様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科研費 KAKENHI

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　　元 年　　６ 月 ２５ 日現在

機関番号：５６４０１

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2015～2018

課題番号：１５Ｋ０４６５６

研究課題名（和文）磁性半導体スピントロニクスデバイスに用いる電気的磁気計測技術の開発

研究課題名（英文）Development of electrical probing of magnetic properties for magnetic semiconductor spintronics

研究代表者

赤崎　達志（AKAZAKI, Tatsushi）

高知工業高等専門学校・ソーシャルデザイン工学科・教授

研究者番号：１０３９３７７９

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　3,900,000円

研究成果の概要（和文）：接合型スピン偏極アンドレーエフ反射分光（J-SPARS）に用いる，1μm以下の微小構造を有するInMnAs磁性半導体を作製し，異常ホール効果により磁気特性の評価を行った。キュリー温度は，~ 60 Kであり，20 μm サイズの実験結果とほぼ同等であった。また，磁化容易軸が面直である点も一致した。飽和磁化に相当する異常ホール効果成分は，　サイズの減少に伴い，増大していくが，600 nm以上では25 K以下で飽和傾向が見られている。保磁力もサイズを小さくすることで増大することがわかった。飽和磁化，保磁力が増大する傾向が観測され，サイズ効果が現れていると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義
本研究で提案したJ-SPARSは，高度に発達した半導体微細加工技術を適用することで磁性半導体を加工し，最小で数十nm角の接合面積を有する超伝導体／磁性半導体接合を作製することで可能となる。このような微小な接合面積を正確に制御して，J-SPARSを行う試みは斬新であり，先例のないものであった。まず，J-SPARSに用いる，1μm以下の微小構造を有するInMnAs磁性半導体を作製し，異常ホール効果により磁気特性の評価を行った。その結果，微細加工を行った100nmサイズの微小InMnAs磁性半導体でも良好な磁気特性を有することが明らかになった。このことは，超伝導体／微小磁性半導体接合作製の礎となる。

研究成果の概要（英文）：We investigate to estimate the spin polarization of InMnAs semiconductors by using the junction-type spin-polarized Andreev reflection spectroscopy (J-SPARS).
In this study, we focus on the magnetic properties of InMnAs magnetic semiconductors with microstructures under 1 μm. The magnetic properties are evaluated by anomalous Hall effect measurements. We found out that all of the InMnAs magnetic semiconductors with microstructures have the Curie temperature of about 60 K and the perpendicular magnetic easy axis. In addition, the coercive force and the saturated magnetization are enhanced by reducing the channel width. Under 600 nm size, however, the enhancement of the saturated magnetization is saturated below about 25 K.

研究分野：総合理工

キーワード：スピントロニクス　超伝導接合

様　式　Ｃ－１９，Ｆ－１９－１，Ｚ－１９，ＣＫ－１９（共通）

１．研究開始当初の背景

磁性半導体は次世代のスピントロニクス材料として注目されている。従来のエレクトロニクスの基幹デバイスである半導体デバイスは，電界制御によりスイッチング動作を実行している。一方，現在のスピントロニクスで使用されている金属磁性体を用いた磁気メモリデバイスは，外部磁場を印加することにより磁化を反転することでスイッチングさせており，従来のエレクトロニクスとの融合を考えると，半導体デバイスと同様に電界で制御できることは大きなメリットとなる。強磁性半導体は，電界制御により強磁性-常磁性状態間のスイッチングが可能であることが示されており，金属磁性体に替わるスピントロニクス材料として大いに期待されている。また，磁性半導体スピントロニクスデバイスでは，従来の半導体微細加工技術をそのまま利用することが可能で，従来の半導体デバイスと融合させたハイブリッドシステムの形成が容易となる。次世代のスピントロニクスの発展のために必要となる磁性半導体に対して，スピン偏極度のような基本的な磁気特性を評価することは必要不可欠である。特に，磁性半導体スピントロニクスデバイスで用いられる数十～百 nm サイズの磁性半導体微細構造中の磁気特性を正確に評価する手法を開発することが重要となる。

２．研究の目的

本研究ではまず，微細加工された磁性半導体の磁気特性の評価手法として，接合型スピン偏極アンドレーエフ反射分光（J-SPARS）を提案・実証することを目的とした。本手法により，応力・磁場・電場による磁気特性の変化が測定可能となり，磁気特性制御に関する指導原理を獲得することができる。さらに，本手法を磁壁移動の時間分解測定に適用すれば，磁気ダイナミクスの直接観察を行うことができる。これらを通して，半導体微細加工技術により形成した微細磁性半導体の基本的な磁気物性に関する知見を得ることとスピンの動的な振る舞いを電気的手法で簡便かつ正確に観測する技術を確立することを目的とした。

３．研究の方法

本研究では，半導体で確立されている微細加工技術を用いて磁性半導体($In_{1-x}Mn_xAs$, $Ga_{1-x}Mn_xAs$ 等)を最小で数十 nm サイズに微細加工し，その構造上に超伝導体を形成することで，接合面積を正確に制御した超伝導体／磁性半導体接合を作製する。その接合のアンドレーエフ反射特性からスピン偏極度を評価する J-SPARS を確立する。次に，磁性半導体のスピン偏極度や容易磁化軸方向などの磁気特性が，膜厚や形状の異方性，層構造の相違によってどのような影響を受けるかを J-SPARS を用いて調べ，将来の磁性半導体スピントロニクスデバイスに用いるための構造最適化や電気的手法で簡便かつ正確にスピンの動的な振る舞いを観測する技術の開発に取り組む。

４．研究成果

J-SPARS に用いる磁性半導体は，最小で数十 nm サイズに微細加工する必要があり，まずこの微小構造に加工した磁性半導体の磁気特性を正確に評価しておくことが重要となる。本研究では，1μm 以下の微小構造を有する InMnAs 磁性半導体を作製し，異常ホール効果(Anomalous Hall Effect:AHE)により磁気特性の評価を行った。

用いた InMnAs 磁性半導体薄膜は，分子線エピタキシ法により作製した。GaAs 基板上に GaSb バッファ層を成長後，InMnAs 層を形成している。今回の実験では，Mn 濃度 12 [%]，InMnAs 層 10 [nm]の薄膜を微細加工技術を用いて，図 1 に示す構造に加工した。本研究では，Channel width (CW) 100 ~ 2000 [nm]， Probe distance (PD) 300 ~ 6000 [nm]，Probe width (PW) 100 ~ 400 [nm]を用いた。

本研究では，微小信号を測定するため，ロックインアンプ測定法を用いた。印加する磁場の強さは，±5000 [Oe]の範囲として，ホール抵抗の温度依存性 (2 ~ 70 K)，印加磁場角度依存性(α = 0 ~ 90°)の測定を行った。

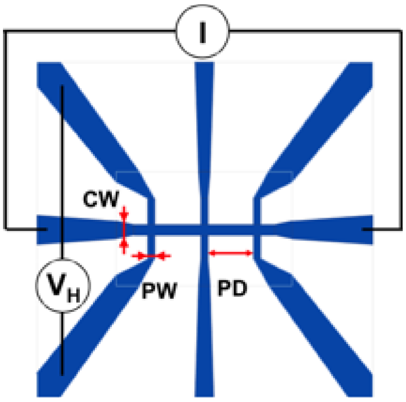

図１　測定試料構造

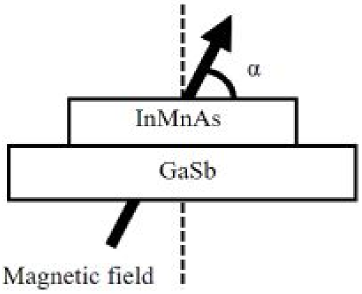

図２　試料と磁場印加角度の関係

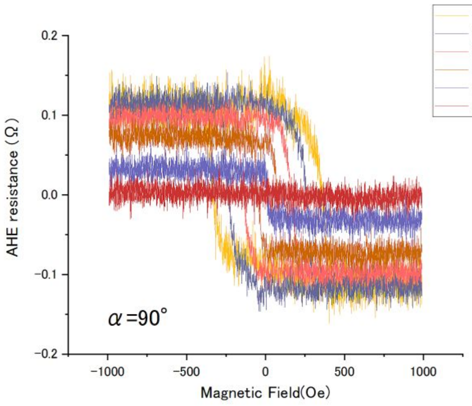

図３　異常ホール効果−印加磁場特性の**温度依存性**（1μm，α=90°（面直））

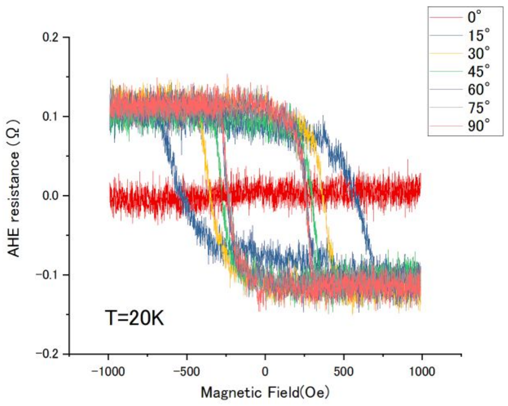

図４　**異常ホール**効果−印加磁場特性の**印加磁場角度依存性**（1μm，α=90°（面直）～0°（面内））

図 3 に，CW = 1000 [nm]，PD = 3000 [nm]，PW = 400 [nm]の異常ホール効果成分の磁場特性の温度依存性（α = 90°）を示す。異常ホール効果成分は，測定データからオフセット成分を取り除いた後，印加磁場に比例する線型成分と分離した。60K 以下で異常ホール効果成分が観測され始め，温度低下に伴い，保磁力の増大と急峻な磁化反転が観測された。一方，飽和磁化に相当する異常ホール効果成分の増大は，30K 以下で鈍化している。同様に CW が 100 nm の微小構造を持つ InMnAs 磁性半導体においても，明瞭な異常ホール効果成分が観測された。キュリー温度は，~ 60 K であり，通常の 20 μm サイズの実験結果とほぼ同等であった。また，異常ホール効果成分は，CW の減少に伴い，増大していく。また，温度の減少とともに増大する傾向を示しているが，CW が 600 nm 以上では 25 K 以下で飽和傾向が見られている。キュリー温度は，60K とほぼ同等であり，一方，保磁力はサイズを小さくすることで増大することがわかった。飽和磁化，保磁力が増大する傾向が観測され，サイズ効果が現れていると考えられる。図 4 に，図 3 に用いたのと同じ試料の異常ホール効果成分の磁場特性の印加磁場角度依存性（α = 90 °（面直）~ 0 °（面内））を示す。α = 90 ° の時が，最も急峻な磁化反転を示し，磁化容易軸が面直であると考えられる。この点は，通常の 20 μm サイズの実験結果とほぼ同等であった。一方，α = 0 ° の時つまり面内方向の外部磁場印加では，異常ホール成分は観測されず，磁化反転は面直成分を含まず面内方向のみで起こっていることがわかる。通常の 20 μm サイズの実験結果では，面内方向の外部磁場印加で，異常ホール成分が観測されており，磁化反転が面直成分も含んでいた。この点は，サイズによって異なる傾向を示した。
また，並行して，InMnAs 磁性半導体を最小で 100 nm サイズに微細加工し，その構造上に超伝導体を形成することで，接合面積を正確に制御した超伝導体／磁性半導体接合を作製し，その接合のアンドレーエフ反射特性からスピン偏極度を評価する予定であったが，作製を担当していただく連携研究者（入江氏）の研究環境の変化により，H30 年度中に作製に至らなかった。このため，この課題には取り組むことが出来なかった。

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計０件）

〔学会発表〕（計４件）

① 森口拓弥，岩本康孝，西沢望，宗片比呂夫，赤崎達志，微小構造を有する InMnAs 磁性半導体の磁気特性評価，平成 29 年度 電気関係学会四国支部連合大会（愛媛大，松山市），11-12，2017 年 9 月 23 日

② 岩本康孝，森口拓弥，坂口京介，阪本麻亜子，真鍋啓幸，西沢望，宗片比呂夫，赤崎達志，InMnAs 磁性半導体薄膜の異常ホール効果 (III)，平成 29 年度 電気関係学会四国支部連合大会（愛媛大，松山市），11-11，2017 年 9 月 23 日

③ 國吉龍太朗，桑名崇矢，赤崎達志，半導体基板上への MgB_2 超伝導薄膜の成長とその物性評価，平成 27 年度 電気関係学会四国支部連合大会（高知工科大，香美市），11-8，2015 年 9 月 26 日

④ 坂口京介，岡部亜人夢，敷地辰也，西沢望，宗片比呂夫，赤崎達志，InMnAs 磁性半導体薄膜の異常ホール効果(II)，平成 27 年度 電気関係学会四国支部連合大会（高知工科大，香美市），11-7，2015 年 9 月 26 日

〔図書〕（計０件）

〔産業財産権〕
○出願状況（計０件）

○取得状況（計０件）

〔その他〕
ホームページ等

６．研究組織

(1)研究分担者

(2)研究協力者

(3)連携研究者
連携研究者氏名：入江　宏
ローマ字氏名： (IRIE, hiroshi)

連携研究者氏名：宗片　比呂夫
ローマ字氏名： (MUNEKATA, hiroo)

※科研費による研究は，研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため，研究の実施や研究成果の公表等については，国の要請等に基づくものではなく，その研究成果に関する見解や責任は，研究者個人に帰属されます。