



República Federativa do Brasil
Ministério do Desenvolvimento, Indústria
e do Comércio Exterior
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(21) **PI0618122-8 A2**

(22) Data de Depósito: 31/10/2006
(43) Data da Publicação: 16/08/2011
(RPI 2119)



(51) *Int.Cl.:*
H03B 15/00 2006.01
H01F 10/32 2006.01
H01L 43/08 2006.01

(54) Título: **OSCILADOR DE RADIOFREQUÊNCIA**

(30) Prioridade Unionista: 02/11/2005 FR 0553321

(73) Titular(es): Commissariat a L'Energie Atomique

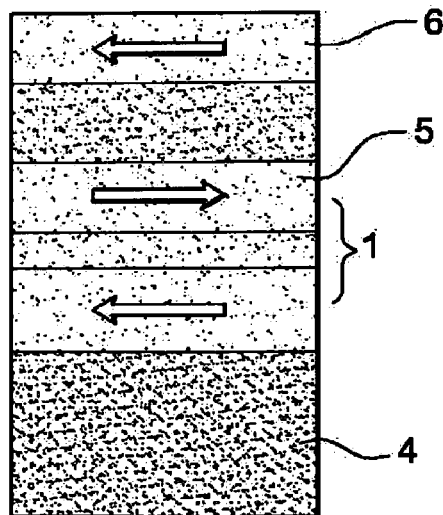
(72) Inventor(es): Alina-Maria Deac-Renner, Bernard Dieny

(74) Procurador(es): Claudia Christina Schulz

(86) Pedido Internacional: PCT IB2006054692 de 31/10/2006

(87) Publicação Internacional: WO 2007/052240 de 10/05/2007

(57) Resumo: OSCILADOR DE RADIOFREQUÊNCIA A presente invenção refere-se a um oscilador de radiofrequência, o qual inclui um dispositivo magneto resistivo, no qual escoam uma corrente elétrica polarizada por spin. O dispositivo compreende uma pilha de pelo menos: uma primeira denominada corrente magnética "ancorada" (1) tendo uma primeira direção de magnetização; uma segunda camada magnética (2); e uma terceira camada não magnética (3) inserida entre as duas camadas mencionadas acima, intencionada para garantir desacoplamento magnético das ditas camadas. O oscilador também compreende meios de provocar um fluxo de elétrons nas ditas camadas, perpendicular a essas camadas, e, se aplicável, de aplicar um campo magnético externo à estrutura. A segunda camada magnética (2) tem um fator de amortecimento de excitação pelo menos 10% maior do que o amortecimento medido em uma camada simples do mesmo material, tendo a mesma geometria para excitação magnética, tendo comprimentos de onda iguais ou menores à extensão do cone ou cilindro de corrente, que escoam pela pilha que constitui o dispositivo magneto resistivo.



**PI0618122-8****OSCILADOR DE RADIOFREQUÊNCIA**SUMÁRIO DA INVENÇÃO

5 A presente invenção se refere ao campo de osciladores de radiofrequência, que usam tecnologia de sistema de filme fino magnético.

10 Esses osciladores de radiofrequência são intencionados para operar no espectro de frequência de substancialmente GHz ou ligeiramente GHz a várias dúzias de GHz.

15 A invenção tem uma aplicação particular no campo das telecomunicações, especialmente nas comunicações móveis.

DESCRIÇÃO DA TÉCNICA ANTERIOR

20 O recente crescimento espetacular nos telefones móveis (telefones celulares, telefones portáteis) tem encorajado profissionais nesse campo para continuar a oferecer ainda mais produtos e serviços. Mais especialmente, a chegada da multimídia inspirou esses profissionais a integrar várias aplicações em telefones móveis. Essas novas aplicações requerem conectividade múltipla à rede celular, além de

25 conectividade a Redes de Áreas Pessoais Sem Fio (WPAN). A Bluetooth é um exemplo dessa tecnologia que tem sido usada como uma base para um novo padrão IEEE 802.15.

Sendo assim, conseqüentemente e para estar de acordo com os vários padrões, a eletrônica desses novos produtos deve ser capaz de operar por uma gama extremamente ampla de bandas de frequência. Por meio de exemplo, as seguintes

5 diferentes faixas de bandas de frequência são encontradas entre aquelas usadas em telecomunicações:

Banda	Frequência
GSM/GPRS/EDGE	850 MHz, 900 MHz, 1,8 GHz, 1,9 GHz
WCDMA	2 GHz
802.11 a/g	2,4 GHz e 5 GHz
GPS	1,6 GHz
UWB	3 a 7 GHz
RFID	2,45 GHz

W-CDMA: Acesso Múltiplo por Divisão de Código de Acesso

GPS: Sistema de Posicionamento Global

10 UWB: Banda Ultra Larga

802.11 a/g: Sistema para rede sem fio

RFID: Identificação de radiofrequência (especialmente, etiquetas)

15 Como é conhecido, o desempenho elétrico de receptores, tanto em termos de sensibilidade quanto de seletividade é basicamente ditado pelo sintetizador de frequência, isto é, o dispositivo em sensores de radiofrequência que é usado para gerar a frequência portadora do sinal. Para cobrir as

20 várias faixas de frequência mencionadas acima, os dispositivos multibanda, multipadrão precisam usar um grande número de osciladores de radiofrequência.

Os osciladores conhecidos incluem os ressoadores LC, que têm um coeficiente de qualidade ou fator de qualidade $Q = f/LIf$ que é relativamente baixo (4 a 10 na banda de frequência em questão). Os osciladores produzidos usando esse ressoador têm um desempenho médio, especialmente em termos de pureza espectral (instabilidade de fase). Além disso, a capacidade de sintonia de frequência é obtida com a ajuda de capacitância (C) do tipo MOS e é baixa, uma vez que a variação de frequência, que pode ser obtida, é da ordem de 20% do valor da frequência portadora.

Não apenas isso, as bandas de frequência alocadas para telecomunicações estão ficando crescentemente saturadas, comprometendo, desse modo, um conceito de alocação estática para as ditas bandas. Para solucionar esse problema de saturação, uma solução é fazer uso de alocação de frequência dinâmica. Esse princípio se baseia na capacidade de analisar o espectro de frequência e, até ao que se refere a aplicação a telecomunicações de 1 GHz a 10 GHz, identificar as bandas de frequência desocupadas, para que seja possível usá-las. Isso é referido como um sistema "radiooportunistico".

No entanto, para usar esse princípio de alocação de frequência dinâmica, os dispositivos em questão, nesse caso os telefones móveis, devem ter osciladores de bandas extremamente largas e oferecerem desempenhos extremamente bons em termos de instabilidade de fase e, por conseguinte,

um fator de alta qualidade. Esse requisito efetivamente governa os osciladores baseados em ressoadores LC, que envolveria o uso de arquitetura cara, complexa.

5 Uma solução técnica capaz de satisfazer esses requisitos pode usar osciladores de radiofrequência spintrônicos. Desse modo, usando esses osciladores, é possível obter uma banda de frequência ampla com um fator de qualidade Q e uma capacidade de sintonia de frequência
10 direta, e, além do mais, usar uma arquitetura relativamente simples.

A eletrônica de spin usa o spin de elétrons como um grau adicional de liberdade, para gerar novos efeitos.

15

A polarização por spin de uma corrente elétrica é uma consequência da assimetria entre a difusão dos elétrons de condução do tipo "spin-up" (isto é, paralelos à magnetização local) e aquela dos elétrons de condução do
20 tipo "spin-down" (isto é, antiparalelos à magnetização local). Essa assimetria resulta em condutividade assimétrica entre os dois canais de spin-up e spin-down e, por conseguinte, a polarização por spin líquida da corrente.

25

Essa polarização por spin da corrente provoca fenômenos magneto-resistivos em multicamadas magnéticas, tais como magneto-resistência gigante (Baibichi, M., Broto, J. M., Fert, A., Nguyen Van Dau, F., Petroff, F., Etienne,

P., Creuzet, G., Friederich, A. e Chazelas, J., "Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices", Phys. Rev.Lett. 61 (1988) 2472, ou magnetoresistência de túnel (Moodera, J. S., Kinder, I.R., Wong, T.M. e Meservey, R. "Large magnetoresistance at room temperature in ferromagnetic thin film tunnel junctions", Phys. Rev.Lett. 74 (1995) 3273-6).

Além disso, observou-se também que passando-se uma corrente polarizada por spin por um filme fino magnético, pode-se induzir a reversão da sua magnetização na ausência de qualquer campo magnético externo (Katine, J.A., Albert, F.J., Buhrman, R.A., Myers, E.B. e Ralph, D.C., "Current-Driven Magnetization Reversal and Spin-Wave Excitations in Co/Cu/Co Pillars", Phys. Rev.Lett. 84, 3149 (2000)).

A corrente polarizada também pode gerar uma excitação magnética sustentada, também referida como "oscilações" (Kiselev, S.I., Sankey, J.C., Krivorotov, I.N., Emley, N.C., Schoelkopf, R.J., Buhrman, R.A., e Ralph, D.C., "Microwave oscillations of a nanomagnet driven by a spin-polarized current", Nature, 425, 380 (2003)).

Usando-se o efeito da geração de excitação magnética sustentada em um dispositivo magneto-resistivo, possibilita-se converter esse efeito em modulação de resistência elétrica, que pode ser usada diretamente em circuitos eletrônicos e, por conseguinte, é capaz de agir diretamente no nível de frequência.

O documento U.S. 5 695 864 descreve vários desenvolvimentos que usam o princípio físico mencionado acima. Descreve, em particular, a precessão da magnetização de uma camada magnética, pela qual escoar uma corrente elétrica magnetizada por spin.

O princípio físico usado vai ser descrito abaixo em detalhes em relação à Figura 1. No contexto de uma estrutura magnética de três camadas, duas camadas (1 e 2) são separadas por uma camada não magnética (3) (o termo "não magnético" é considerado como significando diamagnético ou paramagnético). Essa camada intermediária (3) é também chamada uma "espaçadora". A sua espessura é suficientemente pequena para permitir a transmissão de uma corrente polarizada por spin e suficientemente grande para garantir desacoplamento magnético entre as camadas (1 e 2) que separa.

A camada (1) é uma denominada camada ferromagnética "ancorada", no sentido de que tem uma direção de magnetização fixa. De um modo geral, essa camada (1) é acoplada a uma camada ferromagnética, cuja função é ancorar a dita camada (1), de modo que a sua magnetização não seja revertida, quando o conjunto é submetido a uma corrente elétrica. Essa camada (1) também pode ser constituída de várias camadas, como, por exemplo, as descritas no Documento US-A-5 883 725, para construir uma denominada camada "antiferromagnética sintética". Essa camada (1) é

chamada a "polarizadora". De fato, por causa da sua direção de magnetização fixa, induz a polarização por spin da corrente elétrica, que escoa por ela. Como já mencionado, em um material magnético, a condutividade dos elétrons que
5 têm spins paralelos à magnetização local (spin-up) é diferente daquela dos elétrons que tem spins opostos (spin-down). Desse modo, a reflexão e a transmissão na interface entre as duas camadas, tendo diferentes propriedades magnéticas, são fenômenos que dependem do spin. Os elétrons
10 de condução que atingem a interface entre a camada (1) e a espaçadora (3) têm, em grande parte, um tipo de spin (up ou down), que depende da natureza dos materiais usados.

Para a camada (1) (polarizadora), seleciona-se ou uma
15 camada ferromagnética de espessura suficiente, para garantir uma polarização máxima da corrente, ou uma camada "antimagnética sintética" (SAF) de espessura adequada, para atingir esse mesmo objetivo. Com uma geometria de transporte, que é perpendicular ao plano das camadas, é
20 conhecido que o comprimento característico é o denominado comprimento de difusão por spin (Valet, T., Fert. A., "Theory of perpendicular magnetoresistance em magnetic multilayers", Phys.Rev.B 48, 7099 (1993)). O termo "espessura suficiente", em relação à camada de polarização,
25 é portanto considerado como significando uma espessura que é suficientemente grande em relação ao seu comprimento de difusão por spin (tipicamente, 5 nm em $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ à temperatura ambiente). Obviamente, a camada de polarização pode consistir de uma ou mais camadas (por exemplo, um

compósito laminado bicamada NiFe/CoFe ou multicamada (CoFe1nm/Cu0,3nm/CoFe1nm), para encorajar a polarização da corrente ou encurtar o comprimento de difusão por spin.

5 Se a espessura da espaçadora (3) for suficientemente pequena, a polarização da corrente elétrica, que escoas pelas camadas em ângulos retos, é quase que inteiramente preservada, até que atinja a interface entre a espaçadora (3) e a camada (2). Essa camada (2) é denominada
10 magneticamente uma camada "livre", por exemplo, a direção da sua magnetização pode ser facilmente alterada pelo efeito de um campo externo fraco (tipicamente, uma camada feita de ligas de Ni₈₀Fe₂₀, Permalloy ou CoFe, ou formada por associação de duas camadas, tais como NiFe/CoFe).

15

 No nível da interface entre a camada (2) e a camada (3), a transferência por spin ocorre entre a corrente polarizada por spin e o momento magnético da camada (2). Se esse e a direção de polarização por spin (conferida pela
20 magnetização da camada (1)) não são colineares, a corrente afeta a magnetização da camada (2) suficiente para fazê-la girar (precessão). O sinal do torque de transferência por spin depende da direção da corrente aplicada:

25 - se os elétrons de condução se movimentarem da polarizadora (1) para a camada (2), o torque de transferência por spin vai orientar a magnetização da dita camada (2) paralela àquela da camada (1); e

- em contraste, se os elétrons de condução se movimentarem da camada (2) para a polarizadora (1), o dito torque vai orientar a camada de magnetização (2) antiparalela àquela da camada (1).

5

Demonstrou-se que, dependendo da amplitude da corrente ou mesmo do campo magnético externo aplicado, dois efeitos distintos podem ser detectados:

10 - primeiramente, a reversão da magnetização da camada (2); essa reversão pode ser histerética ou reversível, dependendo da amplitude da corrente ou mesmo do campo magnético externo; esse fenômeno também pode ser usado como um meio de escrever as informações no contexto da produção
15 de memórias de acesso aleatório, também referidas como MRAMs; e

- também a excitação dos estados de precessão sustentados do momento magnético da camada (2): esse é o
20 efeito que é explorado dentro da estrutura da presente invenção.

Quando se considera a precessão sustentada do momento magnético da camada (2), vários modos são revelados por
25 medidas de frequência de microondas, dependendo, em particular, da intensidade relativa da corrente elétrica aplicada:

- modo A: precessão de pequeno ângulo do tipo ressonância magnética (FMR): esse modo de precessão ocorre para correntes de intensidades relativamente fracas e é caracterizado por sinais tendo uma determinada frequência, que não depende da corrente aplicada;

- modo B: precessão de grande ângulo: esse modo de precessão ocorre se a corrente aplicada for aumentada acima de um certo limiar e é caracterizado por uma dependência de frequência pronunciada na corrente aplicada; e

- modo C: ruído RTS de microondas para correntes de intensidades médias além de campos magnéticos fracos; os espectros medidos sob essas condições mostram picos de amplitude muito alta, muito amplos centralizados em torno de 1 GHz.

No contexto da presente invenção, os comportamentos explorados são aqueles para os quais a frequência de precessão pode ser ajustada, ou por influência da corrente ou, de preferência, por influência de ambas a corrente e o campo magnético externo. Essas estruturas em nanoestruturas são integradas em conjuntos ou dispositivos magneto-resistivos. No caso de ambas a magneto-resistência gigante (GMR) em sistemas metálicos ou magneto-resistência em túnel (TMR) em junções de túnel metálicas - isolantes - magnéticas - metálicas, a precessão de magnetização resulta na variação da resistência elétrica, medida quando uma corrente é aplicada em uma direção que é perpendicular ao

plano das camadas (geometria CCP ou de Corrente Perpendicular ao Plano).

Sem precisar os detalhes que são considerados do conhecimento daqueles versados na técnica, as junções de túneis magnéticos referidas como TMRs ou MTJs, da forma mais simples possível, consistem de duas camadas, sendo possível variar a orientação relativa da magnetização delas, e as camadas sendo separadas por uma camada isolante.

Os dispositivos magneto-resistivos usados empregam pilhas feitas de dois modos diferentes:

- as denominadas pilhas de "contato pontual" nas quais as camadas ativas (camada 1, camada 2, camada 3) não são decapadas usando modelos nanométricos, ou se são, são depois fabricadas usando modelos muito grandes (aproximadamente μm^2); um contato metálico extremamente estreito, tipicamente, 50 nm acima da camada (2), é produzido por meio de uma nanoponta externa (por exemplo, ponta de um microscópio de força atômica) ou nanoponta interna (pilar impresso com tela); e

- as pilhas do tipo "pilar": todas as camadas são decapadas para fabricar um pilar, tendo um diâmetro da ordem de 100 nm, para impedir a ocorrência de interação magnetostática significativa entre as camadas (1) e (2), a camada (1) é deixada algumas vezes não decapada.

Quando corrente é passada pelo primeiro tipo de dispositivo perpendicular ao plano das camadas, todas as linhas de corrente convergem para o nanocontato (o contato pontual) e divergem para dentro da pilha em um cone, cuja forma depende da resistividade elétrica das várias camadas. No segundo caso, com uma geometria de pilar, a corrente escoar mais ou menos uniformemente por toda a seção transversal do pilar.

10

Demonstrou-se que com a ajuda de simulações micromagnéticas, o denominado método de "contato pontual" é mais vantajoso para a fabricação de osciladores de radiofrequência, na medida em que minimiza a ocorrência de excitação incoerente produzida por efeitos de orla. A Figura 2 (pilar) e a Figura 3 (contato pontual) mostram esses dois tipos de pilhas.

Em relação a essas estruturas, o Documento FR 2 817 999 mostra que quando a polarizadora (camada 1) é magnetizada, em uma direção que é perpendicular ao plano das camadas que constituem o dispositivo magneto-resistivo, e o momento da camada (2) é orientado em uma direção paralela às interfaces, a corrente crítica requerida para induzir a precessão da dita magnetização pode ser reduzida.

25

Embora, em um nível teórico, os dispositivos magneto-resistivos assim descritos possibilitam a obtenção de implementação de osciladores de radiofrequência, que

satisfazem os requisitos de manufatura industrial (alocação de frequência dinâmica de ampla faixa de frequências é possível, com alto fator de qualidade (Q), é não obstante evidente que a qualidade efetiva desses dispositivos
5 depende da consistência da precessão de magnetização, produzida pela corrente elétrica que escoar pelas camadas.

O termo "consistência de precessão magnética" denota o fato de que a magnetização é movida como uma unidade única
10 por toda a extensão da folha de corrente pela estrutura (isto é, pela seção transversal do pilar com uma geometria de pilar e pela seção transversal do cone de corrente no nível da camada livre, se houver um nanocontato), em contraste com a produção de pequenas excitações múltiplas,
15 que são inconsistentes.

Desse modo, uma maior consistência resulta em sinais de oscilação de frequência mais estreita e amplitude mais baixa; é objeto dessa invenção propor um meio de aumentar a
20 consistência do movimento dinâmico da precessão de magnetização. Em virtude de uma redução na amplitude não ser um efeito buscado depois, uma vez que a estreiteza de corrente tenha sido obtida, os esforços vão ser envidados para reforçar a amplitude.

25

SUMÁRIO DA INVENÇÃO

A invenção se refere, portanto, a um oscilador de radiofrequência, que inclui um dispositivo magneto-

resistivo, no qual escoia uma corrente elétrica polarizada por spin, o dito dispositivo compreendendo uma pilha de pelo menos:

5 - uma primeira denominada camada magnética "ancorada" tendo uma direção de magnetização fixa;

 - uma segunda camada magnética; e

● 10 - uma camada não magnética inserida entre as duas camadas mencionadas acima, intencionada para garantir desacoplamento magnético das ditas camadas;

 e um meio de provocar um fluxo de elétrons nas ditas
15 camadas, perpendicular a essas camadas, e, se aplicável, de aplicar um campo magnético na estrutura.

 De acordo com a invenção, a segunda camada magnética tem um alto fator de amortecimento de excitação (pelo menos
● 20 10% maior do que o amortecimento medido em uma simples camada do mesmo material tendo a mesma geometria), para excitação magnética tendo comprimentos de onda iguais ou inferiores à extensão do cone ou cilindro de corrente, que escoia pela pilha, que constitui o dispositivo magneto-
25 resistivo.

 No resto dessa descrição, com o intuito de brevidade, o fator de amortecimento de excitação, também referido como

o "fator de amortecimento de Gilbert" vai ser simplesmente referido como "amortecimento".

Em outras palavras, a dita segunda camada magnética é selecionada de modo que quando é submetida a uma corrente elétrica polarizada por spin pela camada ancorada, e, se aplicável, a um campo magnético externo aplicado, a sua magnetização precede de uma maneira sustentada, consistente.

10

Expresso de forma distinta, o objeto da invenção é induzir a precessão da magnetização da dita segunda camada, também referida como a "camada livre", devido ao efeito da corrente polarizada por spin da camada ancorada, que age como uma polarizadora, com dinâmicas de precessão que são as mais consistentes possíveis, isto é, a magnetização se comporta como um único objeto que gira como uma unidade, em vez de em consequência de pequenas excitações aleatórias que desorganizam, localmente, a magnetização. Em termos absolutos, o objetivo é garantir que a magnetização se mantém se possível em domínio único (macrospin).

20

Sendo assim, as dinâmicas de magnetização da dita segunda camada são mais consistentes do que aquelas de uma camada única, por exemplo, uma feita de cobalto, níquel ou ferro, ou de uma liga desse dois metais, tendo a mesma geometria, a mesma configuração de magnetização e submetida à corrente de spin sob as mesmas condições e, se aplicável, a um campo magnético externo.

25

Vários métodos são usados para obter amortecimento significativo da segunda camada magnética, para excitação magnética tendo um comprimento de onda igual ou inferior à
5 extensão do cone ou cilindro, que passa pela pilha que constitui o dispositivo magneto-resistivo. Qualquer meio que possibilite aumentar o fator de amortecimento de excitação nas proporções mencionadas acima pode ser usado para implementar a invenção. Os três meios básicos são
10 descritos abaixo.

De acordo com uma primeira concretização da invenção, esse amortecimento é obtido por associação de uma camada antiferromagnética com a dita segunda camada, essa camada
15 AFM sendo localizada na superfície da dita camada oposta à camada espaçadora ou paramagnética. Esse acoplamento aumenta o amortecimento de Gilbert. Além disso, a força de restauração exercida pelo acoplamento ferromagnético / antiferromagnético encoraja o movimento de magnetização
20 dinâmico consistente. Tipicamente, essa camada antiferromagnética consiste de $\text{Ir}_{20}\text{Mn}_{80}$, tendo uma espessura de 3 a 10 nm, ou é feita de FeMn tendo uma espessura típica de 5 a 12 nm, ou PtMn tendo uma espessura típica de 8 a 30 nm.

25

Vantajosamente, essa camada antiferromagnética é uma camada à base de não óxido, metálica, para não conferir a resistência em série do pilar, que é parte das camadas empilhadas excessivamente.

De acordo com uma segunda concretização da invenção, esse amortecimento é obtido por uso, para a dita segunda camada, de um material com uma alta constante de rigidez de substituição. De fato, em virtude dos spins das forças de interação de substituição permanecerem paralelos entre si, é difícil o desenvolvimento de uma excitação de comprimento de onda curto. Desse modo, o amortecimento de excitação de comprimento de onda curto é aumentado relativo ao amortecimento que seria obtido por uma camada tendo uma menor constante de substituição. Há uma certa relação entre essa constante, referida mais comumente como "rigidez de substituição" e a temperatura Curie. São selecionados, de preferência, os materiais que são ricos em cobalto (por exemplo, ligas CoFe) e bem conhecidos por suas altas temperaturas Curie.

Também, pode-se aperfeiçoar a consistência de precessão por uso de materiais magnéticos com um baixo momento magnético (por exemplo, as ligas CoFeB incorporando de 10 a 20% de boro são preferíveis às ligas CoFe com um maior momento), que têm a vantagem de minimizar os efeitos da desuniformidade magnética associada com o forte campo desmagnetizante, que está presente nas orlas do dispositivo.

De acordo com uma terceira concretização da invenção, esse amortecimento é aumentado por adição de várias impurezas da série dos lantanídeos à dita segunda camada

magnética. Por meio de exemplo, essas impurezas podem consistir de térbio em baixas proporções, tipicamente de 0,01 a 2% (percentual atômico).

5 De acordo com a invenção, as ditas primeira e segunda camadas magnéticas são ancoradas em direções otimizadas, que podem ser localizadas no ou fora do plano das camadas. A direção é otimizada de modo que a amplitude do movimento de precessão é tão grande quanto possível, para produzir um
10 sinal RF tendo a maior amplitude possível. Essa otimização pode ser orientada, por exemplo, por modelagem de macrospin dinâmica, com base na equação de Landau - Lifshitz - Gilbert, com a inclusão do termo de transferência de spin de Slonezewski, e depois pode ser ajustada
15 experimentalmente.

De acordo com outra concretização da invenção, que é similar à segunda concretização mencionada acima, a dita segunda camada magnética, cuja magnetização precede, não é
20 acoplada a uma camada antiferromagnética adjacente, mas é associada primeiramente com uma segunda camada magnética na interface oposta, que com a primeira camada magnética e depois em segundo lugar, no outro lado dessa segunda camada, está associada com uma camada de polarização, cuja
25 função é similar àquela da primeira camada de polarização. Sendo assim, a magnetização da dita segunda camada magnética é submetida aos efeitos de transferência de spin das duas camadas de polarização, e isso possibilita

aumentar a eficiência do fenômeno que provoca a precessão da magnetização.

5 A direção da magnetização das duas camadas de polarização não é, de um modo geral, igual e pode ser mesmo substancialmente antiparalela ou ortogonal (uma camada de polarização é substancialmente magnetizada em um plano e a outra camada fica fora desse plano).

10 A invenção possibilita obter uma precessão extremamente consistente da magnetização da camada (2), com fatores de qualidade superiores a 10.000 e, potencialmente, superiores a 20.000.

15 BREVE DESCRIÇÃO DOS DESENHOS

O modo no qual a invenção é implementada e as suas vantagens resultantes vão ficar mais facilmente entendíveis pelas descrições das concretizações apresentadas a seguir,
20 dadas meramente por meio de exemplos, sendo feita referência aos desenhos acompanhantes.

Como já mencionado a Figura 1 é um diagrama esquemático mostrando as camadas empilhadas de um
25 dispositivo magneto-resistivo de acordo com a técnica anterior.

As Figuras 2 e 3 mostram diferentes tipos de empilhamento dessas camadas.

As Figuras 4 e 5 mostram esquematicamente duas concretizações da invenção.

5 As Figuras 6a e 6b mostram o efeito benéfico produzido pela presente invenção nos espectros de excitação das estruturas que são objeto dessa invenção. Desse modo, a Figura 6a mostra um espectro de excitação para as várias correntes escoando pela estrutura, a camada excitada sendo
10 uma camada de CoFe simples, de acordo com a técnica anterior. A Figura 6b mostra o aperfeiçoamento na fineza das linhas de excitação, devido ao efeito da corrente quando essa mesma camada de CoFe é moderadamente ancorada por uma camada antiferromagnética de IrMn. A Figura 6b
15 mostra a capacidade de sintonia da linha de excitação em função da corrente escoando pela estrutura.

DESCRIÇÃO DAS CONCRETIZAÇÕES PREFERIDAS

20 Para produzir o oscilador de radiofrequência de acordo com a invenção, usa-se um dispositivo magneto-resistivo, consistindo de uma pilha do mesmo tipo daquela descrita em relação às Figuras 2 e 3. Essa pilha é inserida entre dois fios de corrente, o contato deles com as duas camadas
25 extremas da dita pilha sendo feito de cobre ou ouro.

A geometria dessa pilha vai ser caracterizada, em particular, por sua largura ou por seu diâmetro, se for cilíndrico.

A camada (1) dessa denominada pilha de "camadas ancoradas" tem uma direção de magnetização fixa. Essa camada (1) pode ser uma camada relativamente espessa (da ordem de 100 nm), simples, feita de cobalto ou de uma liga CoFe ou NiFe, por exemplo. A espessura dessa camada deve ser da mesma grandeza ou superior ao comprimento de difusão do spin do material do que é feita essa camada. Para reduzir esse comprimento de difusão de spin, essa camada pode ser também laminada por inserção de várias (tipicamente, 2 a 4) camadas extremamente finas de cobre, prata ou ouro, tendo uma espessura da ordem de 0,2 a 0,5 nm. Essas camadas inseridas são suficientemente finas para garantir um acoplamento de substituição pela camada laminada, de modo que a ancoragem dessa camada se mantém forte.

A composição típica dessa camada ancorada laminada pode ser $(\text{CoFe1nm}/\text{Cu0,3nm})_3/\text{CoFe1nm}$. Mas pode consistir também de uma camada antiferromagnética sintética (SAF) do tipo $\text{CoFe3nm}/\text{Ru00,7nm}/\text{CoFe2,5nm}$. A espessura do Ru selecionada é tipicamente de 0,6 nm a 1 nm, para garantir um forte acoplamento antiferromagnético entre as duas camadas de CoFe. Mais uma vez, das duas camadas que constituem essa camada SAF, pelo menos a camada de CoFe, que vai ficar mais próxima à camada livre, pode ser laminada por inserção de camadas finas de Cu, para reduzir o seu comprimento de difusão de spin. Além disso, em ambas essas configurações, a camada simples e a camada SAF podem

ser ancoradas por substituição com uma camada antiferromagnética (4) (consultar as Figuras 4 e 5). Essa camada antiferromagnética pode ser constituída de $\text{Ir}_{20}\text{Mn}_{80}$, tendo uma espessura de 6 a 10 nm, ou $\text{Pt}_{50}\text{Mn}_{50}$, tendo uma espessura de 15 a 30 nm. Essa camada (1) preenche basicamente uma função de polarização. Desse modo, os elétrons da corrente elétrica, que escoam pelas camadas que constituem o dispositivo magneto-resistivo, perpendiculares aos seus planos, e são refletidos ou transmitidos pela polarizadora, são polarizados com uma direção de spin, que é paralela à magnetização, tanto na camada (1), quanto na interface oposta àquela que fica em contato com a camada antiferromagnética (4).

Independentemente se é simples (Figura 5) ou sintética (Figura 4), essa camada (1) recebe, na sua superfície que é oposta àquela que recebe a camada antiferromagnética (4), outra camada (3), que funciona como uma espaçadora. Essa camada é metálica (tipicamente, uma camada de cobre de 5 a 10 nm de espessura), ou consiste de uma camada isolante fina do tipo de óxido de alumínio (alumina, Al_2O_3), tipicamente, de uma espessura de 0,5 a 1,5 nm, ou do tipo de óxido de magnésio (MgO), tipicamente de uma espessura de 0,5 a 3 nm.

Finalmente, a natureza da camada (2) pode variar. A espessura dessa camada (2) é, de um modo geral, inferior àquela da camada (1).

Pode consistir, primeiramente, de uma camada magnética simples tendo uma espessura comparável àquela da camada de referência (5) da estrutura antiferromagnética sintética de camada ancorada (1).

5

De acordo com uma primeira concretização (Figura 5), essa camada (2) é acoplada com uma camada antiferromagnética (6), montada separadamente na sua superfície oposta à interface entre a camada (2) e a
10 espaçadora (3). Essa camada antiferromagnética pode ser também feita de um material selecionado do grupo consistindo de $\text{Ir}_{20}\text{Mn}_{80}$, FeMn e PtMn . Essa camada antiferromagnética vai alterar a liberdade relativa da magnetização da camada (2). No entanto, por variação da
15 espessura dessa camada antiferromagnética ou por introdução de uma camada ultra fina de materiais não magnéticos, tal como Cu ou Pt (da ordem de 0,1 a 0,5 nm de espessura ao longo da interface entre as camadas (2) e (6), pode-se, desse modo, garantir que o acoplamento produzido é mais
20 fraco do que aquele da camada ancorada ou polarizadora (1), de modo que a magnetização da camada (2), não obstante, controla para preceder e o desacoplamento inerente na camada antiferromagnética (6) ajuda a manter a dita magnetização consistente.

25

Os estudos de otimização demonstram que mesmo os sinais, que correspondem a essa precessão, têm até 10 vezes mais potência do que aqueles que correspondem à mesma camada sem a sua camada antiferromagnética associada. Esse

aumento na potência do sinal é explicado pelo aperfeiçoamento na consistência da precessão de magnetização da camada (2), devido à interação de substituição pela interface com a camada antiferromagnética associada (6) (consultar a Figura 6). Essa interação de substituição exerce uma força de restauração uniforme na precessão de magnetização, e, pela mesma consistência, encoraja o movimento de precessão da magnetização. Observou-se também que o acoplamento ferromagnético / antiferromagnético resulta em um maior amortecimento de Gilbert (um aumento montando a quase +10% a +400% da temperatura de bloqueio da camada antiferromagnética), e isso resulta em uma forte atenuação da excitação magnética no sistema, ajudando, desse modo, a manter uma boa consistência de magnetização.

Em outra variante da invenção, a dopagem na foram de impurezas baseadas na série de lantanídeos, especialmente térbio, são introduzidas na camada (2), em uma proporção de 0,01 a 2% (percentual atômico). Demonstrou-se que por essa dopagem, pode-se aumentar o fator de amortecimento de excitação, isto é, o "fator de amortecimento de Gilbert" (Russek et al., Journ. Appl. Phys. 91 (2002) 8659). É importante indicar o fator de amortecimento de Gilbert não deve ser aumentado em demasia, porque isso resultaria em um aumento excessivo na corrente crítica que precisa ser passada pela estrutura, para gerar o movimento de precessão de magnetização sustentada. Um compromisso deve ser,

portanto, violado - esse corresponde tipicamente ao amortecimento de Gilbert de 0,01 a 0,05.

Esse amortecimento moderado possibilita atenuar a
5 excitação de comprimento de onda curto, especialmente
aquele tendo comprimentos de onda mais curtos do que o
tamanho da pilha magneto-resistiva, e que é indesejável
porque quebra a consistência da precessão. Esse
amortecimento é não obstante não tão forte de modo a
10 resultar em valores excessivos (superiores a 10^7 A/cm²),
para gerar um movimento de precessão de magnetização
consistente.

Vantajosamente, além da incorporação dessas impurezas,
15 pode-se também, como na primeira concretização descrita
acima, associar a camada (2), dopada desse modo, com a
camada antiferromagnética (6) descrita acima. Nesse caso,
essa não apenas garante um maior amortecimento, mas também
encoraja, como previamente, a consistência da precessão por
20 criação de uma força de restauração exercida na
magnetização.

Vantajosamente, o material usado para a camada (2) tem
uma alta constante de rigidez de substituição. Para que
25 isso seja obtido, usa-se metais do grupo 3D, mais
especialmente cobalto ou ligas ricas em cobalto. Aqueles
versados na técnica vão também estar cientes de que a
camada (2) pode consistir de várias camadas
antiferromagnéticas, que ficam em contato direto entre si,

tal como, por exemplo, bicamadas de NiFe/CoFe), que são comumente usadas em válvulas de spin.

Vantajosamente, pode-se também usar materiais magnéticos com um baixo momento magnético (por exemplo, ligas CoFeB incorporando 10 a 20% de boro são preferíveis às ligas CoFe com um maior momento), que têm a vantagem de minimizar os efeitos da desuniformidade magnética associada com o forte campo de desmagnetização, que está presente nas orlas do dispositivo.

Em outra variante da invenção, a camada (2), em vez de consistir de uma simples camada antiferromagnética, pode consistir, como a camada ancorada, de uma camada antiferromagnética sintética (SAF), isto é, duas camadas ferromagnéticas que são fortemente acopladas antiferromagneticamente por uma camada de espessura de 0,5 a 1 nm de rutênio. Essa camada SAF (2) pode, por sua vez, ser ancorada moderadamente por uma camada antiferromagnética.

Em outra variante da invenção, a camada (2) pode ser ancorada em qualquer direção relativa à magnetização da polarizadora (1) e relativa ao plano das camadas, essa direção sendo selecionada para otimizar a amplitude do movimento de precessão da magnetização da camada livre. Essa magnetização pode ser orientada, por exemplo, por modelagem de macrospin dinâmica, com base na equação de Landau - Lifshitz - Gilbert, com a inclusão do termo de

transferência de spin de Slonezewski (Slonezewski. J., "Currents and torques in metallic magnetic multilayers", J. Magn. Magn. Mater. 159, LI (1996); "Excitation of spin waves by an electric current", 195, L261 (1999), e depois
5 ser ajustada experimentalmente. Para obter essa otimização, pode ser também necessário aplicar um campo magnético externo adicional à estrutura. Esse campo pode ser depois produzido, por exemplo, por camadas de ímãs permanentes posicionados em locais adequados em torno do pilar, no
10 mesmo modo usado, por exemplo, para gerar um campo de polarização em cabeças de leitura magneto-resistivas, para ler as informações dos discos rígidos de computadores.

Também, de acordo com uma outra variante da invenção,
15 se a dita segunda camada magnética, cuja magnetização precede (camada simples ou SAF), não é acoplada a uma camada antiferromagnética adjacente, pode-se associá-la com uma segunda camada não magnética (segunda espaçadora) na interface oposta àquela com a primeira camada não
20 magnética, e depois, no outro lado dessa segunda camada, associá-la com uma camada de polarização, cuja função é similar àquela da primeira camada de polarização. Essa segunda camada ancorada, servindo como uma segunda polarizadora pode ser por ela mesma simples ou consistir de
25 uma camada antiferromagnética sintética (SAF) e ser acoplada a uma camada antiferromagnética, montada separadamente no lado oposto da interface entre essa segunda camada ancorada e a segunda espaçadora não magnética.

Sendo assim, a magnetização da dita segunda camada magnética é submetida aos efeitos de transferência de spin das duas camadas de polarização, e isso possibilita
5 aumentar a eficiência do fenômeno que provoca a precessão da magnetização. A direção da magnetização das duas camadas de polarização não é, de um modo geral, a mesma e deve ser otimizada, dependendo da natureza da camada cuja magnetização precede. Por exemplo, se a camada cuja
10 magnetização processa for uma simples camada dopada, as direções de magnetização das duas camadas de polarização podem ser substancialmente antiparalelas ou ortogonais (uma camada de polarização é substancialmente magnetizada em um plano e a outra camada é magnetizada fora desse plano).

15

Se a camada cuja magnetização precede for uma camada SAF, as direções de magnetização das duas camadas de polarização podem ser substancialmente paralelas ou
20 ortogonais.

25

Por meio de exemplo para ilustrar os efeitos benéficos proporcionados pela presente invenção na estreiteza das linhas de excitação (aumento no fator de qualidade), as Figuras 6a e 6b mostram as linhas de excitação obtidas para
25 uma estrutura baseada na técnica anterior e uma estrutura de acordo com a presente invenção. A Figura 6a mostra um espectro de excitação para várias correntes escoando pela estrutura, a camada excitada sendo uma simples camada de CoFe, de acordo com a técnica anterior, inserida em um

dispositivo do tipo mostrado na Figura 4, compreendendo uma camada sintética ancorada. A Figura 6b mostra o aperfeiçoamento muito marcante na fineza das linhas de excitação, devido ao efeito da corrente quando a mesma
5 camada de CoFe é moderadamente ancorada por uma camada antiferromagnética de IrMn. A Figura 6b também mostra a capacidade de sintonia da linha de excitação, em função da corrente escoando pela estrutura.

REIVINDICAÇÕES

1. Oscilador de radiofrequência, que inclui um dispositivo magneto-resistivo, no qual escoam uma corrente elétrica polarizada por spin, o dito dispositivo compreendendo uma pilha de pelo menos:

- uma primeira denominada camada magnética "ancorada" (1) tendo uma direção de magnetização fixa;

10

- uma segunda camada magnética (2); e

- uma camada não magnética (3) inserida entre as duas camadas mencionadas acima, intencionada para funcionar como uma espaçadora e garantir desacoplamento magnético das ditas camadas;

15

e meios de provocar um fluxo de elétrons nas ditas camadas, perpendicular a essas camadas, e, se aplicável, de aplicar um campo magnético (2) na estrutura,

20

caracterizado pelo fato de que a segunda camada magnética (2) tem um alto fator de amortecimento de excitação pelo menos 10% maior do que o fator de amortecimento de excitação, medido em uma camada simples do mesmo material, tendo a mesma geometria para excitação magnética, tendo comprimentos de onda iguais ou inferiores à extensão do cone ou cilindro de corrente, que escoam pela pilha, que constitui o dispositivo magneto-resistivo.

25

2. Oscilador de radiofrequência de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que a segunda camada magnética (2) consiste de uma simples camada associada com uma camada antiferromagnética (6), essa sendo localizada na superfície da dita camada (2) oposta à camada magnética (3), que funciona como uma espaçadora.

3. Oscilador de radiofrequência de acordo com a reivindicação 2, caracterizado pelo fato de que o material, que constitui a camada antiferromagnética (6), é selecionado do grupo compreendendo as seguintes ligas: $\text{Ir}_{20}\text{Mn}_{80}$, FeMn e PtMn.

4. Oscilador de radiofrequência de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que a segunda camada magnética (2) consiste de uma camada antiferromagnética sintética.

5. Oscilador de radiofrequência de acordo com a reivindicação 4, caracterizado pelo fato de que a segunda camada magnética (2) consiste de uma camada antiferromagnética sintética ancorada por substituição.

6. Oscilador de radiofrequência de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que o material, que constitui a dita segunda camada magnética, é um material com uma alta constante de rigidez de substituição e uma alta temperatura Curie.

7. Oscilador de radiofrequência de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que a segunda camada magnética (2) é feita de materiais magnéticos com um baixo momento magnético, especialmente, liga CoFeB incorporando 10 a 20% de boro.

8. Oscilador de radiofrequência de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 7, caracterizado pelo fato de que a segunda camada magnética (2) é dopada com impurezas, especialmente impurezas à base da série de lantanídeos e, mais especificamente, impurezas à base de térbio, em baixas proporções, tipicamente de 0,01 a 2% (percentual atômico).

9. Oscilador de radiofrequência de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 8, caracterizado pelo fato de que a primeira camada magnética (1), referida como uma camada ancorada e funcionando como uma polarizadora, consiste de uma camada simples, cuja ancoragem é garantida por associação dela com uma camada antiferromagnética, especialmente, uma feita de IrMn ou PtMn (4), e montada separadamente na sua superfície oposta à interface entre a dita camada (1) e a camada não magnética (3).

10. Oscilador de radiofrequência de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 8, caracterizado pelo fato de que a primeira camada magnética (1), funcionando como uma polarizadora, consiste de uma camada antiferromagnética sintética ancorada por substituição.

11. Oscilador de radiofrequência de acordo com a reivindicação 10, caracterizado pelo fato de que a camada antiferromagnética (4) é montada separadamente na superfície da dita primeira camada magnética (1), oposta à interface entre a dita camada (1) e a camada não magnética (3).

12. Oscilador de radiofrequência de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 11, caracterizado pelo fato de que as ditas primeira e segunda camadas magnéticas (1) e (2) são ancoradas em qualquer direção localizada no ou fora do plano das camadas.

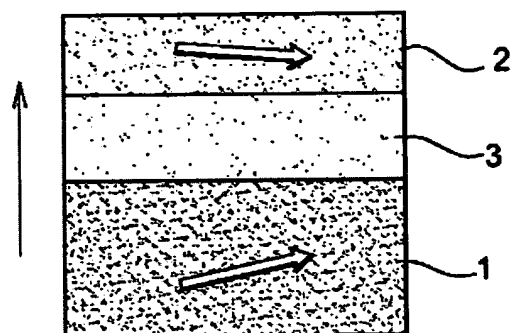
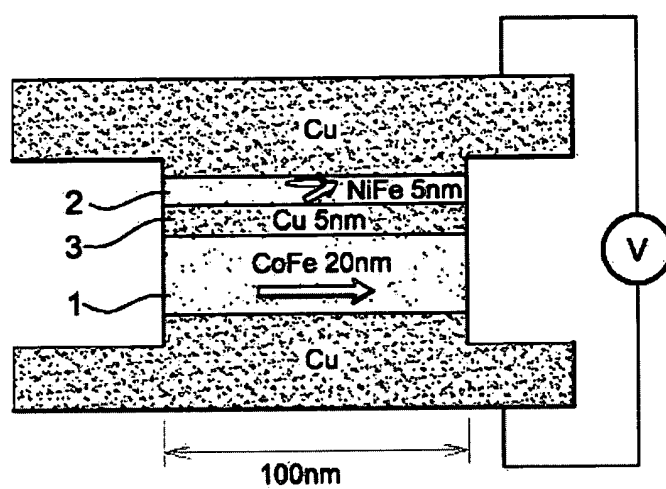
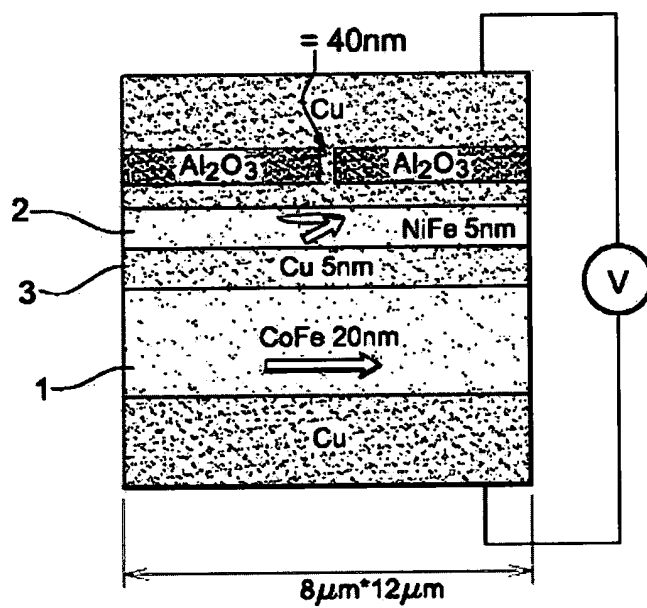
13. Oscilador de radiofrequência de acordo com a reivindicação 1, 4, 6 ou 7, caracterizado pelo fato de que uma segunda camada não magnética, constituindo uma segunda espaçadora, é montada separadamente na superfície oposta à interface entre a dita camada (2) e a espaçadora (3), e uma segunda camada ancorada, funcionando como uma segunda polarizadora, é montada separadamente na interface dessa segunda espaçadora, que é oposta à interface com a camada (2).

14. Oscilador de radiofrequência de acordo com a reivindicação 13, caracterizado pelo fato de que a dita segunda camada ancorada é simples ou consiste de uma camada antiferromagnética sintética (SAF), capaz de ser acoplada com uma camada antiferromagnética, montada separadamente no

lado oposto da interface entre essa segunda camada ancorada e a segunda espaçadora.

15. Oscilador de radiofrequência de acordo com qualquer
5 uma das reivindicações 1 a 14, caracterizado pelo fato de
que a pilha que constitui o dispositivo magneto-resistivo é
feita por "contato pontual", em que as camadas ativas (1,
2, 3) não são decapadas com modelos nanométricos, e pelo
fato de que usa uma nanoponta para produzir um contato
10 metálico da ordem de um máximo de 50 nm acima da camada
(2).

16. Oscilador de radiofrequência de acordo com qualquer
uma das reivindicações 1 a 14, caracterizado pelo fato de
15 que a pilha que constitui o dispositivo magneto-resistivo é
feita como um "pilar", as camadas (2) e (3) sendo pelo
menos decapadas para fabricar um pilar tendo um diâmetro da
ordem de 100 nm.

**Fig. 1****Fig. 2****Fig. 3**

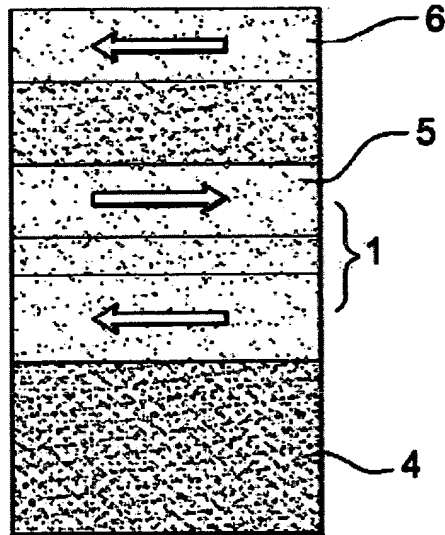


Fig. 4

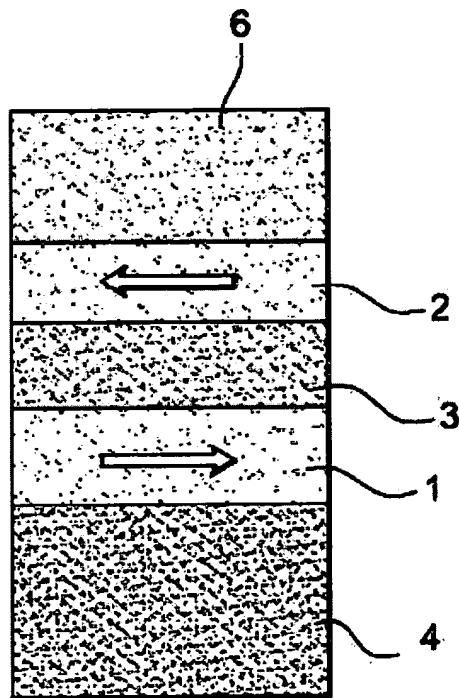
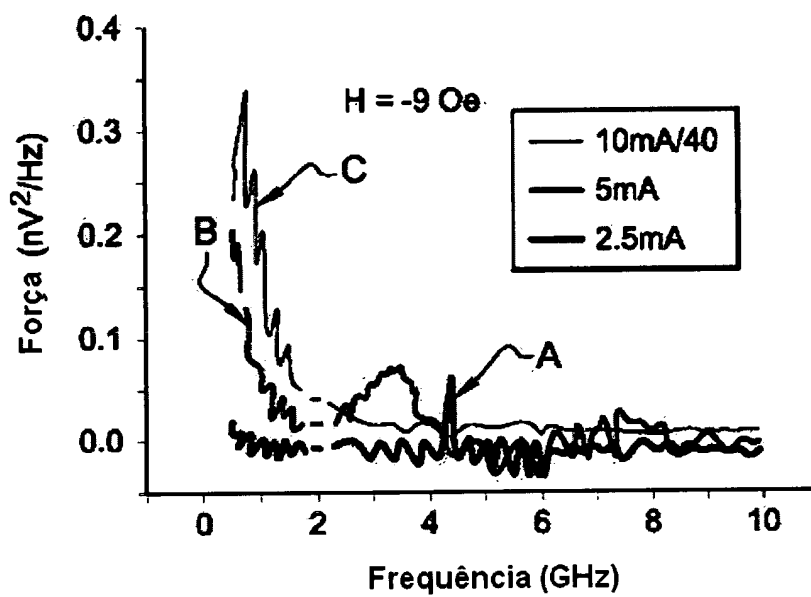
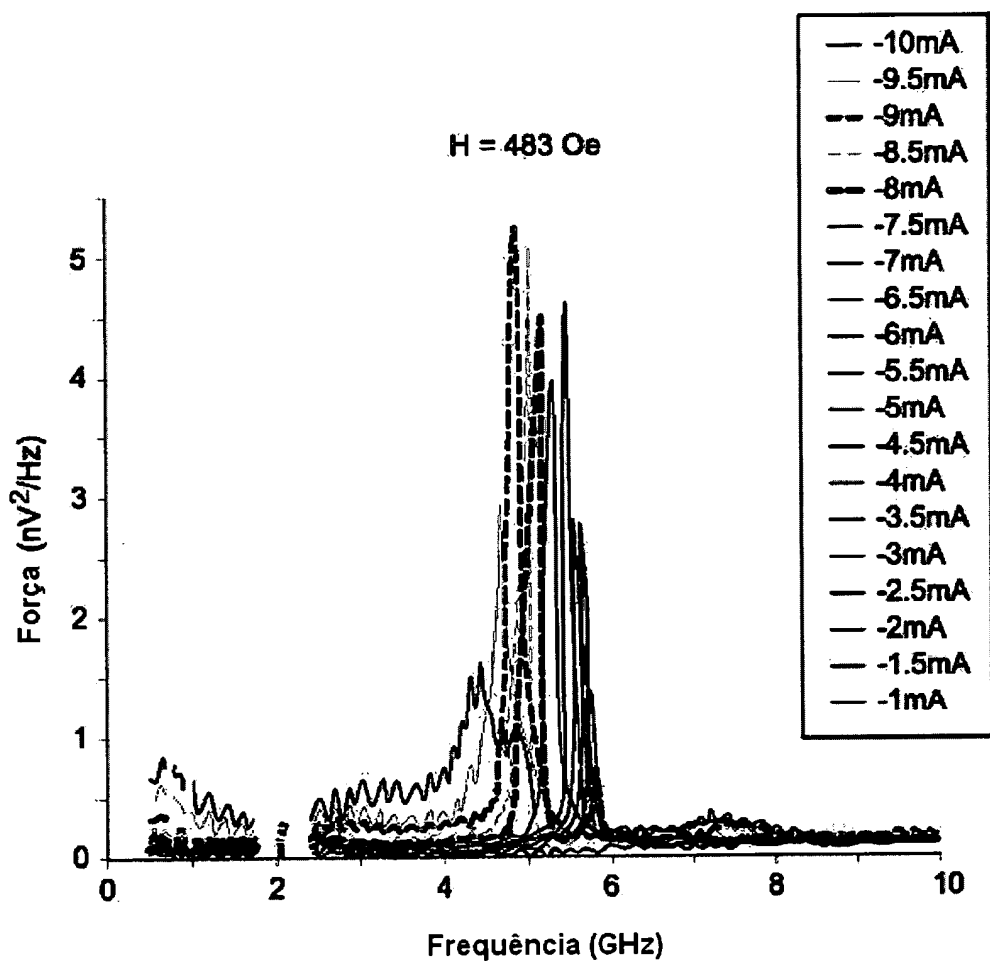


Fig. 5

**Fig. 6a****Fig. 6b**

RESUMO

OSCILADOR DE RADIOFREQUÊNCIA

A presente invenção refere-se a um oscilador de radiofrequência, o qual inclui um dispositivo magnetoresistivo, no qual escoam uma corrente elétrica polarizada por spin.

O dispositivo compreende uma pilha de pelo menos: uma primeira denominada corrente magnética "ancorada" (1), tendo uma primeira direção de magnetização; uma segunda camada magnética (2); e uma terceira camada não magnética (3) inserida entre as duas camadas mencionadas acima, intencionada para garantir desacoplamento magnético das ditas camadas. O oscilador também compreende meios de provocar um fluxo de elétrons nas ditas camadas, perpendicular a essas camadas, e, se aplicável, de aplicar um campo magnético externo à estrutura. A segunda camada magnética (2) tem um fator de amortecimento de excitação pelo menos 10% maior do que o amortecimento medido em uma camada simples do mesmo material, tendo a mesma geometria para excitação magnética, tendo comprimentos de onda iguais ou menores à extensão do cone ou cilindro de corrente, que escoam pela pilha que constitui o dispositivo magnetoresistivo.