

室温さらには 110°Cで世界最高性能のスピンの増幅を達成

～室温でスピン情報が容易に失われる半導体の常識を覆し、実用の光スピントロニクス半導体を確立～

ポイント

- ・実用半導体で、室温で 90%、110°Cでも 80%まで電子のスピン偏極を増幅し、光スピン情報に変換。
- ・超低消費電力のスピン機能半導体電子・光デバイスの実用化を現実にするブレークスルーを達成。
- ・半導体量子ドットの電子スピン偏極を室温以上で巨大に増幅し、量子情報技術の実用化を加速。

概要

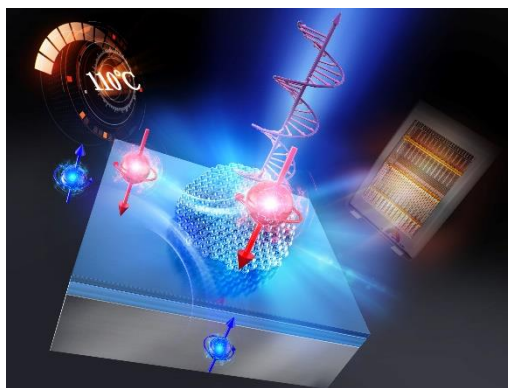
北海道大学大学院情報科学研究院の樋浦諭志准教授、博士後期課程の佐藤紫乃氏（日本学術振興会特別研究員）、高山純一技術専門職員、村山明宏教授らの研究グループは、スウェーデン・リンショープン大学及びフィンランド・タンペレ大学との国際共同研究で、室温で 90%、110°Cでも 80%もの高い電子スピン偏極^{*1}を実用半導体で生成する光スピントロニクスナノ構造を開発しました（下図）。

光スピントロニクスは、電子スピンによる超低消費電力の情報処理/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、電子と光の量子効果を活用する次世代の光電融合情報基盤を構築するコア技術です。スピン情報の光変換には半導体が必須ですが、半導体ではスピン情報が容易に失われ、実用に不可欠な高いスピン偏極が室温では得られませんでした。

今回研究グループは、実用の光デバイス半導体材料である希薄窒化ガリウムヒ素（GaNA_s）とインジウムヒ素（InAs）量子ドット^{*2}から成る独自の量子力学的トンネル結合を開発しました。そして、室温でスピンフィルタリング増幅^{*3}が働く GaNA_sにより、超低消費電力のレーザ素子の材料として実用化が始まっており、さらに将来の単一光子量子情報デバイス材料としても期待されている量子ドット中の電子スピン偏極を大きく増幅することに成功しました。この新しい半導体ナノ構造により、室温で 90%、110°Cでも 80%もの世界最高の電子スピン偏極率を達成し、従来の半導体光スピントロニクスが抱えてきた、実用化を妨げている最大の問題であった室温動作の壁を大きく打破しました。

本研究成果は、半導体光スピントロニクスのパラダイムシフトを引き起こし、磁性を持たない一般の実用半導体でありながら、電子のスピン偏極を室温以上でも高効率に増幅する革新的技術を創出し、超低消費電力のスピン情報光インターコネクションに向けた実用的な技術開発を加速します。

なお、本研究成果は、2021年4月8日（木）公開の英国科学雑誌 Nature Photonics 誌にオンライン掲載されました。



今回開発した光スピントロニクス半導体ナノ構造による室温以上での巨大な光電スピン増幅

【背景】

人工知能やビッグデータを駆使する次世代の情報社会を実現するためには、光と電子の持つ本質的な量子効果を活用し、消費電力の抜本的な削減が可能な両者の光電融合情報基盤の構築が必要不可欠です。この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光スピントロニクス半導体の開発が鍵を握っています。実用半導体は非磁性で電子のスピン状態が偏極しておらず、実用に向けては、室温以上でほぼ完全にスピン偏極した電子を生成する必要があります。しかしながら、半導体では容易にスピンが失われ、これまでの研究では室温の電子スピン偏極率は 60%以下にとどまっていた。

【研究手法】

本研究では、薄い GaAs トンネルバリアを介して InAs 量子ドットと希薄窒化 GaAs (GaNA_s) を量子力学的にトンネル結合させた試料を分子線エピタキシー法により作製しました (図 1 (a))。スピン分解円偏光^{*4}発光分光により、半導体中の電子スピン偏極率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直接測定し、量子ドットと GaNA_s の間で生じる電子スピン偏極の増幅機構を調べました。

【研究成果】

図 1 (b) に室温で得られた円偏光発光スペクトルとその円偏光度を示します。GaNA_s の円偏光度 50%に対して、量子ドットではほぼ完全なスピン偏極を意味する 90%を超える円偏光度を観測しました。これは従来研究の最大値 60%を大きく上回り (図 2)、世界最高性能のスピン増幅機能を創出しました。さらに 110°Cの高温でも 80%の円偏光度を達成し、実用性が極めて高いことを実証しました。

次に、そのスピン増幅メカニズムを調べました。通常の半導体量子ドットではスピンの保たれず時間初期から円偏光度の急激な減少が見られます。ところがこの新しい半導体ナノ構造では 15%から 80%に至る円偏光度の巨大な増幅現象が見られます (図 3 (a))。この 80%を超える円偏光度は、量子ドットと GaNA_s が強く結合するトンネルバリア厚 5 nm 以下の試料で観測され (図 3 (b))、GaNA_s のスピンフィルタリング増幅が働き量子ドットで高いスピン偏極発光が得られたことがわかります。

【今後への期待】

これまで半導体では室温でスピン偏極が容易に失われることが常識でしたが、本研究により半導体中の電子スピン偏極を室温以上で増幅し光に変換する技術が革新され、鉄など金属磁性体ではできない光デバイスや電界操作を可能にする半導体スピントロニクスのパラダイムシフトが期待されます。

また、本研究の発光層に用いている InAs 量子ドットは、200°Cを超える高温環境下でも安定したレーザ発振が実証されています。そこで、本研究のキーテクノロジーである電子スピン偏極の増幅機能をレーザに搭載することにより、スピン情報を長距離の情報伝送手段である光通信に応用するためのスピン偏極レーザなど光スピントロニクスデバイスの開発が急速に加速されることが期待されます。

【謝辞】

本研究は、日本学術振興会二国間交流事業「室温スピントロニクスを目指す半導体ナノ構造のスピン機能性探索」；北海道大学 (事業代表：村山明宏) とリンショーピン大学 (相手国代表：チェン・ウェイミン) の国際共同研究で開始し、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)及び若手研究「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)の助成を受けた成果です。スピンダイナミクスを明らかにした超高速スピン分解発光計測は、北海道大学が推進する文部科学省大学機能強化促進事業「知識を創造する融合光科学研究拠点」(事業代表:村山明宏)の「先端光量子ナノ計測共同研究拠点」で実施しました。

論文情報

論文名 Room-temperature electron spin polarization exceeding 90% in an opto-spintronic semiconductor nanostructure via remote spin filtering (光スピントロニクス半導体ナノ構造のリモートスピントラニングによる室温で90%を超える電子スピン偏極率)

著者名 Huang Yuqing¹, Polojärvi Ville², 樋浦諭志³, Höjer Pontus¹, Aho Arto², Isoaho Riku², Hakkarainen Teemu², Guina Mircea², 佐藤紫乃³, 高山純一³, 村山明宏³, Buyanova Irina¹, Chen Weimin¹ (¹リンショーピン大学, ²タンペレ大学, ³北海道大学大学院情報科学研究院)

雑誌名 *Nature Photonics* (英国科学雑誌)

DOI 10.1038/s41566-021-00786-y

公表日 2021年4月8日(木)(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

北海道大学大学院情報科学研究院 教授 村山明宏 (むらやまあきひろ)

T E L 011-706-6481 F A X 011-706-6481 メール murayama@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 kouhou@jimu.hokudai.ac.jp

【用語解説】

- *1 電子スピン偏極 … 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。
- *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 スピントラニング増幅 … 希薄窒化ガリウムヒ素のバンドギャップ内にGa空孔原子の局在準位が形成され、伝導バンド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、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)。

【参考図】

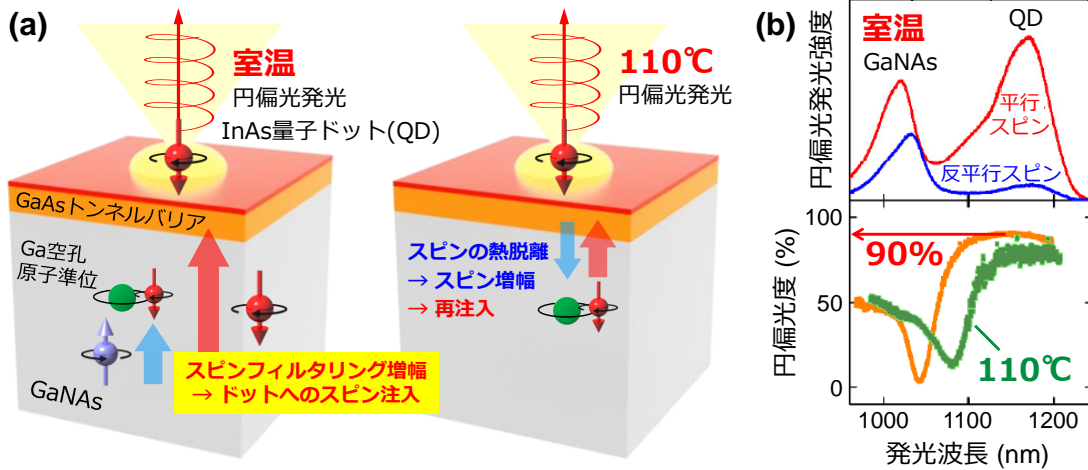


図 1. (a) 開発した InAs 量子ドット (QD) と希薄窒化 GaAs (GaNAs) のトンネル結合構造とスピ
ンフィルタリング増幅を示す模式図。(b)室温円偏光発光スペクトルと 110°Cを含めた円偏光度。

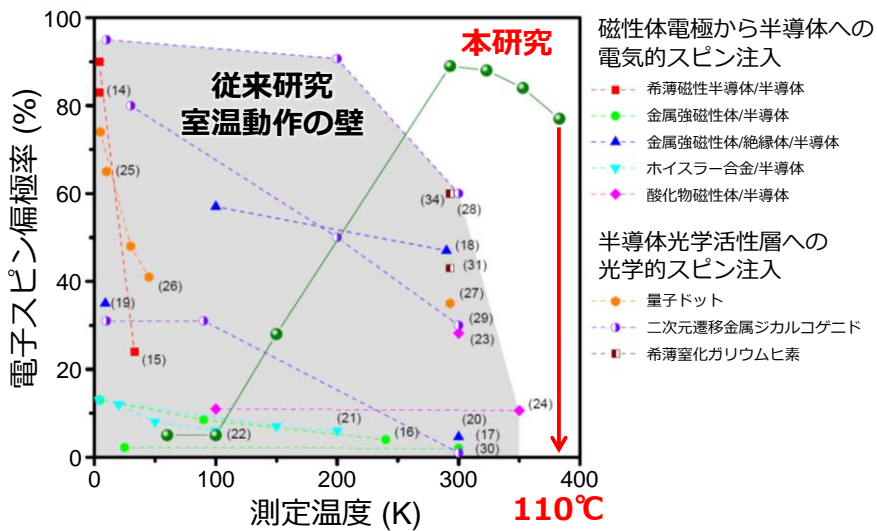


図 2. 半導体中の電子スピン偏極率の測定温度依存性；先行報告と本研究結果の比較。

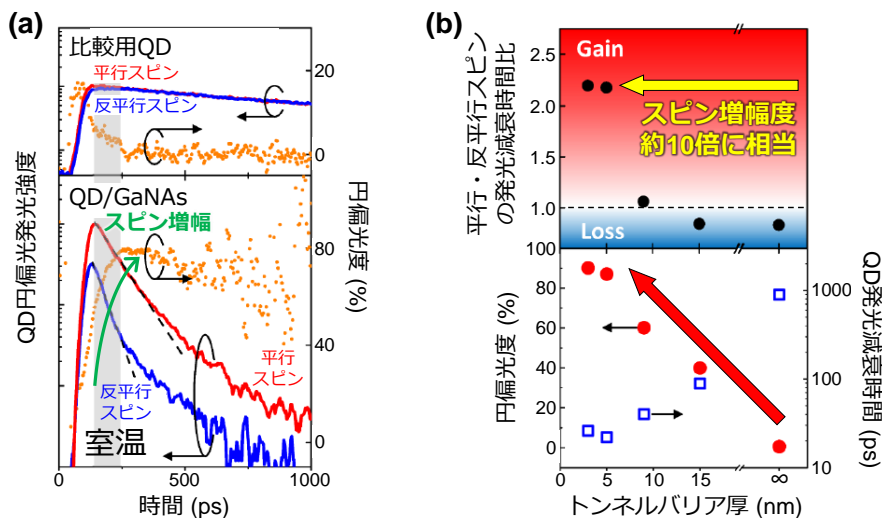


図 3. (a) 本研究の QD/GaNAs トンネル結合構造と比較用 QD における、室温で得られた円偏光発
光強度と発光円偏光度の時間変化。(b) QD の円偏光発光特性の GaAs トンネルバリア厚依存性。