



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

CARTA PATENTE Nº BR 102016030663-9

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 102016030663-9

(22) Data do Depósito: 27/12/2016

(43) Data da Publicação Nacional: 17/07/2018

(51) Classificação Internacional: G02B 6/122; G02F 1/09; B82Y 20/00; H01S 5/026; G02F 1/095.

(52) Classificação CPC: G02B 6/1225; G02F 1/093; B82Y 20/00; H01S 5/026; G02F 1/0955; G02F 2202/32.

(54) Título: ISOLADOR COMPACTO BASEADO EM UM CRISTAL FOTÔNICO BIDIMENSIONAL COM REDE QUADRADA PARA OPERAÇÃO EM SISTEMAS DE SUB-TERAHERTZ

(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; GIANNI MASAKI TANAKA PORTELA; DAIMAM DARLAM ZIMMER.

Prazo de Validade: 20 (vinte) anos contados a partir de 27/12/2016, observadas as condições legais

Expedida em: 31/08/2021

Assinado digitalmente por:

Liane Elizabeth Caldeira Lage

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

ISOLADOR COMPACTO BASEADO EM UM CRISTAL FOTÔNICO BIDIMENSIONAL COM REDE QUADRADA PARA OPERAÇÃO EM SISTEMAS DE SUB-TERAHERTZ

[001] A presente invenção refere-se a um isolador compacto baseado em um cristal fotônico bidimensional com rede quadrada de cilindros dielétricos. São inseridos, no cristal fotônico, uma cavidade ressonante e um guia de ondas. Dois tocos (em inglês, *stubs*) e um cilindro de ferrite, no qual são excitados modos com formato semelhante ao de vórtices eletromagnéticos, compõem a cavidade ressonante do dispositivo.

[002] Um isolador é capaz de permitir a transmissão de sinais eletromagnéticos apenas no sentido direto (em inglês, *forward direction*), bloqueando a transmissão no sentido inverso (em inglês, *backward direction*). O sentido direto é o sentido fonte → carga e, neste caso, o isolador deve transmitir o sinal da fonte para a carga com baixas perdas de inserção. Por outro lado, o sentido inverso é o sentido carga → fonte e, no caso do presente isolador, o sinal parasita proveniente da carga é absorvido pelo cilindro de ferrite operando no regime de ressonância ferromagnética.

[003] Isoladores podem ser projetados para operação em diferentes faixas do espectro eletromagnético, de modo que a escolha dos materiais que os constituem deve levar em consideração a faixa de frequências de operação a que se destinam. Estruturas conhecidas como cristais fotônicos (em inglês, *photonic crystals*) têm ganhado cada vez mais destaque no desenvolvimento de dispositivos para controle do fluxo eletromagnético, especialmente para operação nos regimes de sub-terahertz (sub-THz), terahertz (THz) e óptico, já que permitem o desenvolvimento de circuitos com alto nível de integração de componentes.

[004] Estas estruturas são caracterizadas pela modulação periódica da permissividade elétrica dos materiais constituintes. Tal periodicidade está relacionada à existência de uma banda de frequências proibidas, conhecida como *photonic band gap*. Sinais eletromagnéticos com frequência localizada no interior da referida faixa não podem se propagar ao longo do cristal fotônico.

[005] Serão apresentadas, a seguir, algumas patentes que tratam de isoladores baseados em cristais fotônicos.

[006] A patente US20020154403A1 trata de um isolador composto por um substrato magneto-óptico que apresenta efeito de Faraday e por um par de polarizadores baseados em cristais fotônicos. Os dois polarizadores são colocados em superfícies opostas do substrato magneto-óptico, de modo que o dispositivo permite a seleção de componentes de campo do sinal de entrada com polarização específica.

[007] A patente US6952300B2 faz referência a um isolador composto por um substrato e um canal óptico, por onde pode ocorrer a propagação de sinais eletromagnéticos. O canal óptico inclui uma estrutura baseada em cristais fotônicos capaz de promover o efeito de rotação de Faraday. O arranjo final funciona como isolador, ou seja, permite a propagação de sinais eletromagnéticos ao longo de apenas um sentido.

[008] A patente EP1677129 A1 descreve um isolador que funciona através do efeito de Faraday, sendo constituído por um cristal fotônico que apresenta guias de ondas de entrada e saída. O controle que o dispositivo exerce sobre um dado sinal eletromagnético está associado ao afunilamento da região onde ocorre o acoplamento entre os guias de entrada e de saída. Este estreitamento foi construído de tal modo que o sinal viajante no sentido direto (guia de entrada → guia de saída) é transmitido, enquanto que o sinal viajante no sentido inverso é bloqueado pelo isolador.

[009] Por fim, a patente CN103592781 descreve um isolador que consiste em uma heterojunção baseada em cristais fotônicos, projetado para operação na faixa de frequências de terahertz. A estrutura contém portas de entrada e saída com tamanhos diferentes, assim como dois cristais fotônicos com a mesma constante de rede e com raios dos furos distintos. Através do ajuste dos raios dos furos que constituem os dois cristais fotônicos e dos tamanhos das portas de entrada e saída, alta transmissão no sentido direto e alta isolação no sentido inverso podem ser obtidas.

[010] O cilindro central do isolador desenvolvido é constituído por uma ferrite, cujo tensor de permeabilidade magnética pode ser modificado através da aplicação de um campo magnético DC externo. Através da variação do campo magnético DC aplicado sobre o cilindro de ferrite, é possível o ajuste da resposta em frequência do isolador em questão.

[011] O princípio de funcionamento do presente isolador está relacionado à operação do cilindro de ferrite no regime de ressonância ferromagnética (RFM). O perfil de campo eletromagnético no referido cilindro é semelhante ao de um vórtice eletromagnético, para ambos os sentidos de propagação (direto e inverso).

[012] A invenção aqui detalhada é caracterizada por apresentar baixas perdas de inserção para propagação no sentido direto, alta isolação para propagação no sentido inverso e grande largura de banda de operação.

[013] Em linhas gerais, o dispositivo é composto por um cristal fotônico bidimensional em que são inseridos um guia de ondas e uma cavidade ressonante. A cavidade ressonante é constituída por dois *stubs* – formados através do deslocamento e da remoção de cilindros dielétricos do cristal – e por um cilindro de ferrite.

[014] O princípio de funcionamento do dispositivo está associado à aplicação de um campo magnético DC externo $\pm H_0$ sobre o cilindro de ferrite, paralelo ao eixo deste cilindro. Na situação onde há a aplicação do campo $+H_0$, o dispositivo permite a passagem do sinal da porta de entrada para a porta de saída (sentido direto), enquanto bloqueia o sinal que se propaga no sentido oposto (inverso). Por outro lado, o dispositivo tem o sentido de operação alterado quando da aplicação de um campo $-H_0$, ou seja, o sinal que antes era bloqueado (sentido inverso) passa a ser transmitido e o que era transmitido (sentido direto) passa a ser bloqueado.

[015] São apresentados, nos parágrafos seguintes, detalhes relacionados à estrutura e ao princípio de funcionamento do dispositivo desenvolvido.

[016] O cristal fotônico em que o dispositivo é baseado consiste de cilindros dielétricos feitos de Arseneto de Gálio (GaAs) imersos em ar, dispostos em uma rede quadrada.

[017] Os cilindros dielétricos apresentam raio igual a $0,2a$ (a é a constante de rede do cristal, cujo valor depende da faixa de frequências de operação a que se destina o dispositivo). Por exemplo, para operação no entorno da frequência $f = 100$ GHz, $a = 1,065$ mm.

[018] O guia de ondas que compõe o isolador é formado através da remoção de uma fileira de cilindros dielétricos do cristal fotônico.

[019] A cavidade ressonante do isolador é composta por um cilindro de ferrite magnetizada e por dois *stubs* criados a partir do deslocamento, da remoção e do redimensionamento de alguns cilindros dielétricos localizados na região central do dispositivo.

[020] Os *stubs* promovem, além de reflexões do sinal incidente, a criação de uma região com alta concentração e rotação circular do campo eletromagnético AC na estrutura.

[021] O cilindro de ferrite magnetizada é colocado na região em que o guia de ondas e os *stubs* se encontram, região essa conhecida como “região de junção”.

[022] Quando o sinal eletromagnético se propaga no sentido direto, surge na cavidade ressonante uma alta concentração de campo girante. O perfil de campo eletromagnético no cilindro de ferrite assemelha-se ao de um vórtice eletromagnético que gira no sentido horário. Neste caso, o sinal é transmitido da fonte para a carga com baixas perdas de inserção.

[023] Na situação em que o sinal eletromagnético se propaga no sentido inverso, também surge no ressoador uma alta concentração de campo girante. O perfil de campo eletromagnético no cilindro de ferrite também se assemelha aquele de um vórtice eletromagnético, porém, com rotação no sentido anti-horário. Neste caso,

o sinal proveniente da carga é absorvido no cilindro de ferrite operando no regime de ressonância ferromagnética.

[024] A ferrite magnetizada é anisotrópica, com permeabilidade magnética e permissividade elétrica iguais a:

$$[\mu] = \mu_0 \begin{pmatrix} \mu & i\kappa & 0 \\ -i\kappa & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \varepsilon = 12,5\varepsilon_0.$$

[025] Onde:

ε é a permissividade elétrica do material (em Farads por metro);

ε_0 é a permissividade elétrica do espaço livre (em Farads por metro);

$[\mu]$ é o tensor permeabilidade magnética do material;

μ_0 é a permeabilidade magnética do espaço livre (em Henrys por metro);

[026] Os parâmetros μ e κ são definidos pelas fórmulas a seguir:

$$\mu = 1 + \chi_{xx}; \quad \kappa = -j\chi_{xy};$$

$$\chi_{xx} = \chi'_{xx} - j\chi''_{xx}; \quad \chi_{xy} = \chi'_{xy} + j\chi''_{xy};$$

$$\chi'_{xx} = \frac{\omega_m \omega_0 (\omega_0^2 - \omega^2) + \omega_m \omega_0 \omega^2 \alpha^2}{[\omega_0^2 - \omega^2 (1 + \alpha^2)]^2 + 4\omega_0^2 \omega^2 \alpha^2}; \quad \chi''_{xx} = \frac{\omega_m \omega \alpha [\omega_0^2 + \omega^2 (1 + \alpha^2)]}{[\omega_0^2 - \omega^2 (1 + \alpha^2)]^2 + 4\omega_0^2 \omega^2 \alpha^2};$$

$$\chi'_{xy} = \frac{\omega_m \omega [\omega_0^2 - \omega^2 (1 + \alpha^2)]}{[\omega_0^2 - \omega^2 (1 + \alpha^2)]^2 + 4\omega_0^2 \omega^2 \alpha^2}; \quad \chi''_{xy} = \frac{2\omega_m \omega_0 \omega^2 \alpha}{[\omega_0^2 - \omega^2 (1 + \alpha^2)]^2 + 4\omega_0^2 \omega^2 \alpha^2}.$$

[027] Onde:

ω é a frequência angular (em rad/s);

$\omega_0 = \gamma H_0$ é a frequência de Larmor;

γ é a razão giromagnética ($2,332 \times 10^5$ rad/s por A/m);

H_0 é a intensidade do campo magnético DC aplicado sobre a ferrite (2700 A/m);

$\omega_m = \gamma M_s$ é a frequência de Larmor na magnetização de saturação;

M_s é a magnetização de saturação da ferrite (398 kA/m);

$\alpha = \frac{\gamma \Delta H}{2\omega}$ é o fator de amortecimento;

ΔH é um parâmetro da ferrite conhecido como *linewidth* (15,91 kA/m).

[028] A seguir, são apresentadas as figuras que irão auxiliar na descrição do dispositivo e do respectivo princípio de funcionamento.

[029] A figura 1 apresenta a visão superior do isolador desenvolvido.

[030] A figura 2 mostra, de forma esquemática, o isolador desenvolvido operando nos regimes de propagação direto (figura 2a) e inverso (figura 2b). Na figura 2a é possível observar que, no sentido direto, um sinal eletromagnético injetado na porta de entrada (101) é transmitido para a porta de saída (102), com baixas perdas no cilindro de ferrite (103), que faz parte da cavidade ressonante a qual também pertencem os *stubs* (104) e (105). Por outro lado, na figura 2b, pode-se observar que, no sentido inverso, o sinal eletromagnético proveniente da porta (102) é absorvido no cilindro de ferrite (103), de modo que não há transmissão para a porta (101).

[031] As figuras 3 e 4 apresentam, em detalhes, o isolador operando nos regimes de propagação direto e inverso, respectivamente. Nelas estão representados os cilindros de GaAs (Arseneto de Gálio) embebidos em ar, dispostos em uma rede quadrada periódica que constitui o cristal fotônico, as portas de entrada (101) e de saída (102) – localizadas nas extremidades do guia de ondas que compõe o dispositivo –, a cavidade ressonante localizada na região de junção e a componente E_z do campo eletromagnético no dispositivo.

[032] A figura 5 apresenta a resposta em frequência do dispositivo para as situações em que o sinal eletromagnético se propaga nos sentidos direto e inverso. O eixo das abscissas contém os valores de frequência (em terahertz) e o eixo das ordenadas contém o valor dos coeficientes de transmissão (em decibéis).

[033] A estrutura do cristal fotônico em que se baseia o presente isolador é mostrada na figura 1. Também são apresentadas, nesta mesma figura, as portas de entrada (101) e de saída (102) (conectadas às extremidades do guia de ondas), bem como a cavidade ressonante do dispositivo. Fazem parte da

cavidade os *stubs* superior (104), formado pelo deslocamento e pelo redimensionamento do cilindro dielétrico (106), e inferior (105), formado pelo deslocamento e pelo redimensionamento do cilindro dielétrico (107), bem como pela remoção de um cilindro dielétrico da estrutura de cristal fotônico. O cilindro de ferrite magnetizada (103) também compõe a cavidade ressonante do dispositivo.

[034] O comportamento não recíproco do dispositivo pode ser observado, de forma simplificada, nas figuras 2a e 2b. A propagação de sinais eletromagnéticos no sentido direto, com baixas perdas de inserção, é apresentada na figura 2a. Neste caso, o sinal proveniente da porta (101), ao alcançar a cavidade ressonante formada pelo cilindro de ferrite (103) e pelos *stubs* (104) e (105), sofre múltiplas reflexões. O cilindro de ferrite (103), que está sob a influência de um campo magnético DC \mathbf{H}_0 , apresenta uma concentração de campo referente à componente E_z no seu interior, de modo que o perfil de campo eletromagnético no cilindro possui o formato de um vórtice que gira no sentido horário. Este perfil especial de campo é fruto da combinação das reflexões geradas na cavidade com o sinal proveniente da porta de entrada. As baixas perdas de inserção, neste caso, devem-se ao fato de que a componente de campo da onda incidente gira no sentido oposto ao movimento de precessão do spin da ferrite, de modo que há uma pequena absorção da energia do sinal de entrada e a transmissão do mesmo para a porta de saída (102).

[035] Por outro lado, a propagação no sentido inverso, com alto isolamento entre as portas de entrada e saída, é ilustrada na figura 2b. Neste caso, um sinal eletromagnético proveniente da porta (102), ao alcançar a cavidade ressonante formada pelo cilindro de ferrite (103) e pelos *stubs* (104) e (105), também sofre múltiplas reflexões. O perfil da componente de campo eletromagnético E_z no cilindro de ferrite (103), que está sob a influência de um campo magnético DC \mathbf{H}_0 , apresenta o formato de um vórtice girante no sentido anti-horário. Tal perfil de campo é fruto da combinação das reflexões geradas na cavidade com o sinal oriundo da porta (102). A componente de campo da onda incidente gira no mesmo sentido que o movimento de precessão do spin da ferrite magnetizada, de

modo que há uma grande absorção da energia da onda incidente no cilindro de ferrite, com conseqüente isolamento entre as portas (101) e (102).

[036] Nas figuras 3 e 4 são apresentados, de modo detalhado, o dispositivo e a componente de campo eletromagnético E_z nos modos de propagação direto e inverso, respectivamente, quando da aplicação de um sinal eletromagnético com frequência situada na faixa de sub-THz. Na figura 3, pode-se verificar que o sinal proveniente da porta (101) é transmitido para a porta (102), com baixas perdas de inserção. Neste caso, é excitado o modo com formato de vórtice que gira no sentido horário no interior do cilindro de ferrite (103).

[037] Já na figura 4, pode-se verificar que o sinal proveniente da porta (102) não é transmitido para a porta (101), ou seja, há um grande isolamento entre as mesmas. Neste caso, o sinal incidente é absorvido pelo cilindro de ferrite operando no regime de ressonância ferromagnética. Pode-se observar também, nesta figura, o modo com formato de vórtice girando no sentido anti-horário no interior do cilindro de ferrite (103).

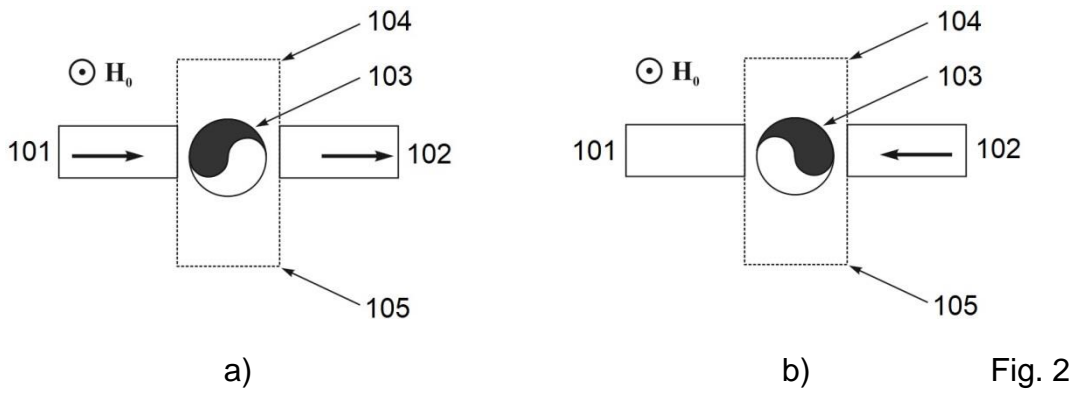
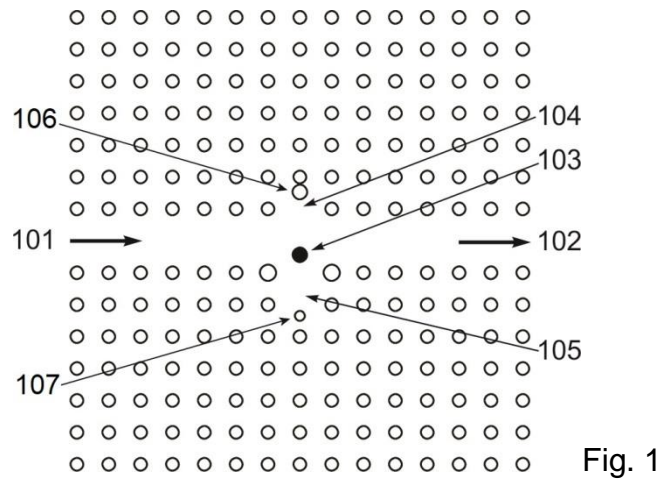
[038] A resposta em frequência do isolador é mostrada na figura 5. O dispositivo apresenta perdas de inserção (coeficiente de transmissão no sentido direto) menores que -1 dB, enquanto que a curva de isolamento (coeficiente de transmissão no sentido inverso) possui 2 pontos de mínimo local (-22 dB e -18 dB). A largura de banda, definida no nível de -15 dB da curva de isolamento, é de 0,8 GHz (para operação em torno da frequência central 106,6 GHz).

REIVINDICAÇÕES

1. Isolador compacto baseado em um cristal fotônico bidimensional com rede quadrada para operação em sistemas de sub-terahertz, **caracterizado pelo** fato de ser constituído por um cristal fotônico bidimensional baseado em uma rede quadrada com constante de rede igual a 1,065 mm de cilindros de arseneto de gálio com raio igual a 0,21 mm em que são inseridos um guia de onda com portas de entrada (101) e de saída (102) – criado através da remoção de uma fileira de cilindros dielétricos – e uma cavidade ressonante formada pelo *stub* (104) – criado a partir do deslocamento vertical e da alteração do raio do cilindro dielétrico (106) –, pelo *stub* (105) – criado a partir da remoção de um cilindro dielétrico e do deslocamento vertical e da alteração do raio do cilindro dielétrico (107) – e pelo cilindro de ferrite magnetizada (103) com raio igual a 0,24 mm.
2. Isolador compacto baseado em um cristal fotônico bidimensional com rede quadrada para operação em sistemas de sub-terahertz, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado por** apresentar uma cavidade ressonante em que modos localizados com formato de vórtice eletromagnético são excitados através da interação, no cilindro de ferrite magnetizada (103) operando em regime de ressonância ferromagnética que compõe a cavidade, entre a radiação incidente e as múltiplas reflexões originadas nos *stubs* (104) e (105).
3. Isolador compacto baseado em um cristal fotônico bidimensional com rede quadrada para operação em sistemas de sub-terahertz, de acordo com as reivindicações 1 e 2, **caracterizado pelo** fato de que o nível de absorção da energia eletromagnética incidente pelo cilindro de ferrite magnetizada (103) depende do sentido de rotação do modo de vórtice eletromagnético criado, que por sua vez depende do sentido de propagação da radiação incidente (direto ou inverso).
4. Isolador compacto baseado em um cristal fotônico bidimensional com rede quadrada para operação em sistemas de sub-terahertz, de acordo com as reivindicações 1 a 3, **caracterizado pelo** fato de que no sentido direto de propagação o vórtice eletromagnético excitado na cavidade ressonante gira no

sentido oposto ao movimento de precessão do spin no cilindro de ferrite (103), resultando em baixa absorção da energia eletromagnética incidente no cilindro de ferrite (103) e em perdas de inserção entre as portas (101) e (102) menores do que -1 dB na banda de frequências de operação do dispositivo (banda com frequência central igual a 106,6 GHz e largura igual a 0,8 GHz), enquanto que no sentido inverso de propagação o vórtice eletromagnético excitado na cavidade ressonante gira no mesmo sentido em relação ao movimento de precessão do spin no cilindro de ferrite (103), resultando em alta absorção da energia eletromagnética incidente no cilindro de ferrite (103) e em um nível de isolamento entre as portas (101) e (102) melhor do que -15 dB na supracitada banda de frequências de operação do dispositivo.

.



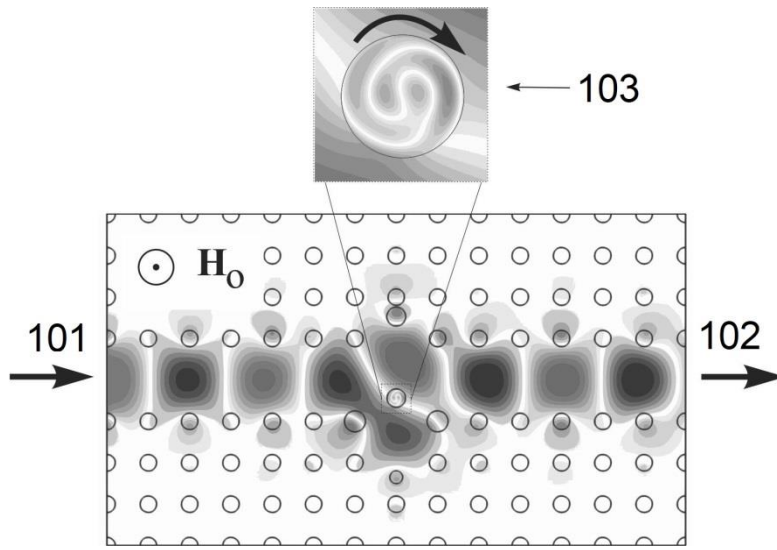


Fig. 3

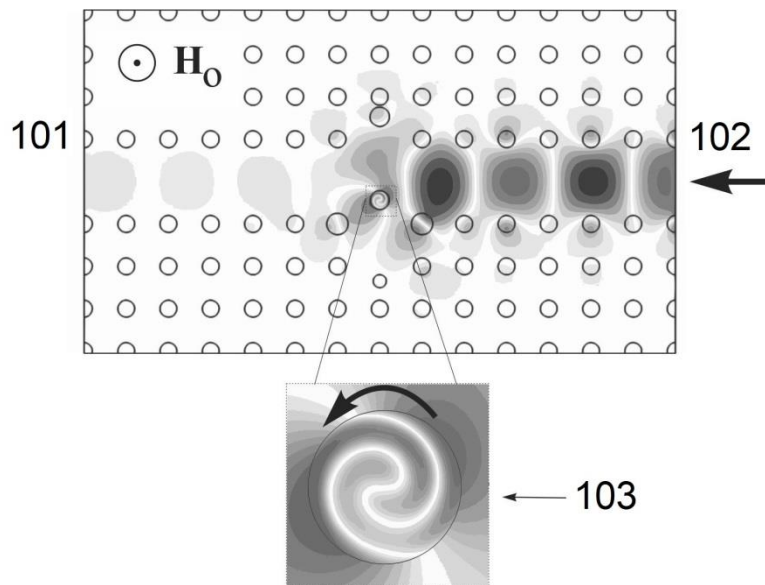


Fig.4

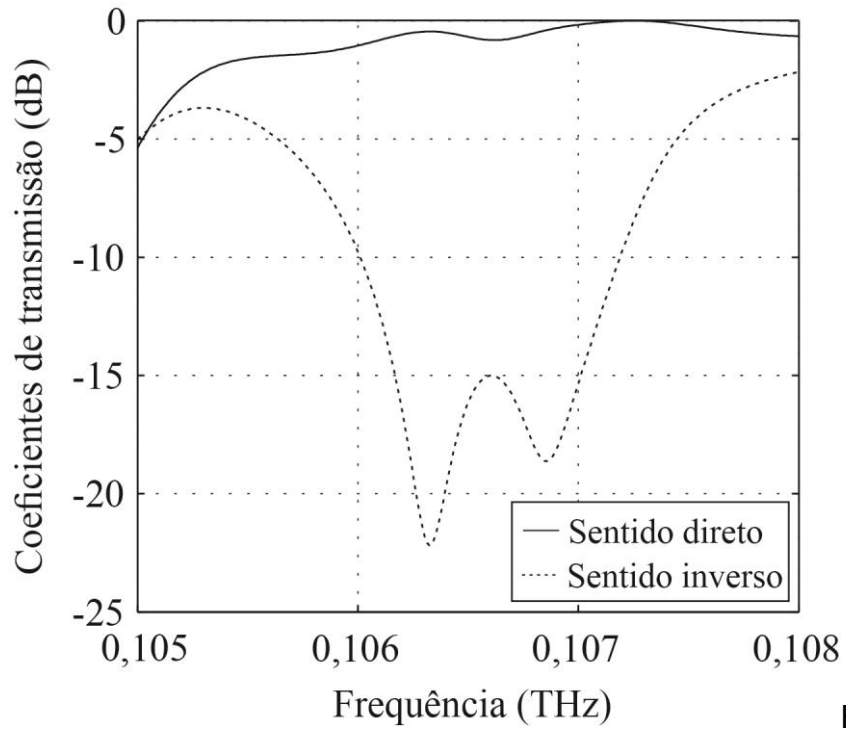


Fig. 5