BRUNO LUIS SOARES DE LIMA

**Modelagem e fabricação de modulador em óptica integrada baseado em filme
magnetostrictivo para aplicação como magnetômetro**

São Paulo

2017

BRUNO LUIS SOARES DE LIMA

**Modelagem e fabricação de modulador em óptica integrada baseado em filme
magnetostrictivo para aplicação como magnetômetro**

Tese apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção de
Título de Doutor em Ciências

São Paulo

2017

Bruno Luis Soares de Lima

**Modelagem e fabricação de modulador em óptica integrada baseado em filme
magnetostrictivo para aplicação como magnetômetro**

Tese apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção de Título
de Doutor em Ciências.

Área de concentração: Engenharia Elétrica -
Sistemas de Potência.

Orientador: Prof. Dr. Josemir Coelho Santos

São Paulo

2017

Dedico este trabalho aos amores de minha vida, minha esposa e filha.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e depois a meus pais, João Soares de Lima e Maria de Lourdes Silva de Lima, sem eles não seria possível chegar a este ponto da jornada acadêmica

Agradeço ao professor Doutor Josemir Coelho Santos, orientador e amigo.

Agradeço ao professor Doutor Antônio Domingues dos Santos do IFUSP pela intensa e decisiva colaboração.

Ao professor Doutor Marcos Franco do IAV-CTA pela ajuda competente e decisiva com os modelos de simulação.

Aos técnicos, Dr. Sérgio Romero do IFUSP e Msc. Ricardo Rangel do LSI-USP, pela sempre solícita e dedicada ajuda.

À Sandra Sato pela colaboração nas simulações multifísicas e amizade.

Aos professores da graduação e mestrado, Dr. Nilton Morimoto e Ana Neilde Rodrigues que contribuíram nesta jornada.

Agradeço ao Msc. Gustavo Marcanti, técnico do LSI-USP, pela ajuda com as litografias e corrosões e apoio.

RESUMO

O trabalho de doutorado teve como objetivo desenvolver um modulador óptico baseado em filme magnetostrictivo para aplicação como magnetômetro. A modelagem e simulação do dispositivo foi realizada utilizando software com cálculo por método dos elementos finitos (MEF) e teve como finalidade auxiliar iterativamente os processos de projeto e fabricação do modulador. A originalidade da proposta baseia-se na construção de um guia de onda em óptica integrada recoberto por um filme magnetostrictivo para permitir a modulação, via efeito elasto-óptico, da onda guiada pela aplicação de campos magnéticos externos. O campo magnético aplicado provoca a deformação do material magnetostrictivo que induz uma modificação no perfil de esforço aplicado ao substrato. O substrato tem suas propriedades ópticas alteradas devido ao efeito elasto-óptico, o que provoca mudanças nas propriedades da luz transmitida. O trabalho tem seu início com o estudo e a caracterização de filmes magnetostrictivos de $\text{Tb}_{25}\text{Fe}_{75}$ e $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$ depositados por *sputtering* sobre substratos de silício. Uma técnica para preparação das amostras e medição da magnetostricção foi estabelecida e os coeficientes de magnetostricção dos filmes foram determinados a partir das medições diretas dos deslocamentos das amostras, em função dos campos magnéticos aplicados, utilizando a técnica de *Atomic Force Microscopy* (AFM). Os resultados experimentais obtidos permitiram a realização de simulações por MEF para verificação dos modos de guiamento da luz gerados pelo perfil de esforços induzidos termicamente no processo de deposição do filme magnetostrictivo sobre substrato de $\text{B}_{12}\text{GeO}_4$ (BGO). Foi modelado e simulado também o efeito da aplicação do campo magnético sobre o guia óptico obtido inicialmente pelo efeito de esforço térmico. No resultado das simulações foi possível verificar as alterações do índice de refração efetivo e da intensidade óptica do modo guiado em função de campos magnéticos aplicados ao modulador. Ao final do trabalho realizaram-se a fabricação de alguns protótipos. Os resultados das caracterizações dos moduladores construídos permitirão, no futuro, ajustar os modelos de simulação elaborados.

Palavras-chaves: Sensores a fibras ópticas, magnetômetros, moduladores ópticos, magnetostricção, óptica integrada, Método dos Elementos Finitos.

ABSTRACT

The doctoral work aims are the development and simulation of an optical modulator based on the effect of magnetostriction for application as magnetometer. The multiphysics simulations were performed using the Finite Elements Method (FEM). In the manufacturing process of optical modulator integrated optics techniques were applied. The originality of the proposal is based on the construction of an integrated optical waveguide covered by a magnetostrictive film to allow the modulation of the guided wave, through the elasto-optical effect, by the application of external magnetic fields. The applied magnetic field causes deformation of the magnetostrictive material that induces a modification of the stress profile produced in substrate.

The substrate has its optical properties altered due to the elasto-optical effect, which causes changes in the properties of transmitted light. The work begins with the study and characterization of $\text{Tb}_{25}\text{Fe}_{75}$ and $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$ magnetostrictive films deposited by sputtering on silicon substrates. A method for sample preparation and measurement of magnetostriction was established. The magnetostrictive coefficient of the films was determined from the direct measurement of displacements of samples by AFM technique for magnetic fields applied. The experimental results obtained allowed to perform MEF simulations to verify the light guided modes generated by the profile of thermally induced stress created by deposition process of magnetostrictive film on $\text{B}_{12}\text{GeO}_4$ (BGO) substrate. It was also modeled and simulated the effect of the application of magnetic field on the optical guide obtained initially by the effect of thermal stress. In simulation results, it was possible to verify the changes of effective refractive index and optical intensity of guided modes as functions of magnetic fields applied to the modulator. At the end of the work, some prototypes were fabricated. The results of characterizations of the built modulators will allow, in the future, adjustments in simulation models.

Keywords: fiber optic sensors, magnetometers, optical modulators, magnetostriction, integrated optics, finite element methods

LISTA DE SÍMBOLOS

α - Coeficientes de deformação térmicos do substrato (α_s) e do filme (α_f).
 n_1 - Índice de refração de substrato.
 n_2 - Índice de refração do filme.
 $\vec{E}$ - Vetor Intensidade de campo elétrico.
 $\vec{D}$ - Vetor densidade de fluxo elétrico.
 $\vec{H}$ - Vetor intensidade de campo magnético.
 $\vec{B}$ - Vetor densidade de fluxo magnético.
 $\vec{J}$ - Vetor densidade de corrente elétrica.
 ρ - Densidade de carga elétrica.
 ω - frequência angular.
 ε - Permissividade.
 μ - Permeabilidade magnética.
 μ_0 - Permeabilidade magnética no vácuo.
 x, y, z - Direções do plano cartesiano
 β - constante de fase.
 ∇_t^2 - operador Laplaciano transversal.
 H - Campo magnético.
 E - Campo elétrico.
 n_x - Índice de refração do material na direção x .
 n_y - Índice de refração do material na direção y .
 n_z - Índice de refração do material na direção z .
 ε_r - Tensor de permeabilidade relativa.
 M - Magnetização.
 μ_σ - Constante de permeabilidade do material para o esforço aplicado.
 λ_m - Constante de magnetostricção do material.
 C^H - Coeficiente de deformação para o campo $\vec{H}$ aplicado.
 S - Deformação.
 ΔL - Variação de dimensão.
 L_0 - Dimensão inicial.
 λ_s - Magnetostricção para o campo magnético de saturação aplicado.
 θ - Ângulo formado entre direção de magnetização e direção de campo aplicado.
 M_s - Magnetização de saturação.
 σ - esforço mecânico.
 S_{kl} - Tensor de deformação.
 p_{ijkl} - Coeficientes do tensor elasto-óptico.
 Tb - Térbio
 Co - Cobalto
 Fe - Ferro
 D - Deslocamento vertical da amostra.

W- Largura da amostra.

ξ - Módulo de Young

ν - Razão de Poisson

T- Espessura.

R- Raio efetivo da curvatura

σ_t – Esforço total médio do filme

R_1 - Raio de curvatura do substrato antes da deposição do filme estressante.

R_2 - Raio de curvatura do substrato com o filme depositado.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema com as modelagens necessárias para simulação do modulador óptico.....	23
Figura 2 - Esquema de modulador óptico tipo canal	29
Figura 3– Esquema de guias de onda (a) planares e (b) tipo canal	30
Figura 4– Esquema de uma onda eletromagnética com seus campos transversais elétrico e magnético ..	31
Figura 5– Variação da magnetização e magnetostricção com variação campo magnético	39
Figura 6– Equipamento <i>sputtering</i> utilizado	53
Figura 7 – Esquema de funcionamento do MO-SNOM	57
Figura 8 – Medida de deformação de amostra no AFM.....	58
Figura 9 – Sistema para tratamento termomagnético	60
Figura 10– esquema e parâmetros de medição da magnetostricção	61
Figura 11 – suporte com amostra de silício com filme de Tb ₂₃ Co ₇₇ depositado	63
Figura 12 – Etapas para fabricação do modular proposto.	66
Figura 13– Tela do COMSOL com constantes físicas utilizadas nas simulações.	68
Figura 14 – Tela do COMSOL com a malha utilizada na simulação.	69
Figura 15 – Equações inseridas para os domínios preenchidos com BGO.	70
Figura 16 – Fluxograma representando o processo de obtenção dos modos ópticos por efeito ISS.....	71
Figura 17 – Aplicação de campo magnético às arestas da estrutura do modulador simulado.....	72
Figura 18 –Inserção das equações para cálculo da magnetostricção.....	73
Figura 19 – Inserção variáveis relativas a magnetostricção como esforço inicial do filme Tb ₂₃ Co ₇₇	74
Figura 20– Sequência de execução dos modelos para obtenção dos modos ópticos devido ao efeito de magnetostricção sobreposto ao efeito de ISS.	74
Figura 21 – Curvas de magnetização nas duas direções paralelas ao plano do filme, ortogonais entre si, para amostra de Tb ₂₃ Co ₇₇	76
Figura 22– Imagem da estrutura de domínios magnéticos obtida pela técnica de LMOKE para o filme de Tb ₂₃ Co ₇₇ com campo magnético aplicado paralelamente à direção da anisotropia magnética induzida....	77
Figura 23– Curvas de magnetização nas duas direções paralelas ao plano do filme, ortogonais entre si, para amostra de Tb ₂₅ Fe ₇₅	78
Figura 24– a) curvas de histerese na direção perpendicular, antes e depois do tratamento térmico para amostra de Tb ₂₃ Co ₇₇ ; b) curva de histerese na direção perpendicular, antes e depois do tratamento térmico para amostra de Tb ₂₅ Fe ₇₅	79
Figura 25– Curva de magnetização versus temperatura para filme de Tb ₂₃ Co ₇₇ variando a temperatura de 0 a 320 K.....	80
Figura 26 – Curva de magnetização versus temperatura para filme de Tb ₂₃ Co ₇₇ variando a temperatura de 0 a 80 K.....	80
Figura 27 – Curva de histerese na direção do eixo fácil do filme de Tb ₂₃ Co ₇₇ para temperaturas de 2 K e 32 K.....	81
Figura 28 – Curva de histerese nas duas direções ortogonais do plano do filme de Tb ₂₃ Co ₇₇ à temperatura de 300 K.....	82
Figura 29 – curva de magnetização versus temperatura para filme de Tb ₂₅ Fe ₇₅ variando a temperatura de 0 a 300 K.	83

Figura 30 – Deslocamento vertical para amostras de Silício e de Silício com filme de $Tb_{23}Co_{77}$. Para amostra com filme de $Tb_{23}Co_{77}$ o campo magnético foi aplicado na direção do eixo fácil.	84
Figura 31 – Variação do deslocamento vertical e do momento magnético para amostra com filme de $Tb_{23}Co_{77}$ com o campo magnético aplicado na direção do eixo difícil com os dois sentidos de magnetização.....	85
Figura 32 – Variação do deslocamento vertical, medida topográfica, para amostra com filme de $Tb_{23}Co_{77}$ com o campo magnético aplicado na direção do eixo difícil para os dois sentidos de magnetização.....	87
Figura 33– Variação do deslocamento vertical e momento magnético para amostra com filme de $Tb_{25}Fe_{75}$ com o campo magnético aplicado na direção do eixo difícil.....	88
Figura 34 - Esforço induzido na região do canal óptico para substrato de BGO com filme de $Tb_{23}Co_{77}$ com espessura de 50 nm e campo magnético nulo. (a) Esforço S_x . (b) Esforço S_y . (c) Esforço S_{xy}	93
Figura 35- Esforço induzido na região do canal óptico para substrato de BGO com filme de $Tb_{23}Co_{77}$ com espessura 100 nm e campo magnético nulo. (a) Esforço S_x . (b) Esforço S_y . (c) Esforço S_{xy}	95
Figura 36 - Esforço induzido na região do canal óptico para substrato de BGO com filme de $Tb_{23}Co_{77}$ com espessura de 50 nm para campo magnético de saturação:(a) Esforço S_x . (b) Esforço S_y . (c) Esforço S_{xy} ...	97
Figura 37- Esforços induzidos na região do canal óptico para substrato de BGO com filme de $Tb_{23}Co_{77}$ com espessura de 100 nm para campo magnético de saturação: (a) Esforço S_x , (b) Esforço S_y e (c) Esforço S_{xy}	98
Figura 38 – Perfis de índices de refração (a) N_x e (b) N_y , gerados por ISS para modulador óptico com filme de $Tb_{23}Co_{77}$ com espessura de 50 nm	101
Figura 39 – Perfis de índices de refração gerados por ISS para modulador óptico com filme de $Tb_{23}Co_{77}$ com espessura de 50 nm.....	102
Figura 40 - Perfis de índices de refração para modulador óptico com filme de $Tb_{23}Co_{77}$ com espessura de 50 nm com aplicação do campo magnético de saturação.	103
Figura 41 - Perfis de índices de refração N_x (a) e N_y (b) gerados por ISS para modulador óptico com filme de $Tb_{23}Co_{77}$ com espessura de 100 nm.	104
Figura 42 – Perfis de índice de refração para modulador óptico com filme de $Tb_{23}Co_{77}$ com espessura de 100 nm sem aplicação de campo magnético.	105
Figura 43 – Perfis de índice de refração para modulador óptico com filme de $Tb_{23}Co_{77}$ com espessura de 100 nm com aplicação do campo magnético de saturação.	106
Figura 44 – Modos de propagação para modulador com filme de $Tb_{23}Co_{77}$, com espessura de 50 nm, sem aplicação de campos magnéticos: (a) E_x (b) E_y	108
Figura 45– Modos de propagação para modulador filme de $Tb_{23}Co_{77}$ com espessura de 50 nm com aplicação de campo magnético de 10 Oe na direção x: (a) E_x (b) E_y	109
Figura 46 – Modos de propagação para modulador com filme de $Tb_{23}Co_{77}$, com espessura de 50 nm, com aplicação de campos magnéticos de 50 Oe na direção x: (a) E_x (b) E_y	110
Figura 47 – Modos de propagação para modulador com filme de $Tb_{23}Co_{77}$ com espessura de 50 nm com aplicação de campos magnéticos de 100 Oe na direção: (a) E_x (b) E_y	111
Figura 48 – Modos de propagação para modulador com filme de $Tb_{23}Co_{77}$, com espessura de 50 nm, com aplicação de campo magnético de 150 Oe na direção x: (a) E_x (b) E_y	112

Figura 49 – Modos de propagação para modulador com filme de $Tb_{23}Co_{77}$ com espessura de 50 nm com aplicação de campos magnéticos de 200 Oe na direção x: (a) E_x (b) E_y	113
Figura 50– Variação das intensidades ópticas dos modos com campo magnético aplicado para filme de 50 nm.....	114
Figura 51 – Variação do índice de refração efetivo com o campo magnético para os modos: (a) E_x , (b) E_y	117
Figura 52 – Variação da birrefringência do modulador com o campo magnético para os modos: (a) E_x , (b) E_y	118
Figura 53 – Modos de propagação para modulador com filme de $Tb_{23}Co_{77}$ com espessura de 100 nm, sem aplicação de campos magnéticos: (a) E_x (b) E_y	120
Figura 54 – Modos de propagação para modulador com filme de $Tb_{23}Co_{77}$ com espessura de 100 nm com aplicação de campo magnético de 100 Oe: (a) E_x (b) E_y	121
Figura 55 – Modos de propagação para modulador com filme de $Tb_{23}Co_{77}$ com espessura de 100 nm com aplicação de campo magnético de 200 Oe: (a) E_x (b) E_y	122
Figura 56– Modos de propagação para modulador com filme de $Tb_{23}Co_{77}$ com espessura de 100 nm com aplicação de campo magnético de 300 Oe: (a) E_x (b) E_y	123
Figura 57– Modos de propagação para modulador com filme de $Tb_{23}Co_{77}$ com espessura de 100 nm com aplicação de campo magnético de 400 Oe: (a) E_x (b) E_y	124
Figura 58– Variação dos índices de refração efetivos com o campo magnético aplicado com filme de $Tb_{23}Co_{77}$ com espessura de 100 nm.	125
Figura 59– Trincheiras abertas utilizando LASER variando parâmetros de processo	129
Figura 60– Imagem do canal 10 com LASER aplicando potência 2 W e velocidade 400 m/s.....	130
Figura 61– Imagem dos canais 14 e 15 com LASER aplicando potência de 3 W e velocidades de varredura de 1000 mm/s e 1200 mm/s, respectivamente.	131
Figura 62– Imagem da trincheira com corrosão do filme de $Tb_{23}Co_{77}$ por baixo do fotoresiste. Corrosão feita com solução 400 H ₃ PO ₄ + 75 H ₂ O + 25 HNO ₃ e tempo de 5 seg.	132

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Medidas de raio de curvatura e esforço residual para lâminas de silício com filme de $Tb_{23}Co_{77}$ depositado.....	90
Tabela 2– Medidas de raio de curvatura e esforço residual para lâminas de silício com filme de $Tb_{23}Co_{77}$ depositado após tratamento térmico	91
Tabela 3 – Medidas de raio de curvatura e esforço residual para lâminas de silício com filme de $Tb_{23}Co_{77}$ depositado após tratamento térmico com rampa com patamar 350 C.....	91
Tabela 4 – Variação dos índices de refração efetivos com o campo magnético aplicado.	116
Tabela 5 – Variações dos índices de refração efetivos com o campo magnético aplicado para filme de $Tb_{23}Co_{77}$ com espessura de 100 nm.	127

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1. Objetivo	17
1.2. Justificativa	17
1.3. Contextualização do trabalho.....	19
1.4. Estrutura do texto	24
2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	25
2.1. Modulador óptico.....	26
2.1.1. Guia de onda.	30
2.2. Magnetostricção.....	36
2.3. Efeito elasto-óptico.	40
2.4. Óptica integrada	46
2.5. Método dos Elementos Finitos (MEF)	48
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	50
3.1. Fabricação e caracterização dos filmes magnetostrictivos	51
3.1.1. Técnica física de deposição de filmes finos por <i>Sputtering</i>	52
3.1.2. Magnetômetro de amostra vibrante (VSM)	54
3.1.3. Magnetômetro SQUID.....	55
3.1.4. Técnica de microscopia atômica de varredura AFM.....	56
3.1.5. Preparação das amostras para determinação da magnetostricção	59
3.2. Procedimento para medição de deslocamento vertical da amostra por AFM e cálculo do efeito de magnetostricção (λm)	60
3.3. Medidas de esforço mecânico dos filmes magnetostrictivos.....	62
3.4. Fabricação do modulador óptico sobre lâmina de BGO.....	65
3.5. Modelagem e Simulação do modulador óptico proposto no COMSOL multiphysics	67
3.5.1. COMSOL	67
3.5.2. Simulação do modulador óptico com modulação a partir do efeito ISS	67
3.5.3. Simulação do modulador com o efeito magnetostrictivo	71
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	75
4.1. Caracterização dos filmes magnetostrictivos e medições de sua magnetostricção por AFM	75

4.1.1.	Curvas de histerese para amostras de silício com filmes magnetostrictivos	75
4.1.2.	Dependência da magnetização dos filmes de $Tb_{25}Fe_{75}$ e $Tb_{23}Co_{77}$ com a temperatura	79
4.1.3.	Medidas de deflexão vertical da amostra e cálculo do coeficiente de magnetostricção do filme $Tb_{23}Co_{77}$	83
4.1.4.	Medidas de deflexão vertical da amostra e cálculo do coeficiente de magnetostricção do filme $Tb_{25}Fe_{75}$	88
4.2.	Resultados das medidas de esforço mecânico do filme magnético de $Tb_{23}Co_{77}$	89
4.2.	Simulação do modulador óptico proposto	92
4.2.1.	Simulação para obtenção de perfil de esforço mecânico e índice de refração	92
4.2.2.	Simulações para obtenção dos modos ópticos para o modulador com filme de $Tb_{23}Co_{77}$ com espessura de 50 nm	107
4.2.3.	Modos ópticos para o modulador com filme de $Tb_{23}Co_{77}$ com espessura de 100 nm	119
4.3.	Fabricação do modulador óptico	128
4.3.1.	Corrosão do filme de $Tb_{23}Co_{77}$ por LASER	128
4.3.2.	Corrosão úmida do filme de $Tb_{23}Co_{77}$	131
5.	CONCLUSÃO	134
6.	Trabalhos futuros	136
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137

1. INTRODUÇÃO

1.1. Objetivo

O objetivo do trabalho é desenvolver um modulador óptico em óptica integrada que tenha seu modo de guiamento da luz influenciado pela aplicação de campos magnéticos externos ao componente. Além disso, o trabalho tem como objetivo:

- Modelar o funcionamento do modulador óptico através de um *software* de simulação multifísica pelo método de elementos finitos (MEF), de forma a permitir o cálculo dos parâmetros de projeto do modulador.

- Atender uma aplicação de sensoriamento de campos magnéticos estáticos e dinâmicos.

- Estabelecer uma metodologia para projeto e fabricação de moduladores em óptica integrada com princípio de modulação através do efeito magnetostrictivo.

‘=

1.2. Justificativa

Os transdutores magnéticos estão presentes nas mais diversas aplicações do cotidiano, desde o apoio à navegação (SANTANA, 2011) passando por dispositivos de armazenamento de dados e indo até o sensoriamento de corrente elétrica (SOARES, 2005; RUBINI, 2013). Estes transdutores se destacam por propiciar, na maioria dos casos, medidas não intrusivas com relativa confiabilidade (MACINTYRE, 2000). Dentre os tipos de magnetômetros encontrados na literatura, destacam-se os do tipo fluxgate, por efeito Hall e os baseados em bobinas de sondagem, empregados em larga escala em diversos sistemas de monitoramento. Os magnetômetros tipo bobina de sondagem e fluxgate apresentam largas faixas de medição de campos magnéticos, porém ambos apresentam dimensões relativamente grandes e sua integração com sistemas de aquisição e coleta de dados é relativamente complexa.

Os magnetômetros à fibra óptica já têm sido estudados e concebidos a partir de fenômenos físicos como o efeito Faraday e a magnetostricção. Nestes últimos, normalmente um material

magnetostrictivo é aderido ou colado a uma fibra óptica (NAZARÉ, et al., 2014). Estes dispositivos têm sua sensibilidade diretamente proporcional ao comprimento da fibra óptica com material magnetostrictivo aderido, fato que também leva à construção de dispositivos de tamanho relativamente grande.

Em diversas áreas da engenharia, como a computação e eletrônica, observa-se uma tendência natural à diminuição do tamanho dos dispositivos e componentes. Este fato também se dá no campo do sensoriamento, onde em muitas aplicações a miniaturização é necessária. Assim, estudos para desenvolvimento de magnetômetros com dimensões reduzidas e maior sensibilidade são necessários. Através de técnicas de óptica integrada e microeletrônica é possível obter moduladores ópticos adequados para serem aplicados como magnetômetros ópticos com dimensões relativamente pequenas se comparadas às dimensões dos tipos de magnetômetros mais utilizados, como bobinas de sondagem ou fluxgate. Além disso, utilizando-se óptica integrada é esperado que possam ser obtidos melhores sensibilidades comparando-se com magnetômetros magnetostrictivos à fibra, uma vez que em componentes em óptica integrada o material magnetostrictivo é depositado sobre o guia de onda, e não colado sobre a fibra óptica.

O trabalho também explora a caracterização de materiais para fabricação do modulador. Atualmente a pesquisa de materiais para fabricação de sensores é de suma importância para desenvolvimentos dos mesmos, a fim de atender ao número crescente de aplicações.

O estudo de materiais magnéticos aliado à aplicação de técnicas de óptica integrada e microeletrônica tem potencial para possibilitar a obtenção de sensores compactos, robustos e com grande precisão, em comparação com outros tipos de magnetômetros.

O desenvolvimento do modulador óptico proposto para aplicação como sensor de campo magnético abrirá espaço para o desenvolvimento de dispositivos como TCs ópticos que poderão ser aplicados aos sistemas elétricos de potência, área de concentração do autor no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) da EPUSP.

O presente trabalho de doutorado tem sua originalidade, caracterizada na proposta de projeto, ligada à modelagem e fabricação, utilizando técnicas de óptica integrada, de um modulador óptico com modulação por magnetostricção. A modelagem do dispositivo foi realizada por meio

de simulação multifísica utilizando o MEF. O modelo matemático por elementos finitos permite simular o modulador e auxilia na definição de parâmetros do processo de fabricação e no refinamento iterativo dos valores dos parâmetros geométricos, físicos e dos materiais utilizados no modulador. A simulação permite o auxílio iterativo à fabricação do modulador. Desta forma, foi formulada uma metodologia de projeto e de fabricação de moduladores ópticos com princípio de modulação baseado no efeito elasto-óptico induzido por magnetostricção, o que também é uma contribuição original. Os resultados das simulações foram publicados na SBMO/IEEE MTT-S *International Microwave and Optoelectronics Conference* 2017 (LIMA, et al, 2017).

O trabalho também apresenta como contribuição original um estudo do fenômeno de magnetostricção em filmes finos com medição direta dos efeitos mecânicos do mesmo. O presente trabalho propôs uma metodologia para fabricação e caracterização do filme magnetostrictivo com medição direta dos efeitos do fenômeno através de técnica de AFM (*Atomic Force Microscope*). Foi elaborada uma metodologia para preparação das amostras de forma a potencializar o fenômeno magnetostrictivo. Os resultados obtidos nos estudos e caracterizações dos filmes magnetostrictivos foram publicados na forma de artigo no *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* (JMMM) (LIMA, et al., 2015)

1.3. Contextualização do trabalho

Os moduladores ópticos são dispositivos que quando submetidos a uma grandeza física externa, possibilitam alterar as propriedades de um feixe óptico, como por exemplo, fase, intensidade, polarização (NISHIHARA, et al., 1989). Os moduladores ópticos podem ser aplicados em diversas áreas, tais como sensoriamento de alta precisão, processamento de sinal óptico, computação óptica e na construção de dispositivos interferométricos (GRATTAN, et al., 2000; PINHEIRO, 2011).

O conceito de óptica integrada está relacionado com o desenvolvimento e fabricação de sistemas com dimensões micrométricas ou nanométricas compostos por guias de onda ópticos (HUNSPERGER, 2009). Na fabricação de componentes em óptica integrada podem-se empregar tecnologias de filmes finos e de microfabricação de componentes eletrônicos integrados. Dentre os componentes em óptica integrada presentes nos sistemas de comunicação destacam-se os

moduladores ópticos. Com o advento da fibra óptica como principal meio físico para propagação de sinais de dados, o desenvolvimento de sensores ópticos também foi alavancado. Os princípios de funcionamento destes sensores podem explorar desde mecanismos simples, como interruptores ópticos, até técnicas complexas de interferometria ou efeitos não lineares, como o Raman e o Brillouin. A evolução dos sistemas ópticos de sensoriamento ganhou grande impulso com as pesquisas e desenvolvimentos de componentes e dispositivos ópticos voltados para aplicações de larga escala em sistemas de comunicações de dados (GRATTAN, et al., 2000). Os moduladores podem explorar inúmeros efeitos que relacionam grandezas físicas com feixes ópticos. Dentre estes efeitos destacam-se os eletro-ópticos e os elasto-ópticos. No primeiro, a aplicação de uma tensão elétrica promove alteração no índice de refração do material do guia de onda, e consequentemente a mudança nas propriedades da luz. Já no segundo efeito é a aplicação de uma tensão mecânica que promove a alteração do índice de refração.

O grupo de pesquisa do Laboratório de Sensores Ópticos (LSO) da Escola Politécnica de Universidade de São Paulo (EPUSP), do qual o autor faz parte, tem desenvolvido moduladores ópticos para aplicações como elementos sensores aplicados aos sistemas elétricos de potência (SANTOS, et al., 2009; LIMA, 2011; PINHEIRO, 2011; SATO, 2015; SANTOS, et. Al, 2006). As pesquisas vão desde a concepção e desenvolvimento de moduladores ópticos, até estudos de viabilidade técnico-econômica da aplicação destes componentes ao sensoriamento de grandezas de interesse, tais como tensão e corrente elétricas, grandezas essas vitais aos sistemas de potência. Os moduladores ópticos são os componentes principais na construção de transformadores de corrente ópticos (TCO) e transformadores de potencial ópticos (TPO), aplicados respectivamente às medições de corrente e de tensão elétricas. Dentre as vantagens nas aplicações destes dispositivos destacam-se: alta precisão, estabilidade, robustez e segurança no sensoriamento. Estas vantagens, somadas ao fato da aplicação já existente das fibras ópticas nos sistemas de comunicação em ambientes como plantas de geração, subestações e circuitos de transmissão e distribuição de energia, fazem dos moduladores ópticos candidatos naturais a serem escolhidos como elementos sensores no setor de energia. Um fator que, em especial, potencializa o uso de sensores ópticos no setor elétrico é a maior segurança nas medições elétricas, uma vez que se ocorrer falha, não haverá condução de potenciais perigosos do circuito que se deseja medir para os terminais secundários do transformador óptico, uma vez que a fibra óptica é totalmente isolante. Além disso, os sensores

ópticos possuem tamanho e peso reduzidos se comparados a transformadores para medições de tensões e correntes elétricas tradicionalmente utilizados em sistemas elétricos de potência.

Os TCOs são baseados em sensores de corrente ópticos, os quais, por sua vez, são constituídos por sensores ópticos de campo magnético, que podem ser classificados como um tipo de magnetômetro. Outros setores da indústria podem beneficiar-se das vantagens dos magnetômetros ópticos para aplicações diversas, tais como: medição de distância, vibração, propriedades magnéticas de materiais, caracterização de equipamentos elétricos, etc. Estes fatores fazem com que o grupo do LSO, que integra a Departamento de Energia Automação Elétricas (PEA) da EPUSP, tenha se dedicado há anos ao desenvolvimento de moduladores magneto-ópticos. Para o avanço contínuo das pesquisas faz-se necessária a aplicação de novos materiais e a exploração de diferentes princípios físicos no intuito de obter moduladores ópticos com diferentes características e performances, adequadas a aplicações específicas. Nesta linha, destaca-se uma tese recentemente defendida intitulada: “Modelagem de estresse térmico residual induzido para guias ópticos em substratos de retículo cúbico para aplicações de moduladores eletro-ópticos”, de autoria de Sandra Sato (SATO, 2015). O trabalho permitiu a modelagem de um guia de onda em substrato de $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ usando a técnica de estresse residual induzido termicamente por filme de nitreto de silício. A modelagem em questão foi realizada utilizando o software de simulação multifísica COMSOL MULTIPHYSICS®, que é baseado no método dos elementos finitos (MEF). O presente trabalho aproveitará parte da modelagem já realizada no trabalho de SATO (2015).

O autor, anteriormente a este trabalho, se dedicou ao desenvolvimento e caracterização de magnetômetros fabricados por técnicas de filme espesso sobre substrato de LTCC (Low Temperature Cofired Ceramics), o qual despertou o interesse do autor em relação ao estudo e caracterização de materiais para o desenvolvimento de sensores de campo magnético, ou seja, magnetômetros. Além disso, o autor possui experiência em projetos de pesquisa e desenvolvimento voltados para o setor elétrico, onde os dispositivos ópticos para sensoriamento tem tido crescente número de aplicações e são de grande relevância (SANTOS, 1993). Estes interesses, aliados às experiências anteriores, fizeram com que o autor procurasse o grupo do LSO com o intuito de realizar pesquisa voltado ao desenvolvimento de sensores ópticos do tipo magnetômetro.

Desta forma, surgiu a ideia de construir um dispositivo óptico tipo canal explorando a deformação mecânica de filmes finos, assunto explorado no trabalho de Sato (2015), dando assim continuidade à linha de pesquisas do grupo. Aliando as experiências anteriores do grupo e a experiência anterior do autor, concebeu-se a possibilidade de desenvolver um sensor óptico do tipo magnetômetro no qual utilizar-se-iam filmes finos, capazes de sofrer deformações a partir de campos magnéticos aplicados externamente, depositados sobre substratos ópticos transparentes, de maneira a formar guias de onda ópticos. Desta forma, as propriedades de propagação do guia seriam alteradas pelo campo magnético externo. Neste cenário foi buscada a cooperação com o grupo de pesquisa do Laboratório de Materiais Magnéticos (LMM) do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IFUSP). O grupo do LMM possui diversos trabalhos e pesquisas na área de materiais magnéticos, inclusive materiais magnetostrictivos, que possuem as características desejadas para desenvolvimento do modulador proposto neste trabalho. Dentre os trabalhos anteriores do grupo do LMM voltados à magnetostricção, destacam-se o de dos SANTOS (1991), que caracterizou o fenômeno para ligas ferro-metálicas amorfas e o de SANTI (2000), que depositou e caracterizou filmes finos amorfos compostos por terra-rara Ferro-Cobalto.

O princípio de funcionamento do modulador desenvolvido neste trabalho baseia-se em dois efeitos: o magnetostrictivo e o elasto-óptico. Através do efeito elasto-óptico, o índice de refração do material transparente é alterado. A deformação provocada induz um perfil de estresse no substrato transparente, responsável pelo guiamento do feixe óptico. O dispositivo tem seu funcionamento como sensor baseado no sinal óptico modulado pelo campo magnético externamente aplicado, que provoca a deformação de um filme com propriedade magnetostrictiva, modificando assim a propriedade de índice de refração efetivo do guia, o qual afeta a luz que se propaga.

O presente trabalho se propôs a aproveitar os modelos ópticos e elasto-ópticos elaborados por SATO (2015) e acoplar o modelo magnetostrictivo à simulação existente, permitindo assim simular e modelar o modulador óptico a ser construído e caracterizado neste trabalho.

O filme magnetostrictivo foi obtido através da técnica de deposição denominada de *sputtering*. O processo de deposição utilizado neste trabalho ocorre à temperatura aproximada de 78 K. A diferença entre a temperatura ambiente e a temperatura do processo de deposição, aliada à

diferença entre os coeficientes de deformação térmicos do substrato (α_s) e do filme (α_f), induz um perfil de estresse no substrato, que visa formar um guia de onda. A aplicação de um campo magnético ao filme influencia este perfil de estresse, alterando as propriedades do guia, o que permite modular o feixe de luz guiado.

A simulação multifísica permite auxiliar, de maneira iterativa, o projeto do modulador, contribuindo para definição dos parâmetros geométricos do guia de onda e a definição dos parâmetros do processo de fabricação do componente óptico.

A figura 1 apresenta um esquema dos conceitos envolvidos na modelagem do modulador proposto.

Figura 1 – Esquema com as modelagens necessárias para simulação do modulador óptico.

Fonte: Autor.

A primeira etapa do trabalho foi a determinação experimental dos parâmetros de processo para fabricação do filme magnetostrictivo e sua caracterização magneto-elástica. A fabricação e caracterização do filme magnetostrictivo foi realizada no LMM do IFUSP. Os métodos empregados e os resultados obtidos serão detalhados nos capítulos 3 e 4.

Após a definição dos materiais e processo para obtenção do filme magnetostrictivo foi realizada a modelagem e simulação por MEF do modulador óptico proposto utilizando o COMSOL. Os resultados são apresentados no capítulo 4

O item 3.3 apresentam os processos de fabricação do modulador óptico desenvolvido no trabalho, dentre os quais o desafio principal foi a corrosão do material magnetostrictivo para abertura do canal do guia de onda.

1.4. Estrutura do texto

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica contendo os itens sobre o modulador óptico, guia de onda, magnetostricção, efeito elasto-óptico, óptica integrada e o métodos dos elementos finitos.

O capítulo 3 apresenta os materiais e métodos.

O capítulo 4 apresenta os resultados experimentais e das simulações realizadas.

O capítulo 5 apresenta as conclusões.

2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

Vários exemplos de sensores ópticos de campo magnético, baseados em moduladores ópticos, exploram o efeito de magnetostricção. Sensores constituídos por uma fibra óptica coberta com uma jaqueta com propriedade magnetostrictiva são propostos em trabalhos da década de 1980 e 1990, (BUCHOLTZ, et al., 1991; KERSEY, 1987; JACKSON, et al., 1980; LEE, et al., 1995; RASHLEIGH, 1981;). No trabalho de BUCHOLTZ (1991) e seus colaboradores, por exemplo, foi depositado um filme magnético através de técnica de *meltspinning* sobre uma fibra óptica comercial. JACKSON (1985) e seus colaboradores, por outro lado, desenvolveram um interferômetro Mach-Zener, aderindo mecanicamente o material magnetostrictivo à fibra óptica.

Nos anos 2000 foram propostos trabalhos (SEDLAR, et al., 2000; MOULSON, et al., 2003) explorando a síntese do material magnetostrictivo através de técnicas de sol gel. Naquela época, dentre os materiais que apresentam magnetostricção gigante, destacaram-se o Terfenol D (TbDyFe), sendo inclusive comercializado e muito aplicado na construção de sensores de campo magnético. Em alguns trabalhos (LIANG, et al., 2005; SOUTO, 2006) o Terfenol D foi usado na fabricação de moduladores ópticos aplicados à área de sensoriamento. Porém, nos referidos trabalhos, o Terfenol D foi colado à fibra óptica, o que pode ter afetado a transferência da deformação do material magnetostrictivo para o guia de onda.

No entanto, os métodos de deposição dos filmes magnéticos aplicados naqueles trabalhos são de difícil controle e não são aplicadas técnicas de fabricação de componentes em óptica integrada nem conceitos fotônicos modernos. Estas técnicas e conceitos aumentam as possibilidades de interação entre o elemento sensor e outras grandezas físicas a serem medidas e, nos casos em que o substrato é semicondutor, pode ser facilitada a integração destes sensores à eletrônica responsável por coletar e tratar os sinais de saída dos sensores.

No final da década de 2000 e início da década seguinte, trabalhos relataram a deposição de filmes finos magnetostrictivos através da técnica de *sputtering* sobre fibras ópticas monomodo. TIERCELIN (2011) e seus colaboradores realizaram deposição por *sputtering* de filmes magnéticos de NiFe e Terfenol D, em multicamadas, o que possibilitou a construção de dispositivos sensores de campo magnético. SHI (2006) e seus colaboradores propuseram um sensor

interferométrico utilizando um guia de onda baseado em fibra óptica, com modulação a partir do efeito magnetostrictivo.

Os trabalhos destacados neste item não apresentam o uso de simulações para obtenção de parâmetros para projeto dos sensores e moduladores ópticos. Recentemente, surgiram trabalhos que propõem a extração de parâmetros de projeto de sensores ópticos e moduladores por simulação computacional utilizando métodos numéricos como o dos elementos finitos. Nesta linha, que se aproxima do presente trabalho, há o exemplo de um sensor óptico do tipo magnetômetro que foi proposto por MATHWES (2011), no qual o campo magnético modula o sinal do feixe de luz que trafega por uma fibra óptica através do efeito fotoelástico induzido pela magnetostricção. O artigo apresenta a simulação do sensor, a qual foi realizada através do método dos elementos finitos (MEF), porém não oferece detalhes sobre o software utilizado. O artigo não detalha o processo de obtenção do material magnetostrictivo e o guia de onda é uma fibra óptica comercial.

Diferentemente da maioria dos trabalhos anteriores citados, o modulador proposto no presente trabalho utiliza materiais e processos compatíveis com as tecnologias aplicadas no âmbito da óptica integrada. Este trabalho de doutorado apresenta um escopo multidisciplinar envolvendo os conceitos de: magnetostricção, efeito elasto-óptico, simulação por elementos finitos e óptica integrada.

Os itens 2.1, 2.2 e 2.3 apresentam o funcionamento do modulador óptico, o fenômeno de magnetostricção e o efeito elasto-óptico, respectivamente.

A revisão bibliográfica relacionada aos conceitos de elementos finitos e óptica integrada são apresentados nos itens 2.4 e 2.5, respectivamente.

2.1. Modulador óptico.

Os moduladores ópticos são dispositivos que permitem alterar as propriedades de um ou mais feixes de luz a partir da aplicação de um sinal controlado. Os moduladores ópticos são classificados de acordo com o sinal ao qual respondem, podendo ser eletro-ópticos, magneto-

ópticos, acusto-ópticos, etc. As propriedades do feixe de luz alteradas pelo modulador podem ser a intensidade, fase, frequência (SHUN, 2009). A forma de propagação da luz nos moduladores ópticos pode ser volumétrica ou guiada (SHUN, 2009), sendo que os guias de onda podem ser planares ou do tipo canal. Moduladores ópticos de qualquer tipo podem ser utilizados como componentes em sistemas de sensoriamento óptico.

Nas últimas duas décadas o interesse em moduladores ópticos aplicados como sensores de campo magnético tem se intensificado, em parte devido à aplicação das fibras ópticas como elementos sensores. Este fato ocorre notadamente em sistemas elétricos de potência onde os sensores magneto-ópticos são aplicados à medição de correntes elétricas em sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia (SILVA, 2012). Os magnetômetros com princípio óptico se utilizam dos efeitos Cotton-Mouton, Kerr e Faraday (GAUGITSCH, et al., 1999). Tais magnetômetros, embora possuam todas as vantagens dos sensores ópticos, exploram na maioria das vezes estes efeitos tendo como guia de onda uma fibra óptica, não utilizando técnicas de óptica integrada.

A fabricação de magnetômetros em óptica integrada é vantajosa em relação a guias de onda em fibra óptica, pois com a possibilidade de obter guias de onda com dimensões reduzidas é possível obtenção de maiores sensibilidades. Como valores de campo magnético, tensão elétrica ou deformações relativamente pequenas é possível sensibilizar o sinal óptico em um guia de onda de óptica integrada (KITANO, 2000). Por isso é interessante o desenvolvimento de magnetômetros em óptica integrada ao invés de magnetômetros ópticos a fibra óptica. Há duas abordagens para magnetômetros ópticos: a primeira é utilizar o substrato sensível ao campo magnético (BARMAN, et al., 2008), a segunda é alterar as propriedades do guia a partir de algum efeito físico dependente do campo magnético. Na proposta em questão é utilizada a segunda forma.

O guia de onda é construído a partir de um substrato dielétrico com uma camada estressante de material magnético com propriedade magnetostrictiva depositado sobre o substrato. O perfil de esforço induzido termicamente a partir da deposição do filme magnético contribui para modificar o índice de refração do substrato. Este esforço induzido durante a deposição do filme é isotrópico e não controlado e ocorre devido às diferenças de coeficientes de dilatação térmica de substrato e filme magnético. Este esforço mecânico pode ser tensivo ou compressivo e ocorre devido a

diferença de coeficientes de dilatação térmica entre substrato guia e filme magnetostrictivo. Para criar um guia é necessário litografar e corroer o filme magnetostrictivo de forma a obter uma trincheira, um canal sobre o substrato. Sob a trincheira surge um perfil de esforço, imposto pelo gradiente de temperatura entre o momento da fabricação do filme magnetostrictivo e a temperatura de operação do guia, que poderá causar a diferença de índices de refração numa região do substrato capaz de promover o guiamento da luz.

No presente trabalho a geometria do guia de onda escolhida é do tipo canal, devendo-se a escolha ao grande número de aplicações com esta geometria e relativa facilidade dos processos de litografia e corrosão para abertura de canal, inclusive a geometria canal já foi utilizada em trabalhos anteriores do grupo do LSO (SATO, 2015).

Os canais são obtidos através da corrosão do material magnetoelástico, utilizando técnicas de fabricação disponíveis no Laboratório de Sistemas Integráveis (LSI) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. O material magnetoelástico é obtido através da técnica de deposição de filmes finos denominada de *sputtering* utilizando a infraestrutura do LMM do IFUSP.

A modulação da luz é realizada dinamicamente através do campo magnético aplicado ao modulador que provoca a deformação do material magnetoelástico e consequentemente induz alteração do perfil de estresse no substrato, possibilitando assim a alteração do índice de refração efetivo na região de guiamento da luz (n_2), denominada de núcleo. A figura 2 apresenta o esquemático da geometria proposta do modulador óptico tipo canal.

A estrutura tipo canal permite um alívio de esforço mecânico do material magnetostrictivo em sua borda promovendo assim um perfil de esforço no substrato na região do canal (G). Assim será possível modular a onda propagante no guia dinamicamente em função da intensidade do campo magnético externo aplicado ao modulador. Os parâmetros geométricos do modulador são determinados através de simulação multifísica por meio do software de elementos finitos COMSOL. A simulação permite obter os modos de guiamento da luz no modulador em função dos índices de refração efetivos obtidos para o perfil de esforço induzido no material do guia, a partir do esforço induzido termicamente e do campo magnético aplicado ao modulador. A simulação

permite determinar a configuração ótima do modulador quanto às suas dimensões e materiais a serem utilizados.

Figura 2 - Esquema de modulador óptico tipo canal

- $n1$ – índice de refração do substrato (casca)
- $n2$ – índice de refração modificado pelo stress mecânico
- G – Lacuna

Fonte: Autor.

Os parâmetros geométricos do modulador são determinados através de simulação multifísica por meio do software de elementos finitos COMSOL. A simulação permite obter os modos de guiamento da luz no modulador em função dos índices de refração efetivos obtidos para o perfil de esforço induzido no material do guia, a partir do esforço induzido termicamente e do campo magnético aplicado ao modulador. A simulação permite determinar a configuração ótima do modulador quanto às suas dimensões e materiais a serem utilizados.

2.1.1. Guia de onda.

Este item detalha o equacionamento e funcionamento do guia de onda que é composto por um material transparente sobre o qual é depositado o filme magnetostriectivo. Existem dois tipos básicos de guias de ondas, os unidimensionais (chamados de guias planares) e os bidimensionais (chamados de guias do tipo canal), como ilustra a figura 3.

Figura 3— Esquema de guias de onda (a) planares e (b) tipo canal.

Fonte: Autor.

O confinamento da luz guiada se dá pela diferença de índices de refração entre regiões próximas no substrato, como é detalhado a seguir. Há várias formas de se obter a diferença de índice de refração necessária para a formação de um guia. Neste trabalho utiliza-se o método de deformação estática induzida, abreviada por ISS (do inglês: *induced static strain*) no material do substrato do guia de onda, este efeito também foi estudado pelo grupo do LSO por SATO (2015) e GONÇALVES (2002). Outra técnica utilizada é a dopagem de regiões do material por difusão térmica ou implantação iônica (MARIANO, 2013).

A geometria do guia e o valor da diferença entre os índices de refração, apresentados na figura 2, são parâmetros importantes para obtenção do guia de onda.

Há métodos analíticos para análise de propagação da luz no guia tipo canal como o apresentado a seguir (KITANO, 2000).

A propagação de ondas eletromagnéticas num determinado meio pode ser descrita pelos vetores campo elétrico $\vec{E}$ e campo magnético $\vec{H}$, pela densidade de fluxo elétrico $\vec{D}$ e pela

densidade de fluxo magnético $\vec{B}$. Uma onda eletromagnética é representada pelos campos $\vec{E}$ e $\vec{H}$, que variam no tempo e no espaço ortogonalmente um ao outro.

A figura 4 apresenta uma onda com suas componentes de campo elétrico e magnético, ambos ortogonais, em função da distância.

Figura 4— Esquema de uma onda eletromagnética com seus campos transversais elétrico e magnético

Fonte: (SANTOS, 2016)

A análise dos guias de onda é realizada a partir das equações de Maxwell, no sistema de coordenadas cartesianas, impondo condições de contorno determinadas pelas paredes do guia (PISSOLATO, sd.). As equações de Maxwell em relação à variação temporal e espacial dos campos num espaço livre são definidas como:

$$\nabla \times \vec{E} + \frac{\delta \vec{B}}{\delta t} = 0 \quad (\text{Lei de Faraday}) \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \vec{H} - \frac{\delta \vec{D}}{\delta t} = \vec{J} \quad (\text{Lei de Ampere}) \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (\text{Lei de Gauss para o campo elétrico}) \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{Lei de Gauss para o campo magnético}) \quad (2.4)$$

onde:

$\vec{E}$ é a intensidade de campo elétrico (V/m)

$\vec{D}$ é a densidade de fluxo elétrico (C/m²)

$\vec{H}$ é a intensidade de campo magnético (A/m)

$\vec{B}$ é a densidade de fluxo magnético (Wb/m²)

$\vec{J}$ é a densidade de corrente elétrica (A/m²)

ρ é a densidade de carga elétrica (C/m³).

A partir das equações de Maxwell, considerando uma geometria simples de confinamento da onda, a análise das ondas pode ser realizada para uma geometria retangular com propagação da onda na direção z, na qual as condições do guia não variam nesta direção e não há perdas. Nessas condições, as ondas chamadas transversais eletromagnéticas (TEM) apresentam $E_z = H_z = 0$, sendo, portanto, $\vec{E}$ e $\vec{H}$, ambos perpendiculares ao eixo z. Assim, o campo elétrico pode ser encontrado através do gradiente transversal de uma função escalar $\Phi(x,y)$, que depende das coordenadas transversais e é uma solução da equação de Laplace em duas dimensões (FRANCO, 1999).

$$\nabla(\epsilon \nabla \Phi) = 0 \quad (2.5)$$

As ondas chamadas transversais elétricas (TE) apresentam $E_z = 0$, porém $H_z \neq 0$. Assim, para o modo TE todas as componentes são obtidas a partir da componente axial do campo magnético. As ondas magnéticas transversais (TM) têm $H_z = 0$, mas $E_z \neq 0$. Desta forma no modo TM todas as componentes podem ser obtidas através da componente axial do campo elétrico.

O modo de propagação é caracterizado pela distribuição espacial de energia que satisfaz as condições de contorno. A equação da onda para os modos de propagação transversais (TE e TM) são obtidas resolvendo as equações de Maxwell livres de fontes de correntes internas e assumindo a propagação ao longo do eixo z (RATNAJEEVAN, 1999).

Os modos ópticos dos guias dependem fundamentalmente da diferença de índices de refração entre a região de guiamento e regiões próximas e do comprimento de onda da luz que se propaga. Quando a diferença entre os índices de refração e o comprimento de onda que se propaga são ambos pequenos se comparado às dimensões do guia, temos o surgimento dos modos. Os modos ópticos podem ocorrer para valores de diferenças de índices de refração da ordem de 10^{-3} , sendo que nesses casos o modo é chamado de fracamente guiado. Já a orientação do sistema de coordenadas pode ser escolhida com campo transversal paralelo a um dos eixos (GOELL, 1969). Se o campo elétrico for paralelo ao eixo y, os modos serão representados como E_y ; e se o campo elétrico for paralelo ao eixo x, os modos serão representados como E_x . Assim sendo, a equação de Helmholtz pode ser derivada pelas equações de Maxwell. Supondo uma onda que se propaga ao longo do eixo z, em um meio dielétrico anisotrópico, não homogêneo e sem perdas, considerando que a permeabilidade magnética relativa seja $\mu_r = 1$ e o tensor permissividade relativa é definido por:

$$\varepsilon_r = \begin{bmatrix} n_x^2(x, y) & 0 & 0 \\ 0 & n_y^2(x, y) & 0 \\ 0 & 0 & n_z^2(x, y) \end{bmatrix}, \quad (2.6)$$

onde n_x , n_y e n_z são, respectivamente, os índices de refração nas direções cartesianas x, y e z.

A partir das equações de Maxwell gerais são obtidas as seguintes equações (YARIV, 1984):

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} + j\beta E_y = -j\omega\mu_0 H_x, \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial x} + j\beta E_x = +j\omega\mu_0 H_y, \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -j\omega\mu_0 H_z, \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} + j\beta H_y = +j\omega\varepsilon_0 n_x^2 E_x, \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial x} + j\beta H_x = -j\omega\varepsilon_0 n_y^2 E_y, \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = +j\omega\varepsilon_0 n_z^2 E_z, \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial x} + \frac{\partial H_y}{\partial y} = +j\beta H_z, \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial(n_x^2 E_x)}{\partial x} + \frac{\partial(n_y^2 E_y)}{\partial y} + \frac{\partial(n_z^2 E_z)}{\partial z} = 0 \quad (2.14)$$

Para determinar a equação de onda para o modo E_x , é necessário isolar H_y , E_z e H_z das equações (2.7), (2.13) e (2.8), sendo obtidas as seguintes equações:

$$H_y = \frac{\beta}{\omega\mu_0} E_x - \frac{j}{\omega\mu_0} \frac{\partial E_z}{\partial x}, \quad (2.15)$$

$$E_z = -j \frac{1}{n_z^2 \beta} \left(\frac{\partial(n_x^2 E_x)}{\partial x} + \frac{\partial(n_y^2 E_y)}{\partial y} \right), \quad (2.16)$$

$$H_z = j \frac{1}{\omega\mu_0} \left(\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \right). \quad (2.17)$$

Substituindo as equações (2.14), (2.15) e (2.16) na equação (2.9), resultando:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial E_y}{\partial x} \right) - \frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{n_z^2} \frac{\partial(n_x^2 E_x)}{\partial x} + \frac{1}{n_z^2} \frac{\partial(n_y^2 E_y)}{\partial y} \right) = -\beta^2 E_x + \omega^2 \mu_0 \varepsilon_0 n_x^2 E_x \quad (2.18)$$

Utilizando a aproximação para modos quase-TE (com $E_y = 0$) e desenvolvendo a equação (2.18), resulta a equação escalar de onda para o modo E_x .

$$n_z^2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{n_z^2} \right) \frac{\partial (n_x^2 E_x)}{\partial x} + \frac{\partial^2 (n_x^2 E_x)}{\partial x^2} + n_z^2 \frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} = n_z^2 \beta^2 E_x - k_0^2 n_x^2 n_z^2 E_x \quad (2.19)$$

onde $k_0^2 = \omega^2 \mu_0 \epsilon_0$.

Para determinar a equação de onda para modos E_y , é necessário isolar E_y , E_z e H_z das equações (2.10), (2.11) e (2.12), obtendo-se as seguintes equações:

$$E_y = \frac{1}{\omega \epsilon_0 n_y^2} \left[-\beta H_x + j \frac{\partial H_z}{\partial x} \right], \quad (2.20)$$

$$E_z = -j \frac{1}{\omega \epsilon_0 n_z^2} \left[\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right], \quad (2.21)$$

$$H_z = -\frac{j}{\beta} \left(\frac{\partial H_x}{\partial x} - \frac{\partial H_y}{\partial y} \right). \quad (2.22)$$

Substituindo a equação (2.22) na equação (2.20), resulta no modo E_y :

$$E_y = \frac{1}{\omega \epsilon_0 n_y^2} \left[-\beta H_x + \frac{1}{\beta} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial H_x}{\partial x} + \frac{\partial H_y}{\partial y} \right) \right]. \quad (2.23)$$

Igualando 2.20 e 2.23 e usando a aproximação para modos E_y , com o $H_y = 0$, resulta a equação escalar de onda para o modo E_y .

$$\frac{\partial H_x}{\partial x^2} + n_y^2 \frac{\partial^2}{\partial x} \left(\frac{1}{n_z^2} \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) - \beta^2 H_x + n_y^2 k_0^2 H_x = 0. \quad (2.24)$$

Para um caso ideal de guia de onda, geometria simples, dielétrico é possível calcular os modos E_x e E_y usando as equações (2.18) e (2.23). A solução dos modos para estas equações é denominada de analítica. Para casos complexos de guias de onda, como neste trabalho, fica inviável realizar o cálculo analítico. Nestes casos são utilizados os métodos numéricos para a obtenção dos modos de propagação do guia.

Os primeiros modelos de solução matemática para guia de onda tipo canal foram elaborados por MARCATILLI (1969). Naquele artigo é proposta uma solução analítica com muitas aproximações para um guia transversal retangular com distribuição de índice de refração tipo degrau considerando um meio isotrópico.

O método de MARCATILLI foi aprimorado para meios anisotrópicos com condição de guiamento fraco por Steinberg (1977). Em ambos os artigos a solução é obtida para guias de onda canal com alteração de índice por processo de difusão de átomos.

As primeiras soluções por método MEF datam da década de 1980, tendo como principal vantagem a não necessidade de aproximações. Na publicação de MABAYA (1981) é realizada uma análise de um guia de onda retangular anisotrópico por difusão em Niobato de Lítio.

Neste trabalho é proposto em modelamento em MEF para guias de onda do tipo canal criados por ISS a partir da deposição de um filme magnetostrictivo, o qual será apresentado na próxima seção.

2.2. Magnetostricção

A magnetostricção é uma propriedade de materiais ferromagnéticos que apresentam variação das dimensões devido a variação da magnetização (HEAPS, et al., 1932).

Nos materiais magnetoelásticos ou magnetostrictivos, a aplicação de um campo magnético externo provoca uma nova orientação dos domínios magnéticos e, conseqüentemente, causa uma variação nas dimensões do material magnético.

O fenômeno de magnetostricção foi descoberto por James Joule em 1842, quando observou a deformação de uma barra de ferro quando submetida a um campo magnético (OLABI, et al., 2008). Porém, apenas na década de 1960 iniciaram-se os estudos de materiais com propriedades de magnetostricção gigante. Na década de 1970, se descobre que adicionando terras raras ao ferro é possível obter materiais com deformação de 10.000 partes por milhão a baixas temperaturas (CLARK, et al., 2000). A evolução dos materiais magnetostrictivos com a adição de diversas terras raras permitiu obter boa propriedade magnetostrictiva mesmo a temperatura ambiente, possibilitando a obtenção de materiais comerciais como o TERFENOL D (nome originado da expressão “Térbio, Ferro, *Naval Ordinance Laboratory e Disprósio*”) que é empregado na fabricação de sensores de campo magnético, torque e posição. Estes materiais comerciais podem ser adquiridos na forma de laminados, chapas ou alvos (CALKINS, et al., 2007; GIBBS, et al., 2001).

Na década atual e na anterior, o estágio de evolução dos materiais magnetostrictivos tem permitido sua aplicação no desenvolvimento dos mais variados sensores, entre os quais se destacam os de campo magnético, posição e distância (EKREEM, et al., 2007; GILETTE, et al., 2014), como também os sensores ópticos (NAZARÉ, et al., 2014; THOMAS, et al., 2010).

Materiais magnéticos apresentam estruturas conhecidas como domínios magnéticos, regiões do material onde os momentos magnéticos dos átomos possuem a mesma orientação (CULLITY, et al., 2008). Para facilitar a compreensão do efeito de magnetostricção é conveniente, primeiramente, apresentar alguns conceitos básicos de magnetismo, como os de saturação magnética e dos eixos magnéticos difícil e fácil. A saturação magnética ocorre quando todos os domínios magnéticos estão orientados na mesma direção do campo magnético aplicado ao material. Nesta situação o processo de magnetização do material dos domínios estaciona (CARDOSO, 2011). O eixo magnético fácil representa a direção do material de mais fácil magnetização, este conceito está ligado à anisotropia magnética do material, que pode ser induzida de várias maneiras, tais como as que foram realizadas neste trabalho e são discutidas no capítulo 3. A maior parte dos

domínios magnéticos do material está orientada na direção do eixo fácil. O eixo magnético difícil representa a direção do material de difícil magnetização. Aplicando o campo magnético nesta direção o efeito magnetostrictivo é mais intenso, devido à rotação de grande parte dos domínios para se orientarem na direção do campo magnético aplicado.

Alguns autores relacionam o efeito magnetostrictivo aos conceitos de mecânica clássica e a efeitos quânticos (CLARK, et al, 2000). O fenômeno magnetoelástico também pode ser caracterizado pelo efeito inverso, ou seja, mediante a aplicação de um esforço mecânico externo que provoca a reorientação dos domínios magnéticos.

O coeficiente de magnetostricção, λ_m , é dado pela relação entre a variação de dimensão, ΔL , e a dimensão inicial do material, L_0

$$\lambda_m = \frac{\Delta L}{L_0}. \quad (2.25)$$

A figura 5 apresenta a relação entre a magnetização, M , e o coeficiente de magnetostricção, λ_m , em função de um campo magnético, $\vec{H}$, aplicado na direção do eixo duro magnético. O trabalho de Heaps (1932) apresentou pela primeira vez resultados experimentais que propõem uma dependência quadrática entre a magnetização e o coeficiente de magnetostricção do material magnético. Observa-se também que a partir do campo magnético de saturação a variação da deformação do material magnético é cessada. Os resultados de Heaps (1932) estão de acordo com o modelamento do fenômeno magnetoelástico apresentado por Lacheisserie e seus colaboradores (2004) e ilustrado na figura 5.

O fenômeno de magnetostricção pode ocorrer de forma espontânea ou induzida. Neste trabalho interessa apenas a forma induzida, como tratado por. LACHEISSERIE e seus colaboradores (2004).

A equação (2.28) relaciona o coeficiente de magnetostricção, λ_m , e o ângulo θ , formado entre a direção do campo magnético aplicado e a direção do vetor de magnetização da amostra.

$$\lambda_m = \frac{3}{2} \lambda_s (\cos \theta)^2 \quad (2.28)$$

onde λ_s é a magnetostricção para o campo magnético de saturação aplicado. Observa-se que o efeito magnetostrictivo é originado pela rotação dos domínios magnéticos, cujas direções tendem a se alinhar com a direção do campo magnético aplicado externamente à amostra.

Figura 5– Variação da magnetização e magnetostricção com variação campo magnético

Fonte: (LACHEISSERIE, et al.,2004)

A magnetização do filme ao longo do plano na direção do eixo duro pode ser definida por:

$$M = M_S \cos \theta \quad (2.29)$$

Isolando o $\cos \theta$ na equação (2.29) e substituindo-o na equação (2.28) estabelece-se uma dependência da magnetostricção com a magnetização da amostra (HARIN, et.al, 2012; HEAPS, et al., 1932).

$$\lambda = \frac{3}{2} \lambda_s \left(\frac{M}{M_S} \right)^2 \quad (2.30)$$

Porém, nas últimas décadas foi observado que esta relação quadrática entre magnetostricção e magnetização é válida apenas para certas condições especiais, ou seja, para rotação completa da magnetização do material ou para rotação das paredes de domínios em 90 graus (LACHEISSERIE,

et al., 2004). Nestes casos a equação (2.30) pode ser aceita para representar a relação entre a magnetostricção e a magnetização da amostra.

Os métodos para medição de magnetostricção podem ser classificados como diretos ou indiretos (CALKINS, et al., 2007). Dentre os métodos diretos podem ser destacados a extensometria, o capacitivo e os métodos ópticos baseados em LASER. Estes métodos normalmente não são muito estáveis e apresentam dificuldades para medições com filmes finos, onde é necessária grande precisão, pois as deformações podem ser da ordem de nanômetros ou até mesmo angstroms. Assim, para caracterizar o fenômeno magnetoelástico é proposto neste trabalho um método para determinação do coeficiente de magnetostricção a partir da medição da deflexão de amostras compostas por lâminas recobertas por filmes finos de materiais que apresentam propriedades magnetostrictivas, utilizando a técnica de microscopia AFM (SCHOENMAKER, et al., 2004).

Neste trabalho, a definição do processo de obtenção do filme magnético é decisiva para o projeto do modulador óptico desejado. Desta forma, se faz necessário definir o filme magnético a ser utilizado e mensurar a deformação do mesmo em função de campos magnéticos aplicados. Este estudo foi realizado, sendo seus resultados apresentados no capítulo 4.

2.3. Efeito elasto-óptico.

O efeito elasto-óptico num material relaciona o acoplamento entre uma deformação mecânica, que altera a estrutura cristalina do material, e a variação do índice de refração do material.

No modulador projetado neste trabalho o efeito elasto-óptico está ligado à tensão mecânica a qual o substrato é submetido na região do canal óptico, que promove tanto a formação do guia óptico quanto a modulação da luz.

Para a formação do guia, uma vez que o substrato óptico o filme magnetostrictivo possuem diferentes coeficientes de expansão térmica, aparecem tensões mecânicas residuais entre eles

devido à diferença de temperatura imposta durante o processo de fabricação e a ambiente. Estas tensões mecânicas formarão um perfil de tensão, que poderá causar uma modificação do índice de refração do material suficiente para promover o guiamento da luz.

Para a modulação, considera-se que material do substrato óptico sofre um esforço adicional devido à deformação do filme de material magnetostrictivo provocada por um campo magnético externamente aplicado.

Para apresentação do cálculo do efeito elasto-óptico faz-se necessário introduzir os conceitos de tensão mecânica e deformação, bem como a relação entre os dois. O esforço mecânico, σ , é definido como a intensidade de força aplicada por unidade de área. A deformação é dada pela relação entre variação nas dimensões do material e sua dimensão original antes da deformação. No caso de filmes finos, tratado neste trabalho, têm-se o estado de tensão plana e a deformação plana, sendo ambos nulos os vetores de deformação e tensão perpendiculares à superfície (MEYERS, et al., 2009).

A relação entre o esforço mecânico e a deformação em materiais isotrópicos, sem tensão inicial, é dada por (KOSHIBA, et al., 1992):

$$\sigma = D(S - \alpha \Delta T) \quad (2.31)$$

onde σ é a tensão mecânica, S é a deformação, α é o coeficiente de expansão térmica e ΔT é a variação de temperatura. D e S são representados matricialmente por tensores de 3 linhas e 3 colunas.

Dependendo do deslocamento global, a deformação pode ser representada na forma de deformação normal (*normal strain*) para os índices (1, 2 e 3) e na forma de tensor de cisalhamento (*shear tensor*) para os índices (4, 5 e 6). Os componentes de deformação normal e os componentes do tensor de cisalhamento vêm do deslocamento global, definido em um sistema de coordenadas cartesianas x , y e z como:

deformação normal,

$$\left\{ S_1 = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad S_2 = \frac{\partial v}{\partial y} \quad e \quad S_3 = \frac{\partial w}{\partial z} \right. \quad (2.32)$$

tensor de cisalhamento,

$$\left\{ S_4 = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right), \quad S_5 = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad e \quad S_6 = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right. \quad (2.33)$$

A condição de deformação plana prevalece em geometrias cujas extensões são grandes num par de direções comparadas com a dimensão na direção transversal, situação própria de um material fino. Assim, pode-se assumir que S_3 , S_4 e S_5 são zero.

O efeito fotoelástico em materiais acopla a deformação mecânica à variação do índice de refração óptico. Este efeito pode ser descrito por (YARIV, 1984):

$$\Delta \eta_{ij} = \Delta \left(\frac{1}{n^2} \right)_{ij} = p_{ijkl} S_{kl} \quad (2.34)$$

sendo: $i, j, k, l = 1, 2, \dots, 6$,

onde: $\Delta \eta_{ij}$ ou $\Delta (1/n^2)_{ij}$ é a mudança na impermeabilidade óptica, S_{kl} é o tensor de deformação e p_{ijkl} são os coeficientes do tensor elasto-óptico (*strain-optic tensor*).

Na equação (2.34), os termos de ordem mais elevada do tensor de deformação são desprezados porque os mesmos são usualmente pequenos comparados com os termos lineares (tipicamente $S_{kl} \sim 10^{-5}$).

O elipsoide de índices de refração de um cristal afetado por um campo de deformações pode ser dado por:

$$\left(\eta_{ij} + p_{ijkl} S_{kl} \right) x_i x_j = 1 \quad (2.35)$$

O elipsoide de índices, representado matematicamente na equação (2.35), permite descrever as propriedades ópticas de um cristal (MARTINS, 2006). A geometria do elipsóide de índices apresenta a variação dos índices de refração ao longo dos eixos x, y e z.

Quando o tensor de deformação é nulo ($S_{kl} = 0$), o elipsoide de índices de refração se reduz a:

$$\frac{x^2}{n_x^2} + \frac{y^2}{n_y^2} + \frac{z^2}{n_z^2} = 1 \quad (2.36)$$

Sendo ambos os tensores S_{kl} e n_{ij} simétricos, os índices i e j, como também k e l, da equação (2.34) podem ser permutados. A permutação simétrica do tensor p_{ijkl} é idêntica à utilizada no caso do tensor eletro-óptico quadrático (S_{ijkl}) (YARIV et al., 1984). É, portanto, conveniente usar a forma contraída dos índices para abreviar a notação. Nesse caso, a equação (2.34) pode ser reescrita como:

$$\Delta \left(\frac{1}{n^2} \right)_i = p_{ij} S_j \quad (2.37)$$

onde i, j = 1, 2, ..., 6 e S_j são as componentes de deformação. A equação do elipsoide de índices afetado por um campo de deformações pode ser descrita como:

$$\begin{aligned}
& x^2 \left(\frac{1}{n_x^2} + p_{11}S_1 + p_{12}S_2 + p_{13}S_3 + p_{14}S_4 + p_{15}S_5 + p_{16}S_6 \right) \\
& + y^2 \left(\frac{1}{n_y^2} + p_{21}S_1 + p_{22}S_2 + p_{23}S_3 + p_{24}S_4 + p_{25}S_5 + p_{26}S_6 \right) \\
& + z^2 \left(\frac{1}{n_z^2} + p_{31}S_1 + p_{32}S_2 + p_{33}S_3 + p_{34}S_4 + p_{35}S_5 + p_{36}S_6 \right) \\
& + 2yz(p_{41}S_1 + p_{42}S_2 + p_{43}S_3 + p_{44}S_4 + p_{45}S_5 + p_{46}S_6) \\
& + 2zx(p_{51}S_1 + p_{52}S_2 + p_{53}S_3 + p_{54}S_4 + p_{55}S_5 + p_{56}S_6) \\
& + 2xy(p_{61}S_1 + p_{62}S_2 + p_{63}S_3 + p_{64}S_4 + p_{65}S_5 + p_{66}S_6) = 1
\end{aligned} \tag{2.38}$$

onde:

n_x , n_y e n_z são os índices de refração nas respectivas direções x,y e z.

O campo de deformação altera as dimensões e também as orientações da equação do elipsoide de índices. A alteração do elipsoide de índices é dependente da aplicação do campo de deformação e dos coeficientes, p_{ij} , de acordo com a equação (2.38). Os elementos não nulos de tensor óptico, p_{ij} , são definidos pela simetria do cristal.

Diversos materiais são utilizados como substrato para obtenção de guias de onda, tais como o Niobato de Lítio (LiNbO_3), vidros (DAVINSON, 2013) e o próprio silício. O silício é um dos principais materiais utilizados em microeletrônica e possui processos de fabricação de óptica integrada relativamente estabelecidos. O silício possui parâmetros bem conhecidos o que facilita as modelagens e simulações e possui baixo custo se comparado ao LiNbO_3 (SIARKOWSKI, 2007). Trabalhos anteriores como SIARKOWSKI (2007) utilizam o silício como substrato para fabricação de guias de onda, por estes fatores o silício é um candidato natural como substrato para fabricação do modulador óptico proposto neste trabalho.

Conforme discutido anteriormente, o tensor de deformação para o caso plano pode ser escrito como:

$$S = \begin{bmatrix} sS_1 & S_2 & 0 \\ S_2 & S_6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{2.39}$$

Assim, por exemplo, sendo o material escolhido para o substrato do guia o BGO (do Inglês *Bismuth Germanium Oxide*), Óxido de Germato de Bismuto, um cristal de retículo cúbico, o elipsoide de índices pode ser escrito em função de seus coeficientes elasto-ópticos como sendo. Aplicando a equação 2.36 e considerando o substrato óptico utilizado, o cristal cúbico de BGO, pode-se escrever a equação do efeito elasto-óptico na forma de matrizes a seguir:

$$\begin{array}{ccccccc}
 \Delta \frac{1}{n_x^2} & p_{11} & p_{12} & p_{21} & 0 & 0 & 0 & S_1 \\
 \Delta \frac{1}{n_y^2} & p_{21} & p_{11} & p_{12} & 0 & 0 & 0 & S_2 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \Delta \frac{1}{n_{xy}^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{44} & S_6
 \end{array} = \quad * \quad (2.40)$$

As razões para escolha do BGO como substrato óptico serão apresentadas ao longo do texto. Os valores zero apresentados na matriz são os coeficientes elasto-ópticos não existentes para o BGO.

A equação da elipsoide de índices descrevendo o efeito elasto-óptico pode ser escrita:

$$x^2 \left(\frac{1}{n_{BGO}^2} + p_{11}S_1 + p_{12}S_2 \right) + y^2 \left(\frac{1}{n_{BGO}^2} + p_{21}S_2 + p_{11}S_1 \right) + 2xyp_{44}S_6 = 1 \quad (2.41)$$

Sendo XY o único termo cruzado, nova diagonal dos eixos principais é obtida pela rotação do antigo eixo principal em torno do eixo z. O índice de refração principal n_z não muda, enquanto os índices de refração n_x e n_y são dados por:

$$n_x = n_{BGO} - 0,5n_{BGO}^3(p_{11}BGO + p_{21}BGO)S_1 - 0,5n_{BGO}^3(p_{12}BGO + p_{11}BGO)S_2 + 0,5n_{BGO}^3(p_{44}BGO)S_6 \tan(2\theta) \quad (2.42)$$

$$n_Y = n_{BGO} - 0,5n_{BGO}^3(p_{11BGO} + p_{21BGO})S_1 - 0,5n_{BGO}^3(p_{12BGO} + p_{11BGO})S_2 - 0,5n_{BGO}^3(p_{44BGO})S_6 \tan(2\theta) \quad (2.43)$$

Sendo a $\tan(2\theta)$ dada pela expressão (YARIV, 1984):

$$\tan 2\theta = \frac{2p_{44} S_6}{(p_{11}-p_{21})S_1+(p_{21}-p_{11})S_2} \quad (2.44)$$

A solução das equações (2.41) e (2.42) que descreve o efeito elasto-óptico num substrato de retículo cúbico do modulador, será encontrada através de simulações numéricas utilizando o MEF.

2.4. Óptica integrada

O conceito de óptica integrada está relacionado à utilização das tecnologias de filmes finos e de microfabricação de componentes eletrônicos integrados para caracterização e desenvolvimento de sistemas de guias de onda ópticos em pequenas dimensões.

Na década de 1960, os lasers surgem como os principais candidatos a fontes de luz estável e coerente, e consequentemente os primeiros sistemas de processamento de sinais ópticos. Porém, neste primeiro momento os sistemas de processamento de sinais ópticos eram relativamente volumosos, pois eram compostos por lentes, prismas, espelhos, etc. O funcionamento destes sistemas era extremamente dependentes das condições ambientais a que estavam submetidos, os feixes de luz sofriam interferências do meio. Neste cenário de evolução dos dispositivos ópticos surgem as necessidades de miniaturização e de implementação de funções mais complexas. Com aplicação de conceitos de óptica integrada é possível a fabricação de dispositivos com componentes ópticos e eletrônicos compondo um único circuito integrado (*chip*).

Os dispositivos ópticos integrados têm sido aplicados em duas grandes áreas, uma relacionada com as telecomunicações, como moduladores, chaves, multiplexadores, etc., e a outra relacionada ao sensoriamento, como interferômetros, sensores de corrente, de absorção, magnetômetros, etc.

Recentemente técnicas de fabricação CMOS (*Complementary Oxide Metal Semiconductor*) têm sido aplicadas com sucesso na fabricação de moduladores ópticos com dimensões relativamente pequenas e com características relevantes para aplicações como sensores ou em telecomunicações (XU, et al., 2005; LIAO, et al., 2005). Outro fator que impulsionou a óptica integrada foi a evolução da fabricação das fibras ópticas e sua utilização como o meio físico mais eficaz e difundido para transmissão de dados no mundo.

Os guias de onda são componentes fundamentais nos dispositivos ópticos como os moduladores, interferômetros, acopladores, etc. Várias técnicas de fabricação têm sido desenvolvidas para obter os guias de onda, dentre estas se destaca a implantação de dopantes no substrato para promover a mudança de índice de refração. Os dopantes são introduzidos no substrato utilizando técnicas de microeletrônica conhecidas como implantação iônica e difusão térmica. Estas técnicas tem um custo relativamente elevado e apresentam difícil controle sobre parâmetros importantes no guia fabricado, tais como dimensões e índice de refração. HUNSPERGER (2009) apresenta as várias dificuldades encontradas para obtenção de guias de onda pela introdução de dopantes em cristais de retículo cúbico como o BGO. Neste contexto, este trabalho e outros do grupo do LSO (SATO, 2015; GONÇALVES, 2002) estudam a utilização da técnica ISS. Esta técnica baseia-se na alteração do índice de refração pelo esforço mecânico provocado pela diferença de coeficiente de expansão térmica de dois materiais. Os processos de fabricação de microeletrônica para deposição de filmes finos ocorrem em temperatura diferente da temperatura de operação dos dispositivos, que comumente é a temperatura ambiente. A diferença de temperatura faz com que o filme e o substrato deformem, provocando alterações na estrutura cristalina do substrato e em seu índice de refração via efeito elasto-óptico, detalhado mais adiante.

O processo de deposição de CVD (*chemical vapor deposition*) para obtenção de filmes de nitreto de silício sobre substratos de BGO utilizados no trabalho de (SATO, 2015) ocorria a temperatura de aproximadamente 700 °C, o que provocava a deformação do filme e

consequentemente um perfil de esforço no substrato de BGO, ocasionando uma modificação do perfil de índices de refração suficiente para formação do guia de onda. No trabalho de (GONÇALVEZ, 2002) são depositados filmes de óxido de silício sobre substratos de niobato de lítio (LiNbO₃).

Em ambos os trabalhos o tempo para obtenção dos filmes e a qualidade dos filmes obtidos foram problemas para continuidade na utilização daqueles processos e materiais. Além disso, os guias possuíam perfil de esforço, e, portanto, de índices, estático, ou seja, não era possível modularlos dinamicamente.

Neste trabalho o guia de onda será obtido pela técnica ISS utilizando o processo de fabricação por *sputtering* que será detalhado no item 3.1.

2.5. Método dos Elementos Finitos (MEF)

O MEF foi escolhido como método de cálculo para modelagem e simulação do modulador óptico proposto com modulação por magnetostricção. A solução por MEF é utilizada para vários problemas físicos macroscópicos tanto na academia como na indústria. As simulações MEF permitem eliminar etapas de testes e fabricação reduzindo custos na produção de protótipos. Uma vez que, é necessário apenas simular para obter parâmetros de operação do dispositivo em função de sua geometria, materiais ou condições de operação. A esta abordagem de projeto e simulação, adotada neste trabalho, é dado o nome de *Computer Aided Design* (CAD) baseado em MEF.

A aplicação do MEF consiste em dividir a geometria da estrutura que se deseja modelar em elementos triangulares em dimensões 2D ou 3D. Na modelagem utilizada nas simulações deste trabalho é aplicada uma malha 2D. A malha é composta pelos elementos triangulares e estes são representados por nós que representam seus vértices. A partir da malha se constrói um sistema de equações relativo ao efeito físico que se deseja calcular, a partir das condições de contorno através das equações pelo MEF se calcula a variação do efeito físico desejado em função da geometria da estrutura.

Dentre vários estudos para obtenção dos modos de propagação em guias de onda tipo canal por MEF se destaca o trabalho de FRANCO (1999). Análogo ao presente trabalho, FRANCO

modela a propagação de ondas TEM, ou seja, na direção z , assim, a distribuição de energia do modo se dá em 2D.

Maior detalhe a respeito sobre a teoria do método dos elementos finitos aplicada a solução de problemas de guias de onda pode ser encontrado no trabalho de Franco (1999).

3. MATERIAIS E MÉTODOS.

A metodologia do trabalho consiste essencialmente na modelagem do modulador óptico por meio de simulações realizadas através do software de simulação multifísica baseado no MEF e o auxílio iterativo das simulações ao projeto e processo de fabricação do modulador tipo canal proposto. Os ensaios de caracterização do modulador poderão servir para os ajustes dos modelos matemáticos implementados no software com solução por MEF. Desta forma, o trabalho se desenvolveu em duas frentes, uma na simulação e implementação dos modelos multifísicos (térmico, mecânico, eletromagnético e óptico) e outra focada na parte experimental, que envolve a escolha e caracterização dos materiais, definição dos processos de fabricação e caracterização do modulador óptico. As duas frentes do trabalho são dependentes, paralelas e auxiliaram uma à outra durante o curso do trabalho.

A parte experimental do trabalho se iniciou com a fabricação, caracterização magnética e medição da magnetostricção dos filmes magnetostrictivos obtidos a partir de materiais e processos de fabricação disponíveis. Esta etapa permitiu definir os melhores materiais e parâmetros para o processo de fabricação do filme, bem como uma metodologia para sua caracterização. Foram produzidas amostras depositando material com propriedade magnetostrictiva sobre lâminas inteiras de silício. Destas lâminas foram medidas as tensões mecânicas residuais antes e depois do tratamento térmico de preparação das amostras. O objetivo inicial da aplicação deste tratamento térmico foi a indução de anisotropia magnética no filme magnetostrictivo. Detalhes deste tratamento térmico serão discutidos e apresentados adiante. Os resultados obtidos nas medições de esforço mecânico das amostras com filme magnetostrictivo após tratamento térmico serviram para comprovar a efetividade das simulações mecânicas.

Após a fabricação dos filmes, foi iniciada a modelagem para simulações por MEF para determinação do esforço mecânico residual provocado pela diferença de coeficientes de expansão térmica do filme e do substrato, a qual propicia uma tensão mecânica residual que é imposta devido à diferença entre as temperaturas de deposição dos filmes e a temperatura ambiente. O objetivo inicial das simulações foi verificar a existência ou não de modos ópticos gerados a partir do perfil de esforços mecânicos residuais na região do canal sem aplicação de campo magnético.

Após verificar os modos de guiamento da luz, sem aplicação de campo magnético, foi simulada a aplicação de campos magnéticos ao modulador. Nesta etapa foi elaborado o modelo para cálculo da magnetostricção e foram verificados os modos de propagação em função dos campos magnéticos externos. As simulações permitiram verificar o comportamento do dispositivo para diferentes dimensões e as condições de modulação em função dos campos magnéticos aplicados. De posse destes parâmetros poderá ser fabricado e caracterizado experimentalmente o modulador em óptica integrada tipo canal. Esta caracterização possibilitará levantar a curva de resposta em função de campos magnéticos externos. A caracterização experimental auxiliará de forma iterativa o ajuste do modelo multifísico, envolvendo as soluções mecânica, eletromagnética, térmica e óptica, elaboradas através do software baseado no MEF.

3.1. Fabricação e caracterização dos filmes magnetostrictivos

Este item apresenta a fabricação e caracterização dos filmes de materiais magnetostrictivos empregados para construção do modulador óptico.

A etapa inicial deste processo consistiu em determinar os parâmetros de fabricação (LACHESSEIRE, et al., 2004; DUC, et al., 2000) e caracterizar o fenômeno magnetostrictivo em cada material candidato. O primeiro passo desta etapa foi a definição dos materiais magnéticos com propriedade magnetostrictiva para fabricação do filme. O grupo de pesquisa do LMM do IFUSP já possuía os insumos necessários e o processo de fabricação relativamente estabelecido para fabricação de filmes magnéticos.

De posse dos alvos disponíveis foram depositados, através da técnica de *sputtering*, filmes de $Tb_{25}Fe_{75}$ e $Tb_{23}Co_{77}$. Os filmes foram caracterizados quanto à sua composição e estequiometria através da técnica de *Rutherford Backscattering Spectrometry* (RBS) no Laboratório de Análises de Materiais por Feixes Iônicos (LAMFI) do IFUSP.

As curvas de histerese magnética das amostras produzidas foram levantadas utilizando o equipamento *Vibrating Sample Magnetometer* (VSM). Também foram medidos os comportamentos da magnetização dos filmes em função da temperatura através do *Superconducting Quantum Interference Device* (SQUID). Para verificação da temperatura de

compensação magnética e da temperatura de Curie foi necessário levantar as curvas do momento magnético das amostras variando a temperatura.

Finalmente, foi medida a magnetostricção dos filmes através da técnica de *Atomic Force Microscopy* (AFM), utilizando um equipamento disponível do LMM do IFUSP. O equipamento do LMM possibilita através de uma bobina a aplicação de campos magnéticos controlados durante a medida topográfica. Os métodos tradicionais apresentam dificuldades para medição de magnetostricção em filmes finos devido à pequena espessura dos filmes e ao valor dos deslocamentos dos filmes, que é da ordem de nanômetros. Para medição de magnetostricção em filmes finos são necessárias altas sensibilidade e estabilidade. A técnica de AFM é utilizada em diversas áreas da nanociência devido às suas características de simplicidade, alta resolução e sensibilidade. Assim, no item 4.1 são apresentados os resultados da determinação do coeficiente de magnetostricção através da medição de deslocamento vertical da amostra através do AFM.

3.1.1. Técnica física de deposição de filmes finos por *Sputtering*

Os filmes magnetostrictivos foram fabricados utilizando o equipamento de deposição de filmes finos *magnetron sputtering* instalado no LMM do IFUSP.

A figura 6 apresenta o sistema ATC 2000 da AJA INTERNATIONAL utilizado.

Figura 6– Equipamento *sputtering* utilizado

Fonte: Autor

O sistema retratado na figura 6 possui quatro canhões de deposição, uma pré-câmara e uma câmara principal. A pré-câmara permite trocar os substratos que ingressam na câmara principal para deposição, a qual consiste em uma câmara de alto vácuo de 90 litros, com pressão de base de 10^{-7} mtorr, onde é introduzido um gás inerte com pressão de, tipicamente, 10^{-3} mtorr.

O processo de fabricação de filmes finos por *sputtering* baseia-se puramente no princípio físico de acelerar átomos de um material alvo em direção à superfície de um substrato. Os átomos ejetados do alvo, por transferência de momento, são depositados sobre a superfície do substrato formando o filme desejado. O controle da taxa de deposição sobre a superfície do substrato se dá pelo controle desta transferência de momento aos átomos do alvo. Este controle ocorre através de fatores como: energia e massa dos átomos incidentes sobre o alvo, ângulo de incidência dos átomos que incidem no alvo, pressão na câmara e potencial elétrico aplicado ao alvo. Os átomos acelerados na direção do alvo, responsáveis pela transferência de momento aos átomos do mesmo, são em

geral gases inertes, como argônio e nitrogênio, a baixas pressões. A ionização do gás inerte ocorre através de uma diferença de potencial (ddp) fornecida por eletrodos na região da câmara onde o gás está presente. Esta ddp pode ser aplicada através de uma fonte de tensão de corrente contínua (CC) ou, no caso de deposição de materiais isolantes, por uma fonte de rádio frequência (RF). Os elétrons acelerados entre os eletrodos produzem íons do gás em quantidade proporcional à ddp aplicada. A incidência dos íons do gás sobre o alvo produz o *sputtering* de seus átomos. As baixas pressões no interior da câmara, controladas adequadamente para garantir sua estabilidade, possibilitam obter um plasma estável. Nestas condições o livre caminho médio dos átomos e íons ejetados do alvo é menor do que a distância entre o catodo e o anodo nos quais é aplicada a diferença de potencial (DEPLA, et al, 2008).

As taxas de deposição, essencialmente, dependem da pressão do gás inerte e de uma grandeza chamada de *sputtering yield*, que representa a facilidade de um dado material ser removido para um determinado sistema.

O sistema *magnetron sputtering* utilizado possui ímãs instalados nos catodos para confinar o plasma próximo aos alvos. Isto permite maiores taxas de deposição e maior controle sobre a espessura e a aderência dos filmes produzidos (LANDI, 2009).

O processo de deposição foi realizado a baixa temperatura com resfriamento por nitrogênio líquido. O resfriamento tem o intuito de obter filmes com propriedade amorfa. Foram utilizados quatro alvos diferentes durante a deposição: Tb, Co, Fe, Si_3N_4 . Os filmes de $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$ e $\text{Tb}_{25}\text{Fe}_{75}$ foram obtidos através de codeposição com potencial CC. Após a obtenção do filme magnetostrictivo é depositada, utilizando à fonte RF, a camada de Si_3N_4 que tem função de proteção, pois os filmes de terras raras têm por característica a fácil oxidação em contato com atmosfera. O gás inerte utilizado durante os processos foi o Argônio. Outros parâmetros de processo são detalhados no item dedicado à preparação das amostras.

3.1.2. Magnetômetro de amostra vibrante (VSM)

O magnetômetro de amostra vibrante *VSM PAR Model 4500* utilizado está instalado no LMM do IFUSP. Este equipamento permite levantar as curvas de histerese magnética, M versus H , de amostras magnéticas. O equipamento faz a amostra vibrar numa certa frequência enquanto é induzida uma tensão alternada (CA) a uma bobina de detecção. A amostra é posicionada na extremidade de uma haste rígida e um campo magnético pode ser aplicado na direção transversal ou longitudinal à amostra. A outra extremidade da haste metálica é fixada a um motor com um sistema de polias e engrenagens. Este sistema permite a movimentação da amostra para seu melhor posicionamento central na bobina de detecção. O VSM detecta através das bobinas um campo CA originado pela vibração da amostra a partir do campo magnético aplicado.

A detecção síncrona da magnetização da amostra é amplificada por um amplificador *lock-in*. Este equipamento tem a função de detectar sinais na presença de ruídos e permite a amplificação de sinais de baixa amplitude em diversas frequências. A sensibilidade do VSM é da ordem de 10^{-5} emu (unidade de momento de dipolo magnético).

Resumidamente, o VSM faz uma amostra com momento magnético m vibrar ao longo de um eixo com uma frequência angular e uma certa amplitude de vibração, isto produzirá uma tensão CA proporcional ao deslocamento, detectada na bobina do equipamento (SAMPAIO, et al, 2009).

3.1.3. Magnetômetro SQUID

O sistema de interferência quântica, denominado de SQUID, utilizado foi o *Quantum Design*, modelo MPMS, pertencente ao LMM do IFUSP. O sistema SQUID permite medir variações de fluxo magnético da ordem de 10^{-9} emu. O princípio de funcionamento do magnetômetro SQUID baseia-se na junção Josephson. Este efeito é descrito pela corrente elétrica crítica na qual uma barreira de potencial é vencida para que um material deixe de se comportar como um supercondutor (SAMPAIO, et al, 2009). Para uma corrente superior à corrente crítica o material deixa de se comportar como um supercondutor, ou seja, sua resistência elétrica torna-se maior que zero, o que permite detectar uma tensão não nula sobre este material. A corrente crítica é função do fluxo magnético aplicado e, assim, a medida da variação da corrente crítica permite a medida da variação de fluxo magnético com alta resolução.

Esse tipo de magnetômetro supercondutor é composto por três partes:

- Um sistema preciso de controle de temperatura, que permite submeter a amostra magnética a temperaturas entre 2 K e 400 K;
- Um ímã, que permite aplicar à amostra campos magnéticos altamente estáveis entre -70 kOe e 70 kOe;
- O sistema de detecção SQUID, composto pelas bobinas de detecção, a eletrônica de amplificação de sinal, os filtros de ruído e o sensor SQUID.

Neste trabalho o objetivo da medida no SQUID foi verificar o comportamento da magnetização dos filmes com a variação de temperatura, cujos resultados são discutidos no item 4.1.

A tese de Yonamine (2000) do LMM apresenta maiores detalhes a respeito do SQUID.

3.1.4. Técnica de microscopia atômica de varredura AFM

O objetivo essencial da técnica de AFM é a obtenção de imagens topográficas sem a necessidade de a amostra estar em vácuo, como ocorre nas técnicas de microscopia eletrônica de varredura (*Scanning Electronic Microscopy* - SEM) e microscopia eletrônica de transmissão (*Transmission Microscopy* - TEM).

O equipamento utilizado para as medidas pode operar não apenas como um AFM, mas também em dois outros modos: *Scanning Near Field Optical Microscope* (SNOM) (MAXIMINO, 2011; POJAR, 2008) e *MO-Magneto-Optical SNOM* (MO-SNOM) (SCHOENMAKER, 2004).

O princípio de funcionamento de um AFM está baseado em medir forças ou interações entre uma ponteira e a superfície de uma amostra fixa. O equipamento AFM utilizado neste trabalho faz parte de um *home made* SNOM operando em modo *shear-force* e detecção de vibração da ponta de sondagem (*tuning fork*) (MAXIMINO, 2011). A ponta de sondagem do equipamento utilizado

é uma fibra óptica afinada através de um ataque químico, que permite realizar medidas opto-magnéticas. Neste trabalho, inicialmente, a ponta foi usada como sonda de um AFM tradicional. Todo o equipamento é conectado à unidade de controle digital modelo Dulcinea da fabricante Nanotec e todo o *setup* é controlado pelo software WSxM (HORCAS, et al., 2007) da mesma fabricante, que é executado num computador conectado à unidade de controle. O cabeçote do AFM possui um bloco metálico onde é fixado um diapasão (*tuning fork*) de frequência de ressonância igual a 32768 Hz. A figura 7 apresenta um esquemático do equipamento de AFM utilizado.

Figura 7 – Esquema de funcionamento do MO-SNOM

Fonte: (SCHOENMAKER, 2004).

Para realizar as medidas de deflexão da amostra devido ao efeito de magnetostricção foi preparado um novo porta amostra diferente do tradicionalmente utilizado nas medidas de AFM no equipamento. O objetivo do novo porta amostra construído é permitir o engaste de uma extremidade da amostra deixando a outra extremidade livre para defletir.

A figura 8 apresenta uma foto do *setup* de medida do AFM com porta amostra, amostra e ponta de sondagem. Observa-se que uma extremidade da amostra fica livre permitindo o balanço da mesma para deformações provocadas a partir de campos magnéticos aplicados por uma bobina, comandada por software, instalada no equipamento.

Figura 8 – Medida de deformação de amostra no AFM.

Fonte: Autor

O *setup* do AFM é composto por uma fibra óptica colada a um diapasão e o conjunto diapasão e ponta são excitados mecanicamente por um cristal piezoelétrico. O sinal elétrico devido à vibração do diapasão é detectado e amplificado por um equipamento *lock-in* e sua amplitude está relacionada à topografia da amostra. A ponta do AFM, constituída pela fibra óptica, é posicionada próxima à superfície do filme magnético na extremidade livre da amostra. Através de uma bobina controlada via software é aplicado um campo magnético paralelamente ao plano do filme. Através de um sistema de controle em malha fechada, a distância entre amostra e ponta de sondagem é mantida constante. Assim, é regulada a interação entre amostra e ponta. A tensão elétrica necessária

para manter a ponta a uma distância fixa da amostra é proporcional à medida de deflexão da amostra fornecida por este *setup*.

Nas medidas realizadas, a deformação do filme magnetostrictivo promove a deflexão da amostra e a ponta do AFM identifica esta deflexão.

3.1.5. Preparação das amostras para determinação da magnetostricção

Os filmes de $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$ e $\text{Tb}_{25}\text{Fe}_{75}$ foram produzidos através da técnica de deposição *magneto sputtering* (LANDI, 2009) a partir de alvos puros. Os filmes foram depositados sobre substrato de silício <100> com dimensões transversais de 1 cm x 1 cm e com espessura de 400 μm . Para obter um estado amorfo dos filmes depositados o substrato foi resfriado utilizando-se nitrogênio líquido. A temperatura estimada da amostra durante o processo de deposição é de aproximadamente 78 K.

O filme de $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$ foi fabricado com 25 W de potência para alvo de Tb e 100 W para Co. O processo teve duração de 12 minutos sob pressão de 5 mTorr. O filme de $\text{Tb}_{25}\text{Fe}_{75}$ foi produzido com mesma pressão de processo e mesmo tempo, com potência de 25 W para Tb e 100 W para alvo de Fe. Para evitar a oxidação dos filmes magnéticos foi depositada também por *sputtering* uma camada de proteção de Si_3N_4 com espessura de 2 nm. Através da técnica de RBS foi determinada a espessura e a estequiometria dos dois filmes fabricados. Tanto o filme de $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$ quanto o filme de $\text{Tb}_{25}\text{Fe}_{75}$ apresentaram espessuras de aproximadamente 50 nm, de acordo com os parâmetros de processo definido.

No intuito de induzir uma direção preferencial dos domínios no plano do filme magnético das amostras foi realizado um tratamento termomagnético. Durante o tratamento termomagnético foi aplicado um campo magnético de 5 kOe, paralelo ao plano de cada amostra, através de um ímã permanente. A amostra é submetida ao campo magnético em vácuo de 10^{-8} Torr. O objetivo do tratamento é induzir uma anisotropia uniaxial no plano do filme. A rampa térmica do tratamento foi realizada a 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$, da temperatura ambiente até 350 $^{\circ}\text{C}$. Ao atingir esta temperatura é mantido um patamar por 1 h e, após o patamar, a amostra resfria controladamente a uma taxa 1

°C/min até a temperatura ambiente. A indução de anisotropia magnética se dá pela aplicação do campo magnético. A escolha da temperatura de 350 °C se deveu ao fato de que se esperava inicialmente que esta temperatura fosse distante da temperatura de Curie dos filmes magnéticos fabricados.

A figura 9 apresenta o *setup* utilizado no tratamento termomagnético para indução de anisotropia, composto por forno com controle de temperatura, bombas de vácuo, imã permanente e uma fonte de tensão.

Figura 9 – Sistema para tratamento termomagnético

Fonte: Autor

3.2. Procedimento para medição de deslocamento vertical da amostra por AFM e cálculo do efeito de magnetostricção (λ_m)

Para realização da medição de deslocamento a amostra pode ser colada no porta-amostra tanto na direção de seu eixo magnético fácil quanto de seu eixo magnético difícil, sendo que a direção do eixo fácil da amostra é definida no tratamento térmico.

Aplicando o campo magnético na direção do eixo magnético difícil da amostra, temos a rotação dos domínios magnéticos e seu alinhamento de acordo com o campo aplicado. Quando isto ocorre, maximizam-se o efeito de magnetostricção e o deslocamento vertical (D) da amostra. O intuito do tratamento térmico é induzir uma anisotropia uniaxial para obtenção da máxima deformação ao ser aplicado campo magnético na direção do eixo difícil.

A figura 10 apresenta o esquema para medição do deslocamento vertical da amostra e os parâmetros L e D, necessários para o cálculo de magnetostricção.

Figura 10– esquema e parâmetros de medição da magnetostricção

Fonte: Autor.

Na figura 10, o deslocamento vertical da amostra (D) é obtido através da medida topográfica fornecida pela técnica de AFM, o parâmetro L representa a distância do ponto de engastamento da amostra até o ponto onde a sonda do AFM está posicionada para medida. A amostra é posicionada no porta-amostra através de um adesivo dupla-face.

O coeficiente de magnetostricção, λ_m , pode ser obtido através da equação (HARIN, et al.,2012), a seguir.

$$\lambda_m = \frac{D T_S^2 \xi_S / (1 + \frac{L}{L+W} \nu_S)}{3 T_F L^2 \xi_F / (1 + \nu_F)} \quad (3.1)$$

onde W representa a largura da amostra, ξ é o módulo de Young, ν é a razão de Poisson, T é a espessura, e os índices S e F representam respectivamente o substrato e o filme magnético.

Esta etapa do trabalho permitiu elaborar uma metodologia para preparação de amostras, bem como um procedimento para medição direta do efeito de magnetostricção utilizando a técnica de AFM. Os resultados foram apresentados em trabalho publicado pelo autor (LIMA, et al., 2015).

3.3. Medidas de esforço mecânico dos filmes magnetostrictivos

Foram fabricadas novas amostras para medição da tensão mecânica do conjunto filme magnético e substrato. A necessidade da fabricação de novas amostras se deve ao fato de que só é possível realizar a medida de esforço mecânico de filmes sobre lâminas de silício inteiras. As amostras do item 3.1 eram quadradas com 1 cm x 1 cm. Desta forma foi necessária a fabricação de novas amostras de lâminas de silício sobre as quais foram depositados os filmes de Tb₂₃Co₇₇ e nitreto de silício, este último para proteção, utilizando os mesmos parâmetros de processo de fabricação do item 3.1, com exceção do tempo de deposição. Foram fabricadas quatro amostras com diferentes tempos de deposição, tendo sido obtidas, consequentemente, diferentes espessuras de filme.

As medidas de esforço mecânico das amostras foram realizadas no LSI da POLI-USP utilizando o equipamento medidor de tensão total FLX – 2410.

O esforço mecânico do filme é calculado pelo equipamento a partir da medida do raio de curvatura da lâmina através da equação:

$$\sigma_t = \frac{\xi_s - T_s}{(1 - \nu_s) \cdot 6 \cdot R \cdot T_f} \quad (3.2)$$

onde ξ_s é o módulo de elasticidade do substrato, ν_s é a razão de Poisson do substrato, T_s é a espessura do substrato, T_f é a espessura do filme, R é o raio efetivo da curvatura e σ_t é o esforço total médio do filme.

O parâmetro R é calculado por:

$$R = \frac{R_1 R_2}{(R_1 - R_2)} \quad (3.3),$$

onde R_1 é o raio de curvatura do substrato antes da deposição do filme estressante e R_2 é o raio de curvatura do substrato com o filme depositado. A medida do raio de curvatura é realizada por meio de um feixe de LASER, sem contato físico com a amostra, à temperatura ambiente.

Foram medidos os raios de curvatura das quatro amostras antes e depois da deposição do filme de $Tb_{23}Co_{77}$. A partir destes valores o equipamento calcula o esforço mecânico do conjunto filme e substrato.

Simulações multifísicas realizadas com o software COMSOL, mostraram que o esforço residual produzido pela deposição do filme sobre substrato de silício não é suficiente para formação do guia de onda. Desta forma, com o intuito de obter um esforço mecânico de maior intensidade, controlado e direcionado, que pudesse facilitar a obtenção do perfil de esforço capaz de formar o guia de onda no substrato, decidiu-se aplicar uma deformação prévia à amostra após o processo de deposição. Para isso, foi construído um suporte para aplicação de esforço na amostra com filme de $Tb_{23}Co_{77}$. Desta forma, foi realizado um tratamento térmico para indução de esforço mecânico de acordo com a figura 11, que também apresenta a lâmina sobre o suporte projetado.

Figura 11 – suporte com amostra de silício com filme de $Tb_{23}Co_{77}$ depositado

Fonte: Autor

A lâmina de silício no suporte fica suspensa por um apoio retilíneo e fino colocado ao longo de seu diâmetro e uma força é aplicada nas bordas da lâmina provocando sua deflexão. O apoio central da lâmina de silício, que permite esta deflexão, possui a mesma espessura da lâmina de silício, que é de aproximadamente 400 μm .

O suporte, bem como, os filetes responsáveis pelo engastamento lateral da amostra, são constituídos por aço inoxidável.

O tratamento térmico foi realizado com rampa de 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$, com patamar de 1 h em 350 $^{\circ}\text{C}$, mesmas condições do tratamento para indução de anisotropia magnética. Após o tratamento térmico foi medido o raio de curvatura das amostras e, tendo como referência o raio de curvatura antes do tratamento térmico, foi calculado o esforço mecânico das amostras após tratamento.

O valor de esforço mecânico obtido após tratamento térmico foi utilizado numa simulação multifísica e verificou-se que não haveria formação de guia de onda no substrato de silício. Este fato levou ao abandono desta alternativa e à busca de outro material viável a ser utilizado como

substrato do guia de onda. Esta busca, como detalhado adiante, acabou apontando para a utilização do BGO como substrato.

Porém, uma nova amostra em lâmina de silício inteira foi fabricada para verificar a influência do tratamento térmico para indução de anisotropia magnética sobre o perfil de esforço. Assim, foi medido novamente o raio de curvatura da lâmina de silício após o processo de deposição do filme e foi também medido o raio de curvatura após tratamento térmico realizado em condições análogas ao tratamento termomagnético apresentado no item 3.1. Como o tratamento termomagnético também tem função de relaxar os domínios, era esperado que isto reduzisse o esforço residual entre filme e substrato. Assim, decidiu-se que após o patamar de 350 C do tratamento seria realizado um esfriamento rápido, retirando a amostra do forno. Os valores das medidas de esforço para esta análise são apresentados no item 4.1.4.

É importante ressaltar que não foi possível medir o esforço residual entre filme de $Tb_{23}Co_{77}$ e o substrato de BGO, uma vez que o equipamento é projetado para medir raios de curvatura de lâminas de silício de 3 polegadas. Porém, as medidas realizadas com substrato de silício foram um parâmetro importante para investigar o perfil de esforço residual.

3.4. Fabricação do modulador óptico sobre lâmina de BGO

A partir da caracterização do filme de $Tb_{23}Co_{77}$ e da determinação de seus parâmetros de fabricação, foi estabelecida uma rota de fabricação para o modulador proposto.

A primeira etapa do processo foi a deposição do filme $Tb_{23}Co_{77}$ sobre a lâmina de $Bi_{12}GeO_{20}$ com dimensões de 20 mm x 20 mm e espessura de 1 mm. Os parâmetros e a técnica de deposição do filme de $Tb_{23}Co_{77}$ são os mesmos apresentados no item 3.1. Depois da deposição é realizada a litografia para definição da região do canal do modulador. A largura do canal estabelecido na máscara foi de 10 μm , esta largura, como já discutido, foi estabelecida no trabalho de SATO (2015). A litografia consiste em depositar um filme fotossensível, denominado fotoresiste (SU-8), pela técnica de *spinner* sobre a lâmina de BGO.

Após a deposição do SU-8 a lâmina é exposta à luz através de uma máscara, que define as regiões que devem ser sensibilizadas pela luz. BLAIS (1991) apresenta mais detalhes sobre o

processo de litografia, o qual é muito empregado em processos de microeletrônica. Após a definição do canal são realizadas a corrosão do filme de $Tb_{23}Co_{77}$ e a remoção do fotoresiste. Não foram encontrados na literatura processos de corrosão estabelecidos para o filme de $Tb_{23}Co_{77}$. Assim, dentre as possibilidades disponíveis no LSI-USP, foram testados processos de corrosão via LASER e corrosão química úmida. Para corrosão úmida foi escolhida uma solução padrão utilizada para alumínio, pois o filme a ser corroído trata-se também de um material metálico.

O processo de corrosão via LASER foi analisado como alternativa de corrosão para o filme $Tb_{23}Co_{77}$, pois, caso viável, seria possível fabricar o dispositivo de forma rápida, sem a necessidade de insumos e sem geração de resíduos. O processo via LASER poderia facilitar e agilizar a fabricação em escala do dispositivo. Os resultados obtidos para os processos de corrosão serão apresentados em item adiante.

A figura 12, a seguir, apresenta a rota de fabricação proposta para o modulador óptico.

Figura 12 – Etapas para fabricação do modular proposto.

Fonte: Autor

3.5. Modelagem e Simulação do modulador óptico proposto no COMSOL multiphysics

Este item apresenta o procedimento e modelos matemáticos utilizados para realizar a simulação do dispositivo proposto. A escolha do COMSOL como software para simulação deve-se aos fatos do mesmo já ter sido utilizado em trabalhos anteriores do grupo, às facilidades de suporte, acesso a documentação e à parceria estabelecida com o Instituto de Estudos Avançados (IEAv) do Centro Tecnológico da Aeronáutica (CTA), que permitiu a execução das simulações remotamente via um acesso virtual remoto, uma vez, que o IEAv possui a licença do COMSOL *Multiphysics*.

3.5.1. COMSOL

O COMSOL *Multiphysics* é uma ferramenta de simulação que permite solucionar equações de diversos ramos da física como mecânica, termodinâmica, eletricidade, eletromagnetismo, mecânica dos fluidos, etc. A ferramenta permite solucionar problemas físicos multidisciplinares simultaneamente ou relacionando-os entre si, sendo possível simular a resposta de uma estrutura a um efeito físico e, a partir deste resultado, simular a resposta da mesma estrutura a um novo fenômeno dependente do primeiro. As soluções das equações que modelam os fenômenos físicos são realizadas pelo MEF, discutido anteriormente. O software permite especificar a geometria e os materiais que serão simulados. No site www.comsol.com.br é possível obter maiores informações sobre o software.

3.5.2. Simulação do modulador óptico com modulação a partir do efeito ISS

Neste item é detalhada a simulação do modulador óptico para obtenção dos modos ópticos a partir do efeito ISS e sem perturbação pelo campo magnético. Nesta simulação são empregados os modelos para soluções de equações de propriedades mecânicas e ópticas, equações 3.41 e 3.42.

Esta etapa se inicia com a especificação da geometria do modulador a ser simulada e seu desenho no COMSOL. Foram realizadas simulações para largura do canal de 5 μm e espessuras de filme de $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$ de 50 e 100 nm.

Definida a geometria, é necessário inserir as constantes dos materiais e das equações físicas utilizadas. A figura 13, a seguir, apresenta as constantes obtidas a partir da literatura e inseridas na simulação para o substrato de BGO e filme de $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$. As constantes coeficiente de magnetostricção, λ_s (lambda_s no COMSOL) e magnetização de saturação (M_{sat}), foram obtidas experimentalmente a partir das medidas no VSM discutidas no item 3.1.

Figura 13– Tela do COMSOL com constantes físicas utilizadas nas simulações.

Name	Expression	Value	Description
alphaBGO	6.3e-6	6.3e-6	coeficiente de expansão termica do BGO
alphaTbCO	12e-6	1.2e-5	coeficiente de expansão térmica do TbCO
EBGO	10.56e10	1.056e11	Modulo de young BGO
ETbCO	80e9	8e10	Modulo de Young TbCO
nuBGO	0.26	0.26	razão de Poisson de BGO
nuTbCO	0.3	0.3	razão de Poisson de TbCO
T1	20	20	Temperatura ambiente
T0	-197	-197	Temperatura de processo
lamb	1.31	1.31	Comprimento de onda da luz
p11BGO	0.11	0.11	Coeficiente de strain óptico do BGO
p12BGO	0.083	0.083	
p21BGO	0.083	0.083	
p44BGO	-0.0595	-0.0595	
rhoTbCO	8600	8600	Densidade kg/m3 do BGO
rhoBGO	7130	7130	Densidade kg/m3 do TbCO
Msat	2e-3[A/m]	0.002[A/m]	Magnetização de saturação
Lambda_s	204e-6	2.04e-4	Coeficiente de magnetostricção

Fonte: Autor

A malha foi refinada para obtenção de melhores soluções nas regiões do canal e do filme magnetostrictivo. Assim, os elementos triangulares possuem menores dimensões nestas regiões e aumentam à medida que se distanciam delas. A escolha de malha mais fina na região do canal se deve ao fato de se esperar que o guia de onda se forme na região. No caso do filme, em virtude de sua pequena espessura, para que se obtenha bons resultados de análise do efeito magnetostrictivo, faz necessária a malha mais fina em sua região. Além disso, outro fator para determinação da fineza da malha foi o tempo de resolução da simulação, sendo que a malha foi adequada para o recurso computacional disponível, de forma a ser obtida uma resposta relativamente rápida.

A figura 14, a seguir, apresenta a malha utilizada na simulação.

Figura 14 – Tela do COMSOL com a malha utilizada na simulação.

Fonte: Autor

Em todos os domínios preenchidos por BGO foram aplicadas duas equações: a equação de dispersão da luz e a de cálculo do índice de refração a partir do esforço mecânico sofrido pelo substrato. A equação de dispersão calcula o índice de refração para o comprimento de onda da luz que atravessa o substrato. As equações 2.42 e 2.43 apresentam o índice de refração em função do esforço mecânico.

A figura 15 apresenta as equações inseridas para os domínios preenchidos por BGO.

Figura 15 – Equações inseridas para os domínios preenchidos com BGO.

Fonte: Autor

A equação de dispersão para o cristal cúbico de BGO (Yariv, 1984) é dada por:

$$n_{BGO} = \sqrt{1 - \frac{3.08959 * \lambda^2}{0.01337 - \lambda^2}} \quad (3.4)$$

sendo que as simulações foram realizadas para o comprimento de onda da luz $\lambda = 1300$ nm.

A simulação obtém o índice de refração do BGO pela equação de dispersão (3.4) e depois, a partir deste, calcula-o novamente pelas equações 2.42 e 2.43 para ser levado em conta o efeito elasto-óptico. Na solução destas equações, referentes às propriedades mecânicas, foi aplicada como condição de contorno que todas as arestas das estruturas estão livres, sem aplicação de qualquer força mecânica.

O fluxograma da figura 16, a seguir, apresenta a sequência para cálculo dos modos obtidos a partir do efeito de ISS.

Figura 16 – Fluxograma representando o processo de obtenção dos modos ópticos por efeito ISS.

Fonte: Autor

Conforme ilustrado na figura 16, primeiramente é executada a simulação do modelo mecânico (*plane strain*), onde são obtidos os índices de refração nas direções x e y para o esforço mecânico gerado a partir da diferença de coeficientes de dilatação térmica. Logo depois, é executado o modelo óptico (*Perpendicular Hybrid-Mode Waves*) que permite calcular os modos ópticos para os índices de refração efetivos encontrados anteriormente.

O capítulo 4 apresenta os resultados para estas simulações.

3.5.3. Simulação do modulador com o efeito magnetostrictivo

O objetivo desta simulação é verificar a dependência do perfil de intensidades do sinal óptico e do índice de refração efetivo com a variação do campo magnético aplicado ao modulador, ou seja, verificar a perturbação do modo pela aplicação do campo magnético. Para esta nova simulação foi necessária a inserção do modelo *magnetostatics* do COMSOL. Este modelo foi adicionado ao arquivo de simulação do item anterior. Em primeiro lugar, são definidos como condição de contorno para o modelo *magnetostatics* os valores de campo magnético a serem aplicados ao modulador. No COMSOL é possível aplicar o campo magnético nas direções x e/ou y nas arestas da estrutura. A figura 17, a seguir, apresenta a aplicação do campo magnético no COMSOL, condição de contorno para simulação

Figura 17 – Aplicação de campo magnético às arestas da estrutura do modulador simulado

Fonte: Autor

Dando sequência à simulação, para os domínios relativos ao filme magnetostrictivo, é inserida a equação que acopla a magnetização do material à deformação do filme. Esta equação acopla o modelo *magnetostatics* ao modelo *plane strain*. A equação 2.30 inserida na simulação calcula o efeito magnetostrictivo.

A figura 18, a seguir, apresenta as equações dos domínios relativos ao filme magnetostrictivo, tal como inseridas no COMSOL.

A deformação gerada a partir do efeito de magnetostricção, é inserida no modelo mecânico como deformação inicial dos domínios relativos ao filme magnetostrictivo.

A figura 19, a seguir, apresenta a inserção no COMSOL das variáveis relativas ao efeito de magnetostricção como deformação inicial dos domínios do filme de Tb₂₃Co₇₇, acoplando assim o modelo magnético e mecânico.

Figura 18 –Inserção das equações para cálculo da magnetostricção

Fonte: Autor

A primeira solução a ser executada é a magnética (*magnetostatics*). A partir deste modelo é calculada, primeiramente, a magnetização do filme magnetostrictivo a partir do campo magnético aplicado. Depois, é executada a solução mecânica (*plane strain*), que calcula o esforço e a deformação mecânica, sobrepondo o efeito da magnetostricção ao efeito térmico propiciado pela diferença de coeficientes de expansão térmica de substrato e filme. Executando o modelo *plane strain* obtém-se o perfil de esforço pela soma total dos esforços térmico e magnetostrictivo, o qual influencia o índice de refração nas direções x e y de acordo com o efeito elasto-óptico. Finalmente, é executado o modelo óptico (*Perpendicular Hybrid-Mode Waves*) que, a partir dos índices de refração n_x e n_y calculados anteriormente, calcula o modo óptico guiado, podendo assim verificar-se a perturbação no índice efetivo do modo e na potência óptica do mesmo para diferentes campos magnéticos aplicados. A figura 20, a seguir, apresenta a ordem de execução dos modelos para verificação da dependência dos modos ópticos com o campo magnético aplicado num fluxograma.

Figura 19 – Inserção variáveis relativas a magnetostricção como esforço inicial do filme $Tb_{23}Co_{77}$.

Fonte: Autor

Figura 20– Sequência de execução dos modelos para obtenção dos modos ópticos devido ao efeito de magnetostricção sobreposto ao efeito de ISS.

Fonte: Autor

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados são divididos neste item em: medições de magnetostricção por AFM, simulações do modulador óptico, medições de esforço e fabricação do modulador óptico.

O item 4.1 apresenta os resultados das medidas do efeito de magnetostricção utilizando a técnica de AFM. O item 4.2 apresenta os resultados das simulações realizadas no COMSOL através da solução via MEF. O item 4.3 apresenta as medidas de esforço induzido entre filme de $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$ e substrato. O último item apresenta em detalhe os testes realizados para corrosão do filme de $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$, etapa crítica para fabricação do modulador óptico.

4.1. Caracterização dos filmes magnetostrictivos e medições de sua magnetostricção por AFM

O item 4.1.1 apresenta as curvas de histerese antes e depois do tratamento termomagnético descrito na secção 3.1.5, para as amostras de $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$ e $\text{Tb}_{25}\text{Fe}_{75}$. Estas curvas permitem verificar a eficácia do tratamento termomagnético.

O item 4.1.2 apresenta as medidas no SQUID para verificação da dependência da magnetização dos filmes fabricados em relação à temperatura. O item seguinte apresenta os resultados das medidas no AFM e os cálculos do coeficiente de magnetostricção para os filmes de $\text{Tb}_{25}\text{Fe}_{75}$ e $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$.

4.1.1. Curvas de histerese para amostras de silício com filmes magnetostrictivos

A figura 21 apresenta as curvas de histerese para o filme de $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$ antes e depois do tratamento térmico nas duas direções ortogonais no plano do filme.

Figura 21 – Curvas de magnetização nas duas direções paralelas ao plano do filme, ortogonais entre si, para amostra de $Tb_{23}Co_{77}$.

a) antes do tratamento térmico b) depois do tratamento térmico

Fonte: Autor

Observa-se que após o tratamento térmico as curvas da figura 21 demonstram a indução de uma anisotropia magnética uniaxial no plano do filme. Também é possível observar que a coercividade do filme, H_C , ficou próxima de 30 Oe para o eixo magnético difícil.

As estruturas de domínios magnéticos da amostra de $Tb_{23}Co_{77}$ foram observadas utilizando a técnica de microscopia LMOKE (*longitudinal magneto-optical Kerr effect*). A figura 22, a seguir, apresenta a estrutura de domínio observada na condição de remanência, após a aplicação de um campo magnético de saturação na direção do eixo magnético fácil da amostra de $Tb_{23}Co_{77}$. O contraste observado na mesma figura corresponde à magnetização do filme na mesma direção de aplicação do campo magnético. A região com contraste mais claro apresentada indica a indução de uma anisotropia uniaxial, como observado nas medidas de VSM realizadas para a amostra de $Tb_{23}Co_{77}$. Os domínios na região escura ainda não estão orientados na direção do campo magnético aplicado.

Figura 22– Imagem da estrutura de domínios magnéticos obtida pela técnica de LMOKE para o filme de $\text{Tb}_{25}\text{Co}_{77}$ com campo magnético aplicado paralelamente à direção da anisotropia magnética induzida

Fonte: Autor

Na figura 22, K_{ind} representa a direção da anisotropia induzida no filme e $\vec{H}$ aplicado representa a direção do campo magnético aplicado.

A figura 23, a seguir, apresenta as curvas de histerese para o filme de $\text{Tb}_{25}\text{Fe}_{75}$ antes e depois do tratamento térmico nas duas direções ortogonais no plano do filme.

Os filmes de $\text{Tb}_{25}\text{Fe}_{75}$ apresentam forte anisotropia perpendicular ao plano do filme (OLIVEIRA, 2014) e observa-se que, mesmo com o tratamento térmico, não houve diferença entre os campos coercivos nas duas direções do plano.

Figura 23— Curvas de magnetização nas duas direções paralelas ao plano do filme, ortogonais entre si, para amostra de $\text{Tb}_{25}\text{Fe}_{75}$.

a) antes do tratamento térmico b) depois do tratamento térmico

Fonte: Autor

Observa-se que mesmo com o tratamento térmico não foi possível induzir uma anisotropia uniaxial no plano do filme de $\text{Tb}_{25}\text{Fe}_{75}$. Os trabalhos de TUFAILE (2001) e OLIVEIRA (2014) indicam que seria mais fácil induzir uma anisotropia no plano para composições com concentrações maiores que 46% de Tb. Porém, aumentado a concentração de Tb, para além de 46%, a temperatura de Curie do filme $\text{Tb}_{46}\text{Fe}_{54}$ se aproxima da temperatura ambiente. Na temperatura de Curie o material ferromagnético perde suas propriedades de magnetizar-se, comportando-se como um material paramagnético. Desta forma, o tratamento térmico para o filme $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$ foi mais eficiente e sua anisotropia pode ser mais facilmente manipulada, em comparação com o filme de $\text{Tb}_{25}\text{Fe}_{75}$. Assim, optou-se pela escolha do filme de $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$ para um estudo mais detalhado visando sua utilização como material magnetostrictivo na fabricação de um modulador óptico.

A figura 24, a seguir, apresenta as curvas de histerese na direção perpendicular à amostra, antes e depois do tratamento térmico, para as amostras com filme de $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$ e $\text{Tb}_{25}\text{Fe}_{75}$.

Figura 24— a) curvas de histerese na direção perpendicular, antes e depois do tratamento térmico para amostra de $Tb_{23}Co_{77}$; b) curva de histerese na direção perpendicular, antes e depois do tratamento térmico para amostra de $Tb_{25}Fe_{75}$.

Fonte: Autor

4.1.2. Dependência da magnetização dos filmes de $Tb_{25}Fe_{75}$ e $Tb_{23}Co_{77}$ com a temperatura

Este item apresenta as curvas de variações do momento magnético das amostras de $Tb_{23}Co_{77}$ e $Tb_{25}Fe_{75}$ em função da temperatura, levantadas no equipamento SQUID.

A figura 25 apresenta a curva de magnetização versus temperatura para filme de $Tb_{23}Co_{77}$, com temperatura variando de 0 até 320 K (5 K/min). A figura 26, também a seguir, apresenta a mesma medida do momento magnético da amostra variando a temperatura apenas até 80 K (2 K/min). As duas curvas de ambas as figuras (25 e 26) apresentam as variações dos momentos magnéticos para variações de temperatura crescentes e decrescentes.

Figura 25– Curva de magnetização versus temperatura para filme de $Tb_{23}Co_{77}$ variando a temperatura de 0 a 320 K

Fonte: Autor

Figura 26 – Curva de magnetização versus temperatura para filme de $Tb_{23}Co_{77}$ variando a temperatura de 0 a 80 K

Fonte: Autor

Observa-se nas figuras 25 e 26 que ocorre uma diminuição da magnetização quando a temperatura se aproxima de 30 K e depois desta um aumento, tanto com o incremento quanto com o decremento da temperatura. A medida apresentada na figura 25 possui algumas instabilidades próximas às temperaturas de 40 K e 140 K. Nestas temperaturas são observados artefatos de medida que, segundo as explicações dos técnicos responsáveis pela operação do equipamento, devem ser desconsiderados por tratarem-se de instabilidades momentâneas no posicionamento das amostras. Além disso, a diferença entre as curvas ida e volta da temperatura também podem ser explicados por instabilidades.

As figuras 27, abaixo, e 28, a seguir, apresentam as curvas de histerese do filme de $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$ da mesma amostra para temperaturas de 2 K, 32 K e 300 K.

Figura 27 – Curva de histerese na direção do eixo fácil do filme de $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$ para temperaturas de 2 K e 32 K.

Fonte: Autor

Figura 28 – Curva de histerese nas duas direções ortogonais do plano do filme de $Tb_{23}Co_{77}$ à temperatura de 300 K.

Fonte: Autor

Observa-se nas figuras 27 e 28, que o valor da magnetização de saturação para temperatura de 32 K é menor que os valores obtidos para 300 K e 2 K. A partir deste resultado, conclui-se que a temperatura de Curie para o filme de $Tb_{23}Co_{77}$ pode ter valor próximo à 32 K.

A figura 29, a seguir, apresenta a magnetização versus temperatura para o filme de $Tb_{25}Fe_{75}$ levantada com taxa de 2 K/min.

Observa-se na figura 29 que com o aumento da temperatura a partir de 100 K a magnetização decresce para o filme de $Tb_{25}Fe_{75}$. De acordo com o resultado obtido, as temperaturas de Curie estão acima da temperatura ambiente para o filme com a composição fabricada ($Tb_{23}Fe_{77}$). No trabalho de OLIVEIRA (2014) é realizado um estudo mais detalhado da dependência do momento magnético com a temperatura para filmes amorfos de $Tb_{25}Fe_{75}$.

Uma hipótese para explicar a ineficiência do tratamento termomagnético realizado no filme de $Tb_{25}Fe_{75}$, citado no texto do item de preparação das amostras, é a de que as temperaturas de Curie possam estar próximas de 350 °C, utilizada no tratamento. Observa-se que pela taxa de queda do valor do momento de magnetização com o aumento da temperatura a hipótese pode ser válida.

A ineficiência do tratamento térmico com campo foi evidenciada pelas curvas de histerese do filme de $\text{Tb}_{25}\text{Fe}_{75}$, apresentadas na figura 23. Nas direções ortogonais contidas no plano do filme o campo coercivo possui aproximadamente o mesmo valor, não existindo distinção entre os eixos fácil e difícil.

Figura 29 – curva de magnetização versus temperatura para filme de $\text{Tb}_{25}\text{Fe}_{75}$ variando a temperatura de 0 a 300 K.

Fonte: Autor

4.1.3. Medidas de deflexão vertical da amostra e cálculo do coeficiente de magnetostricção do filme $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$

Para medição da magnetostricção a amostra foi posicionada no porta-amostra com uma das extremidades fixa e a outra livre para propiciar o balanço mecânico com o campo magnético aplicado. Para cada varredura de campo magnético, de $-H$ até $+H$, são obtidos 256 pontos de medida. Em cada varredura é aplicado campo magnético no intervalo de -205 Oe até +205 Oe.

No intuito de verificar a influência do *setup* de AFM sobre a medição da magnetostricção de filmes finos, foi realizada a medida do deslocamento vertical de uma amostra de Si $\langle 100 \rangle$ com 1 cm^2 , sem filme magnético depositado sobre o substrato (*die* originário de lâmina virgem), a qual deveria exibir deslocamentos nulos em presença de campos magnéticos aplicados.

A figura 30 apresenta a média do deslocamento vertical da amostra de Silício para 88 varreduras em cada direção da curva de magnetização, de $-H$ até $+H$, e no sentido oposto, de $+H$ até $-H$. Na figura 30 também é apresentada a deflexão média da amostra de Silício com filme de $Tb_{23}Co_{77}$ para 100 varreduras com campo magnético aplicado na direção do eixo fácil. A ponta do AFM foi posicionada à 9,10 mm do ponto de engaste. As curvas apresentam os dois sentidos de magnetização na direção do eixo fácil para amostra de $Tb_{23}Co_{77}$.

Figura 30 – Deslocamento vertical para amostras de Silício e de Silício com filme de $Tb_{23}Co_{77}$. Para amostra com filme de $Tb_{23}Co_{77}$ o campo magnético foi aplicado na direção do eixo fácil.

Fonte: Autor

Como esperado, para amostra de silício sem filme magnetostrictivo não houve deslocamento vertical significativo. Porém, é possível observar na curva uma variação máxima de aproximadamente 0,2 nm. Esta variação deve-se à influência de campos magnéticos externos sobre o *setup* de AFM, incluindo ponta, diapasão, micro-motores para posicionamento da amostra nas direções X, Y e Z, cabos e conectores. Utilizando a curva de deslocamento vertical para amostra de silício foi calculado o desvio padrão da incerteza do *setup*, obtendo-se 0,09 nm. Este valor foi assumido como sendo a variabilidade da influência do *setup* de AFM para determinação de coeficientes de magnetostricção de filmes finos. A partir daí, decidiu-se subtrair esta incerteza do

setup, proveniente da média de diversas medidas para amostra de silício sem filme magnético, das medidas de deslocamento da amostra com filme magnético.

Faz-se importante mencionar que o eixo Z do setup do AFM foi calibrado utilizando-se o *kit TGZ01C da MikroMasch*.

Os valores para deflexão do filme de $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$, apresentados na figura 30, ficaram próximos de 0,3 nm. Os valores relativamente baixos para deflexão do filme de $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$, neste caso, devem-se à indução de anisotropia na mesma direção do campo magnético aplicado no levantamento desta curva, ou seja, a maioria dos domínios magnéticos estava previamente alinhada nesta direção. Porém, o baixo efeito de magnetostricção observado deve-se à rotação de domínios não alinhados localizados na borda da amostra e à formação de paredes de domínios na situação em que o valor de campo aplicado é próximo ao campo coercivo do filme na direção do eixo fácil.

A figura 31 apresenta a curva com o deslocamento vertical médio da amostra de $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$ para campo magnético aplicado na direção do eixo magnético difícil. Cada ponto apresenta a média para 110 varreduras de campo magnético. São apresentadas as duas curvas uma para cada sentido de magnetização da amostra de $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$ na direção do eixo difícil.

Figura 31 – Variação do deslocamento vertical e do momento magnético para amostra com filme de $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$ com o campo magnético aplicado na direção do eixo difícil com os dois sentidos de magnetização.

Fonte: Autor

No intuito de obter a do *setup* de AFM foram realizadas 110 varreduras com os mesmos parâmetros utilizados para as medidas de deflexão vertical, porém com o campo magnético desligado. Estas varreduras foram realizadas com a amostra de $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$ já posicionada momentos antes da medida com campo magnético apresentada na figura 31. Assim, foi calculado o efeito linear da deriva térmica sobre as medidas de deslocamento. Este efeito foi subtraído da curva de deflexão vertical, sendo que o resultado é apresentado na figura 32, obtida para campo magnético aplicado na direção do eixo difícil.

Observa-se que a deflexão vertical diminui a partir do campo magnético de -205 Oe. A partir da coercividade do filme de $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$, tem-se o aumento da deflexão vertical da amostra até o campo magnético de saturação. Neste ponto a deflexão é cessada. Na curva para campo magnético aplicado no sentido contrário, de + H até - H, apresentado na figura 31, o mesmo efeito é observado.

Considerando que a curva de histerese é levantada em 20 minutos e a curva de deflexão vertical é obtida em 20 segundos, é possível observar a relação adequada entre o deslocamento vertical e a magnetização no campo de saturação e no campo coercivo. A diferença entre as curvas deve-se ao tempo de resposta do AFM. Observa-se também que a dependência entre a deflexão vertical e a magnetização está de acordo com a equação 2.30, observando-se também a relação entre a magnetostricção e o quadrado da magnetização.

A figura 32 apresenta a variação do deslocamento vertical da amostra, dada pelo deslocamento da ponta de sondagem, em função da variação de campo magnético. Cada linha da imagem representa a variação do deslocamento vertical da amostra para uma varredura de campo magnético. A partir da região indicada pelo retângulo vermelho na figura 32, o campo aplicado foi reduzido a zero, cessando assim a deflexão da amostra.

A partir da medida direta da deflexão vertical através do AFM foi calculado o coeficiente de magnetostricção (λ_m) utilizando a equação 3.1, considerando $E_S = 169$ GPa, $E_F = 80$ GPa, $\nu_S = 0,064$, $\nu_F = 0,30$ (DUC, et al, 2001; HOPCROFT, et al, 2009) e $L = 9,49$ mm.

A deflexão vertical D no campo de saturação foi de 6,48 nm. A partir deste valor foi calculado o coeficiente de magnetostricção de saturação, $\lambda_m = 204 \times 10^{-6}$. Este valor é coerente com valores encontrados na literatura para filmes amorfos de $Tb_{23}Co_{77}$ obtidos por outros métodos relatados por Duc (2001).

Figura 32 – Variação do deslocamento vertical, medida topográfica, para amostra com filme de $Tb_{23}Co_{77}$ com o campo magnético aplicado na direção do eixo difícil para os dois sentidos de magnetização

Fonte: Autor

O coeficiente de magnetostricção diferencial, λ_{dif} , definido como $\frac{d\lambda}{dH}$, também foi calculado, pois este parâmetro pode ser importante para projeto de sensores e de outros componentes. Na região com comportamento linear da curva de deflexão vertical em função do campo, a reta tangente possibilita obter o valor de $\lambda_{dif} = 1,44 \times 10^{-6} \text{ Oe}^{-1}$, considerando os parâmetros de filme e substrato mencionados anteriormente.

4.1.4. Medidas de deflexão vertical da amostra e cálculo do coeficiente de magnetostricção do filme Tb₂₅Fe₇₅

A figura 33, abaixo, apresenta a variação de deslocamento vertical da amostra com filme de Tb₂₅Fe₇₅ com campo magnético aplicado. São apresentadas duas curvas, uma para cada sentido de magnetização, sendo que cada curva representa a média de 100 varreduras de campo magnético.

Observa-se que próximo ao valor da coercividade do filme a magnetostricção se anula, como esperado, e o efeito de variação do deslocamento vertical em função do campo segue o mesmo modelo do observado para amostra de Tb₂₃Co₇₇. As duas curvas apresentam os dois sentidos de magnetização da amostra de Tb₂₅Fe₇₅ para direção do eixo difícil.

As medidas de deslocamento vertical da amostra de Tb₂₅Fe₇₅ apresentaram instabilidades próximas ao campo de 25 Oe aplicado (curva vermelha). Esta instabilidade deve-se ao *setup* de medição e não interfere com a análise do comportamento da amostra que é feito a seguir.

Figura 33– Variação do deslocamento vertical e momento magnético para amostra com filme de Tb₂₅Fe₇₅ com o campo magnético aplicado na direção do eixo difícil

Fonte: Autor

A partir da medida da figura 33 foi calculado o coeficiente de magnetostricção do filme de $Tb_{25}Fe_{75}$ fabricado aplicando a equação 3.1. Os valores assumidos na equação foram $E_S = 169$ GPa, $E_F = 50$ GPa, $\nu_S = 0,064$, $\nu_F = 0,30$ (CHOPRA, et al, 1999) e $L = 9.40$ mm. Os dados foram obtidos na literatura para o substrato de silício com filme amorfo de $Tb_{25}Fe_{75}$.

A magnetostricção do filme de $Tb_{25}Fe_{75}$ fabricado foi calculada pela equação 3.1 a partir da medida de deslocamento vertical no AFM. O valor obtido para o coeficiente de magnetostricção foi de 179×10^{-6} . Este valor ficou distante de valores obtidos na literatura (FORESTER, et al., 1978), o que se deve possivelmente ao fato da não existência de uma orientação preferencial dos domínios magnéticos do filme magnético de $Tb_{25}Fe_{75}$ como apresentado nas curvas de histerese. Adicionalmente, deve-se levar em conta o fato de que, no caso deste trabalho, o material $Tb_{25}Fe_{75}$ está no formato de um filme fino e os alvos utilizados para a deposição do filme eram antigos e poderiam estar contaminados, o que afetaria a sua composição.

Em vista dos resultados obtidos, concluiu-se que o filme de $Tb_{25}Fe_{75}$ não deveria ser utilizado para fabricação do sensor proposto no trabalho.

4.2. Resultados das medidas de esforço mecânico do filme magnético de $Tb_{23}Co_{77}$

Inicialmente foram produzidas 4 amostras com filmes de $Tb_{23}Co_{77}$ depositados sobre lâminas de silício inteiras.

Utilizando o equipamento *stressmeter*, mencionado anteriormente, foram obtidos os valores de raio de curvatura e esforço mecânico das amostras antes e após a deposição do filme magnético. A tabela 1, a seguir, apresenta os valores obtidos para raios de curvatura da lâmina antes e depois da deposição do filme magnético e os valores de esforço mecânico após a deposição do filme.

Tabela 1 – Medidas de raio de curvatura e esforço residual para lâminas de silício com filme de $Tb_{23}Co_{77}$ depositado

Amostras	Raio de curvatura antes da deposição (m)	Espessura do filme de $Tb_{23}Co_{77}$ depositado. (nm)	Raio de curvatura depois da deposição (m)	Esforço residual após deposição (MPa)	Estado do esforço após deposição
1	2036,25	50	541,710	106,6	Tração
2	2571,33	100	310,795	65,6	Tração
3	1640,43	300	-1235,341	-12,4	Compressão
4	7087,21	600	475,114	12,8	Tração

Fonte: Autor

Comparando os raios de curvatura antes e depois da deposição é possível observar uma diminuição no raio de curvatura para todas as amostras, uma evidência de que o processo de deposição impõe um esforço compressivo às amostras de silício com filme de $Tb_{23}Co_{77}$.

Logo após esta análise, foi aplicado um esforço mecânico proposital nas amostras, de acordo com o apresentado anteriormente no item 3.2. Esperava-se que este esforço se sobrepusesse ao esforço residual.

As primeiras tentativas de aplicação de força foram realizadas com lâminas virgens e foram testadas rampas de temperatura com patamares em 400 °C e em 500 °C. Para ambas as temperaturas as lâminas de silício quebraram. Assim, foi realizado um teste com lâmina de silício virgem com rampa de temperatura de 10 °C/min e patamar em 350 °C. Nesta temperatura a lâmina não foi danificada após a realização do tratamento térmico. Assim, as amostras com filme magnético foram carregadas no forno e submetidas ao tratamento descrito para indução de esforço mecânico.

Após o tratamento térmico para indução de esforço mecânico esperava-se observar a indução de uma anisotropia magnética na direção do plano do filme, bem como um perfil de esforço na amostra.

As medidas de esforço mecânico no filme após o tratamento térmico realizado são apresentadas na tabela 2, a seguir.

Tabela 2– Medidas de raio de curvatura e esforço residual para lâminas de silício com filme de Tb₂₃Co₇₇ depositado após tratamento térmico

No. da amostra	Raio de curvatura antes da deposição (m)	Espessura do filme de Tb₂₃Co₇₇ depositado (nm)	Raio de curvatura depois da deposição (m)	Esforço residual após deposição (MPa)	Esforço após tratamento térmico (MPa)
1	2036,10	50	538,079	106,6	340,7
2	2571,01	100	310,795	62,34	502,4
3	1640,91	300	1235,40	-12,40	5,401
4	7087,13	600	475,114	9,701	70,12

Fonte: Autor

Observou-se que o tratamento foi eficaz pois induziu um esforço maior nas amostras. Porém foram realizadas simulações que mostram que para estes valores de esforço não é possível gerar um guia de onda no substrato de silício. Assim, o silício foi abandonado como alternativa de substrato óptico para estabelecer o guia de onda e foi substituído pelo BGO. Verificou-se também que as lâminas de silício virgens não possuem raios de curvatura com valores uniformes, fato que afeta o controle na indução de esforço sobre as lâminas.

Finalmente, foram realizadas medidas para verificar a influência do tratamento termomagnético realizado para induzir anisotropia magnética com patamar de 350 °C, conforme discutido anteriormente.

A tabela 3, abaixo, apresenta os valores de esforço mecânico após a deposição de filme de Tb₂₃Co₇₇ com espessura aproximada de 50 nm e após o tratamento térmico que reproduziu o tratamento para indução de anisotropia magnética.

Tabela 3 – Medidas de raio de curvatura e esforço residual para lâminas de silício com filme de Tb₂₃Co₇₇ depositado após tratamento térmico com rampa com patamar 350 C

Raio de curvatura antes da deposição (m)	Raio de curvatura depois da deposição (m)	Esforço residual após deposição (MPa)	Esforço após tratamento termomagnético (MPa)
405.131	756.003	-96,11	-50,40

Fonte: Autor

Como esperado, o tratamento térmico relaxa a estrutura filme e substrato.

Nas simulações com substrato de BGO que tem seus resultados apresentados no item 4.3 não foi contemplado o efeito do tratamento térmico para indução de anisotropia, pois no simulador não é possível realizar o cálculo para duas variações de temperatura, a primeira do processo de deposição e a segunda relativa ao tratamento termomagnético. Os valores de esforço medido antes e depois do tratamento, embora diferentes, estão na mesma ordem de grandeza. Assim, através das medidas, é possível verificar que o efeito do tratamento térmico sobre o perfil de esforços gerado no substrato de BGO não é significativo. Desta forma, optou-se por realizar a simulação considerando apenas a variação de temperatura relativa à deposição do filme.

Os valores dos esforços para substrato de BGO apresentados nas simulações a seguir são bem diferentes em relação às medidas em silício, devido à diferença dos coeficientes de dilatação térmica dos dois substratos.

4.2. Simulação do modulador óptico proposto

Este item apresenta os resultados das simulações realizadas no COMSOL. O item 4.3.1 apresenta os resultados obtidos das simulações para o perfil de esforço mecânico e índice de refração. O item 4.3.2 apresenta os modos ópticos obtidos nas simulações para o modulador óptico proposto.

4.2.1. Simulação para obtenção de perfil de esforço mecânico e índice de refração

A figura 34 apresenta a distribuição de esforços gerados pelo efeito de ISS no substrato de BGO para o modulador óptico com filme de $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$ com espessura de 50 nm. O resultado apresentado na figura 34 foi obtido sem a aplicação de campo magnético. As linhas apresentadas nas figuras a seguir deste item representam o perfil de distribuição espacial do esforço mecânico, ao longo da linha o valor de esforço é o mesmo, estas linhas são denominadas de isolinhas.

(a)

(b)

(c)

Fonte: Autor

A figura 35, a seguir, apresenta o perfil de esforço induzido para estrutura com filme magnetostrictivo de $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$ com 100 nm de espessura sem aplicação de campo magnético.

Observa-se que com o aumento da espessura do filme os valores de esforço mecânico não se alteram significativamente.

Os perfis e a simetria dos esforços obtidos nas simulações estão de acordo com os trabalhos de SATO (2015) e KOSHIBA (1992).

A figura 36, a seguir, apresenta o perfil de esforços gerados pela superposição dos esforços induzidos por ISS e pelo efeito magnetostrictivo sobre a estrutura do modulador com filme de $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$ de espessura de 50 nm com aplicação do campo magnético de saturação. A figura 37, na sequência, apresenta o mesmo tipo de resultado para modulador com filme de $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$ com espessura de 100 nm.

Através das figuras 36 e 37 é possível observar, para ambas as espessuras de filme, a existência de perturbações dos perfis de esforços devidas ao campo magnético de saturação aplicado.

Figura 35- Esforço induzido na região do canal óptico para substrato de BGO com filme de $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$ com espessura 100 nm e campo magnético nulo. (a) Esforço S_x . (b) Esforço S_y . (c) Esforço S_{xy}

(a)

(b)

(c)

Fonte: Autor

Figura 36 - Esforço induzido na região do canal óptico para substrato de BGO com filme de $Tb_{23}Co_{77}$ com espessura de 50 nm para campo magnético de saturação: (a) Esforço S_x . (b) Esforço S_y . (c) Esforço S_{xy}

(a)

(b)

(c)

Fonte: Autor

Figura 37- Esforços induzidos na região do canal óptico para substrato de BGO com filme de $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$ com espessura de 100 nm para campo magnético de saturação: (a) Esforço S_x , (b) Esforço S_y e (c) Esforço S_{xy}

(a)

(b)

(c)

Fonte: Autor

Observa-se que, com a aplicação do campo magnético de saturação, o valor do módulo do esforço mecânico aumenta em relação ao esforço sem aplicação de campo magnético.

Após a obtenção dos resultados de esforços a partir das simulações, foi possível calcular os perfis de índices de refração e representa-los graficamente ainda utilizando o modelo mecânico do COMSOL.

A figura 38, abaixo, apresenta os perfis de índices de refração N_x e N_y , calculado para estrutura com filme magnetostriativo com espessura de 50 nm, sem aplicação de campo magnético. As isolinhas para as figuras adiante apresentam o perfil de índice de valor igual ao longo da linha.

A figura 39 apresenta a variação dos valores de N_x ao longo de uma linha horizontal a uma profundidade de 2 μm da superfície do substrato de BGO e apresenta também a variação de N_x ao longo de uma linha vertical traçada no centro da estrutura a partir da superfície do substrato de BGO. O mesmo é apresentado para N_y . Todas as figuras da tabela 4 foram obtidas sem aplicação de campo magnético.

Observa-se na figura 39 que os perfis de N_x e N_y são praticamente iguais.

A figura 40 apresenta a variação de índice de refração N_y ao longo de uma linha horizontal a 2 μm da superfície do substrato com filme de 50 nm de $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$ na condição da aplicação do campo magnético de saturação. A variação de índice de refração N_y ao longo de uma linha vertical traçada no centro da estrutura a partir da superfície do substrato de BGO, também na condição de aplicação do campo magnético de saturação também é apresentada. O mesmo é apresentado para N_x . Foram realizadas simulações para outros valores de campo magnético e os resultados para os modos ópticos são apresentados em item posterior.

Na figura 40 são apresentados os perfis de índices de refração para aplicação do campo magnético de saturação, assim, observam-se a perturbação dos perfis de índices a partir da aplicação do campo magnético, comparando as figuras 39 e 40.

Figura 38 – Perfis de índices de refração (a) N_x e (b) N_y , gerados por ISS para modulador óptico com filme de $Tb_{23}Co_{77}$ com espessura de 50 nm

Fonte: Autor

Figura 39 – Perfis de índices de refração gerados por ISS para modulador óptico com filme de Tb₂₃Co₇₇ com espessura de 50 nm.

Fonte: Autor

Figura 40 - Perfis de índices de refração para modulador óptico com filme de $Tb_{23}Co_{77}$ com espessura de 50 nm com aplicação do campo magnético de saturação.

Fonte: Autor

A figura 41, a seguir, apresenta os perfis de índices de refração N_x e N_y calculados para a estrutura com 100 nm de espessura do filme de $Tb_{23}Co_{77}$. Os perfis de índices de refração da figura 41 são os gerados apenas pelo efeito de ISS.

Figura 41 - Perfis de índices de refração N_x (a) e N_y (b) gerados por ISS para modulador óptico com filme de $Tb_{23}Co_{77}$ com espessura de 100 nm.

(a)

(b)

Fonte: Autor

A figura 42, a seguir, apresenta a variação dos índices de refração N_x ao longo de uma linha horizontal a 2 μm abaixo da superfície do substrato com filme de $Tb_{23}Co_{77}$ com espessura de 100

nm, na condição de aplicação do campo magnético de saturação, e a variação do índice de refração N_x ao longo de uma linha vertical traçada no centro da estrutura a partir da superfície do substrato de BGO, também na condição de aplicação do campo magnético de saturação. Analogamente, ainda na figura 42, as mesmas variações são apresentadas para N_x .

Figura 42 – Perfis de índice de refração para modulador óptico com filme de $Tb_{23}Co_{77}$ com espessura de 100 nm sem aplicação de campo magnético.

Fonte: Autor

A Figura 43, a seguir, apresenta as variações de índices de refração para o modulador com filme de $Tb_{23}Co_{77}$ com espessura de 100 nm com aplicação do campo magnético de saturação.

Figura 43 – Perfis de índice de refração para modulador óptico com filme de $Tb_{23}Co_{77}$ com espessura de 100 nm com aplicação do campo magnético de saturação.

Fonte: Autor

Observa-se pela análise dos perfis de N_x e N_y na figura 43 que, devido à semelhança entre ambos para cada caso apresentado, é possível identificar que não há birrefringência natural no guia de onda formado, fato que dificulta a utilização desta propriedade para projeto de um sensor.

Verifica-se que, para ambas as espessuras, a variação espacial de índices de refração é superior a 0,002, sendo este um valor suficiente para formação de um guia de onda mesmo sem aplicação de campo magnético. Observa-se também que com a aplicação do campo magnético de saturação, para as duas espessuras, têm-se a perturbação dos perfis de índices e aumento dos valores

de índices de refração do BGO na região do canal. Para todos os casos apresentados neste item verifica-se que a variação espacial de índices de refração ocorre com maior intensidade na região central do canal próxima à superfície do substrato, fato que propiciará a formação do guia nesta região.

No próximo item são apresentados os cálculos dos modos ópticos, que permitem verificar que a localização dos modos está de acordo com o previsto pelos perfis de índices de refração.

4.2.2. Simulações para obtenção dos modos ópticos para o modulador com filme de $Tb_{23}Co_{77}$ com espessura de 50 nm

Este item e o próximo apresentam as dependências dos modos ópticos de propagação em 1300 nm com a aplicação de campos magnéticos. As variações do perfil de intensidade óptica e do índice de refração efetivo dos modos ópticos permitirão inferir sobre a modulação do sinal óptico com a aplicação de campos magnéticos.

A figura 44, a seguir, apresenta os modos ópticos E_x e E_y para o modulador óptico a partir de substrato de BGO com filme de $Tb_{23}Co_{77}$ com espessura de 50 nm. Os modos ópticos mostrados na figura 44 são gerados pelo efeito ISS, a partir do perfil de índices de refração. As setas em vermelho indicam o sentido do campo elétrico do modo óptico.

A seguir é apresentado o resultado da investigação a respeito da resposta do modulador óptico proposto. É verificada a resposta para aplicação de campos magnéticos entre zero e o campo magnético de saturação.

A figura 45, a seguir, apresenta os modos para um campo magnético aplicado de 10 Oe na direção x. Observa-se na figura 45 a perturbação dos modos em relação à figura 44, sendo possível verificar claramente as alterações nos formatos dos modos.

A figura 46, a seguir, apresenta os modos obtidos para aplicação de campo magnético de 50 Oe na direção x.

Figura 44 – Modos de propagação para modulador com filme de $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$, com espessura de 50 nm, sem aplicação de campos magnéticos: (a) E_x (b) E_y

(a)

(b)

Fonte: Autor

Figura 45– Modos de propagação para modulador filme de $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$ com espessura de 50 nm com aplicação de campo magnético de 10 Oe na direção x: (a) E_x (b) E_y .

(a)

(b)

Fonte: Autor

Figura 46 – Modos de propagação para modulador com filme de Tb₂₃Co₇₇, com espessura de 50 nm, com aplicação de campos magnéticos de 50 Oe na direção x: (a) E_x (b) E_y

(a)

(b)

Fonte: Autor

A figura 47, a seguir, apresenta os modos para campo magnético aplicado de 100 Oe na direção x.

Figura 47 – Modos de propagação para modulador com filme de $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$ com espessura de 50 nm com aplicação de campos magnéticos de 100 Oe na direção: (a) E_X (b) E_Y

(a)

(b)

Fonte: Autor

A figura 48, a seguir, apresenta os modos ópticos com campo magnético de 150 Oe aplicado na direção x.

Figura 48 – Modos de propagação para modulador com filme de $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$, com espessura de 50 nm, com aplicação de campo magnético de 150 Oe na direção x: (a) E_x (b) E_y .

Fonte: Autor

A seguir são apresentados os modos ópticos com o campo magnético de saturação de 200 Oe aplicado na direção x.

Figura 49 – Modos de propagação para modulador com filme de $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$ com espessura de 50 nm com aplicação de campos magnéticos de 200 Oe na direção x: (a) E_x (b) E_y

(a)

(b)

Fonte: Autor

A figura 50 apresenta a variação da intensidade óptica dos modos E_x e E_y em função dos campos aplicados. Os perfis de intensidade foram obtidos na direção vertical a partir da superfície do substrato BGO na região central do canal e na direção horizontal a $2\mu\text{m}$ da superfície do substrato.

Figura 50– Variação das intensidades ópticas dos modos com campo magnético aplicado para filme de 50 nm.

Fonte: Autor

Como observado na figura 50, existe alteração da intensidade óptica com o incremento do campo magnético, fato que evidencia a possibilidade de modulação da potência óptica através da aplicação de campos magnéticos.

Uma possível configuração de interrogação para aplicação do modulador óptico como sensor de campo magnético poderia ser implementada por medição da variação de potência óptica acoplada. Numa configuração deste tipo as condições de acoplamento óptico na entrada do guia seriam projetadas de tal forma que a potência óptica acoplada ao modulador fosse mantida constante, independentemente da variação do modo do guia. Já na interface de saída do guia seria posicionada uma fibra óptica monomodo, com modo guiado de dimensão menor ou igual à do modo do guia. Desta forma, a potência acoplada na interface fibra-guia de saída do modulador, dada pela superposição dos modos da fibra e do guia, seria dependente da posição e do perfil espacial do modo guiado pelo modulador, que são dependentes do campo magnético aplicado.

Outra alternativa de interrogação para o sensor de campo magnético descrito acima seria do tipo Sistema Micro-Ópto-Eleto-Mecânico (*Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems* - MOEMS). Num sistema deste tipo o sinal da potência óptica detectado seria mantido constante por um arranjo mecânico que movimentaria a fibra óptica de saída. A movimentação da fibra seria proporcional à perturbação do modo guiado no modulador gerada a partir do campo magnético aplicado. Este tipo de arranjo segue o mesmo princípio, descrito anteriormente, da técnica AFM.

A tabela 4 apresenta a variação dos valores de índices de refração efetivos em função do campo magnético aplicado para os modos E_x e E_y .

Tabela 4 – Variação dos índices de refração efetivos com o campo magnético aplicado.

Campo magnético (Oe)	Índice de refração efetivo para o modo E_x	Índice de refração efetivo para o modo E_y	N_x-N_y (efetivos)
0	2,025363	2,025360	3E-06
5	2,025367	2,025361	6E-06
10	2,025368	2,025362	6E-06
50	2,025372	2,025365	7E-06
100	2,025389	2,025368	2,1E-05
150	2,025427	2,025427	0
175	2,025457	2,025446	1,1E-05
200	2,025486	2,025464	2,2E-05

Fonte: Autor

Os gráficos da figura 51, a seguir, apresentam as plotagens dos dados da tabela 4.

Figura 51 – Variação do índice de refração efetivo com o campo magnético para os modos: (a) E_x , (b) E_y

(a)

(b)

Fonte: Autor

Verifica-se através dos gráficos anteriores que o índice de refração efetivo varia com a aplicação de campo magnético, ou seja, com o aumento do campo magnético tem-se um incremento do índice de refração efetivo. Os perfis das curvas mostradas na figura 46 se assemelham a um dos sentidos da curva de histerese magnética, apresentada anteriormente na figura 21, o que era esperado, uma vez que o efeito de magnetostricção que modula o sinal óptico é dependente da magnetização do filme. Esta variação de índice de refração efetivo possibilita a aplicação do modulador óptico proposto como sensor de campo magnético numa configuração interferométrica. Uma vez que alterações do índice de refração efetivo propiciarão alterações na fase do sinal óptico modulado.

A figura 52, abaixo, apresenta um gráfico da diferença entre os índices de refração efetivos dos modos x e y (birrefringência) em função do campo magnético aplicado.

Figura 52 – Variação da birrefringência do modulador com o campo magnético para os modos: (a) E_x , (b) E_y .

Fonte: Autor

Em regiões do gráfico da figura 52 onde a dependência da diferença entre os índices de refrações efetivos com o campo magnético é monotônica seria possível utilizar uma interrogação por birrefringência para aplicar o modulador como sensor de campo magnético. Neste caso,

utilizar-se-iam polarizadores na entrada e na saída do modulador orientados a 45° entre os eixos x e y. Desta forma observar-se-ia a interferência entre os modos x e y na saída do modulador. Desta forma o efeito de birrefringência propiciaria uma diferença de fase proporcional ao campo magnético aplicado. Como observado no gráfico da figura 52 existem alguns intervalos com dependência monotônica entre a diferença de índices e o campo magnético. Com isso, poder-se-ia utilizar o sensor baseado no efeito de birrefringência para campos magnéticos dentro de cada uma destas faixas.

4.2.3. Modos ópticos para o modulador com filme de $Tb_{23}Co_{77}$ com espessura de 100 nm

A figura 53 apresenta os modos ópticos para modulador constituído por substrato de BGO com filme de $Tb_{23}Co_{77}$ com espessura de 100 nm sem aplicação de campo magnético. A indução do modo neste caso se dá pelo efeito de ISS.

A figura 54 apresenta os modos de propagação para aplicação de campo magnético de 100 Oe.

A figura 55 apresenta os modos para aplicação de campo magnético de 200 Oe.

A figura 56 apresenta os modos para campo magnético de 300 Oe.

A figura 57 apresenta os modos para aplicação de 400 Oe.

Figura 53 – Modos de propagação para modulador com filme de $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$ com espessura de 100 nm, sem aplicação de campos magnéticos: (a) E_x (b) E_y

(a)

(b)

Fonte: Autor

Figura 54 – Modos de propagação para modulador com filme de $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$ com espessura de 100 nm com aplicação de campo magnético de 100 Oe: (a) E_x (b) E_y

(a)

(b)

Fonte: Autor

Figura 55 – Modos de propagação para modulador com filme de $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$ com espessura de 100 nm com aplicação de campo magnético de 200 Oe: (a) E_x (b) E_y

(a)

(b)

Fonte: Autor

Figura 56– Modos de propagação para modulador com filme de $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$ com espessura de 100 nm com aplicação de campo magnético de 300 Oe: (a) E_x (b) E_y

(a)

(b)

Fonte: Autor

Figura 57– Modos de propagação para modulador com filme de $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$ com espessura de 100 nm com aplicação de campo magnético de 400 Oe: (a) E_x (b) E_y

(a)

(b)

Fonte: Autor

A figura 58, a seguir, apresenta as variações de intensidade dos modos ópticos com a variação de campo magnético para modulador com filme de $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$ de 100 nm.

Figura 58– Variação dos índices de refração efetivos com o campo magnético aplicado com filme de $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$ com espessura de 100 nm.

Fonte: Autor.

A tabela 5 apresenta as variações dos índices de refração efetivo com o campo magnético aplicado para o modulador óptico com filme de $Tb_{23}Co_{77}$ com 100 nm de espessura.

Tabela 5 – Variações dos índices de refração efetivos com o campo magnético aplicado para filme de $Tb_{23}Co_{77}$ com espessura de 100 nm.

Campo magnético (Oe)	Índice de refração N_x	Índice de refração N_y
0	2,045418	2,025410
100	2,045422	2,025414
200	2,045435	2,025426
300	2,045458	2,025448
400	2,025498	2,025482

Fonte: Autor

As variações de índices de refração efetivo para diferentes campos magnéticos aplicados foi significativa para o modulador com filme de $Tb_{23}Co_{77}$, com 100 nm de espessura. Este fato também indica que o modulador é promissor para aplicação como magnetômetro na configuração interferométrica. Nesta configuração um feixe óptico seria dividido em dois, sendo que um deles atravessaria o modulador sujeito à aplicação de um campo magnético. A aplicação do campo magnético alteraria o índice de refração efetivo provocando a mudança de fase da onda guiada. Depois, com a interferência dos dois feixes seria possível relacionar o sinal com o campo magnético aplicado.

4.3. Fabricação do modulador óptico

As etapas de fabricação encontram-se descritas no item 3.3, como mencionado. Com o processo de deposição do filme $Tb_{23}Co_{77}$ estabelecido, o maior desafio passou a ser a definição da etapa de corrosão do filme, uma vez que na literatura não foi encontrado um processo de corrosão especificamente estabelecido para este material. Assim, para corrosão do filme foram propostas e testadas duas alternativas: corrosão úmida através de solução química e ablação através de LASER. Os itens a seguir apresentam os resultados obtidos com as duas técnicas.

A etapa seguinte à fabricação do modulador consiste em sua caracterização óptica, com as verificações experimentais dos modos guiados e da dependência dos mesmos com os campos magnéticos externamente aplicados. Esta etapa será objeto de trabalhos futuros.

4.3.1. Corrosão do filme de $Tb_{23}Co_{77}$ por LASER

Para corrosão via LASER do filme de $Tb_{23}Co_{77}$ para abertura da trincheira que define o guia de onda tipo canal do modulador foi utilizada a prototipadora *ProtoLaser U3* da fabricante *LPKF laser and electronics* (LPKF, 2014) instalada no LSI-USP. Esta máquina possui um diodo laser que pode chegar a resoluções de feixe de até 15 μm , sendo que seu comprimento de onda de operação é de 355 nm e a potência do laser pode chegar até 6 W. O equipamento em questão é utilizado como prototipadora de circuitos impressos. Maiores detalhes sobre o equipamento podem ser encontrados em LPKF (2014).

O processo de corrosão via LASER se mostrava bastante promissor, pois basicamente o processo se limita a desenhar o leiaute que se deseja usinar por meio de um programa de auxílio a projetos (CAD) e depois transferi-lo para a máquina através de um arquivo no formato adequado, no caso o gerber. Através da movimentação de eixos controlados por instruções do tipo comando numérico computadorizado (CNC) a prototipadora desenha o leiaute na superfície desejada. Assim, o processo de fabricação do modulador seria simplificado e haveria menor quantidade de resíduos gerados. Esta abordagem é compatível com FABLAB (Laboratório de Fabricação, conceito de fabricação de dispositivos eletrônicos ágil e colaborativa) e seria muito flexível, permitindo desenvolvimento rápido de outros componentes ópticos como por exemplo interferômetros.

Foi adotado para o processo o mesmo *setup* utilizado na corrosão de cobre com espessura de 5 μm , menor espessura possível nas configurações da máquina.

A lâmina de silício utilizada como amostra para os testes de corrosão possuía um filme de $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$ com aproximadamente 600 nm de espessura.

As condições iniciais dos testes foram: potência de 1 W, varredura única e velocidade de 400 mm/s. Assim, foram feitas três sequências de testes variando um dos parâmetros em cada sequência. Na primeira bateria de testes variou-se o número de vezes que o feixe de LASER incide sobre a região da trincheira, de acordo com a sequência: 1, 2, 5, 10 e 15 vezes. Na segunda bateria foi alterada a potência do LASER, a partir da condição inicial, utilizando-se valores de 0,5; 0,8; 1,0; 1,5 e 2 W. No terceiro conjunto de testes variou-se, a partir das condições iniciais, a velocidade de varredura do LASER, empregando-se os valores de 250, 500, 750, 1000 e 1200 m/s. Neste último teste utilizou-se uma potência de 3 W. A resolução máxima obtida pelo LASER é de 15 μm , o que limita a largura do canal do modulador a este valor.

A figura 59 apresenta uma imagem obtida no SEM instalado no Laboratório Mackgrafe da Universidade Presbiteriana Mackenzie.

Figura 59– Trincheiras abertas utilizando LASER variando parâmetros de processo

Fonte: Autor

Conforme mencionado foi realizada uma análise de todas as trilhas utilizando a técnica SEM. Os canais obtidos foram numerados de acordo com a figura 59.

Com potência de 1 W a variação do número de vezes que o LASER passava sobre o filme, de 1 a 5 varreduras, não possibilitou a obtenção dos canais, como observado nas linhas de 1 a 5 da figura 59. Concluiu-se que seria necessário aumentar a potência do LASER.

Como observado na figura 60, que apresenta a linha 10 mostrada na figura 59, não foi possível abrir o canal mesmo com aumento da potência do LASER para 2 W.

Figura 60– Imagem do canal 10 com LASER aplicando potência 2 W e velocidade 400 m/s.

Fonte: Autor

Com o aumento da velocidade do LASER foi possível obter melhores resultados, porém a rugosidade das paredes do canal não foi satisfatória, considerando que as mesmas se destinam à fabricação de um guia de onda. A não uniformidade da trincheira ao longo do seu comprimento afetaria o perfil de esforço e as propriedades da luz ao longo do guia.

A figura 61, a seguir, apresenta os melhores resultados, obtidos para as trincheiras 14 e 15.

Figura 61– Imagem dos canais 14 e 15 com LASER aplicando potência de 3 W e velocidades de varredura de 1000 mm/s e 1200 mm/s, respectivamente.

Fonte: Autor

A medida da largura de canal efetivamente obtida junto à superfície do substrato, como pode ser observado na figura 61, foi inferior à resolução do LASER devido à geometria das paredes do canal, que assumem perfil trapezoidal. A rugosidade das paredes ao longo do canal, no entanto, deve inviabilizar a fabricação do modulador devido à elevada atenuação que provavelmente será introduzida.

Concluiu-se que para dar continuidade ao estudo e viabilizar a corrosão do filme de $Tb_{23}Co_{77}$ via LASER seria necessário outro equipamento com menor valor de resolução e maior velocidade de varredura, para reduzir a rugosidade.

4.3.2. Corrosão úmida do filme de $Tb_{23}Co_{77}$

O processo de corrosão apresentado neste item foi realizado sobre lâminas de BGO com filme de $Tb_{23}Co_{77}$ com espessura de 100 nm.

Na segunda alternativa para corrosão do filme de $Tb_{23}Co_{77}$ foi utilizada a infraestrutura disponível no LSI-USP. Inicialmente foi testada uma solução estabelecida para corrosão de

alumínio, processo muito comum na fabricação de componentes eletrônicos. A solução ácida inicialmente utilizada foi: $400 \text{ H}_3\text{PO}_4 + 75 \text{ H}_2\text{O} + 25 \text{ HNO}_3$.

Foi realizada uma litografia para definição das trincheiras com diversas larguras de linha, porém a largura de linha de $10 \mu\text{m}$ é a de maior interesse, pois em trabalhos anteriores (SATO, 2015) esta largura demonstrou ser a que apresentou a melhor probabilidade de formação de modos guiados operando em comprimentos de onda de 1300 nm . Observando a reação química e a estrutura após o processo de corrosão num microscópio óptico, constatou-se que a corrosão do filme ocorreu, ou seja, a solução era adequada. Porém, a reação era tão rápida que não havia controle da mesma, uma vez que em 5 segundos visualmente era possível perceber que a trincheira já estava aberta. Como apresentado na figura 62, a seguir, a alta taxa de corrosão prejudicou a definição das paredes da trincheira, pois a solução corroeu o filme de $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$ por baixo do fotoresiste

Figura 62– Imagem da trincheira com corrosão do filme de $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$ por baixo do fotoresiste. Corrosão feita com solução $400 \text{ H}_3\text{PO}_4 + 75 \text{ H}_2\text{O} + 25 \text{ HNO}_3$ e tempo de 5 seg.

Fonte: Autor

Decidiu-se diluir a solução, reduzindo a concentração de ácido fosfórico e ácido nítrico sucessivas vezes. Após diversas diluições constatou-se a não necessidade do reagente de ácido nítrico. Realizando-se sucessivas diluições acompanhadas de análises visuais observou-se que a trincheira foi aberta em aproximadamente 2 minutos pela solução com concentrações de: $40 \text{ H}_3\text{PO}_4 + 460 \text{ H}_2\text{O}$.

Assim, foi possível estabelecer uma taxa de corrosão com relativo controle do processo e com boa definição das paredes da trincheira. Desta forma, decidiu-se que a abertura da trincheira para fabricação do canal do modulador deve ser realizada através da corrosão úmida utilizando a solução química acima mencionada.

Os resultados apresentados acima referem-se a amostras fabricadas sobre lâminas de BGO reaproveitadas de experimentos anteriores. Como estas lâminas já haviam sido utilizadas em outro processo de fabricação, as mesmas foram polidas para retirada de um filme de nitreto de silício anteriormente depositado. Após o polimento foi realizada a fabricação do modulador de acordo com o item 3.3. Apesar de ter sido obtida boa aderência do filme, o mesmo apresentou não uniformidades, causadas justamente pelas irregularidades na superfície do BGO, uma vez que não se conseguiu realizar o polimento óptico adequado.

5. CONCLUSÃO

Com o objetivo de desenvolver e fabricar o modulador óptico para aplicação como magnetômetro em óptica integrada foi necessário, primeiramente, definir o processo de fabricação e a identificação dos materiais adequados para a aplicação.

Foram realizadas as pesquisas dos materiais e dos processos de fabricação disponíveis e de parceiros que tivessem à disposição processos e materiais que possibilitassem a fabricação de filmes magnetostrictivos. A partir da parceria estabelecida com o IFUSP identificou-se que, dentre os materiais magnetostrictivos, os mais promissores foram o $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$ e o $\text{Tb}_{25}\text{Fe}_{75}$. Foi possível definir um processo para fabricação por *sputtering* do filme $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$, um processo de preparação termomagnético das amostras para otimizar o efeito magnetostrictivo e um método para caracterização da magnetostricção de filmes finos $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$ utilizando a técnica AFM, que poderá ser adaptada para outros filmes magnetostrictivos.

O tratamento termomagnético para indução de anisotropia magnética uniaxial no plano do filme proposto neste trabalho foi realizado e demonstrou resultado eficiente nos filmes de $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$.

Embora, o tratamento termomagnético não tenha sido eficiente para indução de anisotropia magnética nas amostras com filme de $\text{Tb}_{25}\text{Fe}_{75}$, também foi possível medir a magnetostricção destas amostras.

O valor obtido para magnetostricção do filme de $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$ pelo método proposto é consistente com os valores encontrados na literatura e está de acordo com a relação que estabelece que a magnetostricção é proporcional ao quadrado do momento de magnetização. O método para medição de magnetostricção utilizando a técnica de AFM mostrou-se eficiente para medição do fenômeno em filmes finos.

Devido ao melhor estado dos alvos disponíveis, aos resultados obtidos no tratamento para indução de anisotropia e aos valores de magnetostricção obtidos, o filme de $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$ foi escolhido como candidato para fabricação do modulador óptico a ser aplicado como magnetômetro. A fim de verificar a possibilidade de se construir um modulador óptico decidiu-se realizar modelagens e

simulações de forma a verificar a melhores materiais e parâmetros para construção do dispositivo. Devido a experiências anteriores do grupo, decidiu-se utilizar o programa COMSOL que resolve os modelos a partir do MEF.

As primeiras simulações realizadas no COMSOL, contemplaram os modelos térmico, mecânico e óptico, visando verificar a formação de guias de onda. Verificou-se que o esforço mecânico residual induzido na deposição do filme de $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$ não era suficiente para formação do guia em substrato de silício. Desta forma, optou-se por realizar simulações utilizando o BGO como substrato. Os resultados das simulações mostraram que é possível estabelecer condições para guiamento da luz em comprimentos de onda próximos a 1300 nm a partir do efeito de ISS gerado pela deposição do filme $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$ sobre substrato de BGO.

A partir da simulação com a geometria do modulador contendo os modelos mecânico e óptico, foram incorporados à simulação o modelo magnético e as equações que calculam o fenômeno de magnetostricção. A partir destas simulações foi possível verificar o efeito de modulação da luz pela aplicação de campos magnéticos. Observaram-se os efeitos do campo magnético sobre a intensidade óptica do feixe e sobre os índices de refração efetivos. Estes resultados comprovaram a possibilidade de construir-se um modulador óptico que pode ser utilizado como magnetômetro com modulação obtida a partir do efeito magnetostrictivo de filmes de $\text{Tb}_{23}\text{Co}_{77}$ depositados sobre BGO.

Foi possível estabelecer uma rota de fabricação do modulador com definições de processos, materiais e parâmetros auxiliados por simulação.

O trabalho apresentou originalidade pelo desenvolvimento do método de medição do efeito magnetostrictivo e pela modelagem e simulação inéditas de um modulador em óptica integrada com modulação pelo efeito magnetostrictivo.

A partir dos resultados obtidos poderá ser fabricado o modulador de acordo com os parâmetros simulados.

6. Trabalhos futuros

Após a caracterização do modulador proposto poderá ser realizado o encapsulamento do dispositivo juntamente com o projeto do arranjo óptico e da eletrônica necessários à interrogação adequada do modulador.

Novas simulações a partir dos modelos elaborados poderão ser realizadas com outros substratos ópticos e com materiais de maiores valores de magnetostricção.

Novos testes com variação de parâmetros de processo podem ser realizados para viabilização da abertura das trincheiras via LASER.

O modulador óptico proposto poderá ser aplicado à construção de um dispositivo interferométrico para medição de campos magnéticos.

Também poderão ser estudados moduladores em óptica integrada com cobertura magnetostrictiva em outras geometrias, por exemplo, Mach-Zehnder, MOEMS, etc.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

KIMURA, T; OTANI, Y; FUKUMA, Y. Benchtop time-resolved magneto-optical Kerr magnetometer, **Review of Scientific Instruments**, v.79, p. 12-16, 2008.

BLAIS, P.; MICHAELS, M. Lithography Tool Selection Strategy. In: GLENDINNING, W. B.; HELBERT, J. N. **Handbook of VLSI Microlithography: Principles, Technology and Applications**, Noyes Publications, 1991.

BUCHOLTZ, F.; DAGENAIS, D. M.; KOO, K. P. Recent developments in fiber optic magnetostrictive sensors. In: SPIE 1367, FIBER OPTIC AND LASER SENSORS, 8. **Proceedings...**, p. 226, 1991.

CALKINS, F. T.; FLATAU, A. B. Overview of magnetostrictive sensor technology. **J. Intell. Mater. Syst. Struct.** v.18, p.1857, 2007.

CARDOSO, J. R. **Engenharia eletromagnética**. São Paulo: Campus, 2010.

CHOPRA, H. D. et al. Magnetic mesostructure of giant magnetostrictive spring magnet type multilayers, **J. Applied Physics**, v. 85, 1999.

CLARK, A. E. Magnetostrictive rare earth-Fe₂ compounds. In: Wohlfarth, E. P. (ed.) **Ferromagnetic Materials**, v. 1, cap. 7. Amsterdam: North-holland, 1980, p.531-589.

CULLITY, B. D.; GRAHAM, C. D. **Introduction to magnetic materials**, 2nd ed. New York: Wiley-IEEE Press, 2008.

DEPLA, D.; MAHIEU, S. **Reactive Sputter deposition**. Berlin: Springer, 2008.

DUC, N. H. Giant magnetostriction in lanthanide-transition metal thin films. In: Gschneidner, K. A.; LeRoy, E.; Lander, G. H. (eds.), **Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths**, 32, 1999.

EKREEM, N. B. et al. An overview of magnetostriction its use and methods to measure these properties, **J. Mater. Process. Technol.** v.191, n.96, 2007.

FORESTER, D. W.; VITTORIA, C.; SCHELLENG, J. Magnetostriction of amorphous Tb_xFe_{1-x} thin films. **Journal of Applied Physics**, v.49, 1978.

FRANCO, M. A. R. A design study of a Ti: LiNbO₃ traveling-wave electro-optic modulator by the finite element method. In: THE INTERNATIONAL MICROWAVE AND OPTOELECTRONICS CONFERENCE IMOC. **Proceedings...** p.68-72, 1999.

GAUGITSCH, M.; HAUSER, H. Optimization of a magneto-optical light modulator. **Journal of Lightwave Technology**, 1999, v. 17, n. 12, p. 2633 - 2644.

GIBBS, M. R. J. **Modern trends in magnetostriction study and application**. Dordrecht: Kluwer Academic, 2001.

GILLETE, S. M. et al. Effects of intrinsic magnetostriction on tube-topology magnetoelectric sensors with high magnetic field sensitivity, **J. Appl. Phys.** v.115, p. 17C734, 2014.

GOELL, J. E. A circular-harmonic computer analysis of rectangular dielectric waveguides. **The bell system technical journal**, 1969, p. 2133-2160.

GOLÇALVEZ, L. C. D.; SANTOS, J. C. Stress fields in anisotropic media due to applied delta forces: application to stress waveguides, In: ENFMC - ENCONTRO NACIONAL DE FÍSICA DA MATÉRIACONDENSADA, 25. **Resumos...**, Caxambú, 2002

GRATAN, K.T.V.; SUN, T. Fiber optic sensor technology: an overview. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 82, p. 40, 2000.

GRATTAN, K. T. V.; MEGGIT, B. T. **Optical Fiber sensor Technology: devices and Technology**. London: Chapman & Hall, 1988, v2.

HARIN, E. V.; SHEFTEL, E. N.; KRIKUNOV, A. I. Atomic force microscopy measurements of magnetostriction of soft-magnetic films, **Solid State Phenom.** v.190, 2012.

HEAPS, W. The effect of strain on magnetostriction and magnetization in nickel, **Phys. Rev.** v.42, n.108, 1932.

HOPCROFT, M. A.; NIX, W. D.; KENNY, T. W. What is the Young's Modulus of silicon? **J. Microelectromech. Syst.**, v.19, n.2, 2010, p.229-238.

HORCAS, I. et al. WSXM: a software for scanning probe microscopy and a tool for nanotechnology, **Rev. Sci. Instrum.**, v.78, 2007.

HUNSPERBER, R. G. **Integrated optics: theory and technology**, 2nd ed. Alemanha: Springer-Verlag, 2009.

JACKSON, D.; DANDRIDGE, S.; SHEEM, K. Measurement of Small Phase shifts using a single-mode optical-fiber interferometer. **Optics Letter**, v. 5, 1980, p. 139-141.

KERSEY, A. D.; BUCHOLTZ, F. Fiber optic magnetic sensor development. **Proc. SPIE Int. Soc. Optical Eng**, v.718, p. 56, 1987.

KITANO, C. Aplicação da abordagem de domínio espectral para análise de moduladores ópticos integrados, Tese (Doutorado) – ITA-Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, 2000.

KITANO, C; OLIVEIRA, J. B. Dispositivo à óptica integrada para aplicações em telecomunicações. **Revista Científica periódica de telecomunicações**, 2000.

KOSHIBA, M. et al. Simple scalar finite element approach to optical rib waveguides. **IEEE proceedings-J**, v. 139, n.2, 1992, p.166-171.

LACHEISSERIE, E. T. Magnetostrictive materials. In: Lacheisserie, E. T.; GIGNOUX, D.; SCHLENKER, M. (eds.), **Magnetism-Material and Applications**, 2, Nova York: Springe Science, 2005.

LANDI, G. **Desenvolvimento de um gerador de nano partículas e caracterização de nano partículas de cobalto**, Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo; 2009.

LEE, K. S.; KANG, H. S.; PARK, M. Y. Fiber optic magnetostrictive transducers for magnetic field sensing. **Optical Eng.**, v.34, p. 3577-3582, 1995.

LIANG, W. et al. Highly sensitive fiber Bragg grating refractive index sensors. **Appl. Phys. Lett.** v.86, 2005.

LIAO, L.; SAMARA-RUBIO, D.; MORSE, M. High speed silicon Mach-Zehnder modulator, **Optics express**, v.13, 2005, p. 3129-3135.

LIMA, B. L. S.; FRANCO, M. A. R.; SANTOS, J. C. Modeling of magnetostrictive optical modulator for application as a magnetic field sensor. In: SBMO/IEEE MTT-S INTERNATIONAL MICROWAVE AND OPTOELECTRONICS CONFERENCE, **Anais ..**, Águas de Lindóia, 2017.

Lima, B. L. S. et al. Direct method for magnetostriction coefficient measurement based on atomic force microscope, illustrated by the example of Tb–Co film, **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 395, 2015, p.336-339.

LIMA, D. K. **Transformadores para instrumentos ópticos: aspectos da viabilidade do seu uso pelas empresas do setor elétrico brasileiro**. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

MABAYA, N.; LAGASSE, P. E. Finite element analysis waveguides of optical, **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, v.29, 1981, p. 600-605.

MACINTYRE, S. A. **Magnetic field measurement.**, United States of America: CRC press LLC, 2000.

MARCATILI, E. A. J. Dielectric rectangular waveguide and directional coupler for integrated optics. **Bell syst. Tech. J.**, 1969, v.48, p. 2071- 2102.

MARIANO, D. **Fabricação e caracterização de guias de onda baseadas em filmes finos e vidros de óxido de metal pesado dopados com Er³⁺ e Yb³⁺ contendo nano partículas metálicas para aplicações em dispositivos fotônicos**, Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo; 2013.

MARTINS, W. W. M. **Sensores ópticos de tensão baseados no efeito eletro-óptico em cristais de Niobato de Lítio**, Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2006.

MATHEWS, J.; BUKSHPHUN, L.; PRADHAN, R. A novel photonic magnetometer for detection of low frequency magnetic fields, photonic fiber and Cristal: Advances and Inovations in Device Applications V, **Proc. of SPIE**, v. 8120, p. 81291, 2011

MAXIMINO, F. L. **Caracterização de plasmons de superfície em filmes de metais nobres através de tunelamento ótico**. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

MEYERS, M. A.; CHAWLA, K. K. **Mechanical behavior of materials**. Cambridge: University Press, 2009.

MOULSON, A. J.; HERBERT, J. M. **Electroceramics**. New York: Willey, 2003.

NAZARÉ, F. V. B.; WERNECK, M. M. Opto-magnetostrictive current measurement instrument for high voltage environments. In: SPIE9157 - INTERNATIONAL CONFERENCE ON OPTICAL FIBRE SENSORS, 23. **Proceedings...**, Santander, 2014.

NISHIARA, H.; HARUNA, M.; SUHARA, T. **Optical Integrated Circuits**. 2nd ed. Nova York: McGraw Hill, 1989, p. 46-95.

OLABI, A. G.; GRUNWALD, A. Design and application of magnetostrictive actuator. **Sensors and Actuators**, v.144, 2008, p. 161-175.

OLIVEIRA, G. F. **Estudo das propriedades magnéticas de um objeto micro estruturado através do SNOM-MO**. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

PINHEIRO, L. **Interferômetros recuperadores de baixa tensão de meia onda para sistemas interferométricos de luz branca utilizando moduladores eletro-ópticos**. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, 2011.

PISSOLATO F. **[notas de aula]**. EE754 Ondas Guiadas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP, s.d.

POJAR, M. **Estudo das propriedades magnéticas de um objeto microestruturado através do SNOM-MO**. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

RASHLEIGH, S. C., Magnetic Field sensing with a single-mode fiber, **Opt. Lett.**, v. 6, p. 19–21, 1981.

RATNAJEEVAN, S.; HOLE, H. **Computer-aided analysis and design of electromagnetic devices**, Nova York: Elsevier, 1999, p. 175-191.

RUBINI, J.; SANTOS, J. C. Desenvolvimento de sensores ópticos aplicáveis à medição de alta tensão em sistemas elétricos de potência. In: WORKSHOP ANUAL DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO DO IEAv, 13. **Anais..**, São José dos Campos, 2013.

SAMPAIO, L. C. et al. Técnicas de Magnetometria. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.22, n. 3, 2000, p 406.

SANTANA, D. D. S. **Navegação terrestre usando unidade de medição inercial de baixo desempenho e fusão sensorial com filtro de Kalman adaptativo suavizado**, Tese (Doutorado) Universidade de São Paulo, 2011.

SANTI, C. E. **Filmes Finos de FexPt1-x**: estudo magnético e estrutural, Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

SANTOS, A. D. **Anisotropias Induzidas em Ligas Ferromagnéticas Amorfas**. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.

SANTOS, J. C. **Estudo e desenvolvimento de moduladores eletro e magnetoópticos e suas aplicações como transformadores de medição (tp e tc ópticos) em sistemas elétricos de potência**, Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

SANTOS, J. C.; SILVA, L. P. C.; JULIANO, J. C. FEM simulation method as a designing tool for electrooptical sensors development, **W S E A S Transactions on Power Systems**, v. 1, p. 1754-1761, 2006.

SATO, S. S. **Modelagem de estresse térmico residual induzido para guias de ópticos em substrato de retículo cúbico para aplicações de moduladores eletro-óptico**. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

SCHOENMAKER, J. et al. Magnetic characterization of microscopic particles by MO-SNOM, **J. Microsc.** v.214, 2004, p. 16-22.

SEDLAR, M.; MATEJEC, V.; PAULICKA, I. Optical fibre magnetic field sensors using ceramic magnetostrictive jackets. **Sensors and Actuators A**, v. 84, 2000, p. 297–302.

SHI, C. et al. Stable dynamic detection scheme for magnetostrictive fiber-optic interferometric sensors. **Opt.Express**, v.14, n.12, 2006, p. 5098–5102.

SHUN, L. C. **Physics of Optoelectronic Devices**, 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 2009.

SIARKOWSKI, A. L. Implementação de sensores ópticos integrados para aplicações em análises químicas e ambientais, Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo; 2007.

SILVA, R. M.; MARTINS, H.; NASCIMENTO, I. Optical Current Sensors for High Power Systems: a Review, **Appl. Sci.**, v.2, n.3, 2012, p. 602-628.

SOARES, A. P.; LUZ G. S. Determinação de correntes elétricas geomagneticamente induzidas (GIC) em sistema de transmissão de energia elétrica no Brasil. In: CITENEL, 3. **Anais...**, Florianópolis, 2005.

SOUTO, J. A. G.; RIVERA, H. L. High resolution ($<1\text{nm}$) interferometric fiber-optic sensor of vibrations in high-power transformers. **Opt. Express**, v.14, n.21, 2006, p. 9679-9686.

STEINBERG, R. A.; GIALLORENZI, T. G. Modal fields of anisotropic channel waveguides, **Journal of Optic Society of America**, v.67, 1977, p. 523-533.

THOMAS, S.; JINESH, M.; RADHAKRISHNANB, P.; NAMPOORI, V. P. N.; GEORGE, S. H. Metglas thin film based magnetostrictive transducers for use in long period fibre grating sensors. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 161, p. 83-90, 2010.

TIERCELIN, T. et al. Room temperature magnetoelectric memory cell using stress-mediated magnetoelastic switching in nanostructured multilayers, **Applied Physics Letters**, v.99, n.19, 2001, 192507.

WATTS, R.; GIBBS, M. R. J.; KARL, W. J. Finite-element modelling of magnetostrictive bending of a coated cantilever. **Appl. Phys. Lett.**, v.70, n.19, 1997.

XU, Q.; ALMEIDA, V. R. Ultrafast integrated semiconductor optical modulator based on the plasma-dispersion effect. **Optics Letters**, v.30, 2005, p. 2403-2405.

YARIV, A.; YEH, P. **Optical Waves in Crystals**. New York: Wiley & Sons, 1984.

YONAMINE, T. **Estudo do ferro, ferri e sperimagnetismo em bicamadas e filmes amorfos de R-Co (R = Y, Gd, Tb)**. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo; 2000.