

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月7日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04346

研究課題名(和文) 強磁性金属表面プラズモンを利用する革新的光アイソレータの開発

研究課題名(英文) Innovative Optical Isolators based on Surface Plasmon Polariton using Ferromagnetic Metals

研究代表者

清水 大雅 (Shimizu, Hiromasa)

東京農工大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：50345170

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：シリコン基板上の強磁性金属表面プラズモンを利用する光アイソレータを開発した。実現の鍵となるデバイス構造($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2/\text{Fe}$)、特性を明らかにした。性能指数を最大化(100%)し伝搬損失を最小化(20分の1)することに成功した。さらにシリコン細線導波路とプラズモン導波路の集積のためにリフトオフを使わない新しい作製技術を開発した。新しい作製技術によって低い結合損失を実現した。伝搬損失を最小化する作製プロセスを最適化し、ブリッジ構造をもつ $\text{Co}/\text{TiO}_2/\text{Si}$ プラズモン導波路を結合したシリコン細線導波路の伝搬損失(0.9 dB)を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光アイソレータは半導体レーザーへの反射戻り光を防ぎ、レーザーの安定動作を実現するために必須の光デバイスである。これまで、光変調器、光合波器等様々な光素子が半導体レーザーと集積化されてきた。光アイソレータを実現するためには、強磁性金属がもたらす非相反効果が必須であり、強磁性金属を使った本研究のアプローチ、磁性ガーネットを使ったアプローチ等が取られてきた。一つの課題は半導体レーザーと同等のサイズで実現し集積できるかどうかであり、本研究では、表面プラズモンポラリトンによって光を強磁性金属近くに伝搬させ、かつ伝搬損失を回避する手法を提案し、実証した。上記課題解決に資するものである。

研究成果の概要(英文)：We have studied integration of a plasmonic isolator on a Si substrate. The key characteristics of the plasmonic isolator have been developed. A method to enhance the magneto-optical figure of merit (FOM) and reduce the propagation loss of a surface plasmon in order to realize the proposed design of the plasmonic isolator is described. One hundred % enhancement of the FOM and 20x reduction of propagation loss in the optimized ferromagnetic plasmonic structures ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2/\text{Fe}$), are demonstrated.

Furthermore, a new fabrication technology for integration of a plasmonic waveguide and a Si nanowire waveguide without lift-off technique, has been developed. Main merit of this technology is a low coupling loss between Si nanowire waveguide and the plasmonic waveguide. The new fabrication technology was optimized in order to reduce the optical loss. A low propagation loss of 0.9 dB for a Si nanowire waveguide coupled to a $\text{Co}/\text{TiO}_2/\text{Si}$ plasmonic waveguide of bridge type was demonstrated.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：強磁性金属 磁気光学効果 表面プラズモンポラリトン 光集積回路 光アイソレータ

1. 研究開始当初の背景

表面プラズモン(Surface Plasmon Polariton : SPP)は、電磁波の一種であり 金属 - 誘電体界面に沿って伝搬する。低抵抗金属の金、銀、及び銅を用いた表面プラズモンは、比較的低い光損失を有し、それらは光デバイスに使用されている。屈折率差を利用した光導波路とは異なり、光の波長より小さい領域に光を閉じ込めることができ、急峻な曲げをもつ光導波路、光集積回路に応用されている。また、表面プラズモンの伝搬形態は、界面周辺の金属・誘電体の屈折率によって大きく変調でき、センサへ応用されている。逆に金属・誘電体の屈折率を制御し、光の伝搬形態を制御・変調したり、発光させたりする研究が世界的に展開され、"Active Plasmonics"と呼ばれ微小な光変調器やナノレーザへの応用が進められている。

強磁性金属は磁化の反転と磁気光学効果を通じて、表面プラズモンポラリトンの伝搬形態、特に、光の一方伝搬特性を制御することができる。磁気光学効果のもつ時間反転対称性の破れがもたらす光の一方伝搬特性は強磁性体に特有である。強磁性金属を用いた表面プラズモンは、低抵抗金属の金、銀、及び銅を用いた表面プラズモンと比較して伝搬損失が 10 倍以上大きいのが課題である。一方、磁気光学効果を示すため、光を一方にのみ通す光アイソレータに応用でき、小さい領域への光閉じ込め効果によって短い素子長で大きな光アイソレーション特性をもたらすことができる。貴金属を用いた表面プラズモンの分野では光導波路、センサへの応用を目指した多くの研究が進められているのに対して、強磁性金属を用いた表面プラズモンの研究例は世界的に見ても数少なく、発展途上である。光アイソレータへの応用に関する報告例はない。

光通信システムや光配線において半導体レーザへの反射戻り光をカットする光アイソレータは特に重要な素子である。光スイッチ等の他のほとんどの光素子は既に市販されている光集積回路に集積化されている。しかし光アイソレータは光集積回路に組み込まれていない。光アイソレータの実現に必要な不可欠な材料は磁気光学 MO (Magneto-Optical)材料であるが、半導体基板上に磁気光学材料を集積化する事が困難なためである。強磁性金属の磁気光学定数は大きく、光アイソレータ用材料として魅力的である。重要なのは強磁性金属の製膜や微細加工が光集積回路の製作技術と互換性がある事である。

2. 研究の目的

本研究では、表面プラズモンに強磁性金属を用いた光アイソレータを新しく提案する。「強磁性金属表面プラズモンを利用する革新的光アイソレータの開発」を研究課題とし、大きな磁気光学効果と低伝搬損失を示し、光集積回路に搭載可能な超小型光アイソレータを実現する。表面プラズモンの研究に強磁性金属という新機軸を加えることを目的とする。強磁性金属と表面プラズモンの組み合わせは世界的にも発展途上の段階にある。強磁性金属と誘電体界面のプラズモンの励起と磁気的な制御という基礎的学理の構築、及び、光通信システムや光配線における集積型光アイソレータの実現を目指す。

3. 研究の方法

目的の実現に向けて 微細加工技術により強磁性金属を製膜したプラズモニック光導波路を作製して光を伝搬させ、伝搬光強度が磁化反転とともに増減することを見だし、光アイソレータの基本動作の実証と大きな光アイソレーションを実現する。上記を実現するためのプラズモン光アイソレータの作製、光伝搬特性の評価、磁気光学効果を考慮した時間領域有限差分法による伝搬特性の計算、基本動作の実証と性能向上を実現する。強磁性金属を用いた表面プラズモンの研究は前例が少なく、光導波路上の評価だけでなく、プリズム結合を用いたプラズモンの励起と磁気的変調を試み、複眼的に評価する。

4. 研究成果

(1) 非相反伝搬・遮断に基づく光アイソレータを設計し、試料を作製し、プリズム結合により磁気光学的応答と伝搬損失を両立する最適構造を見出した(図1)。また、長距離伝搬プラズモン光導波路における非相反効果を計算し、光アイソレータの最適構造を見出した(雑誌論文[1, 7])。

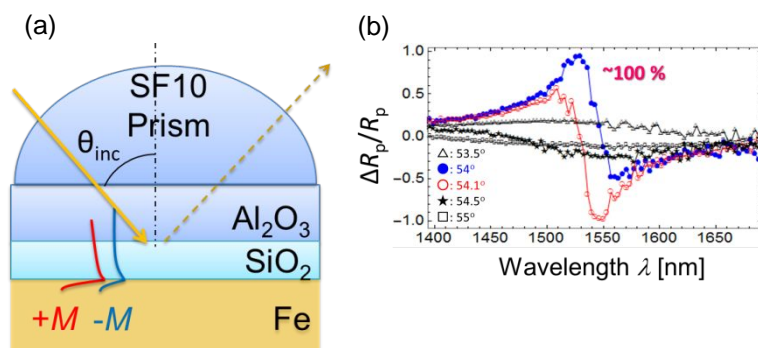


図1 (a) 2層誘電体強磁性金属積層構造における(b)100%の磁気光学性能指数の実証結果

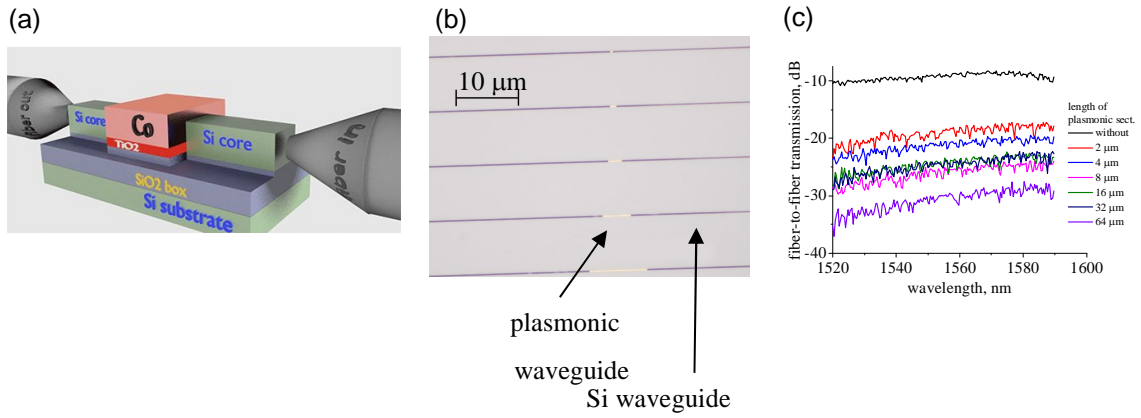


図2 (a)二層誘電体強磁性金属積層構造からなるプラズモン導波路集積 Si 細線導波路の模式図。(b)集積デバイスの光学顕微鏡写真。(c)プラズモン導波路の長さを変えた時の伝搬損失の測定結果

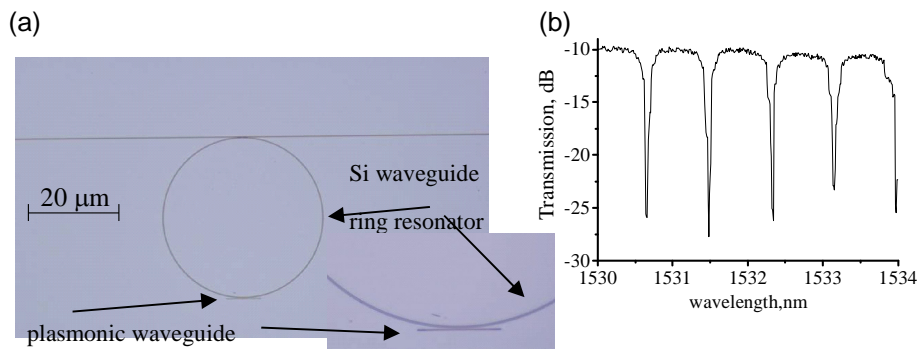


図3 (a)二層誘電体強磁性金属積層構造からなるプラズモン導波路集積 Si リング共振器の光学顕微鏡写真。(b)共振特性の測定結果

(2) 集積型強磁性金属プラズモン光アイソレータの加工技術を改善し、新しい非線形的磁気光学効果を見出した。強磁性金属プラズモン導波路とシリコン細線導波路を集積したリング共振器型、および、マッハツェンダー干渉型の新しい光アイソレータを作製し、最適化した(図2, 3、雑誌論文[1, 5])。

(3) 強磁性金属/貴金属積層プラズモン導波路とシリコン導波路間の非相反結合と消光比について解析し、非相反な方向性結合を利用することにより 34 μm の導波路長で消光比 10.8 dB、損失 13.4 dB をもつプラズモン光アイソレータを設計した。強磁性金属がもたらす非相反性と貴金属が示す低伝搬特性を組み合わせ、低伝搬損失と非相反性を両立させる強磁性金属/貴金属ハイブリッドプラズモン導波路を設計した。貴金属である金を導入した場合、導入しない場合と比較して性能指数が約 20 % 増大することがわかった。強磁性金属や貴金属層の膜厚や位置の最適化について解析するために、組み合わせ最適化計算を用いた。これまでの強磁性金属プラズモン導波路光アイソレータにはないアプローチであり、今後の研究につながるものである(雑誌論文[2])。

強磁性金属/貴金属積層プラズモン導波路とシリコン導波路間の非相反結合を実現すべく、シリコン光導波路の片側側壁に強磁性金属を製膜する手法を確立した。同時に、プラズモン光導波路における光閉じ込めを周波数領域有限差分法にて解析し、解析精度を向上させた。電子線描画とフォトリソグラフィ、斜め電子線ビーム蒸着の組合せにより、シリコン光導波路の長さ 5 μm の領域の片側側壁に金属薄膜を部分的に製膜することに成功した(図4、学会発表[3])。

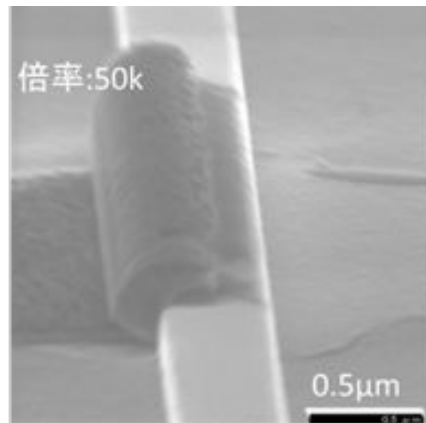


図4 長さ 5 μm の領域にわたって側壁に部分的に金属を製膜した Si 細線導波路の断面電子顕微鏡写真

(4) 長距離伝搬プラズモン光導波路を Si 細線導波路と集積(雑誌論文[4])すべく、モード形状を変換するテーパ型 Si 光導波路を作製し、PMMA 導波路との結合損失を実験により求めた。

結合損失は1端面あたり13 dBと設計より約10 dB大きくなった。これはスピンコートとEB描画、現像プロセスで得られる有機材料のPMMAの膜厚が1.3 μmと設計値である2.2 μmと比べて小さく、伝搬する光の一部がSOI基板のSi基板と結合し、放射したためと考えられる(学会発表[16])。

(5) 強磁性金属とシリコン細線導波路からなるプラズモン導波路の集積プロセスをリフトオフプロセスを用いて確立した。プラズモン導波路とSi細線導波路の間で0.7 dB/μmの伝搬損失を達成した。シリコン光導波路とプラズモン導波路の結合損失低減を目的にリフトオフを用いない集積化プロセスを開発した。伝搬損失・結合損失の原因となる金属側壁の凹凸を小さくすることが主眼である。幅220 nmのシリコン光導波路と幅50 nmのブリッジ型Co/TiO₂/Siプラズモン導波路の結合を実現した。幅600 nmのギャップを隔てて結合したときの伝搬損失は0.9 dB、幅250 nmのギャップを隔てて導波路を結合したときの伝搬損失は2.5 dBとなった(学会発表[7])。今後もリフトオフを用いずに金属を製膜する際の側壁を平滑化することでプラズモン導波路の伝搬損失・結合損失を改善していく。

(6) InP基板上の光増幅器導波路上に強磁性金属の横磁気カー効果によるTEモード方向発振リングレーザを実現すべく、小型化と結合効率の向上を両立する構造を設計・作製・実現することに成功した。リング共振器の半径50 μm、方向性結合器の長さ45 μm以上でレーザ発振が見込まれる。強磁性金属の鉄と金を組み合わせることで、光閉じ込め効果を向上させ、半導体光アイソレータの消光比を従来の3 dB/mmから21 dB/mmと大きくできることを明らかにした(学会発表[1, 2, 17])。

以上の研究成果はMRS Bulletin誌2018年6月号のmaterials for nonreciprocal photonicsに関する特集号に招待論文としてまとめた(雑誌論文[1])。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 10件)

[1] H. Shimizu, V. Zayets, "Plasmonic isolator for photonic integrated circuits", MRS Bulletin **43**, 425 - 429, (2018). 査読有

[2] H. Shimizu, and T. Shimodaira, "Optimization of figure of merit in magnetoplasmonic waveguides with Fe/Au multilayer for optical isolator based on nonreciprocal coupling on Si waveguides", Japanese Journal of Applied Physics, 57(4S): 04FN07 (2018). 査読有

[3] V. Zayets, "Spin transport of electrons and holes in a metal and in a semiconductor", Journal of Magnetism and Magnetic Materials **445**, 53-65 (2018). 査読有
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304885317309514>

[4] T. Kaihara and H. Shimizu, "Nonreciprocal dielectric-loaded plasmonic waveguides using magneto-optical effect of Fe", Optics Express, 25 (2):730-748 (2017). 査読有

[5] V. Zayets, H. Saito, S. Yuasa, "Photonic integration of plasmonic Magneto-optical waveguide and Si nanowire waveguide", Nanomaterials: Application & Properties (NAP), Proceedings of 2017 IEEE 7th International Conference, 04NESP17-1~6 (2017).

<http://ieeexplore.ieee.org/document/8190301/> 査読有

[6] V. Zayets, "High-Speed Non-Volatile Optical Memory: Achievements and Challenges", Electronics **6**, 7 (2017); The Special Issue on Spin Optoelectronics.

<http://www.mdpi.com/2079-9292/6/1/7> 査読有

[7] T. Kaihara, H. Shimizu, A. Cebollada, and G. Armelles, "Magnetic field control and wavelength tunability of SPP excitations using Al₂O₃ / SiO₂ / Fe structures" Applied Physics Letters 109(11):111102 (2016). (Editor's pick) 査読有

[8] A. Kozioł-Rachwał, T. Nozaki, V. Zayets, H. Kubota, A. Fukushima, S. Yuasa and Y. Suzuki, "The effect of the MgO buffer layer thickness on magnetic anisotropy in MgO/Fe/Cr/MgO buffer/MgO(001)", J. Appl. Phys. **120**, 085303 (2016). 査読有

[9] T. Nozaki, A. Kozioł-Rachwał, W. Skowroński, V. Zayets, Y. Shiota, S. Tamaru, H. Kubota, A. Fukushima, S. Yuasa, and Y. Suzuki, "Large Voltage-Induced Changes in the Perpendicular Magnetic Anisotropy of an MgO-Based Tunnel Junction with an Ultrathin Fe Layer", Phys. Rev. Applied **5** 044006 (2016). 査読有

[10] H. Saito, V. Zayets, "スピントロニクス技術による光デバイス開発" 化学工業, **67**, 57 - 60 (2016). 査読無

[学会発表](計 24件)

[1] 西山 知志、駒込 泰輝、荒 雄也、清水 大雅、清水 諭「マイクロローディング効果を用いたInP系リング共振器の作製」2019年春季 第66回 応用物理学関係連合講演会 2019年3月

[2] 駒込 泰輝、水島 裕亮、荒 雄也、清水 諭、清水 大雅「InP系リング共振器作製プロセス

- における近接効果の影響の検討」2018年秋季 第79回応用物理学会学術講演会 2018年9月
- [3] 塩道 溪、下平 貴大、清水 大雅「強磁性金属・貴金属積層Siプラズモン導波路におけるTEモード磁気光学性能指数の解析」2018年秋季 第79回応用物理学会学術講演会 2018年9月
- [4] 水島裕亮、駒込泰輝、荒雄也、清水大雅「Bi-level etchingによるInP系リング共振器の作製と評価」2018年電子情報通信学会ソサイエティ大会 2018年9月
- [5] Vadym Zayets, Hidekazu Saito, Takayuki Nozaki, Akio Fukushima, and Shinji Yuasa, "Study of voltage-controlled perpendicular magnetic anisotropy (VPMA) in a FeB thin film and a FeB/W multilayer by the Anomalous Hall effect", Solid States devices and materials (SSDM 2018)2018年9月
- [6] Vadym Zayets, Hidekazu Saito, and Shinji Yuasa, "Technologies to reduce insertion loss of plasmonic isolator integrated with Si nanowire waveguides", Solid States devices and materials (SSDM 2018)2018年9月
- [7] 清水 大雅(招待講演)「スピン磁性フォトニクスデバイス - シリコンフォトニクスと光アイソレータ・メモリ - 」電子情報通信学会 第28回シリコンフォトニクス研究会(招待講演) 2018年7月
- [8] 上北崇弘, 太田雅也, 森岡俊行, 河原正美, 佐村剛, 清水大雅「有機金属分解法によるSi導波路側壁へのBi_{2.5}置換Bi:YIG薄膜の製膜と評価」2018年春季 第65回 応用物理学関係連合講演会 2018年3月
- [9] Vadym Zayets, "Monolithic integration of a plasmonic magneto-optical waveguide and Si nanowire waveguide" RIKEN-AIST 3rd Quantum Technology Innovation Core Workshop 2017年11月
- [10] V. Zayets, H. Saito, and S. Yuasa, "Photonic integration of plasmonic magneto-optical waveguide and Si nanowire waveguides" IEEE 7th International Conference Nanomaterials: Application & Properties, 2017年9月
- [11] Takahiro Shimodaira, and Hiromasa Shimizu "Optimization of Figure of Merit in Magneto-Plasmonic Waveguides with Fe / Au Multilayer and Nonreciprocal Coupling on SOI substrate", The 2017 International conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2017) 2017年9月
- [12] 清水大雅「シリコン・ガラス基板上への磁性ガーネットの製膜と集積光アイソレータへの応用」2017年電子情報通信学会ソサイエティ大会(招待講演) 2017年9月
- [13] 清水大雅「フォトニクスとスピン・磁性」2017年秋季 第78回応用物理学会学術講演会(招待講演) 2017年9月
- [14] 上北 崇弘、森岡 俊行、清水 大雅「有機金属堆積法によるガラス基板上へのBi_{2.5}置換YIG薄膜の作製と評価」2017年秋季第78回応用物理学会学術講演会 2017年9月
- [15] 森岡俊行, 清水大雅, 「有機金属分解法によるSi基板上へのBi置換YIG薄膜の製膜と通信波長帯におけるファラデー回転角の評価」 2017年秋季第78回応用物理学会学術講演会 2017年9月
- [16] 森田 澗, 貝原輝則, 清水大雅「Si導波路と集積した非相反プラズモンアイソレータの設計と作製」2017年秋季第78回応用物理学会学術講演会 2017年9月
- [17] 荒雄也, 水島裕亮, 山下翼, 清水大雅「TEモード半導体光アイソレータにおける性能指数の最適化」2017年秋季第78回応用物理学会学術講演会 2017年9月
- [18] 太田雅也, 清水大雅「側壁に磁性ガーネット薄膜を配置したSi細線導波路における非相反位相変化の解析」 2017年春季 第64回 応用物理学関係連合講演会 2017年3月
- [19] Toshiyuki MORIOKA, Masashi HOSODA, and Hiromasa SHIMIZU "Faraday Rotation Spectra of Bi-substituted YIG Thin Films with thinner YIG buffer layer on Glass Substrates by Metal Organic Decomposition Method" 2017年春季 第64回 応用物理学関係連合講演会 2017年3月
- [20] 下平 貴大、清水 大雅 「Siハイブリッドプラズモン導波路における非相反結合の設計と解析」2017年春季 第64回 応用物理学関係連合講演会 2017年3月
- [21] 水島 裕亮、荒 雄也、山下 翼、新田 毅、右田 温、清水 大雅「TEモード一方向発振リングレーザ実現のための方向性結合器の設計」2017年春季 第64回 応用物理学関係連合講演会 2017年3月
- [22] T.Nozaki, Y.i Shiota, A. Koziol-Rachwal, W. Skowronski, V. Zayets, S. Tamaru, H. Kubota, A. Fukushima, S.Yuasa, Y.Suzuki, "Towards the realization of voltage-torque MRAM" IEDM2016, San Francisco 2016年12月
- [23] V. Zayets, H. Saito, S. Yuasa "Integration of Si nanowire waveguides and magneto-optical plasmonic waveguides on a Si substrate" SSDM 2016, Solid States devices and materials, Tsukuba, 2016年9月
- [24] 福田登、清水大雅 「強磁性金属/貴金属積層プラズモン導波路とシリコン導波路間の非相反結合と消光比の解析」2016年秋季 第77回応用物理学会学術講演会 2016年9月

〔産業財産権〕

出願状況(計 2件)

名称：全金属型トランジスタとその方法

発明者：V. Zayets, 他3名

権利者：V. Zayets, 他3名

種類：特許

番号：特願 2017-226503

出願年：2017年

国内外の別：国内

名称：Magneto-optical measurement equipment. Magneto-optical measurement method

発明者：V. Zayets, 他3名

権利者：V. Zayets, 他3名

種類：特許

番号：特願 2016-126905

出願年：2016年

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

研究代表者 清水大雅 論文リスト

<http://kenkyu-web.tuat.ac.jp/Profiles/14/0001357/detail.html?lang=ja&achievement=ronbun>

研究代表者 清水大雅 学会発表リスト

http://kenkyu-web.tuat.ac.jp/Profiles/14/0001357/detail.html?lang=ja&achievement=meeting_achievement

研究代表者 Vadym Zayets 研究成果

https://staff.aist.go.jp/v.zayets/technology_nanoSi_plasm_2tech.html

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：Zayets Vadym

ローマ字氏名：Zayets Vadym

所属研究機関名：国立研究開発法人産業技術総合研究所

部局名：ナノスピントロニクス研究センター

職名：主任研究員

研究者番号(8桁)：10357080

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。