HÉCTOR BÁEZ MEDINA

ESTUDO DE VIABILIDADE DE INTEGRAÇÃO DE MICRO-LÂMPADAS INCANDESCENTES COM FILTROS INTERFERENCIAIS

HÉCTOR BÁEZ MEDINA

ESTUDO DE VIABILIDADE DE INTEGRAÇÃO DE MICRO-LÂMPADAS INCANDESCENTES COM FILTROS INTERFERENCIAIS

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do titulo de Doutor em Engenharia.

Área de Concentração: Engenharia Elétrica.

Orientador: Professor Doutor Marco Isaías Alayo Chávez Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 27 de Maio de 2011.

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

FICHA CATALOGRÁFICA

Medina, Héctor Báez

Estudo de viabilidade de integração de micro-lâmpadas incandescentes com filtros interferenciais / H.B. Medina. -- ed. rev. -- São Paulo, 2011. 102 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos.

1. Óptica eletrônica 2. Microeletrônica 3. Sistemas microeletrônicos I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos II. t.



AGRADECIMENTOS

São muitas as pessoas que quero agradecer. Primeiramente ao meu orientador Prof. Dr. Marco Isaías Alayo Chávez pela orientação precisa e competente durante o Doutorado.

Aos técnicos da sala limpa, Cristina, João e Antonio Marco, pela ajuda na fabricação dos dispositivos e, em especial, à Teresa, Rita e Alexandre pela autentica orientação e contribuição científica incondicional. Todos eles foram verdadeiros amigos.

À Carolina Carvalho Previdi Nunes pela grande ajuda na caracterização dos dispositivos finais. Ademais, pelo apoio e carinho nas horas difíceis, com os quais me fortaleci para o termino deste trabalho. Ela sempre estará presente na minha vida.

Aos meus amigos Daniel Baraldi, Fernando Miranda e Gustavo Martins, pela grande amizade e por terem me recebido como um membro a mais em suas famílias.

Aos membros da banca julgadora, Profa. Dra. Márcia Carvalho de Abreu Fantini, Prof. Dr. Julio Roberto Bartoli, Prof. Dr. Roberto Koji Onmori e Prof. Dr. Ricardo Rodrigues de França Bento, pelas importantes contribuições ao texto final e pelos conselhos profissionais.

Aos meus amigos no México que a pesar da distância, sempre estiveram presentes.

We have designed our civilization based on science and technology and at the same time arranged things so that almost no one understands anything at all about science and technology. This is a clear prescription for disaster.
Carl Sagan (1934 – 1996)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	ESTADO DA ARTE E OBJETIVO	20
	2.1. Estado da Arte	20
	2.1.1. Integração de dispositivos ópticos	24
	2.1.2. Fontes luminosas	25
	2.1.3. Filtros interferenciais.	27
	2.2. Objetivo	28
3	DESCRIÇÃO DO DISPOSITIVO FABRICADO	30
	3.1. Materiais e filmes usados.	30
	3.1.1. Equipamentos Utilizados	31
	3.1.2. Caracterização dos filmes usados	38
	3.2. Micro Lâmpada Incandescente	44
	3.3. Filtro Interferencial Multicamadas	50
	3.4. Dispositivo.	51
4	SIMULAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS DISPOSITIVOS FABRICADOS	
	4.1. Resultados para Micro Lâmpadas	53
	4.1.1. Simulação da emissão em micro-lâmpadas	53
	4.1.2. Caracterização das micro-lâmpadas	55
	4.1.3. Comparação de resultados: Micro-lâmpadas incandescentes	56
	4.2. Resultados para Filtros Interferenciais.	65
	4.2.1. Simulação de filtros interferenciais	65
	4.2.2. Caracterização dos filtros interferenciais	71
	4.2.3. Comparação de resultados: Filtros interferenciais	72
	4.3. Resultados para o Dispositivo Integrado.	77
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	83
	5.1. Conclusões.	83
	5.2. Trabalhos Futuros	85
ΑI	NEXO 1	90
ΑI	NEXO 2	95
R	FFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 –	Perfil do índice de refração do núcleo em uma rede de Bragg e	
	resposta espectral [40]	28
Figura 3.1 – C	Configuração triodo do sistema PECVD utilizado	33
Figura 3.2 –	Diagrama esquemático do sistema de PECVD utilizado no LME	34
Figura 3.3 –	Diagrama esquemático do sistema de Sputtering utilizado	37
Figura 3.4 –	Esquema indicando os feixes incidente, refletido e transmitido	
	num sistema composto de um filme e um substrato	39
Figura 3.5 –	Gráfico dos índices de refração medidos em função dos fluxos	
	dos gases	40
Figura 3.6 –	Determinação por método óptico do stress residual em filmes	
	depositados por PECVD.	42
Figura 3.7 –	Gráfico do Stress residual medido em função dos fluxos dos	
	gases.	44
Figura 3.8 –	Processo de fabricação da micro-lâmpada incandescente	46
Figura 3.9 –	Detalhe do filamento da micro-lâmpada	47
Figura 3.10 –	Máscaras utilizadas na fabricação da micro-lâmpada, a)	
	definição de filamentos de pads, b) definição de cavidades no	
	silício e c) abertura dos contatos elétricos	48
Figura 3.11 –	Detalhe das máscaras utilizadas na fabricação da micro-	
	lâmpada	48
Figura 3.12 –	Fotografias ópticas das micro-lâmpadas, a) filamento	
	incandescente e b) cavidade no silício	49
Figura 3.13 –	Distribuição de um conjunto de micro-lâmpadas numa seção da	
	lâmina de silício	50
Figura 3.14 –	Etapas de fabricação do filtro interferencial multicamadas	51
Figura 3.15 –	Micro-lâmpada com filtro depositado sobre vidro	52
Figura 4.1 –	Arranjo para caracterização das micro-lâmpadas	56
Figura 4.2 –	Poder emissivo espectral simulado para um corpo negro ideal a	
	diferentes temperaturas.	57
Figura 4.3 –	Poder emissivo espectral simulado para um corpo negro a	
	diferentes temperaturas	58

Figura 4.4 –	Poder emissivo espectral simulado para a aproximação de corpo	
	cinza a diferentes temperaturas.	.58
Figura 4.5 –	Primeiro caso de intensidade de luz emitida para diferentes	
	valores de corrente aplicada.	.60
Figura 4.6 –	Segundo caso de intensidade de luz emitida para diferentes	
	valores de corrente aplicada.	.61
Figura 4.7 –	Terceiro caso de intensidade de luz emitida para diferentes	
	valores de corrente aplicada	.61
Figura 4.8 –	Diferentes níveis de emissão de luz de uma micro-lâmpada	
	incandescente	.62
Figura 4.9 –	Micro-lâmpada com filamento de cromo queimado	.63
Figura 4.10 –	Diferentes níveis de emissão de luz de uma micro-lâmpada	
	incandescente	.63
Figura 4.11 –	Diferentes níveis de luz emitida pela micro-lâmpada em	
	vermelho.	.64
Figura 4.12 –	Diferentes níveis de luz emitida pela micro-lâmpada em verde	.64
Figura 4.13 –	Máxima intensidade de luz emitida pela micro-lâmpada em azul	.65
Figura 4.14 –	Reflexão e transmissão de uma onda plana na interface entre	
	dois meios semi-infinitos homogêneos e isotrópicos	.65
Figura 4.15 –	Reflexão e transmissão em uma estrutura estratificada com	
	múltiplas camadas	.67
Figura 4.16 –	Comparação da transmitância simulada e medida para um filtro	
	com 9 camadas	.72
Figura 4.17 –	Comparação da transmitância simulada e medida para um filtro	
	com 11 camadas	.73
Figura 4.18 –	Comparação da transmitância simulada e medida para um filtro	
	com 13 camadas	.74
Figura 4.19 –	Comparação da transmitância simulada para filtros com 13	
	camadas com diferentes espessuras das camadas constituintes	.75
Figura 4.20 –	Comparação da transmitância simulada para filtros com 13	
	camadas com diferentes combinações de índices de refração	.76
Figura 4.21 –	Seção da lâmina com dois conjuntos de micro-lâmpadas com	
	filtro integrado.	.77

Figura 4.22 –	Comparação entre a transmitância medida do filtro e a do	
	dispositivo integrado utilizando um filtro com 9 camadas	78
Figura 4.23 –	Sensitividade relativa do detector usado para a caracterização	
	do dispositivo integrado.	79
Figura 4.24 –	Comparação entre a transmitância medida do filtro e a do	
	dispositivo integrado utilizando um filtro com 11 camadas	80
Figura 4.25 –	Comparação entre a transmitância medida do filtro e a do	
	dispositivo integrado utilizando um filtro com 13 camadas	81
Figura 4.26 –	Espectros de transmitância simulada para luz detectada em	
	diferentes ângulos	82
Figura 5.1 –	Conjunto de máscaras de micro-lâmpadas com filamento de	
	20x20 μm.	86
Figura 5.2 –	Conjunto de máscaras de micro-lâmpadas com filamento de	
	20x40 μm.	86
Figura 5.3 –	Conjunto de máscaras de micro-lâmpadas com filamento de	
	20x80 μm.	87
Figura 5.4 –	Micro-lâmpadas triplas com filamentos de três diferentes	
	tamanhos: a) 20x20 μm, b) 20x40 μm, e c) 20x80 μm	88
Figura 5.5 –	Cavidade no silício para uma micro-lâmpada tripla	88
Figura 5.6 –	Três micro-lâmpadas em paralelo emitindo luz	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Classificação dos equipamentos de deposição	32
Tabela 2 –	Valores de índices de refração dos filmes estudados	41
Tabela 3 –	Valores de <i>stress</i> residual dos filmes usados	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BOE Buffered Oxide Etch.

CCD Charge-Coupled Device.

CVD Chemical Vapor Deposition.

DPECVD Direct Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition.

FWHM Full Width at Half Maximum.

GNMD Grupo de Novos Materiais e Dispositivos.

KOH Hidróxido de Potássio.

LED Light-Emitting Diode.

LME Laboratório de Microeletrônica.

MEMS Microelectromechanical systems.

MFC Mass Flow Controller.

MOCVD Metalorganic Chemical Vapor Deposition.

MOEMS Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems.

MOS Estrutura Metal Óxido Semicondutor.

PECVD Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition.

RF Radiofreqüência.

RPECVD Remote Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition.

sccm Standard cubic centimeters per minute.

SOA Semiconductor Optical Amplifier.

SOI Silicon on Insulator.

USB Universal Serial Bus.

UV Ultravioleta.

WDM Wavelength Division Multiplexing.

WDDM Wavelength Division Demultiplexing.

RESUMO

No presente trabalho foi realizado um estudo da viabilidade de integrar dois dispositivos ópticos: micro-lâmpadas incandescentes e filtros interferenciais com o objetivo de construir um dispositivo único com características próprias. A fabricação destes dispositivos ópticos foi feita utilizando materiais dielétricos, obtidos por deposição química a vapor assistida por plasma (PECVD), e usando técnicas convencionais de microeletrônica desenvolvidas neste laboratório. São apresentadas simulações numéricas, processo de fabricação e caracterização de cada um dos dois dispositivos ópticos assim como a caracterização do dispositivo óptico integrado obtido. As micro-lâmpadas incandescentes foram fabricadas a partir de um filamento de cromo, isolado do meio ambiente por duas camadas dielétricas de oxinitreto de silício, sendo alimentado eletricamente com uma tensão contínua com a finalidade de aumentar a temperatura do filamento até atingir a incandescência. Com a finalidade de reduzir a dissipação térmica nessa região, o filamento foi projetado e construído para ficar suspenso através de uma corrosão anisotrópica parcial do substrato de silício. Por outro lado, os filtros interferenciais foram fabricados sobre substratos de vidro a partir de uma série de camadas depositadas por PECVD alternadas de Si₃N₄ e SiO₂, com espessuras de 240 e 340 nm e índices de refração de 1.91 e 1.46 respectivamente, com a finalidade de produzir picos de atenuação na transmitância da luz na região do visível do espectro eletromagnético. Foram construídos filtros com 9, 11 e 13 camadas. Os resultados deste trabalho mostraram que é possível realizar a integração eficiente destes dois dispositivos ópticos para produzir uma fonte luminosa que permite a filtragem de uma determinada faixa de comprimentos de onda. Foi demonstrado também que tanto a largura da faixa, como a região de filtragem, podem ser controladas através do índice de refração, espessuras e número de camadas constituintes do filtro interferencial. Os resultados das simulações numéricas mostraram-se bastante coerentes com os resultados experimentais obtidos.

Palavras chave: Micro-lâmpadas, Filtros Interferenciais, PECVD, Oxinitreto de silício, Óptica integrada, Integração monolítica.

ABSTRACT

In the present work was realized a study of the viability of integrating two optical devices: incandescent micro-lamps and interferometric filters with the intention of obtaining a single device with specific characteristics. The fabrication of these optical devices was made using dielectric materials, obtained by plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD), and using conventional microelectronics techniques developed at this laboratory. Numeric simulations, fabrication process and characterization of each one of the two optical devices as well as the characterization of the obtained integrated optical device are presented. The incandescent microlamps were fabricated from a chromium filament, isolated from the environment by two dielectric silicon oxynitride layers, which is powered electrically with a continuous voltage with the purpose of increasing the temperature of the filament to reach the incandescence. With the purpose of reducing the thermal dissipation in that area, the filament was designed and fabricated to be suspended through a partial anisotropic etch of the silicon substrate. On the other hand, the interferometric filters were fabricated on glass substrates starting from a series of alternate Si₃N₄ and SiO₂ layers deposited by PECVD, with thickness of 240 and 340 nm and refraction indexes of 1.91 and 1.46 respectively, with the purpose of producing light transmittance attenuation peaks in the visible region of the electromagnetic spectrum. Filters were fabricated with 9, 11 and 13 layers. The results of this work showed that it is possible to develop the efficient integration of these two optical devices to produce a luminous source that it allows the filtering of a certain range of wavelengths. It was also demonstrated that, the bandwidth as well as the filtering area, can be controlled through the refraction index, thickness and number of constituent layers of the interferometric filter. The results of the numeric simulations showed to be guite coherent with the obtained experimental results.

Keywords: Micro-lamps, Interferometric filters, PECVD, Silicon oxynitride, Integrated optics, Monolithic integration.

1 INTRODUÇÃO

O campo da óptica usualmente descreve o comportamento da luz visível, infravermelha e ultravioleta. Porém, já que a luz é uma onda eletromagnética, ela apresenta um comportamento similar aos raios X, micro-ondas, ondas de rádio, dentre outras formas de radiação eletromagnética. Por causa disto, a óptica pode ser considerada como uma subárea do eletromagnetismo. Mas, por outro lado, alguns fenômenos ópticos dependem da natureza quântica da luz, o qual relaciona a óptica com a mecânica quântica. É por esta dualidade, que alguns fenômenos ópticos podem ser melhor descritos com a teoria eletromagnética como, por exemplo, a interferência de luz ou o guiamento, enquanto que outros fenômenos podem ser descritos pela teoria quântica, como a emissão e absorção de luz [1].

Os aspectos da ciência pura no campo da óptica freqüentemente são chamados de ciência óptica ou física óptica enquanto que as ciências da óptica aplicada são freqüentemente chamadas de engenharia óptica. As inovações mais recentes em engenharia óptica são freqüentemente categorizadas como *fotônica* ou *optoeletrônica* [2], mas os limites entre estas áreas e a *óptica* propriamente dita são incertos e os termos são usados invariavelmente em diversas áreas sem nenhuma diferenciação, embora o termo *optoeletrônica* tenha uma conotação mais sólida em dispositivos que incluam funções elétricas e ópticas [2].

Depois do começo da *era da microeletrônica*, a miniaturização dos circuitos tem evoluído a passos longos, apoiada pela evolução da *Tecnologia Planar*, e também pelo desenvolvimento de diversos tipos de tecnologias, que vão desde o conforto e entretenimento residencial até a exploração espacial ^[3]. O principal componente desta revolução é o transistor MOS, que tem evoluído em duas formas: primeiro, tem sido construído em dimensões cada vez menores, e segundo, o número de transistores interligados em um único circuito tem aumentado de algumas poucas dezenas a centenas de milhões. Além disso, à medida que as dimensões dos transistores continuarem diminuindo, os limites fundamentais impostos pela mecânica quântica e as propriedades dos materiais poderão ser atingidos ^[3]. Tudo

isto tem levado inevitavelmente ao desenvolvimento da tecnologia nanoeletrônica [4,5], onde o tamanho dos dispositivos está se aproximando ao tamanho de aglomerados atômicos, e onde as propriedades do material diferem muito daquelas observadas em materiais volumétricos (*bulk*). Por outro lado, esta tendência determina restrições na redução adicional de dispositivos microeletrônicos, pois certas propriedades nessas escalas nanométricas serão prejudicadas e até podem impedir o correto funcionamento dos dispositivos microeletrônicos ^[6]. Por esse motivo, outras alternativas tecnológicas que cumpram com as mesmas funcionalidades da microeletrônica terão que ser pesquisadas ^[7,8]. Entre elas podese mencionar o desenvolvimento dos circuitos ópticos integrados ^[10].

Na forma mais geral, um circuito óptico integrado é desenhado para realizar uma determinada função através da integração de três etapas; uma fonte de luz, um sistema de guiamento para a interconexão de componentes funcionais e, finalmente, detectores, todos em um único substrato. Realizando esta integração, pode-se esperar um sistema óptico mais compacto, estável e funcional. Os circuitos ópticos integrados são divididos em dois tipos: *circuito óptico integrado monolítico*, quando as três etapas básicas mencionadas são feitas com os mesmo materiais e utilizando a mesma tecnologia e estão integrados em um único substrato; *circuito óptico integrado híbrido* quando cada uma das três etapas é feita com os materiais e tecnologias apropriadas para cada caso e, posteriormente, são montados em um único substrato [9].

Os materiais mais usados na fabricação de dispositivos ópticos são os compostos dos elementos dos grupos III e V da tabela periódica que se caracterizam como materiais de *gap direto*¹. Porém, uma situação presente nos sistemas ópticos é que o controle lógico e/ou analógico destes dispositivos continua ainda sendo realizado através de microeletrônica convencional usando a tecnologia de circuitos integrados de silício ^[10]. O material proposto para se realizar a união dessas duas tecnologias, óptica e eletrônica, usando integração monolítica é naturalmente o silício. Ainda mais, o silício é um substrato atraente no campo da óptica devido ao fato de ter boas

¹ Quando, no diagrama de bandas, o mínimo da banda de condução corresponde ao mesmo valor de vetor de onda do estado do máximo da banda de valência.

propriedades mecânicas e térmicas, o que facilitaria a integração de diversos dispositivos ópticos e microeletrônicos [11].

Da mesma forma que a redução do tamanho dos componentes microeletrônicos a base de silício tem reduzido o custo por megabyte, a integração monolítica óptica usando a tecnologia de silício reduziria os custos por bit transmitido, e ao mesmo tempo aumentaria a funcionalidade [12]. A automação, tamanho da lâmina, rendimento, volume e desenho para a fabricação dos componentes ópticos têm sido as peças chave para a indústria óptica e ainda mais, todos os conhecimentos adquiridos durante os primeiros anos de fabricação dos dispositivos microeletrônicos de silício estão sendo exploradas na área da óptica com o benefício adicional de poderem-se escolher técnicas comprovadas е bem estabelecidas Adicionalmente, as semelhanças entre as áreas de silício e ópticas são tais que muitos dos equipamentos de processamento de semicondutores usados na área de silício poderiam ser usados em óptica [12].

Assim, a complexidade esperada da seguinte geração de conexões ópticas de comunicação, arquitetura de redes e sistemas comutados está conduzindo inevitavelmente à integração monolítica de dispositivos ópticos. Isto por que a maioria dos dispositivos ópticos requer guias de onda confinadas hermeticamente para se ter um desempenho otimizado, o que resulta em difíceis tolerâncias de alinhamento submicrométrico. Assim, substituindo estas conexões alinhadas individualmente com guias de onda produzidas fotolitograficamente, seria possível reduzir os custos e tamanho e aumentar a robustez de encapsulamento [13,14,15].

Como um exemplo de aplicação dos dispositivos optoeletrônicos pode-se mencionar o uso deles na comunicação a longas distâncias tanto para alta velocidade como para banda larga. As telecomunicações com integração monolítica eletrônica e óptica incluirão guias de onda que podem ser fabricadas com materiais eletro-ópticos de forma a proporcionar várias funções de telecomunicação diferentes, tais como subdivisão, multiplexação, demultiplexação, comutação, modulação e amplificação e, todas estas funções teriam controle eletrônico acompanhado de um sistema integrado com os dispositivos ópticos [16].

A optoeletrônica integrada em silício tem muitas vantagens, como por exemplo, o controle dos sistemas eletrônicos baseados em silício, pois a fabricação de

dispositivos ópticos em silício é o método mais eficiente para a integração de um sistema eletro-óptico [17]. Com o silício é possível fabricar diferentes estruturas e geometrias usando a tecnologia planar, facilitando assim a obtenção de dispositivos ópticos com este tipo de substrato. Além disso, o silício é o material de substrato mais usado hoje em dia, devido à sua abundância, e que é particularmente preparado para a integração em grande escala e produção em massa com uma excelente uniformidade e reprodutibilidade.

Finalmente, o desenvolvimento da tecnologia de fabricação de estruturas em escala nanométrica terá um grande impacto em micro-óptica, pois os sistemas ópticos no passado têm sido volumétricos e com componentes ópticos caros, tais como espelhos ou divisores de feixe de luz. Estes componentes requerem alinhamento preciso na ordem de micrômetros [18]. Mediante o uso da tecnologia de microfabricação, é possível construir MOEMS (*Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems*) e assim, pode-se reduzir o tamanho dos sistemas ópticos atuais. Portanto, a optoeletrônica baseada em silício mostra-se de baixo custo, altamente robusta e multifuncional, o que leva a um futuro brilhante para a produção em massa de MOEMS e optoeletrônica integrada [16].

Neste trabalho, é apresentado um estudo de viabilidade de integração de microlâmpadas incandescentes com filtros interferenciais. A presente tese divide-se em cinco capítulos, sendo o primeiro esta introdução.

No capitulo 2 é apresentada uma revisão do estado da arte de dispositivos ópticos em geral assim como da sua integração em dispositivos mais complexos. Da mesma forma, é apresentada uma revisão dos temas referentes a fontes luminosas e filtros interferenciais. Finalmente, neste capitulo, é apresentado o objetivo deste trabalho.

No capitulo 3 é apresentada uma descrição completa dos dispositivos fabricados, considerando materiais utilizados, técnicas de fabricação e equipamentos. Também, são apresentadas as técnicas de caracterização dos materiais utilizados.

O capitulo 4 consiste de uma revisão dos resultados obtidos das simulações numéricas e das caracterizações dos dispositivos fabricados. Estes resultados são apresentados em três partes, sendo a primeira referente as micro-lâmpadas, a segunda aos filtros interferenciais e a terceira referente ao dispositivo que integra os

dois tipos de dispositivos. São analisados e comparados os resultados teóricos com os experimentais.

Finalmente, no capitulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho assim como um trabalho em andamento e algumas propostas de trabalhos futuros.

2 ESTADO DA ARTE E OBJETIVO

2.1. Estado da Arte

Um circuito óptico integrado do tipo monolítico é o ideal, mas a sua implementação é muito difícil porque os materiais comumente usados na fabricação de cada etapa são diferentes [9]. Por outro lado, um circuito óptico integrado do tipo híbrido é relativamente fácil de fabricar, pois podem ser utilizados diversos materiais e técnicas de processamento apropriadas para cada componente. Porém, na integração híbrida existe um problema com a montagem dos três componentes básicos devido a problemas de alinhamento entre os componentes [9]. Um circuito óptico monolítico integrado completamente funcional ainda não existe, mas o termo é aceito comumente [9]. É assumido incorretamente que os circuitos ópticos integrados são dispositivos que contém circuitos integrados com as linhas de interconexão elétrica substituídas por linhas ópticas. Também, sendo que a velocidade de propagação de um sinal óptico é muito maior que a de um sinal elétrico, é incorreto concluir que o processamento do sinal é muito mais rápido em um circuito óptico que em circuitos eletrônicos já que, neste caso, a transmissão de dados não depende da velocidade da luz e sim da velocidade de processamento do circuito eletrônico. Assim, esta velocidade é só um pouco maior para os circuitos ópticos e, portanto, o ganho em rapidez é pequeno simplesmente substituindo linhas elétricas por linhas ópticas ^[9].

A história dos circuitos ópticos integrados pode ser dividida em três gerações. A primeira geração se ocupa da óptica convencional, na qual os sistemas ópticos são formados com arranjos de componentes ópticos do tipo *bulk* em grandes bancadas ópticas. O tamanho do sistema é da ordem de 1m², e o diâmetro do feixe óptico pode ser tão grande como 1 cm. A segunda geração é chamada de *micro-óptica*, onde os sistemas são montados com o tipo *bulk*, exceto os componentes micro-ópticos tais como diodos emissores de luz (LED), diodos laser, fibras e lentes. Estes componentes discretos têm boas características; porém, acontecem problemas na montagem e alinhamento óptico dos componentes porque seu tamanho é da ordem de 1mm. Não existem meios de fixar perfeitamente os componentes depois de serem alinhados tornando difícil um alinhamento estável [9].

Os circuitos ópticos integrados são dispositivos ópticos da terceira geração, formados principalmente por guias de onda monomodo cujas larguras estão na ordem de micrômetros na qual um feixe de luz se propaga. Isto é, os dispositivos ópticos da primeira e segunda geração podem ser tratados por óptica geométrica, mas os dispositivos da terceira geração têm que ser tratados com teoria eletromagnética. Da mesma forma, um circuito óptico integrado não tem problemas de montagem, já que vários elementos discretos são integrados em um único substrato, não sendo necessários ajustes dos eixos ópticos ou posicionamento preciso posterior, sendo que o alinhamento estável é mantido. O dispositivo pode, portanto, resistir a vibrações e mudanças de temperatura. Este é o maior mérito dos circuitos ópticos integrados monoliticamente [9].

Trabalhar com dispositivos ópticos resulta em inúmeras vantagens tais como: insensibilidade ao ruído eletromagnético, medições sem contato e a vantagem da integração, que por sua vez, envolve a miniaturização e melhor confiabilidade [19]. Outra vantagem são os custos, estes podem ser reduzidos significativamente com o uso de uma quantidade menor de conexões ópticas entre os componentes, que são difíceis e caras. Outras características importantes são a melhoria na integridade do sinal, em comparação com os métodos de transporte elétrico tradicionais [11] assim como a integração de vários elementos em um único substrato fino em uma área pequena. O circuito óptico obtido com esta técnica torna-se bastante compacto e leve e com isto é possível a produção em massa, acarretando como conseqüência a diminuição de preços em um futuro próximo [9]. Além disso, um material compatível com a tecnologia óptica e com a microeletrônica seria benéfico para ambas as áreas. Por exemplo, a interconexão óptica de dispositivos microeletrônicos poderia resolver problemas, tais como a reflexão de onda, relação de impedâncias, etc., que limitam as interconexões elétricas [10].

Um material com o qual se pode conseguir a compatibilidade dessas duas tecnologias é naturalmente o silício [11], pois a tecnologia microeletrônica já está bem desenvolvida com este material. Porém, apesar do sucesso como material eletrônico, o silício tem recebido pouca atenção como material óptico por diversas razões, como por exemplo, não tem um mecanismo inerente para a emissão de luz,

pois é um material de *gap indireto*², o que leva à impossibilidade de fabricar dispositivos emissores de luz. Porém, tem havido mudanças significativas na optoeletrônica baseada em silício com o desenvolvimento de alguns dispositivos optoeletrônicos usando o silício ^[10]. Entre os exemplos de desenvolvimento para conseguir uma fonte de luz de silício pode-se citar: dopagem com érbio para superar o gap indireto do silício ^[20], fabricar nanoaglomerados de silício que aumentam os efeitos quânticos ^[21,22] e amplificação óptica através do efeito Raman ^[23], o que poderia resultar não só em um amplificador óptico, mas também, eventualmente em uma fonte de luz ^[10] ou utilizar silício poroso como fontes eletroluminescentes ^[24,25,26]

Assim, o fato de trabalhar com substratos de silício, proporciona características adicionais que são convenientes para a integração, como ter uma tecnologia avançada e de baixo custo [3]. Isto significa que, considerando a grande infraestrutura para a fabricação de dispositivos microeletrônicos de silício, existe um grande conhecimento adquirido que pode ser usado na fabricação de dispositivos ópticos. Deste modo, se em um futuro próximo existisse a necessidade de fabricar dispositivos ópticos a base de silício com dimensões críticas de centenas de nanômetros, a infraestrutura para as próximas gerações de circuitos ópticos já existe, pois essa tecnologia já foi desenvolvida para os circuitos microeletrônicos em silício [10]. Além disso, utilizar o silício como substrato de integração ajuda a dissipar o calor pela alta condutividade térmica que ele possui (156 W/m·K [27]). Isto é, o silício proporciona uma diminuição dos requisitos de energia de operação, e assim, esta melhora na confiabilidade do dispositivo, devido às reduzidas temperaturas de operação, representaria a possibilidade de reduzir a necessidade de outros componentes para dissipação de calor [11].

Os avanços para a integração óptica e microeletrônica na tecnologia do silício já estão sendo feitos e várias pesquisas estão sendo realizadas procurando principalmente uma compatibilidade com os processos utilizados em cada caso. Também, existem pesquisas em guias de onda baseadas em compostos de silício, já que estas ligas apresentam um índice de refração apropriado, elas são

_

² Quando, no diagrama de bandas, o máximo da banda de valência não coincide no mesmo ponto do valor do vetor de onda do estado do mínimo da banda de condução.

transparentes nos comprimentos de onda utilizados na área de sensores e telecomunicações e, possuem espessuras controláveis da ordem de micrômetros. Com isso, é clara a necessidade e a importância do estudo e desenvolvimento de dispositivos baseados nestes compostos.

Vários resultados [28,29,30,31,32,33] mostram que os guias de onda de oxinitreto de silício (SiO_xN_y) permitem uma baixa atenuação da luz e um índice de refração ajustável, o que é muito conveniente no caso de acoplamento com fibras ópticas comerciais, pois permite um acoplamento óptico apropriado. Diversas pesquisas têm sido realizadas em busca de melhorar as características dos filmes que deverão ser usados na fabricação dos dispositivos ópticos integrados [34,35]. Especificamente, têm-se desenvolvido trabalhos dirigidos à fabricação e caracterização de filmes de óxido de silício (SiO₂) e SiO_xN_y depositados por PECVD (*Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition*) buscando aplicações em microeletrônica, óptica integrada e sistemas micro-eletro-mecânicos (MEMS). Nestes trabalhos observou-se que é possível controlar as propriedades mecânicas, físicas e ópticas dos materiais através da variação dos diferentes parâmetros de deposição.

Esforços estão sendo realizados para conseguir uma integração completa de fontes de luz com sistemas de guiamento e detectores em um único substrato de silício [36], mas as pesquisas sobre integração de fontes de luz ainda são elementares, principalmente porque o silício não é um material de gap direto o que obriga a fabricação de estruturas complexas para conseguir desenvolver um dispositivo emissor de luz eficiente. Por outro lado, resultados mostram consideravelmente mais fácil obter emissão térmica baseada em lâmpadas incandescentes feitas de silício policristalino, tungstênio ou outros materiais condutores. O intervalo de comprimentos de onda em que estas fontes luminosas emitem é maior, abrangendo desde o visível até o infravermelho, o que faz dos dispositivos emissores de luz incandescentes apropriados como fontes de luz em aplicações de óptica integrada. Estas micro-lâmpadas incandescentes podem ser usadas em diversas aplicações como, por exemplo, espectrofotometria, sensores de pressão, displays, entre outros [37,38,39,40].

2.1.1. Integração de dispositivos ópticos.

Têm-se reportado alguns avanços na fabricação de dispositivos ópticos integrados do tipo monolítico, tais como um dispositivo transmissor/receptor integrado com amplificadores ópticos semicondutores (SOA) usando guias de onda [41]. Entre as características que os autores mencionam pode-se destacar que estes dispositivos apresentam um alto desempenho, e que têm integrado um fotodiodo detector fabricado com uma estrutura de um guia de onda tipo *ridge*, resultando assim na obtenção de menor corrente no escuro e menor capacitância parasita [41]. Este dispositivo é fabricado usando a técnica de deposição química a vapor de compostos metalorgânicos (MOCVD) e compostos III e V da tabela periódica. A obtenção de dispositivos ópticos mais complexos cria a possibilidade para o desenvolvimento de uma nova lógica óptica com diversas aplicações como, por exemplo, multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM – *Wavelength Division Multiplex*) [42], redes ópticas passivas [42] e filtros interferenciais [43].

Como componentes essenciais para a seleção e monitoramento de comprimentos de onda, assim como para uma reconfiguração rápida das redes ópticas, têm se desenvolvido filtros ópticos ajustáveis baseados nos efeitos eletro-óptico [44], acústico-óptico [45], termo-óptico [46,47] ou MEMS [48]. Pensando particularmente nesse tipo de dispositivos, o silício é um forte candidato como material estrutural para a fabricação de filtros ópticos sintonizáveis devido ao alto coeficiente termo-óptico que ele apresenta [49,50]. Inclusive, a tecnologia de ajuste térmico baseada no efeito termo-óptico já é comumente usada em sistemas de filtragem baseados em silício [46,51,52].

Diferentes configurações para a fabricação destes filtros têm sido propostas. Li, et al. [53] apresentam um método para fabricar um filtro ajustável termicamente com um intervalo de ajuste de 26 nm. Nessa estrutura, um espelho de alta refletividade é depositado no fundo de uma cavidade formada por um ataque anisotrópico desde a parte traseira da lâmina onde uma camada de SiO₂ enterrada no substrato SOI serve como camada *etch stop*. Devido à remoção do silício na cavidade, a potência do aquecedor de metal não é dissipada para o substrato, diminuindo assim o consumo de potência fornecido ao dispositivo. Desta forma, o filtro tem um intervalo de ajuste maior.

Em um trabalho realizado por Martins ^[54], foram feitas as simulações numéricas, fabricação e caracterização de filtros interferenciais usando filmes de dielétricos depositados sobre substratos de silício e vidro tipo *Corning* (7059), utilizando a técnica de PECVD. Os dispositivos foram construídos usando processos convencionais de microeletrônica e consistiram em camadas periódicas com espessura e índices de refração apropriados para produzir picos da atenuação na transmitância de luz na região do visível. As simulações numéricas foram realizadas baseando-se nas características ópticas dos filmes dielétricos e, para a caracterização dos filtros interferenciais, o feixe monocromático de um laser de He-Ne foi direcionado aos filtros e a luz resultante na saída foi conduzida para um detector.

Um filtro depositado sobre vidro (filtro vertical) e um filtro depositado sobre silício com cavidades (filtro suspenso) foram montados sobre uma estrutura que permite uma variação térmica e angular de modo a ser possível medir suas respostas em função da variação destes dois parâmetros. Também, um filtro depositado sobre silício (filtro horizontal) foi montado sobre um dispositivo térmico, a fim de medir sua resposta à variação de temperatura. Quando os filtros foram submetidos a uma mudança na temperatura, o efeito termo-óptico próprio dos materiais utilizados origina uma variação do índice de refração do material, o que produziu um deslocamento nos picos da atenuação, que puderam ser previstos por simulações numéricas [54]. Esta característica permitiu que estes dispositivos fossem usados como sensores termo-ópticos. Por outro lado, quando o filtro vertical e o filtro suspenso são submetidos a variações angulares entre a normal ao plano do filtro e o feixe de laser, é produzida uma variação na potência da luz de saída, o que permite que estes dispositivos sejam usados como sensores angulares.

2.1.2. Fontes luminosas.

Além da inclusão de dispositivos eletrônicos para o controle de dispositivos ópticos, integrados em uma única tecnologia, hoje em dia também é necessária a integração com uma fonte luminosa, com a finalidade de obter um circuito óptico integrado

completo. As fontes luminosas são classificadas em dois critérios ^[55]. O primeiro é de acordo com sua natureza, tendo duas categorias, as fontes naturais (o sol) e as fontes artificiais (uma lanterna ou uma vela). O segundo critério é de acordo com a forma em que produzem a emissão, tendo aqui duas categorias básicas: as incandescentes (o filamento de uma lâmpada) ou luminescentes (uma luminária de tubo).

Na eletrônica, o silício é um material de *gap* indireto, o que dificulta a fabricação de dispositivos emissores de luz. Por outro lado, as fontes incandescentes apresentam emissão térmica, gerada pelo aquecimento de um filamento no qual flui uma corrente elétrica, já que quando um corpo adquire uma determinada temperatura, os átomos sofrem colisões que os levam a estados excitados, com a subseqüente perda da excitação e produção de radiação em um espectro contínuo ^[56]. Existem diferentes materiais, como o silício policristalino ^[57] ou tungstênio, que podem ser usados para fabricar lâmpadas incandescentes, obtendo uma emissão em uma larga faixa do espectro, desde o visível ao infravermelho, facilitando a sua integração com dispositivos ópticos.

Em um trabalho anterior, Rehder, et al. [58] demonstraram a viabilidade de integração de guias de onda com uma fonte de luz simples, sendo esta luz emitida desde um micro-resistor incandescente de cromo embutido em uma região auto-sustentada de SiO_xN_v. Para a obtenção deste dispositivo foi feita uma corrosão anisotrópica do substrato de silício usando uma solução em KOH com a finalidade de separar o micro-resistor do substrato, o que reduz a dissipação térmica nessa região, o que permite ao micro-resistor atingir temperaturas de incandescência. Depois de um processo de micro-recozimento na estrutura da micro-lâmpada, é possível acoplar a luz à guias de onda fabricadas sobre o mesmo substrato de silício e controlar a potência de saída ajustando a corrente que flui através da micro-lâmpada. Neste trabalho, o filamento é coberto por um filme de SiO_xN_y proporcionando a mesma funcionalidade que um dispositivo de cavidade isolada. Esse recobrimento é necessário, pois o filamento resistivo aquecido pela corrente quando exposto ao ambiente (oxigênio, misturas de gases e partículas contaminantes) pode oxidar-se e ter as suas características de emissão modificadas, o que compromete o tempo de vida da micro-lâmpada [58].

2.1.3. Filtros interferenciais.

As redes de comunicação ópticas permitem uma maior interconexão para o tráfego de informação em diferentes pontos no mundo e, ao mesmo tempo, demandam uma grande largura de banda como resultado de novos serviços que estimulam muitas inovações na área da óptica [43]. A necessidade de colocar canais de comunicação no domínio da óptica tem posicionado a transmissão com WDM como um dos métodos mais usados para aumentar a capacidade e tem permitido o desenvolvimento de métodos ópticos para implementação de sistemas de redes. Acompanhando a evolução das redes ópticas em comunicações, com ênfase em transmissão com WDM, existe a proliferação de novos dispositivos ópticos, muitos dos quais são baseados em redes de Bragg [43].

Um refletor Bragg consiste em uma série de camadas de materiais alternados com índice de refração variável, ou em uma variação periódica de alguma característica, como a espessura, resultando numa variação periódica do índice de refração efetivo do guia. Cada interface das camadas origina uma reflexão parcial de uma onda e as muitas reflexões se combinam através de interferência construtiva, atuando as camadas como um refletor de alta qualidade. O intervalo de comprimentos de onda que é refletido é chamado rejeita-faixa fotônico [59], assim, a luz com estes comprimentos de onda é proibida de se propagar na estrutura.

Com o mesmo princípio do refletor Bragg, uma rede de Bragg pode ser construída sobre um segmento curto de um guia de onda óptica para refletir alguns comprimentos de onda da luz em particular e transmitir os outros. Isto se consegue fazendo-se uma variação periódica do índice de refração do núcleo, conforme mostrado na Figura 2.1, o que gera um espelho dielétrico de um comprimento de onda específico [59]. Portanto, uma rede de Bragg pode ser usada como um filtro óptico para bloquear certos comprimentos de onda ou como um refletor de comprimento de onda específico [60].

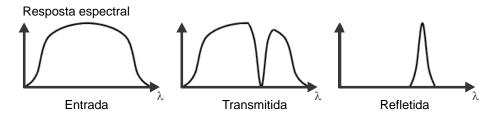


Figura 2.1 – Perfil do índice de refração do núcleo em uma rede de Bragg e resposta espectral [43].

As redes de Bragg têm se desenvolvido como componentes importantes numa variedade de aplicações ópticas, devido às propriedades únicas de filtragem e versatilidade. Dispositivos baseados em redes de Bragg feitos de fibras ópticas são reconhecidos pelo seu uso em lasers de comprimento de onda estabilizada, lasers de fibras, amplificadores Raman, conversores de comprimento de onda, redes ópticas passivas, multiplexadores e demultiplexadores por divisão de comprimento de onda, compensadores de dispersão, equalizadores de ganho [43], entre outros.

Os filtros passa-faixa são considerados como um dos dispositivos mais fundamentais em administração de redes ópticas de múltiplos comprimentos de onda e na maioria dos sistemas de comunicação onde é necessária a demultiplexação de comprimentos de onda (WDDM) [43]. Existem varias técnicas para fabricar estes filtros passa-faixa utilizando redes de Bragg. Uma aproximação é baseada no princípio de interferometria, onde as redes são incorporadas em configurações Saganac, Michelson ou Mach-Zehnder [43].

2.2. Objetivo

O objetivo deste trabalho é integrar dois dispositivos, desenvolvidos anteriormente no grupo, com o intuito de obter um dispositivo único com características próprias. Estes dois dispositivos são: micro-lâmpadas incandescentes e filtros interferenciais. Para conseguir isto, foi preciso simular numericamente, fabricar e caracterizar cada um destes dispositivos de forma separada assim como caracterizar o dispositivo integrado obtido.

A fabricação destes dispositivos é feita utilizando os materiais e técnicas de fabricação desenvolvidos no Laboratório de Microeletrônica (LME).

3 DESCRIÇÃO DO DISPOSITIVO FABRICADO

Em trabalhos anteriores foi demonstrada a viabilidade da fabricação de microlâmpadas incandescentes ^[58] e filtros interferenciais ^[54] separadamente. Neste trabalho propõe-se a integração destes dois dispositivos, com o objetivo de se obter um dispositivo com características próprias.

Neste capitulo serão apresentadas as etapas de fabricação das micro-lâmpadas, filtros interferenciais e do dispositivo que os integra. Também é feita uma descrição dos materiais, técnicas e equipamentos utilizados na fabricação e caracterização dos materiais e dispositivos.

3.1. Materiais e filmes usados.

No Grupo de Novos Materiais e Dispositivos (GNMD), diversas pesquisas têm sido realizadas buscando melhorar as características dos dispositivos ópticos fabricados, através da correlação do desempenho óptico com as propriedades estruturais e também com os parâmetros de processo dos filmes de SiO_xN_y depositados por PECVD [28,29,30,31,32,33]. Têm-se desenvolvido trabalhos dirigidos à fabricação e caracterização de filmes tanto de SiO₂ como de SiO_xN_y com diferentes composições químicas buscando aplicações em microeletrônica, óptica integrada e MEMS. Nestes trabalhos observou-se que é possível controlar as propriedades mecânicas, físicas e ópticas destes materiais através da variação dos diferentes parâmetros de deposição como, por exemplo, a potência do gerador de radiofreqüência (RF), os fluxos dos gases reativos, assim como a pressão e temperatura de processo [28,29,30,31,32,33]

Os filmes estudados no GNMD e utilizados neste trabalho foram depositados pela técnica PECVD em baixa temperatura (320°C), a uma potência de 200W, usando óxido nitroso (N₂O), nitrogênio (N₂) e silana (SiH₄) como gases reativos, obtendo-se,

assim, filmes com composições que vão desde SiO_2 até nitreto de silício (Si_3N_4) . É importante mencionar que, para se obter as diferentes composições nos filmes, os fluxos de N_2O e de N_2 foram variados, mantendo-se sempre o fluxo total de N_2O+N_2 em 75 sccm enquanto que o fluxo de SiH_4 foi mantido constante em 30 sccm.

Assim, quando se utiliza 75 sccm de N_2O (em ausência de N_2), forma-se um filme de SiO_2 , e quando se utiliza 75 sccm de N_2 (em ausência de N_2O), forma-se um filme de Si_3N_4 . Com as misturas intermediárias apresentam-se diferentes composições de SiO_xN_y . Para estes casos, o fluxo dos gases foi variado em intervalos de 15 sccm. Os filmes foram depositados sobre lâminas de silício com orientação cristalográfica (100) e resistividade entre 1-10 Ω ·cm.

3.1.1. Equipamentos Utilizados

No desenvolvimento deste trabalho duas técnicas de processamento foram utilizadas principalmente, sendo estas a técnica de PECVD e a técnica de *Sputtering* (deposição por pulverização catódica). Aqui são apresentadas as descrições dos equipamentos utilizados nestas técnicas.

Deposição Química a Vapor (CVD)

A deposição química a vapor (CVD) consiste na formação de camadas sólidas e estáveis, graças a uma reação heterogênea do tipo gás–sólido ou gás–líquido na superfície do substrato onde as reações químicas podem acontecer de duas formas: pirólise ou redução do hidrogênio [61]. Para ambos os tipos de reação, a forma de se fornecer energia para que ocorram as reações incluem: ativação térmica por elétrons (plasma de Radiofreqüência – RF ou Corrente continua – DC), por fótons (UV ou laser), ou, inclusive, uma combinação destas duas.

Por outro lado, os fenômenos físicos que determinam o regime de deposição são: o transporte dos gases reativos em direção à superfície do substrato aquecido, a

própria temperatura na superfície da lâmina, a velocidade de reação dos gases na superfície do substrato, a pressão em que ocorre a reação e a concentração das espécies reativas ^[61]. A geometria do equipamento de deposição também influencia fortemente nos parâmetros dos filmes depositados. Os equipamentos utilizados para se depositarem camadas dielétricas e semicondutoras por CVD podem ser classificados como indicado na Tabela 1 ^[61].

Tabela 1 – Classificação dos equipamentos de deposição.

Temperatura [°C]	Pressão Atmosférica		Baixa pressão		Baixa pressão com plasma	
	Parede		Parede		Parede	Parede
	quente ³	fria	quente	fria	quente	fria
200-500	0	1	1	0	0	2
500-1000	0	1	1	0	0	0

^{0 →} Não usado comercialmente.

Cabe destacar que em muitas aplicações é necessário depositar uma variedade de filmes finos usando baixas temperaturas de substrato. Nesses casos, a técnica de CVD assistida por plasma (PECVD) é uma alternativa excelente para depositar filmes a temperaturas menores sem comprometer a qualidade dos filmes depositados anteriormente e/ou do substrato utilizado. Por exemplo, podem-se depositar filmes de SiO₂ de alta qualidade entre 300 e 350°C, enquanto que para CVD é necessário utilizar temperaturas no intervalo de 650 a 850°C a fim de se produzirem filmes de qualidade similar [61].

A técnica PECVD usa ondas eletromagnéticas de RF para gerar um plasma no qual a energia é transferida a uma mistura de gases reativos, o que transforma estes em radicais reativos, íons, átomos neutros, moléculas e outras espécies altamente ionizadas. Estes fragmentos atômicos e moleculares são adsorvidos na superfície do substrato e, dependendo da natureza destas interações, acontece um processo de corrosão ou deposição no substrato. A formação das espécies reativas e energéticas acontece por colisões na fase gasosa, sendo que o substrato pode ser mantido a uma baixa temperatura. Assim, a formação do filme a uma temperatura menor que a

_

^{1 →} Uso limitado.

^{2 →} Uso dominante.

³ Refere-se às paredes do reator.

necessária para os processos CVD convencionais é uma das maiores vantagens da técnica PECVD [61].

Dependendo do tipo de acoplamento do campo elétrico de RF podemos classificar os sistemas PECVD como: reatores com eletrodos externos e acoplamento indutivo e reatores com eletrodos internos e acoplamento capacitivo. Porém, outra classificação dos sistemas PECVD considera a localização onde se forma o plasma com relação ao substrato, definindo-se duas categorias: a excitação por plasma direto (DPECVD), que de fato é o PECVD propriamente dito e a excitação por plasma remoto (RPECVD). A diferença entre estas duas técnicas se deve ao fato de que para RPECVD pode-se selecionar o gás reagente que será excitado pelo plasma, ou seja, nem todos os gases que intervém no processo de deposição precisam ser excitados.

Sistema PECVD do Laboratório de Microeletrônica (LME)

Para este trabalho foi utilizado um sistema PECVD com acoplamento capacitivo. Tem-se uma configuração do tipo triodo com as duas grades, nas quais se aplica a excitação de RF (13.56 MHz), e o porta—substrato, que é considerado como o terceiro eletrodo, que pode ser polarizado tanto positiva como negativamente em relação ao eletrodo ativo da excitação de RF. Uma fotografia óptica deste sistema é mostrada na Figura 3.1.

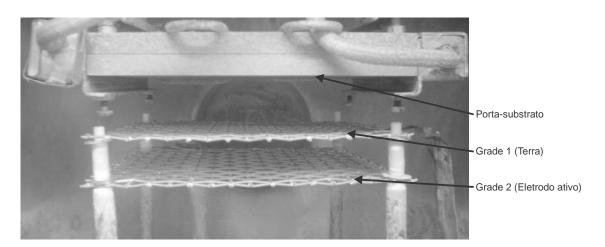


Figura 3.1 – Configuração triodo do sistema PECVD utilizado.

Com esta configuração, pode-se decompor os gases reativos pela excitação do plasma em uma região afastada do porta—substrato, a fim de se diminuir o bombardeamento iônico no filme que está sendo depositado. Outro motivo pelo qual se tem o porta—substrato em uma posição invertida é para se evitar a possível acumulação de particulados sólidos na superfície da amostra que está sendo processada. Estes particulados podem ser provenientes do desprendimento de filmes residuais depositados nas paredes da câmara de deposição ou da própria estrutura da montagem interna da câmara. Na Figura 3.2 é mostrado um diagrama esquemático do sistema PECVD utilizado pelo GNMD do Laboratório de Microeletrônica.

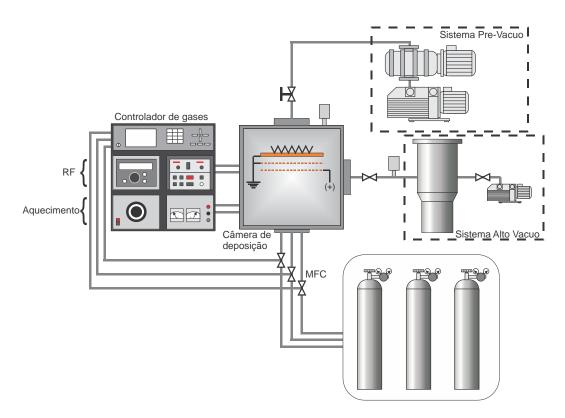


Figura 3.2 – Diagrama esquemático do sistema de PECVD utilizado no LME.

A câmara de deposição tem uma geometria cúbica e é feita de aço inoxidável. O fluxo dos gases que são introduzidos nesta câmara é controlado por um multicontrolador digital (MKS modelo 647B), que permite o controle de até oito linhas de gases e determina a abertura do MFC (*Mass Flow Controller*) com um sinal elétrico. O sistema de aquecimento é do tipo resistivo, podendo chegar até uma temperatura de 400 °C monitorada com um termopar do tipo K.

A câmara de deposição é colocada em alto vácuo antes da deposição dos filmes com a finalidade de garantir uma deposição livre de contaminantes prejudiciais às características dos filmes depositados. Este sistema é composto por uma bomba difusora (Edwards modelo 160 Stak Str Man) assistida por uma bomba mecânica rotativa de paletas de duplo estágio (Varian modelo SD-300), o que permite obter pressões próximas a 10⁻⁶ Torr na câmara de processo. A pressão em alto vácuo é monitorada com um medidor de ionização do tipo catodo frio (Edwards modelo AIM-S).

Por outro lado, o sistema de vácuo usado durante a deposição possui uma bomba mecânica rotativa (Leybold-Heraeus modelo Trivac) em série com uma bomba de deslocamento tipo Booster (Leybold-Heraeus modelo Ruvac). A pressão de processo pode ser controlada com uma válvula tipo borboleta de acionamento elétrico (*Throttle Valve*) e monitorada com um medidor do tipo Baratron, capaz de medir valores da ordem de 10⁻³ Torr.

A excitação é subministrada com uma fonte de radiofreqüência (Advanced Energy modelo RFX600A) que opera a 13.56 MHz através de um acoplador de impedâncias (Advanced Energy modelo ATX600). Uma vez gerado, o sinal de RF reage com a mistura gasosa para formar o plasma, através das duas grades que conformam o acoplamento capacitivo.

Deposição por Pulverização Catódica (Sputtering)

O sistema de pulverização catódica é a principal alternativa para a evaporação de filmes finos de metais na fabricação microeletrônica já que tem melhor cobertura de superfícies que contém degraus, produz danos por radiação muito menores que a evaporação por feixe de elétrons (*Electron Beam Evaporation*) e é muito melhor ao produzir filmes de materiais compostos e ligas [62,63].

Um sistema de pulverização catódica simples é constituído por um reator de plasma de placas paralelas dentro do qual se produz vácuo. Para a geração da pulverização catódica, a câmara de processo deve ter uma geometria tal que os materiais de alvo

devem estar localizados no eletrodo onde se concentra a máxima densidade de íons do plasma [62,63]. A pulverização catódica é originada principalmente pelo intercâmbio de momento entre os íons e o material a ser depositado, devido às colisões. Já que a primeira colisão empurra os átomos para dentro do material, as colisões posteriores entre os átomos têm como resultado a expulsão de alguns dos átomos próximos à superfície para fora do material.

Uma vantagem importante da pulverização catódica é que os filmes depositados têm a mesma concentração que o alvo, o que pode parecer contraditório já que o rendimento de pulverização (*Sputter yield*)⁴ depende do peso atômico das espécies envolvidas. Porém, apesar dos componentes do alvo se pulverizarem em velocidades diferentes, por se tratar de um fenômeno superficial, a vaporização de uma espécie de forma preferencial enriquece a superfície com os átomos das espécies restantes, o que compensa de forma efetiva a diferença entre as velocidades de pulverização, tendo assim os filmes depositados a mesma concentração, ou muito próxima, da concentração do alvo [62,63].

O processo de pulverização quase não tem restrições quanto aos materiais de alvo, podendo ir desde metais puros, até semicondutores e isolantes. A deposição requer condições de vácuo da ordem de 10⁻⁶ Torr e um fluxo controlado de gás no interior da câmara. A deposição pode ser realizada com plasma de um gás não reativo (um gás inerte) ou de gás reativo (gás inerte e gás reativo) com um ou múltiplos alvos. Neste último caso o filme depositado é um produto da reação do gás com os átomos desprendidos do alvo (Sputtering Reativo) [63]. Na Figura 3.3 apresenta-se um diagrama do sistema de deposição por pulverização catódica usado no desenvolvimento deste trabalho.

_

⁴ Número de átomos expulsos por íon incidente.

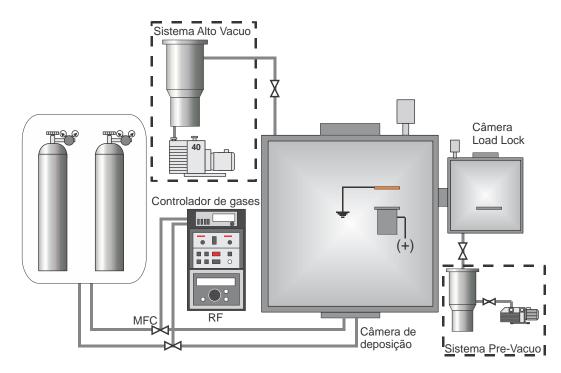


Figura 3.3 – Diagrama esquemático do sistema de Sputtering utilizado.

O sistema de *Sputtering* existente no LME, em particular, é composto de duas câmaras, uma para carregar amostras (*Load Lock*), e outra propriamente para o processo de deposição. A câmara *Load Lock*, tem um sistema de pré-vácuo suficiente para que, depois de carregar as amostras, tem-se um fechamento hermético e um ambiente livre de impurezas. Este sistema de pré-vácuo é constituído por uma bomba turbomolecular em série com uma bomba mecânica. Com este sistema, os valores de vácuo obtidos estão em torno de 10⁻⁵ Torr onde poderia se conseguir valores menores deixando o sistema ligado por mais tempo, mas, como o objetivo é só carregar as amostras, este valor é suficiente. O sistema de alto vácuo para o processo de deposição é constituído por uma bomba turbomolecular (modelo STP-1003C), em série com uma bomba mecânica (modelo E2M80). Com este sistema podem-se conseguir valores de vácuo da ordem de 10⁻⁷ Torr.

Assim como utilizado na técnica de PECVD, a excitação para a formação do plasma é fornecida por uma fonte de radiofreqüência (Advanced Energy modelo RFX600A) que opera a 13.56 MHz, junto com um acoplador de impedâncias (Advanced Energy modelo ATX600). O fluxo dos gases que entram na câmara é controlado por um microcontrolador digital que permite o controle de até quatro linhas de gases e a abertura dos MFC. As leituras de vácuo são feitas com diferentes medidores

localizados em pontos estratégicos do sistema, e monitoradas com um controlador do tipo ACG. Já no interior da câmara de processo, o eletrodo ativo está na parte inferior do Torus de RF, enquanto que o eletrodo de terra está na parte superior. O alvo do material a depositar está em contato direto com o eletrodo ativo. É entre este alvo e o eletrodo de terra que se forma o plasma.

Por outro lado, é importante mencionar que além dos equipamentos aqui descritos, conta-se com uma sala limpa com diversos equipamentos que são essenciais no desenvolvimento do trabalho tais como um perfilômetro (Alpha Step 500) para se determinar as espessuras dos filmes dielétricos e metálicos depositados e equipamentos para se fazer todos os processos de alinhamento e fotolitografia necessários durante o processo.

3.1.2. Caracterização dos filmes usados.

A caracterização dos materiais utilizados para a fabricação dos dispositivos ópticos é de grande importância e muito relevante para o desenvolvimento deste trabalho.

Nesta seção, apresentam-se duas das técnicas de caracterização utilizadas mais freqüentemente: Elipsometria, para se determinar o índice de refração e a espessura de filmes e a medida do raio de curvatura tanto do substrato como dos filmes para se calcular o stress residual. Estas técnicas são importantes para se correlacionar as condições de deposição com as propriedades mecânicas, físicas e ópticas dos filmes. Apesar do controle existente nos diferentes parâmetros de deposição (temperatura, fluxo de gases, pressão), têm-se observado algumas diferenças nas condições de deposição, refletindo-se em mudanças de algumas das propriedades físicas e químicas dos filmes (espessura, índice de refração).

Elipsometria

A elipsometria espectroscópica é uma técnica de análise óptica baseada na mudança do estado de polarização da luz que incide sobre um material, conforme mostrado na Figura 3.4. Esta análise é não destrutiva sendo útil na determinação das espessuras de filmes finos e constantes ópticas de materiais, tal como o índice de refração [70].

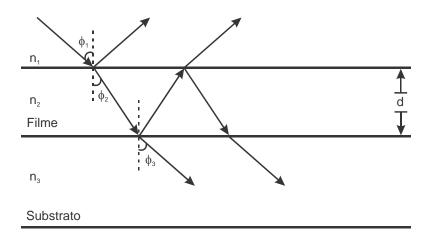


Figura 3.4 – Esquema indicando os feixes incidente, refletido e transmitido num sistema composto de um filme e um substrato.

O método consiste em avaliar as mudanças no estado de polarização da luz causada pela sua reflexão numa superfície. Com esta técnica assume-se que a luz incidente tenha uma polarização plana que possa ser resolvida em duas componentes, uma paralela ao plano de incidência e a outra perpendicular a este plano. O plano de incidência é definido pelos feixes incidente e refletido. O estado de polarização é determinado pela amplitude relativa das ondas refletidas das componentes paralela (ρ_p) e perpendicular (ρ_s) ao plano de incidência, bem como pela diferença de fase entre as duas ondas $(\Delta_p - \Delta_s)^{[1]}$.

Considerando o caso de um substrato coberto por um único filme transparente: a relação entre as duas amplitudes relativas (ρ_p/ρ_s) e a diferença de fase $(\Delta_p - \Delta_s)$, sofrem mudanças durante a reflexão devido ao índice de refração do substrato (n_3) , ângulo de incidência (ϕ_1) , índice de refração do filme (n_2) e espessura do filme (d). Se o índice de refração do substrato é conhecido e se o filme for não absorvente (coeficiente de extinção, k_2 =0), então, os únicos parâmetros desconhecidos serão o índice de refração (n_2) e a espessura do filme transparente (d). Assim, conhecendo o estado de polarização da luz incidente e refletida, podem ser determinados o índice

de refração e a espessura do filme transparente ^[1]. Apesar da teoria básica da elipsometria ter sido desenvolvida por Drude ^[1], ela não será detalhada neste trabalho sendo apresentados aqui unicamente os resultados das análises. Na Figura 3.5, mostra-se o comportamento destes índices de refração em função da composição dos filmes depositados.

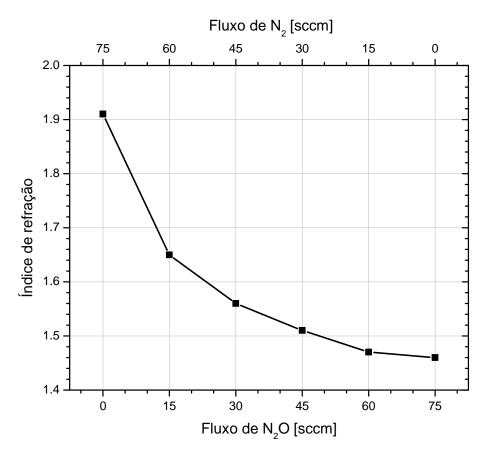


Figura 3.5 – Gráfico dos índices de refração medidos em função dos fluxos dos gases.

Do gráfico da Figura 3.4 observa-se que o maior índice de refração é para o Si₃N₄ e o menor para o SiO₂. Para as composições intermediarias de SiO_xN_y, o comportamento do índice de refração é decrescente.

Na Tabela 2 são mostrados os valores experimentais medidos de índices de refração, segundo a composição dos filmes e a mistura de gases usada durante a deposição. Cabe destacar que em todos esses filmes, a potencia, pressão e temperatura de processo foram mantidos em 200 W, 33 mTorr e 320 °C, respectivamente.

Tabela 2 – Valores de índices de refração dos filmes estudados.

Fluxo de N ₂ O – N ₂	Material	Índice de
[sccm]	depositado	refração
0 – 75	Si_3N_4	1.91
15 – 60	SiO_xN_y	1.65
30 – 45	SiO_xN_y	1.56
45 – 30	SiO_xN_y	1.51
60 – 15	SiO_xN_y	1.47
<u>75 – 0</u>	SiO ₂	1.46

Caracterização do Stress residual dos filmes.

Esta caracterização é feita com o objetivo de se calcular o *stress* residual (ou tensão mecânica) através da utilização da medida por métodos ópticos da variação da curvatura do substrato de silício e dos filmes depositados. Esta caracterização é importante, pois a espessura total das estruturas pode chegar a vários micrômetros o que pode provocar envergaduras ou, em um caso extremo, o trincamento dos filmes constituintes do dispositivo. A Figura 3.6 mostra um esquema desta caracterização.

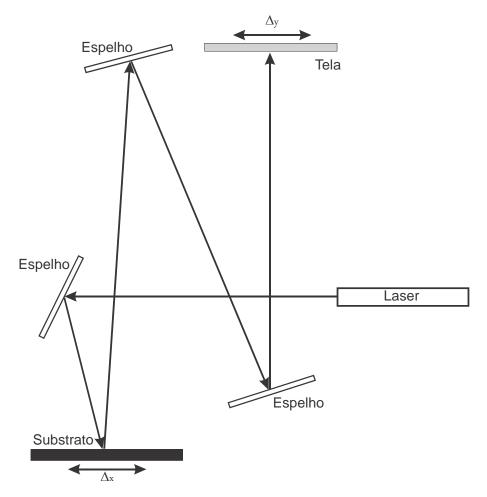


Figura 3.6 – Determinação por método óptico do *stress* residual em filmes depositados por PECVD.

Neste arranjo utiliza-se um laser de He–Ne com comprimento de onda de 632.8 nm e espelhos que mudam a trajetória do feixe em direção à amostra. O feixe refletido é redirecionado através de um conjunto de espelhos que aumentam o percurso total do feixe com o objetivo de aumentar a resolução da medida. As leituras dos valores são feitas deslocando-se a amostra de uma distância determinada (Δx) ao longo da direção perpendicular ao feixe incidente e medindo-se em um anteparo o deslocamento (Δy) produzido no feixe refletido. O raio de curvatura pode ser determinado por:

$$R_a = 2L_L \frac{\Delta x}{\Delta y} \tag{1}$$

onde L_L é a distância percorrida pelo feixe após a reflexão na superfície da amostra. Uma vez estabelecida a curvatura antes e depois da deposição do filme, o stress residual total pode ser calculado usando-se [64]:

$$\sigma = \frac{E_S}{6(1-v)} \cdot \frac{D^2}{d} \left[\frac{1}{R_{Sf}} - \frac{1}{R_S} \right]$$
 (2)

onde σ é o *stress* residual, E_S é o Módulo de Young do substrato de silício, ν é a Relação de Poisson do substrato de silício, D é a espessura do substrato de silício, d é a espessura do filme, R_S e R_{Sf} são os raios de curvatura do substrato de silício antes e depois da deposição do filme respectivamente.

O stress residual pode ser compressivo ou tensivo. No primeiro caso, o filme tende a se expandir, provocando uma deformação convexa. Quando tensivo, o filme tende a se contrair, produzindo-se uma deformação côncava. O *stress* residual total é, por convenção, de valor negativo para amostras convexas e de valor positivo para amostras côncavas. A Tabela 3 mostra os valores experimentais medidos de stress residual, segundo a composição dos filmes e a mistura de gases usada durante a deposição.

Tabela 3 – Valores de stress residual dos filmes usados.

Fluxo de N ₂ O – N ₂ [sccm]	Material	Stress [MPa]
0 – 75	Si_3N_4	129
15 – 60	SiO_xN_y	36
30 – 45	SiO_xN_y	-1
45 – 30	SiO_xN_y	-153
60 – 15	SiO_xN_y	-201
75 – 0	SiO ₂	-309

Na Figura 3.7, mostra-se o comportamento do *stress* residual em função da composição dos filmes depositados.

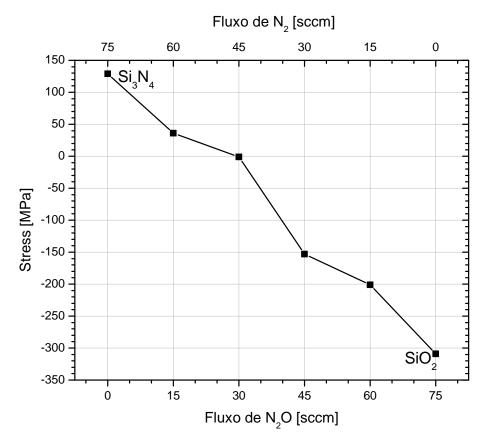


Figura 3.7 - Gráfico do Stress residual medido em função dos fluxos dos gases.

Pode observar-se que para o filme de SiO_xN_y, com os parâmetros de deposição de 30 sccm de N₂O e 45 sccm de N₂, tem-se o menor valor de stress, muito próximo a zero. Neste trabalho foram utilizados filmes com estas condições de deposição com o objetivo de evitar trincamento durante a fabricação dos dispositivos.

3.2. Micro Lâmpada Incandescente.

Nesta seção é apresentada a estrutura de uma micro-lâmpada baseada em um filamento incandescente. Para a fabricação desta estrutura um filamento de cromo é colocado entre dois filmes de SiO_xN_y que o deixam isolado da atmosfera ^[58]. O processo de fabricação é mostrado na Figura 3.8 e tem as seguintes etapas de processo:

- a) Parte-se de um substrato de silício cristalino,
- b) É feita a deposição da primeira camada PECVD de SiO_xN_y com uma espessura de 500 nm. O SiO_xN_y utilizado aqui é o que apresenta a menor tensão mecânica das diferentes composições estudadas,
- c) Em seguida, deposita-se uma camada de cromo de 400 nm pela técnica de sputtering,
- d) É definida a geometria dos filamentos e dos contatos elétricos por fotolitografía e corrosão da camada de cromo,
- e) Deposita-se a segunda camada de SiO_xN_y de 500 nm com o objetivo de isolar o filamento do meio ambiente, evitando-se assim a oxidação do cromo e a ruptura prematura do filamento quando incandesce,
- f) São feitas duas etapas de fotogravação e corrosão nas camadas de SiO_xN_y depositadas. A primeira para definir as áreas onde são expostos os contatos elétricos do filamento (*pads*) e a segunda para expor as regiões no substrato de silício onde serão formadas as cavidades. Neste ponto usa-se a solução *Buffered Oxide Etch* (BOE NH₄F 40% + HF 49%) para se fazer a corrosão do SiO_xN_y,
- g) As regiões do substrato de silício que foram expostas são corroídas em uma solução de KOH (28%) criando-se uma cavidade e formando-se assim uma estrutura suspensa.

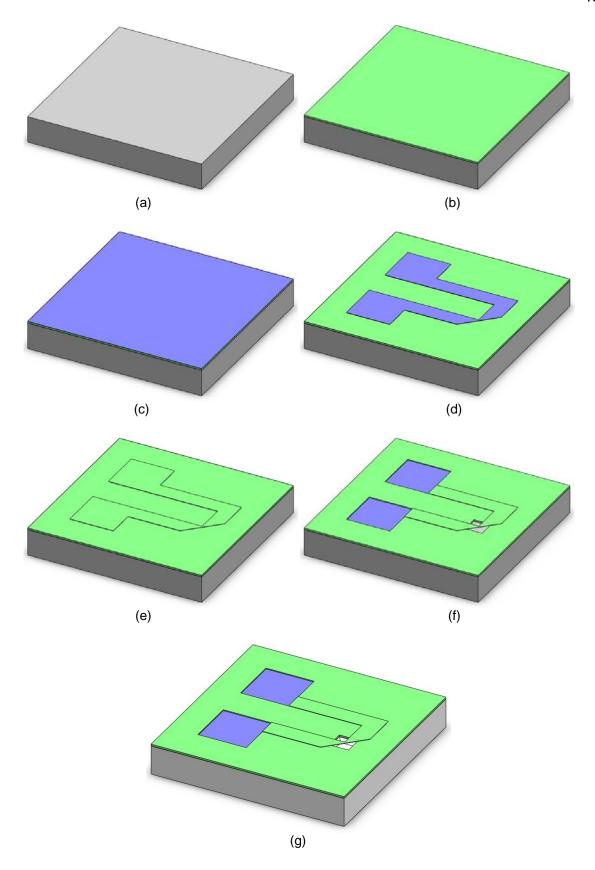


Figura 3.8 – Processo de fabricação da micro-lâmpada incandescente.

Um desenho esquemático detalhado da micro-lâmpada é mostrado na Figura 3.9. Nesta imagem pode-se observar o filamento suspenso e a cavidade no substrato de silício.

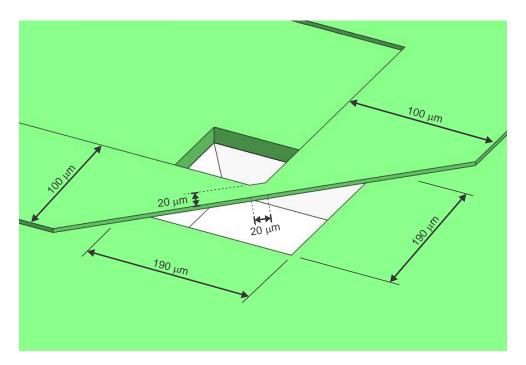


Figura 3.9 – Detalhe do filamento da micro-lâmpada.

O filamento de cromo foi projetado com uma área de 20x20 µm, que são as dimensões mínimas com as quais ainda consegue-se obter uma boa resolução com o equipamento de fotolitografía utilizado.

Para a fabricação das micro-lâmpadas, foi projetado um conjunto de três máscaras. Uma seção de cada uma destas máscaras é mostrada na Figura 3.10, as quais foram utilizadas nas etapas (d) e (f) do processo de fabricação descrito acima.

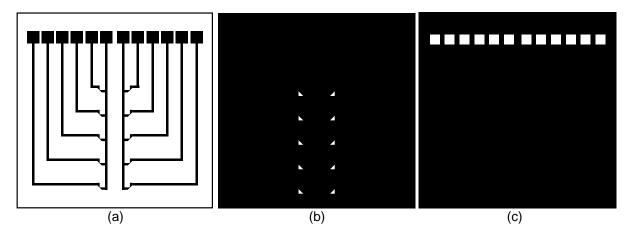


Figura 3.10 – Máscaras utilizadas na fabricação da micro-lâmpada, a) definição de filamentos de pads, b) definição de cavidades no silício e c) abertura dos contatos elétricos.

A Figura 3.10a mostra uma seção da máscara de campo claro que serve para definir os filamentos. São mostrados dois conjuntos conformados por 5 micro-lâmpadas cada um e que possuem um contato elétrico comum, que serve para otimizar a caracterização elétrica e aumentar a densidade de dispositivos em uma área determinada. Na Figura 3.10b é mostrada a correspondente seção da máscara de campo escuro que serve para definir as cavidades por onde será corroído o substrato de silício para deixar suspenso o filamento. Finalmente, a Figura 3.10c mostra a seção da máscara de campo escuro que define os contatos elétricos onde será aplicada a tensão elétrica. Os detalhes das máscaras que definem a micro-lâmpada são mostrados na Figura 3.11.

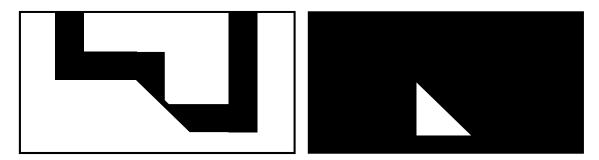


Figura 3.11 – Detalhe das máscaras utilizadas na fabricação da micro-lâmpada.

Observa-se que para formar a cavidade no silício, usa-se uma abertura triangular e, como a hipotenusa deste triângulo está em 45° em relação ao plano (110), a corrosão isotrópica do silício em KOH origina a formação de uma cavidade quadrada.

Na Figura 3.12 são mostradas duas fotografias ópticas das micro-lâmpadas fabricadas. Pode-se observar em 3.11a o filamento de cromo e em 3.11b a cavidade formada no substrato de silício que deixa o filamento suspenso.

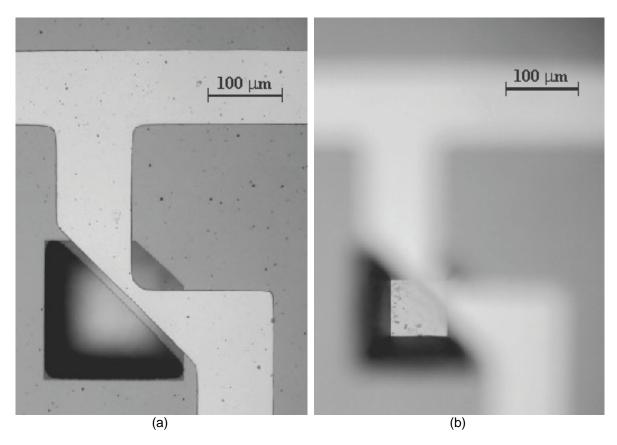


Figura 3.12 – Fotografias ópticas das micro-lâmpadas, a) filamento incandescente e b) cavidade no silício.

Na Figura 3.13 observa-se a distribuição de dois conjuntos, com 5 micro-lâmpadas cada um, em uma seção da lâmina de silício. Na lâmina de silício foram fabricados 14 conjuntos com 5 micro-lâmpadas cada um.

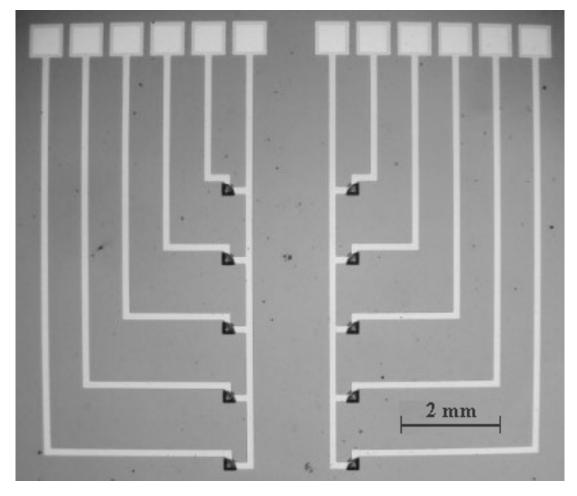


Figura 3.13 – Distribuição de um conjunto de micro-lâmpadas numa seção da lâmina de silício.

As caracterizações elétricas mostraram que as trilhas de cromo ficaram totalmente contínuas havendo contato elétrico com todas as micro-lâmpadas incandescentes.

3.3. Filtro Interferencial Multicamadas.

Aqui é apresentada a estrutura de um filtro interferencial multicamadas construído sobre um substrato de vidro. O procedimento de fabricação desta estrutura é mostrado na Figura 3.14 e tem duas etapas.

a) Parte-se de um substrato de vidro tipo *Corning* do tipo 7059, previamente limpo com um detergente neutro Extran © (pH 7.5),

b) Deposita-se sobre o substrato de vidro, pela técnica de PECVD, as camadas de Si₃N₄ e SiO₂ alternadas que conformam a estrutura do filtro interferencial multicamadas.

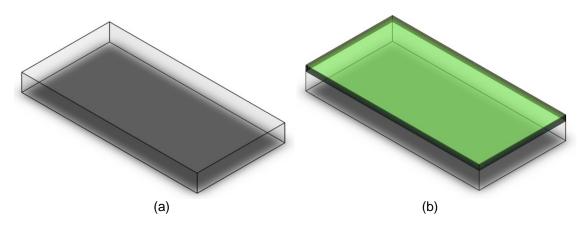


Figura 3.14 – Etapas de fabricação do filtro interferencial multicamadas.

Para a fabricação da estrutura do filtro, as camadas são depositadas de forma alternada para ter o mesmo efeito de um refletor Bragg. As espessuras das camadas foram previamente simuladas para produzir picos de atenuação na região do visível do espectro eletromagnético (tipicamente entre 400 e 700 nm) com um programa desenvolvido neste trabalho e que se encontra detalhado no Anexo 1. Com este programa é possível determinar o comportamento do filtro assim como as características que ele deverá ter (índice de refração, espessuras e número de camadas), para filtrar uma determinada região do espectro visível.

3.4. Dispositivo.

O dispositivo estudado neste trabalho, mostrado na Figura 3.15, é fabricado através da utilização das estruturas descritas anteriormente: uma micro-lâmpada incandescente e um filtro interferencial depositado sobre vidro. Na imagem observase a representação reduzida de uma micro-lâmpada, do conjunto de 5, com os respectivos contato elétrico.

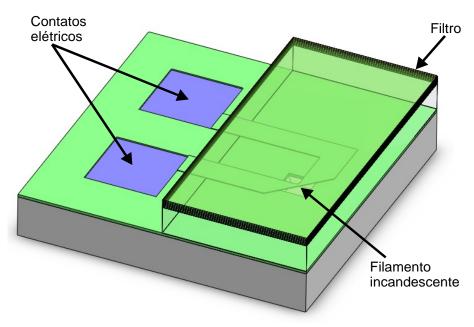


Figura 3.15 – Micro-lâmpada com filtro depositado sobre vidro.

A combinação destas duas estruturas tem como resultado um dispositivo com características próprias. Para se conseguir uma rápida união destas estruturas, foi usada uma graxa a base de silicone nas laterais das lâminas, já que em primeira instância não é necessário que as duas lâminas fiquem unidas hermeticamente. Para isto, precisa-se que a geometria das máscaras seja projetada de tal forma que as micro-lâmpadas coincidam o melhor possível dentro da área do filtro. Uma vez alinhadas, as lâminas são unidas pelas laterais.

Também, o fato do vidro usado como substrato ser transparente, permite que todos os comprimentos de onda gerados pela micro-lâmpada cheguem ao filtro idealmente sem perdas e, assim, pode-se filtrar uma faixa destes comprimentos de onda na saída do filtro. Os contatos elétricos (*pads*) das micro-lâmpadas são localizados nas bordas da lâmina para facilitar o acesso a eles durante a caracterização elétrica.

4 SIMULAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS DISPOSITIVOS FABRICADOS

Neste capítulo são analisados os resultados das simulações numéricas e das caracterizações dos dois dispositivos fabricados (micro-lâmpadas incandescentes e filtros interferenciais). Para cada um dos dispositivos é apresentada uma comparação entre os resultados simulados e medidos. Também, no final deste capítulo, são apresentados os resultados da caracterização feita quando os dois dispositivos estão integrados.

As simulações numéricas foram feitas utilizando o software comercial Mathcad[©]. Foram feitos dois programas, descritos nos Anexos 1 e 2, com os quais foi possível reproduzir o comportamento dos dispositivos estudados. Igualmente, a infraestrutura usada, bem como a montagem implementada para a caracterização de cada dispositivo é detalhada neste capitulo, nas seções correspondentes a cada dispositivo.

4.1. Resultados para Micro Lâmpadas.

4.1.1. Simulação da emissão em micro-lâmpadas.

Considerando-se que a micro-lâmpada funciona sob o princípio de um filamento incandescente de cromo, as simulações são feitas baseando-se na teoria de radiação térmica de um *corpo negro* [65]. Um *corpo negro* é um objeto teórico ou ideal que absorve toda a luz e toda a energia radiante que incide nele. Nada da radiação incidente é refletida ou passa através do corpo negro. Apesar do seu nome, o corpo negro emite luz e constitui um modelo físico ideal para o estudo da emissão de radiação eletromagnética de qualquer outro corpo.

Todos os corpos emitem energia em forma de ondas eletromagnéticas, sendo esta radiação tanto mais intensa quanto mais elevada for a temperatura do emissor. A energia radiante emitida por um corpo à temperatura ambiente é escassa e corresponde a comprimentos de onda superiores a aqueles da luz visível. Ao se elevar a temperatura não só se aumenta a energia emitida como também ocorre a comprimentos de onda mais curtos. Por esse motivo é possível observar a mudança de cor de um corpo quando ele é aquecido. Os corpos não emitem com igual intensidade em todas as freqüências e comprimentos de onda, uma vez que seguem a Lei de Planck [65,66],

$$I(v,T) = \frac{2hv^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{\left(\frac{hv}{kT}\right)} - 1}$$
(3)

onde, h é a constante de Planck, v é a freqüência da luz, c é a velocidade da luz, k é a constante de Boltzmann e T é a temperatura. Derivando a eq.(3) obtém-se o Poder Emissivo Espectral (ou irradiância espectral), que é a quantidade de energia radiante emitida por unidade de superfície e tempo entre um intervalo de freqüências ^[65,66]. Assim, o Poder Emissivo Espectral em função do comprimento de onda é dado por,

$$E(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right)} - 1}$$
(4)

Para temperaturas iguais, a energia emitida pelo corpo depende da natureza da superfície desse corpo; desta forma, uma superfície fosca ou negra tem um poder emissivo maior que uma superfície brilhante.

Mas os objetos reais nunca se comportam como corpos negros ideais. Em vez disso, a radiação emitida a uma dada freqüência é só uma fração da emissão ideal. A emissividade de um material especifica qual é a fração de radiação de corpo negro ideal capaz de ser emitido pelo corpo real. A emissividade depende do comprimento de onda da radiação, ângulo de emissão assim como da temperatura e acabamento da superfície [65,66]. Em alguns casos é conveniente supor que existe um valor de emissividade constante para todos os comprimentos de onda, sempre menor que 1 (que é a emissividade de um corpo negro). Esta aproximação denomina-se aproximação do corpo cinza. Na literatura foram encontrados diferentes valores de

emissividade para o cromo, sendo considerado o valor de ε =0.1 para as simulações deste trabalho ^[67,68,69]. Assim, o cálculo do poder emissivo espectral fica ^[65,66],

$$E(\lambda, T) = \varepsilon \cdot \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right)} - 1}$$
(5)

4.1.2. Caracterização das micro-lâmpadas.

A caracterização das micro-lâmpadas foi realizada utilizando-se um Espectrômetro de Fibra Óptica de alta resolução (Ocean Optics HR2000) que opera em um intervalo de comprimentos de onda de 200 a 1100 nm. Este equipamento consiste de um espectrômetro acoplado com uma fibra óptica que permite a detecção de luz *in situ*. O equipamento integra uma bancada óptica de alta resolução, um conversor analógico/digital de 12 bits, componentes eletrônicos programáveis, um detector CCD de silício e uma porta USB de alta velocidade, sendo que o equipamento tem uma resolução de 0.035 nm. O conversor analógico/digital permite capturar e transferir um espectro completo a uma memória a cada milisegundo, quando se conecta o espectrômetro a um computador via a porta USB.

As amostras são montadas sobre uma base com micro-posicionadores, permitindo uma movimentação nos três eixos cartesianos. A fibra óptica é posicionada acima da micro-lâmpada, no intuito de coletar a luz emitida pelas micro-lâmpadas, sendo o arranjo montado tal como mostrado na Figura 4.1. Como o filamento é muito menor que o detector, ele pode ser considerado como uma fonte pontual de radiação.

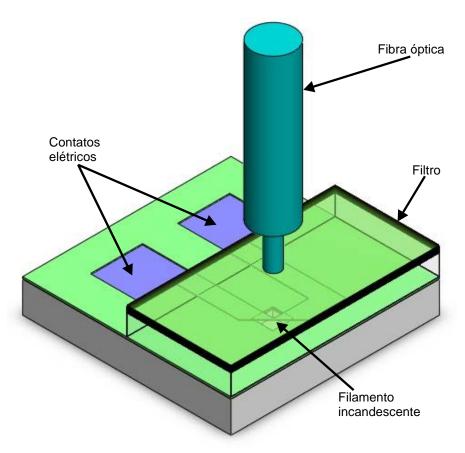


Figura 4.1 – Arranjo para caracterização das micro-lâmpadas.

Uma tensão elétrica é aplicada nos contatos da micro-lâmpada utilizando-se um conjunto de micro-pontas conectadas a uma fonte programável (Agilent E3649A), que também mede a corrente elétrica que circula pelo filamento. A tensão aplicada vai desde zero volt, sendo incrementada em pequenos valores (da ordem de mV) até o filamento de cromo atingir temperaturas de incandescência e dessa maneira a micro-lâmpada apresenta emissão de luz. Tal como explicado anteriormente, o equipamento usado permitiu realizar as medidas da intensidade de luz emitida pela micro-lâmpada em função do comprimento de onda.

4.1.3. Comparação de resultados: Micro-lâmpadas incandescentes.

Na Figura 4.2 observam-se os espectros simulados do poder emissivo espectral de um corpo negro ideal a diferentes temperaturas usando para isto o programa desenvolvido neste trabalho, como explicado no Anexo 2.

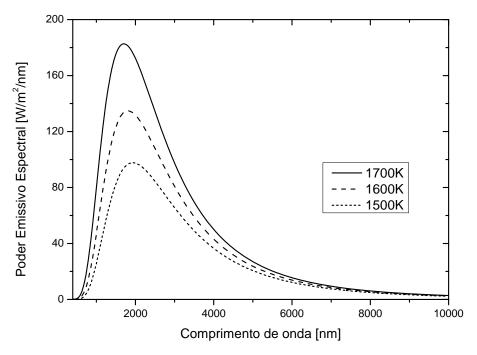


Figura 4.2 – Poder emissivo espectral simulado para um corpo negro ideal a diferentes temperaturas.

Observa-se que o pico de máxima intensidade se desloca para menores comprimentos de onda à medida que a temperatura do corpo negro aumenta. Uma limitante neste ponto é que o equipamento usado para a medida espectral (espectrômetro com fibra óptica) só consegue medir no intervalo de comprimentos de onda entre 200 e 1100 nm. Assim, dentro deste intervalo de comprimentos de onda, só é possível observar a mudança de inclinação da cauda do espectro do poder emissivo espectral do corpo negro ideal, tal como mostrado na Figura 4.3.

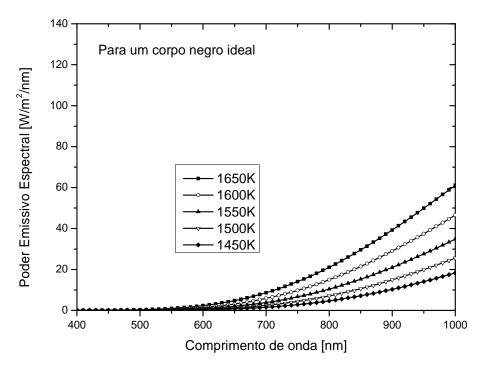


Figura 4.3 – Poder emissivo espectral simulado para um corpo negro a diferentes temperaturas.

Na Figura 4.4 são apresentados os espectros simulados do poder emissivo espectral para o caso de um corpo real com emissividade de ε =0.1. Da mesma forma que no caso anterior, o resultado desta simulação apresenta uma mudança de inclinação das curvas para diferentes temperaturas.

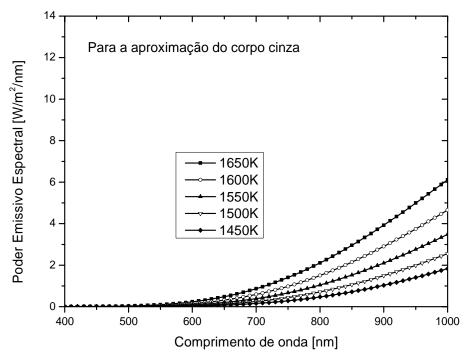


Figura 4.4 – Poder emissivo espectral simulado para a aproximação de corpo cinza a diferentes temperaturas.

Das Figuras 4.3 e 4.4 pode-se observar que os dois corpos apresentam o mesmo comportamento, modificado simplesmente pelo efeito da emissividade refletido nos valores absolutos do poder emissivo espectral. Da mesma forma, no intervalo de comprimentos de onda estudado, não é possível observar o ponto máximo de emissão no espectro, já que este máximo só aparece para temperaturas muito maiores. O comprimento de onda no qual se produz o máximo de emissão é dado pela Lei de Wien [65,66], a qual específica que existe uma relação inversa entre o comprimento de onda no qual se produz o pico de emissão de um corpo negro e sua temperatura. Neste trabalho, diversas micro-lâmpadas (aproximadamente 100) foram caracterizadas e em todas elas foram obtidos resultados similares. As medidas de intensidade obtidas através do espectrômetro com fibra óptica são relativas e apresentadas em unidades de *contagens* (*counts*) para cada comprimento de onda. De acordo com as características técnicas do equipamento, detalhadas no manual, cada contagem corresponde a 41 fótons.

Para a caracterização das micro-lâmpadas, em cada filamento foi aplicada uma tensão elétrica contínua, foi medida a corrente elétrica fornecida ao filamento e obtido o espectro do poder emissivo espectral em função do comprimento de onda. Na seqüência, foi aumentada levemente a tensão elétrica aplicada e novas medidas foram realizadas. Foi observado que para certos valores de tensão o poder emissivo espectral não mudava com o tempo, permanecendo estável por algumas horas. Porém, para tensões elétricas acima de certo limiar o poder emissivo espectral começava a incrementar rapidamente com o tempo, mesmo sem fazer nenhuma alteração no valor da tensão elétrica aplicada ao filamento. Estes dois valores, um mínimo de tensão elétrica necessário para se conseguir incandescência no filamento e outro máximo para se conseguir estabilidade, foram específicos para cada micro-lâmpada, já que eles dependem do valor da resistência do filamento que depende da geometria da micro-lâmpada.

Igualmente, foi observado que para tensões superiores ao limiar e, portanto, com o poder emissivo espectral aumentando rapidamente, a corrente elétrica não aumentava, indicando que provavelmente alguma alteração estrutural estaria ocorrendo no filamento, reduzindo sua resistência elétrica. Alguns filamentos atingiram, nessa condição, temperaturas muito elevadas e se queimaram, sendo que a temperatura de fusão do cromo é de 2180 K.

Contudo, a corrente que circula pelos filamentos, necessária para se conseguir incandescência, deveria ser da mesma ordem para todas as medidas realizadas, mas, foram encontradas mudanças nos valores destas correntes. De todas as micro-lâmpadas medidas, o comportamento da corrente pode se dividir em três conjuntos de valores mostrados aqui. Na Figura 4.5 mostra-se o primeiro caso, com um valor de corrente na qual começa a se apresentar emissão de luz a partir de 74 mA, e um valor de limiar no qual a emissão é estável de 81 mA.

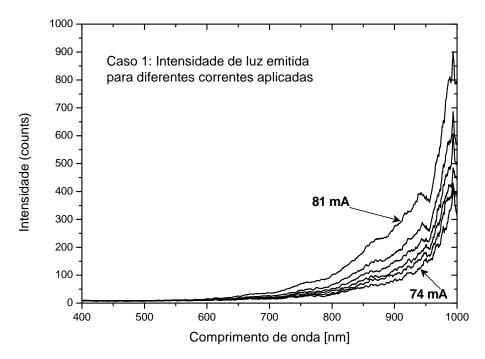


Figura 4.5 – Primeiro caso de intensidade de luz emitida para diferentes valores de corrente aplicada.

No segundo caso observado, a corrente na qual a micro-lâmpada começa a apresentar emissão de luz é de 102 mA, com um limiar de corrente para emissão estável de 109 mA, como mostrado na Figura 4.6.

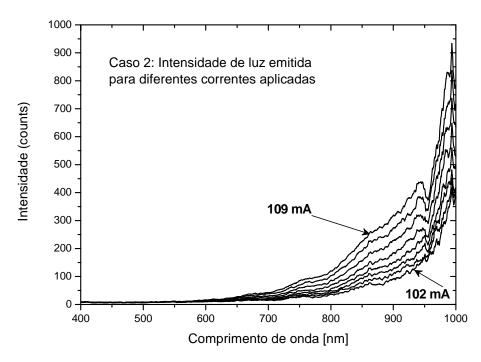


Figura 4.6 – Segundo caso de intensidade de luz emitida para diferentes valores de corrente aplicada.

A Figura 4.7 mostra o terceiro caso, sendo apresentada a primeira emissão de luz a partir de 107 mA, mantendo-se estável até 114 mA.

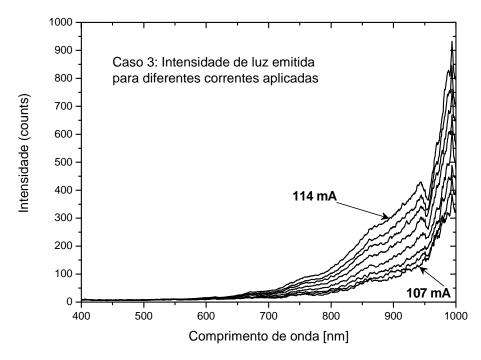


Figura 4.7 – Terceiro caso de intensidade de luz emitida para diferentes valores de corrente aplicada.

Uma das possíveis causas que poderiam explicar as diferenças nos valores necessários para atingir a temperatura de incandescência pode estar relacionada

com as imprecisões ao se fazer o contato elétrico das micro-pontas com os pads das micro-lâmpadas. O posicionamento das micro-pontas é realizado utilizando-se um microscópio óptico e micro-posicionadores, mas não existe um controle preciso da pressão exercida pelas micro-pontas nos contatos elétricos, o que pode originar uma variação da resistência de contato, e que reflete diretamente na corrente necessária para se conseguir incandescência. Contudo, nestes três comportamentos, é evidente que a faixa de valores de corrente entre o início da emissão de luz e o início da instabilidade do filamento (limiar) é da ordem de 7 mA para os três casos mostrados. Isto confirma que o comportamento é único e a diferença de valores é originada provavelmente pela deficiência nos contatos elétricos.

Por outro lado, os três casos de micro-lâmpadas mostrados anteriormente, apresentam o mesmo comportamento espectral que os resultados simulados para um corpo cinza. Através da comparação destes resultados (experimental e teórico), é possível determinar de forma aproximada as temperaturas em que os filamentos atingem a incandescência, sendo de 1450 K quando o filamento começa a incandescer e de 1650 K para o limiar de estabilidade.

Na Figura 4.8 é mostrada uma seqüência de fotografias ópticas de uma microlâmpada desde o momento em que está desligada até ela apresentar uma emissão que pode ser vista mesmo sem ajuda do microscópio óptico.

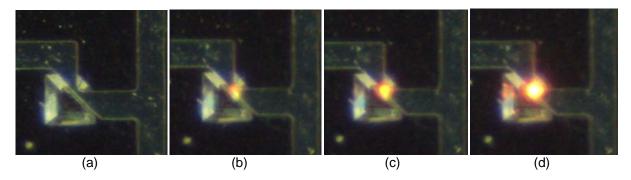


Figura 4.8 - Diferentes níveis de emissão de luz de uma micro-lâmpada incandescente.

Estas imagens foram obtidas utilizando-se iluminação externa para uma melhor visualização. Destas imagens, a marcada como (c) é onde se tem uma emissão estável. Se for aplicada uma tensão elétrica maior, a incandescência na micro-lâmpada aumenta rapidamente (d) até queimar. Na Figura 4.9 podemos observar uma fotografia óptica de uma micro-lâmpada com o filamento queimado.

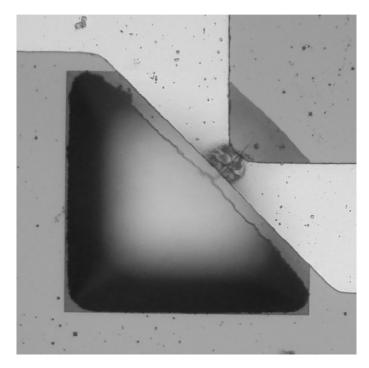


Figura 4.9 – Micro-lâmpada com filamento de cromo queimado.

Como pode ser observado na Figura 4.9, a ruptura do filamento acontece na região onde se apresenta a menor largura. Isto é razoável, pois a resistência elétrica é maior nessa região por causa da geometria e, portanto, onde as maiores temperaturas deverão ser atingidas.

A Figura 4.10 mostra uma seqüência de fotografias ópticas da micro-lâmpada com diferentes níveis de emissão, sem iluminação externa.

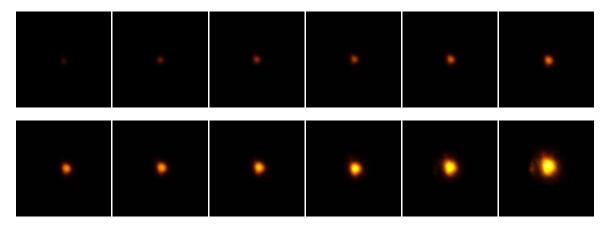


Figura 4.10 – Diferentes níveis de emissão de luz de uma micro-lâmpada incandescente.

Considera-se que a luz emitida pela micro-lâmpada está dentro de toda a faixa do espectro visível. Por isto, outra análise que pode ser feita é filtrar as imagens anteriores nas cores primárias (vermelho, verde e azul) para se observar a

intensidade emitida em cada cor. Assim, na Figura 4.11 tem-se o caso da luz emitida pela micro-lâmpada em diferentes níveis, destacando-se somente o vermelho.

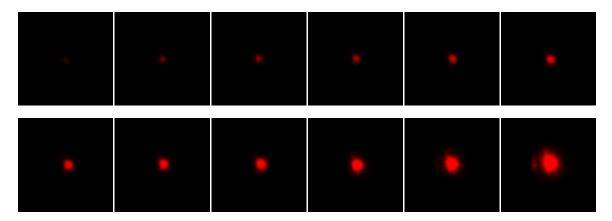


Figura 4.11 – Diferentes níveis de luz emitida pela micro-lâmpada em vermelho.

É evidente que a maior intensidade de luz é emitida no vermelho, o que é um comportamento esperado para este tipo de dispositivo, pois como foi observado nas Figuras 4.5, 4.6 e 4.7, existe uma maior emissão de luz nessa região (acima de 600 nm). Na Figura 4.12 tem-se o caso da luz emitida pela micro-lâmpada em diferentes níveis de emissão, destacando-se somente o verde.

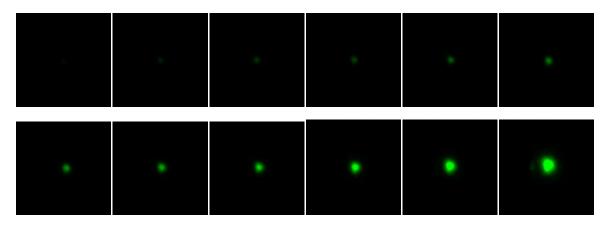


Figura 4.12 – Diferentes níveis de luz emitida pela micro-lâmpada em verde.

Neste caso, a intensidade é menor que no caso do vermelho, já que dos próprios gráficos de intensidade das micro-lâmpadas, observa-se que para 570 nm a emissão é mais baixa que o vermelho, conforme mostrado nas Figuras 4.5, 4.6 e 4.7.

Finalmente, para o caso do azul, a intensidade emitida é muito baixa e unicamente na máxima intensidade consegue-se observar um ponto azul muito tênue, como observado na Figura 4.13.



Figura 4.13 – Máxima intensidade de luz emitida pela micro-lâmpada em azul.

4.2. Resultados para Filtros Interferenciais.

4.2.1. Simulação de filtros interferenciais.

Na fabricação de filtros interferenciais, é possível usar toda a teoria de redes de Bragg. Neste caso, fabrica-se um dispositivo composto por várias camadas dielétricas de tal forma a ter uma estrutura estratificada cujas camadas tenham uma variação periódica dos índices de refração. A teoria completa que explica este comportamento foi desenvolvida por Azzam e Bashara ^[70] e não será apresentada, já que é bastante conhecida. Neste trabalho, serão apresentados unicamente os resultados desta teoria. Inicialmente, considera-se a reflexão e refração de uma onda plana incidente em uma interface entre dois meios isotrópicos com índices de refração n₁ e n₂, como mostrado na Figura 4.14.

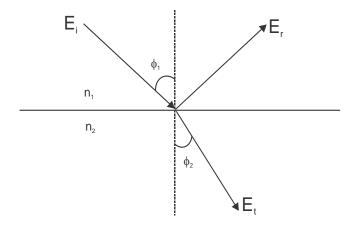


Figura 4.14 – Reflexão e transmissão de uma onda plana na interface entre dois meios semiinfinitos homogêneos e isotrópicos.

O ângulo de incidência deve ser igual ao ângulo de reflexão, enquanto que os ângulos de incidência ϕ_1 e refração ϕ_2 estão relacionados pela Lei de Snell, que estabelece:

$$n_1 \cdot Sen\phi_1 = n_2 \cdot Sen\phi_2 \tag{6}$$

Quando a onda incidente é polarizada linearmente com o vetor campo elétrico vibrando paralelamente (p) ao plano de incidência, as ondas refletidas e transmitidas terão a mesma polarização, vibrando também paralelamente ao plano de incidência. A mesma situação acontece quando a onda incidente é polarizada perpendicularmente (s) ao plano de incidência.

Considerando-se que E_i , E_r e E_t , como mostrado na Figura 4.14, representam as amplitudes complexas das componentes dos vetores campo elétrico das ondas incidente, refletida e transmitida, respectivamente, em pontos opostos imediatamente acima e abaixo da interface, temos que:

$$\frac{E_r}{E_i} = r_{01p} = \frac{n_1 Cos\phi_0 - n_0 Cos\phi_1}{n_1 Cos\phi_0 + n_0 Cos\phi_1}$$
(7)

e,

$$\frac{E_{t}}{E_{i}} = t_{01p} = \frac{2n_{0}Cos\phi_{0}}{n_{1}Cos\phi_{0} + n_{0}Cos\phi_{1}}$$
(8)

Onde, r_p e t_p são os coeficientes de reflexão e transmissão de Fresnel, respectivamente, para polarização paralela. Da mesma forma, tem-se:

$$\frac{E_r}{E_s} = r_{01s} = \frac{n_0 Cos\phi_0 - n_1 Cos\phi_1}{n_0 Cos\phi_0 + n_1 Cos\phi_1}$$
(9)

e,

$$\frac{E_{t}}{E_{i}} = t_{01s} = \frac{2n_{0}Cos\phi_{0}}{n_{0}Cos\phi_{0} + n_{1}Cos\phi_{1}}$$
(10)

Onde, r_s e t_s são, respectivamente, os coeficientes de reflexão e transmissão de Fresnel, para polarização perpendicular.

Nesta mesma teoria abordada por Azzam e Bashara ^[70], também considera o caso da reflexão e transmissão em uma estrutura isotrópica planar e estratificada. O método de adição de múltiplas reflexões não é prático. Portanto, considera-se outra aproximação baseada no fato de que as equações que governam a propagação de luz são lineares e que a continuidade dos campos tangenciais através de uma interface entre dois meios isotrópicos pode ser considerada como uma transformação de matrizes lineares de 2x2. Considera-se uma estrutura estratificada com uma sequência de camadas paralelas (1,2,3,...,j,...m) entre dois meios: o ambiente (0) e o substrato (m+1), sendo todos os meios homogêneos e isotrópicos. Assim, uma onda plana monocromática incidente no meio (0) gera uma onda refletida no mesmo meio e uma onda transmitida no meio (m+1). O campo total dentro a j-ésima camada consiste de duas ondas planas, uma denotada com (+) viajando no mesmo sentido de propagação e a outra denotada com (-) viajando no sentido contrário, como mostrado na Figura 4.15.

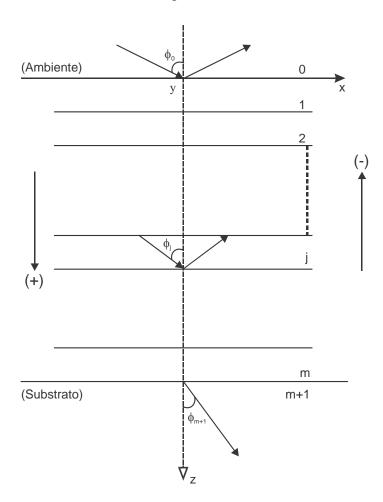


Figura 4.15 – Reflexão e transmissão em uma estrutura estratificada com múltiplas camadas.

Quando a onda incidente está polarizada paralela ou perpendicularmente ao plano de incidência, todas as ondas planas excitadas pela onda incidente nas diferentes camadas da estrutura estarão polarizadas da mesma forma. Considerando os campos em dois planos diferentes $z \in z$ paralelos aos contornos da estrutura, pela linearidade do sistema, E(z') e E(z'') estarão relacionados por,

$$\begin{bmatrix} E^{+}(z') \\ E^{-}(z') \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E^{+}(z'') \\ E^{-}(z'') \end{bmatrix}$$
(11)

ou, simplificando a notação,

$$E(z') = SE(z'') \tag{12}$$

onde,

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix}$$
 (13)

Esta equação define a *matriz de dispersão* (S), que representa as propriedades de reflexão e transmissão totais da estrutura estratificada e pode ser representada como um produto das matrizes de interface (I) e camada (L) que, por sua vez, descrevem os efeitos das interfaces e camadas individuais da estrutura estratificada inteira, tomada em ordem:

$$S = I_{01}L_1I_{12}L_2...I_{(j-1)j}L_j...L_mI_{m(m+1)}$$
(14)

As matrizes I e L, necessárias para se determinar a matriz de dispersão S, são obtidas de forma individual. Primeiramente, a matriz I da interface entre dois meios (a, b) é da forma,

$$I_{ab} = \begin{bmatrix} 1/t_{ab} & r_{ab}/t_{ab} \\ r_{ab}/t_{ab} & 1/t_{ab} \end{bmatrix} = 1/t_{ab} \begin{bmatrix} 1 & r_{ab} \\ r_{ab} & 1 \end{bmatrix}$$
 (15)

onde, r_{ab} e t_{ab} são os coeficientes de reflexão e transmissão de Fresnel da interface e devem ser obtidos usando os índices de refração dos dois meios que definem a interface e o ângulo de incidência local. Isto pode ser obtido pela aplicação repetida da Lei de Snell,

$$n_0 Sen \phi_0 = n_1 Sen \phi_1 = \dots = n_i Sen \phi_i = \dots = n_{m+1} Sen \phi_{m+1}$$
 (16)

Agora, o efeito da propagação através de um filme homogêneo de índice de refração n e espessura d está expresso pela matriz de camada, da forma,

$$L = \begin{bmatrix} e^{j\beta} & 0\\ 0 & e^{-j\beta} \end{bmatrix}$$
 (17)

onde a diferença de fase β é dada por,

$$\beta = \frac{2\pi dn}{\lambda} Cos\phi \tag{18}$$

com ϕ representando o ângulo entre a direção de propagação na camada e a normal na interface, paralelo ao eixo z como mostrado na Figura 4.15.

Com as matrizes de interface I e de camada L obtém-se a matriz de dispersão da estrutura estratificada S, como mostrado na eq.(14). Uma análise matemática extensa produz os coeficientes de reflexão e transmissão totais da estrutura estratificada:

$$R = \frac{E_0^-}{E_0^+} = \frac{S_{21}}{S_{11}} \tag{19}$$

e,

$$T = \frac{E_{m+1}^+}{E_0^+} = \frac{1}{S_{11}} \tag{20}$$

A partir das eq.(19) e (20) fica claro que somente os elementos da primeira coluna da matriz de dispersão S determinam os coeficientes de reflexão e transmissão totais da estrutura estratificada. Os elementos S_{11} e S_{21} da matriz de dispersão têm que ser calculados para ambas as polarizações, paralela e perpendicular ao plano de incidência. Quando for necessário, em cada caso usa-se um subíndice que diferencia cada tipo de polarização. Cada uma das matrizes de interface I que aparecem na eq.(14) é diferente para as polarizações p e s, enquanto que as matrizes de camada L são as mesmas para as duas polarizações. Como exemplo,

para o caso de um único filme entre dois meios semi-infinitos, a equação da matriz de dispersão fica,

$$S = I_{01} L_1 I_{12}$$
 (21)

Depois de substituir as eq.(15) e (17) fica,

$$S = \frac{1}{t_{01}t_{12}} \begin{bmatrix} 1 & r_{01} \\ r_{01} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{j\beta} & 0 \\ 0 & e^{-j\beta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & r_{12} \\ r_{12} & 1 \end{bmatrix} = \frac{e^{j\beta}}{t_{01}t_{12}} \begin{bmatrix} (1 + r_{01}r_{12}e^{-2j\beta}) & (r_{12} + r_{01}e^{-2j\beta}) \\ (r_{01} + r_{12}e^{-2j\beta}) & (r_{01}r_{12} + e^{-2j\beta}) \end{bmatrix}$$
(22)

portanto,

$$S_{11} = \left(\frac{e^{j\beta}}{t_{01}t_{12}}\right) \left(1 + r_{01}r_{12}e^{-2j\beta}\right)$$
 (23)

e,

$$S_{21} = \left(\frac{e^{j\beta}}{t_{01}t_{12}}\right) \left(r_{01} + r_{12}e^{-2j\beta}\right)$$
 (24)

Substituindo as eq.(23) e (24) nas eq.(19) e (20), tem-se que os coeficientes de reflexão e transmissão totais da estrutura estratificada para este caso são,

$$R = \frac{r_{01} + r_{12}e^{-2j\beta}}{1 + r_{01}r_{12}e^{-2j\beta}}$$
 (25)

e,

$$T = \frac{t_{01}t_{12}e^{-j\beta}}{1 + r_{01}r_{12}e^{-2j\beta}}$$
 (26)

Para o caso de varias camadas o princípio matemático é o mesmo, sendo resolvido com métodos computacionais. Assim, a Refletância e Transmitância totais são dadas respectivamente por,

$$R = R^2 \tag{27}$$

e,

$$T = 1 - R^2 \tag{28}$$

As simulações desenvolvidas são baseadas nesta teoria de uma estrutura isotrópica planar e estratificada. Foram feitas simulações para o caso da onda incidente com uma polarização paralela ao plano de incidência e considerando um ângulo de incidência da luz de zero grau e um intervalo de comprimentos de onda do feixe incidente variável entre 300 e 1100 nm. Por outro lado, dentro dos parâmetros da simulação, existe a possibilidade de se ajustar três parâmetros fundamentais que são: o número de camadas totais da estrutura estratificada, os índices de refração dos filmes que conformam a estrutura e as espessuras dos mesmos.

Os índices de refração considerados são de 1.91 para as camadas de Si_3N_4 (ímpares) e de 1.46 para as camadas de SiO_2 (pares). As espessuras consideradas são de 240 nm para as camadas ímpares e de 340 nm para as pares. É importante mencionar que para as simulações são considerados dois fatores relacionados com o substrato de vidro no qual o filtro é depositado e que são fornecidos pelo fabricante; o índice de refração que é de 1.5311 e a transmitância que é maior que 90% para o intervalo de comprimentos de onda entre 380 a 2200 nm. O substrato utilizado para depositar os filtros é um vidro da Corning Glass Works © do tipo 7059 de bário borossilicato.

4.2.2. Caracterização dos filtros interferenciais.

Com o objetivo de obter separadamente as características dos filtros ópticos fabricados, foi feita a caracterização da sua transmitância em função do comprimento de onda usando-se um Espectrofotômetro de absorção óptica (Shimadzu, UV-Visible-1650PC), que usa como fonte de luz uma lâmpada halógena de 50 W e uma lâmpada de deutério, este equipamento usa um fotodiodo de silício como detector e opera em um intervalo de comprimentos de onda de 190 a 1100 nm.

Neste trabalho foram fabricados três conjuntos de filtros, com 9, 11 e 13 camadas. Cada filtro foi projetado com camadas alternadas de Si_3N_4 e SiO_2 , com espessuras de 240 e 340 nm e índices de refração de 1.91 e 1.46, respectivamente.

4.2.3. Comparação de resultados: Filtros interferenciais.

Primeiramente, a Figura 4.16 mostra o resultado da comparação entre o espectro de transmitância simulado e a transmitância real medida para um filtro com 9 camadas.

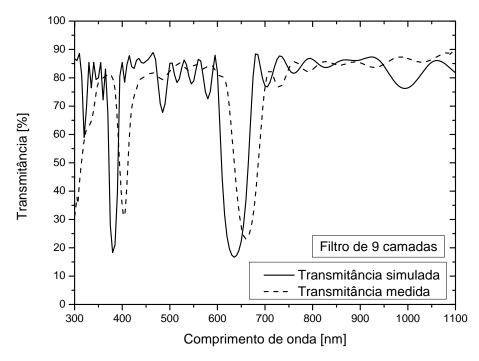


Figura 4.16 – Comparação da transmitância simulada e medida para um filtro com 9 camadas.

Neste caso, pode-se observar que o ponto mínimo do lóbulo principal de transmitância está centralizado em aproximadamente 634 nm para o espectro simulado, enquanto que para o espectro medido este ponto está em 660 nm. Em ambos os casos, a maior atenuação de luz acontece em valores muito próximos, havendo uma boa coincidência entre os dados simulados e medidos. Também, é observado que os valores de Largura a Meia Altura (FWHM – *Full Width at Half Maximum*), também são muito próximos, sendo de 56.4 nm para o espectro simulado e de 50.4 nm para o medido.

Na Figura 4.17 é mostrada a comparação do espectro de transmitância simulado e a transmitância medida para um filtro com 11 camadas.

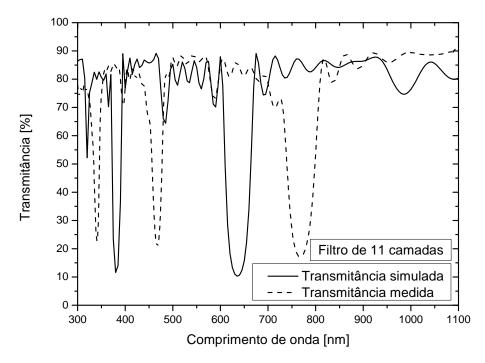


Figura 4.17 – Comparação da transmitância simulada e medida para um filtro com 11 camadas.

A partir desta análise feita para o filtro de 11 camadas, a posição do lóbulo principal no espectro medido está em 768 nm, e no espectro simulado está em 634 nm. Esta diferença pode ser atribuída a uma mudança nas condições de deposição das camadas do filtro, o que possivelmente originou uma mudança nos índices de refração, já que a espessura das camadas foi muito próxima da projetada, sendo confirmada através de uma medida de perfilometria. O reator PECVD utilizado para a deposição das camadas do filtro, também é utilizado para a deposição de outros materiais com composições muito diferentes às utilizadas aqui. Essas deposições anteriores podem ocasionar a variação das propriedades físicas e ópticas dos filmes depositados subseqüentemente. Não obstante, os valores de FWHM novamente são muito próximos, sendo de 54.1 nm para o espectro simulado e de 59.3 nm para o medido.

A Figura 4.18 mostra a comparação entre o espectro de transmitância simulado e a transmitância medida para um filtro com 13 camadas.

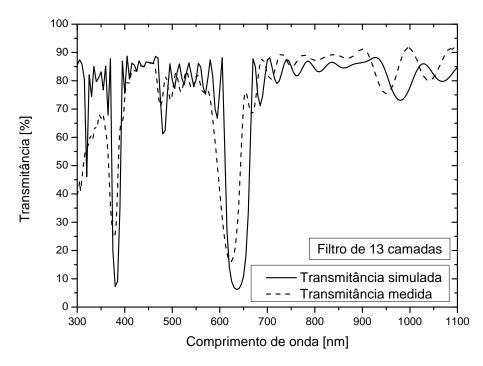


Figura 4.18 – Comparação da transmitância simulada e medida para um filtro com 13 camadas.

Para o filtro com 13 camadas, pode ser observada uma boa coincidência entre o espectro de transmitância simulado e o medido, considerando-se que os mínimos dos lóbulos principais estão localizados em 634 nm e 622 nm, respectivamente, pelo que os valores de maior atenuação de luz acontece em valores próximos a estes mínimos. Da mesma forma, os valores de FWHM também são muito próximos, de 51.8 nm para o simulado e de 48.4 nm para o medido.

Em todos os casos, pode-se observar que existe coincidência não só nos lóbulos principais, mas também nos lóbulos secundários, apesar da diferença para o filtro com 11 camadas. Também, observa-se que o aumento de número de camadas na estrutura dos filtros origina um estreitamento do lóbulo principal de transmitância o que acarreta tanto um aumento da seletividade do filtro, como uma maior atenuação dos lóbulos principais. Foram feitas medidas nas diferentes estruturas fabricadas e também em diferentes regiões de um mesmo filtro, encontrando-se uma muito boa reprodutibilidade nos resultados obtidos.

Também, pode-se demonstrar, através de simulações, a dependência da transmitância às variações dos outros dois parâmetros principais na estrutura do filtro: as espessuras das camadas e os índices de refração. Como exemplo, fazendo uma simulação da transmitância para um filtro com 13 camadas, na Figura 4.19

pode-se observar que quando existe um aumento na espessura das camadas, a conseqüência é um deslocamento dos lóbulos principais e secundários para comprimentos de onda maiores. Baseado neste princípio é possível controlar a região em que o filtro opera.

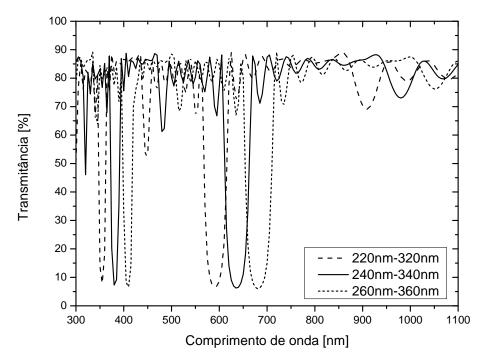


Figura 4.19 – Comparação da transmitância simulada para filtros com 13 camadas com diferentes espessuras das camadas constituintes.

Da mesma forma, o espectro de transmitância de um filtro interferencial tem dependência com os índices de refração dos filmes que o compõem, ou seja, com a própria composição dos filmes. A Figura 4.20 apresenta o exemplo de uma simulação do espectro de transmitância para um filtro com 13 camadas com filmes de Si_3N_4 (n=1.91) e SiO_2 (n=1.46), comparado com outros filtros com filmes de Si_3N_4 e filmes com outras composições de SiO_xN_y que apresentam índices de refração maiores que o do SiO_2 .

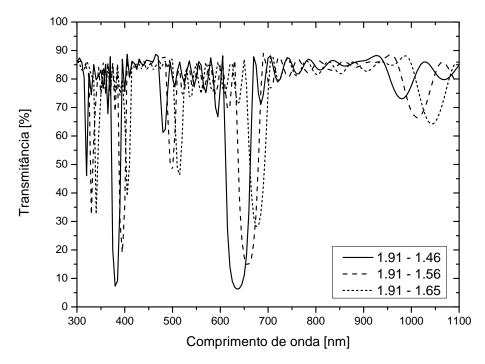


Figura 4.20 – Comparação da transmitância simulada para filtros com 13 camadas com diferentes combinações de índices de refração.

Da Figura 4.20 é observado que usando filmes de Si₃N₄ (n=1.91) e mudando a composição da outra camada constituinte do filtro, o lóbulo principal de transmitância se desloca. Da mesma forma, quanto menor a diferença dos índices de refração das camadas, menor será a atenuação do lóbulo principal.

Assim, ao se projetar um filtro interferencial de multicamadas, procuram-se sempre camadas de filmes que tenham a maior diferença nos valores dos índices de refração para que a atenuação resultante dos lóbulos seja a maior possível. Da mesma forma, existe um compromisso com o número de camadas do filtro (que permite uma maior seletividade do pico de atenuação) e a espessura total do filtro interferencial. Deve-se lembrar que por causa da tensão residual dos filmes utilizados, espessuras grossas podem levar ao trincamento das estruturas. A espessura de cada camada permite determinar a posição do pico de máxima atenuação de transmitância, porém, a escolha de espessuras grossas pode levar também ao mesmo problema de trincamento da estrutura.

4.3. Resultados para o Dispositivo Integrado.

Uma vez fabricadas as micro-lâmpadas e os filtros interferenciais é possível integrálos em uma única estrutura com o objetivo de filtrar um determinado comprimento de onda do feixe luminoso emitido pela micro-lâmpada incandescente. A caracterização para este caso consistiu de medidas da intensidade luz emitida em função do comprimento de onda. Para isto foi usado um Espectrômetro acoplado com a fibra óptica, utilizado para a caracterização das micro-lâmpadas individualmente (equipamento descrito na seção 4.1.2).

A Figura 4.21 mostra uma fotografia óptica de uma seção da lâmina contendo dois conjuntos de dispositivos integrados.

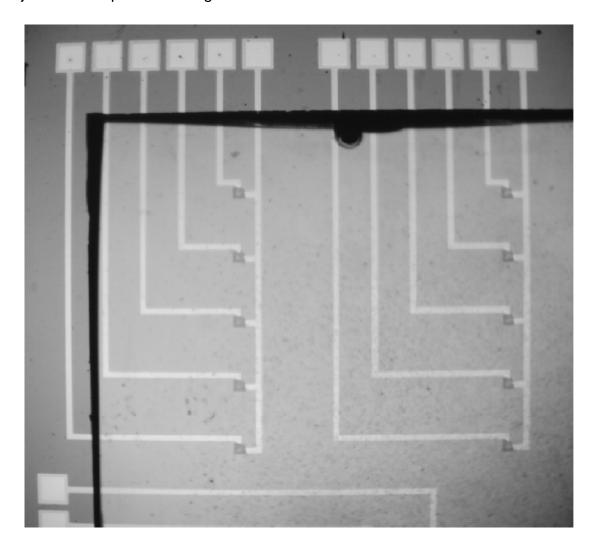


Figura 4.21 – Seção da lâmina com dois conjuntos de micro-lâmpadas com filtro integrado.

Nos resultados apresentados, é mostrado o espectro de transmitância do filtro interferencial (obtido com o espectrofotômetro de absorção óptica) comparado com

três espectros de transmitância obtidos da medida do dispositivo integrado (obtido com o espectrômetro acoplado com uma fibra óptica). Em ambos os casos se faz uso do mesmo conjunto de filtros, mas devendo se considerar que para a caracterização dos filtros individuais, a fonte de luz utilizada foi a lâmpada do próprio espectrofotômetro de absorção óptica e para o dispositivo integrado a fonte de luz utilizada foi a própria micro-lâmpada.

Para esta comparação, foram utilizados três espectros de transmitância de dispositivos integrados diferentes com a finalidade de observar a reprodutibilidade do processo. Primeiramente na Figura 4.22 é mostrada a comparação dos espectros de transmitância quando se utiliza um filtro com 9 camadas.

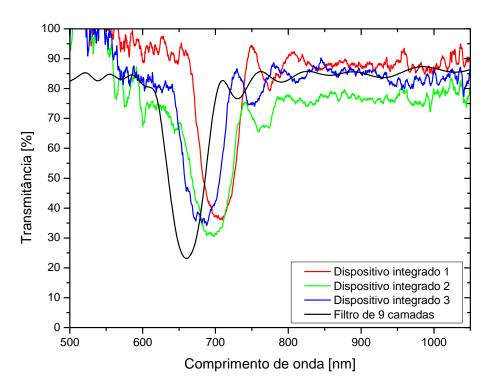


Figura 4.22 – Comparação entre a transmitância medida do filtro e a do dispositivo integrado utilizando um filtro com 9 camadas.

Nesta comparação, pode-se observar uma boa coincidência dos lóbulos principais e alguns lóbulos secundários da transmitância do dispositivo integrado. Observa-se também uma boa reprodutibilidade para os diferentes dispositivos integrados com uma variação do valor do pico de máxima atenuação de aproximadamente 46 nm. É importante destacar que para o caso dos dispositivos integrados, o espectro de transmitância para valores acima de 1000 nm não são totalmente confiáveis, já que

os valores de Sensitividade Relativa do detector usado no espectrômetro de fibra óptica são quase zero nesta região, como mostrado na Figura 4.23.

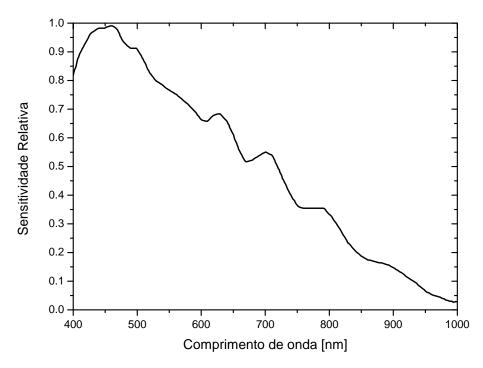


Figura 4.23 – Sensitividade relativa do detector usado para a caracterização do dispositivo integrado.

Igualmente, os valores de transmitância para comprimentos de onda inferiores a 550 nm, não são considerados para o dispositivo integrado, já que neste intervalo não se tem emissão significativa de luz, tal como pode ser confirmado nos próprios espectros de intensidade de luz da micro-lâmpada, como mostrado na Figura 4.5, 4.6 ou 4.7. A Figura 4.24 mostra agora a comparação dos espectros de transmitância quando se utiliza um filtro com 11 camadas.

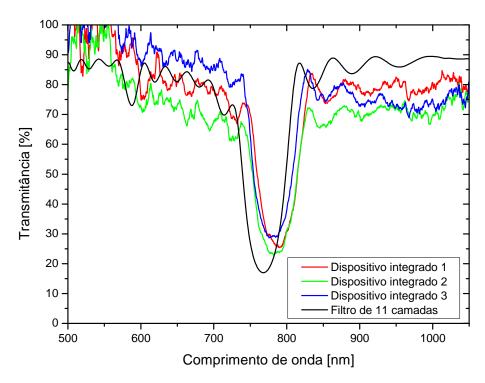


Figura 4.24 – Comparação entre a transmitância medida do filtro e a do dispositivo integrado utilizando um filtro com 11 camadas.

Para este caso, utilizando um filtro de 11 camadas, também é observada uma boa coincidência dos lóbulos principais e secundários dos espectros. Como no caso anterior, as duas considerações para os espectros dos dispositivos integrados têm que ser feitas também aqui. Para comprimentos de onda maiores que 1000 nm e menores que 550 nm, os valores de transmitância são desconsiderados. Observa-se também aqui uma boa reprodutibilidade para os diferentes dispositivos integrados com uma variação do valor do pico de máxima atenuação de aproximadamente 23 nm. Da mesma forma, não é observada uma variação significativa da posição do pico de máxima atenuação do espectro medido no filtro individual e no dispositivo integrado. Finalmente, a Figura 4.25 mostra a comparação dos espectros de transmitância utilizando um filtro com 13 camadas.

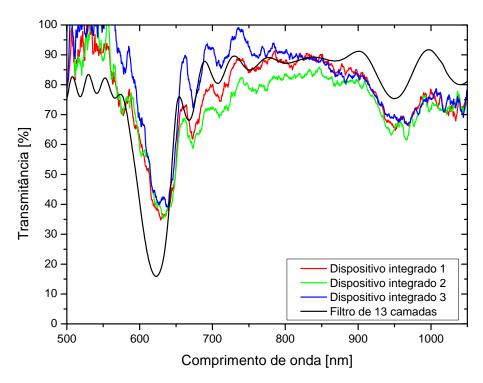


Figura 4.25 – Comparação entre a transmitância medida do filtro e a do dispositivo integrado utilizando um filtro com 13 camadas.

Igual aos casos anteriores, quando se utiliza um filtro de 13 camadas, existe uma boa coincidência de lóbulos principais e secundários ao se compararem os espectros de transmitância do filtro individual com os dos dispositivos integrados. Observa-se também uma boa reprodutibilidade para os diferentes dispositivos integrados com uma variação do valor do pico de máxima atenuação de aproximadamente 9 nm.

Nos gráficos das Figuras 4.22, 4.24 e 4.25 observa-se que existe um leve deslocamento dos espectros de transmitância dos dispositivos integrados, quando são comparados com o do filtro independente. A diferença na posição do pico de atenuação do espectro do filtro individual e do dispositivo integrado pode estar relacionada com a montagem de medida para o dispositivo integrado: dado que a micro-lâmpada emite em todas as direções e a coleta de luz é realizada através de uma fibra óptica na qual não temos total garantia que tenha ficado exatamente a 90º da interface do filtro, um leve deslocamento do pico de atenuação por causa do ângulo de detecção é muito provável. Para demonstrar isso, na Figura 4.26 observase o efeito do ângulo de detecção na posição do pico de máxima atenuação para um filtro com 13 camadas.

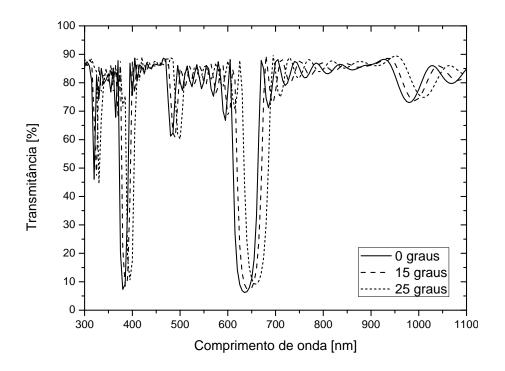


Figura 4.26 – Espectros de transmitância simulada para luz detectada em diferentes ângulos.

Como pode ser observado na Figura 4.26, para cada variação do ângulo de detecção observa-se um deslocamento do pico de máxima atenuação. Inclusive observa-se uma variação no valor de transmitância para diferentes ângulos de detecção, tal como foi observado nos resultados experimentais mostrados nas Figuras 4.22, 4.24 e 4.25.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. Conclusões.

Foi apresentada a simulação, fabricação e caracterização de dois tipos de dispositivos ópticos: as micro-lâmpadas e os filtros interferenciais. Embora esses dispositivos já tenham sido estudados anteriormente pelo grupo de GNMD, com este trabalho foi possível otimizar as características elétricas e ópticas destes dispositivos e integrá-los em um dispositivo único com características próprias. Para cada dispositivo, foram feitas simulações numéricas que reproduziram o seu comportamento o que permitiu, posteriormente, definir os materiais e geometrias necessários para o seu correto funcionamento.

As micro-lâmpadas foram construídas com um filamento de cromo que atinge temperaturas de incandescência quando passa uma corrente elétrica por ele. O filamento de cromo ficou embutido entre duas camadas PECVD de oxinitreto de silício, o que possibilitou que o filamento se mantivesse isolado do ambiente, aumentando assim o tempo de vida útil da micro-lâmpada. Foi feita uma corrosão anisotrópica do substrato de silício a fim de deixar suspenso o filamento e de reduzir a dissipação térmica nessa região o que também permitiu ao filamento metálico atingir temperaturas de incandescência mesmo com baixas tensões.

Os filtros interferenciais consistiram de uma série de camadas PECVD alternadas de Si₃N₄ e SiO₂, com espessuras de 240 e 340 nm e índices de refração de 1.91 e 1.46, respectivamente. Esta estrutura, cujo funcionamento é similar a uma rede de Bragg, foi usada como um filtro óptico que permitia bloquear certos comprimentos de onda. Neste trabalho foram fabricadas três estruturas de filtros, com 9, 11 e 13 camadas, todas elas sobre um substrato de vidro. A integração destes dois dispositivos foi feita através da união das duas lâminas utilizando-se uma graxa de alto vácuo a base de silício. Não foi necessária uma união hermética da estrutura, pois cada dispositivo funciona apropriadamente por separado. Apesar disso, um alinhamento micrométrico foi necessário no intuito de melhorar a eficiência do dispositivo integrado.

A caracterização óptica dos filtros interferenciais demonstrou a capacidade desta estrutura de filtrar certos comprimentos de onda. Também, uma comparação com os

espectros de transmitância simulados, demonstraram uma boa coincidência dos lóbulos principais e secundários para os filtros fabricados com 9 e 13 camadas. Para o caso do filtro com 11 camadas observou-se um deslocamento do espectro medido, que foi atribuído a uma mudança na composição dos filmes devido à baixa reprodutibilidade de nosso sistema PECVD quando deposições de filmes com outras composições são realizadas antes da fabricação do filtro. Contudo, as coincidências entre os espectros simulados e medidos são muito boas, sendo obtidas assim diferenças mínimas entre os valores de FWHM medidas e projetadas (6 nm para o caso do filtro com 9 camadas, de 5.2 nm para o filtro com 11 camadas e de 3.4 nm para o de 13 camadas).

A caracterização das micro-lâmpadas, usando uma fonte programável para aplicar uma tensão elétrica nas estruturas e um espectrômetro de alta resolução acoplado com uma fibra óptica, mostrou que existem dois valores de corrente necessários: um para que a micro-lâmpada comece a emitir luz e outro, chamado de limiar, que determina o valor máximo possível onde a emissão de luz da micro-lâmpada é estável. Foram observados três conjuntos deste par de valores de correntes elétricas: 74-81 mA, 102-109 mA e 107-114 mA. Apesar desses valores mudaram levemente, a diferença entre eles praticamente se manteve constante entorno de 7 mA. Com isto, conclui-se que as micro-lâmpadas apresentam um comportamento reprodutível e que as mudanças são atribuídas a imprecisões produzidas ao se fazer os contatos elétricos das micro-pontas da fonte de tensão com os pads das microlâmpadas, o que acaba refletindo em uma variação da resistência de contato e, portanto, da corrente necessária para se conseguir a incandescência. Na comparação dos espectros de intensidade de luz emitida com os resultados da simulação da aproximação de um corpo cinza, foi observado que as micro-lâmpadas têm o comportamento esperado para um corpo com emissão térmica. Foi possível também determinar, através das simulações, as temperaturas atingidas pelas microlâmpadas quando elas começam a emitir luz e quando chegam no máximo ponto de estabilidade, sendo de 1450 K e 1650 K, respectivamente.

Finalmente, foi realizada a caracterização da transmitância do dispositivo que integra a micro-lâmpada e o filtro interferencial, onde a luz emitida pela própria micro-lâmpada servia como fonte luminosa para a medida do espectro de transmissão. Os resultados destas medidas foram comparados com o espectro de transmitância do

filtro interferencial medido separadamente obtendo uma boa coincidência dos lóbulos principais e secundários dos dois espectros de transmitância para os três tipos de filtros interferenciais: com 9, com 11 e com 13 camadas. Em alguns casos, foi observado um leve deslocamento dos lóbulos dos espectros de transmitância dos dispositivos integrados quando comparados ao espectro do filtro independente o que é atribuído a uma detecção de luz em um ângulo não perpendicular à posição da micro-lâmpada.

5.2. Trabalhos Futuros.

Como proposta para trabalhos futuros, propõe-se fabricar algumas estruturas novas. Uma destas propostas é fabricar a micro-lâmpada e filtros em uma mesma seqüência de processo. Para isto, propõe-se utilizar os dois lados da lâmina de silício. Primeiro, o filtro interferencial seria fabricado na parte posterior da lâmina e, posteriormente, a micro-lâmpada seria fabricada na parte anterior da lâmina. Ao se fazer a cavidade no silício, para deixar suspenso o filamento, ao invés de ser uma corrosão parcial, seria feita uma corrosão total do substrato até atingir o filtro, deixando este último como uma membrana suspensa. Com isto, pode-se obter a integração dos dois dispositivos em um mesmo processo de fabricação.

Outra proposta é construir o filtro interferencial diretamente acima da superfície da micro-lâmpada. Com isto, também se teria uma integração em um único processo, ao invés de dois dispositivos separados. Nesta proposta deve-se ter cuidado com a espessura final da estrutura contendo o filamento e filtro suspenso para evitar o eventual trincamento da estrutura.

Outra das propostas para o futuro é fabricar várias micro-lâmpadas, tendo todas elas um contato elétrico comum. Com esse objetivo, antes do término deste trabalho, conseguiu-se obter alguns resultados preliminares sobre esta nova estrutura. A proposta foi obter três micro-lâmpadas em paralelo. O processo de fabricação consiste das mesmas etapas das micro-lâmpadas que foram apresentadas neste trabalho. São propostos três tamanhos diferentes de filamentos incandescentes, havendo assim filamentos de 20x20 µm, 20x40 µm e 20x80 µm. Para isto, foram

desenhadas as máscaras para serem conseguidas as geometrias propostas. Na Figura 5.1 é mostrando uma secção detalhada do conjunto de máscaras utilizadas para se fabricar uma micro-lâmpada com filamento de 20x20 µm.

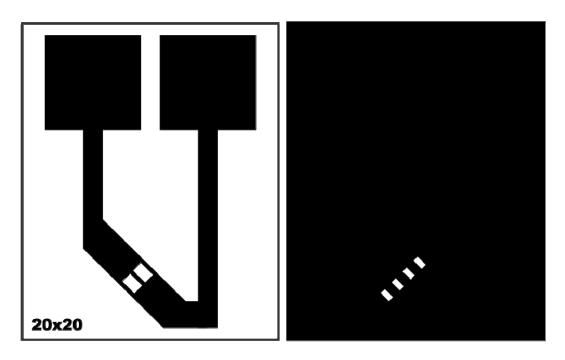


Figura 5.1 - Conjunto de máscaras de micro-lâmpadas com filamento de $20x20~\mu m$.

Na Figura 5.2 são mostradas as máscaras utilizadas para definir a geometria para uma micro-lâmpada com filamento de $20x40~\mu m$.

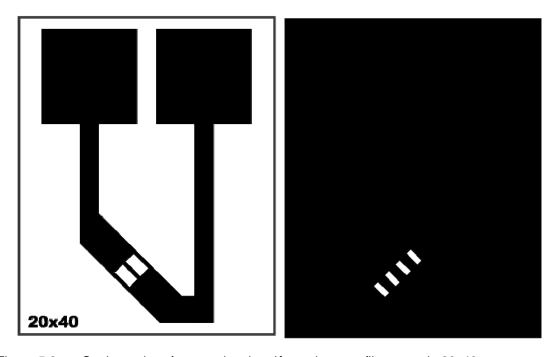


Figura 5.2 - Conjunto de máscaras de micro-lâmpadas com filamento de $20x40 \mu m$.

E finalmente, na Figura 5.3 são mostradas as máscaras utilizadas para definir a geometria do filamento de $20x80~\mu m$.

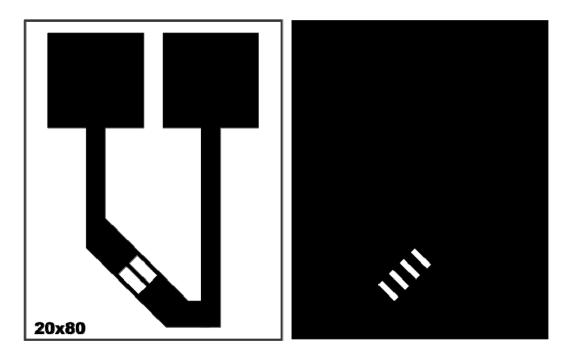


Figura 5.3 – Conjunto de máscaras de micro-lâmpadas com filamento de 20x80 μm.

Destes conjuntos de máscaras, pode-se observar que a diferença fundamental entre elas é o tamanho da cavidade que será feita no silício, no intuito de deixar o filamento suspenso. Quando as aberturas no desenho da máscara são mais compridas, é possível obter uma cavidade maior. Em todos os casos, uma terceira máscara é utilizada, para definir os contatos elétricos das micro-lâmpadas, sendo esta última máscara igual a descrita neste trabalho. Fotografias ópticas destas micro-lâmpadas são mostradas na Figura 5.4.

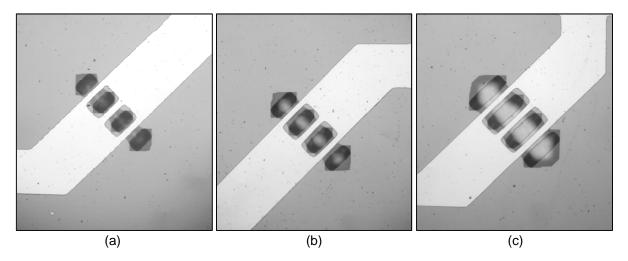


Figura 5.4 – Micro-lâmpadas triplas com filamentos de três diferentes tamanhos: a) 20x20 μ m, b) 20x40 μ m, e c) 20x80 μ m

Na Figura 5.5 pode se observar uma fotografia óptica de uma micro-lâmpada com filamento de $20x80~\mu m$ com foco no fundo da cavidade.

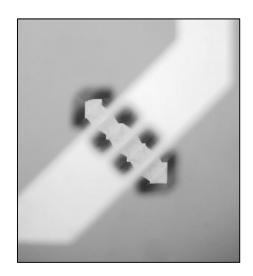


Figura 5.5 – Cavidade no silício para uma micro-lâmpada tripla.

Da Figura 5.5, observa-se que, ao ser corroído o substrato de silício, as quatro aberturas desenhadas na máscara formaram uma única cavidade maior, o que acaba deixando os três filamentos suspensos. Algumas provas, aplicando tensão elétrica, foram feitas nestas últimas estruturas e na Figura 5.6 mostra-se um resultado preliminar de três micro-lâmpadas em paralelo emitindo luz.

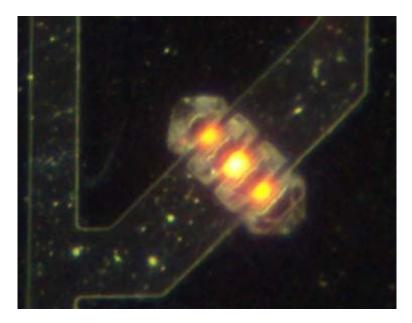


Figura 5.6 – Três micro-lâmpadas em paralelo emitindo luz.

Nas micro-lâmpadas com cavidades de $20x20~\mu m$ e $20x40~\mu m$, não foram feitas caracterizações elétricas. Para um trabalho futuro, se propõe fabricar estas estruturas com camadas de oxinitreto de silício mais grossas para determinar se ocorre uma possível melhora do tempo de vida útil dos filamentos incandescentes.

Também, é necessária uma caracterização e análise completa destas novas estruturas, sendo considerados os diferentes tamanhos e se esses tamanhos poderiam influenciar no nível de intensidade luminosa das micro-lâmpadas. Também, propõe-se integrar estas estruturas propostas com os filtros interferenciais, a fim de se determinar se a faixa do espectro visível que é filtrada muda de alguma forma.

Finalmente, no intuito de otimizar a caracterização elétrica, propõe-se soldar fios nos pads dos dispositivos em uma placa externa, onde os contatos com as micro-pontas da fonte de tensão sejam mais precisos.

ANEXO 1

Programa para simular o comportamento de Filtros Interferenciais Multicamadas

Os dados iniciais são o comprimento de onda da luz incidente (λ) variável em um intervalo, o número total de filmes internos (y), ou seja, sem contar o meio incidente e o substrato e considerando que a estrutura consiste de duas camadas alternadas e periódicas, o índice de refração do ar ($n_o=1$), os índices de refração dos filmes (n_a , n_b), o índice de refração do substrato de vidro ($n_s=1.5311$), e as espessuras dos filmes (n_a , n_b).

 $\lambda := 300 \text{nm}, 305 \text{nm}... 1100 \text{nm}$

y := 13

 $n_0 := 1$

 $n_a := 1.91$

 $n_b := 1.46$

 $n_s := 1.5311$

 $d_a := 240 nm$

 $d_{h} := 340nm$

Os filmes são representados como impares e pares com as letras (a) e (b), respectivamente, e para cada um destes correspondem os valores de (n_a), (n_b), (d_a) e (d_b). Algumas das considerações iniciais da simulação são as seguintes:

i := 0 ... y + 1

 $d_{\Omega} := 1 \cdot mm$

 $\phi_{ar} := 0 \text{deg}$

Onde o vetor i representa o número de filmes totais, ou seja, considerando desde o meio de incidência (0) até o substrato (y+1), a espessura do ar é (d_o) e é considerada com um valor muito grande, e finalmente o ângulo de incidência da luz (ϕ_{ar}) com um valor fixo.

Com o subprograma seguinte se define um vetor que contém os valores dos índices de refração. A asignação dos valores se faz de forma alternada, definindo o valor de (n_a) as camadas impares, e o valor de (n_b) as camadas pares. Este vetor define nos seus extremos, os valores dos índices de refração do meio incidente e do substrato.

```
\begin{array}{l} n := & \begin{array}{l} n_0 \leftarrow n_0 \\ \text{for } i \in 1\,,3\,..\,y \end{array} \\ & \begin{array}{l} n_i \leftarrow n_a \\ \text{break if } i = y \\ i \leftarrow i + 2 \text{ otherwise} \end{array} \\ & \begin{array}{l} \text{for } i \in 2\,,4\,..\,y \\ & \begin{array}{l} n_i \leftarrow n_b \\ \text{break if } i = y \\ i \leftarrow i + 2 \text{ otherwise} \end{array} \\ & \begin{array}{l} n_i \leftarrow n_b \\ \text{break if } i = y \\ i \leftarrow i + 2 \text{ otherwise} \end{array} \end{array}
```

Agora, com o subprograma seguinte se faz a definição do vetor com os valores das espessuras dos filmes internos da estrutura. Da mesma forma que na etapa anterior, a asignação dos valores se faz de forma alternada, definindo o valor de (da) as camadas impares, e o valor de (db) as camadas pares. Nos extremos se definem os valores das espessuras do meio incidente e substrato com valores muito grandes em comparação com os valores das espessuras das camadas.

```
\begin{array}{l} d := & d_0 \leftarrow d_0 \\ & \text{for } i \in 1\,,3\,..\,y \\ & d_i \leftarrow d_a \\ & \text{break if } i = y \\ & i \leftarrow i+2 \text{ otherwise} \\ & \text{for } i \in 2\,,4\,..\,y \\ & d_i \leftarrow d_b \\ & \text{break if } i = y \\ & i \leftarrow i+2 \text{ otherwise} \\ & d_{y+1} \leftarrow d_0 \end{array}
```

Na próxima etapa, se faz o calculo do ângulo de incidência em cada camada da estrutura (ϕ), em função do primeiro ângulo de incidência definido para o meio 0. Isto é feito aplicando em cada caso a Lei de Snell. O ângulo obtido em uma camada é usado para o calculo na seguinte.

$$\begin{split} \varphi \Big(\varphi_{ar} \Big) &:= \left| \begin{array}{l} \varphi_0 \leftarrow \varphi_{ar} \\ \text{for } i \in 1 .. \ y \\ \\ \varphi_i \leftarrow \text{asin} \bigg(\frac{n_{i-1}}{n_i} \cdot \text{sin} \big(\varphi_{i-1} \big) \bigg) \\ \text{break if } i = y \\ \text{i} \leftarrow \text{i} + 1 \quad \text{otherwise} \\ \\ \varphi_{y+1} \leftarrow \text{asin} \bigg(\frac{n_{i-1}}{n_0} \cdot \text{sin} \big(\varphi_{i-1} \big) \bigg) \\ \end{split} \right.$$

O ângulo de fase é calculado para cada camada, da seguinte forma, considerando que, $\kappa(\lambda) := \frac{2\pi}{\lambda}$

$$\beta \big(\lambda, \varphi_{ar} \big) := \text{ for } i \in 1 .. \text{ y}$$

$$\beta_i \leftarrow \kappa(\lambda) \cdot d_i \cdot n_i \cdot \frac{1}{\cos \left(\varphi \left(\varphi_{ar} \right)_i \right)}$$
 break if $i = y$
$$i \leftarrow i + 1 \text{ otherwise}$$

Neste ponto são calculados os coeficientes de reflexão (r) e transmissão (t) de Fresnel para o caso de uma polarização paralela entre as interfaces.

$$\begin{split} r_p\big(\varphi_{ar}\big) \coloneqq & \quad \text{for} \quad i \in 0 ... y \\ & \quad r_{p_i} \leftarrow \left(\frac{n_{i+1} \cdot \text{cos}\big(\varphi\big(\varphi_{ar}\big)_i\big) - n_i \cdot \text{cos}\big(\varphi\big(\varphi_{ar}\big)_{i+1}\big)}{n_{i+1} \cdot \text{cos}\big(\varphi\big(\varphi_{ar}\big)_i\big) + n_i \cdot \text{cos}\big(\varphi\big(\varphi_{ar}\big)_{i+1}\big)}\right) \\ & \quad \text{break} \quad \text{if} \quad i = y-1 \\ & \quad i \leftarrow i+1 \quad \text{otherwise} \\ & \quad r_{p_y} \leftarrow \left(\frac{n_{y+1} \cdot \text{cos}\big(\varphi\big(\varphi_{ar}\big)_y\big) - n_y \cdot \text{cos}\big(\varphi\big(\varphi_{ar}\big)_{y+1}\big)}{n_{y+1} \cdot \text{cos}\big(\varphi\big(\varphi_{ar}\big)_y\big) + n_y \cdot \text{cos}\big(\varphi\big(\varphi_{ar}\big)_{y+1}\big)}\right) \end{split}$$

$$\begin{split} t_p\big(\varphi_{ar}\big) &:= \left| \begin{array}{l} \text{for} \quad i \in 0 \, .. \, y \\ \\ t_{p_i} \leftarrow \left(\frac{2 \cdot n_i \cdot \cos \big(\varphi \big(\varphi_{ar}\big) i\big)}{n_{i+1} \cdot \cos \big(\varphi \big(\varphi_{ar}\big) i\big) + n_i \cdot \cos \big(\varphi \big(\varphi_{ar}\big) i+1\big)} \right) \\ \text{break} \quad \text{if} \quad i = y-1 \\ i \leftarrow i+1 \quad \text{otherwise} \\ \\ t_{p_y} \leftarrow \left(\frac{2 \cdot n_y \cdot \cos \big(\varphi \big(\varphi_{ar}\big) y\big)}{n_{y+1} \cdot \cos \big(\varphi \big(\varphi_{ar}\big) y\big) + n_y \cdot \cos \big(\varphi \big(\varphi_{ar}\big) y+1\big)} \right) \end{split}$$

A matriz de interface I é calculada a seguir. Esta matriz descreve os efeitos das interfaces individuais da estrutura estratificada inteira. Aqui se consideram para o calculo os valores dos coeficientes de reflexão (r) e transmissão (t) de Fresnel para o caso de uma polarização paralela entre as interfaces.

$$\begin{split} I_p\big(\varphi_{ar}\big) &:= \text{ for } i \in 0 ... y \\ \\ I_i &\leftarrow \left(\frac{1}{t_p\big(\varphi_{ar}\big)_i}\right) \cdot \begin{pmatrix} 1 & r_p\big(\varphi_{ar}\big)_i \\ r_p\big(\varphi_{ar}\big)_i & 1 \end{pmatrix} \\ \text{ break } \text{ if } i = y \\ i \leftarrow i + 1 & \text{ otherwise } \end{split}$$

Agora é calculada a matriz de camada L, na sua vez esta matriz descreve os efeitos das camadas individuais da estrutura estratificada inteira.

$$\begin{split} L \Big(\lambda, \varphi_{ar} \Big) &:= \text{ for } \quad i \in 1 ... y \\ L_i \leftarrow \begin{pmatrix} e^{i \, \beta \left(\lambda, \, \varphi_{ar} \right) i} & 0 \\ 0 & e^{-i \, \beta \left(\lambda, \, \varphi_{ar} \right) i} \end{pmatrix} \\ \text{break } \quad \text{if } \quad i = y \\ i \leftarrow i + 1 \quad \text{otherwise} \end{split}$$

A matriz de dispersão (S) que representa as propriedades de reflexão e transmissão totais da estrutura estratificada é calculada. Esta matriz pode ser representada como um produto das matrizes de interface (I) e camada (L). Aqui se faz o calculo para o caso quando existe uma polarização paralela.

$$\mathtt{S}_{p}\!\left(\lambda,\varphi_{ar}\right) := \left[\prod_{i\,=\,0}^{y-1}\,\left(\mathtt{I}_{p}\!\left(\varphi_{ar}\right)_{i}\!\cdot\!\mathsf{L}\!\left(\lambda,\varphi_{ar}\right)_{i+1}\right)\right]\!\cdot\!\left[\left(\mathtt{I}_{p}\!\left(\varphi_{ar}\right)\right)_{y}\right]$$

Assim, os coeficientes reflexão e transmissão total são,

$$\mathsf{R}_{p}\!\!\left(\lambda,\varphi_{ar}\right) \coloneqq \frac{\mathsf{S}_{p}\!\!\left(\lambda,\varphi_{ar}\right)_{1,0}}{\mathsf{S}_{p}\!\!\left(\lambda,\varphi_{ar}\right)_{0,0}} \qquad ; \qquad \mathsf{T}_{p}\!\!\left(\lambda,\varphi_{ar}\right) \coloneqq \frac{1}{\mathsf{S}_{p}\!\!\left(\lambda,\varphi_{ar}\right)_{0,0}}$$

Finalmente são calculadas a Refletância e Transmitância da estrutura para uma polarização paralela.

$$\begin{split} &\mathsf{R}\!\left(\lambda,\varphi_{ar}\right) \coloneqq \!\left[\!\left(\left.\left|\mathsf{R}_{p}\!\left(\lambda,\varphi_{ar}\right)\right|\right.\right)^{2}\right] \!\cdot\! 100 \\ &\mathsf{T}\!\left(\lambda,\varphi_{ar}\right) \coloneqq \!\left[1 - \!\left(\left.\left|\mathsf{R}_{p}\!\left(\lambda,\varphi_{ar}\right)\right|\right.\right)^{2}\right] \!\cdot\! 100 \end{split}$$

ANEXO 2

Programa para simular o Poder Emissivo Espectral de uma fonte de luz incandescente.

Primeiramente são definidas algumas constantes físicas.

$$c = 2.998 \times 10^8 \frac{m}{s}$$
 Velocidade da luz.

$$h := 6.62606896 \cdot 10^{-34} \cdot J \cdot s$$
 Constante de Planck.

$$k := 1.3806503 \cdot 10^{-23} \cdot \frac{J}{\kappa}$$
 Constante de Boltmann.

$$\lambda := 400 \text{nm}, 410 \text{nm}... 1000 \text{nm}$$
 Intervalo de comprimentos de onda.

Com isto, o Poder Emissivo Espectral para o caos de um corpo negro ideal é:

$$E(\lambda, Tr) := \left(\frac{2\pi \cdot hc^2}{\lambda^5}\right) \cdot \left[\frac{1}{e^{\left(\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k \cdot Tr}\right)} - 1}\right]$$

Por outro lado, para o caso da aproximação do corpo cinza deve-se considerar o valor da Emissividade do material, que para o caso do cromo foi considerado,

$$\varepsilon_{\text{mat}} := 0.1$$

Assim, tem-se que o Poder Emissivo Espectral para um filamento de cromo é:

$$\mathsf{E}_{\mathsf{mat}}(\lambda,\mathsf{Tr}) \coloneqq \varepsilon_{\mathsf{mat}} \cdot \left(\frac{2\pi \cdot \mathsf{h} \, \mathsf{c}^2}{\lambda^5}\right) \cdot \left\lceil \frac{1}{e^{\left(\frac{\mathsf{h} \cdot \mathsf{c}}{\lambda \cdot \mathsf{k} \cdot \mathsf{Tr}}\right)} - 1} \right\rceil$$

Para ambos os casos, Tr é a temperatura do corpo estudado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

¹ Born, M.; Wolf, E. *Principles of Optics*. Cambridge: Pergamon Press. 0-08-026481-6, 1991.

² Walker, B.H. *Optical engineering fundamentals: historical review*. Bellingham, WA: SPIE Press. 9780819478771.

Wong, H.; Iwai, H. The road to miniaturization. From physics world. Bristol: IOP Publishing, ISSN 0953-8585. September 2005.

⁴ Peercy, P.S. The drive to miniaturization. **Nature Magazine**, v. 406, p.1023, 2000.

⁵ Takashi, I.; Okazaki, S. Pushing the limits of lithography. **Nature Magazine**, v. 406, p.1027, 2000.

⁶ Devoret, M.H.; Schoelkopf, R.J. Amplifying quantum signals with the single-electron transistor. **Nature Magazine**, v. 406, p.1039, 2000.

⁷ Lindert, N; Chang, L; Choi, Y.K; Anderson, E; Lee, W.C; King, T.J; Bokor, J; Hu, C. Sub-60-nm quasi-planar FinFETs fabricated using a simplified process. IEEE Electron Device Letters, v. 22, n. 10, p. 487-489, 2001.

⁸ Kim, K; Kwon, O; Seo, J; Won, T. Nanoscale device modeling and simulation: fin field-effect transistor (FinFET). Japanese Journal of Applied Physics, v. 43, p.3784-3789, 2004.

⁹ Nishihara, H.; Haruna, M.; Suhara, M.T. *Optical integrated circuits*. Optical and Electro-Optical Engineering Series. New York: McGraw-Hill, 1989.

¹⁰ Reed, G. The optical age of silicon. **Nature Magazine**, v. 427, p.595, 2004.

Candelaria, J.J. Monolithic integration requires clever process, packaging schemes. Photonics Strategy Physical Sciences Research Labs, Motorola, Tempe, Ariz., EE Times, February 2002.

Humphreys, B.; O'Donnell, A. A building block approach to manufacturing monolithic photonic integrated circuits. **MetroPhotonics**, Ottawa, Canada,

2002.

- Low, Y.; Scotti, R.; Ramsey, D.; Bolle, C. Packing of optical MEMS devices. **Journal of Electronic Packing**, v. 125, p.325, 2003.
- ¹⁴ Romig, A.D.; Dugger, M.; McWhorter, P. Material issues in microelectromechanical devices: science, engineering, manufacturability and reliability. **Acta Materialia** Inc. Published by Elsevier Ltd. p.5837, 2003.
- Samson, S. et. al. Fabrication processes for packaged optical MEMS devices. In: Proceedings of the 2005 International Conference on MEMS, NANO and Smart Systems (ICMENS'05), 2005.
- Bona, G.L.; Germann, R.; Offrein, B.J. SiON high-refractive-index waveguide and planar lightwave circuits. IBM Journal of Research & Development, v. 47, n. 2/3, p.239, 2003.
- Wong, H. Recent developments in silicon optoelectronic devices. **Microelectronics Reliability.** v. 42, p.317-326, 2002.
- Wong, H.; Filip, V.; Wong, C.K.; Chung, P.S. Silicon integrated photonics for microelectronics evolution. In: Proc. of the 25th International Conference on Microelectronics (MIEL'06), 2006.
- Muller, R. et al. Silicon-compatible waveguides used for an integrated optomechanical pressure sensor. **Optical Materials**, v. 17, p.255-258, 2001.
- 20 Franzo, G.; Coffa, S. Mechanism and performance of forward and reverse bias electroluminescence at 1.54 μm from Er-doped Si diodes. **Journal of Applied Physics**, v. 81, n. 6, p.2784-2793, 1997.
- ²¹ Canham, L.T. Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers. **Applied Physics Letters**, v. 57, n. 10, p.1046-1048, 1990.

²² Pavesi, L. et al. Optical gain in silicon nanocrystals. **Nature Magazine**, v. 408,

p.440, 2000.

- ²³ Claps, R. et al. Observation of stimulated Raman amplification in silicon wavequides. **Optics Express**, v. 11, n. 15, p.1731-1739, 2003.
- Torres, V. et at. Desarrollo de filtros interferenciales para emisores fotoluminiscentes basados en silicio poroso. Boletin de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, vol. 43, n. 2, p.506-509, 2004.
- ²⁵ Bisi, O.; Ossicini, S.; Pavesi, L. Porous silicon: a quantum sponge structure for silicon based optoelectronics. Surface Science Reports, vol. 38, p.1-3, 2000.
- ²⁶ Collins, R.T.; Fauchett, P.M.; Tischler, M.A. Porous silicon: from luminescence to LEDs. **Physics Today**, p.24, January 1997.
- ²⁷ Sze, S.; K. Kwok. *Physics of semiconductor devices*. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, 2007.
- Pereyra, I.; Alayo, M.I. High quality low temperature DPECVD silicon dioxide. Journal of Non-Crystalline Solids, v. 212, p.225-231, 1997.
- Alayo, M.I.; Pereyra, I.; Scopel, W.L.; Fantini, M.C.A. On the nitrogen and oxygen incorporation in plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD) SiOxNy films. Thin Solid Films, v. 402, p.154-161, 2002.
- ³⁰ Criado, D.; Pereyra, I.; Alayo, M.I. Study of nitrogen-rich silicon oxynitride films obtained by PECVD. Materials Characterization v. 50, p.167-171, 2003.
- Criado, D.; Alayo, M.I.; Pereyra, I.; Fantini, M.C.A. Structural analysis of silicon oxynitride films deposited by PECVD. Materials Science and Engineering B

 Solid state materials for advanced technology, v. 112, p.123-127, 2004.
- ³² Alayo, M.I.; Pereyra, I.; Carreño, M.N.P. Thick SiOxNy and SiO₂ films obtained by PECVD technique at low temperatures. **Thin Solid Films**, v. 332, p.40-45, 1998.

- Alayo, M.I.; Criado, D.; Gonçalves, L.C.D.; Pereyra, I. Deposition and characterization of silicon oxynitride for integrated optical applications. **Journal** of Non Crystalline Solids, v. 338-340, p.76-80, 2004.
- Gorecki, C. Optimization of plasma-deposited silicon oxinitride films for optical channel waveguides. Optics and Lasers Engineering, v. 33, p. 15-20, 2000.
- Wörhoff, K. et al. Plasma enhanced chemical vapor deposition silicon oxynitride optimized for application in integrated optics. Sensors and Actuators, A: Physical, v. 74, p.9-12, 1999.
- ³⁶ Huang, Z. et. al. Microstructured silicon photodetector. Applied Physics Letters, v. 89, p.033506, 2006.
- Mastrangelo, C.H.; Yeh, J.; Muller, R. Electrical and optical characteristics of vacuum-sealed polysilicon microlamps. IEEE Transactions on Electron Devices, v. 39, p.1363, 1992.
- ³⁸ Fisher, M.A. Flat panel display with array of micromachined incandescent lamps. **United State Patent** n. 5956003, 1999.
- ³⁹ Tu, J.; Howard, D.; Collins, S.; Smith, R. Micromachined, silicon filament light source for spectrophotometric microsystems. **Applied Optics**, v. 42, n. 13, p.2388-2397, 2003.
- ⁴⁰ Hochberg, F.; Seitz, H.K.; Brown, A.V. A thin-film integrated incandescent display. **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 20, n 11, p.1002, 1973.
- ⁴¹ Hwan, S. et al. Fabrication of transmite-receive devices monolithically integrated with semiconductor optical amplifier. **Japanese Journal of Applied Physics**, v. 47, n. 5, p.3489-3492, 2008.
- ⁴² Lam, C. *Passive optical networks, principles and practice*. Academic Press, Elsevier, 2007.
- Othonos, A.; Kalli, K. Fiber bragg gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing. London: Artech House Optoelectronics Library, 1999.

- ⁴⁴ Matsumoto, S.; Hirabayashi, K.; Sakata, S.; Hayashi, T. Tunable wavelength filter using nano-sized droplets of liquid crystal. IEEE Photonics Technology Letters, v. 11, n. 4, p.442-444, 1999.
- ⁴⁵ Dimmick, T. et al. Compact all-fiber acoustooptic tunable filters with small bandwidth-length product. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 12, n. 9, p.1210-1212, 2000.
- ⁴⁶ Hohlfeld, D.; Epmeier, M.; Zappe, H. A thermally tunable, silicon-based optical filter. **Sensors and Actuators, A: Physical**, v. 103, p.93-99, 2003.
- ⁴⁷ Chung, Y.C. Temperature-tuned ZnS Etalon filters for WDM filters. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 4, n. 6, p.600-602, 1992.
- ⁴⁸ Tayebati, P. et al. Microelectromechanical tunable filter with stable half symmetric cavity. **Electronics Letters**, v. 34, n. 20, p.1967-1968, 1998.
- ⁴⁹ Cocorullo, G.; Della Corte, F.; Rendina, I.; Sarro, P. Thermo-optic effect exploitation in silicon microstructures. **Sensors and Actuators, A: Physical,** v. 71, p.19-26, 1998.
- ⁵⁰ Cocorullo, G.; Della Corte, F.; Rendina, I. Temperature dependence of the thermo-optic coefficient in crystalline silicon between room temperature and 550K at the wavelength of 1523nm. Applied Physics Letters, v. 74, n. 22, p.3338-3340, 1999.
- ⁵¹ Iodice, M.; Cocorullo, G.; Della Corte, F.; Rendina, I. Silicon Fabry-Perot filter for WDM systems channels monitoring. **Optics Communications**, v. 183, p.415-418, 2000.
- Niemi, T. et al. Tunable silicon Etalon for simultaneous spectral filtering and wavelength monitoring of a DWDM transmitter. IEEE Photonics Technology Letters, v. 13, n. 1, p.58-60, 2001.
- ⁵³ Li, C.B. et al. Thermally tunable optical filter with crystalline silicon as cavity. **Optics Communications**, vol. 244, p.167-170, 2005.

Martins, G.S.P. Filtros interferenciais construídos com dielétricos depositados pela técnica de PECVD. Dissertação de Mestrado. Depto. de Engenharia de

Sistemas Eletrônicos. PSI-EPUSP, 2008.

⁵⁵ Rechtsteiner, G.; Ganske, J. Using natural artificial light sources to illustrate quantum mechanical concepts. **The chemical educator**, v. 3, n. 4, p.1-12, 1998.

- ⁵⁶ Camporeale, P; Dutt, G. *Manual de Iluminación Eficiente*. Argentina: Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional, 2002.
- Mastrangelo, C.H.; Yeh, J.H.; Muller, R. Electrical and optical characteristics of vacuum-sealed polysiliconmicrolamps. IEEE Transactions on Electron Devices., v. 39, p.1363, 1992.
- ⁵⁸ Rehder, G.; Carreno, M.N.P.; Alayo, M.I. Integration of optical waveguides with micro-incandescent light. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 354, p.2538-2543, 2008.
- Paschotta, R. Encyclopedia of Laser Physics and Technology. RP Photonics Consulting GmbH, 2009.
- ⁶⁰ Erdogan, T. Fiber Grating Spectra. Journal of Lightwave Technology, v. 15, n. 8, p.1277–1294, 1997.
- ⁶¹ Estrada, M.; Escobosa, A. *Procesos tecnológicos de fabricación de microcircuitos: aspectos básicos*. Sección de electrónica del estado sólido, Departamento de Ingeniería Eléctrica, CINVESTAV-IPN, 2009.
- ⁶² Franssila, S. *Introduction to Microfabrication*. San Francisco, CA: John Wiley & Sons, 2004.
- ⁶³ Madou, M. Fundamentals of Microfabrication. Boca Raton, FL: CRC, 2002.
- ⁶⁴ Hoffman, R.W. Mechanical properties of thin condensed films. Physics of Thin Films, v. 3, p. 211, 1966.

⁶⁵ Eisberg, R.M. Fundamentals of Modern Physics. United Kingdom: John Wiley & Sons, 1963.

- Hallaiday, D.; Resnick, R.; Krane, K.S. Physics, Extended version, 4th ed. New York: John Wiley & Sons, 1994. v. 2.
- Material emissivity properties. Disponível em: http://snap.fnal.gov/crshield/crs-mech/emissivity-eoi.html. Acesso em: Novembro de 2010.
- Emissivity values of common materials. Disponível em: http://www.fluke.com/fluke/uken/Thermal-Cameras/Emissivity-table-TI.htm?PID=55967. Acesso em: Novembro de 2010.
- ⁶⁹ Emissivity table. Disponível em: http://www.thermoworks.com/emissivity_table.html. Acesso em: Novembro de 2010.
- Azzam, R.M.A.; Bashara, N.M. Ellipsometry and polarized light. New York: Elsevier North-Holland, 1977.