

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

LÉO CÉSAR PARENTE DE ALMEIDA

OBTENÇÃO E ANÁLISE DA PERFORMANCE DE PORTAS LÓGICAS TOTALMENTE
ÓPTICAS BASEADAS EM GUIAS DE ONDA DE CRISTAIS FOTÔNICOS

DM 23 / 2016

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil

2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

LÉO CÉSAR PARENTE DE ALMEIDA

OBTENÇÃO E ANÁLISE DA PERFORMANCE DE PORTAS LÓGICAS TOTALMENTE
ÓPTICAS BASEADAS EM GUIAS DE ONDA DE CRISTAIS FOTÔNICOS

Dissertação submetida à Banca
Examinadora do Programa de
Pós-graduação em Engenharia
Elétrica-PPGEE da UFPA para
a obtenção do Grau de Mestre
em Engenharia Elétrica na área
de Telecomunicações.

Linha de Pesquisa: Eletromagnetismo Aplicado

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil

2016

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFPA

Almeida, Léo César Parente de, 1983 -

Obtenção e análise da performance de portas lógicas totalmente ópticas baseadas em guias de onda de cristais fotônicos / Léo César Parente de Almeida. - 2016.

Orientador: Marcos Benedito Caldas Costa.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2016.

1. Ótica de cristais - materiais. 2. Guias de ondas. 3. Diferenças finitas. I. Título.

CDD 23. ed. 548.9

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

OBTENÇÃO E ANÁLISE DA PERFORMANCE DE PORTAS LÓGICAS TOTALMENTE
ÓPTICAS BASEADAS EM GUIAS DE ONDA DE CRISTAIS FOTÔNICOS

AUTOR: LÉO CÉSAR PARENTE DE ALMEIDA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO (PPGEE) SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA
EXAMINADORA SENDO APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO
PARÁ E JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE TELECOMUNICAÇÕES.

APROVADA EM 09 / 09 / 2016

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Marcos Benedito Caldas Costa
(ORIENTADOR - UFPA)

Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes
(MEMBRO - UFPA)

Prof. Dr. Waldomiro Gomes Paschoal Junior
(MEMBRO EXTERNO - UFPA)

VISTO:

Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes
(COORDENADOR DO PPGEE / ITEC / UFPA)

Dedico a Deus e à minha Família.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus.

Agradeço a minha família, que apesar da distância, sempre esteve ao meu lado. Pelo incondicional apoio, por tudo! À Christiane, por sua dedicação e fundamental apoio durante o curso e em todos os momentos. Dedico este trabalho a vocês. Amo vocês!

Ao professor Marcos Benedito Caldas Costa, por sua excelente orientação desde o início. Por seu apoio e motivação desde sempre. Muito obrigado!

Aos professores, Evaldo Gonçalves Pelaes e Waldomiro Gomes Paschoal Junior, que participaram como membros da banca de defesa deste trabalho. Muito Obrigado!

Finalmente, agradeço a todos os professores e colegas do PPGEE-UFPA que, de alguma forma, contribuíram para a minha formação e realização deste trabalho.

“On the principle of a true classification, we ought no longer to associate Logic and Metaphysics, but Logic and Mathematics”.

George Boole

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	20
1. CRISTAIS FOTÔNICOS	23
1.1. Breve Histórico sobre os Cristais Fotônicos	24
1.2. Tipos de Cristais Fotônicos	26
1.3. Tipos de Defeitos	28
1.4. Guias de Onda	29
1.5. Ressonadores Ópticos Baseados em Cristais Fotônicos	31
Referências Bibliográficas	33
2. CHAVES ROTEADORAS E PORTAS LÓGICAS	35
2.1. Dispositivos de Chaveamento Ultra-rápidos	36
2.2. Princípio de Operação das Portas Lógicas Ópticas	38
2.3. Portas Lógicas	39
Referências Bibliográficas	44
3. MÉTODOS NUMÉRICOS	45
3.1. As Equações de Maxwell	45
3.2. O Método da Onda Plana (PWE)	47
3.3. O Método FDTD	48
Referências Bibliográficas	50
4. OBTENÇÃO DA PORTA LÓGICA TOTALMENTE ÓPTICA ‘NOT’ BASEADA EM GUIAS DE ONDA DE CRISTAIS FOTÔNICOS	52
4.1. <i>Design</i> da Estrutura Proposta baseada em um Anel Ressonador Planar de Cristal Fotônico	52
4.2. Simulação Numérica da Estrutura Proposta baseada em um Anel Ressonador Planar de Cristal Fotônico (Porta NOT)	54
4.3. Conclusão	59
Referências Bibliográficas	61
5. OBTENÇÃO DA PORTA LÓGICA TOTALMENTE ÓPTICA ‘NAND’ BASEADA EM GUIAS DE ONDA DE CRISTAIS FOTÔNICOS	63
5.1. <i>Design</i> da Estrutura Básica para a Chave Totalmente Óptica (Porta NOT)	63
5.2. <i>Design</i> da Estrutura para duas Chaves Totalmente Ópticas (Porta NAND)	64

5.3. Simulações e Discussão dos Resultados	65
5.3.1. Simulação para a Chave Totalmente Óptica Proposta (Porta NOT)	65
5.3.2. Simulação da Estrutura Proposta para duas Chaves Totalmente Ópticas (Porta NAND)	66
5.4. Conclusão	70
Referências Bibliográficas	72
6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	73
6.1. Conclusão	73
6.2. Trabalhos Futuros	73
6.3. Lista de Publicações	74
6.3.1. Trabalhos Publicados em Eventos Nacionais e Internacionais	74
6.3.2. Artigos Submetidos e Aceitos para Publicação em Periódicos (Revistas)	75
Referências Bibliográficas	77

LISTA DE ACRÔNIMOS

AOLG	All Optical Logic Gates
CW	Continuous Wave
NODC	Nonlinear Optical Directional Coupler
EM	Electromagnetic Waves
FDTD	Finite Difference Time Domain
GVD	Group Velocity Dispersion
HNLF	Highly Nonlinear Fiber
IRS	Intrapulse Raman Scattering
PPLN	Periodically Poled Lithium Niobate
MZI	Mach-Zehnder Interferometer
KHz	Kilohertz
MMI	Multi-Mode Interference
NLDC	Non-Linear Directional Coupler
OLNG	Optical Logic Not Gate
PAM	Pulse Amplitude Modulation
PBG	Photonic Band Gap
PCFs	Photonic Crystal Fibers
PCRR	Photonic Crystal Ring Resonators
PhC	Photonic Crystal
PICs	Photonic Integrated Circuits
PWE	Plane Wave Expansion
Si	Silicon
SOA	Semiconductor Optical Amplifiers
SPM	Self-Phase Modulation

THz Terahertz

TIR Total Internal Reflection

TE Transverse Electric

TM Transverse Magnetic

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

	<i>Pag.</i>
Figura 1.1 - Ilustração do cristal fotônico desenvolvido por Eli Yablonovitch	25
Figura 1.2 - Foto de microscópio da primeira PCF fabricada [9, 10]	26
Figura 1.3 - Cristal fotônico formado pela distribuição periódica de: (a) colunas de ar perfuradas em um substrato dielétrico; (b) hastes dielétricas em um substrato de ar	26
Figura 1.4 - Ilustração do cristal fotônico em (a) uma dimensão, (b) duas dimensões e (c) três dimensões	27
Figura 1.5 - Cristal fotônico 2-D, onde a e r são os parâmetros construtivos da estrutura . . .	27
Figura 1.6 - Cavidade ressonante de cristal fotônico 2-D formada por um defeito pontual . .	28
Figura 1.7 - Ilustração de guias de onda baseados em cristal fotônico 2-D, construídos utilizando o software COMSOL Multiphysics: (a) com dobramento de 90 graus; (b) em linha reta . .	29
Figura 1.8 - (a) e (b) Guias de onda 2-D de cristais fotônicos do tipo <i>slab</i> , baseados em uma rede periódica triangular de furos feitos em um material dielétrico, formados através de <i>defeitos lineares</i> ; (c) Propagação do campo eletromagnético no <i>guia de onda</i> do tipo <i>slab</i> , mostrado no item (b)	30
Figura 1.9 - Utilizando-se do software Opti-FDTD, tem-se: (a) um guia de onda baseado em cristal fotônico 2-D, com uma curva acentuada de 90° ; e (b) a propagação dos campos (EM) utilizando-se diferenças finitas bidimensionais (FDTD)	31
Figura 1.10 - Estrutura de um anel ressoador bidimensional, com índices de refração nos cilindros de 3.39 e no ar, 1. O <i>design</i> da estrutura foi feito utilizando-se do software Opti-FDTD	32
Figura 2.1 - (a) Chave roteadora na qual a entrada é conectada a uma das diversas portas de saídas, sendo o roteamento baseado por posição ou por intensidade. Figura 2.1 (b) - Portas lógicas na qual uma operação Booleana é executada de acordo com os valores dos sinais de entrada	35
Figura 2.2 - Símbolo gráfico e equação Booleana para porta AND	39
Figura 2.3 - Símbolo gráfico e equação Booleana para porta NAND	40

Figura 2.4 - Símbolo gráfico e equação Booleana para porta OR	40
Figura 2.5 - Símbolo gráfico e equação Booleana para porta NOR	41
Figura 2.6 - Símbolo gráfico e equação Booleana para porta XOR	41
Figura 2.7 - Símbolo gráfico e equação Booleana para porta NXOR	42
Figura 2.8 - Símbolo gráfico e equação Booleana para porta NOT	42
Figura 4.1 - Estrutura esquemática da porta lógica totalmente óptica NOT proposta	53
Figura 4.2 - Esquema da estrutura da porta lógica NOT proposta	54
Figura 4.3 - Diagrama de banda em uma rede quadrada de hastes de silício no substrato de ar para os modos TE	54
Figura 4.4 - Dois níveis de limiar para identificar os estados lógicos, o estado ON (Lógica 1) e o estado ‘OFF’ (Lógica 0)	55
Figura 4.5 - (a) Propagação do campo elétrico quando a entrada I é ‘OFF’; (b) Transmissão de potência no estado ‘ON’	57
Figura 4.6 - (a) Propagação do campo elétrico quando a entrada I é ‘ON’; (b) Transmissão de potência no estado ‘OFF’	57
Figura 4.7 - Estrutura digital da porta lógica NOT	58
Figura 4.8 - (a) Transmissão de potência na porta de saída B no estado ‘ON’; (b) Transmissão de potência na porta de saída B no estado ‘OFF’	58
Figura 4.9 - (a) Propagação do campo elétrico quando a entrada I é ‘OFF’ para o estado ‘ON’; (b) Propagação do campo elétrico quando a entrada I é ‘ON’ no estado ‘OFF’	58
Figura 4.10 - (a) Transmissão no estado ‘ON’; (b) Transmissão no estado ‘OFF’	59
Figura 5.1 - Estrutura básica da chave totalmente óptica proposta	63
Figura 5.2 - Estrutura esquemática da porta lógica NAND totalmente óptica formada por dois anéis ressonadores de cristal fotônico	64
Figura 5.3 - Espectro de transmissão para a chave totalmente óptica	65
Figura 5.4 - Estrutura básica para a realização da porta lógica NOT	65

Figura 5.5 - Transmissão de Potência no: (a) estado ‘ON’ e (b) estado ‘OFF’	66
Figura 5.6 - Distribuição de campo elétrico para a porta lógica NAND quando: (a) nenhum sinal de entrada é aplicado nas portas B e A ; (b) nenhum sinal de entrada é aplicado na porta B , mas é aplicado na porta A ; (c) um sinal é aplicado na entrada da porta B , mas não é aplicado na porta A , e (d) é aplicada potência de entrada nas portas B e A	67
Figura 5.7 - Transmissão de Potência [W / m] em todas as portas da estrutura	69
Figura 5.8 - Estrutura digital da porta lógica NAND	70

LISTA DE TABELAS

	<i>Pag.</i>
Tabela 2.1 - Tabela verdade para porta AND	39
Tabela 2.2 - Tabela verdade para porta NAND	40
Tabela 2.3 - Tabela verdade para porta OR	40
Tabela 2.4 - Tabela verdade para porta NOR	41
Tabela 2.5 - Tabela verdade para porta XOR	41
Tabela 2.6 - Tabela verdade para porta NXOR	42
Tabela 2.7 - Tabela verdade para porta NOT	42
Tabela 4.1 - Razão de Contraste para os diferentes raios das hastes dielétricas	56
Tabela 4.2 - Tabela verdade para a porta NOT	58
Tabela 5.1 - Tabela verdade para a porta NOT	66
Tabela 5.2 - Tabela verdade para a porta NAND	70

RESUMO

Nesta dissertação, foi utilizado o conceito de cristais fotônicos (PhCs) para a simulação computacional de duas portas lógicas totalmente ópticas, as portas NOT e NAND. Estas novas estruturas totalmente ópticas são compostas por um anel ressonador de cristal fotônico (PCRR) em duas dimensões (2-D), feito de hastes dielétricas de silício (*Si*) no substrato de ar. O método da *expansão em ondas planas* (PWE) e o método das *diferenças finitas no domínio do tempo* (FDTD) são utilizados para analisar o comportamento destas estruturas. O método PWE é utilizado para calcular o intervalo de *banda fotônica* (PBG) das estruturas de cristais fotônicos (PhC), que é de 0,2654-0,3897 (a / λ). As redes quadradas das portas lógicas (NOT e NAND) fabricadas são implementadas utilizando o comprimento de onda operacional igual a 1700 nm. Os resultados das simulações mostram que as estruturas propostas são candidatas potenciais para a concepção de circuitos ópticos digitais ultra-rápidos e altamente vantajosas com alta potência de transmissão, simples design, além de serem fortemente aplicáveis para a fabricação de circuitos integrados fotônicos (PICs), devido à sua simples estrutura e o seu claro princípio de funcionamento.

PALAVRAS - CHAVE: Porta Lógica Totalmente Óptica (AOLG), Anel Ressonador de Cristal Fotônico (PCRR), Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD), Razão de Contraste (*CR*).

ABSTRACT

In this work, we used the concept of Photonic Crystals (PhCs) for the computational simulation of two all-optical logic gates, the NOT and NAND gates. These new all-optical structures consist of a Photonic Crystal Ring Resonator (PCRR) in two dimensions (2-D) made of dielectric rods silicon (Si) in air substrate. The Plane Wave Expansion (PWE) and the Finite Difference Time Domain (FDTD) methods are used to analyze the behavior of these structures. The PWE method is used to calculate the Photonic Band Gap (PBG) of the PhC structures, that is from 0.2654 to 0.3897 (a / λ). The square lattices of logic gates (NOT and NAND) designed are implemented on the operational wavelength of 1700 nm. The simulation results show that the proposed structures are potential candidates for the design of ultra-fast optical digital circuits and highly advantageous with high transmission power, simple design, and are strongly applicable to the manufacture of Photonic Integrated Circuits (PICs) due to their simple structure and its clear operating principle.

KEYWORDS: All-Optical NOT Logic Gate, Photonic Crystal Ring Resonator, Finite Difference Time Domain, Contrast Ratio.

INTRODUÇÃO

Nesta dissertação, foi utilizado o conceito de cristal fotônico (PhC) para propor, projetar e realizar a implementação de portas lógicas totalmente ópticas baseadas em anéis ressoadores de cristais fotônicos bidimensionais (2-D) que são construídos artificialmente com materiais apresentando diferentes índices de refração. Cristais fotônicos são nanoestruturas organizadas em padrões periódicos que possibilitam a manipulação da luz visível e de outras formas de radiação eletromagnética [1]. Devido às suas propriedades únicas, as portas lógicas baseadas em estruturas de cristais fotônicos possuem muitas vantagens sobre as portas lógicas ópticas convencionais, tais como densidade, estrutura simples, alta taxa de velocidade e alta taxa de confinamento.

Existem alguns comprimentos de onda que não se propagam através da estrutura fotônica, formando uma faixa de frequências proibidas, denominada de *banda proibida* ou PBG, sigla em inglês para Photonic Band Gap. Desta maneira, as ondas eletromagnéticas incidentes com frequência localizada nesta faixa são refletidas pelo cristal, e portanto o fluxo de luz pode ser controlado [1]. A ocorrência deste fenômeno é bastante aproveitada para o projeto da maioria dos dispositivos baseados em cristais fotônicos.

Ultimamente, muitos pesquisadores se interessaram pelo *design* de portas lógicas ópticas de cristais fotônicos, pois é um dos meios ópticos mais importantes para formar processadores ópticos e sistemas de comunicações ópticas. Alguns destes autores projetaram portas lógicas baseando-se em ressoadores, sejam lineares ou não lineares, onde estudaram as vantagens e desvantagens existentes em cada método utilizado. Nesta direção, alguns trabalhos já foram desenvolvidos, entre os quais, referem-se o de Chunrong Tang et al. [2], onde foram projetadas várias portas lógicas totalmente ópticas de um cristal fotônico 2-D, baseadas em interferência multimodal (MMI). Algumas portas lógicas foram obtidas: OR, NAND, XNOR e XOR. Estas estruturas são analisadas e simuladas utilizando-se dos métodos FDTD e PWE. A razão de contraste para as portas lógicas OR e NAND é de 13dB, para XNOR foi de 17dB e para XOR, cerca de 21dB na Banda C (C-Band / Conventional Band) com a região espectral de 1530 nm a 1565 nm. Estas portas lógicas são potenciais candidatas para constituir os circuitos integrados fotônicos (PICs), que irão ser utilizados em processamento de sinal totalmente óptico, redes totalmente ópticas e em computação fotônica.

Em outro trabalho, Yuanliang Zhang et al. [3], demonstraram um dispositivo utilizado para a obtenção de portas lógicas ópticas. O princípio de funcionamento é mostrado através das simulações utilizando o método FDTD. Este dispositivo é aplicável para a faixa de frequências de 0,188-0,199 (a / λ). A razão de contraste obtida dentro da faixa de frequências é de 17 dB sendo que a máxima é cerca de 21dB. Devido a sua simples estrutura e o seu claro princípio de funcionamento, esta estrutura pode ser utilizada para futuras aplicações em PICs.

Em Junjie Bao et al. [4], os autores investigaram uma nova abordagem para a concepção de portas lógicas totalmente ópticas baseadas em cristais fotônicos 2-D em rede quadrada de hastes de silício (Si) em sílica (SiO_2). É constituída por dois anéis ressoadores de cristal fotônico (PCRRs) e guias de onda em formato de cruz sem o uso de amplificadores ópticos e materiais não lineares. O *layout* da porta lógica óptica é simulada e analisada pelos métodos FDTD e PWE. Os resultados da simulação numérica demonstram que a estrutura atua como porta lógica NOR e NAND. Os níveis lógicos, alto '1' e baixo '0' são definidos. Uma vez que esta estrutura é composta de um material linear, apresenta baixa potência consumida em comparação com estruturas compostas de materiais não lineares. Observa-se que a confecção de novas estruturas fazem com que PCRRs tenham novas aplicações em PICs ultra-compactos.

Os trabalhos [2, 3, 4] são alguns exemplos de estudos que se caracterizam pela utilização de uma metodologia numérica com a finalidade de analisar as portas lógicas totalmente ópticas obtidas para a utilização em diversas aplicações no âmbito das telecomunicações.

O objetivo deste trabalho é analisar o desempenho de portas lógicas totalmente ópticas baseadas em cristal fotônico de duas dimensões (2-D) e para esse efeito, o software Opti-FDTD, ferramenta de *design* e simulações da Optiwave Systems Inc., é utilizado de modo a permitir a concepção e simulação de várias configurações de estruturas baseadas em cristais fotônicos. As configurações de *hardware* que foram utilizadas são as seguintes: Intel® Core™ i7-620M Processador (4M Cache, 2.66 GHz) Memória Ram de 2GB. Agora, partiremos para a descrição da estrutura deste trabalho, que foi distribuído em 6 capítulos.

No capítulo 1, é apresentada uma breve revisão de algumas ideias fundamentais sobre cristais fotônicos que serão fortemente utilizadas no decorrer do texto, com o intuito de desenvolvermos a teoria necessária e estabelecer a técnica apropriada para o projeto e as simulações numéricas para as portas lógicas. É apresentado ainda um breve histórico sobre os cristais fotônicos, com alguns fatos considerados pioneiros para o desenvolvimento e evolução desta área, tipos de cristais fotônicos, tipos de defeitos, de guias de onda e ressoadores.

No capítulo 2, será apresentada uma breve introdução sobre a teoria das portas lógicas e chaves roteadoras, onde também abordaremos algumas definições importantes tais como, dos dispositivos de chaveamento ultra-rápidos e o *princípio de funcionamento das portas lógicas* que está diretamente relacionado com a análise feita da performance das portas simuladas.

No capítulo 3, é apresentado a modelagem matemática que descreve o comportamento e a propagação da luz na estrutura, especificada para um meio não condutor, linear, homogêneo e isotrópico. Além disto, foi feita uma descrição dos principais métodos numéricos utilizados durante as simulações das estruturas fotônicas.

Nos capítulos 4 e 5, é feito o projeto e a descrição geral do funcionamento dos ressoadores (PCRR) utilizados para a obtenção das portas lógicas NOT e NAND, respectivamente, onde serão analisadas as suas propriedades mais importantes. Os parâmetros da estrutura utilizados nas simulações computacionais são apresentados, tais como a *constante de rede* quadrada e o *comprimento de onda de operação*. São apresentados os resultados das simulações numéricas para as duas estruturas simuladas e uma análise da performance destas portas é feita utilizando-se como parâmetro a *razão de contraste (CR)*. Primeiramente, no capítulo 4, um novo esquema para a implementação da porta lógica NOT totalmente óptica é proposto, projetado e simulado, em um *wafers* de ar com apenas $12\ \mu\text{m} \times 12\ \mu\text{m}$, apresentando uma elevada razão de contraste (*CR*), sendo esta estrutura bastante compacta, bem como adequada para a concepção de outros circuitos ópticos. Em segundo momento, no capítulo 5, um novo esquema para a implementação da porta lógica NAND totalmente óptica baseado em um anel ressonador de cristal fotônico (PCRR) de duas dimensões (2-D) é proposto, projetado e simulado por uma cascata de dois anéis ressoadores totalmente ópticos, em um *wafers* de ar com apenas $24\ \mu\text{m} \times 12\ \mu\text{m}$. O novo comutador totalmente óptico é composto por dois anéis ressoadores de cristais fotônicos (PCRRs) com guia de onda do tipo L.

Finalmente, o capítulo 6 apresenta algumas considerações finais, uma lista com alguns trabalhos aceitos ou publicados em eventos nacionais e internacionais, além de uma proposta de estruturas que podem ser desenvolvidas em trabalhos futuros.

Capítulo 1

CRISTAIS FOTÔNICOS

Neste capítulo, será feita uma breve introdução de algumas ideias fundamentais no estudo de cristais fotônicos, que serão fortemente utilizadas nos capítulos seguintes. Os estudos desenvolvidos sobre os cristais possibilitaram a compreensão das propriedades físicas da matéria sólida. Um cristal é um arranjo periódico de átomos ou moléculas [5]. Ao longo dos últimos anos, o desenvolvimento de tecnologias baseadas em estruturas conhecidas como *cristais fotônicos* ou simplesmente PhCs (sigla em inglês para Photonic Crystals), vem ocorrendo de maneira bastante acelerada com a utilização destas estruturas nas mais diversas aplicações, sobretudo em telecomunicações.

Com o intuito de se conseguir uma alta velocidade de computação e circuitos compactos, os pesquisadores se voltaram para fótons em vez de elétrons, uma vez que a luz apresenta vantagens sobre os elétrons, tais como, um alto confinamento e baixo consumo de energia, que são condições adequadas para os circuitos integrados fotônicos ou PICs, do inglês, Photonic Integrated Circuits [6]. A principal ideia que fundamenta e motiva o projeto dos cristais fotônicos (PhC), é o fato de que são materiais que podem ser projetados e construídos, a partir de uma geometria previamente definida que permite confinar e liberar fótons, possibilitando o controle do fluxo da luz. Estas tecnologias podem ser utilizadas em diversos sistemas.

Neste trabalho, foi dada atenção especial às aplicações em sistemas de comunicações ópticas. O mecanismo tradicional utilizado para a manipulação do fluxo de fótons é a reflexão interna total (TIR - Total Internal Reflection), mas os cristais fotônicos (PhC) fornecem um mecanismo totalmente diferente para o controle da luz, através do surgimento de uma faixa de frequências que não propagam no interior da estrutura e controla o fluxo de luz, devido à variação periódica da constante dielétrica.

Um *cristal fotônico* representa uma nova categoria de material óptico em que a constante dielétrica muda periodicamente. O espaço em que esta constante dielétrica está inserida, é conhecido como a *estrutura de rede* ou *malha* do cristal e a distância entre dois cristais (ou entre duas hastes dielétricas) é a *constante de rede*. Por sua vez, a propagação da luz ocorre no interior do cristal, então os fenômenos de refração e reflexão ocorrem em cada interface do material dielétrico. Devido as interferências, alguns comprimentos de onda que estão próximos da periodicidade da constante dielétrica não se propagam na estrutura de cristal fotônico.

Analogamente com o que acontece com os cristais eletrônicos, em que a distribuição periódica de moléculas ou átomos pode criar uma *banda proibida* de energia na propagação de elétrons, um *cristal fotônico* construído de regiões dielétricas periodicamente distribuídas em um meio, pode criar uma *banda proibida fotônica*, em que a propagação de ondas (EM) em certas faixas de comprimentos de onda são proibidas, formando a banda PBG (sigla em inglês para Photonic Band Gap), ou simplesmente *banda proibida* da estrutura.

Esta *banda* (PBG) controla o fluxo de fótons (ou de luz) [1, 7], de modo que este fluxo pode ser alterado, desta forma permitindo o projeto de cristais fotônicos para determinadas aplicações, como a obtenção de portas lógicas. Neste conjunto de frequências proibidas, as ondas eletromagnéticas (EM) são fortemente atenuadas e não se propagam através da estrutura de rede, em quaisquer direções.

Os cristais fotônicos são estruturas artificialmente fabricadas utilizando-se de um material com uma particular *banda proibida*, diferentemente do que acontece com um material semicondutor, que ocorre naturalmente. Desta forma, os materiais com PBG definido possuem aplicações para diversos objetivos. Entre alguns exemplos destas aplicações, podemos citar os guias de onda, os ressoadores ópticos e os filtros PBG.

1.1. Breve Histórico dos Cristais Fotônicos

Os primeiros cristais fotônicos evoluíram durante milhões de anos na natureza, entre os quais, se pode citar como exemplo as *opalas*, que são minerais compostos por cristais de sílica. Os cristais fotônicos são nanoestruturas formadas por materiais organizados periodicamente e com diferentes índices de refração que possibilitam a manipulação da luz [1]. Apesar de haverem outros materiais na natureza com essas características, os cristais fotônicos também podem ser concebidos pelo ser humano, podendo ser classificados como metamateriais [5]. Na sua concepção, as suas características (como o formato, as dimensões e os tipos de materiais que os compõem) são projetadas com o objetivo de se conseguir o controle da luz.

Em 1887, Lord Rayleigh foi o primeiro cientista que estudou os cristais fotônicos 1-D [8]. Este estudo mostrou que tais estruturas periódicas apresentam uma faixa de frequências proibidas, que ficou conhecida como *Photonic Band Gap*, onde as ondas eletromagnéticas com frequência compreendida nesse intervalo são proibidas de se propagarem através da estrutura sendo completamente refletidas pelo cristal.

Entre outras contribuições de teóricos ao longo do tempo, foi em 1987, cerca de cem anos após a publicação de Lord Rayleigh [8], que Eli Yablonovitch publicou um importante artigo contribuindo na área dos cristais fotônicos, no qual construiu um cristal fotônico tridimensional, com *band gap* situado na faixa entre 13 e 15 GHz. Este cristal fotônico consistia em um bloco formado por um material com índice de refração igual a 3,6 onde apresentava perfurações milimétricas que foram produzidas mecanicamente [9]. O referido cristal ficou conhecido como *Yablonovite*, sendo representado na Figura 1.1.

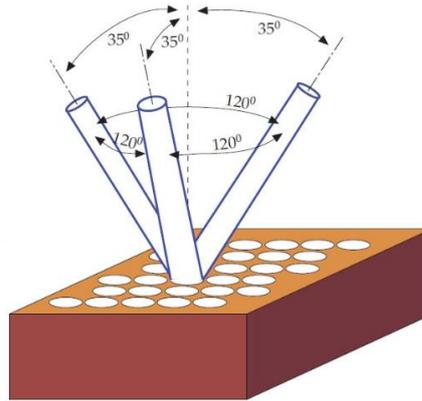


Figura 1.1 - Ilustração do cristal fotônico desenvolvido por Eli Yablonovitch [1].

Em 1990, foi publicado o primeiro trabalho teórico [10] de grande relevância para a comunidade científica. Neste artigo, foi feito o cálculo da estrutura de banda para um cristal de rede cubica e de face centrada, que mostrou a existência de uma geometria cristalina com um completo PBG. A estrutura de bandas foi calculada pelo método da expansão em ondas planas (PWE), e consistiu basicamente em obedecer rigorosamente à natureza vetorial dos campos eletromagnéticos.

Em 1996, Thomas Krauss implementou um cristal fotônico 2-D no comprimento de onda óptico [11]. Existem inúmeros trabalhos de pesquisas que ocorreram em todo o mundo para melhorar o processamento óptico, também para a utilização de estruturas de cristais fotônicos.

Também em 1996, Philip Russell publicou um trabalho no qual desenvolveu a primeira fibra de cristal fotônico (PCF) utilizada comercialmente [12, 13], sendo representada na Figura 1.2. Trata-se de uma classe especial de componentes incorporando cristais fotônicos, que foi proposta por meio da construção de fibras ópticas de sílica pura com uma microestrutura composta de centenas de furos em arranjo hexagonal, que ao longo de seu comprimento estão preenchidos com ar. Estas fibras de cristal fotônico, ou simplesmente PCFs (sigla em inglês para Photonic Crystal Fibers), constituem uma nova classe de fibras ópticas.

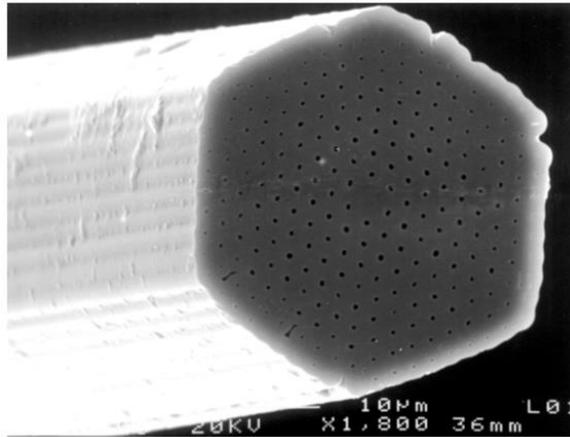


Figura 1.2 - Foto de microscópio da primeira PCF fabricada [12, 13].

1.2. Tipos de Cristais Fotônicos

Os cristais fotônicos podem ser classificados em três tipos: unidimensionais (1-D), bidimensionais (2-D) e tridimensionais (3-D), conforme a sua geometria [1]. Considerando a estrutura de cristal 1-D, a constante dielétrica muda apenas em uma direção, sendo que a *banda proibida* só existe nesta direção. Esta estrutura é mais simples, portanto mais fácil de fabricar.

Em um cristal fotônico 2-D, a constante dielétrica é periodicamente alterada ao longo de duas direções, mas é uniforme na terceira direção. Este cristal (PhC) é formado pela distribuição periódica de hastes dielétricas em um substrato de ar, ou pela distribuição periódica de colunas de ar em um substrato dielétrico, como podemos observar na Figura 1.3. Se a PBG existir no plano de periodicidade a luz não se propaga neste plano [11]. Para a propagação da luz neste plano, os modos harmônicos pode ser dividido em dois modos de polarizações independentes (TE e TM). Cada polarização tem as suas próprias estruturas de banda diferentes. É possível que o PBG em determinada estrutura exista para uma polarização, mas não para a outra.

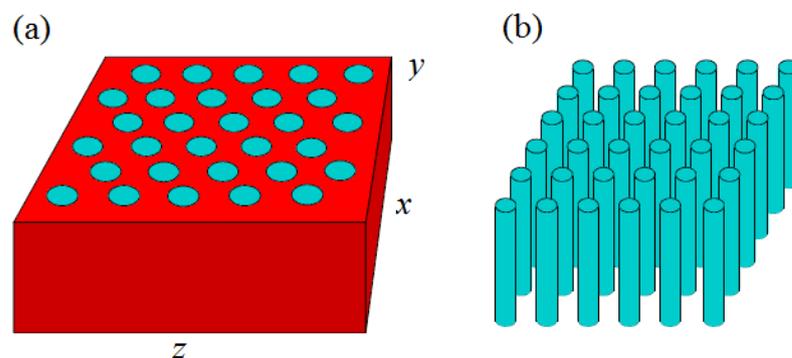


Figura 1.3 - Cristal fotônico formado pela distribuição periódica de: (a) colunas de ar perfuradas em um substrato dielétrico; (b) hastes dielétricas em um substrato de ar. Adaptada de [20].

Em um cristal 3-D, a constante dielétrica muda periodicamente em todas as direções. Portanto, não há eixo ao longo do qual a luz pode propagar na estrutura [14]. Isso resulta em uma abertura de faixa completa. Em 1-D e 2-D pode localizar luz no defeito de ponto ou linha, mas em 3D existe capacidade extra para localizar a luz em todas as direções.

A periodicidade dos cristais fotônicos pode ocorrer em uma, duas ou três dimensões, sendo que o foco deste trabalho são os cristais fotônicos 2-D. Os diferentes tipos de cristais fotônicos são ilustrados na Figura 1.4.

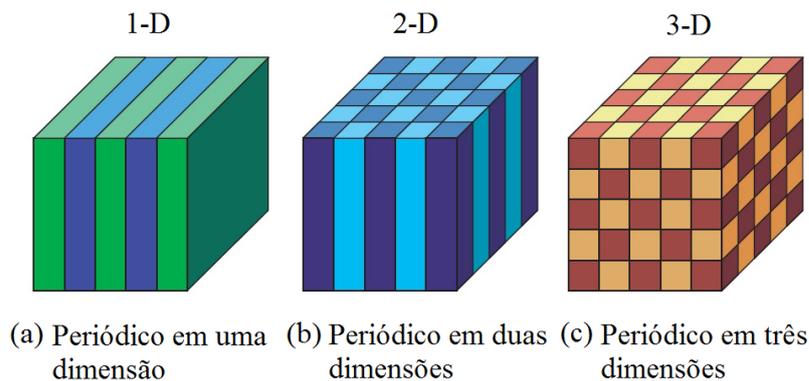


Figura 1.4 - Ilustração do cristal fotônico em (a) uma dimensão, (b) duas dimensões e (c) três dimensões. Adaptada de [1].

Os cristais bidimensionais têm chamado atenção de cientistas porque são de fácil construção e análise. Neste trabalho, são considerados cristais fotônicos bidimensionais com rede quadrada, conforme mostra a Figura 1.5, onde a é a constante de rede quadrada da estrutura e r é o raio das hastes dielétricas. Estas estruturas, por serem baseadas em cristais fotônicos, são bastante compactas e podem ser projetadas em dimensões bastante reduzidas, contribuindo com a densidade de integração de componentes em sistemas de comunicações ópticas.

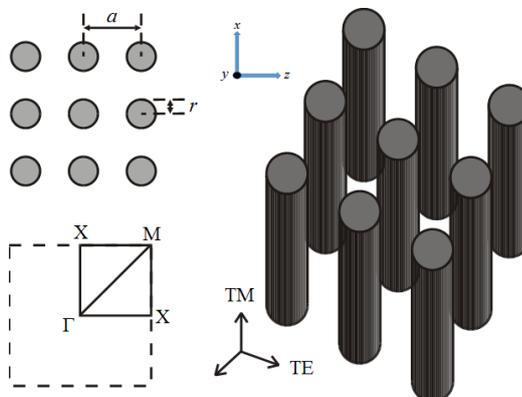


Figura 1.5 - Cristal fotônico 2-D, onde a e r são os parâmetros construtivos da estrutura. Adaptada de [1].

1.3. Tipos de Defeitos

As propriedades de cristais fotônicos podem ser alteradas através de um processo em que hastes dielétricas são adicionadas ou removidos de uma certa região. Esta alteração na estrutura dielétrica é conhecida como defeito, que pode ser um defeito *pontual* ou *de linha* [1]. Nestes defeitos ocorrem o confinamento das ondas EM na estrutura PBG [1]. Os defeitos pontuais são utilizados para prender a luz. Além da criação de defeitos na estrutura de um cristal fotônico, o funcionamento de dispositivos baseados em cristais fotônicos geralmente está associado à existência da *banda proibida* [4, 6].

A inserção de defeitos pode gerar guias de onda que permitem a propagação de ondas eletromagnéticas (EM) em determinada estrutura fotônica, a qual está associada a sua *banda proibida*, responsável pelo guiamento e confinamento da luz [7]. A periodicidade de um cristal fotônico é interrompida pela introdução de defeitos na estrutura, que podem ser criados através da remoção de uma camada de furos do cristal, ou pela retirada de hastes dielétricas, ou ainda alterando-se o diâmetro de uma linha de furos, de modo que um sinal eletromagnético (EM) é confinado no interior do defeito [1].

Alterando-se uma região da rede (por exemplo, modificando a constante dielétrica de uma coluna, ou removendo a mesma) provoca-se um defeito ao longo de uma linha na direção z . Este defeito quebra a simetria da constante dielétrica periódica, ocasionando o surgimento de um modo nesta região, que não se espalha na estrutura do cristal (PhC), ficando confinado no interior do ponto de defeito criado, uma vez que este modo possui frequência dentro da faixa do PBG [14, 15, 17]. Esse distúrbio é conhecido como um *defeito pontual* ou *de cavidade*. A cavidade é cercada por paredes refletoras que determinam o modo de guiamento. Os defeitos pontuais em PhCs são usados para prender a luz, como no caso de cavidades ressonantes, como mostrada na Figura 1.6.

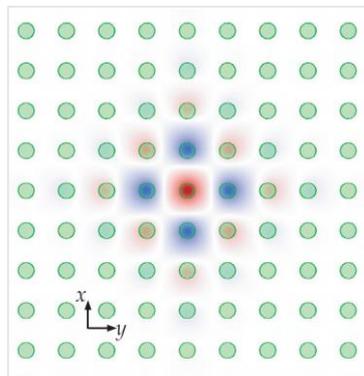
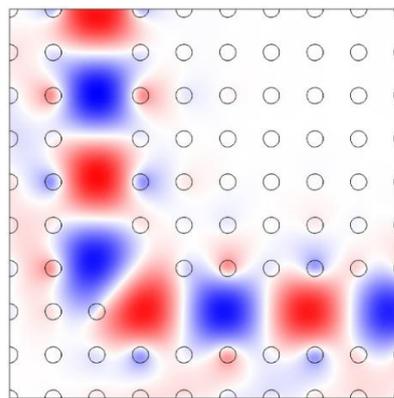


Figura 1.6 - Cavidade ressonante de cristal fotônico 2-D formada por um defeito pontual [1].

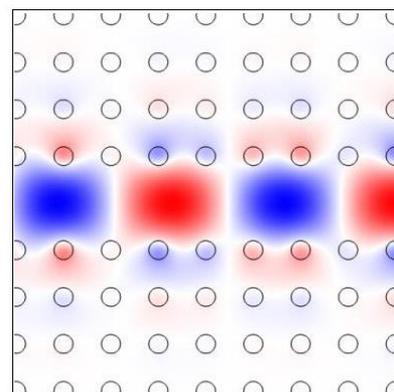
Os *defeitos lineares* são utilizados para guiar a luz a partir de uma posição para outra [1]. A ideia principal é formar um guia de ondas a partir da estrutura do cristal fotônico alterando uma série linear do cristal, como mostrado na Figura 1.7 (b). A luz com a sua frequência no intervalo de *banda fotônica*, se propaga no guia de ondas e está confinada ao *defeito*, de modo que pode ser controlada ao longo do mesmo [1].

1.4. Guias de Onda

Criando-se imperfeições ou defeitos com a retirada, modificação ou troca de elementos da rede cristalina de um cristal fotônico, é possível construir dispositivos capazes de propagar no defeito, os modos eletromagnéticos inicialmente proibidos. Exemplos destas aplicações são guias de onda, trilhas de circuitos impressos, filtros PBG e cavidades ressonantes. A Figura 1.7 (a) mostra uma estrutura periódica conduzindo um feixe de luz por um determinado caminho, resultado de um defeito linear.



(a)



(b)

Figura 1.7 - Ilustração de guias de onda baseados em cristal fotônico 2-D, construídos utilizando o software COMSOL Multiphysics: (a) com dobramento de 90 graus; (b) em linha reta.

Para um cristal fotônico funcionar como um *guia de onda*, é necessário introduzir na sua estrutura defeitos que alterem a sua periodicidade. Existem várias maneiras em que defeitos lineares podem ser introduzidos nos PhCs, mas existe a condição de que a simetria deve ser mantida nas direções. Isto pode ser conseguido através da remoção de cada haste ao longo de uma única linha, o que resulta em um *guia de ondas* com apenas um modo guiado na frequência determinada [18].

Em um cristal fotônico, baseado em uma rede periódica de furos feitos em um material dielétrico, estes defeitos podem ser criados removendo-se uma camada de furos do cristal ou alterando o diâmetro de uma linha de furos da estrutura, de modo que um sinal eletromagnético (EM) seja confinado no interior do defeito [19], como se pode observar na Figura 1.8. Meade et al. [19] publicam o conceito de *fitas* de cristal fotônico (photonic crystals *slabs*), consistindo em estruturas com redes periódicas bidimensionais de extensão finita, nas quais são introduzidos estreitos canais por onde a luz pode ser guiada com mínimas perdas. Os guias de onda de cristais fotônicos do tipo *slab*, são formados através da remoção de uma fileira de orifícios de ar a partir de uma rede periódica 2-D, que pode ser do tipo quadrada ou triangular por exemplo. Isto introduz um *defeito de linha* dentro da rede periódica.

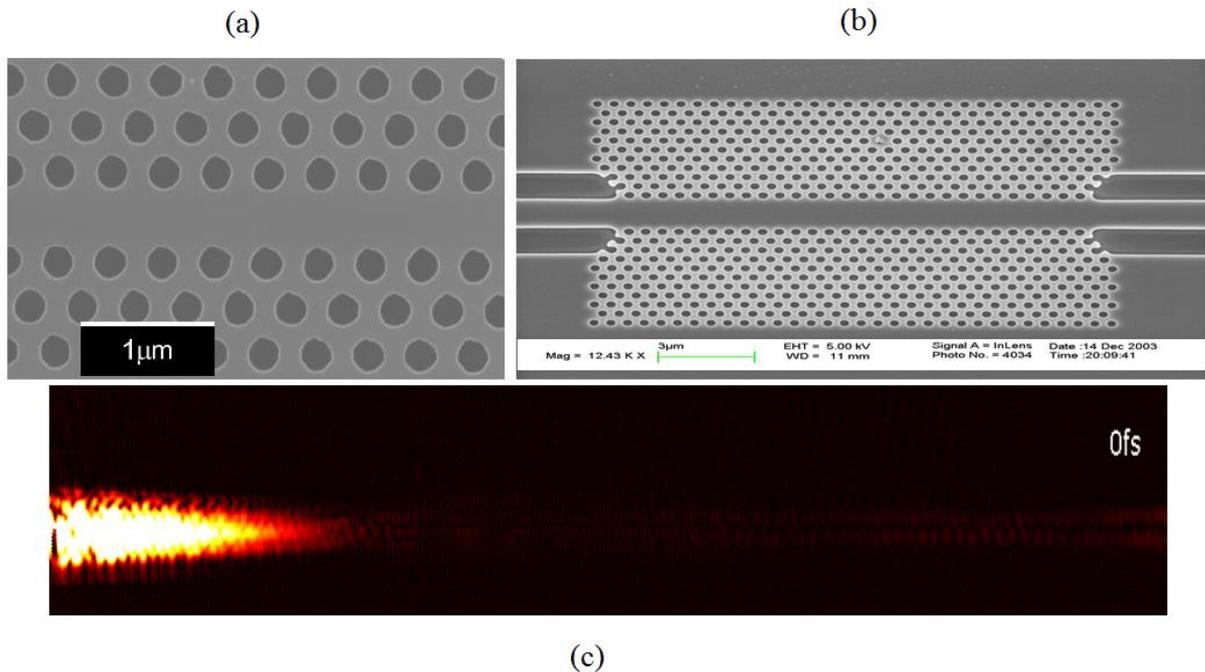


Figura 1.8 - (a) e (b) Guias de onda 2-D de cristais fotônicos do tipo *slab*, baseados em uma rede periódica triangular de furos feitos em um material dielétrico, formados através de *defeitos lineares*; (c) Propagação do campo eletromagnético no *guia de onda* do tipo *slab*, mostrado no item (b). Adaptada de [21].

O mecanismo de guiamento da luz nos guias de onda dielétricos convencionais ocorre através do processo da reflexão interna total, (TIR), mas este mecanismo pode confinar a onda (EM) apenas na região de maior constante dielétrica. Neste caso, o mecanismo de orientação é o *band gap* que é independente das propriedades do material que preenche o núcleo. Esta propriedade é muito importante para um grande número de aplicações em que é necessária a redução da interação entre o material dielétrico e a luz.

A Figura 1.9 (a) mostra um guia de onda construído através da realização de sucessivos defeitos lineares na estrutura com a retirada de hastes dielétricas, formando um guia de onda com dobramento acentuado de 90 graus. A Figura 1.9 (b) mostra a propagação dos campos eletromagnéticos neste guia de onda, onde podemos observar que a curva acentuada de 90°, não oferece resistência ao guiamento da luz, havendo um confinamento praticamente sem perdas. Aliás, esta é uma das vantagens que os guias de ondas baseados em cristais fotônicos possuem, não sendo possível nas fibras ópticas, por exemplo, devido às altas perdas que ocorrem.

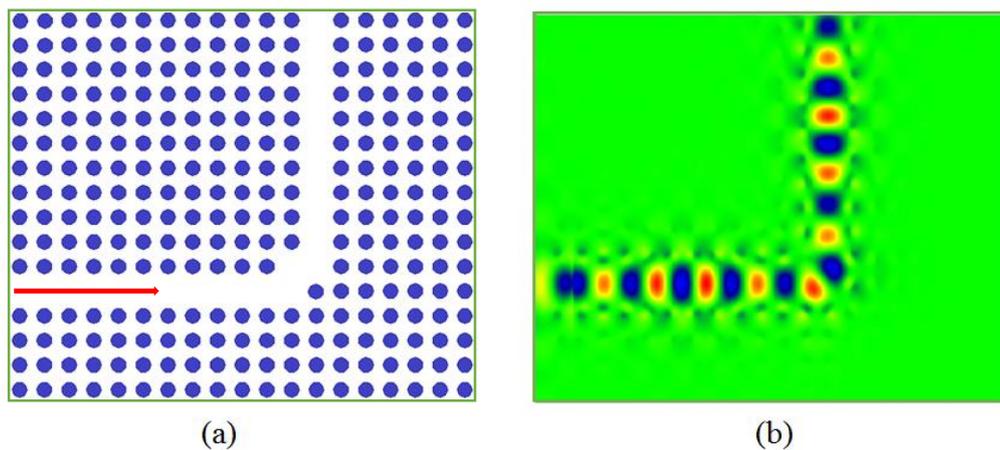


Figura 1.9 - Utilizando-se do software Opti-FDTD, tem-se: (a) um guia de onda baseado em cristal fotônico 2-D, com uma curva acentuada de 90°; e (b) a propagação dos campos (EM) utilizando-se diferenças finitas bidimensionais (FDTD).

1.5. Ressonadores Ópticos Baseados em Cristais Fotônicos

Neste capítulo, a teoria dos cristais fotônicos é estudada com o objetivo de ser aplicada na modelagem de diversas estruturas de reconhecido interesse científico e tecnológico, tais como filtros de cavidades ressonantes e os *ressonadores ópticos*. Um *ressoador* é um dispositivo que exibe comportamento ressonante, ou seja, oscila naturalmente a determinadas frequências, denominadas de *frequências de ressonância*. Estes ressoadores podem ser construídos através de estruturas de cristais fotônicos, simulando efeitos de espelhos obtendo múltiplas reflexões.

Neste trabalho, *anéis ressoadores* baseados em cristais fotônicos (PhC) são utilizados para a obtenção de *portas lógicas totalmente ópticas*, particularmente as portas NOT e NAND.

Estas estruturas ressonantes são construídas através da alteração controlada da geometria da estrutura de rede cristalina, por meio da realização de defeitos sucessivos que podem ser de vários tipos e finalidades diferentes, dependendo apenas dos objetivos do projeto para o dispositivo. Portanto, são projetados e construídos dispositivos capazes de propagar no defeito criado, os modos eletromagnéticos conforme a *banda proibida* para as estruturas. A geometria em forma de anel favorece a uma grande interação entre a onda propagante e o meio material, possibilitando diversas aplicações importantes em sensoriamento como em biosensores.

Estas estruturas são bastante estudadas na literatura, sendo que diferentes configurações foram propostas afim de otimizar a sua resposta espectral, visando cada vez mais, uma maior miniaturização das estruturas, implicando em uma maior flexibilidade no projeto de sistemas de comunicações ópticas, apresentando um alto fator de integração de diferentes componentes. Um exemplo de uma cavidade ressonante na forma de um *anel ressoador* bidimensional, com uma estrutura baseada em cristais fotônicos é mostrado na Figura 1.10.

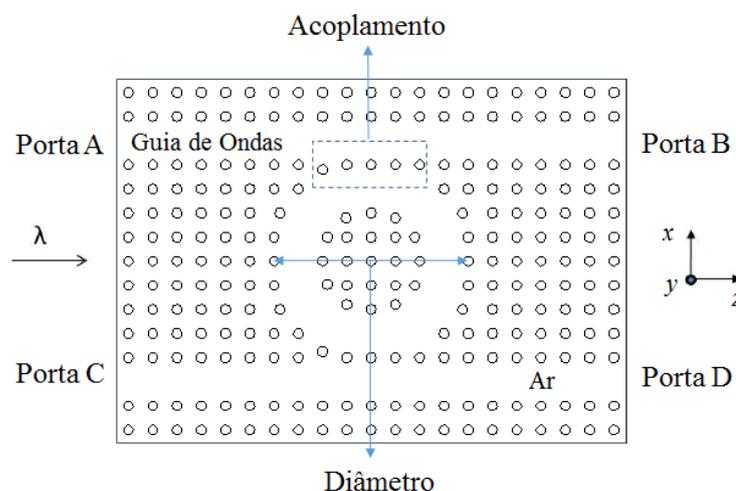


Figura 1.10 - Estrutura de um anel ressoador bidimensional, com índices de refração nos cilindros de 3.39 e no ar, 1. O *design* da estrutura foi feito utilizando-se do software Opti-FDTD.

Os *ressoadores ópticos*, também são conhecidos como *cavidades ressonantes* ou por microcavidades ópticas, sendo utilizadas principalmente para gerar feixes ópticos de alta intensidade. Basicamente, cavidades ressonantes são dispositivos que armazenam energia na forma de campos eletromagnéticos. Estas cavidades são compartimentos metálicos fechados comumente encontrados nas formas cilíndrica e retangular.

Referências Bibliográficas

- [1] John D. Joannopoulos, Steven G. Johnson, Joshua N. Winn, Robert D. Meade, “Photonic Crystals: Molding the Flow of Light”, Copyright by Princeton University Press, (2008).
- [2] C. Tang, X. Dou, Y. Lin, H. Yin, B. Wu and Q. Zhao, “Design of all-optical logic gates avoiding external phase shifters in a two-dimensional photonic crystal based on multi-mode interference for BPSK signals”, *Optics Communications*, vol. 316, no. 7, pp. 49 - 55, 2013.
- [3] Y. Zhang, Y. Zhang and B. Li, “Optical switches and logic gates based on self-collimated beams in two-dimensional photonic crystals”, *Optics Express*, vol. 15, no. 15, pp. 9287 - 9292, 2007.
- [4] J. Bao, J. Xiao, L. Fan, X. Li, Y. Hai, T. Zhang and C. Yang, “All-optical NOR and NAND gates based on photonic crystal ring resonator”, *Optics Communications*, vol. 329, no. 20, pp. 109 - 112, 2014.
- [5] Callister, W. D, “Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução”. John Wiley & Sons, Inc, (2002).
- [6] Babak Vakili, Shahram Bahadori-Haghighi and Rahim Ghayour, “All-optical switching using a new photonic crystal directional coupler”, *Advanced Electromagnetics*, vol. 4, no. 1, July, (2015).
- [7] R. D. Meade, K. D. Brommer, A. M. Rappe and J. D. Joannopoulos, “Existence of a photonic band gap in two dimensions”, *Applied Physics Letters*, v. 61, n. 4, pp. 495-497, (1992).
- [8] Rayleigh, L. “On the maintenance of vibrations by forces of double frequency, and on the propagation of waves through a medium endowed with a periodic structure”. *Philosophical Magazine*, v. 24, pp. 145-159, (1887).
- [9] E. Yablonovitch and T. J. Gmitter, “Photonic band structure: the face-centered-cubic case”, *Physical Review Letters*, v. 63, n. 18, pp. 1950-1953, (1987).
- [10] K. M. Ho, C. T. Chan and C. M. Soukoulis, “Existence of a photonic gap in periodic dielectric structures”, *Physical Review Letters*, v. 65, n. 25, pp. 3152-3155, (1990).
- [11] T. F. Krauss, R. M. De La Rue and S. Brand, “Two-dimensional photonic band gap structures operating at near-infrared wavelengths”, *School of Physics and Astronomy*, vol. 383, no. 12, pp. 699-702, (1996).
- [12] J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell and D. M. Atkin, “All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding”, *Opt. Lett.* 21, 1547-1549, (1996).
- [13] J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell and D. M. Atkin, “Pure silica single-mode fiber with hexagonal photonic crystal cladding”, In: *Optical Fiber Communication Conference, San Jose. Proceedings-SPIE*, (1996).
- [14] E. Yablonovitch, T. J. Gmitter and K. M. Leung, “Photonic band structure: the face-centered cubic case employing nonspherical atoms”, *Physical Review Letters*, v. 67, n. 17, pp. 2295-2299, (1991).

- [15] E. Yablonovich, “Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics”, *Physical Review Letters*, vol. 58, no. 20, pp. 2059–2062, (1987).
- [16] J. D. Joannopoulos, P. R. Villeneuve and S. Fan, “Photonic Crystals: putting a new twist on light”, *Nature*, vol. 386, no. 6621, pp. 143-149, (1997).
- [17] S. John, “Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices”, *Physical Review Letters*, vol. 58, no. 23, pp. 2486-2489, (1987).
- [18] K. Sakoda, “Optical Properties of Photonic Crystal”, Springer Berlin, (2001).
- [19] R. D. Meade, K. D. Brommer, A. M. Rappe and J. D. Joannopoulos, “Existence of a photonic band gap in two dimensions”, *Applied Physics Letters*, vol. 61, No 4, pp. 495-497, (1992).
- [20] Almir W. L. Junior, “Célula de Comutação Óptica em Cristal Fotônico”, Tese de doutorado, PPGETI / UFC, Fortaleza (2010).
- [21] H. Gersen, T.J. Karle, R.J.P. Engelen, W. Bogaerts, J.P. Korterik, N.F. van Hulst, T.F. Krauss and L. Kuipers, “Real-Space observation of ultraslow light in photonic crystal waveguides”, *Phys. Rev. Lett.* 94, 073903 1-4 (2005).

Capítulo 2

CHAVES ROTEADORAS E PORTAS LÓGICAS

São esperados que os sistemas de chaveamentos futuros processem dados de rede a taxas de *terabit* por segundo (Tbits/s). O *terabit* por segundo, do ponto de vista das pesquisas, é significativo porque implica que os sistemas requererão dispositivos e arquiteturas diferentes das usadas atualmente. Estes sistemas futuros podem usar alguns aspectos do chaveamento fotônico e tirar proveito de propriedades inerentes à óptica. A óptica pode ser benéficamente utilizada, por exemplo, em: (1) interconexões fotônicas, (2) operações lógicas paralelas e (3) dispositivos de chaveamento ultra-rápido [1].

Nas duas primeiras aplicações, os processamentos em *terabit* podem ser alcançados usando arranjos paralelos de dispositivos opto-eletrônicos operando em velocidades de *megahertz*. Em oposição, a terceira aplicação é serial por natureza e necessita utilizar dispositivos com velocidades próximas do *terabit* por segundo. Aplicações nas quais dispositivos seriais poderão ser importantes incluem os sistemas de telecomunicações de alta performance e redes locais de fibra óptica.

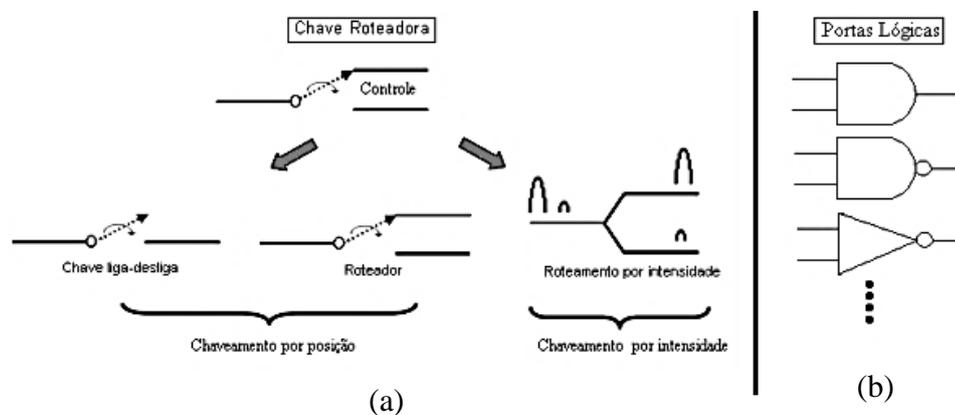


Figura 2.1 - (a) Chave roteadora na qual a entrada é conectada a uma das diversas portas de saídas, sendo o roteamento baseado por posição ou por intensidade. Figura 2.1 (b) - Portas lógicas na qual uma operação Booleana é executada de acordo com os valores dos sinais de entrada.

Dispositivos ultra-rápidos podem ser divididos em duas categorias gerais, conforme ilustra a Figura 2.1. A primeira categoria, Figura 2.1 (a), é a chave roteadora, que caracteriza-se por ter sua porta de entrada ligada a uma das diversas portas de saída, sendo que o roteamento

está baseado nas intensidades dos sinais ou por um controle externo. Se somente uma porta de saída é empregada, então a chave roteada trabalha como uma chave liga-desliga. Também se for baseada na intensidade da entrada, então o dispositivo pode ser usado como um limitador. A outra categoria são as portas lógicas, Figura 2.1 (b), na qual uma operação Booleana é executada de acordo com os valores dos sinais de entrada. A aproximação lógica é uma poderosa ferramenta, pois possibilita uma distribuição inteligente ao longo do sistema (no sentido de que um fluxo de dados pode controlar outro), e esta é uma das razões dos sistemas eletrônicos modernos operarem com base na lógica digital.

Chaves roteadoras e portas lógicas diferem fundamentalmente no modo de controle. Nas chaves roteadoras, o controle é tipicamente externo a estrutura de chaveamento. Nas portas lógicas, o controle pode ser distribuído ao longo de toda a estrutura de chaveamento, tanto fisicamente quanto atuando no próprio dado. Uma outra diferença entre os dois dispositivos da Figura 2.1 está na representação da decisão. A chave roteadora representa sua decisão pela posição ou localização do dado, enquanto que a saída da porta lógica tem um nível lógico '0' ou '1'. Visto que as chaves roteadoras conduzem o dado a partir de uma entrada para uma dada saída, estes dados transferidos pelas chaves roteadoras podem ser degradados por causa de perdas, dispersão ou cross-talk, ao passo que o nível dos sinais, nas saídas das portas lógicas digitais, pode ser regenerado.

2.1. Dispositivos de Chaveamento Ultra-rápidos

Fibras ópticas são um meio muito atrativo para chaveamentos por que elas exibem interessantes fenômenos físicos como dispersão, não linearidade e ganho Raman, dentre outros [2]. Chaveamentos em guias de onda não lineares são baseados em efeitos Kerr [6], e, se estes chaveamentos são operados em regime anômalo de dispersão de velocidade de grupo (GVD), então pulsos de sólitons podem também ser suportados (normalmente pulsos de picosegundos ou femtosegundos) [2].

Diversos dispositivos lógicos e de chaveamento são baseados em susceptibilidade de terceira ordem, χ^3 em fibras. Chaves, tipicamente, têm um pulso de controle em uma frequência diferente e têm múltiplas portas de saída, sendo a decisão representada pela localização ou posição dos dados. Operando como um dispositivo de simples entrada e saída, uma porta roteadora pode funcionar como um limitador óptico.

Exemplos de dispositivos de roteamento incluem moduladores Kerr, misturador de quatro ondas (four-wave-mixing) e interferômetro de Mach-Zehnder (MZI). Por outro lado,

portas lógicas digitais representam estas decisões por um nível '0' ou '1' que podem ser regenerados, isto é, os sinais são substituídos por pulsos que são corrigidos em amplitude, forma e sincronismo. Dispositivos e sistemas totalmente ópticos estão ainda em estágio inicial de desenvolvimento e existem diversas áreas tecnológicas que requerem maiores inovações antes de poder prosperar. O fator crucial em um dispositivo é que ele necessita de uma energia de chaveamento muito baixa, menor que picojoule por bit, da energia líquida.

Novos materiais não lineares também serão estudados para fazer dispositivos mais compactos com redução da latência (atraso da entrada para a saída) e crescimento da estabilidade térmica. Talvez o principal componente para sistemas totalmente ópticos seja uma fonte de laser compacta, com uma potência média aproximada a um watt, que possa atuar como uma fonte de alimentação. Uma outra limitação é um acesso aleatório de memória totalmente óptico, sendo que as soluções para este problema ainda não foram encontradas. Entretanto, a necessidade para acesso aleatório de memória é discutível, pois a latência em acesso a memória pode ser prejudicial. Embora comumente esquecido dos detalhes de engenharia, circuitos de sincronização temporal precisos são necessários para períodos de bits próximos de picosegundos.

Finalmente, em um contexto amplo, as arquiteturas precisam ser padronizadas para melhorar a capacidade de chaveamento dos sistemas tornando essa tecnologia aplicável. Isso tem estimulado progressos contínuos em muitas destas áreas. Por exemplo, diversos grupos estão estudando propriedades ópticas de semicondutores e materiais orgânicos [2, 3]. Também um acoplador direcional totalmente óptico usando dois guias de onda espaçados constituído de AlGaAs tem sido demonstrado usando pulso de 10 ps [4], além do fato de que recentemente lasers EDFAs estão sendo desenvolvidos em ritmo acelerado, o que representa um tremendo impacto em sistemas de transmissão de longa distância visto que os EDFAs compensam perdas por acoplamento, divisão e inserção dentro do sistema.

O campo tecnológico alcançou seu *status* atual por causa de uma combinação de conhecimentos de chaveamentos fotônicos, técnicas de geração de pulsos ultracurtos, óptica não linear e a tecnologia de fibras ópticas. Por esta razão, fibras continuam sendo à base de testes para novas arquiteturas de chaveamento totalmente óptico. Além disso, dispositivos ou sistemas usarão sólitons para chaveamento e transmissão [5]. Potenciais aplicações que utilizam portas ultra-rápidas para redes metropolitanas e locais, sistemas de computadores e memória de acesso aleatório totalmente óptico precisam ser explorados.

2.2. Princípio de Operação das Portas Lógicas Ópticas

O princípio de operação de uma porta lógica totalmente óptica está baseado na alteração das propriedades de transmissão de um meio não linear através de pulsos de controle óptico. Em princípio, todos os meios que apresentam não linearidade óptica podem ser usados em portas lógicas ópticas, porém um alto coeficiente de não linearidade e uma resposta rápida destes efeitos, na ordem de picosegundos, são geralmente muito importantes. São também propriedades desejáveis uma independência de polarização e uma largura de banda grande. Dois diferentes tipos de efeitos não lineares podem ser usados para construir portas lógicas totalmente ópticas.

O primeiro tipo inclui efeitos não lineares em que novas componentes de frequências são geradas por dados e sinal de controle incidente no meio. O segundo tipo inclui efeitos não lineares em que a fase ou a amplitude do sinal propagado através do meio é alterada por mudança do índice de refração não linear ou ganho, induzido por sinal óptico de controle [5]. Especificamente, dois meios não lineares são amplamente usados para portas lógicas totalmente ópticas aplicadas a telecomunicações: o amplificador óptico semiconductor (SOA) e um tipo especial de fibra de sílica com elevada não linearidade, também chamada de HNLF (Highly Nonlinear Fiber) [5].

As propriedades não-lineares destes meios podem diferir significativamente, já que a interação de uma radiação com o meio pode ser ressonante ou não-ressonante, dependendo dos níveis de energia (frequências de transição) do meio e da frequência da radiação. Na fibra de sílica, onde as frequências de transição do meio são distantes das frequências ópticas usadas em telecomunicações (em torno de $1,3\mu\text{m}$ e $1,5\mu\text{m}$), a interação com o sinal dos dados é não-ressonante e as não-linearidades também são ditas não-ressonantes.

Em geral, não-linearidades não-ressonantes têm uma resposta muito rápida, na ordem de alguns femtosegundos, mas o coeficiente não-linear é comparavelmente pequeno. Um amplificador óptico semiconductor (SOA) requer baixa potência e curto comprimento de interação. Comparado com a fibra, a desvantagem do SOA como meio não linear é que a maioria dos efeitos não-lineares estão associados com a dinâmica dos portadores de carga. Em consequência, o tempo de resposta é limitado pelo tempo de recuperação da dinâmica da densidade do portador no SOA, a qual é tipicamente alguma centena de picosegundos.

2.3. Portas Lógicas

As portas lógicas são os componentes básicos para criar circuitos digitais e até mesmo circuitos integrados complexos como, por exemplo, os processadores e microcontroladores. O comportamento das portas lógicas é conhecido pela tabela verdade que apresenta os estados lógicos das entradas e das saídas. Temos sete tipos de portas lógicas, são elas: AND, NAND, OR, NOR, XOR, NXOR e NOT. Em eletrônica digital apenas dois números são permitidos, '1' e '0'. Para uma analogia podemos pensar nos números '1' e '0' como uma lâmpada sendo acesa ou apagada quando você liga ou desliga um interruptor.

• AND Gate (Porta E).

A porta lógica AND realiza uma operação lógica 'AND' ('E'), que é uma multiplicação. Por isso, se A e B são suas entradas, na saída teremos o resultado de $A \times B$ (também representado como $A \cdot B$). Ela produz uma saída '1', se todos os sinais de entrada forem '1' caso qualquer um dos sinais de entrada for '0', a porta AND produzirá um sinal de saída igual a zero.

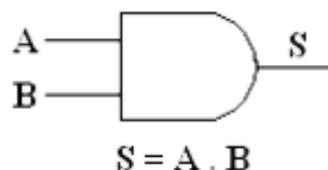


Figura 2.2 - Símbolo gráfico e equação Booleana para porta AND.

A	B	S
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Tabela 2.1 - Tabela verdade para porta AND.

• NAND Gate (Porta NÃO E).

A porta NAND produz uma saída que é o inverso da saída produzida pela porta AND, assim sua saída será sempre '0' quando todos os valores de entrada forem iguais a '1'. Caso contrário, o valor da sua saída será '1'.

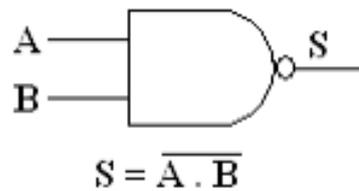


Figura 2.3 - Símbolo gráfico e equação Booleana para porta NAND.

A	B	S
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Tabela 2.2 - Tabela verdade para porta NAND.

- **OR Gate (Porta OU).**

A porta lógica OR realiza uma operação lógica ‘OR’ (‘OU’), que é uma adição. Por isso, se A e B são suas entradas, na saída teremos o resultado de $A + B$. Ela produz uma saída ‘1’, se qualquer um dos sinais de entrada for igual a ‘1’; e produzirá um sinal de saída igual a ‘0’ apenas se todos os sinais de entrada forem ‘0’.

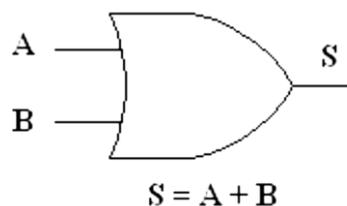


Figura 2.4 - Símbolo gráfico e equação Booleana para porta OR.

A	B	S
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Tabela 2.3 - Tabela verdade para porta OR.

- **NOR Gate (Porta NÃO OU).**

A porta NOR produz uma saída que é o inverso da saída produzida pela porta OR, assim sua saída será sempre '1' quando todos os valores de entrada forem iguais a '0'. Caso contrário, o valor da sua saída será '0'.

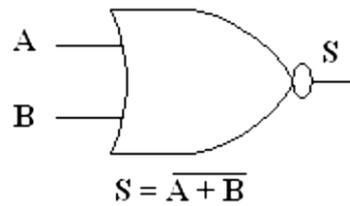


Figura 2.5 - Símbolo gráfico e equação Booleana para porta NOR.

A	B	S
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

Tabela 2.4 - Tabela verdade para porta NOR.

- **XOR Gate (Porta OU Exclusivo).**

A operação XOR é representada pelo símbolo \oplus . A porta lógica XOR compara dois valores e produz saída '0' quando todos os bits de entrada são iguais, e saída '1' quando os bits de entrada são diferentes.

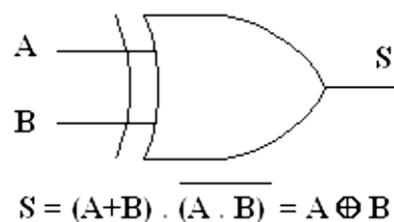


Figura 2.6 - Símbolo gráfico e equação Booleana para porta XOR.

A	B	S
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Tabela 2.5 - Tabela verdade para porta XOR.

- **NXOR Gate (Porta NÃO OU Exclusivo).**

A porta NXOR produz uma saída que é o inverso da saída produzida pela porta XOR. Dessa forma, sua saída será igual a '1' quando suas entradas possuírem o mesmo valor e '0' quando elas forem diferentes.

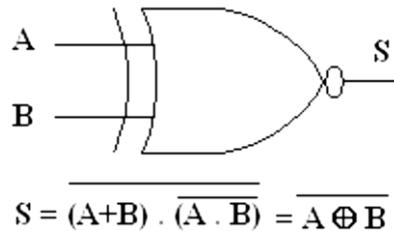


Figura 2.7 - Símbolo gráfico e equação Booleana para porta NXOR.

A	B	S
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Tabela 2.6 - Tabela verdade para porta NXOR.

- **NOT Gate (Porta NÃO ou INVERSOR):**

Sua função é inverter o valor da variável de entrada. Se o sinal de entrada for '0' ela produz uma saída '1', se a entrada for '1' ela produz uma saída '0'.

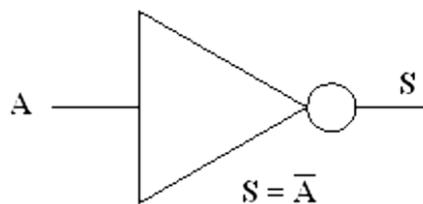


Figura 2.8 - Símbolo gráfico e equação Booleana para porta NOT.

A	S
0	1
1	0

Tabela 2.7 - Tabela verdade para porta NOT.

Desta forma, sabendo que as portas lógicas são a unidade básica construtiva de um sistema digital, os capítulos 4 e 5 desta dissertação propõem a implementação de portas lógicas ópticas (NOT e NAND) a partir da utilização de anéis ressoadores (PCRR) baseados em cristais fotônicos bidimensionais.

Referências Bibliográficas

- [1] MILLER, D. A. B., “Device requirements for digital optical processing in Digital Optical Computing”, Ed. R. A. Athale, SPIE Critical Reviews of Optical Science and Technology, CR35, 68, (1990).
- [2] Callister, W. D., “Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução”. John Wiley & Sons, Inc, (2002).
- [3] TSANG, H. K., and et al., “Field dependent all-optical switching in GaAs quantum well waveguides operating beyond the to photon absorption limit, in Technical Digest on Nonlinear Guided wave Phenomena”, Optical Society of America, Washington, D.C.), vol. 15, pp Pd4-1-Pd4-4, (1991).
- [4] AITCHISON, J. S. and et al., Electron. Lett., 27, 1709, (1991).
- [5] ISLAM, M. N., “Ultrafast Fiber Switching Devices and Systems”, Cambridge University Press, AT&T, (1992).
- [6] Costa, M. B. C., “Análise numérica do acoplador duplo não-linear baseado em fibras de cristais fotônicos (NLDC-PCF) operando com PAM e PWM para obtenção de portas lógicas”, Tese de doutorado, (2013).
- [7] P. Andalib and N. Granpayeh, “All-optical ultracompact photonic crystal AND gate based on nonlinear ring resonators”, J Opt. Soc. Am B 26, 10-16, (2009).

Capítulo 3

MÉTODOS NUMÉRICOS

Neste capítulo, serão apresentados os métodos utilizados nas simulações numéricas, para a realização das portas lógicas totalmente ópticas NOT e NAND. A propagação de ondas eletromagnéticas (EM) em cristais (PhC) é analisada com o recurso das equações de Maxwell [1]. Existem muitos métodos utilizados para analisar o comportamento de dispersão e espectros de transmissão em cristais fotônicos, como o método da expansão em ondas planas (PWE) [2, 3, 4], o método da matriz de transferência (TMM) [5], o método da função de Green, dos elementos finitos (FEM) e o método das diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD) [6, 7]. Cada método tem as suas vantagens e desvantagens. Neste trabalho, foram utilizados os métodos PWE e FDTD para analisar o dispositivo óptico baseado em cristal fotônico. Tipicamente, o método PWE é utilizado para calcular a *banda proibida* (PBG) e os modos de propagação da estrutura periódica, enquanto que o método FDTD é usado para se calcular o espectro de transmissão e a distribuição de campo que é baseado em soluções numéricas das equações de Maxwell. O método FDTD é baseado no algoritmo de Yee [8], utilizado para o estudo de cristais fotônicos 2-D, porque as exigências de tempo e memória computacionais são reduzidos [8, 9].

3.1. As Equações de Maxwell

Modelar matematicamente as propriedades ópticas e elétricas, além de vários fenômenos eletromagnéticos, tais como o guiamento de ondas EM no interior de dispositivos fotônicos, é possível através das *equações de Maxwell* [1]. Para uma região linear, homogênea e isotrópica, estas equações, na forma diferencial, são dadas por

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = J + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (3.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = 0 \quad (3.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = \rho \quad (3.4)$$

onde \vec{E} e \vec{H} são os vetores intensidade de campo, elétricos e magnéticos, respectivamente, e \vec{D} e \vec{B} são os vetores densidade de fluxo elétrico e indução magnética, respectivamente; ' J ' é a densidade de corrente elétrica ' ρ ' é a densidade de cargas elétricas.

O vetores indução magnética e densidade de fluxo elétrico estão relacionados aos campos magnético e elétrico, respectivamente, através das seguintes equações constitutivas

$$\vec{B} = \mu \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad (3.5)$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E} \quad (3.6)$$

onde μ e ε são as constantes dielétricas do material, respectivamente, a permeabilidade e a permissividade. No espaço livre, a permeabilidade e a permissividade são respectivamente: μ_0 é $4\pi \times 10^{-7}$ Henry / m e ε_0 é $8,854 \times 10^{-12}$ Farad / m.

Agora, assumindo as relações constitutivas (3.5 - 3.6) e supondo que o material é linear, isotrópico, periódico e sem perdas, então as equações de Maxwell dadas em (3.1 - 3.4) podem ser reescritas por

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (3.7)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (3.8)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad (3.9)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (3.10)$$

Os campos elétrico e magnético são funções do espaço e tempo. As equações de Maxwell são lineares, de modo que a dependência espacial pode ser separada da temporal escrevendo os campos \vec{E} e \vec{H} em modos harmônicos, em termos de uma exponencial complexa

$$\vec{H}(r,t) = \vec{H}(r)e^{-i\omega t} \quad (3.11)$$

$$\vec{E}(r,t) = \vec{E}(r)e^{-i\omega t} \quad (3.12)$$

onde ω é a frequência angular, sendo $\vec{H}(r)$ e $\vec{E}(r)$ as auto-funções da equação da onda.

Agora, substituindo as equações (3.11 - 3.12) nas equações (3.7 - 3.10), os perfis de modo para qualquer [10] frequência pode ser governado pelas equações

$$\nabla \times \vec{E}(r) = i\omega\mu_0 \vec{H}(r) \quad (3.13)$$

$$\nabla \times \vec{H}(r) = -i\omega\varepsilon_0\varepsilon_r \vec{E}(r) \quad (3.14)$$

$$\nabla \cdot \vec{E}(r) = 0 \quad (3.15)$$

$$\nabla \cdot \vec{H}(r) = 0 \quad (3.16)$$

Para dissociar as duas equações (3.13 - 3.14), podemos dividi-las por ε_r e na sequencia aplicar o rotacional e utilizar a relação da velocidade da luz c com as constantes ε_0 e μ_0 , para obter duas equações para as auto-funções $\vec{H}(r)$ e $\vec{E}(r)$, ou seja,

$$\nabla \times \left[\frac{1}{\varepsilon_r} \nabla \times \vec{H}(r) \right] = \frac{\omega^2}{c^2} \vec{H}(r) \quad (3.17)$$

$$\frac{1}{\varepsilon_r} \nabla \times \nabla \times \vec{E}(r) = \frac{\omega^2}{c^2} \vec{E}(r) \quad (3.18)$$

onde ω é a auto frequência angular e c é a velocidade da luz no espaço livre, dada por

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} \quad (3.19)$$

Para a obtenção dos modos, será considerada a equação (3.17), que é denominada de *equação mestra* (em inglês, *master equation*) [1]. Trata-se de um problema de autovalores. Para a realização das simulações numéricas, foi empregado o software OptiFDTD que utiliza o método das diferenças finitas para a resolução numérica das equações de Maxwell [10].

3.2. O Método da Onda Plana (PWE)

O método PWE foi inicialmente utilizado para a análise teórica de estruturas fotônicas. O diagrama de banda é a representação mais comum da estrutura de banda de cristais fotônicos, e fornece os modos de propagação e a *banda proibida*. A banda PBG é a característica principal dos dispositivos fotônicos e pode ser observada utilizando-se dos diagramas de banda obtidos pelo método de PWE. Este pode ser aplicado a ambos os campos elétricos e magnéticos. Sendo assim, o PBG é diferente para os modos transversal elétrico (TE) e transversais magnéticos

(TM). As estruturas projetadas produzem um *band gap* no modo TE, como será calculado no capítulo seguinte. O cálculo desta *banda proibida* depende de parâmetros tais como, o tamanho da estrutura e a constante dielétrica. Ambos os parâmetros são os mesmos para as portas NOT e NAND implementadas, portanto, a faixa do *band gap* também é semelhante.

O cálculo do diagrama de banda é determinado pela solução das equações de Maxwell [10, 11], através da Equação (3.17) da seção anterior. Esta banda proibida é utilizada para determinar o comprimento de onda de funcionamento ou a frequência operacional da estrutura periódica. Esta frequência normalizada da estrutura de cristal fotônico é $\omega / 2\pi c = 1 / \lambda$, onde ω é a frequência angular, c é a velocidade da luz no vácuo e λ é o comprimento de onda.

3.3. O Método FDTD

O Método FDTD é o mais comum para resolver as equações de Maxwell, sendo baseado no algoritmo de Yee, onde as equações de Maxwell podem ser discretizadas no espaço e no tempo pela técnica das células Yee [8]. A propagação de ondas eletromagnéticas através da estrutura de cristal fotônico é governada pelas quatro equações de Maxwell em sua forma linear, como mostradas nas equações (3.7 - 3.10). O método FDTD será utilizado para a simulação e otimização das portas lógicas que serão tratadas nos capítulos 4 e 5, através do cálculo da energia de transmitância na porta de saída.

Nas simulações, deve-se considerar as condições de fronteiras absorventes na estrutura simulada, que é isolada de modo a não sofrer interferência externa e interna ou relacionadas com os fenômenos físicos que ocorrem durante as simulações, tais como a dispersão do feixe de luz no interior da cavidade e as reflexões, que devem ser evitadas pela técnica para que se tenha resultados mais consistentes. Assim, as camadas perfeitamente casadas PML (em inglês, Perfectly Matched Layers) [12] foram utilizadas com o intuito de suprimirem estes fenômenos, uma vez que são camadas absorventes [11, 12]. Nas simulações foi possível ver os efeitos de reflexão, difração e refração na onda durante o confronto com a estrutura PBG [2, 10], além do efeito de absorção da PML simulando o infinito. A Equação 3.20 mostra o dimensionamento máximo que as células de Yee podem ter, definindo assim, o nível de discretização da mesma. Desse modo, as células devem ser suficientes pequenas para representar a distribuição material e para fornecer resultados com o detalhamento desejado, evitando-se o efeito da dispersão. O tamanho para os passos de tempo e espaço são restrições fundamentais no método FDTD. O seu tamanho refere-se a precisão, estabilidade e dispersão do método FDTD [10]. O tamanho dos passos são escolhidos de acordo com a seguinte regra

$$\Delta x \leq \frac{\lambda}{10} \quad \text{e} \quad \Delta z \leq \frac{\lambda}{10} \quad (3.20)$$

onde Δx e Δz são os passos de espaço ao longo das direções x e z . O comprimento das hastes é ao longo da direção y . O passo de tempo deve satisfazer as seguintes condições [11]

$$\Delta t \leq \frac{\left(\Delta x^{-2} + \Delta z^{-2}\right)^{-\frac{1}{2}}}{v} \quad (3.21)$$

em que Δt é o tamanho do passo do tempo e v é a velocidade da luz no meio do *wafers*. O material é considerado não magnético para as simulações que são realizadas nos modos TE.

Referências Bibliográficas

- [1] John D. Joannopoulos, Steven G. Johnson, Joshua N. Winn, Robert D. Meade, “Photonic Crystals: Molding the Flow of Light”, Copyright by Princeton University Press, (2008).
- [2] K. M. Leung and Y. F. Liu, “Photon band structures: The plane-wave method”, *Physical Review B*, vol. 41, no. 14, pp. 10188-10190, (1990).
- [3] E. Yablonovitch and T. J. Gmitter, “Photonic band structure: the face-centered-cubic case”, *Physical Review Letters*, v. 63, n. 18, pp. 1950-1953, (1987).
- [4] R. D. Meade, K. D. Brommer, A. M. Rappe and J. D. Joannopoulos, “Existence of a photonic band gap in two dimensions”, *Appl. Phys. Lett*, 61, 495-497, (1992).
- [5] Yonekura J, Ikeda M, Baba T, “Analysis of finite 2-D photonic crystals of columns and lightwave devices using the scattering matrix method”, *Journal of lightwave technology*, v. 17, n. 8, pp. 1500-1508, (1999).
- [6] Chan R.Y., Liu J.M., “Time-domain wave propagation in optical structure”, *IEEE Photonics Technology letters*, v. 6, n. 8, pp. 1001-1003, (1994).
- [7] A. Taflov and S. C. Hagness, “Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method”, Norwood: Artech House, (2004).
- [8] Yee KS, “Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell’s equations in isotropic media”, *IEEE Trans Antennas Propag* 14: 302-307, (1966).
- [9] Qui M, He S, “Numerical method for computing defect modes in two dimensional photonic crystals with dielectric or metallic inclusions”, *Phys Rev. B* 61: 12871-12876, (2000).
- [10] K. Sakoda, “Optical Properties of Photonic Crystal”, Springer Berlin, (2001).
- [11] S. G. Johnson, Joannopoulos, “Block-iterative frequency domain methods for Maxwell’s equation in a plane wave basis”, *Opt. Express* 11, 173-190, (2000).
- [12] S. D. Gedney, “An anisotropic perfectly matched layer-absorbing medium for the truncation of FDTD lattices”, *IEEE Trans. Antennas Propagat.* 44, pp. 1631-1639, (1996).
- [13] R. D. Meade, K. D. Brommer, A. M. Rappe and J. D. Joannopoulos, “Existence of a photonic band gap in two dimensions”, *Applied Physics Letters*, v. 61, n. 4, pp. 495-497, (1992).
- [14] E. Yablonovitch and T. J. Gmitter, “Photonic band structure: the face-centered-cubic case”, *Physical Review Letters*, v. 63, n. 18, pp. 1950-1953, (1987).
- [15] T. F. Krauss, R. M. De La Rue and S. Brand, “Two-dimensional photonic band gap structures operating at near-infrared wavelengths”, *School of Physics and Astronomy*, vol. 383, no. 12, pp. 699-702, (1996).
- [16] E. Yablonovitch, T. J. Gmitter and K. M. Leung, “Photonic band structure: the face-centered cubic case employing nonspherical atoms”, *Physical Review Letters*, v. 67, n. 17, pp. 2295-2299, (1991).

- [17] E. Yablonovich, “Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics”, *Physical Review Letters*, vol. 58, no. 20, pp. 2059–2062, (1987).
- [18] J. D. Joannopoulos, P. R. Villeneuve and S. Fan, “Photonic Crystals: putting a new twist on light”, *Nature*, vol. 386, no. 6621, pp. 143-149, (1997).

Capítulo 4

OBTENÇÃO DA PORTA LÓGICA TOTALMENTE ÓPTICA ‘NOT’ BASEADA EM GUIAS DE ONDA DE CRISTAIS FOTÔNICOS

Atualmente, o número de tecnologias que exigem avanços em todos os campos está aumentando, especialmente em eletrônica. As demandas por técnicas de processamento de sinais totalmente ópticos em sistemas de telecomunicações estão aumentando rapidamente, e agora aceita-se que a eletrônica digital não é capaz de atender a esses requisitos no futuro [1]. Os problemas do futuro da computação e comunicação são inevitáveis desde que a tecnologia eletrônica convencional muito em breve atingirá o seu limite de velocidade. As portas lógicas totalmente ópticas com uma alta eficiência desempenham um papel essencial no processamento de sinais de grande largura de banda e redes ópticas. O processamento de sinal totalmente óptico para as redes pode lidar com sinais de grande largura de banda, transmitindo informação com velocidade muito alta. Portas lógicas totalmente ópticas baseadas em cristais fotônicos são os componentes fundamentais nos sistemas de processamento de sinal totalmente ópticos e redes ópticas futuras [2]. Com objetivo de estudar o desempenho de portas lógicas totalmente ópticas, diferentes estruturas têm sido propostas e implementadas utilizando-se diferentes técnicas tais como o amplificador óptico semiconductor SOA (Semiconductor Optical Amplifier), PPLN (Periodicamente poled Lithium Niobate), a interferência multimodo, interferômetro de Mach-Zehnder MZI (Mach-Zehnder Interferometer). Inicialmente, portas lógicas totalmente ópticas com base nas propriedades do SOA foram relatados [3, 4]. No entanto, algumas limitações destes métodos, tais como tempo de latência, a baixa potência de transmissão, os projetos complexos, alto custo, velocidade e tamanho dessas estruturas complexas, fizeram com que estes não sejam usados. Nos últimos anos, guia de onda óptico utilizando cristais fotônicos tem recebido grande atenção por causa de seu tamanho miniaturizado e baixas perdas na estrutura.

4.1. *Design* da Estrutura Proposta baseada em um Anel Ressonador Planar de Cristal Fotônico

Para projetar a estrutura da porta NOT, foi utilizada a rede quadrada 2-D de cristal (PhC) com dimensões 19×19 . A constante de rede, indicada por ‘ a ’, é igual a $0,5943 \mu\text{m}$, que é a distância entre duas hastes sucessivas, como mostrado na Figura 4.1. O raio da haste dielétrica é $0,2a$, aproximadamente igual a $0,11886 \mu\text{m}$. A permissividade relativa das hastes cilíndricas dielétricas na estrutura é de $\epsilon_r = 11,5$, que é equivalente a um índice de refração de 3,39. Nesta

estrutura, as entradas são indicadas por ‘C’ e ‘I’, e a porta de saída é indicada por ‘B’. A estrutura tem fonte de excitação posicionada na porta C com controle pela porta I e saída pela porta B. Quando um sinal óptico é aplicado à porta I, nenhum sinal é verificado na porta de saída B, devido ao acoplamento do PCRR [12, 13, 14]. Agora, quando nenhum sinal é aplicado à porta I, ocorre o contrário, o sinal óptico é transmitido para a porta B. Para a análise de desempenho, a propagação do campo elétrico foi estudada, sendo esta calculada pelo método FDTD, como foi relatado em [17, 18].

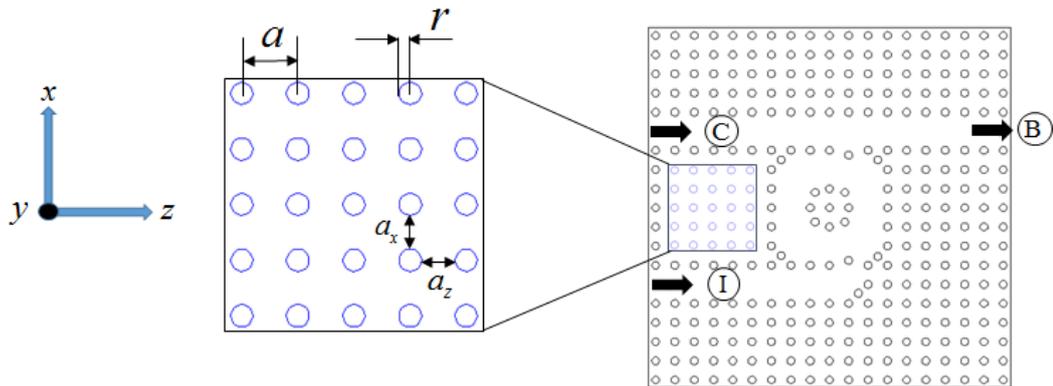


Figura 4.1 - Estrutura esquemática da porta lógica totalmente óptica NOT proposta.

A chave óptica mostrada na Figura 4.2 compõem a porta lógica totalmente óptica NOT. O diâmetro do anel ressonador (PCRR) é de $6a$. O tamanho total da referida estrutura é cerca de $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$, que é bem menor do que as portas lógicas ópticas baseadas em cristais (PhC) convencionais. Um guia de onda de entrada está marcado como *senal de controle* (C) o qual é mostrado pelo guia de ondas horizontal superior, que é feito através da remoção controlada de um número necessário de hastes dielétricas de silício (Si), que são os defeitos de linha da estrutura no plano XZ. Um sensor é colocado na extremidade do guia de onda. A entrada I é um outro guia de onda da estrutura, que está conectado horizontalmente com o anel (PCRR). Na extremidade do guia de ondas da entrada I, foi adicionado um defeito na estrutura, uma haste (Si) de dispersão é colocada através do desvio de sua posição original de $0,707a$, o que impede as reflexões para trás devido à curva formada no guia de ondas [5]. As *hastes de dispersão* são colocadas em cada um dos quatro cantos do anel circular (PCRR), e com a mesma constante de rede, a fim de melhorar a eficiência de acoplamento. As propriedades do material das hastes de dispersão são as mesmas de todas as outras. As hastes situadas no interior do anel circular (PCRR) são chamadas de *hastes internas*. O único anel (PCRR) mostrado na Figura 4.2 é construído através da variação da posição das hastes internas a partir da posição original, enquanto que as hastes internas são construídas pela variação da posição das hastes adjacentes

nos quatro lados, a partir do seu centro por $0,25a$ nas direções ‘X’ e ‘Z’. Para determinar uma microcavidade circular, o anel exterior é construído, deslocando-se as hastes de canto por $0,25a$. As *hastes de acoplamento* são colocadas entre o anel (PCRR) e os guias de onda. O sinal de saída é calculado a partir da porta **B**, através da observação da potência transmitida no guia de onda superior. O sinal de controle **C** tem a mesma potência (P_0) que o sinal de entrada **I**, que pode estar no estado ‘ON’ ou no estado ‘OFF’.

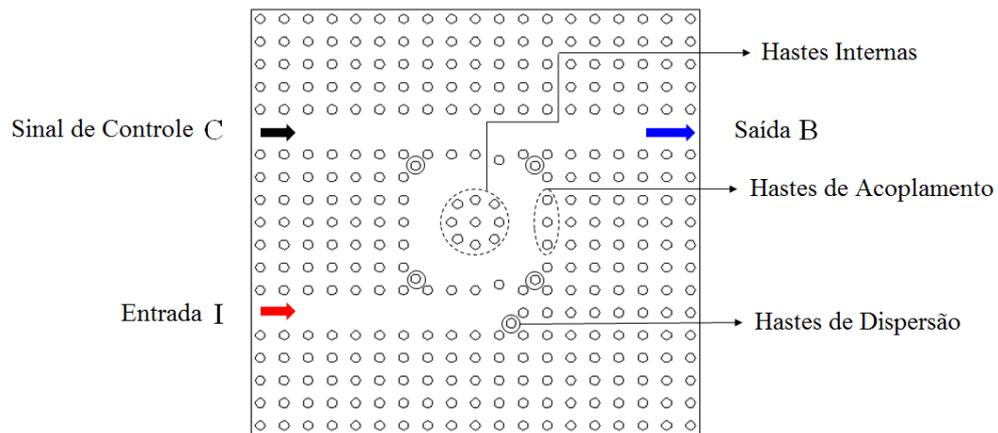


Figura 4.2 - Esquema da estrutura da porta lógica NOT proposta.

4.2. Simulação Numérica da Estrutura Proposta baseada em um Anel Ressonador Planar de Cristal Fotônico (Porta NOT)

O diagrama de banda é calculado pelo método PWE como mostrado na Figura 4.3. A faixa deste *band gap* é de $0,2654 \leq a/\lambda \leq 0,3897$ e a largura é dada por $0,1243$. A frequência central normalizada do *band gap* é $0,32755 (a/\lambda)$. A *banda proibida* calculada é para o modo transversal elétrico (TE), sendo mostrada na Figura 4.3.

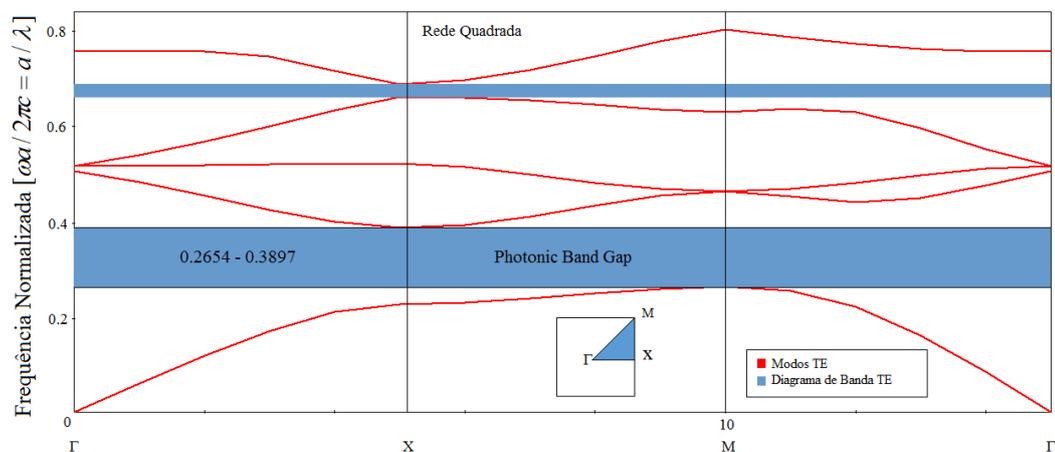


Figura 4.3 - Diagrama de banda em uma rede quadrada de hastes de silício no substrato de ar para o modo TE.

Os guias de onda na direção Γ -X tem modo único em toda a faixa PBG. A luz nesta faixa de frequência não se propaga através da estrutura. A banda proibida depende de parâmetros tais como o tamanho da estrutura e a constante dielétrica. Ambos os parâmetros são os mesmos para as estruturas das portas NOT e NAND, portanto o *band gap* é semelhante para ambas. A faixa de frequências de 0,2654 - 0,3897 (a / λ), corresponde à gama de comprimentos de onda de $1525 \leq \lambda \text{ [nm]} \leq 2239$. A frequência operacional normalizada escolhida é 0,3496 (a / λ), o que corresponde ao comprimento de onda igual a 1,7 μm , utilizado nas simulações. Uma vez obtido o comprimento de onda operacional da estrutura, seus parâmetros podem ser determinados, tais como a *constante de rede* (igual a 0,5943 μm) e o *diâmetro* das hastes dielétricas, que podem ser otimizados.

A ressonância da cavidade depende dos parâmetros da estrutura, cujos valores otimizados são obtidos através de um processo iterativo. Os parâmetros são otimizados para que se obtenha uma elevada eficiência de transmissão através da introdução de hastes com raio apropriado na estrutura. A *razão de contraste* da porta lógica é um fator que determina um *design* adequado. O raio das hastes dielétricas é escolhido adequadamente de forma que a potência transmitida seja a mais elevada na porta de saída da estrutura. O raio das hastes dielétricas (r_i) é otimizado através do cálculo da *razão de contraste* (CR).

Para analisar o desempenho da porta lógica implementada, é calculada a relação entre os dois níveis de potência, isto é, alta potência de transmissão (estado ‘ON’) e baixa potência de transmissão (estado ‘OFF’). Existem dois níveis de limiar para identificar o estado lógico. O limite mais baixo implica que qualquer potência abaixo deste nível atua como lógica 0. Do mesmo modo, valores superiores ao limite superior atua como a lógica ‘1’ [18]. Nenhum estado é definido entre o limiar superior e o limiar inferior, como mostra a Figura 4.4.

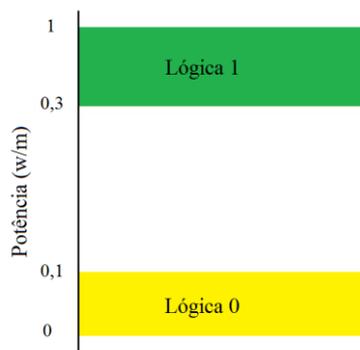


Figura 4.4 - Dois níveis de limiar para identificar os estados lógicos, o estado ‘ON’ (Lógica 1) e o estado ‘OFF’ (Lógica 0).

Os níveis são definidos como nível lógico alto ‘1’ e nível baixo ‘0’. A propriedade de comutação entre a lógica ‘1’ e ‘0’ da porta lógica é alcançada pela propriedade de confinamento da luz nas hastes de silício de cristais (PhCs) [16]. Na lógica ‘1’ deve-se ter uma potência máxima transmitida quando comparada com a potência transmitida no caso da lógica ‘0’.

O fator de transmissão é definido como a razão entre a potência média no estado ‘ON’ e a potência média no estado ‘OFF’ [17]. Esta relação é conhecida como *razão de contraste CR* (*Contrast Ratio*), sendo obtida (em dB) utilizando-se da seguinte equação

$$CR = 10 \cdot \log \left[\frac{P_{ON}}{P_{OFF}} \right] \quad (4.1)$$

O raio da haste dielétrica (r_i) das portas lógicas (NOT e NAND) é otimizado através do cálculo da razão de contraste para diferentes comprimentos de onda (*band gap*), a fim de se obter a potência máxima na porta de saída da estrutura como mostrado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Razão de Contraste (CR) para os diferentes raios das hastes dielétricas.

λ (nm)	a	r_i	P_{ON}	P_{OFF}	CR (dB)
1550	0,54188	0,108376	0,899	0,991	-0,4231
1600	0,55936	0,111872	0,989	0,995	-0,0262
1700	0,59432	0,118860	0,994	0,032	14,922
1800	0,62928	0,125856	0,688	0,119	7,6204
1900	0,66424	0,132848	0,449	0,121	5,6946
2000	0,69920	0,139840	0,879	0,577	1,8281
2100	0,73416	0,146832	0,599	0,607	-0,0576
2200	0,76912	0,153824	0,758	0,809	-0,2827

Observando a Tabela 4.1 verifica-se que o raio otimizado para as hastes dielétricas é de $0,2a$, aproximadamente $0,11886 \mu\text{m}$, uma vez que este raio dá a mais elevada razão de contraste obtida, cerca de 14,922 dB, aproximadamente 15 dB no comprimento de onda operacional. A distribuição de campo da referida porta lógica NOT proposta, é obtida através da utilização da transformada de Fourier [9], que é mostrada na Figura 4.5 e Figura 4.6 onde também são apresentados os gráficos plotados para a potência transmitida no estado lógico ‘ON’ e no estado ‘OFF’. Se apenas um sinal é aplicado na porta C, então não há interferência e o sinal passa diretamente através do guia de ondas de controle, como mostrado na Figura 4.5 (a). Desta forma a potência transmitida é máxima e é representada pela lógica ‘1’ ou estado ‘ON’. No entanto, na Figura 4.6 (a), é mostrada a propagação do campo elétrico no estado ‘OFF’ ou lógica ‘0’.

Neste caso, há interferências e, por conseguinte, a potência transmitida é muito baixa, o que é caracterizado pela condição de estado ‘OFF’.

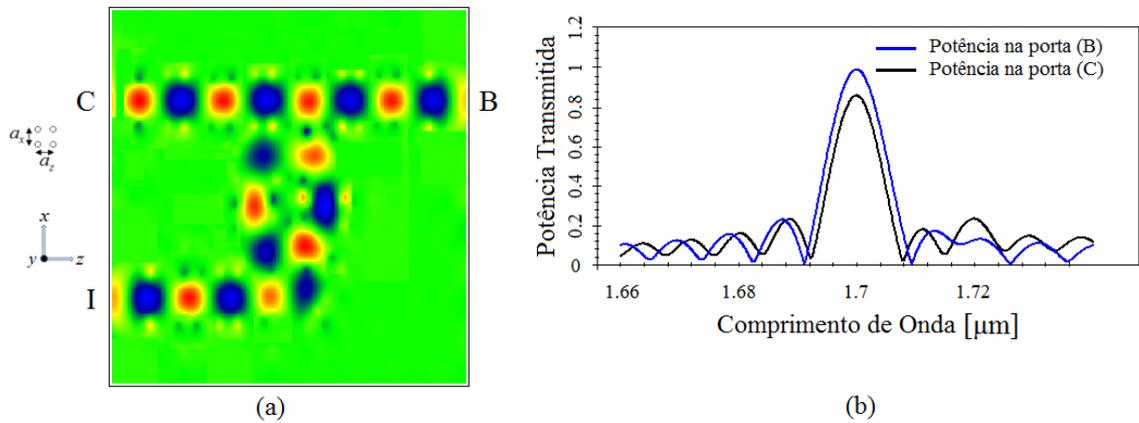


Figura 4.5 - (a) Propagação do campo elétrico quando a entrada **I** é ‘OFF’; (b) Potência transmitida no estado ‘ON’.

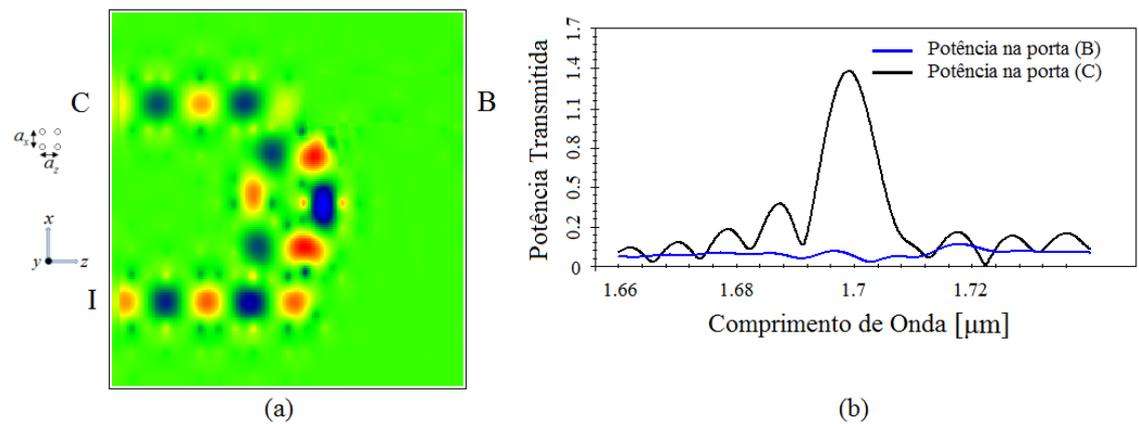


Figura 4.6 - (a) Propagação do campo elétrico quando a entrada **I** é ‘ON’; (b) Potência transmitida no estado ‘OFF’.

A porta lógica totalmente óptica NOT também é conhecida como inversora, porque mostra um comportamento de inversão na estrutura [12]. Esta é uma porta lógica digital que implementa a negação lógica, de acordo com a tabela verdade mostrada abaixo. A representação desta porta lógica é mostrada na Figura 4.7. No caso em que a potência de sinal na porta **I** é lógica ‘1’, o sinal de controle da porta **C** interfere destrutivamente causando uma potência de saída muito baixa na porta **B** [5], isto é, a lógica ‘0’, como se pode observar na Figura 4.6 (b). A natureza de comutação da porta lógica NOT é demonstrada e esta estrutura satisfaz a tabela verdade, mostrada na Tabela 4.2 a seguir. Para a análise da performance da porta lógica óptica NOT, a *razão de contraste (CR)* foi considerada. Para a análise deste parâmetro de transmissão,

deve-se considerar os gráficos da transmissão de potência somente na porta **B**, como mostrado na Figura 4.8, característicos das duas condições: o estado ‘ON’ e o estado ‘OFF’.

Tabela 4.2 - Tabela verdade para a porta NOT.

Sinal de Controle	Entrada	Saída	Potência de Saída
C	I	B	[W / m]
1	0	1	0,994P ₀
1	1	0	0,032P ₀

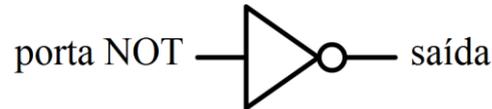


Figura 4.7 - Estrutura digital da porta lógica NOT.

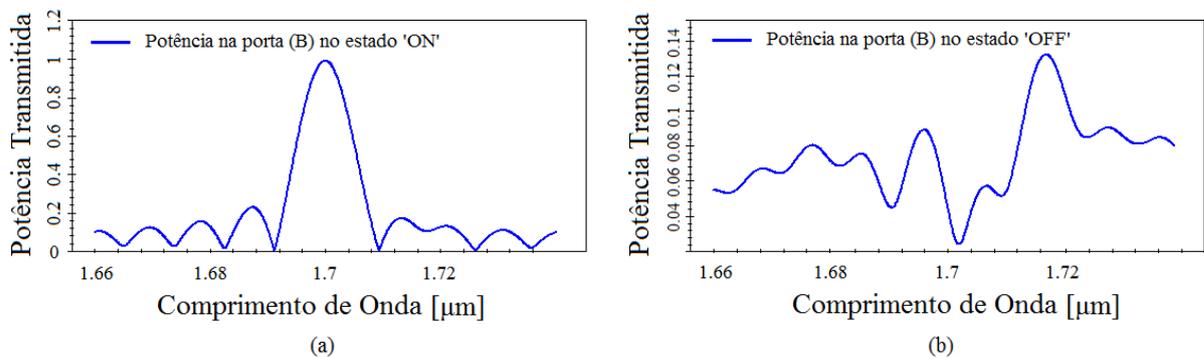


Figura 4.8 - (a) Potência transmitida na porta de saída **B** no estado ‘ON’; (b) Potência transmitida na porta de saída **B** no estado ‘OFF’.

Nesta porta lógica totalmente óptica NOT, a razão de contraste é igual a 14,922 dB, aproximadamente 15 dB. A potência no estado ‘ON’ (P_{ON}) é igual a 0,994 e a potência para o estado ‘OFF’ (P_{OFF}) é igual a 0,032, tal como mostrada na Tabela 4.2.

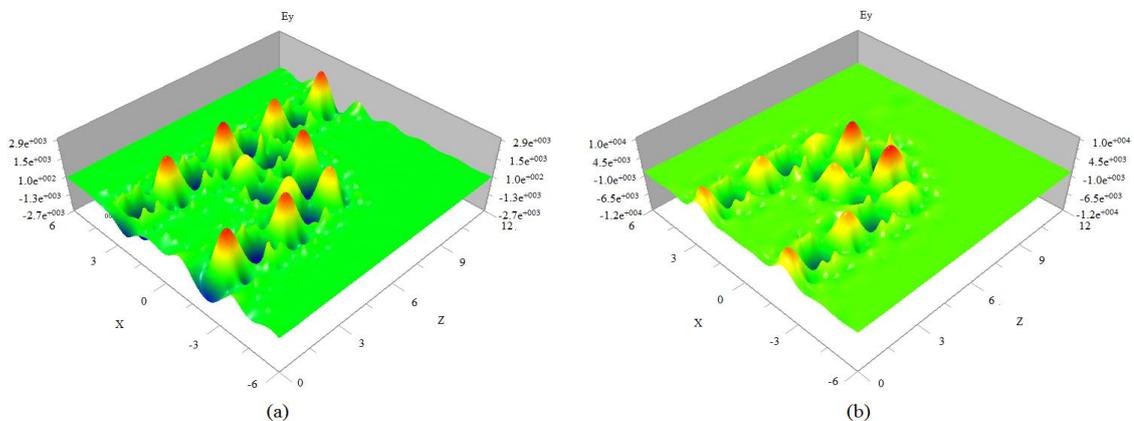


Figura 4.9 - (a) Propagação do campo elétrico quando a entrada **I** é ‘OFF’ para o estado ‘ON’; (b) Propagação do campo elétrico quando a entrada **I** é ‘ON’ no estado ‘OFF’.

A Figura 4.9 mostra os gráficos da onda (EM) confinada no guia de onda depois de 10000 iterações, onde os dois estados são considerados: o estado ‘ON’ e o estado ‘OFF’. Pode ser visto que a amplitude do campo é quase a mesma desde o início até ao fim do guia de onda, isto é, a onda é guiada com pouca perda.

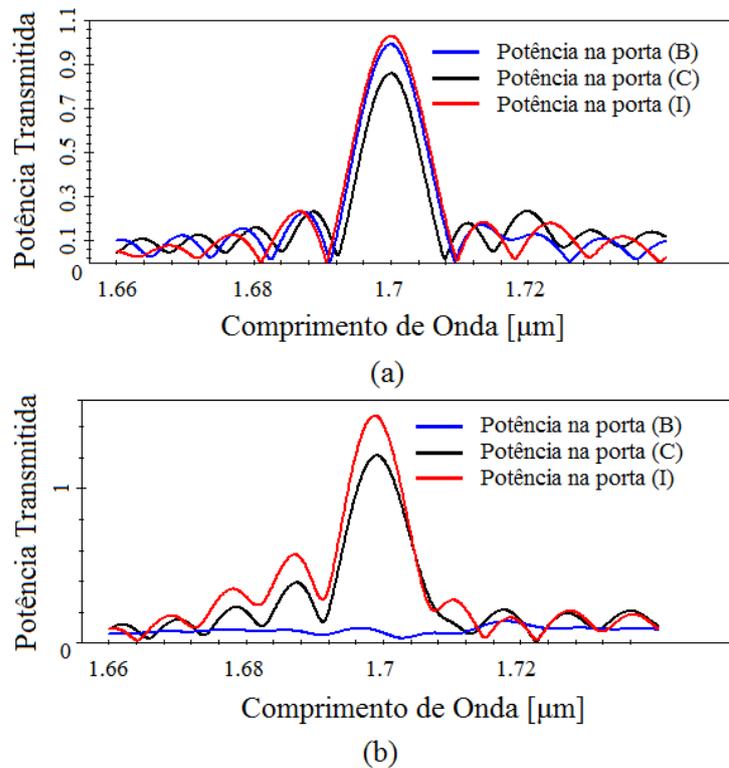


Figura 4.10 - (a) Potência transmitida no estado ‘ON’; (b) Potência transmitida no estado ‘OFF’.

Os gráficos na Figura 4.10 mostram que a potência relativa muda conforme varia o comprimento de onda para todas as combinações possíveis em todas as portas da estrutura. A Figura 4.9 (a) mostra o gráfico da onda confinada no guia de onda depois de 10000 iterações, caso em que a entrada **I** é ‘OFF’, e a saída **B** está no estado ‘ON’, isto é, a potência de transmissão é máxima. Além disso, a Figura 4.9 (b) mostra a distribuição do campo quando a entrada de **I** é ‘ON’, o que implica em uma potência transmitida muito baixa ou lógica ‘0’.

4.3. Conclusão

Este capítulo descreve o projeto e a análise de uma porta lógica totalmente óptica NOT fabricada com hastes de silício (*Si*) em um substrato de ar. Esta análise feita da propagação eletromagnética na estrutura periódica ocorre através do método FDTD. Nesta simulação, a estrutura encontra-se rodeada por uma camada perfeitamente casada (PML) a partir de todos os

lados. Esta foi utilizada para evitar a reflexão a partir de todos os lados através da absorção de ondas. Esta porta lógica óptica mostrada neste capítulo, tem uma dimensão reduzida quando comparada com a literatura relatada, e é uma estrutura muito eficiente em que uma alta taxa de dados pode ser transmitida. O comprimento de onda operacional utilizado nas simulações foi de $1,7 \mu\text{m}$, com uma constante de rede de $0,5943 \mu\text{m}$.

Os resultados mostram um elevado desempenho óptico da porta lógica NOT, o que é evidenciado pela potência de saída elevada. Além disso, obteve-se um valor elevado para a razão de contraste (CR), cerca de 15 dB, aproximadamente, indicando uma porta lógica NOT de alto desempenho. Este valor é muito mais elevado do que os valores previamente obtidos em outros trabalhos. Portanto, a análise desses parâmetros de desempenho demonstram que a porta NOT implementada é benéfica e promissora para um grande número de aplicações em computação óptica, criptografia, sistemas de processamento digitais, entre outras.

Referências Bibliográficas

- [1] ZH Zhu, et al, “High-contrast light-by-light switching and AND gate based on nonlinear photonic crystals”, *Opt. Express*. 14: 1783-1788, (2006).
- [2] E.-H. Lee, “Micro / nano-scale optical network: A new challenge toward next generation”, *Proc. Int. Conf. on Transparent Opt. Networks*. 4: 118-119, (2008).
- [3] T. Houbavlis, et al “10 Gbit/s all-optical Boolean XOR with SOA fiber Sagnac gate”, *Electron. Lett*, 35, 1650-1652, (1999).
- [4] J. Y Kim, et al, “All-optical multiple logic gates with XOR, NOR, OR, and NAND functions using parallel SOA-MZI structures: Theory and experiment”, *J. Light wave Tech*, 24, 3392-3399, (2006).
- [5] K. Sakoda, “Optical Properties of Photonic Crystals”, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, (2004).
- [6] K. M. Leung and Y. F. Liu, “Photon band structures: The plane-wave method”, *Physical Review B*, vol. 41, no. 14, pp. 10188-10190, (1990).
- [7] R. D. Meade., K. D. Brommer., A. M. Rappe. and J. D. Joannopoulos, “Existence of a photonic band gap in two dimensions”, *Appl. Phys. Lett*, 61, 495-497, (1992).
- [8] John D. Joannopoulos, Steven G. Johnson, Joshua N. Winn and Robert D, “Meade Photonic Crystals Molding the Flow of Light”, Copyright by Princeton University Press, (2008).
- [9] S. G. Johnson and J. D. Joannopoulos, “Block-iterative frequency domain methods for Maxwell’s equation in a plane wave basis”, *Opt. Express*, 11, 173-190, (2000).
- [10] Yee K. S, “Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell’s equations in isotropic media”, *IEEE Trans Antennas Propag*, 14, 302-307, (1966).
- [11] Qui M, He S, “Numerical method for computing defect modes in two-dimensional photonic crystals with dielectric or metallic inclusions”, *Phys. Rev. B*, 61: 12871-12876, (2000).
- [12] P. Andalib and N. Granpayeh, “All-optical ultracompact photonic crystal AND gate based on nonlinear ring resonators”, *J. Opt. Soc. Am. B*, 26: 10-16, (2009).
- [13] S. Robinson and R. Nakkeeran. “A bandpass filter based on 2D circular photonic crystal ring resonator,” *Proc. IEEE Int. Conf. on Wireless Opt. Commun. Networks* 1, 1-3, (2010).
- [14] V. D. Kumar, T. Srinivas and A. Selvaraian, “Investigation of ring resonators in photonic crystal circuits,” *Photonics and Nanostructures*, 199-20, 2, (2004).
- [15] M. Soljagic, C. Luo, J. D. Joannopoulos e S. Fan, “Nonlinear photonic crystal microdevices for optical integration”, *Optics Letters*, Vol. 28, No. 8, pp. 637-639, April, (2003).
- [16] M. F. Yanik, S. Fan, M. Soljagic e J. D. Joannopoulos, “All-optical transistor action with bistable switching in a photonic crystal crosswaveguide geometry”, *Optics Letters*, Vol. 28, No. 24, pp. 2506-2508, December, (2003).

- [17] C. Tang, X. Dou, Y. Lin, H. Yin, B. Wu and Q. Zhao, "Design of all-optical logic gates avoiding external phase shifters in a two-dimensional photonic crystal based on multi-mode interference for BPSK signals", *Optics Communications*, vol. 316, no. 7, pp. 49-55, (2013).
- [18] M. Mazidi and J.G. Mazidi, "The 8051 Microcontroller and Embedded Systems", New Jersey: Prentice-Hall, Pearson Education, (2000).
- [19] T. Fujisawa e M. Koshiba, "Time-domain beam propagation method for nonlinear optical propagation analysis and its application to photonic crystal circuits", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 22, No. 2, pp. 684-691, February, (2004).
- [20] M. Koshiba, Y. Tsuji e M. Hikari, "Time-domain beam propagation method and its application to photonic crystal circuit components", *IEEE / OSA J. Lightwave Technol.*, Vol. 18, pp. 102-110, (2000).
- [21] Y. Tsuji and M. Koshiba, "Finite Element Method Using Port Truncation by Perfectly Matched Layer Boundary Condition for Optical Waveguide Discontinuity Problems", *J. of Lightwave Technol.*, Vol. 20, No. 3, pp. 463-468, (2002).
- [22] R. D. Meade, K. D. Brommer, A. M. Rappe and J. D. Joannopoulos, "Existence of a photonic band gap in two dimensions", *Applied Physics Letters*, v. 61, n. 4, pp. 495-497, (1992).
- [23] Majid Ghadrhan, Mohammad Ali Mansouri-Birjandi, "All-Optical NOT Logic Gate Based on Photonic Crystals", *IJECE Int. J. Elec. Comp. Eng.*, (2013).

Capítulo 5

OBTENÇÃO DA PORTA LÓGICA TOTALMENTE ÓPTICA ‘NAND’ BASEADA EM GUIAS DE ONDA DE CRISTAIS FOTÔNICOS

Neste capítulo, trata-se do *design* e da simulação de uma porta lógica totalmente óptica baseada em cristais fotônicos bidimensionais (porta NAND), sendo projetada por uma cascata de dois anéis ressoadores (PCRR) e simulada pelo método FDTD bidimensional.

5.1. Design da Estrutura Básica para a Chave Totalmente Óptica (Porta NOT)

Nesta seção, considera-se a rede quadrada 2-D de cristal (PhC) com dimensões 19×19 , que é utilizada para projetar a estrutura da porta NAND. A constante de rede, indicada por ‘ a ’, é igual a $0,5943 \mu\text{m}$, que é a distância entre duas hastes sucessivas, como mostrado na Figura 5.1. O raio da haste dielétrica é $0,2a$, aproximadamente $0,11886 \mu\text{m}$. A permissividade relativa das hastes cilíndricas dielétricas na estrutura é de $\epsilon_r = 11,5$, que é equivalente a um índice de refração de 3,39. Uma haste de dispersão é colocada na extremidade do guia de ondas de entrada, deslocado por $0,707a$, com o mesmo índice de refração e raio. As três hastes de Si em destaque na Figura 5.1, têm raio igual a $0,05 \mu\text{m}$, o que cria defeitos pontuais que são responsáveis pelo confinamento da luz. Além disso, propõe-se uma nova estrutura consistindo em um guia de onda conectado a um PCRR, como mostrado na Figura 5.1. A estrutura tem fonte de excitação na porta C com controle pela porta A e saída pela porta D. Quando um sinal óptico é aplicado a porta A, nenhum sinal de saída na porta D é verificado, devido ao acoplamento do PCRR. Pelo contrário, o sinal óptico é transmitido à porta D quando nenhum sinal é aplicado à porta A.

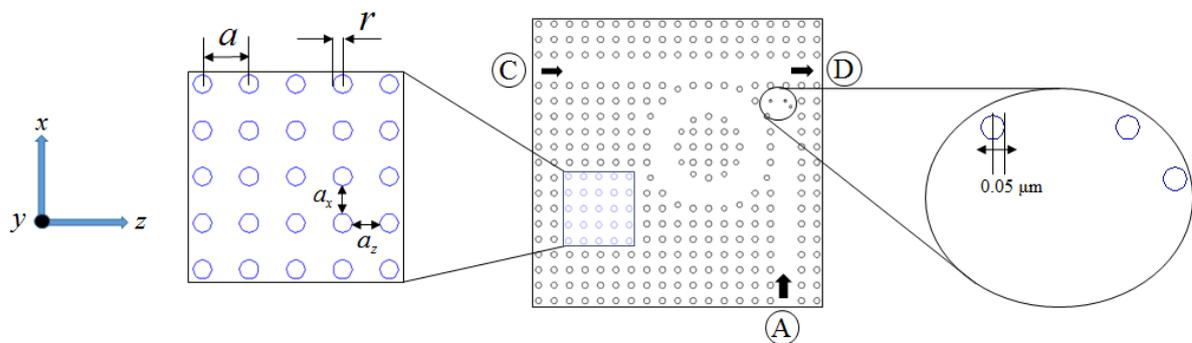


Figura 5.1 - Estrutura básica da chave totalmente óptica proposta.

5.2. Design da Estrutura para duas Chaves Totalmente Ópticas (Porta NAND)

Finalmente, uma cascata de duas chaves totalmente ópticas, com estrutura mostrada na Figura 5.2, é utilizada para projetar a porta lógica totalmente óptica NAND. A distância central, de ambos anéis (PCRR) é $19a$. O tamanho total da estrutura da referida porta lógica é cerca de $24 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$, que é menor do que as portas lógicas ópticas de cristais (PhC) convencionais [1]. Um guia de onda de entrada está marcado como *senal de controle* (C) o qual é mostrado pelo guia de ondas horizontal superior, que é feito através da remoção controlada de um número necessário de hastes dielétricas de silício (Si), que são os defeitos de linha da estrutura no plano **XZ**. Um sensor é colocado na extremidade do guia de ondas. Esta porta lógica totalmente óptica (AOLG) é excitada na porta de entrada **C**, sendo a saída indicada pela porta **D**, onde o controle é feito pela porta **B** e pela porta **A**, que são as entradas da porta lógica implementada. As entradas, denotadas por **B** e **A**, constituem outros guias de onda da estrutura, e estão na posição vertical conectados com os anéis (PCRR). Nas extremidades destes dois guias de onda de entrada, foram adicionados outros defeitos na estrutura, onde hastes de dispersão (Si) são colocadas, desviando-as de suas posições originais por $0.707a$ com relação ao plano XZ. O range de frequências $0,2654 - 0,3897 (a / \lambda)$, corresponde à gama de comprimentos de onda $1525 \leq \lambda [\text{nm}] \leq 2239$. Esta estrutura óptica apresenta duas frequências de ressonância de comutação, $0,3023c/a$ e $0,3628c/a$, conforme mostrado na Figura 5.3.

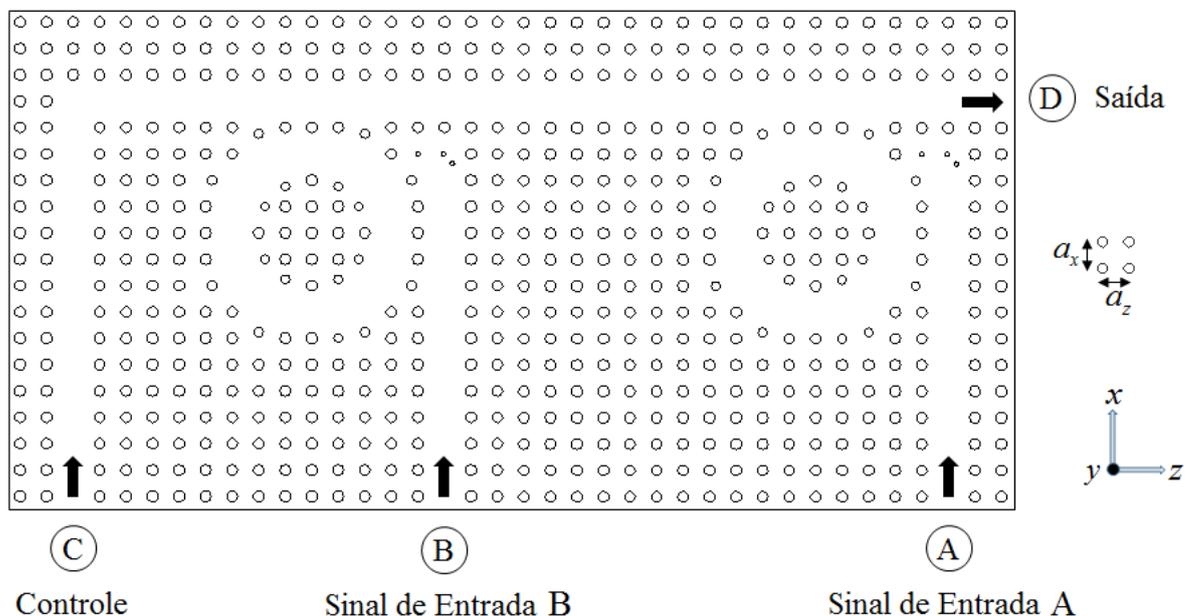


Figura 5.2 - Estrutura esquemática da porta lógica NAND totalmente óptica formada por dois anéis ressonadores de cristal fotônico.

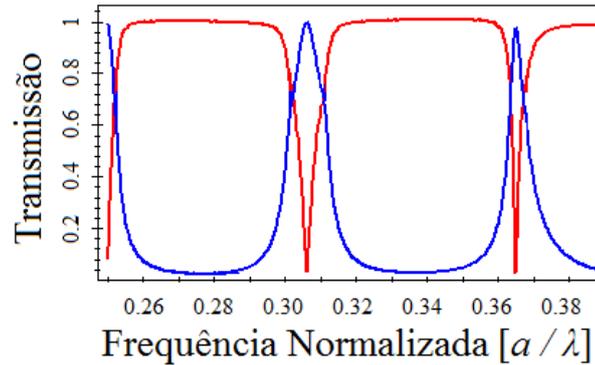


Figura 5.3 - Espectro de transmissão para a chave totalmente óptica.

5.3. Simulações e Discussão dos Resultados

A função lógica da porta NAND é verificada por meio da operação de duas chaves ópticas. Além disto, a distribuição óptica do campo para as portas lógicas totalmente ópticas (NOT e NAND) propostas, é obtida através da utilização da Transformada de Fourier dos campos que são calculados pelo método FDTD bidimensional. Para as estruturas apresentadas, foram traçados gráficos para a potência transmitida de acordo com a Transformada Discreta de Fourier [2] (DFT).

5.3.1. Simulação para a Chave Totalmente Óptica Proposta (Porta NOT)

Os espectros de transmissão normalizados na porta **D**, que é mostrada na Figura 5.4, são obtidos através da realização da Transformada de Fourier [3] dos campos que são calculados pelo método de diferenças finitas (FDTD). Os espectros de transmissão são mostrados na Figura 5.5. Uma fonte de luz Gaussiana é utilizada como fonte de excitação da estrutura, na frequência de ressonância normalizada de $0,3496c/a$, cujo comprimento de onda correspondente é igual a 1700 nm, em que c é a velocidade da luz no vácuo. Para a análise de desempenho, a propagação do campo elétrico foi estudada, a qual é calculada pelo método FDTD [3, 4].

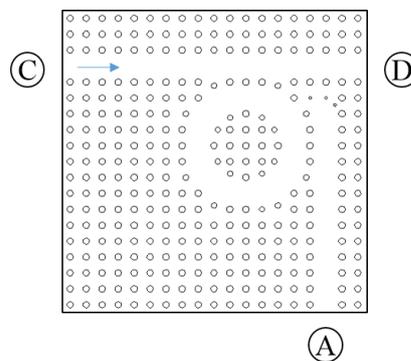


Figura 5.4 - Estrutura básica para a realização da porta lógica NOT.

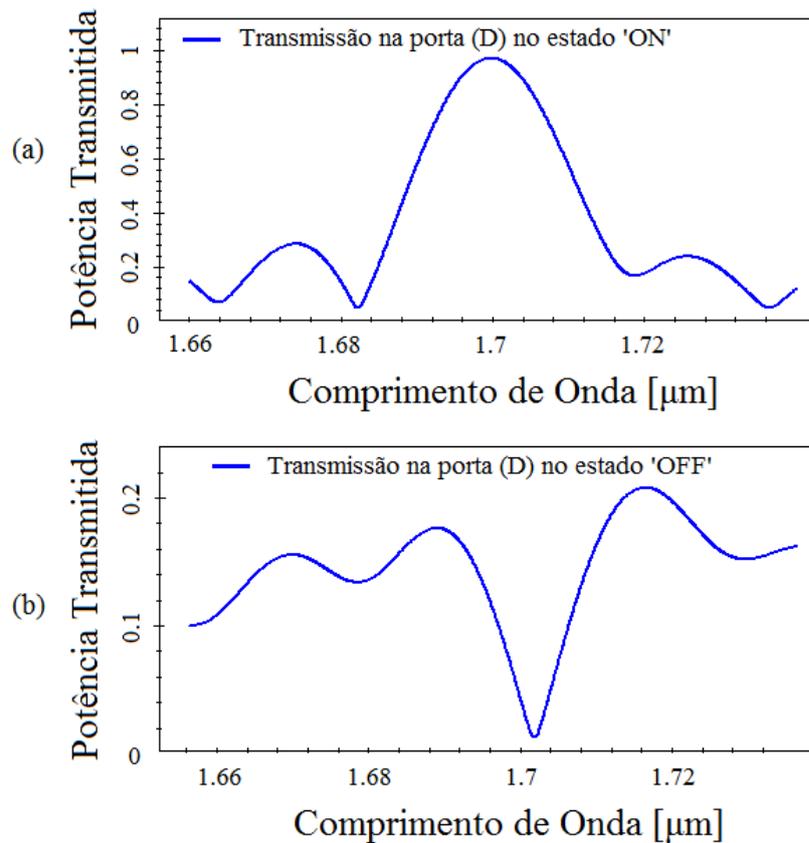


Figura 5.5 - Potência transmitida no: (a) estado 'ON' e (b) estado 'OFF'.

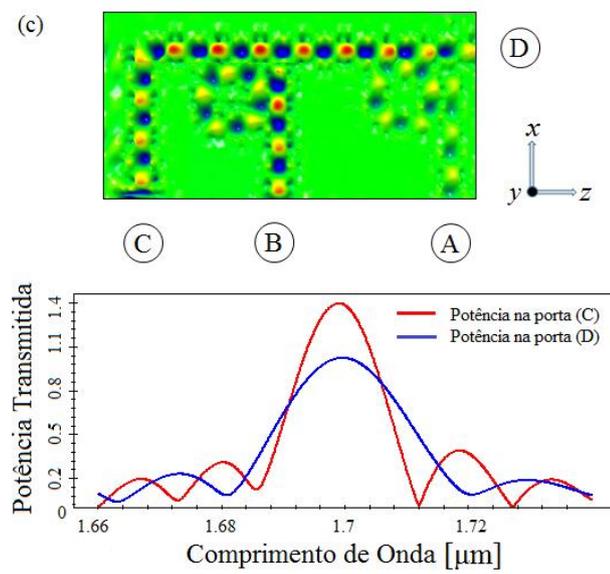
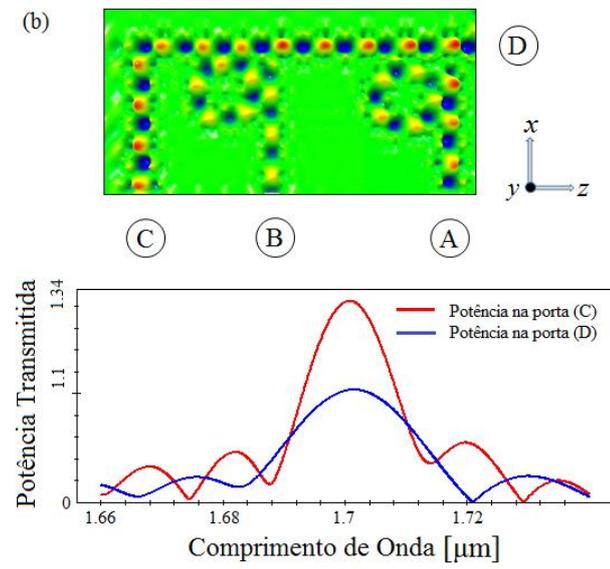
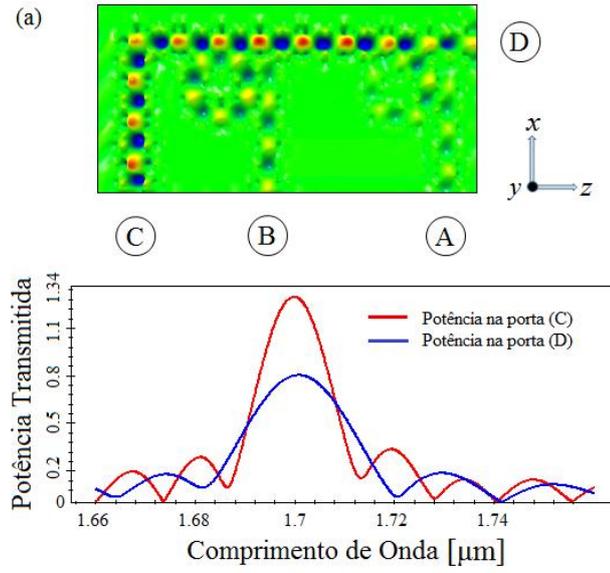
Tabela 5.1 - Tabela verdade para a porta NOT.

Controle (C)	Sinal de Entrada (A)	Saída (D)	Potência [W/m]
1	1	0	0,03
1	0	1	0,96

Neste porta lógica NOT, obteve-se uma elevada razão de contraste igual a 15,051499 dB. A potência no estado 'ON' (P_{ON}) é igual a 0,96 e a potência para o estado 'OFF' (P_{OFF}) é igual a 0,03, tal como consta na Tabela 5.1.

5.3.2. Simulação da Estrutura Proposta para duas Chaves Totalmente Ópticas (Porta NAND).

A função lógica para a porta NAND é verificada por meio da operação de duas chaves ópticas. Além disto, a distribuição óptica dos campos da porta lógica NAND proposta é obtida através da Transformada de Fourier dos campos que são calculados pelo método de diferenças finitas, como mostrado na Figura 5.6.



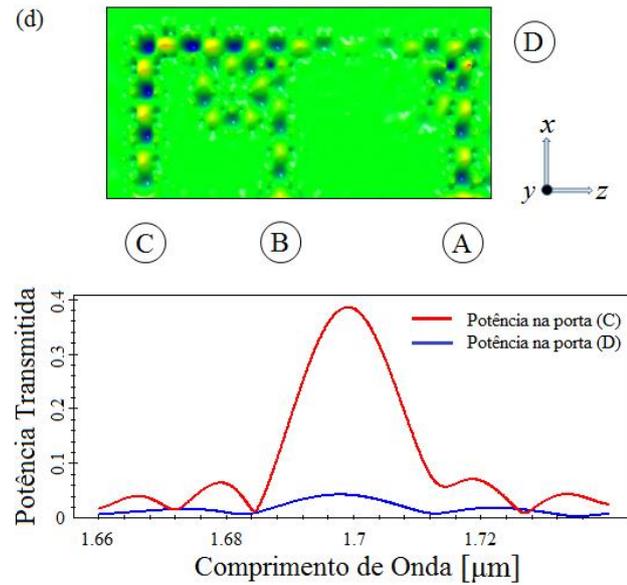
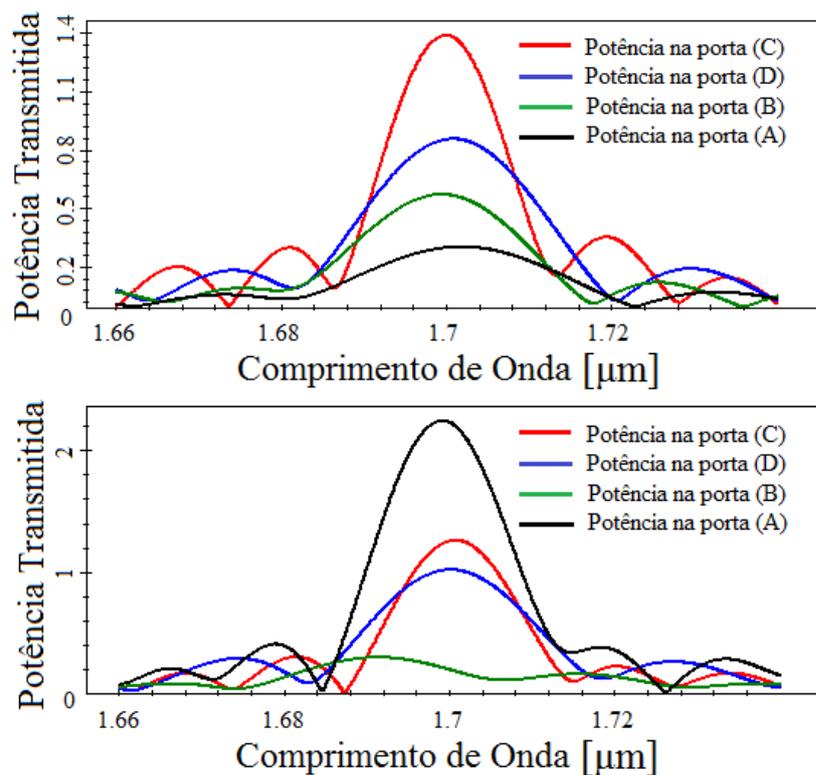


Figura 5.6 - Distribuição de campo elétrico para a porta lógica NAND quando: (a) nenhum sinal de entrada é aplicado nas portas **B** e **A**; (b) nenhum sinal de entrada é aplicado na porta **B**, mas é aplicado na porta **A**; (c) um sinal é aplicado na entrada da porta **B**, mas não é aplicado na porta **A**, e (d) é aplicada potência de entrada nas portas **B** e **A**.



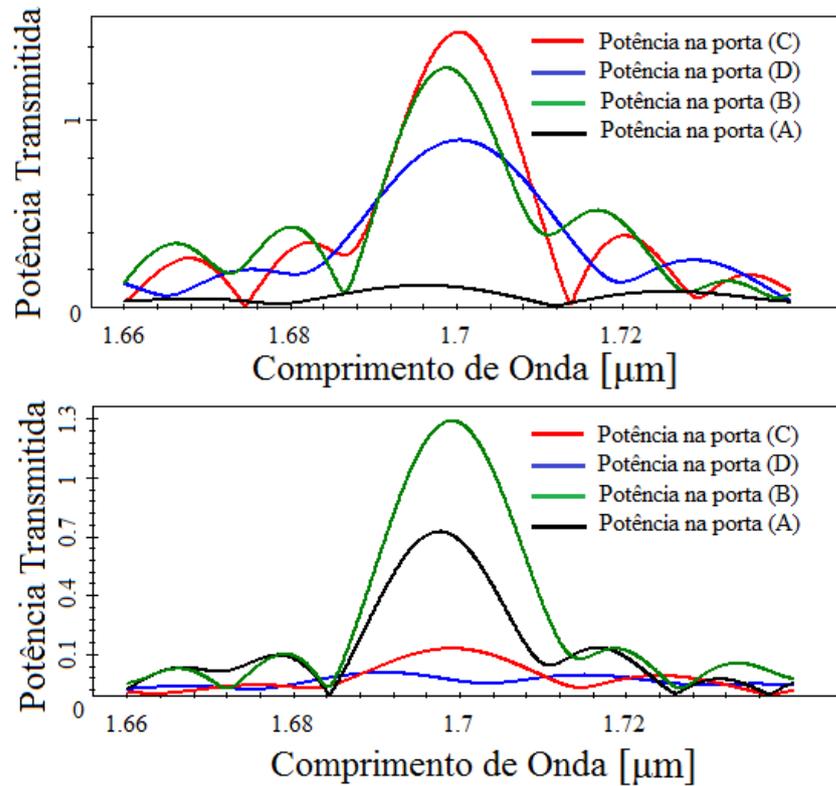


Figura 5.7 - Potência transmitida [W / m] em todas as portas da estrutura.

Os gráficos da Figura 5.7 mostram que a potência relativa muda de acordo com a variação do comprimento de onda para todas as combinações possíveis em todas as portas da estrutura. A Figura 5.8 mostra o símbolo da porta lógica NAND implementada. Esta estrutura digital é um dispositivo idealizado para desempenhar a função Booleana. Revendo a Figura 5.6, tem-se: na Figura 5.6 (a), quando a porta **B** e a porta **A** estão no estado ‘OFF’ (ou bit 0) e na porta **C** é aplicada fonte óptica de bombeamento, podemos ver que o sinal óptico pode chegar à porta **D**, de modo que os resultados da propagação do campo elétrico mostra a capacidade de comutação. Na Figura 5.6 (b), é aplicada fonte óptica de bombeamento na porta **C**, e devido à operação do segundo anel ressonador (PCRR), há uma saída de sinal óptico na porta **D** (ou bit 1), sendo que o sinal na porta **B** está no estado ‘OFF’ (ou bit 0), e na porta **A** no estado ‘ON’ (ou bit 1). Na Figura 5.6 (c), quando as portas **B** e **A** invertem os estados (bit 1 ↔ bit 0), também há sinal de alta potência na porta **D**. Porém, na Figura 5.6 (d), quando a porta **B** e a porta **A** estão no estado ‘ON’ (ou 1 bit), a fonte de sinal óptico na porta **C** está no estado ‘OFF’ devido a operação do primeiro anel ressonador (PCRR) e apenas 3% da potência óptica permanece no guia de ondas da porta **A**. Sendo assim, um resumo dos resultados da operação descrita acima, para a obtenção da porta lógica totalmente óptica NAND proposta, são apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Tabela verdade para a porta NAND.

Sinal de Entrada (Porta B)	Sinal de Entrada (Porta A)	Saída (Porta Lógica D)	Potência na Saída [W/m] (Porta Lógica D)
0	0	1	0,571
0	1	1	0,689
1	0	1	0,799
1	1	0	0,015

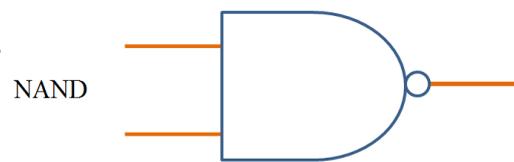


Figura 5.8 - Estrutura digital da porta lógica NAND.

5.4. Conclusão

Neste capítulo, foi projetado, simulado e analisado o desempenho de uma porta lógica totalmente óptica NAND, composta de uma cascata de dois anéis ressoadores ópticos (PCRR) baseados em cristal fotônico bidimensional com tamanho de $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$ cada. Esta estrutura é composta de uma rede quadrada 2-D formada de hastes dielétricas em substrato de ar. Cada anel ressoador tem dimensões 19×19 , sendo utilizado para projetar a estrutura da porta NAND. A constante de rede, indicada por 'a', é igual a $0,5943 \mu\text{m}$. O tamanho total da estrutura da referida porta lógica é cerca de $24 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$, que é menor do que as portas lógicas ópticas de cristais (PhC) convencionais. A porta lógica totalmente óptica NAND foi implementada operando com uma onda contínua (CW) no comprimento de onda operacional de 1700 nm , utilizando o método FDTD bidimensional.

A funcionalidade da porta NAND é verificada na Tabela verdade 5.2. Esta tabela mostra que a saída **D** da porta NAND tem baixa potência, cerca de $0,015 \text{ W/m}$, apenas quando os sinais de entrada estão no estado 'ON' (ou bit 1), isto é, quando apresentam um alto nível de potência. A potência máxima de saída ou lógica '1' é cerca de $0,799 \text{ W/m}$ e a potência mínima de saída é cerca de $0,015 \text{ W/m}$, para o estado de lógica '0' (ou bit 0). Em comparação com outras portas ópticas convencionais, a estrutura da porta NAND pode trabalhar com um baixo consumo de potência, e o seu desempenho permite que a estrutura simulada seja utilizada nas aplicações em

circuitos ópticos integrados em operações ópticas ultra-rápidas e em sistemas de processamento digitais, entre outras.

Referências Bibliográficas

- [1] John D. Joannopoulos, Steven G. Johnson, Joshua N. Winn, Robert D. Meade “Photonic Crystals: Molding the Flow of Light” Copyright by Princeton University Press, (2008).
- [2] V. D. Kumar, T. Srinivas and A. Selvaraian, “Investigation of ring resonators in photonic crystal circuits”, Photonics and Nanostructures 2, 199-20, (2004).
- [3] Majid Ghadrhan, Mohammad Ali Mansouri-Birjandi, All-Optical NOT Logic Gate Based on Photonic Crystals, IJECE Int. J. Elec. Comp. Eng., (2013).
- [4] JY Kim, et al. “All-optical multiple logic gates with XOR, NOR, OR, and NAND functions using parallel SOAMZI structures: Theory and experiment”, J. Light wave Tech; 24: 3392-3399, (2006).
- [5] A. Taflov and S. C. Hagness, Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method, Norwood: Artech House, (2004).
- [6] Chan R.Y., Liu J.M., “Time-domain wave propagation in optical structure”, IEEE Photonics Technology letters, v. 6, n. 8, pp. 1001-1003, (1994).

Capítulo 6

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1. Conclusão

Neste trabalho, foram realizadas simulações computacionais com o propósito de analisar a performance das portas lógicas NOT e NAND baseada em cristais fotônicos bidimensionais. Portas lógicas ópticas desempenham um papel importante no sistema de comunicação óptico, uma vez que são os elementos básicos no processamento de sinais ópticos [1]. É uma solução para todas as limitações no sistema de comunicação eletrônico e atende às crescentes demandas de processadores de sinal *terahertz*, que é o principal gargalo da eletrônica [2, 3]. Há uma série de métodos para se projetar as portas totalmente ópticas, tais como os amplificadores ópticos de semicondutores (SOA) [4] e os interferômetros de guias de onda ópticos [5], mas todos apresentam alguns inconvenientes, pois estes não podem ser utilizados para circuitos integrados fotônicos, devido às grandes dimensões e elevado consumo de energia.

As vantagens das portas lógicas baseadas em cristais fotônicos são: alta velocidade, tem baixo consumo de energia e tamanho compacto, ou seja, na ordem de comprimento de onda. Estas portas lógicas (PhC) podem ser utilizadas para circuitos integrados fotônicos. Devido à facilidade de fabricação e simples *design* de portas lógicas, os circuitos integrados fotônicos (PICs - Photonic Integrated Circuits) estão atualmente sendo estudados para a realização de diversas portas lógicas. Estas estruturas apresentam a possibilidade de conceber outras funções lógicas. Uma vez que o material não linear não é utilizado, o consumo de energia é menor.

6.2. Trabalhos Futuros

Este trabalho pode ser estendido para outros dispositivos ópticos, pois são bastante compactos e funcionam com baixo consumo de energia, podendo ser utilizado em diversas aplicações, como em circuitos integrados fotônicos para a obtenção de portas lógicas. Entre outras possibilidades de trabalhos, podemos destacar:

[1] Utilizando-se das mesmas características de geometria e materiais, uma cascata com quatro anéis ressoadores (PCRR) pode ser projetada e simulada com o intuito da obtenção de portas lógicas totalmente ópticas, sendo que a análise da performance destas portas lógicas pode ser realizada através da razão de extinção.

[2] Um estudo para a melhorar a metodologia utilizada na otimização e escolha dos parâmetros construtivos pode ser feito.

[3] Com a mesma geometria, um acoplador direcional óptico (ODC) incorporado em cristal fotônico não linear (NPhC) bidimensional (2-D) pode ser proposto e analisado. Os métodos PWE e FDTD são utilizados para as simulações e obtenção das portas lógicas.

[4] Com a mesma geometria, um multiplexador por divisão de comprimento de onda (WDM) de quatro portas pode ser projetado e analisado.

[5] Uma extensão deste trabalho utilizando materiais não lineares pode ser feita. Por exemplo, pode ser projetado um dispositivo consistindo de dois anéis ressoadores de cristais fotônicos não lineares do tipo Kerr, que são inseridos entre três defeitos lineares e paralelos. O emprego de nanocristais (*Si* NCs) como o material não linear, é uma opção. Além da observação do efeito Kerr óptico, outros efeitos podem ser observados. O dispositivo pode ser simulado e analisado por métodos tais como o PWE e o método FDTD.

6.3. Lista de Publicações

Ao longo dos dois anos de atividades relacionadas a este projeto de mestrado, foram desenvolvidos e publicados alguns trabalhos na linha do Eletromagnetismo Aplicado, que estão listados a seguir.

6.3.1. Trabalhos Publicados em Eventos Nacionais e Internacionais

[1] Léo César P. de Almeida, Fiterlinge M. de Sousa, Jorge E. de Oliveira, Fabio B. de Sousa and Marcos B. C. Costa, “Design and Performance Analysis of All-Optical NAND Logic Gate Based on 2-D Photonic Crystal”, Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica e Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo. MOMAG, (2016).

[2] Ameida, L. C. P., Costa, M. B. C., “Investigation of Raman Amplification in Photonic Crystal Fibers”, I Simpósio Amazônico de Óptica Não Linear, Fotônica e suas Aplicações, Belém, (2014).

[3] Almeida, L. C. P., and Costa, M. B. C., “Numerical Investigation of Raman Amplification Properties in Photonic Crystal Fibers”, I Feira de Inovações Tecnológicas - FEITEC, UFPA, Ananindeua, (2015).

[4] Costa, M. B. C., Almeida, L. C. P., Silva, R. L. O., “Computational Methods for nonlinear PDEs in Ultrashort Pulse Propagation”, XIII WPDE - XIII Workshop On Partial Differential Equations, Petrópolis, (2014).

[5] Costa, M. B. C., Almeida, L. C. P., Silva, R. L. O., “Investigation of Patch Antenna Based on Photonic Band-Gap Substrate with Heterostructures Using the Method of Finite Difference Time Domain (FDTD)”, XIII WPDE - XIII Workshop On Partial Differential Equations, Petrópolis, (2015).

[6] Léo César P. de Almeida, Fiterlinge M. de Sousa, Jorge E. de Oliveira, Fabio B. de Sousa and Marcos B. C. Costa, “Numerical Simulation of All-Optical NAND Logic Gate Based on 2-D Photonic Crystal using FDTD method”, CNMAC - Congresso de Matemática Aplicada e Computacional, Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics, (2016).

[7] Souza, F. M., Almeida, L. C. P., Sousa, F. B., Oliveira, J. E., Costa, M. B. C., “Filtro de microondas rejeita-faixa com estrutura EBG usando o Método dos Elementos Finitos”, CNMAC - Congresso de Matemática Aplicada e Computacional, Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics, (2016).

[8] L. C. P. de Almeida, J. E. de Oliveira, F. B. de Sousa, F. M. de Sousa and M. B. C. Costa “All-Optical NOT Logic Gate Based on DC 2-D Photonic Crystal”, SEMINATEC - Workshop on Semiconductors and Micro & Nano-Technology, Campinas. SEMINATEC, Campinas-SP. Proceedings of Workshop on Semiconductors and Micro & Nano-Technology, 2016.

[9] Sousa, F. B., Almeida, L. C. P., Oliveira, J. E., Souza, F. M., Costa, M. B. C., “Ultrashort Pulse Switching in an GaAs nanowire coupler”, SEMINATEC - Workshop on Semiconductors and Micro & Nano-Technology, Campinas-SP. Proceedings of Workshop on Semiconductors and Micro & Nano-Technology, 2016.

6.3.2. Artigos Submetidos e Aceitos para Publicação em Periódicos (Revistas)

[1] Almeida, L. C. P. and Costa, M. B. C. “A Performance Analysis of All-Optical NOT Logic Gate Based on 2D Photonic Crystal”.

Submetido ao: Journal of Electromagnetic Analysis and Applications, 2016.

[2] Costa, M. B. C. and Almeida, L. C. P. “A Performance Study of an All-Optical Logic Gate Based in PWM”. Open Access Library Journal, (2016).

Open Access Library Journal, 2016.

[3] Almeida, L. C. P. and Costa, M. B. C., “Performance Analysis of All-Optical NOT Logic Gate Based on 2-D Nonlinear Photonic Crystal”.

Submetido ao: XXXIV - Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, (2016).

Referências Bibliográficas

- [1] Y. Fu, X. Hu and Q. Gong, “Silicon photonic crystal all-optical logic gates”, *Physics Letters A*, vol. 377, no. 4, pp. 329–333, (2012).
- [2] J. Y. Feng, R. D. Ping, L. Hui, L. X. Jun and W. Z. Zhong, “Analysis and experimentation of key technologies in service-oriented optical internet”, *Science China*, vol. 54, no. 2, pp. 215–226, (2011).
- [3] X. Jing, Z. Xinliang, Z. Yin, D. Jianji, L. Deming and H. Dexiu, “Reconfigurable all-optical logic gates for multi-input differential phase-shift keying signals: design and experiments”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, no. 23, pp. 5268-5275, (2009).
- [4] X. Zhang, Y. Wang, J. Sun, D. Liu and D. Huang, “All-optical AND gate at 10 Gbit/s based on cascaded single-port-couple SOAs”, *Optics Express*, vol. 12, no. 3, pp. 361-366, (2004).
- [5] Y. D. Wu, T. T. Shih and M. H. Chen, “New all-optical logic gates based on the local nonlinear Mach-Zehnder interferometer”, *Optics Express*, vol. 16, no. 1, pp. 248-257, (2008).
- [6] E.-H. Lee, *Micro/nano-scale optical network: A new challenge toward next generation*, *Proc. Int. Conf. on Transparent Opt. Networks*, 4, 118-119, (2008).