



REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL
MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA, COMÉRCIO E SERVIÇOS
INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL

CARTA PATENTE Nº BR 102015025682-5

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 102015025682-5

(22) Data do Depósito: 29/09/2015

(43) Data da Publicação Nacional: 12/06/2018

(51) Classificação Internacional: G02B 5/20; H01Q 15/00; B82Y 20/00; C01B 32/182.

(52) Classificação CPC: G02B 5/204; H01Q 15/002; B82Y 20/00; C01B 32/182; C01B 2204/20.

(54) Título: FILTRO ELETROMAGNÉTICO PLANAR EM THZ BASEADO EM GRAFENO COM PEQUENA DEPENDÊNCIA COM ÂNGULO DE POLARIZAÇÃO E ÂNGULO DE INCIDÊNCIA

(73) Titular: UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, Instituição de Ensino e Pesquisa. CGC/CPF: 34621748000123. Endereço: Av. Augusto Correa nº 1, Cidade Universitaria José da Silveira Netto, Guamá, Belém, PA, BRASIL(BR), 66075-900

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

Prazo de Validade: 20 (vinte) anos contados a partir de 29/09/2015, observadas as condições legais

Expedida em: 14/02/2023

Assinado digitalmente por:

Alexandre Dantas Rodrigues

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



Relatório descritivo **“FILTRO ELETROMAGNÉTICO PLANAR EM THZ BASEADO EM GRAFENO COM PEQUENA DEPENDÊNCIA COM ÂNGULO DE POLARIZAÇÃO E ÂNGULO DE INCIDÊNCIA”**.

[001] A patente de invenção apresentada refere-se a um filtro eletromagnético que opera na faixa de terahertz, com pouca dependência de polarização da onda eletromagnética incidente e com pouca dependência com o ângulo de incidência desta onda. A estrutura consiste em uma superfície seletiva de frequências construída unicamente em anéis de grafeno com dimensões diferentes, colocados sobre um substrato dielétrico fino sem a necessidade de inserção de outros elementos metálicos. O dispositivo destina-se ao controle da propagação de um sinal eletromagnético em um canal de comunicação, permitindo a passagem de sinais que pertençam a um determinado intervalo de frequência e bloqueando em outros (função de filtragem).

[002] Do ponto de vista estrutural, pode-se obter um comportamento de filtragem ao se fazerem arranjos periódicos de camadas metálicas suportadas por substratos dielétricos ou giromagnéticos. Estes meta-materiais possuem a principal característica de filtragem de sinais incidentes devido a excitação de ressonâncias eletromagnéticas em determinadas frequências.

[003] Arranjos de camadas metálicas, em geral, possuem características de filtros rejeita-faixa enquanto que sua estrutura complementar (placa metálica com furos de ar) possuem características de passa-faixa, o que está de acordo com o princípio de Babinet. Pode-se ainda combinar os dois efeitos a fim de obter meta-estruturas que proporcionariam o controle de mais características como intensidade, polarização e fase em certas faixas de frequência, o que possibilitaria aplicações nas mais diversas faixas de frequência do espectro eletromagnético. Sendo que a presente invenção é projetada para operar na faixa de terahertz (THz)

[004] A faixa de THz é comumente reconhecida como compreendendo o intervalo de 0,3 a 10 THz. Sistemas de comunicação nesta faixa de frequências ainda permanece pouco explorado, sendo que apenas nas duas últimas décadas é que temos referências de trabalhos e propostas de dispositivos que operem

nesta região do espectro. Estudos recentes mostram que este intervalo de frequências possui um potencial de aplicação para comunicações à curtas distâncias, sendo que alguns autores sugerem, inclusive, que a comunicação na faixa de THz poderá substituir as comunicações baseadas em giga-hertz (GHz) (Wireless e Bluetooth, por exemplo) até meados do ano de 2023. Dispositivos que operam em micro-ondas (GHz), apresentam uma limitada largura de banda, em torno de 500 Mb/s para curtas distâncias, sendo diminuída para cerca de 200Mb/s para distâncias usuais de comunicação.

[005] Dispositivos que operam em THz, por outro lado, estão apresentando larguras de banda consideravelmente maiores, possibilidade de comunicação mais seguras, sofrem menos atenuação com fatores atmosféricos, dentre outros fatores. Estas características permitem com que dispositivos projetados para operar na faixa de THz possam alcançar aplicações em que não seja possível usar dispositivos baseados em outras faixas de frequência.

[006] Estas vantagens do uso das ondas nas faixas de THz levou a comunidade científica e tecnológica a produção de dispositivos que supram a carência de aplicações destinadas à comunicações neste intervalo de frequências, como exemplo, temos a patente CN103779636A faz referência a um dispositivo que opera na faixa de THz, e é baseada em um arranjo de blocos de silício dopados de forma que sua resistividade seja diferente de uma camada pra outra.

[007] Já patente CN203707291U refere-se à um filtro que opera entre 1,5 e 2,4 THz é composto de um arranjo periódico de elementos de cobre com uma geometria denominada de *biscuit-shaped* postas sobre um substrato de silício. Este filtro apresenta uma estreita faixa de transmissão na frequência central de aproximadamente 2,25 THz e uma alta reflexão no restante da janela de trabalho. Contudo esta estrutura não apresenta a possibilidade de controle da janela de transmissão.

[008] A patente CN103592711A, apresenta um filtro baseado em ondas plasmônicas que opera na faixa de THz, que se baseia de um arranjo periódico de elementos metálicos de alumínio de espessuras diferentes postos uns ao lado dos outros. O dispositivo se baseia na propagação de ondas plasmônicas e trabalha

na frequência central de 1 THz. Contudo este, também, não permite o controle das características.

[009] Para operação em THz, o dispositivo apresenta as seguintes características:

[010] a) uma célula unitária de tamanho igual a $100 \mu m$; que representa a distância entre os centros das células vizinhas.

[011] b) o anel de grafeno superior possui um diâmetro externo de $40 \mu m$ e um diâmetro interno de $16 \mu m$;

[012] b) o anel de grafeno inferior possui um diâmetro externo de $80 \mu m$ e um diâmetro interno de $32 \mu m$;

[013] c) o substrato possui uma permissividade dielétrica igual a 3,75 com uma tangente de perdas igual a 0,0184;

[014] d) ao ser aplicado um potencial químico de 0,6 eV sobre o grafeno, tem-se uma janela de transmissão com -1,8 dB e um fator de qualidade igual a 5 na frequência central de 0,8 THz e dois picos de reflexão de -15 dB e -20 dB nas frequências de 0,6 THz e 1,67, respectivamente.

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

[016] O dispositivo é baseado em grafeno, que é um material que pode ser entendido como uma única camada de átomos de carbono arranjados formando uma rede hexagonal. Suas propriedades físicas o tornam um material promissor para aplicações em fotônicas. Uma característica única deste material é o fato de que as propriedades metálicas do grafeno podem ser controladas por campos elétricos externos. Este campo altera a densidade dos portadores e, portanto, a condutividade do material. Efeito, este que é usado para o ajuste das características de funcionamento do dispositivo sem, contudo, a necessidade de se alterar os parâmetros geométricos.

[017] A fim de se obter tal efeito de filtragem, o dispositivo aqui apresentado utiliza-se de repetições de uma mesma estrutura denominada célula unitária. A célula em questão é composta de dois anéis espessos concêntricos posicionados nas faces superior e inferior de uma camada fina de um substrato dielétrico.

[018] O grafeno é modelado através de sua condutividade de acordo com o formalismo de Kubo na sua aproximação de intrabanda pra faixas de frequência de terahertz:

$$[019] \quad \sigma = -j \frac{e^2 k_B T}{\pi \hbar^2 (\omega - 2j\Gamma)} \left[\frac{\mu_c}{k_B T} + 2 \ln \left(e^{-\frac{\mu_c}{k_B T}} + 1 \right) \right], \quad \varepsilon = \varepsilon_0, \quad \mu = \mu_0;$$

[020] onde:

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

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

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

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

[025] e) π é igual a 3.14;

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

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

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

[029] i) μ_c é o potencial químico aplicado a folha de grafeno (e elétron-volts);

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

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

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

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

[034] n) j é a unidade imaginária;

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

[036] A figura 1 mostra a representação esquemática do dispositivo.

[037] A figura 2 resposta em frequência do dispositivo para $\mu_c = 0,6 \text{ eV}$.

[038] A figura 3 apresenta a distribuição de corrente no dispositivo.

[039] A figura 4 apresenta a distribuição de campo elétrico e magnético na região próxima ao dispositivo.

[040] A figura 5a apresenta a resposta em frequência do dispositivo para dois valores de ângulo de incidência e polarização TE de onda incidente, figura 5b

para polarização TM de onda incidente, figura 5c para diferentes valores de potencial químico aplicado sobre o grafeno.

[041] A Fig. 1 apresenta uma descrição da configuração geométrica do dispositivo. Fig 1a mostra a vista superior e frontal da célula unitária **101** do meta-átomo na qual os anéis de grafeno **102** estão posicionados em ambos os lados de um substrato dielétrico **103**.

[042] Na figura 1b está representada uma vista lateral da célula unitária da estrutura **110**. O anel superior **104** é caracterizado por um diâmetro externo **106** e interno **107**. E o anel inferior é caracterizado por um diâmetro externo **109** e interno **108**. Para a operação otimizada célula unitária que **110** mede 100 μm . Os valores para os diâmetros externos **106** a interno **107** do anel superior são 16 μm e 40 μm , respectivamente. Enquanto que o diâmetro externo **108** e interno **109** do anel inferior são de 32 μm e 80 μm , respectivamente. Estes anéis estão separados por uma distância **111** de 10 μm .

[043] O princípio de funcionamento do filtro se baseia em uma combinação de ressonâncias plasmônicas nos elementos de grafeno excitadas por um sinal eletromagnética incidente. A direção de propagação desta radiação é representado por \mathbf{k} , com sua direção paralela representada por \mathbf{k}_{\parallel} na figura 1a. Estes sinais podem ser incididos sob qualquer orientação, ou seja, qualquer valor de θ e ϕ .

[044] Quando o sinal incidente possui uma frequência de 0,6 THz há excitação de uma ressonância plasmônica somente no anel superior (**104** na figura 1), levando a uma alta reflexão fazendo, assim, com que o sinal emitido seja rejeitado. Fato semelhante ocorre quando o sinal incidente tem a frequência de 1,67 THz contudo, nesse caso, a ressonância plasmônica ocorre no anel inferior (**105** na figura 1). Se a frequência da onda incidente atingir valores compreendidos dentro de um intervalo de frequência cujo o valor central é de 0,8 THz, há excitação de ressonância nos dois anéis simultaneamente as quais se cancelam mutuamente, fazendo com que o sinal passe a ser transmitido. O que garante o funcionamento deste dispositivo como um filtro. Este comportamento está de acordo com o tão bem documentado efeito de Fano ressonância. Esta resposta em frequência está mostrada na figura 2.

[045] As ressonâncias plasmônicas se dão devido à corrente que é induzida no material pela radiação incidente. Para os valores de frequência onde há uma maior reflexão, as correntes são induzidas com mais intensidade apenas nos anéis superiores ou inferiores como mostram esquematicamente as figuras 3a e 3b respectivamente. No intervalo de frequência central, onde há o cancelamento das ondas proveniente das ressonâncias mútuas nos dois anéis, as correntes são induzidas nos dois anéis mas com uma diferença de fase de π radianos. Este fator é determinante para que ocorra o pico central de máximo de transmissão. Este comportamento é representado esquematicamente na figura 3c.

[046] As componentes de campo elétrico que são excitadas, devido a ressonância da frequência central, na direção de polarização da onda incidente **402** é maior que as excitadas em outras direções **401** e **404**. Neste ponto as ondas apresentam um caimento exponencial, como é mostrado nas distribuições das componentes do campo magnético **405**, à medida que se afastam do arranjo, ficando, assim como altamente localizadas no interior do substrato **404** de altura representado por **408** na figura 4c.

[047] O filtro opera com boa eficiência mantendo um bom comportamento mesmo com à certa variação com respeito a ângulo de incidência e à polarização da onda incidente. A figura 5a e 5b mostram que as respostas em frequência do dispositivo para polarizações de onda incidente TE e TM, respectivamente, se mantem dentro do limite tolerado para aplicações em terahertz.

[048] O posicionamento em frequência destas janelas de transmissão e reflexão pode ser controlado alterando-se o valor do potencial químico aplicado no grafeno. Temos que aumentando o potencial químico de 0,6 eletrônvolt (eV), representado por **502** na figura 5c para 1,0 eV, representado por **503** na figura 5, desloca a janela de transparência para a direita. O inverso ocorre ao se diminuir o valor para 0,3 eV, por exemplo, mostrado por **501** na figura 5c.

REIVINDICAÇÕES

FILTRO ELETROMAGNÉTICO PLANAR EM THZ BASEADO EM GRAFENO COM PEQUENA DEPENDÊNCIA COM ÂNGULO DE POLARIZAÇÃO E ÂNGULO DE INCIDÊNCIA.

1. Filtro eletromagnético planar em THz baseado em grafeno com pequena dependência com ângulo de polarização e ângulo de incidência, **caracterizado por** ser composto de um arranjo periódico de células unitárias **101** de pares de anéis de grafeno **102** com dimensões diferentes postos com uma distância fixa, cada um de um lado de um substrato dielétrico **103 com** espessura **111**.

2. Filtro eletromagnético planar baseado em grafeno com pequena dependência com ângulo de polarização e ângulo de incidência, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado por** operar na faixa de (0,3-10) THz.

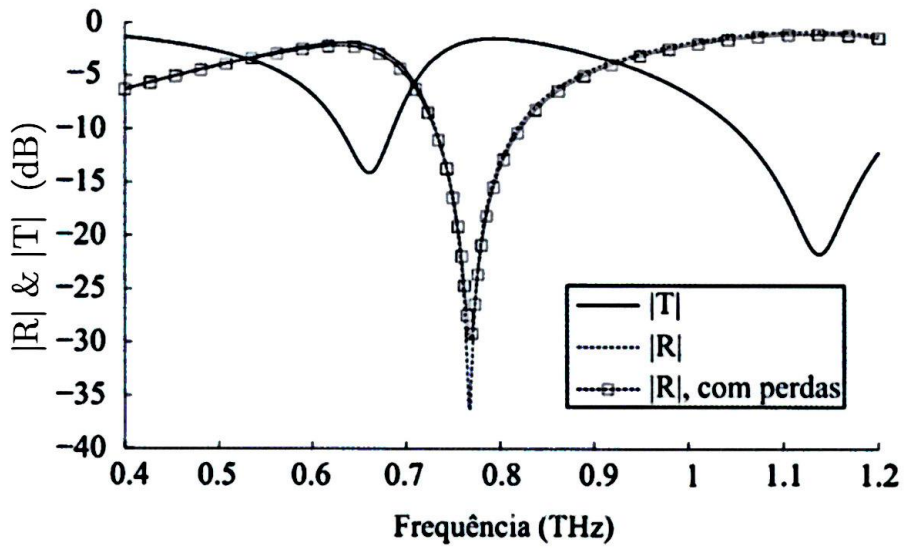
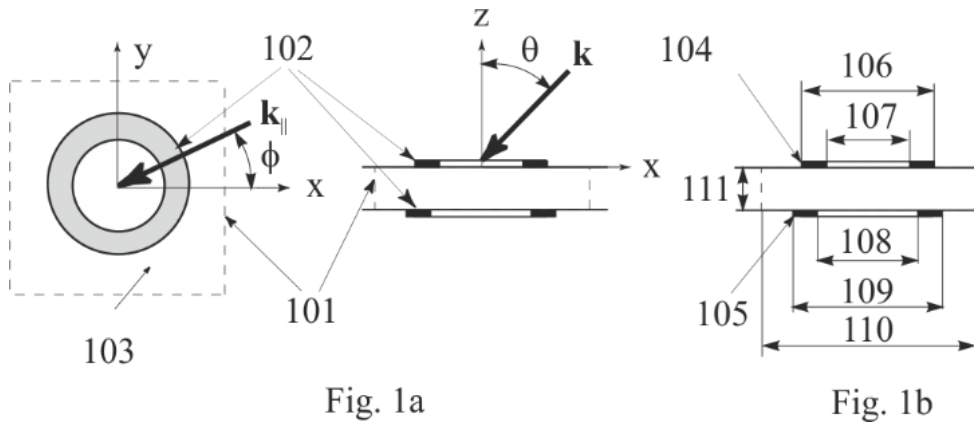
3. Filtro eletromagnético planar em THz baseado em grafeno com pequena dependência com ângulo de polarização e ângulo de incidência, de acordo com a reivindicação 1 e 2, **caracterizado por** ter seu princípio de funcionamento baseado em ressonâncias plasmônicas e efeito de Fano em anéis com diferentes diâmetros **106, 107 e 108, 109**.

4. Filtro eletromagnético planar em THz baseado em grafeno com pequena dependência com ângulo de polarização e ângulo de incidência, de acordo com a reivindicação 1 a 3, **caracterizado pelo** fato de que, na frequência central possui uma janela de transmissão, funcionando como filtro passa banda com um alto fator de qualidade e opera também como filtro rejeita faixa devido as diferentes diâmetros das aneis **106, 107 e 108, 109** separadas por substrato dielétrico **101**, nas frequências mais baixa e mais alta em relação a frequência central.

5. Filtro eletromagnético planar em THz baseado em grafeno com pequena dependência com ângulo de polarização e ângulo de incidência, de acordo com a reivindicação 1 a 4, **caracterizado por** apresentar níveis aceitáveis de transmissão e reflexão independente da polarização da onda

eletromagnética incidente e por apresentar pequena dependência com o ângulo de incidência devido a geometria circular das aneis **106, 107 e 108, 109** e geometria quadrada de célula unitária **103**.

6. Filtro eletromagnético planar em THz baseado em grafeno com pequena dependência com ângulo de polarização e ângulo de incidência, de acordo com a reivindicação 1 a 5, **caracterizado pelo** fato de que aplicando diferentes valores de potencial químico nos elementos de grafeno, a frequência central de filtragem esta deslocando o que permite controle dinâmico do filtro.



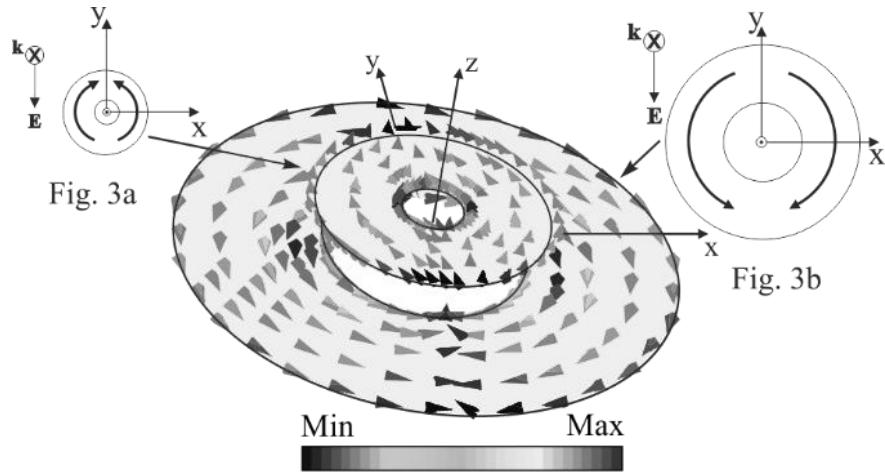


Fig. 3c

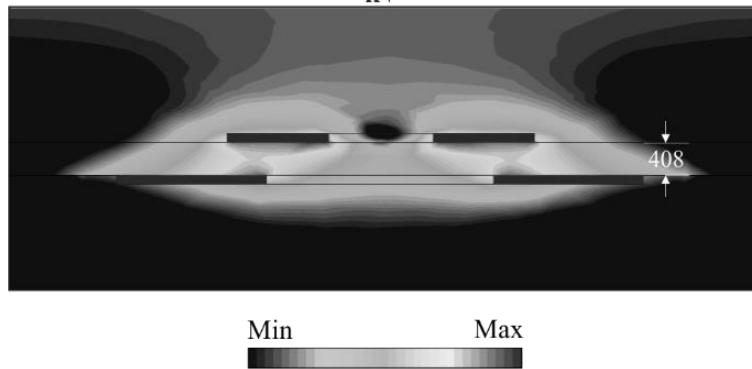
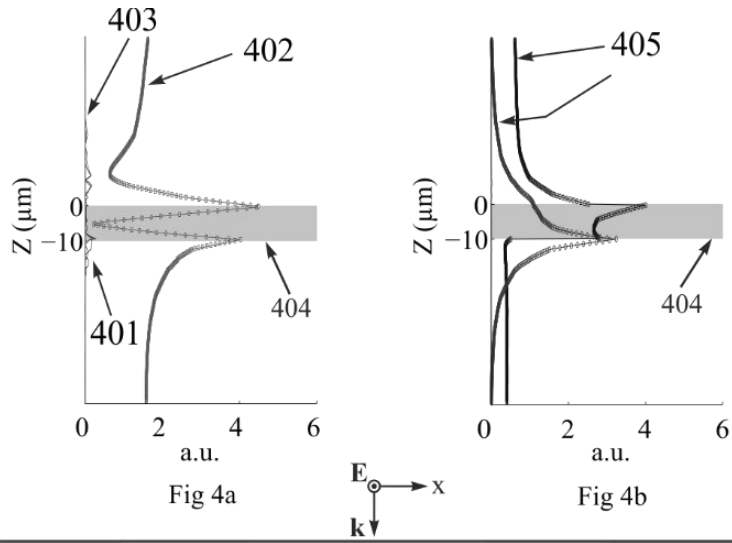


Fig 4c

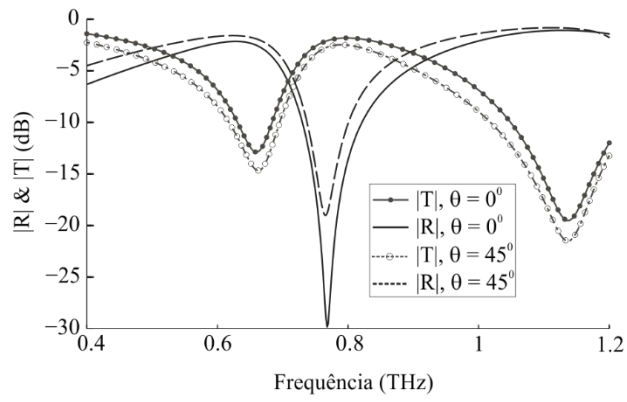


Fig. 5a

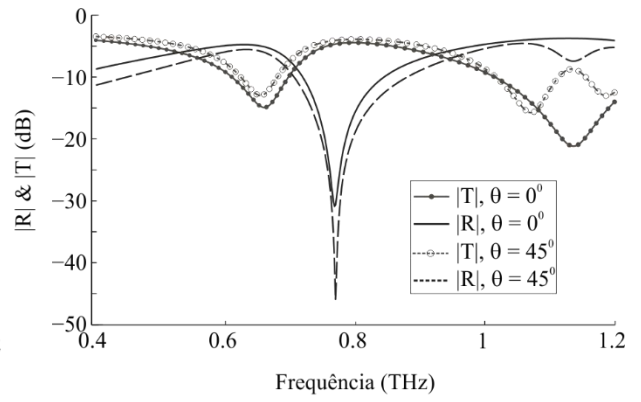


Fig. 5b

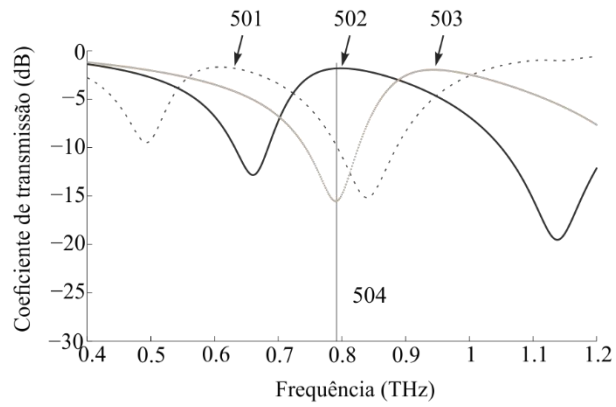


Fig. 5c