



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

CARTA PATENTE Nº BR 102013030624-0

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 102013030624-0

(22) Data do Depósito: 13/11/2013

(43) Data da Publicação Nacional: 20/10/2015

(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.

(54) Título: CHAVE ÓPTICA COMPACTA BASEADA EM UM CRISTAL FOTÔNICO BIDIMENSIONAL COM GUIAS DE ONDA FRONTALMENTE ACOPLADOS A UM RESSOADOR MAGNETO-ÓPTICO

(73) Titular: UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARA. CGC/CPF: 34621748000123. Endereço: AV. AUGUSTO CORREA 1, CID UNIV JOSÉ S.NETO, GUAMA, BELÉM, PARÁ, Guamá, Belém, PA, BRASIL (BR), 66075-900

(72) Inventor: VICTOR DMITRIEV; GIANNI MASAKI TANAKA PORTELA; DAIMAM DARLAM ZIMMER.

Prazo de Validade: 20 (vinte) anos contados a partir de 13/11/2013, 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 GUIAS DE ONDA FRONTALMENTE ACOPLADOS A UM RESSOADOR MAGNETO-ÓPTICO”.

[001] A presente invenção refere-se a uma chave óptica compacta baseada em um cristal fotônico bidimensional com guias de onda frontalmente acoplados a um ressoador magneto-óptico. Em circuitos ópticos, uma chave (em inglês, *switch*) permite o controle do fluxo de um sinal eletromagnético, transmitindo-o ou interrompendo-o ao longo do circuito.

[002] Um *switch* possui dois estados de funcionamento. São eles: estado ligado (em inglês, *on*), onde o sinal é transmitido pelo dispositivo, com baixas perdas de inserção; estado desligado (em inglês, *off*), onde a propagação do sinal eletromagnético é interrompida pelo dispositivo.

[003] Uma das tecnologias que se destaca é a baseada em “Cristais Fotônicos”. Nestas estruturas ocorre a modulação periódica da permissividade elétrica ou da permeabilidade magnética dos materiais que as constituem. Esta periodicidade dá origem a uma banda fotônica de frequências proibidas, conhecida como *photonic band gap*. Ondas eletromagnéticas com frequência nesta banda não podem se propagar dentro da estrutura cristalina.

[004] Diversas patentes sobre dispositivos baseados em cristais fotônicos para utilização na tecnologia óptica já foram depositadas. A seguir serão citadas algumas delas.

[005] A patente CN101571657 trata de um *switch* composto por um cristal fotônico bidimensional, dois guias de onda e uma cavidade ressonante (ressoador). O cristal é formado por uma rede triangular de furos, preenchidos com ar, inseridos em um material com propriedades não lineares. No cristal são criados defeitos, de forma controlada, que dão origem aos guias e à cavidade. Um sinal presente em um dos guias pode ser transmitido (estado *on*) ou não (estado *off*), para o outro guia, dependendo de um sinal de controle óptico que promove a transição entre os estados do *switch*. A transição entre os estados é controlada a partir da modificação do índice de refração do material não linear,

que por sua vez varia de acordo com a magnitude do sinal de controle. Este fenômeno é conhecido como “efeito Kerr”.

[006] A patente US2005249455 refere-se a um *switch* óptico baseado em um guia de onda óptico, cujo núcleo é composto por um cristal fotônico bidimensional em que dois ou mais materiais, com diferentes índices de refração, são arranjados periodicamente no espaço. O estado em que o *switch* se encontra é determinado pelo valor do índice de refração dos materiais, que por sua vez pode ser controlado de várias maneiras. Neste caso, a injeção de uma corrente elétrica através de eletrodos presentes na estrutura ou a incidência de um sinal luminoso de controle (semelhante ao *switch* descrito pela patente anterior) altera o valor deste parâmetro.

[007] A patente JP2003215646 faz referência a um *switch* composto por um cristal fotônico inserido entre dois guias de onda. A transição entre os estados é controlada através do ajuste da tensão aplicada entre dois eletrodos que compõem o dispositivo. Dependendo do valor deste parâmetro, um sinal eletromagnético é transmitido ou não de um guia para o outro.

[008] Por fim, o dispositivo descrito pela patente JP2006184618 baseia-se em um cristal fotônico bidimensional, onde são inseridos guias de onda, em que um dos materiais constituintes tem o valor do seu índice de refração controlado pela temperatura. O correto ajuste da temperatura do dispositivo promove a transição entre os estados *on* e *off*.

[009] Basicamente, o que distingue cada um dos *switches* citados anteriormente é o mecanismo utilizado para o controle da transição entre os dois estados dos dispositivos.

[010] A presente invenção é baseada em um cristal fotônico bidimensional, constituído por um material magneto-óptico onde são inseridos furos preenchidos com ar. A permissividade elétrica do referido material pode ser modificada através da aplicação de um campo magnético DC externo. O estado em que o dispositivo se encontra (*on* ou *off*) depende da intensidade deste campo.

[011] O dispositivo apresentado possui grande largura de banda, baixas perdas de inserção no modo *on* e alta isolamento no modo *off*. Também possui dimensões reduzidas, o que permite o aumento da escala de integração de componentes em sistemas ópticos.

[012] Em linhas gerais, o dispositivo é composto por um cristal fotônico bidimensional em que são inseridos dois guias de onda, formados através da remoção de duas fileiras de furos de ar, e uma cavidade ressonante, formada através da alteração dos raios e das posições dos furos localizados entre os dois guias de onda.

[013] Um sinal eletromagnético, aplicado em um dos dois guias de onda, é transmitido para o outro guia de acordo com o valor do campo magnético DC externo H_0 aplicado. Caso a intensidade de H_0 seja igual a zero, o dispositivo encontra-se no estado *on* e ocorre a transmissão do sinal do guia de entrada para o de saída, com baixas perdas de inserção. Por outro lado, para um determinado valor de H_0 diferente de zero, o dispositivo encontra-se no estado *off* e o sinal presente no guia de entrada não será transmitido para o de saída.

[014] De modo mais detalhado, o dispositivo possui as seguintes características:

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

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

[017] - dois 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 ressoador magneto-óptico;

[018] - um ressoador magneto-óptico é inserido no cristal fotônico bidimensional, através da variação do raio de alguns furos localizados entre os dois guias de onda e da alteração das posições que os mesmos ocupam;

[019] - o valor da intensidade de um campo magnético DC externo define o estado em que o dispositivo se encontra;

[020] - no estado *on*, um modo dipolo estacionário é excitado na cavidade ressonante e os nós do modo são alinhados perpendicularmente ao eixo dos

guias de onda, de modo que no guia de saída são excitadas ondas eletromagnéticas;

[021] - no estado *off*, um modo dipolo estacionário é excitado na cavidade ressonante e os nós do modo são alinhados paralelamente ao eixo dos guias de onda, de modo que no guia de saída não são excitadas ondas eletromagnéticas;

[022] - 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:

$$[023] \quad [\varepsilon] = \varepsilon_0 \begin{pmatrix} 6,25 & -ig & 0 \\ ig & 6,25 & 0 \\ 0 & 0 & 6,25 \end{pmatrix}; \quad \mu = \mu_0$$

[024] Onde:

[025] - ε é a permissividade elétrica do material;

[026] - ε_0 é a permissividade elétrica do espaço livre;

[027] - μ é a permeabilidade magnética do material;

[028] - μ_0 é a permeabilidade magnética do espaço livre;

[029] - g é um parâmetro que depende da intensidade do campo magnético DC aplicado.

[030] A seguir, serão apresentadas as figuras que auxiliam a descrição do dispositivo e do princípio de funcionamento relacionado.

[031] As figuras 1a e 1b representam, de forma esquemática, o switch operando nos estados *on* e *off*, respectivamente.

[032] As figuras 2a e 2b representam dois autovetores V_1 (alinhado com o eixo x) e V_2 (alinhado com o eixo y), respectivamente. A figura 2c representa dois modos degenerados tipo dipolo V^+ e V^- , girando em sentido opostos e com a mesma frequência ω_0 . A figura 2d representa dois modos não degenerados tipo dipolo V_m^+ e V_m^- , girando com frequências distintas ω^+ e ω^- , respectivamente, sob influência de um campo magnético DC externo H_0 .

[033] As figuras 3 e 4 ilustram o switch operando nos estados *on* e *off*, respectivamente. Nelas estão representados a rede triangular de furos de ar inseridos em um material magneto-óptico que corresponde ao cristal fotônico, os guias de onda de entrada (**301** e **401**) e de saída (**302** e **402**), a cavidade ressonante localizada entre os guias de onda e a componente H_z do sinal eletromagnético no dispositivo.

[034] A figura 5 apresenta a resposta em frequência do dispositivo operando nos estados *on* e *off*. O eixo das abscissas contém os valores da frequência normalizada (adimensional) e o eixo das ordenadas contém o valor dos coeficientes de transmissão (em decibéis).

[035] No caso em que não ocorre a aplicação do campo magnético DC H_0 , representado na figura 1a, o parâmetro g tem valor igual a zero. Neste caso, um sinal eletromagnético que se propaga pelo guia de entrada **101** excita a cavidade ressonante, formando um modo de dipolo estacionário **103** que permite a transmissão do sinal para o guia de saída **102**. Esta situação corresponde ao estado *on*.

[036] Já no caso com a presença de um campo magnético DC H_0 , representado na figura 1b, o parâmetro g apresenta valor igual a 0,3. Neste caso, um sinal eletromagnético que se propaga pelo guia de entrada **104** excita a cavidade ressoante. Porém, devido à aplicação do campo H_0 , o dipolo **106** sofre uma rotação de 90° , quando comparado aquele representado na figura anterior. Neste caso, os nós do dipolo alinham-se paralelamente ao eixo dos guias de onda e não ocorre a passagem do sinal eletromagnético para o guia de saída **105**. Esta situação corresponde ao estado *off*.

[037] A cavidade ressonante do dispositivo, sem a conexão de guias de onda, é descrita pelas figuras 2a, 2b, 2c e 2d. As figuras 2a e 2b apresentam dois autovetores V_1 e V_2 que representam os dois modos tipo dipolo suportados pelo ressoador, sendo V_1 orientado ao longo do eixo x e V_2 orientado ao longo do eixo y . Combinações lineares entre eles podem ser escritas como autovetores $V^+ = V_1 + iV_2$ e $V^- = V_1 - iV_2$, que giram em sentidos opostos e com a mesma frequência ω_0 , representados na figura 2c. A aplicação de um campo

magnético DC externo H_0 , representada na figura 2d, remove a degenerescência dos modos V^+ e V^- , transformando-os em modos não degenerados V_m^+ e V_m^- que giram com frequências ω^+ e ω^- , respectivamente.

[038] A frequência central de operação $\omega a/2\pi c$ do dispositivo é igual a 0,303, onde ω 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 300.000.000 metros por segundo). Nas figuras 3 e 4 estão representados os comportamentos do dispositivo nos modos *on* e *off*, quando excitado por um sinal eletromagnético com frequência igual à central.

[039] A resposta em frequência do *switch* é mostrada na figura 5. O dispositivo apresenta perdas de inserção de -0,16 dB (coeficiente de transmissão no estado *on*) e isolamento de -29 dB (coeficiente de transmissão no estado *off*). A largura de banda, no nível de isolamento de -15 dB, é de 88 GHz.

REIVINDICAÇÕES

1. Chave óptica compacta baseada em um cristal fotônico bidimensional com guias de onda frontalmente acoplados a um ressonador magneto-óptico, **caracterizada por** ser baseada em um cristal fotônico bidimensional em que são inseridos dois guias de onda e uma cavidade ressonante, capaz de controlar o fluxo de um sinal eletromagnético, transmitindo-o ou interrompendo-o ao longo de um canal óptico, de acordo com a aplicação de um campo magnético DC externo, cujo princípio de funcionamento se baseia na excitação de modos dipolo estacionários, tanto no estado ligado, com os nós do dipolo (103) alinhados perpendicularmente ao eixo dos guias de onda (101) e (102), quanto no estado desligado, com os nós do dipolo (106) alinhados paralelamente ao eixo dos guias de onda (104) e (105).

2. Chave óptica compacta baseada em um cristal fotônico bidimensional com guias de onda frontalmente acoplados a um ressonador magneto-óptico, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizada por** possuir, na frequência central normalizada $\omega a/2\pi c = 0,303$, perdas de inserção entre os guias de onda de entrada (301) e saída (302) no estado ligado iguais a -0,16 dB e isolamento entre os guias de onda de entrada (401) e saída (402) no estado desligado igual a -29 dB, enquanto que a largura de banda, no nível de -15 dB da curva de isolamento, é de 88 GHz.

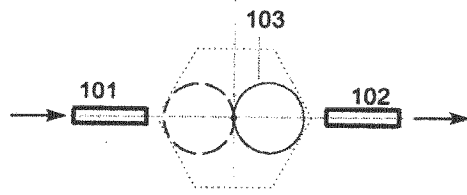


Fig. 1a

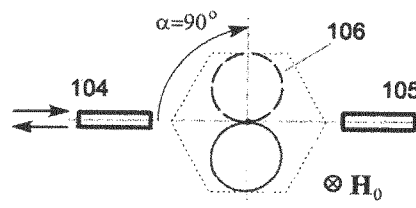


Fig. 1b

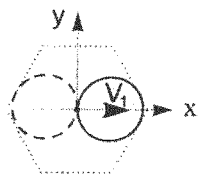


Fig. 2a

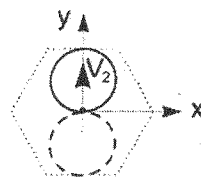


Fig. 2b

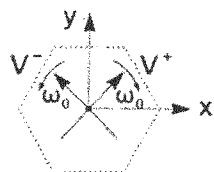


Fig. 2c

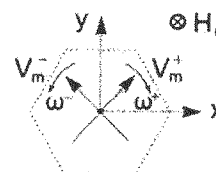


Fig. 2d

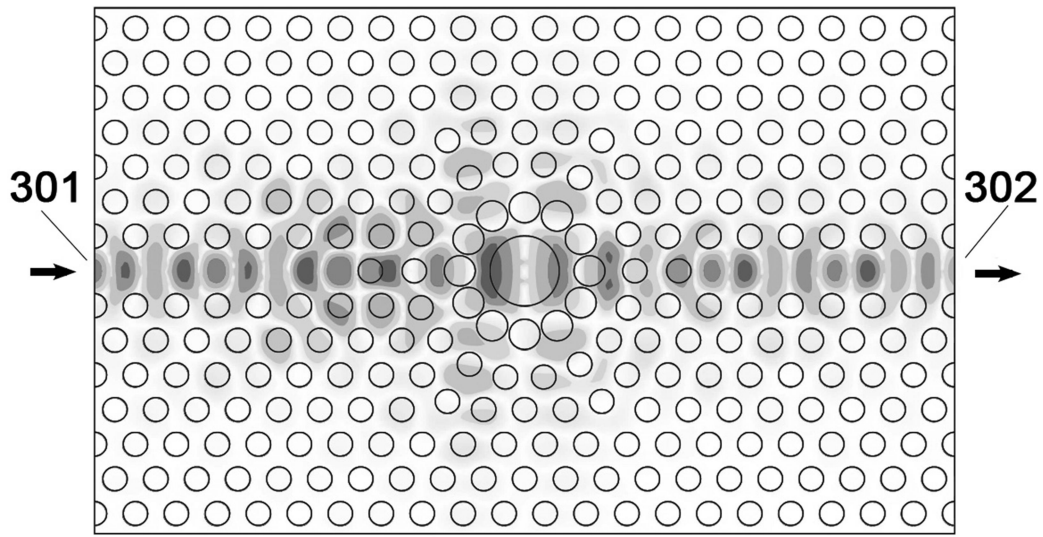


Fig. 3

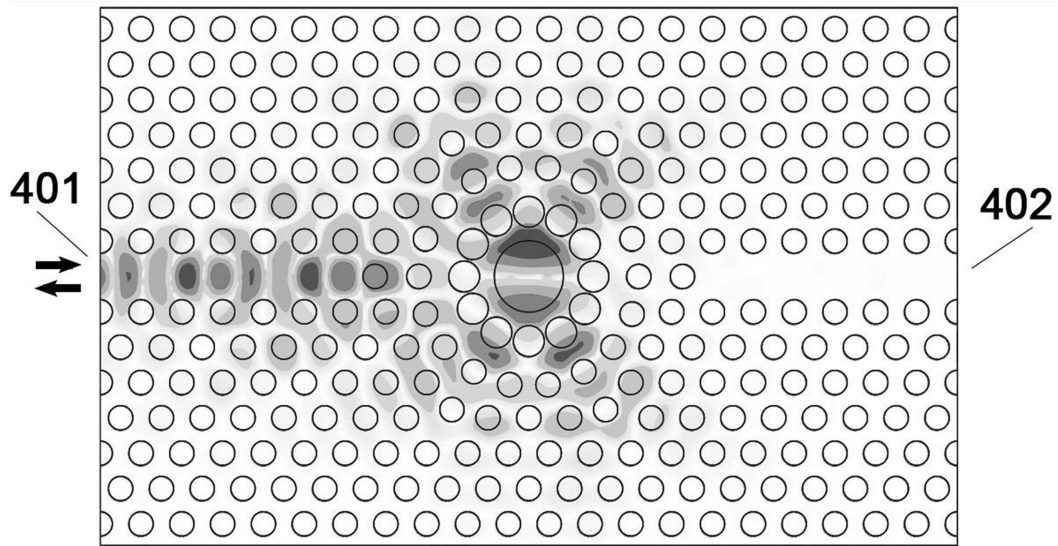


Fig. 4

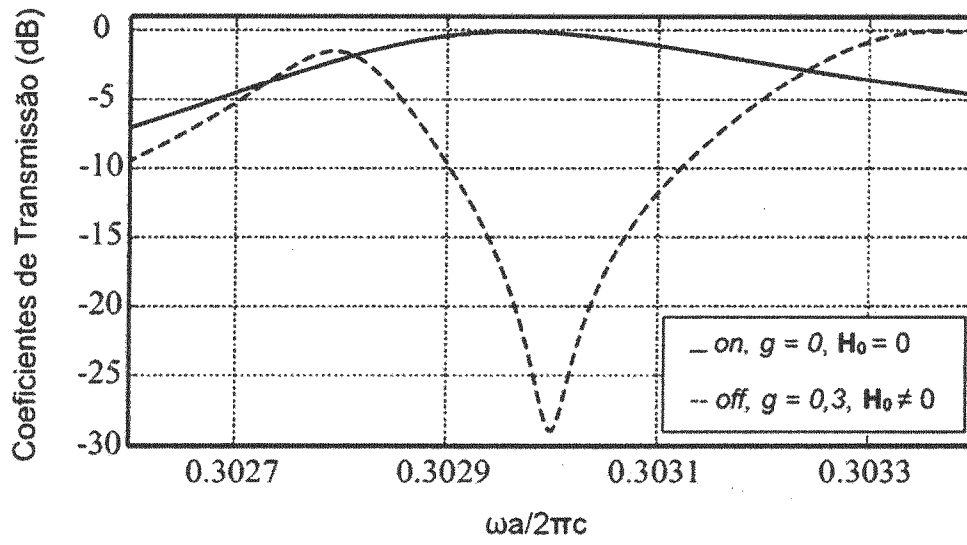


Fig. 5