

氏名	福永守高
生年月日	
本籍	愛知県
学位の種類	博士(学術)
学位記番号	博甲第583号
学位授与の日付	2003年3月25日
学位授与の要件	課程博士(学位規則第4条第1項)
学位授与の題目	数値解析を応用した成形加工プロセスの設計・解析－エレクトロニクスデバイス製造工程への適用－
論文審査委員(主査)	山田 敏郎(工学部・教授)
論文審査委員(副査)	尾田 十八(工学部・教授) 中本 義章(工学部・教授) 田村 和弘(工学部・教授) 加納 重義(工学部・助教授)

学位論文要旨

Summary

This paper is composed of two contents which are analyses of silicon wafer slicing and epoxy curing reaction.

The first content: It is possible thermal expansion from heat generation by slicing deforms a single-crystal silicon ingot but the authors can find no report on the point. In addition, numerical analysis is useful to clarify the mechanism of wafer warping but no paper has been reported the numerical analysis from the start to end of the wafer slicing process. The authors carried out experiments for the wafer slicing. In addition, a finite element analysis was carried out in order to solve the warping mechanism from the start to end of the wafer slicing process. The result by the finite element analysis gave good agreement with experimental one. This paper suggests that thermal expansion of the ingot has great influence on the warp of wafer.

The second content: Curing rate of epoxy resin was usually expressed by power law model which was insufficient to express curing rate because the reaction varies in curing. Epoxy curing reaction makes cross-linking after it makes a straight chain polymer. The previous workers have expressed the reaction rate with power law model but it is insufficient to express the reaction rate from the start to the end of reaction. The reaction degrees of curing reaction are measured at various temperatures and then a new reaction rate equation with a multiple regression analysis is proposed. The new reaction rate equation can express experimental results over wide ranges of reaction degree and temperature. The storage and loss moduli are measured at various reaction degree and temperatures. The parameters of Prony series are determined with the measured moduli in order to express the viscoelastic behavior of epoxy resin. A triple cylinder model is prepared in order to simulate a power transform. The triple cylinder consists of an iron, filled epoxy resin, and iron

cylinders. A circumferential strain of the middle of the outer iron cylinder is measured with time. The strain rises because the epoxy resin shrinks with curing reaction. Expressing curing rate, viscoelastic properties, and adhesive force on the interfaces of epoxy resin with a function of reaction degree in numerical analysis, the circumferential strain change in curing reaction on the numerical analysis gives good agreement with one on the experiment. It indicates that the gelling point of epoxy resin can be estimated. A point that has the highest temperature is not always equal to a point that has the greatest stress in the epoxy resin. To predict the stress, strain, temperature and reaction degree during epoxy curing reaction, the authors proposed the coupled analysis of FEM among them.

情報化が急速に進む中、半導体デバイスの高性能化への要求も留まるところを知らず、微細化、高集積化のスピードは一層速まっている。この微細化・高集積化を実現するためには、半導体デバイスを形成する基板であるシリコンウエハの精度が重要である。また、半導体デバイス製造は一部を除いてもはや先進工業国だけが生産できるものではなく、国際競争力の観点からより安価な製造方法も日夜研究されてきている。

主にコスト削減を目的として、シリコンウエハの直径は徐々に拡大してきている。一枚のシリコンウエハを製造するためには多くの工程が必要である。より直径の大きなウエハ製造工程に関するノウハウの不足と様々な物理的な問題から、それを従来と同じ精度で生産することは非常に難しい。

インゴットからウエハを切り出すスライシング方法の主流はマルチワイヤーソーである。この際、ウエハに数 μm オーダーの「そり」が発生する。研磨によりこの「そり」を外見上なくすことができるが、シリコンの結晶方向がシリコンウエハ表面と直交せず半導体デバイスの歩留まりを大きく低下させてしまう。このように、スライシング工程はシリコンウエハ製造の比較的初期にありながら、最終的な半導体デバイスの精度をほぼ決定してしまうほど重要な工程である。ウエハ製造工程の中でも本研究で特にスライシング工程に着目したのはこの理由からである。

また、本研究で注目しているエレクトロニクスデバイス製造の分野では、軽量で薄型・小型化・高性能化が加速度的に進んでいる。「エレクトロニクス製品」全体として考えた場合、半導体デバイス以外の部品も重要である。

エレクトロニクスデバイスの中でも特にトランスは、エレクトロニクス製品全体に占める容積・重量割合が相当に大きい。そのために、小型化、薄型化、軽量化への要求が非常に強だけでなく、改善による利益も大きい。トランス中の絶縁封止材であるエポキシ樹脂をより薄くすることは、この要求達成への有効な解決策の一つである。

しかし、汎用エポキシ樹脂は充てん後の硬化反応による収縮が避けられないだけでなく、反応中の発熱やその後の冷却による熱ひずみも加わる。さらに、エポキシ樹脂は硬化反応中に、液体から固体へと連続的に変化するために力学的特性が非常に複雑に変化するという問題がある。これらの理由のために、硬化中のクラック発生や硬化後の残留応力の予測は困難であった。

本論文は大きく分けて「ワイヤーソー装置によるインゴット切削解析」と「エポキシ樹脂硬化反応解析」の2つから構成される。

ワイヤーソー装置によるインゴット切削解析では、スライシング工程における「そり」の主原因が切削熱であると仮定した。従来の研究報告例にはスライシング中の切削熱に特に注目したものはなく、新しい観点からの取り組みである。まず、切削のための新しい有限要素解析モデルを作成し、「そり」の絶対量と「そり」の形の予測を試みた。この有限要素解析と実験結果の比較から「そり」発生メカニズムを明らかにし、「そり」低減への提案を行った。

エポキシ樹脂硬化反応解析では、有限要素法を用いた「熱-応力-硬化反応」の連成解析を試みた。従来の研究報告例ではこの3つを一度に連成させて解いた例はない。この連成解析のために、まずエポキシ反応速度解析を行った。次に、応力解析のための粘弾性構成則とそのパラメータを決定した。絶縁封止材として使われるエポキシ樹脂は、その界面で導体である金属と接触している。そのため、金属との接着界面の有限要素解析上の取り扱いを検討することによって、界面における実際の接着や破壊のメカニズム解明を試みた。

以下に本論文の結論を統括する。

(1) 有限要素解析

一般的な手法に属する部分については紙面の都合で割愛するが、本研究においては従来一般的に用いられているものと異なるいくつかの手法を採用している。

熱伝導問題と構造問題が相互に連携している系では、それらの問題を連立させて解く必要がある。そのため、本研究では熱伝導解析と応力解析を交互に1増分ステップずつ解析することにより二つの問題を連成させた。次に、熱伝導問題において、熱伝達境界条件など温度に対する非線形性が存在している場合、増分ステップ最初の温度を用いると誤差が大きくなる。そのため、Fig. 1に示すように「予測温度」を算出してそれを（たとえば、熱伝達境界条件の表面温度として）計算に用いた。さらに、「予測温度」の誤差評価を行うことで誤差を小さくしている。

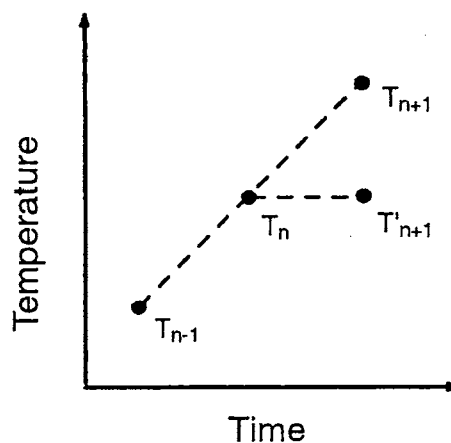


Fig. 1 Method of Estimation for Nodal Temperature

(2) インゴット切削実験

インゴット切削実験において、シリコンインゴットを用いることは非常に多くのコストがかかる。そこで、切削実験においてシリコンの擬似物質を用いることがよくある。本研究では擬似物質として広く用いられるソーダガラスを切削実験に使用した。

切削実験中はインゴットの内部温度をリアルタイムに測定し、切削後はその Warp 量を測定した。それらの結果については次の項の結果と併せて示す。

(3) シリコンウエハスライス工程解析

まず、ソーワイヤー駆動動力からスラリーやソーワイヤーなどが系外に持ち出すエネルギーを差し引き、切削によって加えられる熱量を算出した。有限要素解析は要素および節点に離散化されており、本来連続現象である切削を表現することは難しいとされる。本研究では Fig. 2 に示すように切削部分に相当する要素を用意して、切削後に要素内の剛性と熱伝導率を 0 とすることによって切削を表現した。また、切削の直前には熱流束を与え、切削熱の発生を表現している。

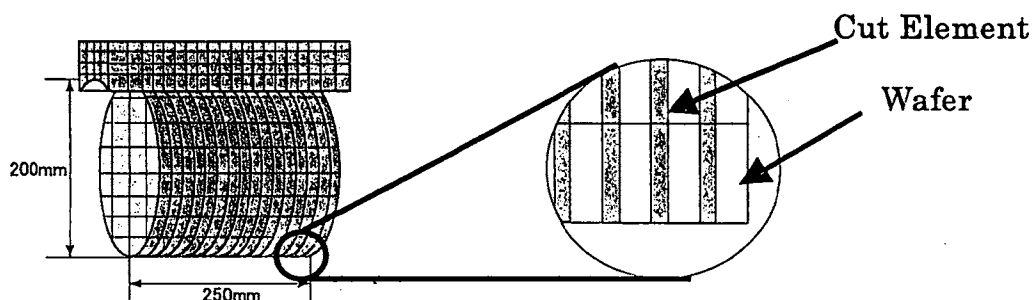


Fig. 2 Cut Element

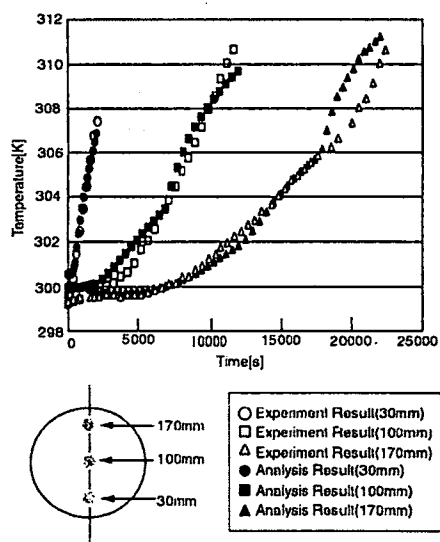


Fig. 4-20 Comparisons between Temperature of Analysis and Experimental one

Fig. 3 Comparison Between Temperatures by Experiment and Finite Element Analysis

実験と有限要素法解析におけるインゴット内部温度の推移を Fig. 3 に示す。この結果から切削熱の発生量をほぼ正確に見積もれていることがわかる。次に、実験と有限要素法解析におけるウエハの「そり」形状の一例を Fig. 4 に示す。ウエハの Warp 量がほぼ一致していることはもちろんのこと、その形状も非常に近い。切り始めと切り終わりで特に曲がりが大きいのは、体積あたりの切削熱が大きいためである。そのため、特に切り始めと切り終わりでいかにうまく放熱するかが Warp 量低減の鍵となっていることがわかる。

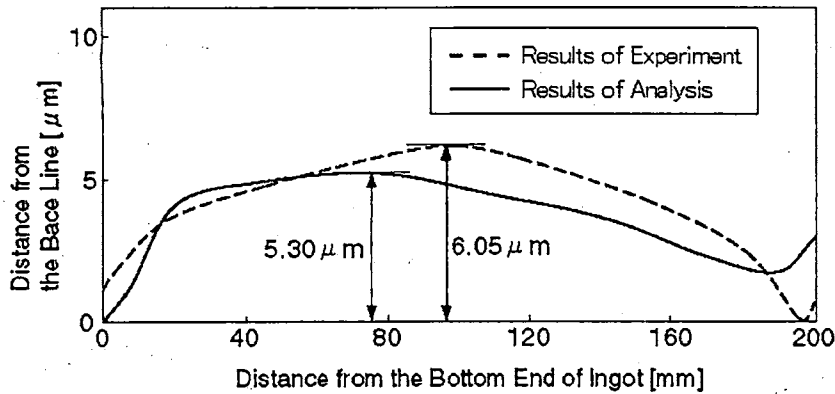


Fig. 4 Comparison Between Warping Shapes in Experiment and Finite Element Analysis

(4) エポキシ樹脂硬化反応速度解析

エポキシ樹脂硬化反応速度を求めるために、エポキシ樹脂硬化反応速度解析を行った。エポキシ樹脂の硬化反応率を測定するために、DSC が広く用いられてきた。しかし、本研究では官能基定量法により未反応末端を直接測定し、反応率をより正確に測定している。

従来の研究報告例ではべき乗則または Kamal モデルが広く用いられているが、Fig. 5 に示すようにエポキシ樹脂硬化反応の最初から最後までを一貫して取扱うには誤差が大きい。

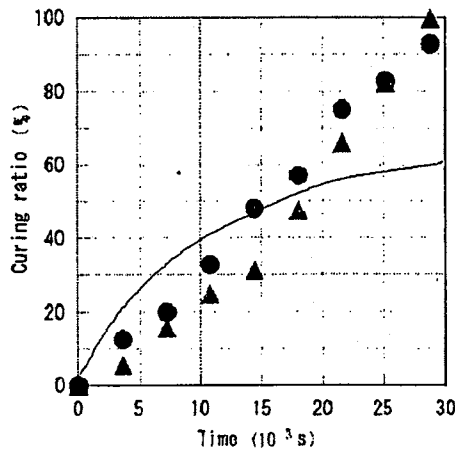


Fig. 5 Calculated Curve for Variation of Reaction Degree at 80 °C :Experimental data (●)

そのため、本研究ではエポキシ樹脂硬化反応速度解析から求めた反応率を元に、反応速度を温度と反応率の多項式で表現した。その多項式を式(1)に示す。

$$\begin{aligned} \frac{dR}{dt} = & 9.0311 \times 10^{-9} T^5 + 2.2756 \times 10^{-9} R^5 \\ & + 1.6695 \times 10^{-6} T^4 - 3.1442 \times 10^{-7} R^4 \\ & + 5.7389 \times 10^{-15} (R \cdot T)^4 - 1.1519 \times 10^{-10} (R \cdot T)^3 \\ & + 1.2488 \times 10^{-2} R^2 + 2.0798 \times 10^{-2} (R \cdot T) \\ & - 3.9186(R + T) + 182.68 \ln(R + T) - 525.78 \end{aligned} \quad (1)$$

反応温度が低い場合に反応率の時間変化はほぼ線形 (Fig. 5) となるが、反応温度が高くなるに従って誘導時間やゲル化に伴う分子運動低下による反応速度低下が顕著に表れ、反応率の時間変化はS字型 (Fig. 6) になる。

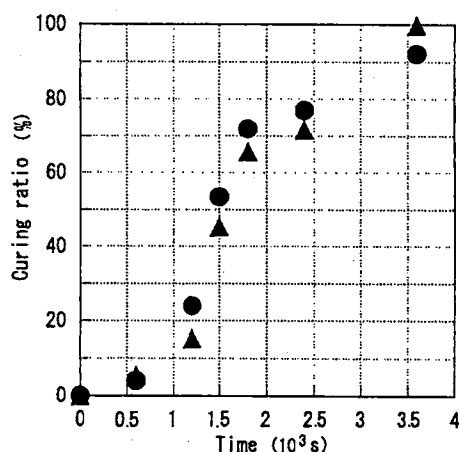


Fig. 6 Calculated Curve for Variation of Reaction Degree at 120 °C :Experimental data (●)

(5) 粘弾性解析

高分子であるエポキシ樹脂の粘弾性挙動は無視できないと考えられる。従来の高分子の粘弾性は動的粘弾性測定によって測定されてきた。本研究で用いたエポキシ樹脂では、高周波数領域においては反応率の影響はほぼ見られなかったものの、低周波数領域では反応率の影響が顕著に見られた。これは、ゲル化による3次元構造は小さなひずみ速度に対する緩和にのみ非常に大きな影響があることを示唆している。

動的粘弾性測定は非常に広く用いられている測定方法であるが、そのままでは時刻歴応答を表現できない。調和応答解析などを除くと有限要素解析では時刻歴応答に対応できる粘弾性構成則を用いなければならない。そこで、時刻歴応答に対応できる粘弾性構成則としてProny級数を使うこととし、動的粘弾性測定データからラプラス変換を利用してProny級数パラメータを求めた。Prony級数は項数を増やすことにより精度が上がるのが期待

されるが、本研究では増分ステップに対して 1/10 以下の緩和速度の項は増分ステップ内ですでに十分緩和しているものとして無視した。

(6) 3重円筒モデル実験

トランス内の絶縁封止用として用いられるエポキシ樹脂の硬化反応を模擬するために、Fig. 7 のような実験系を作成した。外側鉄円筒の円周方向ひずみを測定し、それから熱ひずみを差し引いた時間変化を Fig. 8 に示す。

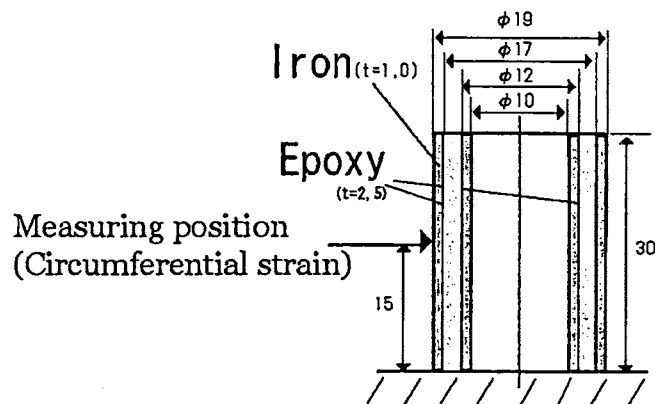


Fig. 7 Cross-sectional view of test pieces (unit:mm)

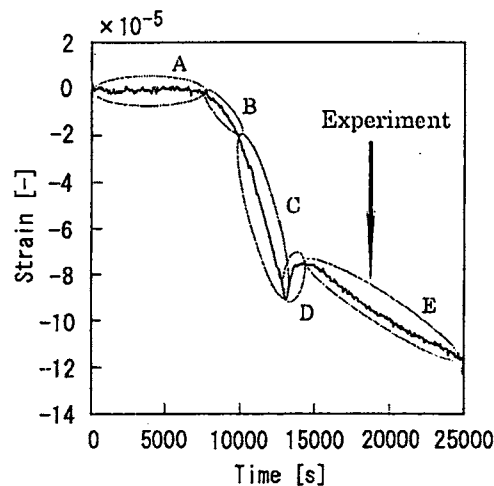


Fig. 8 Circumferential Strain in Experiment at 80 °C
(A: Slipping Stage, B: Partial Gelling Stage,
C: Sticking Stage, D: Cracking Stage
and E: Partial Sticking Stage)

エポキシ樹脂がゲル化するまでは界面の接着はなく、鉄円筒にひずみはほとんど発生しない。しかし、ゲル化後は界面の接着のためにひずみは急速に増大する。そして、界面の破壊が生じたと思われるところで、ひずみの絶対値は不連続に減少する。その後もひずみは増加しつづけるが、破壊前よりも増加の程度は小さくなる。

(7) 界面の接着と破壊を取扱うための有限要素解析

(6) 項に示した現象を模擬するために、エポキシ樹脂と金属の界面に特殊な非線形ばね要素を定義した。このばね要素はゲル化前のばね剛性は0（未接着：Fig.8のA）であるが、ゲル化とともにその剛性は増加し（部分的接着：Fig.8のB）、その後に剛性は一定（完全接着：Fig.8のC）となる。界面で破壊が生じたと判定された場合、ばね剛性とばね力を直ちに減少（界面破壊：Fig.8のD）させる。その後もばね剛性を漸減させることで段階的な界面破壊（Fig.8のE）を表現している。このように界面に特殊な非線形ばねを設定することで、Fig.9に示すように実験結果をうまく説明することができ、エポキシ界面の接着状態変化をほぼ推定することができる。

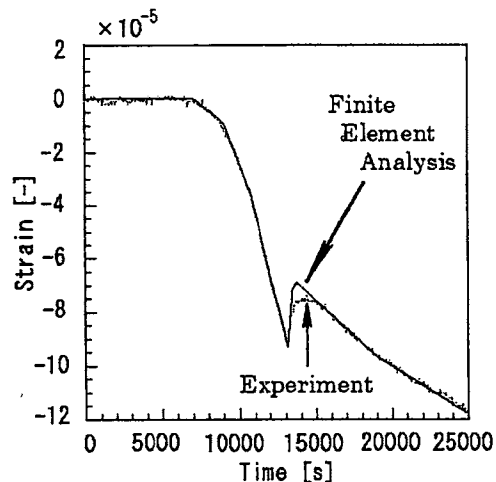


Fig. 9 Comparison Between Calculated Circumferential Strain and Experimental One with Progressive Failure Model at 80 °C

ワイヤーソー装置によるインゴット切削解析では、スライシング工程における「そり」の主要原因が切削熱であると仮定した有限要素法解析を行い、そのWarp量と「そり」形状は実験結果のものとほぼ一致した。特に、切り始めと切り終わりでは切削熱の影響は大きく、放熱を効率的に行う必要があると考えられる。従来の研究報告例ではこの切削熱の影響がほとんど議論されていないが、本研究の結果は切削熱の影響が大きいことを示唆することで「そり」の発生メカニズムの新たな視点を提案した。

エポキシ樹脂硬化反応解析では、従来の研究報告例になかった有限要素法を用いた「熱-応力-硬化反応」の連成解析を行った。エポキシ樹脂界面の接着や破壊を有限要素解析のモデルで表現することにより、それらの現象のメカニズム解明に役立てることができた。界面の現象だけに注目する場合でもエポキシ樹脂硬化反応速度の評価は非常に重要であり、本研究では反応速度論解析から掘り下げることで化学反応と力学的挙動を結び付ける新たな手法を提案できた。

学位論文審査結果の要旨

各審査委員によって提出学位論文に関して個別に審査を行なうと共に、平成15年1月21日に第1回論文審査委員会、平成15年1月28日に開催した口頭発表の結果を踏まえて、同日に第2回論文審査委員会を開催して協議を行なった。その結果、以下のように判定した。

半導体に代表されるエレクトロニクス部品製造工程には様々な課題がある。その中で、インゴットからスライスされたシリコンウエハに「そり」が出るという問題点があった。本論文ではスライス方法の一つであるマルチワイヤーソー方式によるスライスで生じるそりの量と形状を、これまでは困難であった切削という概念を新たにとり入れた有限要素解析により初めて予測し、そりの低減策を示した。

さらに、トランスの封止材に供されるエポキシ樹脂に着目し、エポキシ樹脂硬化反応の速度論解析を行なった。その中で、エポキシ樹脂反応速度を従来のべき乗則では精度良く表現できないことを示した。さらに粘弾性解析を実施し、短時間変形(速い変形)に対する粘弾性特性がゲル化の程度に依存しないことを示した。続いてこの速度論解析と粘弾性解析の結果をもとに、熱-応力-硬化反応有限要素解析のための新しい計算モデルを提案し実施した。その解析結果の考察から、エポキシ樹脂界面の接着と破壊のメカニズムを初めて明らかにしている。

以上のように、エレクトロニクスデバイス製造時の問題の原因とその対策を明らかにしたことは、学術的な面のみならずエレクトロニクス部品製造業界に重要な指針を与え、当該研究分野の発展に大いに寄与するものである。従って、本論文は博士(学術)の学位に値するものと判断する。