室温で高輝度かつ高円偏光度を示す半導体ナノ材料を開発

～電子スピンのフィルタリング機能を発光層に直接搭載し、スピン-光変換素子の実用化へ前進～

ポイント

・高い発光効率を持つ量子ドット発光層に欠陥を利用したスピンフィルタリング機能を直接導入。
・従来の量子ドットでは不可避な状態充填効果の抑制に加え、発光準位から不要なスピンを除去。
・室温で高輝度発光と 50%を超える高円偏光度を両立し、今後のスピン光変換素子の開発を加速。

概要

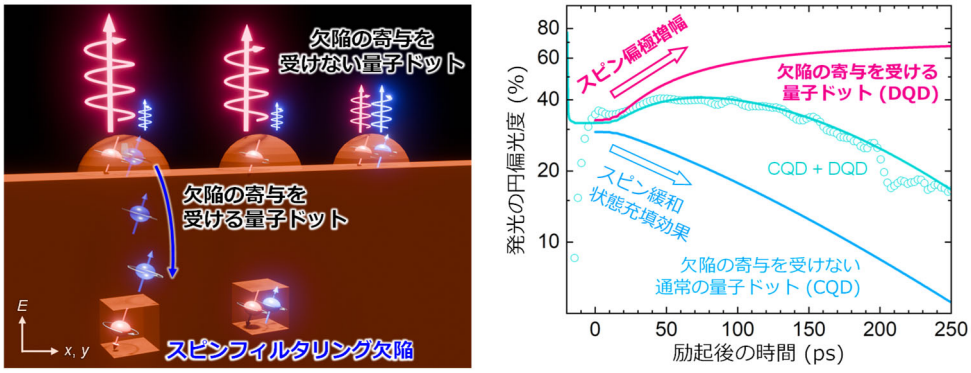
北海道大学大学院情報科学研究院の樋浦諭志教授、高山純一技術専門職員、村山明宏特任教授、同大学大学院情報科学院博士後期課程の森田彩乃氏らの研究グループは、スウェーデン・リンショーピング大学との国際共同研究により、室温で高輝度発光と高い電子スピン偏極率*1を両立する半導体ナノ材料を開発しました。

電子スピンと光を活用した省エネルギー情報記憶・伝送を実現するには、スピン-光変換を担う半導体活性層での高いスピン偏極率が不可欠です。研究グループは 2021 年にスピンフィルタリング機能*2を持つ希薄窒化ガリウムヒ素（GaNAs）とインジウムヒ素（InAs）量子ドット*3のトンネル結合構造を開発し、室温で世界最高のスピン偏極率を達成しましたが、電子と正孔の解離により発光効率が低下してしまうという課題がありました。

今回研究グループは、電子の熱脱離の抑制により室温でも高輝度発光が可能な希薄窒化 InGaAsN 量子ドットに着目し、通常よりも低い 420°Cで成長させることで、スピンフィルタリング機能を持つ欠陥を発光層に直接導入しました。これにより、従来の InGaAs 量子ドットと同等の高い発光強度を維持したまま、発光の円偏光度*4を大幅に向上させました。さらに、時間分解円偏光発光測定により、欠陥の寄与を受ける量子ドットと寄与を受けない量子ドットが共存していることを見いだしました。欠陥の寄与を受ける量子ドットでは 50%以上の高い円偏光度を示し、発光準位から不要な少数個スピンが選択的に除去されることで、スピン偏極率が発光中に大きく増幅されることが分かりました。

これにより、室温で高輝度・高スピン偏極発光を両立する実用的なスピン-光変換材料の設計指針を提示するものであり、将来の光スピン配線に向けた研究開発を加速させることが期待されます。

なお、本研究成果は、2026 年 9 月 1 日（火）公開の Advanced Optical Materials 誌にオンライン掲載されました。



開発したスピンフィルタリング欠陥を持つ半導体ナノ材料の模式図と今回の研究成果

【背景】

半導体量子ドットは、電子と正孔をナノサイズの微小空間に閉じ込めることで高い発光効率と長いスピン寿命を示すことから、超低消費電力のレーザー光源や次世代のスピン-光変換素子であるスピン偏極発光ダイオード（スピン LED）の活性層材料として期待されています。高性能なスピン LED を開発するには、活性層における高い電子スピン偏極率が必要不可欠であり、研究グループはこれまで希薄窒化 GaNAs のスピンフィルタリング効果を活用してきました。2021 年には GaNAs と InAs 量子ドットのトンネル結合構造を開発し、室温で 90％を超える世界最高のスピン偏極率を達成しました。しかし、この従来構造では量子ドット内の正孔と GaNAs 層へ広がる電子との間で空間的解離が生じ、量子ドットの発光効率が原理的に低下してしまう点が課題となっていました。そのため、発光層である量子ドット自身にスピンフィルタリング機能を直接導入する新しい手法が求められていました。

【研究手法】

本研究では、高周波プラズマ支援分子線エピタキシー法を用い、GaAs(100)基板上に希薄窒化 InGaAsN 量子ドットを作製しました（図 1（a））。通常の成長温度（480°C）に加え、より低温の 420°C で成長させることで、スピンフィルタリング機能を持つ欠陥を量子ドット層に意図的に導入しました。作製した一連の試料に対し、室温で円偏光発光分光を含む時間分解発光測定を行い、電子スピンの動的挙動を調べました。さらに、欠陥準位によるスピン依存の電子捕獲過程を組み込んだレート方程式*5 モデルを新たに構築し、円偏光発光強度や円偏光度の時間変化に対する定量的な解析を行いました。

【研究成果】

420°Cで成長した InGaAsN 量子ドットは、高密度の欠陥が導入されているにもかかわらず、欠陥のない通常の InGaAs 量子ドットに匹敵する高輝度な発光を示しました（図 1（b））。円偏光励起による初期の電子スピン偏極率が 50％の条件において、発光の円偏光度（電子スピン偏極率に相当）は最大 40％に達しました（図 2（a））。通常の InGaAs 量子ドットでは、励起光強度を高めると状態充填効果*6 の促進によって円偏光度が低下します。しかし、420°Cで成長した InGaAsN 量子ドットでは、励起スピン密度の増加に伴ってスピンフィルタリング効果が強く働き、円偏光度が大きく増加しました（図 2（b））。

次に、そのメカニズムを解明するために時間分解円偏光発光測定を行ったところ、発光の初期と後半で円偏光度の減衰時間に明確な違いが見られました。解析の結果、作製した量子ドット集合体には、スピンフィルタリング欠陥の寄与を受ける量子ドット（DQD）と、寄与を受けない通常の量子ドット（CQD）が共存することが分かりました。レート方程式解析により DQD 成分のみを抽出したところ、発光初期に 33％であった円偏光度が最大 67％まで増幅することが確認されました（図 3（a））。これは、発光準位から不要な少数個スピンが欠陥準位に選択的に捕獲されたことを実証しています。さらに、抽出した DQD における時間積分発光の円偏光度は 50％以上に達しました（図 3（b））。これらの結果は、量子ドット層へ注入される前にスピン偏極が低下した場合でも、注入後にスピンフィルタリング効果が高効率に働くことで、実質的に 100％のスピン-円偏光変換効率を達成できる可能性を示しています。

【今後への期待】

本研究は、量子ドット発光層にスピン偏極の増幅機能を直接組み込むという、新たな設計指針を提示するものです。今回開発した高輝度発光と高スピン偏極率を兼ね備えた半導体ナノ材料は、実用的なスピン LED やスピンレーザーの活性層への応用が期待されます。今後は成長条件や手法の最適化によって欠陥の密度や配置を制御することで、スピン偏極率と発光効率の更なる向上が期待されます。

【謝辞】

本研究は、JST 創発的研究支援事業（JPMJFR202E）、NEDO 未踏チャレンジ（JPNP14004）、JSPS 科研費（JP21KK0068、JP23K26153、JP24K00913、JP25KJ0446）などの助成を受けた成果です。

論文情報

論文名	Highly Spin-Polarized Luminescent Quantum Nanomaterials Integrated with a Defect-Enabled Spin-Filtering Function（欠陥を利用したスピンフィルタリング機能を統合した高スピン偏極発光量子ナノ材料）
著者名	森田彩乃[1]、Jansson Mattias[2]、高山純一[3]、Buyanova Irina[2]、Chen Weimin[2]、村山明宏[3]、樋浦諭志[3]（[1]北海道大学大学院情報科学院、[2]リンショーピング大学、[3]北海道大学大学院情報科学研究院）
雑誌名	Advanced Optical Materials（光学材料の専門誌）
ＤＯＩ	10.1002/adom.71622
公表日	2026 年 9 月 1 日（火）（オンライン公開）

お問い合わせ先

【研究内容に関すること】

北海道大学大学院情報科学研究院　教授　樋浦諭志（ひうらさとし）

ＴＥＬ　011-706-6519　ＦＡＸ　011-706-6519　メール　hiura@ist.hokudai.ac.jp

ＵＲＬ　https://www.ist.hokudai.ac.jp/labo/epm/

【JST 事業に関すること】

科学技術振興機構　創発的研究推進部　加藤豪（かとうごう）

ＴＥＬ　03-5214-7276　メール　souhatsu-inquiry@jst.go.jp

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）

ＴＥＬ　011-706-2610　ＦＡＸ　011-706-2092　メール　jp-press@general.hokudai.ac.jp

科学技術振興機構広報課（〒102-8666 東京都千代田区四番町 5-3 サイエンスプラザ）

ＴＥＬ　03-5214-8404　ＦＡＸ　03-5214-8432　メール　jstkoho@jst.go.jp

【参考図】

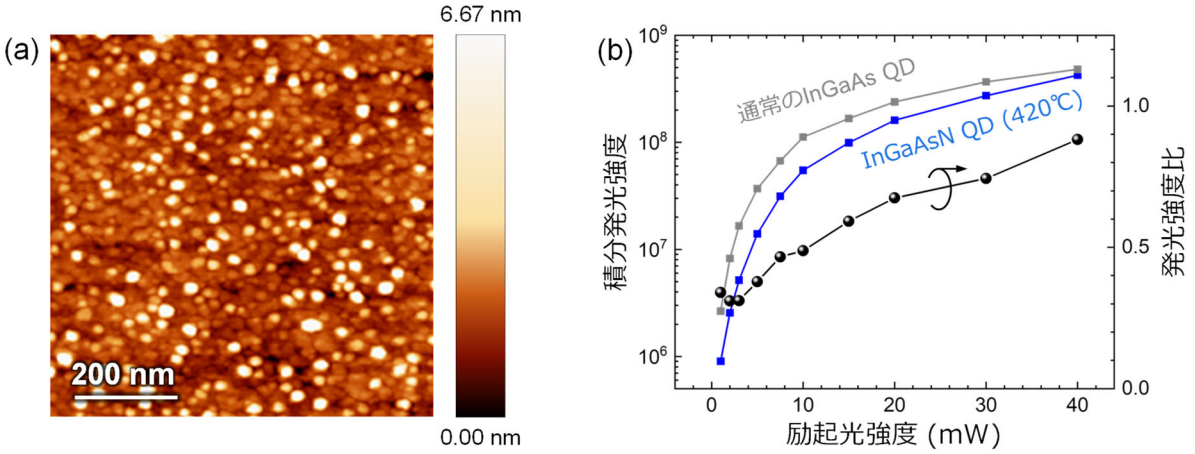


図 1. (a) 開発した InGaAsN 量子ドット (QD) の原子間力顕微鏡像。(b) 通常の InGaAs QD 及び 420°C で成長した InGaAsN QD の室温における積分発光強度と発光強度比の励起光強度依存性。

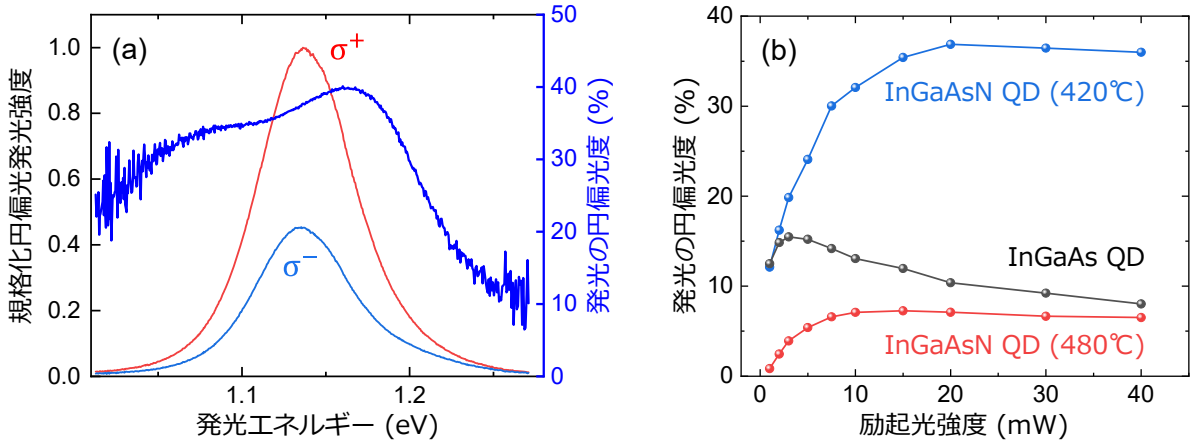


図 2. (a) 420°Cで成長した InGaAsN QD の室温での円偏光発光スペクトルと円偏光度。(b) 通常の InGaAs QD と成長温度を変えた InGaAsN QD における室温での円偏光度の励起光強度依存性。

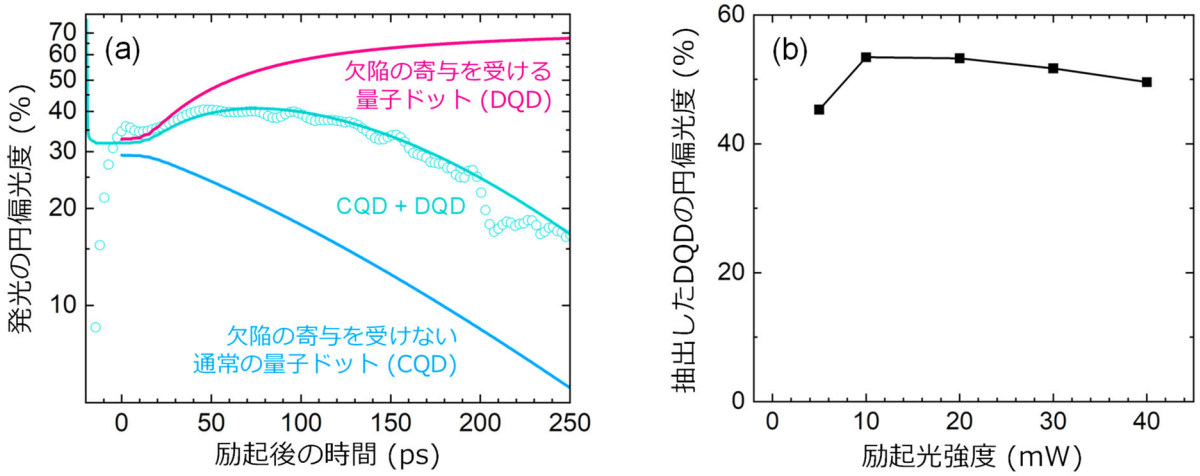


図 3. (a) QD 集合体における円偏光度の時間変化に対するレート方程式解析結果。欠陥の寄与を受ける QD (DQD) の円偏光特性が抽出されている。(b) 抽出した DQD の円偏光度の励起光強度依存性。

【用語解説】

＊1 電子スピン偏極率 … 電子はスピンという磁石の性質を持つ。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。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、その定量的指標がスピン偏極率である。上向きと下向きのスピンを持つ電子数に偏りがない無偏極状態は 0%（通常の半導体）、完全に偏極すると 100 %の値を取る。

＊2 スピンフィルタリング機能 … 希薄窒化物半導体を 400°C程度で成長するとバンドギャップ内に格子間 Ga 原子に由来する欠陥準位が形成され、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。欠陥準位は十分に深く、室温で高効率に動作する。GaNAs と InAs 量子ドットのトンネル結合構造に関する参考論文：
Y. Q. Huang et al. Nature Photonics 15, 475, (2021) https://doi.org/10.1038/s41566-021-00786-y

＊3 量子ドット … 数十 nm（1nm は 10 億分の 1 メートル）以下の半導体結晶のこと。電子と正孔をその微小空間に閉じ込めることができるため発光効率が高いうえに環境温度変化にも強く、レーザー光源としての実用化が進んでいる。

＊4 円偏光度 … 円偏光は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であり、光のスピン状態でもある。GaAs などの半導体によるスピン-光変換では、下向きスピンと上向きスピンが正孔と再結合すると、それぞれ右回り・左回り円偏光に変換される。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転写される（発光の円偏光度＝電子のスピン偏極率）。

＊5 レート方程式 … 物質内における電子などの数や状態が時間とともにどのように変化するのかを移動速度（レート）に基づいて数式化したものである。本研究では、電子スピンの移動やスピン状態の変化をモデル化し、発光強度と円偏光度の時間変化と照らし合わせることで、半導体ナノ材料の内部で生じる複雑かつ高速な電子スピンの動きを可視化・解析するために活用している。

＊6 状態充填効果 … 量子ドットのように状態密度が制限されるナノ材料において、量子準位（本研究では基底準位）が上向き・下向き両方のスピンを持つ電子によって占有される現象である。強い励起光によって両方のスピンが発光準位に注入されると、スピンの偏りが失われて円偏光度が低下する。