



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

CARTA PATENTE Nº BR 102013018869-7

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 102013018869-7

**(22) Data do Depósito:** 25/06/2013

**(43) Data da Publicação Nacional:** 04/08/2015

**(51) Classificação Internacional:** G02B 1/00; G02B 6/12.

**(52) Classificação CPC:** G02B 1/005; G02B 6/12; G02B 2006/1215.

**(54) Título:** DIVISOR POR TRÊS NÃO RECÍPROCO BASEADO EM UM RESSOADOR MAGNETO-ÓPTICO

**(73) Titular:** UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, Pessoa Jurídica. CGC/CPF: 34621748000123.  
Endereço: AV. AUGUSTO CORREA 1, CID UNIV JOSÉ S NETTO, GUAMÁ, Belém, PA, BRASIL(BR), 66075-900

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

**Prazo de Validade:** 20 (vinte) anos contados a partir de 25/06/2013, observadas as condições legais

**Expedida em:** 07/06/2022

Assinado digitalmente por:

**Alexandre Dantas Rodrigues**

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



**“DIVISOR POR TRÊS NÃO RECÍPROCO BASEADO EM UM RESSOADOR MAGNETO-ÓPTICO”.**

[001] A presente invenção refere-se a um divisor por três não recíproco baseado em um ressoador magneto-óptico, capaz de dividir um sinal presente em um canal de entrada entre três canais de saída. Também possui integrada a função de isolamento entre a porta de entrada e as portas de saída.

[002] O setor industrial, em especial a indústria da área óptica, demanda tanto dispositivos recíprocos, dentre os quais destacamos os divisores de potência, como dispositivos não recíprocos, dentre os quais destacamos os isoladores.

[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. Um isolador é usado para permitir a propagação de um sinal apenas em uma dada direção, a fim de evitar, principalmente, problemas de interferência em fontes de sinais.

[004] Estes dispositivos, largamente utilizados na tecnologia de micro-ondas, também podem ser desenvolvidos a partir de estruturas com banda de frequências proibidas fotônica, para utilização em chips e circuitos ópticos. Ondas eletromagnéticas com frequência situada nessa banda, também conhecida como *photonic band gap*, não podem se propagar dentro da estrutura cristalina.

[005] Tais estruturas, conhecidas como “cristais fotônicos”, permitem o controle do fluxo da luz através da modulação periódica da permissividade elétrica ou da permeabilidade magnética dos materiais que as constituem, sendo objeto de vários estudos atualmente. A criação de defeitos controlados dentro da estrutura cristalina está ligada ao princípio de funcionamento de boa parte dos dispositivos ópticos baseados em cristais fotônicos.

[006] Várias patentes já foram depositadas sobre dispositivos baseados em cristais fotônicos, para utilização na indústria óptica.

[007] Por exemplo, a patente US2004008945 refere-se a um divisor de potência baseado em um cristal fotônico bidimensional com rede hexagonal,

onde três guias de onda são inseridos na estrutura periódica através da criação de furos não circulares e conectados a uma cavidade ressonante localizada no centro do dispositivo. Os guias, retilíneos, formam entre si ângulos de  $120^\circ$ , lembrando o desenho da letra Y, e um sinal que incide em um dos guias (entrada) é dividido igualmente entre os dois guias restantes (saídas).

[008] Já a patente CN101561531 refere-se a um divisor de potência baseado em um cristal fotônico bidimensional com rede quadrada. De modo análogo ao divisor citado anteriormente, este possui três portas e uma cavidade ressonante no centro. O arranjo final, que lembra o formato da letra T, possui um guia de entrada e dois guias de saída, porém, neste caso, as posições dos guias não podem ser trocadas (entrada pela saída ou vice-versa), devido à simetria reduzida deste dispositivo.

[009] Destaca-se também a invenção descrita pela patente CN102323641, que se refere a um divisor de potência com quatro canais de saída e um de entrada. Construído a partir de um cristal fotônico bidimensional com rede hexagonal, possui dois estágios de divisão. Cada um dos estágios lembra o divisor a que se refere a patente US2004008945, ou seja, o sinal que provém de um guia de entrada é dividido entre dois guias intermediários, que formam entre si ângulos de  $120^\circ$  (lembrando o formato da letra Y), e cada um dos guias intermediários é conectado a mais dois guias de saída, que também formam entre si ângulos de  $120^\circ$ . Portanto, cada guia de saída é percorrido por um sinal com potência aproximadamente igual a 25% da potência do sinal no guia de entrada.

[010] Por outro lado, a patente US2006140539 refere-se a um isolador óptico baseado em um cristal fotônico com rede hexagonal. Os defeitos na estrutura cristalina são inseridos de tal modo que a propagação de sinais ocorre apenas em uma dada direção. Na direção oposta, o isolador não permite a propagação do sinal. Os isoladores são utilizados, principalmente, na proteção de fontes de sinais contra interferências indesejadas provocadas por reflexões ao longo do caminho de propagação.

[011] Outros dispositivos, como o descrito na patente US2004080805, possibilitam a propagação unidirecional de sinais através do controle do efeito de rotação de Faraday em um cristal fotônico construído com materiais magnéticos.

[012] Ressalta-se que os dispositivos supracitados cumprem única e exclusivamente as funções básicas ou de um divisor ou de um isolador, ou seja, o divisor de potência reparte, entre duas ou mais saídas, a potência de um sinal de entrada, enquanto o isolador inibe a propagação de sinais em uma direção de interesse.

[013] O aumento na demanda por largura de banda nas redes de comunicações tem exigido uma maior densidade de integração de componentes. Isso requer a miniaturização cada vez mais acentuada de componentes, aos níveis dos chips ópticos, o que por sua vez tem motivado uma série de pesquisas.

[014] A invenção aqui apresentada tem como principal vantagem a integração, em um único dispositivo, das funções de um divisor de potência recíproco e de um isolador não recíproco. O dispositivo que apresentamos tem dimensões reduzidas, quando comparado à utilização de dois dispositivos distintos para a realização das mesmas funções, o que favorece a maior densidade de integração em circuitos ópticos.

[015] O dispositivo em questão funciona com magnetização uniforme, o que facilita a construção do circuito de magnetização da estrutura. Além disso, possui uma boa largura de banda e alta isolamento entre a porta de entrada e as portas de saída.

[016] De modo geral, a estrutura é composta por um cristal fotônico com rede hexagonal, onde são inseridos seis guias de onda através da remoção de furos do cristal. Os guias são conectados ao centro da estrutura através de uma cavidade ressonante, construída a partir da alteração dos raios dos furos localizados na porção central da estrutura e das posições dos mesmos. Um sinal, aplicado em um dos guias de onda da estrutura, tem a sua potência dividida entre outros três guias de onda. Os dois guias de onda restantes

cumprem a função de isolador, ao reduzir o impacto causado por reflexões provenientes de cargas não casadas idealmente na fonte de sinais.

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

[018] O cristal fotônico em que é baseado o dispositivo é composto por uma rede triangular de furos preenchidos com ar em um semicondutor magnético;

[019] O raio dos furos de ar é igual a  $0,3a$  ( $a$  é a constante de rede do cristal);

[020] Seis guias de onda são inseridos no cristal fotônico através da remoção de furos de ar em linha reta. Os guias são conectados simetricamente a um ressonador magneto-óptico e aqueles adjacentes entre si formam um ângulo de  $60^\circ$ ;

[021] Cada um dos seis guias de onda do dispositivo é associado a uma porta distinta por onde os sinais ópticos entram ou saem da estrutura;

[022] Um ressonador magneto-óptico magnetizado uniformemente é inserido no cristal fotônico bidimensional, através da variação do raio de alguns furos localizados no centro do dispositivo e da alteração das posições que os mesmos ocupam;

[023] Um modo dipolo é excitado na cavidade ressonante e os nós do modo são alinhados com os dois guias de onda que funcionam como isoladores;

[024] O material magneto-óptico no qual são inseridos os furos de ar é anisotrópico e descrito pelas seguintes expressões para a permissividade elétrica e a permeabilidade magnética:

$$[\varepsilon] = \varepsilon_0 \begin{pmatrix} 6,25 & -i0,3 & 0 \\ i0,3 & 6,25 & 0 \\ 0 & 0 & 6,25 \end{pmatrix}; \mu = \mu_0$$

onde:

- $\varepsilon$  é a permissividade elétrica do material (em Farads por metro);
- $\varepsilon_0$  é a permissividade elétrica do espaço livre (em Farads por metro);
- $\mu$  é a permeabilidade magnética do material (em Henrys por metro);
- $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do espaço livre (em Henrys por metro).

[025] A seguir é descrita detalhadamente a invenção desenvolvida, bem como são apresentadas as figuras que ilustram o funcionamento da mesma. Espera-se, com isso, que o funcionamento do dispositivo, bem como suas potenciais aplicações, sejam bem entendidos.

[026] A figura 1 apresenta esquematicamente a configuração com seis portas (101) a (106) e modo dipolo (108) no ressoador (107). O item (a) mostra esquematicamente o divisor proposto e uma operação de rotação por  $60^\circ$  (que está entre os elementos do grupo de simetria que caracterizam o dispositivo). O item (b) mostra o modo dipolo (108) sem a aplicação da magnetização. O item (c) mostra o modo dipolo (108) rotacionado por um ângulo de  $30^\circ$  no sentido horário, devido à aplicação de um campo magnético externo DC  $\mathbf{H}_0$ . O item (d) mostra o modo dipolo (108) rotacionado por um ângulo de  $30^\circ$  no sentido anti-horário, devido à aplicação de um campo magnético externo DC  $-\mathbf{H}_0$ .

[027] A figura 2 apresenta detalhes do divisor da figura 1(c) com duas cargas casadas (109) e (110). As setas dentro do ressoador (107) mostram a divisão da onda incidente.

[028] A figura 3 apresenta o divisor da figura 2 sendo excitado através das portas (102), (104) e (105) – itens (a), (b) e (c), respectivamente.

[029] A figura 4 contém as respostas em frequência do divisor considerando a aplicação da excitação na porta (101).

[030] A figura 5 é um corte do dispositivo que mostra a estrutura periódica do cristal fotônico, os seis guias de onda retilíneos conectados às portas (101) a (106), a cavidade ressonante (107) e a componente  $H_z$  do campo eletromagnético no divisor para excitação na porta (101), na frequência central normalizada  $\omega a/2\pi c = 0,3035$ , onde  $\omega$  é a frequência angular (em radianos por segundo);  $a$  é a constante de rede do cristal fotônico (em metros);  $c$  é a velocidade da luz no espaço livre (aproximadamente igual a 300.000.000 metros por segundo).

[031] Considerando o estado em que o dispositivo não está sujeito à aplicação de um campo magnético DC  $\mathbf{H}_0$  e a excitação é aplicada em uma das seis

portas do dispositivo, o ressoador (107) do divisor suporta dois modos degenerados que rodam em sentidos opostos. A superposição dos dois modos degenerados dá origem a um modo estacionário do tipo dipolo (108), como mostrado na figura 1(b). O campo eletromagnético deste modo excita ondas eletromagnéticas nos guias de onda conectados às portas (102) a (106). A divisão não é igual e o divisor é recíproco, neste caso.

[032] A aplicação de um campo magnético DC  $\mathbf{H}_0$  faz com que haja a rotação do modo dipolo estacionário (108) por um ângulo de  $30^\circ$  em torno do eixo z, no sentido horário. O valor do parâmetro fora da diagonal do tensor permissividade elétrica do material magneto-óptico é igual a 0,3 neste caso. Conforme se verifica na figura 1(c), os nós do dipolo alinham-se com os guias de onda conectados às portas (103) e (106). Portanto, devido aos nós, estes guias não são excitados. A partir da figura 2 pode-se verificar que as intensidades do campo são iguais para as portas (102), (104) e (105), na proporção  $1/3:1/3:1/3$ . A rotação do modo dipolo (108) ocorre devido às propriedades magneto-ópticas do ressoador (107) e pode ser ajustada através da modificação de parâmetros geométricos do ressoador (107) e do campo magnético DC  $\mathbf{H}_0$ .

[033] No caso em que um campo magnético DC é aplicado na direção oposta, ou seja,  $-\mathbf{H}_0$ , conforme mostrado na figura 1(d), o padrão do campo também é rotacionado por um ângulo de  $30^\circ$ , porém no sentido oposto (anti-horário). Deste modo, são isolados os guias de onda conectados às portas (102) e (105) e a divisão da potência da onda eletromagnética ocorre entre os guias conectados às portas (103), (104) e (106).

[034] As propriedades de isolamento da estrutura podem ser constatadas a partir da excitação das portas de saída, que no caso da figura 2 são as portas (102), (104) e (105). A excitação destas portas representa a reflexão do sinal causada por elementos não casados idealmente e que estão conectados a estas portas. Devido à simetria de rotação por  $60^\circ$  da estrutura, é necessária a investigação das características do divisor para excitação em apenas uma das 6 portas, por exemplo, a porta (101). As características em questão podem ser obtidas para

a excitação das outras portas através de uma permutação cíclica das portas (renumeração das portas). Os três casos são mostrados nas figuras 3(a), 3(b) e 3(c), que são obtidos por uma simples rotação do modo dipolo (108) da figura 2 por  $30^\circ$ ,  $180^\circ$  e  $210^\circ$ , respectivamente.

[035] Em todos os casos da figura 3, duas portas, onde os nós da onda estacionária estão localizados, são desacopladas da porta de excitação. A potência que retorna à porta (101), proveniente das portas (102), (104) e (105), é muito pequena (apenas um terço da potência refletida na porta (104)), ou seja, a maior parte da potência parasita refletida nas portas de saída é absorvida por cargas casadas idealmente (109) e (110), localizadas nas portas (103) e (106). Portanto, verifica-se a significativa redução da influência de eventuais reflexões parasitas provenientes de elementos não casados, o que corresponde à principal ideia da invenção em questão.

[036] A aplicação do campo  $\mathbf{H}_0$  promove a separação das frequências  $\omega^+$  e  $\omega^-$  dos dois modos degenerados que giram em sentidos contrários e que compõem o modo dipolo (108) do ressonador (107). A intensidade desta separação é função do parâmetro  $g$  (termo fora da diagonal do tensor de permissividade elétrica do material magneto-óptico). A presente invenção foi projetada para operar com  $g = 0,3$ .

[037] A banda de frequências de operação do divisor é proporcional à separação dos modos que giram com frequências  $\omega^+$  e  $\omega^-$ . Quanto maior o valor de  $g$ , mais larga a banda de frequências de operação do divisor. O parâmetro  $g$  é proporcional à magnetização  $\mathbf{M}$  do material magnético.

[038] As perdas dos guias de onda são descontadas dos coeficientes de transmissão entre as portas da estrutura. Essas perdas, da ordem de -2 dB, são descontadas para que fiquem evidentes apenas as perdas que ocorrem no divisor propriamente dito.

[039] A resposta em frequência do divisor, considerando a excitação na porta (101) e as saídas nas portas (102) a (106), é mostrada na figura 4, com as perdas dos guias de onda já descontadas. A divisão da potência de entrada entre as portas (102), (104) e (105), na frequência central normalizada  $\omega a/2\pi c$

= 0,3035, é de aproximadamente -6,4 dB para cada uma das portas. As portas (103) e (106), onde cargas casadas idealmente (109) e (110) são conectadas, são isoladas da porta de entrada (101) por aproximadamente -29 dB, ou seja, praticamente não há perda de potência da onda incidente para essas portas.

[040] A largura de banda do divisor, para o nível de isolamento de -20 dB, é de 219 GHz e, nesta banda, a variação da divisão entre as portas de saída (102), (104) e (105) é de  $(-6,4 \pm 0,4)$  dB. A figura 5 mostra a distribuição da componente de campo  $H_z$ , para a frequência central. Como previsto, os nós do modo dipolo (108) ficam alinhados com as portas (103) e (106).

## REIVINDICAÇÕES

1. Divisor por três não recíproco baseado em um ressoador magneto-óptico, composto por um cristal fotônico bidimensional em que são inseridos seis guias de onda associados às portas (101) a (106), além de uma cavidade ressonante (107), **caracterizado pelo** fato de que um sinal de entrada presente na porta (101) excita um modo dipolo (108) na cavidade ressonante orientado de tal sorte que o modo possui intensidade de campo igual para as os guias de onda associados às portas (102), (104) e (105), na proporção  $\frac{1}{3}:\frac{1}{3}:\frac{1}{3}$ , enquanto que o plano nodal do modo dipolo (108) – plano em que a intensidade de campo do modo dipolo (108) é igual a zero – é alinhado com os guias de onda associados às portas (103) e (106).
2. Divisor por três não recíproco baseado em um ressoador magneto-óptico de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo** fato de que a orientação do modo dipolo (108) excitado na cavidade ressonante (107), com intensidade de campo igual para os guias de onda associados às portas (102), (104) e (105), faz com que a potência de um sinal oriundo de uma fonte de sinais conectada à porta de entrada (101) seja igualmente dividida entre os as portas de saída (102), (104) e (105).
3. Divisor por três não recíproco baseado em um ressoador magneto-óptico de acordo com as reivindicações 1, **caracterizado pelo** fato de que reflexões parasitas oriundas de cargas não casadas conectadas às portas de saída (102), (104) e (105) excitam modos do tipo dipolo (108) com plano nodal alinhado de tal modo que a potência que retorna à fonte de sinais conectada à porta de entrada (101), proveniente de cargas não casadas conectadas às portas (102), (104) e (105), é muito pequena – apenas um terço da potência refletida pela carga conectada à porta de saída (104) –, garantindo o funcionamento da fonte de sinais conectada à porta de entrada (101) livre de interferências prejudiciais decorrentes de tais reflexões parasitas.
4. Divisor por três não recíproco baseado em um ressoador magneto-óptico de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo** fato de que a orientação do modo dipolo (108) criado a partir de reflexões parasitas originadas a partir de

cargas não casadas conectadas às portas de saída (102), (104) e (105) resulta na absorção da maior parte da potência parasita refletida por tais cargas não casadas através das cargas casadas idealmente (109) e (110) conectadas às portas (103) e (106).

5. Divisor por três não recíproco baseado em um ressoador magneto-óptico de acordo com as reivindicações 1 a 4, **caracterizado pelo** fato de que a orientação especial do modo dipolo (108) excitado na cavidade ressonante (107) a partir da aplicação de um sinal de entrada na porta (101) faz com que o nível de transmissão para as portas (103) e (106) seja de aproximadamente -29 dB, o nível de transmissão para as portas de saída (102), (104) e (105) seja de  $(-6,4 \pm 0,4)$  dB e a largura de banda de operação, para o nível de isolamento de -20 dB, seja de 219 GHz.

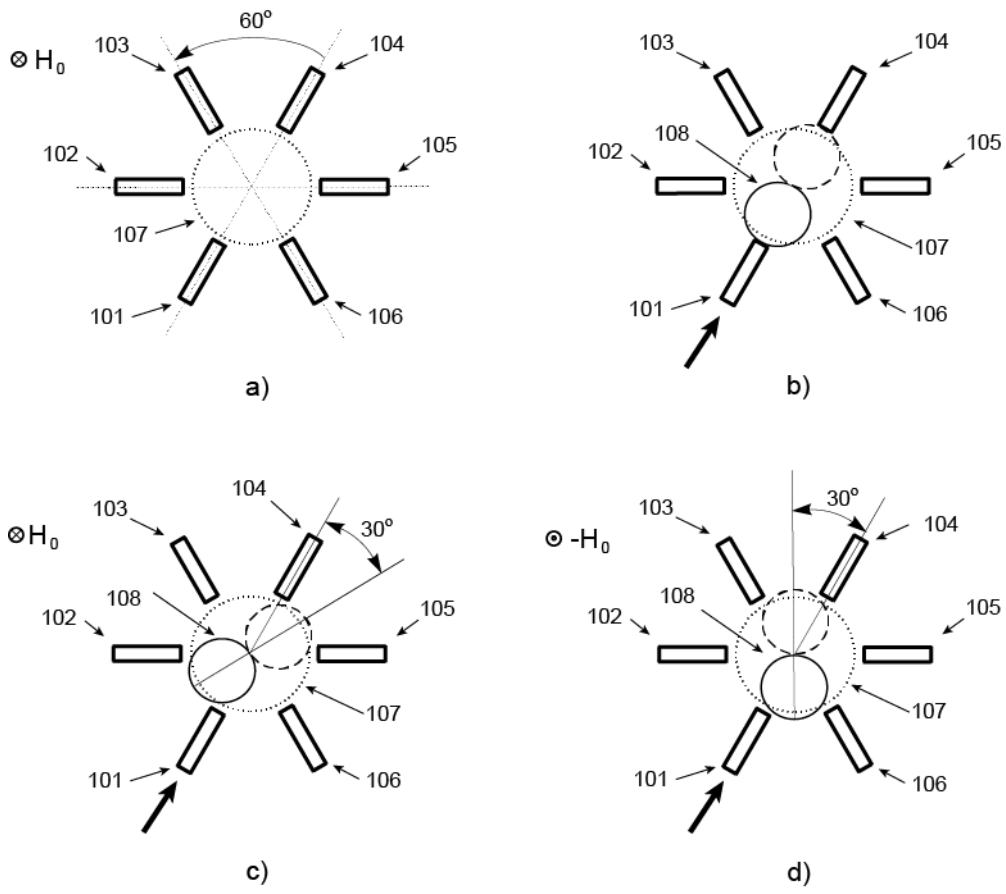


FIG. 1

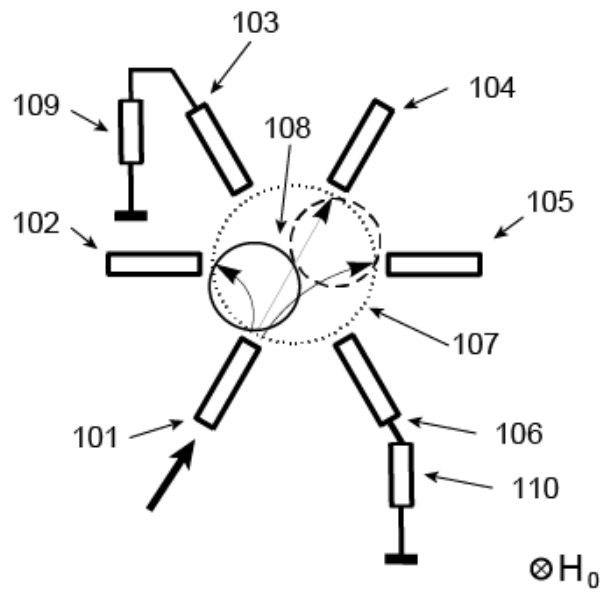


FIG. 2

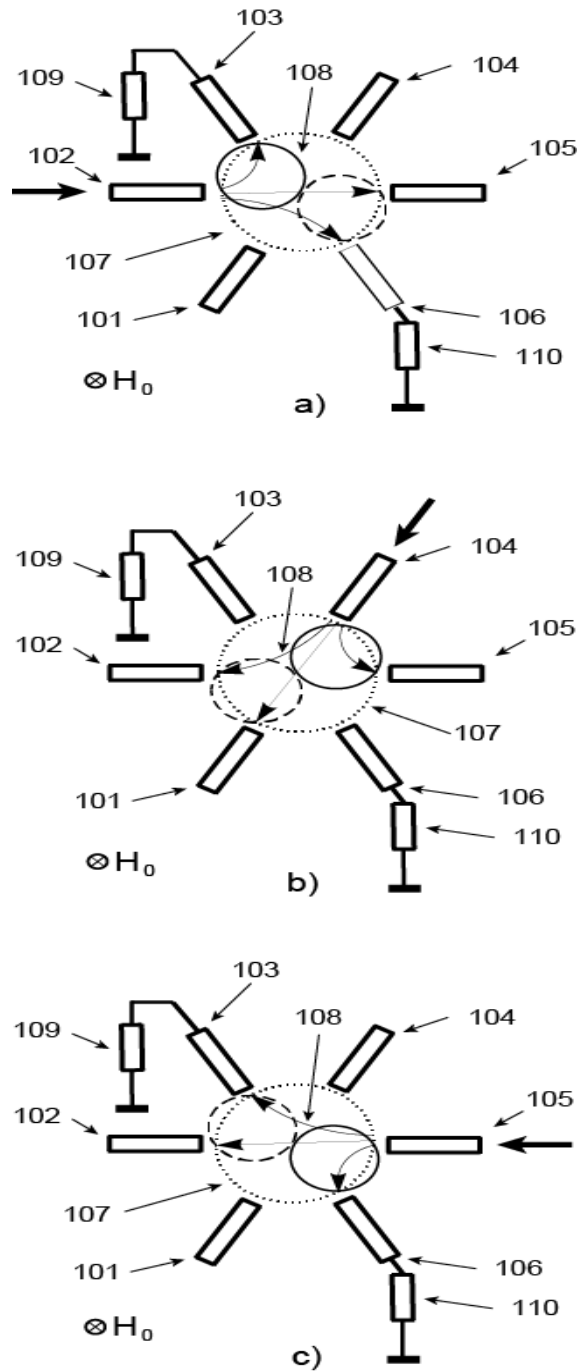


FIG. 3

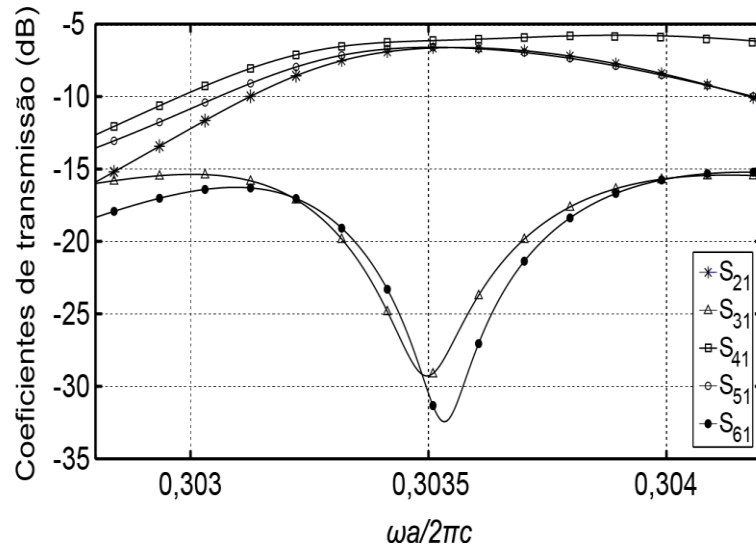


FIG. 4

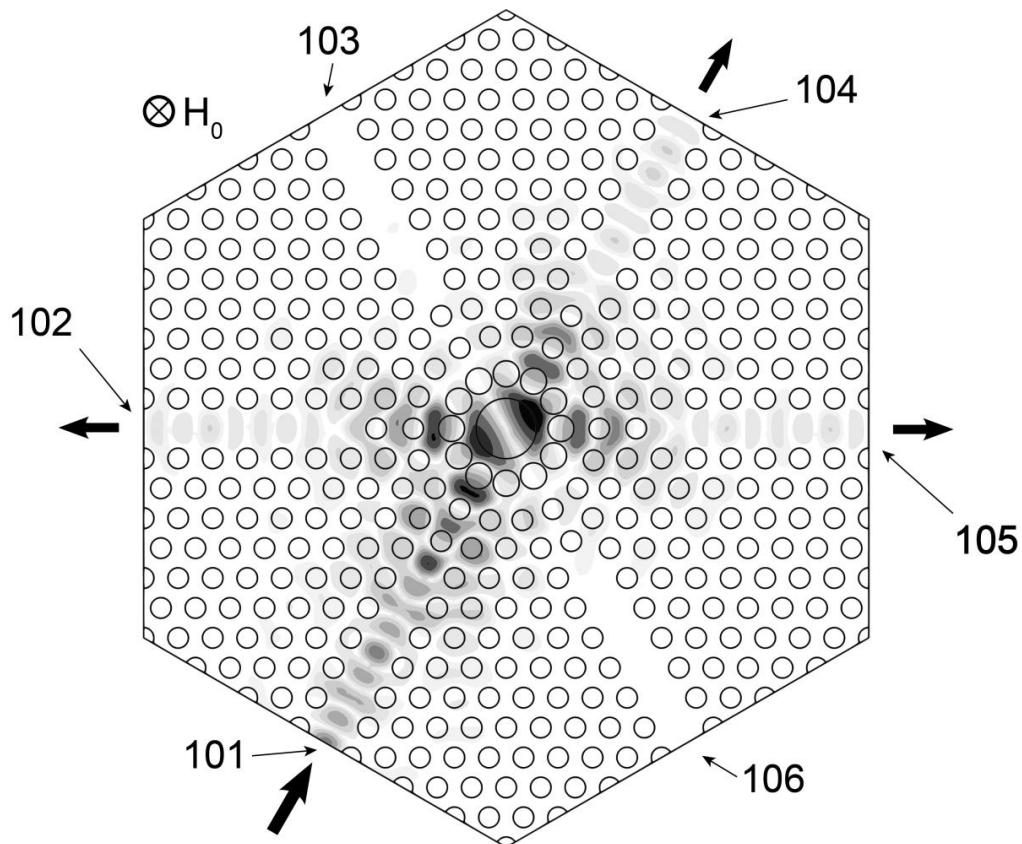


FIG.5