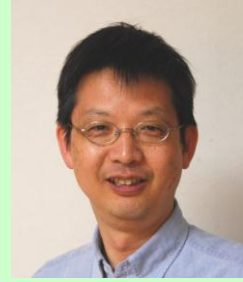


量子ドットスピナー

Spin-polarized Lasing in Quantum Dots

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

電子スピン緩和を抑制する半導体量子ドットを活性媒体として、電子スピン情報を光の円偏光特性に変換するスピナーを研究する。Fe スピン電極と InGaAs 自己組織化量子ドット積層構造において、電子スピン注入可能な高品質の原子層制御エピタキシャル成長を実現した。さらに量子ドットのピコ秒スピン注入ダイナミクスを研究し、高密度ドットの有効性を示した。

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学、マイクロ・ナノデバイス

キーワード：ナノ構造作製、量子ドット、ナノ光デバイス、スピナーデバイス

1. 研究開始当初の背景

電子のスピン情報を光の円偏光特性に変換し、その偏光情報を持つコヒーレント光を放出するスピナーに興味を持たれている。半導体自己組織化量子ドットにおいては電子のスピン状態の緩和が顕著に抑制されるため、量子ドットを活性媒体に用いることにより、レーザー発振中におけるスピン情報の散逸を防ぐことが可能な量子ドットスピナーの実現が期待されている。

2. 研究の目的

室温動作可能な金属強磁性体ナノ構造を用いた電子スピン注入電極を作製し、半導体量子ドット層に対して、スピン偏極電子を高効率に注入するための研究を行う。特に、注入時のスピン緩和を十分抑制することが可能な高品質の原子層制御エピタキシャル界面を形成し、量子ドットスピナーを実現するための物理的機構を明らかにする。

3. 研究の方法

Fe 強磁性体スピン電極から InGaAs 半導体量子ドット層に対してスピン偏極電子を高効率に注入するため、注入時のスピン緩和を十分抑制することができる半導体と金属強磁性体の原子層制御エピタキシャル接合界面の形成を研究する。さらに、量子ドットへのスピン偏極電子の輸送注入に関する研究を行い、スピン緩和時間に対して十分高速となる電子スピン注入プロセスを実現する。

4. これまでの成果

量子ドットスピナーを実現する上で本質的に重要な「量子ドットへの高効率・超高速電子スピン注入」に対して以下の二つの研究課題を設定し、研究を推進した。

(1)量子ドット半導体層上への金属強磁性体スピン電極層のエピタキシャル成長

III-V 族半導体 InGaAs 自己組織化量子ドットと *n* 型 AlGaAs バリア層からなるエピタキシャル積層構造を成長させ、量子ドットの良好な光学特性を示す強い PL と、1 ns 以上の十分長い電子スピン緩和時間を得た。また、Fe 薄膜の微細加工を行い、最小サイズ 50 nm の高精度ナノ加工を実現した。

本研究の中心的課題である、量子ドットと積層した半導体層表面における Fe 強磁性体の結晶成長について研究を行い、In の拡散を抑制しつつ良好な光学・電子スピン特性を得ることができる量子ドット成長条件と、量子ドット上に積層する *n* 型 AlGaAs バリア層の最適な結晶成長条件の整合性について検討を行い、バリア層の二段階成長やポストアニールにより問題を解決した。次に、作製した結晶性の良好な高濃度 *n* 型 AlGaAs バリア層表面に Fe 超薄膜を超高真空中で成膜、その成長条件の検討を行い、原子層レベルで平坦な Fe 単結晶エピタキシャル成長を実現した。

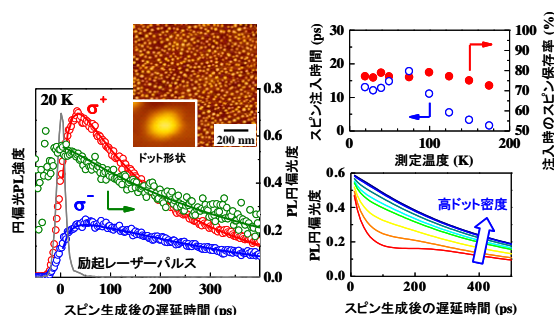
この AlGaAs/Fe ショットキートンネルバリアを用いて、量子ドットスピナーの原型となるトンネル注入型スピン発光ダイ

オード(LED)素子を作製した。その結果、良好な電流特性と高い輝度を持つ EL を得た。さらに低温であるが、EL において 3% の円偏光度 (活性層量子ドットに注入される全電子数に対するスピン分極電子数の比) を観測し、作製したスピン LED において、Fe から量子ドットへの電子スピン注入が確認された。

(2)量子ドットへの電子波動関数の接続と少数個の光学フォノン放出による準共鳴トンネルを利用した超高速スピン注入の研究

スピン分解励起 PL 分光により、室温におけるバリア層から量子ドット基底状態への光スピン注入でスピン分極率 20 % を得た。

次に、バリアへの光スピン注入の手法を用いて、量子ドットの励起状態に着目したピコ秒スピン分解 PL 分光によりスピン注入ダイナミクスを研究した (下図)。注入時間と注入時のスピン保存率の温度依存性を測定し、200 K までほぼ一定の高いスピン保存率を得た。さらに、注入時のスピン緩和やドットのフィリング効果を考慮したレート方程式解析により、ドット面密度を現在作製可能な $5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ まで高めることで、注入時のパウリブロッキングを回避しスピン状態を高く保持したまま注入できることがわかった。



また、スピン状態の連続性を利用するトンネル型スピン注入の研究を行った。量子ドットと希薄磁性半導体量子井戸のトンネル結合で磁性井戸のスピン偏極電子フェルミレベルを制御し、バリアを超えて拡散注入される電子による注入時のスピン緩和を明らかにした。さらに、InGaAs 系量子井戸と量子ドットから成るトンネル結合を作製し、井戸の基底状態とドット励起状態のエネルギー差が縦光学フォノンエネルギーに相当する場合に、高効率のスピン注入を観測した。

さらに、高密度で形状対称性の高いトップダウン法により作製した直径 15 nm の GaAs 量子ドットにおいて、発光に寄与する電子スピンの緩和に対する抑制効果を観測した。

また、数値解析援用可変ストライプ長法により InGaAs 量子ドットの光学的モード利得を測定し、ストライプ長 $200 \mu\text{m}$ で $0.02 \mu\text{m}^{-1}$ と GaAs 量子井戸と同程度の利得最大値を得ており、本研究で用いる InGaAs 量子ドットの良いレーザ発振特性が期待できる。

5. 今後の計画

高効率スピン注入を目指した極薄ショットキーバリアや酸化材料などの新しいスピン注入型トンネルバリア構造を検討する。そして、作製する様々なトンネル型スピン注入電極を持つ InGaAs 量子ドットのスピン LED 素子を作製、円偏光 EL 特性を評価して、スピン電極構造や作製プロセスを検討していく。クラッド層を導入したスピンレーザー素子を試作し、スピンダイナミクスの分光計測に関する研究結果を総合して、高効率の量子ドットスピンレーザー実現のために重要な物理的機構に関する知見をまとめていく。

6. これまでの発表論文

1. Y. Kuno, T. Sasaki, T. Kiba, V.Kh. Kaibyshev, F. Liaci, A.A. Toropov, S.V. Ivanov, A. Murayama, "Dynamics of electron-spin injection in a heterovalent GaAs/AlGaAs/ZnMnSe structure with a coupled double quantum well of GaAs/AlGaAs", J. Crystal Growth, in press.
2. A. Murayama, N. Tamura, T. Yamazaki, T. Kiba, "High-density optical spin injection in self-assembled semiconductor quantum dots", J. Lumin., vol.133, pp.110-113 (2013).
3. D. Dagnelund, Q.J. Ren, I.A. Buyanova, A. Murayama, W.M. Chen, "Antiferromagnetic interaction in coupled CdSe/ZnMnSe quantum dot structures", Appl. Phys. Lett., vol.101, pp.052405:1-5 (2012).
4. K. Kyhm, J. Kim, H.-S. Yang, K.-C. Je, A. Murayama, "Sub-picosecond spin relaxation of bright excitons and imbalance suppression in asymmetric CdSe/ZnS nanocrystal quantum dots under an applied magnetic field", J. Nanoscience and Nanotechnology, Vol.12, pp.2919-2923 (2012).
5. T. Kiba, Y. Mizushima, M. Igarashi, C-H. Huang, S. Samukawa, A. Murayama, "Picosecond transient photoluminescence in high-density Si-nanodisk arrays fabricated using bio-nano-templates", Appl. Phys. Lett., Vol.100, pp.053117:1-4 (2012).
6. N. Ishida, K. Sueoka, "Spin-polarized tunneling between optically pumped GaAs(110) surface and spin-polarized tip", Japn. J. Appl. Phys., Vol.50, pp.08LB02:1-3 (2011).

ホームページ等

<http://processing.ist.hokudai.ac.jp/>