

有機金属分解法により作製した磁性ガーネット薄膜による 巨大磁気表面プラズモン効果の発現

Magnetic garnet films fabricated by metal organic decomposition method
for giant magneto-plasmonic effect

研究代表者 日本大学 准教授 芦澤好人

Yoshito Ashizawa

共同研究者 日本大学 教授 中川活二

Katsuji Nakagawa

Magneto-plasmonic effect is attractive phenomenon from viewpoints of science and technology. To obtain large magneto-plasmonic effect for applying a magnetic sensor, Bi doped magnetic garnet films fabricated by metal organic decomposition method was investigated. $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ magnetic garnet crystal phase, which is a non-equilibrium phase, was formed by using garnet single crystal substrate and by controlling annealing temperature. Magneto-plasmonic effect of Ag/magnetic garnet bilayer film was observed by a difference between two attenuated total reflection methods with and without magnetic field. Optimization of growth condition of the magnetic garnet and tuning of silver layer thickness for generation of surface plasmon are key issues to obtain the larger magneto-plasmonic effect.

要旨

磁気表面プラズモン効果は、磁性体の磁化方向に依存した誘電率変化により、表面プラズモンの励起条件が変化して反射率が変わる現象であり、磁気センサへの応用の観点から近年注目されている。

磁気センサを実現するためには大きな効果を示す薄膜材料の探査が急務であるが、その検討は十分でない。磁気表面プラズモン効果が、薄膜の誘電率テンソル成分変化に起因することに鑑み、大きな磁気光学効果を示す透光性誘電磁性体を用いた二層薄膜において巨大な磁気表面プラズモン効果を発現することを目的とし、透光性誘電磁性体としてBi置換 $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 磁性ガーネット薄膜を用いることを検討した。

1. まえがき

金属と誘電体の界面を伝搬する光と結合した電子の粗密波である表面プラズモンは、その界面の金属及び誘電体の誘電率変化を高感度に検出可能であるため、バイオセンサなど表面プラズモン共鳴センサとして応用されてきた⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。さらに、プラズモン導波路⁽⁵⁾⁻⁽¹⁰⁾、光近接場トランスジューサ⁽¹¹⁾⁻⁽¹⁵⁾、光回路⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾、表面プラズモン増幅器⁽¹⁸⁾など様々なデバイスへの応用が検討されており、表面プラズモンを応用するプラズモニクスの分野が活性化している。

表面プラズモンを励起するためには、励起に用いる光の波数が、その界面に励起可能な表面プラズモンの波数と一致することが必要である。金属表面に付着した分子による誘電率変化を観測するのがバイオセンサであるが、この励起に関わる誘電率変化と磁性を組み合わせて磁気センサとして応用する検討が、近年活発化している。外部磁界によって表面プラズモンの励起条件が変わることの現象は、磁気表面プラズモン効果と呼ばれる。磁気表面プラズモン効果は、2007年にAu/Co/Au積層構造において報告⁽¹⁹⁾され以降、注目を集めている⁽²⁰⁾⁻⁽²²⁾。

磁気表面プラズモン効果を発現するためには、表面プラズモンの伝搬する金属／誘電体界面において、表面プラズモンが良好に励起・伝搬し、加えて、外部磁界に応じて誘電率が変化することが必要になる。一般に、可視光において良好に表面プラズモンを励起可能な材料（以後、プラズモン励起材料）としては、Au、Ag、Cuなどが適している。これらの金属は非磁性であるため、外部磁界に対する誘電率変化はない。一方、Fe、Co、Ni等の強磁性体は、磁化の方向に依存するテンソル量の誘電率を有するため、外部磁界により磁化方向が変化することで、表面プラズモンの励起に関わる誘電率成分を変化することが可能になる。しかし、これら強磁性体金属は、表面プラズモンを励起する波長帯において光吸収成分が大きいた

め、強磁性金属単層で用いるには適さない。したがって、プラズモン励起材料と外部磁界により誘電率変化する磁気応答材料を組み合わせて用いることが必要になる。

プラズモン励起材料と磁気応答材料の組み合わせには、(1)非磁性金属プラズモン励起材料と磁性金属磁気応答材料の積層構造^{(19)~(22)}、(2)非磁性金属プラズモン励起材料と磁性金属磁気応答材料の単層分散構造^{(23)~(25)}、(3)非磁性金属プラズモン励起材料と磁性誘電体磁気応答材料の二層構造^{(26)~(27)}が考えられる。(1)の金属系の積層構造においては、材料種が豊富な特徴を有する。一方、材料に応じて各層の膜厚と全体の膜厚が、表面プラズモン励起の観点及び磁気応答の観点から大きく変化するため、最適化が容易ではない。(2)では表面プラズモン材料と磁気応答材料が固溶しない材料系を選択することで実現可能である。単層であるために、表面プラズモンを高効率に励起する条件制御のための膜厚の決定が安易である。しかし、適用できる材料種が少ないため、磁気特性を改善する方法が限定的である。(3)においては、金属層と誘電体層の役割が完全に分離されているので、金属プラズモン励起層の膜厚のみで励起条件の最適化を行うことが可能である。磁性誘電体材料もフェライト系、ガーネット系など数多く知られており、選択肢も多い特徴がある。ただし、良好な磁性誘電体薄膜を作製するには、高温で適切なプロセスが必要であり、技術的な課題がある。

酸化物を容易に作製可能な手法として、近年、有機金属分解 (Metal-organic decomposition: MOD) 法が注目を集めている。MOD 法により作製された超伝導材料⁽²⁹⁾⁽³⁰⁾、強誘電材料⁽³¹⁾、磁性材料^{(27), (32)~(35)}などが報告されている。そこで本研究では、大きな磁気光学効果を示すことが知られる Bi 置換 $\text{Y}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_{12}$ 薄膜を MOD 法により作製することにより、金属表面プラズモン励起層／強磁性誘電体磁気応答層二層薄膜構造を実現し、大きな磁気表面プラズモン効果の発現を目指した。

2. MOD 法による Bi 置換 $\text{Y}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_{12}$ 薄膜

2.1 作製方法及び評価

基板には、ガラス (EAGLE-XG) 基板、 $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ 単結晶基板 (以後、GGG 基板)、 $(\text{GdCa})_3(\text{GaMgZr})_5\text{O}_{12}$ 単結

晶基板 (以後、SGGG 基板) を用いた。これらの基板は成膜前に、アセトン、エタノール、イソプロピルアルコールを用いて超音波洗浄を施した。磁性ガーネット薄膜は、上述のように MOD 法により作製した。MOD 法での薄膜作製プロセスを図 1 に示す。まず、図 1 の①のように基板に 100 ml の MOD 溶液を滴下し、3,000 rpm で 30 秒間スピンドルコートを行うことで、基板上に均一に MOD 溶液を塗布した。次に、②に示すように、ホットプレートの上で、100 °C で 10 分もしくは 30 分間有機溶媒の蒸発を行った。その後、③に示すように、電気炉内において 450 °C で仮焼成を行った。仮焼成時間は、30 分、60 分とした。仮焼成において、薄膜中の有機物成分が揮発し、酸化物非晶質が形成される。塗布から仮焼成までの工程を行ふとおよそ 40 nm の薄膜が形成されるため、膜厚を厚くするために、この①から③までの工程を 3 回繰り返した。最後に④に示すように、電気炉内でさらに高温で本焼成を行い、薄膜の結晶化を行った。本焼成温度は、490 °C ~ 750 °C、本焼成時間は、3 時間とした。

薄膜の結晶構造及び配向は、 $\text{Cu}-K_{\alpha}$ 線を用いた X 線回折法を用いて評価を行った。

2.2 ガラス基板上に作製した $\text{Y}_{2}\text{Bi}_1\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 薄膜

Bi 置換 $\text{Y}_{3}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 磁性ガーネット薄膜では、Bi 原子

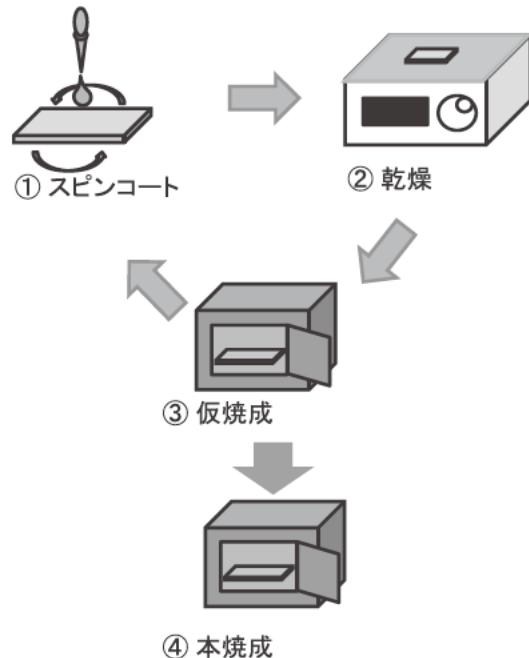


図 1 MOD 法による薄膜作製プロセス

の置換量に応じて磁気光学効果が大きくなるが、Bi 原子で Y 原子を最大置換した $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 相は、熱平衡相ではないため、まずは熱平衡相として存在する組成として、 $\text{Y}_2\text{Bi}_1\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 薄膜の作製を検討した。

ガラス基板上に、本焼成温度 700°C 及び 750°C で作製した $\text{Y}_2\text{Bi}_1\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 薄膜の X 線回折プロファイルを図 2 に示す。700°C、750°C のいずれの本焼成温度で結晶化した薄膜においても、 28.7° , 32.1° , 35.3° 近傍に回折線が観測され、それぞれガーネット相の(400)面、(420)面、(422)面からの回折線と同定される。

700 - 750°C の高温で結晶化することにより、ガーネット相が形成されることがわかった。

2. 2 GGG 単結晶基板及び SGGG 単結晶基板上への $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 薄膜の作製検討

$\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 結晶相は熱平衡相ではないため、同じガーネット構造を有する非磁性単結晶基板を用いたエピタキシャル成長による形成を検討した。ここで、 $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 結晶相の格子定数は $a = 1.26 \text{ nm}^{(33), (35)}$ 、Bi 原子で置換しない $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 結晶相の格子定数は $a = 1.238 \text{ nm}^{(36)}$ であり、基板に用いる $\text{Ga}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ (GGG) 単結晶は $a = 1.238 \text{ nm}^{(36)}$ 、 $(\text{GdCa})_3(\text{GaMgZr})_5\text{O}_{12}$ (SGGG) 単結晶は $a = 1.2450 \text{ nm}^{(37)}$ である。したがって、単結晶基板と $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 薄膜とのミスマッチは、SGGG 基板のほうが小さく 1.0%，GGG 基板においても 2.0% 程度であり、エピタキシャル成長が見込めると考えられる。

格子ミスマッチの小さい SGGG(111) 単結晶基板上に、 $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 薄膜の作製を検討した。本焼成温度 650°C 及び 750°C で焼成した SGGG(111) 単結晶基板上の MOD 薄膜の X 線回折プロファイルを図 3 に示す。650°C, 750°C いずれの焼成温度においても、SGGG 基板の(444)面、(222)面に起因する回折線しか観察されず、薄膜中の結晶層に起因する回折線は観測されなかった。

そこで、GGG 単結晶基板上への $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 薄膜の作製を検討した。本焼成温度 650°C 及び 750°C で焼成した SGGG(111) 単結晶基板上の MOD 薄膜の X 線回折プロファイルを図 4 に示す。650°C で本焼成した薄膜においては GGG 単結晶基板からの(444)面に起因する回折線のみが観察された。一方、本焼成温度 750°C で焼成した薄膜において

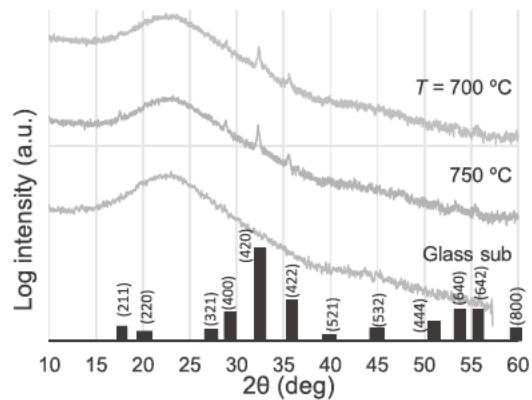


図 2 ガラス基板上に本焼成温度 700°C 及び 750°C において作製した $\text{Y}_2\text{Bi}_1\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 薄膜の X 線回折プロファイル

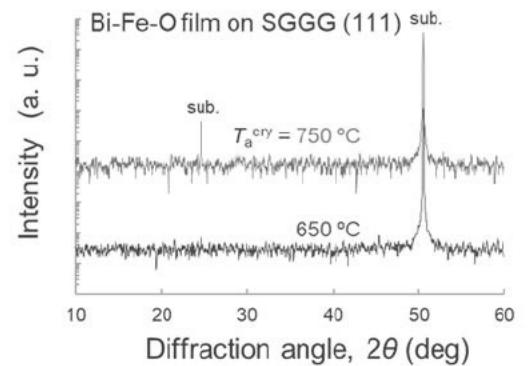


図 3 SGGG(111) 単結晶基板上に本焼成温度 650°C 及び 750°C において作製した MOD 薄膜の X 線回折プロファイル

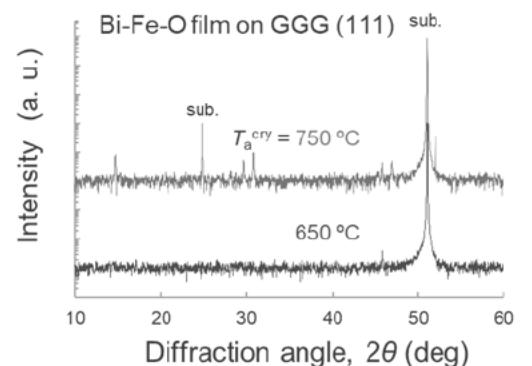


図 4 GGG(111) 単結晶基板上に本焼成温度 650°C 及び 750°C において作製した MOD 薄膜の X 線回折プロファイル

は、 14.7° , 29.7° , 30.8° , 47.0° , 52.0° に薄膜に起因する回折線が観測された。しかし、これらの回折線は、Bi 置換 $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 磁性ガーネット相では説明ができない。結晶相は同定できていないが、Bi, Fe 酸化物が形成されたと推察される。

750°Cの本焼成温度においては所望のガーネット相ではないものの、結晶相の形成が確認された。そのため、結晶化する前の仮焼成における有機物の分解・揮発、非晶質相の形成過程が、ガーネット相の形成に寄与すると考えた。そこで仮焼成時間をこれまでの30分から60分に延ばした。仮焼成温度はこれまで同様450°Cとした。回折プロファイルを図5に示す。60分仮焼成を行った試料においても、30分と同様に 14.7° , 29.7° , 30.8° , 47.0° 近傍に回折線が観測された。 52.0° 近傍の回折線は観測されなかつた。しかし、磁性ガーネット相に起因する回折線は仮焼成時間を延ばしても確認されなかつた。このことは、仮焼成条件は、結晶成長過程に影響を及ぼすものの、 $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 磁性ガーネット相の形成能への影響は支配的ではないということが示唆している。

2.3 $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 薄膜用 MOD 溶液の熱分析

熱平衡相でない Bi 高濃度磁性ガーネット相を作製する温度条件を調査するために、 $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 磁性ガーネット用 MOD 溶液(高純度化学社製：BiFe-03(3/5))の熱分析を行った。熱重量測定及び示唆熱分析測定結果を図6に示す。TG 曲線は、温度の上昇に対して 150°C程度までは急激に減少し、さらなる温度上昇において 460°C程度まで緩やかに減少した。460°C以上の温度では一定値を示した。これは、150°C程度の温度領域で、溶媒が蒸発し、460°Cまで有機分子が分解し、揮発していると推定できる。460°C以上においては TG 値が一定であることから、蒸発や揮発が終了したことがわかる。一方、DTA 曲線を見ると、温度を上昇すると、125°C付近で最小値を示した後、増加し、450°C近傍で最大値を示した。DTA が負の領域では吸熱反応を示すことから、125°C付近で極小値を示すことは、TG 曲線での急激な低下と対応し、蒸発によるものと考えて矛盾しない。また、DTA が最大を示す450°C付近では発熱反応が起きていることから、非晶質状態からの結晶化が促進しているものと考えられ、480°C付近まで続いていると考えられる。TG の結

果をふまえると、400°Cから480°Cまで有機物の分解・揮発と結晶化が同時に進行していることが推察される。

2.4 $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 薄膜の作製

熱分析の結果を踏まえ、低温での $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 磁性ガーネット相の合成を検討した。TG が一定となり、かつ DTA の極大値を超えた直後として、490°Cで本焼成を行った。作製した薄膜の X 線回折プロファイルを図7に示す。 50.1° 近傍に Bi 置換ガーネット相の(444)面に起因する回折線が明瞭に観測された。ガーネット結晶相の他の面からの回折線や薄膜からの他の結晶層の回折線は、観測されなかつた。このことは、 $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 薄膜が GGG(111) 単結晶基板の結晶面を反映してエピタキシャル成長したことを示している。GGG

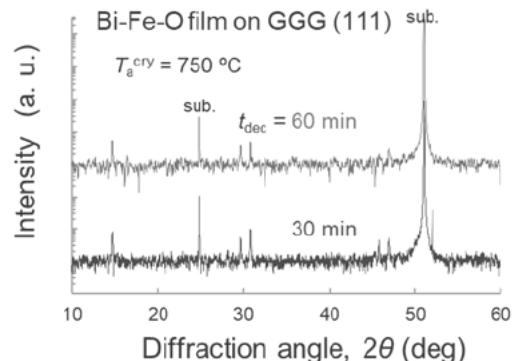


図5 GGG(111) 単結晶基板上に仮焼成時間 30 分及び 60 分において作製した MOD 薄膜の X 線回折プロファイル

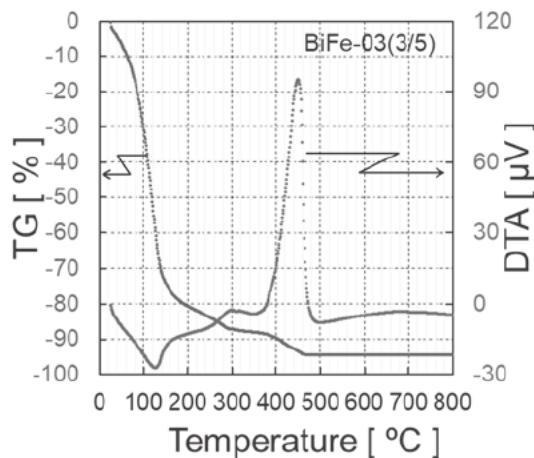


図6 $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 磁性ガーネット用 MOD 溶液の熱重量 (TG) 測定及び示唆熱分析 (DTA) プロファイル

単結晶基板上に成長した $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 薄膜の格子定数は、 $a = 1.261 \text{ nm}$ であり、これまで報告されている値^{(33), (35)}と良い一致を示した。

650°C や 750°C の高温で作製した薄膜では、ガーネット相ではない結晶相が形成されていること、Bi は融点が低く揮発しやすいことから、組成がずれている可能性が考えられる。そこで、SEM-EDS を用いて試料全体の組成を確認したところ、490°C で本焼成した薄膜試料に対し、750°C で本焼成した試料は、7%–14% の Bi 量の減少が、確認された。このことが低温でガーネット結晶相が形成される理由だと考えられる。

同様に SGGG(111) 単結晶基板及びガラス基板において 490°C で本焼成した薄膜の X 線回折プロファイルを図 8 に示す。図 8 には、併せて GGG(111) 単結晶基板上に成膜した薄膜の X 線回折プロファイルも示している。SGGG 単結晶基板においても $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ ガーネット相の(444)面に起因する回折線が確認される。GGG 基板と同様に、磁性ガーネット結晶相が基板に対してエピタキシャル成長したためだと考えられる。SGGG 単結晶基板上に成長した $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 薄膜の格子定数は、 $a = 1.259 \text{ nm}$ であり、GGG 単結晶基板上の薄膜よりも格子が縮んでいた。これは、SGGG 基板の格子定数 $a = 1.2450 \text{ nm}$ ⁽³⁷⁾ が、GGG 基板の格子定数 $a = 1.238 \text{ nm}$ ⁽³⁶⁾ に比較し、 $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ ガーネットの格子定数に近いために、 $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 薄膜が圧縮歪みを緩和することなく成長していると考えられる。

一方、ガラス基板上の薄膜においては、磁性ガーネットに起因する明瞭な回折線が観測されなかった。

以上のことから、 $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ ガーネット結晶相の形成には、Bi 原子が蒸発しないもしくは蒸発量の少ない 490°C 程度の低温で焼成すること、及び、ガーネット単結晶基板を用いることが有用であることが明らかになった。

3. Ag/ $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 二層薄膜における磁気表面プラズモン効果

3.1 磁気表面プラズモン効果

光と結合して表面プラズモンが励起するために、光の角周波数において光の波数と表面プラズモンの波数が一致する必要がある。プリズムを用いて、プリズム側から金属薄膜に入射した光の反射率を入射角度に対して計測する全反射減衰 (ATR:

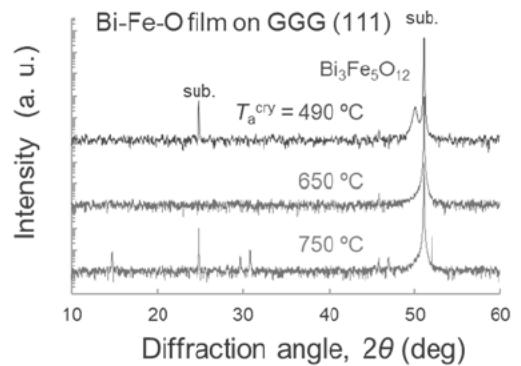


図 7 GGG(111) 単結晶基板上に焼成温度 490°C, 650°C, 750°C で焼成した MOD 薄膜の X 線回折プロファイル

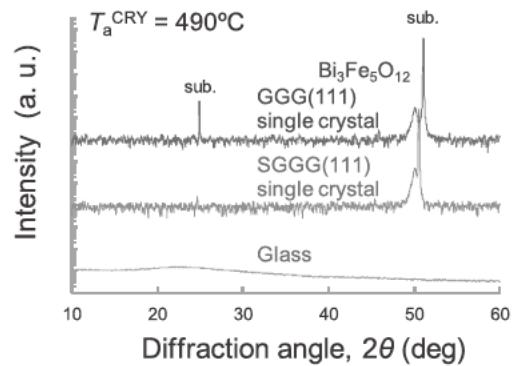


図 8 SGGG(111) 単結晶基板およびガラス基板上に焼成温度 490°C で焼成した MOD 薄膜の X 線回折プロファイル

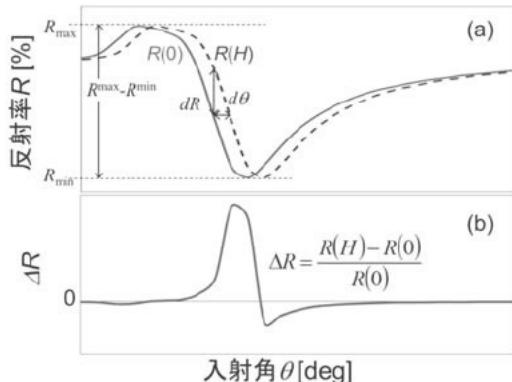


図 9 全反射原減衰法(a)及び磁気表面プラズモン効果(b)の評価例

attenuated total reflectance) 法を用いて、表面プラズモンの励起を行うことが多い。ATR 法における反射率の入射角度依存性の例を図 9(a)に示す。ここではこの反射率曲線を ATR 曲線と呼ぶことにし、無磁界での反射率を $R(0)$ 、磁界中での反射率を $R(H)$ とする。臨界角で全反射するまで、入射角を大きくすると反射率は増加して臨界角で最大値 R_{\max} を示す。臨界角以上に入射角を増加すると表面プラズモンの励起により反射率が減少し極小値 R_{\min} を示す。さらなる入射角の増加に対し、反射率は表面プラズモンの励起条件から外れていくため再度増加する。

磁気表面プラズモン効果は、図 9(b)に示す磁界中の反射率 $R(H)$ と無磁界中での反射率 $R(0)$ を用いた以下の指標、 $\Delta R = \{R(H) - R(0)\} / R(0)$ で評価される。

3. 2 Ag/Bi₃Fe₅O₁₂二層薄膜を用いた磁気表面プラズモン効果

上記の GGG(111) 単結晶基板上に 490°C で本焼成を行った Bi₃Fe₅O₁₂ 薄膜上に、スパッタリング法により Ag 薄膜を 48 nm 成膜した Ag/Bi₃Fe₅O₁₂ 二層薄膜を用いて磁気表面プラズモン効果を検討した。外部磁界は 400 mT 印加した。

全反射減衰法により計測した反射率の角度依存性を図 10 に示す。43.5° 付近で反射率の最小値が確認され、表面プラズモンの励起が確認された。反射率の最小値 R_{\min} は 38% 程度、最大値と最小値の差 $R_{\max} - R_{\min}$ は 20% 程度であった。図 11 には、磁気表面プラズモン効果の評価指標である ΔR を入射角度に対して示している。わずかであるが、ATR 曲線のシフトに起因して ΔR が観測された。

さらに大きな ΔR を得るために、Bi₃Fe₅O₁₂ 薄膜の最適化により薄膜の磁気特性の改善、及び、Ag 薄膜の膜厚の最適化により、表面プラズモン励起時の ATR 曲線の $R_{\max} - R_{\min}$ を大きくすることが今後重要なと考えられる。

4. まとめ

磁気表面プラズモン効果を用いた磁気センサへの応用を目指し、有機金属分解法を用いて Bi 置換磁性ガーネット薄膜の作製とそれを用いた磁気表面プラズモン効果について検討を行った。Y₂B₁Fe₅O₁₂ 薄膜は、

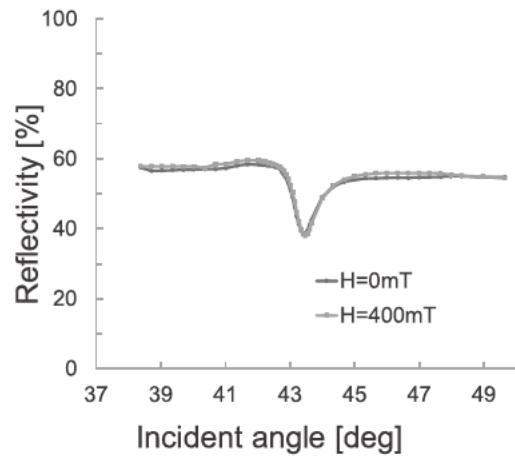


図 10 GGG(111) 単結晶基板上の Ag/Bi₃Fe₅O₁₂ 薄膜の反射率の角度依存性

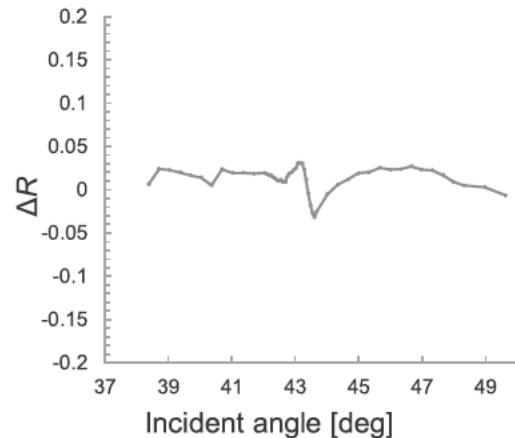


図 11 GGG(111) 単結晶基板上の Ag/Bi₃Fe₅O₁₂ 薄膜の磁気表面プラズモン効果

焼成温度を 700°C ~ 750°C 程度まで高温で行うことで、ガラス基板上においても作製可能であることがわかった。一方、Bi 高濃度の Bi₃Fe₅O₁₂ 薄膜は、焼成を温度を 490°C とし、GGG 単結晶基板および SGGG 単結晶基板を用いることにより、エピタキシャル成長を利用して形成可能であることがわかった。表面プラズモン励起用に Ag を用いた Ag/Bi₃Fe₅O₁₂ 二層薄膜において磁気表面プラズモン効果を観測した。Ag 薄膜の膜厚の最適化、Bi₃Fe₅O₁₂ 磁性ガーネット薄膜の作製条件の最適化をすることで、より大きな磁気表面プラズモン効果を発現できると期待される。

発表論文

[1] 芦澤好人、中川活二、「貴金属-強磁性体薄膜構造における磁気

- 表面プラズモン効果」，奈良磁気研究会2016 ナノ・マイクロ構造磁性体の作製と評価，2016年12月27日。
- [2] Yoshito Ashizawa, Toshihide Harada, and Katsuji Nakagawa, "Magnetic garnet films fabricated by metal organic decomposition method for magneto-plasmonic effect" , The 5th International Conference of Asian Union of Magnetics Societies (IcAUMS 2018), June 5, 2018, Jeju, Korea.

参考文献

- (1) Wolfgang Knoll, "Optical Characterization of Organic Thin Films and Interfaces with Evanescent Waves" , MRS Bulletin, Vol. 16, pp. 29–39 (1991).
- (2) R. C. Jorgenson and S. S. Yee, "A fiber-optic chemical sensor based on surface plasmon resonance" , Sensors and Actuators B, Vol. 12, pp. 213–220 (1993).
- (3) Andrea Cattoni, Petru Gheneche, Anne-Marie Haghiri-Gosnet, Dominique Decanini, Jing Chen, Jean-Luc Pelouard, and Stéphane Collin, " $\lambda^3/1000$ Plasmonic Nanocavities for Biosensing Fabricated by Soft UV Nanoimprint Lithography" , Nano Letters, Vol. 11, pp. 3557–3563 (2011).
- (4) Sookeyoung Roh, Taerin Chung and Byoungcho Lee, "Overview of the Characteristics of Micro- and Nano-Structured Surface Plasmon Resonance Sensors" , Sensors, Vol. 11, pp. 1565–1588 (2011).
- (5) Junichi Takahara, Suguru Yamagishi, Hiroaki Taki, Akihiro Morimoto, and Tetsuro Kobayashi, "Guiding of a one-dimensional optical beam with nanometer diameter" , Opt. Lett., Vol. 22, no. 7, pp. 475–477 (1997).
- (6) Sergey I. Bozhevolnyi, Valentyn S. Volkov, Eloise Devaux, Jean-Yves Laluet, and Thomas W. Ebbesen, "Channel plasmon subwavelength waveguide components including interferometers and ring resonators" , Nature, Vol. 440, no. 7083, pp. 508–511 (2006).
- (7) Yunchuan Kong, Matt Chabalko, Eric Black, Stephen Powell, James A. Bain, T. E. Schlesinger, and Yi Luo, "Evanescent Coupling Between Dielectric and Plasmonic Waveguides for HAMR Applications" , IEEE Trans. Magn., Vol. 47, no. 10, pp. 2364–2367 (2011).
- (8) T. Matsumoto, F. Akagi, M. Mochizuki, H. Miyamoto, and B. Stipe, "Integrated head design using a nanobeak antenna for thermally assisted magnetic recording" , Opt. Exp., Vol. 20, no. 17, pp. 18946–18954 (2012).
- (9) Yoshito Ashizawa, Takeshi Ota, Kyosuke Tamura, and Katsuji Nakagawa, "Highly Efficient Waveguide Using Surface Plasmon Polaritons for Thermally Assisted Magnetic Recording" , J. Magn. Soc. Jpn., Vol. 37, no. 3–2, pp. 111 (2013).
- (10) K. Tamura, T. Ota, Y. Ashizawa, A. Tsukamoto, A. Itoh, S. Ohnuki, and K. Nakagawa, "Circularly Polarized Light Generated by Plasmon Antenna for All-Optical Magnetic Recording" , J. Magn. Soc. Jpn., Vol. 37, no. 3–2, pp. 115–118 (2013).
- (11) T. Matsumoto, Y. Anzai, T. Shintani, K. Nakagawa, and T. Nishida, "Writing 40 nm marks by using a beaked metallic plate near-field optical probe" , Opt. Lett., Vol. 31, no. 2, pp. 259–261 (2006).
- (12) W. A. Challener, Chubing Peng, A. V. Itagi, D. Karns, Wei Peng, Yingguo Peng, XiaoMin Yang, Xiaobin Zhu, N. J. Gokemeijer, Y.-T. Hsia, G. Ju, Robert E. Rottmayer, Michael A. Seigler, and E. C. Gage, "Heat-assisted magnetic recording by a near-field transducer with efficient optical energy transfer" , Nature Photn., Vol. 3, no. 4, pp. 220–224 (2009).
- (13) Y. Moriyama, Y. Ashizawa, K. Nakagawa, T. Sako, and A. Itoh, "Heat Conduction Analysis of Magnetic Recording Media for Thermally Assisted Magnetic Recording" , J. Magn. Soc. Jpn., Vol. 33, no. 6–2, pp. 517–520 (2009).
- (14) Katsuji Nakagawa, Yoshito Ashizawa, Shinichiro Ohnuki, Akiyoshi Itoh, and Arata Tsukamoto, "Confined Circularly Polarized Light Generated by Nano-size Aperture for High Density All-Optical Magnetic Recording" , J. Appl. Phys., Vol. 109, no. 7, pp. 07B735 (2011).
- (15) K. Nakagawa, A. Tajiri, K. Tamura, S. Toriumi, Y. Ashizawa, and A. Tsukamoto, "Thermally Assisted Magnetic Recording Applying Optical Near Field with Ultra Short-Time Heating" , J. Magn. Soc. Jpn., Vol. 37, no. 3–2, pp. 119–122 (2013).
- (16) J. O. Vasseur, A. Akjouj, L. Dobrzynski, B. Djafari-Rouhani, and E. H. El Boudouti, "Photon, electron, magnon, phonon and plasmon mono-mode circuits" , Surf. Sci. Rep., Vol. 54, no. 1–4, pp. 1–156 (2004).
- (17) E. Ozbay, "Plasmonics: Merging Photonics and Electronics at Nanoscale Dimensions" , Science, Vol. 311, no. 5758, pp. 189–193 (2006).
- (18) Pierre Berini and Israel De Leon: "Surface plasmon-polariton amplifiers and lasers" , Nature Photn., Vol. 6, no. 1, pp. 16–24 (2011).
- (19) J. B. González-Díaz, A. García-Martín, G. Armelles, J. M. García-Martín, C. Clavero, A. Cebollada, R. A. Lukaszew, J. R. Skuza, D. P. Kumah, and R. Clarke. Phys. Rev. B, Vol. 76, p. 153402 (2007).
- (20) Vasily V. Temnov, Gaspar Armelles, Ulrike Woggon, Dmitry Guzatov, Alfonso Cebollada, Antonio Garcia-Martin, Jose-Miguel Garcia-Martín, Tim Thomay, Alfred Leitenstorfer, and Rudolf Bratschitsch: "Active magneto-plasmonics in hybrid metal-ferromagnet structures" , Nature Photn., Vol. 4, no. 2, pp. 107–111 (2010).
- (21) Yoshito Ashizawa, Takeshi Nawata, Shusaku Shinohara, and Katsuji Nakagawa, "Surface Plasmon Resonance in Co/Cu Sputtering films" , 2nd International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications, QE-07, 2010, Sendai, JAPAN.
- (22) Yoshito Ashizawa, Shusaku Shinohara, Takeshi Nawata, and Katsuji Nakagawa, "Dependence of Magnetic Response of Surface Plasmon Resonance on Applied

- Field Direction”, Magnetics and Optics Research International Symposium (MORIS) 2011, P103, 2011, Nijmegen, The Netherlands.
- (2 3) Toru Tachikawa, Yoshito Ashizawa, and Katsuji Nakagawa, “Magnetic Response of Surface Plasmons in Ag75Co25 Non-Solid Solution Films”, J. Magn. Soc. Jpn., Vol. 38, pp. 135–138, (2014).
- (2 4) Yoshito Ashizawa, Yusuke Tada, and Katsuji Nakagawa, “Magnetic response of surface plasmon in Ag-Ni single layer thin films prepared by RF magnetron sputtering”, The 11th Asia-Pacific Conference on Near-field Optics, No. 108, July 11, 2017, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan.
- (2 5) Yoshito Ashizawa, Kenta Bando, and Katsuji Nakagawa, “SURFACE PLASMON RESONANCE WITH MAGNETIC ACTIVITY IN Ag-Co SINGLE LAYER SPUTTERING FILMS ON ORGANIC SUBSTRATE”, Magnetics and Optics Research International Symposium 2018, Mo-P-27, Jan. 8, 2018, Queens College of The City University of New York, New York, USA.
- (2 6) Kazuki Narushima, Yoshito Ashizawa, Kerstin Brachwitz, Holger Hochmuth, Michael Lorenz, Marius Grundmann, and Katsuji Nakagawa, “Magnetic activity of surface plasmon resonance using dielectric magnetic materials fabricated on quartz glass substrate”, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 55, pp. 07MC05-1–07MC05-4 (2016).
- (2 7) T. Kajita, Y. Ashizawa, and K. Nakagawa, “NiFe₂O₄ Thin Films Prepared by MOD Method for Magneto-plasmonic Effect”, 26th Annual Meeting of MRS-Japan 2016, A3-P21-008, Dec. 21, 2016, INDUSTRY & TRADE CENTER, Yokohama.
- (2 8) T. Manabe, I. Yamaguchi, M. Sohma, W. Kondo, K. Tsukada, K. Kamiya, S. Mizuta, and T. Kumagai, “Rectangular (1 cm × 12 cm) YBCO films prepared by MOD using spin-coating and wire-bar coating”, J. Phys. Conf. Ser., Vol. 43 pp. 366–368, (2008).
- (2 9) Terry G. Holesinger ; Xiaoping Li ; Martin W. Rupich, “Initial Stages of Nucleation and Growth in MOD YBCO Films”, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 19, pp. 3156–3159, (2009).
- (3 0) Min Liu, Hongli Suo, Shuai Ye, Dongqi Shi, Yue Zhao, Lin Ma, and Meiling Zhou, “YBCO Films With Zr⁴⁺ Doping Grown by MOD Method”, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 19, pp. 3403–3406, (2009).
- (3 1) Shuhei Hashimoto, Toshiyuki Sugie, Ziyang Zhang, Kaoru Yamashita and Minoru Noda, “Effects of final annealing in oxygen on characteristics of BaTiO₃ thin films for resistance random access memory”, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 54, pp. 10NA12-1–10NA12-5, (2015).
- (3 2) Takayuki Ishibashi, Aiko Mizusawa, Masataka Nagai, Shinichiro Shimizu, and Katsuaki Sato, “Characterization of epitaxial (Y,Bi)₃(Fe,Ga)5O₁₂ thin films grown by metal-organic decomposition method”, J. Appl. Phys., Vol. 97, pp. 013516 (2005).
- (3 3) 池原成拓, 和田翔, 小林司, 後藤聰希, 吉田和彦, 石橋隆幸, 西敬生, 「MOD 法によるガラス基板上への Bi₃Fe₅O₁₂薄膜の作製と評価」, 日本磁気学会誌, Vol. 36, pp. 169–172 (2012).
- (3 4) Takayuki Ishibashi, Tomohiko Yoshida, Tsukasa Kobayashi, Shigehiro Ikebara, and Takao Nishi, “Preparation of Y_{0.5}Bi_{2.5}Fe₅O₁₂ films on glass substrates using magnetic iron garnet buffer layers by metal-organic decomposition method”, J. Appl. Phys., Vol. 113, pp. 17A926-1–17A926-3 (2013).
- (3 5) Nobuyasu ADACHI, Toshitaka OTA, “Crystallinity and magnetic properties of Bi₃Fe₅O₁₂ thick film prepared by MOD technique”, J. Cer. Soc. Jpn., 122, 40 (2014).
- (3 6) S. Geller, G. P. Espinosa, and P. B. Crandall, “Thermal expansion of yttrium and gadolinium iron, gallium and aluminum garnets”, J. Appl. Cryst., Vol. 2, pp. 86–88, (1969).
- (3 7) V.J. Fratello, S.J. Licht, C.D. Brandle, H.M. O'Bryan, F.A. Baiocchi, “Effect of bismuth doping on thermal expansion and misfit dislocations in epitaxial iron garnets”, J. Cryst. Growth, Vol. 142, pp. 93–102, (1994).