

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料
〔平成31年度（2019年度）研究進捗評価用〕

平成28年度採択分
平成31年3月18日現在

量子ドットによる光電スピン情報変換基盤の構築

Photoelectric conversion system of spin-information
utilizing semiconductor quantum dots

課題番号：16H06359

村山 明宏 (MURAYAMA, AKIHIRO)

北海道大学・大学院情報科学研究科・教授



研究の概要（4行以内）

III-V 族化合物半導体量子ドットへのスピン偏極電子の注入と半導体バリアのスピン輸送を研究し、スピン偏極光電変換機能の研究を推進する。二次元電子系とのトンネル結合量子ドットにより、光学フォノン共鳴を介する高効率スピン注入や励起状態スピン偏極率の増幅、スピンと発光円偏光の極性の電界制御を実現した。また、超格子を用いたスピン輸送を提案した。

研究分野：電子・電気材料工学

キーワード：電気・電子材料(半導体、磁性体)、薄膜・量子構造、作成・評価技術

1. 研究開始当初の背景

InGaAs 等の III-V 族化合物半導体量子ドットは、温度に依存しないレーザ発振特性などの優れた光学特性を示し、将来の超低消費電力光デバイスへの応用が期待されている。量子ドットでは、電子のスピン緩和時間が発光減衰時間より十分長くなる大きな特長があり、量子ドットに注入された電子のスピン偏極状態は、光電変換時の光選択則に従い、発光の円偏光特性に直接変換される。

量子ドットを用いた光電スピン情報変換機能を開拓するには、スピン緩和が生じる前に量子ドットにスピン偏極電子を注入する超高速のスピン注入や、光デバイスに必要な半導体バリア中でのスピン緩和を抑制可能なスピン偏極電子の輸送などを実現する必要がある。そして、半導体量子ドットに対して室温動作可能な強磁性体電子スピン電極からスピン偏極電子を電流輸送し、電子スピンの偏極状態を円偏光特性に変換するスピン偏極発光ダイオードや円偏光増幅レーザ、円偏光スピン受光ダイオードなどのスピン機能性光デバイスが求められる。

本研究では、独自に提案する量子ドットの結合励起状態を活用し、スピン緩和を抑制可能な超高速の電子スピン注入や半導体バリア中のスピン輸送などを研究し、スピン偏極発光ダイオードなどのスピン機能性光デバイスを作製する。そして、不揮発性の電子スピン情報を生かした超低消費電力の光インターコネクションを目指して、半導体量子ドットの光学活性層を用いる光電スピン情報変換システムの基盤を構築していく。

2. 研究の目的

III-V 族化合物半導体量子ドットにおけるスピン偏極電子の注入とそのダイナミクス、スピン緩和を抑制可能な半導体中のスピン輸送などを研究し、室温動作可能な強磁性体電子スピン電極からスピン偏極電子を電流輸送し注入するスピン偏極発光ダイオードを作製する。特に、独自の提案である、次元性の異なる二次元電子系とのトンネル結合を生かした光学フォノン共鳴を介する高効率のスピン注入、ドット励起状態におけるスピン偏極率の増幅、超格子などを利用した半導体バリア中のスピン輸送などを実現する。

3. 研究の方法

InGaAs などの III-V 族化合物半導体量子ドットのスピン注入を研究する。量子ドット光電スピン変換活性層に二次元電子系とのトンネル結合ハイブリッドナノ構造を活用し、電子スピンの高効率捕獲とスピン緩和を抑制する超高速スピン注入を実現する。半導体バリア中のスピン輸送の研究を行い、電子スピン偏極状態の円偏光特性への変換効率を高める。そして、室温動作が可能な強磁性体スピン電極からスピン偏極電子を電流輸送し円偏光発光に変換するスピン偏極発光ダイオードの研究を推進し、量子ドットへのスピン注入操作やスピン輸送の熱的安定性を研究する。また、電子スピンと円偏光に対する光共振器ナノ構造を作製し、円偏光を増幅可能なレーザ素子や、円偏光を電子スピンに変換する円偏光スピン受光ダイオードの基礎特性に関する研究も行っていく。

4. これまでの成果

まず、自己組織化法や中性粒子ビームエッチングによるトップダウンナノテクノロジーにより、様々な III-V 族化合物半導体の理想的な高密度量子ドットを作製した[1]。

レーザ発振やスピン注入特性に優れた高密度量子ドットでは、横方向に配列したドット励起電子状態が互いにトンネル結合する。このトンネル結合を介してスピン偏極電子はドット間を遍歴し、基底状態が多数個スピンで充填されると、その上の励起状態では少数個スピンのみが基底状態に選択的に緩和する。すなわち、励起状態では残った多数個スピンの偏極率が增大する（スピン増幅）。

まず、高密度の面内結合量子ドットにおいて、このスピン増幅効果を明らかにした[2]。次に、量子井戸・ドット結合構造の井戸膜厚を変えることで横方向ドット間のトンネル結合状態を制御した（図1）。井戸の二次元ポテンシャルを介した多くのドットの励起状態間スピン結合により、スピン偏極率を増幅するとともに、発光再結合中に一定の高いスピン偏極状態を保持することが出来た[3]。

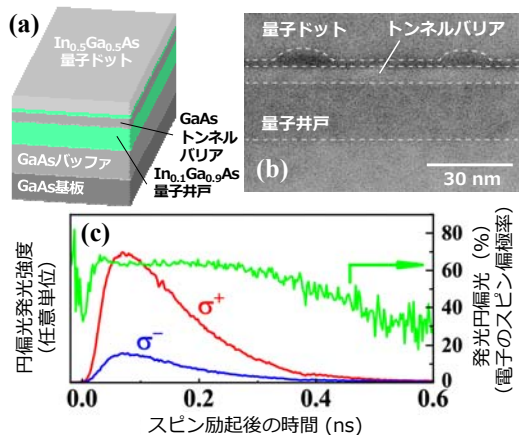


図1 量子井戸とドットのトンネル結合ハイブリッドナノ構造の模式図(a)と断面TEM観察像(b), およびドット励起状態からの円偏光発光強度とその円偏光度の時間応答(c).

ドット発光強度の励起エネルギー依存性を研究し、光学フォノンが共鳴するエネルギー緩和過程では、多数の音響フォノンが関与するエネルギー緩和に比べてスピン偏極率が数倍高くなる「スピフォノンボトルネック」の存在を示した[4]。素子に応用するため、量子井戸との結合ポテンシャルを制御できるスピン注入型の量子ドット電界効果素子を作製し、極めて高いスピン注入効率を示すポテンシャル条件とその機構を特定した。

光デバイス動作に不可欠な半導体バリア中のスピン輸送では、スピン軌道相互作用によるスピン緩和の問題が生じる。原理的にスピン緩和が生じない量子波による電子スピンの輸送を可能にする AlGaAs/GaAs 超格子バリアを用いて、量子ドットへのスピン輸送を研究し、スピン緩和が抑制された量子ドットへのスピン輸送・注入を確認した[5]。

スピン機能光デバイスの研究では、量子井戸・ドット結合構造を用いた光学活性層を持つ電界効果素子を作製し、ドットに注入する電子スピンと発光円偏光の極性を電界で制御した[6]。結合ポテンシャルの電界変調によりドットに注入する電子と正孔の数比を正確に制御することで、ドット励起状態において電子スピン間の交換相互作用により効率的に電子スピン反転させる動作原理である。

5. 今後の計画

量子ドットへの輸送や注入時の電子スピン状態の熱的安定性に関する研究を行い、室温安定動作を目指すスピン偏極発光ダイオードを作製していく。また、円偏光特性に対する光共振器ナノ構造を作製し、円偏光増幅レーザ素子や円偏光スピン受光ダイオードの基礎特性に関する研究も行っていく。

6. これまでの発表論文等

[1] “Optical Study of Sub-10 nm In_{0.3}Ga_{0.7}N Quantum Nanodisks in GaN Nanopillars”, A. Higo, A. Murayama, S. Samukawa, et al., ACS Photonics 4, 1851-1857 (2017).

[2] “Interdot spin transfer dynamics in laterally coupled excited spin ensemble of high-density InGaAs quantum dots”, S. Hiura, K. Takeishi, M. Urabe, K. Itabashi, J. Takayama, T. Kiba, K. Sueoka, and A. Murayama, Appl. Phys. Lett. 113, 023104:1-5 (2018).

[3] “Persistent high polarization of excited spin ensembles during light emission in semiconductor quantum-dot-well hybrid nanosystems”, K. Takeishi, S. Hiura, J. Takayama, K. Itabashi, M. Urabe, A. Washida, T. Kiba, and A. Murayama, Phys. Rev. Appl. 10, 034015:1-8 (2018).

[4] “Effect of a Phonon Bottleneck on Exciton and Spin Generation in Self-Assembled In_{1-x}Ga_xAs Quantum Dots”, Y. Q. Huang, I. A. Buyanova, X. J. Yang, A. Murayama, and W. M. Chen, Phys. Rev. Appl. 9, 044037:1-9 (2018).

[5] “Quantum spin transport to semiconductor quantum dots through superlattice” (selected as *Editor’s Pick*), S. Hiura, K. Itabashi, K. Takeishi, J. Takayama, T. Kiba, and A. Murayama, Appl. Phys. Lett. 114, 072406:1-5 (2019).

[6] “Electric field control of spin polarity in spin injection into InGaAs quantum dots from a tunnel-coupled quantum well”, H. Chen, S. Hiura, J. Takayama, S. Park, K. Sueoka, and A. Murayama, Appl. Phys. Lett., in press. (計 22 編)

7. ホームページ等

<https://www.ist.hokudai.ac.jp/labo/processing/>