

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor, o
texto completo desta tese será
disponibilizado somente a partir de
17/09/2022.

ANDRYOS DA SILVA LEMES

**APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ABORDAGEM DE DOMÍNIO ESPECTRAL PARA
ANÁLISE DE GUIAS DE ONDA PLANOS EM MODULADORES ELETRO-ÓPTICOS
INTEGRADOS COM SUBSTRATOS DE LNOI (LITHIUM NIOBATE THIN FILM ON
INSULATOR)**

Ilha Solteira
2020

ANDRYOS DA SILVA LEMES

**APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ABORDAGEM DE DOMÍNIO ESPECTRAL PARA
ANÁLISE DE GUIAS DE ONDA PLANOS EM MODULADORES ELETRO-ÓPTICOS
INTEGRADOS COM SUBSTRATOS DE LNOI (LITHIUM NIOBATE THIN FILM ON
INSULATOR)**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia
do Câmpus de Ilha Solteira - UNESP
como parte dos requisitos para obtenção do
título de Doutor em Engenharia Elétrica.
Especialidade: Automação.

Prof. Dr. Claudio Kitano
Orientador

Ilha Solteira
2020

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

L552a Lemes, Andryos da Silva.
Aplicação do método de abordagem de domínio espectral para análise de guias de onda planos em moduladores eletro-ópticos integrados com substratos de LNOI(Lithium Niobate Thin film on Insulator) / Andryos da Silva Lemes. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2020
125 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2020

Orientador: Cláudio Kitano
Inclui bibliografia

1. Modulador eletro-óptico integrado. 2. Substrato de LNOI. 3. Guias de onda planos. 4. Abordagem de domínio espectral. 5. Expressões de campo eletromagnético.


Raiane da Silva Santos

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: Aplicação do método de abordagem de domínio espectral para análise de guias de onda planos em moduladores eletro-ópticos integrados com substratos de LNOI (Lithium Niobate Thin Film On Insulator)

AUTOR: ANDRYOS DA SILVA LEMES

ORIENTADOR: CLAUDIO KITANO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em ENGENHARIA ELÉTRICA, área: Automação pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. CLAUDIO KITANO
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP



Prof. Dr. MARCELO CARVALHO MINHOTO TEIXEIRA
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP



Prof. Dr. RICARDO TOKIO HIGUTI
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP



Prof. Dr. GEFESON MENDES PACHECO
Departamento de Engenharia Eletrônica / Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA



Prof. Dr. JOÃO MARCOS SALVI SAKAMOTO
Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial / Instituto de Estudos Avançados - IEAv

Ilha Solteira, 17 de setembro de 2020

Dedico

Aos meus pais, Edson e Madalena, aos meus irmãos, Dyangeles (*in memoriam*) e Natália, aos meus sogros, Renato e Sônia, e à minha esposa, Renata, por todo amor, confiança e apoio em todos os momentos que culminaram nesta conquista. Em especial, ao meu filho, Cauã, que com sua pureza se tornou o meu maior incentivo.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos a todos os familiares, amigos, professores e funcionários da FEIS-UNESP, que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho. Em especial, dedico meus agradecimentos:

- À minha esposa, Renata, que há 12 anos tem sido a minha companheira de vida. O seu amor, companheirismo e paciência foram o meu sustentáculo durante toda esta jornada.
- Ao meu filho, Cauã, que mesmo sem compreender o motivo da minha ausência, nunca me negou o seu carinho inocente. Você, que um dia ao ler esta página, saiba que foi no seu amor puro que encontrei forças para não desistir. Sinta-se motivado, meu filho.
- Aos meus pais, Edson e Madalena, à minha irmã, Natália, e aos meus sogros, Renato e Sônia, que sempre estiveram presentes com suas palavras de apoio e conforto em todos os momentos de dificuldades. Em especial, registro o agradecimento ao meu irmão, Dyangeles (*in memoriam*), cujos sacrifícios pessoais tornaram possível a minha dedicação aos estudos.
- Ao meu orientador, Prof. Dr. Claudio Kitano, por ser um pesquisador de excelência e inspiração para todos próximos. Obrigado pela paciência e por todo o conhecimento compartilhado durante a execução desta Tese.
- À todos colegas do LOE - Laboratório de Optoeletrônica, Stephany, Luiz Henrique, Guilherme, Galeti, Fernando, Flávio, Angel e Anderson, que além das discussões acadêmicas foram amigos durante minha caminhada. Em especial, ao amigo João Paulo, com quem compartilhei esta linha de pesquisa e dividi muitas horas de discussão, trabalho e também de companheirismo.
- Ao IFSP - Câmpus Presidente Epitácio pela concessão do afastamento para o desenvolvimento do meu doutorado com dedicação. Em especial, aos professores da área indústria, por sempre serem excelentes naquilo que se propõem.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

"Podemos facilmente perdoar uma criança que tem medo do escuro; a real tragédia da vida é quando os homens têm medo da luz." Platão

RESUMO

A substituição da eletrônica convencional por componentes ópticos em aplicações de processamento óptico de sinal tem aumentado o interesse em integrar diferentes dispositivos fotônicos em um único *chip*. Por conseguinte, as pesquisas em circuitos fotônicos integrados têm se intensificado ao longo das últimas décadas. Desta forma, aumentou-se a necessidade de moduladores de fase óptica integrados que sejam escaláveis e de alta performance, com ampla largura de banda, compatibilidade com a fotônica baseada em silício e integração com a eletrônica CMOS. Neste contexto, o filme de Niobato de Lítio Sobre o Isolador (LNOI - *Lithium Niobate Thin Film On Insulator*) é uma plataforma promissora que surgiu e tem permitido a confecção de moduladores eletro-ópticos de maior eficiência. Sendo assim, neste trabalho aplica-se a consagrada técnica de Abordagem de Domínio Espectral (ADE) para a análise dos guias de onda planos em moduladores eletro-ópticos integrados com substratos de LNOI. As expressões de campo eletromagnético destes guias são obtidas e a formulação desenvolvida é submetida a testes, obtendo-se resultados em concordância com a literatura publicada. Os resultados numéricos indicam que o substrato de LNOI pode permitir a confecção de guias de onda CPW e CPS pouco dispersivos para uma faixa ampla de frequências e com impedâncias próximas de 50Ω . Além disso, observou-se que a miniaturização do invólucro metálico pode estender a banda monomodo de operação quando comparada a dispositivos do tipo *bulk*. Mostrou-se que se pode obter moduladores eletro-ópticos com tensões de meia-onda de no máximo 5 V e com guias de onda de comprimentos inferiores ao da maioria dos dispositivos *bulk* comercialmente disponíveis. Verificou-se que a adição de uma camada de *buffer-layer*, além de evitar o contato da luz com os eletrodos, permite que se obtenham moduladores com bom casamento de velocidades entre o modo óptico e elétrico, o que resulta em modos fundamentais com respostas em frequência de modulação superiores a região monomodo. Por fim, os resultados sugerem que o modo- π fundamental do guia CPS possui curvas de dispersão pouco dispersivas até 1 THz, sendo que nos testes realizados não foram encontrados os gráficos típicos de transição modal que comumente estão associados às estruturas de óptica integrada. Desta forma, caso pesquisas futuras comprovem que não há acoplamento entre os modos fundamental e superiores, e garanta-se o estabelecimento de somente o modo fundamental no guia, poderia-se obter moduladores eletro-ópticos com respostas em frequência próximos a 900 GHz. Esta frequência está dentro da banda de terahertz, que é considerada a próxima fronteira para aplicações em sistemas de comunicação com banda extremamente larga.

Keywords: Modulador eletro-óptico integrado. Substrato de LNOI. Guias de onda planos. Abordagem de domínio espectral. Expressões de campo eletromagnético.

ABSTRACT

The replacement of conventional electronics by optical components in optical signal processing applications has increased the interest in integrating different photonic devices on a single chip. Therefore, researches in integrated photonic circuits have been intensified over the past few decades. In this way, the need for scalable and high performance integrated optical phase modulators, with wide bandwidth, compatibility with silicon-based photonics and integration with CMOS electronics has increased. In this context, Lithium Niobate Thin Film On Insulator (LNOI) is a promising platform that has emerged and enabled the production of more efficient electro-optic modulators. Thus, in this work the well-established technique of Spectral Domain Approach (SDA) is applied to planar waveguides analysis in integrated electro-optic modulators with LNOI substrates. Electromagnetic field expressions in these guides are obtained and the developed analysis is thoroughly tested, obtaining results in accordance to the literature, determined by other techniques. Numerical results indicate that LNOI substrate shows the possibility of manufacturing CPW and CPS presenting low dispersion for a wide range of frequencies and impedances close to $50\ \Omega$. Besides, it was observed that the metallic box miniaturization can extend the single-mode band of operation when compared to bulk type devices. It has been shown that electro-optic modulators can be obtained with a maximum of 5 V half-wave voltages and waveguide length shorter than most of commercially bulk devices available. It was found that the addition of a buffer-layer, besides avoiding the contact of the light with the electrodes, it allows to obtain modulators with good velocity matching between optical and electrical modes, which results in fundamental modes with higher modulation frequency responses than the single-mode region. Finally, the results indicate that the CPS fundamental π -mode has low dispersion curves up to 1 THz and, in the performed tests, the typical modal transition curves, commonly associated to integrated optics structures, were not found. Thus, if future researches prove that there is no coupling between fundamental and superior modes, and if it can be guaranteed the establishment of only the fundamental mode in the guide, electro-optic modulators with frequency responses close to 900 GHz could be obtained. This frequency is within the terahertz band, which is considered the next frontier to be applied to communication systems applications with extremely broadband demand.

Keywords: Integrated electro-optic modulator. LNOI substrate. Planar waveguides. Spectral Domain Approach. Electromagnetic field expressions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Diagrama da região ativa de um modulador eletro-óptico com canal óptico do tipo Mach-Zehnder.	19
Figura 2	Estruturas blindadas de guias de ondas planos. (a) <i>Microstrip</i> . (b) CPW. (c) CPS.	22
Figura 3	Guia óptico do tipo <i>rib</i> ou <i>ridge</i> em uma plataforma de LNOI.	22
Figura 4	Substrato de LNOI típico com canal óptico difundido.	23
Figura 5	Seção transversal de um guia de onda plano com quatro camadas. (a) CPS. (b) CPW.	26
Figura 6	Elemento diferencial associado a duas linhas de transmissão acopladas.	43
Figura 7	Circuito geral de alimentação associado ao guia de onda. (a) CPS. (b) CPW.	48
Figura 8	Diagrama básico de moduladores de fase óptica com canais ópticos fabricados em substrato de LiNbO_3 em corte-Z. (a) Guia de onda do tipo CPS. (b) Guia de onda do tipo CPW.	50
Figura 9	Conformação do campo óptico no guia de canal difundido. (a) Componente na direção x em $y = -1 \mu\text{m}$. (b) Componente na direção y em $x = 0 \mu\text{m}$	52
Figura 10	Guia de onda do tipo CPS com canal óptico difundido na camada de LiNbO_3	53
Figura 11	Seção transversal de um guia de onda planar com quatro camadas e multieletródos distribuídos.	56
Figura 12	Recorte da seção transversal de um guia CPS com tensão V_x aplicada ao eletrodo 1.	73
Figura 13	Teste de curva de dispersão para os modos fundamental e primeiro superior ímpar de uma estrutura CPW.	76
Figura 14	Teste do cálculo de impedância característica para o modo fundamental de uma estrutura CPW com substrato anisotrópico.	77
Figura 15	Testes da formulação para uma estrutura de 4 camadas com diferentes materiais no substrato.	78
Figura 16	Teste do cálculo de campo elétrico absoluto da componente E_y . (a) Modos $-c$ e $-\pi$. (b) Campo resultante.	80

Figura 17	Determinação das frequências de corte dos três primeiros modos $-\pi$ de ordem superior para o guia CPS do artigo de Railton e McGeehan (1989).	82
Figura 18	Curvas de dispersão de ε_{ef} que se obtêm para os modos- π fundamental e primeiro superior para o guia CPS do artigo de Railton e McGeehan (1989).	82
Figura 19	Fator de superposição Γ^N para um modulador com o guia CPS do artigo de Railton e McGeehan (1989).	83
Figura 20	Resposta em frequência de modulação para um modulador com o guia CPS do artigo de Railton e McGeehan (1989), quando se considera $L_z = 9,1$ mm.	84
Figura 21	Guias de onda de moduladores eletro-ópticos com substratos de LNOI básico. (a) CPS. (b) CPW.	86
Figura 22	Curvas de dispersão dos modos fundamentais do CPS e CPW de um modulador eletro-óptico com substrato de LNOI básico.	87
Figura 23	Curvas de impedância característica dos modos fundamentais do CPS e CPW de um modulador eletro-óptico com substrato de LNOI básico.	88
Figura 24	Magnitude do campo E_y na camada de TFLN do guia de onda do modulador eletro-óptico com substrato de LNOI básico. (a) CPW ($h_3 = 1 \mu m$). (b) CPW ($h_3 = 4 \mu m$). (c) CPS: modo-c ($h_3 = 1 \mu m$). (d) CPS: modo-c ($h_3 = 4 \mu m$). (e) CPS: modo- π ($h_3 = 1 \mu m$). (f) CPS: modo- π ($h_3 = 4 \mu m$).	91
Figura 25	Fator de superposição Γ^N do modulador eletro-óptico com substrato de LNOI básico. (a) Com guia de onda CPW. (b) Com guia de onda CPS.	94
Figura 26	Resposta em frequência de modulação para os modos fundamentais dos moduladores das Tabelas 2 e 3. Consideram-se que as impedâncias estão casadas nos acessos.	97
Figura 27	Guias de onda de moduladores eletro-ópticos com substratos de LNOI com <i>buffer-layer</i> . (a) CPS. (b) CPW.	99
Figura 28	Curvas de dispersão para os guias CPW e CPS de um modulador eletro-óptico com substrato de LNOI com <i>buffer-layer</i> . (a) Modo fundamental do CPW. (b) Modo- π fundamental do CPS.	100
Figura 29	Curvas de impedância característica para os guias CPW e CPS de um modulador eletro-óptico com substrato de LNOI com <i>buffer-layer</i> . (a) Modo fundamental do CPW. (b) Modo- π fundamental do CPS.	101

Figura 30	Fator de superposição Γ^N do modulador eletro-óptico com guia CPW e substrato de LNOI com <i>buffer-layer</i> . (a) $w_{1,2} = 8 \mu\text{m}$. (b) $w_{1,2} = 16 \mu\text{m}$	104
Figura 31	Fator de superposição Γ^N do modulador eletro-óptico com guia CPS e substrato de LNOI com <i>buffer-layer</i> . (a) $w_{1,2} = 8 \mu\text{m}$. (b) $w_{1,2} = 16 \mu\text{m}$	105
Figura 32	Fator de superposição Γ^N do modulador eletro-óptico com um guia CPS assimétrico e substrato de LNOI com <i>buffer-layer</i>	108
Figura 33	Resposta em frequência de modulação dos moduladores com substratos de LNOI com <i>buffer-layer</i> indicados na Tabela 5. (a) CPW. (b) CPS.	110
Figura 34	Curvas de dispersão dos modos fundamental e primeiro superior para os guias CPW de um modulador eletro-óptico com substrato de LNOI com <i>buffer-layer</i> . (a) caso 1: $w_i = 8 \mu\text{m}$ e $h_4 = 1 \mu\text{m}$. (b) caso 2: $w_i = 8 \mu\text{m}$ e $h_4 = 4 \mu\text{m}$. (c) caso 3: $w_i = 16 \mu\text{m}$ e $h_4 = 1 \mu\text{m}$. (d) caso 4: $w_i = 16 \mu\text{m}$ e $h_4 = 4 \mu\text{m}$	112
Figura 35	Curvas de dispersão dos modos- π fundamental e primeiro superior para os guias CPS de um modulador eletro-óptico com substrato de LNOI com <i>buffer-layer</i> . (a) caso 1: $w_i = 8 \mu\text{m}$ e $h_4 = 1 \mu\text{m}$. (b) caso 2: $w_i = 8 \mu\text{m}$ e $h_4 = 4 \mu\text{m}$. (c) caso 3: $w_i = 16 \mu\text{m}$ e $h_4 = 1 \mu\text{m}$. (d) caso 4: $w_i = 16 \mu\text{m}$ e $h_4 = 4 \mu\text{m}$	113
Figura 36	Curvas de dispersão dos modos- π fundamental e primeiro superior para o caso 2 ($w_i = 8 \mu\text{m}$ e $h_4 = 4 \mu\text{m}$) do guia CPS com caixa metálica de $10 \times 10 \text{ mm}^2$	114
Figura 37	Curvas estendidas da resposta em frequência de modulação dos moduladores com guias de onda CPS e substratos de LNOI com <i>buffer-layer</i> indicados na Tabela 5.	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Frequências de corte dos primeiros modos superiores do CPS e CPW de um modulador eletro-óptico com substrato de LNOI básico.	89
Tabela 2	Parâmetros dos moduladores com substrato de LNOI básico analisados quando se tem interação eletro-óptica máxima.	96
Tabela 3	Parâmetros dos moduladores com substrato de LNOI básico analisados quando os centros dos canais ópticos são deslocados em $\sim 1,65 \mu\text{m}$ das bordas dos eletrodos.	97
Tabela 4	Frequências de corte dos primeiros modos superiores do CPS e CPW de um modulador eletro-óptico com substrato de LNOI com <i>buffer-layer</i>	103
Tabela 5	Parâmetros dos moduladores com substrato de LNOI com <i>buffer-layer</i> analisados quando se tem interação eletro-óptica máxima.	106
Tabela 6	Parâmetros dos moduladores com guias de onda CPS assimétricos e substratos de LNOI com <i>buffer-layer</i>	108

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADE	Abordagem de Domínio Espectral
CFI	Circuito Fotônico Integrado
CPS	<i>Coplanar Strips</i>
CPW	<i>Coplanar Waveguide</i>
TEM	Eletromagnético Transversal
FEIS	Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira
LOE	Laboratório de Optoeletrônica
LB	Largura de Banda
LTs	Linhas de Transmissão
LNOI	<i>Lithium Niobate Thin Film on Insulator</i>
MZ	Mach-Zehnder
MIADÉ	Método das Imagens em ADE
MFOI	Modulador de Fase Óptica Integrado
LiNbO ₃ ou LN	Niobato de Lítio
PE	<i>Proton Exchange</i>
RF	Radiofrequência
SiO ₂	Sílica
SOI	<i>Silicon-on-Insulator</i>
TFLN	<i>Thin Film Lithium Niobate</i>
TDF	Transformada Discreta de Fourier

LISTA DE SÍMBOLOS

h_m	Espessura da camada m da estrutura.
w_i	Largura da fita metálica i .
s_i	Distância entre os centros da fita i e o centro da estrutura.
L	Metade da largura da seção transversal da estrutura.
μ_{rm}	Permeabilidade magnética relativa do material da camada m da estrutura.
μ_0	Permeabilidade magnética relativa do vácuo.
ϵ_{rm}	Permissividade elétrica relativa do material da camada m da estrutura.
ϵ_0	Permissividade elétrica relativa do vácuo.
$\epsilon_{rm//}$	Permissividade elétrica relativa na direção paralela ao eixo óptico da camada m da estrutura.
$\epsilon_{rm\perp}$	Permissividade elétrica relativa na direção perpendicular ao eixo óptico da camada m da estrutura.
$\vec{E}_m$	Campo elétrico na camada m .
E_{xm}, E_{ym}, E_{zm}	Componentes de campo elétrico nas direções x , y e z na camada m .
$\vec{H}_m$	Campo magnético na camada m .
H_{xm}, H_{ym}, H_{zm}	Componentes de campo magnético nas direções x , y e z na camada m .
β	Constante de fase do modo guiado.
k_0	Constante de fase no espaço livre.

ω	Frequência angular.
t	Variável temporal.
T_x	Período espacial.
α_n	Variável espectral.
$\tilde{E}_{xm}, \tilde{E}_{ym}, \tilde{E}_{zm}$	Componentes de campo elétrico, no domínio espectral, nas direções x , y e z na camada m .
$\tilde{H}_{xm}, \tilde{H}_{ym}, \tilde{H}_{zm}$	Componentes de campo magnético, no domínio espectral, nas direções x , y e z na camada m .
$\tilde{J}_x$ e $\tilde{J}_z$	Componentes da densidade linear de corrente no domínio espectral.
$\tilde{Z}_{zz}, \tilde{Z}_{zx}, \tilde{Z}_{xz}$ e $\tilde{Z}_{xx}$	Diádicas de Green no domínio espectral.
$\tilde{J}_{zm}$ e $\tilde{J}_{xm}$	Funções de base de $\tilde{J}_z$ e $\tilde{J}_x$, respectivamente.
$\tilde{E}_{zm}$ e $\tilde{E}_{xm}$	Funções de base de $\tilde{E}_z$ e $\tilde{E}_x$, respectivamente.
c_m	Coeficientes de ponderação de $\tilde{J}_{zm}$ e $\tilde{E}_{xm}$.
d_m	Coeficientes de ponderação de $\tilde{J}_{xm}$ e $\tilde{E}_{zm}$.
M	Quantidade de funções de base para $\tilde{J}_z$ e $\tilde{E}_z$.
N	Quantidade de funções de base para $\tilde{J}_x$ e $\tilde{E}_x$.
c'_i	Coeficientes de ponderação normalizados (c_i/c_1 para $i = 2, 3, \dots, M$).
d'_j	Coeficientes de ponderação normalizados (d_j/c_1 para $j = 1, 2, \dots, N$).
$\tilde{J}_{zim}$ e $\tilde{J}_{xim}$	Funções de base relacionadas a $\tilde{J}_{zm}$ e $\tilde{J}_{xm}$, respectivamente, sobre a fita i .
c_{im} e d_{im}	Coeficientes de ponderação de $\tilde{J}_{zim}$ e $\tilde{J}_{xim}$, respectivamente.

ϵ_{ef}	Permissividade elétrica efetiva.
n_{ef}	Índice de refração efetivo.
Z_0	Impedância característica.
P_{AVG}	Potência média transmitida.
I_z	Corrente elétrica na fita metálica.
V_x	Tensão elétrica no <i>slot</i> .
V_i^c e V_i^π	Ondas de tensão na fita i para os modos $-c$ e $-\pi$, respectivamente.
R_c e R_π	Razões entre as ondas de tensão nas fitas para os modos $-c$ e $-\pi$, respectivamente.
Z_{0i}^c e Z_{0i}^π	Impedância característica da fita i para os modos $-c$ e $-\pi$, respectivamente.
Γ^N	Integral de superposição.
$V_{g\pi}$	Tensão de meia-onda do gerador.
RFM	Resposta em frequência de modulação.

SUMÁRIO

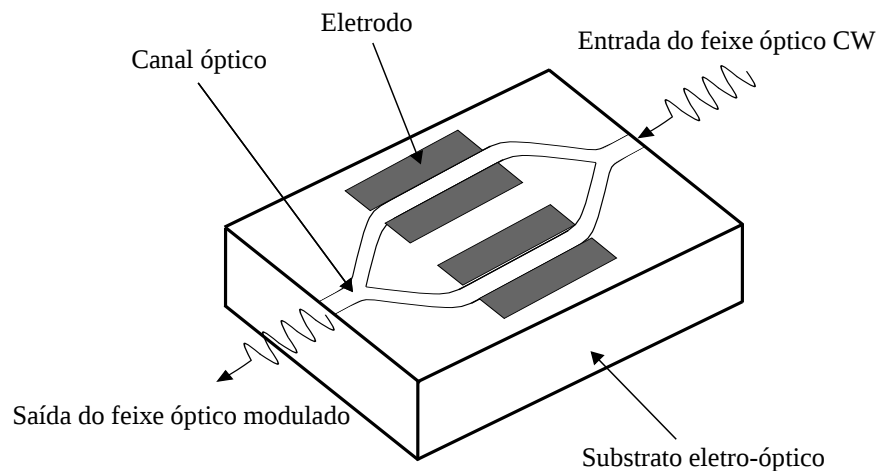
1	INTRODUÇÃO	19
1.1	MODULADORES DE FASE ÓPTICA EM CFIS	20
1.2	ANÁLISE DE MFOIS COM SUBSTRATO DE LNOI	21
1.3	ANÁLISE DE GUIAS DE ONDAS PLANOS COM SUBSTRATOS DE LNOI	23
1.4	OBJETIVOS	24
1.5	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	25
2	MÉTODO DE ABORDAGEM DE DOMÍNIO ESPECTRAL	26
2.1	ESTRUTURA DE GUIA DE ONDA PLANAR COM QUATRO CAMADAS	26
2.2	MÉTODO DE GALERKIN	31
2.3	SELEÇÃO DAS FUNÇÕES DE BASE	34
2.4	DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES c_m E d_m	35
2.5	MÉTODO DAS IMAGENS EM ADE - MIADE	37
2.5.1	Método de Galerkin adaptado para o MIADE	39
3	PARÂMETROS ELÉTRICOS DOS GUIAS DE ONDA PLANOS	41
3.1	CURVAS DE DISPERSÃO	41
3.2	IMPEDÂNCIA CARACTERÍSTICA	41
3.2.1	Impedância característica do CPS	43
3.2.1.1	Análise de linhas de transmissão acopladas	43
3.2.2	Impedância característica do CPW	46
4	FUNDAMENTOS DE MFOIS ASSOCIADOS AO GUIA DE ONDA	48
4.1	CIRCUITOS GERAIS DE ALIMENTAÇÃO ASSOCIADOS AO CPS E CPW	48
4.2	MFOI COM GUIA DE CANAL	49
4.3	CONFORMAÇÃO DE CAMPO ÓPTICO	50
4.4	INTEGRAL DE SUPERPOSIÇÃO (<i>OVERLAP INTEGRAL FACTOR</i>)	53
4.5	TENSÃO DE MEIA-ONDA DO GERADOR - $V_{g\pi}$	54
4.6	RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DE MODULAÇÃO - <i>RFM</i>	55
5	DETERMINAÇÃO DAS COMPONENTES TRANSVERSAIS DE CAMPO ELETROMAGNÉTICO DE UM GUIA DE ONDA PLANAR COM SUBSTRATO DE LNOI	56
5.1	DECOMPOSIÇÃO DAS COMPONENTES DE CAMPO ELETROMAGNÉTICO	57
5.2	CAMPO ELETROMAGNÉTICO TRANSVERSAL	59
5.3	CÁLCULO DE P_{AVG}	68

5.4	CAMPO ELÉTRICO EM VALORES ABSOLUTOS	72
6	TESTES COMPUTACIONAIS DA FORMULAÇÃO DESENVOLVIDA	75
6.1	DISCUSSÃO GERAL SOBRE AS ROTINAS NUMÉRICAS	75
6.2	VALIDAÇÃO - IMPEDÂNCIA CARACTERÍSTICA	77
6.3	VALIDAÇÃO - CAMPO $E_y(x,y)$ EM VALORES ABSOLUTOS	79
6.4	ANÁLISE DE UM MODULADOR ELETRO-ÓPTICO TÍPICO	81
7	RESULTADOS NUMÉRICOS PARA ESTRUTURAS COM SUBSTRATOS DE LNOI	85
7.1	PARÂMETROS GERAIS DOS PROCEDIMENTOS NUMÉRICOS	85
7.2	RESULTADOS - SUBSTRATO DE LNOI BÁSICO	85
7.3	RESULTADOS - SUBSTRATO DE LNOI COM <i>BUFFER-LAYER</i>	98
7.3.1	Descrição das estruturas de guias de onda	99
7.3.2	Curvas de dispersão	100
7.3.3	Impedâncias Características	101
7.3.4	Bandas de operação monomodo	102
7.3.5	Tensões de meia-onda dos geradores	103
7.3.6	Resposta em frequência de modulação eletro-óptica	109
7.3.7	Resultados numéricos para $f > 100$ GHz	111
8	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	117
8.1	CONCLUSÕES	117
8.2	PESQUISAS FUTURAS	119
	REFERÊNCIAS	121

1 INTRODUÇÃO

Os Moduladores de Fase Óptica Integrados (MFOIs) são elementos importantes em sistemas de telecomunicações (WOOTEN *et al.*, 2000), dispositivos de Radiofrequência (RF) em fotônica (SOUZA *et al.*, 2017), Circuitos Fotônicos Integrados (CFIs) (HE *et al.*, 2019; WEIGEL *et al.*, 2016; FATHPOUR, 2015) e sensores (OUYANG *et al.*, 2019). Os MFOIs regularmente empregados são baseados no efeito eletro-óptico linear (BOYNTON *et al.*, 2020), no qual um campo elétrico de modulação é utilizado para variar linearmente o índice de refração de um material através do qual a luz se propaga (YARIV; YEH, 1984). Um diagrama básico da região ativa de um modulador eletro-óptico integrado é apresentado na Figura 1, cujo canal óptico está na forma de interferômetro de Mach-Zehnder. O campo elétrico de modulação pode ser aplicado por meio de eletrodos, a um ou ambos braços do interferômetro, induzindo uma variação nos índices de refração do material eletro-óptico, modificando a fase da onda óptica guiada.

Figura 1 - Diagrama da região ativa de um modulador eletro-óptico com canal óptico do tipo Mach-Zehnder.



Fonte: Elaboração do autor.

Neste contexto, o Niobato de Lítio (LiNbO_3 ou LN) tem sido uma ótima escolha de material empregado nos MFOIs devido ao seu elevado coeficiente eletro-óptico ($r_{33} \approx 31 \text{ pm/V}$), ampla janela de transparência (de $0,4 \mu\text{m}$ a $5 \mu\text{m}$), rápida resposta eletro-óptica e boa estabilidade com relação a flutuação de temperatura (WANG *et al.*, 2018a). Entretanto, os MFOIs de LN

não são escaláveis devido a dificuldade de miniaturização dessas estruturas (LACOUR *et al.*, 2005), como, por exemplo, no processo de fabricação dos canais ópticos pelas técnicas padrões como difusão de titânio e troca de prótons (BAZZAN; SADA, 2015). Geralmente, esses canais ópticos apresentam guiagem fraca e grande *mode-size* devido ao baixo contraste entre os índices de refração efetivo do guia óptico e o substrato de LN. Essa característica faz com que se tenha uma baixa eficiência de modulação, uma vez que a interação entre os campos óptico e elétrico é fraca, o que aumenta o valor da tensão de meia onda (V_π) do modulador. Desta forma, com o objetivo de reduzir V_π , costuma-se empregar eletrodos e guias ópticos mais longos a fim de induzir maiores deslocamentos na fase óptica. Sendo assim, a maioria dos MFOIs comerciais de LN são relativamente grandes (50-150 mm de comprimento), o que faz deles inadequados para aplicações que exigem dispositivos de tamanho reduzido, ampla Largura de Banda (LB) e baixas tensões de alimentação (BOYNTON *et al.*, 2020). Atualmente, um típico MFOI pode alcançar -3dB de LB em 35 GHz e $V_\pi = 3,5$ V (THORLABS, 2020).

Paralelamente, com a substituição da eletrônica convencional por componentes ópticos em aplicações de processamento óptico de sinal, tem-se aumentado o interesse em integrar diferentes dispositivos fotônicos em um único *chip* (POBERAJ *et al.*, 2012). Por conseguinte, as pesquisas em Circuitos Fotônicos Integrados (CFIs) têm se intensificado ao longo das últimas décadas, e com isso, os CFIs vêm se consolidando como uma plataforma industrial, pois permitem a integração de dispositivos ópticos ativos e passivos em um único chip (BOES *et al.*, 2018). Logo, aumentou-se a necessidade de MFOIs escaláveis e de alta performance, o que tem impulsionado os esforços na direção de plataformas miniaturizadas, com ampla LB (WANG *et al.*, 2018b), compatibilidade com a fotônica baseada em silício e integração com a eletrônica CMOS (MERCANTE *et al.*, 2016; WANG *et al.*, 2018a).

1.1 MODULADORES DE FASE ÓPTICA EM CFIS

Recentemente, diferentes princípios de MFOIs competem entre si para atingirem os requisitos de projeto dos CFIs, como baixas tensões de alimentação, ampla resposta em frequência de modulação, miniaturização e compatibilidade com a fotônica baseada em silício. Para citar alguns exemplos, as plataformas compatíveis com processos de micro fabricação têm produzido MFOIs baseados em eletro-absorção (AMIN *et al.*, 2019; JI *et al.*, 2019), semicondutores (FATHPOUR, 2015; AMIN *et al.*, 2018), polímeros (SATO *et al.*, 2017) e grafeno (DING *et al.*, 2015).

Cada uma dessas abordagens tem seus prós e contras (RAO; FATHPOUR, 2018). Por exemplo, moduladores com Silício Sobre o Isolador (SOI - *Silicon-On-Insulator*) podem atingir taxas de 50 Gb/s, contudo, apresentam baixa razão de extinção (RAO *et al.*, 2016). Moduladores com polímeros, apesar de possuírem elevados coeficientes eletro-ópticos, sofrem com as perdas intrínsecas de propagação (KIENINGER *et al.*, 2018). As limitações de outras plataformas

incluem ainda baixa eficiência de chaveamento (AlN, Nitreto de Alumínio), elevada perda óptica (plasmônicos) e desafios de escalabilidade (grafeno) (WANG *et al.*, 2018b).

Uma plataforma promissora que tem surgido é o Filme de Niobato de Lítio no Isolador (LNOI - *Lithium Niobate Thin Film On Insulator*), que consiste de um Filme de LN (TFLN - *Thin Film Lithium Niobate*), de algumas centenas de nanômetros, colocado sobre uma camada de sílica (SiO₂) (BOYNTON *et al.*, 2020). O processo de fabricação de um substrato de LNOI pode ser consultado em detalhes na referência Poberaj *et al.* (2012).

Devido ao grande contraste entre os índices de refração do TFLN e do SiO₂, tem-se produzido canais ópticos com boas qualidade de confinamento e guiamento, *mode-size* reduzido e, conseqüentemente, MFOIs de maior eficiência eletro-óptica (REN *et al.*, 2019). Sendo assim, nos últimos tempos têm-se produzido MFOIs com substratos de LNOI que são altamente competitivos com as outras plataformas de CFIs que foram mencionadas anteriormente (MERCANTE *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2018b; BOYNTON *et al.*, 2020).

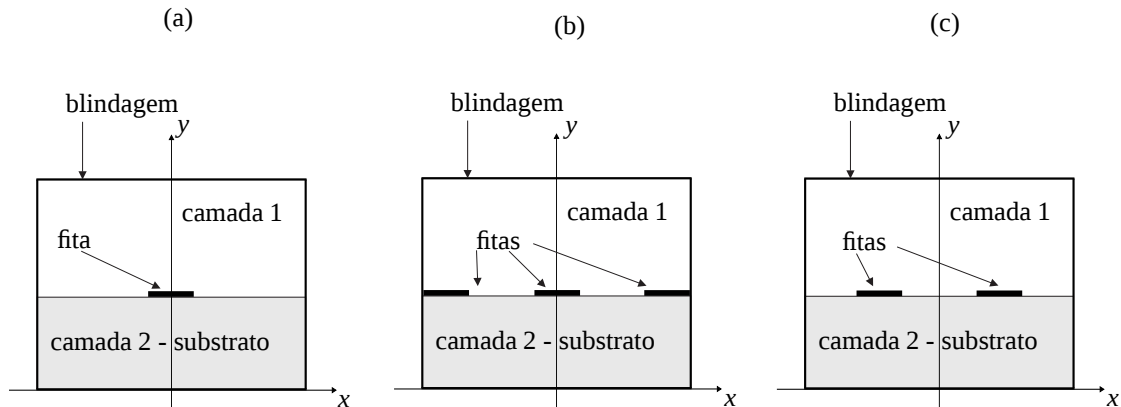
Desta forma, a tecnologia para a plataforma de LNOI tem feito avanços significativos recentemente, o que tem demandado técnicas de projeto para predizer a performance dos dispositivos com este substrato (HONARDOOST *et al.*, 2018).

Neste ponto, deseja-se chamar a atenção do leitor para a nomenclatura adotada neste trabalho. Para diferenciar os dispositivos que fazem uso de LNOI, será empregado o termo volumétrico (*bulk*) para se referir aos substratos de LN cujas espessuras são da ordem de poucos milímetros, contudo, enfatiza-se que estes também se tratam de dispositivos integrados.

1.2 ANÁLISE DE MFOIS COM SUBSTRATO DE LNOI

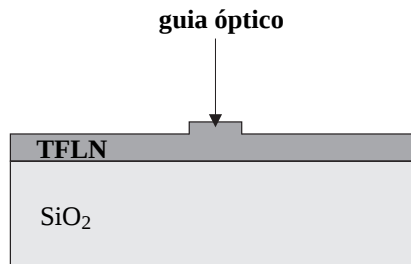
Semelhantemente ao caso *bulk*, as características fundamentais dos MFOIs com substrato de LNOI, tais como V_π e resposta em frequência, dependem da determinação dos parâmetros elétricos associados aos guias de ondas do campo de micro-ondas estabelecidos pelos eletrodos de modulação, conforme ilustrado na Figura 1.

Uma técnica de projeto eficiente para determinar esses parâmetros, tais como dispersão, impedância característica e campo elétrico, é o consagrado método de Abordagem de Domínio Espectral (ADE), que pode ser aplicado a maioria das estruturas de guias de onda com distribuição de eletrodos planares, tais como a *microstrip*, CPW (*Coplanar Waveguide*) e CPS (*Coplanar Strips*) em configurações de multicamadas, podendo ser estruturas abertas ou fechadas (ITOH, 1989). Como exemplo, ilustram-se na Figura 2 as representações da seção transversal de guias de ondas planares com blindagem metálica, sendo que em (a) tem-se a *microstrip*, (b) CPW e (c) a CPS. Por simplicidade, os guias de onda são representados apenas com duas camadas.

Figura 2 - Estruturas blindadas de guias de ondas planos. (a) *Microstrip*. (b) CPW. (c) CPS.

Fonte: Elaboração do autor.

O uso da técnica de ADE provou-se extremamente adequado no projeto de alguns tipos de MFOIs no passado, como nos influentes trabalhos de Railton e McGeehan (1989), Kawano *et al.* (1991), Kitazawa, Polifko e Ogawa (1992). Entretanto, um requisito fundamental para a aplicabilidade da técnica de ADE é a homogeneidade ao longo da direção horizontal da estrutura, pois isso permite o emprego da transformada de Fourier nesta direção. Desta forma, não é possível a aplicação do método de ADE em estruturas de MFOIs com guias ópticos do tipo *rib* ou *ridge* (HE *et al.*, 2019; WEIGEL *et al.*, 2016; WANG *et al.*, 2018a; RAO *et al.*, 2016; MERCANTE *et al.*, 2016; REN *et al.*, 2019). Como exemplo, apresenta-se na Figura 3 um guia óptico do tipo *rib* ou *ridge* fabricado em um substrato de LNOI. Observa-se que a estrutura não é homogênea na direção horizontal.

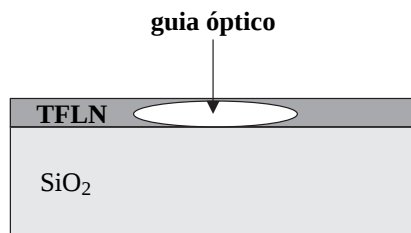
Figura 3 - Guia óptico do tipo *rib* ou *ridge* em uma plataforma de LNOI.

Fonte: Elaboração do autor.

Por outro lado, a técnica de troca de prótons (PE - *Proton Exchange*), que é uma tecnologia de baixo custo e já bem estabelecida na confecção de canais ópticos difundidos em substratos

volumétricos de LN (BAZZAN; SADA, 2015), satisfazem a exigência imposta pelo método de ADE. Essas técnicas têm sido aprimoradas para a aplicação em TFLN, obtendo canais ópticos em substratos de LNOI com *mode-size* de $1 \mu\text{m}^2$, tipicamente, e perdas de propagação tão baixas quanto 0,2 dB/cm para o comprimento de onda $\lambda_0 = 1,55 \mu\text{m}$ (CAI; WANG; HU, 2015; CAI *et al.*, 2015). Ilustra-se na Figura 4 um substrato de LNOI típico com canal óptico difundido na camada de TFLN.

Figura 4 - Substrato de LNOI típico com canal óptico difundido.



Fonte: Elaboração do autor.

1.3 ANÁLISE DE GUIAS DE ONDAS PLANOS COM SUBSTRATOS DE LNOI

De acordo com Rao *et al.* (2016), o descasamento de velocidades entre os modos óptico e elétrico em MFOIs pode ser minimizado pelo projeto apropriado da topologia de distribuição eletrodos que, por sua vez, determina o balanço entre descasamento de velocidades, V_π e impedância característica para performances de alta velocidade. Desta forma, é de interesse ter a disposição ferramentas capazes de auxiliar nos projetos de guias de ondas planos em CFIs com substratos de LNOI, tais como o MFOI com canal óptico difundido.

O método de ADE é uma boa escolha para tratar deste problema, visto que, ao contrário de outras técnicas, como elementos finitos, a ADE é um método semianalítico, isto é, embora seja uma técnica numérica, ela necessita de uma fase significativa de pré-processamento analítico. Isso possibilita uma maior eficiência, porque, além de diminuir o custo computacional com a redução de interações numéricas, permite obter informações físicas importantes e fazer previsões sobre as soluções através de todo o desenvolvimento matemático realizado, o que é mais difícil de conseguir com métodos totalmente numéricos (ITOH; MITTRA, 1973; ITOH, 1989).

A técnica de ADE pode ser aplicada a estruturas de guias de onda planos onde os números de camadas e eletrodos podem ser variados. Neste contexto, é de interesse que na fase de desenvolvimento analítico obtenham-se expressões genéricas o suficiente para permitir um grau de liberdade na alocação de materiais nas camadas de substrato, o que permite maior flexibilidade na análise dos guias de ondas. Uma forma de atingir este objetivo é considerar

que meios anisotrópicos possam preencher as camadas de substrato. Todavia, esta generalidade aumenta a complexidade do tratamento matemático.

Há vários trabalhos na literatura que fornecem os procedimentos para se obterem as expressões das diádicas de Green no domínio espectral para estruturas multicamadas que exibem anisotropia (KAMRA; DREHER, 2018; LUCIDO, 2012; MARQUES; HORNO, 1987). Contudo, as expressões necessárias para o cálculo da impedância característica e campo elétrico de estruturas com multicamadas anisotrópicas são pouco documentadas.

Na referência Itoh (1989), o autor descreve o procedimento para se obterem essas expressões para uma estrutura de até quatro camadas isotrópicas. Kitano (2001) as deduz para estruturas de três e quatro camadas, sendo que em ambos os casos apenas uma das camadas exibe anisotropia.

Salienta-se que a determinação da impedância característica e distribuição de campo elétrico do guia de onda é essencial para se obterem importantes parâmetros de MFOIs, como resposta em frequência de modulação e V_π (FUSTE, 2015; JANNER *et al.*, 2009; KIM; RAMASWAMY, 1989).

Sendo assim, na pesquisa bibliográfica realizada pelo autor deste texto de Tese de Doutorado não foram encontrados registros de dispositivos confeccionados na plataforma de LNOI analisados com o método de ADE, em especial, os MFOIs com guias ópticos difundidos no substrato de LNOI. À vista disso, neste trabalho, pretende-se empregar a técnica de ADE para a análise de guias de onda planos em MFOIs com substratos de LNOI.

Desta forma, se aplicará o método das imagens em ADE (MIADE), que consiste em utilizar a clássica teoria das imagens do eletromagnetismo para descrever as funções de base que estão presentes no método de Galerkin (KITANO, 2001). Esta técnica tem mostrado precisão no cálculo da distribuição de campo elétrico em estruturas com diversos arranjos de eletrodos planares (KITANO, 2001; MENEZES, 2020).

1.4 OBJETIVOS

O objetivo desta Tese de doutorado é aplicar o MIADE para a análise dos guias de onda planos da região ativa dos MFOIs com substratos de LNOI. O direcionamento deste estudo será para as estruturas do tipo CPW e CPS, que são guias de onda típicos de MFOIs. Consideram-se, ainda, que o LN seja de corte-Z e que as fitas metálicas tenham espessuras desprezíveis.

Pretende-se fornecer as expressões necessárias para se determinarem a impedância característica e campo elétrico para estruturas com multicamadas anisotrópicas. Desta forma, para permitir maior flexibilidade na análise de diversas estruturas, considera-se uma configuração de guia com quatro camadas, sendo que o ar é o material da camada acima dos

eletrodos e as três camadas restantes abaixo das fitas são o substrato de LNOI. Considera-se um caso geral onde todos os três meios de substratos podem ser compostos por um material com anisotropia uniaxial e corte-Z, tal como o LiNbO_3 .

As expressões obtidas serão incorporadas à rotinas numéricas, em ambiente MATLAB, no qual se implementará o MIADE para a determinação de parâmetros elétricos dos guias de ondas planos. Com isso, também serão obtidos os valores de resposta em frequência de modulação e de V_π que essas estruturas permitem quando aplicadas em MFOIs com substratos de LNOI.

Espera-se que os resultados obtidos neste trabalho possam auxiliar em projetos de guias de onda planos presentes nos variados dispositivos de CFIs, especialmente, os MFOIs com substratos de LNOI.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este texto de Tese de Doutorado é composto por sete capítulos, incluindo-se esta discussão introdutória.

No capítulo 2, apresentam-se os conceitos gerais da técnica de ADE e a incorporação do método das imagens para se obterem as funções de base adequadas para tratar o caso geral da distribuição de eletrodos planares. O intuito desse capítulo é discorrer sobre o método de ADE de forma ampla, sendo que os detalhes dos longos procedimentos de tratamento analítico são encaminhados para vasta literatura existente em momentos oportunos no decorrer do texto.

Na sequência, aborda-se no capítulo 3 a determinação dos parâmetros elétricos dos guias de onda CPS e CPW, como as curvas de dispersão e impedância característica. No capítulo 4, abordam-se os fundamentos gerais de MFOIs que estão associados ao guia de onda do campo de modulação, como V_π e resposta em frequência. Conforme será exposto nesses capítulos, a obtenção da impedância característica e de importantes parâmetros do modulador dependem das componentes transversais do campo eletromagnético do guia de onda. Sendo assim, dedica-se o capítulo 5 para a obtenção dessas expressões de campo, constituindo como uma das contribuições desta Tese.

Em seguida, realiza-se no capítulo 6 a validação da teoria exposta neste texto, onde os resultados obtidos através das rotinas numéricas desenvolvidas são comparados com alguns trabalhos particulares publicados na literatura. Com isso, na sequência, no capítulo 7 são apresentados os resultados que se obtêm na análise de guias de onda empregados em MFOIs com substrato de LNOI e canal óptico difundido.

Por fim, apresentam-se no capítulo 8 as conclusões deste trabalho e as possibilidades de futuras pesquisas que podem se beneficiar dos resultados desta Tese de Doutorado.

8 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho dedicou-se a aplicar a consagrada técnica de ADE para a análise dos guias de ondas planos em moduladores eletro-ópticos integrados com substratos de LNOI. Estas plataformas, que consistem sobretudo de um filme de LN (TFLN) sobre uma camada de SiO_2 , surgiram de forma promissora para aplicações em circuitos fotônicos integrados, permitindo a fabricação de guias ópticos com boa qualidade de confinamento e guiamento.

Com isso, no decorrer do texto, apresentaram-se os princípios da técnica de ADE, juntamente com a inclusão do método das imagens, e os fundamentos básicos dos moduladores eletro-ópticos associados ao guia de onda.

No julgamento do autor desta Tese, ainda não haviam sido realizadas as análises numéricas de guias de onda planos com substratos de LNOI por meio da técnica de ADE, sendo esta, portanto, a contribuição central desta Tese. Desta forma, a seguir, apresentam-se as conclusões deste trabalho e as perspectivas de continuidade desta linha de pesquisa.

8.1 CONCLUSÕES

Conforme apresentado na fundamentação teórica deste texto, os parâmetros elétricos associados aos guias de onda influenciam diretamente no desempenho do modulador eletro-óptico. Por sua vez, a determinação destas grandezas passam pela obtenção da distribuição de campo eletromagnético no interior destes guias. As expressões que determinam o campo, especialmente para meios anisotrópicos e multicamadas, não são facilmente encontradas na literatura, desta forma, no capítulo 5 deste texto, realizou-se um procedimento analítico para obtenção destas expressões no domínio espectral. Para permitir maior flexibilidade na análise de diversas estruturas, considerou-se uma configuração de guia com quatro camadas, sendo que o ar é o meio da camada acima dos eletrodos e as três camadas restantes abaixo das fitas são o substrato de LNOI. Considerou-se um caso geral onde todos os três meios de substratos podem ser compostos por um material com anisotropia uniaxial e corte-Z, tal como o LiNbO_3 . Além disso, consideraram-se que as fitas metálicas tinham espessuras desprezíveis.

No capítulo 6 a formulação desenvolvida foi testada para diversas estruturas, sendo que os resultados concordaram com alguns casos particulares publicados na literatura. Ressalta-se que o desenvolvimento analítico apresentado é válido para qualquer quantidade de eletrodos distribuídos entre as camadas 1 e 2 da Figura 11, já que a informação sobre a distribuição de fitas está contida nas funções de base das densidades lineares de correntes $\tilde{J}_x$ e $\tilde{J}_z$. Desta forma, as

expressões obtidas são uma das contribuições desta Tese, e espera-se auxiliar o leitor interessado a aplicá-las para análise de guias de onda planos, não limitando-se apenas a estruturas com substratos de LNOI, desde que esteja enquadrado nos critérios descritos no parágrafo anterior.

Na sequência, no capítulo 7, aplicou-se a formulação desenvolvida para a análise dos guias de ondas em moduladores eletro-ópticos com substratos de LNOI. De forma geral, os resultados das Figuras 22 e 28, indicam que os substratos de LNOI, cujas espessuras são da ordem de poucos micrometros, permitem a confecção de guias de onda pouco dispersivos para uma faixa ampla de frequências. Neste ponto, chama atenção o fato de até mesmo o modo-c do guia CPS não ser dispersivo, já que este modo normalmente está associado a dispersão. Desta forma, o modo-c do CPS analisado também pode ser empregado em aplicações de micro-ondas e de óptica integrada que exigem dispersão reduzida.

Consequentemente, a baixa dispersão destes guias de onda conduz a valores de impedâncias características que são aproximadamente constantes para a banda considerada e que podem ser próximas de 50Ω , conforme se observam nas Figura 23 e 29. Esta característica diminui a complexidade de um eventual projeto de casamento de impedâncias nos acessos dos guias de onda de um modulador operando em banda larga.

A plataforma de LNOI surgiu como resultado dos esforços em direção a miniaturização. Desta forma, nas Tabelas 1 e 4, notam-se que redução das dimensões da caixa metálica pode estender a faixa de frequências de operação monomodo dos guias CPW e CPS analisados. Em especial, destaca-se o guia CPS, o qual, caso seja confeccionado com caixa metálica da ordem de $2 \times 2 \text{ mm}^2$, pode exibir banda monomodo de até 74,88 GHz. Estes resultados representam uma melhora com relação ao guia CPS do modulador *bulk* analisado na seção 6.4, cuja banda monomodo era limitada em 10,59 GHz, apenas.

Com relação ao substrato de LNOI básico, analisado na seção 7.2, observa-se na Tabela 2 que poderia se obter moduladores eletro-ópticos com $V_{g\pi}$ de no máximo 5 V e guias de onda com comprimentos inferiores a 15 mm. Entretanto, conforme informado nas curvas da Γ^N nas Figura 25 (a) e (b), isto é obtido quando os canais ópticos são posicionados abaixo dos eletrodos. Na prática, isto pode gerar problemas de atenuação no modo óptico devido ao contato da luz com o metal. Caso se posicione os canais em locais que estão fora da região de eletrodos, os resultados da Tabela 3 mostram que seriam necessários aumentos consideráveis no comprimento L_z dos guias de onda para manter as tensões máximas das fontes em 5 V. Como resultado, tem-se a diminuição das respostas em frequência de modulação, conforme apresentado na Figura 26.

Sendo assim, na seção 7.3 considerou-se um procedimento que é largamente empregado em óptica integrada, o qual consiste em adicionar uma camada de *buffer-layer* de SiO_2 entre os eletrodos e o substrato. Com isto, além de evitar o contato da luz com o metal, puderam-se obter melhor equalização entre as velocidades de propagação dos modos ópticos e elétrico,

obtendo-se na Figura 28, inclusive, resultados de n_{ef} muito próximos do índice de refração efetivo percebido pelo modo óptico considerado.

Desta forma, os resultados numéricos da Tabela 5 indicam que podem-se obter moduladores eletro-ópticos com $V_{g\pi}$ de até 5 V e guias de ondas de comprimentos inferiores aos da maioria dos dispositivos comerciais *bulk* à base de LN, que tipicamente são em torno de 50-150 mm. Além disso, notam-se nas Figuras 33 (a) e (b) que a diminuição dos valores de n_{ef} resultam na ampliação das respostas em frequência de modulação dos modos fundamentais dos guias de onda, o que pode tornar toda a faixa de operação monomodo útil para modulação eletro-óptica.

Por fim, os resultados numéricos, exibidos nas Figuras 35 (a)-(d) e 36, mostram que o modo- π fundamental dos guias CPS analisados podem ser pouco dispersivos para uma banda muito elevada de frequências, da ordem de 1 THz. Nos gráficos de dispersão obtidos neste trabalho para o CPS não foram encontradas as curvas que tipicamente estão associadas à transição modal, que geralmente estão presentes nos guias de onda com dimensões de óptica integrada. Desta forma, caso pesquisas futuras confirmem que não há acoplamento entre os modos fundamental e superiores, e garanta-se o estabelecimento de somente o modo fundamental no guia, os resultados obtidos neste trabalho podem sugerir que a banda útil de operação do CPS pode ser estendida para frequências próximas de 1 THz. Com isso, poderia-se obter moduladores eletro-ópticos com respostas em frequência de modulação próximas a 900 GHz, conforme apresentado na Figura 37. As frequências superiores a 300 GHz formam a banda chamada de terahertz, que é considerada a próxima fronteira para aplicações em sistemas de comunicação com banda extremamente larga.

Com isso, espera-se que os resultados desta Tese possam auxiliar no projeto e análise de guias de onda planos para as diversas aplicações em micro-ondas e óptica integrada, especialmente, quando relacionadas a plataforma de LNOI.

8.2 PESQUISAS FUTURAS

Para trabalhos futuros, sugere-se utilizar os resultados desta Tese para o desenvolvimento de algoritmos de otimização que busquem configurações de estruturas que atendam diversos requisitos de projeto, como casamento de impedâncias, resposta em frequência de modulação ou $V_{g\pi}$.

Sugere-se, ainda, o aprofundamento no estudo sobre o acoplamento entre os modos fundamental e superior nos guias CPS com substratos de LNOI, uma vez que os resultados numéricos apresentaram possibilidades de se operar com o modo- π para frequências próximas a 1 THz.

Por fim, um outro caminho em potencial é a análise de guias com substrato de LNOI cuja

camada de TFLN seja de corte-X. Desta forma, poderiam-se posicionar os canais ópticos entre os eletrodos e utilizar a componente de campo E_x para o cálculo do fator de superposição dos moduladores. Com isso, evitaria-se a necessidade da camada de *buffer-layer* o que pode resultar em valores menores de $V_{g\pi}L_z$ e, consequentemente, em guias onda de comprimentos ainda mais reduzidos.

REFERÊNCIAS

- AMIN, R.; GEORGE, J. K.; SUN, S.; Ferreira De Lima, T.; TAIT, A. N.; KHURGIN, J. B.; MISCUGLIO, M.; SHASTRI, B. J.; PRUCNAL, P. R.; EL-GHAZAWI, T.; SORGER, V. J. ITO-based electro-absorption modulator for photonic neural activation function. *APL Materials*, Melville, v. 7, n. 8, p. 0–11, 2019.
- AMIN, R.; MAITI, R.; CARFANO, C.; MA, Z.; TAHERSIMA, M. H.; LILACH, Y.; RATNAYAKE, D.; DALIR, H.; SORGER, V. J. 0.52 v mm ITO-based Mach-Zehnder modulator in silicon photonics. *APL Photonics*, Melville, v. 3, n. 12, p. 1–15, 2018.
- BAZZAN, M.; SADA, C. Optical waveguides in lithium niobate: Recent developments and applications. *Applied Physics Reviews*, Melville, v. 2, n. 4, 2015.
- BIANCO, B.; PANINI, L.; PARODI, M.; RIDELLA, S. Some considerations about the frequency dependence of the characteristic impedance of uniform microstrips. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Piscataway, v. 26, n. 3, p. 182–185, 1978.
- BOES, A.; CORCORAN, B.; CHANG, L.; BOWERS, J.; MITCHELL, A. Status and potential of lithium niobate on insulator (LNOI) for Photonic Integrated Circuits. *Laser and Photonics Reviews*, Weinheim, v. 12, n. 4, p. 1–19, 2018.
- BOYNTON, N.; CAI, H.; GEHL, M.; ARTERBURN, S.; DALLO, C.; POMERENE, A.; STARBUCK, A.; HOOD, D.; TROTTER, D. C.; FRIEDMANN, T.; DEROSE, C. T.; LENTINE, A. A heterogeneously integrated silicon photonic/lithium niobate travelling wave electro-optic modulator. *Optics Express*, Washington, v. 28, n. 2, p. 1868, 2020.
- BREWS, J. Characteristic impedance of microstrip lines. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Piscataway, v. 35, n. 1, p. 30–34, 1987.
- CAI, L.; KONG, R.; WANG, Y.; HU, H. Channel waveguides and y-junctions in x-cut single-crystal lithium niobate thin film. *Optics Express*, Washington, v. 23, n. 22, p. 29211, 2015.
- CAI, L.; WANG, Y.; HU, H. Low-loss waveguides in a single-crystal lithium niobate thin film. *Optics Letters*, Washington, v. 40, n. 13, p. 3013, 2015.
- COLLIN, R. E. *Field theory and guided waves*. 2. ed. New York: IEEE Press, 1992.
- COLLIN, R. E. *Foundations for microwave engineering*. 2. ed. New York: Wiley-IEEE Press, 2001.
- DING, Y.; ZHU, X.; XIAO, S.; HU, H.; FRANDSEN, L. H.; MORTENSEN, N. A.; YVIND, K. Effective electro-optical modulation with high extinction ratio by a graphene-silicon microring resonator. *Nano Letters*, Washington, v. 15, n. 7, p. 4393–4400, 2015.
- DRAPER, N. R.; SMITH, H. *Applied regression analysis*. New York: John Wiley & Sons,

1981. 709 p.

FATHPOUR, S. Emerging heterogeneous integrated photonic platforms on silicon. *Nanophotonics*, Berlin, v. 4, n. 1, p. 143–164, 2015.

FUSTE, J. A. I. Analytical tool for the design and optimisation of high-speed lithium niobate thin-film Mach-Zehnder modulator. *IET Optoelectronics*, Stevenage, v. 9, n. 6, p. 307–309, 2015.

GANGULY, A.; KROWNE, C. Characteristics of microstrip transmission lines with high-dielectric-constant substrates. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Piscataway, v. 39, n. 8, p. 1329–1337, 1991.

GUPTA, K. C.; GARG, R.; BAHL, I.; BHARTIA, P. *Microstrip lines and slotlines*. 2. ed. London: Artech House, 1996. 535 p.

HE, M.; XU, M.; REN, Y.; JIAN, J.; RUAN, Z.; XU, Y.; GAO, S.; SUN, S.; WEN, X.; ZHOU, L.; LIU, L.; GUO, C.; CHEN, H.; YU, S.; LIU, L.; CAI, X. High-performance hybrid silicon and lithium niobate Mach-Zehnder modulators for 100 Gbit s⁻¹ and beyond. *Nature Photonics*, London, v. 13, n. 5, p. 359–364, 2019.

HONARDOOST, A.; SAFIAN, R.; RAO, A.; FATHPOUR, S. High-speed modeling of ultracompact electrooptic modulators. *Journal of Lightwave Technology*, New York, v. 36, n. 24, p. 5893–5902, 2018.

ITOH, T. Spectral domain immittance approach for dispersion characteristics of generalized printed transmission lines. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Piscataway, v. 28, n. 7, p. 733–736, 1980.

ITOH, T. *Numerical techniques for microwave and millimeter-wave passive structures*. New York: John Wiley & Sons, 1989. 707 p.

ITOH, T.; MITTRA, R. Spectral-domain approach for calculating the dispersion characteristics of microstrip lines). *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Piscataway, v. 21, n. 7, p. 496–499, 1973.

ITOH, T.; MITTRA, R. A technique for computing dispersion characteristics of shielded microstrip lines. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Piscataway, v. 22, n. 10, p. 896–898, 1974.

JANNER, D.; TULLI, D.; GARCÍA-GRANDA, M.; BELMONTE, M.; PRUNERI, V. Micro-structured integrated electro-optic LiNbO₃ modulators. *Laser and Photonics Reviews*, Weinheim, v. 3, n. 3, p. 301–313, 2009.

JANSEN, R. High-speed computation of single and coupled microstrip parameters including dispersion, high-order modes, loss and finite strip thickness. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Piscataway, v. 26, n. 2, p. 75–82, 1978.

JI, L.; ZHANG, D.; XU, Y.; GAO, Y.; WU, C.; WANG, X.; LI, Z.; SUN, X. Design of an electro-absorption modulator based on graphene-on-silicon slot waveguide. *IEEE Photonics Journal*, Piscataway, v. 11, n. 3, p. 1–11, 2019.

JIA, S.; PANG, X.; OZOLINS, O.; YU, X.; HU, H.; YU, J.; GUAN, P.; Da Ros, F.; POPOV, S.; JACOBSEN, G.; GALILI, M.; MORIOKA, T.; ZIBAR, D.; OXENLOWE, L. K. 0.4 THz photonic-wireless link with 106 Gb/s single channel Bitrate. *Journal of Lightwave Technology*, New York, v. 36, n. 2, p. 610–616, 2018.

KAMRA, V.; DREHER, A. Full-wave equivalent circuit for the analysis of multilayered microwave structures with anisotropic layers. *Electronics Letters*, London, v. 54, n. 3, p. 153–155, 2018.

KAWANO, K.; KITO, T.; JUMONJI, H.; NOZAWA, T.; YANAGIBASHI, M.; SUZUKI, T. Spectral-domain analysis of coplanar waveguide traveling-wave electrodes and their applications to Ti:LiNbO₃ Mach-Zehnder optical modulators. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Piscataway, v. 39, n. 9, p. 1595–1601, 1991.

KIENINGER, C.; KUTUVANTAVIDA, Y.; ELDER, D. L.; WOLF, S.; ZWICKEL, H.; BLAICHER, M.; KEMAL, J. N.; LAUERMANN, M.; RANDEL, S.; FREUDE, W.; DALTON, L. R.; KOOS, C. Ultra-high electro-optic activity demonstrated in a silicon-organic hybrid modulator. *Optica*, London, v. 5, n. 6, p. 739, 2018.

KIM, C. M.; RAMASWAMY, R. V. Overlap integral factors in integrated optic modulators and switches. *Journal of Lightwave Technology*, New York, v. 7, n. 7, p. 1063–1070, 1989.

KITANO, C. *Aplicação da abordagem de domínio espectral para análise de moduladores eletroópticos integrados*. 2001. 397 f. Tese (Doutorado) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2001.

KITAZAWA, T.; HAYASHI, Y. Propagation characteristics of striplines with multilayered anisotropic media. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Piscataway, v. 31, n. 6, p. 429–433, 1983.

KITAZAWA, T.; POLIFKO, D.; OGAWA, H. Analysis of CPW for LiNbO₃ optical modulator by extended spectral-domain approach. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, Piscataway, v. 2, n. 8, p. 313–315, 1992.

KITAZAWA, T.; POLIFKO, D.; OGAWA, H. Analysis of LiNbO₃ optical modulator using coplanar-type electrodes. In: IEEE MTT-S INTERNATIONAL MICROWAVE SYMPOSIUM DIGEST, 1993, [S.l.]. *Proceedings of the [...]*. [S.l.]: IEEE, 1993. p. 213–216.

LACOUR, F.; COURJAL, N.; BERNAL, M. P.; SABAC, A.; BAINIER, C.; SPAJER, M. Nanostructuring lithium niobate substrates by focused ion beam milling. *Optical Materials*, Amsterdam, v. 27, n. 8, p. 1421–1425, 2005.

LUCIDO, M. A new high-efficient spectral-domain analysis of single and multiple coupled microstrip lines in planarly layered media. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Piscataway, v. 60, n. 7, p. 2025–2034, 2012.

MARQUES, R.; HORNO, M. On the spectral dyadic Green's function for stratified linear media: application to multilayer MIC lines with anisotropic dielectrics. *IEE Proceedings H: Microwaves, Antennas and Propagation*, Piscataway, v. 134, n. 3, p. 241–248, 1987.

MCKINZIE, W.; ALEXOPOULOS, N. Leakage losses for the dominant mode of conductor-backed coplanar waveguide. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, Piscataway, v. 2, n. 2, p. 65–66, 1992.

- MENEZES, J. P. C. *Desenvolvimento de algoritmos numéricos e interface gráfica aplicados à análise de guias de ondas planos através da abordagem de domínio espectral*. 2020. 168 f. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia Elétrica de Ilha Solteira - Universidade Estadual Paulista, 2020. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/192344>. Acesso em: 20 out. 2020.
- MERCANTE, A. J.; SHI, S.; YAO, P.; XIE, L.; WEIKLE, R. M.; PRATHER, D. W. Thin film lithium niobate electro-optic modulator with terahertz operating bandwidth. *Optics Express*, Washington, v. 26, n. 11, p. 14810, 2018.
- MERCANTE, A. J.; YAO, P.; SHI, S.; SCHNEIDER, G.; MURAKOWSKI, J.; PRATHER, D. W. 110 GHz CMOS compatible thin film LiNbO₃ modulator on silicon. *Optics Express*, Washington, v. 24, n. 14, p. 15590, 2016.
- MIRSHEKAR-SYAHKAL, D.; DANNEEL, J. Criteria for single mode operation of packaged coplanar waveguide circuits. *IEE Colloquium (Digest)*, New York, n. 92, p. 8–11, 1994.
- NAGATA, H.; MITSUGI, N.; ICHIKAWA, J.; MINOWA, J. Materials reliability for high-speed lithium niobate modulators. *Optoelectronic Integrated Circuits*, [S.l.], v. 3006, p. 301, 1997.
- NANOLN. *Moduladores de niobato de lítio*. 2020. Disponível em: https://www.nanoln.com/PRODUCTS_128978.html#comp-maeh1ti8. Acesso em: 03 jul. 2020.
- OUYANG, B.; HAVERDINGS, M.; HORSTEN, R.; KRUIDHOF, M.; KAT, P.; CARO, J. Integrated photonics interferometric interrogator for a ring-resonator ultrasound sensor. *Optics Express*, Washington, v. 27, n. 16, p. 23408, 2019.
- POBERAJ, G.; HU, H.; SOHLER, W.; GÜNTHER, P. Lithium niobate on insulator (LNOI) for micro-photonics devices. *Laser and Photonics Reviews*, Weinheim, v. 6, n. 4, p. 488–503, 2012.
- POLYCARPOU, A. C.; LYONS, M. R.; BALANIS, C. A. Finite element analysis of MMIC waveguide structures with anisotropic substrates. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Piscataway, v. 44, n. 10, p. 1650–1663, 1996.
- RAILTON, C.; MCGEEHAN, J. A rigorous and computationally efficient analysis of microstrip for use as an electro-optic modulator. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Piscataway, v. 37, n. 7, p. 1099–1104, 1989.
- RAO, A.; FATHPOUR, S. Compact lithium niobate electrooptic modulators. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Piscataway, v. 24, n. 4, 2018.
- RAO, A.; PATIL, A.; RABIEI, P.; HONARDOOST, A.; DESALVO, R.; PAOLELLA, A.; FATHPOUR, S. High-performance and linear thin-film lithium niobate Mach–Zehnder modulators on silicon up to 50 GHz. *Optics Letters*, Washington, v. 41, n. 24, p. 5700, 2016.
- REN, T.; ZHANG, M.; WANG, C.; SHAO, L.; REIMER, C.; ZHANG, Y.; KING, O.; ESMAN, R.; CULLEN, T.; LONCAR, M. An integrated low-voltage broadband lithium niobate phase modulator. *IEEE Photonics Technology Letters*, Piscataway, v. 31, n. 11, p. 889–892, 2019.

- SADIKU, M. N. O. *Elements of electromagnetics*. 4. ed. New York: Oxford University Press, 2007. 818 p.
- SATO, H.; MIURA, H.; QIU, F.; SPRING, A. M.; KASHINO, T.; KIKUCHI, T.; OZAWA, M.; NAWATA, H.; ODOI, K.; YOKOYAMA, S. Low driving voltage Mach-Zehnder interference modulator constructed from an electro-optic polymer on ultra-thin silicon with a broadband operation. *Optics Express*, Washington, v. 25, n. 2, p. 768, 2017.
- SOUZA, R. H.; COUTINHO, O. L.; OLIVEIRA, J. E. B.; FERREIRA, A. A.; RIBEIRO, J. A. J. An analytical solution for fiber optic links with photonic-assisted millimeter wave upconversion due to MZM nonlinearities. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, São Caetano do Sul, v. 16, n. 1, p. 237–258, 2017.
- SUCHOSKI, P.; RAMASWAMY, R. Minimum-mode-size low-loss Ti: LiNbO₃ channel waveguides for efficient modulator operation at 1.3 μm . *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Piscataway, v. 23, n. 10, p. 1673–1679, 1987.
- THORLABS. *Moduladores de niobato de lítio*. 2020. Disponível em: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=3918. Acesso em: 11 jun. 2020.
- TRIPATHI, V. Asymmetric coupled transmission lines in an inhomogeneous medium. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Piscataway, v. 23, n. 9, p. 734–739, 1975.
- WANG, C.; ZHANG, M.; CHEN, X.; BERTRAND, M.; SHAMS-ANSARI, A.; CHANDRASEKHAR, S.; WINZER, P.; LONČAR, M. Integrated lithium niobate electro-optic modulators operating at CMOS-compatible voltages. *Nature*, London, v. 562, n. 7725, p. 101–104, 2018.
- WANG, C.; ZHANG, M.; STERN, B.; LIPSON, M.; LONČAR, M. Nanophotonic lithium niobate electro-optic modulators. *Optics Express*, Washington, v. 26, n. 2, p. 1547, 2018.
- WEIGEL, P. O.; SAVANIER, M.; DEROSE, C. T.; POMERENE, A. T.; STARBUCK, A. L.; LENTINE, A. L.; STENGER, V.; MOOKHERJEA, S. Lightwave circuits in lithium niobate through hybrid waveguides with silicon photonics. *Scientific Reports*, Nature Publishing Group, London, v. 6, n. 22301, p. 1–9, 2016.
- WOOTEN, E.; KISSA, K.; YI-YAN, A.; MURPHY, E.; LAFAW, D.; HALLEMEIER, P.; MAACK, D.; ATTANASIO, D.; FRITZ, D.; MCBRIEN, G.; BOSSI, D. A review of lithium niobate modulators for fiber-optic communications systems. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Piscataway, v. 6, n. 1, p. 69–82, 2000.
- YARIV, A.; YEH, P. *Optical waves in crystals: propagation and control of laser radiation*. New York: John Wiley and Sons, 1984. 589 p.