



ROBERTO RIBEIRO NELI

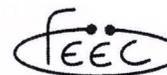
**DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVOS
BOLOMÉTRICOS PARA DETECÇÃO DE
RADIAÇÃO INFRAVERMELHA DISTANTE**

***DEVELOPMENT OF BOLOMETRIC DEVICES FOR
FAR-INFRARED RADIATION DETECTION***

Campinas – SP
2012



Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
Departamento de Semicondutores, Instrumentos e Fotônica



Roberto Ribeiro Neli

DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVOS BOLOMÉTRICOS
PARA DETECÇÃO DE RADIAÇÃO INFRAVERMELHA
DISTANTE

*DEVELOPMENT OF BOLOMETRIC DEVICES FOR FAR-
INFRARED RADIATION DETECTION*

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica. Área de concentração: **Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica.**

Doctorate thesis presented to the Electrical Engineering Postgraduation Program of the School of Engineering Electrical of the University of Campinas to obtain the Ph.D. grade in Engineering Electrical, in field of: Electronic, Microelectronic and Optoelectronic.

Orientador: Prof. Dr. Ioshiaki Doi

Tutor: Associate Professor Ioshiaki Doi

Este exemplar corresponde à redação final da **Dissertação/Tese**
defendida por: Roberto Ribeiro Neli
e aprovada através da Comissão julgadora em: 11/10/2012
Ioshiaki Doi
Orientador

Campinas – SP
2012

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

N322d Neli, Roberto Ribeiro
Desenvolvimento de dispositivos bolométricos para
detecção de radiação infravermelha distante / Roberto
Ribeiro Neli. --Campinas, SP: [s.n.], 2012.

Orientador: Ioshiaki Doi.
Tese de Doutorado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação.

1. Termistores. 2. Ouro. 3. Infravermelho distante.
4. Detectores infravermelhos. 5. Microfabricação. I.
Doi, Ioshiaki. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III.
Título.

Título em Inglês: Development of bolometric devices for far-infrared radiation
detection

Palavras-chave em Inglês: Thermistors, Gold, Far infrared, Infrared detector,
Microfabrication

Área de concentração: Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica

Titulação: Doutor em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Leonardo Breseghello Zoccal, Fábio Renan Durand, José
Alexandre Diniz, Leandro Tiago Manera

Data da defesa: 11-07-2012

Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA – TESE DE DOUTORADO

Candidato: Roberto Ribeiro Neli

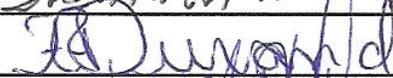
Data da Defesa: 11 de julho de 2012

Título da Tese: “Desenvolvimento de Dispositivos Bolométricos para Detecção de Radiação Infravermelha Distante”

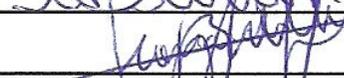
Prof. Dr. Ioshiaki Doi (Presidente):



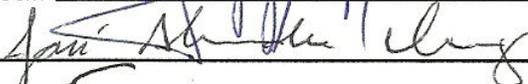
Prof. Dr. Fábio Renan Durand:



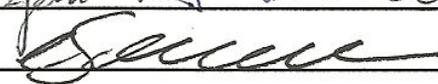
Prof. Dr. Leonardo Breseghello Zoccal:



Prof. Dr. José Alexandre Diniz:



Prof. Dr. Leandro Tiago Manera:



RESUMO

Este trabalho tem como objetivo a fabricação e caracterização de sensores térmicos descritos como bolométricos, que são dedicados à detecção da radiação infravermelha distante. Estes sensores são construídos a partir de técnicas de microfabricação, utilizando filmes finos seletivos a corrosão úmida. Estas microestruturas mecânicas são formadas sobre lâminas de silício a partir de um ataque químico úmido sobre a superfície da mesma. Como estas estruturas são obtidas utilizando-se técnicas convencionais de fabricação de circuitos integrados, torna-se possível a integração monolítica de circuitos eletrônicos e dispositivos mecânicos, permitindo o desenvolvimento de microssistemas integrados.

O ouro poroso ou “ouro negro” foi estudado e caracterizado, sendo utilizado como absorvedor de radiação e apresentou neste trabalho índices de absorção superiores a 80%. Foi desenvolvido também um processo para integrar este filme ao dispositivo. O silício policristalino, submetido à dopagem de boro, foi desenvolvido para se obter valores de TCR próximos a $-2\%K^{-1}$ e resistências abaixo de $1k\Omega$.

Finalmente, foram desenvolvidos os layouts, fabricadas e testadas as microestruturas de diversas geometrias, como pontes, vigas, membranas, espiras, entre outras. Os dispositivos bolométricos testados apresentaram TCR de $-2,54\%K^{-1}$, um tempo de resposta de aproximadamente 2 ms, uma responsividade de 0,35 V/W e uma detectividade específica de $6,04.10^9 \text{ mHz}^{1/2}W^{-1}$, quando submetido a uma radiação de 0,85 THz.

Palavras-chave: *Bolômetro; Ouro Negro; Ouro Poroso; Poly-Si; Corrosão Úmida; Microfabricação; MEMS; Sensor; Detector de Infravermelho; Infravermelho Distante.*

ABSTRACT

This work has as a main goal the fabrication and characterization of thermal sensors, described as bolometrics, which are dedicated to detection of far infrared radiation. These sensors are fabricated using microfabrication techniques and the thin films are selective to wet etching. These mechanical microstructures are formed on silicon wafers using a surface wet etching. As these structures are obtained using conventional techniques for CI's manufacturing, it becomes possible to perform a monolithic integration of electronics and mechanical devices, allowing the integrated microsystems development.

The porous gold or "gold black" used as a radiation absorber, was studied and characterized, and this study showed an absorption index greater than 80%. Was developed a process to integrate this film to device. The doped polycrystalline silicon was performed to obtain TCR values near to $-2\% \text{ K}^{-1}$ and resistance less than $1\text{k}\Omega$.

Finally, the layouts are designed, performed and tested the microstructure of various geometries such as bridges, beams, membranes, coils, among others. The devices tested presented TCR about $-2.54\% \text{ K}^{-1}$, a response time of approximately 2 ms, responsivity about $0.35 \text{ V} / \text{W}$ and specific detectivity about $6.04 \times 10^9 \text{ mHz}^{1/2} \text{W}^{-1}$ when subjected to a 0,85 THz radiation.

Keywords: *Bolometer; Gold Black; Porous Gold; Poly-Si; Wet Etching; Microfabrication; MEMS; Sensor; Infrared Detector; Far Infrared.*

*Dedico este trabalho a minha querida e especial esposa
Angela, pela força e companheirismo nesta etapa de nossas
vidas e aos meus pequenos, Carol e Lucas, por doarem o
tempo que era deles, para que este trabalho fosse realizado.*

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todas as pessoas e instituições que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho. Em particular gostaria de agradecer:

- ❖ A Deus, por ter me dado perseverança para a conclusão deste trabalho e por ter mostrado os melhores caminhos para minha vida;
- ❖ Ao Prof. Dr. Ioshiaki Doi pela orientação, oportunidade, confiança e amizade;
- ❖ Ao Prof. Dr. José Alexandre Diniz, pelas conversas e ensinamentos;
- ❖ Aos meus queridos pais, Moizés e Vera, que me ensinaram a pescar;
- ❖ A minha querida esposa, que sempre esteve ao meu lado com palavras de apoio e que me ajudou muito neste trabalho, que também é dela;
- ❖ Aos meus irmãos Lisandra e Renato, por fazerem parte do que sou hoje;
- ❖ Aos amigos e funcionários do CCS, em especial à Regina, Godoy, Leonardo, Leandro, Marcelo;
- ❖ Aos funcionários do LPD-IFGW/UNICAMP, principalmente ao calmo e ponderado Antônio Celso Ramos;
- ❖ Ao CNPq, que através do programa PNM (Programa Nacional de Microeletrônica), financiou este projeto;

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes entidades:

- ❖ DSIF/FEEC/UNICAMP;
- ❖ CNPq (através do programa PNM)– Auxílio Bolsa;
- ❖ CCS/UNICAMP;
- ❖ LPD-IFGW/UNICAMP.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	23
INTRODUÇÃO	23
1.1 ESPECTRO INFRAVERMELHO	23
1.2 VISÃO GERAL SOBRE DETECTORES TÉRMICOS	28
1.3 CATEGORIAS DE DETECTORES DE INFRAVERMELHO	29
1.4 PROCESSOS DESENVOLVIDOS EM TRABALHOS ANTERIORES.....	31
1.4.1 Nitreto de Silício	31
1.4.2 Dióxido de Silício	32
1.4.3 Deposição Química a Fase Vapor (CVD)	33
1.4.4 Corrosão Úmida.....	37
1.5 OBJETIVO DO TRABALHO.....	40
1.6 ORGANIZAÇÃO DA TESE	42
CAPÍTULO 2	45
RADIAÇÃO INFRAVERMELHA	45
2.1 MATERIAIS UTILIZADOS EM TERMISTORES	45
2.1.1 Silício Policristalino	46
2.1.2 Silício Amorfo	47
2.1.3 Germânio Amorfo.....	50
2.1.4 Silício / Germânio Amorfo	51
2.1.5 Silício / Germânio Policristalino	53
2.1.6 Diodo Schottky	54
CAPÍTULO 3	57
FOTODETECTORES	57

3.1	FOTOCONDUTOR	59
3.2	FOTODIODO	60
DETECTORES TÉRMICOS.....		62
3.3	FÍSICA DOS TERMO-DETECTORES	63
3.3.1	Membranas Suspensas.....	66
3.3.2	Pontes e Vigas	68
3.3.3	Membranas Fechadas	69
3.3.4	Camada de Absorção de Infravermelho.....	69
3.4	BOLÔMETRO.....	70
3.4.1	Teoria Geral sobre Bolômetros	73
CAPÍTULO 4		77
PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS		77
4.1	OBTENÇÃO DE OURO NEGRO PARA ABSORÇÃO DE INFRAVERMELHO DISTANTE.....	77
4.2	FABRICAÇÃO DE BOLÔMETROS SUSPENSOS PARA INFRAVERMELHO DISTANTE	81
4.2.1	Desenvolvimento de Máscaras Fotolitográficas:	82
4.2.2	Obtenção do Óxido de Silício:	86
4.2.3	Obtenção do Silício Policristalino:	88
4.2.4	Implantação iônica de baixa dose:	90
4.2.5	Implantação iônica de alta dose:.....	90
4.2.6	Corrosão do Silício Policristalino:	91
4.2.7	Evaporação do alumínio de contato:	92
4.2.8	Obtenção do nitreto de silício:	93
4.2.9	Corrosão do substrato em KOH:.....	94
4.2.10	Evaporação do ouro poroso:	95
CAPÍTULO 5		97
RESULTADOS E DISCUSSÕES.....		97
5.1	– DEPOSIÇÃO E ANÁLISE DO OURO NEGRO	98
5.1.1	Análises FTIR:.....	104

5.1.2	Análise EDS:	111
5.2	- PROCESSO PARA A CONSTRUÇÃO DO SENSOR BOLOMÉTRICO	113
5.2.1	Encapsulamento:	120
5.3	- TESTES DOS SENSORES DE INFRAVERMELHO FABRICADOS.....	121
5.4	- DETERMINAÇÃO DO DESEMPENHO DO SENSOR BOLOMÉTRICO	126
CAPÍTULO 6		133
CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS		133
CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA		135
TRABALHOS PUBLICADOS		137
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		141
APÊNDICE A		149
RUÍDOS EM DETECTORES TÉRMICOS		149

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	– APLICAÇÕES PARA DETECTORES DE INFRAVERMELHO ^[1]	24
FIGURA 2	- ESPECTRO DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA ^[2]	25
FIGURA 3	- ESQUEMÁTICO DO SISTEMA DE DEPOSIÇÃO RT/RPCVD ^[44]	34
FIGURA 4	- ESQUEMÁTICO DO REATOR ECR TIPO CAMPO DIVERGENTE ^[43]	37
FIGURA 5	- ILUSTRAÇÃO DAS DIREÇÕES DE CORROSÃO ISOTRÓPICA E ANISOTRÓPICA.	38
FIGURA 6	- ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DE CORROSÕES ANISOTRÓPICAS EM LÂMINAS <100>. ^[38]	40
FIGURA 7	- RESISTÊNCIA DO SI POLI X TEMPERATURA PARA DIFERENTES DOSES DE IMPANTAÇÃO ^[52]	47
FIGURA 8	- RELAÇÃO ENTRE TCR X RESISTIVIDADE ELÉTRICA PARA O SILÍCIO AMORFO ^[1, 49]	48
FIGURA 9	- A) RESISTIVIDADE E B) TCR X RAZÃO ATÔMICA DE GE ^[61]	51
FIGURA 10	- TCR X RESISTIVIDADE DO FILME DE A-SI-XGEX DOPADO ^[61]	52
FIGURA 11	- DEPENDÊNCIA DO TCR E DO RUIÍDO X RESISTIVIDADE ^[21]	54
FIGURA 12	– DIAGRAMA DO CIRCUITO E VISTA EM CÔRTE DO CIRCUITO INTEGRADO DO BOLOMETRO UTILIZANDO DIODO SCHOTTKY, FABRICADO COM TÉCNICAS DE MICROMÁQUINAS ^[68]	55
FIGURA 13	- RESPOSIVIDADE DE UM FOTODIODO DE INFRAVERMELHO COM ÁREA ATIVA DE 10x10MM ^[71]	57
FIGURA 14	- GERAÇÃO DO PAR ELETRON-LACUNA EM UM SEMICONDUTOR DEVIDO A INCIDÊNCIA DE UM FOTON COM ENERGIA HV. .	58
FIGURA 15	- ESQUEMA DE UM FOTODIODO TÍPICO DE SILÍCIO.....	61
FIGURA 16	- CURVA I-V CARACTERÍSTICA DE UM FOTODIODO IDEAL ^[73]	61
FIGURA 17	- ESTRUTURA SIMPLIFICADA DE UM DETECTOR TÉRMICO.	64
FIGURA 18	- CORROSÃO ANISOTROPICA UTILIZANDO KOH E TMAH EM SUBSTRATO (100).....	67
FIGURA 19	- MICROGRAFIA SEM DE UMA ESTRUTURA SUSPENSA DE NITRETO DE SILÍCIO.	68
FIGURA 20	– ESQUEMÁTICO DA VISTA EM CORTE SIMPLIFICADA DE UM BOLOMETRO ^[1]	71
FIGURA 21	– ESQUEMA DE UM MICROBOLOMETRO FABRICADO COM VO ₂ ^[78]	73
FIGURA 22	- MODELO TÉRMICO DE UM DETECTOR TÉRMICO.....	73
FIGURA 23	– ESQUEMÁTICO DO EVAPORADOR UTILIZADO NA OBTENÇÃO DO OURO POROSO.	78
FIGURA 24	– DIVERSAS FORMAS GEOMÉTRICAS EMPREGADAS NAS FABRICAÇÃO DOS SENSORES.	82
FIGURA 25	- MÁSCARAS DESENVOLVIDAS PARA FABRICAÇÃO DO BOLÔMETRO	83
FIGURA 26	– ESTRUTURA DO MICROBOLOMETRO.....	84
FIGURA 27	– SEQUÊNCIA DE FABRICAÇÃO DO SENSOR BOLOMÉTRICO.....	86
FIGURA 28	– CORROSÃO DO ÓXIDO DE SACRIFÍCIO.	87
FIGURA 29	– ESQUEMÁTICO DO FORNO TÉRMICO CONVENCIONAL ^[106]	87
FIGURA 30	– LÂMINAS DE SI COLOCADAS EM FORNO TÉRMICO CONVENCIONAL ^[107]	88
FIGURA 31	– PROCESSO FOTOLITOGRAFICO LIFT-OFF.	92
FIGURA 32	– RELAÇÃO PROFUNDIDADE DO POÇO X TAMANHO DA ESTRUTURA.....	95
FIGURA 33	– PORCESSO LIFT-OFF PARA OURO POROSO.	96
FIGURA 34	– RESISTÊNCIA DE FOLHA X PRESSÃO DE DEPOSIÇÃO.....	99
FIGURA 35	– SEM DA VISTA SUPERIOR DA CAMADA DE OURO NEGRO, ILUSTRANDO AS CARACTERÍSITICAS DA SUPERFÍCIE E A FORMAÇÃO DE ESTRUTURAS POROSAS, PARECIDAS COM UMA COUVE-FLOR.	100
FIGURA 36	– SEM DA VISTA LATERAL DA CAMADA DE OURO NEGRO, ILUSTRANDO AS FORMAÇÕES POROSAS.	101
FIGURA 37	– RELAÇÃO ENTRE PRESSÃO E FATOR DE COBERTURA.	104
FIGURA 38	– ANÁLISE FTIR DE OURO NEGRO EVAPORADO NA PRESSÃO DE 8 x 10 ⁻⁴ TORR.	105
FIGURA 39	- ANÁLISE FTIR DE OURO NEGRO EVAPORADO NA PRESSÃO DE 2 x 10 ⁻⁴ TORR.	106
FIGURA 40	– REFLETÂNCIA IV DIFUSA DA CAMADA DE OURO NEGRO DEPOSITADA À 2x10 ⁻⁴ TORR. BAIXA REFLETÂNCIA DE 20%. MAIOR QUE 60% PARA NÚMERO DE ONDA ACIMA DE 600 CM ⁻¹	108
FIGURA 41	– REFLETÂNCIA IV DIFUSA DA CAMADA DE OURO NEGRO DEPOSITADA À 4x10 ⁻⁴ TORR. REFLETÂNCIA MAIOR QUE 40% EM TODA A FAIXA DE MEDIÇÃO (200–1400 CM ⁻¹).	108
FIGURA 42	– REFLETÂNCIA IV DIFUSA DA CAMADA DE OURO NEGRO DEPOSITADA À 6x10 ⁻⁴ TORR. BAIXA REFLETÂNCIA DE APROXIMADAMENTE 10%. AUMENTA PARA 60% PARA NÚMERO DE ONDA ACIMA DE 600 CM ⁻¹	109

FIGURA 43	- REFLETÂNCIA IV DIFUSA DA CAMADA DE OURO NEGRO DEPOSITADA À 8×10^{-4} TORR. REFLETÂNCIA MENOR ENTRE 10% E 20% NA MAIOR PARTE DE COMPRIMENTOS DE ONDA. MENOR DE 30% EM TODA A FAIXA DE MEDIÇÃO ($200-1400 \text{ cm}^{-1}$).....	109
FIGURA 44	- MICROGRAFIAS SEM DO FILME DE OURO NEGRO.	111
FIGURA 45	- ANÁLISE EDS DO FILME DE OURO EVAPORADO A PRESSÃO DE 8×10^{-4} TORR.	112
FIGURA 46	- LINHAS DE SILÍCIO POLI CORROÍDAS EM CORROSÃO ÚMIDA, MOSTRANDO CORROSÃO LATERAL DAS ESTRUTURAS.	114
FIGURA 47	- LINHAS DE SILÍCIO POLI CORROÍDAS POR PLASMA, MOSTRANDO QUE PROBLEMAS COM CORROSÃO LATERAL SÃO PEQUENOS. A ESTRUTURA MANTEVE SUA FORMA ORIGINAL.....	115
FIGURA 48	- MICROGRAFIA SEM MOSTRANDO AS CAMADAS QUE FORMAM O BOLÔMETRO.	117
FIGURA 49	- MICROGRAFIA SEM DO BOLÔMETRO OBTIDO PELA CORROSÃO DO SILÍCIO MOSTRANDO, O ALUMÍNIO DE CONTATO(A), O RESISTOR TÉRMICO DE SI POLI(B) E O FILME DE OURO NEGRO(C).....	118
FIGURA 50	- MICROGRAFIA SEM DO BOLÔMETRO OBTIDO PELA CORROSÃO DO ÓXIDO DE SI MOSTRANDO, O ALUMÍNIO DE CONTATO(A), O RESISTOR TÉRMICO DE SI POLI(B) E O FILME DE OURO NEGRO(C).....	119
FIGURA 51	- CHIPS ENCAPSULADOS DOS SENSORES BOLOMÉTRICOS.	120
FIGURA 52	- APARATO DE TESTES PARA OS DISPOSITIVOS BOLOMÉTRICOS.....	121
FIGURA 53	- DEFINIÇÃO DO PARÂMETROS DE PROJETO DOS FILTROS PASSA-BAIXA [114, 115].....	122
FIGURA 54	- ARRANJO BÁSICO UTILIZADO NAS MEDIÇÕES DE RADIAÇÃO TÉRMICA.	123
FIGURA 55	- ARRANJO FILTRO, CONE E SENSOR (A), E ABSORVEDOR RETIRADO DO NITROGÊNIO LÍQUIDO (B).	124
FIGURA 56	- MEDIÇÕES DE RADIAÇÃO INFRAVERMELHA, NA FREQUÊNCIA DE 0,8THZ.....	125
FIGURA 57	- RELAÇÃO ENTRE VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA X VARIAÇÃO DE TEMPERATURA.	131

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.	COMPARATIVO ENTRE SILÍCIO AMORFO E SILÍCIO AMORFO HIDROGENADO [48].	49
TABELA 2.	ANALOGIA ENTRE PARÂMETROS ELÉTRICOS E TÉRMICOS [1, 75].	63
TABELA 3.	PARÂMETROS DE PROCESSO PARA A DEPOSIÇÃO DO SILÍCIO POLICRISTALINO.....	89
TABELA 4.	PARÂMETROS DE PROCESSO PARA DEPOSIÇÃO DO FILME DE NITRETO DE SILÍCIO [44].	94
TABELA 5.	DEPENDÊNCIA DA MASSA, DENSIDADE, ESPESSURA, FATOR DE COBERTURA E DA POROSIDADE ESTIMADA DOS FILMES DE OURO NEGRO COM RELAÇÃO À PRESSÃO DE DEPOSIÇÃO.....	103
TABELA 6.	PARÂMETROS UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO DOS FILTROS PASSA-BAIXA [114-117].	123
TABELA 7.	VALORES DE POTÊNCIA INCIDENTE E RESPONSABILIDADE.....	129
TABELA 8.	VALORES DOS CÁLCULOS DE POTÊNCIA EQUIVALENTE DE RUÍDO (NEP).	129
TABELA 9.	COMPARATIVO DE PARÂMETROS DO SENSOR FABRICADO NESTE TRABALHO X SENSORES DE OUTROS AUTORES.....	132

LISTA DE ABREVIACOES E SÍMBOLOS

IR - Infrared (infravermelho)
CI - Circuito Integrado
 λ - Comprimento de onda [m]
T - Temperatura [K]
G - Condutância térmica [W/K]
C - Capacidade térmica [J/K]
D - Detectividade [W⁻¹]
D - Detectividade específica [m.Hz^{1/2}.W⁻¹]*
 \mathcal{R} - Responsividade [V/W]
TCR - Coeficiente de Temperatura da Resistência [%/K]
 τ - Constante de tempo ou tempo de resposta [s]
NEP - Potência equivalente do ruído [W/Hz^{1/2}]
f - Frequência da radiação [Hz]
k - Constante de Boltzmann (1,38 . 10⁻²³ J/K)
h - Constante de Plank (6,6256 . 10⁻³⁴ J.s)
c0 - Velocidade da luz no vácuo (2.998 . 10⁸ m/s)
 σ - Constante de Stefan-Boltzmann (5.67 . 10⁻⁸ W/m² .K⁴)
 ΔT - Variação de temperatura [K]
V - Tensão [V]
A - rea do detector [m²]
B - Banda Passante [Hz]
Aativa - rea ativa do detector [m²]
R - Resistência [Ω]
 Φ incidente - Fluxo de radiação incidente [W]
Atrans - rea da secção transversal [m²]
 Δf - Largura de banda [Hz]
N_a - Número de portadores no dispositivo [cm⁻³]
 κ - Condutividade Térmica [W/m.K]
 α - Coeficiente de Hooge de ruído 1/f
CVD-Chemical Vapor Deposition
MEMS - Micro Electro Mechanical Systems
MOS - Metal xido Semicondutor
PECVD - Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition
RPCVD - Reduced Pressure Chemical Vapor Deposition
APCVD - Atmospheric Pressure Chemical Vapor Deposition
 ΔT - Variação de temperatura
G - Condutância térmica
 ϵ - Emissividade da região ativa
 Φ - Radiação incidente

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 Espectro Infravermelho

A detecção de radiação infravermelha na faixa submilimétrica e infravermelho distante apresenta várias aplicações dedicadas ao sensoriamento radiométrico remoto, que também pode ser chamado de termo sensoriamento, e entre eles tem-se: imageamento de objetos em campo, análise de linhas de transmissão, visão noturna, radio meteorologia, propagação atmosférica e aplicações astrofísicas. A Figura 1 ilustra as principais áreas de utilização para os detectores de infravermelho, sendo que a partir dela pode-se concluir a relevante importância do estudo destes detectores em suas diversas aplicações. Atualmente, o interesse por aplicações envolvendo telecomunicações vem apresentando um forte crescimento em instituições de pesquisas dedicadas para essa finalidade. É conhecido que as explosões solares podem causar interferências nestes sistemas de telecomunicações, sendo então de extrema importância conhecer e caracterizar essas radiações emitidas pelo sol.

Este trabalho irá apresentar o estudo, o desenvolvimento e a caracterização de detectores bolométricos sem a formação de imagem, mas com a finalidade de detectar radiação incoerente na banda submilimétrica do espectro, sem a

necessidade de refrigeração externa. Detalhes construtivos referentes aos detectores fabricados utilizando silício policristalino serão apresentados.

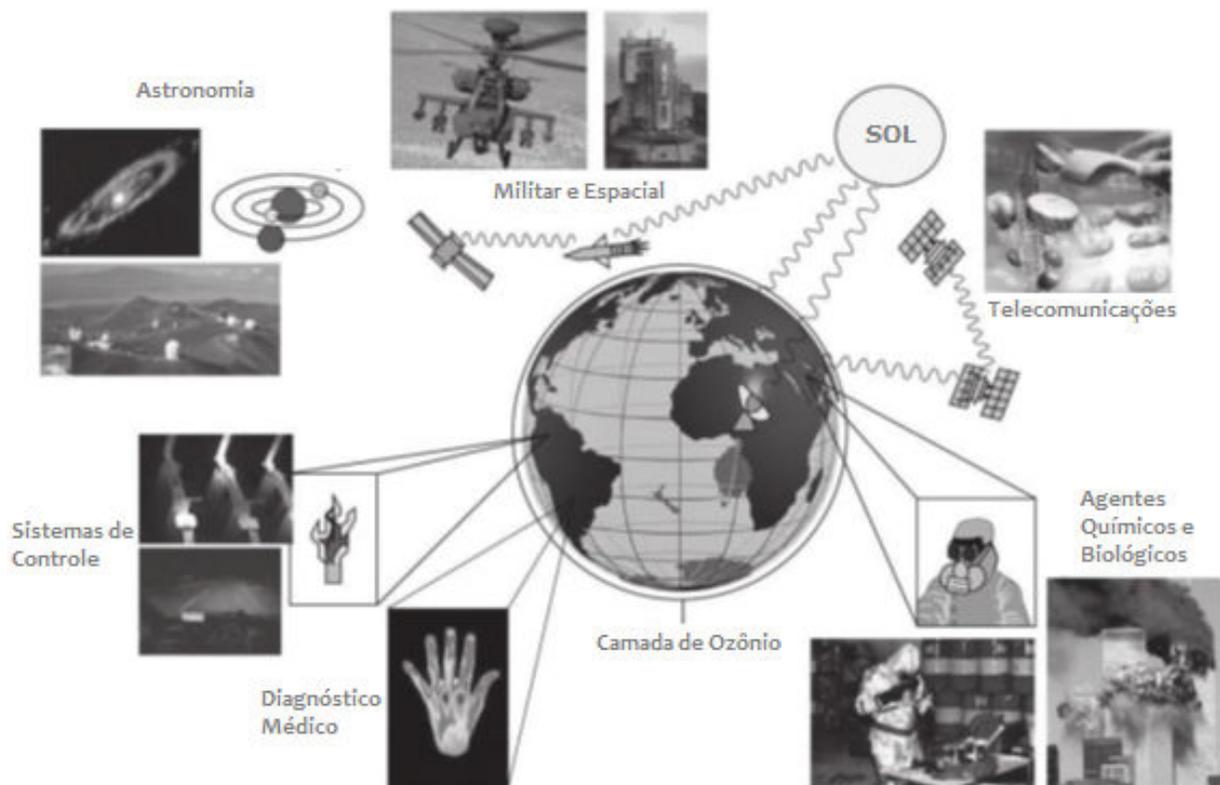


Figura 1 – Aplicações para detectores de infravermelho [1].

O infravermelho (IR) está compreendido em uma faixa de comprimento de onda superior a luz visível, formando parte do espectro eletromagnético, compreendendo a faixa de comprimento de onda entre 0,74 a 1000 μm que corresponde a faixa de frequência que vai de aproximadamente 0,3 THz até 400 THz (Figura 2).

A radiação infravermelha foi descoberta somente a 200 anos atrás por William Herschel, astrônomo e músico nascido em Hannover na Alemanha no ano de 1738. Em 1800 realizou um experimento que permitiu a observação do espectro através da separação da luz solar utilizando um prisma. Através de um monocromador, inventado por ele mesmo, mediu a energia da radiação e classificou esta radiação de acordo com

uma escala de cor. Entretanto, ele realizou ainda a classificação da energia que não é vista pelo olho humano, que está acima do vermelho e é chamada de infravermelho e publicou os primeiros trabalhos com evidências da existência desta radiação.

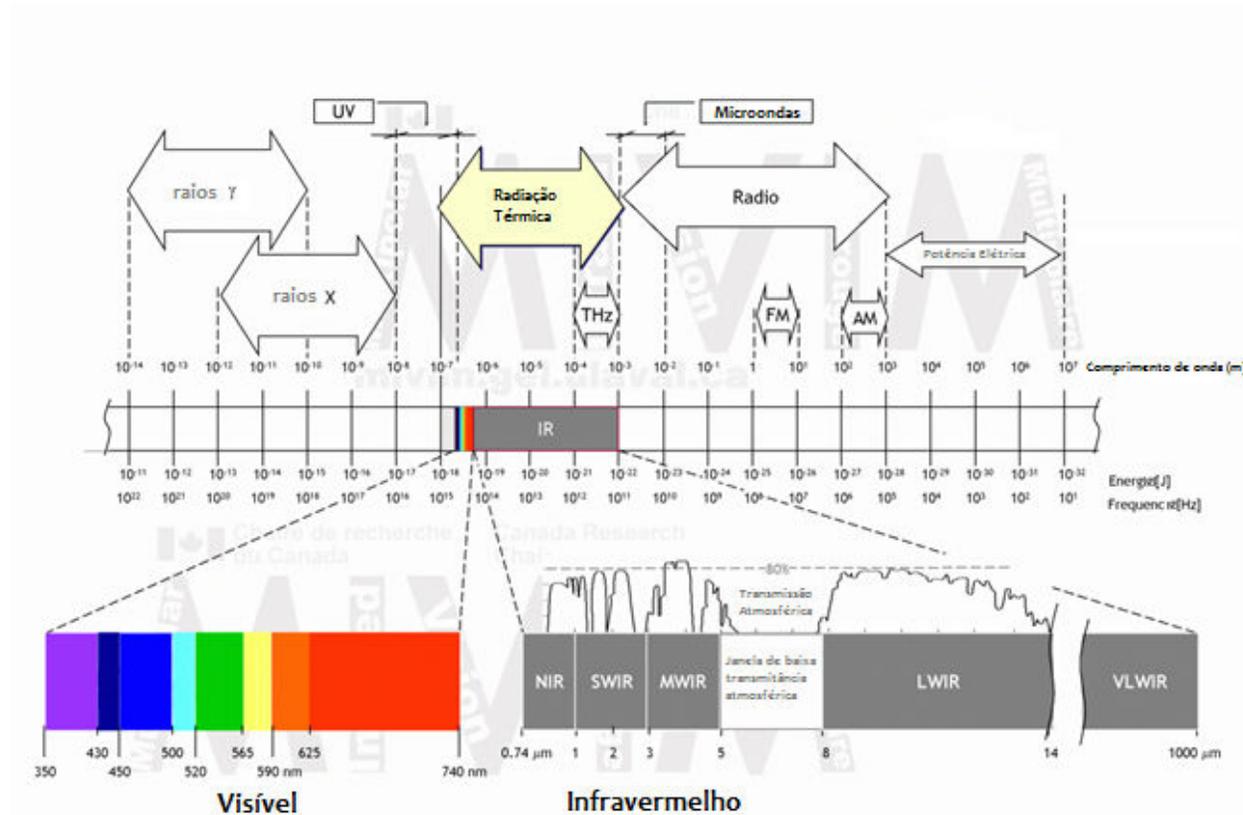


Figura 2 - Espectro de Radiação Eletromagnética [2].

Após este experimento, muitos outros foram realizados com a intenção de detectar a radiação infravermelha. *Seebeck*, em 1821, descobriu o efeito termoelétrico nos terminais de uma conexão de dois fios de materiais diferentes. Este efeito ficou conhecido com “Efeito *Seebeck*” e depois foi chamado de termo acoplamento [3, 4]. Após a descoberta do efeito termoelétrico, a primeira termopilha foi demonstrada em 1829 [1, 5].

O detector de IR é um transdutor de energia, convertendo a energia da radiação incidente em um sinal mensurável. Existem várias aplicações que utilizam a detecção de

radiação com comprimentos de onda fora do espectro visível, dentre as quais, podemos destacar: aplicações militares diversas, segurança civil, investigação médica, sistemas de visão noturna, detecção de incêndio, investigação de radiação solar, entre muitas outras.

Existe uma divisão especial da radiação infravermelho que distingue a radiação com relação a região e a sua aplicação. São elas [6]:

- Infravermelho próximo: está relacionada a faixa de comprimento de onda de 0,74 à 1 μm e pode ser absorvida pela água, e apresenta baixa atenuação no SiO_2 . A principal aplicação é em telecomunicações por fibra ótica;
- Infravermelho curto: compreende a faixa de comprimento de onda de 1 a 3 μm onde a absorção pela água é significativamente observada até 1,45 μm . Nesta faixa, comprimentos de onda de 1,53 a 1,56 μm dominam em aplicações relacionadas a telecomunicações.
- Infravermelho médio: compreende a faixa de 3 à 5 μm , tendo forte aplicação militar;
- Infravermelho longo: compreende a faixa de 5 à 14 μm . É a parte do espectro utilizado para imageamento térmico. Este conceito é aplicado em câmeras de visão noturna;
- Infravermelho distante: compreende a faixa de 14 à 1000 μm . Este grupo de ondas tem forte aplicação na faixa de THz. Muitas aplicações vêm se desenvolvendo nesta região, sendo que uma delas é o imageamento térmico para estudos de explosões solares e para aplicações em segurança.

O conceito de corpo negro é muito útil no entendimento das características de radiações neste comprimento de onda. Serão destacadas aqui 3 propriedades muito importantes de um corpo negro: [1]

- Toda radiação é absorvida pelo corpo negro, independentemente do comprimento de onda e da direção;
- Nenhuma superfície é capaz de emitir mais energia do que um corpo negro para uma condição de temperatura e comprimento de ondas definida;
- O corpo negro emite radiação em função do comprimento de onda e temperatura, mas esta radiação é independente da direção. Entretanto, o corpo negro é um emissor dispersor.

A energia da radiação de um corpo negro pode ser escrita utilizando-se lei de Stefan-Boltzmann, conforme mostrado a seguir:

$$E_{cn} = \int_0^{\infty} \pi * \frac{2hc_0^2}{hc_0} d\lambda = \sigma * T^4 \quad (1)$$
$$\frac{2hc_0^2}{\pi^5 \left(\frac{hc_0}{e\lambda kT} - 1 \right)}$$

sendo:

- h é a constante de Plank ($6,6256 \cdot 10^{-34}$ J.s);
- k é a constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K);
- c_0 é a velocidade da luz no vácuo ($2,998 \times 10^8$ m/s) e
- σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8}$ W/(m² .K⁴))

1.2 Visão Geral sobre Detectores Térmicos

O início dos anos 50 foi o período onde o primeiro detector de IR fotocondutivo extrínseco foi construído, utilizando-se Ge com impurezas. Naquela época, o nível de impureza é que determinava a janela espectral de IR [7]. O Si extrínseco era o próximo candidato a material alternativo para substituir o Ge nestas aplicações durante os próximos 10 anos. Em 1973 houve um enorme desenvolvimento no projeto de detectores, no momento onde tanto o sensor quanto o circuito que trata o sinal recebido, foram fabricados na mesma lâmina de Si. O diodo de barreira ou diodo Schottkly, construído através de uma junção metal/Si, foi utilizado na detecção de radiação IR [8]. Em 1982, o primeiro bolômetro foi fabricado utilizando-se a tecnologia de filmes finos, com o objetivo de obter um dispositivo robusto, de baixo custo, sem necessidade de resfriamento térmico, com dimensões reduzidas, com rápido tempo de resposta e com detectividade superior aos dispositivos até então já construídos [9, 10]. Em poucas palavras, o bolômetro é um termistor sensível com a finalidade de se medir a radiação eletromagnética incidente.

Desde 1950, muitos materiais foram estudados para a detecção das diversas faixas do IR. Os bolômetros sem resfriamento vem sendo o dispositivo mais empregado em aplicações dedicadas a detecção de radiação infravermelha distante [11]. Os bolômetros tem seu funcionamento baseado na variação de resposta do termistor com relação a uma variação de temperatura, e nos dias de hoje, são dispositivos pequenos e baratos. Essa variação de resistência com relação a variação de temperatura é dada por um parâmetro conhecido como TCR ($\%K^{-1}$), sendo que este expressa quantos ohms de variação ocorrem em um resistor para cada unidade de variação da temperatura. Este parâmetro será melhor explicado no capítulo 3.

A técnica mais utilizada na fabricação de detectores térmicos são os microbolômetros formados por pontes suspensas microfabricadas, e o processo MOS na

formação dos resistores e do circuito que faz o tratamento local da onda captada [12-24]. Existem microbolômetros que apresentam uma capacidade de detecção muito similar aos detectores de fótons refrigerados, mas este ponto está diretamente correlacionado com as técnicas de fabricação utilizadas [12, 13, 25]. A fabricação destas pontes suspensas é realizada através de processos muito complicados, e no caso deste trabalho, onde está sendo utilizado o ouro poroso como material absorvedor, essa complexidade toma um caráter um pouco maior. Muitos estudos tem sido direcionados para a utilização do Óxido de Vanádio (VOx) que apresenta um alto TCR ($2\sim 3\%K^{-1}$) [26, 27], mas é um material incompatível com os processos padrões de Si, além de ser um material com alto índice de toxicidade. A opção pelo uso do VOx, demanda um grande esforço na elaboração de um processo que previna a contaminação de outros dispositivos durante a fabricação do dispositivo [28-30]. Os materiais que podem ser utilizados na fabricação de termistores e que são compatíveis com os processos já utilizados são: Silício Amorfo [15], Silício Policristalino [31], Silício-Germânio poli e monocristalino [22-24, 31-33] e mais recentemente o LSMO [34]. Este trabalho foi direcionado ao estudo de um bolômetro fabricado a partir de termistores de Silício Policristalino, que apresentam um bom TCR ($\sim 2\%K^{-1}$), tem seus processos muito bem dominados e compatíveis com o Si e tem uma alta relação sinal ruído, que é uma característica muito importante em bolômetros que necessitam grande precisão na detecção da radiação IR. Por estas razões, o Silício Policristalino é uma excelente alternativa para detectores térmicos de alto rendimento [33].

1.3 Categorias de Detectores de Infravermelho

Os detectores de infravermelho são classificados em duas categorias: fotodetectores e detectores térmicos. Nos fotodetectores e detectores térmicos, há a

formação de portadores de carga, devido à absorção de uma radiação. O sinal de saída proveniente da incidência desta radiação é amplificado por um circuito integrado complementar de leitura, que torna o sinal mais preciso para uma leitura externa. Um ponto importante nestes detectores é a seletividade aos comprimentos de onda, o que torna muito complicado o projeto destes dispositivos. As principais vantagens destes detectores é que estes apresentam um grande desempenho com a relação ao sinal-ruído e tem um tempo de resposta bastante rápido. A maior desvantagem está no fato da necessidade de uma refrigeração externa, o que o torna limitado para certas aplicações. Esta refrigeração é necessária devido a geração de portadores de carga, que fazem com que estes detectores sem refrigeração se tornem muito ruidosos. Os fotodetectores são subdivididos em 4 grupos diferentes, de acordo com a sua natureza de interação, e estes grupos são: intrínsecos, extrínsecos, fotoemissivos e quânticos [5].

Ao contrário dos fotodetectores, os detectores térmicos operam a temperatura ambiente, sem a necessidade de refrigeração [35]. Esta categoria de detector tem uma sensibilidade menor e um tempo de resposta relativamente maior, mas tem a grande vantagem de serem baratos e de fácil utilização [36]. Estes podem ser os principais motivos do fato de estes sensores terem obtido grande atenção em aplicações militares e civis, principalmente na indústria automobilística. Os detectores térmicos são subdivididos em 3 categorias: bolométricos, piroelétricos e termoelétricos. A mudança na polarização do sinal elétrico interno do detector é o fenômeno físico utilizado nos piroelétricos, que convertem esta mudança em sinal de saída. Já nos sensores bolométricos, um termistor absorve a radiação incidente, e tem sua resistência alterada devido a essa absorção gerando assim um sinal elétrico equivalente. O fato deste sinal não ter dependência com a natureza fotônica da radiação, faz com que os detectores bolométricos sejam em geral independentes do comprimento de ondas [37]. Entretanto, o sinal de saída depende diretamente da potência radiante e da sua taxa de variação.

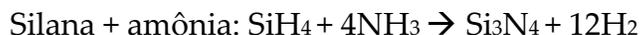
1.4 Processos Desenvolvidos em Trabalhos Anteriores

1.4.1 NITRETO DE SILÍCIO

O nitreto de silício é um filme isolante elétrico que apresenta boa rigidez mecânica, é relativamente elástico e não pode ser facilmente quebrado. A sua estequiometria pode ser controlada, variando os parâmetros de deposição (podendo-se obter desde nitreto estequiométrico Si_3N_4 , $\text{Si}_x\text{N}_y\text{H}_z$ e oxinitretos) e a incorporação de hidrogênio durante o processo de deposição, proveniente da silana (SiH_4), é frequente [38].

A incorporação de hidrogênio é consequência da estrutura do nitreto. Devido ao fato do filme de nitreto de silício obtido por técnicas CVD ser amorfo, elas apresentam algumas ligações incompletas. Estas ligações são então completadas por átomos de hidrogênio e sendo que os filmes de nitreto de silício depositados por plasma podem ter por volta de 20% de hidrogênio, ligados a átomos de silício e de nitrogênio [38]. A adição de grupos NH faz com que a estrutura do filme seja, em termos de propriedades mecânicas, mais flexível [39]. O índice de refração dos filmes de nitreto pode variar entre 1,8 a 2,2, dependendo da sua estequiometria; sua densidade é da ordem de 3 a 3,3 g/cm³ [39]; sua condutividade térmica é da ordem de 0,45 W °C / cm, e possui baixa taxa de corrosão em hidróxido de potássio (KOH) [38].

A deposição deste filme pode ser feita utilizando a combinação de silana com amônia, mas neste caso a incorporação de hidrogênio torna-se bastante elevada, levando à utilização do nitrogênio como substituto da amônia possibilitando uma diminuição considerável de hidrogênio no filme. O nitreto é formado em reações químicas como abaixo:



Entretanto a substituição da amônia por nitrogênio requer para a deposição do nitreto de silício uma energia maior para a dissociação das espécies, devido a energia de ligação do nitrogênio ser maior do que a energia de ligação da amônia, o que pode ser alcançado usando os processos CVD por plasma.

1.4.2 DIÓXIDO DE SILÍCIO

Os filmes de dióxido de silício são largamente utilizados em processos de fabricação de CI's. Este filme é um isolante elétrico e pode ser obtido por técnicas de oxidação térmica ou por deposição CVD. A sua alta compatibilidade com a tecnologia de silício, levou a um grande conhecimento das suas técnicas de obtenção [40, 41].

Na técnica de oxidação térmica, utiliza-se a reação do próprio substrato de silício com o oxigênio ou vapor d'água, a temperaturas elevadas ($\cong 1000$ °C), com uma taxa de crescimento baixa (0,5 $\mu\text{m}/\text{h}$). A qualidade do óxido obtido desta forma é excelente, mas apresenta algumas desvantagens como:

- ❖ Alta temperatura de processo (incompatível com difusões rasas);
- ❖ Elevados tempos de processo;
- ❖ Consumo do substrato;
- ❖ Limitação do substrato utilizado (silício).

Na técnica de deposição CVD, o filme de SiO_2 é obtido utilizando-se a reação entre a silana e óxido nitroso. Esta técnica fornece o filme com qualidade próxima ao obtido termicamente [39] e ainda proporciona a eliminação de alguns problemas encontrados na técnica descrita anteriormente.

As vantagens desta técnica são:

- ❖ Temperaturas de deposição baixas (250 - 500 °C);
- ❖ Baixo tempo de processo, devido a alta taxa de deposição ($\cong 0,1\mu\text{m}/\text{min}$);

- ❖ Não há consumo do substrato;
- ❖ Pode-se utilizar qualquer material como substrato.

1.4.3 DEPOSIÇÃO QUÍMICA A FASE VAPOR (CVD)

O processo de deposição química a partir da fase vapor (CVD) consiste no processo em que uma ou mais espécies de gases reativos reagem na superfície do substrato, depositando sobre a superfície do mesmo como seu subproduto, uma camada de um filme fino. A superfície do substrato deve ser aquecida a uma determinada temperatura, para favorecer a reação e a deposição do filme [39].

Esta técnica encontra-se bastante desenvolvida, pois é utilizada para deposição de filmes para diversas finalidades industriais, dentre elas a indústria de semicondutores, de micromáquinas, de fibras, entre outras. Devido a esta grande gama de utilizações e ao fato de ser economicamente viável, muitas pesquisas relacionada a este tema vêm sendo desenvolvidas, evoluindo ainda mais esta técnica [39].

1.4.3.1 RT/PCVD (Rapid Thermal / Remote Plasma Chemical Vapor Deposition)

Esta técnica possibilita o aquecimento/resfriamento rápido do substrato (RT) com as vantagens do CVD assistido por plasma remoto (RPCVD), e a deposição do filme com a temperatura do substrato entre 200°C a 400°C que pode ser atingida em poucos segundos [42]. O sistema RT/PCVD utilizado neste trabalho está provido de uma antecâmara para o carregamento das lâminas, o que permite isolar a câmara de reação do meio ambiente, minimizando assim a contaminação ambiental.

Além da deposição, este equipamento permite executar o recozimento térmico rápido das estruturas depositadas, possibilitando uma reestruturação cristalina na

região de transição da interface filme isolante / substrato semiconductor, sem a necessidade de se retirar o substrato do ambiente de processo, para obtenção de filmes de alta qualidade [43].

Em vista da quantidade reduzida de contaminantes no processo, o curto intervalo de tempo de processamento necessário e o auxílio do plasma remoto nas deposições, esse sistema possibilita a formação de filmes de nitreto, com baixa incorporação de outros elementos e com estequiometria semelhante aos filmes crescidos termicamente em fornos convencionais.

A Figura 3 ilustra esquematicamente o sistema RT/PCVD utilizado para as deposições de filmes de nitreto.

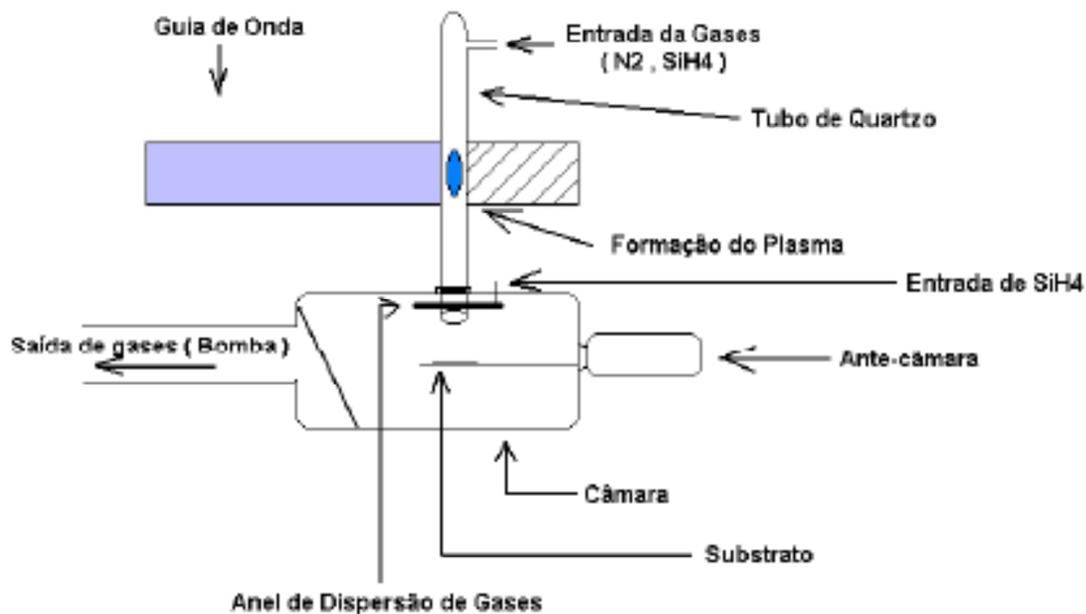


Figura 3 - Esquemático do sistema de deposição RT/PCVD [44]

Os gases utilizados no processo são introduzidos através de um tubo de quartzo, que passa por um guia de onda. Numa das pontas desse guia está instalada a fonte de

microondas. O sinal de microondas gerado passa pelo guia e ioniza os gases ($N_2 - SiH_4$) que passam pelo tubo de quartzo. Os gases ionizados são dirigidos até o substrato pelo fluxo da bomba de vácuo. Os gases que não são ativados (SiH_4) são introduzidos na câmara através do anel de dispersão. Na parte inferior da câmara existe uma janela de quartzo onde está conectado um banco de lâmpadas (não mostrado na figura) responsável pelo aquecimento do substrato. A amostra onde será depositado o filme é colocada inicialmente numa antecâmara e depois movida para a câmara de deposição, de forma a assegurar um melhor nível de “limpeza” na câmara principal, diminuindo contaminantes do ambiente.

Este sistema possibilita o ajuste dos seguintes parâmetros de processo:

- ❖ A temperatura de deposição;
- ❖ O fluxo dos gases;
- ❖ O ajuste de potência incidente e potência refletida;
- ❖ O tempo de processo.

1.4.3.2 ECR (Electron Cyclotron Resonance)

Nas câmaras de sistemas ECR, estabelece-se uma condição de ressonância dos elétrons no plasma ao se utilizar campos elétricos com frequências de microondas (2,54 GHz), campos magnéticos estáticos e baixas pressões ($\cong 0,1$ mTorr). O campo elétrico necessário para se obter a descarga elétrica é bastante reduzido.

O sistema ECR produz plasma de alta densidade de espécies reativas, razão pela qual permitem a obtenção de altas taxas de deposição. O plasma pode ser produzido de forma remota o que reduz os íons de alta energia, minimizando a ocorrência de defeitos

na superfície do substrato por radiação, além de possibilitar a deposição de filmes até em temperatura ambiente.

O componente perpendicular dos campos magnético e elétrico (sendo o elétrico gerado pela frequência de microondas) permite a produção de elétrons que seguem uma trajetória circular.

Quando a frequência do elétron, em resposta ao campo magnético, atinge o mesmo valor da frequência do campo elétrico, ocorre a ressonância. A utilização de pressões menores resulta em uma ressonância mais intensa [41].

Quando a condição de ressonância é estabelecida, os elétrons dentro do plasma são extraídos da fonte de íons na direção do substrato pela interação com o gradiente do campo magnético. Esses elétrons produzem uma região de cargas negativas que é neutralizada pelos íons da fonte ECR e, com isso, esses íons são também extraídos da fonte ECR via componente divergente do campo magnético.

A energia dos íons nesta etapa é da ordem de 15 a 20 eV, o que permite um bombardeamento adequado sobre a superfície do substrato [41].

Além destas vantagens, o equipamento ECR permite combinar processos de deposição e corrosão, operar com pressões mais baixas do que as utilizadas em processos de plasmas convencionais.

Porém a grande vantagem do sistema ECR reside na alta densidade do plasma gerado e da possibilidade de controlar independentemente o fluxo das espécies reativas, necessária a deposição dos filmes e da sua energia através dos controles da potência da fonte do ECR e pela potência do RF empregado para a polarização do substrato. Entretanto, este equipamento apresenta um elevado número de parâmetros a ser controlados: ajuste de campo magnético e controle da estabilidade do plasma.

A Figura 4 ilustra esquematicamente um sistema ECR.

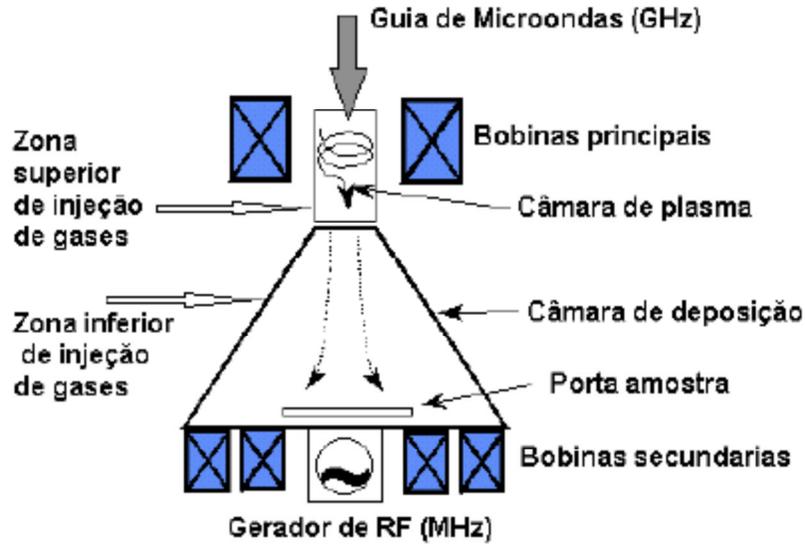


Figura 4 - Esquemático do reator ECR tipo campo divergente ^[43].

Conforme ilustra a Figura 4, a potência de microondas é alimentada pelo guia de onda até a entrada do ECR, que é uma janela de quartzo. As bobinas magnéticas principais com formatos solenoidal, criam um campo magnético de 875 Gauss na fonte que diverge para fora do sistema. As bobinas magnéticas secundárias permitem a formação de um campo magnético ao redor do substrato, realizando o controle e o confinamento do plasma. Estas bobinas também agem no sentido de assegurar com que haja uma boa uniformidade com relação a perpendicularidade dos íons que chegam a superfície da amostra. Essa perpendicularidade se torna mais importante nos casos de corrosão, pois isso garante que essas corrosões sejam anisotrópicas e na deposição de filmes garante a diminuição de defeitos (*pin-holes*) no filme depositado [43].

1.4.4 CORROSÃO ÚMIDA

A técnica de corrosão úmida é utilizada para formar poços em substratos de silício a fim de que sobre esses poços tenhamos as estruturas suspensas, formadas pelos

filmes finos de nitreto de silício ou dióxido de silício. A corrosão úmida pode ser anisotrópica (dependente da orientação do cristal) ou isotrópica (independente da orientação do cristal) e a Figura 5 ilustra as direções destas corrosões. Neste trabalho foi utilizada exclusivamente a corrosão anisotrópica, por ser mais adequada para construção de estruturas suspensas.

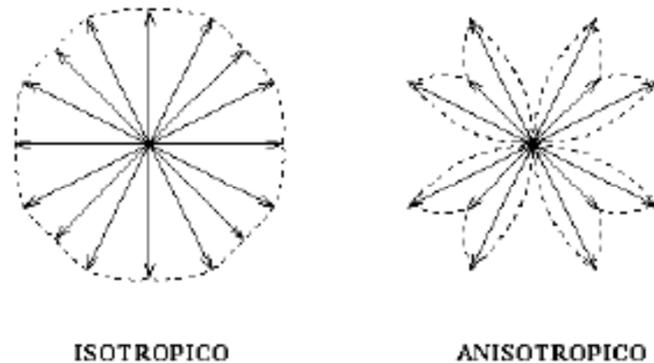


Figura 5 - Ilustração das direções de corrosão isotrópica e anisotrópica.

A solução química mais utilizada para corrosão anisotrópica é o KOH diluído em água. A rugosidade da superfície corroída está diretamente relacionada com a concentração do KOH e com a temperatura em que a corrosão é realizada. Considerando estes fatos, tem-se que em altas concentrações de KOH e temperatura na ordem de 80-85°C a uma superfície após a corrosão é uniforme e brilhante, mas para temperaturas abaixo destes valores, obtém-se uma superfície rugosa [45]. Na prática costuma-se utilizar temperaturas entre 80 a 85 °C, pois temperaturas mais elevadas podem causar evaporação de solventes e gradientes de temperatura na solução.

Para escolher o método de corrosão devem ser levados em consideração os seguintes requisitos:

- ❖ Toxicidade,
- ❖ Taxa de corrosão,

- ❖ Topologia desejada na superfície corroída,
- ❖ Compatibilidade com processos de CI's,
- ❖ Seletividade de corrosão,
- ❖ Material e espessura da máscara, e
- ❖ Facilidade de manuseio.

Sistemas de corrosão com KOH vêm se tornando um dos mais utilizados, pois atende quase todos os requisitos exigidos. Sua grande desvantagem reside na não compatibilidade do KOH em processos de fabricação de CI's, devido a contaminação causada pelos íons alcalinos. Este problema pode ser solucionado protegendo-se a parte eletrônica com filmes de nitreto de silício que funcionam como uma boa barreira para difusão de íons [38]. Uma das características que pode-se observar durante a corrosão é a liberação de bolhas, que podem ser vistas saindo da superfície do silício, devido a liberação de hidrogênio durante a corrosão. Deve-se então estar atento às corrosões realizadas com concentrações muito elevadas de KOH, pois a superfície pode se tornar rugosa ao longo da corrosão. Isso ocorre, pois as bolhas de hidrogênio liberadas impedem o transporte de solução “nova” até a superfície da lâmina de silício.

Este problema pode ser minimizado utilizando-se um agitador imerso na solução, que fará com que esta se mantenha em circulação, removendo as bolhas de hidrogênio da superfície do silício.

A seletividade entre o silício e o dióxido de silício não é muito boa para corrosões em KOH ($\text{Si}/\text{SiO}_2 = 10^2$), por isso os filmes de nitreto de silício são mais indicados para este caso por apresentar uma alta seletividade com o silício ($\text{Si}/\text{Si}_3\text{N}_4 = 10^4$) [38].

Uma relação importante entre a rugosidade e a concentração da solução de KOH é que, quanto maior a concentração, menor é a rugosidade da superfície do silício

corroído. Portanto soluções de KOH com concentrações altas (maior que 7M) são preferenciais nas corrosões [45].

A Figura 6 ilustra esquematicamente uma corrosão anisotrópica utilizando-se padrões retangulares. Nesta ilustração tem-se lâminas do tipo $\langle 100 \rangle$ e os lados dos padrões alinhados na direção $\langle 110 \rangle$. As corrosões anisotrópicas com padrões retangulares resultam em poços com paredes laterais $\langle 111 \rangle$ com ângulos de $54,75^\circ$ da superfície, e o fundo (100) (paralelo com a superfície) [46].

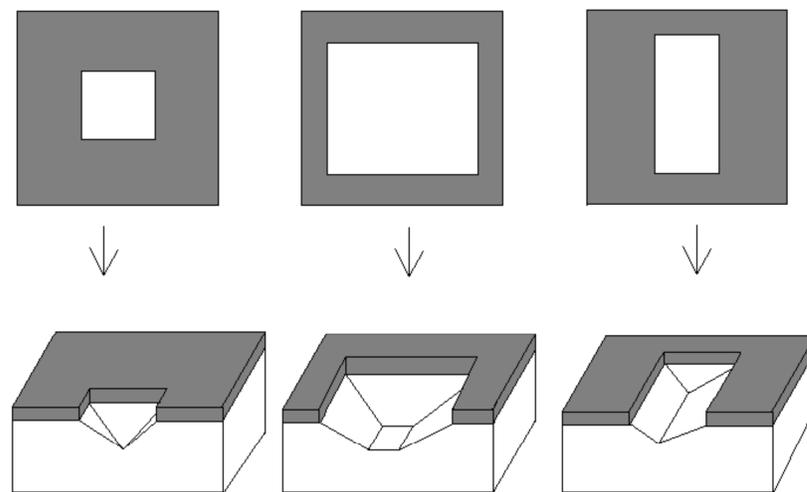


Figura 6 - Ilustração esquemática de corrosões anisotrópicas em lâminas $\langle 100 \rangle$. [38]

1.5 Objetivo do Trabalho

O objetivo geral deste trabalho é a construção de sensores de infravermelho, dedicados à detecção de radiação na faixa de infravermelho distante, construídos a partir de estruturas suspensas, através do ataque químico úmido pela face posterior e utilizando outros processos de fabricação disponíveis no Centro de Componentes Semicondutores (CCS/UNICAMP), utilizando ouro poroso como absorvedor de

radiação e o silício policristalino com elemento ativo, a fim de desenvolver tecnologias de fabricação e caracterização para sensores.

Um foco importante no desenvolvimento desta tese é com relação a obtenção de um material com o nível de TCR desejado (em torno de $-2\%K^{-1}$). O TCR é um parâmetro importante nos detectores térmicos, pois ele indica quanto à resistividade do elemento sensível varia, com uma determinada variação de temperatura. O controle deste parâmetro é feito através da dopagem do silício policristalino.

É importante lembrar que as técnicas de fabricação desenvolvidas dependem diretamente dos materiais utilizados na fabricação do termistor e na fabricação do absorvedor de infravermelho, e das condições de trabalho de cada laboratório de fabricação de microeletrônica, o que torna necessária a escolha e a caracterização completa das soluções empregadas na construção dos dispositivos.

Inicialmente tem-se como desafios principais a obtenção do termistor ideal e a obtenção do absorvedor de infravermelho ideal. Fabricado a partir da deposição de Silício Policristalino, o termistor deve ser dopado adequadamente para o propósito desejado. Foram construídas e caracterizadas algumas variantes de termistores, como dopagem, forma da estrutura suspensa e processos de obtenção das estruturas suspensas. Já com relação ao absorvedor, estudos indicam o ouro poroso ou ouro negro como sendo o material mais indicado para a aplicação buscada [47]. Mas este material é extremamente frágil e, portanto, de difícil manipulação, necessitando então de um forte estudo no desenvolvimento de processos que permitam a fabricação destas estruturas absorvedoras. Em uma segunda etapa, mas não menos importante, tivemos o desenvolvimento da camada de nitreto de silício (Si_3N_4) que será usada como máscara sobre a superfície da lâmina de silício a fim de efetuar o ataque desejado sobre o substrato. Neste trabalho os filmes de nitreto foram obtidos utilizando as técnicas de RT/PCVD e ECR. Foram também fabricados alguns filmes de dióxido de silício por

processo térmico e CVD, a fim de se realizar comparações no comportamento de corrosão dos óxidos e nitretos. Numa segunda etapa, após a obtenção de uma camada de nitreto que seja adequada para a fabricação de microestruturas suspensas, foi estudada e caracterizada a corrosão úmida, em função da concentração e da temperatura da solução do hidróxido de potássio (KOH) e das velocidades de corrosão anisotrópica. Depois de estabelecido os processos de obtenção de nitreto de silício e de corrosão adequados, foram estudadas as construções de algumas estruturas suspensas de geometrias variadas, como pontes, vigas e membranas. Outro desafio foi integrar o ouro poroso ao dispositivo.

1.6 Organização da Tese

A tese foi elaborada estruturando-se em 6 capítulos, sendo que este corresponde ao capítulo 1 onde são descritos sucintamente a motivação, alguns aspectos de sensores de temperatura, técnicas de deposição de filmes finos utilizadas, corrosão úmida e os objetivos da tese.

No capítulo 2 são apresentados os fundamentos básicos de radiação infravermelha, bem como dos materiais utilizados na fabricação de dispositivos com a finalidade de detecção desta radiação.

No capítulo 3 são apresentados os termistores, no aspecto físico destes dispositivos além de introduzir os absorvedores de infravermelho.

No capítulo 4 são apresentados os procedimentos experimentais desenvolvidos e utilizados nesta tese, para a obtenção dos filmes e para a fabricação dos dispositivos.

No capítulo 5 são apresentados os resultados e discussões obtidos a partir dos filmes e dispositivos bolométricos fabricados no decorrer deste trabalho.

No capítulo 6 apresentadas as conclusões dos estudos que permitiram determinar as melhores condições de processo para a construção dos sensores bolométricos, bem como as contribuições científicas desta tese.

Capítulo 2

RADIAÇÃO INFRAVERMELHA

2.1 Materiais Utilizados em Termistores

Nesta área da eletrônica, de acordo com as referências consultadas para a execução deste trabalho, vários grupos de pesquisa estão dedicando seus estudos no objetivo de encontrar um material ideal que apresente todas as características consideradas ideais para a fabricação de termistores, mas até o momento nenhum dos estudos conseguiu um bolômetro que reúna todas essas qualidades requeridas. Dentre as qualidades buscadas, as principais são um alto valor de TCR ($> 2\%K^{-1}$) para o elemento ativo, um alto índice de absorção de radiação e baixos níveis de ruído.

O óxido de vanádio (VO_x) tem a desvantagem de não ser um material padrão em tecnologias de circuitos integrados, os metais apresentam valores de TCR muito baixo e a:Si (SiGe) apresentam um ruído ($1/f$) alto [48].

Embora o material a:SiC apresente altos valores de TCR ($4 \sim 6\%K^{-1}$) e de ser um material compatível com a tecnologia de circuitos integrados [20], seu processo de obtenção requer um recozimento de alta temperatura (cerca de $1.000^\circ C$) para que as estruturas tenham boa estabilidade. Esta alta temperatura é um grande inconveniente e pode vir a danificar os circuitos eletrônicos fabricados no mesmo substrato, impedindo assim uma solução monolítica.

Outro candidato a ser considerado é o a:Si-B que apresenta um dos mais altos valores de TCR entre todos os materiais ($2 \sim 8\%K^{-1}$), mas este apresenta um ruído $1/f$ extremamente alto e assim o torna um material considerado como inadequado para aplicações em detectores térmicos [49].

2.1.1 SILÍCIO POLICRISTALINO

O silício policristalino vem também se apresentando como um dos principais materiais utilizados em MEMS, sendo uma solução para a obtenção de termistores microfabricados, principalmente pela vantagem apresentada de evitar danos aos sistemas eletrônicos de alta velocidade [50].

O principal motivo do interesse deste material para a aplicação citada é com relação às características elétricas e mecânicas do silício policristalino, pois, com dopagem ou não, ele se apresenta como o primeiro candidato a ser o material estrutural em aplicações MEMS [50].

Vários estudos de crescimento do silício policristalino em LPCVD com diferentes doses de dopagem de boro foram realizados e dentre os resultados obtidos, foi encontrado que esse material possui um ponto crítico onde o TCR do termistor tem sua polaridade invertida, conforme pode ser observado nos gráficos ilustrados na Figura 7 [51, 52].

Em baixas temperaturas, a resistência diminui com o aumento da temperatura, pois os átomos de impureza estão ionizados. A resistência permanece constante em determinadas faixas de temperatura e após o ponto determinado de “temperatura crítica”, a vibração da estrutura cristalina tem mais efeito do que o efeito de ionização dos átomos de impureza, sendo este efeito o motivo do aumento da resistência nesta região [52].

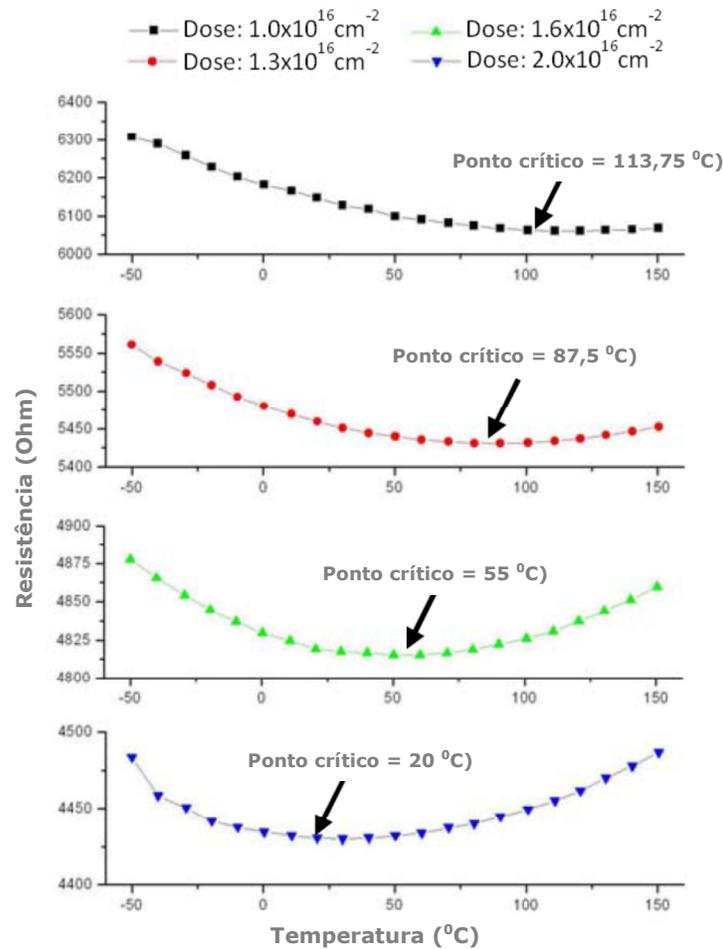


Figura 7 - Resistência do Si Poli x Temperatura para diferentes doses de impantação [52].

2.1.2 SILÍCIO AMORFO

O silício amorfo (a:Si) é um dos materiais utilizados como elemento ativo na fabricação de bolômetros, e portanto, serão apresentadas vantagens e desvantagens do uso deste material para esta finalidade.

Este material possui várias propriedades que fazem dele um grande atrativo como material ativo em termistores, sendo que a principal propriedade apresentada é que altos valores de TCR ($1,8 \sim 5,5\%K^{-1}$) [48, 53, 54] podem ser obtidos de acordo com a técnica de obtenção utilizada. A Figura 8 ilustra um gráfico com a relação entre o TCR e

a Resistividade. Altos valores de TCR são obtidos a partir de altos valores de resistência, que pode ser ajustada através da concentração da dopagem utilizada ou pela adição de hidrogênio no momento da obtenção do filme. Se houver uma diminuição na resistência do material do termistor, a corrente irá aumentar, aumentando conseqüentemente a responsividade do detector. Pela Figura 8 pode-se notar que para se obter o dobro de TCR ($-2,5\%K^{-1}$ a $-5\%K^{-1}$) é necessário um aumento de mais de duas décadas na escala de resistividade do material. Assim, para se obter um melhor valor na responsividade é necessário utilizar baixas resistências, mesmo em demérito ao valor de TCR.

A obtenção do silício amorfo emprega um processo de baixa temperatura, sendo que os processos de deposição e de corrosão são bastante conhecidos, permitindo com que este material possa ser empregado na fabricação monolítica de bolômetros, onde, por exemplo, o elemento sensor e toda a parte eletrônica são fabricados numa mesma pastilha de silício. Outra vantagem com relação a sua alta resistência é a possibilidade de obter matrizes de sensores com amostragem de sinal contínua, pois a dissipação de potência devido ao efeito Joule é minimizada [55].

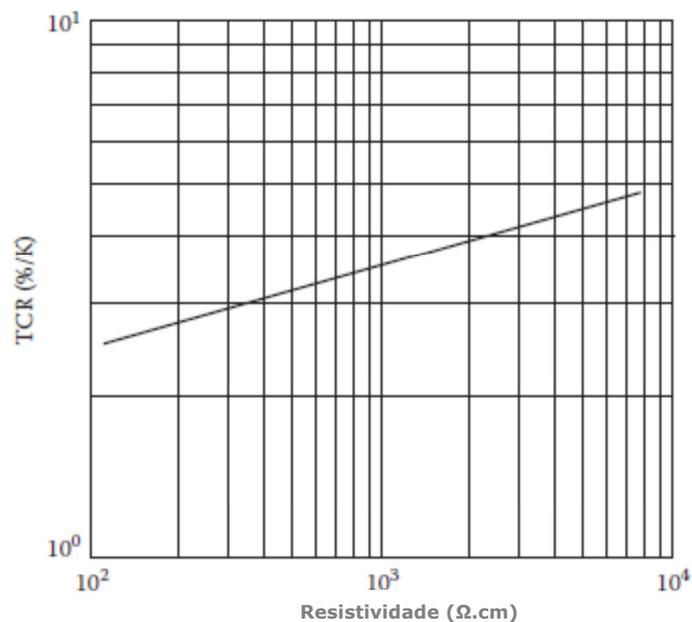


Figura 8 - Relação entre TCR X Resistividade Elétrica para o silício amorfo [1, 49].

O silício amorfo pode ser depositado tanto pela técnica de *plasma enhanced chemical vapor deposition* (PECVD), quanto por *sputtering*, sendo que no processo PECVD a deposição é realizada sob um alto controle de processo permitindo assim obter um filme com alta uniformidade e baixo estresse. Enquanto que, no processo PECVD a resistividade do a:Si é controlada através do nível de dopagem que pode ser de boro ou fósforo, na técnica de *sputtering* a resistividade é controlada por uma passivação de hidrogênio resultando no silício amorfo hidrogenado (a:Si-H), sendo que este processo é obtido através da adição de uma pequena parte de hidrogênio a atmosfera de argônio dentro da câmara do *sputtering*. A dificuldade apresentada por esta técnica é a falta de precisão no controle da injeção do hidrogênio, causando problemas de reprodutibilidade e desuniformidade no filme obtido [48].

Um parâmetro importante apresentado pelos bolômetros, quando se leva em conta a análise de ruído, é o ruído 1/f, considerado como sendo a principal fonte de ruído nos termistores, podendo chegar a ser até 3 vezes menor nos materiais obtidos por *sputtering* do que nos obtidos por PECVD [56]. A Tabela 1 mostra um comparativo de D* (detectividade) e TCR entre o silício amorfo e o silício amorfo hidrogenado, ambos obtidos por *sputtering* [48], onde se pode observar um aumento significativo do TCR para o silício amorfo hidrogenado (a:Si - H).

Tabela 1. Comparativo entre silício amorfo e silício amorfo hidrogenado [48].

	a:Si	a:Si - H
D* (cmHz ^{1/2} W ⁻¹)	2,2x10 ⁸	1,08x10 ⁸
TCR (%K ⁻¹)	1,8	2,1

Outro problema apresentado pelos termistores de silício amorfo é o alto índice de estresse compressivo apresentado, de forma que algumas estruturas podem sofrer deformações e estruturas maiores podem até quebrar em alguns casos [55, 57]. A espessura do filme é que determina a rigidez da membrana e é um parâmetro importante para se controlar o estresse induzido por deformação, para bolômetros fabricados utilizando estruturas suspensas [15, 16, 58]. O aparecimento de defeitos ocasionados pela exposição muito prolongada deste material aos raios solares foi descoberto em 1977, onde o desempenho do sensor acaba sendo extremamente comprometido [56]. Este fator pode ser determinante no momento da escolha do material a ser empregado na fabricação do termistor, tendo em vista que muitas das aplicações são dedicadas a observações de radiações solares.

2.1.3 GERMÂNIO AMORFO

Outro material que vem apresentado bons resultados quando utilizado na fabricação de termistores é o germânio amorfo (a:Ge). Os detectores fabricados utilizando este material, apresentam uma detectividade de $4,7 \times 10^8 \text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ obtida em testes padronizados [57]. Esta melhoria no desempenho do sensor se dá devido a baixa resistividade do a-Ge ($1,4\text{k}\Omega$) se comparado ao a-Si ($22\text{k}\Omega$). O baixo valor de resistência oferecido pelo germânio permite um aumento na corrente que flui pelo termistor, resultando em uma alta responsividade [59].

O valor do TCR para dispositivos fabricados com germânio amorfo podem chegar a $5\%K^{-1}$ para o filme crescido utilizando PECDV, com os gases GeF_4 e H_2 [19]. Este valor de TCR é considerado muito atrativo quando se considera a aplicação na fabricação de termistores.

2.1.4 SILÍCIO / GERMÂNIO AMORFO

Materiais formados por ligas de silício e germânio, também se mostram com grande potencial para serem aplicados na construção de termistores. Bolômetros construídos com base em termistores de Si-Ge amorfo, se comparado com termistores de a:Si, possuem um ganho significativo no valor de TCR, devido à baixa resistência resultante da redução da energia de *band gap* do Si-Ge e consequentemente resulta em uma alta relação sinal-ruído [24, 60]. Nos trabalhos que vem sendo realizados com esse material, foram encontrados valores de TCR de até $5\%K^{-1}$ [57]. Os gráficos obtidos em estudos sobre o efeito da composição do germânio na sua resistividade e no TCR, estão ilustrados na Figura 9 [61].

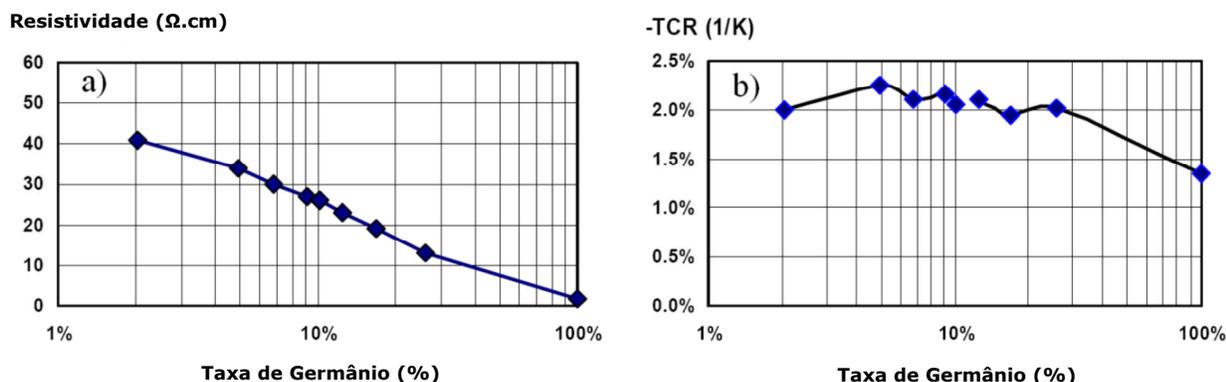


Figura 9 - a) Resistividade e b) TCR x Razão atômica de Ge [61].

As medições de resistividade e TCR a temperatura de $30^{\circ}C$ [61], sendo que o resultado destas medições é a comprovação de uma drástica redução de resistência se comparado com o a:Si (Figura 9-a) e também que a concentração de germânio na composição do filme afeta diretamente o TCR do termistor. A Figura 9-b ilustra que o valor do TCR onde a concentração de germânio é de até 2,5%, ficou em $-2,1\%K^{-1}$ e para concentrações acima de 25%, foi encontrado um valor de $1,35\%K^{-1}$ [61]. De uma forma

geral, melhores resultados de TCR são encontrados para concentrações próximas de 25%, conforme ilustrado no gráfico da Figura 10 [61].

A capacidade de se fabricar sensores com baixas resistências (na ordem de centenas de ohms) tornam este material completamente compatível com a tecnologia CMOS, que opera com baixas tensões (unidades de V).

A responsividade do detector é proporcional ao TCR/R e esta pode ser melhorada em até 50% com a adição de apenas 5% de germânio ao a:Si [61]. Neste caso, com a redução da resistência o ruído Johnson torna-se praticamente insignificante, sendo este fato considerado como uma melhoria importante nas características do termistor. Porém, o ruído 1/f e a responsividade que são proporcionais a corrente, aumentam com a diminuição do valor da resistência, mas não afeta a relação sinal-ruído [61].

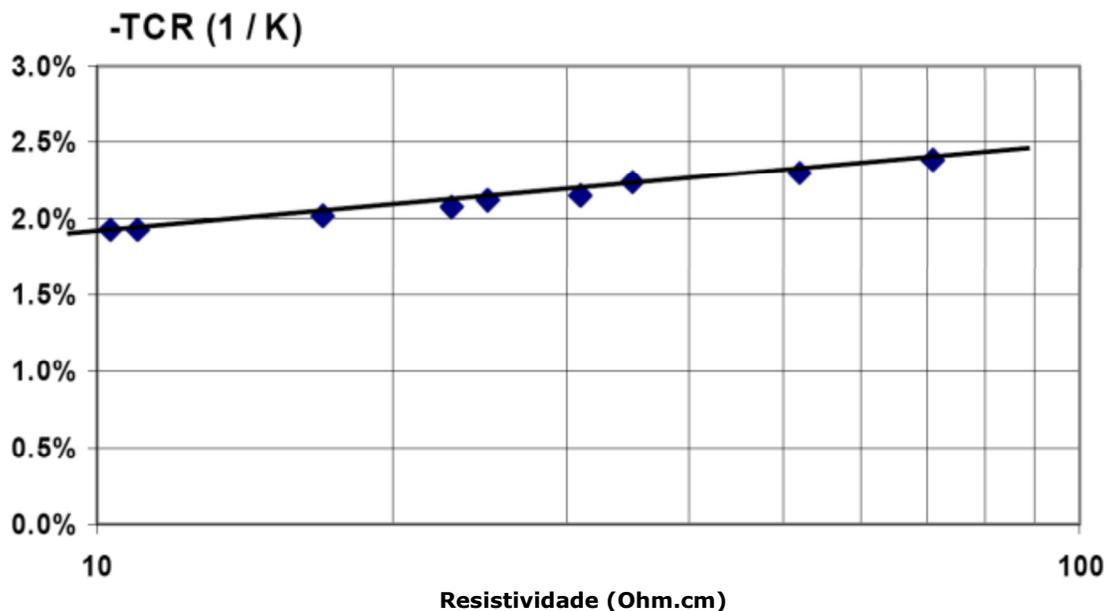


Figura 10 - TCR X Resistividade do filme de a-Si-xGex dopado [61].

2.1.5 SILÍCIO / GERMÂNIO POLICRISTALINO

Devido a compatibilidade com processos padrões de fabricação de circuitos integrados, e por apresentar um ruído $1/f$ baixo se comparado com o silício amorfo, o silício policristalino (silício poli) se apresenta com um bom candidato como material ativo para fabricação de bolômetros. A preocupação com esse material está na obtenção de uma boa estabilidade mecânica [62], que pode ser obtida através de um recozimento a altas temperaturas, mas esta alta temperatura pode danificar os circuitos elétricos. Uma solução para este problema seria a adição de átomos de germânio na estrutura, reduzindo assim a temperatura de deposição, e resultando em camadas com baixos níveis de estresse [63, 64].

Assim, a utilização de SiGe policristalino em substituição ao Si policristalino pode ser uma boa solução como material para a fabricação do termistor, podendo diminuir em pelo menos 4 vezes a condutividade térmica do termistor [63, 65]. Além disso o SiGe apresenta ainda propriedades adequadas aos processos de micromáquinas e tem TCR compatível com outros materiais [66]. O estresse pode ser controlado pelo ajuste dos parâmetros de deposição, como temperatura e pressão [65], podendo adequar o material a estrutura mecânica que este irá formar. As duas técnicas mais utilizadas na obtenção destes filmes são o RPCVD e o APCVD.

Devido a baixa resistência deste material, o ruído shot domina sobre o ruído Johnson, sendo assim, um trabalho com o objetivo de se eliminar ou minimizar os efeitos dos ruídos deve ser direcionado ao ruído shot. Nos termistores, os parâmetros tais como TCR, resistividade e ruído $1/f$ são interdependentes e todos precisam ser levados em consideração quando se deseja otimizar o processo. A dose de dopagem do termistor está encarregada em determinar o TCR e os níveis de ruído, conforme ilustra o gráfico mostrado na Figura 11, construído a partir de um termistor de SiGe policristalino com 1 μm de espessura, crescido em um RPCVD [21].

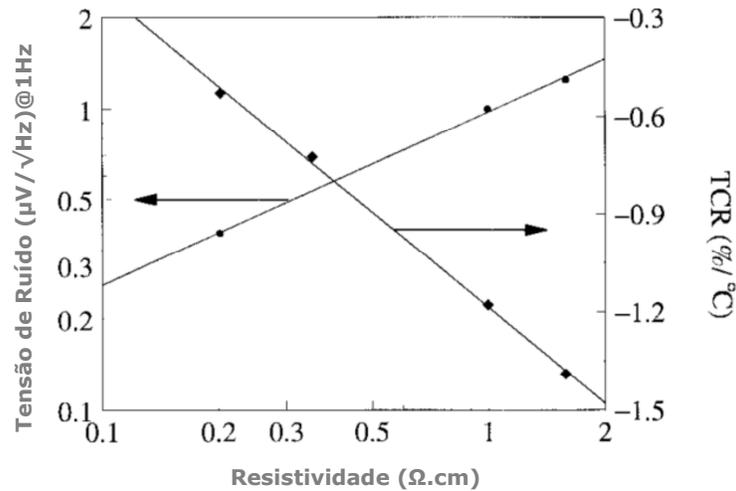


Figura 11 - Dependência do TCR e do Ruído X Resistividade [21].

Neste caso, para se obter uma detectividade D^* maximizada, os efeitos da resistividade neste parâmetro devem ser muito bem entendidos. Da Figura 11 pode se observar ainda que o TCR diminui e o Ruído aumenta, com relação ao aumento da resistividade do material. Experimentos mostram que o TCR para o termistor obtido em APCVD é da ordem de $-2\%K^{-1}$ e em RPCVD é da ordem de $-1\%K^{-1}$ [21, 67], e ainda, materiais obtidos através da técnica de UHVCVD (*ultra high vacuum chemical vapor deposition*) obtiveram TCR na ordem de $-1,91\%K^{-1}$ [25].

2.1.6 DIODO SCHOTTKY

O diodo de barreira Schottky, ou somente diodo Schottky, foi introduzido pela primeira vez no método de microfabricação de sistemas (MEMS) para a fabricação de microbolômetros pela Bell Labs, sendo que estão ilustrados na Figura 12 o circuito utilizado e a vista em corte da estrutura do circuito integrado [68]. Esses dispositivos apresentam um TCR em torno de $6\sim 7\%K^{-1}$ [69] e não apresentam ruídos shot, mostrando-se portanto como um bom candidato a detecção de radiação infravermelha.



Figura 12 – Diagrama do circuito e vista em corte do circuito integrado do bolometro utilizando diodo Schottky, fabricado com técnicas de micromáquinas [68].

Nestes detectores a detecção térmica ocorre através de alterações na corrente reversa do diodo Schottky, sendo que o diodo tem uma alta impedância e atua como uma fonte de corrente. A magnitude da corrente de saturação é proporcional a área eletricamente ativa da junção Schottky e pode ser calculada pela equação (2).

$$J_S = A_R \times T^2 \times \exp\left(-\frac{Y_{bn}}{kT}\right) \quad (2)$$

sendo, A_R : constante de Richardson (dependente do material)[70]; k : constante de Boltzmann; Y_{bn} : potencial de barreira Schottky e T : temperatura absoluta.

De um modo geral, esse tipo de dispositivo apresenta características que o tornam uma boa alternativa na fabricação de bolômetros para aplicações de detecção de infravermelho.

Capítulo 3

FOTODETECTORES

Existem vários tipos de fotodetectores que tem sua fabricação baseada em semicondutores, mas os mais comuns são os detectores fotocondutivos e os fotodiodos. Embora os métodos de detecção destes dispositivos sejam muito parecidos a propriedade fundamental de converter a luz incidente ou fóton incidente em um sinal elétrico, envolve a mesma física para todos.

A Figura 13 ilustra um gráfico sendo que pode se observar que um fotodetector comercial baseado em silício tem sensibilidade a luz na faixa de comprimento de onda de 300 a 1000 nm [71].

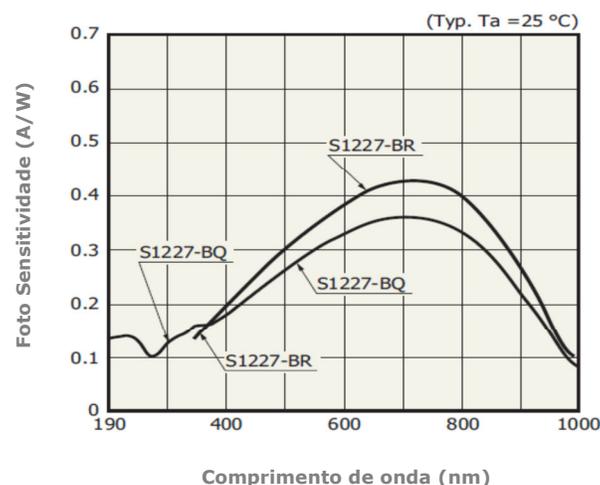


Figura 13 - Resposividade de um fotodiodo de infravermelho com área ativa de 10x10mm [71].

A dependência com o comprimento de onda é gerado pela estrutura de bandas que é específica para cada material semiconductor. Um exemplo simplificado de uma estrutura de banda do silício é ilustrado na Figura 14, sendo que pode-se observar a banda de valência, a banda de condução e a banda proibida. Para o material intrínseco a 0 °K, a banda de valência está totalmente preenchida por elétrons e a banda de condução está completamente vazia, mas quando há um aumento na temperatura, alguns elétrons ganham energia térmica suficiente para que possam atravessar a banda proibida e entrar na banda de condução. Outra forma de fazer com que elétrons tenham energia suficiente para atravessar a banda proibida é pela incidência de luz, onde os fótons incidentes fornecem essa energia ao elétron.

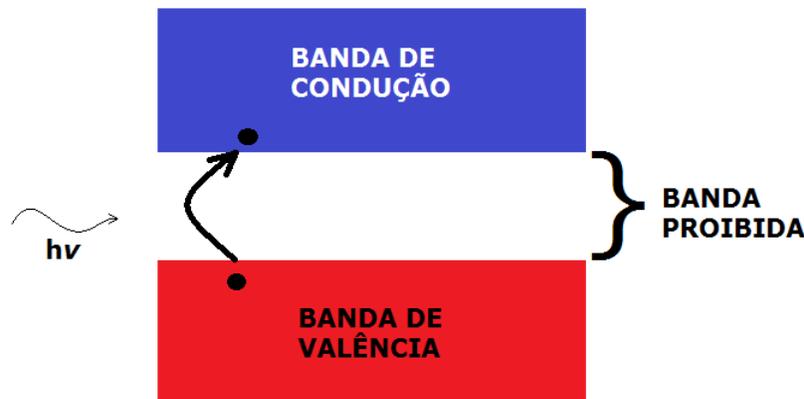


Figura 14 - Geração do par eletron-lacuna em um semiconductor devido a incidência de um fóton com energia $h\nu$.

Pode se calcular a energia da luz incidente no material semiconductor pela equação de Plank.

$$E = h \times \nu \quad (3)$$

Onde: h = constante de Plank ($4,135 \times 10^{-15}$ eV.s);

ν = frequência da radiação incidente.

De forma rápida e prática, se a energia de banda proibida do silício for considerada como 1,1 eV, a frequência incidente será de $2,66 \times 10^{14}$ Hz, ou seja, um comprimento de onda de aproximadamente 1100nm. Pode se concluir deste resultado que, para se obter detectores com capacidade de atuar em frequências mais baixas é necessário utilizar materiais com um banda proibida mais estreitas.

3.1 Fotocondutor

Os detectores do tipo fotocondutivo detectam a incidência de luz pela alteração da condutividade elétrica causada no semiconductor. Dentre as principais aplicações deste dispositivo, destacam-se a de medidor de luz em câmeras e em sistemas de alarme. A alteração da condutividade pela incidência da luz é dada pela equação (4) [72].

$$\Delta\sigma = q \times g_{op} \times (\tau_n \cdot \mu_n + \tau_p \cdot \mu_p) \quad (4)$$

onde, g_{op} : taxa de geração ótica;

τ e μ : tempo de vida dos portadores e mobilidade, para elétrons e lacunas, respectivamente.

Portanto, para que este tipo de dispositivo tenha uma grande variação na condutividade, o τ e μ devem ter altos valores.

Ao se aplicar uma tensão V em um semiconductor com área de secção transversal dada pela relação $W \times D$ e com um comprimento L , a variação na corrente circulante neste dispositivo devido a variação da resistividade, será dada pela equação (5) [72].

$$\Delta i = \frac{W \cdot D}{L} \times \Delta\sigma \times V \quad (5)$$

Tem-se ainda que o comprimento de onda em que este dispositivo irá responder é determinado pela banda proibida do material semiconductor. Para aplicações onde a detecção do espectro infravermelho é necessária são utilizados o Sulfeto de Chumbo (PbS), o Arseneto de Galio-Índio (InGaAs) e o Antimoneto de Índio (InSb). A necessidade de resfriamento externo é uma grande desvantagem apresentada por estes detectores, sendo indispensável, pois é necessária para se reduzir o ruído térmico.

3.2 Fotodiodo

Os fotodiodos são um tipo de fotodetector cujo princípio de funcionamento está baseado na excitação dos elétrons da camada de valência de uma junção PN gerando assim o par elétron-lacuna, cujo esquema básico de construção é ilustrado na Figura 15. A região de junção é feita através da difusão ou implantação iônica de boro nas áreas onde se deseja uma lâmina de silício tipo N, com alta resistividade. Na parte inferior desta lâmina é realizada uma dopagem de alta dose tipo N, onde é aplicado o contato de catodo do dispositivo através de um material metálico. O contato frontal é geralmente feito por um filme de alumínio, evaporado utilizando técnicas fotolitográficas.

Entre a região tipo P e a região tipo N com baixa dose de dopagem, é formada uma região de depleção, sendo esta uma região livre de cargas móveis e a largura desta região depende da dopagem da lâmina de silício utilizada e da tensão aplicada, sendo que a região de depleção é formada mesmo sem a aplicação de um tensão externa. Quando um fóton é absorvido pelo dispositivo, um par elétron-lacuna é gerado e quando eles se separam, onde o elétron vai para a região P e a lacuna para a região N, é gerada uma fotocorrente, variando assim a corrente total que passa pelo dispositivo. Estes dispositivos operam geralmente com uma polarização reversa, pois com isso, a

região de depleção aumenta, aumentando a sua sensibilidade, uma vez que a corrente presente é devida principalmente pela geração dos pares elétron-lacuna.

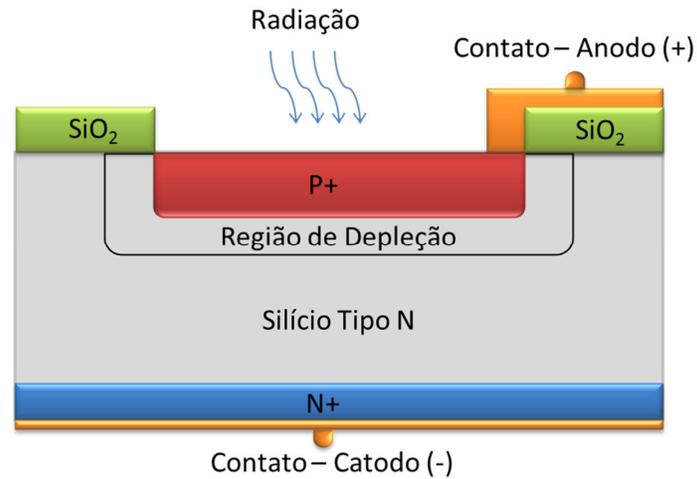


Figura 15 - Esquema de um fotodiodo típico de silício.

Em se considerando um fotodiodo ideal, a corrente reversa é independente da tensão reversa, sendo que essa corrente é proporcional somente a taxa de geração óptica conforme ilustra o gráfico da Figura 16, onde pode ser observado que quanto maior a intensidade de radiação incidente, maior é a fotocorrente reversa.

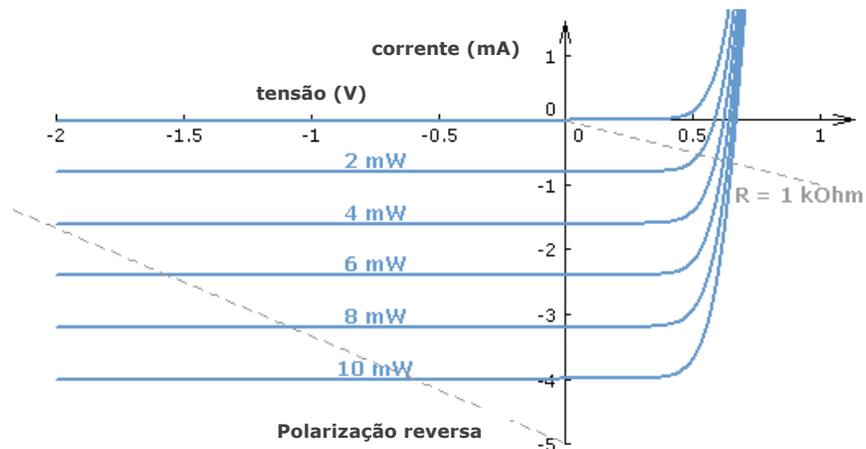


Figura 16 - Curva I-V característica de um fotodiodo ideal [73].

Para que estes dispositivos tenham um melhor desempenho, também dependem de uma refrigeração externa geralmente realizada com nitrogênio líquido (77K) e sofrem ainda com um baixo rendimento e uma grande complexidade de produção, o que inviabiliza sua utilização em aplicações mais simples [74].

DETECTORES TÉRMICOS

Os detectores térmicos têm seu princípio de funcionamento baseado na conversão de uma potência térmica incidente em um sinal elétrico, onde inicialmente a radiação incidente é absorvida, causando um aumento de temperatura no material absorvedor. Esta variação de temperatura causa então modificações sobre alguns parâmetros do elemento ativo, sendo que, de um modo geral, essa variação é uma alteração de condutividade elétrica. Dentro do grupo dos detectores térmicos, encontram-se o bolômetro, os detectores termoelétricos (termopar e termopilha), os piroelétricos e os detectores Golay, sendo que a diferença básica destes detectores é como eles fazem esta detecção. Se for realizada uma comparação entre os detectores térmicos e os fotodetectores, a conclusão será de que a grande vantagem apresentada pelos detectores térmicos é a capacidade de operar a temperatura ambiente, ou seja, sem necessidade de um sistema de resfriamento externo, enquanto que os fotodetectores não apresentam um bom rendimento sem esta refrigeração externa. Este fato torna os fotodetectores volumosos, caros e pesados. Mas, os detectores térmicos têm a desvantagem de apresentar um tempo de resposta maior e uma sensibilidade mais baixa do que os fotodetectores, sendo então que, o limitante de utilização de cada um é o tipo de aplicação a qual será destinado o sensor.

3.3 Física dos Termo-Detectores

Hoje em dia é possível encontrar simuladores de sistemas eletrônicos muito avançados, sendo que uma análise mais simplificada pode ser realizada através da analogia entre comportamentos elétricos e comportamentos térmicos, como por exemplo, utilizar a corrente elétrica e a tensão para explicar o comportamento de fluxo de calor e temperatura. A Tabela 2 mostra de um modo geral a analogia entre parâmetros elétricos e parâmetros térmicos, que torna relativamente mais fácil a análise de comportamento do sensor.

Tabela 2. Analogia entre parâmetros elétricos e térmicos [1, 75].

Parâmetros Elétricos	Parâmetros Térmicos
Tensão: V (V)	Temperatura: T (K)
Corrente: I (A)	Fluxo de Calor: Φ (W)
Resistência Elétrica: R (Ω)	Resistência Térmica: R (K/W)
Condutância Elétrica: G (Ω^{-1})	Condutância Térmica: G (W/K)
Capacitância: C (F)	Capacitância Térmica: C (J/K)
Resistividade Elétrica: ρ ($\Omega.m$)	Resistividade Térmica: ρ (K.m/W)
Condutividade Elétrica: σ ($\Omega^{-1}.m^{-1}$)	Condutividade Térmica: κ (W/K.m)

Ao se projetar um detector térmico, é possível separar a análise em 3 partes distintas, que são:

- Elemento sensível à temperatura;

- Conexão térmica;
- Dissipador térmico.

Para uma detecção máxima da radiação incidente, o elemento sensível, cuja capacitância térmica é C , deve ter uma alta sensibilidade térmica. A conexão térmica com o dissipador térmico deve ter uma baixa condutividade térmica, para que se maximize a variação de temperatura no elemento sensível. Outro recurso para se aumentar a absorção da radiação é a utilização de um material absorvedor sobre o elemento ativo. A Figura 17 ilustra uma estrutura simplificada de um detector térmico, onde tem-se um elemento detector com capacidade térmica C , que está termicamente ligado a um dissipador térmico por uma condutância G [76].

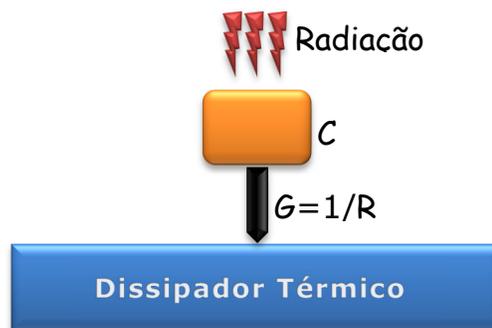


Figura 17 - Estrutura simplificada de um detector térmico.

Como já descrito anteriormente a estrutura ilustrada na Figura 17, é uma estrutura simplificada, onde se leva em consideração apenas que o calor é transportado do elemento ativo somente por condução, através da conexão térmica. A variação de temperatura no elemento ativo causada pela incidência da radiação térmica pode ser obtida pela resolução da equação de balanço de calor, conforme a equação (6) [77].

$$C \frac{dT}{dt} + G\Delta T = \varepsilon \cdot \Phi \quad (6)$$

Onde, C: Capacitância térmica;

ΔT : Variação de temperatura;

G: Condutância térmica;

ε : Emissividade da região ativa;

Φ : Radiação incidente.

Assumindo um sinal térmico incidente regido pela equação $\Phi = \Phi_0 \cdot \cos(2\pi ft)$, variante no tempo, pode-se escrever que a variação da temperatura causada pela absorção do sinal é dada pela equação (7) [77, 78].

$$\Delta T = \frac{R_{th} \cdot \varepsilon \cdot \Phi_0 e^{j\omega t}}{1 + j\omega R_{th} C} \Leftrightarrow |\Delta T| = \frac{\varepsilon \cdot \Phi_0}{\sqrt{G + \omega^2 \cdot C^2}} \quad (7)$$

Analisando-se a equação (7) pode-se concluir que para valores reduzidos de condutância térmica G e capacitância térmica C, há um aumento no valor da variação de temperatura ΔT , melhorando assim a sensibilidade do detector. Na prática, isto significa que os detectores devem ter uma massa térmica reduzida, resultando em uma pequena área de interação entre o dissipador térmico e o elemento ativo. Para que se construa um detector com uma capacidade de resposta rápida, é necessário que se obtenha altos valores de condutância térmica e baixos valores de capacitância térmica, conforme pode ser confirmado pela equação (8). De toda análise feita anteriormente, obtêm-se um compromisso entre a sensibilidade e o tempo de resposta do detector térmico, dado pela seguinte equação:

$$\tau = \frac{C}{G} \quad (8)$$

Existem algumas técnicas que permitem a redução da condutividade térmica entre o substrato que apoia a estrutura e o elemento ativo, onde se busca minimizar a conexão térmica entre estes elementos. Dentre elas, têm-se as membranas suspensas, as membranas fechadas e as estruturas de colunas e vigas [1]. A espessura destas estruturas deve ser pequena e a condutividade térmica dos materiais deve ser baixa para que se obtenha uma condutância térmica reduzida.

3.3.1 MEMBRANAS SUSPENSAS

As membranas suspensas são estruturas térmicas que possuem uma baixa condutância térmica com o substrato. Dentre os materiais utilizados como substrato, o silício é o mais utilizado, pois permite a fabricação de soluções monolíticas onde o sensor e o circuito eletrônico são fabricados no mesmo substrato. As técnicas mais utilizadas para a fabricação destas estruturas suspensas em silício são o *bulk micromachining*, sendo que o substrato é submetido a processos de corrosão para que as estruturas fiquem suspensas e o *surface micromachining*, sendo que estruturas são fabricadas na superfície do substrato.

Na técnica de *bulk micromachining* onde o substrato de silício é corroído, o filme de nitreto de silício é bastante empregado, devido sua baixa taxa de corrosão nas soluções utilizadas, se comparado com a taxa de corrosão do silício. As soluções mais utilizadas são o hidróxido de potássio (KOH) [79] e o hidróxido de trimetilamônio (TMAH) [80], que resultam numa corrosão chamada de anisotrópica onde a corrosão acontece em direções cristalográficas preferenciais. A utilização do KOH pode ser restringida para algumas aplicações, pois o potássio pode contaminar os dispositivos do

circuito. Então o TMAH pode ser utilizado como solução deste problema, devendo ser salientado que este é um material perigoso para o ser humano, com característica de ser carcinógeno. Caso seja utilizado um substrato do tipo (100), a corrosão ocorre de forma mais lenta na orientação $\langle 111 \rangle$ e mais rapidamente nas orientações $\langle 100 \rangle$ e $\langle 110 \rangle$. Dai explica-se o aparecimento de paredes com ângulo aproximado de 54° , formadas pelos planos cristalográficos $\langle 111 \rangle$, conforme ilustrado na Figura 18. Outra forma de inibir a corrosão em determinados pontos é fazendo-se uma dopagem tipo P no substrato, pois isto reduz drasticamente a taxa de corrosão do plano $\langle 100 \rangle$ [81].

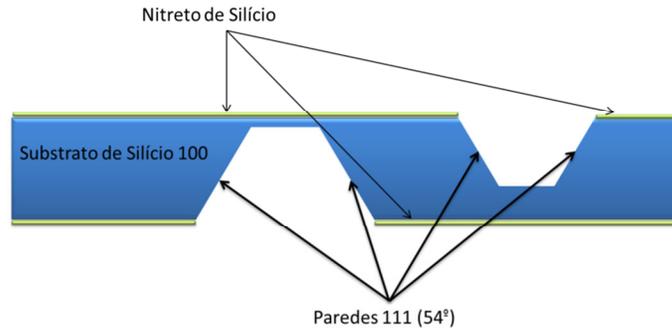


Figura 18 - Corrosão anisotrópica utilizando KOH e TMAH em substrato (100).

Quando se utiliza a técnica de corrosão pela parte posterior do substrato, o processo deve ser interrompido no momento correto para que a membrana resultante tenha a espessura desejada. Para se criar as estruturas suspensas, o nitreto de silício é corroído utilizando-se uma solução de Buffer de Ácido Hidrofluorídrico (BHF), sendo que se obtêm estruturas suspensas conforme a estrutura ilustrada na Figura 19, obtida no CCS-UNICAMP. Estas estruturas buscam apresentar grandes áreas onde o absorvedor será colocado, com a finalidade de absorver a radiação incidente e buscam também estruturas de apoio bastante reduzidas, para aumentar a isolamento térmica do dispositivo a ser fabricado.

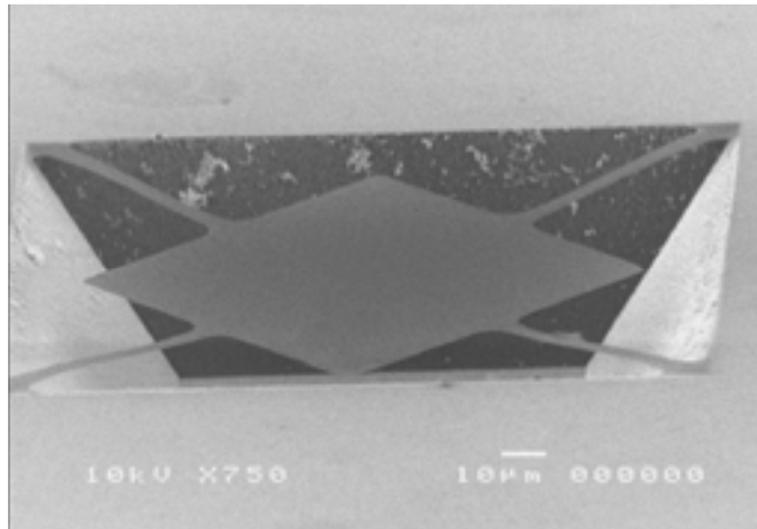


Figura 19 - Micrografia SEM de uma estrutura suspensa de nitreto de silício.

3.3.2 PONTES E VIGAS

Das estruturas suspensas utilizadas como detector térmico, duas se destacam por apresentar uma menor fragilidade e ainda assim manter um baixo valor de condutância térmica com relação ao dissipador. Essas estruturas são as pontes e as vigas. Se for tomado em consideração uma viga com largura W e comprimento L , a resistência térmica desta estrutura no vácuo pode ser calculada de acordo com a equação (9) [3, 70].

$$R_{th} = R_{st} \cdot \frac{L}{W} \quad (9)$$

Onde R_{st} é a resistência de folha térmica, dada pela equação a seguir, sendo D e κ espessura e condutividade térmica da estrutura suspensa, respectivamente.

$$R_{st} = \frac{1}{\kappa \cdot D} \quad (10)$$

3.3.3 MEMBRANAS FECHADAS

As membranas fechadas apresentam-se como uma alternativa para se obter estruturas com alta estabilidade mecânica, mas por outro lado, há um grande aumento na condutividade térmica destes dispositivos, se comparados com as estruturas suspensas. Analisando a equação (8), pode-se ver que com o aumento da condutividade térmica da estrutura, há uma redução no tempo de resposta do sensor. A partir de uma análise dos processos utilizados na obtenção de estruturas, observa-se que as estruturas suspensas são obtidas a partir de estruturas fechadas. Portanto, o processo para a obtenção de membranas fechadas é mais simples, pois as etapas realizadas para a suspensão destas estruturas é eliminado.

3.3.4 CAMADA DE ABSORÇÃO DE INFRAVERMELHO

É desejado nos detectores térmicos que estes apresentem uma resposta espectral que seja independente do comprimento de onda da radiação incidente, mas o que ocorre na realidade é que o sinal do sensor depende somente da potência desta radiação incidente. A camada de absorção deve ter grande eficiência na região do comprimento de onda a ser medido, para que o sensor tenha máxima responsividade. Além disso, o sensor deve ter uma baixa massa térmica, permitindo assim uma rápida transferência da potência absorvida para o elemento ativo. É possível descrever a absorção para qualquer material absorvedor, através da equação (11) [82].

$$A = 1 - R_{opt} - T_{opt} \quad (11)$$

Onde: R_{opt} → Refletância;

T_{opt} → Transmitância.

Então, conclui-se que o material mais adequado para ser utilizado como absorvedor são os metais, devido a baixa capacidade térmica. Mas, de um modo geral, os metais apresentam a desvantagem de atuarem como espelhos devido aos seus altos valores de refletância, não atuando então como absorvedores, conforme desejado. Alguns metais, como o titânio, apresentam uma reflexão de 60% quando submetido a uma radiação na região do infravermelho próximo [83].

Uma solução para evitar que a camada absorvedora, feita utilizando um metal, atue como espelho para a irradiação incidente é utilizar metais porosos, conhecidos como “metais negros” [84]. Devido à estrutura porosa destes filmes, eles possuem uma baixa capacidade térmica e uma alta absorção na região do espectro que compreende desde a radiação visível até a radiação infravermelha [85]. Os metais negros mais utilizados na fabricação de bolômetros são o ouro, a platina, o níquel e o alumínio. Entre as grandes vantagens destes materiais tem-se a sua baixa massa térmica, uma alta resistência mecânica e uma boa cobertura de superfície [86]. Estes filmes são obtidos normalmente utilizando-se a técnica de evaporação a baixa pressão, em um ambiente controlado de nitrogênio. Outra vantagem na utilização do metal negro é com relação ao processo de obtenção das estruturas geométricas, que é realizada através de um processo fotolitográfico padrão, facilitando assim a sua obtenção.

3.4 Bolômetro

O bolômetro é um dispositivo capaz de medir a energia de uma radiação infravermelha incidente, através da variação de sua resistência. É um dispositivo largamente utilizado para imageamento térmico, como por exemplo, imagens noturnas. O bolômetro padrão é composto de uma membrana termicamente isolada, vigas de apoio, um absorvedor e um termistor, conforme ilustrado na Figura 20. A radiação

incidente no dispositivo aumenta sua temperatura causando variações em sua resistência e conseqüentemente, variações de corrente ou tensão podem ser medidas, sendo esta variação equivalente a quantidade de calor efetivamente absorvida.

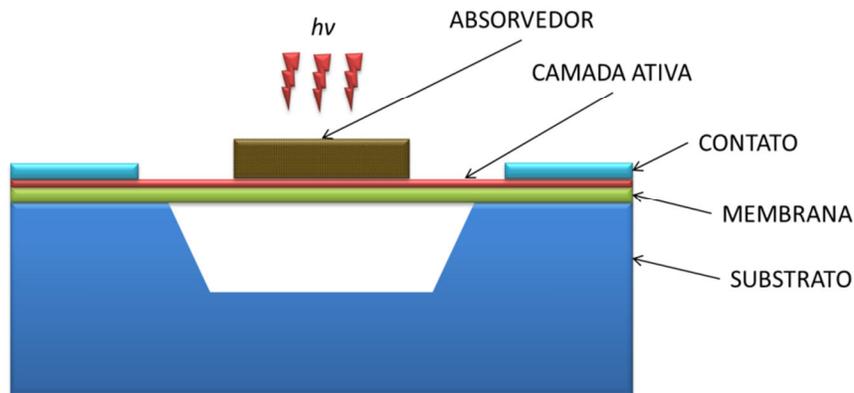


Figura 20 – Esquemático da vista em corte simplificada de um bolômetro [1].

O desempenho dos bolômetros pode ser melhorado minimizando-se a condutância térmica da estrutura suspensa, maximizando então o coeficiente de absorção e o TCR. Para se conseguir esta diminuição na condutância térmica, vários tipos de materiais com baixa condutância térmica podem ser utilizados na função de vigas de apoio, sendo que um dos mais aplicados é o óxido de silício que também apresenta total compatibilidade com os processos de microeletrônica utilizados atualmente.

A principal diferença entre o bolômetro e as termopilhas é com relação ao sinal produzido pelo sensor. A termopilha consiste de vários termopares ligados em série, onde o termopar é a junção de dois materiais com coeficientes termoelétricos diferentes. Quando as duas junções estão a diferentes temperaturas, surge uma corrente proporcional à diferença de temperatura entre as duas junções. Esta corrente deve-se à diferenças no nível de Fermi nos metais e a dependência com a temperatura do nível de

Fermi. Se uma terceira e quarta junção com um terceiro metal condutor (geralmente cobre) for introduzida e mantida ambas na mesma temperatura, o efeito dessas duas últimas se cancela e a tensão medida corresponde à tensão efetiva entre as duas junções originais.

As termopilhas produzem um sinal de saída através do efeito *Seebeck* enquanto os bolômetros requerem uma alimentação externa que, pela mudança de resistência causada pela variação de temperatura, fornece o sinal de saída. Como opções de materiais resistivos, são utilizados metais ou semicondutores, sendo que os metais apresentam um TCR menor com relação ao semicondutor, mas em contrapartida tem valores de ruído $1/f$ menores [87].

Por muitos anos os sistemas de imageamento térmico ficaram restritos ao uso militar, pois, devido ao baixo tempo de resposta dos detectores térmicos, esses sistemas ficaram restritos a utilização de fotodetectores que necessitam de um sistema de resfriamento externo, o que os tornam muito caros e complexos. Entretanto, com a rápida evolução das técnicas de micromáquinas, baseadas principalmente nos processos de silício para microeletrônica, os bolômetros melhoraram significativamente seu tempo de resposta, passando então a substituir os fotodetectores nos sistemas de imageamento térmico [78]. A possibilidade de funcionamento em temperatura ambiente, ou seja, sem a necessidade de um sistema de refrigeração externo, possibilitou a redução do custo destes dispositivos permitindo sua aplicação em maior escala [13]. Pode-se observar na Figura 21 o bolômetro desenvolvido por Honeywell, fabricado utilizando-se membranas suspensas aplicando as técnicas de fabricação em superfície, com camadas sacrificiais e corrosão pela parte frontal do substrato. Este dispositivo utiliza o óxido de vanádio (VO_2) como elemento resistivo, que é um ótimo material para ser utilizado na fabricação do termistor devido ao alto TCR, mas apresenta a desvantagem de possuir um processo de obtenção extremamente complexo [1].

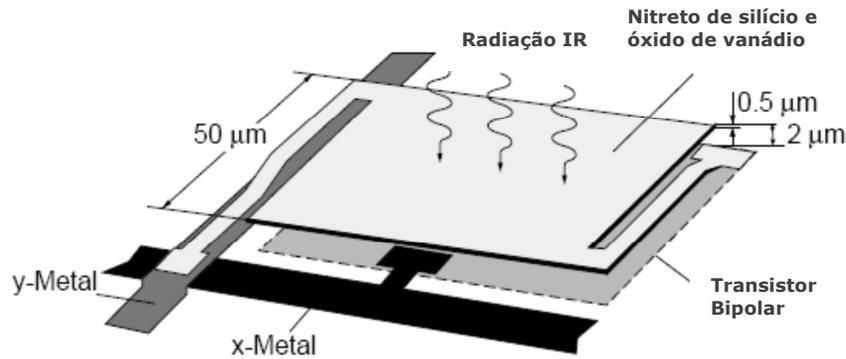


Figura 21 – Esquema de um microbolometro fabricado com VO_2 [78].

3.4.1 TEORIA GERAL SOBRE BOLÔMETROS

Analisando os detectores térmicos de radiação de uma maneira mais simplificada, vemos que estes consistem de um elemento absorvedor com uma capacidade térmica C , na qual é conectado a um dissipador de calor através de uma conexão relativamente fraca. Se uma potência P é absorvida em C , a temperatura T do detector assume valores maiores do que a temperatura T_0 do dissipador de calor.

A Figura 22 ilustra o sistema simplificado do detector térmico citado anteriormente.

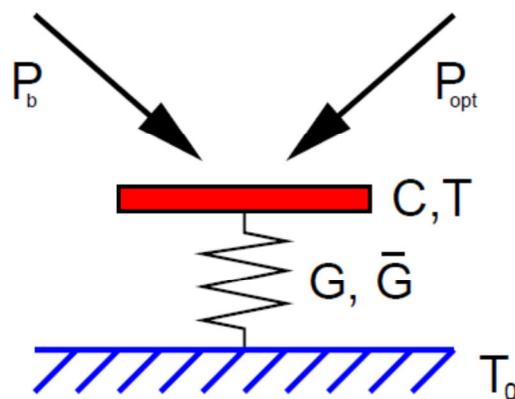


Figura 22 - Modelo térmico de um detector térmico.

A condutância térmica média \bar{G} do link térmico é dado por:

$$P = \bar{G} \cdot (T - T_0), \quad (12)$$

e a condutância térmica dinâmica é dada por:

$$G = \frac{dP}{dT} \quad [\text{W/K}] \quad (13)$$

Se a potência absorvida pelo detector sofre uma variação instantânea para um novo valor P' , T varia em função do tempo de acordo com a equação:

$$T' = T_0 + \frac{P'}{G} \quad (14)$$

Os detectores de radiação térmica detectam variações em P pela medição da variação de T [88, 89].

Para definir o desempenho de um detector térmico, existem parâmetros importantes que auxiliam nesta avaliação, que são [90, 91]:

- **TCR** [60, 92, 93]: é um parâmetro relativo à velocidade de variação da resistência do termistor devido à variação da temperatura.

$$TCR = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT} \quad (15)$$

- **Constante de Tempo Térmico (τ)**: é definido pela relação entre a massa térmica e a condutância térmica [94].

$$\tau = \frac{C}{G} \quad (16)$$

onde, C (Capacitância Térmica [J/K]) e G são parâmetros fortemente relacionados com as propriedades do material e com a geometria do bolômetro.

- **Responsividade (\mathcal{R})**: é a relação entre o sinal de saída pela potência da radiação incidente [30, 95, 96].

$$R = \frac{\Delta tens\tilde{a}o}{\Delta pot\tilde{e}ncia} = \frac{\Delta tens\tilde{a}o}{E \times A_D} \quad [V/W] \quad (17)$$

onde,

$\Delta tens\tilde{a}o$: variaç\~ao da tens\~ao de sa\~ida do sensor [V];

E: irradi\~ancia [W/cm²];

A_D: \~area do detector [cm²];

- **Potencia Equivalente de Ru\~ido** - NEP: quando se avalia um bol\~ometro, a melhor figura de m\~erito para se determinar o NEP, deriva diretamente do ru\~ido da tens\~ao [36, 97, 98].

$$NEP^2 = NEP_{Fund\tilde{o}}^2 + NEP_{Sensor}^2 \quad (18)$$

onde:

$$NEP_{Sensor}^2 = NEP_{Fonons}^2 + NEP_{Johnson}^2 \quad (19)$$

portanto:

$$NEP^2 = \frac{4kTR}{S^2} + 4kT^2G + 8K\sigma(T^5 + T_B^5) \quad (20)$$

sendo:

k: Constante de Boltzmann (1,38 x 10⁻²³ J/K);

σ : Constante de Stefan-Boltzmann (5.67 x 10⁻⁸ [W m⁻² K⁻⁴])

- **Detectividade** (W⁻¹): este par\~ametro \~e calculado fazendo-se o inverso do NEP [99, 100]

$$D = \frac{1}{NEP} \quad [W^{-1}] \quad (21)$$

- **Detectividade Específica (D^*):** Uma importante medida de desempenho para que se possa comparar dispositivos de diferentes tamanhos e tecnologias é a detectividade específica (D^*). A detectividade específica pode ser calculada através da razão entre a responsividade R e o ruído da tensão [101-103]. Como pode ser visto na equação (22), há outra forma de se obter este parâmetro, levando em consideração a área do sensor, a banda passante e o NEP_{total} .

$$D^* = \frac{\sqrt{A \times B}}{NEP_{total}} \text{ [m Hz}^{1/2} \text{ W}^{-1}] \quad (22)$$

sendo,

A = área do sensor [m^2];

B = banda passante [Hz].

Capítulo 4

PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo, serão descritos todos os processos desenvolvidos neste trabalho, para a obtenção dos filmes (absorvedor, elemento ativo, isolantes térmicos e elétricos) assim como o processo completo para a integração destes filmes na formação do dispositivo bolométrico.

4.1 Obtenção de ouro negro para Absorção de Infravermelho Distante

Os metais evaporados em câmaras fechadas com um gás residual a uma pressão $7,5 \times 10^{-1}$ Torr, serão depositados como camadas porosas [104]. Estas camadas apresentam-se completamente negras no espectro visível, por isso são conhecidas com metais negros, e apresentam ainda boas propriedades de absorção para radiações que vão do espectro visível até o espectro infravermelho [105].

O processo mais utilizado nos laboratórios de fabricação de dispositivos para a obtenção de camadas de metais porosos é a evaporação destes metais em ambiente controlado de nitrogênio [104]. Neste trabalho as camadas a serem criadas foram baseadas na obtenção do ouro poroso. Essas camadas são obtidas utilizando-se reatores de evaporação térmica, conforme ilustrado na Figura 23. Este evaporador possui uma bomba de vácuo, que retira boa parte dos gases que podem contaminar o filme durante

a sua evaporação, sendo então o nitrogênio o único gás que compõe o ambiente interno de evaporação.

O nitrogênio é injetado através de uma válvula que controla a sua vazão, permitindo assim um controle do filme de ouro poroso obtido, principalmente no que tange o grau de porosidade deste filme, pois quanto maior for a vazão de nitrogênio, maior será a porosidade do filme obtido, chegando a um limite onde essa porosidade se torna excessiva, impedindo a sua utilização para os fins desejados. Este é um dos motivos da baixa resistência mecânica, tornando o filme extremamente frágil e não mais compatível com os processos utilizados.

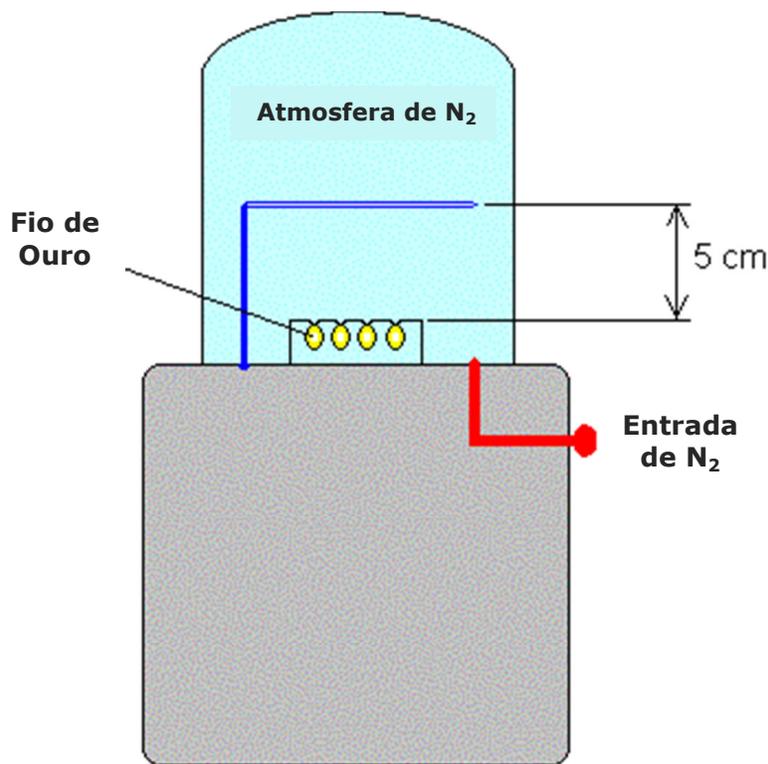


Figura 23 – Esquemático do evaporador utilizado na obtenção do ouro poroso.

O ouro a ser evaporado neste processo estava em forma de fio, com uma pureza de 99,999%. Inicialmente foi testada a “quantidade” de ouro que deveria ser utilizada para se obter uma camada uniforme e com as características visuais desejadas. Foram cortadas então três partes diferentes do fio de ouro, com os seguintes comprimentos: 5cm, 10cm e 15cm, para se obter de 60 a 80mg [104] de ouro.

Dos testes preliminares, os melhores resultados com relação à uniformidade, características mecânicas e nível de absorção de radiação infravermelha, foi o fio com comprimento de 10 cm. Então, vários testes de deposição foram realizados nestas condições a fim de se verificar a repetibilidade de produção da camada de ouro negro. Confirmada a repetibilidade deste processo de obtenção do filme, estes parâmetros passaram a ser adotados como padrão em todos os experimentos de evaporação seguintes.

Concluída a etapa preliminar que determinou a quantidade de ouro a ser utilizado, seguiu-se a etapa de caracterização da evaporação com relação a pressão interna da câmara. Este trabalho foi realizado com a intenção de se encontrar em qual condição de evaporação se obtém o melhor ouro poroso, com relação aos aspectos de absorção, reflexão e transmissão da radiação infravermelha incidente.

Foram utilizados substratos de silício, substratos de silício com uma camada de óxido de silício e substratos de silício cobertos com uma camada de nitreto de silício, a fim de avaliar se há alguma alteração no comportamento do ouro evaporado com relação a este substrato. O resultado obtido com a evaporação sobre a camada de nitreto de silício é a mais importante, pois corresponde a camada onde o ouro será depositado no dispositivo final.

No início de cada evaporação, a câmara foi submetida a um processo de vácuo, por pelo menos 8h, até se atingir a pressão de 1×10^{-6} Torr, com a finalidade de eliminar contaminantes que podem danificar o processo, alterando as condições de absorção do

filme obtido. Após esta etapa, o nitrogênio é inserido na câmara, até que se obtenha a pressão interna desejada sendo que após a estabilização da pressão, o sistema era mantido nesta condição por 10 minutos com a finalidade de reduzir gases residuais, principalmente o oxigênio, conhecido por diminuir a absorção das camadas de ouro poroso [104]. Então, as pressões de evaporação foram definidas como: 2×10^{-4} , 4×10^{-4} , 6×10^{-4} e 8×10^{-4} Torr.

Definidos os procedimentos, foram realizadas as evaporações com a finalidade de se investigar as camadas de ouro poroso obtidas. O fio de ouro de 10 cm foi colocado em uma resistência, distante 5 cm do suporte do substrato. Esta resistência é uma resistência de tungstênio, que é responsável pela evaporação do metal. O substrato foi fixado no suporte sendo que entre a resistência e o suporte existe um anteparo que só deve ser retirado no momento da evaporação.

A câmara é fechada e os procedimentos de vácuo e de injeção do nitrogênio são iniciados. Quando o ambiente da câmara atinge as condições estabelecidas, inicia-se o procedimento de evaporação. Com o anteparo posicionado entre o fio de ouro a ser evaporado e o substrato, é aplicada uma corrente controlada na resistência de tungstênio, com a finalidade de passar o ouro para o estado líquido e também eliminar impurezas que podem prejudicar a formação da camada porosa. O anteparo é retirado e a corrente que passa pela resistência de tungstênio é aumentada até um valor determinado fazendo com que a resistência tenha uma variação de temperatura grande e rápida, onde a evaporação do ouro ocorre.

No passo seguinte, o anteparo é colocado novamente entre a resistência e o substrato. O substrato já com a camada de ouro poroso é mantido na câmara em ambiente de nitrogênio por cerca de 15 min, para que ocorra a eliminação de impurezas dentro da câmara, principalmente resíduos de ouro que podem ser prejudiciais se inalados.

A câmara é aberta e o substrato é retirado, dando início a caracterização da camada de ouro depositada. Os resultados obtidos com relação às caracterizações dos filmes evaporados serão discutidos no capítulo 5 desta tese.

4.2 Fabricação de Bolômetros Suspensos para Infravermelho Distante

Após o desenvolvimento do absorvedor baseado no ouro negro, considerado como um dos itens mais importantes para o sucesso do trabalho e admitindo-se que ainda não havia um processo definido para a fabricação de um dispositivo bolométrico com os recursos disponíveis no Centro de Componentes Semicondutores da Unicamp, passou-se a estudar o processo de integração de todas as partes necessárias para a composição do sensor.

Várias formas geométricas de resistores para atuar como região ativa foram projetadas, para avaliar durante o desenvolvimento dos trabalhos qual se adequaria melhor. Nestas formas há variações de comprimento de resistores, de área de captação de radiação e de isolamento térmica.

A Figura 24 ilustra estas estruturas suspensas com diversas geometrias. De um modo muito simplificado, as partes representadas pela cor preta são as cavidades a serem corroídas a fim de tornar as estruturas suspensas, as partes em cinza representam a região ativa de silício policristalino e a formação das estruturas absorvedoras de ouro negro e as partes brancas representam o óxido de silício que faz a isolamento térmica e elétrica e no processo alternativo atua ainda com camada sacrificial. O nitreto de silício faz a isolamento elétrica entre o silício policristalino.

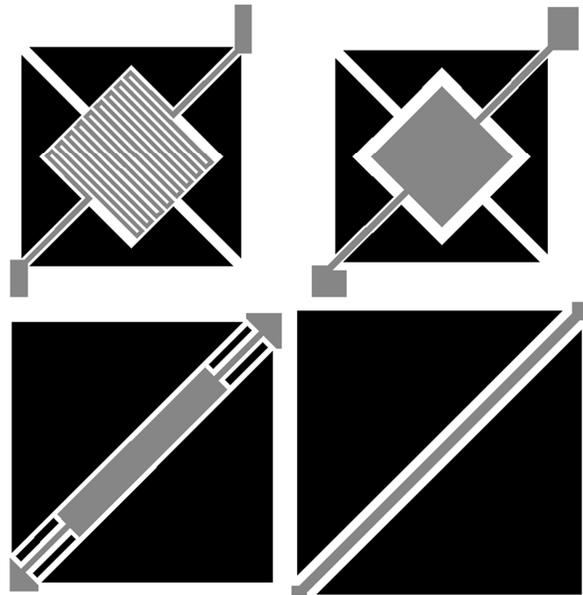


Figura 24 – Diversas formas geométricas empregadas nas fabricação dos sensores.

4.2.1 DESENVOLVIMENTO DE MÁSCARAS FOTOLITOGRAFICAS:

Foram desenvolvidos sete níveis de máscaras utilizadas em processos fotolitográficos, para que fabricação dos dispositivos fosse possível, sendo que cada etapa do processo necessita de uma máscara específica. Estas são responsáveis pela formação de estruturas em cada um dos filmes depositados e devem ter um alinhamento perfeito, para que não ocorram distorções ou falhas indesejadas, como por exemplo, formar uma camada de nitreto de silício defeituosa, que permitiria uma situação de contato elétrico entre o silício policristalino e o ouro poroso, danificando o dispositivo de forma permanente. Este dano permanente ocorre, pois como o ouro é um material condutor, ele colocaria o resistor de silício policristalino em curto circuito, fazendo com que a corrente de polarização não sofra mais variações de acordo com a radiação incidente. Ao se projetar estas máscaras, foi considerado o processo a ser utilizado para que, quando necessário, fossem feitas correções de compensações, principalmente para os casos de corrosão anisotrópica úmida.

A Figura 25 ilustra todos os níveis de máscaras fabricadas, como se estas estivessem superpostas. Pode-se observar que as nomenclaturas adotadas para diferenciar cada nível, aparecem da seguinte forma: SiPoli, Nitreto 1, Nitreto 2, Implantação – fraca, Implantação – forte, Alumínio e Absorvedor.

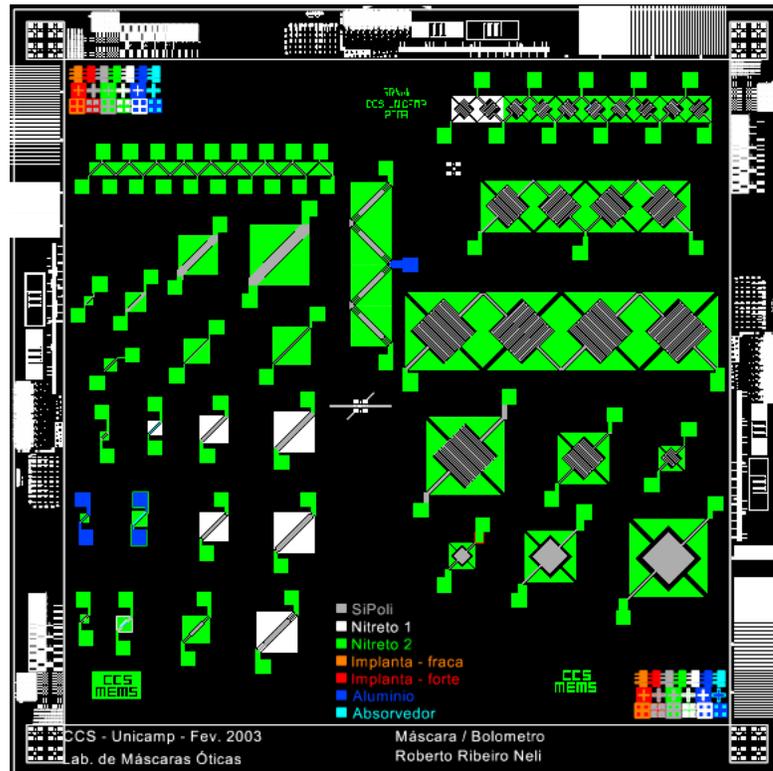


Figura 25 - Máscaras desenvolvidas para fabricação do bolômetro

A Figura 26 é uma ilustração que mostra todos os componentes que foram desenvolvidos neste trabalho, e que formam a estrutura suspensa de detecção de radiação. Fica evidente a formação de cada camada com seu respectivo material e também que a técnica utilizada é a de corrosão frontal do substrato.

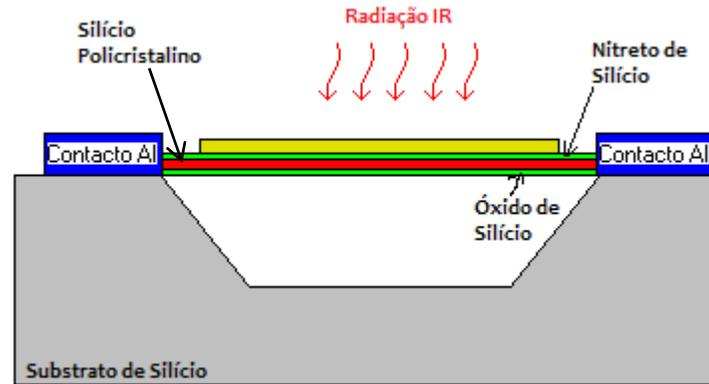
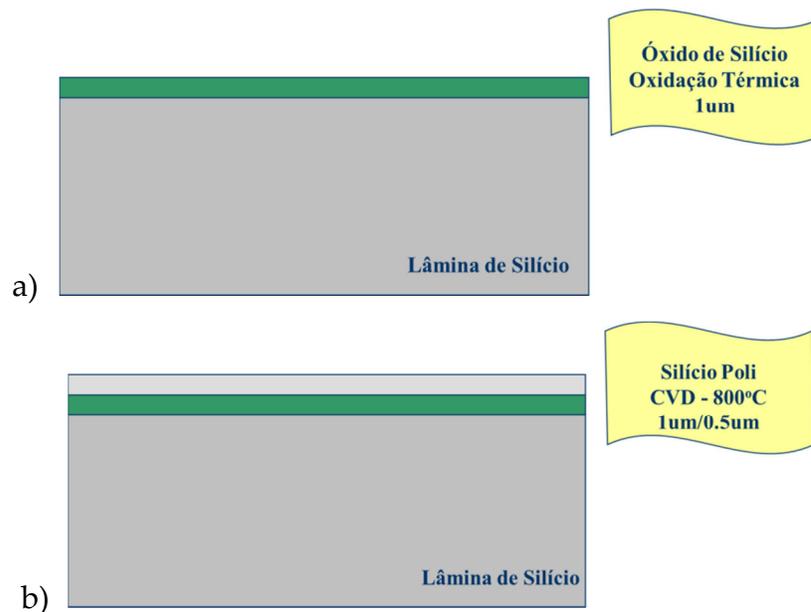
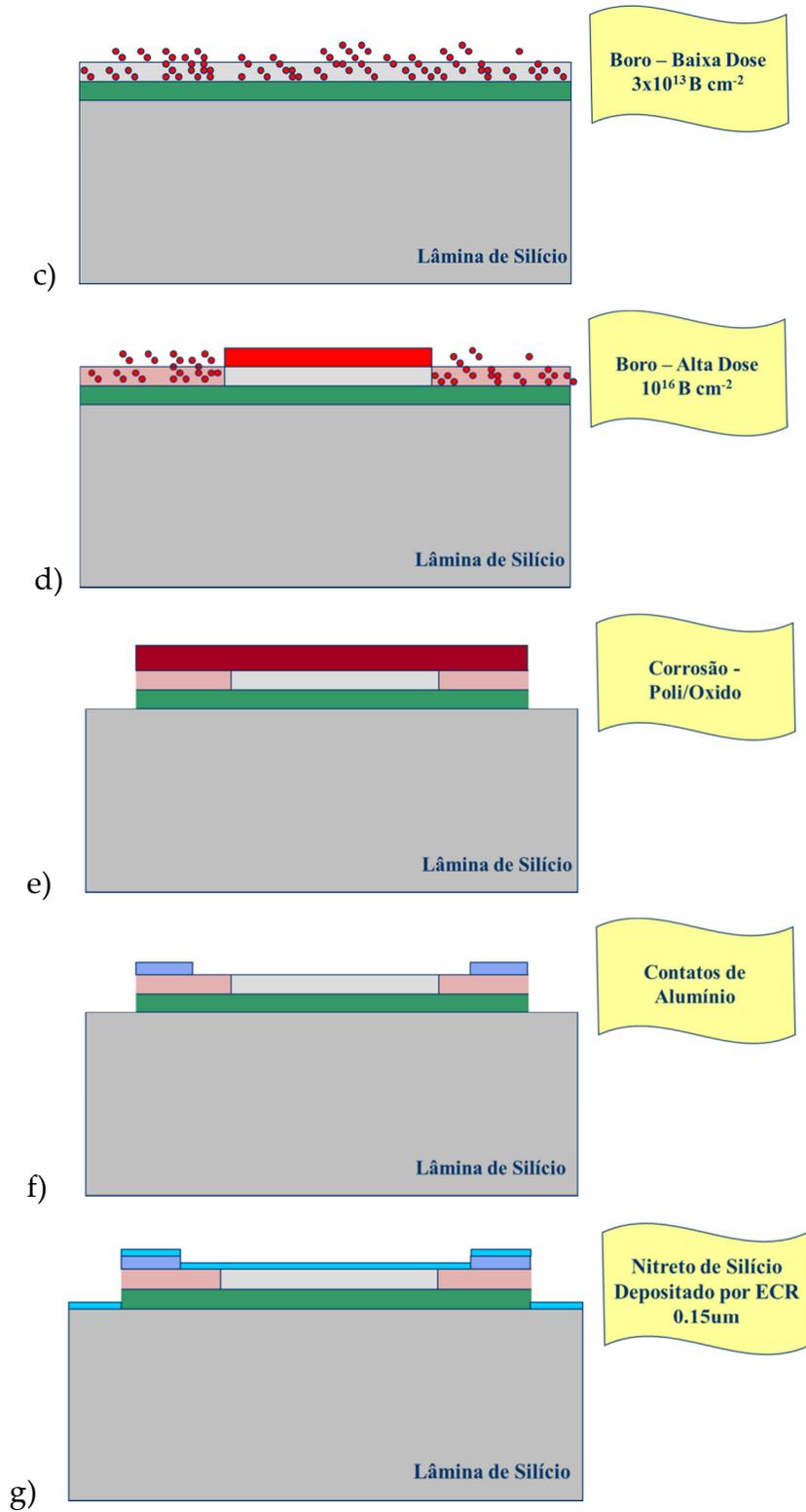


Figura 26 – Estrutura do microbolometro.

O sensor é formado por 5 materiais diferentes, sendo que cada um foi fabricado utilizando-se técnicas distintas e estas técnicas são todas totalmente compatíveis com os processos utilizados no CCS. A Figura 27 ilustra um esquemático com a sequência utilizada neste trabalho para a fabricação do sensor bolométrico, onde todas as etapas desenvolvidas neste trabalho são apresentadas de forma a facilitar o entendimento de cada processo utilizado.





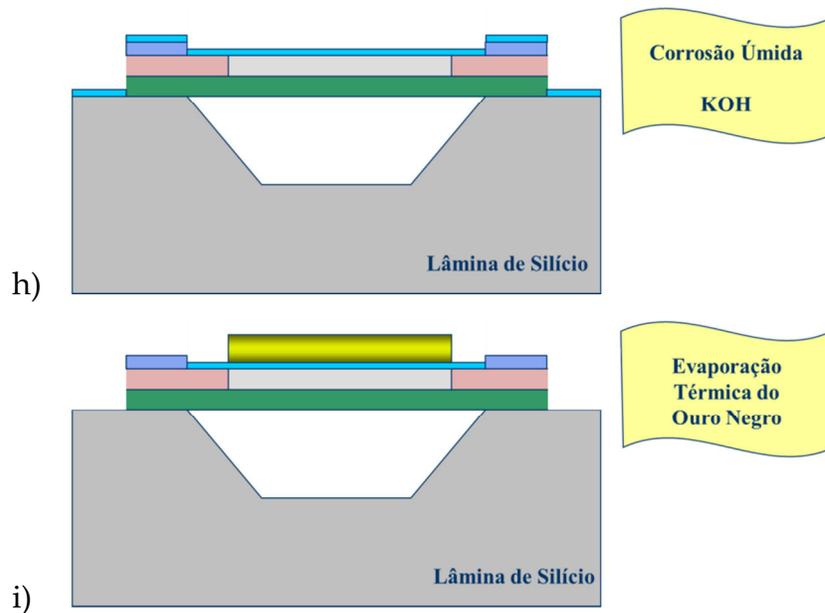


Figura 27 – Sequência de fabricação do sensor bolométrico.

4.2.2 OBTENÇÃO DO ÓXIDO DE SILÍCIO:

Na primeira etapa (Figura 27-a) tem-se a formação do óxido de silício, obtido através da oxidação úmida, que resulta em um filme de espessura bastante controlada e com ótimas características como isolante elétrico, além de ser um processo muito utilizado em fabricação de dispositivos eletrônicos.

O óxido obtido tem uma espessura de $1\mu\text{m}$ e tem como funções:

- Prover a isolação térmica e elétrica da camada resistiva, formada pelo silício policristalino;
- Proteger a camada resistiva contra corrosão do KOH, na etapa de criação do poço;
- Proteger o substrato de silício durante as implantações iônicas de boro;
- Atuar como camada sacrificial quando se utiliza o processo alternativo, sem a corrosão do substrato de silício em KOH. Neste caso, o óxido que

está imediatamente abaixo da parte resistiva ativa do sensor é retirado através de um processo de corrosão úmida, fazendo com que tenhamos uma região de isolamento térmico de $1\mu\text{m}$ entre esta parte ativa e a lâmina de silício. O dispositivo resultante deste processo está ilustrado na Figura 28.

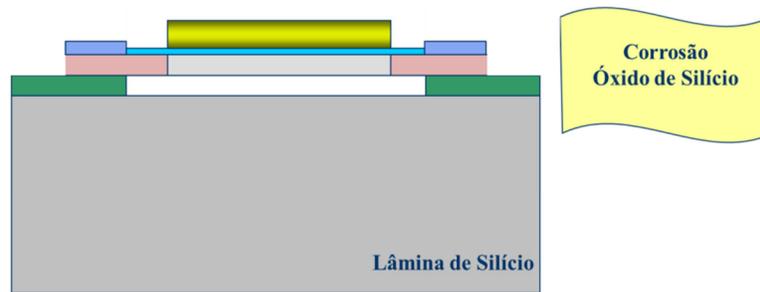


Figura 28 – Corrosão do óxido de sacrifício.

Basicamente, o óxido de silício térmico é obtido, inserindo-se as lâminas de silício em fornos térmicos convencionais a uma temperatura de 1.000°C , submetido a um ambiente de vapor de água (H_2O) e oxigênio (O_2), sendo ambos agentes oxidantes no processo. Este gás é aquecido pela energia térmica dissipada pela resistência elétrica que envolve o tubo de oxidação, conforme ilustrado na Figura 29. A foto mostrada na Figura 30 ilustra as lâminas de silício prontas para a oxidação úmida no forno térmico convencional.

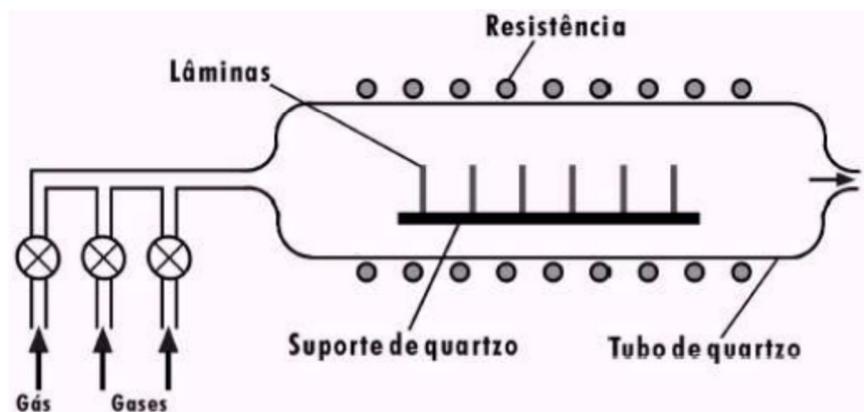


Figura 29 – Esquemático do forno térmico convencional ^[106].

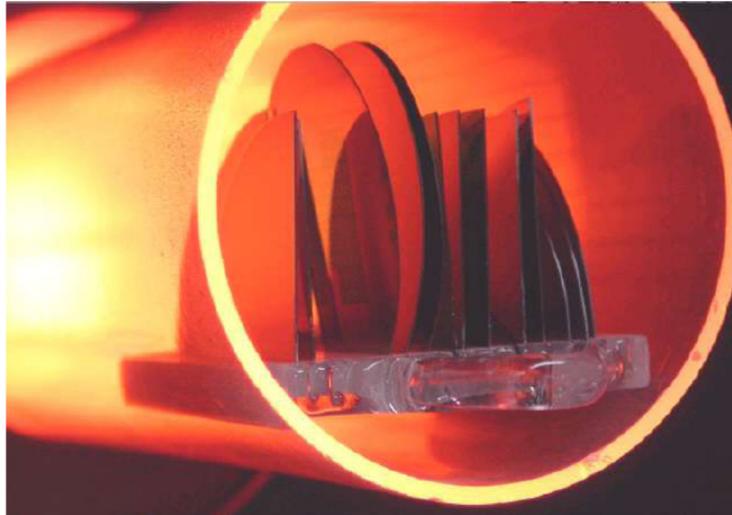


Figura 30 – Lâminas de Si colocadas em forno térmico convencional ^[107].

4.2.3 OBTENÇÃO DO SILÍCIO POLICRISTALINO:

Na etapa seguinte, foi realizada a deposição do filme de silício policristalino, que é responsável pela formação do resistor ativo e dos pontos de contato do dispositivo bolométrico. A Figura 27–b ilustra esta parte do processo. Esta deposição é realizada diretamente sobre o óxido térmico, crescido na etapa anterior. Entende-se como parte ativa como sendo a parte que tem suas características alteradas quando submetida a uma variação de temperatura. Então, o ouro poroso absorve a radiação infravermelha e aquece, aquecendo também o resistor ativo, que tem seu valor de resistência alterado. Partindo desta premissa, se submetermos este resistor a uma tensão elétrica, podemos medir a variação da corrente circulante em função da variação deste resistor, portanto, podendo quantificar a radiação incidente.

Neste trabalho, o filme foi obtido utilizando-se a técnica de deposição química a vapor em um reator LPCVD vertical, sendo que a deposição ocorre dentro de uma câmara em ambiente de vácuo, sendo que é inserida uma mistura do gás silana (SiH_4) com hidrogênio (H_2), num ambiente aquecido a 800°C .

Outra opção de deposição seria a utilização de um reator LPCVD horizontal, que tem a característica de apresentar altos índices de produtividade, podendo processar até 200 lâminas de uma única vez, além de apresentar uma boa cobertura de degrau e uma boa uniformidade do filme obtido. Estes fatores tornam a técnica LPCVD uma das mais utilizadas na indústria de microeletrônica [108]. Este processo é controlado a partir de vários parâmetros, sendo os que causam maior influência na deposição são: pressão, temperatura, gás de arraste e o fluxo de SiH₄ [108, 109]. Estes parâmetros alteram algumas das características específicas do processo de deposição do silício policristalino, principalmente a fase de nucleação, a velocidade da reação e o tamanho do grão ao final do processo [108].

Foram depositados filmes com três espessuras diferentes, para que fosse possível avaliar a que melhor se adequaria a aplicação desejada, sendo elas 0,5µm; 1,0µm e 2,0µm. As duas maiores preocupações na avaliação da espessura ideal é com relação a estabilidade mecânica das estruturas suspensas e com os valores de TCR obtidos. As condições utilizadas nestes processos de deposição são mostradas a seguir, na Tabela 3, onde as condições de controle são a temperatura, o tempo de deposição, a pressão e os fluxos dos gases SiH₄ e H₂.

Tabela 3. Parâmetros de Processo para a deposição do Silício Policristalino.

Parâmetros Espessura	Tempo	Fluxo SiH ₄	Fluxo H ₂	Temperatura	Pressão
	0,5 µm	7 min	40 SCCM	4800 SCCM	800°C
1,0 µm	14 min	40 SCCM	4800 SCCM	800°C	5 Torr
2,0 µm	28 min	40 SCCM	4800 SCCM	800°C	5 Torr

A dopagem do filme de silício policristalino pode ser obtida *in situ* ou através de implantação iônica. A dopagem *in situ* é obtida no momento de crescimento do filme, onde o material dopante é adicionado à câmara, juntamente com a silana e o nitrogênio, mas dependendo do tipo do dopante utilizado, este pode interagir de forma não desejada com os outros reagentes, resultado em filme com características indesejáveis [108]. Outra alternativa é a implantação iônica, que se apresenta como um processo mais preciso no que tange a dose de implantação desejada. Pelo fato de haver dois níveis de dopagem no resistor ativo deste trabalho, sendo uma na formação dos contatos e outra para ajuste da resistência da parte ativa propriamente dita, a técnica de implantação iônica foi escolhida para ser utilizada.

4.2.4 IMPLANTAÇÃO IÔNICA DE BAIXA DOSE:

Então, segue o passo ilustrado na Figura 27-c, onde a camada de silício poli sofre uma implantação iônica de boro. Esta implantação é considerada de baixa dose, sendo realizada com 3×10^{13} B cm⁻² a uma energia de 40 keV, com a intenção de se obter a resistividade e o TCR desejados para este dispositivo. As regiões delimitadas com esses níveis de dopagem formam as regiões ativas, já citadas anteriormente.

4.2.5 IMPLANTAÇÃO IÔNICA DE ALTA DOSE:

No próximo passo, temos uma implantação de boro de alta dose, mas agora, somente algumas áreas do silício poli serão atingidas por esses íons, sendo que as partes que formam a região ativa são protegidas, para impedir a penetração destes íons de boro (Figura 27-d). A dose de boro utilizado neste processo é de 10^{16} B cm⁻² a uma energia de 40 keV. Estas regiões tornam-se condutores com baixíssima resistividade, e

são utilizadas para acomodar os *pads* de contato. A proteção desta etapa é realizada com fotorresiste, que é removido com acetona ao final desta etapa.

4.2.6 CORROSÃO DO SILÍCIO POLICRISTALINO:

Agora, conforme ilustrado na Figura 27-e, foi realizada a corrosão da camada de silício poli, com a finalidade de formar as estruturas básicas do bolômetro, conforme desenhado nas máscaras iniciais. Com o objetivo de se determinar qual processo seria o mais adequado na corrosão deste material, foram utilizadas duas técnicas diferentes:

- A corrosão úmida utilizando uma solução de $\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}:\text{HF}$;
- A corrosão por plasma utilizando uma mistura gasosa que forma o $\text{SF}_6:\text{CF}_4:\text{CHF}_3$.

Em ambos os processos foi utilizado o procedimento fotolitográfico padrão, onde as partes desejadas foram protegidas com o fotorresiste e as partes a serem corroídas, o fotorresiste foi retirado.

Para o caso da corrosão úmida, foi utilizado o fotorresiste 1350 que apresenta a resistência necessária para este processo, e após alguns pré-testes de corrosão, chegou-se a um tempo de 7 min a temperatura ambiente. Após a corrosão do silício poli, as lâminas foram devidamente lavadas em água deionizada e álcool isopropílico (IPA) a fim de remover toda a solução corrosiva, sendo que depois foram secas em um forno apropriado a uma temperatura de 80°C por 30 min. Esta etapa de secagem tem por finalidade eliminar todos os resíduos de água deionizada e de IPA.

Já para o caso de corrosão por íons reativos, foi utilizado o fotorresiste 5214, sendo que as lâminas foram corroídas utilizando-se uma potência de 50W, uma pressão

de 8×10^{-2} Torr e uma tensão de polarização de 180V, onde a taxa de corrosão obtida foi na ordem de 16,67 nm/min.

4.2.7 EVAPORAÇÃO DO ALUMÍNIO DE CONTATO:

Dando continuidade ao processo, tem-se agora o ilustrado pela Figura 27-f, sendo que é realizada a formação dos pontos de contato ou *pads*. Estes são os pontos que permitem o acesso dos dispositivos ao mundo exterior e são comumente feitos utilizando-se evaporação de alumínio. Neste processo, o procedimento fotolitográfico utilizado é o conhecido como *lift-off* sendo que é realizada uma gravação invertida, ou seja, a borda do fotorresiste apresenta um inclinação, conforme ilustra a Figura 31. Então, o alumínio é evaporado sobre toda a lâmina, sendo que as bordas inclinadas do fotorresiste ficam expostas.

Depois esta lâmina é colocada em um recipiente com acetona, sendo que a acetona atinge estas áreas expostas do fotorresiste e o dissolve. Com isso a camada de alumínio que estava sobre este fotorresiste se desprende e é retirada da lâmina, ficando apenas o alumínio diretamente evaporado sobre o silício policristalino. Ao termino deste processo, já termos o resistor fabricado, pronto para ser medido e caracterizado.

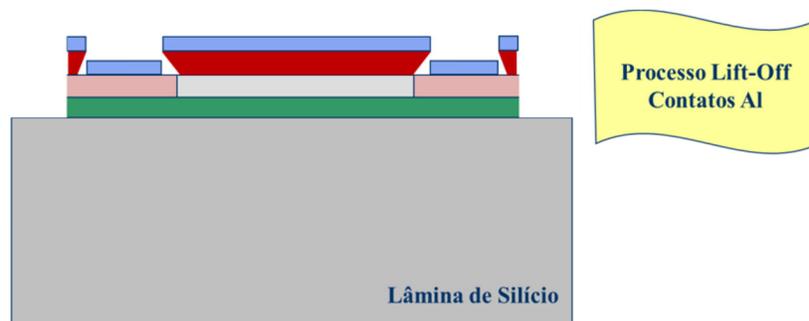


Figura 31 – Processo fotolitográfico *lift-off*.

Agora, serão apresentadas as três últimas etapas, que foram desenvolvidas para tornar este resistor construído capaz de medir radiações infravermelhas, sem a necessidade de um resfriamento externo. Estas etapas são então direcionadas à criação de um absorvedor para a radiação desejada e à suspensão das estruturas resistivas, para que estas fiquem termicamente isoladas.

4.2.8 OBTENÇÃO DO NITRETO DE SILÍCIO:

Na primeira destas três últimas etapas, tem-se a deposição do filme de nitreto de silício, conforme ilustrado na Figura 27-g. Uma fina camada deste filme é depositada pela técnica RT/RPCVD (*Rapid Thermal / Remote Plasma Chemical Vapor Deposition*), com uma espessura fina de 0,15 μ m e esta camada é posteriormente corroída para a formação de estruturas através do processo litográfico padrão. Para o dispositivo em estudo, esta camada assume dupla função:

- Proteger as estruturas já fabricadas durante a corrosão do silício para a formação dos poços. Como a técnica utilizada neste trabalho para a obtenção das estruturas suspensas é a corrosão do substrato pela parte frontal, o nitreto de silício também tem a função de proteger a parte posterior do substrato;
- Isolar eletricamente o silício policristalino da camada de ouro poroso.

A escolha do nitreto de silício foi feita devido ao fato da baixa taxa de corrosão deste filme quando submetido ao hidróxido de potássio e também por ter um ótimo comportamento como isolante elétrico, mesmo para filmes com espessuras tão pequenas [98]. Outras características importantes apresentadas pelo nitreto de silício, é que ele

apresenta boa rigidez mecânica, é relativamente elástico e não pode ser facilmente quebrado, portanto, serão obtidas estruturas suspensas mais resistentes e com capacidade de sofrer pequenas deformações transitórias, voltando ao seu aspecto original sem nenhuma deformação residual [44]. O processo de obtenção deste filme é padrão ao utilizado na fabricação de circuitos integrados, e foi obtido utilizando-se as condições apresentadas na Tabela 4, sendo que as variáveis de controle são temperatura, pressão, tempo de deposição e fluxos dos gases N_2 , SiH_4 e Ar.

Tabela 4. Parâmetros de processo para deposição do filme de nitreto de silício [44].

Variáveis	Valor
Pressão	1,4 Torr
Temperatura	200°C
Fluxo de N_2	5 sccm
Fluxo de SiH_4	200 sccm
Fluxo de Ar	20 sccm

4.2.9 CORROSÃO DO SUBSTRATO EM KOH:

A seguir, foi realizado o passo ilustrado na Figura 27-h, que resulta na corrosão do substrato de silício em solução aquosa de hidróxido de potássio. As lâminas de silício passaram então por um processo de fotolitografia sendo que foi aplicado um fotorresiste e foram abertas “janelas” no filme de nitreto de silício somente nos locais que se desejava fazer a corrosão [44]. A solução de KOH, numa concentração de 10M, foi pré-aquecida a uma temperatura de 80°C e só então as lâminas de silício foram inseridas. As

condições de concentração e temperatura foram determinada em trabalhos preliminares, para se obter a menor rugosidade possível, com uma boa taxa de corrosão. O tempo de corrosão foi de 40 minutos sendo que obteve-se poços com profundidade máxima de $50\mu\text{m}$ e mínima de $15\mu\text{m}$, sendo que essa diferença de profundidade é determinada pelo tamanho das estruturas, ou seja, quanto menor as estruturas, menor é a profundidade pois as paredes formadas com um ângulo de aproximadamente 54° se encontram, e interrompem a corrosão. A Figura 32 ilustra a relação entre o tamanho da estrutura e a profundidade do poço obtido.

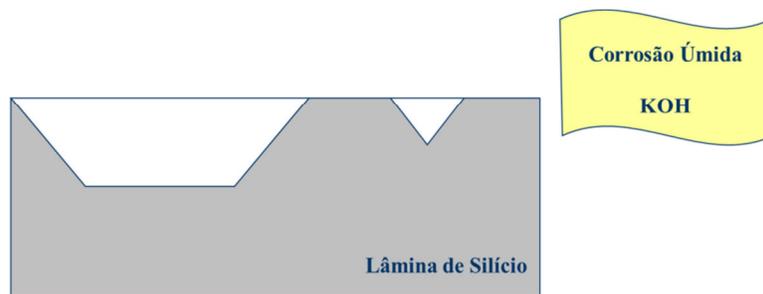


Figura 32 – Relação profundidade do poço X Tamanho da estrutura.

4.2.10 EVAPORAÇÃO DO OURO POROSO:

A Figura 27-i ilustra a parte final da fabricação do sensor, compreendida pela deposição do ouro poroso. O processo utilizado aqui é o mesmo do utilizado na evaporação do alumínio (*lift-off*), mas com algumas adaptações. O desenvolvimento destas adaptações foi necessário, pois o filme de ouro poroso evaporado apresenta uma grande espessura, se comparado com as espessuras dos filmes utilizados até aqui. Como o filme de ouro é espesso, mesmo com a fotogração negativa, o fotorresiste fica encoberto pelo ouro nas partes onde a acetona deve entrar para dissolver o fotorresiste, conforme pode ser observado na Figura 33.

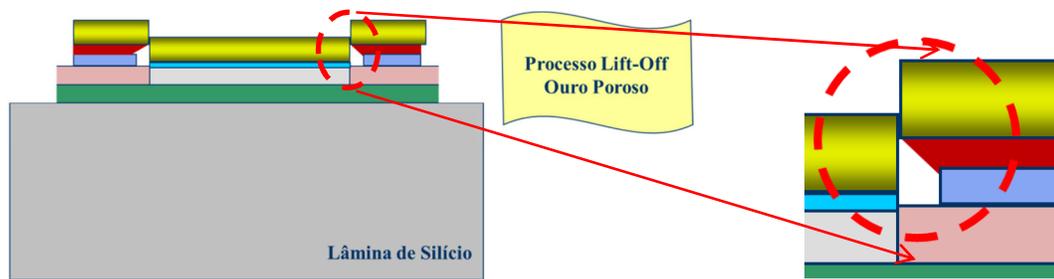


Figura 33 – Processo *lift-off* para ouro poroso.

Então, foi desenvolvida uma técnica para permitir que a acetona atingisse o fotorresiste. As lâminas de silício foram então mergulhadas em uma cuba de ultrassom, preenchida com acetona. O ultrassom promove esse acesso necessário para que o ouro poroso seja eliminado das partes onde este é indesejado. Esse processo de ultrassom deve ser utilizado por um tempo de 5 a 7 segundos, sendo que a partir destes tempos o ouro se desprende em todos os pontos onde ele foi evaporado.

Com a finalidade de melhorar a aderência do ouro poroso na camada de nitreto de silício, foi realizado um processo adicional. Foi evaporada uma camada de titânio com espessura de 100 Å e outra de ouro, também com espessura de 100 Å, pois pode-se observar que em testes de corrosão do substrato de silício em KOH o filme de ouro poroso perdia a aderência ao filme de nitreto de silício [44]. Os filmes de titânio e ouro foram obtidos através de um reator de evaporação *e-beam*, em ambiente de alto vácuo e estas camadas mostraram ser a solução para o problema de falta de aderência do ouro poroso. Em novos testes realizados em uma solução de KOH com uma concentração de 10M, onde as lâminas de silício foram submetidas a uma corrosão a uma temperatura de 80°C por um tempo de 40 min, as estruturas de ouro poroso se mostraram intactas e não foram destruídas. Estas duas camadas incorporadas ao processo contribuem ainda para um aumento de absorção da radiação, pois parte da radiação incidente que atravessaria completamente o ouro poroso, são refletidas por essas camadas, voltando ao elemento absorvedor, podendo agora ser absorvido por ele.

Capítulo 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo é dedicado a mostrar e discutir os resultados obtidos com o desenvolvimento dos filmes e dos processos, e também os resultados das medições, feitas para avaliação dos sensores fabricados. Todos os processos e medições foram realizados nos laboratórios do CCS – Unicamp.

Seguindo uma ordem cronológica de como este trabalho fora desenvolvido, inicialmente serão apresentados os resultados e discussões do processo de obtenção e análise da camada obtida de ouro negro, sendo esta uma das partes de maior importância do trabalho desenvolvido, pois grande parte do desempenho do sensor bolométrico obtido depende diretamente das características deste filme, principalmente com relação a absorção de infravermelho e a aderência deste nos substratos utilizados. Na sequência a discussão será baseada no desenvolvimento do processo para a construção do sensor bolométrico, onde o foco principal foi a integração de todos os processos de fabricação e também na obtenção dos resistores de silício policristalino na formação do material ativo. E finalmente será realizada uma análise do desempenho destes dispositivos fabricados, quando submetidos a uma radiação de infravermelho distante, apresentando os principais parâmetros que qualificam estes sensores com relação ao seu desempenho na detecção de radiação.

5.1 – Deposição e Análise do Ouro Negro

A condutividade elétrica da camada de ouro negro tem uma dependência direta com os parâmetros utilizados na evaporação do ouro. Esta condutividade pode ser fortemente reduzida quando houver a influência de gases inseridos na atmosfera de evaporação. Neste trabalho o gás escolhido para exercer esta função é o nitrogênio (N_2). A escolha deste gás se dá principalmente pela propriedade que este apresenta de ser inerte a reação com outras substâncias utilizadas nesta evaporação.

A Figura 34 ilustra a relação obtida pela resistência de folha versus pressão de deposição, sendo que pode ser observado que a resistência de folha da camada de ouro poroso evaporada diminui de forma diretamente proporcional com o aumento da pressão. Isto ocorre devido ao grau de porosidade do filme, ou seja, quanto maior é a pressão de evaporação, mais poroso é o filme de ouro, pois o contato elétrico entre os átomos diminui, dificultando assim a passagem da corrente elétrica por ele. De forma resumida, tem-se que a consequência destes fenômenos é que a sua resistividade aumenta ou diminui, de acordo com a pressão de evaporação escolhida e do fluxo de nitrogênio que é injetado na câmara de evaporação. Do resultado apresentado pelo gráfico da Figura 33, pode-se concluir que as colisões que ocorrem entre os átomos de ouro evaporados e as moléculas de nitrogênio aumentam quando a pressão no interior da câmara aumenta. Devido a estas colisões, os átomos de ouro evaporados termicamente, perdem energia cinética e quando atingem a superfície onde serão depositados, a energia é muito baixa para que este átomo se mova por esta superfície. Então, este átomo se prende ao primeiro contato com a superfície, formando assim o filme poroso. Outro fenômeno que contribui para a porosidade do filme é que, na colisão do átomo de ouro com a molécula de nitrogênio, além da perda de energia este átomo de ouro segue em trajetória aleatória, sendo que cada átomo atinge a superfície

com um ângulo de incidência e com uma energia diferentes. A deposição do ouro negro ocorre então através da formação de aglomerados irregulares.

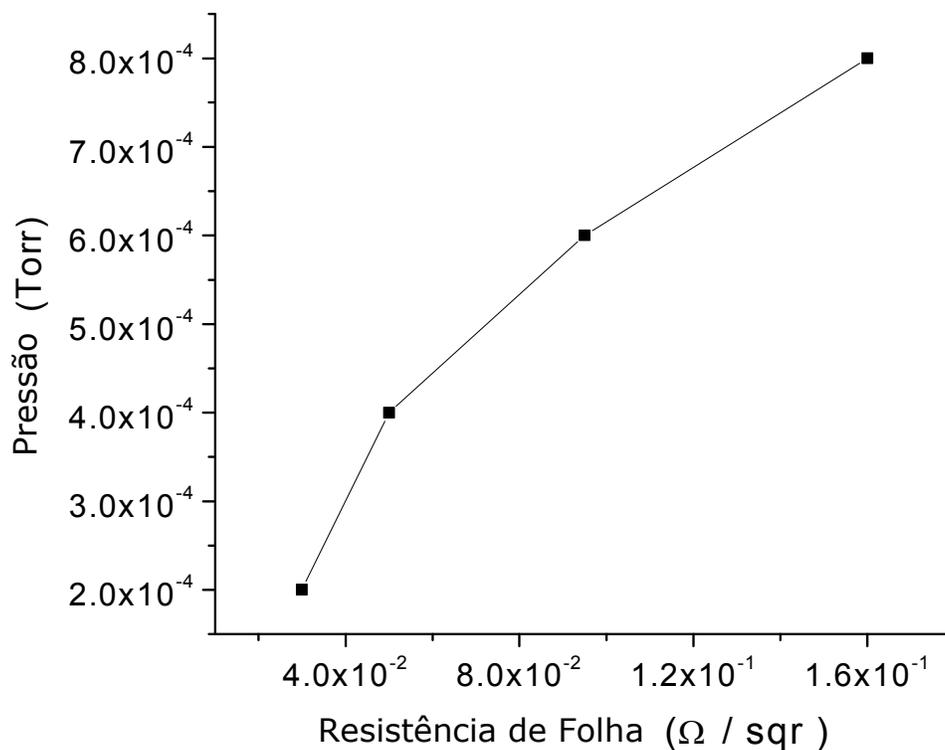


Figura 34 – Resistência de folha X Pressão de deposição.

A Figura 35 e a Figura 36 mostram duas micrografias SEM de amostras de ouro negro obtidos a uma pressão de evaporação de 8×10^{-4} Torr. A primeira figura ilustra a vista superior da amostra com um aumento de 25.000 vezes, e a segunda ilustra a vista lateral do ouro negro com um aumento de 22.000 vezes; e ambas com um nível de energia de 25kV.

Estas micrografias mostram claramente as características da superfície e a formação das estruturas porosas de ouro negro. As estruturas porosas de ouro obtidas utilizando as condições experimentais citadas formam estruturas esféricas ou parecidas

com uma “couve-flor”, apresentando diâmetros que variam na faixa de 0,1 a 1 μm . Estas estruturas esféricas são compostas por partículas de ouro com dimensões nanométricas. Observa-se a formação de grandes espaços vazios e a diferença de tamanhos entre os aglomerados, e na vista lateral, a desuniformidade de altura destas estruturas. Analisando de forma mais meticulosa os próprios aglomerados, pode-se observar que dentro destes, também aparecem muitos “espaços vazios”. Fica evidente que o filme de ouro negro apresenta uma porosidade relativamente elevada e ainda assim apresenta uma estrutura física resistente para que possa ser posteriormente transferido ao processo de fabricação para a formação do sensor de infravermelho desejado. Será então esta porosidade que garantirá uma baixa reflexão e uma alta absorção da radiação incidente cujo objetivo final é medir a intensidade desta radiação, expressando esta intensidade através de uma variação de corrente.

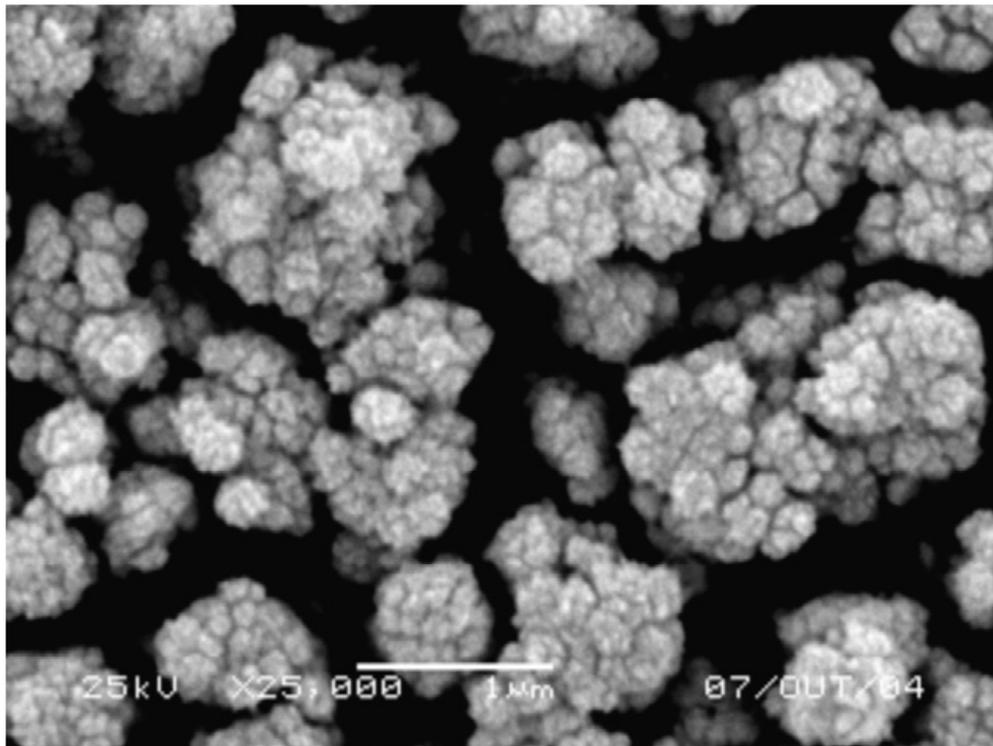


Figura 35 – SEM da vista superior da camada de ouro negro, ilustrando as características da superfície e a formação de estruturas porosas, parecidas com uma couve-flor.

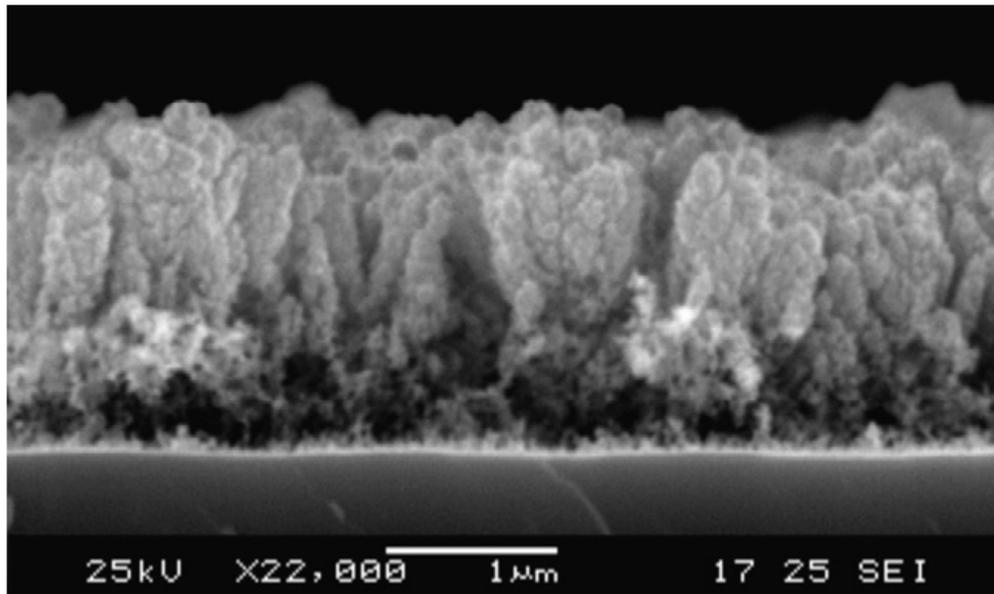


Figura 36 – SEM da vista lateral da camada de ouro negro, ilustrando as formações porosas.

Um parâmetro importante a ser conhecido para se estudar o ouro poroso é a densidade da camada evaporada. A densidade desta camada pode ser estimada com base na área da superfície ocupada, pela medição da espessura e pela massa desses filmes. A massa do ouro negro depositado sobre o substrato de silício pode ser determinada pela pesagem deste substrato em uma balança de precisão, antes e depois da evaporação do ouro. A massa obtida para um filme de ouro negro depositado a pressão de 8×10^{-4} Torr foi de $700 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, onde determinou-se que a espessura da camada é de aproximadamente $2\mu\text{m}$, que foi confirmada pela análise da Figura 36.

Tem-se que a medida de espessura realizada de modo indireto, através da massa do ouro negro, fornece um resultado muito mais preciso do que a medida de espessura feita de modo direto na micrografia SEM.

A densidade obtida para esta camada foi de $\rho_{\text{ON}} = 3.50 \text{ g}/\text{cm}^3$ sendo que a densidade do ouro conhecido como “ouro bulk” é de $\rho_{\text{O}} = 19.31 \text{ g}/\text{cm}^3$. A relação entre a densidade obtida no filme evaporado com relação ao ouro, fornece uma medida de

compactação desta camada e este é um parâmetro conhecido como fator de cobertura (f_c), que é dado por [110]:

$$f_c = \frac{\rho_0 n}{\rho} \quad (23)$$

Para o caso deste filme obtido através de condições específicas, foi obtido um f_c com valor de 0,181.

Então, a porosidade do filme pode ser estimada utilizando a seguinte relação:

$$Porosidade = (1 - f_c) \times 100 \quad (24)$$

Através do cálculo obtido pela utilização da equação (24), encontra-se uma porosidade para o filme analisado de aproximadamente 82% para as amostras obtidas a pressão de 8×10^{-4} Torr, sendo este dado um indicativo de que o filme de ouro negro possui uma porosidade extremamente elevada se comparada com o filme de ouro *bulk*.

A Tabela 5 foi construída utilizando-se os cálculos de fator de cobertura e porosidade estimada e mostra a relação entre pressão de deposição, a massa do ouro, a espessura da camada, a densidade do filme obtido, o fator de cobertura e a porosidade estimada [110]. Aqui fica evidente a influência que a pressão de evaporação exerce nas propriedades das camadas de ouro negro obtidas, ou seja, de acordo com a porosidade na qual este filme é evaporado, obtêm-se variações diretas com relação a espessura, densidade e conseqüentemente no fator de cobertura.

Tabela 5. Dependência da massa, densidade, espessura, fator de cobertura e da porosidade estimada dos filmes de ouro negro com relação à pressão de deposição.

Pressão de Deposição (Torr)	Massa ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	Espessura (μm)	Densidade ($\mu\text{g}/\text{cm}^3$)	Fator de Cobertura (f)	Porosidade Estimada (%)
2×10^{-4}	551	0,80	6,86	0,355	64,5
4×10^{-4}	590	1,06	5,57	0,288	71,2
6×10^{-4}	647	1,20	5,39	0,279	72,1
8×10^{-4}	700	2,00	3,50	0,181	81,9
10×10^{-4}	749	3,12	2,40	0,124	87,6

Pode-se concluir que o fator de cobertura decresce com o aumento da pressão de deposição, portanto, as camadas de ouro poroso fabricadas em baixas pressões são mais compactadas, ou seja, tem baixa porosidade.

Em uma análise mais precisa pode-se ver com maior clareza através do gráfico ilustrado na Figura 37 a relação entre a pressão de evaporação e o fator de cobertura. A porosidade das camadas analisadas variaram dentro de uma faixa de 64,5% a 87,6% e a espessura das mesmas teve uma variação na faixa de 0,80 μm a 3,12 μm , para amostras preparadas nas pressões de evaporação de 2×10^{-4} Torr e 10×10^{-4} Torr, respectivamente. A alta porosidade apresentada na superfície da amostra de ouro negro, depositado em alta pressão, apresentou uma grande rugosidade superficial com uma fraca coalescência entre os aglomerados e com falhas na cobertura do substrato, sendo que estas áreas sem cobertura não atuam como absorvedor de radiação, fazendo com que esta camada tenha uma baixa eficácia de absorção. Este problema é causado pelo grande número de colisões dos átomos de ouro com as moléculas de nitrogênio, pois para atingir essa pressão mais elevada o nitrogênio é injetado com um fluxo maior, fazendo com que

estes átomos cheguem com uma energia extremamente baixa ou nem cheguem à superfície do substrato, causando então esta falha de cobertura.

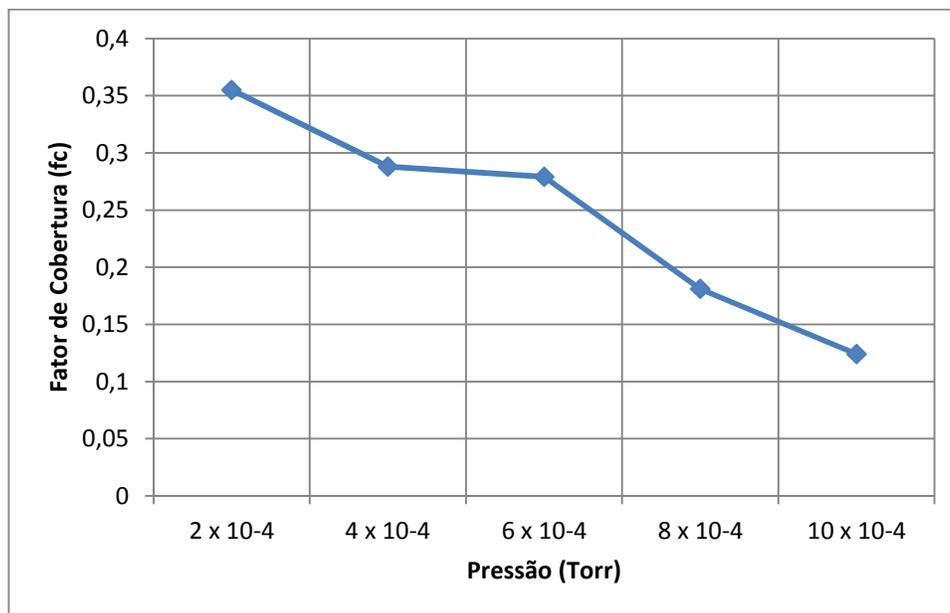


Figura 37 – Relação entre Pressão e Fator de Cobertura.

5.1.1 ANÁLISES FTIR:

Assim, todas as amostras obtidas nesta condição de alta pressão foram eliminadas das análises de absorção e refletância. Para se avaliar as outras amostras obtidas em condições diferentes da citada logo acima, foi utilizada a técnica de espectroscopia de infravermelho. Foram analisadas a absorção, a reflexão e a transmissão em função do espectro de número de onda (número de onda $\rightarrow k = 1/\lambda$, onde λ é o comprimento de onda), para várias amostras preparadas em diferentes pressões, utilizando um Espectrômetro em Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR). Nesta técnica de análise, um feixe de luz infravermelha é produzido e dividido em dois raios separados. Um passa pela amostra, e o outro por uma referência que é normalmente a substância

na qual a amostra está dissolvida ou misturada. Ambos os feixes são refletidos de volta ao detector, porém primeiro eles passam por um divisor que rapidamente alterna qual dos dois raios entra no detector. Os dois sinais são comparados e como resultado desta comparação, tem-se os dados coletados.

A Figura 38–A e Figura 38–B ilustram, respectivamente, as análises de absorção e transmissão realizadas em um FTIR na amostra de ouro poroso obtida na pressão de 8×10^{-4} Torr, onde pode-se observar que a absorção apresentada foi de 80%, a transmissão foi praticamente 0%, resultando numa reflexão de 20%. Estes resultados sugerem que este filme apresenta as características procuradas e necessárias para que este atue como um bom absorvedor, pois esta alta absorção apresentada irá garantir que a maior parte da radiação incidente será absorvida, resultando então em uma maior variação de temperatura no elemento sensível, permitindo que se obtenha uma medição mais confiável e precisa. Esses filmes apresentam ainda uma boa resistência mecânica aos processos de fabricação utilizados na obtenção do sensor e apresenta uma completa cobertura da superfície onde está sendo evaporado.

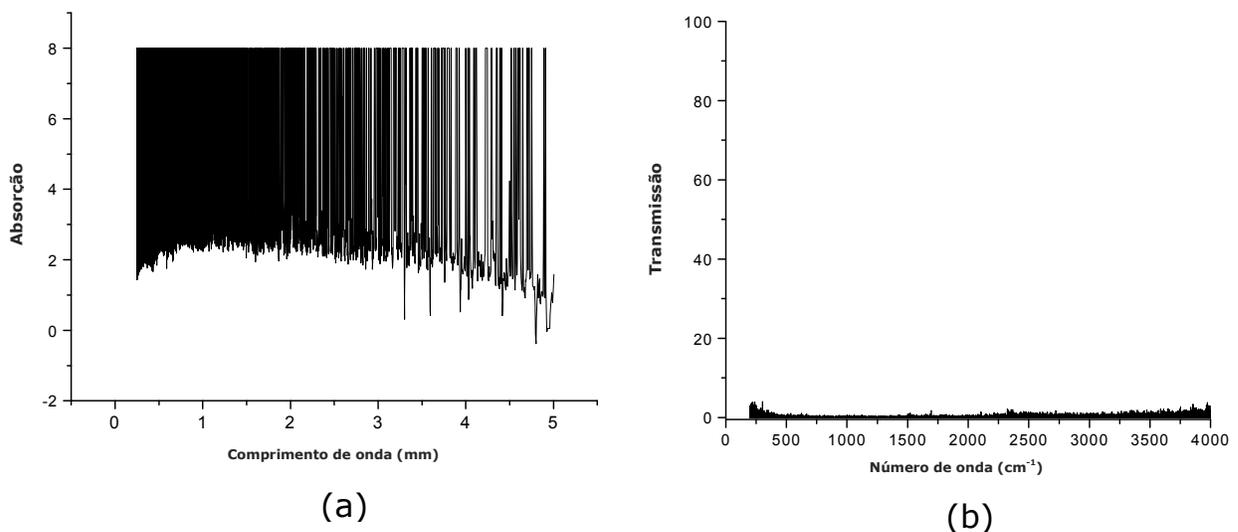


Figura 38 – Análise FTIR de ouro negro evaporado na pressão de 8×10^{-4} Torr.

A Figura 39–A e a Figura 39–B ilustram, respectivamente, as análises de absorção e reflexão em FTIR da amostra obtida numa pressão de evaporação de 2×10^{-4} Torr, onde pode-se observar uma absorção de 20% para a maioria dos comprimentos de ondas analisados, uma transmissão de aproximadamente 0% e uma reflexão resultante de 80%. O propósito destas análises é de avaliar a capacidade do filme obtido em absorver a radiação incidente.

O filme de ouro obtido sob essas condições não se apresenta como uma boa alternativa, pois há um indicativo de que 80% de toda radiação que incidir sobre o dispositivo será refletida por essa camada, ou seja, será eliminada e não causará nenhuma variação de temperatura no elemento sensível. Isto tornaria a sensibilidade do sensor extremamente baixa e o deixaria com menor imunidade aos ruídos característicos, sendo então desapropriado para a aplicação desejada neste trabalho.

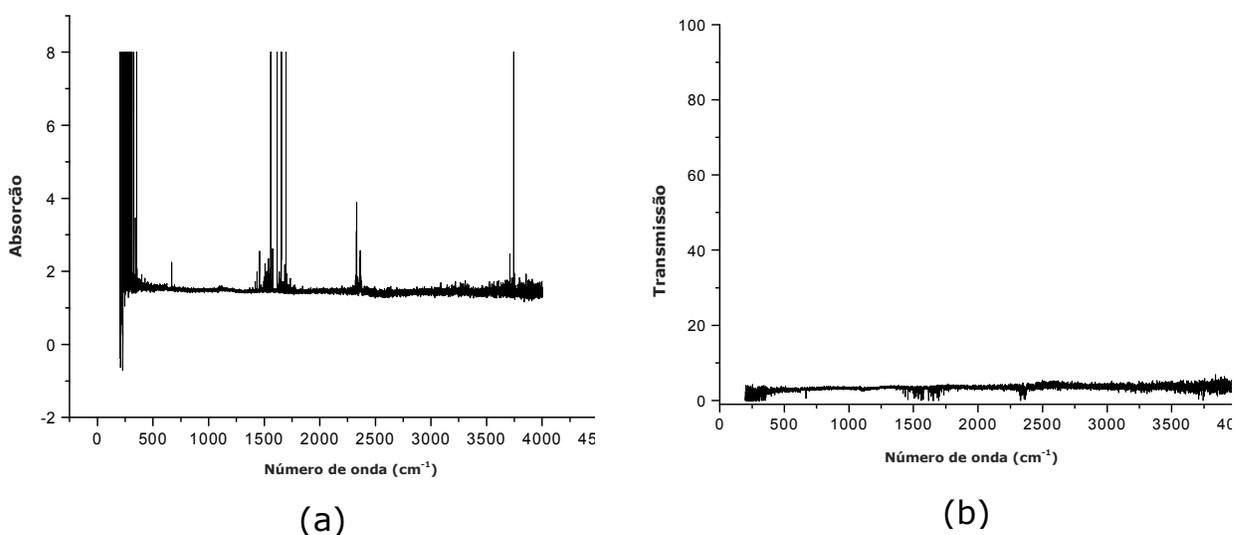


Figura 39 - Análise FTIR de ouro negro evaporado na pressão de 2×10^{-4} Torr.

De modo a completar a análise dos filmes de ouro negro, com relação as características de absorção destes na faixa de infravermelho, foram realizadas medidas de refletância difusa por FTIR. A técnica de refletância difusa é amplamente utilizada em equipamentos que operam no infravermelho sendo geralmente designada como espectroscopia de refletância no infravermelho com Transformada de Fourier. A reflexão difusa ocorre em superfícies não totalmente planas, podendo o substrato ser contínuo ou fragmentado. A energia radiante incidente penetra na amostra interagindo com os elementos em seu interior e retorna à superfície após a absorção parcial e múltiplos espalhamentos. Na reflexão difusa a energia é atenuada depois de entrar em contato diversas vezes com as partículas da amostra, fornecendo muitas informações analíticas sobre a mesma. O poder de penetração da radiação incidente é importante para uma boa eficiência na análise, ou seja, na obtenção de espectros representativos da amostra. No entanto, a energia refletida da amostra tem intensidade bem menor do que a incidente, por isso é necessário convergir-se a radiação para focá-la no detector. Durante este processo de medição, a luz infravermelha que atravessa a amostra é difusamente refletida pela placa metálica de apoio, retornando através da amostra e em seguida é coletada em um detector. Um espelho elíptico contendo um pequeno furo é utilizado como coletor da luz refletida. Tal abordagem permite que espectros sejam obtidos em função de sua localização espacial. Além disso, os métodos de refletância podem ser muito mais sensíveis e muito mais discriminatórios do que os métodos que utilizam absorbância [111-113].

A Figura 40, Figura 41, Figura 42 e Figura 43, mostram as análises realizadas nas camadas de ouro negro obtidas nas pressões de deposição de 2×10^{-4} , 4×10^{-4} , 6×10^{-4} e 10×10^{-4} Torr, respectivamente. Estas figuras permitem concluir que as camadas de ouro negro tem uma dependência direta da pressão do gás presente durante a evaporação, e que esta diminui quando a pressão de deposição na câmara de evaporação aumenta.

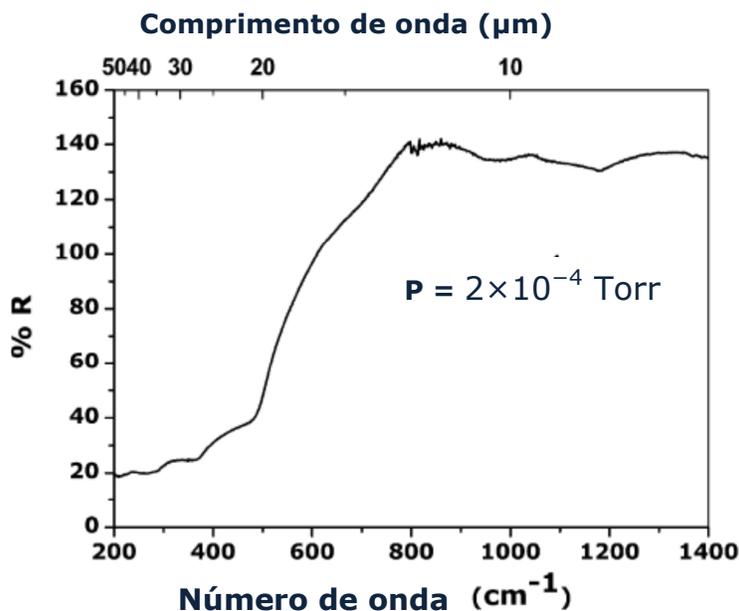


Figura 40 – Refletância IV difusa da camada de ouro negro depositada à 2×10^{-4} Torr. Baixa refletância de 20%. Maior que 60% para número de onda acima de 600 cm^{-1} .

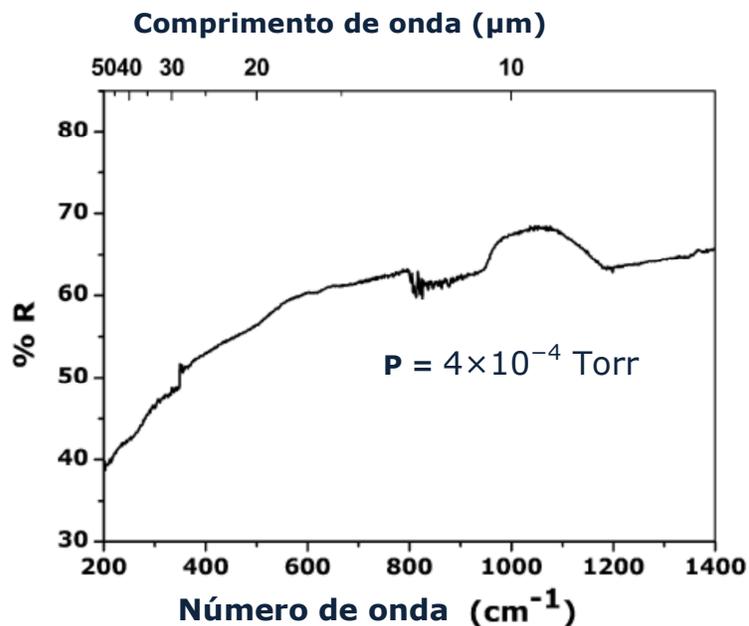


Figura 41 – Refletância IV difusa da camada de ouro negro depositada à 4×10^{-4} Torr. Refletância maior que 40% em toda a faixa de medição (200–1400 cm^{-1}).

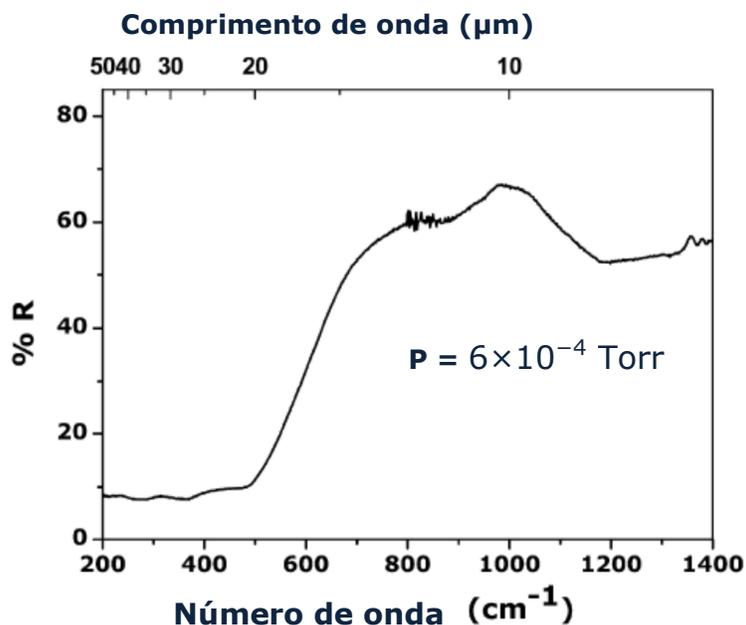


Figura 42 – Refletância IV difusa da camada de ouro negro depositada à 6×10^{-4} Torr. Baixa refletância de aproximadamente 10%. Aumenta para 60% para número de onda acima de 600 cm^{-1} .

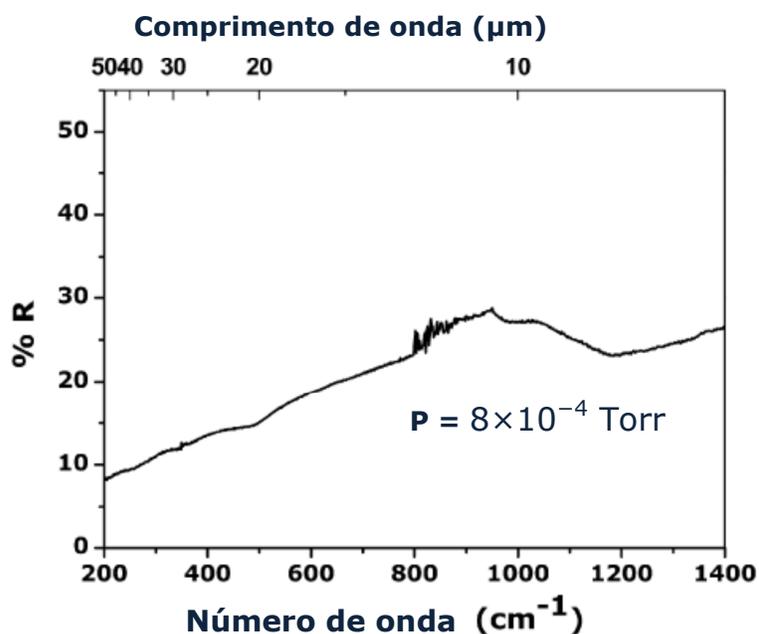


Figura 43 - Refletância IV difusa da camada de ouro negro depositada à 8×10^{-4} Torr. Refletância menor entre 10% e 20% na maior parte de comprimentos de onda. Menor de 30% em toda a faixa de medição (200–1400 cm^{-1}).

A camada de ouro negro evaporada utilizando a pressão de 8×10^{-4} Torr (Figura 43), foi a que demonstrou ser o filme mais adequado para ser utilizado como absorvedor na detecção de radiação infravermelha distante, pois este apresenta uma refletância de somente 10% para a faixa de comprimento de onda desejada que está entre 50-25 nm ($200-400 \text{ cm}^{-1}$), na qual foi o menor valor obtido se comparado com os encontrados para os filmes evaporados em outras pressões. A refletância das amostras preparadas a uma pressão de evaporação de 6×10^{-4} Torr (Figura 42) teve um resultado análogo aos das amostras obtidas em pressões mais elevadas, com a exceção de que nos comprimentos de ondas maiores do que 600 cm^{-1} a refletância sofreu um aumento para 60%. A refletância das amostras obtidas na pressão mais baixa realizada neste trabalho, que corresponde a 2×10^{-4} Torr (Figura 40) foi próximo a 20%, aumentando para 60% a partir do comprimento de onda de 400 cm^{-1} . Este filme pode ser utilizado em dispositivos que necessitem de uma detecção de radiação em outros espectros, mas para os propósitos deste trabalho, ele se mostra inadequado. O filme de ouro negro obtido na pressão de evaporação de 4×10^{-4} Torr, não apresentou uma boa refletância, sendo que a Figura 41 mostra que esta é maior do que 40% para toda a faixa do espectro analisado.

A Figura 44 mostra duas micrografias SEM da camada de ouro poroso obtido a uma pressão de 6×10^{-4} Torr. A ilustração da esquerda mostra o filme de ouro negro com uma aproximação de 10.000 vezes e a da direita mostra o filme com uma aproximação de 30.000 vezes, ambas utilizando uma energia de 25kV. Nestas micrografias pode-se ver a superfície do filme, onde fica bastante evidente a porosidade que este possui. Fica evidente ainda que a estrutura é um conglomerado de agulhas muito finas, onde partículas de diferentes tamanhos juntam-se umas nas outras. Tem-se que, a partir de certo tamanho de partícula, a energia térmica não é suficiente para realizar uma fusão completa, onde das colisões resulta apenas um contato entre estas partículas.

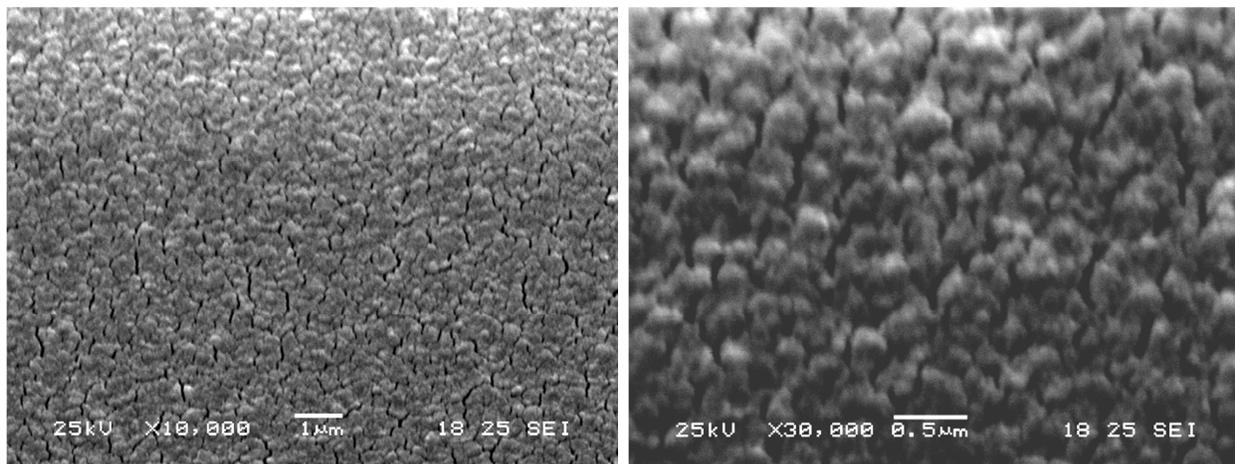


Figura 44 – Micrografias SEM do filme de ouro negro.

Baseado nas análises realizadas, pode-se concluir de forma segura e definitiva que o filme que está mais adequado as necessidades buscadas como absorvedor de infravermelho distante é o filme evaporado a pressão de 8×10^{-4} Torr, que apresentou uma alta absorção e uma baixa refletância.

5.1.2 ANÁLISE EDS:

Agora será mostrado o resultado de uma análise realizada com a finalidade de obter resultados qualitativos das camadas de ouro negro depositadas, através de uma análise conhecida como espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS). A espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS) é uma técnica analítica usada para a análise elementar ou caracterização química de uma amostra. É uma das variantes da espectroscopia por fluorescência de raios X que se baseia na investigação de uma amostra através de interações entre partículas ou radiação eletromagnética e matéria, analisando os raios X emitidos pela matéria em resposta à incidência de partículas carregadas. Suas capacidades de caracterização são devidas em grande parte

ao princípio fundamental que cada elemento tem uma estrutura atômica única, de modo que os raios X emitidos são característicos desta estrutura, que identificam o elemento.

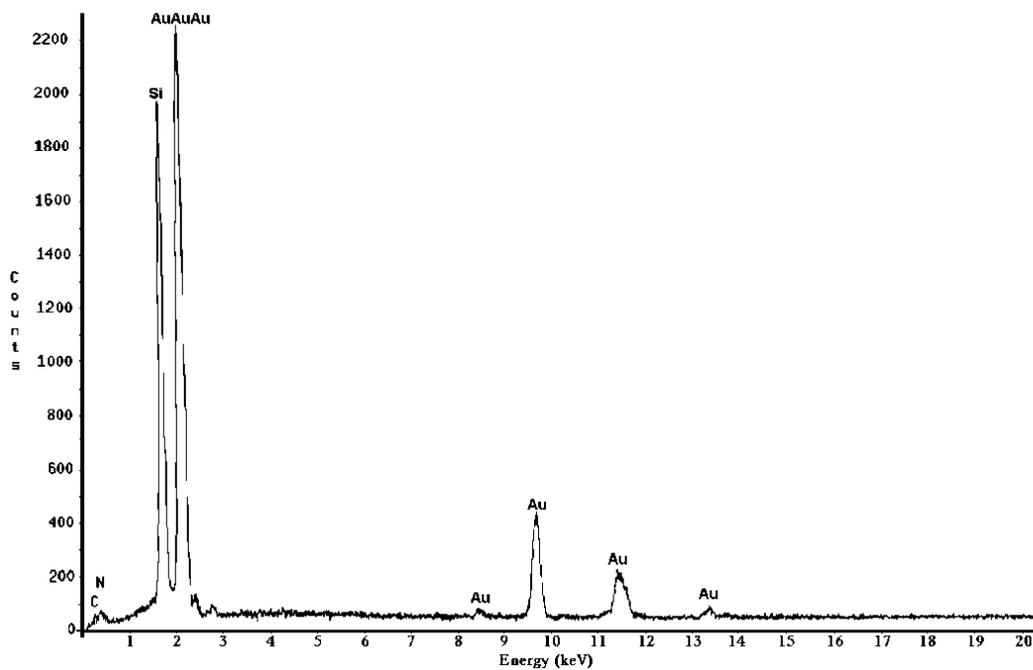


Figura 45 – Análise EDS do filme de ouro evaporado a pressão de 8×10^{-4} Torr.

Analisando o gráfico ilustrado na Figura 45, pode-se observar que o filme de ouro negro obtido é formado apenas por ouro, estando livre de impurezas que são indesejadas no processo e poderiam causar danos na capacidade de absorção desta camada. Pode-se observar ainda um grande pico indicando a presença de silício, que ocorre devido ao fato de que o filme foi depositado diretamente sobre um substrato de silício. Então, conclui-se que todo o procedimento adotado na obtenção deste filme, já descrito anteriormente nesta tese, é adequado com relação a qualidade deste filme. Observa-se ainda que não há indicação de nitrogênio neste filme, sendo que este gás é utilizado com o intuito de aumentar a porosidade do filme. Fica então comprovado de que o nitrogênio é completamente inerte a reação, não se ligando às estruturas de ouro

formadas durante a evaporação, cumprindo então o seu propósito de apenas desacelerar e/ou mudar a trajetória dos átomos de ouro que estão sendo evaporados em direção ao substrato.

5.2 - Processo para a Construção do Sensor Bolométrico

Das várias dificuldades encontradas durante o desenvolvimento de fabricação de microbolômetros, o mais crítico deles é o processo de corrosão para obter as estruturas suspensas. Essa criticidade se deve aos efeitos de seletividade e compatibilidade dos diversos filmes utilizados na composição do sensor.

Durante o desenvolvimento do resistor de silício policristalino, foram testadas duas formas de corrosão. A primeira delas foi a corrosão úmida, realizada em solução de $\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}:\text{HF}$. Os problemas encontrados com a corrosão realizada através desta técnica podem ser observados mais claramente através de uma análise realizada a partir da Figura 46. Nesta micrografia SEM pode-se notar que graves danos foram causados a estrutura original, sendo que no projeto original as linhas tem uma largura de 5 μm . Pode-se verificar que a linha resultante após a realização da corrosão apresenta uma largura de aproximadamente 0,75 μm , além de perder sua forma original, que havia sido projetada para apresentar uma área adequada para absorver a radiação incidente desejada.

O problema observado é típico quando se utiliza a técnica de corrosão úmida isotrópica, onde ocorre uma corrosão lateral, sob a máscara que protege e delimita as formas do resistor, na mesma taxa de corrosão apresentada pela corrosão vertical, resultando então em uma estrutura com o padrão completamente diferente do que havia sido projetado. Esta corrosão lateral faz com que o resistor acabe perdendo as

características desejadas, afetando o valor de sua resistência original e as propriedades mecânicas das estruturas, e reduz também a área de absorção.

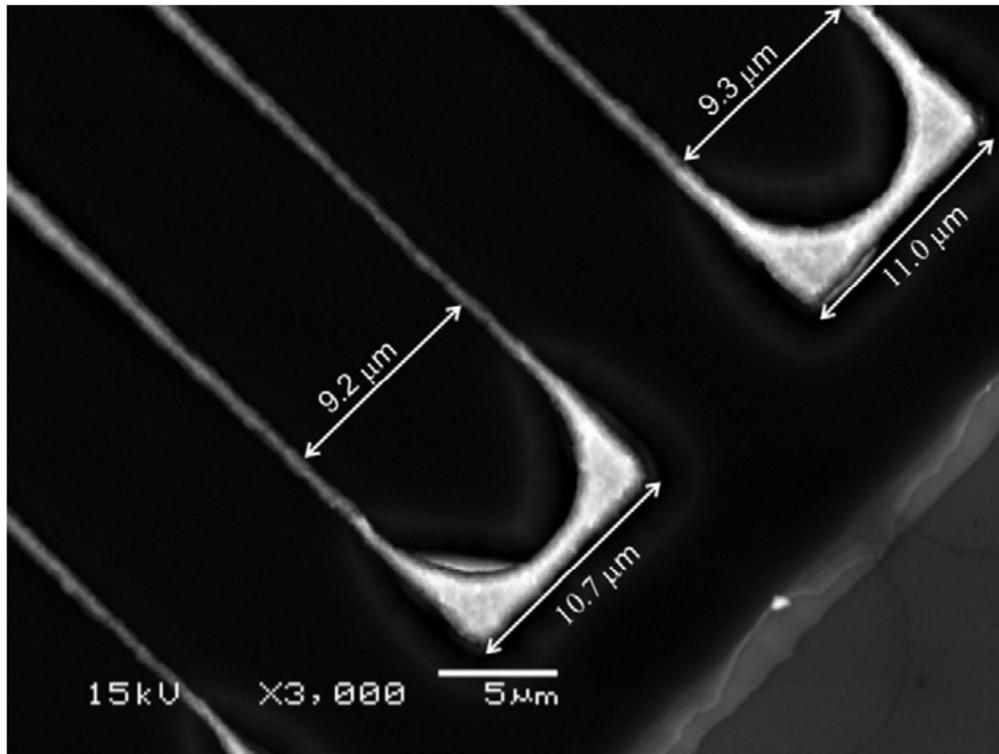


Figura 46 – Linhas de silício poli corroídas em corrosão úmida, mostrando corrosão lateral das estruturas.

Outro problema que poderia aparecer com relação a deformação das formas originais das estruturas é com relação a estabilidade mecânica, que ficará evidente ao se corroer a camada de óxido de silício que está sob esta camada de silício poli, sendo que esta estrutura poderá quebrar ou deformar, inutilizando de forma permanente este dispositivo. Este problema da corrosão lateral pode ser parcialmente resolvido através de uma compensação realizada na máscara que protege o resistor durante a corrosão, onde deve-se calcular a taxa de corrosão lateral e através deste cálculo aumenta-se a largura da linha da máscara na mesma proporção. Desta forma, mesmo com parte da

estrutura do silício policristalino corroída, ainda restariam linhas com as espessuras desejadas. Esta técnica foi impossibilitada de ser utilizada neste trabalho devido as distâncias entre linhas de alguns diapositivos menores, pois, quando as linhas da máscara eram aumentadas, estas acabavam se encontrando e em alguns casos até se sobrepondo, impedido assim que a linha fosse corroída de forma adequada.

A solução para este problema seria avaliar a segunda técnica disponível para a corrosão de silício policristalino, que é a corrosão por plasma.

A Figura 47 mostra uma micrografia SEM que ilustra uma corrosão do resistor de silício policristalino com o mesmo formato e dimensões, testado na corrosão úmida, só que agora, utilizando a técnica de corrosão por plasma.

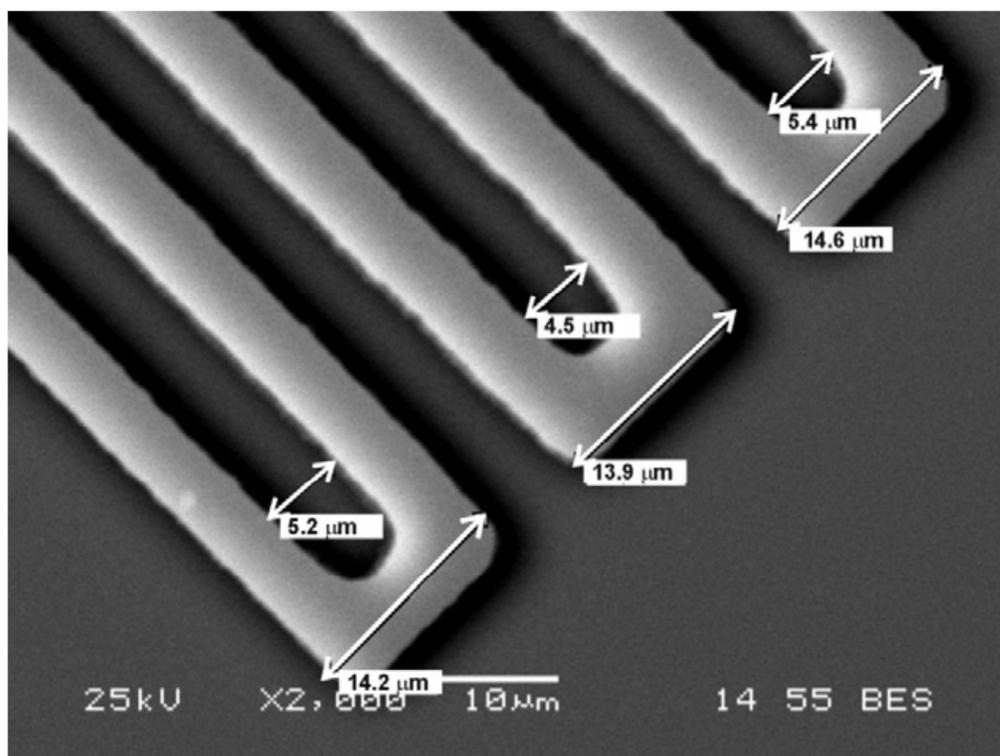


Figura 47 – Linhas de silício poli corroídas por plasma, mostrando que problemas com corrosão lateral são pequenos. A estrutura manteve sua forma original.

Neste caso, as estruturas mantiveram seu formato original com uma corrosão lateral muito pequena, tal que linhas de $5\mu\text{m}$ continuam sendo separadas por linhas de $5\mu\text{m}$ e as estruturas corroídas apresentam uma espessura estimada de $4,7\mu\text{m}$. Pode se concluir, portanto, que o processo mais adequado para a corrosão do filme de silício policristalino é a corrosão por plasma.

A Figura 48 mostra uma micrografia SEM, obtida com uma ampliação de 5.000 vezes e uma energia de 25kV, onde pode-se observar a estrutura completa do sensor de infravermelho que fora proposto.

Na parte inferior da micrografia, pode-se observar o substrato de silício que sustenta toda a estrutura, sendo este substrato uma lâmina com orientação 100, que permitirá a correta corrosão para a formação das estruturas suspensas, conforme será comentado nos capítulos seguintes deste trabalho. Logo acima está o filme de óxido de silício, que é a camada que terá sua função definida de acordo com a técnica de suspensão da estrutura que for utilizada. No caso de corrosão do substrato de silício, o óxido irá atuar como suporte mecânico e como isolante térmico para o elemento sensível, e pela outra técnica disponível, ele seria o elemento sacrificial, corroído para promover a suspensão da estrutura. Logo a seguir pode ser observada a camada de silício policristalino que é utilizada como o elemento ativo do dispositivo. A camada de nitreto de silício é a mais fina da estrutura, ficando portanto difícil notá-la na imagem, sendo que ela está entre o silício policristalino e o ouro negro, com a função de exercer uma isolamento elétrica entre estas estruturas. E finalmente, a camada de ouro negro, responsável pela absorção da radiação incidente, que pode ser vista como sendo toda a parte branca que aparece na parte superior da micrografia.

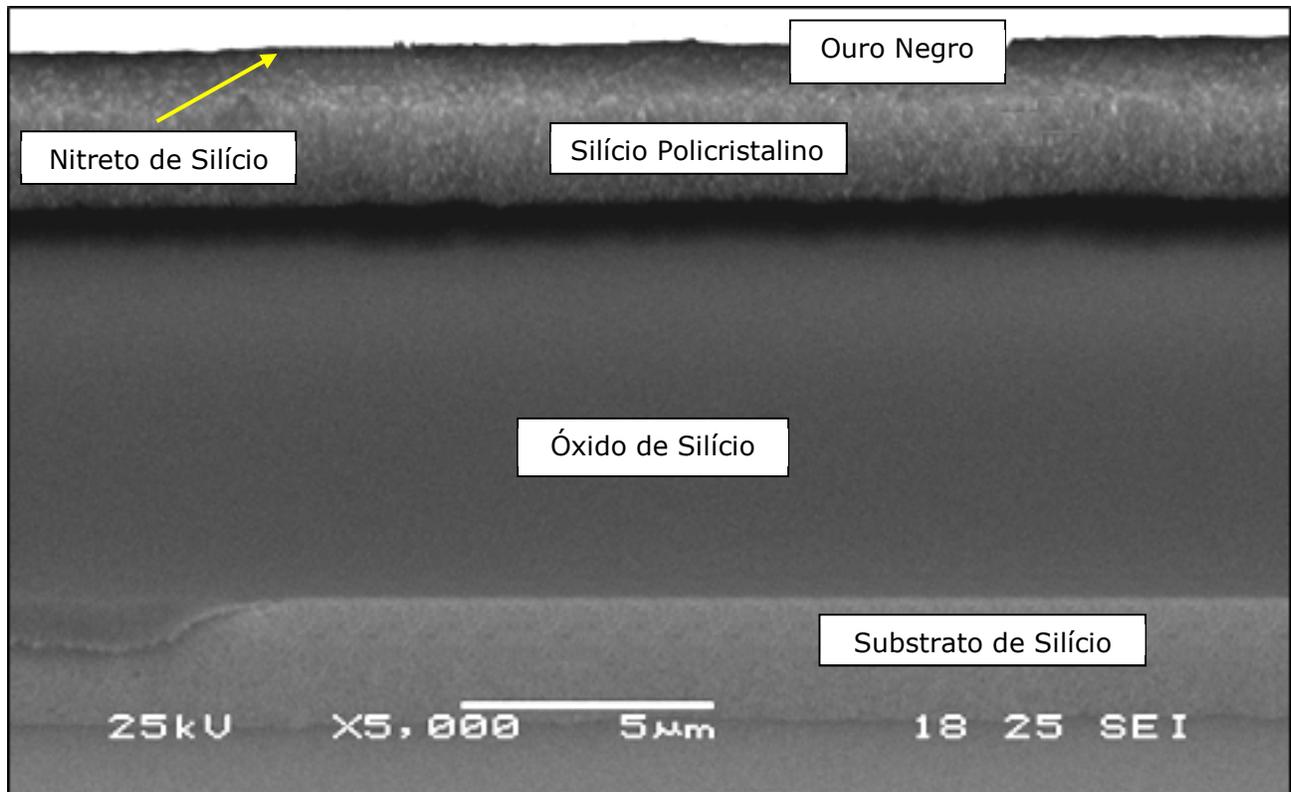


Figura 48 – Micrografia SEM mostrando as camadas que formam o bolômetro.

Ao final do desenvolvimento dos processos necessários para a fabricação dos dispositivos, estes foram fabricados conforme planejamento inicial e estão agora, prontos para serem analisados e caracterizados.

O dispositivo obtido pela técnica de corrosão do substrato de silício, utilizando-se KOH, está ilustrado na Figura 49. Esta micrografia mostra os *pads* de alumínio que são utilizados para contato do dispositivo com o mundo externo (A), o resistor térmico de silício policristalino (B) e a camada de ouro poroso ou ouro negro, evaporado sobre o nitreto de silício, com a função de absorver a radiação infravermelha.

O alumínio, que é o material responsável pela formação dos *pads* de contato, é um material extremamente sensível a solução aquosa de KOH, devendo então ser protegida com um filme de nitreto de silício, para que não seja completamente destruída.

Fica evidente também, a formação das quatro paredes com orientação cristalográfica 111, sendo responsáveis pela formação do poço que fica abaixo da estrutura suspensa. A baixa taxa de corrosão desta orientação 111 é característica quando a corrosão é realizada em solução aquosa de KOH.

Esta técnica de obtenção de estruturas suspensas possibilita a obtenção de um dispositivo com maior isolamento térmica, permitindo com que a sensibilidade do sensor aumente de forma considerável, sem a necessidade de técnicas de resfriamento externo, que encarecem e inviabilizam a utilização dos sensores para determinadas aplicações mais específicas.

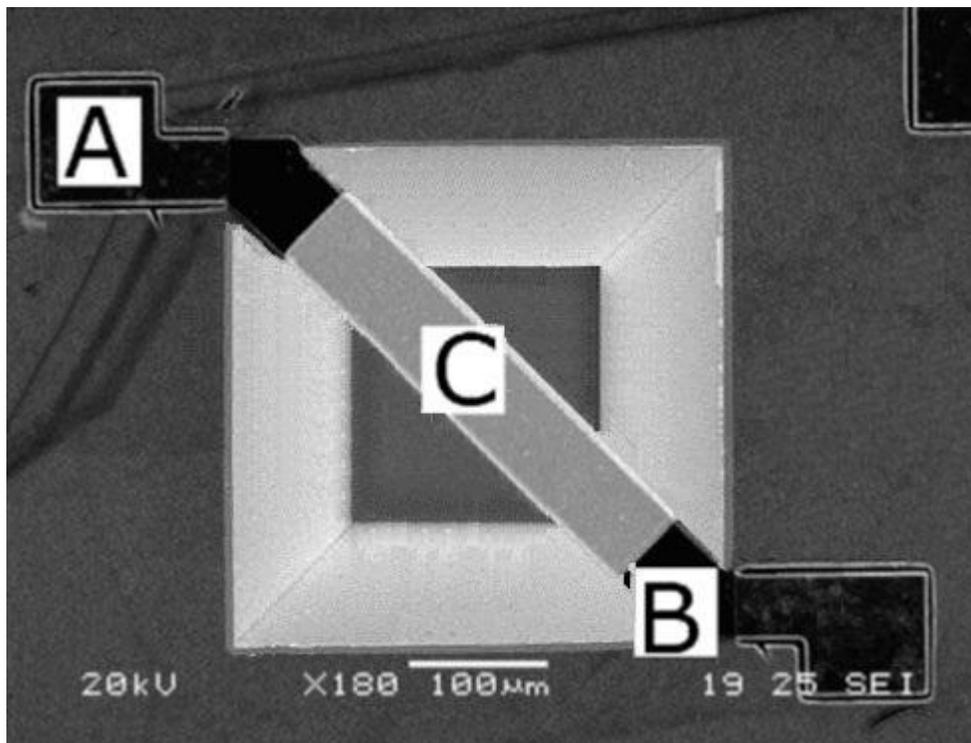


Figura 49 - Micrografia SEM do bolômetro obtido pela corrosão do silício mostrando, o alumínio de contato(A), o resistor térmico de Si poli(B) e o filme de ouro negro(C).

O dispositivo obtido pela técnica do óxido de silício sacrificial, onde este óxido é removido de baixo do resistor de silício policristalino promovendo assim a isolamento térmica, está ilustrado na Figura 50. De modo análogo ao dispositivo ilustrado na Figura 49, temos os *pads* de alumínio (A), o resistor térmico de silício policristalino (B) e a camada de ouro poroso (C).

A técnica de remoção da camada sacrificial apresenta-se menos agressiva com relação aos materiais utilizados na composição do sensor, portanto a isolamento térmica promovida por ela fica um tanto quanto comprometida, fazendo com que a sensibilidade deste sensor fique muito menor se for comparado a um sensor construído utilizando-se as técnicas de corrosão do substrato de silício. Mas, dependendo da aplicação, as facilidades apresentadas por esse processo acabam por compensar a perda de sensibilidade relativa do sensor.

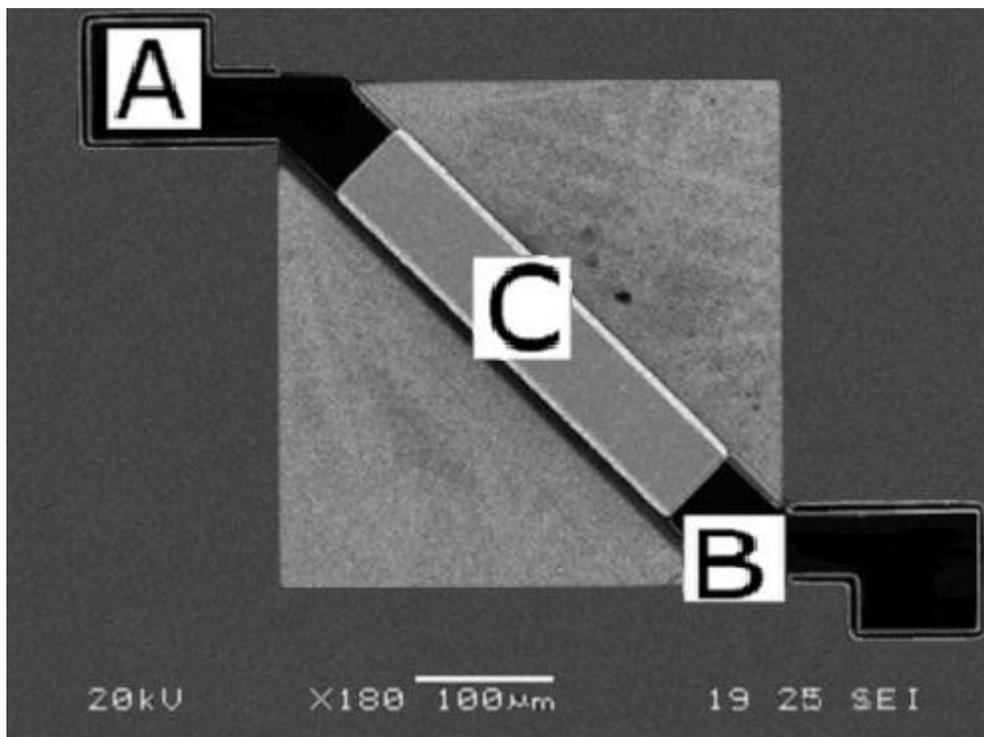


Figura 50 - Micrografia SEM do bolômetro obtido pela corrosão do óxido de Si mostrando, o alumínio de contato(A), o resistor térmico de Si poli(B) e o filme de ouro negro(C).

5.2.1 ENCAPSULAMENTO:

De modo a facilitar o manuseio e acesso aos dispositivos construídos, que de certa forma, apresentam estruturas frágeis e suscetíveis a fortes choques mecânicos ou forte incidência de fluidos, os *chips* passaram por um processo de encapsulamento, sendo que o acesso da radiação é feito através da abertura de uma janela e esse acesso só ocorre quando esta janela esta devidamente aberta.

Outro fator importante que a capsula fornece é o acesso aos dispositivos bolométricos através dos terminais desta capsula. Devido ao grande número de dispositivos e o número limitado de terminais na capsula, apenas alguns dispositivos foram conectados a esses terminais, sendo que os sensores escolhidos foram previamente testados em equipamentos específicos em laboratório, equipamentos esses apresentados na Figura 52. Permite-se avaliar também o comportamento deste dispositivo em uma situação de utilização mais real, onde os efeitos dos fios e terminais de contatos são incluídos nos resultados finais.

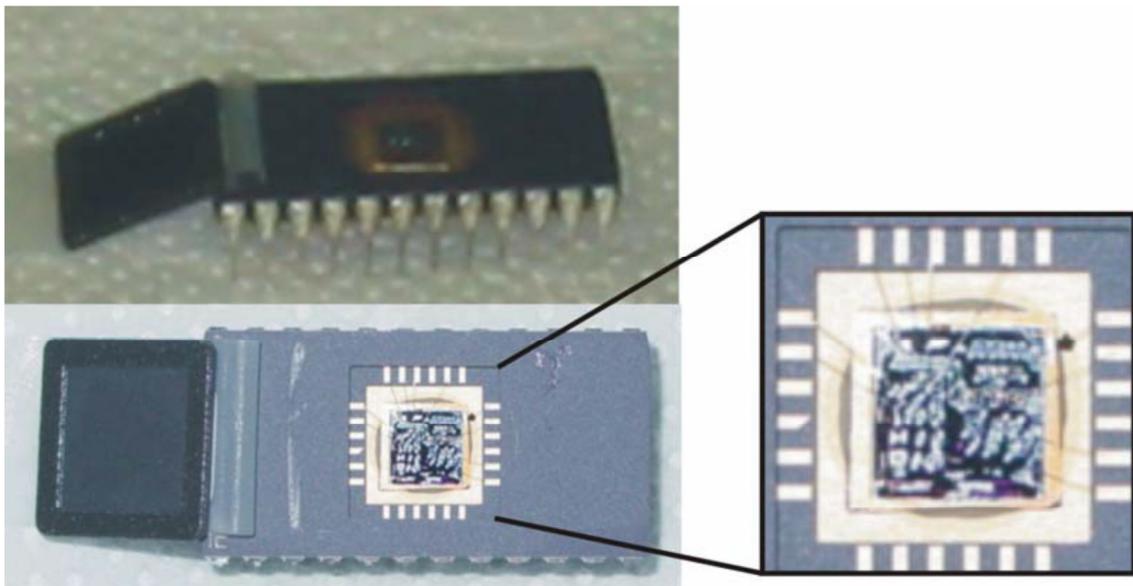


Figura 51 – Chips encapsulados dos sensores bolométricos.

5.3 - Testes dos Sensores de Infravermelho Fabricados

Alguns testes de laboratório foram realizados com a finalidade de se avaliar o desempenho do sensor bolométrico fabricado, em relação a fontes conhecidas de radiação. Estes testes foram realizados nas instalações do CCS/UNICAMP, utilizando-se um sistema de caracterização de semicondutores Keithley 4200, que é um equipamento utilizado na caracterização de dispositivos semicondutores, sendo que foram obtidas medidas de corrente com uma precisão de até 10^{-12} A.

Na montagem do aparato de testes, foram utilizados ainda uma fonte de tensão contínua de 5V, um dispositivo de geração de radiação controlado e um sensor bolométrico devidamente posicionado, conforme ilustra a Figura 52. Através de medições em laboratório determinou-se que a resistência aproximada do bolômetro é de 630Ω . Portanto, há uma corrente constante de 8 mA circulando por esse dispositivo, enquanto este estiver isolado e sem a incidência de nenhuma fonte externa de radiação térmica, resultando num consumo médio de potência de 40mW.

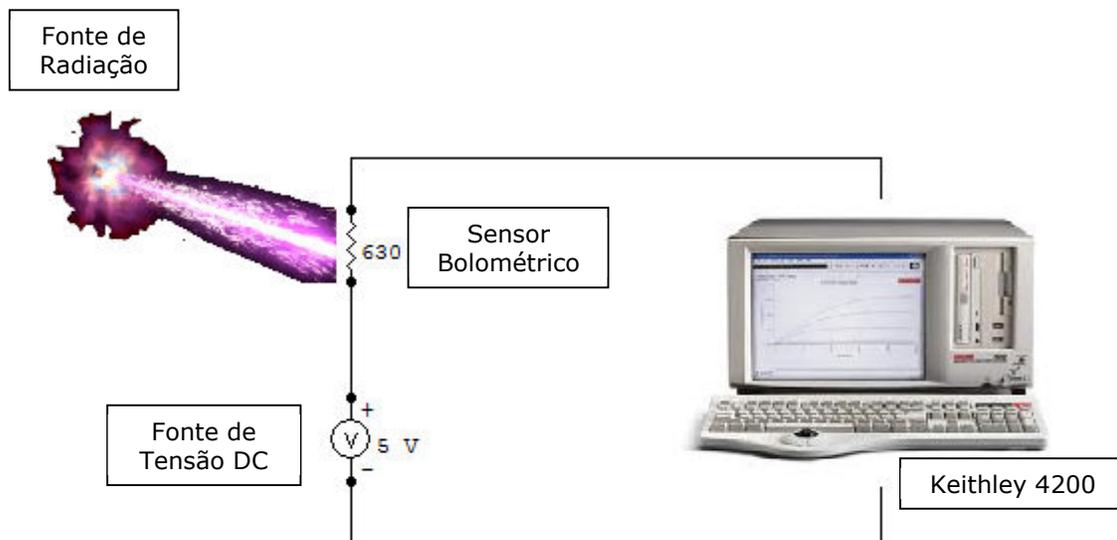


Figura 52 – Aparato de testes para os dispositivos bolométricos.

Estas medições foram realizadas com o auxílio de filtros passa-baixa e coletores de fótons [114, 115], tornando-se partes integrantes ao sistema que funcionava como gerador de radiação. Os filtros passa-baixa foram construídos utilizando-se técnicas de microfabricação, na qual foram utilizados materiais metálicos na composição destes filtros, projetados para atuar nas frequências de 220, 405, 670 e 850 GHz sendo que as frequências são determinadas pelas dimensões L (comprimento), g (periodicidade), $2b$ (espessura) e $2a$ (espaçamento entre as estruturas em cruz), conforme ilustra a Figura 53[116].

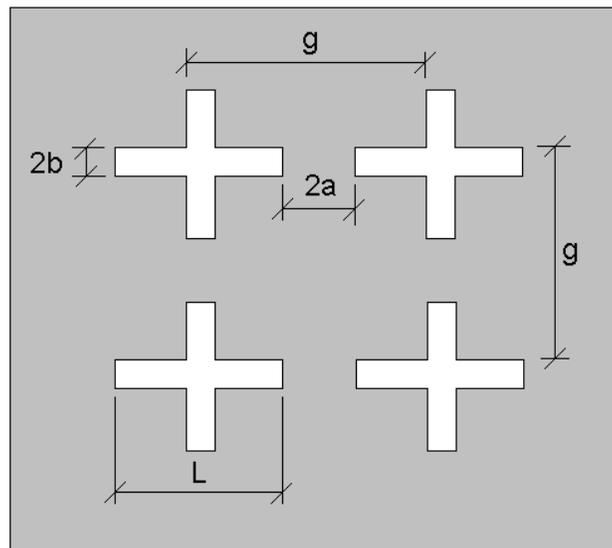


Figura 53 – Definição dos parâmetros de projeto dos filtros passa-baixa [114, 115].

A utilização destes filtros de frequências permite um resultado mais preciso e controlado, onde somente a radiação com os comprimentos de ondas que se deseja medir incide sobre o detector.

As dimensões utilizadas na fabricação destes filtros para cada faixa de frequência desejada estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6. Parâmetros utilizados na fabricação dos filtros passa-baixa [114-117].

f (GHz)	g (μm)	L (μm)	2b (μm)
405	586	348	111
670	358	213	60
870	302,5	175	37

Já os coletores de fótons tem a finalidade de concentrar os fótons incidentes, resultantes da fonte de radiação, no sensor bolométrico, maximizando assim a quantidade desta radiação no sensor, melhorando de forma significativa os resultados de medição obtidos. De forma simplificada, a fonte de radiação é colocada na frente do filtro passa-baixa, que permite a passagem de apenas uma pequena parte da radiação incidente e essa radiação é então concentrada pelo coletor de fótons que está praticamente encostado sobre o sensor, que recebe a radiação térmica e tem sua resistividade alterada devido a sua alteração de temperatura. Essa mudança na resistividade faz que haja uma variação ΔI na corrente que esta circulando por esse resistor. Essa variação ΔI é proporcional a variação de temperatura ΔT no resistor, possibilitando assim medir a intensidade da radiação incidente. O arranjo básico utilizado nestas medições está ilustrado na Figura 54.

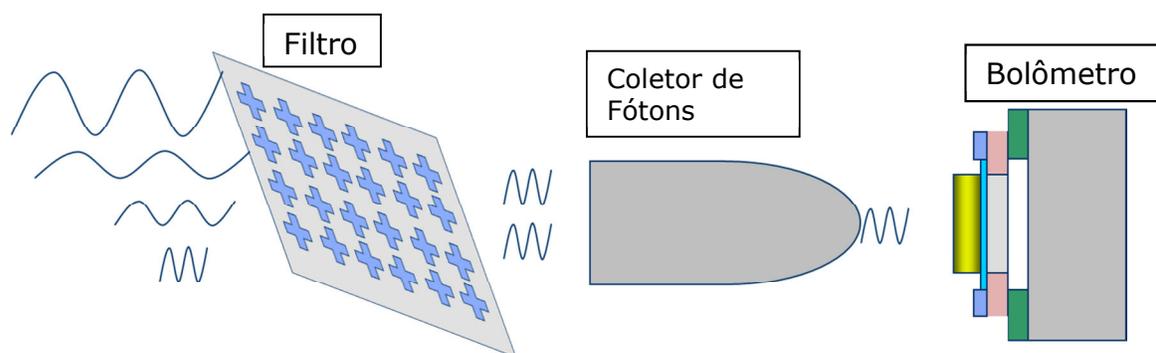


Figura 54 – Arranjo básico utilizado nas medições de radiação térmica.

Para realizar os testes, foram utilizados materiais absorvedores. Estes materiais são mergulhados em uma cuba com nitrogênio líquido e imediatamente colocados em frente ao arranjo de medição utilizado. As fotos da Figura 55 ilustram o arranjo utilizado, onde pode se observar o filtro e o cone de fótons (A), e o absorvedor colocado de forma a excitar o sensor bolométrico (B). Obtém se então uma variação da temperatura ambiente, entendida por ser aproximadamente 273K, para a temperatura do nitrogênio líquido, que atinge um valor de 77K.

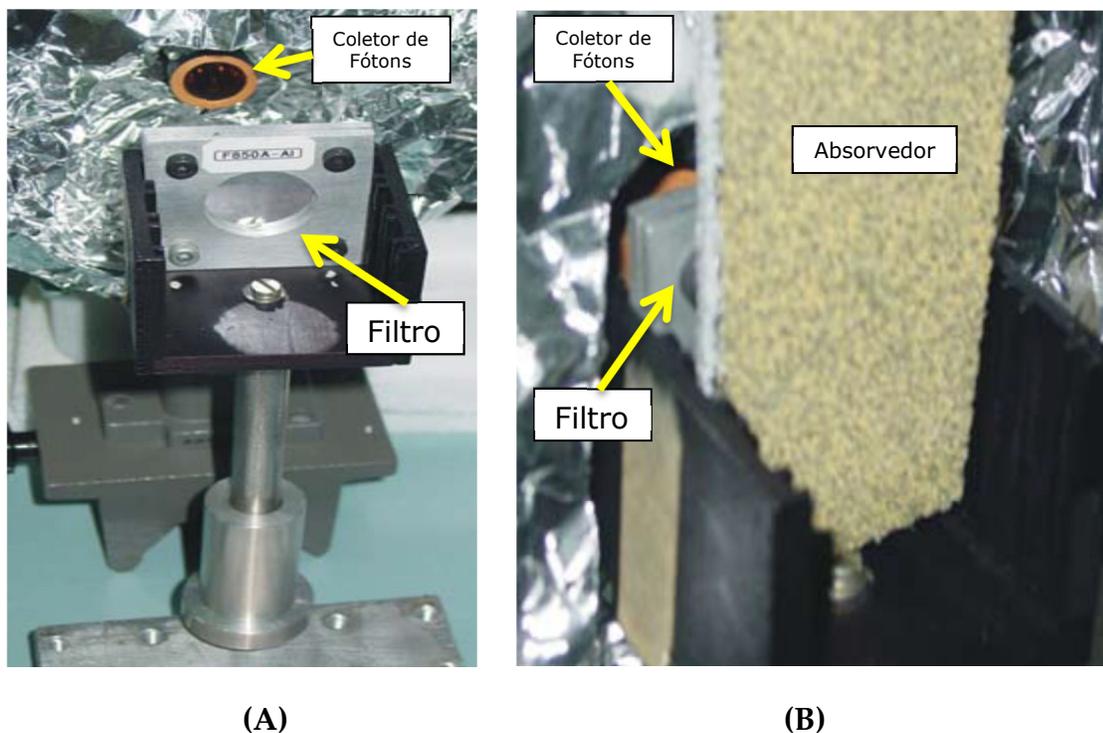


Figura 55 – Arranjo filtro, cone e sensor (A), e absorvedor retirado do nitrogênio líquido (B).

O resultado desta medição realizada na frequência de 0,8 THz (comprimento de onda 0,372 mm), obtido utilizando o filtro já mencionado anteriormente, é apresentado no gráfico da Figura 56, onde pode-se observar a variação da corrente circulante no resistor causada pela incidência da radiação térmica. Estes resultados podem ser

utilizados para se estimar de forma gráfica o tempo de resposta térmica (τ) ou constante de tempo térmico do bolômetro. Este tempo é compreendido como sendo o tempo necessário para o dispositivo diminuir em $1/e$ do seu valor quando a radiação térmica é instantaneamente removida. Para o dispositivo testado, obteve-se valores de τ na faixa entre 1,27 a 2,00 ms. No gráfico em detalhe mostrado na Figura 56 pode ser verificada a ocorrência de dois picos, que foram detectados pelo bolômetro num intervalo de aproximadamente 2 ms.

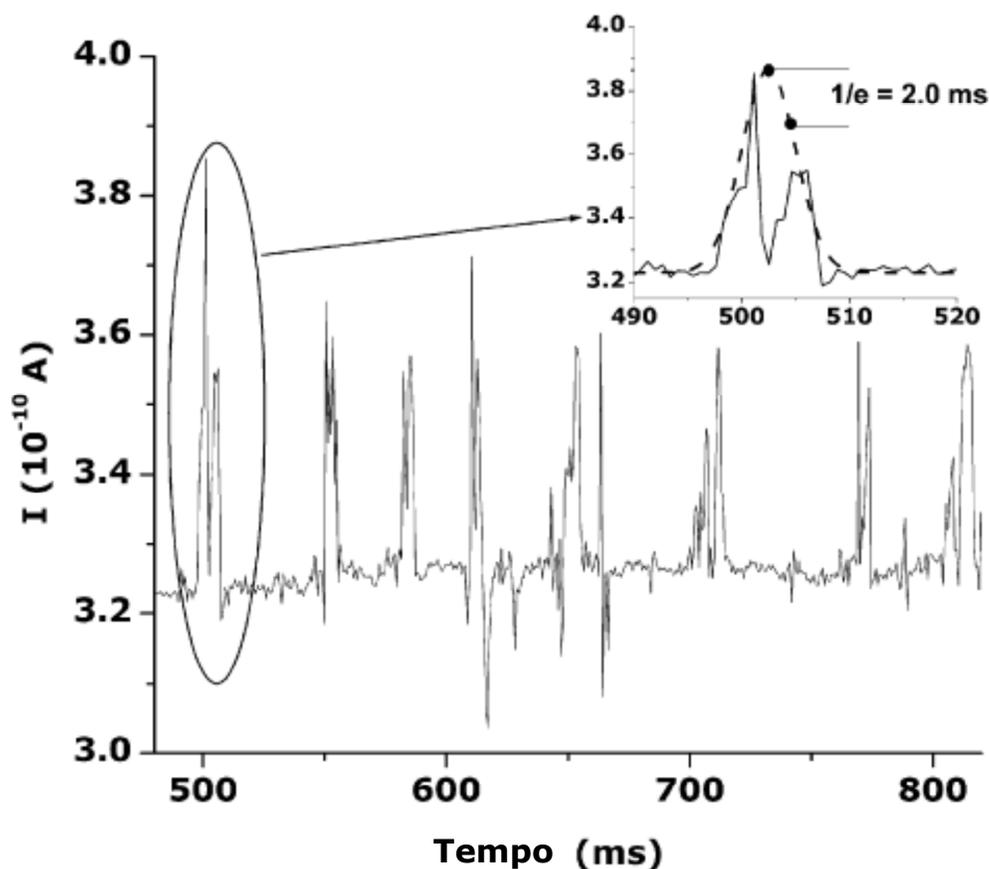


Figura 56 – Medições de radiação infravermelha, na frequência de 0,8THz.

A constante de tempo obtida mostra que o sensor possui uma resposta rápida e apresenta uma recuperação para seu estado de temperatura original bastante rápida. Esta rápida restauração indica a qualidade do bolômetro, pois este índice de resposta

sendo pequeno previne-se que o próximo sinal incidente seja perdido, sendo que tempos de resposta muito longos fazem com que se percam partes importantes da radiação incidente medida.

5.4 - Determinação do Desempenho do Sensor Bolométrico

As análises aqui apresentadas são fundamentadas nas relações entre o comportamento térmico e a resistência do bolômetro, e também é levada em consideração a potência dissipada por esse dispositivo. Então, o bolômetro é classificado aqui, de um modo geral, como sendo um detector de radiação que tem um sinal elétrico como saída, ou seja, quando uma radiação incidente é absorvida, esta modifica de forma temporária a temperatura do bolômetro, na qual sua variação de resistência é medida através da alteração da corrente circulante neste dispositivo. Para que se tenha uma avaliação de desempenho confiável e completa do sensor bolométrico, deve-se levar em consideração alguns parâmetros considerados como principais, que são: TCR, constante de tempo, responsividade, detectividade e NEP.

Os cálculos a seguir estão relacionados a parâmetros dimensionais e com os tipos de materiais que foram utilizados na fabricação do sensor. O primeiro deles é a Capacidade térmica, que determina a capacidade do dispositivo em armazenar calor, é dada por:

$$C = V \times c \times \rho \text{ [J/K]} \quad (25)$$

Onde, V = volume; c = calor específico da parte ativa; ρ = densidade da parte ativa.

Portanto: $C = 3,2 \times 10^{-14} \times 700 \times 23,3 \times 10^3 \Rightarrow C = 5,22 \times 10^{-7} \text{ J/K}$

Quando se realiza a fabricação de estruturas bolométricas, busca-se baixos valores de capacidade térmica, pois como pode ser observado na equação (16), quanto menor C , menor será o tempo térmico do sensor. De forma resumida e prática, a capacidade térmica deve ser baixa para que o sensor aqueça e esfrie da maneira mais rápida possível. Este parâmetro é obtido através de parâmetros dimensionais e características intrínsecas do material empregado, tornando então a fase de escolha dos materiais extremamente importante quando se deseja projetar um sensor bolométrico para uma dada aplicação. De acordo com os trabalhos consultados como referência, a capacidade térmica varia entre $10^{-5} \sim 10^{-9}$, sendo que o sensor que foi fabricado neste trabalho obteve um valor de 10^{-7} , estando então coerente com os dispositivos fabricados por outros autores.

O segundo parâmetro a ser calculado é a condutância térmica (G), dado por:

$$G = \frac{k \times A_{\text{Suporte}}}{C_{\text{Suporte}}} \quad (26)$$

Onde, k : condutividade térmica do suporte - SiO_2 ; A_{Suporte} : secção transversal do suporte; C_{Suporte} : comprimento do suporte.

$$G = \frac{3,25 \times 10^{-11} \times 1,4 \times 10^3}{330 \times 10^{-6}} \Rightarrow G = 1,37 \times 10^{-4} \text{ W/K}$$

Ao contrário da capacidade térmica, a condutância térmica deve apresentar altos valores, pois de acordo com a equação (16), quanto maior o valor de G , menor será o tempo térmico do sensor. Resumindo, quanto mais rápido o material conduzir o calor, mais rapidamente o sensor terá uma variação de resistividade em decorrência desta variação de temperatura, reduzindo então o tempo de resposta do sensor. De acordo com os trabalhos utilizados como referência, o G tem valores que variam de $10^{-4} \sim 10^{-7}$,

sendo que o bolômetro construído nesta tese obteve um valor na ordem de 10^{-4} , estando coerente com os trabalhos realizados por outros autores.

De posse dos valores da capacidade térmica e da condutância térmica, é possível obter mais um parâmetro do sensor através da relação destes 2 parâmetros calculados anteriormente, que é a constante de tempo térmica.

$$\tau = \frac{C}{G} \rightarrow \tau = 3,79 \text{ ms}$$

De maneira simplificada, este parâmetro relaciona a velocidade da variação do sinal de saída, com relação às variações no sinal de entrada, sendo que para a aplicação bolométrica apresentada neste trabalho, este parâmetro seria a relação entre a variação da corrente medida, com relação a varia da temperatura no elemento sensível.

Fazendo uma análise comparativa com relação aos trabalhos utilizados como referência, estes apresentam um τ variando entre 1,2 ~ 55 ms (tabela 9), sendo que o valor encontrado neste trabalho foi de 3,2 ms, demonstrando que o sensor desenvolvido neste trabalho está coerente com os trabalhos desenvolvidos por outros autores, além de ser um valor bastante reduzido, que significa dizer que o sensor tem um tempo de resposta muito rápido ou pequeno.

Pode-se ainda avaliar o valor obtido matematicamente, de modo comparativo com relação ao valor obtido graficamente (2ms), sendo que os valores são bastante próximos, validando a correlação entre os cálculos teóricos e os resultados obtidos através de experimentos práticos do dispositivo.

Será utilizada agora a teoria de equações já apresentadas anteriormente para completar o cálculo de parâmetros de desempenho do bolômetro. Utilizando os gráficos obtidos através de medições de radiação, com variação de 300K a 77K, são obtidos os

valores de corrente equivalentes às variações de temperatura ocorrida, levando em consideração o ruído que integra o sinal e deve ser descartado nesta análise.

Na Tabela 7 são apresentados os valores calculados, referentes a potência incidente e também a responsividade referentes aos sensores térmicos.

Tabela 7. Valores de Potência Incidente e Responsividade.

Frequências (THz)	Potência Incidente (W)	Responsividade (V/W)
0,850	$1,8 \times 10^{-8}$	0,35
0,670	$1,1 \times 10^{-8}$	0,48
0,405	$4,0 \times 10^{-9}$	1,30

Agora serão apresentados na Tabela 8 os resultados relativos aos cálculos de NEP, também de acordo com as equações já apresentadas em capítulos anteriores.

Tabela 8. Valores dos Cálculos de Potência Equivalente de Ruído (NEP).

Frequência (THz)	NEP _{Fundo} (W/√Hz)	NEP _{Fonon} (W/√Hz)	NEP _{Johnson} (W/√Hz)	NEP _{TOTAL} (W/√Hz)
0,850	$3,05 \times 10^{-17}$	$2,61 \times 10^{-11}$	$9,22 \times 10^{-9}$	$9,25 \times 10^{-9}$
0,670	$3,05 \times 10^{-17}$	$2,61 \times 10^{-11}$	$6,73 \times 10^{-9}$	$6,76 \times 10^{-9}$
0,405	$3,05 \times 10^{-17}$	$2,61 \times 10^{-11}$	$2,48 \times 10^{-9}$	$2,51 \times 10^{-9}$

Após a obtenção dos valores de NEP, pode-se obter agora um outro parâmetro conhecido como detectividade específica, muito importante quando se avalia o desempenho do sensor térmico, principalmente quando se faz comparações com outros dispositivos fabricados por outras técnicas e com outros tamanhos.

$$D_{0,850THz}^* = \frac{\sqrt{2,14 \cdot 10^{-8} \times 1,7 \cdot 10^{11}}}{9,25 \cdot 10^{-9}} = 6,04 \cdot 10^9 \text{ mHz}^{1/2} \text{W}^{-1}$$

$$D_{0,670THz}^* = \frac{\sqrt{2,14 \cdot 10^{-8} \times 1,7 \cdot 10^{11}}}{6,76 \cdot 10^{-9}} = 8,93 \cdot 10^9 \text{ mHz}^{1/2} \text{W}^{-1}$$

$$D_{0,405THz}^* = \frac{\sqrt{2,14 \cdot 10^{-8} \times 1,7 \cdot 10^{11}}}{2,51 \cdot 10^{-9}} = 24,06 \cdot 10^9 \text{ mHz}^{1/2} \text{W}^{-1}$$

Uma relação importante da avaliação de desempenho de um sensor térmico baseado em um elemento ativo resistivo é a relação entre a variação de resistência com a variação de temperatura, ou seja, é uma quantificação de quanto o valor da resistência do sensor varia para cada unidade de variação de temperatura. Para que se tenha uma boa sensibilidade no sensor térmico, este deve ter uma alta taxa de variação de sua resistência com relação a temperatura, onde pequenas variações de temperatura causam grandes variações de resistência, fornecendo assim uma maior precisão nas medições da radiação incidente. Este parâmetro é denominado de TCR e é obtido através da equação (15). Para o sensor utilizado neste trabalho é possível concluir, através de uma análise da Figura 56 que essa relação é inversa, pois, quando há uma variação positiva de temperatura, a corrente aumenta, indicando claramente que a resistência diminuiu, apresentando então um TCR negativo. Para se obter esse parâmetro, foi utilizado o mesmo dispositivo dos testes anteriores, que fornece uma resistência de 630Ω para uma temperatura de 25°C .

Então o sensor foi submetido a outras temperaturas, onde foram medidos os novos valores de resistência, e destes dados obtidos foi construído o gráfico ilustrado na Figura 57, que apresenta também a equação determinante que descreve essa relação Resistência X Temperatura. Para o sensor analisado, o TCR obtido foi de -2,54%/K. De acordo com dados obtidos nas referências consultadas para a elaboração desta tese a faixa de variação de TCR está entre -0,26%/K a -6%/K, sendo então que o resultado obtido para o dispositivo resistivo foi dentro do esperado e extremamente satisfatório.

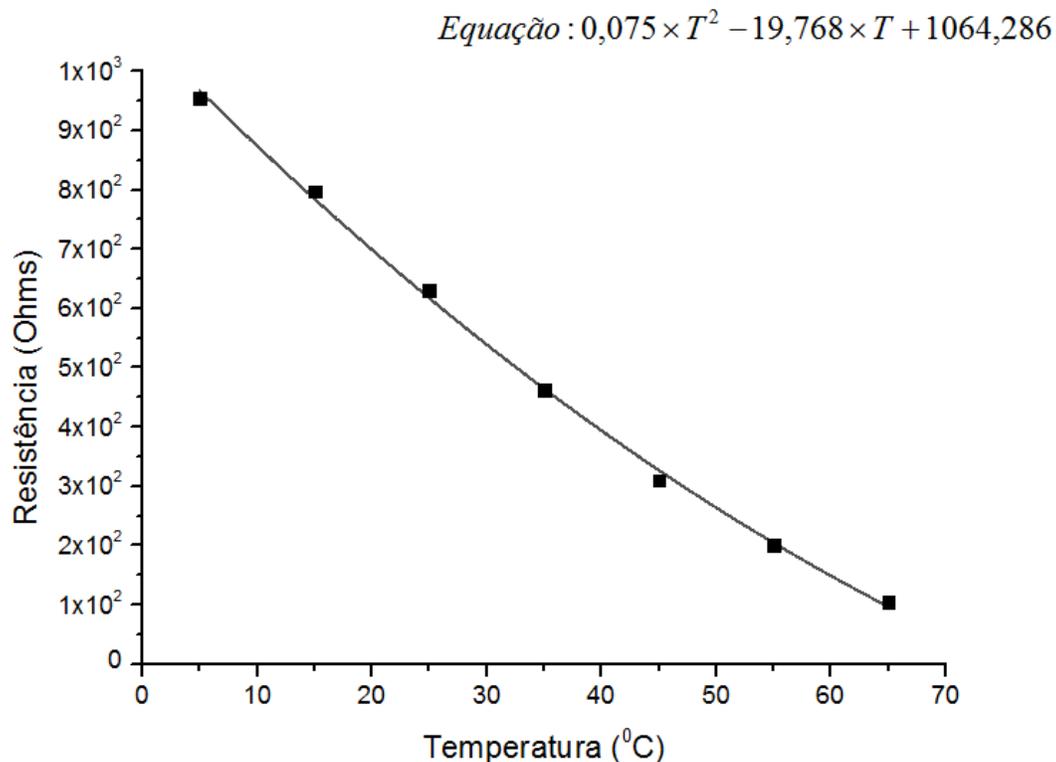


Figura 57 – Relação entre Variação da Resistência x Variação de Temperatura.

Como forma de validação final do dispositivo fabricado, comparações com dispositivos fabricados em outros trabalhos por outros autores foram realizadas, sendo que serão levados em consideração os principais parâmetros encontrados. Os trabalhos

dos outros autores são direcionados na aplicação de materiais e técnicas diferentes para a obtenção do dispositivo bolométrico, sendo que os detectores variam entre resistivos, piroelétricos, termopilhas e TFT, o que torna esta comparação bastante rica de informações qualitativas e quantitativas dos dispositivos bolométricos obtidos neste trabalho.

Tabela 9. Comparativo de parâmetros do sensor fabricado neste trabalho x sensores de outros autores.

Tipo do Sensor	Resistivo Ref. [21]	Piroelétrico Ref. [118]	Termopilha Ref. [11]	TFT Ref. [25]	- Ref. [89]	- Ref. [103]	Resistivo Este Trabalho
Elemento Ativo	SiGe-Poly	PVDF	Si-Poly	Si-a	-	-	Si-Poly
G (W/K)	-	-	-	-	$2,70 \times 10^{-4}$	8×10^{-7}	$1,37 \times 10^{-4}$
C (J/K)	-	-	-	-	$1,50 \times 10^{-5}$	1×10^{-9}	$5,22 \times 10^{-7}$
τ (ms)	22,80	-	-	9,70	55,00	1,20	3,79
NEP (WHz ^{1/2})	-	$0,24 \times 10^{-10}$	$25,20 \times 10^{-10}$	$0,13 \times 10^{-10}$	$2,40 \times 10^{-11}$	$1,20 \times 10^{-12}$	$9,25 \times 10^{-9}$
TCR (%/K)	-2,40	-	-	-4,00	-	-	-2,54
D* (mHz ^{1/2} W ⁻¹)	$2,26 \times 10^9$	$4,4 \times 10^8$	$3,59 \times 10^7$	$8,67 \times 10^8$	-	-	$6,04 \times 10^9$

Os resultados das comparações são apresentados na Tabela 9, sendo que pode-se concluir que o bolômetro projetado e fabricado neste trabalho, possui parâmetros dentro de faixas de valores esperados e praticados, além de apresentar uma compatibilidade completa com os processos de microeletrônica e microfabricação utilizados nos laboratórios destinados a estes fins.

Capítulo 6

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Ao término deste trabalho, foi obtido todo o processo de fabricação de um sensor de infravermelho distante sem resfriamento, sendo que os focos principais eram com relação a evaporação da camada do ouro poroso (ouro negro) usado como absorvedor de radiação infravermelha e da corrosão e formação de estruturas suspensas com silício policristalino, para a obtenção dos elementos resistivos. Foram apresentados processos para a obtenção do ouro negro e do silício policristalino que são compatíveis com as técnicas de fabricação de circuitos integrados e com as técnicas MEMS.

Como caráter inovador desta tese, pode-se destacar o desenvolvimento e aplicação de absorvedores de ouro poroso em dispositivos bolométricos, com altos índices de absorção (>80%) e um resistor de silício policristalino que apresentou um TCR de $-2,54\%K^{-1}$.

A formação do ouro negro e sua porosidade apresentaram uma dependência com relação a pressão de evaporação, sendo que foram obtidos altos índices de porosidade (72,1~87,6%) em deposições realizadas em altas pressões. Este filme apresentou uma alta absorção de radiação infravermelha, com refletância de 10% e 20% para as amostras evaporadas nas pressões de 6×10^{-4} Torr e 8×10^{-4} Torr.

Foram apresentados também problemas de corrosão lateral nas estruturas de silício policristalino utilizado na fabricação do elemento ativo de estruturas suspensas

bolométricas. Os problemas eram mais visíveis quando se buscava a formação de estruturas menores. Técnicas de corrosão úmida e técnicas de corrosão por plasma foram realizadas para poder avaliar o aspecto de corrosão lateral, sendo que a segunda opção se mostrou mais adequada para a aplicação desejada. Valores de TCR foram obtidos para os resistores de silício policristalino, ficando na ordem de -2,54%.

Medições preliminares dos bolômetros fabricados revelaram um rápido tempo de resposta para frequências de 0,8 THz com uma constante de tempo $1/e$ variando de 1,27 a 2,00 ms para diferentes incidências de radiação infravermelha, indicando então uma alta capacidade de recuperação para o estado inicial. Um dispositivo com altos valores de constante de tempo não é adequado para esta aplicação, pois boa parte da radiação incidente será perdida.

Conclui-se então que o trabalho foi realizado com sucesso, pois processos totalmente compatíveis com técnicas de microeletrônica e microfabricação foram obtidos, filmes de ouro negro com alta eficiência na absorção de infravermelho com baixa massa térmica, adequados para a detecção de radiação na faixa submilimétrica, foram obtidos e filmes de silício policristalino com propriedades mecânicas e TCR adequados a formação de resistores ativos suspensos, foram obtidos.

Durante a realização desta tese surgiram algumas propostas que podem ser utilizadas em trabalhos futuros, com o intuito de aperfeiçoar os sensores fabricados e desenvolver aplicações. Entre elas, podemos citar:

- O estudo de materiais que apresentem temperaturas de obtenção menores, com a finalidade de aperfeiçoar a compatibilidade dos sensores com os processos de microeletrônica atuais;
- Desenvolver materiais com TCR's maiores, com a finalidade de aumentar a sensibilidade dos sensores;

- Desenvolver conjuntos de sensores (*arrays*) para a formação de imagens térmicas na faixa de frequência proposta;

- Desenvolver sensores com eletrônica embarcada de forma monolítica, realizando um tratamento do sinal obtido no próprio dispositivo;

- Desenvolver materiais com a finalidade de melhorar a isolamento térmica e elétrica do dispositivo, assim como obter um aperfeiçoamento nos parâmetros de capacidade térmica e condutância térmica, que são parâmetros de fundamental importância no funcionamento de sensores térmicos.

CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA

Alguns outros trabalhos foram desenvolvidos baseando-se nos resultados desta tese, sendo estes citados a seguir:

- **Dissertações de mestrado:**

- Autor: Felipe Lorenzo Della Lucia

Título: Microbolômetros resistivos em membrana suspensa.

Local: Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

Universidade Estadual de Campinas, 2009.

Orientador: Prof. Jacobus Willibrordus Swart.

- Autora: Arline Maria Melo;

Título: Radiometria com sensores de banda larga para a faixa THz.

Local: Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

Universidade Estadual de Campinas, 2004.

Orientador: Prof. Edson Moschim.

- **Tese de doutorado:**

- Autor: Maj. Marcelo Silva Bortolini de Castro

- Título: Obtenção direta por pulverização catódica de filmes fins de óxido de vanádio de alto TCR.

- Local: INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA, 2008.

- Orientadores: Prof. Carlos Luiz Ferreira, IME e Prof. Roberto Ribeiro de Avillez, PUC-Rio

- **Convênio com o Centro de Tecnologia do Exército (CTEx), com interveniência da Funcamp:**

- Título: Matrizes de Sensores de Silício, Período: dez.07 a jul.10, coordenador: Prof. Dr. José Alexandre Diniz.

- Local: Centro de Componentes Semicondutores da Universidade Estadual de Campinas.

TRABALHOS PUBLICADOS

Artigos completos publicados em periódicos:

- 1. NELI, Roberto R, DOI, I., DINIZ, José A, SWART, Jacobus W, Development of Process for Far Infrared Sensor Fabrication. **Sensors and Actuators. A, Physical.** , v.132, p.400 - 406, 2004.

Abstract

The production of bolometers involves various processes. Those which are most likely to interfere with the operation of the sensors are the depositon of the porous gold (gold-black) layer used as an infrared absorber and the poly-Si etching used to form resistive devices. In this paper, we present an appropriate process for the deposition of porous gold for far-infrared detection, and provide a comparison of wet and plasma etching of poly-Si.

Keywords: Bolometer; Gold-black; Poly-Si; Etching; Microfabrication

- 2. NELI, Roberto R, MELO, Arline M, ARBEX, Cristiano J N, ZAKIA, Maria B P, DOI, I., KAUFMANN,, SWART, Jacobus W, MOSCHIM, E., The Development of a Submm-Wave Uncooled Bolometric System and Field Test. *Telecomunicações (Santa Rita do Sapucaí).* , v.07, p.60 - 65, 2004.

Abstract

The detection of radiation in the range of submillimeter and far infrared wavelenglbs has various applications in remote passive radiometric sensing, sometimes called as thermosensing, such as imaging of field targets, power line surveys, night vision, radio meteorology, atmospheric propagation and astrophysics. Developments directed to potential interest for

telecommunications in that band have been increasing in recent years. The development of a non-imaging bolometer detector for incoherent radiation in the submillimeter bands is presented. Construction details are presented for a detector's active material using polycrystalline and amorphous silicon. We describe the bandpass filters to be placed in front of the detector, which are being designed to be constructed using the resonant mesh technology, centered at the peak frequencies around 220, 410 and 670 GHz. The bolometric system will be submitted to qualification and performance tests at the focal plane of a 15-m submillimeter reflector located at a high altitude dry site (El Leoncito, Argentina Andes), using the Sun as a source of blackbody radiation, and a beacon transmitter at 410 GHz located in the far field with respect to the reflector. The first applications considered for the system are measurements of atmospheric propagation, solar imaging and tentative detection of solar transients (flares) in the selected bands.

Index Term-Infrared detectors, silicon, bandpass filters, bolometers.

Trabalhos publicados em anais de eventos (completo)

- 1. NELI, Roberto R, DOI, I., DINIZ, José A, Process Optimization for Microbolometers Fabrication In: 20th International Symposium on Microelectronics Technology and Devices - SBMicro 2005, 2005, Florianópolis. SC. **Proc. of the 20th International Symposium on Microelectronics Technology and Devices - SBMicro 2005**. Pennington, New Jersey, USA: The Electrochemical Society, Inc, 2005. v.PV2005. p.357 - 362

- 2. Biasotto, C, Monte, B, NELI, Roberto R, Ramos, A C S, DINIZ, José A, MOSHKALYOV, S A, DOI, I., SWART, Jacobus W, Suspended Membranes Made by Silicon Nitride Deposited by ECR-CVD In: 19th International Symposium on Microelectronics Technology and Devices - SBMicro 2004, 2004, Porto de Galinhas, Pe, Brasil. **Proc. of the 19th International Symposium on Microelectronics Technology and Devices - SBMicro 2004**. Pennington, New Jersey, USA: The Electrochemical Society, 2004. v.PV2004. p.119 - 124

- 3. NELI, Roberto R, DOI, I., MELO, Arline M, ARBEX, Cristiano J N, ZAKIA, Maria B P, KAUFMANN,, DINIZ, José A, SWART, Jacobus W, Uncooled Thermal Infrared Detector for Detection of Far-Infrared Radiation In: 19th International Symposium on Microelectronics Technology and Devices - SBMicro 2004, 2004, Porto de Galinhas-Pe. **Proc. of the 19th Internacional Symposium on Microelectronics Technology and Devices – SBMicro 2004**. Pennington, New Jersey, USA: The Electrochemical Society, Inc., 2004. v.PV2004. p.95 – 100.

- 4. NELI, Roberto R, MELO, Arline M, ARBEX, Cristiano J N, ZAKIA, Maria B P, DOI, I., KAUFMANN,, SWART, Jacobus W, MOSCHIM, E. A Submm-Wave/Far IR Uncooled Bolometer System and Applications In: International Microwave and Optoelectronics Conference - IMOC 2003, 2003, Foz do Iguaçu, PR -Brasil. **Proc. of the SBMO/IEEE MTT-S IMOC 2003**. Piscataway, NJ, USA: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2003. v.V. p.785 – 789. 2^a

- 5. NELI, Roberto R, DOI, I., RIBAS, R P, DINIZ, José A, SWART, Jacobus W. Orientation-Dependent Anisotropic Etching Simulation in Silicon Wafer In: 18th Symposium on Microelectronics Technology and Devices, 2003, São Paulo-SP, Brasil. **18th Symposium on Microelectronics Technology and Devices.** Pennington, New Jersey, USA: The Electrochemical Society, Inc, 2003. v.PV2003. p.389 – 396.

Trabalhos publicados em anais de eventos (resumo)

- 1. NELI, Roberto R, DOI, I., GODOY FILHO, J, DINIZ, José A, SWART, Jacobus W. Deposition and Characterization of Gold for Micromachined Bolometers Utilized as Detector of Infrared Radiation In: 16th International Vacuum Congress, 2004, Veneza, Itália. **Proc. of the IVC-16.** , 2004. v.Book 2. p.953 - 953

Trabalhos publicados em anais de eventos (resumo expandido)

- 1. NELI, Roberto R, DOI, I., DINIZ, José A, SWART, Jacobus W. Process Development for Far Infrared Sensor Fabrication In: EUROSENSORS XIX, 2005, Barcelona, Spain. **Proc. of the EUROSENSORS XIX.** , 2005. v.WPb24. p.1 - 4

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Rogalski, A., *Infrared Detectors*. 2^a ed. Boca Raton: CRC Press, 2011.
2. *Infrared Vision*. Disponível em:
http://www.absoluteastronomy.com/topics/Infrared_vision. [Acessado em 18/01/2012]
3. Van Herwaarden, A.W. and P.M. Sarro, *Thermal sensors based on the seebeck effect*. *Sensors and Actuators*. vol. 10(3–4): p. 321-346. 1986.
4. Yarris, L. *Taking the Measure of the Seebeck effect*. 2007. no, Berkeley.
5. Sharma, U.C. (2004) *Infrared Detectors*. Electronic Systems Group.
6. Byrnes, J., *Unexploded Ordnance Detection and Mitigation*. Newport: Springer, 2009.
7. Bock, J.J., et al., *A novel bolometer for infrared and millimeter-wave astrophysics*. *Space Science Reviews*. vol. vol. 74: p. 229-235. 1995.
8. Shepherd, F.D., J. Yang, and A.C. and Yang, *Silicon Schottky retinas for infrared imaging*. *International Electron Devices Meeting*. vol. vol 1973: p. 90-101. 1973.
9. Selders, R.H.a.M., *A highly sensitive thin-film bolometer*. *Transducer Technology and Temperature Measurement Conference*. vol. Sensor 82: p. 102-116. 1982.
10. Liddiard, K.C., *Thin-film resistance bolometer IR detectors*. *Infrared Physics*. vol. vol 24(Jan.): p. 57-64. 1984.
11. Schaufelbuhl, A., et al., *Uncooled low-cost thermal imager based on micromachined CMOS integrated sensor array*. *Journal of Microelectromechanical Systems*. vol. 10(4): p. 503-510. 2001.
12. D. Murphy, M.R., R. Wyles, J. Asbrock, N. Lum, A. Kennedy, J. Wyles, C. Hewitt, G. Graham, and W. Radford, *High-sensitivity (25- μ m pitch) microbolometer FPAs and application development*. *Proceedings of SPIE*. vol. vol. 4369: p. 222-234. 2001.
13. Rogalski, A., *Infrared Detectors for the Future*. *Acta Physica Polonica A*. vol. 116(3): p. 389-406. 2009.
14. Wood, R.A., *Uncooled Thermal Imaging with Monolithic Silicon Focal Planes*. *Infrared Technology Xix*. vol. 2020: p. 322-329. 1993.
15. Mottin, E., et al., *Enhanced amorphous silicon technology for 320x240 microbolometer arrays with a pitch of 35 μ m*. *Infrared Technology and Applications Xxvii*. vol. 4369: p. 250-256. 2001.
16. Mottin, E., et al., *Uncooled Amorphous Silicon Technology: High Performance Achievement and Future Trends*. *Proceedings of SPIE*. vol. 4721: p. 56 - 63. 2002.
17. Francisco, G.L., *Amorphous silicon bolometer for fire/rescue*. *Thermosense XXIII*. vol. 4360: p. 138-148. 2001.

18. Minassian, C., et al., *Uncooled amorphous silicon TEC-less 1/4 VGA IRFPA with 25 pixel-pitch for high volume applications*. Infrared Technology and Applications Xxxiv, Pts 1 and 2. vol. 6940. 2008.
19. Garcia, M., et al., *IR bolometers based on amorphous silicon germanium alloys*. Journal of Non-Crystalline Solids. vol. 338: p. 744-748. 2004.
20. Ichihara, T., et al., *A high performance amorphous Si_{1-x}C_x:H thermistor bolometer based on micro-machined structure*. Transducers 97 - 1997 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Digest of Technical Papers, Vols 1 and 2: p. 1253-1256. 1997.
21. Sedky, S., et al., *Characterization and optimization of infrared poly SiGe bolometers*. Ieee Transactions on Electron Devices. vol. 46(4): p. 675-682. 1999.
22. Wissmar, S.G.E., et al., *SiGe quantum well thermistor materials*. Thin Solid Films. vol. 517(1): p. 337-339. 2008.
23. KVisteroy, T., et al., *Far infrared low-cost uncooled bolometer for automotive use*. Advanced Microsystems for Automotive Applications 2007: p. 265-278. 2007.
24. Kolahdouz, M., et al., *Improvement of infrared detection using Ge quantum dots multilayer structure*. Applied Physics Letters. vol. 96(21). 2010.
25. Liang, D., Y. Ruifeng, and L. Litan, *Fabrication and characterization of integrated uncooled infrared sensor arrays using a-Si thin-film transistors as active elements*. Microelectromechanical Systems, Journal of. vol. 14(5): p. 1167-1177. 2005.
26. Zerov, V.Y., et al., *Vanadium oxide films with improved characteristics for IR microbolometric matrices*. Technical Physics Letters. vol. 27(5): p. 378-380. 2001.
27. Zerov, V.Y., et al., *Uncooled membrane-type linear microbolometer array based on a VO_x film*. Journal of Optical Technology. vol. 68(6): p. 428-431. 2001.
28. Chen, C., et al., *Characterizations of VO₂-based uncooled microbolometer linear array*. Sensors and Actuators A: Physical. vol. 90(3): p. 212-214. 2001.
29. Chen, C., et al., *Linear uncooled microbolometer array based on VO_x thin films*. Infrared Physics and Technology. vol. 42(2): p. 87-90. 2001.
30. Chen, C., et al., *Micromachined Uncooled IR Bolometer Linear Array Using VO₂ Thin Films*. International Journal of Infrared and Millimeter Waves. vol. 22(1): p. 53-58. 2001.
31. Yon, J.J., G. Destefanis, and E. Mottin, *Recent development in infrared technologies at Leti for earth observation*. Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites Viii. vol. 5570: p. 525-536. 2004.
32. Roxhed, N., et al., *Low-Cost Uncooled Microbolometers for Thermal Imaging*. Optical Sensing and Detection. vol. 7726. 2010.
33. Wissmar, S.G.E., et al., *SiGe quantum wells for uncooled long wavelength infrared radiation (LWIR) sensors*. Proceedings of the 17th International Vacuum Congress/13th International Conference on Surface Science/International Conference on Nanoscience and Technology. vol. 100. 2008.

34. Gunther, C.G., Bruno; Kouadio, Fiény Kouadio; Routoure, Jean-Marc; Méchin, Laurence, *Bolometric Applications at Room Temperature*, in *University of Caen*. 2009: Caen Cedex.
35. Bhan, R.K., et al., *Uncooled Infrared Microbolometer Arrays and their Characterisation Techniques*. Defence Science Journal. vol. 59(6): p. 580-589. 2009.
36. Lentz, W.A. Characterization of Noise in Uncooled IR Bolometer Arrays. 1998. Tese de Mestrado no Department of Electrical Engineering and Computer Science, Massachusetts Institute of Technology.
37. Zerov, V.Y. and V.G. Malyarov, *Heat-sensitive materials for uncooled microbolometer arrays*. Journal of Optical Technology. vol. 68(12): p. 939-948. 2001.
38. Madou, J.M., *Fundamentals of Microfabrication*. 2^a ed: Editora CRC Press, 2002.
39. Pierson, O.H., *Handbook of Chemical Vapor Deposition, Principles, Technology and Application*. 1^a ed: Noyes Publications, 1992.
40. Jackson, R.L., *Chemical Vapor Deposition of SiO₂*. Sol. St. Techno.: p. 107. 1987.
41. Mariano, W.C. Obtenção de Filmes Finos Isolantes de SiO₂ e Si₃N₄ por Deposição Química a Fase Vapor Auxiliada por Plasma Remoto. 1996. Dissertação de Mestrado no FEEC, UNICAMP.
42. Bonfim, M.J.C. Desenvolvimento de um Sistema RT/PCVD para Deposição de Filmes Finos Isolantes e Metálicos. 1992. Dissertação de Mestrado no FEEC, UNICAMP.
43. ECR System: Anelva Corporation, brochure
44. Neli, R.R. Desenvolvimento de Micro-Estruturas Mecânicas Sobre o Silício Através da Corrosão do Substrato pela Superfície. Campinas, 2002. no CCS - UNICAMP, UNICAMP.
45. Zubel, I., *Silicon Anisotropic Etching in Alkaline Solutions II. On the Influence of Anisotropic on the Smoothness of Etched Surfaces*. Sensors and Actuators A. vol. 70: p. 260-268. 1998.
46. Collins, S.D., *Etch Stop Techniques for Micromachining*. Journal of Electrochemical Society. vol. 144(nº. 6): p. 2242-2262. 1997.
47. Becker, W., et al., *Black gold deposits as absorbers for far infrared radiation*. physica status solidi (b). vol. 194(1): p. 241-255. 1996.
48. Unewisse, M.H., et al. *Growth and properties of semiconductor bolometers for infrared detection*. 1995. San Diego, CA, USA: SPIE.
49. Tissot, J.-L., et al. *LETI/LIR's amorphous silicon uncooled microbolometer development*. 1998. Orlando, FL, USA: SPIE.
50. Mahfoz-Kotb, H., et al., *Polycrystalline silicon thin films for MEMS applications*. Thin Solid Films. vol. 427(1-2): p. 422-426. 2003.
51. Smith, W.F., *Principles of materials science and engineering*. 3^a ed. New York: McGraw_Hill, 1999.

52. Supadech, J., et al. *Characteristics of silicon thin film thermistors*. no *Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, 2008. ECTI-CON 2008. 5th International Conference on*. 2008.
53. Brady Iii, J.F., et al. *Advances in amorphous silicon uncooled IR systems*. 1999. Orlando, FL, USA: SPIE.
54. Tissot, J.L., et al., *High-performance uncooled amorphous silicon video graphics array and extended graphics array infrared focal plane arrays with 17- μ m pixel pitch*. *Optical Engineering*. vol. 50(6). 2011.
55. Schimert, T., et al. *Amorphous silicon based large format uncooled FPA microbolometer technology*. 2008. Orlando, FL, USA: SPIE.
56. Street, R.A., *Hydrogenated Amorphous Silicon*. 1^a ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1991.
57. Smith, A., F.E. Jones, and R.P. Chasmar, *The Detection and Measurement of Infrared Radiation*. Oxford. 1968.
58. Mottin, E., et al. *Uncooled amorphous silicon technology enhancement for 25- μ m pixel pitch achievement*. 2003. Seattle, WA, USA: SPIE.
59. Liddiard, K.C., *Application of interferometric enhancement to self-absorbing thin film thermal IR detectors*. *Infrared Physics*. vol. 34(4): p. 379-387. 1993.
60. Kolahdouz, M., et al., *The performance improvement evaluation for SiGe-based IR detectors*. *Solid-State Electronics*. vol. 62(1): p. 72-76. 2011.
61. Yon, J.J., et al., *Low resistance a-SiGe based microbolometer pixel for future smart IR FPA*. Bellingham: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2010.
62. Maier-Schneider, D., et al., *Variations in Young's modulus and intrinsic stress of LPCVD-polysilicon due to high-temperature annealing*. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. vol. 5(2): p. 121. 1995.
63. Sedky, S., et al., *Structural and mechanical properties of polycrystalline silicon germanium for micromachining applications*. *Journal of Microelectromechanical Systems*. vol. 7(4): p. 365-372. 1998.
64. King, T.J. and K.C. Saraswat, *Polycrystalline Silicon-Germanium Thin-Film Transistors*. *Ieee Transactions on Electron Devices*. vol. 41(9): p. 1581-1591. 1994.
65. Van Gerwen, P., et al., *Thin-film boron-doped polycrystalline silicon70%-germanium30% for thermopiles*. *Sensors and Actuators A: Physical*. vol. 53(1-3): p. 325-329. 1996.
66. Sedky, S., et al., *IR bolometers made of polycrystalline silicon germanium*. *Sensors and Actuators a-Physical*. vol. 66(1-3): p. 193-199. 1998.
67. Sedky, S., et al., *Characterization of bolometers based on polycrystalline silicon germanium alloys*. *Ieee Electron Device Letters*. vol. 19(10): p. 376-378. 1998.
68. Jr., J.M.A., *Solid State Temperature Sensor Employing a Pair of Dissimilar Schottky-Barrier Diodes*, in *Unidet States Patent*, B.T. Laboratories, Editor. 1971: USA.

69. Shepherd, F.D. and J.E. Murguia, *A comparison of infrared detection mechanisms in thermal-emissive vs. photo-emissive silicon Schottky barrier arrays*, in *Solid State Scientific Corporation*. 2000, Proceedings SPIE New Hampshire. p. 90-101.
70. Sze, S.M. and K.K. Ng, *Physics of semiconductor devices*. 3^a ed. New Jersey: Wiley-Interscience, 2007.
71. *Hamamatsu s1227-BQ photodiode datasheet*. Disponível em: http://sales.hamamatsu.com/assets/pdf/parts_S/s1227_series_kspd1036e05.pdf. [Acessado em 15/01/2012]
72. Wilson, J. and J.F.B. Hawkes, *Optoelectronics - An introduction* (2nd edition), 1989.
73. Paschotta, R. Disponível em: <http://www.rp-photonics.com/photodiodes.html>. [Acessado em 15/03/2012]
74. James, T., et al. *Investigation of Surface Passivation of HgCdTe MWIR Photodiode Arrays via a Flood Illumination Technique*. no *Optoelectronic and Microelectronic Materials and Devices, 2004 Conference on*. 2004.
75. Swift, G., T.S. Molinski, and W. Lehn, *A fundamental approach to transformer thermal modeling. I. Theory and equivalent circuit*. *Power Delivery, IEEE Transactions on*. vol. 16(2): p. 171-175. 2001.
76. Kinch, M.A., *Fundamental physics of infrared detector materials*. *Journal of Electronic Materials*. vol. 29(6): p. 809-817. 2000.
77. Djuric, Z. *New generation of thermal infrared detectors*. no *Microelectronics, 1995. Proceedings., 1995 20th International Conference on*. 1995.
78. Rogalski, A., *Infrared detectors: status and trends*. *Progress in Quantum Electronics*. vol. 27(2-3): p. 59-210. 2003.
79. Noor, M.M., B. Bais, and B.Y. Majlis. *The effects of temperature and KOH concentration on silicon etching rate and membrane surface roughness*. no *Semiconductor Electronics, 2002. Proceedings. ICSE 2002. IEEE International Conference on*. 2002.
80. Merlos, A., et al., *Tmah/lpa Anisotropic Etching Characteristics*. *Sensors and Actuators a-Physical*. vol. 37-8: p. 737-743. 1993.
81. Steinsland, E., et al., *Boron etch-stop in TMAH solutions*. *Sensors and Actuators A: Physical*. vol. 54(1-3): p. 728-732. 1996.
82. Pigeat, P., D. Rouxel, and B. Weber, *Calculation of thermal emissivity for thin films by a direct method*. *Physical Review B*. vol. 57(15): p. 9293-9300. 1998.
83. Taralli, E., et al., *Improvement of titanium film absorption with antireflection coatings*. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. vol. 559(2): p. 757-759. 2006.
84. Betts, D.B., et al., *Infrared reflection properties of five types of black coating for radiometric detectors*. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*. vol. 18(8): p. 689. 1985.

85. Novotný, M., et al., *Pulsed laser treatment of gold and black gold thin films fabricated by thermal evaporation*. Central European Journal of Physics. vol. 7(2): p. 327-331. 2009.
86. Fang, Y., et al., *Preparation and characterization of ultra-low density porous gold foams*. Materials Letters. vol. 67(1): p. 46-48. 2012.
87. Kohl, F., et al., *A model of metal film resistance bolometers based on the electro-thermal feedback effect*. Sensors and Actuators A: Physical. vol. 115(2-3): p. 308-317. 2004.
88. Richards, P.L., *Bolometers for infrared and millimeter waves*. Journal of Applied Physics. vol. 76(1): p. 1-24. 1994.
89. Verghese, S., et al., *Sensitive Bolometers Using High-T(C) Superconducting Thermometers for Wavelengths 20-30-Mu-M*. Journal of Applied Physics. vol. 74(6): p. 4251-4253. 1993.
90. Mechin, L., J.C. Villegier, and D. Bloyet, *Suspended epitaxial YBaCuO bolometers on silicon and SIMOX substrates*. Ieee Transactions on Applied Superconductivity. vol. 7(2): p. 2382-2385. 1997.
91. Rieke, G.H. and E.T. Young, *Prospects for Far-Infrared Arrays*. Infrared Astronomy with Arrays: The Next Generation. vol. 190: p. 418-424. 1994.
92. Ahmed, A.H.Z., et al. *A surface micromachined amorphous Ge_xSi_{1-x}O_y bolometer for thermal imaging applications*. 2004. Ottawa, Canada: SPIE.
93. Ahmed, A.H.Z. and R.N. Tait, *Characterization of amorphous Ge_xSi_{1-x}O_y for micromachined uncooled bolometer applications*. Journal of Applied Physics. vol. 94(8): p. 5326-5332. 2003.
94. Neuzil, P. and T. Mei, *Evaluation of thermal parameters of bolometer devices*. Applied Physics Letters. vol. 80(10): p. 1838-1840. 2002.
95. Lakew, B., et al., *High-T_c transition-edge superconducting (TES) bolometer on a monolithic sapphire membrane - construction and performance*. Sensors and Actuators a-Physical. vol. 114(1): p. 36-40. 2004.
96. Lakew, B., S. Aslam, and J.C. Brasunas, *Performance of a far-IR TES bolometer on monolithic sapphire membrane*. Optical Sensing. vol. 5459: p. 76-80. 2004.
97. Eppeldauer, G., A.L. Migdall, and C.L. Cromer, *Characterization of a High Sensitivity Composite Silicon Bolometer*. Metrologia. vol. 30(4): p. 317. 1993.
98. Turner, A.D., et al., *Silicon nitride micromesh bolometer array for submillimeter astrophysics*. Applied Optics. vol. 40(28): p. 4921-4932. 2001.
99. Jones, R.C., *The General Theory of Bolometer Performance*. J. Opt. Soc. Am. vol. 43(1): p. 1-10. 1953.
100. Downey, P.M., et al., *Monolithic silicon bolometers*. Appl. Opt. vol. 23(6): p. 910-914. 1984.
101. Mechin, L., et al., *Low-frequency noise in patterned La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ thin films*. Journal of Applied Physics. vol. 93(10): p. 8062-8064. 2003.

102. Li, B., S.S. Huang, and X. Zhang, *Transient mechanical and electrical properties of uncooled resistive microbolometer focal plane arrays*. Infrared Detector Materials and Devices. vol. 5564: p. 123-132. 2004.
103. Berkowitz, S.J., et al., *Low noise high-temperature superconducting bolometers for infrared imaging*. Applied Physics Letters. vol. 69(14): p. 2125-2127. 1996.
104. Harris, L. and J.K. Beasley, *The Infrared Properties of Gold Smoke Deposits*. Journal of the Optical Society of America. vol. 42(2): p. 134 - 140. 1952.
105. Harris, L.M., R. T. ; and Siegel, B. M., Journal of Optical Soc. America. vol. 48: p. 582. 1958.
106. Swart, J.W., *Semicondutores: fundamentos, técnicas e aplicações*. 1ª ed. Campinas: Editora da Unicamp, 2008.
107. Diniz, J.A. *Obtenção de óxidos de Si através de forno convencional*. Disponível em: <http://www.ccs.unicamp.br/download/ServiceOxidacao.pdf>. [Acessado em 09/01/2012]
108. Cotrin, R.T. *Implementação de um sistema LPCVD vertical para obtenção de filmes finos de silício policristalino*. Campinas, 2001. Dissertação de Mestrado no CCS-FEEC, UNICAMP.
109. Pedrine, A.G. *Deposição de Silício Policristalino por LPCVD*. São Paulo, 1993. Dissertação de Mestrado no, USP.
110. Neli, R.R., et al., *Development of process for far infrared sensor fabrication*. Sensors and Actuators a-Physical. vol. 132(1): p. 400-406. 2006.
111. Fuller, M.P. and P.R. Griffiths, *Infrared microsampling by diffuse reflectance Fourier transform spectrometry*. Appl. Spectrosc. vol. 34: p. 533-539. 1980.
112. Fuller, M.P. and P.R. Griffiths, *Infrared-Analysis by Diffuse Reflectance Spectrometry*. International Laboratory(Jan-): p. 19-&. 1980.
113. Mitchell, M.B., *Fundamentals and Applications of Diffuse-Reflectance Infrared Fourier-Transform (Drift) Spectroscopy*. Structure-Property Relations in Polymers. vol. 236: p. 351-375. 1993.
114. Melo, A.M. *Radiometria com Sensores de Banda Larga na Faixa dos THz*. Campinas, 2004. Tese de Mestrado no FEEC, Unicamp.
115. Arbex, C.J.N. *Dissertação de Mestrado em preparação*. Campinas, no FEEC, Unicamp.
116. Neli, R.R., et al. *A submm-wave/far IR uncooled bolometer system and applications*. no *Proceedings of the 2003 SBMO/IEEE MTT-S International*. 2003.
117. Melo, A.M., et al., *Metal mesh resonant filters or terahertz frequencies*. Applied Optics. vol. 47(32): p. 6064-6069. 2008.
118. Binnie, T.D., et al., *An integrated 16 x 16 PVDF pyroelectric sensor array*. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control. vol. 47(6): p. 1413-1420. 2000.

APÊNDICE A

RUÍDOS EM DETECTORES TÉRMICOS

De uma maneira simplificada, o ruído em microeletrônica pode ser considerado como sendo todo tipo de fenômeno, que ocorre de forma aleatória ou não, e que provoca perturbações ou dificuldades de medição do sinal. O ruído é um fator determinante na limitação do desempenho dos detectores térmicos, e determinam a mínima potência detectável por esses sensores. Como não é possível prever a amplitude do ruído em determinado momento, pois os mecanismos de ruído resultam de processos aleatórios, o valor do ruído é normalmente especificado em termos de valores RMS de tensão ou de corrente.

Quando se faz uma análise mais aprofundada dos ruídos a serem considerados em um detector bolométrico, existem três tipos que podem ser considerados como sendo os principais: ruído branco, ruído $1/f$ (*flicker*) e o ruído térmico.

A.1 Ruído $1/f$ ou Ruído *flicker*:

O ruído *flicker* tem um espectro de ruído relacionado a $1/f$, e é geralmente linearmente dependente da corrente. Por definição, é aquele cuja densidade espectral de potência é proporcional ao inverso da frequência, sendo, portanto, dominante em baixas frequências. A origem deste ruído em semicondutores não é completamente dominada, sabendo-se apenas que este pode estar associado à correntes de fuga na superfície, a efeitos da barreira de potencial nos contatos e a estados da superfície. Não existe um modelamento

padrão, sendo necessário desenvolvê-lo para cada tipo de sistema que estiver sendo estudado. Porém, ele comumente é representado pela fórmula mostrada a seguir:

$$V_{1/f}^2 = \alpha * V_{bias}^2 * B_{1/f}$$

Sendo: $B_{1/f}$: as larguras de banda eficazes;

α : é uma constante de proporcionalidade desconhecida;

V_{bias} : a polarização do bolômetro.

A.2 Ruído Johnson ou Ruído Térmico:

O ruído térmico também é chamado de ruído Johnson, e é uma característica de todos os resistores. A agitação térmica de elétrons em um resistor causa variações na velocidade dos portadores no material, dando origem a flutuações aleatórias na tensão entre seus terminais. O ruído térmico é consequência de troca de calor do sensor com o ambiente que está ao seu redor, portanto pode aparecer em detectores que estejam em equilíbrio, ou seja, com ausência de polarização. Esta é uma fonte de ruído que não apresenta dependência com a frequência, ou seja, é uma fonte de ruído branco (presente em todo o espectro de frequências) e dependendo apenas da temperatura.

A análise do ruído térmico acaba se tornando relativamente difícil devido ao seu baixo nível. Este baixo nível de ruído é obtido quando o bolômetro é construído de forma a ter um G com alto valor ($\sim 1 \times 10^{-4}$ V/W).

Pode-se notar através de uma análise das equações de ruídos que o ruído Johnson pode ser facilmente desmembrado do ruído 1/f, pois eles têm características espectrais diferentes. O ruído térmico pode ser calculado pela equação mostrada a seguir:

$$V_{Johnson}^2 = 4 * k * T * R * B_{Johnson}$$

Sendo: **k**: a constante de Boltzmann;

 T: a temperatura do bolômetro;

 B_{Johnson} : as larguras de banda eficazes.

A.3 Ruído de Fundo ou Ruído de Background:

Este ruído é causado pelos elementos que estão ao redor do sensor, e que emitem radiação infravermelha. Portanto, esta radiação é responsável pelo sinal de fundo, que acaba por determinar a sensibilidade máxima deste dispositivo.

Para se minimizar os efeitos da radiação de fundo, busca-se a construção de sensores que estejam termicamente isolados dos seus elementos vizinhos e pode-se dizer que o está limitado por flutuações da radiação de fundo, pois, a única forma de perda de calor é por radiação.

O ruído de fundo, pode ser obtido através da equação a seguir:

$$V_{fundo}^2 = 8 * k * \sigma * (T^5 + T_B^5)$$

sendo:

k: Constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K);

σ : Constante de Stefan-Boltzmann (5.67×10^{-8} [W m⁻² K⁻⁴]).

A.4 Ruído Fônion:

Ruído fônion, também conhecido como ruído de flutuação térmica, surge a partir da troca aleatória de energia entre uma massa térmica e seu ambiente. Esta energia é quantizada sob a forma de fônions, sendo que cada fônion tem uma energia da ordem $k.T$, onde k é a constante de Boltzmann e T é a temperatura. A troca aleatória de energia leva a flutuações de temperatura e este fenômeno ocorre mesmo quando a massa térmica e o ambiente estão em equilíbrio térmico. Se um dispositivo tem uma resistência elétrica dependente da temperatura, então estas flutuações na temperatura causam flutuações na resistência. De modo prático, impurezas, defeitos e descolamentos podem ser os causadores de alterações no movimento eletrônico do material.

Este ruído pode ser obtido pela equação a seguir:

$$V_{fonon}^2 = 4 * k * T^2 * G$$

Sendo:

k: Constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K);

T: Temperatura do bolômetro [K];

G: Condutância térmica do bolômetro [W/K].

A.5 Potência Equivalente de Ruído (NEP)

Quando se realiza o estudo de desempenho de um sistema, a melhor figura de mérito a ser considerada é a potência equivalente de ruído (NEP). Este parâmetro define a sensibilidade de um detector térmico e pode ser definido como sendo a potência incidente necessária para produzir um sinal de saída igual ao ruído RMS do sistema. O NEP deriva diretamente das variações do ruído de tensão, com é mostrado na equação a seguir:

$$NEP = \frac{G}{TCR} * \frac{V_n}{V_{bias}}$$

Sendo:

V_n: Tensão de ruído;

G: Condutância térmica do bolômetro [W/K];

V_{bias}: a polarização do bolômetro.

Assumindo que o TCR e o G permaneçam relativamente constantes para um determinado processo, uma boa figura de mérito a ser considerada é: V_n/V_{bias} .

Um outro modo de se analisar o NEP, é descrito pelas equações a seguir:

$$NEP^2 = NEP_{Fundos}^2 + NEP_{sensor}^2$$

onde: $NEP_{Sensor}^2 = NEP_{Fonons}^2 + NEP_{Johnson}^2$

portanto: $NEP^2 = \frac{4kTR}{S^2} + 4kT^2G + 8K\sigma(T^5 + T_B^5)$

sendo:

k: Constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K);

σ : Constante de Stefan-Boltzmann (5.67×10^{-8} [W m⁻² K⁻⁴])