

「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 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単一および結合量子ドットとして動作させるデバイス技術の開発を行った。量子状態を読み出すインターフェース技術の重要性を認識し、電子波干渉を例にとって具体的な技術の検討を行ない、初期的な実験を開始した。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

- (i) 量子計算の出力検出系として、「量子ドットSi FE(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提案しており、その実験的検証を進めている。12年度は、(a)11年度に引き続き、nmの大きさをもつSi突起からの電子放出が、その形状や酸化膜被覆構造によってどのように変化するかを明らかにするとともに、(b)ドットからの電子放出の予備実験として、 $\text{SiO}_2/\text{Si}/\text{SiO}_2$ 量子井戸構造を作製し、共鳴トンネル効果を観測することを目的と

した。その結果、(i)高密度Siナノ突起の平均高さを0～数nmの範囲で変化させると、それに応じて電界強度が増大し、エミッション電流が増加すること、およびSiナノ突起をSiO<sub>2</sub>で被覆した構造では、エミッション電流はトンネル確率の理論予測のとおり、4～5nm厚さの時に最大値をとることが分かった。また、SiO<sub>2</sub>/Si/SiO<sub>2</sub>の二次元量子井戸構造をSi量子ドットに準じる方法で形成し、Si/SiO<sub>2</sub>系で初めて共鳴トンネルによる負性微分抵抗を観測した。

- (ii) 強磁性体・半導体ハイブリッド構造である1個の磁気バリアを持つ二次元電子ガスの電気的性質の解明を引き続き進めた。また量子計算機部品の候補として強磁性体A-B Ringの研究を進めた。その結果、強磁性体・半導体ハイブリッド構造の二次元電子ガスにおいて、ホール抵抗ヒステリシスの磁気バリア・ホール端子間距離依存性を観測し、100ミクロン以上にわたりホール抵抗ヒステリシスが減少しないことが分かった。また強磁性体A-B Ringにおいて、通常のA-B Ringに比べ振動周期が約1/4に減少することを明らかにした。この強磁性体A-B Ringに比べて、振動周期をさらに約二千五百分の一に減少できる可能性を持つ局所磁場印加型強磁性体A-B Ringを提案した。

## (2) 機能探索

### 1) カーボンナノチューブ量子ドットの形成

理研グループでは、結合量子ドットなどの固体ナノデバイスで量子ビットとなりうるナノデバイスの開発および実験によるその機能実証を目指している。これまで、結合量子ドットをゲート空乏化法によりGaAs/AlGaAs二次元電子ガス内に作製してきたが、電子ビームリソグラフィーによるドットサイズの制限(通常サブミクロン)により、必要な物理現象であるコヒーレントな2準位系の形成が困難であることがわかっている。引き続きこの系では、電子系を含めた極低温を実現することにより制御された電磁波やパルスを印加する実験を進めている。一方、量子ドットを形成する材料として、カーボンナノチューブを利用することを進めている。単層ナノチューブは直径が数ナノメートルであるため、極微小な量子ドット材料として利用できる可能性がある。これまで、われわれはそれを用いて単一量子ドットを形成できることを示してきた。その際トンネル障壁は、ナノチューブ状に金属電極を蒸着することで形成できることが経験的にわかってきた。そのことを拡張して、量子ドットを形成した後に、電子ビーム露光法における位置制御技術を利用して、電極間のナノチューブ上に微細なSiO<sub>2</sub>層を堆積することにより、単一量子ドットをトンネル効果で結合した2重結合ドットとするプロセスを開発しその電気的特性を調べた。その結果、4.2Kにおけるクーロンブロック特性において、2重結合ドットの形成を示唆する特性を得た。また、ナノチューブデバイス作製を再現性よくするた

めに、ナノチューブを位置制御して配置することを試み一定の成果を得た。その方法を用いて、0.1ミクロンギャップの単一量子ドットを作製し、帯電エネルギーとして約200meV(温度に換算して約2000K)を得た。残念ながらトンネル障壁に温度依存性があるために、室温でのクーロンブロックの観測はできなかったが、ナノチューブが室温で動作する量子ドット材料として有望であることが示せた。

## 2) 量子ドット光応答

### 2) - 1 . 量子ドットアレーの偏光依存発光スペクトル

発光分光測定の特徴の一つは、電子系のスピン状態を偏光依存性から容易にかつ直接的に測定可能なことである。変調ドープ量子井戸表面に電子線リソグラフィにより作製した周期150nmの格子状ゲート電極構造により、量子ドットアレーを形成した。裏面電極と表面電極間に負バイアスを印加することにより、電子系の閉じ込めの強さを制御した。発光スペクトルのバイアス依存性から、負バイアス電圧の絶対値に増加に伴い、(1)準位間隔が広くなり、(2)全電子数が減少し、(3)その結果、擬フェルミ端とバンド端のエネルギー差がほぼ一定に保たれることがわかった。最低ランダウ状態にのみ電子が占有する  $1 < \nu < 2$  において、負バイアスの印加に伴い、発光スペクトルの偏光度の増大が観測された。これは、負バイアスの印加により、量子ドット内のスピン偏極度を制御することが可能であることを示している。

### 2) - 2 . 横方向量子ドットアレーの時間分解発光スペクトル

表面ゲート構造を変調ドープ量子井戸構造に作製して形成した量子ドットからの発光スペクトルには、電子系と正孔の双方が深く関与している。バイアス電圧により電子系がどのように変調されるかは、従来からの研究により知られているが、正孔状態についてはその例は少ない。正孔がそのポテンシャルの最小値にのみ存在したとすると、電子系とは空間的に隔てられ発光は起こらない。発光に関与する正孔は電子系と同じ位置、すなわち、ポテンシャル曲線上の準安定点に存在することになる。従って、正孔のダイナミクスに興味もたれる。本研究では、時間分解発光スペクトルを測定し、負バイアスの印加に従い、発光寿命が短くなり、磁場下で複数のランダウ準位が存在する場合、その指数が大きい方が発光寿命が短いことがわかった。観測される発光は直接遷移であり、高エネルギー(高波数)の正孔のpopulationの減少速度が速いことが示された。

## 3) 量子相関機能材料のコヒーレンスの評価

半導体量子ドット中の光学遷移をレーザー光でコヒーレントに制御することを目的として各種半導体と光の相互作用を検討している。方法としては、フェム

ト秒レーザーを用いたコヒーレント過渡分光法を用いている。平成12年度は半導体中の励起子スピンのダイナミクスをスピンビート法という新しい分光法で調べた。その結果、半導体中の励起子のスピン緩和は励起強度に強く依存することが判明した。また、半導体表面からの反射光やZnSe中の2P励起子のコヒーレント制御を試み、フェムト秒光パルス対によりこれらのコヒーレント制御が可能であることを明らかにした。

#### 4) 量子相関機能の基礎理論

半導体量子構造をはじめ、レーザ冷却原子及びボーズ・アインシュタイン凝縮系など種々の結合量子系における量子(原子、電子)波のコヒーレント・ダイナミクスを解析し、そのダイナミクスをレーザ光、電場、磁場などの外場により制御する方法について研究する。また、これらの解析結果を基に量子情報処理技術に必要な新しい光量子デバイス(量子情報処理ハードウェア)を提案することを目的とする。手法としては、微細量子構造における電子あるいは原子のトンネル現象を非線形シュレディンガー方程式(グロスピタエフスキー方程式)の数値計算により解析する。計算ソフトとして@MATHEMATICAを用いる。それに関して以下のような結論を得た。

- ① トンネルあるいはジョセフソン結合する2つの波動関数の位相をレーザで制御し、その結合ダイナミクスを多様に制御できることを解析的および数値計算で示した。一例として非共鳴トンネル準位間のトンネルをパルス列で共鳴状態にできることを示した。これは、光導波路間の位相整合を空間的周期構造で実現する場合と類似の現象で、時間的周期パルス列がトンネル準位間の非共鳴を補償してくれることによる時間的ことを指摘した。
- ② 2つのボーズ・アインシュタイン凝縮系を励起準位を介してレーザラマン結合する誘導ラマン断熱追従(STIRAP)を解析し、原子間相互作用が大きい場合には全原子はパルス照射後いずれか一方の凝縮系に完全に捕獲され、決して2つの凝縮系に分配されて捕獲されることがないことを見出した。また、この現象を用いた2値論理量子ゲートの可能性も指摘した。

#### 5) 量子ドット構造の電子波の伝搬

GaAs/AlGaAsヘテロ界面などの高移動度2次元系の低温強磁場電気伝導は、電子が試料の端部のみを流れるエッジチャンネルのモデルでよく説明され、散逸が無いために縦方向の抵抗がゼロとなるといった特徴がある。最近これらの現象を利用した強磁場中での単一光子検出器や単一電子トランジスターなどへの応用も行われている。本研究では、超高速ナノ構造での伝導現象探求を目的として、エッジチャンネルを量子ドット中に閉じ込めた際の伝導現象解明のため、開放型量子ドットアレイを用いて研究を行った。



我々が用いたドットアレイは、大きさが  $1 \times 0.6 \mu\text{m}^2$  のドットが、間隔  $0.3 \mu\text{m}$  のポイントコンタクト (QPC) を通して、直列に 3 個接続された構造を持つ。その低温高磁場での磁気抵抗を測定した。とくに、一定磁場でのゲート電圧依存性より、ゲート電圧に依存したエッジチャネルの選択を明らかにして、ドットアレイにおける高磁場伝導機構の解明をおこなった。

高磁場側では整数量子ホール効果のプラト - の位置の低磁場側での立ち上がりに細かな振動ピークが現れる。このピークの特徴は、ゲート電圧の増加に対してその位置が連続的に低磁場側にとシフトし、またその高さは温度ならびに測定電流値に依存することがわかった。これらのピーク起因としては、ドットアレイ中のQPCにおける閉じ込め効果による、微小な電子溜まり (パドル) を介したエッジチャネル間の共鳴散乱が考えられる。

#### 6) 量子ドット中の励起子

量子コンピュータの基本エレメントとして、自己組織化を用いた量子ディスクの適用可能性を検討している。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。今回、励起子の励起状態を共鳴励起するとき、励起密度の増大に伴い、エネルギー軸で励起子発光が単一線から 2 重線に変化する光誘起分裂を見出した。これは励起子のある励起状態と基底状態間の population 振動 (ラビ振動) に対応すると考えられる。そこで時間軸においても、顕微分光において孤立した単一ディスクを、干渉計を用いて位相ロックした光パルス対で共鳴励起し、励起状態の分極の量子干渉によるルミネッセンス強度がパルス間隔により干渉フリンジの減衰と振動として観測され、量子ディスクでのラビ振動が初めて観測された。すなわち、量子力学的位相シフトゲートの可能性があることがわかった。

### (3) 構造作製技術の開発

#### 1) GaN系量子ドットの開発

電子・イオン・光ビームと固体の相互作用を利用して、サブナノメートル級の結合型量子ドット作製技術の開発と、得られた量子ドットの電子輸送特性の評価を研究目的とした。

集束電子ビームを用い形成核の位置を制御することで、自然形成法により形成される極微細Ga液滴の位置制御を行い、窒化させることにより位置制御されたGaNナノ構造を形成させる電子ビーム位置制御液滴エピタキシー法を用いて、量子ドットの位置制御を試みた。

窒化の結晶化工程の最適化を図り、AlGaIn基板上に直径約20nmのGaIn量子ドットを20nm間隔で2つ並べて配置させた結合量子ドット構造を形成させることに成功した。またSiO<sub>2</sub>基板上にランダムに形成させた極微細GaIn量子ドットを再成長により拡大することで結合量子ドットを形成させる手法を新たに提案し、実際に結合量子ドットを形成させた。この結合量子ドットにAlNのトンネル薄膜を形成させ、量子閉じこめ構造を形成し、ソース・ドレインおよびゲート電極を有する単一電子トランジスタを形成し、GaIn量子ドットの電子輸送特性を評価した。温度3 KでGaInドット中の電子の輸送特性を評価した結果、明瞭なクーロンブロック現象を観測し、単一電子動作していることを示した。さらに、共鳴トンネルによる負性抵抗効果を観測した。この結果は本研究において結合量子ドットが得られたことを示している。

本研究で開発した量子ドットの位置制御法および結合量子ドットの結晶成長手法は、今後コヒーレント状態を制御したり、量子相関素子形成への実現に大きく貢献するものと考えられる。

## 2) 結晶成長法を利用した結合量子ドット形成

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。以上述べたように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) 走査プローブを用いた超微細量子ドット構造の形成

室温動作する量子相関素子の作製には10nm以下の素子寸法が必要である。この目的のサイズを達成するために、以下の3つの手法を採り入れ、クーロンダイヤモンドの室温測定に初めて成功した。第1点は、昨年に引き続き、単層カーボンナノチューブを、従来の原子間力顕微鏡のシリコンカンチレバー先端に熱CVDで成長する手法を用い、AFM陽極酸化方を用いて微細加工を行っている。第2点は、従来、素子基盤に原子オーダーで平坦なアルミナを用いてきた。これは平坦度の上で申し分ないものであったが、その誘電率が~8以上と非常に大きな値であるという欠点があった。基盤の誘電率が高いと、単一電子素子の自己容量が誘電率に比例して大きくなるという問題がある。誘電率が低く、かつ原子オーダー平坦になる基盤を探索し、結晶石英(水晶)基盤を用い

ることを提案した。結晶石英は誘電率が3.9とアルミナの半分以下である。かつ我々は、弗酸において結晶石英を緩慢にエッチングし、かつ熱処理を施すことで、表面粗さが、0.1nm以下、テラス幅、300~400nm、ステップ高さ0.38nmの原子オーダー平坦基盤を得ることに成功した。第3点は、以上の基盤を用い、カーボンナノチューブカンチレバーで作製した試料のサイズを更に狭窄するために、室温において熱処理を施した。これにより試料の全容量を0.5aF前後にすること成功した。この試料を室温において測定し、クーロンダイヤモンド特性を得ることに成功した。ゲート電圧は $V_G = -3V \sim 3V$ 、ドレイン電圧は $V_D = -0.45V \sim 0.45V$ の範囲で、3つのクーロンダイヤモンドが観察された。クーロンダイヤモンド特性から、トンネル容量は、 $C_1 = 0.16aF$ ,  $C_2 = 0.31aF$ , ゲート容量は $C_G = 0.064aF$ で、試料のクーロンエネルギーは240meVと、室温より一桁近く高い値となった。これにより室温において、クーロンダイヤモンドの測定が可能になった。

### 3. 主な研究成果の発表 (論文発表)

K. Ishibashi, M. Suzuki, T. Ida, K. Tsukagoshi and Y. Aoyagi : "Quantum dots in carbon nanotubes" (invited paper) Jpn. J. Appl. Phys. 39 (2000) 7053-7057

J. P. Bird, A. Shailos, M. Elhassan, C. Prasad, D. K. Ferry, L. H. Lin, N. Aoki, K. Ishibashi and Y. Aoyagi

"Signature of coherent electron transport in open quantum dot arrays" (invited paper) Nanotechnology 11 (2000) 365-369

C. Prasad, D. K. Ferry, A. Shailos, M. Elhassan, J. P. Bird, L. H. Lin, N. Aoki, Y. Ochiai, K. Ishibashi and Y. Aoyagi : "Phase breaking and energy relaxation in open quantum-dot arrays" Phys. Rev. B 62 (2000) 15356-15358

M. Suzuki, K. Ishibashi, T. Ida and Y. Aoyagi : "Quantum dot formation in single-wall carbon nanotubes" Jpn. J. Appl. Phys. 40 (2001) 1915-1917

S. Nomura, T. Nakanishi, and Y. 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 (2001)

Y. Yamauchi, F. Minami ; J. Lumin. " Spin beats of anisotropic excitons in GaSe" , T. Kuroda, 87-89 (2000) 213-215

S. Kuroda, Y. Terai, K. Takita, T. Takamasu, G. Kido, N. Hasegawa, T. Kuroda, F. Minami ; "Self-organized quantum dots of diluted magnetic semiconductors  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  ", J. Crystal Growth 214-215 (2000) 140-149.

Y. Mitsumori, T. Kuroda, F. Minami ; "Manipulation of 2P excitonic wave function in ZnSe", J. Lumin. 87-89 (2000) 914-916.

- R. Shinohara, H. Akinaga, T. Kuroda, F. Minami : "Lifetime and Spin Relaxation Time Measurements of Micro-Fabricated GaAs Tips", J. J. Appl. Phys. 39( 2000 ) 7093-7096.
- Y. Mitsumori, F. Minami : "Symmetry of 2P exciton wave function in strained ZnSe", Phys. Stat. Sol.(b)223( 2001 )117-121
- N. Tsukada, "Complete population transfer between two Bose-Einstein condensates induced by nonlinear laser coupling", Phys. Rev. A , 61, 063602-1- 5 ( 2000 )
- Yamada T., Akazawa M., Asai T., and Amemiya Y., "Boltzmann-machine neural network devices using single-electron circuits," Nanotechnology, Vol.12, No. 1, pp. 60-67( 2001 )
- Tokuda E., Asahi N., Yamada T., and Amemiya Y., "Analog computation using single-electron circuits," Analog Integrated Circuits and Signal Processing, Vol. 24, No. 1, pp. 41-49( 2000 )
- Akazawa M., Tokuda E., Asahi N., and Amemiya Y., "Quantum Hopfield network using single-electron circuits --- A novel Hopfield network free from the local-minimum difficulty," Analog Integrated Circuit and Signal Processing, Vol. 24, No. 1, pp. 51-57( 2000 )
- Yamada T. and Amemiya Y., "Multiple-valued logic devices using single-electron circuits," Superlattices and Microstructures, Vol. 27, No.5/6, pp. 607-611 ( 2000 )
- Y. Ishikawa, M. Kosugi, M. Kumezawa, T. Tsuchiya, M. Tabe, "Capacitance-voltage study of single-crystalline Si dots on ultrathin buried SiO<sub>2</sub> formed by nanometer-scale local oxidation," Thin Solid Films 369, pp. 69-72 ( 2000 )
- R. Nuryadi, Y. Ishikawa and M. Tabe, "Formation and ordering of self-assembled Si islands by ultrahigh vacuum annealing of ultrathin bonded silicon-on-insulator structure," Appl. Surf. Sci. vol. 159-160, pp. 121-126( 2000 )
- K. Sawada, M. Tabe, M. Iwatsuki, Y. Ishikawa and M. Ishida: Field Electron, "Emission from Si Nano Pillars, Proceedings of the 7th International Display, Workshops( IDW '00 ) pp. 983 - 986, Kobe( 2000 )
- Y. Ishikawa, M. Kosugi, T. Tsuchiya, and M. Tabe, "Concentration of Electric Field near Si Dot/Thermally-Grown SiO<sub>2</sub> Interface," Jpn. J. Appl. Phys. 40, pp. 1866-1869( 2001 )
- Y. Ishikawa, M. Kosugi and M. Tabe, "Effect of nanometer-scale corrugation on



densities of gap states and fixed charges at the thermally-grown SiO<sub>2</sub>/Si Interface," J. Appl. Phys. 89, No.2, pp.1256-1261( 2001 )

M. Tabe, M. Kumezawa, Y. Ishikawa and T. Mizuno, "Quantum confinement effect in Si quantum well and dot structures fabricated from ultrathin silicon-on-Insulator wafers," Appl. Surf. Sci. vol.175/176, pp.614-619( 2001 )

M. Tabe, M. Kumezawa and Y. Ishikawa, "Quantum-Confinement Effect in Ultrathin Si Layer of Silicon-on-Insulator Substrate," Jpn. J. Appl. Phys. Vol.40 No.2B pp.L131 - L133( 2001 )

K. Tsubaki, "Aharonov-Bohm oscillation in rings with Permalloy," Jpn. J. Appl. Phys. 40( 2001 )1902.

A. Chavez, J. Temmyo, and H. Ando "Pressure-induced modulation of the confinement in self-organized quantum dots produced and detected by a near-field optical probe" Physica E 7( 2000 )367-372

H. Kamada, T. Takagawara, H. Ando, J. Temmyo, and T. Tamamura "Optically self-induced transparency of exciton excitation in a single semiconductor quantum dot" Phys. Stat. Sol. (a)78( 2000 )291-296.

Yoshitaka Gotoh, Kazuhiko Matsumoto, Vladimir Bujanja, Francisco Vazquez, Tatsuro Maeda and James S. Harris

"Experimental and Simulated Results of Room Temperature Single Electron Transistor Formed by Atomic Force Microscopy Nano-Oxidation Process"

Japanese Journal of Applied Physics, Vol.39, No. 4 B, pp.2334-2337( 2000 )

Kazuhiko Matsumoto, Yoshitaka Gotoh, Seizo Kinoshita, Masami Ishii

"Application of Single Wall Carbon Nanotube to Nano Electron Devices"

Proceedings of Asia-Pacific Workshop on Fundamental and Application of Advanced Semiconductor Devices, pp.97-102, 信 学 技 報 Technical Report of IEICE ED2000-60, SDM2000-60( 2000-06 )pp.97-102.

Y. Gotoh, K. Matsumoto and T. Maeda, E. B. Cooper and S. R. Manalis, H. Fang, S. C. Minne, T. Hunt, H. Dai, J. Harris and C. F. Quate "Experimental and Theoretical Results of Room Temperature Single Electron Transistor Formed by AFM Nano-Oxidation Process" J. Vac. Sci. Technol. A, Vol. 18, No. 4, pp. 1321-1325( 2000 )

Kazuhiko Matsumoto

"Room-Temperature Single Electron Devices by Scanning Probe Process" ( Invited )

International Journal of High Speed Electronics and Systems, Vol. 10, No. 1,  
( 2000 ) pp. 83-91.

Kazuhiko Matsumoto, Seizo Kinoshita, Yoshitaka Gotoh, \*Tetsuo Uchiyama  
"Ultra-Low Biased Field Emitter using Single Wall Carbon Nanotube Directly  
Grown onto Silicon Tip by Thermal CVD" Extended Abstracts of the 2000  
International Conference on Solid State Devices and Materials, p. 100( 2000 )

Kazuhiko Matsumoto, Seizo Kinoshita, Yoshitaka Gotoh, Tetsuo Uchiyama, Scott  
Manalis, Calvin Quate, "Ultralow biased field emitter using single-wall carbon-  
nanotube directly grown onto silicon tip by thermal chemical vapor deposition"  
Appl. Phys. Lett. Vol.78, No.4 , p.539( 2001 )

松本和彦 「カーボンナノチューブのナノエレクトロニクスへの応用 ( 招待論文 )  
電子情報通信学会技術研究報告Vol.100, No.683, p.47( 2000 )機械振興会館