

令和元年6月2日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2018

課題番号：17K19054

研究課題名（和文）超省電力デバイスに向けた新奇窒化物スキルミオンの創成

研究課題名（英文）Creation of new nitride skyrmion for energy-saving devices

研究代表者

浅野 秀文（Asano, Hidefumi）

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：50262853

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、材料設計自由度の高い、新規窒化物スキルミオンの創成を目的とした。本期間中は、反応性スパッタ法による $\text{Fe}_{1.5}\text{X}_{0.5}\text{Mo}_3\text{N}$ （ $\text{X}=\text{Ni}, \text{Pd}, \text{Pt}$ ）薄膜の作製とその電気磁気特性の解明を行った。全ての添加元素 X （ $\text{X}=\text{Ni}, \text{Pd}, \text{Pt}$ ）において、(110)方向に単一成長したエピタキシャル薄膜作製が可能になった。2. $\text{X}=\text{Pd}$ の室温における磁気特性、および異常ホール効果の測定により、 $\text{Fe}_{1.5}\text{Pd}_{0.5}\text{Mo}_3\text{N}$ エピタキシャル薄膜において室温でスキルミオンが発現することが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で着目するスキルミオンは20-100 nmの領域で閉じた渦状の磁気構造であり、スキルミオンの有無のコントロールの容易さ・スキルミオンの低電流での駆動という特徴を持つことより、既存デバイスよりも低消費電力・高い記録密度で動作するスピン（磁気）メモリ実現に繋がる大きな可能性を秘めた材料として注目されている。

従来は室温以下の低温でしかスキルミオン発現の挙動が報告されていなかったが、本研究では、新奇窒化物である $\text{Fe}_{1.5}\text{Pd}_{0.5}\text{Mo}_3\text{N}$ 系エピタキシャル薄膜において、室温でのスキルミオン発現の挙動を観測し、本材料系が将来のスキルミオンデバイス応用に有望であることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is creation of new nitride skyrmion for energy-saving devices. We have done preparation and characterization of $\text{Fe}_{1.5}\text{X}_{0.5}\text{Mo}_3\text{N}$ （ $\text{X}=\text{Ni}, \text{Pd}, \text{Pt}$ ） thin films grown by reactive magnetron sputtering. For thin films with $\text{X}=\text{Ni}, \text{Pd}, \text{Pt}$, epitaxial growth with (110) orientation was achieved. Measurements by the use of magnetization and anomalous Hall effect indicated that $\text{Fe}_{1.5}\text{Pd}_{0.5}\text{Mo}_3\text{N}$ thin films exhibited a behavior of skyrmion at room temperature.

研究分野：磁性・スピントロニクス材料

キーワード：スキルミオン 窒化物薄膜 磁性体

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

本研究で着目するスキルミオンは 20-100 nm の領域で閉じた渦状の磁気構造であり、この渦状の磁気構造に由来する粒子的な性質を持つことに加え、結晶構造に空間反転対称性が無いためトポロジカルに保存されていることから不純物などに影響されない。そしてスキルミオンの有無のコントロールの容易さ・スキルミオンの低電流での駆動という特徴を持つことより、既存デバイスよりも低消費電力・高い記録密度で動作するスピン(磁気)メモリ実現に繋がる大きな可能性を秘めた材料であると言われている。つまり低消費電力・高い記録密度を同時に解決する事が予測されているため、スピントロニクス材料として非常に有望である。そこで我々は、新たな展開としてデバイス応用に向け優れた磁気特性を示すスキルミオンに着目した。スキルミオンの実用化に向けての課題として、実際にスキルミオンが実証されたキラル磁性体は少ないことより、より高い温度でスキルミオンを示す事など、より応用に適した新しいスキルミオン物質の探索が必要であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では新奇窒化物スキルミオンの創製、そしてスキルミオンを用いた新規スピンデバイスの作製を試みる。作製した窒化物薄膜がスキルミオンとなる証拠として、各種電気測定・磁気測定による結果に加え、X線磁気円二色性光電子顕微鏡(XMCD-PEEM)・スピン偏極透過電子顕微鏡(スピンTEM)を用いた新たなスキルミオン直接観測手法の開拓を行い、スキルミオンである直接的証拠を示す。その後、スキルミオンを用いた新規スピン機能デバイス(スキルミオン磁気抵抗メモリやスキルミオン・トレインメモリ等)を作製し、スキルミオンの優れた物理特性を生かした新奇スピンデバイスの実現を目指す。

3. 研究の方法

新奇窒化物スキルミオンの創成と新奇スキルミオンスピンデバイス応用に関する研究を、新奇窒化物スキルミオン薄膜作製、XMCD-PEEM およびスピンTEMによるスキルミオンの直接観測、新奇窒化物スキルミオンを用いた新規スキルミオンスピンデバイス作製の3段階で進める。に関しては、第一原理計算による理論予測でスキルミオンとなる可能性が指摘されている A_2Mo_3N ($A = Fe, Co, Rh$) に着目し、そのエピタキシャル薄膜作製および電気・磁気特性を詳細に調べる。そして作製したエピタキシャル薄膜を用いて、XMCD-PEEM およびスピンTEMによるスキルミオンの新しい観測手法の開拓を目指す。その一方で、のスキルミオンの応用に向けたデバイス実現を試みる。

4. 研究成果

新奇窒化物スキルミオンに向けた薄膜化に関しては、 A_2Mo_3N ($A = Fe, Co$)系材料について合金ターゲットを用いた $Ar + N_2$ 混合ガス中での反応性マグネトロンスパッタ法を適用して薄膜の作製を行った。格子整合性の観点より、サファイヤ Al_2O_3 の R 面、および C 面基板を用いて、基板温度、窒素分圧、成長速度を制御パラメータとして、エピタキシャル成長条件を探究した。また、作製した薄膜に対する構造、電気磁気特性の評価を行い、以下の結果を得た。

1) サファイヤ R 面基板上では多結晶的な薄膜が成長し、C 面基板上では(110)成長および(331)成長を観測した。さらに、基板温度と窒素分圧を最適化することにより、(110)方向に単一成長した A_2Mo_3N ($A = Fe, Co$)エピタキシャル薄膜の作製が可能になった。

2) Co_2Mo_3N 薄膜に対する磁気特性(4 K~300 K)の測定により、強磁性的なヒステリシス曲線は観測されず、磁場に対して直線的な磁化の挙動が観測され、常磁性、あるいは反強磁性的な磁気特性を持つことが分かった。バルクの先行研究との対比から、反強磁性的な磁気特性を有していると推察され、 Co_2Mo_3N ではスキルミオン発現は困難と判断した。

3) 前項までの検討を受けて対象となる材料系を Fe_2Mo_3N 系に絞り、さらに Fe サイトへの原子の部分置換が電気磁気特性に及ぼす影響を調べることを目的として実験を行った。具体的には、置換元素 $X = Ni, Pd, Pt$ 、置換量 $Y = 0.5$ (ノミナル組成)とした、 $Fe_{1.5}X_{0.5}Mo_3N$ 系に対して検討を進めた。置換元素の添加には、合金($Fe_{1.5}Mo_3$)ターゲット上に置換元素のチップを配置する方法を採用した。いずれの置換元素(Ni, Pd, Pt)においても、(110)成長したエピタキシャル薄膜の作製を実現できることが分かった。

4) $Fe_{1.5}X_{0.5}Mo_3N$ ($X = Ni, Pd, Pt$) 薄膜に対する電気抵抗の温度依存性の測定から、 $X = Ni, Pt$ では半導体的な挙動を示したが、 $X = Pd$ では金属的な挙動を示した。この時、 $X = Pd$ では 350 K 付近で磁気転移に関連すると考えられる挙動が観測された。

5) $Fe_{1.5}X_{0.5}Mo_3N$ ($X = Ni, Pd, Pt$) 薄膜に対する 77 K での磁気特性の測定により、いずれも強磁性的なヒステリシス曲線は観測された。特に、 $Fe_{1.5}X_{0.5}Mo_3N$ ($X = Pd$) 薄膜については、室温においても強磁性的なヒステリシス曲線は観測された。

6) これまでの結果を受けて、 $Fe_{1.5}Pd_{0.5}Mo_3N$ 系に絞って、スキルミオン発現の挙動を観測するため、4 K~350 K の広い温度範囲における、磁気測定、異常ホール効果測定を行った。

膜面内方向および膜面垂直方向の磁化曲線を測定したところ、面内磁化および面直磁化のヒステリシス曲線の形状が類似しており、磁化のしやすさが方位によって決まらないことが分かった。これはスキルミオンの等方的なスピン配置に依存して、磁化困難軸と磁化容易軸に大きな差異がないことが原因と予測される。つまり、スキルミオン発現の1つの証拠と考えられる。

また、異常ホール効果測定においては、通常の強磁性体の異常ホール効果とは挙動が大きく異なる、特異なスキルミオンホール効果、あるいはトポロジカルホール効果が室温（300 K）において観測され、350 K 程度まで維持されていることを見出した。同系のバルクの先行研究で報告されている 200 K の磁気転移（スキルミオン転移に相当）温度が、エピタキシャル薄膜において 350 K 程度まで向上したメカニズムは検討中であるが、置換元素組成の精密制御、エピタキシャル歪みの制御により、さらなる向上が可能と考えている。

以上の結果を総合して、 $\text{Fe}_{1.5}\text{Pd}_{0.5}\text{Mo}_3\text{N}$ 系エピタキシャル薄膜において、間接的ではあるが、室温でのスキルミオン発現の挙動を観測した。（論文投稿準備中）
XMCD-PEEM あるいはスピン TEM によるスキルミオンの直接観測，および新奇窒化物スキルミオンを用いた新規スキルミオンスピndeバイスの実現は今後の課題である。

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〕
出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：羽尻哲也

ローマ字氏名：Tetsuya Hajiri

所属研究機関名：名古屋大学

部局名：工学研究科

職名：助教

研究者番号 (8 桁)：80727272

(2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

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。