

「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

(東京工業大学大学院総合理工学研究科 教授)

「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査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測定した。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用いて単一および結合量子ドットを形成する技術を開発し、単一ドットではないものの室温でのクーロンブロック現象の観測に成功するとともに、結合量子ドットに関して将来の量子ビットの操作に重要となる電磁波との相互作用を調べる予備実験を開始した。量子ドット中のエキシトンに関しては、超短パルス光を用いてエキシトンの量子状態のコヒーレントマニピュレーションに成功した。また、シリコンやガリウムナイトライドを用いて量子ドットを形成する技術の開発を行っている。

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) 量子ドット形成技術の開発

1) GaN 系量子ドット形成技術の開発

伝導帯でのバンドオフセットが大きく電子を強く閉じこめられる GaN/AlN ヘテロ量子ナノ構造を MBE 法を用いた結晶成長法により形成させ、その電子輸送特性を評価した。

まず、液的エピタキシー法により SiO₂/Si 基板上に自然形成させた GaN/AlN 量子ドットに電極を形成し、単一電子トランジスタを作製した。ドットの直径を 30nm 以下に小さくすることで、150K という高温において、明瞭なクーロンダイヤモンドが得られることがわかった。また、4K においては、同トランジスタは電子輸送特性にストカスティックな振る舞いを示した。この結果は単一の量子ドット内においても、不純物等によりポテンシャルの極小点が複数存在していることを示しており、今後、量

量子ドットの結晶性の向上が必須であることが明らかになった。

次に、結晶性向上のために量子ドットを選択成長法により直接形成する手法を検討した。EB リソグラフィにより SiO₂ 選択成長窓を AlGaIn/SiC 基板上に形成し、Ga とアンモニアを用いて GaN の MBE 選択成長を行った結果、成長温度 800°C で良好な選択性が得られ、{1-100} と {1-102} で構成される直径 10nm、高さ 600nm の GaN ナノ構造の選択成長に成功した。さらに柱状構造の高さは成長窓の直径に依存しないこともわかり、成長窓の設計のみで量子準位を規定できるメリットがあることを示した。

この選択成長法を用いて AlN(1nm)/GaN(5nm)/AlN(1nm)/GaN(50nm) の構造を有する共鳴トンネルダイオード素子を作製し、量子構造の特性を評価した。20K における測定の結果、明瞭な負性微分抵抗を観測した。バリア構造から数値計算した値と比較した結果、2.5nm の GaN 井戸の基底量子準位、さらには第二量子準位を介した共鳴トンネル現象が原因であることが分かった。計算により、両エネルギー差は 800meV と非常に大きな値を取っていることが明らかになり、GaN/AlN ヘテロ量子構造の閉じ込めの強さ、及び、量子相関素子実現の可能性を強く示した。

2) 電子ビーム支援量子ドット形成技術の開発

エピタキシャル CaF₂ 表面を集束電子ビームで局所改質し、その部分に自然形成的に金属や半導体の量子ドットを制御性よくかつ近接高密度に形成する技術の確立を目的として進めている。平成13年度には、主に以下の二つの成果が得られた。

(a) 直接改質効果の利用可能性の実証: 従来より、本方法で数 10nm 程度の高密度ドットアレイの形成は達成されていたが、ドットの凝集核にはビーム照射プロセスで生じる炭素性堆積物が介在することが高品質量子ドット実現に対する大きな問題であった。これに対し、実験系を超高真空中で一環して行う in-situ プロセスでの検討を行い、従来よりはるかに低温および低照射領域で炭素性堆積物に頼らず、純粋に CaF₂ の改質表面の性質を利用した Ga などの選択的堆積が可能であることを明らかにした。ただし、このプロセスの実現には電子線非照射部の汚染の制御が重要であることが同時に明らかになった。以上より、本技術を高品質半導体量子ドットアレイの形成に利用できる原理的可能性を明らかにし、また、その実現には表面清浄化の新たな工夫が必要であることもわかった。

(b) 自己整合的手法による量子ドットの補間形成技術: 電子ビーム位置制御法は従来の電子ビームリソグラフィより量子ドットの近接形成に適性を有しているが、最終的な位置精度は基板表面付近での二次電子の広がりによって制限を受ける。これにより、隣接する結合量子ドットの位置決めを直接行うには精度上の困難が予想される。そこで、本方法による位置決めはひとつ間をおいたドットに対して行い、そのようにして形成した二つのドットの間自己整合的に適当なバリア層を介して新たなドットを補間形成する方法を提案した。実験では、CaF₂ の表面ステップ上に自然形成させた Al の一次ドットアレイの上に Al ドットの表面を希薄酸素雰囲気中で酸化してトンネル障壁を形成した後に Ga 分子線を供給する方法で行った。その結果、Al の一次ドット列の間を埋める形で Ga の液滴ドットが自然形成できることを示し、この補間形成法の原理実証を達成した。今後、電子ビーム位置制御法と組み合わせることによって、水平方向に配列した結合量

量子ドットによる量子演算素子の実現に対して有用な方法となり得ることを示した。

3) 走査プローブを用いた量子ドットの形成

原子間力顕微鏡のカーボンナノチューブカンチレバーで6~8nmの微細加工を行い、低誘電率の石英基板を原子オーダー平坦化させたものを基板として用いて単一電子素子を作製した。その後、大気中の熱狭窄プロセスを行い、単一電子トランジスタにおいて、室温でクーロンダイヤモンド特性を得た。この素子特性をオソドックス理論を用いて計算し、実験結果と良い一致を見た。全素子容量は0.4aFであった。

4) カーボンナノチューブ量子ドット形成技術の開発

微細素子をより容易に作製する為の一つの方策は、カーボンナノチューブを用いることである。従来カーボンナノチューブは、その位置制御が非常に困難であるという問題があった。我々は鉄触媒を通常のリソグラフィ法で3μm直径の円形にパターンニングし、熱CVDプロセスを行ったところ、鉄触媒間にカーボンナノチューブを成長させることに成功した。これにより、カーボンナノチューブの位置制御に成功した。またこの位置制御成長したカーボンナノチューブの両端にソース・ドレイン電極となる金属電極を形成し、更に基板の裏側全面にゲート電極を形成して3端子素子を形成した。この素子は、室温に置いて、800mVのクーロンギャップを、95~98%の変調率のクーロン振動特性を示した。またクーロンダイヤモンド特性も室温で明瞭に観察できた。

5) シリコン量子ドット形成技術の開発

- (a) Siドットからの電子放出実験に先立ち、μmオーダーのマクロな高台とnmオーダーのナノ突起の複合構造によって生じる顕著な電界集中効果を明らかにした。マクロ・ナノ複合構造により、大幅なアノード電圧の低減が可能となる。
- (b) SiRTDの負性微分コンダクタンス(NDC)を初めて観測した。詳細な形状観察から、背景電流が下部トンネル障壁の欠落部によって引き起こされていることが判明した。
- (c) 薄いSOI構造をもとに、連結型単結晶Siドットを形成し、クーロンブロックイドによる階段型I-V特性を得た。

6) 結晶成長を利用した2重結合量子ドット形成の試み

制御NOTゲート実現(2ビット)には制御された結合量子ディスクの実現が必要であることから、今回は、ダブルスタック構造での可能性をトライした。シングル量子ディスクを形成後、薄いバリア厚を変えることによりミキシングの状態をかえ量子ディスクの内部構造に変調を試みている。新たに導入し立ち上げを行ったマイクロ顕微システムで室温評価を行った後、さらに低温マイクロPL/PLE並びにSNOMによる圧力効果の実験をとうし、ミクロな結合構造形成の可能性を調べている。現在のところ形成されている可能性はあるが、制御性について問題があり、十分な結論は得られていない状況である。

(2) 量子ドットを用いた量子相関機能探索

1) カーボンナノチューブ2重結合量子ドットの電磁波応答

結合量子ドットを量子ビットとして利用する場合、量子ビットを操作する基本機能として電磁波に

よる2準位系のコヒーレントマニピュレーションが必要となる。量子ドットの現実的なエネルギースケールから電磁波の周波数としてはマイクロ波領域にはいるため、マイクロ波と量子ドットデバイスの相互作用を調べる必要がある。そこで、量子ドットとマイクロ波の相互作用において、量子的な応答と古典的な応答の観点から一般的な考察を行い、量子的な応答を得るための条件を検討した。

実験ではカーボンナノチューブ2重結合量子ドットのマイクロ波応答を極低温(100mK以下)において調べた。マイクロ波照射により、クーロン振動や電流電圧特性が大きな変調を受けることが観測されたが、観測された効果はマイクロ波の振動電界がソースドレイン電圧を変調するという古典的なモデルで説明できることがわかった。古典的に応答した理由は、トンネル障壁が十分に強くなくゼロ次元離散準位が周波数のスケール以上に広がっているためと思われる。現状では、ナノチューブ上に金属電極をのせることによりトンネル障壁を形成しているが、この方法は決して制御された方法とはいえず、もっと積極的なトンネル障壁形成技術の開発を行っていく。

2) 量子ドット中のエキシトンのコヒーレント制御

これまでの量子ディスクの光学的評価から、量子ディスク中の励起子は、原子と同様な離散化したエネルギー準位と長い位相緩和時間によって、光との相互作用において原子と同様に振舞うことが期待されるため、量子ビットの候補として励起子(励起子分子)の利用を検討している。0次元系励起子重ね合わせ状態のコヒーレント制御:位相回転ゲート・量子ドット励起子を量子操作を実現し得る要素として捉え、その実現に向けた第一歩として光による population の制御、並びに重ね合わせ状態の生成を狙った。今回、この結果に基づき光パルス対による任意の励起子分布、すなわち重ね合わせ状態の発生し、さらにパルス対の相対的位相の制御を加えることで、位相に応じた励起子分布の加算・減算に成功した。これは固体量子系ではクーパーペアボックスに続く1量子ビットの位相回転ゲートの実証である。

(3) 量子相関機能の基礎とデバイス設計

1) コヒーレントダイナミクスの理論的検討

(a) 二重ポテンシャルトラップ中のレーザ冷却原子(ボーズ・アインシュタイン凝縮原子)のトンネル・ダイナミクスを原子間相互作用(非線形効果)を含む非線形シュレディンガー方程式を用いて解析した結果、非線形効果によりトンネル結合係数を実行的に大きくできることが分かった。この効果は、量子デバイスの動作速度向上の手段として利用できる可能性がある。

(b) 直線および円形光格子中に置かれたレーザ冷却原子のダイナミクスをディスクリート非線形シュレディンガー方程式により解析した。異なる初期原子分布および初期位相にたいして原子の局在、非局在現象の他、ソリトンの発生およびシンメトリーブレイキングなど多様な現象が見出された。

2) 量子ドットのコヒーレンスと協同現象の基礎

(a) 半導体量子ドット系ではフォノン・ボトルネック効果により、励起子分極の位相は長時間壊されない。フォトンエコー法を使って時間領域から直接このことを確かめた。本研究では GaAs(11nm) / AlGaAs 量子井戸の界面揺動によって作られたアイランド構造を GaAs 量子ドットとして使った。

この試料のアイランド構造が量子ドットとして機能していることは μ PL の測定で離散スペクトルが観測できることにより確かめた。位相緩和時間は ~ 2 ns と以上に長いことが判明した。また、励起強度の増加に伴いエコー強度は振動的に大きくなったり、小さくなったりすることも判明した。この振る舞いはレーザー光との相互作用により量子系の2つの準位間を励起が行ったり来たりする現象であるラビ振動を考えると理解できる。本研究の結果は結晶の基底状態と励起子状態の2つの準位間のラビ振動である励起子のラビ振動を観測していると考えられる。通常、位相緩和時間が非常に短いためと強励起においては k 空間の Γ 点以外の k から電子遷移が始まるため、固体中でラビ振動を明瞭に観測するのは難しいが、励起子の位相緩和時間が ~ 2 ns と極端に長い我々の量子ドット中では比較的弱い励起強度でもラビ振動が観測できている。ラビ振動は量子コンピューティングの基本操作である q ビットの位相シフトを行うための必須の現象であるので、この結果は量子ドットが量子コンピューティングの論理回路構成材料として有望であることを示すデータとなっている。

(b) 電子線リソグラフィ法により作製した表面ショットキー電極により、GaAs 単一ヘテロ接合の2次元電子層に横方向周期的ポテンシャルを印加し、電子状態密度を2次元的なものから0次元的なものへと連続的に制御可能であることを発光分光により示した。前年度までの正孔の自由に動く系についての研究から、この系では正孔の動的振るまいが発光スペクトルに大きな影響を与え、発光スペクトルから電子状態の情報を得るためには複雑な解析が必要であった。本年度は Be 原子をデルタドープした GaAs 単一ヘテロ接合を用い、正孔の分布をデルタ関数的なものとするにより、発光スペクトルと電子状態との対応付けを直接的にした。0磁場および強磁場下における測定から0次元的状态が実現されていることを示した。測定結果は局所密度汎関数法による試料形状を正確に取り入れた計算結果により再現されることが示された。

3) 電子波干渉効果の検討

強磁性体 Permalloy を A-B リング中央に置くことにより A-B 効果の感度を上げる研究を進めた。今回コイル付き A-B リングを作製し、コイル電流が A-B 振動を誘起するかを調べたところ、コイル電流により A-B リング電子波の位相差が生じることを観測した。また Permalloy をリングに置いたコイル付き A-B リングにおいて、Permalloy による磁束増幅率をおよそ1万倍にする素子構造を考案し、量子電子回路の NOT 回路として応用できる可能性があることを示した。

4) 量子ドット中の電子波の干渉

GaAs/AlGaAs ヘテロ界面などの高移動度2次元系の低温磁場電気伝導は、表面ゲートを用いてキャビティー構造を作ると、量子的な電子波であるとともに、試料中を弾道的に伝導するため、古典的なカオティックキャビティーのモデルで類推され、カオスやフラクタル的な伝導を調べられるといった特徴がある。最近これらの現象を観測した結果が報告されている。本研究では、準ナノ構造での結合量子ドットにおける伝導現象探求を目的として、カオスやフラクタル的な伝導現象解明のため、開放型結合量子ドットを用いて研究を行った。我々が用いた量子ドットは、大きさがおよそ $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ の結合量子ドットであり、中間のポイントコンタクト (QPC) を制御して、結合の大きさを制御できる構造を持つ。そして、その低温低磁場での磁気抵抗に注目した。とくに、中間ゲートの一

定ゲート電圧での磁場抵抗より、ゲート電圧に依存したフラクタル的な振る舞いを詳細に調べ、量子ドットにおけるカオティック伝導機構の解明をおこなった。フラクタル的な磁気伝導は自己相似とボックスカウンティング法によって調べたが、両者での共通点や差異について考察した結果、両者の完全な一致はみられなかった。このことから、結合量子ドット内のポテンシャル形状が、これら特異な伝導の起源に大きく影響していることが考えられる。

3. 研究実施体制

構造・機能制御グループ

グループ長: 青柳克信 (理化学研究所、招聘主任研究員)

研究項目:

- ① 単一・2重結合量子ドットの電荷・スピンを用いた量子相関機能
- ② シリコン量子ドット形成技術の開発
- ③ カーボンナノチューブを用いた量子ドット形成技術の開発
- ④ 量子ドットにおけるコヒーレンス・協同現象の評価と量子ダイナミクスの理論的検討

構造制御グループ

グループ長: 筒井一生 (東京工業大学総合理工学研究科、助教授)

研究項目:

- ① ガリウムナイトライド系量子ドット形成技術の開発
- ② 電子ビーム支援量子ドット形成技術の開発

多重化構造作製グループ

グループ長: 天明二郎 (静岡大学電子工学研究所、教授)

研究項目:

- ① 結晶成長を用いた単一・結合量子ドット形成技術の開発
- ② 量子ドット中エキシトンのコヒーレント量子相関機能

超微細構造作製グループ

グループ長: 松本和彦 (産業技術総合研究所、総括研究員)

研究項目:

- ① 走査プローブを用いた超微細量子ドット構造の形成
- ② 成長制御カーボンナノチューブ量子ドット形成技術の開発

4. 研究成果の発表

(1) 論文発表

- Shailos, J. P. Bird, C. Prasad, M. Elhassan, L. Shifren, D. K. Ferry, L. H. Lin, N. Aoki, Y. Ochiai, K. Ishibashi and Y. Aoyagi, “Confinement-induced enhancement of electron-electron interactions in open quantum-dot arrays”, Phys. Rev. B63, 241302(R) (2001)
- M. Elhassan, A. Shailos, C. Prasad, J. P. Bird, D. K. Ferry, L. H. Lin, N. Aoki, Y. Ochiai, K.

- Ishibashi and Y. Aoyagi, “Magneto-Conductance Oscillations in Open Dot Arrays”, Phys. Stat. Sol. (b) 224, No. 3, 711-714 (2001)
- Prasad, D. K. Ferry, A. Shailos, M. Elhassan, J. P. Bird, L. H. Lin, N. Aoki, Y. Ochiai, K. Ishibashi and Y. Aoyagi: “Localization, de-localization, phase breaking and energy relaxation in an array of quantum dots”, Phys. Stat. Sol. (b) 224, No. 3, 665-668 (2001)
 - M. Elhassan, J. P. Bird, A. Shailos, C. Prasad, R. Akis, D. K. Ferry, Y. Takagaki, L. H. Lin, N. Aoki, Y. Ochiai, K. Ishibashi and Y. Aoyagi: “Coupling-driven transition from multiple to single-dot interference in open quantum-dot arrays”, Phys. Rev. B64, 085325-1-085325-7 (2001)
 - K. Ishibashi, M. Suzuki, T. Ida and Y. Aoyagi: “Formation of coupled quantum dots in single-wall carbon nanotubes”, Appl. Phys. Lett. 79 (12) 1864-1866 (2001)
 - A. Shailos, C. Prasad, M. Elhassan, R. Akis, D. K. Ferry, J. P. Bird, N. Aoki, L.-H. Lin, Y. Ochiai, K. Ishibashi, and Y. Aoyagi: “Signatures of the discrete level spectrum in the temperature-dependent transport through open quantum-dot arrays”, Phys. Rev. B64, 193302-1-193302-4 (2001)
 - M. Suzuki, K. Ishibashi, T. Ida, D. Tsuya, K. Toratani, and Y. Aoyagi: “Fabrication of single and coupled quantum dots in single-wall carbon nanotubes”, J. Vac. Sci. Technol. B19 (6), 2770-2774 (2001)
 - 石橋幸治、鈴木正樹、井田徹哉、青柳克信、“カーボンナノチューブを用いた単一および結合量子ドット”信学技報 TECHNICAL REPORT OF IEICE. ED2000-278 (2001-03)
 - 石橋幸治、青柳克信、“量子ドットを用いた量子状態制御”、超精密 VOL.111, 25-31 (2001)
 - 石橋幸治、“量子ドットと単電子デバイス”、Computer Today, No.109 (2002) 30-37 (サイエンス社)
 - Inokuchi T., Yamada T., Asai T., and Amemiya Y., “Analog computation using quantum-flux parametron devices,” Physica C, Vol. 357, pp. 1618-1621 (2001).
 - Yamada T., Kinoshita Y., Kasai S., Hasegawa H., and Amemiya Y., “Quantum-dot logic circuits based on the Binary Decision Diagram,” Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 40, No. 7, pp. 4485-4488 (2001).
 - Y. Ishikawa, T. Ishihara, M. Iwasaki and M. Tabe, “Negative differential conductance due to resonant tunneling through SiO₂/single-crystalline-Si double barrier structure,” Electronics Letters, vol.37, pp. 1200-1201 (2001).
 - K. Sawada, M. Tabe, M. Iwatsuki, Y. Ishikawa and M. Ishida, “Field Electron Emission from Si Nanoprotrusions,” Jpn. J. Appl. Phys., Vol.40 No.8A pp.L832-L834 (2001).
 - Ratno Nuryadi, Y. Ishikawa, Y. Ono and M. Tabe, “Thermal agglomeration of single-crystalline Si Layer on buried SiO₂ in ultrahigh vacuum,” J. Vac. Sci. Technol. B vol. 20, pp. 167-172 (2002).

- Kotaro Tsubaki, “Aharonov–Bohm Oscillation in Rings with Permalloy”, FEMD News Letters, Vol. 3 No. 2 (2001).
- T. Kuroda, A. Tatsugawa, F. Minami, S. Seto, S. Kuroda, K. Takita: “Time-resolved luminescence of high-density magnetic polarons in CdMnTe”, Physica E 10 (2001) 344–347.
- T. Kuroda, Y. Hashimoto, F. Minami: “Photo-induced Faraday rotation in GaAs/AlGaAs multiple quantum wells”, J. Lumin. 94–95 (2001) 551–554.
- Y. Mitsumori, R. Kawahara, T. Kuroda, F. Minami: “Ultrafast phase distortion of the transmitted pulse in GaAs quantum wells”, J. Lumin. 94–95 (2001) 645–648.
- Y. Mitsumori, F. Minami: “Transient coherent emission from anisotropic semiconductors studied with phase-locked pulse pairs”, J. Lumin. 94–95 (2001) 663–666.
- Y. Mitsumori, F. Minami: “Symmetry of 2P exciton wave function in strained ZnSe”, Phys. Stat. Sol.(b) **223** (2001) 117–121.
- H. Tobioka, Y. Mitsumori, F. Minami, A. Hasegawa: “Time-resolved three-pulse photon echoes in GaSe”, J. Lumin. 94–95 (2001) 601–604.
- T. Kuroda, F. Minami, S. Seto: “Strong excitation effect of excitonic magnetic polarons in CdMnTe”, Phys. Stat. Sol. (b) 229 (2002) 757–760.
- S. Seto, N. Mochida, K. Inabe, K. Suzuki, T. Kuroda, F. Minami: “Excitonic emissions of ZnTe/GaAs films grown by hot-wall epitaxy”, Phys. Stat. Sol. (b) 229 (2002) 587–590.
- Shintaro Nomura, Takeshi Nakanishi, and Yoshinobu Aoyagi, “Fermi-edge singularities in photoluminescence spectra of n-type modulation-doped quantum well with lateral periodic potential”, Phys. Rev. B, 63(15), 165330–1–6 (April, 2001).
- N. Tsukada, “Enhancement of quantum tunneling oscillations due to nonlinear interactions”, Phys. Rev. A, 64, 033601–1–5 (2001)
- Koji Kawasaki, Daisuke Yamazaki, Atsuhiko Kinoshita, Hideki Hirayama, Kazuo Tsutsui, Yoshinobu Aoyagi, “GaN quantum-dot formation by self-assembling droplet epitaxy and application to single-electron transistors”, Appl. Phys. Lett. 79 (2001) 2243.
- H. Kamada, H. Gotoh, J. Temmyo, T. Takagahara, and H. Ando: Exciton Rabi Oscillation in Single Quantum Dot, Phys. Rev. Lett. 87, 246401–1 (2001).
- J. Temmyo, H. Kamada, E. Kuramochi, H. Ando, and T. Tamamura: Self-organized quantum disks for a two-state system, Materials Science and Engineering B88, 153 (2001).
- J. Temmyo, H. Kamada, E. Kuramochi, H. Ando, and T. Tamamura: Semiconductor nanostructures via self-organization for a two-state system, J. Korean Phys. Soc. 39, S368(2001).
- H. Kamada, T. Takagahara, H. Ando, J. Temmyo, and T. Tamamura: Optically induced energy splitting of exciton states in a single self-organized InGaAs quantum dot, Proceedings of 25th International Conference of Physics of Semiconductors, 1189 (2001).

- H. Kamada, H. Gotoh, J. Temmyo, T. Takagahara, and H. Ando “Exciton Rabi oscillation in single isolated quantum dots”, Phys. Stat. Sol. (a) (2001).
 - Tomomi Yoshimoto, Tatsuo Iwata, Ryuutarou Minesawa, Kazuhiko Matsumoto, “Emission Properties from Carbon Nanotube Field Emitter Arrays (FEAs) Grown on Si Emitters”, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 40, Part 2, No.9A/B, p. 983 (2001).
 - K. Matsumoto, “Application of Single Wall Carbon Nanotube AFM Probe” (Invited), Proceeding of The 3rd International Conference on Scanning Probe Microscopy, Sensors and Nanostructures, 123 (2001).
 - K. Matsumoto, “Application of Single Wall Carbon Nanotube to Nano Electron Devices”, Proceeding of the First International Workshop on Quantum Nonplanar Nanostructure & Nanoelectronics ‘01, p.195 (2001).
 - Yoshitaka Gotoh, Kazuhiko Matsumoto, Masami Ishii, Tatsuro Maeda, “Room Temperature Coulomb Diamond Characteristics of Single Electron Transistor”, Extended Abstract of 2001 International Conference on Solid State Devices and Materials SSDM, p. 554 (2001).
 - K. Matsumoto, “Application of Carbon Nanotube to Nano-Electron Devices” (Invited), Proceeding of 7th International Symposium on Advanced Physical Fields, “Fabrication and Characterization of Nano-Structure Materials”, p. 20 (2001).
 - Kazuhiko Matsumoto, Yoshitaka Gotoh , “Nano-processing using carbon nano tube probes and its device applications” (Invited), Symposium Proceedings of 2001 International Semiconductor Device Research Symposium(ISDRS), pp. 354 - 357(2001), Georgetown, Washington,D.C, USA
 - 木下誠三、松本和彦、倉知孝介、後藤芳孝、根本俊雄、「位置制御成長カーボンナノチューブによる室温クーロンブロッケイド特性」、電子情報通信学会電子デバイス研究会 信学技報 Vol.101, No. 618, pp47-52., Technical Report of IEICE, ED2001-239, SDM2001-242 (2001-01)
 - 松本和彦、「カーボンナノチューブティップとデバイス応用」、応用電子物性分科会誌 第8巻 第1号 2002、p38-43.
 - 後藤芳孝、松本和彦、安武正敏、村松宏、金 種珉、「単層カーボンナノチューブカンチレバー：作製と応用」、表面科学 Vol. 23, No. 2, pp.44-50 (2002).
- (2) 特許出願
国内1件、外国なし