



**Universidade Federal de Campina Grande**

**Centro de Engenharia Elétrica e Informática**

**Curso de Graduação em Engenharia Elétrica**

VANUZA MARQUES DO NASCIMENTO

**CARACTERIZAÇÃO DE MICROBOLÔMETROS LSMO  
MICRO USINADOS EM SILÍCIO**

Campina Grande, Paraíba  
Fevereiro de 2016

VANUZA MARQUES DO NASCIMENTO

CARACTERIZAÇÃO DE MICRO BOLÔMETROS LSMO  
MICRO USINADOS EM SILÍCIO

*Relatório de Estágio Supervisionado  
submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia  
Elétrica da Universidade Federal de Campina  
Grande como parte dos requisitos necessários  
para a obtenção do grau de Bacharel em  
Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Microeletrônica, Instrumentação

Orientador:

Professor Raimundo Carlos Silvério Freire, D. Sc.

Campina Grande, Paraíba  
Fevereiro de 2016

VANUZA MARQUES DO NASCIMENTO

CARACTERIZAÇÃO DE MICRO BOLÔMETROS LSMO  
MICRO USINADOS EM SILÍCIO

*Relatório de Estágio Supervisionado submetido  
à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Campina Grande como parte  
dos requisitos necessários para a obtenção do grau de  
Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia  
Elétrica.*

Área de Concentração: Microeletrônica, Instrumentação

Aprovado em        /        /

**Professor Avaliador**

Universidade Federal de Campina Grande

Avaliador

**Professor Raimundo Carlos Silvério Freire, D. Sc.**

Universidade Federal de Campina Grande

Orientador, UFCG

## AGRADECIMENTOS

“O quão feliz é uma pessoa depende da profundidade de sua gratidão.” – John Miller. Considero-me feliz pela gratidão que tenho:

Ao meu orientador Raimundo Freire pela amizade, confiança, incentivo e orientações feitas durante o estágio.

A minha orientadora Laurence Méchin pela confiança, por compartilhar parte de sua experiência com bastante entusiasmo, pela atenção, dedicação e preocupação na minha formação durante todo o estágio.

Ao meu orientador Bruno Guillet por me ajudar nas medições frequentemente, sempre preocupado com minha formação, pelos conselhos pertinentes não só profissionais como pessoais, por fazer minha estadia em Caen mais agradável.

A Chantal Gunther pela ótima recepção, pela preocupação em me familiarizar com outros brasileiros, por sempre oferecer apoio e pelas ótimas histórias compartilhadas.

Aos colegas da L'Equipe Eléctronique do laboratório GREYC pela ótima recepção, por fazer do laboratório um ambiente agradável, pelos momentos de descontração fora do laboratório e por sempre estarem preocupados em me integrar na equipe. Em particular, quero agradecer Nicole Delamotte pela ajuda com os procedimentos administrativos.

Aos professores do laboratório GREYC que sempre foram prestativos e proporcionavam ótimas discussões nas pausas diárias do café.

A minha família e amigos que sempre me apoiaram em todos os momentos, em especial aos que foram comigo para a França que sempre estavam comigo dividindo todos os momentos.

## RESUMO

Este trabalho contém as atividades de estágio realizadas por Vanuza Marques do Nascimento, no Laboratório GREYC – *Groupe de Recherche en Informatique, Image, Automatique et Instrumentation de Caen*, no período de 12 de maio a 20 de julho de 2014. O objetivo do estágio é medir as características de detecção de microbolômetros a base de  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}$  micro usinados em silício. Os sensores foram previamente fabricados na sala limpa do Laboratório GREYC. Um trabalho inicial de caracterização e otimização foi desenvolvido sobre o banco óptico de medições instalado no laboratório. A caracterização óptica e elétrica de dois sensores foi realizada com um diodo laser de comprimento de onda de 635nm, o qual é próximo ao comprimento de onda da radiação infravermelha. Parâmetros do sensor como a constante de tempo e frequência de corte foram medidas pelo método óptico. As curvas de resistência em função da temperatura foram traçadas a temperaturas de 240 K a 340 K, utilizando nitrogênio líquido e um regulador de temperatura com controle do tipo PID. Como consequência deste trabalho, um ambiente favorável foi preparado para o desenvolvimento da caracterização de sensores com radiação infravermelha com comprimento de onda visível, bem como o desenvolvimento dos dispositivos visto que após a caracterização, os resultados foram avaliados e diversos parâmetros foram discutidos tanto no nível de fabricação quanto em relação a futuras modificações no banco de medições.

**Palavras-chave:** Bolômetro, Radiação Infravermelha, Caracterização Óptica.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Organograma do laboratório .....  | 10 |
| Figura 2 - Modelo térmico simplificado do bolômetro .....  | 14 |
| Figura 3 - Resistividade em função da temperatura para diversos materiais utilizados em bolômetros ...   | 15 |
| Figura 4 - Leiaute do banco óptico de caracterização .....   | 18 |
| Figura 5 - Fotografia do banco de caracterização .....   | 19 |
| Figura 6 - Transmissão dos elementos ópticos. (a) Reflexão e transmissão do cubo divisor de feixes;<br>(b) Transmissão do polarizador; (c) Transmissão da lente L1; (d) transmissão da lente l2..... | 20 |
| Figura 7 - Caracterização do fotodiodo s10784 com o circuito amplificador i/V à 630 nm .....   | 21 |
| Figura 8 - Caracterização dinâmica do fotodiodo s10784 com circuito amplificador i/v à 630 nm.....   | 22 |
| Figura 9 - Circuito de polarização do diodo laser .....  | 23 |
| Figura 10 - Potência emitida pelo diodo laser em função da tensão de polarização .....   | 23 |
| Figura 11 - Evacuação do calor para estruturas não suspensas e estruturas suspensas [3] .....  | 26 |
| Figura 12 - Fotografia do sensor feita pelo microscópio óptico e microscópio eletrônico .....  | 26 |
| Figura 13 - Processo de fabricação do bolômetro LSMO .....   | 27 |
| Figura 14 - Fotografia das amostras. O pt100 conectado ao substrato do sensor. A resistência de aquecimento sob o substrato e conectado ao controlador de temperatura .....                          | 28 |
| Figura 15 - Fotografia do Sensor excitado pelo diodo laser .....   | 29 |
| Figura 16 – Resistência ( $\Omega$ ) em função da corrente (A) para temperaturas entre 240 e 340 k.....  | 30 |
| Figura 17 - Sensibilidade óptica em função da corrente para temperaturas entre 240 e 290 k .....   | 31 |
| Figura 18 - Resposta em frequência do sensor para corrente de máxima sensibilidade e corrente nula para diversas temperaturas .....  | 31 |
| Figura 19 - Linearidade do sensor para diversas temperaturas.....  | 32 |
| Figura 20 - Resistência elétrica e $dR/dT$ em função da temperatura para corrente de polarização de $50\mu A$ .....  | 33 |

## LISTA DE QUADROS

|  |    |
|--|----|
| Quadro 1 - Representação das grandezas medidas no banco óptico de acordo com a figura 3..... | 19 |
| Quadro 2 - Taxa de transmissão do polarizador .....  | 20 |

# SUMÁRIO

## SUMÁRIO

|  |      |
|--|------|
| Agradecimentos.....                                  | iv   |
| Resumo .....   | v    |
| Lista de Ilustrações.....                            | vi   |
| Lista de Quadros.....                                | vii  |
| Sumário.....   | viii |
| 1 Introdução .....                                   | 9    |
| 2 Fundamentação Teórica .....                        | 12   |
| 2.1 Princípio de Funcionamento.....                  | 13   |
| 2.2 Material LSMO.....                               | 14   |
| 2.3 Figuras de Mérito.....                           | 15   |
| 2.3.1 Sensibilidade .....                            | 15   |
| 2.3.2 Coeficiente de Temperatura da Resistência..... | 17   |
| 2.3.3 Constante de Tempo .....                       | 17   |
| 2.3.4 Linearidade.....                               | 17   |
| 3 Banco Óptico de Caracterização.....                | 18   |
| 3.1 Elementos Ópticos .....                          | 18   |
| 3.2 Fotodiodo .....                                  | 20   |
| 3.3 Diodo Laser .....                                | 22   |
| 4 Programas Utilizados .....                         | 24   |
| 4.1 LabVIEW .....                                    | 24   |
| 4.2 Origin .....                                     | 24   |
| 5 Caracterização dos Bolômetros .....                | 25   |
| 5.1 Descrição das Amostras .....                     | 25   |
| 5.2 Medições Ópticas.....                            | 28   |
| 5.3 Medições Elétricas.....                          | 32   |
| 6 Conclusões .....                                   | 34   |
| Bibliografia .....                                   | 35   |
| Anexo - (A) Artigos Publicados.....                  | 38   |
| (B) Interfaces LabVIEW .....                         | 39   |
| (C) Traçador de curvas.....                          | 40   |

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 OBJETIVOS DO ESTÁGIO

Um dos objetivos da equipe de eletrônica do Laboratório GREYC é desenvolver micro sensores para aplicações em bolometria e magnetometria. Dentre os óxidos utilizados na fabricação de bolômetros, o material  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}$  (LSMO) é um óxido com características importantes para aplicação em bolometria, pois este tem uma grande variação da resistência elétrica em torno da temperatura ambiente e um nível baixo de ruído em relação aos outros materiais, tais como os semicondutores, o que é importante para fabricar sensores térmicos de radiação como os bolômetros [1,2].

Um bolômetro é um detector térmico de radiação, que realiza a conversão da potência de radiação eletromagnética incidente em elevação de temperatura do material que este é composto. Esta elevação de temperatura modifica o valor da resistência elétrica do sensor em função da potência de radiação incidente absorvida. [3]

Uma característica importante de um bolômetro é a não seletividade de comprimento de onda absorvida, o que faz do bolômetro um dispositivo eficiente para medir radiação infravermelha, pois a detecção depende somente da absorção a uma largura de onda considerada. Entretanto, estes possuem uma constante de tempo grande, devido à detecção se dar pela absorção de energia térmica, o que difere dos sensores fotoelétricos, que possuem uma constante de tempo pequena, mas são seletivos ao comprimento de onda incidente. [4]

Como a medição de radiação nos bolômetros é realizada pela absorção de energia térmica, eles são independentes do comprimento de onda incidente—e são bastante utilizados nos setores de visão noturna, termografia, astronomia, detecção de gás, monitoramento de equipamentos, etc.[4]

É preciso várias etapas para desenvolver micro sensores: concepção, fabricação em sala branca e caracterização. O objetivo deste estágio é medir as características de detecção de bolômetros a base de LSMO, isto é, medir a sensibilidade, resistência em função da temperatura, constante de tempo, frequência de corte, etc. e comparar os resultados à bibliografia existente.

## 1.2 O Laboratório

O laboratório GREYC (*Groupe de Recherche en Informatique, Image, Automatique et Instrumentation de Caen*) foi criado em 1995 devido a fusão do LAIC (*Laboratoire d'Informatique et Intelligence Artificielle de Caen – Laboratório de Informática e Inteligência Artificial*) e do LEI (*Laboratoire d'Electronique et Instrumentation – Laboratório de Eletrônica e Instrumentação*) da ENSICAEN (*Ecole Nationale Supérieur d'Ingénieur de Caen – Escola Nacional Superior de Engenharia de Caen*) e uma URA (*Unité de Recherche Associée – Unidade de Pesquisa Associada*), e no ano de 2000, uma fusão com uma UMR (*Unité Mixe de Recherche – Unidade Mista de Pesquisa*) ligada ao CNRS (*Centre Nationale de Recherche Scientifique – Centro Nacional de Pesquisa Científica*). O laboratório é filiado principalmente a dois institutos do CNRS: o INS2I – *Institut des Sciences Informatiques et de leurs Interactions* (Instituto de Ciências Informáticas e suas Iterações) e o INSIS – *Institut des Sciences de l'Ingénieur et des Systèmes* (Instituto de Ciências de Engenharia e de Sistemas).

O GREYC possui mais de 220 membros atuando na área de STIC – *Sciences et Thechnologies de l'Information et de la Communication* (Ciências e Tecnologia de Informação e de Comunicação) repartidas em 8 equipes de pesquisa:

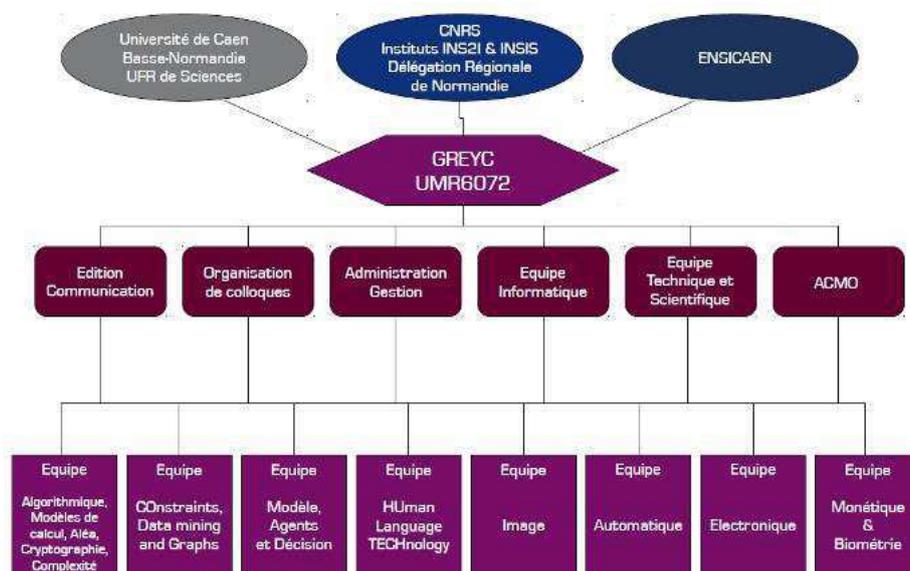


FIGURA 1 - ORGANOGAMA DO LABORATÓRIO

### 1.2.1 Equipe de Eletrônica

A equipe Eletrônica do GREYC (antiga equipe instrumentação), coordenada por C. Doladjan, trabalha essencialmente na concepção de componentes e sensores. Especializada na medição de ruído, a equipe se concentra principalmente na área da bolometria e magnetometria.

Os trabalhos da equipe são internacionalmente reconhecidos. Esta já organizou numerosos cursos temáticos do CNRS e, em 2008, a oitava conferência da EMSA – *European Conference on Magnetic Sensors et Actuators (Conferência Europeia em Sensores Magnéticos e Atuadores)*, importante fórum realizado a cada dois anos, no qual são discutidos os recentes progressos e desenvolvimentos na área de sensores magnéticos.

O laboratório tem a sua disposição um quarto amagnético blindado ( $10\text{ m}^3$ ) que permite eliminar perturbações eletromagnéticas. O laboratório dispõe também de uma sala branca, que permite a fabricação de seus próprios micro e nano dispositivos.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os detectores de energia radiante têm por finalidade detectar radiação a 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.

Materiais que possuem propriedades altamente dependentes da temperatura, como condutividade elétrica ou coeficiente de expansão térmica, são utilizados na fabricação de detectores térmicos para medir radiação devido ao princípio de detecção por absorção de onda incidente [5].

O princípio de medição 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 [5, 6].

Em 1880 o primeiro bolômetro fabricado com uma folha fina de platina escurecida foi inventado por Langley e era utilizado para observações solares [5]. Entretanto, este dispositivo possui limitações para algumas aplicações devido à sua fragilidade. Para solucionar o problema, começou-se a usar bolômetros termistores, que são fabricados com óxidos ou semicondutores que possuem TCR (*Temperature Coefficient of Resistance*) 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. [5-7].

Para aumentar o desempenho dos bolômetros, estes são resfriados para obter maiores mudanças na resistência, uma vez que estas mudanças 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 [6]. Entretanto, o resfriamento dos bolômetros restringe a aplicação dos dispositivos, excluindo, por exemplo, aplicações móveis.

## 2.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Um bolômetro é um detector térmico de radiação. Consiste basicamente num resistor com baixa capacidade térmica e alto coeficiente de temperatura da resistência (TCR). Dessa maneira, mudanças significativas na condutância ocorrem quando o resistor é aquecido por radiação incidente. [3]

A mudança na condutância é detectada pela variação da tensão elétrica nos terminais do bolômetro numa polarização em corrente ou detectada pela variação de corrente elétrica numa polarização em tensão. Calibrando adequadamente o resistor, é possível então, determinar a quantidade de radiação incidente sobre o dispositivo.

O bolômetro é constituído de quatro partes: Absorvedor, termômetro, fuga térmica e termostato. O modelo está ilustrado na Figura 2 para melhor compreensão do modo de operação.

A radiação incidente  $P(W)$  é absorvida pelo absorvedor de coeficiente de absorção  $\eta$ . Esta absorção provoca uma elevação de temperatura  $\Delta T$  sobre o material absorvente, esta elevação de temperatura e varia a temperatura do termômetro  $T$  para  $T = \Delta T + T_0$ , em que  $T_0$  é a temperatura fixada pelo termostato. A resistência elétrica do termômetro muda em função do coeficiente de temperatura da resistência, o TCR ( $K^{-1}$ ).

A condutância térmica  $G = P/\Delta T (W.K^{-1})$  é a ligação térmica entre o absorvedor e o termostato. A constante de tempo do sensor é dada por  $\tau = C/G (s)$ , representa o tempo em o bolômetro leva para atingir 63% do seu valor final de tensão dada uma excitação de radiação e polarização em corrente. É representada como a taxa de transferência de calor entre a superfície do bolômetro e o termostato, em que  $C (J.K^{-1})$  é a capacitância calorífica do termômetro.

Com isto, para melhorar a desempenho do dispositivo, procura-se modificar os parâmetros como condutância térmica, geometria, tamanho e o material.

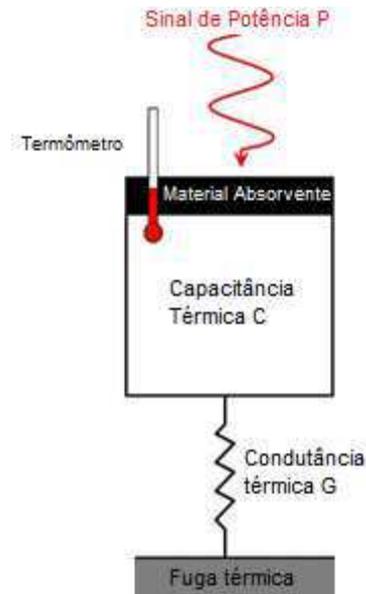


FIGURA 2 - MODELO TÉRMICO SIMPLIFICADO DO BOLÔMETRO

## 2.2 MATERIAL LSMO

Para aumentar o desempenho dos bolômetros é necessário utilizar materiais com alto valor de TCR. Quanto maior o valor do TCR, maior a sensibilidade. O LSMO é um material interessante para a bolometria não resfriada pois este apresenta uma forte variação da resistência elétrica em torno da temperatura ambiente e baixo nível de ruído [3]. Como pode-se observar na Figura 3, o LSMO possui grande variação da temperatura em torno da temperatura ambiente diferentemente de outros materiais que possuem o mesmo comportamento mas para baixas temperaturas.

A tecnologia utilizada para a fabricação destes bolômetros ainda não é compatível com a indústria de microeletrônica de silício. Os custos de fabricação ainda são caros em relação aos atuais para aplicações em câmeras em infravermelho. É por isto que estes detectores podem preferencialmente serem utilizados para aplicações no qual é preciso um pequeno número de detectores e uma grande detectividade, como nos detectores de gás do tipo não dispersivo e a espectrometria infravermelha [4].

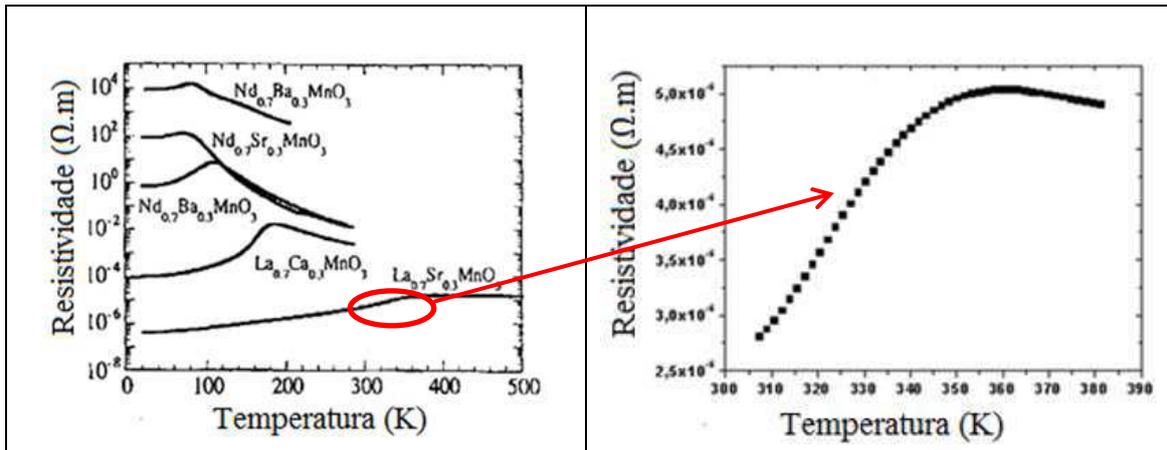


FIGURA 3 - RESISTIVIDADE EM FUNÇÃO DA TEMPERAÇÃO PARA DIVERSOS MATERIAIS UTILIZADOS EM BOLÔMETROS

## 2.3 FIGURAS DE MÉRITO

### 2.3.1 SENSIBILIDADE

Segundo a definição, a sensibilidade é a relação entre a resposta de um instrumento de medição pela variação correspondente do estímulo. Neste estágio, o bolômetro foi polarizado com corrente elétrica, logo, a sensibilidade representada por  $\mathfrak{R}$  é o quociente da tensão de saída do bolômetro sobre a potência da radiação incidente ( $V.W^{-1}$ ).

A expressão da sensibilidade foi determinada a partir da Lei da Conservação da Energia. Em que:

$$\text{Energia acumulada: } C \cdot \Delta T \quad (1)$$

$$\text{Energia recebida: } P_{\text{elec}} + P_{\text{opt}} \quad (2)$$

$$\text{Potência de radiação eletromagnética recebida: } P_{\text{abs}}(t) = \eta P_{\text{opt}}(t).$$

em que  $C$  é a capacitância térmica do sensor,  $P_{\text{elec}}$  é a potência elétrica e  $P_{\text{opt}}$  é a potência óptica incidente.

A evacuação de calor é feita pela condutância térmica ( $G_{\text{géo}}$ ) que depende da geometria do material ligando o bolômetro que está numa temperatura  $T$  ao substrato a uma temperatura  $T_o$ . A energia é evacuada durante o tempo  $dt$  e é expressa por:

$$G_{\text{géo}}(T - T_o)dt \quad (3)$$

Então, a primeira lei da termodinâmica aplicada ao bolômetro fica:

$$C \cdot (T - T_o) = P_{elec}(t) dt + \eta P_{opt}(t) dt - G_{géo}(T - T_o)dt \quad (4)$$

A partir desta expressão, pode-se calcular a sensibilidade óptica que resulta na expressão:

$$R_v^{opt}(f) = \frac{\delta V}{\delta P} = I \frac{dR}{dT} \frac{\delta T}{\delta P} = \frac{\eta I}{G_{eff} + jC2\pi f} \frac{dR}{dT} \quad (5)$$

É importante observar que para que a quantidade de calor recebida seja sempre evacuada, a condutância efetiva -  $G_{eff}$ , dada pela expressão 6, seja sempre positiva. Caso contrário, há instabilidade térmica e o dispositivo é danificado. Logo, é preciso limitar a corrente ou tensão de polarização do dispositivo para não ultrapassar o limite suportado [4].

$$G_{eff} = G_{géo} - \alpha P_{ele} = G_{géo} - I^2 \frac{dR}{dT} \quad (6)$$

O material utilizado LSMO possui um  $dR/dt$  positivo, então, este possui uma limitação na corrente de polarização devido ao fato de  $G_{eff}$  tender a ficar negativo com o acréscimo da corrente elétrica. Para evitar a instabilidade térmica, limitamos a corrente de polarização em  $I_{lim} = \sqrt{3} \cdot I_{máx}$ . Em que  $I_{máx}$  é dado por:

$$I < \sqrt{\frac{G_{géo}}{\frac{dR}{dt}}} \quad (7)$$

Pode-se observar em (5) que para aumentar a sensibilidade é preciso diminuir a condutância térmica e aumentar o  $dR/dt$ . O ideal é trabalhar no ponto de máximo  $dR/dt$  com uma condutância térmica mínima para otimizar a resposta do bolômetro, entretanto, é preciso analisar outros parâmetros de mérito como a constante de tempo e o ruído para verificar o melhor ponto de operação.

### 2.3.2 COEFICIENTE DE TEMPERATURA DA RESISTÊNCIA

O TCR é um parâmetro que influencia diretamente na sensibilidade. Quanto maior o TCR, mais fácil será medir a variação da resistência com a temperatura e consequentemente, mais fácil será de medir a potência incidente. O TCR ( $K^{-1}$ ) é definido como:

$$TCR = \frac{1}{R} \frac{\Delta R}{R} \quad (8)$$

### 2.3.3 CONSTANTE DE TEMPO

Representada por  $\tau$ , a constante de tempo é a velocidade do sinal de resposta do detector dado um estímulo. Este tempo é definido como sendo o tempo necessário para o sinal de saída atingir 63% do valor final dado um estímulo na entrada. Pela expressão 9 é possível deduzir a constante de tempo:

$$C \cdot d(T - T_o)/dt = P_{\acute{e}lec}(t) dt + \eta P_{opt}(t) dt - G(T - T_o)dt \quad (9)$$

Considerando radiação incidente nula e o aquecimento dado por potência elétrica desprezível temos:

$$C \cdot d(T - T_o)/dt = -G(T - T_o)dt$$

$$\frac{d(T - T_o)}{dt(T - T_o)} = -\frac{G}{C}$$

$$T(t) = C \cdot e^{-\frac{G}{C}t}$$

Logo, a constante de tempo é

$$\tau = \frac{C}{G} \quad (10)$$

em que  $C$  ( $J/K$ ) é a capacidade térmica e  $G$  ( $W/K$ ) é a condutividade térmica do dispositivo.

### 2.3.4 LINEARIDADE

Um detector é dito linear quando o sinal de saída é função do sinal de entrada de acordo com uma função do primeiro grau. É uma característica importante para sensores pois torna fácil sua modelagem, tornando seu comportamento previsível.

### 3 BANCO ÓPTICO DE CARACTERIZAÇÃO

#### 3.1 ELEMENTOS ÓPTICOS

A caracterização óptica do sensor foi realizada utilizando o banco óptico desenvolvido durante a tese de Arian [3]. O banco contém uma fonte de radiação controlada, o diodo laser, que emite uma potência de até 5 mW em função da corrente elétrica que circula pelo diodo laser. O feixe emitido passa pelo cubo divisor de feixe e é dividido em 2 partes, uma incide sobre o fotodiodo de alta velocidade, utilizado para medir a radiação emitida, e a outra parte é atenuada, focada e incide sobre o sensor. As lentes convergentes focalizam o spot do diodo laser e o polarizador faz o controle da potência emitida sobre o sensor.

A potência total incidente sobre o sensor é calculada a partir dos coeficientes de transmissão dos componentes do banco e do sinal elétrico do fotodiodo. Os coeficientes de transmissão dos elementos ópticos foram medidos com o wattímetro de acordo com o esquema da Figura 4. Na Figura 5 observa-se a fotografia do banco óptico.

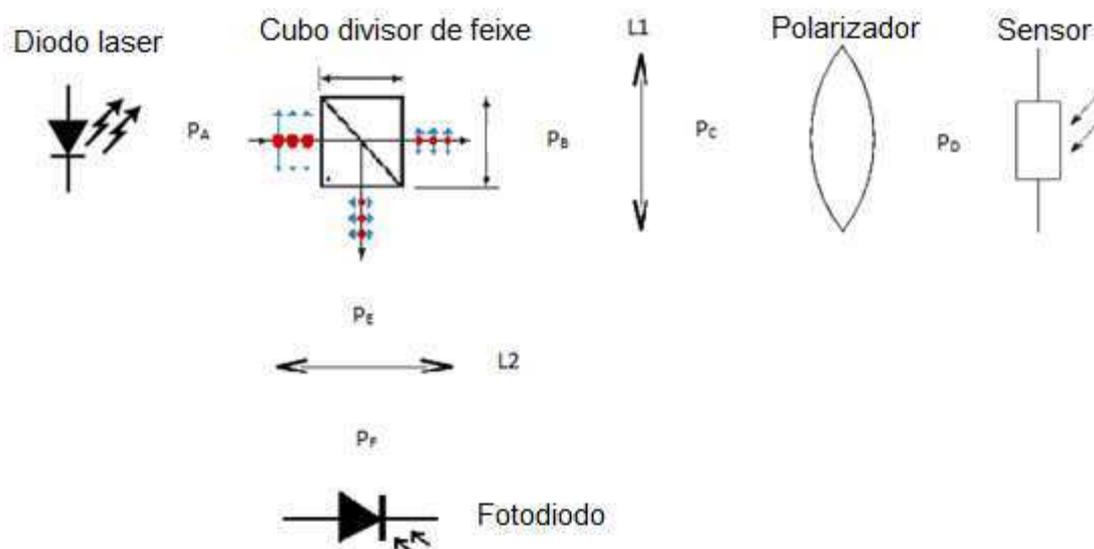


FIGURA 4 – LEIAUTE DO BANCO ÓPTICO DE CARACTERIZAÇÃO

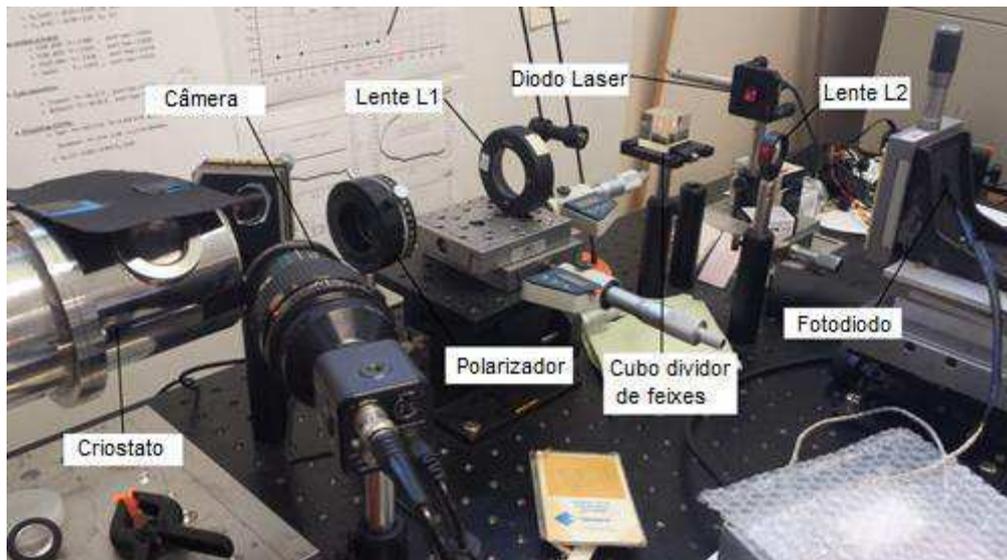


FIGURA 5 - FOTOGRAFIA DO BANCO DE CARACTERIZAÇÃO

O quadro 1 contém as fórmulas para o cálculo da taxa de transmissão de cada elemento óptico.

QUADRO 1 - REPRESENTAÇÃO DAS GRANDEEZAS MEDIDAS NO BANCO ÓPTICO DE ACORDO COM A FIGURA 4

|   |           |
|---|-----------|
| Potência do Diodo Laser                                       | $P_A$     |
| Potência Transmitida pelo cubo divisor de feixes              | $P_B$     |
| Taxa de transmissão da lente L1                               | $P_C/P_B$ |
| Taxa de transmissão do polarizador                            | $P_D/P_C$ |
| Potência Transmitida pelo cubo divisor de feixes a $90^\circ$ | $P_E$     |
| Taxa de transmissão da lente L2                               | $P_F/P_E$ |
| Taxa de transmissão cubo divisor de feixes                    | $P_B/P_A$ |
| Taxa de transmissão cubo divisor de feixes                    | $P_E/P_A$ |
| Potência recebida pelo Fotodiodo                              | $P_F$     |
| Potência recebida pelo Sensor                                 | $P_D$     |

Realizou-se todo o processo de caracterização do banco óptico para estimar a potência incidente sobre o sensor e a taxa de transmissão do polarizador, os resultados estão nos gráficos da Figura 6 e para o polarizador no Quadro 2.

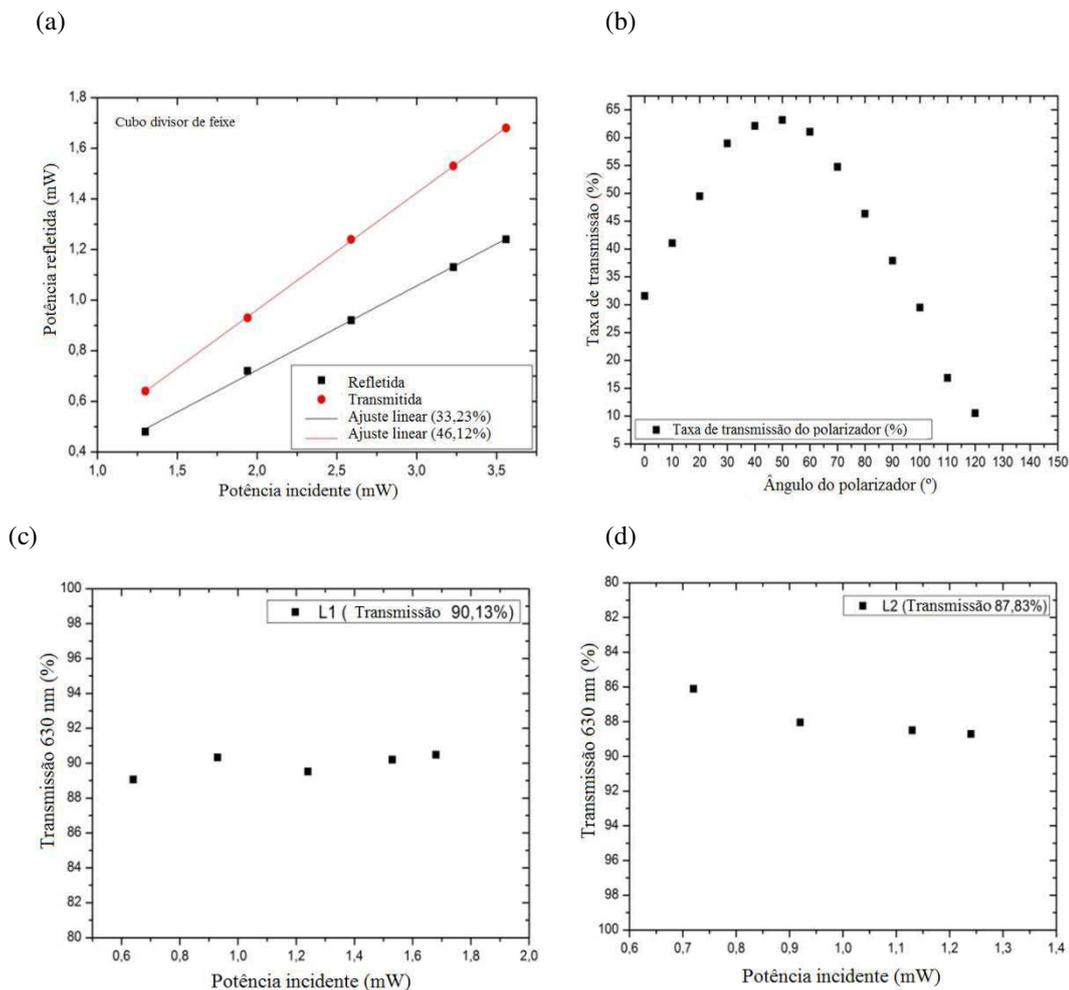


FIGURA 6 - TRANSMISSÃO DOS ELEMENTOS ÓPTICOS. (A) REFLEXÃO E TRANSMISSÃO DO CUBO DIVISOR DE FEIXES; (B) TRANSMISSÃO DO POLARIZADOR; (C) TRANSMISSÃO DA LENTE L1; (D) TRANSMISSÃO DA LENTE L2.

Quadro 2 - Taxa de transmissão do polarizador

| Grau do Polarizador | 0° | 10° | 20° | 30° | 40° | 50° | 60° | 70° | 80° | 90° | 100 ° | 110 ° | 120 ° |
|---------------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-------|-------|
| Transmissão (%)     | 34 | 42  | 48  | 58  | 61  | 62  | 60  | 54  | 46  | 38  | 29    | 17    | 10    |

## 3.2 FOTODIODO

O fotodiodo (Hamamatsu S10784) foi utilizado para fornecer uma alta sensibilidade em relação à frequência de radiação incidente ( $0,45 \text{ AW}^{-1}$  à 650 nm). Para medir a potência de radiação incidente sobre o fotodiodo, um circuito amplificador I/V

foi utilizado para facilitar as medições de forma a ter uma tensão diretamente proporcional à potência emitida.

O circuito amplificador I/V foi caracterizado para obtermos a uma função da potência emitida em função da tensão de saída do circuito. Utilizou-se o wattímetro para traçar a curva de tensão do fotodiodo em função da potência incidente para comparar com os dados do datasheet e verificar a real relação, visto que o datasheet disponibiliza a curva para radiação com comprimento de onda de 660 nm e o comprimento de onda utilizado foi de 635 nm.

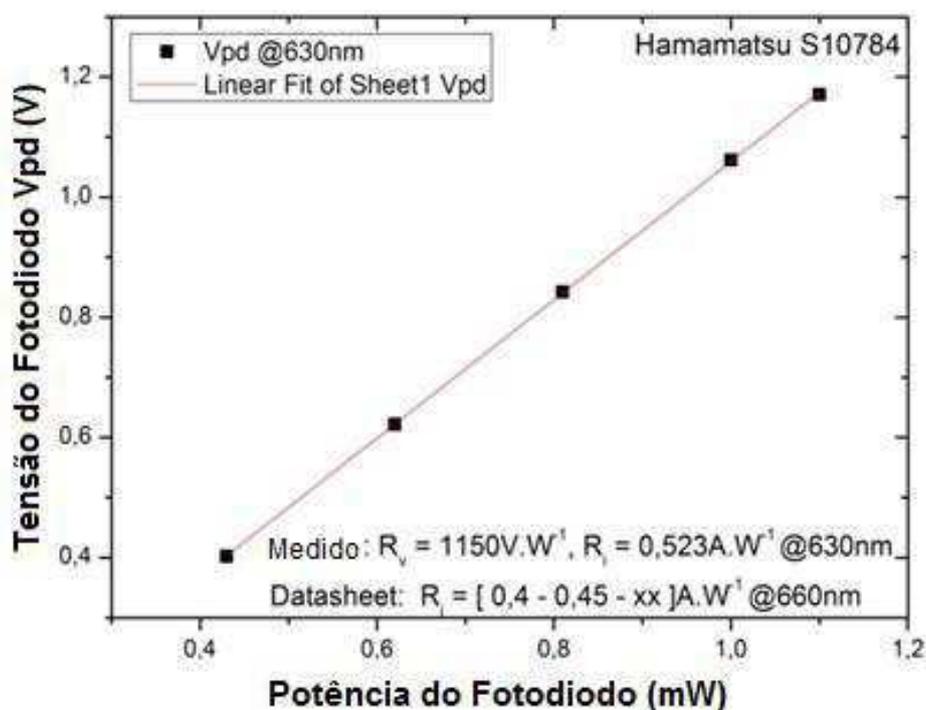


FIGURA 7 - CARACTERIZAÇÃO DO FOTODIODO S10784 COM O CIRCUITO AMPLIFICADOR I/V À 630 NM

A linearidade entre potencia incidente e tensão de saída do circuito I/V do fotodiodo foi verificada. Estimou-se a função da tensão em função da potência incidente para calcular os coeficientes de transmissão dos outros elementos ópticos do banco. A função estimada foi:

$$V_{pd} = (1150 \pm 5) P_{pd} [V] \quad (11)$$

A análise em frequência do circuito I/V e do fotodiodo também foi realizada devido à importância deste comportamento nas medições da resposta em frequência do

sensor para que este não fique limitado a uma pequena banda passante. A curva  $V_{pd}/V_m$  foi traçada em que  $V_{pd}$  é a tensão de saída do circuito I/V e  $V_m$  é a tensão modulada do gerador de funções. O gerador de funções foi utilizado para modular a corrente de alimentação do diodo laser para frequências entre 1 e 100 kHz. A linearização da curva  $V_{pd}/V_m$  foi realizada e estimou-se uma média de  $V_{pd}/V_m = 2,38$ . O fotodiodo funciona como um filtro passa altas como se pode observar na Figura 8, com frequência de corte de 3,5 Hz.

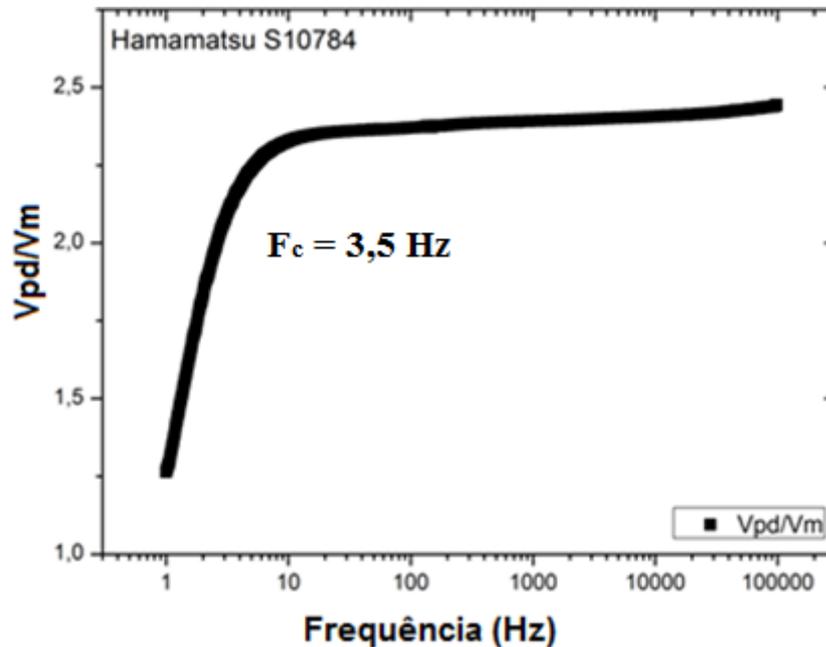


FIGURA 8 - CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA DO FOTODIODO S10784 COM CIRCUITO AMPLIFICADOR I/V A 630 NM

### 3.3 DIODO LASER

A fonte de radiação utilizada para caracterizar os sensores foi o diodo laser ADL-63058TL (630 nm, 5mW). Para polarizar o diodo laser, utilizou-se o circuito da Figura 9 no qual há uma entrada de tensão contínua e uma alternada. A tensão contínua gera uma corrente contínua no diodo laser que emite potência fixa de radiação. A tensão alternada modula a corrente no diodo laser que emite uma potencia modulada.

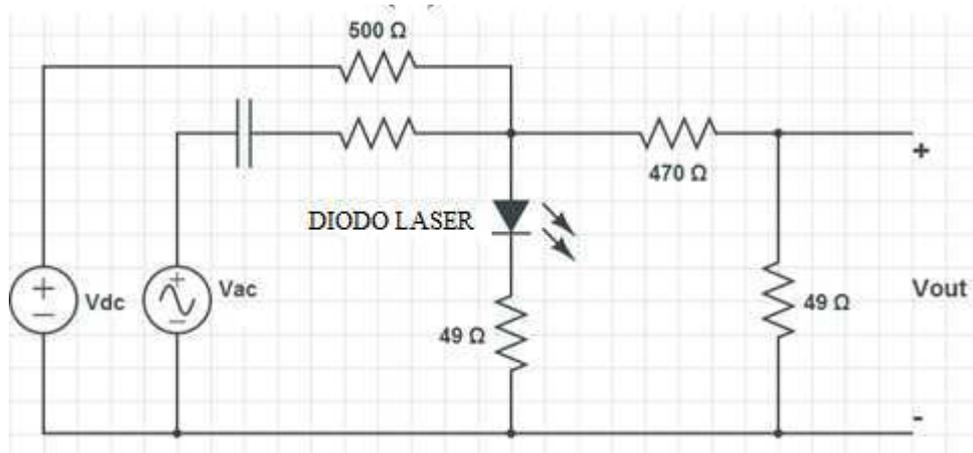


FIGURA 9 - CIRCUITO DE POLARIZAÇÃO DO DIODO LASER

O circuito possui uma saída  $V_{out}$  que corresponde a uma cópia do sinal de corrente no diodo laser com uma atenuação em torno de 10. A potência total emitida pelo diodo laser é  $P = P_o + P_m \cdot \cos(2\pi ft)$ , em que  $P_o$  é a potência DC emitida,  $P_m$  é a amplitude da potência modulada e  $f$  é a frequência de modulação.

Antes de começar as medições com os sensores, mediu-se a curva de potência emitida pelo diodo laser em função da tensão de polarização do circuito da Figura 9. A potência emitida torna-se linear a partir de 18 V como verificado na Figura 10.

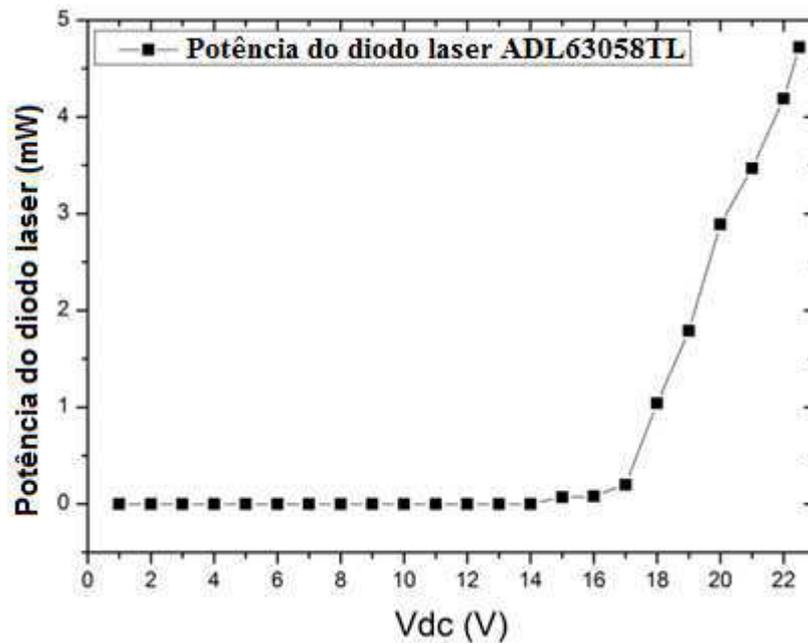


FIGURA 10 - POTÊNCIA EMITIDA PELO DIODO LASER EM FUNÇÃO DA TENSÃO DE POLARIZAÇÃO

## 4 PROGRAMAS UTILIZADOS

### 4.1 LABVIEW

A aquisição dos dados foi realizada com ajuda do software Labview (Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench). É uma plataforma virtual que permite a elaboração de interface de medições e controle, baseado em uma interface gráfica da National Instruments.

O software foi utilizado neste estágio para a aquisição de dados nas medições de resistência em função da temperatura dada uma corrente fixa e aquisição da função de transferência da tensão do sensor sobre a tensão do fotodiodo em função da frequência. As interfaces dos programas utilizados estão no anexo.

### 4.2 ORIGIN

O Origin é um software de tratamento e análise de dados científicos para o sistema Microsoft Windows desenvolvido pelo OriginLab.

O software permite traçar gráficos 2D e 3D, possui funções de transferências prontas e permite importar dados nos formatos Excel, ASCII, Mathematica ou SigmaPlot, também exporta gráficos nos formatos jpeg, gif, tiff, etc.

Os dados obtidos pelo Labview e pelo analisador de dispositivos semicondutores (referência em anexo) são em formato .txt, o que é possível importar para o Origin e tratá-las.

## 5 CARACTERIZAÇÃO DOS BOLOMETROS

### 5.1 DESCRIÇÃO DAS AMOSTRAS

Os bolômetros utilizados neste estágio são do tipo monocorpo, ou seja, o material do termômetro é o mesmo material do absorvedor. O material utilizado nestes sensores é o  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$  (LSMO).

O LSMO foi depositado sobre uma camada de sustentação de  $\text{SrTiO}_3$  (STO) sobre o substrato de silício Si (001). A camada de sustentação foi necessária devido a diferença do coeficiente de dilatação térmica entre o silício e o LSMO e também para evitar reação química entre estes durante a deposição do LSMO em altas temperaturas.

Uma característica importante de um bolômetro é a condutância térmica. Esta grandeza representa o quanto o calor vindo da absorção da potência incidente e da potência elétrica é evacuado para o termômetro do sensor, e também fixa a constante de tempo. Segundo a expressão 5, observa-se que a sensibilidade é inversamente proporcional à condutância térmica, então, quanto menor a condutância térmica, maior será a sensibilidade.

Os bolômetros caracterizados neste estágio têm uma estrutura suspensa para reduzir a condutância térmica e aumentar a sensibilidade. Estes foram fabricados por [4] e como observa-se na Figura 11, a evacuação do calor em estruturas suspensas é bem menor que em estruturas não suspensas, em que o calor se evacua em toda a área do sensor ao invés de se evacuar apenas pelos contatos. Com esta mudança na estrutura, o aquecimento do sensor é bem maior o que o torna mais sensível.

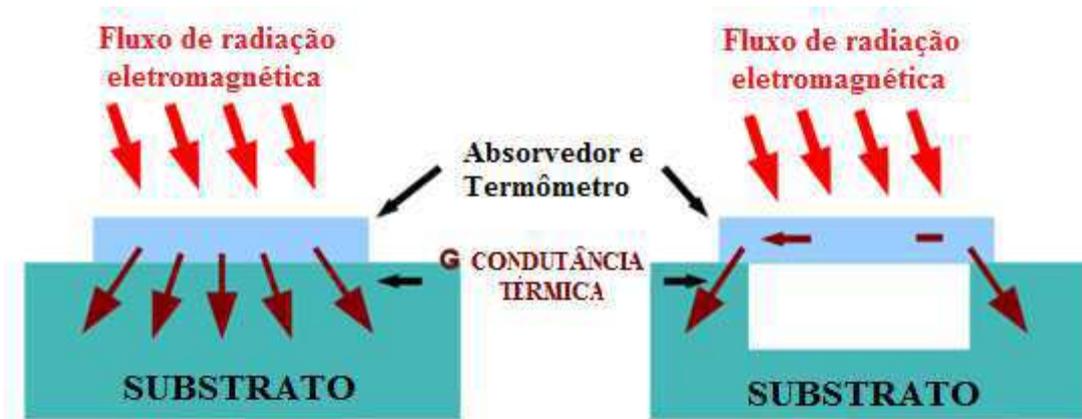


FIGURA 11 - EVACUAÇÃO DO CALOR PARA ESTRUTURAS NÃO SUSPENSAS E ESTRUTURAS SUSPENSAS [3]

Para aumentar a superfície de absorção a estrutura do sensor foi composta de várias pontes paralelas como se pode observar na Figura 12.

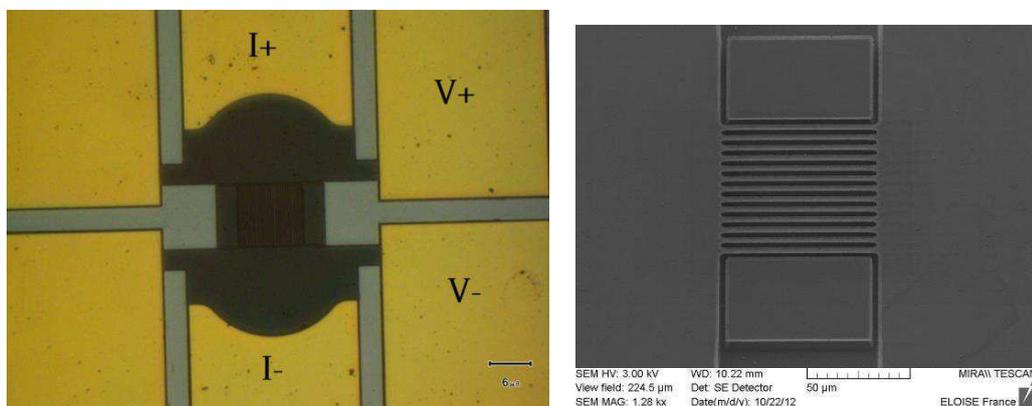


FIGURA 12 - FOTOGRAFIA DO SENSOR FEITA PELO MICROSCÓPIO ÓPTICO E MICROSCÓPIO ELETRÔNICO

O sensor da Figura 12 é composto por pontes paralelas de comprimento de 75  $\mu\text{m}$  de largura de 4  $\mu\text{m}$  espaçadas entre 2  $\mu\text{m}$ . O outro sensor trabalhado tinha comprimento de 100  $\mu\text{m}$ .

O processo de fabricação do sensor pode ser observado na Figura 13 em que foram utilizadas duas máscaras, uma para contato e outra para as pontes de LSMO. Os contatos foram feitos de ouro para diminuir a resistência de contato para não interferir muito na resistência final do sensor

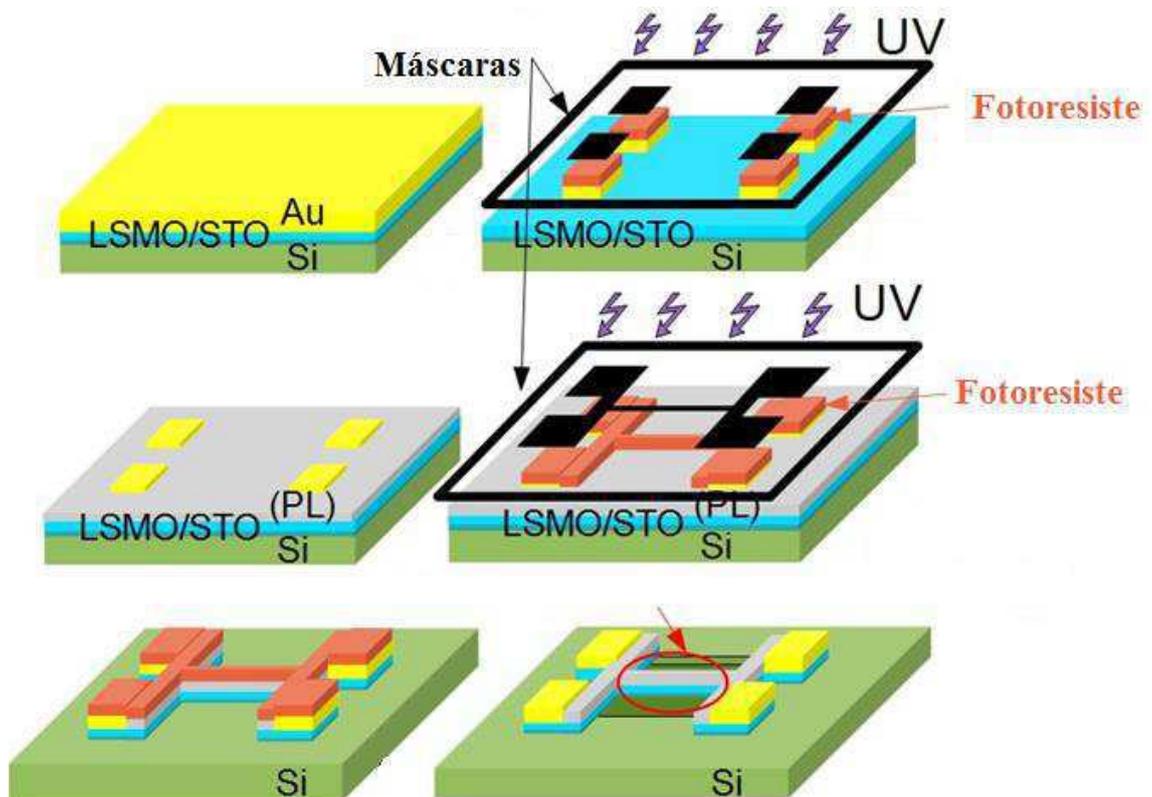


FIGURA 13 - PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO BOLÔMETRO LSMO

As medições de tensão e corrente foram realizadas pelo método das quatro pontas, a corrente passa pelas duas partes retangulares centrais (Figura 12) e a tensão é medida entre as outras duas pontas, seja da direita ou esquerda do sensor.

A primeira medição realizada no bolômetro foi resistência em função da temperatura. Com estes resultados, pode-se extrair a resistividade, o TCR e com este, a temperatura de maior sensibilidade.

A medição da resistência elétrica em função da temperatura e a extração dos valores do TCR estão incluídos na caracterização elétrica. Traçou-se o gráfico da resistência em função da temperatura (Figura 20) que foi realizado primeiramente, aumentando a temperatura do sensor com ajuda do Controlador de Temperatura LakeShore 330 e em seguida, o sensor foi resfriado adicionando nitrogênio líquido no criostato onde o sensor estava contido.

O controlador de temperatura é responsável por regular a temperatura do sensor entre 300 e 360 K. Ele tem uma resistência elétrica (Pt100) conectada ao substrato do sensor e uma resistência elétrica enrolada sob o substrato.

Com ajuda do sensor Pt100 pode-se obter a temperatura do substrato do sensor. O controlador de temperatura controla a corrente da resistência de aquecimento que

varia a temperatura do substrato por Efeito Joule. Na fotografia da amostra com o criostato aberto na Figura 12 pode-se observar o sensor Pt100, a resistência de aquecimento sob o substrato e as conexões dos sensores.

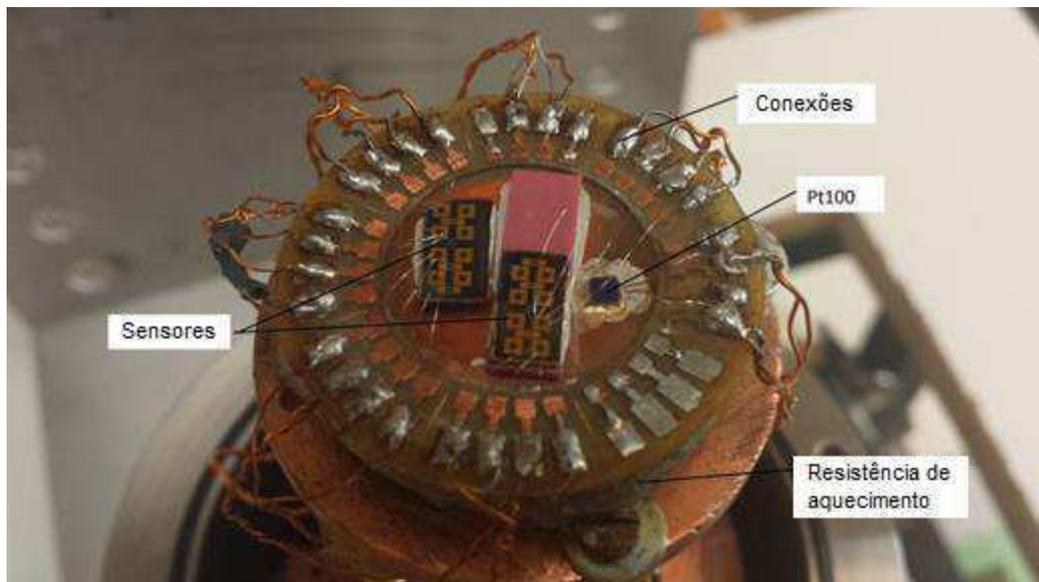


FIGURA 14 - FOTOGRAFIA DAS AMOSTRAS. O PT100 CONECTADO AO SUBSTRATO DO SENSOR. A RESISTÊNCIA DE AQUECIMENTO SOB O SUBSTRATO E CONECTADO AO CONTROLADOR DE TEMPERATURA

É possível também realizar o controle da temperatura modificando os parâmetros PID do controlador de temperatura e alterando o nível de potência dissipada. O LakeShore possui três níveis de aquecimento de acordo com a potência dissipada: Low (0,3 W /30  $\Omega$ ), Medium (3 W /30  $\Omega$ ) e High (30 W /30  $\Omega$ ). O nível Medium foi utilizado durante o estágio devido ao nível Low ser muito lento para aquecer o sensor e o High possivelmente pode danificar as amostras devido a alta potência dissipada na resistência de aquecimento.

## 5.2 MEDIÇÕES ÓPTICAS

Após o trabalho de caracterização do banco óptico, as medições ópticas foram realizadas com intuito de medir a sensibilidade, constante de tempo e observar a variação da resistência dado aquecimento por Efeito Joule e pela temperatura ambiente. Uma fotografia do sensor dada excitação pelo diodo laser é apresentada na Figura 15.

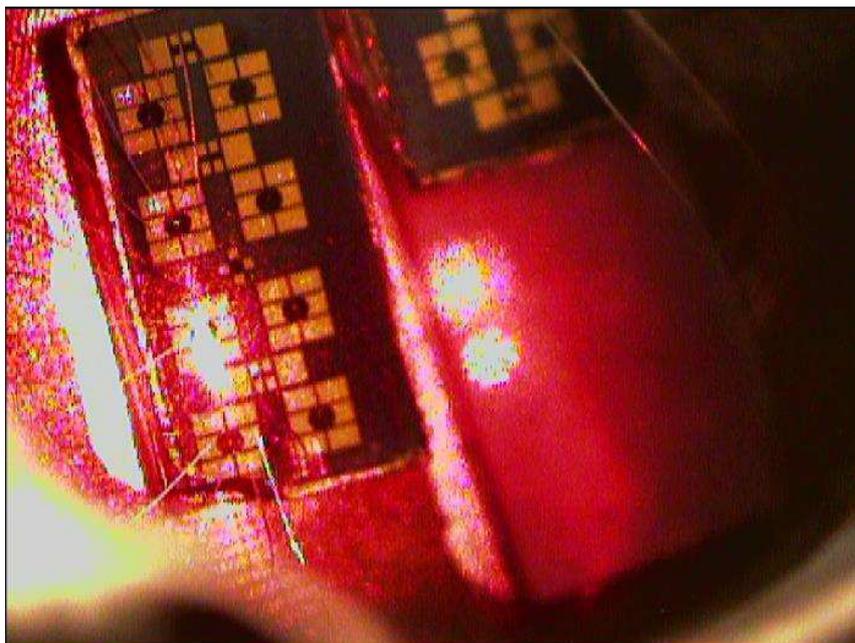


FIGURA 15 - FOTOGRAFIA DO SENSOR EXCITADO PELO DIODO LASER

Para inicializar as medições é preciso polarizar o diodo laser com uma corrente constante em torno de 30 mA. Para isto, uma tensão de 22,5 V foi posta no circuito de polarização apresentado na Figura 9. Para que o diodo emitisse uma potência estável, era preciso esperar em torno de uma hora antes de começar as medições, pois se verificou uma oscilação de potência emitida nos primeiros 30 minutos após polarizar o diodo laser.

Com a finalidade de que o feixe do diodo laser estivesse exatamente sobre o sensor, antes de iniciar as medições ópticas, polarizou-se o diodo laser com uma pequena corrente alternada para modular a potência emitida. Colocou-se uma pequena corrente constante no sensor para medir a tensão do mesmo. Modificou-se a posição das lentes L1 e L2 até atingir o máximo de tensão de saída do sensor, ou seja, quando o feixe está totalmente centralizado no sensor a tensão de saída é máxima dada a absorção da radiação incidente.

Uma vez que o sensor atinja a temperatura desejada para o início de uma série de medições ópticas. Modifica-se a corrente de polarização e com isto, têm-se a tensão DC e AC do sensor. O cálculo da corrente máxima para o sensor foi realizado precedentemente pela expressão 7.

Para verificar o aquecimento da resistência por Efeito Joule, traçou-se o gráfico da resistência em função da corrente elétrica dada temperatura constante para diferentes temperaturas. Observa-se o máximo de variação da resistência para baixas temperaturas de acordo com o gráfico da Figura 16.

É possível observar na Figura 16 a elevação da resistência a cada temperatura e o aumento da variação da resistência em função da corrente. Como mencionado anteriormente, a temperatura é medida no substrato do sensor, logo, a temperatura do LSMO pode ser ligeiramente diferente devido a diferença da troca de calor entre o sensor e o seu substrato.

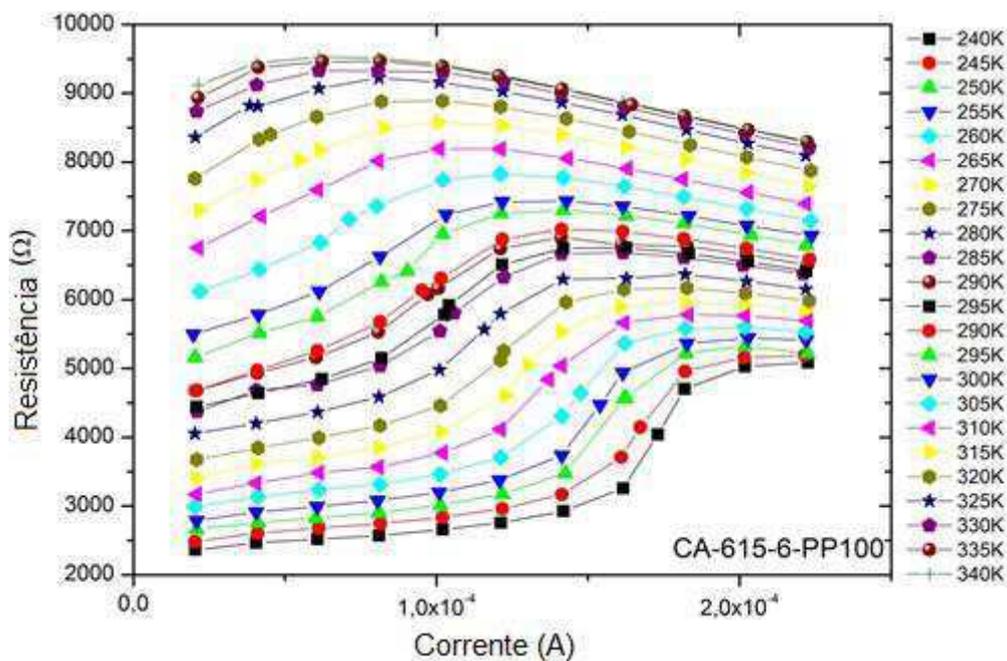


FIGURA 16 – RESISTÊNCIA ( $\Omega$ ) EM FUNÇÃO DA CORRENTE (A) PARA TEMPERATURAS ENTRE 240 E 340 K

Ao fim de cada série de medições, variou-se a corrente para encontrar o ponto de máxima tensão alternada, ou seja, maior sensibilidade. O gráfico da sensibilidade em função da corrente apresenta-se na Figura 17

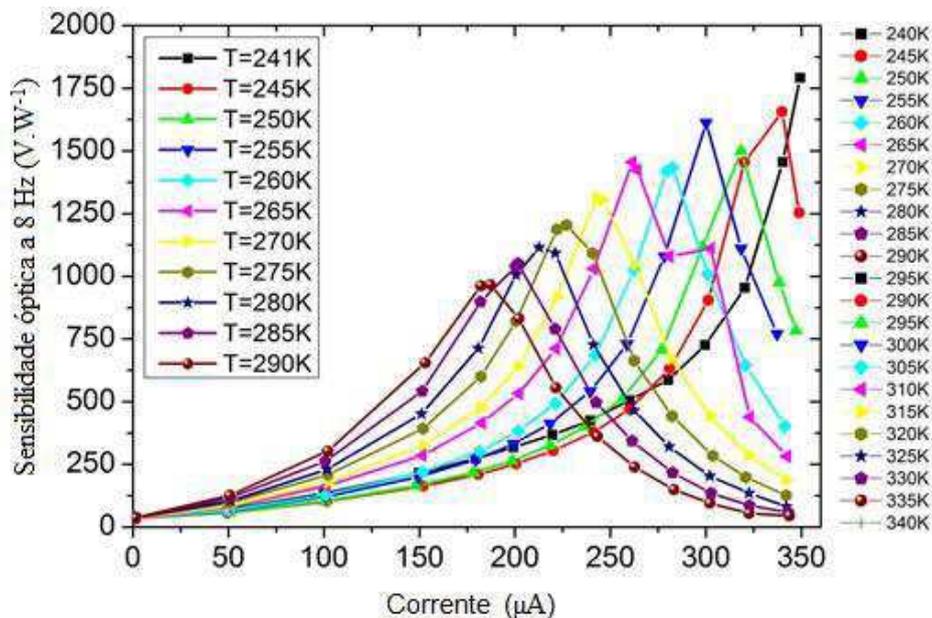


FIGURA 17 - SENSIBILIDADE ÓPTICA EM FUNÇÃO DA CORRENTE PARA TEMPERATURAS ENTRE 240 E 290 K

A cada ponto de máxima sensibilidade para diferentes temperaturas e com ajuda do analisador de rede, mediu-se a resposta em frequência do sensor assim como a resposta em frequência para corrente nula a fim de verificar o ruído. Variou-se a frequência de 1 a 100 kHz e o resultado pode ser observado na Figura 18.

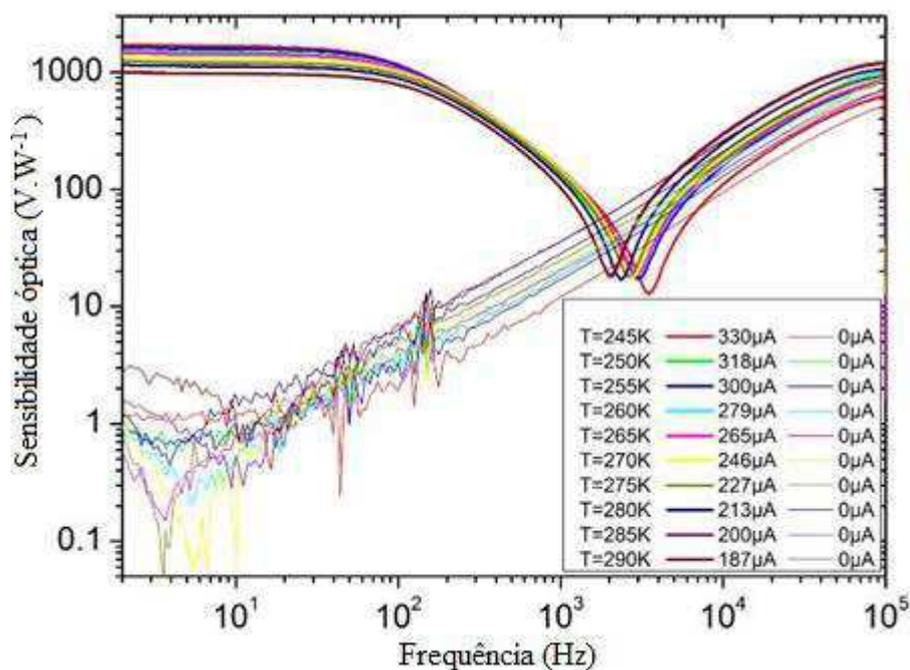


FIGURA 18 - RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DO SENSOR PARA CORRENTE DE MÁXIMA SENSIBILIDADE E CORRENTE NULA PARA DIVERSAS TEMPERATURAS

A partir da Figura 18 é possível calcular a frequência de corte do sensor em torno de 145 Hz e a sensibilidade óptica em torno de  $944 \text{ V.W}^{-1}$ . Observou-se também um comportamento não bolométrico do sensor para a resposta em frequência a corrente nula. Este comportamento pode ser dado pelo efeito fotovoltaico da estrutura LSMO/STO/Si. Estudos estão em progresso no laboratório para explicar este comportamento.

Após a resposta em frequência verificou-se que a frequência de 8 Hz está na banda passante do sensor e mediu-se sua linearidade. Como pode-se notar, a derivada da curva da linearidade resulta na sensibilidade, que como já medida anteriormente, é maior a temperaturas mais baixas. A linearidade foi medida dada uma corrente de polarização fixa do sensor e variando-se a corrente de polarização do diodo laser para o ponto de máxima sensibilidade para temperaturas diferentes (Figura 19).

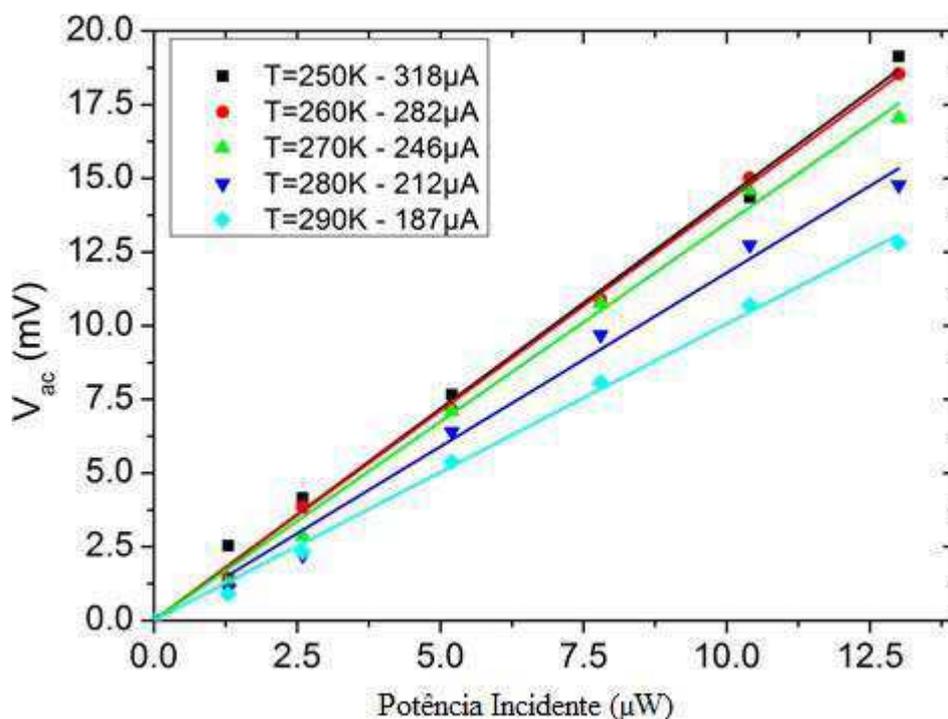


FIGURA 19 - LINEARIDADE DO SENSOR PARA DIVERSAS TEMPERATURAS

### 5.3 MEDIÇÕES ELÉTRICAS

A resistência elétrica das pontes suspensas de LSMO/STO foi medida para temperaturas entre 240 e 340 K com a técnica a quatro pontas e corrente de polarização de  $50 \mu\text{A}$ . A partir do gráfico da Figura 20, com ajuda do software Origin, calculou-se a derivada da curva e obteve-se a curva de  $dR/dT$ . O máximo valor de  $dR/dT$  encontrado

foi de  $72 \Omega \cdot K^{-1}$  a temperatura de 320 K. O máximo TCR foi de  $1,9 \times 10^{-2} K^{-1}$ , o que corresponde a valores esperados para o LSMO [10].

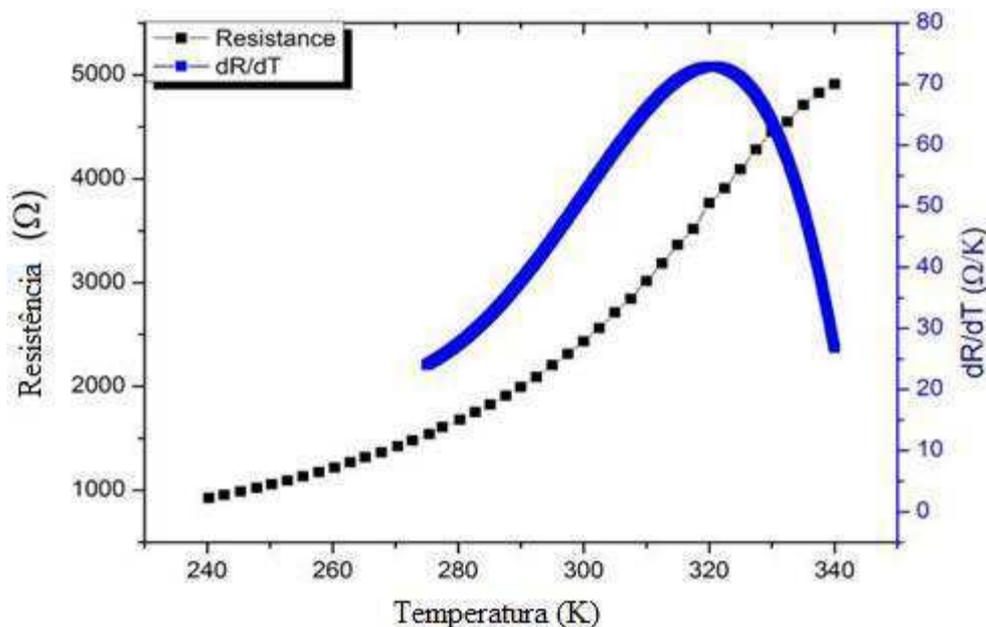


FIGURA 20 - RESISTÊNCIA ELÉTRICA E  $dR/dT$  EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA PARA CORRENTE DE POLARIZAÇÃO DE  $50 \mu A$

A condutância térmica foi medida a partir da corrente elétrica e da curva  $R(T)$ . Valores em torno de  $9 \times 10^{-6} W \cdot K^{-1}$  foram encontrados para temperatura entre 270 e 330 K. Comparando-se com a condutância elétrica medida para bolômetros não suspensos de LSMO [25], observa-se uma redução da condutância térmica de três ordens de grandeza, o que resulta num aumento de três ordens de grandeza da sensibilidade.

A partir dos valores calculados de condutância térmica e a curva  $R(T)$ , a máxima corrente de polarização do sensor para não haver instabilidade térmica encontrada foi de  $360 \mu A$ . A sensibilidade máxima encontrada foi de  $1440 V \cdot W^{-1}$  considerando a absorção do sensor sendo 1 e para corrente de polarização de  $180 \mu A$  (metade da corrente máxima suportada pelo sensor) na banda passante do bolômetro.

## 6 CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi de caracterizar microbolômetros fabricados no laboratório GREYC, analisar suas características de detecção e descrever os procedimentos realizados na caracterização para que futuras medições possam ser facilmente reproduzidas no banco óptico previamente instalado.

Um estudo sobre o banco óptico foi feito na primeira parte do estágio para determinar os parâmetros de transmissão de cada elemento do mesmo, a fim de estimar a potência da radiação incidente no bolômetro.

A principal contribuição deste trabalho foi obter os primeiros resultados da caracterização óptica e elétrica dos bolômetros previamente fabricados no laboratório e de recolocar em funcionamento o banco óptico de caracterização do laboratório e descrever os procedimentos de medições para a caracterização dos bolômetros, assim como ter dado início a medições a baixas temperaturas utilizando nitrogênio líquido.

Os resultados destas medições a baixas temperaturas resultaram em discussões para o aprimoramento do criostato para futuras medições, foi importante para observar o funcionamento dos bolômetros em uma larga faixa de temperatura, analisar seu comportamento dado aquecimento a Efeito Joule ou a temperatura ambiente, verificar a variação da resistência dado tamanho do sensor e encontrar o ponto de maior sensibilidade.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] L. Méchin, J.-M. Routoure, S. Mercone, F. Yang, S. Flament, and R. A. Chakalov, "1/f noise in patterned La<sub>2/3</sub>Sr<sub>1/3</sub>MnO<sub>3</sub> thin films in the 300-400 K range", *J. Appl. Phys.* 103, 083709 (2008).
- [2] L. Méchin, S. Wu, B. Guillet, P. Perna, C. Fur, S. Lebargy, C. Adamo, D.G. Schlom, J.M. Routoure, Experimental evidence of correlation between 1/f noise level and metal-to-insulator transition temperature in epitaxial La<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>MnO<sub>3</sub> thin films, *J. Phys. D: Appl. Phys. - Fast Track Communication* 46 202001 (2013).
- [3] Ayan 2013, Tese "Bolomètres non refroidis à base de couches minces La<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>MnO<sub>3</sub> : Modèle thermique, caractérisation électrique et optique". Université de Caen Basse-Normandie
- [4] Liu 2013, Tese "Fabrication et caractérisation électrique et thermique de microbolomètres non refroidis suspendus à base de couches minces La<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>MnO<sub>3</sub> sur silicium." Université de Caen Basse-Normandie
- [5] Della Lucia F. L. 2008, Dissertação "Microbolômetros resistivos em membrana suspensa." Universidade Estadual de Campinas UNICAMP.
- [6] F. Yang, L. Méchin, J.M. Routoure, B. Guillet, R.A. Chakalov, "Low noise La<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>MnO<sub>3</sub> thermometers for uncooled bolometric applications", *J. Appl. Phys.* 99 024903 (2006).
- [7] M. Rajeswari, C.H. Chen, A. Goyal, C. Kwon, MC Robson, R. Ramesh, T. Venkatesan, and S. Lakeou, "Low-frequency optical response in epitaxial thin films of La<sub>0.97</sub>Ca<sub>0.03</sub>MnO<sub>3</sub> exhibiting colossal magnetoresistance ", *Appl. Phys. Lett.* 68 3555 (1996).
- [8] H. Budzier and G. Gerlach, *Thermal Infrared Sensors*, John Wiley & Sons Inc. (2011).
- [9] P.W. Kruse, L.D. McLaughlin and R.B. McQuistan, *Elements of Infrared Technology*, Wiley, New York (1962).
- [10] A. Aryan, J.M. Routoure, B. Guillet, P. Langlois, C. Fur, J. Gasnier, C. Adamo, D.G. Schlom, L. Méchin, "Optical Characterisation of La<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>MnO<sub>3</sub> thin film based uncooled bolometers," *Third International Conference on Sensor Device Technologies and Applications*, 2009 Rome, Italy.
- [11] A. Rogalski, *Infrared detectors: 2nd ed.*, CRC Press, (2011).
- [12] P. L. Richards, *Bolometers for infrared and millimeter waves*, *J. Appl. Phys.*, 76, 1 (1994).

- [13] A. Goyal, M. Rajeswari, R. Shreekala, S. E. Lofland, S. M. Bhagat, T. Boettcher, C. Kwon, R. Ramesh, and T. Venkatesan, "Material characteristics of perovskite manganese oxide thin films for bolometric applications", *Appl. Phys. Lett.* 71 (17) 2535 (1997)
- [14] L. Méchin, J.M. Routoure, B. Guillet, F. Yang, S. Flament, D. Robbes, R.A. Chakalov, "Uncooled bolometer response of a low noise La<sub>2</sub>/3Sr<sub>1</sub>/3MnO<sub>3</sub> thin film", *Appl. Phys. Lett.* 87 204103 (2005).
- [15] F. Yang, L. Méchin, J.M. Routoure, B. Guillet, R.A. Chakalov, "Low noise La<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>MnO<sub>3</sub> thermometers for uncooled bolometric applications", *J. Appl. Phys.* 99 024903 (2006).
- [16] A. Urushibara, Y. Moritomo, T. Arima, A. Asamitsu, G. Kido and Y. Tokura, Insulator-metal transition and giant magnetoresistance in La<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>MnO<sub>3</sub>, *Phys. Rev. B*, 51, 14103 (1995).
- [17] L. Méchin, J.-M. Routoure, S. Mercone, F. Yang, S. Flament, and R. A. Chakalov, "1/f noise in patterned La<sub>2</sub>/3Sr<sub>1</sub>/3MnO<sub>3</sub> thin films in the 300-400 K range", *J. Appl. Phys.* 103, 083709 (2008).
- [18] L. Méchin, S. Wu, B. Guillet, P. Perna, C. Fur, S. Lebargy, C. Adamo, D.G. Schlom, J.M. Routoure, Experimental evidence of correlation between 1/f noise level and metal-to-insulator transition temperature in epitaxial La<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>MnO<sub>3</sub> thin films, *J. Phys. D: Appl. Phys. - Fast Track Communication* 46 202001 (2013).
- [19] V. Y. Zerov and V. G. Malyarov, "Heat-sensitive materials for uncooled microbolometer arrays," *J. Opt. Technol.* 68, 939 (2001).
- [20] S. Liu, B. Guillet, A. Aryan, C. Adamo, C. Fur, J.-M. Routoure, F. Lemarié, D.G. Schlom, L. Méchin, "La<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>MnO<sub>3</sub> suspended microbridges for uncooled bolometers made using reactive ion etching of the silicon substrates", *Microelec. Eng.* 111 101-104 (2013).
- [21] L. Méchin, C. Adamo, S. Wu, B. Guillet, S. Lebargy, C. Fur, J.-M. Routoure, S. Mercone, M. Belmeguenai, and D. G. Schlom, "Epitaxial La<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>MnO<sub>3</sub> thin films grown on SrTiO<sub>3</sub> buffered silicon substrates by reactive molecular-beam-epitaxy", *Phys. Status Solidi A* 209 (6) 1090 (2012).
- [22] B. Guillet, D. Robbes, L. Méchin, "YBCO transition edge sensors used for very low noise thermal control", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 13 (2), 657-660 (2003).
- [23] B. Guillet, D. Robbes, L. Méchin, "Low noise temperature control : application to an active cavity radiometer", *Rev. Sci. Instrum.*, 74 (1) 243-249 (2003).

[24] J.-M. Routoure, D. Fadil, S. Flament, and L. Méchin, A low noise high output impedance DC current source, AIP Conf. Proc., Vol. 922, no. 1, p. 419-424, 2007.

[25] A. Aryan, B. Guillet, J.M. Routoure, C. Fur, P. Langlois, L. Méchin, "Measurement of thermal conductance of  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$  thin films deposited on  $\text{SrTiO}_3$  and  $\text{MgO}$  substrates", Appl. Surf. Science (in press)

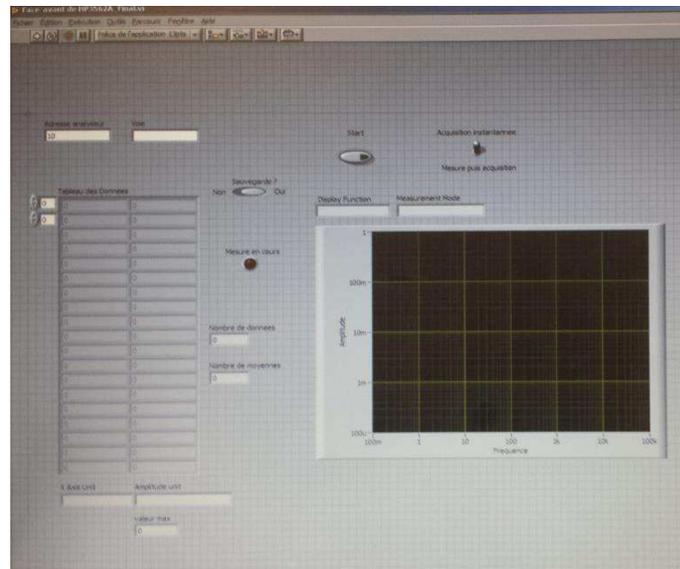
[26] Y. Okimoto, T. Katsufuji, T. Ishikawa, T. Arima, and Y. Tokura, Variation of electronic structure in  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  as investigated by the optical conductivity spectra, Phys. Rev. B, 55, 4206 (1996).

## ANEXO - (A) ARTIGOS PUBLICADOS

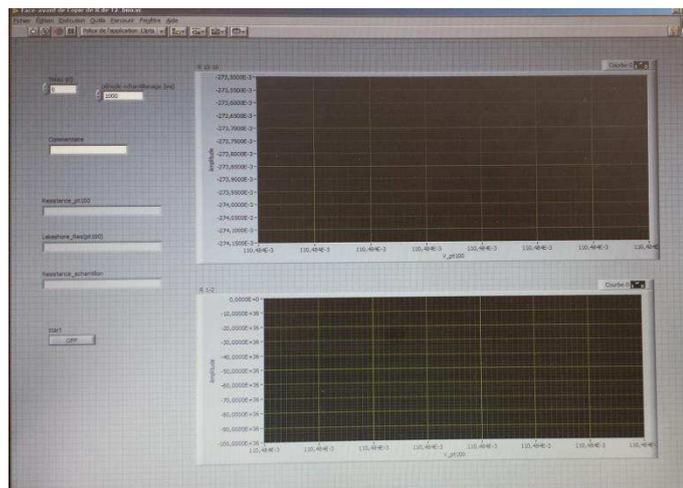
- Nascimento, V. M.; Guillet, B. ; Liu, S. ; Aryan, A. ; Adamo, C. ; Schlom, D. G.; Freire, R. C. S. ; Mechin, L. . “Optical characterization of uncooled bolometers based on  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$  thin films”. In: XXI IBERCHIP, 2015, Montevideo. Proceedings of the XXI International IBERCHIP Workshop, 2015.
- Mechin, L. ; Guillet, B. ; Liu, S. ; Nascimento, V. M. ; Adamo, C. ; Schlom, D. G. . “Self heating effects in  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$  suspended bridges: How to use them to reach theoretical limits for uncooled bolometers.” In: 21st International Workshop on Oxide Electronics (IWOE-21), 2014, Bolton Landing, New York. Anais do IWOE, 2014.
- Guillet, B. ; Liu, S. ; Aryan, A. ; Nascimento, V. M. ; Adamo, C. ; Schlom, D. G. ; Mechin, L. . “Uncooled  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$  suspended bolometers at optimal operating conditions.” In: E-MRS 2014 Fall meeting, 2014, Warsaw. Anais do E-MRS, 2014.
- Nascimento, V. M.; Guillet, B. ; Mechin, L. ; Freire, R. C. S. . “Caracterização de Bolômetros Micro Usinado em Silício.” In: 4º Encontro do Grupo de Sistemas Elétricos, 2014, Campina Grande. Anais do 4º EGSE., 2014.

## ANEXO – (B) INTERFACES LAB VIEW

Interfaces dos programas utilizados para aquisição de dados no traçador de características.



Interfaces dos programas utilizados para aquisição de dados no traçador de características para a resposta em frequência.



Interfaces dos programas utilizados para aquisição de dados no traçador de características para a medição da resistência em função da temperatura do controlador de temperatura Lakeshore.

## ANEXO – (C) TRAÇADOR DE CURVAS

Traçador de curvas: HP 4156B – Précision Semiconductor Parameter Analyser