

「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

本研究の目的は、コヒーレント量子制御技術の高度化、それに基づいた超高速光制御・演算素子技術の開発および基本量子情報素子技術の開発を行うことである。この為に、「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」と「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」の2つの研究項目に分けて研究を推進する。平成14年度は、超高速光制御・演算素子および基本量子論理素子研究の為に必要な量子ナノ構造の作成技術の開発と超高速光制御計測技術の開発に重点を置き研究を推進した。

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、量子論理素子研究への応用

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：

本研究では、初期実験としては量子井戸（2次元）構造および量子細線（1次元）構造の利用を考えるが、最終的には量子ドット（0次元）構造の利用を考えている。その為にH14年度はMOCVD法とMBE法の双方を用いて高品質な量子細線、量子ドット構造および結合細線、結合ドット構造の作製技術の開発を行なった。

量子ドットについては、MOCVDによるS-K自己形成法量子ドットの作成技術の開発を行ない、波長0.9 μ m帯の比較的低密度なInAs/GaAs量子ドット構造の作成が可能になった。また、V溝構造上への自己形成成長法を用いた面方向結合量子ドット構造の開発に着手した。

一方、MBEによるS-K自己形成法とInフラッシュ法の双方を用いて、層厚の設計精度が高いInAs/GaAs量子ドットの開発を行った。特にInフラッシュ法を用いることによって層厚制御性が向上し、層厚方向に結合したInAs/GaAs結合量子ドットの作製が可能になった。障壁層厚を変化させた数種類の2重結合量子ドット構造を作製し、その光学特性を調べたところ、量子力学的結合に伴うエネルギーシフトが観測された。

量子細線については、MBEによるトレンチ溝形状基板への極微細量子細線構造の作成

とそれを用いた3端子ナノトランジスタ構造の開発を行なった。フォトコンダクティビティ、磁気抵抗特性の測定から、負性抵抗のメカニズム、電子-フォノン散乱等の基本的物性を明らかにした。

量子井戸・細線構造中の励起子の超高速キャリアダイナミクスを超高速分光法（ポンププローブ分光法、発光分光法、コヒーレント制御法、テラヘルツ分光法）を用いて調べた。特にV溝上の量子細線構造を用いた実験からは、位相緩和特性、励起子緩和時間、励起子生成時間等のフェムト秒域からピコ秒域の超高速キャリアダイナミクスの詳細が明らかになった。また、量子ドット構造については、励起子発光波長（0.8~1.30 μm ）に適合した超高速光制御・計測システムの構築を行なった。

1-2) 微小領域計測・制御 & スピン状態計測・制御技術

量子細線の局在励起子および量子ドットの励起子を光制御・計測するために微小領域（顕微）分光システム（極低温冷凍器、顕微計測システム、長焦点ダブルモノクロメータ）の構築を行った。顕微フォトルミ（ $\mu\text{-PL}$ ）、顕微励起フォトルミ（ $\mu\text{-PLE}$ ）計測法を用いて量子ドット励起子の基礎物性計測を行なった。当プロジェクトによって開発した量子ドット構造からは、10~20 μeV の非常に狭い発光線幅を有するPL特性が得られ、位相緩和時間が60~120ピコ秒程度の高品質なナノ構造であることがわかった。量子ドットの顕微PLE計測からは単一量子ドットのスペクトル構造の詳細（ゼロ吸収領域、LO共鳴準位、電子準位、連続準位）が明らかになった。さらに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、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。

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

- T. Sugaya, K-Y. Jang, T. Wada, A. Satou, M. Ogura and K. Komori, “V-grooved

- InGaAs Quantum-Wire FET Fabricated under As₂ Flux in Molecular Beam Epitaxy”, *J. Crystal Growth*, Vol. 251, pp. 543–847, 2003
- K-Y. Jang, T. Sugaya, C-K. Hahn, M. Ogura, K. Komori, A. Shinoda and K. Yonei, “Negative differential resistance effects of trench-type InGaAs quantum wire field effect transistor with 50 nm gate-length”, *Applied Physics Letters*, to be accepted.
 - I. Morohashi, K. Komori, X. L. Wang, T. Hidaka and M. Ogura, “Wavelength Dependence of Terahertz Electromagnetic Wave Generation from Quantum Wire”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 41, Part 1, No. 4B, pp. 2710–2713, April 2002
 - K. Komori, G. R. Hayes, B. Deveaud, X. L. Wang, M. Ogura, “Ultrafast phase-locked spectroscopy of excitons in quantum nanostructures”, *Physica status solidi*, Wiley-VCH Verlag Berlin GmbH, vol. 190, no. 2, pp. 885–889, April 2002
 - K. Komori, G. R. Hayes, D. Deveaud, X. L. Wang and M. Ogura, “Ultrafast coherent control of exciton and exciton-polaritons in quantum nano-structure”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 41, Part 1, No. 4B, pp. 2660–2663, April 2002
 - T. Yasuhira, K. Komori, R. Akimoto, X. L. Wang, M. Watanabe, M. Ogura “Exciton formation dynamics in crescent shaped Quantum Wires”, *Applied Physics Letter*, Vol. 81, No. 19, pp. 3642~3644, November 2002
 - K-Y. Jang, T. Sugaya, C-K. Hahn, A. Shinoda, K. Yonei, M. Ogura, and K. Komori, “Negative transconductance in trench-type InGaAs/InAlAs Quantum Wire FET”, *Proc. 13th Int. Conf. Indium Phosphide and Related Materials*, pp. 581~584, 2002, May
 - T. Sugaya, K-Y. Jang, T. Wada, M. Ogura and K. Komori, “V-grooved InGaAs Quantum-Wire Field-Effect Transistor Fabricated under As₂ Flux in Molecular Beam Epitaxy”, *Proc. 2002 International Conference on Molecular Beam Epitaxy*, ISBN: 0-7803-7581-5, pp. 133~134, 2002. September
 - I. Morohashi, K. Komori, H. Shimura, T. Hidaka, H. Ikeda, S. Tsujikura, M. Yamamoto, and Y. Okamoto, “Terahertz wave generation from multi-quantum well with transverse electric field”, *Ultrafast Phenomena XIII*, pp. 444~445 in *Ultrafast Phenomena XIII*, ed. by R. d. Miller, M. M. Murnane and, N. F. Scherer, and A. M. Weiner. (Springer,

Proceedings of the 13th International conference on Ultrafast Phenomena
XIII, Vancouver, BC, Canada, May 12-17, 2002)

(2) 特許出願

2件