

「新しい物理現象や動作原理に基づくナノデバイス・システムの創製」
平成 13 年度採択研究代表者

小森 和弘

(産業技術総合研究所光技術研究部門 グループリーダー)

「光量子位相制御・演算技術」

1. 研究実施の概要

本研究は、量子ナノ構造中のコヒーレントな電子状態を利用した新しいナノデバイスの実現を目的とし、「高品質量子ナノ構造の作製と超高速光物性、量子論理素子研究への応用」と「光量子位相制御技術の開発と光制御・演算素子への応用」の2つの研究項目に分けて研究を推進した。平成17年度からは、中間期までに推進した研究項目の中から「(A)量子情報デバイス研究」を重点課題として選び、重点的に研究を行なうと共に、残りの課題の中で新しい展開と新しい応用が期待できる項目として、「(B) ナノ構造デバイス研究」を副重点課題として選び研究を行なった。

(A) 量子情報デバイス研究に関しては、結合量子ドット中の励起子を用いた2量子ビット(2-qubit)量子論理ゲート素子の研究を進めた。素子構造としては、ドット間の距離が小さい(障壁厚さ $\sim 5\text{nm}$)強結合型と、同距離が大きい(障壁厚さ 7nm 以上)弱結合型の2種類の素子の開発を行った。強結合型の素子に関しては、2つの励起子が結合した2-qubit状態($|11\rangle$ 状態)の形成が可能になると共に、2-qubit間の大きな相互作用(1.3meV)が確認された。これから、本素子が2-qubit量子ゲートとしての必要条件を満たしていることが示された。さらに、2つの励起子qubitの光パルス制御実験を通して、時間軸上での励起子間相関(2-qubit間相関)に関する初期実験結果が得られた。弱結合型の素子に関しては、外部電界による結合制御を目的として、電界印加時の結合ドットの光学特性(シュタルクシフト等)の詳細を明らかにした。量子情報通信への応用を目的として、結合量子ドットを用いた単一光子発生素子の研究に着手し、結合量子ドット中の励起子からの単一光子発生を確認した。

(B)ナノ構造デバイス研究に関しては、(1)量子ナノ構造中のコヒーレント効果を利用した負性抵抗ナノ電子素子の研究、(2)高品質、高均一量子ドット集合体を用いた高性能・新機能光素子の研究、(3)フォトニック結晶構造を用いた光制御素子の研究を副重点課題として選び、それぞれ、100G超の超高周波発振素子への応用、高性能な半導体量子ドットレーザへの応用、集積型の光位相制御デバイスへの応用を目指して研究を推進した。

2. 研究実施内容

(1) 高品質量子ナノ構造の作成と超高速光物性、量子情報素子研究への応用：

平成17年度から重点課題「量子情報デバイス研究」として研究の推進を行なった。

結合量子ドット中の励起子を用いた2-qubit 量子論理ゲートとしては、相互作用が大きい強結合型の構造とスケーラビリティの点で優れている弱結合型の構造の開発を行ってきた。中間期までに、MBE法を用いた積層方向に結合した結合量子ドット構造の開発、単一ナノ構造の光計測、制御が可能なデバイス構造の開発、縦方向電界印加が可能な結合量子ドットデバイス構造の開発、量子ドット励起子の1-qubit ゲートの制御(ラビ振動制御、コヒーレント制御)技術の開発を行ってきた。平成17年度は、1-qubit 回転ゲート操作の低パワー化および再現性向上、2-qubit 素子での励起子間相互作用の確認とその増強、2-qubit 素子の動作実証に向けた2-qubit 光制御・計測技術の開発を重点的に行い、以下の成果を得た。

1-qubit および2-qubit 素子での回転ゲート操作(ラビ振動)の低パワー化および再現性向上のために、遷移双極子モーメントの増大化が可能な素子構造の開発を行った。測定可能な波長帯である900nm帯でかつサイズが大きな量子ドット構造を作成するために、これまでのInAs量子ドット(直径15~20nm)にGa組成を追加した、InGaAs量子ドットの開発を行った。As₂材料を用いて直径が30nm量子ドット、またAs₄材料を用いて楕円形状(短径15nm,長径30nm以上)の900nm帯の巨大サイズ量子ドット構造の作製が可能になった。

励起子を用いた光制御型の2-qubit 量子ゲートを実現する上では、2つの別々の励起子が結合した新しいエネルギー状態である $|11\rangle$ 状態を形成することと、制御光パルスのエネルギー幅よりも十分大きな励起子間の相互作用(励起子分子結合)エネルギーシフトを得ることが必要条件である。

大きな励起子間相互作用が期待される強結合型の素子を用いて、2-qubit 状態($|11\rangle$ 状態)を形成する実験を行なった。二波長CWレーザ励起の発光分光法を用いて、結合ドット中の2つの励起子をそれぞれ独立に励起制御することによって $|11\rangle$ 状態の形成が可能になると共に 1.3meV の大きな相互作用エネルギーシフトが得られ、本プロジェクトで開発した強結合型の素子が2-qubit 量子ゲートとしての必要条件を満たしていることを明らかにした。

さらに、2-qubit 素子としての動作実証を目指し、二波長の超短光パルスレーザ励起の発光分光法を用いて、2つの励起子量子ビットの光パルス制御に関する研究に着手した。励起子 a を制御ビットとして、励起子 b を標的ビットとして、光パルスでそれぞれ制御すると、励起子 a を励起(生成)した直後は、励起子 b の存在確率が変化し、時間軸上での励起子間相関の初期実験結果が得られた。

弱結合型の素子に関しては、これまで開発してきた層厚方向に電界を印加する縦電界印加型素子構造に加えて、相互作用が大きい横電界印加型の素子構造の開発を進めた。

縦電界印加型構造に関しては、電界印加時の結合ドットの発光特性(PL特性、PLE特性)の詳細を調べ、電界による励起子エネルギーのシュタルクシフトと、2つのドットの電子準位エネルギー差に応じて発光強度が明滅する現象を観測した。

横電界印加構造に関しては、理論解析を進め10KV/cm程度の弱電界でも300 μ eV 程度の比較的大きな相互作用エネルギーシフトが得られることを理論的に明らかにした。また、実際に電極間5 μ mのコンデンサタイプの横電界印加型結合量子ドットデバイスの試作を行なった。

量子情報通信への応用を目的として、結合量子ドットを用いた単一光子発生素子の研究に着手した。時間相関光子測定系を構築し、結合ドット素子を光励起した際の発光の時間相関光子計数測定を行なうことによって、時間原点付近での相関アンチバンチングが観測され、これまで開発した弱結合型量子ドット素子からの単一フォトンが発生が確認された。

(2) 光量子位相制御技術の開発と光制御・演算素子への応用：

平成17年度から副重点課題「ナノ構造デバイス」として研究の推進を行なった。

ナノ構造デバイス研究に関しては、(1) 量子ナノ構造中のコヒーレント効果を利用した負性抵抗ナノ電子素子の研究、(2)高品質、高均一量子ドット集合体を用いた高性能・新機能光素子の研究、(3)フォトニック結晶構造を用いた光制御素子の研究を行ない以下の成果を得た。

負性抵抗ナノ電子素子に関しては、100G超の超高周波発振素子化を目指して、サブバンド間遷移による新型のダブルチャネル負性抵抗トランジスタを新規に提案した。実際に、(001)InP基板上に同素子を作製し、室温までの負性抵抗動作を得た。

ダブルチャネル負性抵抗素子とサブテラヘルツスロットアンテナから構成される超高周波発振素子の設計指針を得るために、有限要素法シミュレータを用いて、サブテラヘルツ周波数領域での同素子の発振動作特性解析を行なった。

高品質、高均一量子ドット集合体の研究に関しては、高性能量子ドット半導体レーザ光源への応用を目指し、特に高密度化の研究を進め、高密度(10^{11}cm^{-2})でかつ高均一(PL発光半値幅 $\sim 30\text{meV}$)の量子ドット集合体の作製が可能になった。また、1.3 μ m帯量子ドットレーザの高利得パルス発振動作を達成した。

フォトニック結晶構造を用いた光制御素子に関しては、集積型の光位相制御(波形整形)デバイスの実現を目指して、その基本構造となるGaAs/空気スラブ型2次元フォトニック結晶導波路構造の作製技術の開発を行い、その初期的な光伝播特性の測定が可能になった。また、従来の1/25の大きさで2倍の帯域幅を持つ方向性結合器スイッチの設計を行い、その動作周波数を自在に設計することが可能となった。

3. 研究実施体制

「量子ナノ構造・量子制御研究グループ」

①研究分担グループ長：小森 和弘（産業技術総合研究所 光技術研究部門、グループリーダー）

②研究項目：「高品質量子ナノ構造の作製と超高速光物性、量子論理素子研究への応用」

「超高速光制御研究グループ」

①研究分担グループ長：小森 和弘（産業技術総合研究所 光技術研究部門、グループリーダー）

②研究項目：「光量子位相制御技術の開発と光制御・演算素子への応用」

4. 主な研究成果の発表（論文発表および特許出願）

（1）論文（原著論文）発表

- S. Yamauchi, K. Komori, I. Morohashi, K. Goshima and T. Sugaya, “Electronic structures and carrier correlation in single pair of coupled quantum dots” Jpn. J. of Appl. Phys, Vol.44, No. 4B, 2005, pp2647-2651, 2005/4/21
- K. Goshima, S. Yamauchi, K. Komori, I. Morohashi, A. Shikanai and T. Sugaya
“Observation of bonding states in single pair of coupled quantum dots using micro-spectroscopy”, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 44, No. 4B, 2005, pp2684-2687, 2005/4/21
- N.Yamamoto, Y.Watanabe, and K.Komori: “ Design of photonic crystal directional coupler with high extinction ratio and small coupling length”, Jpn. J. of Appl. Phys, Vol.44, No. 4B, pp2575-pp2578, 2005/4/21
- T.Sugaya, T.Yamane, M.Ogura, K.Komori, K.Yonei, “Negative differential resistance of pseudomorphic InGaAs quantum-wire FETs”, CRYSTAL GROWTH, pp94~pp97, 2005/5/1
- T.Sugaya, K.Komori, K.Amano, S. Yamauchi, “1.3- μ m InAs Quantum Dots Grown with an As₂ Source using Molecular Beam Epitaxy”, Journal of Vacuum Science & Technology B, Vol.23, No.3, pp1243~pp1246, 2005/6/9(publish)
- S.Ichikawa, I.Morohashi, T.Hidaka, M.Watanabe and K.Komori: “横方向電界印型多重量子井戸構造テラヘルツ波発生素子の放射特性” 電子情報通信学会 和文和文誌, Vol.J88, No.7, pp578~pp579, 2005/5/11
- Morohashi, K. Komori, N. Tsurumachi, H. Shimura, T. Hidaka and M. Watanabe, “Terahertz wave generation device using multi-quantum well with transverse electric field,” Jpn. J. of Appl. Phys, Vol.44, No.9A, pp6425~pp6428, 2005/9/8
- S. Yamauchi, K. Komori, I. Morohashi, K. Goshima, T. Sugaya and T. Takagahara:
“Observation of Interdot Correlation in Single Pair of Electromagnetically Coupled Quantum Dots”, Applied Physics Letters, Vol.87, pp182103-1~pp182103-3, 2005/10/24
- S. Yamauchi, K. Komori and T. Sugaya, “Optical characteristics of self-aligned InAs quantum dots on GaAs oval strain”, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.45, No.2A, pp1030-pp1032, 2006/2/8

- S. Yamauchi, K.Komori, I.Morohashi, K.Goshima and T.Sugaya, “Electronic Structures in Single Pair of InAs/GaAs Coupled Quantum Dots with Various Interdot Spacings”, Journal of Applied Physics, Vol.99, pp033522-1~pp033522-8, 2006/2/15
- K. Goshima, S. Yamauchi, K. Komori, I. Morohash and T. Sugaya, “Observation of Exciton Molecule Consisting of Two Different Excitons in Coupled Quantum Dots”, Applied Physics Letters, Vol.87, pp253110-1~pp253110-3, 2005/12/15
- K. Goshima, K. Komori, S. Yamauchi, I. Morohashi, A. Shikanai, and T. Sugaya, “Pulse Area Control of the Exciton Rabi Oscillation in InAs/GaAs Single Quantum Dot”, Japanese Journal of Applied Physics, 2005/9/28
- S.Sugaya, T.Yamane, S.Hori, K..Komori, K.Yonei, “Negative differential resistance of InGaAs dual channel transistors ”, Journal of Physics: Conference Series , 2005/12/05

(2) 特許出願

H17 年度出願件数 : 5 件 (CREST 研究期間累積件数 : 8 件)