

**POLITECNICO DI MILANO**

Scuola di Ingegneria Industriale e dell'Informazione

Corso di laurea magistrale in Ingegneria Fisica



**CARATTERIZZAZIONE DELLA TECNICA DI LOCK-IN  
THERMOGRAPHY NELLA FAILURE ANALYSIS DI  
DISPOSITIVI ELETTRONICI INTEGRATI**

Relatore: Prof. A. Spinelli

Correlatore: Ing. M. Terzi

Tesi di Laurea di:

Tobia Dambruoso

Matr. 814282

Anno Accademico 2014-2015



## Abstract (Italiano)

La tecnica della termografia in lock-in per la rilevazione microscopica delle sorgenti di calore nell'ambito della Failure Analysis di dispositivi integrati nasce grazie al continuo sviluppo e miglioramento dei sensori ccd operanti nello spettro dell'infrarosso, e sopperisce ai limiti di risoluzione spaziale della tecnica dei cristalli liquidi per quanto riguarda le tecnologie più avanzate. La Failure Analysis in fase di qualifica, dove si colloca questo lavoro di tesi, consiste nell'analizzare dispositivi che hanno mostrato un comportamento anomalo a seguito di stress applicati sugli stessi. La tecnica viene applicata ponendo un campione fallente nelle condizioni in cui il fallimento viene attivato, tramite l'applicazione di un'onda quadra di tensione; la sorgente di calore, che solitamente coincide col difetto, viene spazialmente individuata analizzando un segnale di ampiezza e uno di fase. Validata l'approssimazione di onda piana con un modello ad elementi finiti, il segnale di fase è stato correlato sperimentalmente per ottenere la profondità del difetto. In questo lavoro di tesi tale procedimento è stato eseguito per dispositivi in due diverse condizioni: a package integro da fronte, e a package aperto da retro. Nel primo caso le maggiori informazioni si ottengono valutando qualitativamente il segnale: tali informazioni sono al solito sufficienti a definire se la sorgente di calore si trova nel package o sul silicio. Nel caso di dispositivo a package aperto da retro, poiché si è esposto il silicio del die e poiché esso è trasparente nell'IR, è stato invece possibile determinare con una buona risoluzione il livello del dispositivo in cui è presente la sorgente di calore, cioè il difetto.

## **Abstract (English)**

The development of lock-in thermography for Failure Analysis of integrated circuits by means of heat source detection was fostered by the continuous improvement of ccd cameras in the IR range, and can obviate the increasingly limiting spatial resolution of liquid crystals technique due to continuous scaling of transistors size. In this work we focused on analyses on failing devices coming from stress tests applied during qualification process. This technique is applied by putting a failing device in its anomalous conditions by means of a voltage square wave; spatial localization of the heat source, typically corresponding to the defect, is obtained by analyzing two signals: amplitude and phase. Plane wave approximation is analyzed by means of a FE model with the aim to correlate the phase signal with the depth of the defect. This has been performed in two different conditions: with intact package from frontside, and with the package opened from backside. In the first case a qualitative approach can help us to discriminate if the heat source is located in the package or in the die, while a quantitative approach does not provide useful information. The opposite occurs with devices opened from backside. In this case the die is exposed on silicon side, which is transparent in IR range, and it is possible to identify with good resolution the level of the heat source, that usually corresponds to the defect.

# Indice

Abstract (Italiano) .....	i
Abstract (English) .....	ii
Indice.....	iii
Elenco delle figure .....	v
1 Introduzione .....	1
2 La Failure Analysis ed i dispositivi .....	5
2.1 Dispositivi .....	8
2.1.1 Silicio .....	12
2.2 Qualifica e test.....	15
2.3 Failure Analysis .....	16
2.3.1 Failure validation .....	17
2.3.2 Fault localization (o fault isolation) .....	19
2.3.3 Defect observation e characterization .....	25
2.3.4 Root cause determination .....	26
3 Trasmissione del calore .....	29
3.1 Conduzione .....	30
3.1.1 Equazione della conduzione.....	32
3.1.2 Sorgente puntiforme.....	34
3.2 Irraggiamento .....	37
3.3 Effetto Joule .....	40
4 Lock-in Thermography .....	43
4.1 Concetti del Lock-in.....	44

---

4.2	Segnale .....	50
4.2.1	Calibrazione .....	53
4.3	Influenza del calore non armonico .....	53
4.4	Analisi del rumore .....	55
4.5	Emissività .....	60
4.6	Signal-to-noise ratio .....	62
5	Modello .....	65
5.1	Software .....	66
5.2	Geometria e Mesh .....	66
5.3	Equazione e condizioni al contorno .....	70
5.4	Analisi del modello .....	71
5.5	Discussione delle simulazioni .....	75
6	Analisi sperimentale .....	79
6.1	Apparato sperimentale .....	79
6.1.1	Valori medi ed errori .....	82
6.1.2	Offset .....	83
6.1.3	0°-Phase .....	85
6.1.4	Strategie di misura .....	88
6.2	Discussione dei risultati .....	93
6.2.1	Analisi Frontside .....	97
6.2.2	Analisi Backside .....	100
7	Conclusioni .....	105
8	Reference .....	109
9	Appendice .....	113

## Elenco delle figure

Figura 2.1: Esempi di dispositivi presenti in un'automobile .....	6
Figura 2.2: Dispositivo a package chiuso (sinistra) e a package aperto in cui è visibile il die ed il bonding (destra).....	9
Figura 2.3: Dettaglio SEM del bonding .....	10
Figura 2.4: Visivo di cross section di dispositivo (sinistra) e SEM di un dettaglio (destra).....	11
Figura 2.5: Coefficiente di assorbimento per diversi meccanismi nell'IR per il Si .....	13
Figura 2.6: Trasmittanza per un wafer spesso 250um di Si con diversi drogaggi .....	14
Figura 2.7: Misura al Curve Tracer: in verde chiaro pezzo fail, in verde oliva pezzo reference.....	18
Figura 2.8: Immagine X-Ray (sinistra) e SAM (destra) .....	20
Figura 2.9: Immagini OBIRCh (sinistra) e EMMI (destra) di un dispositivo fail	22
Figura 2.10: Sample preparation: device prima dell'apertura (sinistra) e dopo apertura backside (destra) .....	24
Figura 2.11: FIB+SEM (sinistra) e SEM (destra) di due dispositivi.....	25
Figura 3.1: Conservazione dell'energia .....	29
Figura 3.2: Ampiezza della funzione g .....	36
Figura 3.3: Convoluzione (sinistra) ed effetto dell'incremento della frequenza nella diffusione laterale del calore (destra) [29].....	37
Figura 3.4: Radiazione di corpo nero per tre temperature nell'intorno della temperatura ambiente .....	38
Figura 3.5: Circuito con diverse sezioni e quindi diverse densità di corrente ....	41
Figura 4.1: Schematico di una procedura analogica di lock-in [3] .....	45

---

Figura 4.2: Correlazione del segnale lock-in [3].....	50
Figura 4.3: Schema temporale nel caso full frame e freq del lock-in pari a 25Hz .....	52
Figura 4.4: Ampiezza del rumore [mK] in funzione del tempo di misura .....	59
Figura 4.5: Ampiezza del rumore in funzione della frequenza. In blu dati sperimentali, in rosso il fitting [17].....	60
Figura 4.6: Dettaglio di immagine di topografia di dispositivo aperto da frontside .....	61
Figura 4.7: Andamento teorico del SNR in funzione della frequenza .....	63
Figura 5.1: Geometria del modello con COMSOL Multiphysics .....	67
Figura 5.2: Geometria con mesh visualizzata .....	69
Figura 5.3: Estratto di un file .dat generato da COMSOL Multiphysics .....	69
Figura 5.4: Simulazione del pre-heating .....	70
Figura 5.5: Variazione della temperatura sulla sonda normalizzata in un periodo .....	72
Figura 5.8: Variazione della temperatura per piccoli valori della profondità della sorgente .....	74
Figura 5.9: Sfasamento per piccoli valori della profondità del difetto .....	75
Figura 5.10: Profondità del difetto in funzione dello sfasamento a differenti frequenze .....	77
Figura 6.1: DCG ELITE Lock-in Thermography .....	80
Figura 6.2: DCG ELITE Software, segnali: a) ampiezza, b) fase, c) topografia	82
Figura 6.3: Fase per lo stesso difetto con condizioni diversa di frequenza del lock- in e camera size .....	84
Figura 6.4: Die con micropunte sui pad, lente 5x .....	86
Figura 6.5: Misura di fase (sinistra) e grafico della fase (destra) lungo la linea tratteggiata. In rosso evidenziata la 0°-phase. ....	86
Figura 6.6: Fase lungo linea coincidente con la micropunta.....	87
Figura 6.7: 0°-phase per diverse frequenze e camera sizes per la lente 5x .....	88
Figura 6.8: Aumento della risoluzione spaziale con la frequenza [3].....	90
Figura 6.9: Immagine di fase senza (sinistra) e con filtro “Median 3x3” (destra) .....	91



---

Figura 6.10: Immagine thermal lock-in a package chiuso (sinistra) e sovrapposizione con immagine Xray (destra).....	92
Figura 6.11: Lock-in thermography a package chiuso sovrapposta alla topografia, lente 1x.....	94
<i>Figura 6.12: Lock-in thermography backside dopo l'apertura sovrapposta alla topografia, lente 5x (sinistra) e 10x (destra) .....</i>	<i>95</i>
Figura 6.13: Immagini EMMI (sinistra) e OBIRCh (destra) del pezzo in analisi .....	96
Figura 6.14: Immagine al microscopio ottico a livello della Metal4 (sinistra) e SEM sulla Metal3.....	96
Figura 6.15: Schema di analisi frontside.....	98
Figura 6.16: Schema di analisi backside .....	100
Figura 6.17: Cross section di un die. La linea gialla rappresenta il fuoco .....	102



# 1 Introduzione

Questo lavoro di tesi è stato svolto nell'ambito di uno stage di 12 mesi presso STMicroelectronics nella sede di Agrate Brianza. Lo scopo della tesi è quello di ottenere maggiori informazioni da una tecnica, la termografia in lock-in, che in tale azienda viene utilizzata nell'ambito della Failure Analysis, cioè nell'analisi di dispositivi, nel caso specifico in fase di qualifica, che presentano dei difetti. Tali difetti, chiamati inizialmente latenti poiché presenti in fase di produzione ma non visibili elettricamente e funzionalmente, sono attivati a seguito di condizioni severe imposte che simulano la vita dei dispositivi. Tali dispositivi analizzati sono microcontrollori digitali per applicazioni automotive, il cui mercato richiede un grado di affidabilità molto elevato, e per questo vengono eseguite numerose analisi il cui scopo è l'adeguamento degli stessi dispositivi a rigidi requisiti di qualità. Proprio la Failure Analysis si inserisce nel contesto della qualità, poiché permette di analizzare, successivamente alla fase di stress dei dispositivi, il perché alcuni di essi vengano scartati. Ciò quindi serve sia per un miglioramento della resa ma anche per l'individuazione e descrizione di eventuali problemi di design, di processo o di testing.

Spesso le debolezze che possono essere presenti nei dispositivi non sono individuabili tramite i test eseguiti durante la produzione, e per questo motivo in questi casi si parla di difetti latenti. Se questi difetti vengono attivati si ha generalmente un comportamento del dispositivo diverso da quello "normale" o di riferimento. La tecnica oggetto di studio in questa tesi permette di avere

informazioni sulla posizione del difetto che è necessario trovare ed analizzare per comprendere le cause e quindi istituire delle azioni di contenimento e correttive per non avere eventuali ricorrenze in ulteriori dispositivi. La tecnica oggetto del lavoro di tesi si applica nei casi in cui il difetto, attivato quando il dispositivo è posto in condizioni di malfunzionamento, genera una sorgente di calore, che può coincidere con il difetto stesso oppure esserne una conseguenza. Questo spesso è vero soprattutto nei casi in cui si abbiano percorsi di corrente anomali, ad esempio dovuti a bruciature o elettromigrazioni.

La termografia in lock-in consiste nell'eccitare il difetto tramite un'onda quadra di tensione, ed il segnale che lo strumento fornisce come output è la variazione di temperatura della superficie calcolata partendo dall'emissione di fotoni che è proporzionale alla temperatura. Il segnale di fase è stato analizzato per riuscire a correlarlo con la profondità della sorgente di calore, cioè del difetto.

Questo permette di ottenere maggiori informazioni necessarie al flusso della Failure Analysis, permettendo una migliore scelta degli step successivi a tale tecnica nella localizzazione e nell'ispezione del difetto. Inoltre si avrà maggiore reattività in termini di “*cycle time*”, ossia tempo necessario per completare l'analisi, e quindi ciò comporta minori costi e maggiore efficienza. Tali fattori sono molto importanti soprattutto nel caso di scarti cliente, cioè quei dispositivi con comportamento anomalo che sono già stati venduti ai clienti e sono risultati fail in una fase successiva.

Per quanto riguarda il mercato Automotive, in cui i dispositivi sono venduti agli OEM (Original Equipment Manufacturer) che a loro volta forniscono le applicazioni ai Car Makers, i resi cliente si suddividono nelle seguenti categorie:

- *Manufacturing fail*: dispositivi falliti durante i test eseguiti dall'OEM, prima di essere distribuiti ai Car Maker e montati sulle automobili

- *0-km fail*: dispositivi falliti durante la prima accensione dell'automobile: questa categoria di fallimenti è la più grave, in quanto i dispositivi che ne fanno parte sono falliti prima di essere sottoposti agli stress tipici del proprio ciclo vitale, ma non sono stati identificati da nessuno dei test eseguiti durante le fasi precedenti
- *In-field fail*: dispositivi falliti durante il proprio ciclo vitale (quando il cliente finale ha già percorso alcuni chilometri con l'automobile su cui sono montati)

All'interno del flusso di Problem Solving (di cui la Failure Analysis fa parte) è presente anche una fase di definizione di azioni volte a correggere le cause dei difetti e ciò permette un continuo miglioramento della qualità, necessario per mantenere e guadagnare quote di mercato.

La termografia in lock-in permette quindi, dopo una prima caratterizzazione del dispositivo, di conoscere in due momenti diversi dove approssimativamente si trova il difetto. La prima fase delle analisi è stata svolta a dispositivo integro, quindi la tecnica viene considerata non distruttiva e ciò permette di determinare se il difetto è localizzato sul package o se esso si trova a livello del die. La seconda analisi può avvenire solo se il dispositivo viene preparato tramite alcune tecniche distruttive e ciò permette di distinguere, con una affidabilità che verrà discussa, a livello microscopico dove si trova il difetto.

Inizialmente verrà analizzato il contesto della Failure Analysis e si tratterà dei dispositivi in analisi e di come essi siano prodotti per poter identificare le zone in cui i difetti possano trovarsi. Successivamente sarà presentato il modello teorico della diffusione del calore, processo chiave della termografia, e saranno esposte delle simulazioni ottenute tramite software ad elementi finiti. Inoltre sarà presentata la tecnica sperimentale che sfrutta il lock-in per abbattere il rumore presente a frequenza diversa rispetto a quella di eccitazione del difetto. Infine

verranno esposti i risultati sperimentali ottenuti tramite lo strumento DCG ELITE, presente nei laboratori di Failure Analysis di Stmicroelectronics, presentando inoltre un caso pratico di analisi reale.

## 2 La Failure Analysis ed i dispositivi

La Failure Analysis (FA) è un processo di raccolta ed analisi di dati di dispositivi che presentano un guasto. Lo scopo è quello di ricostruire la storia e il meccanismo del fallimento per individuare la causa principale o root cause, al fine di impedire la ricorrenza dello stesso problema in futuro. Tale disciplina risulta essere fondamentale nell'ambito della qualità, in quanto consente l'individuazione di eventuali debolezze del dispositivo o problemi di processo che possono compromettere il funzionamento degli stessi dispositivi, fatto assolutamente non voluto. La Failure Analysis è parte di un processo di problem solving, per il quale si utilizza la metodologia 8D (8 Disciplines), ideata e sviluppata da Ford e molto utilizzata attualmente in qualsiasi ambito ingegneristico. Questa metodologia serve per avere un approccio sistematico e rigoroso ad un problema riscontrato, ed essa deve portare alla risoluzione del problema stesso. Le fasi del sistema 8D sono le seguenti:

D0: pianificazione

D1: individuazione del team

D2: descrizione del problema

D3: attuazione delle azioni di contenimento

D4: individuazione e verifica delle cause primarie (root causes)

D5: individuazione delle azioni correttive permanenti

D6: attuazione e verifiche delle azioni correttive permanenti

D7: Prevenzione della ricorrenza del problema

D8: Congratulazioni al team e lesson learned

Più precisamente, la Failure Analysis è una parte della disciplina D2, in quanto serve per descrivere il problema. Si noti che questa disciplina è di importanza fondamentale per l'intero processo, in quanto solo descrivendo correttamente il problema è possibile risolverlo definitivamente.

Tramite questi step, è possibile rispondere in modo quasi immediato alle problematiche incontrate tramite azioni temporanee di contenimento del problema. Successivamente le azioni di contenimento vengono sostituite con azioni correttive che sono permanenti e quindi più stabili, in quanto agiscono sulla causa invece che sugli effetti.

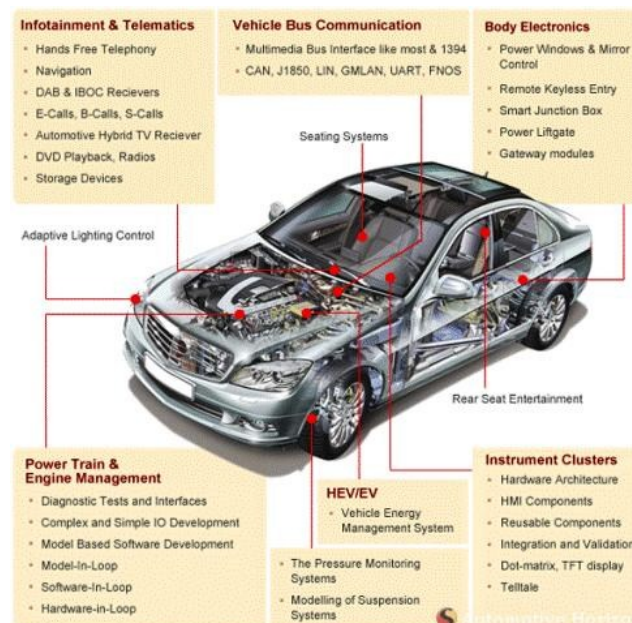


Figura 2.1: Esempi di dispositivi presenti in un'automobile



I dispositivi analizzati in questo lavoro di tesi sono microcontrollori digitali utilizzati in ambito automotive, in fase di qualifica, cioè non ancora venduti ai clienti e quindi in fase di individuazione di eventuali criticità. Si tratta di dispositivi ormai presenti in tutte le automobili poiché comandano autoradio, airbag, ABS, finestrini e specchietti, gps, iniezione... (Figura 2.1).

Molti di questi dispositivi sono flash embedded, presentano quindi una memoria di massa non volatile direttamente implementata sullo stesso chip del microcontrollore. Ciò permette prestazioni di accesso alla memoria migliori rispetto ad una memoria implementata su un chip diverso, tuttavia presenta maggiore difficoltà a livello di produzione, poiché le strutture di tale memoria vengono cresciute tramite gli stessi processi produttivi della logica del chip. I microcontrollori in analisi sono costruiti in tecnologia CMOS a 90 nm o 55 nm, dove tale grandezza rappresenta la tipica grandezza di un transistor (più precisamente, la larghezza minima di gate). La tecnologia attualmente in produzione per questo tipo di applicazioni è qualche anno indietro rispetto a dispositivi quali smartphone, PC, wearable,.. poiché in ambito automotive un requisito fondamentale richiesto dal mercato è l'alto grado di affidabilità e qualità piuttosto che le performance o la grandezza dei dispositivi. Infatti essi controllano parti molto importanti dell'automobile, quali sistemi di sicurezza, come ABS o airbag, che in caso di malfunzionamento possono compromettere vite umane. Si preferisce perciò utilizzare tecnologie più datate ma maggiormente affidabili e testate. Per garantire l'affidabilità è quindi necessario investire in quei processi di controllo della qualità che monitorano la progettazione e produzione di questi prodotti. In questo contesto è quindi collocata la Failure Analysis, al fine di identificare le criticità di progetto e processo da correggere secondo la metodologia 8D.

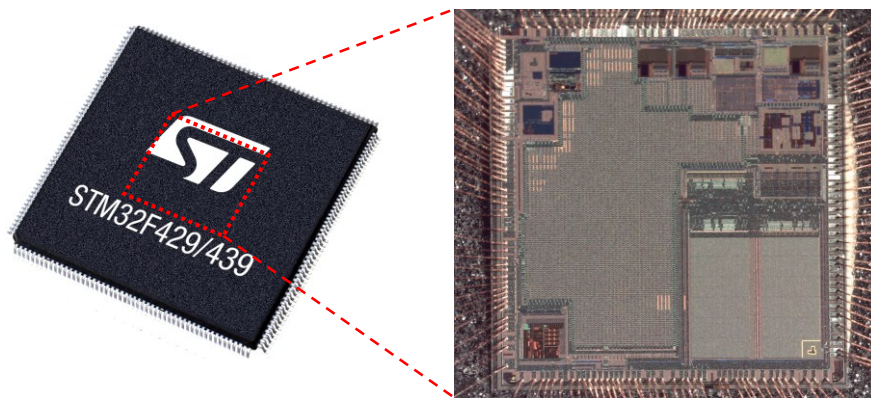
## 2.1 Dispositivi

I dispositivi analizzati sono composti da un die, che costituisce il cuore del device, e una frame, cioè una “cornice” di metallo, solitamente rame, sulla quale viene posto il die; tramite dei fili molto sottili vengono collegati i pad del die con i pin della frame. Una resina infine viene posta intorno al die e alla frame a protezione degli stessi.

Per la produzione dei die si parte da un cilindro di Silicio monocristallino opportunamente tagliato in “fette”, chiamate wafer. Su tali wafer vengono impiantati atomi droganti, cioè atomi appartenenti a un gruppo più alto (drogaggio n) o più basso (drogaggio p) rispetto al silicio. Questi atomi sostituiscono gli atomi di silicio nella struttura cristallina: legandosi con legame tetraivalente essi rilasciano un elettrone (droganti n) o una lacuna (droganti p) liberi, che aumentano la conducibilità locale.

Le zone altamente drogate del dispositivo vengono dette *aree attive* in quanto costituiscono il componente principale dei transistor. Successivamente tramite tecniche foto-litografiche vengono cresciute sul wafer varie strutture complesse: metal, vias, ossidi... Il numero totale di livelli di interconnessione dipende da dispositivo a dispositivo, ad esempio nei dispositivi analizzati le metal variano da un numero di 5 a 7 e sono composte di rame. Come livelli superiori, vengono cresciuti due layers. Il primo è un livello di interconnessione formato da alluminio, detto alucap, mentre il secondo è composto da strati di ossido e nitruro. Tale ultimo livello, detto passivazione, protegge il dispositivo da danni e contaminazioni esterne. Rimangono comunque scoperti i pad, sui quali verranno “bondati” i fili che permettono il collegamento con i pin della frame.

Le avanzate tecniche foto-litografiche che permettono risoluzioni sufficienti per la crescita di strutture di dimensioni fino alle decine di nanometri, si basano sull'uso di un photoresist, cioè un materiale che cambia la propria struttura e quindi le sue proprietà se illuminato da fotoni UV. Posto quindi tale materiale sul wafer, viene parzialmente coperto da una maschera ed illuminato perciò solo nelle aree scoperte. Tali aree del photoresist illuminate diventano solubili e vengono rimosse tramite un solvente. A questo punto è possibile crescere strutture o alternativamente “scavare” nel materiale tramite etching chimico o tramite plasma. In questo modo vengono cresciuti i diversi livelli che compongono il dispositivo, cioè le aree attive, i contatti, le vias, le metal, gli ossidi... Per convenzione vengono assegnati dei nomi ai diversi layer a partire dai livelli inferiori: si parla dunque di Metal1 per il primo livello di metal, Metal2 per il secondo e così via. I contatti tra la Metal1 e la Metal2 si chiamano Vias1, tra Metal2 e Metal3 si chiamano Vias2 ecc.



*Figura 2.2: Dispositivo a package chiuso (sinistra) e a package aperto in cui è visibile il die ed il bonding (destra)*

Per rendere la produzione il più efficiente possibile, sullo stesso wafer vengono prodotti in contemporanea più dispositivi. Prima di procedere alla fase di assemblaggio, i singoli die sul wafer vengono testati singolarmente, ed i dispositivi non funzionanti vengono segnati tramite inchiostro poiché il processo produttivo per loro finisce e sono considerati scarti. A questo punto il wafer viene

assottigliato tramite lappatura meccanica, cioè viene posto su una superficie abrasiva rotante, quindi esso viene appoggiato su un foglio adesivo, chiamato “sticky foil”, e tagliato tramite macchinari con lame rotanti sottili: in questo modo tutti i die risultano essere separati ma rimangono nella loro posizione originaria grazie al foglio adesivo. La fase successiva consiste nell’estrarre un die per volta e nell’attaccarlo tramite una specifica colla, che permette dissipazione termica, sulla frame i cui lati costituiscono i pin che permettono al cliente di saldare il dispositivo sulle proprie board. La fase di bonding, invece, consiste nel collegare i pad del die con i pin della frame tramite dei fili, solitamente in oro o rame, con diametro di circa  $15 - 20 \mu m$ . Tale fase viene eseguita da un macchinario che automaticamente scalda un’estremità del filo che viene “saldato” sull’alucap. In questo modo si forma una ball che permette al filo di essere ben attaccato al pad del die, come visibile in Figura 2.3. Da tale immagine è possibile notare la presenza della passivazione, che, non essendo conduttiva, risulta caricarsi elettronicamente quando viene utilizzato il SEM e quindi non risulta ben definita come invece lo sono i materiali conduttivi. Per ovviare a questo problema quando si ha un ossido e si deve utilizzare la tecnica SEM, è possibile ricoprire il materiale non conduttivo con un sottile strato di materiale conduttivo (ad esempio Au).

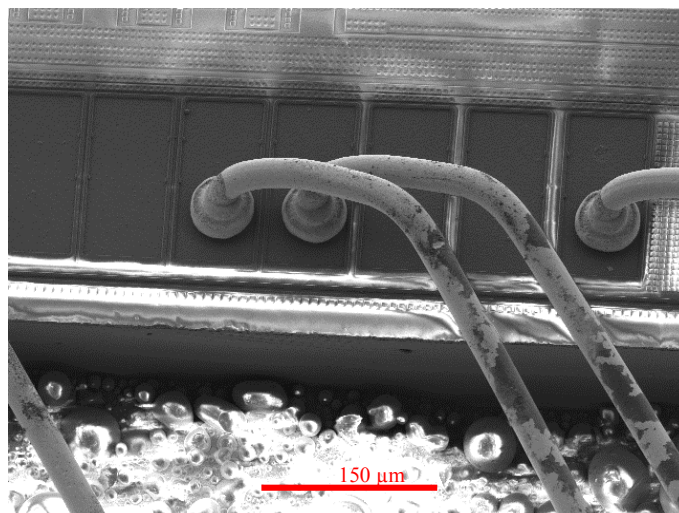


Figura 2.3: Dettaglio SEM del bonding

Successivamente la struttura ottenuta viene ricoperta con una resina, chiamata “molding compound”. Lo scopo è quello di proteggere il die e il bonding del dispositivo. Ovviamente per mantenere il comportamento elettrico corretto del die è necessario che la resina non sia conduttiva, altrimenti tutti i pad sarebbero in tal modo in corto circuito. Il risultato finale della produzione è visualizzabile in Figura 2.4, dove sono rappresentate le sezioni di un dispositivo completo e di un die.

Viene chiamato package il “contenitore” del die che viene formato come è stato descritto fino ad ora. I dispositivi analizzati sono tutti in package TQFP, cioè Thin Quad Flat Package con un numero di pin che varia da 64 a 176 a seconda del dispositivo e del cliente.

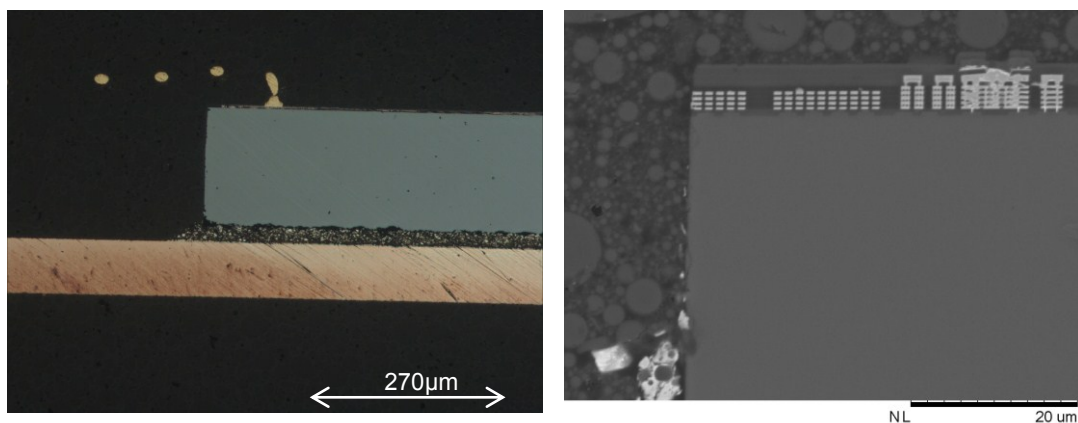


Figura 2.4: Visivo di cross section di dispositivo (sinistra) e SEM di un dettaglio (destra)

Per garantire la qualità del processo, durante la fase produttiva i dispositivi vengono testati più volte, prima a livello di die, in cui delle micropunte contattano i pad del die, e poi quando il dispositivo, ormai assemblato, termina il processo di produzione. I test permettono di simulare il funzionamento del dispositivo e vengono scartati quei dispositivi che hanno un comportamento diverso dal comportamento atteso. Ottimizzare i test affinché i tempi del testing si riducano è un challenge sempre più sentito dato che tale fase impiega un tempo considerevole nella produzione ed abbattere i tempi significa incrementare le produzione ed il profitto.

### 2.1.1 Silicio

Il silicio rappresenta oggi il materiale maggiormente utilizzato per i dispositivi integrati, grazie al basso prezzo rispetto agli altri semiconduttori competitor e alle sue caratteristiche e proprietà chimiche e fisiche. Per integrare i transistor sul wafer di silicio monocristallino risulta essere necessario drogare il semiconduttore con altri elementi. Si parla di drogaggio n nel caso in cui l'atomo drogante ha un elettrone in più rispetto al numero necessario per soddisfare i legami del reticolo cristallino, il quale può acquisire mobilità all'interno del semiconduttore. Si parla invece di drogaggio p nel caso in cui l'atomo drogante abbia un elettrone in meno e tale mancanza di elettrone, detta lacuna, si comporta come una particella positiva: acquista mobilità e perciò può muoversi all'interno del semiconduttore. Nel caso del silicio, atomi droganti n utilizzati solitamente sono il fosforo o l'arsenico, mentre per drogaggi p viene comunemente utilizzato il boro.

Il "grado" del drogaggio viene valutato in base alla densità di atomi droganti nel materiale. Un semiconduttore risulta poco drogato se la densità dell'atomo drogante è dell'ordine di  $10^{13} \text{ cm}^{-3}$ , mentre risulta molto drogato se la densità è dell'ordine di  $10^{19} - 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ . Questi valori sono da confrontarsi con la densità di atomi di silicio in una struttura monocristallina, che è dell'ordine di  $5 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ .

Il doping, oltre a modificare le caratteristiche elettriche del materiale, ne modifica anche le caratteristiche ottiche. Ciò è dovuto alla modifica che avviene a livello delle bande di valenza e conduzione e al restringimento del band-gap con l'aumento della densità degli atomi droganti. Come studiato da S.E. Aw et al. [4, 5], è possibile stimare il restringimento del band-gap e ottenere quindi lo spettro di assorbimento del silicio in funzione del drogaggio. Nella regione di energie dei fotoni di interesse, cioè nell'IR, i fenomeni di assorbimento principali sono due: assorbimento assistito da fononi e assorbimento da cariche libere. Nella Figura

2.5 è possibile distinguere i due contributi nel caso di un silicio drogato p con densità di atomi accettori  $N_A = 8 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Si può dunque osservare che il fenomeno di assorbimento prevalente a lunghezze d'onda maggiori di  $1.5 \mu\text{m}$  è quello dovuto alle sole cariche libere.

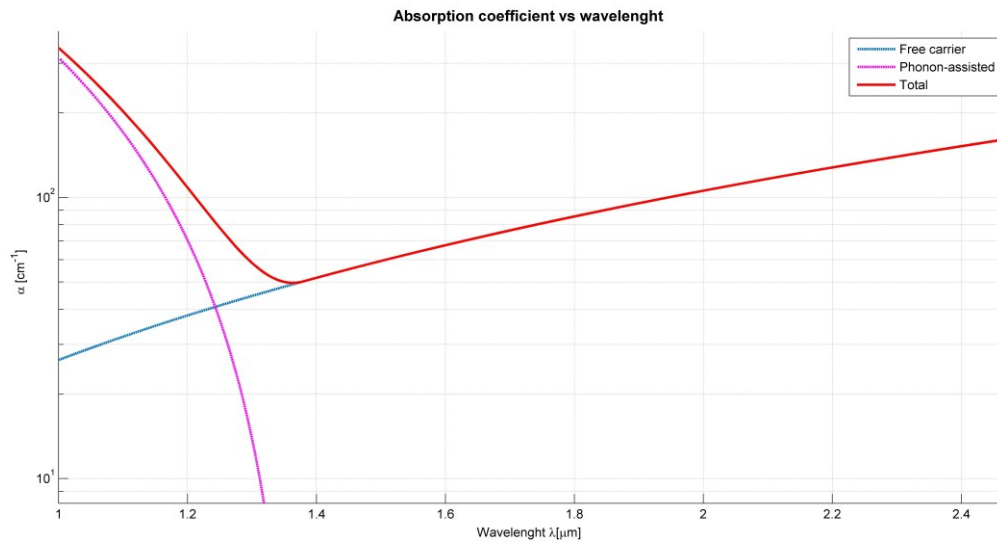


Figura 2.5: Coefficiente di assorbimento per diversi meccanismi nell'IR per il Si

Utilizzando la legge di Lambert-Beer per l'assorbimento ( 2.1 )

$$I_t = I_i e^{-\alpha x} \quad (2.1)$$

che esprime come varia nella direzione  $x$  l'intensità trasmessa rispetto all'intensità incidente, con  $\alpha$  coefficiente di assorbimento, è possibile trovare la porzione di radiazione trasmessa da un wafer di silicio drogato di fissato spessore. Ad esempio, Figura 2.6 rappresenta la trasmittanza  $T$  [4, 5], espressa come

$$T = \frac{I_t}{I_i} \quad (2.2)$$

per un wafer spesso  $250 \mu\text{m}$  al variare della densità di atomi droganti p. Nel caso di atomi droganti n la situazione è del tutto analoga.

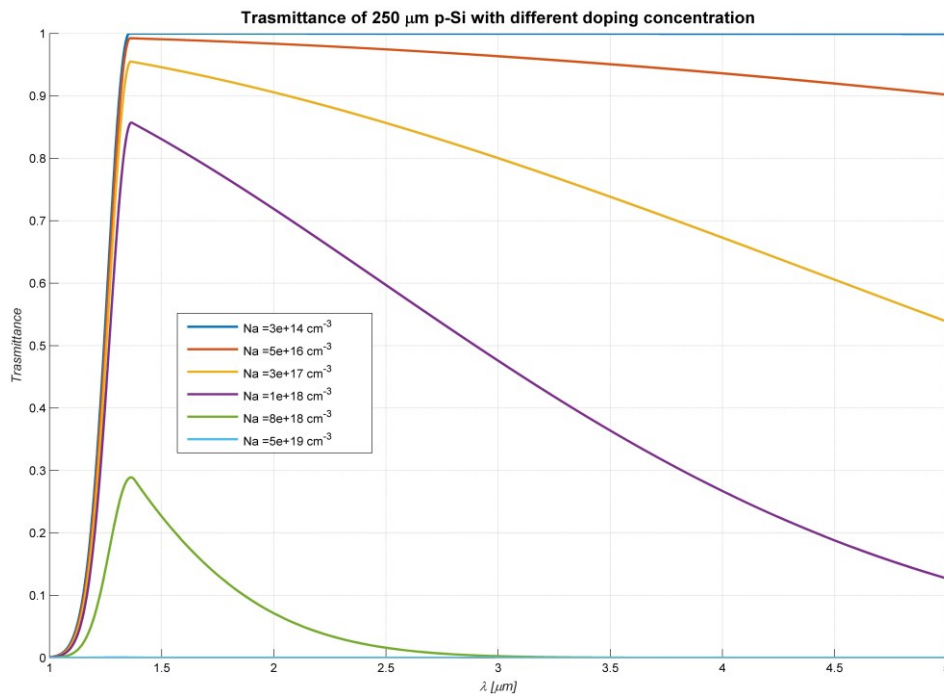


Figura 2.6: Trasmittanza per un wafer spesso 250μm di Si con diversi drogaggi

Come si può notare dalla Figura 2.6, il Silicio non drogato o eventualmente poco drogato, risulta essere trasparente nel range 3 – 5  $\mu m$  mentre se il doping risulta essere considerevole, esso risulta essere opaco nello stesso range. Ciò rappresenta un problema nel caso della termografia, il cui range di lunghezze d'onda di interesse è proprio 3 – 5  $\mu m$  e risulta necessario poter utilizzare la tecnica dal retro del die. Nei dispositivi di potenza, il wafer risulta essere molto drogato e il drogaggio risulta essere delocalizzato sul wafer di silicio. La situazione è completamente diversa, invece, per i dispositivi digitali. Infatti in tali device le aree drogate sono ben localizzate, quindi il wafer risulta essere Si monocristallino puro o al limite molto poco drogato. Quindi per quanto riguarda questi ultimi dispositivi, tramite analisi backside è possibile mettere a fuoco sulla Metall1, essendo il silicio trasparente nel range di lunghezze d'onda specificato in precedenza. Per quanto riguarda i dispositivi di potenza, non trattati in questo



lavoro di tesi, per potersi focalizzare sempre dal retro del dispositivo sulla Metall, è necessario ridurre lo spessore del silicio drogato o utilizzare altri tipi di ottiche.

Operando nel range di lunghezze d'onda descritto e con dispositivi con silicio poco drogato, l'approssimazione di dispositivo trasparente risulta quindi accettabile. Ciò tuttavia non vale più con altri tipi di dispositivi e sono dunque necessari altri tipi di considerazioni.

## **2.2 Qualifica e test**

La qualifica di dispositivi elettronici include una verifica dell'affidabilità, che consiste nella simulazione della vita dei prodotti per poter verificare se il loro comportamento rimane stabile col passare del tempo, cioè durante tutti gli anni di vita operativa degli stessi. Non essendo possibile attendere anni per la qualifica di un dispositivo, viene simulata la vita degli stessi in maniera accelerata. Ciò viene effettuato mediante uno stress dei prodotti in modo da simulare il loro ciclo di vita, per poter cioè valutare la loro affidabilità anche dopo un certo numero di anni, che nello stress accelerato diventano migliaia di ore. Le condizioni di stress includono alte temperature e specifiche condizioni di umidità e pressione alle quali i dispositivi vengono sottoposti mentre vengono forzati ad eseguire delle operazioni elementari o dei cicli di test. L'entità dello stress viene definita in base al "mission profile", ovvero ad una stima delle condizioni di vita operativa del prodotto, che per l'automotive possono essere particolarmente critiche (ad esempio per applicazioni montate direttamente sul motore, sottoposte quindi a temperature molto elevate).

I test vengono progettati già durante la fase di design, al fine di aver la massima copertura, cioè in modo che vengano verificati il maggior numero possibile di componenti circuitali del dispositivo. Un tipo di test che permette l'analisi di parti logiche del dispositivo è lo "scan test", generato tramite un processo chiamato

ATPG (Automatic Test Pattern Generation). In tale tipologia di test il dispositivo viene posto in specifiche condizioni iniziali (“test mode”) accessibili solo al produttore, in cui i flip-flop all’interno del circuito logico da testare sono collegati tra loro in modo da formare una catena, detta “scan-chain”, che permette di caricare i nodi interni con una serie di segnali digitali noti (detti “vettori”). Ad ogni colpo di clock, il bit digitale passa al flip-flop successivo ed in tal modo è possibile controllare se il segnale in uscita risulta essere uguale a quello atteso, cioè quello simulato tramite il design logico del dispositivo. Più la catena risulta lunga, maggiore sarà il tempo necessario per il testing ma maggiore sarà la parte di circuito coperta dal test. Per diminuire i tempi di testing vengono solitamente progettate più scan-chain parallele, ma in tal modo l’individuazione dell’eventuale flip-flop fallente risulta più complessa. Altri tipi di test sono quelli di “continuity”, che permettono l’individuazione di eventuali open o short sui pin esterni del dispositivo, tramite l’applicazione di una corrente e la misura della tensione risultante. L’ambito del testing risulta essere molto ampio e complesso, in quanto si deve giungere a un compromesso tra la copertura dei test ed i tempi necessari per eseguirli, componente da minimizzare per ridurre i costi di produzione.

### **2.3 Failure Analysis**

Se le condizioni dello stress sono adeguate, vengono attivati i cosiddetti “difetti latenti” (se presenti): si tratta anomalie presenti a tempo zero (cioè in fase di produzione), che dopo opportuna sollecitazione si possono attivare e comportano perciò una deviazione del comportamento del dispositivo incriminato rispetto alle specifiche, rispettate invece dalla popolazione di riferimento (in gergo, pezzi “good”). La Failure Analysis ha lo scopo, dunque, di identificare l’eventuale difetto latente ed il perché esso era presente (ad esempio, metal con alta resistività

causate da umidità nella camera di deposizione, collegamenti che non dovrebbero essere presenti dovuti a impurità sulle maschere, o alta difettosità intrinseca del silicio causata da un'erronea manutenzione dei macchinari,...). Immediatamente devono essere concordate delle azioni contenitive temporanee allo scopo di limitare il manifestarsi del problema, e successivamente delle azioni correttive che risolvano definitivamente il problema agendo sulle cause, come già citato nella metodologia 8D.

La Failure Analysis può essere scomposta in quattro differenti fasi:

- failure validation
- fault localization (o fault isolation)
- defect observation e characterization
- root cause determination.

### **2.3.1 Failure validation**

La prima fase consiste nella verifica elettrica del fallimento, o failure validation: viene analizzato il log del tester sul quale il dispositivo fallisce (ad esempio a seguito di un test di qualifica) e vengono riprodotti e caratterizzati i test fallenti su attrezzature da laboratorio. Se si tratta di un fallimento funzionale, cioè quando il dispositivo non riesce ad eseguire alcune specifiche operazioni (normalmente si parla di test GO/NO-GO, ovvero il cui risultato può essere solo PASS o FAIL), vengono utilizzati tester programmabili su cui vengono caricati dei pattern che fanno eseguire le operazioni volute. Esempi di questo tipo di test sono gli scan test discussi in precedenza, o i test sulle memorie, come ad esempio i RAM BIST (Built-In Self Test), oppure scrivere o cancellare dei dati in flash. Eventualmente tali tester possono essere utilizzati anche nella fase successiva per la stimolazione del fallimento, mentre vengono eseguite altre analisi sui dispositivi stessi.

Un altro tipo di test, invece, sono i test parametrici, in cui viene misurata una grandezza continua (ad esempio una tensione o una corrente) e viene confrontata con un valore minimo e uno massimo. Lo strumento principale che viene utilizzato per riprodurre questo tipo di test è il curve tracer. Con tale strumento si misura la caratteristica I-V sui pin candidati ottenuti dal log, eventualmente dando tensione anche alle alimentazioni del dispositivo. Viene poi confrontata la caratteristica I-V tra dispositivo “good” e dispositivo “fail” nelle stesse condizioni di misura. Nel caso di fallimenti al di sopra o al di sotto di una certa temperatura, tale verifica viene eseguita alle condizioni in cui il dispositivo dovrebbe fallire, utilizzando strumenti atti a mantenere una temperatura voluta, solitamente tramite flusso d’aria. Un esempio di misura al CT (Curve Tracer) è visualizzabile in Figura 2.7, in cui si nota la presenza di un leakage sul pezzo fail (curva verde chiaro) rispetto al pezzo di riferimento (curva verde oliva).

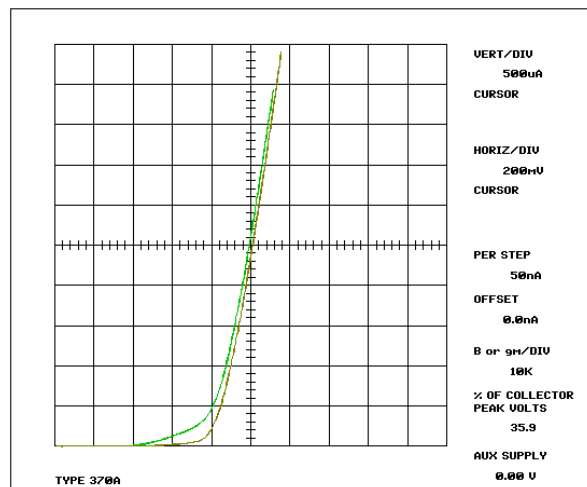


Figura 2.7: Misura al Curve Tracer: in verde chiaro pezzo fail, in verde oliva pezzo reference

### 2.3.2 Fault localization (o fault isolation)

La seconda fase consiste nella fault localization (o fault isolation). Essa può essere non distruttiva o distruttiva, cioè può essere reversibile o no. Tra le tecniche non distruttive c'è proprio la lock-in thermography, che può essere eseguita anche senza alcuna preparazione del campione. Altri esempi di tecniche non distruttive sono gli X-Ray 2D o 3D o il SAM (Scanning Acoustic Microscopy), visibili in Figura 2.9. La tecnica dei raggi X 2D consente un'analisi dei fili di bonding e della frame. Permette inoltre di analizzare la posizione del die attraverso la visualizzazione della colla, dato che il silicio risulta essere trasparente ai raggi X. La tecnica dei raggi X 3D consente una ricostruzione di una piccola zona del dispositivo attraverso molte immagini X-Ray 2D elaborate tramite software (tomografia). Essa è molto promettente per un'analisi di piccole zone, come ad esempio pad, balls o bordo del die per analizzare l'altezza della colla. Risulta invece problematica per analizzare grandi superfici a causa del tempo necessario per la cattura e l'elaborazione delle immagini, oltre alla problematica della quantità di dati da gestire. La tecnica SAM consiste nell'analizzare onde di pressione con frequenze dell'ordine dei 30 MHz riflesse e trasmesse dal dispositivo in analisi. Le interfacce tra i materiali causano scattering, e quindi si ha una variazione nel segnale trasmesso (scattering 0°) o nel segnale riflesso (scattering 180°). Vengono quindi evidenziate in questo modo la presenza di delaminazioni, cioè interfacce non volute tra i diversi strati (ad esempio tra la frame e il die), vuoti e crepe nel dispositivo. A seconda che si consideri l'immagine delle onde acustiche riflesse o trasmesse è possibile individuare a grandi linee, grazie anche all'esperienza, dove si trova l'eventuale interfaccia.

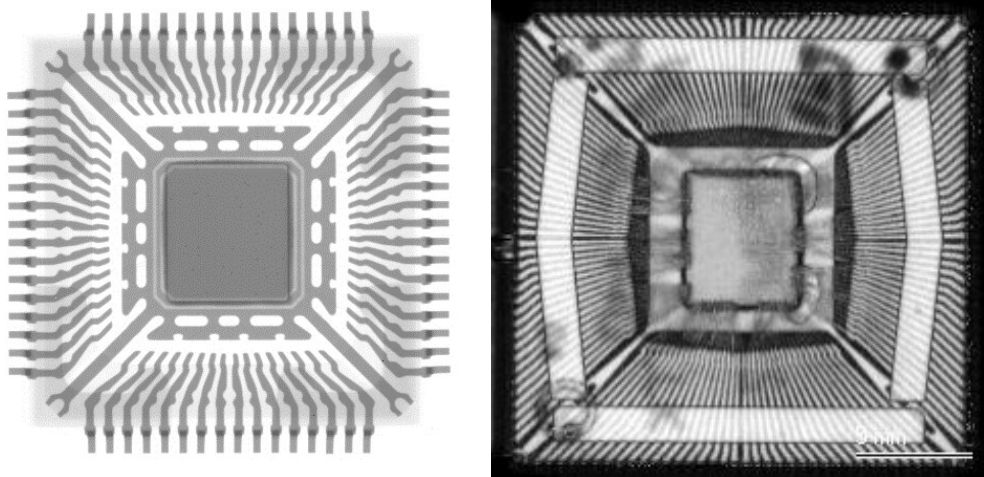


Figura 2.8: Immagine X-Ray (sinistra) e SAM (destra)

Le tecniche di fault isolation su die più note sono Termografia, OBIRCh ed EMMI; poiché necessitano di una preparazione specifica del campione, vengono considerate distruttive. Per poter utilizzare tali tecniche, infatti, è necessario che sia visibile il die, cioè che esso sia esposto frontside o backside. Per poter esporre la frontside o la backside del pezzo esistono alcune tecniche differenti a seconda del dispositivo. Per le aperture da retro si può usare un laser nell'infrarosso che vaporizza il molding compound, in seguito vengono rimosse meccanicamente la frame e la colla che fissa il die a quest'ultima. Per rimuovere tutti i residui della colla è poi possibile usare acetone. Per l'utilizzo del laser è necessario preparare una "ricetta", cioè un settaggio dei parametri di potenza del laser e area, e quindi velocità di ablazione. Tale settaggio va preparato solo una volta per ogni operazione su un determinato dispositivo, dopodiché non risulta più necessaria la calibrazione delle stesse ricette. Un esempio di apertura backside è visibile in Figura 2.10 (destra). Un ulteriore metodo di apertura backside consiste nella lappatura meccanica, cioè viene grattata meccanicamente tutta la superficie del dispositivo mediante una fresa a controllo numerico. Questa tecnica permette anche l'assottigliamento del silicio, che risulta essere necessario nei casi in cui esso è fortemente drogato. Per quanto riguarda l'apertura frontside, essa avviene

tramite ablazione laser seguita da attacco chimico. Si utilizzano ricette differenti per i dispositivi a seconda del materiale e delle condizioni di stress del package e dei fili del bonding; i parametri operativi sono la composizione e la concentrazione della soluzione, la temperatura, il tempo di attacco e il numero di ripetizioni. Ad esempio, per dispositivi con resina stressata e bonding in rame vengono fatti più step di attacco con acido cloridrico diluito a bassa temperatura. Un esempio di un'apertura frontside è visibile in Figura 2.2 (destra).

L'OBIRCh (Optical Beam Induced Resistance Change) consiste nella scansione del die mediante laser nell'IR ( $\lambda = 1340 \text{ nm}$ ), mentre viene applicata una tensione costante al dispositivo. Il laser scalda localmente il dispositivo e ciò induce una variazione della resistenza nel punto specifico su cui il laser è puntato in quell'istante e quindi si ha una variazione della corrente assorbita o erogata dal dispositivo, secondo le relazioni [16]:

$$\Delta R = \frac{\rho_0 L}{S} \alpha_{TCR} \Delta T \quad (2.3)$$

$$\Delta I = \frac{V}{\Delta R} \propto \frac{1}{\Delta T} \quad (2.4)$$

dove  $\rho_0$  è la resistività del metallo,  $S$  la sezione,  $L$  la lunghezza e  $\alpha_{TCR}$  il coefficiente termico del metallo. Perciò la variazione di corrente, e quindi di resistenza, viene utilizzata come segnale rilevato, e viene creata una mappa della variazione di corrente in base alla posizione del laser, il quale esegue una scansione su tutta l'area considerata. Tale tecnica viene considerata attiva in quanto si ha una sollecitazione dall'esterno. È possibile impostare la potenza del laser ed i tempi di scansione, in tal modo quindi viene modificato il  $\Delta T$  dell'equazione (2.3) per ottenere una quantità sufficiente di segnale. Il limite della tecnica OBIRCh è rappresentato dal fatto che di norma non è applicabile ai fallimenti funzionali, a meno che non siano accompagnati da un'alterazione di un valore di corrente che possa misurarsi direttamente. Inoltre la risoluzione spaziale

risulta essere limitata dal beam waist del laser. Il vantaggio principale di tale tecnica è la possibilità di ispezionare device aperti da retro dato che per lunghezza l'onda del laser il silicio risulta essere trasparente, e quindi risulta possibile la stimolazione dei layer inferiori.

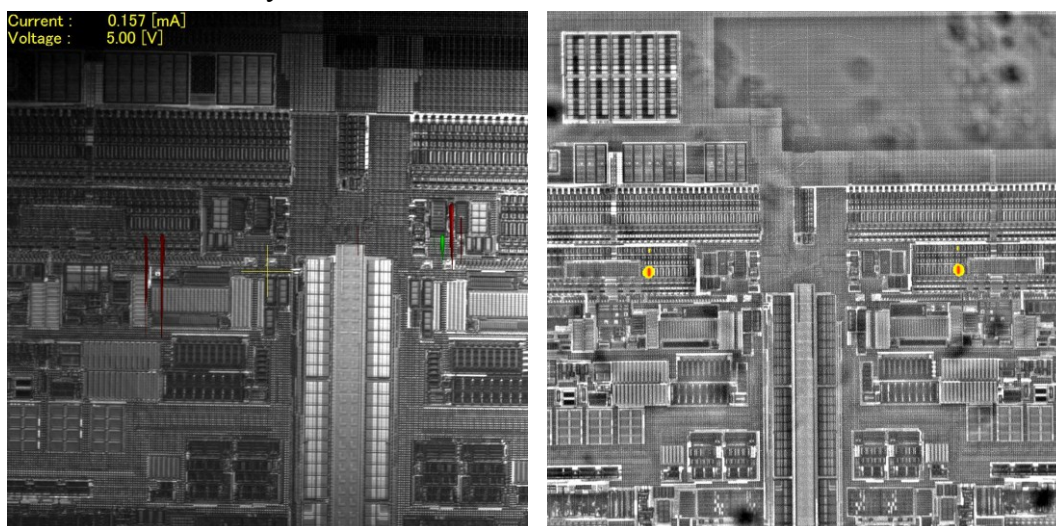


Figura 2.9: Immagini OBIRCh (sinistra) e EMMI (destra) di un dispositivo fail

La tecnica EMMI (light EMISSION Microscopy), invece, consiste nel porre il dispositivo in condizioni di funzionamento anomalo e nell'analizzare i fotoni emessi nel range dei  $0.9 - 1.6 \mu m$ . Per ridurre il rumore, il sensore, InGaAs, viene raffreddato a temperature criogeniche tramite azoto liquido. In questo range di lunghezze d'onda sono emessi fotoni dai transistor in regime di saturazione, quindi confrontando le immagini acquisite del dispositivo fail con quelle di dispositivi di riferimento è possibile individuare transistor in condizioni di funzionamento anomale. L'EMMI ha il vantaggio di poter essere utilizzato mettendo il dispositivo nelle condizioni volute tramite, ad esempio, un tester. Quindi è anche possibile far eseguire al dispositivo delle operazioni, come cancellare, scrivere o controllare una memoria flash, mentre viene eseguita la misura. Entrambe le tecniche, EMMI e OBIRCh, vengono preferibilmente utilizzate con i dispositivi aperti backside poiché è possibile andare a sollecitare ed analizzare i singoli transistor direttamente sulle regioni di area attiva senza

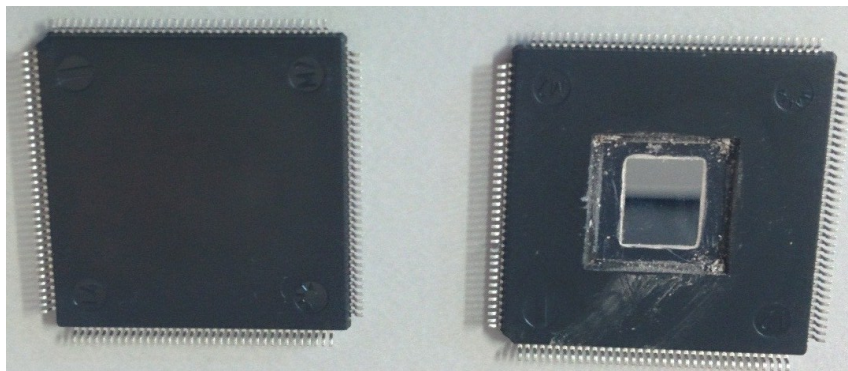


essere mascherati dai livelli di Metal, Oxide, Alucap e passivazione presenti sul fronte del dispositivo. Entrambe le tecniche possono anche essere utilizzate con apertura frontside, con l'accortezza nel caso dell'OBIRCh di usare basse potenze del laser per non bruciare la passivazione.

Analogamente, la tecnica lock-in thermography può essere utilizzata con il die esposto frontside o backside. In particolare è possibile utilizzare tale tecnica per stimare la profondità della zona dove viene maggiormente dissipata potenza mediante l'analisi del segnale di fase. Infatti come si vedrà in seguito, esso è legato alla propagazione del calore nel dispositivo che è possibile modellizzare ed analizzare. Un vantaggio delle tecniche EMMI e OBIRCh rispetto alla termografia risiede nella risoluzione laterale ottenibile. Infatti, poiché la risoluzione è definita dal criterio di Rayleigh ( 6.1 ), le minori lunghezze d'onda in gioco in queste tecniche rispetto alla termografia fanno sì che abbiano prestazioni migliori da questo punto di vista. Ciò comporta quindi un livello di ingrandimento delle lenti differente, infatti sia nel caso dell'EMMI che nel caso dell'OBIRCh si possono utilizzare anche lenti SIL (Solid Immersion Lens), cioè lenti supplementari che arrivano a contatto con il dispositivo, e perciò permettono un alto valore dell'apertura numerica e quindi consentono un ingrandimento elevato (>100x). Due immagini OBIRCh ed EMMI sovrapposte con l'immagine ottica sono rappresentate in Figura 2.9. Le immagini ottiche (o topografie) vengono acquisite dallo stesso strumento: nel caso OBIRCh tramite scansione del laser alla lunghezza d'onda fissata, mentre nel caso della tecnica EMMI essa è un'acquisizione del sensore nel range di lunghezze d'onda dello strumento.

La tecnica del lock-in thermography è una tecnica piuttosto recente. Pochi anni fa per analizzare le zone dove era localizzato il maggior consumo di corrente e quindi dove c'era una zona di surriscaldamento locale, si utilizzavano i cristalli liquidi. Essi conferiscono una risposta binaria, cioè indicano solo se un'area del dispositivo supera o meno la temperatura di transizione del cristallo. Tuttavia, con

L'avanzare della tecnologia, i cristalli liquidi sono stati abbandonati a causa della bassa risoluzione spaziale, limitata dalla grandezza dei cristalli, e della variazione di temperatura necessaria affinché si rilevi un cambio nell'orientamento dei cristalli, che non risulta compatibile con le basse densità di potenze utilizzate. Per questo motivo, grazie agli sviluppi notevoli dei sensori fotonici, si è passati a tecniche di rilevazione dei fotoni con energie nell'IR, cioè nel range dei fotoni termici.



*Figura 2.10: Sample preparation: device prima dell'apertura (sinistra) e dopo apertura backside (destra)*

Per alcune tecniche è necessario quindi che il campione sia preparato in un preciso modo. La sample preparation dei dispositivi consiste nella preparazione dei campioni tramite tecniche distruttive affinché risulti possibile eseguire le analisi programmate. Ad esempio è possibile aprire un dispositivo da backside tramite laser (Figura 2.10). Con un laser nell'IR viene ablata una zona predefinita e attraverso azione meccanica vengono rimosse la frame e la colla. Per l'apertura frontside invece vengono utilizzati acidi che permettono di sciogliere il molding compound senza attaccare i fili di bonding, solitamente in oro o in rame puro o ricoperto di palladio. Nel caso sia necessario eseguire misure direttamente sul die, è possibile estrarlo tramite acidi o soluzioni, prima per eliminare la resina e poi per staccare i contatti e la frame. Una volta estratto il die è possibile eseguire tutte le analisi normalmente fattibili a dispositivo aperto backside, tuttavia è necessario

usare delle micro o nano-punte che andranno posizionate tramite microscopio sui pad da stimolare.

### 2.3.3 Defect observation e characterization

La terza fase di analisi consiste nell'eseguire un'analisi fisica allo scopo di osservare e caratterizzare il difetto, in modo da averne una visualizzazione dettagliata.

L'analisi fisica può essere eseguita principalmente in due modi, a seconda della prospettiva da cui vogliamo osservare il difetto: dall'alto verso il basso o in sezione. Il primo metodo consiste nella lappatura, layer dopo layer, del die. Ciò è eseguito da tecnici esperti mediante l'utilizzo di appositi macchinari ad alta precisione. Controllando mediante microscopio ottico le zone localizzate tramite le tecniche precedentemente descritte, il die viene "grattato" o attaccato (chimicamente o via plasma) livello per livello fino a quando non si trova il difetto. Il secondo metodo, invece, consiste nel fare un taglio perpendicolare alla superficie del die ed osservare in sezione la parete così ottenuta.

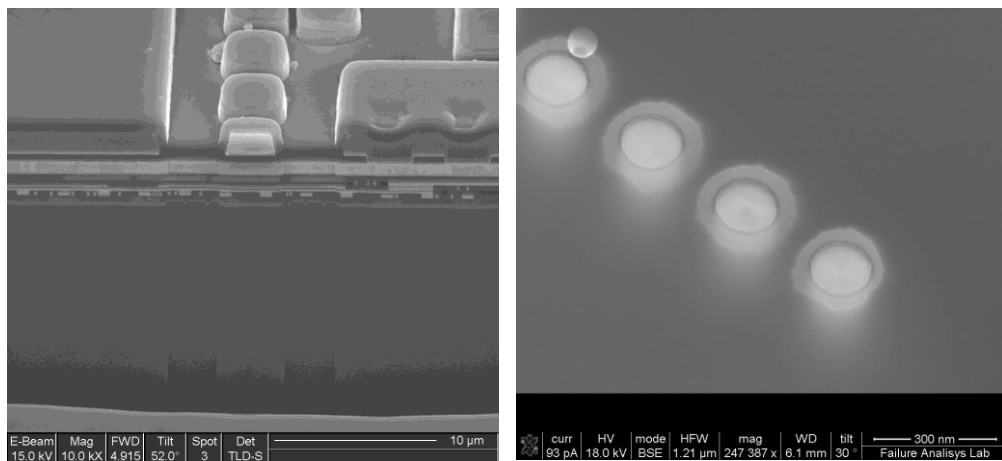


Figura 2.11: FIB+SEM (sinistra) e SEM (destra) di due dispositivi

Una volta trovato il difetto, potrebbe essere necessario caratterizzarlo, ovvero raccogliere dei dettagli su forma, dimensioni, posizione e materiali, in modo da ricostruirne l'origine e l'effetto elettrico locale (Elementary Failure Mode).

Tra le tecniche annoverate per ispezionare una porzione di dispositivo ci sono il contrasto in tensione PVC (Passive Voltage Contrast) e il SEM (scanning electron microscopy). La prima consente di analizzare eventuali leakage o perdite di corrente, utilizzando un fascio elettronico e monitorando dove viene scaricata la carica, la seconda invece è una tecnica di ispezione che permette di raggiungere una risoluzione molto maggiore rispetto ai microscopi ottici sempre grazie a fasci elettronici. Un'altra possibile tecnica è il FIB (Focused Ion Beam), in cui un fascio di ioni focalizzato viene utilizzato per "scavare" una piccola sezione, e tramite SEM essa viene osservata. È possibile anche utilizzare tecniche spettroscopiche per l'analisi degli elementi e composti presenti, ad esempio per valutare la presenza di materiali non voluti o impurità, e tecniche di macro-sezionamento per il controllo ad esempio di eventuali delaminazioni o mancati contatti tra pad e fili. L'ultima tecnica che può essere utilizzata è il microscopio a trasmissione elettronica o TEM, che permette di analizzare piccole porzioni del dispositivo, dette lamelle (con spessore dell'ordine dei 100  $\mu\text{m}$ ), tecnica particolarmente utilizzata nel caso delle singole celle delle memorie.

#### **2.3.4 Root cause determination**

L'ultima fase consiste nella root cause determination. Questa fase non rientra tra le attività di Failure Analysis, ma normalmente chi le ha seguite viene coinvolto, in quanto la caratterizzazione del difetto viene fatta in funzione di questa fase. Una volta raccolte tutte le informazioni sulla storia del dispositivo, dei test a cui è stato sottoposto, delle informazioni di tracciabilità e delle informazioni trovate con i punti precedenti della Failure Analysis, tramite il supporto degli esperti delle

funzioni coinvolte (test engineer, designer, processisti,...) si formulano le ipotesi che hanno portato al difetto, inizialmente latente e che durante lo stress si è attivato. Individuata la causa si procede alla verifica della stessa tramite la riproduzione del failure mode ed inoltre si procede secondo il metodo 8D con la definizione delle azioni correttive di processo.

Le difficoltà della Failure Analysis riguardano la formulazione di ipotesi che riescano a correlare tutte le informazioni ottenute con le diverse tecniche, in quanto non è detto che gli spot risultanti dalle varie tecniche siano causati dal difetto: per questo motivo è buona norma riprodurre la misura anche su un pezzo di riferimento nelle stesse condizioni. Spesso succede anche che siano visibili degli effetti del difetto stesso: per esempio, si consideri il caso in cui la superficie di una via tra due livelli di metal sia parzialmente contaminata da un sottile strato isolante, che a causa degli stress termo-elettrici si espanda fino ad isolare completamente tale via. Tutta la corrente tra le due metal passerà allora sulle altre vias, se ci sono, che quindi porteranno una maggiore densità di corrente. Se questa è eccessiva, si può avere la fusione delle vias stesse. Nel caso eseguiamo un'analisi OBIRCh, vedremo degli spot proprio in corrispondenza delle vias fuse, non evidenziando quindi la causa ma l'effetto.

Per ovviare in parte a questo problema, i Failure Analysis Engineer hanno a disposizione ulteriori strumenti, come il layout CAD completo del dispositivo per analizzare le componenti circuitali, e lo schema logico per l'analisi funzionale, in particolar modo nel caso di fallimenti nella scan-chain. Questi strumenti aiutano quindi a correlare le diverse informazioni ottenute dalle diverse tecniche.



### 3 Trasmissione del calore

Il primo principio della termodinamica, o legge della conservazione dell'energia, afferma che l'energia non viene creata ma al più si trasforma in diverse modalità. Matematicamente tale concetto può essere espresso come

$$\sum E_O + \sum E_I + \Delta E_S = 0 \quad (3.1)$$

Dove  $\sum E_O$  si riferisce all'energia totale in uscita dal sistema,  $\sum E_I$  all'energia in entrata nel sistema e  $\Delta E_S$  l'energia totale immagazzinata nel sistema, che include energia interna, cinetica, potenziale e tutte le ulteriori forme di energia immagazzinabile, e ciò è schematizzato in Figura 3.1. La temperatura è una proprietà corrispondente all'energia cinetica delle particelle che costituiscono il sistema e quindi particelle con energia cinetica maggiore causano una temperatura maggiore.

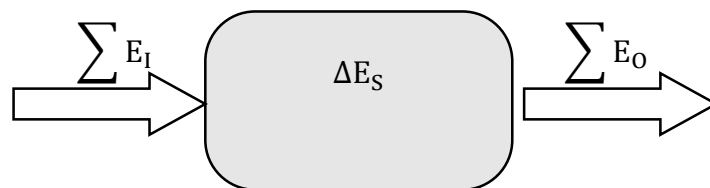


Figura 3.1: Conservazione dell'energia

Quando due sistemi a contatto sono a temperature differenti, si instaura un flusso di calore dal corpo più caldo al corpo più freddo fino a che non si raggiunge un equilibrio statico in cui le due temperature coincidono, ed un equilibrio dinamico, in cui i flussi di calore scambiati sono uguali ed opposti. Esistono tre differenti

modalità di trasmissione del calore: conduzione, convezione ed irraggiamento. Si parla di conduzione quando lo scambio di calore tra due corpi avviene in un mezzo stazionario. Se invece uno dei due corpi è un fluido in movimento si parla di convezione. Infine l'irraggiamento consiste nello scambio di calore tramite scambio di fotoni. Nel caso di sorgenti di calore nei dispositivi elettronici, si considera che tutto il calore si trasmetta tramite conduzione, mentre l'irraggiamento, che rappresenta il segnale che arriva al detector, avviene solo dal piano su cui la lente è focalizzata; si ipotizza cioè che tutti gli altri livelli del dispositivo non siano trasparenti nel range di lunghezze d'onda che si sta considerando. Sarà analizzata inizialmente la soluzione nel caso di un'onda termica piana oscillante in un solido semi-infinito, per poi passare ad una soluzione più complessa che considera un punto che oscilla tra due diverse temperature in uno spazio 3D.

### **3.1 Conduzione**

Uno dei primi modelli microscopici che spiegassero il fenomeno della conduzione fu proposto da P. Drude nel 1900. In tale modello gli elettroni sono considerati liberi, in continuo moto e urto tra di loro. Maggiore è la velocità delle particelle e maggiore è l'energia interna del sistema, ossia maggiore è la temperatura del materiale. Il propagarsi del calore è dovuto al continuo urto tra elettroni e quindi al continuo scambio di quantità di moto. Questo dunque spiega come mai i metalli, in cui l'approssimazione di elettroni liberi è buona, siano buoni conduttori termici.

A livello macroscopico fu Fourier, partendo da dati sperimentali, a formulare un modello matematico che studiasse la propagazione del calore in un materiale. La quantità di calore  $q$  [W] trasferita in una sola direzione  $x$  è espressa da



$$q_x = -\lambda A_x \frac{dT}{dx} \quad (3.2)$$

Dove  $\lambda$  è un parametro fondamentale della conduzione ed è detto conducibilità termica,  $A_x$  è la superficie normale alla direzione di propagazione del calore e  $T$  la temperatura. Il segno negativo di  $q$  è dovuto al secondo principio della termodinamica, che afferma che l'energia è trasferita nella direzione della temperatura decrescente.

In unità del SI, la conducibilità termica è espressa in  $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}\right]$ . In generale esso è un tensore rappresentabile da una matrice quadrata, tuttavia nel caso in cui i due vettori siano paralleli, la conducibilità termica diventa uno scalare, e questo è il caso che sarà considerato per semplicità.

Il secondo parametro è il calore specifico,  $c_p$ , che rappresenta la quantità di calore necessaria per un materiale di massa unitaria affinché la sua temperatura aumenti di 1 K. Nel SI, il calore specifico è espresso in  $\left[\frac{\text{J}}{\text{K}\cdot\text{kg}}\right]$ .

Il terzo parametro è la densità del materiale  $\rho$   $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$ .

Da questi tre parametri è possibile ricavare la diffusività termica del materiale, definita come il rapporto tra la conducibilità termica e il prodotto tra la densità e il calore specifico del materiale:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (3.3)$$

La diffusività termica del materiale è espressa in  $\left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right]$ . Questo parametro risulta essere molto importante nel caso di studio in condizioni non stazionarie.

### 3.1.1 Equazione della conduzione

L'equazione fondamentale non stazionaria della conduzione in un mezzo tridimensionale omogeneo e isotropico è un'equazione differenziale:

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + p \quad (3.4)$$

Dove  $p$  rappresenta la densità di potenza dissipata. Se si vuole calcolare il profilo di temperatura nel tempo, bisogna risolvere l'equazione differenziale con l'aggiunta delle condizioni al contorno del problema. Si consideri ora un'onda termica piana che si propaga in un solido semi-infinito lungo l'asse  $z$ . Sia la frequenza armonica di riscaldamento e raffreddamento alla superficie del solido pari a  $f$ . Quindi l'equazione precedente, assumendo nulla la dissipazione, diventa

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (3.5)$$

La soluzione lungo l'asse  $z$  in un solido isotropico e omogeneo è un'onda piana che si annulla per  $z \rightarrow \infty$ :

$$\begin{aligned} T(z, t) &= A \exp\left(-z \sqrt{\frac{i\omega c_p \rho}{\lambda}}\right) e^{i\omega t} \\ &= A \exp\left(-\frac{z}{\mu}\right) \exp\left(i\left(\omega t - \frac{z}{\mu}\right)\right) \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$\text{con } \mu = \sqrt{\frac{2\lambda}{\omega c_p \rho}} \quad (3.7)$$

La grandezza  $\mu$  è detta lunghezza di diffusione termica, ed ha le dimensioni di una lunghezza. Può anche essere espressa in termini di diffusività termica:

$$\mu = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} \quad (3.8)$$

La lunghezza di diffusione termica permette di analizzare la “distanza” che un calore armonico percorre in un periodo. Nel caso del silicio e con frequenza di 3 Hz, la lunghezza di diffusione vale circa 3 mm, mentre nel caso di materiali non buoni conduttori di calore, la lunghezza di diffusione assume valori di uno o due ordini di grandezza inferiori. Ad esempio, nel caso della resina dei dispositivi, detta molding compound, a 3Hz la lunghezza di diffusione vale circa 180  $\mu m$ . In questa approssimazione la fase del ritardo (in gradi) può essere espressa come

$$\phi = \frac{z}{\mu} \cdot \frac{180}{\pi} \quad (3.9)$$

La lock-in thermography consiste, come sarà descritto nel capitolo 4, nello stimolare una o più sorgenti di calore tramite un’onda quadra di tensione applicata al dispositivo in analisi. Solitamente si instaura così un percorso chiuso della corrente nel dispositivo che in un campione good non esiste, oppure dissipa meno corrente. Per effetto Joule, della potenza viene dissipata ed il percorso della corrente si scalda più o meno in funzione della densità di corrente nei punti del circuito. Assumeremo quindi che un punto dissiperà più potenza e quindi aumenterà maggiormente la sua temperatura rispetto alla restante parte del dispositivo. Le potenze in gioco sono molto basse, infatti ci si pone nella condizione in cui vengono dissipate poche centinaia di  $\mu W$ , quando il limite attuale di rilevazione di tale tecnica è circa 400nW.

Nel modello proposto precedentemente, in approssimazione di onda piana, viene ipotizzato che il calore pulsi ad una frequenza  $f$ , tuttavia introducendo un’onda quadra di tensione, il dispositivo continuerà a scaldarsi, dato che si tratta di un onda quadra non della temperatura ma bensì della potenza indotta nel dispositivo. In realtà il dispositivo tenderà lo stesso a raffreddarsi nei semi-periodi “bassi”

dell'onda piana. Ciò è dovuto alla propagazione stazionaria del calore nel resto del dispositivo, che, essendo a temperatura minore, riceve un flusso di calore che a sua volta viene dissipato all'esterno. Si raggiungerà quindi una situazione quasi-stazionaria: il dispositivo inizialmente si riscalderà fino a raggiungere una temperatura di quasi-equilibrio, attorno alla quale inizierà ad oscillare. Questo risulta anche visibile nelle simulazioni presentate al capitolo 5. Poiché il dispositivo impiega del tempo per raggiungere la condizione di quasi-equilibrio descritta, i dati iniziali sarebbero del tutto incoerenti con i successivi, portando quindi ad errori ed ulteriori deterioramenti dei dati. Ciò vale soprattutto nel caso in cui si considerino pochi periodi del lock-in. Nei casi in analisi, invece, il tempo per raggiungere la condizione di quasi-equilibrio è sufficientemente corto rispetto al tempo della misura, ad esempio nel caso di puro silicio solitamente il tempo medio necessario per raggiungere tale condizione è di 300ms, molto piccolo rispetto ai tempi dell'ordine dei minuti in cui avviene la misura.

### 3.1.2 Sorgente puntiforme

Si analizza ora il caso in cui il solido non sia infinito ma di spessore  $d$ , e la sorgente di calore sia quasi-puntiforme; si parla di sorgente quasi-puntiforme, altrimenti se fosse puntiforme la densità di energia sarebbe infinita, cosa non possibile fisicamente. Per studiare questo caso, si parte dall'equazione della conduzione e si passa in coordinate polari

$$\frac{\partial}{\partial t} T(\vec{r}, t) = \alpha \nabla^2 T(\vec{r}, t) + p(\vec{r}, t) \quad (3.10)$$

dove  $r$  rappresenta la distanza dalla sorgente di calore e  $\alpha \left[ \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$  è la diffusività termica del materiale ( 3.3 ). Si può dimostrare che la risposta termica  $T(r, t)$  è allora data dalla funzione di Green  $g(r, t)$ . Le condizioni al contorno necessarie per la risoluzione dell'equazione precedente risultano essere

$$g(r \rightarrow \infty, t) = 0 \quad \& \quad \lim_{r \rightarrow 0} r \frac{\partial}{\partial r} g = e^{j\omega t}$$

Quindi la soluzione dell'equazione differenziale in coordinate polari con le condizioni al contorno di cui sopra è la seguente

$$g(r, t) = K_0 \left( r \sqrt{\frac{j\omega}{\alpha}} \right) e^{j\omega t} \quad (3.11)$$

Dove  $K_0(\cdot)$  è la funzione modificata di Bessel del secondo tipo, una funzione complessa che non può essere definita analiticamente. Poiché nel caso della termografia lock-in l'informazione è contenuta nella sola prima armonica, è possibile considerare solo la frequenza di interesse:

$$g_{\omega_0}(r) = K_0 \left( r \sqrt{\frac{j\omega_0}{\alpha}} \right) \quad (3.12)$$

La Figura 3.2 rappresenta l'andamento dell'ampiezza del segnale in funzione di  $r \sqrt{\frac{\omega_0}{\alpha}}$ . Da tale grafico si può quindi affermare che aumentando la frequenza diminuisce il valore assoluto del segnale e ciò porterà ad una diminuzione del rapporto segnale-rumore (paragrafo 4.6).

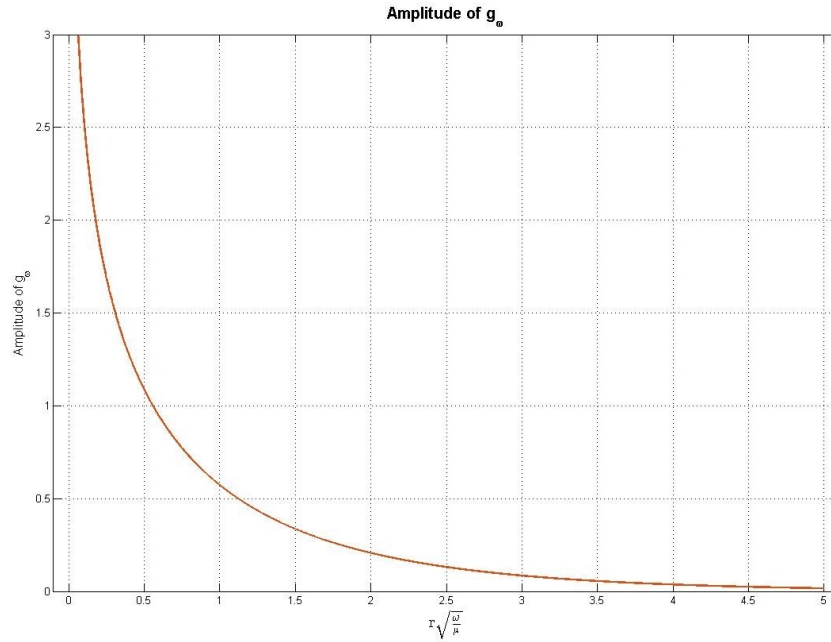


Figura 3.2: Ampiezza della funzione  $g$

Si consideri ora un'onda quadra di ampiezza  $A$  e di duty cycle al 50%, descritta da una funzione di supporto  $u(\vec{r})$  che vale 0 ovunque eccetto nell'area della sorgente di calore. Quindi la sorgente di calore può essere espressa come serie di Fourier

$$p(\vec{r}, t) = A \left( \frac{1}{2} + \sum_{n \text{ dispari}} \frac{2}{\pi n} e^{jn\omega t} \right) u(\vec{r}) \quad (3.13)$$

La risposta termica può allora essere trovata come convoluzione (Figura 3.3 (sinistra)) della funzione di Green con la forma della sorgente di calore, cioè

$$T(\vec{r}, t) = \iint g(\|\vec{r}'\|) p(\vec{r} - \vec{r}', t) r' dr' d\theta' \quad (3.14)$$

È possibile dunque calcolare la distribuzione della temperatura utilizzando la (3.10), la (3.12) e la (3.13). Se si ipotizza una sorgente di calore rettangolare, il risultato per diverse frequenze è confrontabile in Figura 3.3 (destra) nel caso del

silicio. È inoltre visibile come la frequenza influisca nella risoluzione laterale, e ciò sarà visibile anche sperimentalmente.

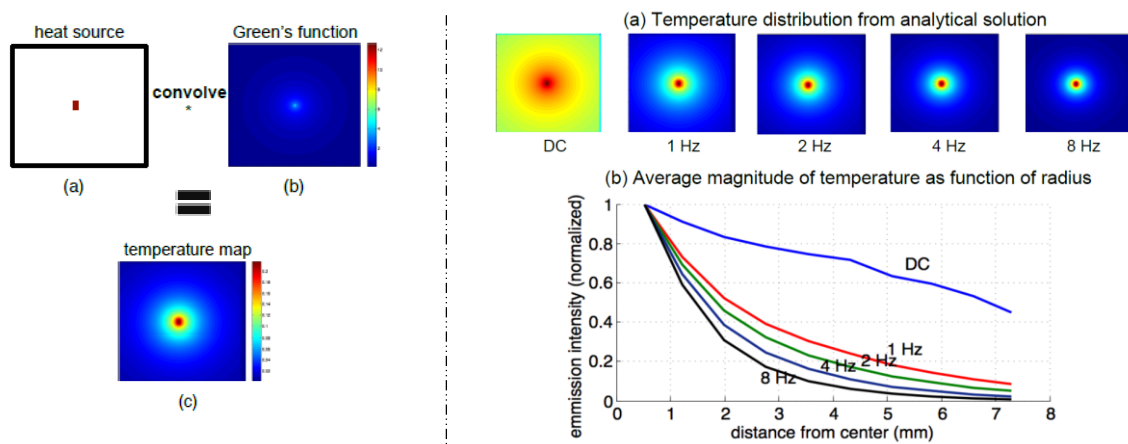


Figura 3.3: Convoluzione (sinistra) ed effetto dell'incremento della frequenza nella diffusione laterale del calore (destra) [29]

### 3.2 Irraggiamento

Come già menzionato, un altro modo di interazione del calore con altri sistemi o con l'ambiente è l'irraggiamento. In particolare proprio l'irraggiamento è il segnale che viene registrato dal sensore della camera. È quindi necessario introdurre la radiazione di corpo nero, cioè lo spettro di fotoni che un corpo ideale emette alla temperatura  $T$ .

Innanzitutto si definiscono i coefficienti  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\tau$ . Essi rappresentano la probabilità che la radiazione elettromagnetica incidente sul corpo venga rispettivamente assorbita, riflessa e trasmessa. Questi coefficienti sono solitamente dipendenti dell'energia dei fotoni incidenti, sono adimensionali e la loro somma è sempre pari a 1. Nel caso di corpo nero si ha  $\alpha = 1$ ,  $\beta$  e  $\tau$  nulli.

Fu Planck ad esprimere lo spettro di corpo nero, inteso come intensità  $\left[\frac{W}{m^2\mu m}\right]$  in funzione della temperatura del corpo. Tramite una trattazione quantistica si ottiene l'equazione di corpo nero

$$M_\lambda(T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \left( e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)^{-1} \quad (3.15)$$

dove  $h$  è la costante di Planck,  $c$  la velocità della luce nel vuoto,  $k$  la costante di Boltzmann e  $T$  la temperatura assoluta del corpo.

Nella Figura 3.4 sono rappresentate alcune distribuzioni per diverse temperature in un grosso intorno della temperatura ambiente, dato che la temperatura dei dispositivi analizzati subisce variazioni di temperatura dell'ordine dei  $mK$  attorno alla temperatura ambiente.

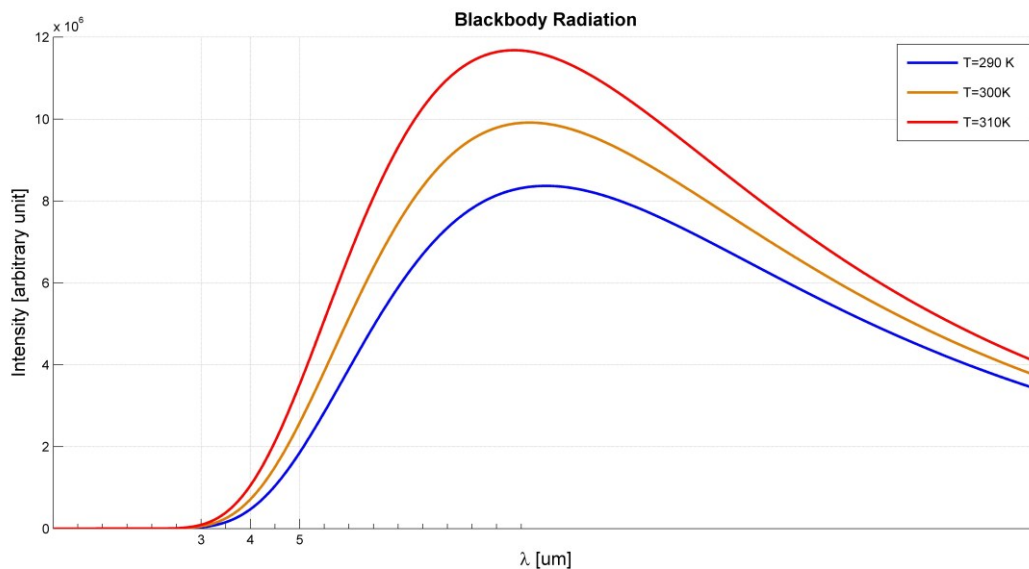


Figura 3.4: Radiazione di corpo nero per tre temperature nell'intorno della temperatura ambiente

La criticità maggiore risiede nel fatto che non si ha a che fare con corpi neri perfetti. Ogni corpo a temperatura costante, infatti, è in equilibrio dinamico con l'ambiente: la probabilità di assorbire radiazione ad una certa lunghezza d'onda è uguale alla probabilità di emettere radiazione alla stessa lunghezza d'onda.



Quest'ultima probabilità è espressa dal coefficiente di emissività  $\varepsilon$ , e l'uguaglianza citata è chiamata legge di Kirchhoff. Per un corpo nero risulta  $\varepsilon = \alpha = 1$ , mentre per corpi reali  $\varepsilon < 1$ . L'incertezza di  $\varepsilon$  e l'influenza della luce riflessa per i corpi reali sono responsabili del degradamento del segnale. La riflessione, tuttavia, risulta essere eliminata dal lock-in poiché contribuirà come una componente non continua.

Oltre alla formula di Planck che esprime lo spettro in funzione della temperatura assoluta, è necessario introdurre un'ulteriore legge che esprime l'emittanza termica  $q$ , cioè la potenza termica emessa per unità di superficie  $[\frac{W}{m^2}]$ , in funzione della temperatura assoluta del corpo  $T$ . Essa è chiamata legge di Stefan-Boltzmann ed è espressa come

$$q = \sigma \cdot T^4 \quad (3.16)$$

Dove  $\sigma$  è la costante di Stefan-Boltzmann,

$$\sigma = \frac{\pi^2 k^4}{60 \cdot \hbar^3 c^2} = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

Tale legge fu prima scoperta sperimentalmente da Stefan nel 1879 e poi dimostrata teoricamente da Boltzmann nel 1884, il quale espresse la costante  $\sigma$  in funzione delle costanti fisiche  $k$  (costante di Boltzmann),  $c$  velocità della luce nel vuoto) e  $\hbar$  (costante di Planck ridotta). La dipendenza dell'emissività dalla quarta potenza della temperatura assoluta permette di poter distinguere distintamente gli "spot" tramite la termografia in lock-in in quanto temperature maggiori hanno un segnale maggiore essendo esso dipendente dalla quarta potenza della temperatura.

### 3.3 Effetto Joule

Fino ad ora si è parlato di sorgenti di calore senza mai specificare il meccanismo di generazione di calore a cui ci si riferisce. Nel caso dei dispositivi elettronici in cui è presente un fallimento, la causa della sorgente di calore è l'effetto Joule.

Un circuito a cui è applicata una tensione  $V$  e circola una corrente  $I$ , dissipa una potenza

$$P = V \cdot I \quad (3.17)$$

che viene dissipata sotto forma di calore. Tale effetto è chiamato effetto Joule e rappresenta il principio cardine nella termografia. Risulta però comodo analizzare la relazione tra la corrente che circola nei circuiti dei dispositivi e la potenza dissipata, in modo da poter fare successivamente alcune considerazioni.

Se si considera l'equazione della conduzione ( 3.4 ), è possibile trovare la relazione tra la densità di corrente  $j(\vec{r}, t)$   $\left[\frac{A}{m^2}\right]$  e la temperatura del circuito,  $T(\vec{r}, t)$ , localmente e temporalmente in un materiale. A tale equazione differenziale si può sostituire il termine di dissipazione, che nei calcoli precedenti era stato considerato nullo. Ora invece, scrivendo la legge di Joule in forma locale si ha

$$p = \vec{j} \cdot \vec{E} = \frac{1}{\sigma} j^2 \quad (3.18)$$

dove  $\sigma$  è la conducibilità elettrica misurata in  $\left[\frac{S}{m}\right]$  e dove è stata utilizzata la legge di Ohm  $\vec{j} = \sigma \vec{E}$ .

Si consideri ora il caso più semplice possibile, cioè quello in cui tutti i parametri del materiale siano costanti e così pure la corrente ed inoltre la distribuzione iniziale di temperatura del materiale sia uniforme [22]. In tal caso allora,

assumendo un percorso della corrente che non dissipa con l'ambiente esterno, la soluzione dell'equazione differenziale diventa

$$\frac{dT}{dt} = \frac{j^2}{c_p \rho \sigma} = \frac{I^2}{c_p \rho \sigma} \cdot \frac{1}{A^2} \quad (3.19)$$

dove A rappresenta la sezione del circuito.

Chiaramente sotto le ipotesi considerate, non potendo il circuito dissipare verso l'esterno, ciò porta ad un continuo aumento della temperatura. Tuttavia tale risultato è importante per un altro motivo: se diminuisce la sezione del circuito aumenta la densità di corrente ed aumenta la temperatura.

Questo fatto è fondamentale per la termografia in lock-in, in cui in realtà si ha dissipazione con l'esterno e soprattutto la corrente è costante solo a tratti. Se si considera ad esempio un circuito di metal fatto come in Figura 3.5.

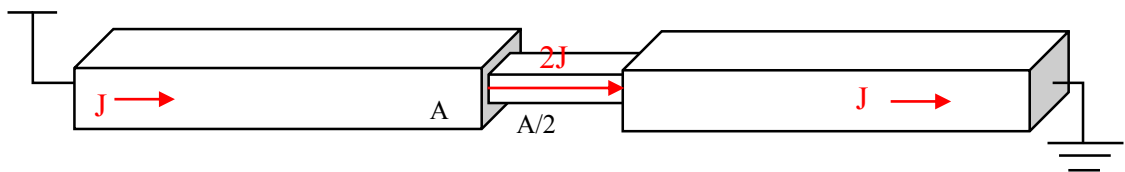


Figura 3.5: Circuito con diverse sezioni e quindi diverse densità di corrente

Considerando che la sezione centrale è metà delle sezioni della restante parte del circuito, la temperatura nella parte centrale del circuito aumenterà di 4 volte rispetto a quella delle altre. Quindi nella termografia lock-in sarà visibile principalmente lo spot corrispondente a questa parte del circuito.



## 4 Lock-in Thermography

Lo sviluppo crescente negli ultimi anni di termocamere per ambito inizialmente militare e successivamente civile ha portato ad investimenti nella ricerca di sensori sempre più sensibili ed affidabili. La termografia passiva, o tempo-indipendente, è stata quindi sviluppata per applicazioni ingegneristiche quali ad esempio lo studio delle distribuzioni delle temperature degli edifici per classificazione di classi energetiche, ma anche medici, come per la distribuzioni della temperatura della pelle nella diagnostica. Uno sviluppo di tale tecnica è rappresentato dalla termografia attiva, cioè il caso in cui un segnale esterno causa un delta di temperatura, e sono di interesse le variazioni dinamiche della stessa temperatura. Tali variazioni possono essere sollecitate o da un flusso di calore pulsato, monitorando l'andamento della temperatura sulla superficie, o tramite la tecnica del lock-in. Tale tecnica consiste nel pulsare la tensione applicata al dispositivo ad una certa frequenza e ciò permette di ridurre notevolmente il rumore. La tecnica del lock-in thermography sta assumendo un ruolo crescente nella Failure Analysis poiché essa può essere utilizzata come tecnica non distruttiva nella distinzione di problemi a livello di packaging o di die del dispositivo. In aggiunta, se il pezzo viene aperto e il die risulta essere esposto, è possibile localizzare la sorgente di calore tramite il segnale di ampiezza e di fase. Di particolare interesse è il caso in cui si vuole trovare un percorso della corrente che in condizioni di dispositivo correttamente funzionante non dovrebbe esistere, ad esempio nel caso di uno short.

## 4.1 Concetti del Lock-in

La tecnica del lock-in permette di estrarre un debole segnale di interesse immerso in un rumore bianco. Ciò è possibile se il segnale primario viene periodicamente pulsato o modulato, prima del primo stadio di amplificazione, con una frequenza detta “frequenza del lock-in”,  $f_{\text{lock-in}}$ . Successivamente, tramite l’utilizzo di un filtro passa-banda, si seleziona solo l’intorno della frequenza del lock-in attorno alla quale è centrato lo spettro in frequenza del segnale da rilevare e attraverso la demodulazione si riottiene il segnale stesso, non più immerso nel rumore bianco dominante.

Lo scopo del lock-in consiste quindi nel poter valutare solo la componente oscillante del segnale, cioè la componente ac. Per poter convertire un segnale da ac a dc si utilizza un raddrizzatore o rectifier al cui ingresso viene posto il “valore assoluto” del segnale, ottenuto tramite un inverter. Il problema del rumore tuttavia rimane, in quanto in questo processo il rumore bianco presente prima di questo stadio risulta essere presente anche alla fine dello stesso. Per ovviare a ciò il segnale viene precedentemente fatto passare per un filtro passa banda centrato sulla frequenza del segnale e per un amplificatore. In questo modo si riesce ad incrementare il SNR (Signal-to-noise ratio) in uscita.

La Figura 4.1 illustra la procedura descritta, in cui all’interno dei cerchi è rappresentata una tipica forma d’onda di segnale nella posizione indicata nel circuito.

Come già detto, il rumore rimane bianco dopo il processo di raddrizzamento, non essendo correlato con il segnale di riferimento. Se ci sono componenti del rumore vicine alla frequenza del segnale di riferimento, dopo tale circuito il rumore sarà sempre presente, ma avrà media nulla. Quindi nell’ultimo stadio, cioè lo stadio di integrazione, maggiore è il tempo di integrazione, maggiore sarà la soppressione

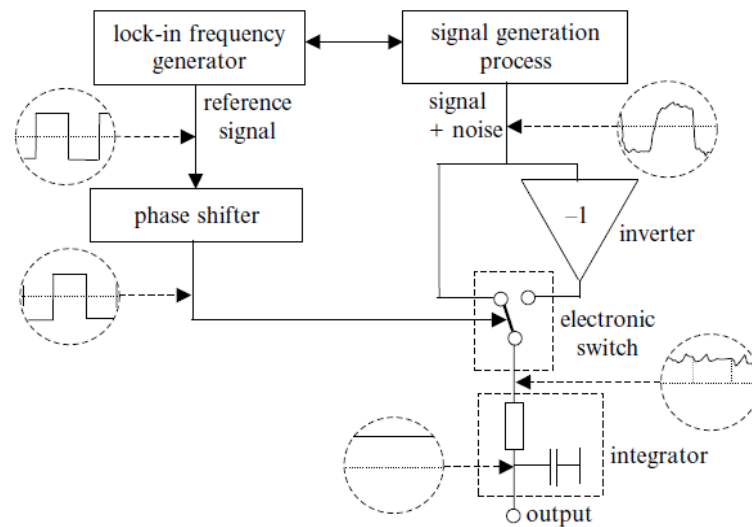


Figura 4.1: Schematico di una procedura analogica di lock-in [3]

del rumore, ma maggiore sarà il tempo di risposta del sistema. Il circuito integratore permette dunque di mediare il segnale su un tempo  $t_{int}$ , per ottenere un compromesso tra rumore soppresso e la banda del segnale d'uscita.

Matematicamente, definito  $F(t)$  il segnale al detector e  $K(t)$  la funzione di correlazione, che per Figura 4.1 è un onda quadra, risulta

$$S = \frac{1}{t_{int}} \int_0^{t_{int}} F(t) \cdot K(t) dt \quad (4.1)$$

quindi con  $K(t) = \begin{cases} +1 & \text{Prima metà periodo} \\ -1 & \text{Seconda metà periodo} \end{cases}$

Se  $K(t)$  è simmetrica e se il tempo di integrazione è un multiplo intero del periodo di  $K(t)$ , tutte le componenti continue risultano soppresse.

Nel caso pratico, il convertitore analogico-digitale (ADC) discretizza il segnale  $F(t)$  in  $F_k(t)$ , e quindi la correlazione descritta nell'equazione ( 4.1 ) avviene

numericamente. In particolare l'integrale diventa una sommatoria e la funzione di correlazione  $K(t)$  va rimpiazzata da un set di valori  $K_k(t)$ . Questi set di valori vengono chiamati fattori peso. Nella maggior parte dei casi i fattori peso non appartengono ad una funzione quadra ma ad una funzione armonica. La correlazione digitale descritta fino ad ora diventa perciò:

$$S = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M F_k K_k \quad (4.2)$$

Esistono ulteriori tipi di correlazione, ad esempio la Fast Fourier Transform o il Least Squares Method, tuttavia questo tipo di correlazione permette calcoli "online", cioè in contemporanea con l'acquisizione. Questo risulta dunque pratico per l'utente che può visualizzare i risultati in real-time, ma anche pratico per il calcolatore che non deve salvare quantità di dati notevoli.

Assumendo che per ogni periodo del lock-in siano campionati  $n$  valori del segnale, dove per il teorema di campionamento  $n \geq 4$ , e che i coefficienti  $K_k$  siano uguali per ogni periodo, eseguendo una misura mediata su  $N$  periodi del lock-in, si ha che il segnale diventa

$$S = \frac{1}{nN} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n K_j F_{i,j} \quad (4.3)$$

Per poter ottenere il miglior SNR, in teoria, la funzione di correlazione ottima è quella coincidente con il segnale atteso. Tuttavia un buon risultato si può ottenere utilizzando funzioni armoniche. Utilizzando quindi funzioni sin/cos si ottengono informazioni esclusivamente sulle armoniche principali, mentre le armoniche superiori vengono soppresse. Ciò risulta essere accettabile in quanto esse non contengono l'informazione principale.

Il vantaggio di utilizzare funzioni armoniche come funzioni correlatrici consiste nel poter ottenere due tipi di informazioni, cioè un segnale di fase ed un segnale



di ampiezza. Ciò è reso possibile usando una correlazione a due canali, cioè due set di funzioni peso: seno e coseno. Le due correlazioni sono svolte in parallelo, quindi il primo canale misura la componente in fase con la funzione seno mentre il secondo canale la componente sfasata di  $90^\circ$  rispetto alla funzione seno, cioè la componente in fase con la funzione coseno. Si assume che  $A$  sia l'ampiezza del segnale e  $\Phi$  la fase riferita alla funzione seno. Allora utilizzando le formule trigonometriche di addizione si ha

$$\begin{aligned} F(t) &= A \cdot \sin(2\pi f_{lock-in}t + \Phi) \\ &= A \cdot \sin(2\pi f_{lock-in}t) \cdot \cos \Phi \\ &\quad + A \cdot \cos(2\pi f_{lock-in}t) \cdot \sin \Phi \end{aligned} \quad (4.4)$$

Inserendo tale equazione nella (2.2) ed utilizzando un fattore 2 per ottenere la corretta ampiezza, con  $K^{0^\circ}(t) = 2 \sin(2\pi f_{lock-in}t)$  e  $K^{90^\circ}(t) = 2 \cos(2\pi f_{lock-in}t)$  si ottiene come risultato delle due correlazioni su un numero intero di periodi:

$$S^{0^\circ} = A \cos \Phi \quad e \quad S^{90^\circ} = A \sin \Phi \quad (4.5)$$

Lo stesso risultato è ottenibile se si utilizza il caso reale con  $n \geq 4$ , sostituendo all'integrale la sommatoria e utilizzando le seguenti funzioni peso:

$$K_j^{0^\circ} = 2 \sin\left(\frac{2\pi(j-1)}{n}\right) \quad K_j^{90^\circ} = 2 \cos\left(\frac{2\pi(j-1)}{n}\right) \quad (4.6)$$

Poiché la sommatoria è estesa da 1 a  $N$ ,  $j$  viene ridotto di un'unità, in tal modo il primo fattore peso risulta essere proprio quello coincidente con  $0^\circ$ .

A questo punto i segnali di ampiezza  $A$  e di fase  $\Phi$  possono essere facilmente calcolati dai due segnali  $S^{0^\circ}$  e  $S^{90^\circ}$ , infatti:

$$A = \sqrt{(S^{0^\circ})^2 + (S^{90^\circ})^2} \quad (4.7)$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{S^{90^\circ}}{S^{0^\circ}}\right) (-180^\circ \text{ se } S^{0^\circ} \text{ è negativo}) \quad (4.8)$$

in cui nella fase viene sottratto un valore pari a  $180^\circ$  solo nel caso in cui  $S^{0^\circ}$  sia negativo. Ciò rende la misura corretta rispetto alla fase poiché la funzione arcotangente si ripete due volte in un periodo di  $360^\circ$ .

Tuttavia, poiché nella termografia lock-in i segnali misurati rappresentano la temperatura alla superficie, la quale è ritardata rispetto all'eccitazione, anziché usare la funzione *cos*, che anticipa la funzione seno, si utilizza la funzione  $-\cos$ . In questo modo il segnale  $S^{90^\circ}$  non sarà più prevalentemente negativo e quindi le formule precedenti saranno riscritte come:

$$K_j^{0^\circ} = 2\sin\left(\frac{2\pi(j-1)}{n}\right) \quad K_j^{-90^\circ} = -2\cos\left(\frac{2\pi(j-1)}{n}\right) \quad (4.9)$$

E le formule di ampiezza e fase diventano

$$A = \sqrt{(S^{0^\circ})^2 + (S^{-90^\circ})^2} \quad (4.10)$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{-S^{-90^\circ}}{S^{0^\circ}}\right) (-180^\circ \text{ se } S^{0^\circ} \text{ è negativo}) \quad (4.11)$$

Detta  $f_s$  la frequenza di campionamento, per il teorema di Shannon deve valere che il numero di campionamenti per periodo sia maggiore di 2. Tuttavia, siccome si deve ricavare sia il segnale in fase che il segnale in contro-fase, sono necessari almeno 4 campionamenti. Perciò

$$f_{lock-in} \leq \frac{f_s}{4} \quad (4.12)$$

La frequenza di campionamento dipenderà direttamente dalle caratteristiche della telecamera IR utilizzata. Nel caso dell'ELITE DCG, strumento utilizzato in questo lavoro di tesi, utilizzando tutti i 512x640 pixel, la frequenza di

campionamento (o frame rate) è di 100 Hz, da cui segue una frequenza massima del lock-in  $f_{MAX\ lock-in} = 25\ Hz$ , mentre riducendo il numero di pixel a 128x128, si ottiene un frame rate di circa 810 Hz e quindi una frequenza massima del lock in di circa  $f_{MAX\ lock-in} = 200\ Hz$ .

Indipendentemente dal numero di pixel utilizzati, se si utilizza la massima frequenza del lock-in possibile, si utilizza la correlazione “a 4 punti”. In questo caso i coefficienti  $K_j$  sono i doppi valori di entrambe le funzioni sin e  $-\cos$ . Quindi

$$K_j^{0^\circ} = (0, 2, 0, -2) \text{ e } K_j^{-90^\circ} = (-2, 0, 2, 0)$$

Essendo il frame rate, cioè la  $f_s$ , fisso, minore è  $f_{lock-in}$  maggiore sarà il numero  $n$  di campionamenti e quindi maggiormente la sommatoria ( 4.3 ) tenderà all'integrale ( 4.1 ).

Come menzionato in precedenza, più la funzione di correlazione è simile al segnale finale più sarà preciso il segnale del lock-in. Quindi ci si aspetterebbe che la funzione che eccita il difetto sia una sinusoidale in modo da ottenere il massimo signal-to-noise ratio (SNR). Tuttavia nel caso specifico di applicazione della tecnica della lock-in thermography su dispositivi elettronici, non risulta conveniente applicare un segnale di eccitazione sinusoidale. Infatti i dispositivi vanno testati con tensioni ben definite, in modo da porsi in condizioni di funzionamento volute. Poiché le caratteristiche  $I - V$  dei dispositivi sono solitamente tutt'altro che lineari, i pin coinvolti vengono solitamente accesi e spenti con la frequenza  $f_{lock-in}$ , cioè viene applicata un'onda quadra.

Questa procedura che utilizza i fattori peso viene matematicamente chiamata “trasformata discreta di Fourier”. Come già menzionato, esiste anche una “trasformata veloce di Fourier”, che consente di analizzare tutte le componenti spettrali del segnale con un numero minore di calcoli, tuttavia non è possibile applicarla in real-time; è quindi necessario che tutti i dati della misurazione siano

salvati prima di poterli elaborare. Per questo motivo essa non viene solitamente utilizzata.

## 4.2 Segnale

Tutto ciò che è stato descritto nel precedente paragrafo può essere applicato a qualsiasi sistema che operi in lock-in; si analizza quindi ora il caso specifico della termografia.

Nella lock-in thermography il calore viene generato periodicamente in un dispositivo e viene rilevato il segnale di temperatura sulla superficie per ogni pixel della camera IR, il cui sensore ccd è sensibile nel range delle lunghezze d'onda di 3-5  $\mu\text{m}$ . Tale range tiene conto sia della radiazione di corpo nero (paragrafo 3.2), sia del comportamento della radiazione elettromagnetica nell'atmosfera. Infatti poiché essa propaga in aria prima di giungere alla lente e quindi al detector, ci possono essere fenomeni di scattering e assorbimento non voluti, specialmente dovuti a  $\text{CO}_2$  e vapore acqueo. Una "finestra" in cui si ha un minimo dell'assorbimento è proprio il range considerato.

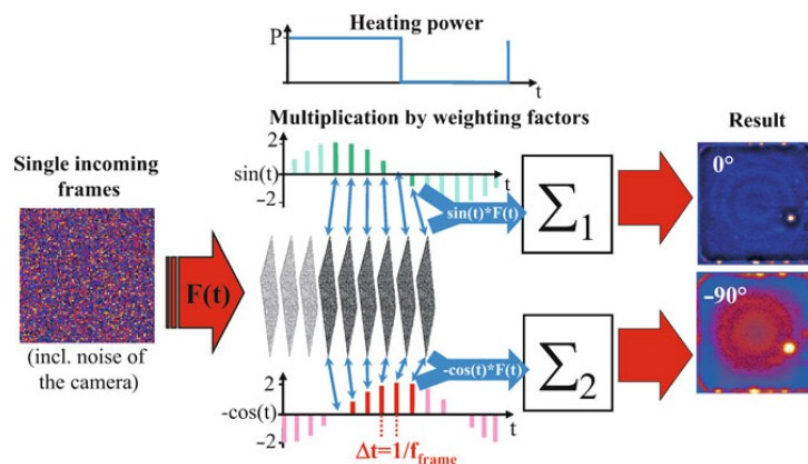


Figura 4.2: Correlazione del segnale lock-in [3]

I segnali vengono elaborati dal computer e vengono visualizzate le mappe di ampiezza, fase e la topografia del campione, per poter localizzare spazialmente le sorgenti di calore.

L'elaborazione a due canali (Figura 4.2) non può essere eseguita fisicamente usando l'elettronica analogica, ma viene utilizzato un calcolatore sufficientemente potente; infatti esso deve essere in grado di elaborare un array di dati notevole, in quanto la camera fornisce dati per ogni pixel ad ogni misurazione.

Aumentando il numero di periodi considerati, e quindi il tempo totale di misura, è possibile aumentare la sensibilità, come sarà mostrato nel paragrafo 4.4.

Come già menzionato, il segnale in uscita dalla camera è un segnale elettrico proporzionale al numero di fotoni incidenti sul detector. Tali fotoni sono emessi dalla superficie sulla quale è focalizzato il sistema. Infatti il calore, emesso dalla sorgente, si propaga tramite il fenomeno della conduzione fino alla superficie più esterna, nel caso di dispositivo a package chiuso. Il sistema sarà poi focalizzato su tale superficie, oltre la quale il calore si diffonderà per irraggiamento. La situazione è del tutto analoga nel caso di device aperto da retro: il calore dalla sorgente, ad esempio posta sulla Metal4, si propaga per conduzione fino alla Metal1 ed oltre la Metal1 esso si propagherà, oltre che per conduzione, anche per irraggiamento. Inoltre, essendo il silicio come visto nel paragrafo 2.1.1, trasparente nell'IR, il fuoco può essere posto sul primo livello di metal. Quindi approssimeremo che il calore si propagherà inizialmente solo per conduzione fino alla superficie su cui ci si focalizza, mentre successivamente tramite irraggiamento, il quale rappresenta il segnale che è analizzato dalla lock-in thermography. Non sarà quindi considerata la conduzione oltre la Metal1, dato che avviene in tempi maggiori rispetto all'irraggiamento che stiamo considerando. Si ipotizza inoltre che, poiché i fotoni si propagano con velocità

della luce, il tempo che i fotoni impiegano per giungere dalla superficie del dispositivo al sensore della camera sia nullo, cioè che ciò non contribuisca al segnale di fase. Il ritardo sarà solo dato quindi dalla conduzione.

Nel paragrafo precedente si è visto come viene correlato il segnale che arriva al detector e come da esso vengano calcolati contemporaneamente fase e ampiezza. Occorre ora fare un passo indietro per analizzare come avviene temporalmente il processo di acquisizione del segnale. Per fare ciò è necessario introdurre il concetto di tempo di integrazione  $t_{int}$ , ossia il tempo in cui il segnale al detector viene integrato. Tale valore deve essere molto minore di  $1/f_{sampling}$ , come è schematizzato nella Figura 4.3. In tale esempio, che rappresenta una modalità di funzionamento usata, si può notare cosa avvenga nel caso di  $f_{sampling} = 100 \text{ Hz}$  e  $f_{lock-in} = 25 \text{ Hz}$ , cioè nel caso limite di 4 campionamenti per ogni periodo del segnale di lock-in.

Così come l'esempio riportato, il tempo di integrazione viene solitamente mantenuto fisso a 0.8 ms.

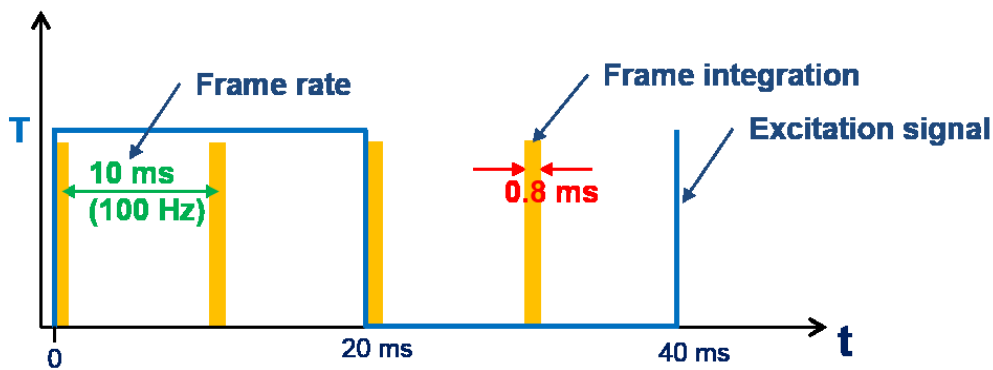


Figura 4.3: Schema temporale nel caso full frame e freq del lock-in pari a 25Hz

### 4.2.1 Calibrazione

La calibrazione dello strumento risulta essere necessaria quando sono quantitativamente interessanti i valori di ampiezza forniti dallo strumento. In questo lavoro di tesi, avendo considerato quantitativamente solo il segnale di fase, non è mai risultato necessario eseguire la calibrazione del sensore. Nel caso fosse necessario calibrare lo strumento, la procedura prevede, per ogni lente, l'acquisizione di due diverse immagini a temperatura nota: un foglio bianco di carta (22°C) e il palmo di una mano (33°C). Tale procedura permette di calibrare il sistema tramite l'emissività diversa dei due corpi.

## 4.3 Influenza del calore non armonico

Come menzionato nel paragrafo 4.1, l'introduzione di un segnale di tensione sinusoidale porterebbe ad effetti non voluti nei device a causa delle caratteristiche I-V fortemente non lineari. Per questo motivo viene applicata un'onda quadra di tensione al dispositivo con duty cycle del 50%. Risulta necessario quindi analizzare quali siano gli effetti dell'introduzione di calore non armonico rispetto al caso di calore armonico trattato nel paragrafo 3.1.1.

La prima considerazione necessaria è che la diffusione del calore è un processo lineare, purché si considerino i parametri termici non dipendenti dalla temperatura, approssimazione più che valida dato l'ordine di grandezza delle variazioni delle temperature all'interno del dispositivo. Quindi la soluzione dell'equazione di diffusione per diverse condizioni al contorno può essere calcolata come sovrapposizione lineare delle diverse soluzioni. Questo vale dunque per le differenti componenti spettrali che compongono l'onda quadra di frequenza  $f = \frac{\omega}{2\pi}$  e potenza  $P_0$ , che quindi durante un impulso può essere scomposta in una componente continua e una non continua:

$$P(t) = \frac{P_0}{2} + P_0 \left( \frac{2}{\pi} \sin \omega t + \frac{2}{3\pi} \sin 3\omega t + \frac{2}{5\pi} \sin 5\omega t + \dots \right) \quad (4.13)$$

Appaiono solo i termini dispari dato che l'onda quadra è una funzione simmetrica.

Si consideri inizialmente la sola componente continua: essa è responsabile del pre-heating, ossia il riscaldamento iniziale del dispositivo. Ciò significa che i primi periodi di eccitazione serviranno al dispositivo per portarsi ad una temperatura di quasi-equilibrio. Una volta raggiunta tale condizione, la temperatura della superficie del dispositivo inizierà ad oscillare alla frequenza del lock-in nell'intorno della temperatura di quasi-equilibrio. Questo effetto di pre-heating o pre-riscaldamento verrà mostrato anche nelle simulazioni tramite simulazioni ad elementi finiti nel capitolo 5. Il pre-heating si può tuttavia non considerare nel caso sperimentale poiché le misure che vengono solitamente effettuate raccolgono dati di un numero di periodi molto maggiore rispetto a quelli necessari al dispositivo per raggiungere la temperatura di quasi-equilibrio.

Considerando solo le componenti non continue ed utilizzando la correlazione sin/cos si ha teoricamente, andando a selezionare la sola frequenza fondamentale, una completa soppressione delle armoniche maggiori, dato che derivano da termini del tipo:

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} \sin \omega t \sin(n\omega t + \varphi) dt \\ = \int_0^{2\pi} \cos \omega t \cos(n\omega t + \varphi) dt = 0 \quad (n = 3, 5, \dots) \end{aligned} \quad (4.14)$$

Quindi maggiore è il numero di campionamenti per ogni periodo, maggiore sarà la soppressione delle armoniche superiori, e minori saranno gli errori sull'ampiezza e sulla fase.



#### 4.4 Analisi del rumore

Il segnale descritto è ovviamente immerso nel rumore, per questo motivo in questo paragrafo saranno analizzate quali sono le sorgenti di rumore e come è possibile ottenere un migliore signal-to-noise ratio (SNR).

Nel sistema utilizzato le sorgenti di rumore sono quattro: rumore termico, rumore di digitalizzazione, flicker noise o rumore 1/f, e dark noise. Il rumore termico è causato dall'agitazione termica dei portatori di carica ed è sempre presente nei dispositivi elettronici. Il rumore di digitalizzazione deriva invece dal convertitore analogico-digitale del sensore infrarosso della camera, mentre il dark noise dalla continua generazione e ricombinazione random di coppie elettrone-lacuna, presente soprattutto nei dispositivi fotosensibili. Infine è presente il rumore 1/f o flicker noise; il flicker noise è l'unica componente del rumore totale che dipende dalla frequenza, le altre infatti sono indipendenti da questo parametro.

È quindi possibile analizzare le componenti indipendenti dalla frequenza, che possono essere modellizzate come rumore bianco. Per l'analisi del rumore bianco in sistemi IR è necessario introdurre un parametro chiamato noise equivalent temperature difference (NETD), definito mediante la seguente formula:

$$NETD = \frac{c}{k} \sqrt{\sum_{i=1}^k (F_i - \bar{F})^2} = \frac{c}{k} \sqrt{\sum_{i=1}^k (F_i^N)^2} = c\sigma_{cam} \quad (4.15)$$

cioè è la media quadratica delle deviazioni tra i vari valori del rumore misurati dal pixel  $F_i$  ed il valore medio misurato nelle successive  $k$  misurazioni ( $k \gg 1$ ). Gli altri elementi presenti nell'equazione (4.15) sono:  $c$  fattore di scala della camera (in  $mK/digit$ ),  $F_i^N$  rumore della cifra  $i$ -esima riferito al suo valor medio,  $\sigma_{cam}$  deviazione standard del rumore della camera. Essendo il segnale della camera in  $mK$ , il fattore di scala va posto a 1.

Poiché ogni pixel della camera avrà lo stesso NETD, misurare il rumore per ogni pixel in più misurazioni equivale ad analizzare  $n$  pixel di un'immagine omogenea ad una certa temperatura costante.

Utilizzando la correlazione sin/-cos, come già trattato nel paragrafo 4.1, le immagini  $S^{0^\circ}$  e  $S^{90^\circ}$  sono calcolate a partire dai valori misurati  $F_{i,j}(x, y)$  come

$$S^{0^\circ} = \frac{2c}{nN} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n \sin\left(\frac{2\pi(j-1)}{n}\right) F_{i,j}(x, y) \quad (4.16)$$

$$S^{-90^\circ} = -\frac{2c}{nN} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n \cos\left(\frac{2\pi(j-1)}{n}\right) F_{i,j}(x, y) \quad (4.17)$$

con  $n$  numero di frames per periodo di lock-in e  $N$  numero di periodi di lock-in mediati.

Il segnale misurato,  $F_{i,j}(x, y)$ , può idealmente essere diviso in tre componenti: una componente statica (topografia)  $F^{topo}(x, y)$  che viene assunta essere senza rumore ed uguale per ogni immagine, una componente che rappresenta la modulazione della temperatura  $\Delta F_j(x, y)$ , che è il segnale che noi vorremmo estrarre, anch'esso assunto senza rumore e ripetuto per ogni periodo. Infine la terza componente è rappresentata dal rumore statistico  $F_{i,j}^N(x, y)$ . Quindi si può scrivere

$$F_{i,j}(x, y) = F^{topo}(x, y) + \Delta F_j(x, y) + F_{i,j}^N(x, y) \quad (4.18)$$

Assumendo di essere già nello stato quasi-stazionario, quindi ignorando la fase di riscaldamento iniziale, sostituendo l'ultima equazione nelle equazioni (4.16) e (4.17) si ha

$$S^{0^\circ}(x, y) = 0 + c\Delta F^{0^\circ}(x, y) + cN^{0^\circ}(x, y) \quad (4.19)$$

$$S^{-90^\circ}(x, y) = 0 + c\Delta F^{-90^\circ}(x, y) + cN^{-90^\circ}(x, y) \quad (4.20)$$

Il primo termine rappresenta la topografia ed esso diventa nullo in quanto la somma dei fattori peso diventa esattamente zero. Questa tecnica di correlazione sincrona consente quindi una perfetta eliminazione della topografia.  $\Delta F^{0^\circ}(x, y)$  e  $\Delta F^{-90^\circ}(x, y)$  rappresentano i segnali di modulazione della temperatura rispettivamente in fase e controfase che si vogliono misurare. Infine  $N^{0^\circ}(x, y)$  e  $N^{-90^\circ}(x, y)$  rappresentano il rumore della componente in fase e controfase della misura corrente:

$$N^{0^\circ} = \frac{2c}{nN} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n \sin\left(\frac{2\pi(j-1)}{n}\right) F_{i,j}^N(x, y) \quad (4.21)$$

$$N^{-90^\circ} = -\frac{2c}{nN} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n \cos\left(\frac{2\pi(j-1)}{n}\right) F_{i,j}^N(x, y) \quad (4.22)$$

Poiché i valori  $F_{i,j}^N(x, y)$  sono distribuiti statisticamente, anche  $N^{0^\circ}(x, y)$  e  $N^{-90^\circ}(x, y)$  saranno distribuiti statisticamente, quindi non è possibile valutare i valori del rumore. Tuttavia poiché è nota la deviazione standard  $\sigma_{cam}$ , è possibile ottenere la deviazione standard di  $N^{0^\circ}$  e  $N^{-90^\circ}$  rispetto ad un numero  $k$  di posizioni differenti. Chiamate rispettivamente  $\sigma_{sys}^{0^\circ}$  e  $\sigma_{sys}^{-90^\circ}$  le deviazioni standard di  $N^{0^\circ}$  e  $N^{-90^\circ}$ , dato che  $F_{i,j}^N$  è normalmente distribuita con valor medio nullo e con deviazione standard  $\sigma_{cam}$ , e che la varianza di una somma di grandezze statistiche equivale alla somma delle varianze degli elementi della somma, risulta:

$$\frac{1}{k} \sum_{l=1}^k (N_l^{0^\circ})^2 = (\sigma_{sys}^{0^\circ})^2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n \left( \frac{2}{nN} \sin\left(\frac{2\pi(j-1)}{n}\right) \sigma_{cam} \right)^2 = \frac{2\sigma_{cam}^2}{nN}$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{k} \sum_{l=1}^k (N_l^{-90^\circ})^2 &= (\sigma_{sys}^{-90^\circ})^2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n \left( -\frac{2}{nN} \sin\left(\frac{2\pi(j-1)}{n}\right) \sigma_{cam} \right)^2 \\ &= \frac{2\sigma_{cam}^2}{nN} \end{aligned}$$

Dove l'ultima identità vale poiché

$$\sum_{j=1}^n \sin^2\left(\frac{2\pi(j-1)}{n}\right) = \sum_{j=1}^n \cos^2\left(\frac{2\pi(j-1)}{n}\right) = \frac{n}{2} \quad (4.23)$$

Che vale per  $n \geq 4$  poiché il valor medio sia di  $\sin^2$  che di  $\cos^2$  vale  $\frac{1}{2}$ . Quindi le deviazioni standard di  $0^\circ$  e  $-90^\circ$  valgono dopo la correlazione:

$$\sigma_{sys}^{0^\circ, -90^\circ} = \sigma_{sys} = \frac{\sqrt{2}NETD}{c\sqrt{nN}} \quad (4.24)$$

Per poter misurare il livello di rumore nel sistema, si può acquisire l'immagine stazionaria di un corpo ad una certa temperatura in modalità lock-in, in questo modo l'immagine sarà dominata dal rumore. Quindi l'ampiezza media del rumore in una regione formata da  $X \cdot Y$  pixel, sarà data da

$$\begin{aligned} \langle A_{noise} \rangle &= \frac{c}{XY} \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y \sqrt{(N^{0^\circ}(x, y))^2 + (N^{-90^\circ}(x, y))^2} \\ &= \sqrt{2}c \cdot \sigma_{sys} = \frac{2}{\sqrt{nN}} NETD \end{aligned} \quad (4.25)$$

Essendo il numero di frames della correlazione dipendente da  $f_{frame}$  e dal tempo di acquisizione  $t_{acq}$  secondo l'equazione

$$Nn = f_{frame} \cdot t_{acq} \quad (4.26)$$

L'equazione precedente può essere ridotta a:

$$\langle A_{noise} \rangle = \frac{2}{\sqrt{f_{frame} t_{acq}}} NETD \quad (4.27)$$

Nel caso dell'ELITE DCG, la camera InSb raffreddata a temperature criogeniche di circa  $77\text{ K}$  ha un NETD di circa  $20\text{ mK}$ , molto alta rispetto alle variazioni di temperatura analizzate, che sono dell'ordine di qualche  $\text{mK}$ . Usando la modalità “full frame”, quindi acquisendo un numero di pixel di  $640 \times 512$ , si ha  $f_{frame} = 100\text{ Hz}$ . Acquisendo un immagine in modalità lock-in per  $30\text{ s}$  si ha  $\langle A_{noise} \rangle = 0.74\text{ mK}$  che si riduce a  $\langle A_{noise} \rangle = 0.16\text{ mK}$  in acquisizioni di 10 minuti. Questo vale solo se si considera la sola componente del rumore non dipendente dalla frequenza. Maggiore sarà il tempo di misura e minore sarà l'ampiezza dell'errore, come rappresentato in Figura 4.4. Nelle misure effettuate per questo lavoro di tesi si è notato che i dati risultavano sufficientemente accurati per tempi di misura tra i 3 e i 10 minuti.

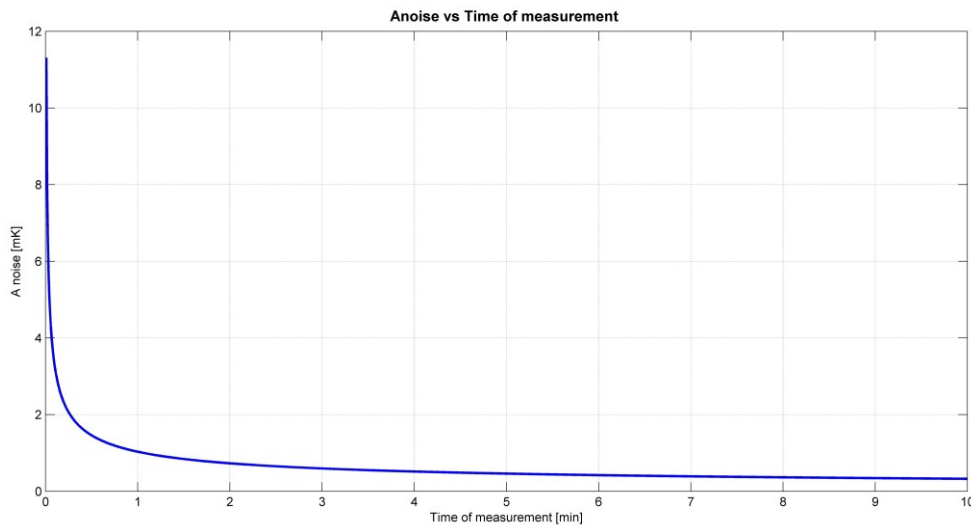


Figura 4.4: Ampiezza del rumore [mK] in funzione del tempo di misura

Finora si è considerato solo il rumore indipendente dalla frequenza. Va invece considerato anche il flicker noise, o rumore  $1/f$ , che risulta essere dipendente dalla frequenza, secondo la dipendenza  $1/f$ . Nowroz e al. [17] hanno analizzato anche questa componente per un sistema simile ed è stata trovata una frequenza d'angolo

compresa tra 2 e 3 Hz (Figura 4.5), oltre la quale il flicker noise non risulta più predominante e può essere trascurato. Dalla Figura 4.5 si può notare inoltre che a frequenze troppo basse non si è possibile ottenere un buon SNR.

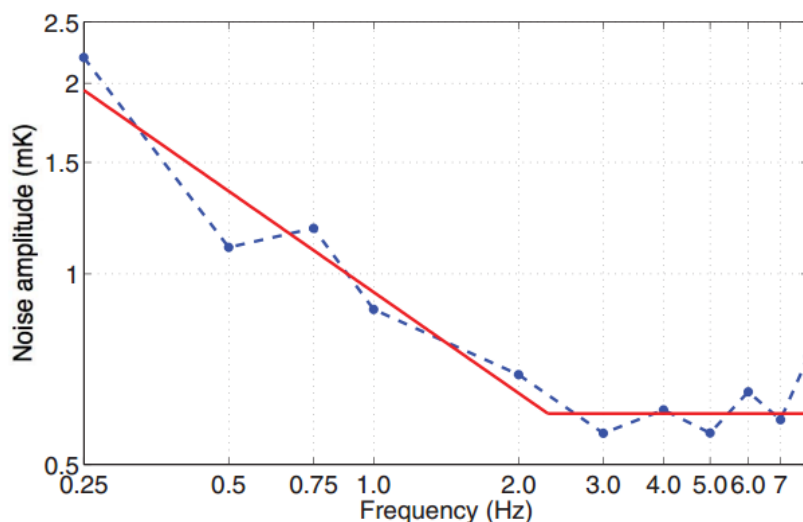


Figura 4.5: Ampiezza del rumore in funzione della frequenza. In blu dati sperimentali, in rosso il fitting [17]

Nonostante il sistema analizzato in [17] sia leggermente diverso, il sistema analogo a quello utilizzato in questo lavoro di tesi studiato in [3] risulta avere sempre una frequenza d'angolo attorno a 2-4 Hz.

## 4.5 Emissività

Come già menzionato nel paragrafo 3.2, ogni corpo ad una temperatura  $T$  emette radiazione elettromagnetica il cui spettro è descritto dall'equazione di Planck. In generale, quindi, non essendo un generico materiale un corpo nero perfetto, il segnale in arrivo sul detector è influenzato dall'emissività  $\varepsilon$  dei materiali. In particolare, tale segnale è il prodotto dello spettro di corpo nero per l'emissività  $\varepsilon$ , la quale coincide con l'assorbanza ed è sempre minore di 1, ossia esso è il cosiddetto "spettro di corpo grigio". L'emissività dipende fortemente dal tipo di

materiale: ad esempio i metalli, e così anche i livelli di metal presenti nei dispositivi, hanno emissività molto bassa, nel range di 1 – 5%, e quindi appaiono scuri nelle immagini IR, anche a device spento. Questo fenomeno è chiamato “contrasto di emissione”. Per questo motivo in una singola immagine (di topografia) non è possibile distinguere deboli sorgenti di calore poiché il contrasto di emissione è maggiore del contrasto termico. Si noti che la scala di colore utilizzata per la topografia nelle misurazioni tramite DCG ELITE, lo strumento utilizzato per questo lavoro di tesi, è la scala di grigi invertita. Per questo motivo le metallizzazioni, che devono apparire a temperatura minore rispetto ad esempio ad un ossido, appaiono di colore tendente al bianco, coerentemente con quanto previsto dalla teoria del corpo grigio (Figura 4.6). Uno dei grandi vantaggi della termografia lock-in è la soppressione della componente dell'emissività nelle immagini di fase. Il motivo matematico risiede nel calcolo del segnale di fase: essendo esso un quoziente tra il segnale fuori fase ( $S^{-90^\circ}$ ) ed il segnale in fase ( $S^{0^\circ}$ ), ed essendo entrambi i segnali dipendenti linearmente dall'emissività, risulta che tale effetto viene compensato.



Figura 4.6: Dettaglio di immagine di topografia di dispositivo aperto da frontside

Tuttavia l'emissività gioca un ruolo importante nel segnale di ampiezza, dato che in questo caso essa non viene soppressa. Una possibile soluzione, allora, è quella di coprire la superficie del dispositivo con una film sottile che sia "nero" nella regione delle lunghezze d'onda di interesse, cioè  $3 - 5 \mu m$ . Tale film dovrebbe ovviamente essere isolante, per non mettere in corto parti del circuito e quindi modificare temporaneamente, o peggio ancora definitivamente, il comportamento del dispositivo stesso. Questo metodo risolve il problema dell'emissività nel segnale di ampiezza ma degrada la risoluzione spaziale se il layer depositato ha spessore maggiore di circa  $10 \mu m$  [9]. Per questo lavoro di tesi tale procedimento non è stato applicato essendo stato considerato principalmente il segnale di fase.

#### **4.6 Signal-to-noise ratio**

È possibile analizzare come varia il rapporto segnale rumore in base alla frequenza del lock-in. Questo permette quindi di valutare e scegliere quali saranno le condizioni ottimali di utilizzo dello strumento. Quello che risulta è che aumentando la frequenza, l'ampiezza del rumore resterà circa costante (non essendo più rilevante la componente  $1/f$  ma solo la componente del rumore bianco) mentre il segnale diminuirà. Queste conclusioni si possono trarre utilizzando il seguente metodo. Utilizzando l'espressione del segnale, nelle approssimazioni descritte in precedenza nel paragrafo 3.1.2 e utilizzando l'espressione del rumore calcolata sperimentalmente [7], è possibile trovare un andamento del SNR dello strumento.



Il risultato teorico di ciò è rappresentato in Figura 4.7, in cui si può notare la presenza di un massimo in corrispondenza della frequenza d'angolo, cioè tra i 2 e i 3 Hz. Questo andamento è stato inoltre verificato sperimentalmente [7]. Per questo motivo in questo lavoro di tesi sarà selezionata una frequenza in tale intervallo quando ciò sarà possibile e conveniente, come sarà presentato successivamente nell'analisi a bassa frequenza.

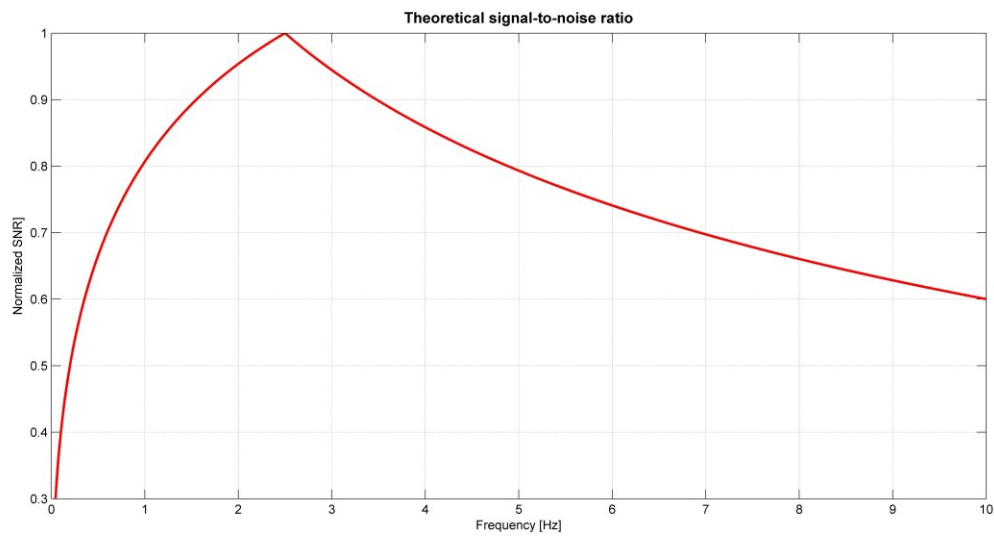


Figura 4.7: Andamento teorico del SNR in funzione della frequenza



## 5 Modello

Per poter valutare l'approssimazione di onda piana e stimare quello che succede in prossimità del bordo, è necessario confrontare i valori ottenuti con tale approssimazione con ciò che si ottiene usando un software di simulazioni fisiche tramite il metodo degli elementi finiti. Tale tecnica di risoluzione numerica consente di trovare soluzioni approssimate ai problemi descritti da equazioni differenziali alle derivate parziali, riducendo queste ultime, grazie ad opportune ipotesi ed approssimazioni, ad un sistema di equazioni algebriche.

I passi per la creazione del modello includono la creazione della geometria e la corrispettiva definizione della mesh, la scelta del problema fisico o dei problemi fisici, e quindi la scelta delle equazioni differenziali che rappresentano i problemi da risolvere, le condizioni al contorno e la scelta del risolutore. Il risolutore permette di distinguere studi stazionari da studi transitori e, nel caso di transitorio, la risoluzione temporale richiesta.

Una volta creato il modello e ottimizzati i valori delle condizioni al contorno, sono state fatte diverse simulazioni. Lo scopo è stato quello, quindi, di valutare il ritardo tra l'impulso di eccitazione e l'arrivo di tale impulso di calore alla superficie. Perciò dalla posizione dei picchi è stata calcolata la fase del ritardo rispetto all'impulso di eccitazione in funzione della profondità della sorgente di calore, cioè del difetto.

## 5.1 Software

Il software utilizzato è COMSOL Multiphysics 5.0. Tale software è composto da diversi moduli che modellano ciascuno un fenomeno fisico e contengono già le equazioni e le variabili necessarie per descriverlo. In questo modo non è quindi necessario inserire e definire le equazioni ed i parametri necessari, in quanto sono parzialmente già pre-inseriti una volta selezionato il modulo o i moduli necessari allo studio. E' inoltre possibile modificare le equazioni predefinite o aggiungerne altre nel caso in cui si debba risolvere un problema che non corrisponde perfettamente ad un modulo presente nella libreria. Questo garantisce una buona flessibilità e consente di risolvere problemi diversificati e di modellare fenomeni di maggiore complessità. Per le simulazioni di interesse, solo un modulo è stato utilizzato cioè quello del "heat transfer", che permette di considerare in contemporanea convezione, irraggiamento e conduzione. Tuttavia sono stati disabilitati i sottomoduli di convezione ed irraggiamento, lasciando quindi attiva la sola conduzione. Nel software sono utilizzabili diversi tipi di solutori numerici e iterativi, transitori o stazionari ed è possibile interfacciarsi con altri software per l'analisi dei risultati. Per questo studio è stato utilizzato un risolutore transitorio con risoluzione temporale di 1 ms e uno sweep parametrico che, come illustrato successivamente, consente far variare uno o più parametri ad ogni simulazione. Infine, per poter analizzare i dati in uscita da COMSOL Multiphysics, per ogni simulazione sono stati scritti in automatico i dati di interesse su un file .dat, e tramite il software MATLAB essi sono stati analizzati e filtrati.

## 5.2 Geometria e Mesh

Essendo interessati ad indagare esclusivamente il trasferimento di calore nella sola direzione perpendicolare del dispositivo, è stata considerata solo la sezione e quindi il dispositivo è stato approssimato ad un rettangolo 2D. Tale rettangolo è

stato suddiviso in due strati, simulando quindi il caso di un'analisi di un dispositivo a package chiuso. Le dimensioni utilizzate rispecchiano i valori di una cross section di un dispositivo reale, cioè altezza totale di  $700 \mu\text{m}$  e larghezza di  $2000 \mu\text{m}$  (Figura 5.1), mentre i parametri del materiale utilizzati sono stati presi dalla letteratura [11, 23] e sono riportati in Tabella 1

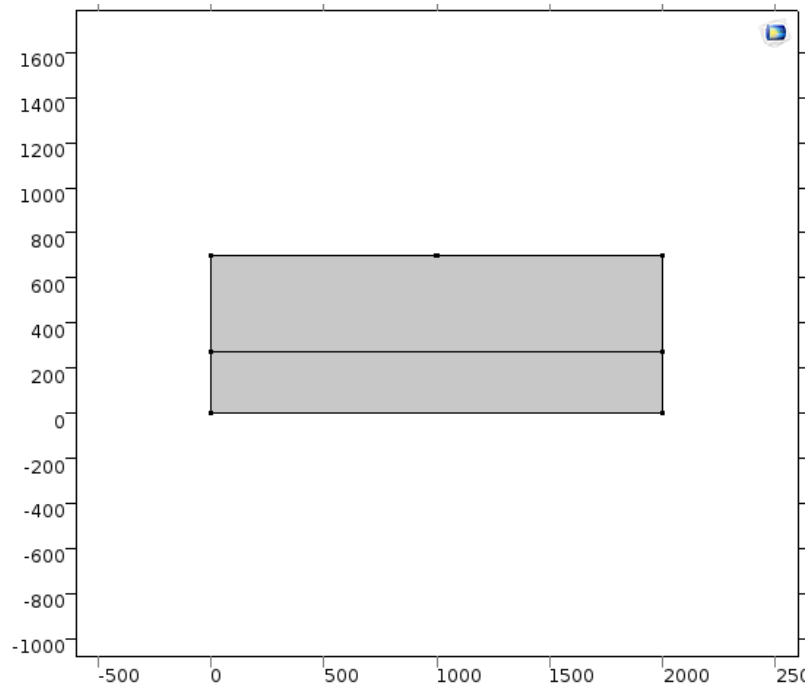


Figura 5.1: Geometria del modello con COMSOL Multiphysics

	<b>Thermal conductivity</b> $\lambda$ [ $W/m \cdot K$ ]	<b>Specific heat</b> $c_p$ [ $J/kg \cdot K$ ]	<b>Density</b> $\rho$ [ $kg/m^3$ ]
<b>Silicon</b>	149	700	2330
<b>Molding Compound</b>	0.6	1070	1810

Tabella 1: parametri termici utilizzati nelle simulazioni [11,23]

Il difetto è stato approssimato ad una circonferenza di raggio  $0.2 \mu\text{m}$  ed è stato posto nel dispositivo con una coordinata x pari a  $1000 \mu\text{m}$ , cioè a metà larghezza del dispositivo. È stata invece creata una variabile specifica, chiamata “depth”,

per la coordinata  $y$  del centro del difetto. Tale coordinata è stata quindi fatta variare a step fissi di  $20 \mu m$  tramite il modulo di sweep parametrico, che permette in automatico di far partire la simulazione per ogni step, deciso dall'utente, del parametro "depth".

Per poter passare dall'equazione differenziale alle derivate parziali ad un sistema di equazioni algebriche è necessario passare dal continuo, e quindi da un insieme infinito di punti, ad un sistema discreto, cioè con un numero finito di punti. Questa discretizzazione viene realizzata modellando la geometria del corpo con un insieme di elementi di forma e dimensioni stabilite; l'insieme di questi elementi viene chiamato mesh. Ognuno di questi elementi possiede un certo numero di punti, chiamati nodi, sui quali vengono applicate le equazioni del modello matematico. In questo modo il problema può essere definito mediante un sistema di equazioni con un numero finito di incognite che dipende dal numero di questi nodi. Il metodo agli elementi finiti permette di determinare una soluzione del problema matematico approssimata mediante delle funzioni polinomiali (funzioni di forma) che dipendono dal tipo di elementi utilizzati per la mesh. Il grado del polinomio di queste funzioni dipende quindi dal numero di nodi che individuano l'elemento finito. Gli elementi che hanno i nodi solo sui vertici della geometria sono chiamati elementi lineari, poiché, avendo solo due nodi su ogni lato, il polinomio della funzione di forma è di primo grado, cioè è una funzione lineare. Nello studio in analisi è stato scelto proprio questo tipo di mesh, cioè la mesh triangolare con nodi nei vertici. Automaticamente il software varia la concentrazione dei triangoli in base alla geometria del problema e ai parametri impostati dall'utente. In particolare è stato scelto di utilizzare una mesh molto fitta, come si può vedere dalla Figura 5.2. Tale mesh risulta quindi caratterizzata da 26104 elementi con un numero di gradi di libertà di 41015. Questi sono numeri piuttosto grandi dato che il tempo necessario per ogni simulazione dipende proprio da tali parametri, ma essendo la geometria semplice ed essendo necessaria

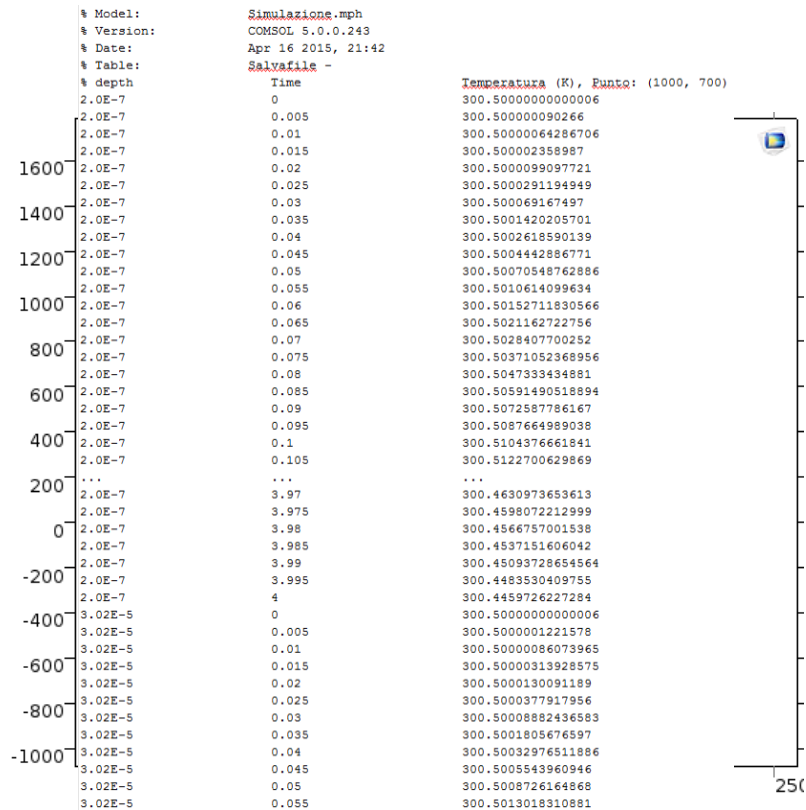


Figura 5.2: Geometria con mesh visualizzata  
 Figura 5.3: Estratto di un file .dat generato da COMSOL Multiphysics

una buona accuratezza per lo studio del ritardo e quindi dello sfasamento, si è mantenuta tale configurazione della mesh.

Infine è stata posta una sonda di temperatura sulla superficie del dispositivo, con uguale coordinata x del difetto. Con tale sonda verrà quindi considerato l'andamento della temperatura sul punto prescelto in funzione del tempo. Questo è il dato scritto in output dal software in un file .dat, in un formato simile a quello rappresentato in Figura 5.3.

### 5.3 Equazione e condizioni al contorno

L'equazione che il software COMSOL Multiphysics risolve approssimandola è l'equazione differenziale del calore ( 3.4 ) già presentata al paragrafo 3.1.1.

La sola definizione dell'equazione non è sufficiente per la risoluzione numerica della stessa, occorre infatti assegnare le condizioni al contorno del modello affinché essa risulti approssimabile e risolvibile.

Le condizioni che sono state imposte simulano il comportamento del dispositivo durante il funzionamento della termografia lock-in, per questo motivo i valori delle condizioni al contorno sono stati scelti dopo un'ottimizzazione rispetto alla fase di pre-heating o pre-riscaldamento, cioè per far sì che il dispositivo fosse già a tempo zero in condizioni di quasi-equilibrio. Infatti, come trattato nel paragrafo 4.3, durante i primi periodi del segnale di input, il dispositivo si riscalda fino ad arrivare ad una situazione di quasi-equilibrio, in cui la temperatura inizia poi ad

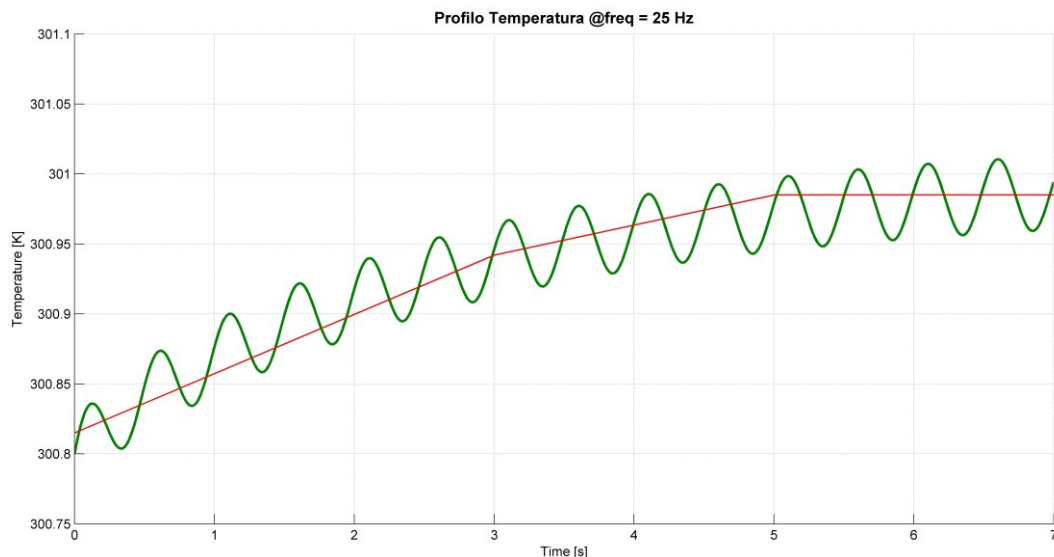


Figura 5.4: Simulazione del pre-heating

oscillare attorno ad una temperatura  $T_{eq}$ . Tale fase di pre-riscaldamento è visibile in Figura 5.4. I parametri sono quindi stati ottimizzati per minimizzare tale effetto.



Nonostante la scelta opportuna dei parametri, rimane tuttavia sempre un minimo tempo di totale assestamento e per questo motivo, per il calcolo della fase, sono stati tenuti in considerazione solo i picchi dopo i quali è stato raggiunto il regime di quasi-equilibrio.

La temperatura iniziale dell'intero modello è quindi stata posta a 300.5 K, mentre la temperatura della circonferenza che rappresenta il difetto è stata fatta oscillare tra 301 e 300 K ad una frequenza di 2 Hz, secondo l'equazione al contorno:

$$T(t) = 0,5 \cdot \text{square}(2\pi t \cdot 2) + 300,5 [K] \quad (5.1)$$

Dove square rappresenta un'onda quadra con derivata seconda continua, per semplificare il lavoro al risolutore del software.

Le simulazioni effettuate con tale condizione al contorno permettono di visualizzare come la forma d'onda vari in funzione della profondità del difetto, come verrà discusso più avanti in questo capitolo.

Tuttavia per il calcolo del ritardo, e quindi della fase, risulta complesso analizzare tali curve. Per questo motivo, è stato scelto di utilizzare come forma d'onda della condizione al contorno del difetto, la funzione seno. Quindi la nuova condizione al contorno risulta essere:

$$T(t) = 0,5 \cdot \sin(2\pi t \cdot 2) + 300,5 [K] \quad (5.2)$$

## 5.4 Analisi del modello

Come citato nel paragrafo precedente, utilizzando la condizione al contorno (5.1) per il difetto, è possibile analizzare come cambia la forma d'onda della temperatura sulla superficie del dispositivo, cioè il segnale in uscita fornito dalla sonda, al variare del parametro "depth", cioè la profondità del difetto. La Figura

5.5 mostra proprio questa situazione, in cui la profondità del difetto è stata espressa in funzione del parametro  $\mu$ , cioè della lunghezza di diffusione termica.

Come si può vedere dalla figura, aumentando la profondità della sorgente di calore, espressa in funzione del parametro  $\mu$ , l'onda quadra tende sempre più ad un'onda sinusoidale. In ogni caso l'informazione del ritardo è contenuta nella sola prima armonica, mentre dalle armoniche superiori si potrebbero ottenere altre informazioni, come ad esempio la conducibilità termica del materiale a partire dalla terza armonica [3].

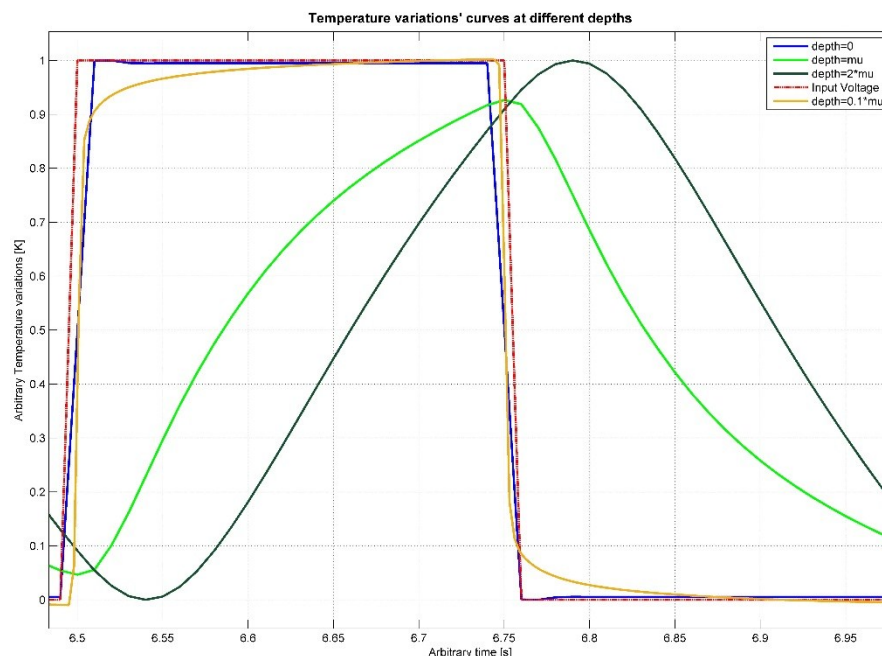


Figura 5.5: Variazione della temperatura sulla sonda normalizzata in un periodo

Utilizzando invece la condizione al contorno sinusoidale per il difetto ( 5.2 ), risulta più facile analizzare i dati e trovare quindi lo sfasamento tra la condizione al contorno e la temperatura sulla sonda. Per il calcolo della fase è stato considerato il tempo a cui si trova il massimo della curva, il cui resto della divisione con il periodo è stato moltiplicato per la frequenza del lock-in e per  $360^\circ$ . Questo procedimento, eseguito con MATLAB, il cui script è riportato in

Appendice, è stato ripetuto per più picchi ed è stato calcolato il valor medio e la deviazione standard.

Le curve corrispondenti ad alcune profondità sono rappresentate in Figura 5.. I parametri temporali imposti al risolutore ed utilizzati per queste simulazioni sono i seguenti: risoluzione temporale di 1 ms da 0 a 4 secondi. Come già menzionato in precedenza, le simulazioni sono state effettuate dopo aver ottimizzato i parametri per porsi in condizione di quasi-equilibrio.

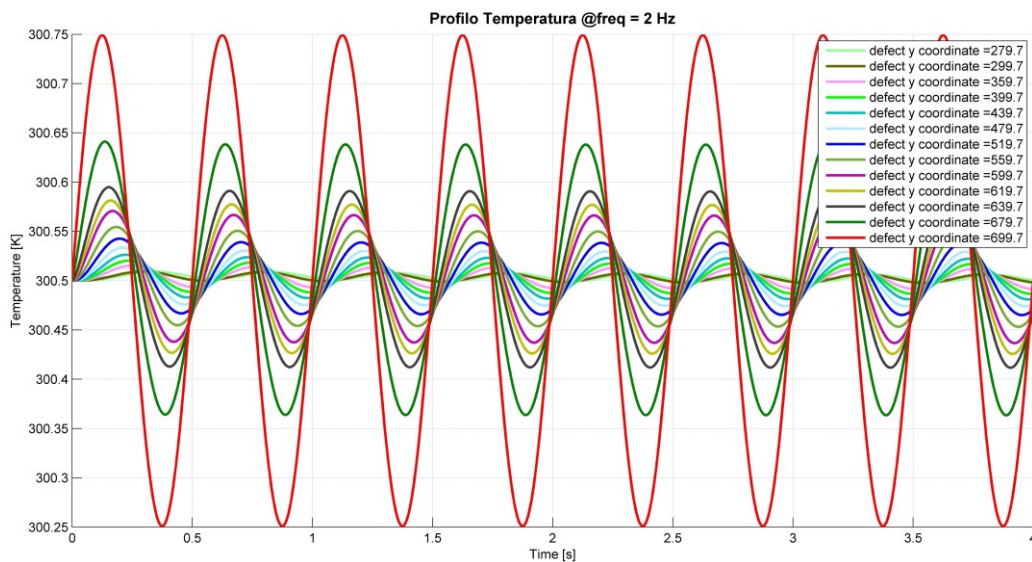


Figura 5.6: Variazione di temperatura sulla sonda per diverse profondità della sorgente di calore

Il risultato dello script di MATLAB che prende in ingresso il file .dat è un grafico dello sfasamento in gradi rispetto alla profondità del difetto confrontato con l'approssimazione di onda piana termica che si propaga nel mezzo utilizzando gli stessi parametri dei materiali usati in COMSOL, come in Figura 5.7.

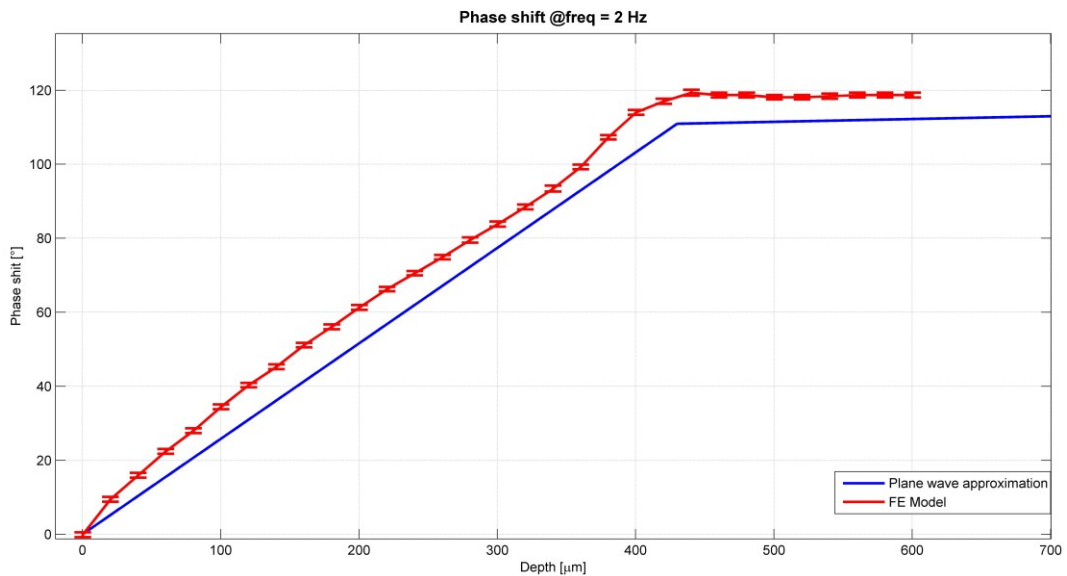


Figura 5.7: Sfasamento in funzione della profondità del difetto

Un'ulteriore simulazione permette di evidenziare il risultato della simulazione tramite COMSOL Multiphysics, per piccole distanze del difetto dalla superficie. Infatti ci si aspetta che il comportamento vicino ai bordi sia diverso rispetto al caso della sorgente di calore localizzata in profondità. Nella simulazione seguente il difetto è stato fatto traslare solo in prossimità della superficie, in particolare tra

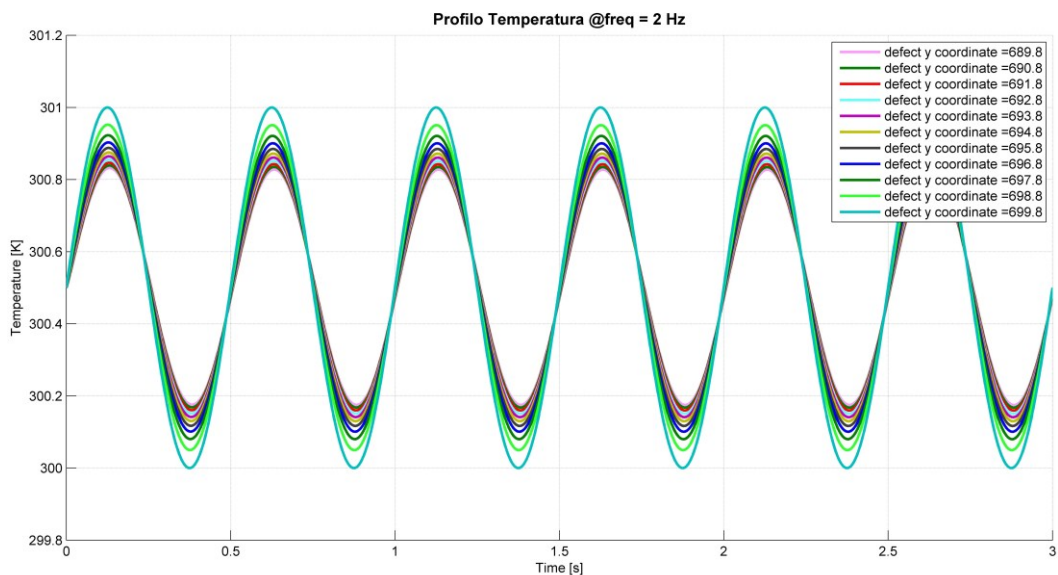


Figura 5.6: Variazione della temperatura per piccoli valori della profondità della sorgente

0.2 e 10  $\mu\text{m}$  a passo di 1  $\mu\text{m}$ . I parametri temporali, cioè step e tempo massimo sono rimasti invariati. I profili di temperatura della sonda sono riportati in Figura 5.8.

La fase risultante calcolata con MATLAB è rappresentata in Figura 5.9.

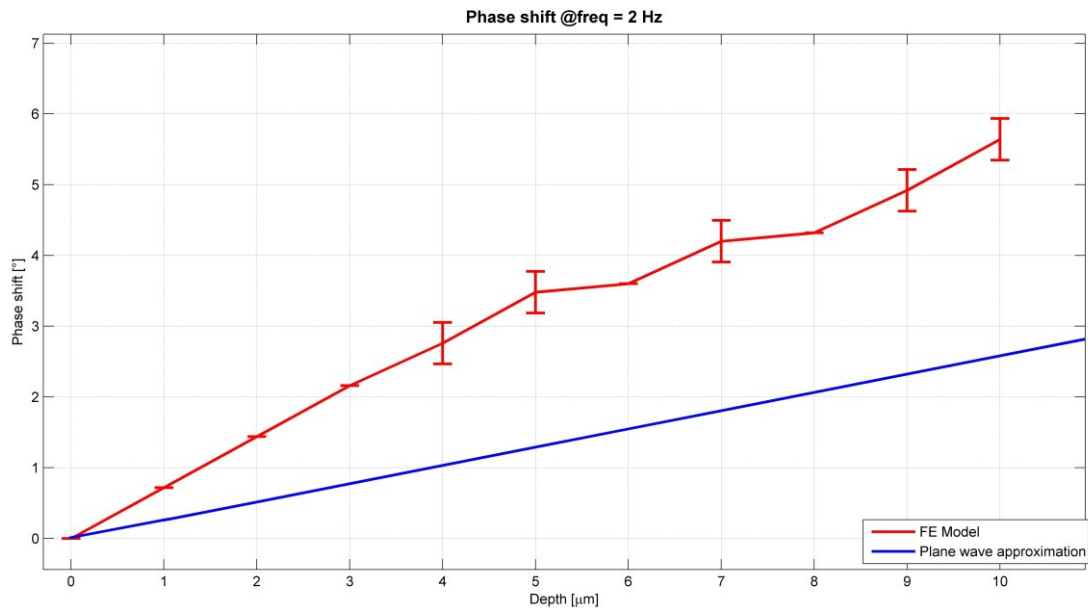


Figura 5.7: Sfasamento per piccoli valori della profondità del difetto

## 5.5 Discussione delle simulazioni

Come è possibile vedere dalla Figura 5.7 e dalla Figura 5.9, lo sfasamento ha un andamento che può essere ben approssimato a lineare con la profondità della sorgente di calore. Il coefficiente angolare risulta però diverso da quello ottenibile tramite la soluzione dell'equazione differenziale con l'approssimazione di onda piana, nonostante i parametri dei materiali siano gli stessi. Ciò potrebbe essere dovuto alla diversa geometria della sorgente termica e al fatto che il solido non è infinito. Infatti nell'approssimazione di onda piana, un'intera superficie oscilla tra due temperature con una certa frequenza, mentre nelle simulazioni è stata fatta oscillare la temperatura di una piccola circonferenza. Il risultato è comunque

importante, poiché è presente un andamento lineare, e perciò è possibile correlare in maniera diretta la fase con la profondità del difetto. Il coefficiente angolare, chiamato ora  $\mu_{equivalente}$  andrà quindi calcolato dai dati sperimentali una volta nota la fase e la corrispettiva profondità dei difetti. Questo permette dunque di poter correlare il segnale di fase con la profondità  $z$  della sorgente di calore, come verrà discusso nel capitolo 6. Si noti infine che, come nel caso dell'approssimazione di onda piana, il coefficiente angolare dipenda ovviamente dal materiale.

Un'ulteriore osservazione può essere esplicitata per quanto riguarda i modelli presentati. In essi la condizione al contorno applicata al difetto è una condizione di Dirichlet, cioè viene fornita la soluzione dell'equazione differenziale nel tempo sulla superficie del difetto. Nel caso fisico, tuttavia, il difetto viene riscaldato per effetto Joule, quindi sarebbe più corretto applicare una condizione al contorno di Neumann, cioè imporre la derivata della soluzione del dominio. Ciò infatti corrisponderebbe all'imporre un flusso di calore dalla circonferenza al resto della geometria del modello anziché imporre un'oscillazione tra due temperature diverse. Questo però risulta più complesso da ottimizzare per ottenere la condizione di quasi equilibrio, poiché andrebbe inserita una condizione di scambio di calore con l'ambiente, ma non ha alcun effetto nello sfasamento risultante. Tuttavia ciò che cambierebbe sarebbero le temperature massime e minime che si avrebbero sul punto-sonda, e quindi sul segnale di ampiezza, che non è stato però considerato in questo modello.

Quindi il modello che verrà utilizzato sarà l'approssimazione di onda piana il cui coefficiente angolare,  $\mu = \mu_{equivalente}(f_{lock-in})$ , sarà ottenuto sperimentalmente utilizzando l'espressione ottenibile dalla ( 3.9):

$$\mu_{equivalente} = \frac{Z_{Physical\ Analysis}}{\Delta\phi_{sperimentale}} \cdot \frac{180}{\pi} \quad ( 5.3 )$$

Se aumenta la frequenza, dall'equazione ( 3.8 ) è possibile mostrare che la lunghezza di diffusione termica diminuisce e quindi è teoricamente possibile ottenere una maggiore risoluzione. Infatti, come mostrato nella Figura 5.10, ad uno sfasamento fissato corrispondono profondità del difetto molto differenti a seconda della frequenza. Quindi ad esempio a  $0,2^\circ$  corrisponde una profondità del difetto di circa  $13\mu\text{m}$  a 2Hz, mentre a 88Hz si ha una profondità di circa  $2\mu\text{m}$ . È perciò auspicabile una maggiore risoluzione nel caso di frequenze di lock-in maggiori.

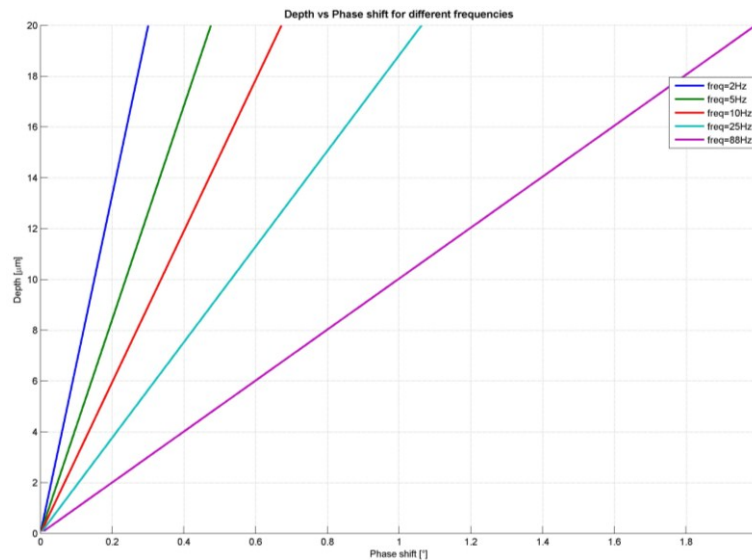


Figura 5.8: Profondità del difetto in funzione dello sfasamento a differenti frequenze





## 6 Analisi sperimentale

### 6.1 Apparato sperimentale

I dati di questo elaborato sono stati raccolti utilizzando DCG ELITE (Figura 6.1). Il sensore della camera presenta un numero di pixel pari a 640x512, nella cui modalità full frame ha una  $f_{frame\ rate} = 100\ Hz$ . È possibile utilizzare porzioni ridotte della camera, ad esempio con una frame di 128x128 si ha  $f_{frame\ rate} = 424.596\ Hz$ . Il sensore della camera è composto da antimoniuro di indio (InSb) raffreddato a temperature criogeniche ( $\sim 77\ K$ ) per avere una massima sensibilità alle lunghezze d'onda nel range di  $3 - 5\ \mu m$ . Le lenti disponibili sono:

-lente wide angle WA apertura numerica  $NA = 0.3$

-lente 1x con apertura numerica  $NA = 0.33$

-lente 5x con apertura numerica  $NA = 0.63$

-lente 10x con apertura numerica  $NA = 0.67$

La massima risoluzione spaziale, usando il criterio di Rayleigh, ottenibile è data da

$$\Delta x = 0.61 \frac{\lambda}{NA} \quad (6.1)$$

Considerando il caso peggiore, quindi  $\lambda = 5\ \mu m$ , la massima risoluzione ottica possibile ottenibile con la lente 10x risulta essere  $\Delta x = 4.55\ \mu m$

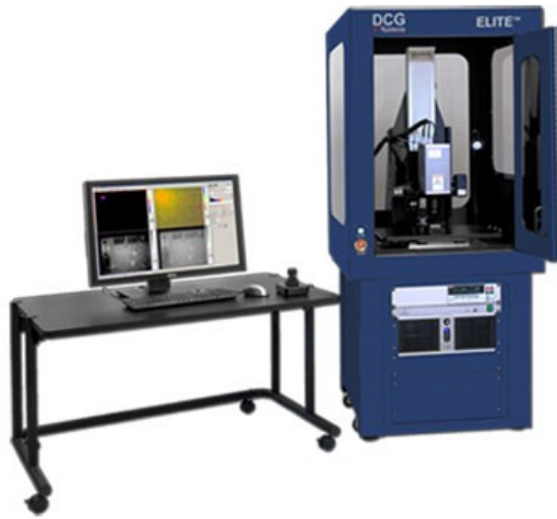


Figura 6.1: DCG ELITE Lock-in Thermography

Tendenzialmente quindi per l'analisi spaziale della sorgente di calore è conveniente utilizzare la lente 10x, tuttavia esiste un trade-off tra il segnale raccolto dal sensore e la risoluzione ottenibile. Infatti utilizzando lenti diverse cambia l'efficienza quantica, cioè la probabilità che un fotone incidente, nel range energetico di interesse, sia assorbito dal sensore e che quindi venga tradotto in una carica elettrica. Tale comportamento va come  $\sim \frac{NA^2}{MAG^2}$ , dove con MAG si intende l'ingrandimento della lente.

Nel settaggio dei parametri del lock-in si è tenuto in considerazione il tipo di misura che si stava effettuando. In particolare il tempo di integrazione  $t_{int}$  è stato mantenuto costante a  $0.8 \text{ ms}$  mentre la frequenza  $f_{lock-in}$  è stata selezionata in base al tipo di misura. Infatti per misure su device in package sono state utilizzate basse frequenze, poiché si ottiene un segnale meno rumoroso anche se risulta poco localizzato. Per quanto riguarda le misure su die le frequenze alte sono state le più utilizzate. Infatti come già citato nella teoria, per i materiali che sono buoni conduttori di calore è possibile usare alte frequenze per ottenere spot

maggiormente localizzati. Tuttavia ciò comporta un deterioramento significativo del SNR.

Il software utilizzato è fornito da DCG e permette un controllo di tutte le parti dello strumento tramite un tool presente nel software stesso. Una volta quindi acceso il generatore di tensione e attivato il circuito di raffreddamento del sensore, dopo circa 15 minuti il sensore raggiunge la temperatura criogenica di circa 77 K ed è perciò possibile utilizzare lo strumento. Una volta impostate le tensioni minime e massime dell'onda quadra e, dopo aver scelto la lente, posto il fuoco sulla superficie voluta, è possibile far partire la misurazione di durata e frequenza di lock-in pre-impostate. Il sistema è in real-time, quindi vengono subito visualizzate le misure di fase e ampiezza pixel per pixel tramite una scala di colori (Figura 6.2). Come si può vedere da tale immagine, la misura di fase è in alto a destra, la misura di ampiezza in alto a sinistra e la topografia in basso a sinistra. L'immagine in basso a destra viene utilizzata esclusivamente per la movimentazione delle lenti e la scelta del fuoco. Si noti il tool in basso a destra per la movimentazione delle lenti e dello stage. La misura può essere fermata e salvata prima del raggiungimento del tempo totale di misura impostato, ed è quindi possibile utilizzare il tool per eseguire la sovrapposizione dell'immagine di topografia con l'immagine di ampiezza o di fase. Questo consente, tramite anche l'utilizzo del layout, di stabilire spazialmente la regione candidata al fallimento.

I dispositivi da analizzare sono stati posizionati in apposite board, le quali sono state disegnate con uno schematico specifico per ogni famiglia di dispositivo, in modo da aver collegato esternamente tutti quei segnali che normalmente il cliente mette in corto sulle board applicative. Ciò permette quindi di non dover collegare tutte le ground e le alimentazioni, ma è necessario un solo collegamento per ognuna di queste. Su tali board c'è la possibilità di montare il dispositivo per

l'analisi sia frontside che backside, in tal modo il setup necessario per le diverse tecniche risulta semplificato.

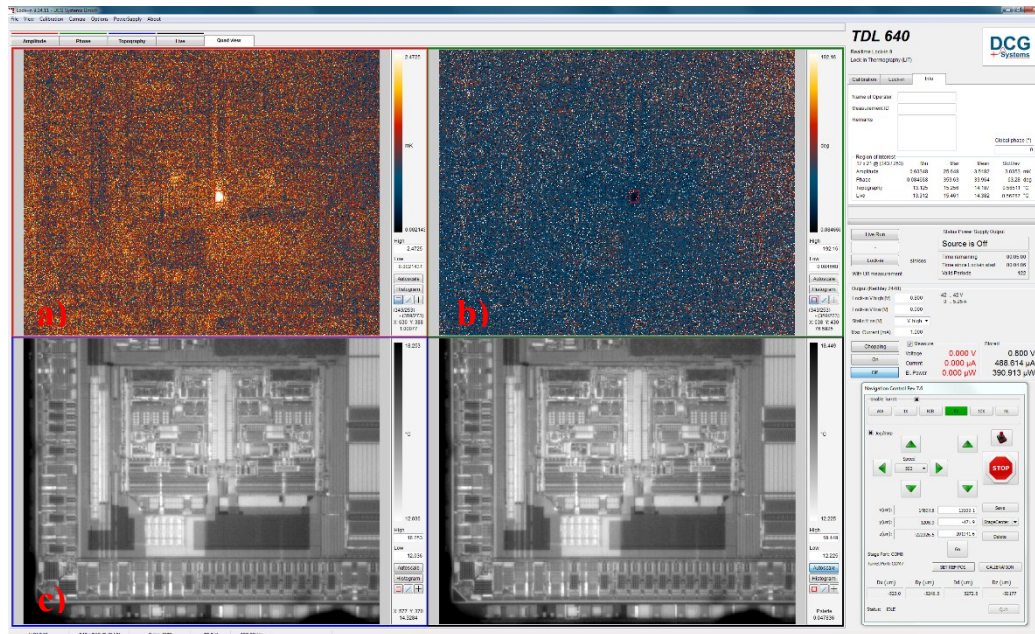


Figura 6.2: DCG ELITE Software, segnali: a) ampiezza, b) fase, c) topografia

### 6.1.1 Valori medi ed errori

I valori che sono stati utilizzati in questo lavoro di tesi sono stati presi da misurazioni su pezzi in fase di qualifica i cui test presentano dei fallimenti. La prima fase, come già descritto nella sezione riguardante la Failure Analysis, è stata quella di confermare o meno il fallimento.

Per fare ciò è stata necessaria la lettura del log del test per individuare i pin coinvolti e fare misure con curve tracer. Successivamente, se le condizioni del pezzo lo permettevano (cioè se si tratta di leakage, short o accensione a tensioni minori dei diodi), sono state eseguite le misure di lock-in thermography tramite DCG ELITE impostando le tensioni in modo da porsi nelle condizioni anomale del dispositivo. Individuato lo/gli spot/s, si è quindi analizzato il segnale di fase.

Per fare ciò, tramite il software che gestisce lo strumento di misura, è stato approssimato lo spot ad un'area rettangolare e si sono valutati i valori della fase all'interno di tale area. Il software fornisce quindi il valore medio e la deviazione standard dei valori nella ROI (Region Of Interest), cioè l'area rettangolare selezionata dall'utente sullo spot. La grandezza della ROI è stata scelta considerando caso per caso ma sempre tenendo in considerazione la minima risoluzione ottenibile, descritta nel paragrafo precedente.

Il significato della deviazione standard è complesso. Infatti la variabilità dei dati è intrinseca al rumore ed è sempre presente e mai completamente eliminabile, ma è anche dovuta al fatto che la sorgente non è mai puntiforme. Per questo lavoro di tesi la deviazione standard non è considerata al fine del calcolo della profondità del difetto. Per tale calcolo, infatti, solo la media di una ROI inscritta nello spot è stata considerata.

### **6.1.2 Offset**

Nei dati raccolti nelle misure effettuate è stata notata una discrepanza nei valori delle fasi. Infatti è risultato che cambiando il numero di pixel, cioè la camera size e quindi la frequenza di campionamento, la fase di uno stesso difetto variava, pur mantenendo costante la frequenza del lock-in. Fisicamente ciò non dovrebbe accadere, dato che, come visto nella teoria, la fase dipende dalla diffusione del calore, e perciò sarà funzione della frequenza di eccitazione e del materiale. Ciò significa che fissata la frequenza del lock-in, la fase deve rimanere costante anche se viene variata la frequenza di campionamento. Questa anomalia è visibile in Figura 6.3 che rappresenta l'analisi di uno stesso difetto per diverse frequenze del lock-in e diversi numeri di pixel selezionati della camera.

Si noti comunque il corretto comportamento, in accordo con la teoria, per cui la fase aumenta con la radice della frequenza del lock-in. Infatti dalle equazioni ( 3.8 ) e ( 3.9 ) risulta

$$\phi = z \frac{180}{\pi} \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} \quad ( 6.2 )$$

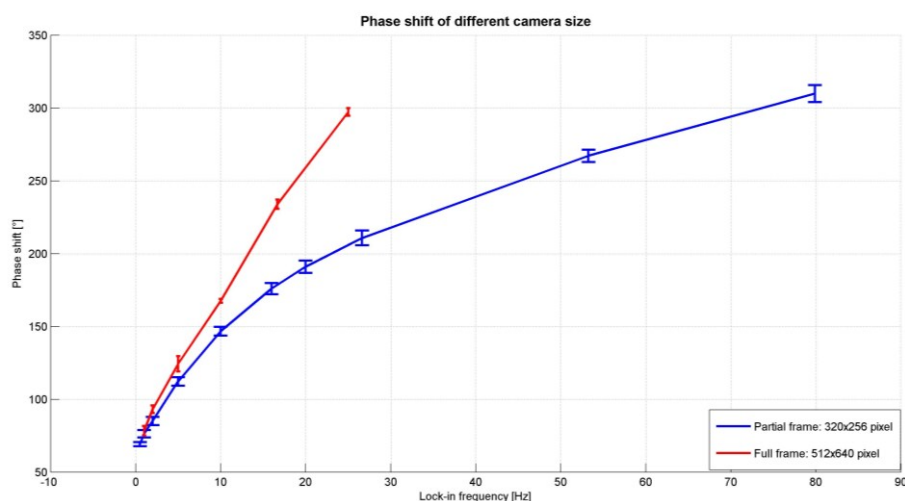


Figura 6.3: Fase per lo stesso difetto con condizioni diversa di frequenza del lock-in e camera size

Il fatto che le due curve non coincidano rappresenta un problema, poiché implica l'esistenza di un offset che rimane presente sempre nel sistema di misurazione, e quindi non si riesce ad ottenere, tramite normali misure, il valore assoluto della fase ma solo un valore relativo. Il problema dell'offset potrebbe essere imputato all'implementazione hardware del sistema lock-in, poiché cambiando la frequenza di campionamento potrebbe variare il circuito di misura e probabilmente lo 0° della fase viene imposto utilizzando tale circuito. La selezione di una diversa camera size implica una diversa frequenza di campionamento e ciò porta quindi ad una diversa impostazione dello zero della fase. Fortunatamente questo offset è un valore dipendente unicamente dalla lente, dalla camera size, e dalle frequenze di lock-in e di campionamento, per cui è sufficiente calcolarlo una sola volta per un determinato set di parametri, e poi

applicarlo a tutte le misurazioni successive; tale dipendenza è stata confermata sperimentalmente dal fornitore della macchina, il quale ha eseguito misure analoghe su un altro esemplare e con altri campioni, giungendo agli stessi valori.

Per ovviare a questo grosso limite della tecnica è stato ideato un metodo per ottenere l'offset per diverse lenti e diverse frequenze di sampling e del lock-in.

### 6.1.3 0°-Phase

Per ottenere l'offset sono state eseguite alcune misure aggiuntive su un die estratto da un dispositivo, quindi frontside: prendendo un die non bondato, sono state eseguite le misure andando a contattare i pad del dispositivo tramite delle micropunte. I due pad utilizzati sono stati scelti in modo che fossero collegati tra di loro così che potesse circolare corrente una volta imposta una differenza di potenziale tra di essi.

La tecnica di contattatura tramite micro e nano-punte sui pad è una tecnica che può essere utilizzata in Failure Analysis una volta esclusi problemi di package e quindi estratto il die, ma richiede molta attenzione e precisione per non danneggiare il die. Per far contattate le punte si utilizzano dei micro-manipolatori, ossia dei bracci meccanici alle cui estremità vengono posizionate le micropunte, movibili nei 3 assi tramite viti. Tali micromanipolatori sono fissati saldamente al piano di lavoro tramite ventose a vuoto e tramite il microscopio si procede con il posizionamento delle micro-punte. In questo caso il microscopio utilizzato è sempre quello termico quindi la risoluzione è limitata rispetto ad un classico microscopio ottico, perciò si è utilizzata la lente 10x per il posizionamento e l'atterraggio delle punte sui pad. Le micropunte sono ovviamente composte da materiale conduttore, così come il loro alloggiamento all'interno del braccio meccanico. In questo modo è possibile imporre un potenziale al pad direttamente tramite la micropunta. Una volta che i contatti punta-pad sono stabili, è possibile

eseguire la misura in lock-in. La topografia di tale misura è visualizzabile in Figura 6.4.

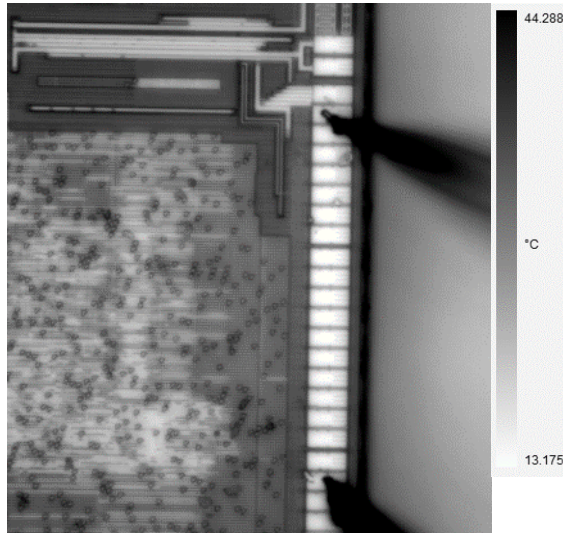


Figura 6.4: Die con micropunte sui pad, lente 5x

Poiché il contatto punta-pad è ohmico, cioè è presente una resistenza di contatto che dissipa potenza, sulla superficie di tale pad ci sarà uno spot, la cui profondità è nota (coincide appunto con il contatto tra punta e pad). Ponendo il fuoco quindi sulla superficie dei pad, la fase di tale spot sarà quindi la misura di 0°-phase, cioè

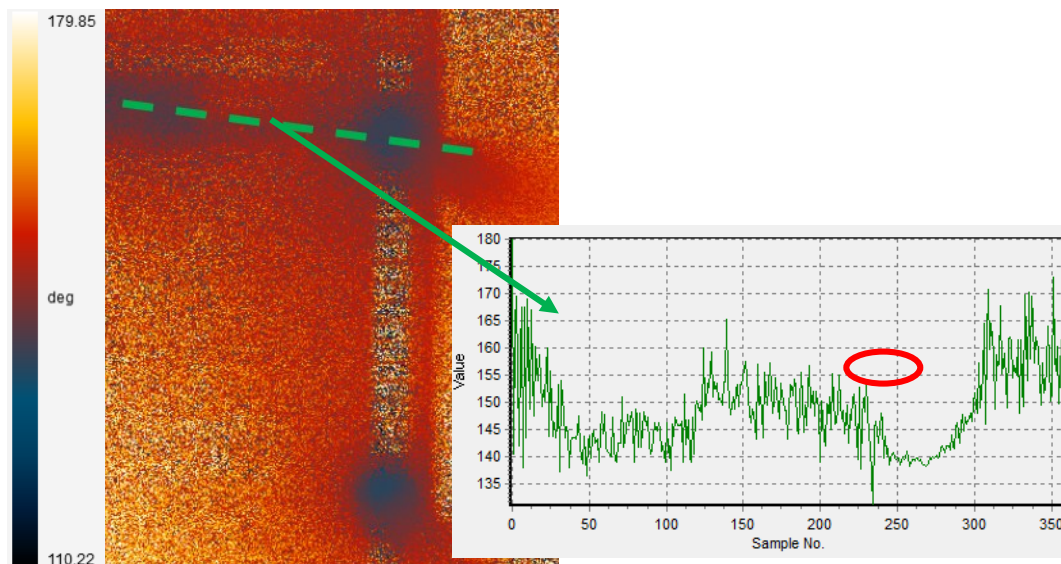


Figura 6.5: Misura di fase (sinistra) e grafico della fase (destra) lungo la linea tratteggiata. In rosso evidenziata la 0°-phase.



l'offset cercato (Figura 6.5). Si noti che è possibile selezionare una linea all'interno dell'immagine tramite software per poter visualizzare la fase lungo tale linea. In uscita si ha il grafico a destra di Figura 6.5 e in Figura 6.6: sull'asse delle

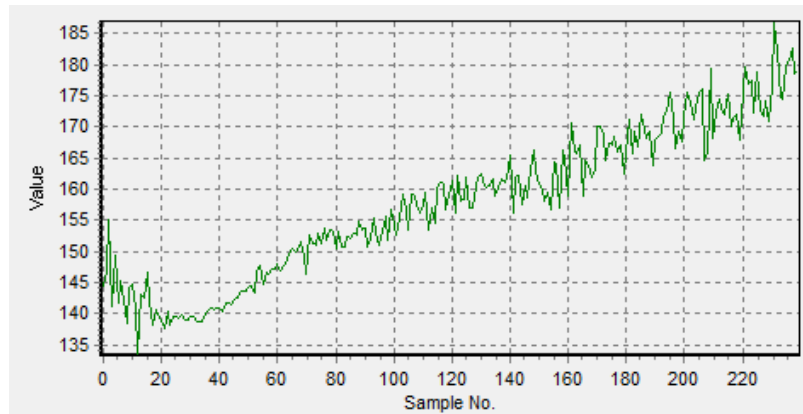


Figura 6.6: Fase lungo linea coincidente con la micropunta

ascisse è presente il numero di pixel mentre sull'asse delle ordinate è rappresentato il valore della fase del corrispondente pixel. In Figura 6.6 in particolare è possibile vedere come la fase vari lungo la lunghezza della micropunta. Si può notare inoltre come il fuoco influenzi il segnale di fase stesso: al punto di contattatura tra micropunta e pad il rumore è “minimo” essendo il sistema focalizzato sul piano contenente tale punto. Man mano che si sale lungo la micropunta si può notare come il rumore aumenti notevolmente rendendo il segnale decisamente meno stabile. Risulta quindi evidente già ora il problema del fuoco: non è noto dai dati delle lenti quale sia la profondità di fuoco, cioè quanto sia effettivamente localizzato il piano del fuoco rispetto all'asse z. Questa rappresenta una prima limitazione nello studio della fase; tale problema verrà discusso più avanti.

Le misure descritte sono state effettuate per diversi valori della frequenza del lock-in e diversi numeri di pixel della camera, cioè diverse frequenze di campionamento. Tali valori sono visualizzabili in Figura 6.7.

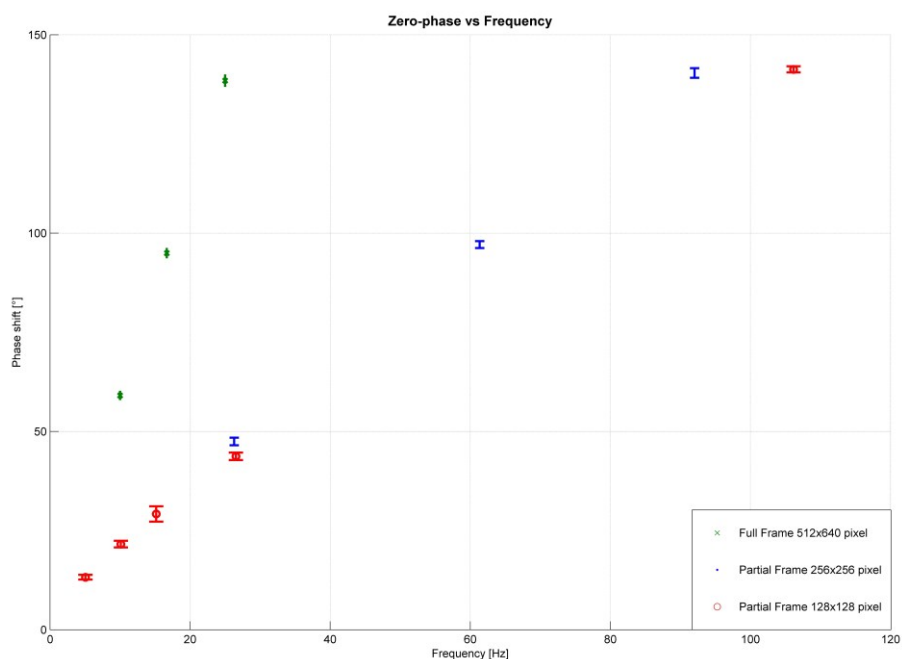


Figura 6.7: 0°-phase per diverse frequenze e camera sizes per la lente 5x

Tali valori saranno quindi poi sottratti ai valori della fase trovati per i difetti, in tal modo risulta allora possibile trovare i valori assoluti degli sfasamenti, come sarà presentato nei prossimi paragrafi.

#### 6.1.4 Strategie di misura

Durante il lavoro di tesi è stato possibile eseguire parecchie misure per poter prendere confidenza con lo strumento, ed è stato quindi possibile analizzare quali siano le migliori condizioni di misura a seconda del caso in analisi. Questo ha poi permesso di scegliere accuratamente i valori delle frequenze e le lenti utilizzate per i dati presentati in questa tesi. I due parametri scelti sono proprio i due indicati: lente e frequenza del lock-in.

Per quanto riguarda le lenti, si è sempre partiti dalla lente WA per dispositivi in package o per die di grandi dimensioni, mentre si è iniziata l'analisi dalla lente 1x per die piccoli. Si è poi proseguito utilizzando lenti ad ingrandimento maggiore e apertura numerica maggiore. La lente finale utilizzata per ottenere i valori sperimentali della fase è stata scelta in base alla grandezza dello spot. L'utilizzo di lenti a maggiore ingrandimento per spot troppo spazialmente distribuiti non risulta tuttavia conveniente poiché la misura di fase risulta essere molto disturbata dal rumore. Ciò vale soprattutto per misure a package chiuso, per i quali ci si è fermati alla lente 1x o, in alcuni casi in cui lo spot era maggiormente localizzato, alla lente 5x, mentre per spot localizzati sul die ci si è solitamente spinti fino alla 10x.

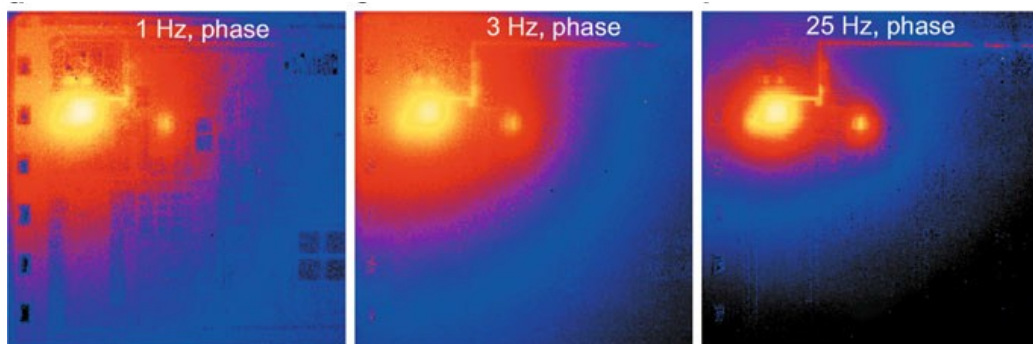
Il secondo parametro fondamentale per la misura è la frequenza del lock-in. Come già detto in precedenza, la frequenza massima utilizzabile è pari ad un quarto della frequenza di campionamento, che coincide con la frequenza di acquisizione delle immagini da parte del sensore. Tuttavia esiste un altro vincolo nella scelta della frequenza di lock-in, infatti la frequenza non è altro che un parametro che discende da un ulteriore parametro, ossia il numero di campionamenti per periodo. Tale numero deve essere pari, cioè devono essere presi, per ogni periodo, un numero uguale di campioni quando è imposta una tensione  $V_{max}$  e quando è imposta una tensione  $V_{min}$  (tipicamente tale tensione minima è stata imposta nulla). Ad esempio si veda la Tabella 2 sottostante, nei casi di full frame mode e partial frame mode di 256x256 pixel.

	<b>Full Frame</b>	<b>Partial Frame</b>
<b>Number of Pixels</b>	<b>640x512</b>	<b>256x256</b>
<b>Freq. Sampling [Hz]</b>	<b>100.000</b>	<b>350.340</b>
<b>Freq. Lock-in 4 samples/period [Hz]</b>	25.000	87.585
<b>Freq. Lock-in 6 samples/period [Hz]</b>	16.667	58.390
<b>Freq. Lock-in 8 samples/period [Hz]</b>	12.500	43.793
<b>Freq. Lock-in 10 samples/period [Hz]</b>	10.000	35.034

<b>Freq. Lock-in 12 samples/period [Hz]</b>	8.333	29.195
<b>Freq. Lock-in 14 samples/period [Hz]</b>	7.143	25.024
<b>Freq. Lock-in 16 samples/period [Hz]</b>	6.250	21.896
<b>Freq. Lock-in 18 samples/period [Hz]</b>	5.556	19.463
<b>Freq. Lock-in 20 samples/period [Hz]</b>	5.000	17.517
<b>Freq. Lock-in 30 samples/period [Hz]</b>	3.333	11.678
<b>Freq. Lock-in 40 samples/period [Hz]</b>	2.500	8.759
<b>Freq. Lock-in 50 samples/period [Hz]</b>	2.000	7.007
<b>Freq. Lock-in 60 samples/period [Hz]</b>	1.667	5.839

*Tabella 2: Esempi di frequenze possibili per due diverse freq. di sampling*

La scelta della frequenza del lock-in deve tenere conto di alcune considerazioni. Maggiore è tale frequenza e minore risulta essere il  $\mu$ , cioè la lunghezza di diffusione termica, come già presentato nel paragrafo 3.1. Questo implica che incrementando la frequenza, diminuirà lo spread del calore ed aumenterà la risoluzione spaziale dello spot, risultando perciò maggiormente localizzato. Un esempio di ciò è visualizzabile in Figura 6.8.



*Figura 6.8: Aumento della risoluzione spaziale con la frequenza [3]*

Tuttavia aumentando la frequenza si ha maggior rumore. Ciò è ben visualizzabile nei dati della fase già dalla Figura 6.3, infatti analizzando l'errore rappresentato in tale figura, ossia la deviazione standard fornita dal software, risulta proprio come la teoria prevede: a maggiore frequenza la deviazione standard dei dati aumenta. Questo risulta essere un altro limite nel calcolo della profondità della sorgente di calore.

In generale le frequenze del lock-in che sono state utilizzate sono dai 2 ai 3 Hz nel caso di dispositivi in package chiuso, mentre per misure su dispositivi a package aperto da retro o direttamente su die sono state utilizzate frequenze dai 25 a circa 90 Hz.

La selezione del picco per ottenere i valori medi delle fasi e la deviazione standard da tale valore medio è stata fatta utilizzando la funzione del software chiamata ROI (Region Of Interest). Tale funzione permette la scelta manuale dell'area in cui si è interessati ai valori della misura. La scelta della ROI è avvenuta selezionando aree rettangolari o quadrate le cui dimensioni dei lati erano maggiori rispetto alla risoluzione spaziale minima ottenibile con la lente in uso.

Per la riduzione del rumore è stato usato un filtro che permette di mediare i valori ottenuti in ogni pixel con i valori dei pixel limitrofi, in un'area di 3x3 pixel. In questo modo il rumore è ridotto anche se diminuisce la risoluzione spaziale. Il confronto tra il segnale di fase non modificato e quello con filtro "Median 3x3" è visibile nella Figura 6.9.

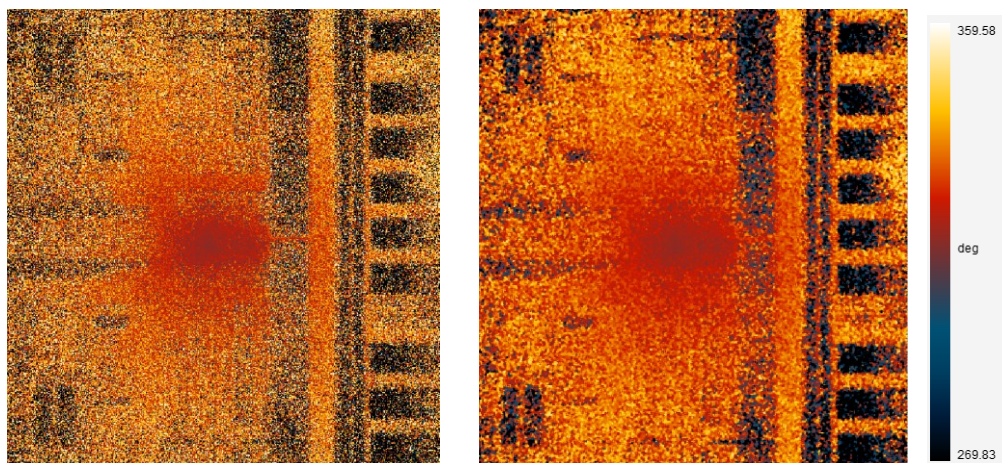


Figura 6.9: Immagine di fase senza (sinistra) e con filtro "Median 3x3" (destra)

Le prime misure sono sempre state effettuate su package chiuso in modo da poter distinguere se lo spot fosse a livello di package o fosse a livello di die. Nei casi in cui lo spot risultasse sul die, si è proceduto tendenzialmente con l'apertura del

pezzo da retro e successiva nuova analisi tramite lock-in thermography da retro. Per poter distinguere dove si trova lo spot si può utilizzare la tecnica dei raggi X e poi sovrapporre le immagini ottenute tramite le due tecniche. Nell'esempio di Figura 6.10 lo spot si trova in corrispondenza dei pad, quindi il passo successivo

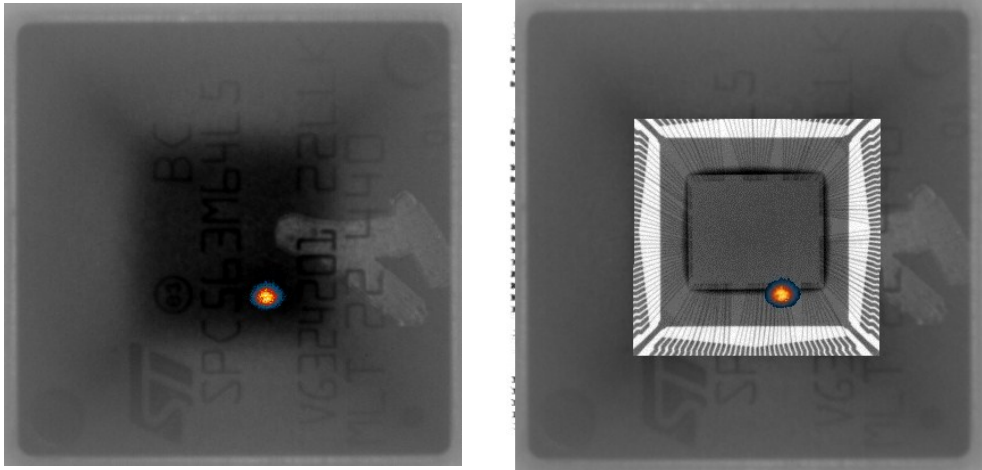


Figura 6.10: Immagine thermal lock-in a package chiuso (sinistra) e sovrapposizione con immagine Xray (destra)

risulta essere l'apertura da retro tramite laser. Quindi in questo modo si riesce ad ottenere già una prima localizzazione del difetto. La Figura 6.10 di sinistra non è altro che la sovrapposizione tra la topografia e l'immagine di ampiezza del segnale, aggiustando i valori delle soglie per la scala di colore. Si noti che nell'immagine di topografia è visibile la frame ed i 4 percorsi collegati a massa. Questo poiché tale misura è stata effettuata alimentando il dispositivo, e quindi ponendo tutti i pin di alimentazione (VDD) a 5V e collegando a massa i pin di VSS, mentre i pin collegati al segnale che viene comandato dal lock-in sono altri. Per questo motivo quindi appare più scura, cioè a temperatura maggiore, poiché sta dissipando energia per effetto Joule (essendo la scala dei colori quella inversa, cioè quella presente in Figura 4.6).

Per quanto riguarda i tempi di misura, il sistema permette di eseguire misure da pochi secondi a molte ore, a seconda della quantità di segnale presente. Ad esempio, l'attuale record di rilevazione minima di segnale è di 400 nW con

un'acquisizione di una durata di circa 80 ore. Le potenze dissipate tuttavia in questo lavoro di tesi sono maggiori, il che permette di avere maggior segnale. Tipicamente per potenze dissipate dell'ordine delle centinaia di  $\mu\text{W}$  è sufficiente un tempo di acquisizione dai 3 ai 10 minuti per ottenere un buon SNR.

Il difetto, nella maggior parte dei casi studiati, è stato stimolato tramite un'onda quadra tra massa (0V) e qualche Volt. Tuttavia con tale strumento di misura è anche possibile settare diversamente il limite inferiore dell'onda quadra, portandolo a tensioni negative o positive. Ciò può essere eseguito, ad esempio, nei casi di fallimenti sulla scan-chain. Infatti imponendo due specifiche tensioni al dispositivo è possibile far passare segnali digitali 1 e 0 nei pin preposti al test ATPG, una volta inizializzato il dispositivo e posto in test mode, e quindi scansionare la catena di test per eccitare il difetto.

## 6.2 Discussione dei risultati

Il flusso che è stato seguito per analizzare i dati prevede, una volta effettuate le misure, la determinazione del coefficiente  $\mu_{equivalente}$ , necessario per la definizione del modello sperimentale. Tale coefficiente è stato determinato utilizzando l'espressione ( 5.3 ), cioè in approssimazione di onda piana. I dati che sono stati presi in considerazione si riferiscono a dispositivi per i quali è stato completato tutto il flusso di lavoro della Failure Analysis, quindi è stata eseguita anche l'analisi fisica del dispositivi ed è stato trovato e caratterizzato il difetto, cioè è stata trovata la profondità della sorgente di calore. Non tutti i dispositivi che sono stati analizzati, tuttavia, sono stati tenuti in considerazione per questo tipo di analisi. Questo poiché in alcuni casi il segnale è risultato molto esteso anziché localizzato, e ciò ha comportato un segnale molto rumoroso. Il motivo di ciò potrebbe essere una sorgente di calore estesa o una frequenza del lock-in non



adeguata. È stato poi calcolato il  $\overline{\mu_{equivalente}}$ , calcolato come media delle lunghezze di diffusione termica per i diversi casi

$$\overline{\mu_{equivalente}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mu_{equivalente,i} \quad (6.3)$$

Noto il valor medio della lunghezza di diffusione termica, è stata calcolata la profondità prevista del difetto utilizzando questo  $\overline{\mu_{equivalente}}$ . È stata così valutata l'accuratezza di tale parametro. Ciò vale purché le misure siano state effettuate ad una frequenza fissata, dato che  $\mu$  dipende dalla frequenza.

Tale flusso è stato applicato inizialmente a dispositivi in package, in cui però essendo la lunghezza di diffusione termica del silicio a frequenza fissata molto maggiore di quella del molding compound, la posizione del difetto è stata approssimata alla sola superficie del die, e ciò corrisponde ad una profondità pari allo spessore del molding compound. Successivamente il flusso descritto è stato applicato anche a dispositivi aperti backside, ed in questo caso è stata tenuta in considerazione la profondità del difetto nel silicio.

Un esempio di un'analisi effettuata utilizzando il metodo descritto è quella su un microcontrollore per applicazioni powertrain, che dopo una specifica serie di test

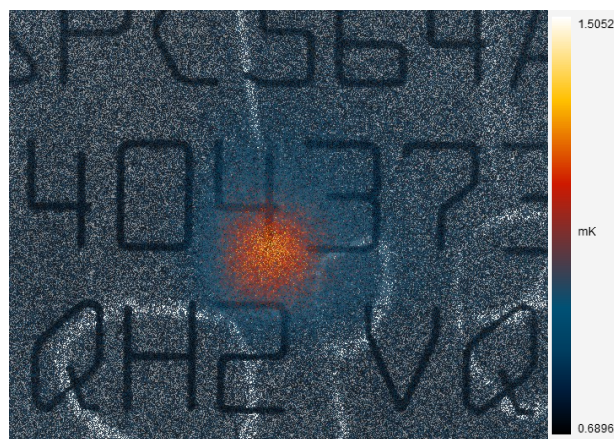


Figura 6.11: Lock-in thermography a package chiuso sovrapposta alla topografia, lente 1x



risultava fallire. Dal datalog risultavano problemi su uno dei pin di alimentazione dell'ADC (Analog-to-Digital Converter) a qualsiasi temperatura. Una volta verificato il fallimento tramite Curve Tracer, eventualmente alimentando il dispositivo per attivare i corretti percorsi di corrente sugli I/O, e dopo aver analizzato il package tramite SAM e X-ray, per verificare cioè che non ci fossero problemi legati all'assemblaggio, è stata effettuata la prima misura tramite lock-in thermography (Figura 6.11) ed è stato verificato tramite sovrapposizione con l'immagine a raggi X (analogo a Figura 6.10) che lo spot presente fosse in corrispondenza del die. Per poter utilizzare le altre tecniche di analisi descritte al paragrafo 2.3, tale pezzo è stato aperto backside tramite laser. Dopo una pulizia grossolana con strumenti abrasivi meccanici e dopo una pulizia più fine per

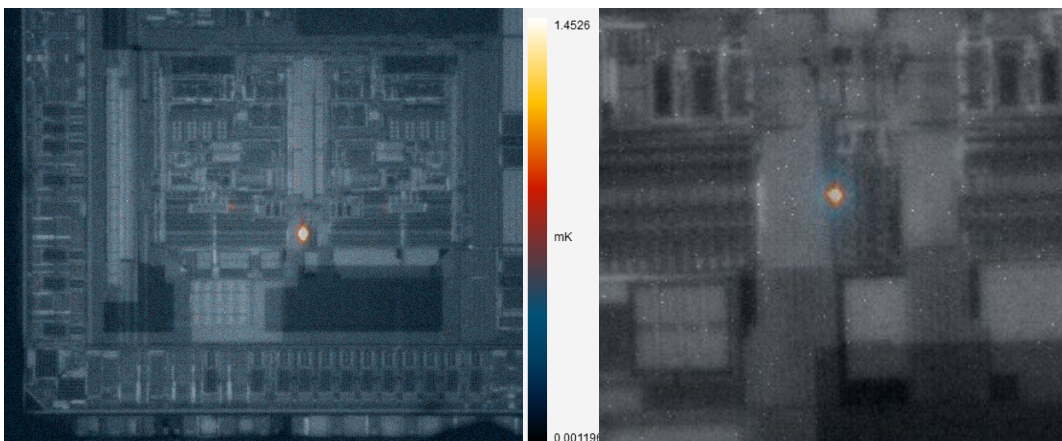


Figura 6.12: Lock-in thermography backside dopo l'apertura sovrapposta alla topografia, lente 5x (sinistra) e 10x (destra)

rimuovere i residui di colla tramite acetone, è stato possibile eseguire misure da retro come EMMI, OBIRCh ma anche nuovamente la lock-in thermography. I risultati delle prime due tecniche sono visibili in Figura 6.. Le immagini mostrate sono state confrontate con quelle dei pezzi di riferimento, che non sono riportate in questo lavoro. Da questo confronto risulta che l'immagine EMMI non ha spot

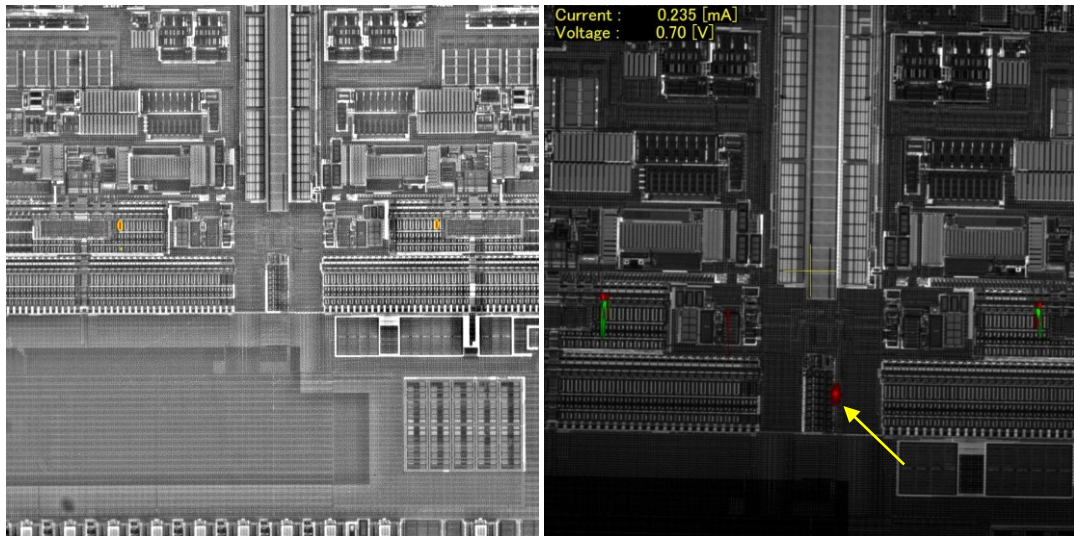


Figura 6.13: Immagini EMMI (sinistra) e OBIRCh (destra) del pezzo in analisi

differenti rispetto al device di riferimento, mentre l'immagine OBIRCh presenta uno spot anomalo, indicato dalla freccia gialla.

È stata quindi eseguita la misura tramite lock-in thermography e ciò che è stato ottenuto è riportato in Figura 6.14. Si può notare che lo spot OBIRCh anomalo

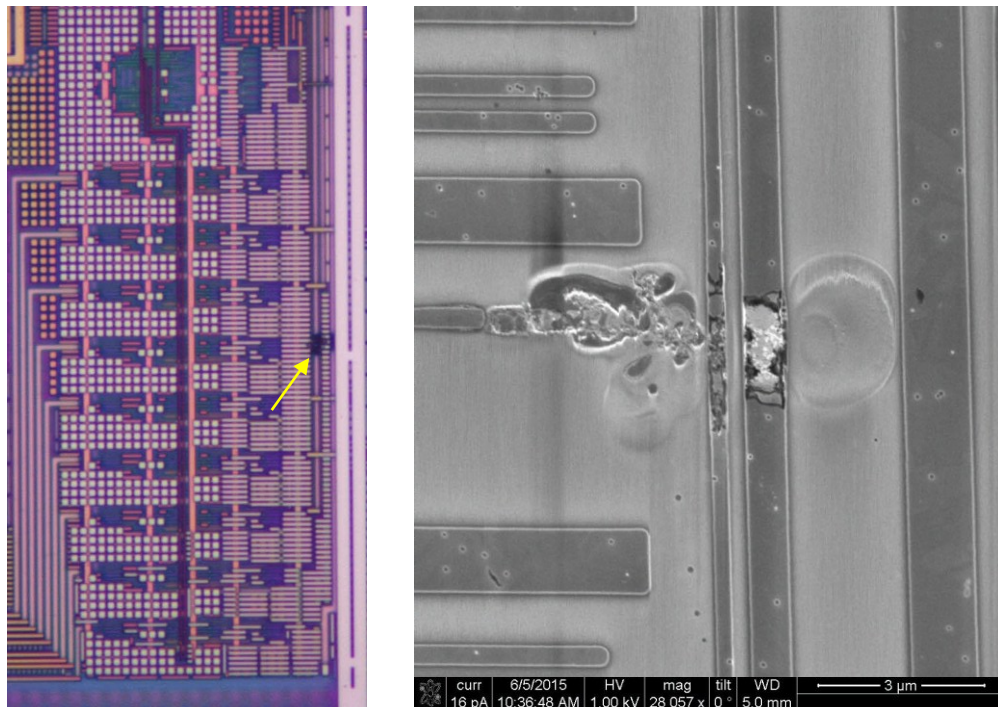


Figura 6.14: Immagine al microscopio ottico a livello della Metal4 (sinistra) e SEM sulla Metal3

coincide proprio con lo spot ottenuto tramite lock-in thermography, tenendo conto che i software degli strumenti dell'EMMI e OBIRCh automaticamente considerano che la misura viene effettuata backside e quindi l'immagine viene specchiata, mentre ciò non avviene nell'ELITE DCG. Specchiando quindi l'immagine del lock-in thermography, si può notare che gli spot coincidono. Si è quindi proceduto con l'analisi fisica del campione, cioè, come descritto in precedenza, tramite parallel lapping vengono rimossi gli strati uno alla volta e si osserva mediante microscopio ottico, SEM e PVC l'area sospetta. Nel caso specifico è stato trovato uno scioglimento delle metal a partire dalla Metal4 fino alla Metal2 (Figura 6.14). La profondità considerata per il calcolo del  $\mu_{equivalente}$  è quindi la distanza tra la Metal1, punto del fuoco nel caso backside, e la Metal2, estremo dello scioglimento delle metal.

Vengono ora analizzati quantitativamente i segnali di fase ottenuti tramite lock-in thermography, prima per il caso frontside a pezzo integro, e successivamente per il caso backside con pezzo aperto. Verrà quindi calcolato il  $\mu_{equivalente}$  per ogni misura e poi verrà calcolato il  $\overline{\mu_{equivalente}}$ , cioè la media dei valori ottenuti dai diversi casi. Utilizzando poi tale valore medio verrà calcolata la profondità tramite il modello presentato e quindi sarà valutata l'affidabilità e la precisione del modello.

### 6.2.1 Analisi Frontside

I primi casi studiati consistono in dispositivi a package chiuso, si tratta quindi di analisi non distruttive in cui il dispositivo è integro (Figura 6.15). Per questo caso sono state considerate le profondità dei difetti come coincidenti con l'altezza del molding compound del dispositivo. Questa è una buona approssimazione, dato che la lunghezza di diffusione termica del silicio è molto maggiore di quella del molding compound a parità di frequenza considerata (a 2 Hz la lunghezza di

diffusione termica del silicio è circa 17 volte maggiore di quella della resina), ed inoltre lo spessore della resina è molto maggiore rispetto alla profondità del difetto dalla passivazione: per questi motivi lo sfasamento dovuto al silicio è trascurabile.

Sono stati quindi analizzati 5 dispositivi le cui Failure Analysis sono state concluse con il ritrovamento del difetto tramite analisi fisica a differenti altezze. Le misure sono state effettuate a 2 Hz e scegliendo la lente adeguata alla grandezza degli spot, quindi si tratta di lenti 1x e 5x. È stato inoltre applicato alle misure il filtro “median 3x3”, già descritto precedentemente nel capitolo. La

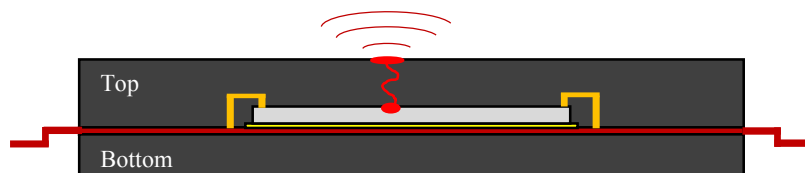


Figura 6.15: Schema di analisi frontside

selezione dell'area per il calcolo della fase media è stato fatto manualmente, andando a considerare un'area in cui il segnale di ampiezza era maggiormente concentrato e ben localizzato. Nella Tabella 3 sono riportati i dati relativi a tali misure, con incluso il valore di 0°-phase trovato come descritto del paragrafo 6.1.3, e la risultante differenza di fase, cioè la fase assoluta. L'altezza del molding compound è diversa a seconda del dispositivo considerato e sono stati tenuti in considerazione i valori forniti dagli standard di processo.

Device	Lens	Frequency (Hz)	Phase (°)	0-Phase (°)	ΔFase (°)
Andorra4M pezzo A	5x	2	127,36	17,738	109,622
Velvety 6.3	1x	2	118,95	22,876	96,074
Velvety 6.0	5x	2	115,4	17,738	97,662
Andorra4M #138	1x	2	124,15	22,876	101,274
Andorra4M pezzo C	1x	2	120,24	22,876	97,364

Tabella 3: Valori per analisi frontside

Dal valore del  $\Delta$ fase e dalla profondità del molding compound è stato ottenuto il  $\mu_{equivalente}$  tramite l'espressione ( 3.9 ). La media dei parametri  $\mu_{equivalente}$  risulta

$$\overline{\mu_{equivalente}} = 236,51 \mu m \quad ( 6.4 )$$

Tale valore è da confrontarsi con il valore ottenibile utilizzando i dati del molding compound espressi nella Tabella 1 a pagina 67, che sempre per 2 Hz risulta

$$\mu_{teorico-MC} = 222,05 \mu m \quad ( 6.5 )$$

Il valor medio trovato risulta allora in buon accordo con il valore ottenibile dai dati della Tabella 1.

Per valutare l'affidabilità del calcolo della profondità del difetto tramite il segnale di fase, è necessario confrontare quanto risulta l'errore sulla profondità ottenibile utilizzando il  $\overline{\mu_{equivalente}}$ .

Device	Errore assoluto ( $\mu m$ )
Andorra4M pezzo A	22,68
Velvety 6.3	-13,25
Velvety 6.0	-6,70
Andorra4M #138	8,21
Andorra4M pezzo C	-7,93

Tabella 4: Errori utilizzando il valore sperimentale della lunghezza di diffusione termica

Nella Tabella 4 sono rappresentati gli errori che si ottengono dalla differenza tra il valore ottenuto tramite l'analisi fisica e il valore ottenibile tramite l'utilizzo del valore sperimentale del  $\overline{\mu_{equivalente}}$ .

Nel caso quindi della lock-in thermography di dispositivi a package integro e frontside, l'errore nella profondità ottenibile tramite il segnale di fase risulta essere paragonabile con le dimensioni delle strutture da analizzare. Per questo motivo un'analisi quantitativa non è in grado di fornire risultati sufficientemente

accurati. La maggior parte delle informazioni ottenibili in questo tipo di analisi sono dunque di tipo qualitativo circa la posizione spaziale degli spot. Infatti risulta possibile distinguere se tali spot sono posizionati sul die o invece corrispondono a problemi di package. Non risulta tuttavia possibile determinare se la sorgente di calore si trovi ad esempio sul pad, sulla ball o sul filo immediatamente sopra, questo anche a causa della variabilità dello spessore della moulding compound, che non risulta essere costante tra diversi dispositivi e non permette dunque la definizione e l'applicazione del  $\mu$  equivalente.

### 6.2.2 Analisi Backside

Già alcuni studi [10, 14, 28] hanno mostrato come sia possibile ottenere buona affidabilità quando si vuole indagare la profondità del difetto dal segnale di fase in dispositivi stacked-die, cioè in quei dispositivi all'interno dei quali sono impilati diversi die, come ad esempio le attuali schede di memoria sd.

Si vuole indagare ora, per dispositivi a singolo die, quale sia l'accuratezza e l'affidabilità che è possibile raggiungere nello studio della profondità del difetto tramite misura del segnale di fase della lock-in thermography per analisi backside (Figura 6.16). Questa misura quantitativa, come già menzionato, può semplificare il lavoro ed incrementare l'efficienza del Failure Analysis Engineer in quanto fornisce maggiori informazioni sfruttabili per correlarle con ciò che è ricavabile da altre tecniche. Sono stati tenuti in considerazione solamente quei dispositivi aperti backside poiché nel caso di dispositivi aperti frontside, data la

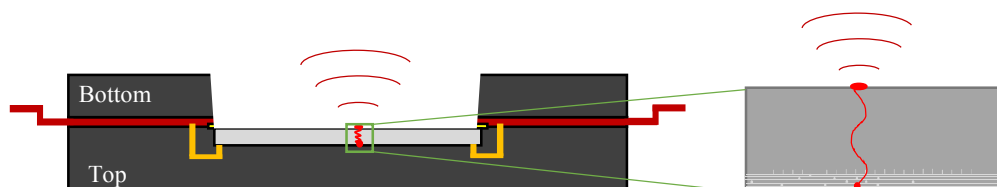


Figura 6.16: Schema di analisi backside

conformazione non planare dei livelli superiori del die, si veda ad esempio la Figura 6.17, non è risultato possibile capire dove esattamente il sistema sia a fuoco. Ciò invece è possibile nel caso di die esposto backside, purché il silicio sia poco drogato, altrimenti esso non risulta più trasparente: in questi casi il fuoco viene posto al livello della Metall.

Il flusso di analisi dei dati è analogo a quello presentato nel caso di dispositivo chiuso e analizzato da fronte, ed anche in questo caso è stato applicato il filtro “median3x3” per la riduzione del rumore. Come già citato, tale filtro sostituisce il valore di ogni pixel con la media dei pixel nell’area di 3x3 pixel centrata sul pixel in analisi stesso. La selezione dell’area per il calcolo della fase media è stata fatta manualmente, andando a selezionare un’area in cui il segnale di ampiezza è maggiormente concentrato e ben localizzato. Sono stati considerati dispositivi diversi con problematiche differenti ed i valori di fase ottenuti sono elencati nella

Tabella 5. La scelta dei parametri delle misure è stata ottimizzata per ogni dispositivo, andando quindi a scegliere un ingrandimento non troppo elevato per non avere uno spread eccessivo dello spot, e la frequenza è stata fissata a 25Hz.

Device	Lens	Frequency (Hz)	Phase (°)	0-Phase (°)	$\Delta$ Fase (°)
Andorra4M pezzo F	5x	25	141,27	139,49	1,78
Andorra4M pezzo F	10x	25	140,75	139,38	1,37
Monaco1M5 #11	10x	25	138,83	139,38	-0,55
Monaco1M5 #11	5x	25	139,19	139,49	-0,3
Andorra4M pezzo B	5x	25	140,25	139,49	0,76
Andorra4M pezzo C	10x	25	141,41	139,38	2,03
Andorra4M pezzo A	10x	25	135,38	139,38	-4,00

Tabella 5: Valori per analisi backside



Con un procedimento del tutto analogo all'analisi a package chiuso, cioè sottratto il valore dello zero della fase e utilizzato il valore della profondità ottenuto una volta eseguita l'analisi fisica sul dispositivo, è stato trovato il  $\overline{\mu_{equivalente}}$  ed è stata calcolata l'accuratezza per ogni caso analizzato utilizzando tale valore. Quindi utilizzando l'espressione (3.9), la media dei parametri  $\mu_{equivalente}$  risulta

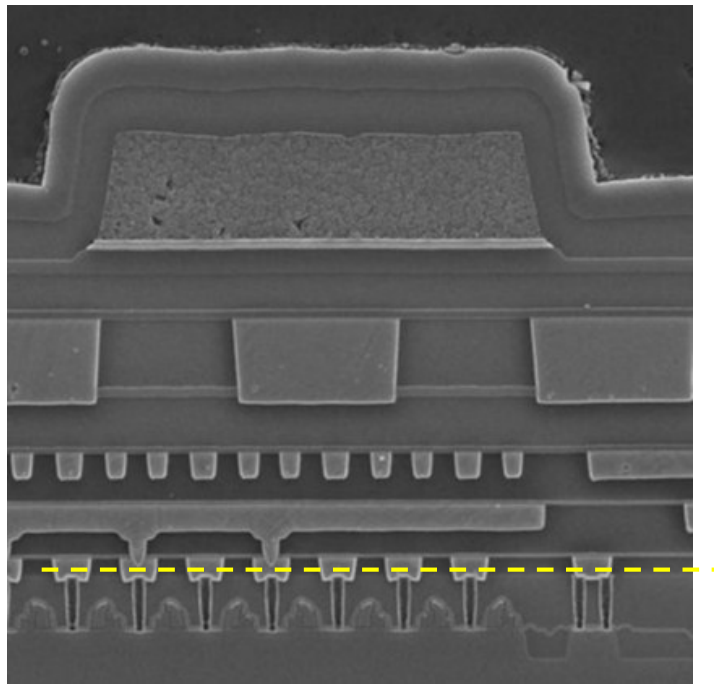


Figura 6.17: Cross section di un die. La linea gialla rappresenta il fuoco

$$\overline{\mu_{equivalente}} = 40,73 \mu m \quad (6.6)$$

Tale valore risulta essere minore rispetto alla lunghezza di diffusione termica a 25Hz di un ossido come il  $\text{SiO}_2$  o, a maggior ragione, del rame che costituisce le metal, i cui valori sono

$$\mu_{teorico-SiO_2} = 92,50 \mu m \quad (6.7)$$

$$\mu_{teorico-Cu} = 1131,65 \mu m$$

Ci si aspetterebbe che i valori di  $\overline{\mu_{equivalente}}$  risultino essere una media dei materiali presenti tra la superficie del dispositivo (per il caso delle analisi a



package chiuso) o tra la metal (per il caso di dispositivo aperto backside), e la zona su cui è localizzato il difetto. Tuttavia il valore ottenuto è minore della lunghezza di diffusione termica dei materiali che compongono il die. Come nel caso frontside a package chiuso presentato nel paragrafo precedente, in

Tabella 6 è presentato l'errore assoluto cioè la differenza tra la profondità calcolata con la lunghezza di diffusione termica sperimentale e la profondità ottenuta tramite l'analisi fisica.

Device	Errore assoluto ( $\mu\text{m}$ )
Andorra4M pezzo F	0,12
Andorra4M pezzo F	-0,18
Monaco1M5 #11	0,01
Monaco1M5 #11	0,19
Andorra4M pezzo B	-0,15
Andorra4M pezzo C	0,75
Andorra4M pezzo A	-3,54

Tabella 6: Errori utilizzando il valore sperimentale della lunghezza di diffusione termica

Da tali risultati è possibile notare come in alcuni casi la misura sia molto affidabile, dato che risulta un ottimo accordo tra i valori ottenuti con il modello e i valori ottenuti tramite l'analisi fisica.

Questo importante risultato mostra che il livello di accuratezza tra la posizione del difetto prevista e trovata tramite analisi fisica per la maggior parte dei casi in analisi risulta in accordo di  $\pm 1$  layer. Ciò comporta una modifica sostanziale del flusso di Failure Analysis poiché risulta possibile ottenere informazioni sulla posizione del difetto tramite una sola tecnica, mentre l'attuale flusso di lavoro consiste nell'utilizzo di più tecniche per la fault isolation per poi passare alla defect observation (paragrafo 2.3). In questo modo, è quindi possibile ottenere risultati preliminari in tempi molto brevi dato che risulta necessario solo rimuovere la moulding compound e la frame dal retro del dispositivo, una volta esclusi problemi di package con tecniche opportune, ed eseguire la misura di lock-in thermography. Una volta calcolata la profondità della sorgente di calore è

quindi possibile procedere tramite ulteriori tecniche per confermare la posizione dello spot e successivamente procedere con l'analisi fisica del dispositivo, come prevede il normale flusso di lavoro di Failure Analysis. In contemporanea, però, ora è possibile procedere con la localizzazione tramite layout e la formulazione delle ipotesi dei motivi che possono aver portato al fallimento ancora prima dell'analisi fisica, portando quindi a diminuzione del tempo di analisi, dato che può non risultare necessario procedere con l'analisi fisica, e quindi ad una maggiore reattività. Inoltre risulta che la lock-in thermography è l'unica tra le tecniche della Failure Analysis in grado di fornire la profondità del difetto senza procedere tramite analisi fisica.

Si è successivamente passati all'analisi a maggiore frequenza, e per fare ciò è stato necessario diminuire il numero di pixel. Si è perciò selezionata una grandezza della camera di 256x256 pixel, ottenendo così una frequenza di frame o frequenza di sampling di 350,34Hz, a cui corrisponde una frequenza massima per il lock-in, per il teorema del campionamento, ( 4.12 ), pari a 87,585Hz.

Per questo tipo di analisi sono stati considerati tre dispositivi, ed i dati risultanti sono rappresentati nella tabella sottostante:

Device	Lens	Frequency (Hz)	Phase (°)	0-Phase (°)	$\Delta$ Fase (°)
Andorra4M pezzo A	10x	87,585	136,83	140,84	-4,01
Andorra4M pezzo C	10x	87,585	137,21	140,84	-3,63
Andorra4M pezzo D	10x	87,585	135,83	140,84	-5,01

*Tabella 7: Valori ad alta frequenza per analisi backside*

Tuttavia in tutti questi casi risulta un delta della fase negativo. Ciò è dovuto principalmente al rumore, maggiormente presente ad alte frequenze, che ha influenzato sia queste misure sia le misure per determinare l'offset. Quindi a causa di tale rumore non è stato possibile procedere con gli ulteriori calcoli già svolti per gli altri casi studiati.

## 7 Conclusioni

La termografia in lock-in risulta essere una tecnica molto valida ed utile per ottenere informazioni di natura diversa e complementari rispetto a tecniche come OBIRCh ed EMMI. La letteratura ha già mostrato che è possibile ottenere importanti informazioni tramite lock-in thermography, come ad esempio è possibile ricavare la forma del difetto e la mappa di dissipazione di potenza tramite deconvoluzione [3,29] o tramite il segnale di ampiezza, la valutazione del tempo di vita dei portatori di carica o la densità degli stessi portatori nel caso di celle fotovoltaiche [3]. Inoltre è stato mostrato [28] che è possibile individuare con buona precisione su quale chip si trovi il difetto nel caso di dispositivi multi-die, cioè dispositivi con più die impilati uno sopra l'altro.

Il primo passo per ottenere informazioni dalla tecnica è la determinazione di quali sono gli spot anomali visibili tramite lock-in thermography: per fare ciò è necessario confrontare i risultati ottenuti sul dispositivo in analisi con quelli ottenibili su un dispositivo di riferimento nelle stesse condizioni; questo accorgimento è necessario soprattutto nei casi in cui sia necessario alimentare il dispositivo, poiché si hanno molti circuiti interni in cui scorre corrente e quindi si avranno molti spot, la maggior parte dei quali non anomali. Nell'approssimazione di sorgente di calore coincidente con il difetto, utilizzata in tutto questo lavoro di tesi, risulta allora possibile una prima analisi dei dispositivi a package integro e frontside. Un'analisi qualitativa permette di distinguere, utilizzando anche le informazioni ottenute con i raggi X, se il difetto si trova a livello di package o a livello di die. Questo primo passo semplifica molto il lavoro al Failure Analysis

Engineer, in quanto non ci sono altre tecniche non distruttive altrettanto veloci e accurate per ottenere una così importante informazione. Utilizzando invece l'analisi quantitativa del segnale di fase, sempre per dispositivi a package integro e frontside, i risultati hanno mostrato che non è possibile ottenere informazioni significative, come ad esempio se il difetto si trova sul pad, sulla ball o sul filo appena sopra. Una determinazione precisa non è possibile anche a causa della variabilità dello spessore della resina posta sopra il die, le cui specifiche non sono sufficientemente stringenti, come invece vale per il caso dei livelli di metal e ossidi nel die. L'analisi qualitativa risulta essere quindi quella che fornisce maggiori informazioni nel caso di dispositivo integro e frontside.

Si è poi passati ad analizzare dispositivi aperti da retro. L'analisi qualitativa permette di individuare con una precisione limitata, rispetto a tecniche come OBIRCh ed EMMI, la posizione sul piano x-y del difetto e ciò è principalmente dovuto alla risoluzione spaziale limitata dalle alte lunghezze d'onda a cui il sensore ccd è sensibile. L'analisi quantitativa permette invece una precisione molto maggiore rispetto all'analisi da fronte a package chiuso. Infatti nella maggior parte dei casi mostrati è stato possibile determinare quale fosse il livello coinvolto dal difetto con una precisione di  $\pm 1$  layer. Questo importante risultato consente di effettuare prime ipotesi ancora prima di aver completato l'analisi fisica, che risulta ora essere maggiormente indirizzata. Questi due fatti portano ad un aumento del success rate e ad una riduzione del "cycle time", che sono i principali indicatori di efficienza del processo di Failure Analysis. Infine la termografia in lock-in risulta essere l'unica tra le tecniche della Failure Analysis in grado di fornire dettagli importanti sulla profondità del difetto senza dover distruggere il dispositivo.

Ci sono tuttavia dei problemi intrinseci che possono rappresentare dei limiti nel calcolo della profondità del difetto. Il primo problema è dovuto al fattore umano: il fuoco viene aggiustato manualmente dall'utente, e quindi se il piano focale non

è correttamente impostato, si ha un errore nell'interpretazione dello stesso segnale di fase. Inoltre la regione di interesse (ROI), in cui viene calcolata la fase media, viene anch'essa selezionata manualmente. Un ulteriore problema risiede nelle caratteristiche del sistema ottico dello strumento, infatti non è nota la profondità di fuoco (DOF Depth of Field), quindi non possibile determinare con massima precisione quanta porzione del dispositivo è messa a fuoco. Questi due limiti non permettono un'analisi quantitativa nel caso di dispositivi aperti frontside, data la non planarità del dispositivo sul fronte. Anche l'alta frequenza rappresenta un limite di tale tecnica. Infatti aumentando la frequenza diminuisce notevolmente il SNR e diventa difficile incrementarlo anche allungando i tempi di misura, e ciò non porta ad un aumento della risoluzione come invece era auspicabile teoricamente. Infine anche la lunghezza di diffusione termica calcolata per ciascun valore della fase sperimentale ha una precisione limitata poiché gli spessori considerati (resina nel caso di analisi a dispositivo integro e frontside, e spessori dei layer nel caso di analisi a dispositivo aperto backside) sono quelli forniti dalle specifiche di processo ed esiste una certa variabilità accettata nell'implementazione fisica del processo stesso.

Un ulteriore limite è dovuto all'approssimazione utilizzata di sorgente di calore coincidente con il difetto: ciò non è sempre vero, poiché la sorgente di calore potrebbe essere invece un effetto. L'esperienza sui casi passati può aiutare nel comprendere quando gli spot rappresentano una causa e quando sono invece solo un effetto. Inoltre va tenuto conto che lo spot sarà tanto più evidente quanto più la temperatura aumenta localmente. Poiché la temperatura aumenta con il quadrato della densità di corrente, possono essere visibili spot che mascherano lo spot dovuto al difetto, e possono causare misure errate. Durante le misure sperimentali è stato trovato un esempio di questo tipo: si è osservato uno spot coincidente con il filo di bonding del pin candidato al fallimento, sia come posizione che come forma. Dopo un'analisi tramite Xray 2D che non ha mostrato

alcuna anomalia, il dispositivo è stato aperto da fronte per osservare i pad ed è stata trovata una grossa bruciatura sul die. Lo spot sul filo era dovuto alle maggiori densità di corrente e quindi al maggior riscaldamento del filo stesso rispetto all'effettivo punto di fallimento, cioè le strutture fuse del pad.

Ulteriori sviluppi di questa tecnica possono essere ottenuti andando a determinare le lunghezze di diffusione termica per differenti frequenze per poter determinare quale sia la più alta frequenza alla quale si ha un buon accordo con i risultati sperimentali. Ciò potrebbe anche essere svolto tramite simulazioni, a patto di definire una geometria opportuna che sappia ben approssimare tutti i livelli e i materiali presenti nel die. Infine in questo lavoro di tesi è stata considerata per l'analisi backside una sola tecnologia. Tuttavia l'analisi di tecnologie più avanzate potrebbe essere maggiormente critica a causa delle minori dimensioni e spessori dei layer.

## 8 Reference

- [1] X. Maldaque, Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing, WILEY, New York (2001).
- [2] JCH. Phang, DSH. Chan, M. Palaniappan, JM. Chin, B. Davis, M. Bruce, J. Wilcox, G. Gilfeather, CM. Chua, LS. Koh, HY. Ng, SH. Tan, A review of laser induced techniques for Microelectronics Failure Analysis, Proceedings of 11<sup>th</sup> IPFA (2004).
- [3] O. Breitenstein, W. Warta, M. Langenkamp, Lock-in Thermography Basics and Use for Evaluating Electronic Devices and Materials, SPRINGER, Second Edition (2010).
- [4] S.E. Aw, H.S. Tan, C.K. Ong, Optical absorption measurements of band-gap shrinkage in moderately and heavily doped silicon, J. Phys.: Condens. Matter 3 pag. 8213-8223 (1991).
- [5] R. Aron Falk, Near IR Absorption in Heavily Doped Silicon-An empirical approach, Proceedings of the 26<sup>th</sup> ISTFA (2000).
- [6] L. Tian, M. Wu, D. Fan, C. Wu, G. Wen, D. Wang, Thickness Measurement of Si Substrate with Infrared Laser of Optical Beam Induced Resistor Change (OBIRCH) in Failure Analysis, 20<sup>th</sup> IEEE Int. Symp. on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits (2013).
- [7] O. Breitenstein, C. Schmidt, F. Altmann, D. Karg, Thermal Failure Analysis by IR Lock-in Thermography, Microelectronics Failure Analysis Desk Reference, Sixth Edition.
- [8] R. Shlangen, H. Deslandes, R. Schussler, T. Lundquist, A. Reverdy, Enhanced Package- and die-level defect localization by dynamic lock-in thermography, 17th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems THERMINIC (2011).

- 
- [9] O. Breitenstein, J.P. Rakotoniaina, M. Hejjo Al Rifai, M. Gradhand, F. Altmann, T. Riediger, New development in IR Lock-in Thermography, [http://www-old.mpi-halle.mpg.de/mpi/publi/pdf/5921\\_04.pdf](http://www-old.mpi-halle.mpg.de/mpi/publi/pdf/5921_04.pdf)
- [10] C. Schmidt, F. Altmann, C. Grosse, A. Lindner, V. Gottshalk, Lock-in Thermography for 3-dimensional localization of electrical defects inside complex package devices, Proc. 34<sup>th</sup> Int. Symp. For Testing and Failure Analysis (2008).
- [11] D. May, B. Wunderle, R. Schacht, B. Michel, Transient Thermal Analysis as Failure Analytical Tool in Electronic Packaging, 13<sup>th</sup> Int. Conf. on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystem (2012).
- [12] L. Chengyan, Q. Fei, B. Zhaowei, Non-destructive Testing for Defects in Electronic Package based on Infrared Thermography, 14<sup>th</sup> Int. Conf. on Electronic Packaging Technology (2013).
- [13] C. Schmidt, F. Altmann, Non-destructive defect depth determination at fully packaged and stacked die devices using Lock-in Thermography, 17<sup>th</sup> IEEE Int. Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits (2010).
- [14] C. Schmidt, F. Altmann, F. Naumann, A. Lindnerk, Application of Lock-In-Thermography for 3d defect localisation in complex devices, 2<sup>nd</sup> electronics system integration technology conference (2010).
- [15] C. Henderson, D. Barton, E. Cole, M. Strizich, Failure and Yield Analysis, Semitracks inc (2002).
- [16] K. Sanchez, R. Desplats, F. Beaudoin, P. Perdu, S. Dudit, M. Vallet, D. Lewis, Dynamic Thermal Laser Stimulation Theory and Applications, 44<sup>th</sup> IEEE Reliability Physics Symposium Proceedings (2006).
- [17] A. N. Nowroz, G. Woods, S. Reda, Power Mapping of Integrated Circuits Using AC-Based Thermography, IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems (2012).
- [18] A. Reverdy, M. de la Bardonnie, L.F.Tz. Kwakman, M. Lamy, C. Wyon, A. Doukkali, H. Murray, P. Perdu, 3-D Defect Localization by Measurement and Modeling of the Dynamics of Heat Transport in Deep Sub-Micron Devices, Proc. 33<sup>rd</sup> Int. Symposium for Testing and Failure Analysis (2007).



- 
- [19] COMSOL Multiphysics 4.3, “Reference guide”.
- [20] COMSOL Multiphysics 4.3, “Introduction to Heat transfer module”.
- [21] COMSOL Multiphysics 4.3, “User’s guide”.
- [22] H. Fangohr, D. Chernyshenko, M Franchin, T. Fishbacher, G. Meier, Joule heating in nanowires, *Phys. Rev. B* 84, 054437 (2011).
- [23] C. Schmidt, F. Naumann, F. Altmann, S. Martens, Thermal Simulation of defect using Lock-in Thermography in complex and fully packaged devices, Thermal, IEEE 10th International Conference on Mechanical and Multi-Physics simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (2009) .
- [24] <http://it.wikipedia.org/>
- [25] H.S. Carslaw, J.C. Jaeger, *Conduction of Heat in Solids*, Clarendon Oxford, Second edition (1959).
- [26] DCG ELITE Users’ Manual
- [27] DCG ELITE Training material from Sector Technologies, October 2014
- [28] C. Schmidt, F. Altmann, O. Breitenstein, Application of lock-in thermography for Failure Analysis in integrated circuits using quantitative phase shift analysis, *Materials Science and Engineering: B Volume 177*, Pages 1261–1267 (2012).
- [29] A. N. Nowroz, G. Woods, S. Reda, Improved Post-Silicon Power Modeling Using AC Lock-In Techniques, 48th IEEE Design Automation Conference DAC (2011).
- [30] [http://dcgsystems.com/products/electrical-fault-analysis/elite\\_/](http://dcgsystems.com/products/electrical-fault-analysis/elite_/)



## 9 Appendice

```
clear all;
clc;
%Import .dat file from COMSOL Multiphysics and create an array
Risultati with these data
ScriptImportResultsComsol;

frequency=2;
Period=1/frequency;

coll = Risultati(:, 1);
uniqueDepth = unique(coll);

figure
hold all

index=1;
%%PLOT DATA
for k=1:length(uniqueDepth)
    thisDepth = uniqueDepth(k);
    indexesWithThisDepth = (coll == thisDepth);

    % Extract all rows with this depth and put into a cell
    array.
    theseDepth = Risultati(indexesWithThisDepth, 2:3); % Get
    cols 2 and 3

    % Assign to a new cell
    ca{k} = theseDepth;
    transiz=ca{k};

    plot(transiz(:,1),transiz(:,2));
    title(sprintf('Profilo Temperatura @freq = %g
    Hz', frequency));
    x(index)=thisDepth*1000000; %To use um as unit of measure
    legendInfo{index} = strcat('defect y coordinate =
    ', num2str(thisDepth*1000000)); %Create legend for each curve
    q=1;

    %% FITTING
```

```

        [maximum,timeMaximum]=findpeaks(transiz(:,2)); %find
maximum and corresponding time of maximum
        for i=3:length(timeMaximum) %selecting only from
third peak
fase(q)=mod(transiz(timeMaximum(i),1),Period)*frequency*360;
%formula to find PHASE SHIFT
            q=q+1;
        end

faseMEDIA(k)=mean(fase)-90; %Calculate mean phase, -90 due to
the fact that heat source is excited by sin function
Dev(k)=std(fase); %calculate standard deviation of phase
index=index+1;
end
legend(legendInfo)
figure
hold all
errorbar(700-x,faseMEDIA,Dev); %plot the phase value found with
std
title(sprintf('Phase shift @freq = %g Hz',frequency));

%% PLANE WAVE APPROXIMATION
%data for Mould Compound
lambda=0.6; %thermal conductivity in W/(m*K)
cp=1070; %specific heat in J/(kg*K)
ro=1810; %density in kg/m^3
mu=sqrt(lambda/(cp*ro*pi*frequency))*1000000; %diffusivity in
m^2/s
f2= @(x1) x1/mu*180/pi; %Formula for phase shift in this
approximation
for y=1:430
planewave(y)=f2(y);
end
a=f2(430);

%data for Silicon
lambda=149; %thermal conductivity in W/(m*K)
cp=700; %specific heat in J/(kg*K)
ro=2330; %density in kg/m^3
mu=sqrt(lambda/(cp*ro*pi*frequency))*1000000; %diffusivity in
m^2/s
f2= @(x1) x1/mu*180/pi/2; %Formula for phase shift in this
approximation
for y=430:700
    planewave(y)=a-f2(430-y);
end
xcooord=1:700;
plot(xcooord,planewave(xcooord)) %Plot the approximation in the
same figure

```