



令和3年10月4日

東北大学金属材料研究所
科学技術振興機構(JST)

単一強磁性体素子で3次元磁場検出を実現 3次元磁気センサの小型化に向けた新たな設計指針を提示

【発表のポイント】

- 強磁性体 Fe-Sn ナノ結晶の薄膜は、外部磁場に依存して巨大な異常ホール効果^{*1}と磁気抵抗効果^{*2}を示すことから、磁気センサの基盤材料として有望です。
- 異常ホール効果、一方向性磁気抵抗効果^{*3}及び異方性磁気抵抗効果^{*3}を組み合わせることで、平面型単一素子による3次元磁場ベクトルの検出を実証しました。
- 磁気センサの小型化に向けた素子開発への新たな設計指針となります。

【概要】

磁場ベクトルの大きさと方向を同時に検出する3次元磁気センサは、移動体の位置・速度・角度の検出を可能とします。スマート社会における自動化やロボットの社会実装の進展に伴い、磁気センサの小型化の重要性がますます高まっています。

従来よく用いられる3次元の磁気センサは、3方向の磁場ベクトルを検出するために3つの磁気センサを各方向に配置しており、この構成では小型化や低消費電力化に対する制約がありました。

東北大学金属材料研究所の塩貝純一助教、藤原宏平准教授、野島勉准教授、塚崎敦教授らの研究グループは、強磁性体 Fe-Sn ナノ結晶薄膜素子を用いて、平面型単一素子による3次元磁場ベクトルの検出を実証しました。

この成果は、3次元磁気センサの小型化の実現だけでなく、強磁性体を使った新たな機能性センシング素子の開発に貢献するものと期待されます。

本研究成果は、2021年10月4日(英国時間)に英国科学誌「Communications Materials」オンライン版に掲載されます。

【詳細な説明】

○研究背景

磁場の大きさと方向を電気的な信号に変換する磁気センサは、磁気メモリの読み出し、電子コンパス、自動操縦のための移動体の位置・速度検出など、様々な工学用途に応用されています。IoT(モノのインターネット)を代表とするスマート社会の構築のためには、このようなセンサを集積化する技術が重要となっています。特に、磁場の大きさと方向を同時に検出できる 3 次元磁気センサの小型化は、家電製品の自動化やロボットの社会実装に向けて必須の技術となっています。本研究グループでは、Fe と Sn からなる強磁性ナノ結晶薄膜における巨大な異常ホール効果を観測し[1]、これまで本物質薄膜を用いた磁場センシングに関する研究を先導してきました[2,3]。

従来の半導体ホール素子^{*1} や磁気抵抗効果素子^{*2} は、特定の方向の磁場に対して優れた特性を示すという特徴があります。そのため、3 次元空間の磁場に応答する 3 次元磁気センサは、各方向に対して複数の素子を立体的に配置して構成されています。一方で、この構成では検出位置の正確性や小型化に対する制約がありました。

[1] Y. Satake *et al.*, *Sci. Rep.* **9**, 3282 (2019).

[2] J. Shiogai *et al.*, *Appl. Phys. Express* **12**, 123001 (2019).

[3] J. Shiogai *et al.*, *Extended Abstracts of the 2021 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2021)*, I-5-06, pp. 510-511, Sep. 2021 (Virtual conference).

○成果の内容

本研究グループは、サファイア単結晶基板上にスパッタリング法(真空中でプラズマを用いて薄膜を作製する技術)を用いて堆積した Fe-Sn ナノ結晶と SiO_x キャップ層^{*4}の薄膜積層構造[図 1(a)]を幅 10 μm のホールバー形状[図 1(b)]に加工し、磁場中の電気抵抗特性を評価しました。

磁場ベクトルを 3 次元的に検出するためには、その大きさ、天頂角、及び方位角をそれぞれ独立に決定する必要があります[図 1(c)]。Fe-Sn ホールバー素子において、ホール抵抗が磁場の z 軸成分(試料に対して面直方向)に比例する出力を示すことから、磁場の天頂角を一意に検出することが可能であることを示しました[図 2(a)]。さらに、本素子の縦抵抗が、磁場の方位角に対して 360 度対称の一方向性磁気抵抗効果を示すことを発見しました[図 2(b)]。また、強磁性金属の磁気抵抗効果の一つである 180 度対称の異方性磁気抵抗効果と組み合わせることで[図 2(c)]、方位角を一意に決定できることを実証しました。

磁場の大きさは縦抵抗の磁気抵抗効果の大きさから求めることができるため、本素子のホール抵抗と縦抵抗を同時に測定することによって、平面型単一素子を用いて 3 次元磁場ベクトルを一意に決定できることを明らかにしました。

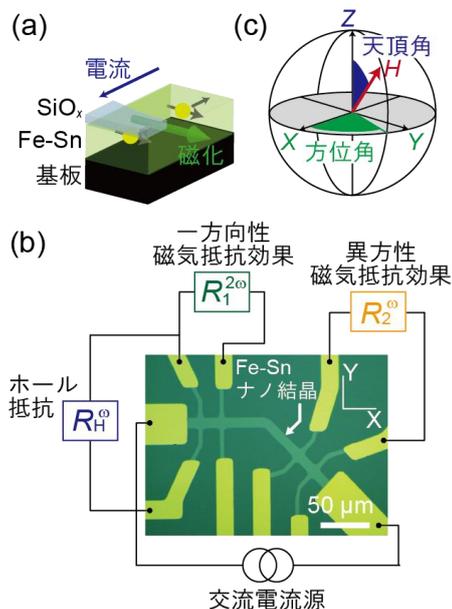


図 1: (a)本研究で使用した Fe-Sn 薄膜積層構造の断面図、(b)素子構造と電気抵抗測定の配置図。(c)磁場ベクトルの模式図。

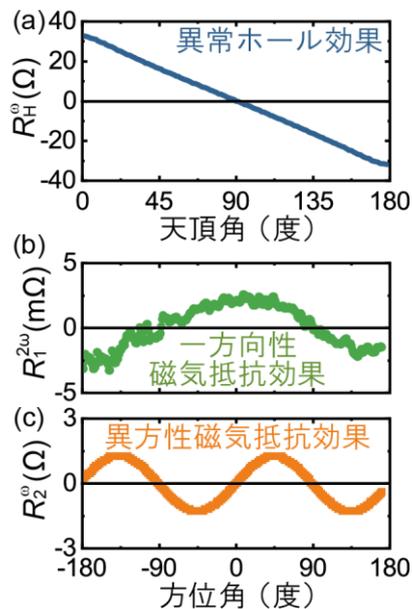


図 2: (a)異常ホール効果の天頂角依存性、(b)一方向性磁気抵抗効果及び(c)異方性磁気抵抗効果の方位角依存性。

○意義・課題・展望

強磁性体の積層構造を用いて、従来の代表的な磁気センサである半導体ホール素子や磁気抵抗効果素子の動作原理とは異なる機構を用いることで、単一素子による 3 次元磁場ベクトル検出を実現しました。これにより、複数の素子を立体的に配置した従来素子と比較して、より集積化に有利な平面型の 3 次元磁気センサが可能となります。本成果は、磁気センサの集積化の新たな設計指針を提示するとともに、今後同様の動作原理を活用した素子の開発やセンサ材料の開発が加速すると期待されます。

○発表論文

雑誌名: Communications Materials

英文タイトル: Three-dimensional sensing of the magnetic-field vector by a compact planar-type Hall device

全著者: Junichi Shiogai, Kohei Fujiwara, Tsutomu Nojima, and Atsushi Tsukazaki

DOI: 10.1038/s43246-021-00206-2

○専門用語解説

※1 異常ホール効果・半導体ホール素子

電気が流れる試料(電気伝導体)の x 方向に電流を流した状態で、 z 方向に磁場を印加すると、ローレンツ力により電子の運動方向が曲げられ、 y 方向に起電力(ホール電圧)が生じる現象を正常ホール効果と呼ぶ。半導体では、この正常ホール効果が比較的大きいことから、本効果を用いた半導体ホール素子が磁気センサとして広く用いられている。磁性体では、これに磁化の寄与が加わり、異常ホール効果と呼ばれる。磁化の z 成分に比例するホール電圧が生じる。Fe-Sn ナノ結晶は、半導体の正常ホール効果に匹敵する大きな異常ホール効果を示すため、磁気センサの材料として有望である。

※2 磁気抵抗効果・磁気抵抗効果素子

外部磁場の大きさや角度によって電気伝導体の縦抵抗が変化する現象。磁性体の積層構造では、磁化方向が外部磁場に応答して反転する際に、大きな磁気抵抗効果(巨大磁気抵抗効果)を示すことが知られている。このような磁気抵抗効果を利用して磁場の大きさや角度を検出する磁気センサを磁気抵抗効果素子と呼ぶ。

※3 一方向性磁気抵抗効果・異方性磁気抵抗効果

一方向性磁気抵抗効果は、電気伝導体の x 方向に電流を流した状態で、磁場方向あるいは磁化方向の方位角に対し、縦抵抗が 360 度周期の依存性を示す磁気抵抗効果。一方、異方性磁気抵抗効果は、縦抵抗が 180 度周期の依存性を示す。このため、異方性磁気抵抗効果のみでは方位角を一意に決定することが困難である。

※4 SiO_x キャップ層

Fe-Sn ナノ結晶薄膜の堆積後、大気中での Fe-Sn 層の劣化を防ぐために設けられた酸化ケイ素(SiO_x)層のこと。SiO_x 層は絶縁体で電気を流さず、大気中で高い安定性を持つ。したがって試料の積層構造は、Al₂O₃(サファイア)基板/Fe-Sn 層/SiO_x キャップ層の三層構造となっている。

○共同研究機関および助成

本研究は、JST CREST「トポロジカル機能界面の創出」(研究代表者:塚崎 敦、課題番号:JPMJCR18T2)、東北大学金属材料研究所附属新素材共同研究開発センター(課題番号:19G0410)からの支援を受けて実施されました。

本件に関するお問い合わせ先

◆研究内容に関して

東北大学金属材料研究所

低温物理学研究部門

助教 塩貝純一

TEL:022-215-2089 Email:junichi.shiogai[at]tohoku.ac.jp

教授 塚崎敦

TEL:022-215-2085 Email:tsukazaki[at]tohoku.ac.jp

◆JST 事業に関して

科学技術振興機構 戦略研究推進部

グリーンイノベーショングループ

嶋林ゆう子

TEL:03-3512-3531 FAX:03-3222-2066

Email:crest[at]jst.go.jp

◆報道に関して

東北大学金属材料研究所 情報企画室広報班

TEL:022-215-2144 FAX:022-215-2482

Email:imr-press[at]imr.tohoku.ac.jp

科学技術振興機構 広報課

TEL:03-5214-8404 FAX:03-5214-8432

Email:jstkoho[at]jst.go.jp