

室温動作スピン LED を開発し、動作特性の支配要因を解明

～デバイス性能を支配する半導体での電子スピン輸送中のスピン保存率の定量評価手法を確立～

ポイント

- ・ 実用半導体光デバイス材料を用いて、スピン発光ダイオード (LED) の室温安定動作を達成。
- ・ LED 発光特性と超高速発光分光を併用し、LED 動作時の電子スピン輸送ダイナミクスを解明。
- ・ 光スピン変換媒体としての量子ドットの高い実用性を実証し、今後の光スピン素子開発を加速。

概要

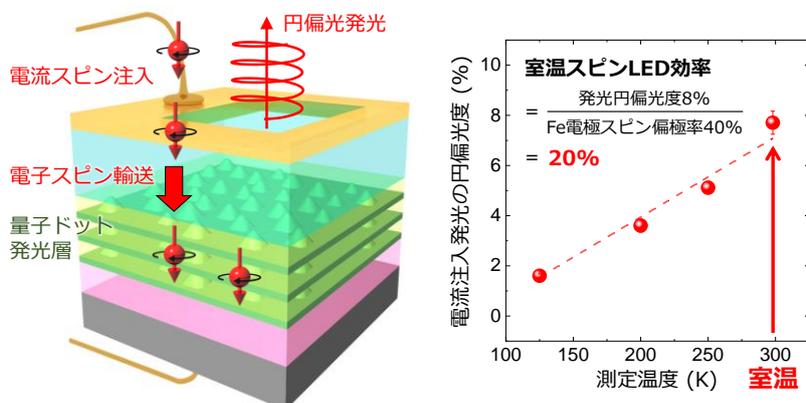
北海道大学大学院情報科学研究院の樋浦諭志准教授、修士課程の江藤亘平氏らの研究グループは、実用の半導体光デバイス材料であるインジウムガリウムヒ素 (InGaAs) 量子ドット*1 を用いたスピン発光ダイオード (LED) を開発し、室温安定動作を達成するとともに、デバイス性能を支配する半導体中の電子スピン輸送におけるスピン保存率を定量的に評価できる手法を確立しました。

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、熱損失がない光によるスピン情報の伝送を実現する光電情報インターフェースであり、次世代の省エネルギー情報基盤を構築するためのコアデバイスです。古くは 1990 年代よりスピン LED の開発が行われてきたものの、安定した室温動作は未だ達成されておらず、その明確な要因については明らかになっていませんでした。

今回研究グループは、実用の半導体光デバイス材料であり、強い量子効果によりスピン情報を発光中に長時間保持できる InGaAs 量子ドットを用いたスピン LED を開発し、室温動作を達成しました。そして、電流注入による LED 発光特性と超高速発光分光を併用した独自手法を考案し、室温でのスピン LED 特性が半導体バリアの電子スピン保存率に強く依存することを定量的に明らかにしました。

本研究成果は、スピン LED の光電変換材料としての量子ドットの高い実用性を実証するとともに、デバイス性能を支配する半導体中の電子スピン輸送特性を定量的に評価できる新たな手法を確立し、超低消費電力のスピン情報光インターコネクションの実現に向けたスピン LED 開発が加速することが期待されます。

なお、本研究成果は、2021 年 7 月 14 日 (水) 公開の米国物理学会専門誌 Physical Review Applied 誌にオンライン掲載されました。



半導体量子ドットを用いたスピン LED の模式図と今回の研究成果

【背景】

高度情報化社会の持続的発展に向けて、情報システムの消費電力を抜本的に削減できる光電融合情報基盤の構築が必要不可欠です。この新たな情報基盤の構築には、電力消費なしに情報を保持する電子のスピン状態とエネルギー熱損失のない情報伝送を担う光の間で、スピン情報の直接変換が可能なスピン発光ダイオード（LED）の開発が鍵を握っています。しかし、スピン LED の安定した室温動作は達成されておらず、その動作特性を支配する要因については定性的な議論にとどまっていました。

【研究手法】

本研究では、光学活性層に p ドープ $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ 量子ドット、スピン輸送バリアに $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}/\text{GaAs}$ 、スピン注入源に Fe/MgO を用いた量子ドットスピン LED を作製しました。スピン分解円偏光^{*2}発光分光により、半導体中の電子スピン偏極率^{*3}に対応する発光の円偏光度（光スピン情報）を測定しました。また、電子スピンの注入や緩和などのダイナミクスを超高速スピン分解発光分光により測定し、量子ドットの光スピン変換効率^{*4}やスピン輸送バリアの電子スピン保存率を調べました。

【研究成果】

図 1(a, b) に 125 K と室温で得られた量子ドットスピン LED の円偏光発光スペクトルとその円偏光度を示します。125 K での円偏光度 2% に対して、室温で 8% の円偏光度を観測しました。これは量子ドットスピン LED の室温での最大報告値 5% を上回っており、高効率の室温動作を達成しました。また、200 K を超える温度では、注入電流の増加に伴う円偏光度の低下が大きくなりました（図 1(c)）。

次に、そのメカニズムを調べました。量子ドットの発光減衰時間は電子の熱脱離により高温で急激に減少する一方、スピン緩和時間は強い量子効果により温度に対してほぼ一定でした（図 2(a)）。その結果、量子ドットの光スピン変換効率は温度上昇とともに大きく増加し、室温で最大値 69% が得られました（図 2(b)）。一方、輸送中のスピン保存率は 200 K を超えると低下し、強い発光が得られる高電流条件では電界誘起のスピン緩和が働き、室温で 10% 以下になることを明らかにしました（図 3）。

【今後への期待】

今回の研究成果により、スピン LED の実用性能が半導体中の電子スピン輸送におけるスピン保存率に依存することが定量的に明らかになったことで、室温で電子スピンを保持しながら発光層まで輸送できる新たなスピン輸送バリアの開発に向けた研究が注目され加速していくことが期待されます。また、本研究により量子ドットの高いスピン保持特性が室温で実証されたことで、量子ドットを情報変換媒体に用いた光スピン変換素子の開発に向けた実用研究が急速に加速することが期待されます。

【謝辞】

本研究は、日本学術振興会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), 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), 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) 及び 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) の助成を受けた成果です。

論文情報

論文名 Room-temperature spin transport properties in $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ quantum dot spin-polarized light-emitting diode ($\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ 量子ドットを用いたスピン偏極発光ダイオードにおける室温でのスピン輸送特性)

著者名 江藤巨平¹, 樋浦諭志¹, 朴 昭暎¹, 阪元和弥¹, 高山純一¹, スバギョアグス¹, 末岡和久¹, 村山明宏¹ (¹北海道大学大学院情報科学研究院)

雑誌名 *Physical Review Applied* (米国物理学会の専門誌)

D O I 10.1103/PhysRevApplied.17.014034

公表日 2021年7月14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

北海道大学総務企画部広報課 (〒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

【用語解説】

- *1 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、究極のレーザ光源としての実用化も始まっている。
- *2 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、上向きと下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 = 電子スピン偏極率)。
- *3 電子スピン偏極率 … 電子はスピンという極小の磁石の性質を持つ。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電子スピン偏極であり、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。
- *4 光スピン変換効率 … 本研究での光スピン変換効率は、量子ドット発光層へのスピン注入時の電子スピン偏極率に対する発光円偏光度の比に対応する。超高速スピン分解発光分光により得られる発光減衰時間 τ_r と電子スピン緩和時間 τ_s を用いて、 $(1 + \tau_r/\tau_s)^{-1}$ と定義される。

【参考図】

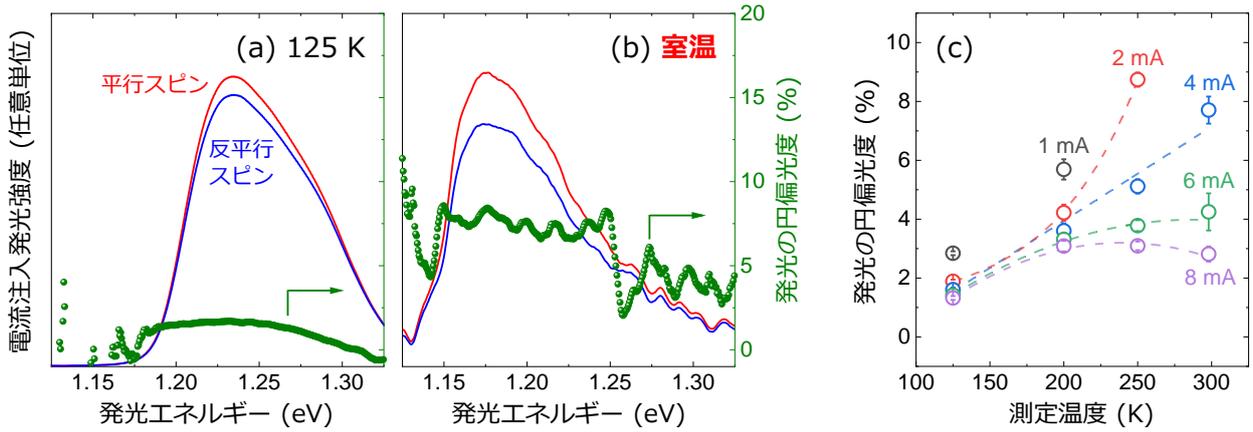


図 1. (a) 125 K と (b) 室温で得られた量子ドットスピン発光ダイオード (LED) の円偏光発光スペクトルと発光の円偏光度。 (c) 様々な注入電流条件で得られた発光円偏光度の測定温度依存性。

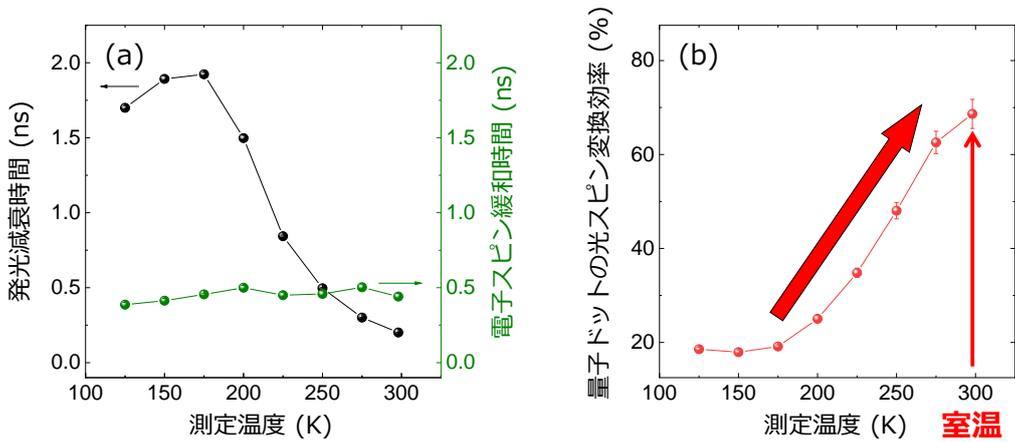


図 2. (a) 量子ドットの発光減衰時間と電子スピン緩和時間の測定温度依存性。 (b) 量子ドットの光スピン変換効率の測定温度依存性。

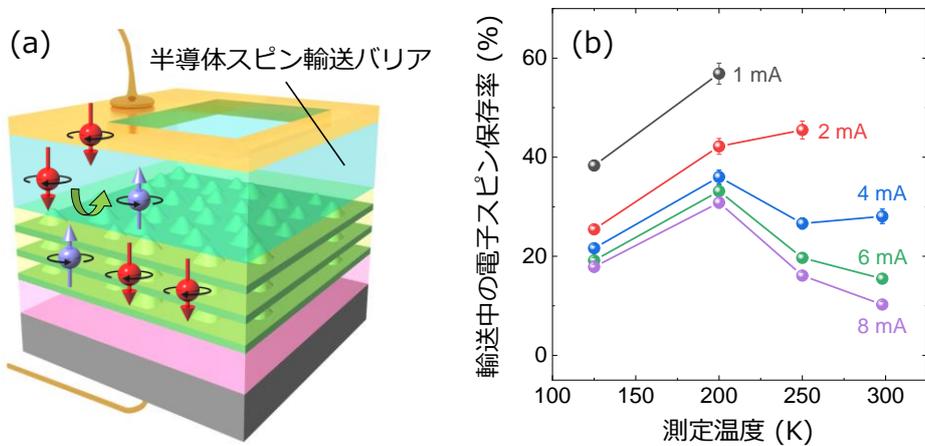


図 3. (a) 量子ドット発光層への電子スピンの輸送中に生じるスピン緩和を示す模式図。 (b) 半導体スピン輸送バリアにおける電子スピン保存率の測定温度・注入電流依存性。