

## ピラミッド微小光共振器を用いた量子ドット励起子状態のコヒーレント制御に関する研究

Study on coherent control of exciton states in quantum dots embedded in pyramidal microcavities

末宗 幾夫 (IKUO SUEMUNE)  
北海道大学・電子科学研究所・教授



### 研究の概要

微小光共振器中で量子ドットの励起子と光子の結合を強め、励起子状態をコヒーレントに制御することを目指して研究し、発光寿命より10倍長いスピンフリップ時間、磁場印可無しで光子円偏光—電子スピン—光子円偏光へ効率92%の高い量子状態変換、金属共振器の開発とこれによる量子ドット励起×光子取り出し効率の40倍改善などの成果を得た。

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子電気材料工学

キーワード：量子ドット、共振器、コヒーレンス、スピン反転、光子、円偏光

### 1. 研究開始当初の背景

電子系の波動関数をコヒーレントに制御することは、光子を用いた量子計算や量子暗号通信を進める重要な研究ステップであり、半導体量子ドットはその舞台となる。しかしフォノンなどによる緩和が激しい、また空間的な広がり数が数nmの量子ドットと数100nmの光子では空間的な重なり積分が小さく両者の結合が小さい課題がある。

### 2. 研究の目的

当該研究では、量子ドットと微小共振器の結合増強と、これを用いた光子と励起子スピン間の効率のよい量子状態変換と制御をコヒーレントに行うための基盤技術を開発する。

### 3. 研究の方法

量子ドット作製の最適化（そのためのMBE設備の購入）、量子ドットを内包した微小光共振器の開発（そのための蒸着源の購入）、量子ドットを円偏光励起してスピン保持時間を測定（そのための励起レーザー購入）、量子ドットから単一光子を発生していることの確認（そのための光子相関測定系の購入）、微小光共振器中に埋め込んだ半導体量子ドットの励起効率、発生した光子の外部取り出し効率の見積もり、光子円偏光から電子スピンへの変換効率の評価、発生した光子のコヒーレンス時間の測定とこれによる量子ドットと光子の相互作用におけるコヒーレンスの評価等の研究方法を用いた。

### 4. 研究の主な成果

#### (1) 量子ドット埋め込み金属微小共振器の開発

研究開始当初、II-VI族半導体DBR表面に選択成長したピラミッド微小共振器の作製を目指したが、GaAs表面に比べると選択成長が困難であった。そこで、特に微小な半導体柱状構造(GaAs系)を金属(Nb)中に埋め込んだ金属微小共振器の開発を進めた。金属による微小領域への光場の閉じ込めによる相互作用の増強と、共振器へ入出力する光子の結合効率の改善を検討し、実測において、入射光子が量子ドットを励起する効率と発生した光子を

取り出す総合効率で、従来に比べ40倍の大きな特性改善を実現した。

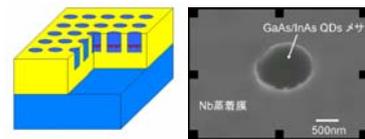


図2 Nbへ埋め込んだGaAs柱状構造

#### (2) InAlAs系単一量子ドットにおける単一光子の発生

コヒーレントに制御された単一光子列を発生するためには、まず単一量子ドットから単一光子の発生を確認する必要があった。そこで現在主に使われているシリコン単一光子検出器が高い量子効率を示す波長700nm帯で発光するInAlAs自己形成量子ドットを用いた。光子相関測定によって2次光子相関関数 $g^{(2)}(0)$ の明瞭な低下を観測し、単一光子の発生を確認した。しかし量子ドットの光励起強度の増加によって $g^{(2)}(0)$ は明瞭な増大を示し

#### [ 4. 研究の主な成果 (続き) ]

on-demand 光子発生には大きな障害になると思われた。光子発生過程のレート方程式解析ならびに光子相関測定系の解像度等の詳細な検討により、こうした問題が測定系に依存する要素と、量子ドットから光子発生過程の本質的な問題に別れることが分かった。その結果、ある励起強度(励起子分布としては~33%)まではほぼ純粋な単一光子の発生が可能であることが分かった。InAlAs 系量子ドットにおいて励起子状態からの単一光子の発生、励起子分子・励起子の時系列発光による光子バンチング特性を確認したことは、InAlAs 系量子ドットでは世界初である。

#### (3) 光子円偏光-励起子電子スピン間の量子状態変換

量子ドットの光子によるコヒーレント制御は、光子 Qubit と電子スピン Qubit をつなぐ重要なステップである。そこでまず、光子円偏光と電子スピン間の量子状態変換を検討した。これに関連して、励起子分子-励起子時系列発光に関する偏光相関測定を行い、これから中性励起子ではスピン反転時間が 3.6ns と、発光寿命の 1ns より 3.6 倍長いことを確認した。さらに正の荷電励起子におけるスピン反転時間はさらに長く、発光寿命の 10 倍、10ns を超えることを確認した。また中性励起子、荷電励起子等、異なる励起子はそれぞれ準共鳴励起を行うことで、ほぼそれぞれの純粋な励起子を励起できることを確認した。この正の荷電励起子の 1LO フォノン上のエネルギーを準共鳴励起することで、円偏光→電子スピン→円偏光の総合変換効率 92%を達成した。これは磁場印可無しの状態での世界最高の変換効率である。

#### (5) 励起子コヒーレンス状態の検討

上記で電子スピン状態を維持する時間は 10ns と長いことが確認できたが、コヒーレント制御のためには、励起子がコヒーレンスを維持できるコヒーレンス時間(位相緩和時間)を測定する必要がある。そこで、干渉光学系を作製し、量子ドット励起子からの発光に関する 1 次の自己相関関数を測定することによって位相緩和時間の評価を進めた。その結果、光励起強度を上げると位相緩和時間が 20ps 以下と短くなり、急速にコヒーレンスを失うことが分かったが、200nW 以下の弱励起にすることで、励起子発光線のエネルギー広がり幅と位相緩和時間がフーリエ限界にある理想的な特性が得られた。

#### 5. 得られた成果の世界・日本における位置づけとインパクト

開発した金属微小光共振器は、本研究独自のユニークな共振器であり、40倍の効率増大は特筆される効率改善である。光子と電子スピンの状態変換において、光子円偏光-量子ドット励起子スピン-光子円偏光と量子状態変換する効率を92%まで高めた研究成果は、外部磁場無しで世界最高値というだけでなく、状態重ねあわせが本質的に重要な量子情報応用には、大きな波及効果をもたらすはずである。

#### 6. 主な発表論文

- **H. Kumano**, S. Ekuni, H. Kobayashi, H. Sasakura, **I. Suemune**, S. Adachi, and S. Muto: "Spin-flip Quenching in Trion State Mediated by Optical Phonons in a Single Quantum Dot" *phys. stat. sol. B* **246** (2009) pp. 775-778.
- H. Kobayashi, **H. Kumano**, M. Endo, M. Jo, **I. Suemune**, H. Sasakura, S. Adachi, and S. Muto: "Highly Circular-polarized Single Photon Generation from a Single Quantum Dot at Zero Magnetic Field" *Microelectronics Journal*, Vol. **39** (2008) pp. 327-330.
- **H. Kumano**, H. Kobayashi, S. Ekuni, Y. Hayashi, M. Jo, H. Sasakura, S. Adachi, S. Muto, and **I. Suemune**: "Optical-phonon Mediated Exciton Energy Relaxation with Highly Preserved Spin States in a Single Quantum Dot" *Phys. Rev. B* **78**, 081306-1-4 (R) (2008).
- M. Jo, Y. Hayashi, **H. Kumano**, and **I. Suemune**: "Exciton-phonon Interactions Observed in Blue Emission Band in Te delta-doped ZnSe" *J. Appl. Phys.* Vol. **104** (2008) 033531-1~4.
- P. Thilakan, G. Sasikala, and **I. Suemune**: "Fabrication and Characterization of a High Q Microdisc Laser Using InAs Quantum Dot Active Regions" *Nanotechnology* Vol. **18** (2007) 055401-1~4.
- **H. Kumano**, S. Kimura, M. Endo, H. Sasakura, S. Adachi, S. Muto, and **I. Suemune**: "Deterministic Single-photon and Polarization-correlated Photon-pair Generations from a Single InAlAs Quantum Dot" *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics* Vol. **1** (2006) pp. 39-51. (*Invited Review Paper*)

ホームページ等

<http://opmac06.es.hokudai.ac.jp/>