



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

CARTA PATENTE Nº BR 102015025280-3

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 102015025280-3

**(22) Data do Depósito:** 23/09/2015

**(43) Data da Publicação Nacional:** 25/07/2017

**(51) Classificação Internacional:** G02F 1/365; G02B 6/26; G02F 1/01.

**(52) Classificação CPC:** G02F 1/365; G02B 6/26; G02F 1/01.

**(54) Título:** CHAVE COMPACTA DE TRÊS CANAIS BASEADA EM UM CRISTAL FOTÔNICO BIDIMENSIONAL COM REDE QUADRADA

**(73) Titular:** UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARA, Pessoa Jurídica. CGC/CPF: 34621748000123. Endereço: AV. AUGUSTO CORREA N.1 , CIDADE UNIVERSITÁRIA JOSÉ DA SILVEIRA NETTO, GUAMÁ, BELÉM, PA, BRASIL(BR), 66075900, Brasileira

**(72) Inventor:** VICTOR DMITRIEV; GIANNI MASAKI TANAKA PORTELA; LENO RODRIGUES MARTINS.

**Prazo de Validade:** 20 (vinte) anos contados a partir de 23/09/2015, observadas as condições legais

**Expedida em:** 05/10/2021

Assinado digitalmente por:

**Liane Elizabeth Caldeira Lage**

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

**Relatório Descritivo “CHAVE COMPACTA DE TRÊS CANAIS BASEADA EM UM CRISTAL FOTÔNICO BIDIMENSIONAL COM REDE QUADRADA”.**

[001] A invenção apresentada refere-se a uma chave com um canal de entrada e três canais de saída. Este dispositivo permite a seleção de três diferentes canais de saída para um sinal eletromagnético de entrada, dependendo dos sinais dos campos magnéticos DC  $H_0$  aplicados.

[002] Cristais fotônicos são arranjos periódicos de materiais com diferentes índices de refração, nos quais, há 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] Várias patentes relacionadas a chaves já foram depositadas, dentre as quais se destacam as citadas a seguir.

[004] Por exemplo, a chave mostrada na patente US201425672A1 apresenta um canal de entrada e dois canais de saída e é construída em um circuito integrado. Essa chave é formada por dois dispositivos de chaveamento RF separados por um capacitor.

[005] Por outro lado, a chave apresentada na patente US20140256271 possui um canal de entrada e três canais de saída. Essa chave é utilizada para reduzir as perdas de inserção a aproximadamente 1 dB para radiofrequências.

[006] Já a chave mostrada na patente CN204046561 apresenta um canal de entrada e dois canais de saída, e é formada por um circuito composto por um conjunto de capacitores, resistores e indutores. Desse modo, obtém-se um alto nível de isolamento na faixa de radiofrequência.

[007] O dispositivo proposto, por ter como base a tecnologia de cristais fotônicos, pode ser construído com dimensões reduzidas, favorecendo o aumento na densidade de integração de componentes em sistemas de comunicações. Além disso, pode ser usado como circulador de quatro portas.

[008] De modo geral, a chave desenvolvida possui quatro portas e é baseada em um cristal fotônico bidimensional com rede quadrada de cilindros dielétricos imersos em ar. Quatro guias de ondas (cada um deles relacionado a uma das portas) e duas cavidades ressonantes 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:

[009] a) Defeitos lineares: correspondem à remoção de cilindros dielétricos em linha reta e originam os guias de ondas do dispositivo;

[010] b) Defeitos locais: correspondem à alteração do raio e da posição de cilindros dielétricos localizados no dispositivo para formar as cavidades ressonantes.

[011] De modo específico, o dispositivo possui as seguintes características:

[012] a) Para a frequência central de operação de 98,45 GHz, a constante de rede do cristal ( $a$ ) é igual a 1,065 milímetros;

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

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

[015] d) As cavidades ressonantes são formadas por um cilindro central de ferrite e por dois cilindros dielétricos próximos a este com diâmetros aumentados. O cilindro central é feito a partir de uma ferrite à base de níquel-zinco e foi inserido em uma posição deslocada em relação ao eixo dos guias de onda horizontais.

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

$$[017] \text{ f) } \epsilon = 12,5\epsilon_0; \quad [\mu] = \mu_0 \begin{pmatrix} \mu & -ik & 0 \\ ik & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu \end{pmatrix}$$

[018] Onde:

[019] a)  $\epsilon$  é a permissividade elétrica do material (em Farads por metro);

[020] b)  $\epsilon_0$  é a permissividade elétrica do espaço livre (em Farads por metro);

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

[022] d)  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do espaço livre (em Henrys por metro);

[023] e)  $i$  é a unidade imaginária;

[024] f)  $\mu$  é um parâmetro que pode ser calculado a partir da seguinte fórmula:

$$[025] \text{ g) } \mu = 1 + \frac{\omega_m(\omega_i + j\omega\alpha)}{(\omega_i + j\omega\alpha)^2 - \omega^2};$$

[026] h)  $\kappa$  é um parâmetro que pode ser calculado a partir da seguinte fórmula:

$$[027] \text{ i) } \kappa = \frac{\omega_m\omega}{(\omega_i + j\omega\alpha)^2 - \omega^2};$$

[028] Os parâmetros  $\omega_m$  e  $\omega_i$ , onde:  $\omega$  é a frequência angular (em radianos por segundo), são definidos pelas fórmulas a seguir:

$$[029] \omega_m = \gamma M_0 \text{ e } \omega_i = \gamma H_0;$$

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

[031] O parâmetro  $\kappa/\mu$  é igual a +0,17 para o caso de aplicação do campo magnético  $+H_0$ . O sinal deste parâmetro é invertido no caso em que um campo magnético  $-H_0$  é aplicado.

[032] A figura 1 apresenta, de modo esquemático, a chave em funcionamento quando há ativação dos diferentes canais de saída.

[033] A figura 2 mostra a resposta em frequência do dispositivo e a componente de campo eletromagnético  $E_z$  na frequência central normalizada  $\omega a/2\pi c = 0,3495$ , no caso em que há a ativação da porta de saída 2, onde:  $a$  é a constante de rede do cristal (em metros);  $c$  é a velocidade da luz no espaço livre (aproximadamente igual a 300.000.000 metros por segundo).

[034] A figura 3 mostra a resposta em frequência do dispositivo e a componente de campo eletromagnético  $E_z$  na frequência central normalizada  $\omega a/2\pi c = 0,3495$ , no caso em que há a ativação da porta de saída 3.

[035] A figura 4 mostra a resposta em frequência do dispositivo e a componente de campo eletromagnético  $E_z$  na frequência central normalizada  $\omega a/2\pi c = 0,3495$ , no caso em que há a ativação da porta de saída 4.

[036] A figura 5 apresenta, de forma esquemática, detalhes da geometria das cavidades ressonantes e da região de conexão entre as cavidades que constituem o dispositivo.

[037] A chave desenvolvida é composta pelos guias de onda 1 (**101**), 2 (**102**), 3 (**103**) e 4 (**104**) e pelas cavidades ressonantes esquerda (**105**) e direita (**106**) (figura 1).

[038] Sinais eletromagnéticos ao serem aplicados no guia de onda de entrada **101**, geram três possíveis situações dependendo da direção do campo DC  $H_0$  nas cavidades ressonantes **105** e **106**. Quando a cavidade ressonante **105** está magnetizada por um campo  $-H_0$ , o sinal é transmitido para o guia de saída **102** e há isolamento dos guias **103** e **104** (figura 1a). No caso em que há magnetização  $+H_0$  na cavidade **105** e  $-H_0$  na cavidade **106**, o sinal se propaga para o guia de saída **103** e são isolados os guias **102** e **104** (figura 1b). Já para o caso em que existe magnetização  $+H_0$  nas cavidades **105** e **106**, ocorre a transmissão do sinal para o guia de saída **104** e isolamento dos guias **102** e **103** (figura 1c).

[039] A componente  $E_z$  de campo, para o caso em que ambos os cilindros de ferrite são magnetizados por um campo  $-H_0$  é mostrada na figura 2b. Se o campo magnético  $-H_0$  é aplicado a cavidade ressonante esquerda, o canal de saída é sempre a porta 2 (associada ao guia de ondas **102**), independentemente, do sinal do campo  $H_0$  na cavidade ressonante direita, e há uma distribuição de campo aproximadamente igual do modo dipolo excitado entre os guias de ondas **101** e **102**. Pode-se observar que o modo dipolo estacionário excitado na cavidade ressonante esquerda é rotacionado por um

ângulo de  $45^\circ$  possui nó alinhado com a razão de conexão entre as duas cavidades ressonantes, de modo que os guias de onda **103** e **104** são isolados.

[040] Já a figura 3b apresenta o desempenho do dispositivo quando  $+H_0$  e  $-H_0$  são aplicados as cavidades esquerda e direita, respectivamente. O modo dipolo estacionário excitado nas cavidades esquerda e direita é rotacionado por um ângulo de  $45^\circ$  e possui nós alinhados com guias de ondas **102** e **104**, respectivamente, o que proporciona o isolamento destes guias. A porta 3 (associada ao guia de ondas **103**) é ativada neste caso.

[041] A componente  $E_z$  de campo, para o caso em que ambos os cilindros de ferrite são magnetizados por um campo  $+H_0$ , é mostrada na figura 4b. O modo dipolo estacionário excitado na cavidade ressonante esquerda é rotacionado por um ângulo de  $45^\circ$  e possui nós alinhados com o guia de ondas **102**, proporcionando o isolamento deste guia. Verifica-se que o modo dipolo estacionário excitado na cavidade ressonante esquerda não sofre rotação e possui nós alinhados com o guia de ondas **103**, proporcionando o isolamento deste guia. Nessa situação, a porta 4 (associada ao guia de ondas **104**) é o canal de saída.

[042] O raio dos cilindros **501** e **508** é igual a  $0.1875a$ . Os cilindros **502** e **505** possuem raio igual a  $0.30562a$ . Já os cilindros **503**, **504**, **506** e **507** apresentam raio igual a  $0.2744a$ . A região de conexão **509** entre as cavidades ressonantes apresenta quatro cilindros com raio igual a  $0,234a$ .

[043] A resposta em frequência do dispositivo é apresentada nas figuras 2a, 3a e 4a. Na frequência central normalizada  $\omega a/2\pi c = 0,3495$ . Na faixa de frequências localizadas em torno de 98,45 GHz, a largura de banda (definida no nível de -15 dB das curvas de isolamento) é igual a 370 MHz. As perdas de inserção são menores que -0,3 dB.

## REIVINDICAÇÕES

### CHAVE COMPACTA DE TRÊS CANAIS BASEADA EM UM CRISTAL FOTÔNICO BIDIMENSIONAL COM REDE QUADRADA

1. Chave compacta de três canais baseada em um cristal fotônico bidimensional com rede quadrada, caracterizado por ser constituído de um cristal fotônico no qual são inseridos quatro guias de onda e duas cavidades ressonantes, capaz de realizar a seleção da porta de saída de sinais eletromagnéticos, de acordo com a direção do campo magnético aplicado nos dois cilindros de ferrite, que o constituem.

2. Chave compacta de três canais baseada em um cristal fotônico bidimensional com rede quadrada, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que a aplicação de um campo magnético  $\pm H_0$  nas cavidades que o constituem é responsável por modificar dos modos dipolo excitados nos mesmos.

3. Chave compacta de três canais baseada em um cristal fotônico bidimensional com rede quadrada, de acordo com as reivindicações 1 e 2, caracterizado pelo fato de que, na frequência central normalizada de operação  $\omega a/2\pi c = 0,3495$ , a largura de banda (definida no nível de -15 dB das curvas de isolamento) é igual a 370 MHz e as perdas de inserção são menores que -0,3 dB.

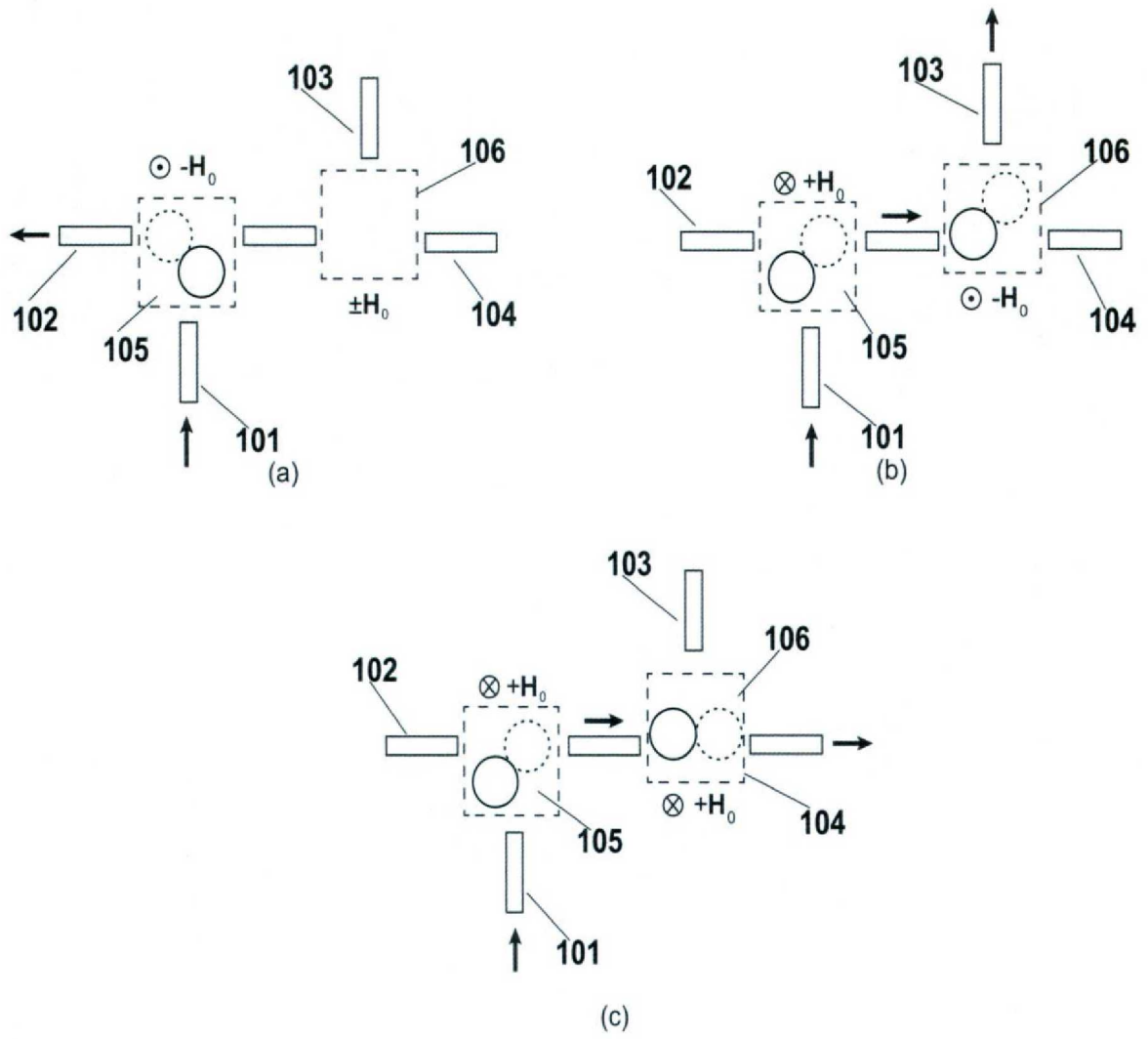
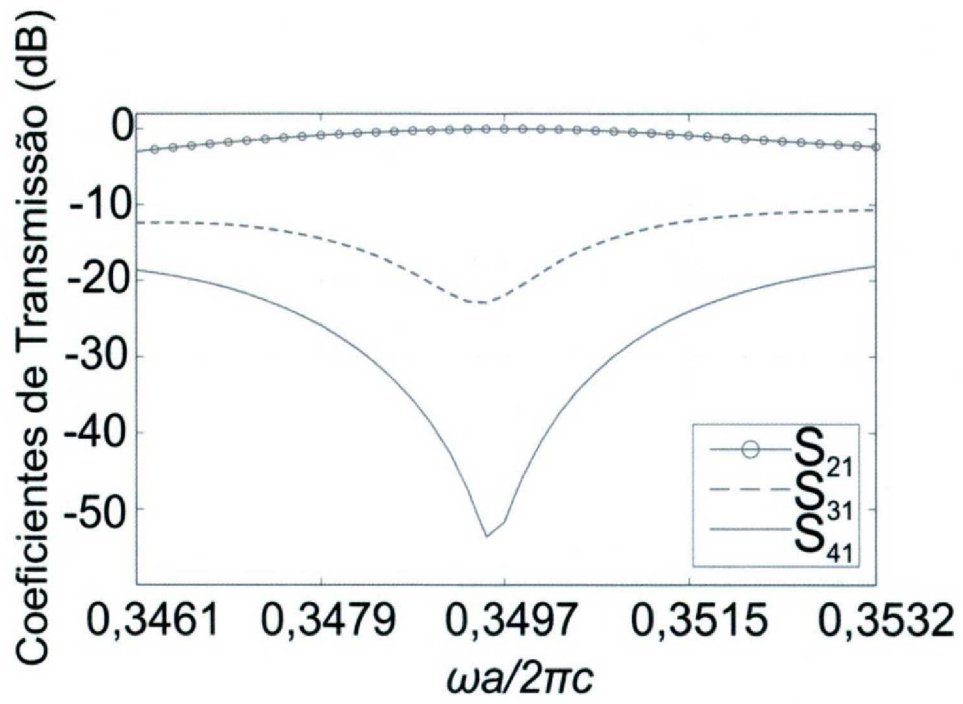
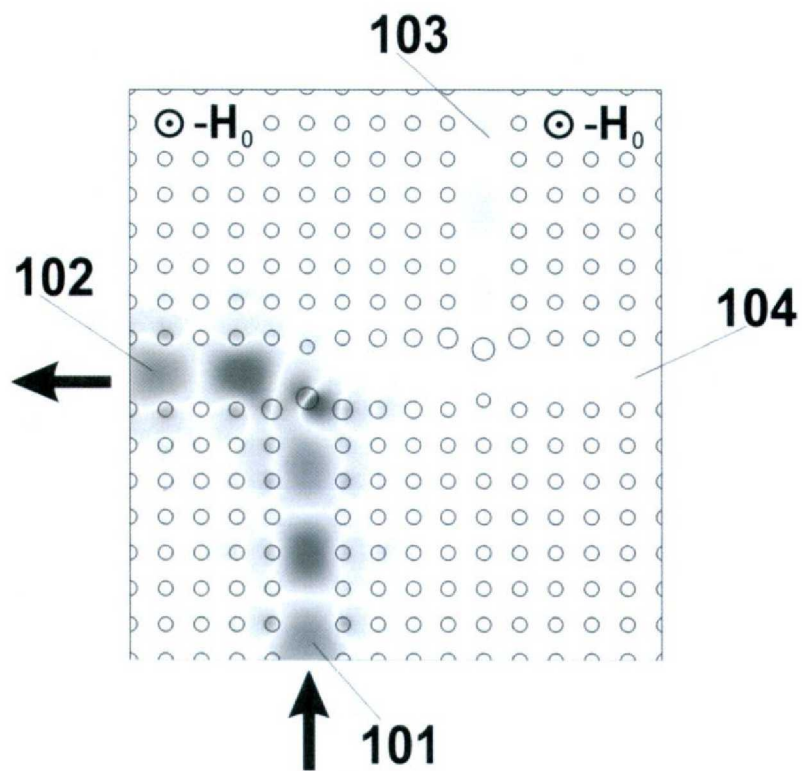


Fig. 1

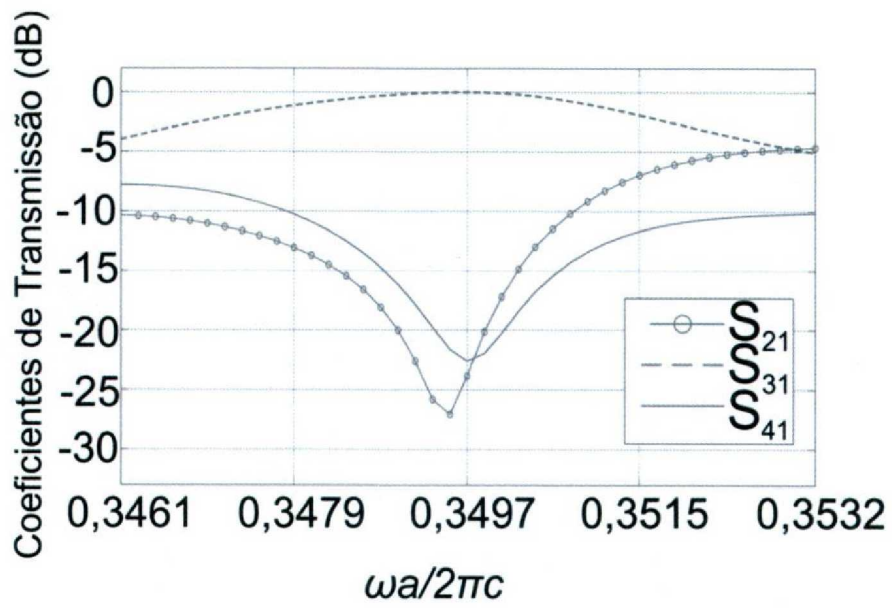


a)

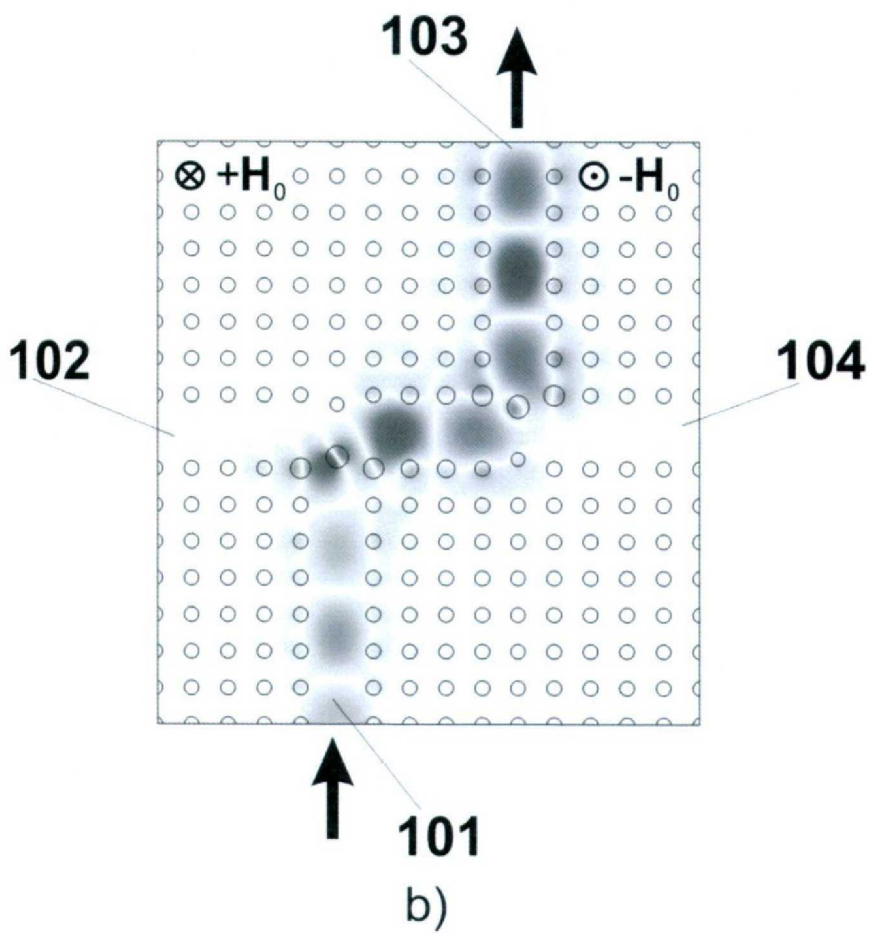


b)

Fig. 2

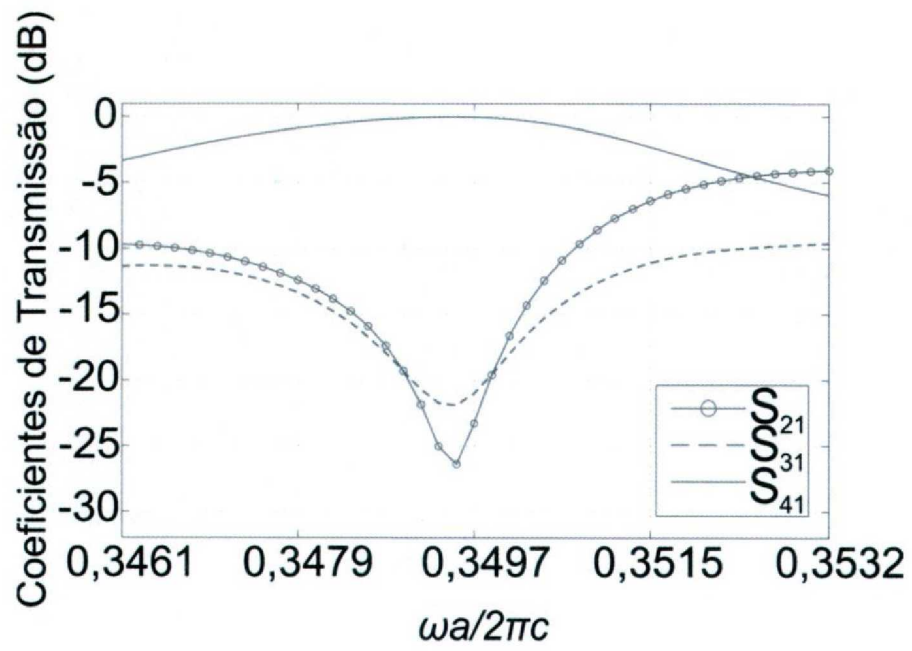


a)

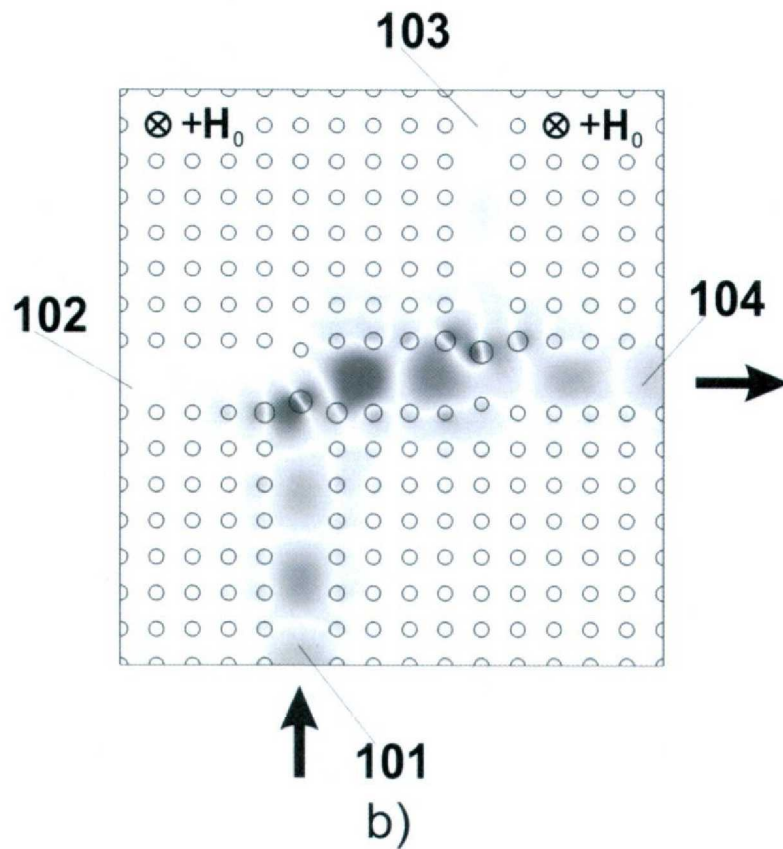


b)

Fig. 3



a)



b)

Fig. 4

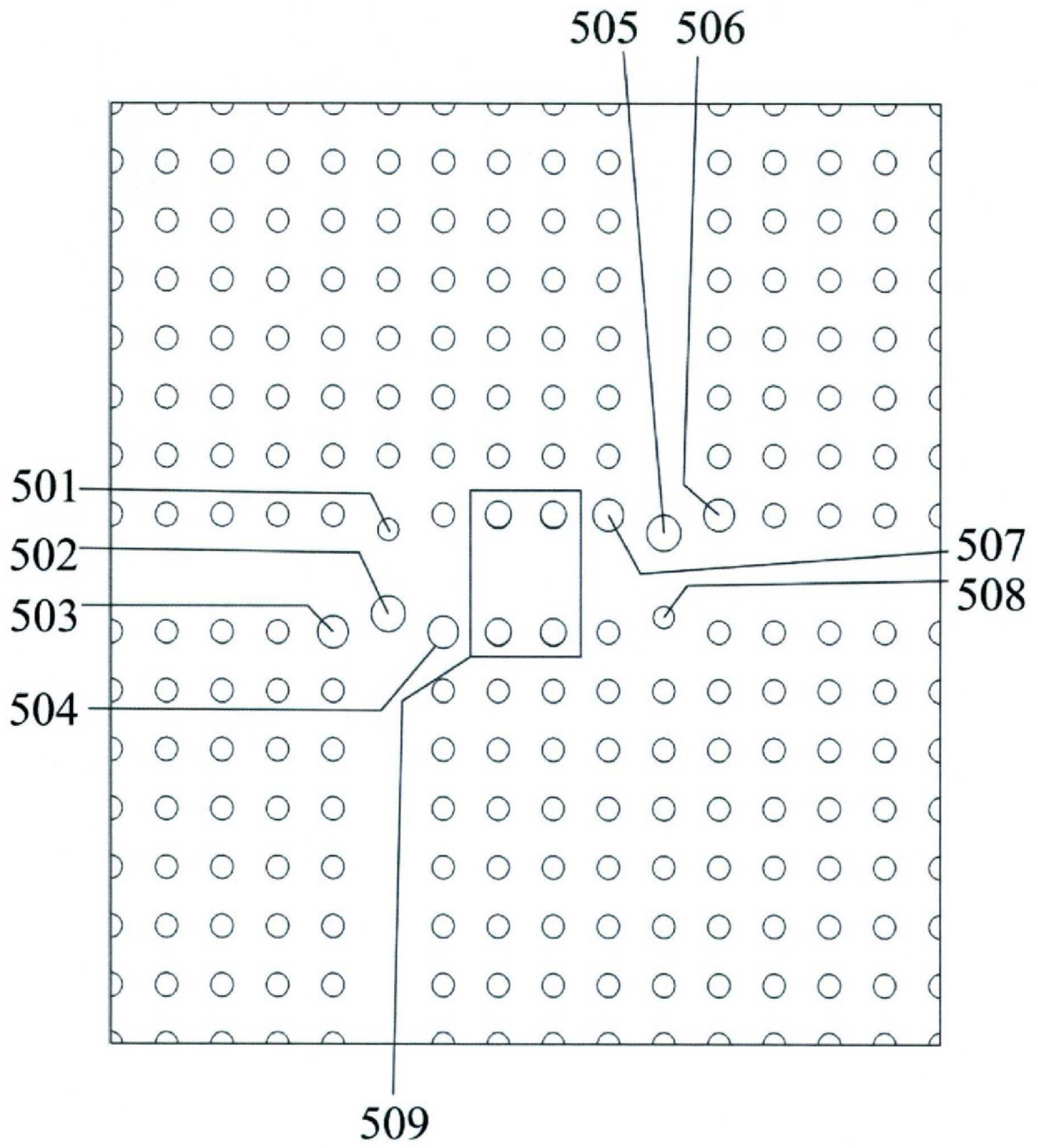


Fig. 5