



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA
DELL'INFORMAZIONE

Termografia applicata all'elettronica

Relatore:

Ch.mo Prof. Gaudenzio Meneghesso

Laureanda: Maria Ruzzarin

A.A. 2012-2013

Indice generale

1	Introduzione.....	5
2	L'importanza del parametro temperatura.....	7
2.1	Affidabilita'.....	7
2.2	Affidabilità per i dispositivi a semiconduttore.....	8
2.3	Relazione tempo-temperatura.....	8
3	Misura della temperatura per dispositivi a semiconduttore.....	11
3.1	Tecniche elettriche.....	12
3.1.1	Tensione della giunzione pn in diretta.....	13
3.1.2	Tensione di soglia.....	14
3.1.3	Resistenza elettrica.....	14
3.1.4	Guadagno di corrente.....	15
3.2	Tecniche ottiche.....	16
3.2.1	Luminescenza.....	17
3.2.2	Raman.....	17
3.2.3	Riflettanza	18
3.2.4	Effetto termo-ottico.....	18
3.2.5	Infrarosso.....	18
3.3	Tecniche a contatto fisico.....	20
3.3.1	Cristalli Liquidi.....	20
3.3.2	Thermographic Phosphors.....	21
3.3.3	Scanning Thermal Probes.....	21
4	Descrizione e analisi di alcuni metodi.....	22
4.1	Termografia a infrarosso.....	22
4.1.1	Applicazioni	24
4.1.1.1	Termografia IR nell'industria.....	24
4.1.1.2	Termografia IR applicata ai sistemi fotovoltaici.....	25
4.1.1.3	Termografia IR nell'edilizia.....	27
4.1.1.4	Termografia IR nel restauro.....	27
4.1.1.5	Termografia IR nel settore medico.....	27
4.2	Raman.....	28
4.2.1	Applicazioni.....	29
4.2.1.1	Termografia Raman applicata ai semiconduttori.....	29
4.2.1.2	Termografia Raman per la nanotecnologia.....	30

4.2.1.3 Termografia Raman nell'industria farmaceutica.....	30
4.2.1.4 Termografia Raman nell'analisi forense.....	30
4.2.1.5 Termografia Raman in geologia.....	30
4.3 Analisi dei vantaggi di entrambe le tecniche per dispositivi AlGaIn/GaN.....	30

1 Introduzione

Attualmente con la diffusione dell'elettronica in tutti i campi sia scientifici che industriali, molte attività dipendono dal buon funzionamento delle apparecchiature elettroniche. Di conseguenza è cresciuto l'interesse per le tecniche di analisi, di controllo dei dispositivi, per l'affidabilità dei sistemi e per la diagnosi dei guasti. Per esempio prevedere ed evitare l'insorgere di un guasto o studiare la durata della vita di un dispositivo permette di determinare la sicurezza di un'applicazione e consente il risparmio in termini di costo e manodopera. Ciò spiega perché, parallelamente allo sviluppo dell'elettronica, si sia avuta una larga diffusione delle tecniche per la valutazione e il miglioramento dell'affidabilità. La conoscenza di queste discipline costituisce oggi uno strumento indispensabile per chi si occupa del progetto di sistemi elettronici.

Uno dei parametri che più fortemente influenza quasi tutti i processi chimico fisici, compresi anche quelli relativi alla degradazione dei componenti elettronici, è la temperatura. E' quindi evidente quanto sia importante determinare accuratamente questo parametro per poter prevedere il tempo di vita di un dispositivo elettronico. A causa dell'aumento della complessità dei circuiti integrati è difficile, se non impossibile, misurare la temperatura con metodi a contatto, è stato necessario trovare quindi tecniche alternative. Esistono diversi metodi per la misura della temperatura che differiscono per tecnica di applicazione e proprietà. Una varietà di caratteristiche che permette, al momento dell'indagine, di scegliere il sistema più adatto per determinare la temperatura nel dispositivo da analizzare. In generale i metodi di misura della temperatura nei semiconduttori si dividono in tre categorie a seconda della proprietà che viene sfruttata per l'indagine: i metodi elettrici che si servono delle proprietà elettriche dei dispositivi che sono funzioni della temperatura, i metodi ottici che misurano le radiazioni emesse, diffuse o riflesse dai campioni e i metodi a contatto fisico.

La tecnica più diffusa è la termografia a infrarosso, che esamina la radiazione infrarossa naturalmente emessa dal dispositivo sotto esame e si applica su grande scala. Un altro metodo da prendere in considerazione è l'analisi termografica basata sull'effetto Raman: è una tecnica più recente ma molto utile per l'indagine di campioni in scala microscopica.

In questa tesi, si analizzano alcuni metodi delle tre categorie esaminando i relativi parametri che variano con la temperatura. In seguito vengono descritti più in dettaglio la termografia a infrarosso e Raman: dopo una breve introduzione storica, si approfondiscono i principi di base e vengono descritti alcuni ambiti applicativi. In conclusione si confrontano le due tecniche applicate su dispositivi AlGaIn/GaN, discutendo i vantaggi di entrambe.

2 L'importanza del parametro temperatura

Dalle richieste della progettazione e del mercato emerge che un criterio fondamentale per la valutazione di un dispositivo elettronico è l'affidabilità. Si dimostra che questa dipende dalla temperatura. Per questo è importante riuscire a misurare e a monitorare la temperatura dei dispositivi elettronici al fine di ottenere maggiori risultati in termini di prestazioni.

2.1 Affidabilità

L'affidabilità di un dispositivo viene definita come *la probabilità che un elemento si comporti soddisfacentemente per un assegnato intervallo di tempo in condizioni d'uso stabilite*.

La frequenza dei malfunzionamenti, la misura cioè del numero di guasti per unità di tempo varia in generale in funzione del tempo. E' decrescente nella prima parte della vita (fase di mortalità infantile), pressoché costante nella seconda parte (periodo di vita utile) e crescente nella terza parte (fase di fine vita).

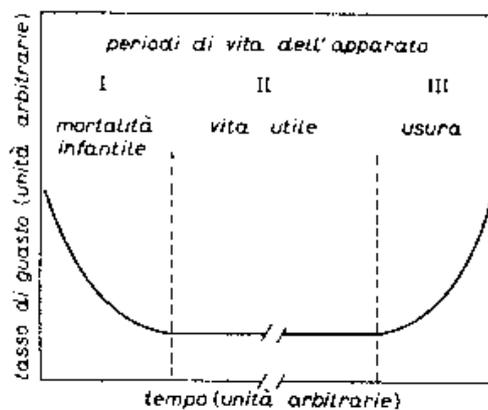


Fig.1.1 Curva caratteristica di vita

Nell'intervallo di tempo del periodo di vita utile l'affidabilità è descritta da:

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

L'importanza del parametro temperatura

Dove $R(t)$ è la probabilità che l'elemento funzioni senza guasti per il tempo t , in condizione di funzionamento assegnate, e λ è la frequenza dei guasti dell'elemento.

$R(t)$ viene assunta costante per ogni assegnato insieme di condizioni di sollecitazione, temperatura e livello di qualità. Viene calcolata in base a dati raccolti su larga scala e/o in base a programmi di prova.

2.2 Affidabilità per i dispositivi a semiconduttore

Per i dispositivi a semiconduttore le distribuzioni di vita sono lognormali (i.e. la distribuzione di probabilità di una variabile aleatoria il cui logaritmo segue una distribuzione normale) e per la previsione e il controllo dell'affidabilità a lungo termine si usa la tecnica delle prove di sollecitazione accelerata. Si tratta di procedure di campionamento e di prove in laboratorio in cui i dispositivi vengono sottoposti a diverse sollecitazioni.

Il concetto di base è di tipo statistico: si considera una popolazione di oggetti (idealmente caratterizzata da un numero infinito di elementi) ciascuno con un tempo di vita definito. L'insieme dei tempi di vita è una funzione di distribuzione con parametri statistici incogniti per esempio media e varianza.

I risultati di prove elaborate su uno stretto campione di componenti possono servire per fare previsioni sul tempo di vita di altri dispositivi appartenenti alla stessa popolazione.

2.3 Relazione tempo-temperatura

Per indagare come i parametri elettrici variano al variare della temperatura, è necessario riferirsi alle reazioni chimico-fisiche che avvengono al seguito dell'aumento dell'energia cinetica.

Il motivo fondamentale per usare i test accelerati sta nel fatto che la maggior parte dei processi chimici e fisici che portano al guasto vengono resi più rapidi dalla temperatura in un modo che può essere facilmente rappresentato con un modello. Per valutare la relazione tra la velocità di reazione di questi processi e la temperatura si usa la relazione di Arrhenius:

$$R=R_0 e^{E_A/kT}$$

Dove $R_0 = \text{cost}$, E_A è l'energia di attivazione espressa in eV, k è la costante di Boltzmann ($8.6 \cdot 10^{-5}$

L'importanza del parametro temperatura

eV/K) e T è la temperatura assoluta (K).

Perciò anche il tempo di guasto, che è legato alla velocità di reazione con una particolare funzione, indipendentemente da questa, dipenderà dalla temperatura nel modo descritto dall'equazione di Arrhenius.

Dato questo effetto della temperatura, possiamo descrivere il passaggio dal suo stato normale a uno stato di mal funzionamento che si verifica quando un certo parametro supera i suoi limiti funzionali, come in figura 1.2 dove R_1 è la velocità della reazione alla temperatura T_1 e R_2 è la velocità alla temperatura T_2 con ($T_1 > T_2$).

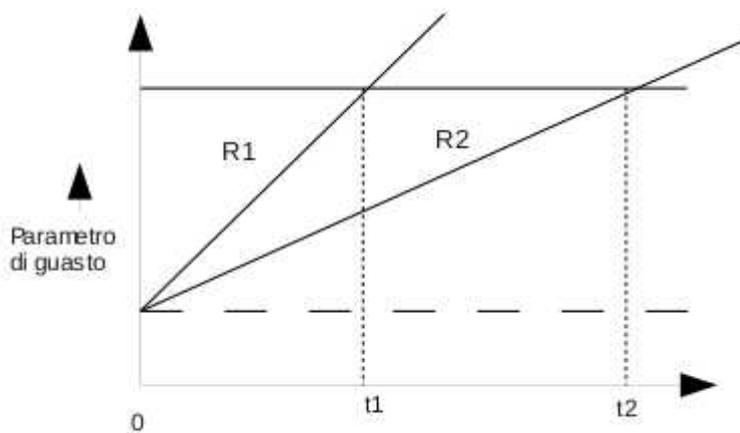


Fig.1.2 Reazione di guasto legata a tempo e temperatura

Se si fa l'ipotesi che la reazione sia lineare nel tempo, $R_1 t_1 = R_2 t_2$; posto t_f = tempo di guasto

$R t_f = \text{cost}$:

$$t_f \propto \frac{1}{R} \propto e^{E_A/kT}$$

$$\ln(t_f) = C + \frac{E_A}{kT}$$

Per calcolare l'energia di attivazione dai tempi equivalenti alle due temperature:

L'importanza del parametro temperatura

$$\ln(t_{f_1}) = C + \frac{E_A}{kT_1}$$

$$\ln(t_{f_2}) = C + \frac{E_A}{kT_2}$$

Sottraendo si ha:

$$\ln(t_{f_1}) - \ln(t_{f_2}) = \frac{E_A}{k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)$$

ovvero:

$$E_A = k \ln \frac{t_{f_2}}{t_{f_1}} \left(\frac{1}{1/T_2 - 1/T_1} \right)$$

Il fattore di accelerazione che lega i tempi di guasto a due diverse temperature, nota l'energia di attivazione è:

$$A = \exp \left[\frac{E_A}{k} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \right]$$

Il fatto che il processo di guasto dipenda da una funzione esponenziale invece che lineare comporta che l'energia di attivazione apparente (che è la quantità di interesse pratico) è $1/n$ volte l'energia di attivazione effettiva. Se si grafica $1/T$ in funzione di $\ln t_f$ si ottiene una retta la cui pendenza è legata a k/E_A .

Ecco perché la misura della temperatura ha un'importanza fondamentale per quanto riguarda l'affidabilità e la performance dei dispositivi a semiconduttore.

Misura della temperatura per dispositivi a semiconduttore

METODO	ESEMPI	VANTAGGI	SVANTAGGI
Elettrico	<ul style="list-style-type: none"> - Tensione di giunzione - Tensione di soglia - Resistenza 	<ul style="list-style-type: none"> - Dispositivo “packaged” - No contatto - Potenzialmente sub-superficiale 	<ul style="list-style-type: none"> - Medie - Può richiedere un intervento speciale sul dispositivo
Ottico	<ul style="list-style-type: none"> - Emissione infrarossa - Riflettanza - Raman 	<ul style="list-style-type: none"> - Mappa di temperature - No contatto - Buona risoluzione spaziale 	<ul style="list-style-type: none"> - Necessita della visione superficiale - Potenzialmente costosa
A Contatto Fisico	<ul style="list-style-type: none"> - Scanning thermal probes - Cristalli liquidi - Fosfori termografici 	<ul style="list-style-type: none"> - Mappa di temperature - Potenzialmente alta risoluzione spaziale 	<ul style="list-style-type: none"> - Necessita della visione superficiale - Il contatto può perturbare la temperatura

Tabella 1

3.1 Tecniche elettriche

Molte delle proprietà elettriche dei dispositivi a semiconduttore sono funzioni della temperatura. La tensione diretta della giunzione pn, la tensione di soglia, la corrente di perdita, il guadagno, per nominarne alcuni, sono esempi di parametri elettrici che dipendono dalla temperatura (TSP electrical temperature sensitive parameters). Perciò un'attenta misura di una di queste quantità può essere usata per calcolare la temperatura di un dispositivo a semiconduttore.

I metodi elettrici sono per loro natura metodi “concentrati” (lumped methods) perché, nonostante la temperatura di un dispositivo non sia la stessa dappertutto, il comportamento elettrico e termico del dispositivo viene considerato concentrato in un modello con una sola temperatura, una sola tensione e una sola densità di corrente.

Misura della temperatura per dispositivi a semiconduttore

VANTAGGI: Il vantaggio principale dei metodi elettrici è dato dal fatto che non è richiesta nessuna strumentazione ulteriore perché sono già disponibili tutte le connessioni elettriche necessarie, dato che sono quelle già utilizzate per il normale funzionamento del dispositivo. Sono non-contacting perché i contatti elettrici richiesti per fare le misure sono quelli già esistenti. I metodi elettrici sono gli unici che possono essere fatti su dispositivi completamente incapsulati (fully packaged).

SVANTAGGI: E' difficile determinare però la risoluzione spaziale, inoltre viene misurata un'unica temperatura media per un dispositivo che normalmente ha una certa distribuzione di temperatura e perciò non si possono fare mappe di temperatura.

3.1.1 Tensione della giunzione pn in diretta

La relazione tra la corrente, la tensione e la temperatura di una giunzione pn ideale è data dalla relazione:

$$I_{pn} = I_s \cdot \left[\exp\left(\frac{qV_{pn}}{kT}\right) - 1 \right]$$

dove:

I_{pn} è la corrente, q la carica dell'elettrone ($1.6 \cdot 10^{-19}$ C), k la costante di Boltzmann ($1.381 \cdot 10^{-23}$ J/K), V_{pn} è la tensione ai capi della giunzione, T è la temperatura, e:

$$I_s = I_0 T^\gamma \exp\left(\frac{-E_g}{kT}\right)$$

dove γ è una costante circa uguale a 3, E_g è l'ampiezza della banda proibita del silicio (1.12 eV a $T=275$ K) e I_0 è una costante non dipendente dalla temperatura.

Dalle equazioni precedenti, la variazione della tensione della giunzione con la temperatura ad una corrente costante I_{pn} è data da:

Misura della temperatura per dispositivi a semiconduttore

$$\left[\frac{\partial V_{pn}}{\partial T} \right]_{I_{pn}} = -\gamma \frac{k}{q} + \frac{(V_{pn} - E_g/q)}{T}$$

La tensione in diretta di una giunzione pn può essere utilizzata per misurare la temperatura se è accessibile attraverso i contatti elettrici del dispositivo.

3.1.2 Tensione di soglia

La variazione della tensione di soglia con la temperatura è data da:

$$\frac{\partial V_T}{\partial T} = \frac{d\psi_B}{dT} \cdot \left(2 + \frac{1}{C_{ox}} \sqrt{\frac{\epsilon_{Si} q N_A}{\psi_B}} \right)$$

dove:

$$\frac{d\psi_B}{dT} \approx \frac{1}{T} \left[\frac{E_g(0)}{2q} - |\psi_B| \right]$$

dove V_T è la tensione di soglia, ψ_B è la distanza del livello di Fermi dalla banda proibita, ϵ_{Si} è la costante dielettrica del Silicio, N_A è la concentrazione degli atomi di drogaggio, E_g è l'ampiezza della banda proibita a $T=0$, e C_{ox} è la capacità intrinseca dell'ossido del canale di gate.

3.1.3 Resistenza elettrica

La resistenza elettrica R (Ω) ai capi di una barretta di lunghezza L (m) e attraverso un area A (m^2) è data da:

$$R = \frac{\rho \cdot L}{A}$$

dove ρ (ohm-metro) è la resistività ed è data da:

$$\rho = \left[\sum n_i \cdot q_i \cdot \mu_i \right]^{-1}$$

Misura della temperatura per dispositivi a semiconduttore

dove i rappresenta il numero di differenti tipi di carica presenti (elettroni e lacune in un semiconduttore e solo elettroni in un metallo), n (m^{-3}) è la concentrazione di questi, q (C) è la carica associata ad ogni particella e μ ($m^2V^{-1}s^{-1}$) è la mobilità delle particelle.

Il valore di n e μ può essere dipendente dalla temperatura.

In un semiconduttore, n cresce e μ decresce al crescere della temperatura. In un metallo μ decresce al crescere della temperatura, ma n non è dipendente dalla temperatura. A temperature tipiche di funzionamento per un semiconduttore, domina il decrescere di μ , e la resistenza sia dei semiconduttori che dei metalli cresce al crescere della temperatura (alle temperature tipiche di funzionamento dei dispositivi a semiconduttore).

La resistenza della barretta è facilmente misurata facendo passare una corrente I (A), attraverso la barretta e misurando la tensione applicata V (V), usando la legge di Ohm:

$$R = \frac{V}{I}$$

Perciò, variazioni nella misura di R possono essere usate per determinare la temperatura

La maggior parte dei dispositivi a semiconduttore non hanno un parametro specifico che obbedisce alla legge di Ohm perché hanno le giunzioni pn che di solito dominano con la loro relazione esponenziale I, V . Un'eccezione sono i dispositivi ad alte tensioni, in particolare i mosfet di potenza, che hanno una regione in cui la loro caratteristica I, V segue strettamente la legge di Ohm. La variazione di temperatura di questa regione del dispositivo, nota come on-resistance region, può essere usata per misurare la temperatura del dispositivo.

Ci sono altri casi in cui la resistenza è usata per determinare la temperatura, ma richiedono la fabbricazione di speciali contatti o strutture sul dispositivo analizzato.

3.1.4 Guadagno di corrente

Il guadagno di corrente dei transistor bipolari β è una funzione fortemente dipendente dalla temperatura. È definito da:

$$\beta = \frac{i_C}{i_B}$$

dove i_C e i_B sono la corrente di collettore e base rispettivamente. I valori di β e la sua variazione con la temperatura sono funzioni complesse dovute alla costruzione del dispositivo, ai livelli di drogaggio e alla temperatura. Generalmente non è una funzione monotona della temperatura; perciò la variazione di temperatura di β è intenzionalmente minimizzata il più possibile nel progetto del dispositivo al fine di migliorare la stabilità e la performance.

3.2 Tecniche ottiche

I metodi ottici basano il loro funzionamento sul fenomeno fisico dell'irraggiamento.

In seguito all'agitazione termica gli atomi eccitati emettono onde elettromagnetiche di frequenza proporzionale alla loro temperatura

Per utilizzare questa proprietà per determinare la temperatura un fascio di fotoni viene centrato in un punto del dispositivo da analizzare, i fotoni incidenti interagiscono con il corpo ed alcuni di essi vengono riflessi dalla superficie dell'oggetto. L'iterazione tra il fonone incidente e il fonone reticolare causa una variazione nella distribuzione di energia che è funzione della temperatura. Se questa variazione viene misurata precisamente può essere utilizzata per ricavare la temperatura dell'oggetto nella regione analizzata.

I metodi ottici sono “non-contacting” nel senso che interagiscono solo i fononi e gli effetti che questi hanno sul dispositivo possono essere trascurati.

VANTAGGI: La risoluzione spaziale dei metodi ottici è determinata dalla grandezza del fascio ottico e dalla regione su cui questo interagisce. Uno tra i vantaggi di questo tipo di metodi è di poter avere una risoluzione spaziale molto ampia e di poter fare mappe della temperatura sulla superficie con una matrice di misure. Inoltre si possono misurare rapide variazioni di temperatura perché il tempo di risposta è determinato in prima analisi dal tempo di risposta dei fenomeni ottici nel cambiare temperatura ma in pratica da quello della strumentazione, quindi con una buona strumentazione è possibile ottenere misure precise.

SVANTAGGI: Bisogna però avere accesso ottico al dispositivo e questo non è sempre possibile a causa del packaging inoltre la strumentazione necessaria è costosa.

3.2.1 Luminescenza

Si dice luminescenza l'emissione di luce da parte di alcuni materiali in risposta a uno stimolo esterno che provoca la salita degli elettroni a livelli energetici superiori. Quando gli elettroni tornano ai loro stati di energia originali emettono il loro eccesso di energia sotto forma di radiazione luminosa.

Nei semiconduttori la luce può venire emessa in conseguenza ai processi di ricombinazione elettroni-lacune nella giunzione pn.

Per il semiconduttore composto GaAs, per esempio, l'energy gap dipende dalla temperatura e vale:

$$E_g = 1.519 - \frac{5.405 \cdot 10^{-4} \cdot T^2}{(T + 204)}$$

dove l'energia è data in eV.

La luminescenza può essere stimolata applicando un campo elettrico (elettroluminescenza) o illuminando con luce visibile o ultravioletta (fotoluminescenza).

Entrambe si usano per misurare la temperatura in dispositivi a semiconduttori composti.

La risoluzione spaziale del picco dell'elettroluminescenza è dell'ordine dell'area della giunzione pn che genera la radiazione, mentre la risoluzione del picco della fotoluminescenza è dell'ordine di grandezza della sollecitazione ottica incidente.

La luminescenza però è utilizzabile solo per semiconduttori composti a banda di energia in diretta come i GaAs.

3.2.2 Raman

Quando un fascio di luce incide su un cristallo una parte del fascio incidente viene diffusa elasticamente mentre una parte minore subisce diffusione anelastica, viene cioè diffusa con una frequenza discreta più alta o più bassa di quella originaria (effetto Raman).

Lo spettro dei fotoni diffusi è dipendente dalla temperatura del cristallo perché lo è lo spettro dei fononi. Le temperature dei Si Mosfet, GaAs e altri dispositivi a semiconduttore composto sono state misurate usando l'effetto Raman.

3.2.3 Riflettanza

La riflettanza indica il rapporto tra l'energia di un'onda luminosa riflessa da una superficie e l'energia totale che incide sulla stessa superficie e può essere dipendente dalla temperatura.

La relativa variazione nella riflettanza ottica con la temperatura è abbastanza piccola essendo dell'ordine tra il 10^{-5} e il 10^{-4} K^{-1} . La termoriflettanza è usata per misurare la temperatura delle interconnessioni e di pellicole sottili. E' utile per misurare transistori termici molto brevi, con una risoluzione di 10ns.

3.2.4 Effetto termo-ottico

I termo-ottici sono variazioni nell'indice ottico di rifrazione di un materiale con una certa temperatura. Come la termoriflettanza, la variazione è piccola, essendo dell'ordine di $10^{-5}/^{\circ}\text{C}$. Un metodo basato sulla misurazione del gradiente dell'indice ottico è stato usato per trovare il profilo di temperatura attraverso la profondità di un transistor di potenza gate-turn-off. Inoltre la temperatura nei modulatori a guida d'onda è stata trovata usando l'effetto termo-ottico.

3.2.5 Infrarosso

Ogni oggetto con temperatura superiore allo zero assoluto emette spontaneamente radiazione infrarossa. La termografia che usa questa proprietà è probabilmente la più diffusa e la strumentazione per questa tecnica si trova in commercio facilmente.

Lo spettro di emissione, W (Watt/m³), di un corpo nero come funzione di lunghezza d'onda, λ (μm), e temperatura, T (K) è dato dalla legge della radiazione di Plank:

$$W = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \cdot \left(\exp\left(\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right)}$$

dove h è la costante di Plank ($6.6 \cdot 10^{-34}$ J sec) e c è la velocità della luce ($3 \cdot 10^8$ m/s). Questa relazione è mostrata nella figura 2.3.

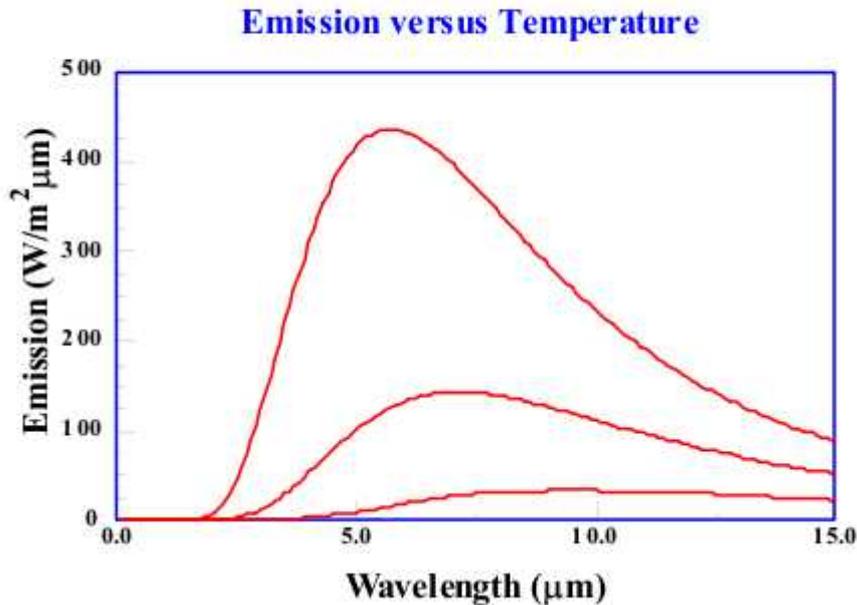


Fig.2.3: L'emissione infrarossa come funzione della lunghezza d'onda del corpo nero.

Al crescere della temperatura la radiazione totale emessa su tutte le lunghezze d'onda cresce e la lunghezza d'onda del picco dell'emissione decresce all'aumentare della temperatura. Integrando l'equazione sopra su tutte le lunghezze d'onda dà l'equazione di Stefan-Boltzmann per l'energia totale emessa per un corpo nero ideale:

$$W = \sigma \cdot T^4$$

dove $\sigma = 5.7 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$

i corpi neri hanno emissività ϵ uguale a 1. I corpi reali hanno un' emissività compresa tra 0 e 1 ($0 < \epsilon < 1$) e la precedente equazione può essere riscritta:

$$W = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

quindi misurando la radiazione totale emessa da un corpo, può essere determinata la temperatura. (Nei sistemi reali viene calcolata solo una porzione dello spettro di energia mostrato in figura, ma è valida un'equazione simile per il pezzetto di spettro.)

Misura della temperatura per dispositivi a semiconduttore

I valori di ϵ dei materiali di un chip possono variare da 0.1 (alluminio) a 0.6 (polisilicio) e così via. Senza tener conto di queste variazioni non sono possibili misure quantitative della temperatura.

La risoluzione spaziale è generalmente limitata alla lunghezza d'onda delle radiazioni rilevate e nei sistemi commerciali la migliore è circa da 3 μm a 5 μm .

3.3 Tecniche a contatto fisico

I metodi che si basano sul contatto fisico del dispositivo si caratterizzano in metodi a contatto singolo e metodi a contatto multiplo (o a rivestimento). Tutti si basano sul trasferimento di energia termica, o calore, dal dispositivo di interesse all'oggetto che è in contatto con il dispositivo cioè il termometro.

La risoluzione spaziale è determinata dalla grandezza del contatto o delle particelle di rivestimento che vengono usate, e la risposta temporale dipende sempre dalla risposta temporale delle particelle o della sonda.

VANTAGGI: Hanno una risoluzione spaziale molto buona (meno di 100nm in alcuni casi) e come per i metodi ottici si può fare una mappa. La mappa delle temperature richiede una matrice di misure per i metodi a contatto singolo, mentre è una caratteristica intrinseca per i metodi a rivestimento.

SVANTAGGI: La superficie misurata dev'essere disponibile per il contatto (perciò chips packaged non possono essere misurati) e la risposta termica dipende dalla risposta della sonda che può essere considerevolmente più lenta rispetto alla risposta del dispositivo.

3.3.1 Cristalli Liquidi

I cristalli liquidi sono composti organici che esistono come fase tra un solido e un liquido isotropo. Diffondono la luce incidente selettivamente con la lunghezza d'onda, la selezione è dipendente dalla temperatura. La lunghezza d'onda della luce riflessa è determinata dal passo dell'elica che dipende dalla temperatura e quindi cambia anch'essa con la temperatura. Così l'apparente colore della regione che viene osservata cambia col cambiare della temperatura della regione. L'intervallo di

Misura della temperatura per dispositivi a semiconduttore

colore dei cristalli liquidi può essere adattato modificando la composizione chimica. I cristalli liquidi sono disponibili commercialmente nel range di temperature da -30°C a 120°C con bande di temperatura tra 0.5°C e 30°C .

3.3.2 Thermographic Phosphors

I fosfori termografici non sono stati utilizzati molto per misurare la temperatura di integrati microelettronici. In molti aspetti tuttavia essi sono simili alla tecnica dei cristalli liquidi ed hanno una risoluzione simile.

Il fosforo viene eccitato tramite esposizione a luce ultravioletta, la fluorescenza così prodotta presenta uno spettro le cui linee di emissione dipendono dalla temperatura.

3.3.3 Scanning Thermal Probes

Gli "Scanning Thermal Probes" sono microscopi a forza atomica in cui la punta della sonda viene modificata con un elemento sensibile alla temperatura come una termocoppia o un termistore. Il microscopio a forza atomica consiste di una microleva alla cui estremità è montata una punta acuminata, che presenta un raggio di curvatura dell'ordine dei nanometri. La punta viene collocata nelle strette vicinanze della superficie del campione di cui si vuole effettuare la scansione.

L'interazione molecolare che agisce tra la punta ed il campione provoca una deflessione della microleva.

Questo metodo potenzialmente offre la più alta risoluzione spaziale di qualsiasi altro metodo a causa della piccola dimensione della punta della sonda.

4 Descrizione e analisi di alcuni metodi

4.1 Termografia a infrarosso

L'origine della termografia ad infrarossi si può attribuire all'astronomo britannico di origine tedesca Sir Frederick William Herschel che nel 1800 eseguì degli esperimenti con la luce solare.

Herschel scoprì la radiazione infrarossa facendo passare la luce visibile attraverso un prisma e misurando la temperatura di ciascun colore dello spettro con un termometro a mercurio. Scoprì che le temperature dei colori crescevano passando dal viola al rosso, così decise di misurare la temperatura oltre la porzione rossa dello spettro in una regione dove non era visibile alcuna radiazione solare. In questa regione, attualmente nota come regione della radiazione infrarossa, c'era la massima temperatura.

La radiazione infrarossa, che ha lunghezze d'onda maggiori del visibile (da $0.7\mu\text{m}$ a circa 1mm) viene normalmente emessa da atomi o molecole quando essi cambiano il loro moto rotazionale o vibrazionale. In particolare è un importante mezzo di trasmissione del calore e viene a volte detta *calore radiante*. Il riscaldamento che si prova quando si pone una mano vicino ad una lampadina accesa è soprattutto il risultato della radiazione infrarossa emessa dalla lampadina ed assorbita dalla mano. Inoltre il picco dell'intensità della radiazione elettromagnetica emessa dagli oggetti, nell'intervallo di temperature a cui si possono trovare abitualmente tra circa 3K a 300K , si trova nella regione dell'infrarosso.

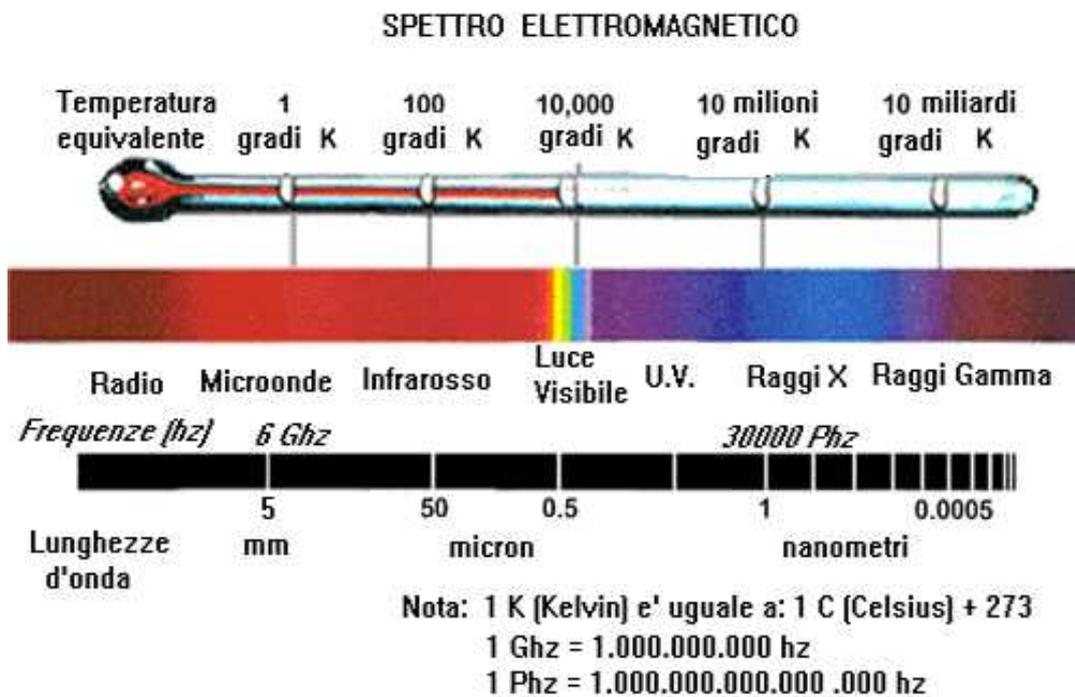


Fig.3.1

La termografia che utilizza questo tipo di radiazioni per analizzare le informazioni sulla temperatura dei dispositivi è la termografia a infrarosso.

La misura dell'irraggiamento viene solitamente effettuata da strumenti detti "termocamere" che utilizzano un sensore capace di percepire la radiazione infrarossa e riproducono in un'immagine le differenze termiche tra i punti della superficie di un oggetto. L'energia emessa dalla superficie di un oggetto è catturata dal sensore all'infrarosso della termocamera e convertita in segnale elettrico: si ottengono delle mappe di temperatura delle superfici esposte. L'immagine prodotta da una termocamera (detta termogramma) è costruita su una matrice di un certo numero di pixel per un certo numero di righe. L'elettronica dello strumento legge velocemente il valore di energia immagazzinata da ogni singolo pixel e genera un'immagine dell'oggetto osservato in bianco e nero o in falsi colori, associando ad ogni temperatura rilevata un colore scelto da una scala corrispondente alle varie temperature.

Descrizione e analisi di alcuni metodi

In una termocamera la radiazione infrarossa (A) emessa da un oggetto viene fatta convergere dai componenti ottici (B) verso un rilevatore a infrarossi (C). Il rilevatore invia le informazioni al sensore elettronico (D) per l'elaborazione dell'immagine (E) visibile sullo schermo di un monitor. Il sistema ottico osserva la scena inquadrata con un angolo di vista definito in fase di costruzione dello strumento stesso.



Fig.3.2 Termocamera

I primi sistemi termografici ad uso civile sviluppati intorno agli anni '60 venivano utilizzati per applicazioni industriali quali controllo di grandi impianti di distribuzione elettrica ed erano ingombranti, lenti nell'acquisizione dei dati e con una risoluzione ridotta. Gli ulteriori sviluppi avvenuti nel corso degli anni 70 per le applicazioni militari produssero i primi sistemi portatili, da utilizzare per applicazioni quali la diagnostica degli edifici e i test non distruttivi sui materiali. Oggi le termocamere sono diventate uno strumento diagnostico essenziale per la ricerca guasti e la manutenzione preventiva in applicazioni industriali, di processo e commerciali.

4.1.1 Applicazioni

4.1.1.1 Termografia IR nell'industria

Nel campo industriale la termografia si pone come una, se non la principale, delle tecniche di diagnostica e si applica essenzialmente a due ambiti:

- La manutenzione su condizione;
- La prevenzione dei rischi di incendio e di fermata di produzione;

La manutenzione su condizione è un particolare tipo di manutenzione preventiva, che si esegue sulla base dello stato di salute attuale di un componente individuando un valore di soglia oltre il quale (o al di sotto del quale) il componente ha una elevata probabilità di guastarsi. Si applica agli impianti in modo globale, sia sulle parti elettriche che meccaniche. Mentre la prevenzione del rischio di incendi dovuti a corto circuito o di mancata produzione richiede l'effettuazione di interventi di prevenzione che vanno ad interessare gli impianti più critici.

4.1.1.2 Termografia IR applicata ai sistemi fotovoltaici

La termografia a infrarosso è un'importante tecnica di diagnostica per la valutazione delle prestazioni dei pannelli fotovoltaici. Si possono rilevare facilmente e velocemente i malfunzionamenti dell'impianto, i difetti di isolamento e sui materiali. Il test sui pannelli fotovoltaici con termografia a infrarosso sta diventando sempre di più un criterio di diagnostica significativo in quanto è relativamente veloce, semplice ed economico. I moduli fotovoltaici sono componenti di sistema che convertono la radiazione solare direttamente in energia elettrica e producono potenza in proporzione all'intensità di luce che raggiunge la superficie del pannello solare. Un modulo fotovoltaico è composto da celle fotovoltaiche in parallelo e in serie, esso viene connesso in un circuito elettrico con altri moduli per formare un pannello solare. Il modello equivalente di un modulo è mostrato in figura 3.3.

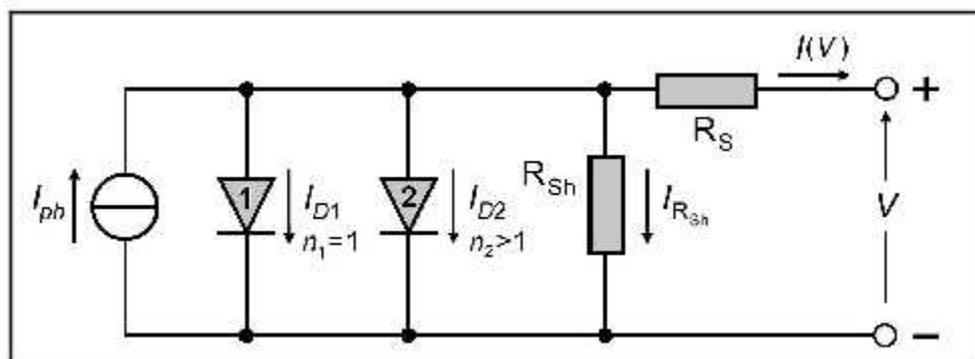


Fig.3.3 Modello equivalente di un modulo fotovoltaico

Descrizione e analisi di alcuni metodi

L'equazione della corrente riferita al modello è la seguente:

$$I(V) = I_{ph} - I_{D1} - I_{D2} - I_{R_{sh}}$$

$$I(V) = I_{ph} - I_{01} \left[\exp \left(\frac{q(V + IR_S)}{n_1 k_b T} \right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp \left(\frac{q(V + IR_S)}{n_2 k_b T} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_S}{R_{sh}}$$

Dove I_{01} e I_{02} sono le correnti di saturazione dei diodi, n_1 e n_2 sono fattori di idealità, q è la carica dell'elettrone, k_b è la costante di Boltzmann, T è la temperatura, R_s e R_{sh} sono rispettivamente la resistenza di serie e di shunt (o derivatore di corrente).

Il secondo e il terzo termine dell'equazione descrivono l'influenza dei due diodi. Sotto condizioni operative normali, l'efficienza di una cella fotovoltaica è ridotta dalla dissipazione della potenza attraverso le resistenze interne. Le resistenze parassite sono modellate con la resistenza shunt in parallelo R_{sh} e la resistenza serie R_s .

I moduli fotovoltaici possono degradare le prestazioni a causa di diversi fattori come:

- Degradazione dei materiali di packaging
- Perdita di adesione delle resine usate per l'incapsulamento
- Degradazione della connessione cella/modulo
- Degradazione causata da infiltrazioni di umidità
- Degradazione dei dispositivi a semiconduttore

Al fine di massimizzare la produzione nel tempo di vita di un sistema fotovoltaico è necessario riconoscere quando c'è un guasto e trovare la causa della perdita di potenza il prima possibile, col minor spreco di tempo e manodopera. Prima che i moduli siano installati all'aperto la termografia IR può determinare la presenza di difetti nella rilevazione di variazioni termiche sia sotto polarizzazione diretta che inversa. Questa tecnica di test è particolarmente efficace nella fase di prova del sistema perché può permettere all'installatore di rimuovere e cambiare i pannelli difettati, ma è utile anche per monitorare periodicamente il sistema per prevenire costose perdite di produzione.

La Fig.3.4 mostra l'immagine a infrarossi di un modulo fotovoltaico in corto circuito in condizioni di bel tempo all'aperto.

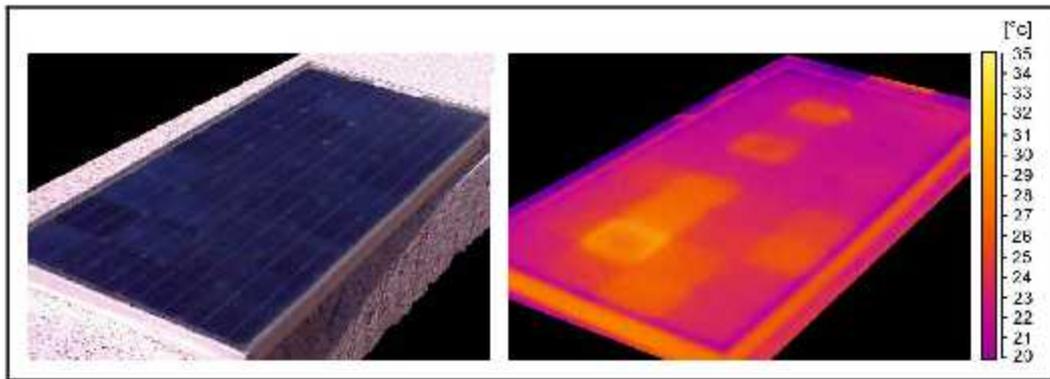


Fig. 3.4 Modulo fotovoltaico e la sua immagine IR

4.1.1.3 Termografia IR nell'edilizia

L'impiego della tecnica termografica trova un altro terreno ideale nelle applicazioni in edilizia per:

- La ricerca guasti;
- La verifica dello stato di conservazione degli immobili;
- La diagnosi energetica.

4.1.1.4 Termografia IR nel restauro

La Termografia applicata al restauro permette in modo rapido e non distruttivo di determinare vari tipi di difetto presente in edifici storici e opere d'arte per guidare i restauratori nelle opere di consolidamento e di recupero. Egualmente importante è l'utilizzo della tecnica termografica nella diagnosi dello stato di conservazione degli affreschi.

4.1.1.5 Termografia IR nel settore medico

La termografia consente di evidenziare e misurare le temperature della superficie del corpo umano, sfruttando l'energia calorica emessa dall'organismo attraverso la cute sotto forma di radiazioni elettromagnetiche infrarosse. Viene utilizzata per la diagnosi di alcuni tumori e di stati infiammatori a livello del sistema muscolare o lesioni ischemiche. Consente, inoltre, di valutare le alterazioni del flusso del sangue negli arti.

4.2 Raman

La diffusione anelastica della luce dalla materia fu predetta sul piano teorico dal fisico francese Lèon Brillouin nel 1922 e dal fisico teorico austriaco Adolf Smekal nel 1923. Fu però grazie al fisico indiano Chandrasekhara Venkata Raman che si poté osservare per la prima volta il fenomeno grazie ad un esperimento da lui compiuto nel 1928. L'esperimento consisteva in una sorgente (un fascio concentrato e filtrato di luce solare), un campione (un grande volume di liquido), e un rivelatore (l'occhio umano). Egli scoprì che una piccola frazione della radiazione diffusa da certe molecole aveva energia diversa da quella della radiazione incidente, e che la differenza di energia era legata alla struttura chimica delle molecole responsabili della diffusione: l'effetto Raman.

La vera nascita della spettroscopia Raman si deve però all'invenzione del laser che è in grado di dare una luce coerente, monocromatica e molto luminosa: la sorgente ideale per la spettroscopia Raman.

Recentemente l'applicazione delle trasformate di Fourier alla spettroscopia Raman ha contribuito all'eliminazione dell'interferenza dovuta alla fluorescenza.

A partire dal 1966 nel giro di pochi anni si definirono i principi base per la strumentazione microscopica e la spettroscopia Raman nell'ultimo decennio ha trovato sempre più spazio al di fuori dei laboratori di ricerca, divenendo un versatile strumento in molti rami della ricerca e della diagnostica dei materiali ma anche utile per l'indagine della temperatura dei dispositivi.

In questo tipo di spettroscopia si fa incidere su un campione una radiazione elettromagnetica monocromatica iniziale di intensità e frequenza nota, tipicamente una luce laser nel campo visibile, infrarosso o ultravioletto, e viene misurata la radiazione diffusa tramite un rivelatore posto a 90° o 180° rispetto al cammino ottico lungo il campione.

La radiazione può essere diffusa in tre modi: Stokes, anti-Stokes e Rayleigh (scattering elastico). Possiamo immaginare che le molecole colpite dalla radiazione passino ad un livello energetico virtuale da cui decadono emettendo fotoni.

La radiazione Stokes, scoperta dal matematico e fisico irlandese George Stokes, possiede energia minore rispetto alla radiazione originaria incidente perché la molecola decade ad uno stato vibrazionale superiore rispetto al livello di partenza e una parte di energia è utilizzata per promuovere la transizione. Oppure la molecola si trovava prima ad uno stato vibrazionale eccitato e decade allo stato fondamentale emettendo un fotone ad energia maggiore di quella incidente

(radiazione anti-Stokes). La radiazione Rayleigh (che deve il nome al fisico britannico John William Strutt Rayleigh) invece possiede la stessa energia della radiazione incidente.

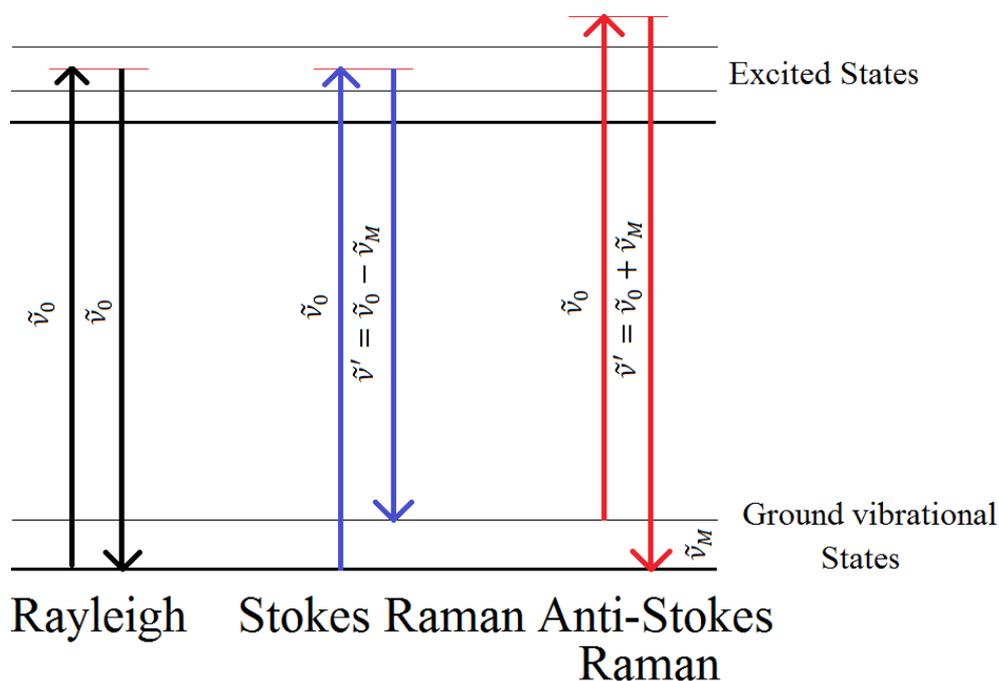


Fig.3.5 Radiazione Rayleigh, Stokes e Anti-Stokes

Dalle informazioni che lo spettro Raman di una molecola può dare possiamo dedurre la temperatura del campione in base al rapporto dell'intensità delle righe Stokes con quelle anti-Stokes.

Combinando un microscopio ottico con uno spettrometro Raman è possibile realizzare la microscopia vibrazionale Raman. Una radiazione laser viene fatta incidere su una piccola area di campione e la luce diffusa, trasmessa o riflessa viene raccolta dal microscopio e quindi analizzata dallo spettrometro. Con questa tecnica si può arrivare a sondare aree fino a una dimensione al di sotto di $1 \mu\text{m}$ permettendo la realizzazione degli spettrometri micro-Raman.

4.2.1 Applicazioni

4.2.1.1 Termografia Raman applicata ai semiconduttori

La spettroscopia Raman è una tecnica versatile per la caratterizzazione di dispositivi a semiconduttore per la valutazione della qualità del materiale, dei livelli di impurità e della temperatura. Viene applicata per misurare la tensione in dispositivi microelettronici al silicio e è un

aiuto importante nello sviluppo di nuove celle fotovoltaiche.

4.2.1.2 Termografia Raman per la nanotecnologia

La nanotecnologia pone sfide particolari con l'utilizzo dei recenti materiali e delle piccole scale di distanza coinvolte. Attraverso l'accoppiamento della tecnica Raman con microscopi si possono analizzare queste strutture dell'ordine del nanometro.

4.2.1.3 Termografia Raman nell'industria farmaceutica

La spettroscopia Raman svolge un ruolo di analisi critica in molte fasi della progettazione di un prodotto farmaceutico e del processo produttivo.

4.2.1.4 Termografia Raman nell'analisi forense

Nel campo delle scienze forensi, la spettroscopia Raman è prevalentemente utilizzata per l'identificazione univoca di sostanze sconosciute. Dato che è una tecnica non distruttiva, ha il vantaggio di identificare tracce di sostanze senza compromettere in alcun modo le prove.

4.2.1.5 Termografia Raman in geologia

Se la sorgente è infrarossa, la spettroscopia Raman può essere usata per rivelare la presenza di sostanze (per esempio acqua) nelle rocce. Quando vengono irraggiate da una sorgente IR, infatti, le molecole di acqua possono acquistare parte dell'energia della luce diffusa per vibrare e la spettroscopia Raman permette di "osservare" queste vibrazioni.

4.3 Analisi dei vantaggi di entrambe le tecniche per dispositivi

AlGaN/GaN

L'affidabilità dei dispositivi è una delle maggiori sfide per la microelettronica, in particolare per dispositivi con nuovi materiali per esempio il Nitruro di Gallio. I transistor a effetto di campo basati su AlGaN/GaN (sviluppati per rispondere alla domanda crescente di prestazioni di potenza alle microonde) sono tuttora privi dell'affidabilità che serve per le applicazioni della vita reale.

L'affidabilità è fortemente affetta da effetti di autoriscaldamento: la temperatura di un dispositivo

cresce a causa della generazione di calore ohmico . Mappare la temperatura dell'area attiva di un dispositivo è quindi non solo la chiave per l'ottimizzazione delle prestazioni del dispositivo ma anche è un importante strumento per determinare la sua affidabilità. Tecniche di termografia tradizionali come quella infrarossa tuttavia sono prive della risoluzione spaziale dell' ordine del micron che serve per misurare accuratamente la temperatura di picco in molti dei dispositivi GaN di oggi. Il riscaldamento in HFET AlGa_N/Ga_N avviene prevalentemente in una regione di grandezza da 0.5 a 1 μm non accessibile usando la termografia IR. Per un'analisi termica dettagliata di AlGa_N/Ga_N HFET è necessario usufruire di entrambe le tecniche sfruttando l'alta risoluzione spaziale del micro-Raman e l'alta velocità dell'IR.

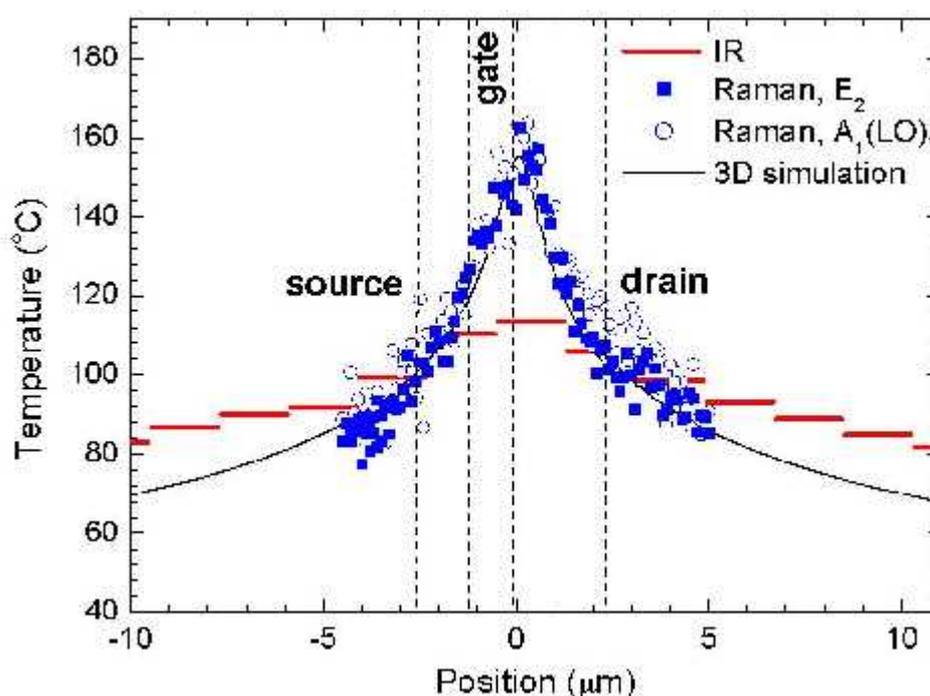


Fig.3.5 Scansione IR e Raman della zona attiva di un HFET AlGa_N/Ga_N

La Fig.3.5 illustra una scansione IR e Raman attraverso la regione attiva mostrando un picco di temperatura . Sebbene entrambe le tecniche mostrino il picco, la temperatura misurata dalla termografia IR è significativamente più bassa rispetto a quella determinata dalla tecnica Raman ma la scansione di temperatura è più ampia usando la termografia IR. Quindi in effetti la termografia infrarossa sottostima il picco di temperatura e sovrastima l'ampiezza del profilo di temperatura. Ciò comporta una sottostima dei rischi potenziali di un guasto del dispositivo.

Sebbene l'uso della spettroscopia microRaman sia superiore in termini di risoluzione spaziale e

Descrizione e analisi di alcuni metodi

accuratezza del picco di temperatura rispetto alla termografia IR, questo approccio tuttavia è privo della velocità di registrazione inferiore al secondo possibile con la termografia a infrarosso. Le mappe termiche Raman sono costruite muovendo il fascio laser sulla superficie del dispositivo stando diversi secondi in ciascun punto di misura della temperatura. Inoltre è limitato all'analisi di aree del dispositivo relativamente piccole e sarebbe impraticabile generare mappe di temperatura come quella mostrata in Fig. 3.6.

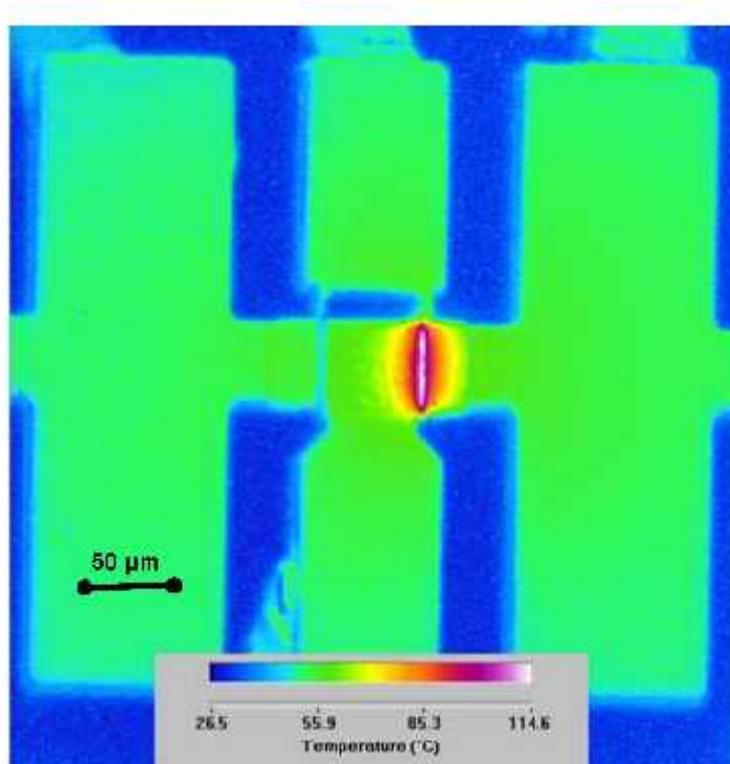


Fig.3.6 Mappa di temperatura IR di un HFET AlGaIn/GaN

In conclusione le due tecniche piuttosto che contrapposte sono complementari: la termografia a infrarosso può essere usata per ottenere panoramiche veloci e mappe della temperatura nel dispositivo, l'analisi micro-Raman è utile per ingrandire le aree di interesse per determinare picchi di temperatura accurati.

I seguenti punti precisano i vantaggi e gli svantaggi della tecnica Raman:

VANTAGGI:

- Possiede un'elevata risoluzione spaziale, che permette di effettuare misure su campioni di pochi micron
- Misura accurata

Descrizione e analisi di alcuni metodi

SVANTAGGI:

- Misure relativamente lente
- Non è pratica per generare mappe di temperatura

I seguenti punti precisano i vantaggi e gli svantaggi della tecnica IR:

VANTAGGI:

- Risultati veloci
- Può essere analizzata una grande area in tempi brevi
- Presentata in forma visuale e digitale

SVANTAGGI:

- Aree al di sotto di 1 μm non accessibili

Per entrambe le tecniche inoltre bisogna avere accesso ottico al dispositivo e il costo per la strumentazione è relativamente alto, però hanno il vantaggio di non essere “a contatto” e quindi sono non distruttive.

Bibliografia

- [1] Ronald T.Anderson, Stanislaw Kus, Henry C.Rickers, James W.Wilbur, Gerald D.Netzband, Dwight E.Davis, H.Bennet Drexler, Kurt E.Gozenbach, Neil V.Owen, Edwin W.Kimball, C.M.Bailey Jr, S.Sugihara, *Affidabilità dei sistemi e dei componeneti elettronici*, in Donald G.Fink, Donald Christiansen, *Manuale di elettronica*, Tecniche Nuove, 1987, pp. 28.1-28.72, ISBN 88-7081-119-0
- [2] David L.Blackburn, “Temperature Measurements of Semiconductor Devices- A Review”, 20th SEMI-THERM Symposium, IEEE, 2004
- [3] Richard A.Epperly, G.Erich Heberlein, Lowry G.Eads, “Thermography, A Tool for Reliability and Safety”, IEEE Industry Application Magazine, Jan/Feb 1999
- [4] G. Schirripa Spagnolo, P. Del Vecchio, G. Makary, D.Papalillo, A.Martocchia, “A Review of IR Thermography applied to PV System”, IEEE, 2012
- [5] Achmad Widodo, Djoeli Satrijo, Muhammad Huda, Gang-Min Lim, Bo-Suk Yang, “Application of Self Organizing Map for Intelligent Machine Fault Diagnostics Based on Infrared Thermography Images”, IEEE, 2011
- [6] F.Farrokhi, F.A. Mohammadi, “Temperature and Power Measurement of Modern Dual Core Processor by Infrared Thermography”, IEEE, 2010
- [7] Andrei Sarua, Alistair Bullen, Martin Haynes, Martin Kuball, “High-Resolution Raman Temperature Measurement in GaAs p-HEMT Multifinger Devices”, IEEE, 2007
- [8] A. Sarua, J. Pomeroy, M. Kuball, A. Falk, G. Albright, M. J. Uren, T. Martin, “Raman-IR micro-Thermography Tool for Reliability and Failure Analysis of Electronic Devices”, IEEE, 15th International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits, 2008. IPFA 2008

- [9] Martin Kuball, Andrei Sarua, Hangfeng Ji, Michael J. Uren, Richard S. Balmer, Trevor Martin, “Integrated Raman-IR Thermography on AlGaN/GaN Transistors”, IEEE, 2006
- [10] R. Resnik, D. Halliday, K. S. Krane, *Fisica 2*, 4° edizione, Ed. Ambrosiana, Milano, 1998, p.941
- [11] Martin Kuball, James W. Pomeroy, Richard Simms, Gernot J. Riedel, Hangfeng Ji, Andrei Sarua, Michael J. Uren, Trevor Martin, “Thermal Properties and Reliability of GaN Microelectronics: Sub-Micron Spatial and Nanosecond Time Resolution Thermography”, IEEE, 2007
- [12] Richard J. T. Simms, James W. Pomeroy, Michael J. Uren, Trevor Martin, Martin Kuball, “Channel Temperature Determination in High-Power AlGaN/GaN HFETs Using Electrical Methods and Raman Spectroscopy”, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 55, No. 2, february 2008
- [13] Wenjun Liu, Bozhi Yang, “Thermography techniques for integrated circuits and semiconductor devices”, Sensor Review, Vol. 27, No. 4, 2007, pp.298–309, <http://www.emeraldinsight.com>
- [14] M. Kuball, G. J. Riedel, J. W. Pomeroy, A. Sarua, M. J. Uren, T. Martin, K. P. Hilton, J. O. Maclean, D. J. Wallis, “Time-Resolved Temperature Measurement of AlGaN/GaN Electronic Devices Using Micro-Raman Spectroscopy”, IEEE, Vol. 28, No. 2, february 2007
- [15] George Turrel, Jacques Corset, *Raman microscopy: Developments and Applications*, Elsevier Academic Press, 1996, pp.1-8