

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：13601

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K18872

研究課題名（和文）変調可能なテラヘルツレーザー発振素子

研究課題名（英文）Frequency Modulated Terahertz Laser Emitting Devices

研究代表者

劉 小晰（LIU, Xiaoxi）

信州大学・学術研究院工学系・教授

研究者番号：10372509

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）：本研究の目的達成するために、絶縁フェリ磁性単結晶薄膜並びにその上のグラフェン薄膜の形成、周期化縞状磁区構造、並びにグラフェン薄膜中のスピン軌道相互作用に関して系統的に検討した。正方晶系フェライト薄膜にCo添加による、波長1100 nm以上の赤外線では、99%以上の透過率を得られた。Coの添加による保磁力、飽和磁化の大幅な改善を確認できた。X線回折から、(001)配向したグラフェン薄膜の形成を確認できた。ラマンスペクトルよりグラフェンの2D、Gシフトを確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

理論上、グラフェンはディラックコーンと呼ばれるバンド構造が存在し、ディラックコーンの頂点における電子は、位置と運動量がある点に決定されるという、ハイゼンベルグの不確定性原理に相反してしまう状態になる。しかしながら相対論効果では、位置幅と運動量幅を大きくすることで不確定性原理の相反を回避しようとし、そのため電子の速度が急激に大きくなる。本研究はマグノンの電子移動度への影響に着目し、新しい学術原理の発見に役立つ研究である。

研究成果の概要（英文）：In this research, we have focused on the preparation of the ferrimagnetic single crystal magnetic thin films and graphene films on top it. We have investigated the magnetic, spin transport, transmittance, and spin-orbit coupling in the unique structures. We have also developed a reliable process to introducing periodic domain structures inside the ferrite films. The magnetic films have orthogonal crystal structures. The transmittance higher than 99% were found for wavelengths longer than 1100 nm. We have successfully prepared (001) orientated graphene films onto the magnetic films according to the X-ray diffraction diagrams. Raman spectrums show clear 2D, G shift of graphene of the films.

研究分野：Spintronics

キーワード：Spin-orbital-coupling spintronics

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ波は周波数 0.3~10 THz (波長 1mm~30 μ m) の帯域の電磁波である。この帯域はマイクロ波と赤外線の中に位置しており、赤外線のように直線伝搬特性と、マイクロ波のように様々な物質を透過できる特性を両立している。3次元イメージングが可能な可視化手段として、医療診断、LSI チップの故障解析、セキュリティ対策、医薬品、食品の品質管理等分野への応用が期待されている。

しかし、テラヘルツ波を効率よく発生するための技術が確立されておらず、高い発光率・小型・コヒーレントなテラヘルツ波発生とその制御が最も重要な事柄である。

これまで唯一、周波数可変なテラヘルツ波発生方式は、Spring-8 などの大型設備を用いた自由電子テラヘルツ波発振源であるこれは放射光を使用して真空中で加速した自由電子ビームに磁界を加え進路を曲げた時にテラヘルツ波が発生する。このような広い周波数範囲のテラヘルツ波は発生できるが、設備そのものが大規模となる。更なる次世代テラヘルツ波の応用を開拓するため、小型、周波数(波長)変調可能なテラヘルツの発生が必要になる。

近年、層内化学結合、層間ファンデルワールス力で結合されている二次元層状材料において自由電子が特殊な振舞を示す【K. S. Novoselov, et al., Science, 353, aac9439 (2016)】。その代表的な材料はグラフェンである。

グラフェン中の電子の移動度は、室温で 15,000 cm²V⁻¹s⁻¹ と驚くほど高く、伝導電子の平均自由行程は一般の金属の数百倍の約 1000 nm 以上である。本研究では、図 2 に示すように、グラフェンの電子伝導特性を利用し、小型テラヘルツ波発振素子の実現を目的とする。本研究の特徴は発生したテラヘルツ波の周波数をナノ磁石の磁極の制御により変えることが可能な点である。電界制御によりナノ磁石の磁極間距離を制御することは本研究の独創性である。

以上のように、本研究の目的はナノテクノロジーの代名詞でもあるグラフェンを用いたテラヘルツ波発振源の開発である。

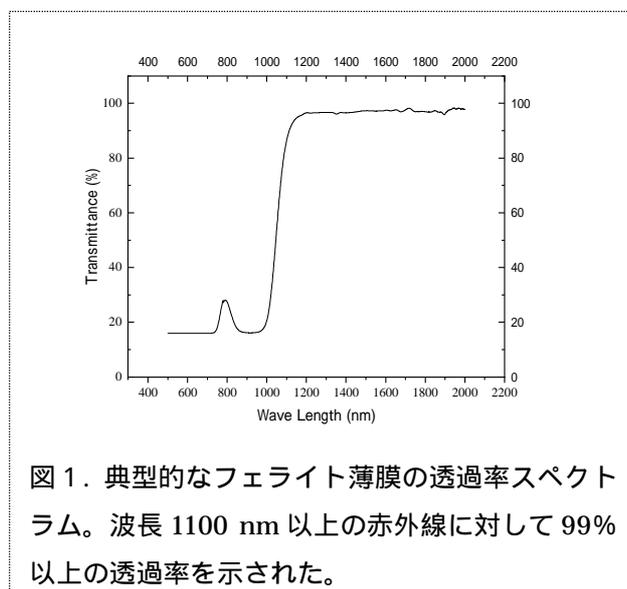
2. 研究の目的

近年、層内化学結合、層間ファンデルワールス力で結合されている二次元層状材料において自由電子が特殊な振舞を示す【K. S. Novoselov, et al., Science, 353, aac9439 (2016)】。その代表的な材料はグラフェンである。

グラフェン中の電子の移動度は、室温で 15,000 cm²V⁻¹s⁻¹ と驚くほど高く、伝導電子の平均自由行程は一般の金属の数百倍の約 1000 nm 以上である。本研究では、グラフェンの電子伝導特性を利用し、グラフェン薄膜の中の電流電子と周期的な小型テラヘルツ波発振素子の実現を目的とする。本研究の特徴は発生したテラヘルツ波の周波数をナノ磁石の磁極の制御により変えることが可能な点である。電界制御によりナノ磁石の磁極間距離を制御することは本研究の独創性である。

すなわち、本研究の目的はナノテクノロジーの代名詞でもあるグラフェンを用いたテラヘルツ波発振源の開発である。

3. 研究の方法



本研究では、絶縁性フェライト薄膜はスパッタ装置を用いて堆積した。薄膜の磁気特性を振動試料型磁力計、磁気力顕微鏡、カー顕微鏡、ファラデー回転測定、並びに強磁性共鳴測定を用いて諸特性を評価した。グラフェン薄膜に関して、ラマン分光、X線回折装置を用いて評価した。

マスクレーズ露光装置、エッチング装置を用いて素子を加工した。ロックインアンプを用いて素子の特性を評価した。

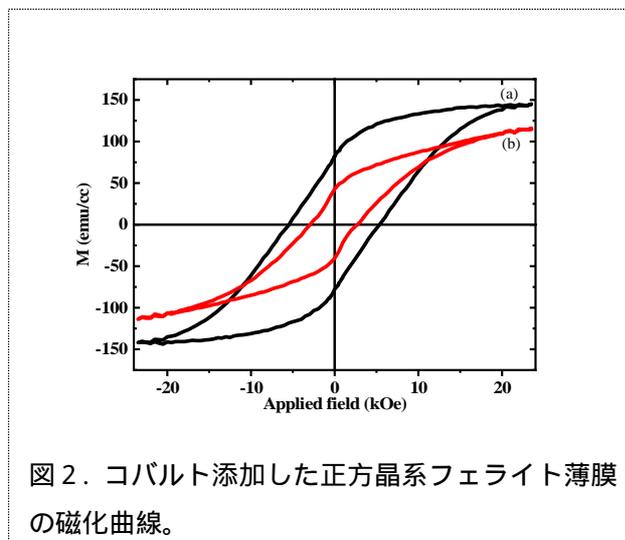


図 2. コバルト添加した正方晶系フェライト薄膜の磁化曲線。

4. 研究成果

本研究は、絶縁、透過率の高いフェライト薄膜に関して、ガーネット系フェライト、正方晶系反強磁性フェライト薄膜を成膜した。スパッタ時の基板温度、ガス圧、エピタキシャル成長の条件を系統的に検討した。結晶性の高い、透過率が高いフェライト薄膜を形成が成功した。図 1 に典型的なフェライト薄膜の透過率を示す。波長 1100 nm 以上の光に約 99% 以上の透過率を得られた。さらに、フェライト薄膜では 790 nm での透過率増強を見られた。これらは良質な単結晶薄膜の特性と考えられる。

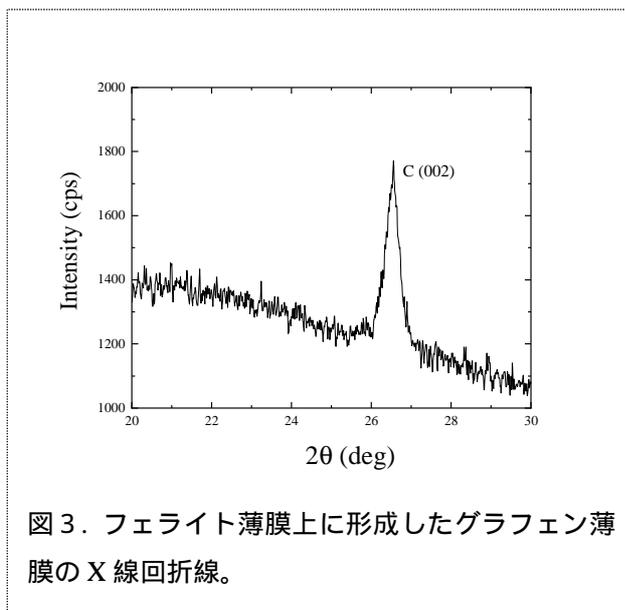


図 3. フェライト薄膜上に形成したグラフェン薄膜の X 線回折線。

縞状磁区を導入するために、フェライト薄膜の高い保磁力を求められる。本研究では、反強磁性薄膜から保磁力高いフェライト薄膜の形成手法を確立した。図 2 に本研究形成した薄膜の垂直磁化曲線を示す。飽和磁化 140 emu/cc、保磁力が 9 kOe と高い保磁力を得られた。この薄膜は正方晶系結晶構造を持つ。一般的に反強磁性を示す正方晶系フェライト薄膜をコバルトの添加により、高い飽和磁化、高い保磁力を示すフェリ磁性薄膜になることを明らかにした。

フェライト薄膜の上に形成したグラフェン薄膜の X 線回折の結果を図 3 に示す。明瞭なグラフェン (002) 回折線を確認できた。グラフェンの形成の確認と共に、グラフェンの C 面が磁性薄膜の表面に平行していることが明らかにした。

図 4 . に薄膜のラマン分光の結果を示す。明瞭な 2D シフトを確認できた。しかしながら、2D シフトと G シフトの強度比から、多結晶のグラフェン薄膜の形成と考えられる。今後、作成条件の最適化することにより、より大面積、良質なグラフェン薄膜の作成を試み。

フェリ磁性薄膜上のグラフェン薄膜の輸送特性を調べたところ、電極とグラフェン薄膜薄膜間の大きな接触抵抗を観察された。

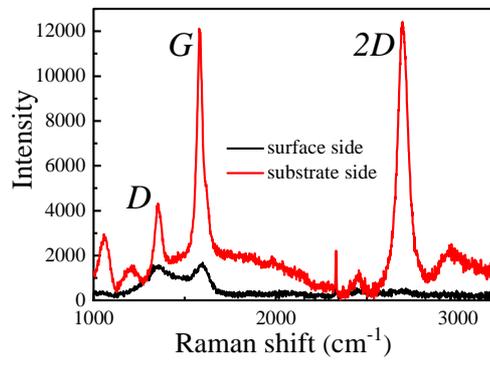


図 4. フェライト薄膜上に形成したグラフェン薄膜のラマンスペクトル。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Xia Jing, Zhang Xichao, Liu Xiaoxi, Zhou Yan, Ezawa Motohiko	4. 巻 3
2. 論文標題 Qubits based on merons in magnetic nanodisks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Communications Materials	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s43246-022-00311-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Ohara Kentaro, Zhang Xichao, Chen Yinling, Kato Satoshi, Xia Jing, Ezawa Motohiko, Tretiakov Oleg A., Hou Zhipeng, Zhou Yan, Zhao Guoping, Yang Jinbo, Liu Xiaoxi	4. 巻 22
2. 論文標題 Reversible Transformation between Isolated Skyrmions and Bimerons	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 8559 ~ 8566
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.2c03106	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Chen Yinling, Sang Liwen, Koizumi Satoshi, Koide Yasuo, Liu Xiaoxi, Liao Meiyong	4. 巻 129
2. 論文標題 Effect of gas pressure on the quality-factor of single-crystal diamond micro cantilevers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Diamond and Related Materials	6. 最初と最後の頁 109340 ~ 109340
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.diamond.2022.109340	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Chen Yinling, Hu Zhixin, Zhao Dongyang, Zhou Kejia, Huang Zhenyu, Zhao Wuduo, Yang Xiaonan, Gao Chaojun, Cao Yangjie, Hsu Yanya, Chang Weijen, Wei Zonhan, Liu Xiaoxi	4. 巻 13
2. 論文標題 Self-Assembled Hexagonal Superparamagnetic Cone Structures for Fabrication of Cell Cluster Arrays	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 10667 ~ 10673
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.0c17890	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Xiaoxi Liu
2. 発表標題 Confinement and Protection of Magnetic Skyrmions
3. 学会等名 The 2022 Joint MMM-INTERMAG Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔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
---------	---------