



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

CARTA PATENTE Nº BR 102014016549-5

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 102014016549-5

(22) Data do Depósito: 22/05/2014

(43) Data da Publicação Nacional: 24/11/2015

(51) Classificação Internacional: G02B 6/12; G02B 6/122; G02F 1/313; G02F 1/01.

(52) Classificação CPC: G02B 6/1225; G02F 1/025; B82Y 20/00; G02F 2202/32.

(54) Título: CHAVE ÓPTICA COMPACTA BASEADA EM UM CRISTAL FOTÔNICO BIDIMENSIONAL COM DOBRAMENTO DE 120 GRAUS

(73) Titular: UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, Instituição de Ensino e Pesquisa. CGC/CPF: 34621748000123. Endereço: Av. Augusto Correa 1, Cidade Universitária José S. Neto, Guamá, Belém, PA, BRASIL(BR), 66075-900

(72) Inventor: VICTOR DMITRIEV; GIANNI MASAKI TANAKA PORTELA; RAPHAEL RAFSANDJANI BATISTA.

Prazo de Validade: 20 (vinte) anos contados a partir de 22/05/2014, observadas as condições legais

Expedida em: 13/10/2021

Assinado digitalmente por:

Liane Elizabeth Caldeira Lage

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

“CHAVE ÓPTICA COMPACTA BASEADA EM UM CRISTAL FOTÔNICO BIDIMENSIONAL COM DOBRAMENTO DE 120 GRAUS”.

[001] A presente invenção refere-se a uma chave óptica compacta baseada em um cristal fotônico bidimensional com dobramento de 120 graus. Em sistemas ópticos integrados, pode ser utilizada, principalmente, no controle da propagação de um sinal eletromagnético ao longo de um canal, permitindo ou interrompendo a passagem do mesmo (função de chaveamento).

[002] O desenvolvimento de novos dispositivos baseados em cristais fotônicos é alavancado pela necessidade de dispositivos com dimensões cada vez menores, de modo que maiores níveis de densidade de integração de componentes em sistemas ópticos integrados sejam alcançados.

[003] Cristais fotônicos são estruturas em que ocorre a modulação periódica da permissividade elétrica ou da permeabilidade magnética dos materiais que os constituem. Esta periodicidade está relacionada à origem de uma faixa de frequências proibida no diagrama de banda destas estruturas, também conhecida como *photonic band gap*.

[004] Ondas eletromagnéticas com frequência situada nesta faixa não podem se propagar ao longo do cristal, sendo totalmente refletidas pelo mesmo. A criação de defeitos na estrutura periódica do cristal, em consonância com a existência do *photonic band gap*, está associada ao princípio de funcionamento da maior parte dos dispositivos baseados em cristais fotônicos.

[005] Entre os diversos dispositivos utilizados em sistemas ópticos integrados, as chaves (em inglês, *switches*) desempenham papel fundamental. Elas possuem dois estados de funcionamento, que são: estado desligado (em inglês, *off*), em que há uma alta isolação entre as portas de entrada e saída da chave, com conseqüente impedimento da transmissão de um sinal eletromagnético; estado ligado (em inglês, *on*), em que ocorre a transmissão de um sinal eletromagnético da porta de entrada para a de saída, com baixas perdas de inserção. A transição entre os dois estados de operação em chaves baseadas em cristais fotônicos é controlada pela modificação de algum

parâmetro característico do cristal, segundo o controle de alguma variável externa à estrutura.

[006] O desenvolvimento de novas chaves ópticas baseadas em cristais fotônico tem sido abordado em vários relatórios descritivos de patentes de invenção, dentre os quais se destacam os descritos a seguir.

[007] O *switch* a que se refere a patente CN101571657 é baseado em um cristal fotônico bidimensional composto por uma rede triangular de furos inseridos em um material com propriedades não lineares. Defeitos na estrutura cristalina dão origem a dois guias de onda (entrada e saída) e a uma cavidade ressonante. O índice de refração do material em questão pode ser modificado a partir da incidência de um sinal de controle óptico, fenômeno este conhecido como efeito Kerr. O estado em que a chave se encontra (ligado ou desligado) depende da intensidade deste sinal de controle.

[008] Já o *switch* descrito na patente US2005249455 é baseado em um guia de onda óptico cujo núcleo é formado por um cristal fotônico bidimensional. O índice de refração dos materiais que compõem o cristal pode ser modificado a partir da injeção de um sinal luminoso ou da aplicação de uma corrente elétrica entre dois eletrodos presentes na estrutura. A transição entre os estados de operação do dispositivo é controlada pelo ajuste do valor do índice de refração dos materiais que compõem o cristal fotônico em questão.

[009] Outro dispositivo que merece atenção é o descrito na patente JP2003215646. Entre dois guias de onda ópticos é inserido um elemento responsável pelo chaveamento (transição entre os estados). Este elemento é baseado em um cristal fotônico bidimensional e um par de eletrodos. O estado em que o *switch* opera (*on* ou *off*) é determinado pelo valor do índice de refração dos materiais que compõem o cristal, que por sua vez é dependente do valor de uma tensão elétrica aplicada entre os eletrodos.

[010] Por outro lado, a chave óptica a que se refere a patente JP2006184618 é baseada em um cristal fotônico bidimensional composto por um material cujo índice de refração varia de acordo com a temperatura. O controle da

temperatura em que o cristal se encontra é responsável por determinar o estado em que a chave se encontra (ligado ou desligado).

[011] Portanto, vários são os modos de se controlar a transição entre os estado de uma chave óptica baseada em cristais fotônicos. A presente invenção é baseada em um cristal fotônico bidimensional composto por uma rede triangular de furos inseridos em um material magneto-óptico. Os dois estados de operação da chave são definidos pelo valor do campo magnético de magnetização do material magneto-óptico, que por sua vez é igual a 0 no estado desligado e igual a H_0 no estado ligado.

[012] Guias de onda típicos na faixa de frequências ópticas são as fibras ópticas. O ângulo de dobramento a que pode ser submetida uma fibra óptica é muito restrito, sendo esta uma das principais dificuldades a serem contornadas em circuitos baseados em fibras ópticas. O funcionamento das mesmas é baseado no princípio da reflexão interna total e, por conta disso, não podem ser dobradas de modo acentuado, o que compromete a sua utilização em circuitos que exigem mudanças bruscas na direção de propagação de sinais eletromagnéticos.

[013] Esta dificuldade pode ser superada com a utilização de guias de onda ópticos baseados na tecnologia de cristais fotônicos. Nestes guias, a escolha correta da topologia de curvas a eles associadas pode promover a mudança de direção de propagação de um sinal eletromagnético. Isto ocorre porque estes dispositivos são baseados na existência do *photonic band gap*, diferentemente das fibras ópticas, que se baseiam no princípio da reflexão interna total.

[014] Os guias de onda baseados em cristais fotônicos são construídos, de um modo geral, a partir da inserção de defeitos lineares na estrutura cristalina. Por conta do *photonic band gap* associado à estrutura cristalina vizinha ao defeito, sinais eletromagnéticos com frequência dentro desta faixa ficam confinados no interior do defeito linear, propagando-se ao longo do mesmo.

[015] O *switch* a que se refere este relatório incorpora, em sua estrutura, um dobramento de 120 graus da direção de propagação de um sinal eletromagnético, proporcionando maior flexibilidade no design de sistemas

ópticos integrados. Além disso, por ter dimensões reduzidas, favorece o aumento da densidade de integração de componentes nestes sistemas.

[016] O circuito de magnetização da estrutura é simplificado, haja vista o fato de o dispositivo operar com magnetização uniforme no estado *on*. Por conta disto, um eletroímã pode ser usado para o cumprimento desta função. A intensidade do campo magnético gerado pelo eletroímã é proporcional à intensidade de uma corrente elétrica que o atravessa.

[017] Entre as características de desempenho do dispositivo em questão, merecem destaque a alta isolação entre as portas de entrada e saída no estado *off*, as baixas perdas de inserção no estado *on* e a grande largura de banda de operação.

[018] De modo geral, o *switch* em questão é composto por um cristal fotônico bidimensional, baseado em uma rede triangular de furos inseridos em um material com propriedades magneto-ópticas. Na estrutura cristalina, são inseridos dois tipos de defeitos, a saber:

[019] a) Defeitos lineares: correspondem à remoção de furos em linha reta, que originam os guias de onda do dispositivo;

[020] b) Defeitos locais: correspondem à modificação do raio e da posição de furos localizados no centro do dispositivo, que originam a cavidade ressonante do dispositivo.

[021] Considerando a aplicação de um campo magnético no ressoador magneto-óptico, a chave pode estar em dois estados, a saber:

[022] a) Caso em que o material magneto-óptico não está magnetizado, onde não há transmissão do sinal para o guia de onda de saída;

[023] b) Caso em que o material magneto-óptico está magnetizado, onde ocorre a transmissão do sinal para o guia de onda de saída.

[024] De modo específico, o *switch* apresenta as seguintes características:

- [025] a) A constante de rede do cristal fotônico (a) depende do comprimento de onda de operação (λ), ou frequência central da banda de frequências de operação do dispositivo. Para λ igual a 1,55 micrômetros, o valor de a é igual a 480 nanômetros;
- [026] b) O raio dos furos inseridos no material magneto-óptico, que dão origem ao cristal, é igual a $0,3a$;
- [027] c) Os guias de onda de entrada e saída são criados a partir da inserção de dois defeitos lineares no cristal fotônico;
- [028] d) A cavidade ressonante é criada a partir da inserção de defeitos locais no centro do dispositivo, entre os guias de onda de entrada e saída;
- [029] e) Um sinal eletromagnético transferido da entrada para a saída do *switch* tem a sua direção de propagação alterada por um ângulo de 120 graus;
- [030] f) O estado de operação (*on* ou *off*) em que o dispositivo se encontra depende da aplicação de um campo magnético externo DC sobre o material magneto-óptico;
- [031] g) No estado *off*, o campo magnético externo DC aplicado é igual a 0 e um sinal eletromagnético aplicado no guia de onda de entrada excita um modo dipolo estacionário na cavidade ressonante, de modo que os nós do modo ficam alinhados com o guia de onda de saída e, conseqüentemente, não há transferência do sinal da entrada para a saída;
- [032] h) No estado *on*, o campo magnético externo DC aplicado é igual a H_0 e um sinal eletromagnético aplicado no guia de onda de entrada excita um modo dipolo girante na cavidade ressonante, com conseqüente transferência do sinal da entrada para a saída;
- [033] i) O material magneto-óptico no qual é baseado o dispositivo é anisotrópico. A permissividade elétrica e a permeabilidade magnética do material são descritas pelas seguintes expressões:

$$[034] \quad [\varepsilon] = \varepsilon_0 \begin{pmatrix} 6,25 & -ig & 0 \\ ig & 6,25 & 0 \\ 0 & 0 & 6,25 \end{pmatrix}; \quad \mu = \mu_0$$

[035] Onde:

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

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

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

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

[040] e) i é a unidade imaginária;

[041] f) g é um parâmetro dependente da intensidade do campo magnético externo DC aplicado.

[042] São apresentadas, a seguir, as figuras que ilustram o funcionamento do dispositivo, bem como é descrita, de modo detalhado, a chave desenvolvida.

[043] As figuras 1a e 1b apresentam, de modo simplificado, a chave operando nos estados *on* e *off*, respectivamente.

[044] As figuras 2a e 2b apresentam os autovetores V_1 e V_2 , respectivamente, que estão associados a dois dos seis modos dipolo existentes no ressoador não magnetizado, com frequência de ressonância ω_0 . A figura 2c apresenta os modos V^+ e V^- existentes no ressoador não magnetizado, que giram em sentidos opostos e possuem a mesma frequência de ressonância ω_0 . A figura 2d apresenta os modos V_m^+ e V_m^- existentes no ressoador magnetizado, que giram em sentidos opostos e possuem frequências de ressonância ω^+ e ω^- , respectivamente.

[045] A figura 3 mostra uma visão superior do dispositivo operando no estado *on*. São apresentados o cristal fotônico em que é baseado o dispositivo, os guias de onda retilíneos **301** e **302** (entrada e saída, respectivamente), a cavidade ressonante em que são excitados os modos dipolo e a componente

H_z do sinal eletromagnético, transferido da entrada para a saída, na frequência central normalizada $\omega a/2\pi c = 0,30235$, onde: ω é a frequência angular (em radianos por segundo); 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).

[046] A figura 4 mostra uma visão superior do dispositivo operando no estado *off*. São mostrados o cristal fotônico em que são inseridos a cavidade ressonante e os guias de onda **401** (entrada) e **402** (saída), além da componente H_z do sinal eletromagnético, que é refletido de volta para a entrada, na frequência central normalizada $\omega a/2\pi c = 0,30235$.

[047] A figura 5 apresenta as curvas de transmissão do *switch* operando nos estados *on* e *off*.

[048] Quando o *switch* está sujeito à aplicação de um campo magnético externo DC H_0 (figura 1a), um sinal eletromagnético presente no guia de onda de entrada **101** excita, na cavidade ressonante, um modo dipolo girante **103**. Este modo faz com que seja transferido, para o guia de onda de saída **102**, o sinal incidente. Este é o estado *on* e, neste caso, o valor do parâmetro g é igual a 0,26.

[049] Por outro lado, considerando o caso em que o *switch* não está sujeito à aplicação de um campo magnético externo DC (figura 1b), um sinal eletromagnético incidente no guia de onda de entrada **104** excita, na cavidade ressonante, um modo dipolo estacionário **106**, cujos nós alinham-se com o guia de onda de saída **105**. Neste caso, o sinal incidente é totalmente refletido de volta para a entrada, não havendo a transmissão do mesmo. Este é o estado *off* e o valor do parâmetro g é igual a 0.

[050] A análise do comportamento do ressoador magneto-óptico sem cargas, isto é, sem a conexão dos guias de onda de entrada e de saída, permite a compreensão do comportamento do dispositivo nos dois estados de operação. No caso não magnetizado, existem seis modos dipolo estacionários V_i ($i = 1, 2, \dots, 6$), com frequência de ressonância ω_0 . Os modos V_1 e V_2 estão representados nas figuras 2a e 2b, respectivamente. Os demais modos V_i

podem ser obtidos a partir de rotações dos dois primeiros por 60 e 120 graus em relação ao eixo z.

[051] Os modos V_i podem ser combinados de tal sorte que sejam produzidos modos dipolo girantes degenerados V^- e V^+ , com frequência de ressonância ω_0 e rotação em sentidos opostos (figura 2c).

[052] A aplicação de um campo magnético externo DC H_0 sobre o material magneto-óptico em que se baseia a cavidade ressonante, orientado ao longo do eixo z, faz com que seja removida a degenerescência dos modos V^- e V^+ , ou seja, os mesmos passam a ter frequência de ressonância distintas ω^- e ω^+ . Esta situação é representada na figura 2d, onde os modos V_m^- e V_m^+ , originados a partir de V^- e V^+ , são não degenerados.

[053] A conexão dos dois guias de onda à cavidade ressonante, nos casos não magnetizado e magnetizado, também é responsável por remover a degenerescência dos modos dipolo. Quanto maior o acoplamento entre a cavidade e os guias, maior a diferença entre as frequências de ressonância dos modos antes degenerados.

[054] O estado *on* é obtido quando o dispositivo está sujeito à aplicação de um campo magnético externo DC H_0 (figura 3). Nesta situação, é excitado na cavidade ressonante um dos dois modos dipolo girantes V_m^- ou V_m^+ , tornando possível a transferência do sinal da entrada para a saída.

[055] Por sua vez, o estado *off* é obtido quando o dispositivo não está sujeito à aplicação de um campo magnético externo DC (figura 4). Neste caso, é excitado na cavidade ressonante um modo dipolo estacionário resultante da combinação entre os modos V_i . O modo resultante tem os nós alinhados com o guia de onda de saída do dispositivo, impedindo a transferência do sinal da entrada para a saída.

[056] As curvas de transmissão nos dois estados de operação são mostradas na figura 5. A largura de banda de operação, nos níveis de -2 dB da curva das perdas de inserção (coeficiente de transmissão no estado *on*) e -15 dB da curva de isolamento (coeficiente de transmissão no estado *off*), é de 146 GHz. Na

frequência central normalizada $\omega a/2\pi c = 0,30235$, as perdas de inserção são de -1,5 dB e a isolação entre as portas de entrada e de saída é de -53 dB.

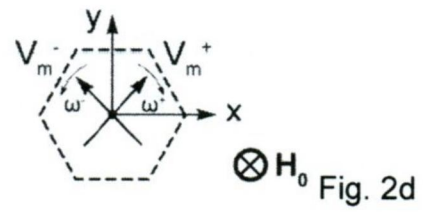
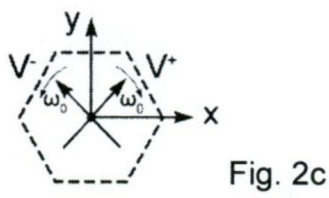
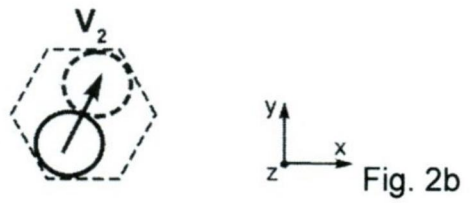
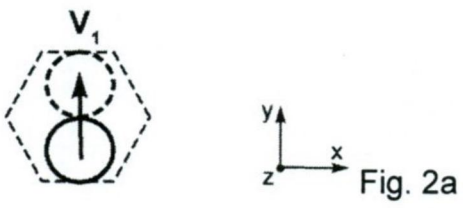
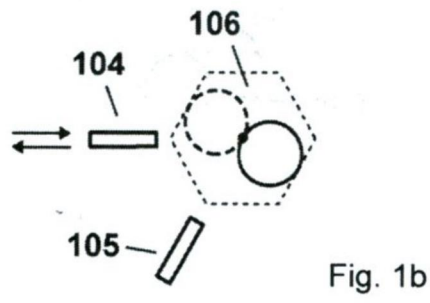
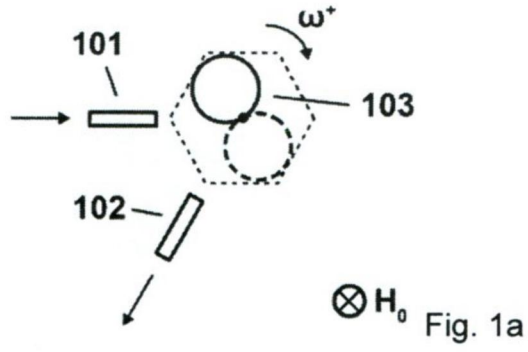
REIVINDICAÇÕES

1. Chave óptica compacta baseada em um cristal fotônico bidimensional com dobramento de 120 graus, baseada em um cristal fotônico bidimensional em que são inseridos defeitos, de forma controlada, que originam dois guias de onda e uma cavidade ressonante com material magneto-óptico, caracterizada por controlar o fluxo de um sinal eletromagnético ao longo de um canal de comunicações ópticas, interrompendo ou bloqueando a passagem do mesmo segundo a aplicação de um campo magnético externo DC aplicado.

2. Chave óptica compacta baseada em um cristal fotônico bidimensional com dobramento de 120 graus de acordo com a reivindicação 1, caracterizada por promover a mudança da direção de propagação de um sinal eletromagnético por um ângulo de 120 graus, no estado *on*, proporcionando maior flexibilidade no desenvolvimento de sistemas ópticos integrados.

3. Chave óptica compacta baseada em um cristal fotônico bidimensional com dobramento de 120 graus de acordo com as reivindicações 1 e 2, caracterizada por operar, no estado *off* (caso não magnetizado), com modos dipolo estacionários cujos nós alinham-se com o guia de onda de saída e, no estado *on* (caso magnetizado), com modos dipolo girantes.

4. Chave óptica compacta baseada em um cristal fotônico bidimensional com dobramento de 120 graus de acordo com as reivindicações 1 a 3, caracterizada por apresentar, na frequência central normalizada $\omega a/2\pi c = 0,30235$, perdas de inserção (coeficiente de transmissão no estado *on*) iguais a -1,5 dB e isolamento entre as portas de entrada e saída (coeficiente de transmissão no estado *off*) igual a -53 dB. A largura de banda de operação é igual a 146 GHz, nos níveis de -2 dB e -15 dB das curvas de perdas de inserção e isolamento, respectivamente.



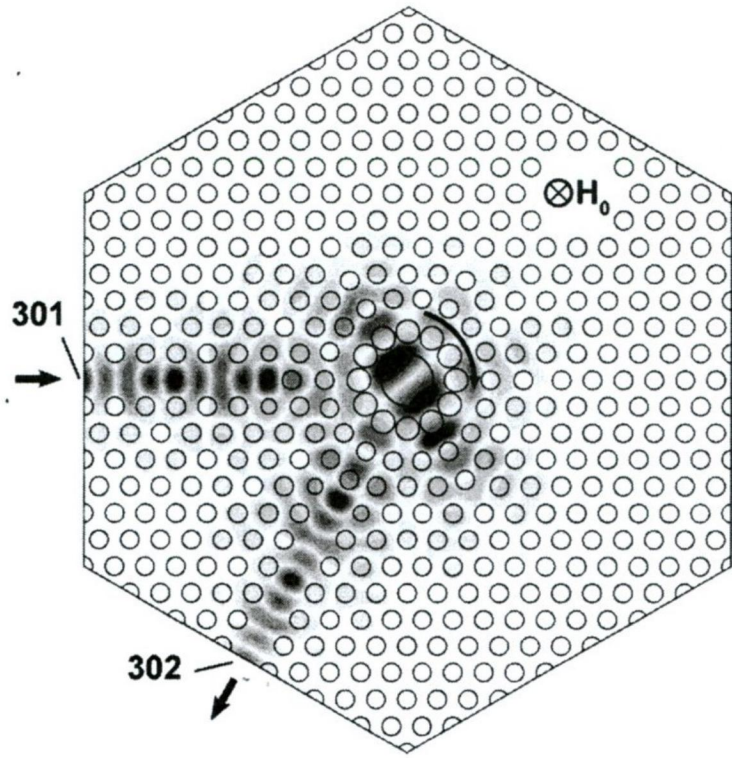


Fig. 3

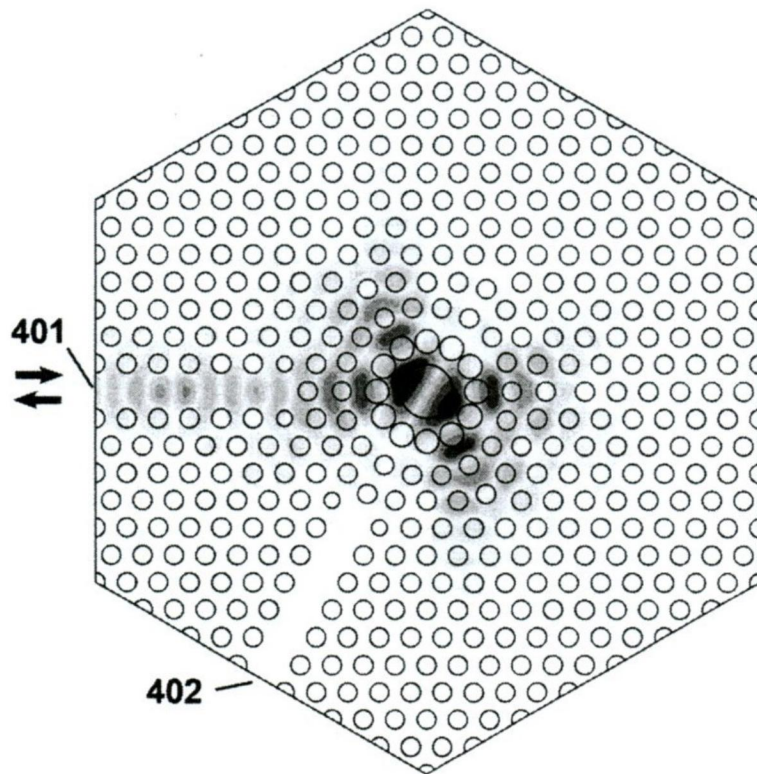


Fig. 4

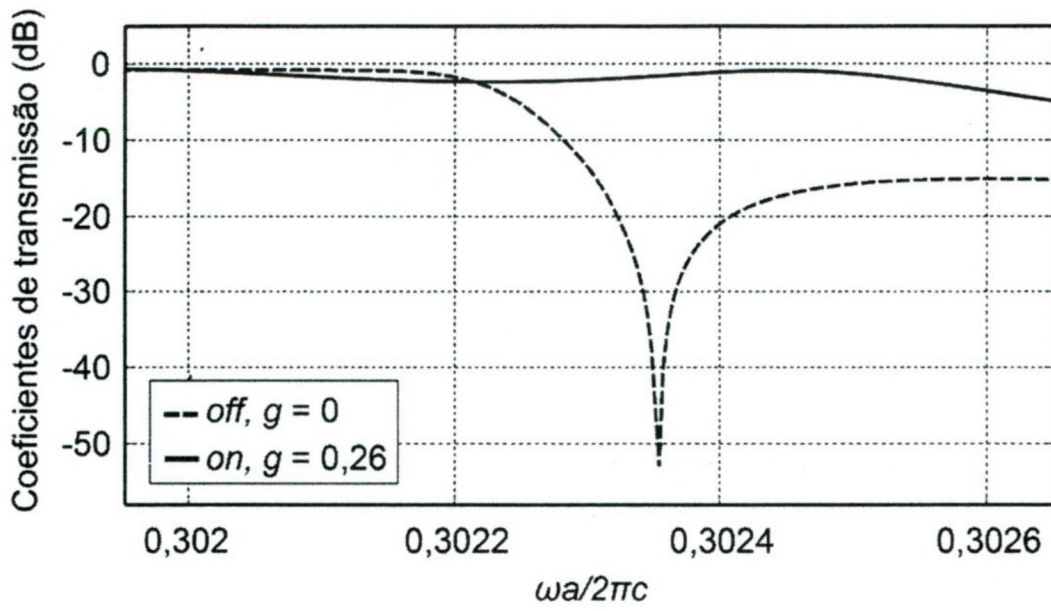


Fig. 5