

Tese apresentada à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” como parte dos requisitos para obtenção do Título de Professor Livre Docente em Materiais Elétricos, do Curso de Engenharia Elétrica - Campus de Guaratinguetá.

TEÓFILO MIGUEL DE SOUZA

Análise de Dissipadores de Calor com Filmes de Diamante CVD

Guaratinguetá

Junho de 2008

TEÓFILO MIGUEL DE SOUZA

Análises de Dissipadores de Calor com Filmes de Diamante CVD

Tese de Livre-Docência
apresentada à Banca Examinadora
na Universidade Estadual Paulista,
Campus de Guaratinguetá,
Departamento de Engenharia
Elétrica como parte dos requisitos
para obtenção do Título de Livre
Docente em Materiais Elétricos.

Teófilo Miguel de Souza

Guaratinguetá, SP

Junho de 2008

S729a Souza, Teófilo Miguel de
Análise de dissipadores de calor com filmes de diamante
CVD / Teófilo Miguel de Souza. - Guaratinguetá: [s.n], 2008.
59f.: il.
Bibliografia: f.42-43

Tese (Livre-Docência) – Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, 2008.

1. Materiais Elétricos. I.Título

CDU 621.3-03

Análises de Dissipadores de Calor com Filmes de Diamante CVD

Teófilo Miguel de Souza

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Márcio Abud Marcelino, UNESP GUARATINGUETÁ

Prof. Dr. Samuel Euzédice de Lucena, UNESP GUARATINGUETÁ

Profa. Dra. Kátia Campos de Almeida, UFSC

Prof. Dr. Tales Cléber Pimenta, UNIFEI

Prof. Dr. Jamil Haddad , UNIFEI

UNESP, junho de 2008

DEDICATÓRIA

À minha esposa Denise

Aos Meus Pais, Hilda e Geraldo

À Idalina

Ao Ildelfonso, Marilda, Bruna e Letícia

Ao Anderson e Flávia

À Tia Jacyra.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos

Ao Falconi pelos constantes incentivos e cooperações nas elaborações dos circuitos.

Ao Dr. João Moro, da Universidade São Francisco, por fornecer um filme de diamante CVD com 100 mm de diâmetro.

Ao Eng. Adonis Alvarenga, da Fluke, pelo empréstimo da câmera de imagem térmica.

Aos amigos do DEMAR, EEL-USP, Jorge Rosa, Durval Rodrigues e Paulo Suzuki pelas caracterizações dos materiais dos dissipadores.

Aos amigos da UNESP, Campus Guaratinguetá.

À Zélia pela organização do memorial.

INDICE DE ASSUNTOS

	Página
1. Introdução	01
1.1 Objetivos.....	01
1.1.1 Objetivos Gerais.....	02
1.1.2 Objetivos Específicos.....	02
1.2 Principais Propriedades dos Materiais Usados em Dissipadores de Calor.....	02
1.3 Filme de Diamante CVD.....	05
1.4 Silício Como Material de Deposição do Filme de Diamante CVD.....	07
1.5 Metodologia.....	08
1.5.1 Pesquisa bibliográfica.....	08
1.5.2 Adequação do reator de filamento quente.....	08
1.5.3 Materiais utilizados em dissipadores de calor.....	09
1.5.4 Geometria mais empregada em dissipador de calor.....	09
1.5.5 Análise do dissipador de calor com geometria retangular e/ou redonda para dispositivo semicondutor	09
1.5.6 Cálculos da resistência térmica de radiação e convecção dos dissipadores de calor confeccionados com cobre, alumínio e com filmes de diamante CVD sobre silício.....	09
1.5.7 Desenvolvimento e as análises de dissipadores de calor utilizando os filmes de diamante CVD.....	10
1.5.8 Análises das propriedades térmicas dos filmes de diamante CVD utilizados como dissipadores de calor.....	10
1.6 Estrutura da Tese.....	11
2. Técnicas de Caracterização dos Dissipadores de Calor.....	12
2.1 Microscopia Eletrônica de Varredura.....	12
2.2 Dispersão de Energia de Raios X.....	12
2.3 Difração de Raios X.....	13
2.4 Imagem Termográfica.....	14
3. Cálculos das Resistências Térmicas e os Procedimentos Experimentais.....	16
3.1 Cálculos das Resistências Térmicas.....	17

3.1.1 Cálculos das Resistências Térmicas para os Dissipadores de Calor de Alumínio de Cor Escura.....	20
3.1.2 Cálculos das Resistências Térmicas para os Dissipadores de Calor de Cobre de Cor Escura.....	21
3.1.3 Cálculos das Resistências Térmicas Para o Dissipador de Calor de Filme de Diamante CVD para a Cor Escura Depositados sobre o Silício.....	21
3.2 Procedimentos Experimentais.....	24
4. Resultados das Análises.....	28
4.1 Microscopia Eletrônica de Varredura dos Materiais dos Dissipadores de Calor	28
4.2 Dispersão de Energia de Raios X dos Materiais dos Dissipadores.....	30
4.3 Difração de Raios X dos Materiais dos Dissipadores.....	32
4.4 Imagens Termográficas dos Dissipadores de Calor.....	35
5. Comentários, Conclusões e Trabalhos Futuros.....	40
6. Referências Bibliográficas.....	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
3.1. Fluxograma para o cálculo da resistência térmica do dissipador de calor.....	20
3.2 Reator de filamento quente com os periféricos: fonte de corrente ajustável, medidores de vazão, pressão e temperatura.....	26
3.3. Circuito eletrônico onde conectou-se cada conjunto transistor e dissipador.....	27
3.4. Dissipadores na forma redonda: diamante CVD, cobre e alumínio.....	27
3.5. Dissipadores na forma retangular: diamante CVD, cobre e alumínio.....	27
3.6. Perfis de temperatura utilizando a câmera de imagem termográfica.....	27
4.1. Microscopia eletrônica de varredura sobre a superfície do cobre.....	28
4.2 Microscopia eletrônica de varredura sobre a superfície do alumínio.....	29
4.3 Microscopia eletrônica de varredura sobre a superfície do filme de diamante CVD na forma retangular.....	29
4.4 Microscopia eletrônica de varredura sobre a superfície do filme de diamante CVD na forma redonda.....	30
4.5 EDX sobre a superfície do cobre.....	31
4.6 EDX sobre a superfície do alumínio.....	31
4.7 EDX sobre a superfície do filme de diamante CVD na forma quadrada.....	32
4.8 EDX sobre a superfície do filme de diamante CVD na forma redonda.....	32
4.9 Difratoograma para o cobre utilizado como dissipador de calor.....	33
4.10 Difratoograma para o alumínio usado como dissipador de calor.....	33
4.11 Difratoograma para o filme de diamante CVD sobre o silício na forma retangular utilizado como dissipador de calor.....	34
4.12 Difratoograma para o filme de diamante CVD sobre o silício na forma redonda usado como dissipador de calor.....	34
4.13 Imagem térmica sobre a superfície do transistor TIP 41C NPN sem dissipador de calor.....	35
4.14 Imagem térmica da superfície do cobre usado como dissipador de calor.....	36
4.15 Imagem térmica da superfície do alumínio usado como dissipador de calor.....	36

4.16 Imagem térmica sobre a superfície do filme de diamante CVD retangular utilizado como dissipador de calor.....	38
4.17 Imagem térmica sobre a superfície do filme de diamante CVD redondo utilizado como dissipador de calor.....	38
4.18 Comportamento da temperatura nos dissipadores retangulares.....	38
4.19 Comportamento da temperatura nos dissipadores redondos.....	39

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela	Página
1.1 Propriedades dos materiais usados nos dissipadores de calor.....	05
1.2 Características do filme de diamante CVD.....	07
3.1 Tabela dos coeficientes de emissividade dos materiais dos dissipadores.....	17
3.2 As condutividades térmicas dos materiais utilizados em dissipadores de calor e o filme de diamante CVD.....	18
3.3 As constantes de acordo com o formato e a cor do dissipador de calor.....	18
3.4 Resistências térmicas dos dissipadores de calor.....	23

RELAÇÃO DE ABREVIações

CH ₃	- radical metila composto de um átomo de carbono e três átomos de hidrogênio.
CH ₄	- metano composto de um átomo de carbono e quatro átomos de hidrogênio.
CVD	- do inglês Chemical Vapor Deposition significa deposição química a partir da fase vapor
EDX	- do inglês energy dispersive X-Ray significa dispersão de energia de raios X
GPa	- gigapascal
H ₂	- hidrogênio molecular
SiO ₂	- dióxido de silício
keV	- unidade de energia que significa quiloeltronvolt
MEV	- microscopia eletrônica de varredura
NPN	- transistor em que o semicondutor da base é do tipo p e os semicondutores do coletor e do emissor são do tipo n
U.A.	- unidade arbitrária utilizada no eixo vertical de difração de raios X e EDX

PRINCIPAIS SÍMBOLOS

A	- unidade de corrente elétrica que significa ampère
Al	- alumínio
c	- comprimento do dissipador
C	- carbono
Cu	- cobre
°C	- graus celsius
d	- diâmetro do dissipador
e	- espessura
g	- grama
kg	- quilograma
l	- largura do dissipador
K	- para elemento químico significa potássio
K	- unidade de temperatura kelvin
K_{CR}	- constante relativa ao formato e a cor do dissipador
L	- constante que permite a obtenção da condutividade elétrica a partir da condutividade térmica
mm	- milímetro
Mn	- manganês
n	- número de aletas do dissipador de calor
Pa	- unidade de pressão que significa pascal
q	- escoamento de calor por unidade de tempo e de área
R_{thc}	- resistência térmica de convecção
R_{thr}	- resistência térmica de radiação
R_{th}	- resistência térmica total do dissipador
S	- área de uma aleta do dissipador
S_T	- área total de todas as aletas do dissipador
Si	- silício
T	- temperatura absoluta
Torr	- unidade prática de pressão que significa torricelli
V	- unidade de tensão que significa volt
W	- unidade de potência que significa watt

θ	- ângulo de difração
λ	- condutividade térmica total
λ_r	- condutividade térmica devido ao retículo cristalino
λ_e	- condutividade térmica devido aos elétrons
μ	- micro (10^{-6})
σ	- condutividade elétrica
Ω	- ohms

SUMÁRIO

Dissipadores de calor recobertos com filmes de diamante CVD foram desenvolvidos para acoplar a semicondutores, utilizando-se do Laboratório de Deposição de Filmes de Diamante CVD, na UNESP - Campus de Guaratinguetá e o Laboratório de Diamantes da Universidade São Francisco, em Itatiba, SP. Analisou-se o filme de diamante CVD sobre o silício, para emprego como dissipador de calor, porque o filme de diamante CVD pode ter o valor da condutividade térmica até cinco vezes superior ao do cobre e de dez vezes a do alumínio. Os filmes foram obtidos via deposição através de reator de filamento quente, trabalhando-se com vários filamentos retilíneos em paralelo, resultando assim em um processo que visou obter um filme mais uniforme e com grande área de deposição. Os dados para análises da composição química superficial dos filmes foram obtidos por Difração de Raios-X, Dispersão de Energia de Raios-X e para a verificação da morfologia e espessura do filme foi utilizada a Microscopia Eletrônica de Varredura. Para a verificação do comportamento da temperatura sobre o dissipador com o filme de diamante CVD foi utilizada uma câmera de imagem termográfica, marca Fluke, modelo Ti 40 FT. Foram obtidos filmes de 2 e 10 μm sobre o silício. Estas espessuras ainda não oferecem um desempenho mecânico que o torne auto-sustentado. Do ponto de vista de desempenho térmico as análises mostraram que, mesmo com pequena espessura, o filme de diamante CVD apresentou bom resultado experimental. Os principais desafios de construção para esse dissipador de calor são a obtenção do filme com espessura acima de um mm e a garantia da qualidade do filme com a repetitividade do processo em cujo caso torna-se necessário definir as dimensões do dissipador antes da deposição do filme.

ABSTRACT

Heat sinks recovered with polycrystallized CVD diamond films were developed to apply in semiconductors, using the facilities of the CVD diamond Laboratory - UNESP-Campus de Guaratinguetá and the Diamond Laboratory at the São Francisco University, Itatiba – SP. The analysis of the CVD diamond film deposited on silicon intended for semiconductor heat sinks was due to the fact that the CVD diamond film presents a higher thermic conductivity up to five times in comparison to copper and ten times as compared to aluminum. The films were obtained by the hot filament reactor deposition, in which several straight filaments were placed in parallel so to acquire a uniform film covering a large deposition area. Data for the superficial chemical composition for the film analysis were gathered from the results of the X-ray Diffraction and Energy Dispersive X-ray. The electronic microscopy scanning was employed for the morphological identity and thickness of the film. A Fluke camera model Ti 40 FT specifically intended for thermografic image was employed to register the temperature behavior in the heatsinks deposited with CVD diamond film. Film depositions with 2 and 10 μm were obtained on silicon. Meanwhile, these thickness do not offer a mechanic performance to make them self sustained. From the thermal performance point of view those analysis demonstrated that, although the thin thickness of the CVD diamond film deposition it presented good experimental results. The main challenge in the construction of this kind of heatsink is in building the film thickness higher than 1 mm and the guarantee of the film quality maintaining the process repetitivity. Moreover, once the film has been deposited, it is impractical to try to cut it to any other dimensions in which case it becomes necessary to prepare the material to dimension before the CVD diamond film deposition.

1. INTRODUÇÃO

Neste trabalho é apresentado e analisado o filme de diamante CVD (do inglês *Chemical Vapor Deposition*) sobre o silício como material alternativo para ser utilizado em dissipador de calor.

O cobre é um material com boas características térmicas, mas é um material com custo elevado. O alumínio é um bom material termicamente, sendo um dos materiais mais utilizados na fabricação de dissipadores, de custos compatíveis, mas com propriedades térmicas inferiores às do cobre. Com a finalidade de obter um dissipador mais eficiente foram obtidos e analisados os dados sobre o filme de diamante CVD (Spear, 1994). Apresenta-se assim uma tecnologia no ramo da eletrônica para ser utilizada em dissipadores de calor, com promissoras qualidades térmicas. A seguir, o item 1.1 apresenta os objetivos gerais e específicos do desenvolvimento do trabalho.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo desta proposta foi desenvolver e otimizar o processo de deposição e propriedades dos filmes de diamante CVD para aplicação em dissipadores de calor. Foi realizada uma adequação nas dependências e equipamentos do Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento de Dispositivos com Filmes de Diamante CVD e Novos Materiais, na UNESP, Campus Guaratinguetá, SP. Também houve cooperações laboratoriais e científicas com o Laboratório de Diamantes da Universidade São Francisco, localizada em Itatiba, SP e com a Escola de Engenharia de Lorena, USP onde foram feitas as caracterizações dos materiais usados nos dissipadores de calor.

As análises anteriores, realizadas pelo autor sobre a superfície do silício, apresentaram soluções referentes à aderência dos filmes para temperaturas entre 600 e 900°C (Souza, 1997).

Foi também objeto desse trabalho a continuidade dessa análise, procurando soluções para a minimização das tensões mecânicas sobre o filme, a melhoria da aderência, e, com isto, obter crescimento de filmes auto-sustentados e espessos para o uso direto como dissipadores de calor em circuitos eletrônicos. Deve-se ressaltar que um importante objetivo foi a otimização das condições de crescimento que levou a obtenção de um filme aderente ao silício, sem fragilização do filme e sem alterar as características mecânicas do substrato.

1.1.1 Objetivos Gerais

Os objetivos gerais foram:

- a) Trazer para a UNESP, Campus Guaratinguetá um novo campo de pesquisas do autor a nível internacional e na UNESP, campus Guaratinguetá, na área de dissipadores de calor, sendo estes recobertos com filmes de diamante CVD.
- b) Obter um acervo de conhecimentos importantes para o desenvolvimento de projetos de dissipadores de calor com filmes de diamante CVD.
- c) Deposição de filme de diamante CVD utilizando reator de filamento quente com mistura gasosa constituída principalmente de H_2 e CH_4 .
- d) Otimização dos parâmetros de deposição, como por exemplo, tensão, corrente, mistura dos gases, vazão dos gases, pressão e temperatura do substrato para deposição.
- e) Deposição sobre materiais não-metálicos.
- f) Interação com outros grupos, entre eles, do Departamento de Engenharia de Materiais da UNESP, Campus de Guaratinguetá, Departamento de Materiais da USP, Escola de Engenharia de Lorena, PUC-Paraná, Curitiba e Laboratório de Diamantes da Universidade São Francisco, Itatiba, SP.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos foram:

- a) Analisar os dissipadores de calor com filmes de diamante CVD através de imagens térmicas.
- b) Analisar o desempenho térmico relacionando os resultados obtidos entre os dissipadores de calor usando o cobre e o alumínio e o de filme de diamante CVD sobre o silício.

1.2 PRINCIPAIS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS USADOS EM DISSIPADORES DE CALOR

A condução térmica é o fenômeno segundo o qual o calor é transferido das regiões de alta temperatura para as regiões de baixa temperatura em uma substância. A propriedade que caracteriza essa habilidade de um material em transferir calor é a condutividade térmica. Sendo q o escoamento de calor por unidade de tempo e por unidade de área perpendicular à

direção do escoamento, λ a condutividade térmica e dT/dx o gradiente de temperatura através do meio de condução e as unidades para q e λ são W/m^2 e $W/m.K$, respectivamente, o escoamento de calor por unidade de tempo e por unidade de área, pode ser representado pela equação 1 (Callister, 2006).

$$q = -\lambda(dT/dx) \quad (1)$$

A equação 1 é válida para o escoamento de calor em condições de regime estacionário, isto é, para as situações em que o escoamento de calor não se altera ao longo do tempo. O sinal negativo na expressão indica que a direção do escoamento de calor é aquela da região mais quente para a região mais fria, ou seja, aquela que diminui ao longo do gradiente de temperatura.

O calor é transportado em materiais sólidos tanto através das ondas de vibração do retículo cristalino, denominados *fônons*, como através dos elétrons livres. Sendo grandezas que representam as condutividades térmicas devidas à vibração do retículo cristalino, λ_r , e devido à vibração de elétrons, λ_e . Em geral uma forma ou outra é predominante. A condutividade térmica está associada com cada um desses mecanismos e a condutividade total, λ , é a soma das duas, conforme a equação 2.

$$\lambda = \lambda_r + \lambda_e \quad (2)$$

Um *fônon* designa um *quantum* de vibração em um retículo cristalino rígido. O estudo dos *fônons* é importante para a compreensão de muitas propriedades dos sólidos, como por exemplo, a condução térmica e a propagação do som. Os *fônons* equivalem a um tipo de movimento vibratório, conhecido como modos normais de vibração, em que cada parte de uma rede oscila com a mesma frequência. Estes modos normais são importantes porque qualquer vibração arbitrária de movimentos, de uma determinada rede, pode ser considerada como uma superposição de modos normais com diversas frequências (Callister, 2006).

A energia térmica que está associada aos *fônons* ou às ondas reticulares é transportada na direção do seu movimento. A contribuição de λ_r resulta de um movimento líquido ou global dos *fônons* desde as regiões de alta temperatura para as regiões de baixa temperatura de um corpo, através do gradiente de temperatura.

Os elétrons livres participam na condução térmica eletrônica. Aos elétrons livres em uma região quente da amostra é fornecido um ganho em energia cinética. Eles migram para as

regiões mais frias, onde uma parte desta energia cinética é transferida para os próprios átomos na forma de energia vibracional, como consequência de colisões com os fônons ou outras imperfeições no cristal. A contribuição relativa de λ_e para a condutividade térmica total aumenta com o aumento das concentrações de elétrons livres, uma vez que mais elétrons livres estão disponíveis para participar nesse processo de transferência de calor. Em metais de alta pureza cristalina, o mecanismo eletrônico de transporte de calor é muito mais eficiente do que a contribuição dos fônons, pois os elétrons são os que possuem mais velocidades. Além do mais, os metais são excelentes condutores de calor, pois existem números relativamente grandes de elétrons livres que participam na condução térmica. As condutividades térmicas de vários metais estão na Tabela 1.1. Os valores situam-se na faixa entre 20 e 400W/mK.

Uma vez que os elétrons livres são responsáveis tanto pela condução elétrica quanto pela condução térmica nos metais, os tratamentos teóricos sugerem que as duas condutividades devem estar relacionadas de acordo com a Lei de Wiedemann-Franz representada pela equação 3 (Callister, 2006).

$$L = \lambda / (\sigma T) \quad (3)$$

Onde σ representa a condutividade elétrica, T é a temperatura absoluta e L é uma constante. O valor teórico de L , $2,44 \times 10^{-8} \Omega \cdot W/K^2$, deve ser o mesmo para todos os metais se a energia calorífica for transportada inteiramente através de elétrons livres.

A formação de ligas com os metais pela adição de impurezas resulta em uma redução da condutividade térmica, pela mesma razão que a condutividade elétrica é reduzida. Os átomos de impurezas, especialmente se tiverem em estado sólido, atuam como centros de espalhamento ou dispersão, reduzindo a eficiência do movimento dos elétrons.

Os materiais cerâmicos e não metálicos em sua maioria são isolantes térmicos, uma vez que eles têm um número muito menor de elétrons livres. Desta forma os fônons são os principais responsáveis pela condutividade térmica, onde o valor de λ_e é muito menor que o valor de λ_r . Mas, os fônons não são tão efetivos como os elétrons livres no transporte da energia calorífica, o que é um resultado do espalhamento dos fônons pelas imperfeições da rede cristalina. Os valores da condutividade térmica à temperatura ambiente para os materiais cerâmicos variam entre 2 e 50W/mK. Nas cerâmicas cristalinas o espalhamento das vibrações da rede cristalina se torna muito mais acentuado com o aumento da temperatura. A condutividade começa a aumentar em temperaturas mais elevadas, o que se deve à

transferência de calor por radiação. A porosidade nos materiais cerâmicos pode ter uma influência sobre a condutividade térmica. O aumento do volume dos poros irá resultar em uma redução da condutividade térmica. A transferência de calor através dos poros é lenta e ineficiente. O ar, normalmente presente nos poros, tem uma condutividade térmica muito pequena, com um valor próximo de 0,02W/mK. Na Tabela 1.1 são apresentados as principais propriedades do cobre, alumínio e filme de diamante CVD selecionados para os dissipadores de calor deste trabalho (Davis, 1993; Spear, 1994; Callister, 2006).

Tabela 1.1 Propriedades dos materiais usados nos dissipadores de calor

Material	Filme de diamante CVD	Silício	Cobre	Alumínio
Coefficiente de emissividade	0,02	0,25	0,03	0,05
Condutividade térmica do material $-\lambda$ (W/m °C)	500 - 2000	150	360	210
Coefficiente de dilatação térmica ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	0,80	4,15	4,50	4,90
Densidade (g/cm^3)	3,52	2,33	8,90	2,70

No item 1.3 será apresentada uma descrição sobre o filme de diamante CVD.

1.3 FILME DE DIAMANTE CVD

A forma alotrópica do carbono, com a ligação química covalente simples mais forte da natureza, ou seja, a do diamante, foi descoberta no século XVIII. Entretanto, devido ao fato de ser um produto meta-estável nas condições ambientais, o diamante só foi possível ser sintetizado, a partir da grafite em 1954, submetendo-o a pressões acima de 60.000 atmosferas e a temperaturas acima de 2000 °C. Justamente neste ano, publicou-se o primeiro indício de obtenção de diamante a partir da forma gasosa de alguns compostos orgânicos, isto é, via CVD, com pressão inferior a uma atmosfera e temperatura inferior a 1000 °C (Bachmann, 1991; Spear, 1994).

A pequena taxa de crescimento do filme de diamante CVD permitiu que as técnicas de alta pressão e alta temperatura prosperassem rapidamente, sendo responsável pela maior parte do diamante industrial utilizado no mundo. O sucesso com as técnicas CVD vieram somente no final da década de 1970, através de intensa atividade da escola russa, que descobriu que o átomo de hidrogênio podia funcionar como elemento ativador. A partir da década de 1980 vários grupos de pesquisa se proliferaram em todo o mundo, particularmente no Japão.

O processo de crescimento de filme de diamante CVD consiste na ativação, por vários métodos, de uma mistura de gases composta de pequenas quantidades de hidrocarbonetos diluídas em hidrogênio. A ativação destes gases produz hidrogênio atômico e radical de hidrocarboneto, em especial o radical metila (CH_3), em condições de não equilíbrio termodinâmico. O crescimento da rede cristalina do diamante se faz pela incorporação dos átomos de carbono dos hidrocarbonetos provenientes da fase gasosa. Os processos de ativação mais utilizados são os assistidos por plasma gerado por filamento quente, por microondas, por chama de acetileno e oxigênio e por jato de plasma (Davis, 1993; Spear, 1994).

O filme de diamante CVD é observado como um dos materiais de grande interesse econômico, devido à sua possibilidade de aplicação, principalmente resultante de suas propriedades peculiares, ou seja:

- a) é o material mais duro;
- b) possui coeficiente de atrito muito baixo (equivalente ao do teflon);
- c) possui condutividade térmica muito alta (até cinco vezes superior à do cobre);
- d) é transparente a radiação na região espectral desde o ultravioleta até o infravermelho;
- e) tem alto índice de refração;
- f) é material hospedeiro para vários tipos de dopagens;
- g) é resistente a radiações cósmica, nuclear e ultravioleta;
- h) é quimicamente inerte para temperaturas inferiores a 800°C na presença de oxigênio e a 1550°C sem oxigênio;
- i) é um material biocompatível e de excelente integração óssea.

A Tabela 1.2 apresenta as principais características do filme de diamante CVD (Bachmann, 1991; Davis, 1993; Spear, 1994).

Desta forma, com estas características gerais superiores, o filme de diamante CVD tornou-se objeto de análise para muitas aplicações. O potencial de aplicações do filme de diamante CVD pode atingir muitas áreas tecnológicas. Na área da eletrônica com a obtenção de dissipadores de calor com melhor desempenho térmico.

Tabela 1.2 Características do filme de diamante CVD

Propriedades	Valor	Unidade
Densidade	3520	kg/m ³
Condutividade Térmica	500 – 2000	W/m. °C
Difusão Térmica	2,3 – 9,2	m ² /s
Dureza	1 x 10 ⁴	kg/mm ²
Índice de Refração	2,38	-
Constante Dielétrica	5,7	-
Coefficiente de dilatação térmica	0,8 x 10 ⁻⁶ (20 °C)	/°C
Resistividade	1016	ohms.m
Rigidez Dielétrica	1 x 10 ⁷	V/m
Força de Tensão	290	kg/mm ²
Módulo de Young	1200	GPa
Coefficiente de Poisson	0,2	-
Emissividade	0,02 – 0,03	-

A aplicação na indústria mecânica é devido às possibilidades de uso como ferramentas de corte, como camada anti-atrito para motores automotivos e proteção de superfícies contra desgastes. Na indústria odontológica e médica, como brocas odontológicas e implantes. Na indústria de vidros e cerâmicas, como brocas, materiais abrasivos e ferramentas de corte (Spear, 1994).

Estas aplicações se devem ao fato das obtenções do filme de diamante CVD, com as propriedades do diamante natural, na forma de filmes finos ou espessos em superfícies de diversos materiais e nas mais variadas formas, em áreas que pode variar de 0,1 mm² até centenas de cm².

1.4 SILÍCIO COMO MATERIAL DE DEPOSIÇÃO DO FILME DE DIAMANTE CVD

O silício é um material de valência IV e termicamente estável em temperaturas até 400 K. Excetuando-se o hidrogênio, o silício é o elemento mais encontrado na natureza, correspondendo em peso a aproximadamente ¼ da crosta terrestre. Na forma natural é encontrado nas rochas e nos minérios de quartzo, feldspato e mica. O composto mais característico do silício é o dióxido de silício (SiO₂). O silício não é encontrado livre na

natureza. Ele é obtido através de processo industrial resultando o silício cristalino ou amorfo. O silício amorfo é um pó de cor marrom. O silício cristalino é uma substância de cor negra, frágil, quebradiça, de brilho metálico, quimicamente muito reativo e tem a camada de valência completa com 8 elétrons. A sua estrutura cristalina é cúbica de face centrada tipo diamante. Sua temperatura de fusão é de 1415°C. Tem uma resistividade de 63000 ohms.cm a 20 °C. A condutividade térmica é 150 W/m °C. O coeficiente de dilatação térmica linear é $4,15 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ a 20 °C. Na presença do ar, se recobre com uma fina camada de óxido. Elevando-se a temperatura, o silício reage com diversos elementos como o hidrogênio e o carbono. Na temperatura de deposição do filme de diamante, 800°C, o silício e o filme de diamante CVD apresentam o mesmo coeficiente de dilatação térmica (Davis, 1993).

1.5 METODOLOGIA

Apresenta-se a metodologia para o desenvolvimento da Tese visando à análise detalhada dos dissipadores de calor com filmes de diamante CVD para dispositivos semicondutores comparados com os dissipadores de cobre e alumínio. O autor apresenta a metodologia de acordo com a execução das seguintes atividades:

1.5.1 Pesquisa bibliográfica

Na primeira etapa do desenvolvimento do trabalho foi feita uma pesquisa bibliográfica sobre os materiais usados nos dissipadores de calor (Kays, 1984; Aavid, 1989; Spear, 1994; Ledezma, 1996; Lee, 1997; Incropere, 1998; Kraus, 1999; Rashid, 1999; Callister, 2006; Dissitec, 2007). Também se realizou uma pesquisa sobre o filme de diamante CVD, propriedades térmicas, mecânicas, elétricas e aderência sobre materiais cerâmicos e metálicos (Bachmann, 1991; Davis, 1993; Spear, 1994; Ho, 2000).

1.5.2 Adequação do reator de filamento quente

Foi realizada adequação no reator de filamento quente, dispondo vários filamentos retilíneos em paralelo, visando obter um filme de diamante mais uniforme e com maior área de deposição.

A técnica assistida por filamento quente usa o filamento de tungstênio aquecido a alta temperatura (2000 a 2500°C), situado 6mm acima do substrato. Dentro de uma pequena

câmara em baixa pressão (1500 a 10000Pa) é colocada uma mistura de gás metano diluído em hidrogênio. Podem ser adicionados outros gases na mistura, como por exemplo, o flúor, oxigênio ou o nitrogênio para obter um filme de diamante CVD mais cristalino. Neste método, a taxa de crescimento depende da temperatura do filamento e da distância entre o filamento e o substrato. A taxa de dissociação de hidrogênio aumenta com o aumento da temperatura e cuja concentração influencia no crescimento do filme de diamante CVD (Bachmann, 1991; Spear, 1994).

1.5.3 Materiais utilizados em dissipadores de calor

No desenvolvimento do trabalho usaram-se os materiais mais empregados na confecção de dissipadores de calor e as propriedades térmicas que permitem as suas utilizações como esse dispositivo. Entre os materiais estão o cobre e o alumínio (Lee, 1997; Incropera, 1998; Kraus, 1999).

1.5.4 Geometria mais empregada em dissipador de calor

Foi realizada uma pesquisa das diversas formas geométricas de dissipadores com a finalidade de melhorar a troca de calor da junção de um semicondutor até ao meio ambiente (Kays, 1984; Aavid, 1989; Ledezma, 1996; Lee, 1997; Incropera, 1998; Kraus, 1999).

1.5.5 Análise do dissipador de calor com geometria retangular e/ou redonda para dispositivo semicondutor.

Foram realizadas as análises das geometrias simples para dissipadores de calor utilizados em dispositivos semicondutores, como por exemplo, placas planas verticais (Aavid, 1989; Lee, 1997; Kraus, 1999; Dissitec, 2007).

1.5.6 Cálculos da resistência térmica de radiação e convecção dos dissipadores de calor confeccionados com cobre, alumínio e com filmes de diamante CVD sobre silício.

Foi elaborado um roteiro de cálculo, baseado no cálculo de dissipadores convencionais (Kays, 1984; Aavid, 1989; Lee, 1997; Kraus, 1999; Dissitec, 2007) para os dissipadores de

calor com filmes de diamante CVD. Os parâmetros para comparação foram os dissipadores convencionais, principalmente os confeccionados em alumínio e cobre.

1.5.7 Desenvolvimento e as análises de dissipadores de calor utilizando os filmes de diamante CVD

O desenvolvimento do dissipador de calor com filmes de diamante CVD teve como objetivo final a aplicação em dispositivos semicondutores. Os parâmetros para comparação foram os dissipadores convencionais já mencionados. Foram feitas caracterizações via microscopia eletrônica para verificar a morfologia da superfície do filme de diamante CVD e avaliar a espessura do filme, análise por difração de Raios X e EDX, para verificar a composição química após a deposição do filme (Ohring, 2002).

1.5.8 Análises das propriedades térmicas dos filmes de diamante CVD utilizados como dissipadores de calor

As propriedades térmicas dos filmes de diamante foram obtidas da literatura (Davis, 1993; Spear, 1994; Ho, 2000). O método de análise utilizado foi a imagem termográfica (Fluke, 2008). Com essa análise detectou-se as variações de temperatura sobre a área do dissipador, a partir do dispositivo semicondutor. As ondas térmicas podem se propagar, perante os gradientes de temperatura dentro e sobre a superfície da amostra provocando um aquecimento local do ar sobre a superfície. A fim de constatar a condutividade térmica, foi necessário investigar a zona sobre a qual a onda térmica se deslocou. Esta zona foi maior quando a condutividade térmica foi elevada.

Para poder comparar os resultados do filme de diamante CVD sobre o silício, utilizou-se dos valores obtidos para os materiais bons ou relativamente bons condutores de calor, entre eles, o cobre e o alumínio.

Com relação a condutividade térmica dos dissipadores de calor, com filme de diamante CVD, foram analisados de acordo com a:

a) espessura do filme

b) área do filme

c) condução térmica do filme de diamante CVD em comparação com a dos dissipadores convencionais, com as mesmas dimensões e características geométricas.

1.6 ESTRUTURA DA TESE

A seguir e sob a forma de Capítulos, desenvolve-se a estrutura da Tese.

No Capítulo 1, como introdução, são apresentados os materiais mais utilizados em dissipadores de calor e, em particular, o filme de diamante CVD, o silício, seguindo-se os objetivos, a metodologia e a estrutura da Tese.

O Capítulo 2 apresenta as técnicas de caracterização das amostras através da microscopia eletrônica de varredura, EDX, difração de raios X e imagem termográfica.

No Capítulo 3 são apresentados os procedimentos de cálculos dos dissipadores de calor e a parte experimental utilizando dissipadores de alumínio, de cobre e amostras de silício recobertas com filmes de diamante CVD. Para os experimentos foi desenvolvido um circuito eletrônico de corrente controlada para utilização do transistor de potência (TIP 41C). Foram selecionados transistores de potência com ganho de 60 e fixados convenientemente a cada amostra de dissipador por onde se obtinha a fonte de calor, ajustada a uma temperatura considerada ideal para as análises de 89°C. Em seguida, cada conjunto dissipador mais a fonte de calor foi ativado pelo circuito eletrônico de modo a estabilizar a termodinâmica do conjunto e os resultados foram coletados como descrito no Capítulo 4.

O Capítulo 4 mostra os resultados de acordo com as análises obtidas pelas técnicas de caracterização mencionadas no Capítulo 2.

O Capítulo 5 apresenta os comentários, as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

2. TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO DOS DISSIPADORES DE CALOR

Neste capítulo são apresentadas as técnicas para a caracterização dos materiais empregados em dissipadores de calor, ou seja, a microscopia eletrônica de varredura (MEV), a dispersão de energia de raios X (EDX) (Ohring, 2002), a difração de raios X (Cullity, 2001) e a imagem termográfica (Fluke, 2008).

2.1 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

A principal função da MEV é produzir uma imagem de aparência tridimensional varrendo a superfície de uma amostra com um feixe de elétrons. A forma e o tamanho dos acidentes topográficos na superfície de uma amostra sólida, podem ser visualizados com uma resolução e riqueza de detalhes impossíveis em um microscópio óptico.

Alguns números típicos mostram as vantagens de uma MEV que tem resolução de cerca de 4nm, profundidade de foco cerca de 300 vezes maior do que um microscópio óptico e uma ampliação nominal nos equipamentos de até 100.000 vezes, evidenciando detalhes dos microcristais e contornos de grão com as suas geometrias.

É uma técnica muito usada na análise da morfologia superficial e seção de corte transversal da amostra, permitindo verificar a morfologia do substrato e interface.

As análises de microscopia eletrônica de varredura foram obtidas com um microscópio eletrônico de varredura modelo LEO 1450VP, equipado com o aparelho para análises EDX.

2.2 DISPERSÃO DE ENERGIA DE RAIOS X

O princípio básico desta técnica está fundamentado na própria microscopia eletrônica de varredura onde um elétron primário colide com um átomo da amostra, provocando a excitação. O átomo excitado decai para seu estado original emitindo um fóton de raios X característico. O sinal de raios X pode ser selecionado por energia usando-se um detector de dispersão de energia de raios X. Esta técnica analítica é denominada espectroscopia de dispersão de energia de raios X. Cada elemento tem suas energias de fótons muito características que permitem sua identificação visual através dos picos. Além da emissão das linhas características, os espectros de raios X apresentam um ruído de fundo sempre presente, que limita a detecção de sinais fracos e conseqüentemente a possibilidade de determinação de baixas concentrações de elementos.

A análise pode ser semiquantitativa para elementos com número atômico maior que 10, com limite de detecção a partir de 1000 ppm e apenas qualitativa para números atômicos entre 5 e 10. A análise semiquantitativa é baseada no fato de que a intensidade da radiação emitida é proporcional à fração em peso dos respectivos elementos. Para o cálculo das frações utilizam-se padrões com composição química próxima à da amostra. A sensibilidade é baixa para elementos leves e a análise quantitativa é limitada a superfícies planas e polidas.

Nesta técnica de análise, um ponto crítico é a detecção, que utiliza janela de berílio, bastante fina, mas que mesmo assim absorve grande parte da energia dos raios X, principalmente radiação com energia inferior a 0,7 keV. Para que elementos mais leves pudessem ser detectados foram desenvolvidas janelas ultrafinas, à base de materiais plásticos, que permitem a passagem de radiação correspondente ao carbono com energia ao redor de 0,3keV. As janelas de diamante têm sido usadas, com menor absorção, principalmente na região dos espectros de raios X de menor energia e se obtém melhores resultados para elementos leves.

As análises de EDX foram obtidas com o aparelho para análise EDX acoplado ao microscópio eletrônico de varredura modelo LEO 1450VP.

2.3 DIFRAÇÃO DE RAIOS X

A técnica de difração de raios X analisa qualitativa e quantitativamente informações relacionadas com a estrutura cristalina e as propriedades de materiais. Ela permite a identificação dos materiais (Cullity, 2001). É uma técnica não destrutiva, não requerendo preparação específica da amostra e não é necessário remover o filme do substrato para ser analisado.

O difratograma para um filme de diamante CVD apresenta os picos típicos com ângulo de difração 2θ em $44,829^\circ$, $76,189^\circ$ e $92,242^\circ$. Já o difratograma para o cobre policristalino apresenta os picos típicos com ângulo de difração 2θ em 43° , 51° , 74° e 91° . Para o alumínio o difratograma apresenta os picos típicos com ângulo de difração 2θ em 39° , 43° , 65° , 78° , 82° e 100° (Cullity, 2001; Callister, 2006).

As análises de difração de raios X foram obtidas com o difratômetro SHIMADZU Lab XDR-6000 X-Ray Diffractometer.

2.4 IMAGEM TERMOGRÁFICA

O princípio da imagem termográfica está baseado na medição da distribuição de temperatura superficial do dispositivo ensaiado, quando este estiver sujeito a diversas temperaturas. A medição é realizada pela detecção da radiação térmica ou infravermelha emitida por qualquer corpo ou dispositivo (Fluke, 2008).

A imagem termográfica tem aplicações em muitos setores. Uma das aplicações é a visualização dos pontos quentes em componentes elétricos e eletrônicos.

A imagem termográfica é uma das técnicas de inspeção definida como uma atividade de monitoramento. As técnicas termográficas geralmente consistem na aplicação de tensões térmicas no objeto, medição da distribuição da temperatura da superfície e apresentação da mesma, de tal forma que as anomalias que representam as várias temperaturas possam ser reconhecidas. Há duas situações que podem ser analisadas. A primeira relativa às tensões térmicas causadas diretamente pelo próprio objeto durante a sua operação, como o aquecimento do equipamento elétrico, instalações com fluido quente ou frio e isolamento entre zonas de diferentes temperaturas. A segunda refere-se às tensões térmicas aplicadas durante o ensaio através de aquecimento por radiação ou condução para que se possa obter boa detecção das temperaturas.

Em ambas situações é necessário haver um conhecimento prévio da distribuição da temperatura superficial, como um referencial comparativo com a distribuição real obtida durante o ensaio. O caso mais simples ocorre quando a distribuição da temperatura for uniforme e as discontinuidades se manifestam como áreas quentes, como por exemplo, os componentes com maior resistência elétrica em uma instalação, ou áreas frias com fluxo interno de ar nos materiais.

Há limitações na técnica quando as variações na distribuição das temperaturas podem ser muito pequenas para serem detectadas, as discrepâncias muito pequenas podem ser mascaradas e permanecer sem detecção. A distribuição de temperatura pode ser medida usando-se pinturas sensíveis ao calor que alteram a sua cor de acordo com a temperatura.

A câmera de imagem termográfica permite a coleta da imagem colorida no monitor da distribuição de temperatura da superfície focalizada pela câmera, de acordo com a sua temperatura, conhecida como da imagem termográfica infravermelha. O infravermelho é uma frequência eletromagnética emitida naturalmente por todos os corpos. Neste caso, a distribuição da temperatura superficial será mostrada através de regiões coloridas.

Os melhoramentos nos sistemas da imagem termográfica computadorizada e softwares específicos para o processamento de dados termográficos facilitam a aplicação dessa técnica, na medida que os ensaios necessitavam ser mais preciso.

Na presente Tese a imagem termográfica foi utilizada para detecção das faixas de temperatura nos dissipadores de calor de alumínio, cobre e filmes de diamante CVD sobre o silício. A obtenção da imagem termográfica foi através da câmera de imagem termográfica Fluke, modelo Ti 40 FT.

3. CÁLCULOS DAS RESISTÊNCIAS TÉRMICAS E OS PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Os transistores têm geralmente uma temperatura máxima admissível na junção. Quando um transistor opera em regime contínuo na máxima temperatura admissível, sua vida útil poderá ser reduzida. Para o transistor de silício, o fabricante estipula uma faixa de temperatura a ser respeitada, a fim de não comprometer o funcionamento do componente. Assim há a necessidade de estabilização da temperatura, pois dela depende o funcionamento esperado do transistor. Na maioria dos casos, é de bom procedimento controlar o nível de temperatura do transistor, em especial aqueles que operam a potências razoáveis, associando-o a um dissipador de calor. O dissipador de calor se encarrega de manter o dispositivo a uma temperatura mais baixa, de forma a lhe permitir operação segura.

Os dois tipos de dissipadores de calor ou radiadores de calor são os ativos e os passivos. Os dissipadores de calor ativos têm o desempenho melhorado com o auxílio de fluídos refrigerantes como o ar e a água. Os passivos atuam no dispositivo a ser resfriado devido ao fenômeno da condução térmica e sua refrigeração é conseguida pelos fenômenos da convecção térmica e irradiação térmica. Os seus parâmetros são estabelecidos pela capacidade térmica do material, diferença de temperatura, dimensões, área de contato, de dissipação e cor. Apesar da transferência de calor poder ser conseguida através de condução, convecção ou radiação, o resfriamento por convecção natural ou por ventilação forçada é o comumente utilizado em aplicações industriais. Os dissipadores são escolhidos na indústria com base num parâmetro denominado resistência térmica. A área de contato entre o dispositivo e o dissipador é extremamente importante para minimizar a resistência térmica entre o encapsulamento e o dissipador. As superfícies devem ser chatas, lisas e livres de sujeira, corrosão e oxidações. São aplicadas pastas de silicone para melhorar a capacidade de transferência de calor entre o transistor e o dissipador e para minimizar a formação de óxidos e corrosões (Rashid, 1999).

O dispositivo transistor em geral é colado adequadamente no dissipador para se obter uma melhor pressão de montagem entre as superfícies de contato. Os procedimentos de instalação adequados são usualmente recomendados pelos fabricantes de dispositivos. Em caso de dispositivos do tipo rosca, os torques excessivos na montagem podem causar danos mecânicos à pastilha de silício. O calor produzido pelas perdas em um dispositivo semiconductor pode ser suficiente e efetivamente dissipado para que este possa operar dentro do seu limite superior de temperatura. Para melhorar a dissipação de calor dos dispositivos e

circuitos eletrônicos foi analisado o filme de diamante CVD na aplicação como dissipador de calor.

3.1. CÁLCULOS DAS RESISTÊNCIAS TÉRMICAS

A Tabela 3.1 apresenta os coeficientes de emissividade dos materiais utilizados nos dissipadores (Aavid, 1989; Davis, 1993; Dissitec, 2007; Fluke, 2008). Nota-se que o filme de diamante CVD tem um coeficiente de emissividade menor que dos outros materiais, tornando-o assim um material indicado para aplicação como dissipador de calor.

Tabela 3.1 Tabela dos coeficientes de emissividade dos materiais dos dissipadores.

Material	Emissividade
Alumínio polido	0,05
Alumínio oxidado	0,20
Cobre polido	0,03
Cobre oxidado	0,60
Filme de diamante CVD	0,02
Silício oxidado	0,25

É apresentado um procedimento de cálculo usado na determinação da resistência térmica de dissipadores de calor para dispositivos semicondutores.

A facilidade apresentada por um corpo em transmitir calor denomina-se condutância térmica, e o seu inverso é a resistência térmica.

Sendo R_{thc} a resistência térmica de convecção natural ou livre e R_{thr} a resistência térmica de radiação, a resistência térmica total R_{th} será calculada pela equação 4. As unidades das resistências térmicas são °C/W.

$$R_{th} = R_{thc} + R_{thr} \quad (4)$$

Para o cálculo da resistência térmica do dissipador, precisa-se do formato do dissipador, a espessura da parede e da área da aleta, da posição da aleta se está na posição horizontal ou vertical e da condutividade térmica do material, podendo assim dimensionar o dissipador para a aplicação desejada. O dissipador de placa plana os parâmetros importantes são a espessura

e , em mm, e a área da aleta S , em mm^2 , para o cálculo da resistência térmica (Aavid, 1989; Dissitec, 2007).

Sendo λ a condutividade térmica do material, em $\text{W/m}^\circ\text{C}$, K_{CR} a constante relativa ao formato e cor do dissipador, onde S é a área de cada aleta, S_T é a área total em mm^2 e n é o número total de aletas, o cálculo da R_{thc} será fornecido pela equação 5 e a R_{thr} através da equação 6.

$$R_{thc} = \frac{33.(K_{CR})^{1/4}}{(\lambda.e)^{1/2}} \quad (5)$$

$$R_{thr} = \frac{67,5.10^{-3}.K_{CR}}{S_T} \quad (6)$$

A condutividade térmica do material utilizado em dissipadores, a constante relativa ao formato e cor do dissipador estão relacionadas nas Tabelas 3.2 e 3.3, respectivamente.

De acordo com a Tabela 3.2 o filme de diamante CVD tem o valor de sua condutividade térmica superior a dos outros materiais (Davis, 1993; Kraus, 1999; Callister, 2006), o que mostra a possibilidade dele ser um material para o uso em dissipadores de calor.

Tabela 3.2 As condutividades térmicas dos materiais utilizados em dissipadores de calor e o filme de diamante CVD.

Material	Condutividade térmica do material ($\text{W/m}^\circ\text{C}$)
Filme de diamante CVD	500-2000
Cobre	360
Alumínio	210
Silício	150
Latão	110
Aço	46

Tabela 3.3 As constantes de acordo com o formato e a cor do dissipador de calor.

Posição e cor das aletas	K_{CR}
Horizontais – claro	1,0
Horizontais – escuro	0,5
Verticais – claro	0,85
Verticais - escuro	0,45

Os cálculos de dissipadores de calor foram feitos utilizando o alumínio, o cobre e o filme de diamante CVD juntamente com a base de silício. Os cálculos foram realizados para um dissipador de placa plana, nos formatos redondo e retangular e comparado entre si, para analisar que material tem o melhor desempenho quando utilizado como dissipador de calor.

Com bases nestes cálculos foi feita uma comparação entre os valores, e assim pode-se verificar a aplicação do filme de diamante CVD como dissipador de calor.

Os cálculos seguem o roteiro apresentado na Figura 3.1, através de um fluxograma, que apresenta as etapas para o cálculo da resistência térmica dos dissipadores, de acordo com os materiais empregados e a geometria de construção.

Os cálculos para o cobre e o alumínio foram feitos para um dissipador com placa redonda com diâmetro de 100mm, resultando numa área S de 7854 mm², espessura e de 0,5 mm e utilizando uma aleta na posição vertical na cor escura. Apresentou-se também os cálculos para os dissipadores de placa plana 20mm x 40mm, resultando numa área S de 800 mm², espessura e de 0,5 mm e utilizando uma aleta na posição vertical na cor escura. A razão desse cálculo é devido aos dissipadores geralmente serem confeccionados na forma retangular ou quadrados. Para o filme de diamante CVD sobre o silício, a espessura do filme da placa redonda, com 100mm de diâmetro, foi de 0,5mm para o silício e 10 μ m para o filme de diamante. Para a placa retangular, com dimensões de 20mm x 40mm, o silício teve uma espessura de 0,5mm e o filme de diamante 2 μ m.

Sob o ponto de vista técnico de processo industrial é economicamente dispendioso obter-se lâminas de cobre e alumínio de espessuras na ordem de 10 μ m. Com a taxa típica de crescimento de 1 μ m por hora, para a deposição do filme de diamante CVD, o tempo total será de 1000 horas ou 42 dias para obter um filme auto-sustentado com 1(mm) mm de espessura utilizando os reatores de filamento quente. Estão ainda em desenvolvimento procedimentos de modo a obter uma alta taxa de crescimento de filmes de diamante CVD (Amaral, 2006; Miyatake, 2007). Uma taxa interessante está em torno de 100 μ m por hora. Foram efetuados cálculos da resistência térmica com todas as dimensões geométricas mencionadas para efeito de comparação. Para a espessura de 0,5mm o filme deve permanecer sobre o silício devido as necessidades de resistência mecânica.

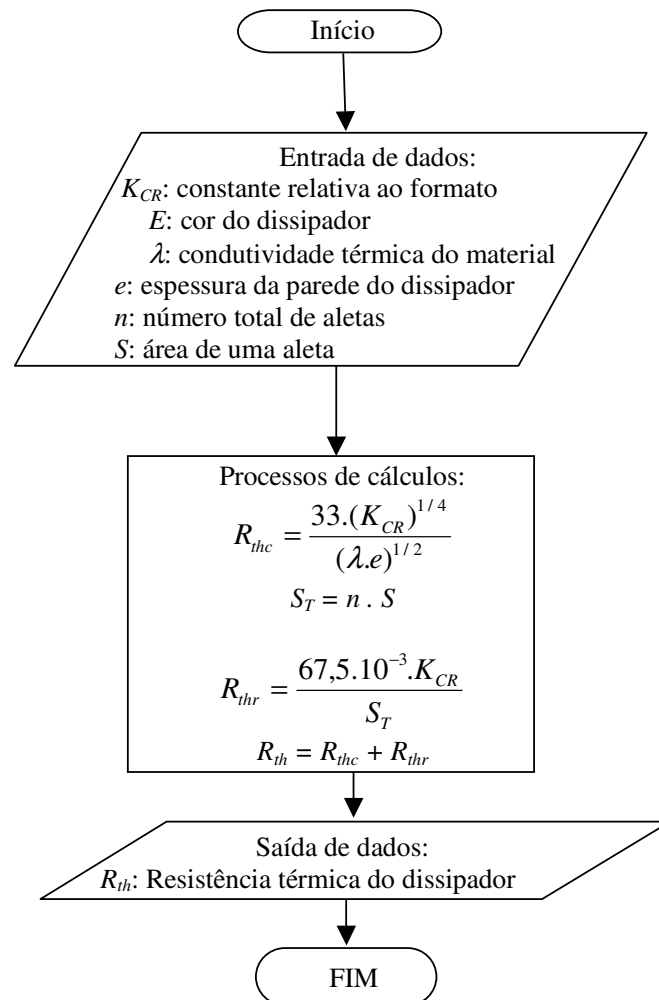


Figura 3.1. Fluxograma para o cálculo da resistência térmica do dissipador de calor.

3.1.1 Cálculos das Resistências Térmicas para os Dissipadores de Calor de Alumínio de Cor Escura

Primeiramente é apresentado o cálculo do dissipador de alumínio de cor escura, de acordo com a área, a espessura e utilizando uma aleta na posição vertical com convecção natural. Os cálculos para o alumínio foram feitos para um dissipador com placa redonda com diâmetro de 100mm, resultando numa área S de 7854 mm², espessura e de 0,5 mm e utilizando uma aleta na posição vertical na cor escura. O K_{CR} do alumínio na cor escura, com a posição vertical das aletas é 0,45 e a condutividade térmica é 210,0W/m°C. O valor calculado da resistência térmica de convecção R_{thc} foi 2,638 °C/W, a resistência térmica de

radiação, R_{thr} , foi de $3,867 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C/W}$ resultando numa resistência térmica total, R_{th} , de $2,638 \text{ }^\circ\text{C/W}$.

Apresentam-se também os cálculos para os dissipadores de placa plana $20 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$, resultando numa área S de 800 mm^2 , espessura e de $0,5 \text{ mm}$ e utilizando uma aleta na posição vertical. O valor calculado da resistência térmica de convecção, R_{thc} , foi $2,638 \text{ }^\circ\text{C/W}$, a resistência térmica de radiação, R_{thr} , foi de $3,797 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C/W}$, resultando numa resistência térmica total, R_{th} , de $2,638 \text{ }^\circ\text{C/W}$. Os cálculos, para a forma redonda e quadrada, apresentaram os mesmos resultados porque a contribuição maior para a resistência térmica é devido a espessura que é a mesma para as duas formas, sendo o valor da resistência térmica de radiação desprezível.

3.1.2 Cálculos das Resistências Térmicas para os Dissipadores de Calor de Cobre na Cor Escura

Utilizaram-se as mesmas dimensões e a posição vertical da aleta para o cobre na cor escura. O valor calculado da resistência térmica de convecção, R_{thc} , foi $2,014 \text{ }^\circ\text{C/W}$, a resistência térmica de radiação, R_{thr} , foi de $3,867 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C/W}$ resultando numa resistência térmica total, R_{th} , de $2,014 \text{ }^\circ\text{C/W}$.

Apresentam-se também os cálculos para os dissipadores de placa plana $20 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$, resultando numa área S de 800 mm^2 , espessura e de $0,5 \text{ mm}$ e utilizando uma aleta na posição vertical na cor escura. O valor calculado da resistência térmica de convecção, R_{thc} , foi $2,014 \text{ }^\circ\text{C/W}$, a resistência térmica de radiação, R_{thr} , foi de $3,797 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C/W}$ resultando numa resistência térmica total, R_{th} , de $2,014 \text{ }^\circ\text{C/W}$. Também os cálculos, para a forma redonda e quadrada, apresentaram os mesmos resultados porque a contribuição maior para a resistência térmica é devido à espessura que é a mesma para as duas formas, sendo o valor da resistência térmica de radiação desprezível.

3.1.3 Cálculos das Resistências Térmicas Para o Dissipador de Calor de Filme de Diamante CVD para a Cor Escura Depositados sobre o Silício.

Utilizando os mesmos procedimentos de cálculos, as dimensões e o valor da condutividade térmica, os cálculos foram feitos para uma placa redonda de 100 mm de diâmetro, sendo assim uma área, S , de 7854 mm^2 , espessura do filme de diamante CVD de $0,01 \text{ mm}$ e uma aleta. O valor calculado, para a área redonda, da resistência térmica de

convecção, R_{thc} , foi 6,044 °C/W, a resistência térmica de radiação, R_{thr} , foi de $3,867 \cdot 10^{-6}$ °C/W resultando numa resistência térmica total, R_{th} , de 6,044 °C/W.

Para a placa de silício, onde o filme foi depositado, utilizou-se o mesmo procedimento de cálculo, as dimensões com o valor da condutividade térmica do silício de 150W/m°C. Os cálculos foram feitos para uma placa redonda de 100mm de diâmetro, resultando numa área S de 7854 mm², espessura da placa de 0,5 mm e uma aleta. O valor calculado para o silício, com a área redonda, da resistência térmica de convecção, R_{thc} , foi 3,121 °C/W, a resistência térmica de radiação, R_{thr} , foi de $3,867 \cdot 10^{-6}$ °C/W, resultando numa resistência térmica total, R_{th} , de 3,121 °C/W. Assim a resistência térmica, em paralelo, para a forma plana redonda resultante do filme de diamante CVD sobre o silício foi 2,058 °C/W.

Também são apresentados os cálculos para os dissipadores de placa retangular plana 20 mm x 40 mm, resultando numa área S de 800 mm², espessura e de 0,002 mm e utilizando uma aleta na posição vertical na cor escura. O valor calculado da resistência térmica de convecção, R_{thc} , foi 13,514 °C/W, a resistência térmica de radiação, R_{thr} , foi de $3,797 \cdot 10^{-5}$ °C/W resultando numa resistência térmica total, R_{th} , de 13,514 °C/W.

Para a placa de silício retangular onde o filme foi depositado utilizou-se o mesmo procedimento de cálculo com o valor da condutividade térmica do silício de 150W/m°C. Os cálculos foram feitos para uma placa retangular plana com 20 mm x 40 mm, resultando numa área S de 800 mm², espessura e de 0,5 mm e utilizando uma aleta na posição vertical na cor escura. O valor calculado da resistência térmica de convecção, R_{thc} , foi 3,121 °C/W, a resistência térmica de radiação, R_{thr} , foi de $3,797 \cdot 10^{-5}$ °C/W, resultando numa resistência térmica total, R_{th} , de 3,121 °C/W. Assim a resistência térmica, em paralelo, para a forma plana retangular resultante do filme de diamante CVD sobre o silício foi 2,535 °C/W.

As resistências térmicas, para os materiais usados como dissipadores de calor de placa plana e cor escura, com a aleta na posição vertical, são apresentadas na Tabela 3.4. Observa-se que, a resistência térmica para o filme de diamante CVD, com espessura de 1 mm e sem o silício, é 2,35 vezes menor que a do cobre e 3,09 vezes menor que a do alumínio. Quanto às dimensões geométricas a espessura do cobre será de 5,55 mm e a do alumínio 9,52 mm.

A aplicação de dissipadores de calor a componentes e circuitos em geral tornou-se tão importante para o desempenho dos produtos eletrônicos, que hoje é tratada como uma técnica em si mesma, e recebeu o nome de gerenciamento térmico. Os circuitos de potência estão se tornando muito compactos devido a extraordinários avanços nos encapsulamentos. Os engenheiros dos fabricantes de semicondutores se utilizam novas topologias, materiais e

configurações de montagem que fazem com que o calor gerado no semicondutor seja levado rapidamente para o exterior (Rashid, 1999).

Tabela 3.4 Resistências térmicas dos dissipadores de calor

Material	Filme de diamante CVD sobre o silício	Cobre	Alumínio
Formato	redondo	redondo	redondo
Dimensões	$d = 100 \text{ mm}$ $e(\text{silício}) = 0,5 \text{ mm}$ Espessura do filme de $10\mu\text{m}$ sobre o Si	$d = 100 \text{ mm}$ $e = 0,5 \text{ mm}$	$d = 100 \text{ mm}$ $e = 0,5 \text{ mm}$
R_{thc} na cor escura ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)	2,058	2,014	2,638
R_{thr} na cor escura ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)	$3,867 \times 10^{-6}$	$3,867 \times 10^{-6}$	$3,867 \times 10^{-6}$
R_{th} na cor escura ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)	2,058	2,014	2,638
	Espessura do filme de $1,0 \text{ mm}$ sem o Si		
R_{th} na cor escura ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)	0,604	1,424	1,865
Razão entre os valores das resistências térmicas dos materiais e do filme de diamante CVD	1,00	2,35	3,09
Espessura da aleta em mm para ter a mesma dissipação térmica do filme de diamante CVD com espessura de $1,00 \text{ mm}$	1,00	5,55	9,52
Formato	Retangular	Retangular	Retangular
Dimensões	$c = 40\text{mm}$ $l = 20\text{mm}$ $e(\text{silício}) = 0,5\text{mm}$ Espessura do filme de $2\mu\text{m}$ sobre o Si	$c = 40\text{mm}$ $l = 20\text{mm}$ $e = 0,5\text{mm}$	$c = 40\text{mm}$ $l = 20\text{mm}$ $e = 0,5\text{mm}$
R_{thc} na cor escura ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)	2,535	2,014	2,638
R_{thr} na cor escura ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)	$1,898 \times 10^{-5}$	$3,797 \times 10^{-5}$	$3,797 \times 10^{-5}$
R_{th} na cor escura ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)	2,535	2,014	2,638

Do encapsulamento para o dissipador, e daí para o ar circundante, o desafio é do projetista do produto. E um dos pontos mais críticos é a interface entre o componente e o dissipador de calor. As duas superfícies apresentam micro imperfeições e defeitos macroscópicos como concavidade, convexidade e torções. Esses vãos são preenchidos com ar, aumentando drasticamente a impedância térmica entre o componente e o dissipador.

Com a possibilidade de se fabricar dissipadores de calor com filmes de diamante CVD, implementa-se uma nova técnica, com grandes possibilidades de diminuir o tamanho do dispositivo acoplado ao circuito e com uma melhor eficiência na dissipação.

O gerenciamento térmico de circuitos eletrônicos permite que se desenvolva dispositivo cada vez mais eficiente para a dissipação térmica. Assim, os dissipadores com filmes de diamante CVD estão se apresentando como uma alternativa de grande viabilidade de aplicação.

3.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

A primeira parte dos experimentos consistiu em confeccionar os dissipadores de calor na cor preta utilizando o cobre, o alumínio e o filme de diamante CVD sobre o silício, com as dimensões apresentadas nos cálculos do item 3.1.

Para a obtenção do filme de diamante depositou-se o mesmo sobre o silício. O silício foi selecionado devido permitir a deposição do filme, ter estrutura cristalina semelhante e coeficiente de dilatação térmica a temperatura de deposição próxima do valor do filme de diamante CVD.

Para a obtenção do filme de diamante CVD sobre o silício foi utilizado o reator de filamento de tungstênio quente, com configuração para vários filamentos retilíneos em paralelo, visando obter um filme de diamante mais uniforme e com maior área de deposição. Este sistema é composto do reator propriamente dito, que é a parte mecânica (câmara) e o sistema de controle de temperatura, de vazão dos gases, bomba mecânica para vácuo, medidor de pressão absoluto, válvulas solenóide, medidores de vazão para gases e fonte estabilizada de corrente e tensão.

O método utilizado para efetuar a deposição dos filmes de diamante CVD foi a técnica assistida por filamento quente (Davis, 1993; Souza, 1997, Amaral, 2006). A Figura 3.2 apresenta um reator e seus periféricos, localizado no Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento de Dispositivos com Diamante CVD e Novos Materiais na UNESP,

Campus Guaratinguetá. Os filmes de diamante com superfícies maiores foram depositados no Laboratório de Diamantes da Universidade São Francisco, Itatiba, em um reator semelhante, mas de dimensões adequadas para obter filmes de diamante CVD em grandes áreas.

A deposição do filme consistiu em admitir os gases precursores H_2 e CH_4 com vazão controlada através do rotâmetro. A pressão interna do reator, medida com um medidor de pressão absoluta foi mantida constante por uma bomba de vácuo mecânica e uma válvula agulha. A temperatura do substrato foi medida fazendo uso de um termopar do tipo K e um conversor digital para leitura dos valores. O substrato foi colocado distante 6 mm do filamento que sempre estava aquecido a uma temperatura acima de $2200^\circ C$ e, para evitar aquecimento elevado dos eletrodos do filamento eles foram refrigerados a água. Os suportes para o silício foram também refrigerados a água e onde houve a passagem da corrente elétrica proporcionando sempre uma temperatura controlada para o crescimento do filme do diamante CVD sobre o silício.

As condições típicas de crescimento dos filmes de diamante foram as seguintes:

- a) substrato: amostras de silício, na forma redonda, com 100 mm de diâmetro x 0,5 mm de espessura e retangular com as dimensões de 40 mm x 20 mm x 0,5 mm;
- b) preparação da superfície do silício: lixas com granulometria 1200;
- c) gases da mistura: CH_4 (1,5% em volume) + H_2 (98,5% em volume);
- d) vazão total de gases: 100 sccm (standard centímetro cúbico por minuto);
- e) pressão total dentro do reator: 6650 Pa (50 Torr);
- f) filamentos: fios de tungstênio de diâmetro 0,15 mm dispostos em paralelo, com densidade de corrente por fio de $453 A/mm^2$, onde cada filamento permite a deposição de um filme de 8 mm de largura e comprimento de acordo com a distância entre os eletrodos de corrente;
- g) Relação de potência mínima dissipada por área lateral, de cada filamento, para obtenção do filme de diamante CVD: $4,8W/mm^2$;
- h) temperatura do filamento: acima de $2200^\circ C$;
- i) distância entre os filamentos e o substrato: 6 mm;
- j) temperatura da superfície do silício: $800^\circ C$;
- l) tempo de deposição típico: uma hora para cada um micron de espessura do filme de diamante CVD.



Figura 3.2. Reator de filamento quente com os periféricos: fonte de corrente ajustável, medidores de vazão, pressão e temperatura.

Para obtenção dos perfis de temperatura, sobre os dissipadores, foi desenvolvido um circuito eletrônico de corrente controlada para conectar o transistor de potência NPN (TIP 41C) com ganho típico de 60, mostrado na Figura 3.3. Para cada dissipador aplicou-se um transistor de potência como gerador de calor, por onde se poderia obter de forma controlada, uma temperatura considerada ideal para as análises de 89°C . Em seguida, cada conjunto dissipador e fonte de calor foi energizado pelo circuito eletrônico pelo tempo a estabilizar a termodinâmica do conjunto. Os experimentos foram realizados com dois tipos de geometria de placas planas com 0,5 mm de espessura. A redonda com 100 mm de diâmetro, conforme Figura 3.4, e a retangular de 40 mm x 20 mm, mostrada na Figura 3.5. Da esquerda para a direita encontra-se os dissipadores com filme de diamante CVD, cobre e alumínio.

Estabeleceu-se 89°C como temperatura de referência, inicialmente imposta diretamente sobre um transistor sem dissipador de calor. Uma vez obtida esta condição pré-estabelecida, substituiu-se o transistor sem dissipador pelo conjunto formado pelo dissipador e o transistor. Deste modo foram avaliados os perfis de temperatura de cada conjunto, utilizando a câmera de imagem termográfica, conforme a Figura 3.6.



Figura 3.3. Circuito eletrônico onde conectou-se cada conjunto transistor e dissipador.



Figura 3.4. Dissipadores na forma redonda: diamante CVD, cobre e alumínio



Figura 3.5. Dissipadores na forma retangular: diamante CVD, cobre e alumínio.



Figura 3.6. Perfis de temperatura utilizando a câmera de imagem termográfica.

4. RESULTADOS DAS ANÁLISES

Nos itens 4.1 a 4.4 são apresentados os resultados obtidos com as técnicas de caracterizações, ou seja, a microscopia eletrônica de varredura, a EDX, a difração de raios X e a imagem termográfica.

4.1 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DOS MATERIAIS DOS DISSIPADORES DE CALOR

Neste item são apresentadas as microscopias eletrônicas de varredura sobre o cobre, o alumínio e o filme de diamante CVD sobre o silício.

A Figura 4.1 apresenta a microscopia sobre a superfície do cobre com a sua superfície na cor preta. Foram feitas amostras com o formato plano retangular nas dimensões de 40 mm x 20 mm e redonda com 100 mm de diâmetro. As amostras para a forma retangular e redonda foram do mesmo material. Observa-se que a morfologia da superfície não é homogênea, tem um aspecto de encruamento e apresenta pouca rugosidade.

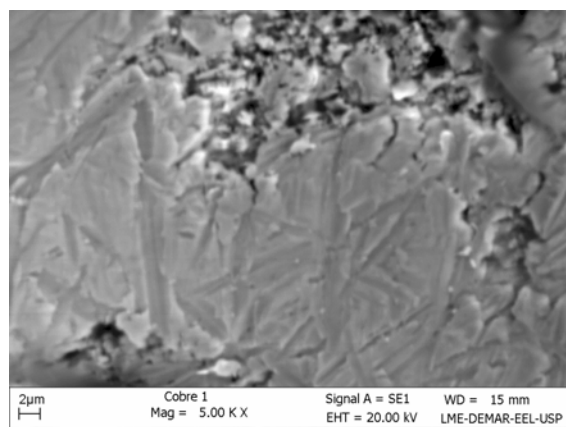


Figura 4.1. Microscopia eletrônica de varredura sobre a superfície do cobre.

A Figura 4.2 apresenta a microscopia sobre a superfície do alumínio com a sua superfície na cor preta. Foram feitas amostras com o formato plano retangular nas dimensões de 20mm por 40mm e redonda com 100mm de diâmetro. As amostras para a forma retangular e redonda são do mesmo material. Observa-se que a morfologia da superfície não é homogênea e apresenta pouca rugosidade.

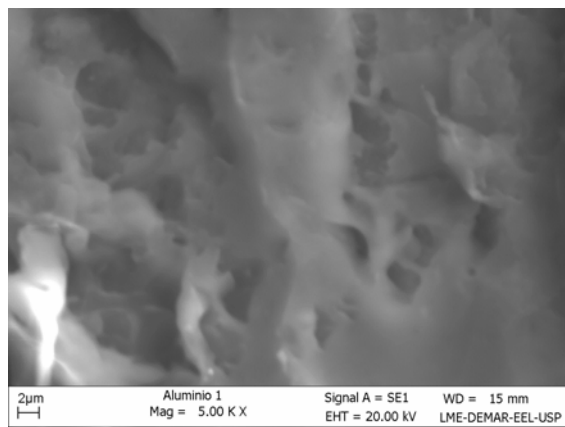


Figura 4.2. Microscopia eletrônica de varredura sobre a superfície do alumínio.

A Figura 4.3 apresenta a microscopia sobre a superfície do filme de diamante CVD com espessura de 2 µm, na forma retangular plana nas dimensões de 20mm por 40mm, com a sua superfície na cor cinza escuro. Observa-se que a morfologia é em geral uniforme, homogênea e com pouca rugosidade. Neste caso a condução térmica é melhor devido a uniformidade, entretanto a pequena espessura do filme não favorece a mesma.

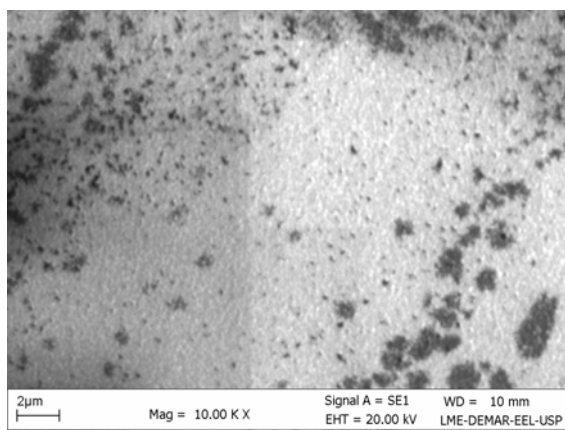


Figura 4.3. Microscopia eletrônica de varredura sobre a superfície do filme de diamante CVD na forma retangular

A Figura 4.4 apresenta a microscopia sobre a superfície do filme de diamante CVD com espessura de 2 µm, na forma redonda, com 100 mm de diâmetro, com a sua superfície na cor cinza escuro. Observa-se que a morfologia não é uniforme, há contornos de grãos, pouca homogeneidade e rugosidade. Devido a estas características a condução térmica pode ser prejudicada, embora a espessura do filme seja maior.

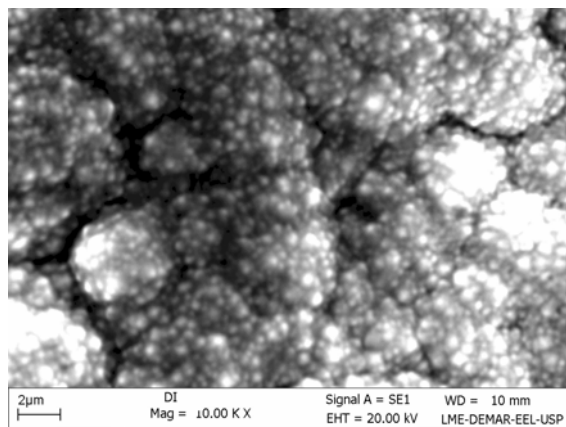


Figura 4.4. Microscopia eletrônica de varredura sobre a superfície do filme de diamante CVD na forma redonda.

Comparando os resultados da superfície para as amostras de silício, com filme de espessura de 2 μm e o filme com espessura de 10 μm , observa-se que existe a diferença de morfologia. Com espessuras maiores há uma presença maior de fissuras no diamante devido ao mesmo ter um coeficiente de dilatação térmica menor que o silício, estando assim, sobre uma tensão. Há a tendência do filme de diamante descolar da base de silício à medida que aumenta a espessura. O efeito final é uma diminuição global na condutividade térmica pelo filme devido não haver uma continuidade uniforme na superfície do mesmo. Para espessuras menores esse efeito é menor, apresentando uma aparência praticamente contínua e com os cristais do filme ainda pequenos.

4.2. DISPERSÃO DE ENERGIA DE RAIOS X DOS DISSIPADORES

Neste item são apresentadas as dispersões de energia de Raios X na superfície do cobre, do alumínio e do filme de diamante CVD sobre o silício. A escala horizontal apresenta a energia em keV e a escala vertical tem intensidade com unidade arbitrária.

A Figura 4.5 apresenta a EDX sobre a superfície do cobre com a sua superfície pintada na cor preta. Foram feitas amostras com o formato plano retangular nas dimensões de 20mm por 40mm e redonda com 100mm de diâmetro. As amostras para a forma retangular e redonda são do mesmo material. Observa-se que há a presença do cobre em 0,8keV, 8keV e 8,9keV com 99,88% atômica de cobre. Há uma pequena presença do carbono devido à tinta.

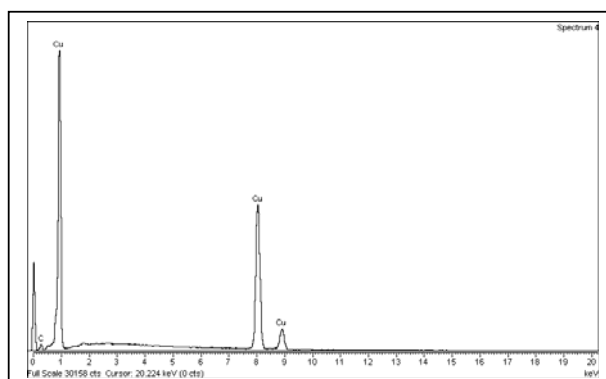


Figura 4.5. EDX sobre a superfície do cobre

A Figura 4.6. apresenta a EDX sobre a superfície do alumínio com a sua superfície na cor preta. Foram feitas amostras com o formato plano retangular nas dimensões de 20mm por 40mm e redonda com 100mm de diâmetro. As amostras para a forma retangular e redonda são do mesmo material. Observa-se que há o pico do alumínio em 1,4keV, com 67,01% em porcentagem atômica. Há ainda os picos de potássio com 24,77% e o manganês com 8,22% em porcentagem atômica.

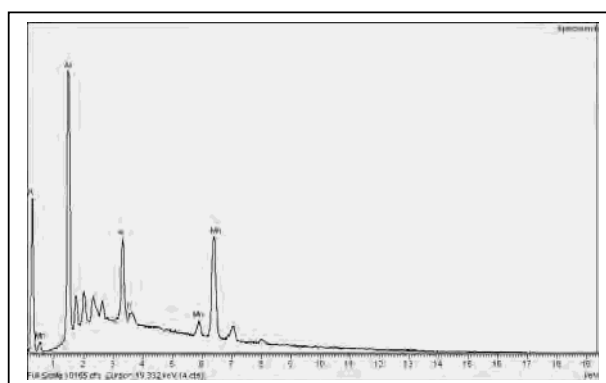


Figura 4.6. EDX sobre a superfície do alumínio

A Figura 4.7 apresenta a EDX sobre a superfície do filme de diamante CVD, na forma retangular, com a forma plana nas dimensões de 20mm por 40mm, com a sua superfície na cor cinza escuro. Observa-se que há o pico do carbono responsável pela formação do filme de diamante em 0,3keV com 87,88% em porcentagem atômica de carbono e 12,12% de silício.

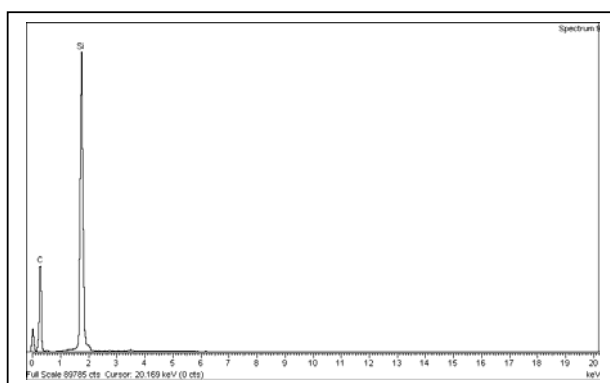


Figura 4.7. EDX sobre a superfície do filme de diamante CVD na forma retangular.

A Figura 4.8 apresenta a EDX sobre a superfície do filme de diamante CVD, na forma redonda, com 100mm de diâmetro, com a sua superfície na cor cinza escuro. Observa-se que há o pico do carbono, responsável pela formação do filme de diamante em 0,3keV com 99,88% em porcentagem atômica de carbono e 0,12% de silício.

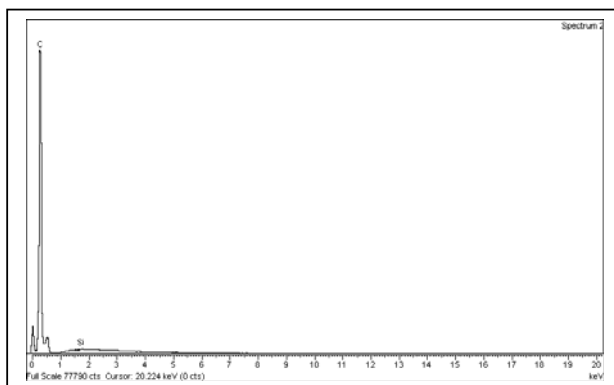


Figura 4.8. EDX sobre a superfície do filme de diamante CVD na forma redonda.

4.3 DIFRAÇÃO DE RAIOS X DOS MATERIAIS DOS DISSIPADORES

Neste item são apresentadas as difrações de raios X para o cobre, o alumínio e o filme de diamante CVD sobre o silício. A escala horizontal apresenta o ângulo de difração 2θ e a escala vertical tem intensidade com unidade arbitrária (U.A.).

A Figura 4.9 apresenta a difração de raios X sobre a superfície do cobre com a sua superfície pintada na cor preta. Foram feitas amostras com o formato plano retangular nas dimensões de 20mm por 40mm e redonda com 100mm de diâmetro. As amostras para a forma

retangular e redonda são do mesmo material. Observa-se que há a presença do cobre com ângulo de difração em $2\theta = 43^\circ$, 51° e 74° .

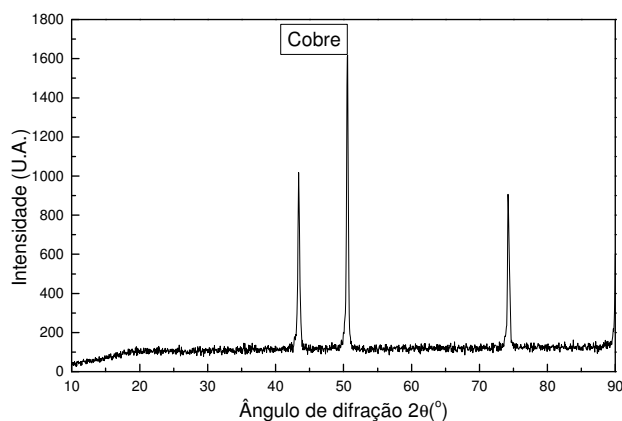


Figura 4.9. Difratograma para o cobre utilizado como dissipador de calor.

A Figura 4.10 apresenta a difração de raios X sobre a superfície do alumínio com a sua superfície pintada na cor preta. Foram feitas amostras com o formato plano retangular nas dimensões de 20mm por 40mm e redonda com 100mm de diâmetro. As amostras para a forma retangular e redonda são do mesmo material. Observa-se que há o pico do alumínio com ângulo de difração em $2\theta = 39^\circ$, 43° , 65° e 78° .

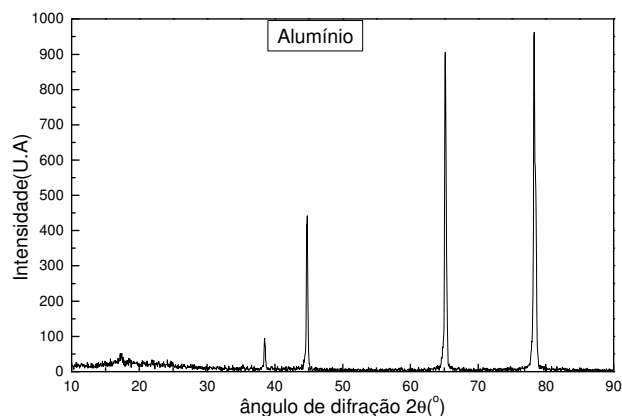


Figura 4.10. Difratograma para o alumínio usado como dissipador de calor.

A Figura 4.11 apresenta a difração de raios X sobre a superfície do filme de diamante CVD, na forma retangular, com a forma plana nas dimensões de 20mm x 40mm, com a sua

superfície na cor cinza escuro. Observa-se que há os picos do carbono, responsável pela formação do filme de diamante CVD com ângulo de difração em $2\theta = 44^\circ$ e 76° . O pico do silício encontra-se com o ângulo de difração em $2\theta = 30^\circ$.

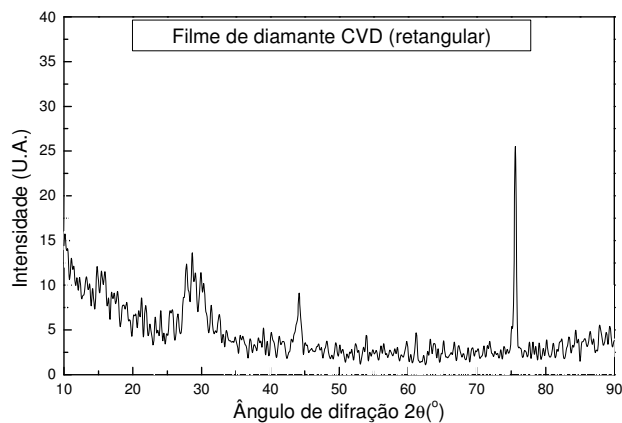


Figura 4.11. Difratograma para o filme de diamante CVD sobre o silício na forma retangular utilizado como dissipador de calor.

A Figura 4.12 apresenta a difração de raios X sobre a superfície do filme de diamante CVD, na forma redonda, com 100mm de diâmetro, com a sua superfície na cor cinza escuro. Observa-se que há os picos do carbono, responsáveis pela formação do filme de diamante com ângulo de difração em $2\theta = 44^\circ$ e 76° . O pico do silício teve o ângulo de difração em $2\theta = 69^\circ$.

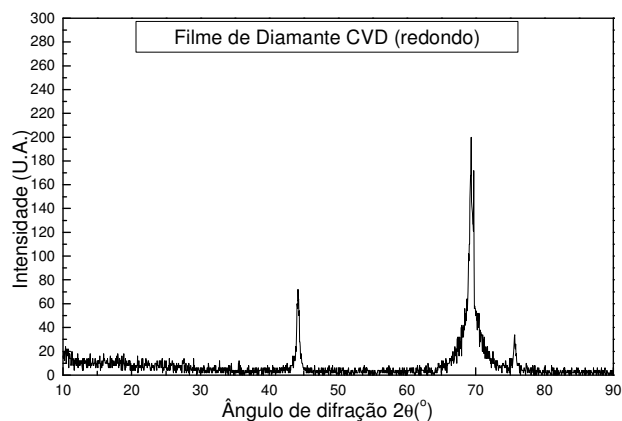


Figura 4.12. Difratograma para o filme de diamante CVD sobre o silício na forma redonda usado como dissipador de calor.

4.4 IMAGENS TERMOGRÁFICAS DOS DISSIPADORES DE CALOR

Neste item são apresentadas as imagens termográficas sobre as superfícies do transistor NPN (TIP 41C) e dos dissipadores de calor feitos de cobre, alumínio e o filme de diamante CVD sobre o silício. A temperatura média do ambiente foi de 26 °C. Foi utilizada somente convecção natural.

A Figura 4.13 apresenta a imagem termográfica sobre a superfície do transistor NPN TIP 41C, com ganho típico de 60, sem dissipador e tomado como referência. Observou-se que a temperatura no centro do transistor, nesse caso, foi 89 °C, e em um local distante 10cm do centro do transistor a temperatura ambiente foi 25,9 °C.

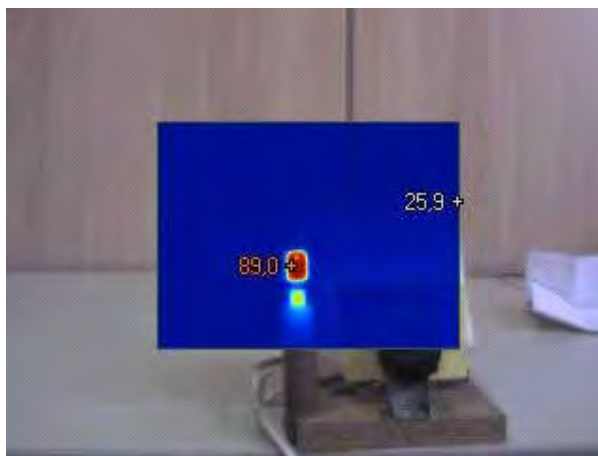


Figura 4.13. Imagem termográfica sobre a superfície do transistor NPN (TIP 41C) sem dissipador de calor.

A Figura 4.14 apresenta a imagem termográfica sobre a superfície do dissipador utilizando o cobre com a sua superfície na cor preta. Foram feitas amostras com o formato plano retangular nas dimensões de 20mm por 40mm e redonda com 100mm de diâmetro. As amostras para a forma retangular e redonda foram do mesmo material. Para a forma retangular, verificou-se que a temperatura onde se localizou o transistor foi 59,5 °C e na periferia distante 3cm do centro a temperatura foi 52 °C. Já para o dissipador no formato redondo, observa-se que a temperatura onde se localizou o transistor foi 45,8 °C e na periferia distante 5cm do centro a temperatura média foi 29,6 °C. A temperatura ambiente teve um valor de 26°C. Recorda-se que a predominância da condução térmica para o cobre é por meio de elétrons livres.

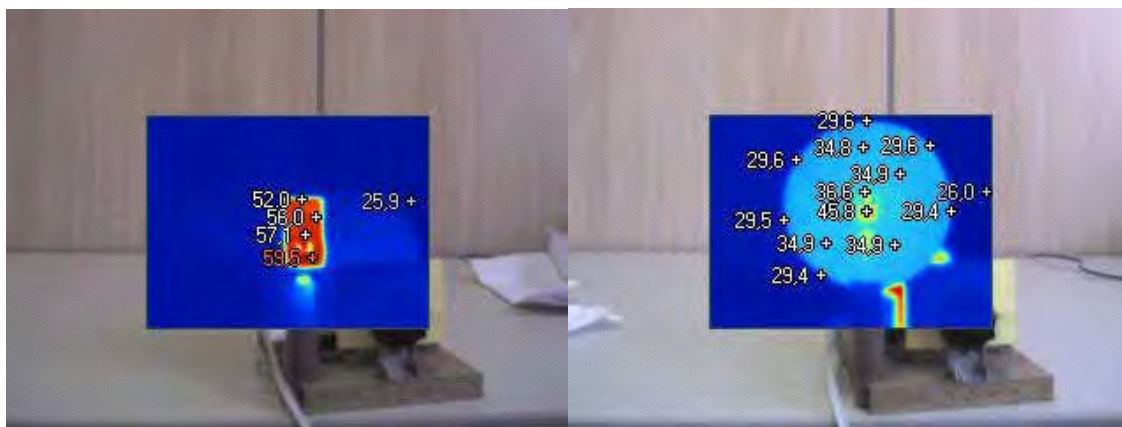


Figura 4.14. Imagens termográficas da superfície do cobre usado como dissipador de calor.

A Figura 4.15 apresenta a imagem termográfica sobre a superfície do dissipador de calor utilizando o alumínio com a sua superfície de cor preta. Foram feitas amostras com o formato plano retangular nas dimensões de 20mm por 40mm e redonda com 100mm de diâmetro. As amostras para a forma retangular e redonda foram do mesmo material. Para a forma retangular, verificou-se que a temperatura onde se localizou o transistor foi 59,5°C e na periferia distante 3cm do centro a temperatura foi 53,7°C . Já para o dissipador no formato redondo, observa-se que a temperatura onde se localizou o transistor foi 41,3°C e na periferia distante 5cm do centro a temperatura média foi 33,1°C. A temperatura ambiente teve um valor de 26°C. Também a condução térmica para o alumínio é por meio de elétrons livres.



Figura 4.15. Imagem termográfica da superfície do alumínio usado como dissipador de calor.

A Figura 4.16 apresenta a imagem termográfica sobre a superfície do dissipador

utilizando o filme de diamante CVD, na forma retangular, com a forma plana nas dimensões de 20mm x 40mm, com a sua superfície na cor cinza escuro. Observou-se que a temperatura onde se localizou o transistor foi 55,3°C e na periferia distante 3cm do centro a temperatura foi 28,4°C. A temperatura ambiente teve um valor em 25,9°C. Lembra-se que a predominância da condução térmica para o filme de diamante CVD é por meio da rede cristalina ou fônons.

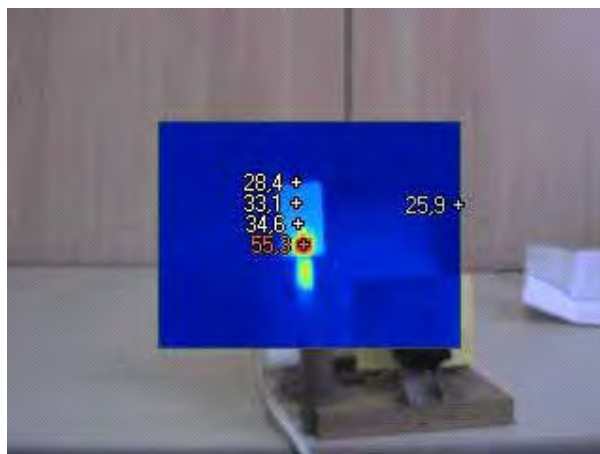


Figura 4.16. Imagem termográfica sobre a superfície do filme de diamante CVD retangular utilizado como dissipador de calor.

A Figura 4.17 apresenta a imagem termográfica sobre a superfície do dissipador utilizando o filme de diamante CVD sobre o silício, na forma redonda, com 100mm de diâmetro, com a sua superfície na cor cinza escuro. Observou-se que a temperatura onde se localizou o transistor foi 37,1°C e na periferia distante 5 cm do centro a temperatura teve uma média de 29°C. A temperatura ambiente teve um valor de 26,4°C. Também nesta imagem há o aparecimento da imagem termográfica dos terminais do transistor. Neste experimento evidencia-se a condução térmica para o filme de diamante CVD por meio da rede cristalina ou fônons.

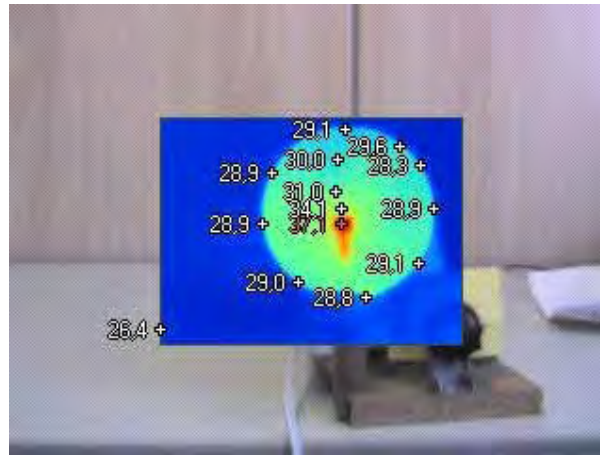


Figura 4.17. Imagem termográfica sobre a superfície do filme de diamante CVD redondo utilizado como dissipador de calor.

De acordo com as imagens termográficas para a forma retangular, a Figura 4.18 apresenta o comportamento da temperatura nos dissipadores de calor a partir do centro do transistor. A temperatura ambiente teve valores médios de 26°C. Observa-se que o cobre e o alumínio apresentam valores de temperatura bem próximos. O filme de diamante CVD sobre o silício apresenta uma melhora acima de 54 %, comparada com os outros materiais, a partir de um cm do centro do transistor. Este desempenho pode ser atribuído a um filme com morfologia de superfície uniforme que proporciona uma melhor transmissão de calor pelo retículo cristalino.

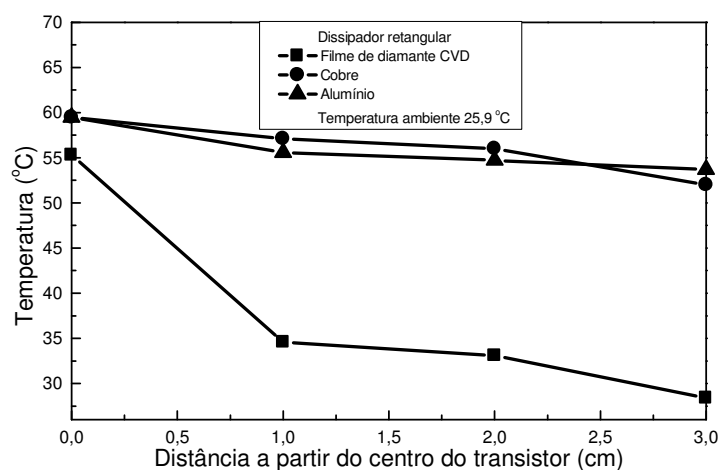


Figura 4.18. Comportamento da temperatura nos dissipadores retangulares.

Analisando as imagens termográficas para a forma redonda, observa-se através do gráfico da Figura 4.19, o comportamento da temperatura nos dissipadores de calor a partir do centro do transistor. Nota-se também que o cobre e o alumínio apresentam valores de temperatura bem próximos. O filme de diamante CVD sobre o silício apresenta, em média, uma melhora acima de 6 %, comparado com os outros materiais, a partir de um 1,5 cm do centro do transistor. O menor desempenho na transmissão de calor, comparada com os outros materiais, relaciona-se ao fato que, para maiores espessuras, o filme apresenta fissuras devido às tensões mecânicas de aderência sobre o silício. Assim o filme pode não ter continuidade, em diversos pontos na sua estrutura cristalina, diminuindo a transmissão de calor. O adequado é a obtenção de filme auto-sustentado a partir de um mm de espessura para atenuar este efeito.

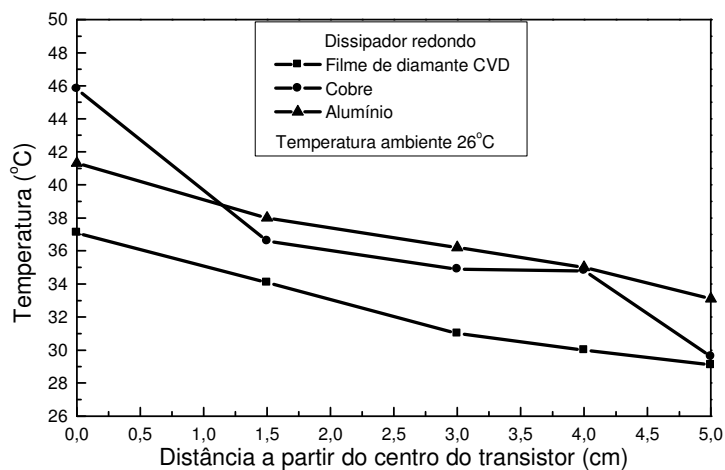


Figura 4.19. Comportamento da temperatura nos dissipadores redondos.

5. COMENTÁRIOS, CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O filme de diamante CVD sobre o silício, mesmo com uma camada muito fina de deposição de filme, é superior na dissipação de calor quando comparado com o cobre e o alumínio. Baseado nos resultados dos cálculos das resistências térmicas, conclui-se que, para os materiais analisados, o filme de diamante CVD destaca-se principalmente com os valores menores de resistência térmica. Os resultados também são confirmados pelas imagens termográficas obtendo-se temperaturas menores com os filmes de diamante CVD.

Sob o ponto de vista técnico de construção, é oneroso obter lâminas de cobre e alumínio de espessuras na ordem de 10 μm . Também é dispendioso obter filmes de diamante CVD auto-sustentados com 1(mm) mm de espessura utilizando os reatores de filamento quente. Necessita-se do desenvolvimento de processos com grandes taxas de deposição do filme.

Com os resultados mostrados na Tabela 3.4 observa-se que o filme de diamante CVD mostra-se superior aos outros materiais utilizados em dissipadores de calor. O dissipador feito com filme de diamante CVD terá dimensão menor. Assim, os equipamentos que trabalham com dissipadores acoplados aos seus circuitos podem ser mais compactos. E ainda, utilizando-se de grande número de peças fabricadas, pode-se obter um preço mais acessível de produção do filme de diamante CVD.

Portanto, no futuro o filme de diamante CVD poderá ser muito eficaz como dissipador de calor e em outras aplicações térmicas.

Ao analisar os cálculos para o alumínio verifica-se que, a resistência térmica do alumínio, é três vezes maior que a do filme de diamante CVD. Analisando as dimensões para fabricação de dissipador de calor verifica-se que, para dissipar a mesma quantidade de calor do diamante CVD, para a resistência térmica calculada, a espessura da parede do dissipador de alumínio terá que ser 9,52 vezes maior do que o dissipador feito com filme de diamante CVD.

Houve o desafio na elaboração de um procedimento para a obtenção de temperatura sobre o dissipador de calor feito de diversos materiais de modo a obter informações adequadas e coerentes para a imagem termográfica. Adotou-se a temperatura de 89°C produzida pelo transistor sem nenhum dissipador. O dissipador fixado ao transistor permitiu analisar cada um dos materiais e analisar o comportamento da temperatura.

Como desvantagem em relação aos materiais normalmente usados em dissipadores menciona-se a quebra com facilidade do dissipador quando depositado sobre o silício ou auto-sustentado, não permite corte depois de confeccionado devido à dureza do filme de diamante

CVD. Sobre o ponto de vista de melhora da resistência mecânica é possível depositar o filme sobre materiais metálicos, mas com o desafio da diferença dos valores do coeficiente de dilatação térmica, entre o filme e o material onde o filme será depositado.

Quanto ao processo de fabricação é possível obter filmes de qualidade semelhante no atual estágio de desenvolvimento utilizando-se da produção em grande quantidade que proporciona características semelhantes aos filmes, além de diminuir o custo de produção.

Assim, o filme de diamante CVD apresenta-se como uma alternativa para aplicação como dissipador de calor onde a finalidade é projetar e desenvolver novos dispositivos para aplicação na eletrônica.

Para o prosseguimento de trabalhos poderão ser feitas análises com relação a condutividade térmica dos dissipadores de calor confeccionados com filme de diamante CVD investigando as influências da:

- a) preparação da superfície do substrato onde se realiza a deposição do filme de diamante CVD;
- b) pureza cristalina do filme obtida através da espectroscopia de espalhamento Raman;
- c) densidade de contornos de grãos do filme;
- d) densidade do filme utilizando balança digital semianalítica com resolução de microgramas;
- e) espessura do filme;
- f) área do filme;
- g) concentração do metano;
- h) presença de outros gases na mistura gasosa, como o flúor, oxigênio e nitrogênio a fim de obter um filme de diamante mais cristalino e com menos impureza;
- i) pressão interna do reator durante a deposição do filme de diamante CVD;
- j) temperatura de deposição do filme;
- l) morfologia do filme de diamante CVD.
- m) utilização de convecção forçada para obtenção dos perfis de temperatura sobre o dissipador

Em todas as situações mencionadas deve-se continuar a verificar a condução térmica da amostra com o filme de diamante CVD, utilizando a imagem térmica sobre toda a área do filme, e comparando sempre com a de outros materiais,, com as mesmas dimensões e características geométricas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AAVID CATALOG No. 1200. **Thermal management**. Santa Clara:H.T. Fox Ed., 1989.

AMARAL, M; FERNANDES, A. J. S.; VILA, M.; OLIVEIRA, F. J.; SILVA, R. F. Growth rate improvements in the hot-filament CVD deposition of nanocrystalline diamond. Amsterdã, **Diamond and Related Materials**, v. 15, n. 11-12, p. 1822-1827, nov.-dec. 2006.

BACHMANN, P.; WIECHERT, D.U. **Diamond and diamond-like film and coatings**. New York: Plenum Press, 1991.

CALLISTER, W. D. **Materials science and engineering: an introduction**. 7th ed. New York: John Wiley & Sons, 2006.

CULLITY, B. D.; STOCK, S. R. **Elements of x-ray diffraction**. 3rd. Ed. New York: Pearson Education Ltd. 2001

DAVIS, R. F. **Diamond films and coatings – development, properties and applications**. New York: Noyes Publications, 1993.

DISSITEC. Site: www.dissitec.com.br, acesso em 17/12/2007.

FLUKE CATALOG. **Fluke Ti 40FT**. Fluke Ed. 2008, Fluke Corporation.

HO, H.P.; LO, K.C.; TJONG, S.C.; LEE, S.T. Measurement of thermal conductivity in diamond films using a simple scanning thermocouple technique. Amsterdã, **Diamond and Related Materials**, v. 9, n. 7, p. 1312-1319, jul. 2000.

INCROPERE, F.P.; WITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 4ª Ed. Rio de Janeiro: LTC, 1998.

KAYS, W. M.; LONDON, A. L. **Compact heat exchangers**. 3rd Ed. New York; McGraw-Hill, 1984.

KRAUS, A. D.; BAR-COHEN, A. **Design and analysis of heat sinks**, New York: John Wiley & Sons. 1999

LEDEZMA, G.; BEJAN, A. Heat sinks with sloped plate fins in natural and forced convection. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 39, n. 9, p. 1773-1783, jun. 1996,

LEE, S. Optimum design and selection of heat sinks. **Microelectronics and Reliability**, v. 37, n. 4, p. 699, apr. 1997.

MIYATAKE, H.; ARIMA, K. MAIDA, O.; TERAJI, T.; ITO, T. Further improvement in high crystalline quality of homoepitaxial CVD diamond. Amsterdã, **Diamond and Related Materials**, v. 16, n. 4-7, p. 679-684, apr.-jul. 2007.

OHRING, M. **The materials science of thin films**. 2. Ed. New York: Academic Press, 2002

RASHID, M.H. **Power electronics - circuits, devices and applications**. New York: Prentice-Hall. 1999.

SOUZA, T. M.; TRAVA-AIROLDI, V. J.; CORAT, E. J.; LEITE, N. F. Studies on cvd diamond on Ti6Al4V alloy surface using hot filament assisted technique. Amsterdã, **Thin Solid Films**, v. 308, p. 254-257, oct. 1997.

SPEAR, K. E.; DISMUKES, J. P. **Synthetic diamond: emerging cvd science and technology**. New York: John Wiley & Sons, 1994.