

GdFe 合金薄膜における Gd 磁気モーメントと異常ホール効果の相関

蜂須賀 裕重¹, 笠谷 雄一^{2,3}, 吉川 大貴², 塚本 新²(¹ 日本大学大学院理工学研究科, ² 日本大学理工学部, ³ 日本学術振興会特別研究員-PD)

Correlation of Gd magnetization and anomalous Hall effect in GdFe alloy thin film

Hiroshige Hachisuka¹, Yuichi Kasatani^{2,3}, Hiroki Yoshikawa², Arata Tsukamoto²(¹ Graduate School of Science and Technology, Nihon Univ., ² College of Science and Technology, Nihon Univ., ³ JSPS Research Fellow)

はじめに 異常ホール効果は膜面垂直方向の磁化成分 $M_S \cos \theta$ に比例する。代表的な強磁性体である Fe 薄膜の磁化が形状磁気異方性に打ち勝ち、膜面垂直方向に飽和させるには約 20 kOe の強磁場を必要とする。そのため、低磁場でのホール電圧は小さい。そこで、主として局在電子が磁気モーメントを担う Gd と遍歴電子が磁気モーメントを担う Fe の磁気モーメントの反平行結合に由来し、正味の磁化の減少、形状磁気異方性の低減、そして磁化補償組成近傍では垂直磁気異方性を発現する GdFe 合金薄膜に着目した。また異常ホール効果において遍歴電子が磁気モーメントを担う Fe が伝導電子に強く影響を与えるものと考えられるが、原子当たりの磁気モーメント量の大きな Gd による寄与度も重要となる。そこで、GdFe 合金薄膜における異常ホール効果の広範囲な組成依存性の検討を行った。

実験方法 試料はガラス基板上に SiN (60 nm) / Gd_xFe_{100-x} (20 nm) / SiN (5 nm) / glass sub. ($x = 0, 10, 16.7, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100$ at. %) をマグネトロンスパッタリング法により作製した。室温にて膜面垂直方向に外部磁場を印加し、面内に 0.1mA の電流を印加した際の電流に対して垂直方向の電圧を測定した。また試料振動型磁力計を用いて 300 K における磁気特性を計測した。

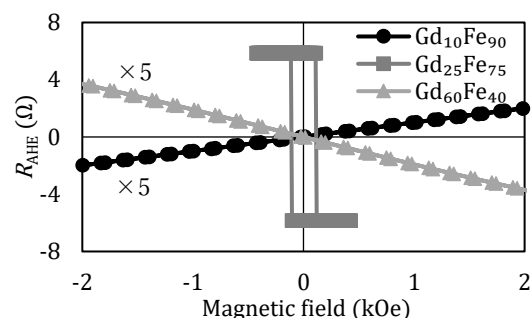
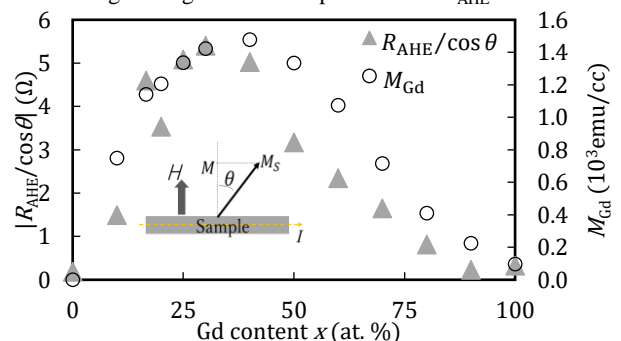
実験結果及び考察 Fig. 1 に電圧計測より求めた異常ホール抵抗 (R_{AHE}) を示す。 R_{AHE} は大きな組成依存性を示した。特に Gd 組成 $x = 25$ at. % で膜面垂直方向に磁化容易軸を持ち無磁場下でも大きな異常ホール効果が計測された。また、Gd 組成 $x = 10, 60$ at. % では磁化容易軸が面内方向となり R_{AHE} は 4kOe においても飽和せず、Gd 組成 $x = 25$ at. % に比べが低いことが確認された。

Fig. 2 に磁気特性の計測より印加磁場 4 kOe における磁化角度 θ から求めた磁化角度無依存定数 $|R_{AHE}/\cos \theta|$ を示す。Gd 組成 Fe 薄膜に対し Gd 組成 x の増大と共に $|R_{AHE}/\cos \theta|$ が増加し、Gd 組成 $x = 30$ at. % において Fe ($x = 0$ at. %) と比べて最大約 30 倍と大きな効果が得られた。また、Gd 組成 $x > 40$ at. % では単調な $|R_{AHE}/\cos \theta|$ の減少がみられた。次に、Fe の正味の磁化が組成 x の増加に対し一様に減少すると仮定し見積もった Gd の単位体積当たりの有効磁気モーメント M_{Gd} の組成依存性を Fig. 2 に示す。Gd 組成 $x = 40$ at. % 程度まで M_{Gd} が増加し、Gd 組成 $x > 40$ at. % では M_{Gd} が減少した。一方、Fe に対して Gd の異常ホール係数は約 10 倍大きい^{1,2)}と報告されている。これらのことから異常ホール効果の増減と Gd の磁気モーメントに強い相関があることが示唆された。

謝辞 本研究の一部は平成 25~29 年度文部科学省私立大学戦略的基盤形成支援事業 (S1311020)、平成 26~30 年度文部科学省科学研究費援助金「新学術領域研究 (研究領域提案型)」ナノスピン変換科学の助成を受けて行った。

参考文献

- 1) T. R. McGuire, J. A. Aboaf and E. Klokholm; IEEE Trans. Magn. 20, 5 (1984)
- 2) N. V. Volkenshtein, I. K. Grigorova, and G. V. Fedorov; Soviet Physics JETP 50 (1966)

Fig. 1 Magnetic field dependence of R_{AHE} .Fig. 2 Composition dependence of $|R_{AHE}/\cos \theta|$ and M_{Gd} .

Tb₁₂Co₈₈ アモルファス垂直磁化膜の磁化反転挙動の温度変化

原子 秋乃、櫻井 浩、拝詞 健人、劉 小晰*、馬 闖*、鈴木 宏輔、星 和志、辻 成希**、櫻井 吉晴**、
安居院 あかね***

(群馬大、*信州大、**JASRI、***QST)

Temperature dependence of the magnetization switching behavior
of a Tb₁₂Co₈₈ amorphous perpendicular magnetic anisotropy film

A. Harako, H. Sakurai, K. Haishi, X. Liu, C. Ma*, K. Suzuki, K. Hoshi, N. Tsuzi**, Y. Sakurai**,
and A. Agui***

(Gunma Univ, *Shinshu Univ., **JASRI, ***QST)

はじめに

我々は、磁気コンプトン散乱を用いて、磁性薄膜のスピ選択磁化曲線 (Spin Specific Magnetic Hysteresis curve: SSMH)、軌道選択磁化曲線 (Orbital Specific Magnetic Hysteresis curve: OSMH) を測定する手法を提案している¹⁻⁴⁾。本研究では、近年磁気トンネル接合で磁気スイッチングを制御する目的で導入されている垂直磁気異方性を有する希土類・遷移金属アモルファス薄膜 (TbCo アモルファス薄膜) の磁化反転挙動の温度依存性を調べることを目的とした。

実験方法

Tb₁₂Co₈₈ 単層膜を Al 基板上に DC スパッタリング法で作製した。組成は EPMA で決定した。XRD によりアモルファス構造を確認した。SQUID 磁力計を用いて全磁化曲線を求めた。SPring-8 BL08W にて磁気コンプトン散乱実験を行い、SSMH を求め、全磁化曲線と SSMH の差より OSMH を求めた。

実験結果

Fig.1 に試料面直方向に-2.5T から 2.5T の磁場をかけたときの全磁化曲線、SSMH、OSMH の温度変化を示す。温度減少と共に保磁力は増大するが全磁化曲線、SSMH、OSMH の保磁力はそれぞれ一致している。また、各温度の SSMH と OSMH の比は一定であった。次に全磁気モーメント、スピン磁気モーメントと軌道磁気モーメントの 2.5T の飽和磁化の温度変化を調べた。その結果、温度低下と共に全磁気モーメントは減少した。これは、スピン磁気モーメントが減少し、全磁気モーメントと逆を向いている軌道磁気モーメントの大きさは増大するためである。さらに、これは Tb 磁気モーメントと Co 磁気モーメントの温度変化を反映すると考えられる。

参考文献

- 1) A. Agui et al., J. Synchrotron Rad. 17 (2010) 321.
- 2) A. Agui et al., APEX 4 (2011) 083002.
- 3) A. Agui et al., J. Appl. Phys., 114 (2013) 183904.
- 4) A. Agui et al., Mater. Res. Express, 4 (2017) 106108.

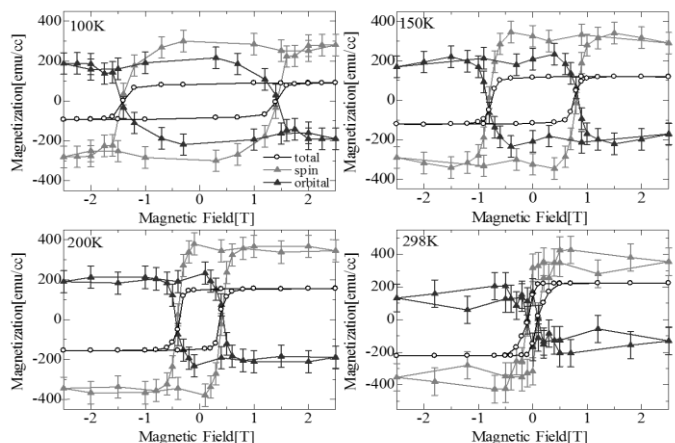


Fig. 1

Fe-Al(001)単結晶薄膜の Gilbert ダンピング定数

川井哲郎・武田 茂*・大竹 充・二本正昭**

(横浜国大, *Magnontech, **中央大)

Gilbert damping constant of Fe-Al(001) single-crystal films

Tetsuroh Kawai, Shigeru Takeda, Mitsuru Ohtake, and Masaaki Futamoto

(Yokohama National University, *Magnontech, Ltd., **Chuo University)

はじめに スピントロニクス進展に伴い磁性薄膜の Gilbert ダンピング定数を精度良く測定することの重要性が増している¹⁾。磁場掃引強磁性共鳴の吸収幅 (ΔH) から Gilbert ダンピング定数を求める方法は良く知られている²⁾。本報告では Fe-Al(001)単結晶薄膜を例として、周波数掃引強磁性共鳴の吸収幅 ($\Delta\omega$) から Gilbert ダンピング定数を求める方法について報告する。Fe-Al 合金薄膜は幅広く実用化されているだけでなく、軟磁気特性に優れているので $\Delta\omega$ に及ぼすさまざまな要因を分離しやすいと考え測定試料に選んだ。

実験方法 Fe-Al 合金ターゲットを使用して UHV RF マグネトロンスパッタ法で MgO(001)単結晶基板の上に厚さ 40 nm の膜を作製した。基板温度は 300 °C の一定温度とした。膜の構造が bcc(001)単結晶膜であることを RHEED と XRD で確認した。1 kOe までの静磁場を膜面内に印加して周波数掃引で強磁性共鳴(FMR)の測定を行なった³⁾。最大周波数は 10 GHz である。共鳴吸収の半値幅 ($2\Delta\omega$) を ΔH に換算して Gilbert ダンピング定数を求めた。

実験結果と考察 Fe₈₀Al₂₀(001)単結晶薄膜の困難軸方向 ($//\text{bcc}[110]$) に 1 kOe までの静磁場を印加した時の共鳴周波数(f_r)の磁場依存性を Fig. 1 に示す。異方性磁場近くで f_r が一旦小さくなり、さらに磁場が大きくなるとそれにつれて f_r も大きくなるという典型的な単結晶膜の挙動を示している。充分飽和していると考えられる 845 Oe の静磁場を印加した時の FMR 測定例を Fig. 2 に示す。実線は LLG 方程式の解から計算した値を示す(計算に使ったパラメーターは図中に記載)。一見、ダンピング定数 $\alpha=0.009$ で実験と計算が良く一致しているように見える。しかし、 $\Delta\omega$ には Gilbert ダンピング定数だけでなくさまざまな外部因子の影響も含まれることが知られている。そこで、磁場掃引の場合と同様な解析を行うため、 $\Delta\omega$ を ΔH に換算し、充分飽和していると考えられる領域で ΔH の f_r 依存性を示したのが Fig. 3 である。直線近似した傾きから算出した Gilbert ダンピング定数は $\alpha=0.005$ 程度である。本実験では f_r に依存しない ΔH_0 が 30 Oe 程度と大きな値となった。今後はこのように ΔH_0 が大きくなった原因を明らかにする。

参考文献

- 1) J. C. Slonczewski, *J. Magn. Magn. Matter.*, **159**, L1 (1996).
- 2) S. S. Kalarickal et al., *J. Appl. Phys.*, **99**, 093909 (2006).
- 3) S. Takeda and H. Suzuki, *J. Magn. Soc. Jpn.*, **33**, 171 (2009).

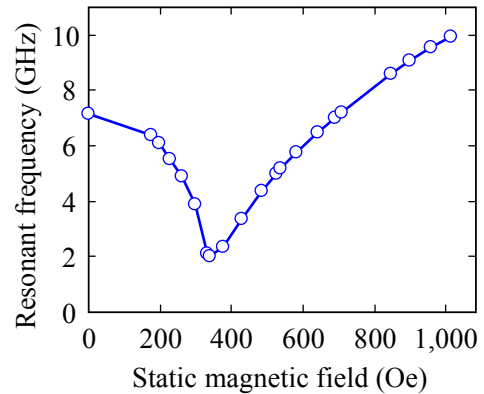


Fig. 1 Static magnetic field dependence of resonant frequency measured for an Fe₈₀Al₂₀(001) single-crystal film.

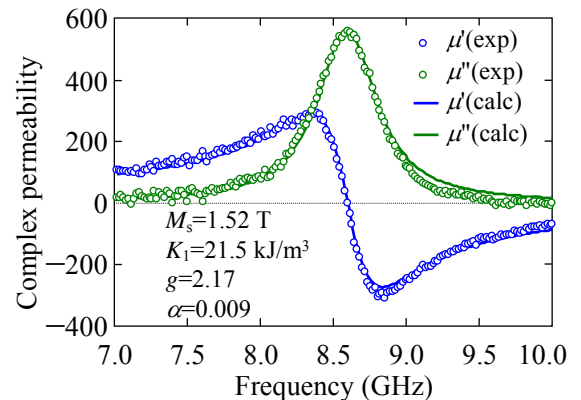


Fig. 2 Measured complex permeability for the Fe₈₀Al₂₀(001) single-crystal film. Circles are experiments and the solid lines are calculations.

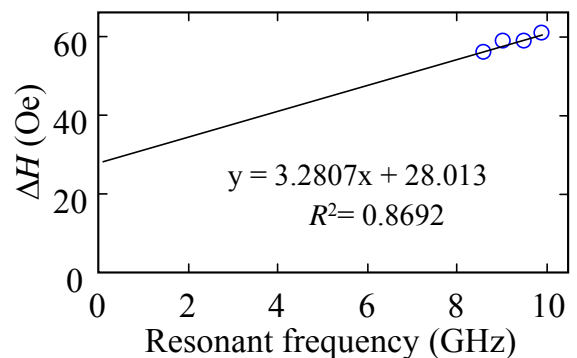


Fig. 3 Resonant frequency dependence of ΔH of the Fe₈₀Al₂₀(001) single-crystal film.

XMCD と第一原理計算から見た Mn_{3-x}Ga の垂直磁気異方性

岡林潤¹、小田洋平²、鈴木和也^{3,4}、佐久間昭正^{5,4}、水上成美^{3,4}

¹東大理、²福島高専、³東北大 AIMR、⁴東北大 CSRN、⁵東北大工

Perpendicular Magnetic Anisotropy in Mn_{3-x}Ga studied by XMCD and first-principles calculations

Jun Okabayashi¹, Yohei Kota², Kazuya Z. Suzuki^{3,4}, Akimasa Sakuma^{5,4}, and Shigemi Mizukami^{3,4}

¹The Univ. of Tokyo, ²NIT Fukushima Collage, ³AIMR, Tohoku Univ., ⁴CSRN, Tohoku Univ., ⁵Tohoku Univ.

Introduction

Magnetic ordered alloys have attracted significant attention for use as spintronics materials because they are highly likely to exhibit perpendicular magnetic anisotropy (PMA). Tetragonal Mn_{3-x}Ga alloys are widely recognized as hard magnets which exhibit high PMA, ferromagnetic or ferrimagnetic properties depending on Mn composition, and metallic properties [1]. Two kinds of Mn sites, which couple antiferromagnetically, consist of the Mn_{3-x}Ga with the D_{022} -type ordering. On the other hand, the L_{10} -type ordered Mn_1Ga alloy possesses the single Mn site. In order to investigate the mechanism of PMA and large coercive fields in Mn_{3-x}Ga , site-specific magnetic properties have to be investigated explicitly. X-ray magnetic circular dichroism (XMCD) can become a powerful tool to study them. However, the difficulty in deconvolution of two kinds of Mn sites has prevented the site-resolved detailed investigations. Some assumptions are required for the analysis [2]. First-principles calculations were also performed, resulting in the small orbital moment anisotropy in the Mn compound cases because of the spin-flip contribution of MA [3]. In this study, we perform the deconvolution of each Mn site using the systematic XMCD measurements for different Mn contents in Mn_{3-x}Ga . We discuss the site-specific spin and orbital magnetic moments which are deduced from angular-dependent XMCD and compare with the density-functional-theory (DFT) calculations.

Experimental

The samples were prepared by magnetron sputtering on MgO substrates. On the 40-nm-thick Cr and 30-nm-thick CoGa buffer layers [4], 3-nm Mn_{3-x}Ga were deposited at room temperature and capped by the 2-nm-thick MgO layer. We prepared the samples of $x=0$ (Mn_3Ga), 1 (Mn_2Ga), and 2 (Mn_1Ga) cases. X-ray diffraction peaks originated from D_{022} and L_{10} -type orderings were clearly observed. The X-ray absorption spectroscopy (XAS) and XMCD were performed at BL-7A in the Photon Factory (KEK). The total-electron-yield mode was adopted, and all measurements were performed at room temperature.

Results

Mn $L_{2,3}$ -edge XAS in Mn_{3-x}Ga showed clear metallic line shapes. XMCD intensities decreased with increasing the Mn contents, resulting in antiferromagnetic coupling. With increasing Mn contents, the fine structures in XMCD line shapes which come from two kinds of Mn sites were clearly detected. Based on the spectrum of Mn_1Ga which consists of single Mn site, the subtraction from Mn_1Ga XMCD spectrum after the normalization of spectral intensities deduces the anti-parallel coupled another Mn site. After the deconvolution processes, the spin and orbital magnetic moments for each site were estimated using magneto-optical sum rules. Furthermore, clear hysteresis curves at Mn L_3 -edge XMCD were also detected, which was consistent with the results of magneto-optical Kerr effects. In the presentation, we discuss the site-specific magnetic properties depending on the Mn contents and compared with the DFT calculations.

This work was in part supported by KAKENHI and the ImPACT program.

References

- [1] S. Mizukami *et al.*, Mn-based hard magnets with small saturation magnetization and low spin relaxation for spintronics, *Scr. Mater.* **118**, 70 (2016).
- [2] K. Rode *et al.*, Site-specific order and magnetism in tetragonal Mn_3Ga thin films, *Phys. Rev. B* **87**, 184429 (2013).
- [3] Y. Kota and A. Sakuma, Mechanism of Uniaxial Magnetocrystalline Anisotropy in Transition Metal Alloys, *J. Phys. Soc. Jpn.* **83**, 034715 (2014).
- [4] K. Z. Suzuki *et al.*, Perpendicular magnetic tunnel junction with a strained Mn-based nanolayer, *Sci. Rep.* **6**, 30249 (2016).

Fe-Ga 合金単結晶の<100>方向への引張りおよび圧縮応力印加による磁区構造の変化

藤枝 俊*、浅野晨平*、志村玲子*、栢 修一郎**、石山和志**、福田承生***、鈴木 茂*
(*東北大学 多元研、**東北大学 通研、***福田結晶研)

Modulation of magnetic-domain structure of Fe-Ga alloy single crystal by applying tensile and compression stresses parallel to a <100> direction

S. Fujieda*, S. Asano*, R. Simura*, S. Hashi**, K. Ishiyama**, T. Fukuda*** and S. Suzuki*
(*IMRAM Tohoku University, **RIEC Tohoku University, ***Fukuda Crystal Laboratory)

背景

Fe-Ga 合金を利用した振動発電デバイスは、身の回りの振動を高効率に電気エネルギーに変換できるため IoT (Internet of Things) への応用が期待される¹⁾。このデバイスでは、コイルの中に Fe-Ga 合金を配置する。Fe-Ga 合金が振動により引張られたり圧縮されたりすると、逆磁歪効果に起因した磁区構造の変化によりコイルを貫く磁束が変化するため電磁誘導により誘導起電力が生じる²⁾。しかし、逆磁歪効果に起因した磁区構造の変化の詳細は明らかでない。そこで、本研究では、Fe-Ga 合金単結晶の磁化容易軸である<100>方向へ引張りおよび圧縮応力を印加した状態で磁区観察を行い、磁区構造に及ぼす逆磁歪効果の影響を調べた。

実験方法

Czochralski (CZ) 法により作製した大型 Fe-Ga 合金単結晶から板面が(001)面および縦方向が[010]方向(応力印加方向)の試験片を切り出した。結晶方位は、背面反射 Laue 法により評価した。Kerr 効果顕微鏡を用いて Fe-Ga 合金単結晶(001)面の磁区観察を行い、特別に作製した治具を用いて応力を印加した。

実験結果

図 1(a)に[010]方向と平行の観察光を用いて得た応力印加前における Fe-Ga 合金単結晶の(001)面の磁区構造を示す。推察される磁化方向を矢印で示す。Fe-Ga 合金単結晶の(001)面の磁区構造は、面内の 4 つの<100>磁化容易軸方向を磁化方向とする磁区および階段状の 180° 磁壁と直線的な 90° 磁壁で構成されることが報告されている³⁾。同様の特徴は図 1(a)において確認される。このような状態の Fe-Ga 合金単結晶の[010]方向と平行に 16 MPa の引張り応力を印加した状態の磁区構造を図 1(b)に示す。引張り方向と平行の<100>方向を磁化方向とする磁区および直線的な 180° 磁壁で構成された縞状磁区が観察される。図 1(c)および(d)に[100]方向と平行の観察光を用いて得た同一箇所の圧縮応力印加前後における磁区構造を示す。12 MPa の圧縮応力の印加により、圧縮方向と垂直の<100>方向を磁化方向とする磁区および直線的な 180° 磁壁で構成された縞状磁区が観察される。本合金において、<100>方向の磁歪定数は正の値を示すため磁歪により結晶格子は磁化方向に伸びている。従って、磁区構造は引張りおよび圧縮応力を緩和するように変化する。逆磁歪効果が Fe-Ga 合金単結晶の磁区構造に及ぼす影響の特色が明らかになった。

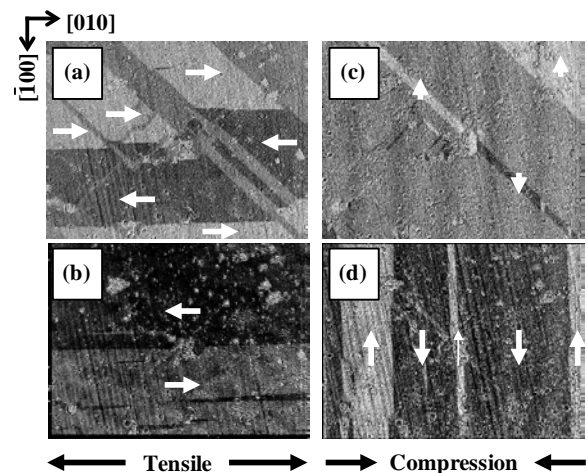


図 1 Fe-Ga 合金単結晶の(001)面の磁区構造。(a) 引張り応力印加前、(b) 16 MPa の引張り応力下、(c) 圧縮応力印加前、(d) 12 MPa の圧縮応力下。(a)および(b)は[010]方向と平行の観察光で撮影。(c)および(d)は[100]方向と平行の観察光で撮影。

参考文献

- 1) T. Ueno and S. Yamada, IEEE Trans. Magn., **47** (2011) 2407.
- 2) S. Fujieda, S. Suzuki, A. Minato, T. Fukuda and T. Ueno, IEEE Trans. Magn., **50** (2014) 2505204.
- 3) S. Asano, S. Fujieda, S. Hashi, K. Ishiyama, T. Fukuda and S. Suzuki, IEEE Magn. Lett. **8** (2017) 6101004.