

N° d'ordre :



THÈSE

PRÉSENTÉE A

L'UNIVERSITÉ BORDEAUX 1

ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGENIEUR

Par Amandine AUBERT

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

SPÉCIALITÉ : électronique

Analyse de défaillance de nouvelles technologies microélectroniques : nouvelles approches dans la méthodologie de préparation d'échantillon

Directeur de recherche : Nathalie Labat
Co-directeur de recherche : Hélène Frémont

Soutenue le : 11 juillet 2012

Devant la commission d'examen formée de :

Mme DOMENGES, Bernadette	Chargée de recherche, LAMIPS	Rapporteur
M. LANDESMAN, Jean-Pierre	Professeur, Institut de physique de Rennes	Rapporteur
Mme LABAT, Nathalie	Professeur, IMS	Examinateur
Mme FREMONT, Hélène	Maitre de conférences HDR, IMS	Examinateur
Mme DUCHAMP, Geneviève	Professeur, IMS	Examinateur
M. POIRIER, Patrick	Ingénieur, Presto Engineering	Examinateur
M. REBRASSE, Jean-Paul	Ingénieur, ST Microelectronics	Examinateur

Résumé

Dans le développement des technologies microélectroniques, l'analyse de défaillance permet par l'étude des mécanismes de défaillance potentiels de définir des solutions correctives. La mise en œuvre des techniques de localisation et d'observation des défauts requiert une méthodologie, dont l'étape clé est la préparation d'échantillons. Celle-ci doit continuellement évoluer pour s'adapter aux innovations technologiques qui introduisent de nouveaux matériaux, et augmentent la complexité des composants assemblés.

Cette thèse s'est intéressée à la méthodologie de préparation d'échantillons pour l'analyse de défaillance de deux familles de produits : les produits discrets et IPAD, et les micro-batteries. Pour les produits discrets et IPAD, une optimisation de la méthodologie existante a été réalisée en intégrant de nouvelles approches, développées pour résoudre des cas jusqu'alors en échec. Pour les micro-batteries, les matériaux utilisés et leur architecture ont nécessité une remise en question complète de la méthodologie de préparation d'échantillon.

Mots clés

Analyse de défaillance, microélectronique, préparation d'échantillon, méthodologie, micro-batteries, produits discrets

Failure analysis of new microelectronic technologies : new approaches in the sample preparation flow

Abstract

In the development of microelectronic technologies, the failure analysis makes it possible to define corrective actions thanks to the understanding of the failure mechanism.

In order to define the most adequate localization and observation techniques to use, a failure analysis flow is required. The sample preparation is a key step of this flow.

This flow must continuously evolve to take into account the technological innovations that introduce new materials, and increase the complexity of assembled components.

This work concerned the sample preparation flow for the failure analysis of two product families : the discrete products and IPAD, and the micro-batteries.

Concerning the discrete products and the IPAD, an optimization of the current flow was performed with the integration of new approaches developed to solve failed cases. For the micro-batteries, the used materials and their architecture required an entire reappraisal of the sample preparation flow.

Key words

Failure analysis, microelectronic, sample preparation, flow, micro-battery, discrete products

Remerciements

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été réalisés au sein de l'entreprise STMicroelectronics de Tours, dans le cadre d'une convention CIFRE, avec le laboratoire de recherche d'intégration du matériau au système (IMS) de l'université de Bordeaux.

Je tiens tout d'abord à remercier mes deux directrices de thèse, **Nathalie Labat** et **Hélène Frémont** qui m'ont apporté leur soutien tout au long de mes travaux. Malgré la distance entre nos deux sites, elles ont su m'aiguiller à chaque étape de la thèse. Au cours de mes travaux, elles ont su me définir un cadre pour équilibrer le besoin industriel de ST et les requis de recherche liés à la thèse. Je les remercie pour leur implication dans les différentes publications que nous avons pu réaliser ensemble, pour leur soutien lors de mes différentes interventions dans les conférences, et pour leurs nombreux conseils dans la rédaction de ce mémoire. Je tiens en particulier à les remercier de s'être adaptée aux contraintes industrielles, avec les changements de responsables industriels qui se sont produits au cours de cette thèse et avec mon embauche prématurée au sein de ST.

Je remercie grandement mes deux responsables industriels, **Lionel Dantas de Morais** et **Stéphanie Pétremont** qui, chacun à leur tour, se sont impliqués dans mes travaux. Je remercie Lionel pour m'avoir guidé dans chacune de mes études. Sa créativité, son entrain et l'ambition qu'il mettait en moi m'ont permis d'avancer avec envie et persévérance. Je garderai en mémoire nos « points thèse » interminables, enrichissants autant sur le plan technique que personnel, et qui, malgré les maux de tête qu'ils généraient, redonnaient confiance et motivation. Je remercie Stéphanie pour s'être investie dans cette thèse en cours de route. Sa rigueur, son esprit critique et son implication jusqu'à la fin de sa présence chez ST et même au-delà, m'ont été d'une grande aide dans la synthèse de mes travaux et dans la rédaction de ce mémoire. Stéphanie comme Lionel, m'ont tout deux aidée à prendre du recul sur mes travaux et à valoriser mes résultats.

Mes remerciements s'adressent aussi à **Jean-Paul Rebrassé**, qui n'était jamais bien loin et qui, jusqu'à ma soutenance, aura répondu présent. Je le remercie pour s'être toujours montré disponible quand il le fallait, pour des brainstorming captivants ou dans des moments de doute. Son goût du technique et de l'innovation ont participé à la durée des points thèse et à leur intérêt.

Je tiens à remercier **Olivier Poitevin** pour sa disponibilité et sa réactivité pour réparer les équipements et répondre aux divers besoins techniques d'une doctorante.

Je remercie **Guy Pouzet** et **Gael Rappeneau** pour m'avoir fourni, toujours avec le sourire, toute sorte d'informations sur les technologies BCB/Cu.

C'est aussi avec plaisir que j'ai travaillé avec **Sébastien Jacques**. J'ai apprécié notre collaboration qui a permis de mettre en commun nos deux travaux de recherche.

Je remercie **Fabrice Guitton** pour avoir accepté d'aller au-delà de sa demande d'analyse en complétant régulièrement mes connaissances sur ses produits.

Mes remerciements vont aussi à l'équipe en charge du développement des micro-batteries, et tout particulièrement à **David Cohen** et **Delphine Guy-Bouyssou**. Ils ont su se montrer disponibles et répondre à toutes mes questions. Je remercie Delphine de s'être impliquée dans mes travaux de thèse sur les micro-batteries jusqu'à la lecture de mon mémoire.

Un grand merci à toute l'équipe du laboratoire d'analyses de défaillance de Tours, ceux qui font avancer le bateau aujourd'hui et ceux qui sont partis vers d'autres horizons:

A **Stéphanie Moulères**, pour toutes nos (longues) discussions et tous ses conseils autant professionnels que personnels,

A **Virginie Marguier, Hélène Harispuru, Nadia Tremblay, Brigitte Raviot** qui complètent le lot des drôles de dames, et qui ont rempli de rires ces années, et qui, chacune à leur manière, m'ont permis d'avancer.

A **Fabien Allanic**, pour m'avoir donné l'opportunité de terminer cette thèse,

A **Joëlle Berthomière et Dany Donnet**, qui se sont toujours intéressées à l'avancement de ma thèse et à son bon déroulement.

A **Raphaël Perdreau**, pour son expertise technique et pour sa capacité à toujours répondre présent pour aider,

A **Ismaël Tahri**, qui m'a souvent tenu compagnie en fin de journée,

A **Yannis Belfort, Christophe Goin, Nicolas Périllard**, nos apprentis qui apportent du peps à cette équipe,

Toutes ces personnes ont été là, au quotidien, dans la vie professionnelle et extra-professionnelle et sont les pièces essentielles d'une thèse appréciée!

Enfin, je remercie toute ma famille pour leur présence et le soutien que chacun m'a donné tout au long de ces années. Je remercie mon compagnon, Ludovic, pour avoir accepté de vivre une thèse par mon intermédiaire. Merci de m'avoir soutenue et motivée pendant ces soirées et ces week-ends, et d'avoir cru en moi, en particulier dans les moments plus difficiles de la rédaction.

Et pour n'oublier personne, je terminerai par saluer toutes les personnes qui ont traversé ma vie professionnelle et personnelle et qui, par leur aide ou par leur sympathie, ont participé à la réalisation de cette thèse.

Table des matières

RESUME	3
MOTS CLES.....	3
REMERCIEMENTS	5
TABLE DES MATIERES.....	7
INTRODUCTION GENERALE	9
CHAPITRE 1 :	13
LA PREPARATION D'ECHANTILLON DANS L'ANALYSE DE DEFAILLANCE	13
1 INTRODUCTION	14
2 LA PREPARATION D'ECHANTILLON DANS L'ANALYSE DE DEFAILLANCE	15
2.1 <i>L'analyse de défaillance</i>	15
2.2 <i>La préparation d'échantillon : une étape cruciale et critique</i>	17
3 METHODOLOGIE ACTUELLE DE PREPARATION POUR L'ANALYSE	30
3.1 <i>Les familles de produits concernées</i>	30
3.2 <i>La méthodologie actuelle pour les produits discrets et IPAD</i>	32
4 LES TECHNIQUES DE PREPARATION UTILISEES	40
4.1 <i>Les préparations chimiques</i>	40
4.2 <i>Les techniques de préparation physique</i>	46
4.3 <i>Les préparations physico-chimiques</i>	61
4.4 <i>Synthèse sur les techniques de préparation d'échantillon</i>	72
5 CONCLUSION CHAPITRE 1.....	74
CHAPITRE 2 :	75
EVOLUTION DE LA METHODOLOGIE DE PREPARATION AVEC LES AVANCEES TECHNOLOGIQUES.....	75
1 INTRODUCTION	76
2 NOUVEAUX MATERIAUX- NOUVEAUX DEFIS : L'ACCES FACE AVANT DES TECHNOLOGIES BCB/CU EN BOITIER PLASTIQUE	78
2.1 <i>Présentation technologique et défaillance</i>	78
2.2 <i>Méthodologie standard et limites</i>	82
2.3 <i>Démarches et essais</i>	85
2.4 <i>Optimisation : compréhension de l'apparition des fissures</i>	92
2.5 <i>Synthèse par rapport à l'étude de cas et généralisation</i>	98
3 COMPREHENSION DES MECANISMES DE DEFAILLANCE APRES TEST DE FIABILITE: MICRO-SECTION DE COMPOSANT DANS UN BOITIER PLASTIQUE ISOLE.....	102
3.1 <i>Présentation du contexte</i>	102
3.2 <i>Description de l'étude de cas</i>	103
3.3 <i>Méthodologie standard et limite</i>	106
3.4 <i>Démarche et essais</i>	109
3.5 <i>Synthèse par rapport à l'étude de cas et généralisation</i>	115
4 AIDE AUX DEVELOPPEMENTS DE NOUVEAUX PRODUITS : ACCES FACE AVANT DE TECHNOLOGIES ENCAPSULEES AVEC DES PLOTS DE CONTACTS EN TINICU AU	117
4.1 <i>Présentation du besoin</i>	117
4.2 <i>Présentation du produit</i>	117
4.3 <i>Méthodologie standard et limite</i>	120
4.4 <i>Démarches et essais</i>	121
4.5 <i>Synthèse de l'étude</i>	128
5 NOUVEAUX PRODUITS: ANALYSE DE DEFAILLANCE DE MICRO-BATTERIES ENFILM™	130
5.1 <i>Introduction aux micro-batteries</i>	130
5.2 <i>Défauts et mécanismes de défaillance possibles</i>	139

5.3	<i>Evaluation de la méthodologie standard d'analyse et de ses limites</i>	143
5.4	<i>Etudes et résultats sur la préparation d'échantillon</i>	151
5.5	<i>Synthèse de l'étude</i>	160
6	CONCLUSION CHAPITRE 2.....	164
CHAPITRE 3 :		165
METHODOLOGIE COMPLETE POUR LA PREPARATION D'ECHANTILLON DANS L'ANALYSE DE		
DEFAILLANCE		165
1	INTRODUCTION	166
2	PRESENTATION DE LA NOUVELLE METHODOLOGIE POUR LES PRODUITS DISCRETS ET IPAD	168
2.1	<i>Nouvelle méthodologie de préparation d'échantillon en vue de la localisation de défauts</i> 168	
2.2	<i>Nouvelle méthodologie en vue de l'accès au défaut</i>	177
3	PRESENTATION DE LA NOUVELLE METHODOLOGIE POUR LES MICRO-BATTERIES	182
3.1	<i>Nouvelle méthodologie de préparation d'échantillon en vue de la localisation de défaut</i> 182	
3.2	<i>Nouvelle méthodologie de préparation d'échantillon en vue de l'accès au défaut</i> 187	
4	CONCLUSION CHAPITRE 3.....	190
4.1	<i>Produits discrets et IPAD</i>	190
4.2	<i>Micro-batteries</i>	190
CONCLUSION GENERALE		192
1	OPTIMISATION DE LA METHODOLOGIE POUR PRODUITS DISCRETS ET IPAD	193
2	MISE EN PLACE D'UNE METHODOLOGIE POUR L'ANALYSE DES MICRO-BATTERIES	196
3	PERSPECTIVES GENERALES	197
REFERENCES		199
	REFERENCE INTRODUCTION GENERALE	199
	REFERENCES CHAPITRE 1	199
	RÉFÉRENCES CHAPITRE 2	201
	RÉFÉRENCE CONCLUSION GÉNÉRALE	203
ANNEXES		204
REFERENCES ANNEXES		235

Introduction générale

En microélectronique, pour atteindre un haut niveau de qualité sur les composants, des laboratoires d'analyse de défaillance ont été largement développés au sein des entreprises depuis les années 1960 [HEN04]. Ceux-ci ont pour mission de réaliser des analyses poussées des produits défaillants afin de comprendre les mécanismes et la cause de la défaillance. Ce travail d'investigation et les conclusions obtenues permettent alors de mettre en place des actions correctives pour remédier aux faiblesses révélées et ainsi améliorer sur le long terme la qualité des produits et la satisfaction du client.

Les analyses de défaillance sont utiles à toutes les étapes de la vie d'un produit, de sa conception à son utilisation. A chacune de ces étapes, les résultats d'analyse vont permettre d'optimiser les produits et leur assurer une plus grande fiabilité. Il est ainsi crucial de pouvoir tirer des informations de chaque analyse et donc d'assurer un haut taux de succès des analyses. Ce taux est d'ailleurs devenu un des indicateurs clé suivi par les laboratoires.

Pour réaliser les analyses de défaillance, les laboratoires sont dotés d'un large panel d'outils permettant de réaliser des contrôles non destructifs, des préparations d'échantillons, des caractérisations électriques et physico-chimiques sur les composants. La connaissance et la maîtrise de ces différents équipements est un facteur important pour réussir une analyse, néanmoins cela ne s'avère pas suffisant. Cette réussite est liée aussi à une méthodologie de travail rigoureuse qui impose de réaliser un enchaînement d'étapes précis au cours de l'analyse. S'enchaînent ainsi dans un premier temps la caractérisation électrique de la défaillance, et des contrôles non destructifs. Par la suite, une étape de préparation d'échantillon, qui modifie physiquement le composant, facilite la localisation du défaut. Une seconde étape de préparation d'échantillon en vue de l'accès au défaut est souvent nécessaire pour caractériser physiquement et chimiquement le défaut dans la zone localisée. De là, le mécanisme de défaillance peut être compris. L'enchaînement de ces différentes étapes doit se faire sans perdre le défaut ou sans en générer de nouveaux qui pourraient gêner la détection du défaut initial.

L'une des étapes les plus critiques dans l'assurance de la réussite de l'analyse est la préparation d'échantillon. Parce que la préparation touche physiquement le composant, elle en devient plus risquée pour le composant et le défaut. Le choix de la préparation d'échantillon va alors varier en fonction du défaut et aussi du composant à analyser : attaque chimique, mécanique, physico-chimique. Pour guider les analystes, des méthodologies d'analyses peuvent être utilisées mais ne sont pas universelles car l'évolution de cette industrie fait que la nature des composants change et que la diversité des composants en terme de matériaux utilisés, de taille ou de structure ne fait que de s'agrandir.

Le site de STMicroelectronics à Tours fabrique depuis longtemps une famille de produits, les discrets, qui assurent une seule fonction (diode, transistor,...) et depuis plus récemment, les IPAD (integrated passive and active devices) qui intègrent sur une même puce des fonctions passives (résistance, capacités, inductances) et des fonctions actives (diodes). Depuis peu, le site s'est lancé aussi dans le développement de produits utilisant de nouvelles technologies : les micro-batteries, sources d'énergie

de petit volume pour alimenter des circuits intégrés par exemple. Des analyses de défaillance sont alors nécessaires sur chacune de ces familles.

Aujourd'hui, une méthodologie spécifique à l'étape de préparation d'échantillons pour l'analyse de défaillance des produits discrets et IPAD est mise en place et permet de guider l'analyste dans le choix des étapes à suivre, en préparation d'échantillon, pour assurer un haut taux de succès sur ces produits. Cependant, l'analyse de ce taux de succès montre que cette méthodologie peut et doit être perfectionnée.

L'objet de ce travail est ainsi d'optimiser la méthodologie de préparation d'échantillon pour l'analyse de défaillance des produits discrets et IPAD pour augmenter le taux de résolution d'analyse. Ce travail a pour deuxième objectif de mettre en place une méthodologie de préparation d'échantillon pour l'analyse des micro-batteries.

Pour développer ces deux méthodologies, le travail de recherche a été réalisé selon les axes suivants :

- Analyse des causes d'échecs d'analyses de défaillance de produits discrets et IPAD
- Développements de solutions alternatives pour certains de ces échecs
- Proposition d'une nouvelle méthodologie intégrant les résultats précédents
- Evaluation des différentes étapes de la méthodologie sur les micro-batteries
- Développement de méthodes alternatives pour les approches non adaptées
- Proposition d'une méthodologie de préparation d'échantillon pour les micro-batteries

La synthèse des travaux présentée dans ce mémoire est divisée en trois chapitres. Dans le premier chapitre, nous ferons un rappel sur les bases de l'analyse de défaillance et l'importance de la préparation d'échantillon dans ces analyses. Les produits sur lesquels le travail a été réalisé seront présentés en décrivant les composants discrets et IPAD ainsi que les micro-batteries. La méthodologie actuellement utilisée pour l'analyse des composants discrets sera ensuite commentée. Enfin, les techniques de préparation d'échantillon utilisées pour l'analyse de défaillance seront présentées de façon à faciliter la compréhension des chapitres suivants.

Dans le chapitre 2, nous présenterons les démarches et résultats techniques réalisés pour le développement de nouvelles approches en préparation d'échantillon. Concernant les produits discrets et IPAD, trois études seront présentées. Celles-ci révèlent trois situations dans lesquelles la méthodologie initiale ne peut répondre à l'analyse. Pour ces cas, la démarche qui a été suivie pour développer une solution alternative sera présentée ainsi que les résultats obtenus.

Enfin, le travail réalisé sur les micro-batteries sera détaillé. Il montrera les difficultés rencontrées sur le développement d'une méthodologie sur des produits innovants et non standards pour la microélectronique. La réflexion, la démarche et les résultats obtenus seront ainsi présentés.

Dans un dernier temps, le chapitre 3 présentera la généralisation des études précédentes qui a permis d'intégrer les résultats dans une nouvelle méthodologie pour

les produits discrets et IPAD et la création d'une méthodologie pour les micro-batteries. Ces méthodologies seront commentées. La mise en place de telles méthodologies permettra une meilleure réussite des analyses sur produits discrets et IPAD et une aide nouvelle à la gestion des analyses sur micro-batteries.

CHAPITRE 1 :

La préparation d'échantillon dans l'analyse de défaillance

1 Introduction

L'analyse de défaillance est une étape importante dans l'amélioration de la qualité des produits et leur développement. En effet, la compréhension des mécanismes de défaillances et donc la mise en place des actions correctives de la cause de la défaillance dépendent des résultats de ces analyses. Pour assurer leur résolution, les analyses de défaillance des composants électroniques exigent le suivi de deux règles principales :

- une bonne connaissance théorique et pratique des techniques expérimentales dédiées à l'analyse pour les utiliser avec maîtrise
- une méthodologie de travail rigoureuse pour assurer le meilleur choix possible dans les différentes étapes d'une analyse de défaillance.

Parmi ces étapes, la préparation d'échantillon est nécessaire et cruciale mais souvent critique et une méthodologie spécifique à la préparation d'échantillon peut s'avérer d'une grande aide pour maîtriser l'analyse. Un large panel de techniques dédié à la préparation est en effet disponible et faire le choix parmi toutes ces techniques peut devenir complexe.

Ce travail de thèse porte sur la mise en place d'**une méthodologie de préparation d'échantillon** pour l'analyse de défaillance de **composants discrets, de circuits IPAD** (Integrated Passive and Active Devices) et de produits innovants, les **micro-batteries**.

Dans ce premier chapitre, une introduction à l'analyse de défaillance sera donnée avec une description spécifique de l'intérêt de l'étape de préparation d'échantillon dans une analyse ainsi que les difficultés qui lui sont liées.

Les trois familles de composants étudiées seront décrites. Pour les deux premières, les composants discrets et les IPAD, des méthodologies d'analyse de défaillance existent déjà. Nous montrerons ici les limites d'applications liées à l'évolution technologique. Pour les micro-batteries, qui utilisent des matériaux nouveaux en microélectronique, la méthodologie doit être novatrice.

Enfin, pour une meilleure compréhension de l'ensemble des travaux décrit par la suite, une synthèse de la bibliographie réalisée sur les techniques de préparation disponibles pour l'analyse de défaillance sera présentée.

2 La préparation d'échantillon dans l'analyse de défaillance

2.1 L'analyse de défaillance

En microélectronique, on parle de défaillance électrique lorsque le composant **n'assure plus sa fonctionnalité électrique**. Ces défaillances peuvent se produire tout au long de la vie du composant : lors de la conception, au cours des étapes de fabrication, ou des essais de fiabilité réalisés, lors de la qualification de nouveaux produits ou encore durant le montage ou en cours d'utilisation chez le client final. L'analyse de défaillance de ces produits consiste alors à mettre en évidence les **défauts physiques** générant la **défaillance électrique** dans le but de comprendre le **mécanisme de défaillance**. Ces analyses ont un fort intérêt pour l'entreprise. Elles vont permettre d'améliorer la fiabilité des produits et ainsi augmenter la satisfaction des clients. Elles vont permettre d'améliorer les rendements et donc de réduire les coûts de fabrication. Elles peuvent même sauver certains marchés en fournissant des informations efficaces et rapides pour les actions correctives. [ROS04]

Donnons dans un premier temps, quelques notions de vocabulaire d'analyse de défaillance qui seront utiles tout au long de ce mémoire.

Tout d'abord, on parle de **défaillance** pour un évènement au cours duquel le composant ne fonctionne pas selon ses spécifications ou son utilisation attendues [EDF04].

Le **mode de défaillance** correspond alors au symptôme de cette défaillance, c'est-à-dire la façon dont le mécanisme de défaillance se manifeste dans un composant défaillant [norme Jedec JESD-671]. Ce sera par exemple, un court-circuit, un circuit ouvert, un courant de fuite trop important...

Ce mode de défaillance est lié à un **défaut** physique, c'est-à-dire à une anomalie physique dans le composant.

Le **mécanisme de défaillance** associé à la défaillance est le processus physique, chimique, électrique ou autre qui a mené à la non-conformité [EDF04, norme Jedec JESD-122].

Enfin, la **cause de la défaillance** est la source de ce mécanisme de défaillance.

Ainsi, le défaut répond à la question « quoi », le mécanisme de défaillance à la question « comment » et la cause à la question « pourquoi ».

Le but de l'analyse de défaillance est le suivant : **déterminer le mécanisme de défaillance du composant**. Mais, atteindre cet objectif n'est pas aisé. Les composants électroniques sont des structures complexes, avec un empilement de couches minces (de quelques nanomètres à quelques dizaines de micromètres) faites de divers matériaux. De plus, les besoins des clients sont en perpétuelle évolution, à la recherche d'amélioration continue des performances et de miniaturisation et cette dynamique amène alors les fabricants de composants à rechercher de nouvelles structures et de nouveaux matériaux. L'analyse de ces structures en devient donc difficile et nécessite des outils de plus en plus avancés et une méthodologie de travail toujours plus rigoureuse, pour éliminer le risque de ne pas détecter le défaut, de le faire disparaître ou de générer de nouveaux défauts.

Pour résoudre les analyses, un large panel d'outils a ainsi été développé dans les laboratoires. Cependant, la **connaissance et la maîtrise de ces équipements** ne suffisent pas pour réussir une analyse. Le **suiti d'une méthodologie précise** est tout aussi crucial. De manière générale, une analyse de défaillance doit être réalisée en suivant un enchaînement d'étapes qui sont présentées en figure 1. Cet enchaînement est standard dans les laboratoires d'analyses [REN10,SON11].

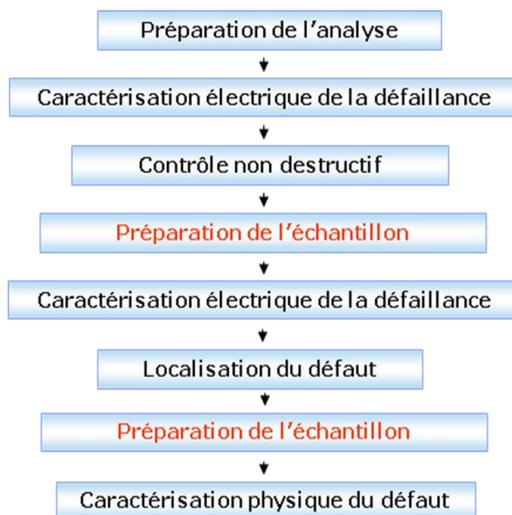


Figure 1: *Etapes d'une analyse de défaillance*

La première étape, à ne pas négliger, est la **préparation de l'analyse**. Elle consiste à s'assurer de la compréhension de la défaillance décrite par le client, et à regrouper le maximum d'informations sur le composant : la fiche technique, l'historique de la pièce, ou encore l'historique des analyses sur des composants similaires.

Après cette étape de préparation, vient alors la **validation de la défaillance** pour confirmer ou non la défaillance électrique décrite par le client. Cette caractéristique électrique est alors analysée afin d'émettre les hypothèses les plus probables de défaut.

Ensuite, un ensemble de **contrôles non destructifs** de l'échantillon doivent être réalisés. Typiquement, vont être utilisés des équipements tels que le microscope optique, la radiographie X, ou le microscope acoustique (SAM). Cette étape permet d'améliorer la connaissance du composant et de déceler, éventuellement, un défaut externe ou d'assemblage tout en conservant l'intégrité du composant. Elle permet cependant rarement de conclure sur l'analyse.

Une étape de **préparation de l'échantillon** devient alors nécessaire pour réaliser des investigations plus poussées. La préparation de l'échantillon consiste à accéder physiquement à une partie enfouie du composant (ex: la puce, la brasure), pour permettre l'utilisation des outils de localisation de défaut mais aussi des techniques d'observation de meilleure résolution. Selon la défaillance et les hypothèses de défauts émises, une réflexion doit être réalisée pour choisir la technique de localisation adaptée à la défaillance électrique. De ce choix, découleront des contraintes spécifiques de préparation d'échantillon (ex : pas de boîtier, pas de couche active...). Cette préparation d'échantillon est une partie critique de l'analyse. En effet, c'est au cours de cette étape qu'il est important d'être particulièrement méthodique pour être certain que le défaut localisé corresponde bien à la défaillance initiale. Il

sera ainsi nécessaire d'agir en conservant le défaut tout en n'en générant aucun autre. Enfin, cette étape devra conserver la testabilité électrique du composant pour permettre, par la suite, de solliciter électriquement le composant.

Suite à cette première préparation d'échantillon, l'analyste va pouvoir utiliser divers outils permettant la **localisation du défaut**. Cette étape sera faite le plus souvent en appliquant les signaux électriques qui sollicitent le défaut, et en utilisant les techniques adéquates de localisation (émission de lumière (EMMI), stimulation thermique laser (OBIRCh), cristaux liquides, thermographie...). Ces outils, choisis selon le mode de la défaillance, vont pouvoir révéler le lieu où le défaut physique génère la défaillance. Cela permet de réduire la partie du composant à étudier en s'intéressant uniquement à la zone localisée.

Une nouvelle étape de **préparation** d'échantillon peut alors être réalisée de manière à atteindre et à **caractériser physiquement et chimiquement le défaut**. La caractérisation de ce défaut permet de comprendre alors le mécanisme de défaillance, puis de remonter à sa cause et de mettre en place d'éventuelles actions correctives.

Suivre l'ensemble de cette méthodologie est crucial pour pouvoir assurer un fort taux de succès des analyses. Cependant, pour réaliser chacune de ces étapes un large panel d'outils est disponible et des choix stratégiques sont alors à effectuer par l'analyste afin d'assurer la résolution de l'analyse.

Pour les deux étapes de préparations d'échantillon, celle précédant la localisation et celle précédant la caractérisation du défaut, le choix de l'approche sera primordial. En effet, la préparation d'échantillon est la partie la plus destructive pour l'échantillon. Les travaux de cette thèse concernent cette étape et ont pour finalité d'aider l'analyste à faire le meilleur choix de préparation d'échantillon pour ces analyses. La partie suivante aborde avec plus de détails l'intérêt de cette étape, ce qu'elle apporte, ainsi que ses risques.

2.2 La préparation d'échantillon : une étape cruciale et critique

Comme introduit précédemment, de toutes les étapes, la préparation d'échantillon est la plus critique pour le composant. Elle va modifier l'échantillon, le contraindre de différentes manières (chimique, thermique, mécanique) et pour autant, l'analyste doit s'assurer de ne pas influencer sur le défaut. Cet objectif est difficile à mettre en application. Il est donc intéressant, tout d'abord, de s'interroger sur l'intérêt d'une telle étape : pourquoi doit-on la faire ? Est-il possible de l'éviter ?

2.2.1 Objectif de la préparation

Avant la préparation d'échantillon, l'analyste va avoir à sa portée toutes les techniques de contrôle non destructif. Celles-ci apportent dans un premier temps une bonne source d'informations mais ne sont généralement pas suffisantes pour conclure.

Les analyses de défaillance portent en majeure partie sur des produits finis. Ceux-ci sont le plus souvent encapsulés dans un boîtier, indispensable pour protéger la puce (la partie active du composant) des dégradations mécaniques, chimiques ou électriques extérieures. Or, ce boîtier est habituellement opaque et empêche donc

l'observation interne du composant. Certaines techniques de contrôle non destructif telles que la radiographie X ou le microscope acoustique (SAM pour « scanning acoustic microscope ») permettent une première analyse de l'intérieur du boîtier. Néanmoins, elles mènent généralement à un résultat avec une trop **faible résolution** (quelques dizaines de microns en XY pour le SAM par exemple), et ne permettent qu'un **taux assez faible de détection** des défauts souvent limités à des défauts spécifiques, essentiellement des défauts d'assemblage. Pour ces deux techniques, le résultat va dépendre de l'absorption du signal, en particulier de la quantité de matière et du nombre d'interfaces que les ondes ont à traverser.

Le SAM, par exemple, a une résolution qui va dépendre de la quantité de matière et d'interfaces que les ondes acoustiques vont traverser avant d'atteindre la zone d'intérêt. Pour l'observation d'une interface profonde, le SAM ne devient alors plus assez précis, et le retrait de la matière recouvrant la zone d'intérêt est nécessaire.

Ainsi, pour l'analyse de l'interface puce/ résine avec une épaisseur de résine de boîtier de 3.3mm (comme dans un boîtier TO247), la résolution en XY sera de l'ordre de 100µm. Pour une épaisseur de résine de boîtier de 0,5mm (comme dans un boîtier BGA), la résolution en XY sera alors de l'ordre de 15µm.

Certains défauts comme les micro-fusions (dues à des décharges électrostatiques par exemple) ne sont, quant à elles, pas détectables par les techniques de contrôle non destructif sans préparation, et nécessitent donc un retrait du boîtier pour accéder à la puce.

De manière générale, la plupart des analyses ne sont pas résolues par des contrôles non destructifs et la préparation d'échantillon bien que **contraignante** pour l'échantillon est **nécessaire**. Elle intervient dans le but **d'enlever les parties du composant limitant ou empêchant l'utilisation de techniques d'observation de résolution adaptée, de localisation et de caractérisation du défaut**.

2.2.2 Difficultés de la préparation d'échantillon

Il existe un large panel d'outils pour réaliser des préparations d'échantillon et celui-ci est détaillé en troisième partie de ce chapitre. Il est indéniable que l'analyste doit, dans un premier temps, connaître les techniques de préparation qu'il utilise, pour déterminer les conséquences qu'elles auront sur le composant étudié.

Le choix et la mise en place d'une préparation d'échantillon exigent alors de s'assurer de l'ensemble des points suivants :

- ne **générer aucun défaut** pendant la préparation d'échantillon
- **ne pas éliminer le défaut** préexistant
- **permettre l'utilisation de techniques d'observation, de localisation et de caractérisation** après la préparation d'échantillon
- **conserver la testabilité électrique** pour **permettre l'utilisation de la technique de localisation** après la première étape de préparation

Face à la multitude de boîtiers et de puces existant sur le marché de la microélectronique, une procédure simple et universelle n'existe pas. Dans la bibliographie, quelques méthodologies sont présentées et sont le plus souvent dédiées à un type de composant, un type d'assemblage ou un type de défaillance [DIA04] [JAC11].

La plupart des procédures relatives à l'analyse de défaillance détaillent le choix de la technique de localisation à adopter sans aborder précisément la préparation d'échantillon [EMP06]. Or, ce choix est tout aussi critique et difficile.

Si plusieurs points sont à prendre en compte pour déterminer le choix de la technique à employer (nature et but de l'analyse, technique de localisation à utiliser), l'un des paramètres qui va avoir un rôle important dans la décision est le composant lui-même : avec la nécessité de prendre en compte les propriétés physiques, thermiques, électriques, chimiques des matériaux, ainsi que l'aspect dimensionnel du composant. Chacune de ces propriétés va permettre ou non l'application de certains types de préparation. C'est pourquoi la partie suivante présente les différents matériaux rencontrés classiquement en microélectronique.

2.2.3 Les matériaux : une donnée importante pour la préparation

Dans le cadre de la préparation d'échantillon, la connaissance du composant consiste pour une grande partie à déterminer les matériaux utilisés (nature, propriétés, procédés de fabrication, etc.) ainsi que les informations dimensionnelles du composant.

A titre d'illustration, le schéma d'un boîtier classique (type TO220) est présenté en figure 2 et permet d'introduire les différentes parties d'un composant.

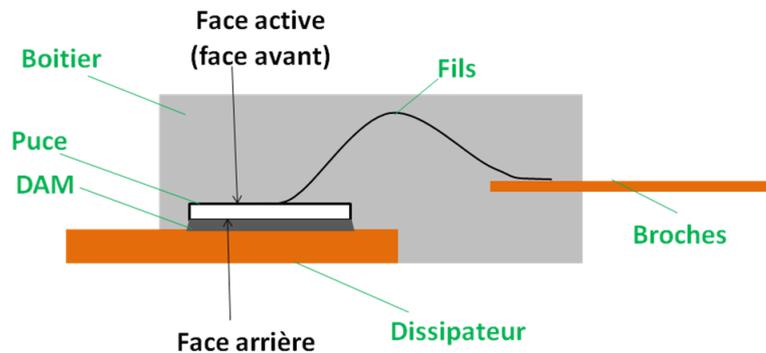


Figure 2: Schéma d'un composant type TO220

Un composant classique est ainsi composé d'une **puce** qui est la partie active du composant, d'un **dissipateur** qui supporte la puce et dissipe la chaleur, d'un **DAM** (Die attach material, c'est-à-dire le matériau d'attache de la puce) qui permet de maintenir la puce sur le dissipateur, de **connexions électriques** entre la puce et les broches (représentées dans la figure 2 par des fils métalliques), et d'un **boîtier** qui protège le tout.

Certains composants n'ont pas de boîtier et ont leurs connexions qui se font par des billes de soudure et non des fils comme dans le TO220 (fig. 3). On parle alors de composants Flipchip car les puces seront alors retournées en direction de la carte imprimée.

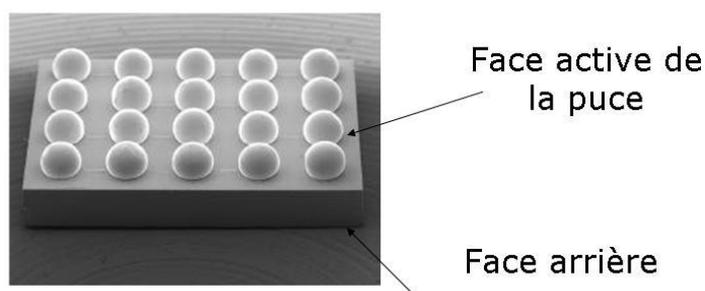


Figure 3: Composant Flipchip : connexion par billes de soudure

Le tableau 1 permet de donner un aperçu des différents matériaux qu'il est possible de trouver pour chaque partie du composant citée ci-dessus, et montre ainsi la diversité des matériaux à traiter ensuite en analyse.

PARTIE DU COMPOSANT	TYPE	MATERIAUX
Puce	Substrat	-Semi-conducteur (Silicium, SiC, ou GaN/Saphir) - Isolant (Verre)
	Couches minces pour la face active	-Métal (Aluminium, Cuivre, Or...) - Isolant (SiO ₂ , Si ₃ N ₄ , BCB,...)
Dissipateur	Dissipateur + broches (=leadframe)	-Métal (Cuivre, Fer ou Nickel Palladium)
Colle	Brasure tendre	-Métal (Alliage de Pb/Ag/Sn)
	Colle conductrice	-Composé organique conducteur (Adhésifs époxy, ou Polyimide)
	Colle isolante	-Composé organique isolant
Connexion électrique	Fils	-Métal (Aluminium, Or, Cuivre, Alliage avec Sn)
	Clips	
	Billes de soudure	
Boîtier		-Plastique (epoxy + billes de verre) -Céramique -Métallique

Tableau 1. Les parties du composant: types et matériaux rencontrés

2.2.3.1 Partie active : la puce

La partie active du composant est la puce, et est aussi appelée partie « front end ». Celle-ci est le plus souvent en silicium et comporte différentes couches en surface, de matériaux divers. Pour l'analyse, il peut être nécessaire de retirer ces couches ou bien le silicium. La suite de ce chapitre permet de détailler les différents matériaux pouvant composer une puce et leurs caractéristiques.

2.2.3.1.1 Le substrat de la puce

La majorité des produits de microélectronique est faite sur **silicium**. Cependant, il existe d'autres substrats tels que le saphir, le GaAs, l'InP, le SiC, ou encore le verre.

Pour les **produits actifs** (comportant des jonctions), un substrat **semi-conducteur** est utilisé. Ces matériaux sont cristallins. Le silicium présente une maille cubique à face centrée. Pour le silicium, on parle de substrat (100) ou (111). Cela signifie que la surface d'une plaquette est parallèle à un plan (100) pour un substrat (100), ou est parallèle à un plan (111) pour un substrat (111) (fig.4).

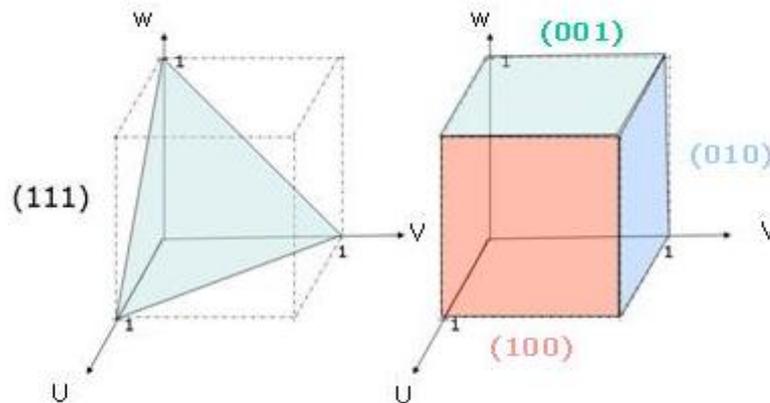


Figure 4: Les plans cristallins employés pour le silicium

Un autre type de substrat, **le verre**, n'est pas cristallin. Il est utilisé pour les **composants passifs**, sans jonction (résistances, bobines, condensateurs). Il est intéressant principalement en raison de son faible coût et aussi de ses meilleures capacités isolantes par rapport au silicium et donc de faibles pertes dans le substrat.

2.2.3.1.2 Les couches minces en surface de puce

Au-dessus du substrat sont déposées différentes couches de matériaux. Ces couches se partagent en 3 catégories :

- les **métallisations** pour assurer les connexions électriques
- les **diélectriques** pour isoler les différentes lignes de métallisation et les différents composants intégrés
- les **passivations** pour protéger la surface de la puce de l'environnement extérieur

Pour chacune de ces catégories, différents matériaux peuvent être utilisés. En dehors de ces trois couches, il est possible de trouver des **matériaux de transition**, qui vont être utilisés dans le but d'améliorer l'adhésion entre les 3 couches principales lorsque cela est nécessaire.

a) Les métallisations

Les métallisations sont généralement en **aluminium** ou en **cuivre**. Le cuivre est de plus en plus utilisé en raison de ses propriétés électriques, en particulier sa

meilleure conductivité électrique (le cuivre ayant une résistivité électrique de $1,70 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ contre $2,70 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ pour l'aluminium).

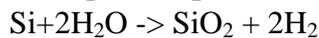
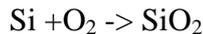
Il existe des **matériaux métalliques de transition** souvent en titane, nickel, or, tungstène, oxyde d'iridium (IrO_2), platine, nitrure de tantale (TaN) ou leurs composés. Ces matériaux permettent alors d'obtenir une meilleure adhésion entre les différentes couches du composant.

b) Les diélectriques

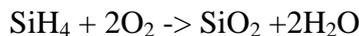
De manière à isoler chaque couche active dans les puces, des isolants électriques sont utilisés. Ceux-ci étaient jusqu'à récemment essentiellement en oxyde de silicium (SiO_2) ou encore en nitrure de silicium (Si_3N_4). Sur les nouvelles technologies, des dépôts de matériaux à plus faible constante diélectrique ou à plus haute constante diélectrique ont été développés. Ces matériaux permettent de réduire les épaisseurs des couches tout en conservant voire en améliorant les propriétés du diélectrique.

Concernant les **oxydes de silicium**, il en existe différents types classés selon leur méthode de fabrication. [BEC98]

On retrouve des **oxydes thermiques** réalisés sous jet de vapeur d'oxygène sec ou humide à 900°C selon les réactions présentées ci-après.



Les oxydes peuvent aussi être produits par **CVD** (chemical vapor deposition) à partir d'oxydation de SiH_4 volatile avec de l'oxygène ou du nitrure d'oxygène à $300\text{-}400^\circ\text{C}$



Ils peuvent être réalisés par **décomposition par pyrolyse** c'est-à-dire en décomposant du $\text{Si}(\text{-OC}_2\text{H}_5)_4$ dans un jet d'azote en SiO_2 et un certain nombre de produits de fission. De l'oxygène va permettre l'oxydation des gaz de fissions combustibles.

Enfin, on parle d'**oxyde pulvérisé** lorsque des ions de gaz nobles accélérés (type argon) à 450°C sous une pression de 10^{-6} à 10^{-7} bar frappent une électrode cible en SiO_2 : les molécules sont alors éjectées de la cible et viennent se déposer sur le substrat.

De cette fabrication peut dépendre leur réaction aux techniques de préparation d'échantillon, car leur composition et leur densité ne sont pas totalement similaires.

Depuis quelques années, l'oxyde de silicium tend à être remplacé par des **diélectriques à plus faible permittivité**. Ces matériaux sont dits « Low-k-dielectric » c'est-à-dire avec une constante diélectrique k inférieure à 3, contre 4 pour le SiO_2 et 9 pour le Si_3N_4 . En plus de permettre la diminution des épaisseurs du diélectrique, ils limitent les effets de capacité parasite, de dissipation thermique et accentuent la rapidité de commutation. [EO04] Il existe différents diélectriques à faible permittivité:

- les oxydes dopés
- les diélectriques organiques
- les diélectriques poreux [WIL04]

Une description plus détaillée est fournie pour chacun de ces diélectriques en annexe 1.

La dernière famille d'isolants concerne les **diélectriques à haute constante diélectrique** qui tendent à remplacer le SiO_2 dans l'oxyde de grille du transistor à effet de champ sur silicium. L'objectif est alors d'avoir le plus fort effet capacitif entre le silicium et la grille. Or, en diminuant l'épaisseur d'oxyde qui permet de réduire les dimensions des transistors, le courant de fuite augmente. Une alternative pour augmenter la capacitance de l'oxyde est alors d'utiliser un matériau à plus haute permittivité que le SiO_2 . Différents matériaux ont été développés pour cela (ZrO_2 , HfO_2 , ZrSiO_4 , HfSiO_4 , TiO_2 , Ta_2O_5 , BST (= $\text{Ba}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{TiO}_3$)). La zircone (ZrO_2) a par exemple une constante diélectrique de 23. Ces matériaux sont aussi utilisés pour créer des condensateurs et ainsi améliorer de la même façon, les capacitances tout en diminuant les épaisseurs.

c) Les passivations

Les passivations ont pour objectif de protéger la surface de la puce et donc l'ensemble des diélectriques et métallisations, de l'environnement. Les passivations sont isolantes et sont souvent des dérivés du silicium (SiO_2 , Si_3N_4). Récemment des passivations organiques, telle que le benzocyclobutène (BCB), ont été développées et sont aujourd'hui utilisées. Les matériaux décrits précédemment pour les diélectriques peuvent aussi être utilisés en passivation.

2.2.3.2 Partie encapsulation: le boîtier

La puce est ensuite encapsulée dans un boîtier. Lorsqu'il est présent et n'a pas de rôle dans la défaillance, le boîtier est l'obstacle le plus important qu'il est souvent nécessaire de retirer pour l'analyse.

Le **boîtier plastique** est le **plus communément utilisé** pour encapsuler les composants. Son principal intérêt reste son **faible prix de revient** par rapport aux autres types de boîtier (environ trois fois moins cher qu'un boîtier céramique par exemple). Il est composé essentiellement de résine époxy ($\approx 20\%$) et de charges ($\approx 70\%$), qui sont principalement des billes de verre, mais qui peuvent être des billes d'alumine (Al_2O_3), de nitrure de bore (BN), ou de nitrure d'aluminium (AlN). Ces billes de verres permettent de donner de meilleures caractéristiques mécaniques au boîtier. D'autres éléments sont incorporés aux boîtiers pour modifier les caractéristiques physiques générales de l'enrobage :

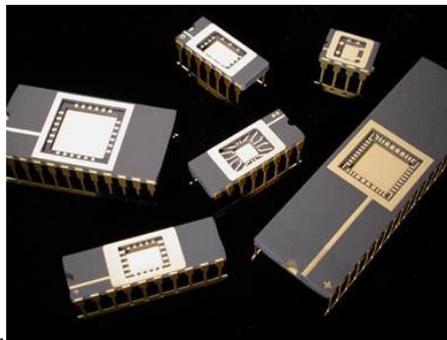
- Durcisseur,
- Catalyseur,
- Retardateur de flamme
- Pigment (carbone noir),
- Antiadhésif (qui facilite le retrait du boîtier de la cavité de moulage : colle naturelle ou synthétique),
- Agent adhésif au silane (qui améliore l'adhésion entre les charges et l'époxy).

La figure 5 présente une large variété de boîtiers plastiques qu'il est possible de retrouver ensuite en analyse de défaillance de composants discrets et IPAD. Ces boîtiers s'étendent sur une gamme étendue de dimensions allant pour les plus petits boîtiers tels que les 0201 de 0,6 mm x 0,3 mm jusqu'aux plus gros boîtiers tels que les « isotops » de 38 mm x 25 mm.



Figure 5: Exemples de boîtiers plastiques pour composants discrets

Le **boîtier céramique** est **plus cher** mais présente de **meilleures qualités électriques, mécaniques, et thermiques**. Il est hermétique, stable à hautes températures, inerte pour la plupart des produits chimiques et il a un faible coefficient d'expansion thermique (de l'ordre de 6ppm/K à température ambiante contre 16ppm/K pour un boîtier plastique [KYO11]) [PER04]. Il est utilisé essentiellement pour des applications militaires ou spatiales (fig.6).



A.



B.

Figure 6: A. Exemples de boîtiers céramiques ; B. Exemple de boîtier métallique

Au-delà du matériau d'encapsulation, le boîtier est aussi composé :

- d'un **substrat en cuivre**, appelé aussi dissipateur.
- de **connexions internes** permettant de relier électriquement la puce aux connexions extérieures. Il s'agit de fils, de clips, ou de billes de soudure. Les fils sont en aluminium, en or ou encore en cuivre. Les clips sont en cuivre. Les billes sont en alliage d'étain (SnAg, SnAgCu, etc...).
- de **connexions externes** permettant l'accès électrique par l'extérieur du boîtier. Ce sont les broches ou bien des billes de soudure.

Enfin, il est possible de trouver des assemblages appelés **SIP** (system in package) ou **MCM** (Multichip module). Ces composants sont alors constitués de plusieurs puces encapsulées dans un même boîtier. On retrouve de la même façon que

pour une puce simple, l'encapsulation et les connexions qui sont cette fois-ci, en plus, entre les puces. Le substrat utilisé est alors soit un dissipateur en cuivre comme pour un boîtier standard, ou bien une petite carte imprimée. Des exemples sont donnés dans la figure 7.

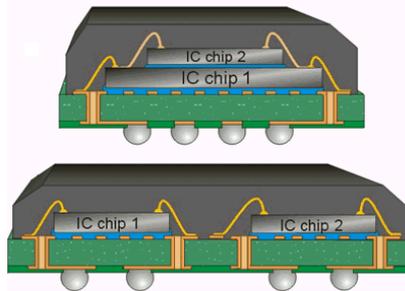


Figure 7: Exemples de SiP

2.2.3.3 Le composant et la préparation d'échantillon

Toutes les parties du composant décrites précédemment peuvent demander à être retirées ou sectionnées lors de la préparation d'échantillon. Retirer le boîtier donne accès à la face avant de la puce et aux fils, retirer le dissipateur donne accès à la colle puis à la face arrière de la puce, sectionner l'ensemble du composant donne une information sur tout l'empilement, etc. Or, pour retirer un certain matériau, il est nécessaire de connaître ses propriétés et les propriétés des matériaux voisins. Ainsi, pour les matériaux les plus communs, un travail de regroupement des propriétés thermiques, mécaniques, électriques a été réalisé. Les données sont synthétisées en annexe 2.

L'ensemble des matériaux standards ayant été introduit, il est intéressant de voir les différents accès possibles grâce à la préparation d'échantillon pour pouvoir analyser un composant.

2.2.4 Les types de préparation

2.2.4.1 La face avant, la face arrière et la micro-section

Pour un composant en boîtier, il est possible de différencier les accès à la puce en trois groupes :

- l'accès par la face avant
- l'accès par la face arrière
- la micro-section

Chacune de ces approches a son intérêt et ses limites.

L'approche classique consiste à retirer le boîtier pour accéder à la puce par **la face avant** et observer de manière directe la face active (fig. 8.A). Il est alors possible de déceler des défauts de surface, de réaliser des mesures sur la face active, et d'utiliser les techniques de localisation par la face avant.

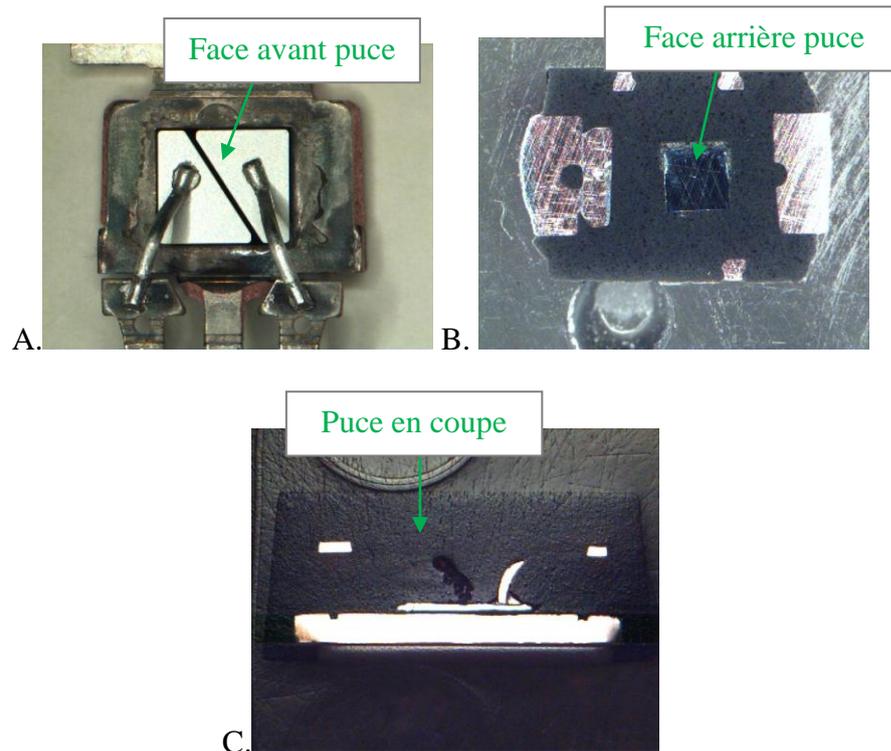


Figure 8: Exemples d'accès:

A. Face avant (retrait chimique) ; B. Face arrière (polissage) ; C. Microsection (polissage)

Cependant, cette approche peut ne pas être suffisante ou même bloquante. Par exemple, pour les techniques de localisation utilisant des signaux infrarouges (EMMI, Thermographie IR, OBIRCh), certains défauts ne sont pas localisables par la face avant. En effet, pratiquement tous les métaux sont opaques dans l'infrarouge, avec un coefficient d'absorption supérieur à $50\,000\text{ cm}^{-1}$ à ces longueurs d'onde [ADA99, PAL98]. De ce fait, un signal qui provient d'un défaut placé sous une métallisation est masqué par la couche métallique. Le défaut devient indétectable. Pour s'affranchir de ce problème, deux solutions sont possibles. La première consiste à retirer cette couche intermédiaire, dans la mesure où cela n'affecte pas la signature électrique du défaut. La seconde solution consiste à localiser le défaut non plus par la face avant, mais plutôt par la face arrière. Dans ce cas, la couche métallique ne s'interpose plus entre le défaut et la caméra ; seul le substrat intervient (fig. 9). Le silicium, le SiC, le verre sont relativement transparents dans le proche infrarouge avec un coefficient d'absorption de l'ordre de $1,8\text{ cm}^{-1}$ pour le silicium, de 1 cm^{-1} pour le SiC et de $0,1\text{ cm}^{-1}$ pour le verre [ADA99, PAL98]. Ceci permet aux signaux infrarouges de traverser le substrat et donc de détecter les défauts situés sous les métallisations. Cette approche est en particulier intéressante pour les flipchips. Pour les composants en boîtier, il est nécessaire de réaliser une préparation d'échantillon afin d'accéder à **la face arrière** de la puce (fig. 8.B) [LIE01] [HUE06] [PER04].

Cette préparation offre, de plus, les intérêts suivants :

- Conservation des contacts fils-puce en face avant
- Conservation de toutes les interfaces en face avant

A noter cependant que, pour les matériaux à large bande interdite, l'accès face arrière ne permettra pas de localisation de défaut par infrarouge dans les couches actives. Il faudrait dans l'idéal changer de gammes de longueur d'ondes.

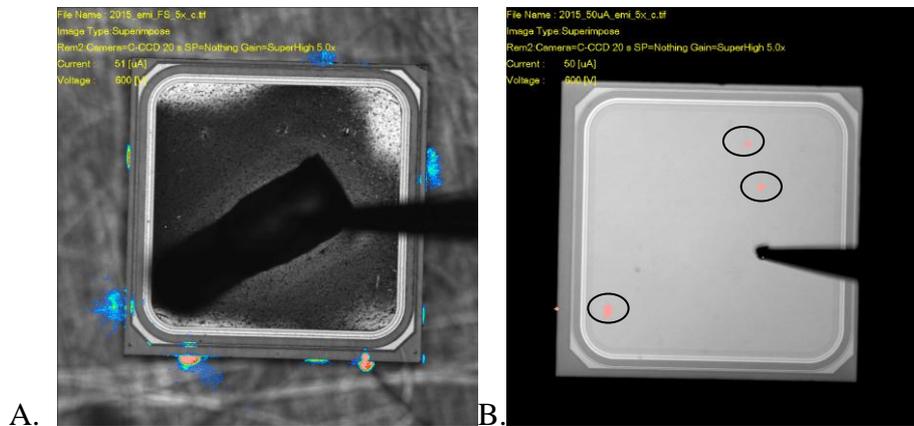


Figure 9: Exemple de défauts non localisables par la face avant :
 A. Emission par la face avant (pas de défaut localisé dans la puce)
 B. Emission par la face arrière (trois défauts localisés)

En plus de l'accès face avant ou face arrière, il peut être nécessaire de réaliser une **micro-section**. Celle-ci a pour but d'observer l'empilement des différentes couches du composant (cf. figure 8.C). Cette approche peut s'avérer complexe en raison de la diversité des matériaux qui composent un produit. Ces matériaux avec des propriétés mécaniques variées doivent alors être traités simultanément ce qui génère des difficultés de préparation.

Lorsque l'analyse porte sur une puce non assemblée, la préparation se fera par la face avant pour un effeuillage des couches actives, par la face arrière pour amincir le silicium ou par micro-section pour analyser l'empilement à un endroit donné.

Il est évident que selon l'accès désiré, les matériaux à retirer ne vont pas être les mêmes. L'analyste doit donc déterminer de quelle manière il souhaite travailler sur le composant, pour connaître les matériaux à traiter et ainsi définir la technique de préparation à utiliser.

Pour la première étape de préparation d'échantillon qui permet la localisation, le type d'accès à préconiser va dépendre :

- de la défaillance elle-même
- de la technique de localisation utilisée
- des matériaux composant la structure.

L'interprétation de la défaillance électrique va en effet permettre de déterminer à quel niveau du composant peut se situer le défaut et donc définir quelle zone du composant, il est intéressant d'atteindre par la préparation.

Selon la défaillance, la **technique de localisation** ne sera pas la même et la préparation nécessaire pour utiliser la technique sera donc différente.

Enfin, certaines **propriétés de matériaux** vont limiter l'utilisation de techniques de préparation, d'où la nécessité d'avoir accès à plusieurs techniques pour traiter tous les matériaux, et toutes les configurations de défaillance.

Nous verrons avec plus de détails dans la partie 3 de ce chapitre, quelle méthodologie doit suivre l'analyste pour déterminer s'il doit réaliser une approche face avant, face arrière, ou une micro-section.

2.2.4.2 L'ouverture globale ou localisée du boîtier

Pour les accès face avant et face arrière, l'analyste doit ensuite se demander s'il a besoin d'une ouverture globale (sur toute la surface du composant) ou localisée (sur une petite partie du composant). **Classiquement, l'ouverture d'un boîtier se fait de manière globale**, c'est-à-dire que le boîtier est retiré totalement et libère ainsi la puce. Ces ouvertures totales peuvent être faites de deux façons.

Dans un premier cas, les broches sont soudées sur un support pour conserver une tenue mécanique du composant après ouverture. Il y a alors court-circuit entre les broches et le test électrique n'est plus possible après décapsulation, à moins de dessouder l'ensemble.

Le deuxième cas, sans soudure des broches, consiste à les maintenir au reste du composant uniquement par les fils. Les fils et les broches attenantes sont alors libérés de la résine, peuvent bouger et risquent d'endommager la puce. Après cette décapsulation, les fils sont donc retirés en tirant dessus et les tests électriques sont effectués sous pointes. Cette solution, bien que rendant possible le test électrique, a ses limitations :

- les pointes masquent une partie de la puce pour l'observation durant l'étape de localisation,
- le nombre de contacts sur les puces est de plus en plus important et peut nécessiter un grand nombre de pointes,
- la manipulation est plus risquée pour l'échantillon car directement en contact avec la puce.

Ainsi, dans certains cas, il est préconisé de réaliser une **ouverture localisée** qui permet un accès uniquement à la partie qui intéresse l'analyste et protège le reste du composant. L'un des avantages est de permettre d'**atteindre la puce tout en conservant les connexions** (broches et fils) et ainsi permettre la localisation sous contrainte électrique. La figure 10 présente un exemple d'ouverture localisée réalisée chimiquement (puce observable et conservation des broches et des fils pour le test électrique).



Figure 10: Exemple d'ouverture localisée sur un boîtier SO8 (ouverture par Jet etch)

A noter cependant, qu'il est important, pour l'ouverture localisée, de prendre en compte **la distance de travail optique** qui peut limiter l'observation de la zone d'intérêt : les objectifs des microscopes doivent permettre de voir la puce au fond de la cavité sans gêne due aux bords hauts de la cavité. Des microscopes avec une distance de travail inférieure à 3mm ne pourront par exemple pas être utilisés sur un boîtier TO-220 localement décapsulé.

L'ouverture localisée permet aussi de faciliter **la manipulation de la puce** puisque l'intégrité du boîtier est conservée au-delà de la puce et celui-ci conserve ainsi une bonne tenue mécanique. Ceci est particulièrement avantageux pour les puces très petites, difficiles à manipuler, mais aussi, pour éviter les contacts de la puce avec les outils comme les précelles, qui peuvent l'endommager.

Cette 1^{ère} partie a permis de voir que la préparation d'échantillon est souvent nécessaire dans l'analyse de défaillance. Etant données la complexité de la structure d'un composant et la diversité des défauts, ces préparations ne sont pas aisées. De nombreuses techniques sont disponibles pour réaliser cette étape et avant de définir la technique à utiliser, l'analyste doit choisir le type d'accès dont il a besoin.

La 2^{ème} partie de ce chapitre décrit une méthodologie existante qui permet de guider l'analyste dans ses choix de techniques de préparation.

3 Méthodologie actuelle de préparation pour l'analyse

Si la connaissance théorique et pratique des équipements dédiés à la préparation d'échantillon pour l'analyse de défaillance est cruciale pour leur utilisation maîtrisée, il est tout aussi important de savoir déterminer quel équipement ou plus précisément quelle approche il est nécessaire de réaliser pour mettre en relief un défaut, sans le perdre et sans en créer de nouveaux. Dans ce but, des méthodologies peuvent être utilisées et permettent de faire le choix parmi le panel à disposition. Ces méthodologies détaillent l'enchaînement des étapes à réaliser en fonction de la défaillance, de ce qui est observé et des matériaux du composant.

Pour être utilisable en toute circonstance, ce type de méthodologie doit donc traiter le plus large panel de composants et de défaillances. Cependant, comme dit en première partie, étant donnée la diversité des produits existants, une méthodologie applicable à tous les composants est très complexe à mettre en place.

Dans le cadre de ce travail, nous nous intéressons à trois familles de produits : **les composants discrets**, **les IPAD** (integrated passive and active devices) et **les micro-batteries**. C'est pour ces produits que la méthodologie est à mettre en place.

Cette partie va présenter dans un premier temps ces familles de produits pour ensuite détailler la méthodologie qui existe actuellement.

3.1 *Les familles de produits concernées*

Les **composants discrets** sont des produits électroniques remplissant **une seule fonction** (une diode, un thyristor...). Ils se distinguent des circuits intégrés qui présentent plusieurs fonctions dans un même boîtier.

La miniaturisation constante imposée par l'industrie électronique tend à remplacer les composants discrets par des circuits intégrés pour réduire leur volume utilisé. Néanmoins, les produits discrets continuent toujours à être employés aujourd'hui dans des applications spécifiques, en particulier dans des domaines réclamant de fortes tensions ou puissances comme l'électronique de puissance.

La diversité de ces composants discrets fait que leur fonction et leur domaine d'application sont variés. Certains, les thyristors par exemple, permettent de contrôler l'énergie électrique pour piloter des appareils électriques (lampe, four, moteur), d'autres, les redresseurs, transforment le courant alternatif en courant continu, d'autres encore, les composants de protection, assurent la protection d'un dispositif en limitant la tension ou en créant un court-circuit.

Les **IPAD** (integrated passive and active devices), intègrent **plusieurs fonctions sur une même puce**. Il peut s'agir de **fonctions passives** comme les résistances, les inductances, les condensateurs, mais aussi de **fonctions actives** avec des diodes, transistors... On retrouve ce type de produits dans l'électronique nomade, les téléphones mobiles, les ordinateurs portables.

Pour ces deux familles nous décrirons avec plus de détails dans le chapitre 2 certains de leurs produits sur lesquels le travail de recherche a été réalisé.

Au-delà de ces deux familles, le site de ST-Tours a misé pour un futur proche sur un nouveau type de produit : les **micro-batteries**. Il s'agit de batteries de petite taille réalisées à partir de procédés de dépôt de couches minces. En raison de la faible quantité de matériaux actifs présents dans la structure, leur capacité (quantité de charge que la batterie peut fournir) est plus faible que celle des batteries ou piles standards (en allant de quelques μAh au mAh pour les micro-batteries contre le mAh à l' Ah pour les batteries). Les micro-batteries n'adressent donc pas le même champ d'application que les batteries standards.

Deux types de micro-batteries sont actuellement en cours de développement les micro-batteries Enfilm™ HighTemp et Enfilm™ HighCap. Dans les deux cas, il s'agit de **micro-batteries Li-ion à électrolyte solide**.

Le premier type de micro-batteries, appelé **Enfilm™ HighTemp est conçu pour supporter les hautes températures** (260°C) et peut être utilisé soit encapsulé comme les composants discrets standards, dans un boîtier plastique, soit intégré dans un module. Les applications visées pour ce type de micro-batteries sont par exemple des batteries de secours dans les téléphones portables.

Les secondes micro-batteries, appelées **Enfilm™ HighCap**, ont une plus **forte capacité** (de l'ordre du mAh contre quelques μAh pour les Enfilm™ HighTemp). Leur capacité permet de toucher d'autres domaines d'application et un de leurs avantages est leur **faible épaisseur** et leur **flexibilité**. Leurs applications concernent alors les puces RFID (identification radio-fréquence), qui permettent de stocker et de récupérer des données à distance en utilisant des balises métalliques, les smartcard, ou encore le domaine médical.

Un exemple d'application concret est le module de génération d'énergie perpétuelle. Une batterie solide en couches minces rechargeable et à longue durée a été couplée à un thermo-générateur (fig. 11). Ainsi, une première solution de capteur de température sans fil, autonome d'un point de vue énergétique, a pu être développée à partir de ce module et a été intégrée dans des plates-formes industrielles.

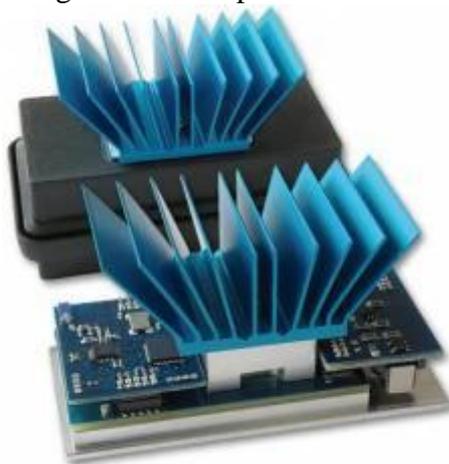


Figure 11: *Module de génération d'énergie perpétuelle*

Ces produits sont toujours des structures micro-technologiques mais éloignées des empilements et matériaux des composants microélectroniques discrets. Ils seront

présentés dans le chapitre 2 (partie 4). Sur ces produits très innovants aucune méthodologie d'analyse n'existe aujourd'hui. De nouveaux matériaux sont employés, de nouveaux moyens de caractérisations électriques sont utilisés et les phénomènes engendrés sont bien différents des composants classiques de microélectronique, autant de paramètres qui les différencient des produits discrets. L'analyse de défaillance de ces nouveaux produits va être tout aussi cruciale mais il est alors nécessaire non plus d'optimiser mais de créer une méthodologie générale de gestion de ces analyses.

3.2 La méthodologie actuelle pour les produits discrets et IPAD

Si à ce jour, il n'existe pas de méthodologie de préparation d'échantillon pour l'analyse des micro-batteries, une méthodologie a été mise en place juste avant le début de ce travail pour les composants discrets et IPAD, et est utilisée actuellement. Celle-ci est présentée en figures 12 et 13. Elle est scindée en deux parties et décrit la **méthode à suivre pour la préparation d'échantillon en vue de la localisation** (fig. 12) puis la **préparation d'échantillon en vue de la caractérisation du défaut** (fig. 13). Le détail de ces deux méthodologies est présenté dans les paragraphes qui suivent. Elles s'appliquent aujourd'hui à l'analyse des produits décrits précédemment avec les outils présents et disponibles dans le laboratoire de ST Tours.

Ces méthodologies permettent à l'analyste de se poser différentes questions le menant à la préparation adéquate pour son composant et son analyse. Dans les deux méthodologies, les questions sont représentées dans un losange vert. De leur réponse, positive ou négative (Yes ou No), l'analyste se dirigera vers la question ou l'étape suivante correspondante. Les actions sont représentées dans des rectangles de différentes couleurs. Les rectangles noirs correspondent à des actions qui vont permettre la conclusion de l'analyse. Dans ces rectangles, nous retrouvons essentiellement des caractérisations physico chimiques qui peuvent être liées à des préparations finales (FIB, micro-section). Les rectangles bleus correspondent à des étapes de préparation d'échantillon en cours d'analyse. Ces étapes permettent d'avancer dans la résolution de l'analyse. Enfin, les rectangles de couleur bordeaux, englobent les autres étapes de l'analyse, la caractérisation électrique, les contrôles non destructifs, les localisations. Cette légende est utilisée pour les deux méthodologies.

3.2.1 En vue de la localisation de défaut

Nous allons commenter dans un premier temps la méthodologie de préparation d'échantillon en vue de la localisation du défaut.

Comme nous avons pu le souligner dans la première partie de ce chapitre, les deux premières étapes de l'analyse consistent à réaliser les contrôles non destructifs, la validation et l'analyse électrique de la défaillance. Suite à ces deux étapes, trois questions vont découler de ce qui a pu être observé et éventuellement décelé dans la phase d'inspection (questions Q1 et Q2) et de l'analyse électrique réalisée (Q3).

Q1: Pendant la phase d'inspection initiale, avez-vous détecté un matériau étranger conducteur entre les connections du boîtier, à la surface de la résine ?

La phase d'inspection initiale correspond à des observations optiques souvent sous microscope du composant défaillant. Des défauts visuels sur l'extérieur du

boitier peuvent être détectés à cette étape. A l'extérieur du boitier le seul défaut pouvant générer une défaillance est la présence d'un matériau étranger conducteur entre les connections qui généreraient un passage du courant. S'il peut expliquer la défaillance, alors aucune préparation d'échantillon n'est nécessaire et la conclusion de l'analyse sera directe après une analyse physico-chimique de ce matériau pour en déterminer son origine.

Q2 : Au cours des contrôles non destructifs, avez vous détecté une anomalie, par exemple un matériau étranger à la radiographie X, ou des fissures au microscope acoustique?

Les contrôles non destructifs ensuite réalisés permettent de révéler des défauts d'assemblage. Si un défaut est observé grâce à ces techniques et qu'il explique la défaillance électrique, alors la compréhension complète du mécanisme de défaillance sera possible après avoir réalisé une micro-section dans ce défaut pour en faire son analyse.

Q3 : Est-ce que l'analyse électrique a conclu que quelle que soit l'approche de préparation d'échantillon choisie, il est préférable de réaliser une analyse de construction complète de l'assemblage et de la puce, focalisée sur une zone d'intérêt bien choisie ? Applicable aux défaillances électriques instables/intermittentes ou au problème Vf ?

La réponse à donner à cette question s'appuie essentiellement sur l'historique et sur des cas d'analyse pour lesquels différentes approches de préparation d'échantillon ont été réalisées sans jamais permettre de donner de résultat à la localisation du défaut. La localisation n'est pas pertinente soit parce que le défaut a disparu, soit parce qu'il n'est pas détectable avec les outils de localisation aujourd'hui à disposition. Dans ces cas-là, on utilise donc le retour d'expérience pour aller directement à la zone de défaut suspecté. Une analyse dite de construction est alors réalisée. Il s'agit d'analyser si la structure du composant est en adéquation avec la spécification du produit (présence de tous les matériaux, de toutes les couches, pas de matériau étranger, bonne épaisseur des différentes couches, ...). Il faut voir néanmoins cette question comme une limite dans la capacité à réaliser l'analyse. En effet, la réalisation d'une analyse de construction est un dernier recours pour l'analyste. Il n'y a pas d'assurance de trouver le défaut à cette étape étant donné qu'aucune localisation n'a été réalisée.

Dans cette question, nous parlons en particulier du mode de défaillance en Vf. Vf est la tension en direct d'une diode mesurée à un courant donné et spécifié (à 30A par exemple). Cette tension doit être faible et est de l'ordre de 0.6V pour une diode sur silicium. Si cette tension est supérieure à la spécification, cela révèle la présence d'une résistance en série de la diode. Parce que la résistance est en série avec la diode, les techniques de localisation actuelles ne donnent aucun résultat. Ainsi, la méthode employée consiste à trouver le défaut à l'origine de cette résistance en série. Une analyse des contacts est donc réalisée pour observer l'intégrité des contacts entre les branches et les fils et entre les fils et la puce.

Dans les cas où l'analyse électrique semble permettre une localisation du défaut alors, une préparation d'échantillon sera nécessaire en vue de la localisation.

La préparation d'échantillon la plus standard est l'attaque chimique humide de la résine du boîtier représentée par la case « full opening wet » et permet d'atteindre la puce. Cette approche ne permet néanmoins pas de résoudre toutes les analyses. C'est pourquoi les questions Q4 à Q7 sont ajoutées et permettent de définir en fonction de la défaillance, et du nombre d'échantillons disponibles, la préparation à réaliser.

Pour expliquer l'intérêt de chacune des questions ajoutées, nous partons de la case de préparation « full opening wet » et remontons la méthodologie en intégrant les cas qui ne sont pas résolus par cette approche.

Avant de réaliser la décapsulation par voie chimique humide, la question Q6 a été ajoutée:

Q6 : Est ce que l'analyse préliminaire de la défaillance électrique indique que le défaut physique peut être localisé en face arrière de la puce (dans la zone active de la face arrière de la puce, le matériau d'attache ou le dissipateur) ou dans le volume du substrat de la puce ?

La pratique a pu montrer que la décapsulation chimique globale pouvait en effet retirer des défauts qui étaient situés en face arrière de puce. Nous pouvons donner en exemple le cas d'une colle organique isolante utilisée comme matériau d'attache. Celle-ci serait retirée en même temps que la résine du boîtier au cours de l'attaque chimique. Or, s'il y avait présence de particules conductrices dans la colle qui conduirait à des courants de fuites, alors cette attaque retirerait le défaut.

La solution alternative dans cette situation de la question Q6, est une autre préparation d'échantillon : le polissage mécanique du boîtier pour atteindre la face avant de la puce qui est représenté par la case « frontside opening (mechanical) ».

Avec ces deux approches, l'intégrité du boîtier et des connexions n'est pas conservée (fils coupés, ou soudés entre eux, ou retirés) ce qui peut être limitant pour certaines analyses. En effet, pour les composants avec un nombre important d'entrées et de sorties, il est nécessaire de pouvoir solliciter le composant par ses broches. Si la connexions par les broches n'est plus possible, il faut réaliser un test sous pointes qui se limite le plus souvent à 4 pointes.

Ensuite, concernant l'intégrité du boîtier, si la puce à l'intérieur du boîtier est très petite (inférieure au millimètre par exemple), il peut être difficile de la manipuler après décapsulation du boîtier pour les étapes suivantes.

Dans ces cas, ni l'approche globale par chimie humide ni le polissage face avant ne peut répondre à ces difficultés.

C'est ainsi que pour traiter ces 2 cas, la question Q5 a été rajoutée :

Q5 : Est-il obligatoire de conserver l'intégrité du boîtier et des connexions disponibles pour des tests électriques futurs (trop d'entrées et de sorties) ou pour la manipulation (puce trop petite) ?

Une autre approche doit donc être utilisée pour atteindre la puce.

Dans le cas de petites puces, pour conserver la rigidité du boîtier pour la manipulation, il est possible :

- soit de réaliser une ouverture locale du boîtier par voie chimique humide par la face avant, ce qui conserve la rigidité du boîtier sur les côtés du composant,

- soit un polissage mécanique par la face arrière du boîtier qui conserve la rigidité du boîtier en face avant de la puce.

Pour conserver les connections, les mêmes approches pourront être utilisées :

- soit la décapsulation locale par voie chimique du composant qui conserve les fils tout en donnant accès à la face avant de la puce,
- soit le polissage mécanique par la face arrière qui sera alors soit local, soit global selon la configuration du boîtier.

C'est ainsi que ces deux approches apparaissent dans les cases « backside opening (full or local) » et « local frontside opening (wet) »

Le choix entre ces deux préparations se fait avec la question Q7 :

Q7 : Est-ce que l'analyse préliminaire de la défaillance électrique indique que le défaut physique peut être endommagé ou retiré par une contrainte induite au cours du procédé mécanique ?

Pour réduire le risque de perdre un défaut en face avant de la puce, on réalise de préférence l'approche par la face arrière. L'accès face avant est réalisé seulement si le polissage mécanique risque de générer une contrainte trop importante au composant et d'endommager ou de retirer le défaut.

Un autre cas peut mener à ces deux préparations et donc à cette question Q7 et est expliqué dans la question Q4.

Q4 : D'après le nombre d'échantillons disponibles et la signature électrique de la défaillance, y a-t-il un risque de réduire les chances d'identifier le mécanisme de défaillance si le défaut est perdu pendant ce procédé?

Cette question a pour but de s'interroger sur le risque pris à réaliser une préparation d'échantillon. Le nombre d'échantillons est évidemment une information importante, puisque si un seul composant est défaillant, il faut être beaucoup plus prudent dans la gestion de l'analyse que si plusieurs échantillons sont disponibles et laissent la possibilité de réaliser plusieurs essais.

Nous prenons aussi en compte à ce stade, l'analyse de la signature électrique de la défaillance et la configuration du produit, notamment de son assemblage. Avec notre retour d'expérience sur le même type de défaillance, il est possible de savoir dès ce stade si le défaut risque d'être retiré avec certaines préparations d'échantillon.

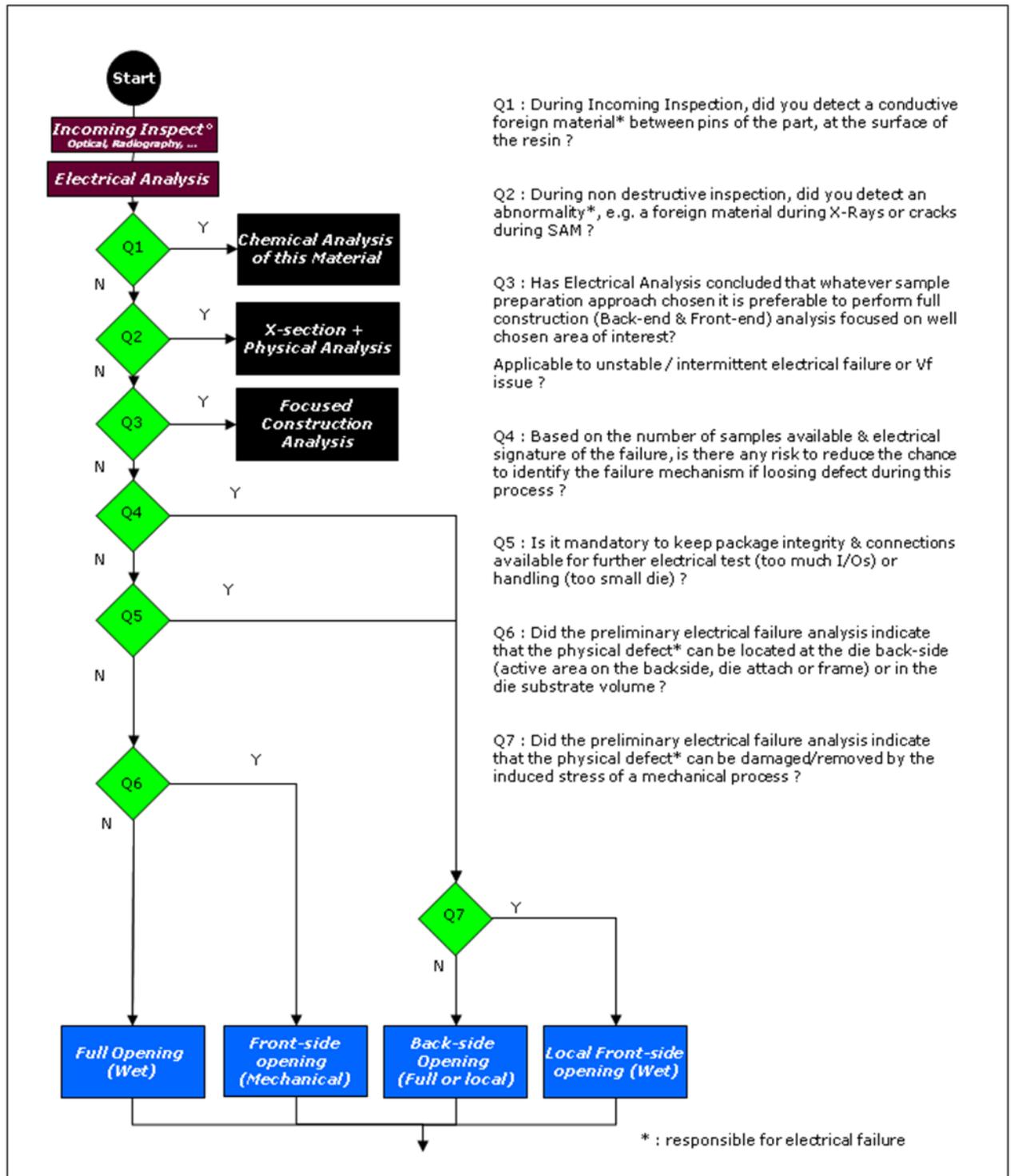


Figure 12: Méthodologie de préparation d'échantillon pour la localisation sur produits discrets

3.2.2 En vue de l'accès au défaut

Cette méthodologie fait suite à la méthodologie précédente. Elle intègre les étapes de localisation et les préparations d'échantillons en vue de l'accès au défaut.

Au début de cette méthodologie, la première étape consiste à valider que la défaillance est toujours présente après les préparations d'échantillon. C'est l'objet de la question Q9 :

Q9 : La défaillance électrique est-elle toujours présente avant l'étape de localisation ?

Si la défaillance est toujours présente, alors l'étape de localisation peut être réalisée.

Un enchaînement de questions Q10 et Q11 s'ensuit alors en variant les méthodes de localisation jusqu'à obtenir une localisation précise et cohérente du défaut.

Q10 : La zone localisée est elle cohérente avec la défaillance électrique (si aucune localisation répondre « non ») ?

Q11 : La zone localisée est elle suffisamment précise pour réaliser directement une analyse physico-chimique du défaut?

Si la première étape de localisation ne fonctionne pas, et ne donne pas une zone de défaut cohérente, une analyse électrique dichotomique doit être réalisée. Il s'agit de faire une analyse poussée pour réduire la zone à investiguer. A l'aide de circuit edit (modification du circuit en créant ou en coupant des pistes), de l'analyse du design, et de l'utilisation d'une netlist, il peut être possible d'isoler une plus petite surface de la puce dans laquelle on assure la présence du défaut.

L'étape de localisation est alors de nouveau testée en sollicitant uniquement cette zone.

Si la première étape de localisation a permis une localisation mais que la zone n'est pas suffisamment précise pour réaliser une analyse physico-chimique du défaut, alors, la localisation est ré-évaluée en optimisant le procédé. Si cette optimisation n'est toujours pas efficace, un effeuillage du composant est réalisé en intégrant une étape de validation de la présence de la défaillance et une localisation à chaque retrait de couche. Cet effeuillage est poursuivi jusqu'à la détection d'une anomalie physique ou d'une localisation cohérente.

Finalement, lorsque la localisation est cohérente et précise, l'objectif est d'atteindre physiquement ce défaut pour le caractériser.

Si cela n'a pas été encore fait, et si cela est possible, un accès à la face avant de la puce est réalisé (**Q13 : Selon les étapes précédentes, est-il possible d'accéder à la face avant de la puce (si l'approche face avant a déjà été utilisée, répondre « oui »**)). Sinon, une micro-section dans le défaut localisé est réalisée.

Si aucune localisation n'a pu être obtenue ou qu'elle n'était pas suffisamment précise, un essai sur une autre pièce avec une défaillance similaire est tenté. C'est l'objet de la question **Q12 : Y a-t-il un autre échantillon avec la même signature électrique (ou similaire mais plus adéquat pour les techniques de localisation**

disponibles ? L'ensemble de la méthodologie est suivi en prenant en compte les résultats déjà obtenus sur la première pièce. S'il s'agit de la seule pièce avec cette défaillance alors une analyse de construction de la puce est réalisée.

Réaliser cette analyse de construction est une limite de la méthodologie car il n'y a alors aucune assurance de trouver le défaut.

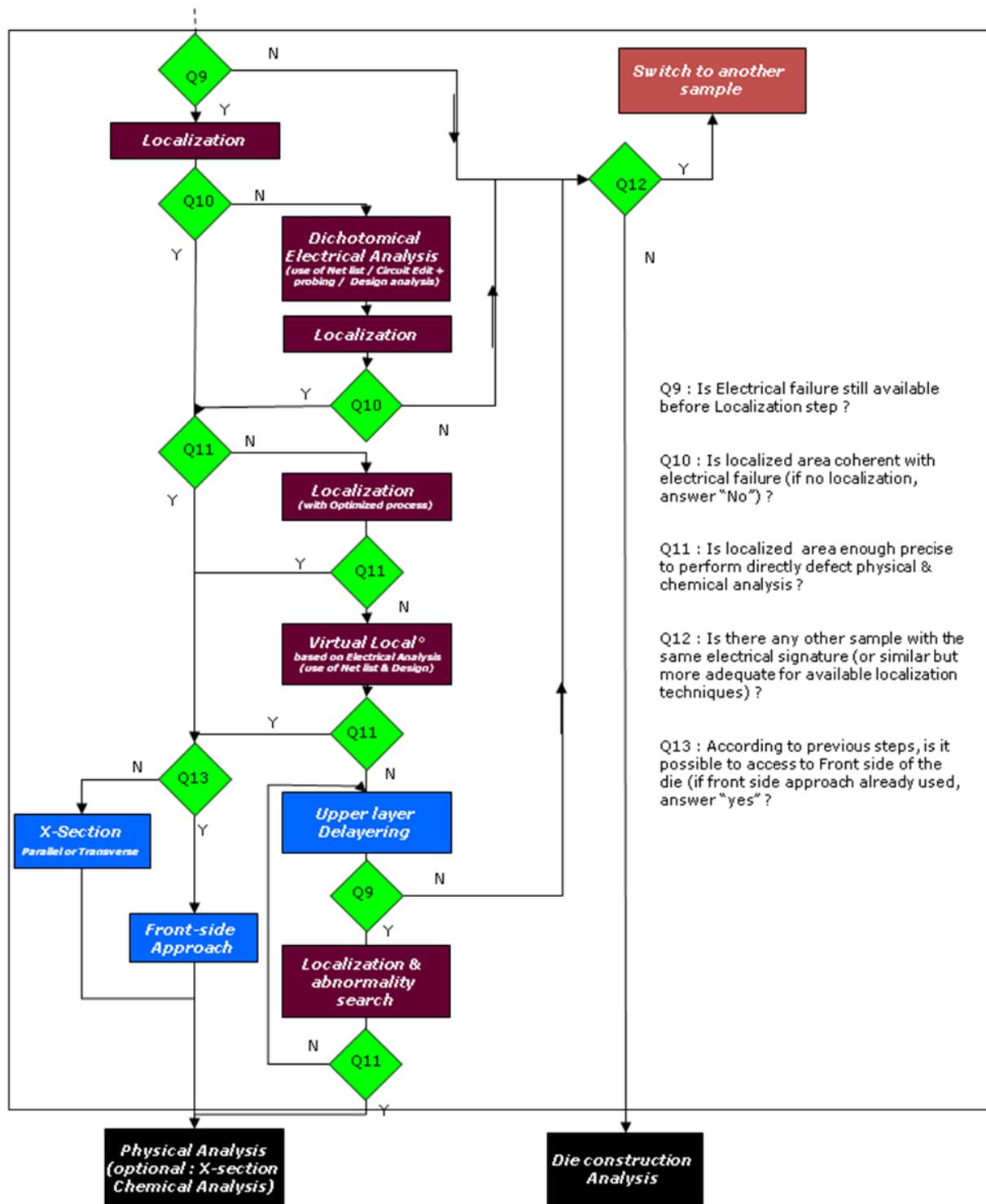


Figure 13: Méthodologie de préparation d'échantillon pour la caractérisation du défaut sur produits discrets

3.2.3 Synthèse sur cette méthodologie

Bien que le suivi de ces deux méthodologies soit concluant dans la plupart des cas, elle a aussi pu montrer certaines limites.

Tout d'abord, elle ne permet pas de traiter l'ensemble des produits défaillants, puisqu'elle ne s'occupe que des composants en boîtier. Ainsi, pour les puces **défaillantes** en sortie de production, ou encore pour des **composants en boîtier montés sur carte** chez le client, la méthodologie n'est **pas traitée**.

Ensuite, parce que les **composants évoluent**, en particulier les **matériaux** utilisés et leur combinaison, cette méthodologie a aussi révélé des limites techniques. Certains cas d'analyses n'ont pas pu être réussis car les méthodes standards de préparation n'étaient pas applicables sur ces nouveaux matériaux et ont conduit à des artefacts ou au retrait du défaut.

L'objectif est donc d'**aller au-delà de ces limites** et en particulier de **proposer des alternatives** aux procédés standards pour réussir l'ensemble des analyses de défaillance sur composants discrets et IPAD.

Que ce soit pour les composants discrets et IPAD ou pour les micro-batteries, une méthodologie complète de la gestion de la préparation d'échantillon est nécessaire pour assurer un taux de succès élevé de résolution des analyses. Concernant les composants discrets et IPAD, la procédure existante doit être optimisée alors qu'elle doit être créée pour les micro-batteries.

Avant de présenter les études et résultats obtenus, la dernière partie de ce chapitre va donner une vue d'ensemble des techniques de préparation existantes.

4 Les techniques de préparation utilisées

A chaque étape présentée dans la méthodologie des figures 12 et 13, nous retrouvons les différents types de préparation : l'accès face avant, l'accès face arrière, la micro-section mais aussi les ouvertures de boîtier globales ou localisées.

Pour chacun de ces accès, il apparaît déjà dans l'organigramme différentes techniques pour les mêmes accès. Dans la figure 12, il est écrit par exemple que l'accès face avant peut être réalisé chimiquement ou mécaniquement selon les configurations. Le paragraphe qui suit, va permettre d'introduire l'ensemble des techniques standards, leurs avantages et leurs limites, tout en ciblant le propos sur les techniques utilisées lors de mes travaux. Sont ainsi abordées les préparations chimiques, physiques et enfin physico-chimiques.

4.1 Les préparations chimiques

L'attaque chimique humide permet de **retirer un matériau défini du composant** par réaction chimique en plongeant le composant dans un mélange de produits (acide, base ou solvant). En choisissant la solution chimique adéquate, il est ainsi possible de retirer de manière sélective le boîtier, la colle, les couches de métallisation ou de passivation ou encore le silicium... Les solutions chimiques étant très variées et menant à des difficultés spécifiques à chacune, il a été choisi de détailler les applications plutôt que de présenter un principe général sur l'attaque chimique humide. Cette attaque chimique peut être faite globalement (composant plongé dans un bécher) ou bien localement (à l'aide d'une pipette ou d'un équipement d'ouverture localisée).

Dans le retrait de matériaux, plusieurs considérations sont importantes dans le but de réussir un effeuillage couche par couche [WIL04]:

- la **sélectivité** : c'est le rapport entre la vitesse d'attaque du matériau à retirer et la vitesse d'attaque des matériaux environnants.
- la **vitesse d'attaque** est un paramètre important pour pouvoir contrôler l'attaque du composant dans le temps. La vitesse d'attaque doit ainsi être suffisamment élevée pour avoir une préparation rapide (pour durer de préférence de l'ordre de la minute à l'heure) mais être suffisamment lente pour permettre le contrôle de la réaction (sans être en dessous de quelques secondes). Cette vitesse est souvent modifiable en jouant sur la température, sur le type de réactif, la concentration des constituants réactifs, ou en ajoutant des catalyseurs ou des inhibiteurs à la réaction.
- l'**(an)isotropie** : c'est-à-dire l'effet directionnel d'une attaque. Dans le cas du silicium, par exemple, des solutions vont attaquer préférentiellement certains plans cristallins.
- le **retrait effectif des réactifs** et des **produits de réaction** de la surface de la puce.

Une fois l'attaque chimique réalisée, une étape importante ne doit pas être négligée : le composant doit absolument être rincé. Ce rinçage a plusieurs utilités :

- Nettoyer l'échantillon et retirer ainsi des résidus en surface de la puce
- Protéger l'échantillon car sans rinçage, le produit chimique continue d'attaquer le composant et peut endommager certaines parties du composant
- Protéger l'analyste car celui-ci va manipuler le composant après l'attaque et ne doit donc pas être en contact avec des restes de solution chimique.

4.1.1 Applications

4.1.1.1 Retrait boîtier

L'attaque chimique est la plus classique des méthodes utilisées pour la décapsulation de boîtiers plastiques. Les acides communément utilisés sont **l'acide nitrique fumant** et **l'acide sulfurique**.

L'ouverture de la majorité des boîtiers plastiques peut se faire avec un mélange d'acide nitrique fumant entre 1 et 9 volumes et d'acide sulfurique (1 volume) souvent autour de 80°C avec un temps d'attaque dépendant du volume de résine à retirer. Ces deux acides attaquent la résine époxy. L'acide nitrique fumant est actif autour de 65-90°C. L'acide sulfurique, est actif, à 250°C et permet d'attaquer certaines résines inertes à l'acide nitrique fumant.

Il est classique d'utiliser un mélange de ces deux acides, pour protéger les autres matériaux du composant. En effet, l'acide nitrique fumant peut corroder le cuivre et l'acide sulfurique attaque l'aluminium. A l'inverse, l'acide nitrique fumant passive l'aluminium et l'acide sulfurique protège le cuivre. En mélangeant les deux acides, il est alors possible de tirer profit des deux, en retirant la résine tout en protégeant le cuivre et l'aluminium s'ils sont présents dans le composant [PER04].

De manière générale, la méthode de retrait de boîtier plastique par voie chimique humide est efficace et rapide et donc largement utilisée pour l'accès face avant des produits encapsulés. Elle peut cependant devenir limitée dans certains cas d'application en raison de la non-sélectivité de l'attaque sur de nouveaux matériaux présents dans le composant. Ainsi, par exemple, les fils en cuivre employés dans les nouveaux assemblages vont être corrodés par l'acide nitrique en dépit de la présence d'acide sulfurique lorsque l'attaque est réalisée à 80°C. Une méthode alternative à cette attaque standard a donc dû être développée. D'autres cas, engendrés par ce problème de sélectivité ont été révélés et deux de ceux-ci seront détaillés dans le chapitre 2.

Il faut noter que ce type d'attaque chimique humide ne fonctionne pas pour la décapsulation de boîtiers céramiques. [PER00]

4.1.1.2 Effeuilage sélectif

Il existe de nombreuses recettes selon les couches de matériaux que l'on souhaite retirer. La suite de ce paragraphe va donner **quelques exemples de recettes typiquement utilisées pour chaque catégorie de couches** mais de nombreuses autres recettes (>200) sont disponibles et sont en particulier décrites dans un tableau du livre « Thin film processes » [KER78]. Pour l'ensemble de cette partie, les annexes 3,4 et 5 répertorient des solutions d'attaque respectivement pour les métallisations, les diélectriques et le silicium.

4.1.1.2.1 Retrait des métallisations

En général, l'ensemble des **métaux** est attaqué par l'**eau régale** (1 volume d'acide nitrique et de 2 à 4 volumes d'acide chlorhydrique). Aucune sélectivité entre les différents métaux n'est alors possible. Le tableau 2 donne quelques exemples de solutions pouvant être utilisées pour le retrait des métaux standards. Plus de détails sont donnés en annexe 3.

Métal à retirer	Solution pouvant être utilisée
Aluminium	1. Mélange de : HNO ₃ (pour oxyder l'alu), acide phosphorique (pour dissoudre l'Al ₂ O ₃), acide acétique (pour rincer) et d'eau pour dissoudre ⁽¹⁾ 2. HCl + H ₂ SO ₄ ⁽²⁾
Cuivre	HNO ₃ fumant + eau ⁽³⁾
Or	KI/I ₂ + eau ^(1,2,3)

Tableau 2. Exemples de solution d'attaque pour les métaux
(⁽¹⁾[MIC12], ⁽²⁾[BEC98], ⁽³⁾ données ST)

4.1.1.2.2 Retrait des diélectriques

Les diélectriques sont, de **manière standard, retirés par voie plasma**. Cependant, des solutions par attaque chimique humide sont aussi envisageables.

Pour l'**oxyde de silicium**, le seul attaquant possible est alors l'**acide fluorhydrique (HF)**. En pratique, un mélange de HF concentré (entre 40%-48%) ou dilué avec du fluorure d'ammonium (NH₄F) peut être utilisé. La bibliographie détaille différents mélanges qui jouent sur le pH, et sur la concentration de fluorure d'ammonium et permettent d'obtenir différentes vitesses de gravure des oxydes de silicium et donc un contrôle associé à chaque application.

Les **diélectriques organiques** peuvent être retirés facilement avec de l'**acide nitrique fumant**.

Enfin, le **nitrure de silicium** peut être gravé par l'**acide phosphorique**.

L'annexe 4 présente certaines solutions gravant ces diélectriques.

4.1.1.2.3 Retrait du substrat de silicium

Il peut être nécessaire au cours de l'analyse de retirer le substrat de silicium ou au moins de l'amincir. Cela peut être, en particulier, utile pour l'observation infrarouge de la face arrière du composant. Il faut alors que le silicium soit suffisamment aminci pour limiter le phénomène d'absorption du faisceau IR par le silicium [BEA04]. Cet amincissement est de manière standard réalisé par polissage mécanique. En théorie, **toute solution avec un pH supérieur à 12 peut attaquer le silicium** [ZHO06]. Il faut cependant noter que pour observer le silicium par la face arrière, la surface du silicium traité doit avoir une faible rugosité. Les attaques devront donc fournir un bon état de surface. Les trois solutions les plus utilisées sont le **TMAH** (TetraMethyl Ammonium Hydroxyde), le **KOH**, et la **Choline**. Pour plus de détails sur ces attaques, voir l'annexe 5.

4.1.2 Exemple d'équipements spécifiques à l'analyse de défaillance

Des équipements pour réaliser des attaques chimiques ont été créés spécifiquement pour l'analyse de défaillance. Deux d'entre eux sont donnés en exemple ci-après.

4.1.2.1 Equipement d'ouverture localisée de boîtier : la Jet-etch

4.1.2.1.1 Le principe

La *Jet-etch* de chez Niscene Technology est un équipement permettant de réaliser des ouvertures de boîtiers plastiques par **voie chimique humide localisée, à l'aide d'acide nitrique fumant et d'acide sulfurique**. L'équipement est présenté en figure 14.

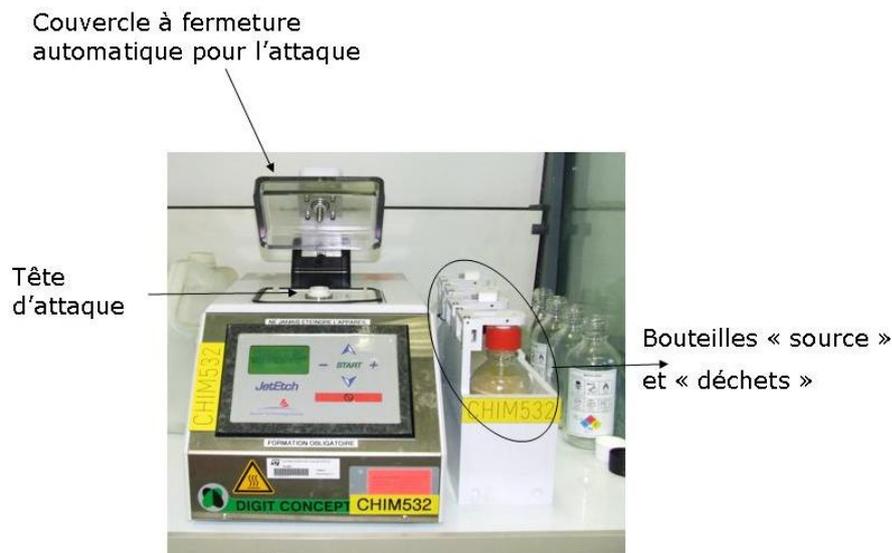


Figure 14: *Jet-etch*

Le principe est le suivant: un joint en forme de disque, appelé « gasket » avec un trou approximativement de la taille de l'ouverture désirée sur le composant est placé sur la tête d'attaque de l'équipement (fig. 15.A.). Puis, le composant est placé

sur ce « gasket » face à attaquer vers le bas (fig.15.A.). Le « gasket » définit ainsi la taille et la forme de l'ouverture à réaliser dans le boîtier.

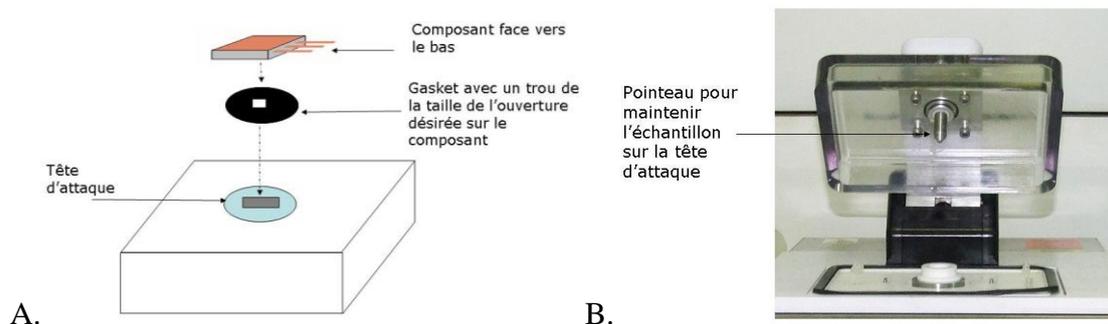


Figure 15: (a) Schéma d'utilisation de la Jet-etch
(b) Photo Jet-etch

Un système de pompe et d'électrovannes gère le déplacement des acides et permet, en particulier, de diriger l'acide à travers un échangeur thermique, avant d'atteindre l'échantillon, de manière à porter l'acide à la température d'attaque désirée. En fin d'attaque, un cycle de rinçage nettoie la cavité réalisée avec de l'acide à température ambiante, puis avec de l'azote gazeux.

L'attaque est faite sous pression dans la chambre, dans une atmosphère inerte pour limiter l'oxydation des métaux et réduire la production de vapeurs nuisibles. Un tel système est facile d'utilisation et sécurisé. L'équipement permet de choisir différents paramètres d'attaque selon le composant : composition du mélange d'acide, température d'attaque, temps d'attaque, type de rinçage, temps de rinçage...

4.1.2.1.2 Les avantages et limites de l'équipement

Cet équipement permet de réaliser des **ouvertures localisées** de boîtier et permet de préserver une partie du boîtier.

Le fait de pouvoir **modifier de nombreux paramètres** laisse une bonne marge de manœuvre pour adapter le type d'attaque au composant. La **quantité d'acide** utilisé est plus **faible** que lors de l'ouverture totale du boîtier puisqu'il faut compter quelques ml d'acide pour un petit boîtier contre plusieurs dizaines de ml pour une ouverture totale dans un bain d'acide.

Enfin, l'utilisateur travaille de manière plus **sécurisée** car il a très peu de contact avec les acides.

De manière générale, **l'ouverture chimique localisée aura les mêmes inconvénients que l'ouverture chimique globale** : certains matériaux sont trop sensibles aux acides, d'autres sont inertes. A ces inconvénients s'ajoutent des restrictions géométriques dues au besoin d'obtenir une ouverture localisée. En effet, l'ouverture localisée **proche des bords** du boîtier est **difficile** à réaliser. Par exemple, la décapsulation des stiches (partie du fil qui est en contact avec la patte du composant) est impossible à la Jet-etch si les stiches sont proches des bords du boîtier [KRU03]. Ainsi, plus généralement, l'attaque chimique localisée fonctionne bien si la puce est assez petite comparativement à la taille du boîtier [PER00].

Enfin, en raison de la taille de l'équipement, les composants montés sur carte imprimée ne peuvent être décapsulés avec la Jetetch que si la carte est suffisamment petite par rapport au couvercle de fermeture.

4.1.2.2 Equipement pour le retrait chimique de couches sur silicium: l'Omnietch



Figure 16: *Omnietch : équipement de retrait couche par couche automatique*

Cet équipement de chez Niscene technology et créé en collaboration avec Texas Instrument permet de réaliser un retrait couche par couche de manière automatique sur des puces individuelles ou des morceaux de plaquette.

L'une des difficultés du retrait couche par couche par voie chimique humide est la possible infiltration de la solution d'attaque à travers les vias vers les couches sous-jacentes. Cet équipement permet d'éliminer ce problème. Il utilise un milieu porteur, appelé *36-6 Carrier Medium*. Il s'agit d'un liquide polymère constitué de molécules hydrophiles. La solution d'attaque est mélangée à ce polymère. Grâce à ces propriétés hydrophiles, les molécules d'eau des solutions d'attaque vont se lier aux molécules hydrophiles. Ces liaisons vont alors empêcher la solution d'attaque de s'infiltrer à travers les différentes couches.

Selon le fournisseur, tous les acides utilisés pour les retraits couche par couche sont compatibles avec le *36-6 Carrier Medium*. C'est un produit inerte chimiquement qui n'attaque donc pas les différents matériaux de la puce.

Il est ainsi possible de réaliser des retraits de cuivre ou encore d'aluminium sans endommager les couches sous-jacentes. [NIS12]



Figure 17: *Vue de dessus du système Omnietch*

Synthèse attaque chimique humide

Avantages: L'intérêt de la préparation chimique est principalement sa rapidité et sa simplicité d'exécution. De plus, elle peut être sélective si les bonnes solutions sont utilisées. Enfin, elle peut être réalisée dans certains cas de manière localisée.

Limitations: Les matériaux du composant étant très variés et changeant d'un composant à un autre, il est nécessaire de faire des essais pour évaluer l'impact des recettes chimiques sur le composant et sur la bonne sélectivité des solutions.

A l'inverse, certains matériaux tels que les céramiques ne réagissent pas aux produits chimiques.

Enfin, beaucoup de variables rentrent en ligne de compte pendant l'attaque (concentration chimique, temps, température, lumière, pH) qui rendent les résultats peu reproductibles.

4.2 Les techniques de préparation physique

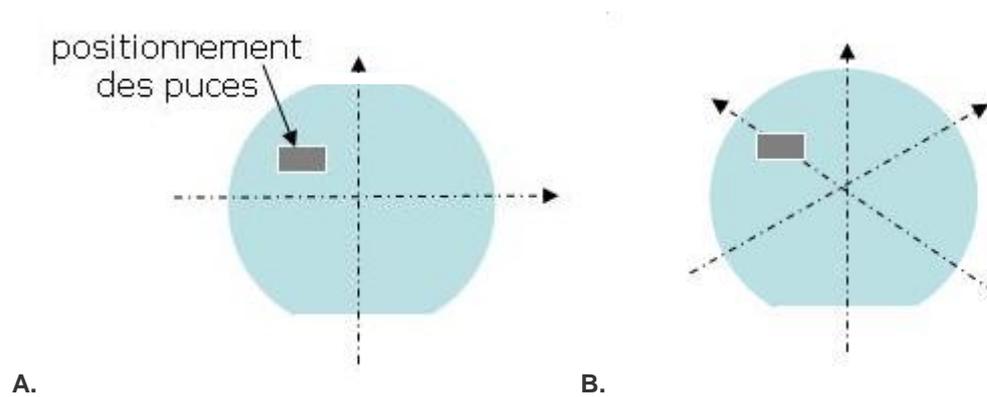
Les techniques de préparation physique ont d'autres avantages et inconvénients que l'approche chimique. Sont abordés le clivage, la découpe, le polissage mécanique, et l'ablation laser.

4.2.1 Clivage

Le clivage est une **méthode de découpe** utilisée sur les **matériaux cristallins**. Il ne peut donc être réalisé que sur produit en plaquette et non sur produits finis. Le clivage peut être utilisé soit pour diminuer les tailles des échantillons lorsque le travail se fait sur plaquette, soit pour observer directement la partie clivée d'un échantillon. Il s'agit d'une première méthode permettant de réaliser des micro-sections.

Cette technique se sert de la structure ordonnée des matériaux cristallins. Les cristaux ont en effet tendance à se casser préférentiellement selon une famille de plans parallèles de moindre résistance [ENG04]. L'orientation du cristal va alors avoir un rôle important.

Dans le cas du silicium, si l'orientation du cristal est (100) alors le clivage va se réaliser selon des plans qui se coupent à 90° (fig.18). Si l'orientation est (111), les pièces clivées forment des triangles avec des angles de 60° entre les plans (fig.18). Cela se traduit par la difficulté à cliver du silicium (111) selon deux côtés perpendiculaires d'une puce.



A. B.
Figure 18: Direction de clivage du silicium : a) pour un substrat Si (100) b) pour un substrat Si (111)

En pratique, la plaquette est rayée à l'aide d'une pointe diamantée ce qui permet une fragilisation de la structure. En exerçant une légère pression sur la plaquette, le clivage se réalise aisément dans cette direction.

Si la rayure n'est pas faite dans la direction du plan de moindre résistance, il se peut que le clivage ne suive pas la rayure mais ce plan. C'est pourquoi un substrat (111) est difficile à cliver dans le sens des puces.

Ce clivage peut être fait manuellement, mais des équipements semi-automatiques ou automatiques ont été développés et permettent de réaliser des clivages de meilleure qualité, avec une plus grande précision.

L'équipement de chez SELA, par exemple, le MC600 est pourvu d'un système pouvant « geler » la surface de la structure avec un jet d'azote liquide. Ceci a pour effet de réduire les déformations mécaniques des couches ductiles telles que le cuivre, les polymères, en surface de puce. Ces couches ont alors une rupture fragile et non plus ductile. La qualité de surface de la micro-section est ainsi nettement améliorée.

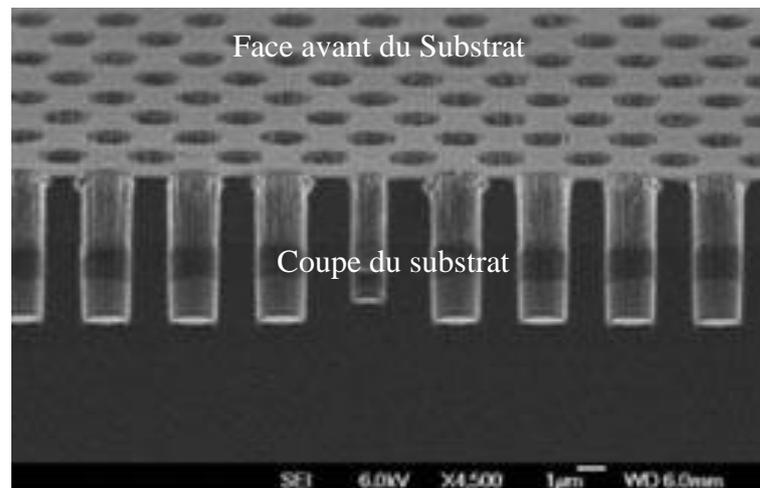


Figure 19: Vue inclinée au microscope électronique à balayage d'un échantillon clivé dans des tranchées

Avantages et limitations du clivage

Avantages: Méthode très rapide et sans contaminant extérieur.

Limitations: Elle ne fonctionne que sur matériaux cristallins et dans des directions définies. De plus, si l'épaisseur des couches en surface de puce est trop élevée, ces couches auront tendance à se soulever ou se déchirer donnant une qualité de micro-section médiocre.

4.2.2 Découpe

La découpe, hors clivage, va permettre de travailler sur produits finis. Elle peut servir à **diminuer la taille de l'échantillon** à analyser (par exemple en découpant une carte imprimée autour du composant), ou bien à **retirer une quantité excessive de matière** pour réduire le temps de polissage qui suit. Cette découpe se fait à la scie diamantée avec une **scie à fil** ou une **scie à disque** (fig.20).



Figure 20: A. Scie à fil B. scie à disque

Pour la découpe d'une partie de boîtier, la scie à disque est suffisante, mais lorsque le chemin de découpe contient la puce, la scie à fil est plus appropriée. En effet, pour la scie à fil, l'objet est pressé doucement contre le fil diamanté qui tourne. L'élasticité du fil permet de réduire la cassure du matériau. Ce n'est pas le cas avec la scie à disque en raison de l'irrégularité des grains et de la présence de particules étrangères sur le disque. Avec la scie à fil, la section peut être faite très près de la zone d'intérêt, et le temps de polissage est diminué. Un nettoyage après découpe est nécessaire.

La micro-section obtenue ne permet pas d'observation poussée de la coupe. La surface est rugueuse et un polissage est nécessaire.

Avantages et limitations de la découpe

Avantages: Méthode très rapide

Limitations: Elle est peu précise et nécessite d'autres étapes pour une observation correcte de la section et des différentes couches.

4.2.3 Polissage

4.2.3.1 Présentation et paramètres des matériaux

Une autre technique de préparation d'échantillons physique consiste à usiner le composant par polissage. Les trois types de préparations mécaniques les plus utilisées sont :

- la micro-section mécanique
- le polissage parallèle
- le fraisage

La **micro-section** consiste à polir le composant perpendiculairement à la surface pour venir observer l'empilement du composant (fig.21).

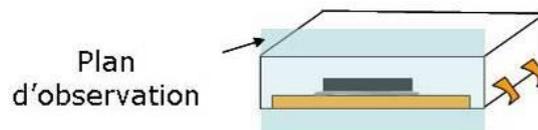


Figure 21: *Plan d'observation d'une microsection*

Le **fraisage** consiste à usiner le composant grâce à une fraiseuse qui se déplace sur l'échantillon. La préparation est généralement réalisée sur une partie localisée du composant et parallèlement à la puce (fig.22).

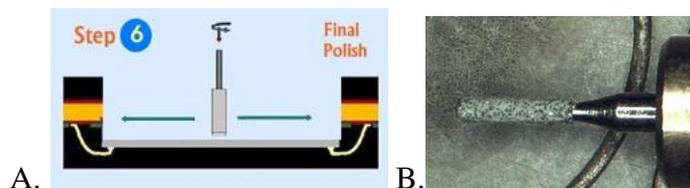


Figure 22: A. *Principe du fraisage* ; B. *Exemple d'un outil de 2mm de diamètre*

Le **polissage parallèle** se fait aussi parallèlement à la puce mais de manière globale et permet de réaliser le retrait couche par couche de la face avant ou par la face arrière.

Avec ces trois techniques, la structure est soumise à différentes contraintes pouvant endommager le composant : des surchauffes, des déformations mécaniques, ou encore l'introduction de particules étrangères dans la surface de l'échantillon. Ces dommages peuvent être évités en choisissant les bonnes étapes de préparation, étapes qui vont varier selon le matériau à usiner.

Pour la préparation mécanique, deux propriétés importantes des matériaux sont à considérer : la **dureté** et la **ductilité**. La dureté est la capacité d'un matériau à résister à une contrainte. C'est la propriété la plus facile à mesurer. La ductilité désigne la capacité d'un matériau à se déformer plastiquement sans se rompre. La rupture se fait lorsqu'un défaut, induit par la déformation plastique, devient critique et se propage. La ductilité est donc l'aptitude que possède un matériau à résister à cette propagation. S'il y résiste bien, il est ductile (tel que le titane), sinon il est fragile (tel que le silicium). La notion de ductilité d'un matériau se trouve dans la valeur de son allongement à la rupture. Cet allongement est de 40% pour le titane et est inférieur à 1% pour le silicium. Cette propriété permet de répondre aux questions suivantes : « est-il facile de déformer ce matériau, ou bien des fissures et des arrachements se forment-ils pendant la préparation ? ».

Selon la ductilité et la dureté d'un matériau, différents fabricants d'équipements pour la préparation métallographique fournissent une aide pour déterminer le type de préparation mécanique à préconiser.

4.2.3.2 Micro-section, polissage parallèle

Les difficultés rencontrées en micro-section et en polissage parallèle sont très proches car les mêmes types d'équipements sont utilisés. La différence réside dans la position de l'échantillon face au disque (puce parallèle au disque pour du polissage parallèle et perpendiculaire au disque pour une micro-section).

Pour réaliser le travail mécanique, plusieurs étapes se succèdent et sont :

- **L'enrobage** pour faciliter la préparation mécanique de pièces complexes, petites ou avec des couches et revêtements en surface
- **Le pré-polissage et le polissage mécanique** qui permettent d'enlever la matière à la surface de l'échantillon à l'aide d'un abrasif.
- **Le polissage mécano-chimique** qui permet de révéler certains matériaux pour faciliter l'observation qui suit.

Toutes ces étapes ne sont pas nécessaires pour tous les échantillons.

4.2.3.2.1 L'enrobage

Certains échantillons doivent être enrobés avant le pré-polissage et le polissage en raison de leur forme (complexe, petite) ou de la présence de couches et revêtements de faible épaisseur et/ou de faible dureté par rapport au substrat ou au boîtier. Cet enrobage permet de **protéger l'échantillon de dommages mécaniques** (ex : décollement de couches fines). L'enrobage a pour intérêt d'aider à obtenir un polissage plan, de protéger l'échantillon d'éventuelles cassures et endommagements de bords de puces et de faciliter la tenue de l'échantillon pendant la préparation.

Cependant, cette étape a aussi ses limites :

- le temps de polymérisation de la résine d'enrobage peut être long (jusqu'à 12h)

- la viscosité de la résine peut être trop élevée et ne pas s'infiltrer dans des petits interstices ce qui crée un vide qui peut générer ensuite des fissures pendant le polissage
- le retrait de la résine dû à la diminution du volume de la résine à la polymérisation peut générer un espace entre le composant et la résine. Ceci peut contraindre l'échantillon et générer des fissures sous la surface de l'échantillon ou des déplacements de matière
- le composant est difficilement récupérable après enrobage car la résine utilisée n'est généralement pas soluble dans les solvants standards
- il peut être difficile de discerner la zone à atteindre à travers l'enrobage, en raison de la déformation optique générée par la résine.

Pour obtenir le meilleur résultat de polissage, la résine d'enrobage employée doit avoir une **dureté similaire à l'échantillon** et doit **résister aux réactifs chimiques susceptibles d'être utilisés** dans la suite de l'analyse.

4.2.3.2 Prépolissage et polissage

Ce sont les étapes les plus importantes de la préparation. Lors du polissage, la matière est enlevée mécaniquement de la surface de l'échantillon à l'aide d'abrasifs (comme du diamant, du carbure de silicium, de l'alumine) de plus en plus fins, définis par leur granulométrie.

La préparation est réalisée avec des disques de granulométrie allant de 60 à 4000 ce qui signifie avec des grains de 300 μ m de diamètre à 5 μ m. Elle se poursuit généralement par des polissages utilisant des solutions diamantées avec des tailles de grains allant de 15 μ m jusqu'à 0,25 μ m. Des solutions comme la silice colloïdale sont parfaites pour finaliser un polissage avec des tailles de grains allant de 0,25 μ m à 0,04 μ m.

Plus de détails sur le polissage mécanique sont donnés en annexe 6. Il faut simplement noter que les paramètres jouant sur le polissage sont :

- **l'abrasif utilisé**
- **le lubrifiant**
- les **propriétés dynamiques** telles que la vitesse de rotation de l'échantillon par rapport au disque et la force perpendiculaire au plan de polissage.

De manière générale, l'abrasif doit avoir une dureté 2,5 à 3 fois supérieure à la dureté du matériau à préparer, ce qui signifie que tous les matériaux ne sont pas polis avec le même type d'abrasifs.

4.2.3.2.3 Finition par gravure

Pour optimiser l'état de surface d'une micro-section, il est possible de terminer le polissage par une gravure ionique avec un équipement tel que le *Duo Mill* de chez Gatan. Il s'agit alors d'introduire des ions avec une faible énergie à la surface d'un échantillon sectionné. La tension appliquée est alors de l'ordre de 4kV à 0,5mA et la gravure dure de 20s à 2min. **Ce polissage ionique permet d'éliminer les plus petites rayures.** L'état de surface est ainsi amélioré comme le montre l'observation au MEB

à la figure 23 et aucune pâte de polissage ne semble permettre d'obtenir ce résultat. [ENG2004 ; BEC1998].

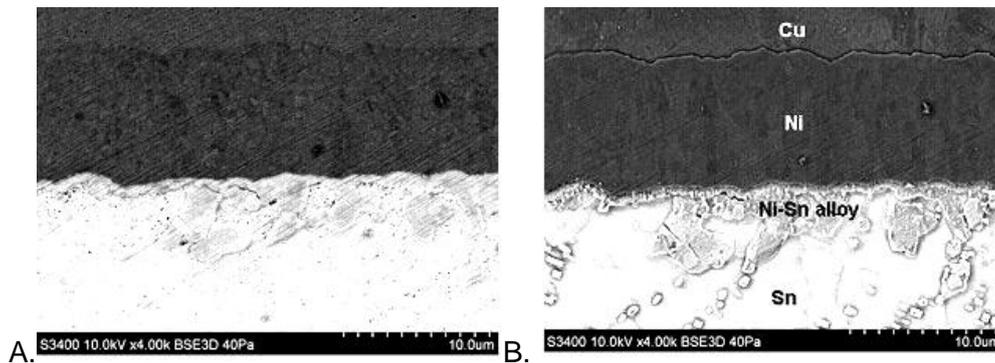


Figure 23: Exemple de finition par gravure ionique [HIT12] :
A. après polissage mécanique
B. après finition par gravure ionique

4.2.3.3 Exemple d'équipements spécifiques à l'analyse de défaillance

Il est important de noter que le résultat d'un polissage mécanique est très dépendant de l'expérience de l'opérateur même avec un mode opératoire précis [PER04]. Des machines semi-automatiques ont donc été développées et permettent de limiter cette dépendance.

4.2.3.3.1 Equipement de polissage semi-automatique

Des rodeuses sont vendues par la plupart des fabricants spécialisés en métallographie (fig.24). Ces équipements disposent de porte-échantillons pour le serrage des composants enrobés. Ils permettent ainsi de régler la force appliquée et de conserver une position parallèle au disque pendant toute la préparation. Sont définis aussi la vitesse de rotation du disque, la quantité de lubrifiant et d'abrasifs déposée et le temps de polissage. Ils permettent la création de programmes utilisables par l'ensemble des analystes pour ainsi améliorer la reproductibilité des procédés.



Figure 24: Exemple d'équipement semi-automatique

4.2.3.3.2 Equipement de fraisage

L'ASAP de chez Ultratec est un des équipements de fraisage utilisés dans les laboratoires d'analyse lorsqu'il est nécessaire de réaliser un polissage localisé (fig.25).

De même que pour le polissage, des outils de moins en moins abrasifs accompagnés de lubrifiant sont utilisés. Le diamètre de l'outil, le matériau et la taille de l'abrasif, le lubrifiant, la vitesse de rotation de l'outil, la force appliquée, sont autant de paramètres à régler lors de la préparation.

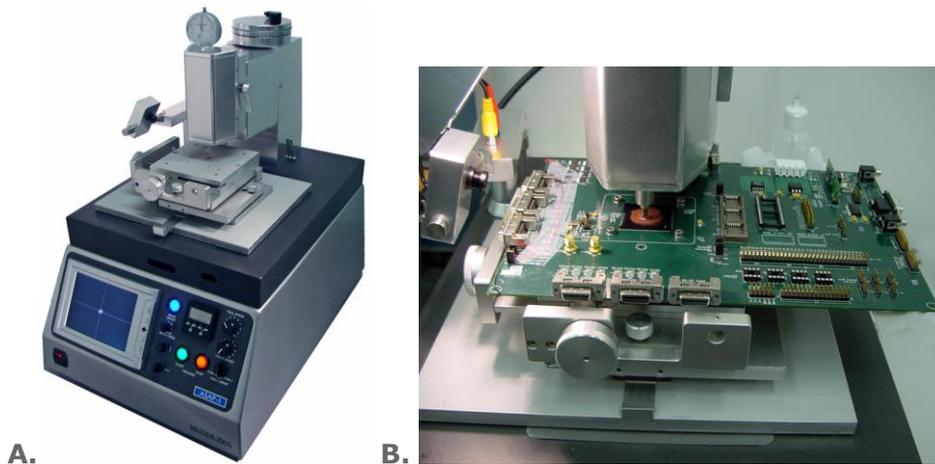


Figure 25: ASAP-1 :A. équipement ; B. exemple d'utilisation sur circuit imprimé

Avantages et limitations du polissage mécanique

Avantages: Le polissage mécanique permet de travailler tout type de matériau, en particulier ceux qui sont inertes aux produits chimiques comme les céramiques. De plus, il évite le contact du composant avec des produits chimiques. Ceci est particulièrement utile pour les matériaux sensibles comme les produits organiques.

Limitations: Le polissage est dépendant de l'opérateur et de son expérience ce qui le rend plus difficile d'accès. Le polissage parallèle attaque la totalité du composant, il est par conséquent rare de pouvoir conserver les connexions. De plus, le polissage mécanique n'est pas sélectif, par conséquent un contrôle régulier de l'avancement dans le composant doit être fait tout au long de la préparation. Le polissage contraint mécaniquement le composant. Il est donc susceptible de créer des artefacts pouvant parfois, aller jusqu'à induire des erreurs d'interprétation des résultats de l'analyse.

4.2.4 L'ablation laser

La dernière préparation physique à aborder est le laser. Des bases sur l'ablation laser sont disponibles dans la référence [AUB08]. Pour l'analyse de défaillance, le laser peut être utilisé soit pour retirer un certain volume d'un matériau soit pour réaliser des découpes.

4.2.4.1 L'interaction laser-matière

Lorsque le laser interagit avec un matériau, l'énergie du faisceau est absorbée, réfléchi et/ou transmise par le matériau. Selon la loi de Beer-Lambert, l'absorption est fonction des propriétés optiques du matériau et de la longueur d'onde du laser.

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha x}$$

- I_0 est l'intensité de la lumière incidente.
- I est l'intensité de la lumière sortante
- α est le coefficient d'absorption (en m^{-1} ou en cm^{-1}).
- x est la longueur du trajet optique (en m ou en cm).

La valeur du coefficient d'absorption α varie entre différents matériaux et aussi avec la longueur d'onde pour un matériau particulier. Le graphe de la figure 26, tiré de deux ouvrages [ADA99] et [PAL98], décrit pour différents matériaux de la microélectronique, les coefficients d'absorption en fonction de la longueur d'onde.

Avec l'absorption du faisceau, deux phénomènes peuvent se passer au niveau de l'atome : un phénomène **photothermique** et un phénomène **photochimique**.

Dans le cas de l'effet photothermique, l'énergie absorbée par le matériau entraîne l'augmentation de l'amplitude de vibration des atomes ce qui crée un échauffement du matériau. D'après les lois de la thermodynamique, une amplitude de vibration critique peut être atteinte par le matériau. Elle correspond à la capacité maximale du matériau à conduire la chaleur en dehors du point d'impact. Passé ce seuil, les liaisons entre atomes sont cassées et le matériau est vaporisé ou sublimé [PAR07] [LET00].

L'effet photochimique agit sur les liaisons moléculaires. Si l'énergie du photon est assez élevée, le photon peut casser les liaisons moléculaires dans le matériau. Dans le cas de la résine époxy, le polymère est dissocié en monomères qui quittent la surface. L'énergie de liaison est de 3,5eV, ce qui signifie qu'il faut au moins cette énergie pour casser les liaisons c'est-à-dire que l'effet photochimique est possible grâce à des lasers de longueur d'onde inférieure à 350nm soit dans l'UV. [LET00]

En pratique, tous les lasers introduisent ces 2 phénomènes (chimique et thermique), mais l'un ou l'autre va être prédominant selon le matériau, et les paramètres du laser employé. [LET00]

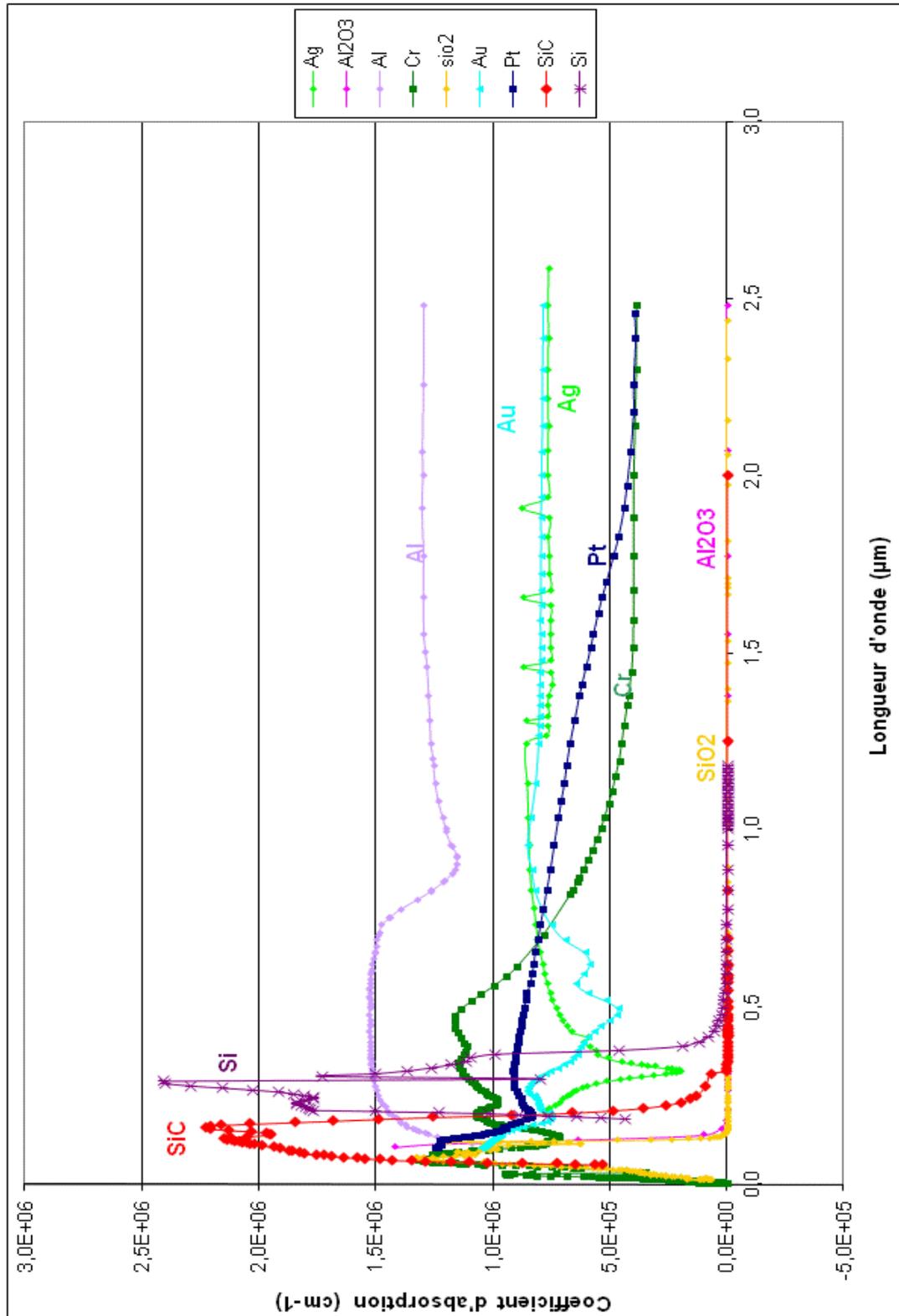


Figure 26: Graphe représentant le coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde pour différents matériaux. Les courbes ont été obtenues à partir des valeurs n et k de l'indice complexe des matériaux tirés de 2 ouvrages [ADA99] et [PAL98]

4.2.4.2 Les différents types de laser

4.2.4.2.1 Les lasers millisecondes ou nanosecondes[TEO03][ILL01]

Un système laser de base émet un rayonnement continu. Il est cependant possible de réaliser des systèmes de **laser pulsé** qui vont émettre un rayonnement avec une certaine fréquence. En mode pulsé, un mode passant et un mode bloqué sont alors réalisés. Pendant la durée du mode bloqué le laser ne sort pas de la cavité et le nombre de photons s'accroît. Au changement en mode passant, étant donné cette amplification de photons, l'intensité du laser est alors très importante par rapport à un mode continu. Ainsi, avec un laser de 10W en continu, il est possible de générer des impulsions de quelques kilowatts. Ces **pics d'énergie** permettent **l'ablation des matériaux**. En fonction de la fréquence des impulsions, on parle de laser milliseconde ou nanoseconde.

Ces lasers sont généralement utilisés en analyse de défaillance pour l'ablation de la résine, le retrait de couches de matériaux ou la section de pistes métalliques. Dans ce cas-là, le matériau est porté localement à très haute température pour être vaporisé et éjecté du composant. Cela crée une zone appelée « ZAT » (Zone Affectée Thermiquement) qui peut générer en particulier localement des microfissures du matériau. Cet effet thermique limite l'application du laser nanoseconde mais il est cependant utilisé pour certaines parties de la préparation. [BEA04]

Dans les lasers milli ou nanosecondes, plusieurs longueurs d'ondes sont utilisées pour l'ablation de matériau. Les lasers UV, tel que le laser ND-YAG UV à 355nm ou les lasers excimer à 248nm, ont l'avantage d'avoir des diamètres de faisceau petits de l'ordre de leur longueur d'onde, et donc de définir des motifs plus fins. De plus, ils permettent de graver de nombreux matériaux, en particulier, ceux qui ont un coefficient d'absorption important pour les petites longueurs d'onde.

La figure 26 permet ainsi de montrer pour ces matériaux quelle longueur d'onde de laser peut être utilisée pour les graver.

De nombreux polymères, cristaux ou métaux réfléchissent ou transmettent les longueurs d'onde du visible ou de l'infrarouge, alors qu'ils sont fortement absorbants dans l'ultraviolet. Ces lasers peuvent être utilisés dans des applications où les longueurs d'onde plus élevées sont inefficaces. Enfin, parce que l'effet photochimique est prépondérant, l'échauffement du composant est moindre avec les lasers UV. Les lasers infrarouges (tels que le laser ND-YAG IR à 1064nm ou le laser CO₂ à 10.6µm) sont moins précis mais aussi moins chers. Le laser ND-YAG IR est en particulier utilisé pour la décapsulation de boîtier plastique. Ce laser peut cependant endommager le composant en générant des points de fusion sur les couches sous-jacentes (fig.27). Par conséquent, il est crucial de ne pas atteindre la surface de la puce avec ce type de laser pendant l'ablation.

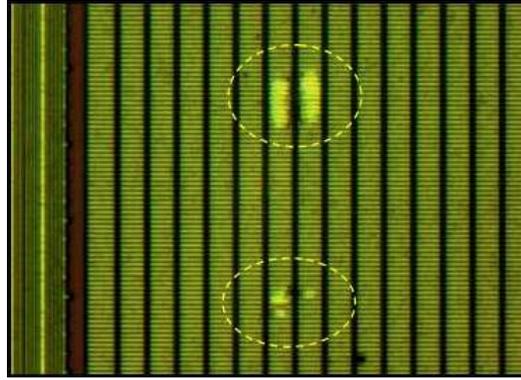


Figure 27: *Vue optique de la surface d'une puce montrant des points de fusion sur la métallisation induit par la décapsulation au laser [PAR07]*

4.2.4.2.2 Les lasers femtosecondes

Dans une impulsion laser, on concentre l'énergie disponible dans un temps très court. La puissance est d'autant plus grande que l'impulsion est courte. Il est donc intéressant de réduire la durée de ces impulsions. C'est dans ce but que les lasers femtosecondes ont été développés.

Le faisceau résultant des lasers femtosecondes met en jeu de hautes intensités ($>10^{15} \text{W/cm}^2$) et **ionise tous les atomes de la surface**. Cela génère de hautes températures et un plasma à haute densité qui diffuse très rapidement (de l'ordre de la picoseconde). La surface irradiée est ainsi gravée avant que tout effet thermique n'ait le temps de diffuser dans le composant. Les **effets thermiques** rencontrés pour les lasers travaillant à la nanoseconde ou à la milliseconde sont **pratiquement inexistant**s pour le pulse « ultra-short ». De plus, en raison des très hautes énergies, ce type de laser permet d'**usiner n'importe quel matériau**, même ceux inaccessibles jusque là en gravure laser, comme les matériaux transparents ou le diamant. Ce laser peut servir à décapsuler des boîtiers mais aussi à amincir du silicium ou encore découper différents matériaux. Il peut ainsi graver les différents types de matériaux présents dans les circuits intégrés sans endommager les matériaux environnants. Plusieurs vitesses de gravure sont données dans le tableau 3.

Matériau	Boîtier plastique	Boîtier céramique	Substrat	Silicium
Vitesse d'ablation ($\times 10^6 \mu\text{m}^3/\text{s}$)	20	1,4	2,2	0,138

Tableau 3. **Vitesse de gravure du laser femtoseconde selon le matériau [BEA04]**

4.2.4.3 Des équipements dédiés à l'analyse de défaillance

4.2.4.3.1 Le FaLit

Le *FaLit* (Failure analysis laser inspection tool) est produit par la société Controlssystemation, spécialisée dans les lasers et est dédié à l'analyse de défaillance et la préparation d'échantillon (fig.28).



Figure 28: *Le FaLit de chez Controlsystemation*

Cet équipement est proposé avec une ou deux longueurs d'ondes au choix : un laser infrarouge Nd-YAG, un laser UV ou un laser vert. Un système de caméra permet de positionner la forme à graver avec précision sur l'échantillon. Ce système de caméra permet aussi de voir en temps réel l'ablation de l'échantillon. Le laser Nd-YAG permet de réaliser des ouvertures de boîtier en retirant la résine. Le laser UV permet d'amincir le silicium. Le laser vert permet de réaliser des micro-sections de composants (fig.29). Pour un boîtier de type BGA, le fournisseur donne un temps de découpe de quelques minutes.

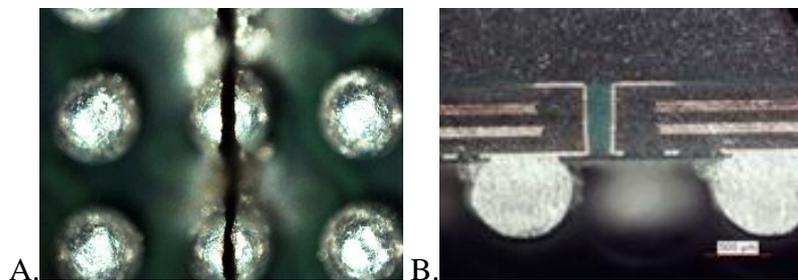


Figure 29: *Micro-section faite au laser vert [CON12]*
A. *vue de dessous du composant avec la ligne de coupe*
B. *Vue de la coupe du composant*

4.2.4.3.2 Le Sésame-1000

L'équipement d'ablation laser, *SESAME-1000*, de la société Digit Concept, est dédié à l'ouverture de boîtier résine (fig.30).

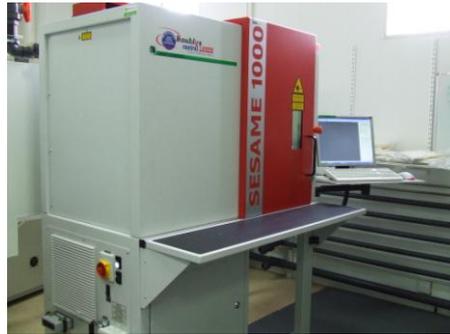


Figure 30: *SESAME-1000*

Le laser utilisé est un laser solide Nd-YAG délivrant une puissance moyenne maximale de 10 W et une énergie d'impulsion inférieure à 1mJ, émettant à la longueur d'onde de **1064 nm**. Son système de pompage est une diode laser. Le laser peut travailler en **mode continu** ou en **mode pulsé**. Le mode pulsé permet d'obtenir des fréquences d'impulsion de 1 kHz à 50 kHz.

Un schéma de l'équipement est présenté en figure 31.

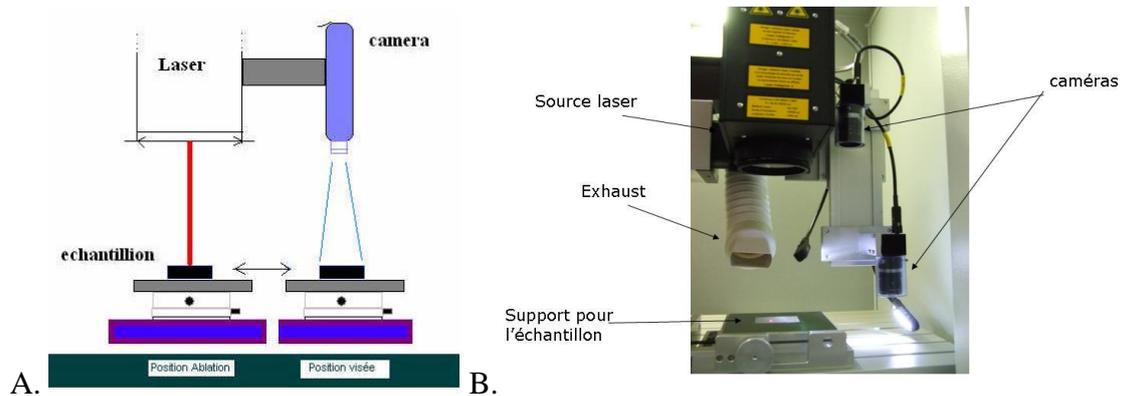


Figure 31: *Système caméra-laser du SESAME-1000 : A. Schéma B. Photo*

Lors d'une ablation, le laser balaye la surface de l'échantillon. L'échantillon est immobile, mais, le laser est dévié grâce à des miroirs dirigés par des galvanomètres. Le laser peut ainsi se déplacer en X et en Y (fig. 32) et réaliser de larges fenêtres d'ablation (jusqu'à 120mm x120mm).

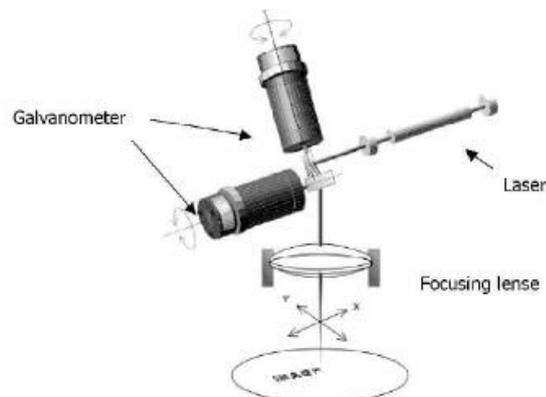


Figure 32: *Galvanomètres permettant de gérer les mouvements des miroirs et donc le déplacement en X et Y du laser [DIG12]*

Avantages et limitations de l'ablation laser

Avantages : L'avantage de la technique laser sur les autres techniques réside dans le fait qu'elle agit sans contact, et que le volume gravé est constant et stable. En effet, le laser retire la même quantité de matière quelle que soit l'épaisseur. Il est donc important de prendre en compte l'homogénéité en épaisseur du matériau à graver. De plus, la technique laser permet de réaliser des ouvertures avec de très bonnes résolutions spatiales (de l'ordre de 100 μ m pour le laser IR à disposition) et des temps de préparation courts (la gravure avec le laser IR dure de l'ordre de la minute pour un boîtier TO220). [KRU03]

Les lasers femtosecondes ne créent pas de phénomène d'échauffement et s'appliquent à tous les matériaux.

Limitations : L'inconvénient majeur du laser est le risque d'endommager thermiquement la puce avec les lasers milli ou nanosecondes quelle que soit la longueur d'onde utilisée. Pour les matériaux traités à la fois par les lasers millisecondes et les lasers femtosecondes, ces derniers ont une vitesse d'ablation plus lente (ex : pour de la résine de boîtier: 60 mm³/min pour un laser milliseconde contre 0,1mm³/min pour le laser femtoseconde).

4.3 Les préparations physico-chimiques

Les techniques d'attaque physique sont nombreuses, mais ont comme les préparations chimiques des limites d'utilisation dues à des contraintes thermiques ou mécaniques qu'elles peuvent générer. Une dernière famille de techniques de préparation d'échantillon reste à détailler : il s'agit des attaques physico-chimiques. Nous verrons qu'elles ont certains avantages de l'attaque chimique et d'autres de l'attaque physique, et que ce sont des solutions complémentaires des techniques déjà introduites.

4.3.1 Gravure plasma

L'attaque chimique sèche, ou gravure plasma, permet de retirer des matériaux en bombardant le composant avec des ions. Elle peut s'appliquer à de nombreux matériaux et peut donc être utilisée aussi bien sur des produits en boîtier que des puces ou des plaquettes. Cependant, pour chaque besoin, la technique employée change, et l'équipement à utiliser ainsi que le choix des paramètres seront différents.

Le plasma, appelé aussi quatrième état de la matière, se crée par transformation d'un gaz en le chauffant à de très hautes températures ou bien en l'excitant par une source extérieure. Cette source peut être un champ électrique de forte intensité, un bombardement de particules, ou un champ électromagnétique très intense [LAG12]. Lorsque l'ionisation est assez importante pour que le nombre d'électrons par unité de volume soit comparable à celui des molécules neutres, le gaz devient alors un fluide très conducteur.

Utilisant ce phénomène, il existe plusieurs types d'équipement d'attaque par voie sèche qui sont détaillés par la suite :

- la gravure plasma (Plasma etching (PE))
- la gravure ionique réactive (Reactive ion etching (RIE)),
- le plasma couplé par induction (Inductively coupled plasma (ICP)) ou gravure ionique réactive profonde (Deep reactive ion etching (DRIE))
- la gravure par faisceau d'ions (IBE)
- le plasma micro-onde

4.3.1.1 Les différentes configurations d'équipements plasmas

Pour la gravure plasma PE, l'ionisation des gaz est faite par une **excitation RF** émise par une **électrode haute** dans une chambre (fig. 33). L'échantillon est déposé sur une **électrode basse** connectée à la **masse**. La pression dans la chambre est comprise entre quelques mTorr et quelques centaines de mTorr. Le mouvement aléatoire des ions dans la chambre les fait atteindre l'échantillon et une **réaction chimique attaque le matériau**.

Le PE réalise une attaque fortement **isotrope** et produit une **surface nette et uniforme**. Ce mode est typiquement utilisé pour retirer des couches de passivation ou des revêtements. L'attaque va dépendre du flux de gaz, de la pression et de la

puissance RF. La nature du gaz va déterminer l'efficacité et la sélectivité de l'attaque. [LAG12] [DIN04].

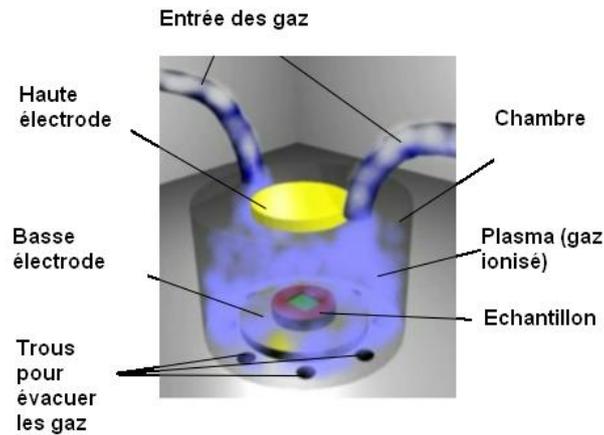


Figure 33: Schéma d'un système d'attaque plasma P.E.

Le plasma RIE est une variante du PE. Le principe est le même sauf que dans ce cas, l'**électrode haute** dans la chambre est connectée à la **masse** et l'échantillon est posé sur une **électrode basse** soumise à une **puissance RF** (fig. 34).

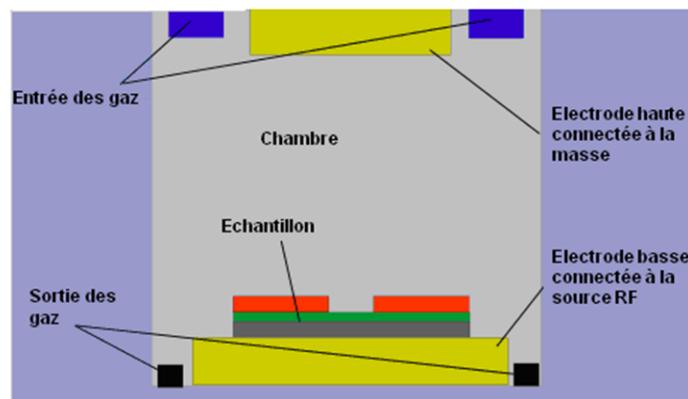


Figure 34: Schéma d'un système d'attaque plasma RIE [LAG12]

Dans cette situation, les ions sont accélérés dans la direction de l'échantillon ce qui a une incidence sur le processus d'attaque. Comme l'échantillon est connecté au signal RF, les électrons sont statistiquement plus souvent en contact avec la cible que les ions positifs. Les électrons sont des espèces hautement réactives, par conséquent ils sont facilement adsorbés par le matériau et le polarisent négativement. Simultanément, la perte d'électrons dans le plasma donne une charge globale positive du « nuage » de plasma ce qui crée une accélération des ions en direction de l'échantillon. (fig. 35) [LAG12]

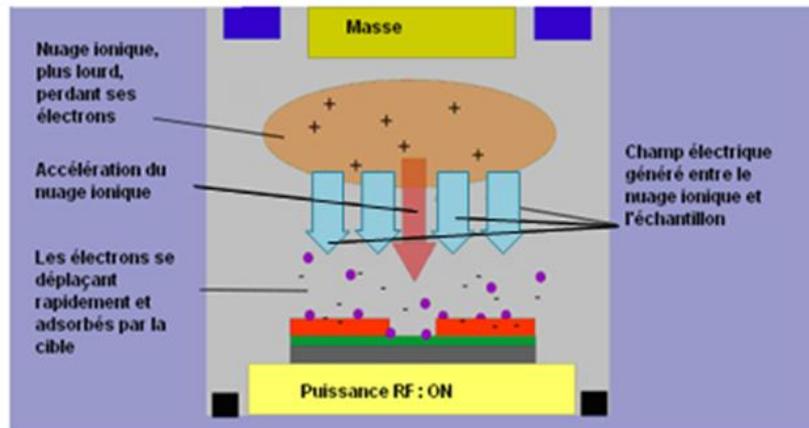


Figure 35: Principe du plasma RIE : création d'un champ électrique entre le nuage ionique et la surface de l'échantillon [LAG12]

Le phénomène remarquable est l'attaque de type physique due à la vitesse des ions qui arrivent sur l'échantillon. Les couches de molécules sont alors éjectées de la surface de l'échantillon par impact des ions (fig.36).

De plus, contrairement au PE où les ions se déplacent aléatoirement au-dessus de la cible, en mode RIE, les ions ont une probabilité plus grande d'avoir un mouvement dans la direction du champ électrique ce qui crée une attaque **anisotrope**. [LAG12]

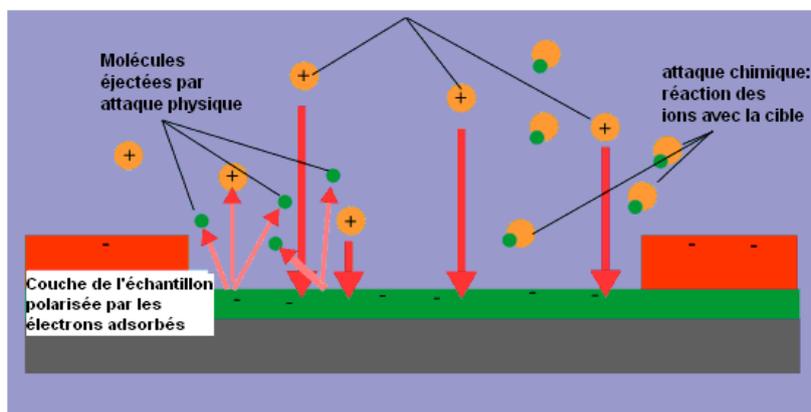


Figure 36: Principe du plasma RIE : réaction à la surface de l'échantillon [LAG12]

Si le matériau a une faible capacité à adsorber les électrons et donc à se polariser, l'attaque RIE sera semblable à l'attaque PE. Au contraire, un matériau ayant une grande capacité à adsorber les électrons permet de réaliser des attaques hautement anisotropes. Les diélectriques ont une faible capacité d'adsorption des électrons, et pour les semi-conducteurs elle est plus élevée. Ainsi, les recettes d'attaques anisotropes concernent principalement le silicium et le polysilicium [LAG12]. Cette technique permet aussi de réaliser des attaques anisotropes de couches intermétalliques, en évitant de couper les pistes métalliques et en maintenant l'intégrité du circuit formé par ces pistes. [DIN04]

Le plasma couplé par induction ICP permet d'obtenir des attaques encore **plus anisotropes** que le RIE. Le principe est de générer le plasma par un **champ**

magnétique et de le densifier par un générateur d'un second champ magnétique (fig.37). Le but est d'atteindre une forte ionisation des gaz pour améliorer l'effet RIE. [LAG12]

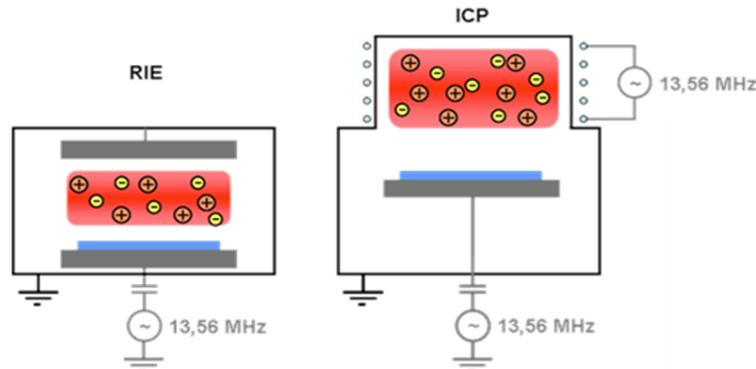


Figure 37: Principe du plasma ICP [CRY12]

La gravure par faisceau d'ions (IBE) correspond au cas extrême de l'utilisation de l'attaque physique. Cela consiste à utiliser de très **hautes énergies** et un gaz neutre (Argon) pour réaliser une **attaque physique pure** de l'échantillon. Cette technique est utilisée pour attaquer les métaux et d'autres matériaux non sensibles aux attaques chimiques humides. Elle est très efficace et peut attaquer la plupart des matériaux. L'inconvénient de cette technique est le bombardement des ions qui crée un échauffement du matériau. Ainsi, l'IBE peut par exemple brûler un masque polymère. La calibration réside dans l'équilibre entre le temps d'attaque et la température atteinte [LAG12].

Totalement opposé à la technique ICP, le plasma micro-onde va limiter toute attaque physique du matériau en conservant une attaque chimique efficace. Le plasma est alors généré par des micro-ondes. [LAG12] Pour les composants sensibles aux ESD, les plasmas micro-ondes ont des avantages sur le plasma RF. Grâce à la plus haute fréquence d'oscillation du champ électrique dans les plasmas micro-onde, les électrons ont un libre parcours moyen plus court. Ceci signifie que moins d'électrons atteignent la surface du composant, minimisant ainsi les effets de charges. Avec un minimum de charges de surface, il n'y a pas d'accélération d'ions en direction de la surface et donc peu de bombardement en surface. **Le plasma micro-onde est donc isotrope.**

4.3.1.2 Les paramètres à maîtriser

Lors d'une attaque plasma, 3 paramètres physiques permettent de décrire le processus : la **vitesse d'attaque**, le facteur **d'anisotropie**, et la **sélectivité**.

Différents facteurs permettent de jouer sur ces 3 paramètres et leur impact est détaillé en annexe 7:

- la tenue de l'échantillon
- les gaz employés
- la pression et les débits
- la puissance RF

4.3.1.3 Arrêt de la réaction

Enfin, il est intéressant et même utile de pouvoir déterminer à quel moment stopper l'attaque plasma. Pour ceci, deux techniques peuvent être couplées à l'équipement de gravure : la spectrométrie ou l'interférométrie.

Grâce à la **spectrométrie**, il est possible de déterminer la composition des gaz de la chambre en utilisant un spectromètre de masse et d'évaluer l'émission optique des gaz. L'apparition ou la disparition d'un gaz, déterminera la fin de gravure. Cette méthode très sensible est capable de fournir des résultats utilisables là où d'autres méthodes échouent. La spectrométrie permet un contrôle de procédé fiable. Cependant le coût d'un couplage de cette technique au plasma est très élevé.

L'**interférométrie** fonctionne sur le principe de la réflexion du laser sur deux interfaces qui génèrent des interférences constructives ou négatives au point où elles se combinent. Si la distance entre les deux interfaces varie alors le motif d'interférence varie aussi. Le faisceau laser pénètre dans la couche à attaquer (ex : SiO_2) et est reflété sur la couche en dessous (ex : Aluminium). Le faisceau réfléchi interfère alors optiquement avec le faisceau incident au miroir semi-réfléchissant. (fig.38). L'intensité du signal d'interférence est mesurée par un photo-détecteur. Cette intensité dépend de l'épaisseur de la couche traversée.

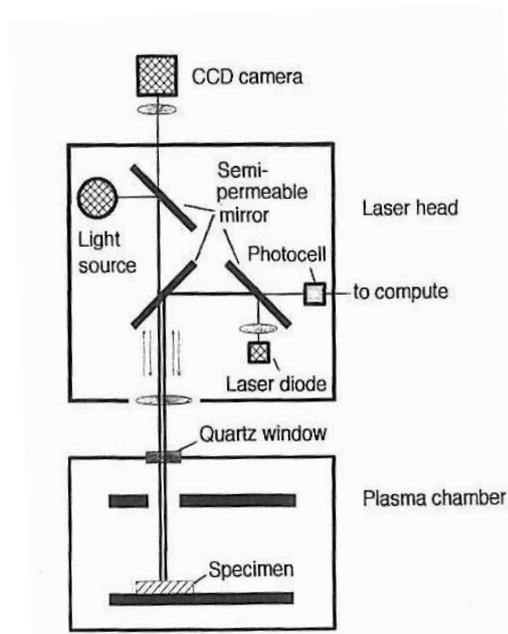


Figure 38: *Système d'interférométrie laser*

Lorsqu'il reste du SiO_2 sur l'aluminium, les deux faisceaux interfèrent et donnent un signal sinusoïdal. Lorsque la couche a été retirée, la fonction d'interférence perd sa périodicité (fig. 39).

Plus la couche à graver est uniforme et plus la réflexion du laser sur la couche inférieure est bonne, plus le signal sera net. Malheureusement pour les technologies récentes, plus complexes, ces conditions sont difficilement réunies. La mesure est alors faite sur des surfaces non uniformes et avec une lumière réfléchie diffuse.

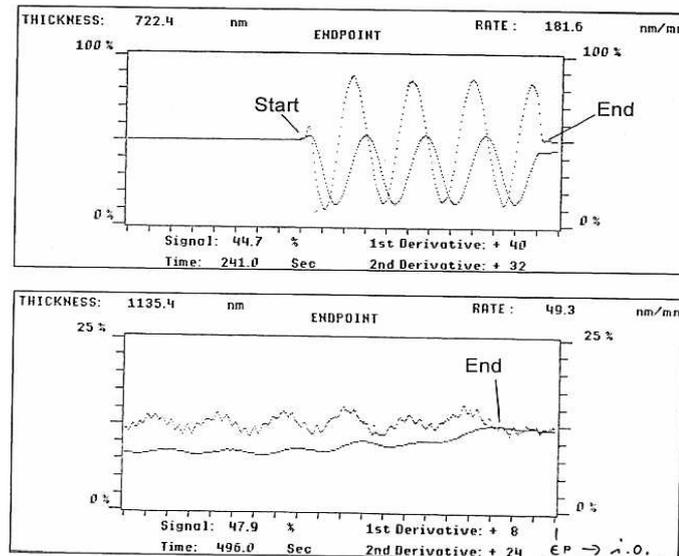


Figure 39: Les spectres d'interférence :

- A. Spectre lorsque la couche n'est pas totalement retirée (sinusoïde)
 B. Spectre lorsque la couche est totalement retirée (plus d'interférence)

Pour les matériaux non transparents tel que les métaux, un changement de la réflectivité va se produire lorsque la totalité du film est retiré.

4.3.1.4 Exemple d'équipements de gravure sèche

4.3.1.4.1 Nextral 90

Nextral était un fournisseur d'équipement plasma aujourd'hui vendu sous le nom Plasma Therm. Les laboratoires d'analyse de défaillance sont encore souvent équipés d'un plasma Nextral et le *NE 90* en est un exemple.

Le *NE 90* a été développé pour la gravure des couches diélectriques d'un circuit intégré, monté sur boîtier, ou d'un circuit sur tranche de silicium. Il s'agit d'une gravure RIE. Le *NE 90* a les caractéristiques suivantes:

- C'est un réacteur permettant la gravure de tranches entières, jusqu'à 200mm de diamètre, ou bien de circuits intégrés montés sur boîtier.
- La conception de la cathode permet la focalisation du plasma sur le circuit à graver, de sorte que le plasma soit très dense pour une faible puissance RF. Il en résulte une grande vitesse de gravure.
- La mise au même potentiel des connexions du boîtier est faite pour préserver le circuit d'éventuelles décharges électrostatiques.

Le réacteur est constitué d'une enceinte en aluminium anodisé de 300mm de diamètre et 100mm de hauteur. Celle-ci est recouverte d'un support en graphite permettant la focalisation du plasma et la mise au même potentiel des connexions du circuit intégré. Au-dessus de l'enceinte, un hublot est prévu pour l'installation d'un réflectomètre laser permettant la mesure "in situ" de la vitesse de gravure, de l'épaisseur gravée, et la détection de fin de gravure. Les échantillons placés sur ce support sont chauffés par le bombardement ionique. Un refroidissement par circulation d'eau ou d'un fluide diélectrique permet de limiter l'élévation de température du composant.

4.3.1.4.2 FA2000P

L'équipement *FA2000P*, distribué par *Digitconcept*, a été développé pour réaliser des gravures RIE de boîtier plastique de manière localisée ou non. La gravure étant lente, cet équipement est souvent utilisé pour finaliser une attaque commencée par polissage mécanique, par chimie humide ou au laser. L'intérêt est alors d'obtenir un retrait contrôlé de la matière.

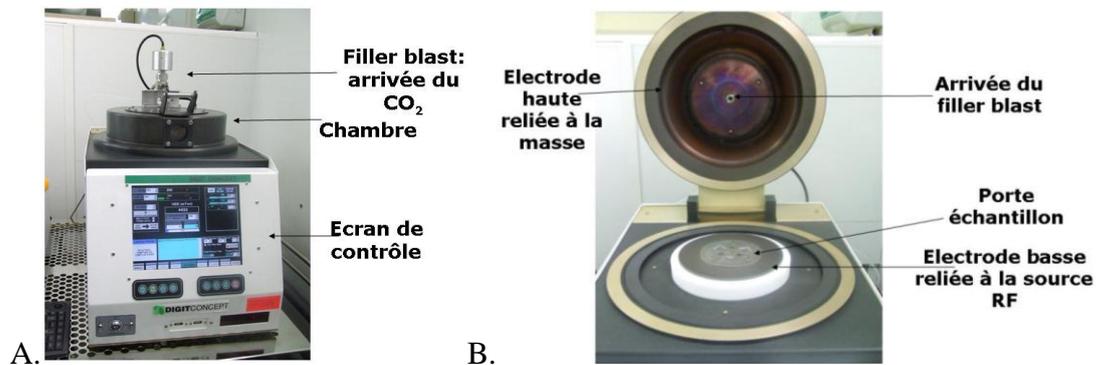


Figure 40: *Equipement FA2000P* : A. *Vue générale* ; B. *Chambre*

Comme un système RIE standard, cet outil comporte (fig. 40):

- une chambre plasma dans laquelle est posé l'échantillon
- une source RF reliée à l'électrode basse de la chambre
- une électrode haute dans la chambre reliée à la masse
- un système de pompage permettant de générer le vide dans la chambre
- un système d'incorporation des gaz de gravure dans la chambre avec les contrôleurs de flux massique pour régler les débits de gaz
- un système de régulation permettant de refroidir ou chauffer le circuit

Les gaz pouvant être introduits dans la chambre sont du tétrafluorure de carbone (CF_4), de l'oxygène (O_2) et de l'azote. Le CF_4 et l' O_2 permettent de graver les matières organiques et donc les boîtiers plastiques. L'azote est utilisé pour remplir la chambre à la fin du processus de gravure pour casser le vide et donc ventiler la chambre. L'azote est aussi relié à la pompe car il peut être nécessaire de saturer la pompe à vide avec de l'azote.

En plus d'un équipement standard, il est équipé d'un système de soufflerie (filler blast) de CO_2 à haute pression (200bar). Cette option est cruciale pour permettre la gravure des boîtiers plastiques. La gravure à l'oxygène ou au tétrafluorure de carbone permet de retirer la matière organique du boîtier (l'époxy) mais pas les billes de verre qui constituent les charges du matériau du boîtier. Le système de soufflerie permet, au cours de la gravure, d'envoyer une forte pression de CO_2 sur la surface du boîtier de manière à éjecter mécaniquement les billes de verre en empêchant ainsi la formation d'un masque de billes à la surface. Ce système peut être dangereux pour des produits faibles mécaniquement.

Avantages et limitations de l'attaque plasma

Avantages: L'avantage de l'attaque chimique sèche réside dans le fait qu'elle permet de réaliser des attaques contrôlées, soit isotropes soit anisotropes, ce qui permet de réaliser des retraits propres et précis. Grâce à l'attaque plasma, les couches de l'échantillon peuvent être retirées tout en préservant l'intégrité du circuit. [DIN04]

Limitations : La principale limite de cette méthode est sa vitesse d'attaque très lente. De plus, cette technique ne permet pas de réaliser des ouvertures localisées à moins d'utiliser des masques complexes. [PER00] Enfin, en raison des déplacements d'électrons en surface de puce, des décharges électrostatiques peuvent se produire et donc générer des défauts.

4.3.2 Gravure ionique focalisée

4.3.2.1 Faisceau d'ions focalisé (Focused ion beam (FIB))

Le FIB effectue une **gravure ionique** c'est-à-dire l'attaque physique par les ions de la surface de l'échantillon. Contrairement aux techniques présentées dans le paragraphe précédent, dans le cas du FIB, l'attaque s'effectue sur une zone très **localisée** de l'échantillon (quelques dizaine de micromètres) grâce à un faisceau focalisé d'ions.

Les ions, généralement de gallium, qui constituent le faisceau sont accélérés sous une énergie de 1 à 150 keV et focalisés sur l'échantillon grâce à des lentilles électrostatiques. Lorsque les ions gallium fortement énergétiques atteignent le matériau, ils éjectent alors des atomes de la surface du matériau. [ALL08]

Le FIB peut être utilisé en préparation d'échantillon pour réaliser des **micro-sections très localisées** (de l'ordre de 20 μ m de large pour 10 μ m de profondeur), révélant ainsi différentes couches à partir de la surface du composant. L'intérêt pour l'analyse de défaillance est la mesure d'épaisseur des couches mais aussi la possibilité de réaliser un plan de coupe du défaut afin de le caractériser.

De plus, le FIB permet de réaliser des gravures accélérées et sélectives en couplant le faisceau ionique à des gaz.

Enfin, le FIB peut aussi permettre de réaliser des dépôts localisés de couches. En combinant gravure et dépôt il est alors possible de réaliser de la modification de circuit (communément appelé « circuit edit ») qui permet de modifier une structure en connectant ou en déconnectant certaines pistes de la puce. Ceci est très utile en particulier au stade de la conception pour mettre au point de nouvelles structures. On parle alors de « design debug ».

Les paramètres du faisceau qu'il est possible de faire varier et qui vont modifier l'attaque sont

- le courant qui est lié au flux d'ions incidents
- la tension d'accélération associée à la vitesse des ions gallium
- le diamètre du faisceau.

La figure 41 présente un exemple de coupe réalisée au FIB.

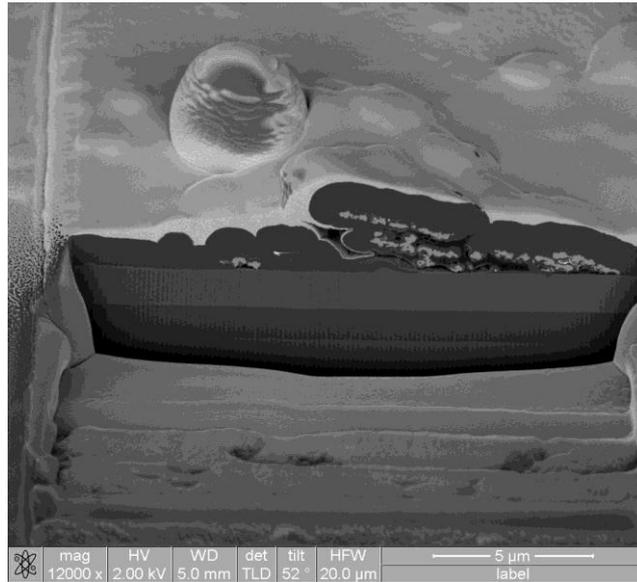


Figure 41: Exemple de coupe réalisée au FIB dans un défaut : particule étrangère en surface de couche

Ces équipements peuvent être seuls ou couplés avec un MEB (microscope électronique à balayage). L'avantage des systèmes FIB / MEB est de pouvoir faire de la préparation d'échantillon localisée au FIB tout en observant au MEB sans manipulation entre les deux étapes.

4.3.2.1.1 Exemple d'équipement de faisceau d'ions focalisé : le Nova 600

Le *Nova 600 NanoLab* de chez FEI est un Dual Beam™ c'est-à-dire intégrant une colonne ionique et une colonne électronique dans le même environnement (fig. 42).

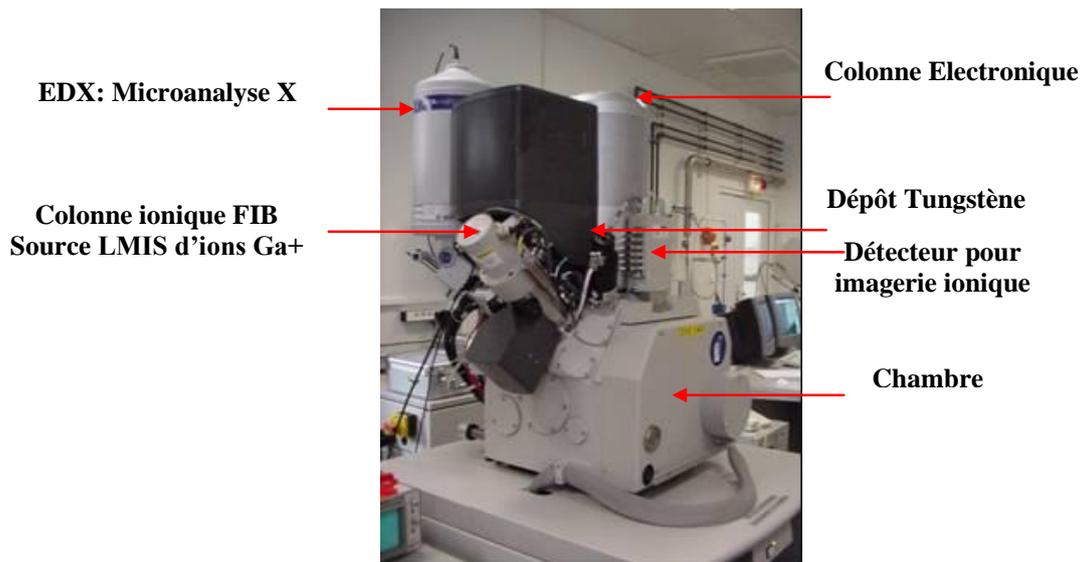


Figure 42: Exemple d'équipement à deux colonnes : électronique et ionique (NOVA 600 Nanolab)

La colonne ionique a une source liquide d'ions Ga^+ (type LMIS). La colonne électronique permet de réaliser des images en haute résolution ou en très haute résolution (de l'ordre du nanomètre).

Le *Nova 600* est en mesure de traiter des plaquettes de 6" et 8", donc d'analyser des plaquettes en cours de fabrication.

Un système d'injection de gaz peut être utilisé afin de réaliser une gravure sélective ou assistée, un dépôt de métal ou d'isolant. Ceci dépend du précurseur gazeux présent dans l'injecteur. Le *Nova 600* est équipé d'un précurseur de tungstène, pour le dépôt métallique et de XeF_2 qui assiste la gravure.

Enfin, un système de détection de fin de gravure est inclus dans le système et permet de suivre en simultané la profondeur de gravure à l'aide de la variation du courant d'échantillon.

Pour l'observation et la caractérisation physique, le MEB est couplé à un système de microanalyse X qui permet de réaliser de l'analyse élémentaire en surface et en coupe.

4.3.2.2 Polissage ionique (Cross-polisher)

4.3.2.2.1 Principe

De nouveaux équipements permettent de réaliser des coupes plus larges que celles réalisées au FIB tout en évitant le polissage mécanique.

Un faisceau d'ions est utilisé, mais il s'agit alors d'un **faisceau d'ions argon** qui a un diamètre d'au moins $500\mu\text{m}$, contrairement aux quelques micromètres pour les FIB classiques présentés précédemment. Ce faisceau attaque l'échantillon perpendiculairement à la surface et crée alors la **coupe du composant** (fig.43). Le dommage généré par le faisceau est moins important que lors des gravures ioniques IBE, technique présentée dans le paragraphe 4.3.1.1 où le faisceau attaque directement la surface.

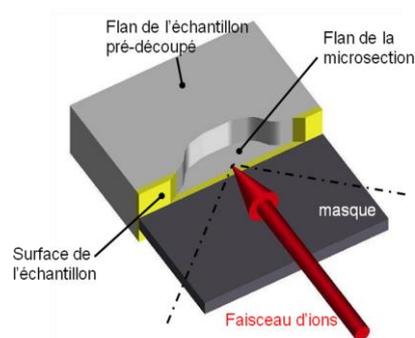


Figure 43: Principe du polissage ionique

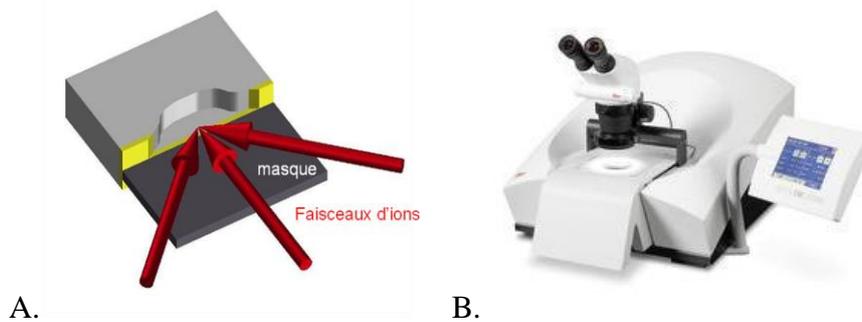
Ces équipements sont prometteurs car ils permettent d'offrir une solution de substitution au polissage mécanique. La dureté et la ductilité des matériaux n'est alors pas une limite comme dans l'approche mécanique qui rend difficile la coupe d'empilement de couches de matériaux avec des propriétés mécaniques très différentes. De plus, la **surface de coupe** qu'il est possible de réaliser est beaucoup **plus grande que par FIB** puisqu'elle est alors de l'ordre du millimètre carré voire de quelques millimètres carré selon les équipements.

Pour utiliser cette technique, il est cependant nécessaire de réaliser une **première préparation d'échantillon** durant laquelle une pré-découpe est déjà réalisée proche de la zone d'intérêt. L'approche mécanique est donc toujours utilisée mais l'arrivée dans la zone d'intérêt et la finition auront les avantages de la gravure ionique (pas de déformation, pas de grains incrustés...).

4.3.2.2 Exemple d'équipements de polissage ionique

Jeol propose un équipement de polissage ionique appelé *Cross section polisher*. Il utilise le principe détaillé ci-dessus. La tension d'accélération des ions est entre 2 et 6kV. Pour homogénéiser l'attaque des ions, l'échantillon est monté sur un système rotatif. La vitesse de gravure est alors de l'ordre de 70 μ m/h sur du silicium pour une largeur de coupe de 100 μ m.

Leica propose l'*EM TIC020*. Cet équipement a la particularité d'utiliser trois faisceaux d'ions (fig. 44). Cela permet d'augmenter la vitesse de gravure jusqu'à 120 μ m/h sur du silicium.



A.

B.

Figure 44: A. Principe du EM TIC020 B. Equipement EM TIC020

Avantages et limitations des gravures ioniques

Avantages: La zone à amincir est choisie avec une précision de quelques nanomètres pour les FIB et peut être orientée dans n'importe quelle direction. Pratiquement tous les matériaux peuvent être amincis. Grâce au FIB, il est possible de réaliser des lames pour le TEM (microscope électronique à transmission). Cette approche ionique est la seule alternative à l'approche mécanique pour les micro-sections. L'état de surface obtenu est alors de meilleure qualité comparativement au résultat mécanique.

Limitations : La surface de chaque coupe ne peut qu'être localisée voire très localisée pour le FIB, pour lequel elle excède difficilement 100 μ m \times 100 μ m. La zone observable en coupe n'est donc pas très étendue. Les vitesses de gravure sont lentes par rapport à un polissage mécanique. La technique peut engendrer un décollement des couches en particulier entre les matériaux organiques et métalliques. Dans le cas de la gravure par FIB, il y a une implantation d'ions gallium dans l'échantillon.

4.4 Synthèse sur les techniques de préparation d'échantillon

Cette quatrième partie de chapitre a permis de présenter l'ensemble des techniques de préparation d'échantillon disponibles. Il s'agit d'un large panel d'outils avec des avantages et des limites propres à chaque technique. Ces différences sont utilisées pour traiter un maximum de configurations, un maximum de structures et de défauts à atteindre.

En synthèse, le tableau 4 permet de regrouper et comparer de manière globale toutes ces techniques avec leurs particularités. De ce tableau plusieurs informations peuvent être retirées. Tout d'abord, les codes +/- révèlent si les caractéristiques de la colonne de gauche sont élevées pour chacune des techniques. Ainsi, par exemple dans le cas du plasma, la sélectivité d'attaque entre matériaux ainsi que les contraintes thermiques sont élevées (+). Par contre, la vitesse de gravure est faible (-).

La deuxième symbolique avec le code couleur permet de souligner pour chacune de ces techniques, les caractéristiques les plus souvent avantageuses dans leur application (en vert) ainsi que leur inconvénient majeur (en rouge).

Ainsi, l'avantage majeur du plasma est sa sélectivité mais sa limite est sa vitesse. A l'inverse, le polissage sera souvent employé parce qu'il n'est pas sélectif et permettra de retirer tous les matériaux du composant simultanément.

Préparation	Attaque chimique humide globale	Attaque chimique humide locale	Polissage parallèle	Micro-fraiseuse	Laser IR	Plasma	FIB	Matériaux attaqués
Sélectivité	++	++	---	---	+/-	+++	+/-	Tout matériau
Vitesse	+++	+++	+	+/-	+++	---	---	Dépend des gaz employés (les métaux gaz dangereux rarement présents en laboratoire)
précision spatiale	---	+	---	++	+++	+	++++	Matériaux absorbant le rayonnement de longueur d'onde 1064nm
Stress thermique	+/-	+/-	+	+	+++	++	---	Tout matériau
Stress mécanique	---	---	++	++	--	--	---	Tout matériau
Stress électrique	--	--	-	-	+	+	+	Tout matériau
Matériaux attaqués	Dépend des acides employés	Ceux attaqués au nitrique et/ou sulfurique	Tout matériau	Tout matériau	Matériaux absorbant le rayonnement de longueur d'onde 1064nm	Dépend des gaz employés (les métaux gaz dangereux rarement présents en laboratoire)	Tout matériau	Tout matériau

Tableau 4. Comparaison globale des différentes techniques de préparation

5 Conclusion chapitre 1

L'analyse de défaillance des composants électroniques est une étape indispensable pour améliorer la qualité des produits. Ces analyses sont nécessaires tout au long de la vie du produit : de sa conception à son utilisation chez le client. Un taux de succès élevé est nécessaire et les analyses doivent donc être liées à un travail rigoureux. Cette rigueur consiste à suivre un enchaînement d'étapes, permettant de passer de la caractérisation électrique de la défaillance jusqu'à l'accès physique au défaut. L'une de ces étapes, la préparation d'échantillon est cruciale et nécessaire pour se rapprocher physiquement de la zone de défaut.

Néanmoins, cette étape contraint l'échantillon mécaniquement, chimiquement, thermiquement et peut générer de nouveaux défauts ou retirer le défaut initial. Cette préparation d'échantillon se doit donc d'être réalisée avec précaution.

Pour réaliser cette étape critique, les laboratoires ont vu leur panel de techniques évoluer avec les composants. Si des techniques nouvelles telles que le FIB ou la gravure laser ont vu le jour et se sont largement implantées dans les laboratoires, les autres techniques plus historiques comme le polissage mécanique, ou l'attaque chimique humide n'ont pas été abandonnées, et toutes s'avèrent aujourd'hui nécessaires et complémentaires.

Avec cette panoplie de techniques à disposition et pour aider les analystes dans la gestion de leur analyse, une méthodologie existe aujourd'hui pour traiter les analyses de défaillance de composants discrets et IPAD. Cette méthodologie permet d'aiguiller l'analyste dans le choix des techniques de préparation à utiliser en fonction du composant, de la défaillance, du nombre d'échantillons. Le suivi de cette méthodologie permet d'atteindre un taux de succès élevé, néanmoins, certains cas d'analyse sur ce type de composant ne sont encore pas réussis.

C'est en s'intéressant à ces cas, et en cherchant une solution alternative non prise en compte dans la méthodologie que le taux de succès peut augmenter. Le travail de cette thèse a ainsi consisté à étudier ces cas d'échec, en comprendre les origines, en proposer une alternative pour ensuite faire évoluer la méthodologie.

La méthodologie actuelle décrite en partie 2 avec les préparations détaillées ci-dessus permettent de répondre au besoin standard sur les composants discrets et IPAD. Cependant, avec l'arrivée de nouveaux produits, de nouvelles défaillances, cette procédure n'est pas toujours adaptée et entraîne des échecs dans la résolution de l'analyse. Les cas d'études présentés dans le chapitre 2 vont révéler précisément les lacunes actuelles de la méthodologie. Le développement de nouvelles approches pour chacun de ces cas est alors décrit.

CHAPITRE 2 :

Evolution de la méthodologie de préparation avec les avancées technologiques

1 Introduction

Comme nous avons déjà pu le souligner dans le chapitre 1, les analyses de défaillance sont nécessaires pour améliorer la qualité des produits. Elles sont utilisées dès les premiers stades du développement d'un produit jusqu'à son utilisation chez le client.

Chez les fabricants de composants micro-électroniques, deux types de développements peuvent voir le jour. Ils concernent soit de nouveaux produits, soit de nouvelles technologies. Les produits correspondent à un composant final avec une application particulière tandis que les technologies correspondent à des procédés de fabrication. Ces deux développements sont liés puisque les nouvelles technologies vont être utilisées pour fabriquer de nouveaux produits.

Un produit et une technologie ont un cycle de vie semblable qui est divisé en deux phases majeures : une phase de qualification et une phase de production en masse. Chacune de ces phases est alors jalonnée d'étapes-clé pour lesquelles un certain nombre d'exigences qualité est requis.

La phase de qualification a pour but d'assurer que la nouvelle technologie ou le nouveau produit développé remplit les critères de robustesse et de fiabilité définis en début de projet. Au cours de cette phase, s'enchainent l'étude de faisabilité, la phase de définition des objectifs (en particulier les objectifs de qualité), la phase de conception et de développement qui permettent de définir le procédé à suivre, et de générer des véhicules de test. Suit alors la phase de validation qui permet de lancer en pré-production ce véhicule de test.

A ce stade, le produit ou la technologie passe à la deuxième grande phase : **la production en masse**. Le produit ou la technologie, alors fiable, peut évoluer de manière à en optimiser ses performances.

A chacune de ces étapes, les analyses de défaillance sont utilisées de manière à vérifier le bon respect des exigences qualités. Nous allons décrire de façon plus détaillée chacun des jalons dans le cas du développement d'un produit et souligner les différentes raisons d'être de l'analyse de défaillance.

La phase de qualification a pour objectif de valider la capacité à réaliser un petit nombre de produits répondant au cahier des charges. Elle commence par une **définition du besoin** et une **étude de marché**. Suit alors une **évaluation de la capacité technique** à répondre à ce besoin. **L'étape de conception** peut ensuite être lancée. Une conception robuste et une analyse de la concurrence doivent être réalisées. La structure mise au point doit alors être conforme au besoin et être robuste face à de premiers tests de fiabilité. Pour cela, un nombre limité d'échantillons est fabriqué et caractérisé électriquement. S'il y a non-conformité de ces caractérisations, des analyses de défaillance sont réalisées. Elles permettent de donner un retour rapide sur les caractéristiques et les défauts du produit. Le procédé peut alors être modifié pour éliminer les défauts observés. L'étape de conception est validée lorsque les prototypes réalisés sont conformes à la spécification mise au point avec le client.

Il est alors nécessaire de garantir la **compatibilité du procédé et de ses variations avec la spécification**. Différents lots sont fabriqués et des produits sont

analysés parmi ces lots. Ces produits sont alors soumis à des caractérisations électriques en cours de procédé ainsi qu'à des tests de fiabilité. Ces caractérisations vont nécessiter des analyses de défaillance pour déterminer les faiblesses de la structure. Les tests de fiabilité, en particulier, ont pour but d'assurer l'intégrité du produit lorsqu'il est soumis à des contraintes électriques et physiques extrêmes spécifiées. En fonction des résultats obtenus, la structure peut encore évoluer pour assurer les exigences de la spécification en terme de fiabilité. Des analyses de défaillances peuvent de nouveau être réalisées après des caractérisations électriques ou des tests de fiabilité sur ces structures optimisées.

Le produit passe alors à la phase de **production en masse**. Le produit est lancé en production mais il peut encore évoluer pour optimiser ses performances. Ces évolutions entraînent une nouvelle série de caractérisations électriques, de tests de fiabilité et d'analyses de défaillance pour valider le procédé.

Enfin, des analyses de défaillance pourront aussi être réalisées pour des produits qui se sont avérés défaillants dans leur utilisation chez le client. L'analyse doit permettre de comprendre la cause de cette défaillance pour déterminer en particulier s'il s'agit d'une faiblesse du produit ou bien si le produit a été utilisé en dehors de sa spécification.

Pour la mise en place d'une nouvelle technologie ou d'un produit, l'analyse de défaillance est donc omniprésente. Dans toutes ces configurations, le succès de l'analyse est une exigence et, pour évaluer la performance des laboratoires, le **taux de succès** des analyses est un indicateur important. Ce succès est défini par le fait qu'à la fin de l'analyse, le défaut à l'origine de la défaillance doit être localisé et caractérisé pour ensuite pouvoir déterminer le mécanisme de défaillance.

La mise en place et l'utilisation d'une méthodologie telle que celle présentée dans le chapitre 1, permet d'atteindre un taux de succès élevé et proche de 100%. Néanmoins, quelques analyses sont encore en échec démontrant que la méthodologie n'est pas parfaite. Un travail approfondi a donc été nécessaire pour comprendre l'origine de ces échecs et proposer des alternatives.

Dans ce deuxième chapitre, nous présentons des cas d'études qui ont mis en échec la méthodologie de préparation d'échantillon standard (détaillée au chapitre 1).

Nous allons ainsi aborder des cas d'analyses complexes à réaliser pour des technologies :

- à la veille de leur commercialisation à la suite d'essai de fiabilité : **les technologies BCB/Cu en boîtier plastique, les Triacs.**
- au stade de la conception : **les technologies avec des plots de contact en TiNiCuAu et les microbatteries**

Chacune de ces études révèle les limites de la procédure d'analyse de défaillance présentée au chapitre 1 (partie 3). Pour chaque cas, les technologies sont présentées, puis sont abordées les limites rencontrées avec la procédure d'analyse standard. Enfin, le développement d'une méthode de préparation alternative est détaillé, en présentant la démarche et les résultats obtenus.

2 Nouveaux matériaux- nouveaux défis : l'accès face avant des technologies BCB/Cu en boîtier plastique

La première étude présentée s'intéresse aux technologies BCB/Cu encapsulées dans un boîtier plastique. Cette partie va s'attacher à trouver une alternative à l'accès à la face avant de ces composants.

2.1 Présentation technologique et défaillance

2.1.1 Présentation du produit

Avec le développement des télécommunications sans fil, les produits de consommation tels que les téléphones portables sont soumis à des interférences en radiofréquence ce qui peut générer des interférences électromagnétiques (EMI) dans les composants du téléphone et perturber alors le fonctionnement des éléments (comme par exemple la caméra) [ST10]. De manière à améliorer la qualité du signal et éliminer ces interférences, des filtres, réalisés à partir de composants discrets (condensateur, résistance, inductance), étaient jusqu'au début des années 2000 montés sur la carte du téléphone. A ces éléments s'ajoutaient aussi des composants de protection ESD (décharges électrostatiques) avec des diodes discrètes (fig. 45). [ST05]

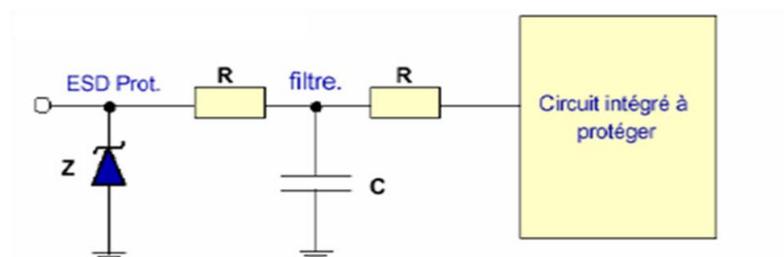


Figure 45: *Filtre RC et protection ESD en composants discrets*

Cependant, la diminution de la taille des mobiles et l'augmentation des fonctionnalités des téléphones ont nécessité de développer des filtres et des éléments de protection avec des réponses plus rapides dans un emplacement plus restreint. Ainsi, des circuits intégrés comportant à la fois des filtres RC et des diodes de protection ESD ont d'abord été conçus (fig. 46) puis des circuits RLC atténuant les fréquences de 200MHz à 2GHz. [ST10,ST05]

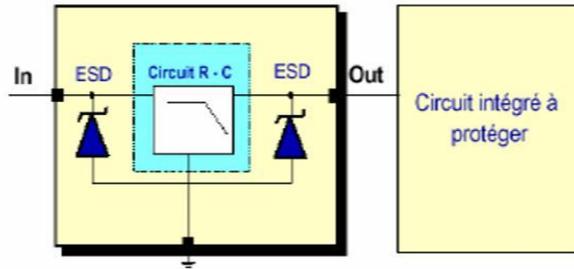


Figure 46: *Filtre RC et protection ESD en circuit intégré*

Ces circuits intégrés permettent, sur un même substrat de silicium, de relier entre eux divers composants électroniques. Ils peuvent être constitués de composants actifs (diodes...) et de composants passifs (résistances, condensateurs, inductances). Chacun de ces composants est alors relié aux autres par des lignes de métallisation et des vias destinés au transfert du signal électrique entre les différents éléments. Ces circuits intégrés permettent de diviser par trois la surface occupée [ST05].

Pour intégrer des bobines dans les circuits RLC, il est indispensable d'utiliser un **métal de faible résistivité**. En utilisant du cuivre à la place de l'aluminium, la résistance des lignes est alors jusqu'à 25 fois plus faible. Mais parce que l'épaisseur de cuivre utilisée peut atteindre $6\mu\text{m}$, il est nécessaire d'utiliser un autre type de diélectrique que l'oxyde de silicium pour **conserver la planéité** de chaque niveau. Des diélectriques organiques à faible constante diélectrique tel que le BCB (benzocyclobutène) arrivent en effet à améliorer la planéité de la surface même avec de hautes marches de métallisation. L'oxyde de silicium n'a pas cette particularité et aurait tendance à conserver le relief ce qui rend complexe les étapes suivantes de la fabrication [STA06]. La technologie utilisant la **combinaison de couches de cuivre et de diélectriques à faible constante diélectrique** est communément appelée **Cu/low-k**.

Au-delà de ces filtres, ces technologies Cu/low-k trouvent leur intérêt dans d'autres circuits intégrés pour lesquels des résistances et capacités parasites perturbent le signal et limitent les performances du circuit, notamment la vitesse de propagation de l'information dans l'ensemble du circuit. Le temps de propagation dépend de deux paramètres : [BRI07]

- Le temps lié à la commutation des composants actifs
- Le temps nécessaire à la transmission du signal par les interconnexions intervenant comme composants passifs aux fréquences de fonctionnement utilisées

Ainsi, le choix du cuivre permet de réduire le délai de transmission et l'utilisation d'un isolant avec une constante diélectrique plus faible permet de limiter les capacités parasites entre les lignes (fig.47) [TSU00] [BRI07] [WU03].

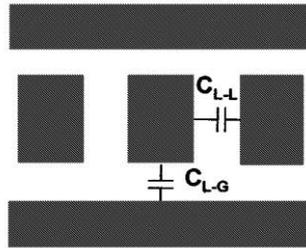


Figure 47: Capacité parasite entre les niveaux de métallisation
 C_{L-L} : capacité ligne à ligne (line-to-line)
 C_{L-G} : capacité ligne à masse (line-to-ground)

Dans cette partie, nous allons nous intéresser aux **structures RLC encapsulées dans un boîtier plastique avec des métallisations en cuivre utilisées pour les inductances, les lignes de métallisation et les vias et des diélectriques en BCB**. Une structure type est donnée en exemple dans la figure 48 en coupe et en vue de dessus.

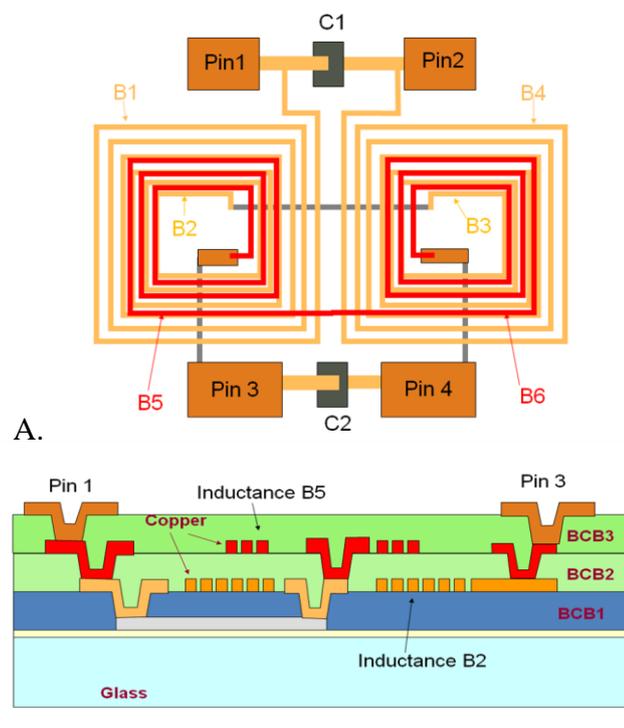


Figure 48: Exemple de structure d'un circuit intégré totalement passif sur substrat en verre
A. Vue de dessus
B. Vue en coupe

2.1.2 Evaluation des défauts physiques pouvant être rencontrés

L'intégration de ces nouveaux matériaux dans les composants génère de nouveaux mécanismes de défaillance qu'il est essentiel d'évaluer et d'anticiper de manière à s'assurer des compétences d'analyse des laboratoires avant la mise sur le marché des nouveaux produits.

L'assemblage des produits issus de cette technologie étant similaire à d'autres déjà existants, les défaillances liées à des défauts d'assemblage sont considérées comme connues et leur analyse suit donc la méthodologie standard. La nouveauté de ces produits concerne les couches supérieures de la puce. Par conséquent, nous nous intéressons ici uniquement aux défauts liés à ces couches.

Nous avons différencié la fabrication du produit de sa vie dans la recherche des défauts.

Dans le tableau 5, les défauts physiques pouvant apparaître au cours du procédé de fabrication ont été détaillés. Dans le tableau 6, nous avons relevé les mécanismes de défaillance susceptibles de se produire dans la vie du produit. Pour chacun de ces défauts ou mécanismes, le mode de défaillance qui en découlerait, est décrit.

Selon la nature de ces modes de défaillances, dans l'analyse, il sera nécessaire d'utiliser un équipement de localisation spécifique qui pourra solliciter électriquement la défaillance et détecter le défaut. Cet équipement donnera une indication sur le type d'accès qu'il est utile de réaliser pour pouvoir localiser le défaut (face avant, face arrière...).

Défauts de fabrication	Modes de défaillances électriques pouvant être associés
Résidus de diélectrique au niveau des contacts ⁽¹⁾	Circuit ouvert
	Résistance élevée
Manque de diélectrique entre deux lignes ou deux niveaux de métallisation ⁽¹⁾	Court-circuit
	Courant de fuite
Mauvaise adhérence du diélectrique ⁽¹⁾	Pas de défaillance directe mais peut générer des problèmes en fiabilité avec la corrosion du cuivre (voir conséquences ci-dessous) et peut aller jusqu'à la rupture du contact (résistance élevée/circuit ouvert)
Epaisseur de diélectrique non correcte ⁽¹⁾	Pas de défaillance directe mais peut générer des problèmes en fiabilité en particulier claquage du diélectrique si épaisseur trop faible (voir conséquence ci-dessous)
	Capacité parasite entre niveaux de métallisation pouvant modifier le gain en RF
Manque de cuivre ⁽¹⁾	Circuit ouvert
	Résistance élevée
Résidus de cuivre entre deux lignes de métallisation ⁽¹⁾	Court-circuit
	Variation de la valeur de l'inductance pouvant modifier le gain en RF
	Fuites entre les niveaux de métallisation
Epaisseur de cuivre non correcte	Modification de la résistance des inductances
Corrosion du cuivre ⁽¹⁾	Résistance + élevée

Tableau 5. Défauts de procédés spécifiques aux technologies BCB/Cu et leurs modes de défaillances associés
(⁽¹⁾[WU03])

Mécanisme de défaillance	Modes de défaillances électriques pouvant être générées
Electromigration du cuivre ⁽²⁾	Circuit ouvert
	Résistance élevée
Délamination des couches ^{(1) (2)}	Pas de défaillance directe mais peut générer des problèmes en fiabilité avec la corrosion du cuivre (voir conséquences ci-dessous) et peut aller jusqu'à la rupture du contact (résistance élevée/circuit ouvert)
Fissuration du diélectrique ^{(1) (2)}	Pas de défaillance directe mais peut générer des problèmes en fiabilité avec la corrosion du cuivre (voir conséquences ci-dessous) et peut aller jusqu'à la rupture du contact (résistance élevée/circuit ouvert)
Déplacement de cuivre dans le diélectrique ⁽²⁾	Court-circuit
	Courant de fuite
Claquage du diélectrique ^{(1) (2)}	Court-circuit
Corrosion du cuivre	Résistance plus élevée
	Courant de fuite
Fusion du cuivre	Circuit ouvert

Tableau 6. Mécanismes de défaillances spécifiques aux technologies BCB/Cu et leurs modes de défaillances associés
(⁽¹⁾ [TSU00], ⁽²⁾[WU03])

D'après ce tableau, nous révélons que les modes de défaillances électriques que l'on peut caractériser sur ces technologies sont de cinq types :

- Des courants de fuite
- Des défauts résistifs
- Des circuits ouverts
- Des courts-circuits
- Des modifications du gain en RF

2.2 Méthodologie standard et limites

Pour chacune des défaillances, il a fallu vérifier si la méthodologie standard d'analyse des produits discrets et IPAD présentée dans la partie 3.2 du chapitre 1, était efficace et applicable à cette nouvelle technologie. Il a donc été nécessaire d'évaluer les éventuelles limites d'application des deux méthodologies de préparation d'échantillon, celle en vue de la localisation de défaut et celle en vue de la caractérisation de ce défaut. Dans ce but, nous avons étudié l'impact, sur ce composant, des méthodes de préparation d'échantillon standards qui peuvent être utilisées en vue de la localisation de défaut et de l'accès au défaut.

2.2.1 Limites de préparation pour la localisation

Le tableau 7 permet de souligner pour chaque mode de défaillance, quelles méthodes de localisation peuvent permettre de solliciter et détecter le défaut ainsi que

la méthode d'accès nécessaire en préparation d'échantillon pour pouvoir l'utiliser, lorsque le composant est en boîtier plastique.

Défaillance électrique générée	Méthodes de localisation à utiliser	Accès nécessaire en préparation d'échantillon
Circuit ouvert	Contraste de potentiel	Face avant
Défaut résistif	Effet Seebeck	Face arrière ou face avant
	Microscopie magnétique	En boîtier, face avant ou face arrière
	Thermographie IR	En boîtier, face avant ou face arrière
	Cristaux liquides	Face avant
	OBIRCh	Face arrière ou face avant
Court-circuit	OBIRCh	Face arrière ou face avant
	Contraste de potentiel	Face avant
	Microscopie magnétique	En boîtier, face avant ou face arrière
Modification du gain en RF	Aucune actuellement : la localisation se limite à une interprétation poussée de la caractéristique électrique	
Courants de fuite	EMMI	Face avant ou face arrière
	Cristaux liquides	Face avant
	Thermographie IR	En boîtier, face avant ou face arrière
	Microscopie magnétique	En boîtier, face avant ou face arrière

Tableau 7. Méthodes de localisation et accès physique nécessaire pour chaque mode de défaillance

Chacune des méthodes de localisation décrite dans ce tableau est détaillée en annexe 7. Le tableau 7 révèle, tout d'abord, que pour une même défaillance, plusieurs techniques peuvent être employées. Dans le cas d'une pièce en court-circuit, par exemple, l'OBIRCh, le contraste de potentiel et la microscopie magnétique peuvent permettre de localiser le défaut. Toutes ces techniques ne reposant pas sur le même principe, elles ont chacune leurs propres limites d'application et en deviennent complémentaires [DEB08].

Ce tableau montre, de plus, que lorsque la défaillance est uniquement détectable sous sollicitation RF, les techniques de localisation actuelles ne sont pas applicables. En effet, l'ensemble des techniques de localisation utilisent le déplacement de charges en mode statique ou dynamique dans le composant pour localiser une perturbation de ce signal. Or, si aucune défaillance n'est observée en statique ou en dynamique, ces techniques ne détecteront pas d'anomalie du signal. Par exemple, si deux lignes de métallisation d'une inductance sont connectées, cela va influencer sur la valeur de l'inductance et donc sur la réponse en fréquence du circuit RLC mais n'aura pas d'influence sur la réponse en I(V) qui sera toujours un court-circuit.

A ce jour, les laboratoires ne sont pas dotés d'équipement permettant de localiser un défaut à l'origine d'une modification de la réponse en fréquence

uniquement. C'est pourquoi avec une telle défaillance, et comme peut l'indiquer la méthodologie standard du chapitre 1 (question Q3 : **Est-ce que l'analyse électrique a conclu que quelle que soit l'approche de préparation d'échantillon choisie, il est préférable de réaliser une analyse de construction complète de l'assemblage et de la puce, focalisée sur une zone d'intérêt bien choisie ?**), l'analyse est traitée telle une analyse de construction. Il s'agit alors d'une limite due aux techniques de localisation et non pas à la préparation d'échantillon. Cette limite d'analyse ne sera donc pas traitée dans cette étude.

Pour les autres défaillances, la dernière colonne du tableau 7 souligne que, comme pour les produits standards, les techniques de localisation nécessitent le plus souvent une préparation du composant, alors en boîtier : soit par la face arrière, soit par la face avant. Nous retrouvons ainsi le besoin de réaliser les mêmes préparations d'échantillon que celles présentées dans la méthodologie en vue de la localisation (chapitre 1 paragraphe 3.2). Nous avons donc évalué l'impact de chacune d'elles sur ce type de structure.

Sur les technologies BCB/Cu, **l'accès par la face arrière** ne se différencie pas de celui réalisé sur une structure sans BCB/Cu. **Aucune difficulté** n'a été révélée pour réaliser une préparation par la face arrière de ces produits. Ainsi, lorsque l'accès par la face arrière est nécessaire, la méthodologie standard fonctionne.

Pour l'accès face avant, trois accès sont possibles, en suivant la méthodologie : le retrait total du boîtier plastique par voie chimique humide, le retrait local du boîtier par voie chimique humide, ou le polissage mécanique du boîtier par la face avant.

Cette dernière solution étant utilisée pour atteindre le substrat, elle a pour effet de retirer les couches actives. La présence de BCB/Cu ne pose également aucune difficulté par rapport à une autre technologie.

Les **limites de préparation** vont en fait être atteintes pour la **décapsulation par voie chimique humide du boîtier**. En effet, cette approche n'est plus applicable lorsque la puce utilise une technologie BCB/Cu comme dans ce cas d'étude. Les solutions acides utilisées (acide nitrique fumant et sulfurique), attaquent autant la résine du boîtier que le BCB en surface de puce car il est organique. Ainsi, en utilisant cette préparation, la majorité des couches actives est aussi retirée. Un exemple est donné en figure 49.

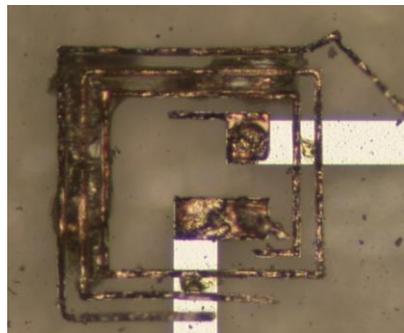


Figure 49: *Résultat d'une ouverture chimique d'une technologie BCB/Cu en boîtier plastique*

Il n'est donc pas possible d'utiliser l'attaque chimique humide standard pour retirer le boîtier et accéder à la face avant de la puce. Dans cette situation, cela empêche l'utilisation de l'ensemble des techniques de localisation du tableau 7

nécessitant l'accès à la face avant. Les cas d'analyses décrites par la méthodologie de préparation en vue de la localisation qui nécessitent un accès chimique par la face avant ne peuvent être traités. Il est donc primordial de développer une méthode alternative de préparation pour permettre la localisation des défauts dans tous les cas d'analyse.

2.2.2 Limite de préparation pour l'accès au défaut

En considérant que le défaut a été localisé, il faut alors le caractériser physiquement et le plus souvent y accéder. Or, de même que pour la localisation, dès lors qu'un **accès à la face avant de la puce** est requis et que l'intégrité des couches actives est indispensable, la **méthode standard de préparation d'échantillon n'est pas efficace**.

Dans tous les autres types d'accès (**face arrière ou micro-section**), **aucune difficulté** liée à la technologie n'a été relevée. L'ensemble des méthodes utilisées sur les produits standards est efficace. Par conséquent, le développement majeur qui a été réalisé au cours de cette étude sur ces technologies a consisté à trouver une alternative à l'accès face avant par voie chimique.

2.3 Démarches et essais

Pour l'analyse de ces puces de technologie BCB/Cu en boîtier plastique, l'accès face arrière a, jusqu'à maintenant, été préconisé. Différentes publications traitent d'ailleurs de cette approche [WU04] [WU03].

Lorsque la localisation de défaut est non réalisable par la face arrière, il est indispensable de développer une **méthode d'accès à la face avant**.

Pour l'accès au défaut et lorsque celui-ci a pu être localisé dans les couches actives, il est nécessaire, dans un premier temps, d'évaluer si une approche alternative est envisageable (il n'est alors pas obligatoire qu'elle soit par la face avant).

Pour les deux situations, **plusieurs techniques de préparation et leurs combinaisons ont ainsi été étudiées**. Celles-ci incluent l'attaque chimique humide, le polissage mécanique, l'ablation laser, le plasma, et le FIB. Pour chacune d'entre elles, nous avons évalué leurs limites et celles-ci sont présentées dans le tableau 8.

Approches face avant pour la localisation de défaut		Limites possibles
A	Polissage mécanique face avant jusqu'à la puce	<ul style="list-style-type: none"> - pertes des fils et de la testabilité électrique en RF (forme des pointes RF non adaptée) - Risque de retirer la preuve à l'origine du mécanisme de défaillance en surface de puce - Difficulté de la réalisation
B	Gravure sèche du boîtier	<ul style="list-style-type: none"> - Procédé long pour les boîtiers épais (vitesse de gravure de l'ordre de 80µm/h)
C	Polissage mécanique face avant (sans atteindre la puce) + Gravure sèche du boîtier	<ul style="list-style-type: none"> - pertes des fils et de la testabilité électrique en RF
D	Ablation laser du boîtier (sans atteindre la puce) + Gravure sèche du boîtier	<ul style="list-style-type: none"> - Gravure sèche = procédé long - Impact du plasma sur le BCB à étudier
Approches pour l'accès au défaut dans les couches actives après localisation		Limites possibles
1	Retrait du boîtier par voie chimique humide	<ul style="list-style-type: none"> - Couches de BCB retirées menant à la destruction de l'échantillon
2	Micro-section mécanique	<ul style="list-style-type: none"> - Risque de dépasser le défaut (qui peut être de taille inférieure à quelques dizaines de microns) - Risque de retirer une particule étrangère pendant le polissage
3	Amincissement face arrière mécanique du substrat + FIB dans la zone du défaut	<ul style="list-style-type: none"> - Temps machine et utilisateur long (attaque lente du substrat en particulier s'il est en verre) - Non adapté pour des défauts > 100µm - Difficulté dans la précision du positionnement de la coupe FIB
4	Attaque chimique face arrière du substrat + FIB dans la zone du défaut	<ul style="list-style-type: none"> - Risque d'attaque de la face avant - Non adapté pour des défauts > 100µm - Difficulté dans la précision du positionnement de la coupe FIB
5	Polissage mécanique face avant jusqu'à la surface de la puce	<ul style="list-style-type: none"> - Risque de retirer la preuve à l'origine du mécanisme de défaillance en surface de puce - Difficulté de réalisation
6	Gravure sèche du boîtier*	<ul style="list-style-type: none"> - Durée du procédé longue (vitesse de gravure de l'ordre de 80µm/h)
7	Polissage mécanique face avant (sans atteindre la puce) + Gravure sèche du boîtier*	<ul style="list-style-type: none"> - pertes des fils et de la testabilité électrique en RF (non critique pour l'accès au défaut)
8	Ablation laser du boîtier (sans atteindre la puce) + Gravure sèche du boîtier*	<ul style="list-style-type: none"> - Gravure sèche = procédé long - Impact du plasma sur le BCB à étudier

Tableau 8. Evaluations d'approches de préparation alternatives en vue de la localisation et de l'accès au défaut
(en gras apparaissent les limites pouvant empêcher la résolution de l'analyse)
(*méthode pouvant être complétée par une coupe FIB, un retrait couche par couche ou une microsection mécanique si nécessaire)

Pour la localisation comme pour l'accès aux défauts, **certaines techniques ne sont pas convaincantes** (techniques A et techniques 1 à 5 du tableau 8).

Pour la localisation de défaut, le **polissage par la face avant** a en effet plusieurs limites. Le premier inconvénient de cette méthode est de ne pas conserver l'intégrité des connexions, car les **fils sont alors coupés**. Cela devient préjudiciable en particulier si il y a un nombre important d'entrées et de sorties. De plus, les **tests en radiofréquence ne sont alors plus réalisables** car les pointes à utiliser ont une géométrie ne permettant pas leur pose sur les fils coupés. La validation de la défaillance n'est donc plus possible. Le dernier point négatif de cette solution réside dans sa réalisation puisqu'il est nécessaire de polir de manière parfaitement parallèle à la puce afin d'atteindre le haut du BCB sur toute la surface de la puce. Cela exige un bon niveau d'**expertise en polissage mécanique**.

Pour l'accès au défaut, les cinq premières techniques décrites ont pour principales limites :

- le **retrait non souhaité des couches actives en face avant** par l'attaque chimique
- la **durée longue** du procédé de gravure par FIB par la face arrière (de l'ordre de $0,2\mu\text{m}^3/\text{nC}$) et la difficulté dans la précision du positionnement de la coupe FIB
- le risque de **dépasser le défaut** par la technique de micro-section : bien que le défaut ait été localisé, l'avancée dans le composant se fait à l'aveugle, le contrôle de cette avancée doit donc être permanent. Plus le défaut est petit et plus le risque de passer le défaut entre deux contrôles est possible.
- le risque de **retirer la preuve du mécanisme de défaillance** à la surface de la puce avec un polissage par la face avant. Ce polissage consiste à atteindre la passivation. Or, si le responsable du défaut (une particule étrangère par exemple) est situé entre la résine du boîtier et la passivation, à l'arrivée sur la puce, la conséquence de ce défaut peut être observée (fusion par exemple) mais la cause a été retirée.

Dans les deux cas (localisation et accès au défaut), trois approches semblent cependant intéressantes à ce stade (B,C,D ou 6,7,8 dans le tableau 8). Elles utilisent toutes une **gravure sèche pour arriver sur la puce**. Cette technique plasma a l'avantage de la chimie humide (**sélectivité entre les matériaux en particulier entre les fils et la puce pour conserver l'intégrité électrique**) et l'avantage du polissage (**contrôle efficace de l'avancement dans le composant**). Le récent équipement de gravure sèche introduit dans le chapitre 1, le *FA2000P*, paraît ainsi adapté à ce cas d'étude puisqu'il permet :

- de réaliser un retrait de boîtier plastique en retirant à la fois la résine epoxy grâce au plasma utilisé et les billes de verre avec le souffleur de CO_2 ,
- de conserver les fils puisque les gaz utilisés ne gravent pas les métaux,
- d'avoir un bon contrôle du retrait de la résine puisque la gravure est beaucoup plus lente que l'attaque chimique humide.

Cependant, si cette vitesse lente est intéressante pour le contrôle de l'attaque, elle peut s'avérer contraignante pour la décapsulation totale d'un boîtier. Il faut compter $100 \mu\text{m}/\text{h}$. Par conséquent, pour la majorité des boîtiers, le temps de décapsulation ne serait pas compatible avec un mode production.

La gravure plasma a tout son intérêt à l'arrivée sur la puce mais n'est pas utile en début de décapsulation. C'est pourquoi il a été proposé les approches 7 et 8 (identiques aux C et D) qui combinent au plasma, une **première préparation d'échantillon retirant de manière rapide la résine sans atteindre la puce.**

Pour cela, un **polissage mécanique** ou une **ablation laser** peut être employé. L'ablation laser présente cependant de nombreux avantages sur le polissage :

- elle permet de **conserver l'intégrité des fils et la rigidité du boîtier** puisque l'ouverture peut être faite localement.
- elle est plus **rapide** que le polissage (un seul programme à lancer au laser contre un changement manuel de disques et un suivi de l'avancée dans le composant pour le polissage ce qui ralentit la procédure)
- la même quantité de résine est retirée sur toute la surface (il n'y a donc **pas de risque d'inclinaison comme au polissage**)
- et elle n'est **pas dépendante de l'utilisateur.**

En raison de ces avantages, par la suite, la préparation combinant le laser et le plasma a été évaluée. La suite de ce paragraphe présente la démarche suivie pour utiliser ces deux techniques de manière optimale et pour valider que cette combinaison peut permettre l'accès face avant des puces BCB/Cu en boîtier.

2.3.1 Pré-ouverture

L'ablation laser a beaucoup d'avantages dont le fait d'être rapide et de réaliser des fenêtres précises. L'équipement laser utilisé est le *SESAME-1000* de DigitConcept. Les paramètres du laser à utiliser dépendent alors du boîtier, de sa taille et de la proportion de billes de verre dans la résine.

La résine de boîtier est un matériau non homogène comme indiqué dans le chapitre 1. Elle est composée essentiellement d'époxy mais aussi de billes de verre. Ces billes de verre sont transparentes aux infrarouges et par conséquent ne sont pas gravées par le laser. Dans l'ablation des boîtiers, l'effet photo-thermique est prédominant et à l'origine du procédé de gravure : l'époxy se vaporise par dégradation thermique et emporte les billes.

Si les paramètres du laser ne sont pas correctement choisis, alors ce procédé n'est pas optimal: les billes stagnent à la surface et agissent comme un masque au dessus de la résine restante. L'ablation est alors limitée sous les billes laissant des résidus de résine (cf. figure 50).

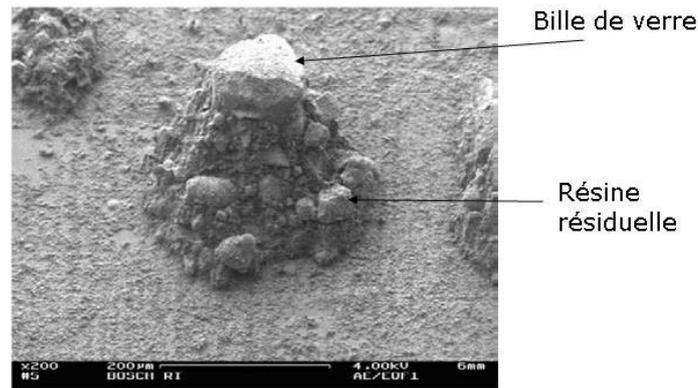


Figure 50: *Présence de résine résiduelle sous une bille de verre qui a empêché le phénomène d'ablation [KRU03]*

Il est donc nécessaire d'utiliser une densité de **puissance laser suffisante pour pouvoir retirer à la fois les billes de verre et la résine**. C'est principalement en faisant varier la puissance de la diode de pompage du laser et la fréquence des impulsions que l'énergie peut être modifiée [AUB08]. La figure 51 révèle l'influence de la fréquence et de la puissance sur la profondeur de gravure. Une puissance de 100% correspond au maximum fourni par l'équipement qui est de 10W.

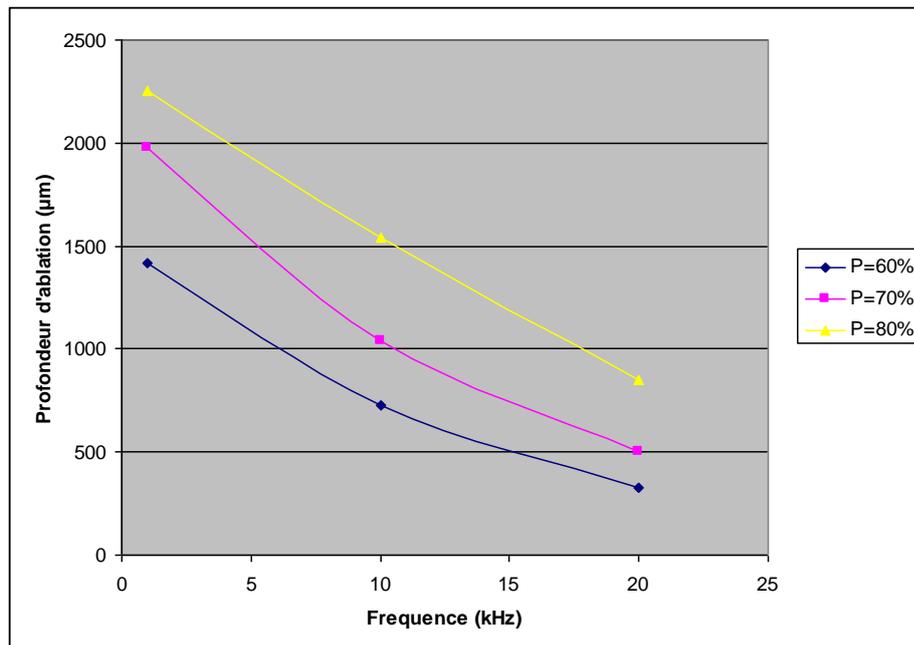


Figure 51: *Influence de la fréquence et de la puissance sur la profondeur de gravure [AUB08]*

Si l'énergie doit être élevée pour retirer les billes et la résine, elle ne doit pas non plus l'être trop, pour éviter de dégrader la puce et les fils. En effet, **le laser peut endommager la puce** s'il interagit directement avec elle. C'est d'ailleurs pour cette raison que la décapsulation du boîtier ne peut être réalisée totalement avec le laser [PAR07]. De plus, cet endommagement peut aussi être indirect car il a été montré que

les billes de verre peuvent transmettre le faisceau laser quasiment sans perte (fig. 52). Ainsi, dans le cas d'un empilement de plusieurs billes de verre au-dessus de la puce, les billes agissent alors comme un guide d'ondes et transmettent le faisceau laser jusqu'à la surface de la puce. Dans ce cas-là, l'endommagement provient d'une transmission non atténuée du faisceau laser jusqu'à la surface de la puce. [PAR07]

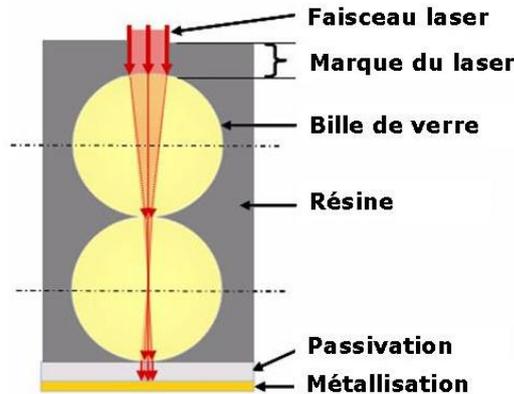


Figure 52: Représentation de l'interaction du faisceau laser avec les billes de verre de la résine [PAR07]

En pratique, cela signifie que pour éviter l'endommagement de la puce par la préparation d'échantillon, il faut arrêter l'ablation avant d'atteindre la puce mais aussi avant d'atteindre de susceptibles billes empilées. La probabilité d'avoir plus de deux billes de verre superposées étant réduite, le fournisseur recommande d'arrêter l'ablation laser à environ deux diamètres de billes de la surface de la puce [DIG12]. Dans les boîtiers plastiques utilisés pour les composants de ST-Tours, les billes peuvent aller jusqu'à $50\mu\text{m}$ de diamètre. **L'ablation doit donc être arrêtée à $100\mu\text{m}$ de la puce au moins.** Ceci est une valeur approximative et peut être modifiée selon la taille des billes de verre.

Enfin, les fils des composants sont assez sensibles aux impacts laser, et peuvent être marqués par le laser, voire coupés si l'énergie de l'impulsion est trop élevée. Il est par conséquent important de ne pas utiliser des paramètres trop intenses pour le composant. L'endommagement est d'autant plus important que le pic initial d'énergie est élevé. Ainsi, **deux programmes avec deux ensembles de paramètres** sont utilisés : **l'un pour avoir une ablation rapide et réduire au maximum les amas de résines** comme en fig. 50 et **l'autre pour préserver les fils lorsqu'ils sont découverts.**

Pour choisir les paramètres adéquats, la démarche a consisté à utiliser l'étude préliminaire réalisée au cours de mon DRT (diplôme de recherche technologique) sur l'équipement et ses paramètres [AUB08] puis à réaliser des essais sur le boîtier concerné pour valider le bon choix des paramètres.

Cette validation s'est faite en observant optiquement l'état des fils et en vérifiant que la puce n'était pas découverte. Une validation de la caractéristique électrique du composant ne pouvait pas être réalisée à ce stade car la résine du boîtier en surface de la cavité est modifiée, n'est plus isolante ce qui génère un courant de fuite entre les fils [AUB08⁽²⁾]. Cette validation du bon fonctionnement du composant n'a donc pu être réalisée qu'après décapsulation finie c'est-à-dire après la gravure plasma.

Le tableau 9 donne un exemple de configuration de paramètres laser utilisés pour la pré-ouverture d'un boîtier SO-20. Deux programmes sont ainsi employés : le premier pour un retrait de résine rapide, le second dès lors que les fils sont découverts et avant d'atteindre la puce.

Prog	Puissance	Fréquence Q-switch	Vitesse de marquage	Type de balayage
Prog1	60%	4kHz	200mm/s	3x60 espacés de 20 μ m ^a
Prog2	60%	11kHz	550mm/s	3x60 espacés de 20 μ m ^a

Tableau 9. Exemples de configuration de laser pour un boîtier SO-20

^a: signifie que pour chaque gravure lancée, le laser fait 3 balayages successifs de la surface de l'échantillon en commençant par un balayage en partant de la gauche jusqu'à la droite, puis en réalisant un changement de 60° pour le second passage et encore 60° pour le dernier passage.

L'état de surface obtenu après décapsulation laser est propre, les fils sont intacts, et le résultat est présenté en fig.53 pour un boîtier SO-20 dans lequel peuvent être encapsulés les technologies BCB/Cu. Le temps de gravure est inférieur à la minute.

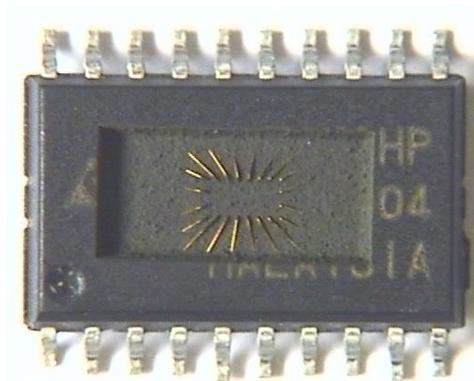


Figure 53: Observations optiques après ablation laser d'un boîtier SO-20

2.3.2 Finition

Après cette étape de pré-ouverture, la gravure plasma, avec l'équipement FA2000P, a été évaluée. L'équipement délivre deux gaz de gravure : le CF₄ et l'O₂ qui peuvent être mélangés. Un plasma oxygène pur peut être utilisé pour retirer la résine epoxy mais l'ajout de CF₄ accélère significativement la réaction de gravure. En effet, les atomes de fluor facilitent l'extraction des atomes d'hydrogène et la dissociation des molécules d'oxygène. Il y a alors plus de molécules réactives dans le plasma et donc une plus forte vitesse de gravure.

Les paramètres de gravure choisis doivent permettre de graver suffisamment rapidement le reste de résine tout en préservant le bon contrôle de l'attaque pour arrêter le procédé avant d'atteindre la puce.

Le CF₄ est un catalyseur de la réaction de retrait du boîtier plastique mais il peut graver le BCB. Dans le but de préserver le BCB, deux programmes de gravure

ont donc été utilisés. Le premier utilise du CF_4 et de l'oxygène et permet une gravure assez rapide de la résine. A l'approche de la puce, un plasma oxygène pur a été utilisé de manière à préserver le BCB.

Les premiers résultats sont intéressants puisque (fig. 54) :

- la gravure laser offre une **pré-ouverture propre du boîtier**
- grâce à l'ouverture localisée, la **rigidité du boîtier est conservée** et tous **les contacts sont utilisables** pour de futurs tests électriques
- le **BCB reste en surface de puce** après ouverture.

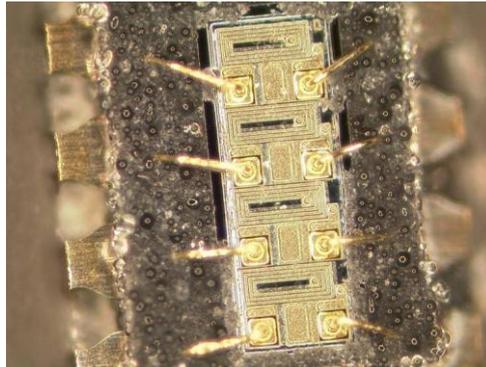


Figure 54: *Puce avec technologie BCB/Cu après gravure sèche du boîtier*

Cependant, après cette étape de gravure, des **fissures dans le BCB ont été quelques fois générées** (fig. 55).

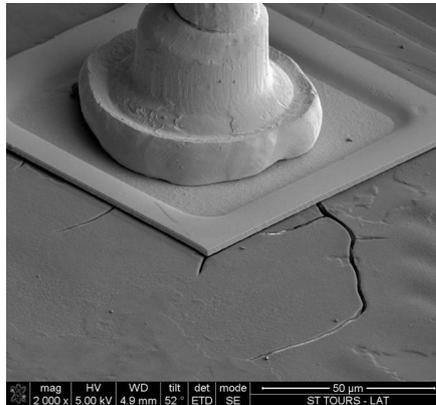


Figure 55: *Fissures dans le BCB après décapsulation par laser et plasma*

2.4 Optimisation : compréhension de l'apparition des fissures

Cette solution de décapsulation avec les paramètres de laser et de plasma décrits précédemment est positive mais pas encore concluante. En effet, il est primordial de comprendre l'origine de ces fissures qui peuvent être générées pour s'assurer de ne pas les produire ensuite durant l'analyse. Une étude a donc été réalisée avec pour objectif de **comprendre le mécanisme de création de ces fissures** puis d'en **déduire une méthode permettant de les éviter**. De cette étude dépend la possibilité de l'application de cette préparation en analyse.

Les investigations ont été divisées en deux parties :

- La première a eu pour but d'évaluer l'impact des différents paramètres du procédé plasma sur la génération de fissures
- La seconde a eu pour objectif d'analyser physiquement les échantillons avec fissures, ceux sans fissures et des échantillons référence.

2.4.1 Paramètres influençant l'apparition des fissures

La première partie de l'étude a consisté à identifier les **paramètres influençant la génération des fissures**. Pour débiter l'étude, il a fallu vérifier que les fissures n'étaient pas présentes initialement et n'étaient donc pas dues à des contraintes générées par le boîtier sur la puce. Un polissage face arrière du composant a été réalisé pour atteindre le silicium et l'amincir. La figure 56 montre une image laser, par la face arrière et permet de voir que le **BCB n'était pas fissuré avant décapsulation**.

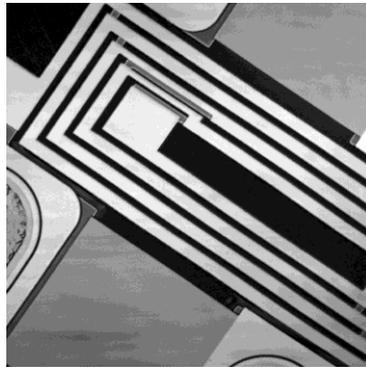


Figure 56: Image laser par la face arrière

Pour valider que les fissures n'étaient pas dues à un relâchement de contraintes dans le BCB lors de la décapsulation, le procédé de gravure a été réalisé sur puce non encapsulée. Il a alors été révélé que des fissures apparaissaient au cours de cette gravure, même sans boîtier, ce qui démontre que le **plasma est bien à l'origine de ce défaut**.

Pour l'étude de l'influence des paramètres du plasma, l'ensemble des paramètres a été listé et chacun d'entre eux a été évalué. Toute cette étude a été réalisée sur **puce non encapsulée** pour les intérêts suivants :

- il a été validé que l'artefact est dû à une interaction entre le plasma et le BCB et pas à la présence du boîtier
- la gravure n'est pas reproductible entre chaque boîtier en raison de l'hétérogénéité des boîtiers ce qui influe sur le temps de gravure. L'influence des différents paramètres serait donc plus difficilement interprétable.
- L'ensemble des essais est plus rapidement réalisé puisqu'il n'est pas nécessaire de décapsuler les boîtiers.

L'étude a alors consisté à évaluer l'impact des paramètres suivants sur l'apparition des fissures:

- Mise sous vide
- Température face arrière

- Temps de gravure
- Echauffement face avant
- Puissance RF
- Régulation thermique face arrière
- Pression dans la chambre pendant la gravure
- Débit de gaz
- Type de gaz
- Maintien d'échantillon
- Hauteur de l'échantillon dans la chambre
- Teneur en humidité de l'échantillon
- Position de l'échantillon dans la chambre
- Type de refroidissement après gravure

Chacun de ces paramètres a alors été modifié individuellement (lorsque cela était possible). L'impact de ces différents paramètres a été étudié en réalisant des observations optiques sur une même zone de la puce. En effet, il a été révélé par les premiers résultats que les fissures s'initient préférentiellement autour des plots de contact. Par conséquent pour chacun des essais, l'observation s'est portée sur un plot en particulier. Le tableau 10 montre ainsi l'exemple de l'influence du temps de gravure sur l'apparition des fissures. Il est alors aisé de conclure de manière qualitative sur l'importance de ce paramètre dans la génération des fissures.

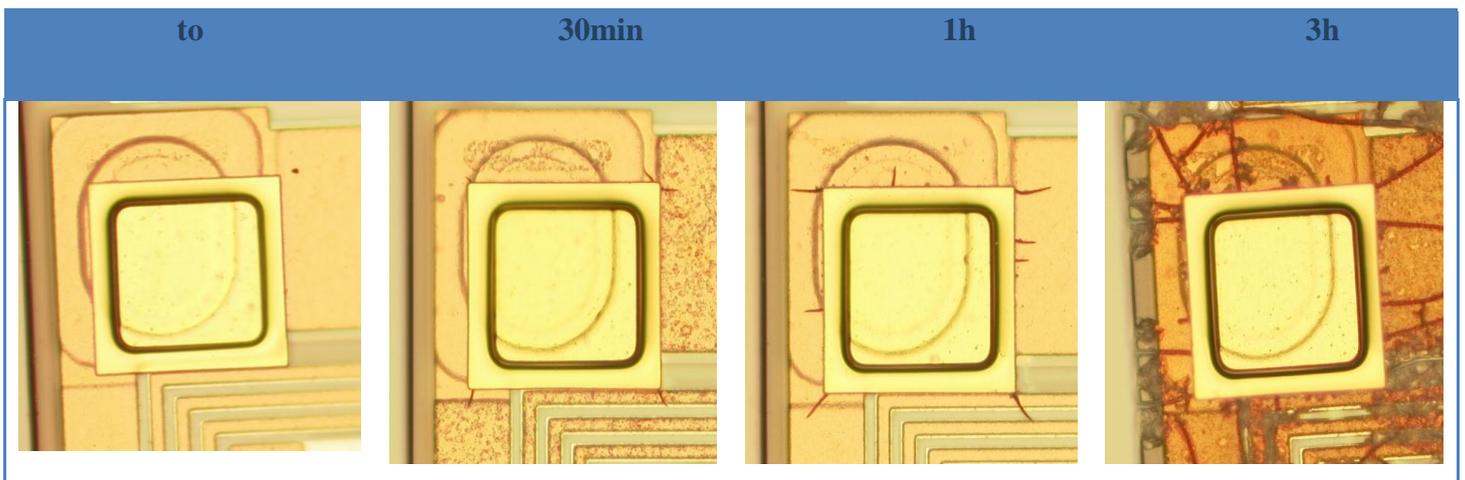


Tableau 10. Influence du temps de gravure sur l'apparition des fissures (à to ; 30min ; 1h ; 3h)

L'interprétation de l'ensemble des essais a permis de révéler trois résultats principaux.

Nous avons établi que l'apparition des fissures est liée à la cinétique de la réaction du plasma : les fissures sont plus nombreuses et plus grandes dès lors que la réaction physico-chimique du plasma est accentuée. Ainsi, lorsque la température est plus élevée ou encore, lorsque la puissance RF est plus forte, les fissures sont plus importantes en nombre et en taille. Par conséquent, il en a été déduit que la génération des fissures est en partie expliquée par un **phénomène physico-chimique**.

Ensuite, il a été montré sur une trentaine d'échantillons que le maintien de l'échantillon a une influence cruciale. Pour des essais réalisés avec un maintien de

faible conductivité thermique, des fissures sont générées dans le BCB ce qui n'est pas le cas avec un maintien conducteur. Cela a mené à considérer un **aspect thermique** dans le mécanisme de génération de fissures.

Enfin, il a été démontré sur une vingtaine d'échantillons que l'ajout de CF_4 dans le plasma oxygène pour atteindre la puce évitait l'apparition des fissures. Ce point signifie que le CF_4 est un **inhibiteur de cet artéfact**.

2.4.2 Analyse physique des échantillons

La deuxième partie des investigations a eu pour objectif de réaliser l'analyse physique de trois types d'échantillon :

- Une puce référence qui n'a pas été soumise au traitement plasma
- Une puce avec des fissures après traitement plasma
- Une puce sans fissure après traitement plasma

L'analyse a consisté à réaliser des coupes FIB dans les couches actives de la puce sur chacun des échantillons, à observer l'empilement et à réaliser des analyse chimique en énergie (EDX) dans les zones intéressantes. Ces analyses ont permis de montrer qu'après un plasma oxygène, les échantillons ont une couche supplémentaire au-dessus du dernier niveau de BCB (fig.57).

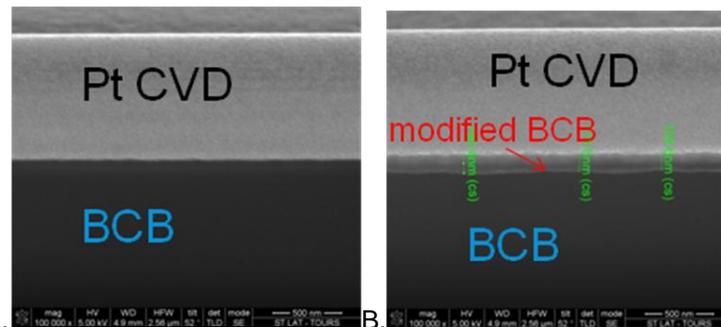


Figure 57: Vue au MEB du BCB supérieur après une coupe FIB :

A. Avant la gravure B. Après gravure O_2

(Note : Pt CVD est un dépôt de platine réalisé dans le FIB pour protéger la surface de l'échantillon pendant la coupe)

Ce phénomène a pu s'expliquer en s'intéressant de plus près à la composition du BCB. Le BCB contient du carbone, de l'oxygène mais aussi des atomes de silicium (voir structure dans le chapitre 1). Or, si le plasma oxygène peut graver les chaînes carbonées, il ne grave pas le silicium qui reste en surface de puce. Ce phénomène a été décrit dans la littérature pour des gravures de BCB [PAI91] [BAK98].

Par la suite, l'oxygène du plasma se combine avec le silicium et forme une couche avec une composition différente du BCB. C'est cette couche de BCB modifié qui apparaît en surface. Ce phénomène a été validé par analyse EDX. La figure 58 montre en effet que la couche supplémentaire est appauvrie en carbone et riche en silicium contrairement au BCB d'origine.

En poursuivant le procédé plasma, cette couche de BCB modifié s'étend de plus en plus dans la profondeur du BCB mais s'arrête aux alentours de 200nm. A ce

stade, la couche agit comme un masque et le plasma oxygène ne réagit plus avec les chaînes carbonées situées en-dessous.

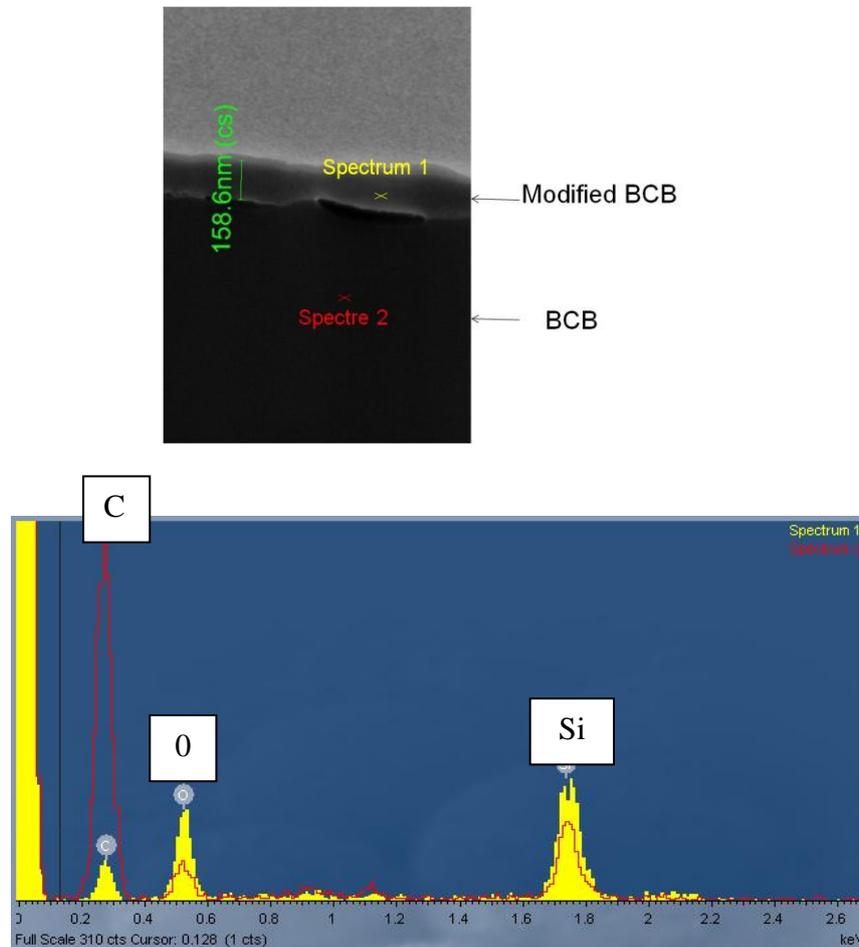


Figure 58: Analyse EDX dans le BCB et la couche modifiée

Enfin, il a été démontré que les fissures peuvent être générées sur un échantillon comportant cette couche de BCB modifié s'il est exposé à de hautes températures (de l'ordre de 200°C). Pour cela, un échantillon ayant été soumis au plasma oxygène mais n'ayant pas de fissures a été chauffé en dehors de l'équipement. Une puce de référence n'ayant pas vu le plasma a été chauffée de la même façon. Le résultat a alors montré que la puce de référence n'avait pas de fissure au contraire de la pièce d'étude.

En raison de cette modification de la structure du BCB, son coefficient thermique de dilatation (CTE) a évolué. A haute température, ceci induirait une contrainte thermomécanique entre les deux couches (le BCB et le BCB modifié) qui générerait des fissures.

Cette dernière hypothèse est en adéquation avec les résultats obtenus à la fois dans l'étude des paramètres influençant l'apparition des fissures et dans l'étude physique des échantillons. En effet, nous avons pu montrer que le plasma oxygène modifie le BCB en surface de puce en formant une couche proche d'un oxyde de silicium et au cours de la gravure plasma, l'échantillon s'échauffe ce qui génère les fissures. Ainsi, lorsqu'en plasma oxygène les fissures ne sont pas formées, cela

signifie que la température n'a pas été suffisamment haute pour contraindre la structure.

2.4.3 Eviter les fissures

En conséquence, pour éviter l'apparition des fissures deux solutions sont disponibles :

- soit la **température doit être limitée**
- soit le **BCB ne doit pas être modifié**

Il serait intéressant de conserver le plasma oxygène pur pour atteindre la puce pour avoir une haute sélectivité de gravure entre l'époxy du boîtier et le BCB. Il a été démontré dans le paragraphe précédent que le plasma oxygène modifie la surface du BCB sur une profondeur d'environ 200nm. Il pourrait être intéressant d'utiliser cet artefact pour atteindre la puce sans risque de retirer tout le BCB.

La solution serait donc de limiter la température dans la chambre pour éviter les fissures. Plusieurs essais ont démontré que diminuer la température de régulation de l'électrode ralentit l'apparition des fissures mais n'est pas suffisant pour les éviter. Le facteur principal est, en fait, le maintien d'échantillon. Dans le but de limiter la température du BCB et permettre la réalisation des étapes suivantes de l'analyse (en particulier la localisation), ce maintien doit avoir les caractéristiques suivantes :

- Une conductivité thermique excellente
- Une bonne conductivité électrique pour éviter les phénomènes ESD
- Une résistance aux hautes températures
- Une résistance au plasma oxygène
- Un moyen de le retirer après l'étape de gravure sans endommager le BCB et en conservant la testabilité électrique du composant

A ce jour, aucun maintien d'échantillon répondant à ces exigences n'a été trouvé. Ainsi, atteindre la puce avec un plasma oxygène pur n'est donc pas possible sans générer de fissures.

Pour préserver le BCB, **la seule solution est donc d'empêcher la formation de BCB modifié**. Contrairement à l'oxygène, le CF_4 peut graver le carbone et le silicium. Ainsi, avec un mélange d'oxygène et de CF_4 , les atomes de silicium sont retirés de la surface de la puce et la couche de BCB modifié n'apparaît pas. Les hautes températures présentes dans la chambre (de l'ordre de $100^\circ C$) ne créent pas de contrainte particulière en surface de puce, ne générant donc pas de fissure. Ceci explique pourquoi dans la première étude réalisée sur l'influence des paramètres, le CF_4 a été révélé comme inhibiteur dans le mécanisme de génération de fissures. Les essais ont permis de montrer qu'avec un plasma réalisé à partir d'un mélange de 495cm^3 d'oxygène et de 30 à 125cm^3 de CF_4 , les fissures ne sont pas générées. Par contre, ce plasma peut graver tout le BCB si la gravure n'est pas contrôlée. Comme la vitesse de gravure est limitée (de l'ordre de $80\mu\text{m/h}$ pour la résine de boîtier), il est aisé de contrôler la progression de la gravure et donc de protéger le BCB.

2.5 Synthèse par rapport à l'étude de cas et généralisation

Ainsi, sur les technologies BCB/Cu en boîtier plastique, s'il est nécessaire de réaliser un accès par la face avant pour atteindre la puce, la solution optimale consiste à réaliser une **pré-ouverture du boîtier avec le laser et à utiliser un mélange de 495 cm³ d'O₂ et de 30 à 125 cm³ CF₄ en gravure sèche jusqu'à la puce.**

Après décapsulation les **fils sont préservés** et des tests en I(V) ou en RF peuvent toujours être réalisés pour la suite de l'analyse. Sur des pièces d'essais non défailtantes, des tests électriques ont été réalisés avant et après décapsulation en particulier en RF et ont montré que la réponse en fréquence n'évolue pas, ce qui valide que cette préparation d'échantillon n'a pas d'impact sur la caractéristique électrique du produit. L'exemple est donné dans la figure 59 pour deux échantillons I4 et I6. La réponse du gain en fonction de la fréquence a été mesurée avant la décapsulation (t₀) et après décapsulation (t₁). Pour chaque échantillon, les courbes avant et après décapsulation se superposent parfaitement.

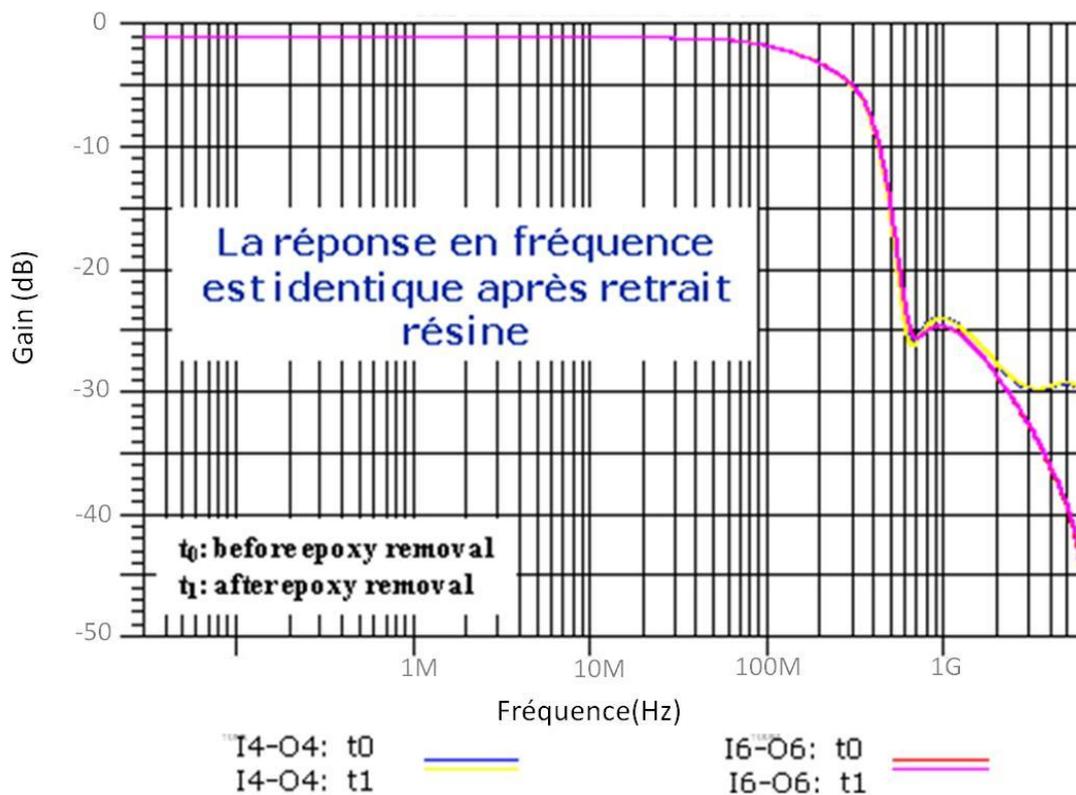


Figure 59: Réponse en fréquence (gain en fonction de la fréquence) avant et après décapsulation pour 2 échantillons (I4 et I6)

La validité et la répétabilité de cette méthode ont été évaluées sur une dizaine d'échantillons, sur quatre produits différents avec une technologie BCB/Cu et en particulier sur des cas réels d'analyses de défaillance.

La figure 60 montre en exemple un défaut de dépôt de cuivre qui a court-circuité deux pistes de métallisation. Dans ce cas, la localisation par la face arrière ne donnait pas de résultat en raison du masquage dû à la superposition des niveaux de

métallisation. La décapsulation par la face avant a alors permis de localiser le défaut et d'y accéder.

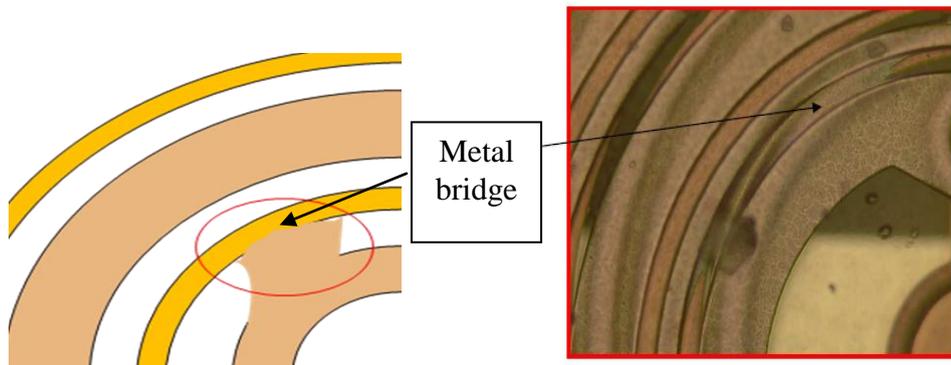


Figure 60: Résidus de métal qui connectent deux pistes de métallisation normalement isolées. La décapsulation face avant a permis d'observer ce défaut non visible par la face arrière en raison des métallisations sous-jacentes.

Enfin, un autre cas d'analyse a été publié dans la revue *Microelectronics Reliability* en 2010 [AUB10]. Ce cas d'analyse concernait un composant RF utilisé dans des modules émetteur-récepteur de téléphones portables. Ce produit se compose d'un ensemble d'inductances et de condensateurs intégrés sur une puce encapsulée dans un boîtier plastique SO20. La partie du composant, défailante dans notre cas, est représentée sur le schéma électrique de la figure 61A. La structure de la puce est donnée en vue de dessus en figure 61B et en coupe en figure 61C.

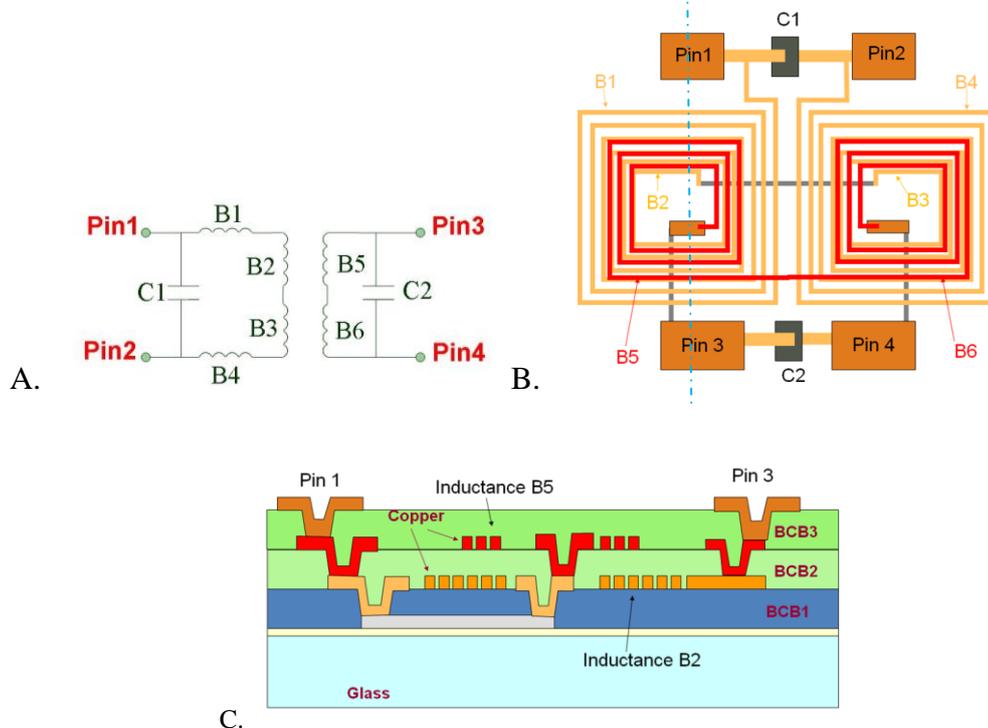


Figure 61: Représentation du composant RF étudié

A. schéma électrique ;

B. Structure schématique du circuit en vue de dessus ;

C. Coupe schématique du composant suivant la ligne pointillée bleue figure B

Le mode de défaillance de ce composant était un court-circuit entre les plots de contact « pin2 » et « pin4 », normalement en circuit ouvert. Après un polissage face arrière du composant pour atteindre la puce, une localisation du défaut par OBIRCh a été possible et a révélé un passage de courant entre l'inductance B5 et B2 (figure 62).

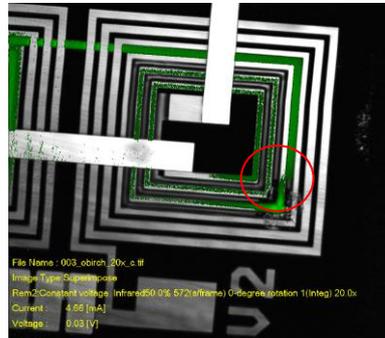


Figure 62: Localisation par OBIRCh (par la face arrière de la puce) du passage de courant entre l'inductance B5 et l'inductance B2.

Un accès au défaut était alors nécessaire pour le caractériser et déterminer le mécanisme de défaillance. La décapsulation du boîtier plastique avec la nouvelle méthode combinant la gravure laser et l'attaque plasma a ainsi été utilisée et a permis d'accéder à la face avant de la puce. La zone de défaut a ainsi pu être observée. Cet accès a ainsi permis de montrer la présence d'une fusion entre les deux niveaux de métallisation (fig.63). Le mécanisme de défaillance a ainsi pu être identifié comme étant une surcharge électrique qui a engendré la fusion des deux couches de cuivre menant à un court-circuit.

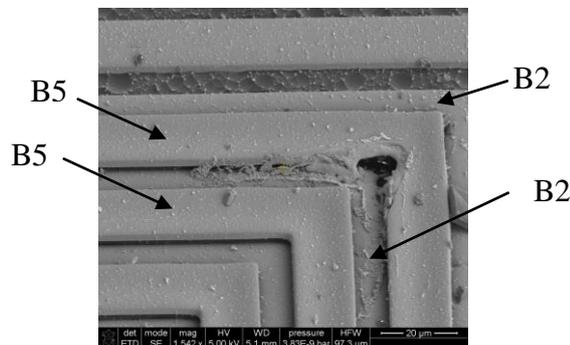


Figure 63: Imagerie MEB de la zone de fusion.

Il est à noter que **cette méthode ne peut pas être utilisée dans le cas où le défaut est en surface de puce** (entre la résine de boîtier et le BCB par exemple). En effet, il a été précisé que la gravure peut retirer une partie du BCB en surface, c'est pourquoi la surface ne peut être analysée après gravure plasma. La méthode permet cependant d'analyser le reste de la structure sans avoir endommagé les couches actives.

Ainsi, l'ensemble des cas dont l'accès par la face avant est nécessaire aussi bien pour la localisation que pour la caractérisation de défaut, peut aujourd'hui être résolu avec une nouvelle méthode de préparation donnant accès à la face avant des technologies BCB/Cu.

De manière plus générale, cette méthode peut s'appliquer à **l'ensemble des composants en boîtier plastique comportant des diélectriques et des passivations en matériaux organiques**. Si le diélectrique ne contient pas de silicium (tel que le SiLK), alors la gravure peut être finalisée avec un plasma oxygène.

Cette nouvelle approche a été intégrée à la méthodologie de préparation d'échantillon et sera présentée dans le chapitre 3.

Jusqu'à aujourd'hui, l'accès face avant des technologies avec des diélectriques organiques en boîtier plastique n'était pas possible sans détérioration des couches actives. Avec la solution de décapsulation présentée, il est dorénavant possible de réaliser l'ensemble des analyses en passant, soit par la face avant, soit par la face arrière.

3 Compréhension des mécanismes de défaillance après test de fiabilité: micro-section de composant dans un boîtier plastique isolé

La seconde étude traitée dans cette partie va s'attacher à trouver une alternative à la micro-section mécanique d'un composant encapsulé dans un boîtier plastique isolé.

3.1 Présentation du contexte

Dans le cadre de la qualification de nouveaux produits, des **tests de fiabilité** sont réalisés. Ces tests ont pour but de soumettre le composant à des contraintes (température, variation de températures, humidité, vibration), afin de reproduire de manière accélérée les contraintes que le produit pourra subir dans les applications. Le vieillissement induit par ces contraintes peut générer des défaillances électriques des produits. L'objectif de ces tests est alors de déterminer comment et quand ces défaillances vont se produire dans la vie du produit. Suite à ces tests, les pièces sont donc analysées pour caractériser le défaut physique et en déduire le mécanisme de défaillance. Il est alors possible de déceler les faiblesses d'un produit et de prédire la durée de vie des composants. Ces différents tests peuvent prendre plusieurs semaines voire quelques mois. Pour avoir une bonne information statistique, ces tests sont réalisés sur un nombre important d'échantillons pouvant aller jusqu'à 80 pièces pour un seul test. Ces essais de fiabilité sont donc longs et coûteux.

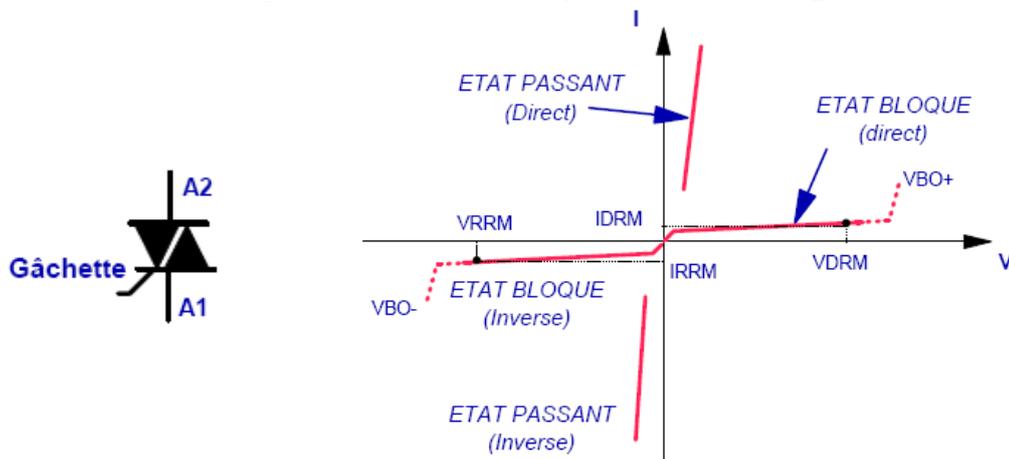
De manière à réduire le temps global employé pour les tests de fiabilité, les fiabilistes cherchent à développer des **modèles de prédiction de durée de vie** en simulant le vieillissement des échantillons sous contraintes. Ces modèles ont pour objectif de calculer les durées de vie de composants soumis à certaines contraintes par simulation. Pour obtenir des modèles reflétant la réalité, il est nécessaire de se servir de résultats de tests expérimentaux. Il est tout d'abord requis **d'évaluer l'impact de différents profils de mission** sur un composant. Pour cela, différents tests sont lancés et l'évolution de caractéristiques électriques du composant est suivie. Par l'étude de l'impact des différents profils, il est alors possible de déterminer les paramètres de test ayant le plus d'influence sur le vieillissement du produit. Liées à ces différents tests, des analyses de défaillance doivent être réalisées pour déterminer les **mécanismes de défaillances impliqués dans le vieillissement du produit**. En utilisant à la fois l'étude sur l'impact des différents profils de mission et la compréhension des mécanismes de défaillance, il est alors possible de créer un modèle de prédiction de durée de vie du composant étudié. Par la suite, les tests de fiabilité peuvent ainsi être réduits en durée et en nombre d'échantillons, ce qui est un temps gagné pour la mise sur le marché du produit et une économie réalisée sur le coût global de la qualification du produit.

3.2 Description de l'étude de cas

L'un de ces tests, le **cyclage de puissance**, est typiquement utilisé pour évaluer la durée de vie des composants discrets de puissance. Ce test consiste à contraindre thermiquement le composant par cycles. En raison de l'empilement de divers matériaux dans les assemblages qui ont des coefficients d'expansion thermique différents, ces variations de températures génèrent des contraintes thermo-mécaniques dans le composant qui peuvent le dégrader et limiter sa durée de vie opérationnelle. Ce test peut être soit passif, soit actif. Lorsqu'il est passif, le cyclage thermique est réalisé en générant des variations de températures externes au composant. C'est l'environnement qui change de température. Lorsque le test est actif, des impulsions de courant sont appliquées au composant. L'échauffement est alors généré par la diffusion de puissance à l'intérieur de la zone active du composant. Ce deuxième test se rapproche plus de ce que subit le composant durant sa vie fonctionnelle.

Pour modéliser ce type de test, il est crucial d'avoir une base de données initiale, obtenue par la pratique et la bibliographie, et qui identifie les facteurs principaux d'accélération responsables du vieillissement du produit ainsi que les mécanismes de défaillance. Le travail concernant l'influence des paramètres de tests a été réalisé au cours d'une autre thèse [JAC10]. La modélisation de ce type de test a commencé par un produit en particulier : le TRIAC.

Le **TRIAC** est un composant utilisé pour contrôler l'énergie électrique afin de piloter des applications domestiques comme les aspirateurs, les machines à café, les fours... Ce composant est équivalent à la mise en parallèle de deux thyristors montés tête-bêche. Sa caractéristique courant-tension est présentée dans la figure 64.



A.

B.

Figure 64: A. Symbole du TRIAC B. Caractéristique électrique : avec VDRM la tension directe maximale à l'état bloqué, IDRM, le courant de fuite à la tension VDRM, IRRM, le courant de fuite à la tension VRRM, et VBO la tension de retournement

Le TRIAC est utilisé pour contrôler le passage des deux alternances d'un courant alternatif. Un exemple de commande est donné dans la figure 65.

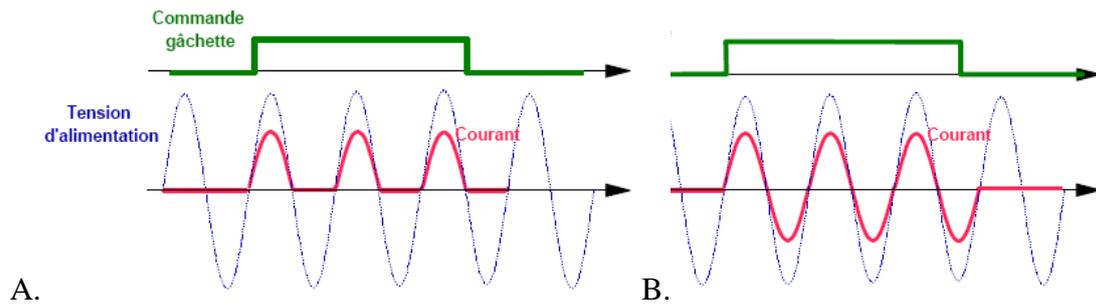


Figure 65: Exemple de commande en tout ou rien d'un thyristor (A) et d'un TRIAC (B)

Comme de nombreux composants de puissance, le TRIAC est assemblé dans deux types de boîtiers TO-220 : l'un est isolé, l'autre ne l'est pas. La différence entre ces deux assemblages réside dans la présence ou non d'un matériau d'isolation, la céramique, entre la puce et le dissipateur. La structure des deux types de boîtier est présentée en coupe figure 66. Chaque niveau est séparé d'un autre par une couche de brasure.

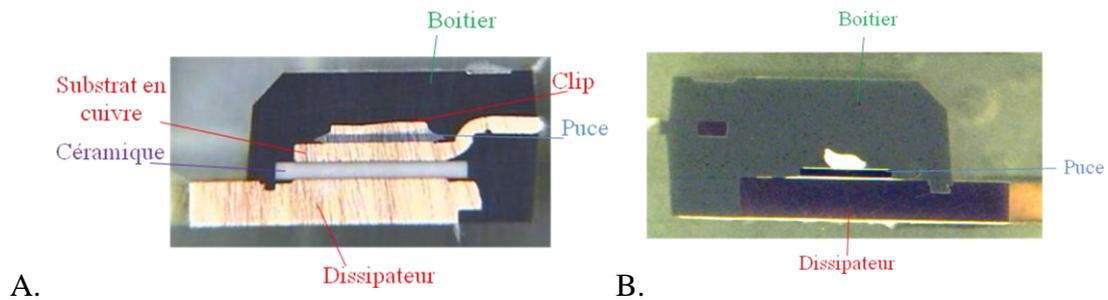


Figure 66: TO-220 A. isolé B. non isolé

La couche de **céramique** composée d'alumine (Al_2O_3) à 96% fournit une isolation électrique de la puce. Ceci est utile pour des raisons de sécurité (au cas où l'utilisateur final ait accès au dissipateur dans l'application du produit) mais aussi pour des raisons fonctionnelles (si le dissipateur est connecté à un autre potentiel). En effet, pour un assemblage non isolé, la puce est directement connectée au dissipateur alors que dans le cas du boîtier isolé, la puce est soudée sur un substrat de cuivre isolé du dissipateur par la céramique.

Pour mettre en place un modèle pour le cyclage de puissance actif, sur ces deux assemblages, divers tests de vieillissement accéléré ont été réalisés, en faisant varier les paramètres de test. Au cours d'un cycle de puissance, des cycles alternés de chauffe (T_{ON}) et de refroidissement (T_{OFF}) sont réalisés. Quatre grandeurs caractéristiques peuvent alors être définies (fig.67) [JAC10]:

- le temps de montée (t_r) de la température initiale (T_{c_low}) à la température maximale (T_{c_high}),
- le temps de palier (PW) à la température maximale,
- la température maximale (T_{c_high}),
- l'excursion de température ($\Delta T_{case} = T_{c_high} - T_{c_low}$).

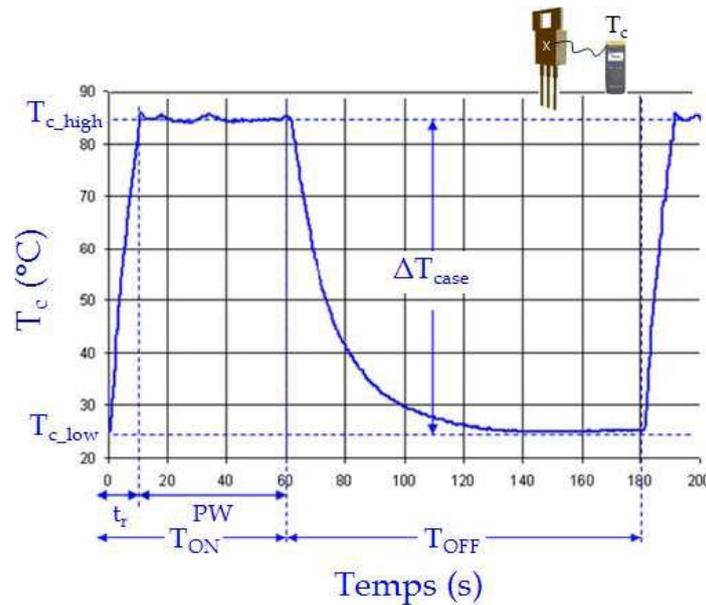


Figure 67: *Grandeurs caractéristiques d'un cycle de puissance actif [JAC10]*

A l'aide d'un banc de test spécifique, il est possible de faire différents tests en faisant varier chacune de ces grandeurs. Il était ainsi possible d'en déduire l'influence de chaque paramètre sur la durée de vie des TRIAC. Nous avons en particulier évalué l'impact de l'excursion de température. Un premier test a été lancé avec $\Delta T_{\text{case}} = 60^\circ\text{C}$ qui correspond aux conditions standards d'utilisation du composant et un second test avec $\Delta T_{\text{case}} = 113^\circ\text{C}$, représentant une condition extrême d'utilisation.

Au cours de ces tests, plusieurs paramètres thermiques et électriques ont été contrôlés : V_{tm} , I_{rrm} et I_{drm} , $R_{\text{th}(j-c)}$. Parmi ceux-ci, seule la **résistance thermique de la jonction au boîtier** (« junction-to-case thermal resistance »), symbolisée par $R_{\text{th}(j-c)}$, a subi une variation significative. Ce paramètre mesure la résistance qu'offre un composant à l'évacuation des calories entre deux points qui servent de référence de température et qui sont la jonction et un point extérieur au boîtier. Dans un boîtier type TO-220, c'est le fond du boîtier qui est pris comme référence. Cette résistance thermique est déterminée par :

$$R_{\text{th}(j-c)} = (T_j - T_c) / P_{j-c}$$

avec T_j la température de jonction définie comme la température maximale à la surface de la puce

T_c la température du fond du boîtier

P_{j-c} la puissance totale dissipée de la puce vers le boîtier

Le critère de défaillance d'un TRIAC a été défini comme une augmentation de $R_{\text{th}(j-c)}$ de 20% par rapport à la valeur initiale [HEL97]. Ce critère s'appuie sur des normes. En effet, la norme JESD22A105 pour les tests de cyclage de puissance précise qu'un composant est défaillant dans les deux cas suivants :

- le paramètre mesuré évolue de +/- 20 % par rapport à sa valeur initiale
- le paramètre mesuré a une valeur supérieure à celle spécifiée par le constructeur.

Le résultat des tests, avec les deux excursions de température, est donné dans la figure 68. Ce graphe représente le pourcentage cumulé de TRIAC défaillants (c'est-

à-dire dont la $R_{th(j-c)}$ a augmenté de plus de 20%) en fonction du nombre de cycles réalisés.

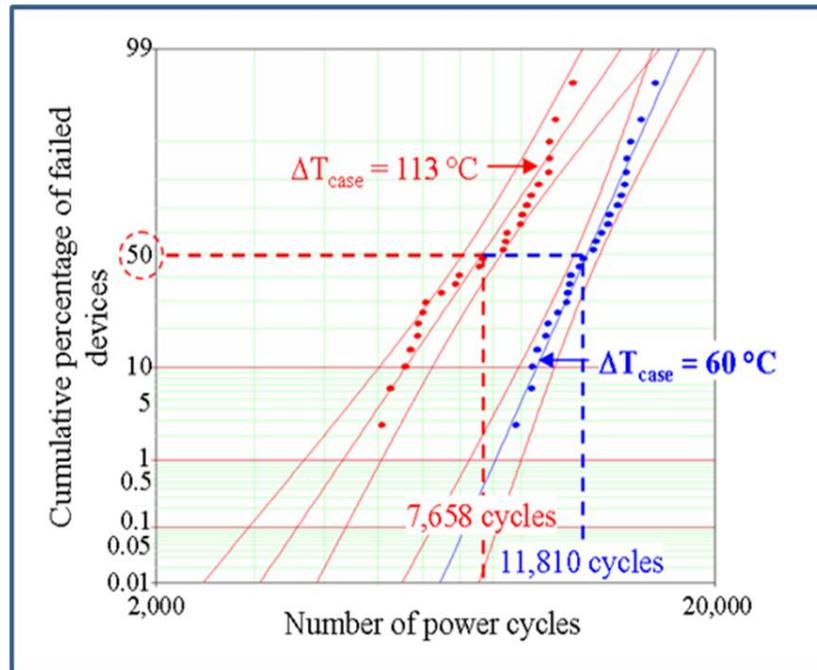


Figure 68: Impact de la température d'excursion sur les TRIAC en boîtier TO-220 isolé [AUB11]

Pour pouvoir développer le modèle, il était nécessaire de réaliser les analyses de défaillance dans toutes les configurations de tests de manière à valider le mécanisme généré et son évolution dans la pièce. L'objectif final est de **corrélér l'évolution de la résistance thermique $R_{th(j-c)}$ à une évolution physique du défaut.**

3.3 Méthodologie standard et limite

Pour l'analyse de défaillance de ces pièces, la préparation de l'analyse a consisté à comprendre de manière théorique ce qui pouvait se produire dans le composant lors de ces tests.

Les tests standards de cyclage de puissance n'affectent pas les TRIAC au niveau de la puce mais dans l'assemblage. Il est connu que la **faiblesse de ces structures vient des joints de brasure**, principalement en raison de la différence de coefficient d'expansion thermique entre les différentes couches de la structure, créant des contraintes de cisaillement dans la brasure pouvant mener à la génération de fissures dans cette couche [LIE09].

Un boîtier non isolé ne contient qu'un niveau de brasure (entre la puce et le dissipateur), ce qui signifie que les fissures sont attendues dans cette couche.

Un boîtier isolé est composé de quatre niveaux de joint. Chacun d'entre eux est sujet à des contraintes de cisaillement pendant le test de cyclage en puissance. D'un point de vue théorique, la contrainte est proportionnelle au gradient thermique dans la structure, à la différence de CTE des matériaux, et à la diagonale de l'épaisseur de la brasure [CIA02].

	Conductivité thermique ($W.m^{-1}.K^{-1}$) @300K	CTE (ppm/K^{-1})
Silicium	124	2,6
Céramique	27	6,2
Cuivre (dissipateur)	330	16,8
Cuivre (substrat puce)	436	16,8

Tableau 11. Coefficient d'expansion thermique des différents matériaux de la structure [JAC10]

Comme peut le souligner le tableau 11, la céramique présente une faible conductivité thermique comparativement au cuivre, ce qui génère un fort gradient thermique entre les deux matériaux. De plus, leurs coefficients de dilatation sont différents ce qui crée de fortes contraintes de cisaillement dans les niveaux de brasure entre le cuivre (substrat ou dissipateur) et la céramique. Enfin, si en théorie les deux couches de brasure en contact avec la céramique doivent avoir la même dimension (même épaisseur et largeur), en pratique, la couche située entre le dissipateur et la céramique est plus large et moins épaisse que celle située entre la céramique et le substrat de cuivre de la puce. Cela signifie que **la couche de soudure la plus contrainte est celle située entre la céramique et le dissipateur en cuivre** [CIA02]. Ainsi, cette couche est la plus faible et sera a priori la plus impactée par les fissures.

Dans le cas du TO-220 non isolé, l'analyse de défaillance va se tourner vers l'étude de la brasure située entre la puce et le dissipateur ; alors que pour le TO-220 isolé, l'analyse se fera sur la brasure située entre le dissipateur thermique et la céramique.

D'après la méthodologie standard présentée au chapitre 1 (fig.12), la première étape de l'analyse consiste à réaliser des contrôles non destructifs. En raison de la théorie expliquée ci-dessus, le microscope acoustique a été utilisé en réflexion par la face arrière du composant. Cette inspection permet d'analyser la couche de brasure située entre le dissipateur et la céramique pour le boîtier isolé et la couche entre le dissipateur et la puce pour le boîtier non isolé. Les ondes ont alors à traverser moins d'interfaces que par la face avant pour atteindre la zone d'intérêt. De plus, pour un gros boîtier comme le TO-220, les ondes n'arrivent pas à traverser toutes les interfaces par la face avant.

Un exemple de résultat de l'imagerie acoustique est donné dans la figure 69 pour un TO-220 isolé. Les divers niveaux de gris de l'image acoustique révèlent un aspect hétérogène du joint de soudure et donc une suspicion de fissures (fig.69).

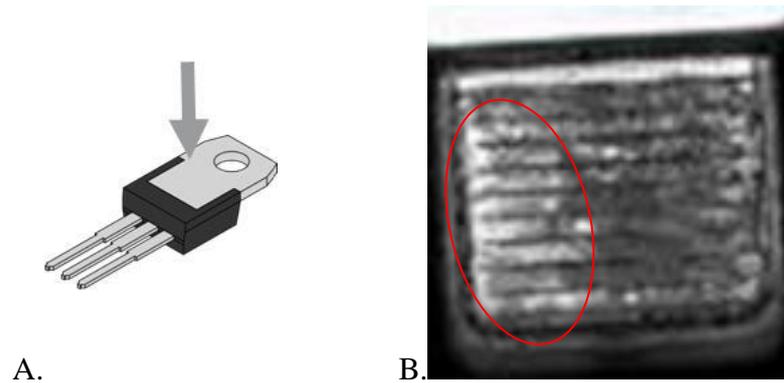


Figure 69: Microscopie acoustique sur un TO220 isolé
A. Sens de l'observation

B. Image acoustique obtenue avec divers niveaux de gris : dans la zone plus claire (entourée en rouge), des fissures sont suspectées

D'après la méthodologie standard (fig.12 chapitre 1), à cette étape (Q2), une micro-section du composant doit être réalisée pour observer le défaut physique à l'origine de ce dégradé de gris présent au niveau de la brasure. De manière standard, cette micro-section est réalisée par polissage mécanique. Cela ne pose aucun problème sur les produits encapsulés dans le boîtier non isolé (fig. 70) ce qui permet de conclure rapidement sur ces analyses.

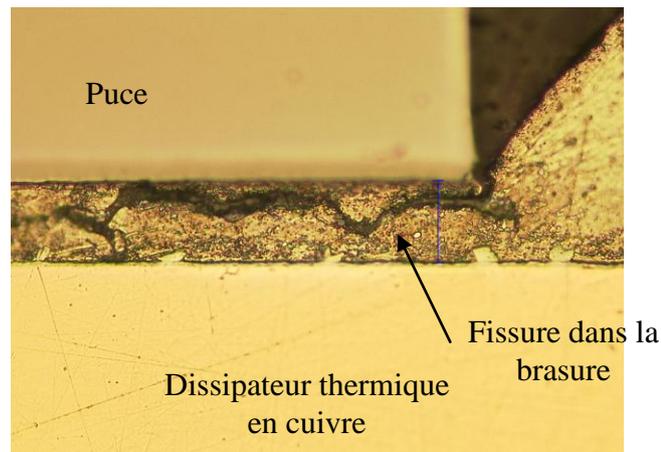


Figure 70: Observation, après polissage mécanique, d'une fissure dans la brasure d'un TO220 non isolé ayant été soumis à un cyclage thermique.

Cependant, dans les assemblages isolés, cette approche s'est avérée non appropriée car aucune fissure n'a pu être observée dans la brasure. Dans cet **empilement complexe**, les **propriétés mécaniques** de chacun des matériaux sont très **différentes**. Ceci génère un vrai **défi technique en polissage** pour obtenir un aspect correct de la brasure permettant son observation optique.

La couche de brasure à inspecter est située entre le dissipateur en cuivre et la céramique. Or, ces trois matériaux ont une **différence importante de dureté** (tableau 12), ce qui crée systématiquement des **artefacts de polissage** (relief, grains insérés), chacun d'eux empêchant l'observation correcte de la couche de brasure.

Matériau	Dureté Vickers
Silicium	>750 HV
Céramique	De l'ordre de 2000 HV
Soudure (PbSb ₁₀ Sn ₅)	<50 HV
Cuivre	100 HV

Tableau 12. Dureté des matériaux utilisés dans un TO220 isolé

Ainsi, la méthode standard de préparation ne permet pas de caractériser le défaut correctement dans les TRIAC encapsulés dans un TO-220 isolé et c'est pourquoi le développement d'une méthode alternative a été nécessaire.

3.4 Démarche et essais

3.4.1 Optimisation du polissage

Dans un premier temps, une étude a été réalisée pour chercher à modifier et optimiser le procédé de polissage. La procédure de micro-section standard consiste à utiliser une succession de disques en carbure de silicium (SiC) comme présenté dans le tableau 13.

Disque	Pression	Vitesse de rotation
SiC-320	30N/échantillon	150 tours/min
SiC-600		
SiC-800		
SiC-1200		
SiC-2400		
SiC-4000		
Finition 3µm diamant		
Finition 1µm diamant		
Finition silice colloïdale		50tours/min

Tableau 13. Enchaînement standard des disques de polissage

L'étude bibliographique a permis de montrer que l'abrasif à utiliser doit avoir une dureté de 2,5 à 3 fois supérieure à celle du matériau à polir [STR11]. Or, la céramique utilisée dans cette structure a une dureté de l'ordre de 2000 HV contre 2500 HV pour le SiC, ce qui explique pourquoi ces disques standards ne sont pas appropriés à ce type de polissage. Avec de tels disques, la céramique n'est que très peu polie contrairement à la brasure et au cuivre, ce qui génère un relief qui finit par empêcher l'observation de la fine couche de brasure. La mesure de topologie réalisée au profilomètre optique sur une micro-section faite avec des disques SiC révèle un **polissage plus profond des matériaux tendres comme le cuivre et un polissage léger de la céramique** (fig.71). Entre ces deux matériaux, la **brasure** se trouve **creusée** et difficilement observable.

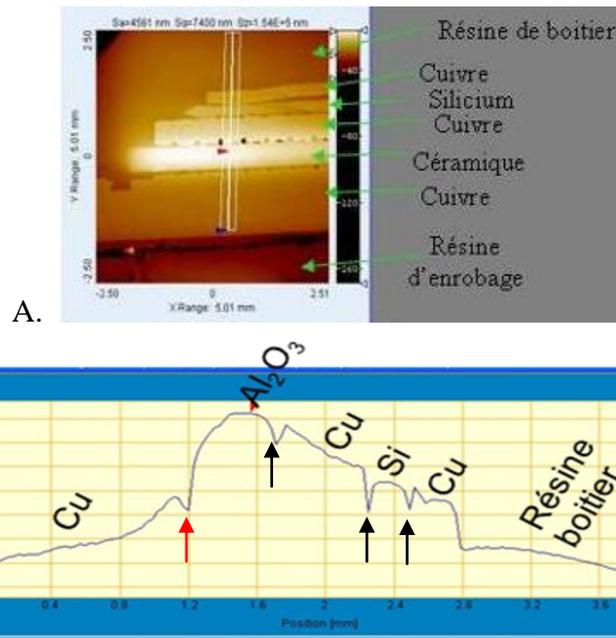


Figure 71: Profil de la micro-section obtenu à l'aide d'un profilomètre optique
 A. Représentation par contraste de couleur du relief (plus la couleur est claire, plus le matériau est haut)
 B. Profil correspondant à la ligne verticale de l'image A. Les 4 flèches représentent les couches de brasure (la rouge étant celle située entre la céramique et le dissipateur en cuivre)

Des disques composés de grains de diamant ont donc été évalués. Ces disques, développés spécifiquement pour les matériaux durs, permettent d'obtenir une surface plane dans un empilement hétérogène. Cependant, en raison de la faible dureté de la brasure, les **grains d'abrasif ou de céramique arrachés viennent s'incruster dans la brasure** empêchant l'observation de l'état de cette couche.

Différents paramètres de polissage ont été modifiés (la pression, la vitesse de rotation, l'enchaînement des disques...). Nous avons en particulier utilisé une étude que j'ai réalisée sur les disques de polissage. Cette étude a consisté en un comparatif des techniques de préparation d'échantillon mécanique rencontrées en laboratoire d'analyses de défaillance en particulier en évaluant l'effet de chacun de ces outils sur un premier matériau connu et largement utilisé: le silicium. Pour l'évaluation des différents disques de polissage, un échantillon de silicium poli miroir d'environ 1cm x 1cm a été collé sur un support de polissage. Cet échantillon a été poli manuellement par le même opérateur environ 30s avec sensiblement la même pression.

L'étude a porté sur l'aspect visuel du silicium après polissage ainsi que sur un comparatif de rugosité. La mesure de rugosité Sa (valeur Ra calculée sur une surface) a été réalisée au profilomètre optique. Pour la majeure partie de l'étude, la préparation mécanique et les mesures ont été faites sur un seul échantillon par outil. Pour quelques disques, le polissage a été réalisé sur 3 échantillons, de manière à valider l'homogénéité des mesures de rugosité et donner un ordre de grandeur de la variabilité de la mesure. Enfin, sur un même échantillon de silicium, une procédure de polissage a été effectuée en utilisant d'abord le plus gros grain pour finir au plus fin. La rugosité a été mesurée entre chaque disque. Cette expérience permet de vérifier que des

rugosités similaires sont obtenues en dégradant un silicium poli miroir, comme c'est le cas dans cette étude, ou en améliorant la surface, disque après disque. C'est cette dernière procédure qui est utilisée dans les analyses réelles.

La figure 72 représente la synthèse des mesures de rugosité réalisée après polissage avec des disques en carbure de silicium (SiC), chaque préparation ayant été effectuée 3 fois. Ainsi, il est montré que les mesures de rugosité pour chacun des outils ont une certaine variabilité mais conservent le même ordre de grandeur.

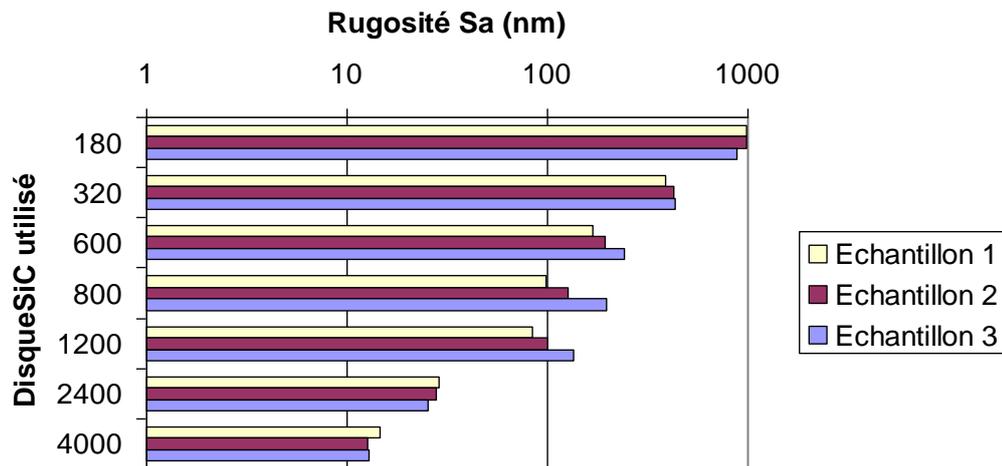


Figure 72: Variabilité de la mesure de rugosité pour les disques SiC (échelle logarithmique)

Le polissage et la mesure de rugosité ont donc été considérés comme suffisamment répétables pour que sur l'ensemble des autres techniques, un seul échantillon ait été traité par outil. Les mesures de rugosité alors obtenues sont synthétisées dans le graphe de la figure 73.

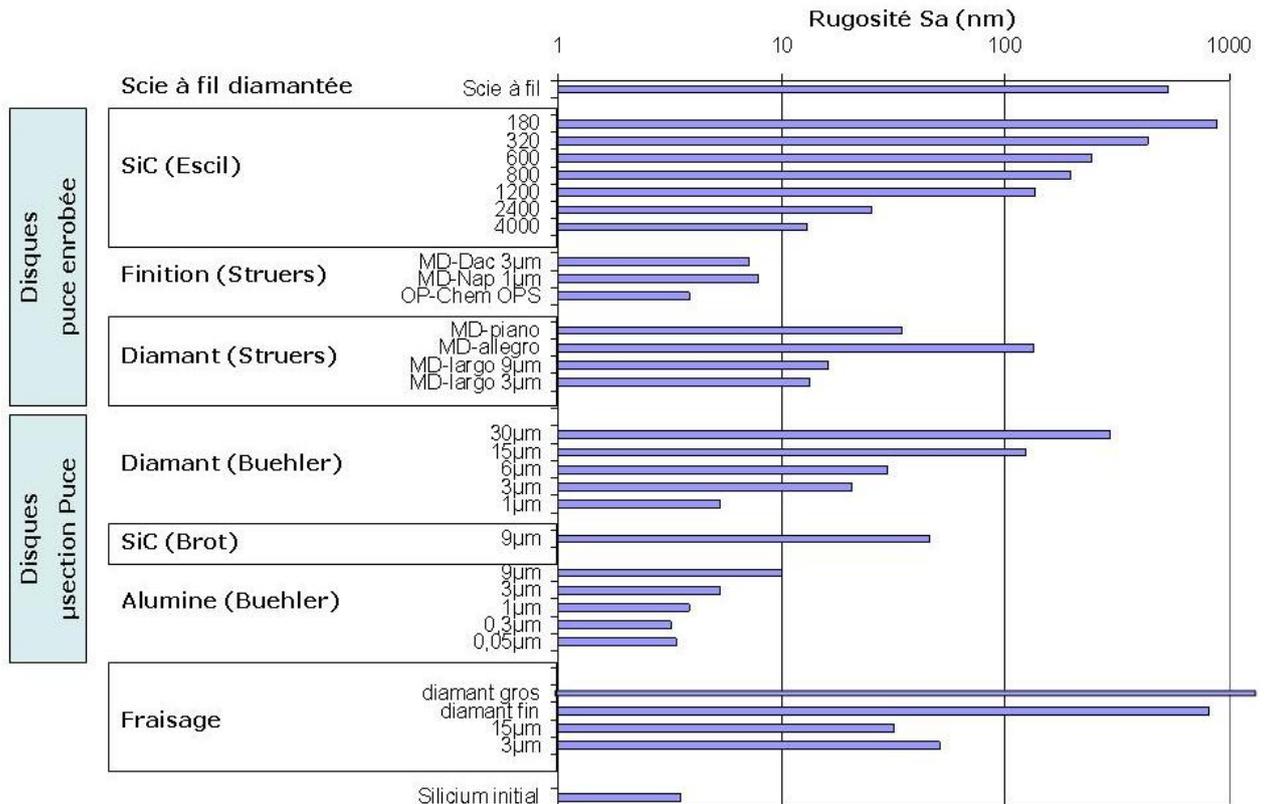


Figure 73: Synthèse des mesures de rugosité Sa (nm) (échelle logarithmique)

Ce graphique permet de connaître de manière quantitative l'effet de chacune des techniques sur le silicium. Avoir un comparatif de l'état de surface avec les diverses techniques de préparation mécanique permet de pouvoir alterner les différents outils. En effet, si une procédure classique tend à utiliser les mêmes types de disques (tout SiC par exemple), certaines configurations peuvent nécessiter d'utiliser l'ensemble du panel de disques et par exemple d'utiliser sur un même échantillon aussi bien des disques diamant que des disques SiC. De manière à être efficace et avoir un gain de temps dans la recherche de solutions, ce graphique permet de connaître approximativement quelle taille de grains utiliser dans chaque gamme d'outil à une rugosité de silicium donnée. Ceci s'applique déjà après une découpe grossière à la scie à fil pour laquelle nous savons dorénavant que le polissage peut être commencé au disque SiC 600 et deux disques sont donc préservés. [AUB10⁽²⁾].

Pour le polissage des TO220 isolés, nous avons utilisé le graphique de la figure 73 pour nous aider dans le choix des disques et leur alternance. Cependant, quelque soit l'enchaînement de disques et les paramètres de polissage employés, **aucun des essais n'a permis d'obtenir un bon état de surface de la brasure, chacun générant des artefacts.**

3.4.2 Alternatives à la micro-section mécanique

Par conséquent, j'ai dû développer une nouvelle approche, évitant le polissage mécanique. **La seule méthode pour obtenir une micro-section sans polissage mécanique est la gravure ionique.**

La plupart des laboratoires d'analyse de défaillance sont aujourd'hui équipés de FIB. Comme il a été dit dans le chapitre 1, cette méthode est lente et très localisée. Elle permet d'analyser de petites surfaces en coupe de l'ordre en moyenne de $20\mu\text{m}$ de large pour $10\mu\text{m}$ de profondeur. Or, ces dimensions ne sont pas compatibles avec celles du TO-220 qui a une épaisseur de 4,5 mm et une largeur de 10mm.

Une première étape de préparation s'est donc avérée nécessaire pour **réduire l'épaisseur du composant et s'affranchir de la limite de profondeur de la coupe FIB**. L'objectif étant d'observer la brasure, l'amincissement du composant a consisté à se rapprocher au plus près de la brasure.

L'attaque chimique humide de la résine du boîtier et ensuite du dissipateur en cuivre a été considérée comme la solution la plus adaptée. Ces deux attaques sont sélectives et permettent d'atteindre avec facilité la face arrière de la brasure en la gardant intègre. La solution utilisée pour le retrait de la résine du boîtier (acide nitrique fumant et acide sulfurique) et l'attaque du cuivre (acide nitrique fumant à température ambiante avec quelques gouttes d'eau) préservent la brasure et la céramique.

La figure 74 permet de voir l'état du composant aux différentes étapes de cette première préparation.

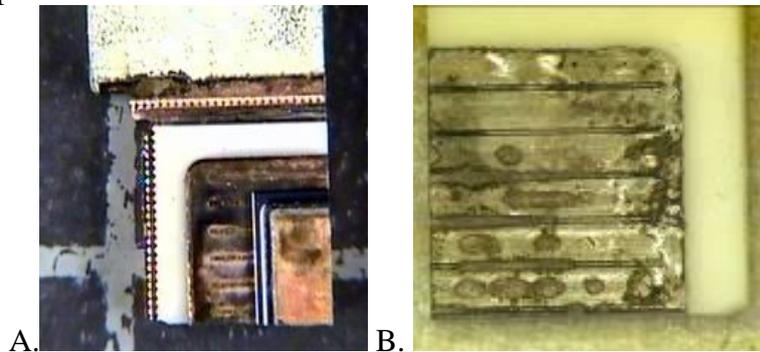


Figure 74: A. *Vue de la face avant du composant après retrait de la résine (après découpe d'un quart du boîtier)*
 B. *Vue de la face arrière de la brasure située entre la céramique et le dissipateur (le dissipateur ayant été retiré)*

Les lignes horizontales observées sur la figure 74 B., correspondent à des dômes de brasure liés à la présence de rainures sur le dissipateur en cuivre. Ces rainures ont pour but d'ancrer la brasure dans le dissipateur, pour éviter une rotation involontaire de la céramique et pour évacuer le flux (et donc minimiser les manques de brasure).

Grâce à cette première préparation, la coupe FIB peut être aisément réalisée sur l'épaisseur de la brasure avec une profondeur de coupe de l'ordre de $30\mu\text{m}$.

La seconde limite du FIB est sa largeur de coupe. Il n'est pas possible par cette technique de réaliser une coupe sur toute la largeur de la brasure. Cependant, en

choisissant les zones de coupe en fonction de l'image acoustique et des dégradés de gris, il a été possible de valider la différence de structure des différentes zones.

En effet, comme le montre la figure 75, il a été possible de **corrélérer la présence de fissures avec l'hétérogénéité des images acoustiques**. Cette figure montre une coupe réalisée à la limite d'une zone suspectée fissurée et d'une zone suspectée non fissurée en lien avec l'image acoustique. Il apparaît que des fissures sont bien détectées dans les zones claires de l'image acoustique et qu'aucune fissure n'est présente dans les zones grises de l'image. Ces résultats confirment donc la **présence de fissures dans l'étage de brasure le plus contraint et valident donc le mécanisme de défaillance**. Les images acoustiques révèlent bien la présence de fissures.

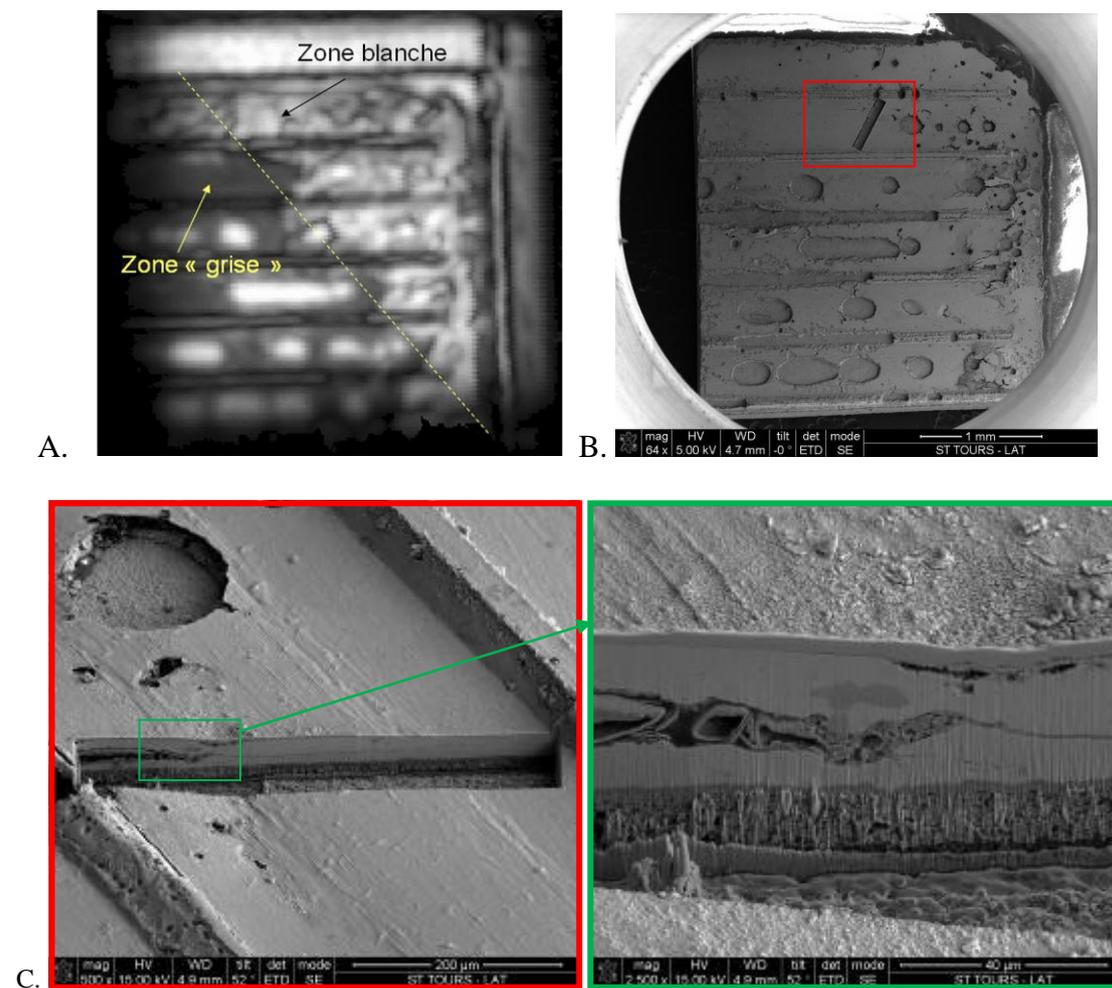


Figure 75: Coupe FIB à la limite d'une zone fissurée et d'une non fissurée dans le joint de soudure en lien avec l'image SAM

A. Image acoustique avant retrait du boîtier et du dissipateur (sur un quart du boîtier)

B. Observation MEB de la brasure après retrait du boîtier et du dissipateur et localisation de la coupe FIB (sur un quart du boîtier)

C. Observation de la fissure

Nous avons validé cette corrélation entre image acoustique et fissures sur une dizaine de pièces. Nous confirmons que pour l'ensemble des tests, les images

acoustiques peuvent être utilisées directement pour déterminer une surface de brasure fissurée et la lier à la mesure de résistance thermique $R_{th(j-c)}$ réalisée en amont de l'analyse. La figure 76 représente ce résultat pour $\Delta T_{case} = 60^\circ C$.

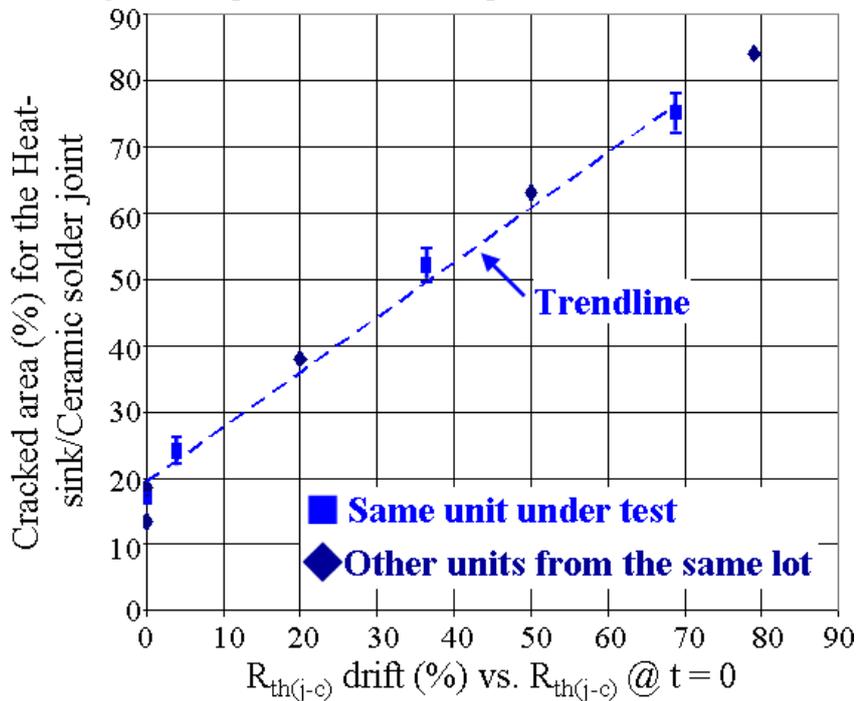


Figure 76: Pourcentage de surface fissurée en fonction de la variation de $R_{th(j-c)}$ pour $\Delta T_{case} = 60^\circ C$

3.5 Synthèse par rapport à l'étude de cas et généralisation

Le développement d'une nouvelle approche pour l'observation de fissures dans la brasure en contact avec la céramique des TO220 isolés a permis de **valider le mécanisme de défaillance des TRIAC pendant le cyclage de puissance**. La méthode standard ne permettait pas d'apporter cette confirmation. Grâce à la nouvelle approche développée, les fiabilistes ont pu utiliser directement les images acoustiques pour montrer l'évolution de la zone fissurée en fonction de la $R_{th(j-c)}$ qui évolue elle-même en fonction du nombre de cycles. Ces résultats sont à la base de la création d'un modèle de prédiction de durée de vie pour les TRIAC [AUB11].

Cette étude de cas révèle la difficulté que peut générer le polissage mécanique en micro-section sur des structures complexes avec des matériaux de dureté très différente comme un TO-220 isolé. De manière plus générale, cette limite de préparation d'échantillon pourra être retrouvée pour l'**analyse de tout boîtier isolé, dès lors que l'observation en coupe d'une couche de brasure en contact avec la céramique sera nécessaire**.

Comme présenté dans le chapitre 1, le polissage dépend de la dureté et de la ductilité des matériaux. Les alliages des brasures pouvant varier, leurs propriétés mécaniques se modifient aussi. Ainsi, il se peut que, pour un autre alliage, le polissage mécanique soit moins complexe et permette l'observation de la brasure. Pour une analyse avec plusieurs composants, il est donc conseillé d'essayer, **sur un premier**

composant, la micro-section par polissage mécanique. Si de bons résultats ne sont pas atteints, alors la méthode présentée ici combinant l'attaque chimique et la coupe FIB doit être utilisée. Cette méthode est intéressante, mais elle est **plus longue qu'un polissage mécanique** et ne doit être utilisée que lorsque ce dernier ne fonctionne pas.

Si la zone d'intérêt à observer par micro-section n'est pas en contact avec la céramique, alors un polissage mécanique peut être utilisé avec des disques adéquats (de dureté suffisante pour conserver la planéité de la micro-section).

Ainsi, des modifications sont à apporter à la méthodologie standard pour intégrer la nouvelle approche de préparation d'échantillon pour les analyses de brasure de boîtiers isolés. Celles-ci seront présentées dans le chapitre 3.

Dans cette partie nous avons montré que la méthodologie utilisée de manière standard peut atteindre ses limites même sur des produits de technologie mature. Les empilements hétérogènes rendent difficile l'étape de polissage mécanique qui peut comme dans le cas étudié créer des artefacts et empêcher la compréhension d'un mécanisme de défaillance.

Avec la méthode présentée, il est dorénavant possible d'avoir une approche alternative pour observer la coupe d'un composant lorsque les artefacts de polissage deviennent trop gênants pour la résolution de l'analyse.

4 Aide aux développements de nouveaux produits : Accès face avant de technologies encapsulées avec des plots de contacts en TiNiCuAu

4.1 Présentation du besoin

Les technologies émergentes permettent la miniaturisation de plus en plus forte des circuits électroniques. Ceci est rendu nécessaire notamment par la montée en fréquence, comme nous avons déjà pu le voir dans la partie 2 de ce chapitre. Pour réaliser ces évolutions technologiques, plusieurs étapes sont souvent nécessaires. La première peut partir d'un **composant déjà existant pour chercher à l'optimiser** grâce aux avancées technologiques. Pour le développement d'un produit innovant, il peut être nécessaire d'effectuer en première approche, des **tests électriques caractérisant de manière approfondie une structure existante**. En utilisant les résultats de cette caractérisation et fonction de son besoin, le concepteur peut alors **déterminer le modèle de sa nouvelle structure**.

La caractérisation électrique de la structure existante est alors poussée et il peut être nécessaire d'accéder à des contacts enfouis, non accessibles pour l'application standard du produit. C'est ainsi que les concepteurs peuvent demander d'accéder à ces zones, à l'aide de préparations d'échantillon utilisées pour l'analyse de défaillance. La particularité d'une telle demande réside dans le fait que le produit ne montre **pas de défaillance**. Il ne s'agit donc pas de réaliser une analyse de défaillance du composant. Cependant, le **besoin s'apparente à celui de l'étape de préparation d'échantillon d'une analyse** puisqu'il consiste à **accéder à des couches enfouies du composant en conservant son intégrité électrique**.

Ce paragraphe illustre par un exemple les difficultés et les solutions proposées pour réaliser ce type d'analyses liées aux évolutions technologiques.

4.2 Présentation du produit

Sur une carte de téléphone de nombreux composants sont soudés, en particulier des composants discrets. De manière à diminuer la surface des composants et réduire les effets parasites générés dans l'ensemble des pistes de la carte, des circuits intégrés tendent à remplacer des ensembles de composants discrets. Le cahier des charges du concepteur consiste à créer un produit qui, une fois monté sur la carte, fournit la même réponse électrique que les composants discrets tout en diminuant les effets parasites. Pour déterminer la structure à réaliser, il est donc nécessaire, dans un premier temps, de connaître la réponse RF du circuit existant. Une fois cette réponse connue, il est ensuite possible de déterminer par les simulations, les caractéristiques du futur circuit intégré.

Pour le développement d'un de ces circuits intégrés, il était nécessaire de connaître l'impédance électrique équivalente d'une carte existante avec ses composants discrets vue à deux points définis de la carte (fig. 77). En plus des

composants discrets normalement montés sur la carte, un composant spécifique a été ajouté à partir duquel il est possible d'obtenir l'impédance électrique équivalente Z du circuit en fonction de la fréquence vue de deux points de ce composant. Celui-ci est indiqué par une flèche sur la figure 77. Il est situé à la place que prendra le futur circuit intégré à développer. Ce composant ne correspond donc pas directement à un futur produit mais il sert d'outil de mesure. La mesure d'impédance obtenue à partir de ses connexions servira de **donnée d'entrée pour réaliser les simulations et déterminer la structure du circuit intégré à réaliser.**

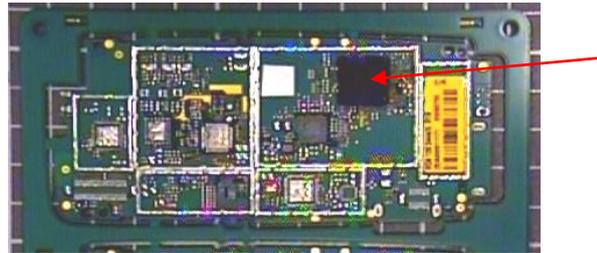


Figure 77: Carte imprimée de l'étude

La structure de ce composant est présentée figure 78 avec l'assemblage en coupe et la puce en vue de dessus.

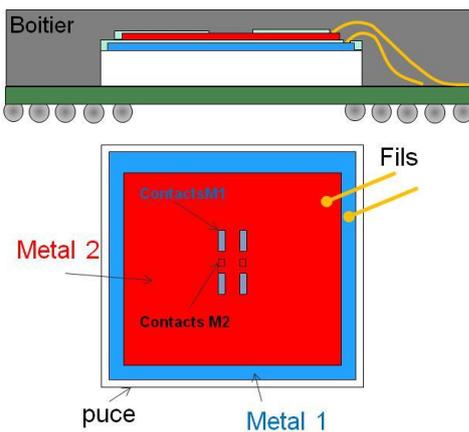


Figure 78: Structure du composant en boîtier (vue en coupe de l'assemblage et vue de dessus de la puce)

Le boîtier est un boîtier BGA (Balls grid arrays : matrice de billes) constitué (fig. 79):

- d'une petite carte imprimée sur laquelle est connectée la puce par des fils
- d'un boîtier plastique pour protéger la puce
- et de billes de soudure pour permettre la connection du boîtier directement sur la carte imprimée.

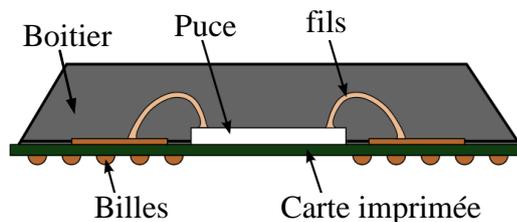


Figure 79: Structure en coupe d'un boîtier BGA

A l'intérieur du boîtier, la puce est en silicium avec, en face avant, deux couches de métallisation isolées par un oxyde de silicium (fig.80). Cet oxyde est aussi utilisé pour la passivation. Au centre de la puce, des plots de métal ont été réalisés et permettent de prendre contact sur les métallisations 1 (M1) et 2 (M2). L'accès au premier niveau métallique au centre de la puce est fait grâce à des vias. Les plots en surface de puce sont composés d'un empilement de différentes couches de métaux : Ti, Ni, Cu puis Au.

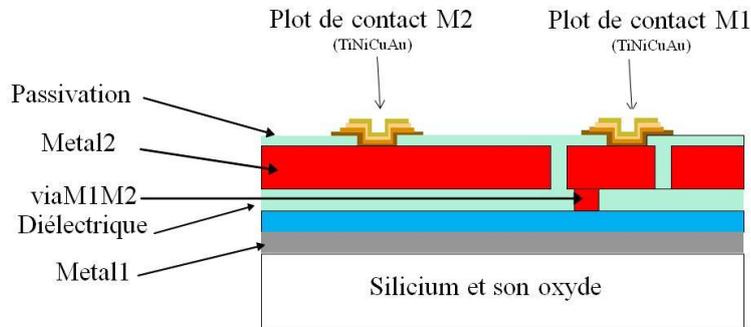


Figure 80: Structure de la puce

La puce étudiée est encapsulée dans un boîtier plastique et soudée sur la carte. Pour pouvoir mesurer l'impédance interne du circuit complet de la carte (résistance des fils, des pistes, des contacts, impédances des fils de liaison...) vue des 2 plots de contact situés au centre de la puce, il est nécessaire d'accéder à ces plots. Notre objectif est donc de préparer l'échantillon c'est-à-dire de **retirer la résine de ce boîtier en face avant, de façon à accéder à la puce et aux plots de contact.**

La particularité de ce composant est de contenir des **plots de contact en TiNiCuAu**. Nous verrons, par la suite, que cette structure est à l'origine des difficultés de préparation d'échantillon. L'avantage d'un tel empilement de couches pour le plot est d'avoir une faible résistance électrique et donc de ne pas interférer sur la mesure d'impédance de la carte.

De manière générale, les plots de contact réalisés pour des connexions par fils sont le plus souvent en aluminium ou en aluminium dopé avec du silicium ou du cuivre. On retrouve des plots en TiNiAu de manière standard pour des produits qui ont des connexions faites non pas par fil mais par soudure (des billes de soudure ou les produits brasés) car la soudure n'adhère pas à l'aluminium. Depuis l'apparition des soudures sans plomb, une couche de cuivre est rajoutée entre le nickel et l'or car l'étain, en plus grande quantité, crée alors des intermétalliques avec le nickel qui le consomme. Le cuivre a donc un rôle de barrière vis-à-vis de la diffusion de l'étain.

Certaines technologies sont réalisées à la fois pour des assemblages avec des fils et avec des billes de soudure. Dans ces cas-là, un seul procédé de fabrication peut être utilisé pour toutes les puces et on peut donc retrouver des produits avec des plots de contact en TiNiCuAu ou TiNiAu avec fils, encapsulés dans les boîtiers plastiques.

D'autres produits, défailants cette fois-ci, pourront donc avoir la même structure de plot et cette étude se situe donc en avance de phase pour l'analyse de défaillance puisque les produits défailants n'ont pas encore eu à être traités.

4.3 Méthodologie standard et limite

Pour les mesures à réaliser, l'étape de brasage du composant sur carte imprimée peut être réalisée aussi bien avant qu'après la décapsulation du boîtier. Cette information permet de travailler sur le développement de la méthode de préparation non pas sur un produit monté sur carte, mais sur le composant seul.

Pour ce cas présent, d'autres contraintes spécifiques ont été soulevées :

- l'intégrité du boîtier côté billes doit être conservée
- l'intégrité électrique de la puce doit être conservée
- l'accès à la puce doit être suffisamment large pour déposer les pointes du test RF

D'après la méthodologie standard, trois types d'accès à la face avant de la puce sont possibles:

- une ouverture globale du boîtier par voie chimique humide
- un accès à la face avant de la puce (local ou global) par voie mécanique
- une ouverture localisée du boîtier par voie chimique humide donnant accès à une partie de la face avant de la puce.

La première solution, en **ouverture globale**, permet de retirer la résine du boîtier pour atteindre la puce. Cependant, cette méthode **attaquerait aussi la carte imprimée du BGA** qui serait alors endommagée. De plus, le composant alors sans boîtier serait difficile à manipuler et donc à braser après décapsulation. Cette solution n'est donc pas envisageable pour cette étude.

L'approche mécanique par la face avant ne permettrait pas non plus de répondre à l'objectif aussi bien en polissage global qu'en polissage local. Pour un polissage parallèle à la puce sur toute la surface, les **fils seront coupés** perdant ainsi la connexion de la puce au reste du circuit et rendant impossible les tests électriques en RF. Avec un polissage local, réalisé uniquement au centre de la puce, les fils pourraient être conservés mais le polissage générerait nécessairement des **dommages à la surface de la puce** et en particulier aux plots de contact auquel il est nécessaire d'accéder. Cette solution n'a donc pas été retenue.

Une seule solution présente dans la méthodologie standard semble en fait pouvoir répondre au besoin : **l'ouverture localisée par attaque chimique humide** (fig. 81). La **rigidité du boîtier** est alors conservée, permettant la manipulation du composant pour l'étape de brasage. La **face arrière du boîtier est intègre** si la préparation ne touche qu'à la face avant et **l'accès aux plots de contact est possible**. Cette méthode doit donc être testée.

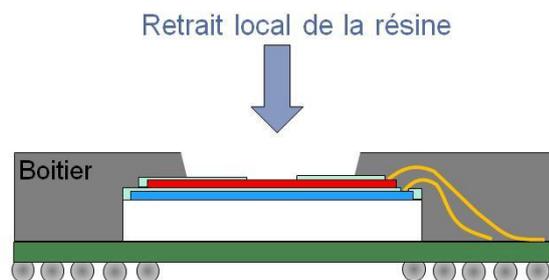


Figure 81: Résultat attendu après ouverture chimique localisée

Enfin, une méthode non traitée dans la procédure standard mais dont l'intérêt a déjà été montré dans les études précédentes est **l'approche par la gravure sèche et sa combinaison avec une première étape de décapsulation**. L'étape préliminaire de préparation (gravure laser ou polissage) permet de réaliser une ouverture localisée du boîtier sans atteindre la puce et donc de conserver la rigidité du boîtier. La gravure plasma peut alors permettre d'**atteindre la surface de la puce avec sélectivité**. Les couches en surface ne seront alors pas gravées. Cette approche semble donc pouvoir aussi répondre au besoin.

Deux solutions peuvent donc être évaluées pour accéder à la face avant de cette puce : **l'attaque chimique humide localisée et la gravure sèche**. Néanmoins, l'approche humide est a priori plus intéressante car plus rapide que la gravure sèche. C'est donc cette méthode qui a été testée dans un premier temps.

Cette décapsulation chimique peut être faite à l'aide d'un équipement d'ouverture localisée comme la *Jet-etch*. L'ouverture a alors été réalisée en suivant la procédure standard de retrait de boîtier, c'est-à-dire avec un mélange d'acide sulfurique (1 volume) et d'acide nitrique fumant (5 volumes) à 80°C.

Cette approche a permis de conserver l'intégrité du boîtier côté billes et de donner l'accès aux plots de contact du centre de la puce. Cependant, les **plots ont été endommagés** par la préparation (fig.82). Cette méthode standard s'est donc montrée infructueuse. La compréhension de cet endommagement et le développement d'une approche alternative a donc été nécessaire.

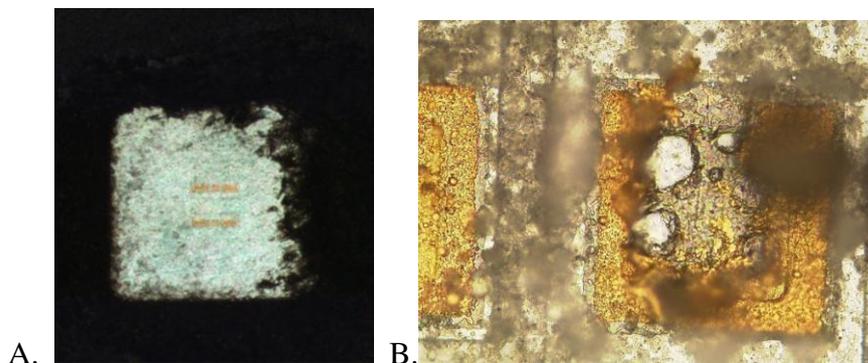


Figure 82: *Impact de la décapsulation chimique localisée*
A. *Vue globale des plots de contacts découverts*
B. *Vue rapprochée des plots et de leur endommagement*

4.4 Démarches et essais

4.4.1 Impact de l'attaque chimique sur les plots

La première étape de l'étude a consisté à **comprendre la cause de l'endommagement** de ces plots pour ensuite proposer une nouvelle approche.

Nous avons validé, dans un premier temps, que les plots n'étaient pas endommagés à l'état initial. Des puces non encapsulées (et non endommagées) ont été plongées quelques minutes dans un mélange d'acides similaire à celui utilisé pour la décapsulation du boîtier. L'observation après attaque a révélé que les plots étaient

aussi endommagés (fig. 83), validant ainsi **l'implication de l'attaque dans l'endommagement des plots.**

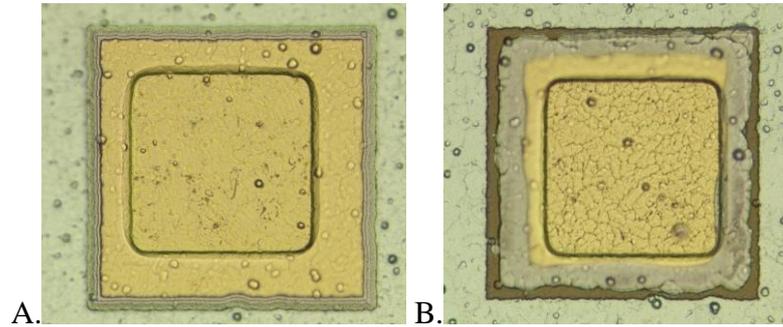


Figure 83: Influence de l'attaque sur un plot
A. avant attaque ; B. après 2 min d'attaque

Une analyse physique des plots a ensuite été réalisée pour déterminer les couches touchées par l'attaque. Une coupe FIB dans les plots a été suivie d'une observation au MEB couplée à une analyse EDX (fig.84).

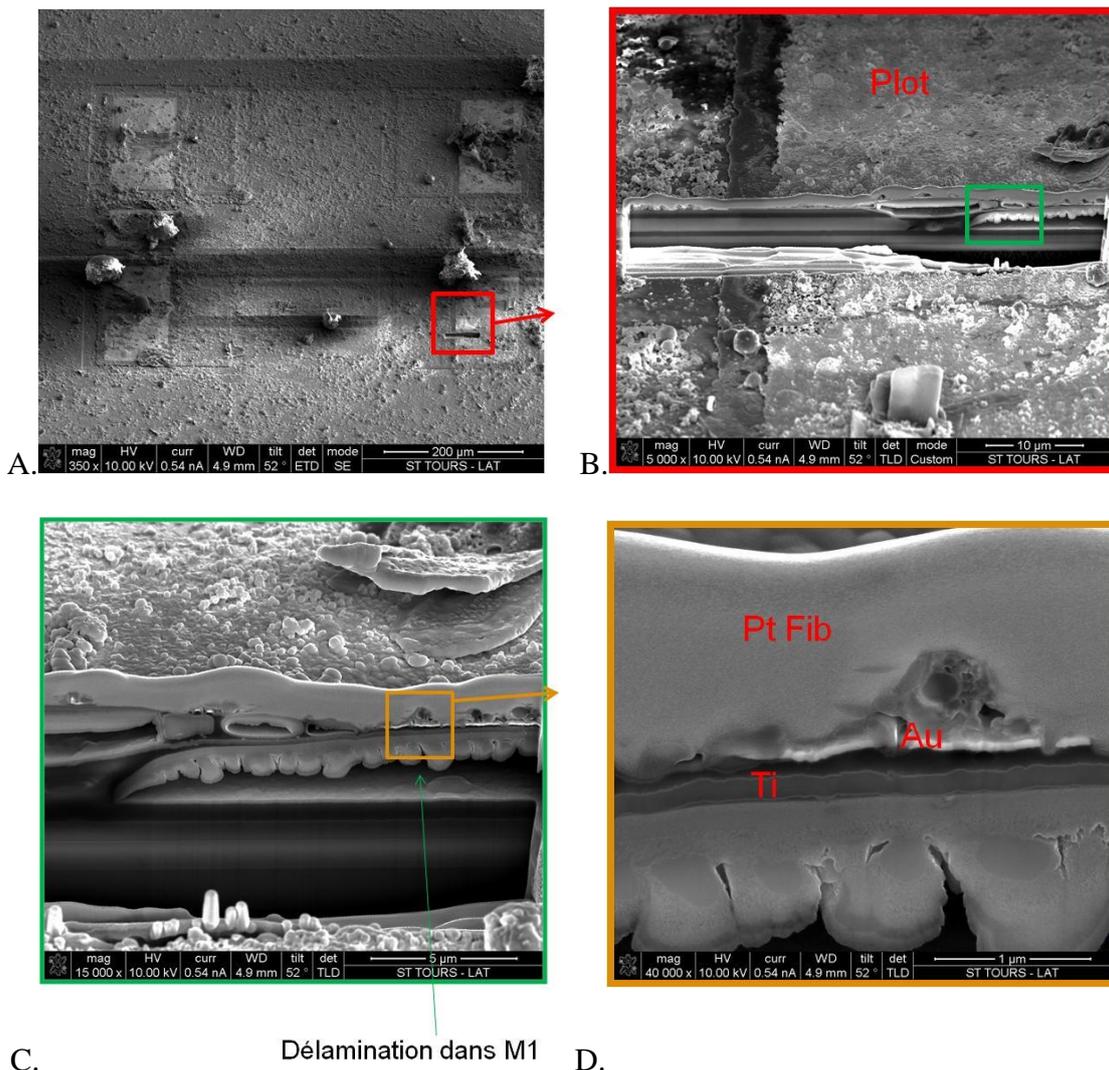


Figure 84: Coupe FIB et observation MEB de l'endommagement des plots

A. Vue de dessus du plot et localisation de la coupe FIB

B. Vue inclinée de la coupe FIB dans le plot

C. Vue de la coupe de l'empilement

D. Vue des couches du plot restantes (Ti et légèrement d'Au)

Cette analyse a permis de montrer que :

- la passivation autour des plots est intègre
- le nickel n'est plus détecté, il a donc été attaqué
- l'or et le cuivre sont détectés mais les couches ne sont pas intègres
- le titane est présent
- la métallisation sous-jacente, comportant de l'aluminium et du cuivre, est aussi endommagée.

Pour comprendre quel acide est à l'origine de cet endommagement, une recherche bibliographique a été réalisée de manière à évaluer l'impact de ces acides sur les différentes couches du plot.

L'acide nitrique est un oxydant puissant. Il peut ainsi dissoudre, seul, de nombreux métaux en particulier le nickel et le cuivre [DUL96]. Sur d'autres métaux, il forme un film protecteur comme sur le titane [DUL96][WAL91]. Le titane n'est

donc pas gravé par l'acide nitrique, par contre, il est sensible à l'acide sulfurique [WAL91]. L'or n'est pas soluble dans les acides utilisés seuls, ni l'acide nitrique, ni l'acide sulfurique [DUL96] [WAL91]. Le tableau 14 synthétise les réactions de l'acide nitrique et de l'acide sulfurique utilisés indépendamment sur les différentes couches du plot.

	Acide sulfurique	Acide nitrique fumant
Ti	Soluble à 80°C ⁽¹⁾ attaque ralentie si [H ₂ SO ₄] > 20% ⁽²⁾	inerte ⁽²⁾
Ni	soluble ⁽²⁾	Soluble dès la température ambiante ⁽²⁾
Cu	soluble ⁽²⁾	Soluble dès la température ambiante ⁽²⁾
Au	inerte ⁽²⁾	inerte ^(3,2)

Tableau 14. Influence des acides sur les métaux du plot
⁽¹⁾[BEC98], ⁽²⁾ [WAL91], ⁽³⁾ [DUL96]

Pour valider ces résultats théoriques sur ce produit, des puces ont été soumises à différentes attaques chimiques et leur impact sur les plots a été évalué. Quelques résultats sont présentés dans la figure 85.

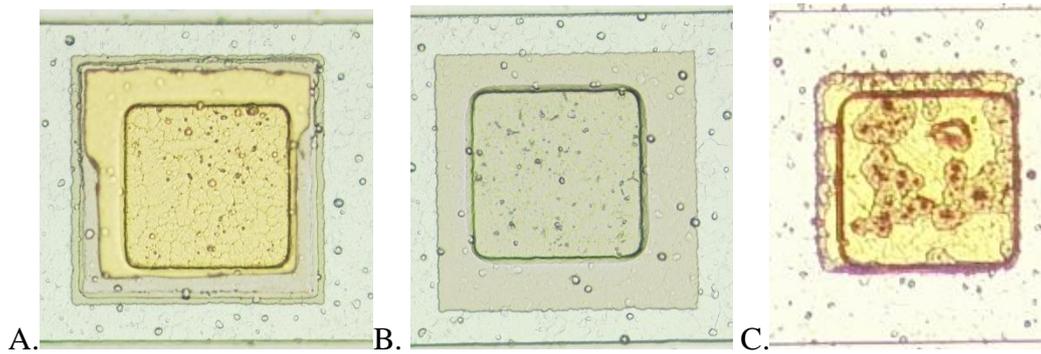


Figure 85: Résultats après 5 minutes d'attaque :
 A. Acide nitrique fumant et sulfurique à 80°C
 B. Acide nitrique fumant seul à 80°C
 C. Acide sulfurique seul à 80°C

Les essais sont en concordance avec les données tirées de la bibliographie et montrent qu'**aucune solution comprenant de l'acide sulfurique et/ou de l'acide nitrique ne permet de préserver la totalité du plot de contact**. Ces essais ont aussi validé que l'utilisation de **l'acide nitrique seul** retire les couches de nickel, de cuivre mais **conserve intègre la couche de titane** (fig. 86).

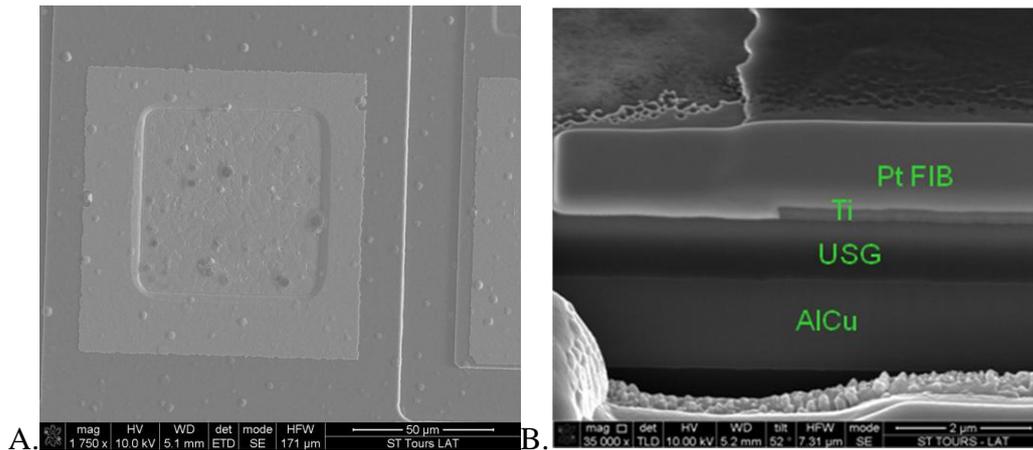


Figure 86: Après attaque à l'acide nitrique fumant à 80°C

Ainsi, en utilisant une solution d'attaque avec de l'acide nitrique fumant seul à 80°C pour retirer la résine de boîtier, certaines couches du plot sont retirées, mais le contact électrique est préservé et permet la mesure électrique du produit.

Pour limiter le temps d'attaque et assurer la conservation des flancs du boîtier, il est possible de réaliser une **pré-ouverture du boîtier**. Cette pré-décapsulation, non obligatoire, peut être réalisée par gravure laser ou polissage mécanique local. L'approche mécanique est plus longue à mettre en place que la gravure laser. Par conséquent, le laser a été choisi pour réaliser cette pré-ouverture. Des essais de décapsulation de boîtier en combinant une première **préparation au laser** et une attaque chimique à l'acide nitrique seul ont donc été réalisés.

Les résultats confirment la **seule présence du titane en surface** de puce et les tests électriques en radiofréquence ont pu être réalisés sur une dizaine de pièces, validant ainsi la méthode de préparation d'échantillon pour conserver la testabilité du produit.

Si cette méthode répond au besoin de cette étude spécifique, elle est cependant limitée car elle ne permet pas de conserver l'intégrité physique de tout le plot de contact.

4.4.2 Une solution possible sans chimie humide ?

Pour préserver l'intégralité du plot, une autre approche a été évaluée : la **gravure sèche**. L'avantage de la gravure sèche sur l'attaque chimique humide est sa **bonne sélectivité entre la résine epoxy du boîtier et les métallisations**. En effet, les métallisations ne sont sensibles qu'aux gaz chlorés non utilisés pour le retrait de l'epoxy.

Néanmoins, la gravure sèche par RIE utilise des mouvements de charges qui pourraient générer des **artéfacts électriques** et ne pas conserver l'intégrité électrique du composant. En effet, l'équipement de gravure sèche par RIE, par son principe, génère en surface de puce une accumulation d'électrons qui a pour effet d'accroître l'attaque des ions.

Dans notre cas d'étude, chacun des plots de contact va accumuler une certaine quantité de charges en surface. Les plots connectés à la métallisation M2 ont une surface largement plus grande que les plots de la métallisation M1 (fig. 78), ce qui

implique que la quantité de charges accumulée par les plots M1 est différente de celle accumulée par les plots M2. Ceci générerait une différence de potentiel entre les plots et donc entre les deux niveaux de métallisation. Avec une forte différence de potentiel, la tension de claquage du diélectrique peut être atteinte, ce qui peut endommager le diélectrique menant à un court-circuit des deux niveaux de métallisation. Ce phénomène a été expliqué dans diverses publications [ACK01][HAR98][WAN04] et la **différence de tailles des plots a été validée comme un facteur responsable de ce dommage** [WAN04].

Afin de s'assurer de cette théorie sur notre structure, nous avons lancé ces essais. Le procédé de gravure sèche est global et long. Pour obtenir une ouverture localisée et réduire le temps de préparation, une **pré-décapsulation du boîtier** est donc nécessaire. Elle peut être réalisée par polissage mécanique localisé ou par gravure laser, dans les deux cas sans atteindre la puce. Le laser est toutefois plus rapide, et il n'est pas nécessaire de maintenir l'échantillon pendant la préparation. On ne génère alors pas de contrainte mécanique dans les billes de soudure. Le *Sesame-1000* a été utilisé pour la pré-ouverture du boîtier au laser et les paramètres de décapsulation ont été choisis en s'aidant de l'étude préliminaire réalisée en DRT [AUB08]. Ces paramètres sont indiqués dans le tableau 15.

	Puissance	Fréquence Q-switch	Vitesse de marquage	Type de balayage
Prog	60%	11kHz	550mm/s	3x60° espacés de 20µm

Tableau 15. Les paramètres laser utilisés pour le boîtier BGA

La figure 87 montre le composant après décapsulation laser.

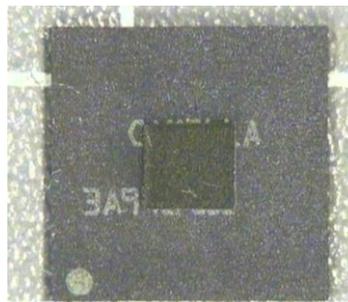


Figure 87: Pré-ouverture du composant par gravure laser

Pour finaliser la décapsulation, à la place de la chimie humide, la gravure sèche a été évaluée.

Comme il a été détaillé dans l'étude de la partie 2 de ce chapitre, l'attaque par voie sèche se fait de manière standard en deux parties :

- la première en utilisant un mélange de CF_4 et d' O_2 pour retirer de manière efficace la résine (de l'ordre de 100µm/h)
- l'autre en utilisant de l'oxygène pur pour atteindre la puce et préserver la passivation qui pourrait être gravée par le gaz fluoré.

Une telle décapsulation donne accès aux plots avec un état de surface très propre (fig. 88). Cependant, comme la bibliographie le mentionnait, cette préparation

a généré une dégradation de la fonctionnalité électrique du composant. Après décapsulation, les **deux niveaux de métallisation**, normalement isolés, sont **court-circuités**.

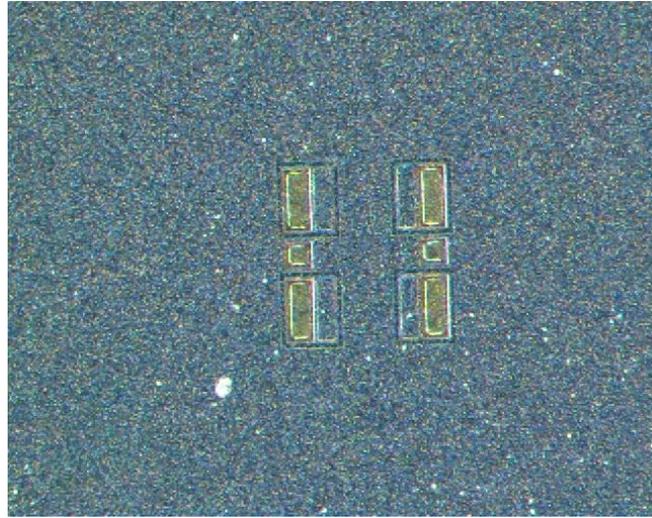


Figure 88: *Résultat après décapsulation au laser puis au plasma*

De manière à éviter ce phénomène, la plupart des solutions proposées dans la littérature consistent à modifier la structure du produit ce qui n'est pas envisageable dans notre cas d'étude.

Pour réduire ces phénomènes, la seule solution serait de connecter au même potentiel les deux métallisations pour éviter le passage de courant par le diélectrique. La puce étant encapsulée, la mise au même potentiel des deux métallisations ne peut se faire que par l'extérieur c'est-à-dire par les billes de soudure du boîtier.

Différents essais ont été réalisés en court-circuitant toutes les billes de soudure entre elles et en les connectant à l'électrode basse de la chambre du plasma. Différents maintiens d'échantillon ont donc été évalués (appui mécanique des billes sur une plaque en aluminium, soudure de toutes les billes, laque d'argent) mais aucun ne s'est révélé efficace. Dans chaque configuration, le composant était défaillant après décapsulation. Cela provient probablement de la structure du boîtier, puisqu'en raison des connexions complexes à l'intérieur de la carte imprimée du BGA, le contact entre les métallisations et l'électrode de la chambre n'est pas direct.

En raison de la structure de la puce, **aucune solution** n'a donc été trouvée aujourd'hui **pour empêcher ces phénomènes de claquage du diélectrique**. Cette méthode par gravure sèche n'est donc pas applicable pour la décapsulation de ce produit.

4.5 Synthèse de l'étude

Aujourd'hui, **aucune méthode n'a été trouvée permettant de décapsuler le produit de cette étude sans endommager les plots de contact** et en conservant l'intégrité électrique du produit.

Deux difficultés ont été rencontrées.

La première complexité de la préparation vient des matériaux constituant ces plots. **Les acides utilisés pour la décapsulation de boîtier attaquent l'un ou l'autre des matériaux** empêchant de conserver l'intégrité du plot par voie chimique humide. De manière standard, les plots de contact sont en aluminium, c'est pourquoi les attaques chimiques de retrait de résine ne créent pas de difficulté.

La seconde difficulté est due à la trop grande sensibilité du composant aux **décharges électrostatiques** qui empêche l'utilisation de la gravure plasma pour la finition de l'ouverture du boîtier.

Pour ce cas d'étude, la solution retenue a été de proposer une préparation combinant la **gravure laser et une finition en chimie humide avec de l'acide nitrique fumant seul**. Cette méthode **ne garde pas l'intégrité de tout le plot** mais permet de conserver une bonne prise de contact sur la couche de titane restante et donne la possibilité de réaliser les tests électrique en RF. Cette technique peut s'appliquer aussi bien aux composants montés sur carte qu'aux produits seuls.

L'étude montre la difficulté de décapsuler des produits avec des plots de contact en TiNiCuAu. On devrait retrouver la **même difficulté** de décapsulation que dans cette étude pour les produits comportant des **plots en TiNiAu** puisque le nickel est gravé par les acides de décapsulation de boîtier. Une seule technologie en boîtier qualifiée à ST-Tours utilise ces plots de contact (TiNiAu). Il s'agit des technologies BCB/Cuivre étudiées en première partie de ce chapitre. Si la présence de ces plots n'a pas été discutée dans la partie 2 c'est qu'elle n'a pas posé de problème pendant la préparation. En effet, la chimie humide n'a pu être utilisée en raison de la présence de BCB et la méthode combinant le laser et le plasma n'a généré aucun problème de claquage de diélectrique. Cela valide que la solution combinant le **laser et le plasma** peut être utilisée pour les technologies comportant des plots de contact en TiNi(Cu)Au, **si les puces ne sont pas sensibles aux phénomènes de charges dans le plasma**.

Cette difficulté de préparation impacte directement la méthodologie standard dans deux situations :

- Lorsqu'après la question Q6, une ouverture par chimie humide est nécessaire
- Lorsqu'après la question Q7, une approche par ouverture chimique localisée est nécessaire.

Dans ces 2 cas, dès lors que les plots de contacts sont en TiNi(Cu)Au, l'ouverture du boîtier combinant le laser et l'ouverture plasma devra être évaluée sur la technologie considérée, pour s'affranchir des possibles claquages de diélectrique.

Si cette approche n'est pas concluante, alors la combinaison de l'ouverture au laser en finissant par une attaque à l'acide nitrique fumant pourra être utilisée. Cette

méthode, ne conserve pas la totalité du plot mais garde l'intégrité électrique du produit. Ainsi, des modifications sont à apporter à la méthodologie standard, et celles-ci sont présentées dans le chapitre 3.

Enfin, un équipement de gravure sèche nouvellement apparu sur le marché réalise la gravure sèche non pas par RIE mais par ICP (inductive coupled plasma). Cette technique semble réduire les effets de charges durant le procédé. Il sera donc intéressant d'évaluer cette technique pour la décapsulation de boîtier plastique de technologies avec des plots en TiNi(Cu)Au endommagés jusque-là par le plasma RIE.

La modification des matériaux utilisés sur une puce engendre de nouvelles difficultés en préparation d'échantillon.

Jusqu'à aujourd'hui, les métaux utilisés pour les plots de contacts de produits discrets ne réagissaient pas avec les acides de décapsulation de boîtier. Cependant, les technologies évoluant, les plots ne sont pas constitués des mêmes matériaux et ces changements peuvent se révéler critiques pour les analyses de défaillance.

Pour des composants en boîtier contenant des plots de contacts en TiNi(Cu)Au, la décapsulation standard endommage le produit.

Deux solutions sont proposées. La première qui conserve l'intégrité de tout le plot combine la gravure laser pour se rapprocher de la puce et la gravure sèche pour atteindre la puce. Cette méthode ne s'applique que pour des produits peu sensibles aux effets de charge du plasma.

Pour les produits sensibles à ces effets de charge, la solution proposée est un compromis puisqu'elle ne conserve pas la totalité du plot mais conserve l'intégrité électrique. Il s'agit alors de réaliser une pré-ouverture du boîtier avec un laser et d'atteindre la puce avec de l'acide nitrique fumant.

5 Nouveaux produits: Analyse de défaillance de micro-batteries EnFilm™

Pour aider au développement et à la mise au point d'une structure optimisée sur les deux micro-batteries en cours de développement à ST-Tours, des analyses de défaillance sont requises. Elles permettent de révéler d'éventuels défauts de fabrication ou faiblesses de manière à faire évoluer les procédés de fabrication et ainsi optimiser la structure du produit final. Ces produits s'éloignent de la micro-électronique standard. Pour cette raison, une étude approfondie a été nécessaire de manière à développer et assurer la capacité du laboratoire à réaliser des analyses de défaillance sur ces produits.

Pour présenter le travail réalisé, une introduction aux micro-batteries sera d'abord donnée en détaillant le principe de fonctionnement général, les structures technologiques spécifiques aux deux micro-batteries et les grandeurs électriques caractéristiques. Les informations technologiques de ces deux micro-batteries EnFilm™ seront présentés dans les limites de confidentialité autorisées dans le cadre du développement du produit.

Dans un deuxième temps, nous nous intéresserons aux défauts et mécanismes de défaillance susceptibles de se produire au sein de ces micro-batteries. L'étude permettant d'évaluer la capacité à réaliser des analyses de défaillance sur ces produits sera alors présentée, en montrant la méthodologie suivie ainsi que les résultats obtenus.

5.1 Introduction aux micro-batteries

Les avancées technologiques de la microélectronique permettent de créer des systèmes de plus en plus petits et performants. Il existe cependant un obstacle à la miniaturisation complète de ces systèmes : les sources d'énergie. Deux types de micro-batteries sont actuellement en développement chez ST-Tours pour répondre à ce besoin: les micro-batteries Enfilm™ HighTemp et les micro-batteries Enfilm™ HighCap. Ces deux micro-batteries touchent des champs d'application différents que nous détaillons ci-après par des exemples.

Outre la source principale d'énergie (batterie lithium-ion), les téléphones portables, et plus globalement l'électronique nomade, nécessitent une source d'énergie secondaire de faible volume. Elle permet l'alimentation de l'horloge interne lorsque la batterie principale est déchargée ou retirée de l'appareil. Actuellement, cette application est gérée par une pile-bouton rapportée sur le circuit imprimé. Ces piles-boutons ont une capacité de 1mAh ce qui est surdimensionné pour l'application qui ne requiert qu'un très faible courant (quelques centaines de nA). De plus, ces piles ne supportent pas l'étape de traitement thermique utilisée pour souder les composants sur carte (solder reflow). Ces piles sont donc assemblées après l'ensemble des composants à l'aide d'un clip (fig. 89), étape supplémentaire qui augmente le coût d'assemblage.

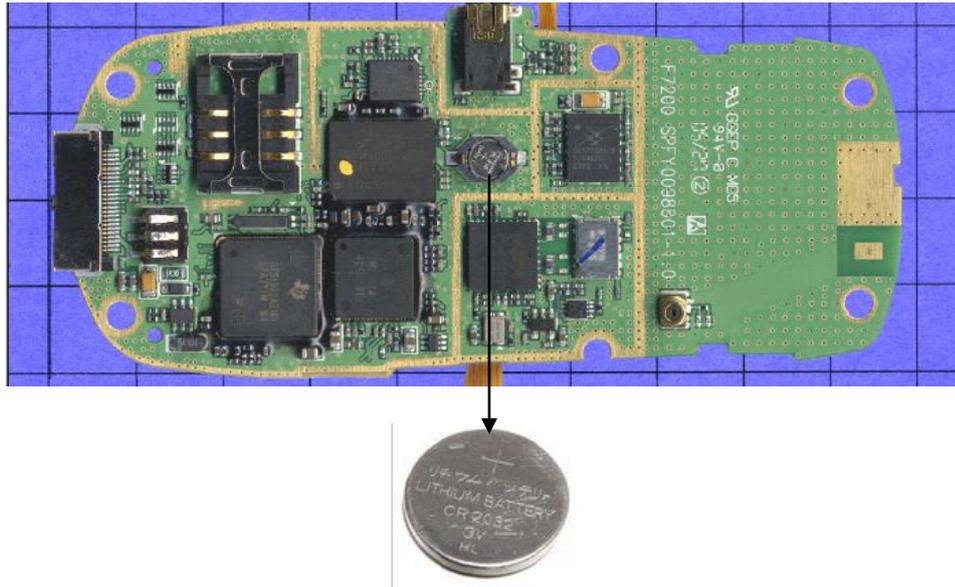


Figure 89: Pile bouton avec clip sur une carte de téléphone

Dans un objectif d'industrialisation du procédé d'assemblage, des recherches se sont portées sur les micro-batteries. Les micro-batteries Enfilm™ Hightemp sont développées pour répondre à ce type d'application en offrant une miniaturisation du composant d'alimentation, et en permettant son intégration sur la carte imprimée à la même étape que celle des autres composants.

Les micro-batteries Enfilm™ HighCap ont une application différente. Elles fournissent un courant plus important, de l'ordre du mA, et de par leur structure ne supportent pas l'étape de brasage. Leur intérêt vient de leur géométrie. En effet, ces micro-batteries sont très fines (moins de $100\mu\text{m}$) et flexibles. Elles vont donc pouvoir s'intégrer dans des étiquettes électroniques RFID, ou des cartes à puce (fig.90). Elles pourront aussi être utilisées dans des applications ultra-portables du domaine médical, par exemple, telles que les aides auditives, les pompes à insuline automatiques et les systèmes de surveillance médicale portables.



Figure 90: Exemple de carte à mot de passe unique utilisant une micro-batterie

5.1.1 Fonctionnement et structure générale d'une micro-batterie

Un générateur électrochimique est un système capable de **transformer l'énergie chimique**, générée par des réactions électrochimiques, **en énergie**

électrique. Si le système ne peut que transformer l'énergie chimique en énergie électrique c'est une pile. Si le système permet aussi la réaction inverse c'est un accumulateur, communément appelé par abus de langage « batterie ». De manière rigoureuse, une batterie est un groupement série ou parallèle de plusieurs accumulateurs [LEV09]. Le terme micro-batterie, que nous utiliserons dans ce mémoire fait donc référence à un micro-accumulateur comportant une surface active de quelques micromètres d'épaisseur dont les différents éléments sont préparés par des techniques spécifiques d'élaboration de couches minces.

Un générateur électrochimique est formé de **deux électrodes séparées par un électrolyte** qui est à la fois un conducteur ionique et un isolant électronique (fig.91). Des **collecteurs de courant** se trouvent au niveau de chaque électrode pour réaliser les contacts extérieurs.

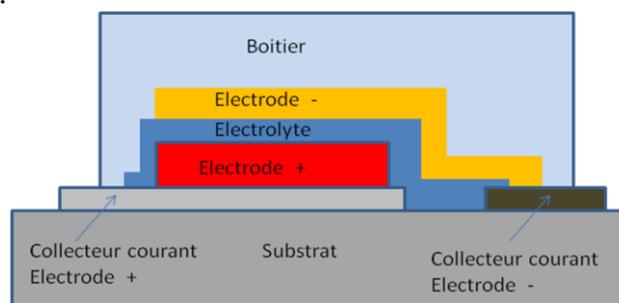


Figure 91: Structure générale d'une micro-batterie

Historiquement, les premières micro-batteries envisagées utilisent une électrode négative de **lithium métallique**. C'est ce qui est utilisé pour les micro-batteries Enfilm™ High Cap. Cependant, les électrodes en lithium métallique sont endommagées lors de l'étape de refusion utilisée pour l'assemblage des composants sur circuit imprimé. Cette étape atteint des températures de 260°C, tandis que la température de fusion du lithium est de 181°C. Un autre type d'électrode négative doit donc être utilisé dans le cas des micro-batteries Enfilm™ HighTemp.

De nouveaux matériaux de l'électrode négative ont alors été développés pour contrer ce problème, en se tournant vers **des matériaux d'intercalation**. Ces matériaux ont la particularité de former un réseau structural permettant l'insertion réversible de lithium au sein même de leur structure. Tout matériau pouvant accueillir en son sein des ions lithium peut alors être à la base d'un accumulateur Li-ion. Les deux électrodes (la négative comme la positive) peuvent utiliser ce type de matériaux et elles ont alors un rôle de réservoir de lithium. Les matériaux utilisés pour ces couches sont ainsi capables d'intercaler (et de désintercaler) des ions lithium dans leur structure permettant le mouvement d'ions lithium de l'une à l'autre des électrodes.

Pour l'électrode positive, on peut retrouver du V_2O_5 , du $LiCoO_2$, du TiS_2 ... L'électrode négative peut être en nitrure ($SiTON$, Zn_3N_2 , Sn_3N_4), ou en alliage de Li avec du Si, Al, Ge, Sn... [LEV09] Enfin, l'électrolyte est solide. Il est couramment en LiPON (contenant du lithium, du phosphore, de l'oxygène et de l'azote) dans lequel peut être ajouté du bore, ou du silicium pour améliorer ses performances. [LEV09] La figure 92 présente le principe de fonctionnement d'une telle micro-batterie.

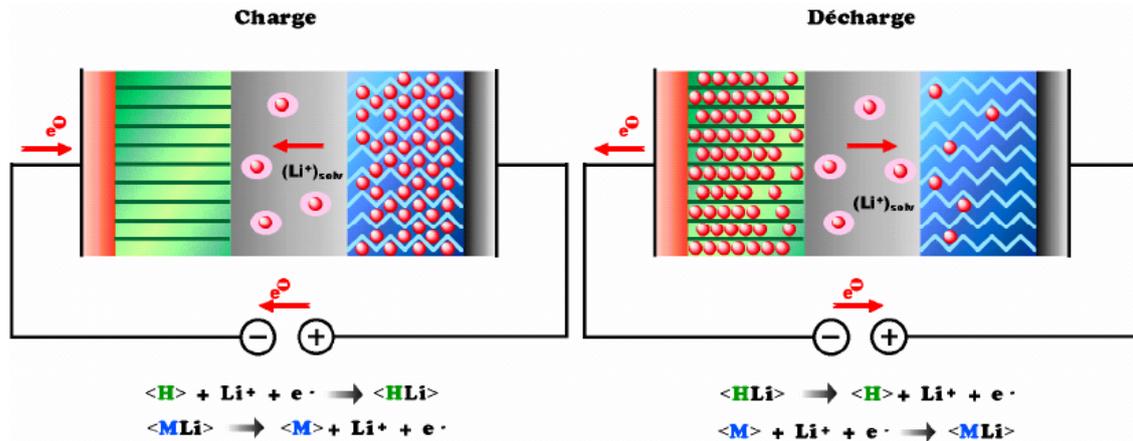
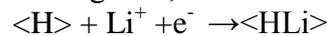


Figure 92: Principe de fonctionnement d'une micro-batterie au Li-ion

Pendant la **charge**, une différence de potentiels est appliquée entre les électrodes négative et positive, générant l'**oxydation** du matériau d'**électrode positive**. Dans le cas d'une micro-batterie au lithium, les ions lithium libérés par l'électrode positive vont traverser l'électrolyte solide et rejoindre l'électrode négative. Les électrons libérés vont rejoindre l'électrode négative par le circuit extérieur. Les ions lithium vont s'intercaler avec les électrons dans le matériau de l'électrode négative.

Durant la charge, à l'électrode négative, la réaction suivante se produit :

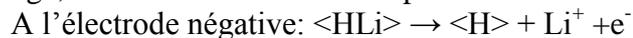


A l'électrode positive, la réaction est :



Lors de la **décharge**, la réaction inverse est imposée. **L'électrode négative** est le siège d'une réaction d'**oxydation** conduisant à une libération d'électrons et d'ions Li^+ . Les ions traversent l'électrolyte pour s'intercaler dans le matériau de l'électrode positive. Les électrons libérés dans l'électrode négative transitent alors par un circuit extérieur pour participer à la **réduction** du matériau de l'**électrode positive**. Ce mouvement d'électrons peut alors permettre d'alimenter un système extérieur.

Durant la décharge, les réactions suivantes se produisent :



La tension de la batterie dépend alors directement du couple de matériaux utilisés pour les électrodes négative et positive. A titre d'exemple, un couple Li/TiS_2 fournira une tension de 2.5V alors que le couple $Li/LiCoO_2$ ou $Li/LiMn_2O_4$ fournira une tension de l'ordre de 4V. [PEC10]

5.1.2 Présentation technologique des micro-batteries EnFilm™

Comme indiqué dans la partie précédente, une micro-batterie est constituée d'une électrode négative, d'une électrode positive et d'un électrolyte. Ces trois couches sont superposées et sont déposées sur un substrat.

5.1.2.1 Les micro-batteries EnFilm™ HighTemp

Pour les micro-batteries EnFilm™ HighTemp, le **substrat** est en **silicium** et se rapproche de ce fait des produits de la microélectronique. L'ensemble de la fabrication est réalisé sur plaquette comme pour la microélectronique standard. L'**électrolyte** est en **LiPON™** (contenant du lithium, du phosphore, de l'oxygène et de l'azote). A chaque électrode, des collecteurs de courant sont utilisés pour permettre la prise de contact et le positionnement des fils avant encapsulation. En surface de puce, une couche de passivation est déposée pour protéger les couches actives de l'environnement. Les matériaux utilisés pour les électrodes, les collecteurs de courant et la passivation sont des données confidentielles.

L'ensemble est encapsulé dans un boîtier plastique, « land grid array » (LGA) (fig.93). La structure d'un tel boîtier est la même que celle d'un boîtier BGA avec des plots de contacts à la place des billes de soudure à la périphérie du boîtier.

En raison de la similitude avec les procédés de la microélectronique sur substrat de silicium, nous avons fait le choix, pour la suite, de parler de « puce » pour nommer les micro-batteries EnFilm™ HighTemp non encapsulées.

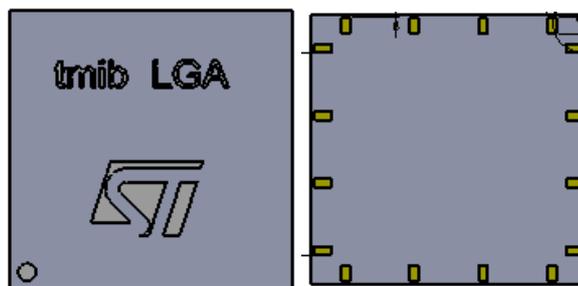


Figure 93: Boîtier LGA

5.1.2.2 Les micro-batteries EnFilm™ HighCap

La structure des micro-batteries Enfilm™ HighCap est plus éloignée de la microélectronique standard. Tout d'abord le **substrat** utilisé n'est plus du silicium mais du **Mica**, un minéral du groupe des silicates comportant majoritairement du silicate d'aluminium et de potassium. On retrouve néanmoins l'empilement standard de la micro-batterie avec les collecteurs de courant, les électrodes, l'électrolyte et l'encapsulation. L'**électrode positive** est en LiCoO_2 , et l'**électrode négative** en **Li métallique**. L'**électrolyte** est en **LiPON™**. L'ensemble est protégé par une passivation et encapsulé par une nouvelle couche de Mica. Une micro-batterie Enfilm™ HighCap est montrée en exemple en figure 94.

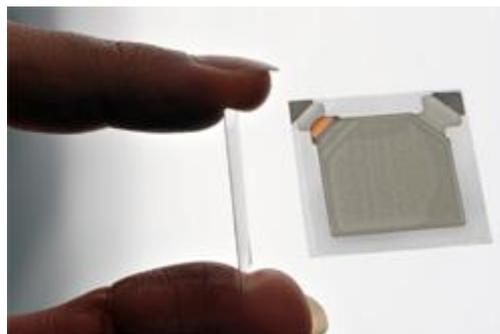


Figure 94: Micro-batterie Enfilm™ HighCap de dimension 25,4mm x 25,4mm

5.1.3 Les types de caractérisation électrique pour l'analyse de défaillance

La première étape clé de toute analyse de défaillance consiste à caractériser et à bien comprendre la nature de la défaillance électrique. Il faut donc connaître les moyens de tests utilisés pour caractériser les micro-batteries. Pour la bonne compréhension des paragraphes à venir, la définition des grandeurs électriques des micro-batteries utilisées par la suite sont explicitées.

Les performances d'un générateur électrochimique sont évaluées à partir des grandeurs physiques suivantes : sa **capacité C**, sa **résistance interne R**, sa **tension à vide**.

La **capacité** d'une batterie correspond à la quantité de charges qu'elle va pouvoir fournir durant sa décharge. Elle est définie pour un courant de décharge donné et s'exprime en ampère-heure (Ah). Une batterie spécifiée avec une capacité nominale de 2 Ah va pouvoir débiter 2 A pendant une heure ou 0,5A pendant 4h. Cette grandeur dépend des conditions de décharge (courant et profondeur de décharge, température) et de l'âge de la batterie.

La **résistance interne** est la somme de la résistance ionique de l'électrolyte, des résistances des matériaux d'électrodes, des collecteurs de courant et des interfaces électrodes/collecteurs de courant et électrodes/électrolyte.

Enfin, l'**open circuit voltage (OCV)** est la tension à vide de la batterie. Comme la capacité et la résistance interne, il s'agit d'une grandeur caractéristique de la batterie qui permet de déterminer « l'état de charge » de cette dernière.

Deux types de tests peuvent être réalisés pour caractériser les micro-batteries : le cyclage de la micro-batterie (charge et décharge) et la spectroscopie d'impédance. Ces deux tests sont détaillés ci-après.

5.1.3.1 Analyses des courbes de charge et de décharge

Le fonctionnement de la micro-batterie est évalué en réalisant des cycles de charge et de décharge.

La courbe de décharge est représentée par l'évolution de la tension de la batterie en fonction du temps, au cours d'une décharge à courant constant. La figure 95 en est un exemple.

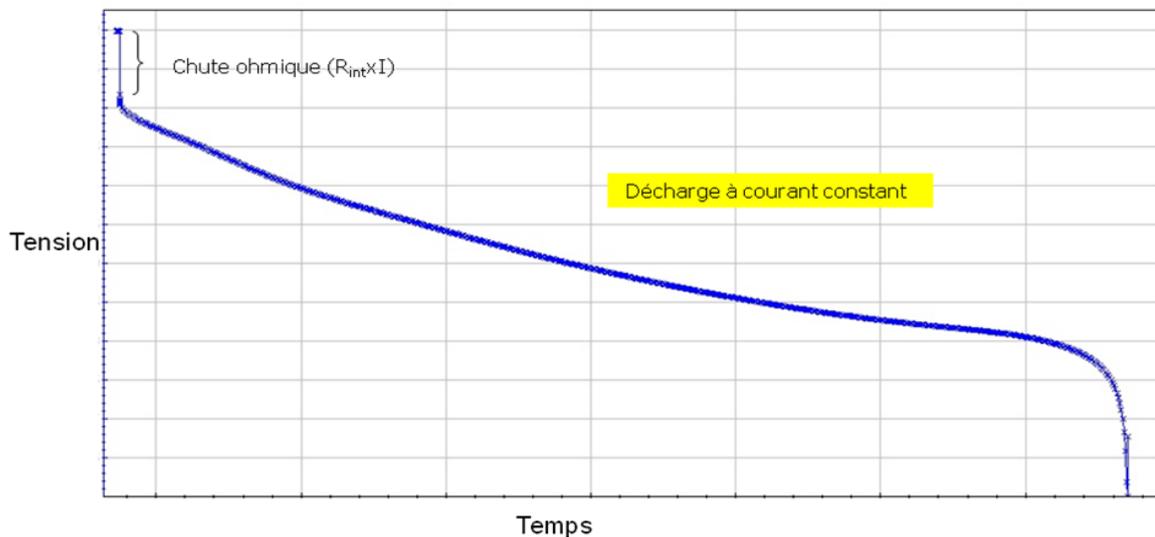


Figure 95: Exemple de courbe de décharge d'une micro-batterie à courant constant : tension vs temps

La courbe de charge est mesurée en appliquant une tension ou un courant constant aux bornes de la micro-batterie et en suivant le courant ou la tension à ses bornes. La figure 96 montre le cas d'une charge réalisée à tension constante. Le courant est mesuré tout au long de la charge. La capacité en est déduite en calculant l'intégrale du courant sur le temps de charge.

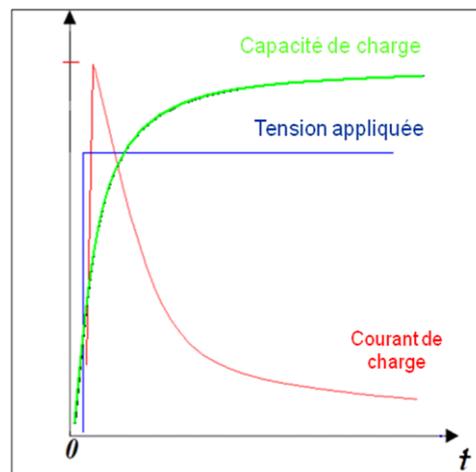


Figure 96: Courbe de charge d'une micro-batterie (échelle arbitraire pour des raisons de confidentialité)

Suite à la caractérisation en charge, il est possible de révéler deux dysfonctionnements de la micro-batterie : une **capacité anormale** ou un **courant de fuite élevé**.

La capacité obtenue au cours de la charge est une capacité « hypothétique ». En effet, on suppose alors que tout le courant rentrant dans la micro-batterie est

utilisée pour charger la micro-batterie. Néanmoins, s'il y a un courant de fuite (résistance en parallèle de la micro-batterie par exemple), tout le courant n'est pas utilisé à la charge. Ainsi, si la capacité obtenue est supérieure à la capacité possible avec la quantité de lithium contenue dans la micro-batterie, une anomalie est relevée. La valeur de capacité est validée au cours de la décharge.

En fin de charge, un courant de fuite est toujours présent et est dépendant de la structure de la micro-batterie. Pour une structure donnée, si le courant en fin de charge est supérieure à la normale, cela révèle la présence d'un passage de courant parasite.

Grâce à la **caractérisation en décharge**, il est possible de **valider la capacité de la micro-batterie**. Le rendement de la micro-batterie est calculée par le ratio de la capacité obtenue à la décharge et celle obtenue en charge. Une différence de capacité va révéler la présence d'un courant de fuite dans la micro-batterie.

5.1.3.2 Spectroscopie d'impédance électrochimique

La **spectroscopie d'impédance électrochimique** (EIS, pour electrochemical impedance spectroscopy) est la deuxième technique permettant de caractériser les micro-batteries. Elle permet de réaliser **l'étude dynamique des micro-batteries**. Indirectement, elle donne des indications sur les **caractéristiques internes des batteries** comme le nombre d'interfaces, les processus de transport de matière et charges, etc.

La technique repose sur la mesure d'une fonction de transfert suite à la perturbation volontaire du système électrochimique autour d'un point d'équilibre. Lors du test, la micro-batterie est soumise à une perturbation électrique $x(t)$ sinusoïdale et répond en émettant un signal $y(t)$. La perturbation imposée est, dans notre cas, une tension sinusoïdale $U(t)$. La réponse en courant du système $I(t)$ est mesurée (fig.97). [JOR07] L'impédance électrochimique se définit alors comme étant le nombre complexe $Z(2\pi f)$ résultant du rapport :

$$Z(2\pi f) = U(t) / I(t)$$

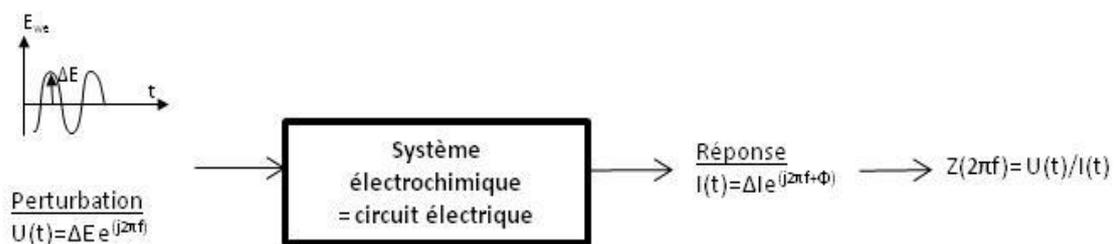


Figure 97: Principe de l'EIS

L'évolution de cette impédance avec la fréquence est étudiée dans le plan de Nyquist et une modélisation du comportement de la micro-batterie en fréquence est donnée en figure 98. On retrouve cette modélisation dans divers articles sur les micro-batteries solides [JOS06] [IRY05].

Grâce à ce spectre, il est possible d'analyser le comportement des différentes parties de la micro-batterie. R_o correspond à la résistance des fils et des collecteurs de courant. Le plus grand demi-cercle correspond à la réponse d'une capacité en parallèle

avec une résistance et représente la conduction de Li^+ dans le LiPON. La fréquence de relaxation est alors typique au LiPON. Le second demi-cercle représente les transferts de charges aux interfaces électrodes/électrolyte. Selon les matériaux employés pour les électrodes, il est possible de distinguer chacune des deux interfaces (électrolyte/électrode positive, électrolyte/électrode négative). Deux demi-cercles peuvent alors être présents. Les fréquences de relaxation respectives sont alors fonction des matériaux des deux électrodes.

A plus basse fréquence, la droite avec une pente à 45° correspond à la diffusion de Li^+ dans les électrodes. Lorsque les ions Li^+ ont atteint les électrodes, un équilibre doit s'installer au sein des électrodes. Ce processus est lent et est observé à plusieurs fréquences. Elle est connue sous le nom de droite de Warburg qui représente la réponse en fréquence de ce phénomène. Elle a été observée en pratique puis modélisée par l'impédance de Warburg suivant l'équation [GAM12] :

$$Z_W = \sigma(\omega)^{-1/2} (1-j)$$

Avec σ , la constante de Warburg et ω , la fréquence. La constante de Warburg peut alors être obtenue à l'aide d'une formule plus complexe :

$$\sigma = \frac{RT}{n^2 F^2 A \sqrt{2}} \left(\frac{1}{C_O^* \sqrt{D_O}} + \frac{1}{C_R^* \sqrt{D_R}} \right)$$

Où R est la constante des gaz parfaits, T la température, F la constante de Faraday, n le nombre d'électrons impliqués, D le coefficient de diffusion des espèces, C^* la concentration des espèces dans le volume, A la surface de l'électrode. L'indice O correspond à l'oxydant et R au réducteur.

Enfin, la dernière droite est typique des structures à couches minces qui contiennent une quantité limitée de substance électro-active. Cela permet de rendre compte de l'accumulation des ions dans la faible épaisseur de l'électrode. En basses fréquences, le circuit est alors équivalent à une capacité parfaite. [JOS06]IRY05]

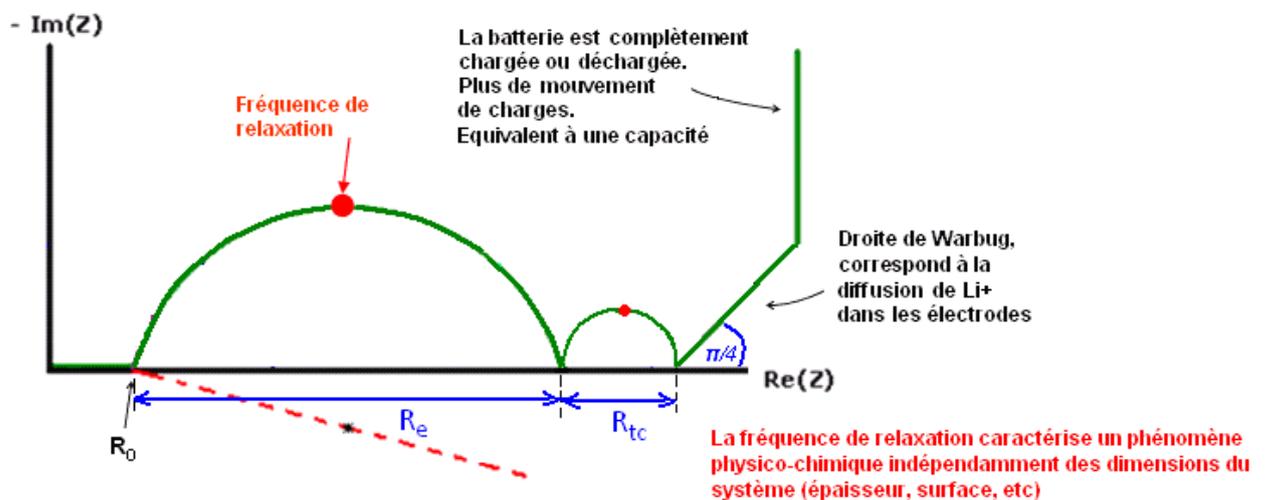


Figure 98: Modélisation du spectre d'impédance d'une micro-batterie dans le plan de Nyquist [IRY05]

Il est possible de modéliser la micro-batterie par un circuit électrique équivalent. Les micro-batteries étudiées sont modélisées comme dans la figure 99 [IRY05][JOS06].

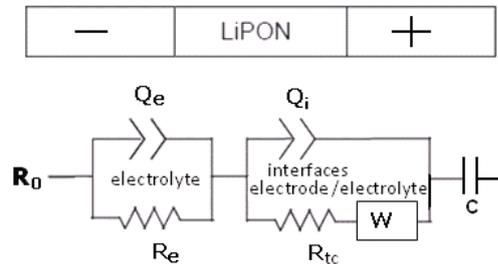


Figure 99: Modélisation de la micro-batterie

On retrouve alors R_o (résistance des fils et des collecteurs de courant). Les paramètres avec les indices e sont ceux de l'électrolyte avec une résistance R_e et Q_e une pseudo capacité (capacité non idéale) appelée « constant phase element » (CPE). R_{tc} est la résistance de transfert de charges aux interfaces électrodes/électrolyte. Q_i est la capacité qui apparaît à l'interface électrode/électrolyte en raison de l'accumulation de charges dans cette zone générée par le signal électrique. Elle est appelée capacité de double couche. W caractérise la diffusion de Li^+ dans l'électrode positive. Enfin C est la capacité équivalente au processus d'accumulation des charges dans les matériaux hôtes de l'électrode négative ou de l'électrode positive.

Lors d'une mesure d'impédance sur une micro-batterie, il est donc possible de déduire certaines de ces valeurs par lecture directe du spectre (R_o , R_{tc} , R_e) (fig.98). **Lorsque la micro-batterie évolue physiquement, ce spectre est modifié** mais l'interprétation de ce nouveau spectre est complexe et la cause directe de cette modification est souvent difficile à déterminer.

L'un des **avantages de cette technique** de caractérisation est de **ne pas modifier la micro-batterie** car le signal perturbateur est choisi de manière à garder quasi- stable l'état du système avec une amplitude du signal faible par rapport aux valeurs de tension nominale (quelques mV vs des V). Le spectre d'impédance est cependant **dépendant du niveau de charge** de la micro-batterie. Les processus de transfert de charges aux interfaces électrode/électrolyte ainsi qu'à l'intérieur des électrodes participent à la réponse de la micro-batterie au signal perturbateur et donc impactent le spectre d'impédance. Si cela complexifie l'interprétation c'est aussi ce qui en fait la **seule technique permettant de voir les procédés de transfert de charge**.

5.2 Défauts et mécanismes de défaillance possibles

La technologie des micro-batteries est en développement. Elle évolue en particulier avec les résultats obtenus en analyse. Il n'est donc pas possible, encore aujourd'hui, de déterminer l'ensemble des mécanismes de défaillance du produit final. Les types de défauts générés sont découverts en même temps que les premières analyses sont réalisées et la fabrication est modifiée de manière à éviter ces défauts.

Ainsi, la base de données des défauts possibles se complète au fur et à mesure que le projet de développement du produit avance.

Cette partie s'attache cependant à présenter les défauts et mécanismes de défaillance que les premiers produits et les premières réflexions ont déjà pu identifier. Cette liste bien que non exhaustive donne une première approche des défauts pouvant se produire au cours de la fabrication, et des mécanismes de défaillance décelés en cours d'utilisation, ou lors du stockage de la micro-batterie. Tous peuvent être à l'origine de modifications des caractéristiques électriques de la micro-batterie. Ce sont donc des exemples de défaillances qu'il est nécessaire de pouvoir analyser.

5.2.1 Défauts susceptibles d'apparaître au cours du procédé

Il a été souligné que la fabrication des micro-batteries est différente de celle des produits discrets. La différence réside dans les matériaux à déposer mais les **procédés** eux-mêmes sont relativement **proches de la microélectronique** standard. On retrouve l'utilisation d'un substrat (silicium ou Mica), le dépôt de couches minces, la réalisation des gravures sèches ou humides, qui sont autant de méthodes classiquement employées dans la microélectronique.

On pourra donc retrouver des erreurs de procédé similaires :

- Des mauvais positionnements de couches (mauvais positionnement de masque)
- Des dépôts mal réalisés (couches trop fines, trop épaisses, avec des impuretés)
- Des gravures non correctes (couches trop ou pas assez gravées)

Les modes de défaillances qui en découlent seront directement répercutés dans les caractéristiques électriques de la micro-batterie. Ils sont présentés dans le tableau 16.

L'emploi de **matériaux non classiques pour la microélectronique** va être à l'origine de mécanismes de défaillance non standards.

On peut ainsi citer l'un des plus spécifiques aux micro-batteries : **l'oxydation des couches actives**. Certains des matériaux employés dans les couches actives de la micro-batterie contiennent du lithium qui, de la même façon que les autres métaux alcalins, réagit au contact de l'air et/ou de l'eau. Ces couches de la micro-batterie s'oxydent donc très facilement dans des milieux riches en azote ou en oxygène et ne doivent pas être en contact avec l'air ou l'eau tout au long du procédé. Cela implique qu'aucun nettoyage à l'eau n'est possible, ou encore qu'aucun stockage à l'air ne doit être fait pendant le procédé de fabrication.

Par les premières conclusions d'analyses de défaillance que nous avons réalisées, nous avons pu voir que les zones de la micro-batterie touchées par cette oxydation deviennent inactives. En fonction du positionnement de ces zones « inactives » dans la structure, différents modes de défaillance vont être générés : une résistance interne élevée, le passage de la micro-batterie en circuit ouvert, ou une réduction de la capacité de la micro-batterie (fig. 100).

Cette oxydation des couches peut se produire tout au long du procédé, dès lors que les matériaux sont mis au contact de manière accidentelle d'un environnement riche en azote ou en oxygène.

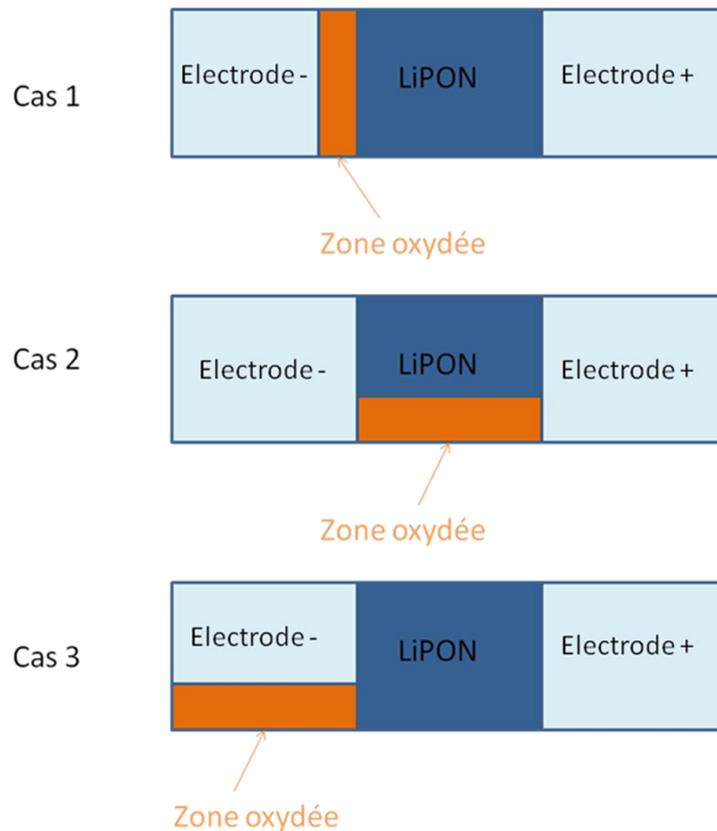


Figure 100: Exemples d'oxydation de couche et de leur impact :
Cas 1 : Circuit ouvert : pas de passage possible pour le lithium
Cas 2 : Résistance interne élevée : le lithium peut moins facilement être transféré d'une électrode à l'autre
Cas 3: Capacité plus faible : moins d'ions lithium peuvent participer à la charge et à la décharge

Cause	Modes de défaillance
Mauvais dépôt	-Modification des caractéristiques de charge et de décharge de la batterie
Mauvais positionnement des couches	-Court-circuit entre les électrodes -Circuit ouvert
Mauvaise gravure	-Court-circuit entre les électrodes -Circuit ouvert -Modification des caractéristiques de charge et de décharge de la batterie
Mécanisme de défaillance	Modes de défaillance
Oxydation des matériaux de la couche active	-Résistance interne élevée -Capacité réduite -Circuit ouvert

Tableau 16. Causes et mécanismes de défaillance des micro-batteries au cours du procédé de fabrication et modes de défaillance associés

5.2.2 Mécanismes de défaillance liés à l'utilisation de la micro-batterie et à son environnement

Au cours de l'utilisation de la micro-batterie, trois causes de défaillances majeures peuvent être générées :

- une **surcharge** : à la charge, une trop forte tension est appliquée entre les deux électrodes. Le LiPON qui agit comme le diélectrique d'une capacité, peut alors être endommagé.
- une **sous-charge** : la batterie est trop fortement déchargée et sa tension descend au-dessous de sa tension minimale. Cela peut endommager le matériau de l'électrode positive si trop de lithium est inséré dans sa structure.
- une **mise en court-circuit** : les électrodes de la micro-batterie sont court-circuitées, ce qui décharge instantanément la micro-batterie. Un courant important traverse alors la micro-batterie pouvant faire fusionner les matériaux.

Les conditions environnementales peuvent aussi dégrader les micro-batteries. Ces micro-batteries peuvent être sensibles au stockage en **humidité** qui peut mener à l'oxydation des couches actives dans le cas d'une mauvaise encapsulation.

La **température** de l'environnement de la micro-batterie peut aussi affecter ses performances. En augmentant la température de l'environnement (à 60°C par exemple), il a été révélé que le phénomène d'autodécharge était accentué générant une réduction irréversible de la capacité. A de plus hautes températures, certains matériaux comme la passivation peuvent être dégradés et leurs propriétés peuvent être modifiées. Enfin si la température varie rapidement (cyclage thermique), des contraintes thermo-mécaniques peuvent être générées entre les couches, menant à des délaminations.

De manière générale, les défaillances électriques que l'on pourra retrouver sur les micro-batteries sont :

- des court-circuits
- des circuits ouverts
- des spectres d'impédance non conformes (résistances internes élevées, réponse d'une interface supplémentaire...)
- des courbes de charge à tension constante non conformes (en particulier courant de charge trop ou pas assez élevé)
- une capacité trop faible

5.3 Evaluation de la méthodologie standard d'analyse et de ses limites

Les matériaux utilisés et le fonctionnement électrique de ces produits étant bien différents de ceux des composants discrets, nous avons dû évaluer si la méthodologie standard d'analyse était applicable à ces nouveaux produits. L'objectif final est de déterminer si la méthodologie standard peut s'appliquer à ces produits, avec quelques modifications, ou bien si une méthodologie complète et séparée doit être créée.

Pour cela, nous avons décidé de lancer une étude consistant à reprendre chaque grande étape de la méthodologie pour évaluer l'impact des techniques classiquement utilisées sur ces produits. Si la méthodologie ou la technique standard ne répondait pas au besoin, nous avons cherché à développer une nouvelle approche. Nous avons ainsi évalué les contrôles non destructifs, les méthodes de caractérisation des défauts, les techniques de localisation et de caractérisations du défaut et les préparations d'échantillon nécessaires pour effectuer chaque étape. Nous avons réalisé cette évaluation à la fois sur les micro-batteries Enfilm™ HighTemp (sur puce et sur puce encapsulée en boîtier plastique) et sur les micro-batteries Enfilm™ HighCap.

5.3.1 Contrôles non destructifs

Les contrôles non destructifs utilisés pour les composants de la microélectronique peuvent être destructifs pour les micro-batteries.

Parmi les techniques classiquement utilisées, nous avons jugé que la **radiographie X**, le **profilomètre optique** et la **microscopie optique** n'étaient **pas plus destructives** sur les micro-batteries que sur les produits électroniques. Ces trois techniques peuvent donc être utilisées pour contrôler les micro-batteries et permettent d'obtenir le même type d'informations que lorsqu'elles sont utilisées sur les produits de la microélectronique.

La précaution majeure qui a été soulevée pour l'ensemble des techniques (et qui reste vraie pour l'ensemble de l'analyse) est de connaître les propriétés électriques du support sur lequel est déposé la micro-batterie. Les équipements dédiés à la microélectronique ont majoritairement des supports d'échantillon métalliques pour limiter les phénomènes de décharges électrostatiques en connectant les broches du composant à la masse. Or, pour les micro-batteries, il est crucial de ne **jamais court-circuiter les électrodes**, et donc de ne pas connecter les contacts du boîtier au même

potentiel. Les contacts de la micro-batterie ne doivent donc pas être posés sur une surface conductrice et le support de l'échantillon doit donc être isolant.

La seule technique non destructive pour la microélectronique qui s'est avérée risquée pour les micro-batteries est la **microscopie acoustique**. Cette technique nécessite de plonger le composant dans l'eau. Des dégradations de l'encapsulation risquent de laisser pénétrer l'eau à l'intérieur de la micro-batterie et de l'endommager. Cette technique doit donc être utilisée avec précaution sur les deux micro-batteries étudiées.

Pour les microbatteries Enfilm™ HighTemp non encapsulées, la microscopie acoustique ne doit pas être utilisée car la passivation utilisée n'isole pas suffisamment les couches actives de l'eau. Lorsque la puce est encapsulée en boîtier, cette technique doit être considérée comme destructive, et réservée aux cas où plusieurs échantillons sont disponibles. La microscopie acoustique sera donc limitée aux cas où la dégradation de la batterie à cette étape ne remet pas en cause la résolution de l'analyse.

Pour les micro-batteries Enfilm™ HighCap, l'encapsulation finale utilisée, le Mica, même intacte, est peu hermétique à l'eau. L'eau s'infiltré dans la micro-batterie par les flancs et la détériore. Nous avons néanmoins étudié des solutions alternatives pour réaliser cette étape de l'analyse. Nous avons ainsi évalué d'autres liquides que l'eau, plus visqueux, qui n'atténuent pas le signal ultrasonique. Nous avons de même évalué des méthodes pour améliorer l'étanchéité de la batterie. Les premiers résultats montrent qu'en utilisant du savon à la place de l'eau, on limite l'endommagement de la micro-batterie. Lié à ceci, nous protégeons les flancs de la micro-batterie à l'aide de silicone. De cette façon, il est possible d'observer la réponse acoustique de la micro-batterie. Par transmission, nous pouvons déceler d'éventuelles délaminations entre les couches. Par réflexion, les résultats obtenus par microscopie acoustique sont aujourd'hui difficilement interprétables. En effet, des matériaux non standards sont utilisés, leur réponse acoustique n'est pas encore connue. Il est donc nécessaire d'en réaliser une étude.

5.3.2 Caractérisation électrique de la défaillance

La méthode de caractérisation électrique de la défaillance est identique sur les deux micro-batteries. Elle consiste aujourd'hui à réaliser, comme expliqué au paragraphe 5.1.3 :

- Un **spectre d'impédance**
- Des **courbes de charge et de décharge**

Ces sollicitations électriques de la micro-batterie ne sont pas réalisées avec les équipements de tests présents classiquement dans les laboratoires d'analyses de défaillance de composants discrets. Seuls les court-circuits et circuits ouverts pourront être mesurés avec un traceur.

Pour les autres modes de défaillance, la réponse des micro-batteries et son évolution en fonction des défauts est encore peu connue. Concernant les résultats de spectroscopie d'impédance, une thèse spécifique à ce sujet vient de commencer et a en particulier pour but d'apprendre à interpréter ces spectres avec précision.

Grâce à la caractérisation de la défaillance par EIS, il est néanmoins déjà possible de donner des hypothèses sur le défaut. On pourra par exemple supposer un défaut au niveau des contacts si la valeur R_o (fig.98) est supérieure à la valeur théorique. De même si la valeur R_e (fig.98) est supérieure à la normale, un défaut au niveau du LiPON sera attendu. L'observation d'un demi-cercle supplémentaire traduira la présence d'une interface supplémentaire dans la micro-batterie. L'analyse des spectres EIS est donc primordiale dans l'interprétation d'un défaut.

Les cycles de charge et de décharge vont donner des informations directes sur les limites de fonctionnement de la micro-batterie. La limite majeure de la mesure de courbe de charge et de décharge réside dans le fait que la batterie évolue physiquement et chimiquement dans le même temps. La caractérisation modifie donc la micro-batterie. Cette caractérisation est néanmoins nécessaire.

A la charge, dans le cas d'une charge à tension constante, les défaillances suivantes peuvent être détectées :

- Courant de charge trop élevé
- Courant de charge trop faible (ou pas de charge)

A la décharge, on retrouvera :

- Une capacité trop faible
- Une autodécharge trop importante
- Une décharge trop rapide

Lier ces modes de défaillances à des défauts n'est pas aisé au stade actuel du développement. Ces modes de défaillances pourront être interprétés en grande partie après un certain nombre d'analyses réalisées. De manière générale, une grande difficulté de la caractérisation électrique d'une micro-batterie réside dans le risque de dégrader les micro-batteries et leur défaut par les tests réalisés.

5.3.3 La localisation

Comme pour les produits de microélectronique standard, la technique de localisation à utiliser va dépendre de la défaillance. Dans les défaillances citées en 5.2, deux types de défaillances se rapprochent de celles trouvées en microélectronique standard :

- les court-circuits et défauts résistifs
- les circuits ouverts

Nous allons nous intéresser dans un premier temps à ces défaillances.

5.3.3.1 Localisation de défauts à l'origine de courts-circuits et défauts résistifs

De manière standard, les court-circuits et défauts résistifs sont localisés sur les produits de la micro-électronique par OBIRCh ou par émission infrarouge. Pour pouvoir utiliser l'OBIRCh, il est nécessaire que le laser n'endommage pas la micro-batterie et qu'il atteigne le défaut. Or, nous allons voir que ces deux besoins ne sont pas réunis pour les micro-batteries. Les premiers résultats obtenus sur les puces Enfilm™ HighTemp présentant un court-circuit ont montré que le **laser** réagissait

avec la surface de la puce et **brûlait les premières couches** lorsque celles-ci avaient des impuretés organiques en surface (résidus organiques, corps gras...) [DEB08]. Sur produits standards, la solution consiste à nettoyer le composant avant la localisation. Cependant, et nous le verrons en détail dans la partie suivante sur les préparations d'échantillon, il n'est pas aisé de nettoyer la surface d'une micro-batterie.

En supposant qu'aucune impureté ne se trouve en surface et que le laser ne brûle pas les couches supérieures, la seconde contrainte exige qu'aucun matériau ne bloque le passage du laser jusqu'au défaut. Il ne doit donc pas y avoir de couche qui réfléchisse ou qui absorbe totalement le faisceau avant l'arrivée sur le défaut. Or, nous allons voir que la structure des deux types de micro-batteries va être bloquante.

Pour les micro-batteries EnFilm™ HighTemp sur puce, la passivation utilisée en surface de puce réfléchit le laser (fig.101A.). La localisation ne peut donc être réalisée par la face avant qu'en retirant cette passivation ce qui mettrait les couches actives en contact avec l'air et donc les oxyderait. L'OBIRCh ne peut donc pas être utilisé sur les puces, si le défaut est au-dessous de la passivation. Lorsqu'elles sont en boîtier, la résine du boîtier absorbe le signal ce qui empêche aussi le laser d'atteindre les couches actives (fig.101B.). La préparation consisterait donc à retirer le boîtier mais la localisation se ferait alors sur la passivation qui comme nous venons de le souligner réfléchit la totalité du signal.

Une dernière approche pour l'OBIRCh, souvent utilisée sur produit discret, est la localisation par la face arrière. Un polissage face arrière du composant est réalisé de manière à atteindre le silicium. Le silicium transmet une partie du laser et peut donc atteindre les couches actives de la micro-batterie. Cependant, pour les micro-batteries, la première couche déposée sur le silicium servant à collecter le courant de l'électrode positive recouvre la majorité de la puce et réfléchit le laser avant d'atteindre les couches actives (fig. 101.B). L'OBIRCh peut localiser un défaut par la face arrière uniquement s'il est dans la première couche déposée sur le substrat ou dans les quelques zones où cette couche n'est pas présente (quelques pourcents de la puce). De manière générale, l'OBIRCh ne permet donc pas de localiser des défauts dans la majeure partie des couches actives. Dans tous les essais réalisés, l'OBIRCh ne s'est, en effet, pas montré efficace.

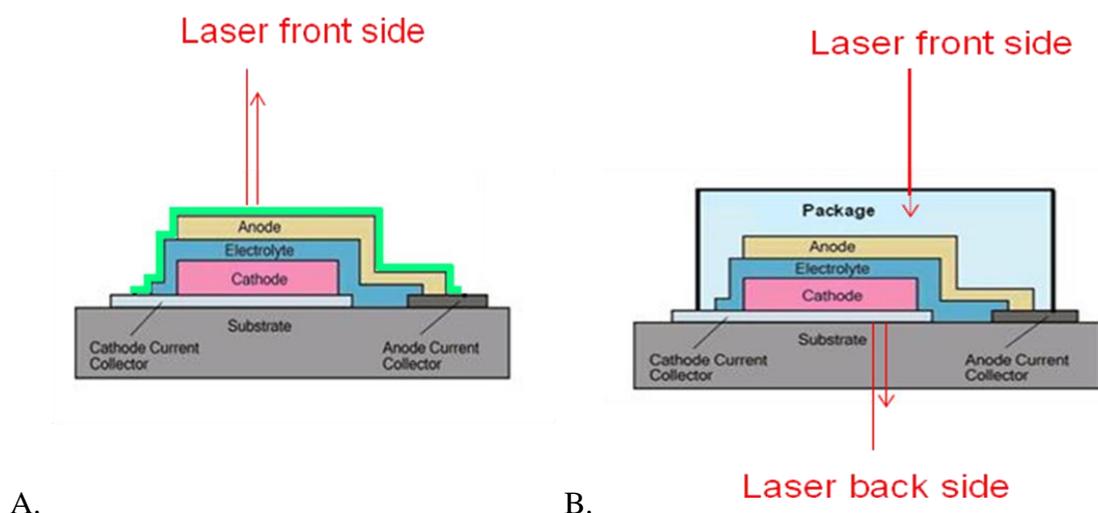


Figure 101: Les effets masques à l'OBIRCh : A. sur puce B. en boîtier

L'émission IR a aussi été évaluée sans résultat concluant. Plusieurs raisons rendent inefficace cette technique. Tout d'abord, de même que pour l'OBIRCh, les couches agissant comme des masques sur la puce par la face avant et la face arrière vont aussi bloquer la détection des défauts dans les couches actives de la puce. Ensuite, l'émission détecte principalement des phénomènes de photo-émission c'est-à-dire de recombinaison de paires électrons/trous. Or, ces phénomènes se produisent uniquement dans les semi-conducteurs, qui ne sont pas présents de manière active dans le cas des micro-batteries. D'autres méthodes de localisation ont donc dû être évaluées pour localiser les défauts à l'origine de court-circuits et les défauts résistifs. La thermographie infrarouge et la microscopie magnétique sont deux méthodes permettant de localiser ces types de défaut.

La thermographie IR décèle des points chauds induits par le passage du courant. Ce courant génère un échauffement local qui se diffuse ensuite dans le composant. Cette technique a été évaluée et s'est révélée concluante pour les court-circuits. L'effet masque est moins important que pour l'OBIRCh car l'échauffement d'une zone se transmet aux couches environnantes et peut donc être localisé même à travers le boîtier (fig. 102). De manière générale, cette technique est capable de détecter des points chauds dissipant quelques dizaines de microwatt.

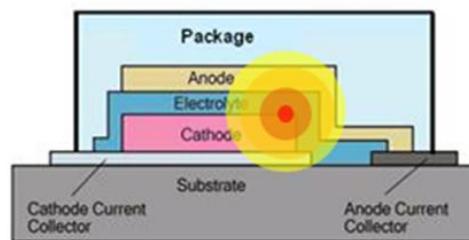


Figure 102: Exemple d'un point chaud pouvant être localisé par thermographie

L'avantage de cette technique est de pouvoir être utilisée dans un premier temps sans préparation spécifique. Cependant, comme le montre la figure 102, plus le défaut est enfoui dans le composant plus le point détecté à la surface du composant sera diffus et la localisation peu précise. La résolution spatiale va donc fortement dépendre de la profondeur à laquelle se trouve le défaut dans la structure. Par exemple, la résolution sera de quelques microns si la localisation est réalisée sur puce mais deviendra de l'ordre de l'épaisseur du boîtier si cette même puce est encapsulée.[REV12] Ainsi, pour un composant en boîtier, il est nécessaire de se rapprocher au plus près du défaut. Si ce dernier est dans la puce cela consiste à retirer le boîtier. En réalisant un amincissement de la face arrière du composant pour atteindre la puce, la thermographie a été évaluée et fonctionne. Un résultat de thermographie IR sur puce présentant un défaut faiblement résistif est présenté en figure 103 . A partir de notre expérience, nous avons réussi jusqu'à ce jour à **localiser par thermographie des défauts sur des micro-batteries en court-circuit avec une mesure de résistance de 10 à 300 Ohms selon les cas.**

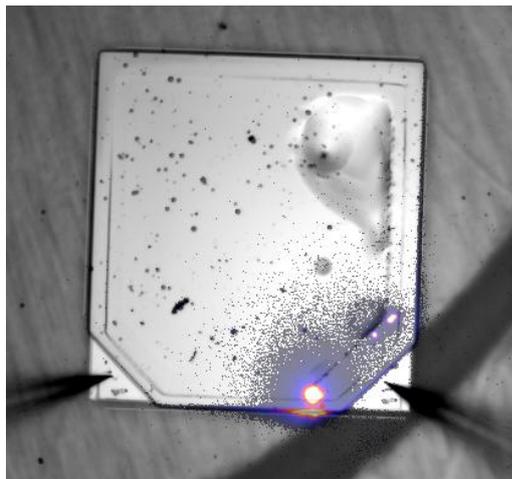


Figure 103: *Thermographie sur puce en court-circuit*

Enfin, la **microscopie magnétique** qui détecte le champ magnétique généré par le passage d'un courant **doit aussi pouvoir localiser les court-circuits à travers le boîtier**. Cette technique de localisation n'a pas été évaluée au cours de ces travaux.

Pour les micro-batteries EnFilm™ HighCap, la couche supérieure en Mica est transparente dans l'infrarouge. Des défauts devraient pouvoir être localisés. Néanmoins, le collecteur de courant de l'électrode négative qui est métallique recouvre pratiquement la totalité de la micro-batterie. Cette couche va donc agir comme un masque vis-à-vis du faisceau laser pour les couches sous-jacentes. Sur toute la surface de la micro-batterie, un défaut pourra être localisé uniquement si celui-ci est situé autour de ce collecteur, au niveau des contacts par exemple ou sur les bords du collecteur. Nous aurons cette même difficulté en face arrière puisque le collecteur de courant de l'électrode positive se trouve aussi sur la quasi-totalité de la surface de la micro-batterie.

De même que pour les micro-batteries EnFilm™ HighTemp, la technique d'émission IR n'est pas adaptée à ce type de produits.

La thermographie IR a aussi été évaluée sur ces produits et s'est aussi avérée efficace **pour détecter des courts-circuits** (figure 104). Sur ce type de micro-batteries, nous avons réussi à localiser des défauts sur des micro-batteries court-circuitées avec une valeur de **résistance comprise entre quelques dizaines d'ohms et quelques centaines d'Ohms**. La résolution spatiale est alors de l'ordre de 5 μ m.

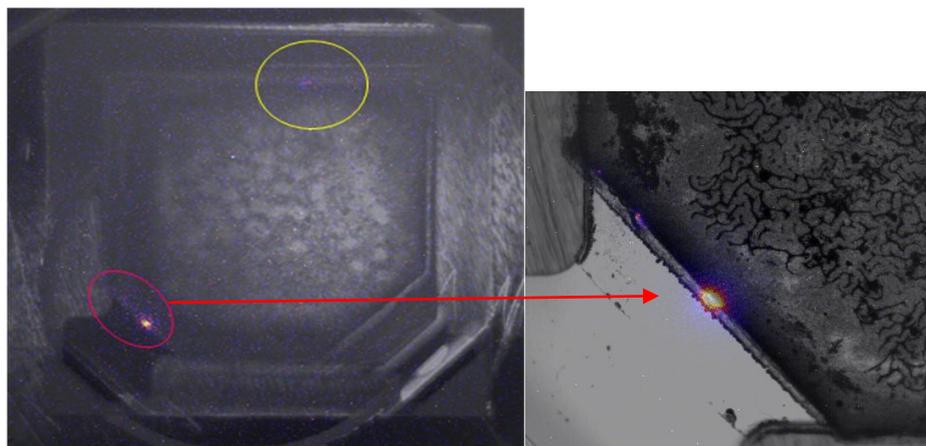


Figure 104: *Thermographie sur micro-batteries EnFilm™ HighCap en court-circuit*

5.3.3.2 Localisation des circuits ouverts

Pour localiser des défauts à l'origine de circuits ouverts, la seule technique aujourd'hui connue pour les produits discrets est le contraste de potentiel. Pour pouvoir la mettre en place, il est nécessaire d'accéder aux zones actives de la micro-batterie. Pour les micro-batteries Enfilm™ HighTemp en boîtier et les micro-batteries Enfilm™ HighCap, l'encapsulation doit être retirée pour accéder aux couches actives. Or, nous verrons dans la partie 5.4 que le retrait de l'encapsulation n'est pas facile à réaliser sur ces produits.

Pour les micro-batteries Enfilm™ HighTemp sur puce, il s'avère nécessaire de retirer la passivation pour réaliser une observation par contraste de potentiel standard. Or, retirer la passivation met à l'air les couches actives et endommage la micro-batterie. Sur des circuits VLSI passivés, la technique du contraste de potentiel peut être utilisée par couplage capacitif [MAR94]. Cette approche consiste à observer l'impact sur le diélectrique du potentiel d'une piste métallique sous-jacente. Il s'agit donc d'observer les variations de potentiel des pistes par couplage capacitif.

D'autre part, en déposant une fine couche de métallisation sur la passivation, les champs électriques présents dans l'épaisseur de la passivation entre la fine couche conductrice et la piste modifient les trajectoires des électrons secondaires lors des interactions entre le faisceau et la passivation.

Pour les micro-batteries Enfilm™ HighTemp sur puce, il sera intéressant d'évaluer ces deux approches. Sur les micro-batteries Enfilm™ HighTemp encapsulées en boîtier, cette technique ne sera pas envisageable sans retirer le boîtier.

Pour les micro-batteries Enfilm™ HighCap, l'encapsulation atteint 100µm d'épaisseur et rend certainement non envisageable la technique du contraste de potentiel par couplage capacitif.

Aucune technique de localisation n'a encore pu être validée aujourd'hui pour localiser le défaut à l'origine d'un circuit ouvert. Cependant, un circuit ouvert signifie qu'aucun contact ne lie les deux électrodes. Il est donc possible de réaliser des coupes du produit à des endroits stratégiques de la micro-batterie pour évaluer l'état des

différentes couches et interfaces. Ainsi, même si la localisation de ce type de défaut n'est pas possible, il est envisageable d'accéder au défaut sur les deux micro-batteries, si une coupe du produit est réalisable.

5.3.3.3 Localisation des autres modes de défaillance

Les autres modes de défaillances des micro-batteries sont spécifiques à ces produits et les phénomènes responsables sont peu connus.

Si l'analyse des spectres EIS réalisée au stade de la caractérisation de la défaillance donne une indication sur la zone défectueuse, il n'est cependant pas possible de localiser avec précision le défaut pour l'observer. Par exemple, si le spectre EIS soulève une anomalie au niveau du LiPON cela ne signifie pas que toute la surface du LiPON est endommagée. Cette caractérisation ne permet pas de définir quelle zone du LiPON est défectueuse. Il est donc nécessaire de réaliser une localisation du défaut plus précise pour accéder au défaut.

A ce jour, cette localisation ne peut être faite qu'en sollicitant la micro-batterie en charge et/ou en décharge. Il est en effet nécessaire de faire fonctionner la micro-batterie pour espérer localiser un défaut avec les techniques actuelles.

Les premiers essais lancés tendent à montrer que l'émission IR ou l'OBIRCh utilisé de manière standard sur les produits discrets ne permettent pas de révéler les défauts dans les micro-batteries. Ces deux techniques de localisation, comme dans le cas des court-circuits, seront limitées par les effets de masquage des couches de la structure.

Des localisations ont été réalisées par thermographie IR. Cette technique semble prometteuse pour localiser des défauts de cyclage. Dans une micro-batterie présentant une résistance interne élevée, la thermographie IR a ainsi permis de localiser une zone où le LiPON était défectueux. Si ces premiers résultats sont prometteurs, ils devront être confirmés sur d'autres analyses. De plus, en fonction des analyses de défaillance à réaliser, de nouveaux essais devront être lancés afin de déterminer les limites d'application de cette technique de localisation.

5.3.4 La préparation d'échantillon

La préparation d'échantillon est une limite importante aussi bien pour la localisation du défaut que pour l'accès au défaut. En effet, la sensibilité des matériaux de la micro-batterie à l'air et à l'eau rend difficile la plupart des approches. Comme dit dans le chapitre 1, la préparation d'échantillon ne doit pas générer de nouveaux défauts. Or, dès lors que les couches actives sont en contact avec l'azote ou l'oxygène (pendant ou après une micro-section par exemple), leur structure et leur état sont modifiés. Ces limites ont donc nécessité le développement d'approches alternatives. L'évaluation de l'impact des différentes préparations et le développement de solutions alternatives sont présentés en détail dans la partie 5.5. En effet, cette partie de l'analyse est directement liée au sujet de la thèse et une grande partie de l'étude lui a été consacrée.

5.3.5 Caractérisation physico-chimique d'un défaut

Lorsque le défaut a été localisé et a été atteint, il est nécessaire de procéder à une analyse physico-chimique pour en déduire le mécanisme de défaillance. Lorsque les défauts ne concernent pas les couches actives, les techniques standards de caractérisation chimique sont utilisables.

Si le défaut est dans les couches actives, une seule technique a été évaluée à ce jour sur l'empilement complet. Il s'agit de l'EDX. Son utilisation simple parce qu'elle est présente dans la plupart des laboratoires d'analyse a été validée sur les micro-batteries. Cette technique a l'avantage de se coupler au sein d'un même équipement au MEB et au FIB. Ainsi, sans aucun contact avec l'air, le composant est coupé, observé, et analysé. Cependant, l'EDX ne permet pas de détecter les éléments légers tels que le lithium. Par conséquent, une présence ou une absence de lithium ne pourra être révélée par EDX. De plus, il faut noter que le faisceau d'électrons incident peut être destructif dans les couches actives en particulier à des tensions élevées (10 ou 15 keV).

5.4 Etudes et résultats sur la préparation d'échantillon

L'étape de préparation d'échantillon s'est révélée complexe en raison de la haute sensibilité à l'air et à l'eau des matériaux constituant la micro-batterie. L'étude a consisté à réaliser sur les micro-batteries, les préparations que l'on utilise en microélectronique dans la méthodologie standard de préparation pour évaluer leur impact sur le produit. Lorsque les techniques standards se sont révélées inapplicables, des nouvelles approches ont été étudiées.

Pour évaluer l'impact de chaque préparation, nous avons choisi de réaliser des observations optiques ou électroniques, pour observer, en particulier, l'évolution temporelle de la micro-batterie à la suite de ces préparations. Pour les préparations d'échantillon conservant la testabilité du produit, des caractérisations électriques ont été réalisées lorsqu'aucune évolution physique n'apparaissait.

Dans la méthodologie standard, les préparations qu'il est nécessaire de réaliser sont :

- la coupe du composant (exemple après la question 2)
- la décapsulation globale du boîtier par voie chimique humide (après la question 6)
- l'approche de la face avant par voie mécanique (question 6)
- l'approche face arrière (globale ou locale) (question 7)
- la décapsulation locale par voie chimique humide (question 7)
- l'effeuillage (question 11)

De manière générale, la difficulté de cette étude sur la préparation d'échantillon a résidé dans le faible nombre d'échantillons disponibles puisque les micro-batteries sont encore au stade de la phase de qualification. Faute d'échantillons, toutes les techniques de préparation d'échantillon n'ont pas pu être évaluées. L'étude a permis d'étudier l'impact des préparations suivantes : **la décapsulation locale ou globale du boîtier plastique, la coupe du composant, l'effeuillage et l'approche locale ou globale par la face arrière.**

5.4.1 Retrait de l'encapsulation

5.4.1.1 Cas des micro-batteries EnFilm™ HighTemp

La décapsulation standard d'un boîtier plastique se fait par voie chimique humide. Nous avons choisi de réaliser une ouverture localisée du boîtier de manière à conserver la testabilité électrique de la micro-batterie et réaliser des tests après ouverture. Les phénomènes engendrés en ouverture locale et globale étant similaires, la réalisation de l'une des approches valide ou invalide l'autre.

Pour évaluer cette préparation, un mélange d'acide nitrique fumant (5 volumes) et d'acide sulfurique (1 volume) a été utilisé. Le résultat présenté en figure 105 montre le non succès de cette approche. La passivation utilisée sur ce type de micro-batterie est, en effet, sensible à l'acide nitrique et à l'acide sulfurique comme la résine du boîtier. Par conséquent, l'ouverture par voie chimique humide retire à la fois le boîtier et la passivation laissant à l'air les couches actives. Ces couches sont rapidement oxydées par l'air ce qui dégrade la micro-batterie et empêche la poursuite de l'analyse. **L'approche standard de décapsulation de boîtier n'est donc pas utilisable sur ces produits avec la passivation actuelle.**

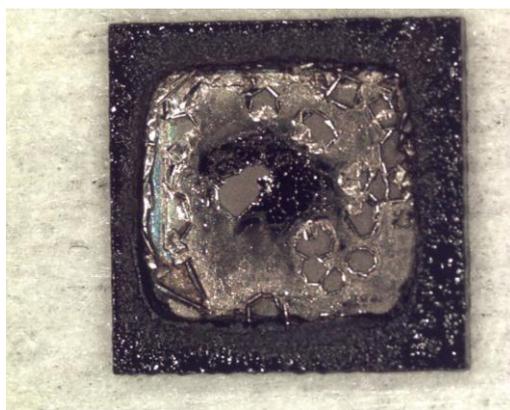


Figure 105: *Dégradation de la micro-batterie après ouverture chimique du boîtier*

Nous avons cependant pu valider que, dès que la passivation utilisée n'est pas sensible à ces acides, la décapsulation par voie chimique humide ne pose aucun problème (fig.106).

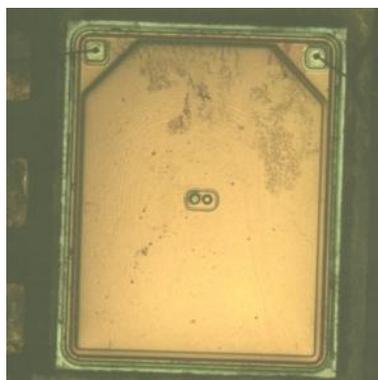


Figure 106: *Décapsulation d'une micro-batterie commerciale Cymbet avec une passivation non sensible aux acides nitrique et sulfurique*

Cette méthode de décapsulation par voie chimique humide est donc directement dépendante de la passivation utilisée et lorsque la passivation est sensible aux acides une nouvelle approche doit être développée.

Autre que par voie chimique humide, l'accès par la face avant peut être fait de quatre façons :

- par plasma seul
- par gravure laser combiné au plasma
- par polissage mécanique combiné au plasma
- par polissage mécanique seul

Le plasma seul serait une méthode trop longue pour retirer la totalité du boîtier LGA. Les deux méthodes qui utilisent le laser ou le polissage avant l'étape plasma ont alors l'intérêt de donner le même résultat final pour la puce en réduisant le temps global de préparation. Néanmoins, seule la pré-ouverture au laser a été évaluée car le polissage réalisé avec de l'eau augmenterait le risque d'oxydation des couches actives. Le Sésame-1000 a été utilisé et les paramètres ont été choisis en s'aidant de l'étude préalable réalisée au cours de mon DRT [AUB08].

Pour l'étape de gravure sèche au plasma, la procédure standard de l'équipement a été utilisée, en réalisant deux procédés : l'un pour s'approcher de la puce avec le mélange d'oxygène et de tétrafluorure de carbone et l'autre pour atteindre la puce avec de l'oxygène pur.

Le résultat est présenté en figure 107. La micro-batterie est beaucoup moins dégradée par cette approche que par la chimie humide (fig.107 A). Cependant, en observant avec plus de détails la puce, nous pouvons voir que la passivation (en blanc sur l'image de la fig. 107.B) est endommagée et laisse alors des zones de la couche active en contact avec l'air. Cette approche bien que plus intéressante car moins destructive que la voie humide, ne permet pas, dans l'état actuel de son développement, l'approche par la face avant de la puce sans endommager les couches actives.

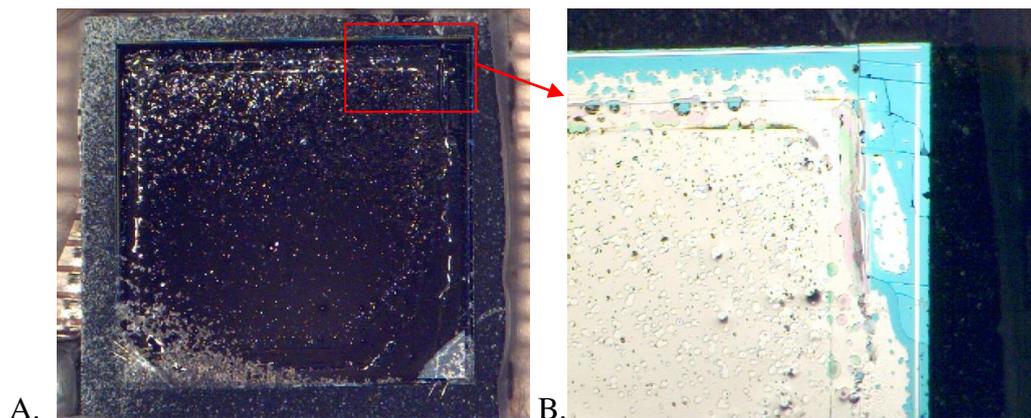


Figure 107: *Décapsulation du boîtier par gravure laser et plasma*

Enfin, le polissage parallèle pourrait s'avérer intéressant à condition de ne pas atteindre les couches actives mais uniquement la passivation. Le contact de l'eau avec les couches actives détériorerait la micro-batterie. Faute d'échantillon encapsulé, cette dernière méthode n'a pu être évaluée.

En résumé, la **décapsulation du boîtier d'une micro-batterie Enfilm™ HighTemp** n'est possible et sans dommage pour la micro-batterie **uniquement lorsque la passivation n'est pas sensible aux acides nitrique et sulfurique**. Dans les autres cas, **aucune méthode n'a été validée**. Le polissage parallèle n'a pas été évalué dans cette étude, cependant cette approche coupe les fils ce qui limitera donc les caractérisations électriques à des tests sous pointes.

5.4.1.2 Cas des micro-batteries EnFilm™ HighCap

L'encapsulation utilisée pour ces micro-batteries est du Mica. Ce matériau, inerte à la plupart des acides [ICR11], ne peut être retiré par voie chimique humide. Il serait sensible uniquement à l'acide fluorhydrique. Néanmoins, les essais lancés pendant 48h à température ambiante n'ont pas modifié le Mica. **Chimiquement, le Mica apparaît donc inerte**. Il serait possible que le Mica soit sensible au HF à chaud, mais pour des questions de sécurité cet essai n'a pas été lancé.

Le **polissage mécanique** a été étudié comme alternative pour retirer cette encapsulation. **La présence d'eau** pour réaliser le polissage **fini par altérer les couches actives**.

Une dernière alternative a été étudiée et consiste à utiliser la structure même du Mica. En effet, ce matériau cristallin est réalisé avec un empilement de couches de Mica menant à une structure lamellaire. Il est alors possible d'isoler ces couches à l'aide d'une précelle insérée entre les couches. Cette méthode sans artifice a été étudiée en évaluant l'impact de ce retrait de couche sur la micro-batterie optiquement et électriquement. Les résultats sont présentés figure 108.

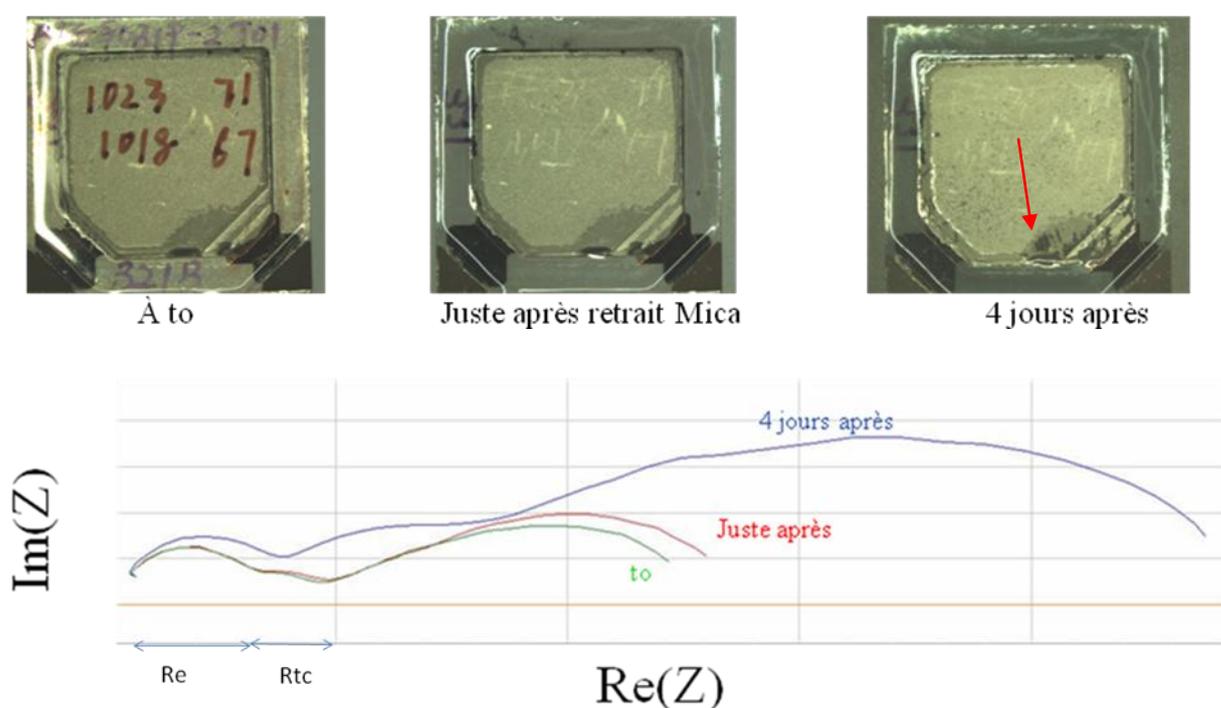


Figure 108: Evolution de l'aspect optique et du spectre d'impédance d'une micro-batterie EnFilm™ HighCap après décollement du Mica

Nous pouvons ainsi remarquer que la micro-batterie a peu évolué juste après le décollement (optiquement et électriquement). Le spectre à haute et moyenne fréquence est alors similaire. Les demi-cercles correspondant à l'électrolyte et aux interfaces électrodes/électrolytes se superposent. La droite de Warburg est aussi similaire dans les deux cas. Quelques minutes après le décollement des couches la différence notée est à très basse fréquence. La différence observée est cependant négligeable car, si le système n'est pas équilibré, il peut y avoir des variations de résistance de transfert de charge qui seront détectés par EIS à ces faibles fréquences.

Néanmoins une évolution est observée après quelques jours. La couche protectrice utilisée sous le MICA n'est que peu hermétique et les couches actives tendent à s'oxyder comme peut le révéler la présence de taches noires après 4 jours. L'évolution des matériaux est aussi révélée sur le spectre EIS puisqu'à la fois le demi-cercle de l'électrolyte et le demi-cercle des interface électrodes/électrolyte ont évolué.

Cette approche semble intéressante, mais il sera nécessaire d'évaluer plus précisément l'impact de ce décollement du MICA sur les couches sous-jacentes en termes de contrainte mécanique ou de décollement de couches. Pour cela, un nombre conséquent de micro-batteries avec la même structure sera nécessaire.

L'approche vers les couches actives de ces micro-batteries EnFilm™ HighCap apparaît donc difficile. **Aucune préparation d'échantillon ne conserve intactes les couches actives sur le long terme** (plusieurs jours). La seule approche possible et à continuer d'évaluer est l'amincissement mécanique du Mica. A ce jour, **l'effeuillage du Mica à l'aide d'une précelle semble convaincant**. Il sera aussi intéressant de réaliser cet **amincissement par polissage**. Ce polissage devra être localisé pour ne pas toucher aux contacts et limiter les infiltrations d'eau par les flancs de la micro-batterie. Dans chaque cas, l'objectif consistera à s'approcher des couches actives sans les atteindre.

5.4.2 Coupe d'une micro-batterie

5.4.2.1 Cas de la micro-batterie EnFilm™ HighTemp non encapsulée

La coupe globale d'une puce de silicium peut se faire de deux façons :

- Par polissage mécanique
- Par clivage

Le polissage est réalisé de manière standard avec un lubrifiant qui est classiquement de l'eau. L'eau rentre alors en contact direct avec les couches actives et dans le cas des micro-batteries, les détériore rapidement. Cette approche n'apparaît donc pas appropriée pour ces produits.

Le clivage peut être utilisé sur les micro-batteries avec un substrat en silicium. Cette approche a l'avantage de ne pas nécessiter d'eau et est donc préconisé pour réaliser une coupe globale du produit. Cette préparation a pu être évaluée et les résultats sont présentés figure 109. L'observation, réalisée au MEB, nous permet de voir l'ensemble des couches de la micro-batterie, sur toute la largeur de la puce. Des

informations générales peuvent alors être retirées de cette coupe : présence des couches, profil des marches, épaisseurs.

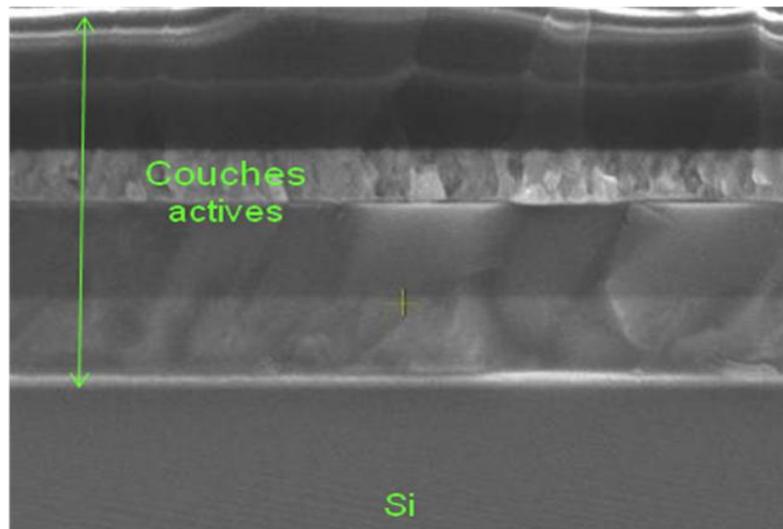


Figure 109: Résultats après clivage

Cette méthode a cependant ses limites. Tout d'abord, la qualité de la coupe ne permet pas de faire des observations sur des couches qui ont une épaisseur d'une centaine de nanomètres. En effet, cette préparation clive parfaitement les matériaux cristallins mais génère un « déchirement » des couches minces en surface. **Le clivage ne crée donc pas une surface parfaite de coupe des couches actives.**

De plus, après clivage, les couches actives sont en contact avec l'air. Pour limiter la détérioration des couches, il est donc primordial de **déplacer l'échantillon sous vide** (dans le MEB par exemple pour les futures observations) **dès que la coupe est faite**. L'utilisation de boîte à gant pourrait être intéressante sur ce type d'application pour réduire le temps de contact des couches avec l'air. Ces boîtes à gant sont en cours d'investissement.

Cette approche est aussi **limitée par la position du plan de la coupe à réaliser**. Pour une analyse de défaillance et lorsque la localisation du défaut a été possible, la micro section doit être réalisée précisément dans cette zone. Or, le clivage n'est pas une technique permettant un positionnement précis de la coupe. Sur puce seule, le clivage ne peut être réalisé que manuellement et le plan de coupe n'est pas défini. Seule la direction de la coupe (verticale ou horizontale par rapport aux électrodes) peut être définie. Cette préparation est donc limitée à une information générale sur la puce mais pas pour un défaut localisé. Pour une puce encore sur wafer, il est possible d'utiliser un équipement automatique tel que la SELA MC200 qui permet de réaliser un positionnement de la zone de coupe avec une précision de l'ordre du micron. Sur ce type d'équipement, il est nécessaire d'avoir une taille d'échantillon spécifique (longueur entre 40mm et 80 mm, largeur entre 11mm et 13mm) ce qui n'est pas possible sur puce seule, plus petite que ce gabarit. Sur plaquette, cette taille d'échantillon peut être réalisée en prenant soin de positionner la zone d'intérêt au centre de cet échantillon.

Enfin, la dernière limite concerne **la direction du plan de coupe**. Celle-ci ne peut que suivre les plans cristallins du silicium. Le silicium utilisé est un substrat (100), les plans de coupe réalisables sont donc les plans perpendiculaires aux côtés de la puce. Toute autre direction de coupe ne peut être réalisée.

Si le clivage ne répond pas au besoin de l'analyse, la seule approche possible est une **coupe localisée réalisée au FIB**. Cette méthode a été évaluée et donne des résultats très intéressants. Tout d'abord, la coupe est de haute qualité car elle ne présente pas de déformation mécanique des couches (fig. 110). Le grand avantage de cette technique est de ne jamais mettre en contact les couches actives avec l'air puisque **la coupe et l'observation sont faites sous vide** et dans le même équipement. Cette technique permet donc de réaliser des **coupes précises et localisées**. Néanmoins, elle ne **permet pas d'obtenir une vue d'ensemble du produit** en coupe.

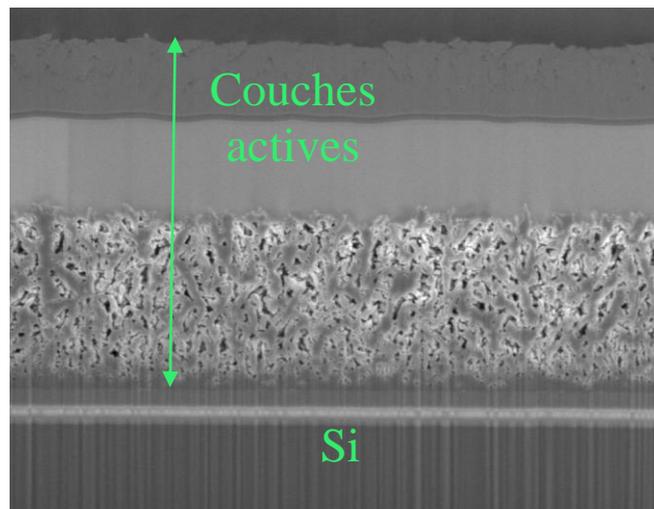


Figure 110: Observation MEB d'une coupe sur puce faite par FIB

Le clivage et le FIB vont donc se montrer complémentaires. L'inconvénient majeur de ces deux approches est de ne pouvoir conserver la micro-batterie après découpe. L'ensemble des observations doit être fait à la suite de la coupe. Dès lors que la micro-batterie n'est plus sous vide, le produit s'oxyde et l'analyse est terminée pour l'échantillon considéré.

Le polissage mécanique classiquement utilisé sur les produits standards est ici à proscrire. Nous verrons avec plus de détails son impact dans la partie suivante (5.4.2.2).

5.4.2.2 Cas de la micro-batterie EnFilm™ HighTemp encapsulée

Dans le cas d'une puce dans son boîtier, de manière standard, la seule approche utilisée pour réaliser une coupe est le polissage mécanique. Cette méthode a été évaluée en enrobant le composant et en réalisant la procédure de polissage de manière standard avec des disques SiC du grain 600 au grain 4000 avec une vitesse de rotation de 150 tours/min et une force de 30N par échantillon. Le polissage n'a pas été réalisé jusqu'aux étapes de finition (avec des solutions diamantées de 3 et 1 microns) en raison de l'endommagement déjà généré par les premiers disques. Le résultat de polissage est présenté figure 111. L'ensemble des couches actives a été endommagé par le polissage générant une délamination entre la passivation et le substrat de silicium. **La méthode standard de polissage ne peut donc être utilisée**. L'eau et les contraintes mécaniques créées ne permettent pas d'observation des couches actives de la puce.

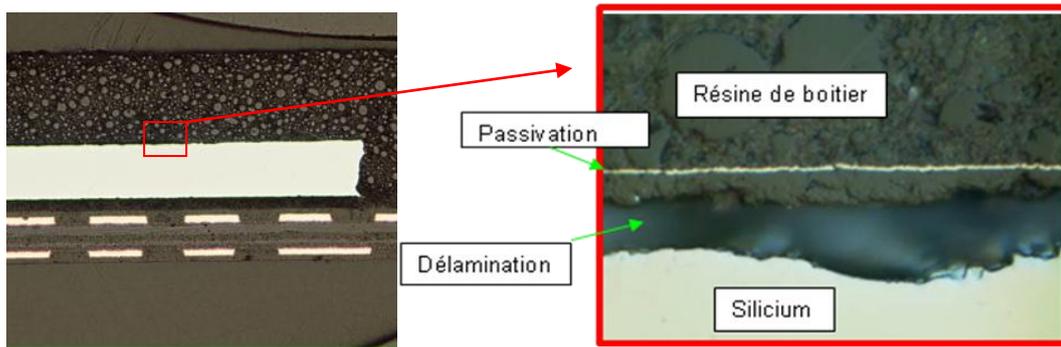


Figure 111: Résultat d'une coupe par polissage mécanique : délamination générée dans la zone active de la micro-batterie

Pour limiter l'effet de l'eau, des essais ont été réalisés en diminuant le débit. Cette modification s'est avérée concluante sur certains types d'électrode plus stables en milieu aqueux que les matériaux utilisés pour les micro-batteries EnFilm™ HighTemp (fig. 112). Ce résultat souligne le fait que si les matériaux utilisés dans les micro-batteries EnFilm™ HighTemp viennent à changer dans le produit final, alors le polissage mécanique devra être réévalué.

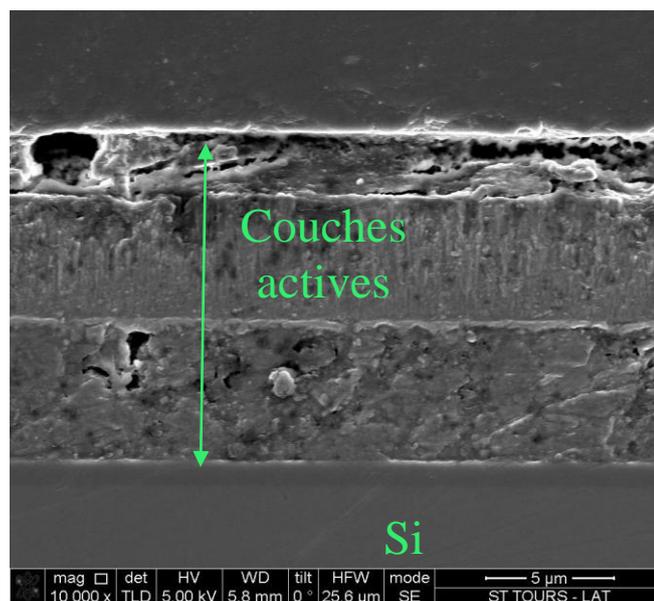


Figure 112: Coupe par polissage mécanique d'une micro-batterie avec des matériaux d'électrodes plus stables en milieux aqueux que les électrodes des micro-batteries EnFilm™ HighTemp

Pour les micro-batteries EnFilm™ HighTemp la diminution du débit n'a pas réduit l'endommagement des couches actives. Le moindre contact des électrodes avec l'eau les dégrade. Un essai sans eau a alors été réalisé mais l'absence de lubrifiant a généré un échauffement important de l'échantillon et des vapeurs dangereuses sont générées pouvant être inhalées par l'analyste. Dans ce cas, la puce est endommagée et

la sécurité n'est pas assurée. Cette méthode a donc été proscrite. Le polissage mécanique n'est donc pas efficace pour obtenir une coupe globale du composant.

Des lubrifiants sans eau sont vendus par des fournisseurs en métallographie. Ils sont utilisés pour des produits sensibles à l'eau, par conséquent, ce type de lubrifiant peut s'avérer intéressant pour les micro-batteries. Il est cependant nécessaire dans un premier temps d'évaluer les phénomènes d'interaction entre le lithium et les produits contenant du lithium avec ce type de lubrifiant. Une fois cette étude réalisée et si aucun problème de sécurité n'est révélé, des essais pourront être lancés.

Une **nouvelle technique de préparation** a été mise au point au cours de cette thèse **pour réaliser une coupe globale d'une micro-batterie en boîtier**. Cette approche fait l'objet d'un « **Trade secret** » au sein de ST et ne peut donc être détaillée dans ce mémoire. Le résultat obtenu après cette préparation est présenté en figure 113. Cette méthode permet d'obtenir une **information globale sur la structure de la puce** mais ne donne **pas un état de surface de la coupe suffisamment propre pour des observations inférieure à quelques centaines de nanomètres**.

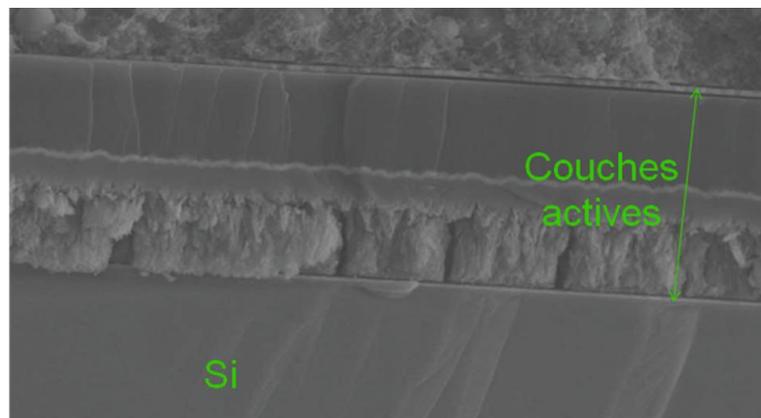


Figure 113: *Résultat de la méthode de préparation développée pour la découpe de micro-batterie en boîtier*

L'utilisation du FIB est la seule solution pour des coupes de bonne qualité mais s'avère complexe sur ce type de produit puisque le boîtier ne peut être retiré par la face avant. La coupe par FIB ne peut se faire qu'après amincissement de la résine par polissage parallèle sans atteindre la puce ou par amincissement de la face arrière du boîtier et du silicium. Dans les deux cas, cette approche montre certains inconvénients:

- le **positionnement de la coupe FIB est difficile** car il est fait sans aucun repère vis-à-vis des couches actives car celles-ci ne sont pas accessibles
- la **coupe est très localisée**
- le **temps de coupe peut être long** (jusqu'à 10 heures). Il est en effet nécessaire de graver le restant de silicium lorsque le polissage a été réalisé par la face arrière. Néanmoins, s'il y a une couche de nitrure de silicium ou d'oxyde de silicium entre le silicium et l'empilement de la micro-batterie, la gravure ionique du silicium peut être combinée au di-fluorure de xénon. Ce gaz accélère la gravure du silicium. L'oxyde ou le nitrure de silicium joue alors un rôle de barrière et permet de protéger l'empilement de la micro-batterie. Le temps de coupe est réduit à 2 heures.

Malgré ces inconvénients, **le FIB est la technique retenue pour réaliser des coupes précises et de grande qualité après localisation d'un défaut.**

5.4.2.3 Cas de la micro-batterie EnFilm™ HighCap

Pour ces micro-batteries, le clivage n'est pas envisageable. En effet, si le mica est cristallin, il ne se clive pas facilement dans le sens de coupe de la micro-batterie. De plus, nous retrouvons les mêmes difficultés de polissage que pour les micro-batteries Enfilm™ HighTemp, puisque l'eau va aussi détériorer les couches actives.

La seule technique envisageable sur ce produit est le FIB. Cette technique est utilisée sans amincissement de l'encapsulation (de l'ordre de 50µm) et rend les coupes extrêmement longues (supérieur à 20h). L'étude sur l'amincissement du Mica sera particulièrement intéressant pour réduire ce temps de préparation.

En conclusion, sur ces produits, nous n'avons donc que la capacité de réaliser des **coupes localisées**.

5.4.3 Effeuilage du composant

L'effeuillage du composant s'applique aux couches minces en surface de puce et à leur retrait sélectif. Sur les micro-batteries EnFilm™ HighTemp, des essais ont été réalisés pour retirer la première couche de passivation. Cependant, le retrait de cette couche réduit considérablement l'étanchéité de la passivation et endommage rapidement les couches sous-jacentes. Les essais ont été stoppés à ce stade en particulier parce qu'en retirant les couches de passivation, nous savons que les couches actives de la puce sont en contact avec l'air et sont donc rapidement oxydées.

L'effeuillage de la puce n'est donc pas une approche applicable aux micro-batteries.

5.5 Synthèse de l'étude

Cette étude a permis de révéler les difficultés que nous sommes amenés à rencontrer dans la gestion d'une analyse de produits très innovants. En raison des différences de matériaux, d'empilement, et de caractéristiques électriques des micro-batteries comparativement aux produits discrets, il nous a fallu réaliser une étude globale sur toutes les étapes de l'analyse de manière à pouvoir mettre au point une méthodologie d'analyse spécifique à ces produits.

Dans un premier temps, nous avons évalué l'impact, sur ces produits, des techniques standards utilisées à chaque étape de l'analyse, du contrôle non destructif à la caractérisation du défaut. Cela a permis de définir les techniques qui peuvent s'utiliser sur les micro-batteries et celles qui ne sont pas adaptées. Pour ces dernières, et lorsqu'elles s'avéraient critiques et nécessaires pour l'analyse, nous avons cherché à développer des alternatives à l'approche standard. Le tableau 17 synthétise l'ensemble des résultats obtenus au cours de cette évaluation, pour chaque approche, à chacune des étapes de l'analyse pour les deux types de micro-batteries.

Au stade de la caractérisation électrique de la défaillance, les tests à réaliser sur les micro-batteries diffèrent de ceux faits sur produits discrets. Pour caractériser la défaillance de ces produits, l'analyse se portera sur des spectres d'impédance et sur des courbes de charge et de décharge.

Pour les contrôles non destructifs, peu de changements sont à noter. La seule exception concerne l'utilisation du microscope acoustique. Cette technique n'est pas adaptée à l'inspection des micro-batteries EnFilm™ HighTemp non encapsulées car les couches actives seraient rapidement endommagées par l'eau. Pour la même raison, cette technique peut être utilisée sur des micro-batteries EnFilm™ HighTemp en boîtier, uniquement si celui-ci est étanche ou si plusieurs échantillons sont disponibles pour l'analyse. L'utilisation d'un liquide alternatif à l'eau devra être étudiée dans le futur. Pour les micro-batteries EnFilm™ HighCap, l'encapsulation n'est pas suffisamment étanche pour que l'observation en microscopie acoustique soit réalisée dans l'eau. Nous avons validé que l'utilisation de savon et de silicone pour rendre les flans de la micro-batterie hermétique est une solution permettant ensuite de réaliser des images acoustiques de ces micro-batteries.

Pour la préparation d'échantillon en vue de la localisation de défaut, nous avons montré que peu d'approches étaient possibles.

Dans le cas des micro-batteries EnFilm™ HighTemp non encapsulées, aucune préparation n'est à réaliser pour la localisation. L'effeuillage du composant n'est en particulier pas envisageable car il ne permet pas de garder intègre la micro-batterie.

Pour les micro-batteries EnFilm™ HighTemp en boîtier, l'accès à la face avant de la puce par voie chimique humide globale ou localisée n'est possible que si la passivation y résiste, ce qui n'est pas le cas actuellement. A ce jour, nous n'avons pas réussi à développer de méthode alternative et l'accès face avant n'est donc pas envisageable. Sur boîtier, la seule préparation possible est une approche par la face arrière pour accéder au substrat de silicium.

Pour les micro-batteries EnFilm™ HighCap, le retrait de l'encapsulation est possible par décollement mais la micro-batterie n'est pas stable dans le temps et se détériore rapidement (dans les jours qui suivent la manipulation).

Les essais de localisation de défaut réalisés ont montré que les seuls résultats de localisation ont été obtenus par thermographie IR. Cette technique peut être utilisée sur les deux types de micro-batteries. Pour les micro-batteries Enfilm™ HighTemp en boîtier, pour plus de précision dans la localisation, elle peut être réalisée par la face arrière du composant après amincissement. Des évaluations complémentaires sont néanmoins encore nécessaires, en particulier pour des défaillances décelées en charge ou en décharge. L'avantage majeur de cette technique est de ne pas exiger de préparation d'échantillon.

La microscopie magnétique qui ne nécessite pas non plus de préparation devra être évaluée.

Une fois le défaut localisé, la préparation d'échantillon en vue de l'accès au défaut se fait le plus souvent par coupe FIB :

- par la face avant pour les micro-batteries Enfilm™ HighTemp non encapsulées
- par la face arrière après un amincissement du composant pour les micro-batteries Enfilm™ HighTemp encapsulées

- par la face avant ou arrière pour les micro-batteries Enfilm™ HighCap.

Cet accès peut aussi se faire par clivage sur les micro-batteries Enfilm™ HighTemp non encapsulées ou par la méthode de micro-section déposée en « Trade secret » pour les micro-batteries Enfilm™ HighTemp en boîtier.

Enfin, l'EDX peut être employé pour caractériser chimiquement le défaut tout en sachant que le lithium n'est pas détecté. L'absence ou la présence de lithium ne pourra donc pas être déterminée par cette approche.

Tout au long de l'analyse, une difficulté spécifique aux micro-batteries a été soulevée et concerne le transport et le stockage de ces pièces. En effet, parce que les matériaux des couches actives se modifient au contact de l'air, dès lors que les couches sont exposées à l'air, l'analyse ne peut être reprise (à la sortie du FIB, après stockage ou archivage...). Ceci empêche donc toute nouvelle observation ou manipulation sur une pièce pour laquelle les couches actives sont exposées à l'air. L'utilisation de boîte à gant pourrait alors être avantageuse.

Etant donné les différences de techniques de préparation d'échantillons, de mesure électrique et de localisation que cette étude a pu montrer par rapport aux produits discrets et IPAD, nous avons choisi de générer une méthodologie dédiée aux micro-batteries sans l'intégrer dans la méthodologie des produits discrets et IPAD. La mise en place de cette méthodologie utilise directement les résultats présentés dans cette partie et est décrite dans le chapitre 3.

Le développement de produits très innovants combinant une structure nouvelle, des matériaux non standards et une application éloignée de celle des composants discrets a amené à évaluer l'ensemble de la méthodologie de l'analyse.

Les études réalisées jusqu'à aujourd'hui ont permis de montrer que ces nouveautés ne permettaient pas de gérer leur analyse avec la même méthodologie que celle mise au point pour les produits discrets et IPAD et qu'une nouvelle méthodologie était nécessaire. Cette nouvelle méthodologie est présentée dans le chapitre 3.

L'ensemble de l'étude n'est encore pas totalement finalisée à ce jour et d'autres développements viendront compléter ces premiers résultats dans un futur proche. De plus, la technologie elle-même est aussi encore amenée à évoluer, pouvant remettre en cause les travaux préliminaires faits jusqu'à présent.

Etapes	Approches évaluées	HighTemp en puce	HighTemp en boitier	HighCap
Caractérisation électrique de la défaillance	Spectroscopie d'impédance			
	Charge et décharge			
Contrôles non destructifs	Observation optique			
	Profilomètre optique			
	Radiographie X			
	Microscope Acoustique		Ok uniquement si plusieurs échantillons et si boitier non impacté	Ok uniquement si savon et silicone de protection
Préparation en vue de la localisation de défaut	Retrait du boitier pour accès à la face avant de la puce	NA	Ok uniquement si passivation non sensible aux acides	Finir l'évaluation du décollement du mica
	Accès à la face arrière de la puce	NA		
	Effeillage de la puce			
Localisation	Thermographie	(essais encore à réaliser)	(essais encore à réaliser)	(essais encore à réaliser)
	OBIRCh			
	EMMI-IR			
Préparation en vue de l'accès au défaut	Coupe globale par polissage mécanique			
	Coupe globale par clivage	avec des limites de précision de l'observation, et de la zone de coupe	NA	NA
	Coupe globale « trade secret »	NA	avec des limites de précision de l'observation, et de la zone de coupe	
	Coupe locale par FIB			Mais long (>20h)
Caractérisation du défaut	EDX	mais lithium non détecté	mais lithium non détecté	mais lithium non détecté

Tableau 17. Synthèse sur les essais réalisés (en vert succès, en rouge échec de l'approche)

6 Conclusion chapitre 2

La méthodologie de préparation d'échantillon déjà mise en place pour la résolution des analyses de défaillance des produits discrets et IPAD permet d'atteindre un haut taux de succès. Certains cas, néanmoins, ne peuvent être réussis en suivant scrupuleusement cette méthodologie. Les cas d'études présentés dans ce chapitre ont permis de souligner ces limites.

Grâce aux trois premières études présentées, nous avons pu déterminer pourquoi la méthodologie atteignait ces limites et nous avons pu mettre au point des solutions alternatives.

Cela ne remet pas en cause l'utilisation de la méthodologie pour l'analyse des produits discrets et IPAD mais pousse à la faire évoluer pour pouvoir traiter les cas présentés ici et continuer ainsi à résoudre le maximum de cas d'analyse. Ainsi, en généralisant ces trois premiers cas d'études et en intégrant ces nouvelles approches au sein de la méthodologie, un plus grand nombre de cas peut être traité et le taux de succès des analyses continuera à tendre vers 100%.

Le chapitre 3 va permettre de présenter ce travail de synthèse et de généralisation et décrire cette nouvelle méthodologie de préparation d'échantillon appliquée aux produits discrets et IPAD.

Concernant la dernière étude de ce chapitre sur les micro-batteries, le travail réalisé a permis d'évaluer l'impact sur ces produits innovants des techniques couramment employées sur produits discrets et IPAD. Nous avons pu montrer que la majorité des approches n'est pas efficace sur ces produits et qu'une nouvelle méthodologie spécifique à ces produits était nécessaire. Grâce à l'ensemble des résultats obtenus pendant ce travail nous avons pu mettre au point une nouvelle méthodologie qui est présentée dans le chapitre 3.

CHAPITRE 3 :

Méthodologie complète pour la préparation d'échantillon dans l'analyse de défaillance

1 Introduction

La méthodologie standard de préparation d'échantillon pour l'analyse de défaillance mise en place pour les produits discrets et IPAD, et présentée dans le paragraphe 3.2 du chapitre 1, est pertinente et efficace pour la plupart des analyses et permet d'atteindre un taux de succès de résolution d'analyse élevé puisqu'il était de 90% sur l'année 2009. Néanmoins, du fait que le taux de succès atteint n'est pas de 100%, cela montre que certains cas d'analyse sur produits discrets ou IPAD ne peuvent pas être encore résolus en suivant strictement cette méthodologie et les procédures de préparation associées.

Les cas d'études présentés dans le chapitre 2 ont permis d'étayer les limites atteintes par cette méthodologie mise en place. Pour les produits discrets et IPAD, la faille principale de la méthodologie est liée à l'utilisation de nouveaux matériaux dans les structures (nouvelle passivation, nouvelles métallisations, ...) mais aussi au besoin de mise en relief de défauts spécifiques comme les microfissures. Les difficultés rencontrées sont alors liées à une interaction non contrôlée entre le produit et la préparation choisie qui dégrade le composant ou le défaut lui-même et empêche la localisation ou l'accès au défaut.

L'ensemble des études réalisées au cours de cette thèse a été basé sur des cas d'analyse dont le succès était limité par la préparation d'échantillon. Pour tous ces cas, nous avons pu démontrer que les limites pouvaient être liées directement à la méthodologie de préparation d'échantillon ou qu'elles pouvaient être dues à une utilisation non appropriée de la technique de préparation. Dans ces deux situations, l'objectif de chaque étude a été de proposer une solution alternative:

- soit en **développant une nouvelle approche** de préparation d'échantillon ce qui impacte directement la méthodologie globale
- soit en **conservant la même approche** (ex : décapsulation globale par chimie humide) mais en **modifiant la procédure technique** alors non appropriée (ex : modification des mélanges...). Ce type de changement n'a alors pas d'impact sur la méthodologie globale mais sur la mise en pratique.

Les trois premières études présentées dans le chapitre 2 font partie du premier cas: elles ne nécessitent pas simplement une modification de recettes mais exigent une nouvelle approche imposant une évolution de la méthodologie. A partir de ces études, un travail de synthèse et de généralisation a été réalisé de manière à intégrer les résultats obtenus dans la méthodologie et ainsi proposer une méthodologie plus complète de préparation d'échantillon pour l'analyse des composants discrets et IPAD. Ce résultat final permet d'assurer une plus grande réussite dans la résolution des analyses et sa présentation fait l'objet de la première partie du chapitre 3.

D'autres travaux réalisés au cours de la thèse ont montré que les échecs dus à la préparation d'échantillon pouvaient être générés par une utilisation non appropriée des techniques de préparation. Pour résoudre ces cas, la solution consiste alors à modifier la procédure de préparation pour la rendre plus adaptée au produit étudié. Parmi ces cas, nous avons ainsi mis au point de nouvelles recettes permettant par exemple de décapsuler des boîtiers plastiques sans corroder les fils en cuivre, de

décapsuler des boîtiers plastiques montés sur carte... Ces travaux n'ayant pas d'impact sur la méthodologie, nous avons choisi de ne pas les aborder dans ce mémoire.

La deuxième partie de ce chapitre propose une méthodologie de préparation d'échantillon pour l'analyse des micro-batteries. Elle s'applique aux deux familles de micro-batteries (les EnFilm™ Hightemp et les EnFilm™ HighCap) dont l'étude a été détaillée en dernière partie de chapitre 2. Les études réalisées sur ces produits très innovants ont permis de montrer les possibilités ou non à réaliser certaines préparations d'échantillon. Grâce à ces résultats, il a alors été possible d'en tirer une méthodologie. Les grandes étapes de l'analyse sont conservées et l'analyse des micro-batteries se fait comme pour les produits discrets et IPAD avec l'enchaînement d'étapes suivantes:

- contrôle non destructif
- caractérisation électrique de la défaillance
- préparation d'échantillon en vue de la localisation de défaut
- localisation du défaut
- préparation d'échantillon en vue de l'accès au défaut
- caractérisation du défaut

Néanmoins, comme les résultats du chapitre 2 ont pu le montrer, un grand nombre de préparations d'échantillon n'est pas adapté à ces produits. La méthodologie mise au point pour les produits discrets et IPAD a donc dû être largement modifiée. Les deux méthodologies dédiées aux produits discrets et IPAD et aux micro-batteries respectivement sont donc aujourd'hui dissociées.

2 Présentation de la nouvelle méthodologie pour les produits discrets et IPAD

2.1 Nouvelle méthodologie de préparation d'échantillon en vue de la localisation de défauts

Pour établir cette nouvelle méthodologie, nous avons travaillé à partir de la méthodologie sur composant en boîtier présentée au chapitre 1 dans laquelle les résultats des études du chapitre 2 ont été intégrés en les généralisant. Nous avons ensuite créé à partir de cette base une méthodologie spécifique pour les analyses sur puce et morceau de plaquettes et une autre sur boîtier monté sur carte. En effet, comme nous avons déjà pu le souligner, la méthodologie initiale ne s'intéressait qu'aux composants en boîtier, ce qui en limitait son utilisation. Enfin, nous avons regroupé ces trois méthodologies en une méthodologie globale de préparation d'échantillon en vue de la localisation.

La figure 114 présente la nouvelle méthodologie de préparation d'échantillon pour l'analyse en vue de la localisation de défauts pour les produits discrets et IPAD. La figure 115 s'y associe en regroupant l'ensemble des questions qui se rapportent à la méthodologie. Pour une meilleure lisibilité et une interprétation plus aisée de la méthodologie, nous avons conservé la même numérotation pour les questions déjà présentes dans la méthodologie initiale. Pour toutes les nouvelles questions, nous les avons annotées par des lettres (Qa, Qb...).

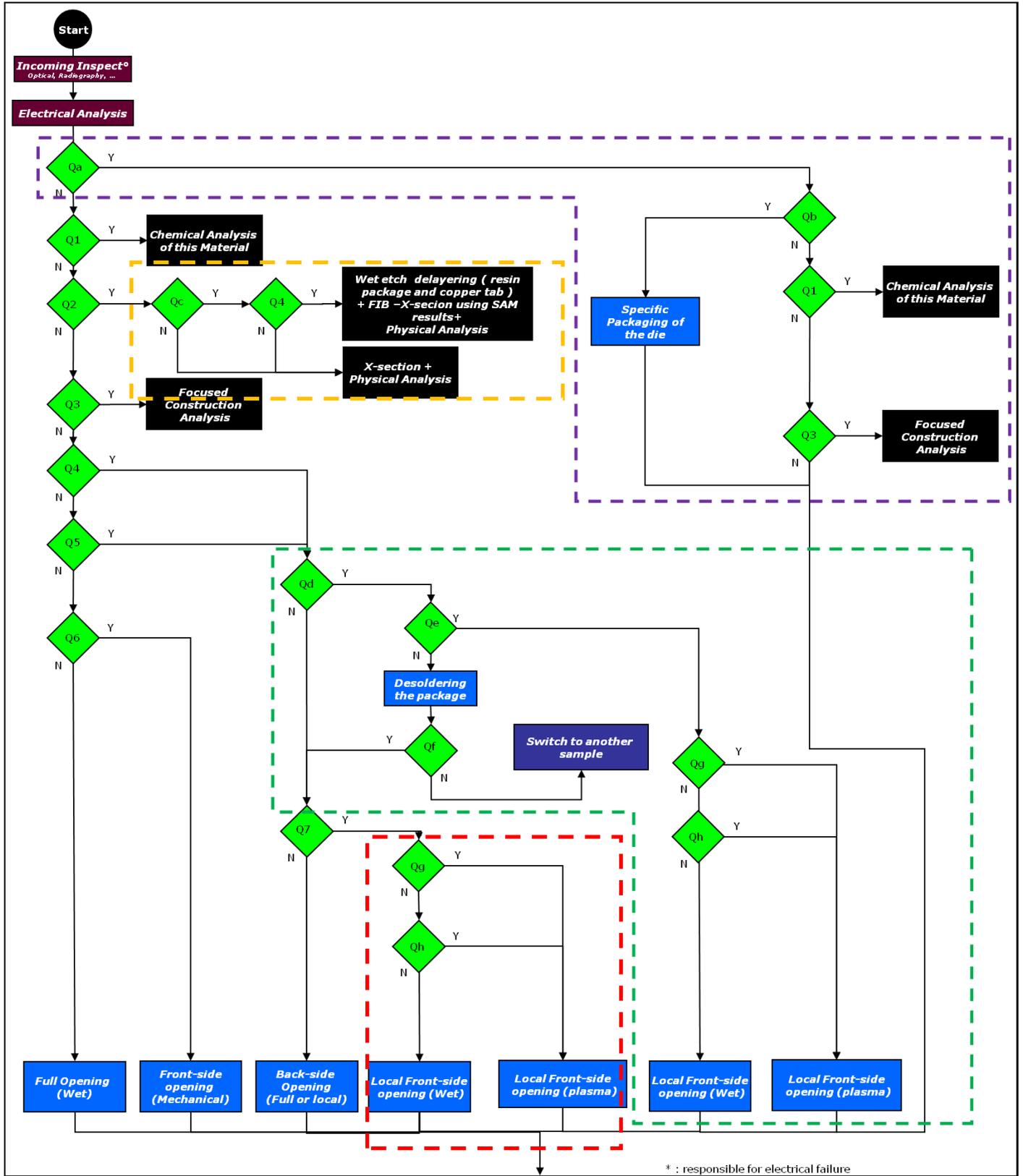


Figure 114: Méthodologie de préparation d'échantillon en vue de la localisation de défaut pour produits discrets et IPAD

Qa: Does the analysis concern a non encapsulated die?

Qb: Is it necessary to integrate the die in a package to stimulate the electrical failure?

Q1 : During Incoming Inspection, did you detect a conductive foreign material* between contacts of the part, at the surface of the product?

Q2 : During non destructive inspection, did you detect an abnormality*, e.g. a foreign material during X-Rays or cracks during SAM ?

Qc: Is the package insulated AND is the area of interest located in the solder layer in contact with ceramic?

Q3 : Has Electrical Analysis concluded that whatever sample preparation approach chosen it is preferable to perform full construction (Back-end & Front-end) analysis focused on well chosen area of interest?

Applicable to unstable / intermittent electrical failure or Vf issue ?

Q4 : Based on the number of samples available, the technology of the product & the electrical signature of the failure, is there any risk to reduce the chance to identify the failure mechanism if loosing the defect during this process ?

Q5 : Is it mandatory to keep package integrity & connections available for further electrical test (too much I/Os) or handling (too small die) ?

Qd: Is the component soldered to a board?

Qe: Is it mandatory to keep the package on the board?

Qf: Is electrical failure still available?

Q6 : Did the preliminary electrical failure analysis indicate that the physical defect* can be located at the die back-side (active area on the backside, die attach or frame) or in the die substrate volume ?

Q7 : Did the preliminary electrical failure analysis indicate that the physical defect* can be damaged/removed by the stress induced by a mechanical process ?

Qg: Is the inter metallic dielectric (IMD) technology damaged by wet chemical attack?

Qh: Is the pad of the die damaged by wet chemical attack?

* : responsible for electrical failure

Figure 115: *Questions liées à la méthodologie de préparation d'échantillon en vue de la localisation de défaut pour produits discrets et IPAD*

2.1.1 Intégration des résultats du chapitre 2

Les nouveautés de la méthodologie tirées des études du chapitre 2 sont entourées en pointillés rouge et orange dans la figure 114 et les questions correspondantes sont écrites de la même couleur dans la figure 115. Pour présenter cette méthodologie, nous avons choisi de la commenter par ordre croissant des questions, en insérant au fur et à mesure les résultats des cas d'étude du chapitre 2.

Dans les premières questions de la méthodologie, une question Qc a ainsi fait son apparition. Elle se rapporte aux résultats de l'étude réalisée sur les TRIACS en boîtier isolé (bloc encadré en orange en figure 114):

«Qc: Le boîtier est-il isolé ET la zone d'intérêt est-elle située dans la couche de brasure en contact avec la céramique ? »

L'étude sur les TRIACS a en effet révélé la difficulté à obtenir un bon état de surface de la section polie pour les matériaux ductiles (comme la brasure) en contact avec un matériau dur (comme la céramique). Cela peut empêcher l'observation d'un défaut et donc par la suite la compréhension d'un mécanisme de défaillance. Cet échec de l'analyse est susceptible de se produire dès lors qu'une micro-section mécanique est demandée. C'est le cas dès la question Q2 après laquelle une micro-section doit être réalisée dans le défaut détecté au cours des contrôles non destructifs. C'est ainsi que juste avant la réalisation de la micro-section, il est nécessaire de se demander si le boîtier est isolé et si la zone à observer est une brasure en contact avec la céramique. C'est l'objet de la question Qc.

Il faut ajouter que la qualité du polissage mécanique dépend de l'épaisseur de la brasure et de l'alliage utilisé. Toutes les micro-sections mécaniques de composants isolés ne mènent pas à un mauvais résultat de polissage. Ainsi, selon l'épaisseur et la composition de la brasure, il est possible d'obtenir une qualité de polissage suffisante pour l'analyse. Aucune étude n'a été réalisée à ce jour pour déterminer les couples épaisseur/composition de la brasure qui ne permettent pas une observation correcte après polissage mécanique. Sans cette connaissance approfondie, nous avons donc choisi de lier à la question Qc, la question Q4:

«Q4: Selon le nombre d'échantillons disponibles, la structure du produit et la signature électrique de la défaillance, y a-t-il un risque de réduire les chances d'identifier le mécanisme de défaillance si le défaut est perdu au cours de ce procédé ? »

Dans le cas où plusieurs échantillons sont disponibles, un premier essai en polissage mécanique peut être réalisé car cette approche est plus facile et rapide à mettre en place que la solution alternative développée. Si ce polissage n'est pas concluant, alors l'analyse sur un nouvel échantillon doit être réalisée en appliquant la méthode alternative qui combine le retrait chimique du boîtier et du dissipateur thermique et une micro-section réalisée au FIB dans le défaut détecté au cours de la phase d'inspection.

Si le nombre d'échantillons est limité et ne permet pas d'essayer le polissage mécanique alors la solution alternative sera directement utilisée pour assurer la résolution de l'analyse.

Pour l'ensemble des autres cas d'analyse dans lesquels un défaut à l'origine de la défaillance a été décelé par contrôle non destructif, la micro-section standard continuera à être appliquée.

Dans la suite de la méthodologie, l'étude réalisée en partie 2 du chapitre 2 sur les technologies BCB/Cu en boîtier plastique a fait apparaître la question Qg (bloc encadré en rouge en figure 114):

«Qg: Les couches intermétalliques (IMD) utilisées dans la technologie de la puce sont-elles endommagées par une attaque chimique humide ?»

Comme nous avons pu le montrer dans le chapitre 2, la présence d'une passivation sensible aux acides peut mener à un échec de l'analyse si un accès à la face avant de la puce par voie chimique humide est nécessaire.

Dans la méthodologie proposée dans le chapitre 1, deux cheminements mènent à une ouverture chimique du boîtier et sont représentés par les deux cases de préparation d'échantillon « full opening (wet) » (ouverture globale par voie chimique humide) et « local frontside opening (wet) » (ouverture locale par voie chimique humide), apparaissant en bas de la méthodologie.

Sur ce type de produits, les réponses n'amèneront jamais à la case « décapsulation globale par voie chimique humide » car à la question Q4, demandant si le défaut risque d'être éliminé lors de la préparation la réponse sera oui. Cette réponse ne dépend pas du nombre d'échantillons, ni de la signature électrique comme pourrait le souligner la question Q4 initiale, mais est due à la technologie du composant. Ainsi, nous avons rajouté à cette question Q4, l'influence de la structure en plus de l'influence du nombre d'échantillons et de la signature électrique.

Pour les technologies avec une passivation sensible aux acides, la réponse à la question Q4 sera donc toujours positive, par conséquent, seule l'approche à la face avant par voie chimique humide localisée va être impactée. C'est donc juste avant cette décision, qu'il est nécessaire de s'interroger sur la technologie de la puce. Lorsque les intermétalliques sont endommagés par l'attaque chimique humide, la nouvelle approche mise au point est la voie plasma. Ainsi, la case de préparation « local frontside opening (plasma) » a fait son apparition dans la méthodologie. Cette préparation peut inclure une première étape de préparation par gravure laser ou par polissage mécanique sans atteindre la puce pour accélérer l'étape de préparation, mais l'accès à la puce se fera toujours par gravure sèche.

L'étude de la partie 4 du chapitre 2 concernant les technologies avec des plots de contact en TiNiCuAu, a permis de rajouter la question Qh (toujours dans le bloc encadré en rouge en figure 114) dans la méthodologie.

«Qh: Les plots de contact utilisés dans la technologie de la puce sont-ils endommagés par une attaque chimique humide ?»

Une technologie utilisant des plots de contact sensibles aux acides va exiger une gestion de l'analyse différente et va entraîner une évolution de la méthodologie lorsqu'un accès par la face avant en chimie humide est nécessaire.

Comme dans le cas précédent, la méthodologie ne va être modifiée que dans les deux cas où une ouverture chimique du boîtier est nécessaire. Il s'agit des deux cases de préparation d'échantillon « full opening (wet) » (ouverture globale par voie chimique humide) et « local frontside opening (wet) » (ouverture locale par voie chimique humide) apparaissant en bas de la méthodologie.

Dès qu'il sera nécessaire de conserver intègres les plots de contact, la question Q4 aura toujours une réponse positive puisqu'il est possible de perdre le défaut lors de la préparation. Le fait d'avoir des plots de contact sensibles aux acides ne mènera donc jamais à la case « full opening (wet) » (décapsulation globale par voie chimique humide). Cette partie de la méthodologie ne sera donc pas modifiée.

Par contre, une évolution de la méthodologie est nécessaire avant la case « local frontside opening (wet) » (ouverture locale par voie chimique humide) où une question supplémentaire doit être ajoutée avant de réaliser une ouverture chimique localisée d'un boîtier.

Si les plots de contact risquent d'être endommagés par l'attaque chimique humide (question Qh), la solution alternative consiste à réaliser une gravure plasma du boîtier. La résine est alors retirée et le plot de contact est intègre. En rajoutant cette question et cette approche, la méthodologie prend dorénavant en compte les composants en boîtier pour lesquels les matériaux des plots de contact sont sensibles aux acides utilisés pour la décapsulation de boîtiers plastiques.

Cette nouvelle approche a néanmoins une limite d'application et ne permet pas de traiter tous les cas. En effet, pour un produit avec des plots de contacts sensibles aux acides, il se peut que le composant soit sensible aux effets de charges dans la chambre plasma. Dans ce cas, ni la gravure plasma, ni l'attaque chimique humide ne peuvent être utilisées. Pour aller au-delà de cette limite, il sera nécessaire d'étudier soit de nouvelles méthodes de préparation d'échantillon, soit de nouvelles méthodes de localisation qui permettraient de contourner la préparation d'échantillon.

De manière générale, grâce à toutes les nouvelles questions et approches présentées dans ce paragraphe, nous avons intégré à la méthodologie de préparation d'échantillon de composant en boîtier plastique, les différents résultats obtenus sur les produits discrets et IPAD. Néanmoins, certains cas d'analyses sur boîtier ne sont encore pas assurés par cette méthodologie mais les études et la généralisation présentées ont permis d'améliorer le taux de succès des analyses.

2.1.2 Prise en compte de la structure du composant à analyser

En plus de l'intégration des résultats des études du chapitre 2, nous avons souhaité aussi élargir le périmètre des types de produits analysés. Nous avons donc rajouté des blocs de questions qui permettent de traiter les analyses de puces (ou de morceaux de plaquette) (bloc violet dans la figure 114) ou de composants montés sur carte (bloc vert dans la figure 114).

La plupart des questions de la méthodologie initiale sont spécifiques au boîtier : à son retrait pour atteindre la puce ou à des défauts d'assemblage. Pour les puces, peu d'étapes de préparation sont généralement nécessaires pour réaliser la localisation de défaut car la puce est déjà accessible.

Dans la méthodologie, la question Qa a été rajoutée:

«Qa: L'analyse concerne-t-elle une puce non encapsulée ? »

Cette question permet de dévier directement l'analyste vers une méthodologie plus simple puisqu'elle ne comprend aucune question qui concerne les boîtiers et se résume alors à trois questions, deux déjà présentes initialement (Q1 et Q3) et une nouvelle (Qb):

«Qb: Est-il nécessaire d'intégrer la puce dans un boîtier pour stimuler la défaillance électrique ?»

Nous pouvons noter qu'un changement de vocabulaire a été fait dans la question Q1 pour qu'elle s'applique aussi bien à des produits en boîtier qu'à des puces. En utilisant le mot « contact » à la place de « pins » (broches), nous intégrons aussi les plots de contacts sur la puce. De même en passant de « la surface de la résine » à « la surface du produit », nous incluons les défauts en surface de boîtier mais aussi les défauts en surface de puce.

La question Qb est nécessaire pour les défaillances que nous ne pouvons valider par test sous pointes directement sur la puce comme par exemple dans le cas d'un produit avec un grand nombre de contacts. Il peut alors être nécessaire de monter la puce dans un boîtier spécifique (figure 116). Ce type de boîtier en plastique (sans puce), à l'origine comme dans la figure 116.A., a été modifié pour répondre à notre besoin. En gravant l'intérieur du boîtier au laser ou par microfraisage, il est possible de réaliser une cavité (fig. 116.B). Une plaque de verre est collée au dessus de la cavité en prenant appui sur le reste de résine, sur le tour de la cavité. La puce ou le morceau de plaquette à analyser est collé sur la plaque de verre (fig. 116.C). Le câblage peut alors être fait des plots de contact de la puce vers les contacts du boîtier (fig. 116.D).

Ce type de boîtier a plusieurs avantages puisqu'il permet de réaliser les connexions à la puce et de solliciter le composant par les broches du boîtier en ayant accès à la face avant de la puce. Enfin, il permet de réaliser la localisation de défaut aussi bien par la face avant que par la face arrière, grâce à la plaque de verre sur laquelle est déposé le composant. Pour cette localisation face arrière, il sera nécessaire d'utiliser une colle transparente dans l'infrarouge pour laisser passer le signal lors de la localisation. La localisation sera dans un premier temps réalisée par la face avant. La colle transparente à l'infrarouge sera néanmoins toujours utilisée en prévision d'une possible localisation par la face arrière dans la suite de l'analyse.

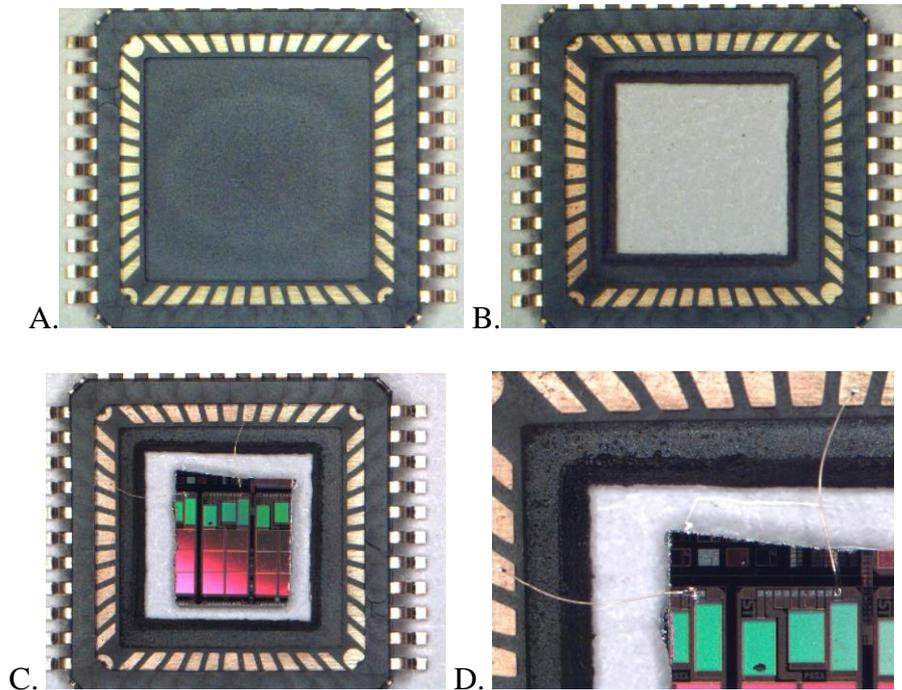


Figure 116: *Montage spécifique d'une puce pour caractériser la défaillance électrique et pour permettre la localisation (face avant ou face arrière)*

A. boîtier plastique à l'état initial

B. gravure du centre du boîtier au laser

C. dépôt d'une plaque de verre qui sert de support à la puce

D. Câblage de la puce

Si la puce peut être testée sans montage spécifique, alors la localisation sera directement faite par la face avant sans aucune préparation.

Pour un composant encapsulé monté sur carte, les questions concernant le boîtier doivent être conservées ; par contre, il peut être nécessaire de garder le boîtier soudé à la carte pour réaliser les tests électriques, ce qui limite les possibilités de préparation d'échantillon.

Ainsi, les questions Qd et Qe permettent d'introduire ce type d'analyses (bloc encadré en vert en figure 114) :

«**Qd: Le composant est-il soudé sur une carte imprimée ?** »

«**Qe: Est-il obligatoire de conserver le boîtier sur la carte?** »

Il peut être intéressant de garder le composant soudé sur la carte, le plus souvent pour permettre des tests électriques non possibles sur boîtier seul, comme par exemple pour réaliser des stimulations sur plusieurs plots, ou encore solliciter des défauts fonctionnels...

Si le composant peut être dessoudé (Qe) alors l'analyse se fait comme pour un boîtier seul après avoir validé que la défaillance est toujours présente à la suite de l'étape de dessoudage (Qf).

«**Qf: La défaillance électrique est-elle toujours présente ?**»

Si le composant doit rester sur la carte, alors seul l'accès à la puce par la face avant est possible et, dans ce cas, selon la technologie de la puce un accès par voie chimique humide ou par voie sèche est réalisé.

On retrouve donc les questions Qg et Qh, qui interrogent sur la technologie de la puce :

«Qg: Les couches intermétalliques (IMD) utilisées dans la technologie de la puce sont-elles endommagées par une attaque chimique humide ?»

«Qh: Les plots de contact utilisés dans la technologie de la puce sont-ils endommagés par une attaque chimique humide ?»

Nous pouvons noter qu'une limite de la méthodologie est atteinte lorsque la réponse est positive à l'une de ces questions Qg et Qh lorsque le composant est monté sur carte imprimée. En effet, la décapsulation du composant par voie plasma est nécessaire, mais, il est possible que la carte ne rentre pas dans la chambre de l'équipement. S'il est possible d'isoler l'échantillon de la carte pour la préparation d'échantillon et de le re-souder après préparation d'échantillon, il n'y a alors pas de limite à utiliser le plasma. Dans le cas contraire, il n'existe pas de solution assurant la réussite de l'analyse.

2.1.3 Synthèse sur la préparation en vue de la localisation de défaut sur produit discret et IPAD

Cette nouvelle méthodologie basée sur la méthodologie initiale permet de traiter des cas qui n'étaient pas pris en compte jusque -là et laissés à l'appréciation de l'analyste, pouvant ainsi mener à des échecs. De plus, elle s'applique aussi bien aux composants encapsulés qu'aux puces, et aux composants montés sur carte imprimée, ce qui n'était pas le cas de la méthodologie initiale.

Comme nous avons pu le souligner à plusieurs reprises dans cette partie, pour certains cas d'analyse, nous n'avons pas pu mettre au point de préparation d'échantillon assurant la résolution de l'analyse. Le premier cas concerne les composants en boîtier ayant des plots de contact sensibles à la chimie humide et qui se dégradent dans une chambre plasma à cause des effets de charges. Pour ce cas, nous devons étudier l'effet d'un autre type de plasma (ICP) qui diminuerait ces effets de charges.

Le second cas concerne la décapsulation d'un boîtier monté sur carte qui nécessite l'approche plasma pour atteindre la puce et dont la carte ne rentre pas dans la chambre. Pour ce cas, la solution serait évidemment d'avoir une chambre plasma plus grande. L'approche par chimie humide à basse température devra être évaluée. Si aucune solution de préparation d'échantillon ne semble possible pour atteindre la puce, il sera nécessaire d'évaluer les techniques de localisation ne nécessitant pas de préparation d'échantillon.

2.2 Nouvelle méthodologie en vue de l'accès au défaut

La méthodologie de préparation d'échantillon en vue de l'accès au défaut a aussi subi quelques évolutions. Cette méthodologie et les questions associées sont présentées respectivement dans les figures 117 et 118. Comme dans la méthodologie précédente, les nouveautés ont été encadrées de différentes couleurs.

Dans un premier temps, deux blocs déjà présents initialement ont dû être développés pour conserver la cohérence et l'homogénéité de la légende de la méthodologie. En effet, la case nommée « dichotomical electrical analysis » (analyse électrique dichotomique) intégrait des analyses électriques mais aussi du « circuit edit ». Le « circuit edit » est une préparation d'échantillon qui permet de connecter ou d'isoler de manière manuelle après fabrication certaines parties du circuit (à l'aide de dépôt localisé par FIB par exemple). Nous avons donc décidé de l'isoler du reste en lui faisant prendre l'apparence d'une case de préparation d'échantillon (bloc rouge dans la figure 117). L'analyse électrique dichotomique a alors pour but d'analyser le composant partie par partie pour déterminer laquelle est défaillante.

Dans la suite de la méthodologie, après la question Q13 (« **En fonction des étapes précédentes, est-il possible d'accéder à la face avant de la puce (si approche face avant déjà utilisée, répondre « oui ») ?** »), une préparation donnant l'accès à la face avant est requise. Or, pour garder l'homogénéité avec la méthodologie en vue de la localisation du défaut, cette approche a dû être détaillée en différenciant les cas d'approches par voie chimique humide et par gravure plasma. Nous retrouvons ainsi les différentes questions liées à la technologie de la puce (passivation, plots de contact) pour déterminer la préparation adéquate (questions Qg, Qh) (bloc orange dans la figure 117) et la question Qj.

«Qg: Les couches intermétalliques (IMD) utilisées dans la technologie de la puce sont-elles endommagées par une attaque chimique humide ?»

«Qh: Les plots de contact utilisés dans la technologie de la puce sont-ils endommagés par une attaque chimique humide ?»

« Qj : L'approche face avant a-t-elle déjà été utilisée ? »

Ensuite, trois questions ont été rajoutées et proviennent de l'intégration des analyses sur puces et sur composants montés sur carte.

Les deux premières questions Qa et Qi sont nécessaires pour les puces :

«Qa: Au début de l'analyse, l'analyse concernait-t-elle une puce non encapsulée ? »

«Qi: Y a-t-il une couche en surface de puce qui peut limiter l'étape de localisation ? »

En effet, pour les puces, qu'elles aient été montées en boîtier dans les premières étapes de l'analyse ou non, seule la localisation par la face avant a été réalisée. Or, il peut être révélé à la première étape de localisation qu'une couche en surface de puce masque le signal à détecter pour la localisation. Dans ce cas là, il peut être utile de réaliser une localisation par la face arrière. Si la puce n'a pas subi de

préparation d'échantillon, alors il sera nécessaire de monter la puce dans un boîtier spécifique comme présenté dans le paragraphe 2.1.2 (fig.116). Il pourra être nécessaire d'amincir la puce avant le montage si le substrat est trop épais (supérieur à 80µm). Pour les puces qui ont déjà été assemblées dans ce boîtier spécifique, la localisation par la face arrière peut être directement réalisée si la puce est suffisamment fine. Sinon, il sera nécessaire de remplir la cavité en face avant avec de la résine et de réaliser un polissage local de ce boîtier par la face arrière.

La troisième question concerne les composants montés sur carte. Lorsque le défaut a été localisé, il est possible de dessouder le composant de sa carte pour réaliser la suite des étapes permettant l'accès au défaut (micro-section, accès à la face avant de la puce). C'est pourquoi la question Qd («**Le composant est-il soudé sur une carte imprimée ?**») déjà ajoutée dans la méthodologie en vue de la localisation du défaut a été rajoutée à ce stade de l'analyse (bloc vert).

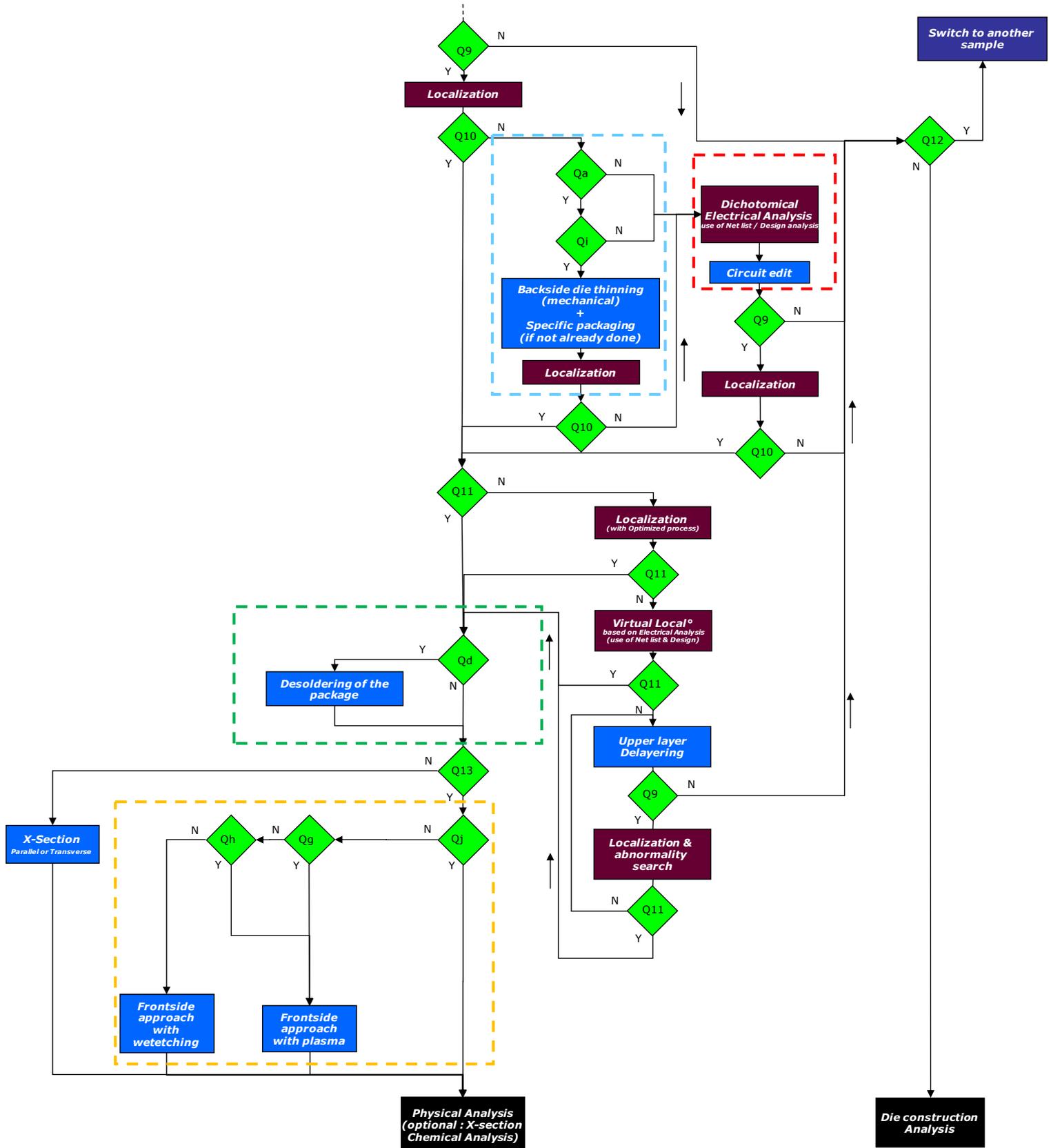


Figure 117: Méthodologie de préparation d'échantillon en vue de l'accès au défaut pour les produits discrets et IPAD

Q9 : Is electrical failure still available before localization step ?

Q10 : Is localized area coherent with electrical failure (if no localization, answer "No") ?

Qa: At the beginning of the analysis, did the analysis concern a non encapsulated die?

Qi: Is there any layer at the frontside of the die that possibly limits the localization step?

Q11 : Is localized area enough precise to perform directly defect physical & chemical analysis ?

Q12 : Is there any other sample with the same electrical signature (or similar but more adequate for available localization techniques) ?

Qd: Is the component soldered on a board?

Q13 : According to previous steps, is it possible to access to the front side of the die (if front side approach already used, answer "yes" ?

Qj: Is frontside approach already used?

Qg: Is the inter metallic dielectric (IMD) technology damaged by wet chemical attack?

Qh: Is the pad of the die damaged by wet chemical attack?

Figure 118: *Questions associées à la méthodologie de la figure 117*

Grâce aux différents développements réalisés et à leur généralisation, nous avons pu mettre au point une méthodologie de préparation d'échantillon répondant à certains cas d'échecs d'analyse liés à la préparation d'échantillon pour les produits discrets et IPAD.

En se basant sur cette nouvelle méthodologie pour les produits discrets et IPAD en boîtier, il a été possible de l'adapter aux composants sur puce ou sur morceaux de plaquette et aux composants en boîtier montés sur carte.

Un plus large éventail de cas peut être résolu grâce à cette méthodologie sur produits discrets et IPAD et permet de se rapprocher d'un taux de succès de 100%.

La méthodologie proposée n'a cependant pas pour but de rester figée et devra intégrer de nouvelles questions et de nouvelles techniques d'approche si d'autres matériaux et d'autres structures sont développés.

Le premier cas concret de produit innovant qui montre la nécessité de continuer à remettre à jour cette méthodologie concerne les micro-batteries. Une nouvelle famille de produit est réalisée poussant à évaluer la méthodologie de travail. La deuxième partie de ce chapitre va ainsi montrer la mise au point d'une méthodologie pour de nouveaux produits.

3 Présentation de la nouvelle méthodologie pour les micro-batteries

Pour élaborer la méthodologie de préparation d'échantillon pour l'analyse de défaillance des micro-batteries, le point de départ a été la nouvelle méthodologie présentée dans la partie précédente. Plusieurs modifications majeures ont été apportées pour la transposer aux micro-batteries, en se basant sur les résultats de l'étude faite en partie 5 du chapitre 2. Pour cette méthodologie les nouvelles questions ont été annotées par une lettre en sens inverse de l'alphabet (Qz, Qy,...).

3.1 Nouvelle méthodologie de préparation d'échantillon en vue de la localisation de défaut

La méthodologie finale est présentée en figure 119 et les questions associées en figure 120. Bien que la gestion de l'analyse des deux types de micro-batteries apparaisse dans la même figure, elles sont tout de même indépendantes dès la première question.

«Qz: L'analyse concerne-t-elle une micro-batterie Enfilm™ HighCap ? »

En effet, en construisant indépendamment les méthodologies pour chacune des micro-batteries, nous avons pu révéler que les étapes à suivre divergent car les structures des deux micro-batteries sont très différentes.

3.1.1 Pour les micro-batteries Enfilm™ HighCap

La grande majorité des questions posées dans la méthodologie dédiée aux produits discrets et IPAD n'est pas applicable aux micro-batteries Enfilm™ HighCap car ces produits sont trop éloignés de la microélectronique standard : le substrat n'est pas du silicium et l'encapsulation n'est pas un boîtier plastique. Ainsi, on ne se posera pas les questions qui s'y rapportent comme par exemple s'il s'agit d'une puce encapsulée, ou encore s'il s'agit d'un boîtier isolé.

Pour cette raison, on retire de la méthodologie les questions (Qa et le bloc s'y reportant, Qb, Qc, Q5, Qd et le bloc s'y reportant, Q6, Q7, Qg, Qh).

Au-delà des questions qui ne sont donc pas en lien avec le produit, les études réalisées sur les micro-batteries Enfilm™ HighCap ont montré qu'aucune technique de préparation ne peut être réalisée sans endommager les couches actives et donc ne peut être utilisée avant la localisation. Seul l'effeuillage manuel mérite encore une évaluation. L'ensemble des préparations avant localisation est donc retiré de la méthodologie car ni l'accès à la face avant ni à la face arrière aux couches actives n'est possible.

Trois cas seulement de gestion de l'analyse sont réalisables pour ces micro-batteries :

- Cas 1 : un défaut est décelé au cours des contrôles non destructifs (CND): comme dans la méthodologie standard, une coupe sera réalisée dans ce défaut. Celle-ci sera obligatoirement faite par FIB.

- Cas 2 : Rien n'est détecté par CND et aucune localisation ne semble possible: comme dans la méthodologie standard, une analyse de construction focalisée dans une zone sera réalisée. Celle-ci consistera à réaliser une ou plusieurs coupes FIB dans une (ou des) zone (s) critique (s) de la micro-batterie (souvent vers les électrodes).
- Cas 3 : dans les autres cas, la localisation sera réalisée directement sur la micro-batterie sans aucune préparation.

La méthodologie de préparation en vue de la localisation de défaut pour les micro-batteries Enfilm™ HighCap est donc très simplifiée et n'intègre que 3 questions.

3.1.2 Pour les microbatteries Enfilm™ HighTemp

Les micro-batteries Enfilm™ HighTemp sont plus proches des produits standards de la microélectronique et cela se ressent sur la méthodologie qui est aussi plus proche de celle des produits discrets. Nous avons utilisé directement les résultats obtenus dans l'étude présentée dans la partie 5 du chapitre 2. Pour ces micro-batteries, le produit peut être encapsulé en boîtier plastique ou non et, comme pour les produits discrets, la méthodologie ne sera pas similaire dans ces 2 cas. Ainsi, la question Qa est aussi utilisée:

«Qa: L'analyse concerne-t-elle une puce non encapsulée ? »

Concernant les micro-batteries sur puce, nous avons retiré la question Qb qui interrogeait sur le besoin de mettre en boîtier la micro-batterie. En effet, sur ce type de produit, la puce est suffisamment grande, les plots de contacts sont larges et le nombre de contacts est limité à 2 (les deux électrodes) ce qui rend possible la pose de pointes pour le test électrique. Il n'est donc pas utile de monter le composant dans un boîtier.

Ainsi, pour les micro-batteries sur puce, la méthodologie se réduit aux questions Q1 (concernant les résultats de l'inspection initiale), et Q3 (se rapportant à l'analyse de la défaillance électrique et de la capacité à localiser le défaut).

Pour l'analyse des micro-batteries en boîtier, la méthodologie est semblable à celle des produits discrets et IPAD dans laquelle quelques questions ont été retirées.

La question Qc (**« Le boîtier est-il isolé ET la zone d'intérêt est-elle située dans la couche de brasure en contact avec la céramique ? »**) a été enlevée, car les micro-batteries ne sont pas montées dans un boîtier isolé.

La question Qd et le bloc qui s'y rapporte ont été retirés car étant donné l'avancement du projet, nous n'avons pas de micro-batteries Enfilm™ HighTemp montées sur carte. Dans le futur, en particulier lorsque la structure du produit sera validée, le fait de devoir analyser une micro-batterie assemblée sur un circuit imprimé devra être étudié : cela limitera-t-il les étapes déjà mises en place ? Des alternatives devront-elles être développées ?

Plusieurs questions spécifiques aux produits discrets et IPAD ont été enlevées car elles ne sont pas applicables à la structure des micro-batteries Enfilm™ HighTemp :

- Question Q5: « **est-il obligatoire de conserver l'intégrité du boîtier et des connexions pour de futurs tests électriques (trop d'entrées/sorties), ou manipulation difficile (petite puce)** »: pour les micro-batteries, nous avons toujours 2 contacts et une taille de puce suffisante pour ne pas nécessiter de conservation du boîtier et des connexions.
- Question Qg : « **Les couches intermétalliques (IMD) utilisées dans la technologie de la puce sont-elles endommagées par une attaque chimique humide ?** » : car la technologie des micro-batteries Enfilm™ HighTemp contient une passivation sensible aux acides et au plasma ce qui empêche tout accès par la face avant.
- question Qh: « **Les plots de contact utilisés dans la technologie de la puce sont-ils endommagés par une attaque chimique humide ?** » : car les plots de contacts de la puce, ne sont pas endommagés par l'attaque chimique humide.

Ces micro-batteries comportent une passivation qui est sensible aux acides employés pour l'attaque chimique du boîtier. Nous avons donc retiré de la méthodologie les deux préparations d'échantillon d'attaque chimique humide du boîtier (l'attaque globale et l'attaque locale) car elles endommagent le composant.

Ainsi, les préparations sont limitées au polissage face avant et au polissage face arrière, ce qui rend la question Q4 superflue car en dépit du nombre d'échantillons faible, de la structure du produit et de la signature électrique il n'y a pas d'autre approche possible. C'est pourquoi cette question Q4 a été retirée.

Question Q4: « **Selon le nombre d'échantillons disponibles, la structure du produit et la signature électrique de la défaillance, y a-t-il un risque de réduire les chances d'identifier le mécanisme de défaillance si le défaut est perdu au cours de ce procédé ?** »

Seules les questions Q6 et Q7 sont conservées ce qui réduit donc largement les approches avec uniquement 2 types de préparation.

Le polissage par la face avant est réalisé lorsque le défaut est suspecté en face arrière du composant ou dans le volume du silicium (Q6). Sinon un polissage mécanique par la face arrière du composant sera réalisé pour atteindre le silicium (Q7).

Pour ces micro-batteries EnFilm™ HighTemp, la méthodologie de préparation d'échantillon en vue de la localisation de défaut est, comme pour les micro-batteries EnFilm™ HighCap, très réduite. Un grand nombre de questions a été retiré. Ce faible nombre d'approches révèle le peu d'alternatives de l'analyste dans la gestion de son analyse. L'effet de cette limitation dans la préparation d'échantillon restreint aussi le choix des techniques de localisation.

Ce produit étant encore en cours de développement, des changements peuvent être réalisés sur sa structure, ce qui pourrait remettre en cause, pour la suite, certaines étapes de la méthodologie proposée. Nous pouvons citer par exemple l'impact d'une modification des matériaux utilisés pour l'encapsulation. Ainsi, si une couche de passivation type nitrure ou oxyde de silicium est utilisée, la décapsulation chimique

du boîtier ne posera plus de difficulté. Cette passivation protégerait les couches actives des acides utilisés pendant le retrait de la résine de boîtier.

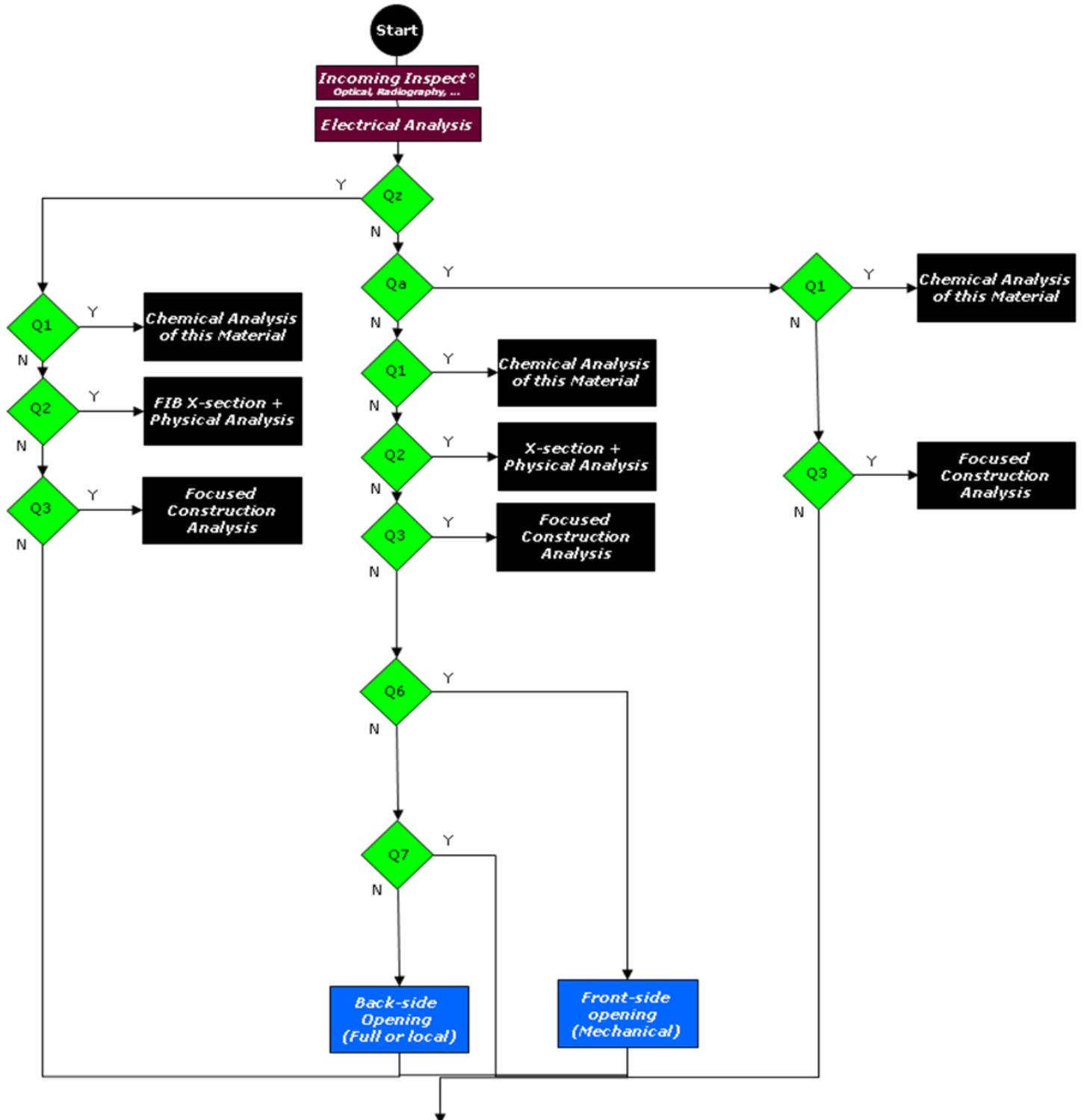


Figure 119: Méthodologie de préparation d'échantillon en vue de la localisation de défauts pour les micro-batteries

Qz: Does the analysis concern a Enfilm™ HighCap microbattery?

Qa: Does this analysis concern a non encapsulated die?

Q1 : During Incoming Inspection, did you detect a conductive foreign material* between pins of the part, at the surface of the product?

Q2 : During non destructive inspection, did you detect an abnormality*, e.g. a foreign material during X-Rays?

Q3 : Has Electrical Analysis concluded that whatever the sample preparation approach chosen it is preferable to perform full construction (Back-end & Front-end) analysis focused on well chosen area of interest?

Q4 : Based on the number of samples available, the structure of the product & the electrical signature of the failure, is there any risk to reduce the chance to identify the failure mechanism if loosing defect during this process ?

Q5 : Is it mandatory to keep package integrity & connections available for further electrical test (too much I/Os) or handling (too small die) ?

Q6 : Did the preliminary electrical failure analysis indicate that the physical defect* may be located at the die back-side (active area on the backside, die attach or frame) or in the die substrate volume ?

Q7 : Did the preliminary electrical failure analysis indicate that the physical defect* may be damaged/removed by the stress induced by a mechanical process ?

* : responsible for electrical failure

Figure 120: *Questions associées à la méthodologie de la figure 119*

3.2 Nouvelle méthodologie de préparation d'échantillon en vue de l'accès au défaut

Cette méthodologie s'applique aux deux types de micro-batteries. De la même façon que précédemment, nous avons repris la méthodologie mise au point pour les produits discrets et IPAD, adapté les étapes à chacune des micro-batteries et ensuite intégré les résultats dans une même figure. Le début de la méthodologie (jusqu'aux différentes questions Q11) est identique à ce qui est fait pour les produits discrets, à l'exception de l'étape de « circuit edit » qui a été supprimée. Ces produits ne se prêtent pas à ce type de préparation car contrairement aux produits discrets et IPAD, il n'y a pas d'intérêt à déposer des pistes de métallisation ou à en couper. Des modifications apparaissent néanmoins à la suite des questions Q11.

Tout d'abord, nous avons retiré l'étape de localisation virtuelle car nous ne disposons pas de base de données permettant de réaliser une localisation virtuelle du défaut. Ensuite, nous avons retiré le bloc de préparation d'échantillon demandant un effeuillage du composant (« upper layer delayering ») et l'étape de localisation qui suivait. En effet, comme nous avons pu le voir dans le chapitre 2, dès le retrait des premières couches des micro-batteries (passivation) une oxydation des couches actives se produit, réduisant considérablement les chances de résolution de l'analyse puisque la batterie est alors fortement dégradée par la préparation. Nous avons donc décidé de ne pas utiliser cette approche pour résoudre les analyses. Si le défaut n'a pas été localisé à ce stade, l'analyste ne réalise pas d'effeuillage de la micro-batterie mais passe directement à la question Q12 pour faire soit une analyse de construction de la micro-batterie, soit l'analyse d'un autre échantillon ayant la même signature électrique.

Lorsqu'une localisation de défaut a été obtenue, les étapes d'accès au défaut vont aussi différer de celles faites sur produits discrets et IPAD. Cet accès au défaut sera aussi différent selon le type de la micro-batterie, c'est pourquoi la question Qz (« **L'analyse concerne-t-elle une micro-batterie Enfilm™ HighCap ?** ») réapparaît dès que la localisation a été réussie.

Pour les micro-batteries Enfilm™ HighCap, la seule préparation possible pour accéder au défaut consiste à réaliser une coupe par FIB dans la zone de défaut déterminée. Pour atteindre les couches actives, il est alors nécessaire de traverser la totalité de l'encapsulation ce qui prend de nombreuses heures au FIB (>20h). Cette coupe peut être réalisée par la face avant de l'encapsulation ou par la face arrière. Néanmoins, pour limiter au maximum le temps de préparation la coupe doit être réalisée du côté où l'encapsulation est la plus fine. C'est ainsi que la question Qy fait son apparition dans la méthodologie : « **Qy: L'encapsulation est-elle plus fine sur la face avant de la micro-batterie que sur la face arrière ?** »

Pour les micro-batteries Enfilm™ HighTemp, les étapes d'accès au défaut se limitent aussi à la micro-section dans le défaut.

Les questions Qg, Qh ont aussi disparu car elles ne sont pas adaptées aux technologies des micro-batteries.

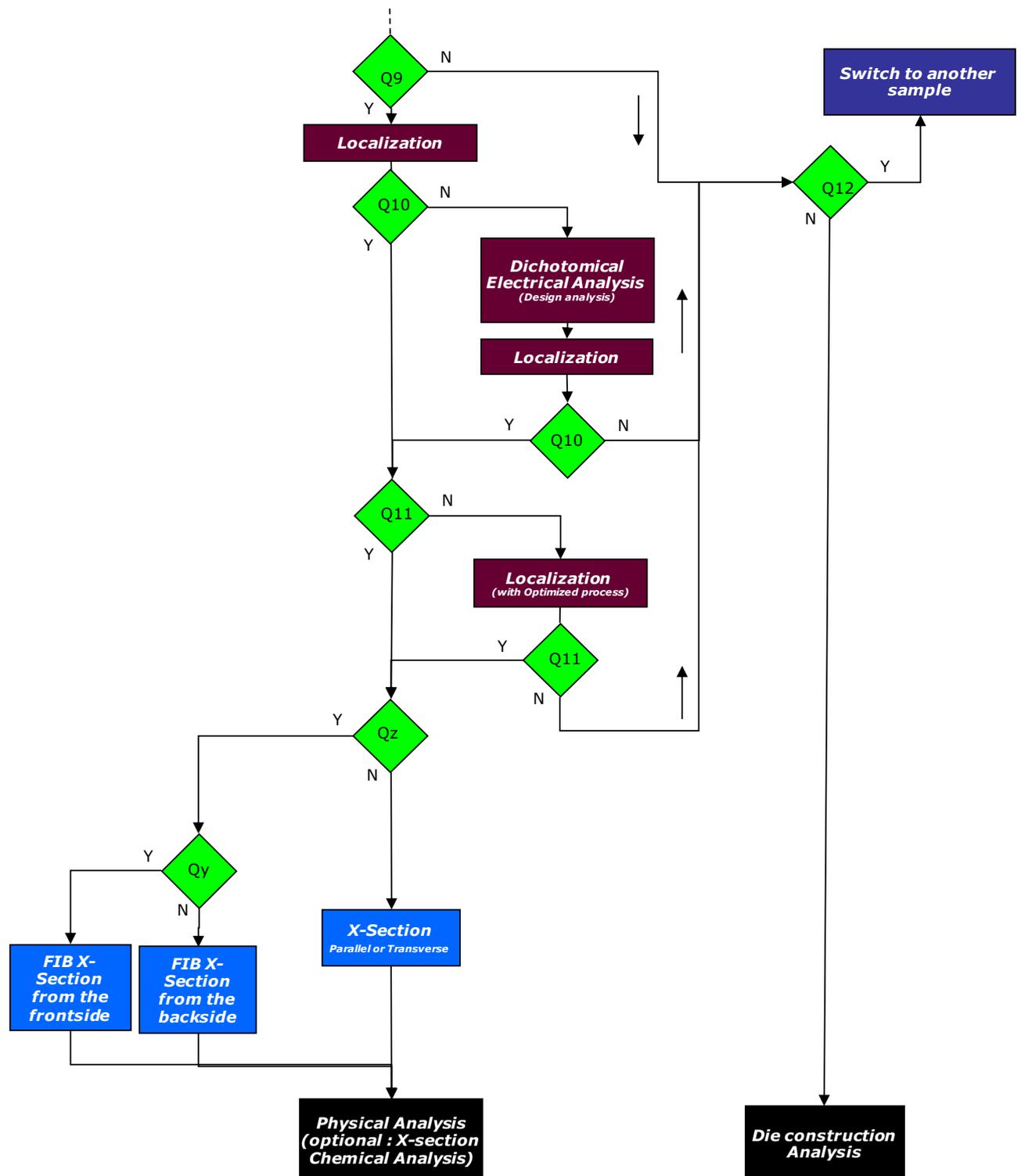


Figure 121: Méthodologie de préparation d'échantillon en vue de l'accès au défaut pour les micro-batteries

Q9 : Is Electrical failure still available before Localization step ?

Q10 : Is localized area coherent with electrical failure (if no localization, answer "No") ?

Q11 : Is localized area enough precise to perform defect physical & chemical analysis ?

Qz: Does the analysis concern a Enfilm™ high cap micro-battery?

Q12 : Is there any other sample with the same electrical signature (or similar but more adequate for available localization techniques) ?

Qy : Is the encapsulation thinner at the top of the micro-battery than at the bottom?

Figure 122: *Questions associées à la méthodologie de la figure 121*

Après avoir évalué l'impact des différentes techniques de préparation sur les micro-batteries, il nous a été possible de mettre au point une méthodologie de préparation d'échantillon pour l'analyse des micro-batteries en vue de la localisation de défaut puis en vue de l'accès au défaut. Ces travaux permettent ainsi d'apporter une base dans la gestion de l'analyse de ces produits innovants.

Néanmoins, les micro-batteries sont encore au stade du développement et leur structure peut encore évoluer, ce qui aura un impact sur la gestion de leur analyse. En fonction des changements opérés dans le futur sur ces produits, de nouveaux essais de préparation d'échantillon s'avéreront nécessaires ce qui pourrait faire évoluer cette première méthodologie de travail proposée.

4 Conclusion chapitre 3

4.1 Produits discrets et IPAD

Les nouvelles méthodologies de préparation d'échantillon proposées dans ce mémoire pour les produits discrets et IPAD permettent de couvrir un plus grand nombre de cas d'analyses de défaillance que ce que le permettait la méthodologie initiale. Elles permettent de traiter certains des cas d'échecs répertoriés jusqu'alors et d'élargir son utilisation en s'appliquant aux boîtiers mais aussi aux puces, aux morceaux de plaquette et aux boîtiers montés sur carte. Les développements proposés et la mise à jour des méthodologies permettent ainsi d'atteindre un plus fort taux de succès. Néanmoins, toutes les limites n'ont pu être étudiées au cours de cette thèse et des solutions n'ont pas pu être proposées dans tous les cas. Certaines de ces limites ont déjà été abordées dans les parties précédentes.

L'une des limites concerne la difficulté de réaliser un accès à la face avant de certaines puces en boîtier, lorsque ni la chimie humide ni le plasma ne peuvent être employés. Pour ces cas, de nouvelles méthodes de préparation pourront être évaluées en continuant en particulier une veille technologique sur les nouveaux équipements proposés sur le marché comme le plasma ICP pour le retrait de boîtier. Lorsque la préparation est réalisée en vue de la localisation du défaut, il faudra, en plus, évaluer de nouvelles techniques de localisation non standards aujourd'hui qui nécessitent peu ou pas de préparation d'échantillon. Nous pouvons citer par exemple la thermographie IR et la microscopie magnétique qui peuvent être utilisées sans préparation d'échantillon préalables.

En plus de ces limites déjà abordées, s'en ajoutent d'autres que cette thèse n'a pu permettre de traiter. On peut citer par exemple certains défauts de coulées de brasure (sur les bords d'une puce) dont l'accès direct n'a pu être fait. Il est alors possible de les observer avec une image laser par transparence au travers du silicium, après un polissage face arrière. Néanmoins, une caractérisation plus poussée n'a pu être réalisée faute de pouvoir y accéder. En effet, au cours du retrait de boîtier par voie chimique humide, ces fines coulées de brasure se décrochent de la puce, et la pièce est restaurée. En micro-section, le liseré de brasure est si fin qu'il n'est alors pas possible d'arriver à arrêter le polissage dans ce liseré.

4.2 Micro-batteries

Concernant les micro-batteries, le travail réalisé au cours de cette thèse a permis d'évaluer les difficultés de résolution d'analyses de défaillance sur des produits très innovants avec des matériaux non standards en micro-électronique. Les essais et développements réalisés sur ces produits permettent de connaître l'impact de la majorité des techniques d'analyse sur ces structures. Les méthodologies proposées dans ce chapitre pour réaliser les analyses de micro-batteries forment une base importante pour les analystes.

Le taux de succès des analyses de micro-batteries est cependant loin de son maximum en raison de deux facteurs principaux :

- tout type de défaut n'est pas encore assuré d'être localisé,
- les préparations d'échantillon envisageables restent restreintes, limitant l'utilisation de certaines techniques de localisation mais aussi l'accès au défaut.

A ce jour, cette méthodologie est une base nécessaire et solide permettant de réaliser les analyses de défaillance sur micro-batterie avec les outils et les connaissances actuelles. Néanmoins, il est nécessaire de continuer à réaliser certaines évaluations en particulier sur les techniques de localisation comme la thermographie infrarouge et la microscopie magnétique. Ces techniques permettent de contourner les difficultés de préparation d'échantillon en proposant une alternative à la localisation de défaut utilisée de manière standard en micro-électronique.

En amont de l'analyse, une compréhension plus poussée des caractéristiques électriques des micro-batteries et en particulier des signatures électriques des défaillances sera primordiale. Une corrélation entre les mesures électriques et les types de défauts n'est pas encore connue mais permettrait de faciliter l'analyse qui suit. La thèse lancée en particulier sur les mesures par spectroscopie d'impédance, ainsi que les futures analyses de défaillance réalisées seront très utiles pour réaliser ce diagnostic électrique.

Les deux types de micro-batteries sont encore en développement et leur structure va sans doute évoluer. Ces changements nécessiteront de réévaluer la pertinence de la méthodologie proposée. En effet, avec ces nouvelles structures, de nouvelles campagnes d'essais sur les techniques de préparation devront être lancés avec deux objectifs. Le premier devra permettre de voir si la méthodologie proposée est toujours applicable. Le second devra montrer si des techniques jusqu'alors absentes de la méthodologie pourraient y être intégrées. Nous avons par exemple évalué sur les micro-batteries Enfilm™ Hightemp actuelle que la décapsulation chimique n'était pas possible. Cette approche n'est donc pas dans la méthodologie. Néanmoins avec une modification de la structure et l'utilisation d'une passivation résistante à l'acide nitrique et/ou à l'acide sulfurique, cette approche pourra fonctionner et simplifiera l'accès à la puce. Dans ce cas, la méthodologie actuelle continuera de fonctionner mais de manière plus complexe que nécessaire.

Que ce soit pour les micro-batteries ou pour les produits discrets et les IPAD, une remise en question de la méthodologie proposée sera toujours nécessaire dès lors que les produits présenteront une évolution.

Conclusion générale

Dans la microélectronique, l'analyse de défaillance des composants est une étape indispensable pour améliorer la qualité des produits. Elle intervient à toutes les étapes de la vie du produit : de sa conception à son utilisation chez le client. Ces analyses de défaillance permettent de comprendre les mécanismes de défaillance. De là, il est alors possible d'en connaître la cause, de modifier les procédés de fabrication en conséquence et ainsi d'améliorer les performances des produits. (*chap.2 §1*)

Pour réaliser ces analyses de défaillance, un travail rigoureux et organisé est nécessaire. Les analyses se découpent en six étapes principales : la caractérisation électrique de la défaillance, les contrôles non destructifs, la préparation d'échantillon en vue de la localisation, la localisation du défaut, la préparation d'échantillon en vue de l'accès au défaut, et la caractérisation physico-chimique du défaut. Les deux étapes de préparation d'échantillon sont primordiales car elles permettent d'accéder à des zones enfouies du composant. Néanmoins, elles sont aussi particulièrement critiques dans l'analyse car elles contraignent l'échantillon mécaniquement, chimiquement, thermiquement et peuvent générer de nouveaux défauts ou retirer le défaut initial (*chap.1 §2*). Pour réaliser ces étapes de préparation d'échantillon, un large panel d'outils est disponible et continue de s'accroître avec l'évolution des produits (*chap.1 §4*). Ce vaste choix de techniques a pour intérêt de varier les types d'accès au composant. Selon le produit analysé, son mode de défaillance et le nombre d'échantillons disponibles, l'analyste va ainsi devoir faire un choix parmi toutes les techniques de préparation à sa disposition. Pour l'aiguiller dans ce choix, des méthodologies ont été mises en place permettant d'assurer un haut taux de succès des analyses. Cependant, les structures, les matériaux, les dimensions, les fonctions électriques des composants électroniques présents sur le marché sont tellement variés qu'une méthodologie universelle et applicable à tout composant n'existe pas. On trouve par contre des méthodologies dédiées à des familles de produits spécifiques (composants de puissance, flip-chip,...). Cette thèse s'est intéressée à la méthodologie de préparation d'échantillon pour l'analyse de défaillance de deux familles de produits : les produits discrets et IPAD, et les micro-batteries. (*chap.1 §3*)

Pour ces deux familles, l'objectif de la thèse était d'obtenir une méthodologie viable permettant d'assurer un taux de succès se rapprochant au plus près de 100%. Cependant, si le but était semblable, l'approche et la méthode de travail ont été bien différentes. En effet, pour les produits discrets et IPAD, il s'agissait de travailler sur l'optimisation d'une méthodologie existante, alors que pour les micro-batteries, il a fallu mettre au point cette méthodologie. En synthèse de ce mémoire, nous différencions ainsi les résultats de ces deux parties de travail.

1 Optimisation de la méthodologie pour produits discrets et IPAD

Concernant la famille des produits discrets et IPAD, une méthodologie était déjà disponible pour ces produits en boîtier et assurait un taux de succès élevé des analyses. Certains cas, néanmoins, ne pouvaient être résolus en suivant scrupuleusement cette méthodologie. Pour assurer la compréhension d'un plus grand nombre d'analyses de défaillance, nous avons décidé d'optimiser cette méthodologie

en nous intéressant à ces cas lorsque l'une des deux étapes de préparation d'échantillon menait à un échec de l'analyse. Le travail de cette thèse a ainsi consisté à étudier les cas d'échec déjà observés ou attendus, à en comprendre les origines, et à développer une méthode de préparation d'échantillon alternative. Les cas d'études présentés dans le chapitre 2 ont ainsi permis d'étayer les limites atteintes par la méthodologie existante (*chap. 2 §2, §3, §4*).

Par les études réalisées, nous avons pu révéler que la faille principale de la méthodologie est liée à l'utilisation de nouveaux matériaux dans les structures (nouvelle passivation, nouvelles métallisations, ...) mais aussi au besoin de mise en relief de défauts spécifiques comme les microfissures. Les difficultés rencontrées sont alors liées à une interaction non contrôlée entre le produit et la préparation choisie qui dégrade le composant ou le défaut lui-même et empêche la localisation ou l'accès au défaut. Enfin, connaissant la cause de ces échecs et une nouvelle solution de préparation d'échantillon, nous avons pu généraliser chacun des cas étudiés et intégrer ces nouvelles approches au sein de la méthodologie. De plus, au-delà de ces cas, nous avons élargi la méthodologie axée sur les composants en boîtier en l'adaptant aux composants sur puce ou sur morceaux de plaquette et aux composants en boîtier montés sur carte. (*chap. 3 §2*)

Cette méthodologie intègre donc aujourd'hui un plus large éventail de cas et a été actualisée avec les développements technologiques actuels. Ces développements vont néanmoins se poursuivre et de nouvelles limites à la méthodologie vont continuer à voir le jour. La méthodologie proposée n'a donc pas pour but de rester figée. Elle évoluera encore avec les produits et les techniques d'analyse arrivant sur le marché.

Concernant les produits, nous pouvons nous attendre à l'apparition de nouveaux matériaux. Il sera alors nécessaire d'évaluer leur interaction avec les différentes techniques de préparation d'échantillon (sensibilité aux produits chimiques, comportement en polissage mécanique, réaction à l'attaque ionique, au laser, au plasma) et la sélectivité d'attaque par rapport aux autres matériaux du composant. On peut citer par exemple l'apparition de gels utilisés autour de flip-chip lorsque ceux-ci sont montés sur carte. Ces gels rendent difficile l'accès à la face avant de la puce des flip-chips. Leur retrait sans endommager la puce est complexe.

Au-delà des matériaux, les structures géométriques et les empilements se modifient continuellement. L'intégration en 3D des composants par exemple continue de s'accroître avec de plus en plus de puces empilées et de tranchées dans les puces. Ceci génère de nouvelles difficultés aussi bien en localisation de défaut qu'en préparation d'échantillon. Concernant la préparation d'échantillon, sur ces structures plus complexes, il sera nécessaire de se demander si les techniques de préparation peuvent s'appliquer : comment réagit le composant en polissage avec ces innombrables matériaux ? Est-il possible de réaliser des retraits couche par couche dans ces structures ?

Une autre limite pour les composants discrets concerne les dimensions des boîtiers qui ne cessent de diminuer avec aujourd'hui des boîtiers pouvant mesurer $250\mu\text{m} \times 130\mu\text{m}$. Il faut alors se demander si toutes les étapes présentes dans la méthodologie sont réalisables sur ces produits et jusqu'à quelle dimension l'analyste pourra manipuler manuellement ces composants.

Au-delà des difficultés liées à l'échantillon lui-même, la méthodologie peut aussi évoluer avec l'apparition de nouvelles techniques de préparation d'échantillons visant à répondre au besoin des laboratoires d'analyse. L'évaluation de ces techniques est nécessaire pour pouvoir répondre à des analyses où aucune solution n'est disponible mais aussi pour optimiser certaines approches aujourd'hui utilisées (meilleure qualité de la préparation, gain de temps). On peut par exemple parler des équipements d'attaques chimiques à basse température (jusqu'à 10°C) ou appliquant une différence de potentiel entre l'échantillon et la solution. Ces deux techniques ont pour but de limiter l'attaque de certaines parties du composant (tels que les fils en cuivre) pendant qu'une autre partie est attaquée (la résine de boîtier). A ceci, s'ajoutent aussi des techniques de gravure FIB couplées à du plasma pour accélérer les temps de gravure et pour permettre de réaliser des micro-sections plus larges (supérieures à 100µm). Ce sont autant de techniques innovantes qu'il sera nécessaire d'évaluer pour en connaître les avantages et les limites.

Les perspectives pour assurer une résolution d'analyse ne se limitent cependant pas à développer de nouvelles approches en préparation d'échantillon mais peuvent consister à la contourner en utilisant des techniques de contrôle non destructif de meilleure résolution ou encore en utilisant de nouveaux outils de localisation ne nécessitant pas de préparation d'échantillon.

Concernant les contrôles non destructifs, de nouvelles techniques à haute résolution, telles que la tomographie 3D ou la microscopie acoustique haute résolution, peuvent apporter des solutions. Avec ces techniques, des défauts observables jusqu'ici uniquement après préparation d'échantillon peuvent être déjà détectés. Parce qu'aucune préparation d'échantillon n'est alors nécessaire, certaines limites dues à la préparation d'échantillon sont éliminées. Les outils de tomographie 3D par exemple atteignent une résolution inférieure au micron permettant d'observer par exemple des fissures à l'intérieur de tranchées dans le silicium ou à l'intérieur de billes de soudure.

Du côté de la localisation de défauts, la thermographie infrarouge ou la microscopie magnétique sont des techniques prometteuses à étudier. Elles ont aussi l'avantage de limiter les étapes de préparation. On voit ainsi des cas d'analyses sur composant 3D résolus grâce à ces techniques [SCH11]. Parce que ces techniques utilisent d'autres principes de localisation que l'EMMI ou l'OBIRch couramment utilisés en laboratoire, elles permettent de localiser des défauts jusqu'ici non détectables. On peut parler par exemple des défauts V_f abordés dans la méthodologie, dus à une résistance en série dans le composant et pour lesquels à ce jour aucune localisation de défaut n'est réalisée. La thermographie IR comme la microscopie magnétique révèlent les passages de courant et devraient permettre une gestion de l'analyse non pas en analyse de construction comme cela est réalisé aujourd'hui mais en analyse de défaillance standard avec l'accès au défaut après sa localisation.

Enfin, il faut noter que les causes d'échecs d'une analyse ne sont pas uniquement liées à l'étape de préparation d'échantillon. On peut en particulier avoir des difficultés à localiser certains défauts. Cette limite de localisation peut venir de la défaillance elle-même qui ne peut être détectée avec les outils actuels, ou des techniques de localisation qui peuvent endommager un composant (tel que l'impact du laser de l'OBIRCh sur certains matériaux), ou encore de la structure du composant

qui limite l'utilisation des techniques de localisation actuelles. Ainsi, c'est aussi sur ces cas qu'il sera intéressant de réaliser des investigations.

De manière générale, le travail réalisé sur la famille de produit discret et IPAD a permis de montrer comment faire évoluer une méthodologie en fonction des développements des produits et des techniques à disposition. La méthode de travail employée pourra être utilisée pour actualiser la méthodologie.

2 Mise en place d'une méthodologie pour l'analyse des micro-batteries

Les micro-batteries sont des produits très récents et s'éloignent de la microélectronique standard. Les matériaux utilisés et les fonctions électriques sont bien différents de ceux des composants analysés classiquement. Pour permettre l'analyse de ces produits avec succès, la mise en place d'une méthodologie était nécessaire.

La première étape du travail a consisté à évaluer l'impact, sur ces produits innovants, des différentes techniques employées couramment sur produits discrets et IPAD. De la caractérisation électrique à la caractérisation physico-chimique des défauts, nous avons pu montrer quelles techniques étaient adaptées aux micro-batteries et lesquelles étaient inappropriées (*chap.2 §5*). A partir de ces résultats, nous avons pu mettre au point deux méthodologies de préparation d'échantillon pour l'analyse des micro-batteries, l'une en vue de la localisation de défaut et l'autre en vue de l'accès au défaut (*chap.3 §3*). Les travaux de cette thèse ont ainsi permis d'apporter une base dans la gestion de l'analyse de ces produits innovants.

Le taux de succès des analyses de micro-batteries n'est cependant pas à son maximum en raison de deux difficultés majeures qui sont liées à la préparation d'échantillon et la localisation de défaut.

Nous avons pu souligner dans le chapitre 2 que le choix possible dans les techniques de préparation est restreint en raison de la sensibilité des matériaux à l'eau et à l'air. Ceci limite l'accès à des zones enfouies de la micro-batterie et en particulier l'accès aux couches actives.

Concernant la localisation des défauts, aucun défaut n'a pu à ce jour être localisé avec les techniques standards (EMMI, OBIRCh). Certains modes de défaillance ne peuvent être localisés (circuit ouvert) et d'autres demandent encore à être évalués (anomalie pendant la charge ou la décharge).

Pour répondre à ces deux difficultés, la clé réside certainement dans deux techniques de localisation (la thermographie et la microscopie magnétique) dont l'évaluation doit être poursuivie. Ces deux approches ont l'avantage de contourner les difficultés de préparation d'échantillon tout en permettant de réaliser une localisation de défaut. Ce sera le point le plus important à développer.

Enfin, l'analyse de défaillance de ces produits pourra aussi progresser lorsque les signatures électriques de la défaillance seront mieux définies. Par le diagnostic électrique, des défauts pourront être associés et attendus, lorsqu'un retour sur un plus grand nombre d'analyses aura été réalisé.

De même que pour les méthodologies proposées pour les produits discrets et IPAD, celles-ci ne vont pas rester figées. Elles vont aussi évoluer avec les produits et les techniques existantes.

Les micro-batteries sont encore au stade du développement et peuvent encore être modifiées. Les matériaux utilisés pour les électrodes et l'électrolyte ne devraient pas changer car ils ont été choisis pour répondre au cahier des charges final (capacité de la micro-batterie, et tenue en température pour les micro-batteries Enfilm™ High Temp). Néanmoins, les collecteurs, les passivations, les contacts, l'encapsulation de ces micro-batteries peuvent être modifiés : les matériaux comme leur géométrie. En fonction de ces changements, deux questions devront être posées :

- La méthodologie actuelle est-elle toujours applicable avec ces nouvelles configurations de micro-batterie ?
- Les approches inadaptées sur la technologie actuelle deviennent-elles appropriées à la nouvelle structure ?

Pour répondre à la première question, l'approche sera identique à ce qui a été fait pour les cas présentés sur les produits discrets et IPAD. Il faudra alors s'interroger sur l'impact du changement sur chaque étape de la méthodologie. Si une étape n'est plus applicable, une solution alternative devra être développée puis intégrée à la méthodologie.

Concernant la deuxième question, il faudra réévaluer les techniques de préparation mises à l'écart dans la méthodologie parce qu'elles ne fonctionnaient pas sur les micro-batteries actuelles. Nous pouvons donner l'exemple d'un changement de passivation sur les micro-batteries Enfilm HighTemp. Aujourd'hui, la passivation utilisée ne permet pas l'accès à la face avant de la puce lorsque la micro-batterie est en boîtier. Si une nouvelle passivation est utilisée, il faudra donc réévaluer les techniques de décapulation et modifier la méthodologie en conséquence si une technique de retrait de boîtier fonctionne sans endommager la micro-batterie.

Malgré toutes ces évolutions possibles, une méthodologie a pu être proposée et mise en place et donne une base nécessaire et solide permettant de réaliser les analyses de défaillance sur micro-batterie avec les outils et les connaissances actuelles.

3 Perspectives générales

Que ce soit pour l'une ou l'autre des méthodologies proposées dans ce mémoire, il sera nécessaire de les faire évoluer avec l'avancement technologique des composants et des techniques. L'impact sur la méthodologie dépendra de ces différentes évolutions.

Avec l'arrivée de nouvelles structures, l'étude de l'impact des techniques de préparation d'échantillon existantes sera réalisée, des solutions alternatives seront éventuellement développées si l'approche standard n'est pas possible. De nouvelles branches apparaîtront alors dans la méthodologie pour traiter ces nouveaux cas.

Lorsqu'une nouvelle technique de préparation d'échantillon est développée, il faudra se demander dans quel cadre cette technique peut être utilisée, et ce qu'elle apporte. Si elle est intéressante pour des cas jusqu'ici non résolus, une nouvelle branche apparaîtra dans la méthodologie. Si cette nouvelle technique est une alternative à une autre approche déjà existante, il faudra se demander dans quel cas il est plus avantageux de l'utiliser (meilleure mise en relief de certains défauts, gain de temps) pour déterminer le choix à faire entre ces approches.

Avec de nouvelles techniques de localisation, il sera nécessaire de se demander pour quelles défaillances ces techniques sont utilisables et quel type de préparation il est nécessaire de réaliser pour utiliser ces techniques. Avec l'utilisation de nouvelles techniques de localisation ne nécessitant pas de préparation d'échantillon par exemple, une nouvelle branche dans la méthodologie devrait apparaître, pour faire un choix parmi les techniques de localisation en fonction du mode de défaillance. Cela aura donc son impact sur la méthodologie.

L'évolution des contrôles non destructifs aura peu d'impact sur la méthodologie proposée en vue de la localisation car leur étape est en amont de la préparation d'échantillon. Néanmoins il y aura un effet certain sur le nombre d'analyses traitées et résolues à ce stade. Ces nouvelles approches pourraient être néanmoins intégrées dans la méthodologie en vue de l'accès au défaut. En effet, si ces nouvelles techniques de contrôle non destructif sont coûteuses en temps pour observer la totalité d'un composant, il pourra être intéressant d'analyser uniquement la zone localisée et observer ainsi le défaut avant d'y accéder physiquement.

Les produits comme les techniques n'ont pas fini d'être développés et le travail réalisé au cours de cette thèse permet de montrer comment créer une méthodologie et comment la faire évoluer. L'approche ainsi présentée pourra être de nouveau utilisée et permettra de continuer à dépasser les limites de résolution d'analyse de défaillance.

Références

Référence introduction générale

[HEN04] Henderson Christopher L., « education and training for the analyst »

Références chapitre 1

Plusieurs références sont tirées du livre “Microelectronics failure analysis desk reference, 5th edition”, EDFAS society, ASM international, 2004 :

[DIA04] Dias Rajen, “Failure analysis flow for package failures”, chap.2, p.34-39

[EDF04] EDFAS society, “failure analysis terms”, chap.18, p.744-759

[ENG04] Engel B, Levine E., Petrus J., Shore A., “The art of cross sectioning”, chap.11, p.474-493

[HEN04] Henderson Christopher L., “education and training for the analyst”, chap.17, p.718-722

[PER04] Perungulam S., Wills K.S., “Chip access techniques”, chap.7, p.313-323

[ROS04] Ross Richard J., “Management principles and practices for the failure analysis laboratory”, chap.17, p.731-740

[WIL04] Wills K.S. , Perungulam S., “delaying techniques: dry processes, wet chemical processing and parallel lapping”, chap.11, p.445-464

Autres références:

[ADA99] Adachi S., “Optical Constants of Crystalline and Amorphous Semiconductors”, Springer,1999

[ALL08] Allanic F., “Maitrise des procédés de préparation d'échantillon par faisceau d'ions focalisés dans un Dual Beam™”, mémoire de diplôme de recherche technologique, Université de Poitiers, 2008

[AUB08] Aubert A., “Mise en place de nouveaux outils de préparation d'échantillon appliqués aux analyses technologiques et de défaillances”, Mémoire diplôme de recherche technologique, Université Poitiers, 2008

[BEA04] F. Beaudoin,, P. Perdu, C. DeNardi, R. Desplats, J. Lopez, M. faucon, “Silicon thinning using ultra-short pulse laser ablation”, Proceedings from the 30th ISTFA, p.552-557, 2004

[BEC98] Beck F., “Integrated circuit failure analysis : a guide to preparation techniques”, 1998, Wiley

[CON12] www.controlsystmation.com, distributeur d'équipements laser

[CRY12] www.crystec.com, distributeur d'équipements pour l'industrie du semi-conducteur

[DIG12] Société Digitconcept, Obein M., Beauquis F., conversation et échange de documents au cours de la thèse

[DIN04] Dineen M., “Plasma etching- an essential tool for failure analysis”, oxford instrument plasma technology, 2004

[EMP06]EMPA, Failure analysis roadmap, 2006

[EON04] Eon D., “Gravure et traitement par plasma de matériaux organosilicé SiOC(H) pour des applications en lithographie avancée et comme isolant

d'interconnexion en microélectronique”, mémoire de thèse, école doctorale de Nantes, 2004

[JAC11] Jacobs P., “Power electronic device failure analysis roadmap”, EMPA, 2011

[HIT12] <http://www.hht-eu.com/cms/18431.html>, site web Hitachi

[HUE06] Huettinger M., Papenberg U., Touzel J., Janeiro A., Guedes R., Conceicao C., Ribeiro C., “Back side die preparation for check of backend related problems”, ISTFA, p.356-360, 2006

[ILL01] Illyefalvi-Vitéz Zsolt, “Laser processing for microelectronics packaging applications”, Microelectronics Reliability, Volume 41, Issue 4, Pages 563-570, 2001

[KER78] Kern W., Vossen J.L., “Thin film processes”, Elsevier science & technology books, dec 1978

[KYO11] www.kyocera-slc.co.jp, Kyocera

[KRU03] Krüger M., Krinke J., Ritter K., Zierle B., Weber M., “laser-assisted decapsulation of plastic-encapsulated devices”, Microelectronics Reliability, vol 43, pp 1827-1831, 2003

[LAG12] http://matthieu.lagouge.free.fr/microtechnology/dry_etch.html

[LET00] Tan Joo Lett, “Laser decapsulation of electronic packages”, SIMtech technical report, Advanced machining group, process technology Division, 2000

[LIE01] Liebert Silke, “Failure analysis from the backside of a die”, Microelectronics Reliability 41, 1193-1201, 2001

[MIC12] www.microchemicals.eu/technical_information

[NIS12] Nisene technology group, “process development”, Technical bulletin

[PAL98] Palik E., “Handbook of Optical Constants of Solids”, Elsevier, vol.3, Part2, 1998

[PAR07] Paul Eric B. Parañal, “Localized die metallization damage induced during laser marking of a semiconductor package”, Proceedings of the 33rd International Symposium for testing and failure analysis, Novembre 4-8 2007 ; McEnery Convention center, San José, California, USA

[PER00] P. Perdu, Desplats R., F. Beaudouin, “A review of sample backside preparation techniques for VLSI”, Microelectronics reliability 40, p1431-1436, 2000

[REN10] Renesas Electronics, “Semiconductor reliability Handbook”, www.renesas.com, section 5, 2010

[SON11] SONY, “Sony Semiconductor Quality and Reliability HandBook”, chap.3, 2011

[TEO03] TeoSys Engineering LLC, “Laser Micromachining Principles”, 2003

[ZHO06] Zhou J.; Zheng W., Lee T., “Fine MCP decapsulation technology development“, Proceedings of the 32nd ISTFA, 2006

Références chapitre 2

- [ACK01] Ackaert J., Wang Z., De Backer E., Coppens P., “Plasma damage in floating metal-insulator-metal capacitors”, proceedings of 8th IPFA, Singapore, 2001
- [AUB08] Aubert A., “Mise en place de nouveaux outils de préparation d'échantillon appliqués aux analyses technologiques et de défaillances”, Mémoire diplôme de recherche technologique, Université Poitiers, 2008
- [AUB08⁽²⁾] Aubert A., Dantas de Morais L., Rebrasse J.P., “Laser decapsulation of plastic packages for failure analysis : Process control and artefact investigations”, Microelectronics Reliability, Vol.48, Issues 8-9, p.1144-1148, 2008
- [AUB10] Aubert A., Rebrasse J.P., Dantas De Morais L., Labat N., Fremont H., “Failure analysis case study on a Cu/low-k technology in package: New front-side approach using laser and plasma de-processing”, Microelectronics Reliability, vol .50, p.1688-1691, 2010
- [AUB10⁽²⁾] Aubert A., Dantas de Morais L., Rebrasse J.P., Labat N., Frémont H., “Etude de la préparation mécanique d'un composant micro-électronique pour l'analyse de défaillance”, JNRDM, Montpellier, 2010
- [AUB11] Aubert A., Jacques S., Petremont S., Labat N., Fremont H., “Experimental power cycling on insulated TRIAC package: Reliability interpretation thanks to an innovative failure analysis flow”, Microelectronics Reliability , Vol.51, p.1845-1849, 2011
- [BAK98] Baklanov M.R., Vanhaelemeersch S., Alaerts C., “Plasma etching of organic low-dielectric-constant polymers: comparative analysis”, Materials Research society symposium proceedings, vol 511, 1998
- [BEC98] Beck F., “Integrated circuit failure analysis : a guide to preparation techniques”, 1998, Wiley
- [BRI07] Brillet-rouxel H., “Etude expérimentale et numérique des phénomènes de fissuration dans les interconnexions de la microélectronique”, Thèse, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007
- [CIA02] Ciappa M., “Selected failure mechanism of modern power modules”, Microelectronics reliability, vol 42, p.653-667, 2002
- [DEB08] Debleds S., “Localisation de défauts par stimulation thermique laser et par émission”, Mémoire de diplôme de recherche technologique, Université Poitiers, 2008
- [DIG12] Société Digitconcept, Obein M., Beauquis F., conversation et échange de documents
- [DUL96] Dulski T., “A manual for the chemical analysis of metals”, ASTM International, vol. 25,1996
- [GAM12] <http://www.gamry.com/assets/Application-Notes/Basics-of-EIS.pdf>, site de la société américaine Gamry Instruments, fabricant d'équipements pour mesures électrochimiques
- [HAR98] Harris E.B., Gregor W., Dennis D.C., Lai T.T., Sen S., Yan Y.F., Esry T., Pita M., “Charging damage in metal oxide metal capacitors”, 3rd symposium on plasma process-induced damage, USA, 1998
- [HEL97] Hel M., Jacob P., Nicoletti G., Scacco P., Poech M.H., “Fast power cycling test for IGBT modules in traction application”, Proc. of IEEE conference on power electronics and drive systems, p. 425-430, 1997
- [ICR11] www.icrmica.com, fabricant indien de MICA et de composants à base de MICA

- [IRY05] Iriyama Y., Kako T., Yada C., Abe T., Ogumi Z., “Charge transfer reaction at the lithium phosphorus oxynitride glass electrolyte/lithium cobalt oxide thin film interface”, *Solid State Ionics*, vol. 176, p. 2371 – 2376, 2005
- [JAC10] Jacques S., “Etude de la fatigue thermomécanique des composants de puissance de type TRIAC soumis à des cycles actifs de température”, mémoire de thèse, université François Rabelais de Tours, 2010
- [JOR07] Jorcin J.B., “Spectroscopie d’impédance électrochimique locale : caractérisation de la délamination des peintures et de la corrosion des alliages Al-Cu”, mémoire de thèse, soutenue le 14 mars 2007
- [JOS06] Jossen A., “Fundamentals of battery dynamics”, *Journal of Power Sources*, vol.154, p. 530–538, 2006
- [KRU03] Krüger M., Krinke J., Ritter K., Zierle B., Weber M., “laser-assisted decapsulation of plastic-encapsulated devices”, *Microelectronics Reliability*, vol 43, pp 1827-1831, 2003
- [LEV09] Levasseur A., Pecquenard B., Vinatier P., Salot R., Le Cras F., Martin M., “Microbatteries : microsources d’énergie en couches minces”, *Techniques de l’ingénieur*, 2009
- [LIE09] Lie J., Karppinen J., Laurika T., Kivilahti J K., “ Reliability of lead-free solder interconnections in thermal and power cycling tests”, *IEEE Transactions on components and packaging technologies*, vol.32, issue 2, p.302-308, 2009
- [MAR94] Marc F., “Elaboration d’une méthodologie de localisation de défauts sur circuits intégrés logiques par test sous faisceau d’électrons, application à différentes fonctions électroniques”, mémoire de thèse, université Bordeaux 1, 1994
- [PAI91] Pail K.W., Saia R.J., Chera J.J., ”Studies on the surface modification of benzocyclobutene (BCB) film by plasma ions”, *Materials research society symposium proceedings*, vol 203, 1991
- [PAR07] Paranal P.E.B., “Localized die metallization damage induced during laser marking of a semiconductor package “, *Proceedings of the 33rd ISTFA*, ASM international, pp226-230, 2007
- [PEC10] Pecquenard B., formation interne, “micro-batteries : état de l’art académique”, juin 2010
- [ST05] ST, “ EMI and ESD consideration for LCD and Cameras in wireless handset”, article technique TA0318, 2005 (disponible sur le site internet www.ST.com)
- [ST10] ST, “LC filters for mobile phone LCD and camera link”, Note d’application AN3141, 2010 (disponible sur le site ST)
- [STA06] http://www.stanford.edu/class/ee311/NOTES/Interconnect_Cu.pdf
- [STR11] www.struers.com, site de la société Struers fabricant d’équipements et de consommables pour la préparation métallographique des surfaces des matériaux solides
- [TSU00] Tsu R., McPherson J.W., McKee W.R., “Leakage and breakdown reliability issues associated with low-k dielectrics in a dual-damascene Cu process”, 38th IRPS, 2000
- [WAL91] Walker P., Tarn W.H.,”Handbook of metal etchants”,1991
- [WAN04] Wang Z., Ackaert J., Salm C., Kuper F.G., Tack M., De Backer E., Coppens P., De Schepper L., Vlachakis B., “Plasma-charging damage of floating MIM capacitors”, *IEEE Transactions on electron devices*, vol.51, numéro 6, juin 2004
- [WU03] Wu H., Cargo J., Serpiello J., “Reliability issues and advanced failure analysis deprocessing techniques for Copper/Low-k technology”, *IEEE*, 41st proceeding of IRPS, 2003

[WU04] Wu H., Cargo J., “Deprocessing techniques for copper, low-k and SOI devices”, Microelectronics failure analysis desk reference, 5th edition, EDFAS society, ASM international, chap.11, p.502-513, 2004

Référence Conclusion générale

[SCH11] Schlangen R., Motegi S., Nagatomo T., Schmidt C., Altmann F., “Use of Lock-In Thermography for Non-Destructive 3D Defect Localization on System in Package and Stacked-Die Technology”, ISTFA 2011, Conference Proceedings from the 37th International Symposium for Testing and Failure Analysis (ASM International), p.68-73, Nov 2011

Annexes

Annexe 1 : Les diélectriques à faible permittivité électrique

1) Les oxydes de silicium dopés

En ajoutant de la phosphine (PH_3) et/ ou du diborane (B_2H_6) à l'oxyde de silicium (SiO_2), du pentoxyde de phosphore (P_2H_5) et de l'oxyde de bore (B_2O_3) sont formés. Ces oxydes sont incorporés à l'oxyde de silicium donnant du **PSG** (phosphosilicate glass), du **BSG** (borosilicate glass) ou un mélange des deux, **BPSG** (borphosphosilicate glass).

Il est aussi possible d'ajouter de l'hydrogène (ex :hydrogen silsesquioxane ($\text{H}_8\text{Si}_8\text{O}_{12}$), des atomes fluorés (que l'on retrouve dans les produits parylène, PTFE) ou des groupements carbonés (SiCOH).

2) Les diélectriques organiques

Les matériaux organiques font partie des premiers choix faits par l'industrie pour obtenir des constantes diélectriques faibles. On peut citer par exemple le **DVS_BCB** (divinyl silozane bis-benzocyclobutane), le **SilK**, le **FALRE**, le **PAE-2**. Le **SilK** et le **BCB** (benzocyclobutene) produits par Dow chemical corporation sont deux matériaux avec une constante diélectrique de 2.6.

Le **SilK** est composé de réseau aromatique et ne contient pas de silicium.

Le **BCB** est un monomère contenant du silicium. Sa formule chimique est présentée figure 123.

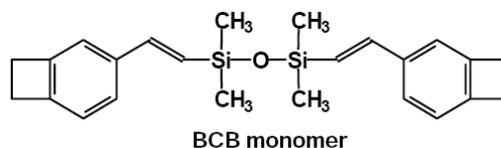


Figure 123: *Formule chimique du BCB*

3) Les diélectriques poreux

La constante diélectrique d'un matériau diminue avec sa densité, c'est pourquoi les matériaux poreux sont utilisés pour diminuer cette constante. Il s'agit alors de prendre un matériau avec une constante diélectrique faible (tels que les oxydes dopés) et d'incorporer un liquide permettant de créer des pores dans l'oxyde. Les techniques sont appelées aerogel ou xerogel.

Ces matériaux ont alors une constante diélectrique inférieure à 2.

Annexe 2 : Tableau de synthèse des propriétés mécaniques, électriques et thermiques à 300K des matériaux de la microélectronique

Sources : MatWeb, différents fournisseurs, Struers, Webelements, Mensnet, Mindat

		MECANIQUE				
		MATERIAU	Dureté (HV)	Masse volumique (kg/m ³)	Ductilité / Allongement (%)	Module d'Young (GPa)
METAL	Fils	Cuivre	100-120	8960	15-60	110
		Aluminium	45	2700	30	70
		Or	25-70	19320	30	77
	Frame	Nickel	200	8800	10	207
		Cuivre (Wieland-K80 CuFeP)	80-150	8890	>2	130
		Etain	10	7310	?	40-50
RESINE		Epoxy (Novolak)	9.4-20.7	1600-2000	1.426-1.535	14.1-14.8
SUBSTRAT		Silicium	> 750	2329	< 1	112
		BSG (Borofloat Schott)	> 500	2230	< 1	63
		GaN		6100	< 1	180
		Saphir		3.97E9		4610
		SiC	2500	3100		410
DAM		Colle isolante élec. (Ablebond 84-3J)				
		Colle conductrice élec.(Ablebond 8390)				
		PbAg2.5Sn2 (microbond soft solder Umicore technical materials)		11200	40-45%	
BILLES		SnAg0.5Cu4.0		8900		1.4E6
		PbSn		8400		35.7
PASSIVATION		BCB			6%	2
		Polyimide			5%	3.4

		THERMIQUE					ELECTRIQUE	
		MATERIAU	Conductivité thermique (W/mK)	Température fusion (°C)	Température vaporisation (°C)	Chaleur de fusion (J/°C)	Chaleur spécifique (J/kg°C)	Résistivité électrique (ohm.cm)
METAL	Fils	Cuivre	385	1083	2927	205	385	$1,70 \cdot 10^{-06}$
		Aluminium	210-237	660	2519	387	900	$2,70 \cdot 10^{-06}$
		Or	300-320	1064	2856	66	132	$2,30 \cdot 10^{-06}$
	Frame	Nickel	61-91	1455	2913	306	460	$6,40 \cdot 10^{-06}$
		Cuivre (Wieland-K80 CuFeP)	350				393	
		Etain	67	231	2602	59.5	213	$1,15 \cdot 10^{-05}$
RESINE		Epoxy (Novolak)	0.149-1.3			1150-1196	$10^{19}-10^{21}$	
SUBSTRAT		Silicium	124	1412	3265	1800	702	10^{-2}
		BSG (Borofloat Schott)	1.12	1250			830	$1,70 \cdot 10^{14}$
		GaN	66	1227	>2500			
		Saphir	42				750	
		SiC	120				750	10^2-10^6
DAM		Colle isolante élec. (Ablebond 84-3J)	0.5					$3,5 \cdot 10^{13}$
		Colle conductrice élec. (Ablebond 8390)	1.8 @121°C					$8 \cdot 10^{-4}$
		PbAg2.5Sn2 (microbond soft solder Umicore technical materials)	54	304				
BILLES		SnAg0.5Cu4.0	57				219	
		PbSn	51				219	
PASSIVATION		BCB	0.29	>350°C				10^{19}
		Polyimide		>310°C				10^{16}

Annexe 3 : Recette d'attaque chimique humide de métallisation

1) Brasure Sn ou Pb/Sn

L'acide nitrique peut être utilisé pour dissoudre les billes de soudure ou brasure Pb-Sn une fois le boîtier retiré. [WIL04]

Actuellement, les billes ne contiennent plus de plomb et une solution d'acide acétique permet de les retirer proprement des flipchips à l'aide d'ultrason.

2) Retrait d'aluminium

Pour toutes les solutions d'attaque de l'aluminium, le retrait de l'aluminium commence d'abord par l'attaque d'une couche d'hydroxyde d'aluminium naturelle qui atteint normalement une épaisseur de 5nm. L'aluminium est ensuite retiré sous la forme d'un composé gazeux qui dépend de la solution de gravure.

Le tableau 18 synthétise plusieurs recettes de retrait d'aluminium.

Solution	Température	Avantages
⁽¹⁾ 30% HCl 30% H ₂ SO ₄	50°C	Température et concentration non critiques car le Si et les oxydes ne sont pas attaqués par ces acides.
Acide phosphorique (65%) ⁽¹⁾	50°C	Attaque très uniforme préserve les oxydes et le silicium
Westinghouse solution ⁽¹⁾ : 25 parts de 85% acide phosphorique 5 parts d'acide acétique 98% 1 part d'acide nitrique 65%	70°C (2µm/min) 20°C(2µm/h)	
H ₂ O ₂ :H ₂ SO ₄ =1:2 ⁽²⁾		attaque l'aluminium et la barrière
⁽³⁾ 63 volumes de H ₃ PO ₄ à 85% 6 volumes de HNO ₃ (70%) 30 volumes d'eau DI	50°C	
80 volumes de H ₃ PO ₄ à 85% 65 volumes de HNO ₃ (70%) 10 volumes d'eau DI 5 volumes d'acide acétique	19°C	
⁽⁴⁾ 72 volumes de H ₃ PO ₄ 2 volumes de HNO ₃ 10 volumes d'acide acétique 16 volumes d'eau DI	50°C (2min)	

Tableau 18. Recette pour retrait d'aluminium source (1)[BEC98]; (2)ST Rousset ; (3)ST Agrate ; (4) ST Grenoble

3) Retrait d'autres métaux

De manière générale, la plupart des métaux nobles tel que Au, Pd, Pt sont dissous dans l'eau régale (3 volumes d'acide chlorhydrique, 1 volume d'acide nitrique). Alors que des métaux tels que Ta, Ti et Nb ne le sont pas [WIL04]. Le tableau 19 donne des solutions possibles pour les différents métaux.

Titane	Tungsten	Argent	Or	Ni -Cr	TiN	Ti	TiW
H ₂ O ₂ (1) H ₂ SO ₄ (1) 80°C	H ₂ O ₂ (1) H ₂ SO ₄ (1) 25°C ou +	NH ₄ OH (2) H ₂ O ₂ (1)	HCl (1) HNO ₃ (1) attaque aussi l'aluminium	H ₂ SO ₄	NH ₄ OH (1) H ₂ O ₂ (1) H ₂ O (1) ou NH ₄ OH (1) H ₂ O ₂ (5) 40°C	HNO ₃ (100) HF (1) Ou H ₂ O ₂ (1) H ₂ SO ₄ (1) ou NH ₄ OH (1) H ₂ O ₂ (5) 40°C	H ₂ O ₂ ou NH ₄ OH (1) H ₂ O ₂ (5) 40°C

Tableau 19. Solution de retrait de métaux par voie chimique humide. (Les chiffres en gras correspondent à la part en volume de ce produit pour la solution) [WIL04,BEC98,données ST]

Pour le cuivre, il est préférable d'utiliser une technique de polissage. En effet, l'attaque de cuivre par voie chimique humide est problématique car les solutions existantes ne sont pas sélectives par rapport aux autres matériaux des composants en particulier vis-à-vis des autres métaux. Ceci est problématique pour les composants ayant plusieurs niveaux de métallisation par exemple. Cependant, l'acide nitrique permet d'attaquer le cuivre. L'acide nitrique n'attaque alors pas le SiO₂ ni les barrières TaN/Ta. La vitesse d'attaque peut être diminuée en diluant l'acide nitrique jusqu'à 1:20. Pour des dilutions plus faibles la vitesse d'attaque augmente de nouveau.

Annexe 4 : Recettes d'attaque chimique humide de diélectriques

1) Retrait de couches organiques

Il existe 2 types de couches organiques, les couches photosensibles, telles que le durimide ou le BCB et les couches non photosensibles, telles que le polyimide.

Ces couches sont attaquées différemment par voie chimique.

a) Retrait de polyimide

Les épaisseurs des couches de polyimide sont souvent de l'ordre de 2 à 5 μm .

Le tableau 20 présente plusieurs solutions chimiques permettant de retirer le polyimide.

Solution	Temperature	Temps	Précaution
Ethylendiamine ⁽¹⁾	100°C	15-60min	Combustion >120°C
- 2 parts d'Ethylendiamine ⁽¹⁾ - 1-4parts d'hydrazine monohydrate ⁽²⁾ (80%)	100°C	15-60min	Combustion >120°C
- 3 parts d'ethylendiamine ⁽¹⁾ - 1 part d'acide acétique (98%)	120-130°C	10-30min	Combustion >120°C
Caro's acid : - 7 parts d'acide sulfurique concentré - 1 part d'eau oxygénée (30%)	80°C		
Acide nitrique fumant			
3 parts dimethyl sulphoxide ⁽³⁾ 1 part d'ethanolamine ⁽⁴⁾	110°C		Combustion >120°C

Tableau 20. **Solution de retrait de polyimide par voie chimique humide [BEC98]**

⁽¹⁾L'éthylendiamine est une solution basique de formule $\text{C}_2\text{H}_4(\text{NH}_2)_2$

⁽²⁾ N_2H_4 ; ⁽³⁾ $(\text{CH}_3)_2\text{SO}$; ⁽⁴⁾ $\text{C}_2\text{H}_7\text{NO}$

b) Retrait de BCB ou durimide

Les couches de protection sont généralement très peu solubles en milieu solvant [BEC98]. Pour les matériaux polymères, la réaction chimique sera fonction du durcissement du polymère. Dans les cas les plus simples, les solutions classiques de retrait de photoresist seront efficaces. Des solutions telles que les produits de retrait de résine de chez Ardrox et les produits Panasolve de chez Eleco-produits sont connus pour être efficaces sur les plastiques ayant un fort durcissement.

L'acide nitrique fumant sera efficace pour retirer ces matériaux organiques mais risque d'être plus agressif pour les couches environnantes.

2) Retrait de nitrure de silicium

Deux couches sont généralement présentes : un oxyde et le nitrure de silicium au dessus. Sous le microscope, le nitrure de silicium a une couleur jaunâtre, très visible sur le dessus des bords d'aluminium exposé sur les plots de contacts. Sous lumière ultraviolette, il devient orange, et de faibles résidus peuvent ainsi être détectés sous un microscope à fluorescence UV. Le nitrure de silicium est **classiquement retiré par voie plasma**, mais peut aussi l'être par voie chimique humide, sélectivement par rapport à l'oxyde à l'aide d'acide phosphorique à 85% à 160°C.

Une autre solution est constituée de :

-1 à 10% d'acide fluorhydrique

-et d'une solution contenant de 1 à 3 parts de solution molaire d'acide fluorhydrique à 48% dans de la glycérine à 60°C-90°C

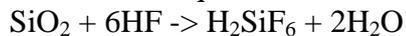
L'inconvénient de toutes ces techniques par voie chimique humide est le **retrait simultané de l'aluminium exposé**, par conséquent la voie chimique humide ne peut être applicable que dans des cas particuliers.

3) Retrait d'oxyde de silicium

Le **retrait classique des oxydes de silicium se fait par plasma**. Cependant, des retraits par voie chimique humide existent. Le seul attaquant possible du SiO₂ est le HF qui en absence d'eau transforme l'oxyde en SiF₄ :



Et en milieu aqueux :



Dans le tableau 21, différentes solutions permettant de graver l'oxyde de silicium sont détaillées.

Nom de la solution	Mélange	Avantage	Inconvénient
Window etch	-400g NH ₄ F - 130mL HF 40% -remplir jusqu'à 1L d'eau DI 20-25°C	Attaque très uniforme	Attaque aluminium
Modified window etch	-150g NH ₄ F - 70 mL HF 40% -350mL d'eau DI 20-25°C	Attaque très uniforme Attaque plus lente que le window etch donc meilleur controle	Attaque aluminium
AMS -5- solution	-1 part acide acétique (98%) -1part NH ₄ F 40% -1 part d'eau DI 20-25°C	Attaque plus lente que « window etch » donc meilleur controle	-Attaque aluminium -laisse qqfois des cristaux de fluorure d'aluminium (AlF ₃) difficile à retirer
Modified AMS-5 solution	-1 part acide acetique (98%) -1 part de NH ₄ F 40%	Attaque plus lente	-Attaque aluminium
MX etching solution	-4 parts de HF(40%) -5 parts d'eau DI -6 parts du poids NH ₄ F (cristallisé) -6 parts d'éthylenglycol 20-25°C		Attaque aluminium
BPSG etching solution	-100ml eau DI -100ml HF(36%) -10ml HF(40%) T ambiante	Attaque les oxydes CVD avec une bonne sélectivité vis-à-vis des oxydes thermiques	Attaque aluminium
HF concentré	2-6s T ambiante		-Difficilement contrôlable (temps très court) -L'ajout d'inhibiteur du HF, va attaquer l'aluminium
Lift off	HF (20%) T ambiante 3h		Retire toute couche au dessus de la puce.

Tableau 21. Solutions de retrait d'oxyde de silicium[BEC98]

La fin de l'attaque du SiO_2 est difficile à distinguer étant donnée la transparence de la couche. Il faut alors noter que l'oxyde est retiré lorsqu'il n'y a plus de marche visible sur les bords des contacts d'aluminium. [BEC98] L'observation régulière est alors importante, puisque **l'aluminium est attaqué** par toutes ces solutions.

Annexe 5 : Recettes d'attaque chimique humide du silicium

L'attaque chimique du silicium peut permettre de révéler des défauts cristallins, de révéler des zones dopées, ou encore d'amincir ou retirer le silicium pour observer les couches actives par la face arrière.

1) Méthodes d'attaque chimique du silicium

Avec une solution d'attaque chimique préférentielle adaptée, la surface du silicium est attaquée et permet de révéler les défauts (fautes d'empilement, dislocation, précipité, défauts ponctuels). L'attaque se fait de manière préférentielle aux endroits où le cristal est désordonné.

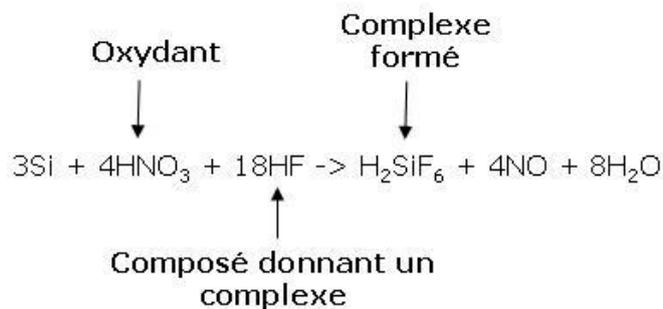
Ces attaques permettent une observation indirecte du défaut. En effet, seulement la piqûre de corrosion (etch-pits) autour du défaut est observée, pas le défaut lui-même.

Il existe différents types de solutions permettant d'attaquer le silicium [BEC98] :

- **Les « stripping etchant »** : pour lesquels une épaisseur uniforme de silicium est retirée
- **Les « polishing etchant »** : pour lesquels une surface endommagée mécaniquement est retirée
- **Les « structural etchants »** : pour lesquels l'orientation cristalline et les désordres cristallins sont révélés
- **Les « doping etchants »** : pour rendre visible les zones dopées et les jonctions PN.

Dans tous les cas, l'attaque du silicium se fait en deux étapes. Dans un milieu acide, le silicium doit tout d'abord être oxydé en SiO₂ ou SiO par un oxydant et ensuite être dissous dans un composé formant un complexe. [BEC98][GON12] Un troisième agent peut être introduit pour diluer la solution et contrôler la vitesse d'attaque. [GON12]

Exemple :



Des oxydants efficaces du silicium sont: l'acide nitrique, l'eau oxygénée, des acides perhalogène, des acides de chrome. Le principal composé formant un complexe est l'acide fluorhydrique. La vitesse d'attaque peut être diminuée en ajoutant un diluant comme de l'eau, de l'acide acétique ou de la glycérine. [BEC98]

De plus, la vitesse d'attaque du silicium peut être contrôlée par le ratio de HF:HNO₃. En changeant ce ratio, une attaque préférentielle de zones dopées P par rapport aux zones dopées N peut être obtenue.

Pour l'observation infrarouge par la face arrière du composant, il est nécessaire d'amincir le silicium pour avoir une épaisseur fine permettant par exemple au laser IR de traverser le silicium et d'observer par transparence la face avant de la puce.

Les solutions chimiques les plus employées pour l'amincissement du silicium sont le **TMAH**, le **KOH** et la **Choline**. Pour tous ces attaquants chimiques, la réaction étant lente de l'ordre d'1µm/min [AUB08], il est préférable d'**amincir mécaniquement** le silicium jusqu'à 50µm ou moins. [PER04] [ABD02] En effet, l'amincissement mécanique permet de réduire la quantité de silicium à retirer par voie chimique et ainsi de préserver l'échantillon de la sur-agression chimique. Il est aussi recommandé de **rendre étanche les bords** du silicium avec de la résine. Sans cette résine, les produits chimiques peuvent s'infiltrer par les flans de la cavité, atteindre le circuit et rapidement l'endommager. [PER04].

Pour observer le silicium par la face arrière, la surface doit avoir une faible rugosité et dans le but d'optimiser l'attaque du silicium, il est possible de **sacrifier un morceau de silicium** en l'ajoutant dans la solution d'attaque 30 min avant l'utilisation effective de la solution. Cela permet de modérer l'attaque et la qualité sera alors meilleure. [BEA04][WIL04]

Annexe 6 : Les paramètres de polissage

1) L'importance des paramètres de polissage

Lors d'un polissage, plusieurs paramètres vont influencer le polissage et peuvent être modifiés directement par l'utilisateur :

- l'abrasif (matériau, granulométrie et quantité)
- le lubrifiant (type et quantité)
- la pression exercée sur l'échantillon
- le sens de rotation du support de l'échantillon vis-à-vis du disque
- la vitesse de rotation du disque

a) Abrasif

De manière générale, l'abrasif doit avoir une dureté de **2.5 à 3 fois la dureté** du matériau à préparer et la quantité d'abrasif sera d'autant plus élevée que le matériau est dur.

Les plus communément utilisés sont les suivants :

- **Diamant**: sous forme de disque de prépolissage, pâte, spray ou suspension. C'est le matériau le plus dur (**8000HV**)
- **Carbure de silicium (SiC)**: sous forme de meule de prépolissage, papier, ou poudre. (**2500HV**)
- **Oxyde d'aluminium (Al₂O₃)**: sous forme de suspension ou de poudre (**2000HV**)
- **Dioxyde de silice** : sous forme de suspension.

b) Lubrifiant

Le lubrifiant a une fonction de refroidissement et de lubrification. L'eau est utilisée comme liquide de refroidissement lors du pré-polissage.

En général, on peut affirmer que les matériaux tendres nécessitent de plus grandes quantités de lubrifiant pour éviter de provoquer des dommages, mais seulement de petites quantités d'abrasif, car l'usure de l'abrasif n'est pas très importante. Au contraire, les matériaux durs demandent moins de lubrifiant, mais de plus grandes quantités d'abrasif en raison de l'usure rapide. Appliquer trop de lubrifiant ne ferait que chasser l'abrasif du disque et le lubrifiant resterait comme une couche épaisse entre l'échantillon et le disque, ce qui réduirait considérablement l'enlèvement de matière.

c) Paramètres dynamiques

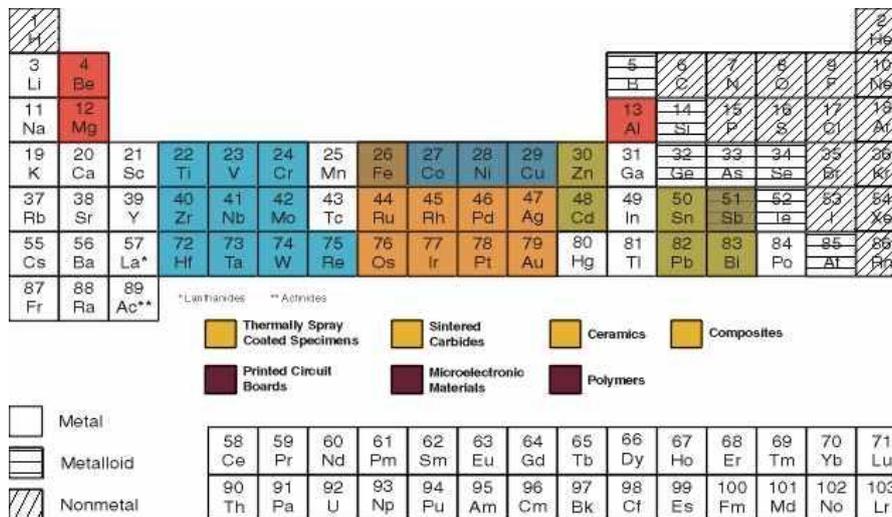
Lors du polissage sur un équipement semi-automatique, le disque tourne et l'échantillon tourne aussi sur lui-même. Ceci permet d'éviter une direction préférentielle de polissage. Ce mode évite ainsi certains dommages sur la puce.

Le porte-échantillon et le drap de polissage doivent tourner dans le **même sens** et à la **même vitesse** pour être dans les conditions optimales de polissage.

Il est possible de faire tourner le porte-échantillon dans le sens opposé au disque. Cela augmente la quantité de matière retirée mais est beaucoup plus stressant mécaniquement pour l'échantillon. Ainsi, une fois la puce atteinte, il est préférable de faire tourner le porte-échantillon dans le même sens que le disque.

2) Aide à la préparation mécanique proposée par les fabricants

a) Liste des matériaux traités par Buehler pour le polissage mécanique



Les matériaux avec une case colorée sur la figure 124 ont une procédure de traitement par polissage mécanique disponible sur le site de [Buehler](#).

Light Metals	Refractory Metals	Ferrous Metals	Copper, Nickel & Cobalt
Aluminum	Titanium	Iron	Cobalt
Beryllium	Zirconium		Copper
Magnesium	Hafnium		Nickel
Precious Metals	Other Refractory Metals	Low-Melting Point Metals	More Materials
Gold	Chromium	Antimony	Ceramics
Iridium	Molybdenum	Bismuth	
Osmium	Niobium	Cadmium	Composites
Palladium	Rhenium	Lead	Electronic Materials
Platinum	Tantalum	Tin	Polymers
Rhodium	Tungsten	Zinc	Printed Circuit Boards
Ruthenium	Vandium		Sintered Carbides
Silver			Thermally-Spray Coated Specimens
Medical Materials			
Cobalt			
Titanium			
Nickel			
Iridium			
Platinum			
Silver			
Ceramics			
Tungsten			
Rhenium			
Tantalum			
Polymers			
Thermally-Spray Coated Specimens			

Tableau 22. Les matériaux traités par Buehler pour le polissage

b) Liste des matériaux traités par STRuers pour le polissage mécanique

La figure 125 présente les matériaux traités par Struers sur leur site internet, pour lesquels une méthode de polissage est préconisée.

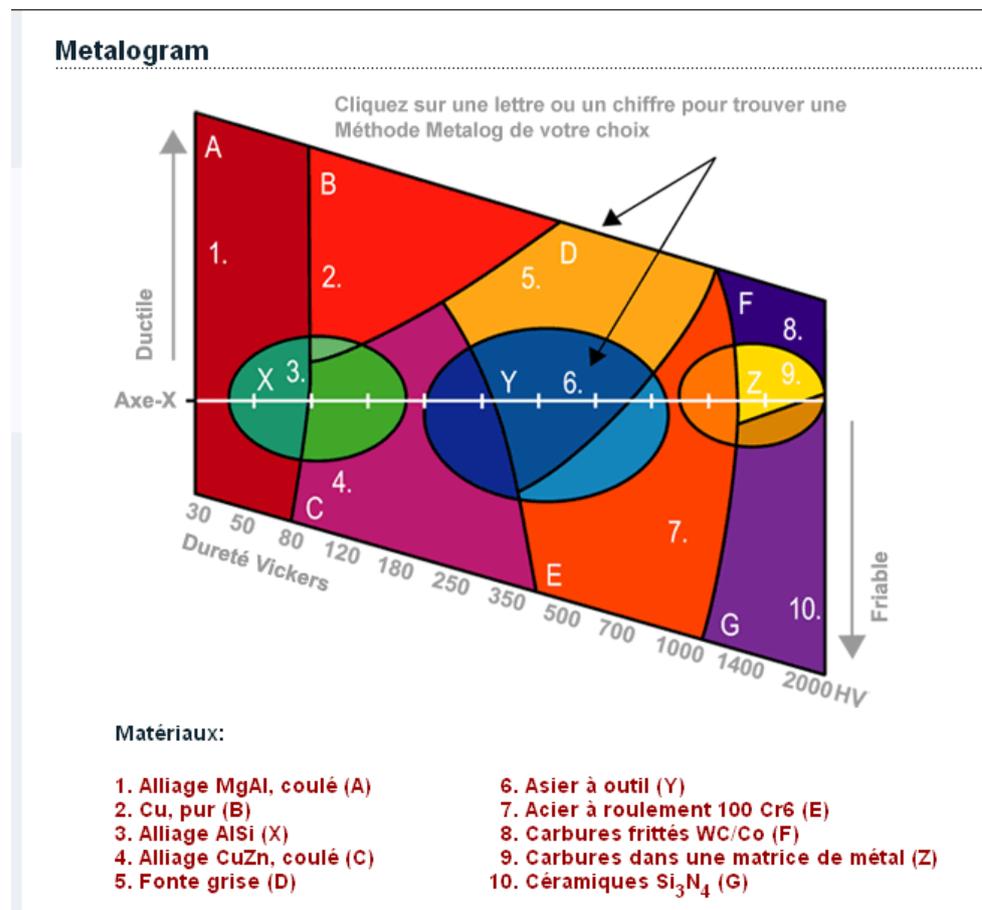


Figure 125: Matériaux traités sur le site de Struers

Annexe 7: les paramètres du plasma

1) Tenue de l'échantillon

Le phénomène plasma est réalisé sous tension et avec une augmentation de température. Par conséquent, l'échantillon est soumis à des contraintes électriques et à des évolutions de température. Il est donc important de les limiter par exemple en fixant l'échantillon.

Utiliser un maintien d'échantillon conducteur thermique permettra d'assurer une reproductibilité du procédé avec une température d'échantillon relativement stable. Un maintien d'échantillon conducteur électrique limitera les éventuels problèmes de décharges électrostatiques (ESD).

La technique de gravure plasma est effective sur toute la surface de la puce. Il est cependant possible de réaliser des attaques localisées à l'aide de masque déposé sur les parties du composant à préserver [PER04]. Le masque utilisé doit être dans un matériau qui ne forme pas de composés non volatiles qui pourraient se poser sur la surface de la puce (le silicium, le quartz, le graphite, le téflon). [ROS90]

2) Influence des gaz

Différents gaz peuvent être utilisés pour un procédé plasma. De ces gaz va dépendre la gravure des matériaux ; comme en chimie humide les réactifs sont liés à l'attaque. Les gaz contenant du fluor, du chlore, ou de l'oxygène, sont utilisés pour retirer les couches de matériaux de la microélectronique. [BEC98]

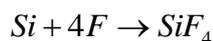
Un plasma oxygène pourra être employé pour graver des composés organiques, un plasma fluoré pour graver le silicium et ses composés, et les plasmas chlorés pour les métaux. Cependant, ces derniers sont peu employés en raison de leur dangerosité pour la santé.

Enfin des plasmas neutres (argon, hélium) permettent de diluer les autres gaz.

a) Plasma O₂

L'oxygène est le gaz utilisé classiquement pour graver les composés organiques (boîtier plastique, passivation organique...). L'ajout de **quelques % de CF₄** peut cependant être utilisé et va alors générer une **vitesse de gravure plus importante**. Les atomes de fluor facilitent l'extraction des atomes d'hydrogène et la dissociation des molécules d'oxygène.

Il faut cependant noter que le silicium est gravé par le CF₄ en raison des atomes de fluor.

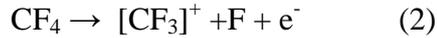


Par conséquent, l'utilisation du CF₄ est réservée au début de la gravure pour ne pas endommager la puce.

b) Plasma fluoré

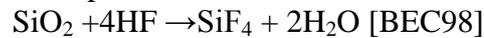
Les gaz fluorés sont utilisés pour graver le silicium et ses composés. Ils ont l'avantage d'être peu corrosifs tout comme leurs produits de réaction. Les produits formés sont volatiles et ainsi faciles à retirer. Les gaz fluorés les plus couramment utilisés sont : le CF_4 , le C_2F_6 , le SF_6 et le CHF_3 . [BEC98].

Dans un plasma CF_4 , les radicaux libres sont formés comme présenté dans l'équation (1) et les ions comme dans l'équation (2) [BEC98]



La nature de la réaction dépend de l'énergie des électrons. La génération d'un ion nécessite plus d'énergie que le radical. Ainsi, il y a beaucoup plus de radicaux que d'ions dans le plasma. [BEC98]

Dans un PE, les principaux réactifs sont : CF_3 , F, et les radicaux HF



Dans un système RIE, les ions $[\text{CF}_3]^+$ ont le rôle le plus important avec un retrait physique et chimique. Les radicaux CF_2 et CF donnent une contribution supérieure à l'attaque chimique.

Des réactions de bords dans le CF_4 et le SF_6 se produisent et mènent à la formation de précipités de carbone ou de soufre élémentaire (ou des composés de ces éléments qui ne sont pas volatiles) et ralentissent la réaction. Si quelques pourcents d'oxygène sont ajoutés, ces composés sont oxydés et donnent des produits volatiles (CO_2 , SO_2). [BEC98]

L'ajout d'oxygène (en quantité <10%) permet donc d'améliorer la vitesse d'attaque car une plus forte concentration de fluor libre est en surface de l'échantillon. [ROS90]

Au contraire, l'ajout d'hydrogène dans un gaz fluoré ralentit la réaction car l'hydrogène réagit avec les atomes de fluor pour former du HF et donc réduit la concentration d'espèces réactives. [ROS90]

Il a été montré que si la concentration en hydrogène est trop élevée, la polymérisation de toutes les surfaces se produit et l'attaque est arrêtée. Parmi toutes les surfaces il y a les murs de la chambre. Un film fluorocarboné est alors déposé. Il est donc important de retirer cette couche après la gravure pour éviter toute contamination lors de manipulations suivantes. Pour retirer cette contamination de la chambre il faut donc réaliser un plasma O_2 qui va volatiliser les composés et donc la nettoyer [ROS90].

Les gaz contenant du fluor sont essentiellement utilisés pour attaquer le silicium et ses composés ainsi que les métaux réfractaires. [BEC98]

Les gaz contenant du chlore sont indispensables pour le retrait de l'aluminium et un certain nombre de siliciures. [BEC98]

Matériaux gravés	Gaz à utiliser	Produits générés
Si	CF ₄ , C ₂ F ₆ , C ₃ F ₆	SiF ₄
Si ₃ N ₄	CF ₄	SiF ₄ , N ₂
Al	CCl ₄ (+Ar), BCl ₃	AlCl ₃
Mo, W	CF ₄	MoF ₆ , WF ₆
Ti	CCl ₄	TiCl ₄
MoSi ₂	SF ₆	SiF ₄ , MoF ₆
TiSi ₂	CCl ₄	SiCl ₄ , TiCl ₄
WSi ₂	CF ₄	SiF ₄ , WF ₆

Tableau 23. Gaz préconisé et produits générés selon le matériau à graver (rem : CF₄ est mélangé à 4%O₂) [BEC98]

c) Plasma chloré

Les gaz contenant du chlore sont employés pour retirer l'aluminium et quelques siliciures. Les gaz utilisés sont : CCl₄, CHCl₃, mais ils peuvent être combinés à des gaz fluorés : CF₃Cl, CCl₂F₂, C₂ClF₅. L'inconvénient des produits chlorés sont leur danger pour la santé car leurs produits de réaction sont agressifs ce qui oblige une protection importante de l'équipement et de traitement des déchets de gaz en sortie. De plus, les produits ne sont que peu volatiles et peuvent limiter la réaction. [BEC98]

d) Plasma neutre

L'argon et l'hélium sont utilisés pour diluer les autres gaz. Cela réduit la température et donne une meilleure stabilité du procédé. L'argon peut générer des réactions de pulvérisation non désirables. [BEC98]

3) Influence de la pression

La pression dans la chambre détermine trois paramètres importants du procédé : la concentration en molécules de gaz, leur libre parcours moyen, et la tension de bias qu'ils forment. [BEC98]

La pression dans la chambre va dépendre à la fois des gaz introduits et de la capacité de la pompe à faire le vide.

Une haute pression signifie alors qu'une forte concentration de réactifs est à la surface de l'échantillon et donc la vitesse de l'attaque chimique sera élevée. Mais simultanément, le libre parcours moyen des particules est très bas à cause des collisions avec les autres particules. Ainsi, les ions migrent beaucoup moins rapidement et de manière non rectiligne vers la surface du composant. L'attaque physique est donc limitée. Ainsi, **une haute pression favorise la gravure isotrope (chimique) et supprime la gravure anisotrope (physique)**. [BEC98]

A l'inverse, à pression basse, les réactions chimiques à la surface de l'échantillon sont réduites en raison de la faible concentration de particules réactives. Le libre parcours moyen est alors plus élevé et l'attaque des ions est alors accentuée. Dans ce cas, l'attaque est anisotrope. [BEC98]

4) Influence de la température

Sur certains équipements, il est possible de réguler la température de l'électrode basse. Pour cela, un thermorégulateur avec un fluide circule sous l'électrode et permet de stabiliser la température de l'électrode et donc la température de l'échantillon. La température classique de travail est de 50°C pour un plasma PE et de 100°C pour un équipement RIE.

Dans une attaque chimique, la vitesse de gravure varie avec la température en fonction de la loi d'Arrhenius :

$$r = \alpha \cdot \exp(-E_a / kT)$$

r : vitesse de gravure ; α : facteur de proportionnalité ; E_a est l'énergie d'activation ; k est la constante de Boltzmann, et T la température.

5) Influence de la puissance et la fréquence RF

La fréquence de travail classique est de 13,56MHz aussi bien pour les équipements PE que RIE. Cette fréquence donne le meilleur compromis ou résultat pour éviter les dommages dus au champ électrique. Les fréquences moyennes sont utilisées car elles favorisent la formation des ions. Les fréquences dans le domaine du GHz génèrent de manière prédominante des radicaux en vertu de la haute énergie d'excitation.

En ne modifiant pas les autres paramètres, **la puissance est un paramètre modifiant de manière linéaire la vitesse de gravure.**

Annexe 8 : Les techniques de localisation de défauts [DEB08]

1) La microscopie à émission

a) Principe de la microscopie à émission

La microscopie à émission est une méthode de localisation de défauts qui combine un microscope, une caméra sensible dans le visible et le proche infrarouge et un système de pointes pour solliciter électriquement le composant.

La caméra va détecter l'ensemble des phénomènes de photoémission du composant dans la gamme spectrale de $0.3\mu\text{m}$ à $1.1\mu\text{m}$ (figure 126).

La photoémission est générée par différents phénomènes :

- Des recombinaisons radiatives de paires électrons trous
- Des porteurs chauds
- De l'émission thermique

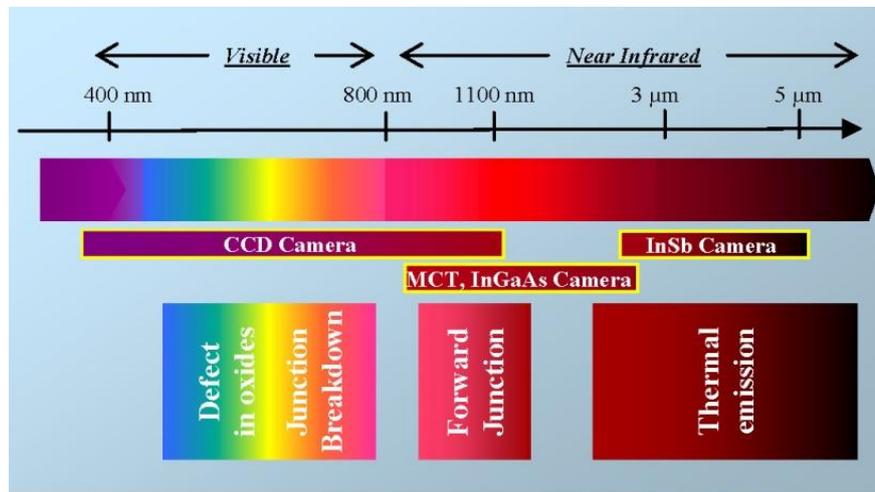


Figure 126: *Caméra et phénomènes détectés en fonction de la gamme spectrale*

En pratique, il peut y avoir photoémission dans les cas suivants :

- Fuites dans la jonction
- Excroissances et courts-circuits métalliques ou à base de silicium
- Jonctions en direct
- Jonctions en inverse
- Fuites localisées dans les oxydes

La photoémission n'est donc pas toujours liée à un défaut (ex: jonction).

Pour cette technique de localisation, une image infrarouge de l'échantillon est d'abord enregistrée par la caméra à travers le microscope. L'échantillon est ensuite sollicité électriquement. Si le défaut émet localement une lumière dans une gamme allant du visible ($0.4\mu\text{m}$) au proche infrarouge alors cette lumière pourra être captée par le détecteur de la caméra qui couvre une gamme spectrale équivalente (de $0.3\mu\text{m}$ à $1.1\mu\text{m}$). Le capteur traduit l'intensité du signal d'émission en intensité de couleurs, ce qui donne une image d'émission. Cette image peut être superposée à l'image initiale de l'échantillon et permet de localiser précisément le défaut (figure 127).

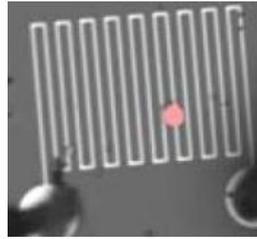


Figure 127: *Image d'émission due à un court-circuit*

b) Limites d'application de la microscopie par émission

Pour cette méthode, un défaut n'est détectable qu'à 4 conditions :

- Le défaut doit émettre de la lumière : photoémission
- La lumière émise doit être dans la gamme spectrale de la caméra.
- Il doit être possible de solliciter l'échantillon électriquement en même temps que l'observation de la puce est faite
- La lumière émise doit pouvoir atteindre librement la caméra : il ne doit pas y avoir d'obstacle entre le défaut et la caméra (ex : couche métallique)

Les deux premières conditions sont directement liées au défaut. Tous les défauts n'émettent pas de la lumière quand ils sont sollicités électriquement. Par conséquent, un défaut n'émettant pas de lumière ne pourra pas être détecté par émission IR. Cette méthode ne sera donc pas adaptée.

La troisième condition signifie que la testabilité du composant doit être conservée pour utiliser cette méthode. Toute forme de préparation d'échantillon doit donc nécessairement conserver la possibilité de solliciter le composant.

La dernière condition est liée à l'échantillon et va être à l'origine de préparation d'échantillon spécifique. Si le défaut est à l'intérieur de la structure du composant, la lumière émise par le défaut peut être réfléchié ou absorbée par des couches du composant situées entre le défaut et la caméra. C'est le cas par exemple des couches métalliques. Celles-ci reflètent le signal émis par le défaut, ce qui empêche cette lumière d'atteindre le détecteur. La photoémission n'est donc pas détectée. De la même façon, un boîtier plastique va absorber le signal qui ne sera pas non plus capté par la caméra. Pour utiliser cette méthode, des préparations d'échantillons sont donc souvent nécessaires.

2) La stimulation thermique laser

a) Principe de la stimulation thermique laser

Il existe plusieurs sortes de technique de localisation de défauts par stimulation thermique laser qui sont:

- OBIRCH (optical beam induced resistance change)
- TIVA (thermally induced voltage alteration)
- SEI (seebeck effect imaging)

Dans chaque cas, une source laser de longueur d'onde infrarouge de $1.3\mu\text{m}$ est utilisée.

▪ **OBIRCH**

Cette technique utilise le principe suivant: la résistivité des matériaux varie avec la température et cette variation est différente d'un matériau à un autre. En faisant balayer un laser IR sur une piste métallique, celle-ci va s'échauffer localement induisant une variation de sa résistivité. D'après la loi d'Ohm, en appliquant une tension aux bornes de cette piste, il est possible de suivre cette variation de résistance, en suivant la variation de courant. En l'absence de défaut, le matériau est identique tout le long de la piste donc la variation de résistance est constante : le courant détecté reste aussi constant. Mais lorsque le laser atteint un défaut, le défaut réagit différemment du reste de la piste. A cet endroit, la variation de résistance induite par le laser est différente du reste de la piste métallique. Un pic de courant (positif ou négatif) apparaît alors. Ce principe est illustré dans la figure 128.

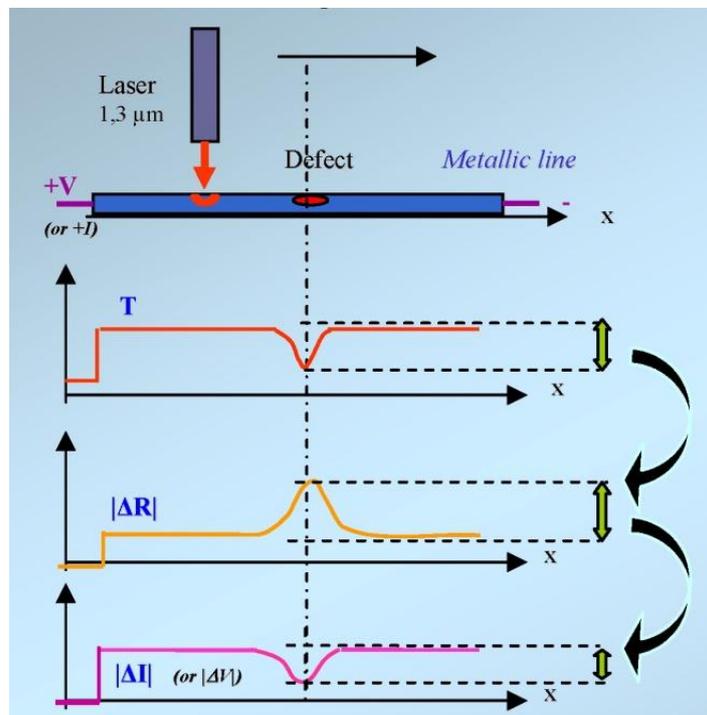


Figure 128: Principe de la stimulation thermique laser : avec T la température, R la résistance et I le courant

Dans un équipement OBIRCh, l'échantillon est sollicité avec une tension constante, le laser balaye la surface de la puce, et une valeur de courant est enregistrée pour chaque position du laser. La corrélation entre la position du laser et la variation de courant permet d'obtenir une possible localisation du défaut.

De même que dans le cas de l'émission IR, une première image de la puce est réalisée pour obtenir son motif ce qui permet une représentation visuelle de la position du défaut en superposant les informations : motif de la puce et position du laser au moment de la variation de courant. Ceci est illustré dans la figure 129.

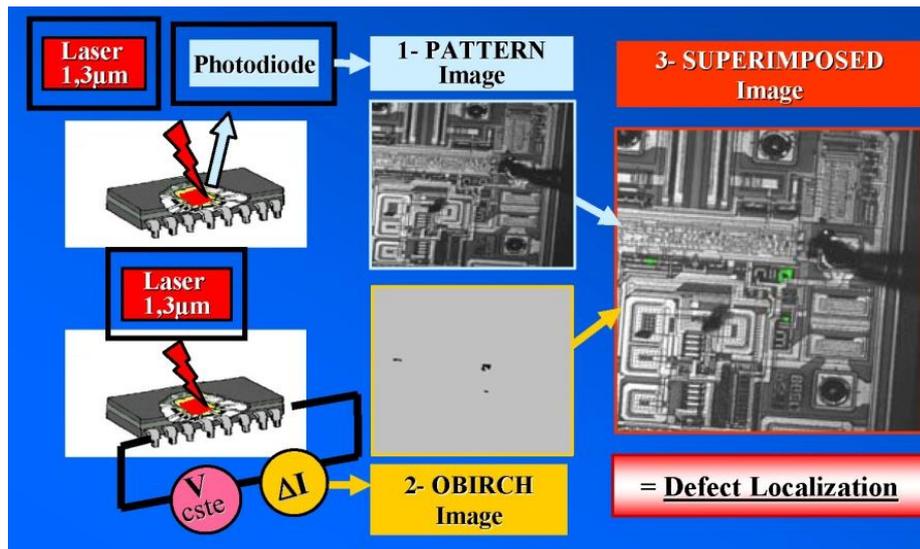


Figure 129: Principe de l'OBIRCh

Cette technique permet de localiser précisément des défauts résistifs (de 10 Ohms à 50kOhms) et a prouvé son efficacité en particulier pour des court-circuits, des interconnexions défailtantes, des claquages d'oxyde, des rétrécissements de pistes, des fusions dans le silicium.

Cette technique peut aussi être utilisée pour des caractérisations de composant car il est possible d'observer des régions très fortement dopées, ou des passages de courant.

- **TIVA**

La méthode TIVA est très proche de la méthode OBIRCh. Le principe physique est le même mais l'échantillon est sollicité en courant et non plus en tension. L'équipement va alors suivre la variation en tension (et non plus en courant) due à la variation de courant. L'avantage de cette technique par rapport à l'OBIRCh est d'avoir une meilleure sensibilité pour des défauts très résistifs.

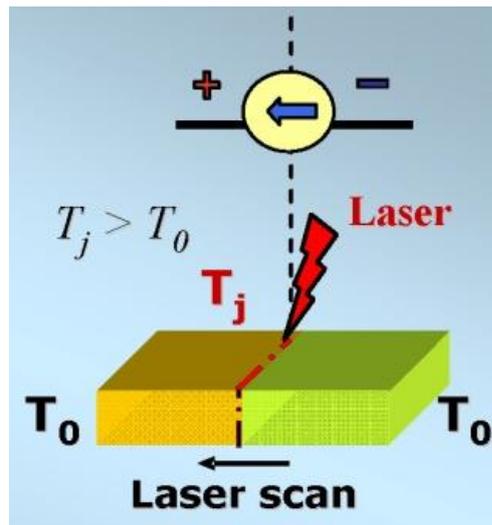
- **SEI**

Cette technique dépend de l'effet Seebeck (effet thermoélectrique). Ce principe repose sur le fait qu'à partir d'une tension appliquée aux bornes d'un couple de matériaux, il est possible d'en déduire leur température si les coefficients seebeck de ces deux matériaux sont connus.

$$\Delta V = - (S_a - S_b) \Delta T$$

avec ΔV la différence de potentiel entre les 2 extrémités

S_a et S_b les coefficients Seebeck respectifs des matériaux A et B appelés aussi pouvoir thermoélectrique. $(S_a - S_b)$ représente le coefficient Seebeck du couple.

Figure 130: *Effet seebeck*

Considérons une interface métallique. Lorsque le laser vient chauffer localement l'interface, un gradient de température existe entre la jonction chauffée et les extrémités des matériaux (qui sont à température ambiante par exemple). De ce fait, une tension et donc un courant apparaît temporairement. Cette valeur va différer en présence d'un troisième matériau ou lorsque le contact n'existe plus localement. Cette technique permet de détecter des interfaces métalliques (une poussière métallique, des particules étrangères) et permettra ainsi de localiser des courts-circuits, des défauts de contact, ou des fusions.

▪ ***Stimulation dynamique laser (DLS)***

Cette technique ajoute à la stimulation laser, la composante temporelle. Elle nécessite l'utilisation d'un testeur extérieur synchronisé avec l'outil laser, pour venir solliciter dynamiquement le composant et enregistrer la réponse du circuit correspondante. Grâce au laser, on vient perturber son fonctionnement. Son action thermique ou photoélectrique peut modifier la température, la fréquence, la tension de fonctionnement ou le temps de propagation et ainsi fournir des informations en temps réel sur le composant étudié.

b) Limites d'application de ces techniques de stimulation thermique laser

De même que pour l'émission, les facteurs suivant doivent être respectés :

- Il est possible de solliciter l'échantillon électriquement en même temps que l'observation de la puce est faite
- Il ne doit pas y avoir d'obstacle entre le défaut et la source laser.
- Le laser doit pouvoir atteindre librement l'échantillon : il ne doit pas y avoir d'obstacle entre le défaut et la caméra (ex : couche métallique)

De la même façon que pour l'émission, certaines couches situées entre le défaut et la source laser vont empêcher la localisation du défaut. Des préparations d'échantillon seront donc aussi nécessaires et devront conserver la testabilité électrique du composant.

3) Le contraste de potentiel passif/actif

a) Principe

Les méthodes de contraste de potentiel utilisent un microscope électronique à balayage (MEB) comme source d'électrons et donc de charges.

Le faisceau électronique balaie la surface de l'échantillon et envoie des électrons dans la matière. Il génère en retour des électrons secondaires qui sont collectés par un capteur. La quantité d'électrons collectés varie avec la topographie du matériau et avec sa nature. Les variations sont traduites à l'écran par des contrastes différents.

Ces électrons, lorsqu'ils peuvent s'écouler, (cas d'un conducteur relié à la masse) font ressortir l'élément en couleur sombre. Inversement, lorsque ces charges sont bloquées au niveau d'une structure (cas d'un conducteur isolé de la masse) cette structure apparaît claire. L'écoulement ou non de ces charges permet ainsi de distinguer les matériaux conducteurs isolés de la masse, des matériaux conducteurs reliés à la masse.

Cette technique permet donc de révéler les circuits ouverts et les court-circuits. La figure 131 montre un exemple d'application.

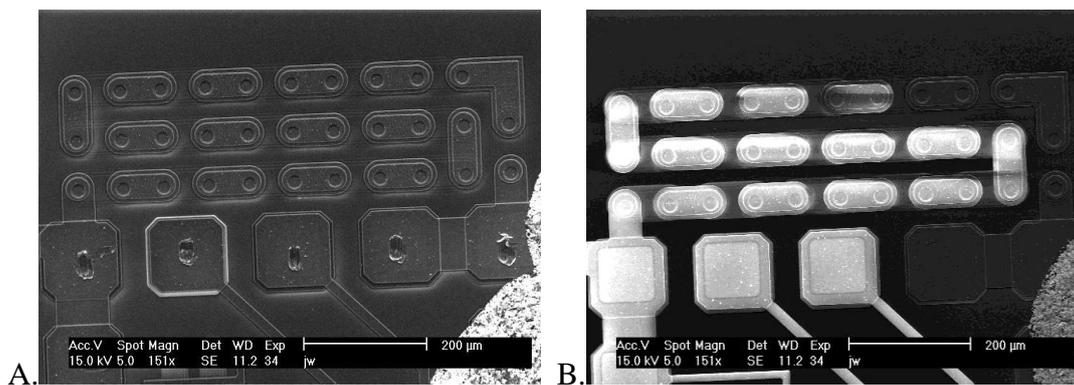


Figure 131: *Exemple de contraste de potentiel*

A. *Echantillon fonctionnel : toutes les lignes de métallisation sont connectées à la masse*

B. *Echantillon en circuit ouvert : les lignes de métallisation apparaissent blanches car elles ne sont pas connectées à la masse.*

La différence entre le contraste de potentiel passif et actif vient de la polarisation. Dans le cas passif, le circuit n'est pas polarisé (pas de tension), alors que dans le cas du contraste actif, le circuit est placé dans sa configuration défailante (tension constante). Les charges supplémentaires permettent d'accentuer les contrastes.

b) Limites d'application du contraste de potentiel

Pour appliquer cette technique, il est nécessaire que le faisceau d'électrons atteigne les pistes métalliques. Par conséquent, celles-ci doivent être proches de la surface de l'échantillon à analyser. Ainsi, cette technique ne peut s'appliquer sur un composant encapsulé dans un boîtier. La résine empêchant l'accès du faisceau à la

zone active de la puce. Les passivations n'empêcheront pas l'utilisation du contraste de potentiel si elles sont inférieures au micron. Selon la configuration de l'échantillon il peut donc être nécessaire de réaliser une préparation d'échantillon.

A noter que les couches enterrées défailantes ne seront pas détectables par contraste de potentiel.

4) La microscopie magnétique

a) Principe de la microscopie magnétique

La microscopie magnétique est une technique non-destructrice qui permet d'imager les courants parcourant un circuit intégré. Lorsqu'un courant circule dans un circuit, un champ magnétique est induit et peut être mesuré par un détecteur de champ magnétique qui balaye le circuit. Grâce à la loi de Biot-Savart, il est possible d'utiliser ces mesures pour en déduire une densité de courant et de la représenter sous la forme d'une cartographie.

$$dB = \frac{\mu_0 Idl \sin \theta}{4\pi r^2}$$

En superposant cette cartographie à l'image du circuit on peut alors en déduire le passage du courant dans le circuit. La figure 132 montre un exemple de résultat obtenu par microscopie magnétique.

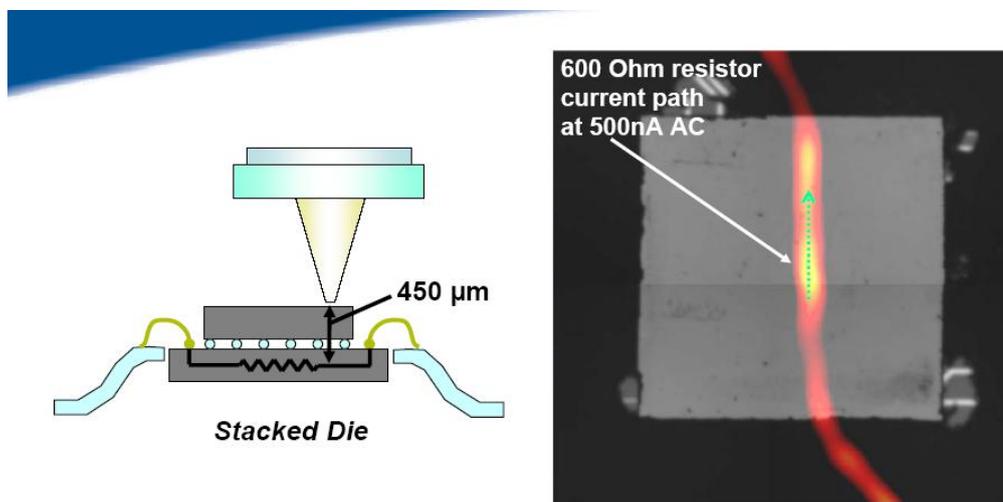


Figure 132: Exemple d'application de la microscopie magnétique

Comme peut le montrer cet exemple, la microscopie magnétique permet de réaliser une véritable localisation dans le volume du composant, et ce indépendamment de la nature des matériaux. Elle est donc intéressante pour les produits présentant plusieurs couches métalliques. Aucun travail de préparation de l'échantillon n'est nécessaire. Elle fonctionne aussi bien sur boîtier que sur puce.

Cette technique permet de révéler des courts-circuits, des défauts résistifs, et des courants de fuite.

b) Limites d'application de la microscopie magnétique

Plusieurs systèmes existent. Les détecteurs GMR (giant magneto resistance) ont une haute résolution (inférieure à 100nm) mais sont limités à une sensibilité de 20nT. Au contraire les systèmes SQUID (superconducting quantum interference device) ont une résolution spatiale de 3µm mais une sensibilité de 200pT. [CRE04] Il sera donc toujours nécessaire de faire un compromis entre résolution spatiale et sensibilité.

5) Les cristaux liquides

a) Principe des cristaux liquides

Cette technique utilise le principe de détection de chaleur et localise les défauts générateurs de chaleur (les points chauds, les courants de fuite et les défauts résistifs). Elle utilise un matériau particulier : les cristaux liquides.

Les cristaux liquides sont des matériaux dont leur phase est dépendante de la température. Ils ont un état intermédiaire entre la phase solide et la phase liquide. En dessous de leur température de transition, le matériau est sous la forme d'un « liquide cristallisé ». Le matériau a alors le caractère anisotrope d'un solide (anisotropique) et les propriétés physiques d'un liquide. Toutefois, si la température dépasse la température de transition, le matériau devient identique à un liquide créant ainsi une structure désordonnée comme pour un liquide (figure 133) .

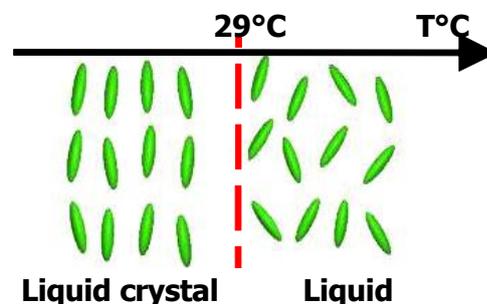


Figure 133: *Les cristaux liquides : influence de la température sur leur état*

Cette configuration atypique lui procure des propriétés optiques particulières. En effet, une lumière polarisée réfléchiée par des cristaux liquides en phase liquide cristallisée voit sa polarisation modifiée. En revanche, cette propriété optique disparaît à plus haute température lorsque l'état physique du matériau change et que les cristaux liquides passent à l'état liquide (figure 134).

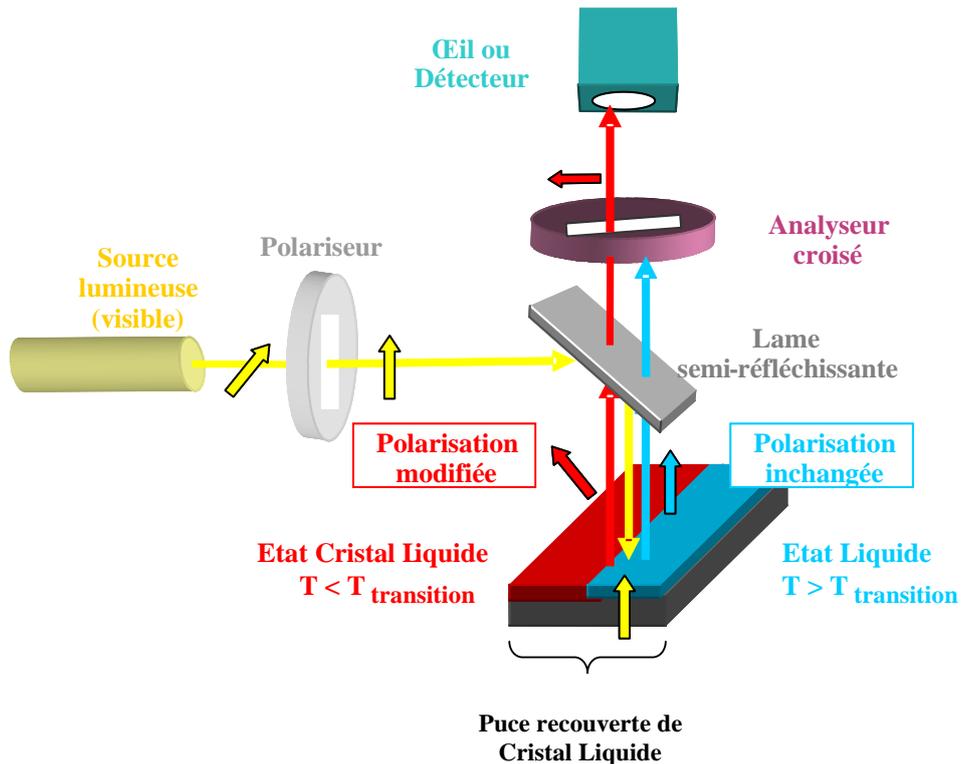


Figure 134: *Principe de la détection de point chaud par cristaux liquides*

Ainsi, si un défaut crée un échauffement local lorsqu'un courant le traverse, alors ce défaut pourra être détecté par cristal liquide. On chauffe l'échantillon juste en dessous de la température de transition des cristaux liquides, puis on vient le solliciter électriquement. Un défaut va échauffer la zone et les cristaux vont se désorienter. On peut observer le faisceau réfléchi d'une lumière polarisée à travers un polariseur. Le polariseur ne laisse passer que les rayons polarisés dans la direction verticale. A l'inverse, l'analyseur croisé ne laisse passer que les rayons polarisés dans la direction horizontale. De ce fait, seule la lumière dont la polarisation est modifiée par l'échantillon est transmise jusqu'à la caméra.

Sans échauffement, les cristaux liquides polarisent la lumière et un signal est détecté par la caméra. En cas d'échauffement, la phase est liquide et ne modifie pas la polarisation, les rayons sont donc toujours polarisés dans la direction verticale, et au passage dans l'analyseur, aucune lumière ne traverse : cette zone apparaît noire. Il est ainsi possible de détecter et de localiser des zones de défauts qui échauffent les matériaux et par suite les cristaux liquides (fig.135).



Figure 135: *Image réalisée par cristaux liquides. La tache noire au centre de l'image montre un échauffement du composant dans cette zone.*

b) Limites d'application des cristaux liquides dues à la configuration du composant

Le premier point particulièrement gênant de cette technique concerne les cristaux liquides eux-mêmes car ils sont toxiques voire cancérigènes; leur manipulation doit être rigoureusement encadrée.

Cette technique ne fonctionnera généralement pas sur boîtier car il est nécessaire d'être au plus près de la zone de défaut pour que les cristaux liquides soient sensibles à l'échauffement. Il sera donc nécessaire de réaliser un retrait du boîtier pour utiliser cette technique. Enfin, il est nécessaire de s'assurer de la compatibilité des cristaux liquides avec les matériaux du composant.

6) La thermographie infrarouge

a) Principe de la thermographie infrarouge

Comme pour les cristaux liquides, la thermographie infrarouge va détecter les défauts générateurs de chaleur. Il s'agit alors de détecter grâce à une caméra thermique (sensible dans la gamme $0.4\mu\text{m}$ - $30\mu\text{m}$), les échauffements des défauts.

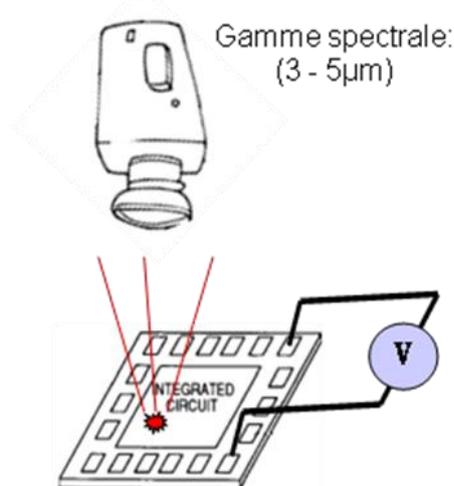


Figure 136: *Principe de la thermographie IR*

L'image du circuit par caméra infrarouge avant et après mise sous tension permet de cartographier les zones d'échauffement. La superposition d'une image thermique avec l'image du circuit met en relief les variations de température. Il suffit alors de comparer les images entre une pièce défectueuse et un échantillon de référence pour révéler les défauts potentiels.

Il existe deux modes d'utilisation de la thermographie IR :

- Par lock-in thermography qui permet la détection de points chauds et donc la localisation de court-circuit ou de chemin résistifs
- La cartographie thermique utilisée en comparant une pièce fonctionnelle et une pièce défective pour caractériser leur différence de réponse thermique.

b) Limites d'application de la thermographie IR dues à la configuration du composant

L'avantage majeur de cette technique est de ne pas nécessiter de préparation d'échantillon spécifique. Elle peut être utilisée sur puce comme sur boîtier. Néanmoins plus le défaut est enfoui dans le composant, plus le signal détecté apparaîtra diffus. En effet, le capteur détecte l'échauffement à la surface de l'échantillon. Il sera nécessaire de laisser le défaut diffuser son échauffement jusqu'à la surface pour le détecter. Le volume échauffé sera donc plus large et la localisation moins précise pour une localisation à travers un boîtier. Des préparations d'échantillon peuvent donc être requises pour obtenir une localisation plus précise.

Références annexes

- [ABD02] Abdellatif F., présentation powerpoint “procédure TMAH”, Rousset central characterization & analysis laboratory, STmicroelectronics
- [AUB08] Aubert A., “Mise en place de nouveaux outils de préparation d'échantillon appliqués aux analyses technologiques et de défaillances” Mémoire diplôme de recherche technologique, Université Poitiers, 2008
- [BEA04] Beaudoin F., Perdu P., DeNardi C., Desplats R., Lopez J., Faucon M., “Silicon thinning using ultra-short pulse laser ablation”, Proceedings from the 30th ISTFA, 2004
- [BEC98] Beck F., “Integrated circuit failure analysis: a guide to preparation techniques”, 1998, Wiley
- [CRE04] Crepel O., Poirier P., Descamps P., Desplats R., Perdu P., Haller G., Firiti A., “Magnetic Microscopy for ICs Failure Analysis : Comparative Case Studies using SQUID, GMR and MTJ systems ”, Proceedings from the 30th ISTFA, 2004
- [DEB08] Debleds S., “Localisation de défauts par stimulation thermique laser et par emission”, Mémoire de diplôme de recherche technologique, Université Poitiers, 2008
- [GON12] Rozgonyi G., “Silicon: characterization by etching”, North Carolina University
- [KER78] Kern W., Vossen J.L., “Thin film processes”, Elsevier science & technology books, dec 1978
- [PER04] Perungulam S., Wills K.S., “Chip access techniques”, Microelectronics failure analysis desk reference, 5th edition, EDFAS society, ASM international, p312-322, 2004
- [ROS90] Rossnagel S.M., Westwood W.D., “handbook of plasma processing technology: fundamentals, etching, deposition, and surface interactions”, 1990
- [WIL04] Wills K.S., Perungulam S., “delaying techniques: dry processes, wet chemical processing and parallel lapping”, Microelectronics failure analysis desk reference, 5th edition, EDFAS society, ASM international, chap.11, p.445-464, 2004