

2025年1月20日

報道機関 各位

国立大学法人東北大学

電子スピんで高速・省電力で制御可能な光メモリの性能 を実証

— 光情報の長期記憶を活かした高度情報処理に期待 —

【発表のポイント】

- 面発光レーザ^(注1)内部の電子のスピンを歳差運動^(注2)させ、出力光の偏光状態を調べました。
- 互いに直交する2つの安定な偏光状態をもつ偏光双安定性^(注3)の出現条件を歳差運動の周波数によって制御できることを発見しました。
- 光情報の長期記憶を獲得した新原理のフォトニックコンピューティング^(注4)により、高度情報処理の大規模化などが期待されます。

【概要】

高速な光を情報処理に活用するフォトニックコンピューティングにおいて、光情報の長期記憶（光メモリ）が実現できれば、情報処理のさらなる大規模化が実現する可能性があります。そのため、偏光双安定性の高速制御が可能な光メモリの一種である面発光レーザの利用が期待されています。しかし、面発光レーザは特定の駆動条件（電流、温度など）において偏光双安定性が得られるかどうかはレーザの材料や構造に依存し、その最適化が難しいという問題がありました。

東北大学電気通信研究所の横田信英准教授と八坂洋教授、産業技術総合研究所プラットフォームフォトニクス研究センターフォトニクスシステム研究チームの池田和浩研究チーム長と新原理コンピューティング研究センタースピ機能材料チームの揖場聡主任研究員、大分大学工学部の片山健夫准教授は、面発光レーザ内部の電子スピンの歳差運動周波数を制御することで偏光双安定性の出現条件が制御でき、これを利用した新しい偏光スイッチング動作が可能であることを実証しました。歳差運動の制御に限らず、電子スピンの電氣的制御技術は近年発展しており、光メモリにスピンドバイスの技術を融合した新技術の発展が幅広く期待されます。

本成果は、米国物理学協会が発行する学術論文誌 APL Photonics に 2025 年 1 月 17 日に Featured Article*としてオンライン掲載されました。

*編集委員会により特に重要性が高いと評価された論文

【詳細な説明】

研究の背景

高速な光を活用するフォトニックコンピューティングは通信や自動運転制御などのリアルタイム性が要求される高度な情報処理への応用が期待されています。光は高速ですがその移動を止めることは難しいため、フォトニックコンピューティングにおける情報処理の大規模化に伴いタイミング調節などが難しくなると予想されます。光の状態を長期記憶する光メモリを導入できれば、このような問題を解決できる可能性があります。大規模な平面アレイ集積が可能かつ消費電力の小さい面発光レーザは、偏光状態における双安定性（偏光双安定性）が光メモリとして機能するため、フォトニックコンピューティングにおいても有望なデバイスの一つであり、これまでに精力的に研究されてきました。面発光レーザにおける偏光双安定性には電流注入した電子のスピンが関係するという理論モデルが知られていましたが、通常、レーザ内部の電子は集団としてスピン無偏極状態であり、わずかに存在するスピン偏極のノイズ（スピンノイズ）が偏光双安定性に与える影響を確かめることは難しく、実験的に明らかにされていませんでした。

今回の取り組み

横田信英准教授らの研究グループは、面発光レーザに面内方向の磁場を印加することで、電流注入された電子のスピンノイズを歳差運動させ、その周波数と偏光双安定性の関係を調べました。通常、わずかなスピンノイズを歳差運動させてもその影響は小さいと考えられますが、図 1 に示すように、歳差運動周波数 (f_{spin}) が面発光レーザの複屈折^(注5)に起因した左右円偏光間の位相結合の周波数 (f_{light}) と一致する条件付近で共振的に相互作用する現象を活用することにより、光とスピンの相互作用を強め、これによって偏光双安定性を制御することを試みました。

印加磁場を掃引しながら測定した面発光レーザの出力偏光を図 2 に示します。磁場を掃引することで、偏光状態は互いに直交する2つの直線偏光（X 偏光と Y 偏光）の間でヒステリシス^(注6)を示しながら変化することがわかりました。この結果は、磁場に比例する歳差運動周波数の制御により、偏光双安定領域の出現が制御でき、これを利用した新しい偏光スイッチングが可能であることを意味します。これまで、外部から光を注入する方法や環境温度を変化させる方法によって偏光スイッチングを実現した報告はありましたが、スピンの制御によって実現した報告は本研究が初めてです。

面発光レーザの偏光双安定領域の測定結果とシミュレーション結果を図 3 に示します。周波数比 $f_{\text{spin}} / f_{\text{light}}$ が ± 1 に近づくと偏光双安定となる駆動電流条件が大幅に拡大することが明らかとなり、このような特徴はシミュレーションによって再現できることが確かめられました。本結果は、面発光レーザにおける

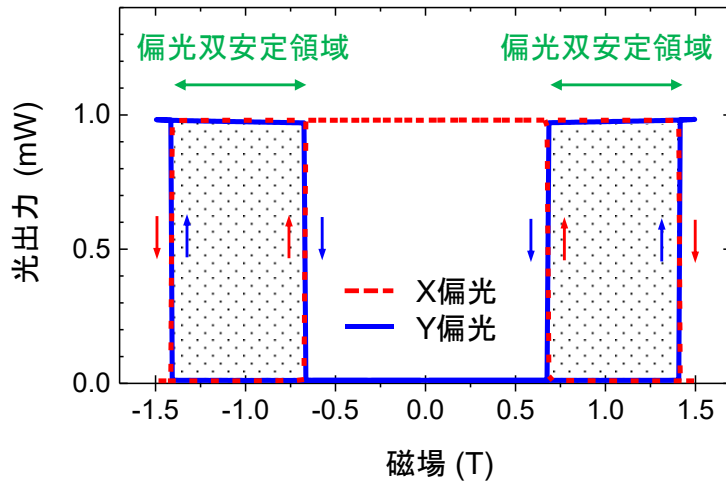


図2. 掃引磁場による面発光レーザの偏光スイッチングとヒステリシス特性。磁場（歳差運動周波数）に依存して、偏光双安定領域が出現している。

測定結果

シミュレーション結果

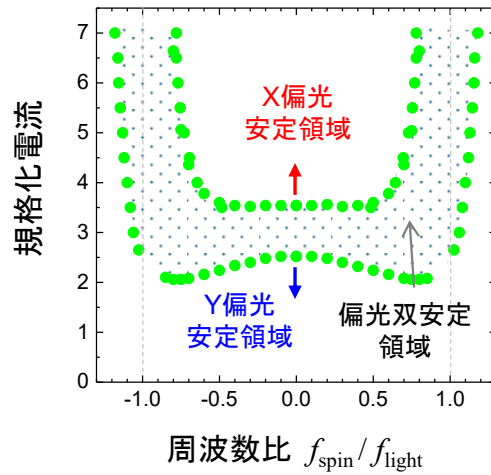
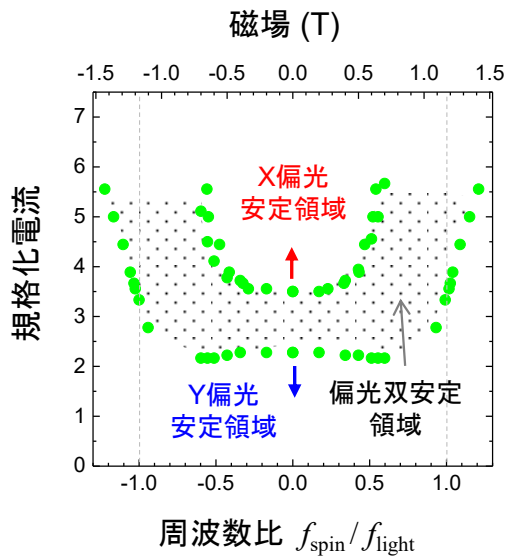


図3. 偏光双安定領域の測定結果とシミュレーション結果（測定ではg因子1.3を仮定）。 $f_{\text{spin}} / f_{\text{light}}$ が±1に近づくと偏光双安定となる駆動電流条件が大幅に拡大することを明らかにした。

【謝辞】

本研究の一部は、JSPS 科研費（課題番号：22H01536、24H00426）、村田学術振興財団、島津科学技術振興財団、東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究、研究基盤技術センターの支援を受けて行われました。本論文は『東北大学 2024 年度オープンアクセス推進のための APC 支援事業』により Open Access となっています。（DOI: 10.1063/5.0234539）

【用語説明】

- 注1. 面発光レーザー：半導体レーザーの一種であり、基板に対して垂直方向に光を出射する。レーザー構造の異方性が小さいため偏光双安定性を発現しやすい。
- 注2. 歳差運動：コマのように自転する物体の回転軸が円を描くように変化する現象。電子のスピンは磁場の方向を軸とした回転を生じる。
- 注3. 偏光双安定性：半導体レーザーから出力される光は、振動の向きが固定された直線偏光となる。2 つの異なる直線偏光の向きを安定に保つ性質を偏光双安定性と言う。面発光レーザーは向きの決まった直線偏光を出力し、向きを 90 度回転した直線偏光にスイッチできる。一度スイッチするとその偏光状態を安定に保つことができ、メモリに活用できる。
- 注4. フォトニックコンピューティング：通常の計算処理は電気的に行われるが、これを光に置き換えることにより計算処理の高速性や省電力性の向上が期待できる技術。
- 注5. 複屈折：屈折率が光の偏光状態に依存して異なる値を示す性質。
- 注6. ヒステリシス：系の状態が過去の条件に依存して変化する現象。本研究では面発光レーザーの 2 つの偏光状態（X 偏光と Y 偏光）が磁場または電流に対してヒステリシスを示した。

【論文情報】

タイトル：Polarization bistability of vertical-cavity surface-emitting lasers under Larmor precession of electron spins

著者：Nobuhide Yokota*, Kazuhiro Ikeda, Satoshi Iba, Takeo Katayama, and Hiroshi Yasaka

*責任著者：東北大学電気通信研究所 准教授 横田信英

掲載誌：APL Photonics

DOI：10.1063/5.0234539

URL: <https://doi.org/10.1063/5.0234539>

【問い合わせ先】

(研究に関すること)

東北大学 電気通信研究所

准教授 横田 信英

TEL: 022-217-5519

Email: nobuhide.yokota.a1@tohoku.ac.jp

(報道に関すること)

東北大学 電気通信研究所 総務係

TEL: 022-217-5420

Email: riec-somu@grp.tohoku.ac.jp