

Universidade Federal de Juiz de Fora
Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Física

Memorial Descritivo

Carlos Raimundo Andrade Lima

*Memorial Descritivo submetido à Comissão Permanente de Pessoal Docente, como parte dos requisitos necessários para promoção para Professor Titular do Departamento de Física do Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal de Juiz de Fora.
Juiz de Fora, junho de 2018.*

Sumário

Sumário	2
1 As Origens e a Graduação na UFES	4
1.1 Identificação e Formação:	4
1.2 Nascimento e infância	5
1.3 Bacharelado em Física na UFES (1980 - 1984)	5
2 A Pós-Graduação na UNICAMP	7
2.1 Mestrado em Física pela UNICAMP/CAMPINAS (1985 - 1989)	7
2.2 Doutorado em Física pela UNICAMP/CAMPINAS (1989 - 1994)	10
2.3 Bolsista do programa RHAЕ do CNPq pela UNICAMP/CAMPINAS (1994 - 1996)	15
2.4 Pós-Doutorado na FEEC/UNICAMP/CAMPINAS (1996 - 1998)	18
3 As Atividades Profissionais na UFJF	21
3.1 Atividades de Pesquisa na UFJF	21
3.2 Atividades de Ensino na UFJF	49
3.3 Atividades Administrativas e Complementares na UFJF	60
4 Artigos científicos mais relevantes	65
4.1 Developed profile of holographically exposed photoresist gratings	66
4.2 Reflecting polarizing beam splitter	67
4.3 Dill's parameter measure in liquid photosensitive materials via interferometric method	68
4.4 Evaluation of chemical kinetics in positive photoresists using laser desorption ionization	69

SUMÁRIO

3

Referências Bibliográficas

70

Capítulo 1

As Origens e a Graduação na UFES

1.1 Identificação e Formação:

- **Identificação:**

- Nome: Carlos Raimundo Andrade Lima
- Data de nascimento: 22 de março de 1961
- Local: Brasília - DF
- Endereço: Av. Senhor dos Passos, 2492, Bairro São Pedro, Juiz de Fora - MG, CEP: 36037-490 - Brasil
- e-mail: cralima@fisica.ufjf.br ou cralima1961@gmail.com

- **Formação:**

- Bacharelado em Física (1980 - 1984 - UFES)
- Mestrado em Física (1985-1989 - UNICAMP/SP)
- Doutorado em Física (1989 - 1994 - UNICAMP/SP)
- Pós-Doutorado em Optoeletrônica (1995 - 1997) FEEC/UNICAMP/SP)
- Área de Pesquisa: Física da Matéria Condensada - Óptica e Espectroscopia/Dispositivos Optoeletrônicos e Materiais Fotossensíveis

1.2 Nascimento e infância

Nasci em 22 de março de 1961 na cidade de Brasília, DF. Fui o primeiro filho da família. No início do ano de 1962, meus pais se mudaram para a pequena cidade de Baixo Guandú, no Estado do Espírito Santo. Nos anos de 1962, 1963 e 1968 nasceram minhas irmãs Luce Helena, Mayre Luce e Maria Paula. Pertencíamos a uma família de classe média baixa: o meu pai era fiscal de fronteira e minha mãe costureira e professora de Escola primária. Na infância, entre os anos de 1968 - 1971, estudei da 1^a à 3^a séries (nível primário - 1^a parte do atual ensino fundamental), no Ginásio Brasil, na Cidade de Baixo Guandú, no Estado do Espírito Santo. Entre os anos de 1972 - 1976, estudei da 4^a à 8^a séries (nível primeiro grau - 2^a parte do atual ensino fundamental) no Colégio Polivalente da Glória, na Cidade de Vila Velha, no Estado do Espírito Santo. Nos anos de 1977 e 1978, estudei a 1^a e 2^a séries (nível segundo grau - atual ensino médio) na Escola Pública Godofredo Schneider, na Cidade de Vila Velha, no Estado do Espírito Santo. No ano de 1979, estudei a 3^a série (nível segundo grau - atual ensino médio) integrado ao curso pré-vestibular no colégio particular Promove da Cidade de Vitória, no Estado do Espírito Santo. O interesse pela curso de Física ocorreu durante o curso da 2^a série do segundo grau, quando tive um professor de Física com incrível capacidade de motivar alunos a seguir a carreira científica. Foi durante o pré-vestibular que decidi seguir a carreira científica, prestando o vestibular para o curso de Física na Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) em dezembro de 1979.

1.3 Bacharelado em Física na UFES (1980 - 1984)

Iniciei o curso de Física no 1^o período de 1980 no então departamento de física e química da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Durante o curso na UFES fui monitor das disciplinas Física I, II, III e IV e participei de uma iniciação científica na área de Física da Matéria Condensada. No final do segundo semestre do ano de 1984 eu fiz a minha colação de grau no curso de Bacharelado em Física. Os cursos de Bacharelado e Licenciatura em Física na UFES, teve início em 1976. No início dos anos de 1980, o então departamento de física e química da UFES tinha mais de 15 professores com nível de doutorado. Apesar disso, o departamento teria cursos de pós-graduação em física somente a partir do ano de 1992, quando eu já estaria formado. No início do ano de 1985, eu me inscrevi em vários programas de pós-graduação em outros Estados do país: mestrado em engenharia nuclear no Instituto

Militar de Engenharia (IME) no Rio de Janeiro, mestrado em física no Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), em São José dos Campos, mestrado em astronomia no Instituto Astronômico e Geofísico (IAG) da Universidade de São Paulo em São Paulo e mestrado em física na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Fui aprovado em todos os programas. Por uma série de motivos, tais como preferência pessoal e também condições financeiras, acabei optando pelo programa de mestrado em física na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

Capítulo 2

A Pós-Graduação na UNICAMP

2.1 Mestrado em Física pela UNICAMP/CAMPINAS (1985 - 1989)

Embora contenha excelência na pesquisa teórica em grandes áreas da Física da Matéria Condensada, o Instituto de Física Gleb Wataghin da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), sempre teve uma grande vocação na pesquisa com a Física experimental e aplicada, também em grandes áreas da Física da Matéria Condensada. Foi exatamente esta vocação que me incentivou a seguir a carreira científica na área de Física experimental. Como eram enormes as possibilidades de escolha, esperei durante um ano para decidir qual seria a área específica de atuação que eu deveria seguir. Aproveitei este período para cursar o maior número de disciplinas obrigatórias do curso de mestrado do Instituto de Física da UNICAMP. Atraído pelo laser, após este período, decidi desenvolver algum trabalho experimental que tivesse como base a tecnologia do laser e suas aplicações. A escolha foi desenvolver algum trabalho experimental no departamento de Eletrônica Quântica da UNICAMP. O tema do trabalho era otimização e utilização de um laser de CO_2 de alta potência para o estudo da espectroscopia fotoacústica em gases. Inicialmente, meu orientador, Prof. Carlos Alberto Ferrari, sugeriu que eu estudasse compostos químicos poluentes emitidos por automóveis movidos a álcool e gasolina. A proposta seria obter sinais fotoacústicos em gases gerados diretamente na chama produzida com a queima desses combustíveis. O feixe do laser de CO_2 , com determinado comprimento de onda na região do infravermelho do espectro eletromagnético (que poderia ser sintonizado em uma faixa de $6,4 \mu m$ e $10,6 \mu m$), deveria incidir diretamente na chama.

Através de um microfone apropriado, localizado nas proximidades da chama, poderia-se obter um sinal fotoacústico associado a um determinado composto poluente, que entrasse em ressonância com o comprimento de onda do laser de CO_2 . Várias tentativas foram feitas e nenhum sinal fotoacústico foi observado. Após dois anos de trabalho, por causa de fortes flutuações de pressão, descobrimos que não é possível obter qualquer tipo de sinal fotoacústico na região de uma chama.

Faltando apenas um ano e meio para a conclusão do meu mestrado, pela minha própria iniciativa, em comum acordo com o meu orientador, decidimos elaborar uma montagem fotoacústica para estudar concentrações de álcool etanol na gasolina. Esse estudo foi motivado pelo programa pro-álcool do governo Federal implementado nos anos 80. Nessa época existiam carros a álcool e a gasolina. Como o etanol era muito mais barato do que a gasolina, era muito comum fraudar combustíveis misturando álcool etanol na gasolina. Essa mistura fraudulenta, provocava sérios danos aos motores dos carros a gasolina. A proposta era desenvolver um equipamento de precisão capaz de medir a quantidade de álcool etanol misturada numa determinada amostra de gasolina utilizando a técnica fotoacústica. A montagem experimental mostrada na Fig.2.1(a), foi usada para esta finalidade. Uma célula fotoacústica especial, bem como um ressonador fotoacústico, denominado ressonador de Helmholtz, mostrado na Fig.2.1(a), que teria a propriedade de amplificar quatro vezes o sinal fotoacústico, foram desenvolvidos exclusivamente para este trabalho.

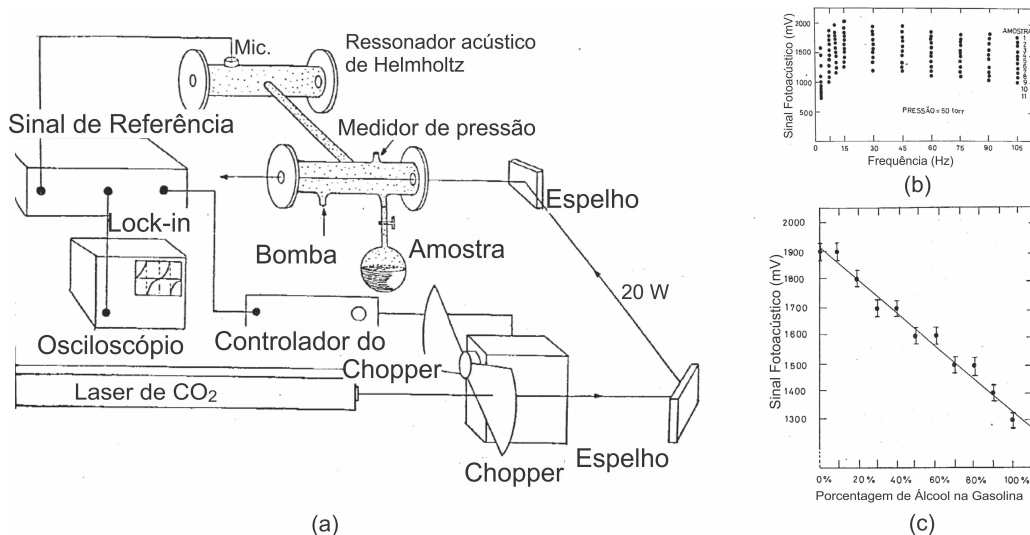


Fig. 2.1: (a) Montagem fotoacústica usada para medir a concentração de álcool em uma mistura com gasolina. (b) Sinal fotoacústico em função da frequência do chopper para várias concentrações da mistura. (c) Sinal fotoacústico em função da concentração de álcool na gasolina.

Picos de absorção para comprimentos de onda da radiação do laser de CO_2 , associados às transições vibracional-rotacional das moléculas de CO_2 , foram identificados para o álcool etanol puro e para a gasolina pura. Foi observado que a gasolina tem um pico de absorção na linha de transição $9P(42)$ do laser de CO_2 , correspondente ao comprimento de onda $\lambda = 9,7535 \mu m$ e, no caso do álcool etanol, o pico de absorção ocorre na linha de transição $9P(32)$, correspondente ao comprimento de onda $\lambda = 9,6575 \mu m$. Por outro lado, foi observado também que o álcool etanol praticamente não absorve na linha $9P(42)$ do laser de CO_2 . Por causa dessa característica, a linha $9P(42)$ foi escolhida para estudar a concentração de álcool etanol em uma mistura com gasolina. O resultado desse trabalho é mostrado nas Figs.2.1(b) e (c).

Várias amostras, com diferentes concentrações de etanol na gasolina, foram preparadas e os respectivos sinais fotoacústicos foram medidos. O resultado desse trabalho foi o tema principal da minha dissertação de mestrado e foi apresentado e publicado, como trabalho completo, nos Anais do 4^o Simpósio Estadual de Lasers e Aplicações somente em 1990 [2], quando eu já tinha defendido a minha dissertação de mestrado. A defesa da dissertação de mestrado, com o título “*A Técnica do Efeito Fotoacústico para o Estudo de Gases e Vapores de Álcool e Gasolina usando como fonte de Radiação Excitadora o Laser de CO_2* ” [1], ocorreu em agosto e 1988, oito meses antes do nascimento do meu primeiro filho, Victor Carvalho

de Andrade Lima. No mês de novembro do ano de 1988, me casei com a mãe do meu filho, Lucia Bonfim de Carvalho, com quem continuo casado até os dias de hoje. Embora tivesse resultados para publicação de artigo, nessa etapa participei somente de alguns congressos científicos.

2.2 Doutorado em Física pela UNICAMP/CAMPINAS (1989 - 1994)

Após a defesa da minha dissertação de mestrado, imediatamente me inscrevi no programa de doutorado do Instituto de Física da UNICAMP. No processo de seleção do doutorado haviam 15 candidatos e somente 04 bolsas do CNPq para serem ofertadas. Nesse momento, sem bolsa, com um filho para criar e morando longe dos meus pais, me senti angustiado e na obrigação de conseguir uma daquelas 4 bolsas. A seleção dos candidatos ao doutoramento seria através de uma prova escrita, com questões de eletromagnetismo, mecânica clássica, mecânica quântica e mecânica estatística no nível do mestrado, que seria aplicada nos próximos dois meses. Os quatro primeiros ficariam com as 04 bolsas disponíveis. Com o objetivo de ficar entre os quatro primeiros classificados, resolvi estudar dia e noite e acabei conquistando a terceira colocação.

Para o doutorado, eu decidi que não deveria continuar mais o trabalho que desenvolvi no meu mestrado. Eu havia me decepcionado um pouco com a pouca ação do meu orientador e, além disso, gostaria de fato de mudar de área. A exemplo do mestrado, comecei a cursar meu doutorado sem saber exatamente qual seria a minha escolha profissional. Durante o primeiro semestre cursei três disciplinas obrigatórias e, aconselhado por um grande amigo, resolvi ingressar no grupo de óptica clássica do departamento de estado sólido da UNICAMP. O objetivo continuava sendo trabalhar com lasers e agora com aplicações em óptica ondulatória. No grupo de óptica da UNICAMP haviam 04 professores que desenvolviam diferentes tipos de trabalho: Prof. Jaime Frejlich Sochaczewsky, chefe do grupo de óptica, que trabalhava com cristais fotorrefrativos, Prof. José Joaquim Lunazzi, que trabalhava com holografia, Prof. Geraldo Ferreira Mendes e Prof(a) Lucila Helena Deliesposte Cescato, que trabalhava ambos com componentes ópticos holográficos. Inicialmente comecei a trabalhar com o Prof. Jaime Frejlich. Entretanto, por causa de problemas de relacionamento pessoal e motivado pelo es-

tudo do desenvolvimento de componentes ópticos holográficos, decidi escolher a Prof(a) Lucila Cescato como orientadora. A prof.(a) Lucila, em retorno recente de um pós-doutorado na Alemanha, rapidamente me apresentou um projeto de doutorado onde eu deveria estudar alguns tipos de fotorresinas para posteriormente utilizá-las na fabricação de componentes ópticos holográficos. Fotorresinas são materiais fotossensíveis largamente empregadas em processos litográficos em microeletrônica e em óptica para a fabricação de componentes de relevo. Em microeletrônica, elas são usadas como máscaras para transferência de padrões geométricos para fabricação de circuitos integrados. Em óptica, as fotorresinas são usadas na construção de estruturas periódicas com propriedades ópticas difrativas. O projeto se baseava em um estudo profundo das propriedades físicas e químicas de algumas fotorresinas positivas e montagem de uma sala limpa (classe 1000) para posterior fabricação de determinados dispositivos ópticos holográficos já conhecidos teoricamente.

Com a garantia da bolsa de doutorado do CNPq, no primeiro semestre de 1990 deixei uma república de alunos para alugar um apartamento exclusivamente para mim e minha família (esposa e filho). Com a nova vida de pai de família e devido ao alto custo de vida da cidade de Campinas, comecei a ter dificuldades financeiras e precisava arranjar uma outra fonte de renda. Nesse momento, um colega da pós-graduação, que era diretor da Universidade Metodista de Piracicaba (UNIMEP), me convidou para dar aulas de Física como professor horista no Campus Avançado de Engenharia, localizado na cidade de Santa Bárbara D'Oeste, próximo á Piracicaba e a 30 *Km* de Campinas. A proposta era dar algumas aulas de Física I, II, III e Mecânica Geral, somente dois dias da semana durante a noite. Antes de aceitar o convite, conversei com minha orientadora e expliquei a ela a minha situação. Ela me disse que, desde que isso não comprometa o meu trabalho de pesquisa, para ela não tinha problema. Comecei então a desenvolver o meu projeto de pesquisa durante o dia e, pelo menos duas vezes por semana no turno da noite, viajava até a cidade de Santa Bárbara D'Oeste para lecionar disciplinas de Física.

No primeiro e segundo semestre do ano de 1990, me dediquei ao estudo de um sistema eletrônico de estabilização holográfica por transmissão, bem como sua utilização na fabricação de componentes ópticos holográficos. O interferômetro era controlado pelo sistema eletrônico de estabilização holográfica que utilizava a própria modulação residual no material fotos-

sensível enquanto está sendo gravado em tempo real [3]. O próprio holograma que vai sendo formado serve como referência para estabilizar o padrão interferométrico que está sendo gravado. Um padrão “moiré” resultante da interferência da modulação residual no material fotosensível com o padrão interferométrico, devido à pequenas perturbações que ocorrem durante a exposição, é detectado por transmissão por um detector semiconductor. O sinal no detector é enviado a um sistema eletrônico que corrige as posições dos espelhos do interferômetro por meio de pequenos cristais piezoelétricos. Quando iniciei meu doutoramento, esse sistema eletrônico de estabilização holográfica por transmissão já estava em funcionamento no laboratório de óptica da UNICAMP.

No segundo semestre do ano de 1991 eu, juntamente com o colega Marcelo Silva Sthel, que também trabalhava com fotorresinas, publicamos nosso primeiro artigo científico, no periódico *Applied optics*, cujo título é “*Photoresist resolution measurement during the exposure process*” [4]. Nesse artigo estudamos a resolução das fotorresinas da série AZ-1300 fabricada pela empresa Shipley utilizando a montagem holográfica estabilizada eletronicamente por transmissão. A evolução da modulação do índice de refração no interior de um filme fino, preparado com a fotorresina AZ-1300, foi medida em tempo real durante a exposição holográfica de padrões periódicos gerados pela interferência de duas frentes de onda de um laser de argônio, sintonizado no comprimento de onda $\lambda = 457,9 \text{ nm}$. Os resultados mostraram uma forte redução na modulação do índice de refração a medida que se aumentava a frequência espacial dos padrões periódicos registrados no material fotossensível.

Ao longo do meu doutorado, projetei e acompanhei a construção de um laboratório com ambiente de sala limpa (classe 1000), que seria destinado ao projeto e fabricação de diversos componentes ópticos holográficos. A ideia era que a sala limpa tivesse dois ambientes: uma sala de exposição holográfica e uma sala química para revelação de componentes holográficos. Uma anti-sala foi construída para dar acesso a esses ambientes sem que houvesse contaminação. O laboratório com a sala limpa ficou pronto no final do ano de 1992. A fotografia na Fig.2.2(a), mostra uma parte importante da sala limpa, alguns dias depois de ter ficado pronta. Na sequência projetei e construí uma montagem holográfica, isolado por uma câmara fabricada em acrílico com objetivo de bloquear radiação ultravioleta e ao mesmo tempo impedir que deslocamentos de ar perturbasse a exposição das amostras. Como mostrado nas fotografias das

Figs.2.2(b) e (c), a montagem holográfica é formada por um interferômetro versátil capaz de gravar várias estruturas periódicas com diferentes frequências espaciais. Um laser de argônio potente da Empresa Spectra Physics, sintonizado no comprimento de onda $\lambda = 457,9 \text{ nm}$, é usado como a fonte de luz do interferômetro. Essa montagem holográfica foi tão eficiente que tem sido utilizada por vários outros alunos de pós-graduação até os dias de hoje. A montagem holográfica era dotada de um sistema eletrônico de estabilização por transmissão que tinha como objetivo eliminar as vibrações mecânicas em tempo real durante a exposição holográfica do filme fotossensível.

Ainda com a intenção de equipar o novo laboratório, juntamente com a minha orientadora, elaborei um projeto de pesquisa para a compra de um microscópio eletrônico de varredura da marca JEOL, modelo JSM-5410, o qual seria submetido à FAPESP no final do ano de 1992. A compra de um equipamento como este era necessário para observação rápida dos dispositivos ópticos e optoeletrônicos, com dimensões submicrométricas, que estariam sendo desenvolvidos no laboratório. Para a nossa surpresa, o projeto foi aprovado e o microscópio foi comprado e instalado logo no início do ano de 1992. Após a instalação do microscópio eletrônico numa sala especial do laboratório de óptica, eu fui designado para o treinamento do uso desse equipamento, para posteriormente repassar o conhecimento a outros alunos e técnicos do laboratório. A fotografia na Fig.2.2(d) mostra uma imagem desse microscópio.

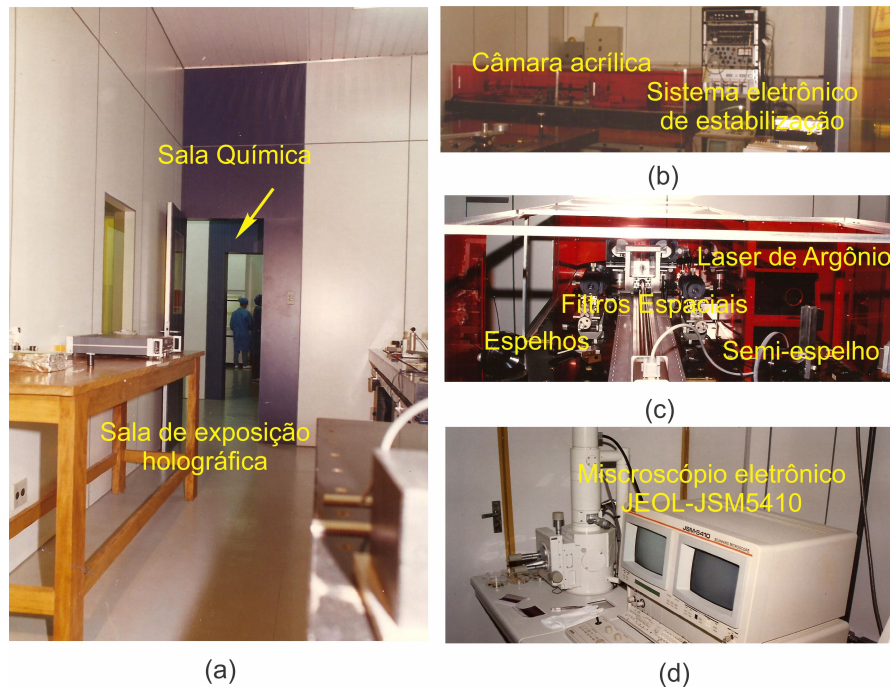


Fig. 2.2: (a) Sala limpa no laboratório de óptica da UNICAMP, alguns dias depois de ter ficado pronta. (b) Câmara em acrílico e sistema eletrônico de estabilização. (c) Montagem holográfica acondicionada pela câmara em acrílico. (d) Microscópio eletrônico JEOL, modelo JSM-5410.

Durante o meu doutoramento, logo no primeiro semestre do ano de 1993, estudei a viabilidade de transformar o sistema de estabilização por transmissão em um sistema de estabilização por reflexão. Isso era necessário porque vários projetos de componentes ópticos holográficos, de interesse do laboratório de óptica da UNICAMP, tinham como base substratos opacos refletivos, tais como filmes finos metálicos e cristais semicondutores. Fiz modificações no sistema de estabilização holográfica por transmissão para possibilitar o seu funcionamento por reflexão. Para a surpresa de toda a equipe do laboratório de óptica da UNICAMP, o novo sistema funcionou de forma extremamente eficiente. A partir desse momento, todas as amostras de fotorresinas preparadas sobre substratos refletivos, passaram a utilizar o sistema de estabilização holográfica por reflexão, o que resultariam na produção e publicação de importantes trabalhos experimentais.

O meu trabalho de doutorado ficaria completo quando eu conseguisse elaborar um modelo teórico que fosse capaz de explicar o sistema de estabilização holográfica por reflexão. Logo no início do primeiro semestre do ano de 1994, esse modelo teórico já estaria pronto e portanto,

o assunto da minha tese encerrado. Na minha tese de doutorado, cujo o título foi “*Estabilização Holográfica por Reflexão e Aplicação na Fabricação de Componentes Ópticos*” [3], fiz uma discussão, não somente das condições experimentais necessárias para o funcionamento do sistema eletrônico de estabilização por reflexão, mas também de toda a base teórica que explicaria a nova técnica. O resultado completo desse trabalho foi publicado no periódico Applied Optics com o título “*Mixing of the Reflected Waves to Monitor and Stabilize Holographic Exposures*” no ano de 1996 [5], quando já havia defendido a minha tese de doutorado em dezembro de 1994.

2.3 Bolsista do programa RHAE do CNPq pela UNICAMP/CAMPINAS (1994 - 1996)

Ainda durante o meu doutoramento, tive uma colaboração importante com o colega Bernardo Assunção Mello, com grande habilidade em simulação computacional na área de óptica. Dessa colaboração escrevi um dos meus artigos científicos mais importante, publicado no ano de 1995, cujo título é: “*Developed profile of holographically exposed photoresist gratings*” [6]. Nessa época eu já tinha defendido a minha tese de doutorado e era bolsista do programa tecnológico do CNPq para recém-doutores denominado “*Programa de Formação de Recursos Humanos em Áreas Estratégicas (RHAE)*”. Neste artigo, desenvolvemos uma simulação, usando a linguagem Pascal, do perfil das estruturas registradas holograficamente em fotorresinas. Na simulação foi levado em consideração os efeitos decorrentes da exposição, fotossensibilização, desenvolvimento e resolução de fotorresinas positivas. Os efeitos da isotropia do processo de revelação, a não linearidade da curva de resposta da fotorresina, a luz de fundo e as ondas estacionárias produzidas por reflexão na interface filme-substrato. Como ilustrado na Fig.2.3, os perfis registrados experimentalmente em fotorresinas positivas AZ-1400 mostraram-se estar em acordo com os resultados da simulação.

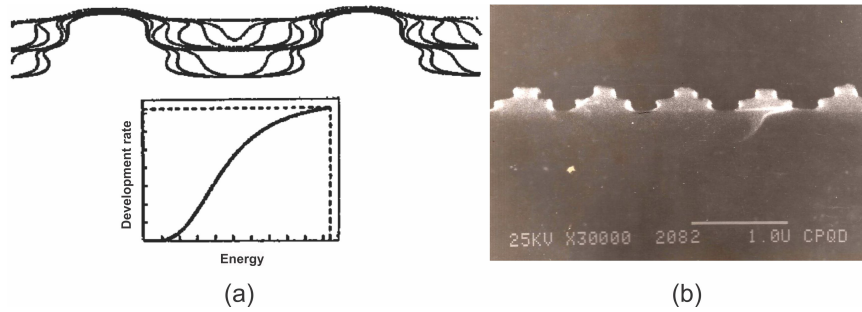


Fig. 2.3: (a) Exemplo de uma simulação do perfil de uma rede de difração de período $d = 1,6 \mu m$ gravada em uma fotorresina positiva, em substrato de silício, quando exposta a uma radiação de comprimento de onda $\lambda = 457,9 \mu m$ e revelada em condições onde o processo de revelação é fortemente não linear. (b) fotografia da estrutura gravada, nas mesmas condições da simulação, em um filme de fotorresina positiva AZ-1400 sobre um substrato de silício.

A nova técnica de estabilização por reflexão, desenvolvida no meu doutorado, permitiu que eu projetasse e construísse vários dispositivos ópticos holográficos inovadores baseados em tecnologia planar, utilizando filmes de fotorresinas, preparados sobre substratos apropriados. Alguns desses dispositivos podem ser destacados:

1- Divisores de Polarização - São componentes ópticos que tem a propriedade de separar a luz despolarizada em suas componentes ortogonais T.E. (“Transverse Electric”) e T.M. (“Transverse Magnetic”). Como exemplos clássicos de tais componentes, podemos citar o prisma de Nicol, o prisma de Wollaston e os cubos polarizadores do tipo Glan-Thomson. De acordo com a teoria [7], para uma rede de difração retangular, o fenômeno da divisão de polarização tem maior efeito para redes retangulares caracterizadas por $\lambda/d = 0,7355$ e $h/d = 0,35$, onde h é a altura da rede, d é o período da rede e λ é o comprimento de onda da radiação utilizada. Nessa teoria adota-se uma configuração especial para as redes de difração, como mostrada na Fig.1(a), denominada “montagem de Littrow” que consiste em incidir a luz em um ângulo de Littrow θ_L , que se dá exatamente na direção da luz difratada na ordem $m = 1$. Utilizando a técnica de estabilização holográfica e um processo de ataque por plasma reativo (RIE), produzimos uma rede de difração gravada sobre um substrato de quartzo (SiO_2), de período $d = 0,855 \mu m$ e altura $h = 0,299 \mu m$, mostrada na Fig.1(b). Esse divisor de polarização foi projetado para dividir a polarização de uma laser de $He - Ne$ de comprimento de onda $\lambda = 0,633 \mu m$, como mostra no espectro na Fig.1(c) para as po-

larizações T.E e T.M. Esse componente óptico foi apresentado em uma feira de protótipos, Processos e Serviços da FINEP/PADCT no ano de 1995, no Anhembi em São Paulo, publicado na revista de divulgação, A Próxima Fronteira em 1995 [8] e também publicado no periódico “Optics Letters” em 1997 [9].

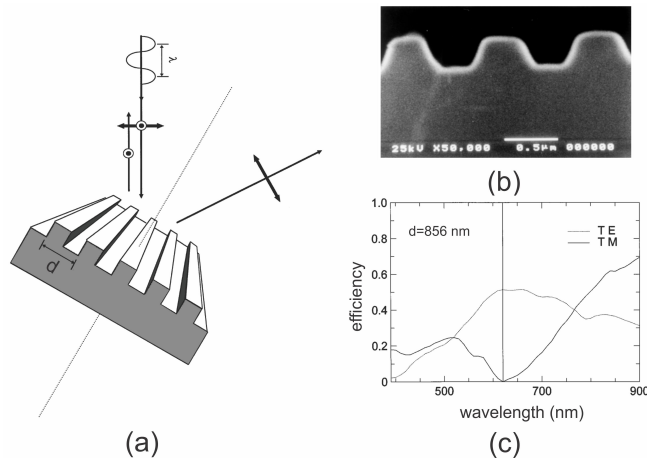


Fig. 2.4: (a) Configuração para redes de difração denominada “montagem de Littrow”, (b) Rede de difração gravada sobre um substrato de quartzo, de período $d = 0,855 \mu m$ e altura $h = 0,299 \mu m$, (c) Espectro para as polarizações T.E e T.M da rede de difração gravada, mostrando uma forte polarização para o comprimento de $\lambda = 0,633 \mu m$.

2- Polarizador de Grade - A teoria eletromagnética de Maxwell mostra que redes de difração de ordem zero, formada por fitas metálicas de alta densidade, se comportam como elementos polarizadores de luz. Esses componentes ópticos, conhecidos como polarizadores de grade, apresentam fortes efeitos de polarização para comprimentos de onda da ordem de três vezes maior do que o seu período [10]. Durante o doutoramento estudei e desenvolvi um polarizador de grade para a região do infravermelho ($\lambda = 0,8$ a $2,0 \mu m$), utilizando o processo da microlitografia holográfica (MLH). A técnica se baseia na preparação de um filme de fotorresina positiva “Shipley AZ-1400”, sobre uma camada fina de alumínio evaporada termicamente sobre um substrato de vidro. Uma rede holográfica, estabilizada por reflexão, é gravada na fotorresina e, em seguida, a rede é transferida para o alumínio até a abertura de “janelas” por um processo de ataque por plasma reativo (RIE), utilizando a fotorresina como máscara. Posteriormente, a fotorresina é removida com acetona em ultrassom, ficando ao final fios metálicos periódicos microscópicos gravadas sobre o substrato de vidro.

3- Redes com deslocamento de fase para lasers DFB monomodo - Os lasers de realimentação distribuída DFB (“Distributed-FeedBack”), operam em comprimentos de onda $\lambda = 1,55 \text{ nm}$, são considerados fontes de luz ideais para sistemas de transmissão de informações de longas distâncias. O laser DFB convencional contém uma cavidade ressonante de “Fabry Perot” de comprimento L , composta por camadas semicondutoras de $InGaAsP/InP$ [11]. Sobre o cristal de InP é gravada uma rede de difração, cujo período é determinado pela condição de interferência construtiva (condição de Bragg) para o comprimento de onda $\lambda = 1,55 \text{ nm}$. Os lasers DFB convencionais apresentam dois modos longitudinais equidistantes ao comprimento de onda de Bragg, causando problemas de dispersão no comprimento de onda da luz emitida. Entretanto, teoricamente mostra-se que os lasers DFB podem oscilar em um único modo longitudinal no comprimento de onda $\lambda = 1,55 \text{ nm}$, por um arranjo apropriado na relação de fase espacial (“phase-Shift”) da rede de difração [68]. Para o caso de emissão de primeira ordem de difração a relação de fase deve ser de π e para o caso de emissão de segunda ordem de difração a relação de fase deve ser de $\pi/2$. Durante o doutoramento estudei e desenvolvi uma técnica para gravar duas redes de difração sobre um substrato de InP defasadas de $\pi/2$. A técnica se baseia na preparação de um filme fino de fotorresina positiva “Shipley AZ-1400”, sobre uma camada fina de quartzo (SiO_2) depositada sobre um substrato de InP . Após duas etapas de exposição e revelação de padrões periódicos de períodos $d = 0,46 \text{ }\mu\text{m}$ defasados de $\pi/2$, com posterior ataques químicos apropriados, foi possível gravar sobre o substrato de InP , as duas estruturas periódicas com as mesmas defasagens. Essa estrutura foi inserida e testada em um laser DFB nos laboratórios do CPQD da Telebrás, resultando em um protótipo eficiente do dispositivo.

2.4 Pós-Doutorado na FEEC/UNICAMP/CAMPINAS (1996 - 1998)

No final do ano de 1995, com a proximidade do encerramento da minha bolsa RHAE, elaborei um projeto de pós-doutorado, com o título: “*Gravação de Estruturas Submicrométricas para Fabricação de Componentes Opto-eletrônicos*”, para ser submetido à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), para ser desenvolvido no departamento de semicondutores, instrumentos e fotônica da faculdade de

engenharia elétrica e de computação (FEEC) da UNICAMP. O projeto surgiu de uma colaboração entre a minha orientadora e o prof. Edmundo da Silva Braga da FEEC, e tinha como base o estudo e desenvolvimento de dispositivos optoeletrônicos para aplicação em telecomunicações. O projeto foi aprovado por um período de 02(dois) anos, com início previsto para o mês de janeiro do ano de 1996. Nessa época eu já tinha me desligado das atividades como professor de Física da Universidade Metodista de Piracicaba (UNIMEP).

Durante o meu pós-doutoramento, com a colaboração do prof. Edmundo da Silva Braga da FEEC, juntamente com seus alunos de pós-graduação, foi possível publicar três importantes trabalhos científicos, enumerados nas referências [12], [13], [14].

O primeiro e o segundo trabalho propõem e demonstram a gravação de estruturas difrativas em filmes de carbono hidrogenado amorfo ($a - C : H$) usando exposições holográficas e posterior ataque por plasma reativo (RIE). Por causa de sua excelente qualidade óptica e enorme rigidez mecânica (como diamante), filmes de $a - C : H$ mostraram que são materiais apropriados para a gravação de estruturas difrativas de relevo que podem ser empregadas na fabricação de dispositivos optoeletrônicos. O alto índice de refração ($n \approx 2,0$) e transparência no infravermelho (IR) do carbono hidrogenado amorfo, fazem com que essas estruturas possam ser usadas como dispositivos ópticos difrativos de transmissão nessa região do espectro eletromagnético. Uma estrutura como essa foi gravada holograficamente em uma filme de fotorresina AZ-1518, e então transferida para uma fina camada de alumínio, a qual foi usada como máscara no ataque por plasma reativo do filme de $a - C : H$. A estrutura registrada foi analisada via microscopia eletrônica e por medidas de difração. A boa concordância entre as medidas e as curvas de difração calculadas teoricamente demonstraram a viabilidade do material para ser usado como dispositivos ópticos difrativos.

O terceiro trabalho descreve o efeito do ruído produzido por “speckle” na gravação de redes holográficas. O padrão de “speckle” aparece superposto nas franjas de interferência e é causado pelo espalhamento da luz coerente nos componentes ópticos da montagem holográfica. Este efeito é particularmente importante quando a rede gravada na fotorresina é usada como máscara para transferência destes padrões para substratos de alta refletividade. Nesse trabalho mostra-se que nesses casos, mesmo espelhos comerciais de alta qualidade, podem causar

sérios problemas na rede gravada.

No final do ano de 1997, durante o pós-doutorado, prestei concurso para professor adjunto no departamento de física da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), e fui aprovado para ocupar a única vaga disponível no grupo de óptica.

Capítulo 3

As Atividades Profissionais na UFJF

Vínculos com a UFJF:

- 1998 - 2000: Professor Adjunto I
- 2000 - 2002: Professor Adjunto II
- 2002 - 2004: Professor Adjunto III
- 2004 - 2006: Professor Adjunto IV
- 2006 - 2008: Professor Associado I
- 2008 - 2010: Professor Associado II
- 2010 - 2012: Professor Associado III
- 2012 - Atual: Professor Associado IV

3.1 Atividades de Pesquisa na UFJF

Período de adaptação ao novo grupo de pesquisa

Tomei posse como professor adjunto I na UFJF em 02 de fevereiro de 1998. Logo que ingressei no departamento de física da UFJF, estava ocorrendo um curso de mestrado em física em convênio com a UFMG. Ao longo do ano de 1998, esse convênio estava se encerrando e logo

no início do ano de 1999 o departamento de física estaria criando o seu “Curso de Mestrado em Física na UFJF”. Nessa época a chefia do departamento era conduzida pelo prof. Sidney de Andrade Leonel e o novo curso de pós-graduação teve como primeiro coordenador o Prof. José Luiz Matheus Valle.

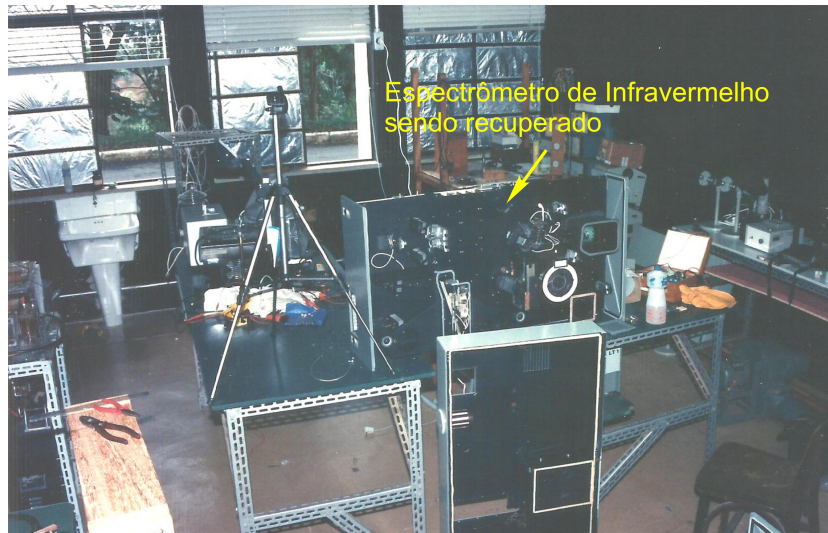


Fig. 3.1: Fotografia do laboratório de óptica do departamento de física da UFJF no final dos anos 90.

O meu contrato como professor da UFJF e também de outros colegas, foi motivado pela criação do curso de pós-graduação em Física na UFJF. Eu fui contratado para atuar no grupo de óptica que tinha somente o prof. José Paulo Rodrigues Furtado de Mendonça como integrante. O laboratório de óptica do prof. José Paulo, instalado numa área de 30 m^2 , era incipiente, bastante rudimentar e necessitava de uma total reestruturação. A fotografia na Fig.3.1 mostra uma imagem do laboratório de óptica do departamento de física da UFJF no final dos anos 90. Quando me integrei ao laboratório de óptica, decidi que deveria trabalhar bastante para equipá-lo e torná-lo produtivo. A estrutura de laboratório que estava à minha disposição era bastante diferente daquela que eu tinha na UNICAMP. Eu estava diante de uma outra realidade onde, na prática, precisava começar tudo de novo.

Ainda no primeiro semestre de 1998, eu e o prof. José Paulo convidamos o prof. Bernhard Johannes Lesche, ex-orientador de doutorado do prof. José Paulo, do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), para uma colaboração em um trabalho sobre

holografia aqui na UFJF. A ideia do trabalho era estudar a germinação de sementes agrícolas usando técnicas de holografia interferométricas de interesse da empresa Brasileira de pesquisas agrícolas (EMBRAPA - gado de leite de Juiz de Fora). A EMBRAPA tinha interesse no desenvolvimento de novos métodos de análise da germinação de sementes, por ser as técnicas usuais extremamente complexas e demoradas. A pesquisa de um método, rápido e eficiente, baseado em técnicas de holográficas era potencialmente promissora para o alcance desse objetivo. Para esse trabalho de pesquisa, contamos também com uma colaboração do pesquisado Dr. Antônio Vander Pereira do departamento de biologia da EMBRAPA de Juiz de Fora, que era especialista em germinação de sementes.

Assim como eu, o prof. Bernhard Lesche tinha larga experiência no uso de técnicas holográficas. Em princípio, o prof. Bernhard Lesche ficaria conosco durante três meses sendo mantido com uma bolsa do programa de professor estrangeiro visitante (PREVI) da própria UFJF. O prof. Bernhard Lesche tinha a intenção de trabalhar como prof. Titular no departamento de física da UFJF e nessa ocasião havia trazido alguns componentes ópticos, construídos por ele mesmo, com o objetivo de construir uma montagem holográfica no nosso laboratório. Como o laboratório de óptica ainda não contava com uma bancada óptica apropriada para experimentos de holografia, eu e o prof. José Paulo decidimos fabricar uma bancada na forma de uma lage de concreto armado. Essa bancada de concreto ficaria sobre câmaras de ar (de pneus de carrinho de mão), montada sobre uma pesada mesa de madeira. Dessa forma, o experimento holográfico ficaria livre das vibrações mecânicas comuns ao ambiente de instalação.

Com toda a estrutura montada no laboratório de óptica, eu e o prof. Bernhard Lesche começamos a fazer os primeiros testes com experimento holográficos, utilizando uma configuração holográfica, mostrado na Fig.3.2 (a), conhecida como “*configuração de Denisyuk*” [15], onde a onda objeto sobrepõe coerentemente com a onda de referência, dando origem a um padrão tridimensional de ondas estacionárias. A distribuição espacial das franjas de interferência é registrada no interior do material fotossensível espesso (placa holográfica), constituindo assim um holograma de volume. Os pequenos movimentos das sementes em condições de germinação pode ser monitorado pelo processo de dupla exposição, onde é gravado um primeiro holograma da semente não perturbada e, em seguida, antes da revelação e na mesma placa holográfica, é gravado um segundo holograma quando inicia o processo de germinação

da semente. Como resultado, obtém-se duas ondas reconstruídas que sobrepõem e interferem dando origem a um padrão de franjas conhecido como “*Moiré*” (ou mapa de franjas), que traduz no deslocamento dos vários pontos da semente. A Fig.3.2 (b) mostra uma fotografia das sementes de feijão e milho em processo de germinação e a Fig.3.2 (c) mostram fotografias dos hologramas dessas sementes antes e depois do processo de germinação. Os resultados desse trabalho foram publicado em anais de congresso científico.

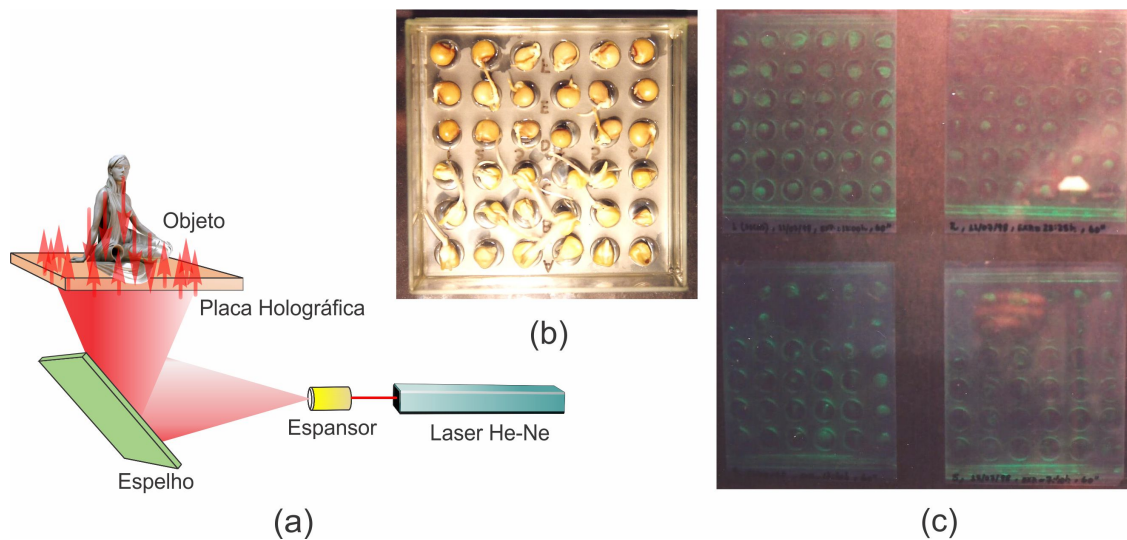


Fig. 3.2: (a) Configuração holográfica de Denisyuk, (b) Fotografia das sementes de feijão e milho em processo de germinação e (c) Fotografias dos hologramas dessas sementes antes e depois do processo de germinação.

Eu, juntamente com o prof. José Paulo, começamos a submeter projetos de pesquisa à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG). O primeiro projeto de pesquisa, sob minha coordenação, submetido à FAPEMIG tinha como título: “*Estudo da Germinação de Sementes por Técnicas de Holografia Interferométrica*”, e solicitava um montante de R\$ 69.101,22 para aquisição de diversos componentes e equipamentos para equipar o laboratório de óptica do departamento de física da UFJF. Este projeto está centralizado na pesquisa e desenvolvimento de novos métodos, baseado em técnicas holográficas, para análise da qualidade de germinação de sementes agrícolas monocotiledôneas e dicotiledôneas, tais como arroz, feijão, soja, etc. Por causa da grande dificuldade de se conseguir placas holográficas no mercado, a ideia do projeto seria substituir o material fotossensível por uma câmera CCD, conectada a um microcomputador, e detectar a germinação das sementes utilizando uma técnica de holografia eletrônica ou “*ESPI*” (Electronic Speckle Pattern Inter-

ferometry), estuda os efeitos de interferência entre padrões “speckle” gerados na superfície de um objeto. No lugar do filme fotossensível, esta técnica emprega uma câmera CCD para aquisição e um microcomputador para processamento de imagens dos padrões speckle. O speckle é um padrão aleatório resultante da interferência de raios de luz coerentes espalhados numa ou mais superfícies rugosas, cuja dimensões é maior do que o comprimento de onda da luz. O speckle é um padrão aleatório resultante da interferência de raios de luz coerentes espalhados numa ou mais superfícies rugosas, cuja dimensões é maior que o comprimento de onda da luz. Inicialmente, o sistema grava um padrão de speckle resultante da interferência entre a onda objeto e a onda referência. Quando o objeto é deslocado, ocorre alteração do speckle, cuja interferência com o speckle inicial gera um padrão “*moiré*” macroscópico, que também é gravado pelo sistema. A medição de deslocamentos posteriores foram efetuados pela comparação entre mapas de franjas. De acordo com a teoria, para o caso de um laser de He-Ne ($\lambda = 633 \text{ nm}$), o sistema ESPI pode detectar deslocamentos mínimos da ordem $d_{min} \approx 316 \text{ nm}$. O sistema ESPI aplicado na análise da qualidade das sementes agrícolas de interesse da EMBRAPA de Juiz de Fora. Além do método ESPI fornecer medidas interferométricas de deslocamentos em tempo real, ele dispensa o uso de emulsões fotossensíveis para a gravação das imagens holográficas. O objetivo era utilizar o método ESPI durante as etapas iniciais do processo de germinação das sementes, onde foi necessário registrar um número muito grande de hologramas das sementes em diferentes situações de germinação.

Enquanto o projeto estava em análise pela FAPEMIG, ainda no início do ano de 1998, comecei a orientar alunos de iniciação científica, usando alguns equipamentos com avarias que tinham sido descartados pela UFJF, e também uma bancada óptica construída por mim e pelo prof. José Paulo feita com massa de cimento. Minhas duas primeiras orientações de iniciação científica foram: Flávio Eduardo Perobelle, com o projeto “*Análise de substrato do capim elefante através do infravermelho*” e Wallace Luis da Silva, com o projeto “*Estudo da germinação de sementes através da holografia*”. O discente Flávio Perobelle era um excelente aluno do curso de engenharia elétrica que foi capaz de recuperar e automatizar um espectrômetro de infravermelho que tinha sido descartado pela UFJF. Com esse equipamento funcionando, o discente Flávio conseguiu obter várias espectros IR do capim elefante, que era um dos principais alimentos do gado de leite estudado pela EMBRAPA. O discente Wallace Luis era um bom aluno da Física que utilizou a montagem holográfica do prof. Bernhard

Lesche para gravar um dos primeiro hologramas no laboratório de óptica da UFJF [16].

No final do ano de 1998, recebemos a notícia de que o projeto tinha sido aprovado pela FAPEMIG (Processo CEX 1533/98), com o código de identificação 153398. Com os recursos desse projeto conseguimos montar uma estrutura razoável para o laboratório de óptica, comprando uma mesa óptica, de dimensões $2,10 \times 0,80 m$, e também vários componentes ópticos da empresa Newport. Com a estrutura montada no laboratório de óptica, conseguimos desenvolver vários trabalhos baseados no estudo da germinação de sementes utilizando as técnicas de holográficas em parceria com a EMBRAPA. A partir desses trabalhos foi possível orientar mais alguns alunos de iniciação científica. Os resultados dessas orientações foram publicados em anais de congresso, mas não foram suficientes para serem publicados em periódicos de circulação internacional.

Em 1999, O prof. Bernhard Johannes Lesche é aprovado em um concurso para professor titular no departamento de física da UFJF. Na época, tive um importante participação na elaboração desse concurso. Nesse momento, o grupo de óptica passa a ser formado por três membros: Por mim, pelo prof. José Paulo e pelo prof. Bernhard Lesche. Ainda nesse ano, já com a participação do professor Bernhard Lesche, submetemos mais um projeto à FAPEMIG, cujo título era: “*Análise de Substâncias Tóxicas por Espectroscopia Fotoacústica com Laser em Processos Industriais*”, onde pretendia-se implantar uma nova linha de pesquisa associada ao laboratório de óptica, para caracterização de compostos orgânicos a partir da técnica de Espectroscopia Fotoacústica com Laser. Embora o projeto tenha sido muito elogiado pelos consultores “ad hoc”, ele não alcançou prioridade para aprovação na faixa de financiamento solicitada.

Logo no início do ano 2000, já como membro do colegiado da pós-graduação, recebi um pesquisador de pós-doutorado cubano, o prof. Raul Tabares, para colaboração no projeto aprovado pela FAPEMIG. O prof. Raul Tabares tinha grande habilidade na área computacional e ficou responsável pelo desenvolvimento de um software para controle do sistema de holografia eletrônica. A colaboração com o prof. Raul Tabares, resultou em algumas publicações em anais de congresso [17], [18].

Período de expansão do laboratório de óptica

No ano de 2000, surge uma vaga nova de professor adjunto no departamento de física que foi destinada ao grupo de óptica. Após a realização do concurso público, a professora Maria José Valenzuela Bell, passou a integrar o nosso grupo de pesquisa. Com a nova professora, o grupo de óptica passou a contar com quatro professores pesquisadores.

Em abril do ano de 2001, nasce meu segundo e último filho, João Pedro de Carvalho Lima, e as minhas responsabilidades familiares aumenta um pouco mais. No final do ano de 2002, o projeto FAPEMIG (Processo CEX 1533/98), foi encerrado e o relatório final foi apresentado em 12 de janeiro de 2004. Entre os anos de 2001 e 2004, orientei mais quatro alunos de iniciação científica:

- Juliana Coutinho Moreira em 2001, com o projeto “*Estudo da germinação de sementes por técnicas de holografia*”, com uma bolsa do programa PROBIC/FAPEMIG.
- Vinícius Balbino Paiva em 2002, com o projeto “*Ensaio Holográfico com Sementes de Milho Utilizando filmes AGFA E75 e Reveladores RCO-12*”, com uma bolsa do programa PROBIC/FAPEMIG
- Luis Fernando de Ávila em 2002, com o projeto “*Desenvolvimento de uma Montagem Holográfica para o Estudo da Germinação de Sementes*”, com uma bolsa do programa BIC/UFJF.
- Anderson Luiz Zaquine Silveira em 2004, com o projeto “*Caracterização Óptica de Materiais Fotossensíveis*”, com uma bolsa do programa BIC/UFJF.

Ao longo do ano de 2003, participei de bancas de algumas dissertações de mestrado na Universidade Federal de Juiz de Fora, tais como: candidato Welber Gianini Quirino, com o título *Espectroscopia Óptica de Vidros Tetrafosfatos Dopados com YB^{3+}* , em março de 2003 e candidata Joelma de Oliveira Mello, com o título *Seção de Choque Total Absoluta do 1,3 – Butadieno da Região de Energia de 100 a 500 eV*, em dezembro de 2003. Ainda ao longo deste ano, apresentei também alguns trabalhos no XXVI Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada entre os dias 06 e 10 de maio em Caxambú (MG).

Ainda ao longo do ano de 2003, conseguimos recursos da reitoria para realização de uma grande reforma nas dependências, laboratórios de ensino e laboratórios de pesquisa do departamento de física da UFJF. O novo laboratório de óptica ganharia um espaço com uma área da ordem de $80 m^2$, e daria para acomodar com folga os quatro professores do grupo de óptica. Mais uma vez fiquei responsável para desenvolver um projeto arquitetônico apropriado propondo uma divisão de espaço com divisórias para os quatro professores do grupo de óptica. Sempre em acordo com o professores interessados, propus uma distribuição de espaço com quatro ambientes isolados para laboratórios e uma sala comum para a montagem de uma oficina mecânica e uma oficina eletrônica. Com essa distribuição, cada professor poderia montar experimentos de interesses específicos e orientar alunos de forma independente. O espaço que ficou destinado ao meu trabalho de pesquisa era constituído de dois ambientes: uma sala de exposições de materiais fotossesíveis e uma sala química para revelação dos materiais expostos. A sala de exposição contava com uma mesa óptica, fabricada pela empresa Newport, isolada mecanicamente por uma sistema pneumático, um interferômetro com um laser de He-Ne, uma câmera de alta resolução para uso em holografia eletrônica e um microcomputador; a sala química contava com um “spinner”, ou centrifugador, para preparação dos filmes fotossensíveis, uma estufa (tipo mufla) para secagem dos filmes fotossensíveis e uma pia apropriada para uso de produtos químicos. Embora prometia grandes expectativas para os nossos trabalho científicos, a reforma no laboratório de óptica também foi responsável pelo o atraso de grande parte das nossas pesquisas científicas.

No final do ano de 2003, comecei a orientar meu primeiro aluno de mestrado, Luiz Fernando de Ávila, meu então ex-orientado de iniciação científica. O projeto da dissertação de mestrado do Luiz Fernando tinha como título “*Cinética Química em Fotorresinas Positivas no Estado Líquido*”. O objetivo deste trabalho foi estudar o comportamento das fotorresinas positivas no estado líquido quando expostas à radiação violeta e ultravioleta e, a partir disso, medir a cinética química desses materiais fotossensíveis. A cinética química foi obtida da determinação do parâmetro C de Dill ajustando-se as variações do índice de refração durante a exposição da luz com o modelo teórico proposto por F. H. Dill [38]. Este parâmetro foi determinado através da exposição da fotorresina no estado líquido com o espectro típico de uma lâmpada de vapor de mercúrio numa faixa de comprimento de onda de 300 a 500 nm e com radiação violeta de comprimento de onda $\lambda = 436 nm$. As experiências foram realizadas utili-

zando um interferômetro de Michelson de alta precisão. Essa orientação de mestrado resultou em uma importante publicação, no periódico de circulação internacional *European Polymer Journal*, cujo título é “*Dill’s parameter measure in liquid photosensitive materials via interferometric method no periódico*” [40]. O aluno Luiz Fernando de Ávila defendeu sua dissertação de mestrado em 29 de agosto de 2005. No ano de 2004, orientei também o aluno Anderson Luiz Zaquine Silveira, no programa BIC/UFJF de iniciação científica, cujo o projeto tinha como título *Caracterização Óptica de Materiais Fotossensíveis*.

Entre os anos de 2003 e 2007, por causa de grandes dificuldades financeiras das agências de fomento de pesquisa, principalmente da FAPEMIG, eu e meus colegas tivemos grandes dificuldades de aprovar recursos para implementação de novos projetos. Nesse período, eu, como coordenador, juntamente com alguns colegas colaboradores, submetemos vários projetos em diferentes editais públicos, que infelizmente não foram aprovados devido a falta de recursos financeiros. Dentre alguns desses projetos posso destacar:

- Espectrometria de Massa por Tempo de Voo que utiliza a Técnica MALDI para Detecção da Bactéria *M. avium* subesp *paratuberculosis* no Gado Mineiro, submetido ao edital universal da FAPEMIG no ano de 2003.
- Análise da Qualidade da Cachaça Mineira por Espectroscopia Fotoacústica, submetido ao edital universal da FAPEMIG no ano de 2005.
- Estudo de Propriedades Termo-Ópticas de Semicondutores e Polímeros via Espectroscopia Fotoacústica e medidas de Capacidade Térmica, submetido ao edital universal da FAPEMIG no ano de 2006.
- Análise da Cinética Química de Fotorresinas Positivas por Espectrometria de Massa por Tempo de Voo, submetido ao edital universal do CNPq no ano de 2007.

Entre os anos de 2004 e 2006, participei como membro de mais algumas bancas de defesa de dissertação de mestrado na Universidade Federal de Juiz de Fora, tais como: candidato César Moura Nascimento, com o título *Absorção Saturável Reversa em Íons Terras-Raras*, em 2004, candidato Ricardo Luis Britto Costa, *Construção de um Analisador Espectral Óptico por Transformada de Fourier*, em 2004 e candidata Helen Silva, *Implantação da Espectroscopia de Impacto de Elétrons de Limiares*, em 2006. Ao longo desses três

anos, também apresentei trabalhos no XXVII, XXVIII e XXIX Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada em Caxambú (MG).

Período após divisão do laboratório de óptica

A partir do ano de 2004, a prof(a). Maria José Valenzuela Bell se desvinculou do laboratório de óptica para, juntamente com o seu esposo, Prof. Virgílio Carvalho dos Anjos, criar o Laboratório de Espectroscopia de Materiais. Isso acabou ocorrendo por causa da grande diferença de especificidade científica que tinha cada um dos integrantes do grupo de óptica. Mesmo com o retorno da formação antiga, ficava cada vez mais evidente os diferentes interesses científicos de cada membro do grupo de óptica. O prof. José Paulo e o prof. Bernhard Lesche, mantinham pesquisa na área de óptica aplicada à biologia e eu, direcionava meus trabalhos no estudo das propriedades dos materiais fotossensíveis. Além de ser um dos assuntos principais da minha formação científica, essa escolha também era uma tentativa de buscar a minha sobrevivência científica.

Como não havia recursos para montar um laboratório nos mesmos moldes daquele usado na minha formação de doutorado e pós-doutorado, a alternativa seria continuar estudando os materiais mais importantes usados na fabricação dos componentes ópticos holográficos: *as fotorresinas*. Esses materiais são de baixo custo e possuem uma série de propriedades físicas e químicas que ainda careciam de investigação científica. De posse de algumas amostras de diferentes fotorresinas, conseguidas como empréstimo do laboratório de óptica da UNICAMP, comecei a desenvolver estudos das propriedades microscópicas desses materiais quando expostos à radiação eletromagnética. Para essa pesquisa, contei com a colaboração dos colegas: prof. Roberto Rosas Pinho do departamento de física da UFJF, prof. Wilson de Souza Melo do departamento de física da UFJF e prof(a) Maria Luiza Miranda Rocco do instituto de química da UFRJ, todos especialistas em técnicas de espectrometria de massa por tempo de voo. O objetivo dessa união era estudar propriedades das fotorresinas, utilizando técnicas de espectrometria de massa, onde antes só se utilizava técnicas ópticas. Dessa colaboração, e também de uma parceria com o laboratório nacional de luz synchrotron (LNLS), localizado na cidade de Campinas (SP), conseguimos desenvolver vários estudos importantes com as fotorresinas utilizando radiação synchrotron e a técnica de espectrometria de massa por tempo

de voo de alta resolução (ToF-MS). Esses estudos ficaram registrados no Active Report do ano 2005 do laboratório nacional de luz synchrotron (LNLS), como título “*AZ-1518 Photoresist analysis with synchrotron radiation using high-resolution time-of-flight mass spectrometry*” [21]. Com resultados aprofundados desses estudos, no ano de 2007, publicamos um artigo no periódico *Polymer Degradation and Stability*, com o mesmo título do Active Report do LNLS de 2005 [22]. Nesse artigo, a técnica de dessorção de íons estimulada por fótons (PSID) foi empregada para a identificação dos fragmentos moleculares. Os experimentos foram realizados utilizando feixes pulsados de radiação sincrotron (Single-bunch) com energias na faixa de 790 eV e 4000 eV, produzidos nas linhas de espectroscopia de raios X suave (SXS), no laboratório nacional de luz synchrotron (LNLS), e usando espectrometria de massa por tempo de voo (ToF-MS).

Ainda com a colaboração desses colegas, como coordenador, consegui aprovar um novo projeto submetido ao edital universal da FAPEMIG no ano de 2008 (processo: CEX APQ-00510-08). O projeto tinha como título, “*Análise da Cinética Química de Fotorresinas Positivas por Espectrometria de Massa por Tempo de Voo*”, essencialmente o mesmo projeto que havia sido submetido ao edital universal do CNPq no ano de 2007. No projeto, foi solicitado um montante de R\$ 47.443,25 para aquisição de componentes e equipamentos para equipar ainda mais o laboratório de óptica do departamento de física da UFJF. Neste projeto, propomos a medida da cinética química, a partir da determinação do parâmetro de Dill, das fotorresinas usando Espectrometria de Massa por Tempo de Voo, pelos métodos PSID (dessorção iônica induzida por fótons) e ESID (dessorção iônica induzida por elétrons). A ideia seria obter espectros de massa das fotorresinas após vários processos de exposição. As medidas deveriam ser realizadas usando fotorresinas na fase sólida, na forma de filme fino preparado em substratos apropriados. As amostras deveriam ser expostas pela radiação emitida por uma lâmpada de mercúrio. A partir do comportamento dos fragmentos observados no espectro de massa, para cada energia de exposição, variações das amplitudes dos picos deveriam ser observadas. Nessa época, o prof. Wilson de Souza Melo, que coordenava o laboratório de colisões atômicas e ciências de superfícies do departamento de física, juntamente com prof. Roberto Rosas Pinho tinham conseguido comprar um sistema de espectrometria de massa por tempo de voo, da empresa Shimadzu Biotech, usando recursos do CTInfra da UFJF. A partir desse momento, definimos uma nova linha de pesquisa que envolvia materiais fotossensíveis e

técnicas de espectrometria de massa por tempo de voo, que pode ser resumida como segue:

Com o avanço da tecnologia optoeletrônica cresce a necessidade de um conhecimento profundo dos processos físicos e químicos dos materiais com propriedades fotossensíveis. Um dos grandes interesses é o estudo das modificações das estruturas moleculares e, conseqüentemente, das propriedades ópticas de materiais fotossensíveis quando exposto à radiação ultravioleta. Essas modificações são representadas por um processo físico químico, denominada cinética química, que pode ser caracterizada pela determinação do parâmetro de Dill, cujo valor está associado diretamente à rapidez com que ocorrem as modificações do índice de refração no material fotossensível. Particularmente, as fotorresinas positivas e negativas são materiais fotossensíveis amplamente empregados nos processos litográficos em microeletrônica e em óptica para a fabricação de componentes de relevo. Em microeletrônica, elas são utilizadas como máscaras para transferências de padrões geométricos para fabricação de circuitos integrados. Em óptica, as fotorresinas são usadas na fabricação de estruturas periódicas com propriedades ópticas difrativas. O método actínico é uma das técnicas óptica mais empregada na determinação da cinética química das fotorresinas induzida por exposição à radiação UV. A principal linha de pesquisa do laboratório consiste na investigação de um método alternativo para a medida da cinética química desses materiais fotossensíveis. Trata-se dos métodos da dessorção de matriz assistidas por laser (MALDI – Matrix Assisted Laser Desorption Ionization), e dessorção iônica por laser (LDI - Laser Desorption Ionization), ambas acopladas a um sistema de espectrometria de massa por tempo de voo (ToF-MS). A gama ilimitada de valores de massa observada na espectrometria de massa por tempo de voo aliada a suave ionização do MALDI, faz dessa técnica uma das melhores escolhas para a análise de macromoléculas, com alta sensibilidade e resolução. Os espectros de MALDI e LDI da fotorresina podem ser adquiridos em função da energia do feixe de fótons UV, apresentando diferenças marcantes, com fragmentos e rendimentos iônicos relativos característicos para cada fotorresina exposta e não exposta. Fragmentos relacionados à decomposição fotoquímica da fotorresina podem assim ser identificados. A partir dos fragmentos observados no espectro de massa, para cada energia de exposição, espera-se determinar o parâmetro de Dill da fotorresina e caracterizar a cinética química correspondente.

Como resultado direto do projeto aprovado pela FAPEMIG em 2008, bem como da colaboração do prof. Roberto Rosas Pinho, prof(a) Maria Luiza Miranda Rocco e também do prof. Luis Fernando de Avila e da prof.(a) Lucila Helena Deliesposte Cescato, ambos da UNICAMP, publicamos um artigo no periódico *European Polymer Journal* em 2009, sob título “*Photoresists comparative analysis using soft X-ray synchrotron radiation and time-of-flight mass spectrometry*” [23]. O resultado desse trabalho teve também a importante contribuição técnica do laboratório nacional de luz síncrotron (LNLS), localizado na cidade de Campinas (SP). O artigo discute importantes modificações moleculares entre as diferentes fotorresinas AZ-1518 e AZ-4620, quando expostas à radiação ultravioleta. Para análise das fotorresinas, foi empregada a técnica de dessorção de íons estimulada por fótons (PSID) seguindo o espectro NEXAFS (Estrutura fina de absorção de raios X de borda próxima) da borda K do enxofre, operando com feixes pulsados de radiação síncrotron (Single-bunch) e usando espectrometria de massa por tempo de voo (ToF-MS).

Entre os anos de 2007 e 2008, participei também como colaborador de um projeto de pesquisa de um edital universal da FAPEMIG, sob título “*Estudo de propriedades termo-ópticas de semicondutores e polímeros via espectroscopia fotoacústica e medidas de capacidade térmica*”, que tinha o prof. Virgílio Carvalho dos Anjos como coordenador.

No ano de 2008 participei como membro de uma banca de defesa de tese de doutorado na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), do candidato Edson José de Carvalho, com o título *Projeto e Fabricação de Nano - Estruturas por Litografia Interferométrica*, no ano de 2009, participei como membro da banca de defesa de dissertação de mestrado na Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), do candidato Daniel Gustavo Mesquita da Silva, com o título *Secção de Choque Total Absoluta do Espalhamento de Elétrons por Metanol e Etanol* e em 14 de junho de 2010, participei como membro suplente de uma banca de defesa de tese de doutorado na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), do candidato Luis Fernando de Ávila, com o título *Estudo de materiais fotossensíveis utilizando exposições holográficas*.

Em 13 de janeiro de 2009, fui “referee” do artigo científico: He Jian, Zhang Qingguo, Chen Qingdong, *Analysis of the optical path difference in the Michelson interferometer for atmospheric wind measurement: A new method*, The science school, Henan University of Science and Technology, Luoyang, 471003, China - The Open Spectroscopy Journal.

No final do ano de 2009, comecei a orientar meu segundo aluno de mestrado, Jefferson da Silva Martins. O projeto da dissertação de mestrado do Jefferson da Silva Martins tinha como título “*Cinética Química em Fotorresinas usando Espectrometria de Massa LDI-ToF de Alta Resolução*”. O objetivo deste trabalho foi estudar o comportamento das fotorresinas positivas e negativas quando expostas à radiação ultravioleta e, a partir disso, medir a cinética química desses materiais fotossensíveis. Essa orientação de mestrado resultou em várias apresentações e publicações em anais de congressos, bem como em uma importante publicação no ano de 2014, no periódico de circulação internacional *European Polymer Journal*, cujo título é “*Evaluation of chemical kinetics in positive photoresists using laser desorption ionization*” [24]. O artigo descreve como a técnica de dessorção de ions estimulada por laser (LDI), acoplada a um espectrômetro de massa por tempo-de-voo de alta resolução (ToF-MS),

pode ser usada para determinar, não somente as mudanças estruturais moleculares devido à exposição à radiação ultravioleta proveniente de uma lâmpada de arco de mercúrio, como também a cinética química da fotorresina positiva AZ-1518, definida por seu parâmetro de Dill C. O parâmetro de Dill C descreve a sensibilidade óptica do composto fotoativo da fotorresina que, no caso da fotorresina positiva AZ-1518, é denominado de *diazonaphthoquinone* ou DNQ.

Um outro artigo resultante da orientação do aluno Jefferson da Silva Martins, foi publicado no periódico Revista Brasileira de Ensino de Física no ano de 2013, cujo título é “***Medidas dos índices de refração de materiais fotossensíveis utilizando o método de Abelès***” [25]. Esse artigo discute a medida do índice de refração de filmes finos de fotorresinas, expostos e não-expostos à radiação ultravioleta, utilizando o método Abelès. O método de Abelès é usado para a medida do índice de refração de filmes finos homogêneos e transparentes. O método se baseia na medida das reflectâncias totais de um feixe de luz p-polarizada ou TM (*Transverse Magnetic*) das interfaces ar-substrato e ar-filme-substrato. A partir das medidas das variações do índice de refração das fotorresinas foi possível determinar as taxas de decaimento do composto fotoativo por unidade de intensidade. Essas medidas permitiu obter importantes informações sobre a cinética química microscópica desses materiais fotossensíveis. Além dos artigos publicados, como resultado da orientação do aluno Jefferson da Silva Martins, posso destacar também mais dois resumos publicados nos anais do XXXV Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada, ocorrido na cidade de Águas de Lindóia no período de 14 a 18 de maio de 2012. O primeiro resumo foi intitulado como “***Use of Abelès method to measure the refractive index of AZ-1518 photoresist exposed and unexposed***” e o segundo resumo foi intitulado como “***AZ-1518 Photoresist analysis using high Resolution MALDI-ToF***”. O aluno Jefferson da Silva Martins defendeu sua dissertação de mestrado em 11 de julho de 2013.

No ano de 2012, com a colaboração do prof. Roberto Rosas Pinho do departamento de física da UFJF e da prof(a) Maria Luiza Miranda Rocco do instituto de química da UFRJ, publiquei mais um artigo no periódico Química Nova, cujo título é “***Estudo da decomposição fotoquímica por exposição à luz UV de fotorresinas positivas***” [26]. Nesse artigo foi descrito como a técnica de desorção de ions estimulada por elétrons (ESID), acoplada a um espectrômetro de massa por tempo-de-voo de alta resolução (ToF-MS), pode ser utilizada

para determinar importantes mudanças moleculares associadas à decomposição fotoquímica das fotorresinas positivas quando expostas à radiação ultravioleta. Ainda com a colaboração do prof. Roberto Rosas Pinho e da prof(a) Maria Luiza Miranda Rocco, publicamos um importante trabalho na 34^a Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química (SBQ) na cidade Florianópolis no Estado de Santa Catarina no ano de 2012, cujo título é *“Photoresist analysis with synchrotron radiation and electron impact using time-of-flight mass spectrometry”* [27].

Ainda no ano de 2012, participei como membro de uma banca de pré-defesa de dissertação de mestrado na Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), da candidata Lyane Marise Moreira Rocha Costa, com o título *Influência de Materiais Nanoestruturados no Transporte Térmico em meio Líquido*. e no ano de 2013, participei como membro presidente da banca de defesa de dissertação de mestrado na Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), do candidato Jefferson da Silva Martins, com o título *Cinética Química em Fotorresinas usando Espectrometria de Massa LDI-ToF de Alta Resolução*.

A partir do ano de 2014, houve mais reestruturação dos laboratórios de pesquisa que envolvia o meu espaço do laboratório de óptica e o espaço do laboratório de espectroscopia de materiais. A prof(a) Maria José Valenzuela Bell e seu esposo Virgílio Carvalho dos Anjos precisavam ampliar seus espaços de laboratórios de pesquisa. Como o meu laboratório era vizinho ao laboratórios desses professores, tive que me envolver diretamente com essa nova reforma. O espaço que era ocupado pelo meu laboratório deveria ser incorporado ao novo laboratório de espectroscopia de materiais. Em troca disso eu receberia um novo espaço com o dobro do tamanho anterior, que antes era uma sala de aula do prédio antigo do Instituto de Ciências Exatas (ICE) da UFJF. O departamento de Física condicionou a essa nova reforma a criação de um novo laboratório de ensino de Física Moderna, paralelo ao meu novo laboratório, que deveria estar sobre minha responsabilidade. Diante dessa nova realidade, elaborei os projetos arquitetônicos do meu novo laboratório e também do novo laboratório de ensino, que podem ser observados nas Figs.1(a). Esses projetos foram submetidos à pro-reitoria de infra-estrutura da Universidade Federal de Juiz de Fora (PROINFRA/UFJF). Nessa época, por causa de várias obras que estavam ocorrendo por conta da reestruturação universitária (REUNI) do governo federal, a UFJF estaria com grandes dificuldades financeiras e qualquer

nova reforma seria muito difícil de ser aprovada. Tudo que conseguimos foi uma visita técnica da PROINFRA/UFJF e a promessa de que a obra seria executada logo que novos recursos financeiros estivessem a disposição. Após diversas cobranças sem sucesso, decidi que a única forma de tornar realidade a nova reforma dos laboratórios, pelo menos parcialmente, seria pedir os materiais de construção civil à PROINFRA/UFJF e contratar mão de obra particular. Para que essa ideia tornasse realidade, contei com a ajuda dos meus colegas prof. Roberto Rosas Pinho e prof. Virgílio Carvalho dos Anjos. Em meados do ano de 2015, finalmente os novos laboratórios ficaram prontos. Planta baixa e fotografias desses novos laboratórios podem ser observados nas Figs.3.3 (a), (b) e (c). Apesar de ser uma expansão do laboratório de óptica, o novo laboratório de pesquisa sob minha coordenação foi registrado com o nome **Laboratório de Materiais Fotossensíveis**. O novo laboratório teria *óptica* como área de atuação e *materiais fotossensíveis* como especificidade.

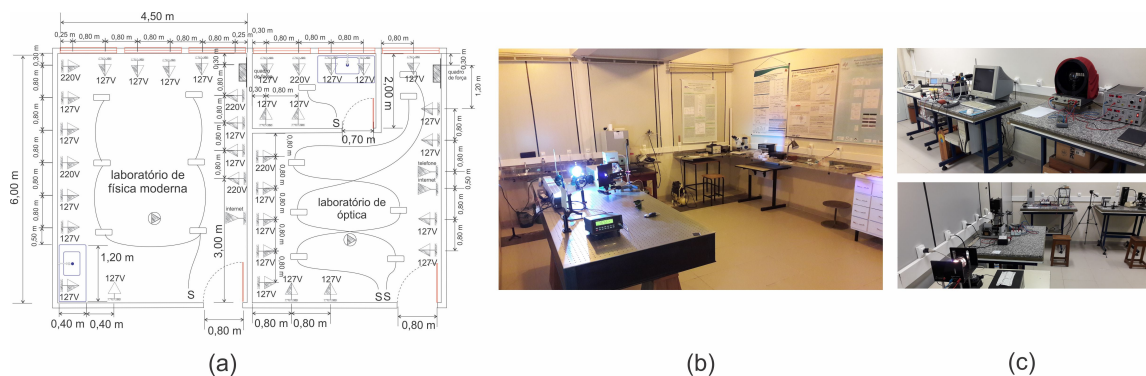


Fig. 3.3: (a) Planta baixa dos laboratórios de materiais fotossensíveis e física moderna atuais, (b) Fotografia do laboratório de materiais fotossensíveis do departamento de física e (c) Fotografia do novo laboratório de física moderna do departamento de física.

O Laboratório de Materiais Fotossensíveis tem uma infraestrutura planejada para preparação de diferentes tipos de amostras de materiais fotossensíveis, para posterior análise de suas estruturas moleculares quando expostas à radiação eletromagnética, bem como para exploração de suas diversas aplicabilidade na fabricação de componentes ópticos holográficos. Embora prometia grandes expectativas para os nossos trabalho científicos, a nova reforma no laboratório de óptica também foi responsável por mais um atraso de parte das minhas pesquisas científicas.

No ano de 2013, participei como membro da banca de defesa de tese de doutorado na Universi-

dade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), da candidata Greice Kelly Bezerra da Costa, com o título *Espectroscopia de Fotoluminescência, Excitação e Fotoacústica de amostras $MgGa_2O_4 : Ni^{2+}$ e $GaNbO_4 - GaNb_{11}O_{29} - Ga_2O_3 : Cr^{3+}$* e no ano de 2014, participei como membro de uma banca de pré-defesa de tese de doutorado na Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), do candidato Geraldo Henrique Silva, com o título *Espectroscopia óptica de vidros PZABP dopados com terras-raras e nanopartículas semicondutoras*.

No mês de outubro do ano de 2014 fui consultor “**ad-hoc**” de um projeto de pesquisa e plano de trabalho para bolsa de fixação de pesquisador, da Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE), de interesse do candidato Dr. Weliton Soares Martins, que tinha o prof. José Wellington R. Tabosa como professor supervisor. O projeto tinha como título *Armazenamento e manipulação coerente de luz em átomos frios e vapores*.

A partir do ano de 2009, com a reestruturação universitária do governo federal (REUNI), o departamento de física praticamente dobrou seu corpo docente. Com isso, a pós-graduação deu um grande salto de qualidade, quando passaria a contar com um corpo docente mais qualificado. Com o crescimento da pós-graduação, além do curso de mestrado, o departamento passaria a contar também com um curso de doutorado. Com o passar do tempo, nos anos de 2014, para manter o conceito da nossa pós-graduação na CAPES, houve a necessidade de criar regras mais rígidas para o seu corpo docente (o professor pesquisador deveria ter, projeto de pesquisa aprovado, pelo menos 2,5 artigos publicados por ano e/ou ser bolsista do CNPq). Com essas novas regras, alguns professores tiveram que deixar o corpo docente das pós-graduação. No ano de 2015, eu fui comunicado pela coordenação de curso que eu estaria desligado do corpo docente da pós-graduação do departamento de física até que eu atingisse novamente as condições necessárias impostas pelas novas regras. Desde então venho traçando metas para voltar a fazer parte do colegiado da pós-graduação do departamento de física da UFJF.

Com o afastamento da pós-graduação, não tive mais a permissão de orientar alunos de mestrado ou doutorado. Com isso, o meu ex-aluno de mestrado, que a princípio seria um potencial aluno de doutorado, Jefferson da Silva Martins, teve que optar por um outro orientador. Por questões de afinidade de pesquisa, o aluno Jefferson da Silva Martins escolheu o prof. Welber

Gianini Quirino como seu orientador e eu fui convidado para ser seu coorientador.

No ano de 2015, participei como membro da banca de defesa de dissertação de mestrado na Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), do candidato Thales Alves Faraco, com o título *Estudo das Propriedades Térmicas, Ópticas e Estruturais de Vidros Fosfato de Silício Dopados com Érbio e Prata para Aplicação em Telecomunicação*, no ano de 2016, participei como membro da banca de defesa de dissertação de mestrado na Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), do candidato Diogo Rúbio Sant’Anna das Dores, com o título *Determinação de Parâmetros ópticos, Estruturais e Espectroscópicos de Vidros Fosfato-Silicato Dopados com Érbio; Parâmetros de Judd-Ofelt*.

No mês de março do ano de 2017 fui consultor “ad-hoc” de um projeto de pesquisa e plano de trabalho para bolsa de Iniciação Científica, da Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE), Edital FACEPE 03/2017 – PIBIC 2017, de interesse do candidato Arthur Luís Silva de Araújo, que tinha o prof. André Fernando Lavorante como professor orientador. O projeto tinha como título *Desenvolvimento de um sistema em fluxo multicomutado explorando compostos de coordenação como reagente sólido para a determinação espectrofluorimétrica de formaldeído em leite e derivados*.

Ainda no ano de 2017, participei de uma banca de pré-defesa de tese de doutorado na Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), do candidato Tibério de Paula Netto, com o título *Correções de origem quântica para a ação do vácuo e suas aplicações*. Ainda ao longo deste ano, apresentei também alguns trabalhos no XL Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada entre os dias 27 e 31 de agosto em Armação de Búzios (RJ).

No mês de maio do ano de 2018, fui membro organizador do *I Simpósio Brasileiro Sobre Materiais e Pesquisas Relacionadas*, ocorrido na Universidade Federal de Juiz de Fora no período de 10/04/2018 a 13/04/2018. Durante o simpósio fui coordenador da sessão de trabalhos orais sobre *Espectroscopia Vibracional e Caracterização de Superfícies*, ocorrido em 12/04/2018 nos horários de 13:30 às 18:00H. Ainda durante o simpósio, minha então aluna de iniciação científica apresentou um trabalho com o título *“Measurement of chemical kinetics in SU8 negative photoresists using laser desorption ionization”*.

O resultado desse trabalho está sendo submetido para publicação.

Entre os anos de 2010 e 2016, orientei mais cinco alunos de iniciação científica:

- Renan Tibiriçá Mendes em 2010, com o projeto “*Cinéticas Químicas em Fotorresinas Positivas e Negativas*”, com uma bolsa do programa BIC/UFJF.
- Douglas Almeida de Moura em 2011, com o projeto “*Comparação das medidas da cinética química da fotorresina positiva AZ-1518 usando Interferometria e Espectrometria de Massa por Tempo de Voo*”, com uma bolsa do programa BIC/UFJF.
- Vinícius Eiterer Rocha em 2013, com o projeto “*Análise de Fotorresinas Usando as Técnicas LDI-TOF e MALDI-TOF de Espectrometria de Massa*”, com uma bolsa do programa BIC/UFJF.
- Luiz Henrique Carmo Castro em 2013, com o projeto “*Medida da Cinética Química em Fotorresinas Usando a Espectrometria de Massa LDI-TOF de Alta Resolução.*”, com uma bolsa do programa BIC/UFJF.
- Carolina Pinheiro em 2016, com o projeto “*Caracterização de Fotorresinas Positivas e Negativas usando Espectroscopia de Fotoelétrons Excitados por Raios X (XPS)*”, com uma bolsa do programa BIC/UFJF.

Atualmente, está em andamento uma orientação de iniciação científica da aluna Carolina Pinheiro, com uma bolsa do programa BIC/UFJF. O projeto de orientação de iniciação científica tem como título “*Medida da Cinética Química em Fotorresinas Negativas Usando Espectrometria de Massa LDI-ToF de Alta Resolução*”.

Pesquisa atual em andamento e perspectivas futuras - Resultados inéditos

Medida da cinética química das fotorresinas negativas SU-8 usando ionização por dessorção a laser

Atualmente, a minha pesquisa que se encontra na fase mais adiantada, é o estudo da cinética química de uma fotorresina especial de grande potencialidade em aplicações tecnológicas: **a**

fotorresina negativa SU-8.

Fotorresinas negativas são material fotossensíveis que fornecem uma reação de polimerização induzida por radiação ultravioleta, o que a torna insolúvel em certas soluções. A SU-8 é uma fotorresina negativa quimicamente amplificada (sensíveis à radiação ultravioleta profundo) que foi desenvolvida pela IBM em 1989 [28]. Essa fotorresina tem alta relação de aspecto ($> 20 \mu m$) cujas propriedades químicas e mecânicas permitem aplicações em micromecânica [29], sistemas micro-eletromecânicos (MEMS) [30] e sistemas bio-micro-eletromecânicos (Bio-MEMS) [31]. Devido à sua alta resolução, a SU-8 também tem aplicações em óptica e fotônica, tais como fabricação de cristais fotônicos [32], guias de onda [33], componentes ópticos difrativos [34] e padrões de relevo nanoestruturados [35]. O SU-8 é formado por uma *resina epoxi* comercial (EPON) dissolvida em um solvente orgânico denominado *gamma-butyrolacton* (GBL). Conforme mostrado na Fig.3.4 (a), a estrutura molecular da resina epoxi EPON é formada por oito anéis epóxi em cada monômero (daí o número oito no nome SU-8). Um sal, denominado *triarylsulfonium hexafluorantimonium* ($C_{18}H_{15}SSbF_6$), é adicionado na solução de resina epoxi [36]. Esse sal é o *composto fotoativo* (PAC) da fotorresina SU-8, que absorve no comprimento de onda $\lambda = 365 nm$.

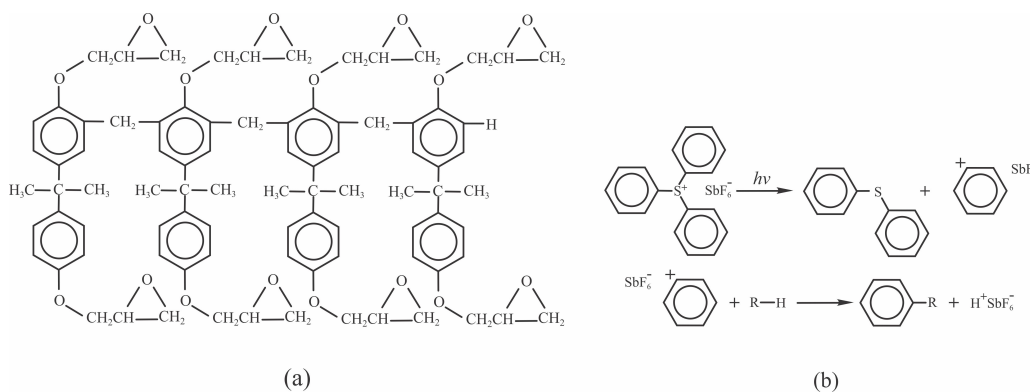


Fig. 3.4: (a) Estrutura molecular do monômero do composto principal da fotorresina SU-8 (resina epoxi EPON). (b) Fotólise do sal de hexafluorantimônio de triarilsulfônio para gerar o ácido fluorantimônico, onde o radical *R* representa o monômero de SU-8.

Quando expostas à radiação ultravioleta, a fotorresina SU-8 induz reações químicas que modificam suas propriedades físico-químicas. Neste trabalho, investigamos as taxas cinéticas de mudanças na estrutura molecular da fotorresina negativas SU-8 10, após exposição à radiação ultravioleta emitida por uma lâmpada de arco de mercúrio, utilizando a técnica de

ionização por dessorção a laser acoplado a um espectrômetro de massa por tempo de voo de alta resolução (LDI-ToF-MS). Após a exposição à radiação ultravioleta, a fotólise do sal de *triarylsulfonium hexafluorantimonium*, através de uma transferência de prótons (protolysis), gera um fotoácido denominado *ácido fluorantimônico* ($HSbF_6$), conforme mostrado na Figs.3.4 (b), o qual tem a função de catalisar termicamente a reticulação dos monômeros das moléculas de SU-8, transformando-o em um polímero mecanicamente super resistente [37]. Essas fotorresinas foram escolhidas para estudo porque suas informações técnicas são bem estabelecidas e apresentam grandes potenciais de aplicações. Em nível microscópico, o mecanismo de absorção óptica da fotorresina negativa SU8 foi descrito em termos do modelo teórico de Dill [38]. De acordo com este modelo, o coeficiente de absorção da fotorresina SU8 é dado por:

$$\alpha(z, t) = AM(z, t) + B \quad (3.1)$$

onde $M(z, t)$ é a concentração relativa do composto fotoativo (sal de *triarylsulfonium hexafluorantimonium*). A taxa de mudança da concentração relativa do composto fotoativo depende da intensidade de radiação óptica local $I(z, t)$, da concentração relativa $M(z, t)$ e de um termo mensurável de sensibilidade óptica C , conforme dado por:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -I(z, t)M(z, t)C \quad (3.2)$$

Na Eq.(3.1) e Eq.(3.2), A , B e C dependem do tipo de fotorresina e do comprimento de onda de exposição [39]. Essas constantes ópticas se referem aos parâmetros de Dill ABC da fotorresina. O parâmetro A é um termo dependente da absorção óptica, o parâmetro B é um termo independente da absorção óptica e o parâmetro C fornece a sensibilidade óptica, ou a cinética química, da fotorresina. Esses parâmetros foram tradicionalmente e convenientemente determinados empregando a técnica de medição da transmissão actínica (técnica que utiliza absorção ultravioleta). No entanto, a metodologia de transmissão actínica é limitada para algumas fotorresinas negativas que absorvem radiação de comprimento de onda acima de 300 nm [38]. Para o caso em que a fotorresina é uma película fina e homogênea, a intensidade da radiação ultravioleta não depende do tempo de exposição e a solução da Eq.(3.2) torna-se

$$M(E) = e^{-CE} \quad (3.3)$$

onde $E = I(z)t$ é a energia por unidade de área do detector. A concentração relativa do produto de exposição (*ácido fluorantimônico*) $P(z, t) = P(E)$ deve assumir a seguinte forma:

$$P(E) = 1 - e^{-CE} \quad (3.4)$$

As diferenças de comportamento entre fotorresinas positivas e negativas não são apenas após o processo de revelação química, mas também no mecanismo das reações envolvidas. Nas fotorresinas positivas, o mecanismo principal é a fotólise do composto fotoativo (PAC). Por outro lado, na fotorresina negativa, quimicamente amplificada (como é o caso da SU-8), além de ocorrer a fotólise do composto fotoativo (PAC) ocorre também a polimerização catiônica. Como o modelo de Dill apenas descreve a fotólise do composto fotoativo, ele pode ser usado diretamente para descrever a primeira etapa do processo.

Neste trabalho, a técnica LDI-ToF-MS foi empregada para estudar, não somente as mudanças estruturais moleculares devido à exposição à radiação ultravioleta, mas também a cinética química da fotorresina SU-8, definida pelo seu parâmetro Dill C. Após diferentes energias de exposição à radiação ultravioleta no comprimento de onda $\lambda = 365 \text{ nm}$, os espectros de massa LDI-ToF apresentam diferentes rendimentos relativos para alguns dos ions moleculares característicos mono-carregados negativamente da fotorresina SU8. Para a medição do mecanismo cinético químico, a técnica LDI-ToF-MS foi utilizada para obter a taxa de decaimento fracional dos fragmentos do sal de *triarilsulfonium hexafluorantimonium* por unidade de intensidade de radiação de exposição. Esses resultados fornecem um novo uso da técnica LDI-ToF-MS para análise da cinética química de materiais fotosensíveis negativos. Para comparar as técnicas, também medimos as taxas cinéticas das mudanças na estrutura molecular da fotorresina SU-8, empregando a metodologia de transmissão actínica, usando um laser de argônio operando $\lambda = 364 \text{ nm}$.

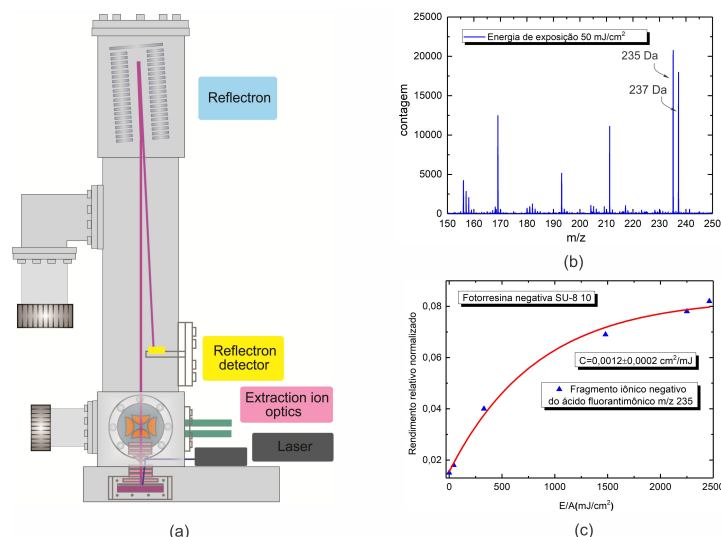


Fig. 3.5: (a) AXIMA Performance MALDI-ToF do sistema Shimadzu Biotech, (b) Espectro de massa de LID-ToF típico da fotorresina SU-8 para uma exposição à radiação ultravioleta de comprimento de onda $\lambda = 365 \text{ nm}$, com uma energia de exposição de $50 \text{ mJ}/\text{cm}^2$, adquirida de uma lâmpada de arco de mercúrio e (c) Variação da intensidade relativa do pico m/z 235 como uma função da energia de exposição.

A Fig.3.5 (a) mostra o AXIMA Performance MALDI-ToF do sistema Shimadzu Biotech, pertencente ao laboratório de física de superfícies atômicas (ACSSL-LaCACiS) do departamento de física da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), utilizado em nossos experimentos. Este sistema inclui um manipulador automático de amostras e um espectrômetro de massa por tempo de voo, alojados em câmaras de ultra-alto vácuo (UHV), com uma pressão de base de cerca de $3,0 \times 10^{-7} \text{ mbar}$. As experiências são realizadas usando um laser ultravioleta pulsado ($\lambda = 337 \text{ nm}$). A potência do laser é ajustada em 139, cada ponto é analisado usando um raster aleatório de 400 perfis e cada perfil contém 10 tiros de laser. O rendimento relativo foi adotado para a análise quantitativa dos espectros de massa. Calculamos os picos de rendimentos relativos, dividindo a área do pico individual pela área de todos os picos no espectro. As amostras são preparadas com fotorresinas SU-8 10 ($10 \mu\text{m}$ de espessura a 3000 rpm), com $1,187 \text{ g/l}$ de concentração de sal, diluída 1 : 1 em solvente (GBL), são pulverizado em diferentes posições de uma placa metálica previamente limpa e seca à temperatura ambiente.

A Fig.3.5 (b) mostra um espectro de massa de LID-ToF típico, de $100,0$ a $550,0 \text{ m}/z$, de amostras de fotorresinas SU-8 10, para exposição à radiação ultravioleta de comprimento de onda $\lambda = 365 \text{ nm}$ e energia de exposição de $50 \text{ mJ}/\text{cm}^2$, adquirida de uma lâmpada de arco

de mercúrio. A calibração foi realizada usando espectros de massa do *ácido alpha-cyano-4-hydroxycinnamic*. Nessa experiência, os picos de calibração foram $[M - H]^-$ (m/z 188.03), $[M - CO_2H]^-$ (m/z 144.04) e $[2M - H]^-$ (m/z 377.08). A fotorresina negativa SU-8 consiste principalmente da resina epoxi (EPON), sendo o sal *triarilsulfonium hexafluorantimonium* uma pequena fração da composição da fotorresina. Assim, a maior contribuição para os picos, nos espectros da Fig.3.5 (b), são atribuídas aos ions moleculares negativos da resina epoxi (EPON). Além disso, a resina epoxi (EPON) não é alterado pela exposição à radiação ultravioleta e, portanto, os picos correspondentes aos seus ions negativos nos espectros de massa não são utilizados no presente estudo da cinética química da fotorresina SU-8 10. Com a resolução em massa do experimento é possível identificar diferentes estruturas e sugerir suas atribuições. Podemos atribuir o fragmento negativo molecular iônico SbF_6^- do produto de exposição (*ácido fluorantimônico*) ao pico de massa de 235 Da e 237 Da. Esses dois picos de massa são referidos a dois isótopos estáveis diferentes do átomo de antimônio (Sb): $m = 121$ Da (57,36 %) e $m = 123$ Da (42,64 %). A partir dos espectros de massa de várias exposições da fotorresina SU-8 10, os rendimentos relativos normalizados dos picos de massa m/z 235 e 237 foram calculados dividindo a área de cada pico pela área total do espectro correspondente.

Os resultados das medidas para a cinética química da fotorresina SU-8 10 são mostrados na Fig.3.5 (c). Nesta figura é mostrado o rendimento relativo normalizado em função da energia de exposição por unidade de área para o ion negativo molecular (m/z 235 Da) correspondente ao (*ácido fluorantimônico*). O ajuste dos pontos experimentais com o modelo teórico, representado na Eq.(3.4), dá um valor para o parâmetro Dill C, $C = (0,0012 \pm 0,0002) \text{ cm}^2/; mJ$. O valor para o parâmetro Dill C obtido neste trabalho para ions negativos moleculares do *ácido fluorantimônico* está em bom acordo, em ordem de magnitude, com o valor adquirido empregando a metodologia de transmissão actínica, que foi $C = (0,0020 \pm 0,0001) \text{ cm}^2/; mJ$, usando um laser de argônio operando em $\lambda = 364 \text{ nm}$. Este resultado reforça a capacidade do uso da técnica LDI-ToF-MS para obter o parâmetro Dill C e estudar os mecanismos cinéticos químicos dos materiais fotossensíveis.

Nesse momento, os resultados dessa pesquisa está sendo submetida para publicação no periódico de circulação internacional *International Journal of Mass Spectrometry*.

Estudo da cinética química no leite por exposição à radiação de microondas.

Essa pesquisa está em fase de discussão juntamente com os prof. Roberto Rosas pinho e prof. José Paulo Rodrigues Furtado de Mendonça, ambos do departamento de física da UFJF. O objetivo dessa pesquisa é estudar os prejuízos nutricionais do leite de vaca e materno, resultante do aquecimento utilizando fornos de microondas.

As proteínas do leite são de fácil digestão. Além disso, elas são de elevado valor biológico e contêm os aminoácidos essenciais em quantidade e proporção adequadas. Daí sua importância na alimentação, principalmente na fase de crescimento, pois é possível obter do leite boa parte das necessidades diárias de proteínas. As principais proteínas do leite são a caseína, a b-lactoglobulina e a a-lactoalbumina. As caseínas (fosfoproteínas) representam 80% das proteínas do leite, o restante é constituído pela b-lactoglobulina e a-lactoalbumina com 16% e 4% do total das proteínas respectivamente. Tanto a b-lactoglobulina como a a-lactoalbumina são nutricionalmente melhores que a caseína, devido ao maior conteúdo de aminoácidos essenciais, como lisina, metionina e triptofano. As proteínas são moléculas estruturalmente ordenadas e qualquer alteração nessa conformação leva à desnaturação. As principais causas são: calor, adição de ácidos ou bases, radiações ultravioleta, luz ou ação mecânica. O tratamento térmico ao qual o leite é submetido, principalmente no leite longa vida, leva à desnaturação das proteínas. A causa é a modificação da conformação globular ou pregueada das proteínas para a forma linear, causando, assim, um desenrolamento da cadeia peptídica. O resultado é a formação de novos enlaces entre moléculas, que tornam as proteínas quimicamente mais reativas. O fenômeno da desnaturação não implica necessariamente diminuição da digestibilidade das proteínas nem a diminuição do seu valor biológico. Entretanto, existe a suspeita de que o aquecimento usando fornos de microondas pode induzir alterações moleculares nas proteínas do leite, principalmente do leite materno, e comprometer os valores nutricionais desse importante alimento.

A ideia da pesquisa é tentar detectar alterações moleculares em amostras de leite, induzidas por exposição à radiação de microondas, utilizando as técnicas de dessorção de matriz assistidas por laser (MALDI – Matrix Assisted Laser Desorption Ionization), e dessorção iônica por laser (LDI - Laser Desorption Ionization), ambas acoplada a um sistema de espectrometria de massa por tempo de voo (ToF-MS). Confirmando essas alterações moleculares, temos a

intenção de medir a cinética química no leite resultante da exposição à radiação de microndas.

Estudo da cinética química devido a incidência de radiação infravermelha na cafeína.

Essa pesquisa está em fase de discussão juntamente com os prof. Roberto Rosas pinho do departamento de física da UFJF e prof.(a) Lilian Lucia Rocha e Silva do departamento de química da UFJF. O objetivo dessa pesquisa é estudar a cinética química da cafeína quando exposta à radiação infravermelha, e identificar as consequências disso no organismo humano.

A cafeína é um composto químico de fórmula $C_8H_{10}N_4O_2$ classificado como alcaloide do grupo das xantinas e designado quimicamente como 1,3,7-trimetilxantina. É encontrado em certas plantas e usado para o consumo em bebidas, na forma de infusão, como estimulante. A cafeína apresenta-se sob a forma de um pó branco ou pequenas agulhas, que derretem a $238^{\circ}C$ e sublimam a $178^{\circ}C$, em condições normais de temperatura e pressão. É extremamente solúvel em água quente, não tem cheiro e apresenta sabor amargo. Entre o grupo das xantinas (que incluem a teofilina e a teobromina) a cafeína é a que mais atua sobre o sistema nervoso central. Atua ainda sobre o metabolismo basal e aumenta a produção de suco gástrico. Doses terapêuticas de cafeína estimulam o coração aumentando a sua capacidade de trabalho, produzindo também dilatação dos vasos periféricos.

Para essa pesquisa, temos a intenção de detectar alterações moleculares em amostras de cafeína, induzidas por exposição à radiação infravermelha utilizando a técnica MALDI acoplada a um sistema ToF-MS e, a partir dos resultados obtidos, medir a cinética química resultante dessa exposição.

Caracterização de fotorresinas usando Espectroscopia de Fotoelétrons Excitados por Raios X (XPS).

Essa pesquisa está sendo conduzida por mim e pela minha aluna de iniciação científica Carolina Pinheiro, em parceria com o prof. Roberto Rosas pinho do departamento de física da UFJF e prof.(a) Maria Luiza Miranda Rocco do instituto de química da UFRJ. O trabalho propõe identificar modificações moleculares em fotorresinas positivas e negativas devido à exposição de luz ultravioleta de comprimento de onda $\lambda = 365 \text{ nm}$, usando a técnica de espectroscopia

de fotoelétrons excitados por raios X (XPS). O objetivo é desenvolver um método de precisão para detectar mudanças estruturais, em nível molecular, dos compostos fotoativos desses materiais fotossensíveis induzidas pela exposição à radiação ultravioleta. Os espectros de fotoelétrons excitados por raios X das fotorresinas adquiridos devem apresentar diferenças marcantes, para diferentes exposições das fotorresinas à radiação ultravioleta. Fotoelétrons relacionados à decomposição fotoquímica das fotorresinas devem ser identificados no espectro para cada energia de exposição.

Uso da holografia eletrônica para estudar o holograma de um único fóton.

Essa pesquisa está em fase de discussão juntamente com os prof. Wallon Anderson Tadaiesky Nogueira do departamento de física da UFJF. O prof. Wallon possui larga experiência na área de óptica quântica e recentemente me procurou para discutirmos a viabilidade do uso da técnica de holografia eletrônica ou “*ESPI*” (Electronic Speckle Pattern Interferometry), no estudo do holograma de um único fóton [41]. A técnica permite armazenar toda a informação espacial contida na função de onda de um fóton. No experimento, um fóton de referência e um fóton desconhecido incidem simultaneamente em um dispositivo que divide feixes de luz em duas partes iguais, que então seguem caminhos separados espacialmente em direção a uma câmera CCD, onde as posições dos fótons são registradas. Quando se repete o experimento várias vezes, é possível obter uma imagem que corresponde a um holograma do fóton desconhecido. Este experimento pode ter grandes implicações no entendimento da mecânica quântica, pois permite observar a função de onda completa de uma partícula quântica. Além disso, o procedimento pode ser adaptado para a construção de hologramas de outros objetos quânticos, como por exemplo de um átomo. A estrutura espacial de fótons tem sido usada extensivamente em protocolos de informação quântica, como na distribuição de chaves de criptografia e para estabelecer limites para a geração de emaranhamento, que é um tipo de correlação quântica pura.

Desenvolvimento de novos componentes ópticos holográficos.

Essa é uma pesquisa que está planejada mais para o futuro e envolve alguns professores e alunos de departamento de física da UFJF. Ela está dependendo ainda da aquisição de um laser de ultravioleta, para equipar o laboratório de materiais fotossensíveis, que pertence a um pacote de compras do último CTInfra que foi aprovado para o Instituto de Ciências Exatas

(ICE). Trata-se de um desejo antigo de produzir trabalhos relacionados a minha formação de doutorado e pós-doutorado.

A ideia é montar um interferômetro com o laser de ultravioleta para exposições holográficas em filmes de fotorresinas, para posterior gravação de microestruturas de relevo na própria fotorresina ou transferência para substratos apropriados (vidro ou substratos semicondutores). O objetivo é fabricação de dispositivos com aplicações em óptica, opto-eletrônica e micro mecânica. A transferência da microestrutura para o substrato deverá ser feita com um processo químico úmido (ataque químico com substância corrosiva) ou seco (ataque por plasma reativo - RIE). Nessa etapa do trabalho, temos a intenção de buscar interação com grupos da UNICAMP, da UFRJ ou mesmo do nosso próprio Instituto. Alguns exemplos de dispositivos ópticos e mecânicos que podemos produzir por tecnologia planar, são: Lâminas de onda, Polarizadores de grade para infravermelho, divisores de polarização e micro engrenagens. Existem outras propostas que ainda estão sendo analisadas, tais como por exemplo: gravação de redes de difração para serem usadas em lasers semicondutores de infravermelho e gravação de outras estruturas aplicáveis em tecnologias de lasers.

O uso dessa estrutura, pode ser estendido a outros laboratórios do departamento de física da UFJF, tais como: Laboratório de Espectroscopia de Materiais (LEM), envolvendo os professores Virgílio Carvalho dos Anjos e Maria José Valenzuela Bell e o Laboratório de Eletrônica Orgânica (LEO), envolvendo os professores Welber Gianini Quirino e Cristiano Legnani. Em particular, no caso do laboratório de novos materiais, a ideia é que o interferômetro seja utilizado para gravação de estruturas em substratos apropriados para posteriormente serem utilizadas na fabricação de diodos emissores de luz orgânico (OLED).

No capítulo 4 disponibilizo cópia da primeira página dos meus quatro artigos científicos que considero mais relevantes, seja pela qualidade do trabalho ou pela quantidade de citações, dentre aqueles que publiquei durante toda a minha carreira.

3.2 Atividades de Ensino na UFJF

Período anterior à reestruturação universitária (REUNI) na UFJF

Logo no início do meu ingresso na UFJF, já no primeiro semestre de 1998, fui convidado para participar de um novo projeto personalizado de ensino que estava se iniciando no departamento de física. Trata-se do *Método Keller*. Nesse projeto eu fui solicitado para ser o professor orientador da disciplina de *Física IV* nos moldes do método Keller.

O método Keller é um sistema personalizado de ensino criado por *Fred Simmons Keller* em 1899, que foi um pioneiro em psicologia experimental na universidade de Columbia. O Método Keller sempre foi considerado como uma possível solução para os problemas do ensino de física básica nas universidades, tais como nível de aprendizagem, retenção dos conhecimentos adquiridos, índice de aprovação, índice de desistências, atitude perante a física e opinião sobre o curso. Uma disciplina do método Keller deve ser conduzida por um professor orientador e alguns monitores (03 ou 04 dependendo do tamanho da turma). No método Keller não existem aulas expositivas e o sucesso depende da qualidade dos tutores e também da escolha do livro texto. As aulas seguem nos mesmos moldes de encontros presenciais (previstos por 04 horas/aulas semanais), onde os alunos recebem orientações sobre as dinâmicas pedagógicas do curso. Durante um encontro presencial, o aluno pode solicitar um roteiro de estudos sobre um determinado capítulo, ou tópico, do livro texto que inclui métodos e estratégias de estudo de conteúdo, bem como uma lista de exercícios para serem resolvidos. Após estudar previamente um determinado capítulo, ou tópico, do livro texto e tentar resolver exercícios propostos, o aluno terá oportunidade de tirar dúvidas com os tutores e também com o professor durante os encontros presenciais. No momento em que o aluno estiver seguro do seu aprendizado sobre um determinado capítulo do livro texto, ele terá oportunidade de solicitar uma avaliação ao professor orientador durante um encontro presencial. Se o aluno obtiver sucesso na avaliação solicitada, ele será orientado a estudar um outros conteúdos do livro texto até que complete todo o programa da disciplina.

No ano de 2000, em colaboração com o professor visitante, Raul Tabares, eu e mais alguns professores do departamento de física elaboramos um projeto de desenvolvimento de aulas digitais da disciplina Física IV, para ser aplicado nas aulas do método Keller. Trata-se da preparação

de conteúdos da disciplina Física IV em formato digital incluindo recursos gráficos e simulações computacionais. Todo o material foi gravado em CD's para que fossem distribuídos aos alunos gratuitamente.

Observou-se que o sistema, da forma como vinha sendo usado, prende demasiadamente o aluno ao livro de texto, não estimulando a pesquisa por conta própria em outras fontes de informação. Chega-se a conclusão que o método Keller pode ser uma alternativa válida para o ensino. Entretanto, ao optar pelo novo sistema, deve-se levar em conta a disponibilidade de tempo e de recursos para a produção do material necessário, bem como a existência de monitores qualificados em número suficiente. Por causa dessas e de outras dificuldades, o método Keller foi extinto no ano de 2004 no departamento de física da UFJF.

Durante toda a minha carreira, ministrei várias disciplinas oferecidas pelo departamento de física em nível de graduação: *EADFIS001 – Introdução às Ciências Físicas I*, *EADFIS002 – Laboratório de Introdução às Ciências Físicas I*, *EADFIS004 – Introdução às Ciências Físicas II*, *EADFIS005 – Laboratório de Introdução às Ciências Físicas II*, *EADFIS006 - Física I*, *EADFIS007 - Laboratório de Física I*, *UABFIS036 - Laboratório Avançado*, *EADFIS028 - Trabalho de Conclusão de Curso - Licenciatura em Física*, *FIS076 - Física IV (método Keller e convencional)*, *Laboratório de Física IV*, *FIS098 - Física Moderna*, *FIS100 - Laboratório de Física Moderna*, *FIS043 - Estrutura da Matéria I*, *FIS121 - Estrutura da Matéria II*. Além dessas disciplinas obrigatórias, ministrei também outras disciplinas que não são obrigatórias. Dentre algumas dessas disciplinas posso destacar:

- Disciplina FIS092 - Tópicos Especiais de Física Experimental I, ministrada no primeiro semestre de 1999 e no segundo semestre de 2001. Essa é uma disciplina de ementa aberta onde foi abordado tópicos teóricos e experimentais de Óptica Linear e Não-Linear.
- Disciplina FIS033 - Teoria Eletromagnética I e FIS034 - Teoria Eletromagnética II, ministradas no primeiro e segundo semestres de 2000. Essas disciplinas foram oferecida para o nivelamento de alunos que ingressaram no programa de da pós-graduação do departamento de física da UFJF.
- Disciplina FIS088 - Seminário de Tópicos Especiais de Física I, ministrada no primeiro e no segundo semestres de 2001. Essa disciplina tinha como objetivo a elaboração de

experimentos para serem usados em um futuro Laboratório de Física Moderna.

- Disciplina UABFIS043 - Tópicos de Matemática, ministrada no segundo semestre de 2009. Essa era uma disciplina que foi criada para dar suporte matemático aos alunos do curso de licenciatura em física a distância. Na grade atual do curso de licenciatura em física a distância essa disciplina passou a ser denominada de EADFIS003 – Tópicos Matemáticos Aplicados a Física.

Para a maioria das disciplinas que ministrei, elaborei notas de aula, ou apostilas, que estão disponibilizadas na internet e podem ser consultadas em http://www.fisica.ufjf.br/~cralima/index_arquivos/Page491.htm. Essas notas de aula receberam vários elogios, não somente dos alunos do departamento de física da UFJF, mas também de vários alunos e professores de outras instituições do país. Posso citar como exemplo as notas de aula da disciplinas Física Moderna (denominada Estrutura da Matéria na grade antiga), que foi ministrada por mim entre os anos de 2000 e 2013.

Ao longo do ano de 2000, assumi a coordenação da disciplina de Laboratório de Física IV, com o objetivo de modernizá-lo por meio do desenvolvimento de novos experimentos. Usando poucos recursos, optando principalmente pela recuperação de sucatas de equipamentos antigos e fabricação de vários componentes elétricos e mecânicos utilizando a oficina mecânica do departamento de física, consegui elaborar 10 (dez) novos experimentos de óptica para o laboratório de Física IV. Após muito trabalho, preparando o laboratório e, ao mesmo tempo, ministrando aulas de Laboratório de Física IV, já no final do ano 2002, o novo laboratório já estava pronto para que qualquer professor pudesse usá-lo. Além dos 10 (dez) novos experimentos em pleno funcionamento, contando com a ajuda de alguns colegas, escrevi uma apostila com o título “*Roteiro Experimental de Laboratório de Física IV*”, que também está disponibilizada na internet e pode ser consultada em http://www.fisica.ufjf.br/~cralima/index_arquivos/Page491.htm.

No início do ano de 2003, após avaliação dos cursos de licenciatura e bacharelado em física da UFJF da modalidade presencial, pela CAPES, entre outras coisas, houve a exigência de montar um laboratório de Física Moderna no departamento de física da UFJF. Mais uma vez essa tarefa ficou sob minha responsabilidade. Nesse caso, além de um espaço com uma área

da ordem de 9 m^2 , localizado no andar de cima da cantina do instituto de ciências exatas (ICE), eu tinha também a disposição alguns equipamentos que já haviam sido adquiridos das empresas Alemã Phywe e Americana PASCO, pelo departamento de física. Apesar de serem equipamentos bons e de última geração, eles ainda não eram suficientes para montar um laboratório de Física Moderna com um número mínimo de experimentos. Como no caso do laboratório de Física IV, para complementar o laboratório de Física Moderna, tive que optar, mais uma vez, pela recuperação de sucatas de equipamentos antigos e fabricação de componentes elétricos e mecânicos utilizando a oficina mecânica do departamento de física. Nesse caso, contei com a ajuda de alguns colegas do departamento de física, principalmente dos professores José Paulo Rodrigues Furtado de Mendonça e Bernhard Johannes Lesche. Com tudo que eu tinha a disposição, eu consegui montar uma primeira versão do laboratório de Física Moderna com apenas 05 (cinco) experimentos. Usando essa infra-estrutura de laboratório, no segundo semestre de 2003, ministrei a primeira aula da disciplina de Laboratório de Física Moderna para 06 (seis) alunos. Ao longo de mais alguns semestres ministrando aulas de Laboratório de Física Moderna, consegui desenvolver mais 03 (três) novos experimentos, o que contemplaria as atividades mínimas necessárias impostas pela ementa da nova disciplina. Além dos 08 (oito) experimentos do Laboratório de Física Moderna em pleno funcionamento, escrevi também mais duas apostilas para ficar à disposição do novo laboratório. A primeira com o título *“Tópicos de Laboratório de Física Moderna”* e a segunda com o título *“Teoria de Erros Medidas e Gráficos”*, ambas disponibilizada na internet e podem ser consultadas em http://www.fisica.ufjf.br/~cralima/index_arquivos/Page491.htm.

Com o passar dos anos, o laboratório de Física Moderna sofreu 03 (três) mudanças de espaço físico, até que no ano de 2015 teve uma instalação definitiva no prédio antigo do instituto de ciências exatas, cuja planta baixa e fotografia do laboratório podem ser observados nas Figs.3.3 (a) e (c). Em todas essas mudanças, exerci um papel estratégico na adequação e reestruturação desse importante laboratório do departamento de física da UFJF.

Uma outra exigência da CAPES, resultante da avaliação dos cursos de licenciatura e bacharelado em física da UFJF da modalidade presencial no ano de 2003, foi a criação de novas disciplinas teóricas obrigatórias que abordam determinados tópicos de física moderna que não estavam sendo oferecidos aos nossos alunos de uma forma adequada. Trata-se de tópicos como

Relatividade, Física do Estado Sólido, Superfluidez, Supercondutividade, Modelos Nucleares, Processos e Reações Nucleares. Na verdade, esses tópicos já estavam previstos na disciplina de Estrutura da Matéria da então grade curricular dos cursos de licenciatura e bacharelado em física da UFJF da modalidade presencial, entretanto, não havia tempo hábil para serem contempladas. Como eu estava ministrando aulas da disciplina de Estrutura da Matéria, durante algum tempo, fiquei de estudar uma solução para o problema. Uma solução encontrada, foi suspender a disciplina Estrutura da Matéria e criar em seu lugar, 03 (três) novas disciplinas denominadas: Física Moderna de 04 (quatro) créditos, Estrutura da Matéria I de 04 (quatro) créditos e Estrutura da Matéria II de 02 (dois) créditos. Para essas novas disciplinas, preparei ementas, sugeri bibliografias e apresentei a ideia à coordenação de curso. As propostas foram então levadas à comissão de ensino e posteriormente aprovadas no colegiado de curso do departamento de física da UFJF. As novas disciplinas entrariam em carga somente em uma reforma curricular ocorrida por ocasião da reestruturação universitária do governo federal (REUNI) no ano de 2008.

Período posterior à reestruturação universitária (REUNI) na UFJF

A partir do ano de 2008, participei de várias comissões internas do departamento de física para discussão e reformulação da grade curricular dos cursos de licenciatura e bacharelado em física da UFJF, devido a então reestruturação universitária do governo federal (REUNI). Além dessas participações ativas nessas comissões, fiz modificações nas minha notas de aula para que ficassem adequadas as 03 (três) novas disciplinas criadas para substituir a disciplina Estrutura da Matéria. Novos capítulos foram elaborados para que toda as ementas das disciplinas fossem contempladas. A nova apostila foi intitulada como “*Introdução a Física Moderna*”, e está disponível em http://www.fisica.ufjf.br/~cralima/index_arquivos/Page491.htm. Essas foram as notas de aula que, recentemente, receberam mais elogios de alunos e professores de várias instituições do país.

Ainda dentro da reformulação universitária (REUNI), a partir do ano de 2009, houve a aquisição de vários equipamentos novos com o objetivo de modernizar os laboratórios de ensino do departamento de física da UFJF. Também nesse caso, tive uma participação ativa na reconstrução do laboratório de Física I, juntamente com o colega prof. Roberto Rosas

Pinho. O objetivo era escolher, montar e testar pelo menos 10 (dez) novos experimentos para serem usados na disciplina Laboratório de Física I. Além disso, também nesse caso, fiquei responsável pela elaboração dos novos roteiros experimentais das práticas que passariam a equipar o laboratório de Física I. Nove desses roteiros estão disponíveis na internet e podem ser consultados em <http://www.ufjf.br/fisica/disciplinas/roteiros-dos-laboratorios/laboratorio-de-fisica-1/>, acessando os “links” **Prática (1 a 9)**. Além dos roteiros experimentais do novo laboratório de Física I, no ano de 2012, fiz uma adaptação da minha antiga apostila “*Teoria de Erros Medidas e Gráficos*” do laboratório de Física Moderna, para ser utilizada também pelos alunos de laboratório de Física I. A versão final dessa apostila está disponível na internet desde o ano de 2014 e pode ser consultada em http://www.ufjf.br/fisica/files/2010/03/analisedados_small12.pdf. Para esse trabalho contei com a ajuda do colega prof. Fabio Zappa.

Entre os anos de 1998 e 2015, participei como membro de bancas de trabalhos de conclusões de curso (TCC) de vários alunos. Dentre algumas dessas participações posso destacar:

- Participação em banca de TCC do discente Cristiano F. de Melo, em 23 de outubro de 1998.
- Participação em banca de TCC, do discente Leandro Alves Rezende, com monografia intitulada “*Estrutura eletrônica dos hidrocarbonetos aromáticos heterocíclicos: Relações Estrutura/Atividade*”, em fevereiro de 2000.
- Participação em banca de TCC do discente Cesar Moura Nascimento, com monografia intitulada “*Vidros dopados com Er^{3+} para aplicações como dispositivos ópticos*”, em 2002.
- Participação em banca de TCC, como presidente, do discente Luis Fernando de Ávila, com monografia intitulada “*Estudo do índice de refração de fotorresinas durante o processo de sensibilização*”, em 22 de julho de 2003.
- Participação em banca de TCC do discente Alexandre Pinheiro da Silva, com monografia intitulada “*Uso de detectores e emissores de luz para espectroscopia óptica*”, em 2004.

- Participação em banca de TCC da discente Magnória Vieira dos Santos, com monografia intitulada “*Estudo da desorção iônica do PVDC por impacto de elétrons*”, em janeiro de 2005.
- Participação em banca de TCC do discente Daniel Gustavo Mesquita da Silva, com monografia intitulada “*Seção de choque total absoluta do espalhamento de elétrons por etano e tolueno*”, em 2006.
- Participação em banca de TCC do discente Alberto da Costa Assafrão, com monografia intitulada “*Determinação dos parâmetros térmicos do carbeto de silício (SiC) via espectroscopia fotopiroelétrica*”, em 2006.
- Participação em banca de TCC do discente Elton Soares de Lima Filho, com monografia intitulada “*Medida interferométrica automática de atividade bacteriana*”, em 06 de julho de 2007.
- Participação em banca de TCC do discente Alysson Miranda de Freitas, com monografia intitulada “*Montagem experimental de lentes térmicas*”, em junho de 2008.
- Participação em banca de TCC do discente Everton Luiz Martins da Paixão, em julho de 2011.
- Participação em banca de TCC da discente Rita de Cássia Polito Vita Alessio, com monografia intitulada “*Aplicações da microtomografia utilizando a luz síncrotron no estudo de estruturas ósseas*”, em 2013.
- Participação em banca de TCC da discente Lucélia Celes de Souza, com monografia intitulada “*Estudos das propriedades ópticas e estruturais de vidros borosilicatos dopados com érbio e prata*”, em 04 de março de 2013.
- Participação em banca de TCC do discente Humberto Vargas Duque, com monografia intitulada “*Implantação de varredura angular em experimentos de impacto de elétrons com amostras gasosas*”, em 17 de dezembro de 2014.
- Participação em banca de TCC da discente Isis Lee da Silva, com monografia intitulada “*Desenvolvimento de um laser de Titânio-Safira de femtossegundos*”, em 02 de julho de 2015.

Criação do curso de Licenciatura em Física a Distância na UFJF

No ano de 2007, o departamento de física resolver participar de um projeto da CAPES sobre a criação de cursos de licenciatura a distância no âmbito da Universidade Aberta do Brasil (UAB). Como eu tive uma contribuição intensa nesse projeto, culminando inclusive na minha atual posição como coordenador de curso, acho pertinente expor aqui um pequeno resumo sobre a história da educação a distância na UFJF.

Além da formação inicial de professores para atuarem no ensino médio, o curso de ensino a distância, no âmbito das licenciaturas na UFJF, teria também a pretensão de oferecer uma formação continuada aos professores que já atuam no ensino médio. Para que um curso a distância seja bem sucedido, além de um corpo docente bem qualificado, é importante contar também com um grupo de tutores capaz de enfrentar as dificuldades inerentes a nova modalidade de ensino. O ensino a distância prevê duas categorias de tutoria:

- **Tutor a distância** - que deve ter experiência comprovada no magistério de, no mínimo, um ano no ensino básico ou superior; ou possuir formação pós-graduada; ou estar vinculado a um programa de pós-graduação. São selecionados pelo coordenador do curso e responderão às dúvidas relacionadas ao conteúdo das disciplinas, através dos meios previstos na plataforma de ensino por meio da Internet.
- **Tutor presencial** - Com os mesmos requisitos de formação dos tutores a distância, são professores selecionados através de seleção pública para atuarem nos polos, com a função de acompanhar os alunos presencialmente. Essa categoria tem a competência de motivar, encorajar e entusiasmar os alunos e manter a disciplina. O tutor local é uma extensão do professor que está distante. É necessário, portanto, que tenham uma capacitação específica para dar um boa orientação aos presencialmente nos polos de apoio.

A proposta do departamento de física da UFJF, seria a criação de um curso de licenciatura em física a distância, onde estaria previsto a contratação de 03 (três) professores em regime de dedicação exclusiva para o departamento de física e oferecimento de bolsas para coordenador de curso, professores colaboradores e tutores. Nessa proposta, o prof. Helder Couto deveria assumir a coordenação desse novo curso na UFJF. O desafio era escrever o projeto pedagógico

de curso (PPC), incluindo a grade curricular com todas as disciplinas obrigatórias e eletivas, e aprova-lo no conselho setorial de graduação (CONGRAD) da UFJF até o segundo semestre do ano de 2008, quando as aulas deveriam ser iniciadas. Como os prazos eram curtos, inicialmente optou-se por seguir o modelo do consórcio Centro de Educação a Distância do Estado do Rio de Janeiro (CEDERJ) da fundação Centro de Ciências e Educação Superior a Distância do Estado do Rio de Janeiro (CECERJ), que é um órgão vinculado à secretaria de Estado de Ciência e Tecnologia do Estado do Rio de Janeiro. O curso de licenciatura em física a distância do consórcio Cederj, vinculado à Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), foi criado no ano de 2000 e tinha o prof. Felipe Canto como primeiro coordenador.

As aulas no curso de Licenciatura em Física a Distância seriam ministradas através de um Ambiente Virtual de Aprendizagem (AVA), que utiliza a plataforma de ensino denominada *Moodle* (“*Modular Object-Oriented Dynamic Learning Environment*”). A plataforma Moodle, é um software livre, de apoio à aprendizagem, executado em ambiente virtual. A expressão representa ainda um sistema de gestão da aprendizagem em trabalho colaborativo, baseado nesse software, acessível por meio da internet ou da rede local. Em linguagem coloquial, em língua inglesa o verbo “*to moodle*” descreve o processo de navegar despreziosamente por algo, enquanto se faz outras coisas ao mesmo tempo. Essa plataforma, ou programa, permite a criação de cursos “*on-line*”, páginas de disciplinas, grupos de trabalho e comunidades de aprendizagem, estando disponível em 75 línguas diferentes. Atualmente a plataforma Moodle conta com mais de 25.000 websites registrados, em mais de 175 países.

Ainda no ano de 2007, o núcleo de educação a distância (NEAD/UFJF), que mais tarde se denominaria centro de educação a distância (CEAD/UFJF), aprovou inicialmente 04 (quatro) polos de apoio presencial, no estado de Minas Gerais, para o curso de licenciatura em física a distância, que foram: polo de Ilícinea, polo de Lavras, polo de Timóteo e polo de Santa Rita de Caldas. No primeiro semestre do ano de 2008, o projeto pedagógico de curso (PPC) foi aprovado, e o primeiro vestibular realizado. Enquanto a contratação dos 03 (três) novos professores não fosse concluída, o professor Helder Couto iniciou o curso no segundo semestre do ano de 2008 com a ajuda de alguns professores bolsistas colaboradores dos departamentos de física, química, matemática e educação.

Para que o novo curso pudesse ser ajustado as realidades acadêmicas do departamento de física da UFJF, além de mim, o prof. Helder Couto contou com a ajuda de mais 03 (três) professores bolsistas formadores e conteudistas do departamento de física, que foram: prof. José Luiz Matheus Valle, prof. Roberto Rosas Pinho e prof. Marcílio José Pedretti. Ainda no primeiro semestre do ano de 2008, eu e meus colegas, juntamente com o professor Helder Couto, agendamos uma visita de uma semana ao polo de apoio da cidade de Três Rios no estado do Rio de Janeiro. Além de próximo a cidade de Juiz de Fora, esse polo oferecia o curso de licenciatura em física a distância e tinha uma das melhores estruturas de laboratório do consórcio CEDERJ. A minha atribuição e dos meus colegas era acompanhar disciplinas experimentais do curso de licenciatura em física a distância do CEDERJ e tentar adaptá-las aos 04 (quatro) polos de apoio do nosso curso. Além disso, também era nossa atribuição a capacitação de 06 (seis) tutores presenciais (aqueles que deveriam atuar nos nossos 04 (quatro) polos de apoio), que tinham sido previamente selecionados pela coordenação de curso. Durante essa visita, estudamos vários experimentos básicos, em nível introdutórios, para serem usados como nivelamento dos nossos estudantes ingressantes no curso de licenciatura em física a distância. As disciplinas de física criadas com esse objetivo foram: EADFIS001 - Introdução as Ciência Físicas I, EADFIS002 - Laboratório de Introdução as Ciência Físicas I, EADFIS004 - Introdução as Ciência Físicas II e EADFIS005 - Laboratório de Introdução as Ciência Físicas II. Durante a realização desse trabalho, eu e meus colegas, gravamos várias videoaulas sobre o tema que, até os dias de hoje, são utilizadas pelos professores que ministram essas disciplinas. Essas videoaulas foram publicadas no “*youtube*” e duas delas podem ser consultadas em: <https://www.youtube.com/watch?v=NAr-YNbAVBA&feature=youtu.be> e <https://www.youtube.com/watch?v=NAr-YNbAVBA&feature=youtu.be>. Os “*links*” dessas videoaulas deveriam ser disponibilizados aos estudantes no ambiente virtual de aprendizagem (AVA) da disciplina, na plataforma de ensino (*Moodle*).

Tive uma participação importante na elaboração de uma apostila sobre conteúdos da disciplina UABFIS043 - Tópicos de Matemática, para ser disponibilizada aos estudantes a distância na plataforma de ensino. O objetivo era promover uma revisão detalhada da física e matemática do ensino médio e garantir que os estudantes sejam bem avaliados nas disciplinas do ensino superior. Para esse trabalho, além de mim, contamos com a ajuda dos professores: José Luiz Matheus Valle, Roberto Rosas Pinho e Marcílio José Pedretti. Além de colaborar no desen-

volvimento do trabalho bibliográfico, entre os anos de 2008 e 2010, orientei e supervisionei os tutores que atuavam a distância na disciplina Tópicos de Matemática do curso de Licenciatura em Física à distância da UFJF.

No primeiro semestre do ano de 2009, quando a primeira turma do curso já estava em andamento, apresentei palestras nos polos de apoio cujo título era O *“Curso de Licenciatura em Física a Distância na UFJF”*. No período de 23 a 24 de novembro de 2009, participei do 1^o Encontro Internacional do Sistema Universidade Aberta do Brasil, com o trabalho de título *“Licenciatura à Distância em Física na UFJF”*. Enquanto as coordenações de polos, em parceria com as respectivas prefeituras, buscavam equipar os laboratórios de introdução as ciências físicas I e II, entre os anos de 2008 e 2010, eu e o prof. Marcílio José Pedretti procuramos desenvolver “kits” experimentais para atender provisoriamente as turmas que já estavam em andamento. Além disso, eu, o prof. Helder Couto e o prof. Marcílio José Pedretti, promovemos encontros com tutores presenciais na UFJF para que sejam capacitados em aulas experimentais de ensino à distância.

No ano de 2010, houve a contratação dos 03 (três) professores em regime de dedicação exclusiva para atuarem no curso de licenciatura em física a distância no departamento de física da UFJF. Os professores que foram aprovados no concurso são: prof. Gil de Oliveira Neto, prof. Julio Akashi Hernandez e prof. Sergio Saul Makler. Entre os anos de 2010 e 2011, eu juntamente com esses professores e também com outros professores bolsistas colaboradores, começamos a desenvolver um novo projeto da coordenação de curso em parceria com o centro de educação a distância CEAD/UFJF, que era a preparação e posterior gravação de videoaulas, envolvendo, não somente disciplinas experimentais, mas também algumas disciplinas teóricas. Várias videoaulas foram gravadas e disponibilizadas aos alunos nos respectivos ambientes virtuais de aprendizagem da plataforma de ensino.

No ano de 2012 houve uma reforma curricular do curso de licenciatura em física a distância na UFJF, para se adequar na época as novas legislações impostas pelo MEC. A partir dessa reforma, o curso de licenciatura em física a distância na UFJF passou a contar com uma carga horária de 420 *h* em disciplinas de práticas escolares, uma carga horária de 420 *h* em disciplinas de estágio supervisionado e passou a integralizar uma carga horária total de

3210 h. Ainda nesse ano, o curso de licenciatura em física a distância da UFJF, passou a ser oferecido em mais 05 (cinco) polos de apoio no estado de Minas Gerais, que são: Cataguases, Durandé, Barroso, Governador Valadares e Juiz de Fora. A partir de então, o curso de licenciatura em física a distância da UFJF passou a contar com um total de 09 (nove) polos de apoio no estado de Minas Gerais. No ano de 2013, o curso de licenciatura em física a distância da UFJF teve a sua primeira avaliação do MEC e recebeu a nota máxima 5 (cinco).

Perspectivas futuras

Tentar publicação de dois livros na área de ensino. Essa ideia está sendo motivada por sugestões de alunos e também de alguns professores, não somente do departamento de física da UFJF, como também de outras instituições do país, de transformar duas das minhas notas de aulas em livros textos. Trata-se das notas de aula: *“Introdução a Física Moderna”* e *“Análise de Dados para Laboratório de Física”*. Uma ideia inicial é tentar submeter o material à editora da USP (EDUSP). Isso deverá ocorrer quando todo o material for digitalizado.

Com a intenção de atender as recentes legislações do MEC, devo incluir em duas disciplinas do curso de licenciatura em física a distância de temas sobre os eixos: direitos humanos e diversidades (étnico-racial, gênero, sexual, religiosa, faixa geracional, educação especial e direitos educacionais de adolescentes e jovens). Minha intenção é incorporar temas sobre direitos humanos e diversidades no conteúdo das disciplinas Prática de Ensino de Física I e Prática de Ensino de Física II.

Promover, em colaboração com os professores, tutores e com o apoio logístico do CEAD, a elaboração de novas videoaulas para atender demandas de vários alunos do ensino a distância.

3.3 Atividades Administrativas e Complementares na UFJF

Logo no primeiro ano de atuação na Universidade Federal de Juiz de Fora (1998), participei de várias bancas de avaliações. Dentre algumas dessas participações posso destacar:

- Participação em banca de concurso de professor substituto em 05 de fevereiro de 1998.

- Participação em banca de concurso de professor visitante em 11 de maio de 1998.
- Participação em banca de concurso de professor substituto em 05 de 1998.

Desde o ano de 1998, participei ativamente, por vários anos, da organização da *Feira de Ciências* que é um evento anual dentro da programação da *Semana de Física da UFJF (SE-FIS)*, que já está na sua 30ª edição. Neste evento, escolas de Juiz de Fora e região são convidadas a apresentarem trabalhos de seus alunos relacionados a ciências em geral. Ainda no mês de novembro do ano de 1998, participei como coordenador da IV Olimpíada de Física durante a X Semana de Física do departamento de Física da UFJF.

No mês de janeiro do ano de 1999, houve um concurso para professor titular para atuar no grupo de óptica do departamento de física da UFJF. Esse foi o primeiro concurso de professor titular no departamento de física da UFJF. Como o interessado era o laboratório de óptica, eu fiquei como responsável pela organização do concurso. Uma das minhas atribuições era entrar em contato com cinco professores titulares e cinco professores suplentes, todos externos a UFJF, para compor a banca do concurso. O prof. Bernhard Johannes Lesche foi um dos dois candidatos inscritos e acabou sendo classificado em primeiro lugar nesse concurso. O prof. Bernhard Lesche foi então o primeiro professor titular do departamento de física da UFJF e passou a integrar o nosso grupo de pesquisa.

No mês de março do ano de 1999, participei de uma banca de concurso de professor substituto no departamento de física da UFJF e no mês de julho, do mesmo ano, participei da montagem de um processo de contratação de um professor adjunto na área de óptica experimental no departamento de física.

Entre os anos de 2000 e 2007, tive participações administrativas diversificadas no departamento de física da UFJF. Dentre algumas dessas participações posso destacar:

- Membro organizador da Olimpíada Brasileira de Física na etapa regional, no ano de 2000.
- Membro organizador da XIII Semana de Física no departamento de física da UFJF, realizada no mês de setembro do ano de 2000.

- Presidente da comissão de avaliação docente da professora Maria José Valenzuela Bell, no período de 2001 a 2003.
- Membro do colegiado do curso de pós-graduação no departamento de física da UFJF, entre os anos de 2000 e 2002.
- Membro organizador da XIV Semana de Física no departamento de física da UFJF, realizada no mês de setembro do ano de 2003.
- Membro organizador da Olimpíada Brasileira de Física na etapa regional, no ano de 2003.
- Membro da banca de elaboração das provas de física do vestibular da UFJF, no ano de 2003.
- Presidente da comissão de avaliação docente da professor Virgílio Carvalho dos Anjos, no período de 2005 a 2007.

Entre os anos de 2001 e 2004, atuei como vice-coordenador dos cursos de licenciatura e bacharelado em física na modalidade presencial, tendo o prof. José Luiz Matheus Valle como coordenador. Nesse mesmo período, fui também representante do departamento de física em alguns colegiados de cursos da UFJF. A partir do ano de 2001, fui escolhido como membro do colegiado do curso de física do departamento de física da UFJF, função essa que exerço até os dias de hoje.

A partir do ano de 2009, fui escolhido para ser coordenador das disciplinas de Física Moderna e Laboratório de Física Moderna, no departamento de física da UFJF, função essa que exerço até os dias de hoje.

Participei da comissão de organização das feiras de ciências durante a XIX, XX, XXI, XXII e XXIII Semanas de Física do departamento de Física da UFJF, todas no mês de outubro, entre os anos de 2008 e 2013.

Entre os anos de 2009 e 2012, atuei como coordenador da banca de elaboração e correção das provas de física do vestibular presencial, a distância e dos programas de ingresso seletivo

misto (Pism I, Pism II, Pism III) da UFJF.

No ano de 2011, participei de uma banca de concurso de professor substituto no departamento de física da UFJF, Edital 024/2011, no qual o Prof. Denílson Carvalho Rezende obteve a aprovação.

Atuei como presidente da comissão de avaliação docente dos professores Julio Akashi Hernandez, Giovana Trevisan Nogueira, Gil de Oliveira neto, Benjamin Fragneaud e Sergio Makler, no período de 2010 a 2014.

Atuei como coordenador do curso de licenciatura em física a distância no período de junho de 2014 a junho de 2017 (primeiro mandato). Atualmente estou exercendo o meu segundo mandato de coordenador do curso de licenciatura em física a distância, que foi iniciado em junho de 2017, com previsão de encerramento no mês de junho de 2020.

Durante os dois primeiros anos tive muito trabalho para me adaptar a essa coordenação. Logo no início do meu mandato, percebi que a coordenação de um curso à distância é de longe mais espinhosa do que a coordenação de um curso presencial. Um coordenador de curso a distância deve ficar muito mais antenado aos seus alunos, uma vez que, não tendo contato pessoal com a coordenação, via de regra, se sentem como se não pertencessem de fato a uma instituição de ensino. Além do trabalho comum a todos os coordenadores de curso, o coordenador de um curso a distância tem várias outras atribuições incomuns, dentre as quais posso destacar:

- Estar sempre verificando as condições dos laboratórios de ensino em todos os polos e, se for o caso, substituir ítems avariados.
- Estar sempre fiscalizando as atividades dos tutores presenciais em todos os polos de apoio.
- Agendar semestralmente provas presenciais nos polos de apoio para todas as disciplinas que se encontram em curso.
- Programar, junto ao CEAD, viagens de professores e/ou tutores a distância para a aplicação das avaliações presenciais em todos os polos,

- Distribuir semestralmente tutores a distância disponíveis para atuarem nas disciplinas ofertadas.
- Programar reuniões regulares com tutores e professores para discutir ações que possam minimizar problemas na forma de ensinar no âmbito da educação a distância.

No mês de dezembro do ano de 2016, gravei uma apresentação do curso de licenciatura em física a distância da UFJF. Nessa apresentação descrevo outras informações relevantes sobre o curso, e pode ser consultada em https://www.youtube.com/watch?v=6ekCkc_iVOM&feature=youtu.be.

Como coordenador do curso de licenciatura em física a distância, entre os anos de 2016 e 2017, fui relator de processos sobre reformas curriculares de alguns cursos a distância no conselho setorial de graduação (CONGRAD). No mês de julho de 2017 o meu primeiro mandato como coordenador se encerrou e, logo em seguida, fui reconduzido ao cargo para atuar no triênio 2018, 2019 e 2020.

Atualmente o curso de licenciatura em física a distância da UFJF possui, aproximadamente, 300 alunos ativos distribuídos em 09 pólos de Minas Gerais e conta com 03 professores formadores contratados, 07 professores formadores bolsistas, 10 tutores a distância bolsistas e 08 tutores presencias bolsistas.

Capítulo 4

Artigos científicos mais relevantes

Nesse capítulo disponibilizo cópia da primeira página dos meus quatro artigos científicos que considero mais relevantes, seja pela qualidade do trabalho ou pela quantidade de citações, dentre aqueles que publiquei durante toda a minha carreira.

4.1 Developed profile of holographically exposed photoresist gratings

Developed profile of holographically exposed photoresist gratings

Bernardo de A. Mello, Ivan F. da Costa, Carlos R. A. Lima, and Lucila Cescato

A simulation of the profile of holographically recorded structures in photoresists is performed. In addition to its simplicity this simulation can be used to take into account the effects that arise from exposure, photosensitization, development, and resolution of positive photoresists. We analyzed the effects of isotropy of wet development, nonlinearity of the photoresist response curve, background light, and standing waves produced by reflection at the film-substrate interface by using this simulation, and the results agree with the experimentally recorded profiles.

Key words: Holographic gratings, photoresist processing.

1. Introduction

Surface-relief structures holographically recorded in photoresist are a subject of great interest in optics and optoelectronics. For applications in holography for which the component is either directly recorded in photoresist or embossed for replication, a linear response is desired.¹ In other applications such as photolithography, in which one can use the photoresist as a mask to etch a substrate, a strong nonlinear response is more adequate to obtain an etch-resistant square profile.² In each case the precise control of a recorded profile in the photoresist is desirable.

Most applications of holographic recording in photoresist are concerned with the fabrication of optical components. The diffraction efficiency of such components is highly dependent on the profile of the diffracting structure, and some interesting components can be obtained if the profile can be constructed.³⁻⁷ The accurate control of a recorded profile in photoresists is therefore indispensable for producing diffraction components or devices.

The profile of recorded structures in photoresist depends on several factors; light exposure pattern,

photoresist sensitization, and development. In such cases, simulations are useful tools to improve the understanding of the effects of each process parameter.

In this paper we develop a simulation that can be used to determine the final profile recorded in photoresist under holographic exposures, and we use this simulator to study the influence of some process parameters. The simulator incorporates a string development algorithm^{8,9} to describe the photoresist profile evolution, the development rate, that can be obtained either from experimental measurements or from the model of Mack,¹⁰ and a spatial frequency filter represented by a simple modulation transfer function.

2. Model

As is well known positive photoresists are basically composed of three components: a photoactive compound (inhibitor), a base resin, and a solvent.¹¹ The base resin is soluble in aqueous alkaline developers and the presence of the photoactive compound strongly inhibits its dissolution. The light neutralizes the photosensitive compound and increases the solubility of the film. After development in such solutions an intensity light pattern is converted into a relief structure.

The resulting relief profile recorded in photoresist depends on both the exposure light pattern through the film and on the complete response of the photoresist, including the development. These processes can be mathematically described, and the profile in the photoresist can then be calculated.

B. de A. Mello, I. F. da Costa, and L. Cescato are with the Instituto de Física Gleb Wataghin, Universidade Estadual de Campinas, Cx Postal 6165, 13081 Campinas, Brazil. C. R. A. Lima is with the Departamento de Física, Centro de Tecnologia, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Barbara D'Oeste, SP, Brasil.

Received 14 May 1993; revised manuscript received 24 May 1994. 0003-6935/95/040597-07\$06.00/0.

© 1995 Optical Society of America.

Fig. 4.1: Primeiro artigo científico mais relevante.

4.2 Reflecting polarizing beam splitter

February 15, 1997 / Vol. 22, No. 4 / OPTICS LETTERS 203

Reflecting polarizing beam splitter

Carlos R. A. Lima, Leandro L. Soares, and Lucila Cescato

Instituto de Física Gleb Wataghin, Universidade Estadual de Campinas, P.O. Box 6165,
13083-970 Campinas, SP, Brazil

Angelo L. Gobbi

Centro de Pesquisa e Desenvolvimento, TELEBRAS, P.O. Box 1579, 13088-061 Campinas, SP, Brazil

Received October 2, 1996

We propose and experimentally demonstrate the use of metal-covered lamellar relief gratings as a polarizing beam splitter operating at a single wavelength near Littrow incidence. We report the characteristics of a grating produced by holography and reactive ion etching that was calculated for operation as beam splitter at $\lambda = 633$ nm (for a He-Ne laser). © 1997 Optical Society of America

Optical polarizing components are elements that modify the state of polarization of light. Classical examples of them are polarizing cubes such as Glan-Thomson prisms, wave plates, Nicol prisms, and Wollaston prisms. Generally they utilize the natural birefringence of such crystalline materials as calcite or quartz and are expensive. Grating structures have interesting polarization properties when their periods are much smaller than or have the same dimensions as the wavelength of light. In the first case one can use effective medium theories to preview the behavior of the structures.¹ In the second case, however, called resonant domain, the Maxwell equations must be solved for each particular case.² For volume gratings the coupled-wave theory furnishes a simple analytical solution of the diffraction problem,³ whereas for surface relief gratings a numerical solution of the rigorous electromagnetic theory is required.^{2,4}

Volume phase holograms were recently used to form polarizing beam splitters⁵; however, surface relief components are more interesting for mass production. Some recent papers studied the use of surface relief structures as transmission beam splitters.^{6,7} At normal incidence the disadvantage of using these structures is that the light splits into at least three diffraction orders unless a more-complex asymmetric profile of the grating is used.⁷ At Bragg incidence the grating behaves somewhat as a volume grating with lower efficiency or requires diffraction angles near 90 deg to optimize the polarization properties of the component.⁶

By analyzing the calculated diffraction efficiencies of perfectly conducting gratings in a Littrow mounting² one can see that the first diffracted order of a lamellar grating (square profile) has interesting properties of polarization. For certain grating parameters the greatest diffraction efficiency of the TE polarization can occur just at a null point of diffraction efficiency of the TM polarization. On the other hand, it is known that the reflection (0 diffracted order) of perfectly conducting lamellar gratings can be used to polarize light.^{8,9} As the polarizing effect at the reflection is less dependent on the grating parameters and

on the incidence angle, as theoretically calculated by Roumiguieres,⁸ we can choose a particular grating and conditions to take advantage of both the 1st and the 0 diffraction orders. In this Letter we propose and experimentally demonstrate the use of lamellar gratings in the Littrow condition of incidence as polarizing beam splitters.

A schematic of the proposed operation for such a beam splitter is shown in Fig. 1. An unpolarized light beam (of wavelength λ) is incident in a lamellar metallized grating (of period Λ) at the Bragg angle θ_B , given by

$$\theta_B = \sin^{-1}(\lambda/2\Lambda). \quad (1)$$

The 1st diffracted order, which returns in the direction of the incident beam, should be linearly polarized in the TE direction (electric vector parallel to the grating lines), whereas the reflection (0 diffracted order) should be linearly polarized in the TM direction.

From Ref. 2, the theoretical diffraction spectrum of a perfectly conducting lamellar grating of aspect ratio (depth/period) = 0.35 and filling factor (linewidth/period) = 0.5 represents a maximum of 100% TE polarization (electric vector parallel to the grating lines), while the TM component vanishes. This effect occurs at the Littrow condition of incidence, when the reflected 1st diffracted order returns parallel to the incident beam (it corresponds to the incidence at the Bragg angle of the grating) and under the condition that λ/Λ (incident wavelength/grating period) = 0.74. To obtain maximum diffraction efficiency and avoid loss of energy in other diffracted orders one must choose the period of the structure (Λ) between $\lambda/2$ and $3\lambda/2$ so only two diffracted orders (-1 and 0) will be present for wavelength λ .

From these theoretical results and taking into account the theoretical results of Roumiguieres,⁸ to produce a polarizing beam splitter for the He-Ne laser ($\lambda = 633$ nm) it is necessary to use a lamellar grating of period $\Lambda = 860$ nm, depth of 300 nm, and filling factor (linewidth/period) = 0.5. Using Eq. (1),

0146-9592/97/040203-03\$10.00/0

© 1997 Optical Society of America

Fig. 4.2: Segundo artigo científico mais relevante.

4.3 Dill's parameter measure in liquid photosensitive materials via interferometric method

Available online at www.sciencedirect.com

European Polymer Journal 43 (2007) 2041–2045

**EUROPEAN
POLYMER
JOURNAL**www.elsevier.com/locate/europolj

Dill's parameter measure in liquid photosensitive materials via interferometric method

L.F. Avila, Carlos R.A. Lima *

*Departamento de Física, Universidade Federal de Juiz de Fora, 36036-900 Juiz de Fora, MG, Brazil*Received 24 August 2006; received in revised form 9 February 2007; accepted 12 February 2007
Available online 22 February 2007

Abstract

In this work, we have studied the behavior of photosensitive materials in the liquid state when exposed to light with the aim of measuring the chemical kinetics in such state. The chemical kinetics is found determining the Dill's parameter through the fit of the refractive index variations with energy per exposed area, based on a model proposed by Dill. The measurements were performed during a blue light exposure process of using a high precision Michelson Interferometer in liquid AZ-1518 photoresist.

© 2007 Elsevier Ltd. All rights reserved.

PACS: 42.25.Hz; 42.70.Jk; 42.70.Gi; 82.20.-w; 82.50.Hp; 83.80.Rs

Keywords: Photoresist; Interferometry; Dill's parameter; Refractive index

1. Introduction

One of the photosensitive materials of larger technological importance used in the industry is the positive photoresist. Positive photoresists are widely used in lithographic process, in microelectronics and in optics for the fabrication of relief components [1]. In microelectronics, they are used as masks to transfer geometric patterns by integrated circuits manufacturers. In optics, the photoresists are used to construct periodic structures with diffractive optics properties. In both fields of applications, the photoresists consist of thin solid films

spined on appropriate substrate. In liquid state, this photosensitive material presents different optical properties which depend on the solubility of the compound.

The most popular positive photoresist is the photoactive compound denominated diazonaphthoquinone (DNQ) jointly with a resin matrix called novolak as shown in Fig. 1 [2–4]. The novolak is a phenol–formaldehyde condensation polymer of moderate molecular weight [5] which is used to supply a mechanical support for the photoresist. In unexposed areas, the Novolak + DNQ films are essentially unchanged during the development process. The novolak is a long chain polymer with a very strong resistance to chemical attacks [4].

When positive photoresists are exposed to UV or blue light, some physicochemical changes occur

* Corresponding author. Tel.: +55 32 32293307; fax: +55 32 32293312.

E-mail address: cralima@fisica.ufjf.br (C.R.A. Lima).

Fig. 4.3: Terceiro artigo científico mais relevante.

4.4 Evaluation of chemical kinetics in positive photoresists using laser desorption ionization

European Polymer Journal 59 (2014) 1–7



Contents lists available at ScienceDirect

European Polymer Journal

journal homepage: www.elsevier.com/locate/europolj

Evaluation of chemical kinetics in positive photoresists using laser desorption ionization



J.S. Martins^a, B.G.A.L. Borges^b, R.C. Machado^c, A.G. Carpane^c, R.M. Grazul^c, F. Zappa^a,
W.S. Melo^a, M.L.M. Rocco^b, R.R. Pinho^{a,*}, C.R.A. Lima^{a,1}

^aDepartamento de Física-ICE, Universidade Federal de Juiz de Fora, Campus Universitário, 36036-900 Juiz de Fora, MG, Brazil

^bInstituto de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Cidade Universitária, 21941-909 Rio de Janeiro, RJ, Brazil

^cDepartamento de Química-ICE, Universidade Federal de Juiz de Fora, Campus Universitário, 36036-900 Juiz de Fora, MG, Brazil

ARTICLE INFO

Article history:

Received 8 May 2014

Received in revised form 26 June 2014

Accepted 1 July 2014

Available online 17 July 2014

Keywords:

Photoresist

Mass spectrometry

Time-of-flight

Dill C parameter

ABSTRACT

Positive photoresists are photosensitive materials widely used in lithographic processes in microelectronics and optics for component relief manufacturing. When exposed to ultraviolet radiation, chemical reactions are induced that modify their physical–chemical properties. This work describes a novel technique to determine the kinetic rates of molecular structure changes of the positive AZ series photoresists after exposure to mercury arc lamp radiation. These positive photoresists consist of a photoactive compound (PAC), known as diazonaphthoquinone (DNQ), and a matrix material, which is a thick base resin. This positive AZ series photoresist was chosen because its technical information is well known while presenting potential for many applications. In the present work, we investigate these processes using laser desorption ionization (LDI) by a pulsed ultraviolet laser coupled to a high resolution time-of-flight mass spectrometer (ToF-MS). The LDI-ToF mass spectra present different relative intensities for some of the characteristic negative molecular ions of the positive photoresist after different exposure energies to the mercury arc lamp radiation. For measurement of the chemical kinetic mechanism, LDI-ToF mass spectrometry was used for the first time to obtain the fractional decay rate of the DNQ per unit of exposure radiation intensity. These results provide a novel use of LDI-ToF-MS to study the chemical kinetics of photosensitive materials.

© 2014 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

A positive photoresist is a photosensitive material which, upon exposure to ultraviolet radiation, undergoes chemical reactions that increase its solubility in alkaline solutions. The radiation absorption properties of the positive photoresist will influence resolution and its process capabilities. The knowledge of the rate (chemical kinetics)

at which these chemical reactions occur permits one to determine the possible technological applications of a specific positive photoresist. After exposure to ultraviolet radiation, a positive photoresist is converted into a relief pattern through a development process, the exposed regions being removed much faster than the unexposed regions. These materials have been widely used in photolithographic processes to manufacture integrated circuits in microelectronics [1–3]. Positive photoresists have also been applied to processes for information storage [4], recording of Bragg gratings in optical fibers, holography [5–9] and holographic memories [10]. The optical absorption mechanism at the microscopic level of the positive photoresist is

* Corresponding author. Tel./fax: +55 32 21023307.

E-mail addresses: roberto@fisica.ufjf.br (R.R. Pinho), cralima@fisica.ufjf.br (C.R.A. Lima).

¹ Principal corresponding author. Tel./fax: +55 32 21023307.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.07.005>
0014-3057/© 2014 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Fig. 4.4: Quarto artigo científico mais relevante.

Referências Bibliográficas

- [1] C.R.A. Lima, A Técnica do Efeito Fotoacústico para o Estudo de Gases e Vapores de Álcool e Gasolina usando como fonte de Radiação Excitadora o Laser de CO₂, Tese de Mestrado, Unicamp, (1988).
- [2] C. R. A. Lima, J. A. Facin, T. Z. D. Atvars, C. A. Ferrari, Espectroscopia Fotoacústica Aplicada aos Vapores de Metanol, Etanol, N-hexano, N-heptano e Isoctano. In: 4o Simpósio Estadual de Lasers e Aplicações, 1988, São José dos Campos. Anais do 4o Simpósio Estadual de Lasers e Aplicações, 01(1988).
- [3] C.R.A. Lima, Estabilização Holográfica por Reflexão e Aplicação na Fabricação de Componentes Ópticos, Tese de Doutorado, Unicamp, (1994)
- [4] M.S. Sthel, C.R.A. Lima, L. Cescato, Photoresist resolution measurement during the exposure process, Appl. Opt.35(1991), 5152-5156
- [5] C.R.A. Lima, L. Cescato, Mixing of the Reflected Waves to Monitor and Stabilize Holographic Exposures, Appl. Opt., 35(10)(1996), 2804-2809.
- [6] B.M. Assunção, I.F. Costa, C.R.A. Lima, L. Cescato, Developed Profile of Holographically Exposure Gratings Recorded in Photoresists, Appl. Opt., 34(1995), 597-603.
- [7] R. Petit, Eletromagnetic theory of gratings, Springer-Verlag, Berlin (1980).
- [8] C. R. A. Lima, L. L. Soares, L. Cescato, Divisor de polarização para infravermelho. In: Feira de Protótipos, Processos e Serviços da FINEP/PADCT, São Paulo. A Próxima Fronteira, 01(1995).
- [9] C.R.A. Lima, L.L. Soares, A.L. Gobbi, Reflecting polarizing beam splitter, Opt. Lett., 22(04)(1997), 203-205.

- [10] Electromagnetic Reflection and Transmission by Gratings of Resistive Wires, *J. of Appl. Phy.*, 23(06) (1952), 605-608.
- [11] T. Matsuoka, H. Nagai, Y. Itaya, Y. Noguchi, Y. Suzuki, T. Ikegami, CW operation of DFB-BH GaInAsP/InP lasers in 1.5 μm wavelength region, *ibid.*, 18(1982), 27-28.
- [12] C.R.A. Lima, L.L. Soares, L. Cescato, M.A.R. Alves, E. S. Braga, Diffractive structures holographically recorded in amorphous hydrogenated carbon ($a - C : H$) films, *Opt. Lett.*, 23(22) (1997), 1805-1807.
- [13] L.L. Soares, C.R.A. Lima, L. Cescato, M.A.R. Alves, E. S. Braga, Recording of relief structures in amorphous hydrogenated carbon ($a - C : H$) films for infrared diffractive optics, *Opt. Lett.*, 45(07) (1998), 1479-1486.
- [14] L.L. Soares, C.R.A. Lima, E.L. Rigon, L. Cescato, Speckle Noise in Holographic Recording, *Revista de Física Aplicada e Instrumentação*, 12(04) (1997), 139-142.
- [15] Y. N. Denisyuk, On the reflection of optical properties of an object in a wave field of light scattered by it, *Opt. Spektrosk.* 18(1965), 275-283.
- [16] C.R.A. Lima, W.L. Silva, Caracterização de Reveladores *RCO - 12* para Utilização em Filmes Holográficos de Alta Resolução. In: 23^o Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada, Anais do 23^o Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada, São Loureço, S.P.,(2000).
- [17] C.R.A. Lima, R. Tabares, J.P.R.F. Mendonça, Holografia Eletrônica Aplicada à Caracterização de Semente. In: 23^o Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada, Anais do 23^o Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada, São Loureço, S.P.,(2000).
- [18] C.R.A. Lima, R. Tabares, J.P.R.F. Mendonça, Técnica Interferométrica para medir reprodução de Microorganismos. In: 23^o Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada, Anais do 23^o Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada, São Loureço, S.P.,(2000).
- [19] F.H. Dill et al., Characterization of positive photoresists, *IEEE Trans. Electron Dev*, 445(22) (1975).

- [20] L.F. Avila, C.R.A. Lima, Dill's parameter measure in liquid photosensitive materials via interferometric method, *European Polymer Journal*, 43(2007), 2041–2045.
- [21] L.A.V. Mendes, L.F. Avila, R.R. Pinho, C.R.A. Lima, M.L.M. Rocco, AZ1518 Photoresist analysis with synchrotron radiation using high-resolution time-of-flight mass spectrometry, *LNLS Active Report*, (2005), 1-2.
- [22] L.A.V. Mendes, R.R. Pinho, L.F. Avila, C.R.A. Lima, M.L.M. Rocco, AZ-1518 Photoresist analysis with synchrotron radiation using high-resolution time-of-flight mass spectrometry, *Polymer Degradation and Stability*, 92(2007), 933-938.
- [23] L.A.V. Mendes, L.F. Avila, J.W. Menezes, R.R. Pinho, C.R.A. Lima b, L. Cescato, M.L.M. Rocco, Photoresists comparative analysis using soft X-ray synchrotron radiation and time-of-flight mass spectrometry, *European Polymer Journal*, 45(2009), 3347–3354.
- [24] J.S. Martins, B.G.A.L. Borges, R.C. Machado, A.G. Carpanez, R.M. Grazul, F. Zappa, W.S. Melo, M.L.M. Rocco, R.R. Pinho, C.R.A. Lima, Evaluation of chemical kinetics in positive photoresists using laser desorption ionization, *European Polymer Journal*, 59(2014), 1–7.
- [25] J.S. Martins, P.S. René, R.R. Pinho, C.R.A. Lima, Medidas dos índices de refração de materiais fotossensíveis utilizando o método de Abelès, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 35(2013)3, 3703(1)-3703(5).
- [26] B.G.A.L. Borges, M.L.M. Rocco, R.R. Pinho, C.R.A. Lima, Estudo da decomposição fotoquímica por exposição à luz UV de fotorresinas positivas, *Quim. Nova*, 35(2012)2, 319-322.
- [27] B.G.A.L. Borges, M.L.M. Rocco, R.R. Pinho, C.R.A. Lima, Photoresist analysis with synchrotron radiation and electron impact using time-of-flight mass spectrometry, 34^a Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química (SBQ), Florianópolis, (2012)
- [28] J.D. Gelorme, R.J. Cox, S.A.R. Gutierrez, Photoresist composition and printed. circuit boards and packages made therewith, U.S. Patent 4,882,245 (IBM Corp.) 21(1989).
- [29] K.Y. Lee, N. Labianca, S.A. Rishton, S. Zolgharnain, J.D. Gelorme, J. Shaw, T.H. Chang, Micromachining applications of a high-resolution ultrathick photoresist, *P. J. Vac. Sci. Technol. B*. 13(1995)3012-3016.

- [30] E.H. Conradie, D.F. Moore, SU-8 thick photoresist processing as a functional material for MEMS applications, *J. Micromech. Microeng.* 12(2002)368-374.
- [31] R.S. Shawgo, C. Amy, R. Grayson, Y. Li, M.J. Cima, BioMEMS for drug delivery; *Current Opinion in Solid State and Materials Science.* 6(2002)329-334.
- [32] J. Scrimgeour, D.N. Sharp, C.F. Blanford, O.M. Roche, R.G. Denning, A.J. Turberfield, Three-Dimensional Optical Lithography for Photonic Microstructures, *Adv. Mater.* 18(2006)1557-1560.
- [33] J.S. Kim, J.W. Kang, J.J. Kim, Simple and low cost fabrication. of thermally stable polymeric multimode waveguides using a UV- curable epoxy, *Jpn J. Appl. Phys.* 42(2003)1277-1279.
- [34] S. Banu, S. Birtwell, G. Galitonov, Y. Chen, N. Zheludev, H. Morgan, Fabrication of diffraction-encoded micro-particles using nano-imprint lithography, *J. Micromech. Microeng.* 17(2007)116-121.
- [35] J.H. Jang, C.K. Ullal, M. Maldovan, T. Gorishnyy, S. Kooi, C.Y. Koh, E.L. Thomas, 3D Micro - and nanostructures via interference lithography, *Adv. Funct. Mater.* 17(2007)3027-3041.
- [36] W.H. Teh, U. Dü rig, U. Drechler, Gü ntherodt, H.-J., Effect of low numerical-aperture femtosecond two-photon absorption on (SU-8) resist for ultrahigh-aspect ratio microlithography, *J. Appl. Phys.* 97(2005)054907-0549011.
- [37] Y. Yagci, I. Reetz, Externally stimulated initiator systems for cationic polymerization, *Prog. Pol. Sci.* 23(1998)1485-1538.
- [38] F.H. Dill, Optical Lithography, *IEEE T. Electron. Dev.* 22(1975)440-444.
- [39] H. Ito, Dissolution behavior of chemically amplified resist polymers for 248, 193 and 157 nm lithography, *IBM J RES DEV*, 2001; 45: 683-695.
- [40] Luis Ávila, Estudo de Materiais Fotossensíveis Utilizando Exposições Holográficas, Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, 2010.
- [41] R. Chrapkiewicz, M. Jachura, K. Banaszek, W. Wasilewski, Hologram of a single photon, *Nature Photonics*, 10(2016)576-579.