



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

GRAVAÇÃO DE REDES HOLOGRÁFICAS EM Bi_2TeO_5

Luma de Cássia Ribeiro Trindade

Relatório de iniciação científica do
programa PIBIC, orientado pelo Dr. Luís
Eduardo Antunes Vieira.

INPE

São José dos Campos

2021

RESUMO

O emprego de materiais fotorrefrativos na gravação de redes holográficas vem tornando-se cada vez mais comum, sendo destinado às mais diversas aplicações, como por exemplo no desenvolvimento de memórias holográficas, mídias de gravação, visores LCD, guias de ondas, difusores holográficos. De fato, esta gama de aplicações deve-se às boas propriedades presentes nestes materiais, dentre as diversas características interessantes que os materiais fotorrefrativos possuem à esse setor, destaca-se o efeito fotorrefrativo, que trata-se da combinação de duas propriedades, sendo elas a fotocondutividade e o efeito eletro-óptico linear. Dessa forma, o efeito fotorrefrativo nada mais é do que a capacidade do material em ter seu índice de refração alterado após uma luz ser incidida no mesmo e é justamente este fenômeno é a base de toda a teoria de gravação de dados em cristais fotorrefrativos, o que garante a capacidade de armazenar dados desde pequenos períodos de tempos até longos períodos, durante anos. Dessa forma, o telurato de bismuto (Bi_2TeO_5), abordado neste trabalho, é um material fotorrefrativo, de resposta lenta, fotocrômico, opticamente biaxial além de possui uma ampla janela óptica, logo estes são um dos fatores que o torna ideal para aplicação na holográfica. De fato, Portanto, no presente trabalho buscou-se explorar na literatura e através de seminários a viabilidade do emprego deste cristal (telurato de bismuto) e também de outros materiais na gravação de redes holográficas.

Palavras-chave: efeito fotorrefrativo, telurato de bismuto, registro holográfico.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Efeito fotorrefrativo e materiais fotorrefrativos	3
2.2 Gravação de redes holográficas	4
2.3 Telurato de bismuto	7
2.4 Crescimento do cristal	8
3 SEMINÁRIOS	9
3.1 Seminários apresentados pelo beneficiário	9
3.2 Seminários apresentados pelos demais integrantes do grupo de pesquisa	11
4 CONCLUSÃO	12
5 REFERÊNCIAS	13

1. INTRODUÇÃO

A holografia, que deriva das palavras “holos” e “grafia” as quais, por sua vez, significam “o todo” e “escrita” respectivamente foi um método inventado por Dennis Gabor em 1948 e consiste na utilização do fenômeno interferência para codificar e guardar informações, como por exemplo a amplitude e fases de um campo de ondas que permeiam o material. Ademais, em outras palavras pode-se colocar que a holografia ou holograma é uma imagem ou uma interferência armazenada que decorrem da interação entre um campo de onda espalhado pelo objeto e um plano de fundo coerente denominado onda de referência. Cabe ressaltar também que estas informações normalmente são gravadas sobre uma superfície plana mas que contém informações sobre todo um campo de ondas tridimensionais[1].

No que tange ao registro holográfico dos materiais, estes podem ser classificados como para gravação irreversível, como por exemplo fotopolímeros e termoplásticos e os materiais para registro dinâmico que, em sua maioria, são os materiais fotorrefrativos. Com isso, a formação das redes holográficas decorrem do efeito fotorrefrativos observado quando materiais fotorrefrativos - ou seja, que apresentam a propriedade de ter seu índice de refração modulado por um padrão de luz - são incididos por um padrão de franjas e a interferência entre duas frentes de ondas leva à formação de uma rede de difração no seu interior. De modo geral, o processo de formação da rede ocorre por meio da excitação dos portadores de cargas devido a iluminação do cristal por um padrão de interferência de luz. Logo, nas regiões claras os elétrons são excitados e difusão ou arraste migram para as regiões mais escuras onde são recapturados ou aprisionados. Ressalta-se que como é utilizado um padrão de luz não homogêneo a excitação é menor nas regiões escuras o que faz com que as cargas elétricas se acumulem nesta região, a distribuição espacial resultante das cargas dá origem a um campo elétrico que é módulo, levando a formação da rede holográfica [4-5].

Portanto, uma grande variedade de materiais são empregados na gravação de redes holográficas, como por exemplo emulsões de haletos de prata, cristais ferroelétricos, fotocromáticos, fotodiódicos e são destinados à diversas aplicações como por exemplo memórias holográficas, mídias de gravação, visores LCD, guias de ondas, difusores holográficos e diversas outras. De fato, em 2001 estimava-se rendimentos no mercado de holograma na faixa de 500 a 590 milhões de dólares[2-4].

Visto isso, os materiais fotorrefrativos podem possuir resposta lenta ou rápida, o que define também suas aplicações, como por exemplo em elementos de memória óptica e em dispositivos com processamento em tempo real, entre outras aplicações. Nessa linha de raciocínio, cristais como LiNbO₃, BaTiO₃, SBN e o BTeO apresentam resposta lenta, enquanto outros como Bi₁₂TiO₂₀ (BTO), Bi₁₂GeO₂₀ (BGO) são de resposta rápida[6]. Dessa forma, no presente projeto de pesquisa, o cristal abordado foi o telurato de bismuto (Bi₂TeO₅), que trata-se, como citado acima, de um cristal fotorrefrativo de resposta lenta, ademais apresenta boa eficiência de difração e longo tempo de retenção do registro, o que o torna muito interessante para gravações de longa duração, de fato, segundo Zanini, uma rede holográfica deste cristal mantém-se por vários anos. Além disso, o Bi₂TeO₅, apresenta altos coeficientes eletro-óptico, piroelétrico, óptico não linear e piezoelétrico [6-7].

Por fim, no intuito de estudar a gravação da rede holográfica neste cristal e respeitando a impossibilidade de realização das práticas laboratoriais decorrentes da pandemia do COVID-19, foram realizados a cada quinzena encontros síncronos do grupo de pesquisa nos quais houveram apresentações e seminários abordando não apenas o cristal deste projeto mas sim outros materiais interessantes à gravação holográfica.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Efeito fotorrefrativo e materiais fotorrefrativos

Em 1966, Ashkin et al [1] enquanto estudavam a criação de segundo harmônico (tentativa de converter a cor da luz de um laser intenso em outra) em cristais de LiNbO_3 e LiTaO_3 notaram pela primeira vez o efeito fotorrefrativo. Este efeito foi inicialmente chamado de “dano óptico” pelo fato de verificarem, após a incidência de feixes de laser de alta potência nestes cristais, a ocorrência de variações localizadas nos índices de refração do material, algo indesejável nas suas áreas de pesquisa [4].

Portanto, o efeito fotorrefrativo é observado quando um material fotocondutor e eletro-óptico, após ser submetido à luz é evidenciado uma variação no índice de refração do mesmo. Ademais, esse efeito advém de outras duas propriedades: a fotocondutividade, que é a capacidade de um material alterar sua condução após ser incidido por uma radiação eletromagnética e o efeito eletro-óptico linear, caracterizado pela mudança no índice de refração do material quando este é submetido a um campo elétrico [5,8]. Outrossim, o que diferencia o efeito fotorrefrativo de outros efeitos ópticos, como por exemplo o efeito fotocromico, é o espaço não uniforme no qual é visualizado o efeito fotorrefrativo, ou seja, as mudanças ópticas observadas em um material fotorrefrativo são mais impactadas pelo gradiente de intensidade da luz do a intensidade da luz propriamente dita. De fato, essa distinção dos materiais com propriedades ópticas não lineares em responder ao gradiente de luz e não à intensidade tem importantes consequências em aplicações ópticas em que são requeridas pequenos níveis de luz, como por exemplo na área da computação [11].

Diferente dos materiais que são denominados mídias ópticas lineares, como por exemplo as lentes, prismas, filtros, nos quais há passagem de luz através por meio deles sem que haja alteração de suas propriedades ópticas, os materiais fotorrefrativos são categorizados como materiais de mídia óptica não-linear, visto que suas propriedades podem mudar de acordo com os padrões de interferência aos quais são submetidos. É importante citar que a maioria dos materiais transparentes apresentam esta propriedade fotorrefrativa, contanto que a eles seja incidido um laser de intensidade capaz de alterar o índice de refração do material. Dessa forma, o termo fotorrefrativo fica mais restrito aos

materiais os quais seu índice de refração sofre alterações sob baixas intensidades de luz [9].

Como citado anteriormente, materiais fotorrefrativos são muito susceptíveis à gravações dinâmicas de hologramas através da interação de duas ou quatro ondas, sejam elas contínuas ou de lasers de pulso [10].

2.2. Gravação de redes holográficas

Nos materiais fotorrefrativos a gravação de redes holográficas baseia-se no efeito fotorrefrativo, citado no tópico anterior. Dessa forma, quando um cristal como o telurato de bismuto é submetido a um feixe de luz com determinado comprimento de onda, ocorre a chamada modulação de cargas que trata-se da excitação dos portadores de carga positivos e negativos. Essa excitação faz com que haja uma corrente de arrasto por ação de um campo externo que difunde os portadores da banda de condução (elétrons) e/ou valência (lacunas). Esse “acontecimento” cria um padrão de regiões escuras e brilhantes, que trata-se do acúmulo de cargas de sinais semelhantes em determinada região e de sinais opostos em outra. Devido a todas as recombinações e excitações, surge então um campo elétrico que é capaz de alterar o índice de refração do material através do efeito eletro-óptico. Com isso, é formado o holograma no volume do cristal que possui uma fase holográfica. Essa fase possui uma defasagem em relação ao padrão de luz incidindo no cristal e depende do tipo de material que será utilizado para determinada aplicação [5-9].

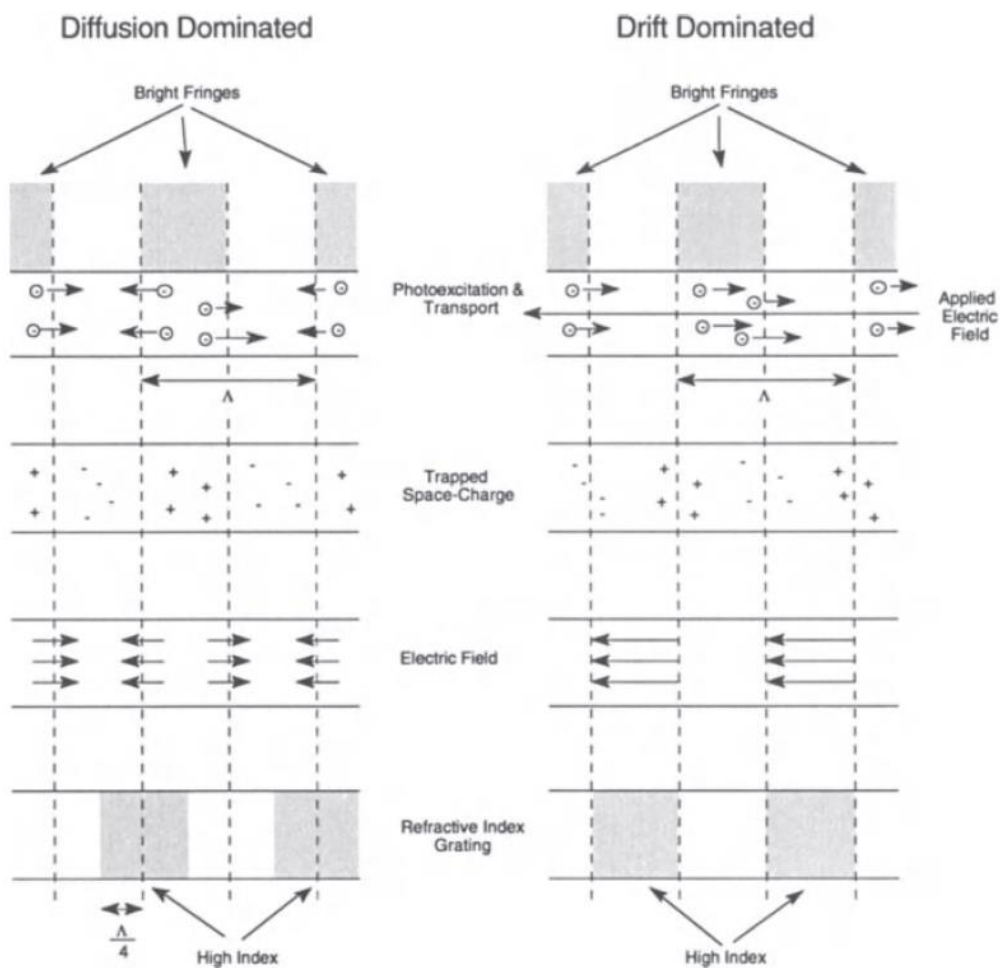
Portanto, o telurato de bismuto, por exemplo, apresenta uma fase holográfica de $\frac{\pi}{2}$ sem a presença de um campo elétrico. Já para materiais como o niobato de lítio, a fase holográfica depende do estado de oxidação que se encontra na amostra. Para um cristal de niobato de lítio dopado com maior número de centros doadores, a fase será π ou 0. Para amostras com maior concentração de centros aceitadores, que trata-se das amostras oxidadas, a fase possui uma variação entre 0 a $\frac{\pi}{2}$. Importante ressaltar que a fase holográfica está diretamente relacionada com o estado de oxidação da amostra, ou seja, quanto mais uma amostra estiver dopada mais eficiente será a formação do holograma[5-10].

Logo com o surgimento do campo elétrico e conseqüentemente da fase holográfica, o campo elétrico distorce a rede do cristal fazendo com que o índice de

refração seja alterado gradativamente, gerando assim um holograma no volume do cristal como mostra a figura 1 [11].

Figura 1 - Efeito fotorrefrativo e o comportamento dos portadores de carga durante uma gravação holográfica.

The Photorefractive Effect



Fonte: PEPPER et al (1990).

A formação do holograma, como dito anteriormente, está relacionada com a modulação dos portadores de cargas no volume do cristal. Logo, existem possíveis causas que descrevem esse fenômeno que serão citadas neste trabalho.

- Corrente fotovoltaica: Caracterizada pela geração de uma fotocorrente em determinado material sem a aplicação de um campo externo. Esta corrente trata-se da movimentação/excitação dos portadores de cargas que são deslocados pelos átomos vizinhos para determinada região.
- Corrente de difusão: Surgimento de uma corrente decorrente da concentração de cargas em determinada região iluminada.
- Corrente de Arraste: Interação coulombiana, que trata-se da movimentação dos portadores de cargas, resultante de um campo elétrico. Sendo ele, campo elétrico externo e o campo elétrico interno devido às cargas fotogeradas.

No entanto, o registro holográfico em materiais fotorrefrativos pode sofrer danos relacionados a condições experimentais ou ambientais. O cristal telurato de bismuto por exemplo, possui um aumento na sua eficiência de difração quando há a presença de um campo externo. Entretanto, esse mesmo campo externo pode gerar perturbações e arruinar a gravação do holograma. Dessa forma, para alcançar o máximo de eficiência possível, é preciso utilizar o método de registro holográfico estabilizado. Esse método trata-se do registro do holograma sem quaisquer perturbações, onde há a fixação das franjas na face do material, utilizando uma referência externa. Essa técnica garante até 100% de eficiência na rede gravada no cristal, para qualquer condição laboratorial [12].

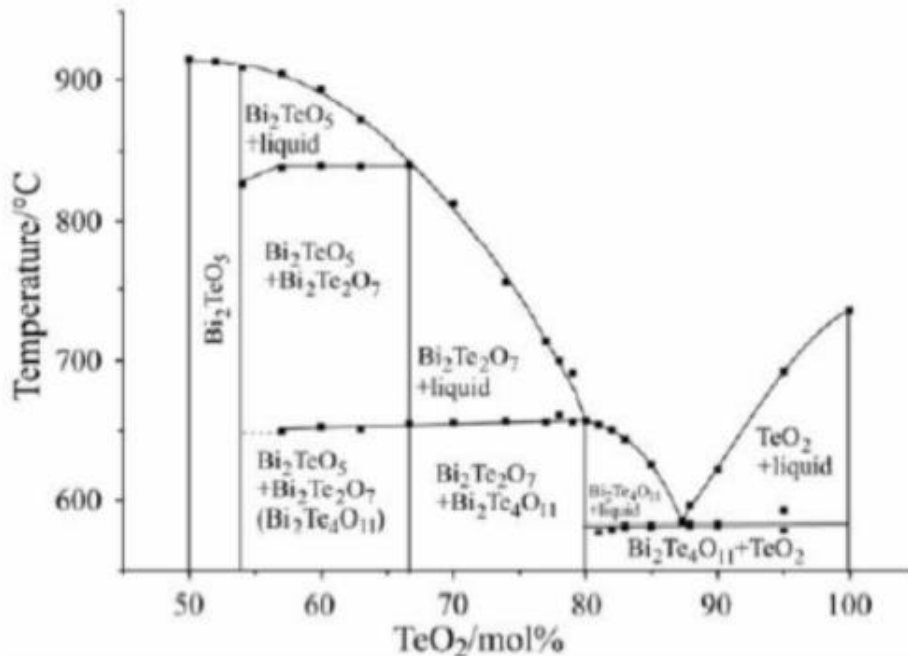
Apona-se que o armazenamento de hologramas no volume dos cristais fotorrefrativos é o número máximo de redes distinguíveis que podem ser armazenadas em seu interior. O holograma gravado pode ser fixado e também apagado, tornando-o reversível. Contudo, o grande obstáculo na fabricação de um componente óptico está no processo de leitura. Pois durante a iluminação do componente ocorre a destruição do mesmo, ou seja, a rede é apagada. Isso acontece porque as cargas que estão presentes no cristal são sensíveis a luz, logo, há a redistribuição de cargas no volume do material, causando o apagamento de informação. Entretanto, essa informação pode ser armazenada e lida sem sofrer nenhum dano pela presença de qualquer comprimento de onda. A fixação de hologramas é baseada na compensação de elétrons por íons positivos. Os íons H^+ são então ditos os compensadores da rede eletrônica e são inseridos no material durante ou depois do crescimento do cristal [12-13].

2.3. Telurato de bismuto

Os cristais de telurato de bismuto são muito utilizados em registros holográficos por possuírem propriedades adequadas. Por exemplo, o Bi_2TeO_5 possui a sensibilidade fotorrefrativa de $0,12 \text{ cm}^2/\text{J}$, que é calculada pela razão dos coeficiente de absorção óptica pela variação de índice de refração, tempo para alcançar a variação do índice de refração e a intensidade do tempo de escrita do holograma. Esse valor é cerca de 100 vezes maior que o do Niobato de Lítio e a variação de difração pode ser 40% maior, o que demonstra o potencial do telurato de bismuto para esta aplicação [5-6].

Segundo o diagrama de fases da figura 2, o telurato de bismuto possui uma das fases estáveis do sistema $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-TeO}_2$. Logo, este material é identificado como um composto não-estequiométrico podendo formar-se em um estreito intervalo de composição. Dessa forma, pela Figura 2 observa-se que essa composição estequiométrica modela-se a $905,5 \text{ }^\circ\text{C}$ [5-6].

Figura 2 - Diagrama de fases do sistema $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-TeO}_2$.



Fonte: FABRIS (2010).

A dificuldade estequiométrica do oxigênio e o estado de oxidação do telúrio podem gerar dificuldades em relação à elevada pressão parcial do TeO_2 . Contudo, o estado de oxidação do telúrio é de +4 com intervalo entre 550 e 770°C . Seu estado de

cristalização acontece no sistema ortorrômbico com grupo espacial $Abm2$, com parâmetros de rede $a = 11,602 \text{ \AA}$, $b = 16,461 \text{ \AA}$ e $c = 5,523 \text{ \AA}$. Além disso, como citado anteriormente o telurato de bismuto é um cristal biaxial opticamente negativo possuindo dois eixos ópticos, onde a bissetriz do ângulo agudo entre os eixos ópticos coincide com o menor índice de refração. Portanto, os índices de refração do telurato de bismuto são $n_1 = 2,3203$, $n_2 = 2,3678$ e $n_3 = 2,4022$, para $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ [5-6].

Ressalta-se que o cristal de telurato de bismuto é relativamente novo e suas propriedades não foram completamente estudadas. Além disso, há poucos estudos na literatura pois há uma minoria de pesquisadores deste material que abordam sua estrutura de defeitos, propriedades ópticas e o crescimento do mesmo. De fato, segundo Zanine[5], sua pesquisa acerca do telurato de bismuto foi pioneira no Brasil.

2.4 Crescimento do cristal

O telurato de bismuto pode ser crescido a partir de sua fase fundida. No entanto, existem dificuldades para tal, como é o caso da elevada pressão parcial do vapor do TeO_2 e a saliente clivagem do cristal. Com isso, é comum utilizar-se uma base fundida de óxido de telúrio no crescimento a fim de evitar a clivagem do cristal durante o puxamento do mesmo. A técnica mais utilizada para crescer o Bi_2TeO_5 é a de Czochralski, porém também utiliza-se outras, como é o caso do crescimento por puxamento. Essa técnica é muito utilizada para cristais com diversos tipos de impurezas intencionais. De fato, Földvári et al [14] cresceram os cristais de telurato de bismuto utilizando-se dopantes como ferro, cromo, vanádio, níquel, cobre e molibdênio. Como resultado, obtiveram que cromo, molibdênio e vanádio incorporaram de maneira muito mais satisfatória que os demais sendo cristais crescidos homogeneamente e livres de inclusões. Além disso, o cromo como dopante em cristais de Bi_2TeO_5 :Cr causa uma transferência de cargas entre os íons Cr^{6+} e Cr^{5+} , tornando-o importante pelo seu efeito foto-crômico. No mais, existe também o método de crescimento de Bridgman que basicamente é a fundição completa do cristal em uma zona mais quente e o cadinho chega a um marco de temperatura negativa permitindo a cristalização. No entanto, a maior dificuldade nesta técnica está no uso de semestres para a orientação do crescimento, já no início da cristalização. A partir disso, pesquisadores aplicam técnicas para um melhor crescimento, visando o controle do

início do procedimento, onde utiliza-se um cadinho com formato específico para determinada aplicação e escolha de formato [5-6].

3. SEMINÁRIOS

3.1. Seminários apresentados pelo beneficiário

No dia 17 de dezembro de 2020 foi apresentado um seminário ao grupo do projeto, no qual introduziu as propriedades ópticas do cristal de niobato de lítio. Contudo, aponta-se que por mais que o material do projeto não seja o niobato de lítio, foi interessante apresentar sua aplicabilidade pois trata-se de um material muito utilizado no registro holográfico.

O cristal de niobato de lítio é muito utilizado na óptica, dispositivos de transmissão, armazenamento e processamento de informações pelo fato de possuir elevados coeficientes eletro-ópticos, piroelétrico, piezoelétrico e ótica não linear [7]. Além disso, é considerado um material fotorrefrativo e fotovoltaico. Por apresentar determinadas propriedades, ele especificamente tem seu índice de refração alterado quando exposto a algum tipo de luz. O efeito fotorrefrativo já citado anteriormente no tópico 2.1, ocorre com a excitação dos portadores de cargas, ocorrendo então uma modelação de cargas criando um campo elétrico entre os portadores positivos e negativos. Esse campo elétrico altera a rede do cristal, alterando gradualmente o índice de refração do cristal. Essa mudança no índice de refração gera um holograma no volume do cristal. Outros efeitos fotoinduzidos estão relacionados diretamente com o efeito fotorrefrativo, como o efeito eletro-óptico que trata-se de uma mudança na permissividade dielétrica, capacidade do material de permitir o adensamento de um fluxo de campo elétrico, quando o mesmo é exposto a um campo elétrico; Termo-óptico que acontece quando um gradiente de temperatura gera uma perturbação no índice de refração; Fotovoltaico que, de maneira simples, consiste no surgimento de uma tensão elétrica em um material semicondutor, quando este é exposto à luz visível; Piroelétrico onde o gradiente de temperatura provoca um campo elétrico foto-induzido na amostra e o efeito Fotocrômico, que trata-se da absorção óptica de um efeito foto-induzido [15].

Posteriormente, foi explicado todo o processo da geração do holograma no volume do cristal a partir da modulação de cargas. Com isso, foi apresentado o porquê do campo elétrico ser defasado em relação ao padrão de luz incidente sobre o cristal,

chamado também de fase holográfica. O registro do holograma gerado foi um tópico de suma importância, pois explicou-se que dependendo do cristal, um holograma no escuro dura poucos dias. Ao contrário do $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ que no escuro, um holograma pode durar meses ou anos dependendo do estado de oxidação deste material. O $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$, por exemplo, possui baixa condutividade no escuro e isso o torna interessante no processo de armazenamento de informação [8].

Em cristais fotorrefrativos, a dopagem desempenha um papel fundamental no processo de registro holográfico. O niobato de lítio, por exemplo, possui um efeito fotorrefrativo fraco, logo para aumentar esse efeito é feita uma dopagem. A presença do ferro no niobato de lítio torna o processo de gravação mais eficiente. O óxido de Ferro inserido no cristal LiNbO_3 torna-se o doador-aceitador por meio de uma troca de valência. Logo, o ferro é o dopante mais eficiente para o caso do niobato de lítio. Porém, há casos em que a dopagem não é bem vinda, visto que pode gerar muitas lacunas no holograma, o que obviamente não é esperado.

Dadas as explicações anteriores, foi apresentada as três possíveis causas da formação do holograma no volume do material, sendo elas:

- Corrente de arraste: movimentação dos elétrons resultante da interação de um campo elétrico com os portadores de cargas.
- Corrente de difusão: em razão da concentração de cargas em regiões iluminadas, surge uma corrente regida pela difusão de cargas na banda de condução.
- Corrente fotovoltaica: essa corrente se deve a uma assimetria da rede cristalina, onde os portadores de cargas são forçados pelos átomos vizinhos a se moverem em determinada região.

Em seguida, apresentou-se as aplicações do registro holográfico na indústria, na medicina e na engenharia biomédica. Sendo elas presentes em microscopias, reconhecimento óptico de padrões, processamento de imagens, radiografia e interferometria. Lembrando que as aplicações vão muito além do que as citadas aqui.

3.2. Seminários apresentados pelos demais integrantes do grupo de pesquisa

Além da apresentação do beneficiário, foi apresentado também outros seminários referentes a temas do projeto como um todo. Eles serão listados abaixo com seus respectivos seminaristas:

- 25/09 - Adriani Barbosa - Análise de incertezas na determinação dos parâmetros de Stokes.
- 08/10 - Ivan de Oliveira - Registro holográfico em cristais fotorrefrativos;
- 22/10 - Evaldo Corat - Nanotubos de carbono (NTCs);
- 23/10 - John Lehman (National Institute of Standards and Technology) - A nova geração de radiômetros utilizando nanotubos;
- 29/10 - Franciele Carlesso - Medidas de refletância de materiais absorvedores (NTCs e Black Ni-P);
- 12/11 - Ana Maria do Espírito Santo - Crescimento de cristais a partir da fusão especialmente sobre a técnica de Micro-Pulling-Down;
- 19/11 - Erica Antunes - Nanotubos de carbono e os resultados encontrados;
- 3/12 - Guilherme Noronha - Niobato de lítio;
- 17/12 - Luma Trindade - Propriedades fotorrefrativas do Niobato de lítio;
- 21/01 - Matheus Verzani - Nanotubos de carbono como materiais absorvedores;
- 04/02 - Evaldo Corat - Física moderna;
- 05/02 - Felipe Tavares - Filtros holográficos.

4. CONCLUSÃO

Conclui-se que apesar de ter ocorrido imprevistos durante a realização do projeto, foi possível obter êxito e aprofundamento na literatura referente ao registro holográfico em cristais fotorrefrativos. Além disso, com as apresentações dos integrantes do projeto foi possível explorar na literatura tópicos relevantes, pois além das apresentações realizadas sobre o processo de gravação de redes holográficas, houve também o estudo e aprendizado de outros materiais e suas aplicações, como é o caso do nanotubo de carbono e métodos de crescimento de cristal como o de Czochralski e de Bridgman. Dessa forma, atualmente o registro holográfico é um campo que está sendo muito explorado, bem como o estudo dos cristais fotorrefrativos, como é o caso do niobato de lítio, mostrando-se cada vez mais importante para aplicações na área da eletrônica, armazenamento de dados, engenharia biomédica, sistemas de memória, metrologia e sistemas de comunicação, contribuindo para o crescimento da tecnologia e avanços na óptica. Contudo, ressalta-se que apesar desta área de conhecimento ter sido descoberta nos anos 70, há poucos estudos que envolvem o Telurato de Bismuto pelo fato de ser um cristal relativamente novo o que evidencia a importância deste projeto de pesquisa.

5. REFERÊNCIAS

- [1] SCHNARS, U. et al. *Digital Holography: Digital Hologram Recording, Numerical Reconstruction, and Related Techniques*. Springer, Alemanha, 2005;
- [2] VACCA, J. *Hologram & Holography: Design, Techniques & Commercial Applications*, Charles River Media, Inc. Massachusetts, 2001.
- [3] NAYDENOVA, I. *Holograms: Recording Materials and Applications*. InTech, Croácia, 2011.
- [4] GARCIA, P. M. **Holografia dinâmica em cristais fotorrefrativos**. Trabalho apresentado como pré-requisito para obtenção do grau de Doutor em ciências, DFESCM - Laboratório de óptica, 1994.
- [5] FABRIS, Z. V. **Crescimento de cristais de Bi_2TeO_5** . Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Física, Instituto de Física - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.
- [6] FABRIS, Z. V. **Caracterização óptica e elétrica de cristais de Bi_2TeO_5 crescidos por um método de duplo cadinho**. Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Física pela Universidade Federal de Goiás, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.
- [7] SYUY, A.V. *Optical properties of lithium niobate crystals*. *Optics*, v. 156, p. 239-246.
- [8] OLIVEIRA, I. **Fixação de hologramas em niobato de lítio**. Trabalho apresentado como requisito parcial para obtenção do grau Doutor de Física, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.
- [9] NOLTE, D. D. *Photorefractive effects and Materials*. Springer, Nova Iorque, 1995.
- [10] GUNTER, P. et al. *Photorefractive Materials and Their Applications: Basics effects*. Springer, Nova Iorque, 2006.
- [11] PEPPER, D. M. et al. **The Photorefractive Effect**. Lufthansa, 1990.
- [12] BRITO, I. V. **Técnicas de microscopia eletrônica holográfica digital aplicadas à análises de sistemas biológicos**. Tese de doutorado apresentada ao Instituto de Física para obtenção do título de Doutor em Ciências, São Paulo, 2015.
- [13] [12] N. V. KUKHTAREV et al. *Holographic Storage in Electrooptic Crystals*. *Ferroelectrics*, v. 22, p. 949-960, 1979.
- [14] FÖLDVÁRI, I et al. *Growth and properties of Bi_2TeO_5 single crystals*. *Journal of Crystal Growth*, v. 100, 75,1990.
- [15] GESUALDI, M. R. R. **Estudos de materiais fotorrefrativos e suas aplicações no processamento óptico holográfico de informação**. 189 f. Tese de doutorado apresentada ao Instituto de Física para obtenção do título de Doutor em Ciências, São Paulo, 2005.