

「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 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

古典的な光制御デバイスでは量子状態の振幅（密度項）だけを利用して、その位相情報（コヒーレンス項）は利用していない。これは、固体中ではデコヒーレンス要因が多く、非常に短い時間領域（位相緩和時間内）でなければコヒーレンス項を制御することが出来ないからである。コヒーレンス項までも制御することが可能になれば、原理的に光周期（数フェムト秒）で量子状態を人工制御することが可能になる。その効果の量的な面では、数光周期で動作する飛躍的に高速な光デバイスの実現、質的な面では量子状態の時間発展を完全制御する新しい量子情報（量子コンピュータ）素子の実現等が期待され、全く新しい原理で動作するデバイスの実現に展開する可能性を有する。

本研究は、位相緩和時間の長い高品質量子ナノ構造の開発とコヒーレント量子制御技術の開発の双方を通して、量子状態のコヒーレンス項の制御を利用する全く新しい光デバイスの実現を目的とし、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 と 2) コヒーレント量子制御技術の開発と光制御・演算素子への応用 を推進した。

1) に関しては、主に結合量子ドット中の励起子を用いた 2-qubit の量子論理ゲート素子の開発を行い、結合量子ドット中の励起子物性を明らかにするとともに、結合効果、電界効果を有し、単一ナノ構造だけを制御・計測することが可能な、スケーラブル 2-qubit 量子論理ゲート素子構造の開発が可能になった。また、量子ドット中の励起子を用いた量子論理ゲート制御技術の開発を行い、1-qubit の操作（ラビ振動操作）とパルス列による制御が可能になった。さらに、結合ドット中の励起子間の相関（2-qubit 間相関）が得られた。

2) に関しては、超高速光制御・演算デバイスのための理論設計に重点を置き、量子ドット集合体を用いる新しいコヒーレント制御デバイスの提案と理論シミュレーション、フォトニック結晶を用いる集積型ナノデバイスの理論設計を行った。

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：

1-1) 高品質量子ナノ構造の作成技術の開発、超高速光物性：

量子情報デバイス用に必要なナノ構造として、高品質な結合量子ドット構造、結合量子ドットアレイ構造、トレンチ形状量子細線デバイスの開発を行った。また、超高速光制御デバイス用に必要なナノ構造として、高均一な量子ドット集合体の開発を行った。

励起子を用いた量子論理ゲート素子として、2個以上の量子ドットが結合した結合量子ドット構造中の励起子を利用する量子論理ゲート素子を提案している。構成方法として、スケーラビリティは低いが大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を考えている。

2-qubit量子論理ゲート素子のために、MBE成長法を用いて上下の量子ドットのエネルギーが近接した共鳴結合型の2重結合量子ドット構造の開発を行ってきた。顕微分光法で結合効果を観測するための必要条件である上下ドット間のエネルギー差が結合エネルギーおよび光学フォノンエネルギー（1LO）よりも十分小さい結合量子ドット構造、近接場メタルマスクを用いて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に引き続き、平成16年度は電界印加が可能な結合量子ドットデバイス構造の開発を重点化し、電界による単一の量子ナノ構造、結合量子ナノ構造の電子状態の制御が可能になった。

面内方向に結合した結合量子ドットアレイ構造としては、MBE法を用いてGaAsテラス基板上への自己形成量子ドットの作成技術の開発を行った。その結果、テラス上部に1列に配列した結合量子ドットアレイ構造の作製が可能になった。

電子のコヒーレントトランスポートを利用するナノデバイスとして、MBE法によるトレンチ形状極微細線構造を用いた量子細線FETの開発を行なった。その結果、コヒーレントなトランスポートを用いた素子としては、初めて、PV比10以上の負性抵抗特性を有する速度変調トランジスターとして動作していることが明らかになった。また、量子細線型のFET素子としては初めて近室温（ $T = 260\text{ K}$ ）負性抵抗動作を達成した。

超高速光制御・演算素子用の量子ナノ集合体構造としては、不均一広がりが少なく高均一でかつ高密度な量子ドット構造が必要不可欠である。そのためにMBE法によって高均一InAs/GaAs量子ドット構造の開発を行い、本研究で開発するデバイスの波長帯である波長 $0.9\ \mu\text{ m}$ 帯と $1.3\ \mu\text{ m}$ 帯において不均一線幅 20 meV 以下（最小 18 meV ）の高均一構造の作製が可能になった。

1-2) 微小領域計測・制御

平成16年度は、層厚方向に結合した一対の結合量子ドット構造の励起子状態の計測と、励起子状態の超高速光制御技術の開発、結合ドット中の2励起子間のキャリア相関に関する測定を重点化した。障壁層厚を 7 nm 、 5 nm 、 3 nm に変えた一対の共鳴結合ドット構造の発光特性の測定から、結合準位 X^+ と反結合準位 X^- の発光ピーク群が現れ、そ

の結合分裂エネルギーは障壁層厚を薄くするにつれて拡大し、一对の結合量子ドットの結合効果を確認した。

量子論理ゲート素子の実現の為には、以上のナノデバイス構造の開発と共に、超高速量子制御技術の開発が必要不可欠である。まず、単一InAs量子ドットの励起子またはCharged励起子を用いて1-qubitゲート操作の実験を行った。励起準位を面積制御パルスで励起して、基底準位に緩和したキャリアの発光再結合を通して、励起準位のキャリア密度をモニターした。ダイポールモーメントが大きく、位相緩和時間が長い励起子に関しては、平均励起パワー密度の $1/2$ 乗（パルス面積に比例）に対するキャリア密度の変化は、正弦波状に変化し、 π パルスでキャリア密度が最大になり 2π パルスで最小になり、ラビ振動しているのが確認された。以上より、この系で1-qubitゲート操作が可能であることが示された。

1-qubitゲートを光パルス列で任意に制御するための技術としてマイケルソン干渉計を用いたコヒーレント制御システムを開発した。まず、高精度マイケルソン干渉計とピコ秒パルスレーザを用いたコヒーレント制御システムを構築し、顕微分光システムと共に用いることにより、量子細線の局在励起子のコヒーレント制御と単一量子ドット励起子のコヒーレント量子制御に関する初期実験に成功した。さらに位相制御の一層高精度化のために2波長レーザ干渉距離計を用いて、マイケルソン干渉計アーム間の距離差の精度を4 nm以内に向上した装置を開発した。この装置と顕微分光システムと共に用いることにより、単一量子ドット励起子のコヒーレント量子制御の4 nm以内（位相制御誤差2度以内）の高精度化、長時間安定化が可能になった。以上によりパルス列によるブロッホベクトルの制御（1-qubitの制御）が可能になった。

2-qubit素子の為には2つの相関のある2準位系の形成が必要である。その為には、結合量子ドットの X^+ 準位と X^- 準位間の相関を次の方法で調べた。 X^+ に固有な準位（ X^- にキャリアが移動しない準位）をポンプ光で励起し、 X^- の準位の励起フォトルミ（PLE）のポンプ光依存性を測定した。その結果、 X^+ キャリア増加に伴う X^- キャリアの変化（キャリア間の相関）が測定された。

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：

超高速光制御・演算技術およびナノデバイス技術の開発：

量子ドットのコヒーレント量子制御デバイス化を考えた場合、より大きな信号強度を得るために、量子ドット集合体を用いる必要がある。しかし、量子ドット集合体では、ドットサイズのばらつきにより均一幅よりも広いスペクトル幅（不均一幅）をもつため、従来の位相ロックパルス対によるコヒーレント制御が困難となる。本研究では、光パルスの位相だけでなく、パルス面積も考慮した制御パルス列を用いた新しいコヒーレント量子制御法の提案を行ってきた。今年度は、光学ブロッホ方程式を用いた数値計算により、実際の量子ドット集合体のような不均一広がりのある系に対しても適用可能なコヒーレント制御のための条件を明らかにした。またパルスシーケンスとパルス面積を最適に選択することにより、エネルギー緩和および

び位相緩和の時定数フリーの光スイッチング動作が可能であることを示した。実験に関しては、InAs/GaAs量子ドットにおいてフェムト秒パルスレーザーを用いた超高速時間分解分光測定系の構築を行なった。具体的には、音響光学変調器(AOM)によって周波数シフトさせた2つの励起光パルスと、周波数シフトしていないリファレンス光パルスを用いたヘテロダイン検出系を構築し、量子ドット集合体における四光波混合信号、ポンププローブ信号の高感度測定を行った。これまでに、量子ドット集合体のポンププローブ実験からエネルギー緩和時間(T1)は約600psという値が得られた。

量子ドット集合体を用いた超高速光制御デバイスを開発する上でのもう一つの課題は、高いQ値を有する光閉じ込め構造を利用して、実屈折率または吸収率変化を大きくすることである。その為の方法として非常にQ値の高い2次元フォトニック結晶(PC)中に量子ドットを閉じこめるフォトニック結晶ナノデバイスの提案を行なった。リング共振器と方向性結合器からなるフォトニック結晶波形整形部と、非線形媒質としての量子ドット集合体と方向性結合スイッチ構造からなるフォトニック結晶スイッチ部の2つの領域からなるコヒーレントスイッチデバイスを念頭に置いて、理論設計に重点を置いて研究を推進した。

まず、FDTD数値解析法を用いて2次元フォトニック構造を用いるリング共振器デバイスの数値シミュレーションを行い、伝播特性および光閉じ込め効果についての初期的な特性を得た。次に共振器構造に高効率光結合が可能な方向性結合器の設計を重点的に行ない、階段状点欠陥導波路構造による広帯域PC方向性結合器の提案と理論解析を行い、超小型PC方向性結合器の設計指針を得た。さらに、フォトニック結晶スイッチ部の方向性結合器において、消光比と結合長、スイッチング長と帯域幅がトレードオフ関係にあることを理論的に明らかにし、そのトレードオフ関係を解消する方法を考案、数値実験でそれらの有効性を明らかにし、光スイッチ部に関する設計指針を得た。

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（産総研・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成と超高速光物性、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（産総研・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) 論文発表

- N. Tsurumachi, K. Komori and T. Hattori, "Ultrafast Coherent Control of Inhomogeneously Broadened System by an Area-Regulated Pulse Sequence" JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, Vo. 43, No. 4B, pp. 2023-2026, 2004/4
- N. Tsurumachi, N. Watanabe, K. Hikosaka, Xue-Lun Wang, K. Komori, T. Hattori and M. Ogura, "Femtosecond Pulse Propagation through a Quantum Wire Optical Waveguide Observed by Cross-correlation Frequency-resolved Optical Gating Spectroscopy", JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, Vo. 43, No. 4B, pp. 2002-2005, 2004/4
- I. Morohashi, K. Komori, T. Hidaka, Xue-Lun Wang, M. Ogura and M. Watanabe, "Investigation of Ultrafast Carrier Dynamics in Quantum Wire by Terahertz Time-Domain Spectroscopy", JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, Vol. 43, No. 4B, pp. 2125~2127, 2004/4
- K. Furuya, N. Yamamoto, Y. Watanabe and K. Komori, "Novel Ring Waveguide Device in a 2D Photonic Crystal Slab - Transmittance Simulated by Finite-Difference Time-Domain Analysis -", JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, Part 1, Vol. 43, No. 4B, pp. 1995-2001, 2004/4
- S. Yamauchi, K. Komori, T. Sugaya and K. Goshima, "Optical Characteristics of InAs/GaAs Double Quantum Dots Grown by MBE with the Indium-Flush Method", JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, Vol. 43, No. 4B, pp. 2083-2087, 2004/4
- K-Y. Jang, T. Sugaya, C-K. Hahn, M. Ogura, K. Komori, A. Shinoda and K. Yonei, "Photoconductive characteristics in a trench-type InGaAs quantum-wire field effect transistor", JOURNAL OF VACUUM SCIENCE & TECHNOLOGY B, Vol. 22, No. 3, pp. 1523-1525, 2004/6
- T. Sugaya, T. Yamane, M. Ogura, K. Komori and K. Yonei, Aist, Crest-JST, Shibaura Institute of Technology, "Pseudomorphic InGaAs quantum-wire FETs with negative differential resistance", Superlattices and Microstructures 34, pp. 479-484, 2004/7
- T. Okada, K. Komori, K. Goshima, S. Yamauchi, I. Morohashi, T. Sugaya, O. Yamazaki, M. Ogura and T. Hattori, Tokai Univ., Aist, Crest-JST, Tsukuba Univ., "Coherent Control of Exciton in a Single Quantum Dot Using High-Resolution Michelson Interferometer", JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, Vol. 43, No. 9A, pp. 6093-6096, 2004/9
- K. Goshima, K. Komori, S. Yamauchi, I. Morohashi, A. Shikanai, T. Sugaya, "Observation of bonding states in single pair of coupled quantum dots

using Micro-spectroscopy” Solid State Devices and Materials (SSDM 2004), Tokyo, Japan, 2004/9/16

- N. Yamamoto, Y. Watanabe, K. Kazuhiro, ” A Design of the Photonic Crystal Directional Coupler with a High Extinction Ratio and a Short Coupling Length” , JJAP, Vol. 44, No. 4B, P2575~2578, 2004/9/27
- K. Goshima, S. Yamauchi, K. Komori, I. Morohashi and T. Sugaya
”Observation of Exciton Molecule Consisting of Two Different Excitons in Coupled Quantum Dots” Appl. Phys. Lett. Submitted (2005.3)
- 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” J. Appl. Phys. Submitted (2005.3)
- 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” Appl. Phys. Lett. Submitted (2005.3)

(2) 特許出願

H16年度特許出願件数：1件（CREST研究期間累積件数：4件）