

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

CIRCULADOR DE 4 PORTAS BASEADO EM UM RESSONADOR ELÍPTICO DE
GRAFENO NA REGIÃO TERAHERTZ

THIAGO LIMA DE OLIVEIRA

DM 01/2020

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

2020

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

THIAGO LIMA DE OLIVEIRA

CIRCULADOR DE 4 PORTAS BASEADO EM UM RESSONADOR ELÍPTICO DE
GRAFENO NA REGIÃO TERAHERTZ

DM 01/2020

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

2020

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

THIAGO LIMA DE OLIVEIRA

CIRCULADOR DE 4 PORTAS BASEADO EM UM RESSONADOR ELÍPTICO DE
GRAFENO NA REGIÃO TERAHERTZ

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

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

2020

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

O48c Oliveira, Thiago Lima de
Circulador de 4 portas baseado em um ressonador elíptico de grafeno na região terahertz / Thiago Lima de Oliveira. — 2020.
67 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Victor Dmitriev
Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2020.

1. Circulador, Grafeno, THz, Plasmons de superfície, Dispositivo não recíproco. I. Título.

CDD 621.3

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

**“CIRCULADOR DE QUATRO PORTAS BASEADO EM UM
RESSONADOR ELÍPTICO DE GRAFENO NA REGIÃO TERAHERTZ”**

AUTOR: THIAGO LIMA DE OLIVEIRA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO
COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO
JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA
ELÉTRICA NA ÁREA DE TELECOMUNICAÇÕES.

APROVADA EM: 20/01/2020

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Victor Alexandrovich Dmitriev
(Orientador – PPGEE/UFPA)

Prof. Dr. Karlo Queiroz da Costa
(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)

Prof. Dr. Licínio Dimitri Sá de Alcântara
(Avaliador Externo – UFRA)

VISTO:

Prof.^a Dr.^a Maria Emília de Lima Tostes
(Coordenadora do PPGEE/ITEC/UFPA)

*Primeiramente a Deus por sempre cuidar dos seus filhos.
Aos meus pais, Francisco das Chagas de Oliveira e Maria das Graças Lima de Oliveira,
que sempre me ajudaram e apoiaram nessa caminhada.*

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus pelo seu infinito amor e misericórdia, e por ter sido meu suporte espiritual para que não desistisse. A Ele toda honra e toda a glória.

Agradeço imensamente aos meus pais Francisco e Maria por sempre me motivarem e estarem ao meu lado em todos os momentos da minha vida. Agradeço por todos os seus esforços, apoio e dedicação na busca do meu sucesso. Obrigado por sempre acreditarem em mim.

A todos os meus irmãos e familiares que me deram o seu apoio.

Agradeço ao professor Daniel Palheta por todos os ensinamentos, amizade e atenção durante essa caminhada.

Agradecimento especial ao professor Victor pela oportunidade, orientação, paciência e dedicação na concepção dessa pesquisa. Seus ensinamentos foram de extrema importância para meu crescimento profissional e pessoal.

A todos os colegas do Laboratório de Nanoeletrônica e Nanofotônica, Gabriel Barros, Sílvio Santos, Wagner Castro, Gianni Portela, Geraldo Melo, Francisco Nobre, Cristiano Braga, pelas conversas e ensinamentos que muito contribuíram para essa pesquisa.

Aos servidores da UFPA, sempre muito atenciosos e solícitos.

Obrigado a todos.

*“Os dois dias mais importantes
da sua vida são: o dia em
que você nasceu, e o dia em
que você descobre o porquê.”
(Mark Twain)*

Resumo

Um novo tipo de circulador de quatro portas baseado em grafeno para a faixa de frequência terahertz é proposto e analisado neste trabalho. O mesmo é constituído de dois guias de ondas paralelos acoplados lateralmente a um ressonador magnetizado em forma de elipse. A secção transversal dos componentes apresenta uma estrutura com três camadas consistindo de grafeno, dióxidos de sílica e silício. O ressonador de grafeno é magnetizado normalmente em seu plano por um campo magnético externo DC. O princípio físico do dispositivo é baseado na ressonância dipolar da cavidade ressonante de grafeno magnetizado. Utilizando a Teoria de Grupos Magnéticos, conseguimos analisar as matrizes de espalhamento das componentes de simetria do dispositivo. Além disso, foi usada a Teoria de Modos Acoplados Temporal, com o intuito de analisar analiticamente as características do dispositivo. Investigou-se a influência de diferentes parâmetros sobre as características do circulador através do software Comsol Multiphysics. Simulações numéricas demonstram o isolamento das portas 3 e 4 em torno de -32,6 dB e -16,2 dB, perdas de inserção em torno de -2,5 dB, reflexão em torno de -20,3 dB e 5,7% de largura de banda com a frequência central de 5,03 THz. O campo magnético DC de polarização aplicado é de 0,8 T. A frequência central do circulador pode ser controlada pela mudança na energia de Fermi do grafeno. Por fim, foi feita uma comparação entre o modelo numérico e analítico do dispositivo, através das ferramentas citadas.

Palavras-chave: Circulador; grafeno; plasmons de superfície; THz; dispositivo não recíproco.

Abstract

A new type of four-port circulator based on graphene for the terahertz frequency range is proposed and analyzed in this work. It consists of two parallel waveguides coupled laterally to a magnetized resonator in the shape of an ellipse. The cross section of the components has a three-layer structure consisting of graphene, silica dioxides and silicon. The graphene resonator is normally magnetized in its plane by an external DC magnetic field. The physical principle of the device is based on the dipolar resonance of the resonant cavity of magnetized graphene. Using the Theory of Magnetic Groups, we were able to analyze the scattering matrices of the symmetry components of the device. In addition, the Temporal Coupled Modes Theory was used in order to analytically analyze the characteristics of the device. The influence of different parameters on the characteristics of the circulator was investigated using the Comsol Multiphysics software. Numerical simulations demonstrate the isolation of ports 3 and 4 around -32.6 dB and -16.2 dB, insertion losses around -2.5 dB, reflection around -20.3 dB and 5.7 % bandwidth with the center frequency of 5.03 THz. The DC magnetic field of applied polarization is 0.8 T. The central frequency of the circulator can be controlled by the change in the Fermi energy of graphene. Finally, a comparison was made between the numerical and analytical model of the device, using the aforementioned tools.

Keywords: Circulator; graphene; surface plasmons; THz; non-reciprocal device.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Espectro eletromagnético com suas respectivas escalas em Hertz. [15]	21
Figura 2 – Carbono e suas edificações alotrópicas entre elas o grafite (a) folhas bidimensionais, o diamante (b) formado por uma rede cristalina, os fulerenos (c) estruturadas na forma de “gaiolas”, ou seja, elas têm a forma fechada em si. Constituídos por uma rede formada por pentágonos e hexágonos, fechando assim a “esfera”. Nanotubos de carbono de parede simples (d) folha de grafeno espiralada, Folha de grafeno de parede dupla (e) folhas de grafenos espiraladas entre si e o grafeno (f) folha bidimensional do grafite [27]	23
Figura 3 – Hibridização do carbono [28].	23
Figura 4 – Diagrama esquemático do grafeno, podendo formar o fulereno, nanotubos de carbono e grafite[32]	25
Figura 5 – Orbitais híbridos do grafeno	25
Figura 6 – Rede direta do grafeno. [35]	26
Figura 7 – Zona Recíproca do Grafeno. [35]	27
Figura 8 – Estrutura de banda de energia do grafeno. [38]	28
Figura 9 – Esquema de um circulador de 3 portas com formato do tipo Y	30
Figura 10 – Imagem retirada de [47]	31
Figura 11 – Imagem retirada de [46]	31
Figura 12 – Esquema de um circulador de 3 portas com formato do tipo W	32
Figura 13 – Alguns tipos de geometrias de circulador de 4 portas. a) Em formato de cruz com 4 guias de ondas acoplados ao ressonador central, b) com dois guias de ondas acoplados.	32
Figura 14 – Malha de elementos finitos aplicada a estrutura do guia de onda e ressonador. Em (a) Observamos a discretização da malha em formato tetraédrica, em (b) a malha mais refinada(discretizada) em uma visão da parte superior do dispositivo.	34
Figura 15 – Excitação pela porta 1(a) e 2(b) com frequências de 5,79 THz e 5,07 THz respectivamente, frequências ω_+ e ω_- .	35
Figura 16 – Descrição dos parâmetros para o circulador de 4 portas.	35
Figura 17 – Funcionamento do circulador de 4 portas do projeto: (a) sinal da porta 1 \Rightarrow 2; (b) sinal da porta 2 \Rightarrow 3.	37
Figura 18 – Representação do plano y e x no circulador de quatro portas, com as componentes do eixo de simetria C_2 e os anti-planos $T_{\sigma 1}$ e $T_{\sigma 2}$	39
Figura 19 – Esquema de um circulador de 4 portas com campo magnético normal ao plano.	43

Figura 20 – Esquema do ressonador de grafeno acoplado lateralmente a um guia de onda	48
Figura 21 – Desdobramento de frequência dos modos ressonantes ω_+ e ω_-	49
Figura 22 – Variação de diferentes gap para um campo $B_0 = 0,8$ T	49
Figura 23 – Distribuição do campo E_z para o estado magnetizado com campo aplicado $B_0 = 0,8$ T a) Excitação na porta 1; b) Excitação na porta 2 .	50
Figura 24 – Frequências ω_+ e ω_- sobrepostas. $B_0 = 0,8$ T e gap = 5nm.	50
Figura 25 – a) Resposta em frequência do circulador para excitação na porta 1, b) Resposta em frequência do circulador para excitação na porta 2	51
Figura 26 – Distribuição de campo E_z com injeção de sinal: a) Porta 1 \implies Porta 2; b) Porta 2 \implies Porta 3; c) Porta 3 \implies Porta 4; d) Porta 4 \implies Porta 1; .	51
Figura 27 – Resposta em frequência referente ao guia de onda de grafeno com $W = 200$ nm, $L = 4850$ nm e $\epsilon_F = 0,15$ eV. Na parte inferior temos a distribuição de campo E_z	52
Figura 28 – Geometria para variação do parâmetro gap.	53
Figura 29 – Resposta em frequência da variação do parâmetro g para diferentes valores: a) 2,5 nm; b) 5 nm; c) 7,5 nm; d) 10 nm	54
Figura 30 – Geometria evidenciando o ressonador elíptico.	54
Figura 31 – Resposta em frequência para os casos do ressonador em formato de disco e elipse com 1%.	55
Figura 32 – Resposta em frequência para a excentricidade da elipse com valores de 2% e 3%.	55
Figura 33 – Resposta em frequência para a excitação através da: a) porta 1; b) porta 2.	56
Figura 34 – Geometria referente ao parâmetro c	56
Figura 35 – Variação do parâmetro C : a) ≈ 160 nm, b) ≈ 230 nm, c) ≈ 280 nm, e d) ≈ 293 nm.	57
Figura 36 – Resposta em frequência para o parâmetro $C = 280$ nm. a) porta 1, b) porta 2.	58
Figura 37 – Distribuição do campo E_z para as fontes de sinais através das: a) porta 1, b) porta 2.	58
Figura 38 – Variação da Energia de Fermi com deslocamento da frequência central. .	59
Figura 39 – Comparação entre os resultados analíticos (TCMT) e computacional (COMSOL) para excitação na porta 1.	60
Figura 40 – Comparação entre os resultados analíticos (TCMT) e computacional (COMSOL) para excitação na porta 2.	60

Lista de abreviaturas e siglas

DC	Campo magnético constante
dB	decibel
GHz	Gigahertz
MEF	Método dos elementos finitos
WDM	Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda
SiO_2	Sílica
Si	Silício
SPP	Surface plasmon polaritons
TCMT	Temporal coupled mode theory
THz	Terahertz
ZB	Zona de Brillouin

Lista de símbolos

λ	Comprimento de onda
$\delta_{i,j}$	Função delta de Kronecker
\mathbf{k}	Vetor de onda
\mathbf{a}_i	vetores de base da rede direta
\mathbf{b}_i	vetores de base da rede recíproca
ϵ_0	Permissividade elétrica do vácuo
μ_0	Permeabilidade magnética do vácuo
σ	Condutividade elétrica
v_F	Velocidade de Fermi
Δ	Espessura do grafeno
\hbar	constante reduzida de Planck
k_x	Componente do vetor de onda na direção x
k_y	Componente do vetor de onda na direção y
$\sigma_{\mathbf{v}}$	Tensor condutividade elétrica
$\sigma_{\mathbf{s}}$	Tensor condutividade superficial
D	Peso de Drude
σ_0	Condutividade óptica universal do grafeno
σ_{xx}	Componente do tensor condutividade na diagonal
σ_{xy}	Componente do tensor condutividade fora da diagonal
ω_B	Frequência de ciclotron
\mathbf{B}_0	Campo magnético DC externo
τ	Tempo de relaxamento do grafeno
e	Carga elétrica

E_z	Componente do intensidade de campo elétrico na direção z
n_{eff}	índice de refração efetivo
β_{eff}	Constante de propagação
ϵ_1	Permissividade elétrica da sílica
ϵ_2	Permissividade elétrica do silício
h_1	Espessura do substrato de sílica
h_2	Espessura do substrato de silício
R	Raio do ressonador de grafeno
L	Comprimento do guia de onda de grafeno
W	Largura do guia de onda de grafeno
G	Gap
C	Concavidade
ϵ_F	Energia de Fermi
S	Matriz dos parâmetros-S
S^T	Matriz transposta dos parâmetros-S
S_{ij}	Elementos da matriz dos parâmetros-S
φ	Fase
ω_{\pm}	Frequências de ressonância nos sentidos horário e anti-horário
ω_c	Frequência central de operação
γ_{\pm}	Taxa de decaimento dos modos horários e anti-horários
$\gamma_{i\pm}$	Perdas intrínsecas do meio

Sumário

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Objetivo geral	19
1.2	Objetivos específicos	19
2	REVISÃO DA LITERATURA	21
2.1	Radiação terahertz	21
2.2	Carbono	22
2.2.1	Hibridização do carbono	23
2.3	Grafeno	24
2.3.1	Propriedades Geométricas - Rede direta e recíproca	25
2.3.2	Estrutura de banda do grafeno	27
2.3.3	Condutividade do grafeno	28
2.4	Circulador	29
3	CÁLCULOS NUMÉRICOS	33
3.1	Modelagem computacional do grafeno usando o software Comsol Multiphysics	33
3.2	Geometria do circulador de 4 portas	35
3.3	Funcionamento do dispositivo	36
4	ANÁLISE USANDO TEORIA DE GRUPOS DE $[S]$	38
4.1	Matriz de espalhamento	38
4.2	Análise do Parâmetro $[S]$ via Teoria de Grupos	39
5	ANÁLISE USANDO TCMT	42
5.1	Teoria de Modos Acoplados Temporal	42
5.2	Matriz $[S]$	43
5.3	Matrizes C , D e K	45
5.4	Elementos da matriz de espalhamento	46
6	RESULTADOS NUMÉRICOS	48
6.1	Resultados do dispositivo	48
6.1.1	Perdas do guia de onda	52
6.2	Influência dos parâmetros geométricos do circulador	52
6.2.1	Gap g	52
6.2.2	Elipse	53
6.2.3	Concavidade C	55

6.3	Dependência da energia de Fermi	58
6.4	Comparação entre resultados analíticos e numéricos	59
	Conclusão	61
	Referências	63

1 INTRODUÇÃO

O estudo sobre circuladores óticos data aproximadamente de 1960, com o primeiro circulador comercial criado na faixa de micro-ondas, faixa essa compreendida na região de GHz. No final de 1970 com os avanços das comunicações óticas, iniciou-se uma vasta pesquisa em janelas de frequências do espectro eletromagnético anteriormente não investigadas [1, 2, 3], em contrapartida, devido ao elevado custo e complexidade de produção houve uma limitação no desenvolvimento de sistemas e dispositivos, mas em 1990 devido à tecnologia WDM (em inglês, *wavelength-division multiplexing*), os circuladores óticos obtiveram papel indispensável para produção desta tecnologia [4, 5]. As aplicações dos circuladores óticos se disseminaram nas telecomunicações, no contato com a fibra ótica dopada com Érbio, em amplificadores e outros campos da tecnologia aplicada. Um circulador é um componente passivo não recíproco, que normalmente é empregado com a função de proteger fontes eletromagnéticas contra reflexões indesejadas em sistemas de comunicações. Recentemente temos circuladores óticos baseados em cristais fotônicos que são amplamente discutidos na literatura.

A radiação terahertz compreende um intervalo do espectro eletromagnético pouco explorado, entre as frequências de microondas e infravermelho (de 100 GHz a 30 THz). Seus estudos versam sobre áreas dos campos da astronomia a ciência analítica, com a aplicação da tecnologia terahertz contemplando os campos de informação, comunicação, biologia e ciências médicas, segurança interna, controle de qualidade de alimentos e produtos agrícolas, monitoramento ambiental global, e computação ultrarrápida, entre outras aplicações [6]. A taxa de transmissão alcançada pela tecnologia terahertz alcança 10 Gigabits (0,1 Terabit), esta radiação também conhecida como raios T, possui excelentes resultados na construção de transmissores [7].

O grafeno foi o primeiro material bidimensional obtido experimentalmente. Esta descoberta permitiu demonstrar que suas propriedades óticas e eletrônicas seriam de interesse para a fotônica e a optoeletrônica [8, 9]. De fato, o grafeno se mostra um material muito promissor na fabricação de dispositivos eletrônicos e fotônicos, devido à característica anisotrópica do tensor condutividade elétrica quando submetido a campo magnético, onde apresenta propriedades girotrópicas [10, 11, 12, 13, 14]. Desta forma, é possível projetar e construir dispositivos não recíprocos baseados em grafeno na região de THz.

Para facilitar o entendimento das pesquisas realizadas, esta dissertação de mestrado foi dividida em alguns capítulos e seções.

No Capítulo 2 deste trabalho é apresentado uma pequena introdução sobre os principais componentes, bases para a estrutura do trabalho de pesquisa tais como radiação

terahertz, grafeno e circuladores ópticos.

Na seção 2.2 a 2.4, faz um levantamento da literatura sobre as propriedades do carbono e seu alótropo grafeno, material chave para a construção de nossa pesquisa. São abordados temas sobre as propriedades geométricas do grafeno, como a rede direta, recíproca, bem como a sua estrutura de banda e condutividade óptica.

Em seguida, Capítulo 3 discorre sobre a metodologia computacional aplicada, o software usado para construção do dispositivo, bem como os parâmetros usados para a sua construção, desta forma observam-se as características físicas tais como camadas de substratos e guias de onda.

Posteriormente no Capítulo 4, observa-se uma análise sobre a Teoria de Grupos para o dispositivo de 4 portas, bem como seus elementos de simetria, a geometria e o princípio de funcionamento.

O Capítulo 5 apresenta uma discussão sobre a Teoria de Modos Acoplados, aplicada no dispositivo de quatro portas, cabe destacar a matriz ideal para o circulador, as matrizes, S , C , D e K , que através das mesmas pode-se obter as equações dos coeficientes de transmissão para o dispositivo.

O Capítulo 6 salienta os resultados numéricos obtidos através das simulações computacionais, são destacados os parâmetros S , cálculos do ressonador, desdobramento, e os resultados para o circulador de quatro portas.

Por fim, no Capítulo 7 obtemos a comparação entre as simulações obtidas através do software COMSOL Multiphysics com as equações da Teoria de Modos Acoplados Temporal através da aproximação entre os gráficos gerados nas simulações e equações analíticas.

1.1 Objetivo geral

O principal intuito das pesquisas realizadas neste trabalho foi propor e analisar numericamente um novo circulador óptico de quatro portas baseado em um ressonador circular e guias de ondas exclusivamente de grafeno que opera na região do espectro eletromagnético definida em THz, adequado para ser utilizado em sistema de comunicação óptica.

1.2 Objetivos específicos

- Análise do dispositivo baseada na Teoria de Grupos por meio da Matriz de Espalhamento.

- Análise analítica do dispositivo usando Teoria de Modos Acoplados Temporal.
- Estudo de alterações dos parâmetros geométricos, afim de obter melhores níveis da resposta em frequência.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Radiação terahertz

Pode-se considerar que radiação é energia que viaja sob forma de partículas de alta velocidade (radiação de partículas) ou ondas (radiação eletromagnética). A radiação de partículas acontece quando um átomo instável ou radioativo se desintegra. Já a radiação eletromagnética não tem massa e viaja pelas ondas. A radiação eletromagnética pode variar de energia muito baixa para muito alta, e esse espaço é chamado de espectro eletromagnético. Existem dois tipos de radiação contidas no espectro eletromagnético – radiação ionizante e não ionizante.

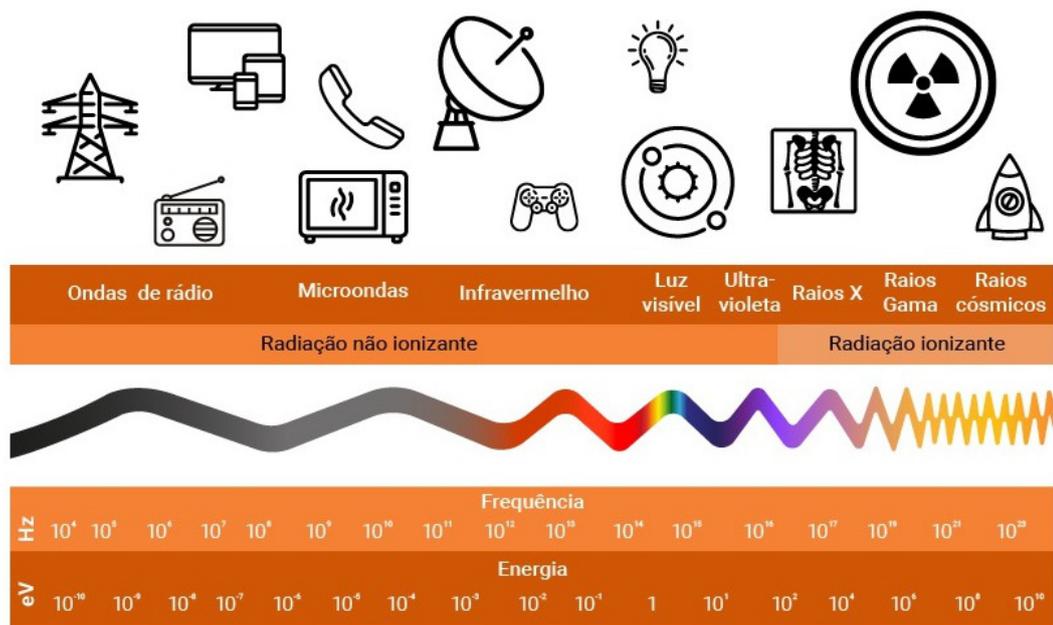


Figura 1 – Espectro eletromagnético com suas respectivas escalas em Hertz. [15]

Dependendo da frequência da onda, ela recebe diferentes denominações, como micro-ondas, radiação infravermelha, luz visível, radiação ultravioleta, radiação gama. Desde a primeira ligação através de um telefone portátil sem fio, feita em 1973 pelo engenheiro Martin Cooper que trabalhava na empresa Motorola, houve um crescente aumento na demanda pela questão da miniaturização de aparelhos e por comunicações sem fio, impulsionando a pesquisa entre cientistas e pesquisadores.

A maioria das aplicações atuais de tecnologia de radiofrequência (RF) e micro-ondas são para sistemas de rede e comunicação sem fio (wireless em inglês), sistemas de segurança sem fio, sistemas de radar, sensoriamento remoto, ambiental e sistemas médicos.

Os dispositivos de comunicação sem fio atualmente operam em frequências de microondas, i.e. GHz por exemplo. Entretanto, com a demanda por velocidades mais rápidas e bandas mais largas de dados, os cientistas e pesquisadores estão procurando maneiras de reduzir o gargalo de comunicação. E uma proposta promissora para esse fim é a radiação Terahertz (THz) [16].

A faixa terahertz (THz) é definida no espectro eletromagnético no intervalo de 100 GHz ($\lambda \approx 3$ mm) a 10 THz ($\lambda \approx 30$ μ m) situando-se entre faixas de microondas e o infravermelho distante [17].

Similar a radiação infravermelha e a de microondas, a radiação terahertz viaja pelas ondas eletromagnéticas e é não-ionizante. Assim, a radiação terahertz pode penetrar em uma ampla variedade de materiais. Essa radiação pode atravessar através da roupa, papel, papelão, madeira, etc. Por possuir profundidade de penetração tipicamente menor que a de microondas, e ter um elevado grau de absorção da água, não apresenta características nocivas ao corpo humano (ao contrário dos raios-x) limitando-se apenas a parte externa (pele). Devido a essas características, seus números de aplicações são bem grandes, como por exemplo na área de segurança, onde a onda THz pode penetrar em roupas e plásticos sem danificá-los, por isso pode ser bastante útil na detecção de objetos suspeitos, especialmente em aeroportos. A detecção passiva através de ondas terahertz evita os problemas de privacidade corporal de outra natureza de detecção, e de fato os scanners THz permitem a detecção remota de objetos metálicos, plásticos, cerâmicos e outros objetos escondidos sob certos anteparos, a uma distância de alguns metros, sendo direcionada a uma variedade muito específica de materiais e objetos. A aplicação da radiação THz tem sido estudada de forma massiva em muitos grupos de pesquisa, atualmente pode-se observar aplicações de técnicas para diagnóstico de doenças [18], efeitos de radiação e processos biológicos [19], aplicações em sistema de defesa com relação às análises espectroscópicas para a detecção de materiais explosivos, drogas ou agentes biológicos [20],[21][22],[23],[24], outras aplicações como indústria farmacêutica, oncologia, dermatologia e comunicações sem fio [25].

O desenvolvimento da tecnologia THz demanda conhecer as propriedades eletromagnéticas de diferentes materiais.

2.2 Carbono

O carbono, elemento químico bastante conhecido e presente em tudo que é orgânico, recebeu esse nome por Lavoisier em 1789, que vem do latim carbono carvão. Ainda no mesmo ano, A.G. Werner e D.L.G. Harsten denominaram o carbono (carvão), de grafite (da palavra grega para "escrever"), uma das suas poucas formas alotrópicas conhecidas até 1789. Através do desenvolvimento da ciência do carbono (em particular a nanociência) a produção de novos alótropos (Figura 2) a partir de suas propriedades, tais como grafite

que teve forte produção no fim do século XIX para fornos elétricos, continua a impulsionar aplicações em novas tecnologias [26].

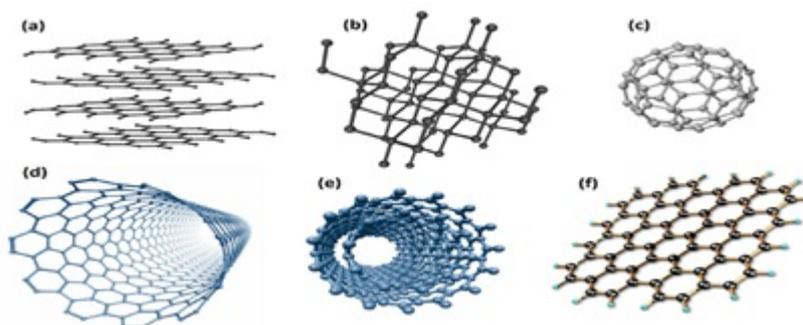


Figura 2 – Carbono e suas edificações alotrópicas entre elas o grafite (a) folhas bidimensionais, o diamante (b) formado por uma rede cristalina, os fulerenos (c) estruturadas na forma de “gaiolas”, ou seja, elas têm a forma fechada em si. Constituídos por uma rede formada por pentágonos e hexágonos, fechando assim a “esfera”. Nanotubos de carbono de parede simples (d) folha de grafeno espiralada, Folha de grafeno de parede dupla (e) folhas de grafenos espiraladas entre si e o grafeno (f) folha bidimensional do grafite [27]

2.2.1 Hibridização do carbono

O carbono está localizado no grupo 14 da tabela periódica possuindo 6 prótons e 6 elétrons com massa de 12 u (unidade de massa atômica) e é sólido a temperatura ambiente. Possui característica de ametal e é tetravalente, proporcionando 4 ligações covalentes com seus 4 elétrons disponíveis, é de notória importância que ele possui 3 isótopos com formação natural o ^{12}C , ^{13}C e ^{14}C , este último é radioativo possuindo uma meia vida de aproximadamente 5730 anos. Em seu estado fundamental (mais estável), sua configuração eletrônica é $1s^2, 2s^2, 2p^2$, pode ser apresentada a seguir na Figura 3.

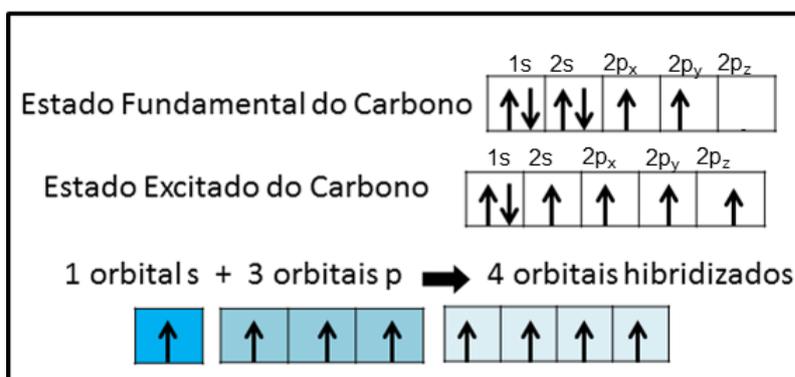


Figura 3 – Hibridização do carbono [28].

Quando se refere as ligações entre carbono-carbono (ligações covalentes), estas ligações podem gerar redes de estruturas cristalinas e moleculares, uma característica

importante, pois alguns outros elementos do mesmo grupo do carbono possuem tal propriedade e.g. o silício. Quando o carbono faz uma ligação covalente entre carbono, ocorre o processo chamado hibridização, onde este processo pode ser evidenciado na passagem de um elétron da camada $2s$ para um orbital vazio, esta passagem consiste de 3 formas diferentes, originando assim, os orbitais híbridos sp^3 , sp^2 e sp [29]. O processo de hibridização do carbono consiste na junção de orbitais subatômicos que se combinam e geram um orbital de menor energia. Os orbitais são regiões espaciais onde se há a maior probabilidade de encontrar determinado elétron com determinada energia [30].

2.3 Grafeno

O grafeno vem sendo discutido teoricamente desde os anos 1940. O pioneiro a propor a existência do grafeno foi o físico Philip Russel Wallace, em 1947. Em 1962, os químicos Ulrich Hofmann e Hanns-Peter Boehm, batizaram o material através da junção das palavras grafite e o sufixo “eno”, resultando em grafeno. Demorou cerca de 60 anos, para ser obtido experimentalmente uma camada bidimensional de alta qualidade com aproximadamente a espessura de um átomo [31]. Em 2004, os Físicos Andre Geim e Konstantin Novoselov da Universidade de Manchester na Inglaterra, isolaram o grafeno com sucesso, fato esse, que levou os pesquisadores a serem laureados com o prêmio Nobel de Física de 2010 [32]. Desde a época do isolamento do grafeno até os dias atuais, uma gama de aplicações tecnológicas vem sendo desenvolvidas baseadas nesse material, pode-se encontrar na área da saúde, segurança, transporte e comunicações [33].

O grafeno é constituído por uma simples camada de átomos de carbono hibridizados pela configuração sp^2 , formando uma grade do tipo “favo de mel”, ou mais simplesmente uma única camada de grafite. Outras formas alotrópicas do carbono além do grafeno, isto é, substâncias simples e diferentes, compostas por um único tipo de elemento, são conhecidas como fulereno, nanotubo de carbono e o grafite, poderiam ser geradas a partir do grafeno como bloco fundamental Figura 4. A hibridização sp^2 do grafeno proporciona aos seus átomos uma ligação forte (covalente).

O grafeno possui hibridização sp^2 seus átomos interagem entre si através de ligações fortes (covalente). As ligações covalentes formam ângulos de 120 graus, com 3 ligações coplanares do tipo σ , restando uma ligação a ser feita que é efetuada fora do plano com um átomo de uma camada superior gerando então uma ligação π .

Na Figura 5 observamos o esquema dos orbitais híbridos associados as ligações σ (no plano) e π (fora do plano).

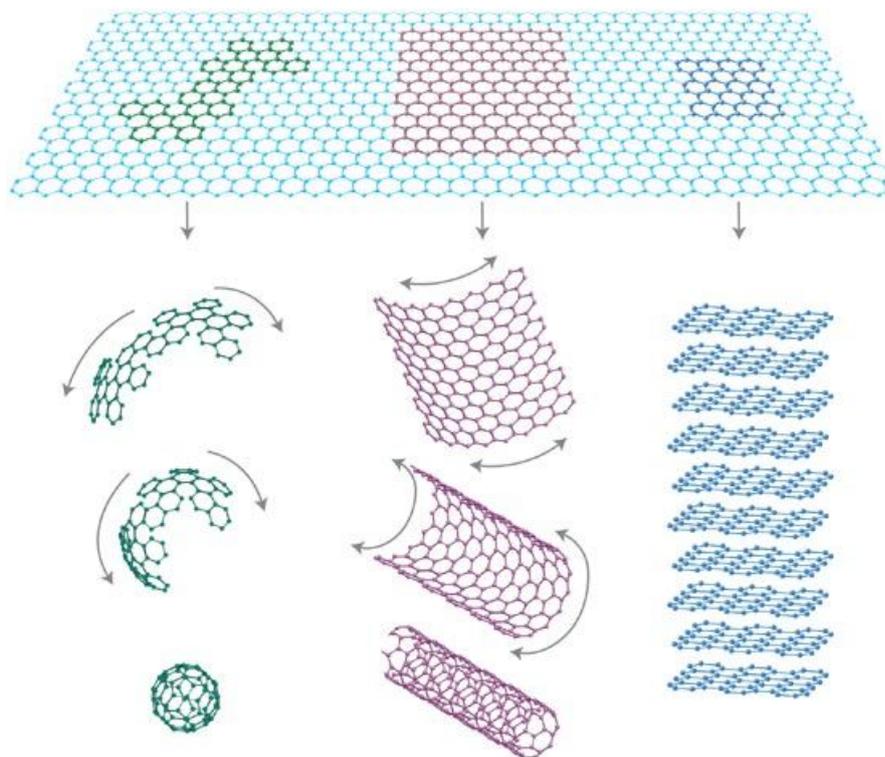


Figura 4 – Diagrama esquemático do grafeno, podendo formar o fulereno, nanotubos de carbono e grafite[32]

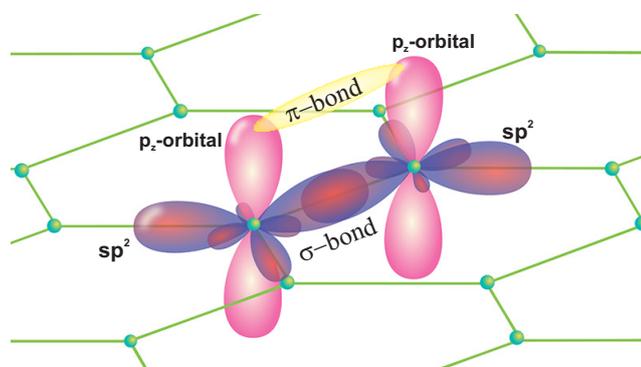


Figura 5 – Orbitais híbridos do grafeno

2.3.1 Propriedades Geométricas - Rede direta e recíproca

O grafeno possui a distância entre os átomos, aproximadamente de $1,42 \text{ \AA}$, com estrutura hexagonal o arranjo atômico é caracterizado como uma rede de Bravais, que tem por base 2 átomos destacados nos sítios A e B na Figura 6, ou duas sub-redes triangulares. Desta forma, a célula unitária compreende 2 átomos que descrevem as propriedades eletrônicas do grafeno. Na figura 6 pode-se notar a rede de Bravais caracterizado pelo caráter hexagonal, e a célula unitária sendo o paralelogramo equilátero com lados equivalente $a = \sqrt{3}$ e $a_{cc} = 2,46 \text{ \AA}$.

Destaca-se os vetores da unidade primitiva da rede direta por [36] :

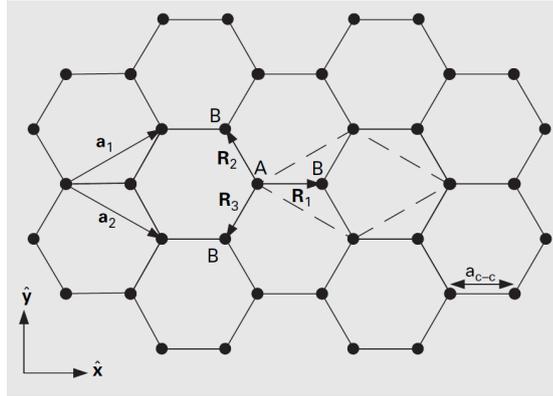


Figura 6 – Rede direta do grafeno. [35]

$$\mathbf{a}_1 = \left(\frac{\sqrt{3}a}{2}, \frac{a}{2} \right), \quad (2.1)$$

$$\mathbf{a}_2 = \left(\frac{\sqrt{3}a}{2}, -\frac{a}{2} \right), \quad (2.2)$$

onde $|\mathbf{a}_1| = |\mathbf{a}_2| = a$.

A rede recíproca do grafeno possui semelhanças com a rede direta, ela pode ser encontrada com uma rotação de 90° desta última, sendo matematicamente descrita como a transformada discreta de Fourier. Podendo ser definida por vetores de base recíproco [37].

$$\mathbf{b}_1 = \left(\frac{2\pi}{\sqrt{3}a}, \frac{2\pi}{a} \right) \quad (2.3)$$

$$\mathbf{b}_2 = \left(\frac{2\pi}{\sqrt{3}a}, -\frac{2\pi}{a} \right) \quad (2.4)$$

onde $|\mathbf{b}_1| = |\mathbf{b}_2| = 4\pi/\sqrt{3}a$ e possuem dimensão inversamente ao comprimento. Estes vetores de base recíprocos estão relacionados com os vetores de base direto através da relação ortogonal $a_i b_j = 2\pi \delta_{ij}$, em que δ_{ij} é a função delta de Kronecker ($\delta_{ij} = 1$, se $i = j$ e $\delta_{ij} = 0$, se $i \neq j$) e são obtidos a partir do espaço direto pelas relações [38]

$$\mathbf{b}_1 = -2\pi \frac{z \times a_2}{z \cdot a_1 \times a_2}, \quad (2.5)$$

$$\mathbf{b}_2 = 2\pi \frac{z \times a_1}{z \cdot a_1 \times a_2}, \quad (2.6)$$

A importância da rede recíproca decorre do fato de que é possível desenhar as Zonas de Brillouin (ZB), que correspondem a espaços formados por regiões vizinhas a um ponto referencial no espaço recíproco, na ZB existem pontos de alta simetria que podem ser

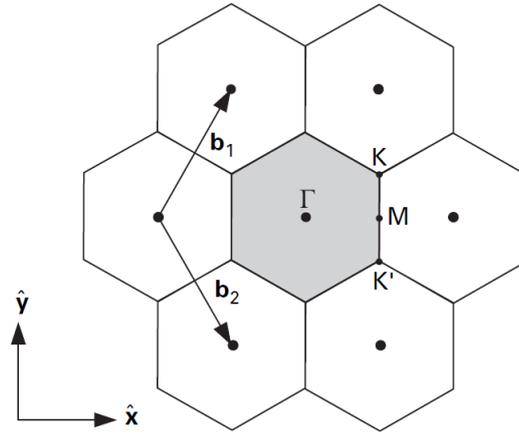


Figura 7 – Zona Recíproca do Grafeno. [35]

evidenciados na Figura 8 na região central, neste setor obtemos as informações referentes as propriedades eletrônicas do grafeno, nas extremidades dos hexágonos existem vértices denominados de pontos de Dirac, tais coordenadas são definidas convencionalmente na literatura como: ponto Γ , ponto M e ponto K . A partir do ponto central outros pontos de alta simetria podem ser definidos pelos vetores de localização:

$$\Gamma M = \left(\frac{2\pi}{\sqrt{3}a}, 0 \right) \quad (2.7)$$

$$\Gamma K = \left(\frac{2\pi}{\sqrt{3}a}, \frac{2\pi}{3a} \right) \quad (2.8)$$

2.3.2 Estrutura de banda do grafeno

É comum encontrar na literatura o método tight-binding no que tange ao estudo da estrutura de bandas do grafeno, pois trata de elétrons fortemente ligados ao núcleo, desta forma uma boa aproximação pode ser feita para a estrutura de banda de energia que é dada por [35]:

$$E(k) = \pm \gamma \sqrt{1 + 4 \cos\left(k_x \frac{a\sqrt{3}}{2}\right) \cos\left(k_y \frac{a}{2}\right) + 4 \cos^2\left(k_y \frac{a}{2}\right)}, \quad (2.9)$$

em que, $\gamma = 2.7$ eV e a são constantes e k_x e k_y são as componentes do vetor de onda \mathbf{k} da rede recíproca. A Figura 8 apresenta a banda de condução e a banda de valência, que correspondem a parte positiva e negativa da equação 2.9 respectivamente. Em quesitos energéticos a banda de condução possui energia $E > 0$ e a banda de valência possui energia $E < 0$, o encontro das bandas de condução e de valência são nomeados de pontos de Dirac, que compreendem os vértices da primeira ZB, o qual, é possível extrair informações sobre a estrutura de banda do grafeno.

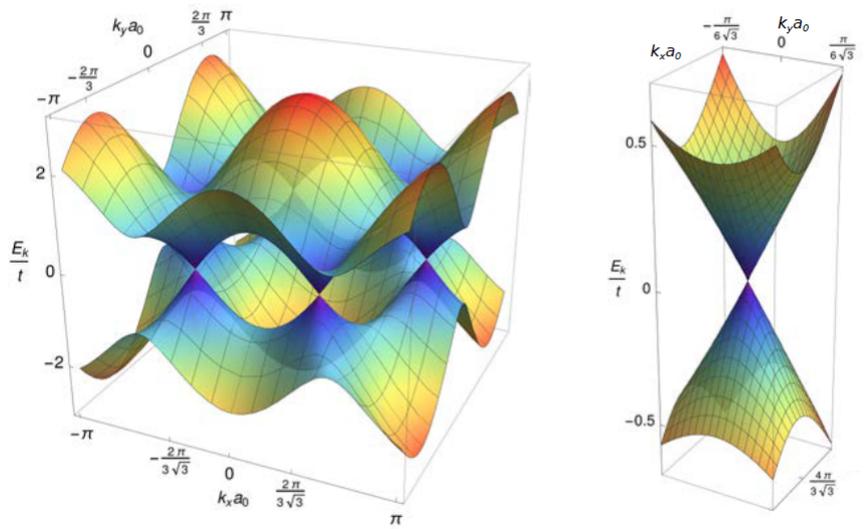


Figura 8 – Estrutura de banda de energia do grafeno. [38]

Expandindo a equação (2.9) em série de Taylor em torno dos pontos de Dirac, pode-se chegar na seguinte expressão:

$$E(k) = \pm \hbar \cdot v_f |\mathbf{k}|, \quad (2.10)$$

em que, $v_f = \frac{3\gamma \cdot a}{2} \cong 10^6$ m/s é a velocidade de Fermi e para regimes de baixa energia, temos uma dispersão linear para o grafeno que aproxima-se à dispersão para partículas relativísticas, e se comportando como férmions de Dirac não massivos.

2.3.3 Condutividade do grafeno

Quando aplicamos um campo magnético DC externo, de forma normal ao ressonador, a densidade de carga no grafeno sofre deflexão que pode ser explicado através da força de Lorentz, movimentando-se em órbita de ciclotron que é a frequência angular de uma partícula movendo-se de forma perpendicular a excitação de um campo eletromagnético uniforme. Desta forma, como resultado, o tensor 2D de condutividade óptica adquire componentes anti-simétricos não diagonais [39]

$$[\sigma_s] = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & -\sigma_{xy} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{xx} \end{bmatrix}. \quad (2.11)$$

Na região de frequência onde as transições interbandas podem ser ignoradas, pode-se usar a forma clássica do modelo de Drude dos parâmetros do tensor condutividade do grafeno [39]

$$\sigma_{xx} = \frac{2D}{\pi} \frac{1/\tau - i\omega}{\omega_c^2 - (\omega + i/\tau)^2}, \quad (2.12)$$

$$\sigma_{xy} = -\frac{2D}{\pi} \frac{\omega_c}{\omega_c^2 - (\omega + i/\tau)^2}, \quad (2.13)$$

onde $D = 2\sigma_0\epsilon_F/\hbar$ é o peso de Drude, $\sigma_0 = e^2/(4\hbar)$ é a condutividade óptica universal do grafeno, ϵ_F é a energia de Fermi do grafeno, $\omega_c = e\mathbf{B}_0v_F^2/\epsilon_F$ é a frequência de ciclotron, \hbar é a constante reduzida de Planck, e é a carga do elétron, ω é a frequência da onda incidente, v_F é a velocidade de Fermi, \mathbf{B}_0 é o campo magnético DC externo, $i = \sqrt{-1}$ e $\tau = 0.9$ ps é o tempo de relaxamento do grafeno que é oriundo de mecanismos de espalhamento no material como defeitos, impurezas e fônons.

2.4 Circulador

Um circulador óptico é um dispositivo passivo multiportas não recíproco que direciona a luz em sequência de porta em porta em uma única direção. Este dispositivo é usado em amplificadores ópticos, multiplexadores, módulos de compensação de dispersão e principalmente para a proteção de fontes eletromagnéticas contra reflexões indesejadas. A função de um circulador óptico é basicamente transmitir uma onda de luz de uma porta para a próxima porta sequencialmente com a máxima intensidade, mas ao mesmo tempo bloquear qualquer transmissão de luz de uma porta para a porta anterior. Na faixa de frequência de microondas, eles podem se basear nas tecnologias de microfita (microstrip - em ingles) ou triplaca (stripline - em ingles) [40], [41].

Sua construção baseia-se tipicamente de três guias de ondas acoplados a uma cavidade ressonante. Para observar como isso funciona, vamos considerar o circulador de três portas, como visto na Figura 9. Aqui, o sinal que é injetado através da porta 1 e é enviado para a porta 2, uma entrada na porta 2 é enviado para a porta 3, e uma entrada através da porta 3 é enviada para a porta 1 [42].

Este tipo de circulador apresentado na Figura 9, é encontrado na literatura com diferentes tipos de materiais e faixas de frequência. Em [43] é discutido sobre um circulador com três portas baseado no material de ferrite, e em [44] também é encontrado outro de ferrite, na faixa de frequência de GHz com aplicação em radares.

É comum também ser encontrado esse tipo de dispositivo baseado em Cristal Fotônico (em ingles, photonic crystal), que são nanoestruturas que possibilitam a manipulação da luz visível e das demais formas de radiação eletromagnética devido à organização de sua estrutura em padrões periódicos. Tal tipo de dispositivo pode ser encontrado em [45] e em [46], como visto na Figura 11.

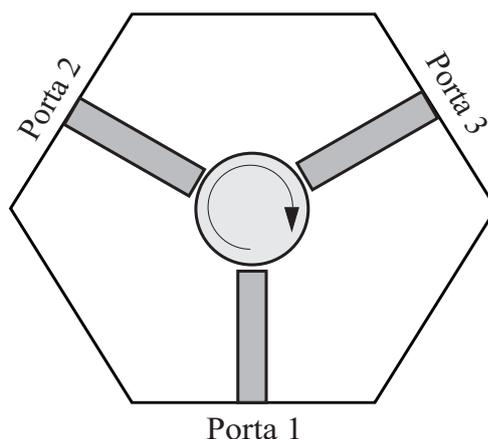


Figura 9 – Esquema de um circulator de 3 portas com formato do tipo Y

Além disso, também pode ser encontrado na literatura, circutores baseados em grafeno, que é de maior interesse neste trabalho. Por suportar plásmon-polárítos de superfície (em inglês - SPP), exibir forte interação na faixa de radiação THz e também a sua condutividade elétrica poder ser sintonizada por um campo magnético DC externo, o grafeno se torna muito atraente para esse projeto de dispositivos passivos não recíprocos na região de THz.

Pode ser visto em [47], o projeto de um circulator com três portas baseado em grafeno, com um campo magnético externo aplicado em uma cavidade ressonante. Na Figura 10, pode ser analisado a distribuição do campo elétrico do dispositivo, em a) é visto o caso não magnetizado, em b) é visto o caso magnetizado com um campo externo DC e o sinal injetado através da porta 1 e saindo através da porta 3, em c) o sinal é injetado pela porta 3 e saindo pela porta 2, e em d) é visto o sinal injetado através da porta 2 e saindo pela porta 1, obedecendo o funcionamento do dispositivo discutido no começo desta sessão. Em [48] pode ser encontrado outro circulator com três portas do tipo Y, de grafeno e magnetizado por um campo externo DC.

Também pode-se encontrar na literatura outros tipos de geometria relacionadas ao circulator com 3 portas além do tipo Y, como pode ser visto na Figura 12, um com formato do tipo W. Esse tipo de dispositivo pode ser encontrado em [49, 50] baseado em cristal fotônico.

Outro tipo de circulator óptico é o de 4 portas, que é o proposto neste trabalho. Pode-se encontrar na literatura alguns tipos de circutores de 4 portas, de vários tipos de materiais e diferentes faixas de frequência. Em [51] é encontrado um a base de ferrite, funcionando na faixa de frequência GHz. Em [52] é tratado sobre um circulator de 4 portas baseado em cristal fotônico, com quatro guias de ondas acoplados em formato de cruz a um ressonador. Também é encontrado em [53] um a base de cristal fotônico, de quatro portas com dois guias de ondas acoplados a uma cavidade ressonante. Pode-se observar na Figura 13, alguns tipos de geometria do circulator de 4 portas.

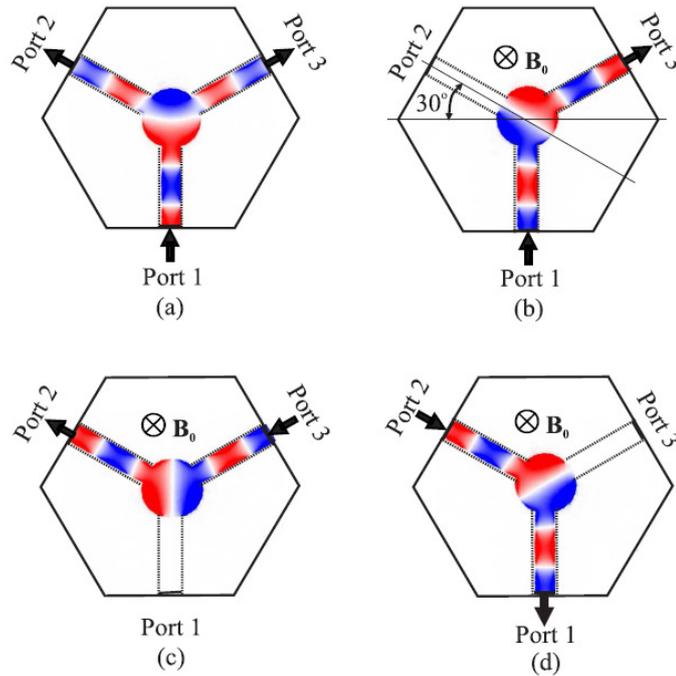


Figura 10 – Imagem retirada de [47]

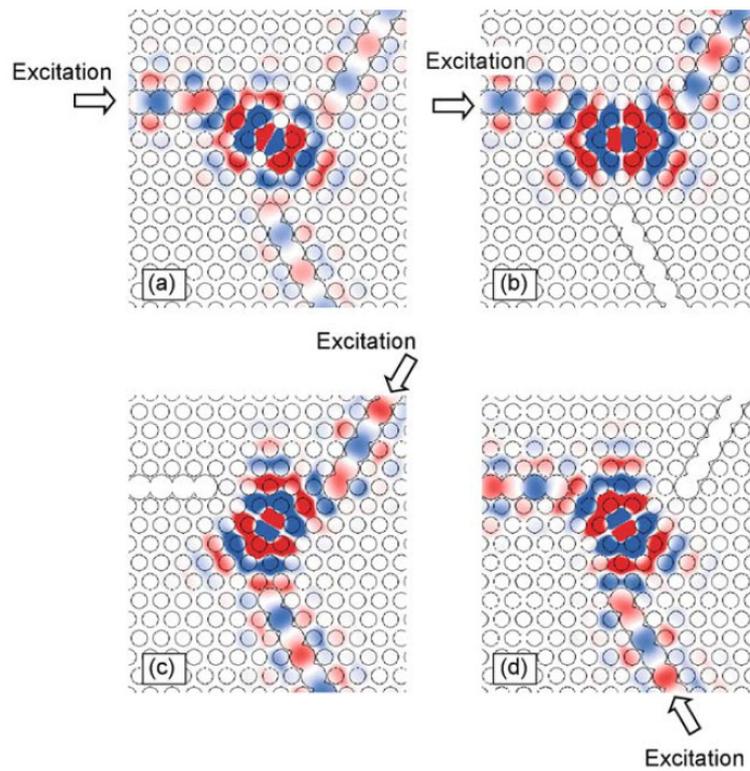


Figura 11 – Imagem retirada de [46]

O novo tipo de dispositivo proposto e analisado neste trabalho, é um circulador de 4 portas com dois guias de ondas acoplados lateralmente a uma cavidade ressonante central, com os dois guias e o ressonador sendo estritamente a base de grafeno e depositados sobre um substrato dielétrico. A geometria deste dispositivo e o princípio de funcionamento,

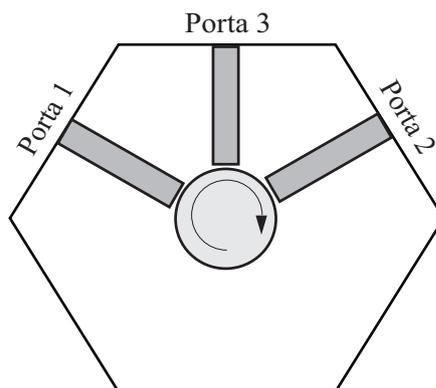


Figura 12 – Esquema de um circulator de 3 portas com formato do tipo W

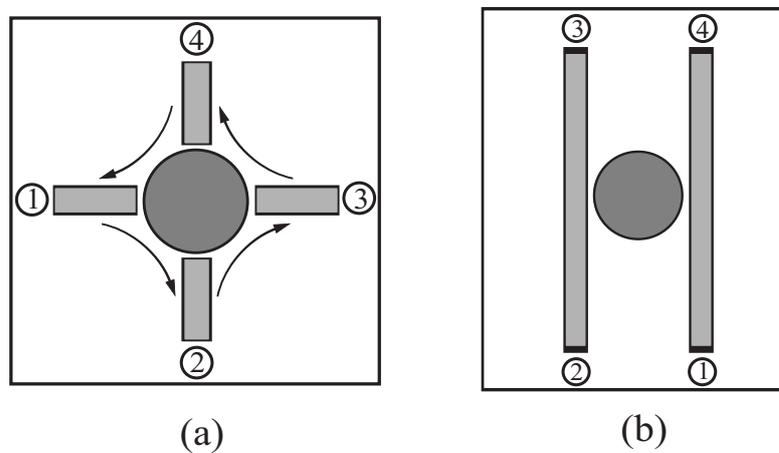


Figura 13 – Alguns tipos de geometrias de circulator de 4 portas. a) Em formato de cruz com 4 guias de ondas acoplados ao ressonador central, b) com dois guias de ondas acoplados.

serão abordados no próximo Capítulo.

3 CÁLCULOS NUMÉRICOS

Apresentaremos nesta seção, um estudo teórico sobre a análise do ressonador bem como a escolha de parâmetros necessários para a construção e desenvolvimento de um circulador de quatro portas, falaremos também sobre o acoplamento do ressonador com guias de ondas baseado em grafeno na região de THz. Este estudo irá auxiliar na escolha dos modos de propagação, campo magnético aplicado e a frequência de operação em que o dispositivo funcionará.

3.1 Modelagem computacional do grafeno usando o software Comsol Multiphysics

O estudo teórico foi realizado através de simulações no software Comsol Multiphysics versão 5.2a [54], onde é possível construir a estrutura a ser pesquisada e definir parâmetros reais que simulam um ambiente controlado. O software utiliza como recurso matemático para resolução de problemas o método de elementos finitos (MEF), que divide o espaço em um conjunto de elementos finitos e representa funções desconhecidas através de aproximações. Um desafio enfrentado é que o grafeno apesar de ser um material bidimensional, não é possível inserir diretamente sua dimensão real no COMSOL, para contornar esse desafio é considerada uma monocamada de grafeno com uma espessura finita Δ , juntamente com o tensor condutividade elétrica do grafeno dado por:

$$[\sigma_v] = [\sigma_s]/\Delta, \quad (3.1)$$

Onde Δ é a espessura da folha de grafeno, sendo igual a 1 nm, tal parâmetro é usado apenas para fins de cálculos.

Seguimos algumas etapas na construção da estrutura até a obtenção dos resultados provenientes das simulações, sendo estas etapas constituídas de: 1. Construção geométrica do dispositivo; 2. Escolha dos parâmetros físicos do dispositivo; 3. Condições de contorno do problema; 4. Criação da malha de elementos finitos e; 5. Pós-processamento dos resultados. Para resolver problemas que envolvam campos eletromagnéticos, foi utilizado o módulo RF.

Seguindo passos descritos anteriormente, foram inseridos todos os parâmetros necessários para o funcionamento da física, assim como a definição de cada subdomínio e posteriormente as condições de contorno, cita-se algumas condições tais como: “Scattering

Boundary Condition” voltada para as faces laterais, superior e inferior do dispositivo, e para as portas utilizamos “Port numeric”.

Quando utilizamos portas numéricas no estudo, devemos obter os modos de propagação no guia de onda de grafeno, e isso somente é possível através do comando “Boundary Mode Analysis” que combinado com o tipo de porta, analisa os possíveis modos determinados manualmente no momento da análise, através dos cálculos de seu índice de refração efetivo (n_{eff}). Portanto, após definirmos os domínios e condições de contorno, por conta do MEF se faz o uso de figuras geométricas para os cálculos sendo estas figuras triângulos e tetraedros, no comando Mesh podemos criar a malha de elementos finitos e discretizar o modelo. Neste ponto, existe uma peculiaridade na malha, na região onde se encontra o guia de onda e o ressonador de grafeno, esta malha deve ser mais refinada (discretizada), adotando assim formas triangulares, e no restante da caixa adota-se o modelo tetraédrico descrito na Figura 14.

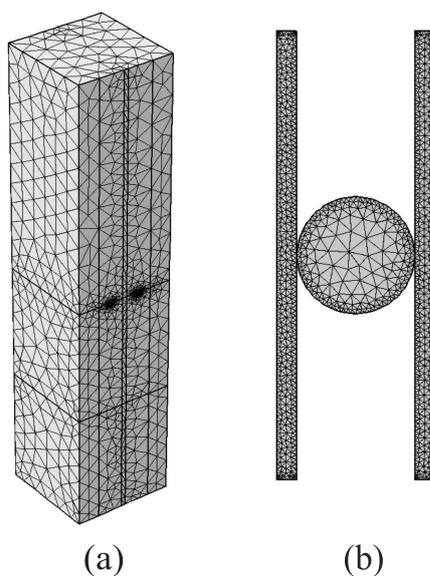


Figura 14 – Malha de elementos finitos aplicada a estrutura do guia de onda e ressonador. Em (a) Observamos a discretização da malha em formato tetraédrica, em (b) a malha mais refinada(discretizada) em uma visão da parte superior do dispositivo.

A princípio quando o ressonador de grafeno é acoplado a um guia de onda pode-se observar a dependência dos modos de dipolo girantes em relação ao campo magnético B_0 como mostrado na Figura 15. Foi adotado um gap de 5 nm entre o ressonador e o guia de onda, e os modos dipolo aumentam de acordo com a elevação do campo magnético B_0 . Com base no estudo do circulador foi escolhido o campo de 0,8 T para trabalhar a operação do circulador.

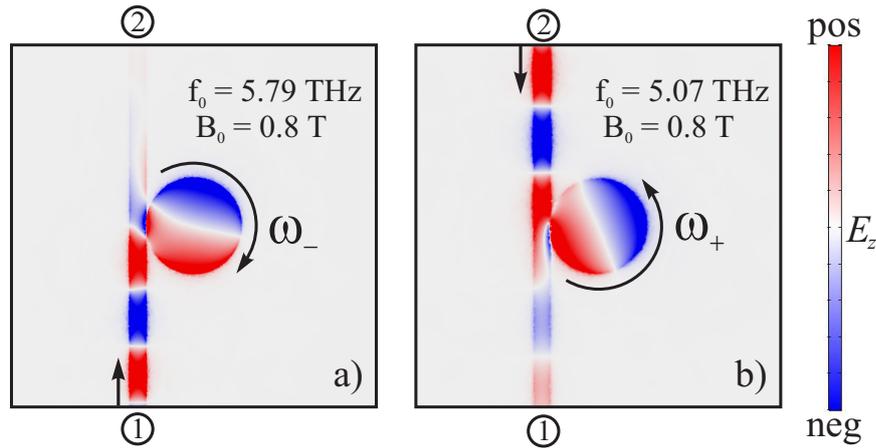


Figura 15 – Excitação pela porta 1(a) e 2(b) com frequências de 5,79 THz e 5,07 THz respectivamente, frequências ω_+ e ω_- .

3.2 Geometria do circulator de 4 portas

Guias de ondas são dispositivos que direcionam a propagação de uma onda eletromagnéticas com a finalidade de transportar a energia contida nesta onda. Neste trabalho foi utilizado grafeno depositado sobre duas camadas dielétricas, uma de sílica (SiO_2) e outra de silício (Si) ambas estruturas são evidenciadas na Figura 16 b). Estes parâmetros foram a base para quaisquer variações de geometria ou parâmetros físicos deste trabalho.

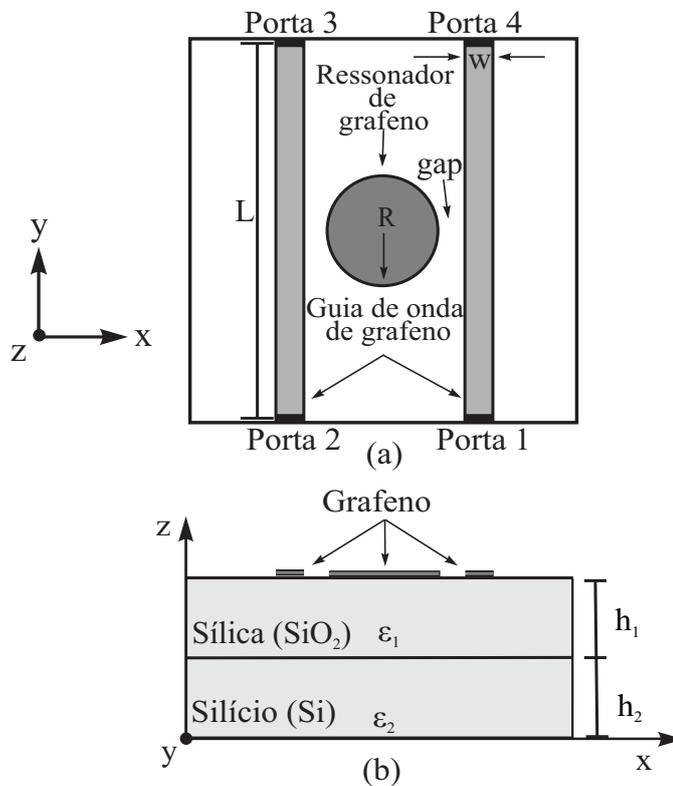


Figura 16 – Descrição dos parâmetros para o circulator de 4 portas.

A geometria de construção do circulator de 4 portas é descrita na Figura 16 a), este

projeto consiste em dois guias de onda acoplados a um ressonador circular em formato de disco, com a distância $g = 5$ nm sendo o acoplamento entre o guia e o ressonador. Ambas as estruturas citadas são baseadas em grafeno. O ressonador está posicionado centralmente entre os guias de ondas que estão dispostos paralelamente, o ressonador possui um raio interno R , sendo ele igual a 600 nm. Os guias são simétricos, possuindo largura W de 200 nm e comprimento L de 4580 nm. Ambos os dispositivos são depositados sobre duas camadas de substratos dielétricos, sendo uma de sílica com permissividade elétrica de 2,09 e espessura $h_1 = 5200$ nm e outra camada de silício com permissividade elétrica de 11,9 e espessura $h_2 = 5200$ nm.

3.3 Funcionamento do dispositivo

Como descrito na seção 2.5, o circulador é um componente passivo não recíproco, isso significa afirmar que em uma mesma frequência o dispositivo vai ter comportamento específico quando o sinal for injetado nas diferentes portas de propagação. Sua função é transmitir a onda eletromagnética em uma porta de entrada e direcionar para uma porta de saída, isolando as demais portas, diminuindo ou exaurindo qualquer vazamento para demais portas, a aplicação do circulador é proteger a fonte que alimenta o circuito contra reflexões indesejadas ao sentido da fonte. O funcionamento do circulador é baseado na incidência de radiação em determinada porta e a transmissão que tomará o sentido horário ou anti-horário de acordo com a direção do campo eletromagnético. Para o circulador obtemos os sentidos de transmissão, $1 \implies 2$; $2 \implies 3$; $3 \implies 4$; $4 \implies 1$, tal esquema é ilustrado na Figura 17. Cabe lembrar que por simetria os sinais transmitidos de $1 \implies 2$ são iguais a $3 \implies 4$, e $2 \implies 3$ são iguais a $4 \implies 1$. O princípio físico está baseado no uso de ondas plasmônicas propagadas na superfície de grafeno, que são guiadas em fitas produzindo assim os plásmos poláritons de superfície (SPP). No ressonador de grafeno obtemos um perfil específico cujo sentido de propagação permite verificar os modos dipolo girantes.

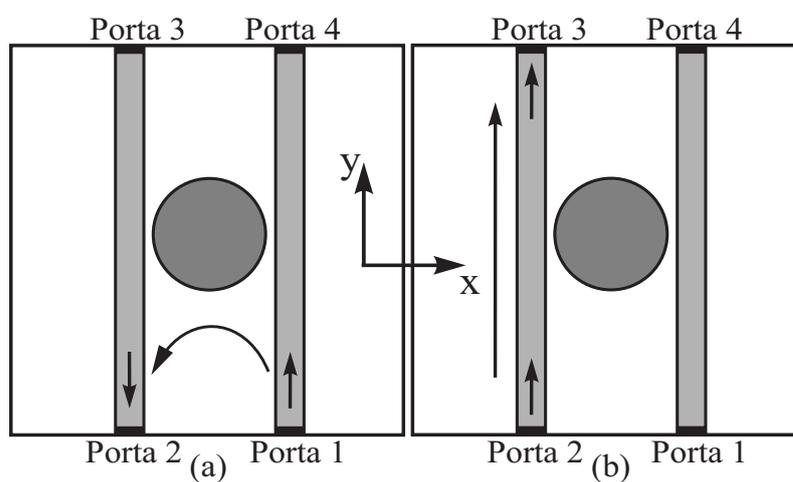


Figura 17 – Funcionamento do circulator de 4 portas do projeto: (a) sinal da porta 1 \Rightarrow 2; (b) sinal da porta 2 \Rightarrow 3.

4 ANÁLISE USANDO TEORIA DE GRUPOS DE $[S]$

Neste capítulo será abordado a análise da geometria do dispositivo usando os elementos de simetria do circulador de quatro portas, usando como base a matriz de espalhamento $[S]$ e os parâmetros $[S]$, através das formalidades da Teoria de Grupos, com o intuito de identificar e reduzir os parâmetros $[S]$, pois muitos deles serão iguais resultando na mesma resposta em frequência.

4.1 Matriz de espalhamento

A matriz de espalhamento é uma ferramenta matemática que relaciona dois estados, inicial e final, em um sistema físico sob um processo de espalhamento. Em particular, a matriz $[S]$ é o que nos permite tornar mais simples, descrever com precisão as propriedades de redes incrivelmente complicadas em altas frequências. Para o caso de um sinal incidente de RF em uma porta, uma fração desse sinal é refletida e enviada de volta para a porta incidente, parte dele entra na porta incidente e sai em (ou se espalha) em algumas ou todas as outras portas (as vezes sendo amplificado ou atenuado). O que resta dessa potência incidente, desaparece como calor ou até radiação eletromagnética. A matriz $[S]$ para um dispositivo com N portas é uma matriz quadrada de coeficientes de ordem N^2 (parâmetros S), cada um representando um possível caminho de entrada e saída do sinal.

Os parâmetros $[S]$ são números complexos, tendo partes reais e imaginárias, ou partes de magnitude e fase, porque ambas a magnitude e a fase do sinal incidente são alteradas pela rede. Frequentemente, nos referimos apenas à magnitude do sinal, pois é frequentemente de maior interesse. Parâmetros S são definidos para uma determinada frequência e impedância do sistema e variam em função da frequência para qualquer rede não ideal.

Parâmetros S são geralmente exibidos em um formato de matriz, com o número de linhas e colunas igual ao número de portas do dispositivo. Por exemplo, um dispositivo de uma porta, terá apenas um parâmetro $[S]$ na matriz de espalhamento, já um dispositivo de duas portas terá quatro parâmetros S em sua matriz de espalhamento, e um dispositivo com três portas terá nove elementos. Para o parâmetro S_{ij} , o subscrito " j " representa a porta excitada (a porta de entrada) e o subscrito " i " refere-se à porta de saída. Assim, S_{11} refere-se à razão da amplitude do sinal que reflete da porta um para a amplitude do sinal incidente na porta um. Parâmetros ao longo da diagonal principal da matriz S são

referidos como coeficientes de reflexão porque se referem apenas ao que acontece em uma única porta, enquanto que os parâmetros S fora da diagonal principal, são chamados de coeficientes de transmissão, porque se referem ao que acontece em uma porta quando é excitada por um sinal incidente em outra porta [55].

4.2 Análise do Parâmetro $[S]$ via Teoria de Grupos

Como mencionado na seção anterior, os coeficientes ou parâmetros da matriz $[S]$ descrevem a resposta em frequência de uma rede de N portas. Através da convenção de que o primeiro índice se refere à porta de resposta, enquanto o segundo índice refere-se à porta de entrada. Porém, o número de portas de um dispositivo em estudo, pode tornar a análise do parâmetro $[S]$ uma tarefa árdua. Assim, pelo uso da Teoria de Grupos na geometria do dispositivo, é possível identificar os elementos de simetria do mesmo, levando a uma redução dos parâmetros $[S]$, pois muito deles serão iguais de maneira a resultar na mesma resposta em frequência.

Portanto, é possível identificar e definir no presente dispositivo proposto de 4 portas, a estrutura dos elementos unitários das matrizes de espalhamento $[S]$, a partir dos elementos de simetria: anti-plano de simetria T_{σ_1} , T_{σ_2} , e o eixo de simetria C_{2v} , correspondente a uma rotação de 180° , vistos na Figura 18.

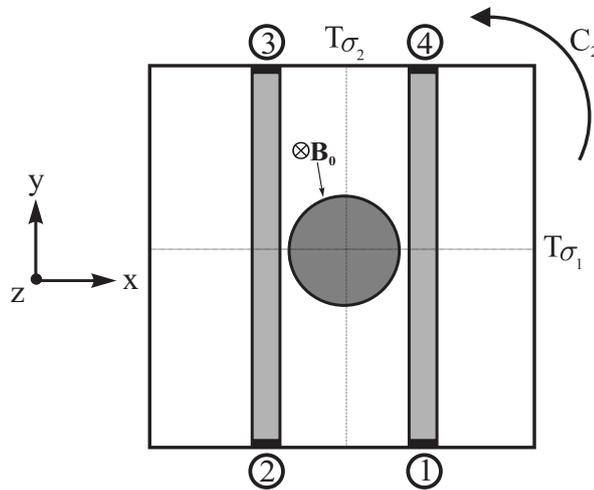


Figura 18 – Representação do plano y e x no circulator de quatro portas, com as componentes do eixo de simetria C_2 e os anti-planos T_{σ_1} e T_{σ_2}

A partir disso, é possível reduzir o número de elementos independentes da matriz $[S]$, considerando os elementos dos grupos C_{2v} , T_{σ_1} , T_{σ_2} e suas respectivas relações de comutação. O elemento C_{2v} , T_{σ_1} e T_{σ_2} , contem todas as informações requeridas sobre a matriz de espalhamento $[S]$. A relação de comutação para C_{2v} é $[R]_{c2}[S] = [S][R]_{c2}$, enquanto que a relação de comutação para T_{σ_1} e T_{σ_2} é $[R][S] = [S^T][R]$ [56], onde $[R]_{c2}$ e $[R]$ são as matrizes de representação dos elementos C_{2v} , T_{σ_1} e T_{σ_2} .

Análise para o caso de simetria de rotação do tipo C_{2v}

Para o caso de simetria de rotação temos a relação $[R]_{c2}[S] = [S][R]_{c2}$

$$[R]_{c2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot [S] \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \\ S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \end{bmatrix}$$

$$[S] \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{bmatrix} \cdot [R]_{c2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{13} & S_{14} & S_{11} & S_{12} \\ S_{23} & S_{24} & S_{21} & S_{22} \\ S_{33} & S_{34} & S_{31} & S_{32} \\ S_{43} & S_{44} & S_{41} & S_{42} \end{bmatrix}$$

$$S_{31} = S_{13}; S_{32} = S_{14}; S_{33} = S_{11}; S_{34} = S_{12}$$

$$S_{41} = S_{23}; S_{42} = S_{24}; S_{43} = S_{21}; S_{44} = S_{22}$$

$$S_{11} = S_{33}; S_{12} = S_{34}; S_{13} = S_{31}; S_{14} = S_{32}$$

$$S_{21} = S_{43}; S_{22} = S_{44}; S_{23} = S_{41}; S_{24} = S_{42}$$

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{13} & S_{14} & S_{11} & S_{12} \\ S_{23} & S_{24} & S_{21} & S_{22} \end{bmatrix}$$

Análise para o caso de simetria de reflexão do tipo $T_{\sigma 1}$

Para o caso de simetria de reflexão temos a seguinte relação $[R][S] = [S^T][R]$

$$[R] \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot [S] \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \end{bmatrix}$$

$$[S^T] \begin{bmatrix} S_{11} & S_{21} & S_{31} & S_{41} \\ S_{12} & S_{22} & S_{32} & S_{42} \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & S_{43} \\ S_{14} & S_{24} & S_{34} & S_{44} \end{bmatrix} \cdot [R] \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{41} & S_{31} & S_{21} & S_{11} \\ S_{42} & S_{32} & S_{22} & S_{12} \\ S_{43} & S_{33} & S_{23} & S_{13} \\ S_{44} & S_{34} & S_{24} & S_{14} \end{bmatrix}$$

$$S_{41} = S_{41}; S_{42} = S_{31}; S_{43} = S_{31}; S_{44} = S_{11}$$

$$S_{31} = S_{42}; S_{32} = S_{32}; S_{33} = S_{22}; S_{34} = S_{12}$$

$$S_{21} = S_{43}; S_{22} = S_{33}; S_{23} = S_{21}; S_{24} = S_{13}$$

$$S_{11} = S_{44}; S_{12} = S_{34}; S_{13} = S_{24}; S_{14} = S_{14}$$

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{13} \\ S_{31} & S_{32} & S_{22} & S_{12} \\ S_{41} & S_{31} & S_{21} & S_{11} \end{bmatrix}$$

Análise para o caso de simetria de reflexão do tipo T_{σ_2}

Para o caso de simetria de reflexão temos a seguinte relação $[R][S] = [S^T][R]$

$$[R] \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot [S] \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \end{bmatrix}$$

$$[S^T] \begin{bmatrix} S_{11} & S_{21} & S_{31} & S_{41} \\ S_{12} & S_{22} & S_{32} & S_{42} \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & S_{43} \\ S_{14} & S_{24} & S_{34} & S_{44} \end{bmatrix} \cdot [R] \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{21} & S_{11} & S_{41} & S_{31} \\ S_{22} & S_{12} & S_{42} & S_{32} \\ S_{23} & S_{13} & S_{43} & S_{33} \\ S_{24} & S_{14} & S_{44} & S_{34} \end{bmatrix}$$

$$S_{21} = S_{21}; S_{22} = S_{11}; S_{23} = S_{41}; S_{24} = S_{31}$$

$$S_{11} = S_{22}; S_{12} = S_{12}; S_{13} = S_{42}; S_{14} = S_{32}$$

$$S_{41} = S_{23}; S_{42} = S_{13}; S_{43} = S_{43}; S_{44} = S_{33}$$

$$S_{31} = S_{24}; S_{32} = S_{14}; S_{33} = S_{44}; S_{34} = S_{34}$$

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{11} & S_{23} & S_{13} \\ S_{13} & S_{14} & S_{11} & S_{12} \\ S_{23} & S_{13} & S_{21} & S_{11} \end{bmatrix}$$

5 ANÁLISE USANDO TCMT

Nesta seção apresentaremos uma análise usando a Teoria de Modos Acoplados Temporal para o circulador de quatro portas e suas respectivas características a respeito do funcionamento do dispositivo bem como suas particularidades.

5.1 Teoria de Modos Acoplados Temporal

A teoria de modos acoplados temporal é um método analítico em que busca descrever sistemas idealizados como guias de onda e cavidades ressonante, uma vez que são perturbados ou acoplados de alguma maneira, dentro da mecânica quântica pode-se encontrar uma semelhante que é a teoria das perturbações dependentes do tempo, desta forma a teoria idealiza um sistema e fornece resultados numéricos para uma estrutura geométrica específica.

As equações do TCMT para sistemas com dois modos de excitação ortogonais de contra rotação podem ser descritos como [57]:

$$\frac{d\mathbf{a}}{dt} = (j\Omega - \Gamma)\mathbf{a} + K^T|s_{in}\rangle \quad (5.1)$$

$$|s_{out}\rangle = C|s_{in}\rangle + D\mathbf{a} \quad (5.2)$$

O vetor a representa as magnitudes dos modos ressonantes da cavidade, enquanto que as matrizes $|s_{in}\rangle$ e $|s_{out}\rangle$ representam as ondas de entrada e saída respectivamente, que pode ser dado por:

$$a = \begin{pmatrix} a^+ \\ a^- \end{pmatrix} \quad (5.3)$$

$$|s_{in}\rangle = \begin{pmatrix} s_{1+} \\ s_{2+} \\ s_{3+} \\ s_{4+} \end{pmatrix} \quad (5.4)$$

$$|s_{out}\rangle = \begin{pmatrix} s_{1-} \\ s_{2-} \\ s_{3-} \\ s_{4-} \end{pmatrix} \quad (5.5)$$

$$\Omega = \begin{pmatrix} \omega_+ & 0 \\ 0 & \omega_- \end{pmatrix} \quad (5.6)$$

$$\Gamma = \begin{pmatrix} 2\gamma_+ + 2\gamma_{i+} & 0 \\ 0 & 2\gamma_- + 2\gamma_{i-} \end{pmatrix} \quad (5.7)$$

As matrizes Ω e Γ representam as frequências de ressonância e as taxas de decaimento dos modos, respectivamente. Os parâmetros γ_+ (γ_-) e γ_{i+} (γ_{i-}) definem a taxa de decaimento dos sentidos anti-horário (horário) dos modos ressonantes relacionados ao acoplamento do guia de onda e as perdas intrínsecas.

5.2 Matriz $[S]$

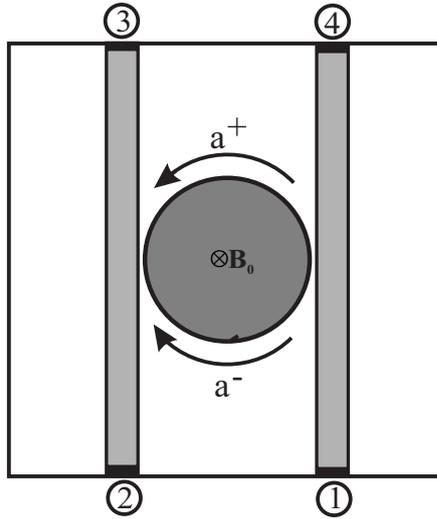


Figura 19 – Esquema de um circulator de 4 portas com campo magnético normal ao plano.

Em um caso ideal, a seguinte condição deve ser satisfeita: a porta 1 é idealmente combinada ($S_{11} = 0$), não há sinal transmitido da porta 2 para a porta 1 ($S_{12} = 0$), e não há sinal transferido da porta 3 para a porta 1 e 2 ($S_{13} = S_{23} = 0$). Se essas condições forem atendidas, a matriz de espalhamento de S_{ideal} de um circulator de quatro portas ideal pode ser definida como:

$$S_{ideal} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & S_{14} \\ S_{21} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_{21} & 0 \end{pmatrix} \quad (5.8)$$

Desde que a condição $S(S^*)^T = S = I$, onde S^* é o complexo conjugado de S (I é a matriz identidade de ordem 4) é satisfeita pela matriz S_{ideal} onde pode ser expresso como:

$$S_{14}S_{14}^*, S_{21}S_{21}^* = 1 \quad (5.9)$$

Da eq. 5.9, pode ser obtida a seguinte relação: $|S_{14}|^2 = |S_{21}|^2 = 1$. Por isso, os números complexos S_{14} e S_{21} podem ser expressados como:

$$S_{14} = |S_{14}|e^{j\phi_{14}} = e^{j\phi_{14}}, S_{21} = |S_{21}|e^{j\phi_{21}} = e^{j\phi_{21}} \quad (5.10)$$

onde ϕ_{21} e ϕ_{14} representam as fases dos parâmetros S_{21} e S_{14} , respectivamente.

A matriz S_{ideal} pode ser reescrita como:

$$S = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ e^{j\phi} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{j\phi} & 0 \end{pmatrix} \quad (5.11)$$

Através da simetria do circulator de 4 portas é possível encontrar a matriz S (Matriz de espalhamento), desta forma ela é composta por valores 0, 1 e $e^{j\phi}$. Os valores 0 e 1, indicam o caso para uma matriz ideal sem perdas do dispositivo internamente ou externamente. Na matriz S os elementos S_{21} e S_{43} apresentam um elemento de fase $e^{j\phi}$ em virtude do caminho percorrido pelo sinal sofrer alterações do ressonador. Quando o sinal é injetado no sentido da porta $1 \Rightarrow 2$, o ressonador provoca grande influência sobre o sinal no que tange a sua propagação para porta 2, o mesmo processo ocorre no sentido da porta $3 \Rightarrow 4$. No entanto quando o sinal percorre da porta $2 \Rightarrow 3$ nota-se pouca interferência do ressonador, o mesmo é válido com o sinal propagado entre as portas $4 \Rightarrow 1$.

A partir da matriz S pode-se encontrar os autovalores e autovetores, resolvendo o polinômio característico através da equação $\det(S_{ideal} - \lambda I)$, onde λ representa os autovalores da matriz ideal.

Desta forma, determinamos os autovalores:

$$\lambda_0 = e^{j\frac{\phi}{2}} \quad (5.12)$$

$$\lambda_1 = -e^{j\frac{\phi}{2}} \quad (5.13)$$

$$\lambda_- = e^{j(\frac{\phi+\pi}{2})} \quad (5.14)$$

$$\lambda_+ = e^{j(\frac{\varphi-\pi}{2})} \quad (5.15)$$

Desta forma, podemos encontrar os autovetores:

$$V_0 = \frac{1}{2}(1, e^{j\frac{\varphi}{2}}, 1, e^{j\frac{\varphi}{2}})^T \quad (5.16)$$

$$V_1 = \frac{1}{2}(1, -e^{j\frac{\varphi}{2}}, 1, -e^{j\frac{\varphi}{2}})^T \quad (5.17)$$

$$V_- = \frac{1}{2}(1, e^{j\frac{\varphi-\pi}{2}}, -1, e^{j\frac{\varphi+\pi}{2}})^T \quad (5.18)$$

$$V_+ = \frac{1}{2}(1, e^{j\frac{\varphi+\pi}{2}}, -1, e^{j\frac{\varphi-\pi}{2}})^T \quad (5.19)$$

Desta maneira os autovetores V_- e V_+ representam o acoplamento com as portas, além de estarem associados aos modos de excitação a^- e a^+ .

5.3 Matrizes C , D e K

Na teoria de modos acoplados a equação característica necessita de matrizes específicas que devem ser encontradas para a solução da derivada temporal de "a", estas matrizes representam os parâmetros do dispositivo. A matriz D Representa o acoplamento do modo excitado no ressonador com as portas de saída, a matriz K representa o sinal incidente nas portas acopladas com o ressonador, esta matriz é a oposta da matriz D , em estruturas recíprocas notamos que $D = K$ uma vez que não importa a direção do sinal propagado, mas neste caso em análise a matriz D é diferente de K , pois o dispositivo tem característica não-recíproca. A matriz C está associada a propagação do sinal nas portas sem a interferência do ressonador ou cavidade. As matrizes K e D são definidas através de considerações empregadas sobre o princípio de conservação de energia e mudanças de reversão de tempo, as matrizes D , K e C podem ser encontradas e definidas por:

$$D^\dagger D = 2\Gamma \quad (5.20)$$

$$K^* \neq D \quad (5.21)$$

$$Ck^* + D = 0 \quad (5.22)$$

observamos que * é o complexo conjugado, as equações de 5.20 a 5.22 podem ser encontradas em [58].

$$D = \sqrt{2} \begin{bmatrix} 0 & \sqrt{\gamma^-} \\ \sqrt{\gamma^+} e^{j\frac{\varphi-\pi}{2}} & 0 \\ 0 & \sqrt{\gamma^-} \\ \sqrt{\gamma^+} e^{j\frac{\varphi+\pi}{2}} & 0 \end{bmatrix} \quad (5.23)$$

$$K = -\sqrt{2} \begin{bmatrix} \sqrt{\gamma^+} e^{j\frac{\varphi+\pi}{2}} & 0 \\ 0 & -\sqrt{\gamma^-} \\ \sqrt{\gamma^+} e^{j\frac{\varphi-\pi}{2}} & 0 \\ 0 & \sqrt{\gamma^-} \end{bmatrix} \quad (5.24)$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.25)$$

5.4 Elementos da matriz de espalhamento

Este modelo matemático atenta para algumas aproximações, onde a reflexão do sinal pela porta emitida é igual a 0, considerando o acoplamento com os modos a^+ e a^- transmitem a onda eletromagnética para os sentidos horário ou anti-horário, os elementos da Matriz S podem ser obtidos através da relação:

$$S = C + DF^{-1}K^T \quad (5.26)$$

onde $F = (i\omega I - i\Omega + i\Gamma_{porta} + \Gamma_{perdas})$ e I é a matriz identidade. Desta forma podemos encontrar os elementos:

$$S_{1\Rightarrow 4} = S_{3\Rightarrow 2} = \left| \frac{2\gamma^+}{j(\omega - \omega^+) + (2\gamma^+ + 2\gamma_i^+)} \right|^2 \quad (5.27)$$

Como observado na equação 5.27 através da simetria e teoria de grupos a transmissão da porta 1 é igual a da porta 2 $S_{1\Rightarrow 2} = S_{3\Rightarrow 4}$.

$$S_{1\Rightarrow 2} = S_{3\Rightarrow 4} = 1 - \left| \frac{2\gamma^+}{j(\omega - \omega^+) + (2\gamma^+ + 2\gamma_i^+)} \right|^2 \quad (5.28)$$

Considerando que o modo propagado pelo guia de onda acopla no ressonador quando o sinal é emitido pela porta 1 o modo a^+ é excitado (sentido anti-horário) desta maneira o ressonador ajuda a onda eletromagnética a ser transmitida para porta 2.

$$S_{1 \Rightarrow 3} = 0 \quad (5.29)$$

$$S_{1 \Rightarrow 1} = S_{3 \Rightarrow 3} = 0 \quad (5.30)$$

Para porta 2 o processo é similar ao esquema representado pela porta 1, no entanto o modo acoplado é o a^- no sentido horário transmitindo o sinal para porta 3, o mesmo processo se repete para as portas 3 e 4 respectivamente.

$$S_{2 \Rightarrow 3} = S_{4 \Rightarrow 1} = 1 - \left| \frac{2\gamma^-}{j(\omega - \omega^-) + (2\gamma^- + 2\gamma_i^-)} \right|^2 \quad (5.31)$$

$$S_{2 \Rightarrow 1} = \left| \frac{2\gamma^+}{j(\omega - \omega^-) + (2\gamma^+ + 2\gamma_i^+)} \right|^2 \quad (5.32)$$

$$S_{2 \Rightarrow 4} = 0 \quad (5.33)$$

$$S_{2 \Rightarrow 2} = S_{4 \Rightarrow 4} = 0 \quad (5.34)$$

6 RESULTADOS NUMÉRICOS

É apresentado neste capítulo, os principais resultados numéricos obtidos para o circulador de 4 portas, provenientes do software COMSOL Multiphysics, que por sua vez utiliza o Método de elementos finitos (MEF) para a resolução dos problemas.

6.1 Resultados do dispositivo

Para analisar a resposta em frequência do modo do dipolo girante para o circulador de 4 portas, foi investigado primeiro o caso do ressonador acoplado lateralmente ao guia de onda, com os parâmetros sendo: largura do guia de onda $W = 200$ nm, comprimento $L = 4580$ nm, raio R do ressonador sendo 600 nm, depositado em um substrato de sílica e silício respectivamente com espessuras 5200 nm, gap = 5nm e potencial químico de 0,15 eV, como observado na Figura 20. Primeiro foi injetado o sinal pela porta 1 e depois pela porta 2, magnetizando o ressonador através de um campo B_0 no plano normal ao dispositivo.

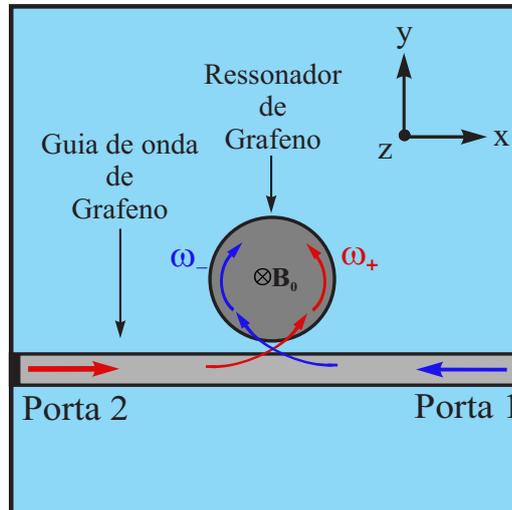


Figura 20 – Esquema do ressonador de grafeno acoplado lateralmente a um guia de onda

Em função do aumento do campo magnético aplicado, ocorre o afastamento das frequências de ressonância como visto na Figura 21, onde é possível observar os modos dipolos girantes ω_+ e ω_- se afastando de acordo com o aumento do campo B_0 aplicado.

A Figura 21 indica o princípio de funcionamento do dispositivo. percebe-se que para o caso onde o campo magnético B_0 é igual a 0, não há separação das frequências ω_+ e ω_- , já quando o campo magnético é aumentado gradativamente, a interação entre as frequências dos modos dipolos girantes irá diminuindo conforme o aumento do campo. É

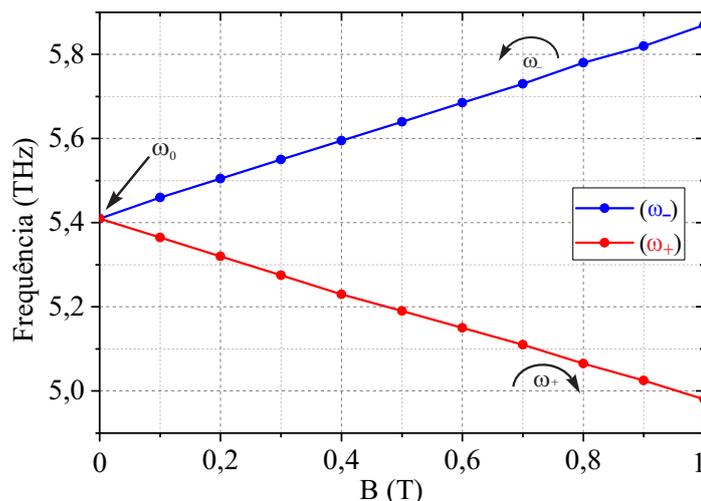


Figura 21 – Desdobramento de frequência dos modos ressonantes ω_+ e ω_-

importante escolher um campo magnético onde há uma baixa interação entre as frequências ω_+ e ω_- . Para o presente trabalho foi escolhido o campo $B_0 = 0,8$ T.

Foi analisado também a influência de outros valores de gap, para saber se há alguma alteração na resposta em frequência do ressonador. Como visto na Figura 22, foi escolhido um campo fixo de $B_0 = 0,8$ T e foi feita a variação do parâmetro gap para valores de 2,5 nm, 5 nm, 7,5 nm e 10 nm, com a incidência do sinal feita através da porta 1 referente a Figura 20. Pode-se observar através da Figura 22, que a frequência de ressonância de 5,79 Thz não se altera para outros valores de gap.

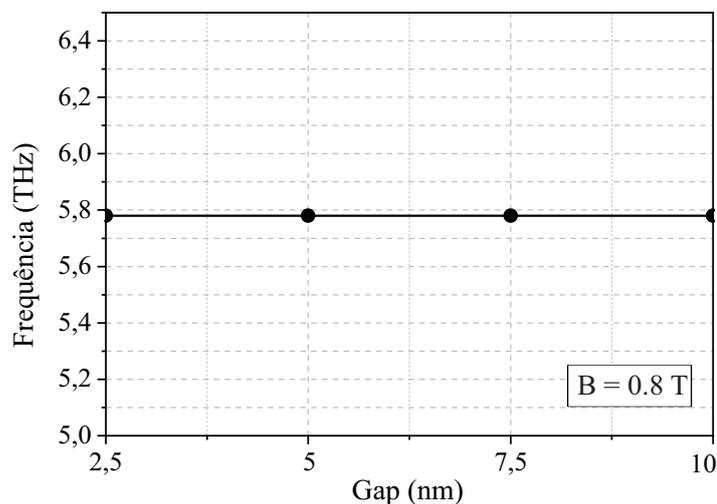


Figura 22 – Variação de diferentes gap para um campo $B_0 = 0,8$ T

Foi efetuado também uma análise da distribuição do campo elétrico da componente E_z no ressonador, onde na Figura 23, as ondas SPP guiadas através do guia de onda, excitam no ressonador circular o modo com rotação no sentido horário com frequência ω_- e rotação de sentido anti-horário com frequência ω_+ .

Ainda tratando-se do caso do ressonador acoplado a um guia de onda paralelo, foi

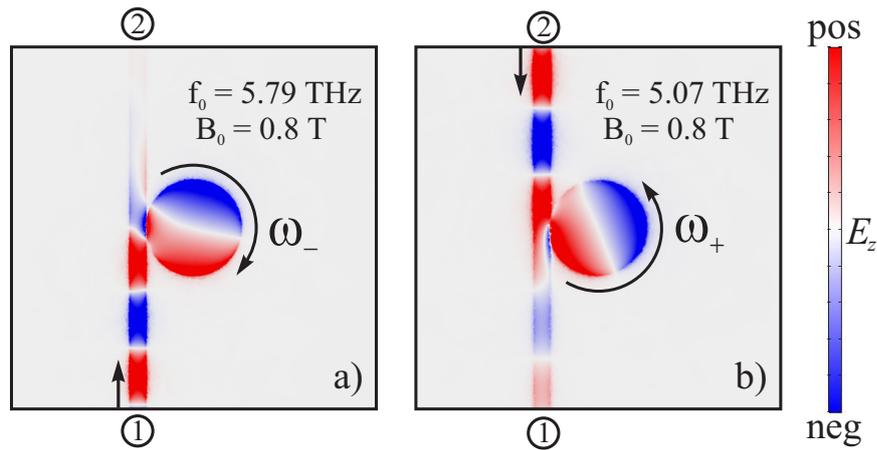


Figura 23 – Distribuição do campo E_z para o estado magnetizado com campo aplicado $B_0 = 0,8$ T a) Excitação na porta 1; b) Excitação na porta 2

evidenciado o distanciamento das frequências de ressonância ω_- e ω_+ , devido ao campo magnético aplicado, onde é observado a resposta em frequência do parâmetro S da curva S_{12} e S_{21} na Figura 24.

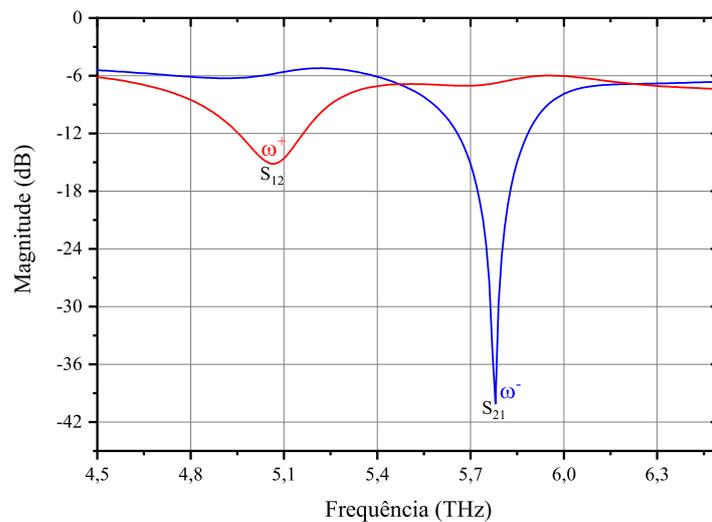


Figura 24 – Frequências ω_+ e ω_- sobrepostas. $B_0 = 0,8$ T e gap = 5nm.

Foi adicionado simetricamente outro guia de onda ao dispositivo, e feito o estudo para saber a resposta em frequência mediante excitação via portas 1 e 2, como visto no esquema da Figura 25. Ao adicionar dois guia de ondas, o circulator de 4 portas apresentou frequência central de operação de 5,23 THz, para a excitação através da porta 1, o dispositivo apresentou perdas de inserção de -3,34 dB , reflexão de -15,06 dB e isolamentos das portas 3 e 4 de -12,43 dB e -14,08 dB respectivamente. Para a excitação através da porta 2, apresentou perdas de inserção de -2,15 dB, reflexão de -13,74 dB e isolamentos das portas 1 e 4 de -16,05 dB e -12,85 dB respectivamente. As perdas referente

ao guia de onda foram descontadas.

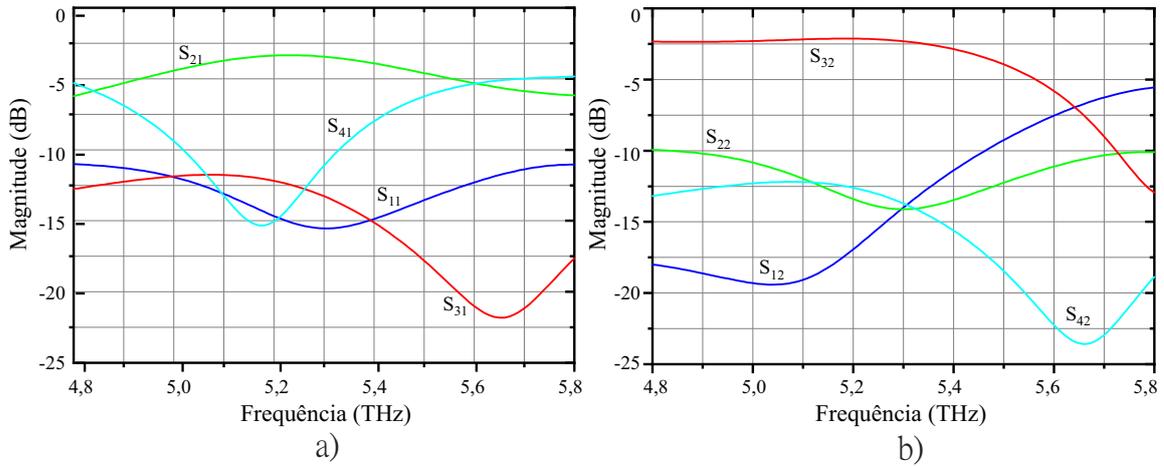


Figura 25 – a) Resposta em frequência do circulator para excitação na porta 1, b) Resposta em frequência do circulator para excitação na porta 2

O princípio de funcionamento descrito na seção anterior é apresentado na Figura 26 a), 26 b), 26 c) e 26 d). O sinal é injetado através da porta 1 e transmitido para porta 2, quando emitido na porta 2 é transmitido para porta 3, por simetria de rotação quando emitido na porta 3 e na porta 4 temos o comportamento similar as portas 1 e 2. a fig. 26 apresenta a distribuição de campo elétrico com incidência de um campo externo $B_0 = 0,8$ T normal ao plano sob frequência central de 5,23 THz.

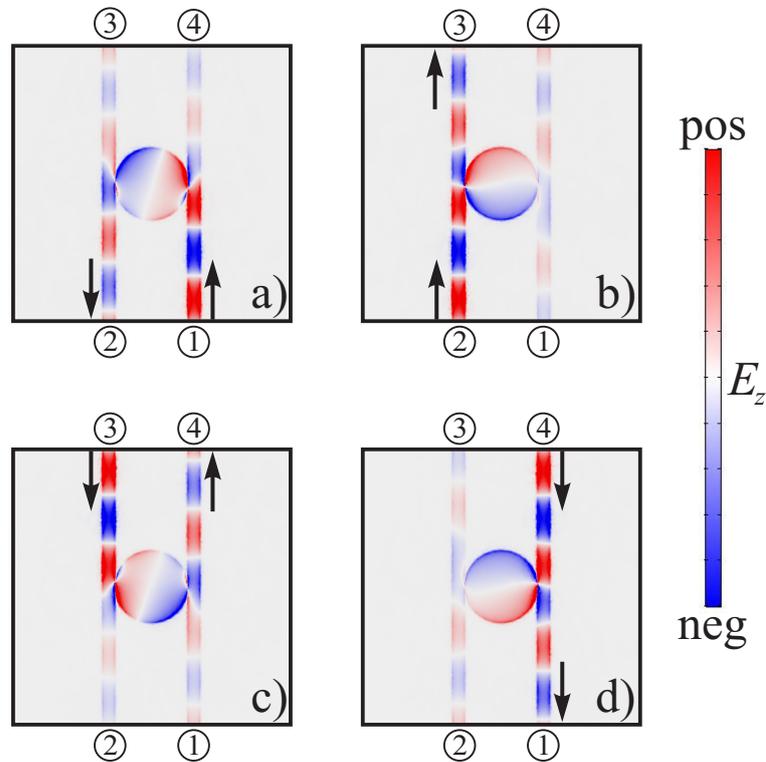


Figura 26 – Distribuição de campo E_z com injeção de sinal: a) Porta 1 \implies Porta 2; b) Porta 2 \implies Porta 3; c) Porta 3 \implies Porta 4; d) Porta 4 \implies Porta 1;

As portas 1, 2, 3 e 4 excitam ondas plasmônicas na interface entre o grafeno e o dielétrico. A descontinuidade presente entre o grafeno-dielétrico introduz modos particulares de oscilações de plasmas, conhecidos na literatura como surface plasmon polariton (SPP), o qual são direcionadas através dos guias de onda de grafeno que por sua vez, excitam ressonâncias plasmônicas com perfil de dipolo girante na cavidade ressonante, também de grafeno.

6.1.1 Perdas do guia de onda

Quando observado a resposta em frequência do circulador (parâmetros S), consideramos somente as perdas relacionadas ao ressonador. Para isto, foram descontadas todas as perdas do guia de onda conectado ao ressonador, neste sentido foi feita uma análise onde somente o guia de onda é projetado sem o acoplamento com o ressonador, como observado na Figura 27, Em vista disso, colocamos o guia de onda em linha reta com o comprimento de L e largura W sem a cavidade ressonante. Por conseguinte, é possível encontrar as características do dispositivo referente somente ao ressonador.

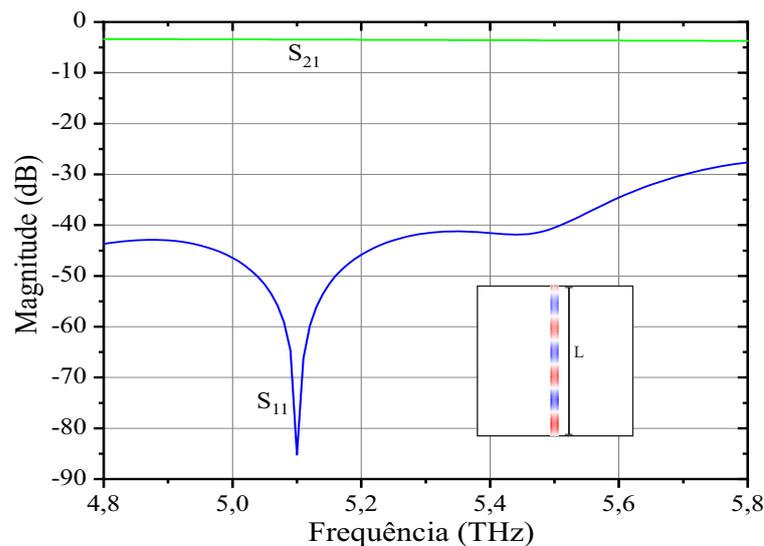


Figura 27 – Resposta em frequência referente ao guia de onda de grafeno com $W = 200$ nm, $L = 4850$ nm e $\epsilon_F = 0,15$ eV. Na parte inferior temos a distribuição de campo E_z

6.2 Influência dos parâmetros geométricos do circulador

6.2.1 Gap g

A influência na variação da distância do ressonador para o guia de onda foi investigada. Definido como parâmetro g , pode-se verificar na Figura 28 a geometria em questão. O gap investigado foi de 2,5 nm, 5 nm, 7,5 e 10 nm, os demais parâmetros como comprimento do guia de onda, largura do guia, raio do ressonador, o potencial químico e

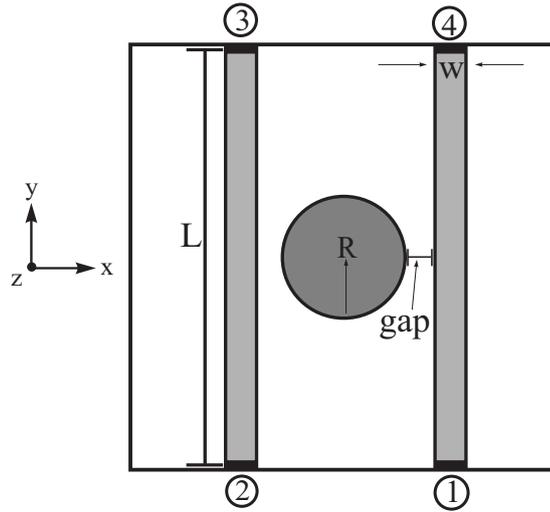


Figura 28 – Geometria para variação do parâmetro gap.

o campo magnético, foram fixados em $L = 4850$ nm, $W = 200$, $R = 600$ nm, $\epsilon_F = 0,15$ eV e $B_0 = 0,8$ T.

Tais resultados são evidenciados da Figura 29, onde é possível observar que com uma aproximação de 2,5 nm, há um bom acoplamento, mas a perda de inserção não é tão alta, conforme o aumento da distância e menor o acoplamento entre o ressonador e o guia de onda, a perda de inserção é aumentada. Para as demais análises, foi escolhido o gap com valor de 5 nm.

6.2.2 Elipse

Foi investigado a influência da alteração do ressonador com geometria em formato de disco para o formato de elipse, ilustrado na Figura 30. Foi verificado a variação da excentricidade do semi-eixo a e semi-eixo b , os demais parâmetros foram fixados, como o $g = 5$ nm, $W = 200$, $L = 4850$, potencial químico de 0,15 eV e $B_0 = 0,8$ T. Foi definido como variação de 1% sendo o semi-eixo a ($R + R * 0,01$) = 606 nm e semi-eixo b ($R - R * 0,01$) = 594 nm; o valor de 2% com o semi-eixo a ($R + R * 0,02$) = 612 nm e semi-eixo b ($R - R * 0,02$) = 588 nm e o valor de 3% sendo o semi-eixo a ($R + R * 0,03$) = 618 nm e semi-eixo b ($R - R * 0,03$) = 582 nm.

A Figura 31 ilustra a resposta em frequência para a variação do ressonador com forma geométrica de disco para uma elipse com excentricidade de 1%. É possível notar uma melhora com a adição de pequeno valor da elipse, o isolamento da porta 3 teve níveis melhores e também em relação a reflexão, comparando os casos com e sem elipse.

A Figura 32 evidencia os parâmetros S em relação a variação de elipse do caso de 2% e 3%. É possível notar o alinhamento dos picos das curvas para o caso de 3%. Analisando a magnitude do valor de 3% sendo o semi-eixo $a = 618$ nm e semi-eixo $b = 582$ nm, para a frequência central de 5,1 THz, as perdas de inserção estão em torno de

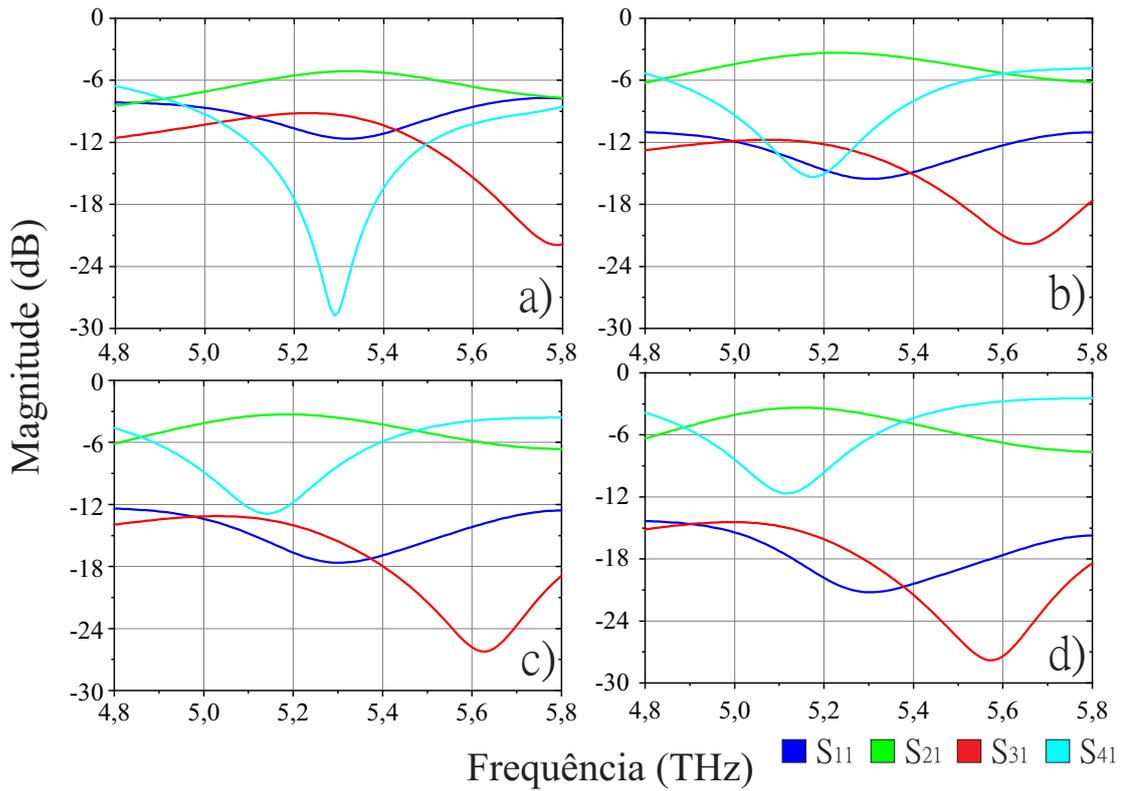


Figura 29 – Resposta em frequência da variação do parâmetro *g* para diferentes valores: a) 2,5 nm; b) 5 nm; c) 7,5 nm; d) 10 nm

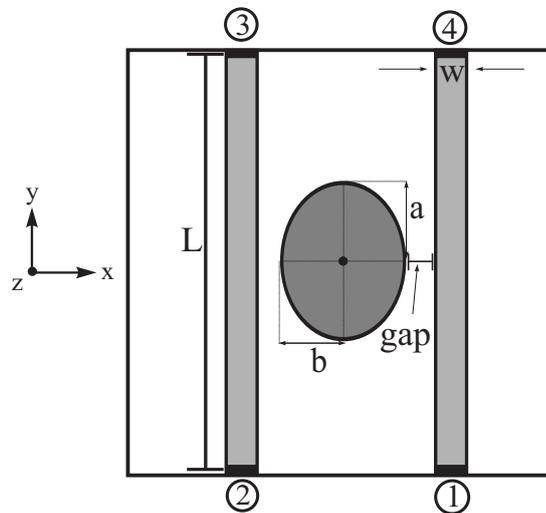


Figura 30 – Geometria evidenciando o ressonador elíptico.

-3,8 dB, a reflexão em torno de -26 dB, o isolamento na porta 3 sendo -38,9 dB e porta 4 em torno de -9,5 dB.

Após isso, foi escolhido para seguir a investigação, o valor de excentricidade igual a 3%, onde observamos o alinhamento das curvas em torno da frequência central de 5,1 Thz. Então foi analisada a resposta em frequência para o caso onde o sinal é injetado através da porta 1 e em seguida através da porta 2 , como pode ser visto na Figura 33. Analisando a

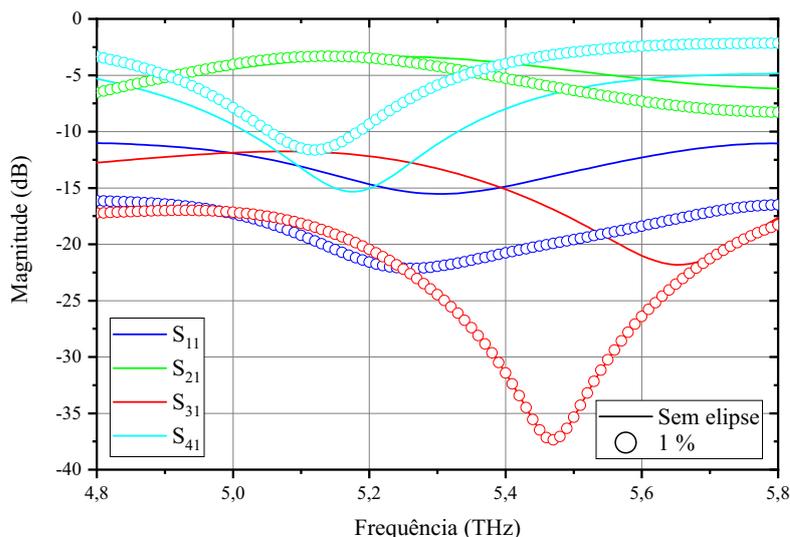


Figura 31 – Resposta em frequência para os casos do ressonador em formato de disco e elipse com 1%.

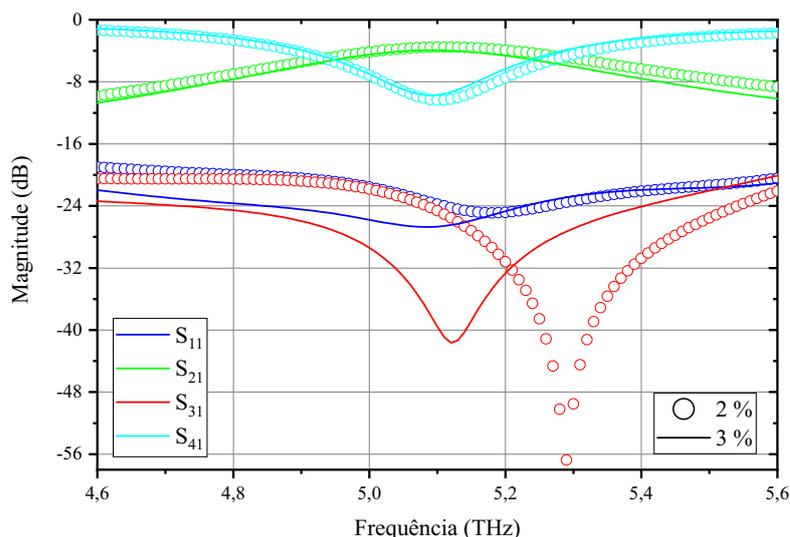


Figura 32 – Resposta em frequência para a excentricidade da elipse com valores de 2% e 3%.

excitação através da porta 2, nota-se que para a frequência central de funcionamento de 5,1 THz, analisando a incidência da onda através da porta 2, a perda de inserção da porta 2 para a 3 é em torno de -0,4 dB, a reflexão em torno de -25,3 dB, a transmissão da porta 2 para 1 em torno de -16,5 dB, e o isolamento de sinal da porta 4 em torno de -37 dB.

6.2.3 Concavidade C

Ainda analisando a influencia da alteração dos parâmetros geométricos, afim de melhorar as características do dispositivo, foi feita uma alteração na geometria do guia de onda, chamado de parâmetro C , que é uma concavidade em torno das laterais do ressonador. Essa concavidade tem uma curvatura que contorna o ressonador elíptico, sendo

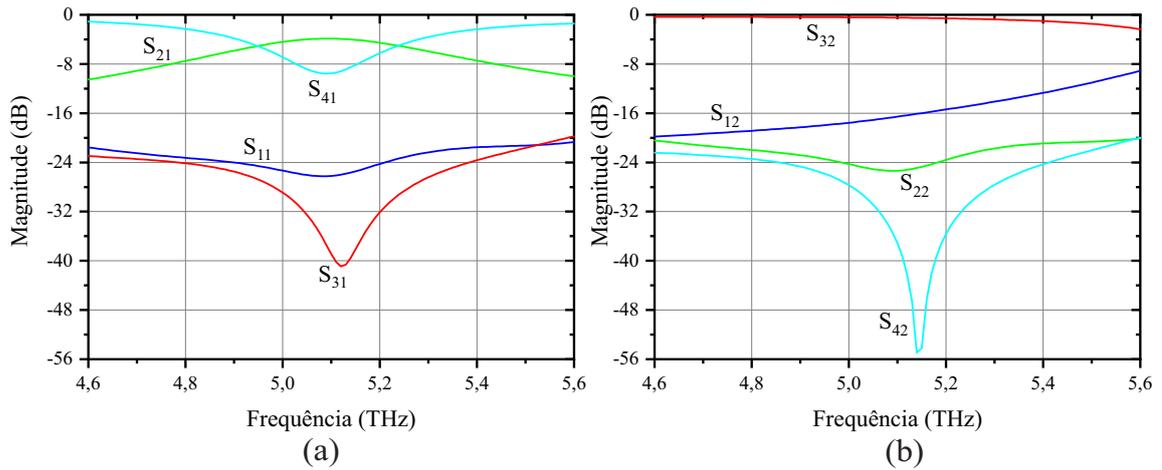


Figura 33 – Resposta em frequência para a excitação através da: a) porta 1; b) porta 2.

alterada a distancia entre os extremos do parâmetro C . Apenas foi adicionado o parâmetro C , os demais valores da geometria permaneceram os mesmos. Assim sendo a elipse com semi-eixo $a = 618$ nm, semi-eixo $b = 582$ nm, $W = 200$, $L = 4580$ nm, $g = 5$ nm entre o guia de onda e o ressonador e $\epsilon F = 0,15$ eV. Na Figura 34 pode-se verificar o parâmetro geométrico C . Foram feitas quatro variações, sendo elas: $C \approx 160$ nm, $C \approx 230$ nm, $C \approx 280$ nm e $C \approx 293$ nm.

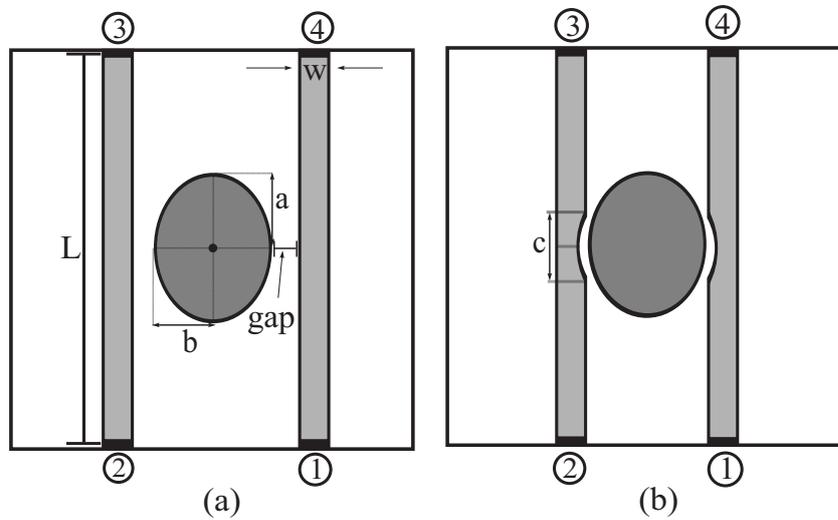


Figura 34 – Geometria referente ao parâmetro c

Desta forma, de acordo com o ângulo combinado com o gap de acoplamento obteve-se os resultados da Figura 35, na Figura 35 a) com acoplamento de 160 nm, observamos o dispositivo com frequência central de 5,15 THz, perdas de inserção de -2,87 dB, reflexão de -22,4 dB e isolamentos das portas 3 e 4 em torno de -29,3 dB e -12,91 dB respectivamente. É observado na Figura 35 b) a concavidade de 230 nm, e o dispositivo apresentou frequência central de 5,19 THz, perdas de inserção de -2,84 dB, reflexão de -16,6 dB e isolamentos das portas 3 e 4 de -20,4 dB e -15,7 dB respectivamente. É visto na Figura 35 c) o parâmetro C de 280 nm, neste caso, o dispositivo apresentou frequência central de 5,03 THz, perdas

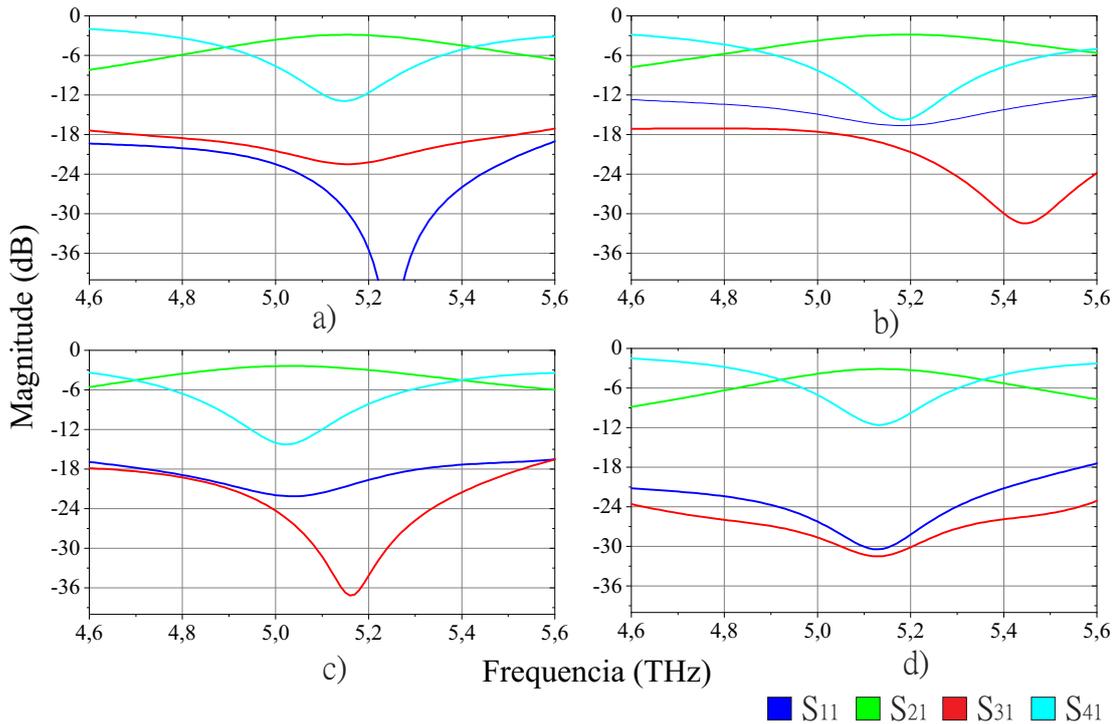


Figura 35 – Variação do parâmetro C : a) ≈ 160 nm, b) ≈ 230 nm, c) ≈ 280 nm, e d) ≈ 293 nm.

de inserção de $-2,54$ dB, reflexão de $-20,3$ dB e isolamentos das portas 3 e 4 de $-32,6$ dB e $-15,2$ dB respectivamente, e por último com parâmetro C sendo 293 nm visto na Figura 35 d) o dispositivo apresentou frequência central de $5,13$ THz, perdas de inserção de $-3,1$ dB, reflexão de $-31,5$ dB e isolamentos das portas 3 e 4 de $-30,4$ dB e $-11,6$ dB respectivamente.

Com o valor de 160 nm, embora os níveis como o isolamento na porta 3 e reflexão tenham melhorado, as curvas se desalinham. Para o valor de 230 nm, o isolamento na porta 4 melhorou em relação ao anterior, mas a curva de isolamento da porta 3 piorou. Já para o valor de C igual a 280 nm, foi o melhor caso obtido, com os picos das curvas todos alinhados, maior perda de inserção, reflexão e isolamentos na porta 3 e 4 com bons níveis de magnitude. Para o caso com o C sendo 293 nm, ainda se permanece o alinhamento das curvas, mas, embora a reflexão tenha melhorado, o isolamento da porta 4 piorou em relação aos parâmetros anteriores.

Sendo assim, por apresentar melhores resultados discutidos acima, foi escolhido para análise o parâmetro C sendo de 280 nm. Logo, analisou-se a excitação através da porta 1 e 2, conforme visto na Figura 36. A largura de banda definida em -3 dB das curvas de ressonância das portas de saída (parâmetros S_{21} e S_{32}) e -20 dB das curvas de ressonância das portas isoladas (parâmetros S_{31} e S_{42} , é em torno de $5,7\%$. A Figura 37 exibe o mapa de campo da componente eletromagnética E_z para a frequência central de ressonância $f_0 = 5,03$ Thz.

Pode-se observar que com a adição da concavidade C , os níveis de magnitude

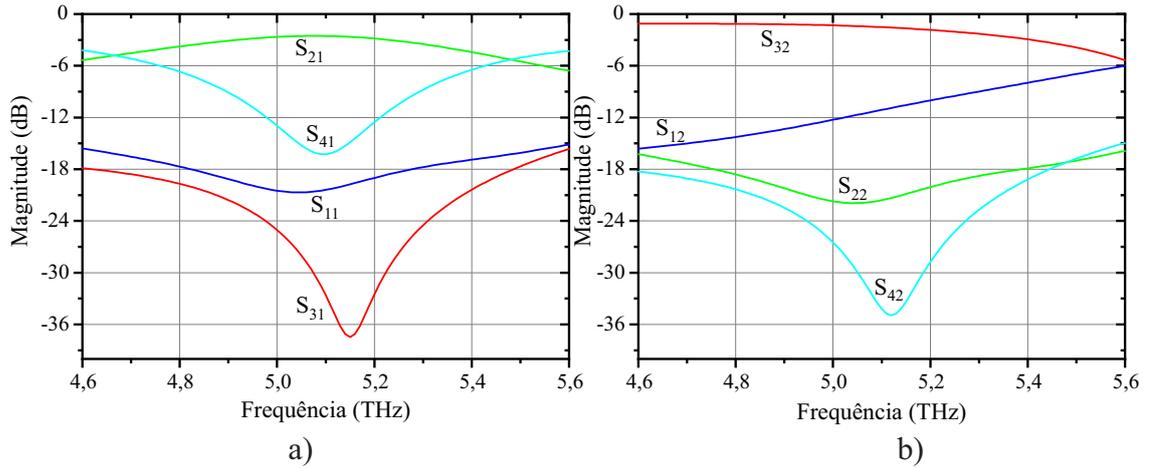


Figura 36 – Resposta em frequência para o parâmetro $C = 280$ nm. a) porta 1, b) porta 2.

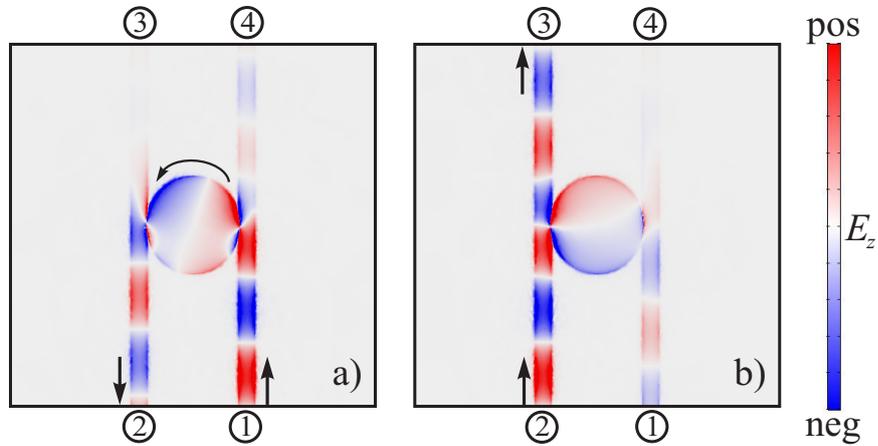


Figura 37 – Distribuição do campo E_z para as fontes de sinais através das: a) porta 1, b) porta 2.

melhoram em relação a variações anteriores. Sendo assim, analisando as variações das seções acima, ficou definido como parâmetro de referencia final para o dispositivo, a largura do guia de onda sendo $W = 200$ nm, o comprimento do guia de onda sendo $L = 4580$ nm, o gap de acoplamento entre o ressonador e o guia de onda sendo $g = 5$ nm, o ressonador elíptico com semi-eixo $a = 618$ nm e semi-eixo $b = 582$ nm, a curvatura da concavidade C sendo de 280 nm, o potencial químico sendo $\epsilon_F = 0,15$ eV e o campo magnético DC de polarização 0,8 T.

6.3 Dependência da energia de Fermi

Nesta seção variamos a Energia de Fermi do grafeno, com o objetivo de se obter um maior controle da frequência de operação do circulator de 4 portas elíptico, isso é possível devido a pequenas alterações na densidade dos portadores de carga para o grafeno que por fim varia a condutividade do grafeno. Desta forma é possível controlar a frequência de operação de trabalho do circulator através da variação do potencial químico.

Variou-se a energia de Fermi de 0,1 eV a 0,3 eV, e as respostas em frequência estão representadas na Figura 38. É importante destacar que o mesmo potencial químico está presente no ressonador e nos guias de ondas. Como base usamos o potencial de 0,15 eV onde encontrou-se uma frequência central de 5,03 THz com perdas de inserção de -2,54 dB, para o potencial químico de 0,10 eV obteve-se uma frequência central 4,13 THz, com perdas de inserção de -3,55 dB, para o potencial químico de 0,2 eV obteve-se uma frequência central de 6,11 THz com perdas de inserção de -2,82 dB, para o potencial químico de 0,25 eV obteve-se uma frequência central de 6,9 THz e perdas de inserção de -2,33 dB e para o potencial químico de 0,3 eV obteve-se uma frequência central de 7,6 THz com perdas de inserção de -1,97 dB. Tomando como referência para a energia de Fermi de 0,15 eV, ao aumentarmos o potencial químico, a frequência de operação é deslocada para a direita e quando diminuimos ela é deslocada para a esquerda, cabe destacar que a partir dessas alterações os isolamentos e reflexões também sofrem modificações em seus níveis.

A partir da energia de Fermi pode-se obter o controle dinâmico da frequência de operação do dispositivo, na Figura 38 observamos o aumento do potencial químico juntamente com o aumento das perdas de inserção e a frequência central do dispositivo, ambos os casos sofrem um crescimento linear.

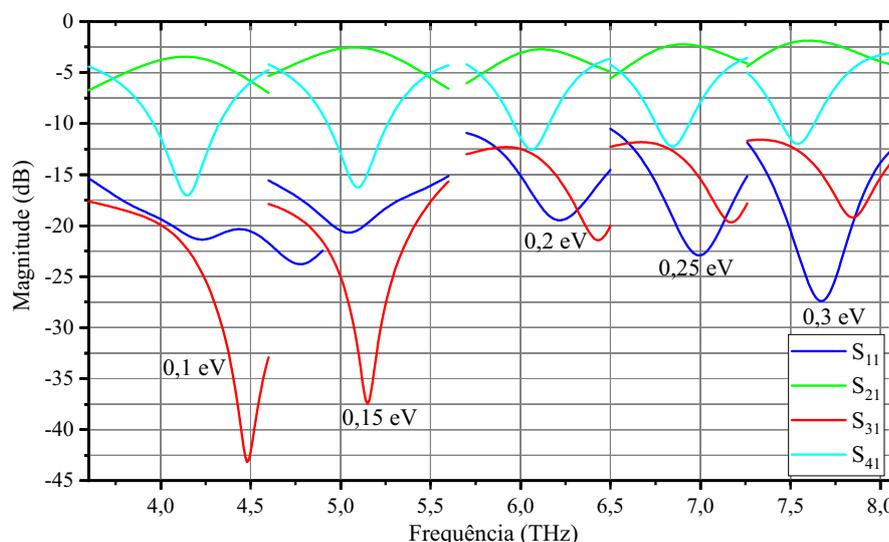


Figura 38 – Variação da Energia de Fermi com deslocamento da frequência central.

6.4 Comparação entre resultados analíticos e numéricos

Foi realizado uma comparação entre os resultados analíticos fornecidos pelo TCMT apresentado baseada em dados e aqueles obtidos a partir de simulações computacionais de onda completa realizadas com COMSOL Multiphysics. A comparação é apresentada nas Figuras 39 e 40, e pode-se verificar um bom acordo entre os resultados analíticos e computacionais.

Os parâmetros dos modos de contra-rotação a_+ e a_- necessários para o cálculo analítico dos coeficientes de transmissão são: $\omega_+ = 3,1604 \times 10^{13} \text{ rads}^{-1}$, $\omega_- = 3,6380 \times 10^{13} \text{ rads}^{-1}$, $\gamma_+ = 10 \times 10^{11} \text{ rads}^{-1}$, $\gamma_{i_+} = 2,5 \times 10^{11} \text{ rads}^{-1}$, $\gamma_- = 6,3 \times 10^{11} \text{ rads}^{-1}$ e $\gamma_{i_-} = 5 \times 10^{11} \text{ rads}^{-1}$

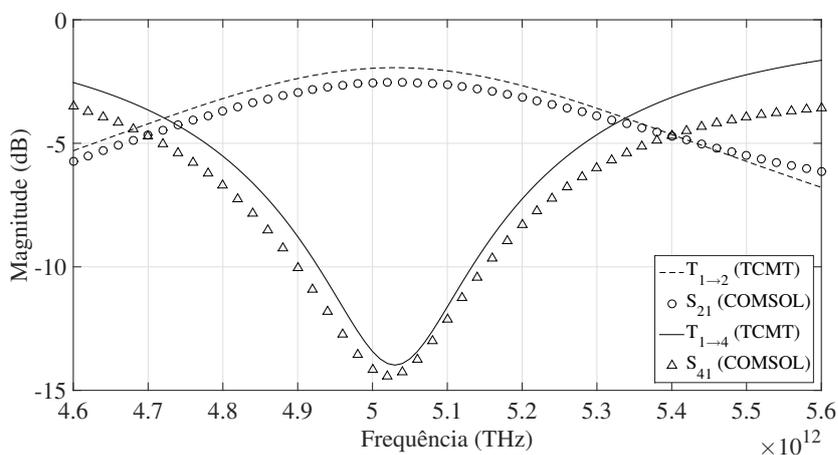


Figura 39 – Comparação entre os resultados analíticos (TCMT) e computacional (COM-SOL) para excitação na porta 1.

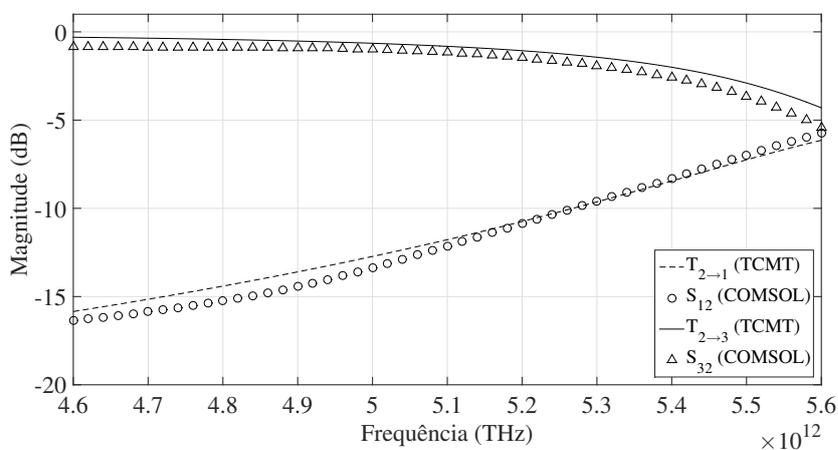


Figura 40 – Comparação entre os resultados analíticos (TCMT) e computacional (COM-SOL) para excitação na porta 2.

Conclusão

Neste trabalho foi abordado um novo modelo de circulador de quatro portas, baseado em grafeno, que pode ser utilizado em sistemas de comunicações ópticas.

Pode-se observar que o objetivo principal deste trabalho foi alcançado, que foi a modelagem computacional e análise via parâmetros S, dos níveis de magnitude de um novo dispositivo.

Foi sugerido e confirmado por simulações numéricas a capacidade de realização do controle dinâmico do circulador de quatro portas baseado em grafeno e operando na região de THz. Este dispositivo possui uma estrutura muito simples composta por grafeno depositado sobre um substrato dielétrico.

A estrutura do dispositivo foi otimizada através do ajuste de seus parâmetros geométricos e físicos, para que os mesmos obtivessem maiores níveis de magnitude e melhores perdas de inserção. A frequência central de operação do circulador pode ser alterada pela energia de Fermi do grafeno.

As simulações do dispositivo, demonstram que o mesmo opera na frequência central de 5,1 THz, tendo como largura de banda 5,7 % considerando o nível de isolamento de -15 dB, perdas de inserção melhor que -2,5 dB, reflexão de -20,3 dB e isolamentos da porta 3 e 4 com níveis de -32,6 dB e -16,2 dB respectivamente, com campo magnético DC de polarização 0,8 T.

Pode-se observar que o dispositivo apresentara uma boa largura de banda, assim como, boas características de transmissão e isolamento, além do controle dinâmico através da energia de Fermi do grafeno, sendo uma excelente opção para utilização em circuitos ópticos integrados.

Trabalhos futuros

Como proposta para trabalhos futuros, sugerimos:

- Análises do circulador de 4 portas com outros modos na cavidade ressonante, como o quadrupolo e hexapolo;
- Aprimoramento de parâmetros usando diferentes métodos de otimização;
- Tentar validar experimentalmente o dispositivo apresentado neste trabalho.

Produção científica e tecnológica

A seguir será listada toda a produção científica e tecnológica que está diretamente associada a este trabalho:

- ✓ Trabalhos apresentados em conferências nacionais e internacionais:
- DMITRIEV, V. ; OLIVEIRA, T. L. ; BARROS, G. F. S. ; CASTRO, W. O. P. ; OLIVEIRA, C. B. ; NOBRE, F. D. M. ; MELO, G. S. ; MATOS, SAMARA . Guided-wave and free-space nonreciprocal and control graphene THz components. In: Graphene Brazil 2019 International conference, 2019, Rio de Janeiro. Graphene Brazil International Summit, 2019.
- DMITRIEV, V. ; OLIVEIRA, T. L. ; BARROS, G. F. S. ; CASTRO, W. O. P. . THz graphene four-port circulators with elliptic resonators. In: META, 2019, Lisboa. The 10th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics, 2019.
- L. O. Thiago, V. Dmitriev, W. Castro, N. D. Francisco, Jr. C. Marcelino, and B. F. Gabriel, “Graphene-based four-port THz circulator”, SBFOTON2018 / Sociedade Brasileira de Ótica e Fotônica, on October 8th, (2018).
- DMITRIEV, VICTOR ; CASTRO, WAGNER ; MATOS, SAMARA ; NOBRE, FRANCISCO ; OLIVEIRA, TIAGO ; BARROS, GABRIEL ; MELO, GERALDO . Nonreciprocal and Control THz Components Based on Planar Graphene Structures. In: Latin America Optics and Photonics Conference, 2018, Lima. Latin America Optics and Photonics Conference, 2018. p. Th2C.3.
- W. Castro, V. Dmitriev, N. D. Francisco, T. Oliveira, and B. F. Gabriel, “Four-port THz Circulator Based on Graphene Ring Resonator”, II Congresso de Tecnologia e Desenvolvimento na Amazônia, em 9 de Novembro, (2018).
- W. Castro, V. Dmitriev, M. S. Geraldo, T. Oliveira, and C. Oliveira, “Graphene-Based Multifunctional THz Device”, II Congresso de Tecnologia e Desenvolvimento na Amazônia, em 9 de Novembro, (2018).

✓ A geração do pedido de patente do modelo de circulator que está em processo de registro intitulado:

- Circuladores controláveis de quatro portas na faixa de THz baseados em grafeno com ressonadores elípticos. - NR: BR 10 2019 021054-0, Depósito: 07/10/2019.

Referências

- [1] H. Toba, K. Oda, K. Nakanishi, N. Shibata, K. Nosu, N. Takato, and M. Fukuda, "A 100-ch optical WDM transmission/distribution at 622 Mbits/s over 50 km," (*IEEE J. Lightwave Technol*), p. 8 (1990) 1396-1401.
- [2] I. Kaminow, C. Doerr, C. Dragone, T. Koch, U. Koren, A. Saleh, ... and R. Barry, "A wideband all-optical WDM network" (*IEEE Journal on Selected Areas in Communications*), v. 14, n. 15, p. 780, (1996).
- [3] X. Zhang, J. Xu. "Introduction to THz wave photonic". V. 29. New York: Springer, 2010.
- [4] N. Nagatsu, S. Okamoto, K. Koga, and K. Sato, "Flexible OADM architecture and its impact on WDM ring evolution for robust and large-scale optical transport networks," (*IEICE transactions on communications*) v. 82.8-B n. 8, p. 1105, (1999).
- [5] H. Toba, K. Oda, K. Inoue, K. Nosu, and T. Kitoh, "An optical FDM-based self-healing ring network employing arrayed-waveguide grating filters and EDFA's with level equalizers" (*IEEE Journal on selected areas in communications*), v. 14, n. 5, p.800, (1996).
- [6] M. Tonouchi, "Cutting-edge terahertz technology". (*Nature photonics*) v.1, n. 2, p. 97, (2007).
- [7] K. Katayama, K. Takano, S. Amakawa, S. Hara, A. Kasamatsu, K. Mizuno, ... and M. Fujishima, "20.1 A 300GHz 40nm CMOS transmitter with 32-QAM 17.5 Gb/s/ch capability over 6 channels" (*IEEE International Solid-State Circuits Conference ISSCC*) p. 342, (2016).
- [8] F. Bonaccorso, Z. Sun, T. Hasan, and A. C. Ferrari, "Graphene photonics and optoelectronics" (*Nature Photonics*, n. 4, p. 611, (2010).
- [9] A. Ferrari, F. Bonaccorso, V. Fal'ko, K. Novoselov, S. Roche, P. Boggild, S. Borini, F. Koppens, V. Palermo, N. Pugno, J. Garrido, R. Sordan, A. Bianco, L. Ballerini, M. Prato, E. Lidorikis, J. Kivioja, C. Marinelli, T. Ryhanen, A. Morpurgo et al., "Science and technology roadmap for graphene, related two-dimensional crystals, and hybrid systems" (*Nanoscale*), v. 7, n. 11, p. 4598, (2015).
- [10] V. Dmitriev, C. M. Nascimento, "Planar THz electromagnetic graphene pass-band filter with low polarization and angle of incidence dependencies" (*Applied Optics*), v. 54, n. 6, p. 1515, (2015).

- [11] V. Dmitriev, C. M. Nascimento, "Planar graphene multifunctional component" (*Microwave and Optical Technology Letters*), v. 57, n. 7, p. 1755, (2015).
- [12] S. Sheng, K. Li, F. Kong, and H. Zhuang, "Analysis of a tunable band-pass plasmonic filter based on graphene nanodisk resonator" (*Optics Communications*), v. 336, n. 1, p. 189, (2015).
- [13] A. Fallahi, J. Carrier, "Manipulation of giant Faraday rotation in graphene metasurfaces" (*Applied Physics Letters*), v. 101, n. 23, p. 231605, (2012).
- [14] G. W. Hanson, "Dyadic Green's functions and guided surface waves for a surface conductivity model of graphene" (*Journal of Applied Physics*), v. 103, n. 6, p. 64302, (2008).
- [15] SANTIAGO, A. Radiação – Entenda de uma vez por todas. Radioproteção na prática. [S.I][2018?] Disponível em: <<https://radioprotecaonapratica.com.br/radiacao-entenda-de-uma-vez-por-todas/>> Acesso em: 5 dez. 2019.
- [16] Franco, M., Cruz, A., *Technologia Terahertz: Avanços e Potenciais Aplicações-Uma Revisão*. p. 554-558, (2018)
- [17] Rostami, Ali and Rasooli, Hassan and Baghban, Hamed. *Terahertz Technology - Fundamentals and Applications*. p. 256 (2011)
- [18] Scarfì, M., Romanò, M., Di Pietro, R. et al. THz Exposure of Whole Blood for the Study of Biological Effects on Human Lymphocytes, *Journal of Biological Physics* (2003) 29: 171.
- [19] M. R. Scarfi, M. Romano, R. Di Pietro, O. Zeni, A. Doria, G. P. Gallerano, E. Giovenale, G. Messina, A. Lai, G. Campurra, D. Coniglio, and M. D'Arienzo, "THz exposure of whole blood for the study of biological effects on human lymphocytes," *J. Biol. Phys.*, v. 29, n. 2/3, pp. 171–176, (2003).
- [20] J. S. Caygill, F. Davis and S. P. J. Higson, "Current Trends in Explosive Detection Techniques," *Talanta*, vol. 88, pp. 14-29, 2012.
- [21] D. S. Moore, "Recent Advances in Trace Explosives Detection Instrumentation," *Sens. Imaging*, vol. 8, pp. 9-38, 2007.
- [22] L. Ho, M. Pepper and P. Taday, "Terahertz Spectroscopy Signatures and Fingerprints," *Nature Photonics*, vol. 2, pp. 541-543, 2008.
- [23] D. Woolard, "Terahertz Sensing Science and Electronic Technology for CB Defense," *Emerging EO Phenomenology*, vol. 19, pp. 1-24, 2005.

- [24] A. G. Davies, et al, "Terahertz Spectroscopy of Explosives and Drugs," *Materials Today*, vol. 11, No. 3, pp. 18-26, Mar. 2008.
- [25] T. Kürner and S. Priebe, "Towards THz Communications – Status in Research, Standardization and Regulation," *J. nfrared Milli. Waves*, vol. 35. pp. 53-62, 2014.
- [26] F. Rodriguez-Reinoso, H. Marsh, and E. Heintz , "Introduction to carbon technologies". (*Publicaciones de la Universidad de Alicante*),1. ed., p. 381-390, (1997).
- [27] A. Zarbin, and M. Oliveira, "Nanoestruturas de carbono (nanotubos, grafeno): Quo Vadis" (*Química Nova*), v. 36, n. 10, p. 1533,(2013).
- [28] J. Gonçalves, "Investigação de Primeiros Princípios de Estruturas de Carbono com Ligações sp² e sp³" (*Dissertação de mestrado*), Universidade Federal de Ouro Preto , Minas Gerais, (2016).
- [29] R. Saito, G. Dresselhaus and M. Dresselhaus, "Physical Properties of Carbon Nanotubes", (*Materials Science and Engineering*), v. 76, n. 3, (1998).
- [30] A. Fonseca, "Introdução às propriedades físicas e estruturais do grafeno e dos nanotubos de carbono". (*Minicurso*), Departamento de Física–UFF, (2011).
- [31] Bao, Qiaoliang, Huiying Hoh, and Yupeng Zhang, eds. *Graphene Photonics, Optoelectronics, and Plasmonics*. CRC Press, 2017.
- [32] Geim, Andre K., and Konstantin S. Novoselov. "The rise of graphene." *Nanoscience and Technology: A Collection of Reviews from Nature Journals*. 2010. 11-19.
- [33] K. S. Novoselov. , A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, A. A. Firsov, "Electric field effect in atomically thin carbon films." (*Science*), v. 306, p. 666-669, (2004).
- [34] M. R. Guassi, "Estrutura eletrônica do grafeno e nanofitas: Efeito de spin-órbita e strain" (*Dissertação de Mestrado*), Universidade de Brasília, Núcleo de Física Aplicada, Distrito Federal, (2010).
- [35] H. S. P. Wong, and D. Akinwande, "Carbon nanotubes and graphene device physics" (Cambridge University Press), 1. ed., p. 47, (2011).
- [36] H.-S. P. Wong ; D. Akinwande, "Carbon nanotube and graphene device physics." [S.l.]: (*Cambridge University Press*), 2011.
- [37] C. Kittel, Introdução à física do estado sólido. [S.l.]: (*Grupo Gen-LTC*), 2000.
- [38] Gonçalves, P. A. D., and Peres, N. M. (2016). An introduction to graphene plasmonics.

- [39] N. Chamanara, C. Caloz, "Fundamentals of graphene magnetoplasmons principles, structures and devices" (*Forum electromagnetic research methods and application technologies (FERMAT)*), (2011).
- [40] Wu, Y. S., and Fred J. Rosenbaum. "Wide-band operation of microstrip circulators." *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 22.10 (1974): 849-856.
- [41] Schloemann, Ernst, and Ronald E. Blight. "Broad-band stripline circulators based on YIG and Li-ferrite single crystals." *IEEE transactions on microwave theory and techniques* 34.12 (1986): 1394-1400.
- [42] G., Keiser, *Optical Fiber Communications*, McGraw-Hill Education (India) Pvt Limited, 2008, p. 580, (2008)
- [43] Helszajn, J. "A simplified theory of the three-port junction ferrite circulator." *Radio and Electronic Engineer* 33.5 (1967): 283-288.
- [44] Setiawan, Arie, et al. "Design of 3 GHz stripline ferrite circulator for radar applications." *2017 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET)*. IEEE, 2017.
- [45] Dmitriev, Victor, Gianni Portela, and Leno Martins. "Three-port circulators with low symmetry based on photonic crystals and magneto-optical resonators." *Photonic Network Communications* 31.1 (2016): 56-64.
- [46] Wang, Zheng, and Shanhui Fan. "Magneto-optical defects in two-dimensional photonic crystals." *Applied Physics B* 81.2-3 (2005): 369-375.
- [47] Dmitriev, V., and Castro, W. (2018). Dynamically controllable terahertz graphene Y-circulator. *IEEE Transactions on Magnetics*, 55(2), 1-12.
- [48] Nikkhah, V., Bakhtafrouz, A., Maddahali, M., and Dezaki, S. K. (2018). Three-port graphene-based electromagnetic circulator in the terahertz and infrared frequency ranges with a very low loss and wideband response. *JOSA B*, 35(8), 1754-1763.
- [49] V. Dmitriev, M. Kawakatsu and F. de Souza, "Compact three-port optical 2D photonic crystal-based circulator of W-format", (*Optics Letters*), v. 37, n. 15, p. 3192, (2012).
- [50] Dmitriev, Victor, Gianni Portela, and Leno Martins. "Temporal Coupled-Mode Theory of Electromagnetic Components Described by Magnetic Groups of Symmetry." *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 66.3 (2017): 1165-1171.
- [51] Marynowski, Wojciech, Adam Kusiek, and Jerzy Mazur. "Microstrip four-port circulator using a ferrite coupled line section." *AEU-International Journal of Electronics and Communications* 63.9 (2009): 801-808.

-
- [52] Sundar, D. S., Umamaheswari, C., Sridarshini, T., Karthikeyan, M., Sitharthan, R., Raja, A. S., and Carrasco, M. F. (2019). Compact four-port circulator based on 2D photonic crystals with a 90 rotation of the light wave for photonic integrated circuits applications. *Laser Physics*, 29(6), 066201.
- [53] Wang, Zheng, and Shanhui Fan. "Suppressing the effect of disorders using time-reversal symmetry breaking in magneto-optical photonic crystals: an illustration with a four-port circulator." *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications* 4.3 (2006): 132-140.
- [54] www.comsol.com.
- [55] Pozar, David M. "Microwave engineering." Wiley (2012).
- [56] A. A. Barybin, and V. Dmitriev, "Modern electrodynamics and coupled-mode theory: Application to guided-wave optics", (*Rinton Press*), Princeton , New Jersey, (2002).
- [57] Haus, Hermann A. *Waves and fields in optoelectronics*. Prentice-Hall, 1984.
- [58] Zhao, Z., Guo, C., and Fan, S. (2019). Connection of temporal coupled-mode-theory formalisms for a resonant optical system and its time-reversal conjugate. *Physical Review A*, 99(3), 033839.