



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

CARTA PATENTE Nº BR 102016008735-0

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 102016008735-0

(22) Data do Depósito: 19/04/2016

(43) Data da Publicação Nacional: 24/10/2017

(51) Classificação Internacional: G02F 1/095.

(54) Título: DISPOSITIVO MULTIFUNCIONAL OPERANDO COMO CHAVE E DIVISOR, BASEADO EM UM CRISTAL FOTÔNICO BIDIMENSIONAL COM REDE QUADRADA

(73) Titular: UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, Instituição de Ensino e Pesquisa. Endereço: Av. Augusto Correa n. 1 Cidade Universitaria José da Silveira Netto, Guamá, Belém, PA, BRASIL(BR), 66075-110, Brasileira

(72) Inventor: VICTOR DMITRIEV; LENO RODRIGUES MARTINS.

Prazo de Validade: 20 (vinte) anos contados a partir de 19/04/2016, observadas as condições legais

Expedida em: 10/08/2021

Assinado digitalmente por:

Liane Elizabeth Caldeira Lage

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



DISPOSITIVO MULTIFUNCIONAL OPERANDO COMO CHAVE E DIVISOR, BASEADO EM UM CRISTAL FOTÔNICO BIDIMENSIONAL COM REDE QUADRADA

[001] A invenção apresentada refere-se a um dispositivo multifuncional que atua como chave de duas operações e divisor de potência. Este dispositivo permite a realização de três diferentes funções: isolamento de duas portas de saída, divisão da potência de um sinal entre dois canais de saída e chaveamento entre duas portas de saída.

[002] Cristais fotônicos são estruturas periódicas formadas por materiais com diferentes índices de refração, nas quais, existe uma faixa de frequências proibida, chamada *photonic band gap*. Ondas eletromagnéticas com frequência nesta faixa são totalmente refletidas pelo cristal. Esse fenômeno é associado ao princípio de funcionamento de grande parte dos dispositivos baseados em cristais fotônicos.

[003] A função de um divisor de potência é repartir, entre dois ou mais canais de saída, a potência de um sinal presente em um canal de entrada. Já as chaves (em inglês, *switches*) permitem a seleção de diferentes canais de saída para um sinal eletromagnético de entrada e possuem dois estados de funcionamento, a saber: estado ligado (em inglês, *on*), onde ocorre a transmissão de um sinal eletromagnético ao longo do dispositivo, com baixas perdas de inserção entre as portas de entrada e saída do dispositivo; estado desligado (em inglês, *off*), onde há o impedimento da propagação do sinal, com alta isolamento entre as portas de entrada e saída.

[004] Várias patentes relacionadas a chaves e a divisores já foram depositadas, dentre as quais se destacam as citadas a seguir.

[005] Por exemplo, a chave mostrada na patente BR102014016547 é baseada em um cristal fotônico bidimensional, no qual são excitados modos dipolo na cavidade ressonante, que se baseia em um material magneto-óptico. Quando há aplicação de um campo magnético DC \mathbf{H}_0 , ocorre a passagem do sinal da entrada para a saída (estado *on*), enquanto que, sem aplicação de \mathbf{H}_0 , ocorre o bloqueio da passagem do sinal da entrada para a saída (estado *off*).

[006] Por outro lado, a chave apresentada na patente US2005249455 baseia-se em um guia de onda óptico, cujo núcleo é formado por um cristal fotônico bidimensional em que dois ou mais materiais, com diferentes índices de refração, são distribuídos periodicamente no espaço. A aplicação de um sinal luminoso ou de uma corrente elétrica entre eletrodos presentes na estrutura provoca a modificação do índice de refração dos materiais que compõem o cristal e, por consequência, o estado em que a chave opera (*on* ou *off*).

[007] Já o divisor mostrado na patente US2004008945 é baseado em um cristal fotônico com rede hexagonal, onde há a inserção de três guias de onda conectados a uma cavidade ressonante localizada no centro do dispositivo. Nesta estrutura, um sinal incidente em um guia de entrada é dividido igualmente entre dois guias de onda de saída.

[008] O dispositivo proposto, por ter como base a tecnologia de cristais fotônicos e por realizar a função dos dispositivos supracitados, pode ser construído com dimensões reduzidas, favorecendo o aumento na densidade de integração de componentes em sistemas de comunicações.

[009] De modo geral, o dispositivo desenvolvido possui três portas e é baseado em um cristal fotônico bidimensional com rede quadrada de cilindros dielétricos imersos em ar. Três guias de ondas (cada um deles relacionado a uma das portas) e uma cavidade ressonante são inseridos no cristal a partir da criação de uma série de defeitos, de forma controlada, na estrutura periódica do cristal. Sinais eletromagnéticos que se propagam no cristal fotônico são confinados nestes defeitos, haja vista a existência do *photonic band gap*. Os defeitos criados são classificados da seguinte maneira:

[010] a) Defeitos lineares: correspondem à remoção de fileiras de cilindros dielétricos e originam os guias de ondas do dispositivo;

[011] b) Defeitos locais: correspondem à alteração do raio e da posição de cilindros dielétricos localizados no dispositivo para formar a cavidade ressonante.

[012] O dispositivo baseia-se na ressonância dos modos dipolo que são excitados na cavidade ressonante para uma determinada faixa de frequências. 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. A seguir serão apresentados valores para uma das configurações possíveis, a fim de ilustrar o funcionamento do dispositivo:

[013] a) Para a frequência central de operação de 98,46 GHz, a constante de rede do cristal (a) é igual a 1,065 milímetros;

[014] b) O raio dos cilindros pertencentes à rede cristalina é igual a $0,2a$;

[015] c) Os três guias de ondas são inseridos através da criação de três defeitos lineares;

[016] d) A cavidade ressonante é formada por um cilindro central de ferrite e por dois cilindros dielétricos próximos a este com diâmetros reduzidos. O cilindro central é feito a partir de uma ferrite à base, por exemplo, de níquel-zinco e foi inserido em uma posição deslocada em relação ao eixo dos guias de onda horizontais.

[017] e) A ferrite é um material girotrópico, sendo caracterizada pelas seguintes expressões para a permissividade elétrica e a permeabilidade magnética:

[018] f)

$$\varepsilon = 12,5\varepsilon_0; \quad [\mu] = \mu_0 \begin{pmatrix} \mu & -i\kappa & 0 \\ i\kappa & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu_3 \end{pmatrix}$$

onde:

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

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

c) $[\mu]$ é o tensor permeabilidade magnética do material (em Henrys por metro);

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

e) i é a unidade imaginária;

f) μ é um parâmetro que pode ser calculado a partir da seguinte fórmula:

$$g) \mu = 1 + \frac{\omega_m(\omega_i + j\omega\alpha)}{(\omega_i + j\omega\alpha)^2 - \omega^2};$$

h) κ é um parâmetro que pode ser calculado a partir da seguinte fórmula:

$$i) \kappa = \frac{\omega_m \omega}{(\omega_i + j\omega\alpha)^2 - \omega^2};$$

j) Os parâmetros ω_m e ω_i , onde: ω é a frequência angular (em radianos por segundo), são definidos pelas fórmulas a seguir:

$$k) \omega_m = \gamma M_0 \text{ e } \omega_i = \gamma H_0;$$

l) M_0 é a magnetização de saturação da ferrite (398 quiloampère por metro), γ é a razão giromagnética ($2,33 \times 10^5$ radianos por segundo/Ampère por metro), α é o fator de amortecimento igual a 0,03175, ω é a frequência angular (em radianos por segundo) e H_0 é a intensidade do campo magnético externo DC aplicado (em quiloampère por metro);

[019] A figura 1 apresenta, de modo esquemático, o dispositivo em funcionamento quando há variação da intensidade do campo magnético DC H_0 aplicado.

[020] A figura 2 mostra a resposta em frequência do dispositivo na frequência central para o caso em que não há magnetização.

[021] A figura 3 mostra a resposta em frequência do dispositivo na frequência central para o caso em que é aplicado um campo magnético.

[022] A figura 4 mostra a resposta em frequência do dispositivo, na frequência central para o caso em que é aplicado um campo magnético de intensidade maior que o referenciado na figura anterior.

[023] A figura 5 apresenta, de forma esquemática, detalhes da geometria da cavidade ressonante.

[024] A figura 6 mostra a componente de campo eletromagnético E_z na frequência central, quando há variação da intensidade do campo magnético DC H_0 aplicado.

[025] O dispositivo desenvolvido é composta pelos guias de onda 1 (**101**), 2 (**102**) e 3 (**103**), como mostra a figura 1.

[026] Quando o dispositivo não está sob a influência de um campo magnético externo DC H_1 (figura 1a), um sinal eletromagnético aplicado no guia de entrada **101** é totalmente refletido e não se propaga para os guias **102** e **103**, correspondendo ao estado *off* do dispositivo. No caso em que há aplicação de um campo magnético externo DC $H_2 = 990$ quiloampère por metro (figura 1b), a

potência do sinal eletromagnético aplicado no guia **101** é dividida para os guias de saída **102** e **103**. Para o caso em que há aplicação de um campo magnético $H_3 = 2178$ quiloampère por metro, um sinal eletromagnético aplicado no guia de entrada **101**, pode se propagar para o guia 102 (figura 1c), se o sinal do campo for positivo, ou para o guia 103 (figura 1d), se o sinal do campo for negativo, correspondendo ao estado *on* do dispositivo.

[027] A resposta em frequência do dispositivo, para a situação em que não há magnetização, é apresentada na figura 2. Considerando a excitação na porta 1 (associada ao guia **101**), a largura de banda é aproximadamente igual a 1 GHz, referente aos níveis de -2 dB e -15 dB. Na frequência central normalizada $\omega a/2\pi c = 0,3495$, a isolação entre os guias de onda é maior que -30 dB.

[028] A resposta em frequência do dispositivo, para a situação em que é aplicado um campo magnético de intensidade $H_2 = 990$ quiloampère por metro, é apresentada na figura 3. Considerando a excitação na porta 1 (associada ao guia **101**), a largura de banda é aproximadamente igual a 1 GHz, referente aos níveis de -2 dB e -15 dB, e a divisão da potência do sinal de entrada é de aproximadamente -3dB, na frequência central normalizada $\omega a/2\pi c = 0,3495$.

[029] A resposta em frequência do dispositivo, para a situação em que é aplicado um campo magnético de intensidade $H_3 = 2178$ quiloampère por metro, é apresentada na figura 4. A largura de banda é maior que 1GHz, para o nível de -15dB, e as perdas de inserção são menores que -2dB.

[030] Uma das configurações possíveis para o funcionamento do dispositivo, pode ser vista na figura 5, onde o raio dos cilindros **501** é igual a $0,30562a$ e os raios dos cilindros **502** e **503** são iguais a $0,12a$.

[031] A componente E_z de campo na frequência central normalizada $\omega a/2\pi c = 0,3495$, no caso em que a excitação é aplicada no guia de ondas **101**, é mostrada na figura 6. Quando o campo magnético H_1 é igual a zero, ocorre o alinhamento do nó do dipolo excitado na cavidade ressonante com as portas 2 e 3 (associadas aos guias **102** e **103**), o que leva a isolação desses guias, conforme pode ser visto na figura 6a. Para o caso em que o campo magnético H_2 é igual a 990 quiloampère por metro, ocorre a variação da divisão entre os guias de saída **102** e **103** no intervalo de $(-3,8 \pm 1,0)$ dB, conforme mostrado na

figura 6b. No caso em que o campo magnético aplicado H_3 é igual a 2178 quiloampère por metro e o modo dipolo estacionário excitado na cavidade ressonante é rotacionado por um ângulo de 45° e possui nós alinhados com o guia de ondas **103**, se a direção do campo for positiva (figura 6c) ou possui nós alinhados com o guia de ondas **102** (figura 6d), se a direção do campo for negativa, o que proporciona o isolamento destes guias e a propagação do sinal para os guias **102** e **103**, respectivamente.

REIVINDICAÇÕES

1. Dispositivo multifuncional operando como chave e divisor, baseado em um cristal fotônico bidimensional com rede quadrada, **caracterizado por** ser constituído de um cristal fotônico, no qual são inseridos três guias de onda **(101)**, **(102)** e **(103)**, através da criação de três defeitos lineares; e uma cavidade ressonante, formada por um cilindro central de ferrite **(501)**, e por dois cilindros dielétricos **(502)** e **(503)**, próximos a este, que através da variação de intensidade do campo magnético externo DC H_0 aplicado no cilindro de ferrite que compõe a cavidade é capaz de executar três funções: isolamento, chaveamento e divisão de potência de sinais eletromagnéticos.
2. Dispositivo multifuncional operando como chave e divisor, baseado em um cristal fotônico bidimensional com rede quadrada, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado por** bloquear a passagem de sinais eletromagnéticos, quando não há magnetização (estado off).
3. Dispositivo multifuncional operando como chave e divisor, baseado em um cristal fotônico bidimensional com rede quadrada, de acordo com as reivindicações 1 e 2, **caracterizado por** dividir a potência de um sinal de entrada entre duas portas de saída.
4. Dispositivo multifuncional operando como chave e divisor, baseado em um cristal fotônico bidimensional com rede quadrada, de acordo com as reivindicações 1, 2 e 3, **caracterizado por** permitir a seleção de duas portas de saída para um sinal eletromagnético de entrada de acordo com a direção do campo magnético aplicado.

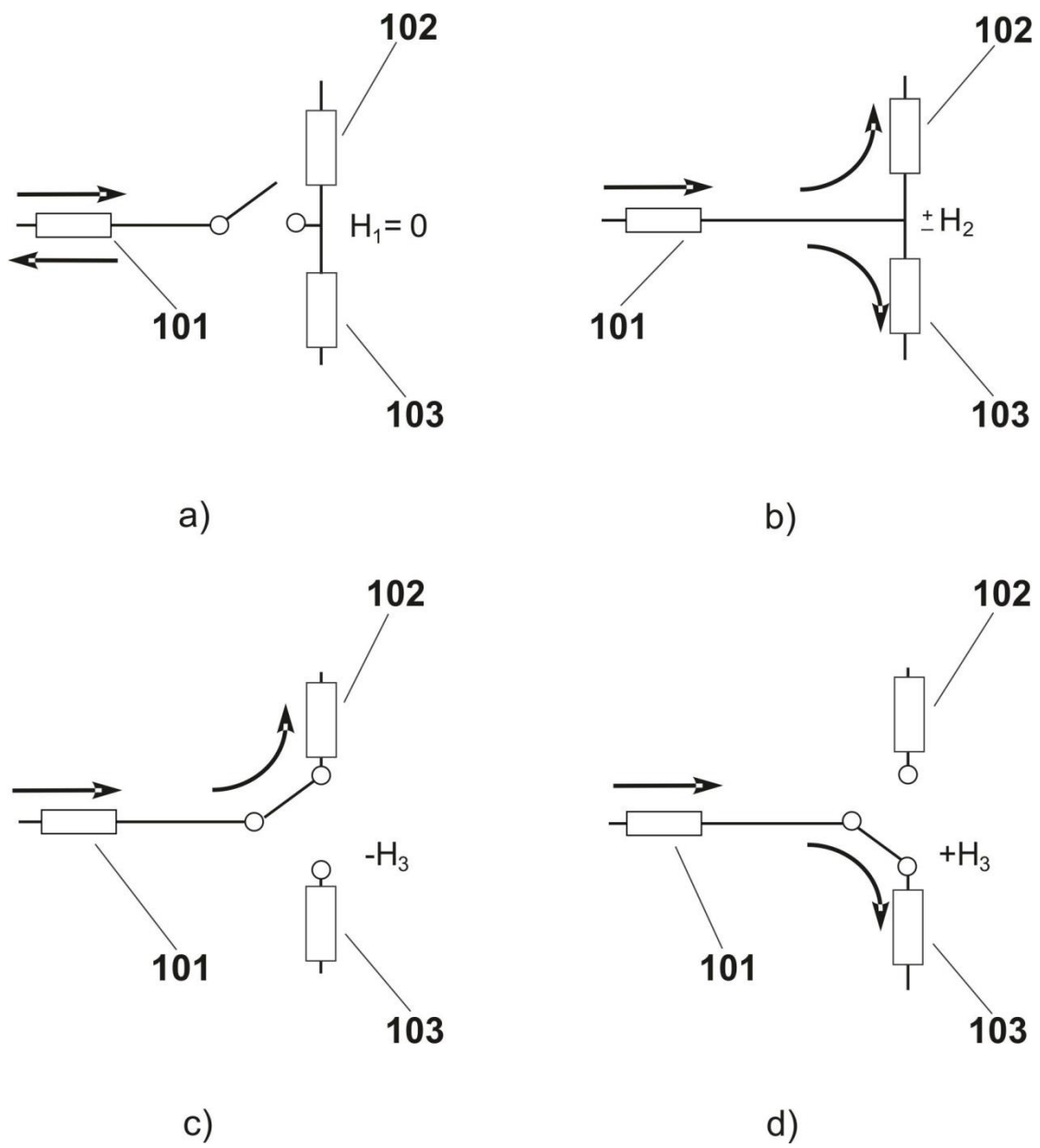


Fig. 1

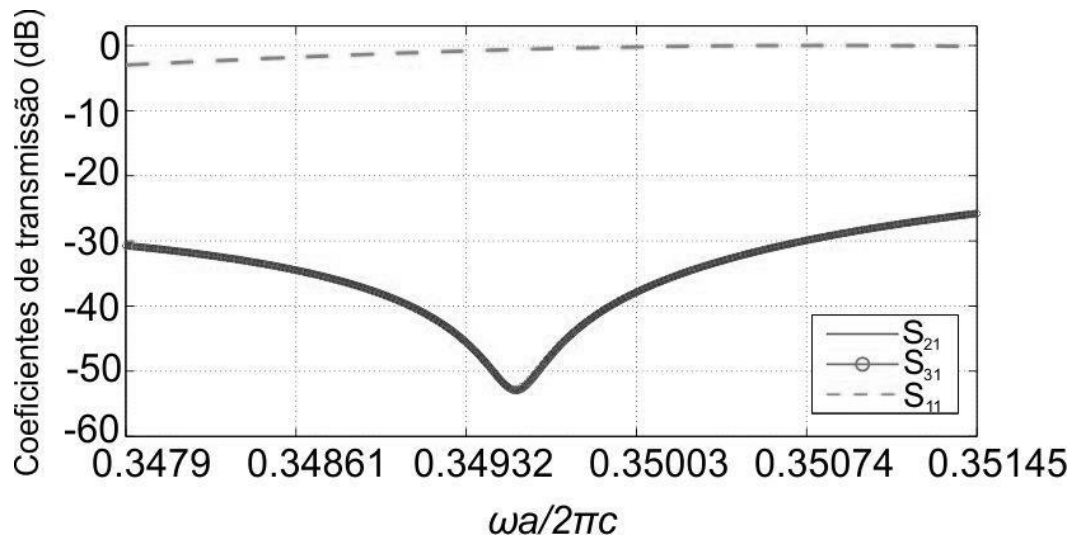


Fig. 2

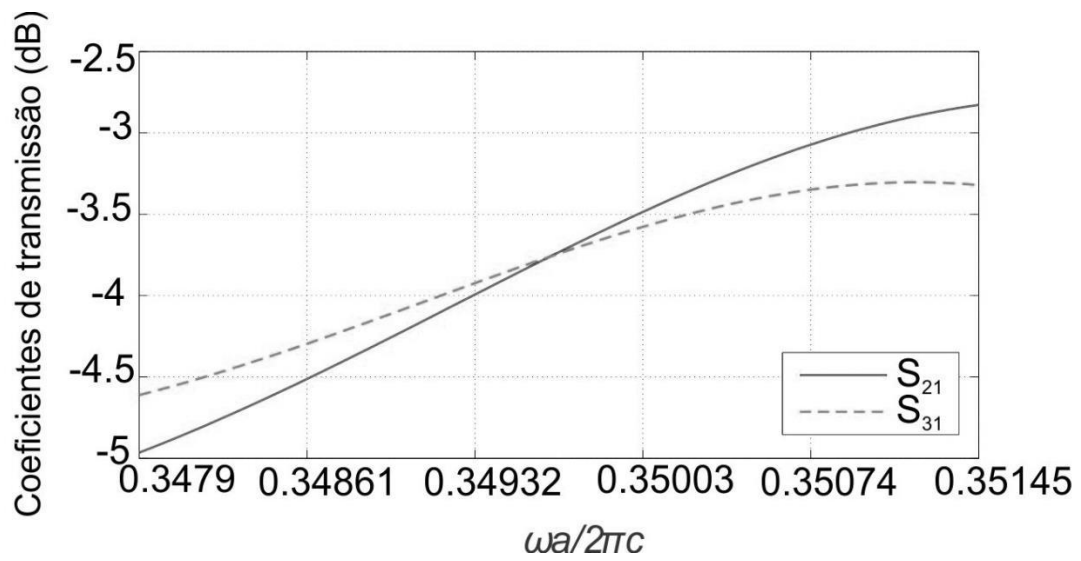


Fig. 3

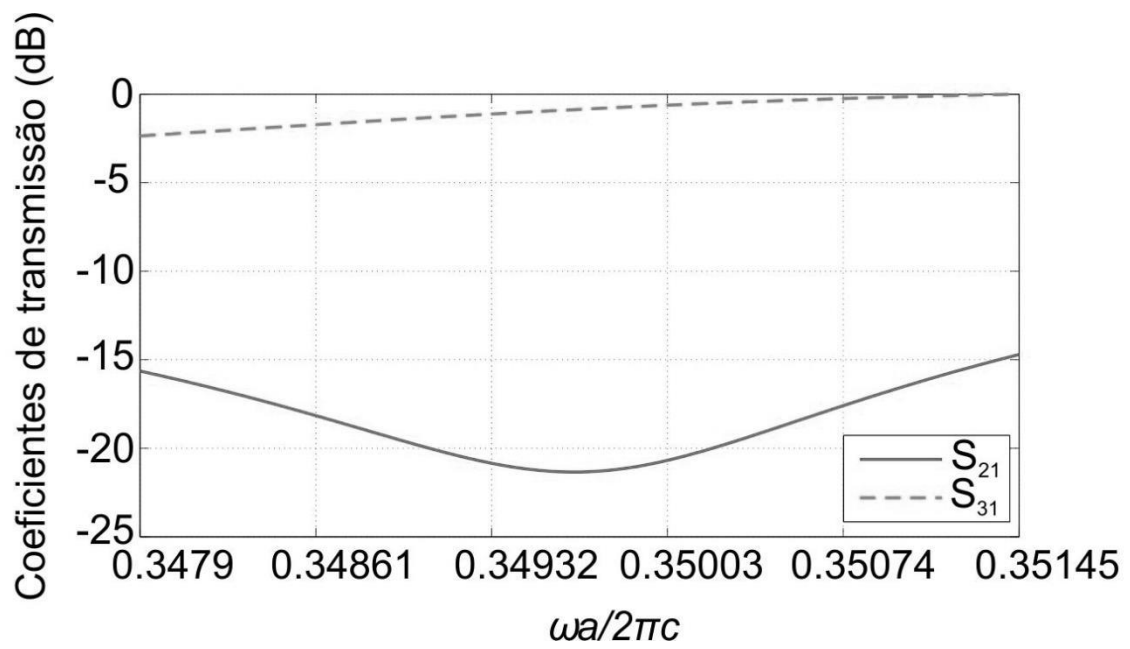


Fig. 4

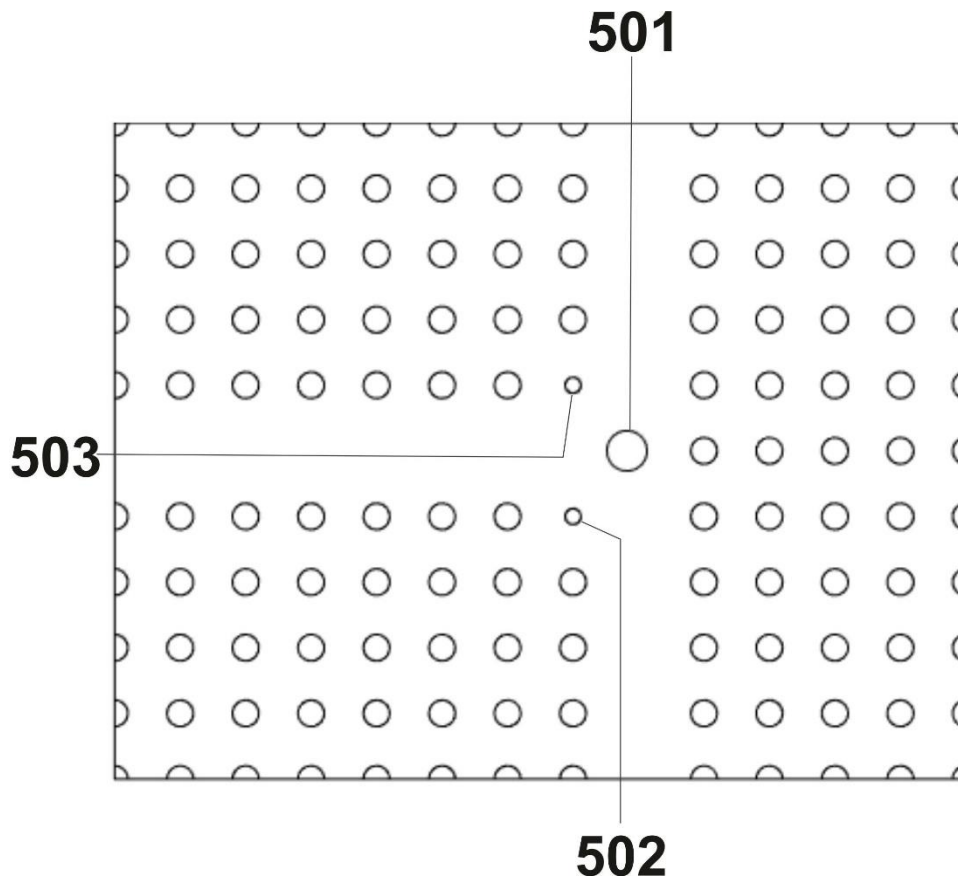


Fig. 5

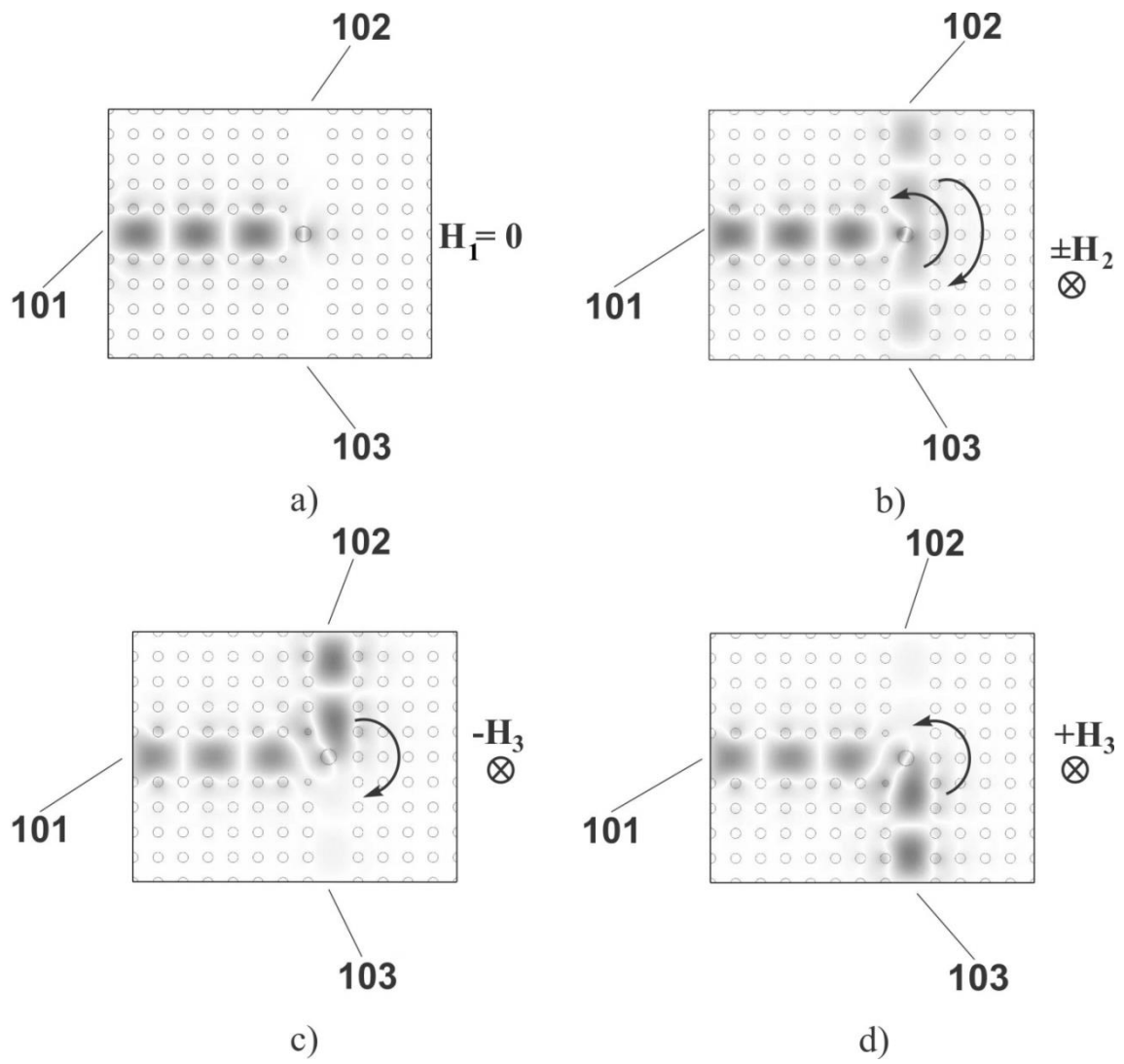


Fig. 6