

人工磁気格子の基礎と応用に関する研究

井上 光輝

(国立高等専門学校機構、豊橋技術科学大学)

Fundamentals and applications of artificial magnetic lattices

Mitsuteru INOUE

(National Institute of Technology, Toyohashi University of Technology)

はじめに

サブミクロンからナノスケールの磁気的な周期構造媒体を伝搬する光（電磁波）やスピン波は、位相干渉によりバンドギャップなどのユニークな性質と、連続体にはない磁気的機能を併せ持つ。我々は、光（電磁波）の場合は磁性フォトニック結晶（Magnetophotonic crystal: MPC）⁽¹⁾、スピン波の場合はマグノニック結晶（Magnonic crystal: MC）⁽²⁾と称するこれら磁気的不連続媒体を「人工磁気格子（Artificial Magnetic Lattice, AML）」として、その基礎的性質とデバイス・システムへの応用を調べてきた。本稿では、その結果の一部を紹介する。

人工磁気格子

可視域で透光性に優れる希土類鉄ガーネット（例えば Bi 置換 YIG, Bi:YIG）は、ファラデー回転角 θ も大きく、光磁気デバイスなどでよく利用される基盤材料である。Fig. 1 (a) に示すように、100 nm 厚程度の Bi:YIG 膜を SiO₂/Ta₂O₅ 誘電体ミラーでサンドイッチした AML では、Fig. 2 に示すように、バンドギャップ中の 700 nm 付近の波長で光局在化により透過率・ファラデー回転角が増大する。この光局在波長は、構成材料の厚さを制御することで比較的広い範囲でシフトできるので、利用する光波長に応じた材料設計ができる。一方、Fig. 1 (b) は Si 基盤に周期的な穴を形成し、その中央に Bi:YIG ロッドを挿入したものであるが、このような構造の AML は光導波路サーキュレータ機能をもつ⁽³⁾。これらの機能は、磁性体中の固有モードである左右円偏波の位相干渉により発現するので、構造の工夫や高次元化によって、連続体では困難な機能実現を図ることができる。

Fig. 3 は、光位相干渉像であるホログラムをアモルファス TbFe 垂直磁化膜に熱磁気書き込みで記録した例である。この像は、磁化分布に顕著な空間的周期性はないが、位相情報をもつ AML と考えることができる。実際、後述するように、磁気ホログラムの原像に立体を用いると、磁気光学的な光回折により空間に立体像の再生ができる。

上述した光で発現する機能は、磁性体固有の波動であるスピン波についても発現する。これは 1980 年代には既に知られていて⁽⁴⁾、周期的な溝をもつ YIG 媒体を伝搬する静磁波の伝送フィルタが示されている。微細加工技術の進展に伴って、数 nm スケールの構造が得られるようになり、波長の短いスピン波を制御して後述するスピン波ロジック回路などを実現しようとする試みがなされてきた。

周期的な溝構造をもつ AML では、端面に発生する磁荷によりローカルな内部磁場が変調を受ける。磁化方位によって、したがって伝搬するスピン波のモードによって効果が異なるので、われわれはこの難点の少ないプレーナ構造をもつ AML を調べてきた。Fig. 4 はその一例として、YIG 単結晶基盤の上に Cu 膜を周期的に形成したスピン波の 1D AML である⁽⁵⁾。膜面に垂直に磁場を印加することで、前進体積モードのスピン波が伝搬する。Fig. 5 に示すように、Cu 周期構造を有する AML では 1.8 GHz 付近にバンドギャップが発現しており、この構造を用いることでスピン波の流れ制御ができることを示唆する。

応用

われわれは、上述した AML の機能を利用した磁気デバイス・システムへの応用を試みてきた。光を制御する AML では、空間光の振幅や位相を高速に変調できる空間光変調器（MOSLM）の実現を目指したが、単結晶磁性ガーネットを用いたものでは Fig. 6 に示すような試作品が得られているものの、AML では駆動

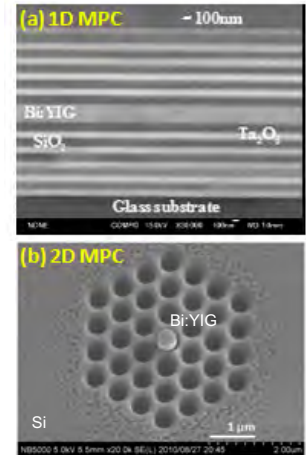


Fig. 1 Examples of the (a) 1D and (b) 2D MPCs.

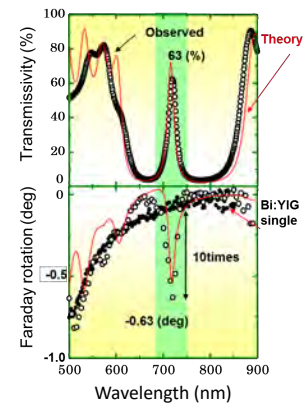


Fig. 2 Wavelength spectra of transmissivity (above) and Faraday rotation angle (below) of the 1D-MPC.

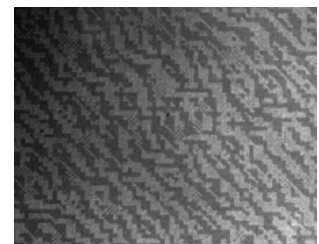


Fig. 3 Magnetic hologram written in an amorphous TbFe thin film with perpendicular magnetization.

の難しさもあり、完全なものは得られていない。

個々のピクセルを駆動する MOSLM とは別に、極めて多くのピクセルを熱磁気書き込みで制御して立体画像を空間に表示するシステムについては、ラポベースのものが得られている。Fig. 7 はアモルファス TbFe 膜を用いた例であるが、これを AML にすると 4 桁近い光効率の向上を確認した⁽⁶⁾。

また、原理的にはよく似ているが、体積磁気ホログラムを用いた情報記録システムについても調べ、ピクセル数は少ないもののエラーゼロの記録再生や、AML 構造を用いることで情報再生時の回折効率が 7 倍以上向上することが分かっている⁽⁷⁾。

スピン波 AML については、スピン波ロジック回路の実現を目指している。Fig. 8 は単結晶 YIG 導波路を用いた 4 ポートロジックゲートである⁽⁸⁾。この素子では、Port 3 と記した Control ラインの信号によって、Port 1, Port 2 の信号間の AND あるいは OR 計算ができる。現在、この原理に基づき、2D 構造を有する AML でスピン波を導波するスピン波ロジック回路や、これに非線型位相シフトを組み合わせた位相制御型の素子形成を試みている。

この他、AML の機能を用いた高出力 Q スイッチ小型レーザ素子⁽⁹⁾や、AML 構造体の中でのプラズモンとの相互作用によるセンシング素子への応用などについても進めており、その結果については別の機会に報告する予定である。

謝 辞

共同して研究を行ってきた内田裕久氏、林攀梅氏、中村雄一氏、後藤太一氏（豊橋技科大）、高木宏幸氏（現 Panasonic）、A. Baryshev 氏、豊橋技科大磁性研究室博士研究員諸氏、卒業生・学生諸氏に深謝する。本研究の一部は、JSPS 科研費（基盤(S) 17106004, (A) 23246060, (A) 23246061, (S) 26220902, (A) 26249041, (A) 15H0240, (A) 19H00765）、JST PRESTO（形とはたらき、素材・デバイス・システム融合による革新的ナノエレクトロニクスの創成）、CREST（高性能情報処理技術）、MEXT キーテク事業（ナノテク・材料）などを受け実施したものである。

参考文献

- (1) M. Inoue et al. (eds.), "Magnetophotonic crystals: From Theory to Applications," Springer Series in Mat., 2013.
- (2) 岩場雅司, 藤原早希, 関口康爾, 日本磁気学会論文特集号, Vol. 4, pp.18-22, 2020.
- (3) A. Wang and S. Fan, Opt. Lett., Vol. 30, pp.1989-1991, 2005.
- (4) M. S. Sodha and N. C. Srivastava, "Microwave Propagation in Ferrimagnetics," Plenum Press, 1981.
- (5) N. Kanazawa, T. Goto, M. Inoue, et al., Sci. Rep. 6, 30268, 2016.
- (6) N. Nakamura, H. Takagi, M. Inoue et al., Appl. Phys. Lett., 108, 022404, 2016.
- (7) R. Isogai, Y. Nakamura, M. Inoue et al., Opt. Express, 24, 522, 2016.
- (8) N. Kanazawa, T. Goto, M. Inoue et al., Sci. Rep. 7, 7898, 2017.
- (9) R. Morimoto, T. Goto, M. Inoue et al., Sci. Rep. 7, 15398, 2017.

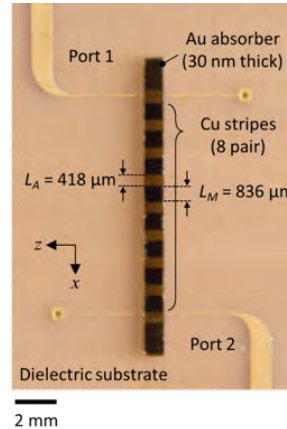


Fig. 4 1D-AML for spin waves composed of periodic Cu stripes formed on YIG single crystal.

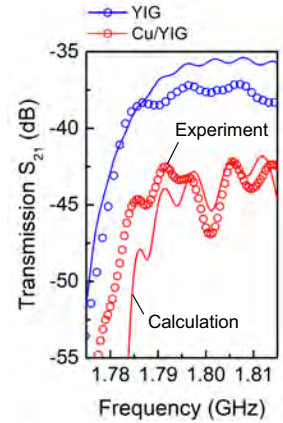


Fig. 5 Transmission spectrum of the volume forward spin wave travelling in the 1D-AML in Fig. 4.

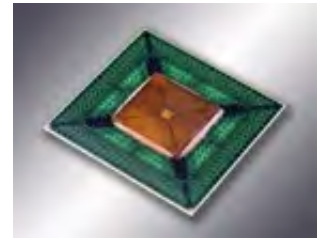


Fig. 6 MOSLM with Fe garnet single crystal film (FDK).

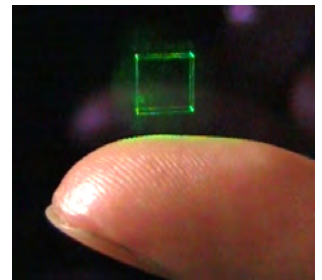


Fig. 7 Holographic 3D image reconstructed with TbFe amorphous thin film.

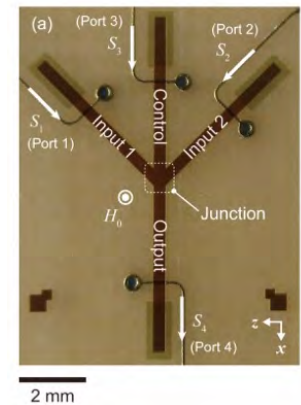


Fig. 8 Four-port spin wave logic gate with YIG single crystal waveguide.