

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H03878

研究課題名(和文)室温純粋円偏光スピン発光ダイオードの作製方法ならびに動作原理の確立

研究課題名(英文) A study on preparation method of room-temperature pure-circular polarization spin LED and its physical mechanisms

研究代表者

宗片 比呂夫 (Munekata, Hiro)

東京工業大学・科学技術創成研究院・教授

研究者番号：60270922

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,300,000円

研究成果の概要(和文)：スピン発光素子で純粋な円偏光が得られるという実験の再現と物理的機構解明に挑んだ。新しい素子化工程とパルスのスピン注入実験により、1平方センチメートルあたり100Aを超える領域で円偏光増大が開始されることを見出すとともに、これを越えると、素子の短絡化・発光強度劣化が開始されることを見出した。このことは局所発熱によるフォノン数増大が円偏光増大と素子特性変化に関わっている可能性を示唆している。すなわち、注入電子の右・左まわりスピンのフォノンとの非弾性散乱により片方のスピン成分に偏極する。発光の再吸収・再放出も関与するだろう。一方、光強励起による実験は、用意した光源の光励起密度が足りずに失敗に帰した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

新しい素子化工程とは、極薄AlAs結晶層の積極的酸化によるスピン注入バリアの形成、ならびに、メカニカルマスクによる微小スピン注入電極の直接形成を指すが、基礎研究を小回り良く(少量・多種類)進めることに向けた手法である。電流パルスによるスピン注入実験、こちらは半導体レーザー研究開発において局所加熱を回避する手法であるが、円偏光増大に際してフォノンが寄与する可能性が高いことをえぐり取ったという点で、理論提唱された円偏極フォノン [J. Kishineら, PRL 125, 245302 (2020)] とキャリアスピンとの間の散乱の重要性を示唆する結果であり、今後の波及効果が期待される。

研究成果の概要(英文)：We have challenged reproduction and physical elucidation of pure circular polarization (CP) electroluminescence (EL) from spin LED reported on 2017. Lithography-free new device process and pulsed current/spin injection approach have made it possible to observe the CP enhancement occurring at 30 to 100 A per square cm or higher region, beyond which dynamic reductions in both EL intensity and junction resistance take place simultaneously. These facts suggest that local heating, presumably around oxide barriers in between metal spin injectors and semiconductor layers, enhances CP values as well as alters electronic/optical characteristics of diodes through abrupt generation of phonons. Namely, pulse-injected hot spins whose spin population are initially weakly polarized are strongly CP polarized via non-elastic scattering with phonons. Re-absorption and -emission also assist this scattering process. Optical spin injection experiments have failed because of the lack of excitation power.

研究分野：応用物理学、物性物理学

キーワード：スピントロニクス スピントロニクス 円偏光発光ダイオード 偏光 医療光学 がん検診

1. 研究開始当初の背景

ここ 30 年間、スピンの絡む物理現象とその応用展開に関する研究進展は目覚ましい。とりわけ、巨大磁気抵抗の発見 (1988 年) を契機に磁性金属系でのそれは目覚ましい。

半導体系では、半導体性と磁性を融合した III-V 族磁性半導体の創成 (1989 年) およびスピンの電界制御の提案 (1990 年) 以降、磁性の光・電界制御 (1997・2000 年)、スピンのキュービット (1998 年)、スピン偏極発光ダイオード (1999 年)、スピン MOS 電界効果トランジスタ (2004 年) などが実証もしくは提唱されてきたが、室温動作を予感させる実験結果はほとんど得られてこなかった。というのも、元来、半導体は非磁性体であるためにデバイス中のスピン情報が熱擾乱で散逸しやすいからである。本課題で扱うスピン偏極発光ダイオード (以下 spin-LED) もその例に漏れず、電子キャリアスピンを円偏光に変換する機構を内蔵する spin-LED において、室温で達成された円偏光度 P_{CL} の最大値は $P_{CL} = 0.47$ という報告が一例だけであった [PRL94, 056601 (2005)]。しかし、我々が独自に 2010 年ごろに着想・提唱し、研究を重ねてきた横型 Fe-spin-LED (図 1) に電流密度 $J \sim 100 \text{ A/cm}^2$ 以上流すと、円偏光度 $P_{CL} = 0.98$ を越えるエレクトロルミネッセンスが得られたのであった (図 1、[1])。我々は、半導体共振器中での誘導放射による円偏光増幅が 2008 年に理論提案されていたこと [APL 93, 042513] を意識して、円偏光度を飛躍的に増大させる実験準備を進めていたので、得られた実験結果は思いがけなかった。というのも、円偏光増幅理論では、低電流領域 ($J \sim 1 \text{ A/cm}^2$ 程度) で有限の強度差が生じている右・左まわり円偏光 (観測上は楕円偏光) が J 増大によって双方とも徐々に増加し、光増幅閾値を先に超えた一方の円偏光にモード集中が起きて円偏光度が急上昇するが、劣勢円偏光モードは消滅しないと予測されるのに対して、我々の実験データでは「 J 増大によって劣勢円偏光がほぼ完全に消滅して純粋円偏光が発現する」からである (図 2 右)。すなわち、2017 年に論文公開した実験結果 [1] は、最新の円偏光増幅理論を含む既存の知見では説明困難であった。これが、本課題申請の核心となる学術的な「問いかけ」である。

[1] N. Nishizawa, K. Nishibayashi, and H. Munekata, Proc. Natl. Acad. Sci. USA **114**, 1783-1788 (2017).

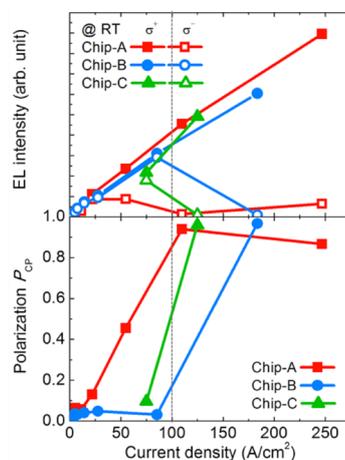
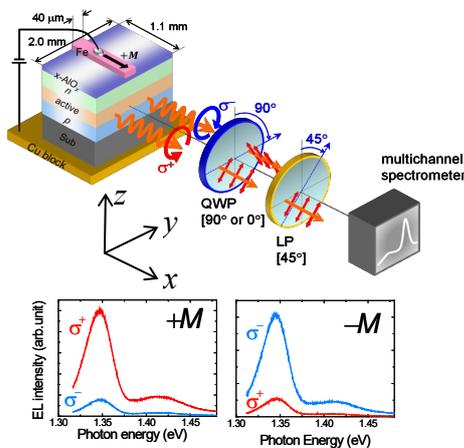


図 1 (左) : 横型 spin-LED と光学実験配置の概要図、ならびに、磁化の向きに対応する円偏光発光スペクトル。

(右) : 右 ($\sigma+$) および左 ($\sigma-$) 回り円偏光発光強度および円偏光度 P_{CL} の電流密度依存性。この実験では、 $P_{CL} = \{I(\sigma+) - I(\sigma-)\} / \{I(\sigma+) + I(\sigma-)\}$ と定義している。

2. 研究の目的

電子キャリア注入から発光に至る微視的プロセスを吟味・整理しながら、具体的な目的と学術的新規性・創造性を述べる。 x 軸 (面内、図 1 参照) に着磁した強磁性体電極から半導体に注入された電子キャリアスピン ($+, -x \text{ spin}$, 図 2 では $\rightarrow \leftarrow \text{ spin}$) はある程度緩和して y, z 軸成分を持った状態 (図 2 では、 $\odot \otimes$ が $y \text{ spin}$, $\uparrow \downarrow$ が $z \text{ spin}$) で発光層に達し、正孔キャリア (スピン無偏極) と再結合発光 (以下 EL 発光と呼ぶ) する。この発光を $+x$ 軸から観測すると (図 2・3)、 $\pm x \text{ spin}$ からの発光はそれぞれ右 ($\sigma+$, 強度 $I(\sigma+)$) ないし左円偏光 ($\sigma-$, 強度 $I(\sigma-)$)、 $\pm y \text{ spin}$ からの発光は直線 (垂直) 偏光、 $\pm z \text{ spin}$ からの発光は直線 (水平) 偏光となっている。すなわち、実際の観測系では直線偏光成分は円偏光と無関係なバックグラウンド EL 発光 (強度 I_0) を与える。したがって、実験で得られる円偏光度 P_{CL} は、厳密には、 $P_{CL} = \{I(\sigma+) - I(\sigma-)\} / \{I(\sigma+) + I(\sigma-) + I_0\}$ と考えるべきであり、低電流密度領域での小さな P_{CL} の原因の一端は、 I_0 成分にあると思われる。再定義した P_{CL} を電流密度 J が大きな領域に適用すると、 P_{CL} が 1 に近くなるためには、 $I(\sigma-)$ ならびに I_0 成分が $I(\sigma+)$ へと転換していく必要がある。すなわち、電流密度

J が大きな領域では、 $-x$ spin、 $\pm y$ spin、 $\pm z$ spin が $+x$ spin へと転換して発光する過程が起きている。III-V 族半導体の電子帯と価電子帯は s , p_x , p_y , p_z 軌道が強く混成して形成されているので、電流密度が大きな状況下では「スピン軸転換」を伴う非線形な発光過程が起こる素地は十分にあると思われる。横型 spin-LED の作製方法を確立しつつ、既存の増幅理論とは異なる「スピン軸転換」を含めた室温純粋円偏光の発光機構解明を目指すことが本課題の学術的独自性と創造性であり、その過程で spin-LED を小型化・集積化可能な新しい円偏光光源へと育てるための基礎的事項を確立することが本課題の目的である。

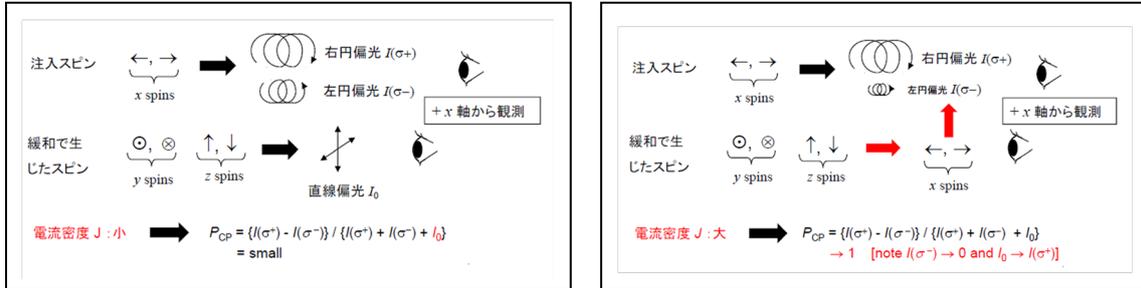


図2：小電流密度ならびに大電流密度における EL 発光中の円偏光成分まとめ

3. 研究の方法

このように、我々が世界に先がけて報告した室温純粋円偏光発光ダイオードを、新光源に育てるための学術的新知見を実験研究によって確立する。具体的には、① 新規トンネルバリア層として有望な結晶性アルミナ超薄膜の再現性良い作製法確立、ならびに、② 高電流密度注入による新規な光学的非線形現象の機構確立—円・直線偏光エレクトロルミネッセンス光のダイオード伝播によるスピン軸転換の検証—に取り組む。加えて、③ 円偏度を検出するための半導体フォトダイオード作製と評価、ならびに ④ スピン注入用強磁性体の作製と評価、を平行して進める。これらの研究を進めながら、⑤ 円偏光の医療応用展開のための基礎研究（共同研究者の西沢望が主導）を支援する。図3に背景・本課題・波及効果の関係を示す。

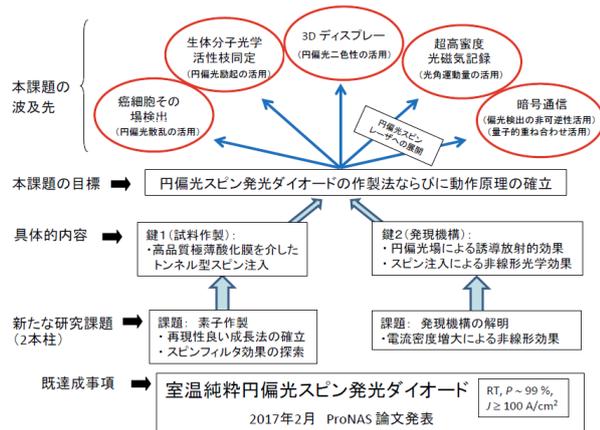


図3：本課題の骨子概要図

4. 研究成果

年度に沿って明らかになった実験事実ならびに得られた成果の概要を記す。

(1) 2018年度

横型 spin-LED において独自開拓した結晶性ガンマ-アルミナトンネルバリア層の改良研究により、我々は素子駆動について大幅な性能向上を達成した。具体的には、アルミ・ヒ素化アルミ2層エピタキシャル薄膜を酸化して得られる酸化バリア層を有する横型 spin-LED の3分の2の数において、ほぼ純粋な円偏光を発する素子を得ることができた。加えて、電流密度 J が $J=5-8 \text{ A/cm}^2$ から急激に上昇し、 $J = \text{約 } 10 \text{ A/cm}^2$ 程度で純粋円偏光発光に達することを見出した。 J の2乗に比例して立ち上がっているようで、ある種の非線形現象を示唆する結果を得た。現象論的な原理提案を行う手がかりである。簡単な耐久試験を行ってみると、円偏光度約30%の中程度の駆動電流密度を保つ状態において24時間以上にわたって連続駆動させても劣化が見られなかった。断面透過顕微鏡観察を外注し、結晶学的に精密な評価を行った結果、得られた酸化薄膜

は極めて均一性のよいアモルファスであることもわかった。すなわち、本課題開始時においては結晶性ガンマ-アルミナトンネルバリア層が必須であると考えていたが、そのような特殊なバリア層が必要でない可能性が示唆される。以上を要するに、結晶性ガンマ-アルミナトンネルバリア層を用いた素子では、純粋円偏光発光に $J=100\text{ A/平方 cm}$ 以上が必要であったが、2層酸化バリア開拓によって必要電流密度が優に一桁低下したことは重要な達成事実である。局所的に酸化不足で金属的なピンホール生成がアモルファス酸化薄膜によって抑制され、電極直下のみスピン偏極電流を集中して流せるようになったものと推測される。いっぽうで、駆動電流 10 A/平方 cm 以上の状態を数時間保つと、テスト中の素子の電流電圧特性が突然（1秒以下）変化し、同時に無EL状態に移行してしまう問題が未解決状態で残った。

(2) 2019年度

2層酸化アモルファスバリア層を実装した spin-LED 素子に関する実験結果と考察を、日米欧で開催の国際会議 4 件にて世界のフォトニクス研究者に発信するとともに、速報会議録の形で刊行した [Proc. of SPIE Vol. 11288 112880Q 1-6 (2020)]。研究室においては、新たに加わった非常勤研究員、常勤教員、客員研究員、修士課程の大学院学生らとともに、2層酸化アモルファスバリア層を実装した spin-LED 素子の断面透過顕微鏡による評価、アモルファスバリア層形成条件の探索、素子に注入されたキャリア輸送の理論解析、円偏光誘起効果に関する光学実験、無EL状態移行（素子劣化）と素子作製プロセスとの関連、などの課題を遂行した。透過顕微鏡観察により、スピン注入電極直下のアモルファスバリア層がほぼ消失し、電極以外の領域ではバリア層が均一に残存していることがわかった。フォトリソグラフ法による電極形成過程において、アモルファスバリア層がエッチングされる可能性が示唆される。分子線エピタキシー成長法を駆使した実験により、原子層レベルで平坦な酸化膜を得るには下地表面層の丁寧な処理が極めて重要であること、電子に対するトンネルバリア高さは 1 eV 以下程度であること、が示唆された。キャリア輸送の理論解析により、外部印加電界によって多量の正孔キャリアが誘起され得ることが示唆され、この過程を経由して素子内に再結合発光を伴わない電流パスが生じる可能性が高いことが実験により示された。円偏光・直線偏光同時照射による蛍光実験では、非線形現象を促すと期待される円偏光の強度不足が示唆された。幅 $40\mu\text{m}$ のストライプ電極上に低抵抗 GaAs チップを接着する工夫を導入し、小回りの利く素子づくり法を開拓した。2019年度は、これまでの素子設計と実験結果解釈で想定してこなかった問題点が顕在化し、新課題が追加された。

(3) 2020年度

2019年度は電極形成工程におけるスピン注入用トンネル酸化バリア層の溶解現象という当初の素子設計で想定しなかった問題が明らかとなった。加えて、素子の電気的特性が実験中に突然変化（低抵抗化）して無発光状態に移行してしまう問題も未解決で残った。これらを解決しない限り、国内外の研究機関を巻き込んだ研究開発機運を盛り上げることは難しい。そこで、コロナ禍中の今年度は、教員（宗片、西沢、加来）が中心となって、素子作製工程と素子駆動実験の見直しによって実験研究を進めた。結果、GaAs ダブルヘテロ構造上に極薄 AlAs エピタキシャル層を形成したのちに、これを低真空酸素雰囲気中で酸化する工程によりナノピンホールが極めて少ない酸化バリア層形成（強磁性原子 Fe の GaAs 部への拡散防止も兼ねる）、さらに、その上部にスパッタ堆積法とメカニカルマスクを組み合わせた強磁性電極直接形成工程を確立した。素子駆動実験では、研究室既存の電子機器を活用したパルス電圧励起法（パルス幅 100 マイクロ秒 ）を立ち上げ、電流密度換算 $1\text{ 平方センチメートルあたり }100\text{ A}$ を超える領域で円偏光の増大開始の痕跡を見出すとともに、この電流密度を越えると、電気特性の短絡化・発光強度劣化が開始されることを見出した。このことは、局所発熱によるフォノン数増大が素子劣化と円偏光増大に関わっている可能性を示唆している。すなわち、理論提唱されたカイラルフォノン [J. Kishine, et al, PRL 125, 245302 (2020)] とキャリアスピンとの間の散乱の重要性を示唆している。本課題で実施した光励起による円偏光増大に関する実験が不調に終わった原因は光波長の選択とともに光励起パワー不足によると推定される。フォノン発生を担保しつつ局所発熱を抑制することめざして課題研究終了後は 10 マイクロ秒 レベルの電圧パルス励起実験を継続する。極薄 AlAs エピタキシャル層を低真空酸素雰囲気中で基板温度 200°C にて酸化したバリア層を有する素子において、素子の動的短絡化過程において円偏光の急激な増大が起こる統計的実験データが得られている。

(4) 本課題遂行期間中に得られた成果：学術文献リスト

- [1] N. Nishizawa, M. Aoyama, R. C. Roca, K. Nishibayashi, H. Munekata: Arbitrary helicity control of circularly polarized light from lateral-type spin-polarized light-emitting diodes at room temperature; *Applied Physics Express* **11**, 053003 (2018). <https://doi.org/10.7567/APEX.11.053003>
- [2] R. C. Roca, N. Nishizawa, K. Nishibayashi, and H. Munekata: A lateral-type spin-photodiode based on Fe/x-AlOx/p-InGaAs junctions with a refracting-facet side window; *Journal of Applied Physics* **123**, 213903 (2018). <https://doi.org/10.1063/1.5026511> *Selected by "Editor's picks".
- [3] J. Okabayashi, Y. Miura, H. Munekata: Anatomy of interfacial spin-orbit coupling in Co/Pd multilayers using X-ray magnetic circular dichroism and first-principles calculations; *Scientific Reports* **8**, 8303 (2018). <https://www.nature.com/articles/s41598-018-26195-w> *Release at Tokyo Tech News (Japanese), May 29, 2018
- [4] B. Al-Qadi, Y. Sakatoku, N. Nishizawa, and H. Munekata; Imaging in-plane 90° magnetization switching in a (Ga,Mn)As epitaxial layer; *Journal of Applied Physics* **124**, 063901 1-8 (2018). <https://doi.org/10.1063/1.5040129>
- [5] 宗片比呂夫: 総合報告 光スピントロニクス：基礎と発展; *光学* Vol.47, p.132-141 (2018).
- [6] A. Goschew, R. C. Roca, N. Nishizawa, H. Munekata, A. Delimitis, P. Fumagalli; Spin Injection From EuS/Co Multilayers Into GaAs Detected by Polarized Electroluminescence; *IEEE Transactions on Magnetics* **55**, 1400804 1-4 (2019). <https://dx.doi.org/10.1109/TMAG.2019.2895907>
- [7] A. Gatilova, E. A. Mashkovich, K. A. Grishunin, A. Pogrebna, R. V. Mikhaylovskiy, Th. Rasing, P. M. Christianen, N. Nishizawa, H. Munekata, A. V. Kimel; Far- and midinfrared excitation of large amplitude spin precession in the ferromagnetic semiconductor InMnAs; *Physical Review B* **101**, 020413® (2020). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.101.020413>
- [8] H. Munekata, S. Ogawa, K. Michihiro, K. Nishibayashi, and N. Nishizawa: Imparting memory functionality to planar waveguide structures with photo-magnetic materials; *Japanese Journal of Applied Physics* **59**, SEEA05 1-8 (2020). <https://doi.org/10.7567/1347-4065/ab658d>
- [9] N. Nishizawa, A. Hamada, K. Takahashi, T. Kuchimaru, and H. Munekata: Monte Carlo simulation of scattered circularly polarized light in biological tissues for detection technique of abnormal tissues using spin-polarized light emitting diodes; *Japanese Journal of Applied Physics* **59**, SEEG03 1-7 (2020). <https://doi.org/10.35848/1347-4065/ab69db>
- [10] 西沢望: スピントロニックデバイスの進展と応用; *電気学会論文誌.A, 基礎・材料・共通部門誌* Vol.140, p.13-118 (2020). doi.org/10.1541/ieejfms.140.113
- [11] H. Munekata: Low-threshold pure-circular polarization electro-luminescence from spin-light-emitting diodes consisting of oxidized Al/AlAs tunnel barriers; *Proc. SPIE* **11288**, 112880Q 1-6 (2020). [doi: 10.1117/12.2545701](https://doi.org/10.1117/12.2545701)
- [12] N. Nishizawa, S. Kawashima, B. Al-Qadi, Takahiro Kuchimaru and Hiro Munekata: Spatial discrimination of cancer using circular polarization of light scattered by biological tissues; *Proc. SPIE* **11521**, 1152114 1-6 (2020). doi.org/10.1117/12.2573280
- [13] B.A. Magill, S. Thapa, J. Holleman, S. McGill, H. Munekata, C.J. Stanton, and G.A. Khodaparast: Magnetic field enhanced detection of coherent phonons in a GaMnAs/GaAs film; *Physical Review B* **102**, 045306 1-9 (2020). doi.org/10.1103/PhysRevB.102.045306
- [14] R.C. Roca, N. Nishizawa, and H. Munekata: Modeling and Optimization of Refracting-Facet Spin-Photodiodes based on Ferromagnetic Metal-Insulator-Semiconductor Tunnel Junctions; *SPIN* **10**, 2050017 1-14 (2020). <https://doi.org/10.1142/S2010324720500174> *Recommended by editors
- [15] E. A. Mashkovich, K. A. Grishunin, H. Munekata, and A. V. Kimel: Ultrafast demagnetization of ferromagnetic semiconductor InMnAs by dual terahertz and infrared excitations; *Applied Physics Letters* **117**, 122406 1-5 (2020). doi.org/10.1063/5.0017778
- [16] N. Nishizawa, B. Al-Qadi, T. Kuchimaru: Angular optimization for cancer identification with circularly polarized light; *Journal of Biophotonics*, **14**, 202000380 1-8 (2020). doi.org/10.1002/jbio.202000380 * Released at Tokyo Tech News (Japanese & English), March 17, 2021
- [17] N. Nishizawa and Hiro Munekata: Lateral-type spin-photonic devices; Development and applications; *Micromechanics* **12**, 644 1-31 (2021). doi.org/10.3390/mi12060644

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 17件 / うち国際共著 5件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 N. Nishizawa and Hiro MuneKata	4. 巻 12
2. 論文標題 Lateral-type spin-photonic devices; Development and applications	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Micromechanics	6. 最初と最後の頁 644 1-31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/mi12060644	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 N. Nishizawa, B. Al-Qadi, T. Kuchimaru	4. 巻 14
2. 論文標題 Angular optimization for cancer identification with circularly polarized light	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Biophotonics	6. 最初と最後の頁 202000380 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/jbio.202000380	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 E. A. Mashkovich, K. A. Grishunin, H. MuneKata, and A. V. KimeI	4. 巻 117
2. 論文標題 Ultrafast demagnetization of ferromagnetic semiconductor InMnAs by dual terahertz and infrared excitations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 122406 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0017778	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 R.C. Roca, N. Nishizawa, and H. MuneKata	4. 巻 10
2. 論文標題 Modeling and Optimization of Refracting-Facet Spin-Photodiodes based on Ferromagnetic Metal-Insulator-Semiconductor Tunnel Junctions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 SPIN	6. 最初と最後の頁 2050017 1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S2010324720500174	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 B.A. Magill, S. Thapa, J. Holleman, S. McGill, H. Munekata, C.J. Stanton, and G.A. Khodaparast	4. 巻 102
2. 論文標題 Magnetic field enhanced detection of coherent phonons in a GaMnAs/GaAs film	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B 102, 045306 (2020).	6. 最初と最後の頁 045306 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.045306	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 N. Nishizawa, S. Kawashima, B. Al-Qadi, Takahiro Kuchimaru and Hiro Munekata	4. 巻 11521
2. 論文標題 Spatial discrimination of cancer using circular polarization of light scattered by biological tissues	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. SPIE	6. 最初と最後の頁 1152114 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2573280	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Gatilova A., Mashkovich E. A., Grishunin K. A., Pogrebna A., Mikhaylovskiy R. V., Rasing Th., Christianen P. M., Nishizawa N., Munekata H., Kimel A. V.	4. 巻 101
2. 論文標題 Far- and midinfrared excitation of large amplitude spin precession in the ferromagnetic semiconductor InMnAs	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 020413(R) 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.020413	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Munekata Hiro, Ogawa Shunta, Michihiro Kento, Nishibayashi Kazuhiro, Nishizawa Nozomi	4. 巻 59
2. 論文標題 Imparting memory functionality to planer waveguide structures with photo-magnetic materials	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SEEA05 1~8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab658d	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nishizawa Nozomi、Hamada Atsushi、Takahashi Kazumasa、Kuchimaru Takahiro、Munekata Hiro	4. 巻 59
2. 論文標題 Monte Carlo simulation of scattered circularly polarized light in biological tissues for detection technique of abnormal tissues using spin-polarized light emitting diodes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SEEG03 1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ab69db	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nishizawa Nozomi	4. 巻 140
2. 論文標題 Recent Progress of Spin-photonic Devices and its Applications	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials (和文)	6. 最初と最後の頁 113~118
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejfms.140.113	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Munekata Hiro	4. 巻 11288
2. 論文標題 Low-threshold pure-circular polarization electro-luminescence from spin-light-emitting diodes consisting of oxidized Al/AlAs tunneling barriers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 SPIE Proceedings	6. 最初と最後の頁 112880Q 1~6.
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2545701	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nozomi Nishizawa, Masaki Aoyama, Ronel C. Roca, Kazuhiro Nishibayashi, and Hiro Munekata	4. 巻 11
2. 論文標題 Arbitrary helicity control of circularly polarized light from lateral-type spin-polarized light-emitting diodes at room temperature	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 053003 1~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/APEX.11.053003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Okabayashi Jun, Miura Yoshio, Munekata Hiro	4. 巻 8
2. 論文標題 Anatomy of interfacial spin-orbit coupling in Co/Pd multilayers using X-ray magnetic circular dichroism and first-principles calculations	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 8303 1~9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-018-26195-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Roca Ronel Christian, Nishizawa Nozomi, Nishibayashi Kazuhiro, Munekata Hiro	4. 巻 123
2. 論文標題 A lateral-type spin-photodiode based on Fe/x-AlO _x /p-InGaAs junctions with a refracting-facet side window	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 213903 1~10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5026511	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Al-Qadi B., Sakatoku Y., Nishizawa N., Munekata H.	4. 巻 124
2. 論文標題 Imaging in-plane 90° magnetization switching in a (Ga,Mn)As epitaxial layer	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 063901 1~8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5040129	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Goschew A., Roca R. C., Nishizawa N., Munekata H., Delimitis A., Fumagalli P.	4. 巻 55
2. 論文標題 Spin Injection From EuS/Co Multilayers Into GaAs Detected by Polarized Electroluminescence	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1400804 1~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2019.2895907	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 宗片比呂夫	4. 巻 47
2. 論文標題 光スピントロニクス：基礎と進展	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J. Optics (光学)	6. 最初と最後の頁 132-142
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計26件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 12件)

1. 発表者名 Nozomi Nishizawa and Hiro Munekata
2. 発表標題 Recent progress in spin-LED: realization of pure circular polarization EL at room temperature with current density of 10 A/cm ²
3. 学会等名 SPIE Optics+Photonics 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiro Munekata
2. 発表標題 Low-threshold pure-circular polarization electro-luminescence from spin-light-emitting diodes consisting of oxidized Al/AlAs tunnel barriers
3. 学会等名 Photonic West 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Munekata, S. Ogawa, K. Michihiro, K. Nishibayashi, and N. Nishizawa
2. 発表標題 Imparting Memory Functionality to Planar Wave-Guide Structure with Photo-Magnetic Materials
3. 学会等名 Magnetics and Optics Research International Symposium (MORIS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Hamada, H. MuneKata, and N. Nishizawa
2. 発表標題 An Application of Spin-LED: Unstraining and Non-Invasive Cancer Detection Using Circularly Polarized Light
3. 学会等名 Magnetics and Optics Research International Symposium (MORIS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Nishizawa and H. MuneKata
2. 発表標題 Electrical Circular Polarization Switching at Room Temperature with Spin-Polarized Light Emitting Diodes
3. 学会等名 Magnetics and Optics Research International Symposium (MORIS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryohei Ito, Nozomi Nishizawa, and Hiro MuneKata
2. 発表標題 Electroluminescence characteristics and spin dynamics of spin-light-emitting diodes (spin-LEDs) consisting of oxidized Al /AlAs tunneling barriers
3. 学会等名 The 21st International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (EDISON21) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nozomi Nishizawa, Kazumasa Takahashi, Atsushi Hamada, Takahiro Kuchimaru, and Hiro MuneKata
2. 発表標題 Non-invasive, unstaining, and in vivo diagnosis technique of tumor tissues using circularly polarized light;
3. 学会等名 SPIE Optics+Photonics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Nishizawa, B. Al-Qadi, T. Kuchimaru, K. Takahashi, K. Hara, and H. MuneKata
2. 発表標題 Cancer Detection using circular polarization of light scattered by biological tissues
3. 学会等名 The 4th International Symposium on Biomedical Engineering (ISBE2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. MuneKata, N. Nishizawa, and R. Ito
2. 発表標題 Low-threshold pure circular-polarization electroluminescence of spin-LEDs with oxidized Al/AlAs tunnel barriers
3. 学会等名 第24回半導体におけるスピン工学の基礎と応用
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西沢 望, 河島 眞弥, 宗片 比呂夫, Bassam Al-Qadi, 口丸 高弘, 原 和彦
2. 発表標題 円偏光散乱を用いたがん検出の実証
3. 学会等名 令和元年度生体医歯工学共同研究拠点 成果報告会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西沢 望, Bassam Al-Qadi, 口丸 高弘, 宗片 比呂夫
2. 発表標題 円偏光散乱を用いたがん検出
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1 . 発表者名 H. Munekata and N. Nishizawa
2 . 発表標題 Consideration on a mechanism of pure circular polarization electroluminescence in a lateral spin-LED
3 . 学会等名 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 N. Nishizawa, K. Takahashi, A. Hamada, T. Kuchimaru, K. Hara, and H. Munekata
2 . 発表標題 Development of a novel, non-invasive and unstaining diagnosis technique of cancerous tissues using circularly polarized light;
3 . 学会等名 The 3rd International Symposium on Biomedical Engineering (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 N. Nishizawa, K. Takahashi, T. Kuchimaru, and H. Munekata
2 . 発表標題 Preparation of a Phantom: A Step Toward Application of a Spin-LED for Unstained and Non-Invasive Cancer Detection;
3 . 学会等名 2018 Workshop on Innovative Nanoscale Devices and Systems (WINDS2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 H. Munekata and N. Nishizawa
2 . 発表標題 Realization of Pure Circular Polarization Electroluminescence at Room Temperature with Spin-LEDs;
3 . 学会等名 2018 Workshop on Innovative Nanoscale Devices and Systems (WINDS2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 宗片比呂夫
2. 発表標題 室温純粋円偏光発光ダイオードのメカニズム仮説を中心に
3. 学会等名 北大学電気通信研究所 共同プロジェクト研究会「固体中のスピン・ダイナミクスの物理と応用」ならびに「スピン軌道相互作用を介した磁化・スピンダイナミクスの電氣的操作に関する研究」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Nishizawa and H. MuneKata
2. 発表標題 Arbitrary helicity control of circular polarization state from lateral-type spin-LED at room temperature
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. MuneKata and T. Matsuda
2. 発表標題 Experimental evidence of non-thermal aspect of photo-excited precession of magnetization in (Ga,Mn)As;
3. 学会等名 第23回半導体におけるスピン工学の基礎と応用 (PASPS-23)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小野寺蓮太, 西沢 望, 宗片 比呂夫
2. 発表標題 パーマロイ表面に形成したCo/Pd極薄多層積層膜の光誘起磁化才差運動
3. 学会等名 第23回半導体におけるスピン工学の基礎と応用 (PASPS-23)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 N. Nishizawa and H. Munekata
2. 発表標題 Second-generation spin-LEDs having nearly pure circular polarization electroluminescence with x-AlOx/AlAs hybrid tunneling barriers;
3. 学会等名 第23回半導体におけるスピン工学の基礎と応用 (PASPS-23)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 B. Al-Qadi, Y. Sakatoku, N. Nishizawa, and H. Munekata
2. 発表標題 Imaging in-plane magnetization switching in a (Ga, Mn)As epitaxial layer;
3. 学会等名 第23回半導体におけるスピン工学の基礎と応用 (PASPS-23)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小川峻太、西沢望、宗片比呂夫
2. 発表標題 磁化の光励起才差運動が極めて大きな多層積層Co/Pd 構造の作製
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小野寺蓮太、西沢望、宗片比呂夫
2. 発表標題 Co/Pd 多層積層膜の光パルス励起を經由するパーマロイのスピนว波生成
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 B.Al-Qadi, Y. Sakatoku, N. Nishizawa, and H. Munekata
2. 発表標題 Imaging in-plane 90° magnetization switching in (Ga,Mn)As;
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Nishizawa and H. Munekata
2. 発表標題 Nearly pure circular polarization electroluminescence from spin-LED with significantly reduced current densities
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiro Munekata and Takashi Matsuda
2. 発表標題 Experimental evidence for non-thermal aspect of photo-excited precession of magnetization in (Ga,Mn)As
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>1. 室温で発光する円偏光スピンLEDの創製に成功 多分野への応用が期待される光源の登場 https://www.titech.ac.jp/news/2017/037434.html</p> <p>2. 円偏光散乱を用いた新たながん診断技術を実証 https://www.titech.ac.jp/news/2021/049223.html</p>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	西沢 望 (Nishizawa Nozomi) (80511261)	東京工業大学・科学技術創成研究院・助教 (12608)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関