

メタマテリアルと量子ドットを用いた極小単一光子放出器の創出

研究代表者

向井 剛輝 横浜国立大学大学院工学研究院 教授



1. 研究の背景と達成目標

次世代の高セキュリティ情報伝送・高速情報処理を実現する為に、量子ドット(QD)を用いた量子情報技術の研究が実績を挙げている。フォトニック結晶を用いた高 Q 値(quality factor)の光キャビティ内にエピタキシャル成長型 QD を配置する単一光子発生器などが、その代表例である。本研究では、走査型プローブ顕微鏡(SPM)によるリソグラフィを用いて、コロイド型 QD1個をシリコン基板上で位置制御する技術とメタマテリアル(MM)要素の作製技術を組み合わせ、ナノオーダーサイズの単一光子放出器を実現することを目的とした(図1)。MM 中のプラズモンの共鳴周波数と QD の発光周波数を一致させることで、パーセル効果による高速な光子放出、発光効率の増大、コロイド型 QD 独特の発光明滅現象の改善、プレーナ回路実現に必要な指向性を持つ光放射、量子演算に必要となる偏光方向の制御、などが達成されると見込まれる。素子の試作と、その動作を示す光学現象の確認を目指した。

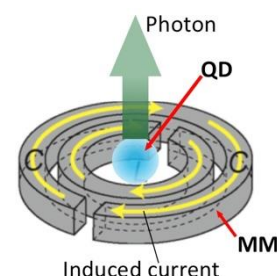


図1 提案する素子構造

2. 主な研究成果と社会、学術へのインパクト

- FDTD 法(時間領域差分法)を用いた3次元シミュレーションにより原理検証を行った。MM 要素の中心に位置する QD から、指向性の高い光子放出が行えることを確認した(図2)。提案するシンプルな構造で光子制御の効果があることを初めて報告した。
- Si 基板上にナノホールを形成して直径数 nm の QD をトラップし、スパッタ埋め込みの後、その周囲に SPM リソグラフィで MM を形成することで、素子構造を試作した。これにより、極限的な半導体微細加工を実現した。
- 電子線リソグラフィで作製した MM の中央部分に、シリカシェルを付与して 140nm までサイズを拡大した QD をトラップすることにより、所望の素子と同等の構造を試作した。実現したシリカシェルは世界最大であった。
- 発光波長の温度依存性の評価によって、試作素子中の共振現象を示唆する特徴的な光学的性能を確認することができた。これまでに無いコンパクトな固体光量子回路の設計が可能であることを示す研究成果であり、同分野の新たな基盤技術に発展することが期待される。

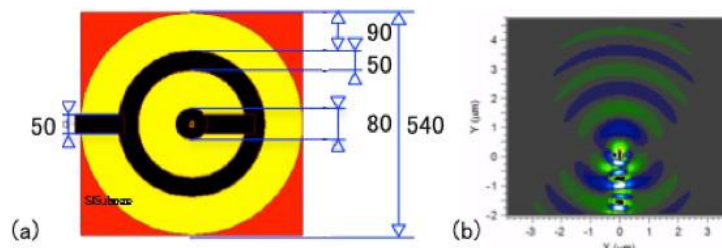


図2 (a)設計値(unit: nm)

(b)発光断面図

3. 研究成果

SPMリソグラフィの精度を向上させ、素子を試作し

た。Si 基板の表面化学基修飾・SPM 加工条件(湿度・電流・電圧)の検討により加工精度を向上させ、更に SPM 酸化部分に無電解ニッケルメッキを施すことで MM パターンを作製する技術を構築した。Si 基板上に QD をトラップする技術と組み合わせ、提案する新しいナノオーダーサイズの単一光子放出器の試作技術を構築した。

シリカシェルを QD に付与する技術を開発し、上記とは別の方法でも同等の素子の試作を行った。シ

エルサイズ制御・光学性能の改良を行って、発光波長を維持したまま、直径 5nm の QD を実質 140nm ままで拡大できた。これにより、QD の Si 基板上へのトラップ位置の操作性と再現性が格段に向上した。サイズを拡大した QD を、電子線リソグラフィを用いて作製した MM 要素の中心に直接トラップする方法による、試作技術を構築した。

試作素子の光学評価によって、所望の動作を示す光学現象の確認を行なった。必要な性能を持つ装置を入手するため、各社製品の比較試験を慎重に行ない、最終年度に光学実験系を完成した。それを用いて、試作素子の基本性能を確認した。図3は、発光ピーク波長の温度依存性を、QD のみ(数千個程度)の場合と、試作素子(QD+MM。但し QD は素子中に十数個存在)で比較した結果である。試作素子では、ピーク波長がほとんど変化しないことが示された。MM の共振波長は温度に依存しないことから、素子からの発光ピークは、MM 要素に共鳴した QD からの上方指向性を持った光子放出に起因するものであることが示唆された。

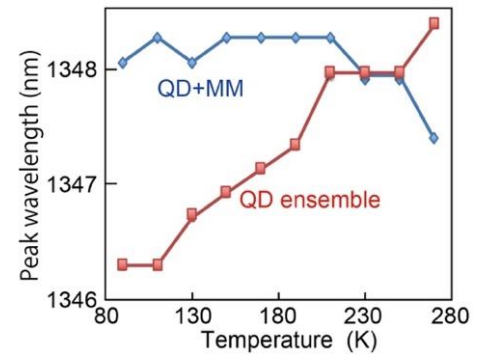


図3 発光ピーク波長の温度依存性

4. 今後の展開

我々が本研究で取り組んだ新しい原理による素子構造は、特にその極小性が量子情報素子の研究分野に大きなインパクトを与えると思われる。更に、安価に大量生産できるコロイド型 QD を使用できることも、従来用いられてきたエピタキシャル型 QD に対しての優位性であり、今回の成果は将来の量子情報処理システムの高性能・低コスト化に繋がることが期待される。

5. 発表実績

1. K. Mukai, I. Okumura, Y. Nishizaki, S. Yamashita, and K. Niwa, "Silica coating of PbS quantum dots and their position control using a nanohole on Si substrate", *Jpn. J. Appl. Phys.* **57**, 04FH01 (2018).
2. Kohki Mukai, "Template method used for position control of individual silica-coated quantum dot and formation of quantum-dot perfect superlattice (**Invited**)", 4th World Congress on Materials Science and Engineering, London, UK, August 13-15, 2018.
3. Kohki Mukai, Fumimasa Suetsugu, Keisuke Niwa, "Controlling The Electron Coupled State in The Superlattice of PbS Quantum Dots by Replacing Ligands", *IEEE Transact. Nanotechnol.* **16**, 600 (2017).
4. Kohki Mukai, Fumimasa Suetsugu, and Keisuke Niwa, "Large Red Shift of Emission of PbS Quantum-dot Superlattice with Butylamine Ligands", *Current Nanoscience* **13**, 574 (2017).
5. Kohki Mukai, "Template method for individual positioning and dense packing of colloidal quantum dot for optoelectronic device application", *Int. Conf. Adv. Mater.*, Kyoto, Japan, August 27-, 2017.
6. 向井剛輝「光子放出素子、量子デバイス及び光子放出素子の製造方法」特開 2017-55057.
7. 渡辺慧、奥村勲、山下洲造、杉本卓、向井剛輝「メタマテリアルとPbS量子ドットを組み合わせた光子発生素子の提案」春期応用物理学学会講演会、2018/3/18、早稲田大学。
8. 山下洲造、渡辺慧、伊海雅和、向井剛輝「原子間力顕微鏡リソグラフィによる微小光学素子の製造方法」春期応用物理学学会講演会、2017/3/14-17、パシフィコ横浜。
9. 西崎雄太、山下洲造、向井剛輝「単一量子ドット配置制御の為の原子間力顕微鏡リソグラフィ、春期応用物理学学会講演会、2017/3/14-17、パシフィコ横浜。