



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

CARTA PATENTE Nº BR 102014016547-9

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 102014016547-9

(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 60 GRAUS

(73) Titular: UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, Instituição de Ensino e Pesquisa. CGC/CPF: 34621748000123. Endereço: Av. Augusto Corrêa,1, 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: 31/05/2022

Assinado digitalmente por:

Alexandre Dantas Rodrigues

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



“CHAVE ÓPTICA COMPACTA BASEADA EM UM CRISTAL FOTÔNICO BIDIMENSIONAL COM DOBRAMENTO DE 60 GRAUS”.

[001] A invenção apresentada refere-se a uma chave óptica compacta baseada em um cristal fotônico bidimensional com dobramento de 60 graus. Destina-se, basicamente, ao controle da propagação de um sinal eletromagnético ao longo de um canal de comunicações ópticas, permitindo ou bloqueando a passagem do mesmo (função de chaveamento).

[002] A necessidade por dispositivos com dimensões cada vez menores, de modo a atender os requisitos de maior densidade de integração nos novos sistemas de comunicações ópticas, tem motivado o desenvolvimento de novas tecnologias, dentre as quais se destaca aquela baseada em estruturas conhecidas como “cristais fotônicos”.

[003] Nestes cristais, ocorre a modulação periódica da permissividade elétrica ou da permeabilidade magnética dos diferentes materiais que os constituem. Como consequência, uma faixa de frequências proibida, conhecida como *photonic band gap*, tem origem no diagrama de bandas característico destas estruturas.

[004] A propagação de ondas eletromagnéticas com frequência situada nesta faixa é proibida porque, ao incidirem no cristal, são totalmente refletidas. O princípio de funcionamento da maior parte dos dispositivos baseados em cristais fotônicos está associado, de alguma maneira, à existência deste fenômeno.

[005] Entre os vários dispositivos que são utilizados em sistemas ópticos, destacam-se as chaves (em inglês, *switches*). Elas possuem dois estados de funcionamento, a saber: estado ligado (em inglês, *on*), onde ocorre a transmissão de um sinal eletromagnético ao longo do dispositivo, com baixas perdas de inserção entre as portas de entrada e saída do dispositivo; estado desligado (em inglês, *off*), onde há o impedimento da propagação do sinal, com alta isolamento entre as portas de entrada e saída. A transição entre estes dois estados de operação é determinada pela modificação de algum parâmetro característico do cristal fotônico em que se baseia o *switch*, decorrente do ajuste de alguma variável externa à estrutura.

[006] Com o avanço nas pesquisas referentes ao desenvolvimento de novos dispositivos baseados em cristais fotônicos, várias patentes tratando de chaves ópticas baseadas nestas estruturas já foram depositadas.

[007] Por exemplo, no dispositivo a que se refere a patente CN101571657, a variação da intensidade de um sinal de controle óptico é responsável pela mudança no índice de refração do material no qual é baseado o *switch*. Este fenômeno, conhecido como efeito Kerr, está associado à transição entre os estados *on* e *off* do dispositivo. O *switch* é construído sobre um cristal fotônico bidimensional com rede triangular de furos, preenchidos com ar e feitos no material com propriedades não lineares em questão. No cristal são inseridos, de modo bem definido, defeitos que dão origem aos guias de onda e à cavidade ressonante.

[008] Por outro lado, o *switch* descrito na patente US2005249455 baseia-se em um guia de onda óptico, cujo núcleo é formado por um cristal fotônico bidimensional em que dois ou mais materiais, com diferentes índices de refração, são distribuídos de modo periódico no espaço. A injeção de um sinal luminoso ou de uma corrente elétrica entre eletrodos presentes na estrutura é responsável pela modificação do índice de refração dos materiais que compõem o cristal e, conseqüentemente, pelo estado em que o *switch* opera (ligado ou desligado).

[009] Merece destaque também o *switch* descrito pela patente JP2003215646. Neste caso, entre dois guias de onda ópticos, é inserido um elemento responsável pelo chaveamento (transição entre os estados *on* e *off*). Este elemento é baseado em um cristal fotônico bidimensional e um par de eletrodos. A transição entre os estados de operação do dispositivo é controlada pelo valor de uma tensão elétrica aplicada entre os dois eletrodos. Dependendo do valor da tensão aplicada, o dispositivo pode tanto permitir (estado *on*) como interromper (estado *off*) a passagem de um sinal eletromagnético do guia de onda de entrada para o de saída.

[010] Já o *switch* a que faz referência a patente JP2006184618 é baseado em um cristal fotônico bidimensional em que o índice de refração dos materiais que o constituem varia de acordo com a temperatura. O controle da temperatura do

dispositivo é responsável por definir o estado em que o *switch* se encontra (ligado ou desligado).

[011] Várias são as formas de controlar a transição entre os modos de operação em um *switch* baseado na tecnologia de cristais fotônicos. A presente invenção é baseada em um cristal fotônico bidimensional composto por uma rede triangular de furos feitos em um material magneto-óptico, cuja permissividade elétrica depende da intensidade de um campo magnético externo DC aplicado. Quando o material está não magnetizado (campo magnético externo igual a 0), o *switch* opera no estado *off*. Por outro lado, quando o mesmo está magnetizado (campo magnético externo igual a \mathbf{H}_0), o dispositivo opera no estado *on*.

[012] Um dos grandes problemas que é inerente à tecnologia de fibras ópticas diz respeito ao ângulo de dobramento das mesmas. Funcionam segundo o princípio da reflexão interna total e, por conta disto, não podem ser dobradas de modo acentuado, o que dificulta a sua utilização, por exemplo, em circuitos ópticos que exigem muitas mudanças de direção na propagação dos sinais ópticos.

[013] A utilização de guias de onda baseados em cristais fotônicos supera essa dificuldade porque, com a escolha correta da topologia de curvas a eles incorporadas, podem promover a mudança de direção de propagação de um sinal eletromagnético. Isso ocorre porque o princípio de funcionamento destes guias não é baseado no princípio da reflexão interna total, como no caso das fibras ópticas, mas sim na existência do *photonic band gap*.

[014] Neste caso, o sinal eletromagnético fica confinado no interior do defeito linear que originou o guia, sendo impedido de se propagar para fora do mesmo, por conta do *photonic band gap* associado à estrutura periódica que está ao redor dele.

[015] O dispositivo aqui apresentado incorpora, em sua estrutura, um dobramento de 60 graus, o que proporciona maior flexibilidade no design de circuitos ópticos integrados. Além disso, possui dimensões reduzidas, o que favorece o aumento na densidade de integração.

[016] O *switch* em questão opera com magnetização uniforme, o que simplifica o desenvolvimento do circuito de magnetização, haja vista que um simples eletroímã pode ser utilizado para a realização desta função. A magnitude do

campo magnético gerado é proporcional à intensidade de uma corrente elétrica que atravessa o eletroímã.

[017] Destacam-se, entre as características de desempenho do dispositivo, a grande largura de banda de operação, as baixas perdas de inserção no estado *on* e a alta isolação entre os guias de onda de entrada e saída no estado *off*.

[018] De modo geral, o dispositivo é baseado em um cristal fotônico bidimensional composto por uma rede triangular de furos inseridos em um material magneto-óptico. Neste cristal, são inseridos dois tipos de defeitos, a saber:

[019] a) Remoção de fileiras de furos (defeito linear), que dão origem aos guias de onda de entrada e saída;

[020] b) Alteração do raio e da posição de furos inseridos no material magneto-óptico, 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 não magnetizado do material magneto-óptico, em que o sinal não é transmitido para o guia de onda de saída;

[023] b) Caso magnetizado do material magneto-óptico, em que o sinal é transmitido para o guia de onda de saída.

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

[025] a) A constante de rede do cristal (a) é igual a 480 nanômetros;

[026] b) O raio dos furos pertencentes à rede cristalina é igual a $0,3a$;

[027] c) Os guias de onda de entrada e saída são inseridos através da criação de dois defeitos lineares;

[028] d) Um sinal eletromagnético transferido para a saída tem a sua direção de propagação alterada em 60 graus;

[029] e) A cavidade ressonante é inserida através da alteração do raio e da posição de alguns furos localizados no centro do dispositivo, na fronteira entre os dois guias de onda;

[030] f) A intensidade de um campo magnético externo DC determina o estado em que o dispositivo se encontra;

[031] g) No estado *off*, o campo magnético externo DC é igual a 0 e um modo dipolo estacionário é excitado na cavidade ressonante, de tal sorte que os nós do modo ficam alinhados com o guia de onda de saída e, conseqüentemente, não há transferência de sinal da entrada para a saída;

[032] h) No estado *on*, o campo magnético externo DC é igual a \mathbf{H}_0 e um modo dipolo girante é excitado na cavidade ressonante, proporcionando a transferência do sinal da entrada para a saída;

[033] i) O material magneto-óptico no qual é baseado o cristal fotônico é anisotrópico, sendo descrito pelas seguintes expressões para a permissividade elétrica e a permeabilidade magnética:

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

[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] A seguir, são apresentadas as figuras que ilustram o funcionamento do dispositivo, bem como é descrita, de modo detalhado, a invenção desenvolvida.

[043] As figuras 1a e 1b apresentam, de forma esquemática, o *switch* funcionando nos modos *on* e *off*, respectivamente.

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

[045] A figura 3 mostra um corte do dispositivo operando no estado *on*. São mostrados o cristal fotônico, os dois guias de onda retilíneos **301** (entrada) e **302** (saída), a cavidade ressonante e a componente de campo magnético na direção z do sinal eletromagnético (representada por superfícies com tons de cinza variáveis), transferido da entrada para a saída, na frequência normalizada $\omega a/2\pi c = 0,30308$, 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 apresenta um corte do dispositivo operando no estado *off*. São apresentados o cristal fotônico, os dois guias de onda retilíneos **401** (entrada) e **402** (saída), a cavidade ressonante e a componente de campo magnético na direção z do sinal eletromagnético (representada por superfícies com tons de cinza variáveis), refletido de volta para a entrada, na frequência normalizada $\omega a/2\pi c = 0,30308$.

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

[048] Quando o dispositivo está sob a influência de um campo magnético externo DC H_0 (figura 1a), um sinal eletromagnético aplicado no guia de entrada **101** excita, no ressoador magneto-óptico, um modo dipolo girante **103**. Este, por sua vez, faz com que o sinal presente na entrada seja transferido para o guia de saída **102**, com baixas perdas de inserção, correspondendo ao estado *on* do dispositivo. O valor do parâmetro g , que é proporcional à magnitude de H_0 , é igual a 0,3.

[049] Por outro lado, quando o campo magnético externo DC é igual a 0 (figura 1b), um sinal eletromagnético aplicado no guia de entrada **104** excita, na cavidade ressonante, um modo dipolo estacionário **106**. Os nós do modo alinham-se com o guia de saída **105**, de tal sorte que neste não são excitadas ondas eletromagnéticas. O sinal incidente é totalmente refletido, com alta isolamento entre a entrada e a saída. Esta situação corresponde ao estado *off* e, neste caso, o valor do parâmetro g é igual a 0.

[050] Estes comportamentos podem ser explicados a partir da análise dos modos excitados no ressonador magneto-óptico sem cargas, isto é, sem a conexão dos guias de onda de entrada e saída. No caso não magnetizado, existem seis modos dipolo estacionários V_i ($i = 1, 2, \dots, 6$) com frequência de ressonância ω_0 , sendo que dois deles estão representados nas figuras 2a (modo V_1) e 2b (modo V_2). Os outros modos podem ser obtidos a partir de rotações por 60 ou 120 graus dos modos V_1 e V_2 em torno do eixo z .

[051] Estes modos podem ser combinados de modo a produzir modos 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 \mathbf{H}_0 , orientado ao longo da direção z , remove a degenerescência de V^- e V^+ , fazendo com que os mesmos passem a possuir frequências de ressonância distintas ω^- e ω^+ (modos V_m^- e V_m^+ , respectivamente, representados na figura 2d).

[053] A inserção dos guias de onda na estrutura, tanto no caso não magnetizado como no magnetizado, também remove a degenerescência dos modos excitados na cavidade ressonante. Quanto maior o acoplamento entre a cavidade e os guias, maior é a diferença entre as frequências dos modos antes degenerados.

[054] O estado *on* (figura 3) é obtido quando o dispositivo está magnetizado. Neste caso, é utilizado um dos modos girantes V_m^- ou V_m^+ , representados pela seta arqueada localizada no centro da figura.

[055] Por outro lado, o estado *off* (figura 4) é obtido quando o dispositivo não está magnetizado. Nesta situação, é utilizado um modo resultante da combinação entre os modos dipolo estacionários V_i . O modo resultante possui os nós alinhados com o guia de onda de saída.

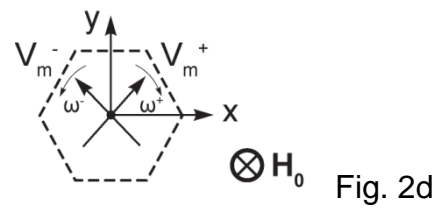
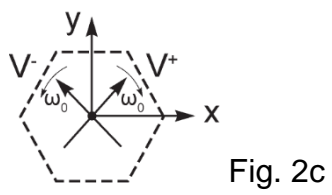
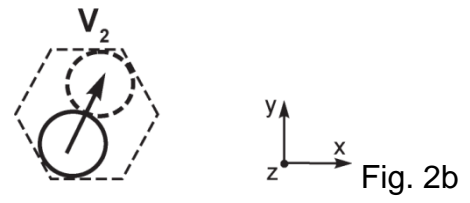
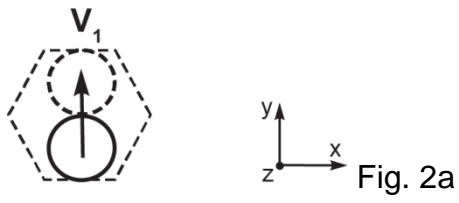
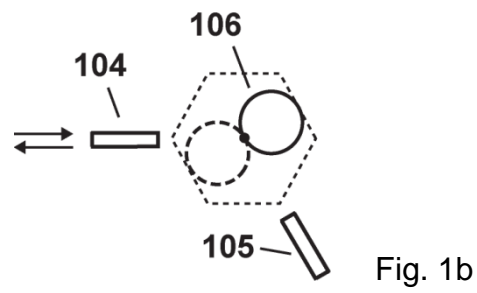
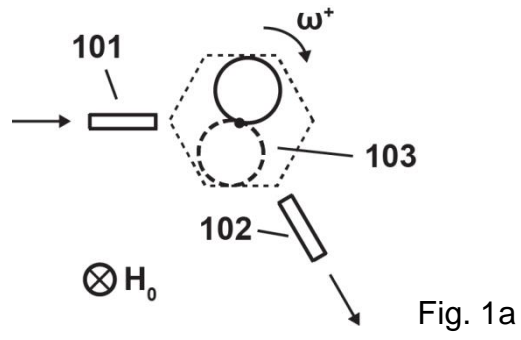
[056] A resposta em frequência do dispositivo é apresentada na figura 5. Considerando a excitação na porta 1 (associada aos guias **301** e **401**), a largura de banda do dispositivo é igual a 186 GHz, referente aos níveis de -2 dB e -15 dB das curvas associadas aos estados *on* e *off*, respectivamente. Na frequência central normalizada $\omega a/2\pi c = 0,30308$, as perdas de inserção no estado *on* são de -0,9 dB e a isolação entre os guias de onda no estado *off* é de -54 dB.

REIVINDICAÇÕES

1. Chave óptica compacta baseada em um cristal fotônico bidimensional com dobramento de 60 graus, composta por um cristal fotônico bidimensional com constante de rede a de 480 nm e raio de furos da rede cristalina de $0,3a$ em que são inseridos dois guias de onda e uma cavidade ressonante, caracterizada pelo fato de que possui um estado *on* (caso magnetizado), em que um sinal eletromagnético presente no guia de onda de entrada (101) excita um modo dipolo girante (103) na cavidade ressonante do dispositivo, resultando na transferência da potência de entrada para o guia de onda de saída (102), e possui um estado *off* (caso não magnetizado), em que um sinal eletromagnético presente no guia de onda de entrada (104) excita, na cavidade ressonante do dispositivo, um modo dipolo estacionário (106) cujo plano nodal é alinhado com o eixo do guia de onda de saída (105), resultando na interrupção da transferência da potência de entrada para o guia de onda de saída (105).

2. Chave óptica compacta baseada em um cristal fotônico bidimensional com dobramento de 60 graus de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que o eixo do guia de onda de saída é rotacionado por um ângulo de 60 graus no sentido horário em relação ao eixo do guia de onda de entrada, resultando na mudança da direção de propagação de um sinal eletromagnético por um ângulo de 60 graus durante a operação no estado *on*.

3. Chave óptica compacta de acordo com as reivindicações 1 e 2, caracterizada pelo fato de que é operada na frequência central normalizada $\omega a/2\pi c = 0,30308$ 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).



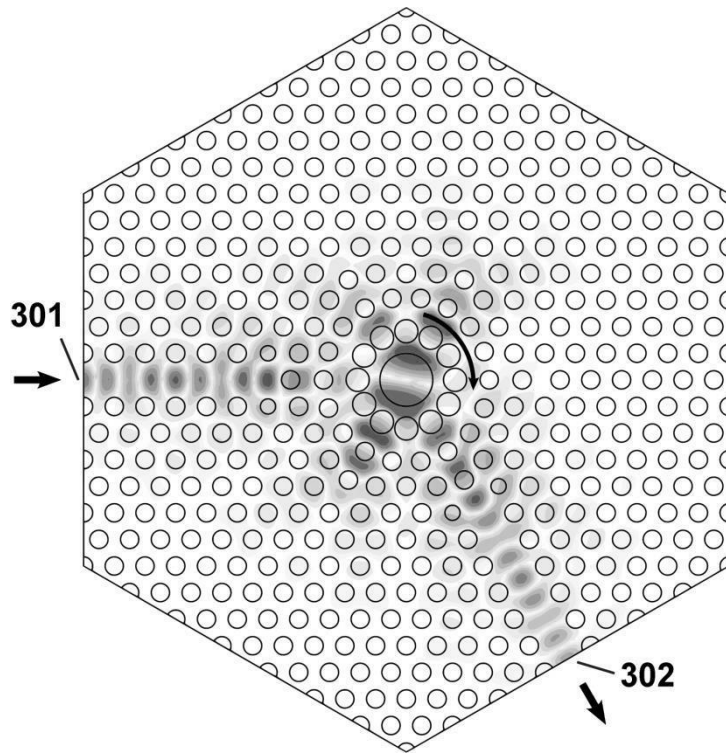


Fig. 3

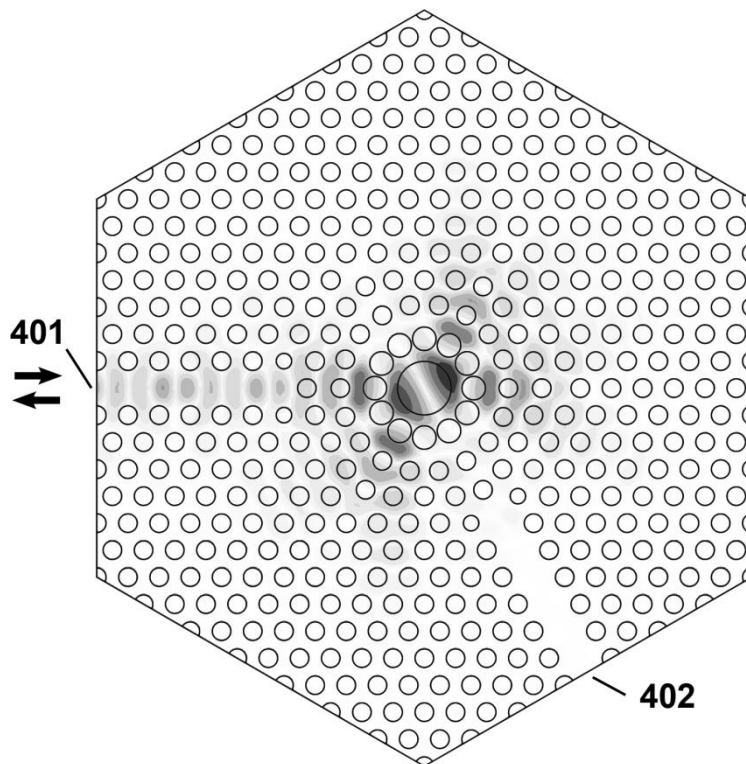


Fig. 4

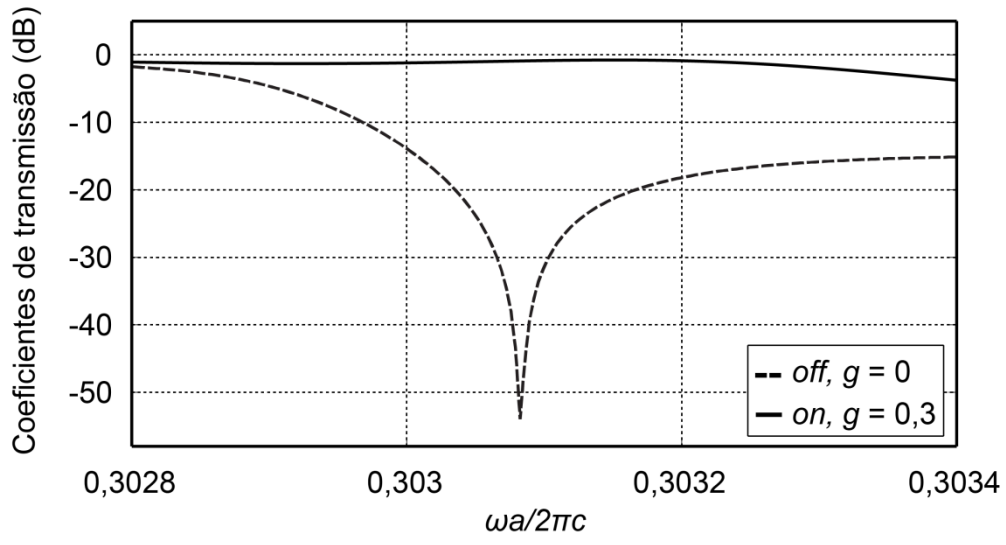


Fig. 5