



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

CARTA PATENTE Nº BR 102013030623-1

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 102013030623-1

(22) Data do Depósito: 13/11/2013

(43) Data da Publicação Nacional: 27/10/2015

(51) Classificação Internacional: G02B 6/122; G02F 1/095; G02B 6/35.

(52) Classificação CPC: G02B 6/1225; G02F 1/095; G02B 6/35.

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

(73) Titular: UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, Pessoa Jurídica. Endereço: Avenida Augusto Correa n.1 Cidade Universitaria José da Silveira Netto, Guamá, Belém, PA, BRASIL(BR), 66075-900, Brasileira

(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: 09/08/2022

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 E EM GUIAS DE ONDA LATERALMENTE ACOPLADOS A UM RESSOADOR MAGNETO-ÓPTICO”.

5 A presente invenção refere-se a uma chave óptica compacta baseada em um cristal fotônico bidimensional e em guias de onda lateralmente acoplados a um ressoador magneto-óptico. Tem como função principal o controle da propagação de um sinal eletromagnético ao longo de um canal de comunicações, permitindo ou interrompendo a passagem do mesmo.

10 A demanda crescente por circuitos com alta escala de integração de componentes, em especial na área da indústria óptica, requer o desenvolvimento de novos dispositivos, com dimensões cada vez menores. Dentre esses dispositivos, destacam-se as chaves (em inglês, *switches*).

15 A função de um *switch* é permitir, ou interromper, a passagem de um sinal eletromagnético ao longo de um canal de comunicações óptico. Portanto, pode-se dizer que o mesmo possui dois estados, que são: estado ligado (em inglês, *on*), em que o *switch* transmite o sinal, com baixas perdas de inserção; estado desligado (em inglês, *off*), em que o dispositivo interrompe a propagação do sinal.

20 A função de chaveamento não é necessária apenas em redes e circuitos ópticos. Um simples interruptor que liga ou desliga uma lâmpada, por exemplo, controla a passagem de uma corrente elétrica que aciona o dispositivo. Entretanto, em sistemas ópticos, são necessárias novas tecnologias para a realização dessa tarefa.

25 Uma das tecnologias que está em evidência é aquela baseada em “Cristais Fotônicos”. São estruturas em que ocorre a modulação periódica da permissividade elétrica ou da permeabilidade magnética dos materiais que as constituem. Possuem uma banda de frequências proibida fotônica, também conhecida como *photonic band gap*. Ondas eletromagnéticas com frequência
30 situada nesta banda não podem se propagar dentro da estrutura cristalina.

A criação de defeitos controlados dentro da estrutura cristalina e a existência do *photonic band gap* estão ligados ao princípio de funcionamento de boa parte dos dispositivos ópticos baseados em cristais fotônicos.

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

Destaca-se, entre outras, a patente CN101571657, que trata de um *switch* completamente óptico. Basicamente, o dispositivo em questão é composto por um cristal fotônico bidimensional, por dois guias de onda e por uma cavidade ressonante (ressoador). O cristal é formado por uma rede triangular de furos, preenchidos com ar, 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 controla 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”.

Já o *switch* descrito pela patente US2005249455 é 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.

Vale ressaltar também o *switch* descrito pela patente JP2003215646. Entre dois guias de onda ópticos, é inserido um elemento que permite, ou não, a passagem do sinal eletromagnético. Este elemento é composto por um cristal fotônico bidimensional e um par de eletrodos. Dependendo do valor da tensão elétrica aplicada entre os dois eletrodos, o sinal pode ser transmitido do

guia de entrada para o de saída (estado *on*) ou ser totalmente refletido pelo cristal fotônico, não se propagando através do guia de saída (estado *off*).

Vários são os exemplos de *switches* que se baseiam na tecnologia de cristais fotônicos. Como se pode verificar, a principal diferença entre eles é o processo que promove a transição entre os estados. O *switch* descrito pela
5 patente JP2006184618, por exemplo, baseia-se em um cristal fotônico bidimensional e na modificação do índice de refração de um dos materiais constituintes de acordo com a temperatura.

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

Com o crescente aumento na demanda por largura de banda em
15 redes e circuitos ópticos, o aumento da densidade de integração de dispositivos tem se tornado cada vez mais evidente. Isso implica a miniaturização de componentes, aos níveis dos chips ópticos, requerendo o desenvolvimento de novas tecnologias.

Uma das limitações que existe na tecnologia de fibras ópticas diz
20 respeito ao ângulo de dobramento das mesmas. Por conta de limitações físicas, relacionadas ao princípio de funcionamento das mesmas, o ângulo de dobramento a que elas podem ser sujeitadas é restrito, o que dificulta a sua utilização em aplicações que exijam uma mudança mais acentuada e rápida da direção do sinal eletromagnético.

Os guias de onda baseados em cristais fotônicos superam essa
25 dificuldade, pois o funcionamento dos mesmos não se baseia no princípio da reflexão interna total (caso das fibras ópticas), mas sim na existência do *photonic band gap*.

Entre as principais vantagens que a invenção aqui apresentada
30 possui, destaca-se a inversão do sentido de propagação de um sinal eletromagnético, oferecendo mais flexibilidade no design de circuitos ópticos

integrados. Por ter dimensões reduzidas, pode promover maior densidade de integração em sistemas ópticos.

Além disso, por funcionar com magnetização uniforme, o circuito de magnetização da estrutura é simplificado e pode ser baseado em um eletroímã, onde a intensidade da corrente elétrica que o atravessa determina a intensidade do campo gerado. Destaca-se também a alta largura de banda, as baixas perdas de inserção no estado *on* e a alta isolação no estado *off*.

De modo geral, a estrutura é composta por um cristal fotônico bidimensional em que são inseridos dois guias de onda, através da remoção de duas fileiras de furos de ar, e uma cavidade ressonante, através da alteração dos raios e das posições dos furos localizados entre os dois guias de onda. Um sinal, aplicado em um dos dois guias de onda, é transmitido para o outro guia de acordo com o campo magnético DC aplicado. Se não houver a aplicação do campo, o dispositivo encontra-se no estado *off* e não há transmissão do sinal. A aplicação de um campo magnético DC H_0 promove a transição para o estado *on* e a transmissão do sinal para o outro guia.

De modo específico, o dispositivo possui as seguintes características:

- o cristal fotônico em que é baseado o dispositivo é composto por uma rede triangular de furos preenchidos com ar em um semicondutor magnético;
- o raio dos furos de ar é igual a $0,3a$ (a é a constante de rede do cristal);
- 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 e formam entre si um ângulo de 180° ;
- 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;
- a aplicação de um campo magnético DC controla o estado em que o dispositivo se encontra;
- no estado *off*, um modo dipolo estacionário é excitado na cavidade ressonante e os nós do modo são alinhados com o guia de onda de saída, de modo que neste não é excitada uma onda eletromagnética;

- no estado *on*, um modo dipolo girante é excitado na cavidade ressonante, de modo que no guia de onda de saída é excitada uma onda eletromagnética;
- 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:

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

onde:

- ε é a permissividade elétrica do material (em Farads por metro);
- ε_0 é a permissividade elétrica do espaço livre (em Farads por metro);
- μ é a permeabilidade magnética do material (em Henrys por metro);
- μ_0 é a permeabilidade magnética do espaço livre (em Henrys por metro);
- g é um parâmetro proporcional à intensidade do campo magnético DC aplicado.

São apresentadas, a seguir, as figuras que ilustram o funcionamento do dispositivo em questão, bem como é descrita detalhadamente a invenção desenvolvida.

As figuras 1a e 1b apresentam, de modo esquemático, o *switch* operando nos estados *on* e *off*, respectivamente.

As figuras 2a e 2b apresentam os autovetores V_1 e V_2 , respectivamente, que correspondem a dois modos dipolo ortogonais do ressoador magneto-óptico, com frequência de ressonância ω_0 . A figura 2c apresenta os modos girantes V^+ e V^- , que giram em sentidos opostos e com a mesma frequência ω_0 . A figura 2d apresenta os modos girantes V_m^+ e V_m^- , que giram em sentidos opostos e com frequências distintas ω^+ e ω^- .

A figura 3 é um corte do dispositivo que mostra a estrutura periódica do cristal fotônico, os dois guias de onda retilíneos **301** (entrada) e **302** (saída), a cavidade ressonante e a componente H_z do campo eletromagnético no *switch* operando no estado *on*, para excitação no guia **301**, na frequência central normalizada $\omega a/2\pi c = 0,30518$, 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 igual a 300.000.000 metros por segundo).

A figura 4 é um corte do dispositivo que mostra a estrutura periódica do cristal fotônico, os dois guias de onda retilíneos **401** (entrada) e **402** (saída), a cavidade ressonante e a componente H_z do campo eletromagnético no *switch* operando no estado *off*, para excitação no guia **401**, na frequência central normalizada $\omega a/2\pi c = 0,30518$.

A figura 5 apresenta a resposta em frequência do *switch* operando nos estados *on* e *off*.

Considerando o caso em que ocorre a aplicação de um campo magnético DC H_0 , representado na figura 1a, um sinal, aplicado no guia **101** (entrada) excita, na cavidade ressonante, um modo dipolo girante **103**. Deste modo, ocorre a transmissão do sinal para o guia **102** (saída). Este é o estado *on* do dispositivo e o valor do parâmetro g , neste caso, é igual a 0,3. Neste caso, o sinal que atravessa o guia de entrada tem o sentido esquerda \rightarrow direita, enquanto que o sinal que atravessa o guia de saída tem o sentido inverso, ou seja, direita \rightarrow esquerda.

Quando não ocorre a aplicação de um campo magnético DC H_0 , situação representada na figura 1b, um sinal, aplicado no guia **104** (entrada) excita, na cavidade ressonante, um modo dipolo estacionário **106**. Como os nós do dipolo estão alinhados com o guia **105** (saída), neste não são excitadas ondas eletromagnéticas, ou seja, não há transmissão do sinal. Este é o estado *off* do dispositivo e o valor do parâmetro g , neste caso, é igual a 0.

Este comportamento é mais facilmente compreendido a partir de uma análise do ressoador magneto-óptico sem cargas, ou seja, sem a presença dos guias de onda. Neste caso, o ressoador suporta dois modos dipolo ortogonais e degenerados, associados a autovetores V_1 (figura 2a) e V_2 (figura 2b). Quaisquer combinações lineares entre eles, por exemplo, $V^+ = V_1 + iV_2$ e $V^- = V_1 - iV_2$ (figura 2c) também são autovetores. Esses últimos são degenerados e apresentam rotação em sentidos opostos (horário e anti-horário), porém com a mesma frequência de ressonância ω_0 . A aplicação de um campo magnético DC

H_0 remove a degenerescência dos modos V^+ e V^- , fazendo com que eles passem a girar com diferentes frequências ω^+ e ω^- (modos V_m^+ e V_m^- , figura 2d).

A conexão dos dois guias de onda ao ressoador magneto-óptico, no caso não magnetizado, remove a degenerescência dos modos V_1 e V_2 . Esses modos, que antes giravam com a mesma frequência ω_0 , passam a girar com frequências distintas ω_1 e ω_2 , respectivamente. Quanto maior o acoplamento entre o ressoador e os guias, maior a diferença entre as duas frequências. No caso magnetizado, a conexão dos guias à cavidade também altera as frequências dos modos V_m^+ e V_m^- .

O estado *on* (figura 3) é obtido com a aplicação do campo magnético DC H_0 ($g = 0,3$) e corresponde à utilização de um dos modos girantes V_m^+ ou V_m^- (representados pela seta arqueada localizada no centro da figura 3). Já o estado *off* (figura 4) é obtido sem a aplicação da magnetização ($g = 0$) e corresponde a um modo estacionário formado por $V_2 - V_1$, cujos nós estão alinhados com o guia de saída. O ajuste do parâmetro l (distância entre cada um dos guias de onda e o centro do ressoador, representado nas figuras 1a e 1b) é fundamental no processo de otimização da resposta em frequência do dispositivo. Nesta invenção, o parâmetro l é igual a 1047,6 nm e a relação l/λ_0 é igual a 0,67, onde λ_0 corresponde ao comprimento de onda no espaço livre no qual ocorre a ressonância mostrada na figura 5.

A resposta em frequência do *switch*, considerando a excitação na porta 1, é mostrada na figura 5. O dispositivo apresenta, na frequência normalizada $\omega a/2\pi c = 0,30518$, perdas de inserção de -1,3 dB (coeficiente de transmissão no estado *on*) e isolamento de -37 dB (coeficiente de transmissão no estado *off*). A largura de banda, no nível de isolamento de -15 dB, é de 71 GHz.

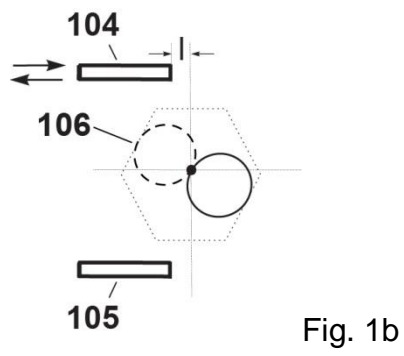
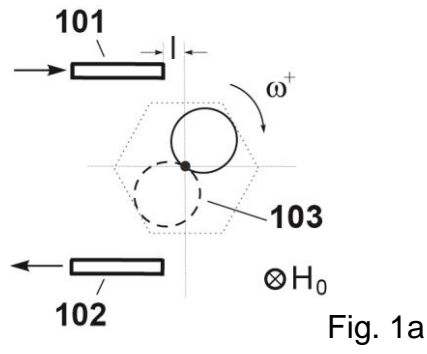
REIVINDICAÇÕES

1. Chave óptica compacta baseada em um cristal fotônico bidimensional e em guias de onda lateralmente acoplados a um ressoador magneto-óptico, composta por um cristal fotônico bidimensional em que são inseridos dois guias de onda e uma cavidade ressonante com constante de rede a , raio de furos da rede cristalina de $0,3a$ e l/λ_0 igual a $0,67$ onde l é a distância entre cada um dos guias de onda e o centro do ressoador e é igual a $1047,6$ nm e λ_0 é o comprimento de onda no espaço livre, caracterizada por ser controlada através da aplicação de um campo magnético DC para permitir ou bloquear a passagem de um fluxo luminoso.

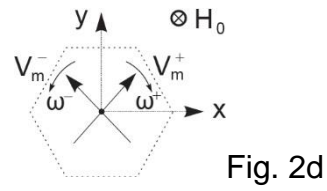
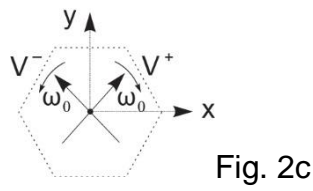
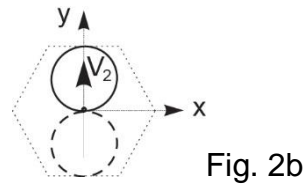
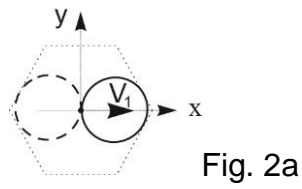
2. Chave óptica compacta baseada em um cristal fotônico bidimensional e em guias de onda lateralmente acoplados a um ressoador magneto-óptico de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que, no caso em que ocorre a aplicação de um campo magnético DC H_0 sobre o material de que é feito o dispositivo ou, equivalentemente, quando o parâmetro g é igual a $0,3$, um sinal aplicado no guia de onda de entrada (101) excita um modo dipolo girante (103) no ressoador, que por sua vez excita o guia de onda de saída (102), de modo que ocorre a inversão do sentido de propagação do sinal eletromagnético aplicado no dispositivo, já que o sinal no guia de onda de entrada (101) se propaga da esquerda para a direita e o sinal no guia de onda de saída (102) se propaga da direita para a esquerda.

3. Chave óptica compacta baseada em um cristal fotônico bidimensional e em guias de onda lateralmente acoplados a um ressoador magneto-óptico de acordo com as reivindicações 1 e 2, caracterizada pelo fato de que um modo dipolo excitado na cavidade ressonante pode tanto ser girante (103) no estado *on* como pode ser estacionário (106) no estado *off*, a depender de um campo magnético DC aplicado sobre o dispositivo, com o modo dipolo estacionário no estado *off* sendo excitado a partir de um sinal aplicado no guia de onda de entrada (104) e possuindo nós alinhados com o guia de onda de saída (105).

4. Chave óptica compacta de acordo com as reivindicações 1 a 3, caracterizada pelo fato de que é operada na frequência central normalizada $\omega a/2\pi c = 0,30518$ com a aplicação de um campo magnético DC \mathbf{H}_0 sobre o dispositivo para minimizar as perdas de inserção entre os guias de onda de entrada (301) e de saída (302) ou com a remoção do referido campo magnético \mathbf{H}_0 para maximizar a isolação entre os guias de onda de entrada (401) e de saída (402).



5



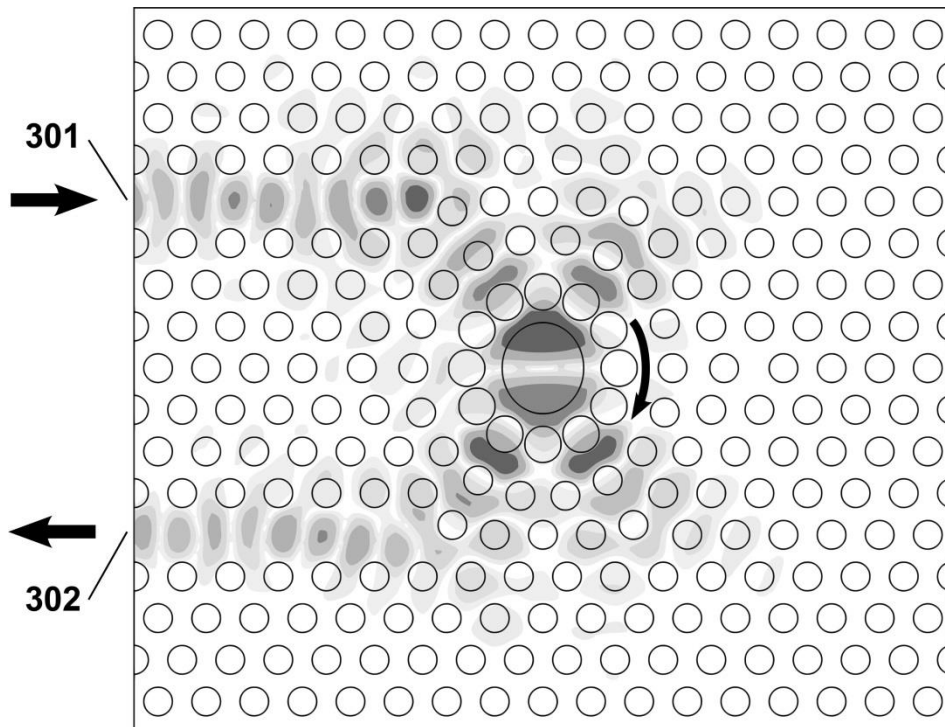


Fig. 3

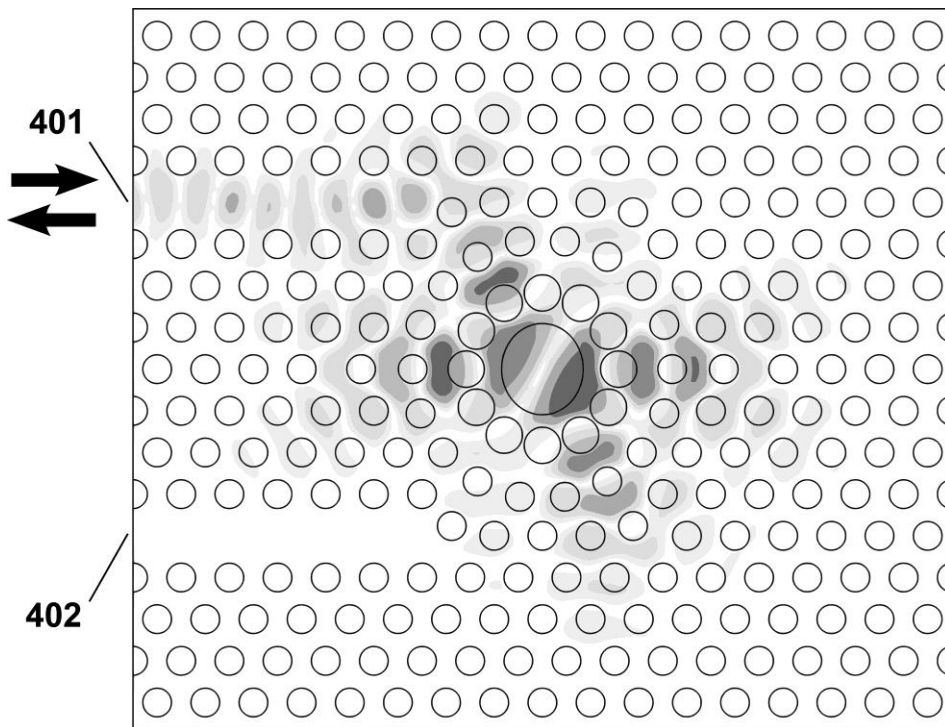


Fig. 4

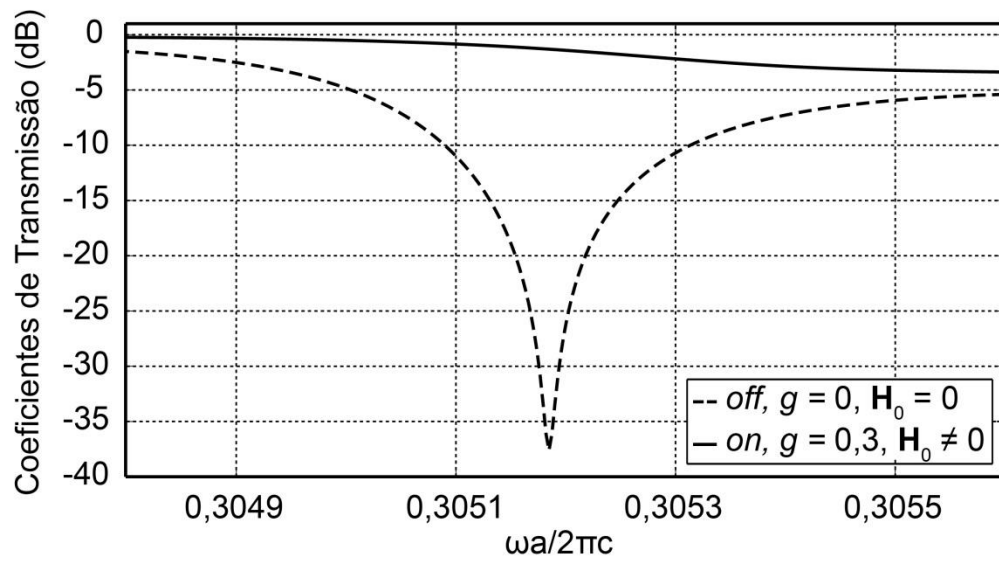


Fig. 5