

# 実用に必須の室温で高電圧動作が可能なスピン LED を実現

～超高速動作を可能にする高電界の印加で失われる電子のスピン情報を独自のスピン増幅により復元～

## ポイント

- ・ 実用光半導体を用いて、室温かつ高電圧下でスピン発光ダイオード（LED）の高性能動作を達成。
- ・ 高電界により電子スピンの輸送中に急速に失われてしまうスピン偏極情報を光学活性層内で復元。
- ・ スピン偏極を高める希薄窒化物半導体の高い実用性を実証し、今後の光スピン素子の開発を加速。

## 概要

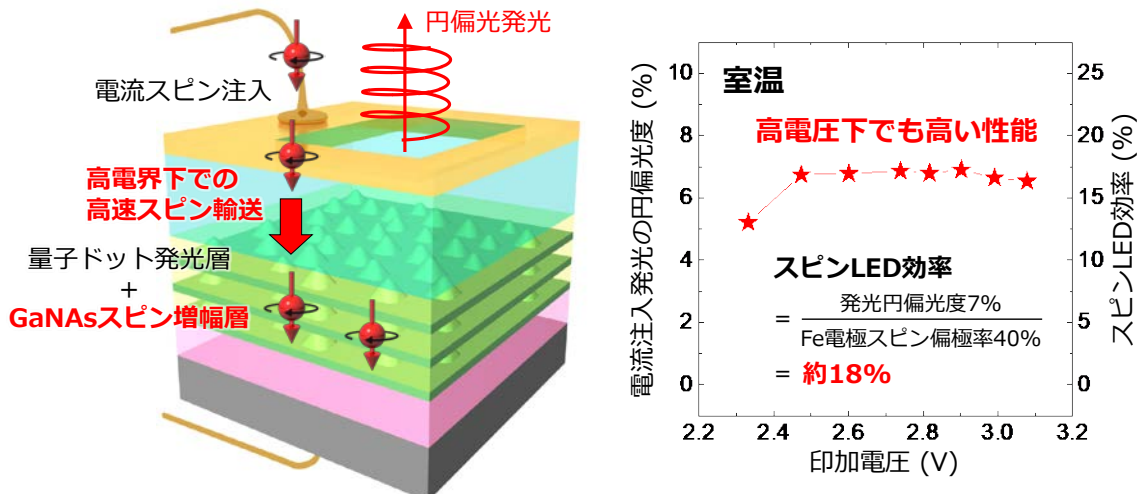
北海道大学大学院情報科学研究院の樋浦諭志准教授、同大学大学院情報科学院博士後期課程の江藤亘平氏らの研究グループは、超高速動作に必要な高電圧下で高効率に動作するスピン発光ダイオード（LED）を開発しました。

スピン LED は、電子スピンによる超低消費電力の情報記憶と、光によるスピン情報の高速伝送を実現する新しい光電変換素子であり、次世代の省エネルギー情報基盤を構築するために必要不可欠です。スピン LED の超高速動作を実現するには高電圧下での動作が必須ですが、室温かつ高電界下では電子のスピン偏極<sup>\*1</sup>情報が急速に失われるため、高い性能がこれまで実現していませんでした。

今回、研究グループは、超低消費電力のレーザー材料として実用化されているインジウムガリウムヒ素（InGaAs）量子ドット<sup>\*2</sup>と、室温でスピンフィルタリング増幅<sup>\*3</sup>が働く希薄窒化 GaAs（GaNAs）量子井戸から成る、量子力学的トンネル結合ナノ構造を活性層に用いたスピン LED を開発しました。高電圧下では電子のスピン偏極は活性層への注入前に電界によるスピン緩和が生じて低下してしまいます。しかし、本研究では活性層への注入後に GaNAs のスピン増幅効果が働くことで量子ドットにおける電子のスピン偏極が高まり、高電圧下でも高い性能を実現できることを明らかにしました。

本研究成果は、スピン偏極を高める GaNAs のスピンドバイスへの高い応用性を実証するとともに、超低消費電力の光スピン配線の実現に向けたスピン LED の開発が加速することが期待されます。

なお、本研究成果は、2023 年 2 月 22 日（水）公開の Physical Review Applied 誌にオンライン掲載されました。



本研究で開発したスピン LED の模式図と今回の研究成果

## 【背景】

近年の情報機器の消費電力低減に対する高い要求から、電子の持つ磁氣的性質であるスピンを情報処理に活用する、スピントロニクスに基づく新機能デバイスの開発が進められています。なかでも、スピン発光ダイオード(LED)は半導体中の電子スピン状態を円偏光\*4に転写して光伝送できるため、次世代の光電変換素子として注目されています。スピンLEDの超高速動作に向けては高バイアス電圧を印加する必要がありますが、半導体中では高電界により電子のスピン偏極状態が急速に失われてしまうため、高電圧下で高い性能を実現するための鍵となる技術はこれまでありませんでした。

## 【研究手法】

本研究では、InGaAs量子ドットと5nmの希薄窒化GaAs(GaNAs)量子井戸を量子力学的にトンネル結合\*5させたナノ構造を光学活性層に用い、スピン輸送バリアに $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}$ 、スピン注入源にFe/MgOを用いたスピンLEDを作製しました。そして、円偏光電流注入発光(EL)分光により半導体中の電子スピン偏極率に対応するEL円偏光度(光スピン情報)を室温で測定しました。また、室温で電界印加円偏光フォトルミネセンス(PL)測定を行い、高電圧下でのスピンLEDの動作機構を調べました。

## 【研究成果】

図1(a、b)に本研究で開発したスピンLEDと、通常のスピンLEDにおける3.0Vの高電圧下にて室温で得られた円偏光ELスペクトルとEL円偏光度を示します。通常のスピンLEDでは量子ドットのEL円偏光度が約3%であるのに対して、本研究のスピンLEDでは約7%のEL円偏光度が得られました。通常のスピンLEDでは、EL発光強度が増加すると、引き換えにEL円偏光度が低下しますが、本研究のスピンLEDでは高輝度発光と高円偏光度を両立することに成功しました(図2)。

次に、高電圧下で高いEL円偏光度が得られるメカニズムを調べました。図3(a)に3.0Vにて室温で得られたPL円偏光度の励起光強度依存性\*6を示します。量子ドットへ注入される電子スピンの少ない弱励起条件では、PL円偏光度は電界によるスピン緩和が強く反映されて5%程度の低い値しか得られませんが、励起光強度を増加するとGaNAsのスピンフィルタリング増幅が徐々に活性化されて、PL円偏光度が最大23%まで増加しました。

その結果、スピンLEDの高電圧(高電流)動作においては量子ドット活性層への注入前に電子のスピン偏極は低下するものの、注入後にGaNAsのスピン増幅効果が働きスピン偏極が回復することで、高いEL円偏光度が得られることが分かりました(図3(b))。

## 【今後への期待】

今回の研究成果により、希薄窒化物半導体GaNAsのスピン光デバイスへの高い応用性と実用性が明らかになりました。今後はGaNAsのスピンフィルタリング増幅を活用したスピンプォトダイオードやスピンレーザーなどの光スピントロニクス素子の開発が急速に加速することが期待されます。

一方、スピンLEDの性能を更に向上させるには電界によるスピン緩和を抑制する必要があります。高電界下でスピン状態を保持しながら活性層まで輸送する電子スピン輸送技術の開発が待たれます。

## 【謝辞】

本研究は、科学研究費助成事業・基盤研究(B)「電子スピン増幅機能を搭載した室温動作光スピン変換素子の開発」(課題番号21H01356、研究代表：樋浦諭志)、若手研究「サイズ変調結合量子ドット

の励起スピンエンジニアリングによる室温高スピン偏極発光」(課題番号 19K15380、研究代表：樋浦諭志)、JST 創発的研究支援事業「ナノ量子光スピン機能の開拓による光電スピントロニクス創成」(課題番号 JPMJFR202E、研究代表：樋浦諭志)、2021 年度新世代研究所 ATI 研究助成「希薄窒化物半導体を基盤としたスピン選択輸送の開拓」(研究代表：樋浦諭志) 及び科学研究費助成事業・基盤研究 (S)「量子ドットによる光電スピン情報変換基盤の構築」(課題番号 16H06359、研究代表：村山明宏)、挑戦的研究(開拓)「光スピントランジスタ」(課題番号 19H05507、研究代表：村山明宏)の助成を受けた成果です。

## 論文情報

|     |   |
|-----|---|
| 論文名 | Efficient Room-Temperature Operation of a Quantum Dot Spin-Polarized Light-Emitting Diode under High-Bias Conditions (高バイアス条件での量子ドットスピン偏極発光ダイオードの高効率な室温動作)  |
| 著者名 | 江藤亘平 <sup>1</sup> 、樋浦諭志 <sup>2</sup> 、朴 昭暎 <sup>1</sup> 、高山純一 <sup>2</sup> 、スバギョアグス <sup>2</sup> 、末岡和久 <sup>2</sup> 、村山明宏 <sup>2</sup><br>( <sup>1</sup> 北海道大学大学院情報科学院、 <sup>1</sup> 北海道大学大学院情報科学研究院) |
| 雑誌名 | <i>Physical Review Applied</i> (米国物理学会の専門誌)   |
| DOI | 10.1103/PhysRevApplied.19.024055  |
| 公表日 | 2023 年 2 月 22 日 (水) (オンライン公開)   |

## お問い合わせ先

北海道大学大学院情報科学研究院 准教授 樋浦諭志 (ひうらさとし)  
T E L 011-706-6519 F A X 011-706-6519 メール hiura@ist.hokudai.ac.jp  
U R L <https://www.ist.hokudai.ac.jp/labo/processing/>

## 配信元

北海道大学社会共創部広報課 (〒060-0808 札幌市北区北 8 条西 5 丁目)  
T E L 011-706-2610 F A X 011-706-2092 メール jp-press@general.hokudai.ac.jp

【参考図】

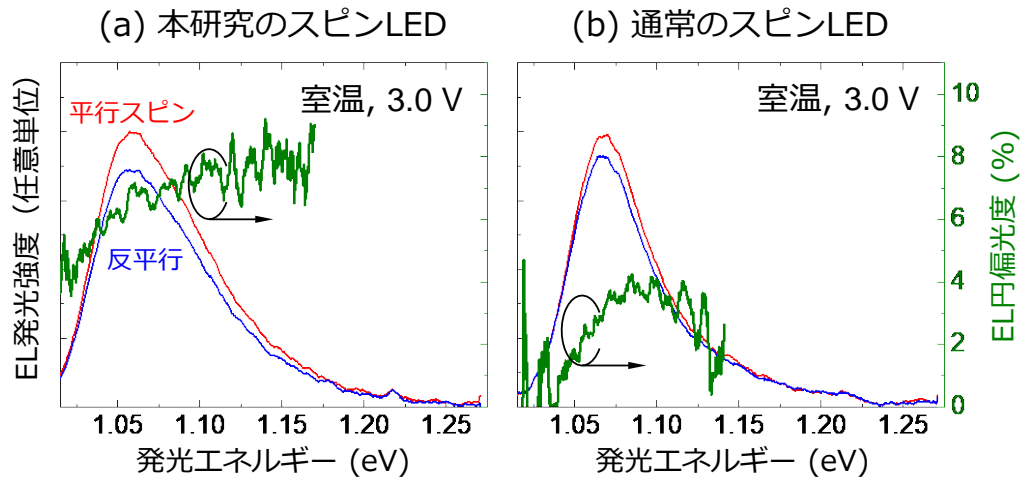


図 1. (a) 本研究で開発した量子ドットと GaNAs を用いたスピン LED と、(b) 通常の量子ドットスピン LED における 3.0 V の高電圧下にて室温で得られた円偏光 EL スペクトルと EL 円偏光度。

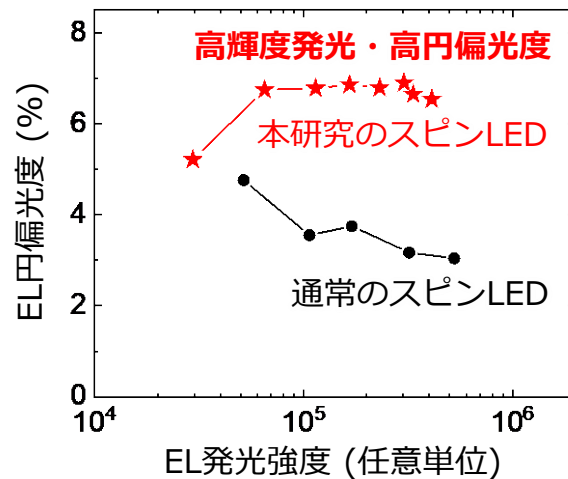


図 2. 本研究のスピン LED と、通常のスピン LED における EL 円偏光度の EL 発光強度依存性の比較。

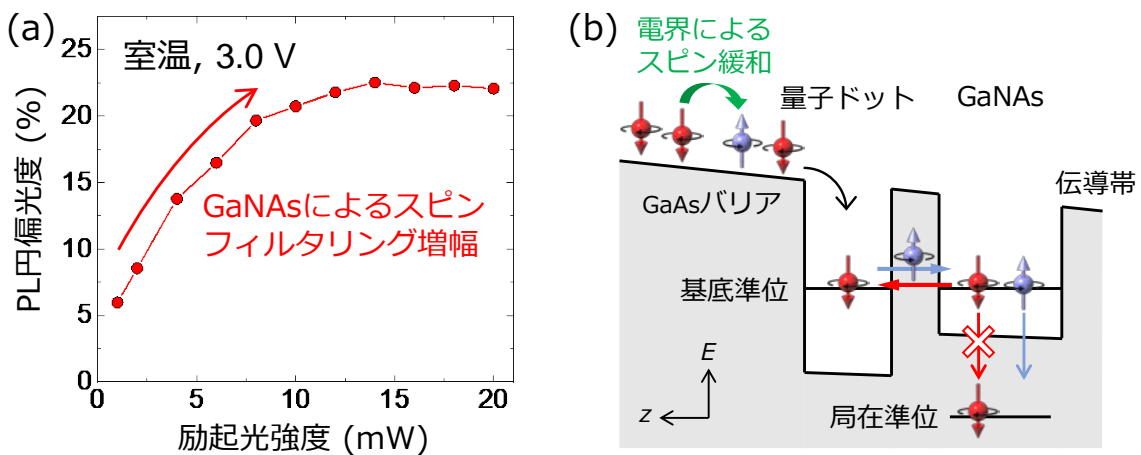


図 3. (a) 3.0 V の高電圧下にて室温で得られた PL 円偏光度の励起光強度依存性。  
(b) 本研究で開発したスピン LED における高電圧下での動作機構を示す模式図。

## 【用語解説】

- \*1 電子のスピン偏極 … 電子はスピンという極小の磁石の性質を有する。スピンは上向きと下向きの二つの状態を取り、両者の電子数が同じ場合にはお互いの性質が打ち消されている（通常の半導体）。この二つのスピンの電子数がどちらか一方に偏ることがスピン偏極であり、外部に取り出し可能なスピン情報になる。スピン偏極を定量的な数値で表す指標がスピン偏極率であり、上向きと下向きのスピンを持つ電子数に偏りが無い無偏極は 0 %（通常の半導体）、完全に偏極すると 100 %の値を取る。
  
- \*2 量子ドット … 数十 nm 以下の半導体結晶のこと。発光の源となる電子と正孔をその微小な領域に閉じ込めることができるため発光効率が高く、究極のレーザー光源としての実用化も始まっている。
  
- \*3 スピンフィルタリング増幅 … 希薄窒化ガリウムヒ素のバンドギャップ内に格子間 Ga 原子の局在準位が形成され、伝導帯からこの準位に緩和する電子に働くパウリ排他律により、伝導電子のスピン偏極率が増幅される。この局在準位のエネルギーは十分に深いため、室温以上で高効率に動作する。
  
- \*4 円偏光 … 光の進行方向に対して電場の軌跡が円を描くように伝搬する光のこと。光のスピン状態でもある。ガリウムヒ素などの半導体を用いた光電変換では、下向きと上向きの電子のスピン偏極に対応して、右回りと左回りの円偏光特性に情報変換される。すなわち、電子のスピン偏極率は左右円偏光の強度の偏りである円偏光度にそのまま転写される（発光の円偏光度 = 電子のスピン偏極率）。
  
- \*5 トンネル結合 … 電子をはじめとする微視的粒子が、エネルギー的に通常は超えることのできない障壁を透過することをトンネル効果と呼ぶ。ここでは、InGaAs 量子ドットと GaNAs 量子井戸が GaAs 障壁を介して結合され、両者の間を電子がトンネル移動により行き来できることを意味する。
  
- \*6 励起光強度依存性 … 半導体に光を当てると価電子帯から伝導帯に電子が励起される。光の強度が強いほど励起される電子の数は増える。すなわち、励起光強度を増加させることは LED の注入電流を増加させることと同意である。