



REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL
MINISTÉRIO DA ECONOMIA
INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL

CARTA PATENTE Nº BR 102016013406-4

O INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL concede a presente PATENTE DE INVENÇÃO, que outorga ao seu titular a propriedade da invenção caracterizada neste título, em todo o território nacional, garantindo os direitos dela decorrentes, previstos na legislação em vigor.

(21) Número do Depósito: BR 102016013406-4

(22) Data do Depósito: 10/06/2016

(43) Data da Publicação Nacional: 19/12/2017

(51) Classificação Internacional: G02B 6/10; G02F 1/095.

(54) Título: CIRCULADOR ELETROMAGNÉTICO CONTROLÁVEL BASEADO EM GRAFENO NA REGIÃO DE THZ

(73) Titular: UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, Instituição de Ensino e Pesquisa. CGC/CPF: 34621748000123. Endereço: AV. AUGUSTO CORREA N. 1 CIDADE UNIVERSITARIA JOSÉ DA SILVEIRA NETTO, GUAMÁ, Belém, PA, BRASIL(BR), 66075-110, Brasileira

(72) Inventor: VICTOR DMITRIEV; CLERISSON MONTE DO NASCIMENTO; WAGNER ORMANES PALHETA CASTRO.

Prazo de Validade: 20 (vinte) anos contados a partir de 10/06/2016, observadas as condições legais

Expedida em: 10/01/2023

Assinado digitalmente por:
Alexandre Gomes Ciancio

Diretor Substituto de Patentes, Programas de Computador e Topografias de Circuitos Integrados



Relatório descritivo CIRCULADOR ELETROMAGNÉTICO CONTROLÁVEL BASEADO EM GRAFENO NA REGIÃO DE THZ

[001] A presente invenção refere-se a um circulador eletromagnético baseado unicamente em grafeno e substratos dielétricos. Esta estrutura é formada por fitas de grafeno atuando como guias de ondas, dispostas sobre uma dada simetria e conectados a um elemento ressonador também de grafeno.

[002] A função de um circulador é conduzir um sinal eletromagnético na porta de entrada para uma específica porta da saída, isolando, assim, as demais portas. Como exemplo, um circulador de três portas recebe o sinal na porta 1 e transmite para a porta 2, isolando a porta 3. Se o sinal for incidido na porta 2, este é transmitido para a porta 3, isolando a porta 1. O mesmo ocorre no caso de a incidência ser pela porta 3: o sinal é transmitido para a porta 1, isolando a porta 2.

[003] Dentre as aplicações do circulador, pode-se destacar a proteção de fontes de sinal ligados ao dispositivo, dentro de um sistema digital maior. Isto é, reflexões provenientes no guia de saída (porta 2, por exemplo) seriam transmitidas para a outra porta (porta 3, por exemplo) ao invés de voltar para a porta de entrada (porta 1, por exemplo) na qual está ligada o gerador do sinal.

[004] Circuladores datam de meados do ano de 1950, quando se tem conhecimento do primeiro circulador comercial voltado para a faixa de micro-ondas, que compreende a região de gigahertz (GHz). Circuladores nesta faixa de frequência são amplamente utilizados em escala industrial, nos dias atuais.

[005] A proposta da presente invenção é trabalhar na faixa de frequências da região de terahertz (THz, 0.1 THz a 10 THz). Esta região do espectro permanece ainda pouco explorada e possui vantagens sobre a faixa de GHz. Como, por exemplo, a taxa de transmissão em comunicação sem fio na região de THz pode chegar a 10Gbit/s, o que pode apresentar uma alta taxa de transferência de dados. Além disso dispositivos em THz possuem maiores larguras de banda e menos interferências sobre fatores atmosféricos. Dispositivos que operem nessa

frequência podem apresentar uma largura de banda consideravelmente grande, baixa perdas de inserção, dimensões reduzidas e uma melhor transmissão de dados em relação a velocidade da informação.

[006] Há um pequeno número de invenções que operam nesta região espectral. Como exemplo, a patente CN103592711A apresenta um filtro operando em THz baseado em ondas plasmônicas. A estrutura consiste de um arranjo periódico de elementos metálicos de alumínio dispostos uns ao lado dos outros. Seu princípio de funcionamento é baseado na ressonância de ondas plasmônicas de superfície e operam com uma frequência central de 1 THz.

[007] Já a patente US20120243844A1, apresenta um circulador de três portas a base de cristal fotônico formado por um material dielétrico perfurado, formando cilindros de ar. Guias de onda no cristal conduzem o sinal a uma cavidade ressonante magneto óptica. A invenção opera na faixa de gigahertz (GHz).

[008] Semelhante ao dispositivo anterior temos a patente US8693823B2, o qual também consiste em um circulador de três portas a base de cristal fotônico.

[009] As invenções mencionadas apresentam circuladores e/ou dispositivos passivos semelhantes, contudo nenhum apresenta circuladores baseados em grafeno, que são estruturas capazes de suportar a propagação de Plasmon-polaritons de superfície (surface plasmon polariton – SPP) e que pode ser controlável por um campo elétrico. Estas são as características da presente invenção.

[010] A presente invenção consiste de um circulador de três portas a base de grafeno, sendo o seu princípio de funcionamento baseado na propagação Plasmon-polaritons de superfície, o qual consiste de oscilações de elétrons livres na interface entre o grafeno e o dielétrico, fazendo com que a energia eletromagnética seja localizada, confinada e guiada na interface entre condutor e dielétrico.

[011] A estrutura consiste em três guias de ondas acoplados a uma cavidade ressonante todos de grafeno, disposto sobre substrato dielétrico, não havendo a

necessidade de inserir outros elementos metálicos. Este dispositivo tem como finalidade atenuar a influência nociva de reflexões sobre as fontes de ondas eletromagnéticas.

[012] Dentre as variações de configuração geométrica deste dispositivo, será apresentado, a seguir, um exemplo de um circulador de três portas baseado em grafeno. Neste exemplo, os guias de onda estão dispostos sob ângulos de 120° e conectados a uma cavidade ressonante no formato circular.

[013] A frequência de operação do dispositivo possui dependência primária com as dimensões físicas do ressonador central e, por conseguinte, com o tamanho dos guias de onda. Esta frequência de operação pode ser deslocada se forem alteradas essas dimensões, o que é condizente com o, bem estabelecido, princípio da escalabilidade das equações de Maxwell para o eletromagnetismo. A seguir apresentar-se-á uma das configurações possíveis para o qual o circulador pode operar.

[014] Como exemplo, para o dispositivo operar em uma frequência central de 8,25 THz, deve-se escolher as seguintes dimensões físicas:

- a) Três nanofitas de grafeno com 140 nm de largura na entrada da porta e 200 nm de largura na saída (conectada ao ressonador) e 600 nm de comprimento.
- b) Uma estrutura ressonante de grafeno com raio de 320 nm.
- c) Substrato de sílica com permissividade elétrica de 2,09 e 600 nm de espessura e outro de silício de permissividade elétrica de 11,9 e espessuras de 200 nm.

[015] A modelagem do grafeno foi feita através do tensor condutividade elétrica do grafeno dado por:

$$\sigma_{xx} = \frac{2D}{\pi} \frac{\frac{1}{\tau} - i\omega}{\omega^2 - (\omega + \frac{i}{\tau})^2};$$

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

Em que:

$$D = \frac{2\sigma_0\epsilon_F}{\hbar};$$

Onde:

a) σ_0 é a condutividade mínima do grafeno (em Siemens);

b) ω_c é a velocidade de ciclotron (em um por segundo);

Dada por:

$$\omega_c = \frac{eBv_F^2}{\epsilon_F};$$

Sendo que:

c) e é a carga do elétron (em Coulomb);

d) B é o campo magnético (em Tesla);

e) v_F é a velocidade de Fermi (metros por segundo);

f) π é igual a 3,14;

g) \hbar é a constante de Planck (em Joule vezes segundo);

h) ω é a frequência angular do sinal incidente (em radiano por segundo);

i) Γ é o inverso do tempo de relaxação do grafeno (em Hertz);

j) ϵ_F é o potencial químico aplicado a folha de grafeno (em eletrôn-voltz);

l) i é a unidade imaginária.

[016] A seguir serão apresentadas as figuras que ilustram o funcionamento do dispositivo.

[017] A figura 1 apresenta o diagrama esquemático para um circulador de 3 portas.

[018] A figura 2 ilustra a operação do circulador com e sem magnetização e pelo sinal injetado por diferentes portas.

[019] A figura 3 mostra a resposta em frequência do dispositivo.

[020] A figura 4 apresenta a dependência da frequência de operação, largura de banda e das perdas de inserção com a energia de Fermi do grafeno.

[021] A figura 5a e 5b representam respectivamente o módulo do campo magnético em função da dimensão perpendicular e a distribuição de campo elétrico, ambos na interface grafeno-SiO₂.

[022] A seguir será apresentado o princípio de funcionamento do dispositivo.

[023] As portas **101,102** e **103** na Fig. 1^a, excitam ondas plasmônicas na interface grafeno-dielétrico. A descontinuidade entre o grafeno-dielétrico induz modos particulares de oscilações de plasmons, conhecidos como (surface plasmon polariton – SPP), os quais são guiados pelos guias de onda de nanofitas de grafeno **104** e excitam ressonâncias plasmônicas com perfil de dipolo no elemento ressonante, também de grafeno **105**, apresentados na mesma figura. A estrutura é colocada sobre um substrato de SiO₂ **106** que, por sua vez, está sobre um substrato de Si **107**. O Campo de SPP é evanescente e perpendicular à interface do grafeno-SiO₂, apresentando um decaimento exponencial tanto dentro do grafeno como no dielétrico.

[024] Para o caso da estrutura sem magnetização, o sinal injetado na porta de entrada **101** na (Fig. 2a), é dividido para as demais portas de saída **102** e **103**.

[025] Um campo magnético DC de 1,1 T altera o ângulo de orientação do dipolo em 60°, ficando, assim, alinhado à porta de saída. Como exemplo, o sinal injetado na porta **101** é transmitido para a porta **102**, isolando a porta **103**, na figura 2b.

[026] Mantendo o mesmo valor de campo magnético sobre a estrutura, e modificando-se a porta em que o sinal injetado, o circulador transmite ou isola portas diferentes. Como exemplo, se o sinal for injetado pela porta **102**, é transmitido à **103**, isolando a **101**, como mostra a figura 2c. Da mesma forma, se o sinal for incidido sobre a porta **103**, este transmite para a **101**, isolando a **102**.

[027] Para o caso apresentado na figura 2b e uma energia de Fermi igual a 0,15 eV, o dispositivo apresenta uma transmissão de -1,2 dB na frequência central de 8,25 THz e isolamento de - 33 dB, com largura de banda de 6,98 % no nível de - 15 dB. Como mostra a figura 3.

[028] Variando a energia de Fermi do grafeno, via campo eletrostático, por exemplo, pode-se controlar a frequência central do dispositivo. Aumentando-se este valor de 0,15 eV para 0,20 eV, pode levar o dispositivo a operar em uma frequência central de 9,4 THz, enquanto que diminuindo para 0,12 eV, o

dispositivo passa a operar com uma frequência de 7,3 THz. Como mostra a figura 4.

[029] Por outro lado, deve-se ter em mente os valores da largura de banda das perdas de inserção, ambas apresentadas na figura 4, na frequência desejada.

[030] Nas figuras 5a e 5b é mostrado o comportamento do módulo do campo magnético com respeito a coordenada perpendicular, evidenciando tanto o decaimento com perfil exponencial, como também uma alta concentração de campo na interface grafeno-dielétrico, o que é característico de ondas plasmônicas.

REIVINDICAÇÕES

CIRCULADOR ELETROMAGNÉTICO CONTROLÁVEL BASEADO EM GRAFENO NA REGIÃO DE THz

1. Circulador eletromagnético controlável baseado em grafeno na região de THz, entre 0,01 THz e 10 THz, **caracterizado por** ser baseado unicamente em grafeno (**104** e **105**) sobre substrato dielétrico (**106** e **107**).

2. Circulador eletromagnético controlável baseado em grafeno na região de THz, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado por** possuir guias de onda de grafeno (**104**) conectados a um elemento ressonante, também de grafeno (**105**), onde são excitadas nos guias de onda de grafeno (**104**) oscilações de plásmons de superfície, produzindo ressonâncias plasmônicas com perfil de dipolo no elemento de grafeno ressonante (**105**).

3. Circulador eletromagnético controlável baseado em grafeno na região de THz, de acordo com a reivindicação 2, **caracterizado por** possuir 3 portas (**101**, **102** e **103**) dispostas sob ângulo 120° , transmitindo o sinal eletromagnético ao longo de nanofitas de grafeno (**104**) a partir de qualquer uma das referidas portas (**101**, **102** ou **103**), de acordo com a aplicação de um campo magnético DC externo de 1,1 T.

4. Circulador eletromagnético controlável baseado em grafeno na região de THz, de acordo com as reivindicações 1 a 3, **caracterizado por** serem excitadas nos guias de onda de grafeno (**104**) oscilações de plasmons de superfície (surface plasmon polariton – SPP), produzindo ressonâncias plasmônicas com perfil de dipolo no elemento de grafeno ressonante **105**.

5. Circulador eletromagnético controlável baseado em grafeno na região de THz, de acordo com as reivindicações 1 a 4, **caracterizado pelo** fato de que uma frequência central de 8,25 THz, com transmissão de -1,2 dB, ser ajustada via campo eletrostático entre as frequências de 7,3 THz a 9,4 THz, aplicando-se diferentes valores de energia de Fermi na estrutura de grafeno que vão de 0,12 eV a 0.2 eV.

FIG. 1

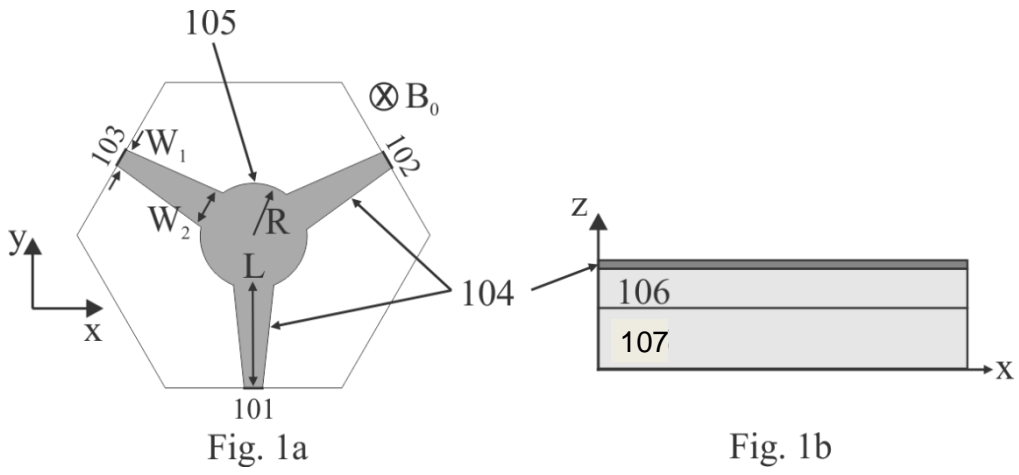
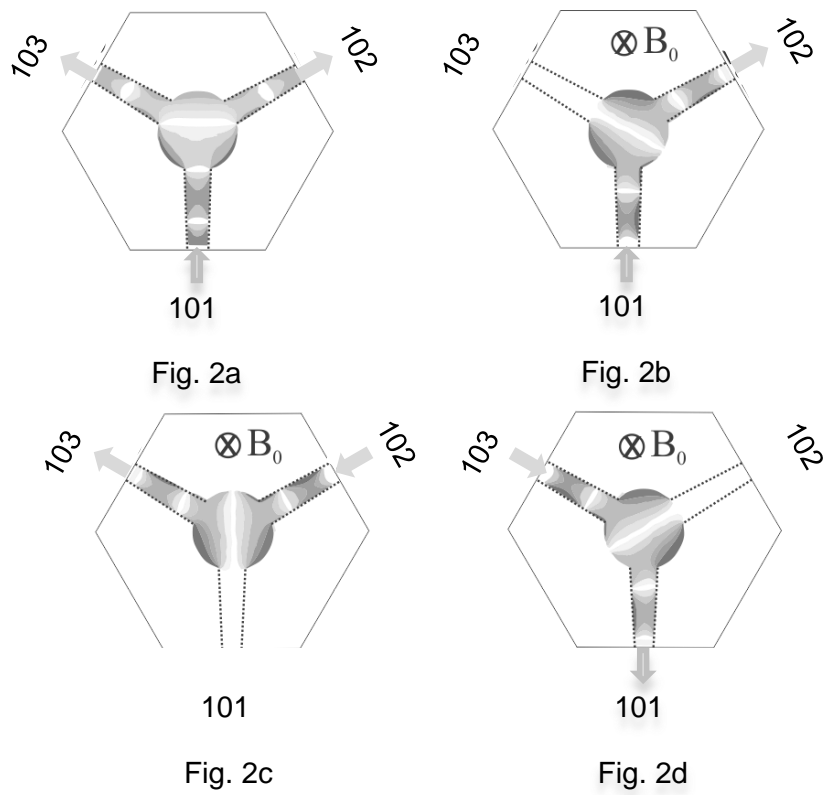


FIG. 2



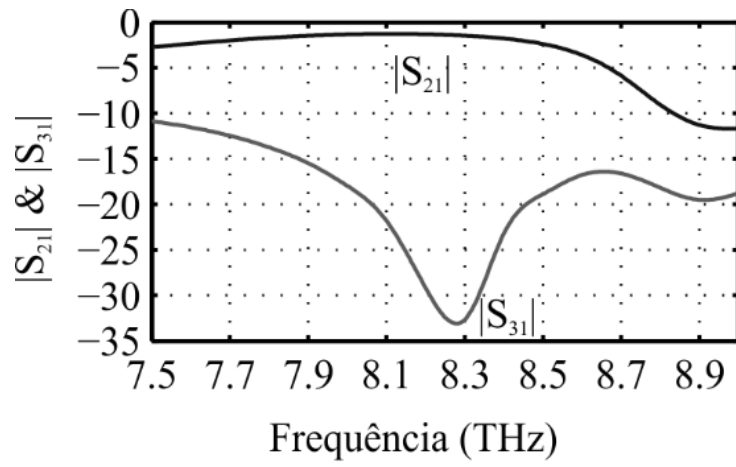


Fig. 3

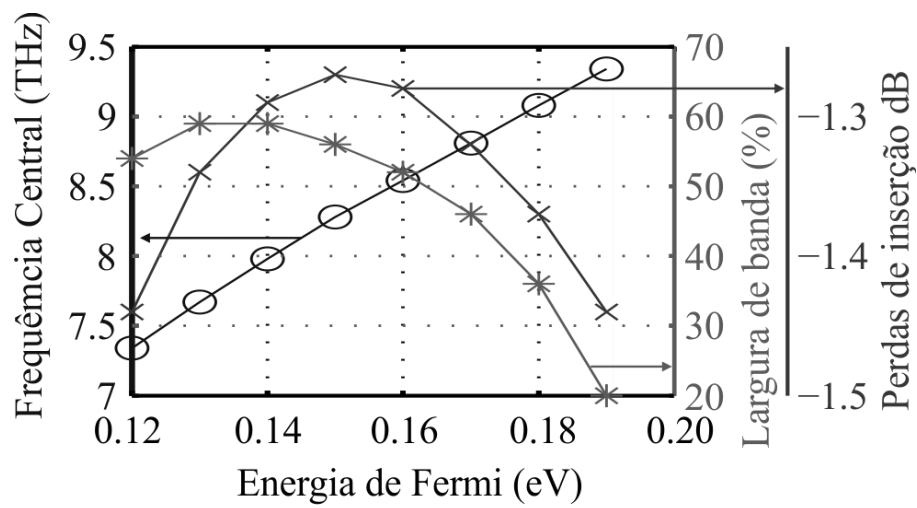


Fig. 4

FIG. 5

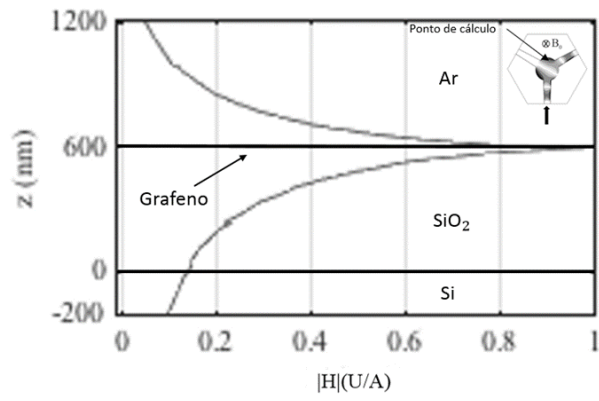


Fig. 5a

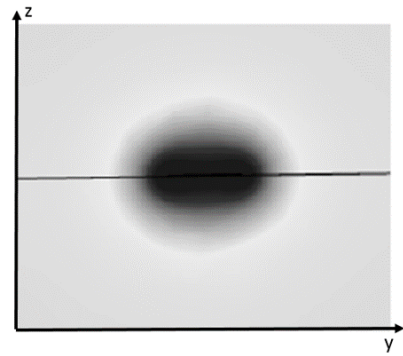


Fig. 5b