

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23246061

研究課題名(和文) マグノニック結晶のスピン波制御機能と室温超高感度磁界センサへの応用

研究課題名(英文) Study on controllability of spin waves using magnonic crystal and its applications

研究代表者

井上 光輝 (INOUE, Mitsuteru)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90159997

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 38,400,000円、(間接経費) 11,520,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、基盤研究(S)等で得た磁性フォトニック結晶に関する知見を発展させ、人為的周期構造をもつマグノニック結晶を用いたスピン波の制御と、そのスピン波機能を応用した室温で動作する高い感度をもつマグノニック結晶磁界センサの開発を目指すものである。厚さ約0.1 mmのガーネット上に、幅0.1 mmオーダーの銅の周期構造を形成した媒体を利用することで、高感度な磁界センシングが可能になることが分かり、これに付随し、多くの興味深いマグノニック結晶のスピン波制御機能が明らかになった。開発の中で、新規磁性材料の形成方法、ナノ構造の改善、新デバイス構造の提案を行い、論文誌、学会発表等によって報告を行った。

研究成果の概要(英文)：Magnonic crystals comprising yttrium iron garnet (YIG) with the periodic change of conductivity can control the propagation properties of spin waves. We investigated the fundamental properties on the controllability of spin wave by magnonic crystals. For instance, single defect was introduced into the magnonic crystals and generated the localization mode of spin waves. This phenomenon was applied to the magnonic sensors. And also, the novel processes, nano-scale materials, and new device structures to improve the quality factor of the sensors were developed. These results were reported in journals and academic symposiums.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学

キーワード：電気・電子材料 マグノニック結晶 磁界センシング 心磁界 脳磁界 室温動作 モノリシック 広ダイナミックレンジ

1. 研究開始当初の背景

(1) 数 nm から数 100nm のスケールで人為的構造を導入した磁性体は、構造に起因する新規の磁性と機能とを示すことから、これを工学的に利用する研究が重要な技術分野を形成しつつある。特に、最近の情報テクノロジーの飛躍的な進展に伴い、重要な情報キャリアである光（光子）やスピン波、あるいは高周波電磁界とナノ構造との相互作用が注目されるようになった。最もよい例は、光波長オーダーで周期構造体を形成したフォトニック結晶（フォトニック・バンドギャップ材料）で光局在現象を利用した多彩な光子輸送制御が試みられている。

我々は、これらフォトニック結晶に関する一連の研究とは別に、透明磁性体にナノスケール構造を導入することで巨大な磁気光学効果が発現することを見出し、磁性体のスピンド制御可能な新しい光学媒体の実現可能性を示した。この光とナノ構造スピンシステムとが結合したフォトニック結晶（磁性フォトニック結晶）に関する研究は、その後 JST さきがけ研究 21 や科研費基盤研究 C、B、A、S として展開し、1次元から3次元人工構造体形成へのチャレンジとその線形・非線形光機能解明を行ってきた。既に、図1に示すような1次元フォトニック結晶などが得られており、その一部はデバイスに応用展開した。

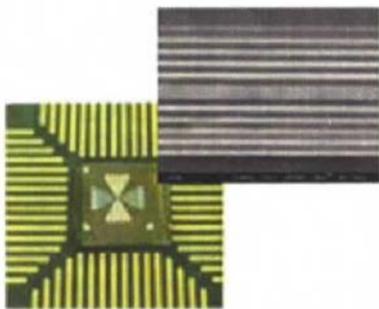


図1 磁性フォトニック結晶の断面図とデバイス応用例

(2) 上述した磁性フォトニック結晶のフォトニックバンドギャップは、光波の位相干渉に起因するもので、波動として存在するものであれば同様の機能が発現する。我々はこの観点から、上述した科研費基盤研究Sの中で、磁性フォトニック結晶の光波をスピン波に替えた周期構造スピンシステムの性質を調べた。この媒体は、スピン波キャリアに対するバンドギャップ材料で、現在ではマグノニック結晶と呼ばれる。過去にも伝播媒体であるYIG ($\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 、イットリウム鉄ガーネット) に周期的な溝を構成してストップバンドを形成する試みがあったが、この系をフォトニック結晶のアナロジーでとらえ、1次元はもとより、2次元や3次元のスケールでスピン波を制御しようとする試みは、国内外を通じてあまり知られていなかった。我々は、媒体表面にエネルギーが集中して伝搬する静磁表面波 (Magnetostatic Surface Wave:

MSSW、数GHzオーダーの周波数で励起される表面スピン波。この波は、波長が長いので、スピン間の交換相互作用よりも静磁気結合を起源として波動が伝搬する) に着目し、YIG 表面にMSSWの波長に対応した周期でCuストライプを蒸着形成した媒体の特性を調べた (図2)。その結果、まさにフォトニック結晶のアナロジーとして、この人為的構造を導入したマグノニック結晶を伝搬するMSSWは、非常にシャープなマグノニック・バンドギャップを示し、その特定周波数ではMSSWの伝搬(マグノンの存在) 阻止された。このバンドギャップが急峻であることと、スピン波の伝搬特性が周囲の磁界に敏感であることから、マグノニック結晶は室温で動作する高感度磁界センサとして働くことが示唆されていた。

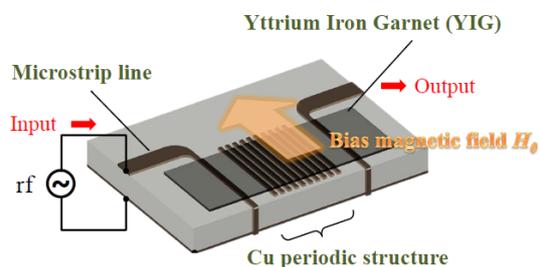


図2 Cuストライプを用いたMSSWマグノニック結晶

2. 研究の目的

(1) 上述の結果は、マグノニック結晶を用いることで、心磁界レベルの微弱な磁界を室温で検出できる可能性を示唆しており、物理的のみならず医療情報テクノロジーの観点からも極めて魅力あるものである。

本研究は、これらの研究背景を踏まえ、室温で高感度を有するマグノニック結晶磁界センサを実現すると共に、これに必要な不可欠なマグノニック結晶の現象の解明、材料、プロセスを解明する。

(2) 上述した研究目的の達成には、マグノニック結晶の構成材料や人為的導入構造の最適化、あるいはスピン波制御に関する基礎的知見の獲得はもとより、室温超高感度磁界センサとして動作させるためのマグノニック結晶の低ノイズ化、高安定化、システム化など、総合的な理工学研究が不可欠である。

3. 研究の方法

(1) デバイス全体を、ワンチップに収めるために、薄膜磁石とトランスデューサーとをマグノニック結晶に一体化したモノリシック素子の形成を行った。モノリシック化にあたり必要な要素技術、材料の改善にも着手した。

(2) 上記モノリシック素子の磁界センサへ応用を目的として磁気シールドルーム内での磁界感度の定量評価を行った。この結果を踏まえ、マグノニック結晶磁界センサの高感度

化、高安定化を行った。

(3) 実用には YIG の安価な形成方法を用いた方が有利と考えられることから、ガラス基板等への YIG 多結晶薄膜の形成方法を実験により探査した。

(4) マグノニック結晶を用いた複数軸同時計測可能な磁界センサの検討を行った。

(5) マグノニック結晶を用いた広ダイナミックレンジ磁界検出を行い、これによって、電流センサとして使用できる可能性を検討した。

4. 研究成果

(1) デバイス全体を小型にする目的で、YIG 基板上に直接 Cu ストライプを安定して形成できる条件を見つけ、さらに、薄膜磁石を同基板上に、磁界中スパッタを用いて形成し、モノリシック化されたマグノニック結晶を形成した。厚膜（厚さ約 100 マイクロメートル）の YIG を用いた時には、ストライプの周期の大きさと、段数の関係から、これ以下の微細化には、薄膜化が必須であることが分かった。一方で、磁気媒体にナノ構造を導入することで性能の向上を目指し、これに付随した現象の物理的解明に関する知見が得られ、国内外を通じて報告例が少ないため、雑誌論文において報告した。

(2) マグノニック結晶磁界センサを磁気シールドルーム内で、感度の定量評価を行った結果、心磁界程度の磁界を測定可能であることが分かった。周辺の温度変化に対する安定性を向上させる目的で、温度勾配による変動をキャンセルするシステムを構築した。さらに、2つの磁気センサの差を検出することで安定性を向上させる回路を考案した。

(3) 安価な基板上に、高周波マグネトロンスパッタ法を用いて多結晶 YIG を形成可能な条件を確立した。得られた形成条件は高温の熱処理が必要であり、膜は単結晶の YIG に比べて特性が劣ったが、同時に、形成方法および、装置の改良によって改善できる可能性が示された。

(4) 1つのマグノニック結晶中に複数方向に伝搬するスピン波を励起し、検出を行った。スピン波の高い干渉性が明らかになり、ノイズの影響が極めて高くなることが示された。学会等で報告を行った。

(5) マグノニック結晶に用いる磁気媒体は、磁化特性の飽和した状態を用いることから、外部磁場に対する応答が飽和することがないと分かった。このことから、従来のセンサに比べて、広ダイナミックレンジでかつ、感度の良い電流センサとして利用できる可能

性を見出し、特許申請し、学会等で発表した。実験的にも、広いダイナミックレンジが示され、これについても、学術論文にて報告予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 13 件）

- ① R. Hashimoto, H. Takagi, T. Yonezawa, K. Sakaguchi, and M. Inoue, High-Spatial Resolution and High-Contrast Magneto-optical Imaging By Magnetophotonic Crystals, J. Appl. Phys., 査読有, Vol. 115, 2014, 17A931, <http://dx.doi.org/10.1063/1.4866702>
- ② A. V. Baryshev, H. Uchida, and M. Inoue, Peculiarities of plasmon-modified magneto-optical response of gold-garnet structures, J. Opt. Soc. Am. B: Opt. Phys., 査読有, Vol. 30, 2013, 2371-2376, 10.1364/JOSAB.30.002371
- ③ T. Goto, R. Isogai, and M. Inoue, Para-magneto- and electro-optic microcavities for blue wavelength modulation, Opt. Express, 査読有, Vol. 21, 2013, 19648-19656, 10.1364/OE.21.019648
- ④ T. Higashi, A. Kajima, M. Inoue, and T. Fujii, The Influence of Electrode Material of Planar Capacitor on Magnetoelectric Properties in Ferromagnetic Oxide Sputtered Films with the Bi203-Fe203-PbTi03 System, J. Magn. Soc. Jpn., 査読有, Vol. 37, 2013, 171-174, https://www.jstage.jst.go.jp/article/msjmag/37/3-2/37_1301R006/_pdf
- ⑤ A. V. Chetvertukhin, A. A. Grunin, T. V. Dolgova, M. Inoue, and A. A. Fedyanin, Transversal magneto-optical Kerr effect in two-dimensional nickel magnetoplasmonic crystals, J. Appl. Phys., 査読有, Vol. 113, 2013, 17A942, doi:<http://dx.doi.org/10.1063/1.4801639>
- ⑥ T. Goto, Y. Eto, K. Kobayashi, Y. Haga, M. Inoue, and C. A. Ross, Vacuum annealed cerium-substituted yttrium iron garnet films on non-garnet substrates for integrated optical circuits, J. Appl. Phys., 査読有, Vol. 113, 2013, 17A939,

<http://dx.doi.org/10.1063/1.4800946>

- ⑦ A. V. Baryshev, A. M. Merzlikin, and M. Inoue, Efficiency of optical sensing by a plasmonic photonic-crystal slab, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 査読有, Vol. 46, 2013, 125107, <http://stacks.iop.org/0022-3727/46/i=12/a=125107>
- ⑧ Baryshev, A. M. Merzlikin, and M. Inoue, Plasmonic photonic-crystal slab as an ultrasensitive and robust optical biosensor, *SPIE Proceedings*, 査読有, Vol. 8632, 2013, 863209, doi:10.1117/12.2003253
- ⑨ H. Takagi, J. Noda, T. Ueno, N. Kanazawa, Y. Nakamura, and M. Inoue, マグノニック結晶のモノリシック化と多軸磁界センシングの検討, *電気学会論文誌A*, 査読有, Vol. 132, 2012, 833-837, 10.1541/ieejfms.132.833, <http://dx.doi.org/10.1541/ieejfms.132.833>

[学会発表] (計61件)

- ① M. Inoue, H. Takagi, P. B. Lim, and T. Goto, 3D applications with magneto-optic holography, 194th Topical Symposium of the Magnetics Society of Japan, 2014/01/10, Suruga-dai-kinenkan, Chuo Univ., Tokyo, Japan, Invited, Oral
- ② M. Inoue, 光磁気工学-光磁気の基礎と応用, 第36回日本磁気学会サマースクール, 2013/07/18, Rengo Kaikan, Tokyo, Invited, Oral
- ③ M. Inoue, H. Takagi, T. Goto, A. V. Baryshev, and P. B. Lim, Magnetophotonics and Their Applications in Hologram Memory and 3D Display, the 2013 Summer Topicals meeting, 2013/07/09, Hilton Waikoloa Village, Waikoloa Hawaii, USA, Invited, Oral
- ④ H. Takagi, K. Nakamura, P. B. Lim, and M. Inoue, Magnetophotonic microcavity for holographic three-dimensional display, Collaborative Conference on 3D & Materials Research CC3DMR 2013, 2013/06/24, Ramada Plaza jeju Hotel, Jeju-to, Korea, Invited, Oral
- ⑤ M. Inoue, P. B. Lim, H. Takagi, and Y.

Nakamura, Magneto-optic collinear holography with nano-clustered ferromagnetic garnet films for rewritable hologram memories, ICF 11 Conference, 2013/04/18, 沖縄コンベンションセンター (沖縄県宜野湾市), Invited, Oral

- ⑥ H. Takagi, T. Ueno, N. Kanazawa, Y. Nakamura, and M. Inoue, マグノニック結晶を用いた磁界センサ, 日本セラミックス協会第25回秋季シンポジウム, 2013/04/25, Nagoya Univ., Nagoya, Invited, Oral

[図書] (計1件)

- ① M. Inoue, M. Levy, A. V. Baryshev, Springer, Magnetophotonics From Theory to Applications, 2014

[産業財産権]

○出願状況 (計9件)

名称: 静磁気デバイスおよび磁気センサ
発明者: 岡嶋伸吾, 松田賢二, 志智慎介, 井上光輝, 高木宏幸, 後藤太一
権利者: 同上
種類: 特許
番号: 特願 2014-47814
出願年月日: 2014年03月11日
国内外の別: 国内

名称: スピン波非可逆回路素子, および高周波非可逆回路素子
発明者: 志智慎介, 松田賢二, 岡嶋伸吾, 井上光輝, 後藤太一, 高木宏幸
権利者: 同上
種類: 特許
番号: 特願 2014-47815
出願年月日: 2014年03月11日
国内外の別: 国内

名称: 光変調システムの制御方法, 光変調システム及びそれに用いる光学体
発明者: 井上光輝, 後藤太一
権利者: 同上
種類: 特許
番号: 特願 2013-521600
出願年月日: 2013年12月05日
国内外の別: 国内

名称: インピーダンス調整素子および高周波モジュール
発明者: 岡嶋伸吾, 和田貴也, 井上光輝, 高木宏幸
権利者: 同上
種類: 特許
番号: 特願 2013-156468
出願年月日: 2013年07月29日

国内外の別：国内

○取得状況（計0件）

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.spin.ee.tut.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井上 光輝 (INOUE, Mitsuteru)

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：90159997

(2) 研究分担者

中村 雄一 (NAKAMURA, Yuichi)

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：20345953

高木 宏幸 (TAKAGI, Hioryuki)

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・講師

研究者番号：40390463