

orientada por Luiz Otávio Saraiva Ferreira
junior e aprovada pela Comissão
fulgada em 19/09/03
Ioshiaki Doi
Orientador

UNICAMP - UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FEEC - FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
DMCSI - DEPARTAMENTO DE MÁQUINAS, COMPONENTES E SISTEMAS
INTELIGENTES

DESENVOLVIMENTO DE MICRO-AQUECEDORES COMPATÍVEIS
COM TECNOLOGIAS DE MICROELETRÔNICA PARA
APLICAÇÃO EM TRANSDUTORES TÉRMICOS

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Autor: Adeilton Cavalcante de Oliveira Júnior

Orientador: Prof. Dr. Ioshiaki Doi

Banca Examinadora:

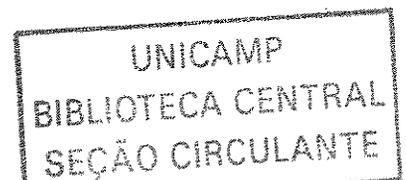
Prof. Dr. Ioshiaki Doi – FEEC/UNICAMP

Prof. Dr. Raimundo Carlos Silvério Freire – UFCG

Prof. Dr. Luiz Otávio Saraiva Ferreira – FEM/UNICAMP

Prof. Dr. José Alexandre Diniz – FEEC/UNICAMP

Campinas, Setembro de 2003



NIDADE	BC
CHAMADA	
	F/Unicamp
	OL4d
	EX
IMBO BC/	61343
IOC.	16-86-05
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
IEÇO	21.00
ITA	04-2-05
CPD	

10 ID 335466

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

OL4d

Oliveira Júnior, Adeilton Cavalcante de
Desenvolvimento de micro-aquecedores compatíveis
com tecnologias de microeletrônica para aplicação em
transdutores térmicos / Adeilton Cavalcante de Oliveira
Júnior. --Campinas, SP: [s.n.], 2003.

Orientador: Ioshiaki Doi.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação.

1. Microeletrônica. 2. Transdutores. 3.
Semicondutores. 4. Calor-Transmissão. 5. Materiais –
Propriedades elétricas. I. Doi, Ioshiaki. II. Universidade
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica
e de Computação. III. Título.

RESUMO

Nesta dissertação estudou-se duas estruturas diferentes de micro-aquecedores compatíveis com tecnologias de microeletrônica através da modelagem, simulação, fabricação e caracterização dos dispositivos. O principal objetivo desse estudo é o desenvolvimento de um processo de fabricação que possibilite a fabricação simultânea de transdutores térmicos e circuitos eletrônicos em um mesmo substrato.

Os micro-aquecedores fabricados podem ser usados como sensores e/ou atuadores em transdutores térmicos. A primeira estrutura fabricada foi um resistor formado dopando-se com boro o substrato de silício monocristalino e a segunda formada por um resistor de silício policristalino dopado com fósforo, sobre uma camada de dióxido de silício (SiO_2), que serve como isolante térmico. Os dispositivos foram fabricados em diferentes geometrias e dimensões (com dimensão mínima de 20 μm) para se estudar o efeito desses parâmetros no comportamento termo-elétrico.

Foram analisadas as influências das condutividades térmica e elétrica dos materiais na distribuição de temperatura sobre os micro-aquecedores, a relação entre a variação de resistência e densidade de potência, a influência da concentração de dopantes no TCR (coeficiente de temperatura da resistividade) do resistor de silício policristalino e a comparação entre o consumo de potência em ambos os tipos de estruturas.

A partir da análise dos resultados da caracterização elétrica conclui-se que os micro-aquecedores de silício policristalino apresentam uma eficiência térmica de aproximadamente 80 Ω/W e 40 Ω/W para doses de $7 \cdot 10^{15}$ e $2 \cdot 10^{16}$ átomos/ cm^2 , respectivamente, e para os fabricados em silício monocristalino esse valor é de 25 Ω/W , para dose de $5 \cdot 10^{15}$ átomos/ cm^2 . A maior eficiência dos micro-aquecedores de silício policristalino é devida à camada isolante de SiO_2 . A comparação entre os resultados experimentais e os das simulações numéricas mostrou boa concordância, validando o modelo termo-elétrico utilizado na simulação numérica.

ABSTRACT

In this dissertation a two different microelectronics technologies compatible micro-heater structures have been studied by modeling, simulation, fabrication and characterization. The main goal is to develop fabrication processes that leads to a monolithic fabrication of thermal transducers and electronic circuits on the same substrate.

These micro-heaters can be used as thermal sensors and/or actuators. One of the structure is a resistor made by monocrystalline silicon substrate doped with boron and the second one is the resistor made with phosphorous-doped polysilicon, on thermal insulating silicon dioxide (SiO_2) layer. Devices with different geometries and sizes (minimum size of 20 μm) were fabricated for studying the effects of these parameters on thermo-electrical behavior.

The influences of thermal and electrical material conductivities on micro-heaters temperature distributions have been analyzed, as well as the resistance variation and power density relationship, dopant concentration influences on the polysilicon resistor TCR (temperature coefficient of resistivity) and comparison between power consumption for both structures.

The electrical characterization of these devices have shown that polysilicon micro-heaters present thermal efficiency of 80 Ω/W and 40 Ω/W for $7 \cdot 10^{15}$ and $2 \cdot 10^{16}$ atoms/ cm^2 doses, respectively, and monocrystalline silicon micro-heaters the thermal efficiency of 25 Ω/W for a $5 \cdot 10^{15}$ atoms/ cm^2 dose. The larger thermal efficiency of polysilicon micro-heaters is due to SiO_2 thermal insulating layer. Comparison of experimental results and numerical simulation data shows good agreements that corroborate the thermo-electrical model proposed and used in the numerical simulation.

Dedico este trabalho aos meus pais, Adailton e Fátima e meus irmãos, Andrey e Cybelle, que sempre me apoiaram e incentivaram durante estes dois anos.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes entidades:

CAPES – Auxílio Bolsa de Mestrado
CCS / UNICAMP
DMCSI / FEEC / UNICAMP

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todas as pessoas que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

Especialmente, agradeço:

Ao meu orientador, Prof. Ioshiaki Doi, pelo apoio e confiança;
ao Prof. Jacobus W. Swart, pela oportunidade oferecida;
ao Prof. José A. Diniz, pelas discussões sobre o desenvolvimento do trabalho.

Agradeço também aos funcionários do CCS (em ordem alfabética): Daniel, Eudócio, Godoy, Lino, Mara e Regina, e ao amigo Ricardo Cotrin Teixeira, pelas ajudas nos procedimentos de laboratório, sem as quais esse trabalho não teria sido realizado.

Agradeço ainda aos amigos: Christian, Lindomberg, Júlio e Júnior, pela convivência pacífica, e aos colegas do CCS pelas horas de descontração e partidas de futebol.

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS	IX
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO GERAL	1
1.1 Introdução	1
1.2 Técnicas de microfabricação.....	3
1.3 Objetivos da dissertação	4
1.4 Organização da dissertação.....	4
CAPÍTULO 2 – TRANSDUTORES TÉRMICOS.....	6
2.1 Introdução	6
2.2 Transdutores convencionais e microfabricados.....	7
2.3 Características dos transdutores térmicos	8
2.4 Sensores térmicos microfabricados	9
2.4.1 <i>Sensor de gás</i>	9
2.4.2 <i>Sensor de velocidade</i>	10
2.4.3 <i>Sensor de pressão do tipo Pirani</i>	12
2.4.4 <i>Sensor de umidade</i>	12
2.5 Atuadores térmicos microfabricados	13
2.6 Resumo do capítulo	14
CAPÍTULO 3 - MODELAGEM DO DISPOSITIVO	15
3.1 Introdução	15
3.2 Estruturas dos dispositivos.....	16
3.3 Equações do domínio elétrico.....	17
3.4 Equações do domínio térmico.....	19
3.5 Problema de domínios acoplados	21
3.6 Relação entre resistividade e temperatura.....	22
3.7 Troca de calor com ambiente externo.....	24

3.8 Sensores térmicos com troca de calor por condução	25
3.9 Sensores térmicos com troca de calor por radiação	25
3.10 Sensores térmicos com troca de calor por convecção.....	26
3.11 Resumo do capítulo	28
CAPÍTULO 4 - SIMULAÇÃO DAS ESTRUTURAS	29
4.1 Introdução	29
4.2 Software FlexPDE e método dos elementos finitos.....	30
4.3 Definição do dispositivo: geometria e materiais.....	30
4.4 Características térmicas dos micro-aquecedores	33
4.4.1 <i>Micro-aquecedores de silício policristalino</i>	33
4.4.2 <i>Micro-aquecedores de silício monocristalino</i>	37
4.5 Características termo-elétricas do micro-aquecedor de silício policristalino proposto	40
4.6 Simulação de um microsensor de velocidade do tipo fio quente	46
4.7 Resumo do capítulo	52
CAPÍTULO 5 - PROCESSOS DE FABRICAÇÃO.....	53
5.1 Introdução	53
5.2 Geometria dos micro-aquecedores.....	54
5.3 Máscaras ópticas	55
5.4 Micro-aquecedores em silício monocristalino	56
5.4.1 <i>Caracterização inicial das lâminas</i>	57
5.4.2 <i>Limpeza RCA</i>	58
5.4.3 <i>Oxidação úmida para formação do óxido de campo</i>	58
5.4.4 <i>Fotogravação 1 – Definição dos resistores</i>	59
5.4.5 <i>Implantação iônica de átomos de boro e ativação dos dopantes por RTA</i>	60
5.4.6 <i>Fotogravação 2 – Abertura de vias</i>	62
5.4.7 <i>Metalização</i>	63
5.4.8 <i>Fotogravação 3 – Definição dos pads</i>	64
5.4.9 <i>Sinterização dos contatos</i>	64
5.4.10 <i>Deposição e corrosão do nitreto</i>	64
5.4.11 <i>Fotogravação 4 – Abertura de janelas no óxido para corrosão do substrato</i> ..	65

5.4.12 Corrosão do substrato com KOH.....	65
5.5 Micro-aquecedores em silício policristalino.....	66
5.5.1 Caracterização inicial da lâmina.....	66
5.5.2 Limpeza RCA completa.....	66
5.5.3 Oxidação úmida para formação do óxido de campo.....	66
5.5.4 Deposição do silício policristalino.....	68
5.5.5 Implantação iônica de átomos de fósforo e ativação dos dopantes por RTA.....	68
5.5.6 Fotogravação 1 – Definição dos resistores.....	69
5.5.7 Fotogravação 2 – Abertura de vias.....	69
5.5.8 Metalização.....	70
5.5.9 Fotogravação 3 – Definição dos pads.....	70
5.5.10 Sinterização dos contatos.....	71
5.5.11 Fotogravação 4 – Corrosão da camada sacrificial de SiO ₂	71
5.6 Resumo do capítulo.....	72
CAPÍTULO 6 – CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA.....	73
6.1 Introdução.....	73
6.2 Micro-aquecedor de silício monocristalino implantado com boro.....	73
6.3 Micro-aquecedor de silício policristalino implantado com fósforo.....	77
6.3.1 Energia de implantação: 150 keV, dose: 7·10 ¹⁵ átomos/cm ²	77
6.3.2 Energia de implantação: 150 keV, dose: 2·10 ¹⁶ átomos/cm ²	82
6.4 Resumo do capítulo.....	85
CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS.....	86
REFERÊNCIAS.....	88

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1 – Técnica <i>bulk silicon micromachining</i> [10]	3
1.2 – Técnica <i>surface micromachining</i> [11]	3
2.1 – Diagrama esquemático do detector de gás [19]	9
2.2 – Estrutura do micro-aquecedor de baixa tensão e potência para sensor de gás [20].....	10
2.3 – Micro-aquecedor sobre membrana de Si ₃ N ₄ e SiO ₂ [21].....	10
2.4 – Vista superior e transversal do sensor de vazão [25].....	11
2.5 – Estrutura do sensor de pressão do tipo Pirani [27]	12
2.6 – Diagrama do processo de fabricação de um sistema de PCR [17]	14
3.1 – Resistores fabricados em silício (a) monocristalino e (b) policristalino.....	17
4.1 – Definição dos materiais do micro-aquecedor (a) com camada sacrificial e (b) sem camada sacrificial	31
4.2 – Estruturas em três dimensões dos dispositivos (a) com camada sacrificial e (b) sem camada sacrificial	32
4.3 – Cortes da distribuição de temperatura e fluxo de calor no dispositivo de silício policristalino com camada sacrificial de SiO ₂	34
4.4 – Cortes da distribuição de temperatura e fluxo de calor no dispositivo de silício policristalino sem camada sacrificial	35
4.5 – Definição dos materiais da estrutura do micro-aquecedor formado em substrato de silício (a) sem isolamento térmica e (b) com isolamento térmica	37
4.6 – Cortes da distribuição de temperatura e fluxo de calor no dispositivo de silício monocristalino sem isolamento térmica	38
4.7 – Cortes da distribuição de temperatura e fluxo de calor no dispositivo de silício monocristalino com isolamento térmica	39
4.8 – Distribuição de temperatura no dispositivo	43
4.9 – Curvas de características elétricas do dispositivo: (a) <i>Resistência x Tensão</i> e (b) <i>Corrente x tensão</i>	43
4.10 – Distribuição de temperatura no dispositivo	45

4.11 – Curvas de características elétricas do dispositivo: (a) <i>Resistência x Tensão</i> e (b) <i>Corrente x Tensão</i>	45
4.12 – (a) Estrutura do micro-sensor de velocidade do tipo fio quente. (b) Resistor em ponte. (c) Região de solução: resistor de silício monocristalino dopado com boro.	47
4.13 – Distribuição de temperatura ao longo do resistor com fluido em repouso	49
4.14 – (a) Resistência em função da temperatura máxima para um fluido em repouso. (b) Característica I-V	50
4.15 – Distribuição de temperatura ao longo do resistor com fluxo de gás.....	51
4.16 – Resistência do micro-aquecedor em função da velocidade do fluido, para uma tensão de 1,5 V	51
5.1 – Padrões de dispositivos desenhados com AutoCad para fabricação das máscaras ópticas	55
5.2 – Padrões existentes nas máscaras do (a, b) primeiro, (c) terceiro e (d) quarto níveis de fotogração.....	56
5.3 – Etapas do processo de fabricação do micro-aquecedor compatível com PMOS e CMOS (ver descrição detalhada no texto).....	57
5.4 – Primeira etapa de fotogração: definição dos resistores	60
5.5 – Simulação de implantação iônica de boro	61
5.6 – Simulação de implantação iônica de boro	62
5.7 – Segunda etapa de fotogração: abertura de vias	63
5.8 – Terceira etapa de fotogração: definição dos <i>pads</i>	64
5.9 – Simulação de corrosão anisotrópica do silício em KOH com o <i>software</i> ACES	65
5.10 – Etapas do processo de fabricação do micro-aquecedor compatível com PMOS, NMOS e CMOS (ver descrição detalhada no texto).....	67
5.11 – Perfil de concentração de fósforo após implantação com energia de 150keV e RTA à 1000 °C por 40 s, para dose de (a) $2 \cdot 10^{16}$ átomos/cm ² e (b) $7 \cdot 10^{15}$ átomos/cm ²	69
5.12 – Primeira etapa de fotogração: definição dos resistores	69
5.13 – Segunda etapa de fotogração: abertura de vias	70
5.14 – Terceira etapa de fotogração: definição dos <i>pads</i>	70
5.15 – Fotogração para corrosão da camada sacrificial	71
6.1 – Conjunto de resistores para verificar uniformidade na resistência	73

6.2 – Curva <i>Corrente x Tensão</i> de resistores de silício monocristalino dopado com boro, de diversos comprimentos e largura de 20 μm	74
6.3 – Variação percentual da resistência em função da tensão aplicada.....	75
6.4 – Curva de resistência em função da potência, para resistor de 200 μm	76
6.5 – Curva de resistência em função da potência, para resistor de 300 μm	77
6.6 – Curva <i>Corrente x Tensão</i> de resistores de silício policristalino dopado com fósforo com dose de $7 \cdot 10^{15}$ átomos/ cm^2 , de diversos comprimentos e largura de 20 μm	79
6.7 – Variação percentual da resistência em função da tensão aplicada.....	80
6.8 – Curva de resistência em função da potência, para resistor de 200 μm	81
6.9 – Curva de resistência em função da potência, para resistor de 300 μm	81
6.10 – Curva <i>Corrente x Tensão</i> de resistores de silício policristalino dopado com fósforo com dose de $2 \cdot 10^{16}$ átomos/ cm^2 , de diversos comprimentos e largura de 20 μm	83
6.11 – Variação percentual da resistência em função da tensão aplicada.....	84
6.12 – Curva de resistência em função da potência, para resistor de 200 μm	84
6.13 – Curva de resistência em função da potência, para resistor de 300 μm	85

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO GERAL

1.1 Introdução

Os primeiros dispositivos eletrônicos fabricados foram as válvulas termoiônicas, de alto consumo de potência, e os relés eletromecânicos, que apresentavam um tempo de chaveamento alto, e além disso, eram dispositivos volumosos [1].

Com o intuito de substituir os relés usados nas centrais telefônicas por dispositivos eletrônicos de estado sólido, um grupo de pesquisa da empresa Bell Labs nos Estados Unidos, no qual trabalhavam Shockley, Bardeen e Brattain, iniciou a pesquisa sobre transistores de efeito de campo (FET) utilizando semicondutores de germânio e silício, em 1946, mas que devido às dificuldades tecnológicas da época impediram o funcionamento deste dispositivo. Em 1947, o mesmo grupo descobriu o efeito transistor em um dispositivo bipolar, dando início à microeletrônica. Em 1950, seus três integrantes ganharam o Prêmio Nobel pelo desenvolvimento do dispositivo [1].

Em 1959, a Fairchild desenvolveu um processo de fabricação com o qual foi possível fabricar, em um mesmo substrato, vários dispositivos eletrônicos [1]. Este processo, chamado de processo planar, permitiu o desenvolvimento de circuitos eletrônicos integrados (CIs).

Com o avanço da tecnologia utilizada para fabricação de CIs, foi possível aumentar, cada vez mais, a densidade de elementos de circuitos em um *chip*, o que possibilitou o surgimento de dispositivos como os microprocessadores, que usam milhões de transistores para formar seus circuitos lógicos. A grande densidade de transistores utilizados em sistemas de processamento digital da informação permitiu o surgimento do que são chamados atualmente de dispositivos ULSI (*Ultra Large Scale Integration*) [1].

Na década de 1960, o mesmo processo planar empregado na tecnologia de microeletrônica para fabricação de dispositivos e circuitos eletrônicos começou a ser usado para fabricação de vários tipos de transdutores [2] e, com isso, houve um crescente interesse no estudo das propriedades não elétricas do silício, que é ainda hoje o material mais utilizado na fabricação de dispositivos eletrônicos de estado sólido. Estes novos

1.2 Técnicas de microfabricação

Duas técnicas foram desenvolvidas para permitir a microfabricação de estruturas através da tecnologia de microeletrônica: *bulk micromachining* e *surface micromachining* [9]. Na primeira, é feita a corrosão do substrato de silício com uma solução química. Um exemplo é mostrado na Figura 1.1. Quando a corrosão é feita pela superfície inferior, é chamada *back side bulk micromachining*, quando é feita pela superfície superior, *front side bulk micromachining* [9]. Na segunda técnica, mostrada na Figura 1.2, corrói-se apenas uma camada, chamada camada sacrificial, liberando as estruturas acima dela.



Figura 1.1 – Técnica *bulk silicon micromachining* [10]

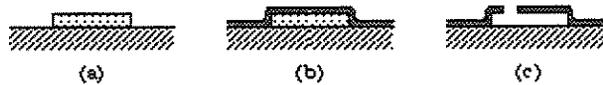


Figura 1.2 - Técnica *surface micromachining* [11]

Duas outras técnicas dizem respeito à fabricação monolítica de sensores. Nesse tipo de fabricação é possível integrar em um mesmo *chip* transdutores e circuitos eletrônicos de condicionamento e interface. Se os circuitos eletrônicos forem fabricados antes dos transdutores, a técnica é chamada pós-processamento. Caso contrário, chama-se pré-processamento.

Apesar de existirem alguns sensores microfabricados sendo comercializados e um grande número de pesquisas desenvolvidas sobre eles, poucos são fabricados de forma monolítica. Um motivo para isso é que nem sempre é fácil, ou até possível, fabricar transdutores e circuitos eletrônicos em um mesmo substrato.

A dificuldade é que, quando se utilizam as técnicas pós- ou pré-processamento, os processos de uma etapa de fabricação interferem nas etapas anteriores, principalmente quando são necessários processos em alta temperatura. Assim, para a fabricação monolítica,

o ideal seria um processo de fabricação onde os transdutores e circuitos fossem fabricados simultaneamente.

Uma vantagem adicional da fabricação simultânea é que em sensores cujo elemento transdutor é um resistor, em que se utiliza uma ponte de Wheatstone para condicionamento dos sinais, é mais fácil conseguir o casamento nos valores das resistências do que fabricando estes dispositivos em etapas diferentes.

1.3 Objetivos da dissertação

O objetivo deste trabalho é desenvolver dispositivos micro-aquecedores fabricados com tecnologias de microeletrônica, através de processos que permitam a fabricação simultânea dos dispositivos aquecedores e de outros dispositivos eletrônicos, que possam fazer parte de circuitos de condicionamento e interface de sensores. Estes micro-aquecedores podem ser usados em transdutores térmicos, tanto como sensores quanto atuadores.

1.4 Organização da dissertação

Esta dissertação é dividida em sete capítulos. O conteúdo dos próximos capítulos é descrito a seguir:

No Capítulo 2 são abordados sensores e atuadores térmicos. São apresentadas as estruturas dos sensores e atuadores encontrados na literatura e é descrito o funcionamento de cada um deles.

No Capítulo 3 é desenvolvido o modelo termo-elétrico dos micro-aquecedores fabricados. Também é apresentada a classificação dos sensores de acordo com o modo de transferência de calor em que se baseiam seus princípios de funcionamento.

A simulação termo-elétrica das estruturas dos micro-aquecedores, a partir do modelo desenvolvido, é apresentada no Capítulo 4.

Os processos realizados para fabricação de cada uma das estruturas, além de simulações dos processos, são apresentados e discutidos no Capítulo 5.

Os resultados das caracterizações dos dispositivos fabricados e a comparação entre eles são mostrados no Capítulo 6.

Finalmente, as conclusões do trabalho e perspectivas futuras são apresentadas no Capítulo 7.

CAPÍTULO 2 – TRANSDUTORES TÉRMICOS

2.1 Introdução

Os primeiros dispositivos microfabricados com a tecnologia planar de microeletrônica que não tinham como finalidade o processamento de sinais elétricos foram os transdutores. Transdutores são dispositivos utilizados para transformar energia de um domínio físico para outro, usualmente entre os seguintes: elétrico, magnético, térmico, mecânico e químico [12].

A partir desta definição de transdutores, diz-se que sensores e atuadores são transdutores. Sensores são dispositivos capazes de detectar sinais ou estímulos físicos e transformá-los em informações elétricas. Já os atuadores fazem o inverso, transformando informação de um sinal elétrico em sinais ou estímulos de outros domínios físicos.

Sensores são elementos importantes em sistemas de instrumentação, nos quais se deseja obter informações sobre alguma grandeza física. A transformação desta grandeza em informação elétrica é realizada quando é necessário o processamento ou armazenamento da informação. Atuadores são elementos essenciais em sistemas de controle, onde o objetivo é fazer com que uma grandeza física tenha o comportamento desejado que, nesse caso, é definido por uma informação elétrica [12].

Transdutores cujo funcionamento baseia-se no princípio de transferência de calor, chamados de transdutores térmicos, são encontrados em várias aplicações, como: medição de temperatura, umidade, vazão, radiação, condutividade térmica de gases, controle de temperatura em sistemas de análise genômica, e outras [13-17].

Neste capítulo apresentamos e descrevemos de forma resumida o funcionamento dos principais sensores que utilizam micro-aquecedores como transdutores térmicos. Os estudos sobre os micro-aquecedores podem ser justificados pela grande variedade de aplicações desenvolvidas com estes dispositivos.

2.2 Transdutores convencionais e microfabricados

Para que um elemento funcione como transdutor térmico é preciso que haja uma relação entre suas propriedades (ou grandezas) elétricas, como por exemplo a resistividade, e grandezas (ou propriedades) térmicas, como por exemplo a temperatura. Esta relação pode ser produzida por um efeito bastante conhecido, o Efeito Joule, que ocorre em condutores elétricos, ou resistores, quando conduzindo corrente elétrica. Nestes resistores, quando os elétrons se chocam contra os átomos, parte da energia cinética é transferida, provocando vibração dos átomos e, conseqüentemente, um aumento de temperatura [18]. Por outro lado, há uma relação entre temperatura e resistividade nos resistores. Esta relação depende do material do qual o resistor é feito. Assim, o resistor é um elemento de circuito que pode ser usado tanto como um sensor térmico, convertendo energia térmica em elétrica, quanto um atuador, convertendo energia elétrica em térmica.

Vários tipos de sensores são formados por um resistor como elemento transdutor que, em muitos casos, são fios de metal, como platina, alumínio, tungstênio e cobre [12]. Os resistores usados em sensores térmicos também podem ser microfabricados com a tecnologia planar usada na microeletrônica. A vantagem da microfabricação destes resistores é que, além das pequenas dimensões possíveis de serem obtidas, também se podem fabricar os circuitos de condicionamento junto a eles.

Um outro motivo do uso da tecnologia de microfabricação, ao invés da fabricação convencional, é que com a utilização de resistores fabricados em escala micrométrica, e por isso pequena massa térmica, é possível diminuir o tempo de resposta térmica do sensor [12]. Em alguns casos, a única maneira de se conseguir dimensões suficientemente pequenas é através da microfabricação do dispositivo.

Nas aplicações em que o transdutor é usado como aquecedor, há necessidade de o dispositivo trabalhar em uma temperatura mais elevada que a temperatura do ambiente em que este se encontra. Em alguns casos, para se conseguir a temperatura de trabalho desejada em sensores microfabricados, deve-se isolar termicamente o resistor do substrato para evitar perda excessiva de calor, deixando-o apoiado apenas pelas extremidades, resultando em uma estrutura em forma de ponte.

Como mostrado na seção 2.4, muitas estruturas de micro-aquecedores são fabricadas com materiais que, mesmo sendo compatíveis com tecnologias de microeletrônica, não são necessários para a fabricação de circuitos eletrônicos integrados. O uso desses materiais pode ser justificado quando se deseja obter estruturas com características bem específicas. Um exemplo é o uso de camadas de materiais diferentes para isolamento térmico, o que resulta em estruturas com membranas, resultando em um menor consumo de energia. Dessa forma, o uso de alguns materiais acrescenta etapas ao processo de fabricação de um dispositivo eletrônico, o que impede a fabricação simultânea do transdutor e de um circuito e, nesse caso, deve-se usar o método pré-processamento ou pós-processamento na fabricação de um sensor monolítico.

2.3 Características dos transdutores térmicos

Duas características importantes dos transdutores térmicos são a constante de tempo térmica e o TCR (coeficiente de temperatura da resistividade). Essas características são importantes por definirem em que tipo de aplicação o transdutor pode ser utilizado. Quanto menor a constante de tempo térmica, maior sua frequência de operação, o que possibilita seu uso em aplicações onde ocorrem variações rápidas da grandeza a ser medida. O TCR é o coeficiente de quanto varia a resistividade de um material em função da sua temperatura. Além disso, a temperatura de um resistor aquecedor, para uma certa tensão aplicada, é dependente do TCR.

Para aplicação como sensor térmico, deseja-se que o aquecedor sofra grandes variações de resistência quando ocorram variações na temperatura, ou seja, tenha uma alta sensibilidade. Para aplicação como atuador térmico, deseja-se obter altas temperaturas com baixo consumo de potência elétrica. Tanto a sensibilidade do dispositivo quanto o consumo de potência dependem da sua geometria e dos materiais que formam a estrutura.

2.4 Sensor es térmicos microfabricados

2.4.1 Sensor de gás

O sensor de gás é baseado na medição do fluxo de calor do elemento aquecedor para a estrutura, passando pelo gás do ambiente em que o sensor se encontra. Este fluxo de calor depende tanto das propriedades térmicas do material que forma o aquecedor quanto da mistura de gases existentes no ambiente. Como a condutividade térmica de uma mistura de gases é dependente da quantidade de cada um deles na mistura, se a quantidade de um dos gases for alterada, ocorre uma variação na condutividade térmica da mistura [19]. Esta variação na condutividade térmica provoca a variação do fluxo de calor do aquecedor para o ambiente. Quanto maior a condutividade térmica do ambiente, maior o fluxo de calor. O aumento da perda de calor faz com que a temperatura do aquecedor diminua e, conseqüentemente, há uma variação na sua resistência.

Um dos primeiros estudos sobre sensores de gás microfabricados foi o realizado por Kimura, em 1995 [19]. Este sensor, mostrado na Figura 2.1, possuía resistores de platina como elementos aquecedores, sobre uma membrana de Ta_2O_5 e era coberto por uma camada de SiO_2 , e apresentou um tempo de resposta em torno de 20 ms e alta sensibilidade em testes com Argônio, ar puro e Hélio, quando comparado com os de fabricação convencional da época.

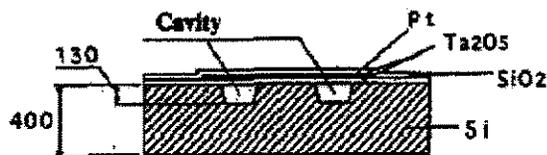


Figura 2.1 - Diagrama esquemático do detector de gás [19]

Mais recentemente, Mo [20] apresentou um micro-aquecedor de baixa tensão e potência para uso como sensor de gás, utilizando um resistor de Pt/Ti como elemento aquecedor, fabricado usando a técnica *front side bulk micromachining*. Este dispositivo é esquematizado na Figura 2.2.

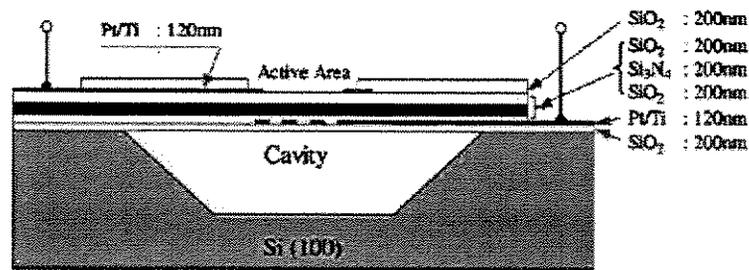


Figura 2.2 - Estrutura do sensor de gás de baixa tensão e potência [20]

Um outro sensor de gás, com micro-aquecedor de silício policristalino dopado com fósforo sobre uma membrana de Si_3N_4 e SiO_2 , e fabricado com técnica *back side bulk micromachining*, mostrado na Figura 2.3, foi apresentado por Puigcorbé [21].

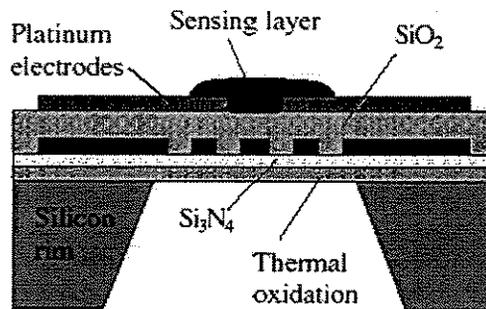


Figura 2.3 – Micro-aquecedor sobre membrana de Si_3N_4 e SiO_2 [21]

2.4.2 Sensor de velocidade

Uma das aplicações mais difundidas de sensores térmicos usando resistores é o anemômetro a fio quente. Na fabricação convencional, os resistores são fios metálicos com dimensões de aproximadamente 4 a 5 μm de diâmetro e 1,25 mm de comprimento. Esta pequena dimensão física dificulta seu manuseio e conexão a um circuito eletrônico de condicionamento [22].

A microfabricação de resistores para uso em anemômetros visa principalmente diminuir o consumo de potência, ocasionada pela perda de calor por condução do fio para seu suporte [22].

Com a microfabricação de sensores de velocidade é possível construir mais facilmente sensores com vários elementos aquecedores. Isto permite a fabricação de outros tipos de sensores de velocidade, como o calorimétrico e de tempo de voo [23].

Uma diferença entre a estrutura microfabricada e a convencional é que, na primeira, como os resistores podem ser construídos em diferentes dimensões e formas, os coeficientes que definem a transferência de calor podem ser bem diferentes daqueles encontrados na segunda, e a transferência de calor na estrutura deve ser bem analisada [24].

Um exemplo de estrutura impossível de se conseguir com a fabricação convencional é a mostrada na Figura 2.4, utilizada para determinar a velocidade, direção e sentido de vazão do fluido [25]. Este dispositivo é formado por um resistor aquecedor R_h , rodeado por quatro resistores sensores: R_n , R_e , R_s e R_w , deslocados de 90° em relação aos adjacentes, formando as direções norte-sul e leste-oeste. Devido a este posicionamento, a sensibilidade de cada um dos sensores é dependente da direção de vazão. Ainda é possível notar que o calor transferido do resistor aquecedor para os resistores sensores depende do sentido da vazão. Em um certo sentido, é transferido mais calor para o sensor que está localizado após o aquecedor que para o que está localizado antes dele, devido à convecção forçada.

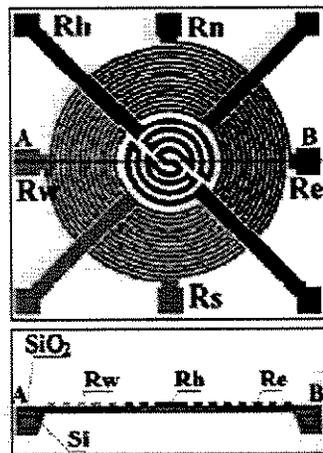


Figura 2.4 – Vista superior e transversal do sensor de vazão [25]

2.4.3 Sensor de pressão do tipo Pirani

O funcionamento do sensor de pressão do tipo Pirani é baseado no fato de que a condutividade térmica de um gás é proporcional à sua densidade molecular. Dessa forma, em um sistema de vácuo, a condutividade térmica do gás é determinada pela sua pressão [26]. Os sensores de gás descritos na Seção 2.4.1 podem então ser usados para a medição de pressão, em um ambiente onde existe um único tipo de gás.

Na Figura 2.5 é mostrado a estrutura do sensor de pressão desenvolvido por Chou [27]. Este sensor é formado por dois micro-aquecedores de platina. Um deles, fabricado sobre uma membrana de SiO_2 , é o sensor de pressão propriamente dito. O outro, sobre o substrato, funciona como sensor para compensação da temperatura ambiente.

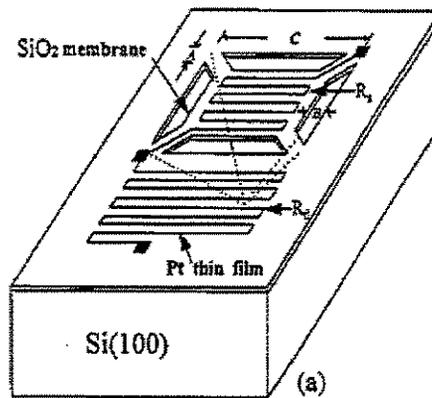


Figura 2.5 – Estrutura do sensor de pressão do tipo Pirani [27]

Um sensor de pressão do tipo Pirani com micro-aquecedor de silício policristalino, compatível com tecnologia CMOS, foi desenvolvido por Robinson [28].

2.4.4 Sensor de umidade

A condutividade térmica de uma mistura de gases depende da sua umidade. Para temperaturas abaixo de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, a condutividade térmica é menor em ambiente úmido que em ambiente seco. Para temperatura acima de $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, ocorre o inverso. Na faixa de temperatura entre de 100 e $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, a condutividade térmica é insensível à umidade [29].

Kimura [29] desenvolveu um sensor de umidade independente da temperatura do ambiente utilizando um único micro-aquecedor de platina e a técnica de chaveamento de temperatura do sensor. Assim, eliminou a necessidade de um segundo micro-aquecedor para compensação da temperatura, como a estrutura mostrada na Figura 2.5. Uma vantagem deste dispositivo, em relação aos de fabricação tradicional da época, foi o pequeno tempo de resposta, na ordem de 30 a 40 ms, proporcionado pelo volume reduzido do dispositivo.

2.5 Atuadores térmicos microfabricados

As estruturas dos micro-aquecedores apresentadas na seção anterior também podem ser utilizadas como atuadores térmicos. Uma das aplicações deste tipo de dispositivo é no controle de temperatura de microssistemas, como o utilizado na Reação em Cadeia da Polimerase - PCR (*Polimerase Chain Reaction*) para análises genômicas [17,30].

O PCR é um método que permite selecionar e amplificar um segmento de DNA, possibilitando obter grandes quantidades de DNA a partir de poucas células. Este método consiste em aplicar às amostras três etapas térmicas: a desnaturação, a aproximadamente 95°C, o anelamento, a aproximadamente 55 °C, e a extensão, à 72 °C [30]. Estas etapas térmicas devem ser repetidas ciclicamente até que seja obtida a quantidade desejada de DNA.

O uso de um dispositivo aquecedor microfabricado diminui consideravelmente o tempo necessário para realizar um ciclo de temperatura, já que o volume reduzido do dispositivo implica em uma constante de tempo térmica bem menor que nos dispositivos convencionais, permitindo rápidas variações de temperatura. Em [30] o tempo necessário para executar 30 ciclos foi de 3 minutos, enquanto em sistemas convencionais de PCR este tempo chega a até 2 horas. O micro-aquecedor apresentado é fabricado com platina.

Na Figura 2.6 é mostrada uma estrutura utilizada em um sistema de PCR [17]. O processo de fabricação é compatível com a tecnologia CMOS e o micro-aquecedor é obtido pela dopagem do próprio substrato de silício. Para a fabricação da estrutura foi utilizada a técnica *back side bulk micromachining* para formação de cavidades para amplificação do DNA.

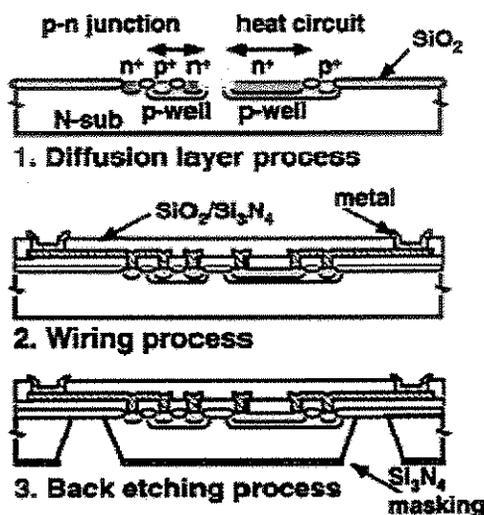


Figura 2.6 – Diagrama do processo de fabricação de um sistema de PCR [17]

Há alguns anos, grande parte dos trabalhos sobre dispositivos ou sistemas que utilizam micro-aquecedores buscam desenvolver estruturas que permitam um menor consumo de potência, através da modificação da geometria ou utilização de diferentes materiais para formação de membranas [31-33], e em algumas aplicações, nas quais o funcionamento do dispositivo baseia-se na condução de calor, busca-se a compensação da perda de calor por convecção e radiação [34-35].

2.6 Resumo do capítulo

Neste capítulo foi feita uma comparação entre características de transdutores térmicos convencionais e microfabricados e foram apresentadas as estruturas e os princípios de funcionamento de alguns sensores e atuadores térmicos microfabricados encontrados na literatura. O grande número de dispositivos citados, suas diversas aplicações e vantagens sobre os transdutores convencionais, justificam o estudo sobre os transdutores microfabricados que será apresentado nos capítulos seguintes.

CAPÍTULO 3 - MODELAGEM DO DISPOSITIVO

3.1 Introdução

A etapa inicial do projeto de um dispositivo é a sua idealização. É nessa etapa onde surgem as primeiras idéias: justificativa do projeto, definição de características e princípio de funcionamento. As etapas seguintes à idealização são o seu planejamento e realização. Para isso, são escolhidos os métodos e materiais que serão utilizados. Se a realização do projeto não for bem planejada, é possível que haja erros na execução e, conseqüentemente, desperdício de material e tempo, já que será necessário repetir etapas já realizadas. Para evitar que isso ocorra, devem-se estudar a concepção do projeto, a tecnologia com a qual ele será implementada e se este terá as características desejadas. Isso pode ser feito através da modelagem e análise. Modelar o dispositivo significa descrever de alguma forma o seu comportamento.

Neste capítulo são mostradas as diferentes estruturas dos micro-aquecedores fabricados e a sua modelagem matemática. Apresentamos as equações diferenciais parciais que regem seus comportamentos termo-elétricos e a distribuição de temperatura nos resistores aquecedores, que depende tanto das suas geometrias quanto das propriedades térmicas e elétricas dos materiais que os constituem, além do ambiente em que estes se encontram.

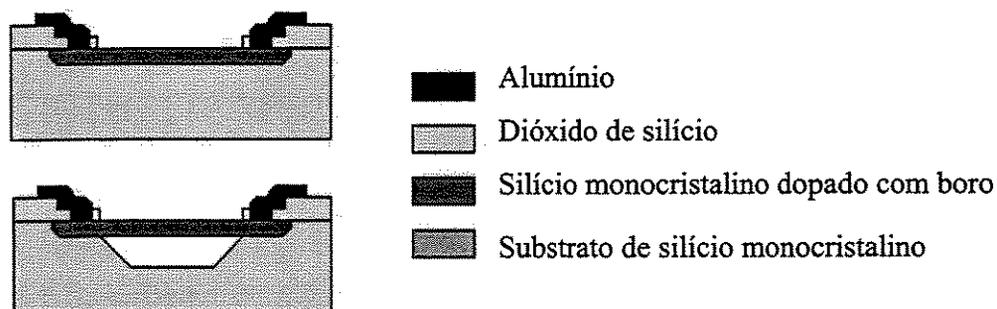
A modelagem destas estruturas pode ser efetuada baseando-se nas leis da conservação de cargas elétricas e da energia que, neste caso, são representadas pelas equações de continuidade da corrente elétrica e do fluxo de calor. Como as equações de continuidade são pontuais, valem para regiões de qualquer dimensão física. Assim, servem tanto para modelar dispositivos de tamanho macroscópico quanto microscópico.

3.2 Estruturas dos dispositivos

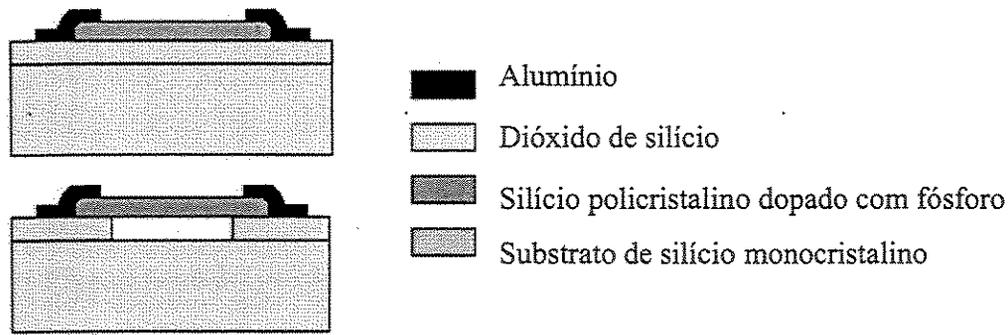
Os micro-aquecedores propostos são resistores compatíveis com tecnologias de microeletrônica fabricados em dois tipos de estruturas. Na primeira delas, o resistor aquecedor é fabricado no substrato de silício monocristalino, através da implantação iônica de dopantes de boro. Na segunda, este resistor é fabricado na camada de silício policristalino, através da implantação iônica de fósforo. Esses dois tipos de estruturas são desenvolvidos para serem compatíveis com as tecnologias de microeletrônica PMOS, NMOS e CMOS, e estes processos de fabricação são descritos no Capítulo 5.

Em algumas aplicações, os micro-aquecedores devem trabalhar a uma temperatura mais elevada que a do ambiente em que se encontram, assim, é necessário isolá-los termicamente do substrato para diminuir a perda de calor. Isso é feito corroendo-se o material que fica abaixo do resistor, que são diferentes em cada uma das estruturas. Com esse isolamento térmico se verifica uma diminuição de dissipação de calor dos resistores para o substrato, a qual traz como consequência um maior aquecimento destes dispositivos quando conduzindo corrente elétrica.

A primeira estrutura proposta, na qual o resistor é fabricado diretamente na lâmina de silício, é mostrada na Figura 3.1(a). Na segunda estrutura, mostrada na Figura 3.1(b), o resistor é fabricado sobre uma camada de dióxido de silício (SiO_2). Nessas figuras são mostrados os resistores termicamente isolados e não isolados das camadas em que são fabricados.



(a)



(b)

Figura 3.1 - Resistores fabricados em silício (a) monocristalino e (b) policristalino

3.3 Equações do domínio elétrico

A equação do domínio térmico que rege o comportamento do dispositivo é a equação da continuidade da corrente elétrica [36]

$$\nabla \cdot \vec{J} = -\frac{\partial \rho_e}{\partial t} \quad (3.1)$$

onde

\vec{J} é o vetor densidade de corrente elétrica

ρ_e é a densidade volumétrica de carga elétrica

Essa equação relaciona a corrente que sai de um pequeno volume ao decréscimo de carga por unidade de volume em cada ponto do volume em questão.

Outras equações do domínio elétrico que relacionam densidade de corrente, campo elétrico \vec{E} e potencial elétrico V , são definidas como a seguir:

$$\vec{J} = \sigma(x, y, z, T) \vec{E} \quad (3.2)$$

$$\vec{E} = -\nabla V \quad (3.3)$$

onde σ é a condutividade elétrica do material constituinte do micro-aquecedor, e pode ser considerada tanto função das variáveis espaciais x, y, z , quanto função da temperatura T . Se a condutividade for a mesma em todo o material, é considerada uniforme, e σ torna-se apenas função da temperatura, $\sigma(T)$.

Substituindo estas relações (3.2) e (3.3) na equação (3.1), obtém-se

$$\nabla \cdot (-\sigma(T) \nabla V) = -\frac{\partial \rho_e}{\partial t} \quad (3.4)$$

Aplicando o operador diferencial vetorial ∇ ao operando, tem-se

$$-\nabla \sigma(T) \cdot \nabla V - \sigma(T) \nabla^2 V = -\frac{\partial \rho_e}{\partial t} \quad (3.5)$$

A equação (3.5) é a equação que deve ser resolvida para se obter o comportamento elétrico do dispositivo.

Um caso particular é quando a condutividade σ é uniforme em todo o material e independente da temperatura e o dispositivo está trabalhando em regime permanente - ou estacionário - ou seja, não há variações de grandezas elétricas no decorrer do tempo. Nesse caso, σ é uma constante e o termo $\frac{\partial \rho_e}{\partial t}$ é nulo. Então, a equação (3.4) pode ser simplificada da seguinte forma

$$\nabla \cdot (\nabla V) = \nabla^2 V = 0 \quad (3.6)$$

que é a conhecida equação de Laplace. O campo potencial elétrico dado pela equação (3.6) é independente das propriedades elétricas do material, sendo apenas função do potencial aplicado ao dispositivo (condições de contorno) e da sua geometria.

3.4 Equações do domínio térmico

O comportamento térmico do dispositivo é determinado pela equação da continuidade do fluxo de calor [37]

$$Q = \nabla \cdot \vec{f} + h(T - T_\infty) + \varepsilon\sigma(T^4 - T_\infty^4) + \rho_m C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.7)$$

onde:

Q é calor gerado internamente, por unidade de volume

\vec{f} é o vetor fluxo de calor

h é o coeficiente de convecção

ρ_m é a densidade de massa do material

C_p é a capacidade calorífica do material

T é a temperatura em um dado ponto

T_∞ é a temperatura do ambiente

ε é a emissividade do material

σ é a constante de Boltzmann

A equação (3.7) é a análoga térmica da equação (3.1), do domínio elétrico. O termo Q é uma fonte de calor interna ao dispositivo. Esta fonte de calor pode ser gerada por diversos fenômenos físicos: elétricos, mecânicos, químicos, etc. O primeiro termo do lado direito dessa equação representa a troca de calor por condução térmica, o segundo, por convecção e o terceiro, por radiação. O quarto termo representa a taxa de variação da energia interna do dispositivo. Neste trabalho não é tratada a perda de calor por radiação. A perda de calor por convecção é modelada na seção 3.10, que trata de sensores térmicos com troca de calor por convecção.

A definição de fluxo de calor, que o relaciona com a propriedade do material conhecida como condutividade térmica k , é dada pela seguinte equação

$$\vec{f} = -k(x, y, z, T) \nabla T \quad (3.8)$$

Considerando que a condutividade térmica é a mesma em todo o material, sendo apenas função da temperatura, substituindo (3.8) na equação (3.7) e desconsiderando as perdas de calor por convecção e radiação, obtém-se

$$\nabla \cdot (k(T) \nabla T) + Q = \rho_m C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.9)$$

Nos micro-aquecedores, a fonte Q é a energia gerada internamente por auto-aquecimento, devido ao efeito Joule. Então

$$Q = \vec{J} \cdot \vec{E} \quad (3.10)$$

representa a potência dissipada por unidade de volume, e a equação (3.9) pode ser escrita como

$$\nabla \cdot (k(T) \nabla T) + \vec{J} \cdot \vec{E} = \rho_m C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.11)$$

Aplicando o operador diferencial vetorial ao operando, tem-se a seguinte equação térmica análoga à elétrica (3.5)

$$\nabla k(T) \cdot \nabla T + k(T) \nabla^2 T + \vec{J} \cdot \vec{E} = \rho_m C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.12)$$

Considerando um caso particular, onde a condutividade térmica é a mesma em todo o material, que não varia com a temperatura e operação do dispositivo em regime permanente, a equação (3.12) é simplificada para

$$k \nabla^2 T + \vec{J} \cdot \vec{E} = 0 \quad (3.13)$$

A partir dessa equação pode-se concluir que, quando há geração de calor internamente ao dispositivo, a distribuição de temperatura depende da condutividade térmica k do material constituinte. Além disso, como o termo $\vec{J} \cdot \vec{E}$ é a energia elétrica dissipada por unidade de volume, ou seja, a densidade de energia dissipada, a distribuição de temperatura para os dois dispositivos com a mesma resistência elétrica e volumes diferentes, também será diferente. Nesse caso, será necessária maior potência elétrica para que o dispositivo de maior volume tenha a mesma distribuição de temperatura que o de menor volume. Esse é um fato muito importante que deve ser levado em conta quando se está projetando o dispositivo.

Quando não há geração interna de energia, a equação (3.13) é simplificada da seguinte forma

$$\nabla^2 T = 0 \quad (3.14)$$

Esta é a equação de Laplace do domínio térmico, análoga à elétrica (3.6). O campo de temperatura dado pela equação (3.14) é independente das propriedades térmicas do material, sendo apenas função da temperatura na vizinhança do dispositivo (condições de contorno) e da sua geometria.

3.5 Problema de domínios acoplados

Pela equação (3.12) pode-se observar que há uma relação entre a distribuição de temperatura e as grandezas elétricas, pela existência do termo $\vec{J} \cdot \vec{E}$. Por esse motivo, (3.10) é chamada de equação de acoplamento. Ainda há uma outra equação de acoplamento, que relaciona a condutividade elétrica $\sigma(T)$, que aparece na equação (3.5), à temperatura no dispositivo.

Para os dispositivos aquecedores estudados nesta dissertação, a relação entre a condutividade elétrica e a temperatura é da seguinte forma [18]:

$$\sigma(T) = \sigma_0 [1 + \alpha(T - T_0)]^{-1} \quad (3.15)$$

onde

σ_0 é a condutividade elétrica na temperatura de referência T_0

α é o coeficiente de temperatura da resistividade (TCR)

O sistema de equações diferenciais parciais, dado pelas equações (3.5) e (3.12), juntamente com as equações de acoplamento (3.10) e (3.15), e com as condições de contorno e iniciais, forma um problema de domínios acoplados térmico-elétrico.

3.6 Relação entre resistividade e temperatura

A dependência da condutividade elétrica com a temperatura depende do material. É mais usual escrever essa relação em termos da resistividade elétrica em função da temperatura, relacionando a condutividade à resistividade da seguinte forma

$$\sigma(T) = \frac{1}{\rho(T)} \quad (3.16)$$

Para muitos metais puros usados como condutores elétricos, como cobre, alumínio e ouro, a relação linear $\rho \propto T$ é observada em uma ampla faixa de temperatura, até a temperatura de fusão [18]. Para metais não puros a relação pode ser não linear, e pode ser generalizada por um polinômio de grau n , como a seguir

$$\rho = \rho_0 \left[1 + \alpha(T - T_0) + \beta(T - T_0)^2 + \dots + \eta(T - T_0)^n \right] \quad (3.17)$$

onde

α é o coeficiente de temperatura da resistividade de primeira ordem

β é o coeficiente de temperatura da resistividade de segunda ordem

η é o coeficiente de temperatura da resistividade de ordem n

Em muitos casos, pode-se fazer uma aproximação com um polinômio de segunda ordem sem perda de precisão. A equação (3.17) é escrita então da seguinte maneira

$$\rho(T) = \rho_0 \left[1 + \alpha(T - T_0) + \beta(T - T_0)^2 \right] \quad (3.18)$$

A relação entre resistividade e temperatura em materiais semicondutores não é linear como para os metais. A resistividade de um semicondutor de estrutura monocristalina extrínseco, isto é, dopado, depende do nível de concentração de portadores e de suas mobilidades [18].

Quando o nível de concentração de dopantes em um semicondutor alcançar um valor da ordem de 10^{19} à 10^{20} átomos/cm³, o semicondutor é considerado degenerado. Nesse caso, ele apresenta algumas características que são bastante similares com as de um metal que as de um semicondutor, entre elas, a relação linear entre a resistividade elétrica e a temperatura, $\rho \propto T$. Além disso, no semicondutor degenerado, nem todos os átomos dopantes são ionizados, e a concentração de portadores atinge um nível de saturação por volta de 10^{20} átomos/cm³ [18]. Algumas aplicações dos semicondutores degenerados são na formação de contatos ôhmicos em circuitos integrados e como porta em transistores MOS.

Uma discussão adicional para silício monocristalino dopado com boro, a respeito dos coeficientes de temperatura da resistividade de primeira e segunda ordens da equação (3.18), α e β , respectivamente, e suas variações com os níveis de dopagem, pode ser encontrada na referência [38]. O valor do coeficiente α , segundo [38], é sempre positivo em uma faixa de concentração entre 10^{17} e 10^{20} átomos/cm³, com um valor mínimo em torno de $5 \cdot 10^{18}$ átomos/cm³. Na concentração de 10^{20} átomos/cm³ o valor de α encontra-se entre 1.500 e 2.000 ppm/°C. Com relação ao valor do coeficiente β , observa-se um decaimento monotônico, se aproximando de zero, até a concentração de 10^{19} átomos/cm³. Isso indica que quanto maior o nível de dopagem, a relação entre a resistividade e a temperatura torna-se mais linear, já que o coeficiente de segunda ordem β se aproxima de zero.

Das discussões acima, conclui-se que para fazer resistores com característica linear entre resistividade e temperatura, deve-se usar metais ou semicondutores altamente dopados, e que, no caso de semicondutores, quanto maior for a dopagem, mais linear será esta relação. Assim, a equação (3.18) pode ser aproximada por um polinômio de primeira ordem, da forma

$$\rho(T) = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (3.19)$$

Isso justifica a equação da condutividade elétrica (3.15), utilizada no modelo de domínios acoplados.

Nos micro-aquecedores que estamos tratando a resistividade e a geometria definem a resistência do dispositivo. A resistividade e o TCR do dispositivo por sua vez, são parâmetros que podem ser controlados através do nível de dopagem. A escolha desses parâmetros é feita de acordo com as características de funcionamento desejadas: se há necessidade de o dispositivo dissipar pouca potência, pode-se escolher uma resistência mais elevada; se a potência não é uma variável a ser minimizada, aumenta-se a liberdade de escolha da resistência do dispositivo. O TCR é um parâmetro que indica a variação na resistividade em virtude de uma variação na temperatura do dispositivo. Em alguns sensores térmicos, a sensibilidade do dispositivo é diretamente proporcional ao TCR e deseja-se ter um valor de TCR alto. Isso é exatamente o oposto do que se deseja para resistores em circuitos eletrônicos, onde se requer que a resistência do dispositivo seja independente da temperatura. Nesse caso há necessidade de um TCR baixo.

3.7 Troca de calor com ambiente externo

As equações diferenciais que regem o comportamento termo-elétrico do dispositivo, apresentadas anteriormente, são válidas não apenas para a região limitada pelo contorno do dispositivo, mas também para o ambiente onde ele se encontra. Assim, a equação da continuidade da corrente elétrica (3.1) e a do fluxo de calor (3.7) levam em conta a interação entre o dispositivo e o ambiente a sua volta. É esta interação entre o dispositivo

e o ambiente que permite o desenvolvimento de sensores térmicos, já que ocorre troca de calor entre eles. Essa troca de calor, que depende tanto das propriedades térmicas do dispositivo quanto do ambiente, modifica a distribuição de temperatura no dispositivo. Se é possível relacionar alguma propriedade térmica ou elétrica do dispositivo com a grandeza física do ambiente que se deseja medir, o dispositivo torna-se um sensor dessa grandeza. Como foi mencionado, há uma relação entre as propriedades elétricas do dispositivo e sua distribuição de temperatura, então, se a grandeza a ser medida modifica a distribuição de temperatura e essa modifica uma propriedade elétrica, a medição da variação dessa propriedade é uma medição indireta da grandeza física.

É importante distinguir os três modos de troca de calor entre o micro-aquecedor e o ambiente: condução, convecção e radiação, porque são eles que determinam o funcionamento do sensor. Assim, pode-se dividir os sensores térmicos em três grupos: os que têm o princípio de funcionamento baseado na troca de calor por condução, os baseados na troca de calor por convecção e os baseados na troca de calor por radiação.

3.8 Sensor es térmicos com troca de calor por condução

Os sensores térmicos baseados na troca de calor por condução são aqueles sensíveis aos parâmetros ou grandezas físicas envolvidas nesse fenômeno. Nesse grupo encontram-se os sensores de: temperatura, pressão do tipo Pirani, condutividade térmica de gases, mistura de gases. Como mostrado no Capítulo 4, os micro-aquecedores podem ser utilizados como sensores térmicos baseados nesse princípio de funcionamento.

3.9 Sensor es térmicos com troca de calor por radiação

Qualquer corpo à temperatura acima do zero absoluto emite radiação em forma de ondas eletromagnéticas cujo espectro é uma função da sua temperatura [37]. Os bolômetros são sensores capazes de medir radiação eletromagnética. As estruturas propostas para os micro-aquecedores também podem ser utilizadas como bolômetros. Nesse caso, como o objetivo é medir o calor recebido em forma de radiação, o dispositivo deve trabalhar sem

dissipar calor, ou seja, com baixa temperatura de funcionamento. Nesta dissertação não será abordada a modelagem ou simulação específica para esse tipo de sensor, em vista de estar fora de escopo deste trabalho.

3.10 Sensor es térmicos com troca de calor por convecção

A troca de calor por convecção se observa quando há diferença de temperatura entre um corpo e o fluxo de massa na sua vizinhança [37]. Isso permite que sensores baseados nesse modo de transferência de calor funcionem como sensores de velocidade de fluidos. Nesta seção, modelamos o funcionamento do micro-aquecedor como um sensor de velocidade de fluido do tipo fio quente. A velocidade é determinada medindo-se o resfriamento do aquecedor causado pela convecção forçada. A medição do resfriamento é feita pela medição da resistência do aquecedor, visto que a resistividade e a temperatura se relacionam pela equação (3.19), repetida aqui, por conveniência.

$$\rho(T) = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (3.20)$$

A perda de calor por convecção por unidade de área é dada pela equação

$$q_{conv} = h(T - T_\infty) \quad (3.21)$$

onde h é o coeficiente de convecção, que depende da geometria do dispositivo, do tipo de escoamento, das propriedades térmicas e velocidade do fluido, T é a temperatura do dispositivo e T_∞ é a temperatura do fluido. Para um dispositivo em que a temperatura varia a cada ponto (não isotérmico), define-se um coeficiente de convecção pontual, e a equação (3.21) pode ser discretizada da seguinte forma [39-40]

$$q_{conv}(x) = \sum_{i=0}^n h(x, \xi_i) \Delta T_i \quad (3.22)$$

Considerando o escoamento laminar em um plano, o coeficiente de convecção é dado por [39]

$$h(x, \xi_i) = \frac{0,332\kappa \text{Pr}^{1/3} \text{Re}_x^{1/2}}{x \left[1 - (\xi_i/x)^{3/4} \right]^{1/3}} \quad (3.23)$$

onde

$$\text{Re}_x = \frac{u_\infty x}{\nu} \quad (3.24)$$

$$\text{Pr} = \frac{\mu c}{\kappa} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (3.25)$$

Re_x e Pr são quantidades adimensionais, conhecidos respectivamente como *Número de Reynolds* e *Número de Prandtl*, e dependem da velocidade u_∞ e das propriedades físicas do fluido: viscosidade dinâmica ν , viscosidade cinemática μ , calor específico c , condutividade térmica κ e difusividade térmica α .

O coeficiente de convecção pode ser escrito em função da velocidade do fluido

$$h(x, \xi_i) = \frac{0,332\kappa \text{Pr}^{1/3} \sqrt{u_\infty}}{(x\nu)^{1/2} \left[1 - (\xi_i/x)^{3/4} \right]^{1/3}} \quad (3.26)$$

Considerando o termo da perda de calor por convecção em função da velocidade do fluido, equação (3.22), na equação da difusão do calor sem o termo de troca de calor por radiação e o dependente do tempo, equação (3.7), obtém-se a equação no domínio térmico para o sensor de vazão em regime permanente

$$Q = \nabla \cdot \vec{f} + q_{conv}(u_\infty) \quad (3.27)$$

A simulação do funcionamento do micro-aquecedor como um sensor de velocidade do tipo anemômetro a fio quente é feita usando a equação (3.27) e será abordada no próximo capítulo.

3.11 Resumo do capítulo

Neste capítulo foram apresentados os esquemas das estruturas de micro-aquecedores fabricados neste trabalho, e em seguida, as equações diferenciais do domínio elétrico e do domínio térmico, que regem o comportamento dos transdutores térmicos e formam um problema de domínios acoplados. Também foi descrita a classificação dos transdutores quanto ao modo de transferência de calor em que se baseiam seus princípios de funcionamento: condução, convecção ou radiação. A solução do problema de domínios acoplados, formado pelas equações apresentadas neste capítulo, será discutida no capítulo a seguir.

CAPÍTULO 4 - SIMULAÇÃO DAS ESTRUTURAS

4.1 Introdução

No capítulo anterior desenvolvemos um modelo matemático que descreve o comportamento termo-elétrico do micro-aquecedor através de duas equações diferenciais parciais e outras duas equações de acoplamento. O objetivo deste capítulo consiste em obter a solução desse sistema de equações, ou seja, calcular o campo potencial elétrico e o campo de temperatura no dispositivo. A obtenção de uma solução analítica para esse tipo de sistema é bastante difícil devido à presença de termos não lineares nas equações, razão pela qual optamos pela solução numérica.

Muitos *softwares* estão disponíveis para a simulação de problemas físicos, como o ANSYS, MEMCAD, Flow3D e outros. Alguns desses *softwares*, conhecidos como CAD (*Computer Aided Design*), contêm módulos para serem utilizados em cada um dos domínios físicos. A simulação do micro-aquecedor e seu uso como sensor baseado na troca de calor por condução foi realizada com o FlexPDE, que é um *software* para solução de equações diferenciais parciais por elementos finitos, sendo mais geral e de uso mais simples que os outros citados, mas nem por isso menos poderoso. A justificativa da escolha desse *software* se deve ao fato de que estamos interessados não somente na simulação do dispositivo, mas também um melhor entendimento dos parâmetros do modelo. Quanto as propriedades dos materiais necessárias para a solução do sistema de equações, estes foram utilizados os valores existentes na literatura e não os medidos, mas que, nem por isso comprometem os resultados obtidos nesta simulação.

Para a simulação do dispositivo como um sensor baseado na troca de calor por convecção - sensor de velocidade de fluidos do tipo anemômetro a fio quente - foi desenvolvido um algoritmo para solução do sistema de equações através do método das diferenças finitas.

Neste capítulo, apresentamos os resultados das simulações dos micro-aquecedores, obtendo os campos potenciais, de temperatura, densidade de corrente elétrica, fluxo de calor e outras curvas importantes para o entendimento das características termo-elétricas e

de funcionamento de cada uma das estruturas. Ainda, são analisadas as relações entre as propriedades dos materiais utilizados e os resultados obtidos.

4.2 Software FlexPDE e método dos elementos finitos

FlexPDE é um *software* para solução de sistemas de equações diferenciais parciais de primeira ou segunda ordens, lineares ou não, dependentes do tempo ou não, em um domínio de duas ou três dimensões. O sistema a ser resolvido pode ter qualquer número de equações. Como os campos encontrados na natureza são governados por equações diferenciais parciais, FlexPDE é uma ferramenta apropriada para a solução numérica de problemas físicos, e para isso, o *software* utiliza a análise por elementos finitos (FEA).

Na análise por elementos finitos, o domínio do problema é dividido em regiões (elementos) simples, formando uma malha. A cada região se associa um sistema de equações semelhante ao original, e esses novos sistemas são resolvidos simultaneamente. O *software* FlexPDE divide um domínio bidimensional em triângulos e um tridimensional em prismas. Assim, o problema que inicialmente contém infinitas incógnitas, para cada ponto do domínio, passa a conter um número finito, para cada vértice dos triângulos ou prismas.

Para simular o comportamento do micro-aquecedor com FlexPDE, são necessários três requisitos: o modelo descrito por equações diferenciais parciais, a definição do domínio ou geometria do problema e a definição dos materiais. O primeiro foi descrito no capítulo anterior e os dois últimos abordados a seguir.

4.3 Definição do dispositivo: geometria e materiais

A primeira etapa para a simulação de uma estrutura consiste na definição da sua geometria e dos materiais que a compõem. Isso é feito atribuindo as propriedades térmicas e elétricas que caracterizam um material à sua região específica no volume que limita o dispositivo. Por exemplo, o substrato de silício monocristalino é definido atribuindo à região desejada as propriedades desse material. Esse procedimento é feito para cada um dos materiais presentes no dispositivo e para o ambiente à sua volta.

A Figura 4.1 mostra a definição das regiões formadas por cada material em duas dimensões, onde cada cor representa um material diferente, em cada um dos tipos de micro-aquecedores que serão simulados: (a) com camada sacrificial e (b) sem camada sacrificial. As regiões mostradas nestas figuras são apenas para os dispositivos a serem construídos com silício policristalino.

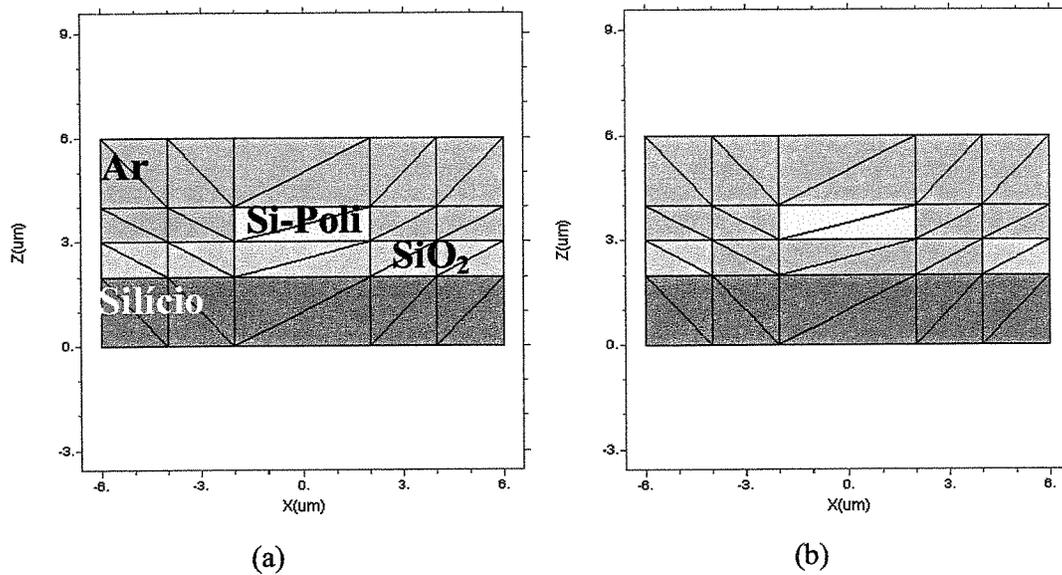


Figura 4.1 - Definição dos materiais do micro-aquecedor (a) com camada sacrificial e (b) sem camada sacrificial

Os triângulos em cada uma das figuras formam a malha definida pelo software, que calcula as variáveis do problema em cada um dos vértices. As geometrias em três dimensões dos volumes que limitam o domínio do problema, definindo o micro-aquecedor e o ambiente à sua volta, são mostrados na Figura 4.2(a), para a estrutura com camada sacrificial, e na Figura 4.2(b), para a estrutura sem camada sacrificial.

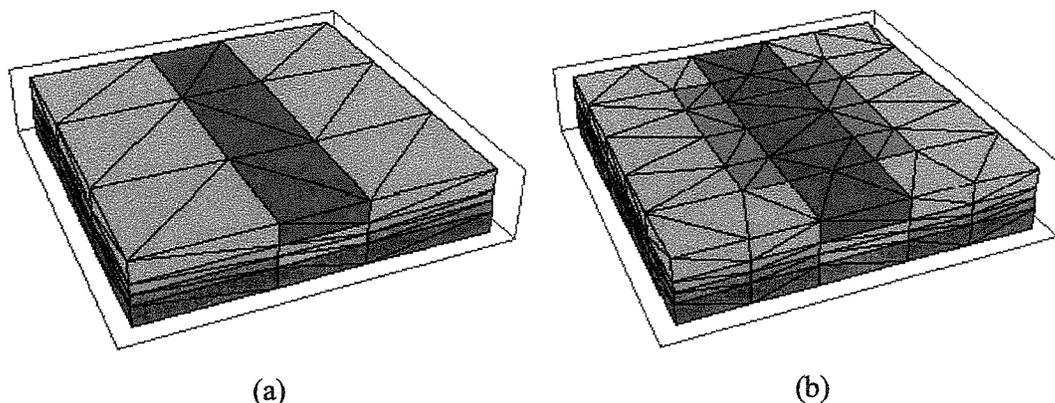


Figura 4.2 - Estruturas em três dimensões dos dispositivos (a) com camada sacrificial e (b) sem camada sacrificial

As regiões que compõem cada material foram definidas a partir das propriedades térmicas e elétricas de cada uma. Na Tabela 4.1 são mostrados os valores das condutividades térmicas e elétricas de cada material utilizado nas simulações. A partir destas simulações podemos analisar o efeito da condutividade térmica dos materiais nas distribuições de temperatura nas estruturas.

Tabela 4.1 - Condutividades térmicas e elétricas dos materiais para simulação

Material	Condutividade térmica (W/mK) [37]	Condutividade elétrica (Ω^{-1})
Silício monocristalino (substrato tipo N)	148	$1 \cdot 10^{-5}$
Silício monocristalino (dopado com Boro)	148	$4 \cdot 10^{-2}$
Silício policristalino	32 [41]	$4 \cdot 10^{-2}$
Dióxido de silício	1,38	$1 \cdot 10^{-7}$
Ar	0,0263	$1 \cdot 10^{-7}$

4.4 Características térmicas dos micro-aquecedores

As dimensões reais dos micro-aquecedores construídos dificultam a visualização dos resultados de simulação porque a largura e comprimento dos resistores são muito maiores que sua espessura. Para uma melhor visualização e análise dos resultados, optou-se inicialmente pela simulação de dispositivos com dimensões de mesma ordem para cada uma das três coordenadas espaciais. Os resultados dessas simulações são mostrados nesta seção e os dos dispositivos simulados com dimensões reais, mostrados na Seção 4.5.

4.4.1 Micro-aquecedores de silício policristalino

Após a definição da geometria do micro-aquecedor, é necessário definir a tensão aplicada e a temperatura. Na simulação, isso é feito a partir das condições de contorno aplicadas às regiões necessárias. Como o problema a ser resolvido possui duas variáveis, é preciso fornecer as condições de contorno para cada uma delas. Caso isso não seja feito, o problema terá um número infinito de soluções. A condição de contorno para o campo potencial é a tensão aplicada aos terminais do dispositivo, e para a temperatura, é a temperatura ambiente na base do substrato, considerada constante e uniforme.

A estrutura do micro-aquecedor com resistor de silício policristalino é a mostrada na Figura 4.1. O resistor é isolado elétrica e termicamente do substrato de silício por uma camada de dióxido de silício. Sobre o dispositivo, define-se a região do ar ambiente.

Na Figura 4.3 são mostradas as distribuições de temperatura nos micro-aquecedores fabricados em silício policristalino com camada sacrificial de dióxido de silício (SiO_2), com tensão aplicada de 1 V e temperatura ambiente de 25 °C. Os cortes apresentados nessa figura foram escolhidos de forma a efetuar futuras comparações com outros resultados de simulações.

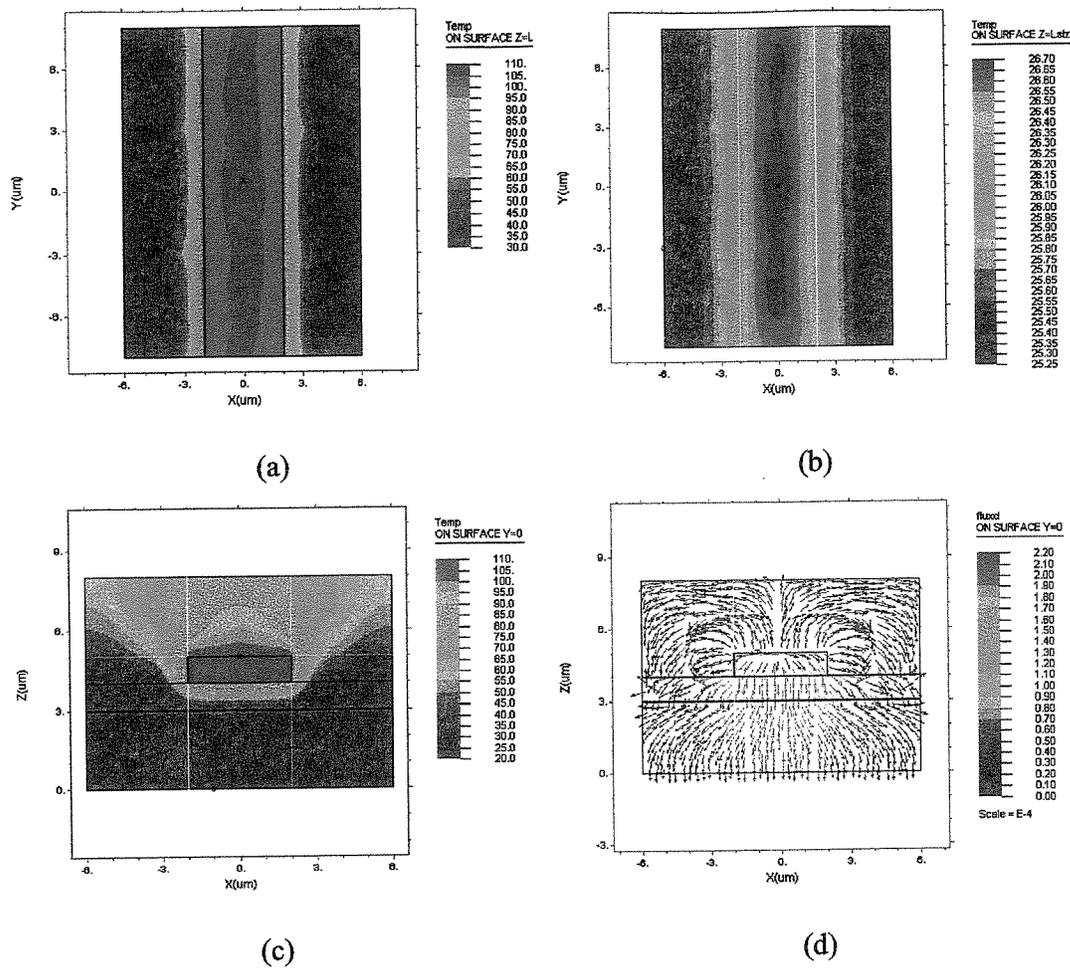


Figura 4.3 – Cortes da distribuição de temperatura e fluxo de calor no dispositivo de silício policristalino com camada sacrificial de SiO₂

Na Figura 4.3(a) observa-se que a temperatura é aproximadamente 110 °C por todo o resistor de silício policristalino, e que a temperatura diminui a partir do resistor em direção ao ar ao seu redor. A distribuição de temperatura na interface substrato-SiO₂ é mostrada na Figura 4.3(b). Observa-se que, nessa interface, a temperatura máxima é aproximadamente 26,7 °C, que é próxima à temperatura ambiente. Isso indica que há uma diferença de temperatura significativa entre o resistor de silício policristalino e o substrato, ou seja, sobre a camada de SiO₂. Esse fato se deve à baixa condutividade térmica do dióxido de silício, e pode ser melhor visualizado na Figura 4.3(c), na qual pode-se observar o gradiente de temperatura na camada de SiO₂ entre o resistor e o substrato.

O fluxo de calor na estrutura é mostrada na Figura 4.3(d). Essa figura mostra que o fluxo de calor pelo ar é praticamente nulo e que a maior parte do fluxo ocorre do microaquecedor para o substrato através do óxido de silício.

Na Figura 4.4 são mostrados os resultados da simulação da estrutura do microaquecedor fabricado em silício policristalino, mas agora sem a camada sacrificial de dióxido de silício, para as mesmas condições de contorno: tensão aplicada de 1 V e temperatura ambiente de 25 °C.

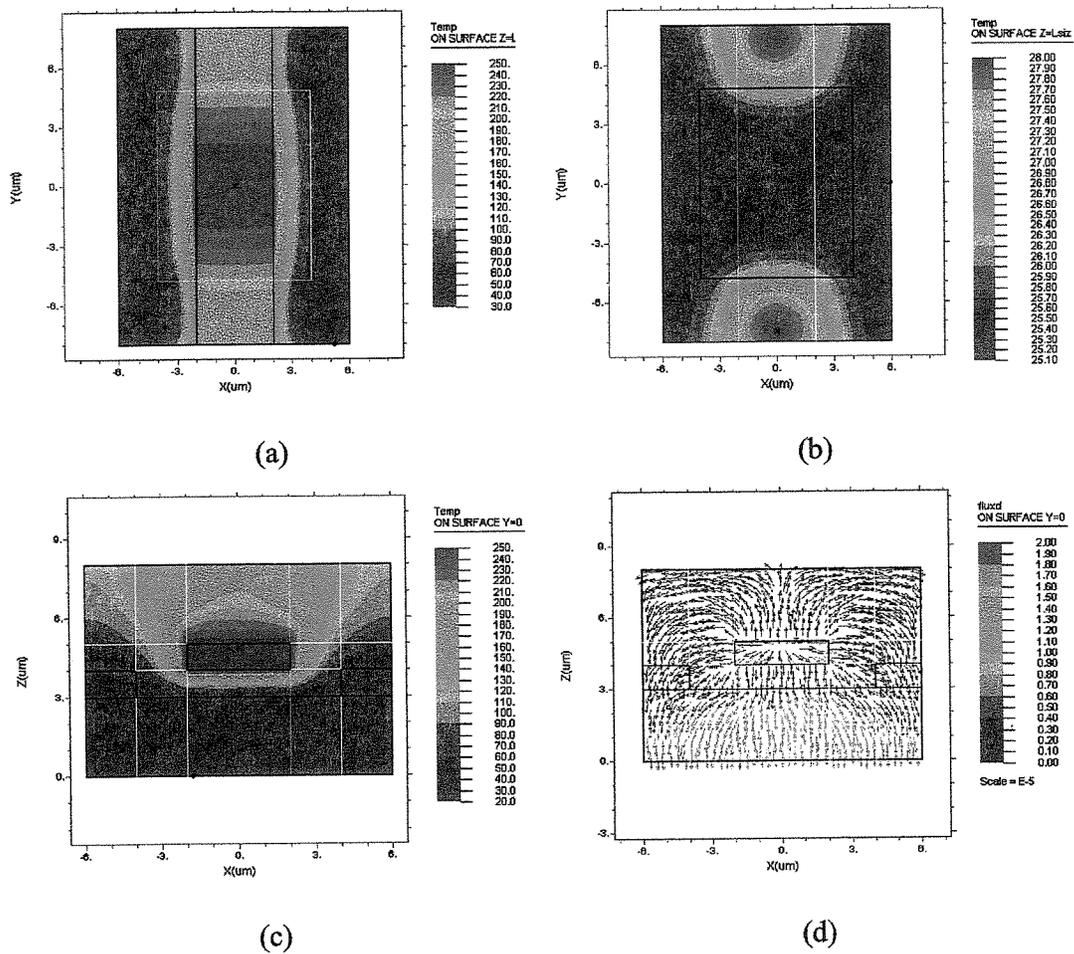


Figura 4.4 – Cortes da distribuição de temperatura e fluxo de calor no dispositivo de silício policristalino sem camada sacrificial

Dois efeitos resultantes da remoção da camada de SiO_2 podem ser observados na Figura 4.4(a): a temperatura máxima no micro-aquecedor aumenta para aproximadamente $250\text{ }^\circ\text{C}$, e essa temperatura não é mais uniformemente distribuída, tendo um valor máximo no centro do micro-aquecedor, diminuindo em direção às suas extremidades. O aumento significativo de temperatura se deve à melhor isolamento térmica do micro-aquecedor. Uma vez que o ar é menos condutor térmico que o dióxido de silício (ver Tabela 4.1), há uma menor perda de calor do dispositivo para o substrato. Na Figura 4.4(b), na qual é mostrada a interface substrato- SiO_2 , é possível observar que as regiões de maior temperatura são onde o micro-aquecedor está apoiado sobre o óxido. Na Figura 4.4(c) pode-se observar mais claramente a remoção do óxido sob o micro-aquecedor. A distribuição de temperatura mostrada é praticamente igual àquela da Figura 4.3(c), mas com valores de temperatura mais elevados.

Um resultado importante desta estrutura é apresentado na Figura 4.4(d). Diferentemente da estrutura com óxido sob o micro-aquecedor, agora há fluxo de calor pelo ar. Mesmo o ar tendo uma condutividade térmica baixa, o fluxo de calor é significativo através dele nesta estrutura. É esse fluxo de calor que permite o funcionamento do dispositivo como um sensor de parâmetros que dependem dos gases presentes no ambiente, pois a intensidade do fluxo é uma função da condutividade térmica desses gases. Assim, é possível usar essa estrutura como um sensor de condutividade térmica de um gás, mistura de gases e outros.

O fluxo de calor pelo ar, abaixo do micro-aquecedor, depende da distância entre este e o substrato. Quanto menor a distância, maior o fluxo de calor e, conseqüentemente, maior a sensibilidade do dispositivo. Quando se deseja que o dispositivo perca a menor quantidade de calor possível por condução através do ar, deve-se aumentar essa distância, que, nesta estrutura, é dada pela espessura da camada de dióxido de silício. A obtenção de camadas de SiO_2 espessas, acima de $2\text{ }\mu\text{m}$ por exemplo, é possível pelo processo de deposição, mas quanto mais espessa a camada, maior o tempo de deposição.

4.4.2 Micro-aquecedores de silício monocristalino

Nesta seção apresentamos as simulações realizadas para as estruturas de micro-aquecedores formados por resistores fabricados em substrato de silício por dopagem com boro. Na Figura 4.5 são mostradas as regiões de materiais definidas para estes tipos de estrutura.

A distância entre o resistor e o substrato é dada pela espessura de silício corroído do substrato, e não por uma camada sacrificial como na estrutura da seção anterior, sendo então possível obter distâncias maiores.

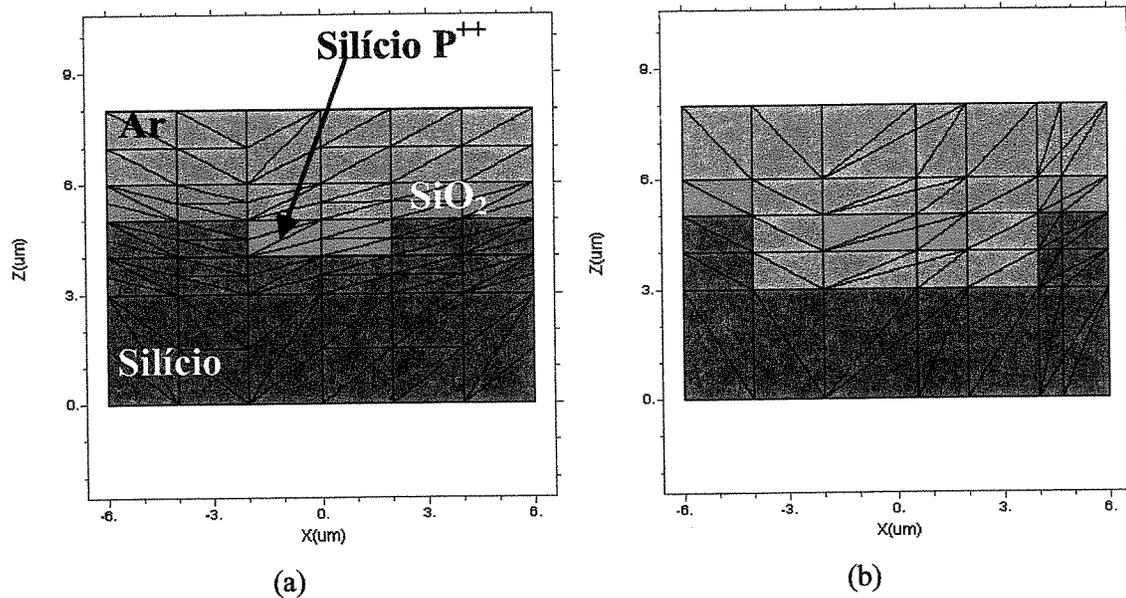


Figura 4.5 – Definição dos materiais da estrutura do micro-aquecedor formado em substrato de silício (a) sem isolamento térmica e (b) com isolamento térmica

Na Figura 4.6 são mostradas as distribuições de temperatura e fluxo de calor na estrutura sem isolamento térmica entre o resistor e o substrato, para as mesmas condições de contorno anteriores: tensão de 1 V e temperatura ambiente de 25 °C. O primeiro efeito observado é que a temperatura máxima é de aproximadamente 27,5 °C na superfície do resistor, mostrada na Figura 4.6(a), e de 26,9 °C na interface entre o resistor e o substrato, mostrada na Figura 4.6(b). A temperatura máxima neste dispositivo é aproximadamente

82,5 °C menor que as apresentadas pelos micro-aquecedores fabricados com resistores em silício policristalino, sendo apenas 2,5 °C acima da temperatura ambiente considerada na simulação.

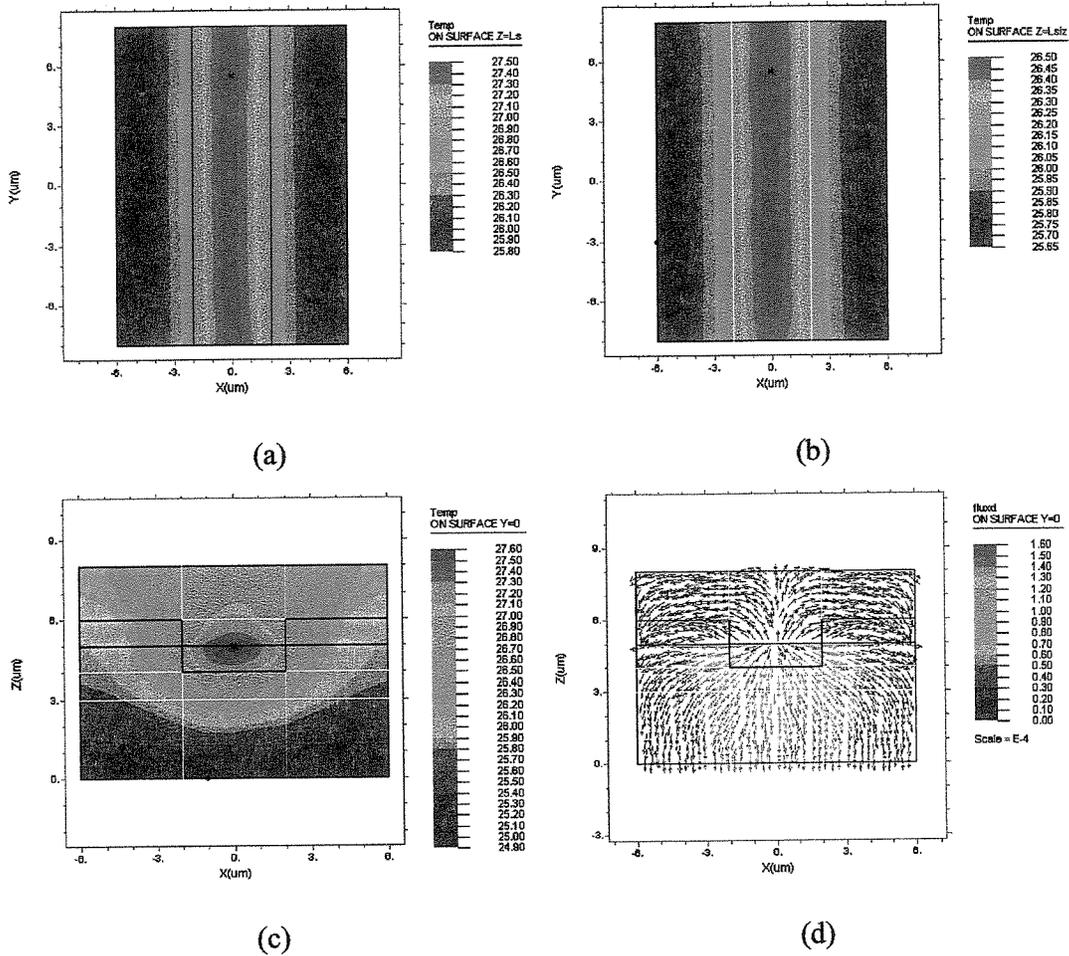


Figura 4.6 – Cortes da distribuição de temperatura e fluxo de calor no dispositivo de silício monocristalino sem isolamento térmica

Este pequeno aumento de temperatura se deve ao contato térmico entre o resistor e o substrato do dispositivo. Como o material do substrato é o silício monocristalino, que possui uma condutividade térmica elevada em comparação com os outros materiais utilizados (ver Tabela 4.1), não há resistência térmica suficiente para impedir o fluxo de calor entre o resistor e o substrato. Na Figura 4.6(c) observa-se que não há grandes gradientes de temperatura entre o resistor e o substrato, o que confirma que não há isolamento

térmica entre esses dois elementos. A Figura 4.6(d) mostra que quase todo o calor gerado é perdido para o substrato. É este fluxo de calor elevado que impede que o resistor seja aquecido a temperaturas mais altas. Este é o mesmo comportamento térmico apresentado por resistores em circuitos integrados que, nesse caso, não devem ser sensíveis à temperatura, visto que o aumento de temperatura altera o valor da resistência, a não ser que esse seja o objetivo.

Com esta estrutura de micro-aquecedor pode-se alcançar temperaturas mais elevadas removendo-se parte do substrato abaixo do resistor, deixando-o suspenso apenas nas extremidades, aumentando assim a isolamento térmica entre este e o substrato. Os resultados da simulação desta nova estrutura são mostrados na Figura 4.7.

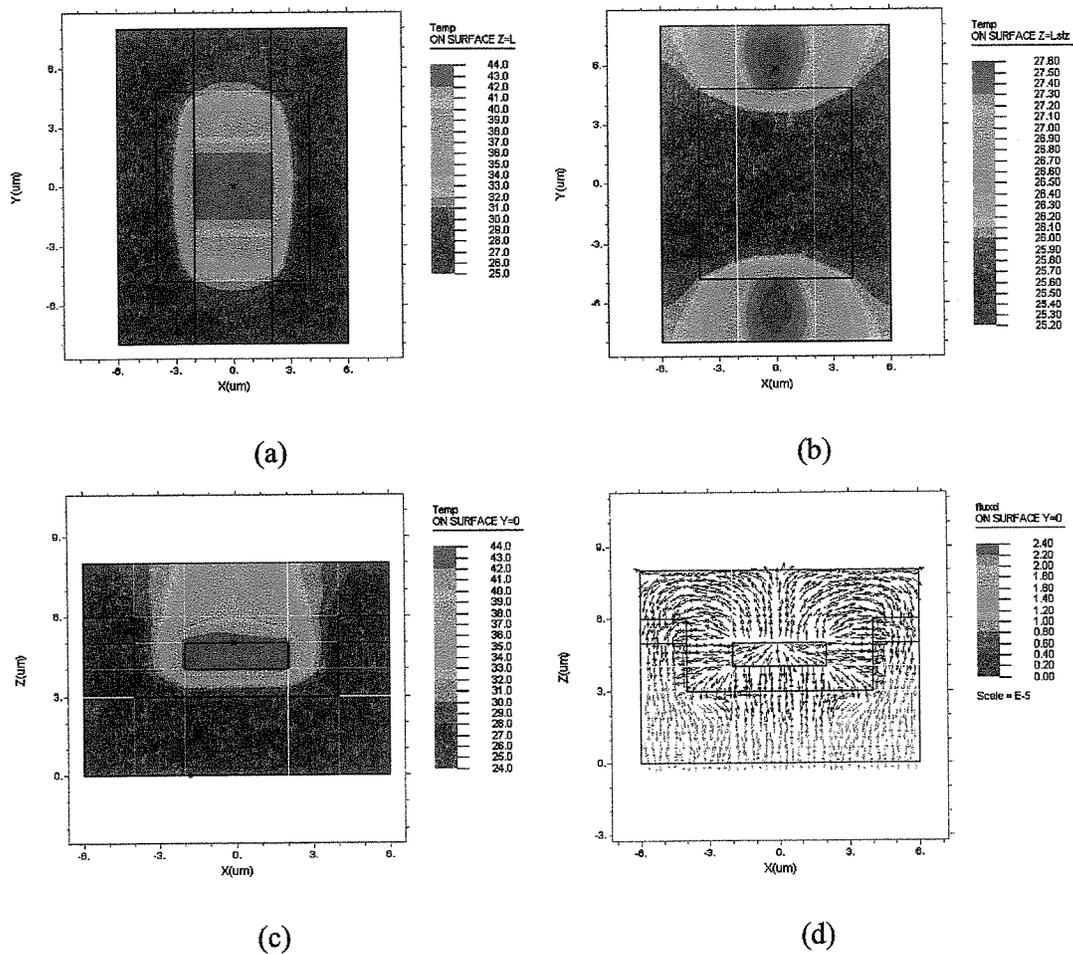


Figura 4.7 – Cortes da distribuição de temperatura e fluxo de calor no dispositivo de silício monocristalino com isolamento térmica

A distribuição de temperatura ao longo do resistor é mostrada na Figura 4.7(a). O aumento na isolamento térmica diminui a perda de calor do resistor para o substrato, o que provoca um aumento na temperatura do dispositivo para aproximadamente 44 °C. Além disso, a diminuição de temperatura no resistor é do centro para as extremidades, por onde o substrato ainda absorve calor do resistor. Na Figura 4.7(b) é mostrado o gradiente de temperatura provocado pelo contato entre o resistor e o substrato. Na Figura 4.7(c) pode-se observar que toda diferença de temperatura ocorre no ar, entre o resistor e o substrato, o que mostra a característica de isolante térmico do ar. Na Figura 4.7(d) observa-se que o fluxo de calor pelo ar continua praticamente nulo. O fluxo de calor presente no substrato é devido à condução de calor pelas extremidades do dispositivo.

Comparando os resultados de simulação das duas estruturas de micro-aquecedores, nota-se claramente que a de resistor de silício policristalino atinge uma temperatura muito mais elevada que a de resistor fabricado no substrato de silício. Isso era de se esperar, já que no segundo caso o resistor está em contato térmico com o substrato, que tem uma condutividade térmica elevada, perdendo calor por condução.

4.5 Características termo-elétricas do micro-aquecedor de silício policristalino proposto

Nesta seção apresentamos as simulações termo-elétricas dos dispositivos de tamanho real. Os resultados obtidos são as curvas de relação entre corrente elétrica e tensão aplicada, resistência em função da tensão, e potência dissipada nos dispositivos. Com essas relações é possível prever o comportamento térmico e elétrico destas estruturas.

São simulados dois dispositivos micro-aquecedores com resistores de silício policristalino. As duas estruturas possuem a mesma geometria, mostrada na Figura 4.1(a). A diferença entre esses dispositivos é a condutividade elétrica do resistor, que na prática é controlada pela concentração de dopantes no silício policristalino. O primeiro dispositivo possui uma resistividade igual a 25 $\Omega \cdot \mu\text{m}$ e o segundo, 10 $\Omega \cdot \mu\text{m}$.

As dimensões físicas do dispositivo são mostradas na Tabela 4.2:

Tabela 4.2 - Dimensões reais do micro-aquecedor de silício policristalino

Resistor de silício policristalino	Largura: 20 μm
	Espessura: 0,5 μm
	Comprimento: 200 μm
Camada de SiO₂	Largura: 40 μm
	Espessura: 0,5 μm
	Comprimento: 200 μm
Substrato de Silício monocristalino	Largura: 40 μm
	Espessura: 1 μm
	Comprimento: 200 μm

A resistência deste dispositivo é calculada pela equação abaixo:

$$R = \rho \frac{L}{W \cdot t} \quad (4.1)$$

onde

ρ é a resistividade elétrica do material

L é o comprimento do resistor

W é a largura do resistor

t é a espessura do resistor

Considerando os valores das dimensões do dispositivo dados na Tabela 4.2, $L=200$ μm , $W=20$ μm , $t=0,5$ μm e a resistividade $\rho=25$ $\Omega \cdot \mu\text{m}$, pela equação (4.1) a resistência do micro-aquecedor é de 500 Ω . Além disso, como é realizada a simulação das características térmicas e elétricas do dispositivo, deve-se levar em conta o TCR do micro-aquecedor, que é considerado igual a 1500 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ [38], para o silício policristalino. Para os outros materiais usados nesta simulação, as condutividades térmicas e elétricas são as mesmas da Tabela 4.1 e o TCR considerado nulo para todos eles.

Na simulação do dispositivo é aplicada uma tensão de 20 V, mas esta tensão deve ser aumentada em intervalos pequenos, da ordem de 0,2 V, para obter a convergência na simulação. Assim, são realizadas 100 iterações de 0,2 V, e o resultado de cada uma delas considerado como condição inicial para a seguinte. A cada iteração o FlexPDE gera um sumário, onde são apresentados os valores de algumas variáveis selecionadas.

A Tabela 4.3 mostra o sumário da primeira iteração de simulação, para uma tensão de 0,2 V, e da última iteração, para uma tensão de 20 V. Um dado importante é a resistência do micro-aquecedor para cada uma destas tensões. Para a tensão de 0,2 V a resistência é de 500 Ω , enquanto na tensão de 20 V a resistência aumenta 9,8%, para um valor de 549,03 Ω , devido à dissipação de potência, que provoca aumento de temperatura e, por consequência, aumento de resistência.

Tabela 4.3 – Resistor de silício policristalino com resistividade 25 $\Omega \cdot \mu\text{m}$

Tensão [V]	0,2	20,0
Resistência [Ω]	500,00	549,03
Corrente [mA]	0,4	36,4
Potência [W]	$80 \cdot 10^{-6}$	0,73
Densidade de potência [$\text{W}/\mu\text{m}^3$]	$40 \cdot 10^{-9}$	$0,36 \cdot 10^{-3}$

Um outro resultado obtido desta simulação é a temperatura máxima no dispositivo: 93 $^{\circ}\text{C}$. A distribuição de temperatura na estrutura é mostrada na Figura 4.8. Devido às dimensões do dispositivo é difícil visualizar detalhes desta figura, mas nota-se que a distribuição de temperatura é semelhante à apresentada na Figura 4.3(c).

Na Figura 4.9 são apresentadas duas curvas que caracterizam o comportamento elétrico do micro-aquecedor. Na Figura 4.9(a) é mostrada a curva *Resistência x Tensão*. No gráfico, a tensão é substituída pelo parâmetro de simulação *STAGE*, que representa cada uma das iterações da simulação. Então, *STAGE 100* indica uma tensão de 20 V. Observa-se claramente o aumento da resistência com o aumento da tensão aplicada ao dispositivo. A curva *Corrente x Tensão* é mostrada na Figura 4.9(b). A variação na inclinação dessa curva, comparando com a curva de referência, é um indicativo do aumento de resistência.

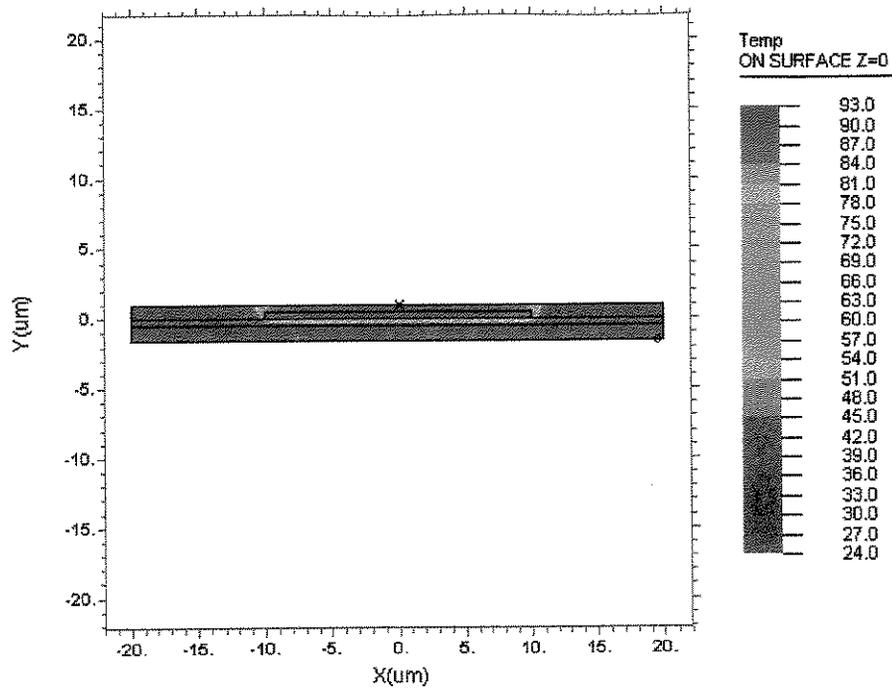


Figura 4.8 – Distribuição de temperatura no dispositivo

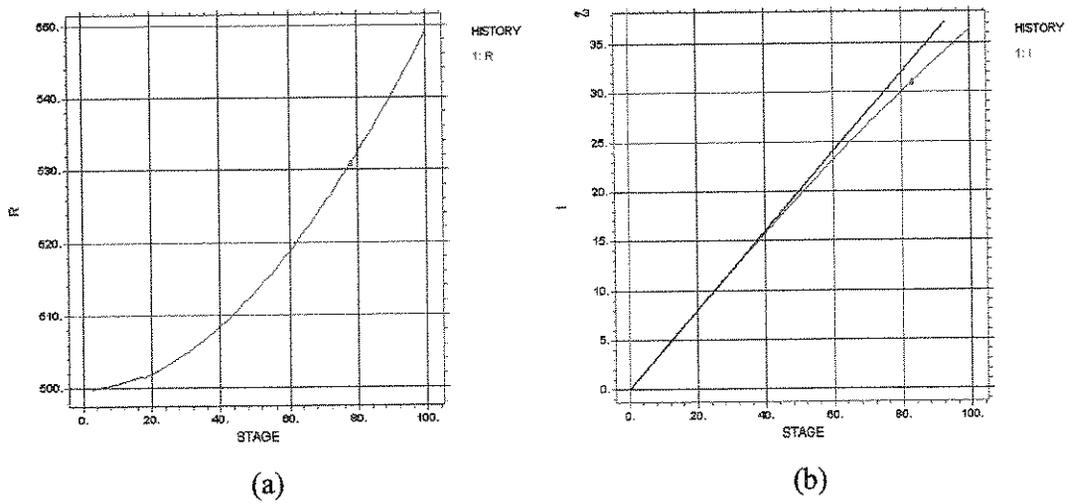


Figura 4.9 – Curvas de características elétricas do dispositivo: (a) Resistência x Tensão e (b) Corrente x tensão

O segundo dispositivo simulado com essa mesma estrutura possui uma resistividade igual a $10 \Omega \cdot \mu\text{m}$, que pode ser obtida experimentalmente com uma implantação de fósforo com dose de $2 \cdot 10^{16}$ átomos/cm² e energia 150 keV, como mostrado no Capítulo 5. O TCR do silício policristalino foi mantido em 1500 ppm/°C e as propriedades térmicas e elétricas dos outros materiais são as mesmas da simulação anterior, apresentadas na Tabela 4.1.

Esse dispositivo também foi simulado para uma faixa de tensão de até 20 V. Os sumários para a primeira e últimas iterações, equivalentes a 0,2 e 20 V respectivamente, são mostrados na Tabela 4.4. Observa-se que a resistência aumenta de 200 Ω para 244,1 Ω , o que significa um aumento percentual de 22,05%.

Tabela 4.4 - Resistor de silício policristalino com resistividade $10 \Omega \cdot \mu\text{m}$

Tensão [V]	0,2	20,0
Resistência [Ω]	200,0	244,1
Corrente [mA]	1,0	81,9
Potência [W]	$200 \cdot 10^{-6}$	1,64
Densidade de potência [$\text{W}/\mu\text{m}^3$]	$100 \cdot 10^{-9}$	$0,82 \cdot 10^{-3}$

Da distribuição de temperatura no dispositivo, mostrada na Figura 4.10, observa-se que o valor máximo de temperatura é 180 °C, enquanto que para o dispositivo anterior, era de 93 °C. O aumento na temperatura máxima é explicado pela maior dissipação de potência no dispositivo. A resistência do primeiro micro-aquecedor é de 500 Ω , a do segundo, de 200 Ω . Assim, para a mesma tensão de 20 V, o segundo micro-aquecedor dissipa uma potência bem maior que o primeiro, como pode ser observado fazendo-se a comparação dos valores da Tabela 4.3 e Tabela 4.4.

As curvas características do micro-aquecedor são apresentadas na Figura 4.11. Na curva *Resistência x Tensão*, mostrada na Figura 4.11(a), observa-se a variação da resistência em função da tensão (parâmetro *STAGE*). A curva *Corrente x Tensão* é mostrada na Figura 4.11(b).

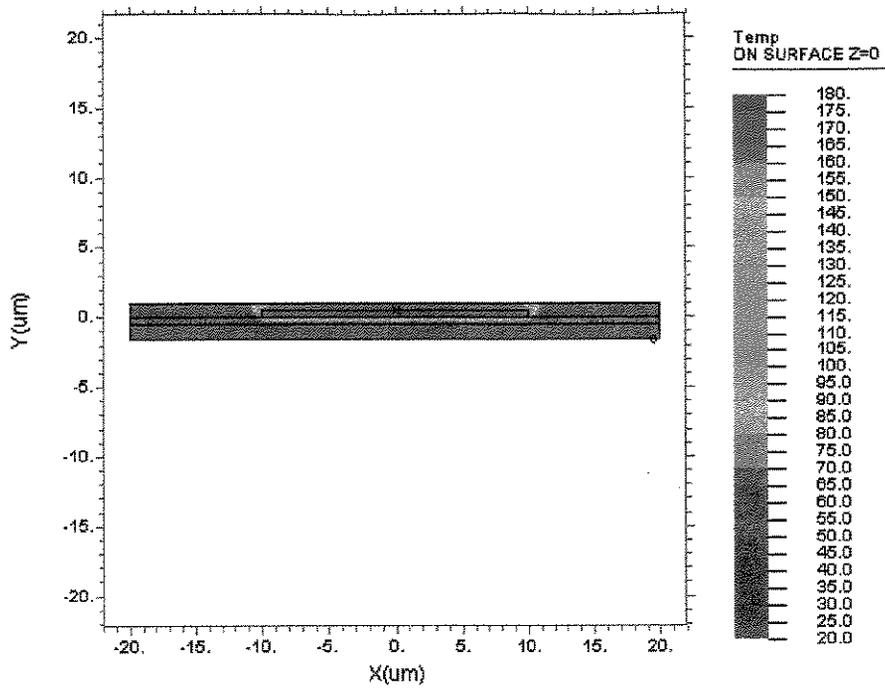


Figura 4.10 – Distribuição de temperatura no dispositivo

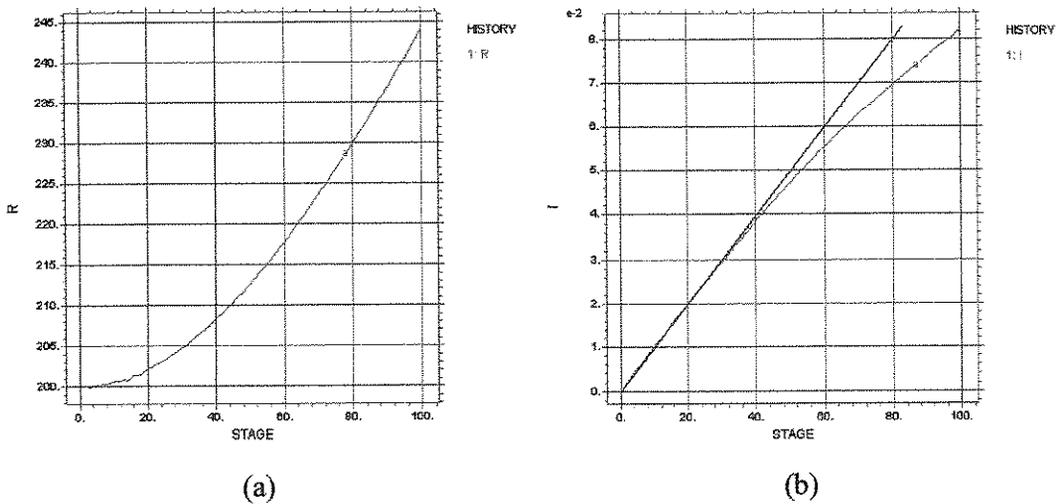


Figura 4.11 – Curvas de características elétricas do dispositivo: (a) Resistência x Tensão e (b) Corrente x Tensão

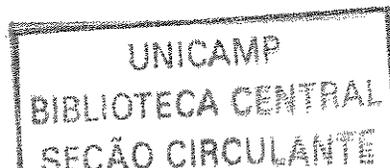
Com esses dados obtidos da simulação, é possível comparar a densidade de potência de cada dispositivo, definida como a relação entre a potência elétrica fornecida ao dispositivo e seu volume. Para o primeiro dispositivo, com resistividade de $25 \Omega \cdot \mu\text{m}$, a densidade de potência é de $0,36 \text{ mW}/\mu\text{m}^3$, para a tensão aplicada de 20 V. O segundo, com resistividade de $10 \Omega \cdot \mu\text{m}$, apresenta, para a mesma tensão aplicada, uma densidade de potência maior de $0,82 \text{ mW}/\mu\text{m}^3$, o que é de se esperar, uma vez que se verifica maior consumo de potência.

Comparando-se a variação relativa da resistência de cada dispositivo, para a tensão aplicada de 20 V, conforme anteriormente mencionado, o primeiro apresenta um aumento de 9,8% e o segundo, de 22,05%.

Dividindo-se a variação relativa da resistência pela densidade de potência de cada dispositivo, pode-se obter a eficiência de aquecimento por unidade de volume, que resultaram nos seguintes: $272,22\% \cdot (\text{mW}/\mu\text{m}^3)^{-1}$ para o primeiro dispositivo e $268,90\% \cdot (\text{mW}/\mu\text{m}^3)^{-1}$ para o segundo. Como os valores obtidos são muito próximos, conclui-se que a variação relativa da resistência é controlada pela densidade de potência elétrica dissipada pelo dispositivo.

4.6 Simulação de um microssensor de velocidade do tipo fio quente

No Capítulo 3 foi apresentada a modelagem de um sensor de velocidade de fluido do tipo fio quente, cujo funcionamento baseia-se na troca de calor por convecção. Nesta seção descrevemos os resultados da simulação de um micro-sensor fabricado com uma estrutura igual àquela apresentada na Figura 2.1(a) que, para melhor visualização, é mostrada em três dimensões na Figura 4.12(a). Neste dispositivo, o micro-aquecedor é um resistor dopado com boro, em forma de ponte, mostrado com maior detalhe na Figura 4.12(b).



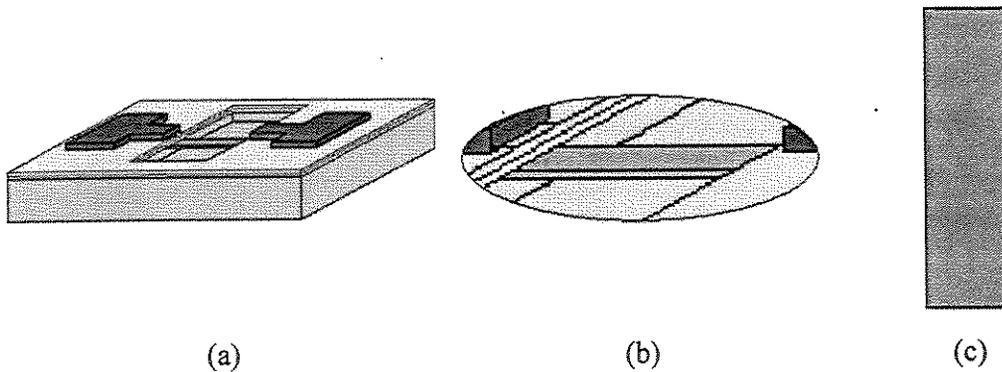


Figura 4.12 – (a) Estrutura do micro-sensor de velocidade do tipo fio quente. (b) Resistor em ponte. (c) Região de solução: resistor de silício monocristalino dopado com boro.

Para a simulação do micro-sensor de velocidade foi implementado um algoritmo em linguagem de programação C para solução do modelo desenvolvido no Capítulo 3. A região de solução do problema é o retângulo que representa o resistor dopado, mostrada na Figura 4.12(c), ou seja, o problema é bidimensional. Para simplificar o problema, a estrutura tridimensional completa não será considerada, visto que o objetivo que se busca neste item reside em mostrar o funcionamento da estrutura proposta como sensor de velocidade, e não realizar uma análise detalhada do seu comportamento termo-elétrico.

As equações que formam o sistema a ser resolvido são apresentadas novamente abaixo, considerando regime estacionário:

$$\nabla \sigma(T) \nabla V + \sigma(T) \nabla^2 V = 0 \quad (4.2)$$

$$k \nabla^2 T + \vec{J} \cdot \vec{E} = 0 \quad (4.3)$$

Para a solução do problema de domínios acoplados foi usado o Método das Diferenças Finitas (*FDM – Finite Difference Method*), no qual as diferenciais são discretizadas e aproximadas por diferenças entre os pontos adjacentes. A escolha deste método se justifica pela facilidade de sua implementação e pela geometria simples da região de solução. Foi utilizado o método de iteração SOR (*Successive over-relaxation*), por apresentar boa velocidade de convergência [42].

A aproximação das diferenciais por diferenças é feita pela expansão em séries de Taylor do operador diferencial de primeira ordem [42]

$$\begin{aligned} \nabla f &= \left(\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \right) f|_{x_0, y_0} = \\ &= \frac{f(x_0 + \Delta x, y_0) - f(x_0 - \Delta x, y_0)}{2\Delta x} + \frac{f(x_0, y_0 + \Delta y) - f(x_0, y_0 - \Delta y)}{2\Delta y} \end{aligned} \quad (4.4)$$

Na expressão acima não são considerados os erros de truncamento. Para a solução numérica, o operador deve ser escrito na forma

$$\nabla f = \frac{f(i+1, j) - f(i-1, j)}{2h_x} + \frac{f(i, j+1) - f(i, j-1)}{2h_y} \quad (4.5)$$

Para o operador diferencial de segunda ordem o resultado é o seguinte

$$\nabla^2 f = \frac{f(i+1, j) - f(i, j) + f(i-1, j)}{h_x^2} + \frac{f(i, j+1) - f(i, j) + f(i, j-1)}{h_y^2} \quad (4.6)$$

Aplicando os operadores (4.5) e (4.6) às equações (4.2) e (4.3) obtém-se as equações discretizadas para a solução numérica do problema de domínios acoplados.

As condições de contorno devem ser especificadas para os domínios elétrico e térmico. No domínio elétrico, uma condição de contorno é a tensão aplicada às extremidades do dispositivo, no domínio térmico, a temperatura ambiente é definida como a temperatura no contato entre o dispositivo e o substrato.

Na simulação, o dispositivo foi definido com condutividade térmica de 148 W/mK, resistividade elétrica de $10^{-3} \Omega\text{-cm}$, TCR $\alpha_T = 1500 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$, e as seguintes dimensões: comprimento $L = 200 \mu\text{m}$, largura $W = 20 \mu\text{m}$ e espessura $t = 0,1 \mu\text{m}$. A distribuição de temperatura ao longo do resistor, para dimensões normalizadas, com tensão de alimentação

de 1,5 V e fluido estacionário, é apresentada na Figura 4.13. Observa-se um perfil parabólico, e a temperatura máxima no resistor está localizada no seu centro.

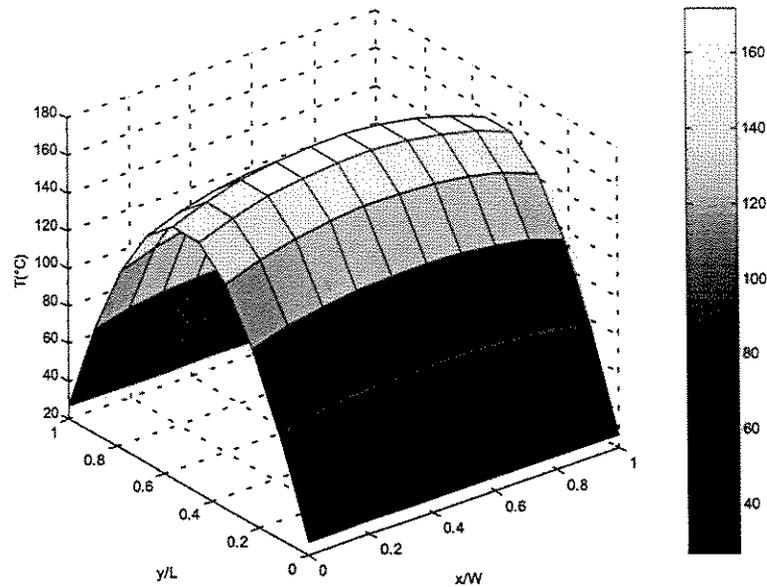


Figura 4.13 – Distribuição de temperatura ao longo do resistor com fluido em repouso

A característica linear entre a resistência do sensor e sua temperatura máxima é apresentada na Figura 4.14(a). Esta curva representa a relação linear entre a resistência e temperatura para um resistor de silício altamente dopado, como mencionado no Capítulo 3. A característica I-V do dispositivo é mostrada na Figura 4.14(b). Esta curva característica pode ser comparada com as apresentadas na Figura 4.9(b) e Figura 4.11(b).

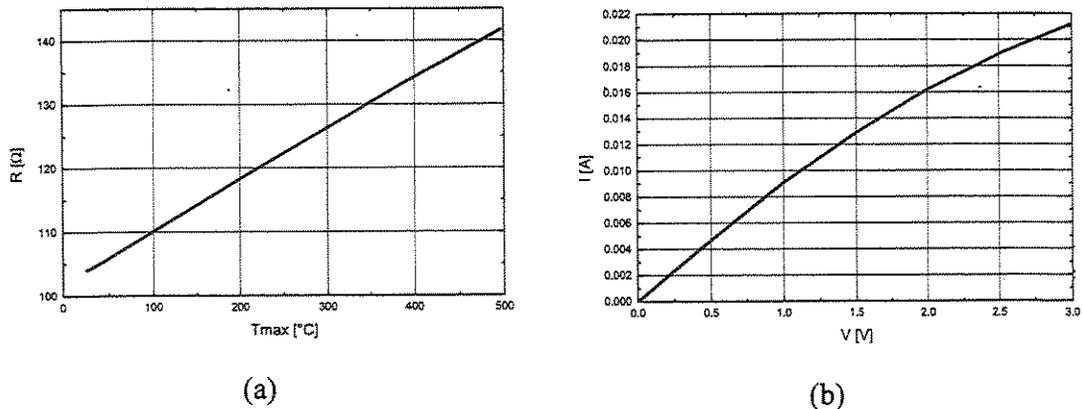


Figura 4.14 – (a) Resistência em função da temperatura máxima para um fluido em repouso. (b) Característica I-V

A simulação do micro-aquecedor como sensor de velocidade do tipo fio quente com fluido em movimento foi realizada considerando o fluxo de nitrogênio, com as seguintes propriedades [37]: condutividade térmica $\kappa = 30$ W/mK, viscosidade dinâmica $\nu = 22,5$ m²/s, número de Prandtl $Pr = 0,7095$. A velocidade do fluido foi variada de 0,125 a 5 m/s. A distribuição de temperatura ao longo do resistor com tensão de alimentação de 1,5 V e velocidade do fluido de 5 m/s é apresentada na Figura 4.15. Comparando esta distribuição de temperatura com a apresentada na Figura 4.13, observa-se que quanto maior a velocidade do fluido, maior a transferência de calor por convecção forçada e menor a temperatura no resistor. Ainda, o ponto de temperatura máxima se desloca para a borda do resistor. Este efeito de resfriamento reduz o valor da resistência do resistor. Esta variação de resistência representa uma medição indireta da velocidade, de acordo com a curva mostrada na Figura 4.16.

Esses resultados indicam a possibilidade de se construir um sensor de velocidade do tipo anemômetro a fio quente utilizando esta estrutura, mas é importante comentar que esta relação entre a resistência e a velocidade do fluido foi obtida aplicando-se uma tensão constante (CV) ao resistor. A maioria dos sensores de velocidade do tipo fio quente operam em temperatura constante (CT), obtida pelo uso de circuitos realimentados.

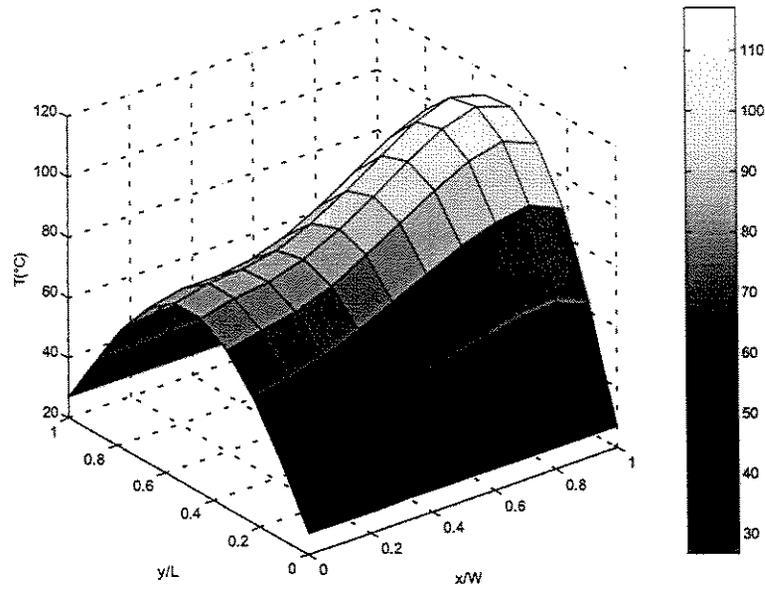


Figura 4.15 – Distribuição de temperatura ao longo do resistor com fluxo de gás

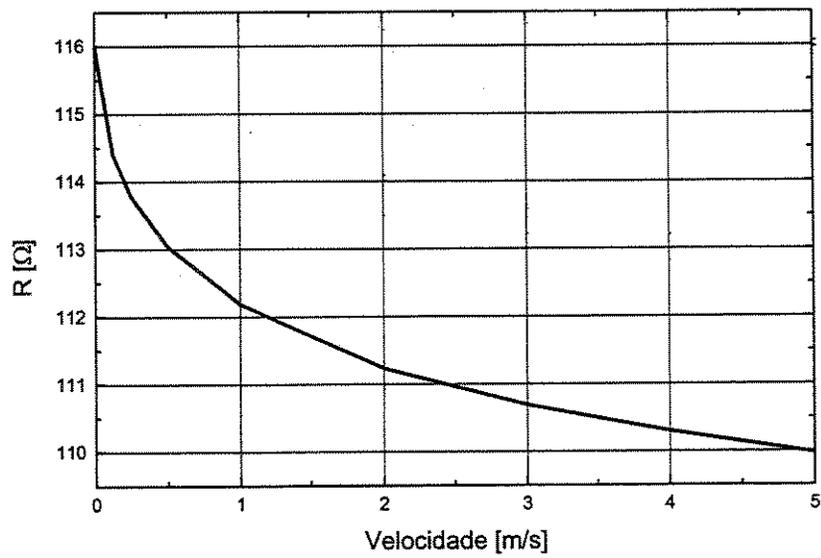


Figura 4.16 – Resistência do micro-aquecedor em função da velocidade do fluido, para uma tensão de 1,5 V

4.7 Resumo do capítulo

Neste capítulo foram apresentados os resultados de simulação das estruturas de micro-aquecedores. Os resultados foram obtidos resolvendo-se o sistema de domínios acoplados, discutido no Capítulo 3, com a ferramenta de Método dos Elementos Finitos (FEM) FlexPDE. Para cada uma das estruturas foram apresentadas as distribuições de temperatura e fluxo de calor e os resultados numéricos, analisados e comparados. Concluímos que os micro-aquecedores de silício policristalino consomem menos energia para atingir uma temperatura específica que os micro-aquecedores de silício monocristalino. Finalmente, foi realizada a simulação do micro-aquecedor aplicado à medição de velocidade de fluido em um anemômetro a fio quente.

Realizado o estudo do comportamento termo-elétrico dos micro-aquecedores, passou-se a fabricação destes dispositivos, cujo processo descrevemos no capítulo seguinte.

CAPÍTULO 5 - PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

5.1 Introdução

Em um laboratório de desenvolvimento de componentes eletrônicos há restrição nos materiais que podem ser utilizados na fabricação dos dispositivos, e o principal motivo para isso é que alguns materiais, como soluções químicas alcalinas, podem contaminar os equipamentos onde se realizam os processos de fabricação. Como um dos objetivos deste trabalho é desenvolver dispositivos micro-aquecedores que sejam fabricados através de processos compatíveis com tecnologias de microeletrônica, há a mesma restrição nos materiais, e serão utilizados apenas aqueles disponíveis no laboratório.

Muitas estruturas de micro-aquecedores são fabricadas apenas com materiais utilizados na microeletrônica, mas por processos que nem sempre seguem as etapas de fabricação das tecnologias PMOS, NMOS ou CMOS, já que algumas etapas adicionais são incluídas no processo para que os micro-aquecedores possam ser fabricados.

Outro fato importante é a dificuldade quando se deseja fabricar um sensor monolítico, onde o transdutor e os circuitos eletrônicos se encontram no mesmo substrato. Por exemplo, se o transdutor for fabricado após os circuitos eletrônicos, etapas de alta temperatura dos processos de fabricação podem alterar as características dos dispositivos eletrônicos; se for fabricado antes, estas etapas podem modificar as características do transdutor. Então, um processo de fabricação de um sensor monolítico onde o sensor e os circuitos eletrônicos são fabricados simultaneamente tem grande vantagem sobre o pós-processamento. O desenvolvimento de processos desse tipo é outro objetivo deste trabalho.

Neste capítulo descrevemos o desenvolvimento de dois processos de fabricação de micro-aquecedores, formando duas estruturas diferentes: um compatível com as tecnologias PMOS, NMOS e CMOS, e a outra com PMOS e CMOS apenas. As etapas de processos empregadas na sua fabricação são descritas detalhadamente.

5.2 Geometria dos micro-aquecedores

A primeira etapa para a fabricação dos micro-aquecedores é a definição das geometrias e desenho das máscaras para as etapas de fotolitografia. Os dispositivos possuem diferentes dimensões e geometrias para que possa ser feito um estudo das características termo-elétricas com relação a esses parâmetros. Alguns padrões de dispositivos, que foram desenhados com o *software* AUTOCAD para posterior fabricação das máscaras ópticas, são mostrados na Figura 5.1.

O padrão (a) foi fabricado com comprimentos 200 μm , 300 μm , 400 μm , 500 μm e 1000 μm e larguras de 20 μm e 40 μm . A finalidade de se projetar os micro-aquecedores com essas dimensões é analisar seus comportamentos em função das variações de resistência.

Com o padrão (b), que também foi fabricado com diferentes comprimentos e larguras, é possível verificar *stress* no material do resistor, pois ele estará suspenso e qualquer nível de *stress* tenderá a rotacioná-lo em torno do eixo que une as duas extremidades. Esses dois tipos de dispositivos podem ser usados em sensores para medir temperatura, pressão, vazão, condutividade térmica de gases, porcentagem de gases em uma mistura, e também como aquecedores em microssistemas de PCR.

O padrão (c) é formado por quatro resistores aquecedores de mesmas dimensões. O uso de vários elementos sensores na mesma estrutura permite que um deles funcione como sensor da grandeza a ser medida e os outros como sensores para compensação de outros efeitos que, por não serem de interesse, são considerados como interferência. Para exemplificar, um deles seria um sensor de pressão do tipo Pirani, enquanto os outros seriam compensadores de temperatura e radiação. Uma outra aplicação desse tipo de dispositivo é como sensor de velocidade que permite medir, além da velocidade, a direção e sentido do fluxo.

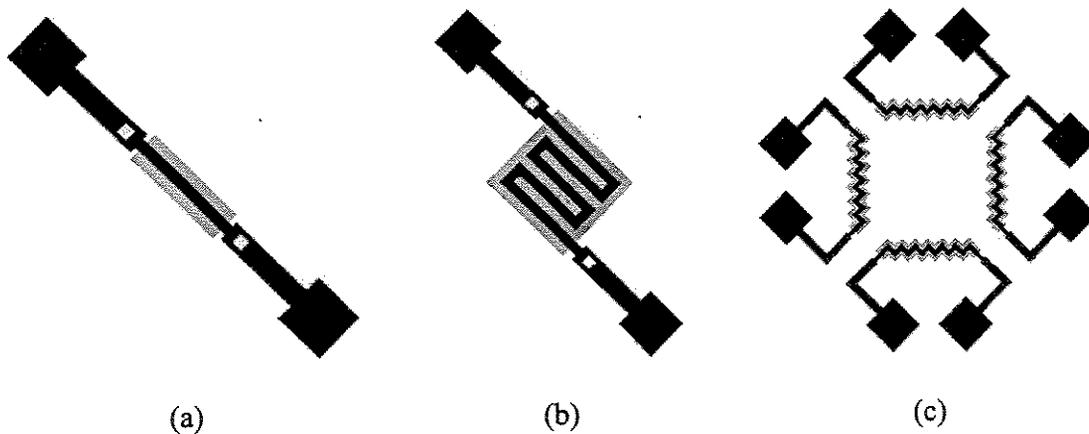


Figura 5.1 – Padrões de dispositivos desenhados com AutoCad para fabricação das máscaras ópticas

5.3 Máscaras ópticas

Para cada etapa de fotogavação no processo de fabricação, que será descrita posteriormente, é necessária uma máscara óptica. As máscaras para fotogavação utilizadas foram fabricadas por processo fotográfico em máscaras de emulsão.

As duas estruturas são fabricadas por processos que possuem quatro níveis de fotogavação, então são necessárias quatro máscaras diferentes, uma para cada nível. Como no processo de fotogavação disponível são utilizados cacos de $\frac{1}{4}$ de lâmina de três polegadas de diâmetro, os padrões dos quatro níveis foram desenhados em uma máscara de campo claro e outra de campo escuro. A vantagem de se ter máscaras de campo claro e de campo escuro para todos os níveis é que se pode escolher o tipo de foto-resiste (positivo ou negativo), com o qual se quer trabalhar, o que torna o processo de fabricação mais flexível. Alguns padrões desenhados nas máscaras fabricadas são mostrados na Figura 5.2.

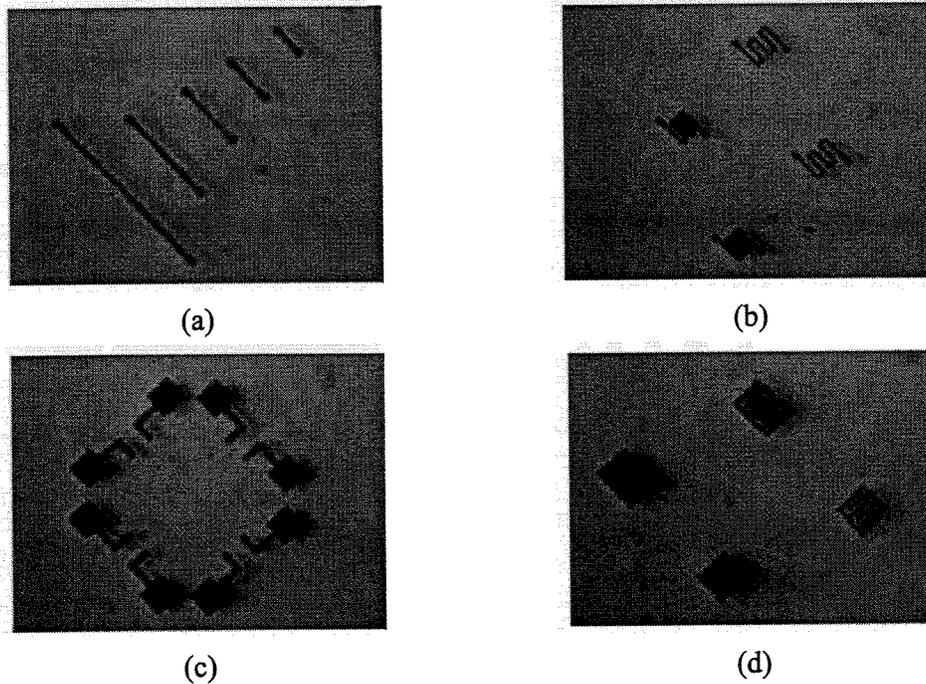


Figura 5.2 – Padrões existentes nas máscaras do (a, b) primeiro, (c) terceiro e (d) quarto níveis de fotogravação

5.4 Micro-aquecedores em silício monocristalino

Este tipo de estrutura é compatível com as tecnologias de fabricação PMOS e CMOS, visto que o resistor aquecedor é fabricado em um substrato de silício monocristalino através da dopagem por boro. Desse modo, um transistor fabricado simultaneamente com este resistor seria do tipo PMOS. Se for necessário um isolamento térmico entre o resistor e o substrato, após todo o processo de fabricação, a região do substrato abaixo do resistor pode ser corroída, para essa finalidade. Esta corrosão pode ser efetuada utilizando a solução de KOH, que apresenta seletividade entre silício altamente dopado com boro e silício intrínseco. Assim, o micro-aquecedor será uma estrutura em forma de ponte.

Todo o processo de fabricação desta estrutura é mostrado na Figura 5.3 e nas seções subsequentes, feitas a descrição de cada etapa do processo.

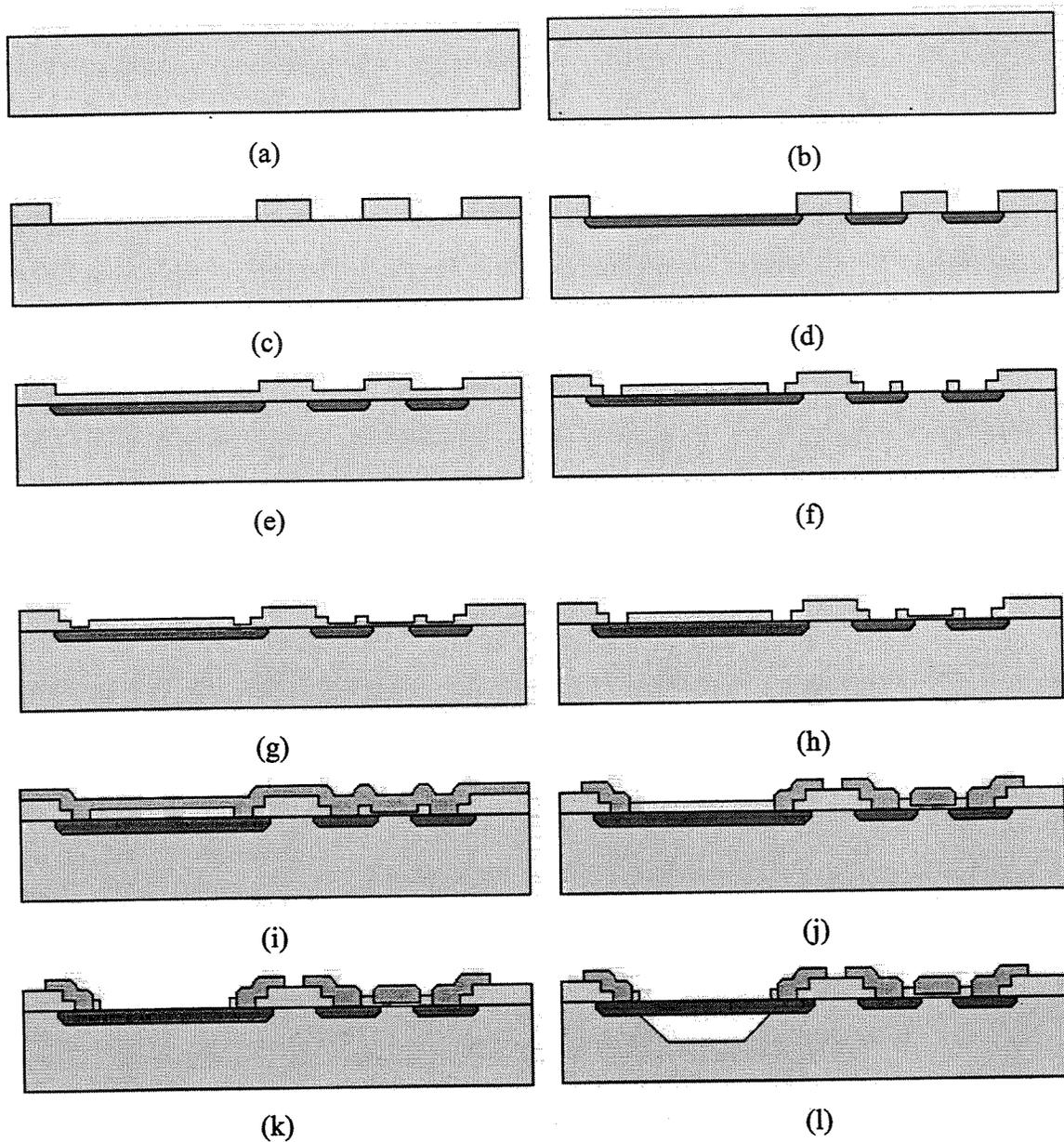


Figura 5.3 – Etapas do processo de fabricação do micro-aquecedor compatível com PMOS e CMOS (ver descrição detalhada no texto)

5.4.1 Caracterização inicial das lâminas

Antes de se iniciar a fabricação do dispositivo, é recomendado fazer a caracterização das lâminas – mostrada na Figura 5.3(a) - que serão utilizadas, com o

objetivo de se conhecer suas características iniciais. Ainda, serão guardadas amostras de cada etapa para possibilitar um melhor acompanhamento de todo o processo.

Para as estruturas fabricadas por este processo foram utilizadas lâminas de silício de três polegadas, tipo N, com orientação de superfície (100). Esse tipo de lâmina foi escolhido porque é com ele que se faz a fabricação de dispositivos PMOS. A espessura das lâminas é em torno de 368 μm , e a resistência de folha R_s de aproximadamente 79,46 Ω/\square .

5.4.2 Limpeza RCA

A primeira etapa do processo consiste na limpeza das lâminas. Antes de se iniciar o processo de fabricação, as lâminas devem passar por um processo de limpeza, conhecido como RCA, que consiste em quatro etapas sequenciais, cada um com uma finalidade específica:

- $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}_2$ 4:1 – solução conhecida como “piranha” - para remoção de gordura presente na superfície da lâmina
- $\text{HF} + \text{H}_2\text{O}$ 1:10 para remoção do óxido nativo
- $\text{NH}_4\text{OH} + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$ 1:5:5 para remoção de gordura e metais
- $\text{HCl} + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$ 1:5:5 remoção de íons alcalinos e hidróxidos de Fe^{+3} , Al^{+3} e Mg^{+3}

5.4.3 Oxidação úmida para formação do óxido de campo

Esta oxidação úmida realizada nesta etapa é para a formação do óxido de campo, com uma espessura em torno de 0,5 μm , que tem o objetivo de isolar eletricamente os dispositivos, como mostrado na Figura 5.3(b). Para isto, as lâminas de Si são colocadas em um forno térmico a uma temperatura de 1000 °C em ambiente de H_2O (vapor de água) e de O_2 .

A entrada no forno é feita em N_2 , com um tempo maior que 3 minutos, para evitar oxidação não uniforme e gradiente de temperatura na lâmina. Em seguida, feita a oxidação em ambiente de O_2 , que é conhecida como oxidação seca, durante 5 minutos, com o objetivo de crescer um óxido com uma baixa densidade de defeitos. A continuidade do processo é feita em ambiente de $H_2O + O_2$, conhecida como oxidação úmida e é realizada para que a taxa de oxidação seja mais alta. A oxidação úmida resulta em um óxido com uma maior densidade de defeitos que a seca. O tempo dessa oxidação foi de 100 minutos e a espessura do óxido crescido foi de aproximadamente $0,56 \mu m$.

Após a oxidação é feito um recozimento do óxido em ambiente de N_2 , por 10 minutos. Esta etapa é necessária para reestruturar a camada de óxido formada e consumir o O_2 restante no forno, a fim de evitar a posterior formação de SiO_x não estequiométrico.

5.4.4 Fotogravação 1 – Definição dos resistores

A primeira etapa de fotogravação visa transferir para o óxido o padrão da máscara que contém o desenho dos resistores, como mostrado na Figura 5.3(c).

Primeiramente, as lâminas são levadas à estufa para retirada da umidade, incorporada do ambiente. Foram aplicadas 5 gotas do foto-resiste AZ1350, e espalhadas com um *spinner* à velocidade de 7000 rpm, durante 30 segundos. Após a aplicação, a lâmina é submetida a um *pré-bake* numa estufa para a evaporação de solvente, a uma temperatura de $90 \text{ }^\circ\text{C}$, por 30 minutos. Em seguida, é feita a exposição à luz ultravioleta para sensibilização do fotorresiste, durante 24 segundos, utilizando a primeira máscara óptica. A revelação foi feita com o revelador MIF 312.

A etapa seguinte consiste na corrosão do SiO_2 , com uma solução de HF e NH_4F , conhecida como *buffer*. O resultado desta corrosão é mostrado na Figura 5.4. Certificando que todo o óxido exposto ao HF foi corroído, o fotorresiste é removido com acetona.

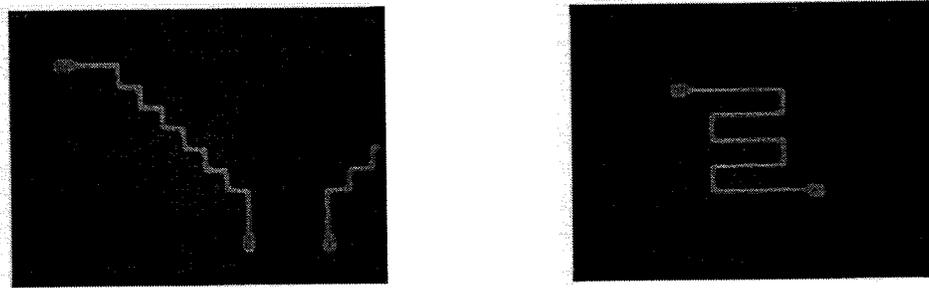


Figura 5.4 – Primeira etapa de fotogração: definição dos resistores

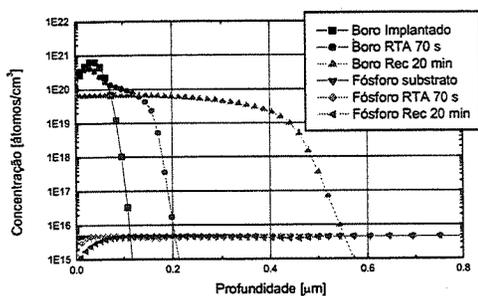
5.4.5 Implantação iônica de átomos de boro e ativação dos dopantes por RTA

Os resistores são formados no substrato de silício por implantação iônica de boro, cujos parâmetros são a energia, a dose e o ângulo de inclinação da lâmina. Estes parâmetros devem ser escolhidos para se obter o perfil desejado de concentração de dopantes.

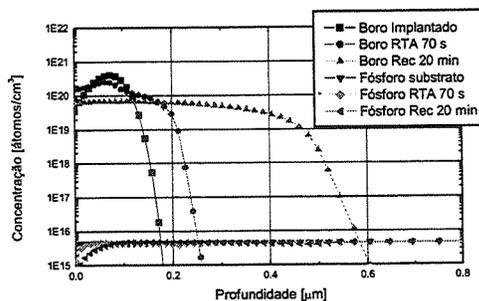
A ativação dos dopantes é um recozimento realizado para que os átomos implantados se liguem aos átomos de silício, e também para reconstruir a estrutura cristalina do substrato, danificada pela implantação. Este recozimento pode ser feito em forno convencional ou através de RTA (*Rapid Thermal Annealing*). Os parâmetros do recozimento são a temperatura e tempo. Estas duas etapas (implantação e recozimento) definem a resistividade e a espessura do resistor - Figura 5.3(d).

Um método rápido e confiável para a escolha dos parâmetros empregados na implantação iônica é a simulação com o *software* SUPREM. Os resultados das simulações efetuadas para a implantação de boro, são mostrados na Figura 5.5, para dose de $3 \cdot 10^{15}$ átomos/cm² e na Figura 5.6, para dose de $5 \cdot 10^{15}$ átomos/cm².

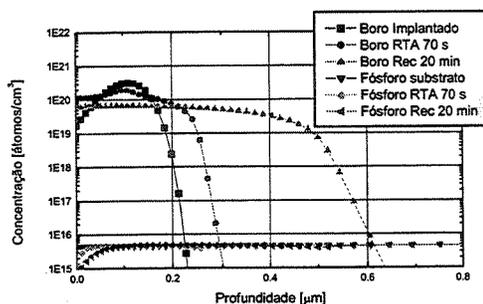
Nessas figuras são mostrados os perfis da concentração de dopantes implantados (Boro) e do próprio substrato (Fósforo), antes e depois de processos de recozimento com forno convencional e RTA. O recozimento em forno convencional foi simulado com temperatura de 1000 °C e tempo de 20 minutos, suficiente para ativação dos dopantes. O recozimento por RTA foi simulado com temperatura de 1000 °C e tempo de 70 segundos.



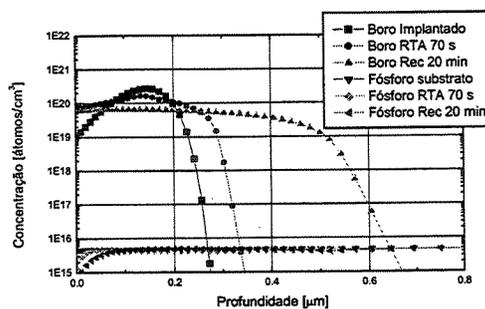
(a) Energia 10 keV - Dose $3 \cdot 10^{15}$



(b) Energia 20 keV - Dose $3 \cdot 10^{15}$



(c) Energia 30 keV - Dose $3 \cdot 10^{15}$

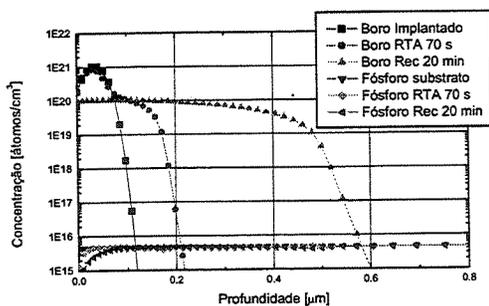


(d) Energia 40 keV - Dose $3 \cdot 10^{15}$

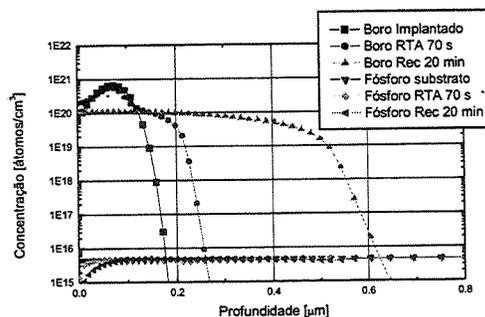
Figura 5.5 – Simulação de implantação iônica de boro

Para uma posterior corrosão do substrato com KOH, se desejado o isolamento térmico do micro-aquecedor, a concentração de átomos de boro no resistor deve ser superior a 10^{20} átomos/cm³ para seletividade entre o resistor e o substrato. Essa técnica é comentada na seção 5.4.12.

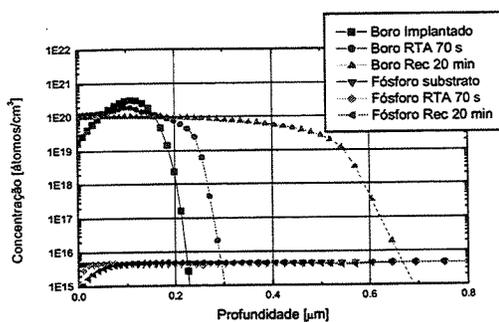
Observa-se dessas figuras que quanto maior a energia de implantação, maior a profundidade onde ocorre a concentração máxima de dopantes e menor a concentração na superfície da lâmina. Ainda, o recozimento com forno convencional provoca a diminuição na concentração, por difusão, muito maior que o RTA.



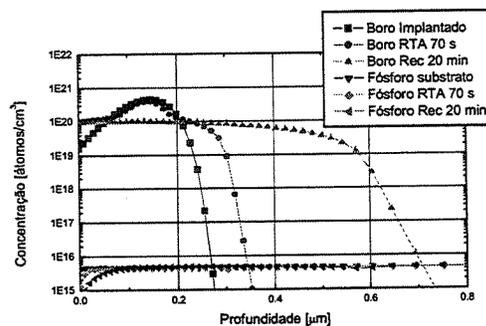
(e) Energia 10 keV - Dose $5 \cdot 10^{15}$



(f) Energia 20 keV - Dose $5 \cdot 10^{15}$



(g) Energia 30 keV - Dose $5 \cdot 10^{15}$



(h) Energia 40 keV - Dose $5 \cdot 10^{15}$

Figura 5.6 – Simulação de implantação iônica de boro

Para a fabricação dos dispositivos micro-aquecedores, foram escolhidas a energia de implantação de 20 keV e dose de $5 \cdot 10^{15}$ átomos/cm², e recozimento RTA. Com esses parâmetros pode-se construir resistores com espessuras de aproximadamente 0,25 μm . Após a corrosão com KOH, considerando que a região com concentração menor que 10^{20} átomos/cm³ seria corroída, o resistor teria uma espessura de aproximadamente 0,15 μm .

5.4.6 Fotogração 2 – Abertura de vias

A segunda etapa de fotogração é feita para abrir vias no óxido, nas quais será depositado alumínio para a formação de contato elétrico - Figura 5.3(f). Esta etapa é necessária quando há óxido sobre os resistores, como o óxido de porta, que é crescido

quando se fabrica um transistor - Figura 5.3(f) e (g). Neste dispositivo esta etapa não seria necessária, mas é realizada apenas para permitir o alinhamento entre a primeira e terceira etapas de fotogração.

Esta etapa segue o mesmo procedimento já descrito no item 5.4.4. O resultado desta fotogração é mostrado na Figura 5.7.

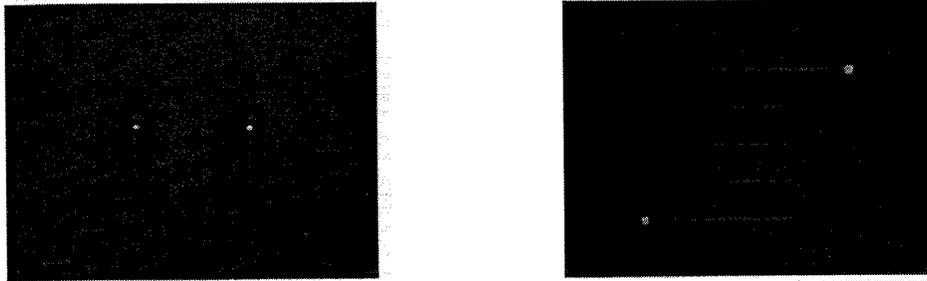


Figura 5.7 – Segunda etapa de fotogração: abertura de vias

5.4.7 Metalização

O alumínio é o metal utilizado para formar os contatos elétricos do resistor. Para isto, uma camada de aproximadamente $0,5 \mu\text{m}$ foi evaporada sobre toda a lâmina. Na evaporadora empregada, um feixe de elétrons é utilizado para fundir a fonte de alumínio, o qual é transportado e se deposita sobre o substrato, formando uma camada condutora como mostrado na Figura 5.3(i).

Os parâmetros utilizados neste processo de metalização foram os seguintes:

Espessura: $0,5 \mu\text{m}$

Taxa de deposição: 1% da espessura total por segundo

Pressão: $4 \cdot 10^{-6}$ Torr durante a deposição

Pressão de base: $4 \cdot 10^{-7}$ Torr

Corrente: 0,4 A

Tensão: 7 kV

5.4.8 Fotogravação 3 – Definição dos *pads*

Após a deposição do alumínio, é necessário mais uma etapa de fotogravação para isolar eletricamente os dispositivos e definir os *pads* - Figura 5.3(j). O procedimento para esta fotogravação é o mesmo já mencionado. A única diferença é que, para a corrosão do alumínio, é utilizada uma solução de ácido ortofosfórico e ácido nítrico: $H_3PO_4 + HNO_3$ na proporção de 19:1. A Figura 5.8 mostra o resultado desta fotogravação.

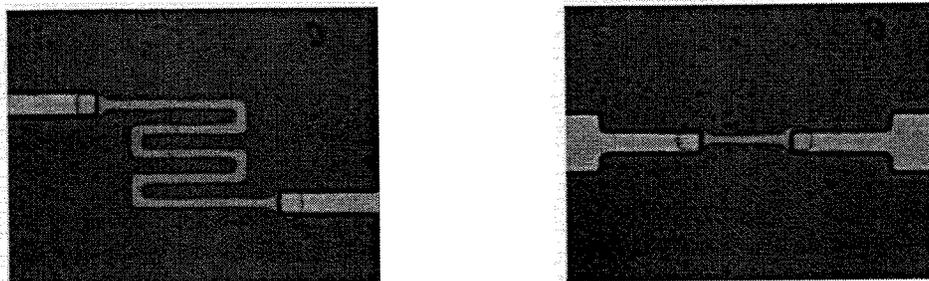


Figura 5.8 – Terceira etapa de fotogravação: definição dos *pads*

5.4.9 Sinterização dos contatos

A etapa de sinterização é um recozimento efetuado a temperatura de 430 °C por 20 minutos, em ambiente de N_2 e H_2 , realizado para reestruturar as camadas e melhorar o contato elétrico, reduzindo os defeitos nas interfaces das estruturas, que podem ter sido gerados durante a evaporação do alumínio.

Terminada esta etapa de sinterização, a fabricação do dispositivo está completada restando somente a sua caracterização.

5.4.10 Deposição e corrosão do nitreto

Se for necessário fazer o isolamento térmico entre o micro-aquecedor e o substrato, deve-se fazer a corrosão do substrato pela técnica *front side bulk silicon micromachining* [9]. Este isolamento térmico não foi realizado no dispositivo fabricado e estudado nesta dissertação, deixando estes estudos para trabalhos futuros.

Para efetuar a corrosão do substrato de silício, primeiramente abre-se janelas na camada de óxido de silício. Para isso, faz-se a deposição de nitreto de silício que serve para proteger os *pads* de alumínio e como máscara na corrosão do SiO₂ com buffer de HF e corrosão do substrato de silício com KOH.

5.4.11 Fotogração 4 – Abertura de janelas no óxido para corrosão do substrato

A quarta e última etapa de fotogração é realizada para abertura de janelas no óxido, seguindo os processos descritos de corrosão de SiO₂, para permitir a corrosão do substrato de silício, como mostrada na Figura 5.3(k).

5.4.12 Corrosão do substrato com KOH

A corrosão anisotrópica de silício monocristalino com KOH é uma técnica bastante utilizada na fabricação de MEMS. Estudos mostram que há seletividade entre os planos cristalinos [43]. O plano (100), o da superfície das lâminas utilizadas, apresenta maior taxa de corrosão que o plano (111). Além disso, a taxa de corrosão também é função da concentração de boro no silício. Esse efeito é conhecido como *boron etch stop* e permite fabricar estruturas suspensas, como a mostrada na Figura 5.9, obtida por simulação com o *software* ACES (*Anisotropic Crystalline Etch Simulation*). Essa é a última etapa de processo, mostrada na Figura 5.3(l).

Para se obter a seletividade suficiente para *boron etch stop*, a concentração de boro no silício deve ser superior a 10^{20} átomos/cm³, para uma solução de KOH 10% [44] e $1,2 \cdot 10^{20}$ átomos/cm³ para uma solução de KOH 20% [45].

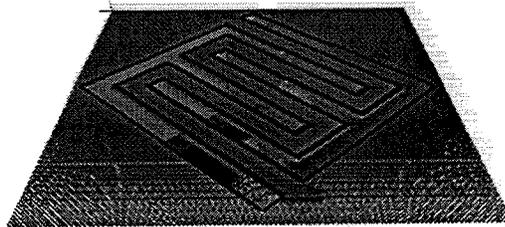


Figura 5.9 – Simulação de corrosão anisotrópica do silício em KOH com o *software* ACES

5.5 Micro-aquecedores em silício policristalino

No segundo tipo de estrutura, compatível com os processos PMOS, NMOS e CMOS, o micro-aquecedor é um resistor de silício policristalino dopado com fósforo, sobre uma camada de SiO_2 , que pode ser seletivamente corroída para aumentar o isolamento térmico entre o micro-aquecedor e o substrato, deixando o dispositivo suspenso. Nessa estrutura podem ser usados dois tipos de camadas para formação da camada sacrificial: uma de dióxido de silício ou um “sanduíche” de dióxido de silício e nitreto de silício. Esse último tipo de camada é bastante utilizado para a fabricação de micro-aquecedores, mas o uso do nitreto de silício acrescenta uma etapa ao processo convencional de fabricação de circuitos integrados. Por isso, foi estudado nesse trabalho o processo que utiliza apenas o dióxido de silício.

Todo o processo de fabricação de um resistor e um transistor com estrutura auto-alinhada é mostrado na Figura 5.10 e a descrição das etapas feitas em seguida.

5.5.1 Caracterização inicial da lâmina

As lâminas usadas no processo de fabricação desta estrutura são iguais às da estrutura anterior e são ilustradas na Figura 5.10(a).

5.5.2 Limpeza RCA completa

A limpeza RCA das lâminas usadas neste processo foi realizada juntamente com as do processo anterior.

5.5.3 Oxidação úmida para formação do óxido de campo

A oxidação dessas lâminas foi realizada juntamente com as do processo anterior, e é ilustrada na Figura 5.10(b).

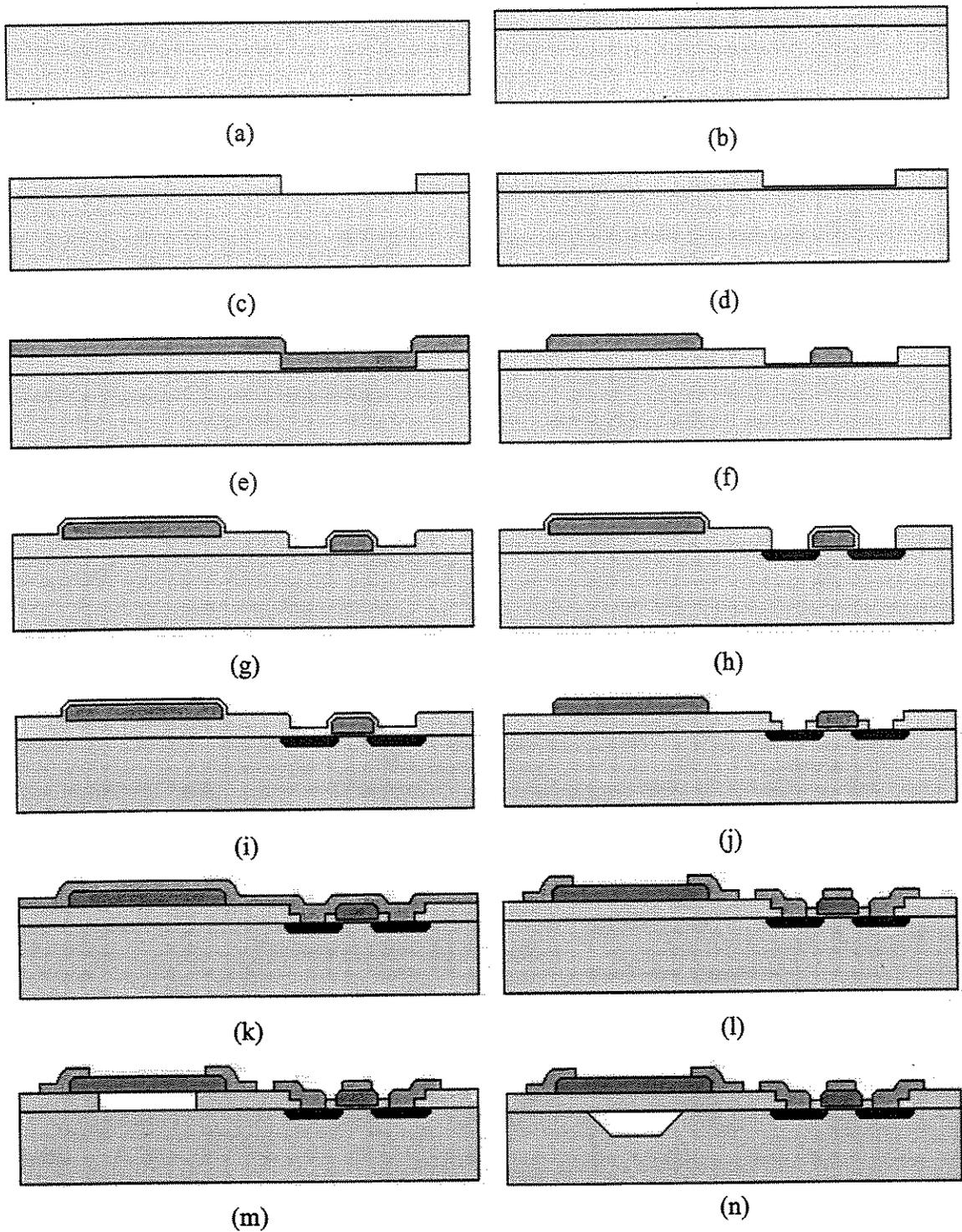


Figura 5.10 – Etapas do processo de fabricação do micro-aquecedor compatível com PMOS, NMOS e CMOS (ver descrição detalhada no texto)

5.5.4 Deposição do silício policristalino

O silício policristalino é depositado em um reator CVD (*Chemical Vapor Deposition*) – Figura 5.10(e). As etapas mostradas nas Figura 5.10(c) e (d) são realizadas somente se forem fabricado simultaneamente um transistor. A espessura desejada da camada é de 0,5 μm , e os parâmetros utilizados para a obtenção dessa espessura foram os seguintes:

Fluxo de H_2 : 4.800 sccm

Fluxo de SiH_4 : 40 sccm

Tempo de deposição: 10 minutos

Temperatura de deposição: 800 °C

5.5.5 Implantação iônica de átomos de fósforo e ativação dos dopantes por RTA

A dopagem do silício policristalino para formação do resistor foi feita com fósforo. A escolha da energia, dose de implantação e parâmetros de recozimento por RTA também foram simuladas, como para o caso do resistor fabricado diretamente no substrato.

Foram escolhidas duas doses diferentes de implantação, $2 \cdot 10^{16}$ e $7 \cdot 10^{15}$ átomos/ cm^2 , para o estudo de sua influência nas características do dispositivo. Para ambas as doses, a energia de implantação foi de 150 keV e RTA efetuada a temperatura de 1000 °C por 40 segundos. Os resultados das simulações são mostrados na Figura 5.11.

Nessa figura, a região de silício policristalino é de $-1,1 \mu\text{m}$ a $-0,55 \mu\text{m}$, o óxido de $-0,55 \mu\text{m}$ a 0, e a partir desse valor, o substrato de silício. Observa-se que a concentração de fósforo é maior para a implantação com maior dose, como era de se esperar, e que os perfis de concentração são uniformes, diferentemente do recozimento por RTA para o resistor de silício monocristalino. Isso se explica pela maior difusibilidade dos dopantes em silício policristalino, devida aos contornos de grãos.

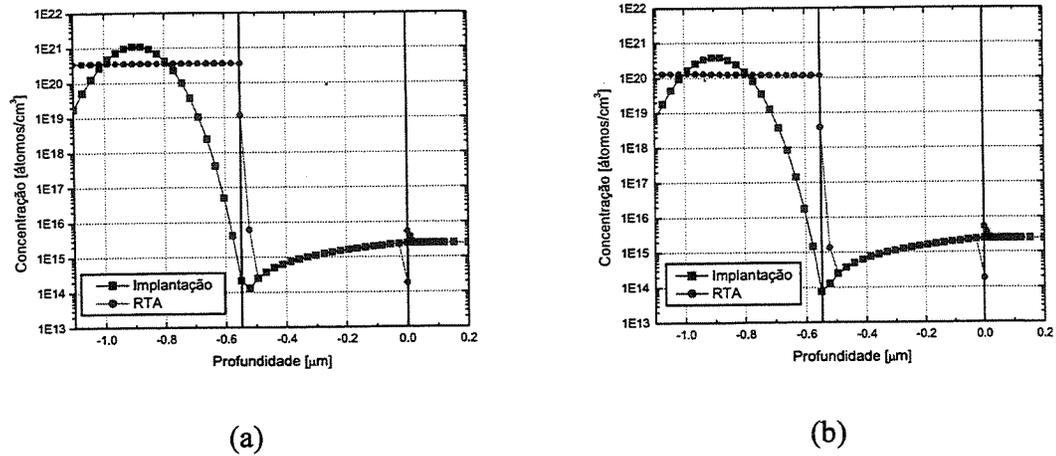


Figura 5.11 – Perfil de concentração de fósforo após implantação com energia de 150keV e RTA à 1000 °C por 40 s, para dose de (a) $2 \cdot 10^{16}$ átomos/cm² e (b) $7 \cdot 10^{15}$ átomos/cm²

5.5.6 Fotogravação 1 – Definição dos resistores

Diferentemente da estrutura anterior, no caso deste micro-aquecedor, a primeira fotogravação é realizada para definir os resistores no silício policristalino - Figura 5.10(f). O resultado desta etapa é mostrada na Figura 5.12.

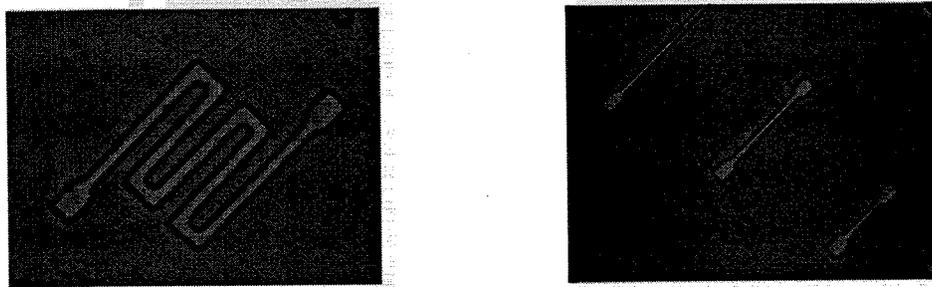


Figura 5.12 – Primeira etapa de fotogravação: definição dos resistores

5.5.7 Fotogravação 2 – Abertura de vias

A segunda fotogravação foi realizada apenas para permitir o alinhamento entre a primeira e terceira fotogravações. Neste tipo de estrutura não há óxido sobre o silício

policristalino antes da metalização, mesmo com a fabricação simultânea de um transistor. Na Figura 5.13 é mostrado o resultado desta fotogração.

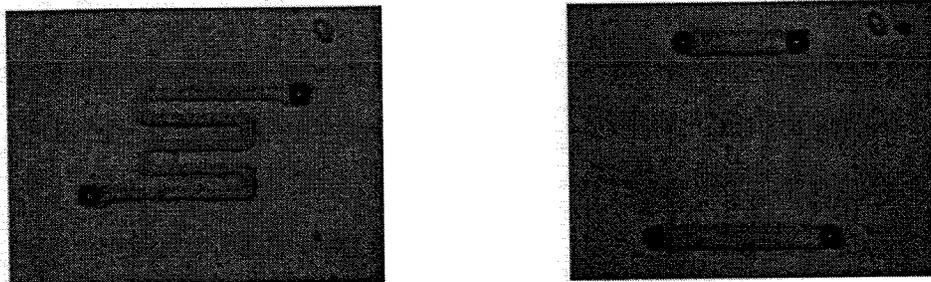


Figura 5.13 – Segunda etapa de fotogração: abertura de vias

5.5.8 Metalização

Esta etapa foi realizada juntamente com a da estrutura anterior, discutida na seção 5.4.7, e é ilustrada na Figura 5.10(k).

5.5.9 Fotogração 3 – Definição dos *pads*

Esta etapa foi realizada juntamente com a da estrutura anterior, discutida na seção 5.4.8. Ela é ilustrada na Figura 5.10(l) e os resultados mostrados na Figura 5.14.

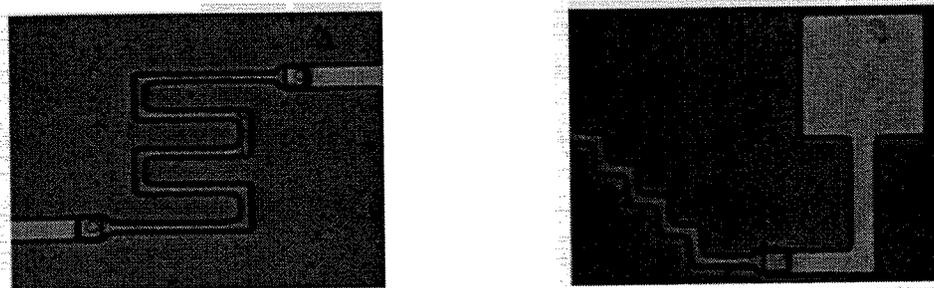


Figura 5.14 – Terceira etapa de fotogração: definição dos *pads*

5.5.10 Sinterização dos contatos

Esta etapa foi realizada juntamente com a da estrutura anterior, discutida na seção 5.4.9. Terminada esta etapa o dispositivo está pronto para ser caracterizado.

5.5.11 Fotogravação 4 – Corrosão da camada sacrificial de SiO₂

Esta etapa de processo é realizada apenas quando se deseja aumentar a isolamento térmica do dispositivo e é efetuada por corrosão da camada sacrificial, utilizando a técnica *surface micromachining*, conforme a Figura 5.10(m). A fotogravação é feita como citada em outras etapas e o resultado obtido mostrado na Figura 5.15.

Durante a corrosão do óxido, o fotorresiste pode-se desprender da lâmina em algumas áreas, se o tempo de corrosão for excessivo, sendo necessário parar o processo antes do término.

Uma alternativa para contornar este problema é a mostrada na Figura 5.10(n), onde o substrato de silício é corroído deixando o micro-aquecedor sobre a membrana de SiO₂. Com o conjunto de máscaras fabricado neste trabalho também é possível construir esse tipo de estrutura.

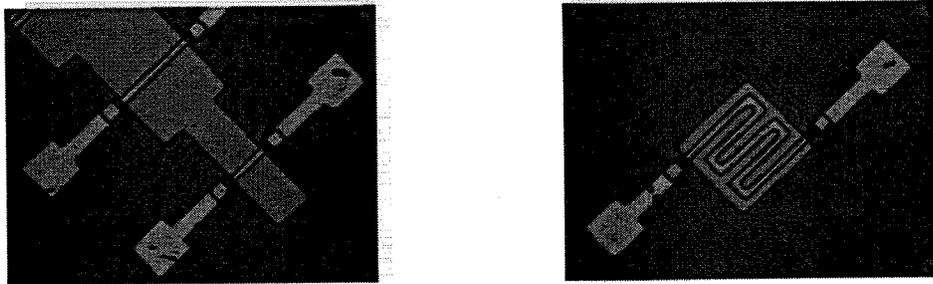


Figura 5.15 – Fotogravação para corrosão da camada sacrificial

5.6 Resum o do capítulo

Neste capítulo foram descritos em detalhes os dois processos de fabricação dos micro-aquecedores desenvolvidos neste trabalho, desde o desenho das máscaras para fotolitografia até a última etapa de fabricação. Os processos são compatíveis com as tecnologias de microeletrônica PMOS, NMOS e CMOS. A caracterização dos dispositivos fabricados é a última parte deste trabalho e será abordado no próximo capítulo.

CAPÍTULO 6 – CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA

6.1 Introdução

Depois de concluído o processo de fabricação dos micro-aquecedores, foram feitas as caracterizações elétricas dos mesmos, onde foram levantadas as curvas que relacionam os parâmetros elétricos desses dispositivos.

A realização desta caracterização permite comparar o funcionamento dos micro-aquecedores, relacionar suas características com os parâmetros de fabricação e ainda verificar os resultados obtidos nas simulações. A caracterização dos micro-aquecedores também é necessária para que se possa, posteriormente, projetar um circuito de condicionamento para os dispositivos.

6.2 Micro-aquecedor de silício monocristalino implantado com boro

A primeira estrutura caracterizada foi o micro-aquecedor com resistor fabricado por implantação de boro no silício monocristalino.

Inicialmente foram feitas as medidas de resistência dos resistores com geometria mostrada na Figura 6.1. Como estes dispositivos são idênticos, pode-se analisar a uniformidade no processo de fabricação. Os resultados das medidas efetuadas são apresentados na Tabela 6.1.

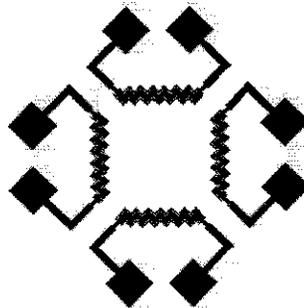


Figura 6.1 - Conjunto de resistores para verificar uniformidade na resistência

Tabela 6.1 - Resistência dos resistores em forma de escada para estrutura com resistor de silício monocristalino dopado com boro

Resistor	Resistência [Ω]
1	815,89
2	826,06
3	848,40
4	833,87
Média	831,06
Desvio Padrão	13,71
Desvio Padrão / Média	1,65 %

O valor médio das quatro resistências medidas é de 831,06 Ω e o desvio padrão de 13,71 Ω . Na próxima seção, utilizamos o valor deste desvio padrão como parâmetro de comparação a outra estrutura fabricada.

Na Figura 6.2 são mostradas as curvas de *Corrente x Tensão* na faixa de -20 a 20 V de cinco resistores com largura de 20 μm e comprimentos variando entre 200 e 1.000 μm .

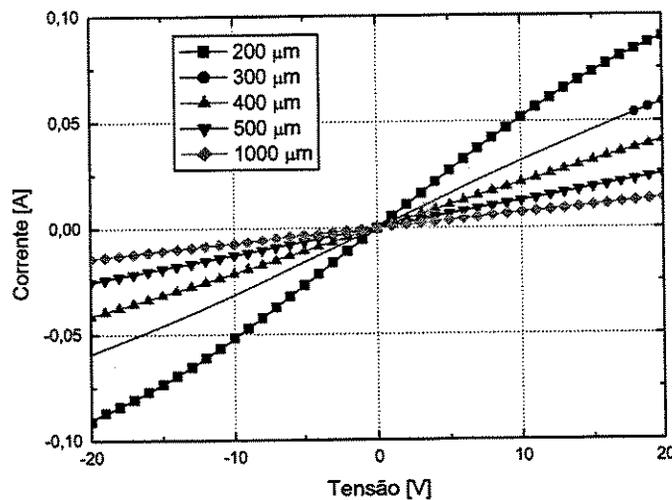


Figura 6.2 - Curva *Corrente x Tensão* de resistores de silício monocristalino dopado com boro, de diversos comprimentos e largura de 20 μm

Do resultado apresentado na Figura 6.2 observa-se que quanto menor o comprimento do resistor, maior a inclinação da curva I-V. Esta variação na inclinação indica um aumento de resistência devido ao auto-aquecimento por efeito Joule, como comentado no Capítulo 4. Para os dispositivos com maior resistência, este efeito de aumento é menos perceptível.

Na Figura 6.3 são mostrados, para os mesmos cinco dispositivos, os aumentos percentuais das resistências em função da tensão aplicada. Observa-se que quanto menor o comprimento do resistor, maior o aumento na sua resistência, o que pode ser explicado pelo fato de resistores menores dissiparem maior potência. O aumento percentual é maior que 20% para o resistor de comprimento igual a 200 μm , enquanto que para o resistor de 300 μm , este aumento é de 8%. Para resistores de comprimentos maiores, o aumento percentual é ainda menor.

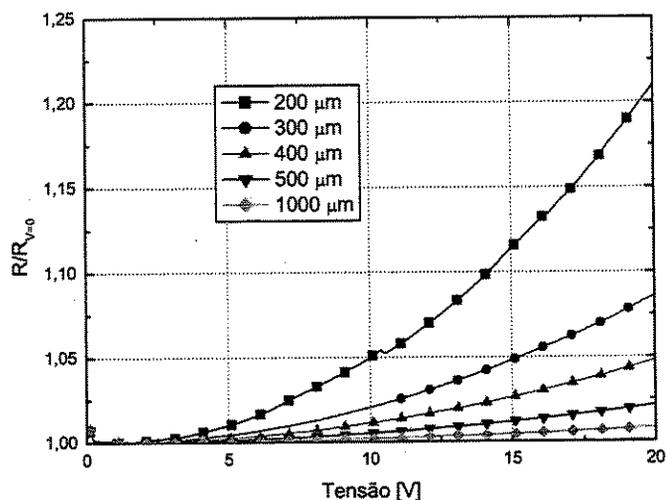


Figura 6.3 - Variação percentual da resistência em função da tensão aplicada

Para analisar a relação entre a resistência e potência dissipada escolheu-se os dois resistores menores, por apresentarem maior variação de resistência. Na Figura 6.4 é apresentada a curva *Resistência x Potência* e seu ajuste linear, para o resistor de 200 μm . A função de ajuste mostra que a resistência aumenta 20,26 Ω para cada Watt de potência dissipada, indicando uma eficiência de aquecimento de 20,26 Ω/W . Esta eficiência de

aquecimento é o parâmetro utilizado para comparação com os micro-aquecedores de silício policristalino.

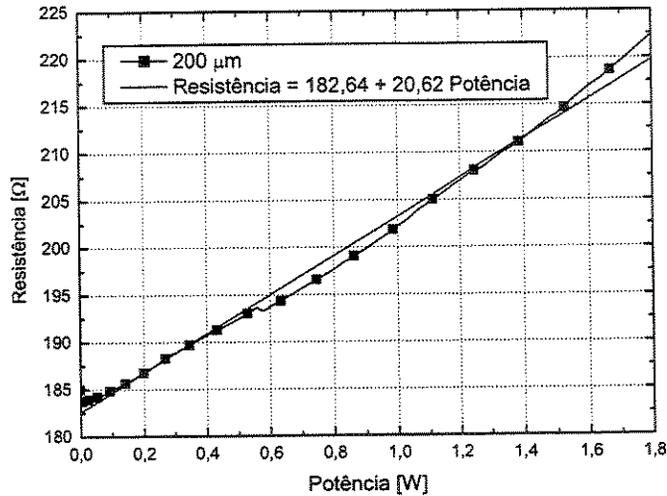


Figura 6.4 - Curva de resistência em função da potência, para resistor de 200 μm

Na Figura 6.5 é apresentada a curva *Resistência x Potência* do resistor de 300 μm . A partir da função obtida pelo ajuste linear da curva, apresentada na figura, a eficiência de aquecimento deste micro-aquecedor é de 22,62 Ω/W . Esse resultado indica que a eficiência de aquecimento é praticamente a mesma para qualquer dispositivo fabricado com os mesmos parâmetros de processo, independentemente da sua geometria.

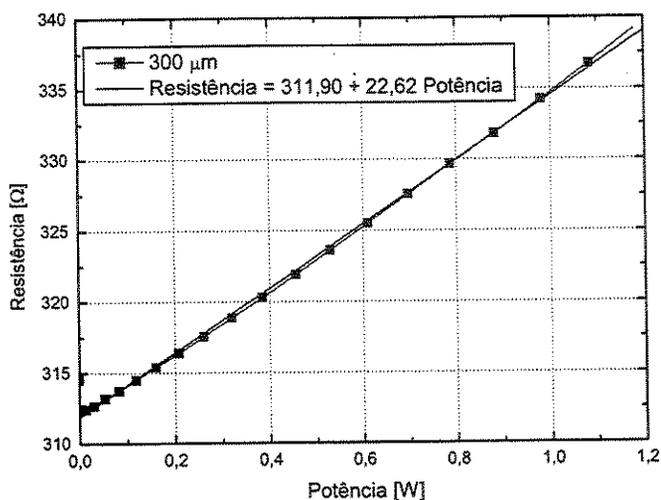


Figura 6.5 - Curva de resistência em função da potência, para resistor de 300 μm

6.3 Micro-aquecedor de silício policristalino implantado com fósforo

6.3.1 Energia de implantação: 150 keV, dose: $7 \cdot 10^{15}$ átomos/cm²

Os resultados da medição das resistências da geometria mostrada na Figura 6.1 dos micro-aquecedores de silício policristalino são mostrados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Medição de resistores de silício policristalino - dose de $7 \cdot 10^{15}$ átomos/cm²

Resistor	Resistência [Ω]
1	1893,54
2	1746,25
3	1870,04
4	1945,26
Média	1863,77
Desvio Padrão	84,41
Desvio Padrão / Média	4,53 %

Depois da deposição de silício policristalino, as lâminas apresentam manchas esbranquiçadas nas bordas. Por esse motivo, decidiu-se medir as resistências de vários outros resistores, com tamanhos diferentes, por toda a lâmina, para melhor analisar a uniformidade do processo de fabricação. Estes resultados são mostrados na Tabela 6.3. Observa-se que os valores das medidas na linha 1, são bem maiores que os outros. Estas medições foram realizadas em resistores próximos à borda da lâmina, o que indica a ocorrência do “efeito de borda” na resistividade do silício policristalino. Devido a constatação deste problema, para o cálculo do desvio padrão não foi levada em consideração estas medidas da linha 1.

Tabela 6.3 - Medição de resistores de comprimentos diferentes de silício policristalino

Número da medida	Comprimento do resistor				
	200 μm	300 μm	400 μm	500 μm	1.000 μm
1	1,07 k	1,16 k	1,64 k	2,67 k	5,62 k
2	519,42	965,49	1,19 k	2,33 k	5,04 k
3	505,81	856,60	1,18 k	1,89 k	3,65 k
4	488,46	847,90	1,47 k	2,04 k	3,84 k
5	531,38	829,70	1,30 k	2,06 k	4,05 k
Média	511,27	874,92	1,29 k	2,08 k	4,15 k
Desvio padrão	18,45	61,41	134,78	183,12	618,63
Desvio padrão/média	3,61 %	7,02 %	10,45 %	8,80 %	14,9 %

Na Figura 6.6 são mostradas as curvas de *Corrente x Tensão* de resistores com largura de 20 μm e diferentes comprimentos. Pode-se observar que as inclinações das curvas são bem menos perceptíveis que as apresentadas na Figura 6.2, para o outro tipo de estrutura.

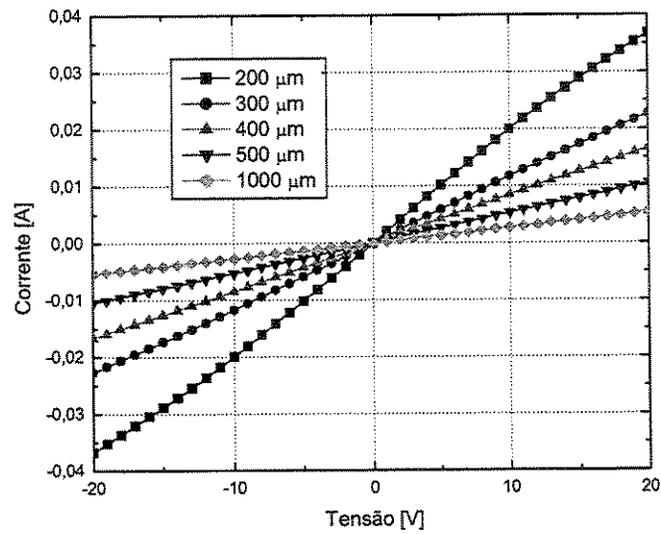


Figura 6.6 – Curva *Corrente x Tensão* de resistores de silício policristalino dopado com fósforo com dose de $7 \cdot 10^{15}$ átomos/cm², de diversos comprimentos e largura de 20 μm

Os aumentos percentuais das resistência em função da tensão aplicada são mostradas na Figura 6.7. A maior variação percentual, de 12%, é observada para o resistor de 200 μm de comprimento. Pode-se comparar este valor com o calculado a partir dos parâmetros da Tabela 4.3, obtida da simulação do dispositivo que é de 9,8%. Esse resultado confirma o comportamento deste dispositivo previsto pela simulação.

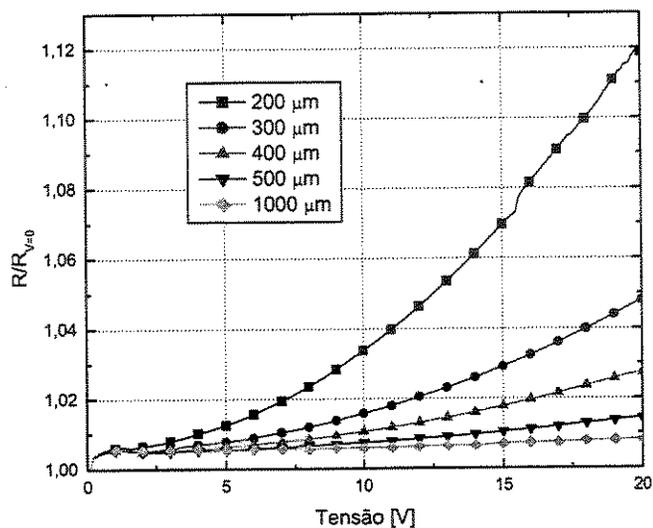


Figura 6.7 – Variação percentual da resistência em função da tensão aplicada

O cálculo da eficiência de aquecimento desta estrutura pode ser obtido pelo ajuste linear da curva *Resistência x Potência*, mostrada na Figura 6.8. O valor da eficiência de aquecimento é de 76,21 Ω/W para o resistor de 200 μm . Para o dispositivo de 300 μm , a eficiência de aquecimento é de 79,30 Ω/W , como mostrada na Figura 6.9. Esses resultados indicam que a eficiência de aquecimento da estrutura de micro-aquecedor com silício policristalino é aproximadamente três vezes maior que a da estrutura de silício monocristalino, apresentado no item anterior.

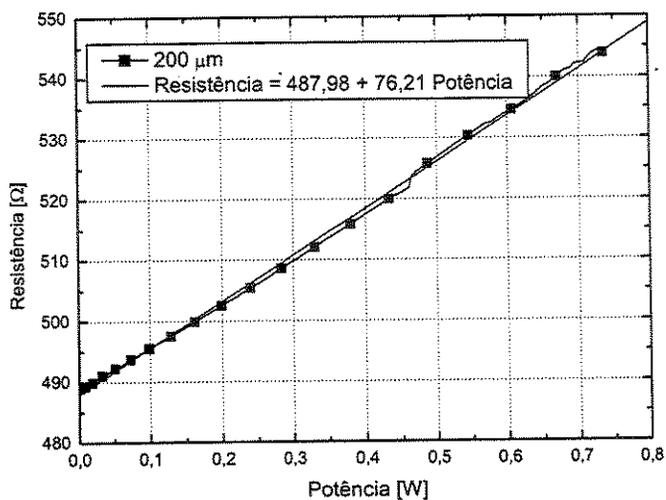


Figura 6.8 – Curva de resistência em função da potência, para resistor de 200 μm

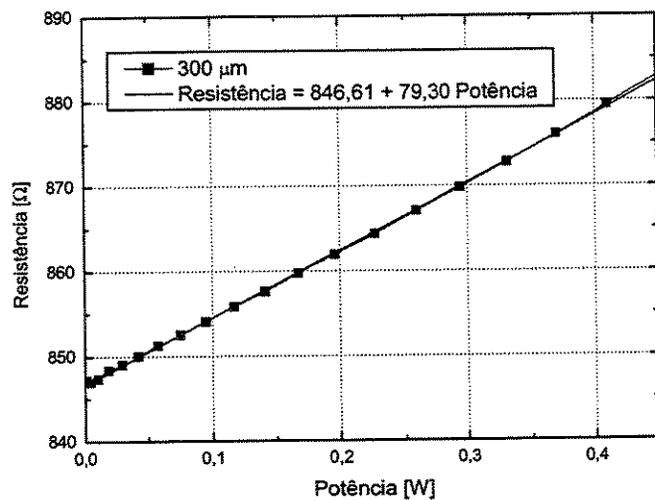


Figura 6.9 – Curva de resistência em função da potência, para resistor de 300 μm

6.3.2 Energia de implantação: 150 keV, dose: $2 \cdot 10^{16}$ átomos/cm²

As medições das resistências dos dispositivos mostrados na Figura 6.1 para esta estrutura são mostrados na Tabela 6.4. O resultado da medição da resistência de resistores de vários comprimentos por toda a lâmina é mostrado na Tabela 6.5. Um fato interessante é que o desvio padrão calculado é menor neste caso que no anterior. Uma possível explicação para isto é que esta dose de implantação implica em uma condutividade bem maior, e então o efeito da não uniformidade da resistividade do silício policristalino seria atenuado.

Tabela 6.4 - Medição de resistores de silício policristalino - dose de $2 \cdot 10^{16}$ átomos/cm²

Resistor	Resistência [Ω]
1	577,50
2	544,04
3	583,24
4	604,64
Média	577,36
Desvio Padrão	25,09
Desvio Padrão / Média	4,34 %

Tabela 6.5 - Medição de resistores de comprimentos diferentes de silício policristalino

Número da Medida	Comprimento do resistor				
	200 μm	300 μm	400 μm	500 μm	1.000 μm
1	198,83	323,11	470,86	678,84	1360
2	195,42	336,86	414,71	692,2	1277
3	191,47	309,88	429,01	671,18	1289
4	188,83	308,62	447,68	699,06	1329
5	194,24	294,14	446,02	720,17	1368
Média	193,75	314,52	441,65	692,29	1324,6
Desvio padrão	3,82	16,16	21,18	19,04	40,89
Desvio padrão/Média	1,97 %	5,13 %	4,80 %	2,75 %	3,09 %

As curvas de *Corrente x Tensão* de resistores com largura de $20\ \mu\text{m}$ e diferentes comprimentos são mostradas na Figura 6.10. Estes dispositivos apresentam uma variação na resistência maior que os fabricados com menor dose de implantação, como no caso anterior.

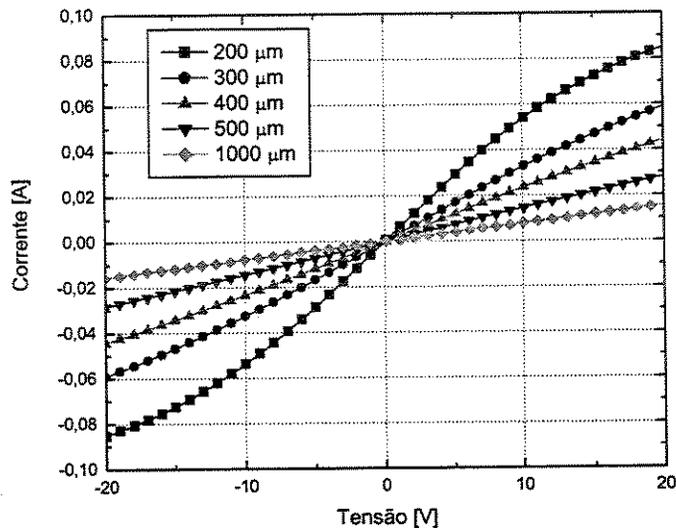


Figura 6.10 – Curva *Corrente x Tensão* de resistores de silício policristalino dopado com fósforo com dose de $2 \cdot 10^{16}$ átomos/cm², de diversos comprimentos e largura de $20\ \mu\text{m}$

As curvas de variação percentual da resistência em função da potência são mostradas na Figura 6.11. Observa-se que o maior aumento é para o resistor de menor comprimento, sendo da ordem de 40 %. Esse é um fato interessante, pois pelos resultados da simulação (Tabela 4.4) o valor desta variação seria de aproximadamente 22,5 %. Uma possível explicação para isso é que alguma propriedade do micro-aquecedor, como o TCR, seja dependente da concentração de dopantes.

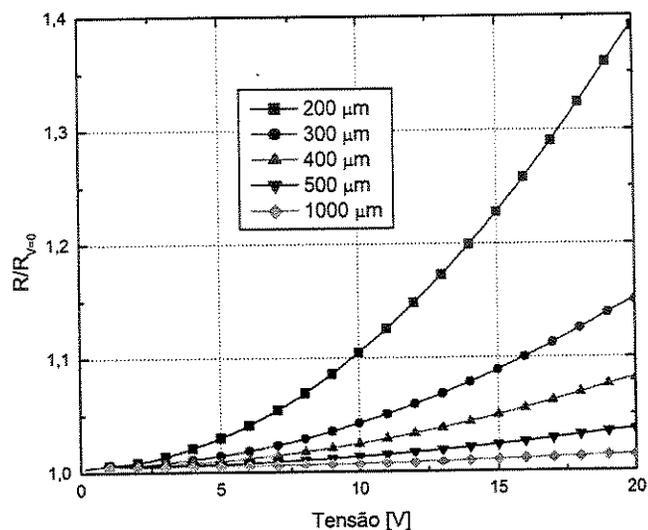


Figura 6.11 – Variação percentual da resistência em função da tensão aplicada

Na Figura 6.12 e Figura 6.13 são mostradas as curvas de *Resistência x Potência* para os resistores de 200 μm e 300 μm , respectivamente. A partir do ajuste linear dessas curvas, pode-se determinar que a eficiência de aquecimento destes dispositivos é de 37,42 Ω/W e 36,43 Ω/W , respectivamente.

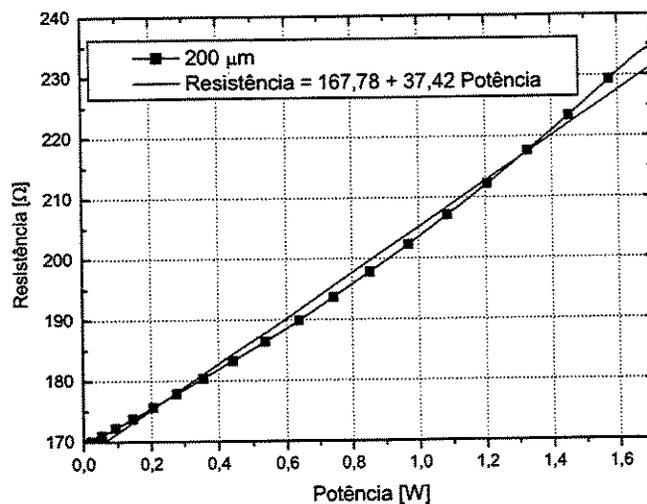


Figura 6.12 – Curva de resistência em função da potência, para resistor de 200 μm

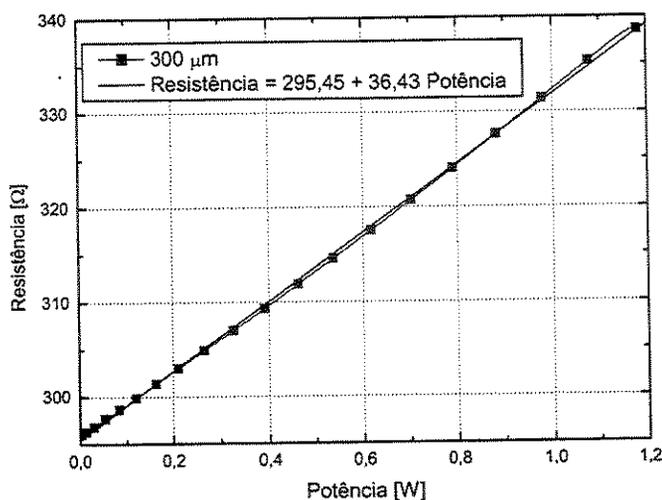


Figura 6.13 – Curva de resistência em função da potência, para resistor de 300 μm

6.4 Resumo do capítulo

Neste capítulo foram apresentados os resultados da caracterização elétrica dos micro-aquecedores. Esses resultados possibilitaram a análise da eficiência térmica, que foi o principal parâmetro de comparação entre as estruturas fabricadas. Desses resultados, conclui-se que os resistores fabricados em silício policristalino apresentam uma maior eficiência térmica que os fabricados por implantação em silício monocristalino, e que esta eficiência térmica depende do nível de dopagem do resistor aquecedor. Além disso, a fabricação de resistores com vários comprimentos possibilitou analisar o efeito da densidade de potência dissipada em dispositivos fabricados com os mesmos parâmetros de processo.

Também foi feita uma comparação entre os resultados experimentais e os das simulações apresentados no Capítulo 4, mostrando a existência de uma boa concordância entre eles.

CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Com a realização deste trabalho foi possível mostrar a viabilidade da fabricação de estruturas micro-aquecedoras utilizando dois processos de fabricação distintos, compatíveis com as tecnologias de microeletrônica PMOS, NMOS e CMOS. Estes micro-aquecedores podem ser usados em sensores e atuadores térmicos monolíticos, possibilitando a fabricação de sistemas inteligentes.

A principal contribuição deste trabalho foi mostrar que não há nenhuma dificuldade em se incluir outros dispositivos eletrônicos, como transistores, diodos e capacitores juntos aos micro-aquecedores, uma vez que a seqüência das etapas dos processos permitem a fabricação simultânea destes dispositivos sem a necessidade de etapas adicionais às das tecnologias mencionadas. Outra contribuição do trabalho foi apresentar todos os passos, da modelagem matemática à fabricação e caracterização dos dispositivos, que pode servir como referência para o desenvolvimento de sensores térmicos monolíticos. Em geral, o trabalho segue uma metodologia que também é adequada ao desenvolvimento de outros tipos de sensores.

A partir da análise dos resultados apresentados neste trabalho, conclui-se que, qualitativamente, o comportamento dos dois tipos de estruturas de micro-aquecedores são semelhantes, mas quantitativamente, não. Os micro-aquecedores de silício policristalino, por serem fabricados sobre a camada termicamente isolante de SiO_2 , apresentam uma eficiência térmica maior que os fabricados em silício monocristalino, e por isso consomem menos potência, sendo essa uma vantagem desse processo e do dispositivo, mas apresentam menor uniformidade nos valores dos resistores devido aos efeitos de borda do processo de deposição do silício policristalino. Isso pode ser minimizado usando-se lâminas maiores ou inteiras durante o processamento. De qualquer forma, este fato não precisa ser levado em consideração em aplicações que usam apenas um elemento sensor. Além disso, a eficiência térmica depende do nível de dopagem do resistor. Para os parâmetros de processo usados, a eficiência térmica dos micro-aquecedores de silício policristalino é de aproximadamente $80 \text{ } \Omega/\text{W}$ e $40 \text{ } \Omega/\text{W}$ para doses de $7 \cdot 10^{15}$ e $2 \cdot 10^{16}$ átomos/ cm^2 , respectivamente, e para os fabricados em silício monocristalino, de $25 \text{ } \Omega/\text{W}$, para dose de $5 \cdot 10^{15}$ átomos/ cm^2 .

A partir da comparação entre os resultados de simulação e os obtidos experimentalmente, como as curvas *resistência x tensão* e *corrente x tensão*, conclui-se que o modelo utilizado descreve com boa exatidão o comportamento dos dispositivos, e que as simulações realizadas são de grande importância para o entendimento e previsão das características térmicas e elétricas dos micro-aquecedores.

Algumas atividades propostas para possíveis trabalhos futuros:

- Corrosão do substrato de silício dos micro-aquecedores fabricados com implantação de boro e da camada sacrificial de dióxido de silício usados na fabricação dos resistores de silício policristalino. Para a corrosão da camada sacrificial de dióxido de silício, seria necessário ainda um estudo mais detalhado desse processo, além da escolha de uma máscara para corrosão, como alternativa para o fotorresiste utilizado.
- Caracterização dos materiais utilizados na fabricação para simulação com os valores reais de suas propriedades térmicas e elétricas. O uso de valores medidos das propriedades dos materiais levariam a resultados de simulações mais reais.
- Caracterização dos micro-aquecedores como os diversos tipos de sensores descritos.
- Projeto de circuitos eletrônicos para serem fabricados junto aos micro-aquecedores, formando sensores inteligentes.
- Encapsulamento do sensor.

REFERÊNCIAS

- [1] Hausler, L., *Tecnologia MOS*, 1986, São Paulo, NOBEL
- [2] Kovacs, G. T. A., *Micromachined Transducers Sourcebook*, 1998, New York, McGraw-Hill
- [3] Borwick III, R.L., Stupar, P.A., DeNatale, J., Anderson, R., *A high Q, large tuning range MEMS capacitor for RF filter systems*, Sensors and Actuators A 103, 2003, 33-41
- [4] Oka, T., Nakajima, H., Tsugai, M., Hollenbach, U., Wallrabe, U., Mohr, J., *Development of a micro-optical distance sensor*, Sensors and Actuators A 102, 2003, 261-267
- [5] Koch, M., Shabmueller, C.G.J., Evans, A.G.R., Brunnschweiler, A., *Micromachined chemical reaction system*, Sensors and Actuators A 74, 1999, 207-210
- [6] Xie, H., Pan, Y., Fedder, G.K., *Endoscopic optical coherence tomographic imaging with a CMOS-MEMS micromirror*, Sensors and Actuators A 103, 2003, 237-241
- [7] Wisniowski, H., *Analog Devices Puts Micromachined in Motion*, disponível on-line em <http://www.analog.com/technology/mems/accelerometers/library.html>, em 25/08/2003
- [8] Doscher, J., *Using Micromachined Motion Sensors to Improve the Human/Machine Interface*, Multimedia Systems Design, January 1999, versão on-line disponível em www.analog.com/iMEMS, em 25/08/2003
- [9] Senturia, S. D., *Microsystem Design*, pp. 59, Kluwer Academic Publishers, Norwell, 2001
- [10] Introduction to Microengineering: MEMS, Micromachines, MST, disponível on-line em <http://www.dbanks.demon.co.uk/ueng/sistruct.html>
- [11] Introduction to Microengineering: MEMS, Micromachines, MST, disponível on-line em <http://www.dbanks.demon.co.uk/ueng/surfum.html>
- [12] Fraden, J., *Handbook of modern sensors : physics, designs, and applications*, 1996, New York, Springer

-
- [13] Wu, Y.E., Chen, K., Chen, C.W., Hsu, K.H., *Fabrication and characterization of thermal conductivity detectors (TCDs) of different flow channel and heater designs*, Sensors and Actuators A 100, 2002, 37-45
- [14] Schmid, U., *A robust flow sensor for high pressure automotive applications*, Sensors and Actuators A 97-98, 2002, 253-263
- [15] Abedinov, N., Grabiec, P., Gotszalk, T., Ivanov, Tz, Voigt, J., Rangelow, I.W., *Micromachined piezoresistive cantilever array with integrated resistive microheater for calorimetry and mass detection*, J. Vac. Sci. Technol. A, 19 (6), 2001, 2884-2888
- [16] Park, H., Pak, J.J., Son, S.Y., Lim, G., Song, I., *Fabrication of a microchannel integrated with inner sensors and the analysis of its laminar flow characteristics*, Sensors and Actuators A 103, 2003, 317-329
- [17] Kajiyama, T., Miyahara, Y., Kricka, L. J., Wilding, P., Graves, A. J., Surrey, S., Fortina, P., *Genotyping on a Thermal Gradient DNA Chip*, Genome Res. 2003 13: 467-475
- [18] Kasap, S. O., *Principles of electrical engineering materials and devices*, McGraw-Hill, 2000
- [19] Kimura, M., Manaka, J., Satoh, S., Takano, S., Igarashi, N., Nagai, K., *Application of the air-bridge microheater to gas detection*, Sensors and Actuators B 24-25 (1995) 857-860
- [20] Mo, Y., Okawa, Y., Inoue, K., Natukawa, K., *Low-voltage and low-power optimization of micro-heater and its on-chip drive circuitry for gas sensor array*, Sensors and Actuators A 100 (2002) 94-101
- [21] Puigcorbé, J., Vogel, D., Michel, B., Vilà, A., Gràcia, I., Cané, C., Morante, J. R., *Thermal and mechanical analysis of micromachined gas sensors*, J. Micromech. Microeng. 13 (2003), 548-556
- [22] Bruun, H. H., *Hot-Wire Anemometry*, Oxford Science Publications, New York, 1995
- [23] Wu, J., Sansen, W., *Electrochemical time of flight flow sensor*, Sensors and Actuators A 97-98, 2002, 68-74
- [24] Giani, A., Mailly, F., Bonnot, R., Pascal-Delannoy, F., Foucaran, A., Boyer, A., *Thermal model of thin film anemometer*, Microelectronics Journal 33 (2002) 619-625

- [25] Park, S., Kim, S., Kim, S., Kim, Y., *A flow direction sensor fabricated using MEMS technology and its simple interface circuit*, Sensors and Actuators B 91 (2003) 347-352
- [26] Weng, P. K., Shie, J. S., *Micro-Pirani vacuum gauge*, Rev. Sci. Instrum. 65 (2), 1994, 492-499
- [27] Chou, B. C. S., Chen, Y. M., Ou-Yang, M., Shie, J. S., *A sensitive Pirani vacuum sensor and the electrothermal SPICE modelling*, Sensors and Actuators A 53 (1996) 273-277
- [28] Robinson, A. M., Haswell, P., Lawson, R. P. W., Parameswaran, M., *A thermal conductivity microstructural pressure sensor fabricated in standard complementary metal-oxide semiconductor*, Rev. Sci. Instrum. 63 (3), 1992, 2026-2029
- [29] Kimura, M., *Absolute-humidity sensing independent of the ambient temperature*, Sensors and Actuators A 55 (1996) 7-11
- [30] Yoon, D. S., Lee, Y. S., Lee, Y., Cho, H. J., Sung, S. W., Oh, K. W., Cha, J., Lim, G., *Precise temperature control and rapid thermal cycling in a micromachined DNA polymerase chain reaction chip*, J. Micromech. Microeng. 12 (2002) 813-823
- [31] Rossi, C., Temple-Boyer, P., Estève, D., *Realization and performance of thin SiO₂/SiN_x membrane for microheater applications*, Sensors and Actuators A 64 (1998) 241-245
- [32] Das, N. C., Monroy, C., Robinson, D., Jhabvala, M., *Design and fabrication of low power polysilicon sources*, Solid-State Electronics 43 (1999) 1239-1244
- [33] Fürjes, P., Vizváry, Z., Ádám, M., Morrissey, A., Dücső, Cs., Bársony, I., *Thermal investigation of micro-filament heaters*, Sensors and Actuators A 99 (2002) 98-103.
- [34] Berlicki, T. M., *Convection-conductive vacuum sensor*, Vacuum 57 (2000) 413-419
- [35] Berlicki, T. M., *Thermal vacuum sensor with compensation of heat transfer*, Sensors and Actuators A 93 (2001) 27-32
- [36] Hayt Jr, W. H., *Eletromagnetismo*, LTC, Rio de Janeiro, 1994
- [37] Incropera, F. P., DeWitt, D. P., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wiley & Sons, New York, 1990
- [38] Boukabache, A., Pons, P., *Doping effects on thermal behaviour of silicon resistor*, Electronics Letters, 2002, 38, 7, pp. 342-343

-
- [39] Eckert, E. R. G., Drake Jr, R. M., *Heat and Mass Transfer*, p.180, McGraw-Hill, Nova York, 1959
- [40] Swart, N.R., Nathan, A., *Coupled Electrothermal Modeling of Microheaters Using Spice*, Transactions on Electron Devices, **41**, 6, 1994
- [41] McConnell, A. D., Uma S., *Thermal Conductivity of Doped Polysilicon Layers*, IEEE J. Microelectromec. Syst., Vol 10, no 3, 2001
- [42] Jaluria, Y., Torrance, K. E., *Computational Heat Transfer*, Hemisphere Publishing Corporation, Nova York, 1986
- [43] Zubel, I., Barycka, I., *Silicon anisotropic etching in alkaline solutions I. The geometric description of figures developed under etching Si(100) in various solutions*, Sensors and Actuators A 70, 1998, 250-259
- [44] Folkmer, B., Steiner, P., Lang, W., *Silicon nitride membrane sensors with monocrystalline transducers*, Sensors and Actuators A 51, 1995, 71-75
- [45] Manea, E., Muller, R., Popescu, A., *Some particular aspects of the thin membrane by boron diffusion processes*, Sensors and Actuators A 74, 1999, 91-94