

令和 5 年 5 月 24 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K14520

研究課題名（和文）ワイル磁性体の元素置換エンジニアリングで創出する次世代ホールセンサ

研究課題名（英文）Element-substitution engineering of Weyl magnets for next-generation Hall sensor

研究代表者

中野 貴文（Nakano, Takafumi）

東北大学・工学研究科・助教

研究者番号：90839185

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、巨大な異常ホール効果を有するワイル磁性体を利用し、超高感度・超高精度なホールセンサを創出することを自指した。現在は基礎研究の対象に留まるワイル磁性体の候補材料を複数選び、それらの単結晶薄膜の作製条件を探索した。将来的には、これらの薄膜の元素置換によってその電子構造・磁気構造を自在に設計することで、超高感度・超高精度なホールセンサを実現し、超スマート社会を支えるセンシング技術の発展に貢献することが期待できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、基礎研究の対象であるワイル磁性体の候補材料を実験的に作製し、実用的な磁性材料に利用することを試みた。デバイス応用に向けたワイル磁性体の設計指針を確立する一助となり、同分野における新たな材料開発の研究トレンドを形成することが期待できる。また本研究では、これまでにない設計自由度を備えた超高感度・超高精度なホールセンサを提案した。将来的には、大きな成長が見込まれる世界の磁気センサ市場を席捲し、あらゆる領域で省エネ化・スマート化に貢献する技術となることが期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we employed a Weyl magnetic material to realize a highly-sensitive and highly-precise Hall sensor. We selected a few materials from the predicted candidates of Weyl magnets, which have attracted attention from the viewpoint of basic science yet, and investigated deposition processes for their epitaxial growth. We expect early demonstration of this concept by a high-quality thin-film growth technique and proper elemental substitution to design its electronic and magnetic structure, leading to development of sensing technologies for the smart society.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：薄膜作製 ホイスラー合金 異常ホール効果

1. 研究開始当初の背景

超スマート社会の実現に向けて、携帯機器・自動車・インフラ・保健医療などのあらゆる分野において、超高感度・超高精度な磁気センサが求められている。ホールセンサは、小型・低コスト・高信頼性などの利点から現在最も普及している磁気センサであり、半導体薄膜において発現する正常ホール効果を利用する。その中で最高の感度を持つのは、化合物半導体 InSb を用いたホールセンサであり、 $\pm 50 \text{ mT}$ に及ぶダイナミックレンジにおいて、 1 mV/mT/V を超える感度を示す。しかしながら、その感度は物質固有の値である電子移動度によって決まるため、向上の余地が残されていない。また、InSb はバンドギャップが極めて狭いため、出力電圧の線形性誤差 ($>1\% \text{FS}$) が大きく、高精度な測定には向かない。超高感度・超高精度なホールセンサの創出には、新しい概念に基づいた材料開発によるブレークスルーが不可欠である。

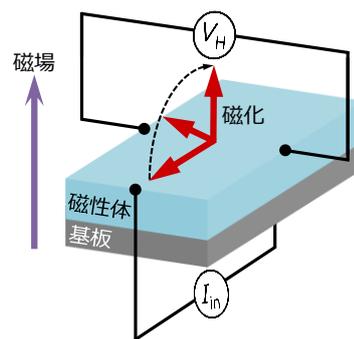


図 1. 異常ホール効果を利用したホールセンサの概念図。

本研究では、上述の現状を打破するべく、磁性体薄膜において発現する異常ホール効果に着目した。異常ホール効果とは、磁性体薄膜に電流を印加すると、その磁化の面直成分に比例したホール電圧が生じる現象である (図 1)。磁場がない状態では面内方向を向いている磁化が、磁場が大きくなるにつれて徐々に面直方向を向いていくため、磁場に応じた出力を示し、磁気センサとして利用可能である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、巨大な異常ホール効果を示すワイル磁性体を利用して、超高感度・超高精度なホールセンサを創出することである。ワイル磁性体は、伝導帯と価電子帯が交差している特異な電子構造を持ち (図 2)、その交差点 (ワイル点) が 100 T 以上に相当する仮想的な磁場を生ずる。フェルミ準位がワイル点の近くに位置するワイル磁性体では、この仮想磁場が伝導電子に作用するため、巨大な異常ホール効果が得られる。加えて、その出力特性は磁性体の磁気特性によって決まることが予測できる：(1) 出力電圧の線形性誤差は、磁性体が高次の磁気異方性を持つとき、その磁化回転が非線形になるために生じる。(2) ダイナミックレンジは、磁化が完全に磁場方向を向くときの飽和磁場に相当する。(3) 飽和磁場を測定した

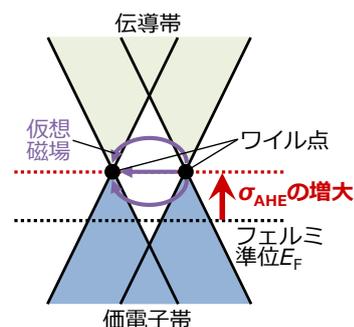


図 2. ワイル磁性体の電子構造。

い磁場範囲に合わせることで、同範囲における感度を最大化できる。感度を定めるもう 1 つの要素は出力電圧の大きさであり、これは磁性材料の異常ホール伝導率 σ_{AHE} に比例する。すなわち、大きな異常ホール伝導率を有するワイル磁性体を利用し、その磁気特性を自在に制御できれば、超高感度・超高精度なホールセンサの創出が可能となる。

3. 研究の方法

本研究では、Ti 系ホイスラー合金 Ti_2MnAl 薄膜および Mn 系ホイスラー合金 Mn_2TiAl 薄膜の開発に取り組んだ。これらの合金は、理論計算からワイル磁性体の候補材料とされている物質群である。これらの候補物質について、単結晶 $\text{MgO}(001)$ 基板および単結晶 $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}(001)$ 基板 (以下、GGG 基板) を用いて、スパッタ法によってその薄膜を作製した。成膜には、 10^{-8} Pa 台の超高真空が得られる 5 元 DC マグネトロンスパッタ装置を用いた。各単結晶基板をスパッタ装置内へ導入した後に、基板ステージの加熱によるクリーニングをおこなった。ホイスラー合金薄膜の成膜中あるいは成膜後に、その結晶構造の規則化を促すために、 $300\sim 700^\circ\text{C}$ で基板ステージを加熱した。スパッタ条件 (投入電力およびプロセスガス圧力) と基板加熱温度を最適化することで、平坦で原子規則度の高い単結晶薄膜の作製を狙った。作製した薄膜の表面保護層として、 3 nm の Al 層を室温で成膜した。作製した薄膜の組成は、誘導結合プラズマ質量分析法によって同定した。結晶構造および表面平坦性の解析には、Cu K α 線を用いた X 線回折法装置 (XRD) および原子力顕微鏡 (AFM) を用いた。磁気特性の評価には、試料振動型磁力計を用いた。上記の測定は、すべて室温でおこなった。

4. 研究成果

Ti_2MnAl については、格子整合性の観点から、その基板として単結晶 GGG を選択した。はじめに、GGG 基板の平坦性を確保するために、その加熱条件の最適化をおこなった。大気圧の熱処理炉に 2 枚重ねた基板を導入し、 900°C で熱処理をおこなうことで、明瞭なステップ・テラス構造を有する原子層レベルで平坦な表面 (平均表面粗さ 0.1 nm 程度) を得ることに成功した (図

3). つづいて、その GGG 基板に、Ti 系ホイスラー合金のバッファ層として利用する、 Mg_2Ge 薄膜を作製した。 Mg_2Ge の(001)面が Ti_2MnAl と良い格子整合性を示すと予想し、この方位へのエピタキシャル成長の実現を試みた。基板加熱条件を系統的に変えて成膜をおこなったが、これまでのところ、すべての条件で非晶質薄膜になっていることを確認した。一方で MgO 基板にも、 Mg_2Ge 薄膜を作製した。基板加熱条件を系統的に変えて成膜をおこなったところ、図 5 に示すとおり、室温成膜では非晶質であったが、 $300^\circ C$ では(111)面に配向した Mg_2Ge 薄膜が得られた。 $400^\circ C$ では、(220)面由来のピーク、および Ge 単体のピークが重畳し、 $500^\circ C$ 以上では Ge 単体のみのピークが現れた。基板加熱温度を $300^\circ C$ に固定し、投入電力およびプロセスガス圧力を系統的に変えて成膜をおこなったが、(111)面に配向した Mg_2Ge 薄膜のみが得られた。したがって、(001)面に配向した Mg_2Ge 薄膜を得るには、引き続き成膜条件の最適化が必要である。標準的な成膜条件で作製した Ti_2MnAl および Mg_2Ge 薄膜の組成分析の結果から、おおよそ狙い通りの組成 ($50:25:25$ at.% および $67:33$ at.%) が得られていることは確認している。

Mn_2TiAl については、格子整合性の観点から、その基板として単結晶 MgO を選択した。はじめに、標準的な成膜条件で作製した薄膜の組成分析をおこない、おおよそ狙い通りの組成が得られていることを確認した。つづいて、 Mn_2TiAl の薄膜を作製するために、その基板加熱条件の最適化に取り組んだ。 $300^\circ C$ から $700^\circ C$ まで基板加熱温度を変えて成膜をおこなったが、これまでのところ、単結晶薄膜の作製には成功しておらず、引き続き成膜条件の最適化が必要である。また、これらの薄膜の磁気特性も評価したが、有限の磁化は観測されておらず、 Mn_2TiAl の規則構造は得られていないことを裏付けている。

これらの材料に加えて、ワイル磁性体の候補材料には含まれないが、Mn 系ホイスラー合金の一種である Mn_2VAl および Mn_2VGa の薄膜作製にも取り組んだ。 Mn_2VAl は先行研究で高品質な単結晶薄膜の作製が報告されており、Al 原子をスピン軌道相互作用のより大きい Ga 原子に置換することで、その σ_{AHE} が増大する可能性が示唆されている。本研究では、作製した Mn_2VGa 薄膜においても、 Mn_2VAl 薄膜と同程度の σ_{AHE} を得ることに成功した。今後、これらの合金をコスパッタ法により同時に成膜し、Al:Ge 比率を系統的に変えた薄膜を作製し、 σ_{AHE} を増大することが期待できる。また、Mn 原子を Co 原子に置換することで、Co 原子が Mn 原子と反強磁性的な結合を示し、磁化および飽和磁場の大きさを制御できるため、出力特性を自在に設計できる可能性がある。

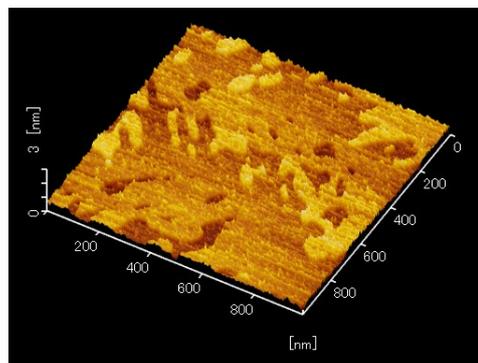


図 3. 単結晶 GGG 基板の AFM 像。

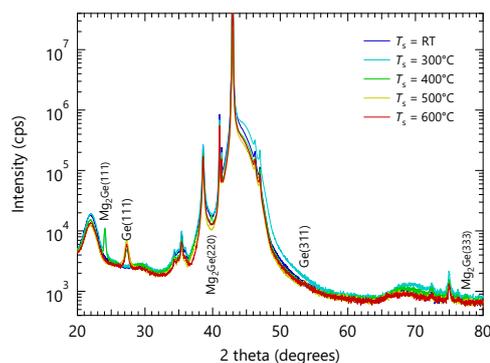


図 4. Mg_2Ge 薄膜の XRD プロファイル。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------