



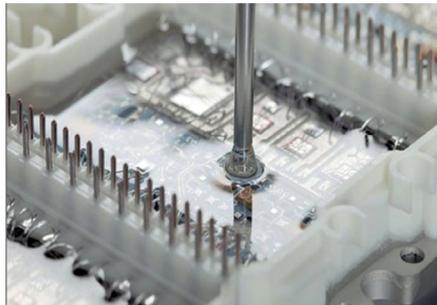
UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CATANIA
Dipartimento di Ingegneria Industriale

Dottorato di ricerca in Scienza e Tecnologia dei Materiali
XXVII Ciclo

Tesi di dottorato:

**MATERIALI E TECNOLOGIE PER L'ELETTRONICA DI
POTENZA**

GIULIA M. A. COZZO



Tutor:
Prof. Ing. Gianluca Cicala
Coordinatore:
Prof.ssa Maria Grazia Grimaldi

CATANIA
Dicembre 2014

Indice

Indice.....	ii
Elenco delle Figure.....	i
Elenco delleTabelle	i
1. Introduzione.....	1
1.1 Il packaging nell'elettronica	1
1.2 Obiettivi della tesi.....	6
1.3 Organizzazione tesi	7
2. L'elettronica di potenza	9
2.1 Introduzione.....	9
2.2 I dispositivi di potenza.....	11
2.2.1 Multi-Die.....	11
2.2.2 Single-Die	16
2.2.3 Problematiche dei dispositivi di potenza.....	18
3. Materiali per l'elettronica.....	25
3.1 Introduzione.....	25
3.2 Materiali per incapsulamento	27

3.3	Requisiti dei materiali per incapsulamento	31
3.3.1	Proprietà fisiche	33
3.3.2	Proprietà meccaniche.....	33
3.3.3	Proprietà termiche.....	34
3.4	Processi di incapsulamento	37
3.4.1	Molding.....	37
3.4.2	Liquid encapsulation.....	38
4.	Nanocompositi conduttivi a matrice polimerica.....	39
4.1	Introduzione	39
4.2	Matrici.....	41
4.3	Filler	44
4.4	Teoria della percolazione	47
5.	Analisi sperimentale: sviluppo di nano compositi conduttivi.....	55
5.1	Introduzione	55
5.2	Tecniche di caratterizzazione	57
5.2.1	Analisi dinamico-meccanica (DMA).....	57
5.2.2	Microscopia a scansione elettronica (SEM)	62
5.2.3	Analisi termomeccanica (TMA)	64
5.2.1	Analisi reologica.....	64
5.2.2	Analisi di conducibilità termica.....	66
5.2.3	Modelli per conducibilità termica di sistemi compositi	68
5.3	Composti con nanotubi di carbonio.....	73
5.3.1	Preparazione e caratterizzazione miscele 1° parte.....	74

5.3.2	Preparazione e caratterizzazione miscele 2°parte	80
5.4	Composti con particelle di nitruro di boro.....	91
5.5	Caratterizzazione composti commerciali.....	100
6.	Modellazione termica di un dispositivo di potenza.....	109
6.1	Materiali e metodi.....	111
6.2	Risultati e considerazioni	114
6.3	Analisi termica di un dispositivo di potenza con dissipatore	119
6.4	Analisi termica di un modulo di potenza.....	125
7.	Modellazione di un packaging altamente conduttivo.....	127
8.	Thermal interface materials	139
8.1	Introduzione.....	139
8.2	Stato dell'arte di Thermal Interface Materials.....	142
8.3	Lavoro sperimentale su TIM	149
9.	Analisi strutturale.....	159
9.1	Introduzione.....	159
9.2	Modellazione strutturale di un dispositivo di potenza.....	162
9.3	Modellazione strutturale di un packaging altamente conduttivo.	167
10.	Analisi economica	173
11.	Conclusioni.....	175
12.	Bibliografia.....	181

ELENCO DELLE FIGURE

FIGURA 1 - LIVELLI DI PACKAGING.....	1
FIGURA 2 - LIVELLI DI INTERCONNESSIONE DI UN PACKAGING.....	4
FIGURA 3 - DISCIPLINE COINVOLTE NEL PACKAGING.....	5
FIGURA 4 - APPLICAZIONI DELL'ELETTRONICA DI POTENZA.....	10
FIGURA 5 - MODULI DI POTENZA.....	12
FIGURA 6 - COMPONENTI DI UN MODULO DI POTENZA.....	12
FIGURA 7 - RAPPRESENTAZIONE A STRATI DI UN MODULO DI POTENZA.....	13
FIGURA 8 - PROCESSO DI PRODUZIONE DI UN MODULO DI POTENZA.....	14
FIGURA 9 - DISPOSITIVO DI POTENZA SINGLE-DIE TO220.....	17
FIGURA 10 - ANDAMENTO DEL 'FAILURE RATE' IN FUNZIONE DELLA TEMPERATURA.....	19
FIGURA 11 - RESISTENZE TERMICHE PRESENTI IN UN DISPOSITIVO DI POTENZA.....	20
FIGURA 12 - ESEMPI DI DISSIPATORI.....	23
FIGURA 13 - ESEMPI DI PACKAGES.....	29
FIGURA 14 - TIPICA COMPOSIZIONE DI UN EPOXYMOLDINGCOMPOUND.....	30

FIGURA 15 - EPOXY MOLDING COMPOUND IN POLVERE E IN PELLETTI	30
FIGURA 16 - PROPRIETÀ TIPICHE RICHIESTE PER UN PACKAGING	32
FIGURA 17 - COMPORTAMENTO STRESS-STRAIN DI MATERIALI PER INCAPSULAMENTO	34
FIGURA 18 - CTE DI ALCUNI MATERIALI PER INCAPSULAMENTO	35
FIGURA 19 - TEMPERATURA DI TRANSIZIONE VETROSA DEI POLIMERI.....	36
FIGURA 20 - PROCESSO DI TRANSFER MOLDING	38
FIGURA 21 - ESEMPIO DI 'LIQUID ENCAPSULATION'	38
FIGURA 22 - COMPONENTI ELETTRONICI RICOPERTI DA SILICONE	40
FIGURA 23 - VANTAGGI E SVANTAGGI DI ALCUNI POLIMERI PER INCAPSULAMENTO	41
FIGURA 24 - PROPRIETÀ DEI COMUNI INCAPSULANTI POLIMERICI PER PACKAGING ELETTRONICO	43
FIGURA 25 - PROPRIETÀ GENERALI DI MATRICI POLIMERICHE	44
FIGURA 26 - VANTAGGI E SVANTAGGI DELL'UTILIZZO DEI FILLER	46
FIGURA 27 - TIPICI FILLER E RELATIVE CARATTERISTICHE	46
FIGURA 28 - CONDUCIBILITÀ TERMICA DI ALCUNI FILLER CONDUTTIVI TERMICAMENTE	47
FIGURA 29 - EFFETTO DELLA FRAZIONE VOLUMETRICA SULLA RESISTIVITÀ DI ADESIVI TERMICAMENTE CONDUTTIVI	48
FIGURA 30 - ANDAMENTO DELLA RESISTIVITÀ ELETTRICA IN FUNZIONE DELLA FRAZIONE VOLUMETRICA DI FILLER.....	49
FIGURA 31 - RESISTIVITÀ DI NANOPARTICELLE DI AG IN FUNZIONE DELLA FRAZIONE VOLUMETRICA	50

FIGURA 32 - RESISTIVITÀ DI PARTICELLE MICRO E MIXED (MICRO E NANO) DI AG IN FUNZIONE DELLA FRAZIONE VOLUMETRICA	50
FIGURA 33 - INFLUENZA DELLE DIMENSIONI DELLE PARTICELLE SULLE PROPRIETÀ TERMICHE DEL COMPOSITO.....	51
FIGURA 34 - CONDUCEBILITÀ TERMICA DI NANOCOMPOSITI IN FUNZIONE DELLA FRAZIONE VOLUMETRICA DI CNT	52
FIGURA 35 - VISCOSITÀ IN FUNZIONE DELLA FRAZIONE VOLUMETRICA	53
FIGURA 36 - CONDUCEBILITÀ TERMICA IN FUNZIONE DELLA FRAZIONE VOLUMETRICA.....	53
FIGURA 37 - RISPOSTA IN FASE DI UN SISTEMA ELASTICO.....	59
FIGURA 38 - RISPOSTA FUORI FASE DI UN SISTEMA VISCOSO	59
FIGURA 39 - RISPOSTA MISTA DI UN SISTEMA VISCOELASTICO	60
FIGURA 40 - STRUMENTO DMA	62
FIGURA 41 - TIPOLOGIE DI MISURE ESEGUITE CON IL REOMETRO	65
FIGURA 42 - STRUMENTO LASER FLASH NETZSCH	67
FIGURA 43 - ANDAMENTO DELLA CONDUCEBILITÀ TERMICA CALCOLATA CON IL MODELLO DI KNAPPE (ROSSO) E DI MAXWELL (BLU).....	69
FIGURA 44 - MODELLI PER LA PREDIZIONE DELLA CONDUCEBILITÀ TERMICA	70
FIGURA 45 - PARAMETRI PER IL MODELLO DI LEWIS-NIELSEN	71
FIGURA 46 - PARAMETRI PER IL MODELLO DI LEWIS-NIELSEN	72
FIGURA 47 - MODELLO DI LEWIS NIELSEN.....	72
FIGURA 48 - MISURE DI CONDUTTIVITÀ ELETTRICA DI COMPOSTI EPOXY/CNT	73

FIGURA 49 - CARATTERISTICHE DEI NANOTUBI DI CARBONIO BAYTUBES DELLA BAYER	74
FIGURA 50 - EFFETTO DI DIFFERENTI QUANTITÀ DI CNT E SILICE M5	76
FIGURA 51 - EFFETTO DI DIFFERENTI QUANTITÀ DI CNT E SILICE TS720	76
FIGURA 52 - TANδ DELLE MISCELE IN ESAME: EFFETTO DELLA SILICE M5 ..	77
FIGURA 53 - TANδ DELLE MISCELE IN ESAME: EFFETTO DELLA SILICE TS720	77
FIGURA 54 - CONDUCIBILITÀ TERMICA OTTENUTA IN ACCORDO AL MODELLO DI LEWIS-NIELSEN.....	79
FIGURA 55 - CARATTERISTICHE DEI NANOTUBI GRAPHISTRENGHT	83
FIGURA 56 - IMMAGINE SEM DEL CAMPIONE CARICATO CON 1WT% NON PRESONICATO	84
FIGURA 57 - IMMAGINE SEM DEL CAMPIONE CARICATO CON 1WT% PRESONICATO	84
FIGURA 58 - IMMAGINE SEM DEL CAMPIONE CARICATO CON 1WT% PRESONICATO	85
FIGURA 59 - ANDAMENTO DEL MODULO PER IL CAMPIONE MWCNT 1WT% NON PRESONICATO.....	86
FIGURA 60 - ANDAMENTO DEL MODULO PER IL CAMPIONE MWCNT 1WT% PRESONICATO	86
FIGURA 61 - ANALISI TMA PER IL CAMPIONE MWCNT1% PRESONICATO.	87
FIGURA 62 - ANALISI TMA PER IL CAMPIONE MWCNT 1% NON PRESONICATO	88
FIGURA 63 - PROPRIETÀ TERMOFISICHE DEL CAMPIONE DGEBA/MWCNT 1% PRESONICATO	89

FIGURA 64 - CONDUCIBILITÀ TERMICA DEL CAMPIONE DGEBA/MWCNT 1% PRESONICATO	89
FIGURA 65 - PROPRIETÀ TERMOFISICHE DEL CAMPIONE DGEBA/MWCNT 1% NON PRESONICATO	90
FIGURA 66 - CONDUCIBILITÀ TERMICA DEL CAMPIONE DGEBA/MWCNT 1% NON PRESONICATO	90
FIGURA 67 - PROPRIETÀ TERMICHE DI COMPOSITI EPOXY/BNNT.....	91
FIGURA 68 - CONDUCIBILITÀ TERMICA DI COMPOSITI CARICATI CON PARTICELLE DI BN	92
FIGURA 69 - CONDUCIBILITÀ TERMICA DI VARI COMPOSITI CARICATI CON BN	92
FIGURA 70 - CARATTERISTICHE DELLE POLAR THERM PTX25 E PTX60	93
FIGURA 71 - CONFRONTO TRA DIVERSE PARTICELLE	94
FIGURA 72 - IMMAGINE SEM DELLE SINGOLE PARTICELLE DI NITRURO DI BORO	95
FIGURA 73 - IMMAGINE SEM DEI CAMPIONI CARICATI CON 1WT% DI BN...	96
FIGURA 74 - IMMAGINE SEM DEI CAMPIONI CARICATI CON 5WT%	96
FIGURA 75 - ANALISI DMA PER IL CAMPIONE CARICATO CON 1WT%BN....	97
FIGURA 76 - ANALISI DMA PER IL CAMPIONE CARICATO CON 5WT%BN....	97
FIGURA 77 - PROPRIETÀ TERMOFISICHE DEL CAMPIONE DGEBA/BN 1%...	98
FIGURA 78 - CONDUCIBILITÀ TERMICA DEL CAMPIONE DGEBA/BN 1%	98
FIGURA 79 - PROPRIETÀ TERMOFISICHE DEL CAMPIONE DGEBA/BN 5%...	99
FIGURA 80 - CONDUCIBILITÀ TERMICA DEL CAMPIONE DGEBA/BN 5%	99
FIGURA 81 - IMMAGINE SEM HENKEL GR640A.....	101
FIGURA 82 - IMMAGINE SEM HENKEL GR640A.....	101

FIGURA 83 - IMMAGINE SEM HITACHI GE880B	102
FIGURA 84 - IMMAGINE SEM HITACHI GE880B	102
FIGURA 85 - ANALISI DMA DELLA RESINA COMMERCIALE SUMITOMO G620A	103
FIGURA 86 - DATASHEET DELLA RESINA SUMITOMO G620A	104
FIGURA 87 - ANALISI TMA PER LA RESINA HENKEL GR640A	105
FIGURA 88 - ANALISI TMA PER LA RESINA HITACHI GE880B	105
FIGURA 89 - PROPRIETÀ TERMOFISICHE DELLA RESINA HENKEL GR640A	106
FIGURA 90 - CONDUCIBILITÀ DELLA RESINA HENKEL GR640A	107
FIGURA 91 - PROPRIETÀ TERMOFISICHE DELLA RESINA HITACHI GE880B	107
FIGURA 92 - CONDUCIBILITÀ TERMICA DELLA RESINA HITACHI GE880B	108
FIGURA 93 - CONDUCIBILITÀ TERMICA DI TUTTI I CAMPIONI ESAMINATI...	108
FIGURA 94 - GEOMETRIA DEL DISPOSITIVO “SINGLE DIE” ANALIZZATO	113
FIGURA 95 - ANDAMENTO DI TMAX E TMIN IN FUNZIONE DI λ_{CASSA}	116
FIGURA 96 - DISTRIBUZIONE DI TEMPERATURA PER IL CASO $\lambda=0,8$ W/MK	117
FIGURA 97 - DISTRIBUZIONE DI TEMPERATURA PER IL CASO $\lambda = 5$ W/MK .	117
FIGURA 98 - I TRE MECCANISMI DI PROPAGAZIONE DEL CALORE NEL CASO DI UN DISPOSITIVO ELETTRONICO FISSATO AD UN DISSIPATORE	121
FIGURA 99 - RESISTENZE TERMICHE TRA CHIP ED AMBIENTE ESTERNO	122
FIGURA 100 - GEOMETRIA DEL DISPOSITIVO TO220 MONTATO SU UN DISSIPATORE	123

FIGURA 101 - ANDAMENTO DELLA TEMPERATURA DI UN DISPOSITIVO T0220 MONTATO SU UN DISSIPATORE	124
FIGURA 102 - GEOMETRIA DEL MODULO DI POTENZA STA1.....	125
FIGURA 103 - MODULO STA1 CHIUSO.....	126
FIGURA 104 - ANDAMENTO DELLA TEMPERATURE PER IL MODULO STA1	126
FIGURA 105 - EFFETTI DEL LAVORO DI MODELLAZIONE	127
FIGURA 106 - LASTRE TPG PRODOTTE DALLA DITTA MOMENTIVE	129
FIGURA 107 - CARATTERISTICHE DELLE LASTRE TPG	129
FIGURA 108 - CASSA DEL DISPOSITIVO TO220 COSTITUITO DA RESINA E LASTRE DI GRAFITE	130
FIGURA 109 - IMPOSTAZIONE DELLA CONDUCIBILITÀ TERMICA ORTOTROPICA DI UN MATERIALE	131
FIGURA 110 - IMMAGINE CASO STANDARD.....	132
FIGURA 111 - CASO 5 TPG.....	133
FIGURA 112 - CASO 7 TPG.....	133
FIGURA 113 - CASO 17 TPG.....	134
FIGURA 114 - CASO 20 TPG.....	134
FIGURA 115 - CASO 30 TPG (FRONTE)	135
FIGURA 116 - CASO 30 TPG (RETRO)	135
FIGURA 117 - CASO 30 TPG (DETTAGLIO).....	136
FIGURA 118 - ANDAMENTO DELLA TEMPERATURA IN FUNZIONE DEL VOLUME DI MATERIALE CONDUTTIVO.....	137
FIGURA 119 - CARATTERISTICHE DI ALCUNI TIPICI THERMAL INTERFACE MATERIALS	140
FIGURA 120 - AREA DI CONTATTO TRA DUE SOLIDI	141

FIGURA 121 - RESISTENZA TERMICA.....	141
FIGURA 122 - RAPPRESENTAZIONE SCHEMATICA DI UNTIM.....	142
FIGURA 123 - CONFRONTO IN TERMINI DI RESISTIVITÀ DI DIVERSE TIPOLOGIE DI MATERIALI USATI COME SOLDERNEI DISPOSITIVE ELETTRONICI.....	144
FIGURA 124 - CONDUCIBILITÀ TERMICA DI ALCUNI CAMPIONI CARICATI CON CNT E CB.....	145
FIGURA 125 - PROPRIETÀ ELETTRICHE DI COMPOSITI CNT/AG/EPOXY	145
FIGURA 126 - LASTRE DI GRAFITE PER APPLICAZIONI ELETTRONICHE.	146
FIGURA 127 - RESISTENZA TERMICA IN FUNZIONE DEL BLT.....	147
FIGURA 128 - RISULTATI TERMICI PER NANO-TIMCONSiC.....	148
FIGURA 129 - CONFRONTO NANO-TIM IN ESAME CON PRODOTTI COMMERCIALI.....	148
FIGURA 130 - PIANO DEGLI ESPERIMENTI IMPOSTATO PER L'ANOVA	150
FIGURA 131 - DIAMETRO MEDIO IN FUNZIONE DELLA CONCENTRAZIONE DELLA SOLUZIONE	151
FIGURA 132 - DENSITÀ SUPERFICIALE IN FUNZIONE DELLA CONCENTRAZIONE DELLA SOLUZIONE.....	152
FIGURA 133 - TABELLA RIEPILOGATIVA DEL PIANO DEGLI ESPERIMENTI IMPOSTATO	152
FIGURA 134 - DENSITÀ SUPERFICIALE IN FUNZIONE DEL FLUSSO.....	153
FIGURA 135 - IMMAGINI SEM DELLE FIBRE ELETTROSPINNATE E DISTRIBUZIONE DEI DIAMETRI	154
FIGURA 136 - PLOT DI INTERAZIONE DEGLI EFFETTI TRA I FATTORI.....	154
FIGURA 137 - IMMAGINE SEM FIBRE ELETTROSPINNATE CON 1WT% DI CNT	155

FIGURA 138 - IMMAGINE SEM FIBRE ELETTROSPINNATE CON 1WT% DI CNT	156
FIGURA 139 - IMMAGINE SEM FIBRE ELETTROSPINNATE CARICATE CON CNT.....	157
FIGURA 140 - IMMAGINE SEM FIBRE ELETTROSPINNATE CARICATE CON CNT.....	157
FIGURA 141 - CRACK DI UN INTERCONNESSIONE ELETTRICA DOVUTO AD UN ERRATO RICOPRIMENTO DEL FILO	160
FIGURA 142 - CRACK NEL CASO DI UN LEGAME DOPPIO.....	161
FIGURA 143 - ESEMPI DI CRACK SUL SILICIO DOVUTI A STRESS A FLESSIONE PRESENTI SUL BASEPATE	161
FIGURA 144 - VARI MECCANISMI DI FRATTURA OSSERVATI IN MODULI DI POTENZA.....	161
FIGURA 145 - ESEMPI DI FRATTURA DOVUTI A STRESS TERMICO	162
FIGURA 146 - VINCOLO PER L'ANALISI STRUTTURALE.....	164
FIGURA 147 - CARICO PER L'ANALISI STRUTTURALE	164
FIGURA 148 - DEFORMAZIONE TOTALE DEL DISPOSITIVO TO220.....	165
FIGURA 149 - DEFORMAZIONE SUL SILICIO DEL DISPOSITIVO TO220.....	166
FIGURA 150 - VON MISES STRESS SUL DISPOSITIVO T0220	166
FIGURA 151 - VINCOLO PER L'ANALISI STRUTTURALE.....	168
FIGURA 152 - CARICO PER L'ANALISI STRUTTURA	169
FIGURA 153 - DEFORMAZIONE TOTALE PER IL CASO PACKAGING CON TP. 169	
FIGURA 154 - DEFORMAZIONE SUL SILICIO PER IL CASO CON TPG.....	170
FIGURA 155 - VON-MISES STRESS SUL SILICIO PER IL CASO PACKAGING CON TPG.....	171

ELENCO DELLE TABELLE

TABELLA 1 - METODI SPERIMENTALI DELLA TECNICA DMA	61
TABELLA 2 - VALORI DI TG DEI CAMPIONI IN ESAME	78
TABELLA 3 - CONFRONTO DEI COEFFICIENTI DI ESPANSIONE TERMICA	106
TABELLA 4 - MATERIALI E RELATIVI VALORI DI CONDUCIBILITÀ TERMICA	113
TABELLA 5 - PARAMETRI PER L'ANALISI IN ESAME.....	114
TABELLA 6 - TMAX E TMIN IN FUNZIONE DI λ CASSA	116
TABELLA 7 - ANDAMENTO DI TMAX PER ALTI VALORI DI λ	118
TABELLA 8 - SPECIFICHE DEL CASO STANDARD	131
TABELLA 9 - SPECIFICHE DEI VARI CASI ESAMINATI E RISULTATI	136
TABELLA 10 - RIEPILOGO DEI CASI ESAMINATI E RISULTATI.....	137

TABELLA 11 - CONFRONTO TRA CARATTERISTICHE DI DIFFERENTI SOLDER	143
TABELLA 12 - PROPRIETÀ TERMICHE DELLE PASTE IN AG SINTERIZZATO E DEL SISTEMA BULK IN AG.....	144
TABELLA 13 - DATI DI INPUT PER L'ANALISI STRUTTURALE	163
TABELLA 14 - DATI DI INPUT PER L'ANALISI STRUTTURALE PER IL PACKAGING ALTAMENTE CONDUTTIVO.....	168
TABELLA 15 - DATI PER L'ANALISI ECONOMICA.....	173

1. INTRODUZIONE

1.1 IL PACKAGING NELL'ELETTRONICA

In elettronica con il termine “Package”, si intende il contenitore in cui sono racchiuse alcune tipologie di componenti elettronici.

Il packaging viene solitamente distinto in cinque livelli come riportato in Figura 1, anche se i più importanti, e quelli di nostro interesse, sono i package di 1°e 2° livello. La Figura 1 mostra la tipica gerarchia dei livelli di integrazione di componenti elettronici.

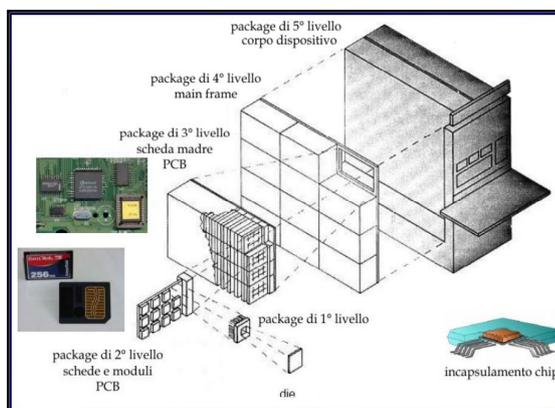


Figura 1 - Livelli di packaging

In particolare si distinguono:

- Package di 1° livello: è il livello del chip vero e proprio, si riferisce esclusivamente alla strutturazione del chip stesso.
- Package di 2° livello: riguarda l'unione del chip ad un substrato per la creazione di un singolo modulo (SCM - single chip module) o di un modulo con più chip (MCM - multi chip module). A seconda delle sollecitazioni termiche che caratterizzano l'ambiente operativo di destinazione, i substrati per gli MCM/SCM possono essere parte di package organici o ceramici. In alcuni casi, i chip (senza un substrato) sono direttamente collegati alle schede (direct chip attach) e sono conosciuti come COB (chip-on-board). I package di primo livello sono distinguibili in due categorie: i package in materiale plastico e quelli ceramici; i primi offrono molti vantaggi rispetto ai secondi in termini di dimensioni, peso, performance, costi e disponibilità.
- Package di 3° livello: il terzo livello di packaging prevede che SCM e MCM integrati siano assemblati, insieme ad altri componenti, su schede PCB (printed-circuit-board), generalmente costituite da fogli di rame e laminati in vetro epossidico.
- Package di 4° livello: il quarto livello di packaging può variare a seconda del sistema considerato. In un desktop, più schede PCB sono poste all'interno di una scheda madre, mentre in un computer portatile il quarto livello di packaging è rappresentato dall'involucro esterno. In un sistema complesso, più schede madre possono essere racchiuse in un involucro, potendo questo essere inteso come il quinto livello di packaging.

- Package di 5° livello: è l'involucro esterno dentro il quale vengono montate le schede madre.

La necessità del packaging deriva dal fatto che nel settore elettronico, tutti i componenti devono essere integrati con la struttura che li circonda. Questo collegamento è realizzato in modo tale da mantenere inalterate le prestazioni del componente e assicurando una protezione dall'ambiente esterno.

Le principali funzioni del package sono: fornire una via di accesso alla corrente elettrica che alimenta il circuito, distribuire i segnali da e per i chip, dissipare il calore generato dai componenti ed infine fornire supporto meccanico e protezione. L'obiettivo del packaging microelettronico è quello di assicurarsi che i chip e le interconnessioni siano integrate efficacemente e in modo affidabile.

Le interconnessioni principali sono due e corrispondono sostanzialmente ai packaging di primo e secondo livello. Poiché la connessione diretta dei chip sulle schede presenta alcune problematiche, quali maneggiare le schede, sostituire chip difettosi, garantire l'affidabilità meccanica ed elettrica dell'intero sistema, è necessario che siano realizzati diversi livelli di interconnessione, come raffigurato in Figura 2.

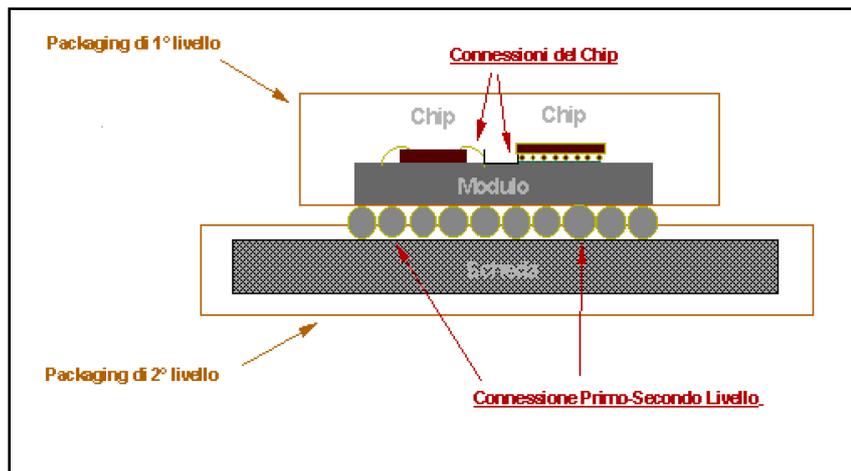


Figura 2 - Livelli di interconnessione di un packaging

Il Packaging elettronico è dunque la scienza che studia non solo l'interconnessione, ma anche il raffreddamento, la protezione ed il supporto meccanico dei componenti elettronici ai fini di ottenere un'elevata affidabilità del prodotto.

Dunque, un packaging elettronico deve essere progettato in modo tale da:

- Ridurre o rimuovere il calore che si genera internamente durante il funzionamento del dispositivo o da condizioni ambientali esterne.
- Fornire protezione dall'umidità
- Fornire protezione da contaminazioni di tipo chimico
- Fornire protezione dalle radiazioni
- Ridurre lo stress termo-meccanico
- Fornire supporto meccanico ai componenti elettronici

Le innovazioni del packaging prevedono di ottenere:

- maggiori prestazioni, ovvero maggiore densità di connessione e migliore rimozione del calore
- minor costo, derivante da dimensioni minori del package e da adeguata scelta di materiali e processi
- maggiore affidabilità, data da maggiore protezione, processi più semplici e materiali più adatti allo smaltimento del calore.

Il Packaging è dunque una scienza che coinvolge al suo interno parecchie discipline che s'integrano fra di loro come riportato in Figura 3. Oltre alle materie base quali chimica, meccanica, microelettronica, scienza dei materiali, oggi è fondamentale, per la progettazione di un packaging ad hoc, la simulazione ad elementi finiti. Il motivo è principalmente dovuto alla necessità di diminuire i tempi di progettazione attraverso l'ausilio dell'elaboratore e di comprendere al meglio tutti i fenomeni legati all'efficienza del prodotto finale.

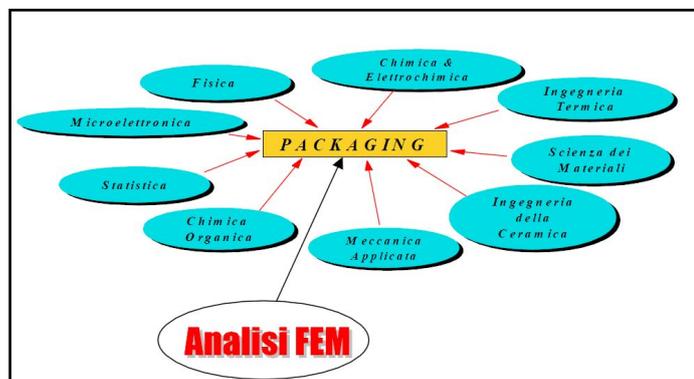


Figura 3 - Discipline coinvolte nel packaging

1.2 OBIETTIVI DELLA TESI

L'oggetto della seguente tesi è lo studio e lo sviluppo di materiali nanostrutturati a base polimerica per dispositivi utilizzati nell'elettronica di potenza. In particolare, le applicazioni sono quelle nei quali ambiti sia necessario convertire in maniera efficace l'energia elettrica. Le applicazioni dei convertitori di potenza sono numerose e spaziano dal settore automotive alla robotica industriale e alla produzione di energie rinnovabili. Per la varietà di settori di applicazioni, lo studio di nuovi materiali per i dispositivi di potenza è di enorme interesse per l'ambito Energia e Risparmio Energetico evidenziato nei bandi PON a supporto del Dottorato di ricerca in Scienza e Tecnologia dei Materiali.

L'obiettivo della tesi è quello di progettare e quindi sviluppare, tramite materiali e tecnologie innovative, nano compositi polimerici da utilizzare come composti di incapsulamento per dispositivi elettronici. Lo scopo della ricerca è riuscire ad ottenere nanocompositi con proprietà confrontabili ai prodotti commerciali o comunque studiare soluzioni innovative da valutare come possibili packaging di dispositivi di potenza.

Il lavoro ha inoltre compreso lo studio e l'effetto dei molteplici parametri coinvolti nell'intero sistema tramite lo sviluppo di un modello ad elementi finiti. La valutazione di tutti i fenomeni interessati è stata quindi propedeutica all'ottimizzazione del modello ai fini di ottenere un packaging altamente conduttivo.

1.3 ORGANIZZAZIONE TESI

La seguente tesi è organizzata in undici capitoli. Nell'introduzione è esposto il concetto di packaging nell'elettronica, ovvero i livelli di interconnessione presenti in un dispositivo e il ruolo fondamentale e le proprietà di un packaging. Nel capitolo 2 sono introdotti l'elettronica di potenza, le tipologie di dispositivi, il funzionamento, le problematiche legate a questi ultimi e un esempio di processo di produzione di moduli di potenza. Il capitolo 3 presenta lo stato dell'arte sui materiali per l'elettronica e il dettaglio dei materiali per incapsulamento, oggetto del presente lavoro. Nel capitolo 4 vengono descritte le proprietà e caratteristiche dei nano compositi conduttivi a matrice polimerica utilizzati come packaging per l'elettronica, ovvero le tipologie di matrici e filler utilizzati e un accenno alla teoria della percolazione. Il capitolo 5 riguarda la parte sperimentale della ricerca ovvero la realizzazione in laboratorio dei nano compositi polimerici e la descrizione delle tecniche di caratterizzazione eseguite; in ultimo sono anche presentati i modelli empirici per il calcolo della conducibilità termica. Il capitolo 6 presenta invece il modello agli elementi finiti implementato. Il capitolo 7 riguarda l'ottimizzazione del modello precedentemente sviluppato per ottenere migliori proprietà termiche. Nel capitolo 8 viene esposto un nuovo tipo di materiali d'interfaccia prodotti tramite una tecnica innovativa, mentre nel capitolo 9 è descritta l'analisi strutturale del dispositivo precedentemente analizzato. A seguire, nel capitolo 10, l'analisi economica degli scenari valutati ed infine le conclusioni della ricerca.

2.L'ELETTRONICA DI POTENZA

2.1 INTRODUZIONE

Il settore dell'elettronica di potenza, nel quale s'inquadra la seguente proposta di progetto e nel quale ricadono le applicazioni di conversione elettrica e controllo motori in ambito auto motive e industriale, assorbe circa il 30% della produzione mondiale dei semiconduttori (1). La domanda del mercato è sempre stata in crescita costante con un ampio portafoglio di prodotti, spesso adattato alle specifiche richieste di dispositivi a basso costo ma ad elevata importanza strategica. L'elettronica di potenza è infatti presente in tutti i sistemi in cui ci sia la necessità di convertire energia elettrica in maniera efficiente e quindi nelle telecomunicazioni, nei trasporti, nell'elettronica di consumo e nelle applicazioni residenziali e industriali (Figura 4).

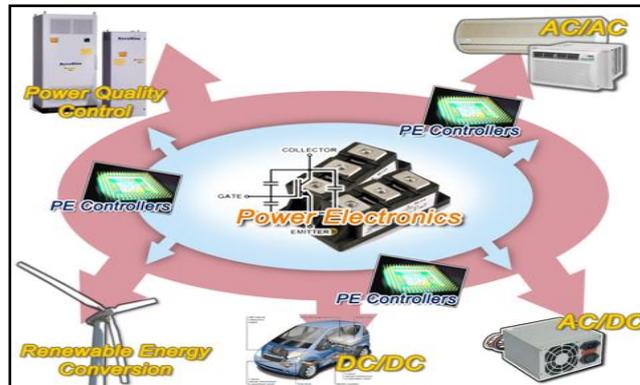


Figura 4 - Applicazioni dell'elettronica di potenza

Tali applicazioni sono principalmente basate su tecnologie MOS, IGBT e moduli integranti i dispositivi elementari in modo da incrementare i livelli di potenza gestiti ed aumentare la potenzialità del convertitore. I convertitori di potenza operanti in tali ambiti, si sono evoluti indirizzando l'integrazione di componenti a semiconduttore, componenti passivi, circuiti di controllo in moduli integrati, per potenze che partono dai 3-5 kW fino alle centinaia di kW. Parallelamente, è stata posta attenzione alle riduzioni dell'ingombro, elevando le frequenze di lavoro e le temperature d'esercizio. La capacità dei componenti di operare a più alte temperature, riduce la necessità di superfici radianti e dei relativi sistemi di raffreddamento. Questa capacità è stata ottenuta, in gran parte, grazie ad un notevole sviluppo di materiali innovativi, eco-compatibili, che vanno dai lead free solders, ai compositi per substrati, ai ceramici non ossidici e alle resine per incapsulamento, caratterizzati da alta conducibilità termica ed alta stabilità chimica alle alte temperature. Questo scenario richiede dunque, sia lo sviluppo di dispositivi ad alta efficienza di conversione ed alta densità di potenza, sia la costruzione

di moduli integrati in grado di garantire le funzionalità ad elevate potenze e temperature. Per quanto riguarda i dispositivi veri e propri, le tecnologie emergenti per l'alta efficienza di conversione ed elevata densità di potenza sono quelle basate su materiali ad ampio bandgap, come il Carburo di Silicio (SiC) e il Nitruro di Gallio (GaN).(2). Allo stato attuale, dunque, le nuove tecnologie per l'elettronica di potenza, prevedono l'integrazione di dispositivi elementari in moduli di potenza. L'aumento della scala di integrazione consente una migliore efficienza energetica in quanto consente l'ottimizzazione delle medesime funzioni del sistema con ingombri, volume, pesi e consumi inferiori, consentendo anche un risparmio di materiale.

I moduli integrati dovranno operare fino alla tensione di 1200V, con correnti nel campo di 50-100 A e temperature sul dispositivo fino a 250°C. Come già detto, il superamento delle tradizionali temperature dei componenti a stato solido è permesso grazie allo sviluppo di dispositivi basati su materiali composti SiC e GaN (diodi, transistori) da integrare con dispositivi basati su silicio di nuova generazione (IGBT) e all'utilizzo di nuovi materiali nelle tecniche di packaging.

2.2 I DISPOSITIVI DI POTENZA

2.2.1 MULTI-DIE

Un modulo di potenza è rappresentato, aperto e chiuso, in Figura 5.

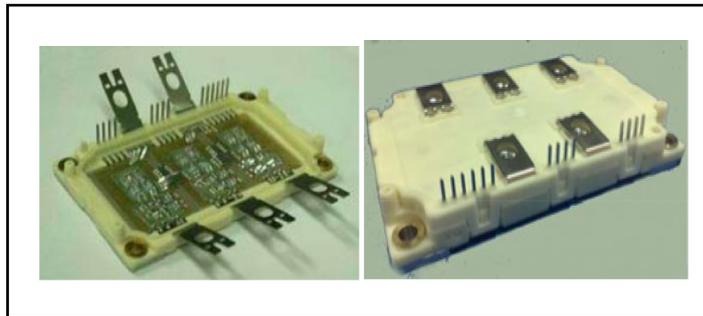


Figura 5 - Moduli di potenza

In un modulo ci possono essere da un minimo di 2 ad un massimo di “n” dispositivi tra diodi, IGBT e componenti passivi (resistenze, ntc, ecc..) . Come riportato in Figura 6, un modulo di potenza è costituito da diversi componenti e per la precisione:

- Baseplate
- Solder
- DBC (Direct Bonded Copper): 3 strati
- Solder
- Die: IGBT, diodi
- Passivi: Resistenze, NTC
- Materiale da incapsulamento
- Case in plastica

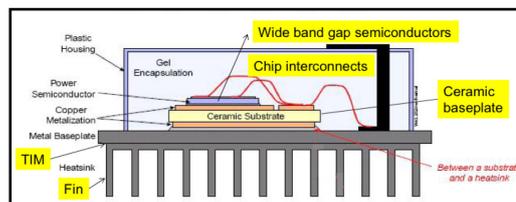


Figura 6 - Componenti di un modulo di potenza

In dettaglio in Figura 7, una rappresentazione a layer di un tipico modulo di potenza prototipale realizzato in STMicroelectronics con il dettaglio dei materiali utilizzati.

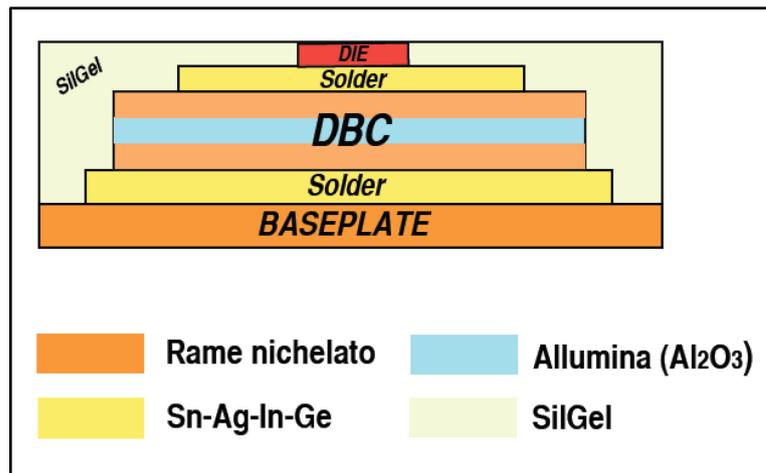


Figura 7 - Rappresentazione a strati di un modulo di potenza

Lo sviluppo dei moduli di potenza comprende diversi processi tra i quali "Die Attach", tecnologia attraverso la quale si salda il die (dispositivo elettronico in silicio) alla struttura di supporto, reflow (saldatura in forno), bonding (interconnessioni elettriche tramite materiali altamente conduttivi) e infine di incapsulamento del dispositivo nel package.

In Figura 8, il diagramma di flusso esplicativo della procedura di produzione di un modulo di potenza.

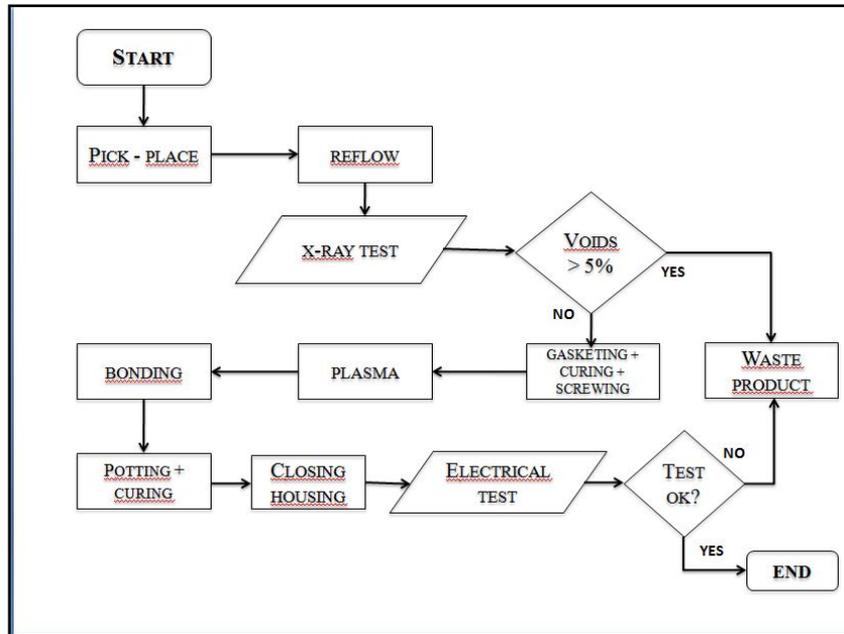


Figura 8 - Processo di produzione di un modulo di potenza

Nel dettaglio, la spiegazione di ogni sub-processo:

1) Pick – Place (P&P):entra il pallet con i dissipatori (baseplate in rame avente un plating compatibile verso i materiali di saldatura utilizzati) in cui sopra viene posizionata una maschera al cui interno saranno posizionati materiali e dispositivi. Il primo posizionamento riguarda il primo solder preform (Sn-Ag-In-Ge) sulla quale, a sua volta, viene fissato il DBC (Rame, Allumina, Rame). Sopra il DBC, la macchina posiziona un'altra maschera più piccola che andrà a contenere, prima, il solder preform (lo stesso del baseplate ma con dimensioni più piccole a seconda della dimensione del dispositivo) e successivamente, i dispositivi veri e propri. Sui dispositivi, la

macchina posiziona dei pesetti in acciaio che hanno lo scopo di tenere bloccati i dispositivi nel passaggio dal Pick-Place al Reflow.

2) Reflow: il materiale proveniente dal P&P, viene messo in forno al fine di fissare tutti i dispositivi precedentemente posizionati

3) Test a raggi X: a campione, viene effettuato un test a raggi X per vedere se ci sono vuoti nella lega saldante e tra le varie interfacce; i pezzi che hanno una percentuale di vuoti superiore al 5%, vengono considerati prodotti di scarto.

4) Gasketing + Screwing + Curing: dopo aver rimosso i pesi, viene effettuato il gasketing; come prima cosa avviene la pulitura delle superfici con plasma a freddo e poi viene dispensato (dispensing) un silicone solo sul bordo dell'housing. Segue lo screwing, ovvero l'avvitamento, tramite delle viti, del baseplate (dissipatore) all'housing. Il tutto poi viene portato in stufa per finalizzare il curing a 125 °C per 15 minuti.

5) Plasma: dopo il curing sul modulo viene fatto un trattamento con plasma a caldo in modo "da pulire" tutte le superfici che saranno successivamente coinvolte nel processo di Bonding

6) Bonding: il bonding è lo step in cui si fanno le interconnessioni elettriche. Le interconnessioni sono solitamente realizzate con fili di alluminio.

7) Potting + Curing: dopo il bonding si passa al potting, ovvero all'incapsulamento dei dispositivi che avviene in un ambiente privo di aria; la macchina fa il vuoto e poi inizia il dispensing del silicone su tutto il modulo. Al dispensing segue un curing a 100°C per 30 minuti.

8) Chiusura dell'housing: il modulo viene completato chiudendo manualmente l'housing con un coperchio in plastica.

9) Test elettrico: dopo la chiusura, viene effettuato un test elettrico per verificare il funzionamento del modulo. I pezzi che non superano il test, vengono scartati.

Gli obiettivi della ricerca nel campo dei moduli di potenza sono: materiali e processi di Die Attach, materiali e tecnologie di interconnessione e tecnologie di raffreddamento e smaltimento del calore, in quanto gli aspetti più critici di un modulo di potenza riguardano la giunzione dissipatore/die, la dissipazione termica, i materiali d'interfaccia e i processi di assemblaggio.

In questo contesto, lo scopo del progetto di ricerca è lo sviluppo di materiali innovativi da impiegare per il package del modulo di potenza. In particolare, verranno presi in considerazione resine e gel per incapsulamento che abbiano elevata stabilità termica, dell'ordine di 250 °C, ed elevata conducibilità termica. Successivamente verranno descritti in dettaglio i materiali utilizzati in ogni processo.

2.2.2 SINGLE-DIE

Sebbene la tendenza attuale sia l'integrazione di dispositivi in moduli di potenza ai fini di ottenere minore ingombri, pesi e volumi inferiori, molta importanza rivestono anche i dispositivi di potenza single-die. In Figura 9, le immagini di un tipico package per dispositivi di potenza single-die, il TO220. Il die size di un dispositivo TO220 è il seguente: altezza 2,92 mm; larghezza 3,96 mm e spessore 0,28 mm. Questo è il taglio G ed è il taglio standard, quello comunemente usato.

Da considerare che il die size è importantissimo, perché più è grande e meglio dissipa, più è sottile e meglio dissipa. Le dimensioni variano a seconda del dispositivo e dell'applicazione.

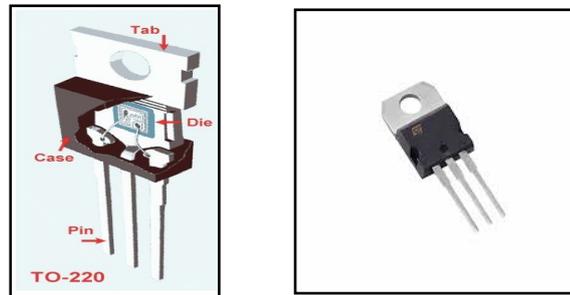


Figura 9 - Dispositivo di Potenza single-die TO220

Nei circuiti elettronici, praticamente tutti i componenti sono generatori di calore, avendo una resistenza ed essendo attraversati da una corrente. Un componente elettrico è caldo perchè genera calore per effetto Joule, ovvero il calore è prodotto all' interno dello stesso componente. Il componente che si riscalda è il cosiddetto “die”, ovvero la piastrina di silicio che è il cuore del dispositivo: il calore è infatti generato dalle giunzioni realizzate in questa piastrina.

Il die, di pochi millimetri quadrati di superficie, è inglobato al centro di un blocchetto di materiale plastico che ha funzione di isolamento, supporto meccanico e trasmissione del calore. Le connessioni elettriche sono riportate all' esterno attraverso pin o altri sistemi. Come si può vedere dall'immagine del TO-220, il die è fissato a una frame metallica o “tab”, in rame, che ha lo scopo di condurre all' esterno il calore generato e di consentire il fissaggio meccanico ad un sistema di raffreddamento. Il centro della piastrina di silicio prende il nome di giunzione (in inglese junction, abbreviato in j). Il resto del package è costituito solitamente da resine epossidiche, che essendo appunto materiali plastici, sono dei completi isolanti termici e presentano dunque una resistenza al passaggio del calore ben maggiore di quella della frame

metallica. In un tipico circuito termico di questo genere dunque, il calore viene generato dalla giunzione del semiconduttore, passa attraverso il materiale del package, poi nel contatto tra questo ed il dissipatore e infine da quest'ultimo all'aria.

2.2.3 PROBLEMATICHE DEI DISPOSITIVI DI POTENZA

Le problematiche relative ai dispositivi di potenza sono molteplici, tra le più rilevanti ricordiamo:

- Dissipazione termica
- Giunzione dissipatore/die
- Interconnessioni elettriche
- Materiali d'interfaccia
- Stress termico
- Processi di assemblaggio

La dissipazione termica è uno dei fattori più rilevanti poiché uno degli elementi principali da attenzionare per tutti i tipi di dispositivi elettronici.

In particolare, tali dispositivi di potenza, poiché sviluppano temperature elevate (i.e. 130°C - 250°C) operando a tensioni dell'ordine dei 1200V, necessitano, per l'integrità della funzionalità elettronica e dei requisiti di affidabilità, di un'efficace smaltimento del calore. La gestione del calore e della temperatura sono fondamentali ai fini della prevenzione dei guasti. I guasti sono infatti spesso associati ad un grande aumento di temperatura, che porta a una drastica deteriorazione dei semiconduttori, e/o frattura, delaminazione, e anche combustione del packaging. La minimizzazione o eliminazione dei guasti indotti da problemi termici, spesso richiede la riduzione dell'aumento di temperatura e la minimizzazione della variazione

di temperatura dentro il packaging. L'affidabilità di un sistema è la probabilità che esso incontri i requisiti richiesti in un dato periodo di tempo. Un componente elettronico opera ad alte temperature e, conseguentemente, risulta essere vicino alla probabilità di guasto dovuta alla lunga esposizione alle alte temperature. In Figura 10, si riporta l'andamento del failure rate in funzione della temperatura: si nota che un aumento di temperatura da 75 a 125 °C, comporta un aumento del failure rate fino a 5 volte. (3)

Tempi di guasto così rapidi, portano a creep meccanici e a relativi problemi di funzionamento del dispositivo. Il ruolo dell'ingegnere per il packaging è quello di assicurare che l'affidabilità dei componenti sia tale da giustificare i costi legati a speciali materiali, processi e soluzioni per il raffreddamento del dispositivo.

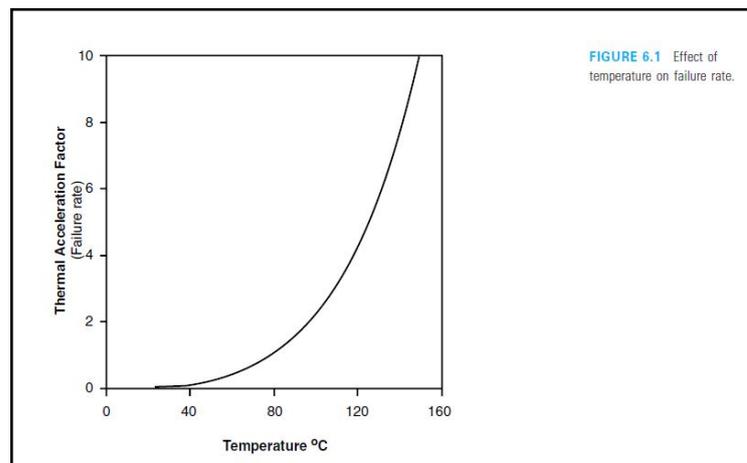


Figura 10 - Andamento del 'failure rate' in funzione della temperatura

Come già detto, in un tipico circuito termico, il calore viene generato dalla giunzione del semiconduttore, passa attraverso il materiale del package, poi

nel contatto tra questo ed il dissipatore e infine da quest'ultimo all'aria. Dunque, il calore attraversa le resistenze termiche dei materiali in serie tra di loro in questo preciso ordine: giunzione - package - dissipatore di calore – ambiente. Le resistenze termiche si misurano in gradi Celsius/watt [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$] o gradi Kelvin/watt [K/W] e indicano di quanti gradi salirà la temperatura in funzione dei watt applicati; quindi, a parità di potenza, minore è il valore della resistenza termica, minore sarà la temperatura raggiunta.

Si possono quindi individuare quattro resistenze termiche, come riportato in Figura 11, che si oppongono al passaggio del calore dalla giunzione all'ambiente e precisamente:

1. R_{thjc} : resistenza termica tra la giunzione e il package (case)
2. R_{thja} : resistenza termica tra la giunzione e l' ambiente
3. R_{thch} : resistenza termica tra il package e il dissipatore
4. R_{tha} : resistenza termica tra il dissipatore e l' ambiente

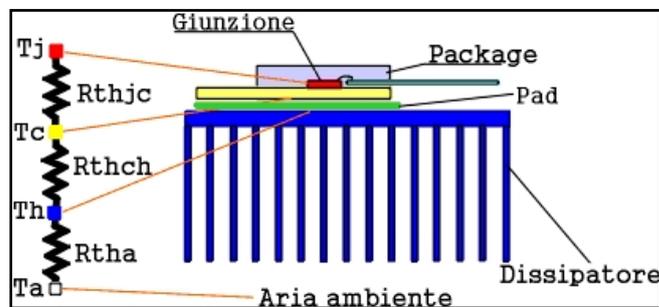


Figura 11 - Resistenze termiche presenti in un dispositivo di potenza

La resistenza termica tra la giunzione e il package, R_{thjc} , è un dato relativo al componente, riportato nei datasheet e rappresenta la difficoltà che incontra il calore nel passare dalla giunzione (o die) alla superficie del package (o case).

Il suo scopo è quello di indicare la resistenza da inserire nei calcoli per determinare la caduta di "tensione" termica nel circuito di cui fa parte un dissipatore come elemento finale di scambio con l'ambiente. Questa resistenza dipende quindi da come è realizzato il semiconduttore e quindi dal suo case. In generale, il valore di R_{thjc} è abbastanza costante per un certo tipo di package, indipendentemente dal componente contenuto. Per fare un esempio, la R_{thjc} di un TO220 è compresa tra 1 e 8 °C/W. Ovviamente, a parità di sigla di package, è possibile che prodotti di costruttori diversi abbiano parametri leggermente differenti. La resistenza termica tra la giunzione e l'ambiente, R_{thja} , è anch'esso un dato relativo al componente e rappresenta la difficoltà che incontra il calore nel passare dalla giunzione all'ambiente. Il suo scopo è quello di indicare la resistenza da inserire nei calcoli per determinare la caduta di "tensione" termica nel circuito in cui è presente il solo package come elemento di scambio con l'ambiente. Questo dato dipende, come il precedente, da come è realizzato il semiconduttore e quindi dal suo case e, in particolare, dalla sua superficie. E' un parametro fisso, citato dal foglio dati del fornitore e in linea di massima, si può dire che il valore di R_{thja} è abbastanza costante per un certo tipo di package, indipendentemente dal componente contenuto. La resistenza termica tra il package e il dissipatore, R_{thcs} , rappresenta la difficoltà che incontra il calore nel passare dalla superficie del package a quella del dissipatore. Il suo scopo è quello di indicare la resistenza da inserire nei calcoli per determinare la caduta di "tensione" termica nel circuito di cui fa parte un dissipatore come elemento finale di scambio con l'ambiente. Questo dato dipende, come i precedenti, da come è realizzato il semiconduttore, dal suo case e, in particolare, dalla sua superficie di contatto con il dissipatore. E' chiaro che

un grosso package avendo un'ampia superficie di contatto, avrà una minore resistenza. Per ridurre la resistenza termica di contatto bisognerebbe, o aumentare la pressione del contatto, oppure riuscire a ridurre la rugosità della superficie di accoppiamento. In realtà una pressione eccessiva sul sistema di fissaggio del componente al dissipatore, può essere controproducente, in quanto rischia di danneggiare o deformare il case. Migliorare invece la qualità di finitura superficiale del case è abbastanza difficile, la soluzione più comune è l'uso di una pasta termo conduttiva. Il valore di resistenza termica tra package e dissipatore è infatti fortemente influenzato dalla presenza del materiale usato per accoppiare termicamente la superficie di contatto del componente con quella del dissipatore. I materiali termici disponibili vanno dai fogli metallici, come indio, piombo, stagno e argento a paste a base di silicio e ossidi metallici (zinco, argento, rame) a composti ceramici o di carbonio. Infine, la resistenza termica tra il dissipatore e l'ambiente, R_{thha} , è un dato relativo al dissipatore che tiene conto della trasmissione di calore per convezione ed irraggiamento dal dissipatore all'ambiente circostante. Rappresenta la difficoltà che incontra il calore nel passare dalla superficie del dissipatore a quella dell'ambiente. Il suo scopo è quello di indicare la resistenza da inserire nei calcoli per determinare la caduta di "tensione" termica nel circuito di cui fa parte un dissipatore come elemento finale di scambio con l'ambiente. Questo dato dipende da come è realizzato il dissipatore, dalla sua forma, dal materiale e dalla superficie, ed è un parametro che si rileva dal datasheet del fornitore. Ovviamente, più piccola è la resistenza termica, migliori sono le prestazioni del dissipatore; i modi più semplici per ridurla sono l'aumento della superficie del dissipatore oppure l'inserimento di una metodologia di

raffreddamento come la circolazione ad aria forzata. In Figura 12, alcuni esempi di dissipatori disponibili in commercio.



Figura 12 - Esempi di dissipatori

A prescindere dalla presenza del dissipatore, comunque nello scambio termico quello che deve essere considerato non sono solo i funzionamenti estremi, ma il fatto che la temperatura ambiente, al di fuori di aree controllate e stabilizzate (riscaldamento, condizionatori, ecc.), può essere fortemente variabile. Infatti, la temperatura dell'ambiente (T_a) influenza la temperatura del sistema in quanto fornisce al sistema stesso una quantità di calore di base ed allo stesso tempo è influenzata dalla temperatura del sistema, perchè il calore che il sistema dissipa nell' ambiente contribuisce ad aumentarne la temperatura. Si può dire dunque che la temperatura massima della giunzione va considerata come la somma della temperatura ambiente più quella prodotta dalla potenza persa in calore. Lo scambio di calore tra due corpi a contatto sarà via via meno efficiente con l'equilibrarsi delle temperature e quanto maggiore è la differenza di calore, tanto più efficiente

sarà la sua trasmissione. E' chiaro anche che maggiore è la superficie su cui avviene lo scambio del calore, maggiore sarà la quantità di calore che sarà scambiato; questo è il motivo per cui quando si progetta un dissipatore bisogna tenere conto della sua superficie in relazione all'energia dissipata dal dispositivo.

Ricapitolando, il percorso che fa il calore generato dal componente elettronico è il seguente: il calore è generato al centro del componente, nel die, passa dal die al package (per conduzione) e dal package all' ambiente (per convezione e irraggiamento). In questo contesto, avere materiali che conducono bene il calore è fondamentale per ottenere la migliore dissipazione possibile e il più efficiente scambio termico.

3. MATERIALI PER L'ELETTRONICA

3.1 INTRODUZIONE

I materiali per l'elettronica, come precedentemente detto, sono un argomento rilevante ai fini della corretta funzionalità e completa affidabilità del dispositivo elettronico. Poiché un sistema di potenza presenta diverse problematiche tra le quali dissipazione termica, giunzione dissipatore/die, materiali d'interfaccia e processi di assemblaggio, è necessario pensare e progettare materiali e processi che soddisfino i molteplici requisiti richiesti. Ogni layer del dispositivo ha infatti caratteristiche e funzioni differenti e richiede dunque materiali con prerogative specifiche. In generale, un dispositivo di potenza necessita, ai vari strati, di materiali che abbiano:(4)

- Elevate conducibilità termica
- Elevata testabilità termica
- Buone proprietà di adesione

- Buone proprietà meccaniche
- Bassi valori di costante dielettrica
- Coefficiente di espansione termica simile a quello del silicio

A seconda dello strato in cui ci si trova, le caratteristiche sopra riportate dovranno avere più o meno rilevanza.

All'interno di un modulo di potenza, partendo dall'alto verso il basso, le più importanti tipologie di materiali che si possono individuare sono tre:

1. Materiali per il “case”, ovvero il contenitore in plastica che va a ricoprire l'intero modulo. Le caratteristiche che deve avere sono la capacità di dissipare calore e di operare a temperature superiori ai 200 °C.
2. Materiali per “potting”, ovvero per l'incapsulamento dei dispositivi, al fine di proteggere e isolare i componenti elettronici da umidità e variazioni di temperatura e perché utile per il fissaggio dei componenti. Le caratteristiche che devono avere i materiali per l'incapsulamento sono moltissime e vanno dalla capacità di dissipazione alla stabilità termica, fino ad arrivare alla buona adesione e alla flessibilità.
3. Materiali d'interfaccia (TIM o Thermal Interface Material): sono i materiali che si trovano tra specifici layer del modulo di potenza. In particolare, il primo TIM si trova tra il Die ed il DBC, mentre il secondo TIM si trova tra il DBC ed il Baseplate. I materiali d'interfaccia svolgono un ruolo molto importante in quanto devono garantire la giunzione tra gli strati ed allo stesso tempo essere conduttivi termicamente ed elettricamente.

Per quanto riguarda i materiali per il “case”, ad oggi, i case utilizzati per i moduli di potenza sono in semplice plastica, e di conseguenza, non assolvono alla funzione di dissipazione, requisito principale ai fini del buon funzionamento del dispositivo. I materiali d’interfaccia invece, sono comunemente chiamati “solder”, ovvero paste saldanti che vengono utilizzate come materiali di interconnessione. Da sempre, le leghe saldanti contengono piombo; recentemente, per normativa europea, queste devono essere “leadfree”. Le leghe leadfree prese in considerazione sono principalmente leghe di Sn-Ag. Infine, ai materiali per il potting o incapsulamento, sarà dedicato il paragrafo seguente poiché questi sono l’oggetto del seguente lavoro di ricerca.

3.2 MATERIALI PER INCAPSULAMENTO

Un dispositivo elettronico non può svolgere al meglio le funzioni per le quali è progettato se non è opportunamente protetto e connesso con il resto del sistema tramite un qualsiasi packaging.

L’incapsulamento è una delle principali tipologie di protezione dei dispositivi, viene fatto per proteggere i dispositivi elettronici da condizioni ambientali sfavorevoli e da effetti meccanici indesiderati ed è tipicamente costituito da polimeri.

Denominati commercialmente “potting compound”, i materiali per il potting sono composti solidi o gelatinosi che hanno principalmente il compito di proteggere i componenti elettronici da urti o vibrazioni e da agenti corrosivi e umidità. I diversi tipi di “potting compound” si differenziano anche in base alla tecnica con la quale vengono depositati sui dispositivi. I potting compound solidi sono per esempio gli “Epoxy molding compound”(EMC),

ovvero composti solidi a base di resine epossidiche che vengono inseriti in uno stampo, fusi ad alte temperature e messi sotto pressione; quando il composto ha completamente reticolato, lo stampo viene rimosso. Un'altra tecnica possibile per effettuare il processo di incapsulamento dei dispositivi prevede l'utilizzo di un sistema di erogazione che, miscela più componenti e dispensa il mix, possibilmente sotto vuoto, sull'intero dispositivo. Gli incapsulanti dunque, siano essi in forma di molding o liquidi, servono ad incorporare la struttura in un sistema più rigido e robusto e sono fondamentali per fornire protezione chimica e meccanica ai dispositivi tale da assicurargli un tempo di vita utile ragionevole ai campi di applicazione ai quali sono destinati.

Il veloce progresso che riguarda i componenti elettronici, che consiste nella riduzione in dimensione e peso, aumento delle performance e riduzione dei costi implica avere packages sempre più sottili, più compatti e miniaturizzati. Allo stesso tempo, il crescente interesse a problematiche quali ambiente e riciclo, hanno spostato l'attenzione allo sviluppo di EMC "environmentally friendly", cioè che non contengano piombo come richiesto dalle recenti normative europee. In Figura 13, si riportano alcuni esempi di packages presenti sul mercato.



Figura 13 - Esempi di packages

Gli epoxy molding compound dunque, usati per proteggere i semiconduttori da condizioni esterne ambientali, per la precisione da forze fisiche esterne quali impatto e pressione e da forze chimiche esterne come umidità, calore e raggi ultravioletti, sono costituiti da diversi materiali per soddisfare appunto i requisiti di affidabilità e non compromettere in maniera invasiva la funzionalità elettronica dei dispositivi. Essi devono essere conduttivi termicamente e isolanti elettricamente.

Esempi di questi materiali sono: resina epossidica o resina fenolica, silice fusa come filler, agenti accoppianti, agenti reticolanti ed agenti di rilascio; sono tutti materiali che influenzano la resistenza all'adesione e la processabilità del prodotto che ne viene fuori.

Si riporta in Figura 14 una tipica composizione di un EMC per semiconduttori. (5)

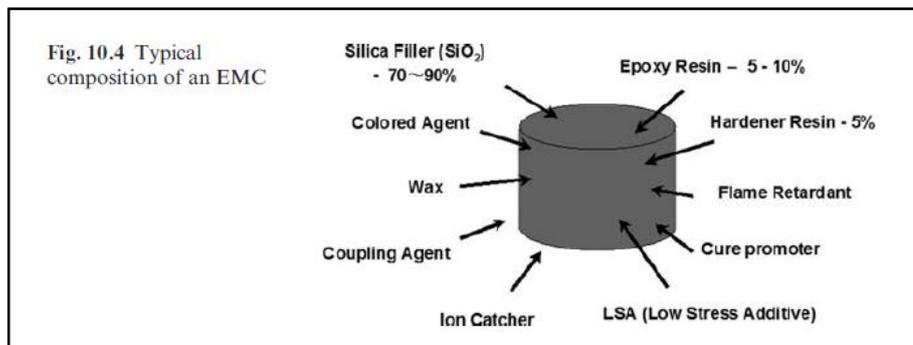


Figura 14 - Tipica composizione di un epoxymoldingcompound

Queste materie prime vengono mixate a caldo in un opportuno miscelatore meccanico o mixer a rulli. Dei materiali, prima miscelati, raffreddati e polverizzati vengono formati pellet da utilizzare per il processo di transfer molding, descritto nel successivo paragrafo.

In Figura 15 un esempio di EMC in forma di polvere e di pellet.

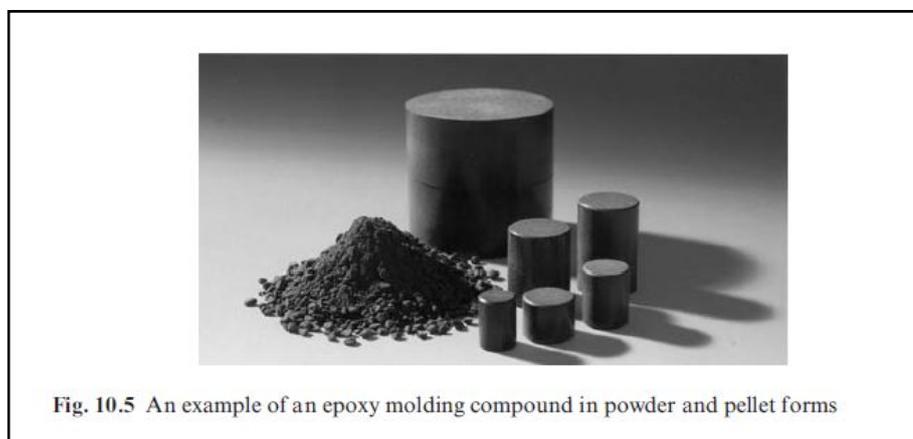


Figura 15 - Epoxy molding compound in polvere e in pellet

Questo tipo di packaging è un modo molto economico per proteggere i dispositivi, ma la loro protezione non è permanente, perché influenzata da possibili penetrazioni delle resine polimeriche che vengono usate per il processo di incapsulamento.

Le performance dell'incapsulamento sono determinate dalla sua stabilità dimensionale, dalla resistenza alle escursioni termiche, dalla dissipazione termica, dato che dovrebbero favorire lo smaltimento del calore generato dal dispositivo, e dalla capacità di prevenire stress meccanici tra il dispositivo ed il substrato del package.

Il paragrafo successivo fornisce alcune delle fondamentali caratteristiche dei materiali e dei processi di incapsulamento usati per il packaging di dispositivi.

3.3 REQUISITI DEI MATERIALI PER INCAPSULAMENTO

Di qualsiasi applicazione si parli, la selezione del materiale è guidata dalle sue proprietà; i materiali per l'incapsulamento devono avere le richieste proprietà fisiche, meccaniche e termiche. E' importante dunque capire l'origine di queste proprietà e i materiali disponibili per il range di proprietà richieste. Si riportano in Figura 16 le proprietà tipiche per un packaging. (3)

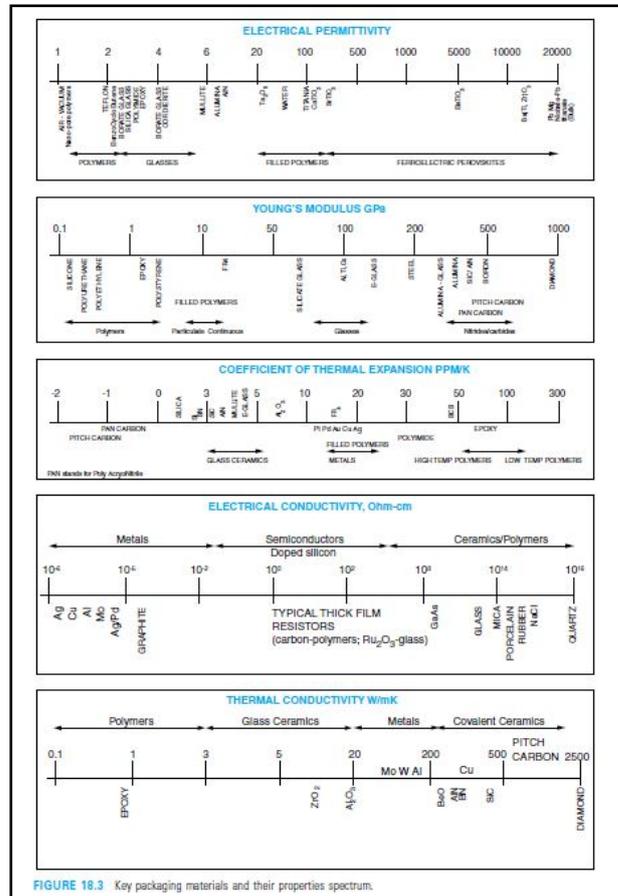


FIGURE 18.3 Key packaging materials and their properties spectrum.

Figura 16 - Proprietà tipiche richieste per un packaging

Queste proprietà sono determinate dalla struttura molecolare ovvero dagli atomi che costituiscono il reticolo e le interazioni. I requisiti relativi ai materiali per incapsulamento comprendono anche proprietà quali assorbimento di umidità e bagnabilità che sono altrettanto importanti. A seguire il dettaglio delle proprietà fisiche, meccaniche e termiche.

3.3.1 PROPRIETÀ FISICHE

Il flusso e l'adesione sono due delle primarie proprietà fisiche che ogni incapsulante dovrebbe avere per essere al top delle sue performance. L'adesione è definita come la misura di resistenza tra due interfacce; un sistema di incapsulamento ideale dovrebbe fornire una forte adesione all'interfaccia del dispositivo in modo tale da preservare l'integrità meccanica in condizioni di stress termico. Sia i legami covalenti che i legami meccanici possono essere generati nel sistema per ottenere i risultati desiderati: per esempio, l'aggiunta di promotori di adesione nelle formulazioni, potrebbe migliorare notevolmente i legami chimici e di conseguenza l'interfaccia tra substrato e dispositivo. E' chiaro che, scarse proprietà adesive potrebbero creare guasti al dispositivo, infatti un piccolo danneggiamento potrebbe portare alla formazione di microcrack e di conseguenza a processi di delaminazione interfacciale. (3)

3.3.2 PROPRIETÀ MECCANICHE

Una delle più importanti proprietà meccaniche che dovrebbe avere un buon incapsulante è un buon comportamento stress-strain. In particolare, un incapsulante ideale dovrebbe avere allungamento a rottura > 1% ed un modulo a trazione con valori pari a 5-8 GPa che non contribuisca ad aumentare gli stress meccanici durante i cicli termici. In Figura 17 un esempio di un buon materiale per incapsulamento (A) e di un materiale che si rompe a bassissimo strain e quindi non accettabile (B). (3)

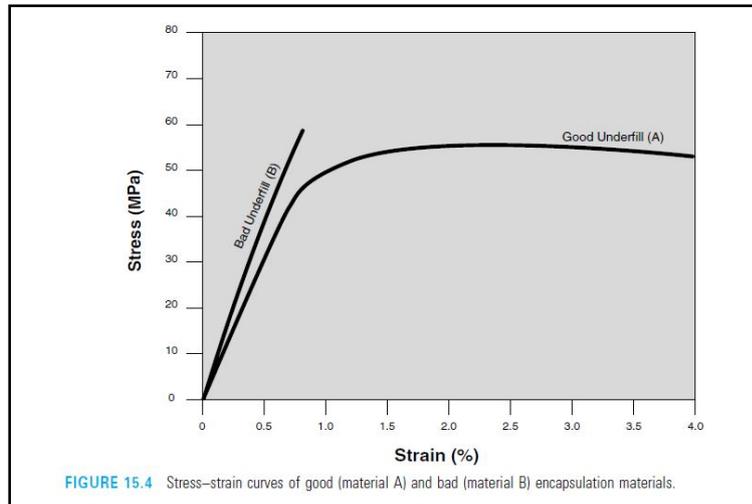


Figura 17 - Comportamento stress-strain di materiali per incapsulamento

3.3.3 PROPRIETÀ TERMICHE

Tra le più importanti proprietà termiche, quelle da attenzionare per un incapsulante, sono sicuramente il coefficiente di espansione termica (CTE), la conducibilità termica e la temperatura di transizione vetrosa.

Per quanto riguarda il coefficiente di espansione termica, definito come il cambio dimensionale che occorre all'aumento di temperatura, l'ideale per un molding compound sarebbe avere il CTE con valori vicini il più possibile a quelli del silicio (2.6 ppm/°C). Questa proprietà assicura basso stress tra chip e incapsulante, come anche tra solder e incapsulante. Il CTE è bene che stia in un determinato range, con Tg fuori dalla finestra dei test di affidabilità (-65, 150°C), cioè che assicuri stabilità dimensionale durante i test di affidabilità.

Si riporta in Figura 18 il CTE e altre proprietà fisiche di alcuni materiali di interesse per l'incapsulamento.

TABLE 15.2 Physical properties of some materials of interest.

Material	CTE (ppm/°C)	Modulus (GPa)	Density (g/cc)
Silicon	2.6	107	2.33
Silicon dioxide	0.5	119	2.60
Alumina	6.6	345	3.90
Solder (63Sn/37Pb)	25	50	8.40
Aluminum	23	79	2.90
Molding compound	15	14.2	2.30
FR-4	16	20	1.85

Figura 18 - CTE di alcuni materiali per incapsulamento

Molte resine epossidiche hanno CTE pari a 50-80 ppm/°C e quindi richiedono l'aggiunta di filler ceramici per abbassare il CTE e fare in modo che si avvicini il più possibile a quello del solder e del silicio. Normalmente il valore del CTE è dato dalla quantità di silice presente (CTE: 0.5 ppm/°C) che può essere inserita nella resina (60 ppm/°C) senza compromettere il flusso e l'adesione durante il molding. In realtà, i molding compound con CTE pari a 10-15 ppm/°C sono comunemente accettati. I valori di CTE per molti polimeri per l'elettronica sono ottenuti da analisi termomeccaniche (TMA).

Per quanto riguarda la temperatura di transizione vetrosa, come noto, essa è la temperatura alla quale avviene la transizione da solido a liquido; al di sopra di questa temperatura il modulo è basso e quasi costante. Molti polimeri, sopra la Tg, mostrano un CTE tre volte maggiore, e poiché bruschi cambiamenti di CTE potrebbero causare guasti catastrofici, sarebbe il caso che tutti i sistemi di incapsulamento liquido, abbiano la Tg sopra le

temperature previste per i test di affidabilità (125-150°C). Per i sistemi di incapsulamento non liquidi, questi requisiti di Tg potrebbero essere non applicabili; infatti molti rivestimenti hanno Tg a temperature più basse di 125°C.(3). In Figura 19 la curva di temperatura di transizione vetrosa dei polimeri.

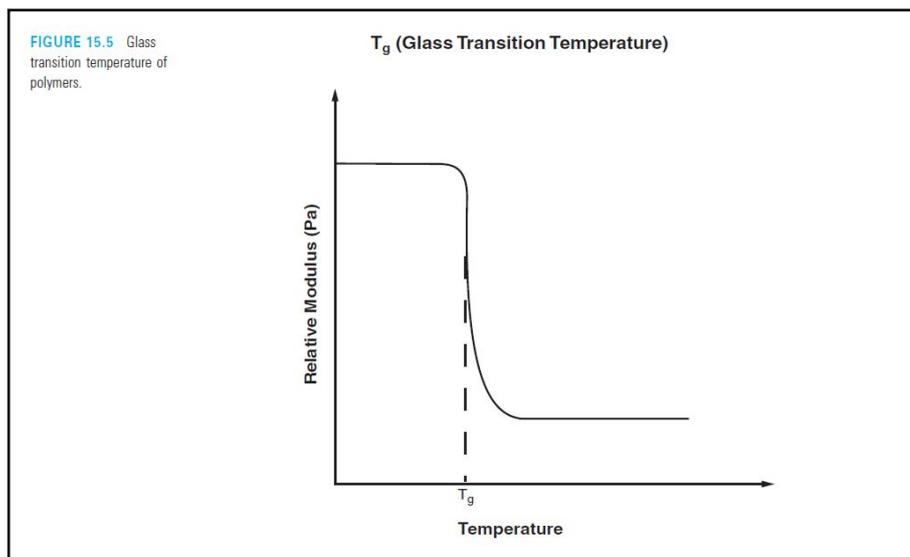


Figura 19 - Temperatura di transizione vetrosa dei polimeri

Infine, per quanto riguarda la conducibilità termica, essa è definita come il rapporto tra il flusso di calore e il gradiente di temperatura.

La conducibilità termica è un' importante proprietà per la dissipazione di calore di un componente elettronico. Il calore prodotto da un dispositivo va da 1 watt per prodotti portatili, a più di 150 Watt per chip ad alte performance. Essendo la misura della facilità con la quale il calore fluisce attraverso un materiale, significa che un'alta conducibilità termica consente

più facile dissipazione di calore generato dal chip. Come noto, i polimeri sono scarsi conduttori di calore a causa della loro struttura amorfa.

3.4 PROCESSI DI INCAPSULAMENTO

I processi di incapsulamento possono essere classificati in due grandi categorie: “molding” e “liquid encapsulation”.

3.4.1 MOLDING

La maggior parte dei processi di incapsulamento dei dispositivi elettronici sono processi di transfer molding. Il processo è semplice, economico e nella maggior parte dei casi automatico. Il processo di transfer molding include i seguenti step: a) si piazza un substrato, la leadframe, e si interpone con i chip nella cavità dello stampo, b) si chiude lo stampo molto stretto e si applica, sotto alta pressione tramite degli stantuffi, il pellet di EMC dentro ogni cavità, c) si tiene l'EMC compresso nella cavità fino a quando non è reticolato, d) si apre lo stampo e si ottiene il package stampato. La temperatura dello stampo è impostata tra 170-180°C. Il tempo di molding è generalmente tra 60 e 120 secondi. Il package dopo il molding è normalmente sottoposto ad un processo di post-curing per ottenere le proprietà ottime. La condizione di post-curing è generalmente 170-180°C per 2-8 ore. In Figura 20 i vari step del processo di transfer molding.(5)

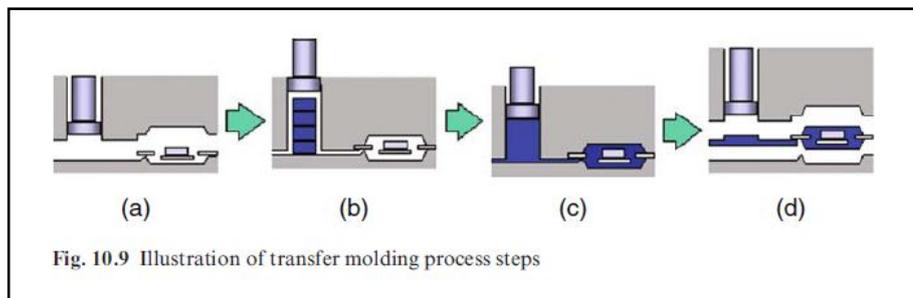


Figura 20 - Processo di transfer molding

3.4.2 LIQUID ENCAPSULATION

Il processo di incapsulamento di materiali liquidi, consiste appunto nel dispensare, con dispensatori automatici, un incapsulante in forma liquida e farlo reticolare per formare un package solido e robusto. E' chiaro che, per questo tipo di processo, i requisiti dei materiali sono differenti da quelli utilizzati nel processo di transfer molding. Infatti, gli incapsulanti liquidi vengono progettati a differenti viscosità per soddisfare i requisiti di flusso e di lavorabilità. In Figura 21, l'immagine di un silicone dispensato sui dispositivi di un modulo di potenza.

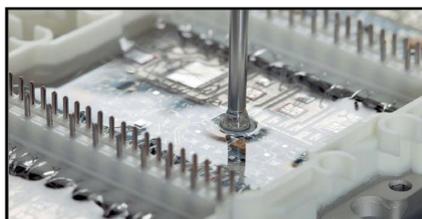


Figura 21 - Esempio di 'liquid encapsulation'

4. NANOCOMPOSITI CONDUTTIVI A MATRICE POLIMERICA

4.1 INTRODUZIONE

Dopo avere presentato le caratteristiche e i requisiti richiesti per i materiali destinati all'incapsulamento, questo capitolo è dedicato all'introduzione dello stato dell'arte dei nano compositi termicamente conduttivi a matrice polimerica, usati per la gestione del calore nei packaging dei sistemi elettronici. (6). Ad oggi, i materiali più usati per l'incapsulamento sono i siliconi. I materiali siliconici, pur avendo il grande vantaggio di essere molto flessibili, di mantenere le loro caratteristiche meccaniche ed elettriche in un campo di temperature molto ampio ed assicurando una buona adesione alla maggioranza dei materiali, hanno il grosso limite di essere isolanti termici costituendo così una barriera alla dissipazione termica del dispositivo. Purtroppo, i polimeri, eccellenti per svariati motivi, a causa della loro bassa

conduttività termica, non sono adatti nelle regioni in cui sia richiesta alta dissipazione termica. Per queste ragioni, gli studi recenti propongono l'utilizzo di filler conduttivi in matrici polimeriche per migliorare le performance dei materiali utilizzati per l'incapsulamento.

In Figura 22 si riporta un'immagine di alcuni componenti elettronici ricoperti da silicone.

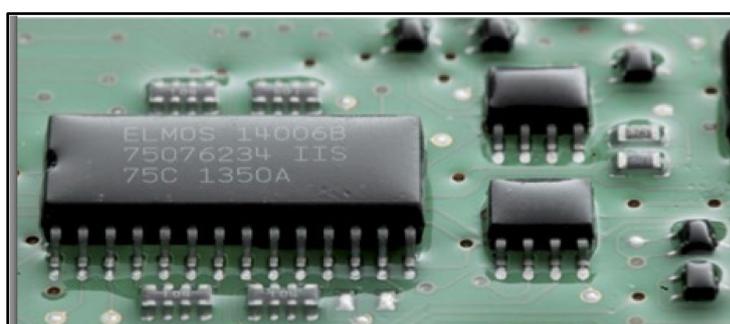


Figura 22 - Componenti elettronici ricoperti da silicone

Nessun materiale preso singolarmente può avere la combinazione delle proprietà richieste. Da qui la necessità di creare compositi, cioè progettare materiali che combinati, abbiano le proprietà desiderate. I compositi sono ampiamente impiegati nel packaging per modificare e migliorare le proprietà dei materiali ceramici, polimerici e metallici. Vari filler e rinforzi sono introdotti in queste matrici per migliorare la loro rigidità e conducibilità termica, permittività elettrica, coefficiente di espansione termica e ancora altro. Tutte queste proprietà sopra elencate non sono presenti in una singola resina epossidica. Quindi, una formulazione che comprenda una resina

epossidica ed un filler fornisce un approccio pratico per soddisfare le principali esigenze di un materiale per incapsulamento

4.2 MATRICI

Sia i polimeri che i ceramici sono usati come matrici per incapsulanti. I ceramici come SiO_2 e Si_3N_4 , hanno alta resistenza dielettrica, alta conducibilità termica, stabilità termica ma non sono al 100% esenti da crack o microfratture. I polimeri usati per gli incapsulanti invece sono sia termoplastici che termoindurenti: i vantaggi e gli svantaggi di alcuni polimeri sono riportati in Figura 23. Il silicone, per esempio, ha buone proprietà elettriche ma ha basso modulo e risulta quindi troppo morbido e flessibile per fornire la protezione meccanica. (4)

Table 1.10 Encapsulants, from [69].

<i>Materials</i>	<i>Application</i>	<i>Advantages</i>	<i>Disadvantages</i>
Epoxies	Normal dispensing	Good solvent resistance Excellent mechanical strength	Not repairable Marginal electrical performance
Polyimides	Normal dispensing (spin coat)	Good solvent resistance Thermally stable	High temperature cure Not repairable High stress
Polyxylylene (Parylene, Union Carbide)	Thermal deposition (reactor)	Good solvent resistance Conformal coating	Thin film only Not repairable
Silicone-polyimides	Normal dispensing	Less stress than polyimide Better solvent resistance than silicone	High stress Thin film only
Silicones (RTV gel)	Normal dispensing	Good temperature cycling Good electrical properties Very low modulus	Weak solvent resistance Low mechanical strength
Benzocyclobutene	Normal dispensing	Good solvent resistance Low moisture absorption Low dielectric constant Low modulus	High temperature cure

Figura 23 - Vantaggi e svantaggi di alcuni polimeri per incapsulamento

Le matrici polimeriche includono sia matrici termoplastiche che termoindurenti. I compositi termoplastici possono essere rilavorati e sono interessanti per questo, mentre quelli a matrice termoindurente sono ottimi per la loro stabilità termica e le proprietà dielettriche. Tra le tipologie di resine, molto usate sono le poliesteri, che forniscono un'ottima combinazione di basso costo, versatilità nel processo e buone performance. Le resine epossidiche invece sono vantaggiose a causa delle loro proprietà fisiche, ovvero hanno buona adesione alla resistenza, basso ritiro, resistenza chimica, resistenza all'umidità e relativa alta resistenza alle alte temperature. Inoltre, l'uso di resine epossidiche è vantaggioso dal punto di vista dell'efficienza del processo poiché reticolano a basse temperature, in poco tempo e hanno bassa viscosità prima di reticolare. Sono più costose rispetto alle poliesteri a causa dell'alto costo dei precursori chimici; tuttavia la complessità delle catene polimeriche offre buone proprietà in termini di resistenza e duttilità. La maggior parte delle resine richiedono che resina e reticolante siano miscelati in uguali proporzioni e necessitano, per avere la massima resistenza, di un completo processo di reticolazione.

Per quanto riguarda i siliconi polimerici invece, usati più come TIM, possono esistere liquidi, resine o gomme. Essi hanno ottima resistenza all'acqua e all'ossidazione, ottima flessibilità e buona stabilità ad alte e basse temperature. Le resine silconiche, per le loro proprietà dielettriche, sono infatti usate per applicazioni di coating nel quale la stabilità termica richiesta è tra i 300-500°C. Purtroppo, la bassa Tg (-125 °C), gli elevati valori di CTE (300-800 ppm /°C), il basso modulo ed il fatto che non sono conduttivi termicamente limitano le loro applicazioni come incapsulanti.

I polimeri pur avendo eccellenti proprietà dielettriche, non sono conduttivi termicamente; per questo motivo, si aggiungono filler conduttivi di cui si parlerà nel paragrafo successivo. In Figura 24 le proprietà tipiche di comuni incapsulanti polimerici utilizzati per applicazioni elettroniche.(7).

Polymeric Material	Advantages	Disadvantages
Epoxies	<ul style="list-style-type: none"> • Good chemical and mechanical protection • Low moisture absorption • Suitable for all thermosetting processing methods • Excellent wetting characteristics • Ability to cure at atmospheric pressure • Excellent adhesion to a wide variety of substrates under many environmental conditions • Thermal stability up to 200°C 	<ul style="list-style-type: none"> • High stress • Moisture sensitivity • Short shelf life (can be extended under low temperature storage conditions)
Silicones	<ul style="list-style-type: none"> • Low stresses • Excellent electrical properties • Good chemical resistance • Low water absorption • Thermal stability up to 315°C • Good UV resistance 	<ul style="list-style-type: none"> • Low tensile tear strength • High cost • Attacked by halogenated solvents • Poor adhesion • Long cure time
Polyurethanes	<ul style="list-style-type: none"> • Good mechanical properties (toughness, flexibility, resistance to abrasion) • Low viscosity • Low moisture absorption • Ambient curing possible • Thermal stability up to 135°C • Low cost 	<ul style="list-style-type: none"> • Poor thermal stability • Poor weatherability • Flammable • Dark color • High ionic concentration
Phenolics	<ul style="list-style-type: none"> • High strength • Good moldability and dimensional stability • Good adhesion • High resistivity • Thermal stability up to 260°C • Low cost 	<ul style="list-style-type: none"> • High shrinkage • Poor electrical properties • High cure temperature • Dark color • High ionic concentration

Figura 24 - Proprietà dei comuni incapsulanti polimerici per packaging elettronico

In Figura 25 invece, le proprietà generali di tipiche matrici polimeriche(8)

Table 5.1 General properties of typical polymer matrices of polymer matrix composites (Alvino 1994)							
Properties	Polyesters	Epoxyes	Phenolics	Polyethylene	Polypropylene	Acrylics	Silicones
Thermal conductivity (W/m K)	0.15-0.4	0.14-0.87	0.87	0.33	0.17-0.25	0.21-0.23	0.19-0.22
Coefficient of thermal expansion (10 ⁻⁶ /K)	18-80	18-63	14.4-40	31.7-67.3	15.1-23.4	11.9-23.8	178.2
Specific heat (J/K kg)	840-2,090	1,674	1,172-1,674	1,925-2,301	1,883-2,008	1,464	-
Glass transition temperature (°C)	70-90	-	-	-25	-1 to -13	-24 to -115	-
Melt temperature (°C)	220-285	-	-	83-135	160-168	<100 to >200	-
Volume resistivity (Ω cm)	10 ⁷	10 ⁹ -10 ¹⁶	10 ⁹ -10 ¹²	10 ¹⁵ -10 ¹⁹	10 ¹⁷	10 ¹⁴ -10 ¹⁶	10 ¹⁴ -10 ¹⁵
Dielectric strength (kV/mm)	14-23	11.0-17.0	7.9-18.7	18.9	17.7-27.6	15.8-20.9	4.9-21.7
Dielectric constant							
60 Hz	3.1-4.3	3.3-5.7	5.0-16	2.3	2.2	3.4-4.5	2.7-5
1 MHz	2.9-3.9	2.7-4.8	4.0-7.0	-	2.2	2.5-3.2	2.6-4
Tensile strength (MPa)	55-172	28-186	21-117	11.0-62	20.7-96.5	34.5-75.8	2.4-10.3
Tensile modulus (GPa)	1.65-24	0.35-3.45	5.52-23	0.028-6.21	0.90-1.66	1.93-3.10	0.062
Elongation (%)	1-300	1.0-60	0.4-1.0	80-1000	3-200	2.0-30	20-800
Density (g/cm ³)	1.2-1.4	0.75-1.15	1.35-1.75	0.91-0.97	0.905	1.18	1.05-1.19
Flammability	Self extinguishing	Self extinguishing	V0, V1, HB	HB	HB	-	-
Water absorption 24 (%)	0.3	0.2-1.0	0.05-0.7	<0.01	0.01-0.03	0.3	0.12

Figura 25 - Proprietà generali di matrici polimeriche

4.3 FILLER

I filler hanno un importante ruolo nel massimizzare le performance del polimero: differenti tipi di filler o rinforzi sono stati infatti sviluppati per creare materiali compositi con desiderate proprietà termiche, elettriche e meccaniche. I tipi di filler possono essere: fibre o nanotubi di carbonio, schiume e altre particelle termicamente conduttive a base ceramica o metallica. Possono essere in forma di fibra o di particelle, uniformemente distribuite nella matrice polimerica. L'argento è tra i più popolari filler conduttivi, ma vengono usati anche oro, nickel, rame e carbonio. L'argento ha altissima conducibilità termica ma è costoso, mentre adesivi basati su nickel e rame non hanno buona stabilità. Il rame infatti, ha buona conducibilità e non è molto costoso, ma in presenza di ossigeno, forma uno

strato crescente di ossido che riduce la conducibilità del composito, non potendo così da offrire stabilità riguardo alle proprietà termiche ed elettriche. L'alluminio ha la stessa tendenza del rame a creare lo strato di ossigeno che riduce le proprietà elettriche, ma esso è ampiamente usato come filler termicamente conduttivo per TIM. Un filler molto usato per gli EMC è la silice, adatta a ridurre il CTE e l'assorbimento di umidità: per la precisione viene usata 'fused silica', cioè silice amorfa ottenuta dopo la fusione di silice naturale. E' usata per gli EMC a causa della sua grande purezza, alta resistenza chimica, bassa espansione termica, isolamento elettrico e basso prezzo. La fused silica in forma sferica è preferibile perché, usata per alti contenuti di filler, riduce molto la viscosità durante il molding. Dall'altro lato, siccome è necessario aumentare la conducibilità termica del package, altri filler che vengono utilizzati per questa applicazione sono silice cristallina, alumina o nitrato di silicio.

Le proprietà dei materiali compositi polimerici dipendono fortemente non solo dalle proprietà del filler ma anche da parametri microstrutturali del filler quali diametro, lunghezza, distribuzione, frazione volumetrica e allineamento.(8). In Figura 26 vantaggi e svantaggi dell'utilizzo dei filler.(7).

Table 2.6 Advantages and Disadvantages of using fillers [15]

Advantages	Disadvantages
<ul style="list-style-type: none"> • Reduced formulation cost • Reduced shrinkage • Improved toughness • Improved abrasion resistance • Reduced water absorption • Increased heat deflection temperature • Decreased exotherm • Increased thermal conductivity • Reduced thermal expansion coefficient 	<ul style="list-style-type: none"> • Increased weight • Increased viscosity • Machining difficulties • Increased dielectric constant

Figura 26 - Vantaggi e svantaggi dell'utilizzo dei filler

In Figura 27 si riporta un elenco dei tipici filler usati per il packaging elettronico con le relative caratteristiche.(7) ed in Figura 28 le conducibilità termiche dei filler più usati per le applicazioni elettroniche.

Table 2.7 Typical Fillers and Their Characteristic Properties [16,17]

Property	Fused Silica	Cryst. Silica	AlN	Al ₂ O ₃	BN	SiC	Si ₃ N ₄
Thermal conductivity (W/m K)	1.3	14	130-260	20-25	20	90-270	30
CTE (ppm/°C)	0.5	15	4.4	6.7-7.1	0	3.7	3.0
Electrical resistance (ohm cm)	10 ¹⁴⁻¹⁸	10 ¹⁴	10 ¹⁴	10 ¹³	10 ¹¹	>10 ¹³	>10 ¹⁴
Dielectric constant (RT, 1 MHz)	3.9	3.8-5.4	8.7-8.9	8.9	4.1	40	8.0
Density (g/cm ³)	2.2	2.64	3.26	3.89	1.90	3.21	3.20
Young's modulus (GPa)	73	310	331	345	43	407	310
Vicker hardness (GPa)	6	9-11	12	20	<3	30	15

CTE: Coefficient of thermal expansion; RT: Room temperature.

Figura 27 - Tipici filler e relativecaratteristiche

Material	Thermal Conductivity at 25 °C (W/m K)
Graphite	100~400 (on plane)
Carbon black	6~174
Carbon Nanotubes	2000~6000
Diamond	2000
PAN-based Carbon Fibre	8~70 (along the axis)
Pitch-based Carbon Fibre	530~1100 (along the axis)
Copper	483
Silver	450
Gold	345
Aluminum	204
Nickel	158
Boron Nitride	250~300
Aluminum nitride	200
Beryllium oxide	260
Aluminum oxide	20~29

Figura 28 - Conducibilità termica di alcuni filler conduttivi termicamente

4.4 TEORIA DELLA PERCOLAZIONE

I compositi polimerici conduttivi tradizionali conducono grazie ad un meccanismo detto percolazione, che è alla base dell'analisi della conducibilità termica. Questi materiali sono costituiti da una matrice isolante nella quale sono disperse delle particelle conduttive di dimensioni micrometriche. Per la conduzione del composito è determinante la concentrazione, ovvero il rapporto filler-matrice polimerica. Esiste infatti una soglia critica del filler, chiamata appunto 'soglia di percolazione' a cui il campione diventa improvvisamente un eccellente conduttore. Il concetto è che si crea un percorso continuo per il passaggio di corrente attraverso le particelle. La conduttività elettrica o termica dipendono infatti dalla quantità di punti di contatto tra le particelle; questo significa che, aumentando la quantità di filler, la conduttività aumenta. Tuttavia, è chiaro che, aumentando la quantità di filler, deve necessariamente decrescere la quantità di resina: si

può dire dunque che c'è un limite alla quantità di filler che può essere usato senza far decrescere troppo le proprietà di adesione e resistenza della matrice. Si riporta in Figura 29 l'immagine esplicativa della teoria della percolazione.(9)

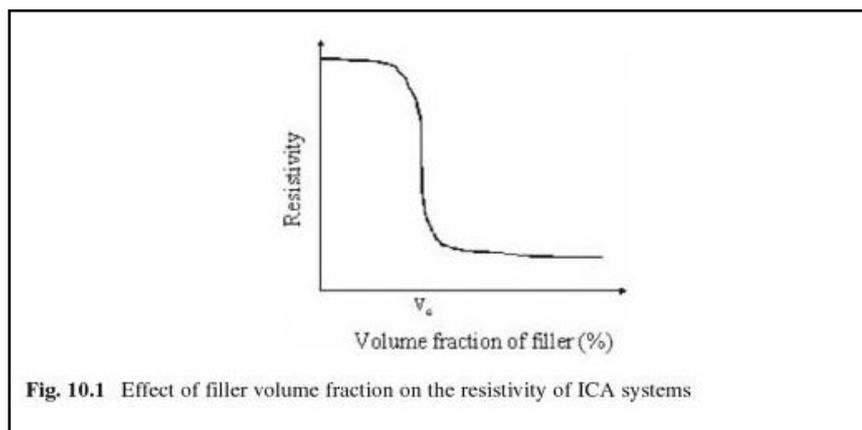


Figura 29 - Effetto della frazione volumetrica sulla resistività di adesivi termicamente conduttivi

Per chiarire questo concetto, si riporta un esempio della variazione di resistività elettrica in funzione della frazione volumetrica di filler per nano compositi polimerici caricati con particelle metalliche. Come mostrato in Figura 30, la conduttività elettrica di un composito particolato rivela un aumento non lineare all'aumento del volume di filler, passando attraverso la soglia di percolazione. Infatti, a basse frazioni volumetriche, le particelle conduttive sono separate e le proprietà elettriche del composito sono determinate dalla matrice, mentre all'aumento della concentrazione di filler, le particelle formano dei clusters. Alla soglia di percolazione, questi cluster formano una rete (network) tra i componenti, risultando in un salto notevole

della conducibilità elettrica (8). Le performance elettriche del composito dipendono molto anche dalla dispersione e dall'allineamento del filler.

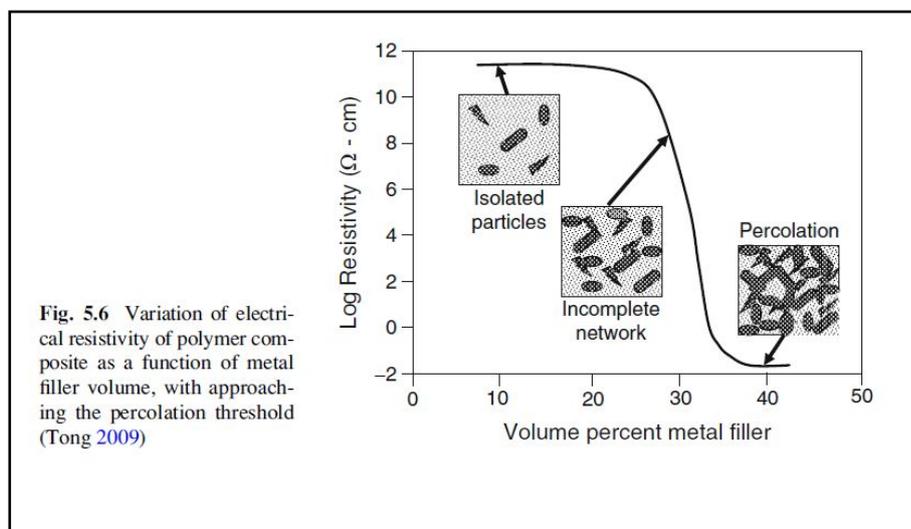


Figura 30 - Andamento della resistività elettrica in funzione della frazione volumetrica di filler

Nella scelta del filler infatti, non sono importanti solo le proprietà intrinseche, ma anche la dimensione e la forma poiché esse influenzano le proprietà finali; alcune proprietà che possono essere influenzate da dimensione e forma sono infatti conduttività elettrica, termica e viscosità.

Un esempio dell'effetto di nano particelle di argento sulla resistività del composito polimerico conduttivo in confronto a micro-particelle e mixed-particelle (micro e nano) è riportato in Figura 31 ed in Figura 32(10).

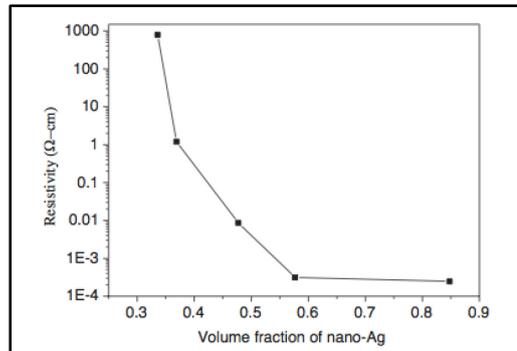


Figura 31 - Resistività di nanoparticelle di Ag in funzione della frazione volumetrica

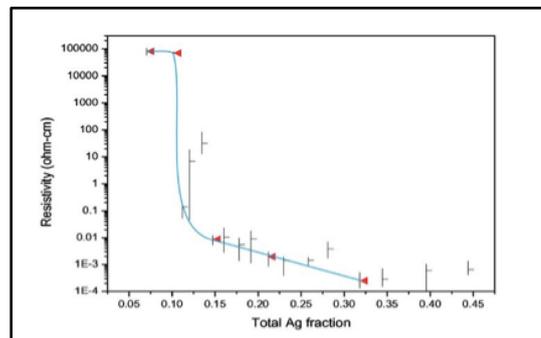


Figura 32 - Resistività di particelle micro e mixed (micro e nano) di Ag in funzione della frazione volumetrica

Lo studio mostra come, a basse frazioni volumetriche (0.335), la resistività aumenta fino ad un valore molto vicino a quello della soglia di percolazione. Si nota come, questo valore della soglia di percolazione si ha ad una frazione volumetrica più alta confrontata a quella che si ha per le micro-particelle (Figura 32). La giusta dimensione delle nano particelle è da valutare perchè dimensioni molto piccole aumentano significativamente la conduttività

termica, ma allo stesso tempo diminuiscono il fattore di dissipazione. Un ulteriore esempio di influenza delle dimensioni delle particelle sulle proprietà termiche del composito è riportato in Figura 33 (11).

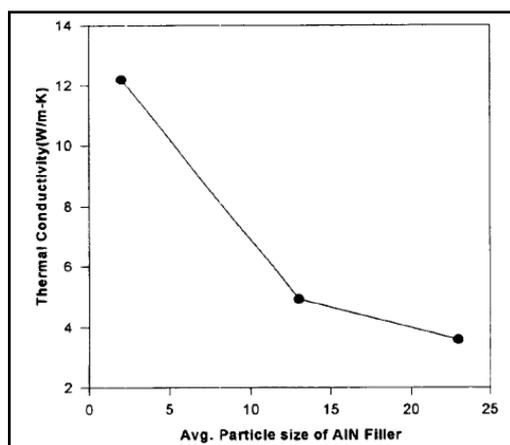


Figura 33 - Influenza delle dimensioni delle particelle sulle proprietà termiche del composito

Un ulteriore elemento da prendere in considerazione è sicuramente l'effetto del grado di dispersione dei filler sulle proprietà termiche, meccaniche e reologiche del nano composito.

Un esempio dell'influenza del grado di dispersione dei nanotubi di carbonio sulla conduttività termica per un composito a base di resina epossidica è riportato in Figura 34 (12).

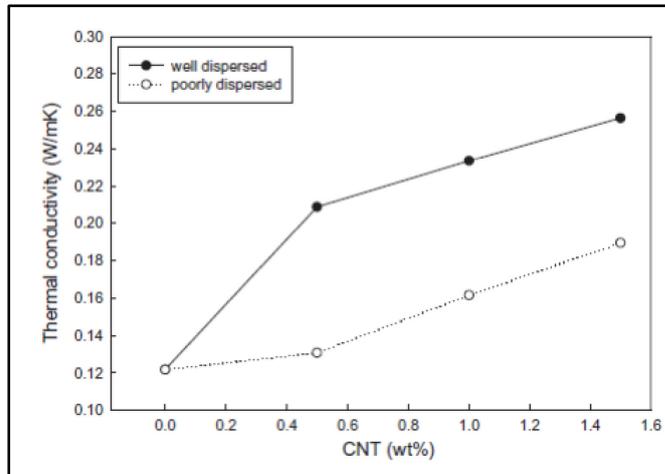


Figura 34 - Conducibilità termica di nanocompositi in funzione della frazione volumetrica di CNT

Infine, si riporta un esempio dell'influenza della frazione volumetrica sulle proprietà reologiche e termiche del composito. La frazione di volume di filler da integrare risulta essere ancor più importante nel caso dei potting compound piuttosto che per i molding compound. Infatti, mentre generalmente per gli Epoxy molding compound si hanno anche frazioni di filler pari al 90 wt%, per i potting compound questa percentuale è molto più bassa proprio per facilitare il processo di dispensazione. Uno studio comparativo di filler termicamente conduttivi, mostra la viscosità di alcune particelle termicamente conduttive in funzione del contenuto di filler; si nota per esempio che particelle di nitrato di boro (BN) mostrano valori di viscosità molto alti, dovuti alla forma delle particelle, rispetto alle tradizionali particelle di silice. Di contro, il BN mostra per esempio valori di conducibilità termica, a basse frazioni volumetriche, molto più alti rispetto

alla silice. In Figura 35 e Figura 36 si riportano i valori di viscosità e di conducibilità termica di vari tipi di filler usati in composti per incapsulamento di componenti elettronici. I risultati mostrano che il composto SCAN (silica coated aluminum nitride) è quello che ha, al 50wt%, sia conducibilità termica molto elevata che buoni valori di modulo elastico rispetto agli altri filler presi in considerazione. (13)

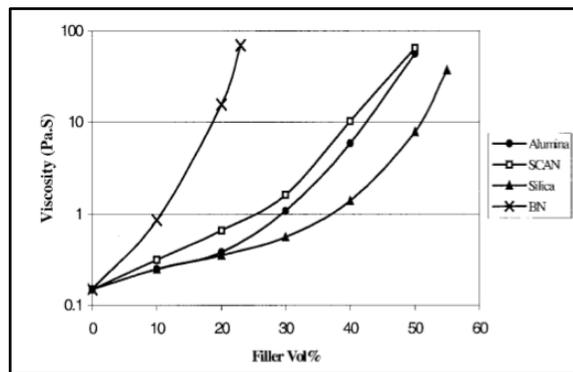


Figura 35 - Viscosità in funzione della frazione volumetrica

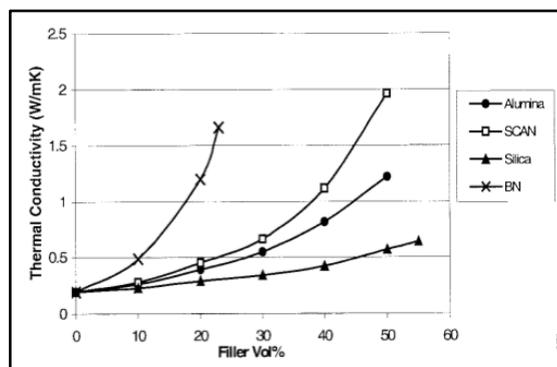


Figura 36 - Conducibilità termica in funzione della frazione volumetrica

5. ANALISI SPERIMENTALE: SVILUPPO DI NANO COMPOSITI CONDUTTIVI

5.1 INTRODUZIONE

La parte sperimentale di questo lavoro si può pensare suddivisa in due fasi: la prima dedicata all'attività di laboratorio e la seconda dedicata alla caratterizzazione. Propedeutico alle attività svolte in laboratorio, è stato l'approfondimento in merito alle tecniche e ai materiali disponibili per i processi di incapsulamento, oggetto del progetto di ricerca. L'analisi dei materiali presenti in commercio ha portato alla creazione di un database nella quale si identificano tutti i possibili materiali disponibili per il processo di potting in funzione del tipo di materiale, viscosità, tempo e temperatura di reticolazione, conducibilità termica, coefficiente di espansione termica e temperatura massima di esercizio. Da questa ricerca è emerso che i migliori incapsulanti risultano essere i siliconi e le resine epossidiche, poiché, per

esempio quest'ultime, pur avendo elevata viscosità rispetto alle poliuretaniche, mostrano maggiore resistenza alle alte temperature. Quest'ultimo requisito, insieme all'elevata conducibilità termica e alla flessibilità, risulta essere l'obiettivo della ricerca condotta durante il periodo di dottorato.

La ricerca bibliografica eseguita in merito, ha indirizzato lo studio all'utilizzo di nanocompositi costituiti da nanotubi di carbonio (CNTs) e particelle di nitruro di boro (BN) in matrici polimeriche, grazie ai quali migliorano enormemente le proprietà termiche, elettriche e meccaniche. La letteratura mostra inoltre, come precedentemente illustrato, che è necessario prendere in considerazione materiali con basso coefficiente di espansione termica per evitare fenomeni di stress termico e che è bene valutare l'influenza delle dimensioni delle particelle e l'effetto del grado di dispersione sui compositi a base di resina epossidica.

Le attività di ricerca comprendono, quindi, lo studio di nanocompositi per incapsulamento con elevata stabilità termica ed elevata conducibilità termica (valori compresi tra 5-20 W/mK). L'obiettivo è l'ottenimento di campioni di composti da impiegare fino a 250 °C e l'ottimizzazione dei parametri di processo di assemblaggio per assicurare alti livelli di adesione, affidabilità dei giunti e minima presenza di vuoti.

In particolare le attività sono volte a:

- Sviluppare strumenti e metodi per migliorare la dispersione di cariche organiche e inorganiche in matrici polimeriche per composti di incapsulamento.

- Caratterizzare nanocomposti di tipo commerciale e sperimentale per studiarne le relazioni struttura/proprietà.

In particolare, in prima istanza, sono stati realizzati compositi con nanotubi di carbonio e particelle di nitruro di boro, successivamente caratterizzati e confrontati con i sistemi commerciali. Infine, sono stati implementati modelli termici per i sistemi realizzati ai fini del calcolo della conducibilità termica.

5.2 TECNICHE DI CARATTERIZZAZIONE

5.2.1 ANALISI DINAMICO-MECCANICA (DMA)

L'analisi dinamico-meccanica è una tecnica che misura le proprietà fisiche dei solidi, quali modulo e smorzamento, in un ampio intervallo di temperature e frequenze. In principio, i test DMA furono sviluppati per investigazioni strutturali sui metalli. Oggi questa tecnica è una delle più performanti per lo studio di materiali polimerici. Questa analisi rappresenta la via più sensibile per lo studio delle transizioni vetrose, proprietà chiave dei polimeri sia da un punto di vista strutturale che di processamento. Il valore del modulo sotto la T_g è funzione dei livelli dell'orientazione molecolare e della cristallinità. Le transizioni che avvengono possono essere relazionate alla struttura del polimero e possono essere molto utili quando si studiano miscele multicomponenti. Sopra la T_g , il comportamento gommoso fornisce importanti fattori come la densità di reticolazione e utili indizi per la processabilità.

Uno strumento DMA applica una forza oscillante (stress) al provino registrandone una risposta oscillante. Il modulo viene calcolato dalla risposta elastica, ad esempio la risposta del provino “in fase” con lo stress oscillatorio applicato. Lo smorzamento è calcolato dalla risposta viscosa, ad esempio la risposta del provino “fuori fase” con lo stress oscillatorio applicato. Il modulo, come noto, è definito come lo stress per unità di area diviso la deformazione risultante ed è quindi una misura della resistenza del materiale alla deformazione, ovvero maggiore è il modulo più rigido sarà il materiale. Questa definizione però non tiene conto del tempo. Per materiali che esibiscono una deformazione invariante nel tempo, come i metalli e le ceramiche a temperatura ambiente, qualsiasi misura della deformazione porterà ad un valore costante del modulo. Tuttavia, per materiali che invece esibiscono una deformazione tempo-dipendente, il modulo deve includere il tempo per essere significativo. Questo è il motivo per cui l’analisi meccanica dinamica offre potenti vantaggi; si applica uno stress periodico al campione misurando la deformazione risultante. A causa delle proprietà tempo-dipendenti dei polimeri, la risposta sarà fuori fase con l’input applicato. Il modulo complesso M^* è definito come il rapporto stress/deformazione istantaneo; per capire i meccanismi di deformazione che avvengono nel materiale si hanno delle risposte in fase e fuori fase. Questo è equivalente ad un numero complesso, dove M' è la risposta in fase o elastica e rappresenta l’energia immagazzinata (Figura 37), mentre M'' è la risposta immaginaria o viscosa, proporzionale all’energia dissipata (Figura 38).

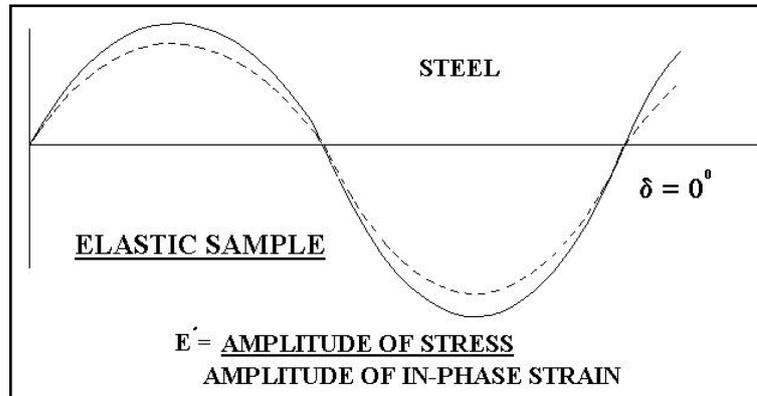


Figura 37 - Risposta in fase di un sistema elastico

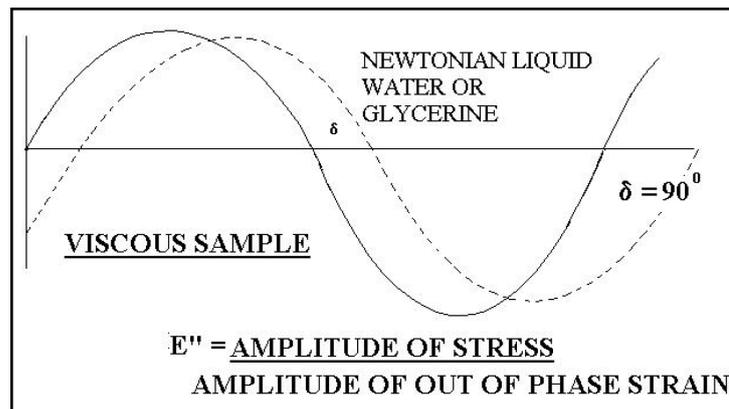


Figura 38 - Risposta fuori fase di un sistema viscoso

In Figura 39 viene riportato il tipico comportamento viscoelastico dei polimeri:

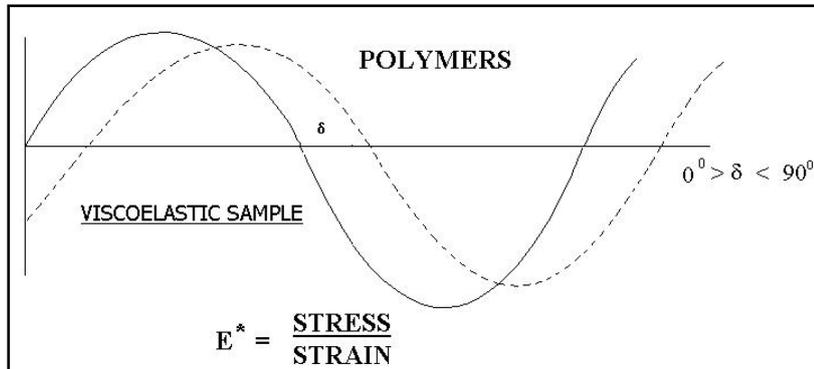


Figura 39 - Risposta mista di un sistema viscoelastico

Quindi, per un materiale perfettamente elastico si ha $M^* \equiv M'$, mentre per un materiale totalmente viscoso $M^* \equiv M''$; δ è la differenza di fase misurata tra la forza applicata e la risposta. Il rapporto M''/M' definisce il termine $\tan\delta$ che prende il nome di fattore di smorzamento ed è proporzionale al rapporto tra l'energia dissipata e quella immagazzinata. Questo è uno dei parametri chiave nell'analisi DMA, in quanto si è visto che si ha un aumento durante le transizioni tra meccanismi deformazionali differenti.

Nell'analisi meccanica differenziale esistono vari metodi operativi, ciascuno finalizzato a scopi ben precisi e riportato nella Tabella 1.

Tabella 1 - Metodi sperimentali della tecnica DMA

Modalità Temperatura	Metodo della Frequenza	Tipico uso
<i>Nessuna</i>	Singola o scansione	Modulo e $\tan\delta$ a RT
<i>Isoterma costante</i>	Singola o scansione	Modulo e $\tan\delta$ a T
<i>Isoterma costante</i>	Singola	Scansione di deformazione a T
<i>Rampa rapida, isoterma</i>	Scansione	Studi di curing, cinetiche di cristallizzazione
<i>Scansione termica</i>	Singola o multipla	Impronta tipica dei polimeri, Tg
<i>Isoterma a stadi</i>	Scansione (full range)	Set di dati completo, migliore accuratezza termica

Il metodo a scansione termica è il più comune in quanto fornisce i dati DMA più rilevanti, ed è stato quello utilizzato per lo studio dei sistemi epossidici formulati in questo lavoro di tesi. Il range termico scansionato è stato variato in funzione del campione in esame, le frequenze utilizzate sono state di 1 e 10 Hz e i campioni hanno all'incirca le seguenti dimensioni: larghezza (10 mm), lunghezza (40 mm) e spessore (3 mm). Le misure sono state condotte utilizzando un TRITECH 2000 della TRITON Technology, riportato in Figura 40.

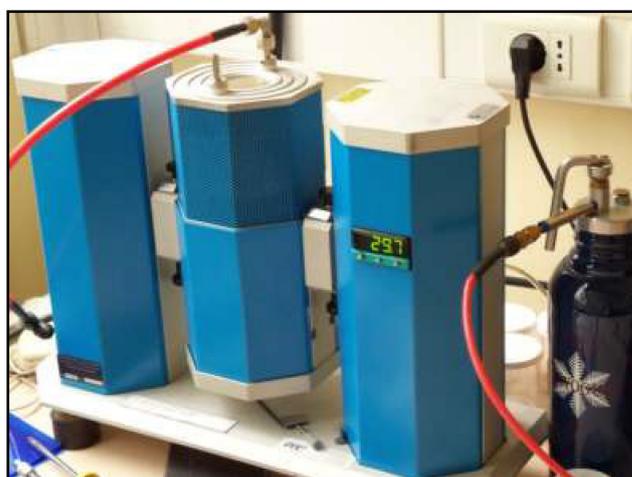


Figura 40 - Strumento DMA

5.2.2 MICROSCOPIA A SCANSIONE ELETTRONICA (SEM)

Il microscopio elettronico a scansione, comunemente indicato con l'acronimo 'SEM' dall'inglese *Scanning Electron Microscope*, è un tipo di microscopio elettronico.

Il microscopio non sfrutta la luce come sorgente di radiazioni ma un fascio di elettroni che colpiscono il campione. Dal campione vengono emesse numerose particelle fra le quali gli elettroni secondari. Questi elettroni vengono rilevati da uno speciale rivelatore e convertiti in impulsi elettrici. Il fascio non è fisso ma viene fatto *scandire*: viene cioè fatto passare sul campione in una zona rettangolare, riga per riga, in sequenza. Il segnale degli elettroni secondari viene mandato ad uno schermo (un monitor) dove viene eseguita una scansione analogica. Il risultato è un'immagine in bianco e nero che ha caratteristiche simili a quelle di una normale immagine fotografica. Il potere di risoluzione di un normale microscopio elettronico SEM a catodo di tungsteno si aggira intorno ai 5 nm, ma alcuni modelli arrivano a 1 nm. L'immagine SEM ha un'elevata profondità di campo. Il campione deve essere messo sotto alto vuoto (10^{-5} Torr), poiché l'aria impedirebbe la produzione del fascio (data la bassa energia degli elettroni) e deve essere conduttivo (oppure metallizzato), altrimenti produce cariche elettrostatiche che disturbano la rivelazione degli elettroni secondari.

Gli altri segnali emessi dal campione in seguito all'eccitazione del fascio sono: elettroni riflessi (fenomeno di back scattering), raggi X, catodoluminescenza, correnti indotte dal fascio e per alcuni tipi di campioni, anche elettroni trasmessi. Esistono anche SEM modificati per determinate applicazioni: con il SEM a pressione variabile *low vacuum*, per esempio, si riescono ad analizzare anche campioni biologici non metallizzati o isolanti. Con il cosiddetto "Environmental SEM" inoltre si possono analizzare anche campioni liquidi. Nel seguente lavoro è stato utilizzato un microscopio LEO.

5.2.3 ANALISI TERMOMECCANICA (TMA)

L'analisi termomeccanica misura le variazioni delle dimensioni del campione lungo una direzione (lineare) o lungo le tre dimensioni (volumetrica) in funzione del tempo, della temperatura e della forza applicata. Le caratteristiche meccaniche dei campioni (coefficienti di espansione, moduli di trazione e flessione) vengono determinate dalla misura delle variazioni dimensionali in funzione della temperatura di provini sottoposti a un determinato carico. Un'analisi di questo tipo consente di ottenere informazioni sul coefficiente di espansione termica, sulla viscosità, sul tempo e sulla temperatura di gelificazione di un sistema polimerico; inoltre consente di raccogliere ulteriori informazioni derivanti dall'applicazione di sollecitazioni meccaniche variamente applicate (trazione, flessione) quali il modulo elastico e dissipativo o il rilassamento degli sforzi consentendo una completa caratterizzazione termomeccanica di materiali viscoelastici. La TMA risulta, quindi, di particolare utilità nella caratterizzazione di sistemi polimerici di varia natura (termoplastici, termoindurenti, compositi in genere, rivestimenti polimerici ed adesivi) e trova un interessante impiego in quei campi in cui risulta indispensabile analizzare la risposta del materiale in ambienti termicamente e meccanicamente controllati.

5.2.1 ANALISI REOLOGICA

L'oggetto di studio della reologia è l'analisi delle deformazioni di strutture solide o fluide soggette a scorrimento. L'analisi reologica riguarda quindi tutti i processi in cui i materiali possono o devono scorrere per qualsiasi motivo. Gli strumenti abili a misurare le proprietà reologiche sono i

reometri: esistono vari tipi di reometri, per esempio i reometri rotazionali a stress o strain controllato e i reometri capillari. Con i reometri solitamente si svolgono due tipi di misure: misure di viscosità, per una valutazione delle proprietà di scorrimento, e misure in oscillatorio, per una valutazione delle proprietà di deformabilità della struttura del materiale ovvero delle proprietà viscoelastiche, senza però arrivare allo scorrimento. In Figura 41 le due tipologie di misure possibili da eseguire con il reometro.

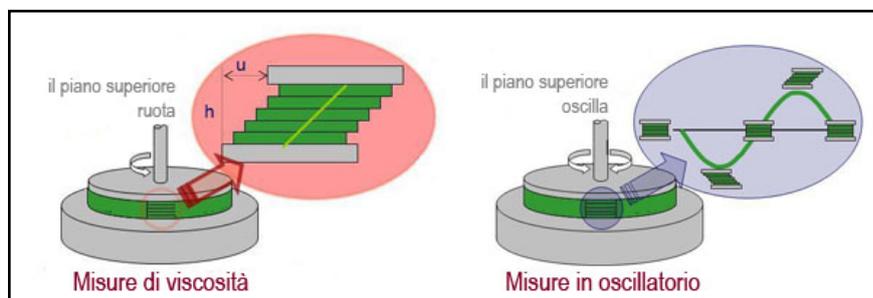


Figura 41 - Tipologie di misure eseguite con il reometro

La misura delle proprietà reologiche è applicabile a tutti i tipi di materiali: ai fluidi, ai semisolidi come i gels, ma anche ai sistemi solidi come polimeri e compositi. Grazie a misure di reologia si possono collegare le proprietà fisiche di un materiale o di una formulazione durante le varie tappe del processo alle proprietà d'uso del prodotto e alle sue prestazioni per l'utilizzatore finale. La misura delle proprietà reologiche può contribuire alla formulazione di un prodotto migliore, predicendone le caratteristiche finali e le proprietà fisiche durante e dopo il processo di lavorazione del prodotto stesso.

5.2.2 ANALISI DI CONDUCEIBILITA' TERMICA

La conduttività termica e la diffusività termica sono tra i parametri termofisici più importanti per la descrizione delle proprietà di trasferimento di calore di un materiale o di un composto. Per la misura precisa della diffusività termica, la tecnica Laser Flash (LFA) è conosciuta come un metodo assoluto, veloce e preciso. Questo metodo della misura di diffusività termica consiste in una misura indiretta in condizioni non stazionarie della conduttività termica attraverso la determinazione preliminare della diffusività termica e del calore specifico.

Il metodo, come descritto dalla norma ASTM E-1461, consiste essenzialmente nel fornire un impulso uniforme di energia termica tramite un laser, ad una faccia del campione in esame, posto in alto vuoto, per un tempo breve paragonato al tempo di transito: si misura dunque la temperatura raggiunta dalla superficie opposta in funzione del tempo trascorso mediante un termometro.

Lo strumento è rappresentato nella Figura 42. I campioni analizzati per questo lavoro, con questo strumento, hanno un diametro pari a 12,7 mm ed uno spessore pari a 1,0 mm.



Figura 42 - Strumento laser flash Netzsch

Tramite questo strumento è possibile calcolare il calore specifico e la diffusività termica. Da questi si ricava la conducibilità termica.

La conducibilità termica è quindi calcolata tramite la seguente equazione:

$$\lambda (T) = \rho (T) * c_p (T) * a (T)$$

dove λ è la conducibilità termica, ρ la densità, c_p il calore specifico, a la diffusività termica e T la temperatura.

Il vantaggio di questa tecnica è che consente una misura di λ senza dovere prendere in considerazione il flusso di calore termico presente, né il gradiente termico. Inoltre consente una misura molto rapida.

5.2.3 MODELLI PER CONDUCEBILITA' TERMICA DI SISTEMI COMPOSITI

Sono disponibili in letteratura moltissimi modelli per predire la conducibilità termica di materiali compositi. Questi modelli sono stati formulati principalmente per micro compositi ma possono essere utili anche per dare una stima delle caratteristiche dei nano compositi. In questo paragrafo si riportano alcuni di questi modelli per la predizione della conducibilità termica di nano compositi caricati e nei paragrafi successivi l'applicazione di questi ai nano compositi sviluppati con nanotubi di carbonio.(14)

Tutti i modelli usati per predire la conducibilità termica sono espressi in termini di frazione volumetrica del filler. Due modelli ampiamente usati sono quelli di Knappe e Maxwell riportati di seguito

$K1c(\phi_f) := K_m \cdot \frac{2 \cdot K_m + K_{f1} - 2 \cdot \phi_f \cdot (K_m - K_{f1})}{2 \cdot K_m + K_{f1} + \phi_f \cdot (K_m - K_{f1})}$	Knappe Model
$K2c(\phi_f) := \left[1 + 3 \cdot \phi_f \cdot \frac{\left(\frac{K_{f1}}{K_m} - 1 \right)}{\left(\frac{K_{f1}}{K_m} \right) + 2} \right] \cdot K_m$	Maxwell Model

In Figura 43 l'andamento dei modelli riportati sopra: più è alta la frazione volumetrica del filler, più aumenta la conducibilità termica.

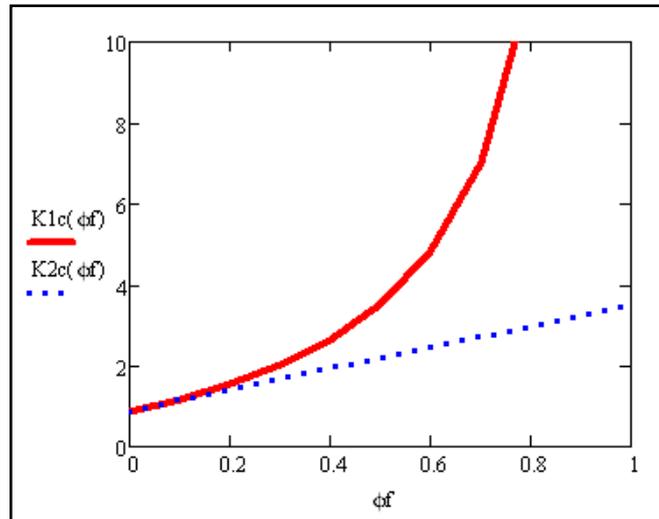


Figura 43 - Andamento della conducibilità termica calcolata con il modello di Knappe (rosso) e di Maxwell (blu)

Nei modelli termici si considera sempre come parametri:

$$K_m := 0.88 \cdot \frac{W}{m \cdot K} \text{ Thermal conductivity of Epoxy Resins}$$

$$K_{f1} := 3000 \cdot \frac{W}{m \cdot K} \text{ Thermal conductivity of CNT}$$

La figura sopra mostra che nel caso più favorevole (modello di Knappe) e con alte frazioni volumetriche si possono raggiungere valori di conducibilità pari a 10 W/mK.

In letteratura sono riportati alcuni modelli più “ottimistici” come quelli di seguito:

$$K_{3c}(\phi_f) := K_m + \left(\frac{1}{3}\right) \cdot K_{f1} \cdot \phi_f$$

$$K_{4c}(\phi_f) := K_m + K_{f1} \cdot \phi_f$$

$$K_{6c}(\phi_f) := K_m \cdot \left(1 + \frac{\phi_f \cdot K_{f1}}{3 \cdot K_m}\right)$$

In Figura 44 l'andamento dei modelli riportati sopra

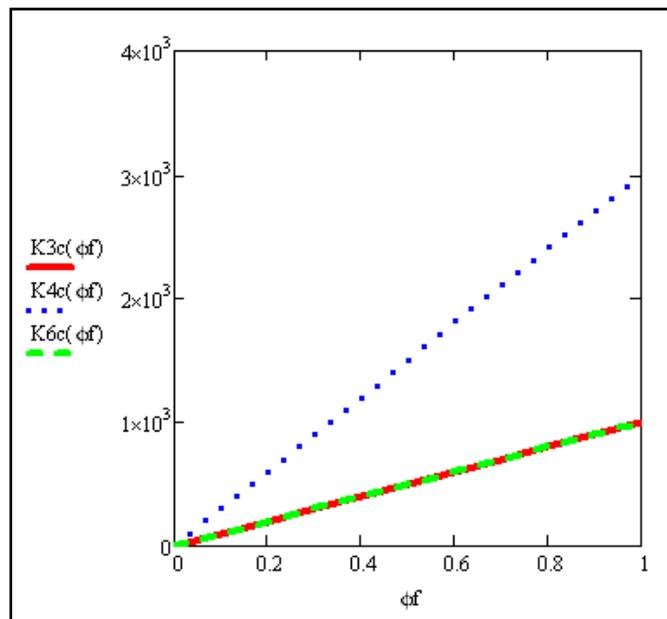


Figura 44 - Modelli per la predizione della conducibilità termica

Secondo questi modelli possono essere raggiunte alte conducibilità termiche; tuttavia questi modelli sembrano non essere molto realistici. Per ottenere una predizione più vicina ai dati sperimentali, il modello da utilizzare è quello di Lewis-Nielsen. Questo è riportato sotto:

$$K_{7c}(\phi_f) := K_m \left(\frac{1 + A_p \cdot B \cdot \phi_f}{1 - B \cdot \phi_f \cdot \psi(\phi_f)} \right)$$

I parametri A_p , B e ψ possono essere stimati dalle tabelle riportate in Figura 45 ed in Figura 46 dalle formule riportate sotto:

$$B := \frac{\left(\frac{K_{f1}}{K_m}\right) - 1}{\left(\frac{K_{f1}}{K_m}\right) + A_p} \quad \psi(\phi_f) := 1 + \left[\frac{1 - \phi_m}{(\phi_m)^2} \right] \cdot \phi_f$$

Inoltre in Figura 47 si riporta il modello di Lewis Nielsen.

Shape of Particle	Type of Packing	ϕ_m
Spheres	Hexagonal close	0.7405
Spheres	Face centered cubic	0.7405
Spheres	Body centered cubic	0.60
Spheres	Simple cubic	0.524
Spheres	Random close	0.637
Spheres	Random close	0.601
Rods or fibers	Uniaxial hexagonal close	0.907
Rods or fibers	Uniaxial simple cubic	0.785
Rods or fibers	Uniaxial random	0.82
Rods or fibers	Three dimensional random	0.52

Figura 45 - Parametri per il modello di Lewis-Nielsen

Type of dispersed phase	Direction of heat flow	A
Cubes	Any	2.0
Spheres	Any	1.50
Aggregates of spheres	Any	$\frac{2.50}{\phi_f} - 1$
Randomly oriented rods Aspect ratio = 2	Any	1.58
Randomly oriented rods Aspect ratio = 4	Any	2.08
Randomly oriented rods Aspect ratio = 6	Any	2.8
Randomly oriented rods Aspect ratio = 10	Any	4.93
Randomly oriented rods Aspect ratio = 15	Any	8.38
Uniaxially oriented fibers	Parallel to fibers	$2L/D$
Uniaxially oriented fibers	Perpendicular to fibers	0.5

Figura 46 - Parametri per il modello di Lewis-Nielsen

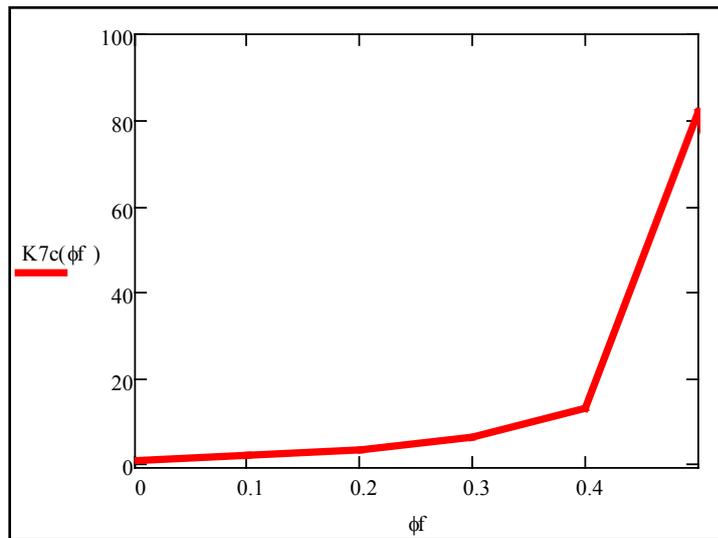


Figura 47 - Modello di Lewis Nielsen

5.3 COMPOSTI CON NANOTUBI DI CARBONIO

Il lavoro è stato svolto su sistemi epossidici caricati con nanotubi di carbonio (CNT). La scelta dei CNT come filler è giustificata dall'elevata conducibilità termica di questa categoria di materiali, pari circa a 3000W/mK, valore considerevolmente maggiore rispetto ai valori di conducibilità delle resine base (0.7 e 1 W/mK).

La letteratura più recente riporta, per il packaging elettronico, l'utilizzo di nanocompositi costituiti da nanotubi di carbonio (CNTs) in matrici polimeriche, grazie ai quali migliorano enormemente le proprietà termiche, elettriche e meccaniche.(15)

Un esempio della variazione di conduttività elettrica dei nanotubi di carbonio inseriti in una matrice epossidica, confrontata a quella di altri adesivi, è riportato in Figura 48(16).

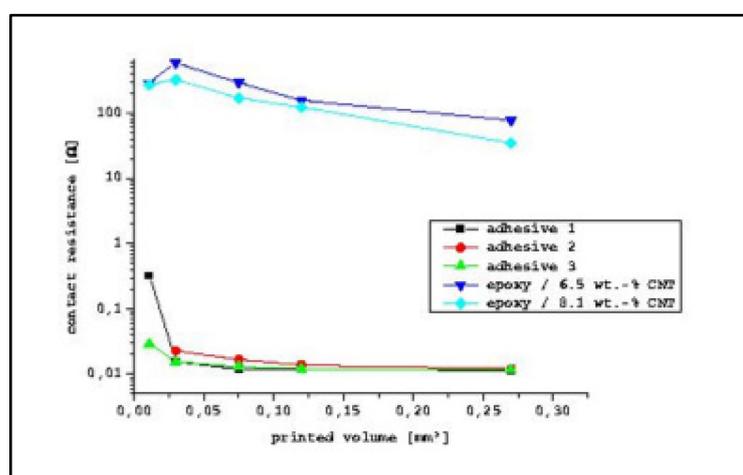


Figura 48 - Misure di conduttività elettrica di composti epoxy/cnt

5.3.1 PREPARAZIONE E CARATTERIZZAZIONE MISCELE 1° PARTE

La prima parte dell'attività sperimentale ha riguardato lo sviluppo di composti ottenuti tramite miscelatore meccanico. La procedura svolta è la seguente:

- 1) Miscelazione meccanica di cnt e resina
- 2) Aggiunta ammina
- 3) Processo di reticolazione

I nanotubi selezionati per queste analisi sono stati i Baytubes prodotti dalla Bayer; la Figura 49 riporta i dati caratteristici di questi nanotubi.

Property	Value	Unit	Method
C-Purity	> 95	%	Elementary analysis
Free amorphous carbon	Not detectable	%	TEM
Number of walls	3-15	-	TEM
Outer mean diameter	13-16	nm	TEM
Outer diameter distribution	5-20	nm	TEM
Inner mean diameter	4	nm	TEM
Inner diameter distribution	2-6	nm	TEM
Length	1 - >10	µm	SEM
Bulk density	140-160	kg/m ³	EN ISO 60
Loose agglomerate size	0,1-1	mm	PSD

Figura 49 - Caratteristiche dei nanotubi di carbonio Baytubes della Bayer

La resina selezionata per questa prima fase di studio è un diglidiletere del bisfenolo A (DGEBA) reticolata con un'ammina aromatica primaria del tipo 3,3' diaminodifenil solfone (DDS).

Oltre ai CNT le resine sono state caricate con particelle di nanosilicie della Cabot. Le nanosilici utilizzate sono state la Cabosil TS720 e M5. Quest'ultima è una silicie non funzionalizzata mentre la TS 720 presenta PDMS in superficie. Quest'ultima è "fumed silica" o silice pirogenica perché prodotta in una fiamma, costituita da goccioline microscopiche di silice amorfa fuse in ramificati e particelle secondarie tridimensionali che poi agglomerano in particelle terziarie. La polvere risultante ha bassa densità apparente ed alta area superficiale. Vengono utilizzate come addensante o carica rinforzante.

Le miscele preparate per la caratterizzazione reologica e termo-meccanica sono state le seguenti :

1. DER – DDS
2. DER – DDS con 0.1%-0.25%-0.5%-0.75%-1% CNT
3. DER – DDS con 0.1%-0.25%-0.75%-1%CNT e con 3%M5
4. DER – DDS con 0.1%-0.25%-0.5%-0.75%-1% CNT e con 3% TS720

Dall'analisi svolta mediante un reometro a piatti paralleli, il confronto mostra in Figura 50 ed in Figura 51 che l'aggiunta dei nanotubi alle percentuali considerate non influenza significativamente la viscosità, mentre l'aggiunta delle nanosilici incrementa la viscosità. Inoltre, si nota che le silici funzionalizzate (TS720) incrementano la viscosità più delle silici base (M5). La presenza delle catene di PDMS sulla superficie delle nanosilici è tale da facilitare la creazione di un reticolo di silicie in grado di stabilizzare la sospensione aumentandone però la viscosità.(17), (18).

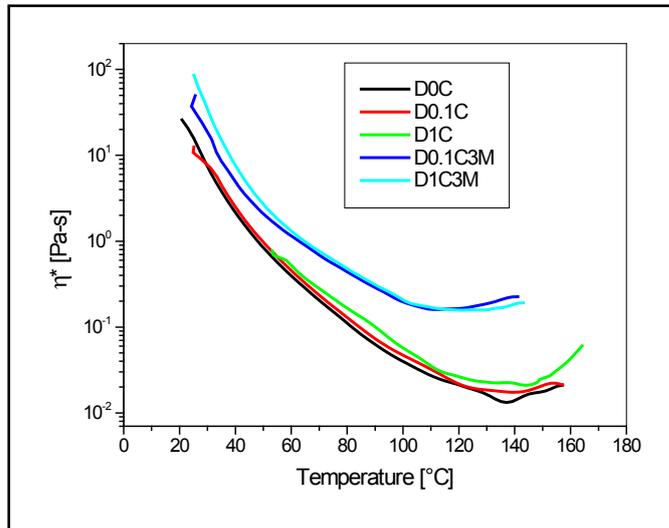


Figura 50 - Effetto di differenti quantità di CNT e silice M5

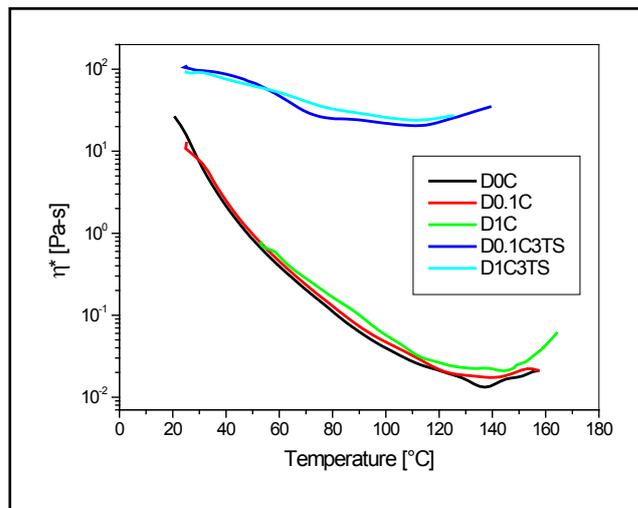


Figura 51 - Effetto di differenti quantità di CNT e silice TS720

Inoltre, le miscele sono state reticolate ed analizzate con un DMTA per determinarne le caratteristiche termo meccaniche. I dati mostrano che utilizzando le silici TS720 in combinazione con i nanotubi è possibile ottenere incrementi nei valori di temperatura di transizione vetrosa, mentre l'aggiunta della silice M5 comporta riduzioni della temperatura di transizione vetrosa. I risultati sono riportati in Figura 52 ed in Figura 53.

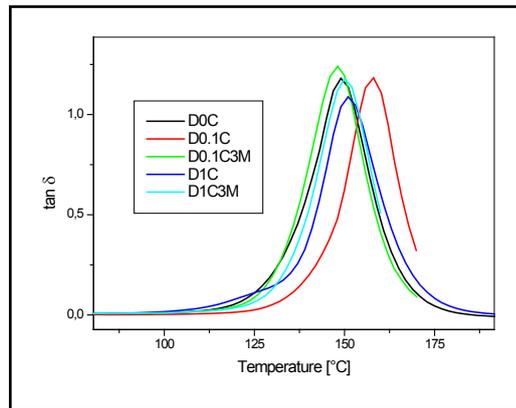


Figura 52 - $\text{Tan}\delta$ delle miscele in esame: effetto della silice M5

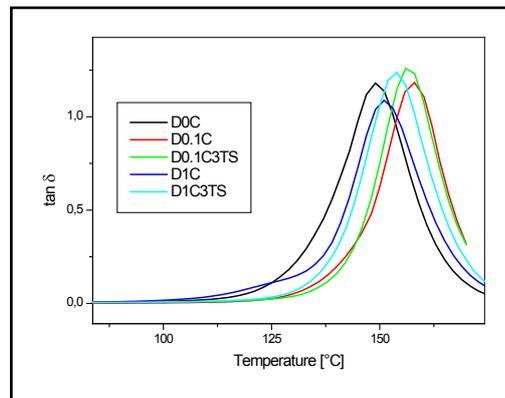


Figura 53 - $\text{Tan}\delta$ delle miscele in esame: effetto della silice TS720

La Tabella 2 riporta i valori di temperatura di transizione vetrosa misurati come picco della $\tan\delta$ nelle prove DMTA sopra riportate.

Tabella 2 - Valori di Tg dei campioni in esame

Campione	Tg [°C]
D0C	149
D0.1C	158
D1C	151
D0.1C3M	148
D1C3M	150
D0.1C3TS	156
D1C3TS	154

Oltre alla valutazione delle proprietà termo meccaniche sono state condotte anche analisi previsionali per determinare i valori di conducibilità termica attesi dalla realizzazione di miscele epossido/CNT, secondo i modelli riportati nel paragrafo precedente. Il modello di Knappe mostra che una conducibilità di 10W/mK è raggiungibile con frazioni volumetriche di nanotubi pari al 60%, mentre quello di Lewis-Nielsen mostra che valori di conducibilità dell'ordine di 80W/mK sono previsti per frazioni volumetriche pari a 50%.

Quest'ultimo, che è tra i più utilizzati è stato quello implementato per questo lavoro. In accordo alla Figura 45 e Figura 46, per il nostro caso si è considerato $A_p=8.38$ e $f_m=2.52$; usando questi parametri di input, il modello ottenuto è quello riportato in Figura 54.

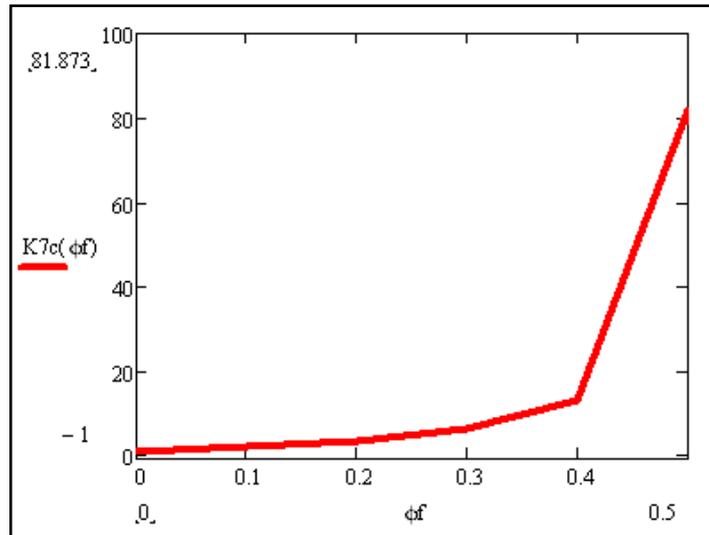


Figura 54 - Conducibilità termica ottenuta in accordo al modello di Lewis-Nielsen

Secondo questo modello, oltre una frazione volumetrica pari a 0.4, si ottiene un elevato aumento della conducibilità termica.

In base ai risultati esposti sopra esposti è possibile dunque prevedere che i sistemi nanocompositi basati su nanotubi possano essere utilizzati per realizzare sistemi polimerici con elevata conducibilità. Tuttavia, questi sistemi possono essere realizzati solo utilizzando alte frazioni volumetriche. Per ottenere queste frazioni si renderà necessario dotarsi di sistemi di miscelazione in grado di lavorare sistemi ad alta viscosità quali le calandre a tre rulli.

5.3.2 PREPARAZIONE E CARATTERIZZAZIONE MISCELE 2° PARTE

La seconda parte dell'attività sperimentale ha riguardato lo sviluppo di composti ottenuti tramite il mixer planetario a tre rulli "Thinky Mixer" (19)(20). La scelta di utilizzare questo sistema è dovuta al fatto che è necessario un sistema innovativo per riuscire ad ottenere alte frazioni volumetriche (21), (22). Infatti, il miglioramento delle proprietà dei materiali a fase nanometrica è possibile solo quando le particelle sono uniformemente disperse nei polimeri. Il miglioramento delle proprietà fisiche dei nanocompositi polimerici basati su cnt, dipende da una buona dispersione e da forti interazioni tra filler e matrice. L'effettiva utilizzazione dei cnt nelle varie applicazioni dipende principalmente dalla dispersione di questi nella matrice. Inoltre, un buon legame interfacciale è richiesto per avere il trasferimento di carico tra cnt e matrice, condizione necessaria per migliorare le proprietà meccaniche. Se l'adesione tra matrice e cnt non è abbastanza forte per sostenere alti carichi, i benefici della alta resistenza a trazione dei cnt, si perdono. Ci sono vari meccanismi di trasferimento di carico dalla matrice al filler, di seguito i principali:

1. High speed mixing : miscelatore meccanico
2. Sonicazione: anche se le proprietà dei compositi migliorano, si osservano agglomerati sulla superficie di frattura. È adatto per materiali a matrice poco viscosa e per piccoli volumi perché gli ultrasuoni hanno un forte impatto energetico ma introducono basse forze di taglio. Conviene disperderli in un solvente (acetone,

metanolo) che consente agli agglomerati di separarsi, poi la sospensione viene mixata e il solvente evapora.

3. Processi di evaporazione della soluzione
4. Calandratura: è molto efficace ma aumenta la viscosità della matrice durante la degassificazione della resina e dell'hardener, complicando il processo RTM. Un vantaggio di questa tecnica è che si possono lavorare grandi quantità.
5. Thinky mixing: non richiede come metodo né l'aggiunta di agenti disperdenti, né di modifiche chimiche dei cnt per ottenere una buona dispersione. Confrontato con un banbury mixing , questo metodo porta ad una diminuzione significativa nella soglia di percolazione, punto in cui la conduttività elettrica aumenta portando alla formazione di percorsi percolativi dei cnt. Questo perché l'aspect ratio dei cnt è mantenuto anche dopo il mixing process al contrario del banbury mixing che rompe i cnt. La dispersione uniforme di queste nanoparticelle, produce un'ampia area interfacciale tra le nanoparticelle e il polimero (la matrice), cioè si ha un maggiore rapporto area/volume. Quest'ultimo consente fenomeni interfacciali di maggiore intensità, quindi per aumentare il rapporto si deve diminuire il raggio della particella.(rapporto area/volume sfera= $r^2/r^3=1/r$. Aspect ratio= indica il rapporto tra la dimensione più lunga e quella più corta in una figura bidimensionale(larghezza/lunghezza), i cnt hanno aspect ratio elevato, cioè sono molto più larghi che lunghi.

In sostanza, le tecniche per ottenere buone proprietà sono:

1. Migliorare la dispersione
2. Allineamento dei cnt nella resina
3. Funzionalizzazione dei cnt per buona adesione con ammine , un altro modo per migliorare l'adesione è l'utilizzo di surfattanti.

Le criticità relative alla fabbricazione dei nanocompositi con cnt sono:

1. Dispersione di cnt nella matrice polimerica
2. Interazione cnt-polimero e natura dell'interfaccia
3. Allineamento dei cnt in una matrice polimerica

La procedura svolta per la preparazione dei campioni è la seguente:

- 1) Miscela resina + cnt
- 2) Sonicazione della miscela per 45 minuti (50W – 20% amplitudine)
- 3) Thinky mixer (6 minuti-2000 rpm -5torr)

I nanotubi selezionati per queste analisi sono stati iGraphistrength C100 prodotti dalla Graphistrength; la Figura 55 riporta i dati caratteristici di questi nanotubi.

Description	CCVD multi-wall carbon nanotubes	
Appearance	Black powder	
Powder characteristics	Apparent density	50 – 150 kg/m ³
	Mean agglomerate size	200 – 500 µm
	Weight loss at 105 °C	< 1 %
MWNT characteristics	C content	> 90 wt%
	Free amorphous carbon	Not detectable (SEM/TEM)
	Mean number of walls	5 – 15
	Outer mean diameter	10 – 15 nm
	Length	0.1 – 10 µm

Figura 55 - Caratteristiche dei nanotubi Graphistrength

La resina selezionata per questa prima fase di studio è un diglidilietere del bisfenolo A (DGEBA) reticolata con un'ammina aromatica del tipo DETDA. Le miscele preparate per la caratterizzazione sono state le seguenti :

- 1) DGEBA DETDA - MWCNT 1% presonicato
- 2) DGEBA DETDA - MWCNT 1% non presonicato

Sono stati preparati due tipi di campioni, presonicato e non presonicato, per vedere la differenza. (23)

La caratterizzazione dei campioni caricati con MWCNT comprende l'analisi SEM, l'analisi DMA, TMA e l'analisi termica.

In Figura 56 l'immagine SEM del campione caricato con 1wt% non presonicato, mentre in Figura 57 ed in Figura 58 le immagini dei campioni caricati con 1wt% ma presonicati.

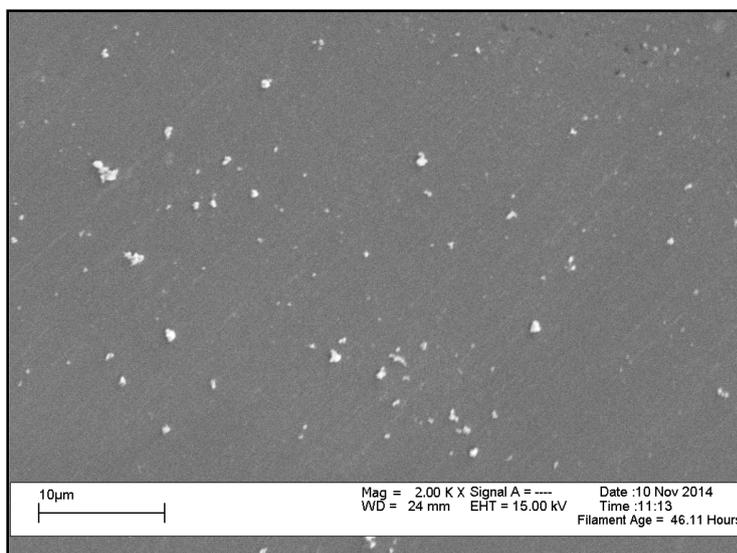


Figura 56 - Immagine SEM del campione caricato con 1wt% non presonicatedo

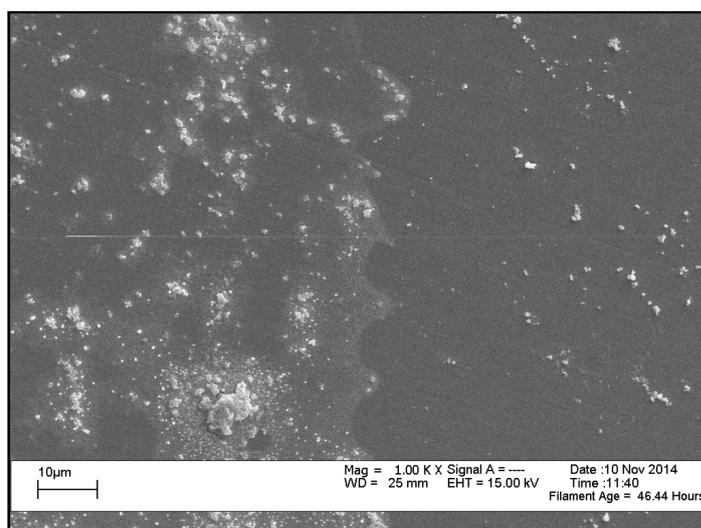


Figura 57 - Immagine SEM del campione caricato con 1wt% presonicatedo

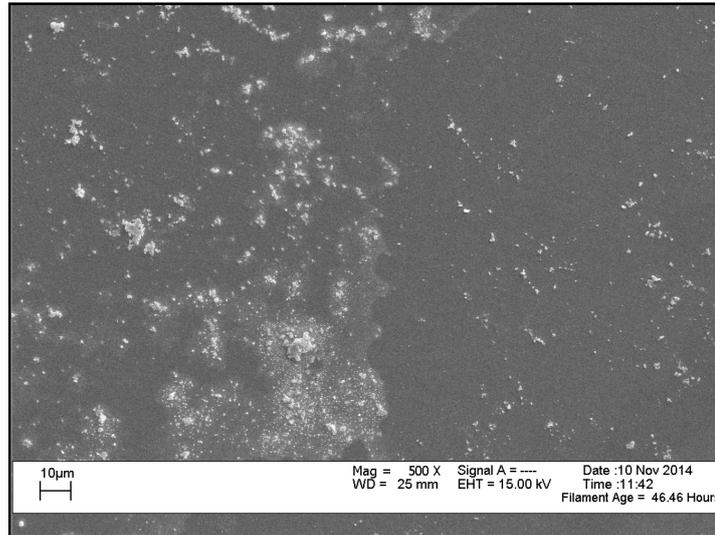


Figura 58 - Immagine SEM del campione caricato con 1wt% presonicated

L'analisi del modulo elastico dei campioni caricati con MWCNT è stata eseguita con la tecnica DMA. L'analisi è stata eseguita in un range di temperatura che va da -10 a 110°C con un ramp rate di 5°C/min. La modalità di analisi è il three point bending, ovvero un test a flessione su 3 punti. In Figura 59 si riporta l'andamento del modulo per il campione non presonicated ed in Figura 60 l'analisi per il campione presonicated.

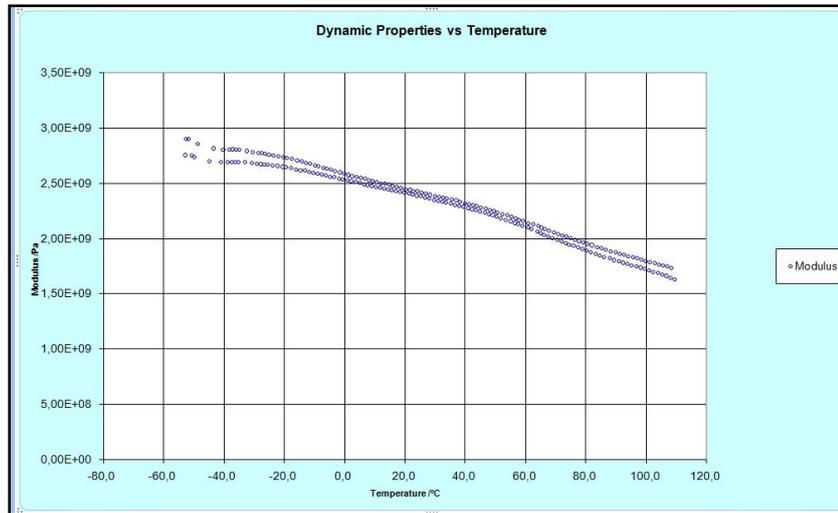


Figura 59 - Andamento del modulo per il campione MWCNT 1wt% non presonicatedo

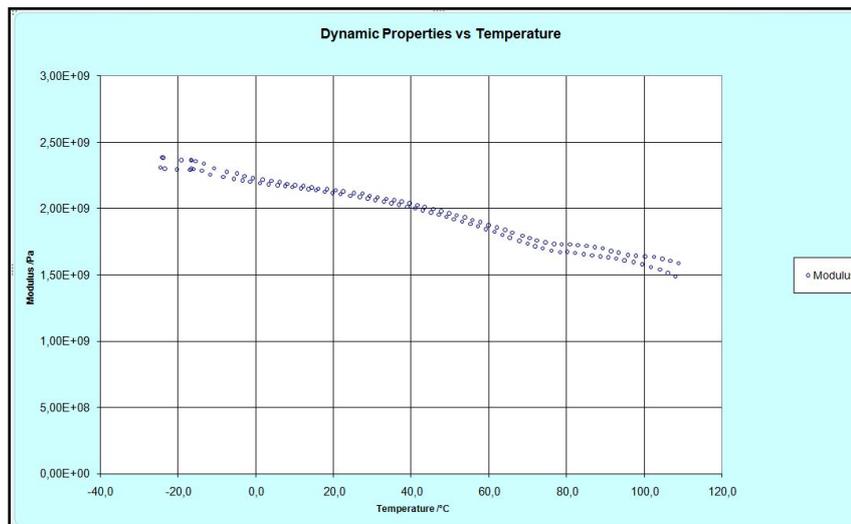


Figura 60 - Andamento del modulo per il campione MWCNT 1wt% presonicatedo

I valori di modulo ottenuti sono dell'ordine di $2\text{-}3\text{E}+09$, in linea con i valori riportati nei datasheet.

Per quanto riguarda l'analisi termo meccanica per la valutazione dei coefficienti di espansione termica. Le analisi sono state eseguite applicando inizialmente un carico pari a 0.05 N, ma si è notato un eccessivo effetto di "penetrazione" sul campione per cui le analisi successive sono state eseguite ad un carico dimezzato pari a 0.025 N. Si riporta in Figura 61 l'analisi TMA del campione MWCNT 1wt% presonicated.

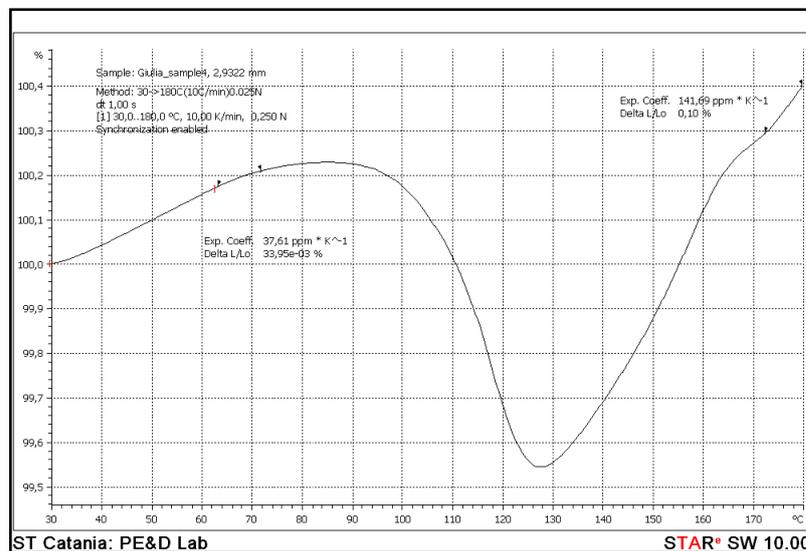


Figura 61 - Analisi TMA per il campione MWCNT1% presonicated

I valori ottenuti sono $\alpha_1 = 37.61$ ed $\alpha_2 = 141.69$.

In Figura 62 i risultati ottenuti per il campione MWCNT 1% non presonicato; i valori di coefficiente di espansione termica sono rispettivamente $\alpha_1=68.61$ ed $\alpha_2=189.76$.

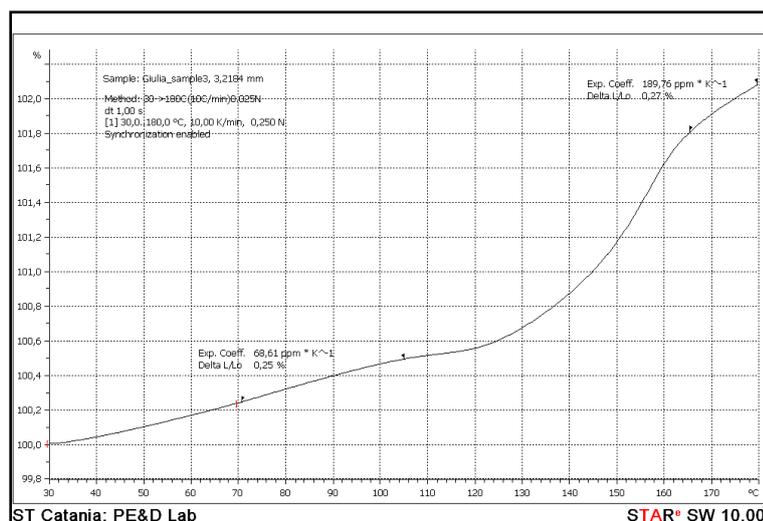


Figura 62 - Analisi TMA per il campione MWCNT 1% non presonicato

In entrambi i casi si ottengono valori molto alti di CTE rispetto a quelli richiesti per una resina di molding (10-15 ppm/°C). Questi materiali hanno dunque la capacità di dilatarsi e “rammollire” per effetto del calore.

Per quanto riguarda l’analisi termica, è stata fatta l’analisi con lo strumento LFA467 Hyperflash della Netzsch che utilizza la tecnica laser flash, descritta precedentemente.

I risultati ottenuti sono riportati in Figura 63 ed in Figura 64 per il campione presonicato.

Table 1: Thermophysical properties of DGEBA-DETDA MWCNT 1% presonicated (density: 1.17 g/cm³)

Temperature / °C	Thermal Diffusivity/ mm ² /s	Specific Heat / J/(g·K)	Thermal Conductivity / W/(m·K)
25	0,143	1,137	0,190
120	0,119	1,784	0,249
250	0,093	2,495	0,271

Figura 63 - Proprietà termofisiche del campione DGEBA/MWCNT 1% presonicated

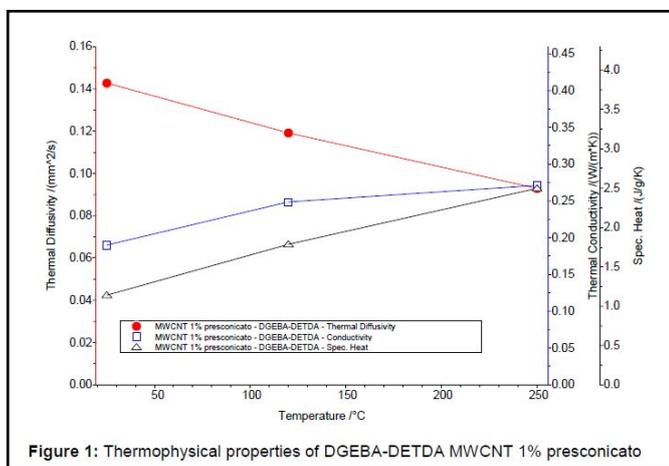


Figura 64 - Conducibilità termica del campione DGEBA/MWCNT 1% presonicated

In Figura 65 le proprietà termo fisiche del campione non presonicated ed in Figura 66 la conducibilità termica del campione 1wt% non presonicated.

Table 2: Thermophysical properties of DGEBA-DETDA MWCNT 1% non presconicato (density: 1.17 g/cm³)

Temperature / °C	Thermal Diffusivity/ mm ² /s	Specific Heat / J/(g·K)	Thermal Conductivity / W/(m·K)
25	0,140	1,159	0,189
120	0,115	1,786	0,239
250	0,092	2,536	0,273

Figura 65 - Proprietà termofisiche del campione DGEBA/MWCNT 1% non presconicato

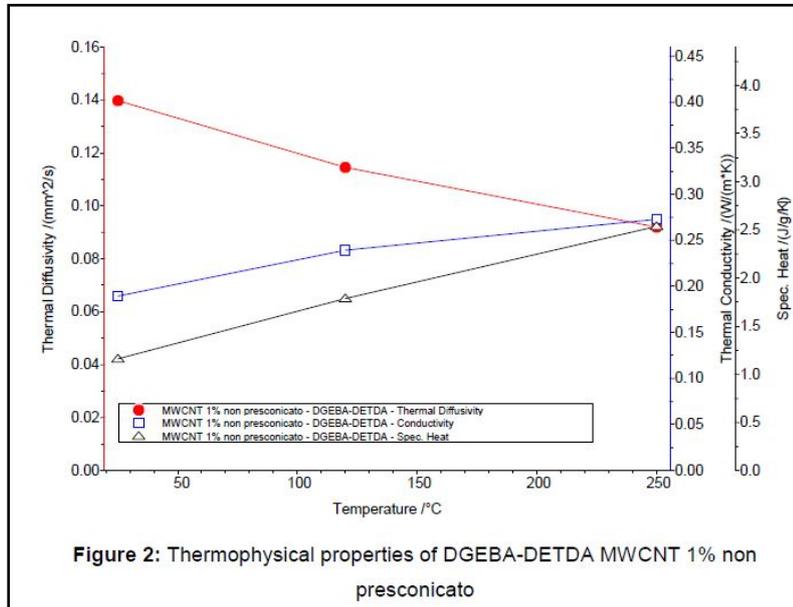


Figura 66 - Conducibilità termica del campione DGEBA/MWCNT 1% non presconicato

5.4 COMPOSTI CON PARTICELLE DI NITRURO DI BORO

In alternativa ai nanotubi in carbonio si sono anche richieste delle particelle di nitruro di boro dalla ditta Momentive. Queste particelle, nel grado conduttore termico, presentano valori di conducibilità di 300W/mK. Il valore è minore rispetto ai nanotubi in carbonio ma rispetto a quest'ultimi, le particelle di nitruro di boro, presentano il vantaggio di essere isolanti elettrici. Questo aspetto è un vantaggio per quei componenti del dispositivo che necessitano di mantenere la caratteristica di isolante elettrico per non compromettere la funzionalità del dispositivo come per esempio gli incapsulanti che, coprendo gli elementi del dispositivo, non possono dar luogo a corto circuiti.

In letteratura si trovano diversi studi che riguardano compositi caricati con nitruro di boro. In Figura 67 si riportano le proprietà termiche di compositi caricati con nanotubi di boro (24) ed in Figura 68 la conducibilità termica, in funzione percentuale di filler, di compositi caricati con particelle di nitruro di boro.(25). Inoltre in Figura 69, il confronto della conducibilità termica tra compositi caricati con nanotubi e nanosheet di nitruro di boro. (26)

Sample	Specific heat (MJ/m ³ K)	Thermal diffusivity (mm ² /S)	Thermal conductivity (W/mK)
Epoxy	0.0023	202.9	0.49
Epoxy + 1 wt % BNNTs	0.0027	207.6	0.55
Epoxy + 5 wt % BNNTs	0.0028	299.8	0.83

Figura 67 - Proprietà termiche di compositi Epoxy/BNNT

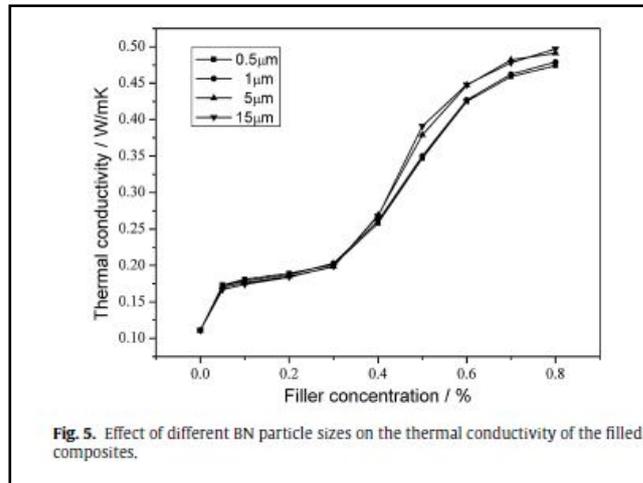


Figura 68 - Conducibilità termica di compositi caricati con particelle di BN

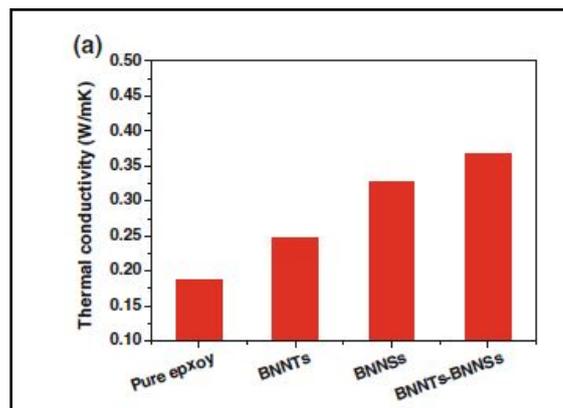


Figura 69 - Conducibilità termica di vari compositi caricati con BN

Il lavoro sperimentale è consistito appunto nella realizzazione e successiva caratterizzazione di compositi epossidici caricati con particelle di nitruro di

boro. La resina selezionata è sempre un diglicidil etero del bisfenolo A (DGEBA) reticolata con un'ammina aromatica del tipo DETDA.(27), (28).

I campioni preparati sono i seguenti:

- 1) DGEBA DETDA - BN 1%
- 2) DGEBA DETDA - BN 5%

Le particelle di nitruro di boro utilizzate sono fornite dalla ditta Momentive e sono nano particelle di forma sferica utilizzate come filler per molteplici applicazioni elettroniche. I potenziali usi includono adesivi, gel, thermal interface material ed ovviamente electronic molding compound. Il nome specifico è PolarThermBoronNitridePowder PTX25 e PTX60. Le caratteristiche di queste nano particelle sono riportate in Figura 70, mentre in Figura 71 si riporta il confronto tra le particelle di nitruro di boro ed altre particelle utilizzate comunemente per applicazioni elettroniche.

Typical Physical Properties ¹	PTX25	PTX60
Structure	Spherical Agglomerate	Spherical Agglomerate
Mean Particle Size μm	25	55-65
D10/D90	10/45	20/90
Surface Area m^2/g	7.0	6.0
Tap Density g/cm^3	0.3	0.4
Oxygen %	0.2	0.3
Carbon %	0.03	0.05
Soluble Borates %	0.1	0.1

Figura 70 - Caratteristiche delle PolarTherm PTX25 e PTX60

	BN	AlN	Al₂O₃	SiO₂	ZnO	Ag	Al
Thermal Properties							
Thermal Conductivity (W/m-K)	300+*	260	30	1.4	54	430	235
Specific Heat (J/kg-K @ 25°C)	794	734	798	689	523	235	900
Theoretical Density (g/cc)	2.25	3.26	3.98	2.20	5.64	10.5	2.7
Electrical Properties							
Dielectric Constant	3.9	8.8	9.7	3.8	9.9	--	--
Volume Resistivity (ohm-cm)	10¹⁵	10¹⁴	10¹⁴	10¹⁴	10 ⁷	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶
Mechanical Properties							
Coefficient of Expansion (ppm/K)	<1	4.4	6.7	0.5	0.7	19	23
Young's Modulus (Gpa)	40	400	340	72	12	83	70
Knoop Hardness (kg/mm ³)	11	1200	1500	500	387	260	180

Figura 71 - Confronto tra diverse particelle

La procedura eseguita per la preparazione dei campioni prevede due fasi: nella prima fase le nanoparticelle sono miscelate meccanicamente con l'agente di cura in un miscelatore meccanico per 10 minuti, poi la miscela così ottenuta è sonicata per 30 minuti mediante un sonicatore utilizzando un'ampiezza pari al 20% di quella massima. Durante la sonicazione, la miscela è immersa in un bagno d'acqua e ghiaccio per evitare incrementi di temperatura. Per l'eliminazione delle bolle d'aria, la miscela sonicata è stata degassata mediante l'utilizzo del "Thinky Planetary Vacuum Mixer" impostando i seguenti parametri operativi (speed: 800 rpm; vacuum: 0,2 kPa; time: 2 min). Successivamente è stata aggiunta la resina epossidica ed il catalizzatore secondo i rapporti consigliati da scheda tecnica. Il materiale è stato ulteriormente degassato e poi miscelato col miscelatore "Thinky" secondo la procedura: Degassing (speed: 800 rpm, vacuum: 0,2 kPa, time: 2 min), Mixing (speed: 2000 rpm; time: 2 min). Il materiale è stato versato

nello stampo e sottoposto al processo di cura (130°C per 3 ore - 180°C per 3ore).

Per quanto riguarda la caratterizzazione, è stata effettuata l'analisi SEM delle singole particelle di nitruro di boro e dei compositi, l'analisi DMA e TMA ed infine l'analisi termica per il calcolo della conducibilità termica.

In Figura 72 si riportano le immagini SEM delle particelle di nitruro di boro fornite dalla ditta Momentive. In Figura 73 le immagini dei campioni caricati con 1wt% ed in Figura 74 i campioni caricati con 5wt%.

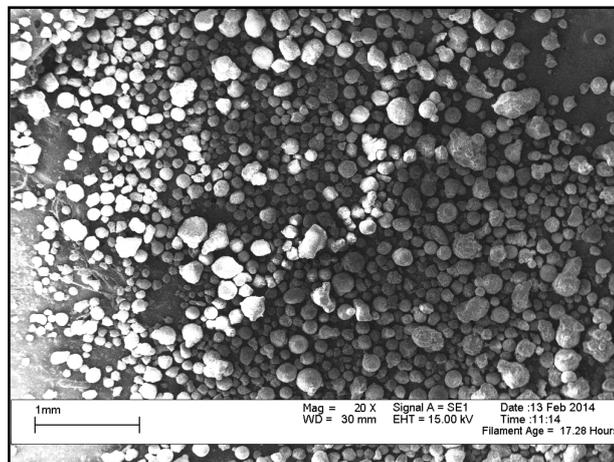


Figura 72 - Immagine SEM delle singole particelle di Nitruro di Boro

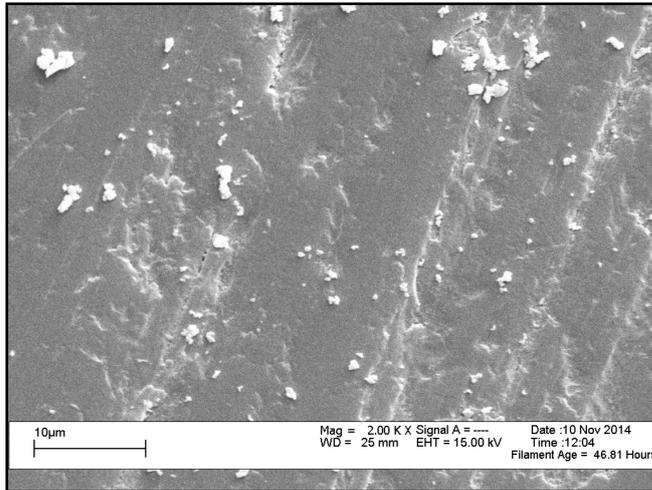


Figura 73 - Immagine SEM dei campioni caricati con 1wt% di BN

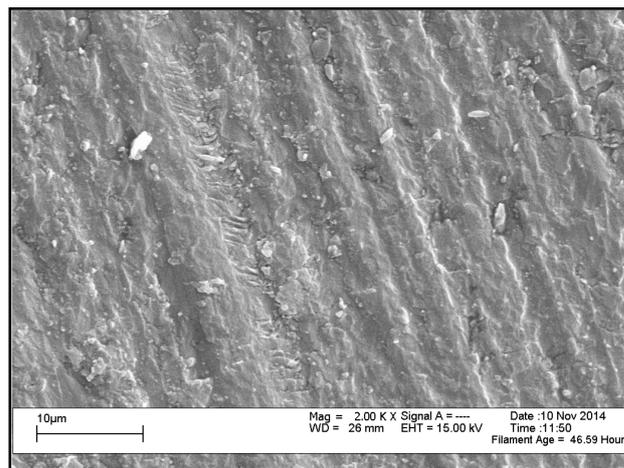


Figura 74 - Immagine SEM dei campioni caricati con 5wt%

Per quanto riguarda l'analisi DMA, si riportano in Figura 75 i valori di modulo ottenuti per il campione caricato con 1wt% BN.

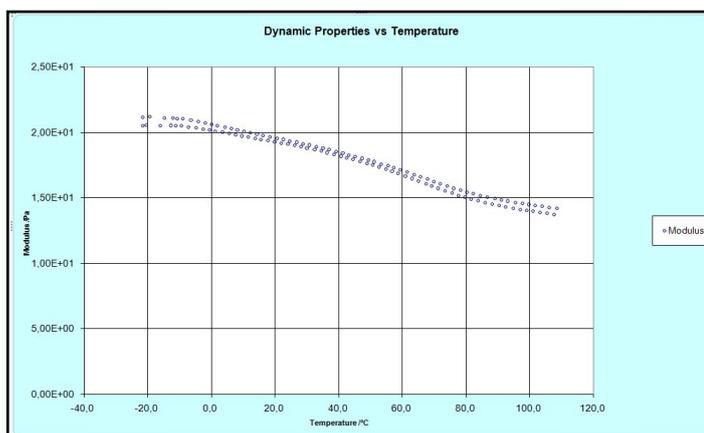


Figura 75 - Analisi DMA per il campione caricato con 1wt%BN

In Figura 76 i risultati per il campione caricato con 5wt%BN.

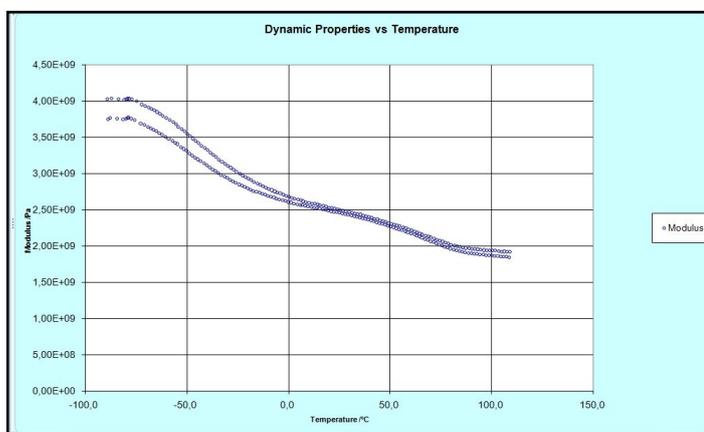


Figura 76 - Analisi DMA per il campione caricato con 5wt%BN

Per quanto riguarda l'analisi termica, si riportano in Figura 77 ed in Figura 78, le proprietà termofisiche e la conducibilità termica del campione DGEBA/BN 1%.

Table 3: Thermophysical properties of DGEBA-DETDA BN 1% (density: 1.17 g/cm³)

Temperature / °C	Thermal Diffusivity / mm ² /s	Specific Heat / J/(g·K)	Thermal Conductivity / W/(m·K)
25	0,135	1,129	0,178
120	0,113	1,691	0,224
250	0,093	2,556	0,278

Figura 77 - Proprietà termofisiche del campione DGEBA/BN 1%

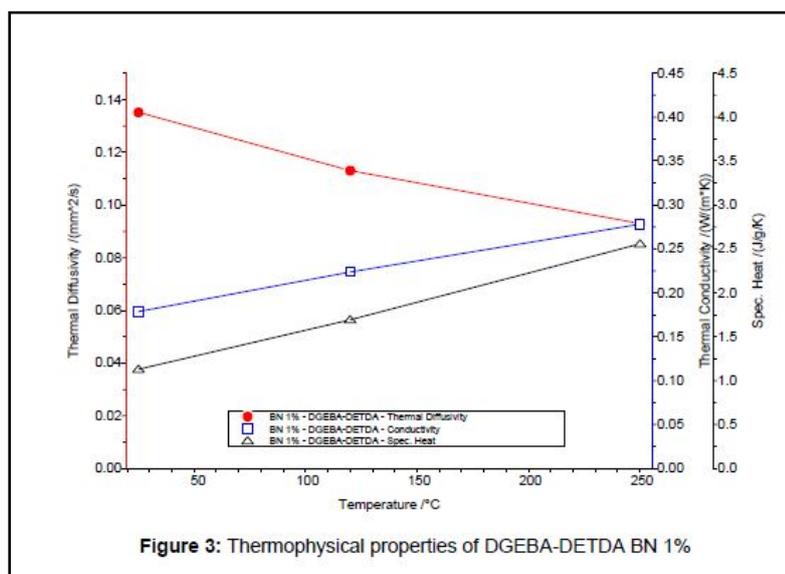


Figura 78 - Conducibilità termica del campione DGEBA/BN 1%

In Figura 79 ed in Figura 80 le proprietà termo fisiche e la conducibilità termica del campione 5%BN.

Table 4: Thermophysical properties of DGEBA-DETDA BN 5% (density: 1.17 g/cm³)

Temperature / °C	Thermal Diffusivity / mm ² /s	Specific Heat / J/(g·K)	Thermal Conductivity / W/(m·K)
25	0,140	1,132	0,186
120	0,115	1,619	0,218
250	0,092	2,349	0,253

Figura 79 - Proprietà termofisiche del campione DGEBA/BN 5%

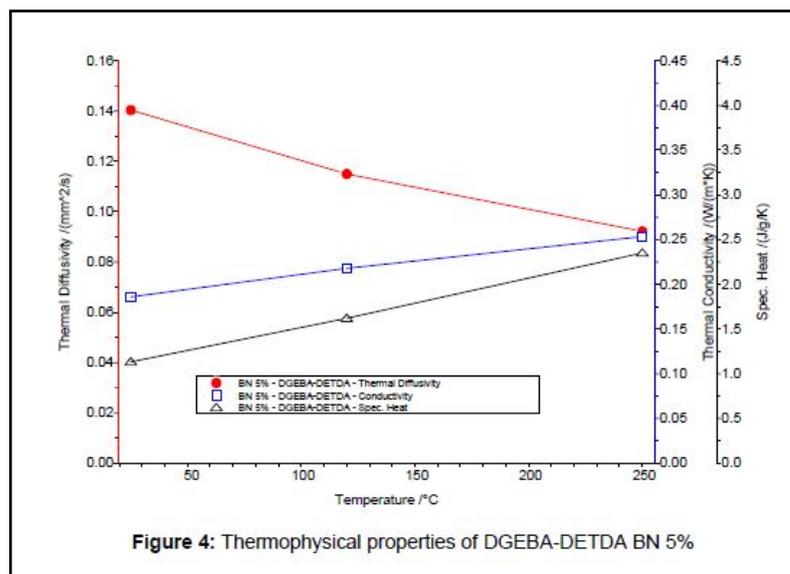


Figura 80 - Conducibilità termica del campione DGEBA/BN 5%

Come si può vedere, anche nel caso dei campioni con BN i valori di conducibilità si aggirano intorno a 0.1-0.2 W/mK ed inoltre non si nota molto la variazione di conducibilità all'aumentare del filler passando cioè dall'1% al 5% di BN.

5.5 CARATTERIZZAZIONE COMPOSTI COMMERCIALI

La caratterizzazione dei compositi ottenuti è stata poi confrontata con la caratterizzazione eseguita per i prodotti commerciali. (29)

Le analisi sono state fatte sui campioni di resine di molding commerciali fornite dall'azienda.

In particolare, si è posta l'attenzione su due campioni commerciali:

1. HENKEL GR640A
2. HITACHI GE880B

Di questi due campioni, come per quelli sperimentali sono state svolte le analisi SEM, l'analisi TMA e l'analisi termica per verificare se i valori ottenuti sono confrontabili con i valori riportati nei datasheet.

In Figura 81 ed in Figura 82 si riportano le immagini SEM della resina HENKEL GR640A, mentre in Figura 83 ed in Figura 84 le immagini SEM della resina HITACHI GE880B.

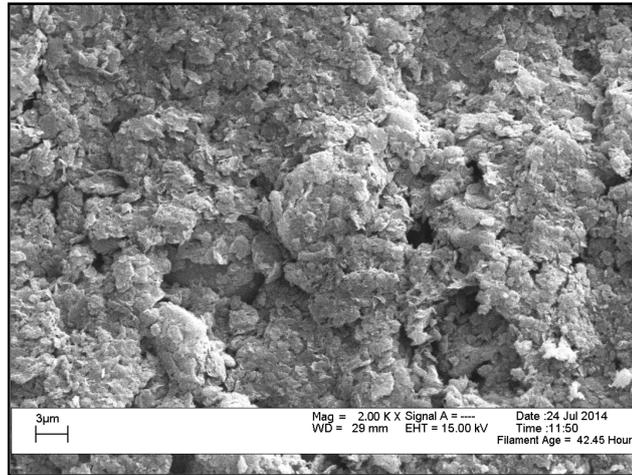


Figura 81 - Immagine SEM HENKEL GR640A

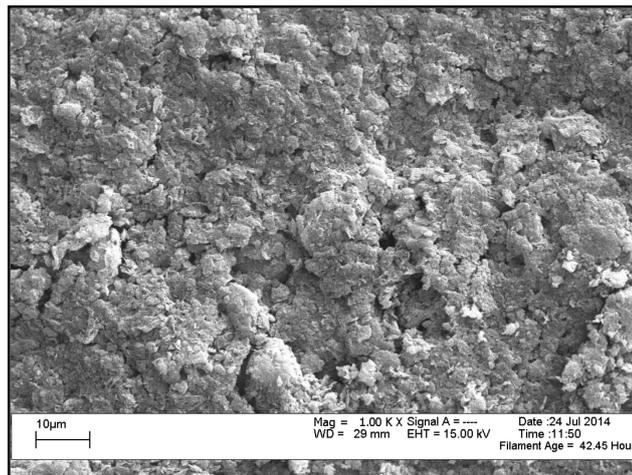


Figura 82 - Immagine SEM HENKEL GR640A

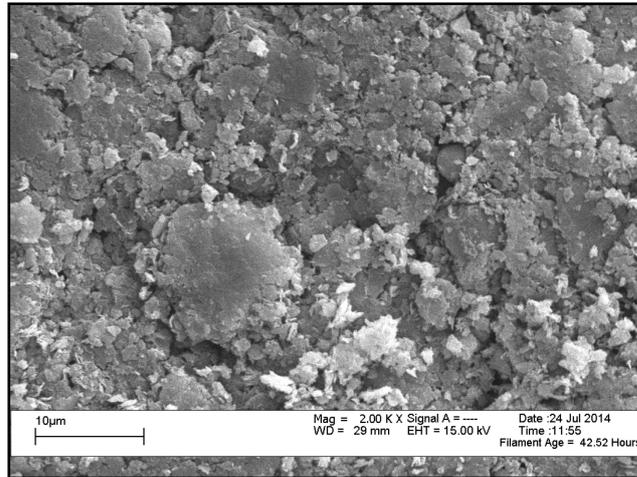


Figura 83 - Immagine SEM HITACHI GE880B

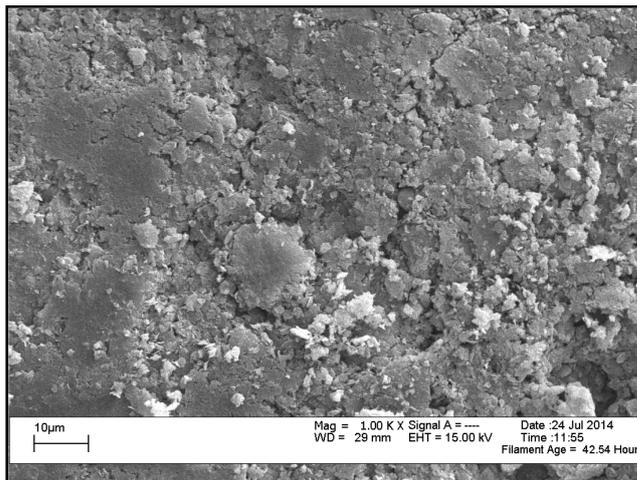


Figura 84 - Immagine SEM HITACHI GE880B

Dalle immagini SEM quello che si può dedurre di entrambe le resine, se confrontate con i campioni realizzati sperimentalmente (campioni con CNT e con BN), è che sono caricate con un'alta percentuale di filler, visibile facilmente dalle immagini SEM.

Per quanto riguarda l'analisi DMA si riporta l'analisi di un'altra resina commerciale poiché non è stato possibile svolgere l'analisi sui campioni HENKEL ed HITACHI analizzati con la TMA e col SEM. In ogni caso per avere un'idea dei valori di modulo delle resine commerciali si è analizzata la seguente resina fornita dall'azienda:

1. SUMITOMO G620A

In Figura 85 l'andamento del modulo della resina SUMITOMO G620A.

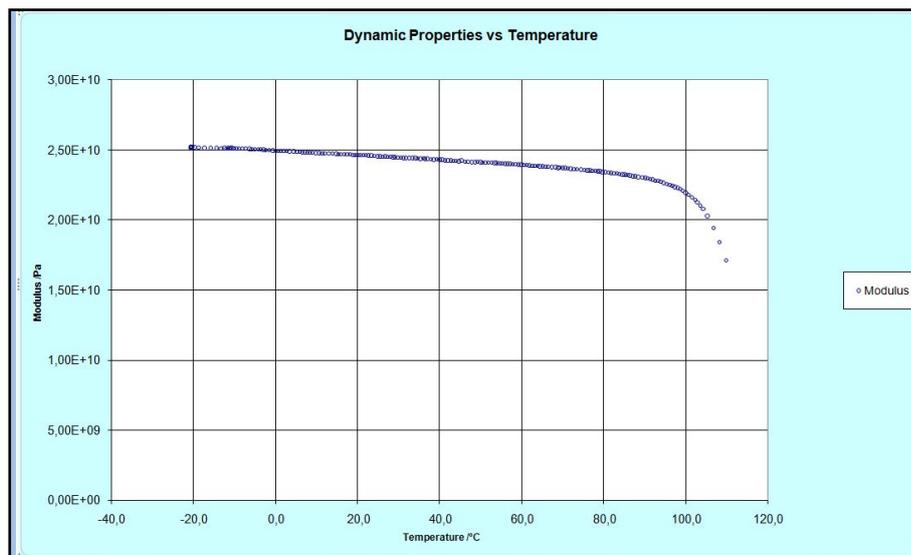


Figura 85 - Analisi DMA della resina commerciale SUMITOMO G620A

Come si può vedere, il valore di modulo (25 GPa) è più elevato di quello ottenuto per i campioni sperimentali e comunque più basso di quello dichiarato nel datasheet (34 GPa), mostrato in Figura 86.

Grade	EME - G620	Specification No.	SUM-E- 4815	Revision (A)	PAGE : 6/7
Type	A				
4. Physical Properties					
Item	Unit	Specification	Test Method	Fre *	
Thermal Expansion ($\alpha 1$)	1/°C	1.3×10^{-5} max.		A	
Thermal Expansion ($\alpha 2$)	1/°C	5.5×10^{-5} max.	SB-U-02-002	A	
Tg	°C	110 min.		A	
Specific Gravity	-	1.980-2.080	SB-U-03-018	B	
Water Absorption (after boiling 24hrs)	%	0.30 max.	SB-U-03-002	B	
Flexural Strength	N/mm ² {kgf/mm ² }	147.1 min. {15.0 min.}	SB-U-01-001	B	
Flexural Modulus	N/mm ² {kgf/mm ² }	343.4×10^2 max. {3500 max.}	SB-U-01-002	B	
Volume Resistivity (at 150 °C)	Ω -cm	1.0×10^{11} min.	SB-U-00-004	B	
Flammability (3.2mmt)	-	UL-94 (V-0)	SB-U-02-003	B	

Figura 86 - Datasheet della resina SUMITOMO G620A

Per quanto riguarda l'analisi TMA, ai fini della valutazione dei coefficienti di espansione termica, fondamentali per l'aspetto strutturale del dispositivo, le misure sono state eseguite nel laboratorio PE&D della ST Microelectronics di Catania.

In Figura 87 si riporta l'analisi TMA per la resina HENKEL ed in Figura 88 l'analisi per la resina HITACHI GE880B.

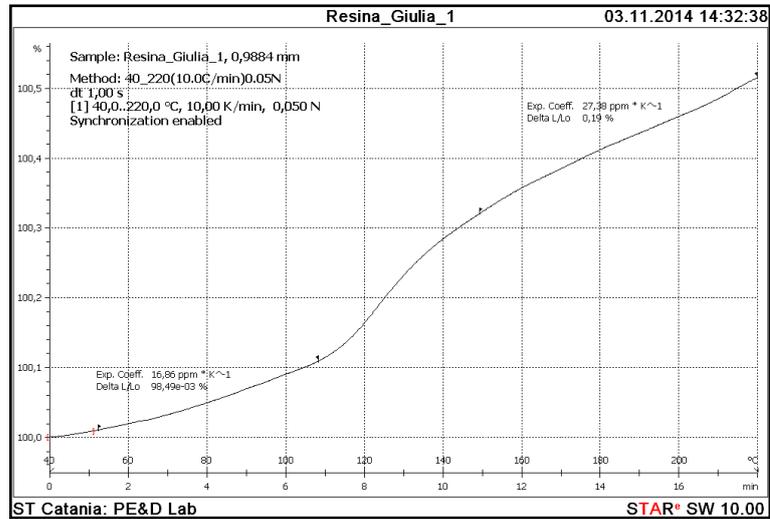


Figura 87 - Analisi TMA per la resina HENKEL GR640A

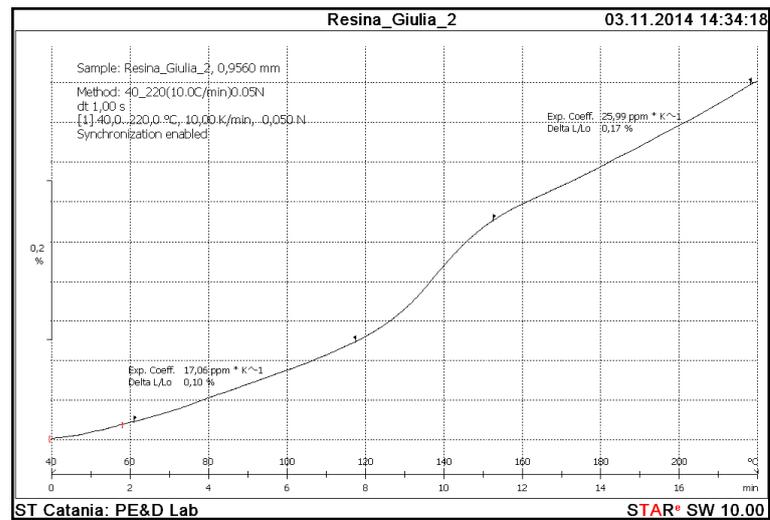


Figura 88 - Analisi TMA per la resina HITACHI GE880B

Come si può vedere dalla Tabella 3, i valori di coefficiente di espansione termica ottenuti sono i seguenti:

Tabella 3 - Confronto dei coefficienti di espansione termica

RESINA	Valori sperimentali		Valori datasheet	
	α_1	α_2	α_1	α_2
HENKEL GR640A	16,86	27,38	21	60
HITACHI GE880B	17,06	25,99	11	38

L'analisi termica eseguita con la tecnica laser flash, per valutare la conduttività termica, è riportata in Figura 89 ed in Figura 90 per la resina HENKEL GR640A.

Temperature / °C	Thermal Diffusivity / mm ² /s	Specific Heat / J/(g·K)	Thermal Conductivity / W/(m·K)
25	0,559	0,852	0,935
120	0,490	1,155	1,110
250	0,448	1,424	1,250

Figura 89 - Proprietà termofisiche della resina HENKEL GR640A

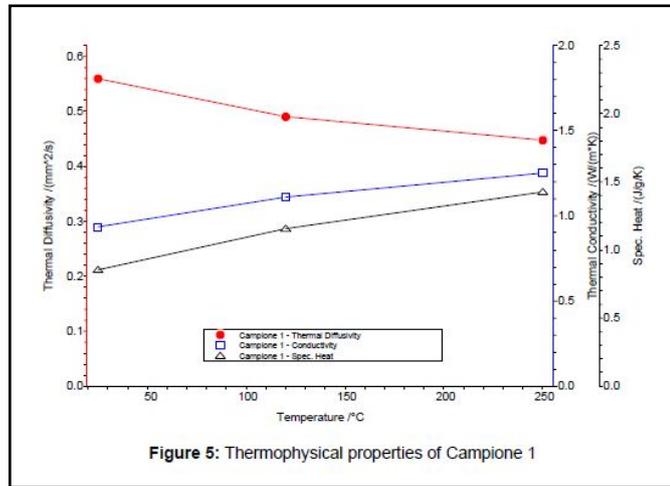


Figure 5: Thermophysical properties of Campione 1

Figura 90 - Conducibilità della resina HENKEL GR640A

I risultati termici per la resina HITACHI GE880B, sono invece riportati in Figura 91 ed in Figura 92. Come ci si aspettava, i valori di conducibilità termica sono molto bassi, dell'ordine di 0,9 W/mK.

Table 6: Thermophysical properties of Campione 2 (density: 1.97 g/cm³)

Temperature / °C	Thermal Diffusivity / mm²/s	Specific Heat / J/(g·K)	Thermal Conductivity / W/(m·K)
25	0,565	0,867	0,965
120	0,508	1,167	1,169
250	0,460	1,463	1,327

Figura 91 - Proprietà termofisiche della resina HITACHI GE880B

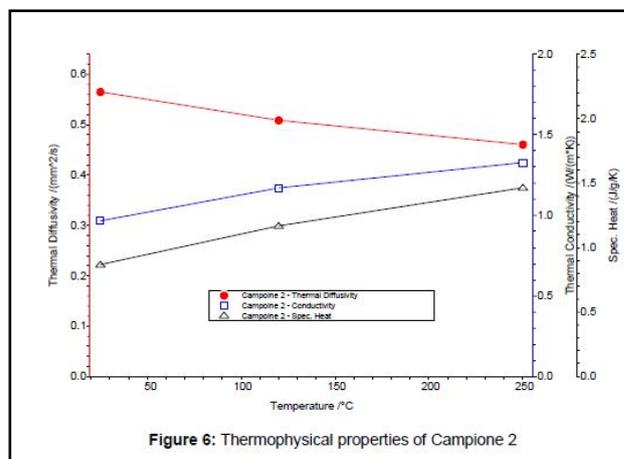


Figure 92 - Conducibilità termica della resina HITACHI GE880B

Infine, in Figura 93, si riporta la conducibilità termica di tutti i campioni esaminati. I campioni sperimentali hanno, come prevedibile, conducibilità molto più bassa (0,2 W/mK) rispetto a quelli commerciali.

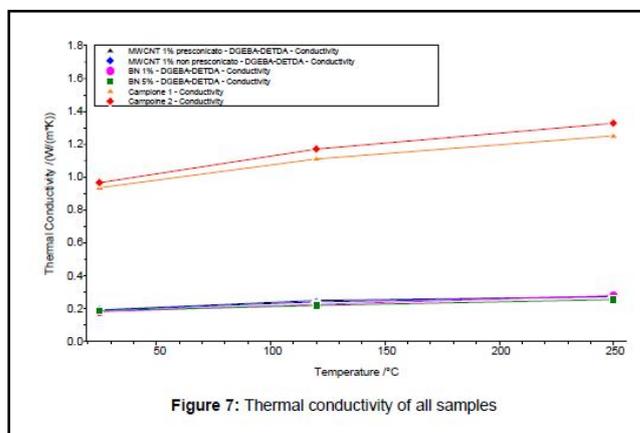


Figure 93 - Conducibilità termica di tutti i campioni esaminati

6. MODELLAZIONE TERMICA DI UN DISPOSITIVO DI POTENZA

L'analisi sperimentale, descritta nel capitolo cinque, ovvero lo sviluppo dei nano compositi conduttivi, ha portato alle seguenti considerazioni:

1. Risulta difficile miscelare alte frazioni volumetriche anche con sistemi di miscelazione avanzati quali il Three RollMill.
2. I composti ottenuti non hanno valori di conducibilità termica abbastanza elevati.
3. I composti per incapsulamento commerciali, come evidenziato anche dalle caratterizzazioni termiche, non raggiungono, ad oggi, valori di conducibilità superiori a 2 W/mK.

Queste analisi hanno portato a considerare se realmente un aumento di conducibilità termica dei composti di incapsulamento abbia effetto sulla

gestione del calore dell'intero dispositivo e quindi se consenta una migliore dissipazione.

A questo proposito, accanto all'analisi sperimentale, è stato sviluppato un modello, tramite software ad elementi finiti, per valutare il comportamento dal punto di vista termico di un dispositivo di potenza. (30)

L'obiettivo del presente lavoro è infatti lo studio delle caratteristiche termiche di dispositivi elettronici utilizzati in elettronica di potenza. Tali dispositivi, poiché sviluppano temperature elevate (i.e. 130°C - 250°C) operando a tensioni dell'ordine dei 1200V, necessitano, per l'integrità della funzionalità elettronica e dei requisiti di affidabilità, di un'efficace smaltimento del calore.

Quest'ambito, per la numerosità e complessità delle applicazioni alle quali è rivolto, richiede la necessità di realizzare sistemi complessi in grado appunto di operare a tensioni molto più elevate rispetto a quelle dei tradizionali dispositivi. Come precedentemente descritto, le tipologie di strutture di elettronica di potenza esistenti, comprendono sistemi "single die" e sistemi integrati a più dispositivi chiamati "moduli di potenza". Qualunque sia la tecnologia adottata, la problematica principale riguarda l'aumento di temperatura causato dalle tensioni di esercizio e di conseguenza la necessità di smaltire il calore interno generato dal chip. Lo scopo della presente ricerca è stato quello di valutare, tramite un opportuno modello, l'effetto che hanno, sulla temperatura massima raggiunta dal sistema, i materiali presenti nel dispositivo, la superficie di scambio e la presenza dei dissipatori.

L'obiettivo è dunque l'abbattimento della temperatura massima, in modo tale da avere una migliore dissipazione dell'energia sviluppata. E' chiaro che,

dovendo agire sulla temperatura, i fattori sui quali bisogna indagare sono, in primo luogo, le proprietà termiche dei materiali in esame e successivamente i fattori che influenzano lo scambio termico ovvero la superficie di scambio.

6.1 MATERIALI E METODI

I sistemi considerati, sia che siano single die o moduli di potenza, sono strutture multilayer composte oltre che dal chip vero e proprio, da una serie di elementi quali baseplate o struttura di supporto, solder, DBC (Direct Bonded Copper) e cassa incapsulante (Figura 7).

Tra i materiali presenti nella struttura, i più critici dal punto di vista termico ma anche strutturale, sono il solder e il materiale incapsulante. I solder sono leghe, storicamente a base di piombo, che hanno il compito di fare da legante tra due elementi, in questo caso tra baseplate e DBC e tra DBC e die. Per quanto riguarda invece il materiale incapsulante, si possono trovare moduli o dispositivi racchiusi da siliconi dispensati, che essendo dielettrici costituiscono una barriera alla dissipazione termica, o da resine, principalmente epossidiche, trattate mediante un processo di molding. Proprio a quest'ultime, è rivolto il seguente studio; nella ricerca condotta infatti, si è posta particolare attenzione alla valutazione dell'utilizzo di sistemi nanocompositi polimerici che costituiscono lo stato dell'arte per i materiali ad elevata dissipazione termica (i.e. $\lambda > 2$ W/mK), in particolare a resine caricate con nanoparticelle ad elevata conducibilità termica.

L'analisi termica è stata effettuata dunque sui materiali di incapsulamento per valutare gli effetti delle proprietà termiche dei materiali sulla

temperatura massima con lo scopo di realizzare un composito con valori il più possibili alti di conducibilità termica.

La complessità dei sistemi indagati rende opportuno l'utilizzo di sistemi avanzati di modellazione numerica in grado di ottenere un comportamento dei dispositivi il più possibile coerente ai sistemi reali. L'analisi termica di questi dispositivi prevede fenomeni complessi di scambio termico con sovrapposizione di conduzione, convezione e radiazione.(31)

Lo studio ha dimostrato che si possono raggiungere buoni risultati in termini termici, intervenendo sui valori di conducibilità termica dei materiali di alcune parti del sistema, confermando la validità della metodologia di modellazione sviluppata per l'analisi di sistemi complessi a più parametri.

In questo contesto, l'analisi FEM risulta utile ai fini della creazione di un modello che consenta di analizzare più parametri di un sistema complesso come il dispositivo elettronico e di ottimizzare lo scambio termico. Per chiarezza, si riportano i passi eseguiti per effettuare l'analisi, in questo caso termica, tramite modellazione agli elementi finiti.

1. Creazione o importazione della geometria da analizzare
2. Assegnazione dei materiali a ciascun elemento
3. Creazione dei contatti e della mesh
4. Impostazione delle condizioni iniziali
5. Assegnazione delle condizioni e impostazione dei parametri relativi allo scambio termico per convezione.
6. Analisi dei risultati

Per semplicità di disegno e di calcolo, si è effettuata inizialmente l'analisi del dispositivo "single die", per poi passare all'esempio di un modulo di potenza a più dispositivi. Nei due casi, i materiali presenti sono gli stessi e lo scambio termico avviene allo stesso modo; quello che cambia è il calore interno generato e dunque la temperatura massima raggiunta dai due sistemi. In Figura 94 si riporta il disegno del dispositivo single die analizzato.

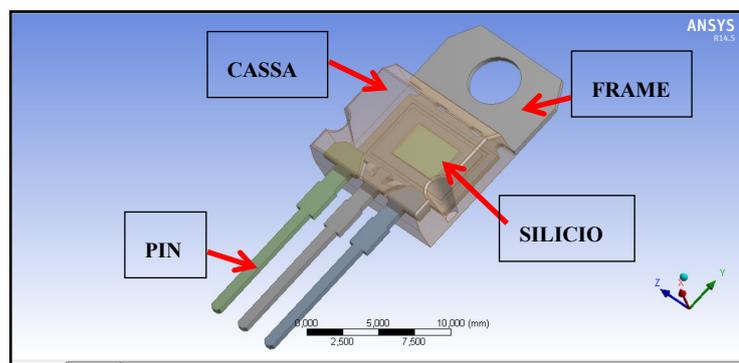


Figura 94 - Geometria del dispositivo "single die" analizzato

Definita la geometria da analizzare, i materiali assegnati sono quelli di un dispositivo standard e sono riportati in Tabella 4 con i relativi valori di conducibilità termica.

Tabella 4 - Materiali e relativi valori di conducibilità termica

Componente	Materiali	Conducibilità termica [W/mK]
Cassa	Resina standard	0,8
Die	Silicio	135
Solder	Pasta saldante a base di Pb	53
Baseplate	Rame	360

In relazione ai passi definiti precedentemente, le impostazioni relative allo scambio termico sono il calore interno generato dal dispositivo e la condizione di convezione definita tramite coefficiente di scambio convettivo e superficie di interesse. In Tabella 5 si riportano i parametri considerati per l'analisi in esame.

Tabella 5 - Parametri per l'analisi in esame

Condizioni iniziali: Temperatura ambiente [°C]	25
Potenza [W]	2,5
Densita' di potenza [W/mm ³]	0,77
Superficie di scambio [mm ²]	614,7
Coefficiente di convezione [W/mm ² K]	3,84E-05

6.2 RISULTATI E CONSIDERAZIONI

In prima istanza, lo studio tramite FEM, è rivolto ad individuare gli effetti che hanno i materiali sulla temperatura del sistema, per capire il vantaggio che si ottiene, in termini di smaltimento di calore e quindi di affidabilità dei componenti, realizzando un nanocomposito per incapsulamento ad elevata conducibilità termica.

Posto dunque che la trasmissione con l'aria è legata alla superficie di scambio e al coefficiente di convezione, si ha ovviamente che aumentando la superficie interessata, si migliora il fenomeno di scambio termico con l'esterno e di conseguenza lo smaltimento di calore è più efficace; questo è il motivo per il quale quasi tutti i dispositivi di questo genere vengono montati su opportuni dissipatori, in genere costituiti da materiali altamente conduttivi. Ma, a parità di superficie di scambio e di densità di potenza, ci si

è chiesto se è possibile migliorare la situazione agendo sui materiali presenti nel sistema e sul coefficiente di scambio convettivo.

Lasciando invariati gli altri materiali ed aumentando la conducibilità del materiale della cassa di incapsulamento, l'analisi ha mostrato risultati soddisfacenti in termini di temperatura massima raggiunta dal sistema. Infatti, a parità di densità di potenza, di superficie di scambio e di coefficiente di convezione, mettendo una cassa con materiale più conduttivo, la T_{max} diminuisce e la T_{min} aumenta.

Questo significa che, a parità ovviamente di calore ceduto, la distribuzione di temperatura è più uniforme, indice del fatto che allo scambio termico partecipa tutto il corpo e tutta la superficie scambia meglio, più uniformemente. Ciò che avviene è che il materiale più conduttivo si riscalda di più e la differenza $T_{max}-T_{min}$ dell'intero corpo si abbassa notevolmente, ottenendo così la diminuzione della temperatura massima che era l'obiettivo che ci si era prefissati.

Nella pagina successiva, in Tabella 6 si riporta l'elenco dei casi analizzati e le temperature massime e minime raggiunte all'aumentare della conducibilità termica del materiale della cassa, mentre in Figura 95 il grafico esplicativo dei risultati ottenuti.

Tabella 6 - Tmax e Tmin in funzione di λ cassa

Caso	MaterialeCassa	Conducibilità termica	Tmax	Tmin	ΔT
1	Resina	0,60	160,46	92,74	67,72
2	Resinastd	0,80	155,25	99,88	55,37
3	Resina	1,00	151,88	104,70	47,18
4	Resina	2,00	144,40	115,91	28,49
5	Resina	5,00	138,99	121,05	17,94
6	Resina	10,00	136,67	123,01	13,66
7	Resina	20,00	135,15	124,23	10,92
8	Resina	50,00	133,80	125,13	8,67

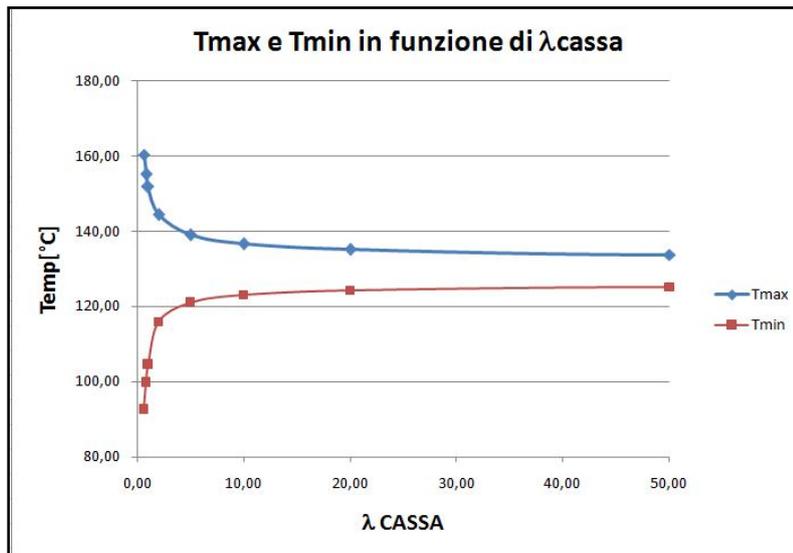


Figura 95 - Andamento di Tmax e Tmin in funzione di λ cassa

Per ulteriore chiarezza, si riporta in Figura 96 ed in Figura 97 la distribuzione della temperatura nel caso della resina standard con $\lambda=0,8$ W/mK e $\lambda=5$ W/mK.

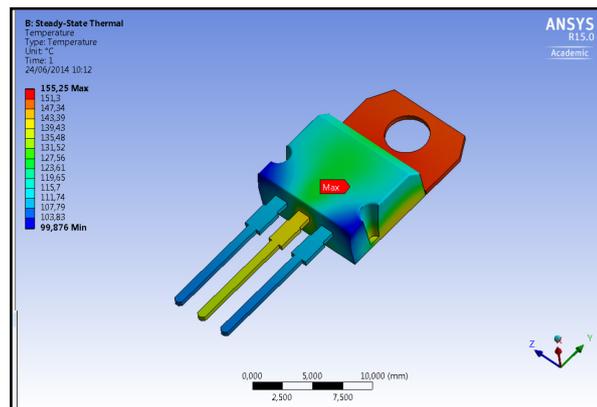


Figura 96 - Distribuzione di temperatura per il caso $\lambda=0,8$ W/mK

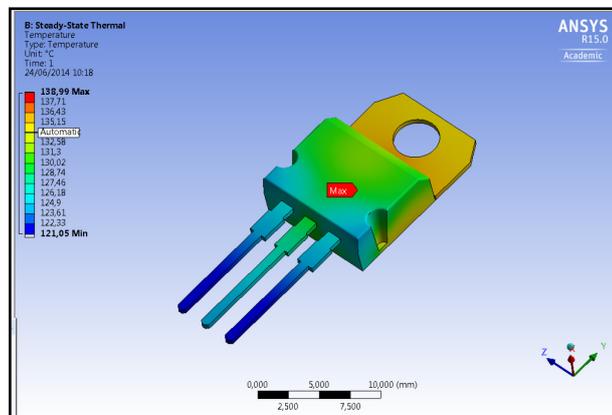


Figura 97 - Distribuzione di temperatura per il caso $\lambda = 5$ W/mK

Nel primo caso, la cassa è quasi tutta fredda e il baseplate è caldissimo, mentre nel secondo caso e quindi passando da $\lambda=0,8$ a $\lambda=5$, si nota che il baseplate è giallo e non rosso e quindi molto meno caldo, mentre la cassa è già visibilmente più calda rispetto alla precedente.

Riassumendo, si ha un abbassamento della T_{max} migliorando la distribuzione e questo è possibile mettendo un materiale più conduttivo. Da notare che l'andamento, riportato in Figura 95 ed in Tabella 7 è molto sensibile anche ad un piccolo aumento di λ e che, inoltre, ad un certo valore, va a regime e la T_{max} non diminuisce più.

Tabella 7 - Andamento di T_{max} per alti valori di λ

Materiale	Conducibilità termica	Temperatura max
Resina	20,00	135,15
Resina	50,00	133,80
Rame	360,00	132,18
Resina	500,00	132,03

In conclusione, aumentando anche di poco il valore di conducibilità del materiale della cassa, si ottengono buoni vantaggi in termini di smaltimento del calore. Lo studio successivo, svolto tramite analisi FEM, riguarderà la realizzazione e l'ottimizzazione, in termini di geometria e di tipologia di materiale scelto, di nanocompositi da utilizzare per la cassa di incapsulamento, ai fini di ottenere valori di λ superiori a quelli dei prodotti commerciali.

6.3 ANALISI TERMICA DI UN DISPOSITIVO DI POTENZA CON DISSIPATORE

Accanto all'analisi termica del singolo dispositivo di potenza si è sviluppato il caso di un TO220 montato su un dissipatore esterno.

Dati gli alti valori di temperatura e quindi di potenza è possibile smaltire adeguatamente il calore prodotto impiegando un dissipatore di calore, ovvero un elemento che sia un buon conduttore di calore (tipicamente un metallo o un materiale ceramico) che, posto a contatto con il nostro dispositivo (incollato o fissato a vite), permetta una maggiore dissipazione di calore.

Come opera un dissipatore? In sostanza esso “estende” le dimensioni fisiche del dispositivo, permettendo quindi un miglior smaltimento del calore, in quanto “sottrae” il calore prodotto per effetto Joule e lo trasferisce all'ambiente circostante, impedendo così il superamento della temperatura limite. Poiché la presenza del dissipatore serve ad aumentare la conduttanza termica fra il dispositivo e l'ambiente, si può affermare che la presenza del dissipatore porta ad una riduzione della resistenza termica, che è appunto l'inverso della conduttanza termica. La riduzione della R_{th} permette quindi di diminuire la temperatura raggiunta dal dispositivo oppure, volendo sfruttare comunque la massima temperatura di lavoro, di disporre di una potenza dissipabile più elevata.

Per meglio comprendere non solo il meccanismo di smaltimento del calore ma anche come ottimizzare i vantaggi derivabili dall'impiego di un dissipatore, si descrivono brevemente le tre modalità di propagazione del calore.

- *Conduzione*: avviene all'interno di un corpo o fra due corpi in contatto fra di loro a causa dell'agitazione termica degli atomi, ed è il meccanismo più efficiente di trasmissione del calore. Per tale motivo il dispositivo che produce calore va fissato saldamente a contatto con il dissipatore, che deve essere costituito da un materiale con una elevata conducibilità termica. Il materiale più utilizzato grazie al costo contenuto e alla facilità di produrre profilati ottenuti per estrusione è l'alluminio.
- *Convezione*: la convezione è il moto all'interno di un fluido, per cui si sfrutta questo fenomeno ad esempio per asportare il calore del dissipatore (o del componente stesso) attraverso il movimento dell'aria, che può essere naturale (dovuto al fenomeno di espansione termica) oppure forzato (tramite ventole). Per le elevate potenze, il fluido refrigerante può anche essere un liquido, che scorre in un condotto all'interno del dissipatore e viene poi raffreddato o per sostituzione (acqua corrente) o tramite un opportuno radiatore.
- *Irraggiamento*: il dissipatore e lo stesso componente irradiano calore nell'ambiente circostante per mezzo della radiazione infrarossa, ed anche questo fenomeno contribuisce allo smaltimento del calore, anche se alle basse temperature rappresenta una frazione trascurabile del totale.

Una esemplificazione visiva dei tre meccanismi è mostrata in Figura 98.

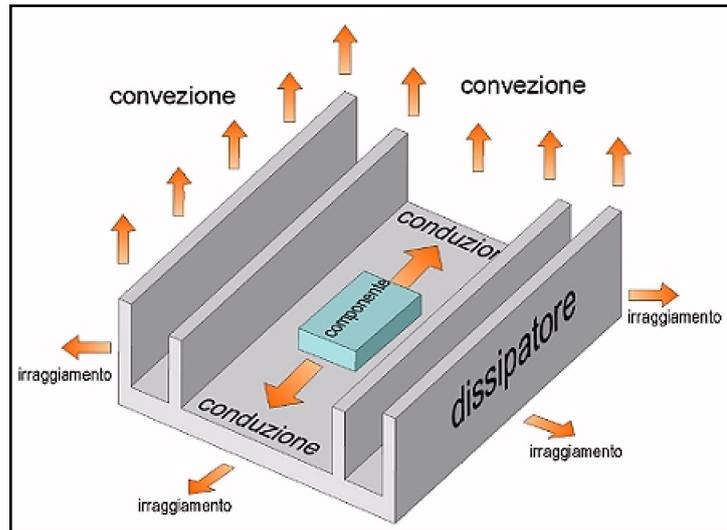


Figura 98 - I tre meccanismi di propagazione del calore nel caso di un dispositivo elettronico fissato ad un dissipatore

Va precisato che l'efficienza di un dissipatore dipende da parametri quali ad esempio il materiale utilizzato (conducibilità termica), le sue dimensioni (valore della resistenza termica), la forma (efficacia della convezione dell'aria), il colore (effetto "corpo nero" e quindi efficienza nell'irraggiamento), la finitura superficiale (resistenza di contatto con il componente elettronico e valore dell'irraggiamento), le condizioni di ventilazione (anche se interno o esterno all'apparecchiatura), la posizione di montaggio (verticale ad alette verticali per una migliore convezione dell'aria) e infine la posizione di montaggio del carico sul dissipatore stesso (centrale oppure verso il bordo).

Detto ciò, il parametro che caratterizza l'efficienza di un dissipatore e che riassume gli altri parametri, è la sua resistenza termica R_{th} tra dissipatore e ambiente, che viene specificata dal costruttore sul relativo foglio tecnico.

Per scegliere un dissipatore occorre conoscere i seguenti parametri: potenza massima dissipata dal dispositivo, temperatura massima consentita per il dispositivo e sua resistenza termica, massima temperatura ambiente e tipo di flusso di aria in corrispondenza del dissipatore.

Per tener conto di questi parametri, si deve fare riferimento alle resistenze termiche che si vengono a creare tra il chip e l'ambiente esterno.(Figura 99).

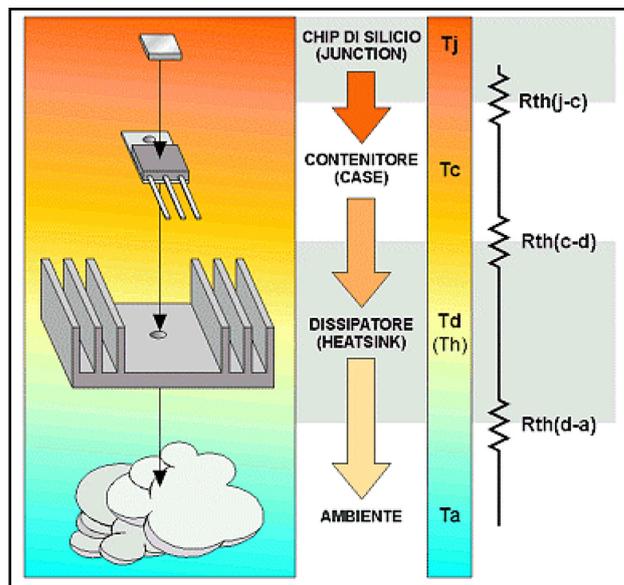


Figura 99 - Resistenze termiche tra chip ed ambiente esterno

In questo contesto, si è ritenuto interessante sviluppare un modello per il dispositivo TO220 montato su un dissipatore. Le dimensioni del dissipatore e delle alette sono state fissate basandosi sui data sheet di dissipatori presenti sul mercato.

L'analisi termica implementata è analoga a quella vista per il caso precedente tranne per il fatto che la superficie di scambio aumenta notevolmente; infatti è chiaro che il notevole vantaggio che si ha in termini di abbassamento di temperatura è dovuto all'aumento della superficie di scambio. Gli altri parametri, ovvero il coefficiente di scambio convettivo, il calore interno generato ed i materiali dei singoli elementi sono quelli impostati nel caso standard. In Figura 100, si riporta il disegno del TO220 montato su un dissipatore.

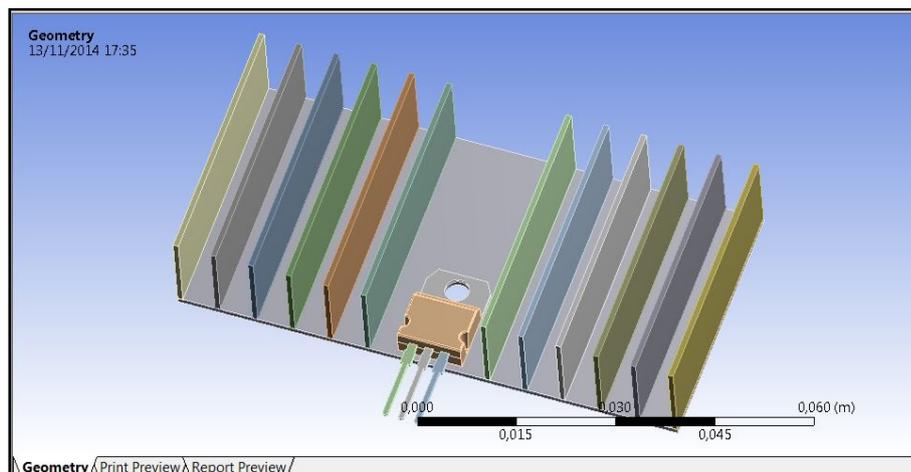


Figura 100 - Geometria del dispositivo TO220 montato su un dissipatore

Il materiale del dissipatore preso in esame è il rame. In Figura 101 si riporta l'andamento della temperatura di un dispositivo TO220 montato su un dissipatore. Come si può vedere, la temperatura raggiunta è 32.035 °C, perchè chiaramente la superficie di scambio è notevolmente maggiore e la convezione ha un effetto molto importante ed evidente.

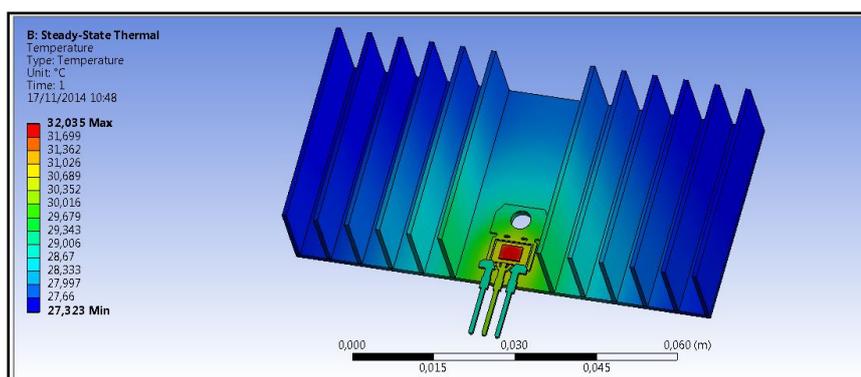


Figura 101 - Andamento della temperatura di un dispositivo T0220 montato su un dissipatore

Il risultato ottenuto è molto vantaggioso ed il ruolo di un dissipatore è chiaro, ma il presente lavoro è rivolto allo studio della temperatura nel caso di un dispositivo non montato su un dissipatore. L'obiettivo è infatti l'abbattimento della temperatura ottenuto intervenendo sui materiali presenti nel sistema e sulle tecnologie da adottare per creare materiali innovativi ad alta stabilità termica ed alta conducibilità termica. In ogni caso, si è volutamente riportato l'esempio di un dispositivo di potenza montato su un dissipatore perché nella realtà è quello che succede.

6.4 ANALISI TERMICA DI UN MODULO DI POTENZA

Accanto ai dispositivi single die, come abbiamo già discusso nel capitolo 2, esistono i dispositivi multi-die, chiamati moduli di potenza. Il beneficio che si ha in un modulo di potenza riguarda il risparmio in termini di materiali, peso ed ingombri. Nel seguente lavoro si è preferito fare l'analisi del dispositivo single die per semplicità di geometria; pur tuttavia si riporta un esempio di analisi termica di un dispositivo di potenza chiamato STA1.

Come si può vedere dalla Figura 102, questo modulo è costituito da 3 piazzole, in ognuna di queste ci sono 8 dispositivi, per l'esattezza die; sono dunque presenti un totale di 24 dispositivi.

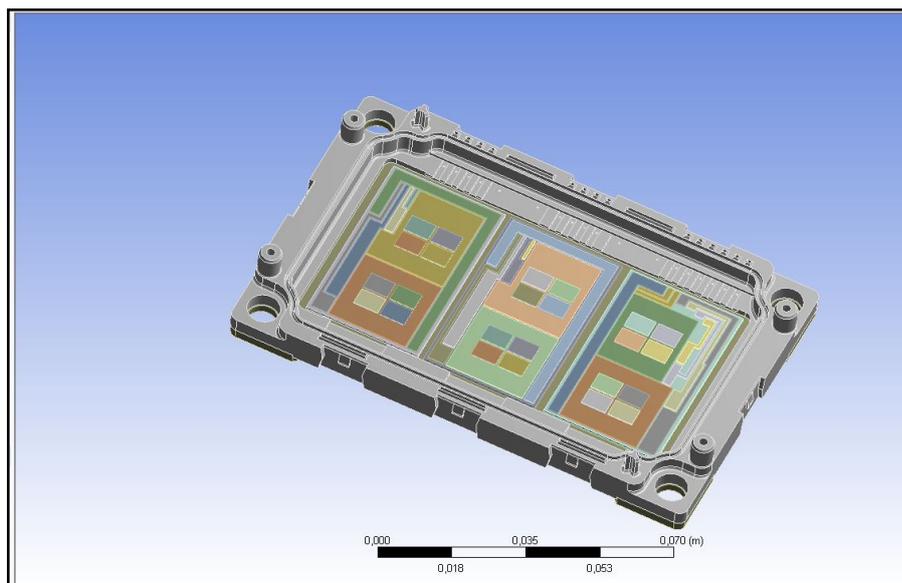


Figura 102 - Geometria del modulo di potenza STA1

L'analisi termica per questo dispositivo è stata impostata considerando un vincolo di temperatura sulla faccia inferiore del baseplate ed un calore interno generato pari a $7,62 \text{ W/mm}^3$. La temperatura massima che si ottiene è $26.117 \text{ }^\circ\text{C}$, in Figura 103 è riportato il modulo chiuso con la cassa ed in Figura 104 il dettaglio dell'andamento della temperatura per tutti i dispositivi accesi.

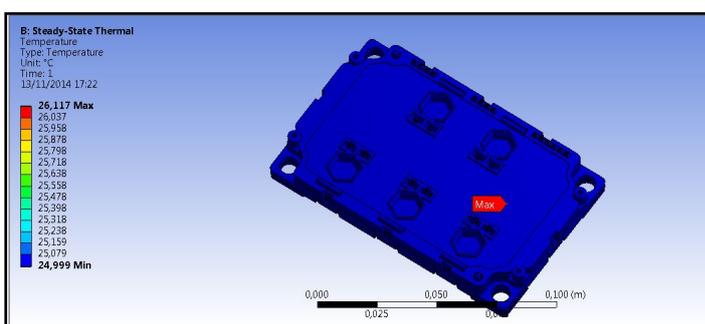


Figura 103 - Modulo STA1 chiuso

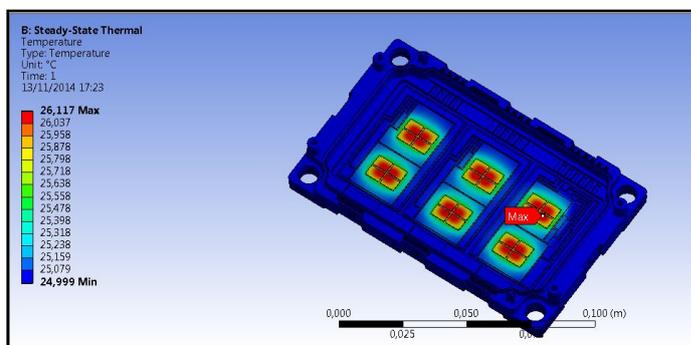


Figura 104 - Andamento della temperature per il modulo STA1

7. MODELLAZIONE DI UN PACKAGING ALTAMENTE CONDUTTIVO

Il modello eseguito tramite software ad elementi finiti è stato sviluppato per valutare due fondamentali effetti sui sistemi per l'incapsulamento. In sostanza, si può riassumere il lavoro di modellazione in due principali categorie, come rappresentato in Figura 105.

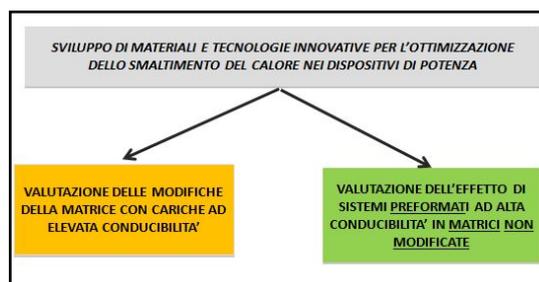


Figura 105 - Effetti del lavoro di modellazione

Come presentato nel capitolo precedente, è interessante valutare l'effetto della modifica della matrice al variare di λ , per vedere quanto realmente sia efficace l'aumento di conducibilità termica della cassa in termini di temperatura massima raggiunta dal sistema. Quello che si può dedurre è che si ottengono buoni vantaggi in termini di smaltimento di calore (10°C - 15°C), ma che per valori di λ del materiale della cassa >15 non si hanno benefici effettivi, perché la superficie di scambio termico diventa il parametro dominante.

Questo scenario ha portato all'implementazione di un secondo modello agli elementi finiti per valutare l'effetto di sistemi preformati ad alta conducibilità in matrici non modificate.

Considerato che non è semplice ottenere materiali che abbiano alti valori di conducibilità per i motivi presentati nel capitolo dell'analisi sperimentale, si è pensato di costruire un sistema composito costituito da resina epossidica e lastre altamente conduttive.

Il concetto è quello di costruire una griglia che abbia un volume il più possibile maggiore di materiale conduttivo piuttosto che di materiale isolante: il materiale isolante è ovviamente la resina epossidica, il materiale conduttivo sono le lastre. L'idea di avere un sistema preformato ad alta conducibilità, consente di non fare modifiche alla matrice preesistente e di superare così i problemi relativi alla lavorabilità della resina.

Le lastre prese in considerazione sono lastre di grafite pirolitica chiamate TPG (Thermal Pyrolytic Graphite) prodotte dalla ditta Momentive, disponibili in un'ampia varietà di forme, dimensioni e spessori.

In Figura 106 le immagini delle lastre TPG ed in Figura 107 le caratteristiche fisiche confrontate a quelle di altri materiali.

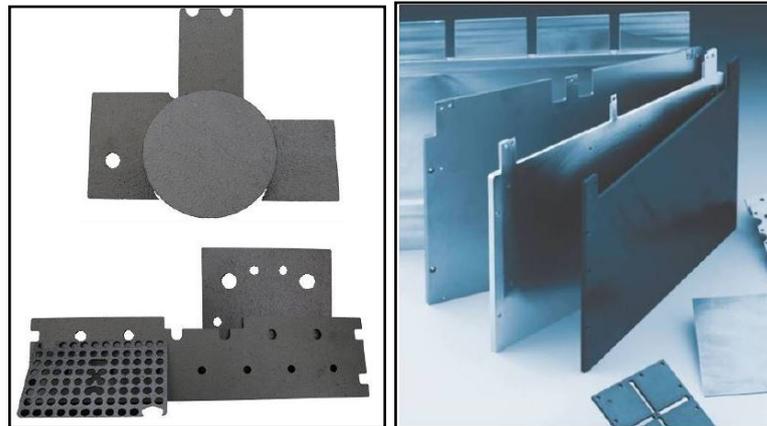


Figura 106 - Lastre TPG prodotte dalla ditta Momentive

Material	In-Plane TC (w/m-K)	Thru-Plane TC (W/m-K)	In-Plane CTE (ppm/°C)	Specific Gravity	Specific In-Plane TC ¹
Aluminum	218	218	23	2.7	81
Copper	400	400	17	8.9	45
AlSiC-12	180	180	11	2.9	62
CuW	185	185	8.3	15.2	12
Carbon/Carbon	400	40	-1.0	1.9	210
CVD Diamond	1100-1800	1100-1800	1-2	3.5	310-510
TPG Graphite	1500+	10	-1	2.3	650

¹ In-plane thermal conductivity / specific gravity
Sources: Carl Zweben, Thermal Consultant

 MOMENTIVE
* TPG is a trademark of Momentive Performance Materials, Inc.

Figura 107 - Caratteristiche delle lastre TPG

Il disegno è stato realizzato eliminando la cassa preesistente e sostituendo a questa una nuova cassa all'incirca dello stesso volume, ai fini di avere una superficie di scambio analoga a quella del caso standard. La cassa è stata scavata per inserire le lastre di grafite: la prova è stata fatta aggiungendo un numero di lastre che va da 3 a 30. In Figura 108 il disegno della cassa costituita dalle lastre di grafite e dalla resina.

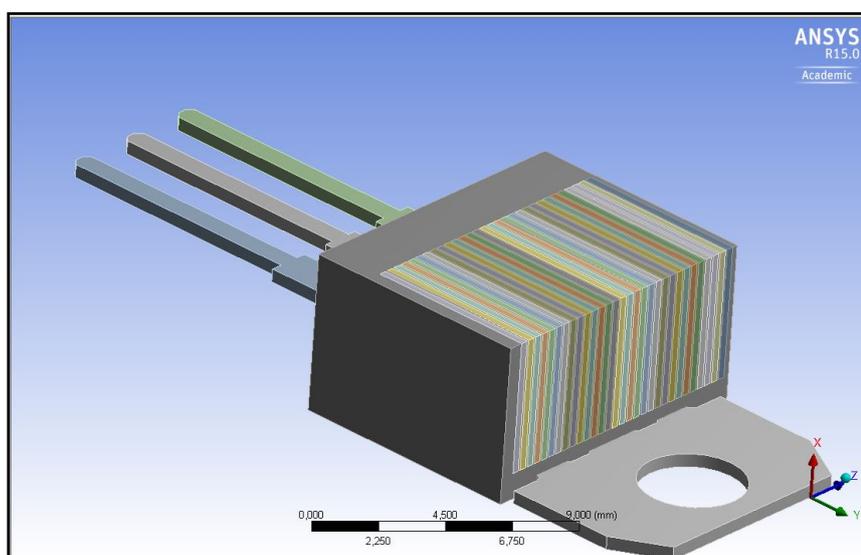
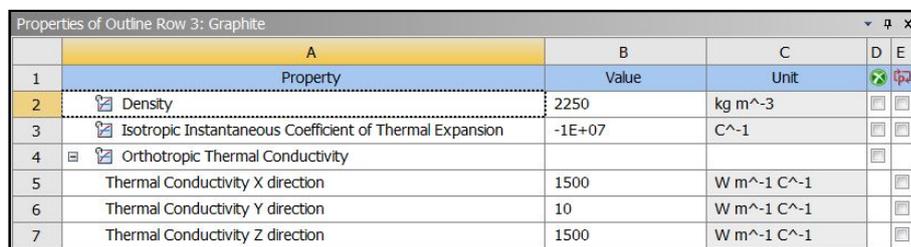


Figura 108 - Cassa del dispositivo TO220 costituito da resina e lastre di grafite

Da sottolineare che la cassa è costituita di semplice resina epossidica con valore di conducibilità pari a 0.8 W/mK e che le lastre di grafite hanno una conducibilità termica ortotropica; infatti per la proprietà della grafite di avere una struttura cristallina ordinata in piani, essa conduce moltissimo in piano (1500 W/mK) e poco (10 W/mK) nella direzione perpendicolare al piano.

Questo è di per sé un gran vantaggio nel caso in cui il vincolo considerato sia la conduzione, perché data la rilevanza, in termini di scambio termico, della conduzione rispetto alla convezione, l'effetto della direzionalità del materiale è più evidente. In ogni caso, per tutte le simulazioni eseguite in questa ipotesi della cassa costituita da lastre di grafite, è stata opportunamente inserita nel modello la direzionalità della grafite. In figura la finestra di impostazione dei materiali.



	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	2250	kg m ⁻³		
3	Isotropic Instantaneous Coefficient of Thermal Expansion	-1E+07	C ⁻¹		
4	Orthotropic Thermal Conductivity				
5	Thermal Conductivity X direction	1500	W m ⁻¹ C ⁻¹		
6	Thermal Conductivity Y direction	10	W m ⁻¹ C ⁻¹		
7	Thermal Conductivity Z direction	1500	W m ⁻¹ C ⁻¹		

Figura 109 - Impostazione della conducibilità termica ortotropica di un materiale

Come caso di riferimento, è stata considerata la cassa standard costituita da resina con valore di conducibilità termica pari a 0.8 W/mK, in Tabella 8 le specifiche del caso standard ed in Figura 110 il corrispondente disegno del dispositivo.

Tabella 8 - Specifiche del caso standard

Caso	Volume cassa (mm ³)	Superficie di scambio (mm ²)	λ resina (W/mK)	Tmax (°C)
0	356,08	593,23	0,8	158,88

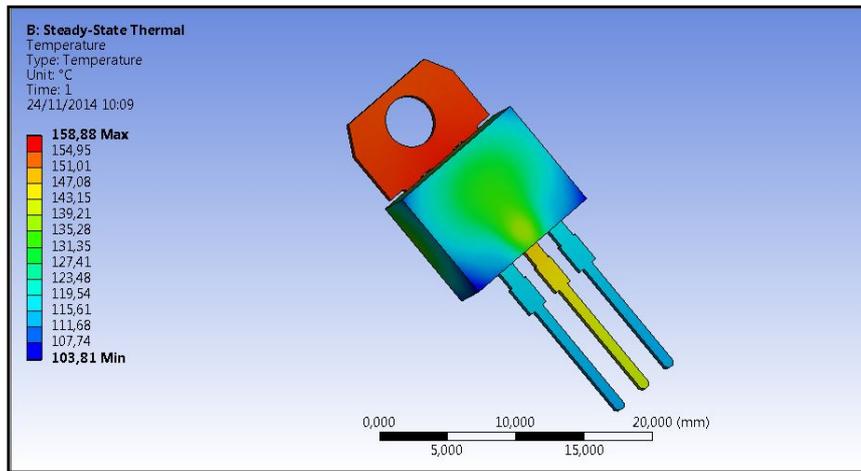


Figura 110 - Immagine caso standard

Lasciando dunque inalterate le condizioni di vincolo e di carico e chiaramente i materiali con le rispettive conducibilità termiche, i risultati sono stati analizzati in funzione del numero di lastre presenti per analizzare l'andamento della temperatura massima all'aumentare del volume di materiale conduttivo.

Si riporta in Figura 111 il caso con 5 TPG, in questo caso la temperatura risulta essere 153,59°C, già 5 °C meno rispetto al caso di riferimento.

In Figura 112 il caso con 7 TPG ed in Figura 113 e Figura 114 le immagini dei casi con 17 e 20 TPG.

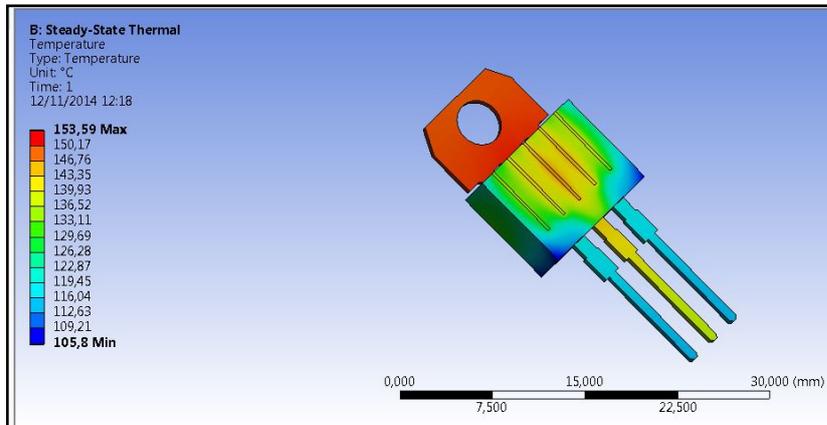


Figura 111 - Caso 5 TPG

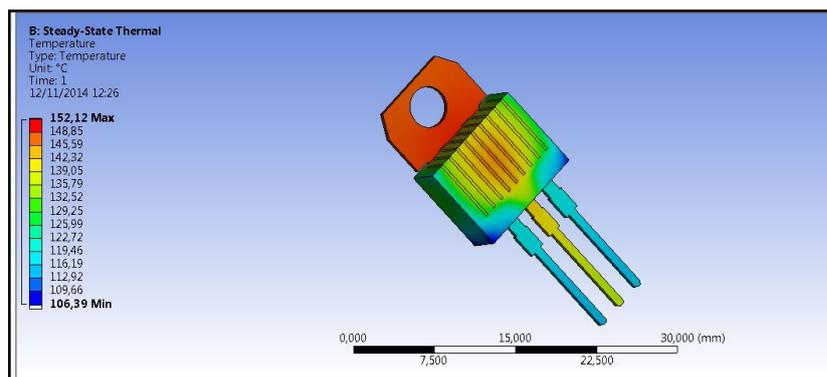


Figura 112 - Caso 7 TPG

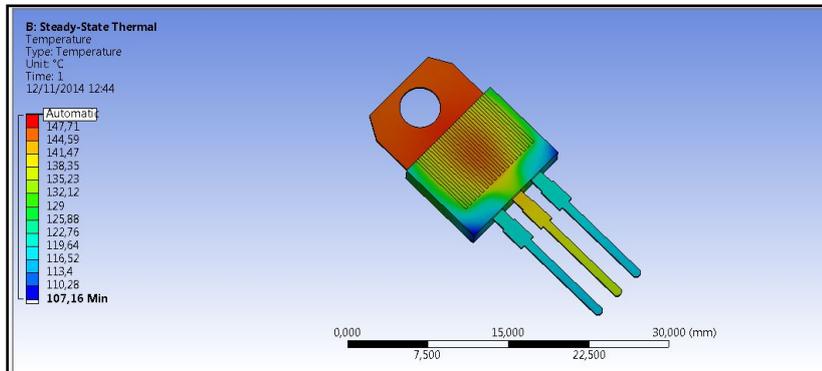


Figura 113 - Caso 17 TPG

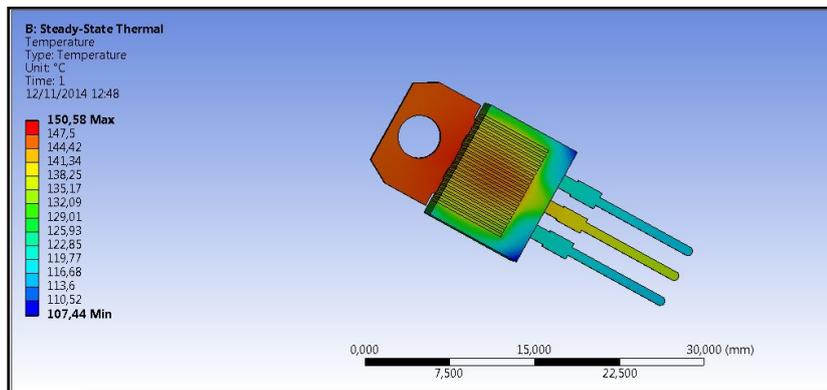


Figura 114 - Caso 20 TPG

Infine, in Figura 115, Figura 116 ed in Figura 117 il caso con 30 TPG.

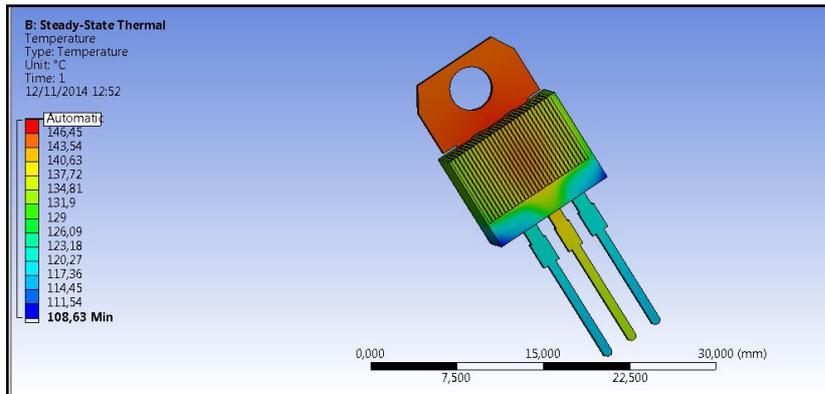


Figura 115 - Caso 30 TPG (fronte)

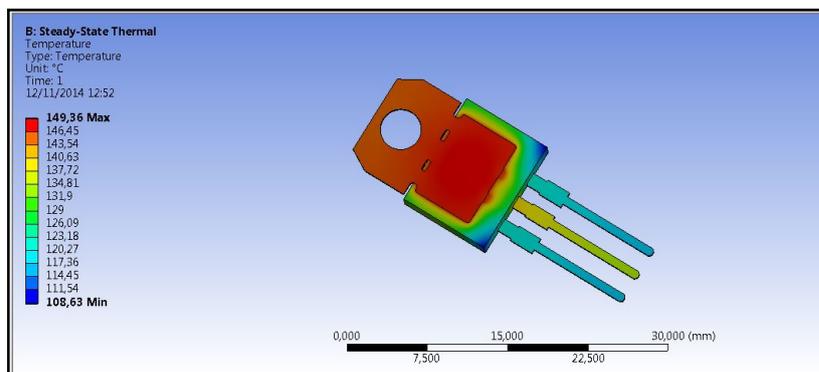


Figura 116 - Caso 30 TPG (retro)

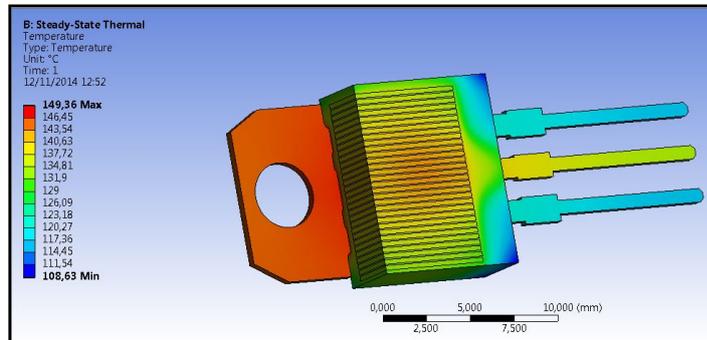


Figura 117 - Caso 30 TPG (dettaglio)

L'idea è quella di valutare come cambia la temperatura all'aggiunta delle TPG, cioè facendo aumentare a poco a poco il volume di materiale conduttivo, diminuendo di conseguenza il volume di materiale isolante. Il riepilogo dei vari casi ed il calcolo del volume del materiale conduttivo con i risultati sono riportati in Tabella 9 ed in Tabella 10.

Tabella 9 - Specifiche dei vari casi esaminati e risultati

Caso	Volume cassa totale	Volume mat isolante	Volume mat conduttivo	Volume tpg	n°tpg	Sup di scambio	Tmax
caso0_RIF	356,08	356,08	0,00	0,00	0,00	593,23	158,88
caso1	356,17	338,71	17,46	5,82	3,00	593,23	155,17
caso2	356,25	327,13	29,12	5,82	5,00	593,23	153,59
caso3	356,34	315,57	40,77	5,82	7,00	593,23	152,78
caso4	356,42	304,04	52,38	5,82	9,00	593,23	152,12
caso5	356,42	292,40	64,02	5,82	11,00	593,23	151,69
caso6	356,49	280,83	75,66	5,82	13,00	593,23	151,34
caso7	356,54	269,24	87,30	5,82	15,00	593,23	151,05
caso8	356,65	257,71	98,94	5,82	17,00	593,23	150,83
caso9	356,76	240,36	116,40	5,82	20,00	593,23	150,58
caso10	357,05	182,45	174,60	5,82	30,00	593,23	149,36

Tabella 10 - Riepilogo dei casi esaminati e risultati

Caso	Volume cassa totale [mm3]	%volume mat isolante	%volume mat conduttivo	verifica	Tmax
caso0_RIF	356,08	100	0	100	158,88
caso1	356,17	95,10	4,90	100	155,17
caso2	356,25	91,82	8,18	100	153,59
caso3	356,34	88,56	11,44	100	152,78
caso4	356,42	85,30	14,70	100	152,12
caso5	356,42	82,04	17,96	100	151,69
caso6	356,49	78,78	21,22	100	151,34
caso7	356,54	75,51	24,49	100	151,05
caso8	356,65	72,26	27,74	100	150,83
caso9	356,76	67,37	32,63	100	150,58
caso10	357,05	51,10	48,90	100	149,36

L'andamento della temperatura in funzione del volume del materiale conduttivo è riportato in Figura 118.

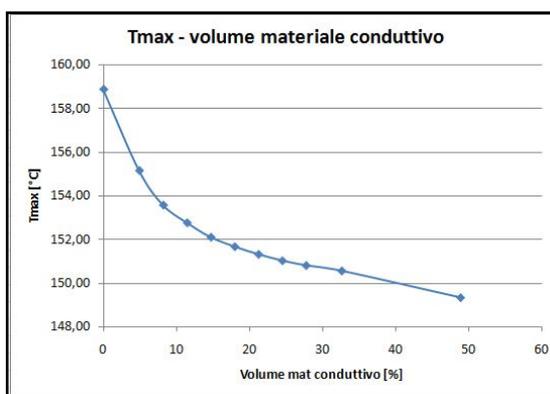


Figura 118 - Andamento della temperatura in funzione del volume di materiale conduttivo

Il confronto è stato dunque fatto tra il caso di riferimento, ovvero il caso in cui la cassa è costituita dalla sola resina con conducibilità termica pari a 0,8 W/mK e il caso in cui la cassa è un composito costituito da resina e da 30 lastre di grafite. I valori di temperatura che si ottengono sono rispettivamente 158,88 °C nel primo caso e 149,78 °C nel secondo caso. Il ΔT risulta dunque essere di 9,1°C, che è un risultato piuttosto soddisfacente.

In questo scenario, in cui si è al 50% di volume di materiale conduttivo, si ottiene lo stesso risultato che si potrebbe ottenere nel caso standard con un valore di conducibilità per la resina standard pari a 2 W/mK (144°C). Il vantaggio di questa soluzione consiste però nell'evitare la lavorabilità della resina e di potere pensare questa configurazione nel caso di incapsulamento di dispositivi con siliconi (0,8 W/mK).

8. THERMAL INTERFACE MATERIALS

8.1 INTRODUZIONE

Tra i materiali di interesse per l'elettronica, risultano essere di rilevante importanza i materiali d'interfaccia o thermal interface materials (TIM). Questi, devono garantire la giunzione tra gli strati ed allo stesso tempo essere conduttivi termicamente ed elettricamente. Necessari per minimizzare la resistenza termica tra il chip ed il dissipatore, la loro funzione è quella di riempire i vuoti che si vengono a creare tra i vari strati che compongono il dispositivo e di favorire, tramite un percorso altamente conduttivo, una corretta dissipazione del dispositivo.(32)

Le tipologie tradizionali di TIM possono essere classificate in varie categorie: solder, thermalgrease, thermal gel o thermally conductive adhesives.(33) In Figura 119 alcune caratteristiche dei principali TIM utilizzati per il packaging.

Table 13.1 Summary of Characteristics of some typical thermal interface materials (PCM: phase change material)				
TIM Type	RTIM of fresh samples ($^{\circ}\text{C cm}^2/\text{W-l}$)	General Characteristics	Advantages	Disadvantages
Greases	0.1	Typically silicone based matrix loaded with particles to enhance thermal conductivity	<ul style="list-style-type: none"> • High bulk thermal conductivity • Thin BLT with minimal attach pressure • Low viscosity enables matrix material to easily fill surface crevices • No curing required • TIM delamination is not a concern 	<ul style="list-style-type: none"> • Susceptible to grease pump-out and phase separation • Considered messy in a manufacturing environment due to a tendency to migrate
PCM	0.1	Polyolefin, epoxy, low molecular weight polyesters, acrylics typically with BN or Al_2O_3 fillers	<ul style="list-style-type: none"> • Higher viscosity leads to increased stability and hence less susceptible to pump-out • Easier application and handling than greases • No cure required • Delamination is not a concern 	<ul style="list-style-type: none"> • Lower thermal conductivity than greases • Surface resistance can be greater than greases. Can be reduced by thermal pre-treatment • Requires attach pressure to increase thermal effectiveness and thus could lead to increased mechanical stresses
Gels	0.08	Al , Al_2O_3 , Ag particles in silicone, olefin matrices that require curing	<ul style="list-style-type: none"> • Conforms to surface irregularity before cure • No pump out or migration concerns 	<ul style="list-style-type: none"> • Cure process needed • Lower thermal conductivity than grease • Lower adhesion than adhesives; delamination can be a concern
Adhesives	Data not available	Typically Ag particles in a cured epoxy matrix	<ul style="list-style-type: none"> • Conform to surface irregularity before cure • No pump out • No migration 	<ul style="list-style-type: none"> • Cure process needed • Delamination post reliability testing is a concern • Since cured epoxies have modulus, CTE mismatch induced stress is a concern

Figura 119 - Caratteristiche di alcuni tipici Thermal Interface Materials

I TIM giocano un ruolo fondamentale nella riduzione della resistenza termica tra package e dispositivo e tra il dispositivo e il componente esterno di raffreddamento; in generale sono quindi utilizzati per limitare il più possibile la resistenza termica interfacciale tra i vari strati.

Per chiarezza, definiamo cosa si intende per resistenza termica interfacciale. Quando due superfici solide sono in contatto, come mostrato in Figura 120, le asperità superficiali tipicamente limitano il contatto tra i due solidi a una piccolissima frazione di contatto all'interfaccia. Il flusso di calore attraverso l'interfaccia comprende la conduzione solido-solido nell'area di contatto e la conduzione attraverso i vuoti d'aria che occupano l'aria di non contatto dell'interfaccia; questo flusso di calore imprigionato è la resistenza termica all'interfaccia (R_c).

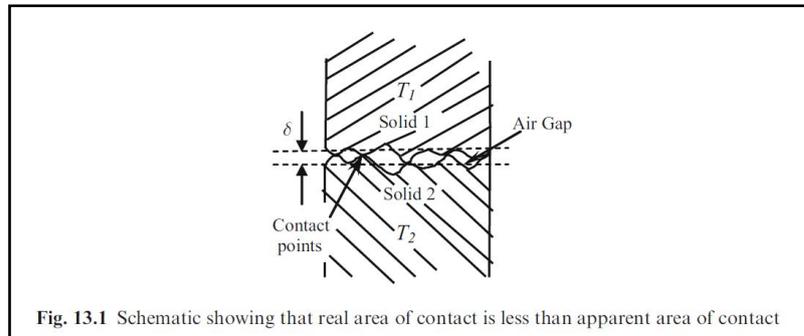


Figura 120 - Area di contatto tra due solidi

La via più semplice per ridurre la resistenza termica all'interfaccia è riempire il vuoto tra le asperità con soft material ad alta conduttività termica che si chiamano appunto thermal interface materials. (TIM). La resistenza termica di un TIM si calcola come mostrato in Figura 121.

$$R_{\text{TIM}} = \frac{BLT}{k_{\text{TIM}}} + R_{c1} + R_{c2}$$

Figura 121 - Resistenza termica

In cui K_{TIM} rappresentala conducibilità termica del TIM in considerazione, R_c la resistenza di contatto del TIM alle due superfici e BLT lo spessore della linea di giunzione. Si deduce dunque che, per migliorare le performance dei TIM e quindi abbassare il più possibile la R_{TIM} , le azioni che si possono intraprendere sono:

1. Ridurre il BLT
2. Aumentare la conducibilità termica K_{TIM}

3. Ridurre le resistenze di contatto alle superfici R_{c1} e R_{c2}

In Figura 122 si riporta la rappresentazione schematica di un TIM.

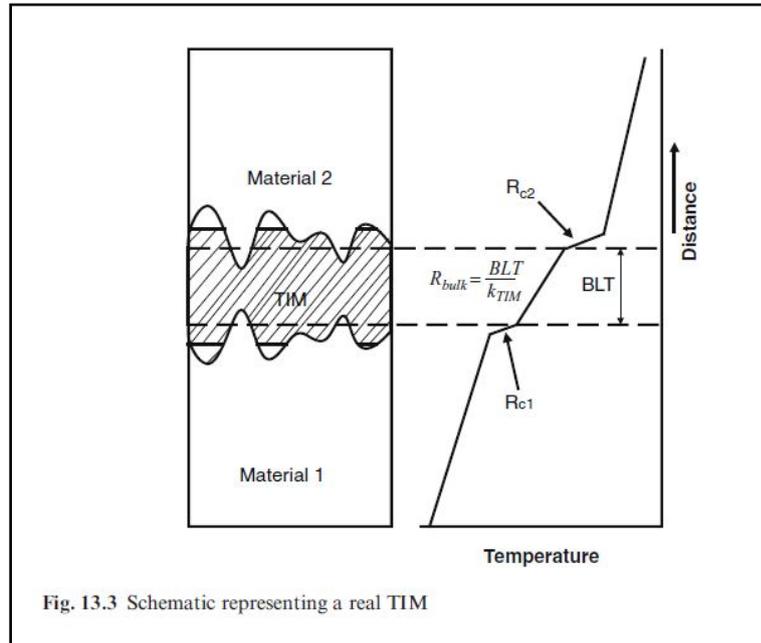


Figura 122 - Rappresentazione schematica di unTIM

8.2 STATO DELL'ARTE DI THERMAL INTERFACE MATERIALS

Data la complessità e l'importanza della funzione delle diverse tipologie di TIM, in letteratura ci sono molteplici studi a riguardo.

Tra i materiali d'interfaccia, i più comuni sono i "solder", ovvero paste saldanti che vengono utilizzate come materiali di interconnessione. Da sempre, le leghe saldanti contengono piombo; recentemente, per normativa

europea, queste devono essere “leadfree”. Le leghe leadfree prese principalmente in considerazione in letteratura sono leghe di Sn-Ag.

Per esempio, uno studio riporta l’effetto dell’introduzione di particelle di diverso tipo (Co, Ni, Pt, Al, P, Cu, Zn, Ge, Ag, In, Sb) su solder Sn-Ag. I risultati mostrano che in effetti, in particolare la presenza delle particelle di Co, Ni e Pt riduce la formazione e quindi lo spessore di composti intermetallici (IMC), causa dell’inizio e della propagazione di crack, fenomeno critico per l’affidabilità del dispositivo.(34), (35)

La letteratura più recente invece riporta l’utilizzo di nuovi solder costituiti da nanoparticelle di Ag sinterizzate. Come mostrato in Tabella 11, in confronto alle leghe e alle particelle tradizionali, queste mostrano migliori proprietà in termini di conducibilità termica, elettrica e temperatura massima di esercizio(36).

Tabella 11 - Confronto tra caratteristiche di differenti solder

Feature	Processing Temperature / °C	Max. Use Temperature / °C	$\sigma / (10^6/\Omega m)$	$\lambda / W/mK$	Die-shear Strength / MPa	Price / (\$/g)
Material						
PbSn Solder	217	<183	6.9	51	35	<1.0
Pb-free Solder	260	<225	7.5	70	35	<1.0
AuSn Solder	310	<280	6.25	58	30-60	60-80
Ag Epoxy	100-200	<200	1	10	10-40	2-9
Au	-	<1064	45	317	-	32
Ag	-	<961	62	429	-	0.46
Cu	-	<1084	58	401	-	0.003
Sintered Ag	<300	<961	40	240	20-60	<20

Confrontate alle leghe tradizionali, i solder con Ag sinterizzato, hanno buoni valori di conducibilità termica e di resistività ed inoltre sono termicamente stabili ad alte temperature. Si riporta, in Figura 123, il confronto in termini di resistività di diverse tipologie di materiali usati come solder nei dispositivi elettronici ed in Tabella 12, le proprietà termiche delle paste in Ag sinterizzato e del sistema bulk in Ag.(37)

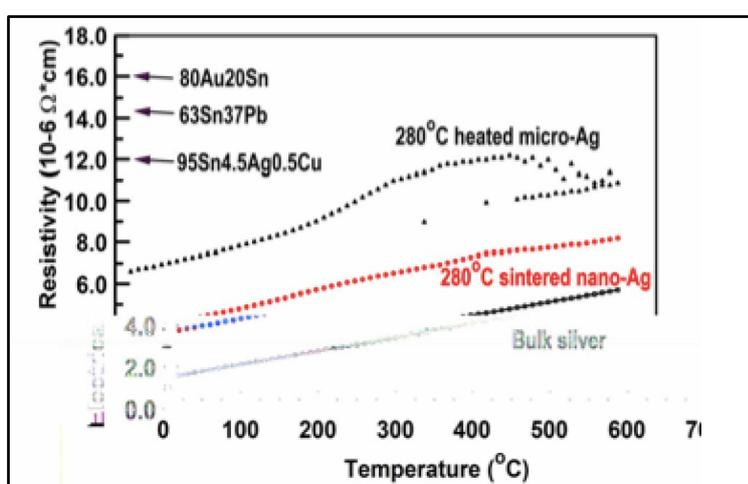


Figura 123 - Confronto in termini di resistività di diverse tipologie di materiali usati come solder nei dispositivi elettronici

Tabella 12 - Proprietà termiche delle paste in Ag sinterizzato e del sistema bulk in Ag

Table I: Thermal properties of the sintered nanoscale silver paste and those of the bulk silver.				
	Density ρ (g/cm ³)	Specific heat c (J/g-K)	Diffusivity α (cm ² /s)	Conductivity k (W/K-cm)
Sintered silver	8.58	0.233	1.19	2.38
Bulk silver	10.5	0.235	1.74	4.29

Un altro interessante esempio di TIM per packaging è l'effetto dell'aggiunta di CNT e CB a una resina epossidica al fine di aumentare la conducibilità termica. I risultati sono mostrati in Figura 124.(38)

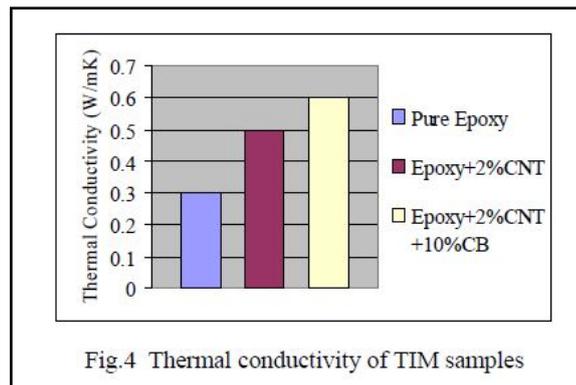


Figura 124 - Conducibilità termica di alcuni campioni caricati con CNT e CB

In Figura 125 le proprietà elettriche di compositi CNT/Ag/Epoxy a differenti composizioni. (39)

Ag(wt %)	45	52	57	66.5	72
bulk resistivity of Ag/Ep composites (ρ_1) (ohm-cm)	$\gg 10^8$	6.91×10^6	1.04×10^6	1.01×10^4	1.5×10^{-3}
CNTs (wt%)	1.35	1.0	0.4	0.27	0.24
bulk resistivity of CNTs/Ag/Ep composites (ρ_2) (ohm-cm)	4.8×10^3	3.82×10^1	2.4×10^{-2}	6.47×10^{-3}	1.43×10^{-3}
ρ_1/ρ_2	--	$\approx 10^5$	$\approx 10^8$	$\approx 10^6$	--

Figura 125 - Proprietà elettriche di compositi CNT/Ag/Epoxy

Infine, i lavori più recenti, si basano su materiali d'interfaccia realizzati con grafene, proprio perché il grafene è un ottimo conduttore termico ed elettrico. In un esempio di orientazione di lastre di grafite utilizzate come thermal interface materials per applicazioni elettroniche. (40), (41).

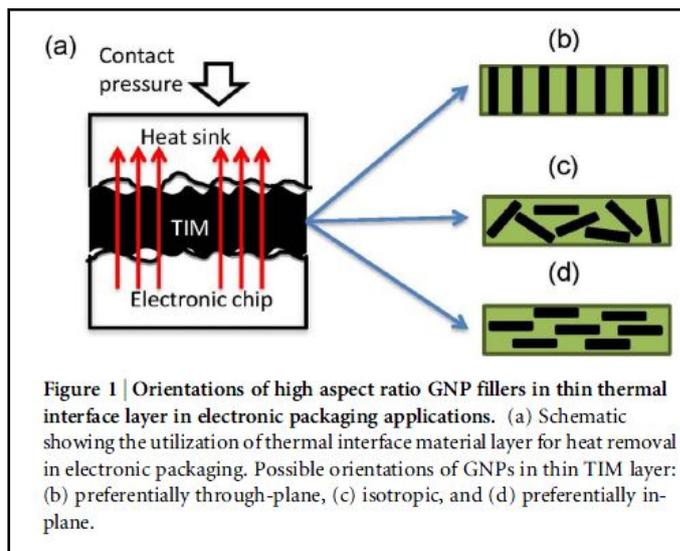


Figura 126 - Lastre di grafite per applicazioni elettroniche.

Una nuova tipologia di TIM molto interessante è la realizzazione di un tipo di composito in cui la matrice polimerica è costituita da fibre prodotte tramite electrospinning. La scelta di utilizzare le fibre come filler nasce dal fatto che in primo luogo, con l'elettrospinning è possibile ottenere fibre con diametri nano e micro, in secondo luogo perché è possibile utilizzare un gran numero di materiali da potere spinnare ed in ultimo perché l'elettrospinning è un processo tecnologicamente abbastanza semplice.

Vari studi riportano lo sviluppo di nano compositi utilizzati come thermal interface material costituiti da fibre polimeriche. L'aggiunta di nano particelle conduttive quali CNT o di leghe metalliche porta ad un miglioramento delle performance dei TIM in quanto, nel primo caso, le nano particelle vengono aggiunte alla soluzione polimerica prima che questa venga spinnata per migliorare la conduttività termica, mentre nel secondo caso l'alta conducibilità termica si ottiene inserendo nel polimero una fase metallica continua. Questa procedura porta alla formazione di una rete metallica connessa all'interno di una struttura polimerica, in questo modo l'alta conducibilità termica si ottiene con la fase metallica continua e la parte polimerica definisce lo spessore. Al contrario dei tradizionali solder, la fase polimerica abbassa la rigidezza abbassando anche il BLT (Bondline Thickness).

Un esempio di questo tipo di nano composito (polyimide/indium) mostra con bondline thickness= 0, una resistenza termica pari a $8 \text{ Kmm}^2/\text{W}$ e una conducibilità termica pari a 28 W/mK . (Figura 127).(42)

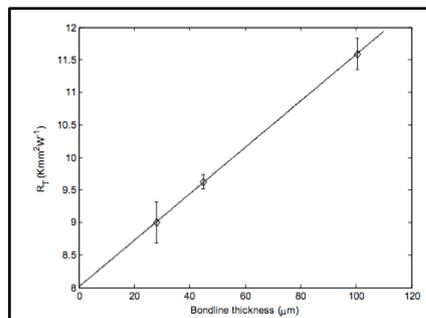


Figura 127 - Resistenza termica in funzione del BLT

Altri studi mostrano come per esempio, l'aggiunta di nanoparticelle di SiC (25 wt%) ad una soluzione di poliuretano, produce fibre con le seguenti caratteristiche termiche (Figura 128). La Figura 129 riporta un confronto con i prodotti commerciali.(43), (44).

Table 1: Thermal results of Nano-TIM					
Resin with silicon carbide (Beta) particles					
Thermal Resistance(°C/W)			Thermal Conductivity(W/mK)		
50	70	100	50	70	100
3.7	2.64	1.493	0.52	0.72	1.28

Figura 128 - Risultati termici per Nano-TIMconSiC

Table 2: Comparison of SiC Nano-TIM with commercial production.				
	Characteristics	Unit	Commercial material	Nano-TIM (25% SiC)
1	Thermal Conductivity	W/mK	3.656	1.28
2	Thermal Resistance	K/W	0.599	1.493
3	Thickness	µm	460	110
4	Operating Temperature	°C	-40– 120	0-90

Figura 129 - Confronto Nano-TIM in esame con prodotti commerciali

8.3 LAVORO SPERIMENTALE SU TIM

Data la rilevanza della tecnica dell'electrospinning, infatti l'utilizzo delle fibre polimeriche abbassa il bondline thickness e riduce la resistenza termica, si è pensato di sviluppare TIM costituiti da fibre di PES e nanotubi di carbonio. La scelta del PES come polimero da elettrospinnare è dovuta alle sue proprietà di solubilità.

Data l'importanza del processo, semplice per tecnologia ma con un sistema complesso di variabili e fattori che vi prendono parte, si è pensato di effettuare un'analisi che consenta di ottenere risultati statisticamente significativi e informazioni valide che permettano di migliorare continuamente il processo. La metodologia utilizzata per una caratterizzazione ed ottimizzazione del problema di tipo statistico è l'analisi della varianza (ANOVA) insieme alla progettazione ed analisi degli esperimenti (DoE).

Gli scopi della progettazione degli esperimenti sono i seguenti:

- Caratterizzazione del problema: trovare i parametri di input che più significativamente influenzano l'output.
- Ottimizzazione del problema: agire su quelle variabili trovate al punto precedente per determinarne la regione di ottimo, ovvero quella a cui corrisponde un output più favorevole.

Un obiettivo è stato quello di analizzare tramite l'analisi della varianza, quali sono i parametri del processo di elettrofilatura che influenzano maggiormente la risposta in uscita, rappresentata in questo caso dal diametro medio della fibra e dalla densità superficiale. I parametri caratteristici del

processo di elettrofilatura si distinguono in parametri della soluzione polimerica, parametri di processo e parametri ambientali.

- Parametri della soluzione polimerica: peso molecolare e viscosità, tensione superficiale, conducibilità e tipo di solvente.
- Parametri del processo: voltaggio, flusso, distanza tra il collettore e l'ago e tipo di collettore.
- Parametri ambientali: umidità, pressione e temperatura.

Un esempio di analisi della varianza è stato effettuato per capire quali sono i parametri del processo di elettrofilatura che influenzano il diametro medio di una fibra di PES prodotta tramite electrospinning.

Il piano degli esperimenti definito è riportato nella Figura 130.

<i>Fattore</i>	<i>Livelli</i>	<i>Valori</i>	<i>Risposta</i>
Concentrazione	3	0,15;0,25;0,35	Diametro medio Densità superficiale
Potenziale	3	22,25,28	
Gap	3	14,17,20	

Figura 130 - Piano degli esperimenti impostato per l'ANOVA

Mediante il software Minitab, è stata eseguita l'analisi della varianza per ogni singolo fattore (ONE WAY). Considerando come risposta osservata, in

primo luogo, il diametro medio della fibra ed in secondo luogo, la densità superficiale, l'analisi riporta un p-value < 0.05 (livello di significatività impostato), solo per il fattore concentrazione. In altri termini, l'unico fattore che ha influenza su entrambe le risposte è la concentrazione della soluzione; infatti all'aumentare della concentrazione, il diametro medio della fibra aumenta, come già detto precedentemente. Per quanto riguarda la densità, questa aumenta linearmente all'aumentare della concentrazione.

La Figura 131 e la Figura 132 mostrano quanto appena detto.

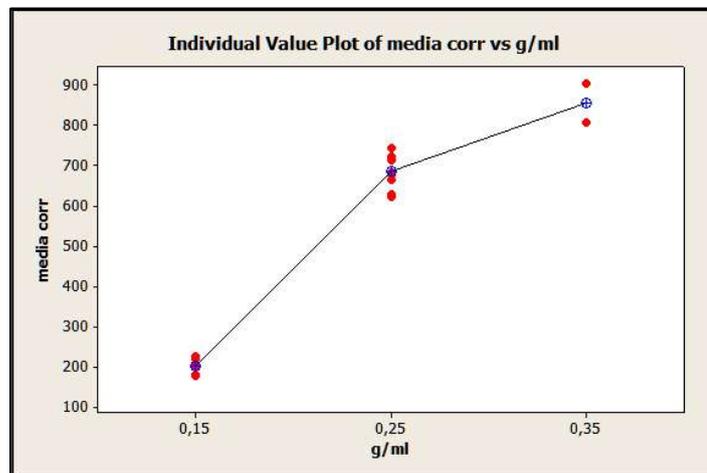


Figura 131 - Diametro medio in funzione della concentrazione della soluzione

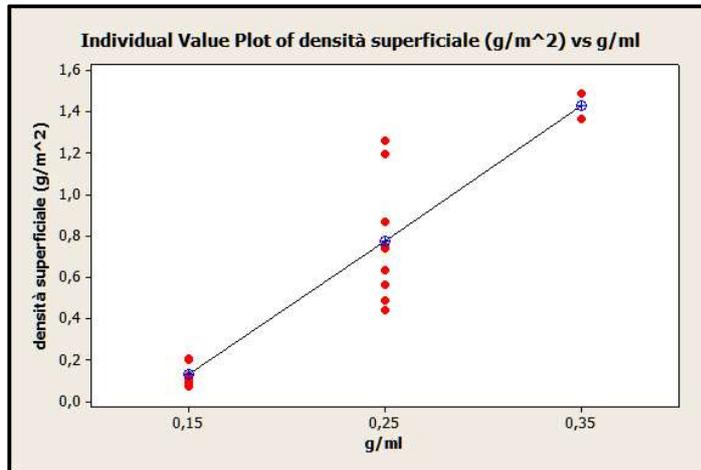


Figura 132 - Densità superficiale in funzione della concentrazione della soluzione

Definito quindi che la concentrazione è il parametro guida e dunque il fattore più importante, per capire come controllare il processo, si è impostato un altro piano nel quale, definito come fattore fisso la concentrazione della soluzione e come risposta la densità superficiale, si sono fatti variare potenziale, flusso e distanza tra ago e collettore.

Si riporta in Figura 133 la tabella riepilogativa del piano.

<i>Fattore</i>	<i>Tipo</i>	<i>Livelli</i>	<i>Valori</i>	<i>Risposta</i>
Concentrazione	fisso	-	-	Densità superficiale
Potenziale	variabile	3	17,22,5,28	
Gap	variabile	3	6,5,12,5,18,5	
Flusso	variabile	3	30,45,60	

Figura 133 - Tabella riepilogativa del piano degli esperimenti impostato

L'analisi della varianza mostra che l'unico fattore importante per la densità è il flusso, infatti è chiaro che all'aumentare della portata, si ha un aumento della densità superficiale.(Figura 134).

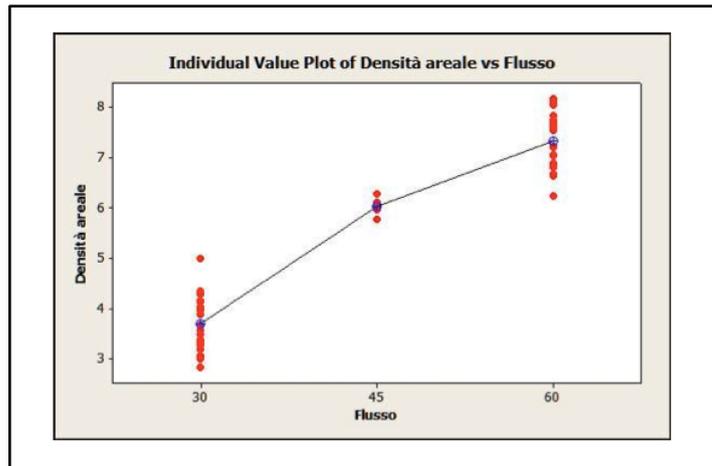


Figura 134 - Densità superficiale in funzione del flusso

L'analisi della varianza e la progettazione sperimentale consentono di capire come controllare il processo e di conseguenza come agire al fine di ottenere, per esempio, fibre di un desiderato diametro.

Infatti, attraverso il software di analisi delle immagini FibraQuant, si sono analizzati automaticamente i diametri delle fibre ed ottenuto le relative distribuzioni come riportato in Figura 135. Definito il diametro medio per ogni condizione di processo, l'analisi della varianza mostra che, per il diametro, tutti e tre i fattori presi in considerazione sono rilevanti e che il processo rileva forti non linearità come mostrato in Figura 136 dal plot di interazione degli effetti.

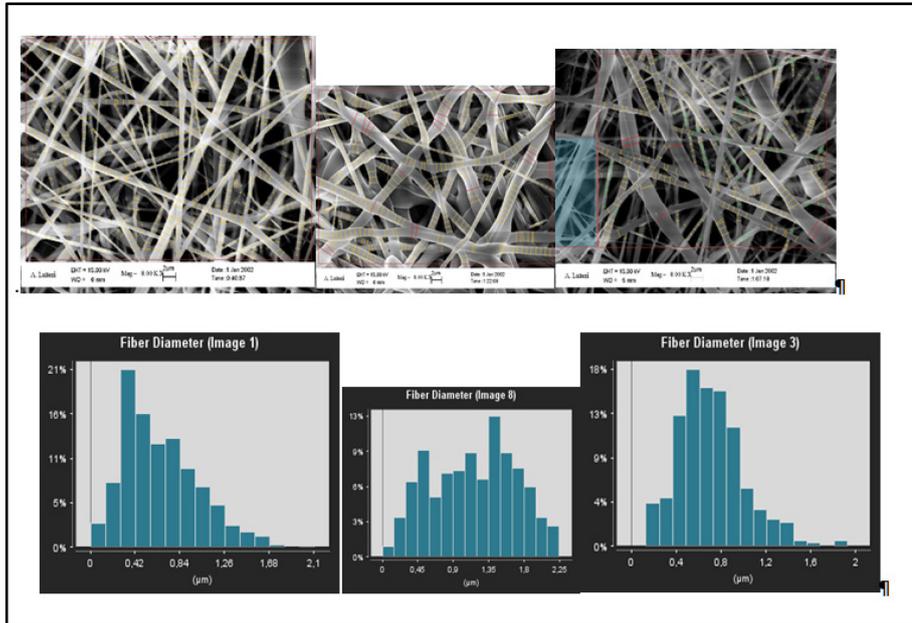


Figura 135 - Immagini SEM delle fibre elettrospinnate e distribuzione dei diametri

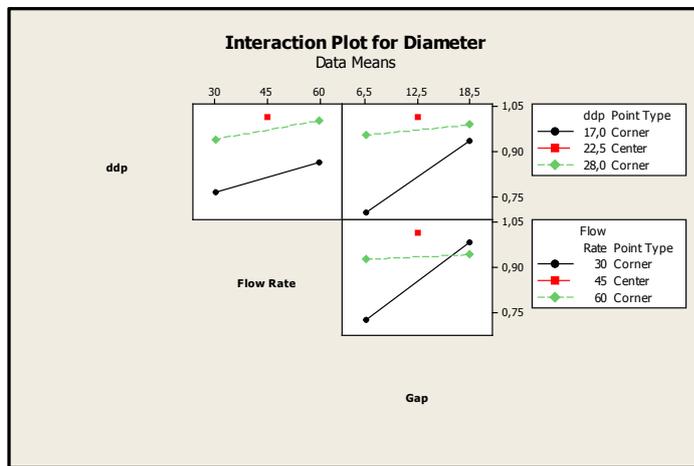


Figura 136 - Plot di interazione degli effetti tra i fattori

Ai fini dello sviluppo di TIM, è interessante capire variando le condizioni di processo, quali voltaggio, flusso o distanza ago-collettore, come si ottengono fibre con diametri nanometrici o con quale frazione volumetrica di nanoparticelle conduttive si ottengono le migliori fibre in termini di diametro, densità, conducibilità termica e Bondline Thickness, requisiti fondamentali per un Thermal Interface Material.(45).

Ottimizzate le condizioni di processo di produzione delle fibre a base PES si è passati alla realizzazione di fibre caricate con nanotubi in carbonio ad alta conducibilità. I campioni sono stati preparati utilizzando concentrazioni variabili tra 0.1wt% e 1wt%. In Figura 137 e in Figura 138 sono riportate le immagini microscopiche dei campioni al 1wt%.

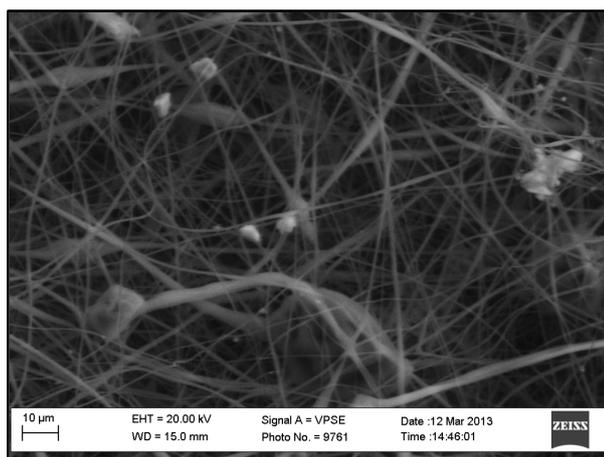


Figura 137 - Immagine SEM fibre elettrospinnate con 1wt% di CNT

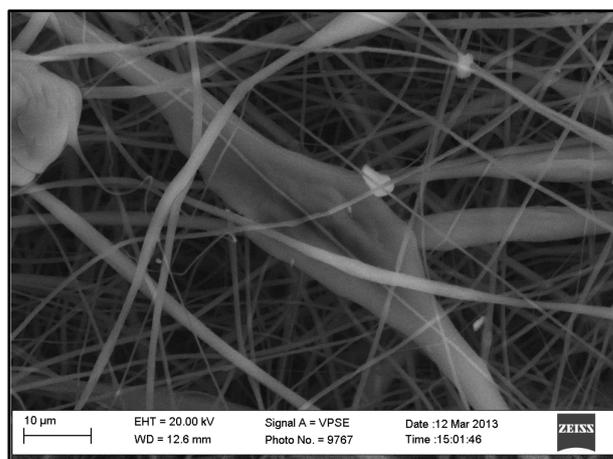


Figura 138 - Immagine SEM fibre elettrospinnate con 1wt% di CNT

L'analisi microscopica rileva che le fibre caricate presentano un diametro maggiore e la presenza di beads è riconducibile agli agglomerati di nanotubi. Per analizzare il contenuto delle fibre, osservando le sezione delle stesse fibre, si è proceduto all'inglobamento delle fibre in resina epossidica e alla successiva criofratturazione dei campioni ottenuti. Le analisi, riportate in Figura 139 ed in Figura 140, mostrano che le fibre presentano una struttura con una corona circolare esterna di PES e una struttura interna ricca in strutture nanometriche ascrivibili ai nanotubi.

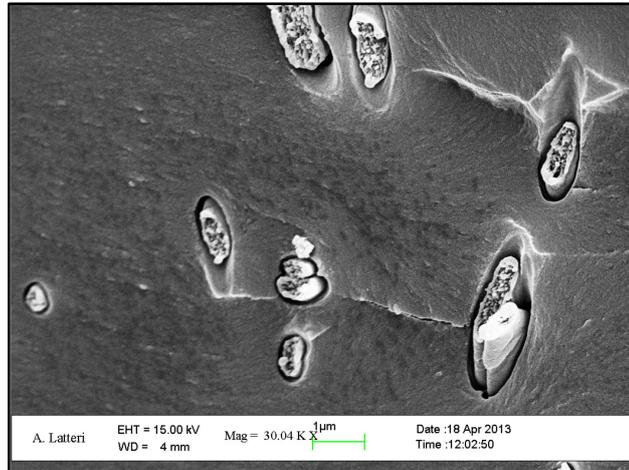


Figura 139 - Immagine SEM fibre elettrospinnate caricate con CNT

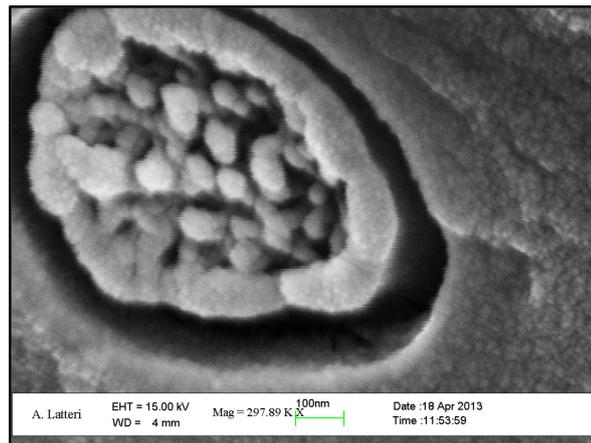


Figura 140 - Immagine SEM fibre elettrospinnate caricate con CNT

9. ANALISI STRUTTURALE

9.1 INTRODUZIONE

Come precedentemente visto, la gestione del calore e della temperatura sono fondamentali ai fini della prevenzione dei guasti. I guasti sono infatti spesso associati ad un grande aumento di temperatura, che porta a una drastica deteriorazione dei semiconduttori, e/o frattura, delaminazione, e anche combustione del packaging. La minimizzazione o eliminazione dei guasti indotti da problemi termici, spesso richiede la riduzione dell'aumento di temperatura e la minimizzazione della variazione di temperatura dentro il packaging. L'affidabilità di un sistema è la probabilità che esso incontri i requisiti richiesti in un dato periodo di tempo. Un componente elettronico opera ad alte temperature e, conseguentemente, risulta essere vicino alla probabilità di guasto dovuta alla lunga esposizione alle alte temperature. Tempi di guasto rapidi chiaramente portano a creep meccanici e a relativi problemi di funzionamento del dispositivo. Per queste ragioni, è necessario

accanto all'analisi termica svolgere un'analisi di tipo strutturale che tenga in considerazione problemi legati ad elementi interni quali silicio e alle conseguenze che ne potrebbero derivare (46), (47).

L'analisi strutturale è infatti fondamentale nella scelta dei componenti del composito, poiché lo stress termico causato da una grande quantità di calore potrebbe compromettere l'affidabilità del dispositivo e quindi il suo corretto funzionamento. I danni strutturali maggiori si riscontrano sui substrati, sul silicio e sulle interconnessioni elettriche (wirebonding). In letteratura ci sono diversi studi che si occupano dell'argomento. Tra i più comuni meccanismi di guasto dei moduli di potenza, riportiamo in Figura 141 il tipico crack di un filo elettrico che non è stato ricoperto in maniera corretta ed in Figura 142 il crack alla base del filo nel caso di un legame doppio. In Figura 143 due esempi chiarissimi di crack sul silicio.(48)

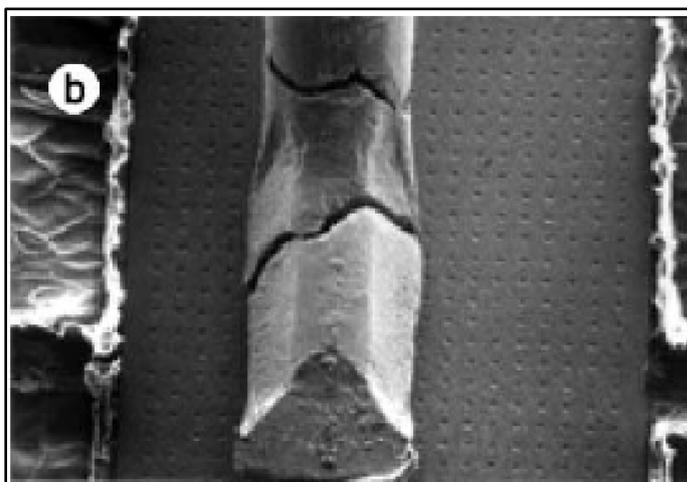


Figura 141 - Crack di un interconnessione elettrica dovuto ad un errato ricoprimento del filo



Figura 142 - Crack nel caso di un legame doppio

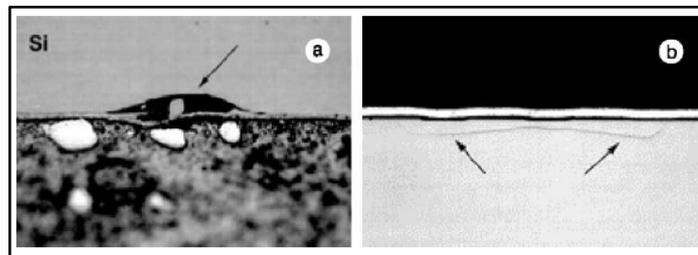


Figura 143 - Esempi di crack sul silicio dovuti a stress a flessione presenti sul baseplate

Infine, in Figura 144 ed in Figura 145 vari meccanismi di frattura. (49), (50), (51).

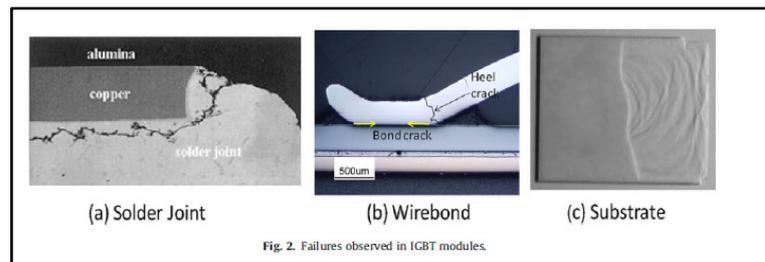


Figura 144 - Vari meccanismi di frattura osservati in moduli di potenza

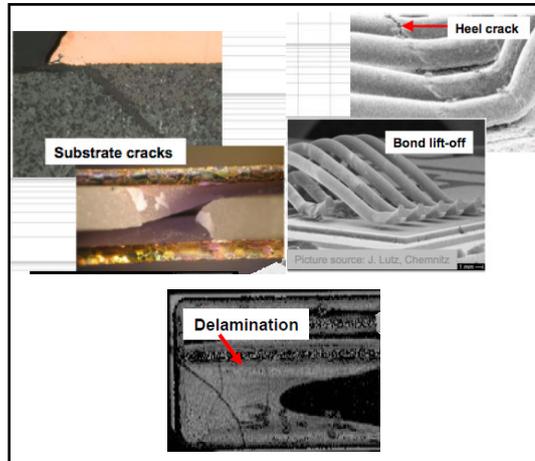


Figura 145 - Esempi di frattura dovuti a stress termico

Dalle immagini precedenti, si deduce che i casi di frattura e di guasto dovuti allo stress termico sono diversi e si manifestano su differenti parti del dispositivo; per queste ragioni sarebbe bene utilizzare materiali con basso coefficiente di espansione termica in modo tale da minimizzare questi fenomeni.

Accanto all'analisi termica è stata dunque svolta l'analisi strutturale, sempre tramite modellazione agli elementi finiti, del dispositivo di potenza in esame.

9.2 MODELLAZIONE STRUTTURALE DI UN DISPOSITIVO DI POTENZA

Il dispositivo analizzato è lo stesso su cui si è svolta l'analisi termica, ovvero il TO220 single die.

Se per l'analisi termica come dati di input era necessario conoscere solo la conducibilità termica, nel caso dell'analisi accoppiata termo-strutturale è indispensabile conoscere la densità, il coefficiente di espansione termica, il

modulo di Young ed il coefficiente di Poisson dei materiali degli elementi di cui interessa conoscere lo stress subito o la deformazione. I dati che si devono inserire per impostare l'analisi strutturale e lanciare il modello, sono specificati per ogni elemento del dispositivo e sono riportati in Tabella 13.

Tabella 13 - Dati di input per l'analisi strutturale

Materiale	Densità [kg/m ³]	Modulo di Young [Pa]	CTE [1/C]	ν
Resina	1830	1.256E+10	1.7E-05	0.34
Solder	11200	2E+10	2.87E-05	0.35
Silicio	2340	1.83E+11	2.5E-06	0.22
Rame	8900	1.15E+11	1.65E-05	0.34

Per quanto riguarda invece il carico ed il vincolo impostato per l'analisi, essi sono:

- *Vincolo:*
 1. Un supporto fisso sulla frame sul retro del dispositivo (Figura 146).
- *Carico:*
 1. Un vincolo di pressione, di valore 5 MPa, impostato sulla faccia superiore della cassa (Figura 147).

Gli output dell'analisi di interesse per questo studio sono:

- Deformazione Totale
- Deformazione sul silicio
- von Mises stress (MPa) sul silicio

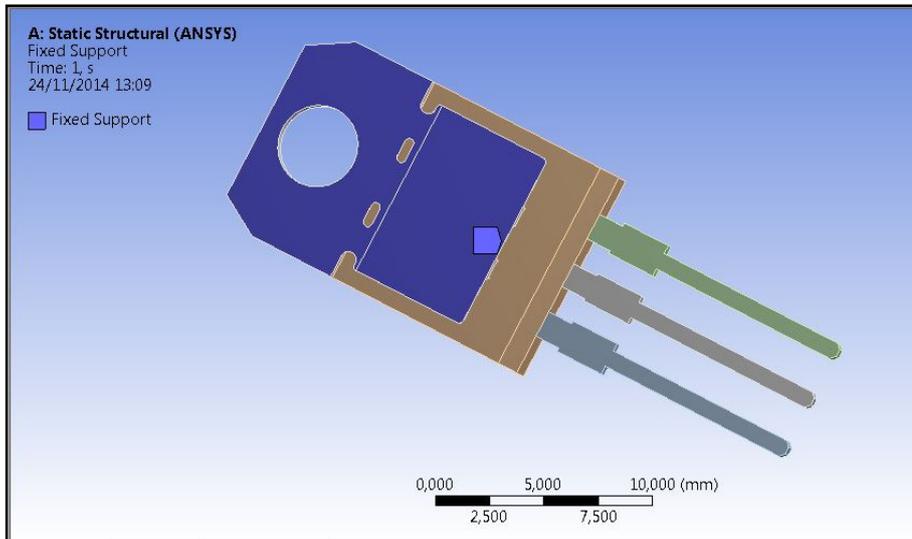


Figura 146 - Vincolo per l'analisi strutturale

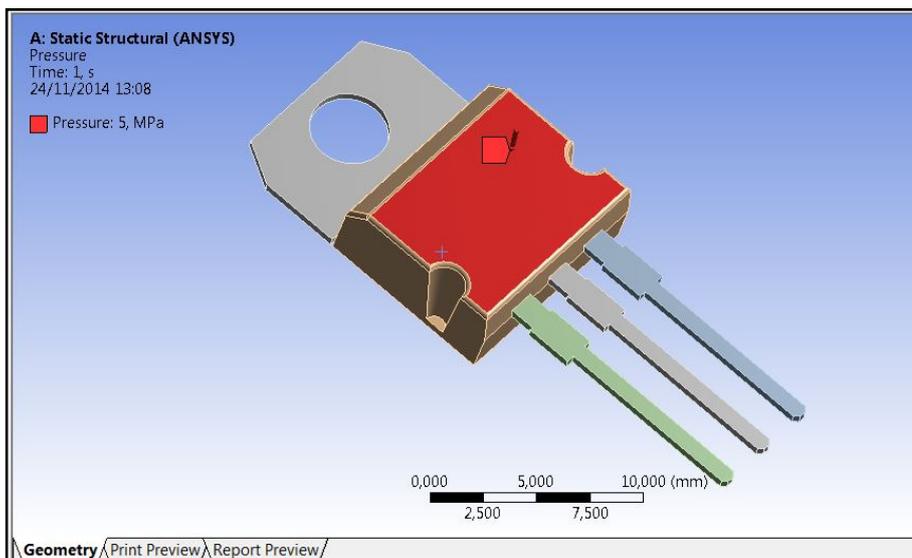


Figura 147 - Carico per l'analisi strutturale

Una volta nota, dalla simulazione, la deformazione totale del silicio e lo stress Von Mises, per capire se il dispositivo in questa configurazione è affidabile e non si deforma fino a rottura, si può confrontare il valore ottenuto con il Tensile Ultimate Strength. Infatti, il carico di rottura a trazione dà un'idea del massimo carico che è capace di reggere un determinato materiale; nel caso del silicio il tensile ultimate strength è 172 MPa. I risultati ottenuti, tramite il software, per il dispositivo TO220, sono riportati sotto. In Figura 148 si riporta la deformazione totale del dispositivo TO220 sottoposto ad una pressione di 5 MPa; esso si deforma di 0,01 mm.

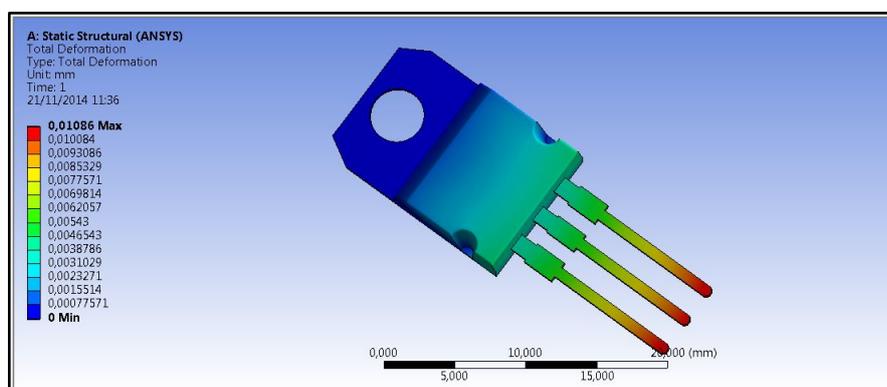


Figura 148 - Deformazione totale del dispositivo TO220

I risultati più interessanti riguardano la deformazione sul silicio e lo stress equivalente von-Mises riportati rispettivamente in Figura 149 ed in Figura 150.

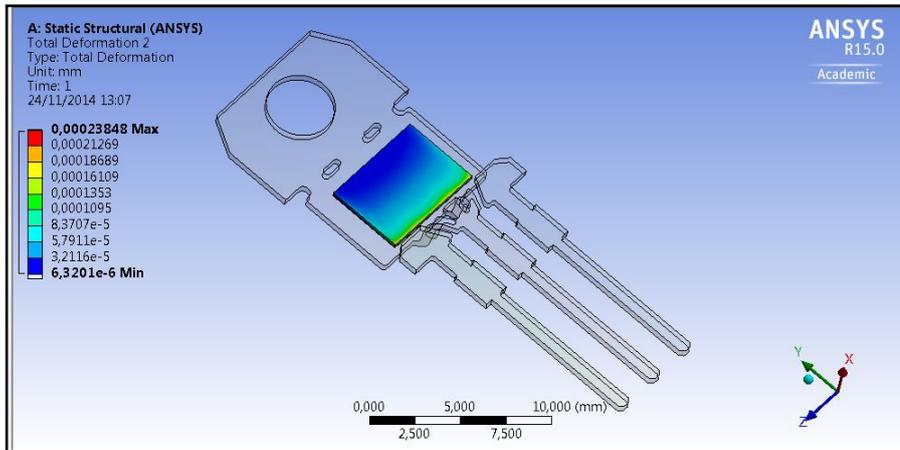


Figura 149 - Deformazione sul silicio del dispositivo TO220

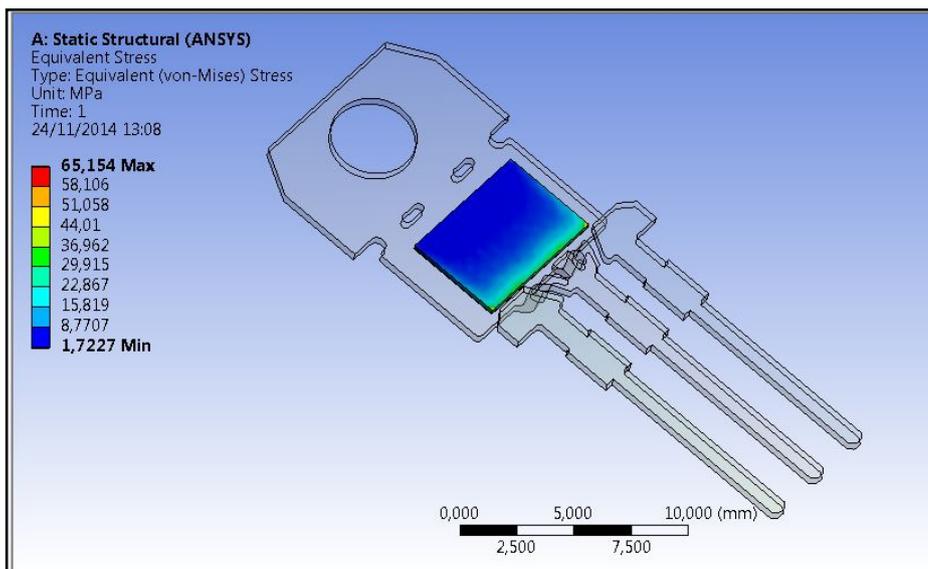


Figura 150 - von Mises stress sul dispositivo T0220

Come si può vedere in figura, il von-Mises stress sul silicio risulta essere pari a 65,154 MPa; si può dunque affermare che, in questa configurazione di geometria e di carichi e vincoli, il silicio non è sottoposto a una deformazione eccessiva e raggiunge un valore di stress molto più basso del massimo carico di trazione che lo portebbe a frattura.

9.3 MODELLAZIONE STRUTTURALE DI UN PACKAGING ALTAMENTE CONDUTTIVO

La modellazione strutturale si è eseguita anche per il packaging altamente conduttivo descritto nel capitolo 7 e costituito da resina e da 30 lastre di grafite pirolitica, per validare la proposta presentata nel seguente lavoro.

Come per il dispositivo single die, anche per questo, è necessario conoscere i valori di densità, E, CTE e ν per sviluppare l'analisi strutturale.(52) L'unica difficoltà si è riscontrata nella ricerca del valore di coefficiente di Poisson per le lastre di grafite pirolitica. Infatti, uno studio (53) riporta come valore di rapporto di Poisson un valore negativo (-0,15) sul piano, valore che non è possibile inserire nel modello perché il software accetta valori di coefficiente di Poisson compresi tra 0 e 0.5. Pertanto, si è considerato il valore di rapporto di Poisson della grafite (0,23), fermo restando la consapevolezza dell'errore commesso nell'implementazione del modello.

In Tabella 14 i dati di input per l'analisi strutturale del packaging altamente conduttivo.

Tabella 14 - Dati di input per l'analisi strutturale per il packaging altamente conduttivo

Materiale	Densità [kg/m ³]	Modulo di Young [Pa]	CTE [1/C]	v
Resina	1830	1.256E+10	1.7E-05	0.34
Solder	11200	2E+10	2.87E-05	0.35
Silicio	2340	1.83E+11	2.5E-06	0.22
Rame	8900	1.15E+11	1.65E-05	0.34
TPG	2250	2e+07	xz=-1E-06 , y=26	0.23

Il vincolo è lo stesso considerato per il TO220, ovvero un supporto fisso sulla frame di rame del dispositivo, mentre il carico è una pressione di 5 MPa sulla faccia laterale del dispositivo. Ciò che ci interessa vedere è la deformazione a cui vengono sottoposte le lastre e il von mises stress sul silicio. In Figura 151 ed in Figura 152 il carico e il vincolo impostati.

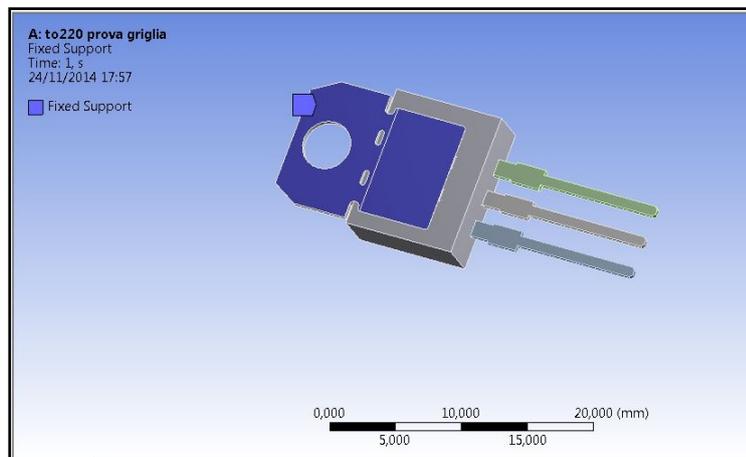


Figura 151 - Vincolo per l'analisi strutturale

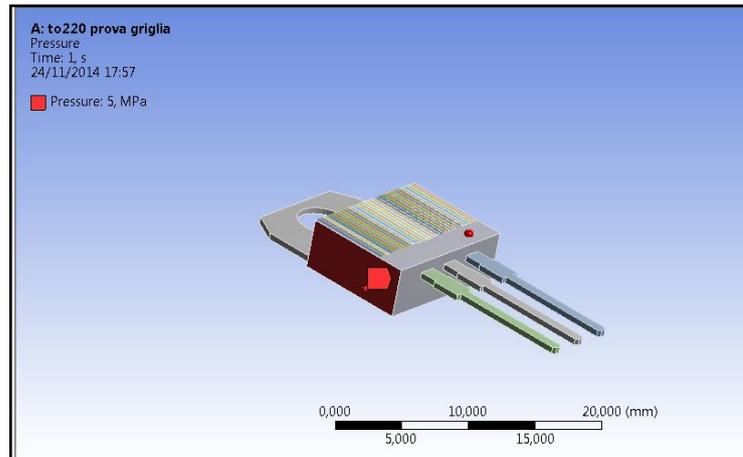


Figura 152 - Carico per l'analisi struttura

In Figura 153 la deformazione sulle lastre che sono ovviamente poste sotto maggiore sforzo dal lato in cui è impostata la pressione; il valore della deformazione è di 0,5 mm che è comunque un valore da attenzionare.

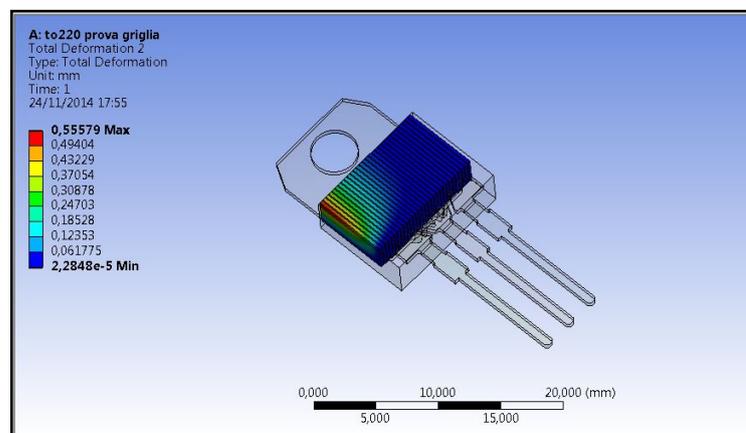


Figura 153 - Deformazione totale per il caso packaging con TPG

In Figura 154 la deformazione sul silicio, che risulta essere di un'ordine di grandezza più piccolo rispetto al caso con cassa standard.

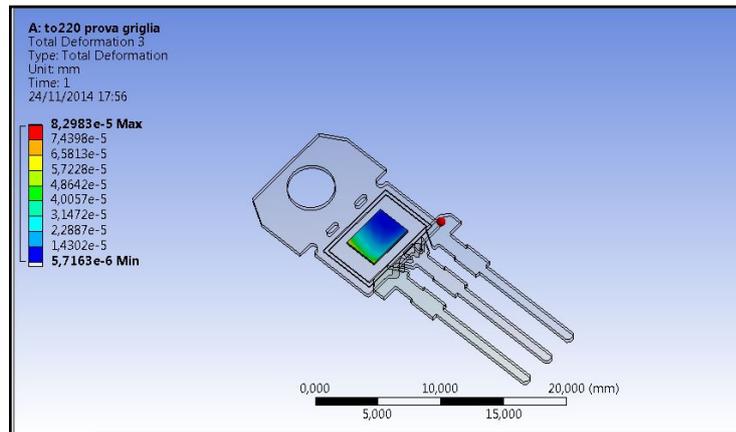


Figura 154 - Deformazione sul silicio per il caso packaging con TPG

Infine, in Figura 155, il von-Mises stress sul silicio. Il valore ottenuto è 17,711 MPa, ben più basso del caso con cassa standard (65 MPa); ciò significa che le lastre fanno maggiormente da protezione. Da notare che questo è dovuto anche al fatto che il CTE della grafite, rispetto a quello della resina utilizzata per la cassa, si avvicina di più a quello del silicio e assicura dunque basso stress tra chip e incapsulante, come anche tra solder e incapsulante. Ricordiamo infatti che l'ideale per un molding compound sarebbe avere il CTE con valori vicini il più possibile a quelli del silicio (2.6 ppm/°C).

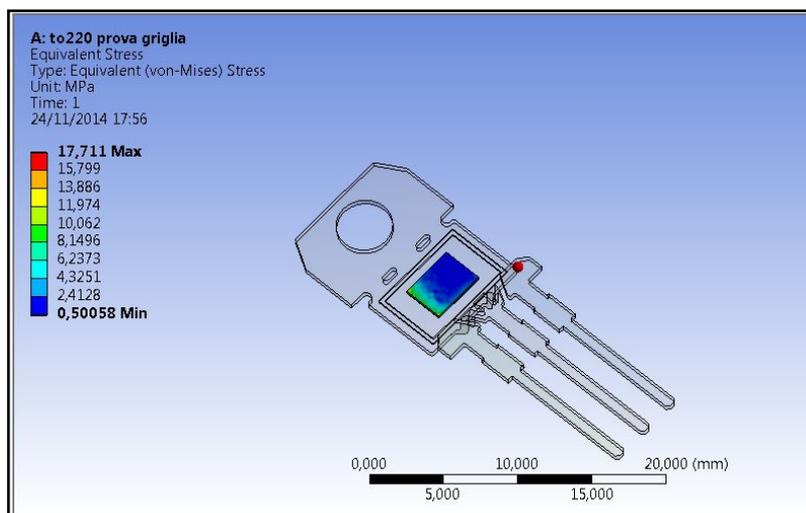


Figura 155 - von-Mises stress sul silicio per il caso packaging con TPG

10. ANALISI ECONOMICA

Per completare il lavoro, è stata eseguita una sommaria analisi economica ai fini di valutare se realmente la proposta presentata abbia una validità dal punto di vista produttivo.

Quello che viene considerato in questa analisi è esclusivamente il processo di molding. Esso ha una durata di 40 - 60 sec, seguito da un post-curing di 8h. I dati necessari all'analisi sono riportati in Tabella 15.

Tabella 15 - Dati per l'analisi economica

	Quantità resina (Kg)	Quantità TPG (Kg)	Costo resina (\$/Kg)	Costo TPG (\$/Kg)	Costo totale resina (\$)	Costo TPG (\$)	Costo totale per 1 dispositivo TO220 (\$)	Costo totale per 200 dispositivi TO220(\$)
Caso Resina	0,0015	-	4	-	0,006	-	0,006	1,2
Caso TPG	0,00075	0,00036	4	2	0,003	0,00072	0,004	0,8

I grammi di resina considerati su un TO220 sono circa 1,5, ma bisogna tenere conto che in realtà è una quantità maggiore, perché parte della resina

rimane e nel pistone. In generale, per un ottimale utilizzo della resina, occorre anche progettare gli stampi in maniera tale da ridurre le quantità di materiale inutilizzato. Invece, i Kg di TPG sono stati calcolati considerando la densità della grafite pirolitica (2250 Kg/m^3) ed il volume occupato dalle 30 lastre ($5.27\text{E}+9 \text{ m}^3$). Inoltre, il costo a Kg dei TPG è stato ricavato dai siti dei vari fornitori che dichiarano un costo pari a 0.9-2 \$/Kg. Il confronto tra le due soluzioni è stato fatto calcolando il costo ottenuto per 200 dispositivi; la configurazione con la sola resina (1,2\$) risulta più costosa rispetto allo scenario resina più TPG (0,8\$). Quello che però va valutato è che nel caso TPG, quello che potrebbe incidere di più è la modalità di produzione rispetto al semplice processo di molding.

Prescindendo dunque dalla modalità di produzione, il costo, le proprietà strutturali insieme alle capacità termiche, potrebbero validare questa soluzione per applicazioni specifiche che richiedono maggiori requisiti strutturali e un rilevante abbassamento della temperatura ottenuto senza la presenza di un dissipatore esterno.

11. CONCLUSIONI

In conclusione, l'obiettivo della tesi era quello di progettare e quindi sviluppare, tramite materiali e tecnologie innovative, nano compositi polimerici da utilizzare come composti di incapsulamento per dispositivi elettronici. Lo scopo della ricerca era riuscire ad ottenere nanocompositi con proprietà confrontabili ai prodotti commerciali o comunque studiare soluzioni innovative da valutare come possibili packaging di dispositivi di potenza. Il lavoro ha inoltre compreso lo studio e l'effetto dei molteplici parametri coinvolti nell'intero sistema tramite lo sviluppo di un modello ad elementi finiti. La valutazione di tutti i fenomeni interessati è stata quindi propedeutica all'ottimizzazione del modello ai fini di ottenere un packaging altamente conduttivo.

Le analisi sperimentali eseguite hanno mostrato alcune difficoltà riguardo la miscelazione di alte frazioni volumetriche anche con sistemi di miscelazione avanzati quali il Three Roll Mill. Inoltre, i composti ottenuti non hanno valori di conducibilità termica abbastanza elevati. Le caratterizzazioni

termiche dei composti per incapsulamento commerciali, dichiarano valori di conducibilità pari a 2 W/mK.

Queste analisi hanno portato a considerare se realmente un aumento di conducibilità termica dei composti di incapsulamento abbia effetto sulla gestione del calore dell'intero dispositivo e quindi se consenta una migliore dissipazione. A questo proposito, accanto all'analisi sperimentale, è stato sviluppato un modello, tramite software ad elementi finiti, per valutare il comportamento dal punto di vista termico di un dispositivo di potenza. L'obiettivo è dunque l'abbattimento della temperatura massima, in modo tale da avere una migliore dissipazione dell'energia sviluppata. Quindi, a parità di superficie di scambio e di densità di potenza, ci si è chiesti se è possibile migliorare la situazione agendo sui materiali presenti nel sistema.

Lasciando invariati gli altri materiali ed aumentando la conducibilità del materiale della cassa di incapsulamento, l'analisi ha mostrato risultati soddisfacenti in termini di temperatura massima raggiunta dal sistema. Infatti, a parità di densità di potenza, di superficie di scambio e di coefficiente di convezione, mettendo una cassa con materiale più conduttivo, la T_{max} diminuisce e la T_{min} aumenta. Questo significa che, a parità ovviamente di calore ceduto, la distribuzione di temperatura è più uniforme, indice del fatto che allo scambio termico partecipa tutto il corpo e tutta la superficie scambia meglio, più uniformemente. Ciò che avviene è che il materiale più conduttivo si riscalda di più e la differenza $T_{max}-T_{min}$ dell'intero corpo si abbassa notevolmente, ottenendo così la diminuzione della temperatura massima che era l'obiettivo che ci si era prefissati.

In questa configurazione, quello che si può dedurre è che si ottengono buoni vantaggi in termini di smaltimento di calore (10°C-15°C), ma che per valori

di λ del materiale della cassa >15 non si hanno benefici effettivi, perché la superficie di scambio termico diventa il parametro dominante.

Questo scenario ha portato all'implementazione di un secondo modello agli elementi finiti per valutare l'effetto di sistemi preformati ad alta conducibilità in matrici non modificate.

Considerato che non è semplice ottenere materiali che abbiano alti valori di conducibilità per i motivi presentati nel capitolo dell'analisi sperimentale, si è pensato di costruire un sistema composito costituito da resina epossidica e lastre altamente conduttive. Il concetto è quello di costruire una griglia che abbia un volume il più possibile maggiore di materiale conduttivo piuttosto che di materiale isolante: il materiale isolante è ovviamente la resina epossidica, il materiale conduttivo sono le lastre. L'idea di avere un sistema preformato ad alta conducibilità, consente di non fare modifiche alla matrice preesistente e di superare così i problemi relativi alla lavorabilità della resina. L'idea è quella di valutare come cambia la temperatura all'aggiunta delle TPG, cioè facendo aumentare a poco a poco il volume di materiale conduttivo, diminuendo di conseguenza il volume di materiale isolante. Il confronto è stato dunque fatto tra il caso di riferimento, ovvero il caso in cui la cassa è costituita dalla sola resina con conducibilità termica pari a $0,8 \text{ W/mK}$ e il caso in cui la cassa è un composito costituito da resina e da 30 lastre di grafite. I valori di temperatura che si ottengono sono rispettivamente $158,88 \text{ }^\circ\text{C}$ nel primo caso e $149,78 \text{ }^\circ\text{C}$ nel secondo caso. Il ΔT risulta dunque essere di $9,1^\circ\text{C}$, che è un risultato piuttosto soddisfacente.

In questo scenario, in cui si è al 50% di volume di materiale conduttivo, si ottiene lo stesso risultato che si potrebbe ottenere nel caso standard con un valore di conducibilità per la resina standard pari a 2 W/mK (144°C). Il

vantaggio di questa soluzione consiste però nell'evitare la lavorabilità della resina e di potere pensare questa configurazione nel caso di incapsulamento di dispositivi con siliconi (0,8 W/mK). L'analisi strutturale ha inoltre mostrato risultati vantaggiosi per il dispositivo con cassa costituita da resina e lastre TPG. Infatti, il von-Mises stress sul silicio (17,711 MPa), risulta ben più basso del caso con cassa standard (65 MPa); ciò significa che le lastre fanno maggiormente da protezione. Da notare che questo è dovuto anche al fatto che il CTE della grafite, rispetto a quello della resina utilizzata per la cassa, si avvicina di più a quello del silicio e assicura dunque basso stress tra chip e incapsulante, come anche tra solder e incapsulante. Ricordiamo infatti che l'ideale per un molding compound sarebbe avere il CTE con valori vicini il più possibile a quelli del silicio (2.6 ppm/°C). Infine, è stata eseguita una sommaria analisi economica ai fini di valutare se realmente la proposta presentata abbia una validità dal punto di vista produttivo. Il confronto tra le due soluzioni è stato fatto calcolando il costo ottenuto per 200 dispositivi; la configurazione con la sola resina (1,2\$) risulta più costosa rispetto allo scenario resina più TPG (0,8\$). Quello che però va valutato è che nel caso TPG, quello che potrebbe incidere di più è la modalità di produzione rispetto al semplice processo di molding.

Prescindendo dunque dalla modalità di produzione, il costo, le proprietà strutturali insieme alle capacità termiche, potrebbero validare questa soluzione per applicazioni specifiche che richiedono maggiori requisiti strutturali e un rilevante abbassamento della temperatura ottenuto senza la presenza di un dissipatore esterno.

Infine, parallelamente, oltre alla realizzazione di resine per incapsulamento, sono stati sviluppati dei thermal interface materials con una tecnica

innovativa. Una nuova tipologia di TIM molto interessante è infatti la realizzazione di un tipo di composito in cui la matrice polimerica è costituita da fibre prodotte tramite electrospinning. La scelta di utilizzare le fibre come filler nasce dal fatto che in primo luogo, con l'elettrospinning è possibile ottenere fibre con diametri nano e micro, in secondo luogo perché è possibile utilizzare un gran numero di materiali da potere spinnare ed in ultimo perché l'elettrospinning è un processo tecnologicamente abbastanza semplice.

Data la rilevanza della tecnica dell'elettrospinning, infatti l'utilizzo delle fibre polimeriche abbassa il bondline thickness e riduce la resistenza termica, si è pensato di sviluppare TIM costituiti da fibre di PES e nanotubi di carbonio. La scelta del PES come polimero da elettrospinnare è dovuta alle sue proprietà di solubilità. Data l'importanza del processo, semplice per tecnologia ma con un sistema complesso di variabili e fattori che vi prendono parte, si è pensato di effettuare un'analisi che consenta di ottenere risultati statisticamente significativi e informazioni valide che permettano di migliorare continuamente il processo. Ai fini dello sviluppo di TIM, è interessante capire variando la concentrazione della soluzione e le condizioni di processo, quali voltaggio, flusso o distanza ago-collettore, come si ottengono fibre con diametri nanometrici o con quale frazione volumetrica di nanoparticelle conduttive si ottengono le migliori fibre in termini di diametro, densità, conducibilità termica e Bondline Thickness, requisiti fondamentali per un Thermal Interface Material. Per questa ragione, la metodologia utilizzata per una caratterizzazione ed ottimizzazione del problema di tipo statistico è stata l'analisi della varianza (ANOVA) insieme alla progettazione ed analisi degli esperimenti (DoE). Considerando come output la densità ed il diametro medio, l'unico fattore che ha influenza su

entrambe le risposte è la concentrazione della soluzione; infatti all'aumentare della concentrazione, il diametro medio della fibra aumenta. Definito quindi che la concentrazione è il parametro guida e dunque il fattore più importante, per capire come controllare il processo, si è impostato un altro piano nel quale, definito come fattore fisso la concentrazione della soluzione e come risposta la densità superficiale, si sono fatti variare potenziale, flusso e distanza tra ago e collettore. L'analisi della varianza mostra che l'unico fattore importante per la densità è il flusso, infatti è chiaro che all'aumentare della portata, si ha un aumento della densità superficiale; mentre per il diametro medio che tutti e tre i fattori presi in considerazione sono rilevanti e che il processo rileva forti non linearità.

12. BIBLIOGRAFIA

1. *Trends of Power Electronic Packaging and Modeling*. **Liu, Irving e Kinzer**. s.l. : 10th Electronics Packaging Technology Conference, 2008.
2. *Silicon Carbide Power Modules for High-Temperature Applications*. **Palmer, Johnson, Fellow**. s.l. : IEEE Transactions on components, packaging and manufacturing technology, 2012.
3. **Tummala, Rao R**. *Fundamentals of Microsystems packaging*. s.l. : McGraw-Hill, 2004.
4. **Chung, Deborah D.L**. *Materials for Electronic Packaging*. s.l. : Butterworth-Heinemann, 1995.
5. **Lu, Daniel e Wong, C.P**. *Materials for Advanced Packaging*. s.l. : Springer, 2009.
6. *Electrically and Thermally Conducting Nanocomposites for Electronic Applications*. **Jones, Chiguma et al**. s.l. : Materials, 2010, Vol. 3, 1478-1496.

7. **Haleh Ardebili, Michael G.Pecht.** *Encapsulation Technologies for Electronic Application*. s.l. : Elsevier, 2009.
8. **Tong, Xingcun Colin.** *Advanced materials for thermal management of electronic packaging*. s.l. : Springer , 2011.
9. **Morris, James E.** *Nanopackaging - Nanotechnologies and Electronics Packaging*. s.l. : Springer, 2008.
10. *Effect of nano-sized particles on the resistivity of polymeric conductive adhesives.* **Hsien-HsuenLeea, Kan-SenChoua, Zong-WhieShihb.** s.l. : International Journal of Adhesion & Adhesives, 2005, Vol. 25, 437-441.
11. *Thermally conductive EMC for Microelectronic Encapsulation.* **Wonho, Kim et al.** 4, s.l. : POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE, 1999, Vol. 39.
12. *Influence of dispersion states of carbon nanotubes on physical properties of epoxy nanocomposites.* **Song, Y. S. e Youn, J. R.** s.l. : Carbon, 2005, Vol. 43, 1378-1385.
13. *Comparative study of thermally conductive fillers for use in a liquid encapsulants for electronic packaging.* **Wong, C. P.** s.l. : IEEE TRANSACTIONS ON ADVANCED PACKAGING, VOL 22, NO.1, 1999.
14. *Methods for predicting the thermal conductivity of composite systems: A Review.* **Progelhof, R. C., Throne, J. L. e Ruetsch, R. R.** 9, s.l. : Polymer Engineering and Science, 1976, Vol. 16.
15. *Polymer/CNTs Composites for Electronic Packaging.* **Bara, A., Bondar, A. M. e Svasta, P. M.** s.l. : Electronics System Integration Technology Conference, 2006.
16. *Characterization of Carbon Nanotubes/Epoxy Composites for Electronics Applications*. **Heimann e Lemm.** s.l. : 30th ISSE, 2007.
17. *Rheological behavior of multiwalled carbon nanotube/polycarbonate composites.* **Potschke, Fornes, Paul.** s.l. : Polymer , 2002, Vol. 43, 3247-3255.

18. *Rheological and Electrical Properties of Multiwalled Carbon Nanotube-Epoxy Composites.* **Petty, Fitzwater, Franchi.**
19. *Processing and characterization of epoxy nanocomposites with Mwcnt's/Cnf's using thinky and 3-roll shear mixing techniques.* **Hosur, Barua, Zainuddin et al.** 2, 247-253, s.l. : Revista Materia, Vol. 15.
20. *The effect of Mixing Methods on the dispersion of carbon nanotubes during the solvent-free processing of multiwalled carbon nanotubes/epoxy composites.* **Gupta, Sydlik, Schnorr, Woo et al.** s.l. : Journal of polymer science, part B: Polymer Phisics, 2013, Vol. 51, 410-420.
21. *Dispersion of Carbon Nanotubes: Mixing, Sonication, Stabilization and Composites Properties.* **Huang, Terentjev.** 4, 275-295, s.l. : Polymers, 2012.
22. *High electrical performance of carbon nanotube/rubber composites with low percolation threshold prepared with a rotation-revolution mixing technique.* **Tsuchiya, Sakai et al.** s.l. : Composites Science and Technology , 2011, Vol. 71, 1098-1104.
23. *The optimum Dispersion of Carbon Nanotubes for Epoxy Nanocomposites: Evolution of the particle size distribution by ultrasonic treatment.* **Fromyr, Hansen, Olsen.** s.l. : Journal of Nanotechnology, 2012.
24. *Dielectric and thermal properties of epoxy/boron nitride nanotube composites.* **Zhi, Bando et al.** 11, 2175-2183, s.l. : Pure Appl. Chem., 2010, Vol. 82.
25. *Study on thermal conductive BN/novolac resin composites.* **Li, Qi, Liu and Cao.** s.l. : Thermochimica Acta, 2011, Vol. 523, 111-115.
- 26 *Enhanced thermal-mechanical properties of polymer composites with hybrid boron nitride nanofillers* Applied Physics A - Materials Science & Processing
- 27 *Boron nitride-MWCNT/epoxy hybrid nanocomposites: Preparation and mechanical properties* Applied Surface Science

- 28 *Thermal conductivity epoxy resin composites filled with boron nitride*
Polymer Advanced Technology
29. *Characterization of some commercial thermally-cured potting materials.*
Baylakoglu, Hillmann, Pecht. s.l. : International IEEE Conference on
the business of electronic product reliability , 2003.
30. **Erdogan Madenci, Ibrahim Guven.** *The finite element method and
applications in Engineering using Ansys.* s.l. : Springer, 2006.
- 31 *Failure modes and FEM analysis of power electronic packaging* Finite
Elements in Analysis and Design
32. *Recent advances of conductive adhesives as a lead-free alternative in
electronic packaging: materials, processing, reliability and applications.*
Li, Wong. s.l. : Materials Science and Engineering, 2006, Vol. 51, 1-35.
33. *Research advances in nano-composite solders.* **Shen, Chan.** s.l. :
Microelectronics Reliability, 2009, Vol. 49, 223-234.
34. *A study of nanoparticles in Sn-Ag based lead free solders.* **Amagai,
Masazumi.** s.l. : Microelectronics Reliability , 2008, Vol. 48, 1-16.
35. *High solder joint reliability with lead free solders.* **Amagai, Toyoda,
Tajima.** s.l. : Electronic Components and Technology Conference, 2003.
36. *Perspectives of Sintering with nano-scale Ag-Particles.* **Knoerr,
Matthias.** s.l. : ECPE Seminar - Innovative Materials for Power
Electronics, 2009.
37. *Characterization of low-temperature sintered nanoscale silver paste for
attaching semiconductor devices.* **Bai, Zhang, Calata and Lu.** s.l. : IEEE
Conference on High density microsystem design and packaging and
component failure analysis , 2005.
- 38 *Study on thermal interface material with carbon nanotubes and carbon
black in high-brightness LED packaging with flip-chip technology*
Electronic Components and Technology Conference 2005

- 39 *The improvement on the properties of silver-containing conductive adhesives by the addition of Carbon Nanotube* Proceeding of HDP'042004
- 40 *Anisotropic Thermal and electrical properties of thin thermal interface layers of graohite nanoplatelet-based composites* 1710Scientific Reports 3
- 41 *Graphene-Multilayer Graphene Nanocomposites as Highly Efficient Thermal Interface Materials* NanoLetters
- 42 *Nanofiber based composites for thermal management*
- 43 *New Nano-thermal interface materials (Nano-TIMs) with SiC Nano-particles used for removal in electronics packaging applications* 2006 IEEE
- 44 *New Nano-Thermal interface material for heat removal in electronics packaging* 2006 IEEE
- 45 *Nano-Thermal Interface Material with CNT Nano-particles for heat dissipation application* 2008 IEEE
46. *Present problems of power module packaging technology.* **Shammas.** s.l. : Microelectronics Reliability, 2003, Vol. 43, 519-527.
47. *Advanced packaging yields higher performance and reliability in power electronics.* **Bayerer, Reinhold.** s.l. : Microelectronics Reliability, 2010, Vol. 50, 1715-1719.
48. *Selected failure mechanisms of modern power modules .* **Ciappa, Mauro.** s.l. : Microelectronics Reliability, 2002, Vol. 42, 653-667.
49. *Design for reliability of power electronics modules.* **Lu, Bailey, Yin.** s.l. : Microelectronics Reliability, 2009, Vol. 49, 1250-1255.
50. *Predicting the reliability of power electronic modules.* **Bailey, Lu, Tilford.** s.l. : 8th International Conference on Electronic Packaging Technology, 2007.

51. *Predictive Reliability, Prognostics and Risk Assessment for Power Modules* . **Bailey, Lu, Yin, Ridout**. s.l. : 5th International Conference on Integrated Power Systems, 2008.
52. **Marchiando, Robert**. Momentive performance materials - Thermal Pyrolytic Graphite and Thermal Management Materials. *www.momentive.com*. [Online] 2008.
53. **Gebhardt, Berry**. *Mechanical Properties of pyrolytic graphite*. s.l. : Space Sciences Laboratory - General Electric , 1964.
54. *Modification of epoxy resin with siloxane containing phenol aralkyl epoxy resin for electronic encapsulation application*. **Ho, Tsung-Han e Wang, Chun-Shan**. s.l. : European Polymer Journal , 2001, Vol. 37, 267-274.
55. *Electrical and thermal conductivities of polymer composites containing nano-sized particles* . **Fan, Su, Qu, Wong**. s.l. : Electronic components and technology conference, 2004.
56. *State of the art of high temperature power electronics - Review*. **Buttay, Planson, Allard, Bergogne et al**. s.l. : Material Science and Engineering B, 20101, Vol. 176, 283-288.
57. *Diluent filler particle size effect for thermal stability of epoxy type resin*. **Lee, Lee, Hong**. s.l. : Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2012, Vol. 18, 635-641.
58. *Flexible Thermoplastic Conductive Adhesive with High Reliability*. **Yang, Yuen, Gao, Ma**. s.l. : Electronic Components and Technology Conference, 2099.
59. *Carbon nanotube coatings for thermal control*. **Sample, Rebello, Saffarian, Osiander**. s.l.: Inter society conference on thermal phenomena, 2004.
60. **Jamnia, Ali**. *Practical guide to the packaging of Electronics*. s.l. : Dekker, 2003.
61. **Yiu-Wing Mai, Zhong-Zhen Yu**. *Polymer Nanocomposites* . s.l. : WP.

62. *The electronic Packaging Handbook*. s.l. : Blackwell.
63. **McKeown, Stephen A.** *Mechanical Analysis of electronic packaging systems*. s.l. : Dekker, 1999.
64. *Thermal Design of electronic equipment* . s.l. : Ralph Remsburg , 2001.
65. **Liu, Yong.** *Power Electronic Packaging* . s.l. : Springer, 2012.
66. **Cengel, Cimbala.** *Fluid Mechanism - Fundamentals and Applications*. s.l. : McGraw Hill.
67. **Giuseppe, Gozzelino.** *Materie plastiche - Struttura, proprietà e applicazioni dei materiali polimerici industriali*. s.l. : HOEPLI.
68. **Cengel, Yunus A.** *Termodinamica e trasmissione del calore*. s.l. : McGraw-Hill.
69. *Improved thermal conductivity in microelectronics encapsulants*. **Procter, Solc.** s.l. : IEEE, 1991.
70. *Characterization of electrical and thermal properties of carbon nanotube/epoxy composites*. **Gardea, Lagoudas.** s.l. : Composites:Part B , 2014, Vol. 56, 611-620.
71. *Electrical and Mechanical Characterization of Carbon Nanotube Filled Conductive Adhesive*. **Li, Lumpp.** s.l. : IEEE, 2006.
72. *Influence of dispersion states of carbon nanotubes on physical properties of epoxy nanocomposites*. **Song, Youn.** s.l. : Carbon , 2005, Vol. 43, 1378-1385.
73. *Review: Polymer Nanocomposites Containing Carbon Nanotubes*. **Moniruzzaman, Winey.** s.l. : Macromolecules , 2006, Vol. 39,5194-5205.
74. *Processing and electrical properties of carbon nanotube-vinyl ester nanocomposites*. **Thostenson, Ziaee, Chou.** s.l. : Composites Science and Technology, 2009, Vol. 69,801-804.

75. *A review on Thermal conductivity of polymer composites using carbon-based fillers: carbon nanotubes and carbon fibers.* **Hong, Park and Shim.** 4, 347-356, s.l. : Carbon Letters, 2010, Vol. 11.
76. *Thermal conductivity of carbon nanotubes and their polymer nanocomposites: a review.* **Han, Fina.** s.l. : Progress in Polymer Science, 2011, Vol. 36, 914-944.
77. *Tailoring the electrical properties of MWCNT/epoxy composites controlling processing conditions.* **Faiella, Antonucci, Buschhorn et al.** s.l. : Composites: Part A, 2012, Vol. 43, 1441-1447.
78. *Electrically conductive composites of polyethylene filled with polyamide particles coated with silver.* **Krupa, Mikova, Novak et al.** s.l. : European Polymer Journal , 2007, Vol. 43, 2401-2413.
79. *Flexible Thermoplastic Conductive Adhesives with High Reliability.* **Ynag, Yuen, Gao, Ma.** s.l. : Electronic Components and Technology Conference, 2009.
80. *Novel lead free Nano-scale Non-Conductive Adhesive (NCA) for ultra-fine pitch interconnect applications.* **Li, Moon, Wong.** s.l. : Electronic Component and Technology Conference, 2006.
81. *Novel Packaging Technology for power modules.* **Pluschke.** s.l. : IEEE, 2012.
82. *Thermal conductivity of molding compound for plastic packaging.* **Bujard, Kuhnlein, Ino and Shiobara.** s.l. : IEEE Transaction on components, packaging and manufacturing technology part A, 1994.
83. *Development of Environmental Friendly (Green), Thermally Enhanced Mold Compound (TEMC) for Advance Packages.* **Tan, Mogi and Yeoh.** s.l. : Symp on Electronic Materials & Packaging, 2000.
84. *Fabrication and characterization of aluminum nitride polymer matrix composites with high thermal conductivity and low dielectric constant for electronic packaging.* **Zhou, Wang et al.** s.l. : Materials Science and Engineering B, 2012, Vol. 177, 892-896.

85. *Preparation and Dielectric Properties of Epoxy-BN and Epoxy-AlN Nanocomposites.* **Kochetov, Andritsch et al.** s.l. : IEEE Electrical Insulation Conference, 2009.
86. *Thermally conducting aluminum nitride polymer-matrix composites.* **Xu, Chung, Mroz.** s.l. : Composites: Part A, 2001, Vol. 32, 1749-1757.
87. *A low-viscosity, highly thermally conductive epoxy molding compound (EMC).* **Bae, Kim, Lee et al.** 1, 78-84, s.l. : Macromolecular Research, 2004, Vol. 12.
88. *Preparation and Characterization of electrically and thermally conductive polymeric nanocomposites.* **Choudhury, Mohanty, Nayak and Aphale.** s.l. : Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, 2012, Vol. 11, 744-756.
89. *Comparative study of thermally conductive fillers for use in liquid encapsulants for electronic packaging.* **C.P.Wong.** s.l. : IEEE Transactions on advanced packagin, 1999.
90. *Enhanced thermal conductivity of polymer composites filled with hybrid filler.* **Lee, Park, Kim et al.** s.l. : Composites: Part A, 2006, Vol. 37, 727-734.
91. *Estimating the engineering properties of electronic packaging materials.* **M.Hurley, James.** s.l. : IEEE Transactions on components and packaging technologies, 2008.
92. *Mixed filler combinations for enhanced thermal conductivity of liquid encapsulants for electronic packaging.* **S.Bollampally, C.P.Wong and Raja.** s.l. : International Symposium on Advanced Packaging Materials, 1999.
93. *Polymer Adhesives and Encapsulants for Microelectronic Applications.* **Richard C. Benson, Dawnielle Farrar and Joseph A. Miragliotta.** 1, s.l. : JOHNS HOPKINS APL TECHNICAL DIGEST, 2008, Vol. 28.
94. **Nazempour, Hassan Ebadi-Dehagani and Monireh.** Thermal Conductivity Nanoparticles filled polymers. *www.intechopen.com.* [Online]

95. **Khan, Muhammad Omer.** Thermally Conductive Polymer Composites for electronic packaging applications. 2012.
96. *Resin for potting and encapsulation in electronics.* **Humphries.** s.l. : OnBoard Technology November 2006, 2006.
97. *Polyamide 11-carbon nanotubes nanocomposites: processing, morphological, and property characterization.* **Lao, Kan, Lam, Chen et al.**
98. *Properties of thermally conductive micro and nano size boron nitride reinforced silicon rubber composites.* **Kemaloglu, Ozkoc, Aytac.** s.l. : Thermochemica Acta, 2010, Vol. 499, 40-47.
99. *Exfoliated hexagonal boron nitride-based polymer nanocomposite with enhanced thermal conductivity for electronic encapsulation.* **Lin, Mcnamara et al.** s.l. : Composites Science and Technology, 2014, Vol. 90, 123-128.
100. *Thermal and Mechanical Properties of Polypropylene/Boron Nitride Composites .* **Cheewawuttipong, Fuoka et al.** s.l. : Energy Procedia, 2013, Vol. 34, 808-817.
101. *Superior thermal conductivity of polymer nanocomposites by using graphene and boron nitride as fillers.* **Liem, Choy.** s.l. : Solid State Communications, 2013, Vol. 163, 41-45.
- 102 Thermal Interface Materials: a brief review of design characteristics and materials www.electronics-cooling.com
- 103 *Characterization of Nanoparticles of lead free solder alloys* Electronics System Integration Technology Conference 2006
- 104 *Investigations of thermal interfaces aging under thermal cycling conditions for power electronics applications* Microelectronics Reliability
- 105 *Characterization of nanostructured thermal interface materials - A review* International Journal of thermal sciences 62

- 106 *Performance and testing of thermal interface materials* Microelectronics Journal
- 107 *Thermal Interface, a key factor in improving lifetime in power electronics* powerguru.org
- 108 *Preparation of thermal interface material filled with micro-nano-composite particles into the polymer* International conference on electronic packaging technology & high density packaging 2012
- 109 *Silver nanoparticle-based thermal interface materials with ultra-low thermal resistance for power electronics applications* Scripta Materialia
- 110 *Thermal interface materials used for improving the efficiency and power handling capability of electronic devices: a review* International Journal of innovative technology & creative engineering 2011
- 111 *Recent progress of thermal interface material research - an overview* EDA Publishing/THERMINIC 2008 2008
- 112 *Investigation of Dielectric Strength of electrospun Nanofiber Based Thermal Interface material* 2007 IEEE
- 113 *Aligned Carbon Nanotube Composite films for thermal management* Advanced Materials
- 114 *Electrospinning of Nanomaterials and Applications Electronic Components and Devices* Journal of Nanoscience and Nanotechnology
- 115 *Integration of electrospun materials in microelectronic and biomedical applications* 2009
- 116 *Manufacturing and characterization of nano silver particles based thermal interface material* 2007 IEEE
- 117 *Utilization of carbon fibers in thermal management of microelectronics* 2005 IEEE
- 118 *Integration of nanofibrous materials in microsystem applications*

- 119 *Preparation and characterization of graphene oxide/poly(vinyl alcohol) composite nanofibers via electrospinning* Journal of applied polymer science
- 120 *Thermal Analysis and Improvement of high power electronic packages* 2011 International Conference on electronic packaging technology & high density packaging
- 121 *Finite Element Modeling of heat transfer and thermal stresses for three-dimensional packaging of power electronics modules*
- 122 *A physics-of-failure based Prognostic Method for power modules* 2008 IEEE
- 123 *Thermal conductivity of boron nitride reinforced polyethylene composites* Materials Research Bulletin
- 124 *Effect of boron nitride nano filler filled epoxy composites for underfill application* Journal of Engineering Science
- 125 *Thermal properties and moisture absorption of nanofillers-filled epoxy composite thin film for electronic application* Polymer advanced technologies
- 126 *Study on insulating thermal conductive BN/HDPE composites* Thermochemica Acta
- 127 *Superior thermal conductivity of polymer nanocomposites by using graphene and boron nitride as fillers* Solid State Communications
128. *Ultra high thermal conductivity polymer composites.* **Chen, Ting.** s.l. : Carbon, 2002, Vol. 40, 359-362.
129. *A new solder matrix nano polymer composite for thermal management applications.* **Zandén, Luo, Ye and Liu.** s.l. : Composites Science and Technology, 2014, Vol. 94, 54-61.
130. *Emerging challenges and materials for thermal management of electronics.* **Moore, Shi.** 4, s.l. : Materials Today, 2014, Vol. 17.

131. *A Physics-of-failure based Prognostic Method for Power Modules*. **Yin, Lu et al.** s.l. : 10th Electronics Packaging Technology Conference, 2008.
132. *Thermal Analysis and Improvement of high power electronics packages*. **Wan, Xu et al.** s.l. : International conference on electronic packaging technology & high density packaging, 2011.
133. *Computer Simulation of Crack Propagation in Power electronics module solder joints*. **Lu, Ridout et al.** s.l. : 2008 International conference on electronic packaging technology & high density packaging , 2008.
134. *Investigations of thermal interfaces aging under thermal cycling conditions for power electronics applications* Microelectronics Reliability
135. *Lifetime analysis of solder joints in high power IGBT modules for increasing the reliability for operation at 150°C*. **Feller, Hartmann, Schneider.** s.l. : Microelectronics Reliability, 2008, Vol. 48, 1161-1166.
136. *Thermal conductivity of carbon nanotubes and graphene in epoxy nanofluids and nanocomposites* Nanoscale Research Letters, Springer