

## 電子のスピン情報を増幅する半導体ナノ構造の開発に成功

～固体素子の電子スピン情報を光情報に変換する実用光デバイスの開発に道を拓く～

### ポイント

- ・ 電子情報を光情報に変換するために用いられる発光ダイオードなどの半導体光デバイスにおいて、電子スピンの情報を増幅・維持できるナノ構造の開発に成功。
- ・ 電子スピン情報の光伝送やスピン情報ネットワークを実現する技術に道筋。

### 概要

北海道大学大学院情報科学研究科の村山明宏教授、樋浦諭志助教、高山純一技術専門職員らの研究グループは、北見工業大学の木場隆之助教と共同で、電子情報を光情報に変換する半導体光デバイスにおいて、電子のスピン情報を増幅・時間的にも一定に維持できる新しいナノ構造を開発しました。

電子には、磁石の性質をもたらすスピンと呼ばれる状態があります。電子のスピン状態の偏りを表すスピン分極率は、鉄やコバルトなど金属の強磁性体では一定の高い値を保ちます。しかし金属では、電子情報を光情報に変換する発光ダイオードやレーザーなどの光デバイスが作製できません。一方、光デバイスに用いられる半導体では、逆に、電子のスピン分極率が刻一刻と低下するスピンの緩和現象が避けられないため、スピンの情報が失われてしまいます。

そこで、大きさが数十ナノメートル以下で電子の個数を厳密に制御できる半導体のナノ構造である量子ドットを利用して、スピンの反転し緩和した電子を選択的に除去することを考えました。これによりスピン分極率を高めたり時間的にも一定に保つことが可能になります。スピンの選択的除去を効率よく行うためには、極めて小さな量子ドットの間で、スピンの分極した電子を量子力学的に結合させる（トンネル効果）必要があります。そこで、薄膜状の量子井戸という別のナノ構造を量子ドットにトンネル結合させた新しいナノ構造（下図）を作製したところ、発光中のスピン分極率を最大 80%まで高めるとともに、発光が生じている時間中に一定の値に保つことができました。

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）の助成を受けた成果であり、2018年9月10日（月）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。



今回の研究で作製した新しいナノ構造

## 【背景】

現代社会を支えるコンピューティングや光通信では、情報の担い手として、電子の電荷と、その電荷を変換して生成した光(光電変換)を利用しています。このような通常の情報処理に用いる電荷以外に、電子にはスピンという状態があります。このスピンの集団は磁石の性質を持ち、情報の保持に電力が不要なハード磁気ディスクのメモリとして既に使われています。そこで、スピンを演算などの電子情報処理にも活用することで、演算中の電力消費を抑えた超低消費電力の電子回路や大規模な画像処理、さらに可塑性を持つ脳型コンピューティングなどが可能になり研究開発が精力的に行われています(スピンを利用するエレクトロニクス、すなわちスピントロニクスと呼ばれています)。

スピントロニクスにおいては、スピン状態の偏りであるスピン分極と呼ばれるスピン情報を安定的に保持することができる、鉄やコバルトなどの金属強磁性体と呼ばれる磁石材料の使用が必須です。しかし金属では、電子情報を、光通信などに用いる光情報に変換する発光ダイオードやレーザーなどの光デバイスが作製できません。一方、光デバイスに用いられる半導体では、逆に電子のスピン分極が刻一刻と低下するスピンの緩和現象が避けられないため、スピン情報が失われてしまいます。そこで、金属を用いるスピントロニクスに対して、電子のスピン情報(スピン状態が偏ったスピン分極電子)を光デバイスとなる半導体に輸送・注入するとともに、半導体において低下するスピン分極すなわちスピン情報を増幅し、さらに発光などの光電変換時に一定に保つことができる新しい技術が強く求められています。

## 【研究手法】

電子のスピン状態の偏りは、以下のスピン分極率  $P$  で表されます(電子スピンにはアップとダウンの二つの状態があり、それぞれの個数を  $N_{\uparrow}$  と  $N_{\downarrow}$  で表しています)。

$$P = \frac{N_{\uparrow} - N_{\downarrow}}{N_{\uparrow} + N_{\downarrow}} \times 100 [\%]$$

例えば、アップスピンの個数  $N_{\uparrow}$  がダウンスピンの個数  $N_{\downarrow}$  に対して多い場合、 $P$  の値はスピンの偏りすなわちスピン情報を表します。アップスピンの反転してダウンスピンになると両者の個数が近づいていくため  $P$  値は低下し、両者の個数が完全に等しくなると  $P$  は 0 となりスピン情報が失われます(スピン緩和)。ところで、この数式を見ると、例えばダウンスピンだけを除去する( $N_{\downarrow}$ のみを減らす)ことができれば  $P$  値は顕著に増加します。このようなメカニズムを利用したスピン分極率の増幅については、電子の数を厳密に制御できる量子ドットと呼ばれる数十ナノメートル以下の半導体ナノ構造を用いるとともに、量子ドットの間で電子を量子力学的に結合(トンネル効果)させることで可能になると提案され、その原理が検証されていました。しかし、極限的に小さな点状の量子ドット間に適切なトンネル効果を再現性よく導入することは非常に難しく、実用的な技術への道筋は見えていませんでした。

量子ドットは、一般的な光デバイス材料であるガリウム砒素中にインジウムを添加することで作製できます。そこで、研究グループでは、インジウムガリウム砒素の非常に薄い薄膜である量子井戸という別のナノ構造を点状の量子ドットにトンネル結合させた新しいハイブリッドナノ構造を提案しました(図1)。このハイブリッドナノ構造において電子の量子力学的な状態である波動関数を計算してみると、量子ドット中の波動関数の分布、すなわち電子の存在確率分布が量子井戸の膜の厚さ(膜厚)に強く依存することがわかりました。例えば、井戸の膜厚を 20 nm まで厚くしていくと、空間的に離れている量子ドットの間でも波動関数が強く繋がり、トンネル効果による効率的な電子の移動が可能になることがわかります(図2)。

## 【研究成果】

実際の実験は以下のように行いました。半導体中の電子スピン分極は、光電変換時にはそのまま発光の偏光特性に変換されます。発光により生じる光子一つ一つの偏光特性には、右回り ( $\sigma^+$ と表記) と左回り ( $\sigma^-$ ) の二つの円偏光 (Circular Polarization) 状態があり、それぞれの光子個数 (すなわち円偏光発光の強度) を  $I_{\sigma^+}$  と  $I_{\sigma^-}$  で表すと、電子のスピン分極率に対応して光の円偏光度 (Circular Polarization Degree: CPD) が以下のように定義されます。

$$\text{CPD} = \frac{I_{\sigma^+} - I_{\sigma^-}}{I_{\sigma^+} + I_{\sigma^-}} \times 100 [\%] \cong P$$

このような光電変換時の電子スピン分極と円偏光特性の直接的な対応関係は、電子と光子の間の角運動量保存により理解できます。そして、電子のスピン情報が光の偏光情報へと変換 (転写) されます。

そこでまず、量子ドットの周りのガリウム砒素バリア層に電子スピンを生成します。上記の電子スピン分極と円偏光特性の関係を利用すると、円偏光をガリウム砒素に照射することでスピスが分極した電子を励起することができスピンの生成が可能になります。ただし、原理的な制約から、円偏光励起した電子のスピン分極率は最大で 50% になります。次に、このスピン分極電子はポテンシャルの低い量子ドットへと流れ込み発光します。ガリウム砒素中の電子の移動やドットへの注入時にスピンは緩和していきスピン分極率は低下します。円偏光発光とその時間変化を測定した結果、20 nm の膜厚の量子井戸を用いた場合、量子ドットからの発光の円偏光度 (CPD 値) すなわち発光中の電子スピン分極率が 60 % 以上に高まり、さらに発光中にもそのまま一定の高い値に保たれることがわかります (図 3)。

## 【今後への期待】

半導体量子ドットでは、極めて限られた数個レベルの電子を保持し光電変換に活用することができます。したがって、極限的な低消費電力を目指した量子ドット光デバイスの実用化が既に始まっています。さらに、量子ドットを用いることで、単一の電子を用いた究極のトランジスタや電子スピン状態の量子力学的結合状態を利用する量子コンピューティングなどの実現も強く期待されています。

本研究成果では、量子ドット間の電子の波動関数の結合であるトンネル効果の強さを、量子井戸の膜厚という簡単に制御できる構造パラメーターのみで精度よくコントロールすることを可能にしました。

将来の超低消費電力光デバイス材料の本命である半導体量子ドットを用いて、電子スピンを用いた光デバイス (光電変換) を実現することにより、金属強磁性体を用いて開発が進められている超低消費電力の電子回路や脳型コンピューティングを実現するスピントロニクス分野において、スピン情報の光通信や光配線に向けた実用的な技術開発が可能になります。また、量子ドット間で電子やスピンの量子力学的結合を制御することにより、スピン情報ネットワークなどの新しい機能性の開拓も期待できます。

## 論文情報

論文名	Persistent high polarization of excited spin ensembles during light emission in semiconductor quantum-dot-well hybrid nanosystems (半導体量子ドット・井戸ハイブリッドナノシステムにおける発光中の励起スピン集団の持続的な高い分極)
著者名	武石一紀 <sup>1</sup> , 樋浦諭志 <sup>1</sup> , 高山純一 <sup>1</sup> , 板橋皓大 <sup>1</sup> , 浦部晶行 <sup>1</sup> , 鷺田晃宏 <sup>1</sup> , 木場隆之 <sup>2</sup> , 村山明宏 <sup>1</sup> ( <sup>1</sup> 北海道大学大学院情報科学研究科, <sup>2</sup> 北見工業大学地球環境工学科)
雑誌名	Physical Review Applied (米国物理学会の専門誌)
DOI	10.1103/PhysRevApplied.10.034015
公表日	2018年9月10日 (月) (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科 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@jimuhokudai.ac.jp

北見工業大学総務課 (〒090-8507 北見市公園町 165 番地)

T E L 0157-26-9116 F A X 0157-26-9125 メール soumu05@desk.kitami-it.ac.jp

## 【参考図】

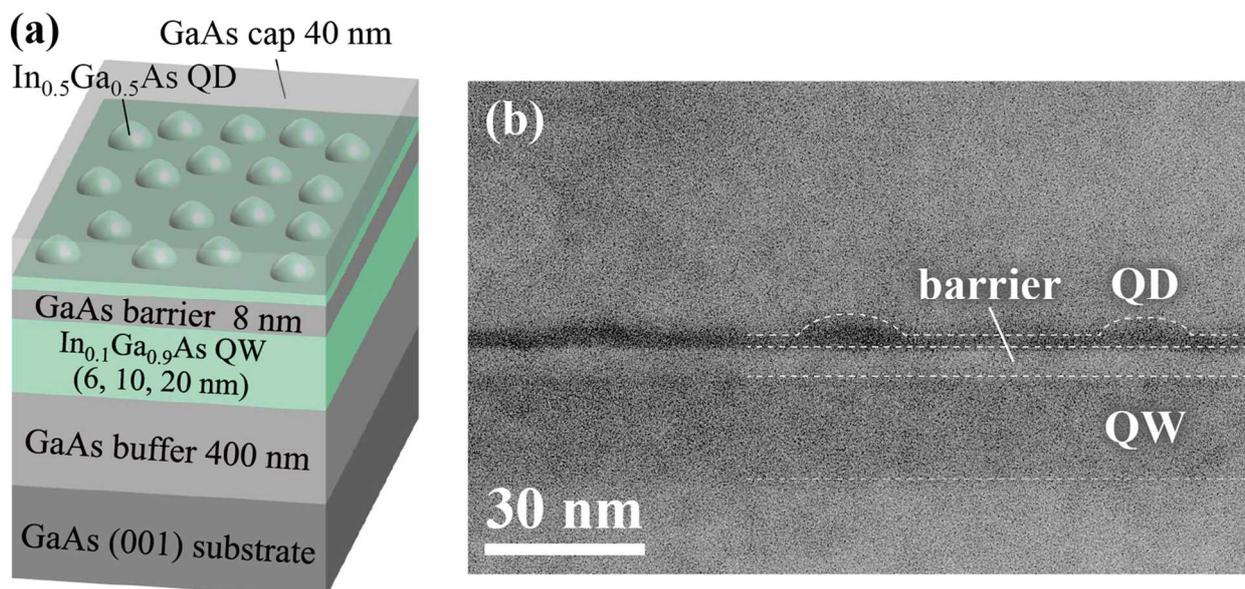


図 1 インジウムガリウム砒素 (InGaAs) 半導体の量子ドット (Quantum dot: QD) と量子井戸 (Quantum Well: QW) から成るハイブリッドナノ構造の模式図 (a)。実際に作製したハイブリッドナノ構造の積層構造断面に対する高分解能透過電子顕微鏡像の例 (b)，破線は補助的なガイド線。量子ドットは点状のナノ構造であるため，観察試料断面から奥行き方向に存在している場合，透過型電子顕微鏡の焦点が合わずにその形状が不明瞭に観察されている (画像左領域)。

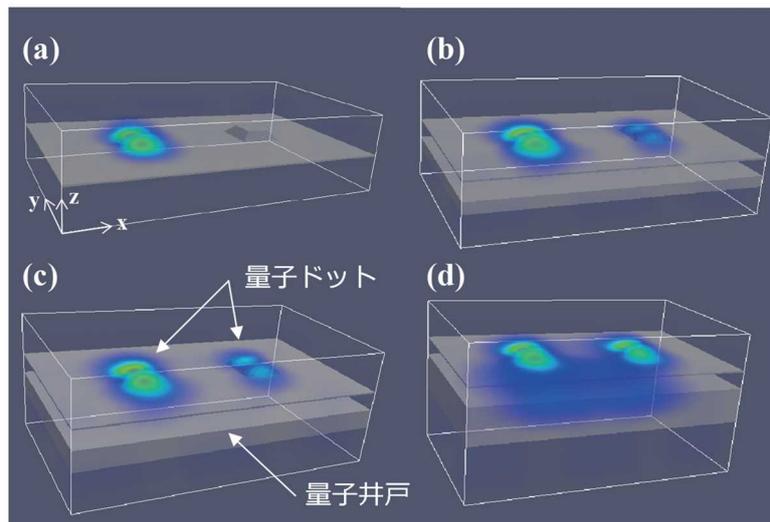


図2 量子井戸の上方に、膜厚 8 nm のトンネルバリアを介して横方向に配置した二つの半導体量子ドット (ドット間隔 60 nm) から成るハイブリッドナノ構造における、量子ドット中の電子 (励起状態の波動関数) の存在確率分布を示す三次元シミュレーション計算結果。それぞれ、量子井戸の膜厚が 0 nm (a:井戸のない通常の量子ドット), 6 nm (b), 10 nm (c), 20 nm (d)。井戸がない場合 (a), 電子は片方の量子ドットのみが存在しているが、井戸の膜厚が増加するに従い、他方の量子ドットにもトンネル効果により波動関数が浸み出し電子の存在確率が増加していることが読み取れる。すなわち、電子は量子力学的に二つの量子ドットに跨って存在し、ドット間を移動できる。なお、トンネル効果では電子のスピンの状態は保持されている。

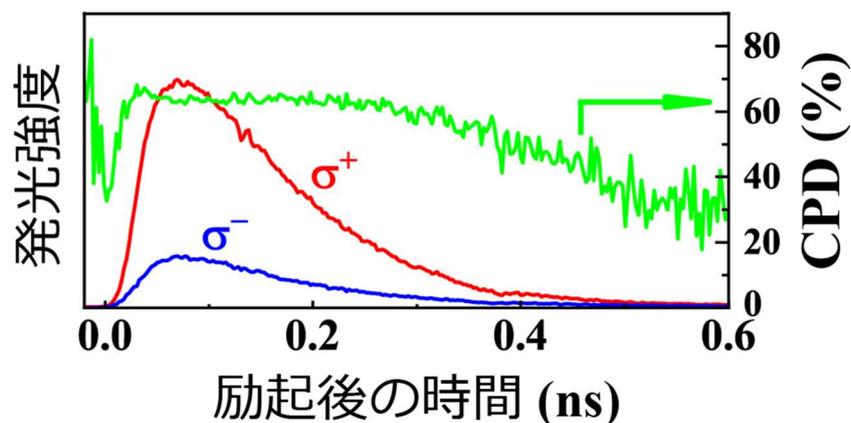


図3 膜厚 20 nm の量子井戸を持つハイブリッドナノ構造における、量子ドット励起状態からの円偏光発光の時間分解測定結果。右回り ( $\sigma^+$ ) 円偏光を持つ時間幅 0.0002 ns のレーザーパルス光によりガリウム砒素バリア層を励起している。励起スピンと同じ円偏光特性 ( $\sigma^+$ ) を持つ発光強度の時間変化を赤線、スピンが反転し緩和した反対の円偏光特性 ( $\sigma^-$ ) を持つ発光強度の時間変化を青線、スピン分極率を示す発光の円偏光度 (CPD) の時間変化を緑線で示している。円偏光励起される電子のスピンの分極率は最大 50%。また、バリアから量子ドットに電子が注入される間にもスピン分極率は低下していく。この量子ドットからの発光では、光励起直後から急激に CPD 値が増大し 0.3 ns にわたって 60% を越える一定値を保っており、この間に大部分の発光が生じていることがわかる (0.3 ns 以降は、この励起状態の電子は多くが消失し発光強度も十分に小さくなっている)。