



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

Microbolômetros Resistivos em Membrana Suspensa

Autor: Felipe Lorenzo Della Lucia

Orientador: Jacobus Willibrordus Swart

Trabalho apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Comissão Examinadora

Nome: Jacobus Willibrordus Swart (DSIF/FEEC/UNICAMP)

Nome: José Alexandre Diniz (DSIF/FEEC/UNICAMP)

Nome: Antonio Carneiro de Mesquita Filho (COPPE/UFRJ)

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

D38m Della Lucia, Felipe Lorenzo
Microbolômetros resistivos em membrana suspensa /
Felipe Lorenzo Della Lucia. --Campinas, SP: [s.n.],
2009.

Orientador: Jacobus Willibrordus Swart.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação.

1. Radiação infravermelha. 2. Medidas
eletromagnética. 3. Microeletrônica. 4. Semicondutores.
I. Swart, Jacobus Willibrordus. II. Universidade
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica
e de Computação. III. Título.

Título em Inglês: Suspended-membrane resistive microbolometers

Palavras-chave em Inglês: Bolometers, Microbolometers, Infrared, Microfabrication,
Semiconductors

Área de concentração: Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Antônio Carneiro de Mesquita Filho, José Alexandre Diniz

Data da defesa: 20/02/2009

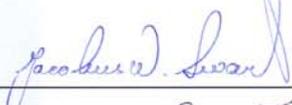
Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

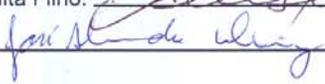
Candidato: Felipe Lorenzo Della Lucia

Data da Defesa: 20 de fevereiro de 2009

Título da Tese: "Microbolômetros Resistivos em Membrana Suspensa"

Prof. Dr. Jacobus Willibrordus Swart (Presidente): 

Prof. Dr. Antônio Carneiro de Mesquita Filho: 

Prof. Dr. José Alexandre Diniz: 

Agradecimentos

Dizem que a felicidade de uma pessoa depende da profundidade de sua gratidão. Considero-me feliz, especialmente pela gratidão que tenho:

Ao meu orientador professor Dr. Jacobus Swart pela oportunidade que me foi dada há quase 5 anos atrás, ainda na graduação, quando descobri o quanto gosto de trabalhar com semicondutores. Obrigado pela amizade e pela confiança, desde os tempos da iniciação científica até o mestrado e as aulas de simulação e os cursos que tive a oportunidade de ajudar a ministrar.

Ao amigo Leonardo Zoccal pelos conselhos, amizade, pelas horas que passamos juntos no laboratório e toda ajuda que me foi dada todas as etapas deste trabalho.

Ao amigo Leandro Manera pela ajuda durante as medidas de ruído e pela grande amizade que construímos.

Ao professor José Alexandre Diniz pelo apoio e pela confiança durante todo meu mestrado.

Ao professor Newton Frateschi pela grande ajuda e pelos ensinamentos de medidas ópticas, assim como os fenômenos físicos envolvidos no trabalho.

Aos professores Fabiano Fruett e Ioshiaki Doi pela ajuda nas medidas do dispositivo, pelas críticas construtivas e pelas horas de discussão acerca deste trabalho.

Ao Aristides Pavani por ter me ajudado sempre que precisei, pela oportunidade que me foi oferecida de aprender ainda mais no CTI e pelas dicas que sempre me ajudaram em meu trabalho.

Aos funcionários do CCS que me auxiliaram na execução deste trabalho, em especial, José Godoy e Regina com quem criei grande afeto.

Ao Marcelo Macchi e Alfredo Vaz pelas imagens realizadas no Microscópio Eletrônico e cortes realizados no FIB.

Aos amigos que fiz no CCS e aqueles que, mesmo longe, conseguimos sempre manter-nos unidos: Marcelo, João Victor, Adriano, Macabeu, Fábio, André, Marcos, Thiago, Juliana, Angélica, Bárbara, Heraldo, Diego, Ricardo Cotrin, Andrea, Cléber e Sr. Hugo.

Por fim, agradeço a minha companheira Priscilla, que sempre me motivou e me incentiva a encarar os obstáculos sempre com a cabeça erguida e a Deus pela paciência e perseverança para a conclusão deste trabalho.

Dedico este trabalho ao meu pai, Ricardo e minha mãe Terezinha, que sempre me ensinaram os verdadeiros valores da vida e que, por muitas vezes, sofreram com minha distância de casa durante estes 7 anos.

Aos meus irmãos Ricardo e Susana pelo companheirismo e pelo orgulho que sinto por ter crescido ao lado de vocês.

Resumo

Este trabalho tem como objetivo desenvolver a tecnologia de microbolômetros resistivos que serão utilizados como sensores de infravermelho. Para isso, foi realizado um projeto inicial de dispositivo constituído de cálculos matemáticos e simulações computacionais a fim de prever o comportamento do dispositivo e ajustar parâmetros de processo de fabricação de modo a aperfeiçoar seu desempenho.

De posse dos dados do projeto, foi realizada a fabricação. Foram fabricados microbolômetros resistivos de Silício Policristalino (Si-poli) em membranas suspensas para aumentar a isolamento térmica do material resistivo. Ouro Negro (poroso) foi evaporado de forma a funcionar como camada absorvedora de radiação infravermelha. Eventuais problemas ocorridos durante a fabricação foram relatados, sanados e realimentados ao processo de fabricação de forma a simplificar e aperfeiçoar ao máximo a fabricação. Imagens realizadas por microscópio eletrônico de varredura e cortes realizados utilizando Feixe de Íons Focalizado mostram os detalhes da fabricação, indicando os materiais utilizados e a forma na qual a membrana de Si-poli está isolada do substrato.

As medidas realizadas nos dispositivos fabricados revelam uma responsividade de 1,8 V/W, TCR de -0,95%/K, tempo de resposta de 13 ms e detectividade de $5,66 \cdot 10^5 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$. Apesar de algumas destas características não se encontrarem dentro dos parâmetros projetado, outras se assemelham às características de dispositivos comerciais e publicados na literatura.

Como resultado deste trabalho, um ambiente favorável foi preparado para o desenvolvimento deste tipo de dispositivo. Matrizes de dispositivos poderão também ser desenvolvidas de forma a produzirem imagens em infravermelho que poderão ser utilizadas em diversas aplicações diferentes.

Abstract

This work has as a main goal to develop the resistive microbolometers technology that will be used as infrared sensors. In order to do so, an initial device design was performed using mathematical calculations and computational simulations were accomplished to predict the behavior and adjust the fabrication process parameters of this device to improve its performance.

After the simulations, the fabrication was performed. Using Polysilicon as active element of the resistive microbolometers, suspended membranes were fabricated to enhance thermal isolation. Gold Black (porous) was evaporated to work as an infrared radiation absorber. Some problems that occurred during the fabrication were reported, solved and provided feedback to simplify and improve the fabrication. Some Scanning Electron Microscopy images and cuts using Focused Ion Beam show some fabrication details, indicating the materials used and how the Polysilicon membrane is isolated from the substrate.

The measurements performed in the fabricated device show that the responsivity is about 1.8 V/W, the TCR is about -0.95%/K, the response time is 13 ms and the specific detectivity is $5,66 \cdot 10^5 \text{ cm.Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$. Although some of these characteristics are not within the designed parameters, others are similar to the characteristics of commercial devices and devices found in literature.

As a result of this work, a favorable environment was prepared to the development of this kind of device. Arrays of devices can also be developed in order to produce infrared images which may be used in many different applications.

Sumário

| | |
|--|------|
| Lista de figuras..... | xi |
| Lista de tabelas..... | xiii |
| Lista de símbolos e abreviações..... | xiv |
| Trabalhos afins publicados pelo autor..... | xv |
| Capítulo 1 – Introdução..... | 01 |
| Capítulo 2 – Sensores de infravermelho e bolômetros..... | 04 |
| 2.1. Energia Radiante e a Lei de Stefan-Boltzmann | 04 |
| 2.2. Radiação Infravermelha..... | 06 |
| 2.3. Fotodetectores..... | 07 |
| 2.3.1. Fotocondutores..... | 07 |
| 2.3.2. Detectores Fotovoltaicos (de junção)..... | 08 |
| 2.4. Detectores Térmicos | 08 |
| 2.4.1. Termopilhas..... | 09 |
| 2.4.2. Células de Golay..... | 10 |
| 2.4.3. Detectores Piroelétricos..... | 10 |
| 2.5. Bolômetros..... | 11 |
| 2.5.1. Histórico e Aplicações..... | 11 |
| 2.5.2. Princípio de Funcionamento..... | 13 |
| 2.5.3. Materiais Resistivos..... | 14 |
| 2.5.4. Figuras de Mérito..... | 16 |
| 2.5.4.1. Responsividade..... | 16 |
| 2.5.4.2. Coeficiente de Temperatura da Resistência (TCR)..... | 16 |
| 2.5.4.3. Potência Equivalente de ruído (Noise Equivalent Power)..... | 18 |
| 2.5.4.4. Detectividade..... | 18 |
| 2.5.4.5. Tempo de Resposta..... | 17 |
| 2.5.4.6. Resposta Espectral..... | 19 |
| 2.5.4.7. Linearidade..... | 19 |
| 2.5.4.8. Fontes e Tipos de Ruído..... | 19 |
| Capítulo 3 – Projeto e Fabricação..... | 22 |

| | |
|--|----|
| 3.1 Projeto de um Microbolômetro..... | 22 |
| 3.2 Microbolômetro Projetado..... | 29 |
| 3.3 Simulação..... | 30 |
| 3.3.1 Simulação Térmica 3D..... | 31 |
| 3.3.2. Simulação Mecânica FEM 3D..... | 35 |
| 3.3.3. Simulação de Processos (Athena)..... | 36 |
| 3.3.4. Simulação de Dispositivo (ATLAS)..... | 40 |
| 3.3.5. Simulação Elétrica..... | 40 |
| 3.4. Fabricação..... | 44 |
| 3.4.1. Limpeza RCA e Deposição de SiO ₂ | 44 |
| 3.4.2. Deposição de Si-poli..... | 45 |
| 3.4.3. Implantação Iônica, Limpeza Orgânica e Recozimento..... | 46 |
| 3.4.4. Corrosão do Si-poli para definição do Resistor – 1ª Máscara..... | 46 |
| 3.4.5. Implantação Iônica com Alta Dose para melhoria dos Contatos - 2ª Máscara..... | 47 |
| 3.4.6. Deposição de Nitreto de Silício (SiN _x)..... | 48 |
| 3.4.7. Corrosão de Nitreto de Silício – 3ª Máscara..... | 49 |
| 3.4.8. Litografia para Evaporação do Alumínio e Lift-Off – 5ª Máscara.. | 49 |
| 3.4.9. Recozimento Térmico para Sinterização dos Contatos..... | 51 |
| 3.4.10. Litografia para Evaporação do Titânio, Ouro e Lift-Off – 6ª Máscara..... | 51 |
| 3.4.11. Litografia e Corrosão da Camada de SiO ₂ Sacrificial – 7ª Máscara..... | 51 |
| 3.4.12. Litografia e evaporação do Ouro Negro – 8ª Máscara..... | 52 |
| 3.4.13. Imagens no Microscópio Eletrônico de Varredura e cortes utilizando <i>Focused Ion Beam</i> (FIB)..... | 55 |
| Capítulo 4 – Caracterização e Resultados..... | 60 |
| 4.1. Curva IxV..... | 60 |
| 4.2. Coeficiente de Temperatura da Resistência (TCR)..... | 61 |
| 4.3. Absorção do Ouro Negro..... | 64 |
| 4.4. Responsividade..... | 65 |

| | |
|---|----|
| 4.5. Tempo de Resposta..... | 69 |
| 4.6. Ruído e Detectividade..... | 72 |
| Capítulo 5 – Conclusões e Perspectivas..... | 76 |
| Referências Bibliográficas..... | 78 |

Lista de Figuras

- FIGURA 2.1..... Radiância espectral de um corpo negro ideal a diversas temperaturas em função do comprimento de onda.
- FIGURA 2.2..... (a) William Herschel e (b) esquema do experimento realizado que levou à descoberta da região infravermelha do espectro.
- FIGURA 2.3..... Galáxia Andrômeda vista em infravermelho.
- FIGURA 2.4..... Termografias do corpo para auxílio em diagnósticos.
- FIGURA 2.5..... Aplicações na indústria bélica: visão noturna.
- FIGURA 2.6..... Monitoramento de equipamentos: Dissipação de potência em chips.
- FIGURA 2.7..... Esquema simplificado de um bolômetro resistivo.
- FIGURA 2.8..... TCR em função da temperatura para Silício amorfo e Silício policristalino.
- FIGURA 2.9..... Modelo indicando a deformação nas bandas devido à barreira.
- FIGURA 3.1..... Diagrama esquemático mostrando o compromisso entre os parâmetros de fabricação do dispositivo e suas características finais.
- FIGURA 3.2..... Tempo de resposta em função da espessura do Si-poli para diferentes relações L/W .
- FIGURA 3.3..... Detectividade específica em função da resistência de folha para diferentes L/W .
- FIGURA 3.4..... Detectividade específica em função da corrente de polarização do dispositivo para diferentes L/W .
- FIGURA 3.5..... Responsividade em função da corrente de polarização para diferentes L/W .
- FIGURA 3.6..... Detectividade específica em função da responsividade.
- FIGURA 3.7..... Esquema do microbolômetro projetado indicando os materiais utilizados.
- FIGURA 3.8..... Descrição geométrica tridimensional da estrutura a ser simulada termicamente.
- FIGURA 3.9..... Distribuição de temperatura no caso em que o absorvedor está a 350 K e o substrato a 300 K.
- FIGURA 3.10..... (a) Deformação na membrana devido à ação da gravidade. (b) Distribuição do stress mecânico na membrana sob ação da gravidade.
- FIGURA 3.11..... Perfil de dopagem de Boro na região do resistor de Si-poli.
- FIGURA 3.12..... Geometria final do dispositivo a ser simulado eletricamente.
- FIGURA 3.13..... Curva $I \times V$ do dispositivo à 300 K. O inverso de sua inclinação fornece o valor da resistência.
- FIGURA 3.14..... Resistência *versus* dose de implantação iônica.

- FIGURA 3.15..... Resistência *versus* temperatura para diferentes doses de implantação iônica.
- FIGURA 3.16..... TCR vs Dose de implantação.
- FIGURA 3.17..... Esquema dos passos principais da fabricação do microbolômetro de poli-Si.
- FIGURA 3.18..... Fotos das etapas de processo (a) - (g).
- FIGURA 3.19..... Imagem de Microscópio Eletrônico de Varredura do dispositivo final.
- FIGURA 3.20..... (a) Imagem da borda da ponte suspensa destacando regiões com Si-poli, Ti-Au e Ouro Negro. (b) Ampliação da região, mostrando a espessura do ouro negro (3,21 μm) e do Si-poli (1,07 μm).
- FIGURA 3.21..... Ampliação da borda da ponte suspensa destacando a rugosidade e porosidade da camada de ouro negro.
- FIGURA 3.22..... Corte transversal do dispositivo com membrana suspensa de Si-poli.
- FIGURA 3.23..... Corte transversal da membrana suspensa, desta vez sem camadas superiores de modo a minimizar a redeposição.
- FIGURA 4.1..... Curva IxV do dispositivo fabricado.
- FIGURA 4.2..... Método de medida da resistência do microbolômetro de forma a eliminar o efeito dos cabos.
- FIGURA 4.3..... Variação da resistência do microbolômetro em função da temperatura e equação da curva.
- FIGURA 4.4..... Comparação de TCR de dois resistores diferentes.
- FIGURA 4.5..... Gráfico construído utilizando o FTIR e mostra a refletância em função do comprimento de onda.
- FIGURA 4.6..... Montagem da bancada para realização de medidas ópticas.
- FIGURA 4.7..... Esquema de aterramento dos cabos e câmara de vácuo.
- FIGURA 4.8..... Sinal vs Corrente de Polarização para diferentes temperaturas do corpo negro.
- FIGURA 4.9..... Sinal vs Temperatura do corpo negro para duas correntes de polarização.
- FIGURA 4.10..... Resposta em frequência.
- FIGURA 4.11..... Resposta em frequência do dispositivo para diferentes correntes de polarização.
- FIGURA 4.12..... Esquema da montagem da bancada de medidas de ruído.
- FIGURA 4.13..... Fotografia da bancada de medidas de ruído.
- FIGURA 4.14..... Densidade espectral de ruído em função da frequência.

Lista de Tabelas

- TABELA 2.1..... Tipos de detectores e método de operação [3]
- TABELA 3.1..... Condutividades térmicas dos materiais utilizados no microbolômetro [22,23,24]
- TABELA 3.2..... Comparação entre os parâmetros projetados e os parâmetros simulados.
- TABELA 4.1..... Comparação entre os parâmetros projetados, simulados e medidos.

Lista de Símbolos e Abreviações

| | |
|---------------------------|--|
| λ | Comprimento de onda [m] |
| T | Temperatura [K] |
| \Re | Responsividade [V/W] |
| h | Constante de Planck ($6,63 \cdot 10^{-34} \text{ W.s}^2$) |
| ν | Frequência da radiação [Hz] |
| c | Velocidade da luz ($3 \cdot 10^{10} \text{ cm/s}$) |
| k | Constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23} \text{ W.s/K}$) |
| C | Capacidade térmica [J/K] |
| G | Condutância térmica [W/K] |
| ΔT | Variação de temperatura [K] |
| V | Tensão [V] |
| A | Área do detector [m^2] |
| A_{ativa} | Área ativa do detector [m^2] |
| R | Resistência [Ω] |
| τ | Constante de tempo ou tempo de resposta [s] |
| (TCR) | Coefficiente de Temperatura da Resistência [%/K] |
| $\Phi_{\text{incidente}}$ | Fluxo de radiação incidente [W] |
| NEP | Potência equivalente do ruído [$\text{W/Hz}^{1/2}$] |
| A_{trans} | Área da secção transversal [m^2] |
| D | Detectividade [W^{-1}] |
| D^* | Detectividade específica [$\text{m.Hz}^{1/2}.\text{W}^{-1}$] |
| Δf | Largura de banda [Hz] |
| N_a | Número de portadores no dispositivo [cm^{-3}] |
| η | Emissividade |
| σ | Constante de Stefan-Boltzmann ($5.6704 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$) |
| I_{bias} | Corrente de Polarização [A] |
| κ | Condutividade Térmica [W/m.K] |
| α | Coefficiente de Hooge de ruído 1/f |

Trabalhos afins publicados pelo autor

F.L. Della Lucia, J.W. Swart, L.B. Zoccal, J.A. Diniz, I. Doi and N.C. Frateschi, “Simulation and Fabrication of Suspended-Membrane Resistive Microbolometers Using Gold-Black as absorber”, ECS Transactions, Vol. 14, N^o 1, pp. 93-98, 23rd Symposium on Microelectronics Technology and Devices, September 1 - September 4, 2008, Gramado, Brazil.

Capítulo 1 - Introdução

Desde a descoberta da região infravermelha do espectro eletromagnético por William Herschel em 1800, imensos progressos têm sido feitos nesta área da engenharia especialmente no que tange o desenvolvimento de sensores de infravermelho [1].

Anos após a descoberta da região infravermelha do espectro foi desenvolvida uma teoria eficiente que explicasse os fenômenos relacionados a esse tipo de radiação eletromagnética [2,3]. Posteriormente a pesquisa se direcionou à utilização de novos materiais e à realização dos primeiros experimentos com dispositivos sensores propriamente ditos. O termopar foi inventado por Nobili em 1829 e utilizado e aperfeiçoado por Melloni a fim de construir a primeira termopilha, capaz de detectar um ser humano a 9 metros de distância [4]. O ápice destas pesquisas no século dezenove se deu em 1880 quando Langley construiu o primeiro bolômetro, capaz de detectar uma vaca a 400 metros de distância [5,6]. Tais dispositivos operavam à temperatura ambiente e, obviamente, possuíam baixa sensibilidade e alto tempo de resposta, no entanto foram precursores de grandes descobertas que estavam por vir.

Com a descoberta do efeito fotocondutivo e o desenvolvimento da mecânica quântica e materiais semicondutores, o foco das pesquisas com sensores de infravermelho foi alterado para os fotodetectores. Este tipo de sensor possuía maior sensibilidade e menor tempo de resposta e era baseado na geração de portadores de carga devido à radiação incidente. Os compostos III-V (ou seja, materiais constituídos por elementos das colunas III e V da tabela periódica) ganharam destaque visto que possuem *Band Gaps* (quantidade de energia que separa as bandas de condução e de valência do material) menores e podiam ser produzidos na forma de cristais. Com o aperfeiçoamento da fotolitografia (transferência de padrão geométrico) e o surgimento dos primeiros circuitos integrados nas décadas de 1960 e 1970, surgiu a primeira geração de matrizes destes dispositivos que possibilitavam a formação de imagens em infravermelho [6]. O problema que este tipo de tecnologia enfrenta é a necessidade de resfriamento dos dispositivos, uma vez que o sinal por eles produzido é de pequena amplitude e tende a se confundir com o ruído térmico. Isso prejudica a mobilidade e a praticidade do detector.

O desenvolvimento da microfabricação em Silício estimulou então a construção de sensores de infravermelho com este tipo de material. O Silício não possui propriedades adequadas para ser utilizado como fotodetector de infravermelho, logo é utilizado como elemento resistivo para

bolômetros (resistores cuja resistividade varia com a mudança de temperatura e radiação incidente). Sua compatibilidade com a microeletrônica e grande conhecimento de suas propriedades e formas de manuseio foram estímulos fundamentais do desenvolvimento dessa tecnologia especialmente na década de 1990. Foram fabricados bolômetros de Silício em escala micrométrica (microbolômetros) e integrados em matrizes de forma também a formarem imagens em infravermelho. Estes sensores possuem menor sensibilidade e maior tempo de resposta do que os fotodetectores, no entanto seu custo de fabricação é consideravelmente menor e não necessitam refrigeração para sua operação, o que diminui o consumo de potência e seu peso, aumentando sua mobilidade e praticidade. Além disso, o tempo de resposta tem diminuído consideravelmente para a faixa de dezenas de milisegundos, o que é rápido o suficiente para operação normal de vídeo de 24 *frames* por segundo [6].

Apesar de a tecnologia envolvida no processo de fabricação de microbolômetros resistivos já ter sido amplamente utilizada e consolidada na década de 1990, pouco foi realizado no Brasil. As câmeras de infravermelho são de difícil obtenção devido às restrições de exportação para países em desenvolvimento por parte dos países detentores dessa tecnologia. Também a importação de equipamentos e peças relacionadas ao encapsulamento de sensores é de difícil realização devido à restrições de venda a países em desenvolvimento. Muitas vezes o conteúdo intelectual envolvido na fabricação e encapsulamento é ocultado o que também dificulta a fabricação localmente. O principal motivo para a criação de tais empecilhos é a possibilidade de utilização desses detectores no setor militar.

O principal objetivo do presente trabalho é desenvolver a tecnologia de fabricação de um sensor de infravermelho utilizando um microbolômetro resistivo. A faixa espectral de interesse do projeto é de 8 μm a 14 μm . Outro objetivo é a criação de uma metodologia de projeto de microbolômetros resistivo. Serão realizadas simulações a fim de prever processos de fabricação e medidas de forma a aperfeiçoar as etapas de fabricação. Serão desenvolvidas metodologias para a caracterização, assim como a montagem de bancadas de medidas. Esta etapa de caracterização avaliará características básicas do dispositivo de forma a aperfeiçoar parâmetros de processo a fim de melhorar o desempenho do sensor. O conjunto de máscaras utilizado foi também utilizado em um trabalho anterior realizado no mesmo laboratório [7].

Existem diversas aplicações para os microbolômetros. Podem ser utilizados na medicina, na astronomia, na agricultura, em segurança, na monitoração de equipamentos, em sistemas de

transporte e na indústria bélica. Desenvolver esse tipo de tecnologia no Brasil é sinônimo de desenvolvimento do país e de sua indústria como um todo.

Capítulo 2 - Sensores de Infravermelho e Bolômetros

2.1. Energia Radiante e a lei de Stefan-Boltzmann

A idéia básica dos detectores de energia radiante é detectar radiação de um comprimento de onda específico em uma ampla faixa de comprimentos de onda e produzir um sinal de saída que é proporcional à quantidade de energia absorvida. Para determinar as características e a eficiência de tais dispositivos é necessário antes, compreender as propriedades de emissão de radiação dos corpos a diferentes temperaturas.

Para descrever a distribuição de energia de qualquer emissor de radiação térmica, o termo “corpo negro” foi introduzido por Kirchoff [8]. Um corpo negro é um objeto que absorve toda energia que incide sobre ele, independentemente do comprimento de onda, e, paralelamente, é um emissor radiante perfeito. Foi determinado tanto por Stefan (1879) quanto por Boltzmann (1874) que a quantidade total de energia irradiada de um corpo negro é proporcional à quarta potência de sua temperatura absoluta. Contudo, uma expressão para a distribuição espectral de radiação de um corpo negro não foi desenvolvida até o ano de 1900 quando a equação de Planck se encaixou perfeitamente com dados experimentais através da teoria de quantização de energia:

$$W_{\lambda}(T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\left[e^{ch/\lambda kT} - 1 \right]} \quad (2.1)$$

onde

W_{λ} é a emitância [W/cm^2]

λ é o comprimento de onda [cm]

T é a temperatura absoluta [K]

c é a velocidade da luz ($3 \cdot 10^{10}$ cm/s)

h é a constante de Planck ($6.63 \cdot 10^{-34}$ W.s²)

k é a constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}$ Ws/K)

Integrando a lei de Planck em todos os comprimentos de onda, de zero ao infinito, a emitância total W é obtida de tal forma que:

$$W(T) = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} T^4 \therefore W = \sigma T^4 \quad (2.2)$$

As curvas do corpo negro derivadas destas equações para diferentes temperaturas são mostradas na Figura 2.1 em função do comprimento de onda.

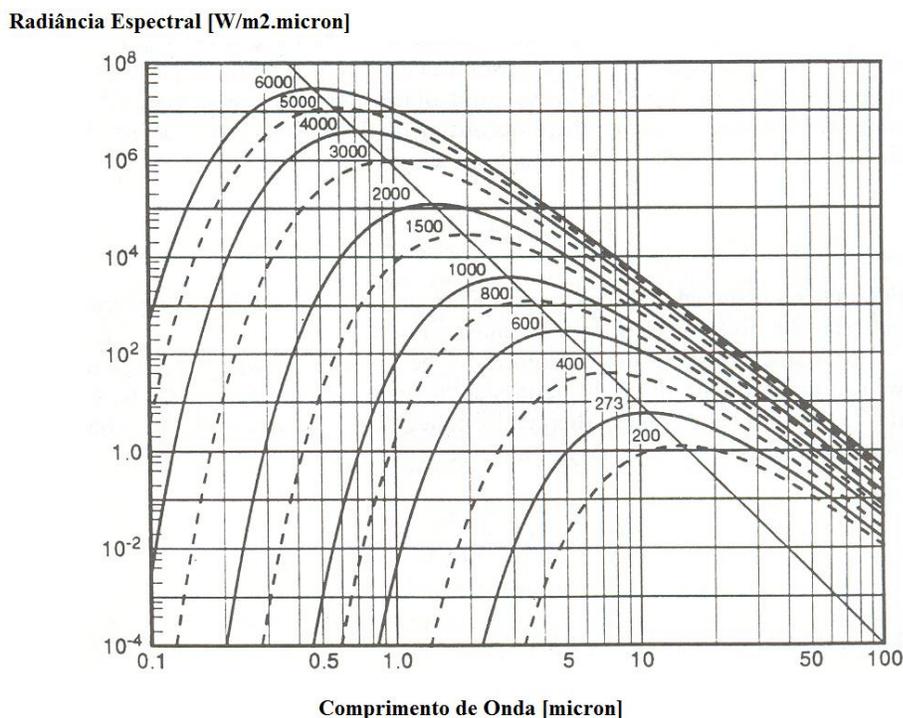


Figura 2.1: Radiação espectral de um corpo negro ideal em diversas temperaturas em função do comprimento de onda [9].

O comprimento de onda de pico de emissão λ_m das curvas é obtido pela lei de deslocamento de Wien e é dado por $\lambda_m T = 2898 \mu m \cdot K$ que pode ser derivado da equação de Planck.

Pode ser observado da Figura 2.1 que a radiação é emitida em um espectro contínuo sobre um intervalo determinado pela temperatura do corpo. Em baixas temperaturas, a emissão é relativamente baixa e situada principalmente no infravermelho. À medida que a temperatura aumenta, a emitância cresce rapidamente proporcional à quarta potência da temperatura absoluta e seu pico se desloca em direção aos menores comprimentos de onda até que em temperaturas de alguns poucos milhares de Kelvins o pico das curvas ocorrem na região visível do espectro [8].

O corpo humano está a uma temperatura de $37^\circ C$ ou $310 K$, portanto temos um pico de emissão em $9.3 \mu m$, ou seja, na região do infravermelho distante. Um corpo aquecido a $400^\circ C$ ou $673 K$ (uma resistência aquecida, por exemplo) terá um pico de emissão em $4.3 \mu m$ e também emitirá no visível na faixa vermelha, por isso sua coloração será avermelhada [10].

2.2. Radiação Infravermelha

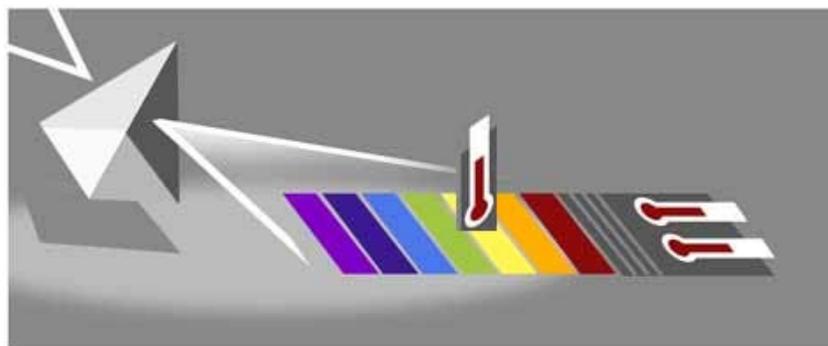
William Herschel (Figura 2.2 (a)), um astrônomo amador famoso pela descoberta do planeta Netuno, em 1800 fez uma importante descoberta. Reproduzindo o famoso experimento de Isaac Newton que consistia na decomposição da luz via refração por um prisma, Herschel supôs que cada cor continha diferentes níveis de calor. Com essa hipótese ele projetou um simples e engenhoso experimento (Figura 2.2 (b)).

Herschel decompôs a luz solar através de um prisma para criar um espectro e mediu a temperatura em cada cor através de um termômetro de bulbo negro. Ele usou três termômetros, sendo um alocado na cor a medir e os outros dois fora do espectro como controle [1,2,3].

Ao medir a temperatura nas diferentes cores do espectro, ele percebeu que todas apresentavam temperaturas mais altas que as dos termômetros de controle e que as temperaturas aumentavam à medida que se passava do violeta à parte vermelha do espectro. Além disso, Herschel também mediu a temperatura em uma pequena faixa além do vermelho e verificou que esta região possuía a maior temperatura de todas, logo era a região que continha maior calor. O que Herschel descobriu foi uma forma de luz além do vermelho. O experimento de Herschel foi extremamente importante não apenas porque levou à descoberta do infravermelho, mas também porque foi o primeiro experimento que demonstrava a existência de formas de luz que não são vistas pelo olho humano. O experimento de Herschel foi o passo inicial para o desenvolvimento de um amplo ramo da tecnologia que explorava a radiação eletromagnética para o benefício do homem [8].



(a)



(b)

Figura 2.2: (a) William Herschel e (b) esquema do experimento realizado que levou à descoberta da região infravermelha do espectro [11,12].

Para medir a radiação do espectro eletromagnético (inclusive a região do infravermelho) são utilizados sensores de radiação ou detectores. A maioria destes dispositivos pode ser dividida entre os detectores térmicos ou detectores de fótons [8].

Um detector térmico é fabricado de um material com propriedades altamente dependentes da temperatura que serão modificadas pela radiação incidente. Ao medir e calibrar estas alterações, será possível determinar a quantidade desta radiação incidente.

Em detectores de fótons, a radiação incidente (fótons) gera portadores de carga no material, alterando suas propriedades, o que também pode ser medido e calibrado.

2.3. Fotodetectores

O princípio básico de funcionamento dos fotodetectores, como dito anteriormente, é a formação de portadores de carga (pares elétron-lacuna ou elétrons por efeito fotoelétrico) no material em razão da incidência de fótons provenientes de uma fonte luminosa. Essa mudança no número de elétrons e de lacunas no material causa uma mudança de suas propriedades que podem ser monitoradas como um sinal de saída elétrico. A forma como essa monitoração é realizada determina o tipo de fotodetector. Os tipos mais comuns são os fotocondutores e os fotovoltaicos (dispositivos de junção). Normalmente estes dispositivos são formados pela combinação de elementos das colunas III e V da tabela periódica, uma vez que o tipo de material resultante possui *Band Gap* adequado para a detecção de radiação infravermelha. *Bang Gap* é a quantidade de energia que separa as bandas de condução e de valência do material. Dependendo dessa quantidade de energia, radiação infravermelha será ou não absorvida pelo material.

2.3.1. Fotocondutores

Neste tipo de fotodetector, uma mudança na condutividade (resistividade) de um material fotocondutivo é monitorada. A geração de portadores de carga no material facilita a passagem de corrente, ou seja, aumenta a condutividade (diminui a resistividade).

Em geral um par de contatos ôhmicos é fixado nas extremidades do material e uma corrente flui ao longo do dispositivo. Quando a radiação incide sobre o detector, a alteração no valor da corrente ou da tensão sobre o dispositivo é detectada como um foto-sinal.

A faixa de comprimento de ondas no qual haverá absorção da radiação incidente está ligada à natureza do material, sendo dependente do seu *Band Gap* (E_G) de acordo com a equação 2.3.

$$\lambda \leq hc/E_G \quad (2.3)$$

Somente comprimentos de onda menores que hc/E_G serão absorvidos pelo material e poderão causar alguma alteração em suas propriedades. Em outras palavras, somente fótons com energia maior que o *Band Gap* do material serão absorvidos.

2.3.2. Detectores Fotovoltaicos (de Junção)

A principal característica dos detectores fotovoltaicos é a utilização de uma junção p-n para realizar a captura dos pares de elétron-lacuna gerados pela radiação incidente.

Dentro da junção p-n existe uma região com poucas cargas móveis (região de depleção), na qual existe um campo elétrico bastante forte. Os pares elétron-lacuna que são gerados dentro ou próximo da região de depleção são separados pelo campo elétrico, uma vez que os elétrons possuem carga negativa e as lacunas carga positiva. Esta separação de cargas causa variações, por exemplo, na curva IV (corrente-tensão) da junção, podendo esta então, ser medida e calibrada.

Estes dispositivos são normalmente operados em tensão reversa, uma vez que esta condição aumenta a largura da região de depleção (aumenta a área de captura de pares elétron-lacuna) e aumenta o módulo do campo elétrico.

Assim como os dispositivos fotocondutores, os detectores fotovoltaicos somente absorvem fótons com energia maior que o *Band Gap* do material de acordo com a equação 2.3.

2.4. Detectores Térmicos

Detectores térmicos utilizam materiais que possuem propriedades altamente dependentes da temperatura, como condutividade elétrica ou coeficiente de expansão térmica, para monitorar a quantidade de radiação incidente. O experimento de Herschel, por exemplo, utilizou um líquido com alto coeficiente de expansão para investigar o espectro eletromagnético.

A natureza dos detectores térmicos faz com que suas respostas espectrais sejam mais planas do que os fotodetectores, no entanto, uma desvantagem é seu tempo de resposta (tipicamente da ordem de milissegundos), muito mais lento do que os fotodetectores, o que pode limitar sua aplicação [8].

Após o experimento de Herschel, os termômetros foram substituídos pelo primeiro detector de infravermelho, a termopilha em 1830 [6,8]. Alguns anos depois o primeiro bolômetro resistivo foi inventado por Langley [6,8]. Ao longo dos anos, muitos avanços foram alcançados, sendo o

mais significativo o dispositivo piroelétrico, de baixo custo e possível de se produzir em larga escala.

A tabela 2.1 lista os principais tipos de detectores térmicos e seu método de operação. Serão descritos com mais detalhes os quatro primeiros detectores.

Tabela 2.1: Tipos de detectores e método de operação [8].

| Detector | Método de operação |
|--|--|
| Termopilha | Geração de tensão causada pela mudança de temperatura de uma junção de dois materiais diferentes |
| Célula de Golay | Expansão térmica de um gás |
| Piroelétrico | Mudanças em propriedades elétricas e magnéticas |
| Bolômetro | Mudança na condutividade elétrica |
| Evapografo | Taxa de condensação de vapor em uma membrana fina |
| Emissão termiônica | Taxa de emissão de um catodo coberto com óxido |
| Conversor de imagem de absorção de borda | Transmissão óptica de um semiconductor |
| Dispositivo de cristal líquido | Mudança de propriedades ópticas |

2.4.1. Termopilhas

Termopilhas são basedas no efeito *Seebeck*. Este efeito consiste na geração de tensão elétrica em função da variação de temperatura em uma junção de dois materiais condutores diferentes. Usando este efeito, Melloni produziu a primeira termopilha em 1833 para investigar o espectro infravermelho. Para se fabricar termopilhas eficientes, deve-se utilizar materiais com alto coeficiente *seebeck*, baixa condutividade térmica (para evitar a troca de calor entre o material quente e o frio), alta condutividade elétrica (a fim de diminuir a dissipação de calor causada pelo fluxo de corrente) e baixa capacidade térmica (a fim de diminuir o tempo de resposta da junção) [8].

O desenvolvimento da pesquisa em semicondutores proporcionou materiais com coeficientes *seebeck* muito mais altos do que materiais convencionais, permitindo a fabricação de termopilhas cada vez mais sensíveis. No entanto, termopilhas de semicondutores são menos robustas e estáveis do que as termopilhas de metais, sendo as de metais ainda largamente utilizadas em aplicações industriais [8].

2.4.2. Células de Golay

Uma célula de Golay é fabricada com uma célula de volume constante contendo um gás (geralmente Xenônio), com uma janela em um dos lados que permite a entrada de radiação. Esta radiação aquece o gás dentro da célula, causando a expansão do gás e a deflexão de uma membrana flexível. Esta deflexão desloca um feixe de luz incidente dentro da célula. A calibração do deslocamento deste feixe indica o valor da radiação incidente no gás [9].

A grande vantagem deste tipo de detector é a alta sensibilidade obtida. No entanto, devido à sua fabricação, este detector é extremamente frágil e muito suscetível a vibrações [9].

2.4.3. Detectores Piroelétricos

Este tipo de detector utiliza o efeito piroelétrico como fenômeno básico de funcionamento. Se um material é um condutor, as cargas móveis assumirão uma distribuição que neutraliza o momento de dipolo interno. Entretanto, materiais piroelétricos possuem distribuição de carga extrínseca relativamente estável e até mesmo pequenas mudanças de temperatura na amostra produzem mudanças no espaçamento da rede cristalina e no momento de dipolo. Desse modo, um campo elétrico externo pode ser medido e caracterizado. Um coeficiente térmico de momento de dipolo pode também ser determinado (coeficiente piroelétrico) [8].

A diferença entre este tipo de detector e outros detectores térmicos é o fato de responder a uma taxa de variação de temperatura, enquanto os detectores convencionais utilizam a própria variação de temperatura. Desse modo, detectores piroelétricos são usados em frequência alternada, a fim de prevenir a neutralização da carga antes que seja medida. É possível pensar nos detectores piroelétricos como se fossem capacitores sensíveis à temperatura [8,9].

2.5. Bolômetros

Um bolômetro simples consiste em um resistor com baixa capacidade térmica e alto coeficiente de temperatura da resistência (TCR – *Temperature Coefficient of Resistance*). Dessa maneira, mudanças significativas na condutância ocorrem quando o resistor é aquecido por radiação incidente. Esta mudança na condutância é detectada pela variação da corrente elétrica que flui através do resistor. Calibrando adequadamente o resistor, é possível então, determinar a quantidade de radiação incidente sobre o dispositivo.

2.5.1. Histórico e Aplicações

O primeiro bolômetro, conforme dito antes, foi inventado em 1880 por Langley e consistia em uma folha fina de platina escurecida e era utilizado para observações solares [1,2,3]. Este tipo de bolômetros metálicos, fabricados de folhas finas ou camadas evaporadas como, Níquel, Bismuto ou Antimônio ainda estão em uso hoje em aplicações que requerem estabilidade em longo prazo. Infelizmente, este tipo de dispositivo é frágil, limitando seu uso em algumas aplicações. Este problema foi resolvido pelo uso de bolômetros termistores, que são fabricados com óxidos ou semicondutores que possuem TCR maior que o de metais (da ordem de $-2\%/K$). O valor do TCR depende do *Band Gap* do material, dos estados de impurezas e do mecanismo dominante de condução. Normalmente a área sensível do dispositivo é escurecida para melhorar as características de absorção da radiação [6,8].

O primeiro semicondutor utilizado para a fabricação de bolômetros foi o Germânio, seguido pela utilização do Silício, material de menor calor específico ($700 J/(Kg.K)$). A utilização de Silício como material resistivo foi de grande interesse para o desenvolvimento de microbolômetros, devido, principalmente a facilidade e conhecimento de como se trabalhar com este material (adquiridos ao longo da evolução da microeletrônica). Além disso, os dispositivos podem ser fabricados junto com toda a eletrônica de condicionamento de sinais [8].

Um aumento significativo no desempenho dos bolômetros pode ser obtido se estes forem utilizados resfriados, uma vez que as mudanças na resistividade são muito maiores do que à temperatura ambiente e o ruído térmico menor. Além disso, os dispositivos podem ser fabricados mais espessos para aumentar a absorção do infravermelho, sem aumentar a capacidade térmica, devido ao reduzido calor específico do material resfriado [8]. Entretanto, o resfriamento dos bolômetros restringe a aplicação dos dispositivos, excluindo, por exemplo, aplicações móveis.

Bolômetros termistores foram desenvolvidos durante a II Guerra Mundial nos Estados Unidos para espectroscopia infravermelha e sensores de calor e, desde então, tem sido usados na instrumentação de satélites, alarmes de segurança e detecção de incêndio [6]. Uma infinidade de aplicações podem ser imaginadas para bolômetros, especialmente na região do infravermelho. Os principais exemplos atuais de sua aplicação são:

- **Astronomia:** A espectroscopia de infravermelho possibilita a observação de galáxias e objetos distantes (Figura 2.3), assim como a determinação de temperatura de estrelas e nuvens de gases.

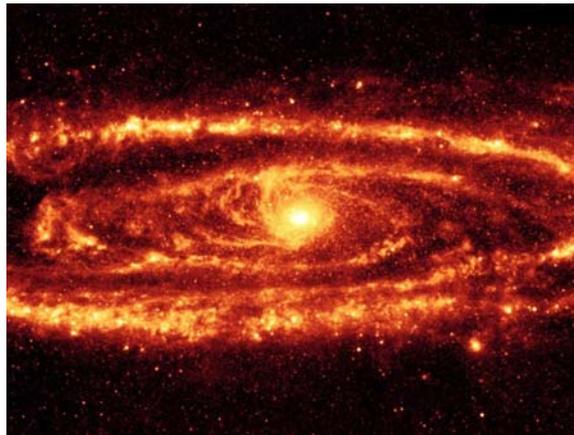


Figura 2.3: Galáxia Andrômeda vista em infravermelho [13].

- **Medicina:** Termografia (imageamento térmico) para diagnóstico de tumores e coágulos, verificação de atividade arterial, e tratamento de dores reumáticas.

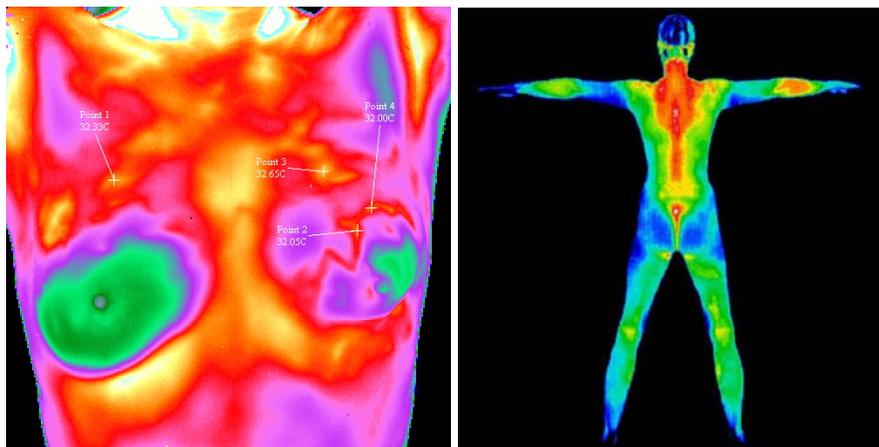


Figura 2.4: Termografias do corpo para auxílio em diagnósticos [14,15].

- **Indústria Bélica:** Visão noturna, detecção de minas terrestres, interceptação de mísseis, monitoração de perímetros, dentre outros.

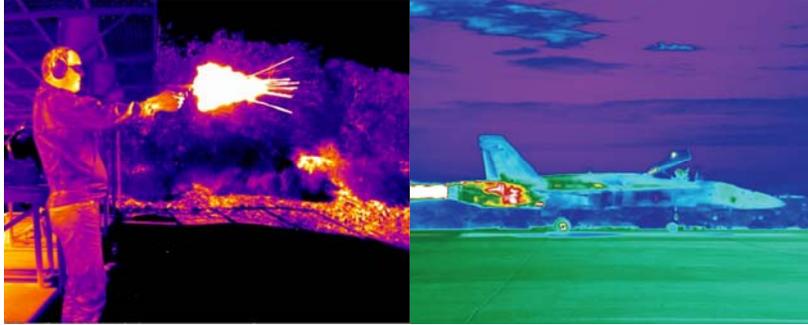


Figura 2.5: Aplicações na indústria bélica: visão noturna [16].

- Monitoramento de equipamentos: Verificação de dissipação de potência e aquecimento em chips eletrônicos, sistemas de energia elétrica, transformadores, disjuntores e máquinas em geral.

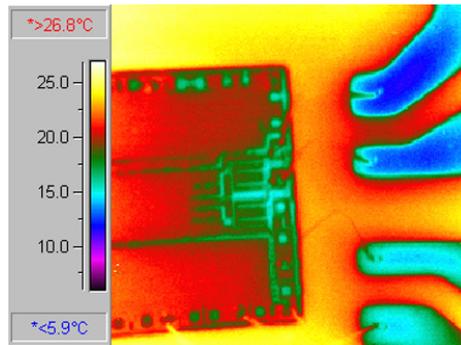


Figura 2.6: Monitoramento de equipamentos: Dissipação de potência em chips [16].

- Agricultura: Mapeamento da distribuição de temperaturas no cultivo de plantas.
- Dispositivos de segurança: Observação de passageiros em aeroportos, com a finalidade de encontrar armas, detectores de presença, alarmes de incêndio.
- Sistema de transporte: visão noturna para prevenção de colisões em vôos noturnos ou através de nuvens e fumaça. Navegação em geral.

2.5.2 Princípio de funcionamento

O princípio de funcionamento de um bolômetro é extremamente simples. Consiste basicamente em um resistor com uma capacidade térmica pequena, que, quando aquecido por radiação incidente, apresenta grandes variações em sua condutância (resistividade) devido a seu

grande coeficiente de temperatura da resistência [8]. A Figura 2.7 ilustra funcionamento do dispositivo.

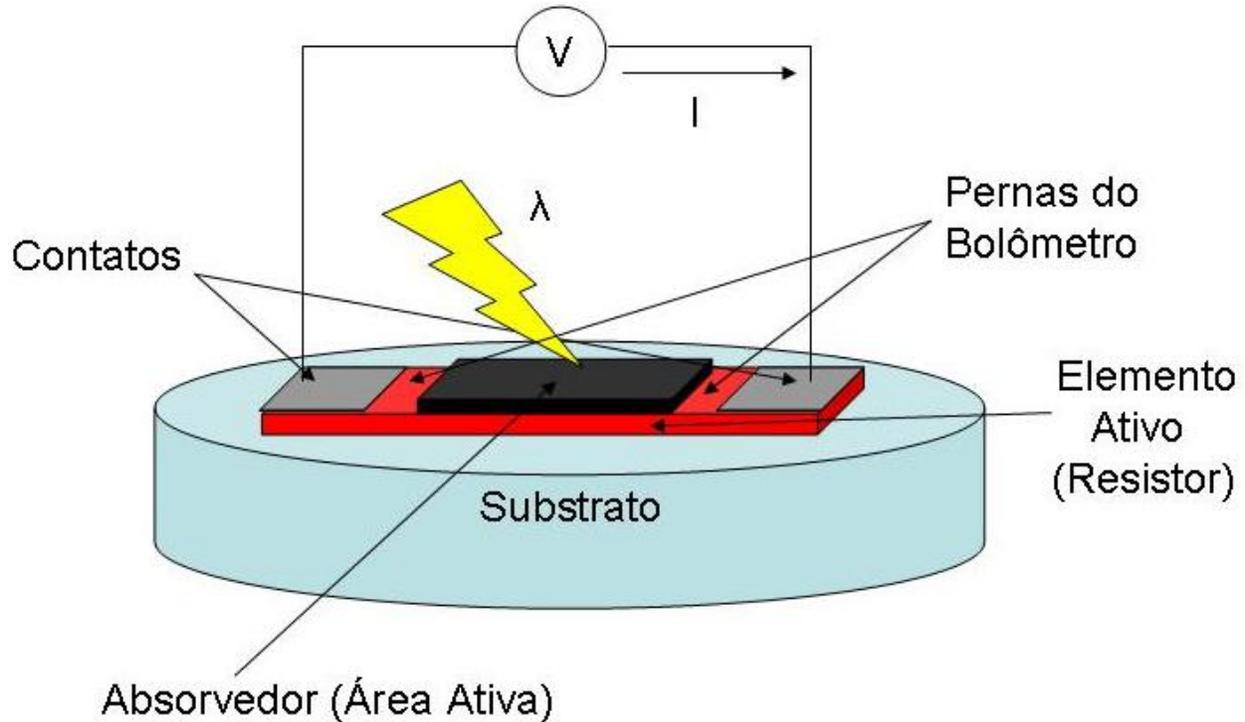


Figura 2.7: Esquema simplificado de um bolômetro resistivo.

2.5.3. Materiais resistivos

Quanto maior a alteração na resistividade para certa quantidade de radiação incidente, maior a sensibilidade (TCR) do bolômetro. O principal determinante no aumento da sensibilidade do dispositivo é o material utilizado como resistor. Este material deve apresentar alto TCR, baixo ruído para frequências de interesse e, nos dias atuais, ser compatível com os processos de microfabricação de circuitos integrados. É desejável também que a condutividade térmica do material seja baixa a fim de que ele não perca calor para as redondezas, o que diminuiria sua sensibilidade. Além disso, sua capacidade térmica (e consequentemente sua massa) deve ser pequena, a fim de que ele possa aquecer e resfriar com rapidez.

Ao longo do tempo, diversos materiais já foram sugeridos para a utilização como materiais resistivos de bolômetros. Como mencionado no item 2.5.1, os primeiros bolômetros construídos utilizavam metais tais como platina, níquel, bismuto e antimônio como materiais resistivos. No entanto, metais apresentam baixo valor de TCR (menor que 1%/K), o que prejudica a sensibilidade.

Com o avanço da indústria de semicondutores, estes materiais passaram a ser amplamente utilizados na fabricação de bolômetros, uma vez que suas características tornaram os bolômetros mais eficientes e diminuam os custos de produção. Dentre estes, os mais utilizados são: Óxido de Vanádio, Silício Policristalino, Silício amorfo e Silício-Germânio Policristalino [17, 18-21]. Dentre eles, cada um possui suas próprias peculiaridades, sendo sua utilização adequada ao propósito de aplicação.

O Silício Policristalino, o Silício-Germânio Policristalino e o Silício amorfo são totalmente compatíveis com a tecnologia de circuitos integrados. Isso facilita a utilização destes tipos de materiais, uma vez que já têm propriedades e parâmetros bem explorados pela indústria microeletrônica. Possuem também características interessantes que consistem no fato de que sua condutividade elétrica e seu TCR poderem ser facilmente controlados pela dopagem do material, o que aumenta a flexibilidade do projeto de dispositivos [22,23]. A desvantagem destes materiais encontra-se no fato de que, por não possuírem uma rede monocristalina, apresentam ruído 1/f relativamente alto [21,24, 25]. Valores tradicionais do TCR de bolômetros construídos com estes materiais estão próximos de $-2,0\%/K$ [19].

O Óxido de Vanádio também é bastante utilizado na fabricação de bolômetros, especialmente devido a seu alto TCR (usualmente em torno de $-4\%/K$) [26]. O ruído 1/f de dispositivos que utilizam este tipo de material também é relativamente alto, devido à sua estrutura amorfa, o que prejudica a detectividade em baixas frequências de operação. Óxido de Vanádio não é um material padrão na tecnologia de circuitos integrados, dessa maneira, nem sempre é adequada sua utilização [22].

Um material que promete ser bastante utilizado no futuro é o Silício-Germânio Policristalino. Este material possui condutividade térmica mais baixa que o Silício Policristalino (o que facilita sua isolação) e TCR adequado (tradicionalmente $-2\%/K$). Sua constante de tempo (de acordo com fontes consultadas) é da ordem de aproximadamente 1,6 ms e sua detectividade é de $10^8 \text{ cm.Hz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ [22, 25].

Foi escolhido o Silício Policristalino para ser utilizado neste trabalho, pois este material possui compatibilidade com a tecnologia de circuitos integrados, valor de TCR adequado e pela facilidade com a qual este material é obtido nas dependências do laboratório do Centro de Componentes Semicondutores da UNICAMP.

2.5.4. Figuras de Mérito

2.5.4.1. Responsividade

A responsividade é uma das figuras de mérito mais importantes e fundamentais de um detector. Essencialmente é definida como o sinal de saída dividido pela potência de entrada:

$$\mathfrak{R} = \frac{V_s}{P} \quad (2.4)$$

onde V_s é a tensão de saída e P é a potência incidente. Esta potência é igual ao produto da irradiância no dispositivo, normalmente dada em W/cm^2 , pela área ativa do dispositivo [22]. A unidade de responsividade é normalmente dada em Volts/ Watts ou Ampère/Watts.

2.5.4.2. Coeficiente de Temperatura da Resistência (TCR)

Esta figura de mérito é de extrema importância para os sensores bolométricos visto que influencia diretamente em suas sensibilidades. Quanto maior o TCR, mais fácil será medir a variação da resistividade com a temperatura, e, conseqüentemente, mais fácil será medir a potência incidente. Matematicamente, o TCR pode ser definido como:

$$\frac{\Delta R}{R} = (TCR) \cdot \Delta T \quad \therefore (TCR) = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} \quad (2.5)$$

onde (TCR) é o TCR [%/K], R é a resistência [Ω] e T a temperatura [K].

Metais em geral possuem valores pequenos e positivos de TCR. Semicondutores possuem TCR variável, podendo ser positivo ou negativo, dependendo da dopagem (e resistividade) utilizada. A Figura 2.8 apresenta o valor do TCR do Si-poli e Silício amorfo em função de sua dopagem [27]. É possível observar que para altas dopagens (10^{20} cm^{-3}), o valor do TCR é positivo e baixo (o comportamento do material se aproxima do comportamento dos metais) e para baixas dopagens, o TCR é negativo e bastante alto.

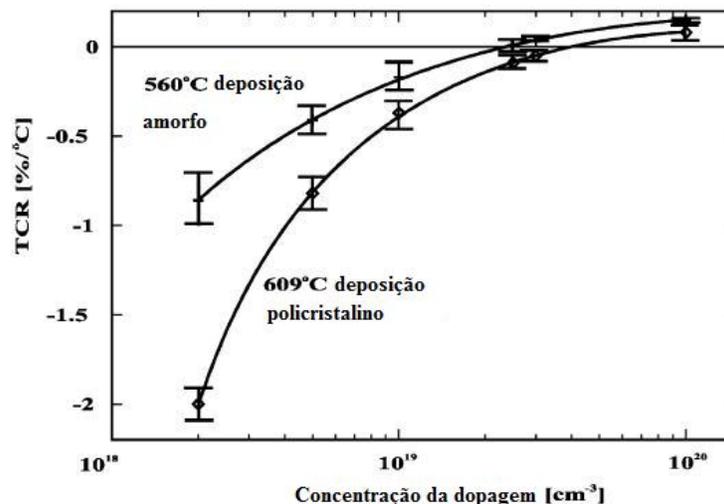


Figura 2.8. TCR em função da temperatura para Silício amorfo e Silício policristalino [22].

Em temperatura ambiente, Silício monocristalino possui TCR positivo, enquanto Silício policristalino possui TCR negativo. Isso pode ser explicado devido ao fato de que nas bordas dos grãos do Si-poli, é formada uma barreira de potencial similar a uma barreira *Schottky*. Para baixos valores de dopagem, a barreira é mais larga, o que torna seu efeito bastante perceptível. Para altos valores de dopagem, a barreira é muito estreita, ocorrendo livre tunelamento dos portadores, comportando o material como se fosse um monocristal [27, 28]. Tanto faz um material possuir TCR positivo ou negativo, desde que o valor seja adequado à aplicação. Vide Figura 2.9.

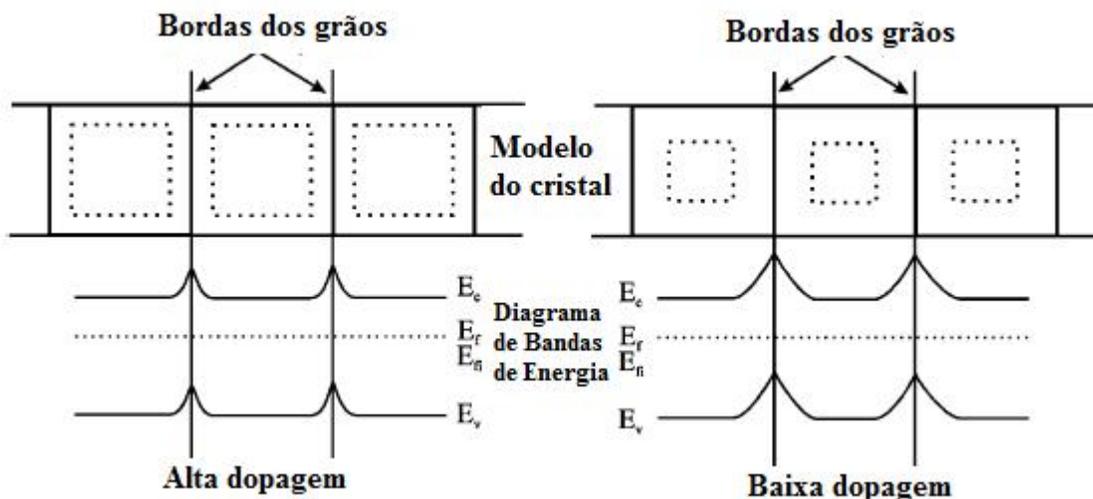


Figura 2.9. Modelo indicando a deformação nas bandas devido à barreira. À esquerda para baixa dopagem e à direita para alta dopagem.

2.5.4.3. Potência Equivalente de Ruído (*Noise Equivalent Power – NEP*)

A potência equivalente de ruído, como o próprio nome indica, é a mínima potência incidente necessária que iguale o sinal de saída com o nível rms de ruído. Em outras palavras, é a potência que faz com que a relação sinal-ruído seja igual a um [29].

$$NEP = \frac{P}{V_s / V_r} \therefore NEP = \frac{V_r}{\Re} \quad (2.6)$$

Onde V_r é o nível de ruído. A unidade do NEP é o Watt e, obviamente, quanto menor for o NEP, melhor será o desempenho do dispositivo.

2.5.4.4. Detectividade

A detectividade é exatamente o inverso do NEP e sua unidade é o W^{-1} .

$$D = \frac{1}{NEP} \quad (2.7)$$

Ao se informar a detectividade de um dispositivo é necessário também informar o comprimento de onda da radiação incidente, a temperatura de operação, a polarização utilizada, a área do detector, dentre outros parâmetros. Por esse motivo, foi criada uma figura de mérito que pudesse ser utilizada para comparar diferentes detectores. A detectividade específica é medida em $cm.Hz^2/W$ sendo calculada da seguinte forma [29]:

$$D^* = \frac{\sqrt{A_{ativa} \cdot \Delta f}}{NEP} \quad (2.8)$$

onde A_{ativa} é a área ativa do detector e Δf a largura de banda. Esta figura de mérito é a relação sinal-ruído quando 1 Watt de potência é incidente em um detector que tem área sensível de 1 cm^2 , sendo o ruído medido em uma largura de banda de 1 Hz. Podem ser considerados valores altos de detectividade específica aqueles acima de $1.10^7 cm.Hz^{1/2}.W^{-1}$.

2.5.4.5. Tempo de Resposta

O tempo de resposta (τ) é uma figura de mérito importante, uma vez que pode determinar se um detector é adequado para determinada aplicação [30]. Essencialmente é a velocidade da resposta (variação do sinal de saída) do detector a alguma mudança no sinal de entrada.

Este tempo é definido como sendo o tempo necessário para o sinal de saída subir para $(1-1/e)$ do valor de pico ou para cair $1/e$ do valor pico. Normalmente é fornecido em milisegundos [30].

No caso dos bolômetros, τ é o tempo necessário para que o dispositivo apresente uma mudança da corrente (ou tensão) quando ocorre uma mudança de temperatura. Essa figura de mérito depende então da capacidade térmica (massa) e da condutividade térmica do elemento ativo, sendo os dois relacionados por:

$$\tau = \frac{C}{G} \quad ; \quad C = \rho V c \quad ; \quad G = n \cdot \frac{\kappa A_{trans}}{l} \quad (2.9)$$

onde G [W/K] é a condutância térmica e C [J/K] é a capacidade térmica, ρ é a densidade do material resistivo, V o volume do material resistivo e “ c ” o calor específico do material resistivo. No cálculo do termo G de condutância térmica, foram omitidos os componentes de irradiação e de convecção a fim de simplificar os cálculos. Logo, a condutância térmica será representada pela condutância das pernas do bolômetro, ou seja, os pontos por onde ele é afixado ao substrato (Vide Figura 2.7). A área transversal das pernas é representada por A_{trans} na equação 2.9, κ é a condutividade térmica do material das pernas, l é o comprimento das pernas e n é o número de pernas [30].

2.5.4.6. Resposta Espectral

A resposta espectral descreve as mudanças no sinal de saída em função das do comprimento de onda do sinal de entrada. Normalmente é representada por um gráfico em função do comprimento de onda para uma potência incidente. A resposta espectral de detectores térmicos (bolômetros, por exemplo) é proporcional à energia absorvida, logo, idealmente exibem uma resposta plana (constante) uma vez que a potência incidente é também constante [8].

2.5.4.7. Linearidade

Linearidade é uma característica desejável em sensores porque torna mais simples sua modelagem, tornando seu comportamento mais previsível. Um detector é dito linear quando o sinal de saída é diretamente proporcional ao sinal de entrada de acordo com uma função do primeiro grau [8].

2.5.4.8. Fontes e Tipos de Ruído

Ruído, em eletrônica, é todo tipo de fenômeno, aleatório ou não, que provoca perturbação ou dificuldade de medição de determinado sinal. É justamente o ruído que limita o desempenho dos

detectores sejam eles, térmicos ou não, e que determinam a mínima potência detectável. Como os mecanismos de ruído resultam de processos estocásticos ou aleatórios, não é possível prever a amplitude do ruído em determinado momento. Dessa maneira, o valor do ruído é normalmente especificado em termos do valor rms da tensão ou da corrente [8,29].

Existem várias fontes, ou processos, de geração de ruído: ruído Johnson (ou térmico), ruído de geração-recombinação, ruído Shot e ruído 1/f (ou ruído Flicker). Destas formas de ruído, as mais importantes para os bolômetros são: o ruído Johnson e o 1/f [29]. Também o ruído de fundo é um fator limitante para o desempenho de todos os detectores.

Ruído Johnson ou Térmico

Esta forma de ruído é encontrada em todos os materiais resistivos e ocorre mesmo na ausência de polarização. Esse ruído surge por variações na velocidade dos portadores no material. Isso causa pequenas oscilações no valor da tensão ou da corrente que está sendo medida. Esta fonte de ruído é independente da frequência, ou seja, é uma fonte de ruído branco (presente em todo o espectro de frequências) e depende apenas da temperatura. Sua expressão matemática é dada por [29]:

$$V_{r,t\acute{e}rmico} = (4kTR\Delta f)^{\frac{1}{2}} \quad (2.10)$$

onde k é a constante de Boltzmann, T é a temperatura absoluta do elemento e Δf a largura de banda em questão.

Ruído 1/f (ou Flicker)

Este tipo de mecanismo de ruído é denominado 1/f devido ao comportamento de sua densidade espectral com a frequência, ou seja, é inversamente proporcional à frequência, sendo assim, dominante em baixas frequências. Nos semicondutores não se domina plenamente as origens desse tipo de ruído, sabe-se que normalmente é associado com efeitos da barreira de potencial nos contatos, estados de superfície e correntes de fuga na superfície. Também não é completamente modelado, não existindo expressão exata para descrevê-lo, no entanto, normalmente é representado na forma [8,29]:

$$V_{r,1/f} = \left(\frac{(\alpha V^2)}{N_a f} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.11)$$

onde V é a tensão de polarização, α é um coeficiente característico do dispositivo e N_a o número de portadores no dispositivo.

Ruído de Fundo

Mesmo que todas outras fontes de ruído fossem eliminadas, ainda assim existiria um limite fundamental para o desempenho do detector devido às flutuações na radiação de fundo. Estas flutuações nos processos de emissão fazem com que exista um NEP que limita o valor da detectividade. Para a maioria das situações, as redondezas estão provavelmente a 300 K, que corresponde a um comprimento de onda de aproximadamente 10 μm [29].

A potência equivalente de ruído de fundo, desconsiderando as outras formas de ruído é descrita pela relação:

$$NEP = \left(\frac{16\sigma T^5 A \Delta f}{\eta} \right) \quad (2.12)$$

Logo a detectividade específica para um detector ideal, com área sensível unitária, largura de banda unitária e emissividade unitária é relacionada por:

$$D^* = (16\sigma k T^5)^{-1} \quad (2.13)$$

Onde σ representa a constante de Stefan-Boltzmann e η a emissividade.

Para o exemplo do detector operando com radiação de fundo a 300 K, temos que D^* é igual a $1,81 \cdot 10^{10} \text{ cm.Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ [8,29].

Capítulo 3 - Projeto e Fabricação

3.1. Projeto de um Microbolômetro

O projeto de um microbolômetro exige que se atinja um compromisso entre os parâmetros de processo de fabricação a fim de que sejam obtidas características elétricas e ópticas adequadas a determinada aplicação.

No caso de microbolômetros resistivos em membrana suspensa, os parâmetros principais de fabricação que devem ser ajustados são a Resistência de Folha (R_s), a Espessura do Si-poli (t_{poli}), Corrente de Polarização (I) e a Área, aqui representada pela relação $L.W$, uma vez que a partir deles é possível ajustar as figuras de mérito do dispositivo.

A Figura 3.1 ilustra um diagrama descrevendo o compromisso que deve ser buscado entre esses parâmetros. Os três círculos representam características importantes do dispositivo – Detectividade Específica (D^*), Responsividade (\mathcal{R}) e Tempo de Resposta (τ) – com a indicação de quais parâmetros de processo influenciam diretamente essas características.

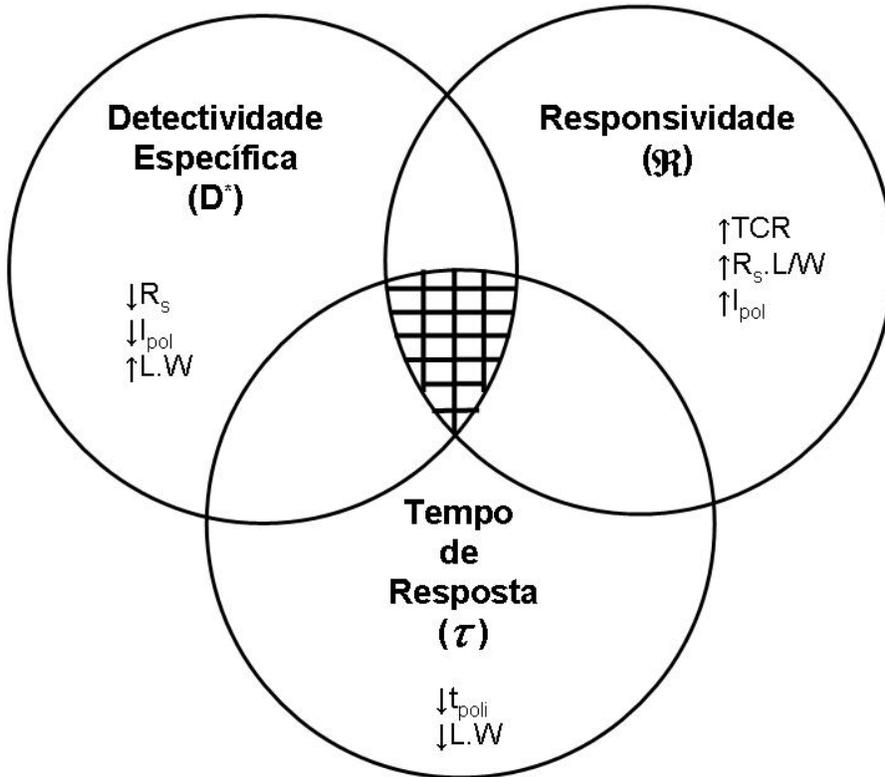


Figura 3.1. Diagrama esquemático mostrando o compromisso entre os parâmetros de fabricação do dispositivo e suas características finais.

Obviamente, os parâmetros podem influenciar positivamente para uma característica e negativamente para outra. Por exemplo, o aumento da Resistência de Folha aumenta o valor do ruído no dispositivo, diminuindo a Detectividade Específica. No entanto, o aumento da Resistência de Folha, também aumenta a Responsividade do Dispositivo. O mesmo acontece para a espessura do Si-poli. Aumentando a Área ($L.W$), o tempo de resposta também aumenta, pois o volume do material a ser aquecido também aumenta. No entanto, aumentando a área do dispositivo, a detectividade também aumenta.

Dessa maneira, um equilíbrio deve ser encontrado entre os parâmetros de fabricação para que se encontre características adequadas a determinada aplicação. A intersecção entre os três círculos da Figura 3.1 (região hachurada) apresenta a região comum em que os parâmetros de processo propiciam características adequadas do dispositivo, sendo também chamada de região de aceitação. É preciso utilizar parâmetros de processo que se situem no interior dessa região. Cada característica fornecerá restrições quanto aos parâmetros de fabricação e a fusão de todas as restrições indicará os parâmetros de fabricação a serem utilizados. Cada uma das características deve então, ser investigada para se encontrar os parâmetros ideais de fabricação.

Tempo de Resposta

Através da equação 2.9 é possível calcular o tempo de resposta do microbolômetro para diferentes valores de espessuras do Si-poli e relações L/W . O resultado disso é mostrado na Figura 3.2. O termo G na equação (condutância térmica) foi aproximado para o valor de condutância das regiões onde o microbolômetro se encontra apoiado. Os termos de perda de calor por convecção e irradiação foram desprezados frente ao maior valor de perda pela região de apoio (pernas do sensor). Obviamente alguma diferença poderá ser observada caso estes termos sejam levados em consideração.

Da Figura 3.2, é possível concluir que para se ter baixo tempo de resposta (menor que 41 ms) é interessante utilizar filmes de Si-poli com espessura reduzida e pequena área, uma vez que isso resulta em sensores com menor massa térmica, sendo rápido o processo de aquecimento e resfriamento. Nessa figura, a dimensão W é mantida constante ($75\mu\text{m}$) e é variado o comprimento L , de forma a se obter diferentes relações L/W .

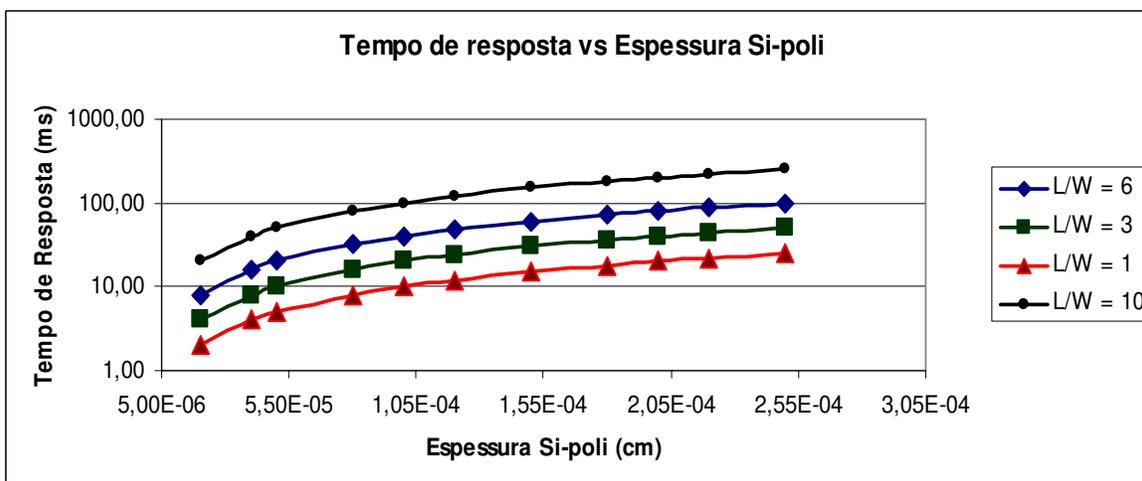


Figura 3.2. Tempo de resposta em função da espessura do Si-poli para diferentes relações L/W.

Assumindo que o microbolômetro será utilizado para aplicações em imageamento, por exemplo, o tempo de resposta deve ser menor que 41 ms (24 *frames* por segundo) [6]. Caso seja utilizado uma relação L/W de 6 e 1 μm de espessura, por exemplo, o tempo de resposta será de aproximadamente 40 ms, estando no limite de aceitação para essa aplicação. Relações L/W menores irão resultar em tempos de respostas menores, no entanto, a menor área, poderá prejudicar a detectividade.

Idealmente seria interessante que fossem utilizados filmes extremamente finos para que a área do dispositivo pudesse ser grande, no entanto, filmes muito finos podem se quebrar mais facilmente. Desta forma, a restrição feita para o tempo de resposta é de que a espessura do Si-poli seja menor que 1 μm e que a relação L/W seja menor que 6.

Uma vez que a relação L/W e a espessura do Si-Poli produzem efeitos inversos, seria conveniente utilizar o produto entre os dois parâmetros como referência. Dessa forma, deve-se escolher o produto ($L/W \times t_{\text{poli}}$) menor ou igual a 6 μm . Dessa maneira, é possível utilizar uma espessura de Si-poli de 2 μm , por exemplo, desde que a relação L/W seja menor ou igual a 3, pois o produto ($L/W \times t_{\text{poli}}$) é menor ou igual a 6 μm .

Detectividade Específica

A detectividade específica, conforme descrito no capítulo 2, está intrinsecamente ligada ao nível de ruído no dispositivo. Quanto maior a detectividade, maior a “facilidade” de detecção do sinal, e menor o nível de ruído.

O ruído total no dispositivo é calculado pela soma das equações 2.10 e 2.11 resultando na seguinte equação:

$$V_r^2 = 4kTR\Delta f + \frac{\alpha V^2}{N_a f} \quad (3.1)$$

Para o cálculo da detectividade, foram considerados apenas o ruído térmico, o ruído 1/f e o ruído de fundo (que limita a detectividade). A detectividade é calculada através da equação 2.8.

Observando a Figura 3.3, verifica-se que para pequenos valores de resistência de folha, o ruído no dispositivo se torna bastante pequeno (ruído térmico principalmente), aumentando o valor da detectividade, até o limite imposto pelo ruído de fundo. Para valores menores que 1 kΩ/□, a relação L/W pouco influencia no valor da detectividade.

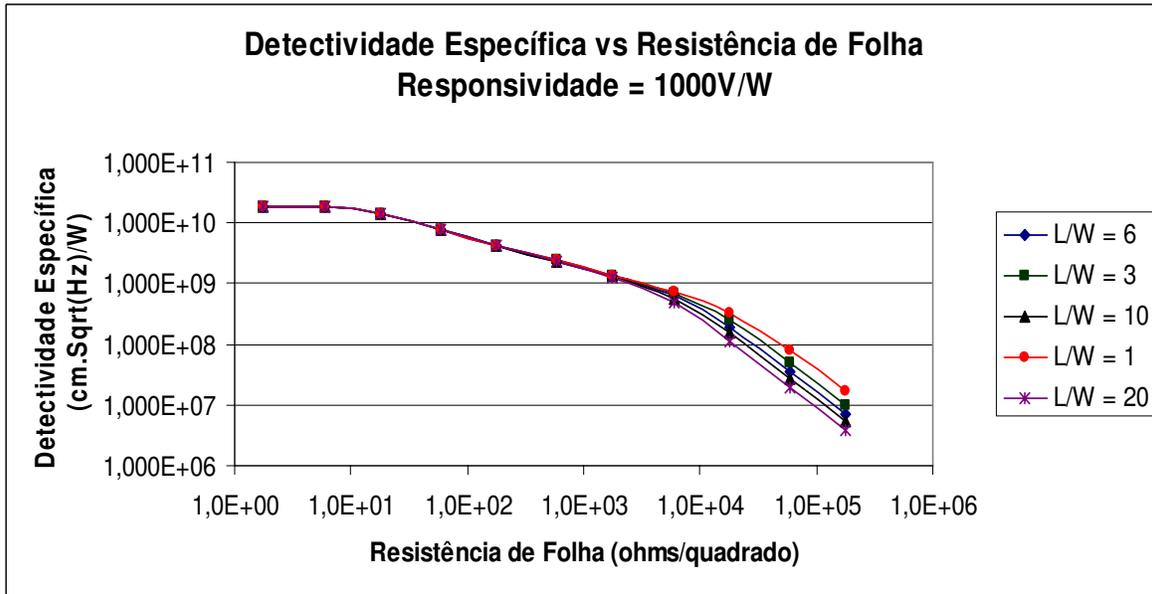


Figura 3.3. Detectividade específica em função da resistência de folha para diferentes L/W.

Valores típicos de detectividade específica estão compreendidos na faixa entre 1.10^7 cm.Hz^{1/2}.W⁻¹ e 3.10^9 cm.Hz^{1/2}.W⁻¹ [22]. Desta maneira, é conveniente escolher um valor de resistência de folha entre 595 Ω/□ e 59,5 kΩ/□. Isso representa, de acordo com a Figura 2.8, um TCR mínimo de aproximadamente -1%/K, valor perfeitamente aceitável, visto que, tradicionalmente, os bolômetros apresentam TCR em torno de -2%/K.

A Figura 3.4 apresenta a influência da corrente de polarização na detectividade específica para diferentes L/W, mantendo fixa a resistência de folha em 5,95 kΩ/□. O aumento da corrente de

polarização prejudica a detectividade uma vez que aumenta o valor do ruído $1/f$. No pior caso deste gráfico ($L/W=10$), o aumento da corrente pode reduzir a detectividade específica em 49%, enquanto que no melhor caso ($L/W=1$), a redução é de aproximadamente 11%.

Aceitando como razoável uma diminuição na detectividade específica de 25% devido ao aumento da corrente de polarização, é possível estipular um limite de corrente (baseado no pior caso) de 25 μA .

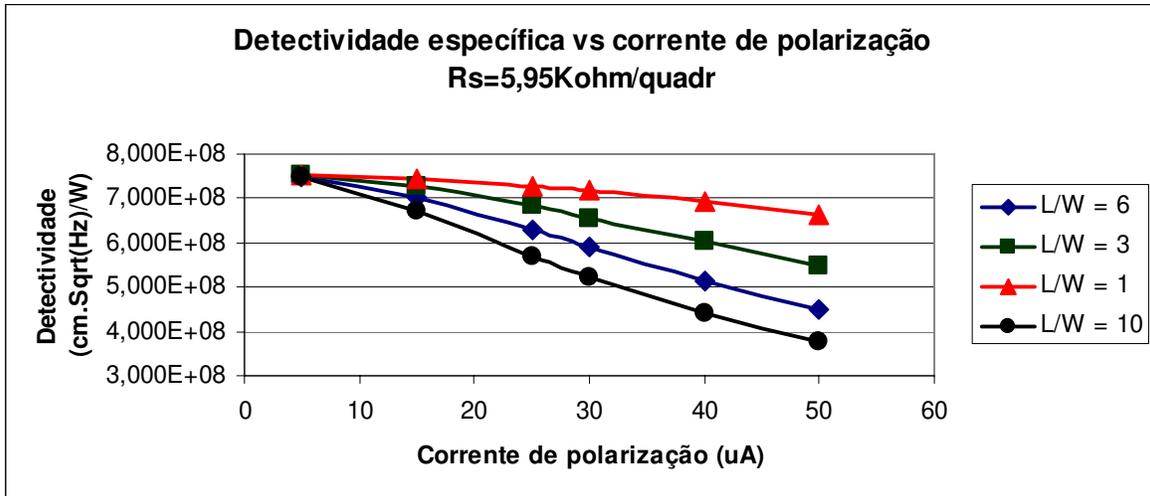


Figura 3.4. Detectividade específica em função da corrente de polarização do dispositivo para diferentes L/W .

Responsividade

A responsividade é obtida através da expressão 3.2, e leva em conta diversos parâmetros do dispositivo [22]. O parâmetro η (emissividade) e o parâmetro G (condutância térmica) foram mantidos constantes de forma a facilitar o estudo do dispositivo e o projeto.

$$\mathfrak{R} = \frac{(TCR) \cdot \eta \cdot R \cdot I}{G \cdot \sqrt{1 + 4\pi^2 f^2 \tau^2}} \quad (3.2)$$

Obviamente, aumentando a resistência de folha e a corrente de polarização, a responsividade aumenta. No entanto, é possível perceber pela Figura 3.5, que para valores de corrente menores que 10 μA , o aumento percentual da responsividade é muito maior do que para valores maiores que 10 μA . Desta maneira, é conveniente utilizar corrente de polarização maior que 10 μA .

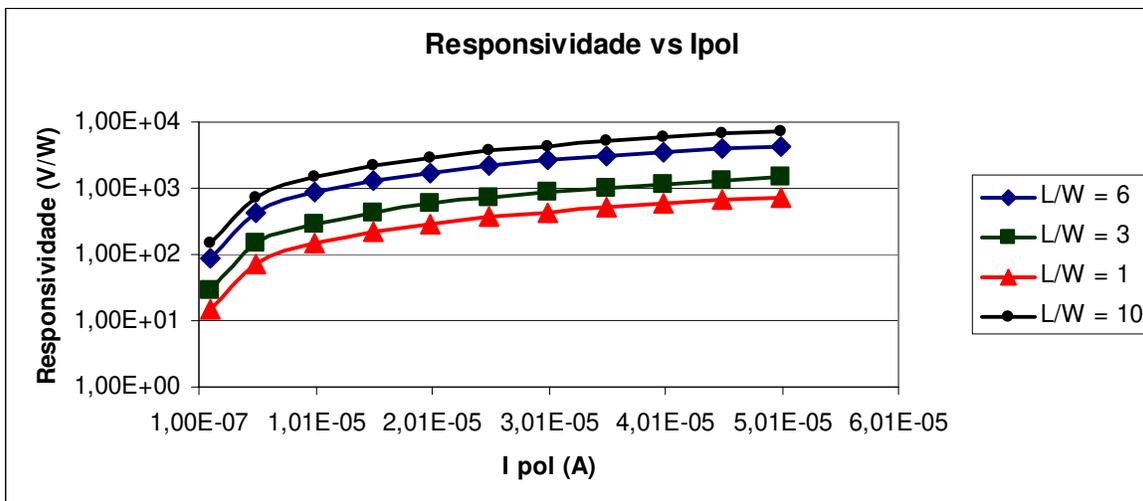


Figura 3.5. Responsividade em função da corrente de polarização para diferentes L/W.

Cabe ressaltar que, nos cálculos utilizados para gerar o gráfico acima, a condutância térmica G foi assumida como sendo constante, a fim de facilitar os cálculos. O valor de G pode ser reduzido através da redução da área transversal e aumento do comprimento das pernas do sensor. Desta maneira, se a região absorvedora de radiação possuir área grande com as pernas do dispositivo pequenas, maior será a absorção de radiação e menores serão as perdas de calor desta região por condução. Isso aumenta a responsividade do dispositivo (vide equação 3.2). Devido a essa característica, também é possível que dispositivos com mesma relação L/W , possam apresentar responsabilidades diferentes, caso as áreas transversais das pernas dos dispositivos sejam, também, diferentes. Logo, é desejável para aumentar a responsividade do sensor, que as pernas da estrutura tenham pequena área transversal.

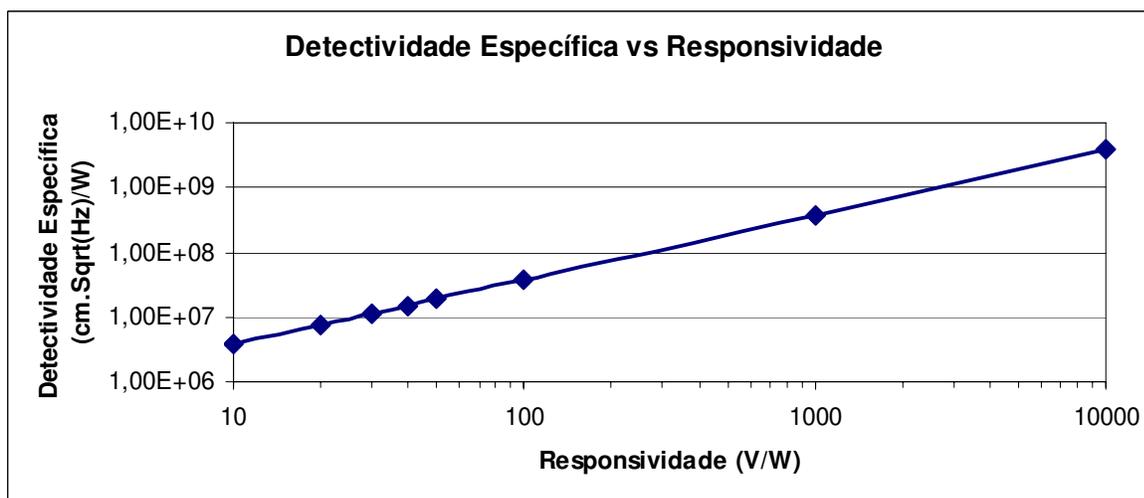


Figura 3.6. Detectividade específica em função da responsividade.

A Figura 3.6 mostra a dependência da detectividade específica com a responsividade. Quanto maior a responsividade, maior a detectividade. Assumindo o valor mínimo aceitável de detectividade específica $1.10^7 \text{ cm.Hz}^{1/2}.\text{W}^{-1}$, conforme visto no tópico anterior, é necessário obter aproximadamente 30 V/W de responsividade.

Combinação dos parâmetros

Combinando os parâmetros definidos por cada uma das características do dispositivo, chega-se às seguintes restrições:

- $L/W \times t_{\text{poli}} \leq 6 \mu\text{m}$
- $595 \Omega/\square \leq R_S \leq 59,5 \text{ k}\Omega/\square$
- $10 \mu\text{A} \leq I_{\text{bias}} \leq 25 \text{ uA}$

Quaisquer valores escolhidos no centro desta região de aceitação estarão dentro da região hachurada de aceitação da Figura 3.1 e serão aceitáveis dentro do projeto do dispositivo.

3.2. Microbolômetro Projetado

O microbolômetro projetado neste trabalho tem como objetivo aumentar de forma significativa a responsividade ao isolar termicamente o elemento ativo do substrato, obter também alto TCR, baixo tempo de resposta e alta absorbância por parte do material absorvedor. A Figura 3.7 apresenta um esquema simplificado da geometria do dispositivo.

Termopilhas são também detectores térmicos bastante utilizados devido ao fato de não precisarem de tensão de alimentação externa, uma vez que produzem um sinal naturalmente por efeito *seebeck*, no entanto, o motivo de se ter escolhido trabalhar com microbolômetros e não com termopilhas é o fato de os microbolômetros apresentarem responsividades muito maiores [31]. Além disso, termopilhas geralmente requerem um amplificador de baixo ruído (LNA) acoplado ao dispositivo para aumentar sua relação sinal-ruído uma vez que, como não são polarizadas, não é possível aumentar o nível da resposta apenas aumentando o nível da polarização, como é feito em bolômetros [32].

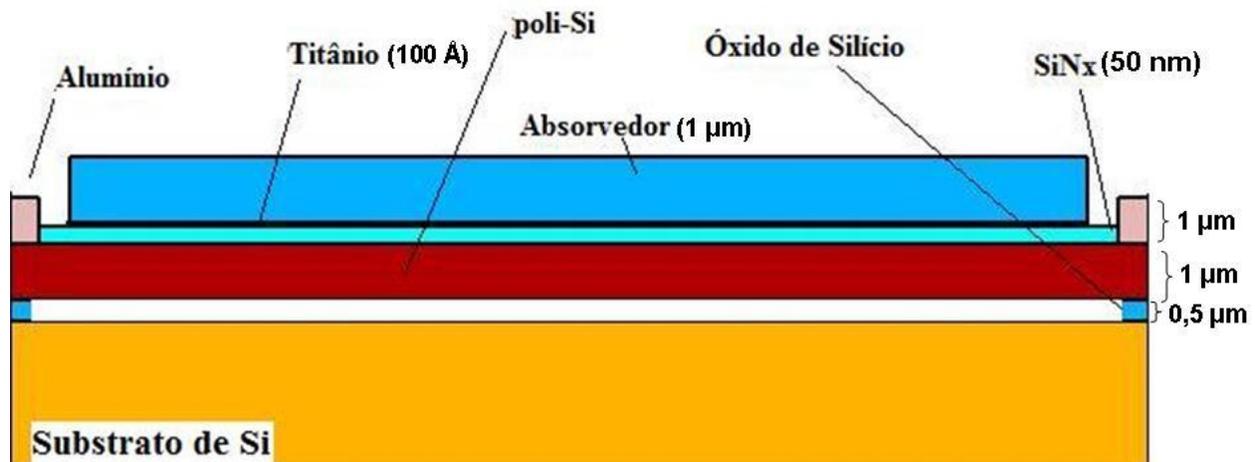


Figura 3.7: Esquema do microbolômetro projetado indicando os materiais utilizados.

Optou-se pela utilização de uma membrana suspensa de Si-poli para que a região ativa do dispositivo fique termicamente isolada do substrato. Isso impede que o calor absorvido pelo absorvedor (ouro negro) seja perdido para o substrato, concentrado apenas na região do Si-poli. O valor escolhido para a espessura desta membrana foi de 1 μm , conforme uma das restrições do item 3.1.

A membrana de Si-poli fica apoiada sobre SiO₂ “sacrificial” de aproximadamente 0,5 μm de espessura (valor escolhido conforme será discutido adiante), que no final do processo, é corroído de forma a suspender esta membrana. Sobre o Si-poli é depositada uma camada de 50 nm de SiN_x a fim de isolar eletricamente o Si-poli do absorvedor. Este filme de SiN_x possui coeficiente de dilatação térmico bastante diferente do Si-poli e por esta razão, normalmente, utiliza-se uma camada de SiO₂ entre os materiais a fim de evitar a quebra da estrutura por um choque térmico. No entanto, a espessura escolhida, propicia boa isolamento elétrica sem inserir stress mecânico na estrutura, visto que seu volume é muito menor que o volume da camada de Si-poli. O absorvedor consiste em uma camada de ouro negro (ou ouro poroso). Esta camada tem a propriedade de absorver com eficiência a radiação infravermelha incidente sobre o dispositivo. Sobre o nitreto de silício deve ser utilizada uma fina camada de Titânio e Ouro que aumenta a aderência entre o ouro poroso e o nitreto, visto que a aderência entre estes dois materiais é extremamente baixa.

Os contatos são feitos de alumínio de aproximadamente 1 μm de espessura, com área quadrada de 100 μm².

3.3. Simulação

Durante o desenvolvimento de qualquer dispositivo é necessário prever seu comportamento a fim de compreender os fenômenos envolvidos em sua operação e aperfeiçoar suas características. As principais vantagens da simulação são: baixo custo em comparação com fabricação em laboratórios e a capacidade de observar fenômenos internos ao dispositivo, que não poderiam ser medidos por equipamentos de medição.

Os *softwares* utilizados para esse fim pertencem ao pacote de simulação da empresa SILVACO, são eles: ATHENA e ATLAS. O primeiro é um simulador de processos de fabricação, que permite realizar deposições de diversos materiais, implantações de íons, corrosões, oxidações, dentre outros. Já o segundo programa é um simulador elétrico de dispositivos. O ATLAS pode tanto usar como arquivo de entrada um dispositivo gerado pelo ATHENA quanto ser usado para gerar uma estrutura geométrica e posteriormente a simular. Sucintamente, o que este programa faz é obter a solução bidimensional das equações da continuidade de portadores e da equação de Poisson, tendo como condição de contorno a estrutura física e as tensões aplicadas aos terminais. Além disso, é interessante utilizar modelos complementares tais como modelos de mobilidade (dependente de campo elétrico, concentração

de portadores, etc.), recombinação (Auger, Shockley-Read-Hall), estatística (Fermi, Boltzmann) dentre outros possíveis [33].

Para a simulação mecânica foi utilizado o *software* de simulação de elementos finitos ANSYS, que abrange também simulações térmicas, elétricas e eletromagnéticas [34].

3.3.1. Simulação Térmica 3D

A simulação de fluxo de calor é utilizada para compreender como o calor flui através do dispositivo, tornando possível tomar providências (tais como utilização de camadas isolantes ou suspensão da membrana de Si-poli) para que o dispositivo seja isolado termicamente. Isso impede que o calor se dissipe para o substrato, o que diminuiria a sensibilidade do sensor. Além disso, a má isolamento térmica poderia causar *crosstalk* (um tipo de interferência) entre dispositivos próximos, como, por exemplo, em matrizes de dispositivos.

O módulo de simulação térmica do pacote de simulação da SILVACO permite a simulação tridimensional do fluxo de calor em uma estrutura, dada a diferença de temperatura entre duas regiões ou a emissão de energia térmica de uma região do dispositivo resultante de sua operação.

No presente dispositivo, foi utilizada a simulação térmica a fim de verificar a qualidade do isolamento térmico do dispositivo para aumentar sua sensibilidade às variações de temperatura da camada absorvedora.

A descrição geométrica desta estrutura tridimensional foi realizada utilizando o próprio programa ATLAS, conforme pode ser visto na Figura 3.8. Após a descrição da geometria do dispositivo, é necessário informar ao programa os valores das condutividades térmicas dos materiais que compõem o sensor. Estes valores são mostrados na tabela 3.1. Em seguida, foi fixada a temperatura do absorvedor em 350 K e a temperatura do substrato de Silício em 300 K e foi simulado o fluxo de calor de uma região à outra.

Tabela 3.1: Condutividades térmicas dos materiais utilizados no microbolômetro [35,36,37].

| Material | Condutividade Térmica (W/cm.K) |
|--------------------------------|--------------------------------|
| Al puro | 2,37 |
| Ar | $2,62 \cdot 10^{-4}$ |
| Au puro | 3,18 |
| Si | 1,57 |
| Si-poli | 0,45 |
| SiO ₂ | $1,4 \cdot 10^{-2}$ |
| Si ₃ N ₄ | 0,301 |

É interessante ressaltar que a condutividade térmica do Si-poli é um parâmetro dependente da dopagem utilizada [38]. Ciente disso foi utilizado o valor 0,45 W/cm.K, que melhor se encaixava na dopagem utilizada (a ser discutida no item 3.1.5). Este valor para o Si₃N₄ também é dependente da pressão e temperatura utilizadas no processo de deposição, e foi adotado aquele que mais se aproxima do processo utilizado (0,301 W/cm.K) [39]. A condutividade térmica do Ouro poroso foi assumida com sendo igual à do Ouro denso.

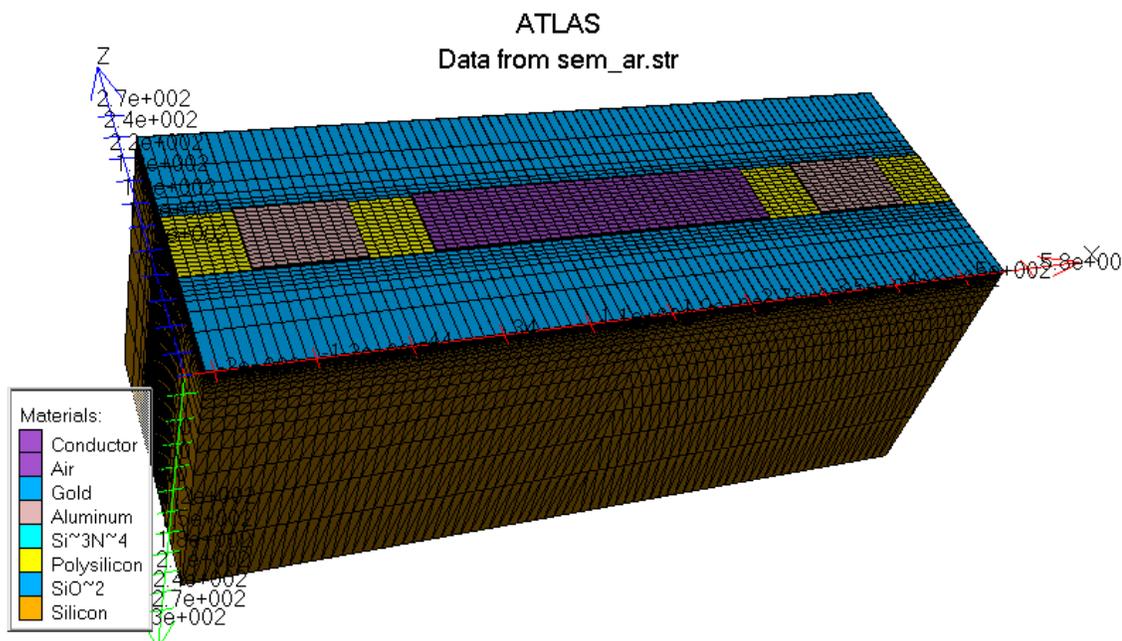


Figura 3.8: Descrição geométrica tridimensional da estrutura a ser simulada termicamente.

Na Figura 3.9 (a) é mostrado o gradiente de temperatura ao longo da secção transversal do dispositivo quando o Si-poli se encontra em contato direto com o substrato. É possível perceber que o isolamento não é eficiente, uma vez que grande parte do calor foi perdida para o substrato de Silício.

É importante impedir que o calor da camada absorvedora se dissipe para o substrato de Silício antes que a região sensível de Si-poli se aqueça de forma suficiente para causar alterações significativas no valor da resistência do microbolômetro.

Uma forma de se obter tal isolamento é a inserção de uma camada de SiO_2 (isolante térmico) entre o Si-poli e o substrato. O resultado disso é mostrado na Figura 3.9 (b), quando foi utilizada uma camada de $0,5 \mu\text{m}$ de espessura. Constata-se significativa melhora em relação ao caso anterior. No entanto se essa camada de óxido (entre o Si-poli e o substrato) for apenas sacrificial e for removida, deixando a membrana de Si-poli suspensa, a isolamento se dará de forma mais eficiente, uma vez que o ar (ou vácuo) que ficaria sob essa membrana é melhor isolante térmico do que o SiO_2 . Isso pode ser constatado na Figura 3.9 (c). Esta figura mostra o gradiente de temperatura no sensor com membrana suspensa com $0,5 \mu\text{m}$ de distância do substrato. Praticamente todo o calor se concentra na membrana de Si-poli (elemento sensível) e quase não há fluxo de calor para o substrato.

Diante disso, conclui-se que a melhor opção para isolamento térmica do dispositivo é a utilização de uma camada de óxido sacrificial para a formação de uma ponte de Si-poli suspensa.

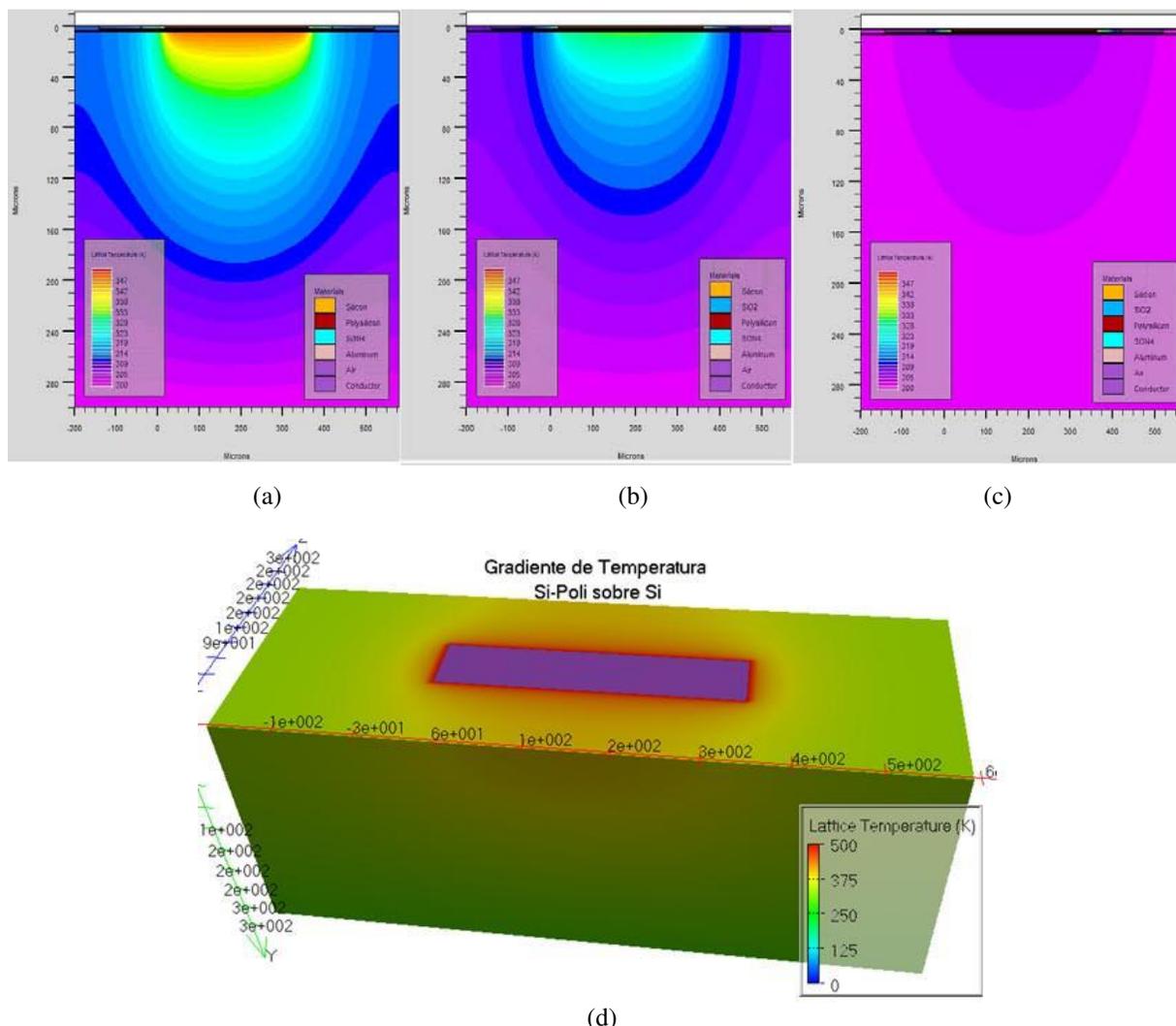


Figura 3.9: Distribuição de temperatura no caso em que o absorvedor está a 350 K e o substrato a 300 K. No caso da esquerda (a), não há isolamento térmico entre o resistor e o substrato. Na figura do meio (b) é utilizada uma camada de SiO₂ para isolamento térmico. À direita (c) é mostrado o caso em que o resistor está suspenso. Em (d) a distribuição tridimensional de temperatura.

O próximo passo na simulação foi variar parâmetros da estrutura (tais como a espessura do Óxido e do Nitreto de Silício) a fim de checar sua influência no funcionamento do dispositivo.

Primeiramente foi diminuída para 0,3 μm a espessura da camada de SiO₂ depositada, ou seja, diminuída a altura da ponte de Si-poli. Isso causou uma diminuição da temperatura na camada de Si-poli, uma vez que a isolamento térmico foi diminuído. A temperatura do absorvedor foi fixada em 350 K e a temperatura do substrato em 300 K. A temperatura na extremidade final da camada de Si-poli (região mais distante do absorvedor) passou de 349,92 K (com óxido de 0,56 μm) para

349,88 K (com o óxido mais fino). Isso representa uma redução de apenas 0,011% na temperatura em relação à espessura do Óxido inicial da estrutura (0,5 μ m).

Para verificar a influência da espessura da camada de Si₃N₄ foi aumentada sua espessura para 1 μ m. A temperatura observada no final da camada de Si-poli foi de 349,86 K quando imposto a temperatura de 350 K no absorvedor. Isso representa uma redução de 0,017% na temperatura em relação aos parâmetros iniciais do dispositivo.

Isso indica que a precisão na espessura de deposição do SiO₂ e do Si₃N₄ não é de vital importância para a boa isolamento térmica do dispositivo, sendo toleráveis variações de até 50% nestas espessuras. Desta forma, adotaram-se as seguintes espessuras: Para o filme de SiO₂ utilizou-se 0,5 μ m e 50nm para o filme de SiN_x.

3.3.2. Simulação Mecânica FEM 3D

Decidido pela utilização da membrana suspensa, é necessário verificar sua resistência mecânica a fim de garantir que a membrana não quebre devido a ação do próprio peso. Para isso, foi utilizado o *software* de simulação de elementos finitos ANSYS. Assim como na simulação térmica e elétrica, é necessário descrever a geometria da estrutura e dividi-la em uma grade de simulação. Feito isso, são inseridos os parâmetros dos materiais utilizados no dispositivo. A fim de simplificar a análise, foi descrita a membrana apenas com duas camadas, a de Si-poli e a de ouro poroso. O comprimento da membrana simulada é de 450 μ m e a largura é 75 μ m. A espessura de Si-poli é de 1 μ m e a espessura do ouro poroso é de 0,6 μ m. O módulo de Young do Si-poli é aproximadamente 170 GPa e a relação de Poisson de 0,22, enquanto o módulo de Young do Ouro é 80 GPa e a relação de Poisson de 0,35. A densidade do Si-poli é de 2330 kg/m³ e a do ouro é de 19280 kg/m³ [40,41]. A densidade do ouro poroso é de cerca de 3500 kg/m³, no entanto foi utilizada a de ouro puro para retratar o pior caso, em que o ouro não fique poroso [7].

Uma vez descrita a estrutura e as características dos materiais, são inseridas as condições de contorno do problema. É inserido o valor da gravidade 9,8 m/s², sendo a membrana engastada nas duas extremidades opostas. O resultado da simulação com essas condições de contorno é apresentado na Figura 3.10.

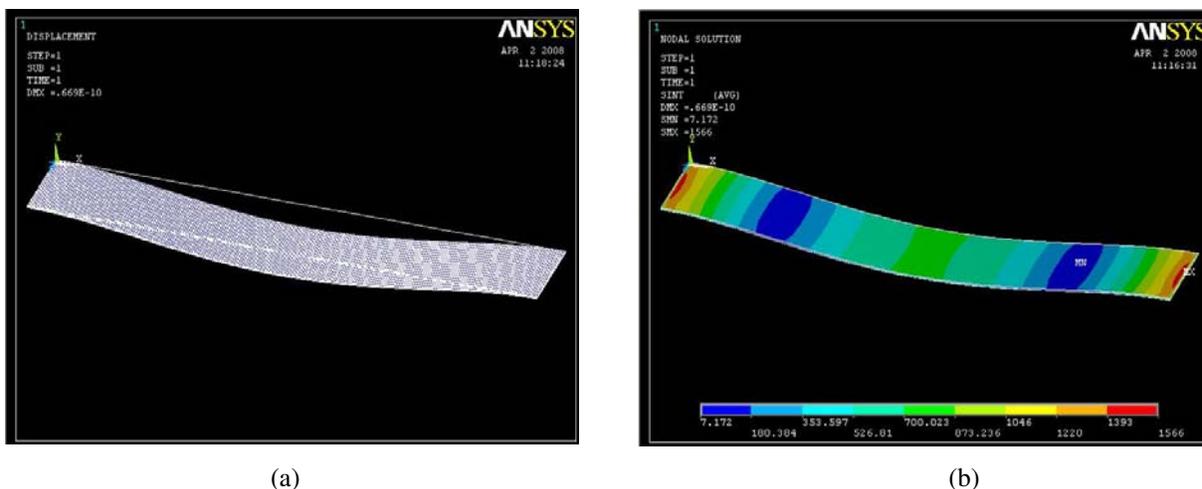


Figura 3.10: (a) Deformação na membrana devido à ação da gravidade. (b) Distribuição do stress mecânico na membrana sob ação da gravidade.

É possível verificar que o deslocamento vertical máximo da membrana é de $0,669 \text{ \AA}$, ou seja, a membrana praticamente não se deforma. Os pontos máximos de *stress* na membrana ocorrem próximos aos engastes com o valor de 1566 Pa . Entretanto, o valor de *stress* para o qual o Si-poli sofre fratura é de aproximadamente $1,2 \text{ GPa}$ [40]. Logo, o *stress* máximo na membrana é bem menor do que o ponto de fratura do Si-poli, confirmando que a membrana não quebrará devido à ação do próprio peso.

Outra simulação é realizada para determinar a pressão máxima uniforme que esta membrana suporta antes de quebrar. Aplicando uma pressão uniforme de 24 kPa sobre toda a área superior da membrana é possível verificar que os engastes sofrerão um *stress* igual ao ponto de ruptura do Si-poli, ou seja, quebrarão. Entretanto, antes que esta condição aconteça (com uma pressão uniforme de 500 Pa), a membrana se deformará $0,55 \text{ \mu m}$, encostando-se ao substrato antes de quebrar.

3.3.3. Simulação de processos (ATHENA)

A primeira etapa de simulação de processos é a definição da geometria do dispositivo a ser fabricado e o dividir em linhas verticais e horizontais de modo a formar uma grade. Esta grade será utilizada para resolver as equações necessárias e efetuar a interpolação ponto a ponto das soluções obtidas. Essa etapa é de fundamental importância, uma vez que grades inadequadas (com grande espaçamento entre as linhas – mais de $0,3 \text{ \mu m}$ – por exemplo) podem proporcionar resultados inverossímeis ou incoerentes.

Uma vez definida a grade de simulação, com espaçamento de $0,05 \mu\text{m}$ na região de Si-poli, deve-se executar os processos de fabricação na ordem correta em que devem acontecer. Seguindo os passos do processo anteriormente descritos, primeiro é feita uma deposição de SiO_2 com espessura de $0,5 \mu\text{m}$. Em seguida é feita uma deposição de Si-poli de $1 \mu\text{m}$ de espessura e uma posterior implantação de Boro com dose $3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ e 40 keV de energia. Na região dos contatos é feita uma implantação com maior dose ($5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ e 40 keV) a fim de diminuir a resistência dos contatos. Um dos motivos para a escolha de Boro como dopante é o fato de filmes de Si-poli dopados com Boro possuírem condutividades térmicas menores do que filmes dopados com fósforo (com mesma dopagem) [38]. Isso aumenta a isolação térmica do elemento ativo. Os átomos de Boro também são mais uniformemente distribuídos dentro dos grãos de Si-poli do que os átomos de Fósforo [38]. Tipicamente materiais tipo p também apresentam menor nível de ruído $1/f$. Além disso, a junção alumínio-semicondutor tipo p é, naturalmente, um contato ôhmico, o que diminui a resistência da região dos contatos. Por último, filmes dopados com Boro apresentam maior resistividade do que filmes dopados com fósforo (para mesma dose de implantação), visto que a mobilidade das lacunas é menor que a dos elétrons no Silício. Dessa maneira, é mais fácil atingir valores mais altos de resistência (e TCR) com Boro do que com Fósforo.

Após a implantação é feito um recozimento térmico rápido a $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ por 1 minuto a fim de ativar eletricamente os dopantes e reconstruir a rede cristalina. O perfil de dopagem ao longo do resistor de Si-poli pode ser verificado na Figura 3.11. O próximo passo consiste em uma deposição de uma camada de $0,5 \mu\text{m}$ de Si_3N_4 seguida de uma corrosão deste material nas regiões em que se localizarão os contatos (extremidades). É então feita uma deposição de Alumínio para a formação dos contatos seguida por uma corrosão deste Alumínio das áreas que não serão os contatos.

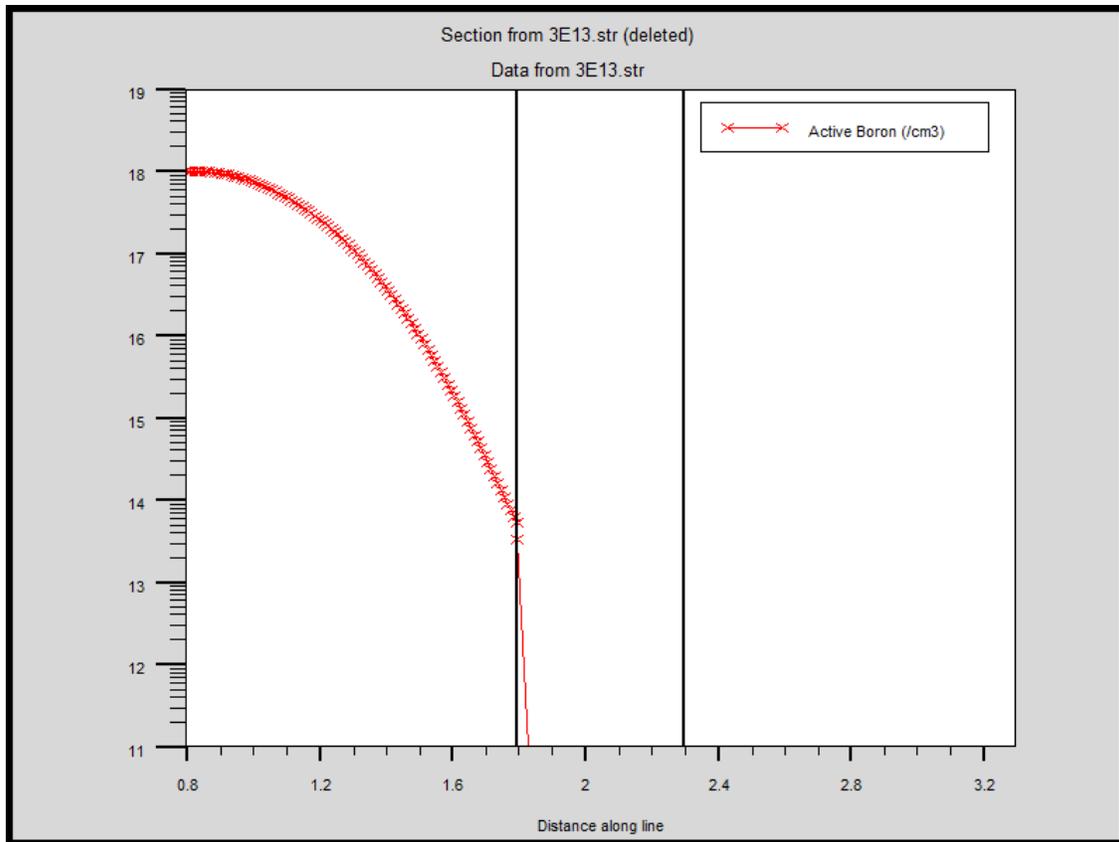


Figura 3.11: Perfil de dopagem de Boro na região do resistor de Si-poli.

Foi então feita uma deposição de titânio e corrosão de titânio a fim de que ele ficasse sobre o nitreto. Similarmente, foi feita uma deposição e corrosão de ouro sobre o titânio para a formação do absorvedor. Cabe ressaltar que estas duas camadas de metais não influenciarão nas características elétricas do dispositivo, uma vez que estão eletricamente isoladas do resistor de Si-poli. O comprimento escolhido para simular o dispositivo foi de 450 μm e a largura escolhida foi de 75 μm , uma vez que estas dimensões foram algumas das projetadas na máscara utilizada no processo de fabricação. A área ativa (região que contém o absorvedor) é de 340 μm de comprimento e 75 μm de largura.

Neste momento, cabe uma discussão acerca da área do dispositivo. É sempre interessante fazer a área ativa tender à área do próprio dispositivo, pois dessa forma, a área do sensor é mais bem aproveitada (aumenta o *fill factor* do dispositivo). Além disso, *pixels* normalmente são quadrados, dessa forma, é interessante fabricar sensores que ocupem áreas quadradas. Isso não impede que o sensor em si tenha *layouts* diferentes (circulares ou em serpentina, por exemplo), no entanto é desejável que o pixel seja quadrado. O tamanho deste *pixel* será determinado não só

por desempenho, mas também por requisitos de projeto. Caso seja necessário fabricar matrizes de muitos elementos, (120x160, 640x480, por exemplo) é necessário que a área do *pixel* (e do sensor) seja reduzida, de forma a caber todos os elementos em uma lâmina de silício ou ainda, possam ser produzidas várias matrizes por lâmina. Dessa forma, a determinação da área do sensor deve ser um dos primeiros cálculos a ser realizado. No presente trabalho, este cálculo não foi necessário, visto que as máscaras dos dispositivos já haviam sido fabricadas em trabalhos anteriores [7].

Finalizado o processo de fabricação (geometria totalmente descrita), foram então definidas as localizações dos eletrodos (contatos de Alumínio) e foi salva a estrutura em extensão *.str* que será utilizada como ponto de partida para a simulação elétrica. Uma visão da estrutura final construída é mostrada na Figura 3.12.

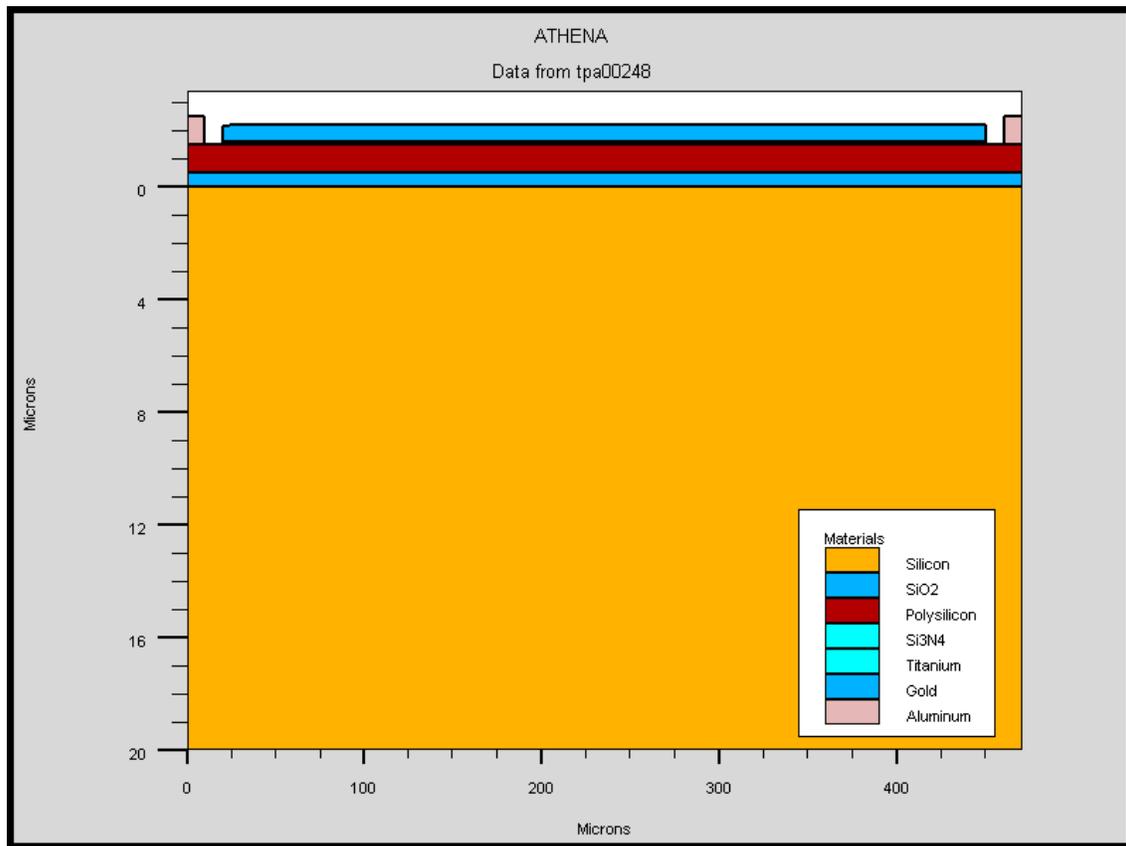


Figura 3.12: Geometria final do dispositivo a ser simulado eletricamente.

3.3.4. Simulação de dispositivo (ATLAS)

A simulação de dispositivo pode envolver tanto a simulação elétrica (trânsito de portadores) quanto fluxo de calor (gradiente de temperatura), simulações optoeletrônicas (geração de portadores), simulações de ruído dentre outras. Neste trabalho os dois tipos de simulação de dispositivos utilizados foram a simulação elétrica e a simulação de fluxo de calor (já discutido no item 3.3.1).

A simulação elétrica foi utilizada para medir o valor da resistência do microbolômetro para diferentes doses e energias de implantação assim como para diferentes espessuras de Si-poli e poder prever e ajustar o TCR do dispositivo.

3.3.5. Simulação Elétrica

Para realizar a simulação elétrica do dispositivo primeiramente é fornecido ao programa como arquivo de entrada, aquele arquivo gerado no programa ATHENA, descrito na seção 3.3.3. Através desta simulação, é possível analisar campos elétricos internos, traçar curvas características, verificar a concentração de portadores além de diversas outras grandezas físicas do dispositivo.

Traçando uma curva IxV do resistor é possível medir o inverso de sua inclinação e determinar o valor de sua resistência (Figura 3.13).

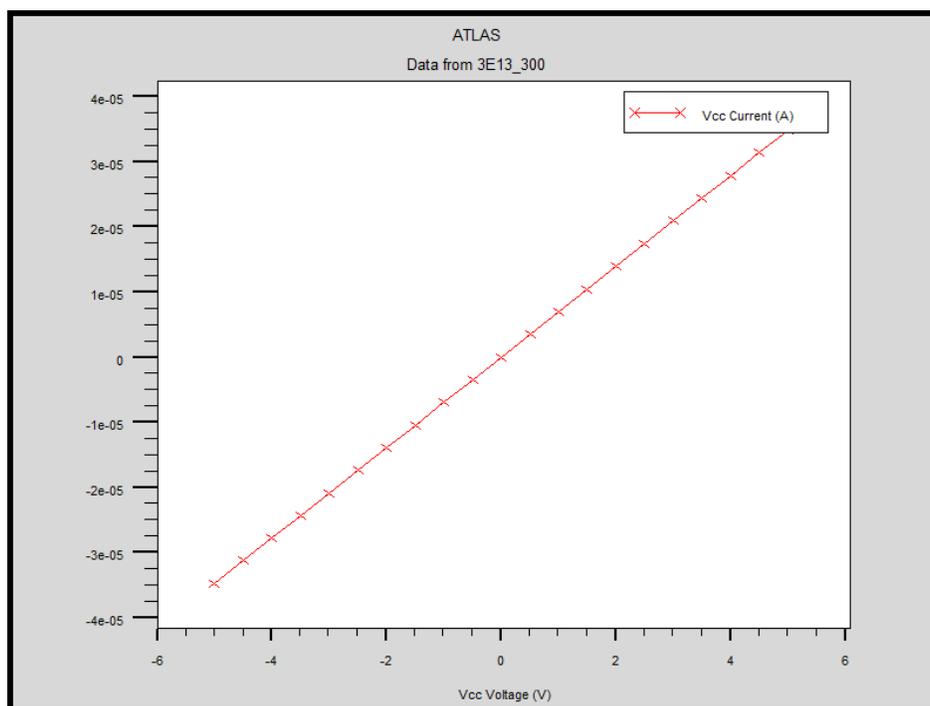


Figura 3.13: Curva IxV do dispositivo a 300 K. O inverso de sua inclinação fornece o valor da resistência.

Realizando esta medição para diferentes valores de dose de implantação, constrói-se o gráfico 3.14 em que temos diferentes valores de resistência em função da dose da implantação.

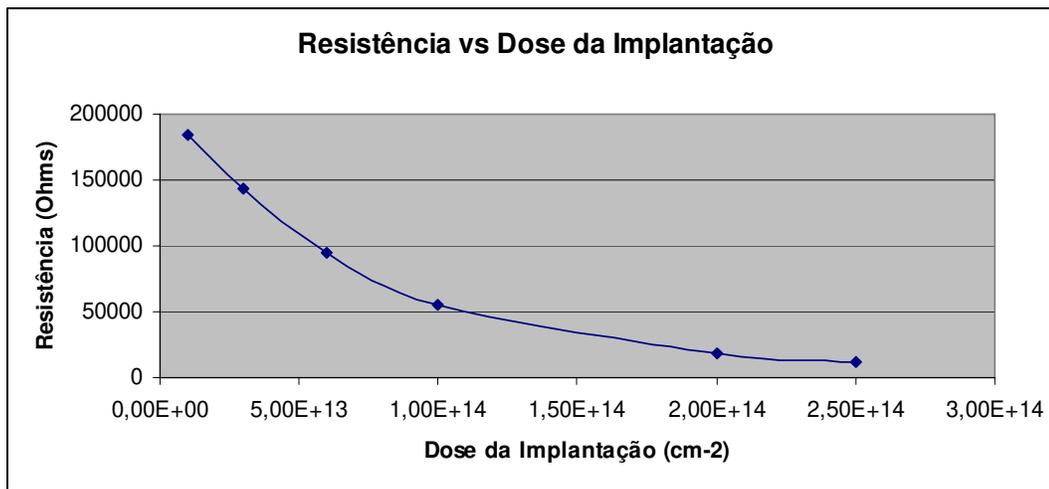


Figura 3.14: Resistência *versus* dose de implantação iônica.

É possível concluir que, obviamente, diminuindo a dose da implantação, a resistência é aumentada. De acordo com o item 3.1, é possível escolher uma dose de implantação de $3 \cdot 10^{13}$ cm⁻² de forma a produzir uma resistência de 143,7 kΩ e uma resistência de folha de aproximadamente 23,95 kΩ/□.

Outro estudo que pode ser feito é a influência da energia de implantação, mantendo a dose constante em $3 \cdot 10^{13}$ cm⁻². É possível verificar que aumentando a energia de implantação, a resistência diminui. No entanto, essa redução é de, em média, apenas 2,2 Ω por keV de implantação. Em termos percentuais isso representa apenas 0,345% de variação para cada 10 keV de energia. Isso significa que a energia de implantação, para esse caso, não causa grandes diferenças no valor da resistência, sendo a dose mais significativa.

Variando agora a temperatura de simulação, constrói-se um gráfico da resistência versus temperatura, que informa o valor do TCR do microbolômetro. Este gráfico é mostrado na Figura 3.15, onde é possível observar que à medida que diminui a dose de implantação (dopagem), maior é o TCR e menor sua linearidade. É sabido que a não-linearidade pode ser corrigida por *software* (durante o tratamento do sinal), no entanto se deve buscar um bom compromisso entre estas duas características do dispositivo. Além disso, conforme anteriormente mencionado, uma dose muito baixa de implantação aumenta o valor da resistência, aumentando também o ruído e o auto-aquecimento do dispositivo.

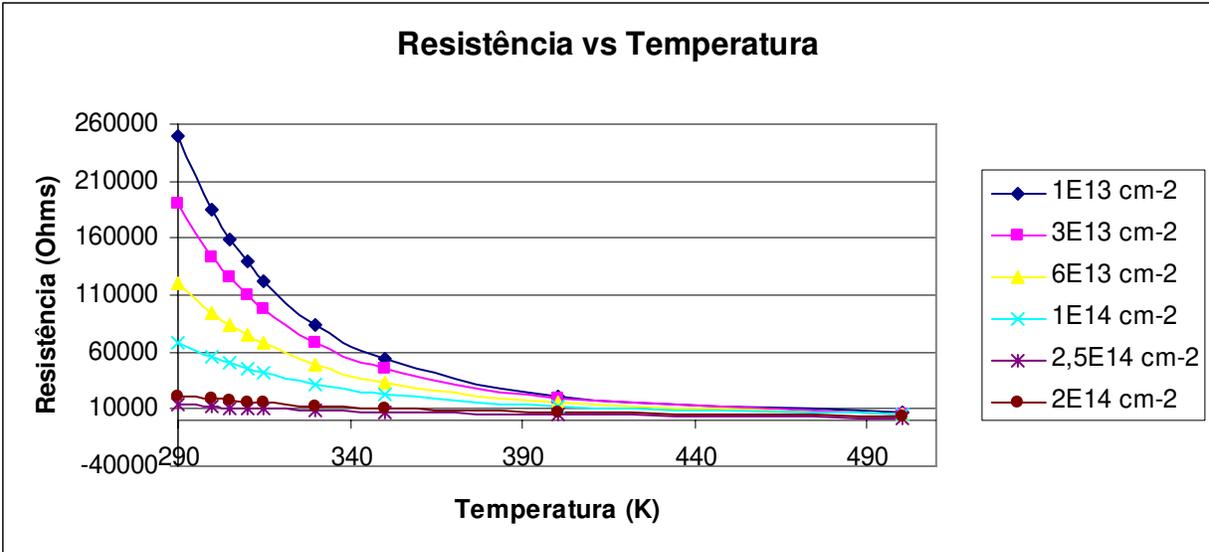


Figura 3.15: Resistência *versus* temperatura para diferentes doses de implantação iônica.

Outra figura interessante de ser observada é o valor do TCR vs Dose de implantação, que é mostrada na Figura 3.16. O valor do TCR diminui à medida que se aumenta a dose de implantação. Até que para valores de dopagem muito elevados, o TCR passa a ser positivo (o material se assemelha aos condutores). Este gráfico se assemelha bastante com valores experimentais já publicados (vide Figura 2.8). O valor de TCR esperado para a dose escolhida ($3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$) é de aproximadamente $-2,5\%/K$.

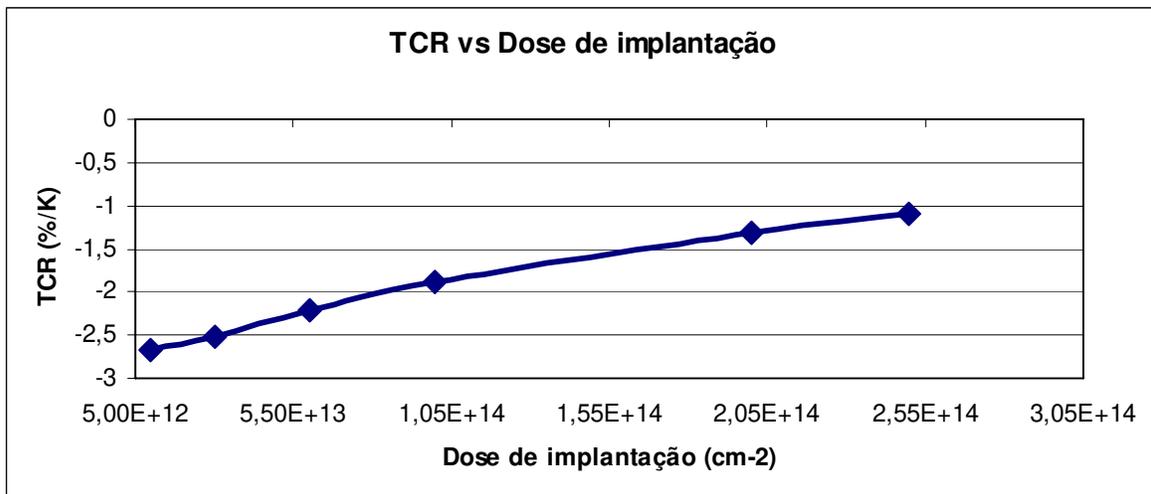


Figura 3.16. TCR vs Dose de implantação. O aumento da dose de implantação diminui o valor do TCR.

A tabela 3.2 apresenta uma comparação entre os parâmetros projetados e os parâmetros simulados do dispositivo. A detectividade específica, o tempo de resposta e a responsividade não foram simulados uma vez que os *softwares* utilizados não abrangem esses tipos de simulações. A espessura do Si-poli e a relação L/W estão de acordo com o projetado. A dose de implantação utilizada proporciona uma resistência de folha e TCR também adequados ao projeto.

Concluída a simulação elétrica e térmica do dispositivo, seguiu-se adiante para sua fabricação tendo sempre em mente os parâmetros escolhidos e aperfeiçoados durante a simulação.

Tabela 3.2. Comparação entre os parâmetros projetados e os parâmetros simulados.

| Parâmetro | Projetado | Simulado |
|------------------------------|---|---------------------------------|
| $L/W \times t_{\text{poli}}$ | $\leq 6 \mu\text{m}$ | $6 \mu\text{m}$ |
| R_s | $595 \Omega/\square < R_s < 59,5 \text{ k}\Omega/\square$ | $23,95 \text{ k}\Omega/\square$ |
| TCR | $\geq -1\%/K$ | $-2,5\%/K$ |
| D^* | $\geq 1.10^7 \text{ cm.Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ | - |
| \mathfrak{R} | $\geq 30 \text{ V/W}$ | - |
| τ | $<41 \text{ ms}$ | - |

3.4. Fabricação

Os resultados das simulações (dose de implantação, espessuras das camadas) servem como ponto de partida para a determinação e desenvolvimento das etapas de fabricação dos dispositivos. Para melhor compreensão destas etapas, a Figura 3.17 ilustra os passos mais importantes do processo de fabricação.

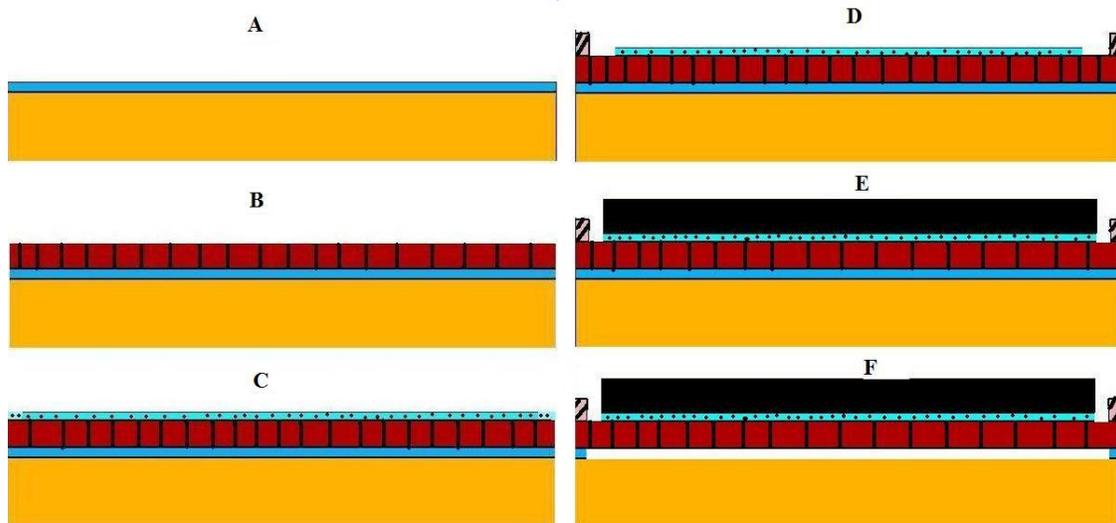


Figura 3.17. Esquema dos passos principais da fabricação do microbolômetro de poli-Si. (A) deposição de 0,5 μm de SiO_2 , (B) deposição de 1 μm de Si-poli e implantação iônica, (C) deposição de 50 nm de SiNx , (D) definição da região dos contatos de alumínio e do SiNx , (E) deposição e *Lift-off* de titânio e ouro poroso e (F) corrosão do SiO_2 sacrificial.

Os itens seguintes apresentam uma descrição mais detalhada de cada uma das etapas de fabricação de forma a se obter como resultado o dispositivo projetado. Convém ressaltar que o projeto das máscaras não foi executado no presente trabalho, sendo estas, reaproveitadas de um trabalho anterior [7]. Dessa maneira, parâmetros relacionados à geometria do dispositivo não puderam ser alterados.

3.4.1. Limpeza RCA e Deposição de SiO_2

Ao retirar as lâminas da embalagem é realizada uma limpeza padrão RCA para retirar quaisquer impurezas que poderiam contaminar as amostras. Esta limpeza consiste nas seguintes etapas:

- $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}_2$ (4:1) a 80 $^\circ\text{C}$ por 10 minutos.
- $\text{HF}/\text{H}_2\text{O}$ (1:10) em temperatura ambiente por 10 segundos.

- $\text{NH}_4\text{OH}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ (1:1:5) a 80°C por 10 minutos.
- $\text{HCl}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ (1:1:5) a 80°C por 10 minutos.

A primeira etapa de fabricação consiste na deposição de SiO_2 para a formação de uma camada sacrificial. O nome “sacrificial” deve-se ao fato de que ao final do processo, esta camada será corroída para que as camadas superiores fiquem suspensas, ou seja, sem contato com o substrato.

A deposição deste óxido foi realizada em um sistema ECR-CVD (*Electron Cyclotron Resonance Chemical Vapor Deposition* ou Ressonância Ciclotrônica de Elétrons – Deposição Química por fase Vapor). Foi escolhido este tipo de deposição, uma vez que o óxido depositado neste equipamento, sob determinadas condições, é facilmente removível por corrosão em razão da alta concentração de Hidrogênio no filme. Estas condições de deposição foram:

- Fluxo de 40 sccm de O_2 , 200 sccm de SiH_4 (2% em Ar) e 20 sccm de Ar.
- Pressão de 20 mTorr.
- Potência do ECR de 750 W.
- Temperatura de 20°C .
- Tempo de 25 minutos.

Antes de cada deposição deve ser executada uma limpeza *in-situ* das paredes da câmara de processo do ECR com plasma de SF_6 e de Ar sequencialmente. Este procedimento garante que todas as deposições sejam executadas com as mesmas condições de limpeza da câmara [42].

Nestas condições, através de medidas de elipsometria, o óxido depositado apresentou espessura média de $0,56\ \mu\text{m}$.

3.4.2. Deposição de Si-poli

A segunda etapa é a deposição de Si-poli através do sistema LPCVD (*Low Pressure Chemical Vapor Deposition*) vertical. Este será o filme que atuará como elemento resistivo do microbolômetro. Foi escolhido o sistema LPCVD vertical, uma vez que este apresenta boa taxa de deposição (em torno de $1500\ \text{Å}$ por minuto) e produz filmes com moderado stress residual, sendo adequado para fabricação de membranas suspensas [43].

Os parâmetros da deposição de Si-poli utilizados foram:

- Fluxo de 4800 sccm de H_2 e 40 sccm de SiH_4 (100%).
- Pressão de 180 psi.
- Temperatura de 800°C .

- Tempo de deposição de 5 minutos e 10 segundos.

Para a medida da espessura do filme depositado foi colocada uma amostra de acompanhamento do processo simultaneamente com as lâminas de Silício. Nessa amostra foi feita uma litografia em metade de uma pequena amostra de forma que parte ficasse protegida pelo fotorresiste e parte desprotegida, sendo suscetível à corrosão. A corrosão foi realizada com uma solução de Ácido Nítrico (HNO_3), Ácido Fluorídrico (HF) e água (H_2O). O tempo de corrosão foi de 26 minutos e 15 segundos. A espessura do degrau (medido pelo perfilômetro) entre o lado corroído (inclusive o Óxido sob o Si-poli) e o não corroído foi de 1,5 μm , indicando uma espessura de Si-poli de aproximadamente 1 μm .

3.4.3. Implantação Iônica, Limpeza Orgânica e Recozimento

Em seguida é feita uma implantação iônica de forma a dopar o Si-poli e ajustar o valor de sua resistividade. De acordo com o item 3.1.5, a dose de Boro escolhida foi de $3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ com energia de 40 keV. Após a implantação iônica, é realizada uma limpeza RCA e uma limpeza orgânica com acetona, isopropanol e água a fim de eliminar quaisquer impurezas orgânicas que possam ter atingido as amostras. Em seguida, é necessária a realização de um recozimento térmico rápido para reestruturação da rede cristalina e ativação elétrica de dopantes. As amostras são colocadas em um forno de aquecimento rápido para recozimento em 1000 °C por 1 minuto em ambiente de N_2 com fluxo de 1 litro por minuto.

3.4.4. Corrosão do Si-poli para Definição do Resistor – 1ª máscara.

Esta etapa envolve a primeira fotolitografia do processo e é realizada para delimitar o Si-poli de forma a definir a região dos resistores. A Figura 3.18 (a) refere-se a esta etapa do processo. Abaixo estão listados em ordem de realização os passos desta litografia.

1. Aplicação de fotorresiste AZ 3312, com rotação de 3000 rpm por 40 segundos: este passo deve ser realizado com umidade relativa do ar em torno de 50% para promover boa aderência do polímero sobre a lâmina de Silício. Foi escolhido este fotorresiste, pois apresenta boa resistência à corrosão seca por RIE.
2. *Soft-bake* em placa quente por 4 minutos a 90 °C: realizado para evaporar o solvente do fotorresiste e fixar o polímero na superfície da amostra.

3. Alinhamento entre a primeira máscara e a lâmina de Silício e exposição por 40 segundos: transferência do padrão geométrico da máscara para a lâmina.
4. Revelação do fotorresiste em solução MIF 300 (*Metal Ion Free*) por 25 segundos.
5. *Hard Bake* em placa quente por 8 minutos a 120 °C: realizado para o enrijecimento do fotorresiste não polimerizado.

Em seguida as amostras são levadas ao reator de corrosão por plasma do tipo RIE (*Reactive Ion Etching*) de fabricação do próprio laboratório LPD/IFGW/UNICAMP para a corrosão do Si-poli. Para esta corrosão, foram utilizados os seguintes parâmetros [44]:

- Fluxo de 10 sccm de SF₆, 15 sccm de CF₄ e 20 sccm de N₂.
- Pressão de 80 mTorr.
- Potência de RF de 85 W.
- Polarização de 210 V.
- Tempo de corrosão de 4 minutos.

A seletividade da corrosão do Si-poli em relação ao óxido é de 18, que é um valor considerado alto. Isso significa que a corrosão de Si-poli é 18 vezes mais rápida que a corrosão do óxido; dessa forma, o óxido praticamente não é corroído. Em seguida o fotorresiste é retirado utilizando acetona, isopropanol e água DI (Deionizada).

3.4.5. Implantação Iônica com Alta Dose para Melhoria dos Contatos – 2ª Máscara

Outra implantação iônica é então realizada somente na região do Si-poli onde se localizarão os contatos. Para isso, executa-se a segunda fotolitografia, utilizando o fotorresiste AZ5214 como forma de proteção das regiões fora dos contatos.

O fotorresiste AZ5214 é aplicado com rotação de 4000 rpm por 30 segundos. Em seguida é realizado o *soft bake* em placa quente a 90 °C por 4 minutos. Na fotoalinhadora, executa-se o alinhamento entre a segunda máscara e a lâmina. A exposição à luz ultravioleta é feita por 40 segundos e o *hard bake* é também realizado em placa quente a 118 °C por 20 minutos.

Esta implantação é feita com alta dose ($5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$) a fim de que a resistência dos contatos seja bastante diminuída, da ordem de 160 vezes, para obtenção de uma resistência de folha da ordem de 30 Ω/\square .

O fotorresiste é removido com acetona, isopropanol e água DI. Foi também utilizada uma limpeza em plasma de O_2 em um sistema do tipo plasma barril para a remoção de qualquer resquício de fotorresiste que ainda pudesse existir nas amostras. Os parâmetros utilizados nessa limpeza foram:

- Fluxo de O_2 : 50 sccm.
- Potência: 200 W.
- Pressão: 200 mTorr.
- Tempo: 10 minutos.

Logo em seguida, é feito um recozimento térmico rápido (RTA) de $1000\text{ }^\circ\text{C}$ durante 40 segundos com fluxo de N_2 de 1000 sccm. Este recozimento é necessário para ativar eletricamente o átomo dopante, ou seja, colocá-lo em posição substitucional na rede cristalina, e também reconstruir a rede cristalina que foi danificada durante a implantação.

Um fato observado durante o recozimento térmico rápido que cabe ser ressaltado foi a quebra do SiO_2 nas amostras menores (cacos) devido ao choque térmico e stress residual. Recozimento térmico causar rachaduras na maioria dos óxidos [45]. Esse incidente sugere que seja utilizado o crescimento térmico do óxido ao invés da deposição deste material, para evitar eventuais rupturas. Também é recomendável realizar apenas um recozimento térmico das duas implantações iônicas a fim de diminuir o choque térmico e stress residual.

3.4.6. Deposição de Nitreto de Silício (SiN_x)

A deposição de SiN_x foi feita através de um sistema de LPCVD horizontal. Os parâmetros de deposição são listados abaixo e o nitreto obtido por essa deposição é de alta qualidade. Uma espessura de 56 nm foi obtida por esse processo. A Figura 3.18 (b) refere-se a esta etapa do processo.

- Temperatura de $720\text{ }^\circ\text{C}$.
- Tempo de 30 minutos.
- Fluxo de 100 sccm de NH_3 e 1,5 sccm de Diclorosilana.
- Pressão Base de 590 mTorr.
- Espessura Média do filme: 560 \AA .

3.4.7. Corrosão do Nitreto de Silício – 3ª Máscara

A corrosão do SiN_x é feita para abrir regiões no filme de nitreto para que os contatos metálicos atinjam o Si-poli. As primeiras etapas de fotolitografia são semelhantes àquelas descritas no item 3.4.4. Utilizou-se um tempo de exposição de 40 segundos e tempo de revelação de 20 segundos. A Figura 3.18 (c) refere-se a esta etapa do processo.

Assim como no ECR-CVD, antes de introduzir as amostras no reator, uma limpeza *in-situ* é feita nas paredes da câmara, utilizando plasma de O_2 , plasma de SF_6 e plasma de Ar sequencialmente durante 10 minutos cada gás.

Em seguida as amostras são levadas para o mesmo reator de plasma RIE do item 3.4.4, com os seguintes parâmetros de corrosão:

- Fluxo de 5 sccm de SF_6 e 10 sccm de Ar.
- 30 W de potência de RF.
- 50 mTorr de pressão.
- Tempo: 1 minuto.

O fotorresiste é então removido conforme descrito nos itens anteriores.

Foram também abertas regiões no nitreto por onde será realizada a corrosão do óxido sacrificial e posterior suspensão da membrana. É também definida a região sobre a membrana na qual haverá nitreto isolando o Si-poli do material absorvedor.

Cabe ressaltar que não há seletividade desta corrosão entre o Nitreto e o Si-poli (seletividade de 0,26). Logo, deve-se proceder com extrema cautela, pois o excesso de corrosão pode remover o Si-poli da região mais dopada dos contatos, prejudicando o funcionamento do dispositivo. É ainda recomendável realizar uma evaporação e *lift-off* de uma fina camada de alumínio (como explicado no próximo item) de forma a proteger o Si-poli da região dos contatos durante a corrosão.

3.4.8. Litografia para Evaporação do Alumínio e *Lift-Off* – 4ª Máscara

Para a formação dos contatos de Alumínio, o *Lift-Off*, um processo bastante conhecido, é utilizado. Este processo de litografia consiste em realizar duas exposições do fotorresiste (a primeira, rápida e sem máscara, e outra com máscara por um período de tempo maior), para ocorrer a inversão do gradiente de solubilidade por meio de um tratamento térmico. Após a primeira exposição (*flood*), um tratamento térmico é realizado de forma a diminuir a solubilidade

da fina camada superior do fotorresiste devido a formação de ligações (*crosslink*) nesta região. Esta região, por consequência, será a de maior dificuldade de remoção. Em seguida, é feito um tratamento térmico de forma a diminuir ainda mais a solubilidade desta camada. Durante a exposição com máscara, tanto a fina camada superior quanto a camada inferior de fotorresiste terão suas solubilidades aumentadas. Ao revelar o fotorresiste, é obtida uma estrutura com perfil negativo necessária para a posterior remoção do metal das regiões desejadas [42]. Para a remoção do fotorresiste sob a camada de metal (*Lift-Off* propriamente dito), a amostra é colocada em um béquer com acetona a fim de que o fotorresiste seja dissolvido. Em seguida, lavam-se as amostras com acetona, isopropanol e água DI. A Figura 3.18 (d) refere-se a esta etapa do processo. As etapas de litografia necessárias para o *Lift-Off* padrão são listadas abaixo:

1. Aplicação do fotorresiste AZ 5214 com rotação de 4000 rpm durante 30 segundos.
2. *Soft-Bake* em placa quente a 90 °C durante 4 minutos.
3. Exposição das amostras à luz ultra-violeta durante 1 segundo sem máscara (*flood*).
4. *Hard-Bake* em placa quente 110 °C durante 1 minuto e 45 segundos.
5. Alinhamento da máscara com a lâmina e exposição durante 60 segundos.
6. Revelação do fotorresiste em solução MIF 300 durante 60 segundos.
7. Limpeza em plasma barril: fluxo de 50 sccm de O₂, 100 mTorr de pressão e 100 W de potência durante 3 minutos.
8. Imersão em solução de HF e H₂O (1:10) durante 15 segundos para remoção de qualquer óxido nativo que possa ter crescido na região dos contatos.
9. Evaporação de filme de Alumínio de 1 µm por evaporadora do tipo E-Beam.
10. Remoção com acetona do fotorresiste sob o alumínio a fim de que o alumínio continue apenas na região dos contatos (*Lift-Off*).

Neste momento cabe ressaltar que um filme de Alumínio pouco espesso (abaixo de 3000 Å) pode apresentar problemas durante a soldagem do fio de ouro que fará sua ligação com a cápsula. Devido à pequena espessura, pode ser difícil de manter a solda fixa no contato. Por esta razão, é conveniente utilizar um filme de Alumínio de aproximadamente 1 µm de espessura. Para definir este filme, pode-se utilizar tanto a corrosão úmida de Alumínio em solução de Ácido Fosfórico e Ácido Nítrico quanto utilizar *Lift-Off*, porém usando duas camadas de fotorresiste (AZ4620 e AZ5214) a fim de que se consiga a razão de aspecto no fotorresiste ideal para o *Lift-Off*.

3.4.9. Recozimento Térmico para Sinterização dos Contatos

Esta etapa é realizada para melhorar a interface entre o Si-poli e o Alumínio, saturando as ligações químicas incompletas nesta interface, garantindo um bom contato elétrico para o dispositivo. A sinterização é realizada em um forno à temperatura de 450 °C durante 30 minutos em ambiente de gás verde (2% de H₂ e 98% de N₂). Isto faz com que o Si-poli difunda para dentro do Alumínio e qualquer fina camada de óxido nativo que esteja na superfície do Si-poli seja parcialmente absorvida pelo Alumínio, melhorando assim o contato ôhmico Al-Si-poli [46].

3.4.10. Litografia para Evaporação do Titânio, Ouro e *Lift-Off* – 5ª Máscara

A camada absorvedora consiste em um filme de Ouro poroso (ouro-negro) que absorve grande quantidade de radiação infravermelha. No entanto esta camada tem baixa aderência em filmes em geral. Para minimizar este problema, é utilizada uma camada de Titânio e outra de Ouro para melhorar a interface entre os materiais e garantir maior união entre eles (formação de uma “semente”). A Figura 3.18 (e) refere-se a esta etapa do processo.

O processo de evaporação e *Lift-Off* do Titânio é semelhante ao do Alumínio:

1. Aplicação do fotorresiste AZ 5214 com rotação de 4000 rpm durante 30 segundos.
2. *Soft-Bake* em placa quente a 90 °C durante 4 minutos.
3. Exposição das amostras à luz ultra-violeta durante 1 segundo sem máscara.
4. *Hard-Bake* em placa quente 110 °C durante 1 minuto e 45 segundos.
5. Alinhamento da máscara e exposição durante 60 segundos.
6. Revelação do fotorresiste em solução MIF 300 durante 60 segundos.
7. Limpeza em plasma barril: fluxo de 50 sccm de O₂, 100 mTorr de pressão e 100 W de potência durante 3 minutos.
8. Evaporação de filme de Titânio de 100 Å por evaporadora do tipo E-Beam.
9. Evaporação de filme de Ouro de 200 Å por evaporadora do tipo E-Beam.
10. Dissolução do fotorresiste em acetona para o *Lift-off*.

3.4.11. Litografia e Corrosão da Camada de SiO₂ Sacrificial – 6ª Máscara

Esta importante etapa do processo de fabricação consiste na suspensão da membrana de Si-poli para isolamento térmico. Para isso, é necessário proteger todas as regiões do dispositivo com fotorresiste, com exceção apenas da região onde será corroído o SiO₂. Dessa forma, foi utilizada

a 3ª máscara de litografia, também utilizada no passo 3.4.8. Foi decidido, durante o processo de fabricação, realizar essa etapa antes da evaporação do ouro negro uma vez que o filme de ouro negro é delicado e poderia ser removido durante a corrosão do SiO₂. A Figura 3.18 (f) refere-se a esta etapa do processo.

A litografia foi realizada da seguinte maneira:

- Aplicação de fotorresiste AZ 1350J com rotação de 7000 rpm durante 30 segundos.
- *Soft-Bake* em estufa a 90 °C por 30 minutos.
- Alinhamento da máscara (mesma máscara do item 3.2.8) e exposição durante 20 segundos.
- Revelação do fotorresiste em MIF 300 durante 60 segundos.
- *Hard-Bake* em estufa a 118 °C durante 30 minutos.

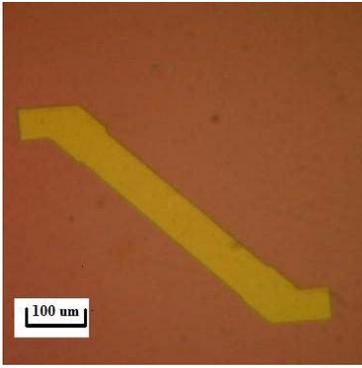
As amostras então são imersas em uma solução Tampão de HF e colocadas em banho-maria a 60 °C. O tempo de corrosão destas amostras foi de aproximadamente 3 minutos e 30 segundos, resultando em uma taxa de corrosão maior que 10 µm/min. Esta alta taxa de corrosão se deve à grande concentração de hidrogênio no filme de SiO₂.

Após lavar as amostras com água DI o fotorresiste é removido com acetona, isopropanol e água DI. Muito cuidado deve ser tomado no momento da secagem, uma vez que o jato de nitrogênio pode quebrar as membranas. Por este motivo, a secagem deve ser realizada apenas com isopropanol e as amostras colocadas sobre a superfície morna de uma placa quente. Ao observar no microscópio eletrônico é possível verificar que as membranas estão devidamente suspensas. Não foi observada qualquer colagem da membrana no substrato. Isso mostra a boa rigidez mecânica desta membrana, conforme descrito na parte de simulação mecânica.

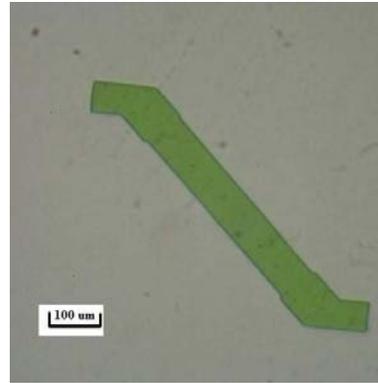
3.4.12. Litografia e evaporação do Ouro Negro – 7ª Máscara

A última etapa do processo de fabricação deve ser a evaporação do ouro negro, visto que a baixa aderência deste material torna difícil a realização de etapas posteriores. A etapa de litografia consiste em um *Lift-Off* cujos parâmetros de processo são os mesmos daqueles descritos no item 3.4.11, que descreve o *Lift-Off* da camada de Ti-Au. A Máscara utilizada nesta etapa é também a mesma máscara utilizada naquele item. A Figura 3.18 (g) refere-se a esta etapa do processo.

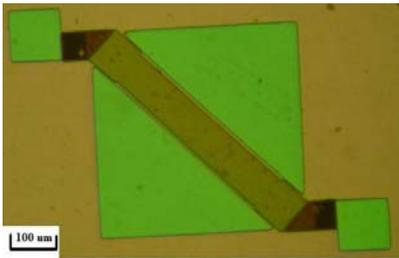
Para que o Ouro fique poroso, a evaporação térmica deve ser realizada em ambiente de N₂. Inicialmente faz-se vácuo na câmara de evaporação, e, posteriormente injeta-se N₂ no interior da câmara. Foi utilizado um fio de ouro de 6 cm de comprimento como fonte de material e a distância entre esta fonte e a amostra foi de 8 cm. A pressão usada no interior da câmara de evaporação foi de aproximadamente $7 \cdot 10^{-4}$ Torr. Estes parâmetros proporcionam um filme cuja absorção na faixa de 8 a 14 μm esteja entre 80% e 65%, conforme medido experimentalmente.



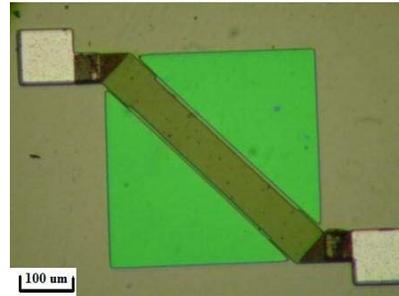
(a) Deposição de SiO_2 , deposição de Si-poli e corrosão de Si-poli para definição do resistor.



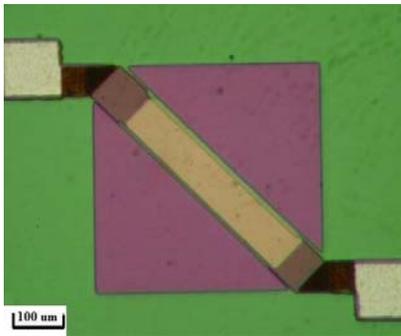
(b) Deposição de Si_3N_4 .



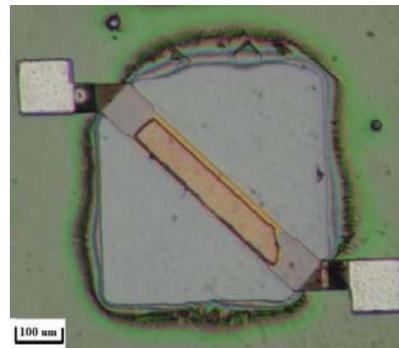
(c) Corrosão do Si_3N_4 para abertura da região onde será corroído o óxido e abertura dos contatos.



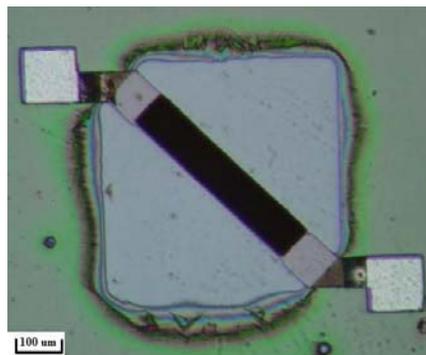
(d) Evaporação térmica e *Lift-off* de Alumínio dos contatos.



(e) Evaporação por *e-beam* e *Lift-off* de Ti-Au para semente do ouro negro.



(f) Corrosão do SiO_2 sacrificial para suspensão da membrana de Si-poli.



(g) Evaporação de Ouro negro para formação da camada absorvedora.

Figura 3.18. Fotos das etapas de processo (a) – (g).

3.3.13. Imagens no Microscópio Eletrônico de Varredura e cortes utilizando Feixe de Íons Focalizado (*Focused Ion Beam - FIB*)

Utilizando um microscópio eletrônico de varredura é possível observar com mais detalhes a estrutura fabricada. Na Figura 3.19 observa-se a estrutura onde estão apontados os diferentes materiais empregados nas etapas de fabricação.

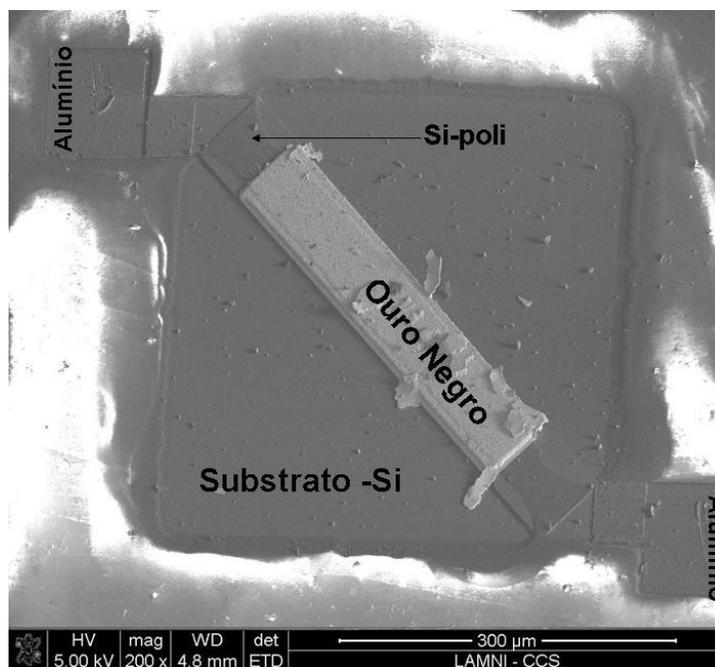


Figura 3.19: Imagem de Microscópio Eletrônico de Varredura do dispositivo final. Os diferentes materiais utilizados no processo de fabricação estão indicados na figura.

Observando o resistor com maior ampliação é ainda possível enxergar a interface entre cada material. Na Figura 3.20, cada material é destacado e uma ampliação é ainda executada na interface entre eles a fim de que se possa medir a espessura da camada de ouro negro. É mostrado na figura que a espessura da camada de ouro negro é de aproximadamente 3,21 μm . É mostrada também a espessura de 1 μm de Si-poli (que é exatamente o valor projetado).

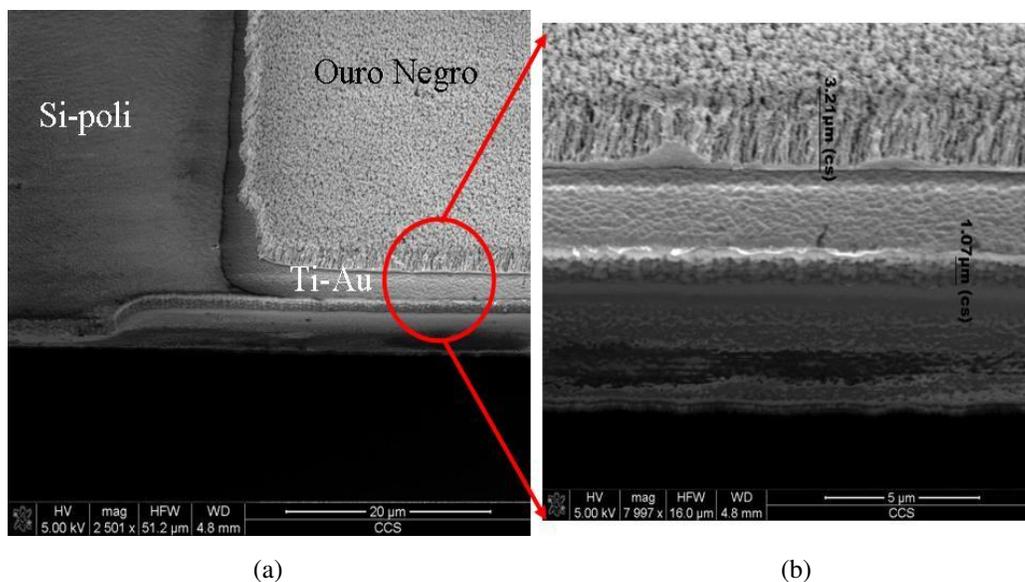


Figura 3.20: (a) Imagem da borda da ponte suspensa destacando regiões com Si-poli, Ti-Au e Ouro Negro. (b) Ampliação da região, mostrando a espessura do ouro negro (3,21 μm) e do Si-poli (1,07 μm).

A Figura 3.21 mostra também a interface entre o resistor de Si-poli, a camada de Ti-Au (sobre o filme de Nitreto de Silício) e o ouro negro. É também amplificada a interface entre os materiais, sendo possível observar a alta rugosidade e porosidade do filme de ouro negro, parâmetros estes que são os motivos da alta absorção de radiação infravermelha pelo filme.

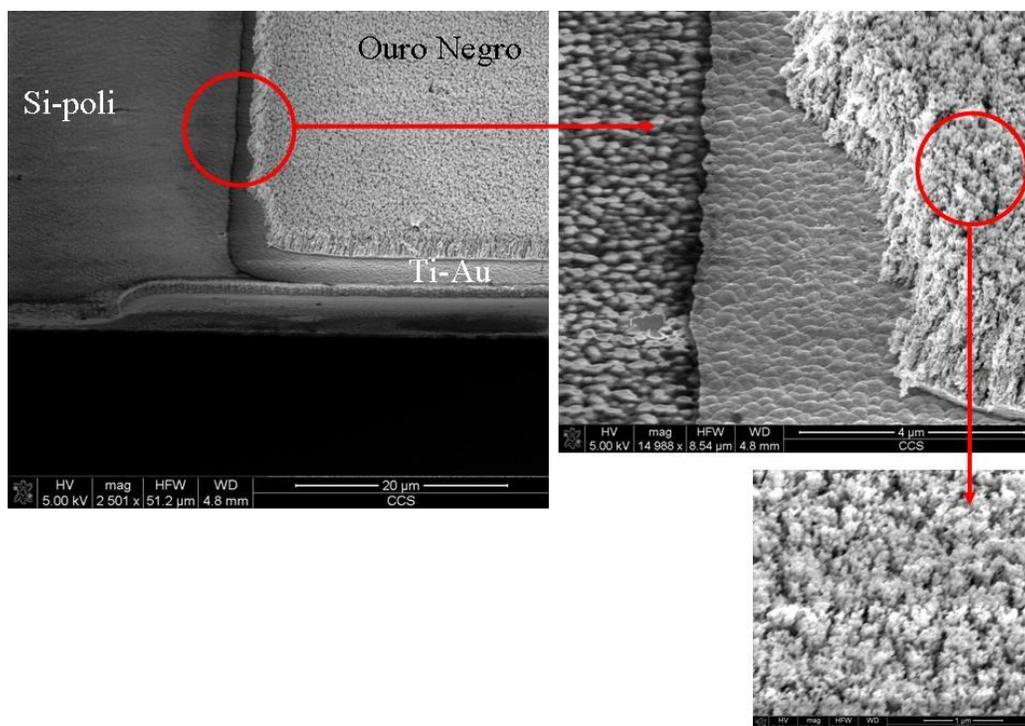


Figura 3.21: Ampliação da borda da ponte suspensa destacando a rugosidade e porosidade da camada de ouro negro. Esta alta porosidade é a responsável pela alta absorção de radiação infravermelha.

A fim de verificar que as membranas estão devidamente suspensas, as amostras foram levadas ao FIB (*Focused Ion Beam*), equipamento este que propicia que se utilize um feixe de íons de Gálio para fazer cortes na estrutura, sendo possível observar as camadas de materiais em secção transversal. A Figura 3.22 apresenta um corte transversal da ponte suspensa em que é possível ver a camada de ouro negro e o filme de Si-poli separado do substrato por um espaço (*gap*) de 0,57 μm de espessura, que é exatamente a espessura do óxido sacrificial corroído (vide detalhe na imagem). Um pequeno problema encontrado na confecção destas imagens é a redeposição do material removido pelo feixe de íons. Esta redeposição pode fazer com que o material removido pelo feixe tampe o *gap* entre o Si-poli e o substrato, impedindo que se observe que a membrana está devidamente suspensa. Por esta razão, foi também feita uma imagem de um corte transversal em um dispositivo sem os filmes de nitreto, Ti-Au e ouro negro, a fim de que pouco material se redepositasse no *gap*. A Figura 3.23 apresenta essa imagem.

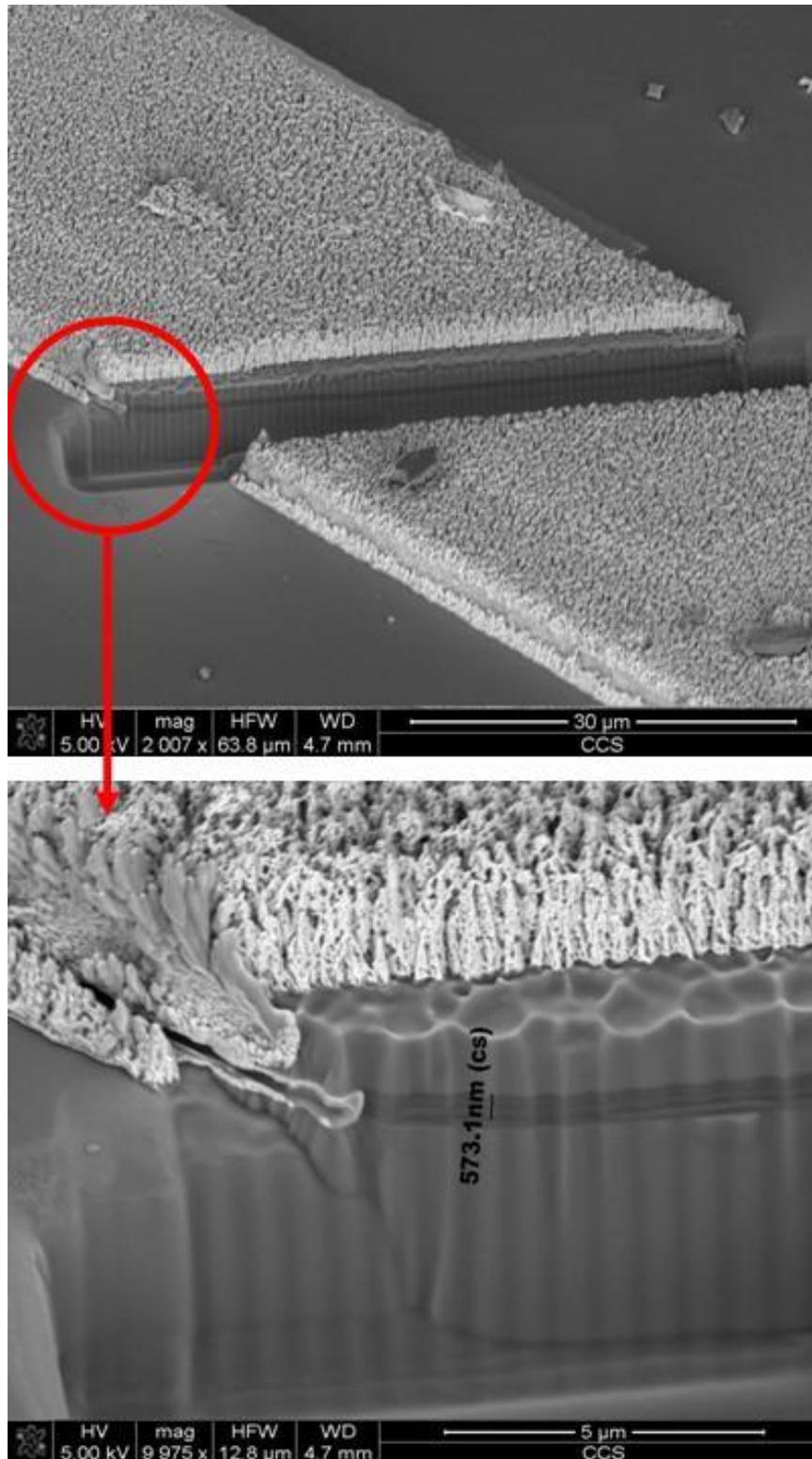


Figura 3.22. Corte transversal do dispositivo com membrana suspensa de Si-poli. É possível observar um *gap* de aproximadamente 0.57 μm igual à espessura do óxido sacrificial.

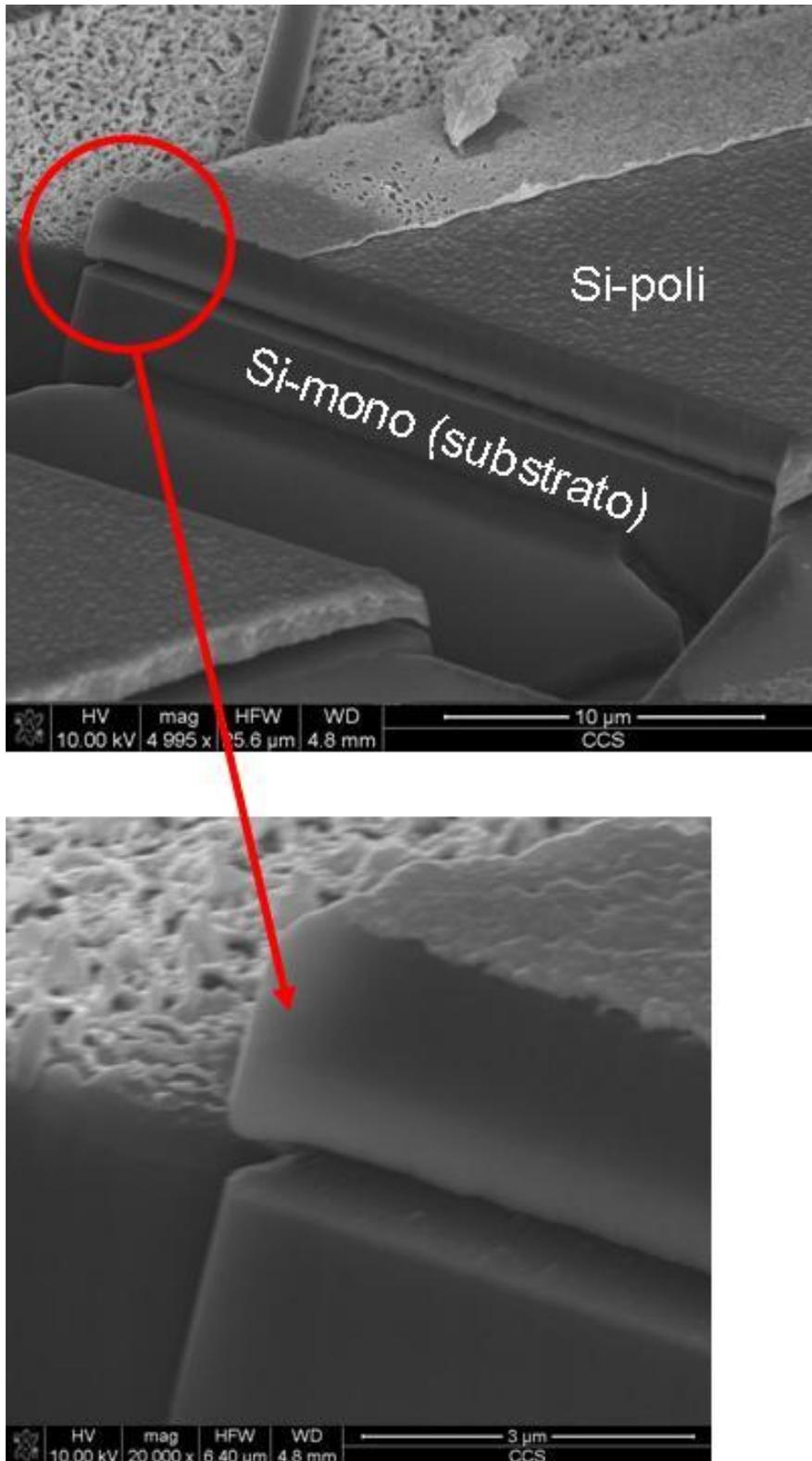


Figura 3.23. Corte transversal da membrana suspensa, desta vez sem camadas superiores de modo a minimizar a redeposição de material. É destacado o espaço entre a membrana de Si-poli e o substrato de Silício monocristalino.

4. Caracterização e Resultados

Após as etapas de simulação e de fabricação do microbolômetro projetado, faz-se necessária a extração de seus parâmetros mais importantes e a posterior comparação destes parâmetros com os simulados e com microbolômetros comerciais e em estado de pesquisa.

4.1. Curva IxV

A primeira etapa da caracterização de um bolômetro é a extração da curva IxV do dispositivo. Esta curva permite que se verifique a característica resistiva dos bolômetros, ou seja, a corrente varia de forma linear com a tensão. Como em qualquer resistor, nos bolômetros o aumento da tensão aplicada entre seus terminais produz um aumento na corrente que por ele circula de forma linear. O inverso da inclinação desta reta fornece o valor da resistência elétrica do dispositivo.

Esta medida foi realizada no Centro de Componentes Semicondutores da UNICAMP por meio do extrator de parâmetros HP4145 ligado a uma estação com pontas de provas que tocam os contatos do dispositivo. Neste instrumento são escolhidos os valores mínimos e máximos de tensão a serem aplicados e qual o valor do incremento dessa tensão durante a medida. Também é possível medir a inclinação das curvas para obter o valor da resistência elétrica do dispositivo.

A Figura 4.1 mostra a curva IxV de um dispositivo de 450 μm de comprimento por 75 μm de largura e 1 μm de espessura. Desta curva, é possível extrair o valor da resistência do dispositivo como sendo 139,66 k Ω .

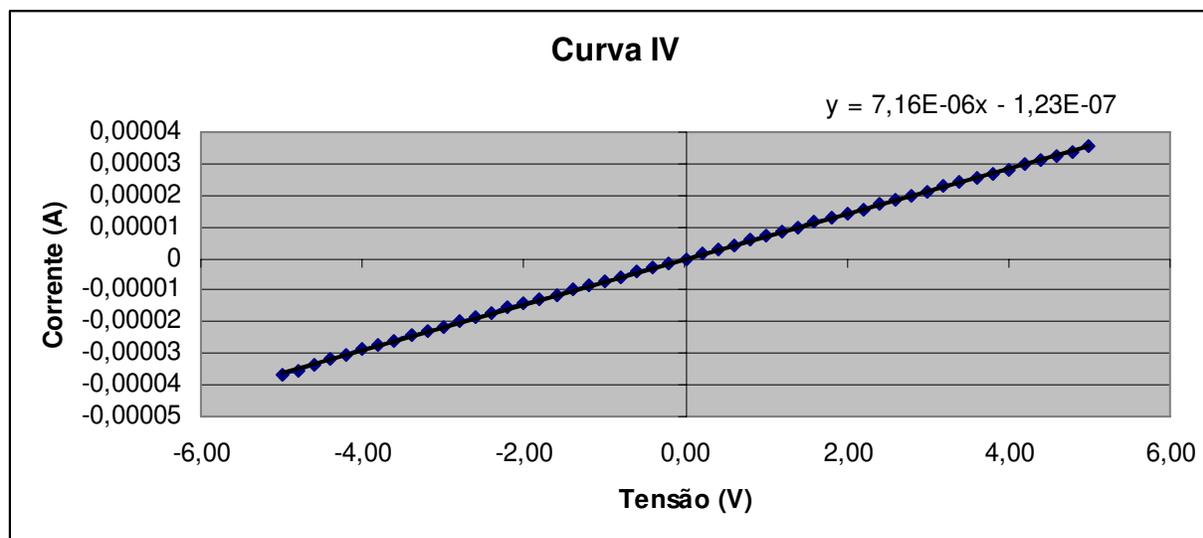


Figura 4.1: Curva IxV do dispositivo fabricado. As dimensões do resistor são 450 μm por 75 μm e o valor da resistência é de 139,66 k Ω .

Comparando o valor medido da resistência com o valor projetado no item 3.3.5 (143,7 k Ω), observa-se que o valor medido é bastante próximo do valor simulado, sendo a diferença relativa de apenas 2,8%. Obviamente, o valor medido depende das condições de temperatura do laboratório. Como a medida provavelmente não foi realizada a 300 K exatamente, variações do valor simulado são normais.

Outros resistores foram também fabricados e medidos, no entanto, devido à pobre uniformidade do filme de Si-poli, os valores de resistores com mesma dose de implantação e mesma relação L/W foram bastante discrepantes (mais de 40% de diferença). Dessa forma, foi escolhido um resistor que apresentasse parâmetros semelhantes aos projetados e simulados, de forma que fosse possível efetuar uma comparação eficiente entre as medidas e o projeto e simulação. Futuramente, através da correção da deposição de Si-poli ou realização em outros equipamentos, esse problema será sanado.

A resistência de contato foi considerada desprezível uma vez que além de o contato Alumínio-Semicondutor tipo p não apresentar barreira de potencial, como ainda há dopagem forte na região dos contatos, o valor dessa resistência se torna muito pequeno.

4.2. Coeficiente de Temperatura da Resistência (TCR)

Conforme discutido anteriormente, este parâmetro é de extrema importância para a utilização de microbolômetros. Para a medida deste parâmetro, foi utilizada uma câmara climática localizada no Laboratório de Sensores Microeletrônicos na Faculdade de Engenharia Elétrica da UNICAMP. Os sensores foram colados com cola prata em uma cápsula condutora térmica e foram feitas micro-soldas com fio de ouro conectando os contatos da amostra aos terminais da cápsula. Feito isso, a cápsula é posicionada no interior da câmara climática e a temperatura é variada de 10 °C a 80 °C em intervalos de 5 °C. Para a medida da resistência, o resistor foi polarizado com uma fonte de corrente de 50 μ A e foi medida a queda de tensão sobre ele. Esta medida foi realizada através do método Kelvin (medida da resistência a 4 fios) em que o valor da resistência é calculado pela divisão do valor indicado no voltímetro pelo valor indicado no amperímetro (vide Figura 4.2). Desta forma os efeitos das resistências dos cabos de ligação das fontes ao resistor em análise são eliminados.

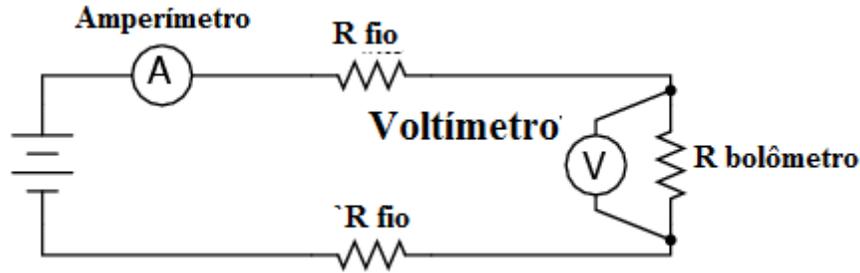


Figura 4.2. Método de medida da resistência do microbolômetro de forma a eliminar o efeito dos cabos.

A variação da resistência em função da temperatura é vista na Figura 4.3, onde também é incluída a equação da curva. O resistor em questão possui comprimento de 450 μm por 75 μm de largura e 1 μm de espessura.

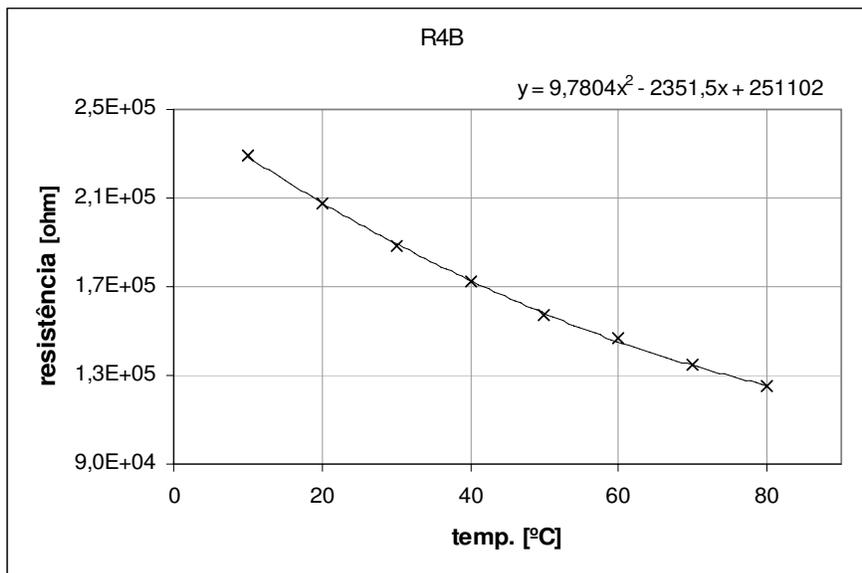


Figura 4.3. Variação da resistência do microbolômetro em função da temperatura e equação da curva.

A resistência deste dispositivo medido à 25 °C é de 198,4 KΩ e o valor do TCR pode ser calculado através da equação 4.1, obtendo-se o valor -0,95 %/K. O valor da resistência se encontra diferente do valor medido na curva IxV pois esta medida foi feita em outra amostra, uma vez que, para ser acoplada à câmara climática é necessário utilizar um encapsulamento diferente daquele utilizado nos equipamentos para medida da curva IxV e de responsividade.

$$TCR [\% / ^\circ C] = \frac{1}{R_0} \left(\frac{dR(T_0)}{dT} \right) \times 100 \quad (4.1)$$

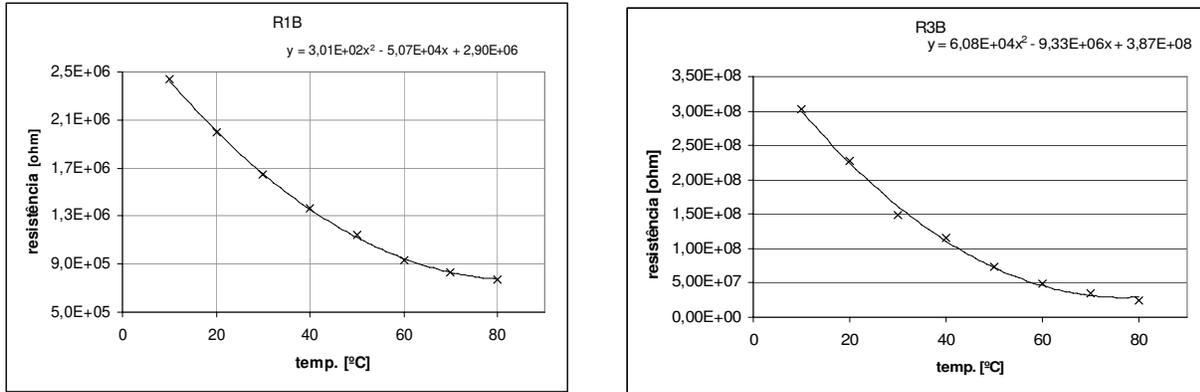
Este valor indica que o resistor sofre uma variação de aproximadamente $1,88 \text{ K}\Omega$ para cada grau Celsius variado em sua temperatura. O valor negativo do TCR indica que a resistência do dispositivo diminui com o aumento da temperatura, conforme já explicado no item 2.5.4.2.

O valor do TCR medido é menor do que valor esperado pelas simulações ($-2,5\%/K$), possivelmente porque o Si-poli foi fabricado em um reator não-comercial que utiliza altas temperaturas de deposição ($800 \text{ }^\circ\text{C}$), formando grãos de Si-poli grandes, o que diminui o TCR do dispositivo. O *software* de simulação assume que o Si-poli é depositado em reatores comerciais a temperaturas mais baixas (500 a $600 \text{ }^\circ\text{C}$), formando grãos menores de Si-poli que propiciam TCR mais alto [27].

É interessante ainda ressaltar que para um mesmo valor de resistência de um dispositivo é possível obter diferentes valores de TCR em função do tamanho de grão do Si-poli depositado [27]. Essa informação é valiosa, uma vez que torna possível pesquisar métodos de deposição que diminuam o tamanho do grão de Si-poli afim de que se aumente o TCR do dispositivo sem que se aumente sua resistência. Dessa forma, maximiza-se o TCR, mantendo adequados os níveis de ruído, auto-aquecimento e linearidade.

A maioria dos artigos encontrados em publicações apresenta TCR entre $-0,3 \text{ } \%/K$ e $-3\%/K$ e, conforme discutido anteriormente, esses valores variam de acordo com requisitos de projeto e com o foco do trabalho. Apesar de o projeto inicial do microbolômetro em questão ter previsto um TCR de aproximadamente $-2,5 \text{ } \%/K$ o valor medido ainda é aceitável e interessante para o projeto.

A título de comparação, foi ainda feito um estudo para medir o TCR de microbolômetros fabricados com diferentes valores de resistência e mesma relação L/W , ou seja, diferentes níveis de dopagem. Para um resistor fabricado de $1,82 \text{ M}\Omega$, por exemplo, o TCR medido foi de $-2\%/K$ (Figura 4.4(a)) enquanto para resistores ainda mais altos ($192 \text{ M}\Omega$) o TCR medido foi de aproximadamente $-4\%/K$ (Figura 4.4 (b)).



(a)

(b)

Figura 4.4. Comparação de TCR de dois resistores diferentes. (a) Resistor de 1,82 MΩ e TCR medido de -2%/K e (b) resistor de 192 MΩ e TCR medido de -4%.K.

4.3. Absorção do ouro negro

Um parâmetro extremamente importante no processo de fabricação a ser caracterizado é a absorção do ouro negro, visto que este parâmetro influencia diretamente na eficiência do dispositivo.

Para esta medida, foi utilizado um espectrômetro de infravermelho com transformada de Fourier (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy - FTIR*) instalado nas dependências do Centro de Componentes Semicondutores da UNICAMP. A Figura 4.5 apresenta o resultado desta medida. É conveniente destacar que a figura mostra a porcentagem de Refletância do material em função do comprimento de onda do infravermelho. De posse da equação 4.1, é possível extrair o valor da Absorbância do gráfico. Na faixa de 8 μm a 14 μm de comprimento de onda, a absorção do filme de ouro negro está entre 80% e 65%.

$$\text{Refletância} + \text{Absorbância} = 100\% \quad (4.1)$$

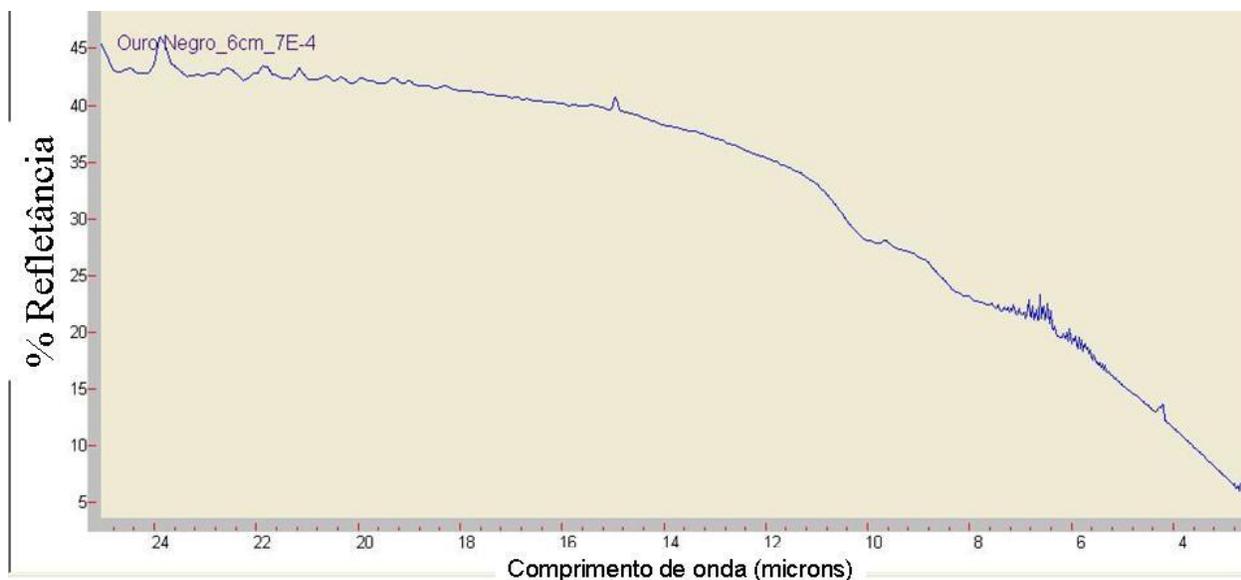


Figura 4.5. Gráfico construído utilizando o FTIR e mostra a refletância em função do comprimento de onda. Através da equação 4.1, obtém-se que a absorbância do ouro negro na faixa de 8 μm a 14 μm está entre 80% e 65%.

4.4. Responsividade

O sistema de medidas ópticas foi montado conforme mostra a bancada de medidas (Figura 4.6). Este consiste em um corpo negro com controle de temperatura e um *chopper* para a modulação da luz e uma câmera de vácuo com janela óptica para montagem da amostra. Estes sistemas são montados e alinhados de tal forma a iluminarem a janela da câmara de vácuo onde se encontra a amostra. A distância entre o corpo negro e o sensor é de aproximadamente 15 cm. Em frente à janela é colocado um filtro de Silício que bloqueia toda radiação com comprimentos de onda inferiores a 1,1 μm . Uma fonte de corrente é utilizada para aplicar corrente ajustável nos terminais do dispositivo a ser caracterizado. A tensão entre esses dois terminais (sinal de saída devido à mudança no valor da resistência do microbolômetro) é medida na entrada de alta impedância de um amplificador *lock-in* que recebe a referência de modulação do *chopper* operado em frequência ajustável.

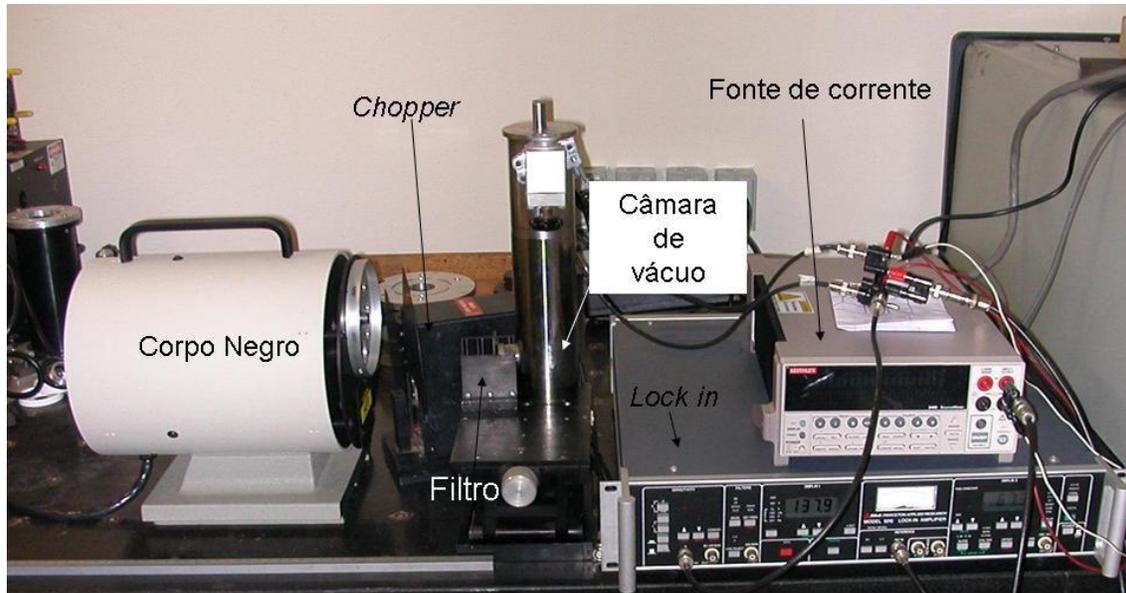


Figura 4.6. Montagem da bancada para realização de medidas ópticas.

O aterramento dos cabos e da câmara de vácuo é fundamental para que se consiga medir o sinal do dispositivo efetivamente. Este aterramento é mostrado esquematicamente na Figura 4.7. O sistema é envolvido por malhas de cabo coaxial e aterrado no pólo negativo da fonte de corrente. O *Lock-in* é mantido na condição de terra flutuante para evitar “*loop*” de terra na entrada de alta impedância (entrada de voltagem do amplificador).

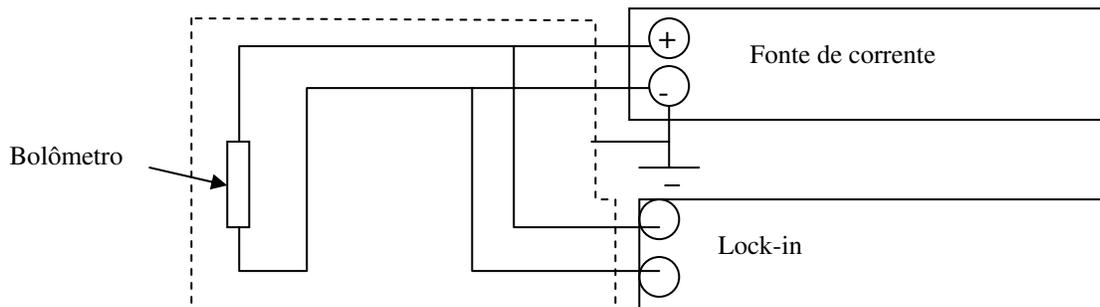


Figura 4.7. Esquema de aterramento dos cabos e câmara de vácuo.

O *chip* com o dispositivo é colado com cola-prata em uma placa de alumina. Os *pads* do *chip* são soldados com fios de ouro aos contatos metálicos existentes na placa de alumina. Esta placa é então encaixada em um conector situado no interior de uma câmara de aço onde se faz vácuo (aproximadamente 10^{-4} Torr). Nesta câmara existe uma janela de safira para que a radiação do corpo negro entre na câmara e incida sobre o microbolômetro. São utilizados passantes de fios para ligar os cabos do conector à fonte de corrente que se encontra fora da câmara de vácuo.

A primeira medida que pode ser realizada é o sinal em função da corrente de polarização do dispositivo para diferentes temperaturas do corpo negro. A frequência do *chopper* é mantida constante em 100 Hz. A Figura 4.8 apresenta o resultado desta medida. Observa-se que aumentando a corrente de polarização, o valor do sinal aumenta, de acordo com o esperado. No entanto, a partir de determinado nível de corrente (aproximadamente 25 μA), o sinal aumenta muito pouco com o aumento da corrente, devido ao efeito do auto-aquecimento no dispositivo.

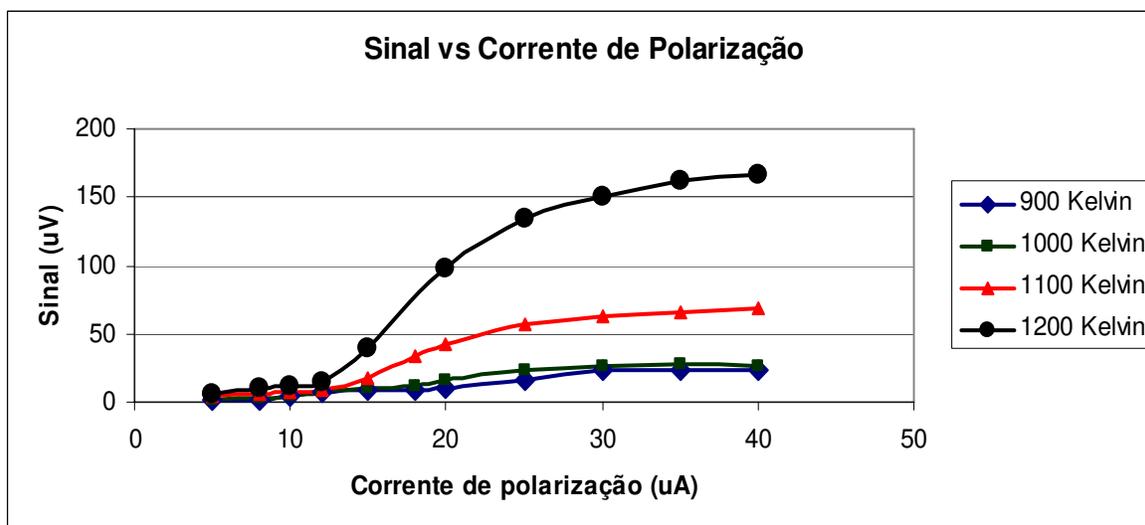


Figura 4.8. Sinal vs Corrente de Polarização para diferentes temperaturas do corpo negro.

Outra medida realizada foi o sinal em função da temperatura do corpo negro, com a frequência de modulação constante de 100 Hz, apresentada na Figura 4.9 para duas correntes de polarização diferentes.

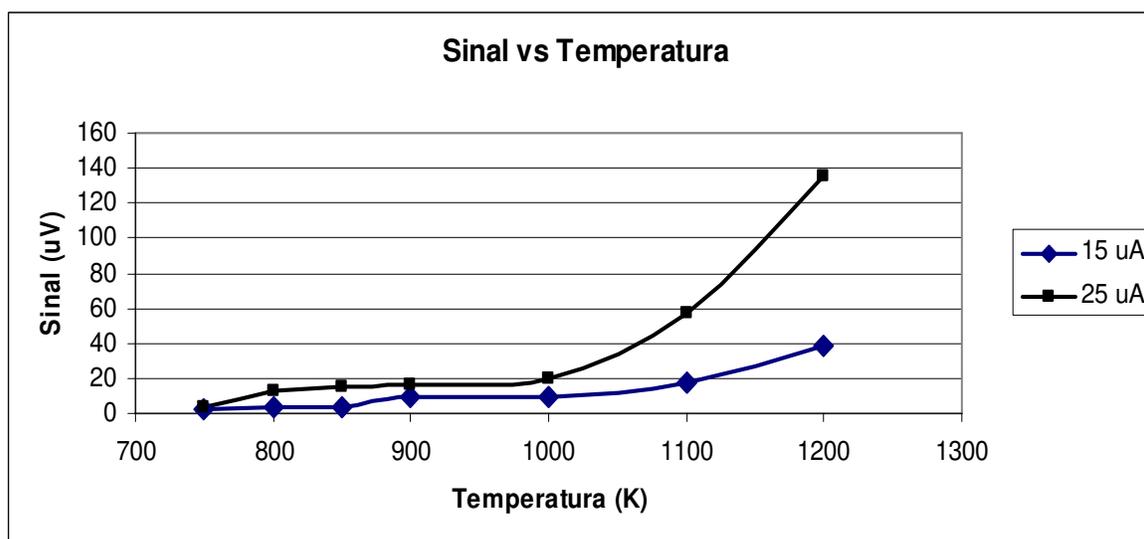


Figura 4.9. Sinal vs Temperatura do corpo negro para duas correntes de polarização.

Verifica-se que para temperaturas abaixo de 800 K, o nível de sinal é muito baixo, sendo, esta temperatura, o limite de detecção de sinal para esta distância entre o corpo negro e o sensor. Obviamente, utilizando um aparato óptico, com lentes, filtros e espelhos parabólicos para concentrar o sinal sobre o sensor, temperaturas próximas à temperatura ambiente também poderão ser detectadas.

Para o cálculo da responsividade do microbolômetro, é necessário utilizar de alguns conceitos de física moderna lembrados no item 2.1. Considerando a temperatura de 1000 K, e o raio da abertura do corpo negro de 1 cm, podemos integrar a lei de Planck nos comprimentos de onda entre 1,1 μm (filtro utilizado na medida) e 14 μm (região máxima de interesse do projeto) e obter a potência emitida pelo corpo negro nessa faixa. Esta potência é de aproximadamente 17,128 W.

Considerando a distância entre o corpo negro e o sensor de aproximadamente 15 cm e a área de absorção (com ouro poroso) do sensor de $2,55 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2$ (340 x 75 μm), a potência que atinge o sensor é de $1,941 \cdot 10^{-5} \text{ W}$.

O sinal produzido pelo sensor para uma corrente de polarização de 25 μA está em torno de 35 μV . Logo, a responsividade do microbolômetro é obtida dividindo o sinal produzido pelo sensor pela potência incidente sobre ele. Dessa forma, a responsividade obtida é de **1,80 V/W**.

Este valor de responsividade se encontra abaixo do valor projetado de responsividade. Uma das razões de não ter-se atingido o nível projetado reside no fato de a largura das pernas do bolômetro serem muito grandes. Isso causa grande perda do calor absorvido pela camada absorvedora para o substrato, o que diminui sua responsividade. A melhor forma de solucionar este problema é, ao projetar a máscara de fabricação, manter a largura da região ativa (região que contém o absorvedor) e diminuir a largura das pernas do bolômetro. Dessa forma, o isolamento térmico é aumentado, aumentando também a responsividade. Supondo que as pernas do bolômetro sejam diminuídas para 10 μm , o valor de “G”, seria diminuído 7,5 vezes, logo a responsividade aumentada desse fator (vide equações 2.9 e 3.2).

Além disso, o TCR ficou abaixo do valor simulado. Caso o TCR obtido fosse igual ao simulado, o valor da responsividade seria aumentado 2,63 vezes. Se tanto o TCR quanto as pernas do bolômetro fossem corrigidas, a responsividade do dispositivo seria de aproximadamente 35,52 V/W, dentro do valor projetado.

4.5. Tempo de Resposta

Uma medida interessante de ser realizada é a resposta em frequência do dispositivo, pois dessa forma, determina-se o tempo de resposta do dispositivo. Mantendo a temperatura do corpo negro em 1000 K e a corrente de polarização em 25 μA , é variada a frequência do *chopper* (modulação), sendo possível observar a resposta em frequência do dispositivo. A Figura 4.10 apresenta este resultado.

Da equação 3.2, é possível fazer uma substituição de variáveis e observar que o sinal do dispositivo pode ser reescrito da forma:

$$\delta V = \frac{\delta V_{\max}}{\sqrt{(f\tau)^2 + 1}} \quad (4.2)$$

Onde τ é o tempo de resposta, f é a frequência de modulação e δV_{\max} é o sinal máximo obtido no dispositivo. Observa-se que para altas frequências, o sinal do sensor é reduzido significativamente, uma vez que o material resistivo não mais consegue esquentar e esfriar suficientemente rápido. O sinal máximo é obtido para frequência igual a zero, ou seja, sem modulação da radiação do corpo negro. Graficando os dados medidos do sensor com a equação 4.2, é possível ajustar os parâmetros da equação de forma a determinar o tempo de resposta do dispositivo. Na Figura 4.10 os pontos são os dados medidos experimentalmente e a linha cheia representa o *fitting* da equação 4.2. O tempo de resposta encontrado foi de 13 ms. Este valor está perfeitamente adequado às especificações discutidas no item 3.1. Na verdade, este valor é bem menor que o valor projetado no item 3.1, provavelmente devido a diferenças no parâmetro G , que contabiliza as perdas de calor no dispositivo, visto que foi desprezado o termo de perda de calor por irradiação.

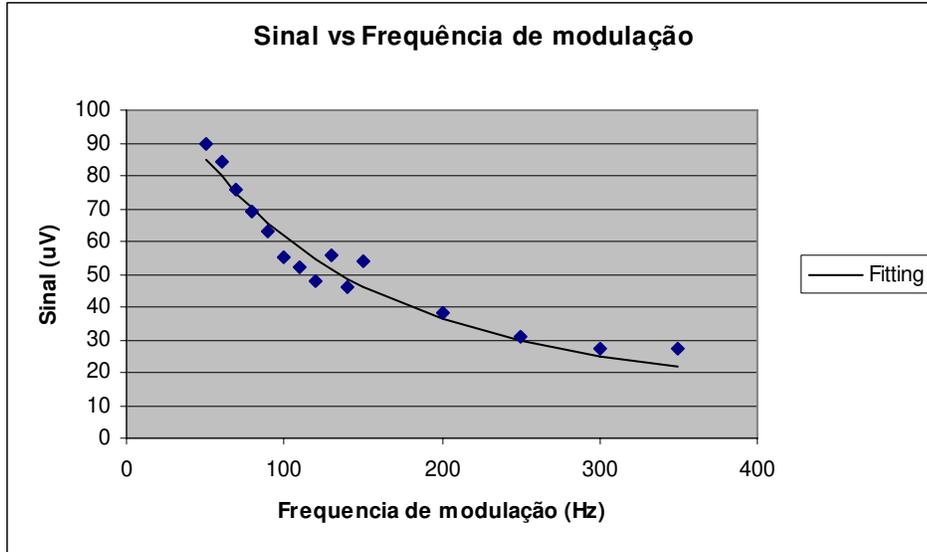
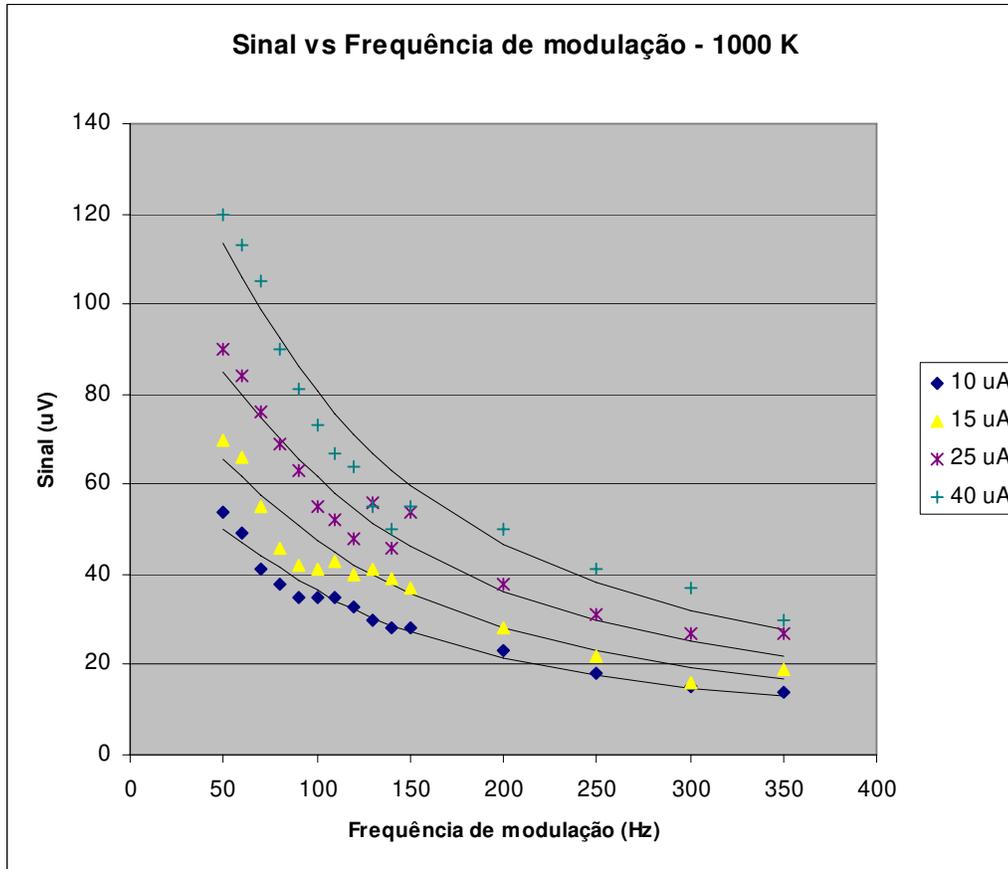
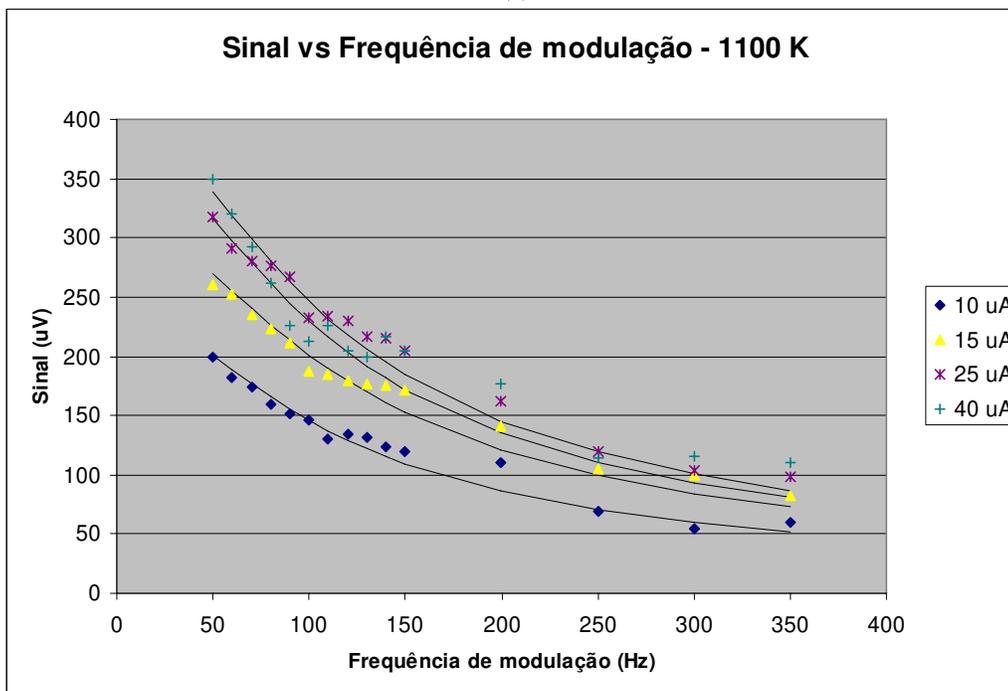


Figura 4.10. Resposta em frequência. Sinal vs Frequência de modulação. Tempo de resposta igual a 13 ms.

Obviamente, o tempo de resposta não varia com a corrente de polarização ou com a temperatura do corpo negro, o que pode ser comprovado na Figura 4.11. Nesta figura estão as respostas em frequência do sensor para diferentes correntes de polarização juntamente com seus respectivos *fittings*. Todos os ajustes apontam para um tempo de resposta 13 ms.



(a)



(b)

Figura 4.11. Resposta em frequência do dispositivo para diferentes correntes de polarização. (a) temperatura do corpo negro igual a 1000 K e (b) temperatura do corpo negro igual a 1100K. Tempo de resposta de 13 ms.

4.6. Ruído e Detectividade

Para a medida de ruído do microbolômetro foi montada uma bancada de medidas, de acordo com o esquema mostrado na Figura 4.12.

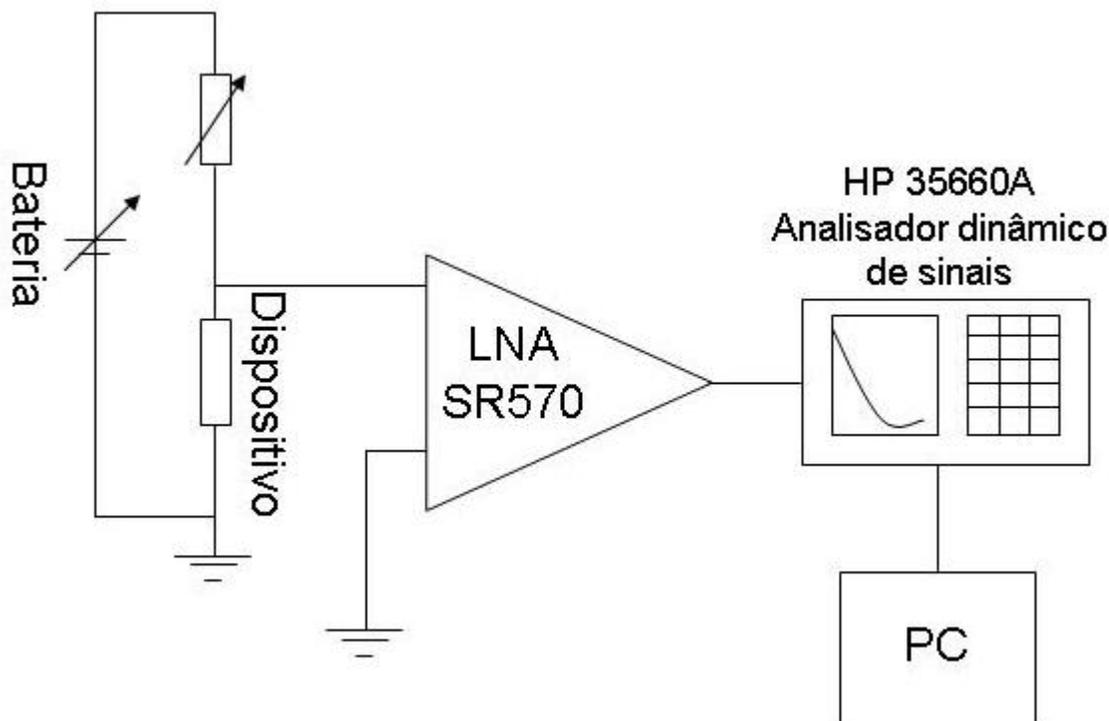


Figura 4.12. Esquema da montagem da bancada de medidas de ruído.

O bolômetro é polarizado por uma bateria de tensão variável interna ao amplificador de baixo ruído (LNA Stanford Research SR570). Esta bateria não só alimenta o dispositivo, como também o próprio amplificador, o que diminui significativamente o ruído oriundo da rede elétrica do laboratório. O amplificador de baixo ruído faz-se necessário visto que os níveis de ruído normalmente são bastante baixos, necessitando de amplificação para que o analisador de sinais seja capaz de identificá-los. Este amplificador também é munido de controladores para escolher o ganho que será dado ao sinal, assim como filtros para selecionar a largura de espectro desejada.

Uma vez polarizado o dispositivo, a corrente que flui através de seus terminais é ligada à entrada do amplificador, sendo a saída em tensão, ligada ao analisador de sinais HP 35660A. Este dispositivo tem a capacidade de analisar o sinal em ampla faixa de frequências através da Transformada de Fourier Rápida (FFT). Dessa maneira, é possível medir o ruído tanto para baixas frequências (onde o ruído $1/f$ é dominante) quanto para altas frequências (maiores que 1 kHz) onde o ruído térmico é dominante. Este equipamento é conectado a um computador através

de uma entrada GPIB (*General Purpose Interface bus*) de modo que os dados possam ser recolhidos e analisados.

Cabe ressaltar que é extremamente importante o aterramento de todos os equipamentos utilizados e a realização das medidas em ambiente afastado de equipamentos que possam causar eventuais interferências. Mesmo com todos estes cuidados, ainda é possível observar alguma interferência da rede elétrica do laboratório nas medidas de ruído. Isso fica evidenciado quando, observando a Figura 4.14, é verificado um pico de ruído na frequência de 60 Hz, mesma frequência da rede elétrica.

A bancada de medidas montada para as medidas de ruído é mostrada na Figura 4.13.

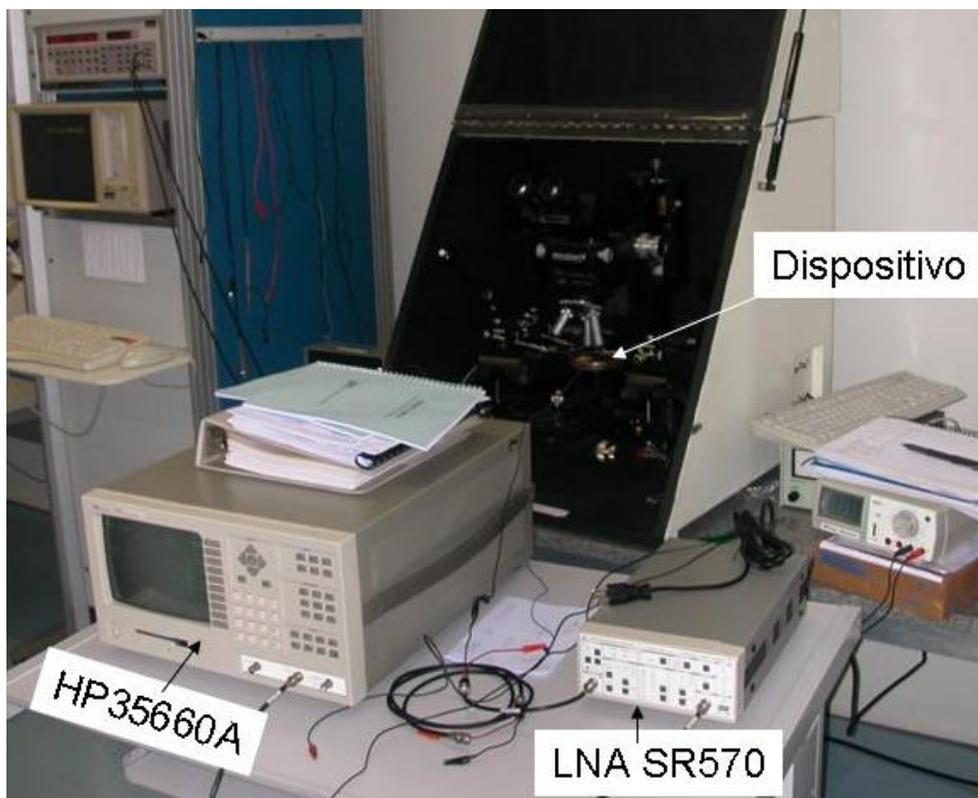


Figura 4.13: Fotografia da bancada de medidas de ruído.

O primeiro cuidado que se deve ter ao analisar as medidas de ruído é subtrair o ruído gerado pelo próprio amplificador do ruído medido. Dessa forma, é eliminado um ruído vindo do amplificador, restando apenas o ruído proveniente do dispositivo. Além disso, é necessário descontar a sensibilidade ($1/\text{ganho}$) do amplificador, caso contrário seria medido o ruído amplificado, e não o ruído real do dispositivo.

A Figura 4.14 mostra o gráfico da densidade espectral de ruído em função da frequência do sinal para duas correntes de polarização diferentes. São destacadas no gráfico as faixas de frequência onde o ruído 1/f e o ruído térmico dominam. É possível observar também que a corrente de polarização somente influencia na faixa de frequências onde o ruído 1/f domina, uma vez que o ruído térmico independe da corrente de polarização. Foi utilizada sensibilidade de $2 \times 10 \mu\text{A/V}$, offset de 1 pA, sem filtro e o modo de ganho em *Low Noise*.

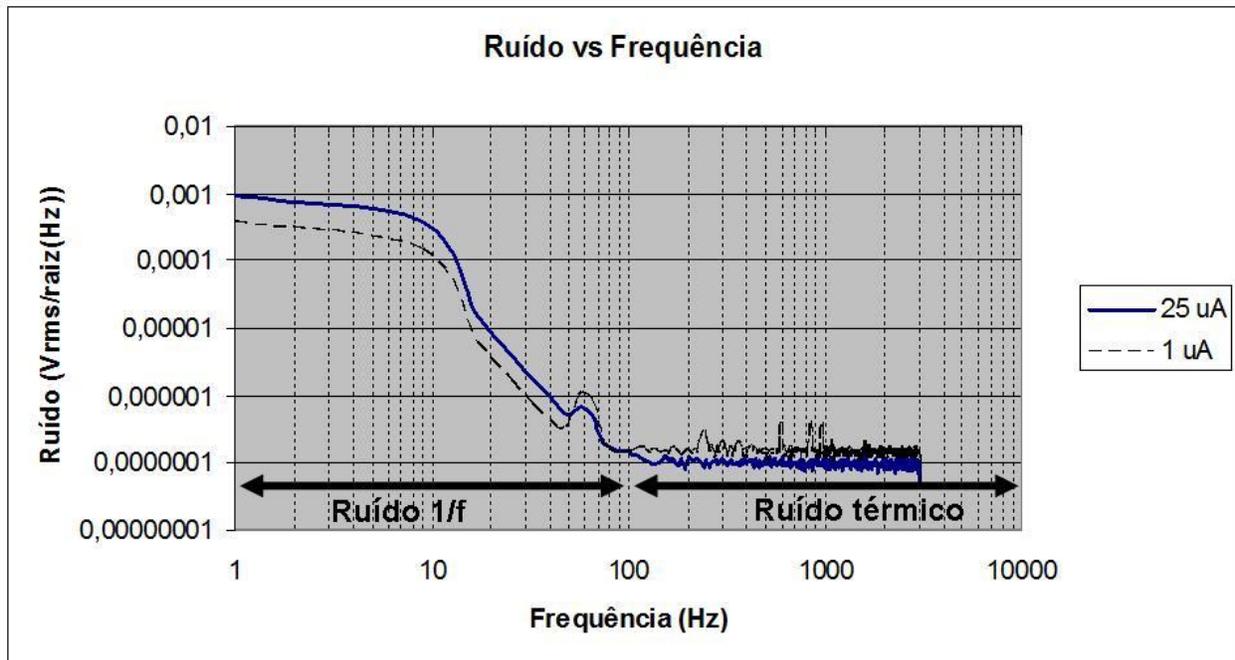


Figura 4.14. Densidade espectral de ruído em função da frequência. São destacadas as regiões em que o ruído 1/f e o ruído térmico dominam.

O nível de ruído térmico do dispositivo, retirado do gráfico acima, é de aproximadamente $96 \text{ nV}_{\text{rms}}/\text{Hz}^{1/2}$. O ruído do amplificador foi medido com o equipamento em aberto e apresentou o valor de $45,3 \text{ nV}_{\text{rms}}/\text{Hz}^{1/2}$. Subtraindo o valor do ruído do amplificador do valor medido no dispositivo, encontra-se $50,7 \text{ nV}_{\text{rms}}/\text{Hz}^{1/2}$ como sendo o nível de ruído térmico real no dispositivo.

De posse das dimensões da área ativa do sensor, de sua responsividade e do ruído total, é possível determinar sua detectividade específica como sendo $5,66 \cdot 10^5 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$. Este valor encontra-se em torno de duas ordens de grandeza abaixo dos valores típicos de detectividade em razão da baixa responsividade do dispositivo, já discutida anteriormente.

A tabela 4.1 é uma atualização da tabela 3.2 e mostra uma comparação entre os parâmetros projetados, simulados e medidos. Dentre os parâmetros em consideração medidos, a espessura do Si-poli, a relação L.W, a resistência de folha e o tempo de resposta estão de acordo com o

projetado e o simulado. O valor do tempo de resposta encontra-se melhor que o valor projetado uma vez que, como as pernas do bolômetro são grandes, o calor no elemento ativo é escoado rapidamente para o substrato, diminuindo o tempo necessário para o resfriamento da membrana. O TCR, apesar de levemente abaixo do projetado, é aceitável e válido. A responsividade está 16 vezes menor do que a desejada, por motivos já discutidos, o que levou também a detectividade a estar abaixo do valor projetado.

Tabela 4.1. Comparação entre os parâmetros projetados, simulados e medidos.

| Parâmetro | Projetado | Simulado | Medido |
|-----------------------|---|---------------------------------|---|
| $L/W \times t_{poli}$ | $\leq 6 \mu\text{m}$ | $6 \mu\text{m}$ | $6 \mu\text{m}$ |
| R_s | $595 \Omega/\square < R_s < 59,5 \text{ k}\Omega/\square$ | $23,95 \text{ k}\Omega/\square$ | $23,27 \text{ k}\Omega/\square$ |
| TCR | $\leq -1\%/K$ | $-2,5\%/K$ | $-0,95\%/K$ |
| D^* | $\geq 1.10^7 \text{ cm.Hz}^{1/2}.\text{W}^{-1}$ | - | $5,66.10^5 \text{ cm.Hz}^{1/2}.\text{W}^{-1}$ |
| \mathfrak{R} | $\geq 30 \text{ V/W}$ | - | $1,8 \text{ V/W}$ |
| τ | $<41 \text{ ms}$ | - | 13 ms |

5. Conclusões e Perspectivas

O presente trabalho consiste no passo inicial para o desenvolvimento de tecnologia de sensores microbolométricos em território nacional. Conforme visto antes, este tipo de tecnologia não é recente, no entanto, pouco foi realizado nesta área no Brasil.

Sensores com tempo de resposta de 13 ms, reponsividade de 1,8 V/W, TCR de -0,95%/K e detectividade específica de $5,66 \cdot 10^5 \text{ cm.Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ foram fabricados. Ainda há espaço para melhorias nestes parâmetros, no entanto o objetivo principal de se desenvolver o processo de fabricação dos dispositivos foi bem atingido. Foi desenvolvida uma metodologia de projeto de bolômetros, por análise física da influência dos parâmetros e por simulação. O processo de fabricação produziu bons resultados, tais como boa rigidez da membrana de Si-poli e isolamento térmica através da corrosão do óxido sacrificial (distância adequada entre a membrana e o substrato); taxa de corrosão do óxido sacrificial adequada, mesmo após o recozimento térmico; ouro negro com boa absorbância de radiação infravermelha. Além disso, foi desenvolvida uma metodologia de caracterização adequada para a extração de parâmetros através da montagem de bancadas de medidas específicas para o dispositivo em questão, de forma a extrair a curva IV, responsividade, tempo de resposta, TCR, absorbância, ruído e detectividade.

Uma vez que as etapas de fabricação do sensor agora se encontram bem definidas e compreendidas, a possibilidade de se fabricar matrizes destes sensores torna-se bastante concreta. Além disso, de posse de um processo de fabricação confiável, é possível fazer pequenas alterações em algumas etapas, de forma a aperfeiçoar as características dos sensores, produzindo dispositivos e matrizes com menor nível de ruído, maior sensibilidade e absorção de radiação infravermelha. É possível aperfeiçoar a deposição de Si-poli a fim de melhorar sua uniformidade e otimizar o tamanho de grão visando aumentar o TCR do sensor. Também se deve alterar o *layout* das membranas de forma a minimizar as perdas de calor para o substrato por condução térmica. Ainda há espaço para alguma melhora também na absorbância de infravermelho do ouro negro.

Como sugestão para futuros trabalhos deve-se destacar a pesquisa de outros materiais que funcionem como absorvedor de infravermelho, uma vez que ouro é um material de alto custo. Pesquisas recentes apontam alguns tipos de Nanotubos de Carbono como sendo bons materiais absorvedores de radiação infravermelha. Outros materiais são também sugeridos devido à

praticidade com a qual podem ser utilizados tais como os chamados *Sprays* Térmicos. Estes consistem em camadas (tipicamente, depositadas através de *spays* ou atomizadores) que possuem pequenas micro-esferas de sílica cobertas com uma camada de carbono que propiciam alta absorção de radiação infravermelha [47]. A utilização deste tipo de material pode reduzir drasticamente o custo de produção de matrizes de sensores e simplificar a etapa de deposição do absorvedor.

Outra sugestão que cabe fazer é a possível tentativa de se adaptar o processo de fabricação às regras de projeto de *Foundries* de forma que se possa fabricar um sensor, ou uma matriz de sensores, com toda a eletrônica de processamento (circuito de leitura, por exemplo) no *chip*. Tentar adaptar este tipo de sensor a projetos multi-usuários pode também ser bastante interessante.

Uma gama de outros trabalhos pode ter origem a partir deste e espera-se que grandes avanços sejam feitos na área a fim de que se possa dar continuidade ao desenvolvimento tecnológico de sensores bolométricos de infravermelho no país.

Referências Bibliográficas

[1] Herschel, W., LL. D. F. R. S. “Investigation of the Powers of the Prismatic Colours to Heat and Illuminate Objects; With Remarks, That Prove the Different Refrangibility of Radiant Heat. To Which is Added, an Inquiry into the Method of Viewing the Sun Advantageously, with Telescopes of Large Apertures and High Magnifying Powers”. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Volume 90, pp. 255-283.

[2] Herschel, W., LL. D. F. R. S. “Experiments on the Solar, and on the Terrestrial Rays that Occasion Heat; With a Comparative View of the Laws to Which Light and Heat, or Rather the Rays Which Occasion Them, are Subject, in Order to Determine Whether They are the Same, or Different. Part I”. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Volume 90, pp. 293-326

[3] Herschel, W., LL. D. F. R. S. “Experiments on the Refrangibility of the invisible rays of the sun”. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Volume 90, pp. 284-292

[4] Melloni, M. “La Thermochrôse ou la Coloration Calorifique - Première partie” Imprimerie de Joseph Baron, Naples, 1850.

[5] Langley, S.P. “The Absorption Lines in the infra-red spectrum of the sun”. Annals of the Astrophysical Observatory of the Smithsonian Institution, Vol.1, Government Printing Office, Washington, 1900.

[6] Sharma, U.C., “Infrared Detectors”, M. Tech Credit Seminar Report, Electronic Systems Group, EE Dept, IIT Bombay submitted Oct 2004.

[7] Neli, R. R., I. Doi, et al. (2006). "Development of process for far infrared sensor fabrication." Sensors and Actuators A 132: 400-406.

[8] Dennis, P. N. J. (1986). Photodetectors - An Introduction to Current Technology. New York and London, Plenum Press.

[9] Melo, A. M. (2004). Radiometria com sensores de banda larga para a faixa de THz. FEEC. Campinas, Universidade Estadual de Campinas. Tese de mestrado: 12.

[10] Hudson Jr. R. D., Hudson J. W., “Infrared detectors”, Haltsted Press, 1975.

[11] www.wvu.edu/depts/skywise/history/herschel.jpg consultado em 14/09/2007.

[12] www.electrophysics.com/View/Viw_TechPrimer_InfraredTutorial.asp consultado em 14/09/2007.

- [13] www.thermascan.com/physicians.ivnu consultado em 23/08/2007.
- [14] www.thermalbodyscan.com/images/thermalman consultado em 23/08/2007.
- [15] www.flirthermography.com consultado em 23/08/2007.
- [16] www.flirthermography.com/brazil consultado em 23/08/2007.
- [17] Wentworth S. M., Neikirk D. P., “Composite Microbolometers with Tellurium Detector Elements”, IEEE Transactions on Microwave theory and techniques”, vol. 40, No. 2 , 1992.
- [18] Lang W., Kühl K., Sandmaier H., “Absorbing Layers for Thermal Infrared Detectors”, IEEE, 1991.
- [19] MacDonald M. E., Grossman E. N. “Niobium Microbolometers for Far-Infrared Detection”, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 43, No 4, 1995.
- [20] Chen C., Yi X., Zhao X., Xiong B., “Characterizations of VO₂-based uncooled microbolometer linear array”, Sensors and Actuators, 90, 212-214, 2001.
- [21] Wada H., YBaCuO uncooled microbolometer IRFPA, SPIE 4369, 2001.
- [22] Sedky S., Fiorini P., Baert K., Hermans L., Mertens R., “Characterization and optimization of Infrared poly SiGe Bolometers”, IEEE Transactions on electron devices, vol. 46, No. 4, 1999.
- [23] Liddiard K. C., “Thin-film resistance bolometer IR detectors”, Infrared Phys., vol. 24, No. 1, 57-64, 1984.
- [24] Eminoglu, S., Tezcan, D. S., Akin, T., “A CMOS N-well Microbolometer FPA with Temperature Coefficient Enhancement Circuitry”, SPIE 4369, 240-249, 2001.
- [25] Fiorini E., “Thermal detectors to search for Dark Matter”, Dark matter : proceedings of DM97, 1st Italian conference on dark matter, Trieste, December 9-11, 1997 / editor, Paolo Salucci. Firenze, Italy : Studio Editoriale Fiorentino, c1998, p. 287.
- [26] Yuqiang L., Hu M., Wu M., Liu Z.; ” Preparation of vanadium oxide thin films with high temperature coefficient of resistance by facing targets d.c. reactive sputtering and annealing process”; Surface and Coatings Technology, Volume 201, Issues 9-11, 26 February 2007, Pages 4969-4972; Proceedings of the Fifth Asian-European International Conference on Plasma Surface Engineering - AEPSE 2005.
- [27] French, P.J.; “Polysilicon: a versatile material for microsystems”; Sensors and Actuators A 99, 2002, pp. 3-12.

- [28] Sze, S.M. (1986). Physics of Semiconductor Devices. John Wiley and Sons, 2007, 3rd edition, pp.274.
- [29] Drigers, R.G., Encyclopedia of Optical Engineering (2003), Marcel Dekker Inc., 349-357.
- [30] Niklaus F., Jansson C., Decharat A., Källhammer J., Pettersson H., Stemme G., “Uncooled Infrared Bolometer Arrays Operating in a Low to Medium Vacuum Atmosphere: Performance Model and Tradeoffs”, Conference of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2007, Orlando, USA.
- [31] V .K. Jain and C.R. Jalwania, “Recent trends in smart technology”, Defence Science Journal, Vol 48, N^o 1, January 1998, pp. 21-29.
- [32] Marc C. Foote, “Temperature stabilization requirements for unchopped thermal detectors”, Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering, 1999, vol. 3698, pp. 344-350.
- [33] ATLAS and ATHENA Users’ Manuals, Silvaco International, 2004.
- [34] ANSYS Verification Manual, ANSYS Inc., 2004.
- [35] www.memsnet.org consultado em 13/04/2007.
- [36] CRC Materials Science and Engineering Handbook, CRC Press, 3^a ed., 2001.
- [37] www.wikipedia.org consultado em 13/04/2007.
- [38] Angela D. McConnell, Srinivasan Uma and Kenneth E. Goodson, "Thermal Conductivity of Doped Polysilicon Layers", Journal of the microelectromechanical systems, Vol.10, No. 3, September 2001, 360-369.
- [39] www.memsnet.org/material/siliconnitridesi3n4/ consultado em 13/04/2007.
- [40] William N. Shape, Jr., Kamili M. Jackson, Kevin J. Hemker and Zielang Xie, “Effect of Specimen Size on Young’s Modulus and Fracture Strength of Polysilicon”, Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 10, No. 3, Semptember 2001, 317-326.
- [41] Pamula, V. K. (2001) et al. “Mechanical property measurement of thin film gold using thermally actuated bimetallic cantilever beams”. International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems, Nanotech. 1.
- [42] Zoccal, L.B. (2002). Desenvolvimento de elementos de projeto de MMIC em tecnologia HBT. FEEC. Campinas, Universidade Estadual de Campinas. Tese de mestrado: 73.
- [43] M. Madou, Fundamentals of Microfabrication, 1997, CRC press, 234.

[44] Nunes, A.M. (2005). Corrosão por plasma de filmes de Silício policristalino e nitreto de Silício para tecnologia MEMS e CMOS. FEEC. Campinas, Universidade Estadual de Campinas. Tese de mestrado: 81.

[45] M. Madou, Fundamentals of Microfabrication, 1997, CRC press, 221-222.

[46] Apostila de Materiais Elétricos do Prof. Jacobus Swart, página 9-30; Disponível em <http://www.ccs.unicamp.br/index.php?pagina=cursos/ee511/index.html&indice> consultado em 15/09/2008.

[47] D. B. Betts, F. J. J Clarke, L. J. Cox and J.A. Larkin; “Infrared reflection properties of five types of black coating for radiometric detectors”, J. Phys. E: Sci. Instrum., Vol. 18, 1985, 689-696.