



República Federativa do Brasil
Ministério da Economia
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(21) BR 102018011575-8 A2



(22) Data do Depósito: 07/06/2018

(43) Data da Publicação Nacional: 24/12/2019

(54) **Título:** FILMES NANOESTRUTURADOS COM GIGANTE EFICIÊNCIA NA INTERCONVERSÃO ENTRE CORRENTE DE SPIN E CORRENTE DE CARGA COMO ELEMENTOS PARA DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS BASEADOS EM SPIN

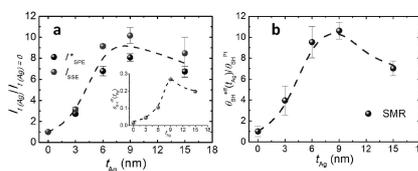
(51) **Int. Cl.:** G11C 11/16; H01L 29/66; H01L 43/10.

(52) **CPC:** G11C 11/161; H01L 29/66984; H01L 43/10.

(71) **Depositante(es):** UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO.

(72) **Inventor(es):** ANTONIO AZEVEDO DA COSTA; EDIMILSON FELIX DA SILVA; OBED ALVES SANTOS.

(57) **Resumo:** A presente patente de invenção visa empregar um sistema nanoestruturado do tipo filme fino, o qual apresenta um gigante aumento na eficiência do processo de interconversão de corrente de spin em corrente de carga, como elemento para aplicação em dispositivos tecnológicos baseados em spintrônica. O sistema nanoestruturado proposto consiste em filmes finos na forma [Material metálico não magnético (com alto ângulo Hall de spin) - Nanopartículas metálicas de material não magnético] /Material metálico não magnético (com alto ângulo Hall de spin). Essa estrutura uma vez depositada sobre um material ferromagnético realça o acoplamento spin-órbita do metal não magnético, assim aumentando o processo da interconversão corrente de spin-carga. Deste modo, respostas variando de 40% a 50% vezes maiores que o processo de interconversão spin-carga em estruturas [Material ferromagnético/Material metálico não magnético (com alto ângulo Hall de spin)] podem ser obtidas, o que elege os filmes com nanopartículas metálicas crescidas aleatoriamente no plano médio da camada intermediária como candidatos promissores para o desenvolvimento de dispositivos tecnológicos baseados em spintrônica.



FILMES NANOESTRUTURADOS COM GIGANTE EFICIÊNCIA NA INTERCONVERSÃO ENTRE CORRENTE DE *SPIN* E CORRENTE DE CARGA COMO ELEMENTOS PARA DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS BASEADOS EM *SPIN*

[001] A presente patente de invenção tem por finalidade produzir um sistema nanoestruturado do tipo filme e/ou multicamada ferromagnética, com nanopartículas metálicas crescidas no plano médio, para uso como elemento em dispositivos tecnológicos baseados em spintrônica que necessitem de um gigante aumento na eficiência do processo de interconversão entre corrente de *spin* e corrente de carga.

[002] Para tornar-se viável, a tecnologia baseada em *spin* depende da interação reprodutível e robusta entre o transporte carga e o de *spin*. Portanto, a busca por meios mais eficientes para converter a corrente de *spin* em corrente de carga e vice-versa é de importância central para o campo da spintrônica.

[003] Entre as formas mais eficazes de gerar e manipular as correntes de *spin*, o efeito Hall de *spin* (SHE), o efeito de bombeamento de *spin* (SPE), o SHE inverso (ISHE) e o efeito Seebeck de *spin* (SSE) emergiram como fenômenos primordiais desde suas propostas e descobertas experimentais (M. I. D'YAKONOV et al. *Sov. Phys. JETP. Lett.* **13** (1971) 467 e J. E. HIRSCH *Phys. Rev. Lett.* **83** (1999) 1834 e S. ZHANG *Phys. Rev. Lett.* **85** (2000) 393 e Y. TSERKOVNYAK et al., *Phys. Rev. Lett.* **88** (2002) 117601 e Y. K. KATO et al., *Science* **306** (2004) 1910 e J. WUNDERLICH et al., *Phys. Rev. Lett.* **94** (2005) 047204 e A. AZEVEDO et al., *J. Appl. Phys.* **97** (2005) 10C715 e E. SAITOH et al., *Appl. Phys. Lett.* **88** (2006) 182509 e S. O. VALENZUELA et al., *Nature* **442** (2006) 176-179 e K. UCHIDA et al., *Nature* **455** (2008) 778-781).

[004] Como SHE e ISHE são conceitos centrais na spintrônica, a pesquisa por métodos que artificialmente aumentem suas intensidades são indispensáveis nos dias de hoje. Enquanto os mecanismos intrínsecos estão relacionados com a estrutura eletrônica de materiais perfeitamente ordenados,

os extrínsecos são devidos aos espalhamentos de elétrons por impurezas combinadas com o acoplamento *spin*-órbita (SOC) (L. BERGER *Phys. Rev. B* **2**, (1970) 4559 e J. SMIT *Physica* **24**, (1958) 39).

[005] O ângulo Hall de *spin* (SHA) (θ_{SH}) usado para quantificar o SHE e o ISHE tem sido cada vez mais reconhecido como sendo fortemente afetado por efeitos interfaciais, sendo aumentado pela presença de oxigênio em interfaces metal normal/ferromagnético (MN/FM) assim como em interfaces como Permalloy/Bi e Ag/Bi (J. C. ROJAS SÁNCHEZ, et al., *Nat. Commun.* **4** (2013) 2944 e K. - U. DEMASIUS et al., *Nat. Commun.* **7**, (2016) 10644 e D. HOU et al., *Appl. Phys. Lett.* **101** (2012) 042403). Investigações teóricas recentes têm proposto uma variedade de métodos para aumentar o SHA pelo uso de ligas de Pt e Au como o conversor de corrente carga em corrente de *spin* (M. OBSTBAUM et al., *Phys. Rev. Lett.* **117** (2016) 167204) ou por considerar o aprimoramento do SOC devido à rugosidade da superfície (L. ZHOU et al., *Phys. Rev. B* **91** (2015) 045407).

[006] Normalmente, metais como Pt, W, Pd e Ta possuem os maiores valores de SHA. Neste caso, as fases β do tungstênio ($\theta_{SH} \sim 0,30$) (C.-F. PAI et al., *Appl. Phys. Lett.* **101** (2012) 122404) e do tântalo ($\theta_{SH} \sim 0,12$) (L. LIU et al., *Science* **336** (2012) 555) exibem os maiores valores de θ_{SH} , respectivamente. A desvantagem destes materiais é que as fases β são estáveis apenas em certas condições de fabricação e abaixo de certas espessuras críticas.

[007] Na presente patente de invenção, com o intuito de obter um gigante aumento na eficiência do processo de interconversão corrente de *spin*-carga em filmes para uso como elemento em dispositivos tecnológicos baseados em spintrônica, considera-se um sistema nanoestruturado do tipo filme fino. O sistema nanoestruturado proposto consiste em filmes finos na forma [Material ferromagnético/[Material metálico não magnético (com alto valor de SHA) – Nanopartículas metálicas de material não magnético]/Material metálico não magnético (com alto valor de SHA)].

[008] O sistema proposto pode ser preparado, por exemplo, a partir do empilhamento de uma camada ferromagnética de YIG ($Y_3Fe_5O_{12}$) e nanopartículas de Ag no plano médio horizontal de uma camada metálica não magnética como Pt. Pode-se produzir, em princípio, um conjunto de amostras consistindo de um filme fino na forma YIG(100 nm)/[Pt(3 nm)-Ag(t_{Ag})]/Pt(3 nm) com as espessuras nominais do filme de Ag, depositadas no plano médio da camada Pt(6nm), variando de 0 a 15 nm. Filmes com as supracitadas estruturas podem ser produzidos em substratos de GGG (111) ($Gd_3Ga_5O_{12}$), com dimensões 3,5 mm x 1,7 mm, por *sputtering*, técnica que propicia qualidade e reprodutibilidade das amostras.

[009] A Figura 1 mostra a visão esquemática da heteroestrutura exibindo a imagem topográfica das nanopartículas de Ag (a) e dos processos de SPE, conduzido por ressonância ferromagnética (FMR), SSE e magnetorresistência Hall de *spin* (SMR) (b), (c) e (d), respectivamente. Enquanto SPE e SSE são baseados na conversão de uma corrente pura de *spin* por ISHE na camada de Pt, o processo de SMR é baseado na ação simultânea de ambos efeitos SHE e ISHE. No SPE, conduzido por FMR, a precessão da magnetização na camada YIG gera uma densidade de corrente de *spin* na interface YIG/Pt, dada por

$$\vec{J}_s = \left(\frac{\hbar g_{ef}^{\uparrow\downarrow}}{4\pi M^2} \right) (\vec{M} \times \partial \vec{M} / \partial t) \quad (1)$$

sendo $g_{ef}^{\uparrow\downarrow} = (4\pi M t_{coe} / \hbar \omega) \delta H$ a parte real da condução mista de *spin* (Y. TSERKOVNYAK et al., Phys. Rev. Lett. **88**, (2002) 117601). Devido ao ISHE, uma corrente de carga transversal

$$\vec{J}_c = \theta_{SH} \left(\frac{2e}{\hbar} \right) (\vec{J}_s \times \hat{\sigma}) \quad (2)$$

é criada na camada de Pt, em que $\hat{\sigma}$ é a componente dc da corrente de polarização de *spin*, o qual é paralela ao campo magnético aplicado $\vec{H} = H \hat{z}$. Ao integrar a densidade de corrente de carga ao longo de toda amostra obtemos uma tensão dc nas extremidades da camada de Pt dada por

$$V_{dc} = R_N w \lambda_N (2e/\hbar) \theta_{SH} \tanh(t_N/2\lambda_N) J_S^z(0) \cos \alpha \quad (3)$$

sendo λ_N , R_N , t_N e w , respectivamente, o comprimento, a resistência, a espessura e o comprimento de difusão de *spin* da camada de Pt.

[010] No SSE longitudinal, um gradiente de temperatura ∇T é aplicado perpendicularmente ao plano da bicamada (ao longo de \hat{y}). Uma corrente de *spin*, induzida por *magnons*, flui paralelamente através da interface YIG/Pt. De acordo com o modelo teórico da corrente de *spin magnon* (S. M. REZENDE et al., *J. Magn. Magn. Mater.* 400 (2016) 171 e Y.T. CHEN et al., *Phys. Rev. B* 87 (2013) 144411), o gradiente de temperatura cria um acúmulo de *magnons* na interface YIG/Pt que resulta em uma densidade de corrente de *spin* injetada na Pt, dada por

$$J_{Sy}^z(0) = C_s g_{eff}^{\uparrow\downarrow} \nabla T \quad (4)$$

onde C_s é um coeficiente envolvendo parametros intrinsecos da camada de YIG, sua espessura e temperatura. Por sua vez, no processo de SMR (H. NAKAYAMA et al., *Phys. Rev. Lett.* 110, (2013) 206601 e Y. -T. CHEN et al., *Phys. Rev. B* 87, (2013) 144411 e M. Weiler et al., *Phys. Rev. Lett.* 111, (2013) 176601), uma corrente de carga longitudinal $\vec{J}_c = J_c \hat{x}$, fluindo através da camada de Pt é convertida em uma corrente de *spin* transversal $\vec{J}_s = J_s \hat{y}$ devido ao SHE. Dependendo da orientação relativa entre a polarização da corrente de *spin* $\hat{\sigma} = \hat{z}$ direcionada para a interface YIG/Pt e a magnetização \vec{M} da camada de YIG, os *spins* dos eletrons serão reflectidos ($\vec{M} \parallel \hat{\sigma}$) ou absorvidos ($\vec{M} \perp \hat{\sigma}$). No primeiro caso, a corrente de *spin* refletida gera (devido ao ISHE) uma corrente de carga que se acrescenta à corrente longitudinal e, neste último caso, a corrente de *spin* absorvida não afeta a corrente longitudinal.

[011] A Figura 2 mostra a varredura de campo da derivada do espectro de absorção de FMR, com o ajuste numérico obtido pela derivada de uma função Lorentziana, e as varreduras de campo de tensão ISHE medida para diferentes ângulos no plano para a amostra YIG(100 nm)/[Pt(3 nm)-Ag(6 nm)]/Pt(3 nm). A dependência angular dos espectros de FMR e das tensões ISHE foi medida para cada amostra alterando o ângulo α no plano. As curvas de tensão ISHE exibem as seguintes características: (i) linhas Lorentzianas

centradas nos valores de campo FMR; (ii) valores de tensão máxima medidos perpendicularmente às direções de campo (0° e 180°) e valores nulos para direção ao longo do campo (90° e 270°); (iii) dependência angular proporcional a $\cos(\alpha)$. Uma descoberta surpreendente obtida das medições foi o forte aumento das tensões ISHE medidas para amostras com as nanopartículas de Ag depositadas no plano médio das camadas de Pt. Por exemplo, a amostra sem nanopartículas de Ag (YIG(100 nm)/Pt(6 nm)) apresentou uma tensão ISHE de $1,0 \mu\text{V}$ e para a amostra com a espessura de Ag = 3,0 nm, a tensão ISHE foi 3 vezes maior. Na parte inferior da Figura 2(d) é verificada a dependência angular dos componentes simétricos e antisimétricos de V_{SPE} e a parte superior mostra a dependência 3D de V_{SPE} como uma função do campo de $H - H_R$ e do ângulo no plano. Como os valores de V_{SPE} dependem da resistência da camada de Pt, a corrente SPE ($I_{SPE} = V_{SPE}/R$) é fisicamente mais significativa. A Figura 2(e) mostra a dependência da varredura de campo de I_{SPE} para cinco amostras diferentes, sendo o valor máximo de $I_{SPE} = 198 \text{ nA}$ para a amostra com $t_{Ag} = 9,0 \text{ nm}$. Esta característica única representa uma enorme melhoria na procura de métodos extrínsecos para aumentar a interconversão *spin-carga*.

[012] A Figura 3 mostra as variações da tensão criadas pelo SSE com gradiente de temperatura aplicado paralelo a \hat{y} , em função de $\vec{H} = H\hat{z}$ e ΔT , para a amostra YIG(100 nm)/[Pt(3 nm)-Ag(6 nm)]/Pt(3 nm). Como esperado, $V_{SSE} \propto \Delta T$ como mostrado na Figura 3 (b), onde cada ponto experimental foi obtido fazendo a média dos valores de V_{SSE} nas regiões de regime saturado para campos magnéticos positivos e negativos. As Figuras 3(c) - 3(g) mostram a dependência de ($I_{SSE} = V_{SSE}/R$) como uma função de ΔT para as mesmas amostras previamente investigadas. Para o maior ΔT aplicado (= 15 K), obteve-se o valor de I_{SSE} máximo de 44,9 nA para a amostra YIG(100 nm)/[Pt(3 nm)Ag(9 nm)]/Pt(3 nm), enquanto que o valor de I_{SSE} para YIG(100 nm)/Pt(6 nm) foi 4,4 nA. Neste caso, o processo de conversão de corrente de *spin-carga* foi aumentado 10 vezes.

[013] Para investigar ainda mais os mecanismos de conversão *spin*-carga em estruturas [Pt-Ag]/Pt, o efeito SMR foi medido utilizando o mesmo conjunto de amostras. Através do método de magnetorresistência dependente de ângulo (ADMR), a resistência longitudinal foi medida, paralela à corrente dc através da técnica de quatro pontas. As medições de ADMR foram realizadas varrendo o campo magnético \vec{H} ao longo dos planos: (i) yx , variando o ângulo γ de 0° a 360° ($\gamma=0^\circ$ para $\vec{H}\parallel y$); (ii) ao longo do plano yz , variando o ângulo β de 0° a 360° ($\beta=0^\circ$ para $\vec{H}\parallel y$) e (iii) ao longo do plano xz variando o ângulo α de 0° a 360° ($\alpha=0^\circ$ para $\vec{H}\parallel x$). No caso (i), nenhuma variação na resistência é esperada pela SMR para a medida de resistência longitudinal. No caso (ii), a variação na resistência longitudinal é atribuída ao efeito SMR e será dada por

$$R_L = R_0 + \Delta R \cos^2(\beta). \quad (5)$$

[014] A figura 4 mostra os resultados de SMR para as amostras com as nanopartículas de Ag. Para a amostra com $t_{Ag} = 3,0$ nm, a contribuição de SMR aumentou várias vezes em comparação com a amostra com camada de Pt pura. A contribuição de SMR aumenta ainda mais para a amostra com $t_{Ag} = 6,0$ nm e começa a diminuir para a amostra com $t_{Ag} = 9,0$ nm tornando-se desprezível para a amostra com $t_{Ag} = 15,0$ nm, como mostrado nas Figuras 4(c) e 4(d). Embora os resultados de SMR não possam ser diretamente comparados com as correntes ISHE obtidas pela SPE e SSE, há uma impressionante correlação entre os resultados obtidos pelas três técnicas.

[015] A figura 5 mostra a dependência do aumento relativo da corrente ISHE, $I_{t(Ag)}/I_{t(Ag=0)}$ gerado por SPE, I_{SPE}^* , e por SSE, I_{SSE} , assim como a dependência dos dados SMR em função da camada nominal de nanopartículas de Ag. O comportamento de ambas as correntes ISHE em função de t_{Ag} são muito semelhantes. Eles aumentam constantemente para $0 \leq t_{Ag} \leq 9$ nm e diminuem para $t_{Ag} \geq 9$ nm. $t_{Ag} = 9$ nm é a espessura crítica abaixo da qual a camada de Ag é formada por nanopartículas e acima da qual a camada de Ag coalesce em um filme contínuo. O aumento de oito vezes e de 10 vezes de

$I_{SPE}^*/I_{SPE}^{SPE}{}_{t(Ag=0)}$ e $I_{SSE}/I_{SSE}^{SSE}{}_{t(Ag=0)}$, respectivamente, confirmam a eficiência do mecanismo de interconversão *spin*-carga mediado pelas nanopartículas de Ag.

[016] Para ter um modelo quantitativo para interpretar os dados apresentados anteriormente, podemos escrever a corrente ISHE como

$$I_{SPE} = V_{dc}/R_N = w\lambda_N(2e/\hbar)\theta_{SH} \tanh(t_N/2\lambda_N) J_{Sy}^z(0) \cos(\alpha), \quad (6)$$

onde as densidades de corrente de *spin* na interface YIG/Pt são dadas por $J_{Sy}^z(0) = (\hbar\omega p g_{eff}^{\uparrow\downarrow}/4\pi)(h_{rf}/\Delta H)^2 L(H - H_R)$ para o SPE e pela Equação (4) para a SSE, sendo H_R e ΔH , respectivamente, o campo de FMR e a largura de linha da bicamada YIG/Pt, $L(H - H_R)$ é a forma de linha Lorentziana da absorção FMR ($L(0) = 1$) (p é a elipticidade de precessão, e α é o ângulo do campo magnético aplicado conforme definido na Figura 2(b)). A partir da Equação (6) podemos determinar o ângulo Hall de *spin* efetivo θ_{ef}^{SPE} através das medidas de SPE usando a seguinte equação:

$$\theta_{ef}^{SPE} = \frac{8\pi I_{SPE}}{p_{xz} w \lambda_N \omega e g_{eff}^{\uparrow\downarrow} \tanh(t_N/2\lambda_N) (h_{rf}/\Delta H)^2}. \quad (7)$$

[017] Utilizamos duas abordagens para determinar θ_{ef}^{SPE} a partir dos dados de SPE. No primeiro, assumimos que os parâmetros λ_N , t_N , e $g_{eff}^{\uparrow\downarrow}$ são iguais para todas as amostras, e θ_{ef}^{SPE} é calculado em relação ao valor da camada pura de Pt considerando os valores medidos de ΔH e I_{SPE} . Considerando um SHA efetivo típico de 5% de uma camada de Pt pura e $\Delta H = 9,6$ Oe, 8,5 Oe, 9,0 Oe, 6,2 Oe e 7.4 Oe para $t_{Ag} = 0, 3, 6, 9$ e 15 nm, respectivamente, obtemos valores para $\theta_{ef}^{SPE}(t_{Ag})$, mostrado na inserção da Figura 5(a). O máximo de θ_{ef}^{SPE} é obtido para o YIG/[Pt(3nm)-Ag(9nm)]/Pt(3nm). Na segunda abordagem, assumimos que o alargamento da largura de linha do FMR da camada de YIG com deposição da camada metálica é inteiramente atribuído ao amortecimento por bombeamento de *spin* (E. SAITOH et al., Appl. Phys. Lett. **88**, (2006) 182509). Neste caso, podemos calcular a condução mista de *spin* efetiva para cada amostra usando $g_{eff}^{\uparrow\downarrow} = (4\pi M_S t_{FM}/\hbar\omega)\delta H$, onde δH é a largura de linha de FMR adicional devido ao SPE. Usando os parâmetros $p_{xz} = 0,3$ (que leva em conta a elipticidade da precessão e a

variação espacial do modo FMR no filme de YIG), $w = 0,17\text{cm}$, $\lambda_N = 3,7\text{ nm}$, $t_N = 6\text{ nm}$, $h_{rf} = 0,2\text{ Oe}$ (correspondente a 20 mW em uma cavidade com $Q = 2000$) e linhas de largura fornecidas antes, obtivemos θ_{ef}^{SPE} usando a Equação (7).

[018] Por meio do procedimento supracitado, a característica mais atrativa dos resultados, do ponto de vista tecnológico, reside na fabricação de nanopartículas metálicas aleatória no plano médio da camada Pt aumentando em 40% o SHA efetivo, se considerarmos os dados obtidos por SPE, e mais de 50% se considerarmos os dados obtidos por SSE e SMR para a amostra com $t_{Ag} = 9,0\text{ nm}$.

[019] Desta forma, aproveitando as fracas propriedades de coalescência da Ag no regime de camadas ultrafinas, fabricamos nanopartículas de Ag no plano médio da camada de Pt de 6,0 nm de espessura. Variando o tempo de deposição de Ag, obtivemos nanopartículas isoladas até alcançar a espessura nominal crítica de 9,0 nm, acima da qual a camada Ag se torna um filme contínuo. A rugosidade das nanopartículas de Ag serviram como moldes nanoscópicos que aumentam a eficiência do processo de interconversão corrente *spin*-carga em uma estrutura YIG(100 nm)/[Pt(3 nm)-Ag(9 nm)]/Pt(3 nm) pelo menos uma ordem de magnitude em comparação com o processo de interconversão corrente de *spin*-carga na Pt pura, o que coloca esses filmes como candidatos promissores para o desenvolvimento de dispositivos tecnológicos baseados em spintrônica.

REIVINDICAÇÕES

1) FILMES NANOESTRUTURADOS COM GIGANTE EFICIÊNCIA NA INTERCONVERSÃO ENTRE CORRENTE DE *SPIN* E CORRENTE DE CARGA COMO ELEMENTOS PARA DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS BASEADOS EM *SPIN*, caracterizados por sistemas nanoestruturados, na forma de filme fino e/ou multicamada ferromagnética para uso como elemento em dispositivos tecnológicos baseados em spintrônica que necessitem de um gigante aumento na eficiência do processo de interconversão entre corrente de *spin* e corrente de carga.

2) FILMES NANOESTRUTURADOS COM GIGANTE EFICIÊNCIA NA INTERCONVERSÃO ENTRE CORRENTE DE *SPIN* E CORRENTE DE CARGA COMO ELEMENTOS PARA DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS BASEADOS EM *SPIN*, de acordo com a reivindicação 1, caracterizados por sistemas nanoestruturados na forma de filme fino e/ou multicamada ferromagnética, ou seja, com estrutura [Material ferromagnético/[Material metálico não magnético (com alto ângulo Hall de spin) – Nanopartículas metálicas de material não magnético]/Material metálico não magnético (com alto ângulo Hall de spin)], com um gigante aumento na eficiência do processo de interconversão corrente de *spin*-carga, para uso como elemento em dispositivos tecnológicos baseados em spintrônica.

3) FILMES NANOESTRUTURADOS COM GIGANTE EFICIÊNCIA NA INTERCONVERSÃO ENTRE CORRENTE DE *SPIN* E CORRENTE DE CARGA COMO ELEMENTOS PARA DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS BASEADOS EM *SPIN*, de acordo com as reivindicações 1 e 2, caracterizados por sistemas nanoestruturados na forma de filme fino e/ou multicamada ferromagnética, independentemente da estrutura da amostra, bem como da espessura e composição das camadas ferromagnética, do material metálico não magnético (com alto ângulo Hall de spin) e das nanopartículas metálicas não magnéticas, que apresentem um gigante aumento na eficiência do

processo de interconversão corrente de *spin*-carga para uso como elemento em dispositivos tecnológicos baseados em spintrônica.

DESENHOS

Figura 1

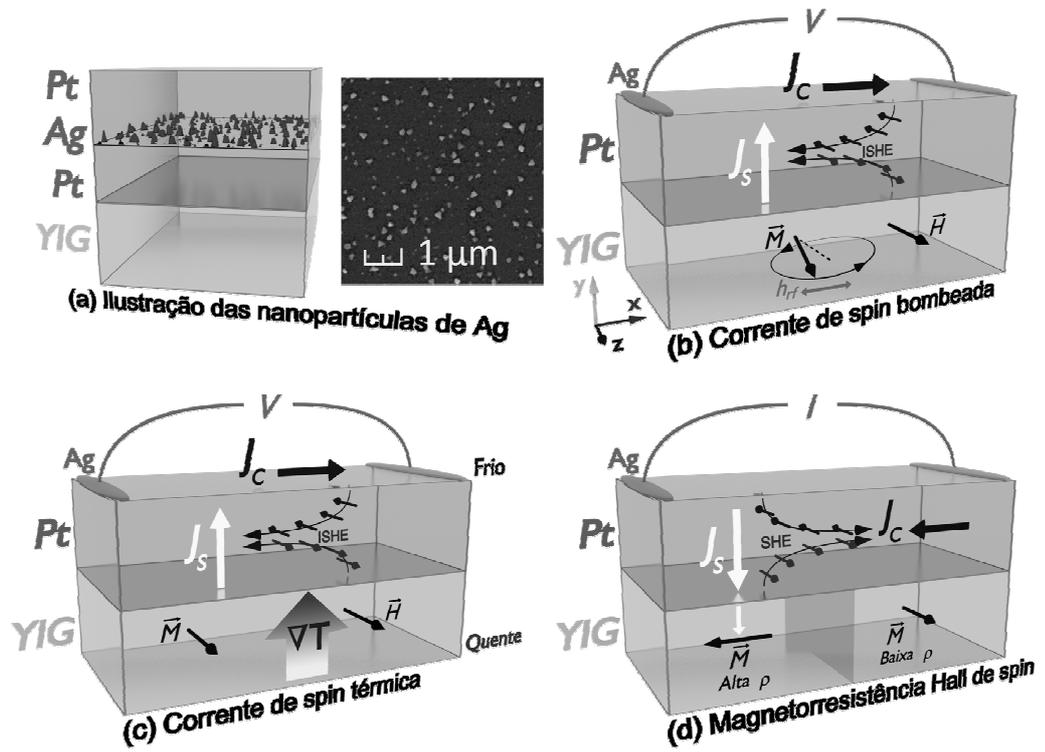


Figura 2

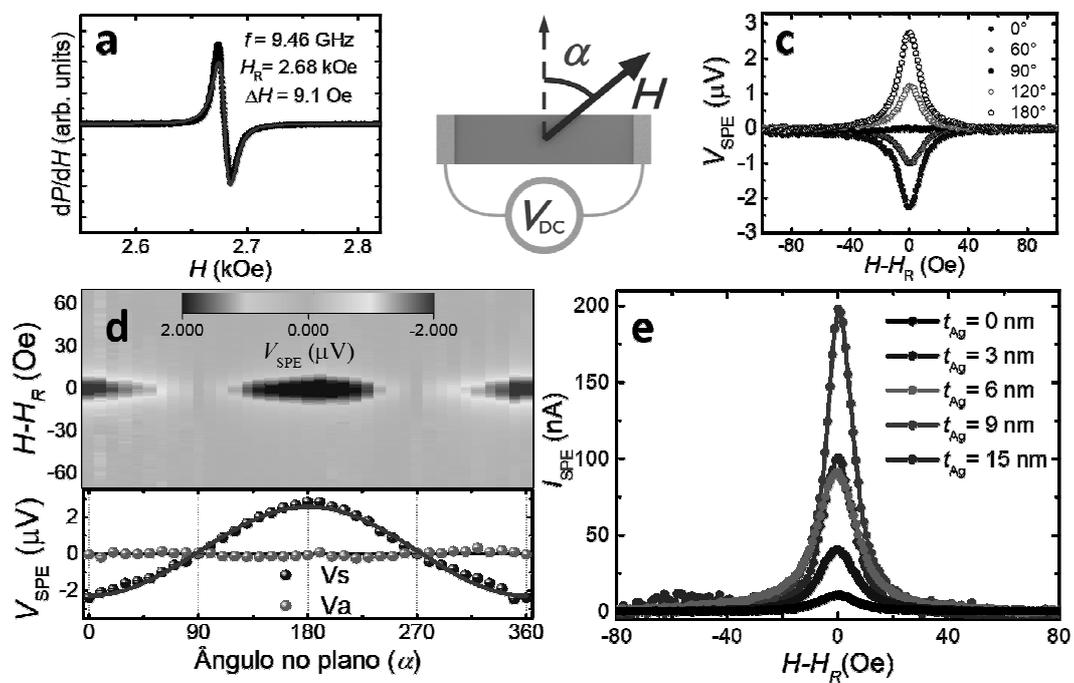


Figura 3

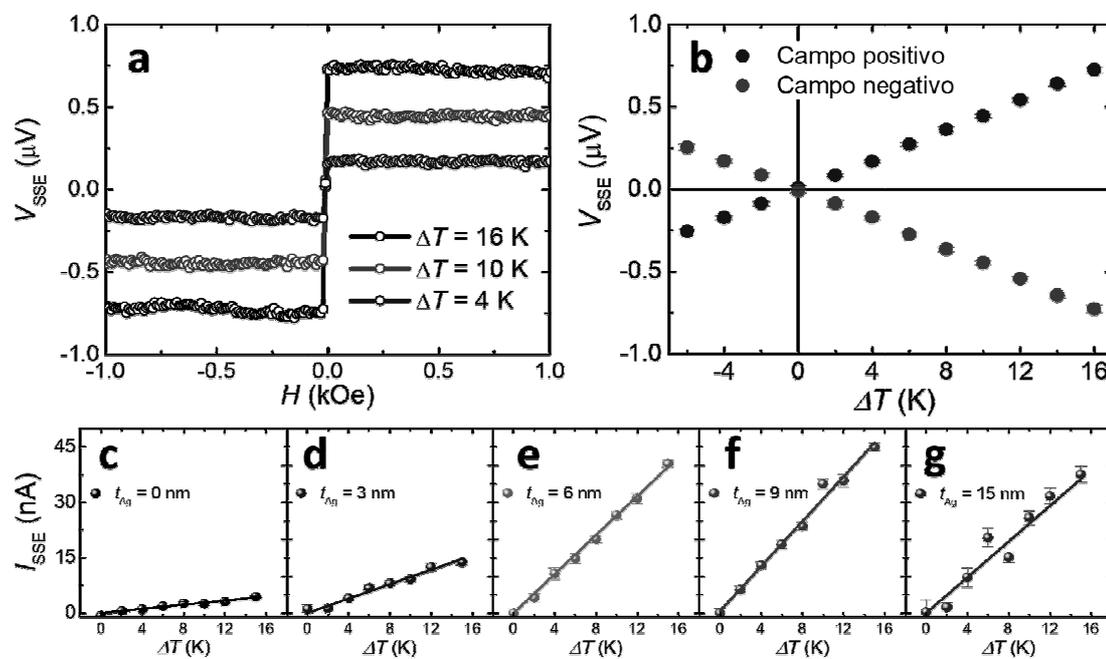


Figura 4

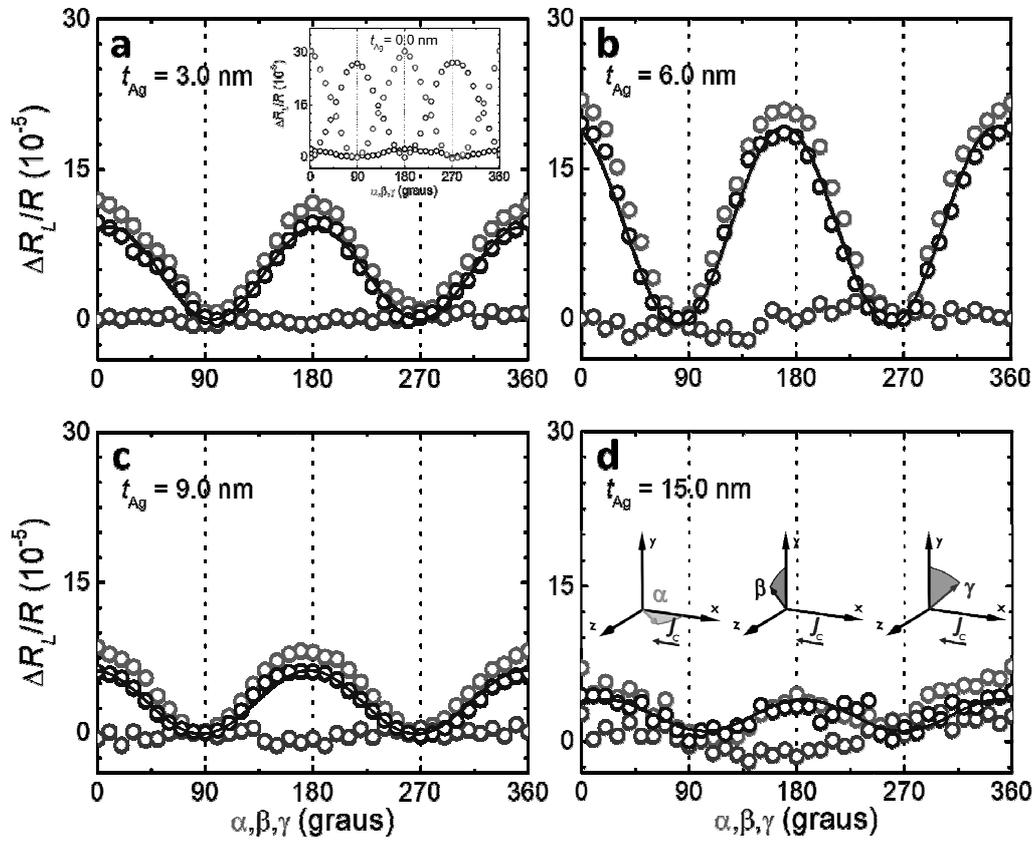
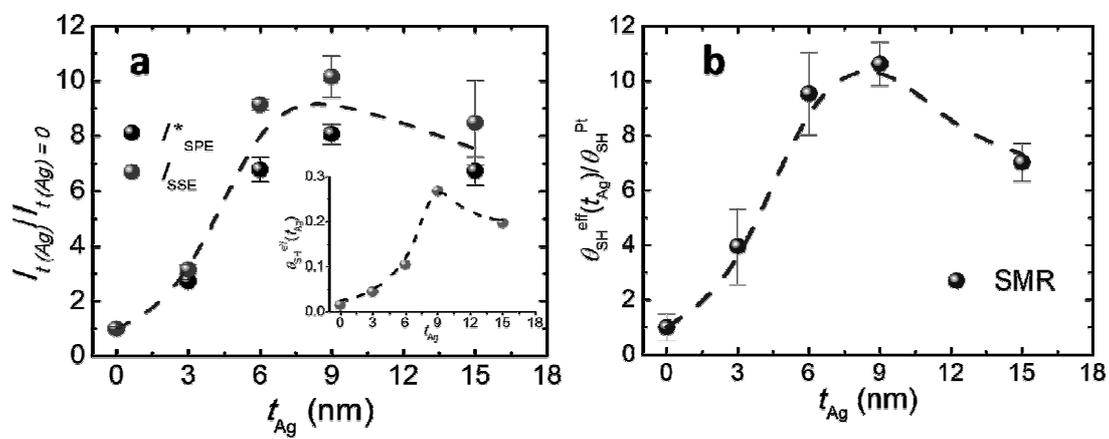


Figura 5



RESUMO**FILMES NANOESTRUTURADOS COM GIGANTE EFICIÊNCIA NA INTERCONVERSÃO ENTRE CORRENTE DE *SPIN* E CORRENTE DE CARGA COMO ELEMENTOS PARA DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS BASEADOS EM *SPIN***

A presente patente de invenção visa empregar um sistema nanoestruturado do tipo filme fino, o qual apresenta um gigante aumento na eficiência do processo de interconversão de corrente de *spin* em corrente de carga, como elemento para aplicação em dispositivos tecnológicos baseados em spintrônica. O sistema nanoestruturado proposto consiste em filmes finos na forma [Material metálico não magnético (com alto ângulo Hall de *spin*) - Nanopartículas metálicas de material não magnético]/Material metálico não magnético (com alto ângulo Hall de *spin*). Essa estrutura uma vez depositada sobre um material ferromagnético realça o acoplamento *spin*-órbita do metal não magnético, assim aumentando o processo da interconversão corrente de *spin*-carga. Deste modo, respostas variando de 40% a 50% vezes maiores que o processo de interconversão *spin*-carga em estruturas [Material ferromagnético/Material metálico não magnético (com alto ângulo Hall de *spin*)] podem ser obtidas, o que elege os filmes com nanopartículas metálicas crescidas aleatoriamente no plano médio da camada intermediária como candidatos promissores para o desenvolvimento de dispositivos tecnológicos baseados em spintrônica.