



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

CARTA PATENTE Nº BR 102016013410-2

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 102016013410-2

(22) Data do Depósito: 10/06/2016

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

(51) Classificação Internacional: G02F 1/01.

(54) Título: FILTRO CONTROLÁVEL DE FREQUÊNCIA E DE POLARIZAÇÃO EM THZ BASEADO EM GRAFENO COM GEOMETRIA DE ESCAMA DE PEIXE

(73) Titular: UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, Pessoa Jurídica. 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; JOSÉ ROBERTO SOBRINHO NETO.

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

Expedida em: 25/01/2022

Assinado digitalmente por:

Liane Elizabeth Caldeira Lage

Diretora de Patentes, Programas de Computador e Topografias de Circuitos Integrados



FILTRO CONTROLÁVEL DE FREQUÊNCIAS E DE POLARIZAÇÃO EM THZ BASEADO EM GRAFENO COM GEOMETRIA DE ESCAMA DE PEIXE

[001] A patente de invenção apresentada refere-se a um filtro eletromagnético de polarização que opera na faixa de terahertz (THz). O dispositivo é composto por um arranjo periódico de elementos de grafeno posto sobre substrato dielétrico metalizado. A geometria da folha de grafeno é conhecida como geometria de escama de peixe.

[002] O arranjo possui a característica de absorver ondas eletromagnéticas na faixa de THz para determinada polarização e refleti-las para outra polarização. Esta absorção é baseada em ressonâncias de plasmon polariton de superfície (SPP – *Surface Plasmon Polariton*). O dispositivo apresenta a possibilidade de controle dinâmico da sua frequência de operação, variando-se tensão elétrica nos elementos de grafeno.

[003] A região do espectro de THz é comumente compreendida como sendo o intervalo de 0,3 a 10 THz. Dispositivos de comunicação baseados nesta faixa de frequência têm o potencial de apresentar, dentre outras, maiores larguras de banda, o que significa, por exemplo, que há a possibilidade de aumentar a velocidade na transmissão da informação.

[004] Há, contudo, uma escassez de equipamentos que operam nesta faixa de frequência devido ao fato de que os materiais-base, como cobre, por exemplo, não operam de forma satisfatória em THz. O grafeno é um material capaz de servir como plataforma para o projeto de equipamentos baseados em ondas em THz.

[005] Um exemplo de invenção que opera como filtro de polarização é apresentado na patente CN104730738A, em que a informação é guiada pela superfície da estrutura por meio de chamados guias de onda. O modo de operação é obtido através de uma variação de voltagem elétrica nos terminais do equipamento.

[006] Outro exemplo de dispositivo é apresentado na patente CN103105686A. Nela há a absorção da radiação eletromagnética para determinadas

polarizações. O controle das características da estrutura é mediante a diferença de potencial elétrico nos terminais do dispositivo, que altera a organização das moléculas de cristais líquidos do metal refletor, modificando, assim, seu índice de refração.

[007] Outro exemplo de dispositivo é apresentado em CN102692393A, baseado em elementos de grafeno associado a um aparato composto de diversas lentes. Sua função é determinar, de forma dinâmica, o índice de refração de um material orgânico ou sintético. O dispositivo funciona na faixa de luz visível, ou seja, fora da faixa de THz. A onda não polarizada passa por uma lente convexa, que atua como um divisor de feixe de polarização. O resultado obtido apresenta dois feixes com polarizações diferentes.

[008] Como vantagem sobre as patentes apresentadas, a presente invenção é projetada com base em um arranjo planar, onde o sinal eletromagnético atravessa esta superfície, ao invés de ser propagado ao longo da mesma. Uma das aplicações para esta característica seria a possibilidade de acoplar o presente dispositivo a outros elementos em um mesmo sistema de comunicação já pré-existente. Por ser baseado em ondas plasmônicas no grafeno, a presente invenção permite o ajuste dinâmico da frequência de operação;

[009] Como outra vantagem, podemos apontar a confecção do filtro baseado na absorção de mais de 99% da onda incidente para determinada faixa de frequências, o que possibilita uma maior segurança no processo de transmissão das informações, diminuindo, assim, a possibilidade de interceptação de dados por terceiros. Pode-se destacar então, que a presente invenção reúne as vantagens das patentes apresentadas anteriormente em um único dispositivo.

[010] A seguir serão apresentadas figuras que ilustram o funcionamento da invenção bem como uma descrição detalhada de sua operação.

[011] A figura 1 apresenta a configuração geométrica do dispositivo.

[012] A figura 2 apresenta a resposta em frequência do dispositivo bem como a distribuição de corrente induzida no grafeno nas frequências de ressonância do material.

[013] A figura 3 apresenta a dependência da resposta em frequência com respeito à variação do ângulo de polarização para as polarizações TE e TM.

[014] A figura 4 apresenta a dependência da resposta em frequência com respeito à variação do ângulo de incidência para as polarizações TE e TM.

[015] A figura 5 apresenta a dependência da resposta em frequência com respeito à variação do potencial químico na folha de grafeno para as polarizações TE e TM.

[016] A seguir será apresentada uma descrição do princípio de funcionamento do dispositivo.

[017] O grafeno é um material bidimensional formado unicamente por átomos de carbono, que possui, dentre outras, a possibilidade de controle de sua condutividade por intermédio de uma dopagem eletrostática.

[018] Este material é numericamente modelado por meio de sua condutividade de acordo com o formalismo de Kubo na sua aproximação de intrabanda para faixas de frequência de THz:

$$\sigma = -j \frac{e^2 k_B T}{\pi \hbar^2 (\omega - 2j\Gamma)} \left[\frac{\mu_c}{k_B T} + 2 \ln \left(e^{-\frac{\mu_c}{k_B T}} + 1 \right) \right], \quad \varepsilon = \varepsilon_0, \quad \mu = \mu_0,$$

onde:

- a) σ é a condutividade ótica do grafeno (em Siemens);
- b) e é a carga do elétron (em Coulomb);
- c) k_B é a constante de Boltzmann (em Joule por Kelvin);
- d) T é a temperatura (em graus Celsius);
- e) π é igual a 3.14;
- f) \hbar é a constante de Planck (em Joule vezes segundo);
- g) ω é a frequência angular do sinal incidente (em radiano por segundo);
- h) Γ é o inverso do tempo de relaxação do grafeno (em Hertz);
- i) μ_c é o potencial químico aplicado a folha de grafeno (e eletronsvltz);
- j) ε é a permissividade elétrica do material (em Farads por metro);

- k) ϵ_0 é a permissividade elétrica do espaço livre (em Farads por metro);
- l) μ é a permeabilidade magnética do material (em Henrys por metro);
- m) μ_0 é a permeabilidade magnética do espaço livre (em Henrys por metro);
- n) j é a unidade imaginária;

[019] A presente invenção é baseada em um arranjo periódico, o que significa que uma estrutura básica, chamada célula unitária, é replicada no plano. A célula unitária do dispositivo em questão, representada na Fig. 1a e 1b, é baseada em elementos de grafeno **101**, com geometria no formato de escama de peixe, posicionado em cima um substrato dielétrico **102**, que, por sua vez, está sobre uma camada metálica **103**. O dispositivo opera com uma onda linearmente polarizada, cujo campo elétrico incidente pode estar orientado sobre eixo x ou sobre eixo y . A onda chega ao material sob um ângulo de incidência **105**. O plano de incidência é definido a partir da componente paralela **106** do vetor de onda **107**, sendo sua orientação definida pelo ângulo de incidência **108**.

[020] O filtro baseia-se no princípio de ressonância dos SPP que ocorrem na superfície do grafeno para uma determinada faixa de frequências, em uma dada polarização. Os valores da frequência em que essas ressonâncias ocorrem estão em função das dimensões do dispositivo e podem ser deslocadas aumentando ou diminuindo seus elementos constituintes, de acordo com o conhecido princípio da escalabilidade das equações de Maxwell. Como exemplo, serão apresentados os valores para as características de funcionamento do filtro, para uma célula unitária retangular de dimensões $92 \mu m \times 100 \mu m$, uma fita de grafeno com largura $40 \mu m$, um substrato dielétrico de altura $24 \mu m$, com permissividade dielétrica relativa de 3.5. O metal da parte inferior do dielétrico é considerado perfeito condutor elétrico.

[021] Para estas dimensões, a superfície absorve aproximadamente 99,99% das ondas incidentes polarizadas na direção do eixo y , com frequência de 0,48 THz, apresentando um coeficiente de reflexão de -48 dB, com um fator de

qualidade de 5,37, de acordo com a curva **201** na Fig. 2a. Nesta mesma figura, as ondas polarizadas em y apresenta um coeficiente de reflexão de $-0,4$ dB, levando a uma taxa de extinção de polarização de $-47,6$ dB. A corrente induzida neste caso está representada na Fig. 2b. Por outro lado, ondas com polarização em x possuem um coeficiente de absorção também de aproximadamente 99,99%, que representa um coeficiente de reflexão de -47 dB, com um fator de qualidade igual a 6,4, mas em uma frequência de 0,79 THz. Neste caso, as ondas polarizadas em y apresentam um coeficiente de transmissão de $-0,9$, levando a uma taxa de extinção de polarização de $-46,1$ dB. A corrente induzida pra este caso está representada na Fig. 2c.

[022] O dispositivo funciona com sua eficiência máxima para ângulos de polarização iguais a zero e 90^0 , contudo apresenta níveis de reflexão abaixo de -10 dB para ângulos de até 30^0 para polarização x e 60^0 para polarização y . Ver Fig. 3. Com respeito ao ângulo de incidência, o filtro pode operar com valores abaixo de -20 dB para ângulos de até 30^0 para ambas as polarizações **401** e **402**, y e x respectivamente, na Fig. 4.

[023] A frequência de operação equipamento pode ser alterada variando-se o potencial químico na folha de grafeno. Como exemplo, considerando uma frequência central de operação de 0,48 THz para um potencial químico de 0,5 eV, para ondas polarizadas na direção y , ao se diminuir este parâmetro de 0,4 as curvas são deslocadas de 0,46 THz, enquanto que se aumentando para 0,6 eV, a curva desloca para 0,5 THz. Por outro lado, para frequência central de 0,79 THz com 0,5 eV, diminuindo o potencial químico para 0,4 eV a frequência de operação passa a ser 0,75 THz, enquanto que se aumentando o parâmetro químico para 0,6 eV, a operação passa a ser 0,84 THz.

REIVINDICAÇÕES

FILTRO CONTROLÁVEL DE FREQUÊNCIAS E DE POLARIZAÇÃO EM THZ BASEADO EM GRAFENO COM GEOMETRIA DE ESCAMA DE PEIXE

1. Filtro controlável de frequências e de polarização em THz baseado em grafeno com geometria de escama de peixe, composto por um substrato dielétrico (102) que por sua vez, está sobre uma camada metálica (103) e **caracterizado por** ser composto também por um arranjo periódico de elementos de grafeno (101) com geometria no formato de escama de peixe posicionado sobre o referido substrato dielétrico (102).
2. Filtro controlável de frequências e de polarização em THz baseado em grafeno com geometria de escama de peixe, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado por** operar na faixa de 0,3 a 10 THz, com elementos de grafeno com célula unitária retangular de dimensões $92\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ e uma fita de grafeno com largura $40\ \mu\text{m}$.
3. Filtro controlável de frequências e de polarização em THz baseado em grafeno com geometria de escama de peixe de acordo com as reivindicações 1 e 2, **caracterizado por** conter substrato dielétrico metalizado onde o substrato dielétrico tem altura de $24\ \mu\text{m}$, com permissividade dielétrica relativa de 3,5.
4. Filtro controlável de frequências e de polarização em THz baseado em grafeno com geometria de escama de peixe de acordo com as reivindicações 1 a 3, **caracterizado pelo** fato de se variar o potencial químico da folha de grafeno de 0,4 eV a 0,6 eV para controlar a filtragem de polarização de ondas eletromagnéticas para modos TE e TM eletromagnético na faixa de 0,3 a 10 Thz.

FIG. 1

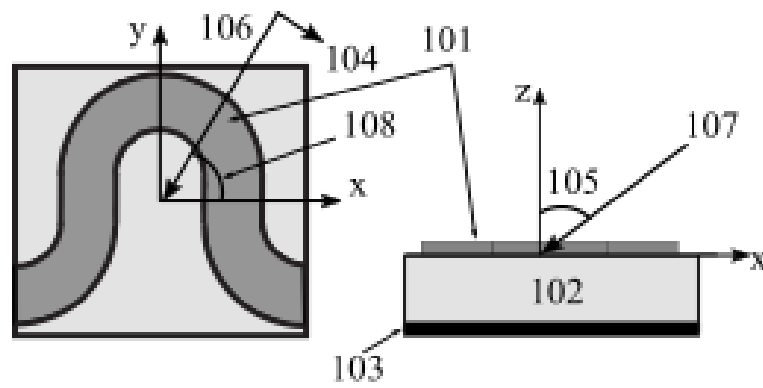


Fig. 1a

Fig. 1b

FIG. 2

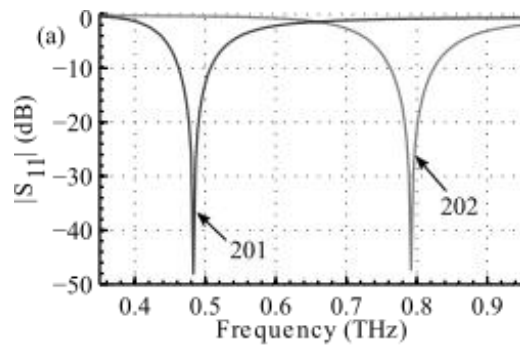


Fig. 2a

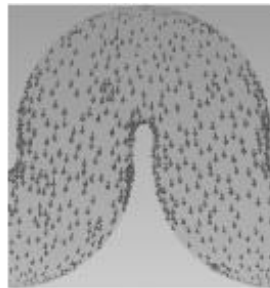


Fig. 2b

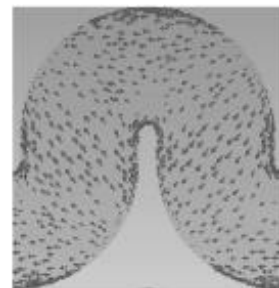


Fig. 2c

FIG. 3

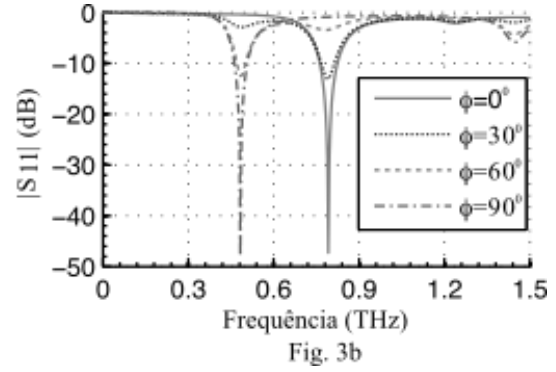
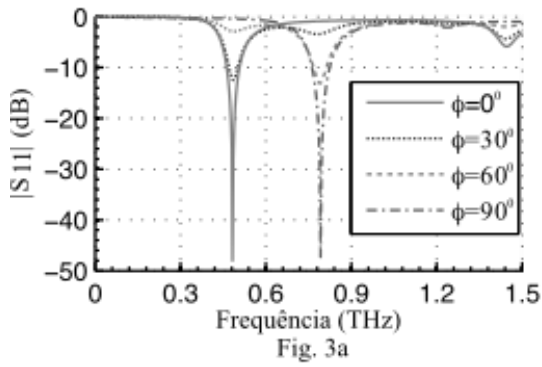


FIG. 4

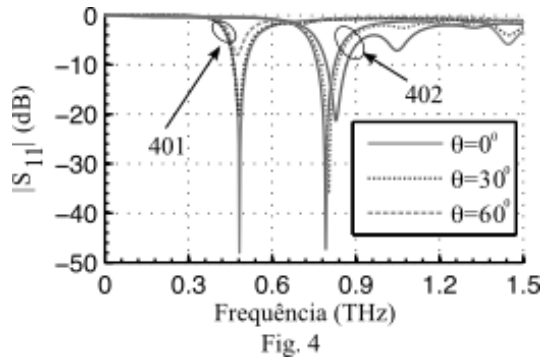


FIG. 5

