

「電子・光子等の機能制御」  
平成10年度採択研究代表者

青柳 克信

(理化学研究所 主任研究員)

## 「量子相関機能のダイナミクス制御」

### 1. 研究実施の概要

本研究では、量子状態の時間的・空間的相関に関わる基礎的な物理を明らかにし、それを用いた新たな機能デバイスを探索することを目的とし、そのためのデバイス設計・機能探索および構造作製の研究を行っている。これまで電子の波動性(位相)、スピン、電荷および励起子の量子相関を利用するための具体的なデバイス構造を検討してきており、その基礎的な特性を検証するための量子相関測定システムの準備を行っている。ナノ構造作製技術に関しては、電子ビームを用いた選択的量子ドット形成技術、自己組織化による量子ディスク形成およびカーボンナノチューブを走査プローブ法の針として利用する手法を開発した。また、カーボンナノチューブを量子ドットとして動作させる技術の開発を行った。今後、量子相関機能発現のため量子構造をさらに制御性よく作製する技術を確立し、時間領域での電子・光量子相関の測定を行うことにより量子相関を規定している物理メカニズム(デコヒーレンス)を明らかにするとともに、機能デバイスへの応用可能性を探索する予定である。

### 2. 研究実施内容

本研究では、量子状態の時間的・空間的相関に関わる基礎的な物理を明らかにし、それを用いた新たな機能デバイスの探索および構造作製技術を開発することを目的としており、以下の3つのグループで研究を行っている。以下に本年度の研究成果について述べる。

#### (1) デバイス・回路設計

昨年度に、量子計算の出力検出系として「先端部に量子ドットをもつSiFE(フィールドエミッタ)」と「低エネルギー電子線干渉計」を組み合わせたシステムを考案した。それにもとづいて本システムの各要素の研究を開始した。すなわち(量子ドット型 FEに先立ち) nm凹凸をもつ平面型SiFEからの電界放出の予備実験を行うとともに、高密度Siドットの形成法の改良を行った。その結果、(i) nm凹凸をもつ平面型SiFEから低い印加電圧で電界放出が生じ、表面観察から(すべてではないものの)多数のnm突起が電子源となっていることが示唆された。将来、平面内の量子ドットからの電界放出に期待がつながる好ましい結果である。

(ii) ナノスケールの選択酸化を用いたSi量子ドットの形成法を改善し、薄いSOI層の熱的不安定性を回避する酸化条件を見出した。今後は、高密度ナノ突起からのFE 放出特性をさらに詳しく調べるとともに、ドットからのFEの実験を開始する。さらに、今回見出した(電子波の干渉性にもとづく) I - V特性の振動的振る舞いから、電子源の構造や性質を探る手法を検討する。

## (2) 機能探索

これまで研究してきた電子ビームリソグラフィを用いて作製するサブミクロン領域のガリウム砒素系量子ドットに加えて、さらに高温での動作およびコヒーレンスの増大を期待して、サブナノメートルの直径を有するカーボンナノチューブを量子ドットとして用いること考案し、単一量子ドットを形成する技術を開発し、液体ヘリウム温度で量子準位を有する量子ドットとしてのクーロンブロック特性の測定に成功した。さらに、量子ドットとしてのカーボンナノチューブに極低温において電磁波を照射しその応答を調べた結果、電磁波が古典的に量子ドットと結合していることがわかった。今後はこれをさらに発展させて結合量子ドットを形成し、その動作を実現し、さらに電磁波との量子的な相互作用を実現することを目指す。

結合量子ドットの時間領域でのダイナミクスに関し、現象論的理論を基礎とした検討を行い、十分なコヒーレンスが維持される場合には、電磁波パルスや電気パルスを与えることにより、ラビ振動の観測が可能であることがわかった。

時間領域での量子相関機能を測定するために、超短光パルス照射光伝導スイッチを用いた電気パルス発生基礎実験を行い、数十ピコ秒程度の電気パルスを発生させることができた。今後は、この技術を極低温へと拡張していく。

これまでの量子ディスクの光学的評価から、量子ビットの候補として励起子(励起子分子)の利用を考え、原理的には結合量子ディスクを用いて、量子力学的位相シフトゲート、並びに制御NOTゲート実現の可能性が見出した。自己組織化量子ディスクを用いてこのことを検討するために、新たにマイクロ顕微システムを導入し立ち上げを行った。また、SNOMによる圧力効果に続き、弱励起PLの検討、量子干渉効果のスピン依存性を調べ、光学的基礎データを蓄積した。一つのナノクリスタル中にミクロな結合構造が自然にできている可能性があることがわかってきており、量子ビット実現を念頭に製作・評価の連携を強め検討を進めている。

## (3) 構造作製技術の開発

GaN結合量子ドットを用いて量子相関素子を実現することを念頭に置き、GaN結合量子ドットを形成させる手法として提案した電子ビーム位置制御液滴エピタキシー法を用いて形成させた構造の評価、単電子デバイスへの応用を目

的として研究を行った。この技術を用いて実際に単電子トランジスタ構造を作製し、極低温で電流電圧特性を評価し、単電子動作によるゲート変調効果を確認することができた。得られた構造を評価した結果、直径30nm程度のGaNドットが位置制御されていることが明らかになり、本手法でさらに微細化することで、結合量子ドットが形成可能である見通しを得た。また、PL発光においても量子ドットが形成されることを明らかにした。

従来の走査プローブ法を用いた超微細構造作製技術をさらに改良するためにシリコンカンチレバー先端に、単層カーボンナノチューブを直接CVDで成長させる技術を開発した。この単層カーボンナノチューブカンチレバーの先端曲率半径は1～2nmである。このカンチレバーを用いて5nmの酸化チタントンネル接合を作製することに成功し、これを用いた単一電子トランジスタにおいてクーロン振動を観測した。現状ではまだ満足のいく動作特性を得られていないが、作成条件を最適化することにより、素子特性を飛躍的に向上させることができると考えられる。

自己組織化を用いた量子ディスク作製法においては、新たにIn組成の高い比較的サイズの小さいナノクリスタル試料を作製し、再現性にも注意を払いながら、内部の閉じ込め構造の評価を継続して行った。

### 3. 主な研究成果の発表（論文発表）

T.Aono, K.Ishibashi and Y.Aoyagi : Physica B272 (2000) 39-41 "Phenomenological theory of the Rabi oscillations in coupled quantum dots"

T.Maemoto, M.Ichiu, A.Ohya, S.Sasa, M.Inoue, K.Ishibashi and Y.Aoyagi: Physica B272 (2000)110-113"Magnetotransport in an InAs/GaSb quantum wire with a weak periodic potential"

P.Ramvall, Y.Aoyagi, A.Kuramata, P.Hacke and K.Horino: Appl.Phys.Lett. 21 (1999) 3866 "Influence of a piezoelectric field on the electron distribution in a double GaN/AlGaN heterojunction",

X.Q.Shen, P.Ramvall, P.Ribret, Y.Aoyagi, K.Hoshi, S.Tanaka and I.Suemune, "Investigations of optical and electrical properties of In-doped GaN films grown by gas-source molecular beam epitaxy", Journal of Crystal Growth 209 (2000) 396

H.Kumano, K.Hoshi, S.Tanaka, I.Suemune, X.Q.Shen, P.Ribret, P.Ramvall, and Y.Aoyagi, "Effect of indium doping on the transient optical properties of GaN films", Appl. Phys. Lett. 75 (1999) 2879

X.Q.Shen, P.Ramvall, P.Ribret and Y.Aoyagi, "Improvement of optical and electrical properties of GaN films by using In-doping method during growth", Jpn. J. Appl. Phys. 38 (1999) L411

H.Hirayama and Y.Aoyagi, "Optical properties of Si-doped  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$  ( $x=0.24-0.53$ ,  $y=0.11$ ) multi-quantum well structures", Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 537 (1999) G3.74

H.Hirayama, Y.Aoyagi, and Y.Tanaka, "Fabrication of self-assembling AlGaIn quantum dot on AlGaIn surfaces using anti-surfactant", Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 537 (1999) G9.4

Y. Mitsumori, K. Okamoto, T. Kuroda, F.Minami;"Coherent control of the 2P excitonic polarization in ZnSe", Proc. 24th Int. Conf. Semicond. Phys. (1999) II-C-1

T.Mihashi,M.Mizuno,F.Minami;"Stimulated photon echo decay arising from spectral diffusion in GaSe", Proc. 24th Int. Conf. Semicond. Phys. (1999) II-C-2

S.Matsushita, N.Hasegawa, T.Kuroda, F.Minami; "Spatially resolved photoluminescence spectra of CdTe quantum dots", Proc. 24th Int. Conf. Semicond. Phys. (1999) VII-B-54.

T.Kuroda,F.Minami,K.Inoue;"Photo accumulation effect on nonlinear emissions in semiconductor nanocrystals", Proc. 24th Int. Conf. Semicond. Phys. (1999) VII-B-61

H.Itoh, T.Takano, F.Minami, S.Nagao, H.Goto: "Type-II photoluminescence from GaP/AlP/GaP quantum wells under hydrostatic pressure", phys. stat. sol. (b)211 63 (1999).

S.Matsushita, F.Minami, A.Imada, R.Shimada, T.Koda: "Light propagation In two-dimensional photonic crystals illuminated by a tightly focused laser beam", Superlattices, Microstructures 25 347 (1999).

Y.Takahashi, S.Koshihara, F.Minami, Y.Tokura, T.Koda: "Ultrafast Dynamice of Reverible Photoinduced Neutral-Ionic Transition in Quasi-one-dimensional Organic Crystal Tetrathiafulvalence-Chloranil", Synthetic Metals 103 1961 (1999).

A.Hasegawa, F.Minami:"Spectral diffusion within exciton line in GaSe", J.Lumin. 83 & 84 127 (1999).

T.Kuroda, N.Hasegawa, F.Minami, Y.Terai, S.Kuroda, K.Takita:"Micro photoluminescence spectra of CdTe and CdMnTe self-organized quantum dots", J.Lumin. 83&84 321 (1999).

N.L.HOLMBERG, D.VASILESKA, Richard AKIS, Yuichi OCHIAI\*, and David K.FERRY : "Backscattering of electrons in a periodically corrugated quantum wire modeled with a self-consistent potential", Microelectronic Engineering ,47(1-4),151-153 (1999)

Wu N.-J., Lee H., Amemiya Y., and Yasunaga H., "Analog computation using coupled-quantum-dot spin glass," IEICE Trans. Electronics, Vol.E82-C, No.9, pp.1623-1629 (1999).

Y. Ishikawa, Shigenori Makita, Jianhua Zhang, Toshiaki Tsuchiya and M. Tabe, "Capacitance-voltage study of silicon-on-insulator structure with an ultrathin buried SiO<sub>2</sub> layer fabricated by wafer bonding," *Jpn.J.Appl.Phys.* Vol.38, pp.L789-L791 (1999).

Akazawa M., Kanaami K., Yamada T., and Amemiya Y., "Multiple-valued inverter using a single-electron-tunneling circuit," *IEICE Trans. Electronics*, Vol.E82-C, No.9, pp.1607-1614 (1999).

Yamada T. and Amemiya Y., "A multiple-valued Hopfield network device using single-electron circuits," *IEICE Trans. Electronics*, Vol.E82-C, No.9, pp.1615-1622 (1999).

K. Tsubaki, "Quantized magnetotransport through magnetic barrier systems", *Inst. Phys. Conf. Ser.* 162 (1999) 373-378

Kazuhiko Matsumoto, Yoshitaka Gotoh, Tatsuro Maeda, \*John A. Dagata, \*\* James S. Harris "Metal-Based Room Temperature Operating Single Electron Devices Using Scanning Probe Oxidation" *Jpn.J. Appl. Phys.* Vol. 38, Part 1, No. 1B, p. 477 (1999)

Kazuhiko Matsumoto, "Room Temperature Operated Single Electron Transistor made by STM/AFM Nano-Oxidation Process" *International Journal of Electronics*, Vol. 86, No. 5, p. 641 (1999)

松本和彦、後藤芳孝、前田辰郎 「AFM微細加工法による室温動作単一電子メモリ」 *日本物理学会誌* 9月号「最近の研究から」 Vol. 54, No. 9, p. 738-742、(1999)

Kazuhiko Matsumoto, Yoshitaka Gotoh, Tatsuro Maeda, \*John A. Dagata, \*\* James S. Harris, "Room temperature single electron memory made by pulse-mode atomic force microscopy nano-oxidation process on atomically flat  $\alpha$ -alumina substrate" *Appl. Phys. Lett.* Vol.1, No.2, p.239 (2000).

H. Kamada, H. Gotoh, H. Ando, T. Tamamura, J. Temmyo, "Spin-selective excitation spectroscopy of excitons and biexcitons in InGaAs quantum disks: Suppression of the spin-flip process in semiconductor zero-dimensional systems", *Phys. Rev. B.* vol. 60, pp. 5751-5796, 1999, Aug.

H. Kamada, J. Temmyo, E. Kuramochi, H. Ando, T. Tamamura, "InGaAs quantum disk: Fabrication via self-organization and spectroscopies", *Bull. Mater. Sci.* vol. 22, pp. 543-552, 1999, May.

H. Gotoh, H. Kamada, H. Ando, J. Temmyo, "Lateral electric-field effects on excitonic photoemissions in InGaAs quantum disks", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 76, pp.867-869, 2000, Feb.