



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

CARTA PATENTE Nº BR 102015025274-9

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 102015025274-9

(22) Data do Depósito: 23/09/2015

(43) Data da Publicação Nacional: 07/11/2017

(51) Classificação Internacional: H01L 29/16.

(52) Classificação CPC: H01L 29/16.

(54) Título: DISPOSITIVO MULTIFUNCIONAL PLANAR BASEADO EM GRAFENO NA FAIXA DE THZ

(73) Titular: UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, Pessoa Jurídica. CGC/CPF: 34621748000123.
Endereço: AV. AUGUSTO CORRÊA N. 1, CIDADE UNIVIVERSITARIA JOSÉ DA SILVA NETTO, GUAMÁ, BELÉM, PA, BRASIL(BR), 66075-900, Brasileira

(72) Inventor: VICTOR DMITRIEV; CLERISSON MONTE DO NASCIMENTO.

Prazo de Validade: 20 (vinte) anos contados a partir de 23/09/2015, 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



Relatório descritivo “**DISPOSITIVO MULTIFUNCIONAL PLANAR BASEADO EM GRAFENO NA FAIXA DE THz**”.

[001] A patente de invenção apresentada refere-se a um dispositivo multifuncional planar baseado unicamente em grafeno que consiste em um arranjo periódico planar no qual a sua célula unitária é baseada em dois elementos interagentes quase complementares: um orifício circular em uma placa de grafeno e um disco, também de grafeno, posicionado concentricamente no interior do furo. Esta estrutura é *quase complementar* devido ao fato de que o disco possui um diâmetro menor que o diâmetro do orifício. A estrutura mencionada é posta em ambos os lados de um fino substrato dielétrico.

[002] Este arranjo geométrico possui a característica de permitir a passagem de um sinal em uma determinada frequência e proibir sua passagem quando a frequência do sinal for outra, possuindo, assim, um comportamento de filtro. Por ser baseado em grafeno, o dispositivo possui a capacidade de controle dinâmico da janela de transparência do filtro. Isto é a frequência central quando o dispositivo opera como filtro pode ser ajustada sem a necessidade de sua modificação geométrica.

[003] A invenção aqui apresentada pode, também, funcionar como um chaveador eletromagnético. Isto é, em uma mesma frequência central pode-se controlar se o sinal incidente será ou não transmitido ao atravessar a estrutura. Estas características fazem com que a invenção possa ser usada tanto como filtro eletromagnético controlável como um chaveador de sinais eletromagnéticos.

[004] Filtros e chaveadores são elementos importantes em muitos sistemas eletromagnéticos, especialmente em sistemas de comunicação digital. Eles podem ser implementados usando em superfícies seletivas de frequência. Na última década foram dadas atenções para materiais que suportam ressonâncias do tipo de Fano em elementos diferentes. Em geral essa ressonância é excitada por arranjos de elementos que possuem uma certa assimetria geométrica. Materiais que apresentam ressonâncias do tipo de Fano trabalham com ondas plasmônicas e na faixa de THz (terahertz).

[005] A faixa de THz compreende de 0,3 a 10 THz, isto é, está entre micro-ondas e o infravermelho, e é pouco explorada atualmente devido ao fato de materiais usuais não apresentarem funcionamento adequado nesta região do espectro eletromagnético. Há, portanto, uma demanda de dispositivos eletromagnéticos que operam nesta faixa de frequências. O grafeno oferece a oportunidade suprir parte desta carência por apresentar ressonâncias plasmônicas com níveis de perdas toleráveis para tais aplicações.

[006] Dentre os dispositivos que operam nesta faixa de frequência há a patente CN103135260B que apresenta um chaveador composto de um substrato semiconductor disposto de forma intercalada com camadas de ar, formando assim, um cristal fotônico. O dispositivo opera na faixa de THz e possui a característica de modular a radiação eletromagnética incidente.

[007] A patente CN103487953A apresenta um modulador de sinais na faixas de frequências de THz. A modulação do sinal ocorre á devido à excitação de fônons em nanopartículas de ouro. Este dispositivo é composto por gerador de ondas em THz, um gerador de ondas de pulsos de luz, um modulador de THz e um detector de THz.

[008] Já a patente US8836446B2 apresenta um modulador modulador de ondas eletromagnéticas na faixa de THz baseado em uma camada de grafeno sobre uma camada de SiO₂, ambos postos sobre um substrato de silício dopado. A modulação acontece graças a uma tensão elétrica que é aplicado entre contatos metálicos (posicionados acima da camada de grafeno) e uma porta metálica abaixo do silício dopado, que muda a concentração de portadores de carga no grafeno pela variação de potencial elétrico aplicados entres os eletrodos.

[009] A patente CN103592711A, que é construído a partir de um arranjo periódico de elementos metálicos de alumínio de espessuras diferentes postos de forma adjacente uns dos outros. O dispositivo se baseia na propagação de ondas plasmônicas e opera na frequência central de 1 THz.

[010] Os dispositivos anteriores propõem a modulação (chaveamento) de ondas ou a filtragem de sinais na faixa de THz. A presente invenção unifica as duas aplicações em um único dispositivo compacto que é baseado somente em elementos de grafeno sobre um substrato dielétrico. O controle das características do dispositivo pode ser conseguido apenas variando campo elétrico sobre as placas de grafeno, sem a necessidade de inserção de materiais diferentes ou outros elementos metálicos como é apresentado nas patentes citadas anteriormente.

[011] A seguir serão apresentadas figuras que ilustram o funcionamento do dispositivo bem como uma descrição detalhada de sua operação.

[012] A figura 1 mostra a configuração geométrica da célula unitária do dispositivo.

[013] A figura 2 apresenta a resposta em frequência dos elementos ressonantes isolados e do conjunto.

[014] A figura 2d mostra a influência das pontes de grafeno sobre o funcionamento do dispositivo.

[015] A figura 3 apresenta as distribuições de campo elétrico e de corrente induzida nos elementos nas frequências de máxima transmissão e de mínima transmissão.

[016] A figura 4 apresenta a resposta em frequência do dispositivo para diferentes valores de potencial químico aplicado ao grafeno.

[017] A figura 5 apresenta o coeficiente de transmissão para o dispositivo operando como uma chave eletromagnética.

[018] A figura 6 apresenta a influência do ângulo de incidência e da polarização da onda sobre o dispositivo.

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

[020] O dispositivo é baseado em grafeno, que pode ser entendida como uma camada bidimensional de átomos de carbono. O grafeno é um material promissor para aplicações em eletrônica e fônica uma vez que permite a característica singular e controle elétrico das ondas eletromagnéticas.

[021] O grafeno é modelado através de sua condutividade de acordo com o formalismo de Kubo na sua aproximação de intrabanda para faixas de frequência de THz:

$$[022] \quad \sigma = -j \frac{e^2 k_B T}{\pi \hbar^2 (\omega - 2j\Gamma)} \left[\frac{\mu_c}{k_B T} + 2 \ln \left(e^{-\frac{\mu_c}{k_B T}} + 1 \right) \right], \quad \varepsilon = \varepsilon_0, \quad \mu = \mu_0;$$

[023] onde:

[024] a) σ é a condutividade ótica do grafeno (em Siemens);

[025] b) e é a carga do elétron (em Coulomb);

[026] c) k_B é a constante de Boltzmann (em Joule por Kelvin);

[027] d) T é a temperatura (em graus Celsius);

[028] e) π é igual a 3.14;

[029] f) \hbar é a constante de Planck (em Joule vezes segundo);

[030] g) ω é a frequência angular do sinal incidente (em radiano por segundo);

[031] h) Γ é o inverso do tempo de relaxação do grafeno (em Hertz);

[032] i) μ_c é o potencial químico aplicado a folha de grafeno (e eletrônvolts);

[033] j) ε é a permissividade elétrica do material (em Farads por metro);

[034] k) ε_0 é a permissividade elétrica do espaço livre (em Farads por metro);

[035] l) μ é a permeabilidade magnética do material (em Henrys por metro);

[036] m) μ_0 é a permeabilidade magnética do espaço livre (em Henrys por metro);

[037] n) j é a unidade imaginária;

[038]

[039] A Fig. 1a mostra a vista superior da célula unitária do dispositivo de dimensão **101**. Esta célula é composta de uma placa de grafeno **102** na qual foi feito um furo circular de ar no qual é inserido um disco **103**, também de grafeno. O disco e a placa de grafeno estão ligados por quatro pontes **104** do mesmo material e de largura **105**. O disco central possui um diâmetro **108**, enquanto que o orifício de ar possui um diâmetro **109**. Esta estrutura é posta em ambos os lados de um substrato dielétrico **110** de permissividade dielétrica relativa ϵ E com espessura **111**. As propriedades condutivas do grafeno podem ser ajustadas ao

se aplicar uma tensão elétrica **112** entre as placas que influencia diretamente no potencial químico μ_c do grafeno.

[040] O dispositivo em questão é baseado na incidência de um sinal eletromagnético cuja orientação do vetor de onda incidente \mathbf{k} é representado por **113** na Fig. 1b. O plano de incidência da onda incidente é formado pelo vetor $\mathbf{k}_{||}$, (**114** na Fig. 1a), que é a componente de paralela de \mathbf{k} ao plano xy, e um vetor orientado no sentido positivo de z. **107** representa o ângulo de incidência e **106** representa o angulo do plano de polarização.

[041] Sob essas condições, a invenção em questão pode trabalhar em dois modos de operação distintos: em regime de filtragem ou em regime de chaveamento. A frequência de operação pode ser ajustada de acordo com as configurações geométricas, devido a propriedade de escalabilidade das equações de Maxwell. Como exemplo, para operar em frequências que compreendem o início da faixa de THz têm-se as seguintes dimensões geométricas:

[042] Parâmetro de rede igual a $100 \mu m$;

[043] Diâmetro do orifício de ar igual a $70 \mu m$.

[044] Diâmetro do disco central igual a $60 \mu m$.

[045] Pontes de grafeno de largura $1 \mu m$.

[046] Para obter um comportamento de filtragem de sinais, pode-se adotar um potencial químico de $0,5 eV$. A resposta em frequência do dispositivo com essas dimensões é mostrada na Fig. 2c. Pode-se notar que há um máximo de transmissão na frequência de $f_1 = 0,85 THz$ e um mínimo de transmissão (isolamento) na frequência de $f_2 = 1,3 THz$. Logo pode-se obter um filtro passa banda na frequência central f_1 e/ou um filtro rejeita banda na frequência f_2 .

[047] Este comportamento é obtido por excitação de ressonâncias plasmônicas nos elementos interagentes da célula unitária. Um arranjo formado apenas pelos discos isolados se comporta como um dipolo elétrico com frequência central de $1,5 THz$, como mostra a Fig. 2a. Enquanto que um arranjo formado apenas por orifícios de ar em placas de grafeno apresentaria um comportamento de dipolo

magnético, com um máximo de transmissão em $1,56 THz$, apresentada na Fig. 2b. Os níveis de transmissão (reflexão) possuem um deslocamento com respeito à largura das pontes de grafeno. Contudo para valores menores ou iguais a aproximadamente $1 \mu m$ essa diferença não possui grande influencia no dispositivo e este atinge níveis equiparados ao dispositivo sem ponte, como mostra a Fig. 2d. Deve-se, contudo, atentar para o fato de que pontes de largura muito pequenas poderiam levar à queima da estrutura por aquecimento via efeito Joule, fazendo com houvesse a interrupção do contato elétrico entre o disco central e a placa de grafeno, o que faria com que a placa e o disco não permanecessem com o mesmo potencial químico.

[048] Estes valores de ressonâncias próximos uns dos outros permite com que haja uma interação entre os dois modos ressonantes ambas as estruturas estão presentes na mesma célula unitária. Nestas condições, na frequência $f_1 = 0,8 THz$ há a excitação de ondas plasmônicas cujos efeitos são maiores na borda da placa de grafeno e na borda do disco, como mostra a Fig. 3a e 3b. A corrente induzida na placa externa e no disco central apresentam uma diferença de fase de π entre si, como mostra a Fig. 3c. Esta diferença de fase leva à uma interferência destrutiva das ondas provenientes das ressonâncias individuais, o que explica o máximo de transmissão na frequência de $0,85 THz$ da Fig. 2a.

[049] Por outro lado, quando a frequência atinge valores de $1,3 THz$ há o prevailecimento da ressonância do disco central como podem-se ver na Fig. 3d e 3e e é confirmada pela corrente induzida mostrada na Fig. 3f.

[050] Uma das vantagens da presente invenção em relação à outras patentes analisadas é a possibilidade de controle dinâmico da janela de transparência (rejeição) do filtro, alterando-se o potencial químico do grafeno. A Fig. 4 mostra que se aumentarmos o valor do potencial químico do grafeno, o máximo (mínimo) de transmissão será deslocado para frequências mais altas. O inverso ocorre quando se diminui o valor deste parâmetro.

[051] Um outro regime de funcionamento do dispositivo seria operar como um chaveador ou modulador. Nesse modo de operação, a invenção pode trabalhar

em um intervalo fixo de frequências, permitindo ou proibindo a passagem de sinais. Quando a chave está configurada para operar transmitindo a informação, diz-se que temos o estado *ON* (ligado), na configuração em que ela rejeita o sinal diz-se no estado *OFF* (desligado). A presente invenção está dimensionada para operar como chave em duas faixas de frequência.

[052] Na primeira variante, ao se configurar o potencial químico do grafeno para 0,5 eV, há um máximo de transmissão do sinal na frequência central de 1.08 THz levando, assim, o dispositivo para o estado *ON*. Quando o potencial químico é ajustado para 0,21 eV a resposta em frequência do dispositivo é deslocada levando, assim, a um mínimo de transmissão (estado *OFF*) nesta mesma frequência, como é mostrada na Fig. 5a.

[053] Nesta variante o a chave possui as seguintes especificações: Uma banda de frequências que vai de 0,99 THz até 1.15 THz, com níveis de perda no estado *ON* menores que - 3 dB e um isolamento melhor que - 10 dB. Na frequência central esses níveis são -2,5 dB e -12 dB, respectivamente. A máxima taxa de modulação neste caso é de cerca de 91%.

[054] Como uma segunda variante, pode-se obter o estado *ON* do dispositivo na frequência central de 1,58 THz ao se ajustar o potencial químico do grafeno para 1,5 eV e um estado *OFF* nesta mesma frequência quando o potencial é igual a 0,5 eV. Como mostra a Fig. 5b. Nestas condições temos: uma banda de frequências que vai de 1,44 THz até 1,75 THz, com níveis de perda no estado *ON* menores que - 3 dB e um isolamento melhor que - 13 dB. Na frequência central de esses níveis são -1,96 dB e -21,7 dB, respectivamente. A máxima taxa de modulação neste caso é de cerca de 99%.

[055] Ao reajustar o valor inicial químico do grafeno pode-se deslocar, também, as duas regiões de frequências as quais a chave trabalha.

[056] Com respeito ao ângulo de incidência da onda (ver Fig. 6). Para a incidência normal, as características de frequência para os modos TE e TM são quase idênticas e não dependem do ângulo φ . Além disso, as frequências

ressonantes para estes modos têm pequena mudança para os ângulos de incidência θ até 45° . No entanto, a partir de 15° , as formas das respostas no vale de transmissão passam por uma mudança significativa e isso deve ter em conta nos projetos de filtro.

REIVINDICAÇÕES

DISPOSITIVO MULTIFUNCIONAL PLANAR BASEADO EM GRAFENO NA FAIXA DE THz

1. Dispositivo multifuncional planar baseado em grafeno operado na faixa de 0,3 a 10 THz, **caracterizado por** ser composto de um arranjo periódico planar no qual cada célula unitária (**101**) é baseada em elementos de grafeno (**102,103,104**), em que a estrutura mencionada é posta em ambos os lados de um substrato dielétrico (**110**) com espessura 10 μ m (**111**) onde são excitadas ressonâncias plasmônicas nos elementos do grafeno, que levam o dispositivo a funcionar tanto como um filtro eletromagnético quanto como uma chave eletromagnética.
2. Dispositivo multifuncional planar de acordo com a reivindicação 1 **caracterizado por** ser composto por um arranjo periódico de orifícios com discos de grafeno (**103**) concêntricos no centro de cada orifício.
3. Dispositivo multifuncional planar baseado em grafeno de acordo com a reivindicação 2 **caracterizado por** conexão de cada disco (**103**) com outra parte de grafeno (**102**) por pontes de grafeno (**104**) simetricamente para igualar o potencial químico em todas partes de grafeno .
4. Dispositivo multifuncional planar de acordo com as reivindicações 1, 2 e 3, **caracterizado por** fato de que seu princípio de chaveamento eletromagnético baseado em ressonâncias plasmônicas no grafeno com um valor do potencial químico permite realizar o estado *ON* quando a onda incidente passa por estrutura com máximo de transmissão do sinal, e de outro lado, ajustando o potencial químico para outro valor, o estado *OFF* com um mínimo de transmissão pode ser realizado.
5. Dispositivo multifuncional planar baseado em grafeno de acordo com as reivindicações 1, 2, 3 e 4, **caracterizado por** apresentar simetria angular.

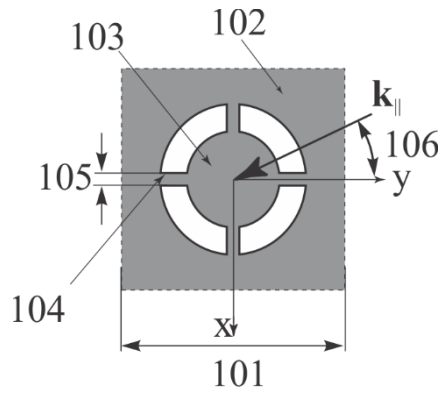


Fig. 1a

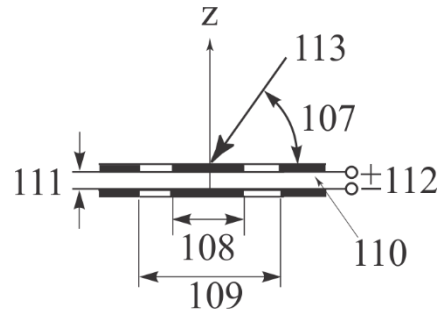


Fig. 1b

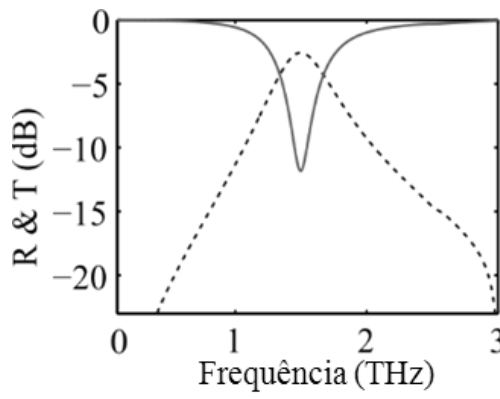


Fig. 2a

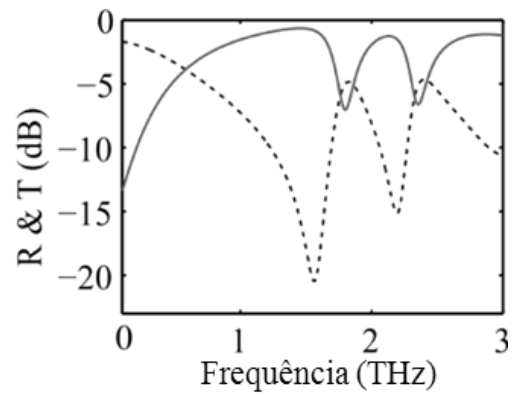


Fig. 2b

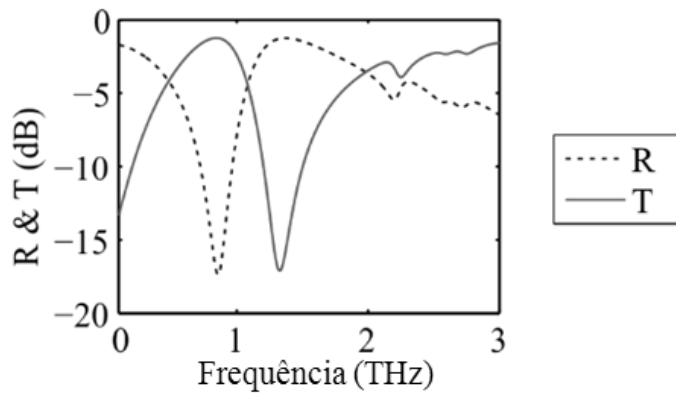


Fig. 2c

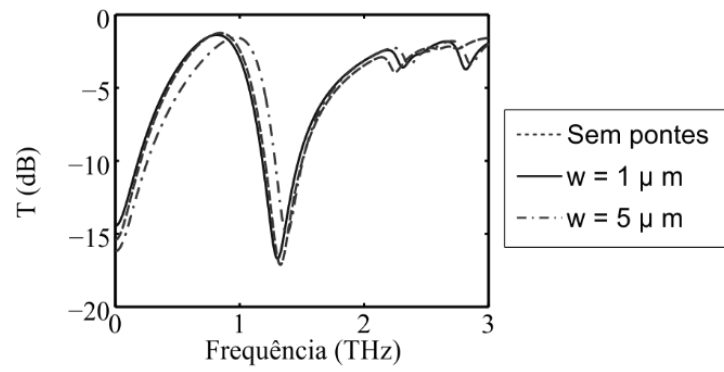


Fig. 2d

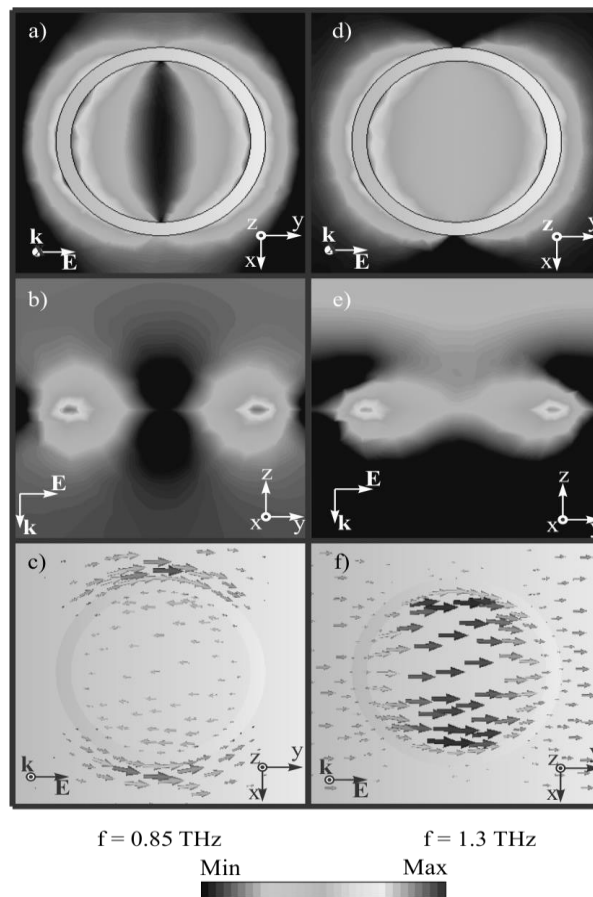


Fig. 3

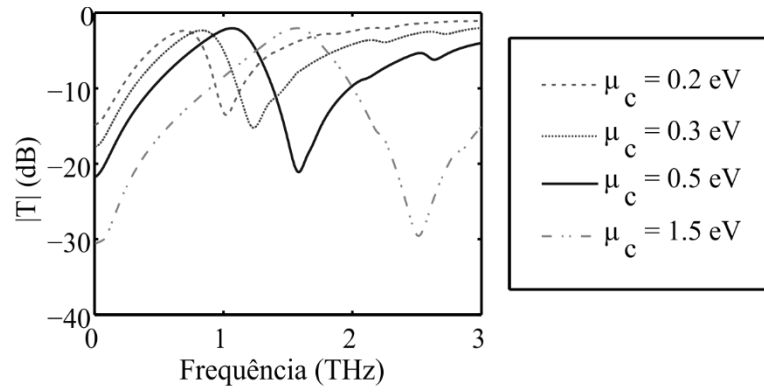


Fig. 4

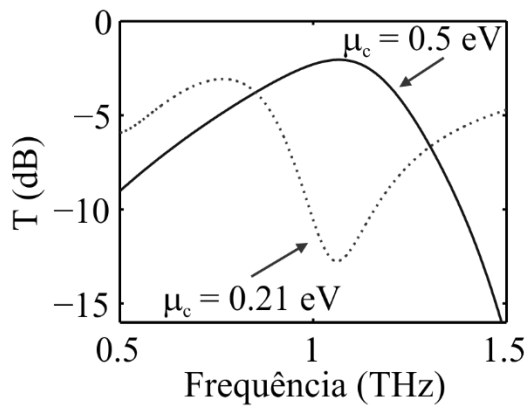


Fig 5a

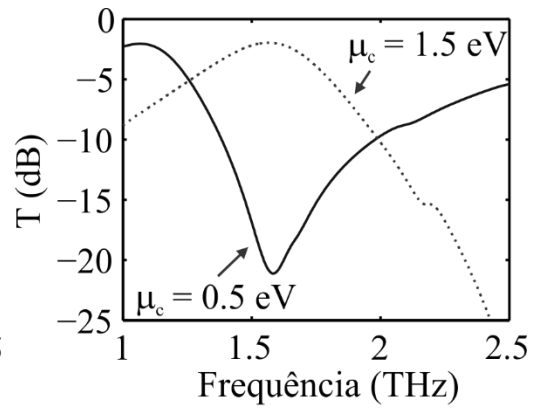


Fig 5b

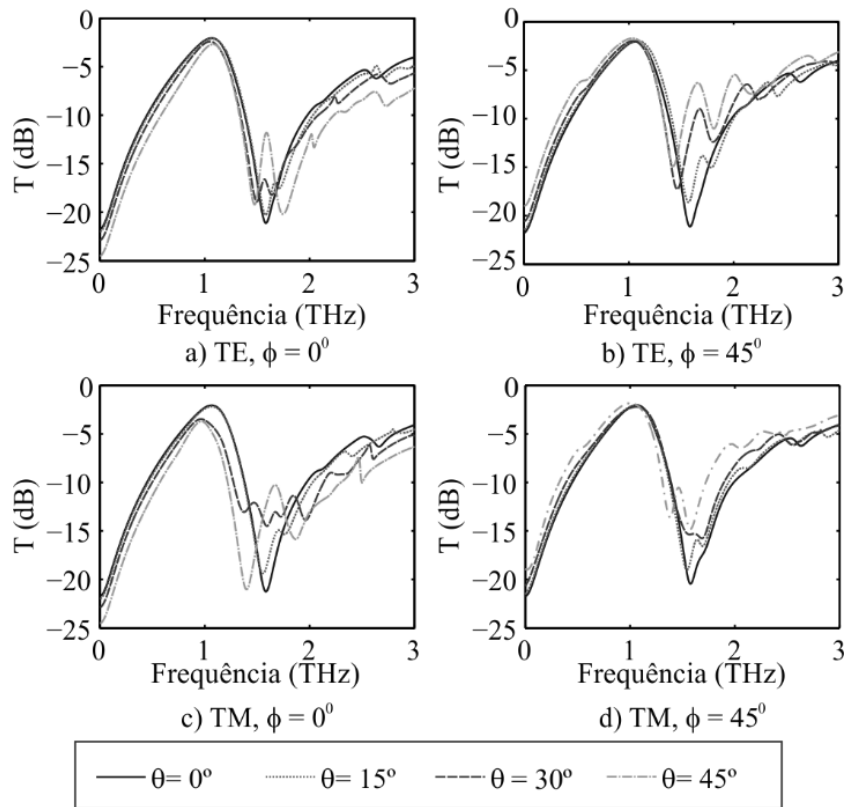


Fig. 6