総 説

光・高周波マイクロ磁気デバイスのための人為的周期構造磁性体
—磁性フォトリック結晶とマグノニック結晶の形成と応用—井上 光輝^{☆1}, Alexander Baryshev^{☆1}, 高木 宏幸^{☆1}, Pang Boey Lim^{☆1}, 内田 裕久^{☆2}^{☆1}豊橋技術科学大学工学部電気電子情報工学系, 〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1.^{☆2}東北工業大学工学部知能エレクトロニクス学科, 〒982-8577 仙台市太白区八木山香澄町 35-1.Artificial Periodic Magnetic Structures for Photonic and High Frequency Micro-magnetic Devices
-Fabrication and Application of Magnetophotonic Crystals and Magnonic Crystals-Mitsuteru Inoue^{☆1}, Alexander Baryshev^{☆1}, Hiroyuki Takagi^{☆1}, Pang Boey Lim^{☆1} and Hironaga Uchida^{☆2}^{☆1}Toyohashi University of Technology, 1-1 Tempaku, Toyohashi 441-8580, Japan.^{☆2}Tohoku Institute of Technology, 35-1 Yagiyama-Kasumi, Taihaku, Sendai 982-8577, Japan.

Received July 5, 2011

SYNOPSIS

Magnetophotonic crystals and magnonic crystals having periodic structures formed band gaps by interference of waves. A one-dimensional magnetophotonic crystal (1D-MPC), which exhibits optical Tamm state at the interface between magnetic and nonmagnetic photonic crystals (PCs), shows resonant transmissivity and large enhancement of Faraday rotation at the localized mode inside the photonic band gap. We developed two-dimensional magnetophotonic crystals (2D-MPCs) on various types of templates with periodical structures. A 2D-MPC with multi-layers formed on a periodic 1D line resist template has several photonic band gaps with enhanced magneto-optical (MO) effects. In a structural garnet film formed on the opal template, a significant enhancement of MO response was obtained at edges of band gaps. Magnonic crystal with Cu metal strips formed on YIG surface showed high sensitivity of 11400%/Oe as a magnetic sensor. In addition, enhanced MO effect was demonstrated by plasmonic composite films with noble metal particles and magnetic garnet.

KEY WORDS

Magnetophotonic crystal, magneto-optical effect, periodic structures, magnonic crystal, surface plasmon resonance

1 緒 言

光や電磁波の波長オーダーで人為的周期構造を導入したバンドギャップ材料では、波の多重反射によるバンドギャップが発現するが、その周期構造中に欠陥を導入するとバンドギャップ中の特定の波長で波が局在化し、そこで波の高い透過率を得ることができるようになる。さらに周期構造の繰返し数により波に対する応答の急峻性を変えることができるなど、波に対する応答を制御できるようになることから、工学的に重要な分野を形成しつつある。透明な磁性体である希土類鉄ガーネットを用いて、光の波長オーダーで周期的構造を持つ磁性フォトリック結晶¹⁾ (Magnetophotonic crystal: MPC) では、高い透過率と大きな磁気光学 (Magneto-optical: MO) 効果が共存するために、光磁気デバイスへの応用が試みられている。例えば、光の大きな回転角が得られる MPC を用いて、磁化反転の高速性を生かした磁気光学空間光変調器への応用が試みられている²⁾。また磁性材料に数十 μm オーダーの周期構造

を導入したマグノニック結晶 (Magnonic crystal)³⁾ は、バンドギャップによる静磁波の制御ができることから、GHz 帯マイクロ磁気デバイスへの応用が期待される。さらに周期構造を持たないが、微細な貴金属ナノ粒子を磁性ガーネットと組み合わせた複合膜では、局在型表面プラズモン共鳴が励起され、その波長で磁気光学効果が著しく増大することが分かり⁴⁾、新規の磁気光学材料となる可能性が示唆されている。本総説では、これらの人為的構造を有する磁性体の光学および高周波の応答について、最近の我々の研究結果を中心に紹介する。

2 磁性フォトリック結晶 (MPC)

MPC に関する研究は 1995 年頃に始まり⁵⁾、屈折率が異なる 2 種類の材料 SiO_2 と Ta_2O_5 薄膜を交互に積層した誘電体多層膜の間に、透明な磁性材料であるイットリウム鉄ガーネットの一部を Bi で置換した Bi:YIG を欠陥層として挟み込んだ構造について理論計算と実験の両面から研究が行われてきた。

この構造体は1次元磁性フォトニック結晶(1D-MPC)と呼ばれ, 光の干渉によって透過率スペクトルに透過率が低下するフォトニックバンドギャップ(PBG)が現れ, そしてBi: YIG欠陥層での光局在に起因する局在モードが発生する. その局在モードでは, 大きな透過率が得られるとともに, 磁気光学効果の一つであるファラデー回転が増大する. さらに非線形光学効果である第2高調波発生が増加し, 非線形磁気光学カー効果の増大も観察されている⁶⁾. またBi: YIG薄膜とSiO₂薄膜を交互に積層したBi: YIG/SiO₂多層膜においては, PBG端でファラデー回転角が増加することが明らかになっている⁷⁾.

2.1 タム状態1次元磁性フォトニック結晶

本節では, タム状態を利用する新しい1D-MPCを紹介する. タム状態とは本来表面の電子状態を表わしていたが, 最近, 周期構造を持つフォトニック結晶の表面および界面における光局在状態へ拡張されて使われるようになってきた⁸⁾. 一方, 我々が始めに研究を行った1D-MPCでは誘電体多層膜の中に磁性体欠陥層が導入された構造を持っているが, このときの光局在状態は, 電子に対するバンドギャップの中で欠陥によって現れる電子準位に相当するものである. そのため表面(界面)のタム状態を利用する局在モードとは発現原理が異なる.

Fig.1 (a)にタム状態1D-MPCの構造を示す. Ta₂O₅/SiO₂多層膜のフォトニック結晶(PC)とBi: YIG/SiO₂多層膜のMPCが接合した構造 [Substrate/Ta₂O₅/(SiO₂/Ta₂O₅)⁵/(Bi: YIG/SiO₂)⁵] を持ち, その接合面(界面)に光が局在化することになる. Fig.1 (b)は, 作製したタム状態1D-MPC断面の走査電子顕微鏡(SEM)像である⁹⁾. Fig.1 (c)には, このタム状態1D-MPCを構成するPC [(SiO₂/Ta₂O₅)⁵]の透過率スペクトル(三角)では中心波長800 nmにPBGが現れ, もう一方の構成要素であるMPC [(Bi: YIG/SiO₂)⁵]の透過率スペクトル(四角)にも同様にPBGが現れているのが示されている. しかし, これら2つのPBGはほぼ同じ波長域にあるものの, PBGの中に局在モードは現れていない. PCとMPCを接合したタム状態1D-MPC(黒丸)では, PBG中の波長800 nmで透過率が增大しているのが分かる. これが, PCとMPCとの界面で光が局在化することによって発現したタム状態である. Fig.1 (d)に示すファラデー回転スペクトルには, 磁性体を含まないPCのファラデー回転は当然0であるが, MPCでもファラデー回転角はほぼ一定であることが示されている. しかし二つを接合させたタム状態1D-MPCでは, 界面で起こる局在モードの波長800 nmでファラデー回転角が-0.8°まで増大しているのが分かる. シミュレーション(灰色線)によっても同様に波長800 nmの局在モードで, 透過率の増加とファラデー回転の増大が起こることが示されている. このように, 従来の周期構造中の欠陥によって起こる局在モードと同様に, 2種類の周期構造体が接合した界面においても光が局在し, そこでMO効果の増大が生じることが明らかになった. 物質のバンドギャップおよび欠陥や表面(界面)による電子状態との類似性が光に対する結晶においても見られる.

2.2 ポーラスアルミナテンプレートを利用して作製した2次元磁性フォトニック結晶(2D-MPC)

前節の1次元構造だけでなく, 2次元¹⁰⁾および3次元¹¹⁾構造のMPCの試作が行われてきた. 2次元構造体の作製法の1つは, Al基板を陽極酸化することによって自己組織化的に微細孔が形成されるポーラスアルミナを, テンプレートとして用いる方法である. Al基板上に自己組織化的に形成された微細孔は六方格子状に配列する. しかし, そのままでは狭い領域内で周期配列した多結晶状に配列するため, 透過率スペクト

Fig.1 (a) Structure of Tamm state 1D-MPC. (b) Cross-sectional SEM image of the fabricated 1D-MPC. (c) Transmissivity and (d) Faraday rotation spectra of PC (triangles), MPC (squares) and Tamm state 1D-MPC (black circles). The gray solid lines present simulated spectra.

ルに明瞭なPBGは現れない。そこで高周期性の微細孔配列を得るため、光ディスクの製造で使用するNiの突起が周期的に配列した特注スタンプをAl基板に押しつけて圧痕を付けてから陽極酸化を行うことによって、微細孔が2次元に配列した構造体(Fig.2(a))を作製した。このポーラスアルミナはNiスタンプの高周期性構造が転写されるため、単結晶状の構造を持ち、透過率スペクトルにはPBGが現れる。このポーラスアルミナの表面を基準にして入射角を変えると、PBGの波長位置が変化する(Fig.2(b))。角度と波長の関係は、ブラッグの式を用いた計算の結果と一致することが分かっている¹²⁾。作製したポーラスアルミナの微細孔の内部にBi:YIG前駆体となるゾル液を導入し、Bi:YIGの2次元柱状構造配列の作製を試みたが、十分な透過率が得られず、磁性フォトニック結晶とすることはできなかった。ゾル液による微細孔でのBi:YIGの形成では、Bi:YIG柱の中に微小ボイドが発生しやすく、作製上の課題が残る。Fig.2(d)は、ポーラスアルミナを

Fig.2 (a) SEM image of surface of a porous alumina plate obtained by using a Ni stamper having periodical dot pattern. (b) Transmissivity spectra of the porous alumina plate. An incident angle of light with a reference to the plate surface is denoted. (c) SEM image of Bi:YIG poles fabricated by sol precursor solution filling into pore array.

溶かして、Bi:YIG柱状構造を出したものであり、保持していたポーラスアルミナ媒体がなくなったために互いに接触しているが、穴の奥まで達する柱状構造が形成されていることが分かる。この結果から、テンプレートを利用する方法は2次元構造体を作製するには有効であることが分かる。

2.3 周期的ラインテンプレートを利用して作製した2D-MPC

基板上的微細構造を利用して周期構造体を作製する方法として、自己クローニング法¹³⁾が知られている。我々は電子線露光装置によって基板上にラインが周期的に並んだレジストテンプレート(Fig.3)を作製し、その上に1D-MPCであるSiO₂/Bi:YIG多層膜を形成することで、レジストテンプレートの周期性を取り入れた2D-MPCを作製した。Fig.4(a)に示すように、レジストの波状構造が10層上の積層膜まで保たれていることが分かる。比較のため同時に作製したレジストテンプレートがない場所の多層膜をFig.4(b)に示す。この2D-MPCでは、多層膜自体が持つ周期性によって700 nm付近に第1のPBGが現れ、そして570 nm付近にレジストにより導入された波状構造による第2のPBGが現れるが¹⁴⁾、ファラデー回転スペクトル(Fig.4(c))から第1と第2のPBG端の波長で回転角が増大していることが分かる。さらにP偏光とS偏光で応答

Fig.3 SEM image of one dimensional periodic resist pattern. Width and periodicity of resist lines are 125 nm and 400 nm, respectively.

Fig.4 (a) Cross sectional SEM image of a 2D-MPC with a structure of resist/(SiO₂/BiYIG)⁵ and (b) 1D-MPC with (SiO₂/BiYIG)⁵. (c) Faraday rotation spectra of the 2D-MPC and 1D-MPC.

が異なり, S 偏光の方が回転角の変化は大きいことが明らかになった。

2.4 オパールテンプレートを利用して作製した2次元周期Bi:YIGの2D-MPC

ヴァーティカル・デポジション(VD)法で作製したオパール薄膜¹⁵⁾のfcc(111)面をテンプレートとして用いた2D-MPCが試作されている¹⁶⁾。テンプレートは、直径290 nmのシリカ(SiO₂)微小球を基板上に自己組織化的に配列させたオパール薄膜である。この上にBi:YIGを成膜すると、オパールの周期構造を反映させたBi:YIGが形成される。Fig.5(a)は、オパールテンプレートの上に、Bi:YIGをイオンビームスパッタ法で150 nm成膜した試料の断面のSEM像である。表面第1層のシリカ球が縦に伸びているように見えるが、これはBi:YIGが付着したためである。Fig.5(b)に2D-MPCであるOpal/Bi:YIGの透過率スペクトルを示す。角度を変えた測定を行っているため、オパール薄膜のfcc(111)面によるPBGが625 nmから720 nmへシフトし、さらに付着しているBi:YIG周期構造体によって新たなPBGが現れ、これは420 nmから570 nmでシフトしている。Fig.5(c)に示すOpal/Bi:YIG構造2D-MPC

Fig.5 (a) Cross sectional SEM image of a 2D-MPC of opal/Bi:YIG structure. (b) Transmissivity spectra and (c) Kerr rotation spectra.

のカー回転スペクトル(実線)は、Bi:YIG薄膜(点線)と比較すると、520 nm付近で波状の周期構造により、 $+1.5 \sim -1.5^\circ$ の範囲で大きく回転角が変化しているのが分かる。

2.5 2D-MPCを利用した光サーキュレータ試作の検討

MPCの光デバイスへの応用の一つに、入力光の出力先を選択して光を伝達する光導波路サーキュレータがある。理論計算により2D-MPCを用いた光導波路サーキュレータが提案されているが¹⁷⁾、構造が複雑でありかつ微小領域で磁性体の磁化方向の制御が要求されるため実現は難しい。そこで実現可能な構造の2D-MPCベースの光導波路サーキュレータの構造をシミュレーションによって検討し、構成要素の試作を行った^{18,19)}。

シミュレーションによって得られた光導波路サーキュレータの構造をFig.6に示す。微小穴が周期的に配列した2D-PCのSiスラブがあり、その中央にBi:YIG微小柱が欠陥として挿入されることで2D-MPCとなる。この2D-MPCには、3方向からリッジ型光導波路が接続される。動作波長域は光通信波長帯の約1.5 μmである。

この2D-MPC光導波路サーキュレータを開発するため、始めに、収束イオンビーム装置(FIB)を用いてSi薄膜を加工し、2D-PCの両側にリッジ型光導波路が接続した構造を試作した。Fig.7(a)はFIBで作製したリッジ型光導波路の端部であり、(b)は2D-PCとその左右に接続した光導波路である。導波路のみの挿入損は、1.87 dB/mmであった。導波路中の2D-PCによる導波特性の違いをFig.7(c)に示す。導波路に2D-PCの導入により約20 dBの挿入損失が生じることが分かった。シミュレーションでは波長1500~1600 nmにPBGが発現するという結果が得られているが、作成した試料では顕著なバンドギャップの発生は認められなかった。これは光導波路と2D-PCの厚さが十分ではないこと、周期構造入射端での光散乱、測定波長域が狭いことなどが考えられるが、今後検討が必要である。

3 マグノニック結晶

静磁表面波を利用するマグノニック結晶では、100 μmオー

Fig.6 Schematics of a waveguide circulator having 2D-MPC.

Fig.7 SEM images of (a) an edge of ridge waveguide and (b) a 2D-PC slab connected two ridge waveguides. (c) Propagation losses of the Si ridge waveguide and the 2D-PC slab with two waveguides. A length of the waveguide is 2 mm.

ダの周期構造の導入によりバンドギャップが発現し、GHz帯で動作する電子デバイスとなる可能性を持つ。静磁波は、磁性体中の磁気モーメントと電磁波の相互作用によって励振される波であり、磁性体への直流磁界印加によって磁気モーメントの方向を揃え、高周波信号を加えることで磁気モーメントの歳差運動を起こす²⁰⁾。強磁性共鳴周波数の近くの周波数が加わるときには、歳差運動に位相差が生じる。この位相差が隣接する磁気モーメントに波として伝わる。静磁波の伝搬モードには3種類あるが、ここでは膜に平行に磁界を印加し、波の伝搬方向と磁界の方向が直交する配置の静磁表面波 (magnetostatic surface wave: MSSW) を利用する。磁気モーメントの歳差運動はランダウ・リフシッツ・ギルバート方程式とマクスウェル方程式によって表われ、静磁表面波の伝搬帯域は印加する直流磁界で制御できるものである。波に対する周期構造を付与したマグノニック結晶では、波の存在を許さないマグノニックバンドギャップが発現し、外部磁界によってバンドギャップの周波数を変化させることができるよ

Fig.8 (a) Photograph of fabricated magnonic crystal with one dimensional Cu periodic pattern on epitaxial YIG film formed onto GGG substrate. (b) Schematics of MSSW excitation in the magnonic crystal device placed on two microstriplines. (c) Frequency shift of a band gap by external applied magnetic field. (d) Relation between the magnetic field and frequency shift of the magnonic band gap.

うになる。

静磁表面波の導波路材料として、GGG基板上にエピタキシャル成長させた単結晶YIG膜(110 μ m)を用い、その上に厚さ14 μ mのCu周期ラインを電気メッキ法によって形成した(Fig.8(a))。Cu周期ラインの寸法は、線幅200 μ m、間隔50 μ m、ペア数10である。このデバイスの両端には、YIG端面での反射防止のため厚さ30nmのAu膜を形成した。

Fig.8(b)に示すように、石英基板に形成したマイクロストリップラインの上にマグノニック結晶であるYIGとCu周期ライン構造が付いた面を重ねて置き、それを電磁石間に設置し、マイクロストリップラインにネットワークアナライザを

接続して、高周波信号の伝搬特性を測定した。外部磁界 H_{ex} が200 Oeのとき、マグノニックバンドギャップの周波数は3.00 GHzであり、その深さは-60 dBであった (Fig.8 (c))。このバンドギャップは、外部磁界 H_{ex} を大きくするにつれて高周波側にシフトした。Fig.8(d)に示すように、外部磁界に対し、バンドギャップの周波数は線形に変化し、その変化率は2.6 MHz/Oeであった。磁界の検出感度は、周波数3.01 GHz、外部磁界205 Oeのとき、11400%という値を得ることができた³⁾。これは磁気インピーダンスセンサーの10倍以上の感度である²¹⁾。同様の磁界検出は、伝搬帯域の端でも可能であるが、Fig.8(c)から分かるように静磁表面波の高周波側では脈動が生じているため検出精度を保つのが難しくなる。結論として、急激に変化するバンドギャップの周波数で、マグノニック結晶をセンサとして用いるときには脈動の影響がなくなり、かつ周期構造のペア数でQ値を変えることができるため、優位性があると言える。

4 磁気光学プラズモニック複合構造体

干渉によるバンドギャップに依るものではないが、貴金属ナノ粒子による表面プラズモン共鳴によって、磁気光学効果による光の制御を行うこともできる。貴金属ナノ粒子を基板の上に形成し、Bi:YIGをその上に成膜した複合構造体ではMO効果が増大する。ナノ粒子に光が照射されるとき、光の電界によって自由電子が集団的に振動する局在型表面プラズモン共鳴が励起されるが、このとき光が吸収され、ナノ粒子の周りに磁気光学材料があるときMO効果が増大する²²⁾。プラズモン共鳴を励起する波長は、ナノ粒子の金属の種類、サイズ、間隔などで変わる。粒子サイズが大きくなるにつれて長波長側で共鳴が励起されるようになり、またAgナノ粒子ではAuよりも短波長側で局在プラズモン共鳴が現れる²³⁾。しかしAgナノ粒子をBi:YIG膜と複合化すると、AgとBi:YIGの界面で化合物が形成され、MOの増大効果が消失してしまう。Au-Ag合金ナノ粒子ではその比によって共鳴波長を変えることができ、そして合金化することによって反応性が低下し、界面での化合物形成が抑えられるためにMO効果の増大が得られる²⁴⁾。

Auナノ粒子は薄膜を加熱することによって作製することができるが、この粒子形成プロセスを繰り返すことによってナノ粒子の密度と平均直径を変えることができる⁴⁾。Fig.9(a)と(b)に繰り返しが1回および6回のときの粒子のSEM像と粒径分布を示す。1回の形成ではAuナノ粒子径はガウス分布を示すのに対し、繰り返し回数が増えるにつれて、粒子径が2分化するようになる。大きなサイズの粒子は、すでに存在する粒子の上にAuが堆積し、この形成を繰り返すことで直径が増加したものである。小さなサイズの粒子は、粒子の間に残されたAuの断片によって形成されたものである。

繰り返し形成法によって作製したAu微粒子の上にBi:YIGを60 nm成膜した試料の、透過率とファラデー回転スペクトルをFig.9(c)と(d)に示す。プラズモン共鳴の発生によって光の

吸収が大きくなり、600 nm付近で透過率が低下している。ファラデー回転角は6回の繰り返しにより作製したBi:YIG/Au複合膜において-1.2°まで増大している。これは同じ厚さのBi:YIG膜の20倍の大きさである。薄膜の加熱によるナノ粒子形成は、プロセスが容易で広い範囲に粒子を形成できる利点がある。しかし、必要な数密度を得るために繰り返し形成を行うと、粒径分布が大と小に分離してしまうため、全てのナノ粒子がMO効果増大へ同等に寄与しているとは考えられず、最適な粒子サイズが存在するはずである。プロセスが容易で、かつ必要なサイズのナノ粒子を適した密度で形成する方法が必要となる。

5 まとめ

周期性によって光および静磁波の干渉効果を利用する磁性構造体について、そしてナノ粒子における表面プラズモン共鳴を利用する構造体について、我々の最近の研究結果を紹介し

Fig.9 SEM images and distributions of Au particles formed by repetitive formation method: (a) 1 time and (b) 6 times formations. (c) Transmissivity and (d) Faraday rotation spectra of Au particles and Bi:YIG composite films.

た。周期構造を持つ磁性フォトニック結晶では、ここで述べた2種類の誘電体多層膜の界面に現れる光タム状態により、PBG中に光を透過する局在モードが生じ、そこでMO効果が増大する。物質における表面電子状態と同様の状態が光でも発現し、磁性材料と組み合わせることによってMO効果の増大が期待できる。また2次元の周期性を持つMPCを作製するためには、テンプレートを利用する作製法が有効であり、ラインレジストおよびオパールテンプレートの用いることによって2D-MPCを作製することができた。この2D-MPCの応用の一つとして光導波路サーキュレータがあり、本稿では実現のための基礎的な検討について述べた。また、静磁表面波の干渉を利用するマグノニック結晶では、バンドギャップの周波数が外部磁界に対して敏感に変化し、最大感度11,400%/Oeという高い値を示すことが明らかになった。今後、超高感度磁気センサとしての応用が期待される。表面プラズモン共鳴によるMO増大が得られる複合膜は、膜を加熱することによって得られるナノ粒子を用いて複合膜を作製するもので、作製法が容易で、かつ広い範囲に作製できるという利点を持つもので、磁気ビュアや空間光変調器への応用が考えられるものである。ここで述べた周期構造による光や静磁波などの干渉によるバンドギャップ材料は、新しい研究分野である。磁気光学デバイスや磁気センサなど様々な応用の可能性があり、今後の研究開発の展開が期待される。

謝 辞

本研究の一部は、科学研究費基盤研究(No. 17106004)および(No. 20560298)の援助を受けて行ったものである。

文 献

- M. Inoue, A. V. Baryshev, A. B. Khanikaev, M.E. Dokukin, K. Chung, J. Heo, H. Takagi, H. Uchida, P.B. Lim, and J. Kim: "Magnetophotonic Materials and Their Applications", IEICE Trans. Electron, E91-C(2008)1630-1638.
- H. Takagi, J. Kim, K. H. Chung, S. Mito, H. Umezawa, and M. Inoue: "Magneto-Optic Spatial Light Modulators with Magnetophotonic Crystals Driven by PZT Films", Journal of the Magnetics Society of Japan, 33(2009)525-527.
- J. Noda and M. Inoue: "Magnetic Field Sensing with One-dimensional Magnonic Crystals", Tech. Rep. Inst. Electro. Eng. Japan, MAG-10-079(2010)1-6.
- H. Uchida, Y. Mizutani, Y. Nakai, A. A. Fedyanin, and M. Inoue: "Garnet Composite Films with Au Particles Fabricated by Repetitive Formation for Enhancement of Faraday Effect", J. Phys. D: Appl. Phys., 44(2011)064014-1-7.
- M. Inoue, T. Yamamoto, K. Isamoto, and T. Fujii: J. Appl. Phys., 79(1996)5988-5990.
- T.V. Murzina, R.V. Kapra, T.V. Dolgova, A.A. Fedyanin, O.A. Aktsipetrov, K. Nishimura, H. Uchida, and M. Inoue: "Magnetization-induced Second-harmonic Generation in Magnetophotonic Crystals", Phys. Rev. B, 70(2004)012407-1-4.
- A.G. Zhdanov, A.A. Fedyanin, O.A. Aktsipetrov, D. Kobayashi, H. Uchida, and M. Inoue: "Enhancement of Faraday Rotation at Photonic-Band-Gap Edge in Garnet-based Magnetophotonic Crystals", J. Mag. Mag. Mat., 300(2006)e253-e256.
- A.P. Vinogradov, A.V. Dorofeenko, S.G. Erokhin, M. Inoue, A.A. Lisiansky, A.M. Merzlikin, and A.B. Granovsky: "Surface State Peculiarities in One-dimensional Photonic Crystal Interfaces", Phys. Rev. B, 74(2006)045128-1-8.
- T. Goto, A.V. Dorofeenko, A.M. Merzlikin, A.V. Baryshev, A.P. Vinogradov, A.B. Granovsky, and M. Inoue: "Excitation of Optical Tamm States and Enhancement of Faraday Rotation in One-dimensional Magnetophotonic Crystals", Tech. Rep. Inst. Electro. Eng. Japan, MAG-08-102(2008)19-22.
- Y. Ikezawa, K. Nishimura, H. Uchida, and M. Inoue: "Preparation of Two-dimensional Magneto-photonic Crystals of Bismuth Substitute Yttrium Iron Garnet Materials", J. Magn. Magn. Mat., 272-276(2004)1690-1691.
- T. Kodama, K. Nishimura, A. Baryshev, H. Uchida, and M. Inoue: "Opal Photonic Crystals Impregnated with Magnetite", Phys. Stat. Sol. (b), 241(2004)1597-1600.
- M. Jinno, R. Fujikawa, A. Baryshev, A. Khanikaev, K.-H. Shin, H. Uchida, and M. Inoue: "Fabrication and Optical Properties of Two-dimensional Magnetophotonic Crystals by Using Porous Alumina as a Template", Tech. Rep. Inst. Electro. Eng. Japan, MAG-06-98(2006)1-4.
- S. Kawashima, K. Miura, T. Sato, and S. Kawakami: "Mechanism of Shape Formation of Three-dimensional Periodic Nanostructures by Bias Sputtering", Appl. Phys. Lett., 74(1999)463-465.
- S.M. Baek, M.E. Dokukin, K. Yayoi, J. Kim, H. Uchida, A.V. Baryshev, and M. Inoue: "2D Magnetophotonic Crystals Fabricated on Patterned Substrates", Journal of the Magnetics Society of Japan, 33(2009)489-492.
- R. Fujikawa, A.V. Baryshev, K. Nishimura, H. Uchida, and M. Inoue: "Optical Study on Opaline Thin Films Grown by Vertical Deposition", J. Porous Mater., 13(2006)287-290.
- S. Baek, A.V. Baryshev, and M. Inoue: "Multiple Diffraction in Two-dimensional Magnetophotonic Crystals Fabricated by the Autoclone Method", Tech. Rep. Inst. Electro. Eng. Japan, MAG-10-77(2010)29-32.
- Z. Wan and S. Fan: "Magneto-optical Defects in Two-dimensional Photonic Crystals", J. Appl. Phys. B, 81(2005)369-375.
- K. Yayoi, K. Tobinaga, Y. Kaneko, A.V. Baryshev, and M. Inoue: "Analysis and Structural Design of Optical Waveguide Circulators with Two-Dimensional Magnetophotonic Crystals by Means of Finite Element Method", Tech. Rep. Inst. Electro. Eng. Japan, MAG-10-080(2010)7-11.

- 19) K. Tobinaga, K. Yayoi, Y. Kaneko, A. Baryshev, and M. Inoue: "Preparation and Properties of 2-dimensional Magnetophotonic Crystal Based on Optical Waveguide Circulators Formed by Focused Ion Beam", Tech. Rep. Inst. Electro. Eng. Japan, MAG-10-081(2010)13-16, in Japanese.
- 20) D.D. Stancil: "Theory of Magnetostatic Waves", Springer-Verlag, (1993).
- 21) L.V. Panina, K. Mohri, and T. Uchiyama: "Giant Magneto-impedance, (GMI) in Amorphous Wire, Single Layer Film and Sandwich Film", Physica A, **241**(1997)429-438.
- 22) H. Uchida, Y. Masuda, R. Fujikawa, A.V. Baryshev, and M. Inoue: "Large Enhancement of Faraday Rotation by Localized Surface Plasmon Resonance in Au Nanoparticles Embedded in Bi:YIG Film", J. Mag. Mag. Mat., **321**(2009)843-845.
- 23) S. Link, Z.L. Wang, and M.A. El-Sayed: "Alloy Formation of Gold-Silver Nanoparticles and the Dependence of the Plasmon Absorption on Their Composition", J. Phys. Chem. B, **103**(1999)3529-3533.
- 24) Y. Mizutani, H. Uchida, Y. Masuda, A.V. Baryshev, and M. Inoue: "Magneto-optical Plasmonic Bi:YIG Composite Films with Ag and Au-Ag Alloy Particles", Journal of the Magnetism Society of Japan, **33**(2009)481-484.