

## 室温で電子スピン情報を光情報に変換するナノ材料を開発

～次世代レーザーに応用可能なスピン情報の光インターコネクションの実現に向けて～

### ポイント

- ・室温で強い発光と80%もの高い光電スピン変換効率の両立に成功。
- ・半導体量子ドットを疑似量子ドットに埋め込むことで、室温におけるスピン情報の熱損失を低減。
- ・次世代レーザーに搭載可能なスピン情報の光伝送や光スピン配線システムへの応用に期待。

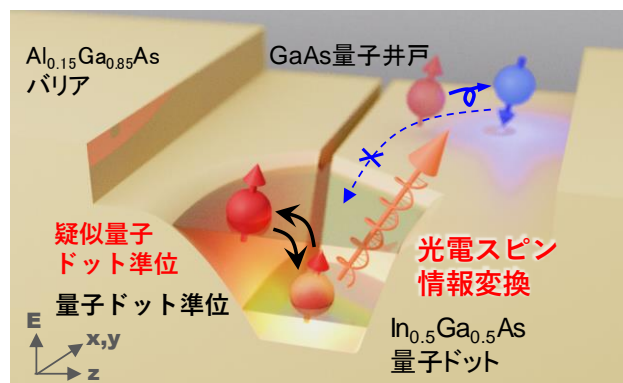
### 概要

北海道大学大学院情報科学研究院の樋浦諭志准教授，村山明宏教授，高山純一技術専門職員らの研究グループは，室温環境下で電子スピン情報\*1を光の偏光情報に高効率に変換できる新しい半導体ナノ材料を開発しました（下図）。

数10ナノメートル以下の半導体単結晶である量子ドットは，電子と正孔を空間的に同じ場所に閉じ込めることで発光効率を高めることができるため，将来の超低消費電力光デバイス材料の本命として注目されています。一方，半導体の電子スピンと光の円偏光\*2特性の間に角運動量保存に基づく光電スピン変換機能が存在します。量子ドットは三次元方向の量子閉じ込め効果により，光電変換中に電子のスピン状態を保持できるため，スピン情報を円偏光情報に変換するナノ材料として期待されています。しかし，実用上重要となる室温では高効率な光電スピン変換は実現できていませんでした。

今回，研究グループは量子ドットの両側に量子井戸層が設けられた dot-in-well 構造に注目しました。そこで，疑似量子ドットが薄い量子井戸層に形成され，量子ドットに匹敵する強い量子効果を示すことを見出しました。この特異なナノ構造において，量子井戸層での高い発光効率によりスピン反転した電子の量子ドットへの再注入が抑制されるとともに，疑似量子ドットの形成によりスピン情報の熱損失が低減し，室温で約80%の光電スピン変換効率\*3を達成しました。本研究成果は，電子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を加速させることが期待されます。

なお，本研究成果は，2020年10月8日（木）公開の米国物理学会専門誌 Physical Review Applied にオンライン掲載されました。



今回の研究で開発した新しい半導体ナノ材料

## 【背景】

超情報化社会における情報処理の負荷を削減するために、固体中の電子スピンの性質を情報処理に活用するスピントロニクスが注目を集めています。近年では、スピン流やスピン波を用いた新原理の論理演算素子が開発され、電子情報処理の省エネルギー化に向けて期待されています。一方、情報通信ではIoTやAIの社会実装の進行に合わせて情報処理デバイス・システムの心臓部へ光技術を導入する動きが広がり、世界各地で光配線の大型研究が行われています(米国: AIM Photonics, 欧州: Horizon2020)。光配線では、電気配線の問題である電流熱損失を削減し、高速かつ長距離伝送が可能です。また、空間を利用した三次元実装ができるうえ、波長多重技術の適用により伝送帯域を増大できます。このスピントロニクスと光配線の融合により、「光電融合」型の新たなコンピューティング基盤を実現できます。

スピントロニクスでは、スピン情報を安定的に保持できる金属強磁性体の使用が必須ですが、金属では原理的にスピン情報を光情報に変換する光デバイスが作製できません。一方、光デバイス材料として広く知られているIII-V族化合物半導体ではスピンの緩和現象が避けられないため、スピン情報が刻一刻と失われてしまいます。そのため、金属強磁性体から電子のスピン情報を半導体に輸送・注入するとともに、スピン情報を光情報に高効率に光電変換できる光源材料の開発が強く求められています。

これまでに、強い量子閉じ込め効果により光学性能が温度に依存せず、光電変換中に電子のスピン状態を保持できるIII-V族半導体量子ドットが有望な材料として期待されていましたが、実用上重要な室温では、スピン反転した電子が光電変換時に再注入し、スピン情報の熱損失が生じていました。

## 【研究手法】

本研究では、 $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ 量子ドットの両側に、GaAs量子井戸層が設けられたdot-in-well試料と量子井戸層のない通常の $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ 量子ドット試料を分子線エピタキシー法により作製しました。続いて、走査透過型電子顕微鏡とエネルギー分散型X線分析を併用し、量子ドット近傍の原子構造解析と元素マッピングを行いました。また、電子スピンの注入や緩和などのダイナミクスを直接測定できるスピン分解超高速発光分光により、量子ドットと量子井戸の電子スピン特性を6Kから293Kまで調べました。

一般的に、半導体中の電子スピン特性は、電子と光子の間の角運動量保存に基づき光電変換時に発光の円偏光特性に直接変換されます。円偏光特性には、右回り( $\sigma^+$ と表記)と左回り( $\sigma^-$ と表記)の2つの円偏光状態が存在し、それぞれの光強度を $I_{\sigma^+}$ と $I_{\sigma^-}$ で表すと、円偏光度(Circular Polarization Degree: CPD)は以下の式(1)で定義することができ、この値は電子スピンの偏極度 $P_e$ に対応します。

$$\text{CPD} = \frac{I_{\sigma^+} - I_{\sigma^-}}{I_{\sigma^+} + I_{\sigma^-}} \times 100 (\%) \cong P_e \quad (1)$$

本研究では、dot-in-well試料において $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ バリア層に円偏光を照射し、通常の量子ドット試料においてGaAsバリア層に円偏光を照射することにより、電子スピンを生成しました。この時、光学遷移選択則により各バリア層で生成される電子スピンの初期偏極度は最大50%です。これらの電子スピンはポテンシャルの低い量子井戸あるいは量子ドットへと輸送・注入され、正孔と発光再結合します。この発光強度や円偏光度の時間変化を測定することで、電子スピンの注入や緩和現象を議論できます。

## 【研究成果】

Dot-in-well試料において、In原子が量子ドット周辺層に広い範囲に分布していることを明らかにしました(図1)。その結果、 $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ 量子ドットを埋め込むGaAs量子井戸層にInGaAs中間層が新たに形成され、積層方向の量子閉じ込めだけでなく面内方向の量子閉じ込めが加わり、量子ドットに匹敵

する三次元方向の量子閉じ込め効果を有することを見出しました（疑似量子ドットの形成）。

通常の量子ドットでは 200 K を超えると電子スピンの熱脱離により発光強度が急激に減少してしましますが、疑似量子ドットを有する新しい半導体ナノ材料は電子スピンの高い注入効率により、室温での発光強度が 1 桁以上増加することが分かりました（図 2）。また、温度増加に伴い、量子ドットに対する量子井戸層の発光強度の割合が増加することを明らかにしました。この結果は、量子井戸へ熱脱離した後に量子ドットに再注入する電子スピンの割合が減少していることを意味しています。

次に、電子スピン特性を反映する円偏光特性を調べました。6 K から 50 K までは円偏光度の差は見られませんでした。室温（293 K）において通常の量子ドットの円偏光度は約 5% であったのに対して、新しい半導体ナノ材料は約 20% と、スピン情報の熱損失が低減されていることが分かりました（図 3）。その結果、広いエネルギー範囲で強い発光強度と高い円偏光度が両立していることを見出しました。

最後に、電子スピンのダイナミクスを定量的に評価し、量子ドットの光電スピン変換効率を調べました。一般的に、量子ドットの発光円偏光度 CPD に対応する電子スピンの偏極度  $P_e$  は、注入時のスピン偏極度  $P_0$ 、発光減衰時間  $\tau_r$ 、電子スピン緩和時間  $\tau_s$  を用いて以下の式(2)で定義することができます。

$$\text{CPD} \cong P_e = \frac{P_0}{1 + \tau_r/\tau_s} \quad (2)$$

ここで、 $P_0$  は量子ドット注入前の電子スピンの緩和に依存するため、量子ドットの”正味”の光電スピン変換効率は  $(1 + \tau_r/\tau_s)^{-1}$  と定義することができます。図 4 に各試料の光電スピン変換効率の温度依存性を示します。室温（293 K）において、通常の量子ドットの変換効率は約 50% であったのに対して、新しい半導体ナノ材料は約 80% の高い変換効率を示しました。量子井戸層における高い発光効率により、熱脱離後にスピン反転した電子の再注入が抑制されることに加えて、疑似量子ドットの形成により量子井戸層でのスピン緩和時間が飛躍的に増加し、量子井戸から量子ドットへ再注入する電子スピンの偏極度が向上することで、温度増加に伴う変換効率の低下が大きく抑制されることを明らかにしました。

### 【今後への期待】

超低消費電力のレーザー動作を目指した量子ドット光デバイスの実用化は既に始まっており、100°C を超える高温環境下においてもレーザー動作が実証されています。そこでは、本研究で注目した dot-in-well 構造を採用しているため、スピン機能を搭載したレーザーの高温動作が今後期待できます。また、本研究の発展により、量子ドットを埋め込む量子井戸層を真の量子ドット層に置き換えることができれば、スピン情報の熱損失を一層低減することができ、光電スピン変換効率の更なる向上が期待できます。

さらに、半導体量子ドットを情報変換媒体とし、スピン情報の円偏光情報への高効率な光電変換を実現することにより、金属強磁性体を軸とした超低消費電力の電子回路を実現するスピントロニクス分野において、スピン情報の光インターコネクションの実現に向けた実用的な技術開発が可能になります。

### 【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)、挑戦的研究(開拓)「光スピントランジスタ」(課題番号 19H05507)、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)、公益財団法人服部報公会工学研究奨励援助金、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」の助成を受けた成果です。また、本研究の一部は、文部科学省委託事業ナノテクノロジープラットフォーム課題として北海道大学微細構造解析プラットフォームの支援（課題番号 JPMXP09A19HK0064）を受け実施されました。

## 論文情報

論文名 Highly efficient room-temperature electron-photon spin conversion using semiconductor hybrid nanosystem with gradual quantum dimensionality reduction (量子次元性が段階的に低下した半導体ハイブリッドナノシステムを用いた高効率な室温光電スピン変換)

著者名 樋浦諭志<sup>1</sup>, 瀧下水月<sup>1</sup>, 高山純一<sup>1</sup>, 佐藤紫乃<sup>1</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院)

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

D O I 10.1103/PhysRevApplied.14.044011

公表日 2020年10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

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

## 【参考図】

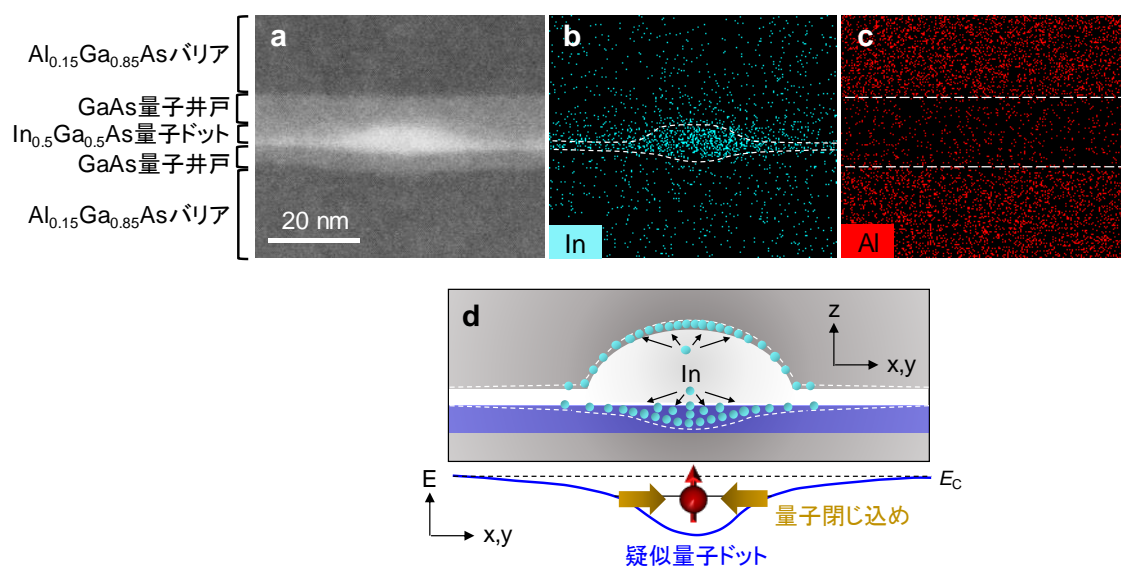


図 1. 今回の研究で開発した半導体ナノ材料の(a) 高角度環状暗視野走査透過型電子顕微鏡像と(b) In, (c) Al の元素マッピング像。(d) 量子ドット周辺層での広い In 分布を表す模式図。擬量子ドットに相当する InGaAs 中間層が GaAs 量子井戸層に形成され, 三次元方向の量子閉じ込め効果を持つ。

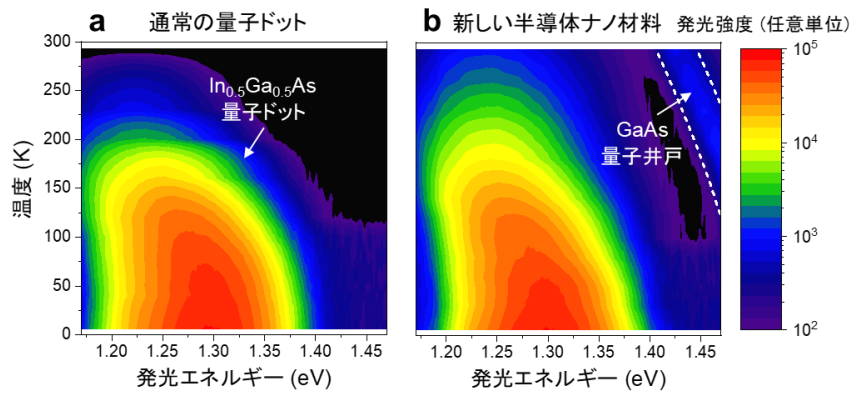


図 2. (a) 通常の量子ドットと(b) 新しい半導体ナノ材料の発光強度の温度依存性及び発光エネルギー依存性。白い破線で囲まれた領域は GaAs 量子井戸層からの発光を示している。

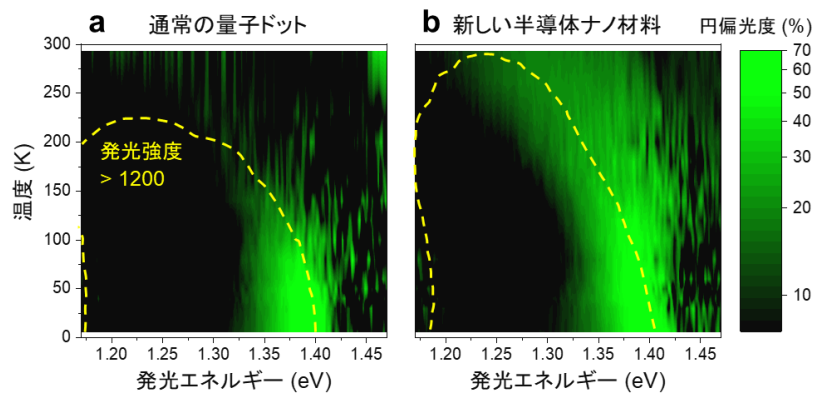


図 3. (a) 通常の量子ドットと(b) 新しい半導体ナノ材料の円偏光度の温度依存性及び発光エネルギー依存性。黄色い破線で囲まれた領域は量子ドットからの発光強度が比較的強い温度と発光エネルギーの範囲を示している。

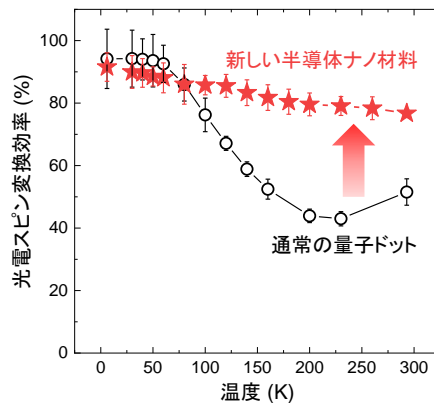


図 4. 通常の量子ドットと新しい半導体ナノ材料の光電スピ変換効率の温度依存性。

### 【用語解説】

- \*1 電子スピン情報 … 電子はスピンという小さな磁石の性質を持つ。スピンは上向きと下向きの二つの状態を取る。電子スピン情報は、そのスピン状態の偏りであるスピン偏極度のこと。
- \*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。本研究では、電場の軌跡が時計回りの光を $\sigma^+$ 円偏光、反時計回りの光を $\sigma^-$ 円偏光と定義している。
- \*3 光電スピ変換効率 … 本研究では、光源となる量子ドットへの注入時の電子スピンの偏極度に対する発光円偏光度の比と定義している。