

Construção de um medidor de campo magnético para utilização em processos de geração e manipulação de correntes puras de spin

Construction of a magnetic field meter for use in processes of generation and manipulation of pure spin currents

Wenderson R.F. Silva^{*1}, Leonardo V. Freitas¹, Rafael O.R.R. Cunha¹,
Joaquim B.S. Mendes¹

¹Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Física, 36570-900, Viçosa, MG, Brasil.

Recebido em 23 de abril de 2023. Aceito em 08 de junho de 2023.

Neste trabalho apresentamos a construção de um medidor de campo magnético (gaussímetro) com alta sensibilidade e detecção de 1 a 80 mT, constituído de componentes eletrônicos simples, com proposta de aplicação em uma montagem experimental para geração de correntes puras de spin por meio do efeito spin Seebeck. Através de um cabo USB, o dispositivo é alimentado e troca dados com um computador via comunicação em linguagem C++ com o Arduino Uno, em conjunto com uma interface gráfica LabVIEW. Para realizar medidas em ambientes de profundidade, como no interior de eletroímãs, desenvolveu-se uma sonda Hall. O equipamento também dispõe de uma tela LCD. O sensor de campo magnético utilizado é o SS49E, com o qual foi possível obter medidas com resolução e alcance apropriadas. O gaussímetro foi empregado no desenvolvimento de uma montagem experimental para investigações dos efeitos spin Seebeck e spin Hall, onde estimamos o ângulo Hall de spin para bicamadas formada por um filme de platina (Pt) crescido sobre um filme magnético isolante de YIG. Portanto, o gaussímetro desenvolvido tem potencial para ser utilizado tanto em ambientes de ensino como os de pesquisa e tem como principal vantagem o baixo custo de produção, de aproximadamente 22 dólares.

Palavras-chave: Medidor de campo magnético, gaussímetro, sensor de efeito Hall, spintrônica, efeito spin Seebeck, Efeito Hall de spin.

In this work we present the construction of a magnetic field meter (gaussmeter) with high sensitivity and detection from 1 to 80 mT, consisting of simple electronic components, with a proposal of application in an experimental setup for the generation of pure spin currents through the effect spin Seebeck. Through a USB cable, the device is powered and exchanges data with a computer via communication in C++ language with Arduino Uno, together with a LabVIEW graphical interface. To perform measurements in deep environments, such as inside electromagnets, a Hall probe was developed. The equipment also has an LCD screen. The magnetic field sensor used is the SS49E, with which it was possible to obtain measurements with appropriate resolution and range. The developed gaussmeter was used in the development of an experimental setup for investigations of the spin Seebeck and spin Hall effects, where it was possible to estimate the spin Hall angle for bilayers formed by a platinum (Pt) film grown on a YIG insulating magnetic film. Therefore, the developed gaussmeter has the potential to be used both in teaching and research environments and its main advantage is the low production cost, approximately US\$ 22.00.

Keywords: Magnetic field meter, gaussmeter, Hall effect sensor, spintronics, Spin Seebeck effect, Spin Hall Effect.

1. Introdução

Aparelhos de medidas de campos magnéticos são fundamentais em laboratórios de ensino e pesquisa em física. A principal fenomenologia associada ao gaussímetro proposto é o efeito Hall, descoberto por Edwin H. Hall em 1879 [1–5]. O fenômeno consiste na geração de uma diferença de potencial entre as superfícies opostas de um condutor ou semicondutor submetido a um campo elétrico e a um campo magnético perpendiculares entre si.

Um campo elétrico E estabelecido sobre um material condutor (ou semicondutor) produz uma corrente elétrica, com densidade J_C , que se propaga na direção deste campo E , com velocidade v . Se o material for submetido a um campo magnético B com direção perpendicular ao campo E , os portadores de carga estarão sujeitos à Força de Lorentz $\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$ [5–10]. Esta força é perpendicular ao campo magnético B e à direção de propagação da corrente elétrica J_C , fazendo que os portadores de cargas opostas sejam defletidos e direcionados para as bordas opostas do material, como esquematizado na Fig. 1(a). Dessa forma, é gerada uma diferença de

*Endereço de correspondência: wenderson.f@ufv.br

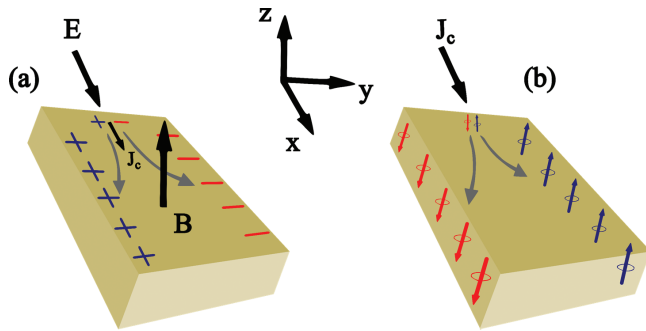


Figura 1: (a) Representação do efeito Hall clássico. Uma corrente densidade de corrente elétrica J_c ao longo do eixo x é injetada no material, o qual está submetido a um campo magnético B em z , que empurra as cargas para as extremidades ao longo do eixo y . (b) Representação do efeito Hall de spin.

potencial entre as extremidades opostas do condutor (ou semiconductor), denominada tensão Hall (V_{hall}).

Adotando o sistema de referências mostrado na Fig. 1, um campo elétrico aplicado ao longo do eixo X produz um fluxo de cargas (corrente elétrica J_C) nesta direção. Se um campo magnético B for aplicado ao longo do eixo Z , a Força de Lorentz sobre os portadores de carga, se forem negativos (elétrons), os fazem defletir no sentido positivo do eixo Y . Se forem portadores de carga positivos (buracos), serão defletidos em sentido oposto [10, 11], gerando uma tensão Hall V_{hall} que pode ser medida facilmente e é proporcional à intensidade do campo magnético B aplicado.

O efeito Hall descrito acima, representado na Fig. 1(a), é o princípio elementar para a fabricação de um sensor Hall utilizado nos mais variados medidores de campo magnético. O sensor de efeito Hall SS49E [12, 13], utilizado neste trabalho, é um chip semiconductor que, ao ser submetido a um campo magnético B , induz uma diferença de potencial Hall diretamente proporcional à intensidade do campo magnético aplicado. Para sensores como o SS49E, pode-se obter uma proporcionalidade entre V_{hall} e B , como mostrado na equação (1) abaixo, sendo α um fator de proporcionalidade que possui unidade de V/T , a partir do qual, pode-se obter o valor do campo magnético B por meio do valor de V_{hall} .

$$V_{hall} = \alpha B. \quad (1)$$

Esse efeito Hall é conhecido como efeito Hall clássico. Mais recentemente, previsto em teoricamente por Dyakonov e Perel em 1971 [14, 15] e verificado experimentalmente por Hirsch em 1999 [16], o princípio do efeito Hall de spin (SHE) vem sendo estudado em termos das propriedades quânticas de alguns materiais e tem despertado grande interesse na comunidade científica mundial. O SHE leva em consideração a informação de spin do elétron, que é uma propriedade intrínseca do elétron (assim como sua carga) e possui um valor de $1/2 N.m.s$ [6, 17, 18]. No SHE, os elétrons de uma corrente

elétrica J_C , ao atravessarem um condutor, podem sofrer desvios se os átomos que constituem o condutor tiverem uma boa interação entre suas órbitas eletrônicas e os spins dos elétrons da corrente J_C . Esta interação é chamada acoplamento spin-órbita e, para alguns metais, este fenômeno é bastante pronunciado. A Fig. 1(b) mostra um esquema do efeito Hall de spin. No efeito Hall de spin, elétrons da corrente J_C com “spin up” (spin para cima, que é representado por uma seta na direção positiva do eixo Z) sofrem um desvio na direção positiva do eixo Y , enquanto que os elétrons com “spin down” (spin para baixo, que é representado por uma seta na direção negativa do eixo Z) sofrem um desvio na direção negativa do eixo Y . Diferentemente do efeito Hall clássico, no SHE não existe acúmulo de cargas nas extremidades (bordas) do condutor, mas sim uma população de elétrons com spin up em uma extremidade e elétrons com spin down na outra extremidade. Durante o processo, estes elétrons viajam em sentidos opostos na direção Y , constituindo-se, assim, uma “corrente de spin” J_S nesta direção. Em resumo, o efeito Hall de spin converte uma corrente de carga J_C em uma corrente de spin J_S . Este fenômeno abre um novo caminho para a investigação e aplicação de materiais em uma nova eletrônica baseada no spin do elétron, chamada “spintrônica”.

O gaussímetro produzido neste trabalho utiliza como princípio fundamental para medida de campo magnético o efeito Hall clássico. Entretanto, para verificar toda a sua potencialidade e sensibilidade, será usado em um experimento de spintrônica, baseado no efeito Hall de spin inverso (ISHE), que envolvem propriedades quânticas. Materiais metálicos que possuem um forte acoplamento spin-órbita, convertem uma corrente de carga J_C em uma corrente de spin J_S através do SHE. No processo inverso, ISHE, uma corrente de spin J_S é convertida em uma corrente de carga J_C , a qual pode ser medida através de um multímetro de precisão. A geração de uma corrente de spin J_S é um dos grandes desafios em spintrônica e uma das maneiras é utilizando o efeito spin Seebeck (SSE), que consiste em aplicar um gradiente térmico em um material com propriedades magnéticas, promovendo um desbalanço nas populações de elétrons com spin up e down [19]. Dessa forma, quando esse material magnético é colocado em contato com um metal, uma corrente de spin J_S é injetada no metal. Se esse metal possui um forte acoplamento spin-órbita, a corrente de spin J_S será convertida em uma corrente de carga J_C através do ISHE. Uma condição necessária para se observar essa corrente de carga J_C é que a espessura desse metal seja muito pequena, geralmente na ordem nanométrica: os chamados filmes finos.

Em experimentos de spintrônica, se faz necessária a aplicação de um campo magnético na amostra para que haja a polarização dos spins e gere uma corrente de spin líquida [20]. Desse modo, o controle do campo magnético aplicado à amostra é fundamental, tanto no

que se refere ao conhecimento acerca da magnitude desse campo quanto a sua orientação. Importante ressaltar que o fenômeno físico investigado neste trabalho, efeito spin Seebeck, está na fronteira do conhecimento nas áreas magnetismo e spintrônica, o que torna ainda mais atrativo a construção de um medidor de campo magnético eficiente e com boa precisão. Nesse sentido, neste trabalho propomos a construção de um medidor de campo magnético com alta sensibilidade, constituído por componentes eletrônicos simples e que possui um intervalo de detecção de 1 a 80 mT. Outros autores propuseram a construção de medidores de campo magnético de baixo custo, utilizando como sensor o próprio magnetômetro do celular [21, 22], bobinas [23] ou dispositivos semicondutores baseados no efeito Hall [24, 25], associados a circuitos com microcontroladores [26]. Para fins de ratificação, o gaussímetro aqui construído será utilizado em um experimento sofisticado como parte integrante de uma montagem experimental para geração de correntes puras por meio do efeito spin Seebeck.

2. Materiais e Métodos

2.1. Construção e calibração do dispositivo

A principal meta deste trabalho é desenvolver um dispositivo robusto e com recursos otimizados, utilizando materiais de baixo custo e que fosse capaz de realizar medidas precisas de campos magnéticos. Para tal, utilizamos o “chip” SS49E, em conjunto com um conversor analógico digital de 16 bits (ADS1115) e o microcontrolador ATmega328P do Arduino Uno R3. Para visualização dos dados, utilizamos um display LCD 16 × 2 acoplado ao módulo de comunicação via protocolo I²C. A montagem dessa eletrônica foi colocada em uma caixa de dimensões 12 × 9 × 3 cm³ para proteção e manuseio do equipamento. Um esquema ilustrativo das ligações elétricas é apresentado na Fig. 2(a), e o circuito elétrico na Fig. 2(b).

Um programa na linguagem C++ foi desenvolvido para comunicação entre os componentes do gaussímetro

proposto, bem como uma interface gráfica para acompanhar e salvar os dados em LabVIEW em formato .exe, o qual pode-se salvar e exportar os dados em formato .txt. Os códigos para o programa em LabVIEW e também para o controle do Arduino estão disponibilizados no Material Suplementar deste artigo e também podem ser acessados pelo website: <https://github.com/wphysics/Efficient-and-low-cost-gaussimeter.git>. Uma rotina de calibração ao ligar o gaussímetro também foi implementada no código fonte. Para calibração inicial, é necessário posicionar o sensor longe de fontes de campo magnético e, depois, ligá-lo. Nos cinco primeiros segundos de funcionamento o dispositivo armazenará algumas medidas devido a flutuações e, por meio de uma média, desconsiderará tal valor e ajustará o dispositivo em 0 mT. O ADS1115 foi programado para operar com ganho de 1X, possibilitando a realização de leituras dos sinais enviados do sensor Hall com resolução de 0,125 mV.

Para realizar medidas em ambientes com profundidade, como no interior de eletroímãs, desenvolveu-se uma sonda utilizando um cabo de áudio P2 estéreo de 3 vias, onde, em uma das extremidades, foi soldado o sensor Hall. Afim de proporcionar maior rigidez à sonda, imediatamente antes do sensor, o cabo foi inserido em um tubo de polipropileno de diâmetro próximo (canudo rígido), e esse terminal da sonda foi selado com espaguete termoretrátil. Para remover a sonda do *case* central, afim de possibilitar mais segurança ao equipamento quando guardado, utilizou-se uma saída P2 estéreo fêmea, adaptando-a em uma das faces do equipamento (ver Fig. 4(c)).

O “chip” SS49E apresenta características que variam de sensor para sensor. Tal chip, fabricado pela empresa Honeywell International Inc e distribuído pela Farnell.com, por exemplo, aparece no catálogo com uma sensibilidade de $14 \pm 3V/T$ [12]. Chips fabricados pela SEC Electronics Inc e distribuído pela Addicore.com, apresentam uma sensibilidade de $(25 \pm 5)V/T$ [13]. Considerando a variação na sensibilidade desse sensor apresentada por diferentes fabricantes e as variações que podem ocorrer de sensor para sensor dentro do mesmo

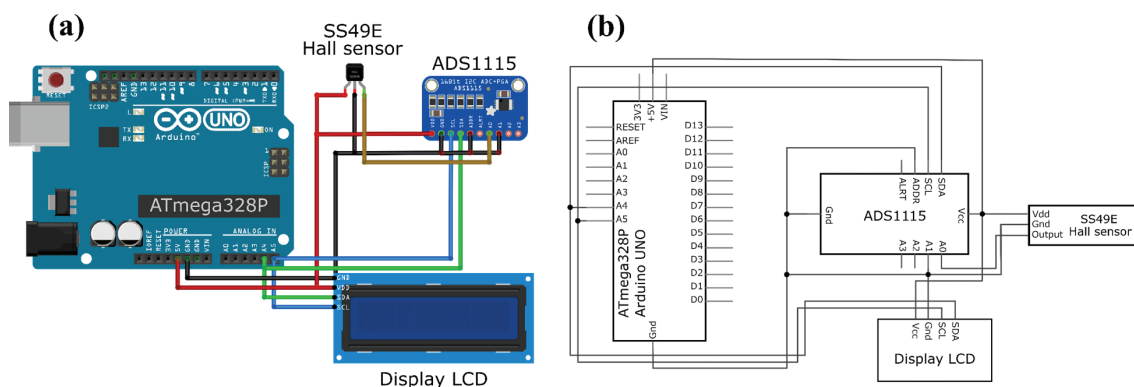


Figura 2: (a) Diagrama esquemático com os principais componentes. (b) Esquema elétrico do gaussímetro proposto.

fabricante, fez-se necessário efetuar uma calibração, afim de se obter o fator de conversão necessário para se transformar o valor de diferença de potencial (tensão Hall V_{hall}) medido pelo gaussímetro proposto em valores de intensidade de campo magnético B . A calibração do dispositivo proposto foi realizada em duas etapas; i) inicialmente levantando a correlação da tensão Hall medida pelo sensor e o valor do campo magnético aplicado; ii) em seguida foram verificados os limites de leitura de campo magnético.

Para a primeira etapa, mediu-se diversos valores de campo magnético, utilizando um eletroímã fabricado pela GMW, modelo: 5405 Dipole, e comparando os resultados com as medidas de um gaussímetro comercial da marca Lake Shore Cryotronics, afim de correlacionar os valores de V_{hall} medidos pelo dispositivo proposto com os valores do campo magnético medidos pelo gaussímetro comercial. Os sensores do dispositivo proposto e do gaussímetro comercial foram posicionados no centro do eletroímã. Variando-se a tensão aplicada sobre ele com uma fonte de tensão bipolar com potência de até 400 W, modelo Kepco Power BOP 20-20D-4886, de 0 a 0,2 V, com passo de 0,01 V, foi possível obter diferentes valores de campo magnético, para os quais mediu-se os valores de diferença de potencial V_{hall} gerados pelo gaussímetro proposto e os valores do campo B_I utilizando o gaussímetro comercial.

Para se obter a faixa de medida (*range*) possível para o equipamento proposto, bem como a taxa de captura de dados, fez-se um estudo utilizando um eletroímã alimentado por uma fonte de corrente controlada por um computador, o qual permite variar a amplitude das tensões aplicadas ao eletroímã e, conseqüentemente, variar a corrente e o campo magnético produzido por ele. Com isso, foi possível realizar uma varredura da tensão aplicada ao eletroímã e, com o dispositivo proposto já calibrado na etapa anterior, medir o campo magnético em seu centro. Fez-se, então, duas varreduras, uma de $-3,0$ a $3,0$ V e outra de $-6,0$ a $6,0$ V, com taxa de captura de dados de 8 pontos por segundo. Os valores de tensão utilizados para as varreduras foram escolhidos para se obter campos magnéticos no eletroímã em um intervalo que possibilitasse investigar toda a faixa possível de medida com o sensor utilizado no gaussímetro proposto. A análise gráfica dos dados permite obter a sensibilidade do sensor e conhecer a range do dispositivo proposto.

2.2. Estudo do efeito spin Seebeck e efeito spin Hall inverso

Como forma de aplicar o dispositivo em uma medida de interesse científico em laboratório, realizou-se um experimento para observar o efeito spin Seebeck (SSE). Para observar o SSE, aplicamos um gradiente térmico através da amostra utilizando um módulo Peltier. Uma amostra típica utilizada para observar o efeito spin

Seebeck é composta essencialmente por uma bicamada, sendo uma camada formada por um filme com propriedades magnéticas (responsável pela geração da corrente de spin J_S) e outra de um filme fino metálico (responsável pela conversão de J_S em uma corrente de carga J_C , através do spin Hall inverso – ISHE). O módulo Peltier permite gerar o gradiente térmico nos dois sentidos, possibilitando esquentar ou esfriar a amostra. Com isso, é possível manipular o sentido de J_S em função do sentido do gradiente térmico em um material ferromagnético. Um campo magnético uniforme B é necessário para orientação inicial dos spins dos elétrons da corrente de spin J_S que compõem o material estudado. Contatos elétricos são estabelecidos nas bordas da amostra através de finos fios de cobre, afixados utilizando-se tinta de prata de secagem rápida. Estes contatos são conectados a um nanovoltímetro modelo Keithley 2182A para medir a tensão ISHE. Para controlar o gradiente térmico no módulo Peltier, seus terminais foram ligados a uma fonte de alimentação DC modelo Minipa MPS-3035D. Por fim, o eletroímã foi conectado a fonte de tensão bipolar KEPCO.

2.3. Preparo da amostra

Para que seja possível identificar uma corrente de carga J_C convertida a partir de uma corrente de spin J_S , é necessário que os materiais sejam extremamente pequenos, pois, assim, conseguimos minimizar o número de colisões dos elétrons e, conseqüentemente, preservar sua orientação do spin. Portanto, as amostras precisam apresentar um elevado livre caminho médio, que é a distância entre sucessivas colisões dos elétrons. Por isso, para produzir a amostra nestas dimensões foi utilizada uma técnica conhecida como *sputtering*. Essa técnica é muito usada na fabricação de filmes nanoestruturados, já que o alvo do material desejado é bombardeado por íons de um gás inerte (geralmente argônio) capazes de remover átomos desse material e depositar átomo por átomo em um substrato formando as camadas nanométricas do filme fino. A amostra utilizada para estudar o SSE utilizando o gaussímetro proposto é composta por um filme fino (6 nm) de platina (Pt), depositada pela técnica de *sputtering* sobre uma granada de ferro e ítrio, $Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG), que é um material ferrimagnético isolante, fabricado pela técnica de epitaxia de fase líquida (LPE).

2.4. Sistema de medidas de SSE e ISHE

A imagem da Fig. 3 ilustra o sistema de medida para observar o efeito spin Seebeck realizado com o gaussímetro proposto. Nesta figura, a fonte de tensão KEPCO alimenta o eletroímã e a fonte Minipa alimenta o módulo Peltier, o qual gera o gradiente térmico na amostra. O nanovoltímetro para medida da tensão ISHE (V_{ISHE}) pelo efeito spin Seebeck, gerada pela conversão da corrente de spin J_S em corrente de carga

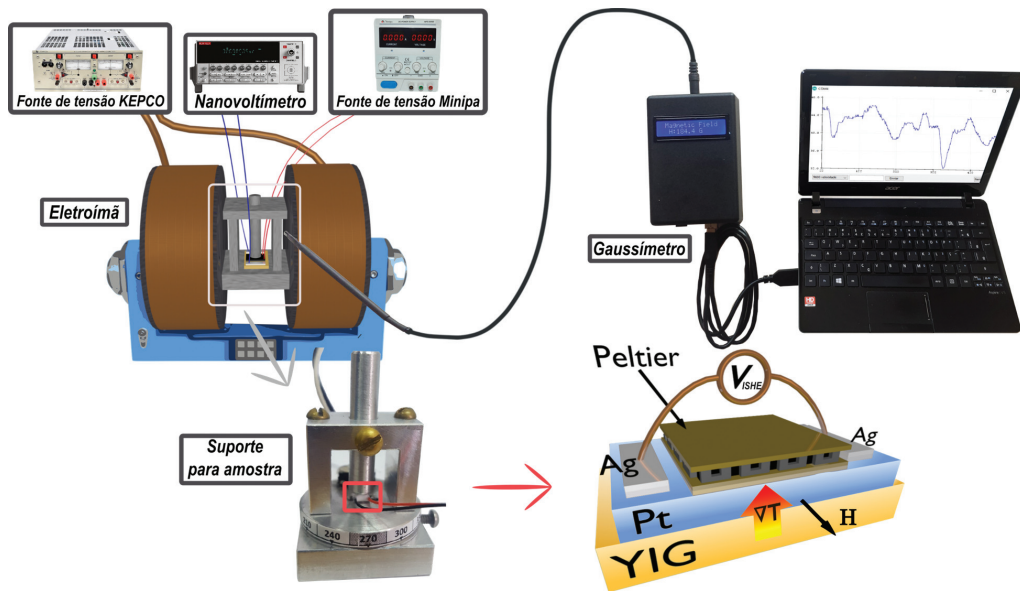


Figura 3: Esquema relacionado a montagem utilizada para observar a geração de correntes de spin via ISHE. O eletroímã é alimentado pela fonte de tensão. A amostra é fixada no suporte e os terminais eletrônicos são ligados no nanovoltímetro e o módulo Peltier em uma segunda fonte de tensão. O gaussímetro é conectado ao computador por onde pode-se salvar e analisar os dados em tempo real.

J_C , é conectado na amostra de YIG/Pt. A amostra é montada em um porta-amostra alocado entre os polos do eletroímã. A sonda Hall do gaussímetro proposto é posicionada entre os polos do eletroímã e o dispositivo é ligado a um computador para controle e aquisição de dados.

3. Resultados e Discussão

A imagem da Fig. 4 apresenta o dispositivo montado com suas partes desafixadas. A sonda pode ser removida do dispositivo e guardada separadamente, assim como o cabo de comunicação/alimentação, o que garante maior vida útil ao equipamento.

Para se chegar ao valor da tensão Hall V_{hall} e calibrar o dispositivo proposto, subtraiu-se dos valores de V_B o valor gerado pelo aparelho quando o campo magnético nas proximidades do sensor é nulo $V_{B=0} = 2,56$ V. Os valores de V_{hall} em função do campo magnético medido com o gaussímetro industrial B_I , da marca GlobalMag, modelo TMAG-v2, são apresentados no gráfico da Fig. 5. A partir de uma regressão linear dos dados, encontrou-se $\alpha = (20,4 \pm 0,1)V/T$ como o valor da constante de proporcionalidade (coeficiente angular) apresentado na equação (1).

A partir da correlação dos dados, chegou-se na equação (2) de calibração, a qual foi introduzida e utilizada pelo dispositivo proposto.

$$B_I(T) = [V_{hall}(V) + 0,04]/20,4. \quad (2)$$

Os gráficos da Fig. 6 representam as medidas do campo magnético realizadas pelo dispositivo proposto obtidas a partir de uma varredura de tensões aplicadas



Figura 4: Imagem do gaussímetro montado. (a) cabo USB, em (b) dispositivo montado e, em (c), sonda com sensor Hall na extremidade.

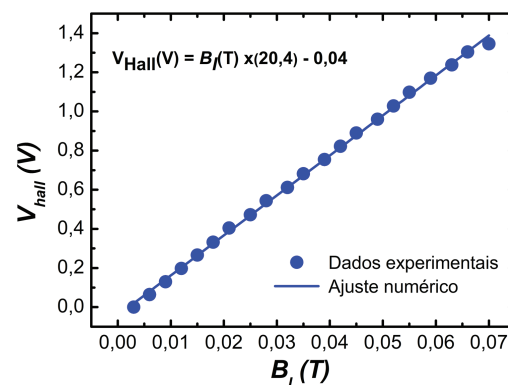


Figura 5: Curva de Calibração: valores da tensão Hall em volts medidos pelo gaussímetro proposto em função do campo magnético, em tesla, medido pelo gaussímetro industrial, para ambos os sensores situados no centro do eletroímã e para as mesmas tensões aplicadas a ele.

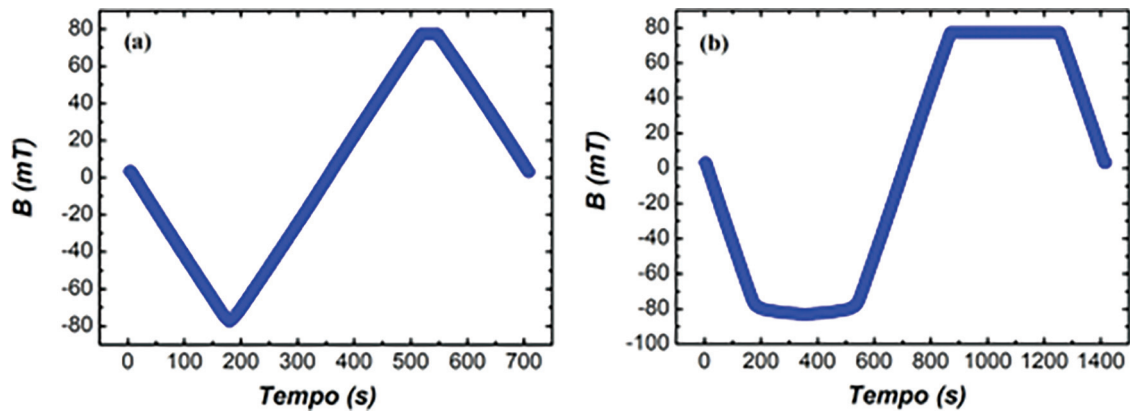


Figura 6: Campo magnético medido pelo gaussímetro proposto em função do tempo para uma tensão aplicada ao eletroímã da marca GMW, de (a) $-3,0$ a $3,0$ V e (b) $-6,0$ a $6,0$ V.

de (a) $-3,0$ a $3,0$ V e (b) $-6,0$ a $6,0$ V aplicadas no eletroímã, de modo a possibilitar um estudo sobre a sensibilidade e o intervalo de medidas de campo magnético possíveis utilizando o sensor proposto. As medidas foram realizadas para um ciclo completo entre valores positivos e negativos de tensões elétricas, os quais correspondem a valores de campo magnético máximo atingido de 80 mT (e/ou -80 mT), que correspondem as regiões saturadas no gráfico que, por sua vez, são os valores de saturação do sensor Hall. Foram realizadas medidas em intervalos de 125 ms com o ganho programado do ADS1115 em $1X$, que equivale a uma resolução de medidas de tensão de $0,125$ mV, as quais corresponderam a um intervalo médio de campo magnético $2,0$ mT, de acordo com a equação (2). Caso seja necessária uma maior resolução, pode-se experimentar programar ADS1115 para ganhos maiores (até $7,812 \mu\text{V}$) e, para campos que oscilam no tempo mais rapidamente, tais sensores são capazes de realizar leituras com ganho de tensão constante em frequências de até 35 KHz [12]. Desde modo, a sensibilidade do nosso equipamento é melhor ou equivalente aos valores verificados em modelos comerciais.

Com o dispositivo calibrado, iniciou-se os experimentos para a geração de correntes puras de spin por meio do efeito spin Seebeck. Foi verificado o intervalo do campo magnético obtido no eletroímã utilizando o equipamento proposto. Realizando uma varredura de $-20,0$ a $20,0$ V, foi possível obter os campos mostrados no gráfico da Fig. 7. Esta curva de calibração do campo é essencial, pois o controle do campo magnético B sobre a amostra é feito através da tensão aplicada ao eletroímã.

O estudo inicial do SSE foi realizado na amostra em bicamada de YIG ($5 \mu\text{m}$)/Pt (6 nm) como representado na Figura 8(a). A Fig. 8(b) mostra o comportamento de V_{ISHE} em função da variação do campo magnético aplicado ($V_{ISHE} \times B$) para diferentes valores fixos de gradiente térmico ΔT aplicado na amostra, em um intervalo de -6 K até 55 K. Desse modo, foi possível obter uma relação entre a corrente de carga convertida e a intensidade do campo magnético aplicado, para

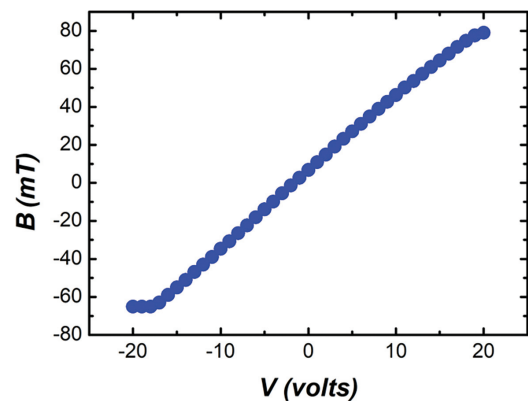


Figura 7: Calibração do eletroímã utilizado na montagem para estudo do efeito spin Seebeck: diferença de potencial aplicada (DDP) no eletroímã em função do campo magnético gerado para realização dos experimentos SSE.

diferentes ΔT . Logo, pode-se verificar que a orientação do campo magnético é um fator determinante no sentido da corrente de carga convertida, uma vez que a inversão do campo resultará em uma alteração da polarização dos spins dos elétrons da amostra.

Os pontos azuis no gráfico da Fig. 8(c) mostram o comportamento da tensão V_{ISHE} em função de cada gradiente térmico ΔT aplicado à amostra ($V_{ISHE} \times \Delta T$) para um campo magnético fixado em $B = 30$ mT, enquanto os pontos vermelhos são as medidas de $V_{ISHE} \times \Delta T$ para o campo magnético aplicado no sentido oposto. Com essa análise, foi possível observar que a corrente de carga J_C convertida varia proporcionalmente com o gradiente de temperatura [27] e, além disso, a inversão do sentido do gradiente térmico provoca uma reorientação no sentido da corrente de spin J_S , e conseqüentemente na corrente de carga J_C convertida, assim como para campos magnéticos com orientações opostas, como previsto na equação (3):

$$\vec{J}_C = \theta_{SH}(2e/\hbar)\vec{J}_S \times \hat{\sigma}, \quad (3)$$

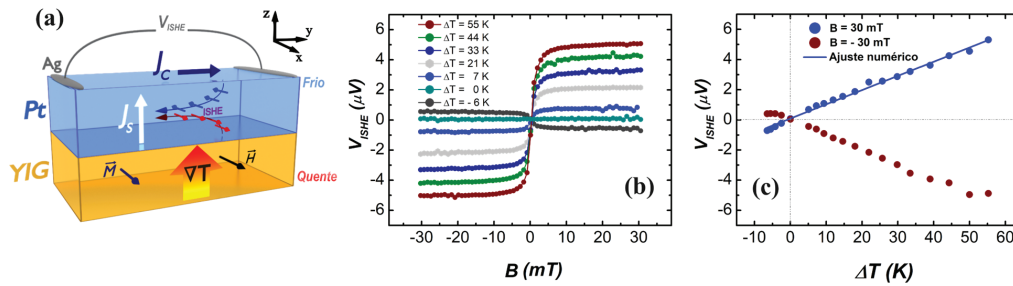


Figura 8: (a) Representação dos mecanismos de geração e detecção de corrente de spin em uma amostra típica formada pela interface de um filme de Pt crescido sobre YIG. A corrente de spin J_s é gerada ao longo da direção z pelo efeito spin Seebeck no filme de YIG. No filme de Pt ocorre a conversão da corrente de spin J_s em corrente de carga J_c ao longo do eixo y e devido ao efeito spin Hall inverso. (b) Variação da tensão ISHE em função do campo magnético para diferentes gradientes de temperatura. (c) Estudo da tensão ISHE em função para diferentes gradientes de temperatura para dois campos magnéticos aplicados, $B = 30$ mT e $B = -30$ mT. Com a inversão do campo magnético verifica-se uma mudança na orientação da tensão ISHE.

onde θ_{SH} é o ângulo spin Hall (que mede a eficiência de conversão de corrente de spin J_s em corrente de carga J_c), e é a carga do elétron, \hbar é a constante reduzida de Planck e $\hat{\sigma}$ é a direção de polarização dos spins dos elétrons devido ao campo magnético B aplicado.

Usando os dados obtidos das medições SSE para a bicamada YIG/Pt, podemos obter informações quantitativas relacionados as amostras e aos mecanismos investigados neste trabalho, com o auxílio do gaussímetro proposto. O valor de V_{ISHE} é obtido em termos de J_c , uma vez que $V_{ISHE} = RJ_c$. A corrente de carga J_c é dada em termos da corrente de spin J_s , de acordo com a equação (3). Por outro lado, a corrente de spin J_s é gerada no efeito spin Seebeck, dada por $J_s = -C_s \rho g_{eff}^{\uparrow\downarrow} \nabla T$, onde C_s é um coeficiente que depende dos parâmetros intrínsecos de YIG, temperatura e intensidade de campo aplicado, ρ é um fator que representa o efeito da espessura finita da camada YIG, g_{eff} é a condutância de mistura de spin, que está relacionado com a eficiência do transporte de spin na interface YIG/Pt, e $\nabla T = \Delta T / t_{amostra}$ é o gradiente térmico aplicado na amostra. Combinando estas equações e a equação (3), a tensão V_{ISHE} pode ser reescrita em termos de J_s como [27–29]:

$$V_{ISHE} = F_p R w (2e/\hbar) \lambda \theta_{SH} \tanh\left(\frac{t_{Pt}}{2\lambda}\right) J_s, \quad (4)$$

onde F_p um fator relativo à porção coberta da superfície da amostra pelo módulo Peltier, R e w são a resistência e a largura da amostra, respectivamente, λ o coeficiente de difusão de spin. Portanto, a partir do ajuste linear realizado nos resultados experimentais mostrados na Fig. 8(c), para o campo magnéticos de $B = 30$ mT, obtemos um coeficiente angular $\beta = (9,4 \pm 0,01) \times 10^{-8}$ V/K, que corresponde à razão $V_{ISHE}/\Delta T$. Combinando a equação de J_s descrita acima e a equação (4), obtemos:

$$\beta = \frac{V_{ISHE}}{\Delta T} = F_p R w (2e/\hbar) \lambda \theta_{SH} \tanh\left(\frac{t_{Pt}}{2\lambda}\right) \cdot \left(C_s \rho g_{eff}^{\uparrow\downarrow} \left(\frac{1}{t_{amostra}}\right)\right). \quad (5)$$

A partir da equação (5) foi possível estimar o valor de $\theta_{SH} = 0,04 \pm 0,01$ (ou 4%) para ângulo spin Hall, onde foram considerados os seguintes parâmetros: $F_p = 2/3$; $R = 204\Omega$; $w = 3,0$ mm; $e = 1,60 \times 10^{-19}$ C; $\hbar = 1,05 \times 10^{-34}$ J.s; $\lambda = 3,7$ nm; $t_{Pt} = 6$ nm; $C_s = 3,3 \times 10^{-33}$ J.m.K⁻¹; $\rho \approx 1$ para $t_{YIG} \gg \lambda$; $g_{eff} \approx 10^{17}$ m⁻² e $t_{amostra} = 0,5$ mm, que são valores obtidos em trabalhos anteriores [30–33]. O resultado obtido para θ_{SH} mostra que o ângulo de spin Hall encontrado para amostra de YIG/Pt estudada é compatível com valores relatados na literatura [34–38]. Isso confirma que o dispositivo proposto para medidas de campo magnético é eficaz para uso diverso e, em especial, auxiliando em experimentos de spintrônica, como o SSE. Portanto, podemos concluir que a montagem proposta utilizando o gaussímetro desenvolvido mostrou ser satisfatória e apropriada para estudos quantitativos, onde foi possível estudar o transporte de correntes de spin em uma bicamada YIG/Pt, bem como estudar diferentes fenômenos: (i) geração de corrente pura de spin por mecanismo térmico por meio do efeito de spin Seebeck; (ii) injeção de correntes de spin na interface YIG/Pt; (iii) e finalmente a conversão da corrente de spin em corrente de carga na camada de Pt por meio do efeito spin-Hall inverso.

4. Conclusão

O conhecimento acerca do comportamento magnético dos materiais é fundamental, tanto a nível de pesquisa básica quando no ensino de física. Nesse sentido, o gaussímetro é o instrumento essencial pois, com ele, várias propriedades de origem magnética em diferentes sistemas podem ser investigadas. Logo, a proposta de construção de um gaussímetro robusto e de baixo custo, munido de interface gráfica e sonda Hall, vem como uma forma de trabalhar a instrumentação científica em cursos de graduação, possibilitando alunos e professores desenvolverem seu próprio instrumento, bem como aplicar o dispositivo desenvolvido em um experimento de spintrônica envolvendo a geração de

correntes puras por meio do efeito spin Seebeck, possibilitando a investigação de fenômenos magnéticos de origem quântica. O equipamento foi capaz de realizar medições precisas, reproduzíveis e acuradas, sendo de fácil montagem e utilização, podendo ser empregado em medidas de campo magnético em diferentes sistemas e em aulas de laboratório de física experimental, sendo sua principal vantagem o baixo custo de produção. O custo total de todos os acessórios, incluindo o sensor Hall, caixa plástica, placa Arduino, cabos, conexões e demais componentes eletrônicos utilizados para confecção do medidor de campo foi de aproximadamente 22 dólares. O gaussímetro desenvolvido ainda pode ter a sua leitura feita diretamente no seu display, além de possuir uma interface USB que possibilita que o equipamento seja utilizado em montagens experimentais automatizadas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Professor Antonio Azevedo (UFPE) por ter gentilmente disponibilizado os filmes de YIG. O presente trabalho foi realizado com apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) – Rede de Pesquisa em Materiais 2D e Rede de Nanomagnetismo, do INCT de Spintrônica e Nanoestruturas Magnéticas Avançadas (INCT-SpinNanoMag), CNPq 406836/2022-1.

Material suplementar

O seguinte material suplementar está disponível online: Apêndice A – Programa LabVIEW utilizado para controle do medidor de campo magnético por meio da interface com computador.

Apêndice B – Programa para controle do Arduino.

Referências

- [1] H. Edwin, *American Journal of Mathematics* **92**, 287 (1879).
- [2] A.S. Nature **21**, 361 (1880).
- [3] B. Shelford, *Science* **60**, 3 (1884).
- [4] B. Shelford, *Royal Society Publishing* **352**, 224 (1883).
- [5] G.S. Leadstone, *Phys Educ* **14**, 374 (1979).
- [6] A. Karsenty, *Sensors* **20**, 4163 (2020).
- [7] D.J. Jackson, *Classical Electrodynamics* (Wiley, New York, 1999).
- [8] D.J. Griffiths, *Introduction to Electrodynamics* (Pearson, Boston, 2013).
- [9] D. Halliday, R. Resnick e J. Walker, *Fundamentos de Física – Gravitação, Ondas e Termodinâmica* (LTC, Rio de Janeiro, 2007), v. 3.
- [10] C.L. Chien e C.R. Westgate, *The Hall Effect and its Applications*, *Springer Science+Business Media* (LLC, New York, 1980).
- [11] H.A. Lorentz, *American Philosophical Society* **45**, 183 (1906).
- [12] DATASHEET SS49E, *Honeywell International Inc*, 2003, disponível em: <https://datasheet.octopart.com/SS49E-Honeywell-datasheet-8399479.pdf>, acessado em 05/02/2022.
- [13] DATASHEET SS49E, *SEC Electronics Inc*, 2013, disponível em: <https://www.addicore.com/SS49E-Linear-Hall-Sensor-p/ad316.htm>, acessado em 05/02/2022.
- [14] M.I. Dyakonov e V.I. Perel, *Phys. Lett* **35**, 459 (1971).
- [15] M.I. Dyakonov e V.I. Perel, *Phys. JETP Lett* **13**, 467 (1971).
- [16] J.E. Hirsch, *Phys. Rev. Lett* **83**, 1834 (1999).
- [17] S.M. Girvin, *Springer* **45**, 23 (1987).
- [18] B.A. Bernevig e S.C. Zhang, *Phys. Rev. Lett* **96**, 106802 (2006).
- [19] K. Uchida, S. Takahashi, K. Harii, J. Ieda, W. Koshibae, K. Ando, S. Maekawa e E. Saitoh, *Nature* **455**, 778 (2008).
- [20] O.A. Santos, *Spintrônica em Heteroestruturas Magnéticas: Conversão Recíproca de Corrente de Spin e Corrente de Carga*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife (2018).
- [21] E. Arribas, I. Escobar, R.R. Vazquez, C.P.S. Rodriguez, J.G. Rubio e A. Belendez, *The Physics Teacher* **58**, 182 (2020).
- [22] E. Arribas, I. Escobar, C.P. Suarez, A. Najera e A. Beléndez, *Eur. J. Phys* **36**, 065002 (2015).
- [23] E. Lüdke e C.A. Gomes, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **33**, 1503 (2011).
- [24] W.C. Magno, M. Andrade e A.E.P. Araújo, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **32**, 3403 (2011).
- [25] W.R.F. Silva e J.M. Fonseca, *Revista A Física na Escola* **19**, 52 (2021).
- [26] F. Marujo, G. Azzi e M. Buchner, *Notas Técnicas CBPF* **5**, 12 (2015).
- [27] S.M. Rezende, R.L. Rodríguez-Suárez, R.O. Cunha, A.R. Rodrigues, F.L.A. Machado, G.A.F. Guerra, J.C.L. Ortiz e A. Azevedo, *Phys. Rev. B* **89**, 014416 (2014).
- [28] J.B.S. Mendes, S.L.A. Mello, O. Alves Santos, R.O. Cunha, R.L. Rodríguez-Suárez, A. Azevedo e S.M. Rezende, *Phys. Rev. B* **95**, 214405 (2017).
- [29] J.B.S. Mendes, R.C.O. Guedes e R.O. Cunha, *J. Magn. Mater.* **543**, 168635 (2022).
- [30] W. Zhang, V. Vlaminck, J.E. Pearson, R. Divan, S.D. Bader e A. Hoffmann, *Appl. Phys. Lett.* **103**, 242414 (2013).
- [31] S.M. Rezende, A. Azevedo e R.L. Rodríguez-Suarez, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **51**, 174004 (2018).
- [32] M.B. Jungfleisch, A.V. Chumak, A. Kehlberger, V. Lauer, D.H. Kim, M.C. Onbasli, C.A. Ross, M. Kläui e B. Hillebrands, *Phys. Rev. B* **91**, 134407 (2015).

- [33] J.B.S. Mendes, M. Gamino, R.O. Cunha, J.E. Abrão, S.M. Rezende e A. Azevedo, *Phys. Rev. Materials* **5**, 024206 (2021).
- [34] A. Hoffmann, *IEEE transactions on magnetics* **49**, 5172 (2013).
- [35] J.B.S. Mendes, R.O. Cunha, O. Alves Santos, P.R.T. Ribeiro, F.L.A. Machado, R.L. Rodríguez-Suárez, A. Azevedo e S.M. Rezende, *Phys. Rev. B* **89**, 140406(R) (2014).
- [36] H.L. Wang, C.H. Du, Y. Pu, R. Adur, P.C. Hammel e F.Y. Yang, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 197201 (2014).
- [37] O. Alves-Santos, E.F. Silva, M. Gamino, R.O. Cunha, J.B.S. Mendes, R.L. Rodríguez-Suárez, S.M. Rezende e A. Azevedo, *Phys. Rev. B* **96**, 060408(R) (2017).
- [38] J. Holanda, O.A. Santos, J.B.S. Mendes e S.M. Rezende, *J. Phys.: Condens. Matter* **33**, 435803 (2021).