

東京工業大学
大学院総合理工学研究科 教授

青柳 克信

「量子相関機能のダイナミクス制御」

研究期間：平成10年12月1日～平成15年11月30日

目次

1 . 研究実施の概要	1
2 . 研究構想	5
3 . 研究成果	
3 - 1 . チーム全体の成果	9
3 - 2 . 量子相関機能の探索と発現	
3 - 2 - 1 . カーボンナノチューブを用いた量子相関機能 (研究主担当： 理化学研究所 石橋幸治、青柳克信)	11
3 - 2 - 2 . 半導体量子ドット中の励起子を用いた量子相関制御 (研究主担当： NTT 基礎技術総合研究所 鎌田英彦)	28
3 - 2 - 3 . 量子ドット系のラビ振動 (研究主担当： 東京工業大学 南不二雄)	41
3 - 2 - 4 . 電子波回路における量子相関機能発現の可能性 (研究主担当： 東洋大学 椿光太郎)	47
3 - 3 . 量子相関機能のための新材料・プロセス開発	
3 - 3 - 1 . カーボンナノチューブ超微細量子ドットの作製 (研究主担当： 産業技術総合研究所 松本和彦)	49
3 - 3 - 2 . シリコン超微細量子ドットの作製 (研究主担当： 静岡大学 田部道晴)	57
3 - 3 - 3 . ナイトライド系超微細量子ドットの作製 (研究主担当： 東京工業大学 川崎宏治、青柳克信)	63
3 - 3 - 4 . フッ化物系材料を用いたヘテロ接合の形成 (研究主担当： 東京工業大学 筒井一生)	73
3 - 3 - 5 . 結晶成長を利用した多重量子ドット作製の可能性 (研究主担当： 静岡大学 天明二郎)	80
3 - 4 . 量子相関機能の理論的検討	
3 - 4 - 1 . 結合量子ドット系のコヒーレントダイナミクスの理論的検討 (研究主担当： 広島工業大学 塚田紀昭)	85
3 - 4 - 2 . 新しい量子相関機能を求めて -量子ドット集積体を用いた反応拡散デバイスの検討 - (研究主担当： 北海道大学 雨宮好仁)	91

4 . 研究実施体制	
(1) 体制.....	97
(2) メンバー表.....	98
5 . 研究期間中の主な活動	
(1) ワークショップ・シンポジウム等.....	101
(2) 招聘した研究者等.....	101
6 . 主な研究成果物、発表等	
(1) 発表論文	102
(2) 口頭発表	
国際会議招待講演.....	112
国際会議一般講演.....	114
国内会議招待講演.....	129
国内会議一般講演.....	130
(3) 特許出願	149
7 . 結び.....	150

1. 研究実施の概要

1 - 1. 基本構想・研究目的

本研究では、現在のシリコンエレクトロニクスとは相補的役割を果たす新しいエレクトロニクスを目指し、特に、量子相関機能のダイナミクス制御ともいべき量子状態のダイナミカルな制御に着目し、量子細線や量子ドットを具体的なナノ構造とし、それを実現するために特にさまざまな材料系を調べることを特徴とした。そして、量子相関機能の基本物性、機能性の発現とともに独自のデバイスプロセスの開発を行った。ここでいう量子相関機能としては、量子状態のコヒーレントな時間発展を利用するもので、具体的なデバイス応用としては量子コンピューティングデバイスの基本デバイスである量子ビットの実現を目指した。

量子状態を制御して新しいデバイスを実現する概念は、1970年のEsakiによる半導体超格子と量子井戸による波動関数制御にさかのぼることができる。本研究の基本構想は、量子状態が(スピン)(時間)(空間)からなることに注目し、波動関数制御がEsakiの提案以来その(空間)部分だけに対してのみ行われてきたことに着目し、(スピン)(時間)特に(時間)にまでその制御の範囲を広げようとする着想である。しかも、電子1個単位での量子状態の制御を行おうとするものである。これにより、現在のエレクトロニクスを支える代表的なデバイスである電界効果トランジスタが電子の流れ(電流)を電界効果という物理現象だけで制御してきたという動作原理をさらに拡張し、制御すべき情報媒体を電荷としての電子だけではなく、電子スピン、励起子、核スピンなどへも拡張し、それらの間の相互作用やそれらを制御する手法など、デバイス・システムとしてはこれまでとは全く異なるものであり、それを概念的に量子相関機能と名付けた。量子相関機能の具体的な応用領域としては、現在、量子情報処理システムが考えられるが、本研究ではそのほかの応用領域の原理的探索も行った。

本研究では、量子相関機能の代表的応用分野である量子コンピューティングデバイス(量子ビット・量子ゲート)に特に注目し、以下のように(1)具体的なデバイスモデルを検討し、(2)それを実現するために最適な材料の探索、およびその材料に適したプロセス技術の開発を行った。本プロジェクト内で量子情報処理システムを実現することは到底不可能であるが、本プロジェクトの目的は、それを構築するための要素技術としての量子ビット・量子ゲートの基本デバイスの何らかの系での原理実証、ビットの読み出しを行うための基本物理現象、たとえば電荷量子ビットで必要となる室温動作単電子トランジスタの実現など、全く未開拓な本分野に踏み込むに当たり、何らかの手がかりを得ようとするものである。

1 - 2. 研究成果の概要

(1) 量子相関機能の基本デバイス(量子ビット・量子ゲート)の原理的検討と実証 1) 電子波導波路型(電子波量子ビット)

理論的に検討した量子ビット・量子ゲートとして量子細線を利用した2本の電子波導波路からなる量子ビットを理論的に検討し、電子波の位相変化にはアハラノフボーム効果や静電ポテンシャルを利用することを考えた。2量子ビットの相互作用を利用する量子ゲートには、電子波導波路を通過する単一電子間のクーロン相互作用を検討した。この

場合、単一電子の運動の同期が重要であるが、それには、量子ドットを並べたターンスタイル型の電子波導波路が考えられた。この提案には、理論的には可能性のあるものの、電子波の空間コヒーレンスが一般的には極低温でも数ミクロン程度しかないことから、現実的には技術的に困難であると判断し実験的な実現は断念した。しかし、アハラノフボーム効果に必要な磁界強度を増幅するためにパーマロイをリング構造内に挿入し、小さな磁場で AB 振動を実現することを実験的に示すことに成功した。

2) 2重結合量子ドット型 (電荷量子ビット)

もう一つの量子ビット・量子ゲートとして、2重結合量子ドットを検討した。2重結合量子ドットにクーロンブロックードを利用して電子を1個だけ導入し、トンネルで結合した2つのドットのどちらに電子がいるかによる量子ビットを検討した。量子ゲートは、量子ビット間のクーロン相互作用を利用し、ビットの読み出しには単電子トランジスタを利用すればよいことを原理的に提案した。この際のエネルギースケールは、ドット間のエネルギースケールに依存するが、サブミクロンスケールの量子ドットでは、量子ビットの共鳴エネルギー・ゲート動作周波数はマイクロ波の領域にはいる。2重結合量子ドットを通常のリソグラフィをベースとしたサブミクロンスケールの半導体量子ドットで作製することに加え、将来的に高温・高速動作を可能とするナノスケール量子ドットを利用するために、カーボンナノチューブやナイトライド半導体を用いた2重結合量子ドットに関し実験的な検討を行った。カーボンナノチューブで初めて2重結合量子ドット特性を実験的に観測することに成功した。

3) 励起子型 (励起子量子ビット)

半導体量子ドットに励起される励起子(電子正孔対)を量子ビットとして利用することを検討した。光波領域の励起で発生する励起子の寿命は数ピコ秒から数ナノ秒程度と短い光パルス技術の進展により、フェムト秒スケールまで制御が可能である。このことを利用して、コヒーレンス時間が決して長くない励起子を用いて量子相関機能を実現することを検討した。量子ビットには、単一量子ドット中の励起子、量子ゲートには2重結合量子ドット中の励起子の励起子間相互作用を利用することができる。励起子状態の観測には適当な準位からのフロレッセンス発光を観測することで可能であることを提案し実験的な検証を行った。MOCVD法におけるひずみを利用した位置を制御した高品質 InGaAs 量子ドットの成長により、エネルギー領域でコヒーレンスの高い励起子発光スペクトルを実現した。さらに量子ドット中の単一励起子を用いてそのコヒーレントなマピュレーションを時間領域でラビ振動として観測することに世界で初めて成功し、コヒーレント制御の研究対象として非常に有効であることを示した。

また、通常の GaAs 系量子井戸の界面ラフネスによりに形成される量子ドットアンサンブルにおいて、多数の励起子が存在する系で初めてラビ振動をパルス面積の関数として観測することに成功し、上記単一励起子とあわせて、励起子アンサンブルでもコヒーレント制御が可能であることを初めて示した。

4) 電子スピン型 (電子スピン量子ビット)

電子スピンは量子ビットを構成する2準位系としては当然考えられる対象である。しかし、量子ビットとして利用するためには1個の電子スピンを発生しなければならない。電子スピンを利用した量子ビット・量子ゲートは、Loss・DiVincenzoにより提案され

ている。彼らの提案では、外部から3次元方向の静磁場をある一定の時間に印可し、それによりスピン歳差運動を利用して任意の方向にスピンを向かせる。初期状態の準備にはスピン偏極電子注入、スピンの検出にはスピンバルブ効果を利用する。これに対して、われわれの提案では、常時外部静磁場を印可し、ゼーマン分裂した2準位を量子ビットとして用いる。量子ビットの操作には磁気共鳴を利用する。量子ゲートを構成するために、スピン間の相互作用を利用する。これは Loss・DiVincenzo の提案と同じである。問題は、単一スピンを量子ドット中にどのように発生させるかであり、電子数を1までできれば最も簡単であるが、カーボンナノチューブを用いれば多電子を含んだ量子ドットであるにもかかわらず、大きなゼロ次元離散準位のために単一スピンを安定して発生できることを初めて実験的に明らかにした。

(2) 量子相関機能のためのナノ構造作成技術の開発

1) カーボンナノチューブ

本研究の大きな特色の1つとして、量子相関機能の基本要素デバイス構造としての量子ドットを作製するに当たり、従来の半導体材料にとらわれず、新規材料としてカーボンナノチューブを国内では初めて量子ドット材料として検討を始めた点にある。カーボンナノチューブは、1996年に量子ドットとしての電気伝導特性が報告された。その後すぐに1次元物理の研究が世界の数カ所で行われたが、われわれはすぐに量子相関機能を目指した量子ドットデバイスへの応用開発に取りかかった。

カーボンナノチューブは単層ナノチューブと多層ナノチューブが存在するが、単層ナノチューブの場合には1本のナノチューブの上に電極をつけただけで量子ドットが形成される。本研究では、単一量子ドットプロセスを拡張して2重結合量子ドットを作製することに成功し、また、量子ビットへ向けた研究の副産物として、その電磁波応答を調べる過程で新しいタイプのクーロンブロックードへの振動電界効果を観測し、カーボンナノチューブのエネルギースケールに対応して、サブミリ波・テラヘルツ波帯での高感度電磁波検出や量子状態制御が可能であることを示すことに成功した。ナノチューブ量子ドットプロセスをさらに最適化することにより、ナノチューブ量子ドットの詳細なエネルギースペクトルや shell filling を観測することに成功し、単一スピンのゼーマン効果の観測に成功した。これにより、量子ビットとしてのスピン2準位系を実現できたことになる。また、ナノチューブの集積デバイス化を目指してカーボンナノチューブのCVD成長にもいち早く取り組み、触媒のパターンニング化によりある程度の位置制御成長に成功し、イオンビーム照射技術と組み合わせることにより室温動作が可能なカーボンナノチューブ量子ドットの作製に成功した。

2) ガリウムナイトライド系、シリコン、フッ化物系材料

量子相関機能をさらに高温・高速で実現することを想定し、バンドオフセットが大きくとれるこれら材料のヘテロ接合形成技術の開発を行った。特に大きな成果は、ガリウムナイトライドを用いた単電子トランジスタ動作に初めて成功したこと、Si/SiO₂系およびフッ化物系ヘテロ接合において共鳴トンネル効果の観測に初めて成功したこと、をあげることができる。これらの成果は新しい材料系の開発という点では、大きな成果であるが、量子相関機能デバイスへの応用にはさらなるプロセス開発が必要である。

1 - 3 . 計画達成度、研究成果の意義、自己評価

本研究プロジェクトを開始した時点では、量子情報処理システムに例証される量子相関機能は、これまでのエレクトロニクスデバイス概念とは全く異なり、全く未開拓な領域へ踏み込むことであった。そのなかで、われわれのアプローチは固体デバイスを用いて量子ビット・量子ゲートの具体的なデバイスイメージを持つとともに、それを実現するための材料探索およびそれに適した独自のデバイスプロセスを開発することであった。研究目的のメインストリームの中でのもっとも大きな成果として、(1) 励起子2準位系を実現し、コヒーレント量子操作の第1歩として時間領域でのラビ振動の観測に世界で初めて成功したこと、(2) カーボンナノチューブという全く新しい材料で2重結合量子ドットの形成に世界で初めて成功したこと、(3) カーボンナノチューブ単一量子ドットで単一スピンのゼーマン分裂2準位系の形成に初めて成功したことなどがあげられる。前者は電荷量子ビット、後者は電子スピン量子ビットを実現できたことに対応し、今後そのコヒーレント量子操作の実現が待たれる。いくつかの系で、実際に量子ビットを形成し、励起子系ではコヒーレント量子操作を世界に先駆けて実証したことは、現在の量子コンピュータ研究の土台の形成に本プロジェクトが果たした意義は大きい。その点で、本来の研究計画は十分達成できたと考える。研究開始当初は、量子相関機能の具体的なエレクトロニクス応用として量子情報処理が考えられたが、本研究ではそれ以外の可能性も探索し、量子相関機能が基礎をおく量子力学に立脚した可逆的構造とは全く反対の位置にある散逸系とのある意味での融合により量子ドットデバイスの反応拡散デバイスへの発展を理論的に予測したことは、今後のエレクトロニクスの新しい発展に関して大変大きな意義があったと思う。

また、予期しなかった波及効果として次のことをあげることができる。すなわち、量子相関機能デバイスとしての本プロジェクトでのカーボンナノチューブ研究は、分子エレクトロニクスの観点からも注目され、われわれの成果は、われわれが行ってきた量子ナノデバイスに加え、電界効果トランジスタとしてのナノチューブ、さらに化学・バイオセンサーデバイスを含むナノチューブエレクトロニクスという新しい研究分野を切り開いたという点でも大きな意義がある。ナノチューブエレクトロニクスが実用化できるかどうかを判定するためにはさらなる研究が必要であるが、現在のナノサイエンス・ナノテクノロジー研究の中で、1つの研究の柱となっていることは確かである。

これらの事実を反映して、本研究の主要成果は、Physical Review Letters や Applied Physics Letters などの世界の重要な雑誌に掲載された。また研究に携わった研究者は、物性物理、量子コンピューティングのみならず、分子エレクトロニクスなどのさまざまな分野の国内研究会・国際会議で多くの招待講演を行っている。その点でも、その研究成果は国内外で十分評価されたと自負している。

以上のような点から、本研究では当初および中間評価後の研究計画をほぼ満足できる形で達成でき、成功裡に終了できたと自己評価している。

2. 研究構想

2-1. 研究開始当初の目標・計画・研究体制

研究開始時に目指した量子相関機能は、量子状態のコヒーレントな制御を想定していたが具体的な量子ビット・量子ゲートとしては、上記項目内の電子波導波路型と2重結合量子ドット型のみであった。そのための、量子ドット・量子細線の基本物理現象をコヒーレンスという立場から検討し、コヒーレント量子操作への可能性を実験的に検討しながら、量子ビットとしての妥当性を調べてゆくとともに、量子相関機能のコヒーレント量子状態制御以外の可能性も検討してゆくことを目的としていた。その際キーとなる基礎技術と考えたのは、量子相関機能の設計、機能実証、新しい材料系の開拓、高品質・多重量子ドット形成技術、そして超微細量子ドット形成技術である。このような研究を遂行するために当初設定した研究グループは、以下のようなものである。

原理の設計グループ(北海道大学工学部、青森大学工学部、静岡大学電子工学研究所)

量子相関機能とは何か、量子相関機能の一例である量子ビット・量子ゲートとしての電子波導波路型量子ビットの原理的検討、量子ビット読みだし技術の原理検討、および一般的な2準位系のダイナミクスのシミュレーション研究を行う。

機能実証グループ(理化学研究所、東京工業大学理学部)

2重結合量子ドットを用いた量子ビット・量子ゲートの原理的な提案と、GaAs/AlGaAsを主に用いた2重結合量子ドットのマイクロ波応答、量子ドットの電気伝導に関わる基本物性とコヒーレンスに関わる基本物性を調べる。量子ビットの読みとり方法として、単電子トランジスタによる単一電荷検出技術の開発を目的として研究を行う。

量子ドット用新材料・プロセス開拓グループ(東京工業大学総合理工学研究科)

新しい量子ドット材料として大きなバンドオフセットを有するナイトライド半導体やフッ化物系半導体ヘテロ接合の量子ドット作製技術の開発、また、電子線を利用した量子ドットの位置制御技術の開発を行う。

多重半導体量子ドット開発グループ(NTT物性科学基礎研究所)

ひずみを利用してInGaAs量子ドットを位置制御して高品質に作製することを行うとともに結晶成長を用いて2重結合量子ドット作製技術を開発する。これにより、将来の多重量子ビット作製技術へと発展させる。

超微細量子ドット作製技術の開発(産業技術総合研究所)

量子相関機能の基本構造である量子ドットをリソグラフィーの限界を超えたサイズで実現するために、走査プローブを用いた陽極酸化による10ナノメートル級超微細量子ドットの開発を行う。

2-2. その後の研究計画の変更・新たな目標等

研究計画の新たな進展およびそれに伴う研究計画の変更は以下の点である。

カーボンナノチューブ量子ドットの利用

理化学研究所、産業技術総合研究所のグループが量子ドット材料として、カーボンナノチューブを積極的に利用することになった。最終的にはこのことが本プロジェクトのもっとも大きな成果の1つにつながるようになった点で、この材料の研究計画への新た

な追加は大きな意味があったといえる。理研で行っていた GaAs/AlGaAs 2 重結合量子ドットの研究は、リソグラフィースケールであるために極低温を必要とし、原理実証は可能であったとしても将来的な発展は期待できないとの判断から、引き続き研究は続けるとし、主力はカーボンナノチューブ量子ドットを用いた単一量子ドット・2 重結合量子ドットなど量子相関機能デバイスへの応用を検討することとなった。単層カーボンナノチューブではソースドレイン電極を形成するだけで、電極間に単一量子ドットを形成できることが明らかとなっており、実際に実験を行ってみると、量子ドットとしてのエネルギーパラメータ(1 電子帯電エネルギーや離散化量子準位間隔)がリソグラフィースケールの量子ドットよりも 1 桁程度大きいことや、従って量子ドット動作が高温で可能なこと、また、量子ドットとしての資質として大変いいものがあると直感したことにある。しかし、デバイスプロセス技術に信頼性や再現性が乏しいことは確かで、これは、ナノチューブが分子性の新しいナノ材料で、そのデバイスプロセスの開発は、おそらくこれまでのリソグラフィースケールを基本としたトップダウンプロセスではなく、分子レベルの全く新たなデバイスプロセスが必要であると思われる。これに関しては、本プロジェクト内では実行不可能と判断し、トップダウンプロセスを基本としながらもできるだけデバイスプロセスの再現性・信頼性をあげることにより、むしろカーボンナノチューブの量子相関機能デバイスとしての有効性を示す方向で研究を行うこととした。

励起子量子ビットの実現

NTT 物性科学基礎研究所のグループは、研究の中心を多重量子ドット形成技術の開発から、すでに得られている高品質半導体量子ドットを用いて励起子量子ビットを提案し、その実証に研究の主力を注ぐことになった。このことは、励起子量子ビットという全く新しい量子ビットの提案により、われわれのグループで考えていた量子ビットの可能性が光波領域にまで広がったこと、量子ビットの可能性を探索する上で新たな可能性が出てきたという点で大変重要な課題であると判断した。しかも、NTT グループのこれまでの量子ドット材料評価の結果から、エネルギー領域で非常に高いコヒーレンスが得られていたことから、量子ビット実証のためのコヒーレント制御が、すでにグループ内で成熟していたレーザーパルス技術と組み合わせることにより、十分実証可能であると判断した。実際最終的に、時間領域でのコヒーレント振動(ラビ振動)の観測に半導体単一量子ドットを用いて初めて成功したことは、大変大きな成果である。

さらに、これまで量子ドット中のコヒーレンス物性を調べていた東工大理学部グループもこれに刺激され、量子井戸中に束縛された多数の励起子アンサンブルにおいても、パルス面積の関数としてラビ振動の観測に成功したことも大変大きな成果である。

電子波導波路型量子ビットからスピン量子ビットへ

北海道大学のグループが理論的に検討を進めていた電子波導波路型量子ビットは、バリスティック伝導領域でさえ、不純物によるランダムポテンシャルの影響で決して空間コヒーレンスがよくないという問題があり、その実現は本プロジェクト内では困難であると判断した。これにかわり、磁場中の電子スピンを量子ビットとして用いることを考え、それを用いた量子ゲートも 2 重結合量子ドットで原理的に可能であることを提案し、単一スピンの生成を目指すこととした。単一スピンの実現は量子ドット内の電子数をゼロに持っていく手法以外には決して自明な問題ではない。そこで、カーボンナノチュー

ブの大きなゼロ次元離散準位に目をつけ、カーボンナノチューブ単一量子ドット作製プロセスを高精度化することにより、最終的には、電子数の偶奇性効果の観測、さらにはそれを発展させて単一電子スピンの外部静磁場によるゼーマン分裂の観測に成功したことは、とりもなおさずスピン2準位系(電子スピン量子ビット)を実現できたことに対応し、ここでの目標の再設定が大きな成果へ結びついたといえる。

量子ビットの具体的目標を、電荷型(2重結合量子ドット)、励起子型そして電子スピン型に設定し、あとは、実際に実験的実証を行う段階になった後、北海道大学の設計グループは量子相関機能の量子情報処理以外の新たな可能性を探索する研究へと移った。量子情報処理の新奇性に議論を挟む余地はないが、量子コンピューティングの有効性はShorによる因数分解アルゴリズム以外明確には知られていない。それ自身が大変インパクトのあるアルゴリズムであるが、量子アルゴリズムの研究はさらなる可能性を求めている。その中で北海道大学グループは、必ずしもコヒーレント量子状態制御にとらわれることなく、量子ドットを用いた新しいエレクトロニクスシステムの探索を行い、散逸系を取り入れた反応拡散デバイスの提案に至った点は、今後のナノエレクトロニクスに新しい方向性を示した点で大きな成果へ結びついたといえる。

2 - 3 . 研究過程で得られた新しい発見

具体的な研究目標を目指す中で、いくつかの思いがけない実験的発見があり、それらは新しい研究方向を開くものと考えられる。第1に、カーボンナノチューブ2重結合量子ドットの電流電圧特性には、大きな非線形性が観測される。このことは、原理的には温度に依存しないため、室温でも大きな非線形性を有する電磁波検出デバイスとしての可能性が考えられる。しかも、ナノチューブのエネルギースケールが数 meV とサブミリ波からテラヘルツ波領域にあるため、この領域での高感度電磁波検出器としての利用が考えられる。ここでの検出メカニズムは、よく知られた2乗検波や量子検波だけではなく、電子の運動が周波数には追従しない non-adiabatic 領域でも、クーロンブロックード効果の交流電界応答というべき新しい検出メカニズムに基づいており、デバイス自身の高速性を求めることなく高周波検出が可能となる点で、全く新しい電磁波検出機構となり得ることがわかった。

カーボンナノチューブを超微細量子ドットとして利用することに主力を注いだ理研・産総研グループは、デバイスの制御性向上をめざしてイオンビーム照射による特性の改善の研究を行った。これにより、産総研グループは室温で動作する単電子トランジスタの作製に初めて成功した。このことは、本研究の主目標ではないが単電子エレクトロニクス実現にカーボンナノチューブが大変有効であることを示した点で、その波及効果は大きい。

2 - 4 . 研究項目ごとの達成度

本プロジェクトでは、研究途中からプロセスと機能制御を特に分けることなく、目標を大きく(1)励起子型(NTT・東工大理)、(2)電荷型(理研・東工大総理工)、(3)電子スピン型(理研・東工大総理工)の各量子ビットの実現、(4)超微細量子ドットの形成(産総研)そして、(5)量子ドットを用いた新しいエレクトロニクス探索(北

大・静岡大)に絞り込んだ。(1)では世界で初めて、量子ビットの形成とコヒーレントな量子操作の実証に成功したことで、十分な達成度を得られた。(2)では、カーボンナノチューブやガリウムナイトライドを用いて世界で初めて2重結合量子ドットを形成し、量子ビットの形成には成功したが、量子操作の実証までには至らなかったことは残念である。(3)ではカーボンナノチューブ量子ドットを用いて世界で初めて単一スピンの磁場によるゼーマン分裂の観測に成功したことは十分満足できる結果である。その量子操作は今後の課題である。(4)ではやはりカーボンナノチューブの位置制御CVD技術とイオンビーム技術を組み合わせることにより世界で初めて明確な単電子トランジスタ動作を室温で実証できたことで、超微細量子ドット形成の初期目標は十分達成された。(5)では、量子力学のコヒーレンスに基づく量子情報処理に加えて、散逸伴う反応拡散デバイスへの展開を示せたことは、今後のエレクトロニクスに全く新しい方向性を示すことができた点で、初期には予測していなかった新奇でかつ重要な成果である。

3 . 研究成果

3 - 1 . チーム全体の成果

研究チームでは、毎年チーム内でブレインストーミング的なミーティングを開催し、その中から、最終的なプロジェクト目標を大きく分けて(1)電荷、励起子、スピンによる量子ビットの実現、(2)超微細量子ドットの形成、(3)新しい量子相関機能システムの探索とした。量子相関機能の1例である量子情報処理システムの固体デバイスによる実現に、本プロジェクトは世界でもいち早く取り組み、すでに世界で成果の出つつあった超伝導系を意識的に目標からはずし、また、世界でも全く成果の出ていなかった半導体に加え、カーボンナノチューブなどの全く新しい材料に関してその可能性を探索した。

項目1, 2ですでに述べたように、多くの材料系でこれらの機能を探索した結果、次のような成果を挙げるができる。

(1)特にカーボンナノチューブは、その後IBMやNEC、デルフト効果大学を中心にFETへの応用に関する研究が活発に行われることになるが、量子ビットを目指した量子ドットデバイスへの展開は、われわれのプロジェクトの独壇場であったといえる。このことは、主要な成果がAppl. Phys. Lett.に掲載されたのみならず、固体物理学の新しい展開を取り上げた国際ウィンタースクール(12th International Winterschool on New Developments in Solid State Physics, Austria, 25 February - 01 March, 2002)に本プロジェクトの研究者が招待講師として招かれたことから、カーボンナノチューブ研究においてわれわれの研究が評価されたことの表れと考えている。また、最近実験に成功したカーボンナノチューブ量子ドットにおける単一電子スピンのゼーマン効果の観測に関しては、現在Phys. Rev. Lett.への投稿を準備中である。カーボンナノチューブに関する本研究プロジェクトの成果は、量子相関機能の観点のみならず、ナノチューブを用いたナノデバイス作製の観点からも注目され、分子・バイオナノエレクトロニクス関係の会議から招待講演を受けている(例えば、Second International Conference on "Molecular Electronics and Bioelectronics (M&BE2)", Tokyo, Japan, March 5-7, 2003)。本研究プロジェクトは、材料主導型のカーボンナノエレクトロニクスという新たな分野へ大きな影響を与えた。

(2)量子ビット実現の観点からもっとも大きな成果は、世界で初めての単一励起子のコヒーレント制御の実証であろう。本成果は、Phys. Rev. Lett.に掲載され、多くの引用を受けているばかりでなく、量子情報処理デバイスの新しい可能性として、多くの国際会議で招待講演を受けている(例えば、CLEO/QELS2002, Long Beach, USA (2002))。本成果により、国内外で量子ドットを用いた励起子量子光学なる研究分野が急速に活発化したことは確かであり、量子コンピューティングデバイスの実現可能性がこれまで超伝導系がトップにおかれている実情に一石を投げかけたといえる。

このように本研究では、量子相関機能という概念を初期段階で提示し、その波及効果は現在の量子コンピューティング研究の発展に明らかにみることができる。また、それを実現するために、従来の材料にとらわれずカーボンナノチューブを用いたことは、カーボンナノエレクトロニクスに関する最近の研究の発展にみることができる。それらの点

で、本研究が開始後 5 年間に与えた研究の動向に関する波及効果は十分大きなものと考えられ、固体デバイスを用いた量子情報処理デバイス研究のさらなる発展のみならず、カーボンナノチューブに代表される新材料を用いた新しいナノエレクトロニクスへの継続発展が期待される。

3 - 2 量子相関機能の探索と発現

3 - 2 - 1 カーボンナノチューブを用いた量子相関制御

(研究主担当： 理化学研究所、 石橋幸治、青柳克信)

A：はじめに

カーボンナノチューブはグラフェンシートを筒状に巻いた形状を持ち、単層ナノチューブと多層ナノチューブが存在する。また、2次元のグラフェンシートをどのように巻いたか(カイラリティー)の違いによって、半導体的になったり金属的になったりする。この物理的メカニズムは、定性的には、金属的な2次元グラファイトに円筒にしたことによる周期境界条件が加わり、量子化が起こる。この量子化が、ゼロギャップの部分を通るか通らないかでギャップが開くかどうかが決まる。確率的には、ナノチューブのうち1/3が金属的で、残りの2/3が半導体的である。多層ナノチューブの場合には、一般には、異なる相ではカイラリティーは異なる。ナノチューブの直径は、単層ナノチューブで数ナノメートル程度、多層ナノチューブで数十ナノメートル程度である。ナノチューブは、アーク放電法、レーザーアブレーション法、CVD法などで作製されるが、現在のところカイラリティーを制御することはできていない。最終的にデバイス化するためには、このことが最も重要な課題となることが予想される¹⁾。

1997年になって、デルフト工科大学²⁾とカリフォルニア大学バークレー校³⁾のグループから1本の単層ナノチューブ(ただし、後者のグループは何本かが束ねられた、いわゆるバンドルとなっている)の電気伝導が報告され、半導体量子ドットと同様の量子ドット特性が示された。ただし、量子ドットとしてのエネルギースケール(1電子帯電エネルギーや量子化離散準位間隔)は、リソグラフィ技術で作製されるサブミクロンスケールの半導体量子ドットに比べて1桁以上大きい。このことは、カーボンナノチューブの高温動作ナノデバイスとしての大きな可能性を示唆している。さらに、1次元構造であることは、榊が提案している散乱の抑制、また、安藤らが提案しているナノチューブに特有の長距離クーロン散乱の抑制が理論的に予測されており、コヒーレンスの観点からも有望な材料であると想像される。

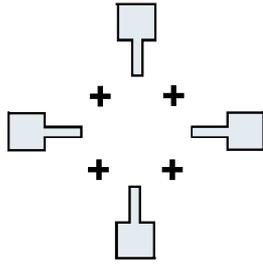
このような背景のもと、理研グループではカーボンナノチューブの量子ドットデバイス、特に量子コンピューティングデバイスへの可能性を明らかにするため、デバイスプロセスの開発から、量子ドットの基礎特性、電荷 Qubit を目指した2重結合量子ドットの形成、スピン Qubit を目指した単一量子ドット中での単一スピン形成、また副産物としてテラヘルツ波領域まで検出可能な電磁波検出器としての2重結合量子ドットの可能性に関して5年間の研究成果を報告する。

B：デバイス作製プロセスの開発

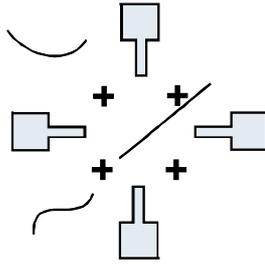
B - 1：標準デバイスプロセス

標準的なデバイス作製プロセスを以下に示す(図1)。基本的には、溶液中に分散した単層・多層ナノチューブを基板上に散布し、乾燥させた後、電子顕微鏡(SEM)または、原子間力顕微鏡(AFM)を用いてナノチューブを探し、適当なナノチューブに電子線露光を用いて金属電極を蒸着する。このとき用いる基板は、高濃度Pタイプシリコン基板で、酸化炉内において表面を酸化する。ゲート電極は、基板の上に作製するか、

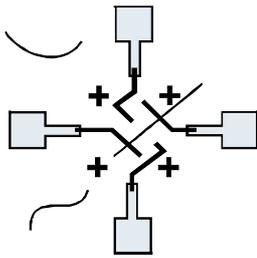
1. Fabrication of Large pads and marks



2. Spin coat of CNTs



3. Contact to individual CNTs



"Metal on Tubes"

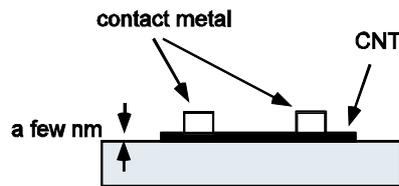


図1 標準的デバイス作製プロセス

表 同一チップ上に作製したデバイスの2端子抵抗のばらつき

Sample No.	Resistance (kΩ)
1	223
2	98
3	6,300
4	58,000
5	196
6	208
7	85
8	24
9	194
10	110
11	125
12	97

■ semiconducting sample

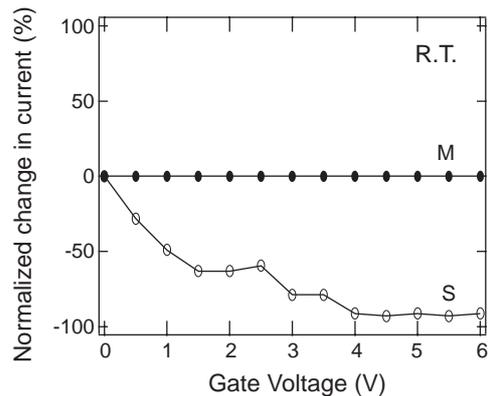


図2 金属的ナノチューブ (M) と半導体的ナノチューブ (S)

または、高濃度基板自身をバックゲートとして用いる。一般に、適正に動作するデバイスの歩留まりは決してよくないので、1チップ上に約10個のデバイスを作製する。単層カーボンナノチューブの場合、この歩留まりの悪さは、ナノチューブがバンドルを形成していることに起因していると考えている。SEMを利用してナノチューブを探す場合、本当に1本のナノチューブを探すことは困難であるため(直径が1nm程度)、コンタクトを形成できるナノチューブ(直径は数nm程度)は、通常バンドルになっていると考えられる。従って、後で単一スピンのところで述べる試料はAFMを用いてコンタクトしているので、本当に1本のナノチューブにコンタクトが可能となり、これにより再現性は向上している。

単層カーボンナノチューブの場合には、金属電極を蒸着しただけで電極間全体のナノ

チューブが量子ドットになる。この際蒸着する金属の種類によって、接触抵抗は異なるが、本研究では、Pt/Ti, Ti, Au-Ag 合金を用いた。Au-Ag 合金は、他に比べて比較的抵抗が低い。一例として、表に、Au-Ag 合金を用いて形成した1チップ上の12個のデバイスの2端子抵抗のばらつきを示す。これを見てわかることは、数十から数百 k Ω 程度の比較的抵抗の小さなグループと、数 M Ω 以上の高い抵抗を示すナノチューブが存在することがわかる。これら2つのグループの室温での電流のゲート電圧特性(ソースドレイン電圧は一定)を調べると、図2に示すように、抵抗の高いグループの試料ではゲート電圧を正に印可してゆくと電流が減少して最後になが流れなくなるが、抵抗の低いグループでは電流はゲート電圧に対して全く変化しないことがわかる。このことから、電界効果を持つ前者を半導体的ナノチューブ、電界効果が全くない後者を金属的ナノチューブと定義する。半導体ナノチューブの中には、電流がいったん流れなくなった後、再び増加し始めるいわゆる、Ambipolar 特性を示すものもある。この現象は、ナノチューブ-金属界面に形成されるショットキーバリアがゲート電圧によって変調され、注入されるキャリアが正孔から電子に変わるためと考えられており、応用上からも重要であるのでIBMのグループなどで精力的に研究されている。本研究では、量子ドットを形成するため、主に金属ナノチューブを対象とする。

B - 2 : 散布ナノチューブの位置制御の試み

上記標準プロセスの問題点は、ナノチューブの溶液からの散布を行うため、基板上に配置されるナノチューブがランダムにばらまかれる点にある。これにより、ナノチューブを探す効率が悪いことや、さらに深刻な問題は、電極パッドまでリード線をのばした場合に、たまたまそこにあったナノチューブによってリード線間に予期しないショートが起こることである。これにより、デバイスプロセスの歩留まりが低下する。したがって、位置を制御してナノチューブを散布することは本プロセスの歩留まりを上げる点で重要な課題である。もちろん、位置制御技術の開発はナノチューブ集積デバイス開発の点から、解決されるべき必須の問題であることは明らかで、現在CVD法を用いて位置制御成長法が研究されている。

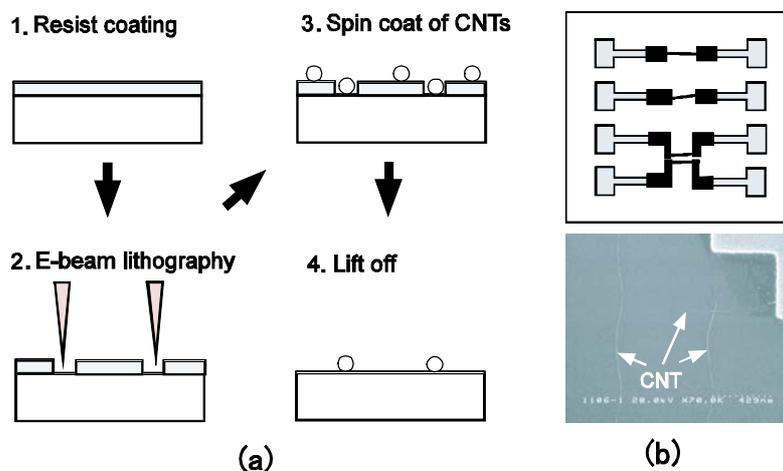


図3 (a)リフトオフを利用した位置制御の試み (b)リフトオフされたナノチューブ

本研究での位置制御プロセスは、あくまでも、現プロセスの改良のために行ったものであり、その基本的な手法を図 3(a)に示す。基本的な考え方は、パターンを形成したレジストを用いて“ナノチューブをリフトオフ”しようとするものである。この手法を用いれば、基板上の決まったところにナノチューブが散布されるために、リード線間の不必要なショートの問題は回避されるし、ナノチューブが存在するところも限られるので、ナノチューブを探す効率もよくなる。図 3(b)にナノチューブがうまくリフトオフされた例を示す。ところが実際は、うまくリフトオフできる確率は十分大きくなく、本方法はまだまだ改善されなければならない。

C : 単一量子ドット

C - 1 : 単電子トランジスタの原理

単電子トランジスタはクーロンブロック効果を制御するデバイスで、図 4 (a)のような等価回路で表される。量子ドットはトンネル障壁を通してソース・ドレイン電極とつながっており、また、容量(トンネル不可)を通してゲート電極につながっている。ゲート電圧を印可することにより、ドット内のポテンシャルを変えることができる。このトランジスタの動作は図 4 (b)のように、ソースドレイン電圧(V_{sd})とゲート電圧(V_g)で決まる。影をつけてある周期的な菱形領域(クーロンダイヤモンド)の中はクーロンブロック状態で電子数が固定している。隣り合うクーロンダイヤモンドでは電子数が正確に 1 個だけ異なる。クーロンダイヤモンド内では電流は流れないが、隣り合うダイヤモンドが接するところでは電子数 $N+1$ の状態と N の状態の両方をとることができ、ここではドット内を 1 個ずつ電子が通過してゆくことにより電流が流れる。したがって、 V_{sd} を小さく固定した状態で V_g をスイープすると、電流のピークが周期的に現れる。これはクーロン振動と呼ばれ、その周期は e/C_g である。図 4 (c)は半導体量子ドットにおけるクーロン振動の例である。図 4 (b)から想像できるように、ゲート電圧をパラメータとして単電子トランジスタの電流電圧特性を測定すると、 V_{sd} が小さい領域では電流が流れず(クーロンギャップ)その外では電流が増加する。クーロンギャップはゲート

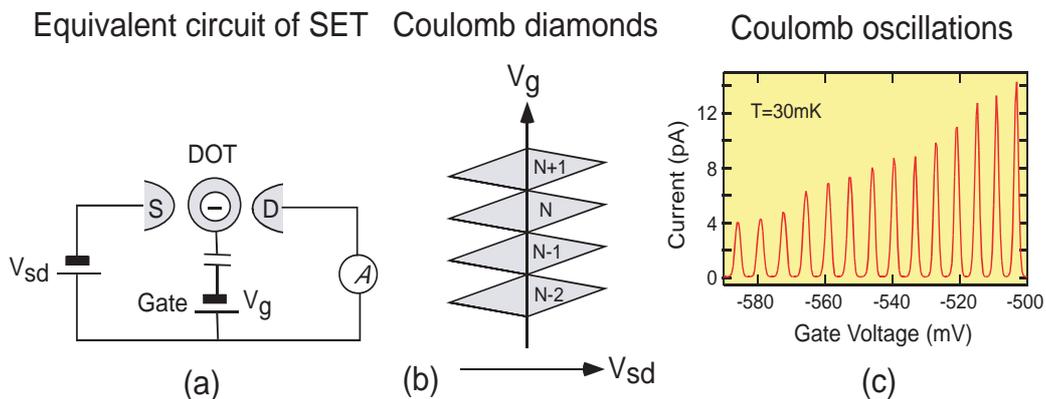


図4 (a)単電子トランジスタの等価回路 (b)単電子トランジスタの動作モードを表すクーロンダイヤモンド (c)表面ゲートGaAs/AlGaAs 2次元電子ガス量子ドットにおけるクーロン振動の例

ト電圧の関数として周期的に伸び縮みすることがわかる。クーロンギャップの最大値が1電子帯電エネルギー ($E_c=e^2/C_\Sigma$) を与える。

これまでの議論では電子の電荷だけを考えたが、極低温やカーボンナノチューブドットのような超微細なドットではドット内に形成されるゼロ次元離散準位が顕著になる。そのことは、クーロンダイヤモンドの外側、すなわち電流が流れる領域に現れ、電流チャンネルとしての量子準位の離散性を反映して階段状に電流が増加する。このことはコンダクタンス表示としてのクーロンダイヤモンドの外側に縞状の模様として現れる。

C - 2 : 単一量子ドットと多重量子ドット (典型的な例)

前項で述べたようなデバイスの電流電圧特性を室温で測定すると線形で数十 kΩから数百 MΩまでまちまちな抵抗を示す。温度を下げていくと、ほとんどの場合抵抗があがってくるが、あるものは液体ヘリウム温度では抵抗が大きくなりすぎて測定不能となる。液体ヘリウム温度で電気伝導を示す試料の中で、抵抗値が量子抵抗よりも十分大きな値を持つものの中に、クーロンブロック効果を示すものがある。図5は、典型的な試料(図)の微分コンダクタンスの V_{sd} , V_G 依存性を示す(クーロンダイヤモンドの測定)。この試料では、電極間の距離は $0.25\mu\text{m}$ である。図5において、 V_{sd} が小さい領域で電流が流れないというクーロンブロック効果が観測されている(白い部分: クーロンギャップ)。単電子トランジスタとして重要な特性は、このクーロンギャップがゲート電圧によって周期的に変調されていることであり、図5の微分コンダクタンス表示ではっきりわかる。周期的なダイヤモンドパターンが観測されており、単一量子ドットとしての動作をしていることがわかる。

図5のクーロンダイヤモンドの測定から、量子ドットに関わるパラメータを算出することができる。それらは、帯電エネルギー $E_c \sim 9\text{meV}$, 平均離散準位幅 $\Delta E \sim 2\text{meV}$, 自己容量 $C_\Sigma \sim 9\text{aF}$, ゲート容量 $C_g \sim 0.08\text{aF}$ である。これらのエネルギーは、例えば電子ビーム露光による表面ゲート法で作った量子ドット(サブミクロンサイズ)に比べて1桁以上大きい値となっている。電極間隔を $0.1\mu\text{m}$ 程度まで電極間隔を狭くした試料では、液体窒素温度程度までクーロンダイヤモンドが観測されるものもあり、ナノチューブを用いた量子ドットの高温動作の可能性を示唆している。

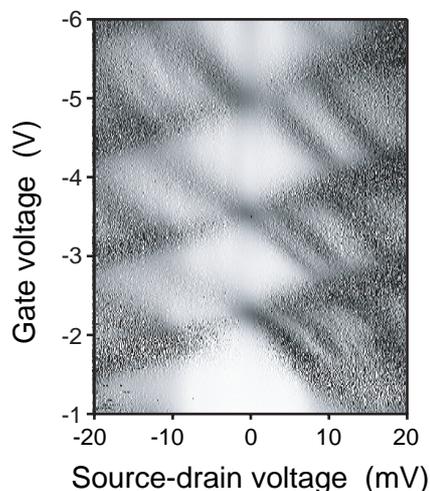


図5 単一量子ドットの振る舞いを示す試料のクーロンダイヤモンド ($T=4.2\text{K}$)

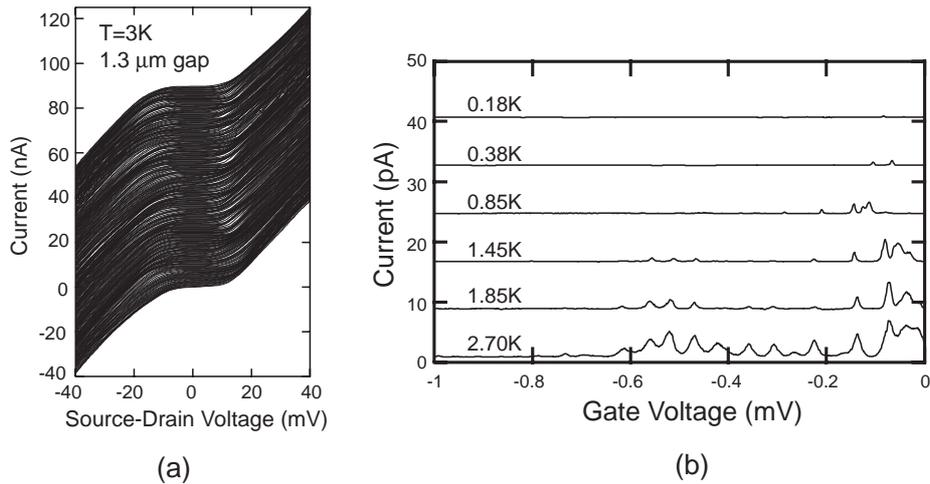


図6 多重量子ドットの振る舞いを示す試料の(a)ゲート電圧をパラメータとした電流電圧特性と(b)各温度でのクーロン振動

このようなナノチューブの両端に金属電極を蒸着した全ての試料が、単一量子ドットの動作を示すわけではない。中にはゲート変調がかからなかったり、多重量子ドットの振る舞いをしたりするものがある。多重ドットの振る舞いを示す試料の電流電圧特性およびクーロン振動の例を図 6(a)(b)に示す。電流電圧特性には周期的なクーロンダイヤモンドは全く観測されず、ゼロバイアス付近ではすべての領域がブロッケード領域にある。大きなバイアス電圧を印可し、クーロン振動を測定した図 6 (b)では、高温(液体ヘリウム温度付近)で不規則に観測されるクーロン振動の数が温度を下げゆくに従って減少してゆくことがわかる。測定した最低温度では、クーロンピークは全く消失してしまふ。このことは、半導体多重量子ドットでよく知られているストカスティッククーロンブロッケード現象と酷似しており、同じことがナノチューブで起こっていると思われる。ストカスティッククーロンブロッケード現象は、大きさの異なる多重ドットが直列に接続した系において 1 個のゲートをスイープした場合に起こる。大きさがそれぞれ異なるので各ドットの自己エネルギーが異なり、クーロンブロッケードがはぶれる条件はドットごとに異なる。したがって、すべてのドットのクーロンブロッケードがはずれて電流が流れることは確率的に起こり、ドットの数が多くなるほどその確率は小さくなることが予想される。また、低温ほどクーロンブロッケードの条件は厳しくなるので、ストカスティッククーロンブロッケードが厳密に生じ、その結果電流が流れることはまれになる。これが、図 6(b)の最低温度の結果に対応している。温度が上昇するとクーロンブロッケードの条件が甘くなって、熱励起によりストカスティッククーロンブロッケードが起こりにくくなる。したがって、各ドットのクーロン振動が組み合わせられたような非周期的なクーロン振動現れる。これが、図 6(b)の高温の振る舞いに対応する。

多重ドットが形成されたり単一ドットが形成されたりする理由については現在明らかではない。安藤や McEuen らは、金属チューブでは長距離相互作用が抑制されるのに対して半導体ナノチューブではそのメカニズムが働かないために、金属ナノチューブの

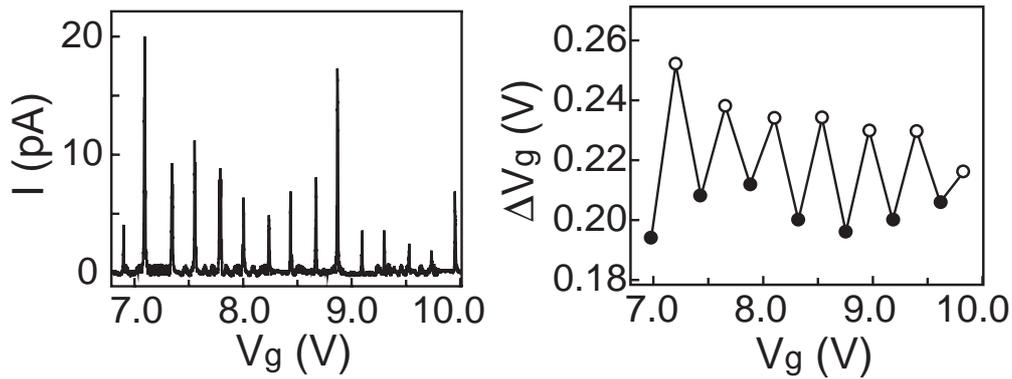


図7 電子数の偶奇性を示す試料の(a)クーロン振動と(b)振動周期の電子数依存性

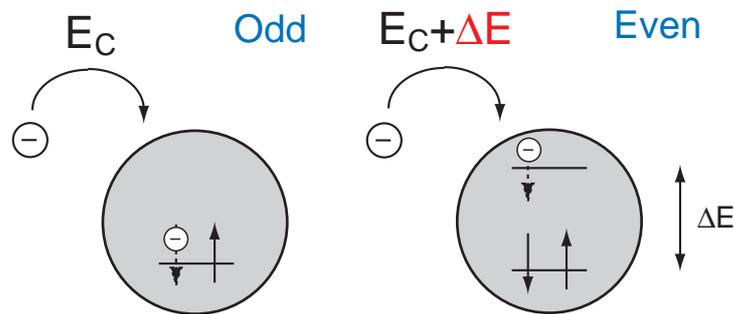


図8 電子数の偶奇性効果を説明するモデル 左図：奇数個から偶数個への変化 右図：偶数個から奇数個への変化

方が散乱の影響を受けにくいとの指摘もある^{4,5})。ただし、ナノチューブ内にプロセス中、あるいはナノチューブ製造時に導入された欠陥やダメージの影響を排除することはできない。理論的にはホストカーボンの欠損によるコンダクタンスの影響は、どのようにカーボン原子が欠損するかというミクロなメカニズムに依存しており、単純に議論することは困難である。ただし、経験的にはAFMで探した本当に1本のナノチューブでは単一量子ドットになる確率は大きくなることは事実である。

C - 3 : 単一量子ドットにおける単一スピとゼーマン効果

単一量子ドット的な振る舞いを示す試料のクーロンダイヤモンドとクーロン振動を詳しく見ると、通常のオーソドックス理論では説明できない興味深い現象が現れることがある。図7(a)(b)にはある試料のクーロン振動と、ピーク間隔を示す。興味深いことはピーク間隔が一定でなくて、振動していることである。通常の単電子トランジスタのオーソドックスモデルではピーク間隔は一定である。実は、この効果はクーロンブロッケードの理論的解析が始まった頃から指摘されている電子数の偶奇性の効果である。すなわち、図8に示すように、電子数が奇数の時は次の電子は軌道が同じ準位へスピンの向きを逆にして入ることができる。したがって、このときの、1電子追加エネルギー (addition energy) は E_C である。これに対して、電子数が偶数の場合には次の電子は同じ軌道にはいることはできないので、その上の空の軌道に入ることになる。

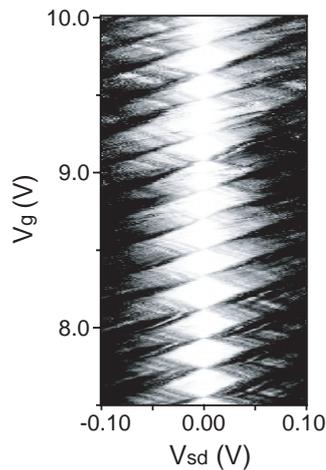


図9 電子数の偶奇性効果が観測される試料のクーロンダイヤモンド (1.8K)

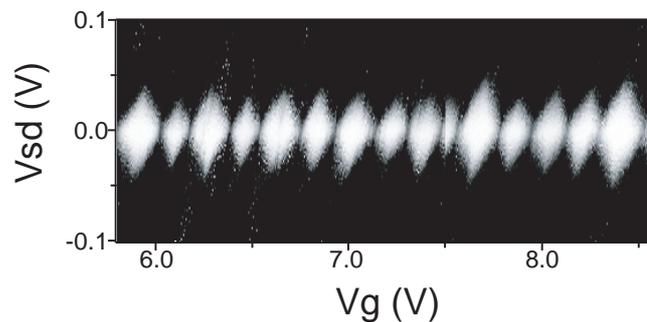


図10 電極との結合が強くなった後のクーロンダイヤモンド (図9と同じ試料)

このときの addition energy は $E_c + \Delta E$ となる。 E_c と ΔE の大きさが極端に異なる場合には、この違いは見えるはずである。図9はクーロンダイヤモンドを示すが、ピーク間隔の振動振幅 (ΔE) とダイヤモンドから得られる励起準位間隔とよく一致していることは、このモデルが成り立っていることを指示している。

しかし、これまで GaAs/AlGaAs 2次元電子ガス内スプリットゲート法で作製されたサブミクロンスケールの量子ドットにおいてこの効果が全く報告されていないのは、以下のようなことが原因として考えられる。数百・数千の多数の電子を有するサブミクロンスケールの量子ドットでは、 ΔE が on-site クーロンエネルギーや交換エネルギーに比べて十分に大きくないため、フェルミ準位近傍のエネルギースペクトルは多体効果のために準位間の相互作用が大きくなり、電子の占有は複雑にミックスされてしまっているためと思われる。これに対し、カーボンナノチューブでは ΔE が十分に大きいため多体効果の1電子エネルギースペクトルへの影響が小さいためであると思われる。

電子数の偶奇性効果とクーロンダイヤモンドにみられる励起準位の効果はともに ΔE の効果である。量子ドットの閉じこめが緩くなり、外部電極との結合が大きくなると離散準位そのものがぼけてくる。このことにより、クーロンダイヤモンドにみられた励起離散準位による効果は見えなくなるが、電子数の偶奇性はよく見えている (図10は図9と同じ試料で数日間の低温での保持の後、電極の状態が変化したためにコンタクト抵抗が大きく減少した)。量子ドットが強結合になったことは、クーロンダイヤモンドに対応したクーロン振動のピーク形状が、ローレンツ型になっていることから確認される。また、偶奇性効果は 10 K でも観測されている。

電子数の偶奇性が明確に見えたことは、電子数が偶数の時は全電子スピンの総和は S

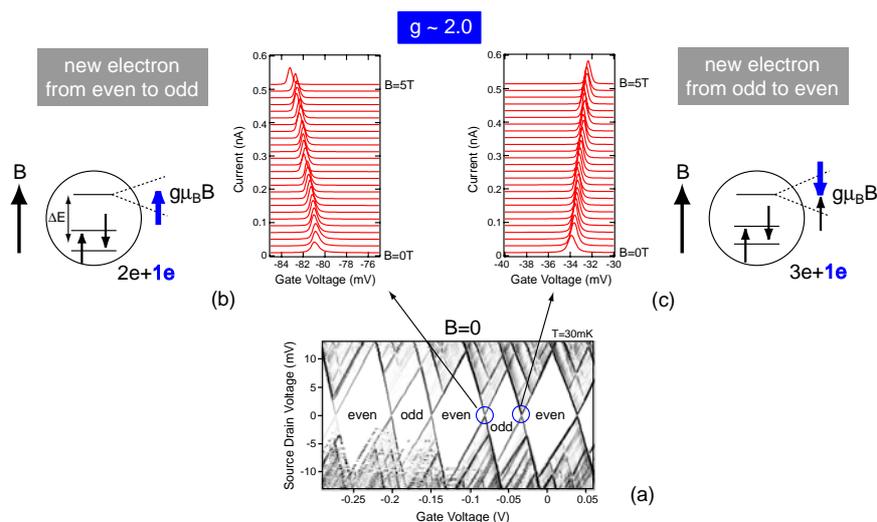


図11 電子数の偶奇性効果が観測される試料の極低温（30mK）における（a）クーロンダイヤモンド（b）クーロンピークの磁場によるシフト（電子数の変化が偶数から奇数）（c）電子数変化が奇数から偶数の場合のピークシフト

= 0 であり、電子数が奇数の時には $S = 1 / 2$ であることを示している。このことは、電子数が奇数の時に単一スピンの実現できることを意味しており、電子スピン量子ビット実現の観点からカーボンナノチューブ量子ドットが有力であることが示されたことになる。

このような電子数の偶奇性効果がみられる試料に対して、磁場の印可による単一電子スピンのゼーマン分裂を観測した結果を次に示す。図 11 (a) は 30 mK におけるクーロンダイヤモンドである。電子数の偶奇性効果によるダイヤモンドサイズの大小が交互に起こっていることがはっきり見て取れる。ダイヤモンドが小さい領域は、電子数が奇数、大きい領域は電子数が偶数であることを示している。ここで、バイアス電圧を小さくしたときのクーロン振動の位置の磁場依存性を図 11 (b) (c) に示す。図 11 (b) の状態は電子数が偶数から奇数へ変わる状況に対応しており（図 11 (a)）、図 11 (c) は奇数から偶数へ変わる状況に対応している（図 11 (a)）。前者では、ゼーマン分裂した 1 電子準位の下位の順位に電子が入るのに対し（図 11 (a)）、後者の場合では上の順位に電子が入ることになるため、磁場に対するクーロンピークの動きの方向が逆である。いずれの場合にも、クーロンピークは磁場に対して線形に移動しているが、その差を $g\mu_B B$ とした場合、 g 因子は自由電子の値に対応するほぼ 2 である。この値は、異なるピークペアでも同じである。このことは、多体効果により g 因子が自由電子の値から大きくずれたり、大きな磁場依存性を持つ化合物半導体とは大きく異なる舞いが異なり、カーボンナノチューブのゼーマン分裂は単純である。この点も、ナノチューブ量子ドットスピンの量子ビットへの応用に有利である。

D : 2重結合量子ドット

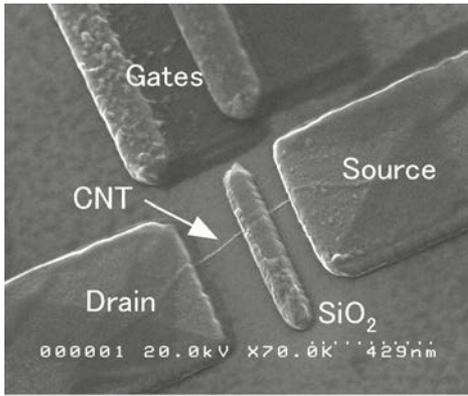


図12 2重結合量子ドットの電子顕微鏡写真

D - 1 : クーロンブロック特性

前項のように、単層ナノチューブの両端に金属をのせるだけでトンネル障壁が形成され、電極間が量子ドットとなることが経験的であるがわかった。このことを利用して、2重結合量子ドットを図12のようなデバイスで形成できるのではないかと考えた。すなわち、電極間の単一量子ドットの上に細い SiO₂ を蒸着し、1つのドットがトンネルで結合した2つのドットに分かれるのではないかと考えた。実際そのことを確かめるために、まずナノチューブの両端に電極をつけたデバイスを1チップの上にかくつか作製し、液体ヘリウム温度で単一量子ドット動作を確認できたデバイスに対して、クライオスタットから取り出して SiO₂ を蒸着し、蒸着前後のクーロンダイヤモンド特性を比べ

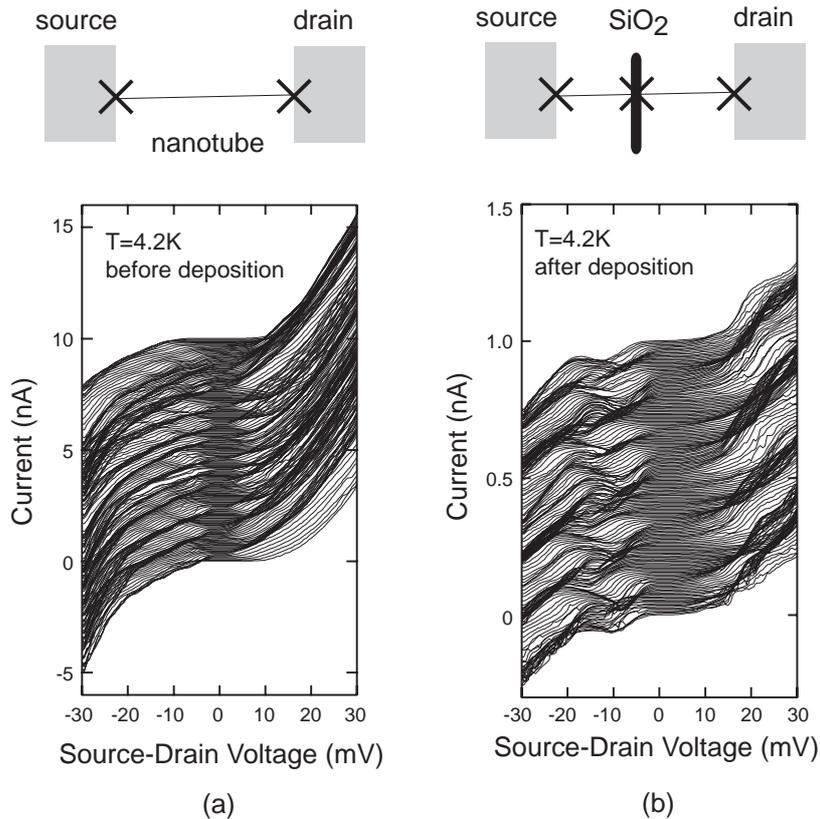


図13 SiO₂蒸着(a)前(b)後での電流電圧特性の変化(一方のゲート電圧をパラメータ)

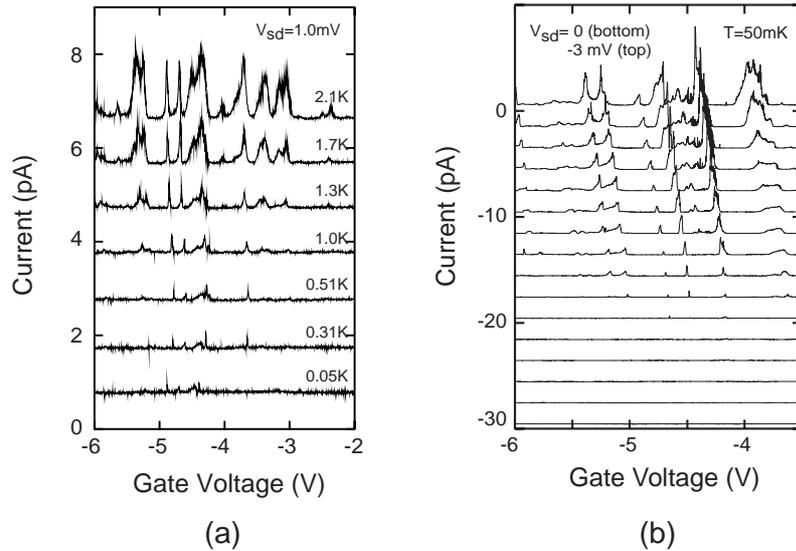


図14 2重結合量子ドットのクーロン振動 (a) 温度をパラメータ (b) バイアス電圧をパラメータ

るという実験を行った。

図13には蒸着(a)前、(b)後の4.2Kにおけるゲート電圧をパラメータとした電流電圧特性(クーロンダイヤモンド)を示す。図12のデバイスの写真を見てもわかるように、このデバイスにはゲートが2つついている。ここでは、1つは接地し、他の1つだけを変化させた。図13(a)からわかるように、蒸着前は周期的なクーロンダイヤモンドが観測され単一量子ドットとして動作していることがわかる。これに対して蒸着後は様子が大きく変わっている。注目すべき変化は、以下の2点である。1) 周期的なクーロンダイヤモンドが不規則になったこと。2) 負のバイアス領域に負性微分抵抗が見られる。この試料をさらに極低温にすると、負性微分抵抗は正負両バイアスで現れさらに顕著になる。1)は、2重結合量子ドットに見られるストカスティッククーロンブロックードと考えられる。定性的には、1つのゲートに対して大きさの異なる2つのドットが応答するため、大きさの異なる2つのダイヤモンドが重なったようになることで理解できる。さらに重要な変化は、2)の負性微分抵抗があらわれたことで、これがまさに2つの量子ドットの量子化準位を介した共鳴トンネル効果であると考えられる。両端が金属電極である単一ドットでは原理的に負性微分抵抗が現れることはないの、共鳴トンネル効果である。

2重結合量子ドットの形成をさらに示唆する測定結果として、図14に極低温におけるクーロン振動の(a)温度依存性、および(b)バイアス電圧依存性を示す。図13の測定と同じように1つのゲートは接地し、他方のゲートをスイープしている。ストカスティッククーロンブロックードの観点からは、(a)と(b)は定性的には同じである。このような振る舞いを定性的に説明するために、図15(a)のような2重結合量子ドットの等価回路を考える。その動作は図15(b)の電荷安定図(単一ドットのクーロンダイヤモンドに対応する。)で考えることができる。等価回路からわかるように、2重ドットの動

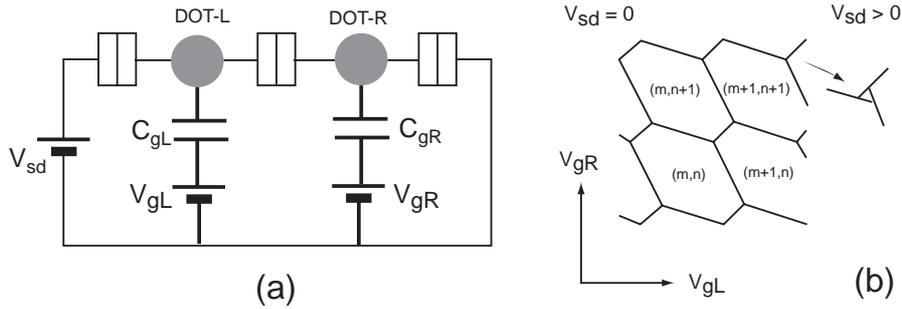


図15 2重結合量子ドットの(a)等価回路と(b)その動作を示す電荷安定図

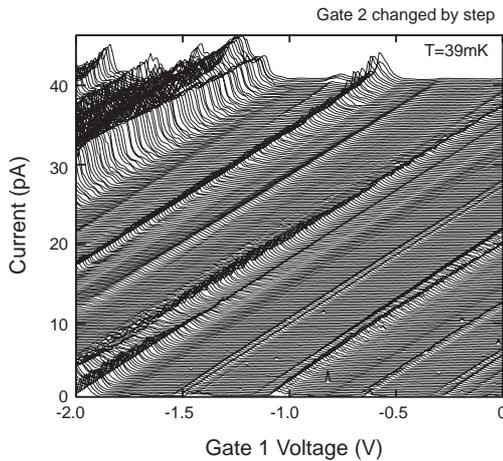


図16 2重結合量子ドットの電荷安定図の測定(クーロン振動の測定を一方のゲート(V_{g2})を小さなステップで変えて、もう一方のゲート(V_{g1})をスイープ)

作を決めるパラメータはソースドレイン電圧に加えて2つのドットについての2つのゲート電圧(V_{gL} と V_{gR})の3つである。図15(b)の電荷安定図は $V_{sd}=0$ の場合の系の状態を(V_{gL} と V_{gR})関数として書いたもので、系の状態は2つのそれぞれのドットの電荷数で指定される。六角形で囲まれた中はクーロンプロセード状態で電流は流れない。電流は六角形が接する点(A,B)で流れる。A,Bの分裂はドット間の結合容量のためである。

図14の特徴は、温度が低いときやバイアス電圧が小さいときは、クーロン振動があまり現れず、温度が高くなったりバイアス電圧が大きくなるに従いピークの数が増えてくるように見える。さらに、あるピークはペアになっているように見える。これらのことは、等価回路において点線で示したクロス容量が実際のデバイスでは存在することで説明することができる。(デバイスの写真からこのような容量が存在することは十分に可能である。)すなわち、実際に1つのゲートをスイープしても、そのゲートは両方のドットのポテンシャルを同時に変調することになる。したがって、図15(b)の電荷安定図で矢印の方向にスイープしていることになる。この矢印の正確な方向は、さまざまな容量の詳細に依存するが、矢印が六角形の接点を通ればそこで電流が流れることになる。温度が高くなったり、バイアス電圧が大きくなると交わる点を実効的に広がり電流が流れる領域が実効的に多くなり、矢印がそこを通る確率が増えるので現れるピークの数が増えると説明できる。いくつかのピークがペアを形成するように見えるのは、容量的結合によるA,Bを通ることによるものと思われる。2つのゲートを独立に変化さ

せて、図 1 5 (b)のような電荷安定図の測定を試みたが、クロス容量のために (V_{gL} と V_{gR}) 2次元面を操作することができないため成功していない。図 1 6 に示すように、実際に観測された結果は一方のゲート電圧の変化によるクーロン振動の単純なシフトであり、このことはクロス容量のために、ドットのポテンシャルが2つのゲート電圧により独立に制御されていないことを示している。

D - 2 : 新しいタイプのマイクロ波応答

2重結合量子ドットの電流電圧特性は量子準位間の共鳴トンネルで決まるために、一般に大きな非線形性を示す(図 1 7)。この大きな非線形性は電磁波検出の観点から興味深い。しかもカーボンナノチューブ量子ドットのエネルギースケールが数 meV であることから、検出できる電磁波の周波数はサブミリ波からテラヘルツ波領域にまで広がることが考えられる。そこで、4 - 1 で示した2重結合量子ドットに対して放射されたマイクロ波に対する直流応答を調べた。

実験に用いた試料は、4 - 1 で示した試料と同じものであるが、いったん室温に戻してから再度低温にしたので特性が変化した。図 1 8 にクーロンダイヤモンドを示すが、以前にみられた負性抵抗電流ピークは観測されない。しかし、クーロンギャップの不規則なパターンは残っており(ストカステッククーロンブロック) 以前として2重結合量子ドットは形成されているものと思われる。また、ピークではないにしろ大きな非線形性は相変わらず存在するので、これがマイクロ波照射によりどのように変化するかを調べることは興味深い。ここでの実験はすべて希釈冷凍機を用いて 22mK で行った。

まずマイクロ波印可によるクーロン振動の変化を調べるために、マイクロ波強度を変えながらクーロン振動がどのように変化するかを、周波数 5 GHz と 30 GHz の場合

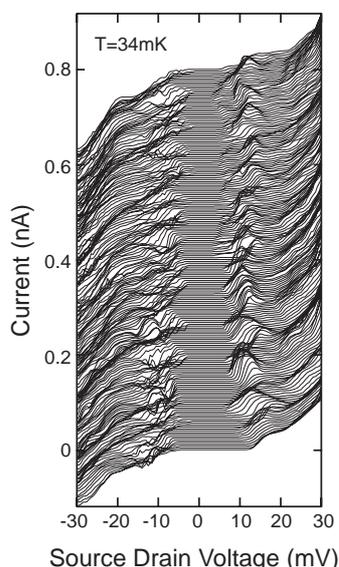


図17 極低温における2重結合量子ドットの非線形電流電圧特性(ゲート電圧をパラメータ)

について行った。図 1 9 (a) (b)からわかるように、マイクロ波を照射していないときは2重結合ドットに特有のピークペアが現れている。いずれの場合においても、マイクロ波の強度を強くしてゆくと、ピークペアの両側に新たなピークが現れる。新たなピーク

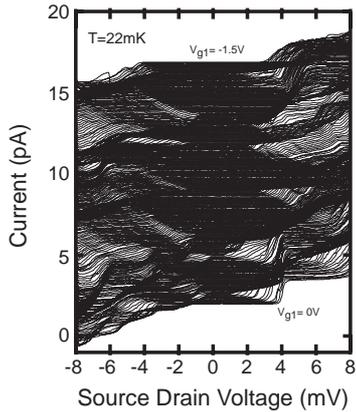


図18 マイクロ波照射前のクーロンダイヤモンド（電流電圧特性）

の位置は両周波数で同じところであることから（周波数依存性なし）マイクロ波の振動電界を光子として検出する量子的な応答ではないことがわかる。同様に、電流電圧特性に与えるマイクロ波照射効果を図20に示す。マイクロ波を照射していないときには、階段状のクーロンステアケースが観測されている。これにマイクロ波を印可して強度を強くしてゆくと、電流電圧特性の形状を維持しながら全体的に原点に向かってシフトしてくる様子が見える。すなわち、マイクロ波照射の効果は、クーロンギャップを小さくさせているように見える。この効果も本質的に周波数依存性がないために、量子的な効果ではないことが考えられる。ただし、古典的非線形検波器の特性である、2乗検波的な特性とも異なることから新たな応答メカニズムであることが示唆される。

この2重結合量子ドットのマイクロ波応答を定性的に説明するために、まず、マイク

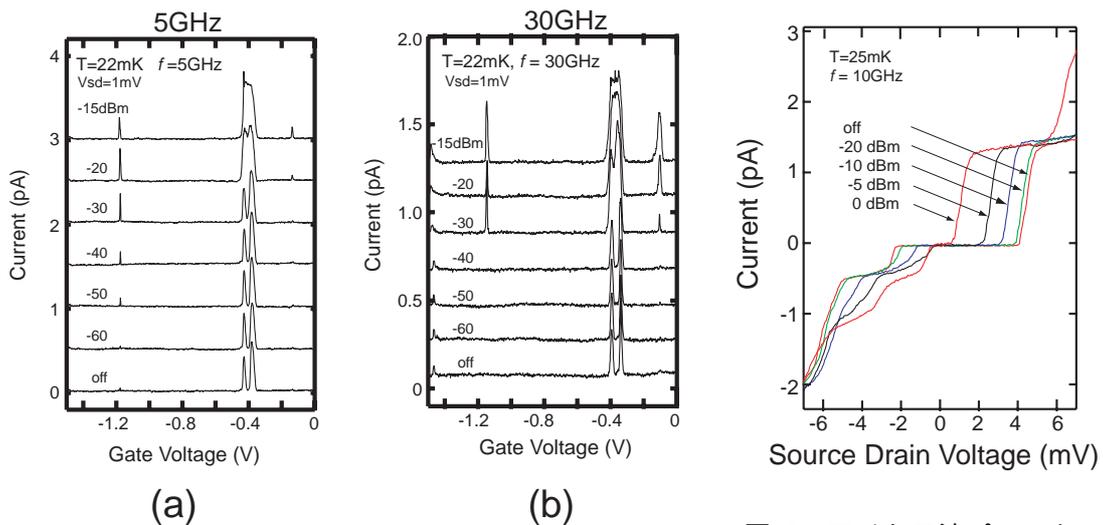


図19 マイクロ波パワーを変えた場合のクーロン振動 (a)5GHz (b)30GHz

図20 マイクロ波パワーを変えた場合の電流電圧特性

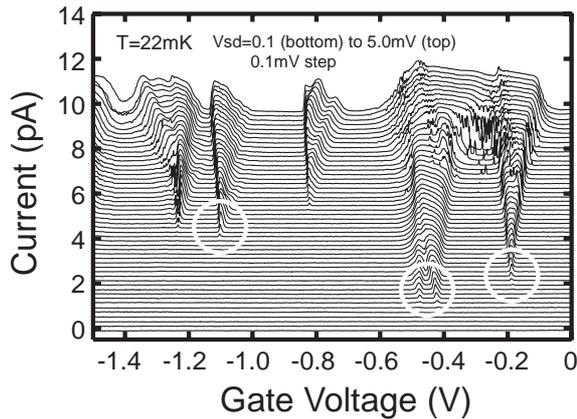


図21 V_{sd} をパラメータとしたクーロン振動（で示したピークが図19に見られる）

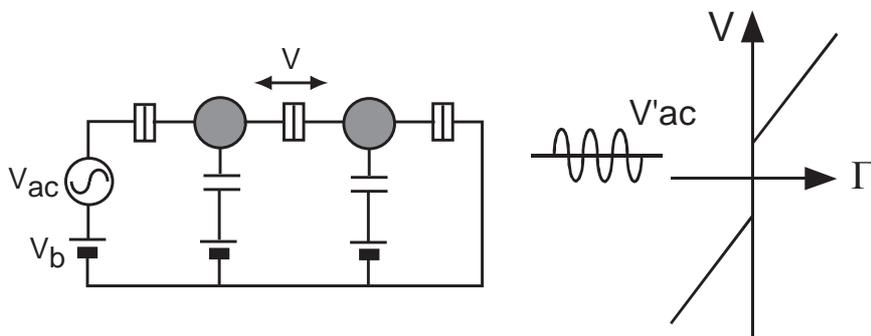


図22 (a)マイクロ波照射の等価回路モデル (b)ある容量の遷移確率（クーロンブロッケード特性）

口波を印可していない場合の電流のソースドレイン電圧依存性（クーロン振動）を図21に示す。これによれば、図19にみられたマイクロ波を照射したときに現れる新しいピークは、ソースドレイン電圧を大きくしていった場合にも現れ、このことから、マイクロ波印可の効果は実効的にソースドレイン電圧を大きくすることに等しいことがわかる。まず、マイクロ波がソースドレイン電極に強く結合することは十分理解できる。なぜならば、カーボンナノチューブ2重結合量子ドット部分はたかだか1ミクロン程度で、その近傍にはすぐにマクロなスケールの金属電極が存在している。このことから、カーボンナノチューブは周りの金属電極にシールドされてしまい、ナノチューブ内の電子自身は直接マイクロ波の振動電界を感じない。もちろんゲート電極にもマイクロ波電界が結合することが考えられるが、ゲート電圧がドットに与える効果は小さいために（ドットとゲート間の容量が小さい）マイクロ波の効果は主にソースドレインを振動させることであると考えられる。また、電極サイズがマイクロ波波長と同程度か少し小さい程度であることから、ソースドレインに結合するマイクロ波電界には、位相が異なる成分も存在し、電極を振動させていると考えられる。

このモデルを基に図22でマイクロ波応答を考える。ソースドレイン電圧は直流のバイアス電圧に加えてマイクロ波振動電界からくる交流の信号が加わることになる。2重結合量子ドットを形成する3つの接合の内もっとも小さな容量を有する接合（これはど

こかわからないが、図 2 2 では仮に真ん中の接合とする) にもっとも大きな振動電圧がかかる。電流の絶対値から大まかにトンネルレートは周波数よりも十分小さく、電子は交流電圧による振動追従していない (non-adiabatic regime)。1 つの接合のクーロンブロック特性を考えると、電圧の瞬時値はバイアス電圧を大きくするにつれ、振動している周期の内ある一定の時間はクーロンギャップを超えることが生じる。クーロンギャップを超える時間はバイアス電圧が大きくなるにつれて長くなる。電圧の瞬時値がクーロンギャップを超えても、必ずしもすぐに電子がトンネルをするとは限らないが、いったん電子がトンネルすると、すべての接合のクーロンブロックがはずれ電流が流れる (クーロンステアケースの原理)。このモデルにより、電流電圧特性の原点方向へのシフトやクーロン振動のマイクロ波応答を定性的に理解することができる。

このメカニズムは、量子的ではないにしろ通常の 2 乗検波とは adiabatic な応答ではないという点で異なる。この応答の特徴は、周波数に依存しないこと (電極ギャップより十分大きな波長で限定される)、感度が 2 乗検波に比べてきわめて大きいことから、ミリ波からテラヘルツ波領域での高感度電磁波検出に応用できる。今回の応答では量子的な応答が生じなかったが、これは、共鳴トンネルピークが消失していることからわかるように、どちらかのドット (あるいは両方) の閉じこめがトンネル障壁の変化により弱くなり、量子準位が周波数のエネルギースケール以上に広がってしまったことが理由として考えられる。今後、量子的な検波を実現できれば、ナノチューブのエネルギースケール (~ meV) から、テラヘルツ波領域までの単一光子検出器としての可能性を示唆しており、大変興味深い。

参考文献

- 1) 田中一義 (編) 「カーボンナノチューブ - ナノデバイスへの挑戦 - 」 (化学同人)
- 2) S. J. Tans, M. H. Devoret, H. Dai, A. Thess, R. E. Smalley, B. L. Geeligs and C. Dekker: Nature **397** (1997) 474.
- 3) M. Bockrath, D. H. Cobden, P. L. McEuen, N. G. Chopra, A. Zettl, A. Thess and R. E. Smalley: Science **275** (1997) 1922.
- 4) T. Ando and T. Nakanishi, J. Phys. Soc. Jpn. **67** (1998) 1704
- 5) P. L. McEuen, M. Bockrath, D. H. Cobden, Y. -G. Yoon and S. G. Louie: Phys. Rev. Lett. **83** (1999) 5098.

E . 得られた研究成果の評価および今後期待される効果

本研究では、世界でもいち早くカーボンナノチューブの量子ドットデバイスとしての資質に注目し、そのデバイスプロセスを開発するとともに、電荷型量子ビット、スピン型量子ビットへの応用に関する研究を行ってきた。主な成果は、(1) 2 重結合量子ドットの形成に初めて成功したこと (Appl. Phys. Lett.) (2) 2 重結合量子ドットの新しい電磁波応答 (Appl. Phys. Lett.) そして (3) 単一スピンの外部磁場によるゼーマン分裂の観測 (Phys. Rev. Lett. への投稿準備中) の 3 つである。(1) は、2 重結合量子ドット自身のカーボンナノチューブでの形成が世界で始めてであったこと、量子ビットとしては準備できたので今後の量子操作への展開が期待される。(3) は、電

子スピン量子ビットが形成できたことに対応し、やはり量子操作への展開が期待される。(2)は2乗検波とも量子検波とも異なる大きな非線形性を持つ2重結合量子ドットの電磁波応答で、原理的にテラヘルツ領域まで高感度を持つことが期待され、この周波数領域での、超高感度電磁波検出器への応用のみならず、この周波数帯を用いた量子状態のコヒーレント操作への展開が期待される。カーボンナノチューブの量子ドットデバイス应用に関しては、世界でもわれわれのグループがもっとも進んでいると考えている。そのことは、本研究に関する国内会議・研究会(19件)・国際会議(15件)への招待講演の数に反映されている。

本研究により、量子状態のコヒーレントな操作をナノデバイスを用いて行うことに関するきっかけとなったばかりではなく、カーボンナノチューブを用いてそれを行おうとしたことはナノチューブという新しい材料のナノデバイスへの展開に大きな役割を果たしたと考える。

3-2-2 量子ドット励起子のコヒーレント制御と量子相関効果

(研究主担当 日本電信電話株式会社・物性科学基礎研究所 鎌田 英彦)

A はじめに

本研究では、単一あるいは複数の量子状態のコヒーレントなユニタリ時間発展に基づくダイナミクスを積極的・人為的に利用・制御することで得られるコヒーレントな量子相関機能の実現に向けて、ナノ構造作製技術の確立と固体量子系のコヒーレント制御の実証、エンタングル状態の生成と制御を目指した。担当者は、半導体低次元構造中の素励起の光学的コヒーレント量子相関制御を重点課題として注力した。特に、固体単一量子としての量子ドット中の素励起を量子ビットとする量子コンピューティングの構成方法の検討とその基本ゲート動作の検証を行った。具体的には、電子・正孔対(励起子)をビット情報の担い手とし、光波領域の電磁波との電気双極子相互作用によって誘起されるコヒーレントな時間発展を制御して利用すること、並びにエンタングル状態の生成・制御を中心課題と位置づけた。(2)量子ドットの光物性の解明を基に、電磁波との相互作用をダイナミックに制御することにより単一ドット励起子のコヒーレント制御を検証し、量子ゲート機能を実証した。(3)さらに、単一光子レベルの光非線形性を利用した新たな光機能の創出を検討した。

研究の初期においては、重要な課題として以下を設定した：

- 基本ユニットとなる量子ドット構造作製技術の創出・発展の検討。
- 半導体量子ドット励起子状態のコヒーレント制御と量子ゲートの実証。

具体的な目標として、量子ドット励起子の励起状態を量子ビットとする1量子ビットのユニタリ回転ゲートの実証を第1の目標に設定し、量子ドット励起子を量子ビットとした量子ゲート操作の実証を行い、第2に2量子ドットの2励起子間の双極子間相互作用によるエンタングル状態の検出、コヒーレンスの評価を設定した。第3の目標は半導体量子ドット励起子系に特有の単一光子レベルの光非線形性を利用した新光機能の提案を設定した。

B 研究結果

これらの検討の結果、以下の研究成果をマイルストーンとして確立した：

- 単一の半導体自己組織化量子ドット中の一対の電子・正孔対を量子ビットとして見立て、コヒーレント光の照射によって位相緩和時間以内にその分布を自在に時間発展させ得ることを実証するとともに、これを利用して1量子ビット回転ゲートを実証した。
- 量子ドット励起子系においては、コヒーレンス寿命が長く、かつ励起子相関エネルギーが量子ドットの均一幅を超えるため1量子ドットあたり1光子レベルの強度で光非線形性が出現する。この結果、励起光子数に依存する量子力学的干渉効果が生じ漸進的な励起子吸収の消失を観測した。
- 実用的な観点から量子ビット・量子相関ゲートの構成・実装形態の創案を行った。

以下の節では、これらの研究成果のうち量子ドット励起子のコヒーレント制御と量子相関効果、ならびに励起子量子ビット・量子相関ゲートの構成・実装形態について報告する。

B - 1 半導体量子ドット励起子のコヒーレント制御と量子計算

近年、半導体ナノ構造が注目を集めている。ナノ組立て技術の進展により作成中のダメージ等によって特性を損なうこと無しに、0次元の半導体構造作ることが可能な技術が進展したおかげで、量子ドットは量子情報科学にとって魅力的なプラットフォームとなった^{1,2)}。これまでに提案された量子ドットの適用領域は非常に広範である：レーザを始めとして、メモリ装置、また、量子情報分野における単一光子エミッターや量子計算における量子ビット等、広範な領域をカバーする。この理由は紛れもなく半導体における電荷やキャリア密度、あるいはスピン等の自由度の制御の融通性と柔軟性である。量子ドットでは状態密度(DOS)の離散化により電子および正孔は量子化された原子状のスペクトルやレスポンスを獲得し、また、同時に位相緩和をもたらす散乱頻度の低下により長寿命のコヒーレンスを獲得する。加えて、原子に類似の特定のエネルギーに集中した振動子強度を利用して単一の量子系の離散的な状態の光波によるコヒーレント操作の実現が期待できる。これが量子計算におけるアドバンテージである。量子情報技術分野においては、さらに量子ドットの局在化したキャリア環境が増強されたキャリア・キャリア相関効果を通じて新しい光子・電子機能をもたらすと思われる。

本報告では、半導体量子ドット中の電子・正孔対(励起子)を基本要素とした前者の量子計算を念頭に置いたアプローチについて述べる。ここでは、ユニタリ時間発展としての励起子2準位系のコヒーレント光との相互作用が鍵である。励起子がゼロまたはひとつ存在する状態の任意の重ね合わせを生成・変更するユニタリ操作として、2準位系が強い電磁波に曝された時にコヒーレントな分極振動とともに生ずる分布振動、すなわち Rabi 振動を利用する^{18, 20-22)}。これが量子ビットに対する演算操作の基本である(図1)。重要なポイントは、励起子の双極子能率の増強(メゾスコピックな振動子強度の増強)²³⁾、状態の完全な離散化によるフォノン散乱の抑制による長い量子状態のコヒーレンス¹²⁻¹⁵⁾である。量子ビットの入れ物として多数の量子ドットを使い、コントロールゲートに多色レーザを用いるシンプルな量子計算スキームについて考察し、必要なハードウェア構成と、励起子のラビ振動を用いた励起子量子ビットのコヒーレントなゲートの実現方法、また多ビット化に向けての問題点と必要とされる技術要素について考察する。

B - 1 - 1 量子ドット励起子による量子計算

量子計算における重要な項目は、以下の通りである：

- (1) よく分かっている量子ビットから構成されるスケーラブルな物理系、
- (2) 初期化、
- (3) ゲート操作に要する時間に比して十分に長いデコヒーレンス時間、
- (4) ユニバーサルな量子ゲート機能のセット、
- (5) 個別の量子ビットの選択的な read-out。

最大の難関は着目する系の量子力学的な時間発展を損なう、環境に付随した制御の難し

いカップリングによるデコヒーレンスである。量子情報処理用の現実的なプラットフォームへの提案の多くは、デコヒーレンスを改善することを目的として考案された。これに呼応して、提案の内訳は原子核や電子スピンを始めとして、共振器光学の応用や本物の原子やイオンの量子状態を使用するものである。これらはコヒーレンス寿命が長いことがよく知られている。半導体量子ドットを用いる Loss と DiVincenzo⁴⁾の最初の提案では、電子のスピンを量子ビットとして採用し、それらのダイナミクスを利用する：スピンと環境の結合は電荷のそれと比べて非常に弱くデコヒーレンス頻度が低いので多数回のゲートを実行するには都合が良い。他方で、実際的な量子計算は量子ビットとして多くの2準位系を必要とする。この観点では半導体量子システムはスケーラブルな集積に適しているといえる。また半導体では基礎吸収端近傍の電子・正孔対の電気双極子に対して量子光学を応用した超短レーザーによる超高速なゲート操作を実現できる。したがって、基本の励起としての量子ドット中の電子・正孔対、すなわち励起子の離散化した状態密度と長いコヒーレンス寿命を生かし、増強された光学双極子モーメントを活用すべくピコ・フェムト秒レーザーによって高速のコヒーレントゲート操作(ユニタリ時間発展)を行うことが可能である。量子計算では物理系がデコヒーレンスするまでに行えるゲートの最大回数が重要であるため、長寿命なコヒーレンスと高速なゲートは非常に重要である。

B-1-2 量子計算と量子ゲートの方法

量子ドット励起子を量子ビットとして用いる量子計算の基本的なシナリオを以下に示す：まず多数の量子ドットを用意する。これが論理値を表わすビットとしての励起子の入れ物になる。論理値として量子ドット中の励起子の存在(無)を採用する。始めに述べたように、計算操作にはゲート機能としてコヒーレントな電磁波で誘起されるコヒーレントな分布振動を用いる。量子ドットの閉じ込めの強さがメソスコピックな領域(こ

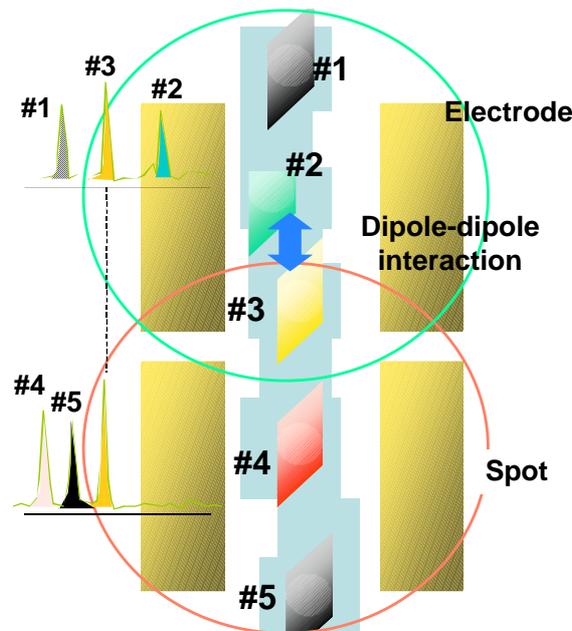


図1 全光学量子計算のための1次元量子ドットアレイ：個別の量子ドットへのアクセスには光ビームの位置決めと光学応答の周波数軸での識別を用いる。

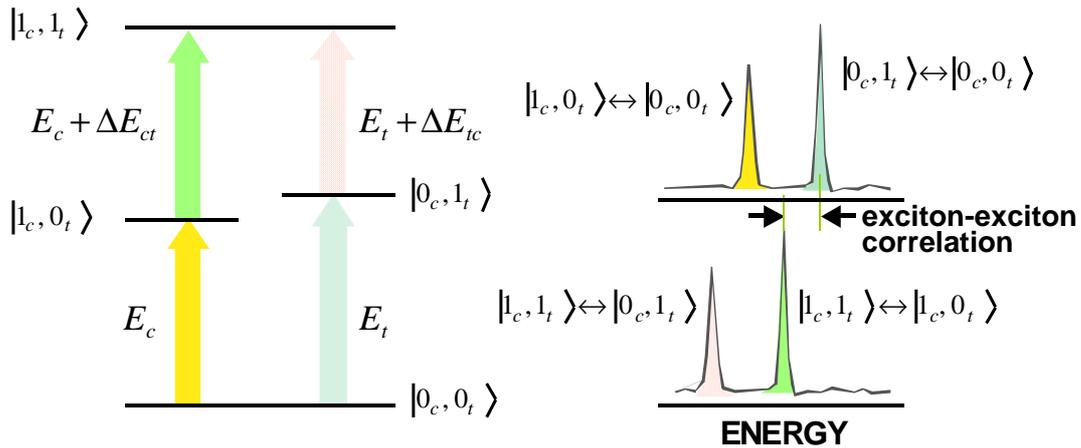


図2 励起子間の双極子・双極子相互作用で結ばれた隣接量子ドットの励起子ペアの光学遷移。励起子間の相関のため励起子をひとつ励起するのに必要なエネルギーは隣のドットの励起子の有無に依存する

ここで QD の領域は励起子拡がりの数倍)にあれば、増強された励起子双極子モーメントが予想される。量子ドットの大きさが励起子重心運動の量子化をもたらすほど十分に小さく、状態の離散化がフォノン散乱の抑制をもたらす状況にあれば、励起子重心運動は量子ドットの全域でコヒーレントであり、量子ドットの全域で電磁放射とコヒーレントに相互作用できるようになる。これは一種の超放射に相当し、有効に双極子モーメント(メゾスコピックな増強)を増強する。エネルギー・ギャップを 1eV より大きく選べば、熱励起はほとんど起きず量子ドットは基底状態にあるので初期化は容易である。量子ドットの線形配列の模式的な概要、および光学的な手段による量子ビットへのアクセスの仕方を図 1 に示す。

どんな普遍的な量子計算も一連の 1 ビットの回転ゲートおよび 2 ビットの制御 NOT (CNOT)ゲートの組み合わせに分解されるので 5)、量子ドットの 1 次元あるいは 2 次元配列を用意し、一度に隣接した 2 つの量子ビットにのみ作用するゲート・シーケンスを使う方法が最も自然であろう。重要なゲート機能は 1 ビットの回転、2 ビットの条件付きの回転および SWAP ゲートである。1 量子ビットの回転ゲートは、本質的に量子ビット 2 準位系の分布を外部摂動によって引き起こされる p パルス分のラビ振動に等価である。制御 NOT ゲートは 2 つの量子ビットのうち一方のビット(コントロール・ビット)が 1 状態である場合に限り、他方のビット(ターゲット・ビット)を回転させる機能を果たす。この機能は 2 つの量子ビット間の量子相関によって実現される。この条件付きの 2 ビットのゲート機能には最近接量子ビットペアの 2 つの励起子間の双極子・双極子相互作用を使用する(図 2)。このシナリオの重要な部分は条件付きのゲート操作を実現するのに、最近接量子ビットペア間の励起子・励起子相互作用だけを有効に働かせることにある。このとき系の実行ハミルトニアンは

$$\sum_i E_i n_i + \sum_{ij} \frac{\Delta E_{ij}}{2} n_i n_j \quad .$$

ここに E_i は i 番目の励起子のエネルギー、 ΔE_{ij} は i 番目と j 番目のドット中の励起子間の励起子・励起子相関エネルギーである。 n_i は励起子の有無を表す。相関エネルギー ΔE_{ij}

は隣接したドットにおいてのみノンゼロであると仮定した . 単一励起子のエネルギー E_i は隣のドット j の占有率により変化し以下のように与えられる :

$$E_i' = E_i + \sum_{j \neq i} \Delta E_{ij} n_j .$$

したがって与えられたドットのペア , c (*control*) と t (*target*) に対して , t -ドットのエネルギーは $E_t'(n_c) = E_t + \Delta E_{tc} n_c$ で与えられる . 2つの相関する励起子の遷移エネルギーを図2に示す . もしも , エネルギー $E_t'(n_c)$ のコヒーレントな光パルスが分布を π だけ回転するものであれば , *control*-ビットの分布 n_c が1の時だけ *target*-ビットの論理値がフリップする . これが CNOT ゲートの動作原理である .

これまでに単一の量子ドットの励起子・励起子分子系における励起子・励起子相関は実験的に 5meV 程度と評価されている 6,7) . 条件付きの2ビットゲート用にこの程度の量子相関を働かせるためには , 2つの隣接ドット間の距離を数 nm から 10nm までの範囲内にする必要がある . Biolatti 等 8)はこの双極子双極子カップリングを増強するもっと精巧な方法を提案している : この方法では外部の静的なシュタルク電場によって

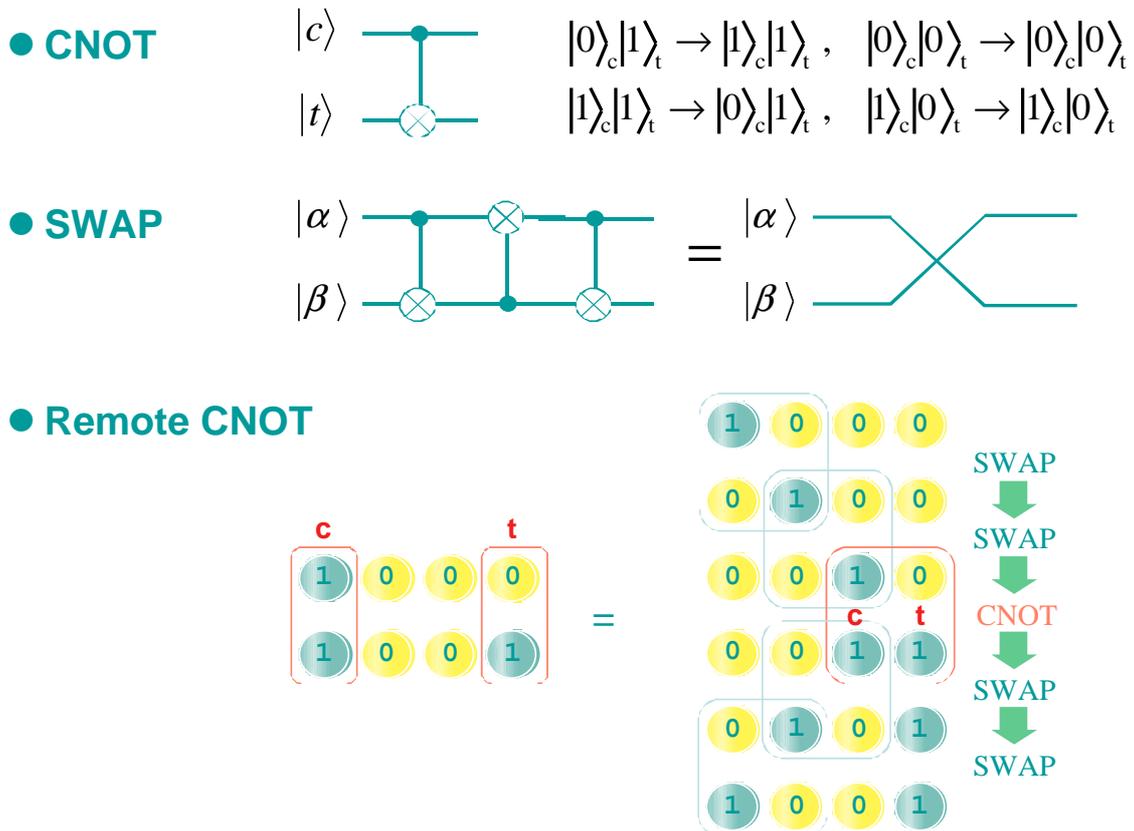


図3 (a) 制御NOT (CNOT) ゲート , (b) 3つのCNOTゲート操作で得られるSWAPゲート機能 . (c) 遠隔2量子ビット間のCNOTゲートは複数回のSWAPゲートとCNOTゲートに分解できる .

電子・正孔間の相対的な距離を有効に増加させ , 双極子・双極子相互作用の増強を行う . この外部電場は調整可能であるので , 双極子・双極子相互作用をオンオフしたり強さを変更することが出来る . さらに , シュタルク電場は目的とする2ビット以外の近くの量子ビットが好ましくないコヒーレント時間発展をしないように励起子遷移の周波数を

変えてしまうことにも利用できる。SWAP ゲートは、連続の 3 つの CNOT ゲートのシーケンスによって実現される。実効的に隣接した 2 つの量子ビットを交換する機能を有するこのゲートは、遠く隔てられた量子ビットペア間の CNOT ゲート・オペレーションのために使用される（図 3）。以上の 3 つのタイプのコヒーレントゲート機能を用いて任意の定量子アルゴリズムのためのゲート・シーケンスを構築することができる。

次に個々の量子ビットへのアクセスに着目しよう。どんな量子ドット系を使用するか、またどんな組立て技術を用いるかに拠らず、量子ドットにはサイズあるいは組成の統計的な分布がある。このような統計的な分布により遷移周波数のような量子ドットの光学のレスポンスにはエネルギー分布が生じる。これは多数のビットから特定のビットを識別することに利用できる。特定の量子ビットへのアクセスは、希望の位置に励起あるいはプローブビームスポットを位置させ、特定の周波数領域を励起あるいは観測することで成される。言い換えると、選択的なアドレッシングはビームの位置決めと周波数での識別とを組み合わせることで実現することができる。コヒーレントゲートおよび読み出しの概要を図 1 に記述した。

読み出しのための最も省力的な方法は散逸の利用かもしれない：量子ドット励起子系は真空場の無限個のモードに対して開いているので、光子やフォノンの自然放出がコヒーレンスの消失と励起の散逸をもたらす。したがって、一連の超高速のコヒーレントゲートによるシステム全体のコヒーレントな時間発展はフォノンおよび光子の放射で乱されて終わる。先程と同様に量子ビット励起子の自然放出光の周波数はドット毎に異なるので、すべての量子ビットのコヒーレントな時間発展の結果を自然放出光を観測することでの読み出すことが出来るだろう。多数の量子ドットまでこの戦略を延長することは自然であるように見える。また、計算のスケラビリティは保証されると考えられる。

考えられるもうひとつの問題は、核磁気共鳴(NMR)量子計算の場合でのように、与えられた周波数範囲中の量子ビット遷移数の増加が、光のスポットの典型的なサイズ中の量子ビットの数の上限を与えることである。遷移周波数の差が小さいと、ゲートパルス光の時間幅を広げて、同時に周波数軸上の線幅を小さくする必要がある。これは高速性をある程度損なう。現実的には $1\ \mu\text{m}$ のスポットに 10nm 毎に配置されたドットは約 100 個である。ドットの統計的なサイズや組成の揺らぎに起因したスペクトル拡がり $30\ \mu\text{eV}$ 程度であれば各ドットの周波数の平均的な差は $300\ \mu\text{eV}$ であり、ps のレーザ・パルスならば線幅は 1meV 程度なので複数のドットを駆動する可能性が生ずる。これは先程述べたように電場の印加である程度対策できる範囲である。また、励起子・励起子相関は疑似的にしか OFF することが出来ないため、CNOT ゲートには NMR 量子計算で行われているような、デカップリング操作が必要になるであろう。このような手続きは余分にコヒーレンス寿命を消費するが、それでもなお、計算のスケラビリティは保証される。

B-1-3 量子ドット作製技術

量子ドットをプラットフォームとする量子計算スキームを実現するためには、まず作製技術を確立する必要がある。近年、量子ドットは歪みを有する半導体ヘテロ構造が微細な島に自発的に再構成する現象、自己組織化、を利用して作られている。最もポピ

ユラーな方法は、(001)方位のGaAs基板上にGaAsに格子整合する半導体を、次いでInAs等のGaAsに格子整合しない結晶を積層成長し、成長を中断してInAsの微細な島状結晶への自己組織化を促す方法である。最も有名な現象はStranski-Krastanow成長モードと呼ばれ、歪み量で決まる膜厚を越えて結晶成長が続くと、それまでの2次元的な面の積層成長から3次元的な成長に変わる現象である。我々はこの方法と異なりGaAsの(311)B面上で起きるユニークな $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ の自己組織化をドットの作製に利用している：この自己組織化現象では、(311)B-GaAs基板2)上で、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ ヘテロ構造が内在する歪みを緩和してなるべく全エネルギーの小さな構造になろうとする自発的な自己組織化現象が起きる。その特徴は、(1)円盤状の $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ の形成、(2)大規模な原子移動、(3)混晶間の原子の相互拡散、(4)歪み構造の低歪み材料での被覆、(5)自発的な配列化、である。

GaAsの(311)B面上の自己組織化構造の典型的な表面二次電子顕微鏡像を図4(左下)に示す。また、原子間力顕微鏡イメージを2つのIn組成($x=0.2$ および 0.4 、左上)に示す。Stranski-Krastanow成長モードとは異なり、GaAsの(311)B面上の自己組織化構造では2次元成長によるwetting layerが無い。これは自己組織化プロセスの最中に、歪んだ成長界面を横切る原子の相互拡散が起きることと、非常に効率的な多量の原子移

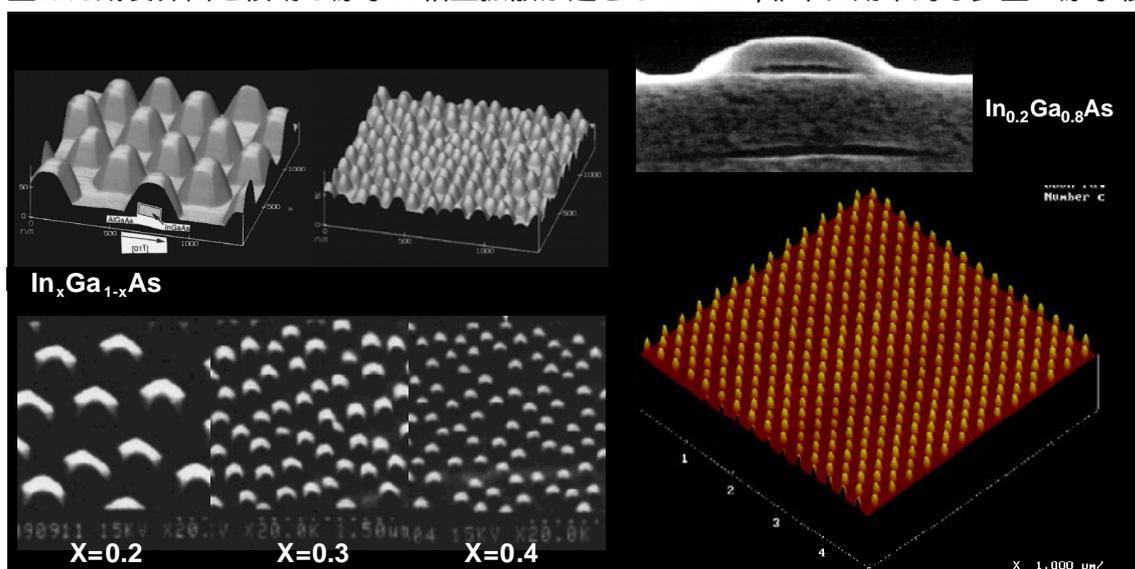


図4 自己組織化量子ドット：5 nm- $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ 、3.5 nm- $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ 、3 nm- $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ 試料の二次電子(SEM)像(左下)。原子間力顕微鏡(AFM)像(左上)。5 nm- $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ 試料の断面二次電子像(右上)、並びに位置制御を施した3.5 nm- $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}/\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ 試料のAFM像。

動が起きることによって、アルミを含む混晶によって円盤状のInGaAs島が自発的に覆われてしまうことによる。この結果は図で確認できることが出来る(図4, 右上)。この現象では、歪みの緩和、非常に動的な原子の再整理、表面エネルギーの高い面からエネルギーの低い面への転換、表面の原子の相互拡散、および再整理によって歪み島を構成することによって全体のエネルギーを低下しようとする自発的な傾向が大きな役割を担っていると推察される。円盤状の構造の大きさは直径にして30~100nm程度であり、歪みの大きさ、つまり、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ の組成 x によって制御できる。この現象の著しい特徴は $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ドットの自然な整列である(図4, 左上)。この傾向のために位置をコン

トロールするための工夫を追加することで自己組織化の位置とその整列性を大幅に改善することができる(図4, 右下). よく知られているように結晶歪みを有する構造はそれ自身の格子定数に近い格子上に成長する傾向がある. 大きな InGaAs 島の周期的配列を形成し,それを AlGaAs で埋め込めば InGaAs 島の直上の AlGaAs の格子定数は InGaAs 島に引っ張られて $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ の自然状態での格子定数に近くなる. 後はこの上に薄い $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 層を成長し,自己組織化を起こさせれば,図4の中で示されるような著しく良く整頓された二次元のドット配列を得ることが出来る. 大きな InGaAs 島の役割は $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ の格子を歪ませることであり,歪みアンカーと言えるだろう. プロセスの詳細は別記 11)を参照されたい.

これらの技術で,量子ドット励起子を作製し量子計算に使うことは十分に現実的である. ドットのリニア・アレイは,ドット層を積み重ねることにより最も単に作る事が出来るだろう: 格子不整合混晶は自身の格子定数に近い格子を好むので,歪みドットは概ね直上にスタックする傾向を持っていることが知られている. 一次元の配列を定義する別の簡便な方法は界面の揺らぎを有する量子細線の使用かもしれない. 1~2 単分子層程度の界面揺らぎを有する量子井戸では相対的に井戸層厚が大きい部分のポテンシャルエネルギーは相対的に低くなるため,その部分が十分に微細であれば量子ドットとして働くことが知られている. 実際,成長中断等で故意に界面揺らぎを導入した量子井戸では,そのような島状の領域に励起子が局在し,シャープな励起子発光スペクトルが観測される(6, 12). 重要なポイントは,最近接ドット間で有効な励起子・励起子相関が得られる量子ドットの配列をどのようにして作り上げることが出来るかであり,その試みは現在進行中である.

B - 1 - 4 単ドット励起子のラビ振動と回転ゲート

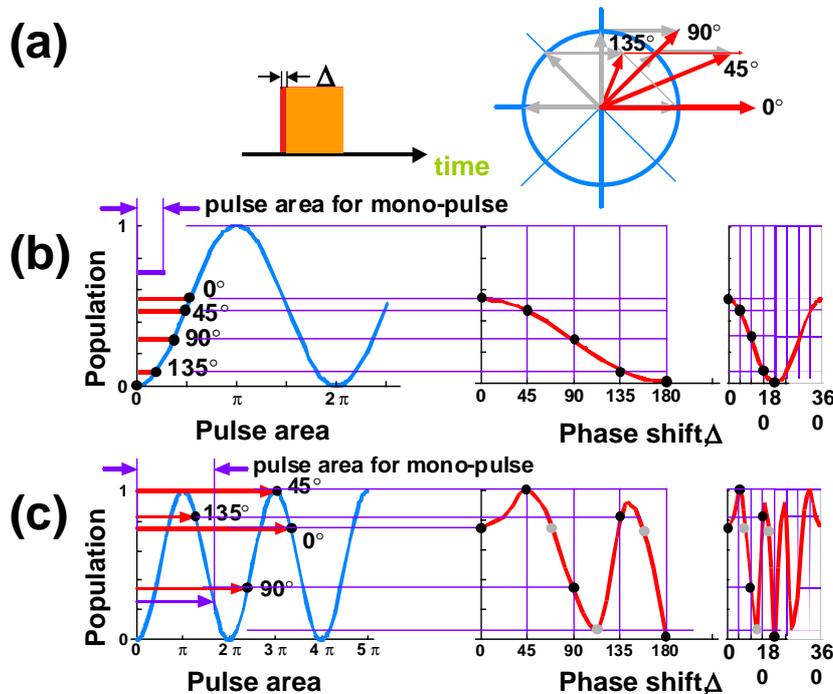


図5 パルス対によって生ずる2準位系の応答. (a) オーバーラップする2つの光パルスが与える実効的な電場はパルス間の相対位相差に依存する. (b) 低強度のパルスの下で生じる2準位系の分布干渉は正弦関数的に振る舞う. (c) パルス面積が π 程度か,あるいはそれを越える高強度のパルス下で生じる分布干渉には大きな分布変化の増減に伴って複雑な周期パターンを示す.

前節で議論したように、量子ゲートのインプリメンテーションは本質的にラビ振動の使用に他ならない。したがって、実験のインプリメンテーションは非常に単純である。特定の量子ドットを計測するには、顕微鏡タイプの光学系を用いて遷移に共鳴するパルス・レーザを照射し応答を計測すればよい。特定のドットのレスポンスを周波数領域でのフィルタリングにより識別するのは容易である。著者等は単一の励起子ビットの回転ゲートに相当するテクニックを利用して 2-パルス励起の実験を行なった。コヒーレントな光パルス・ペアで励起子 2 準位系を励起する場合を考えよう。光パルスの強度が小さければ、最初の光パルスは励起子の分極の振動を誘起する。励起光が励起子 2 準位系のエネルギー差に共鳴であれば、この分極の振動周波数は励起光の周波数に等しい。このような分極の振動が 2 準位系のコヒーレンスに相当し、系が環境との相互作用によってコヒーレンスを失うまで継続する。2 番目のパルスの効果は 1 番目のパルスが誘起した分極のコヒーレントな振動と 2 番目のパルスの振動の相対的な位相差に応じて変わる。励起が弱い場合は光パルスが作る分布変化はほぼ線形であるので、位相差が $2p$ の整数倍であれば分極の振動振幅は倍加し、 π の奇数倍であれば振動を打ち消す。これは分極振動の干渉に他ならない。この様子は Bloch-Feynman vector の時間発展でも理解できる。強い励起光のもとではこのような分極の干渉効果に加えて、分布が大きく変化する効果が加わる。この様子を図に示した。2 つのパルスが時間的にほぼ重なっている場合を考える。2 つのパルスの時間差は位相差で記述できる。この場合、2 つの光パルスの実効的な電場は位相角だけ方向の異なる同じ大きさの 2 つの電場ベクトルを合成したもので与えられる [図 5 (a)]。分極の振幅、すなわち分布は電場が存在する間ラビ振動するので、パルス持続時間と電場に比例するパルス面積が各位相について得られ、相当する分布変化を再び位相差の関数としてプロットすれば、図 5 (b) が得られる。強度の小さい光のもとでは、有効な電場は分布振動がゼロから立ち上がる領域でのみ変化するので、分布変化は位相差について単に正弦関数的に増減するだけである [図 5 (b)]。光電場が大きく個別のパルスが p におよぶ分布変化をもたらす時は、2 パルスを合成した有効な電場は非線形な分布の変化を生ずるため、分布の位相差についての変化はかなり複雑になる。この場合も光の周波数での繰り返しは保たれる [図 5 (c)]。

さて、このような原理をもとにして単一のドットの励起子双極子干渉実験 (14, 15) を行った。2 つの光パルスの生成とパルスの相対位相のコントロールを同時に可能にする

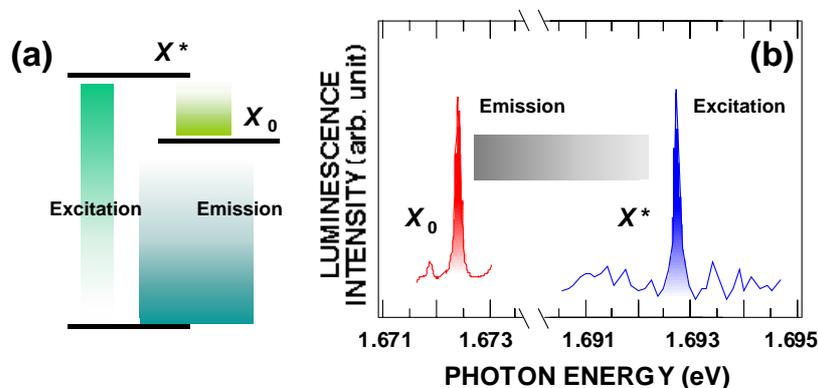


図6 (a) コヒーレント制御実験に用いた単一ドット励起子のエネルギー準位スキーム。(b) 励起準位の励起スペクトルと最低エネルギー準位の発光スペクトル。

ため、高コヒーレンスなヘリウムネオン・レーザの干渉によって光路長差をロックし安定化する機構を備えた Mach-Zehnder 干渉計を利用した。モードロック・レーザ光をこの安定化された干渉計を通すことで時間差が精密に安定化された光パルスペア・シーケンスが得られる。パルス・ペアの相対的な遅延は $1/130$ ($l=633\text{nm}$) まで安定化された。一時的なパルス相関性幅は約 5 ピコセカンドとした。

実験に使用した量子ドットは前のセクションで記述した (311)B-GaAs 基板上の 3.5nm 厚 $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ である。双極子干渉を観測する 2 準位として単一の量子ドットの励起子のある励起状態を上準位として選び、図 6 (a) に示すようにこれを共鳴励起し、分布変化を反映するホトルミネセンス強度を 2 つのパルス間の遅延の関数として計測した。量子ドット励起子のコヒーレンス寿命は 10 ~ 100 ピコセカンドとバルク半導体や量子井戸と比べて遥かに長いが、依然としてデコヒーレンスが主たる障害である。しかしデコヒーレンスや散逸は既に述べたように読み出し方法として使用することができる。デコヒーレンスやエネルギー緩和はピコ秒のレーザ・パルスがあたっている時間内では無視できるので、レーザが作る分布変化は最低エネルギー励起子状態にコピーされ、さらにこの最低エネルギー状態は自然放出を起こす。したがってこの放射の強度はレーザ・パルスによって引き起こされたコヒーレント分布変化を反映する。強い光に対しては、励起子の分布は周期的な吸収・誘導放出を繰り返す(ラビ振動)、エネルギー軸上では遷移の分裂として実験的に観察できる。実際、連続的なレーザでさえ強度が十分に高く共鳴であれば基底状態ホトルミネセンス放射 (13) のラビ分裂を引き起こす。これは励起子状態が強い光でドライブされて dressed pair state になることを反映している。このようなときの基底状態放射のスペクトルを図 7 に示す。

図 8 に示す実験結果は原理で説明した分極干渉の特徴をよく再現する：低励起時には、第 1 のパルスによって引き起こされたコヒーレントな双極子の分極振動 [図 8 (e)] が、パルス同士のオーバーラップが無くなった後も続き、約 40ps の時定数で減衰 [図 8 (a) および 8 (b)] することが分かる。この減衰は励起子の音響フォノンの放出による最

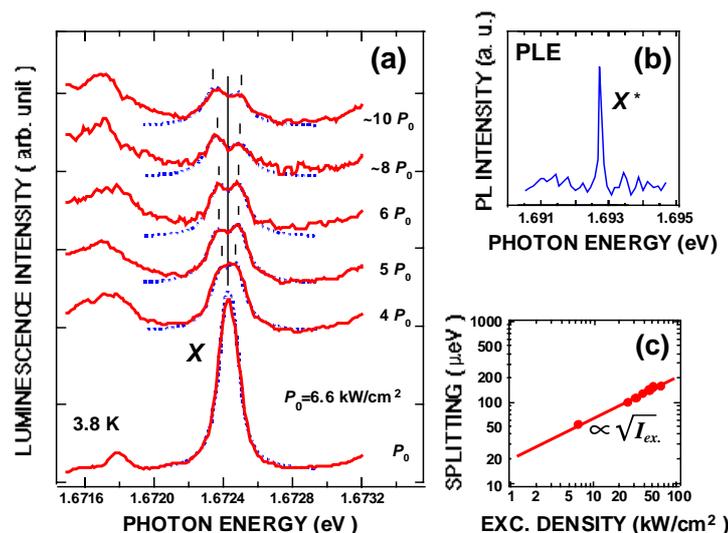


図7 (a)単一ドット励起子の励起状態 X^* [(b)] を共鳴励起した時のルミネッセンススペクトル：励起強度の増大とともに励起子発光は分裂し、その分裂エネルギーは励起光の電場強度に比例して増大する、(c)。

低準位までのエネルギー緩和によるものだと考えられる。レーザ励起強度が1桁以上増加するとともに、レーザの電磁場は双極子の振動（歳差）だけでなく分布振動（章動）をも引き起こす。強励起時の複雑な励起子双極子干渉縞がこれを反映している[図8(f)]。これに呼応して別の振動する振る舞いは、周辺封筒[図8(c)および8(d)]に10~20ピコ秒の期間で現われる。これらは励起子2準位系のラビ振動を明示する。量子ドット励起子の双極子モーメントは43Debyeであると見積もられた。

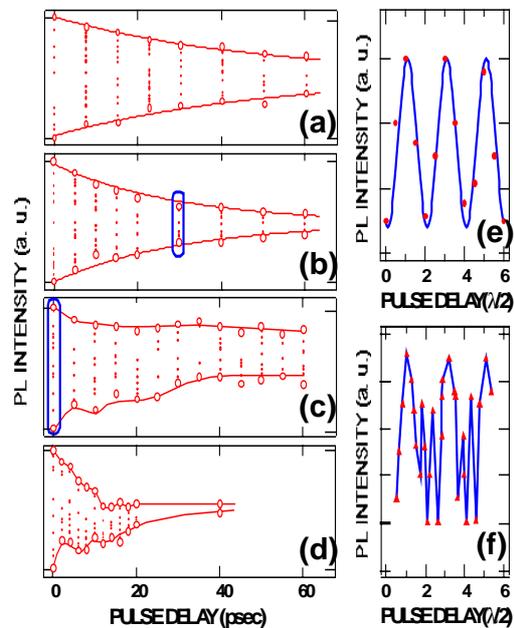


図8 単一ドット励起子の2パルスコヒーレント分布干渉実験：最低エネルギー準位からの発光強度から得られる励起準位の分布をパルス間の相対遅延の関数として示す。(a)励起密度が P_1 ($0.067 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ /pulse)の時、(b) $2 P_1$, (c) $12 P_1$ ($0.8 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ /pulse), (d) $24 P_1$ 。励起光周波数で振動する分極干渉フリッジ、(e)図(a)で遅延 30 ps付近、(f) 図(c)で遅延0ps付近。

最後に単一量子ドット励起子分布のコヒーレントな制御を実証する。コヒーレントな励起子分布の制御の基礎的な機能は、パルスによって任意の励起子分布を、したがって任意の重ね合わせ状態を生成しそれを自在に変更することである。この機能の検証のために干渉計を利用する同じセット・アップを使用した。図9は実験のデモンストレーションを示す。第1のパルスは励起子の2準位系を任意の分布状態（重ね合わせ状態）にセットする。図9ではパルス面積は約0.3-0.4pにセットした。第1のものに10ps遅れた第2のパルスはそれが第1のものに同位相であれば上準位の分布を2倍にする。この場合、対応するルミネセンス強度は、第1のパルスによってのみ引き起こされたそれよりほぼ2倍大きい。逆相であれば分布はゼロに戻る。したがってルミネセンスは観測されない。これは最も単純な量子ゲートの機能である回転ゲートに他ならない。

自己形成ドットでは最低エネルギーの励起子状態のコヒーレンス寿命が1ns程度持続することが報告されている(16-18)。この場合、励起子量子ビットの1000回程度のコヒーレントゲートが行えることが期待できる。次なる課題は2量子ビット量子相関の時間

発展の制御，ならびに CNOT ゲート機能の実現である．

C まとめ

半導体量子ドット中の素励起を利用する量子計算スキーム，および論理的なゲート操作・構成のプロトタイプについて記述した．ここでは，各々の量子ドット中の励起子を識別可能な量子ビットとし，量子ゲート操作に対応する相互作用として外部電磁放射がもたらす電気双極子相互作用が駆動する励起子 2 状態系の時間発展を利用する．このアプローチに沿った重要なステップとして，単一ドット励起子のコヒーレントな時間発展を調べた．量子状態と動的な電場の間の強い結合は，量子ドットにおけるコヒーレントな過程のうち最も重要な役割を果たす．このコヒーレントな制御によってどんな重ね

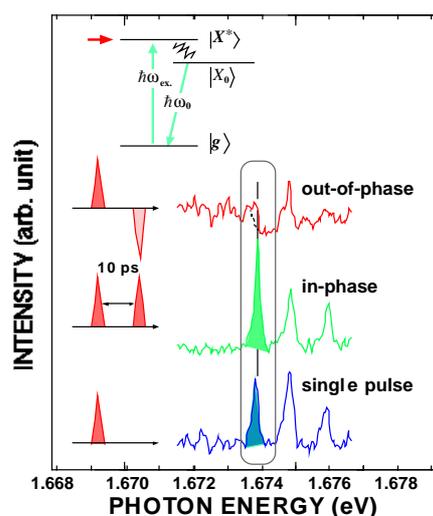


図9 位相の精密制御を行うことで実施した単一励起子量子ビットの回転ゲート実験．単一のパルスは重ね合わせ状態を作る．2つのパルスと同相，あるいは逆相で照射すると励起子 2 準位系の分布はそれぞれ倍増するかゼロになる．

合せ状態にある励起子も生成することができる．より精巧な方法で固体中の量子状態のコヒーレントな制御することで，さらにエンタングル状態の生成への道を開くであろうと思われる．

D 研究の自己評価および今後の展開

量子演算に向けたアプローチにおいては，2量子ビットの制御NOTゲートに代表される複数ビット間の相関ゲートの実証とエンタングルメントの確認が重要な課題の筆頭に挙げられる．これは，複数ビット間のエンタングルメント量子コヒーレンスの観測・実証と言い替えることが出来る．

また，よく知られているように光子は相互作用が非常に弱いため光子同士の相関を生じることが困難な反面，コヒーレンス寿命が著しく長い．一方，電子系では反対に相互作用・相関が非常に大きい反面，長いコヒーレンス寿命が得難い．量子情報技術においてはこの両者の仲立ちをする機能が求められている．これらの研究項目は近年活発に展開している量子鍵配付等の量子暗号技術の展開上も非常に重要な要素技術である．単一光子の発生源としての量子ドットのポテンシャルや，電子系の励起と光子を相互に

変換し得る媒質としての半導体の性質 ,また先に述べた量子ドットの単一光子レベルでの光非線形性を根拠として ,電子 (励起子) 系のエンタングルからエンタングル光子対への変換の可能性の追及も重要な課題である .

参考文献 :

- 1) D. Leonard, M. Krishnamurthy, C. M. Reaves, S. P. Denbaars, and P. M. Petroff, Appl. Phys. Lett. 63, 3203 (1993).
- 2) R. Nozel, et al., Nature 369, 131 (1994).
- 3) D. P. DiVincenzo: quant-phy/0002077 (2000).
- 4) D. Loss and D. P. DiVincenzo, Phys. Rev. A 57, 120 (1998); D. Loss and D. P. DiVincenzo, Phys. Rev. B 59, 2070 (1999).
- 5) D. Deutsch, A. Brenco, and A. Eckert: Proc. Roy. Soc. London Ser. A 474, 969 (1995).
- 6) K. Brunner et al., Phys. Rev. Lett. 73, 1138 (1994).
- 7) H. Kamada et al., Phys. Rev. B 58, 16243 (1998).
- 8) E. Biolatti et al., Phys. Rev. Lett. 85, 5647 (2000).
- 9) T. H. Stievater, Xiaoqin Li, D. G. Steel, D. Gammon, D. S. Katzer, D. Park, C. Piermarocchi, and L. J. Sham, Phys. Rev. Lett. 87, 133603 (2001).
- 10) Gang Chen, T. H. Stievater, E. T. Batteh, Xiaoqin Li, D. G. Steel, D. Gammon, D. S. Katzer, D. Park, and L. J. Sham, Phys. Rev. Lett. 88, 117901 (2002).
- 11) E. Kuramochi, J. Temmyo, T. Tamamura, and H. Kamada, Appl. Phys. Lett. 71, 1655 (1997); E. Kuramochi, J. Temmyo, T. Tamamura, and H. Kamada, Appl. Phys. Lett. 71, 3448 (1997).
- 12) D. Gammon, E. S. Snow, B. V. Shanabrook, D. S. Katzer, and D. Park, Phys. Rev. Lett. 76, 3005 (1996).
- 13) H. Kamada, H. Gotoh and J. Temmyo, T. Takagahara, and H. Ando, Phys. Rev. Lett. 87, 246401 (2001).
- 14) H. Kamada, H. Gotoh and J. Temmyo, T. Takagahara, and H. Ando, phys. stat. sol. (a) 190, 485 (2001).
- 15) A. P. Heberle, J. J. Baumberg, and K. Köhler, Phys. Rev. Lett. 75, 2598 (1995); X. Marie, P. Le Jeune, T. Amand, M. Brousseau, J. Barrau, M. Paillard, and R. Planel, Phys. Rev. Lett. 79, 3222 (1997); N. H. Bonadeo, J. Erland, D. Gammon, D. Park, D. S. Katzer, D. G. Steel, Science 282, 1473 (1998).
- 16) D. Birkedal et al., Phys. Rev. Lett. 87, 227401 (2001).
- 17) M. Bayer et al., Phys. Rev. B 65, 041308 (2002).
- 18) T. Flissikowski et al., Phys. Rev. Lett. 86, 3172 (2001).

3 - 2 - 3 . 量子ドット系のラビ振動

(研究主担当：東京工業大学大学院理工学研究科 南 不二雄)

A . はじめに

M B E や M O C V D などの最新の結晶作成技術や微細加工技術の進歩により、ナノメートルサイズの結晶が作れる時代になってきた。このようなナノ空間中では、電子のドブロイ波長と空間のサイズが同程度となり、バルクの場合とは異なる電子の状態がこのようなナノ空間中では実現している（量子閉じ込め構造）。特に、3次元閉じ込め系である半導体量子ドット中では電子の構造は原子の場合と酷似していて、かつ以下に述べるフォノン・ボトルネック効果によりその線幅は非常に鋭いことが予想されている。実際、それを反映して半導体量子ドットの吸収、発光スペクトル線の幅も極端に狭いことが報告されている。ここでは、ナノ空間として“人工的な原子”である半導体量子ドット構造を考えることにする。

3次元閉じ込め系である半導体量子ドット中に電子を閉じ込めた場合電子のエネルギーは完全に離散的になる。したがって、結晶中を自由に電子が動けるバルクの場合とは電子とフォノンの相互作用は大きく異なり、電子とフォノンとの衝突確率は著しく減少する（フォノン・ボトルネック）ことが予想される[1,2]。その結果、励起状態の非輻射過程は無視できる程になり、励起状態の寿命は輻射過程により決められると考えられる[3,4]。このことは半導体量子ドット中ではレーザー光により半導体量子ドット中にコヒーレントに作成された電子分極の位相情報はフォノンとの衝突による過程が凍結されているために長時間保持されるはずである[5,6]。このことをうまく利用すれば、量子コンピューティングを行う画期的な材料になるのではないかと多くの研究者が期待している。

本研究では、半導体量子ドットである GaAs 量子ドットにおいて電子準位、特に励起子準位の線幅が十分に狭いこと、およびレーザー光で作成された電子分極の位相が 1ns 以上も保持することを示すことにする。

B . 研究内容

まず、液滴エピタキシー法で作成した GaAs/Al_{0.4}Ga_{0.6}As 量子ドット（ドット径 ~ 15nm、密度 ~ 10⁹ cm⁻²）からの微小領域（1 μm 以下）からの発光（μPL）を調べた。図

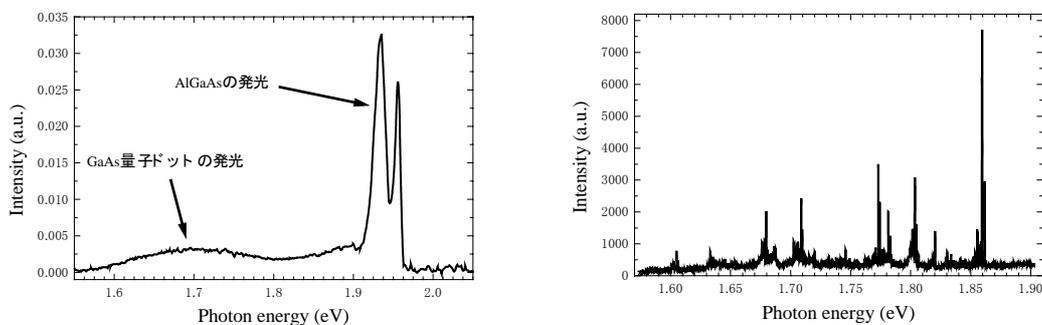


図1 GaAs/Al_{0.4}Ga_{0.6}As量子ドットの発光スペクトル（右）顕微発光スペクトル（左）

1にこの試料からの発光スペクトルを示す。横軸は光のエネルギーであり、縦軸はその波長での放出光の明るさを示している。左図は広い空間領域からの発光を集めた通常のPLスペクトルである。1.9eVより高エネルギー側はAlGaAs障壁層からの発光であり、1.7eV付近にある幅広い発光バンドが量子ドット中の励起子からの発光である。作成された量子ドットのサイズが均一でないため、閉じ込めエネルギーが少しずつ異なる励起子からの発光をすべて観測しているため、量子ドットからの発光スペクトル幅は単一量子ドットからの発光線の幅に比べるとかなり広がっていると思われる(不均一広がり)。

たくさんの量子ドットからの発光の重ねあわせによってスペクトル幅が広がっている系(不均一広がり系)において単一の量子ドットからの発光を観測する方法としてマイクロPL(μ PL)法がある。この方法では、観測する領域を狭めて、その領域にある量子ドットの数減らすことにより、発光線の重ねあわせをなくし、個々の量子ドットの発光を観測する。この測定に使用した試料の量子ドットの密度は $\sim 10^9 \text{ cm}^{-2}$ であるから $1 \mu\text{m}^2$ の領域には10個程度の量子ドットしか含まれない。この程度の領域からの発光を観測すれば単一量子ドットからの発光を観測できることになる。ここでは、微小領域からの発光のみを見るために、顕微鏡を用いて $1 \mu\text{m}$ 程度の領域からの発光を集めた。その結果が右図に示してある。 $1 \mu\text{m}$ 程度の領域からの発光を集めた場合には個々の量子ドットからの発光を反映してスペクトルは鋭い発光ピークの集合に変化している。GaAsバルク結晶中の励起子のエネルギー(1.515eV)よりはるかに高エネルギー側に鋭い発光線の集合が観測されている。このデータは我々の試料でGaAsドットがちゃんと存在していることを示している。個々の発光線のスペクトル幅は測定系の分解能(0.2meV)以下であり、GaAs量子ドット中の励起子準位の幅は予想通り十分狭いことが判明した。このスペクトル線の細さはGaAs量子ドット系にフォノン・ボトルネック効果があることを示している。

GaAs量子ドット系ではフォノン・ボトルネック効果により、励起子線のスペクトル幅は非常に狭いことが確認できたが、このことは励起子分極の位相が長時間壊されないことを意味している。時間領域から直接このことを確かめるためにはパルスレーザーを

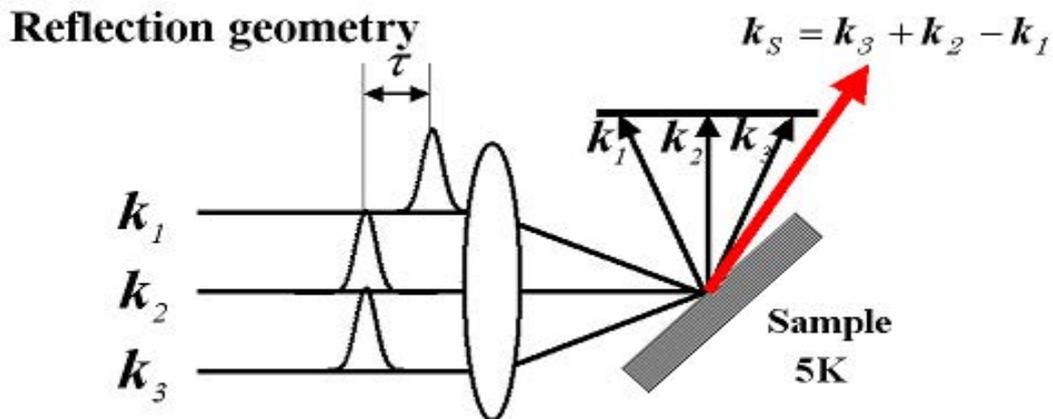


図2 フォトンエコーの実験概念図(反射型)

用いたコヒーレント分光法であるフォトンエコー法を使うのがもっとも有効である[8]。この方法では図2に示すようにパルスレーザー光を3つに分け、 k_1 、 k_2 、 k_3 の方向から試料に入射させる。1番目のパルスと2番目のパルスで作られた励起子分極が干渉して物質上に干渉縞が作られ、それにより3番目のパルスが回折される。この際に、1番目のパルスと2番目のパルスを時間 だけずらして入射させて、 だけ時間が経って

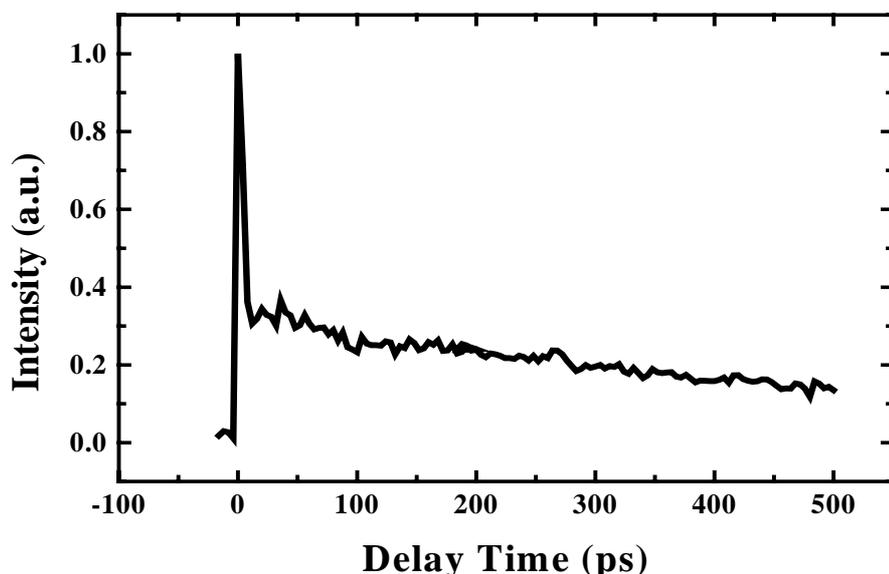


図3 GaAs量子ドット中の励起子フォトンエコー

も励起子分極は干渉できるのかを3番目のパルスがどの程度回折されるのかで調べる方法である。励起子分極の位相が壊れない間は干渉縞ができるのでこの方法で励起子分極の位相緩和情報が取得できるのである。

量子ドット中の励起子に対するフォトンエコー法の結果を図3に示す。ここでは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。時間のゼロ点付近に早い減衰が観測されるが、その後は減衰時間 ~ 1 nsで非常にゆっくりと減衰している。したがって、この系の位相緩和時間は1ns程度であることと結論できる。通常の量子井戸の励起子の位相緩和時間は1ps程度であるのでそれから比べると量子ドット内の励起子の位相緩和は極端に遅いことが分かる。この減衰時間から単一量子ドット中の励起子準位のスペクトル幅は ~ 1 μ eVと見積もれ、非常に狭いことが判明した。時間のゼロ点付近の早い減衰は基板であるバルクのGaAsの位相緩和による減衰であると考えている。同様な結果はGaAs(9nm)/AlGaAs量子井戸中のアイランド構造に捕まった励起子に対しても得られた。

図3に示したフォトンエコーの測定の際に、1番目のパルスと2番目のパルスの時間差をフォトンエコーの遅い減衰が観測される適当な時間に固定して、1, 2, 3番目のパルスの強度を変化させて見るとフォトンエコーの信号強度が大きく変化すること

が判明した。その結果を示したのが図4である。1、2、および3番目のパルスを入力電界を $0.4E_0$ から $0.6E_0$ に変えると、信号は強くなる。しかしながら、より強いパルスにすると、信号は減少し始める。そして、 $0.8E_0$ の入力電界では、信号は完全に見えなくなる。入力電界の増加を続けると、信号は再び現れる。つまり、エコー強度は励起強度の増加に伴い振動的に大きくなったり、小さくなったりしているのである。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[7]。図4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、固体中でラビ振動を観測するのは難しいが、励起子の

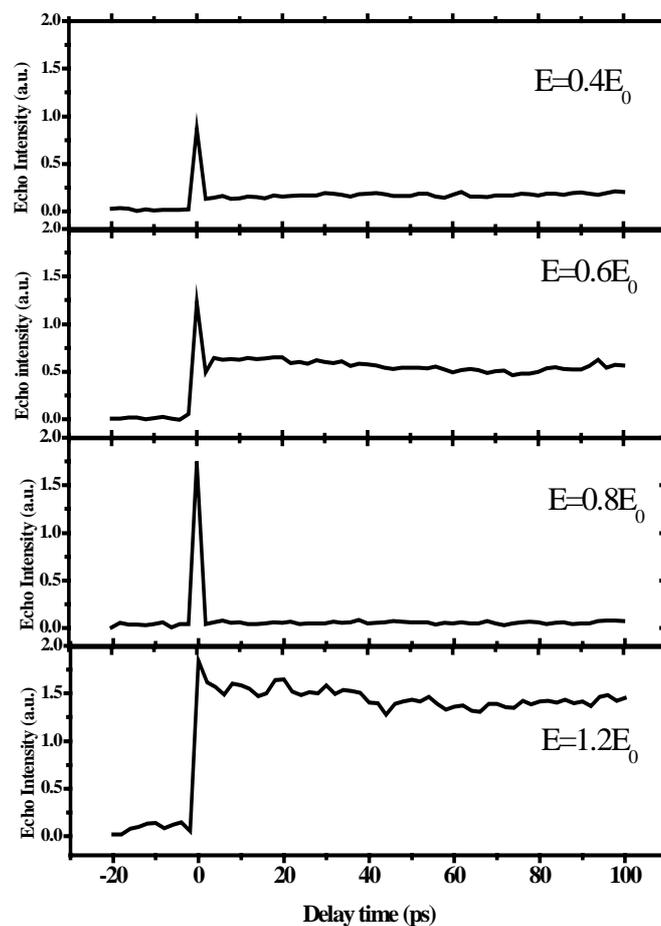


図4 フォトンエコー減衰曲線の励起強度依存性

位相緩和時間 $\sim 1\text{ns}$ 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 ビットの回転を行うための必須の現象であるので、図3、4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。

入力電界に信号の強さの詳細な関係を調べるために、一定時間遅延 におけるエコー

強度の入射電場依存性を測定した。図5で示されるように入射電場強度に対して明確な振動構造が観察される。振動振幅は入力電界に対して非線形に増大する。また、振動周期もわずかに変化している。この振動の振る舞いは原子のような簡単な2レベルシステムの場合と非常に異なっている。簡単な2レベルシステムの場合では、Rabi振動に対する振幅と周期は、理想的な正弦関数的な振る舞いをするのに対し、この系の場合はまったく異なっている。したがって、この系には追加的な増強効果が存在することが考えられる。この増強効果の原因として2つの可能性が考えられる。1つは、励起子分子効果に対応するドット内における励起子の間の相関効果である。もう1つが双極子-双極子相互作用(局所場修正)に関連する相互ドットの間での励起子相関効果である[8]。励起子分子効果であるかを確認するために、円偏波の励起でこのような振動構造を観察

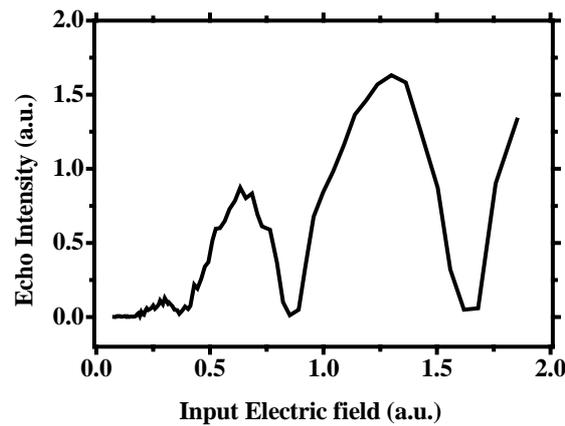


図5 $\tau=100\text{ps}$ でのフォトンエコー信号の励起強度依存

することができるかを調べた。その結果、同じ振動構造が観測できたので、励起子分子効果は我々の系では無視できる程度であると結論できる。相互ドットの間での励起子相関効果では、励起子の間の距離がレーザー波長との比較で十分小さくしなければならないので、ドット密度は重要な役割を果たす。私たちのサンプルのドット密度は $\sim 10^{11}$ であるとマイクロ PL 測定の結果から手荒く見積もられることより、ドットの間での平均距離は $\sim 30\text{nm}$ と計算することができる。ドットの間での平均距離は原子と分子の双極子-双極子(NDD)相互作用理論によって予想される距離より1か2桁の大きい値であるが、半導体量子ドットでの双極子モーメントは原子と分子よりも数桁大きいため、NDD効果は平均距離が大きい系でも現れることができる。NDD効果が外部電場に重畳すると、Rabi振動の振る舞いは入力電界で強く変更される。この重畳効果により、実験結果はうまく説明できる。

参考文献

- [1] U.Bocklmann and G.Bastard, Phys. Rev. B42 (1990) 8947.
- [2] H.Benisty, C.M.Sotomayor-Torres and C.Weisbuch, Phys. Rev.B44 (1991) 10945.
- [3] D.Gammon, Science 273 (1996) 87.
- [4] Xudong Fan, T.Takagawara, J.E.Cunningham and Hailin Wang, Solid State Commun.108 (1998) 857.
- [5] E.Biolatti, R.C.Iotti, P.Zanardi and F.Rossi, Phys. Rev. Lett. 85 (2000) 5647.

[6] P.Chen, C.Piermarocchi and L.J.Sham, Phys. Rev. Lett. 87 (2001) 67401.

[7] L.Allen and J.H.Eberly, Optical Resonance and Two-Level Atoms (Dover, New York, 1975).

[8] A. Knorr, K. -E. Susse, and D. -G. Welsch, J. Opt. Soc. Am. **B9** 1174(1992).

D . 得られた研究成果の評価および今後期待される効果

半導体量子ドット中で励起子ラビ振動が観測できたので、満足行く成果が得られたと思う。通常系では見られないラビ振動現象が観測できており、他の物質でも観測できるか興味深い。この現象に量子ドット間の双極子双極子相互作用が重要だとすると量子計算に対して大きな影響があると思う。この点に関して今後さらに研究を進めるつもりである。

3 - 2 - 4 電子回路における量子相関機能発現の可能性

(研究担当: 東洋大学工学部 椿光太郎)

A 始めに

電子回路における量子相関機能発現の可能性を追求する目的で、量子細線を使った量子電子回路を考案した。考案した量子電子回路実現の一番大きな障害は相関ゲートの感度が低いことである。相関ゲートの感度を向上する基本的なアイデアを着想し、着想したアイデアが原理的に働くことを示した。

B 研究結果

図1に量子細線を使った量子電子回路(位相シフト、方向性結合器)の一例を示す。電子が散乱されない高品質な量子細線が必要なり、この条件は実現の高い障壁となっている。図.2は制御NOT回路の一例で、相関ゲートはA B効果リングで実現可能となる。しかし高感度なA B効果リングの作製もまた、困難な問題である。

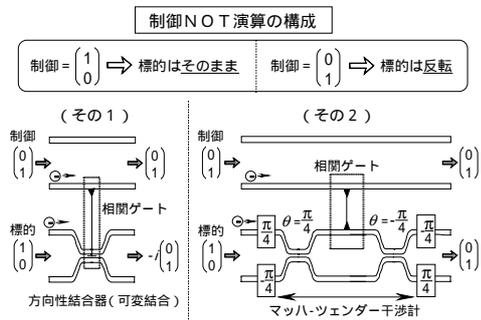
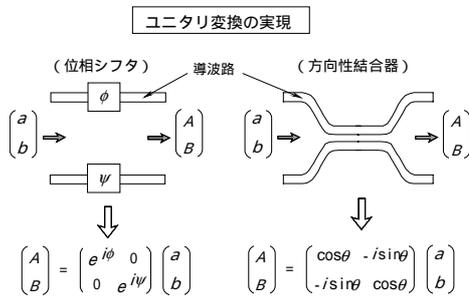


図1 量子細線を使った量子電子回路

図2 制御NOT回路の一例

図3は高品質二次元電子ガスのリングで観測されるA B振動で、量子磁束が周期の振動を有する。(AlGaAs/GaAs 2DEG 濃度: $3 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 、移動度: $8 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ リング: 外径 $1 \mu\text{m}$) 図.4に示すように磁束を増幅するために強磁性体パーマロイを挿入した。磁束が増幅された結果、振動周期が細くなり、磁束の増幅率は約4倍となった。

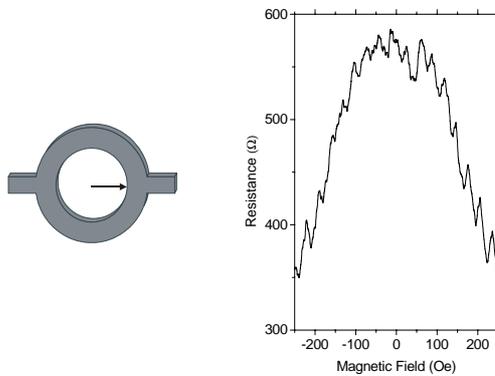


図3 2DEGリングで観測されるAB振動

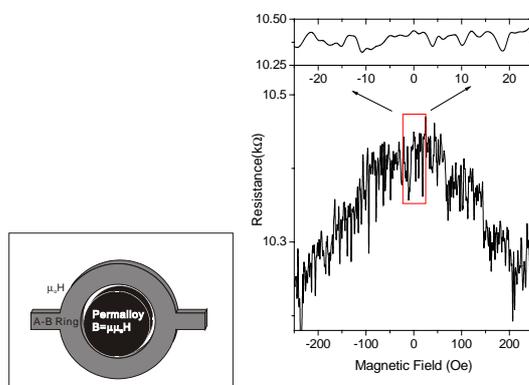


図4 パーマロイを挿入した2DEGリングで観測されるAB振動

図5は磁束をリング直上のコイルにて生成する電流駆動A B効果リングの写真で、0.8mA 周期で振動が起きる。これは量子電子回路で使われる電流に比べ、およそ百万倍大きな電流であり、磁束増幅が必要になる。図6は磁束増幅のために、磁石を持つ電流駆動A B効果リングの写真で、磁石は反磁場の影響を避ける構造を持つ。この場合推定磁束増幅率は約一万倍になり、必要と予想される最低限の磁束増幅率を得る見通しがついた。

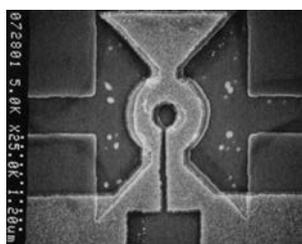


図5 磁束をリング直上のコイルにて生成する電流駆動A B効果リング。コイル電流は左右に流れ、チャンネル電流は上下に流れる。

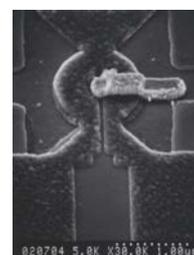


図6 磁束増幅のために、パーマロイを挿入した電流駆動A B効果リング。パーマロイは反磁場の影響を避ける形状となっている。

C まとめ

量子細線を使った量子電子回路を考案し、考案した量子電子回路実現への一番大きな障害である低感度な相関ゲートの問題を原理的に克服する見通しを得た。残された問題は電子が散乱されない高品質な量子細線の作製である。

D 研究の自己評価および今後の展開

自己評価： 磁束の増幅に関する国内外の類似研究はない。一方制御NOT回路を量子電子回路で構成する提案が英国から1件 (R. Inonicioiu, G. Amaratunga, F. Udrea; arXiv:quant-ph/0011051)あった。制御NOT回路作製に関しては、他の方法に比べて初期段階で克服すべき課題が大きいため、研究の大きな流れを作り出すまでにはいたらなかった。

自己評価については研究のゴールを高くおいたため、ゴールへの達成度は10%である。しかし5年前に予測した到達点に対しては、カーボンナノチューブへの研究の転換ができたことを評価して、70%程度の達成度になる。

今後の展開： 制御NOT回路作製にAlGaAs/GaN 2DEGやAlGaN/GaN 2DEGを利用してきたが、カーボンナノチューブのほうが、より簡単にゴールに到達できるのではとの考えに至った。よって今後はカーボンナノチューブを用いた制御NOT回路作製をゴールにすえて、一步一步研究を進めていく。

3 - 3 量子相関機能のための新材料・プロセス開発

3 - 3 - 1 .カーボンナノチューブ超微細量子ドットの作製

(研究主担当： 産業技術総合研究所 松本和彦)

A はじめに

カーボンナノチューブは数ナノメートルという微細な構造を有しているためにナノデバイスの構成要素としてきわめて魅力的である。しかしその微細性故に、カーボンナノチューブの位置、方向を制御することがきわめて困難であった。ここでは、触媒をシリコン集積回路で使われているフォトリソグラフィ法でパターニングし、カーボンナノチューブの成長位置を制御する手法について述べる。次いでこの手法により形成したカーボンナノチューブをチャンネルとして用い、室温で動作する単一電子トランジスタを作成する手法について述べる。

B 研究結果

B-1 カーボンナノチューブの位置、方向制御

カーボンナノチューブの位置、方向を成長時に制御する手法を以下に示す。図1は通常のフォトリソグラフィ法を用いて触媒をパターニングし、カーボンナノチューブの成長位置を制御する方法である。

- 1) シリコン基板上にフォトレジストをパターニングする。
- 2) 触媒となる鉄(Fe)を 3nm 蒸着する。
- 3) リフトオフを行い、鉄触媒のパターンを形成する。
- 4) CVD 成長炉で 900C、30 分、メタンガスを流し、カーボンナノチューブを成長する。高温において鉄触媒は直径数ナノメートルの微粒子状になり、これを核としてカーボンナノチューブが成長する。

図2の上の図はリフトオフで形成した鉄触媒の電子顕微鏡写真である。白い500個のドット状のものが鉄である。図2の下の図は上の図の一部を拡大したものである。2つの触媒間に一本のカーボンナノチューブが成長していることが分かる。この手法によりカーボンナノチューブの位置を制御できることが分かる。しかしながらこの方法で触媒間をカーボンナノチューブが渡る確率はわずか10%である。この確率をより高くするために、図3のように、触媒形状を先端の急峻な構造にし、成長最中にこの2つの触媒間に電界を印加する。これにより急峻な触媒間の電気力線に沿ってカーボンナノチューブが成長することが期待できる。この際、触媒と、基板の間には、シリコン、あるいは酸化シリコンでできたスペーサー層を挿入し、その効果を確認する。図4はこのような手法で2つの急峻な触媒間に成長したカーボンナノチューブの電子顕微鏡写真である。電気力線に沿ってカーボンナノチューブが成長する理由は、2通り考えられる。一つは電極から成長を開始したカーボンナノチューブは大きな分極モーメントを持っているために、電界に沿った方向に成長する。他の一つの考え方は、高温で分解したカーボンイオンが電気力線に沿ってカーボンナノチューブを形成していくという考えである。どちらが正しいかは未だ不明である。しかしながらこのように成長中に電界を印可しても、電界方向に沿って成長するカーボンナノチューブは図5の上図に示すようにわずか20%にしか過ぎず、大きな改善にはならない。これは基板とカーボンナノチューブとの間に働く大きな Van der Waals 力の影響でカーボンナノチューブが基板に密着し、方向制御が困難になるのである。この Van der Waals 力の影響を弱くするために、図3に示すように、触媒と基板との間に酸化シリコンで形成したスペーサー層を挿入し、カーボン

ナノチューブを基板から浮かして成長を行うと、電界方向に沿って成長するカーボンナノチューブの割合は図5の上図に示すように50%まで上がる。図5の下図はシリコンで形成したスペーサ層の厚さをかえた場合、カーボンナノチューブが電界方向に成長する割合を示したものである。図よりスペーサ層の厚さが厚くなるほど電界方向に成長するカーボンナノチューブの割合が増えており、明らかに Van der Waals 力の影響を弱めることができたと結論づけられる。

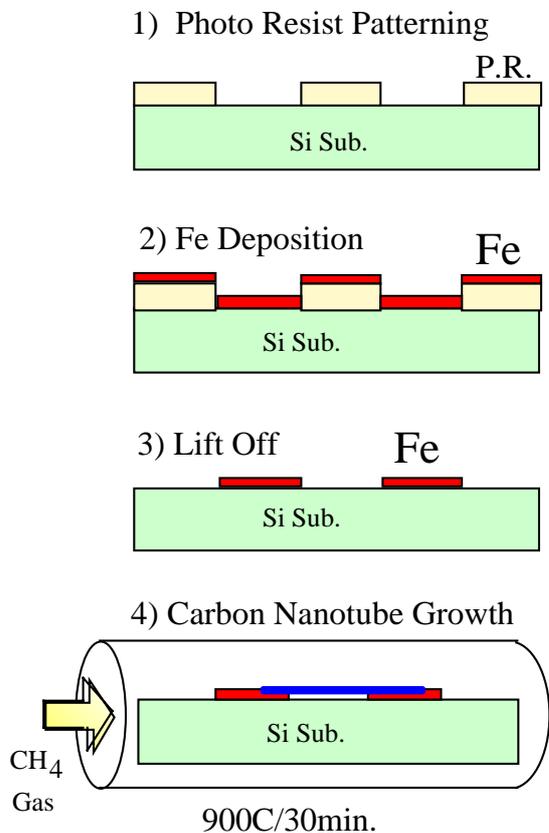


図1 触媒をパターニング法によるカーボンナノチューブ成長位置制御法

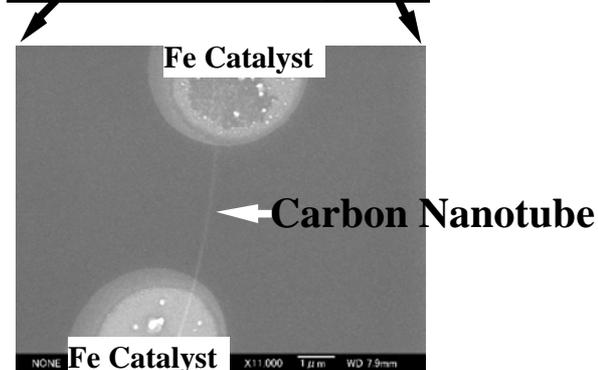
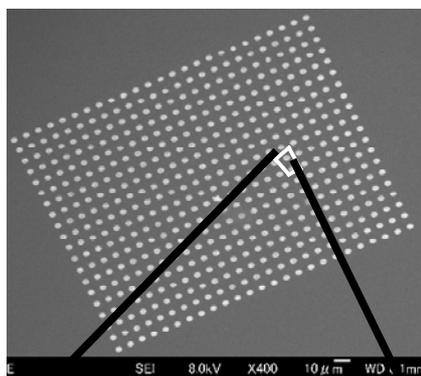


図2 リフトオフで形成した鉄触媒SEM像
図2、下図は一部の拡大図。1本のCNTが成長している。

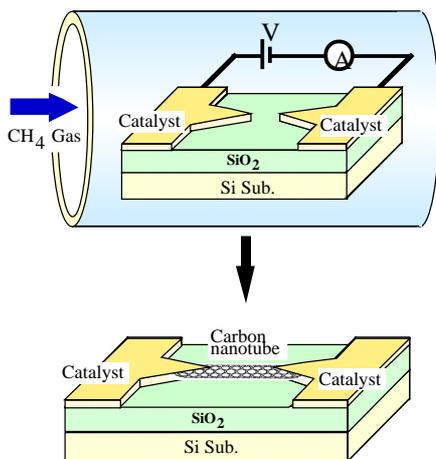


図3 急峻な触媒間に電界を印加してCNTの成長方向を制御する方法

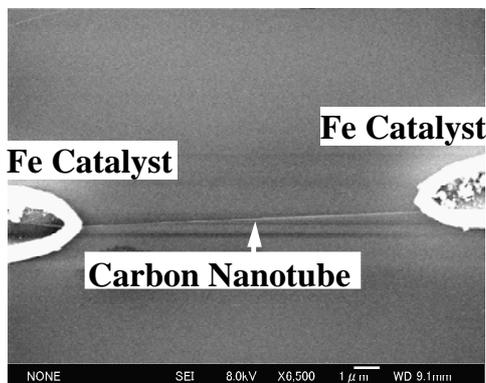


図4、図3の電界印加成長法で成長した触媒間のCNTのSEM像

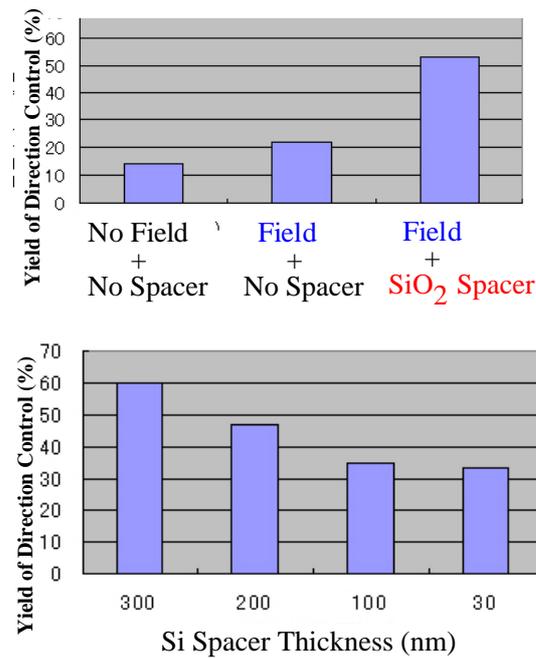


図5 電界とスペーサによるCNTの成長制御の割合

B-2 カーボンナノチューブチャンネルトランジスタ

上記の手法で位置方向制御して成長したカーボンナノチューブをチャンネルにして形成した3端子素子のデバイスを図6に示す。カーボンナノチューブ成長後、その両端にソース、ドレイン電極のオーミック電極をチタン/金、あるいは白金/金 金属で形成する。図7は実際に形成した

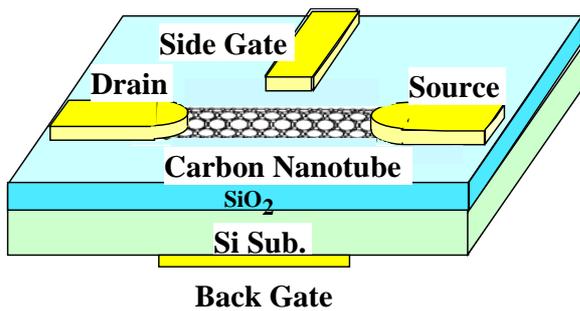


図6 カーボンナノチューブFET

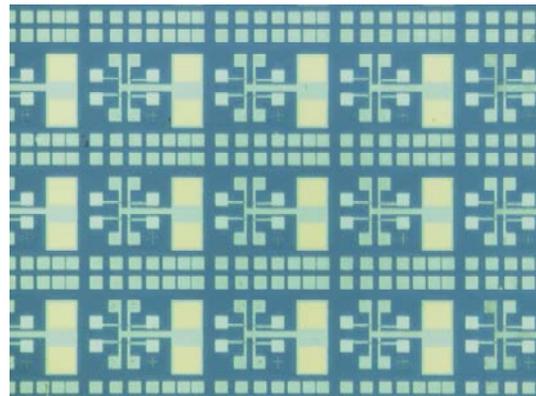


図7 作成したCNTFETの顕微鏡写真

カーボンナノチューブチャンネル3端子素子の顕微鏡写真である。全体で1 cm 角の資料内部に400個の素子をフォトリソグラフィー技術で一挙に作成ができる。1ユニット

の中には1つのソース電極に4つのドレイン電極が形成されている。チャンネル領域近傍にサイドゲートがそれぞれ形成されている。

B-3 カーボンナノチューブチャンネル単一電子トランジスタ

前章で述べたカーボンナノチューブをチャンネルに用いる素子では、カーボンナノチューブの直径は数ナノメートルであるが、長手方向は数ミクロンという巨大な長さを有している。これでは折角のナノ構造を活かした電子デバイス特性を得ることができない。

ここではカーボンナノチューブを長手方向に微細にして、ナノ構造のサイズの特徴を活かした電子デバイス特性を得る方法について述べる。図8はチャンネルとして用いるカーボンナノチューブに、化学的処理により多数の欠陥を導入した構造を模式的に示している。化学的に欠陥を入れるために欠陥の位置、サイズ等はランダムになる。カーボンナノチューブの直径が数ナノメートルであることから、欠陥を導入すると欠陥と欠陥の間の領域が数ナノメートルの微細なドット構造を形成する。また欠陥のサイズは数ナノメートルであるから、電子に対してトンネルバリアとして働く。従って図8の構造は、概念的に図9に示すような多島構造の単一電子トランジスタと等価的な構造を有することが分かる。しかも島領域のサイズが数ナノメートルであるから、非常に高いクーロンエネルギーを有し、室温で動作することが期待される。

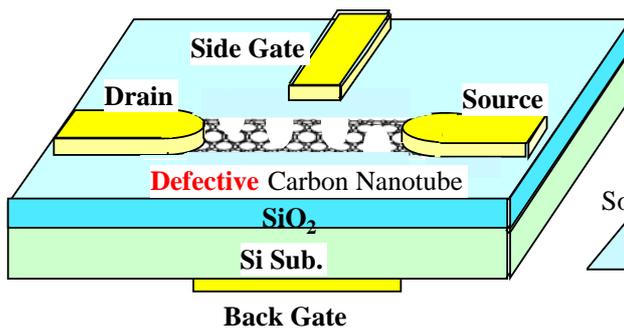


図8 CNTに化学的処理により欠陥を導入した構造の模式図

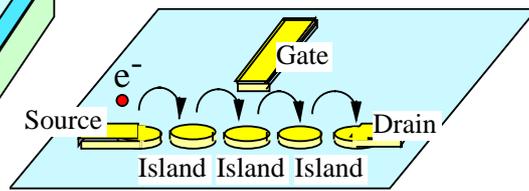
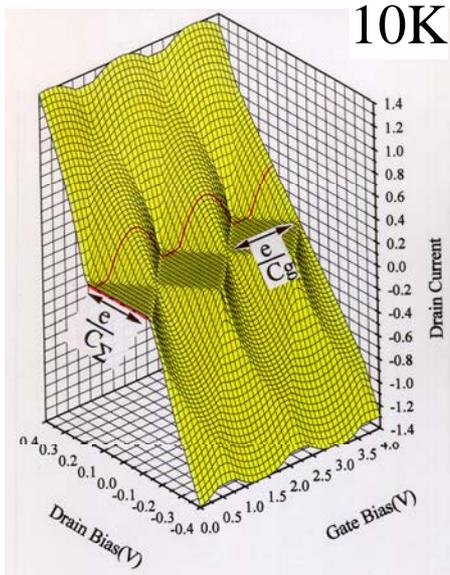


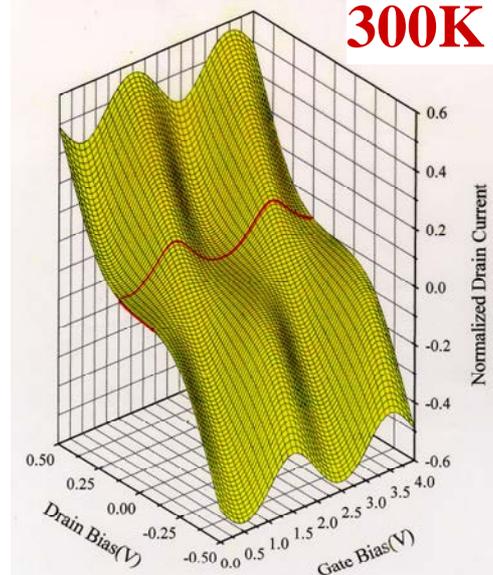
図9 等価的に多島単一電子トランジスタになる

図10(a)はオーソドックス理論により計算した単一電子トランジスタのドレイン電流のドレイン電圧とゲート電圧依存性である。計算は10Kの温度で行い、全容量は $4E-19$ Fを仮定している。図より、ドレイン電圧の0V近傍で電圧を印可しているにも関わらずドレイン電流が全く流れないクーロンギャップ特性が現れている。これはトンネルにより電子が島領域に入ると、電子自身が有している電荷($1.6E-19$ クーロン)により電位(e/c)を生じてしまう。従ってこの電位より低い印可電圧では電子は島領域に入ることができず、従って電子は流ることができない。それ故に電流が0になる。この現象をクーロンブロック現象と呼び、この電流の流れない領域をクーロンギャップと呼ぶ。クーロンギャップの大きさは、 e/c Vである。ゲート電圧を大きく印可していくと、このクーロンギャップのサイズが小さくなっていくのが見える。これはゲート電圧により、島領域の電位が下げられることにより、電子がより低電圧から島領域に入りやすくなることによる。さらにゲート電圧を増すと、クーロンブロック現象がやぶれ、電子が自由に島領域に入れる領域が現れる。ここではクーロンギャップが完全に消失し、



10K

Tunnel Capacitance $C_1 = C_2 = 4 \times 10^{-19}\text{F}$
 Gate Capacitance $C_G = 1 \times 10^{-19}\text{F}$



300K

$C_\Sigma = C_1 + C_2 + C_G = 1.8 \times 10^{-19}\text{F}$
 Tunnel Capacitance $C_1 = C_2 = 5 \times 10^{-20}\text{F}$
 Gate Capacitance $C_G = 8 \times 10^{-20}\text{F}$

図10(a) オーソドックス理論により計算した9Kの単一電子トランジスタ特性

図10(b) 300Kの単一電子トランジスタ特性

電流が大きく流れる。さらにゲート電圧を印可して島領域の電位を下げていくと、島領域に電子が一個入った状態になり、再びクーロンギャップ領域が生じる。このクーロンギャップ領域はダイヤモンドの形状を示すために、「クーロンダイヤモンド」と呼ぶ。ドレイン電流は、クーロンギャップ領域では流れず、クーロンギャップ領域が解けた領域で大きく流れるために、ゲート電圧に対して振動を繰り返す。これをクーロン振動と呼ぶ。このように、単一電子トランジスタは従来のトランジスタとは全く異なった特性を示す。このクーロンギャップの大きさは、島領域の容量の逆数に比例するため、島領域の容量が小さいほど明瞭に観察が可能になる。特に熱エネルギーよりも一桁以上大きなクーロンエネルギーがないと、クーロンギャップは熱雑音に隠れて観察できなくなる。従って単一電子トランジスタ特性を観察するには島領域の容量の小さな、言い換えれば島領域のできるだけ小さなサイズを実現する必要がある。

図10(b)は室温における単一電子トランジスタをオーソドックス理論により計算したものである。全容量は、図10(a)の場合より少し低く、 $1.8\text{E-}19\text{ F}$ を仮定している。図より、高温の為に電子の有する熱エネルギーにより電流—電圧特性が図10(a)と比較してなまっている事が分かる。しかしながら、クーロンギャップや、クーロン振動、クーロンダイヤモンド特性が室温でも得られることが分かる。従って、 $1.8\text{E-}19\text{ F}$ の容量を実現できれば室温で単一電子トランジスタ特性を観察することが可能となることを図10(b)は示している。

図 8 に示した欠陥を導入したカーボンナノチューブをチャンネルとして有する単一電子トランジスタの、室温におけるドレイン電流のドレイン電圧依存性を図 11 に示す。ゲート電圧をパラメータとし、 $V_g = 0.8 \text{ V} \sim V_g = 2 \text{ V}$ まで変化させている。図から $V_g = 0.8 \text{ V}$ の場合、ドレイン電流は大きな傾きを持って流れ、クーロンギャップは全く観察されない。ゲート電圧を大きく印可していくに従い、ドレイン電流は減少していき、 $V_g = 1.6 \text{ V}$ で最小の値を示す。この時、ドレイン電圧近傍で、ドレイン電圧を印可しているにもかかわらず、ドレイン電流が流れないクーロンギャップ特性が観察される。クーロンギャップのサイズは約 800 mV である。さらにゲート電圧を増加させていくと、ドレイン電流は減少せず、再び増加をはじめ、 $V_g = 2 \text{ V}$ で再びクーロンギャップが完全に消失する。この特性は、図 10 (b) で示した単一電子トランジスタのドレイン電流のドレイン電圧依存性と同様の特性をしめしている。

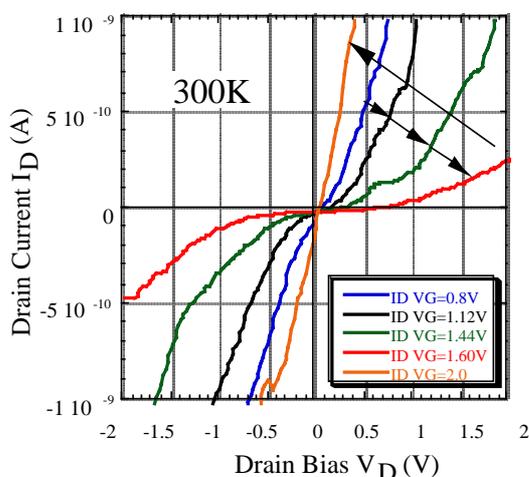


図 11 室温クーロンギャップ特性

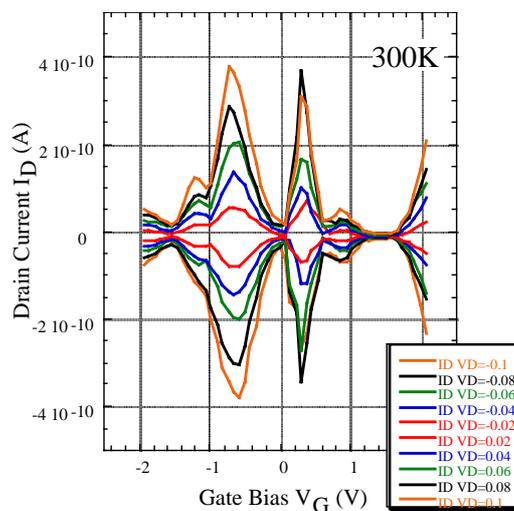


図 12 室温クーロン振動特性

図 12 はカーボンナノチューブ単一電子トランジスタの室温におけるドレイン電流のゲート電圧依存性を示す。ドレイン電圧をパラメータとし、 $V_d = -0.1 \text{ V} \sim +0.1 \text{ V}$ まで印可している。ゲート電圧の変化に対してドレイン電流が大きくなったり小さくなったりして振動している事が分かる。また異なったドレイン電圧においても、ほとんど同じゲート電圧の位置に振動のピークと谷がある事が分かる。これは図 10 (b) のドレイン電流のゲート電圧依存性が示すクーロン振動特性である。室温で明瞭なクーロン振動特性が得られている。ドレイン電流の変調率は $96 \sim 99 \%$ である。クーロン振動のピークの高さ、周期が一定でないのは、カーボンナノチューブの中に多くの欠陥があり、多島構造の単一電子トランジスタになっていることを示している。

図 13 はカーボンナノチューブ単一電子トランジスタの室温におけるドレイン電流のドレイン電圧およびゲート電圧依存性を立体的に示したものである。ドレイン電流がゲート電圧の変化に対して大きく振動していることが分かる。黒い領域はクーロンブロック現象により電流が流れないクーロンギャップ領域である。このクーロンギャップ領域のサイズがゲート電圧の変化で大きくなったり小さくなったりして、クーロンダイヤモンド構造を示していることが分かる。このクーロンダイヤモンド特性により、カーボンナノチューブ内の島領域にある電子の数を一個一個カウントすることができる。

図14は図13の特性を等高線表示したものである。ゲート電圧の範囲を $V_g = -2V \sim +2V$ まで広げている。同図より5つのクーロンダイヤモンド特性が室温で観察できている事が分かる。クーロンダイヤモンドのサイズがそれぞれ異なるのは、カーボンナノチューブの中に多くの欠陥があり、多島構造の単一電子トランジスタになっていることによる。

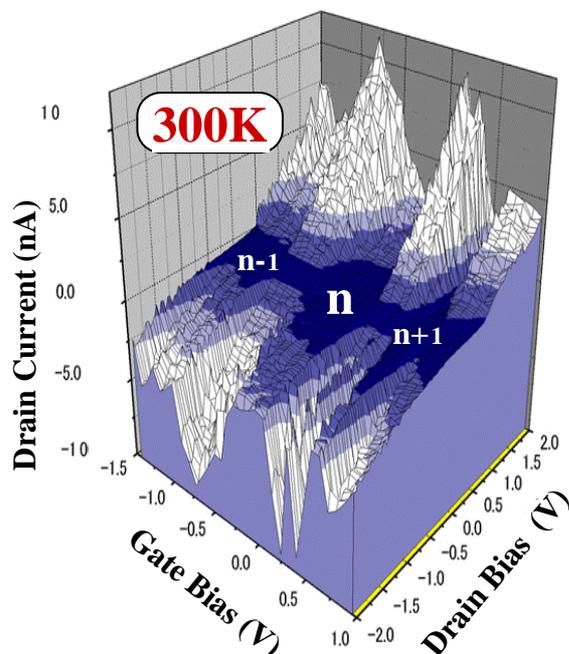


図13 室温クーロンダイヤモンド特性

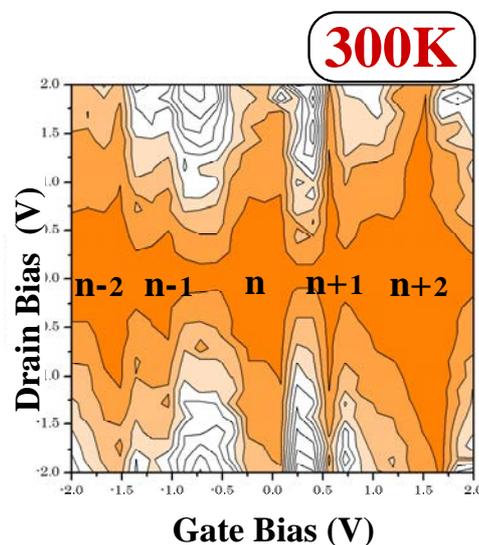


図14 室温クーロンダイヤモンド特性の等高線表示

以上の電気的な特性からこのカーボンナノチューブ単一電子トランジスタの全容量は、 $1E-19 F$ と算出できる。この値を用いて自己容量からサイズを見積もってみると、カーボンナノチューブ内部に、実効的に直径 $1\sim 2nm$ の島領域が形成されている事に相当する。クーロンギャップのサイズからチャージングエネルギーは $400meV$ と見積もられ、これを温度に換算すると $5000K$ に相当する。従って室温より一桁以上高いクーロンエネルギーを有するため、本カーボンナノチューブ単一電子トランジスタが容易に室温動作することが当然であることが理解できる。

従来の技術を用いて $1\sim 2nm$ のサイズのものを作成することは非常に困難であった。カーボンナノチューブの微細性を利用することによりはじめて、室温で完全に動作する単一電子トランジスタの作成が可能になった。

C まとめ

本研究では、カーボンナノチューブの位置、方向を触媒をフォトリソグラフィーによりパターンニングし、かつ電界を印可することにより制御する手法について述べた。これにより徐々にではあるが電子デバイスを作成する上で必要不可欠な位置、方向制御が可能になりつつある。次いでこの位置、方向制御して形成したカーボンナノチューブに欠陥を導入し、チャンネルとして用いた単一電子トランジスタについて述べた。カーボンナ

ノチューブはその直径が数ナノメートルであるため、これに欠陥を導入することにより容易に直径数ナノメートルのドット構造が形成できることを示した。この微細ドットを島領域として用いることにより、クーロン振動特性、クーロンギャップ特性、クーロンダイヤモンド特性等、室温において完全な単一電子トランジスタ特性が得られた。これは従来技術では不可能なことであり、カーボンナノチューブの微細性を活用することにより初めて可能にすることができた。

D 研究の自己評価および今後の展開

研究開始直後は、カーボンナノチューブカンチレバーを開発し、これを用いた超微細酸化法で単一電子トランジスタの微細化を行い、室温動作をめざしたが、作成プロセスの微細化に限界があり、安定な室温動作特性を得ることが困難であった。この問題に直面し、チャンネルにカーボンナノチューブを直接用いることにし、なおかつ欠陥を導入することにより所望の微細構造を得ることができ、初期の目的である単一電子トランジスタの完全な室温動作に成功した点は、高く評価できると考えられる。

今後の課題として、欠陥の位置、サイズ、エネルギー高さを制御する手法が必要である。この手法が完成すれば、単一電子トランジスタのみならず、量子相関素子の作成も容易に行なえるものと期待される。

3 - 3 - 2 . シリコン超微細量子ドットの作製

(研究主担当： 静岡大学 田部道晴)

A はじめに

量子相関機能への適用を目指して、量子閉じ込め効果が大きい Si/SiO₂系ナノデバイスの研究を行ってきた。特に、これまでほとんど報告例のない(1) 共鳴トンネルダイオード(RTD)と(2) 2 次元マルチドット型単電子デバイス(SED)の研究を行った。5 年間の成果として、RTD については、Si/SiO₂系で初めて負性微分コンダクタンスを観測し、共鳴トンネル特性を得た。次のステップで Si 井戸層をドット化することを目指している。また、2 次元マルチドット SED においては、単電子および単正孔トンネル特性を得るとともに、光応答特性の研究を行った。いずれも Si/SiO₂系で初めて得られた結果であり、量子相関機能の実験には至らなかったが、新しい Si 系デバイスの足がかりが得られた。以下、RTD および SED の研究結果について述べる。

B 研究結果

B - 1 Si/SiO₂系共鳴トンネルダイオード(RTD)

B - 1 - 1 背景

共鳴トンネルは、1973 年に IBM の Tsu と Esaki によって超格子の一形態として提案され、翌年同じグループから、AlGaAs/GaAs/AlGaAs 量子井戸を用いて初めて共鳴トンネルダイオード特性が報告された。その後、ヘテロエピタキシャル成長を利用して種々の化合物半導体の共鳴トンネルダイオードが報告された。一方、Si/SiO₂系では SiO₂ が非晶質であるために、単結晶 Si を井戸層として SiO₂/Si/SiO₂ 構造を作製することが困難で研究報告例も限られている。しかし、Si/SiO₂系はトンネル障壁が 3eV と高く、電子準位の離散化が容易で、比較的高温で量子効果を利用できるとともに、2 準位系の qubit 実験に適していると期待される。

Si/SiO₂系の RTD に関するこれまでの報告例は、筆者が知る限り 2 例のみである。一つは、Yuki ら Matsushita グループ(JJAP1995)、他のひとつは Namatsu ら NTT グループ(JJAP1997)からのものである。いずれの方法も Si 表面を EB リソグラフィでパターンニングし、アルカリ系で選択エッチングして(111)面方位の屏風状 Si 量子井戸層を形成する方法である。しかし、その結果は負性微分コンダクタンス(NDC)はまったく見られず、I-V 特性の 1 次微分曲線にわずかな折れ曲がりが見られる程度であった。かくして Si/SiO₂系で RTD のような電子波干渉デバイスを作製することはきわめて困難なことと認識されて研究も停滞していた。

B - 1 - 2 SiO₂/Si/SiO₂量子井戸構造作製法

このような状況下で、われわれはアルカリ系の選択エッチング法から離れ、ウエハ接合を用いて量子井戸構造を作製する方法を開発した。ウエハ接合を用いれば、(100)面の量子井戸が可能となるとともに、水平面上に形成できるため、加工上の利点は大きい。

手順を図1に示す。まず、市販のSOIウエハと通常のバルクウエハを薄い(約2nm)熱酸化膜を介して貼り合わせる。この熱酸化膜は、最終的には量子井戸の下部障壁層となる。その後、SOIウエハの不要部を順次エッチング除去して約10nmの単結晶Si層を残す。最後に熱酸化と希弗酸エッチングの繰り返しでSiO₂/Si/SiO₂構造を作製する。

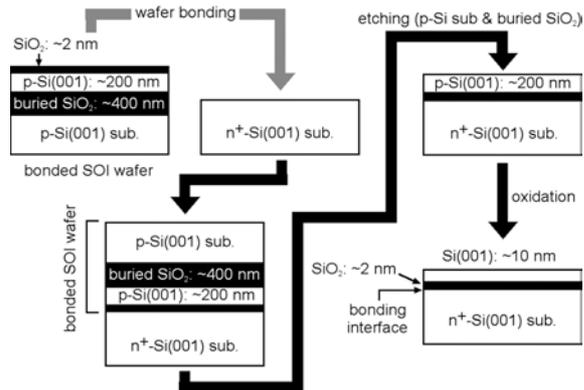


図1 ウエハ接合による量子井戸構造の作製

図2は、このようにして形成したRTD構造の断面TEM像である。なお、この構造で、ウエハ貼り合わせの界面は下地Siと下側SiO₂との界面に設定している。これは、貼り合わせ界面に付随する界面準位が量子井戸内の電子準位に影響を与えることを避ける意図による。また、表面側にはAl電極を蒸着で形成しており、下地のn⁺-SiからAl電極に向かって電子を流す方向でI-V測定を行った。

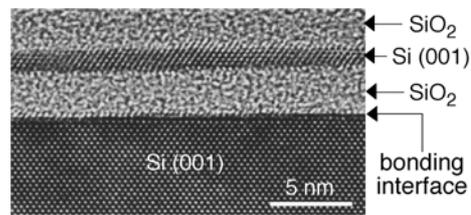


図2 作製したRTDの断面TEM像

B - 1 - 3 RTD 特性

図3に15Kの低温で測定したI-Vカーブを示す。Si井戸層2nm、下側SiO₂障壁層3nmの特性である。約0.3Vに大きな電流ピークが見られ、NDCが観測された。破線で示した電圧値は、理論的に求めた電流ピークを与える値であり、ほぼ実験と一致している。なお、Si井戸層5nmのRTDでは、特にI-Vカーブに構造はなく、これは電子準位が密集していることに由来する。これらのことから本実験で得られたNDCが共鳴トンネルによるものである、と結

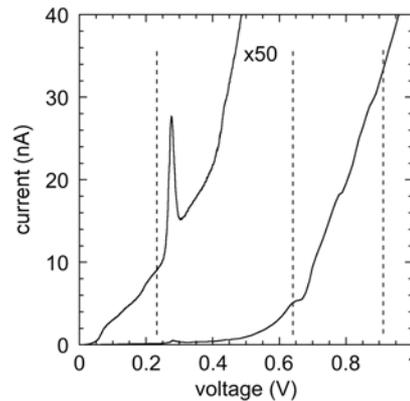


図3 I-V特性とNDC

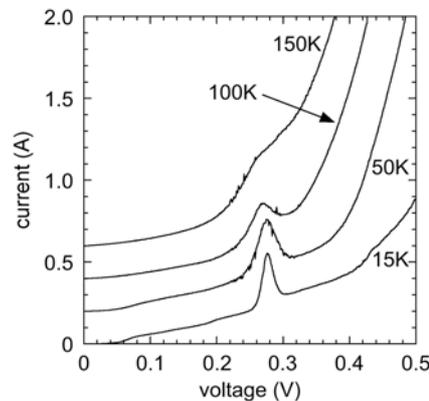


図4 電流ピークの温度依存性

論できる。

図4は、電流ピークの温度依存性であり、測定温度の上昇とともに電流ピークの半値幅は増大し、ピーク/バレイ比は減少して100K以上でNDCは消滅する。これは、エミッタ側(n^+ -Si)の電子分布の広がりが第一義的に効いているものと思われるが、RTDの高温動作に向けて今後さらに検討していく必要がある。図5は、別のRTDデバイスの測定例であり、図3に示したデバイスより小さな電流ピークを示しているが、やはり共鳴トンネルの特性をよく表している。以上述べたように、われわれはSi/SiO₂系で初めて明瞭な共鳴トンネルを観測した。

B - 1 - 4 入射電子のエネルギー依存性

多重量子井戸の実験に向けて、量子井戸に入射する電子の運動エネルギーを次第に高めていった場合の様子を調べておく必要がある。下側SiO₂障壁層を5nmと厚くしてI-V特性を測定すると必然的に量子井戸に入射する電子のエネルギーを高める実験を行うこととなり、図6のように、4V付近に大きな電流ピークが現れる。この場合も一見共鳴トンネルのように思われるが、実際はまったく異なる原因(Si井戸層への電子の蓄積帯電)によるものであり、図6に示したように電圧の掃引速度に大きく依存する。これは、図7に示したように印加電圧の増大とともにインパクトイオン化散乱の確率が指数関数的に増大し、量子井戸への入射電子がFN注入モードに近づく急激にイオン化散乱によって運動エネルギーを失い井戸層に蓄積されていくことによる。井戸層に蓄積される電子電荷が増大す

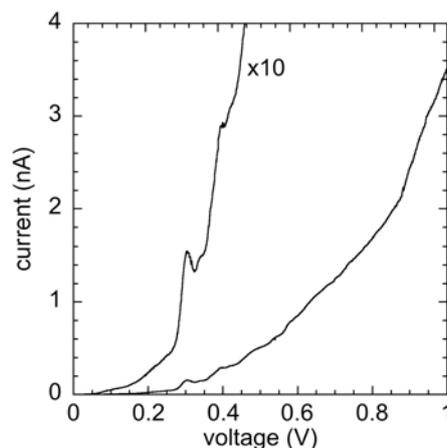


図5 別のRTD測定例

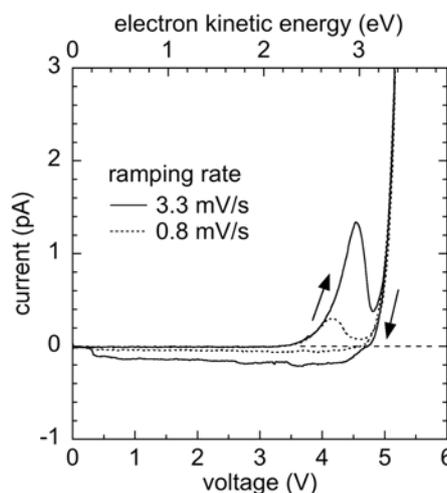


図6 下側SiO₂障壁層5nmの試料のI-V特性

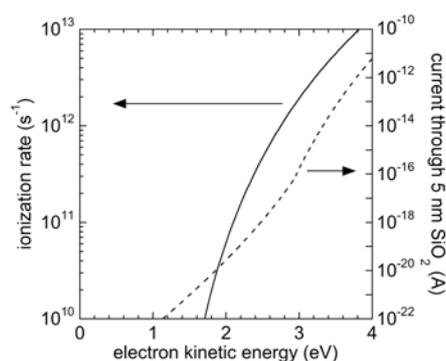


図7 Si中でのインパクトイオン化散乱レートと入射電子エネルギーの関係

ると電子ポテンシャルが増大し、適当な条件下では電流値がピークをとって減少に転ずる。よって以上のことから、Si/SiO₂系では、電子波のコヒーレント条件を保つためには FN トンネルモードに近づけない注意が特に重要となる。

B - 2 Si マルチドット型単電子デバイス (SED)

以上は、縦方向のトンネリングを取り扱ったが、横方向トンネリングも研究対象とした。図 8 は薄い SOI 層を nano-LOCOS 法と名づけた独自の方法でマルチドット化し、バックゲート型 FET に加工する工程を示している。ドット部の AFM 像も併せて示した。このマルチドット形成法は、単結晶 SOI 層から出発して選択酸化を利用するため、完全に単結晶性が保証されており、他に類似の報告例は見当たらない。ドットと

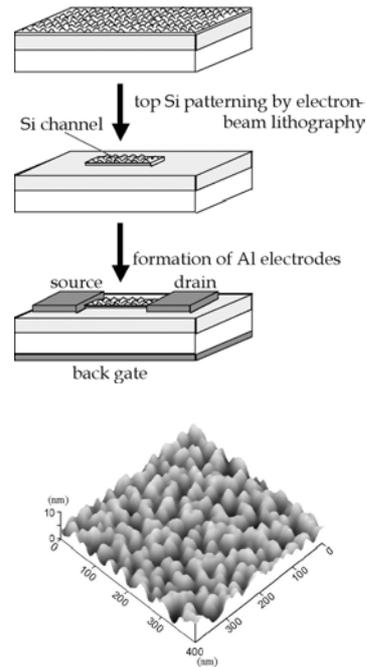


図8 デバイス作製工程とマルチドット部のAFM像

ドットの間には薄い単結晶 Si 層を故意に残しており、トンネルバリアの役割を担わせている。このデバイスの I_d - V_{bg} 特性は、図 9 に示したように、明瞭なコンダクタンス振動が V_{bg} が正負のいずれにおいても見られており、単電子トンネリング (SET) および、単正孔トンネリング (SHT) の特徴を表している。

以上述べたように、本マルチドットデバイスは SHT/SET 特性をもつことが明らかとなった。最後にこの系の光応答について述べる。本デバイスの SHT 動作時に、ハロゲンランプの白色光を照射したところ、図 10 に示すように光照射によって新しい

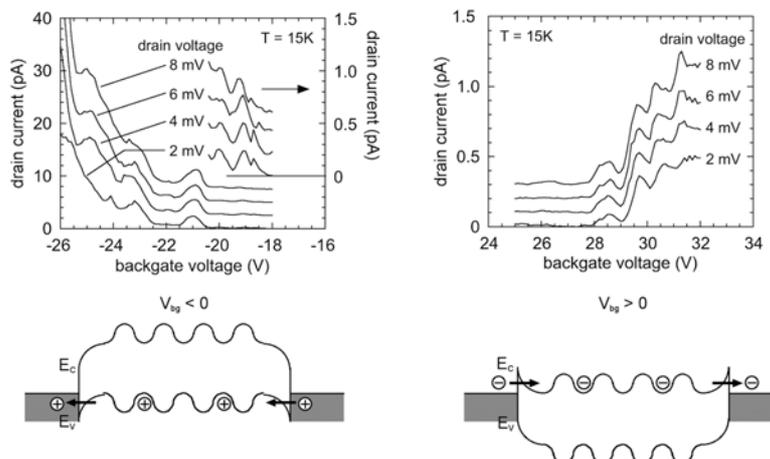


図9 ゲートバイアスの正負による単電子 / 単正孔トンネリング

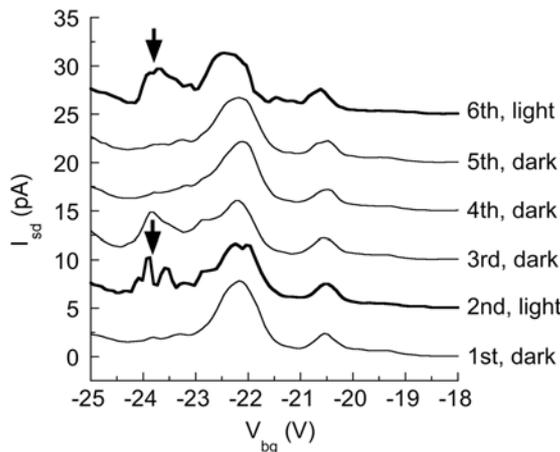


図10 光照射による電流ピークの出現

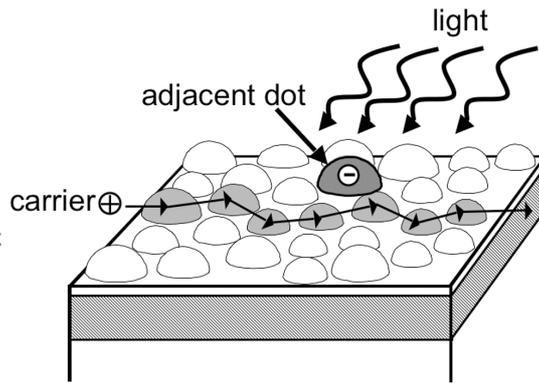


図11 SHTの伝導パスと光誘起電荷

コンダクタンス振動のピークが現れた。これは、SET の標準理論によるシミュレーションの結果、図 11 に示すように、キャリアの伝導パスに隣接するドットに光誘起電荷が発生し、その電位変調効果によるものであることが明らかとなった。この光応答は、Si マルチドット系で初めての結果であり、今後、分光照射系を組み上げ、より定量的な実験へと発展させる。

なお、以上は 2 次元マルチドット系の結果であったが、薄い SOI 層の熱凝集を利用した 1 次元マルチドット系の実験も進めている。図 12 は、1 次元的に並べた Si ドット列の形成例である。現在、伝導特性を測定する準備を行っている。

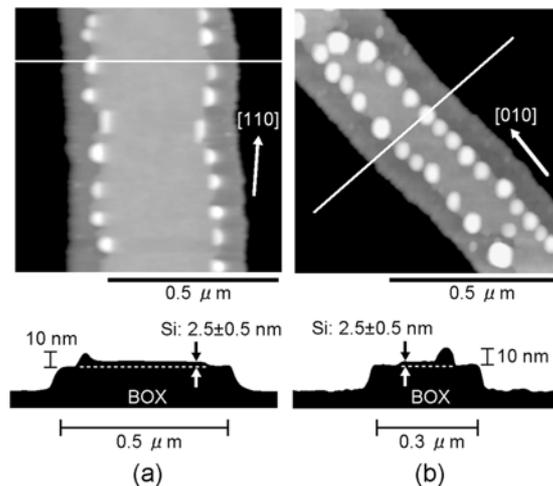


図12 熱凝集を利用したSiマルチドット列

C 研究の自己評価と今後の展望

以上述べたように、量子相関機能への適用を目指して、量子閉じ込め効果が大きい Si/SiO₂ 系ナノデバイスの研究を行ってきた。特にこれまで報告例のない「共鳴トンネルダイオード(RTD)」と「2次元マルチドット型単電子デバイス(SED)」の研究を行った。これまでの成果と対応する論文を列挙する。

(1) RTD については、Si/SiO₂系で初めて負性微分コンダクタンスを観測し、共鳴トンネル特性を得た。2002-IEEE Si Nanoelectronics Workshop(米国)で日本から唯一の招待講演を行った。また、Silicon Nanoelectronics (Marcel Dekker, New York)に執筆予定である。

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 (2001.9).

(2) さらに RTD における入射電子エネルギーの効果、特にホットエレクトロンの量子井戸内への電子蓄積効果を見出した。インパクトイオン化によるエネルギー散逸の効果を目指したものである。2004-European Workshop on Low Temperature Electronics(オランダ)にて招待講演の依頼を受けている。

H. Ikeda, M. Iwasaki, Y. Ishikawa and M. Tabe: Resonant tunneling characteristics in SiO₂/Si double-barrier structures in a wide range of applied voltage, Appl. Phys. Lett. vol. 83, pp. 1456-1458 (2003).

(3) マルチドットデバイスについては、これまで開発してきた微細選択酸化法を用いて単正孔および単電子特性を得た。今後、多様な発展が見込まれる基本デバイスと認識している。その一例として光応用が考えられ、光誘起電荷の効果をも単正孔特性の変調から明らかにした(光応答については、現在 Appl. Phys. Lett. に投稿中。)

なお、ごく最近、Ratno Nuryadi は本内容にて第 15 回 (2003 年秋季) 応用物理学会講演奨励賞の受賞通知を受けた。

Ratno Nuryadi, Hiroya Ikeda, Yasuhiko Ishikawa and Michiharu Tabe: Ambipolar Coulomb blockade characteristics in a two-dimensional Si multi-dot device, IEEE Trans. Nanotechnology, accepted for publication (2003 Dec. Issue).

(4) 1 次元連結 Si マルチドット列をパタン化した SOI 層の熱凝集現象を用いて形成した。これまで、薄い SOI 層の熱的安定性の研究で培ってきた知識を駆使したものである。

Y. Ishikawa, Y. Imai, H. Ikeda and M. Tabe: Pattern-induced alignment of silicon islands on buried oxide layer of silicon-on-insulator structure, Appl. Phys. Lett. vol. 83, pp. 3162-3164 (2003).

以上、4 篇の代表論文 (Electronics Letters 1 篇、Appl. Phys. Lett. 2 編、IEEE Trans. Nanotechnology 1 編) を中心に成果を説明した。自己評価としては、量子相関機能の実験にまでは至らなかったが、電子局在性の強い Si/SiO₂ 系で、共鳴トンネルとマルチドット型単電子 / 単正孔トンネル FET という新しいデバイス分野の足がかりを得たと考えている。以上のデバイスに共通するキーワードは「マルチドット」、「マルチジャンクション」であり、微細化限界に達している Si-ULSI に活路を開く可能性がある。今後は、個別の電子の動きを精密に制御した新しいマルチドットデバイスのパラダイムを構築していく予定である。

3 - 3 - 3 . ナイトライド系超微細量子ドットの作製

(研究主担当： 東京工業大学 川崎宏治、青柳克信)

A はじめに

GaN や AlN で代表されるバンドギャップの大きな窒化物半導体のヘテロ構造における伝導帯のバンド不連続量は 2.3eV と大きく、GaN 量子ドット中に電子を強く閉じ込めることが可能である。さらに、その構造を小さくすること GaN 量子ドット内の量子化エネルギー準位間隔も同程度に大きくできる。したがって、本材料系で量子ドットを形成することによって、外界と孤立した大きなエネルギー差を持った 2 準位系を形成することが可能となる。例えば、量子ドットの寸法を 5nm に小さくすると、形成される量子化エネルギーは 120meV 程度になり、波長約 10 ミクロンの赤外線に相当する。この赤外領域でも共鳴励起できる 2 準位系を量子ドット内に実現できれば、励起源としてマイクロ波を用いないため金属電極と相互作用が少なく、動作環境として極低温を必要としないなど、従来とは異なる新しい量子相関素子の実現が期待できる。

本研究では窒化物半導体の量子ドットを用いて量子相関機能素子を実現することを最終目的として、その素子構造の提案、量子ドット形成法の開発、基本素子の作製を行うことを目的として研究を行った。

B 研究結果

B - 1 電子ビーム照射による窒化物半導体量子ドットの位置制御

結合量子ドットを作製し、形成される 2 準位系を量子ビットの基本構造とする場合量子ドットの位置制御技術の開発が必要不可欠である。とりわけ 2 つの量子ドットを近接して配置することが重要といえる。本研究では、集束電子ビーム照射と分子線エピタキシー法 (MBE) による個々の量子ドットの位置制御の技術および量子ドット間距離を制御し、結合係数を制御することが可能な「電子ビーム位置制御液滴エピタキシー法」の開発を行った。本手法は、図 1 に示すように電子ビーム照射により基板表面を直接描画することにより、表面エネルギーを変調させ、Ga 液滴の位置制御を行った後、アンモニアを供給することで金属 Ga を窒化させ GaN を得ようとしたものである。図 2 に Ga 液

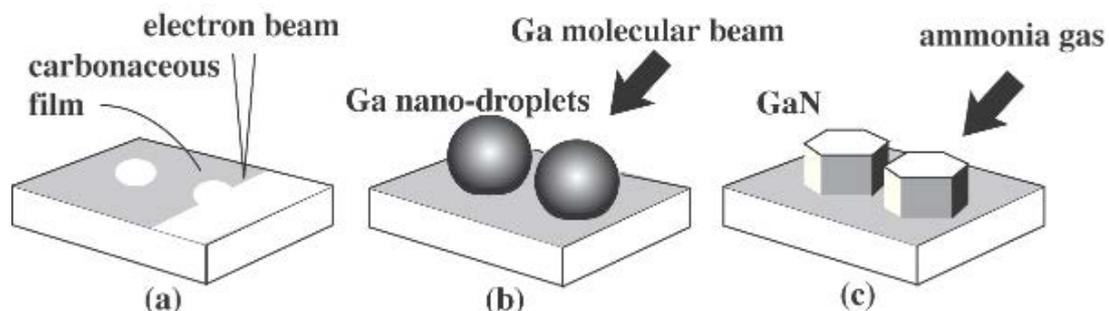


図1 電子ビーム位置制御液滴エピタキシーの概念図

(a) 電子ビームによる表面エネルギー変調. (b) 金属(Ga)液滴の形成. (c) アンモニア供給とアニールによるGa液滴の窒化.

滴を本手法により位置制御した結果を示す。SiC 基板表面を格子状に電子ビームを $0.35 \mu\text{C}/\text{cm}$ 、 $0.32 \mu\text{C}/\text{cm}$ 、 $0.30 \mu\text{C}/\text{cm}$ のドーズで格子状に照射したのちに、MBE 装置内で Ga 分子線を照射した結果である。格子の中心に Ga 液滴が配置されていることがわかる。格子間隔はそれぞれ 100nm 、 90nm 、 70nm であり、得られた Ga 液滴の平均直径は 45nm 、 40nm 、 35nm である。格子間隔を小さくすることで、周囲から集める Ga の量が少なくなるため、液滴のサイズを小さくできることが分かった。

ビーム照射により基板表面には極薄膜のカーボンが堆積され、これが基板の表面エネルギーを変調し、金属液滴の形成位置を決定づける。この液滴の形成位置の電子ビーム照射領域との関係は、基板とカーボン薄膜の表面エネルギーの大小関係よりきまり、SiC および AlGaIn 上においてはネガ型に CaF_2 上においてはポジ型に形成できることを明らかにした。

次に、アンモニアを供給して窒化を行い得られた GaN ドットの走査型電子顕微鏡 (SEM) 像を図 3 に示す。成長温度 700°C において良好なドットが得られることがわかり、

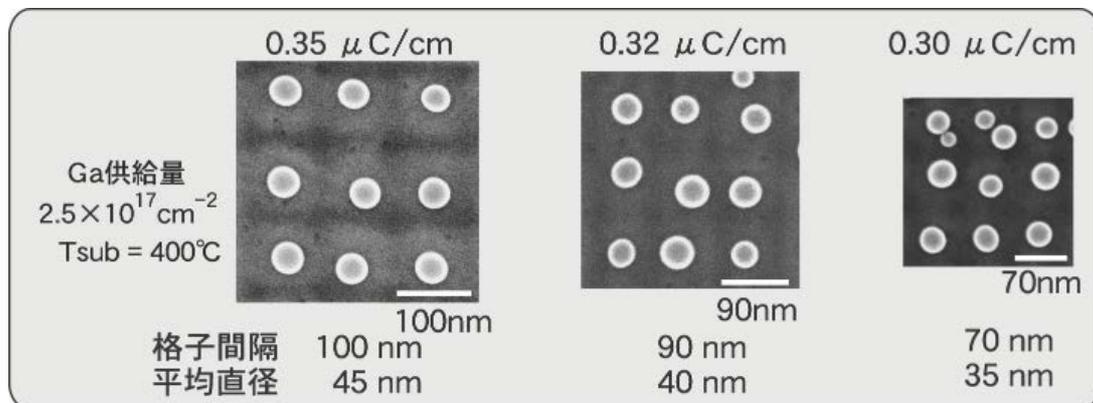


図2 電子ビーム照射によるGa液滴の位置制御

電子ビームを $0.35 \mu\text{C}/\text{cm}$ 、 $0.32 \mu\text{C}/\text{cm}$ 、 $0.30 \mu\text{C}/\text{cm}$ のドーズで格子状に照射した。格子間隔はそれぞれ 100nm 、 90nm 、 70nm である。得られた Ga 液滴の平均直径は 45nm 、 40nm 、 35nm である。

直径 20nm 程度の六角柱構造の GaN 量子ドットを $2 \times 20\text{nm}$ 離して位置制御させることに成功した。さらに、ドット間隔の制御に関しては、再成長法により直径 30nm の量子ドットを 3nm 以下の間隔にする事に成功した。

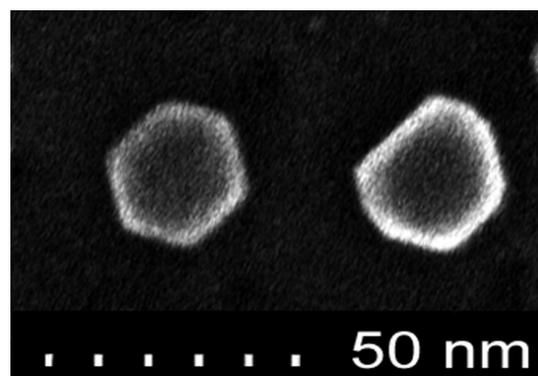


図3 電子ビーム液滴エピタキシーにより得られた GaN の SEM 像
直径 20nm の六角柱構造の GaN 量子ドットを $2 \times 20\text{nm}$ 離して位置制御されている。

B - 2 窒化物半導体量子ドットを用いた横型単一電子トランジスタの作製

極微細な自然形成 GaN 量子ドットを用いて単一電子トランジスタ (SET) が形成できることを示すことを目的として研究を行った。デバイスの作製方法を説明する。まず、MBE法を用いて SiO₂ 基板の上に Ga 液滴をランダムに形成させる。この液滴は表面エネルギー差により形成されるため直径 5 nm 程度にできる。この液滴を窒化させ GaN 極微細量子ドットを形成させる。その後、トンネルバリアとなる AlN を MBE 法で結晶成長させることにより、AlN で閉じ込められた GaN 量子ドットが形成できる。AlN を成長する前に GaN を結晶成長させることで、量子ドットのサイズも制御可能である。得られた量子ドットを図 4 (a) に、この量子ドットに電極を形成させて作製した SET を図 4 (b) に示す。ソースドレイン間に量子ドットが配置されていることがわかる。温度 2.7 K で GaN ドット中

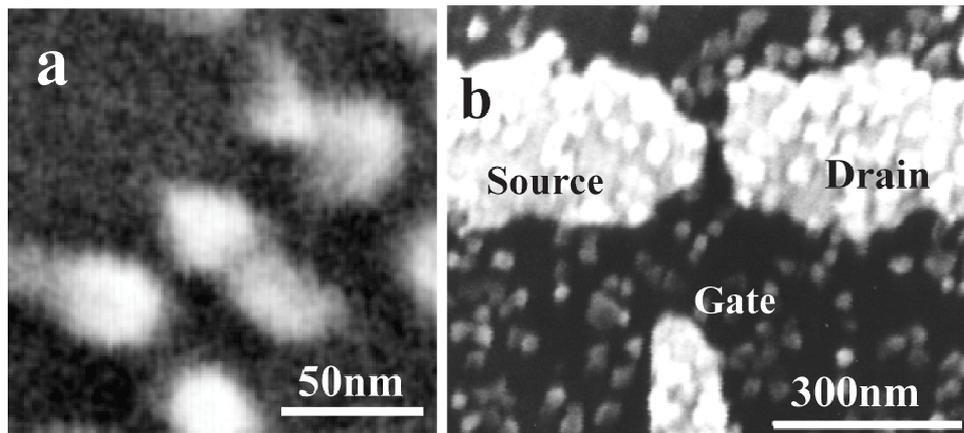


図4 SiO₂ 基板の上に形成させた GaN 結合量子ドットと作製した単一電子トランジスタ
(a) 表面を AlN でコーティングした GaN が 2 つ重なり結合量子ドットを形成している。
(b) 作製した SET のソースドレイン間の距離は約 30 nm であった。

の電子の輸送特性を評価した結果、図 5 に示すように明瞭なクーロンブロッケード現象を観測し、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。

GaN と AlN のバンドオフセットは約 2 eV あるので、本デバイスは高温でも動作すると期待できる。図 6 に、室温で動作させた SET の電荷安定図を示す。図中黒色の領域が電流の流れない、クーロンブロッケードの領域を示している。このデバイスの静電エネルギーは 200 meV と見積もられる。さらに室温で動作するという事実は、窒化物半導体量子ドット系が、

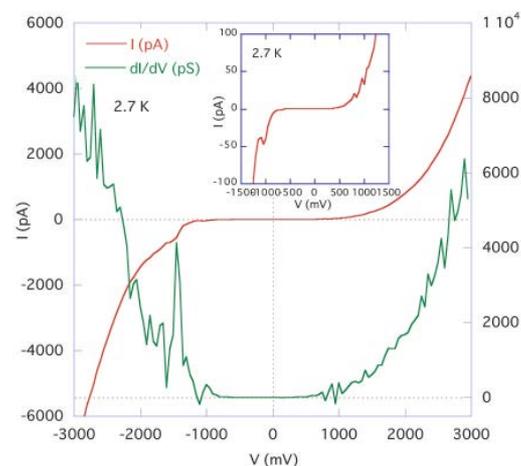


図5 SETの電流電圧特性
挿入図は原点付近を拡大したものである。
負性微分抵抗が観察できる。

電子を強く閉じ込めるために有利であることを示している。

B - 3 赤外線円偏光パルスを用いた量子相関素子の提案

結合量子ドット内の2準位系を用いなくても、単一量子ドット内の2準位系を用いることが可能であれば、より簡略された素子構造が実現できる。ここでは、赤外領域でも共鳴励起できるスピン2準位系を単一量子ドット内に実現し、ドット内の単一スピンを円偏光パルス照射により選択励起させることを基本とする新しい量子ビット、量子相関ゲートを提案した。この系はスピンを用いるため位相緩和時間が長い、赤外光を用いるため電極との相互作用が無視できる、極低温を必要としない等を多くのメリットがあり、又、量子ドット、赤外光の組み合わせであるため多ビット系に用意に発展させることができる等多くの可能性を持っている。提案するキュービットの実現方法について以下説明を加える。

GaNとAlNによる伝導帯バンドオフセットは図7に示すように約2eVあり、AlNをトンネルバリアとしてGaN量子ドット形成すれば、その基底状態と励起状態のエネルギー差Eは赤外線の波長(3~10μm)に相当することが計算により明らかになってい

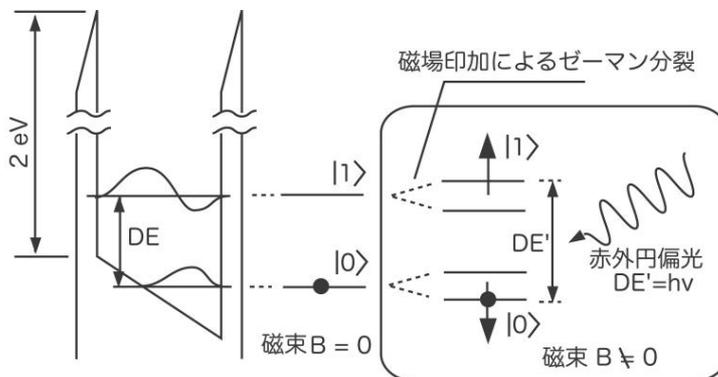


図7 GaN量子ドット内の単一電子スピンを赤外円偏光で制御する全く新しい原理の量子ビットの実現法

る。磁界を印加し、最も低い準位にクーロンブロッケード効果により、単一電子スピンを注入し、E'に相当する赤外円偏光をパルス分照射すれば、スピン選択則によりスピン反転が起こり、スピンの上の準位に励起される。この状態が緩和するためには、スピン反転を伴わなければならない、緩和時間が電子の場合に比べて千倍以上長い、電子系より多くの演算が可能である。さらにE'は外部電界によりシュタルクシフトさせることが可能なため、演算したくないビットの電極に電圧を印加してE'を赤外光波長からずらしてしまえば、赤外光パルスを均一に照射したまま、希望のビットのみの反転操作が外部電圧により可能である。

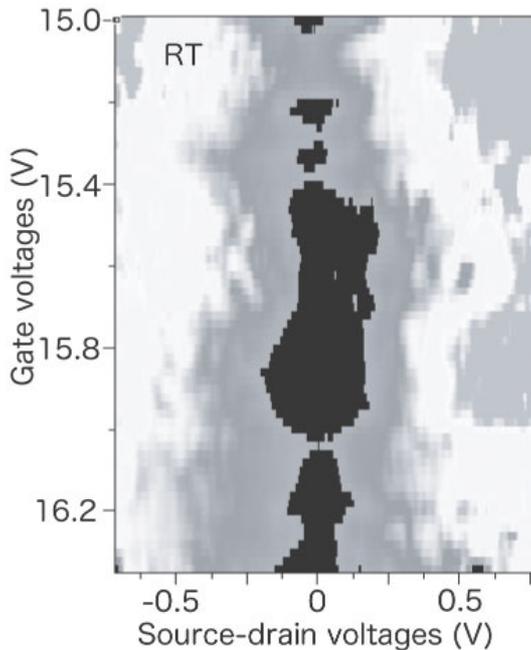


図6 室温における単一電子動作クーロンギャップを黒で示す。大きなところで200meVあることが分かる。

量子相関素子は次のようにして形成可能である。図8のように、井戸幅の異なる2重量子ドットを形成すれば、GaN特有の自発分極のため、バンドの底は図のように傾斜していて、磁場をかけたときの、制御ビットと標的ビットの単一電子スピンのエネルギーはすべて異なる。ここで、電界を印加してそれぞれのビットの上向きスピンのエネルギーを等しくさせれば、交換相互作用及びクーロンエネルギー変化により、制御ビットはエネルギーが下がり、標的ビットはそれが上がるように分裂する。それぞれのビットに対するエネルギーは、 h_1, h_2 に変化するため、キュービットの場合と同様に、これらのエネルギーに相当する赤外円偏光を照射すれば、 h_1 照射により制御ビットが $|1\rangle$ になったときのみ、 h_2 を照射することで、標的ビットの値を入れ替えることが可能になる。以降、提案した量子ビット並びに量子相関素子を形成させるための研究を行った。

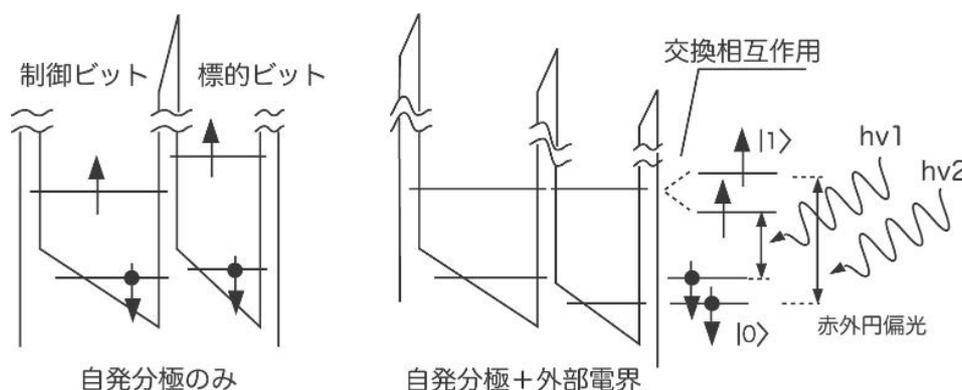


図8 GaN二重量子ドット内の単一電子スピンを赤外円偏光で制御する新しい原理の量子相関素子の実現法

B - 4 選択成長法を用いた窒化物半導体量子ドットの位置制御

窒化物半導体はその結晶構造の多くが六方晶であり、六角柱構造が安定化構造である。ナノテクノロジー技術をもちいて基板の上に極微細な窓を開け、結晶成長技術に特有な選択成長法を用いれば、六角柱の縦に長い量子ドット構造が形成できると考えられる。選択成長法のような結晶成長技術を用いて形成させた量子ドットは、イオンビーム等で加工して作製したドットと比べて、加工ダメージがなく結晶性が良好であり、電子あるいはスピンのコヒーレンス性を高めるためには、適した形成法といえる。本研究では良好な結晶成長が可能な条件をまず見出すことにした。SiC 基板上あるいはサファイヤ基板上に有機金属気相堆積法 (MOCVD) で作製した AlGaIn エピタキシャル基板上に SiO₂ 膜を堆積させ、電子ビームリソグラフィ法で微細な選択成長用の窓を形成させ、成長温度を変化させて作製した GaN の結晶を図9に示す。いずれの温度でも良好な選択性が得られた。これらの形状はアンモニアの流量を変化させたときに大きく変わることがわかり、成長温度 750 °C、アンモニア流量 2sccm の時に、GaN の横方向成長を抑制した希望の構造が得られることが分かった。さらに、選択成長の窓の直径を変化させた場合においても、横方向成長を抑制して、縦方向に同じ成長速度で成長できる条件があることを見いだした。この結果より量子ドット形成時に同一成長においても、窓の寸法を変化させれ

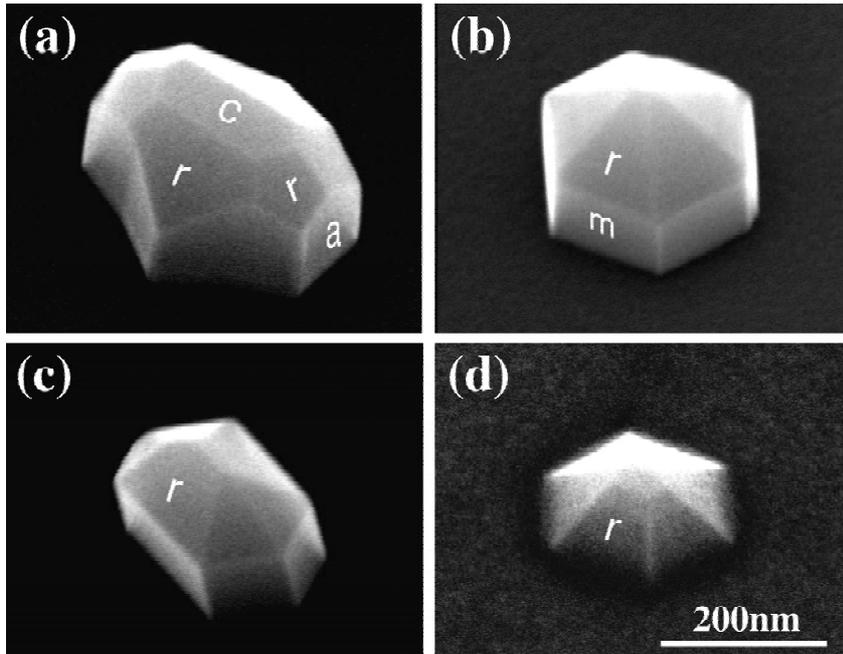


図9 選択成長法により形成させたGaNドット構造の成長温度依存性
 成長温度は(a)650、(b)700、(c)750、(d)800であった。約200nmの窓領域
 に選択成長させた。図中のアルファベットはGaNに特有な安定な面の指標である。30°
 傾斜させた撮影したSEM像である。

ば個々の量子ドットの2準位を変化することができ、素子設計が容易になる。

B - 5 窒化物半導体を用いた共鳴トンネルダイオードの作製

GaN/AlN 量子構造の輸送特性を評価するために、共鳴トンネルダイオード(RTD)を作製した。MOCVD法を用いて量子井戸を作製し、図10に示すように、GaN井戸幅が5nm、AlNのバリア幅が1nmの2重障壁構造であった。この試料に直径100ミクロンのAl/Auの電極を形成してRTDを形成させた。この素子を80Kで評価した結果、明瞭な共鳴トンネル効果を確認した。図11(a)に示す理論計算では、井戸幅5nmを仮定しており、このときの2準位間のエネルギーは120meVである。計算により導き出した電流電圧特性と比較しても、ほぼ同様の共鳴準位間隔を示しており、波長10ミクロンの赤外線で共鳴励起可能な良好なヘテロ構造が形成されている。

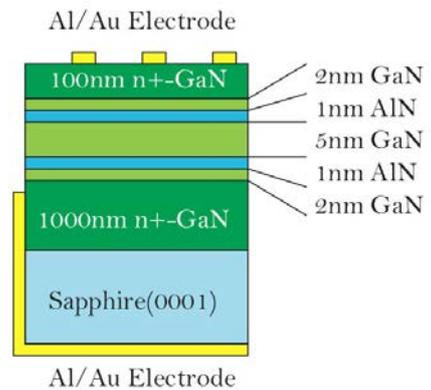


図10 作製したRTDの構造図

さらに、この波長領域の赤外線透過しやすい材料としてオスmium(0s)を選択して、金属薄膜の透過率の測定を行った。ZnSe 基板の上に 5nm の 0s を堆積させたときの強度変化を図 12 に示す。約 43%の赤外線が透過することが分かり、赤外線を用いた量子ビット形成のための電極材料として有用であることを示した。

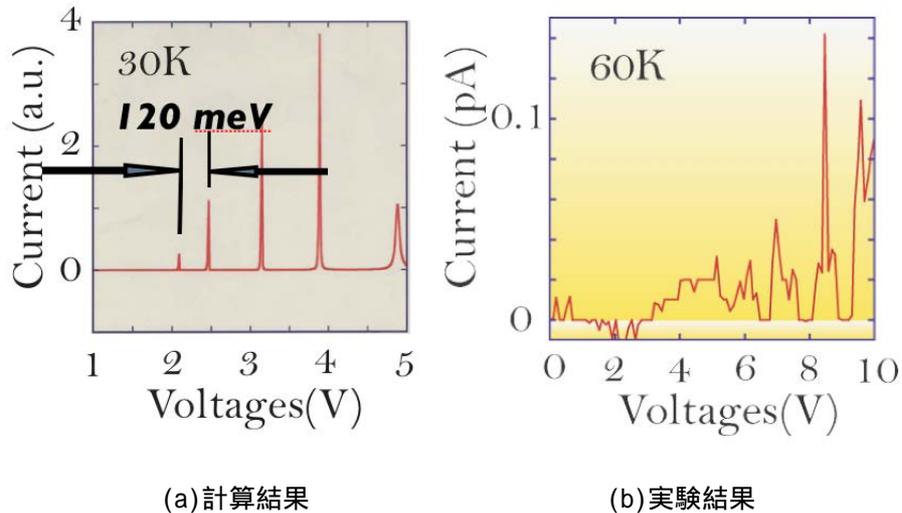


図11 RTDの電流電圧特性

(a)は図10の構造を仮定して30K計算した結果である。第1ピークと第2ピークの間隔はエネルギーにして120meVに相当する。(b)60Kで測定した結果。共鳴の周期が計算結果とよく一致している。

B - 6 窒化物半導体量子ドット縦型単一電子トランジスタの作製

GaN の選択成長法と同様に、SiO₂によりマスクを施した AlGaIn 基板の上に、MBE を用いて GaN/AlIn のヘテロ成長を行い、GaN 量子ドットを形成させた。電子輸送制御のためのゲート電極の形成法として図 13 に示すような埋め込み法(同図(b))と、斜め蒸着法(同図(c))を試みた。斜め蒸着法においては、量子ドットとゲート電極の距離を同図(e)に示すように 10nm にまで近接させることに成功しており、今後素子作製プロセスの簡略化および微細化に対応できるものといえる。今回素子作製に用いた量子ドットの直径は100nm、高さは5nm、また AlIn のバリア層厚は1nmであった。ソースおよびドレイン電極を基板の裏面および量子ドットの上にとり、ゲート電極としては SiO₂ マスク中にあらかじめ埋め込んだものを用い、縦型の単一電子トランジスタを作製した。図 13(d)に作製した量子構造の AFM 断面像を示す。GaN の安定化面である r 面(1-102)でと c 面(0001)で形成されており、おおよそ 100nm であることが分かる。

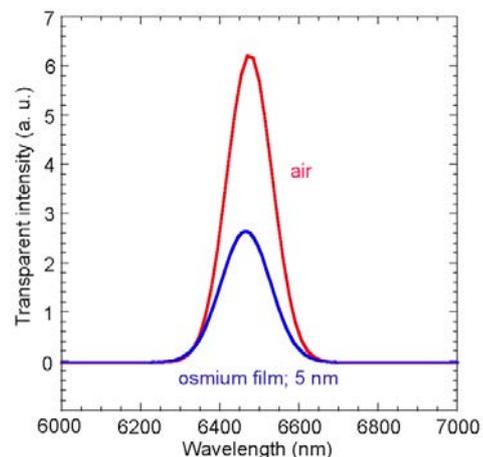


図12 オスmium膜の透過率測定
波長6.5ミクロンの赤外線に関しては40%以上の高い透過特性を得た。

本デバイスの 10K における電流電圧特性を図 14(a)に示す。ゲート電圧により電流特性が変調されていることが分かる。この素子の同温度における電荷安定図を図 14(b)に示す。図中黒い領域がクーロンブロッケード領域であり、この図から静電エネルギーは 20mV であり、実際の量子ドットのサイズが大きく、かつ、ドット内には電子数の多い状態であることが分かった。

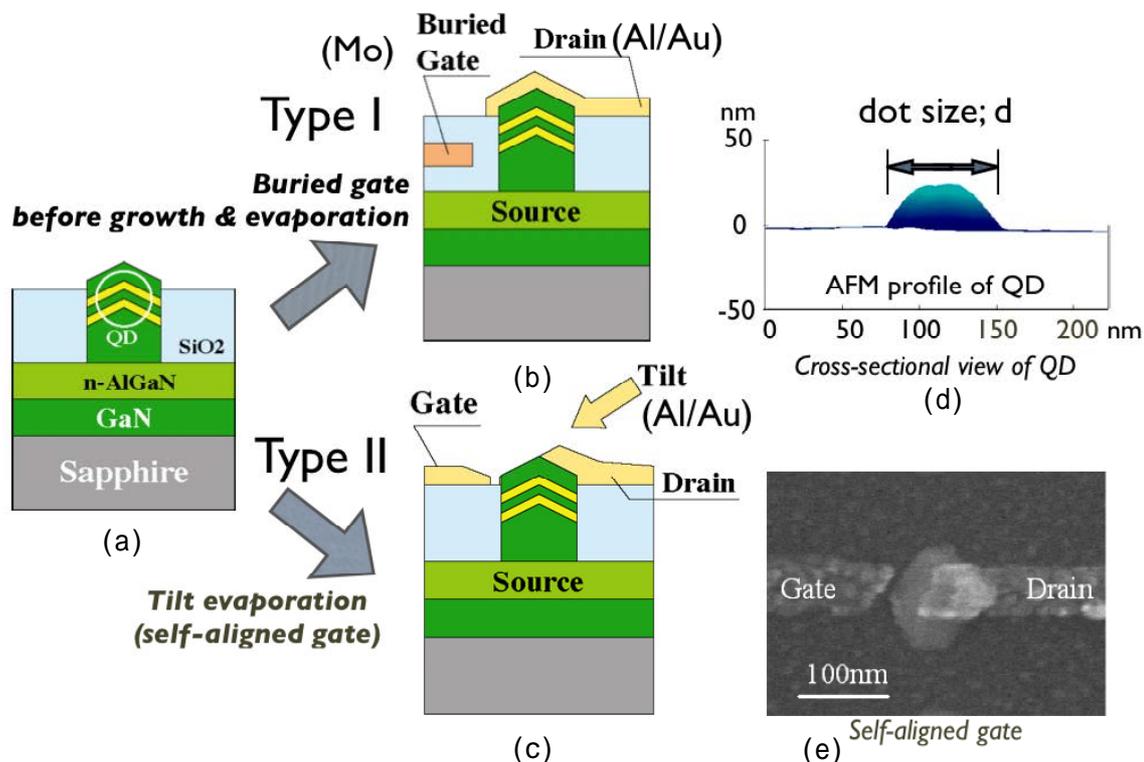
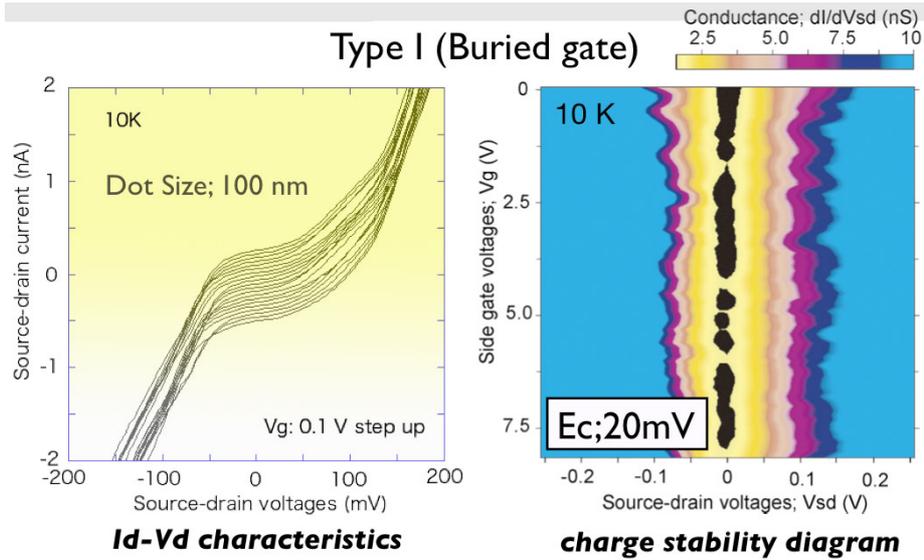


図13 窒化物半導体量子ドットを用いた縦型単一電子トランジスタ
 (a)縦型量子ドットの基本構造.(b)埋め込みゲート型SET.(c)セルフアラインゲート型SET.(d)量子ドットのAFM断面像.(e)セルフアライン法で作製したSETの表面SEM像.

次に、0 電子準位実現のためにさらにドットサイズを 50nm まで微細化したものについて評価を行った。ヘテロ構造の成長条件は同様であった。図 15 に作製した素子の電流電圧特性を示す。ステップ状の非線形性の高い特性が得られた。同図に示した微分負性抵抗特性においては約 200mV 周期で、電流が増大することがわかる。これは量子ドット内の 0 電子準位を介した単一電子輸送に起因するものであり、目的とする特性が得られた。本特性より、素子の静電エネルギーは約 100meV とわかり、赤外線の波長 12.4 ミクロンに対応し、おおむね目標とするエネルギーを実現できたといえる。



(a)

(b)

図14 量子ドットのサイズが100nmの埋め込みゲート型SETの10Kにおける動作特性 (a)電流電圧特性. (b) 電荷安定図. 静電エネルギーは20meVである。

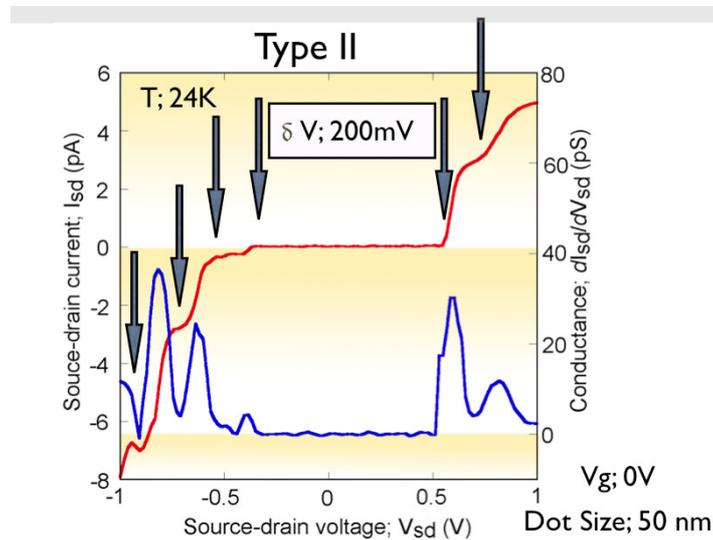


図15 量子ドットの寸法が50nmのSETの24Kにおける電流電圧特性 図中の矢印は、電流がステップ状に変化している場所を示している。ステップ状の変化は GaNの量子ドット内の0電子準位によるものである。100meVの大きな離散化エネルギーを得た。

C まとめ

量子相関素子実現を目指し、窒化物半導体量子ドットの位置制御と素子作製に関する研究を行い、以下に示す事項を明らかにした。

- 1) 結合量子ドット形成のために、集束電子ビームを用いた新しい量子ドットの位置制御法である「電子ビーム位置制御液滴エピタキシー法」開発し、実際に良質の窒化物半導体量子ドット列を形成させた。
- 2) 自然形成させた GaN/AlN 量子ドットを用いた単一電子トランジスタを作製し、クーロンブロッケード現象、共鳴トンネル現象を観測した。窒化物半導体量子ドットは量子相関デバイスを実現するのに有望である。
- 3) 窒化物半導体量子ドット内の単一電子スピンを赤外線円偏光パルスを用いて反転励起させる量子ビットの実現法を提案した。自発分極を利用した量子相関素子は窒化物半導体特有である。
- 4) 選択成長法を用いて窒化物半導体量子ドットの位置制御が可能である。ヘテロ構造の形成が容易に可能である。
- 5) 共鳴トンネルダイオードを試作した結果、理論特性とよく符合する結果が得られた。良好なヘテロ界面の形成を実現した。
- 6) 縦型の単一電子トランジスタを作製した。0次元離散化準位を介在した単一電子輸送特性が得られた。赤外線で励起可能なエネルギースケールまで、デバイス設計が実現した。

D 研究の自己評価および今後の展開

窒化物半導体の量子ドットの位置制御と量子効果電子デバイスの応用の見地から本研究を評価すれば、本研究は国内外に類を見ない事例であり、オリジナリティの高く、新規性、先進性は明らかに高い。量子ドット構造をエッチング技術を用いないで結晶成長のみで位置制御して作製する手法は、高品質な量子ドットを形成する上で将来必要不可欠な技術といえ、オリジナリティの高い研究である。これらの成果は、以下の論文での発表により集約されている。

- 1) "Formation of GaN nanopillars by selective area growth using ammonia gas source molecular beam epitaxy", Koji Kawasaki, Ikuo Nakamatsu, Hideki Hirayama, Kazuo Tsutsui and Yoshinobu Aoyagi, J Cryst. Growth, 243 (2002) 129-133.
- 2) "GaN quantum-dot formation by self-assembling droplet epitaxy and application to single-electron transistors ", Koji Kawasaki, Daisuke Yamazaki, Atsuhiko Kinoshita, Hideki Hirayama) Kazuo Tsutsui and Yoshinobu Aoyagi, Appl. Phys. Lett. 79 (2001) 2243-2245.

今後の展望としては、得られた単一電子トランジスタに磁場を印加して、円偏光した赤外線パルスを照射することによる応答性の評価を行い、量子相関素子を作製することである。本事項は、本研究期間内で達成できなかったが、現在も実験を遂行中であり、窒化物半導体を用いた量子演算素子の実現の可能性を明らかにして行く。

3 - 3 - 4 . フッ化物系材料を用いたヘテロ接合の形成

(研究主担当： 東京工業大学 筒井一生)

A はじめに (Si 基板上の $\text{CaF}_2/\text{CdF}_2$ ヘテロ系の特徴)

量子演算素子の基本となる結合量子ドット構造を実現するためには、電子の閉じこめ効果が大きいエネルギー障壁の高いヘテロ材料系が有用である。また、量子ドット間の結合度を制御するために、その間のエネルギー障壁高さが可変できれば、特性制御の自由度が高い。このような量子井戸構造はこれまで半導体ヘテロ接合を用いて形成されてきたが、絶縁体に相当する材料系を用いれば、さらにエネルギー障壁の高いヘテロ系が実現できる。このような材料系として、本研究では、Si 結晶上にヘテロエピタキシャル成長できる $\text{CaF}_2/\text{CdF}_2$ 系に着目し研究を進めた。

表1 CaF_2 および CdF_2 の結晶構造パラメータ

	CaF_2	CdF_2	Si
結晶型	螢石型	螢石型	ダイヤモンド型
格子定数[nm]	0.546	0.539	0.543
Si に対する格子不整	+0.6%	-0.8%	--

CaF_2 および CdF_2 は結晶性絶縁物であり、その結晶構造と格子定数を半導体のSiと比較して表1に示す。両弗化物の螢石型構造はSiのダイヤモンド構造と類似性が高く、相互の格子不整も小さい。これらの関係は、良好なヘテロエピタキシーにとって有利である。さらに、この材料系の重要な特徴としてエネルギーバンドアライ

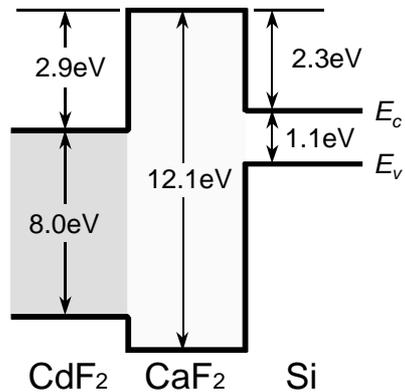
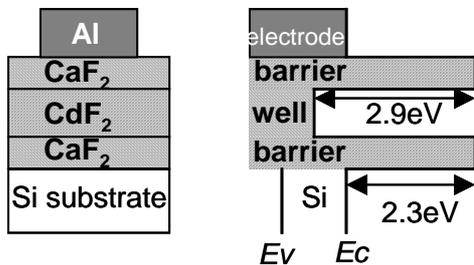


図1 $\text{CdF}_2/\text{CaF}_2/\text{Si}$ ヘテロ界面のエネルギーバンドアライメント

メントがある。図1に、 $\text{CdF}_2/\text{CaF}_2/\text{Si}$ のヘテロ構造におけるバンドア

ライメントを示す。両弗化物とも禁制帯幅の広い絶縁物であるが、伝導体端のエネルギーレベル (E_c) に大きな違いがある。 CdF_2 の E_c は非常に低く(電子親和力が大きい)、半導体のSiの E_c よりさらに低いところに位置する。その結果、 CaF_2 を障壁層、 CdF_2 を井戸層に用いると2.9eVのエネルギー障壁をもった量子井戸構造が形成できることになる。

実際に、このヘテロ系では、急峻な界面を有した量子井戸構造の成長が分子線エピタキシー法で可能であることが示されてきた。図2は、本ヘテロ系を用いて作られた共鳴トンネルダイオード (RTD) の例である。常温で大きなピーク電流/

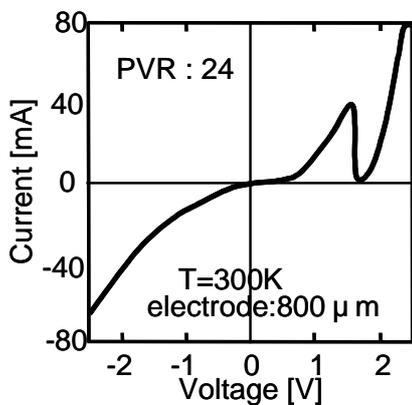


図2 Si基板上の $\text{CdF}_2/\text{CaF}_2$ 系ヘテロ構造による共鳴トンネルダイオード

ヴァレー電流比 (P/V 比) が観測されている。

一方、このヘテロ材料系には、Si と CdF_2 との間に非常に強い化学反応性が存在することが問題であり、この制御が重要な課題であった。実際には図 1 や図 2 に示されるように、Si 基板と CdF_2 の間には必ず CaF_2 層をこの反応を阻止するバッファ層として挿入する。しかし、この CaF_2 バッファ層は電子がトンネルできる程度に薄い必要がある。このための層厚は約 1nm 程度であり、このような極薄層では反応抑制のバッファ効果が充分ではないという問題もあった。

B 研究成果

B - 1 CaF_2 と CdF_2 の混晶化によるバンドエンジニアリングの実現と成長特性の制御

本研究では、 CaF_2 と CdF_2 の混晶を新たに導入し、このヘテロ構造が持つ高いポテンシャルを素子形成で実現することを目的として推進した。混晶系の導入は、主に次の二つの観点からメリットが期待される。すなわち、

- 1) 混晶組成によってエネルギー障壁を任意に制御する。
- 2) CdF_2 と Si の化学反応性を抑制し、高品質な量子井戸層を安定に成長する。

である。

このうち、1) は混晶化でバンドエンジニアリングを目指すことになる。結合量子ドットでドット間の結合度を制御するには、エネルギー障壁が固定の場合は障壁の厚さを制御するしかない。しかし、障壁の高い材料系を用いるのでその厚さは数 nm 以下になり、厚さのみで制御するのは困難が予想される。もし、障壁を任意に制御性よく下げられれば、より自由度の高い結合度制御が実現する。

また、2) は、 CdF_2 に CaF_2 を混入することによって CdF_2 の低い E_c レベルを維持しながら純粋な CdF_2 よりも Si との化学反応性を抑制することを目指すものである。

以上は、量子井戸構造上でみると、1) が障壁層に混晶を導入した場合、2) が井戸層に混晶を導入した場合に、それぞれ期待されるメリットである。

本研究の開始時点では、Si 基板上への $\text{Ca}_x\text{Cd}_{1-x}\text{F}_2$ 混晶の成長はまだ報告がなく、実際にエピタキシャル成長ができるのかどうかはわからなかった。さらに、混晶が成長できたとして、上記のような効果が実際に得られるのかも不明であった。従って、研究は、これを実験的に明らかにしてゆくことを順番に進めた。

B - 2 $\text{Ca}_x\text{Cd}_{1-x}\text{F}_2$ 混晶の成長特性

Si (111) 基板上に 10nm の CaF_2 バッファ層を成長し、その上に組成が全範囲 ($0 < x < 1.0$) にわたる $\text{Ca}_x\text{Cd}_{1-x}\text{F}_2$ を基板温度 200 で 110nm 成長した。これを二結晶 X 線回折で観察した結果を図 3

に示す。高い x の領域では基板の回折に重なってしまうが、 $x = 0.62$ では単一の回折ピーク

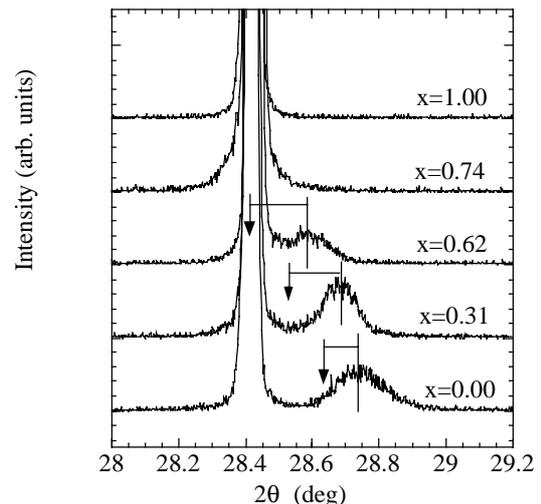


図3 Si基板上の $\text{Ca}_x\text{Cd}_{1-x}\text{F}_2$ 層のX線回折
図中の は無歪み状態で期待されるピーク位置

が組成に依存してシフトして観察された。これより、組成が均一な混晶層がエピタキシャル成長できていることがわかる。また、これらの混晶層の結晶性を高速 He イオンの後方散乱法 (RBS 法) で調べたところ、組成に依存せずほぼ最小チャネリング収率で 10-20% の値を得た。表面モフォロジーは原子間力顕微鏡 (AFM) で評価し、表面ラフネスの RMS 値として 0.3-1.5nm 程度を得た。この RMS 値は組成や成長温度でやや複雑な変化を示したが、純粋な CaF_2 あるいは CdF_2 より混晶状態の方がより平坦な成長表面が得られる現象が明らかになった。

以上より、Si 基板上に $\text{Ca}_x\text{Cd}_{1-x}\text{F}_2$ を全組成領域にわたって良好にエピタキシャル成長できることを明らかにした。

B - 3 Cd-rich 混晶による井戸層の安定成長

量子井戸構造やトンネルデバイスへの応用では、電子がトンネル可能な薄い CaF_2 バッファ層上に量子井戸にあたる CdF_2 を急峻性よく超薄膜成長しなければいけない。これは、上記のように、比較的厚い (10nm 程度) バッファ層の上に CdF_2 や混晶をこれまた比較的厚く成長することに比べると難易度が高い。これは、トンネル層となる 1nm 程度の CaF_2 層では Si 基板と CdF_2 との間の反応を完全に抑制しきれないためと考えられる。

厚さ 1.2nm の CaF_2 バッファ層上に 3nm の成長に相当する CdF_2 分子線を基板温度を変えて供給し、その後の基板表面での CdF_2 の付着量を RBS 法で測定し、平均的な付着係数を求めた。その結果、図 4 に示すように、基板温度を常温より高くして行くと純粋な CdF_2 では付着係数が顕著に低下した。これは基板温度の上昇により、Si と CdF_2 の反応が促進され、反応生成物が揮発して失われたためと考えられる。これに対し、 CdF_2 成長時に 10% の CaF_2 分子線を同時に供給し、純粋 CdF_2 の代わりに $x=0.1$ の $\text{Ca}_x\text{Cd}_{1-x}\text{F}_2$ を成長するようにすると、同じく図 4 に示すように CdF_2 成分の付着係数が同じ温度に対して顕著に高くなった。これは、 CaF_2 バッファ層が同じでも、井戸層を混晶化することで基板との反応を抑制する効果があることを示している。

同じく 1.2nm の CaF_2 バッファ層上に 3nm の混晶層を組成を変えて成長 (室温) したときの表面モフォロジーの組成依存性を図 5 に、また、

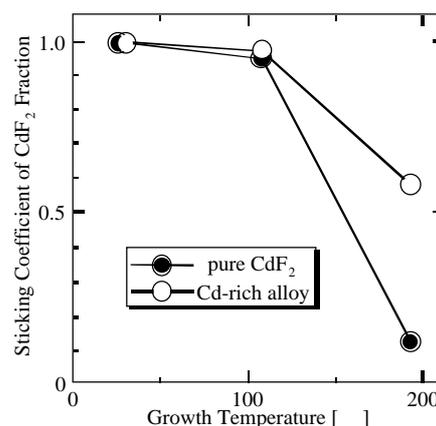


図4 1.2nm- CaF_2 バッファ層上に CdF_2 あるいは $\text{Ca}_x\text{Cd}_{1-x}\text{F}_2$ ($x=0.1$) を成長したときの CdF_2 成分の付着係数

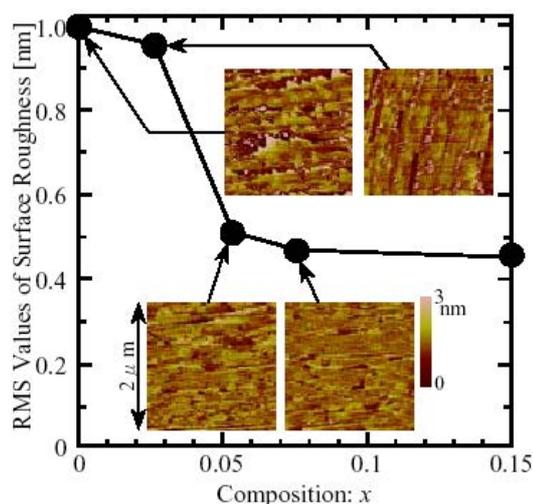


図5 1.2nm- CaF_2 バッファ上に室温成長した $\text{Ca}_x\text{Cd}_{1-x}\text{F}_2$ 表面ラフネスと組成の関係

100nm 程度の厚い混晶層を組成を変えて成長したときのX線回折のロックンクカーブ半値幅の組成依存性を図6に示す。これらの結果より、 CdF_2 に5~10%程度の CaF_2 を混入したCd-rich混晶を用いることで、成長層の表面モフォロジーが改善し、200 程度の高い成長温度で良好な結晶性が得られることが明らかになった。すなわち、従来の $\text{CaF}_2/\text{CdF}_2$ 構造の超薄膜ヘテロ構造で問題であった CdF_2 とSiの化学反応性に対し、混晶層を用いることでこの反応性を効果的に抑制できることを示せた。

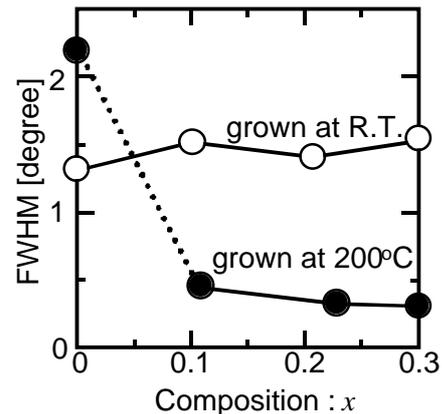


図6 1.2nm- CaF_2 バッファ層上に成長した $\text{Ca}_x\text{Cd}_{1-x}\text{F}_2$ のX線ロックンクカーブ半値幅の組成および成長温度依存性

B - 4 伝導帯端 (E_c) エネルギーレベルの制御

混晶化によって $\text{Ca}_x\text{Cd}_{1-x}\text{F}_2$ の E_c が組成によってどのように変化するかを実験で明らかにした。評価方法は、 E_c が高いレベルに位置すると予想される CaF_2 組成が多い領域と、 E_c が低いレベルに位置すると予想される CdF_2 組成が多い領域に分け、それぞれに適した方法を利用した。

まず、前者に対しては、内部光電子放出法による評価を行った。電子のトンネルが起こらない比較的厚い混晶層のMIS構造にバイアスをかけ、単色光で電極のフェルミレベルにある電子を励起し、その光励起電流の励起光波長のしきい値から障壁高さを評価する方法である。 CaF_2 組成が0.5以上の領域でこの測定を行い、障壁高さと組成の関係をプロットしたものを図7に示す。純粋な CaF_2 に対し、 CdF_2 が混入し CaF_2 組成が減少するに従って障壁高さが低下する効果が確かめられた。純粋な CaF_2 の場合の障壁高さは、図1に示したX線光電子分光法での評価値と一致し、そこから混晶の組成に対して線形に変化することもわかった。すなわち、少なくともこの組成範囲で E_c に対してベガード則が成り立っていることが示された。

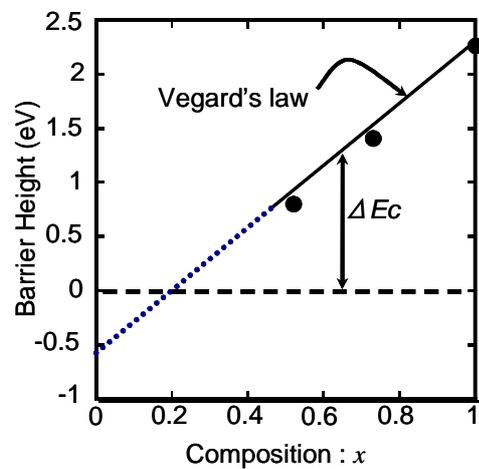


図7 内部光電子放出法によって求めた $\text{Ca}_x\text{Cd}_{1-x}\text{F}_2$ の E_c レベルの組成依存性 (Siの E_c を基準として)

この方法では評価が難しい低障壁の領域については、次項のRTDによる評価で行った。

B - 5 $\text{Ca}_x\text{Cd}_{1-x}\text{F}_2$ 混晶系を用いた共鳴トンネルダイオード (RTD)

B - 5 - 1 障壁層の混晶化による障壁高さの制御

2重障壁構造の障壁層を混晶化した共鳴トンネルダイオードを製作し、その動作を確認した。図8に素子構造と得られた電流電圧特性(室温測定)を、従来の純粋 CaF_2 障壁の素子と比較して示す。

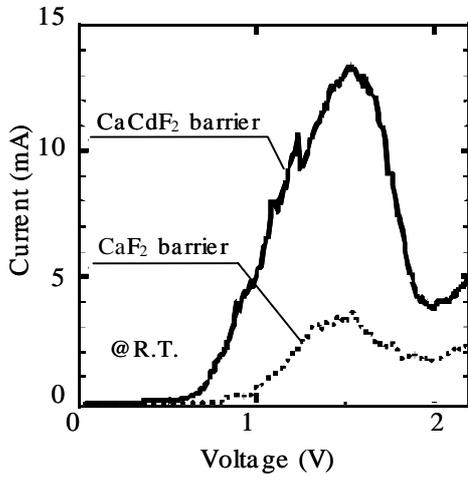
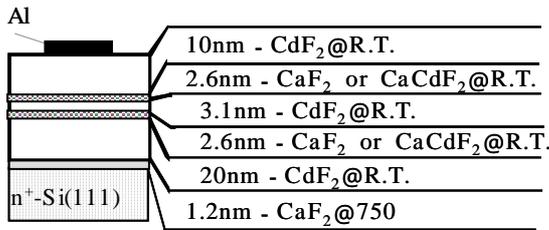


図8 障壁層に $\text{Ca}_x\text{Cd}_{1-x}\text{F}_2$ ($x=0.5$)を導入した共鳴トンネルダイオードの構造と特性

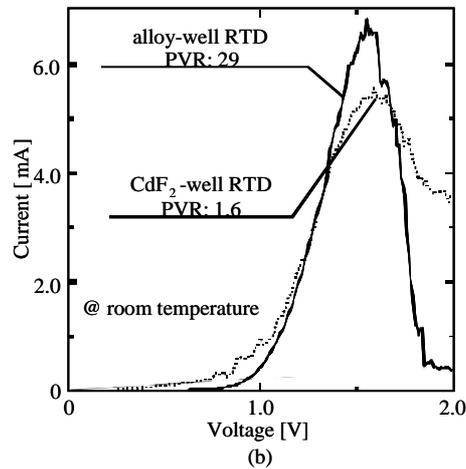
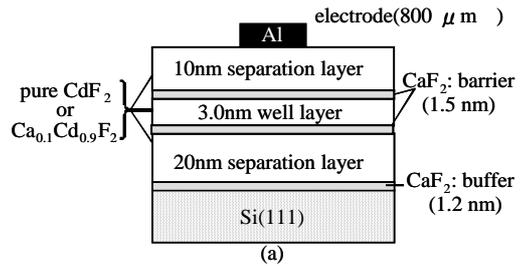


図9 井戸層に $\text{Ca}_x\text{Cd}_{1-x}\text{F}_2$ ($x=0.1$)を導入した共鳴トンネルダイオードの構造と特性

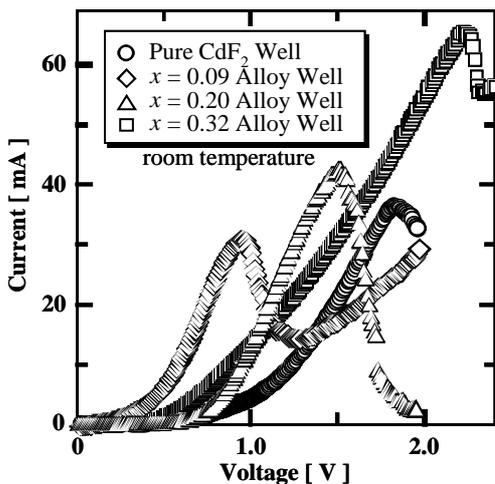
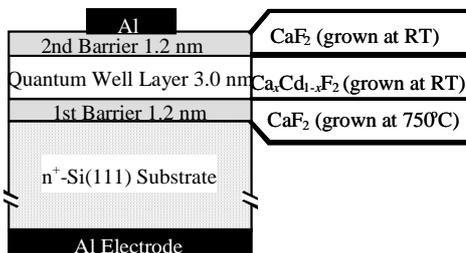


図10 井戸層に $\text{Ca}_x\text{Cd}_{1-x}\text{F}_2$ を導入した共鳴トンネルダイオード特性の混晶組成依存性

ここでは、RTDの活性層を厚い CdF_2 ではさんだ構造をとっており、基板界面の影響が活性層に及びにくい構造と考えて用いた。この結果より、混晶の障壁層でも共鳴トンネル動作が正常に行われることが確かめられた。また、同じ障壁層の厚さに対し、より大きなピーク電流が得られたことから、障壁の高さが低下した効果が電气的特性に現れていると考えられる。

既に述べた内部光電子放出の実験結果と合わせて、量子井戸の障壁高さが混晶を用いることで制御できることが示された。これは、このヘテロ系で結合量子ドット系を構成する場合、ドット間の障壁高さを制御して結合度を可変とする方法が可能であることを示唆している。

B - 5 - 2 井戸層の混晶化による品質向上と E_c の変化

RTDの井戸層を従来の CdF_2 から Cd-rich 混晶に変えた構造を製作し評価した。まず、図8の場合と同様に活性層を厚いドリフト層 (separation layer) ではさんだ図9のような構造で製作した。井戸層およびドリフト層を、純粋 CdF_2 あるいは $x=0.1$ の $\text{Ca}_x\text{Cd}_{1-x}\text{F}_2$ とし、 CaF_2 バッファ層より上層部分を前者では室温で、後者では 200 で成長した。従来、純粋な CdF_2 を用いる場合、成長温度を 200 まで上げると Si との反応が顕著になり素子特性は得られなかった。これらの RTD の電流電圧特性 (室温測定) を図9に示す。まず、井戸層を混晶化した場合も微分負性抵抗特性は正常に得られており、P/V 比は純粋 CdF_2 の井戸層の場合よりむしろ向上した。これは、混晶化により成長温度を上げることができ、その結果、井戸層の結晶性が向上したためと考えられる。(膜厚が大きく異なるので直接比較はできないが、図6を参照。)

次に、Cd-rich 混晶における組成と E_c レベルの関係を RTD 特性から求める実験を行った。これは、高 E_c レベルの混晶に対して内部光電子放出法で評価したものと相補的な位置づけになる。実験は、図10のようなドリフト層のない活性層を直接基板上に形成する形で、井戸層の混晶組成を変化させた。これらの素子で得られた電流電圧特性 (室温測定) を同図に合わせて示す。微分負性抵抗特性のピーク電圧が組成とともに変化している。ピーク電圧は、電子の注入源になっている Si の E_c を基準とした井戸層底部の E_c の相対位置の他に井戸層の厚さの影響も受ける。そこで、各測定試料について RBS 法を用いて井戸層の厚さを個々に見積もった。そして、この値を元に、ピーク電圧から Esaki-Tsu モデルを適用して、井戸層の E_c を計算した。

その結果を図11に示す。ここには、図7の内部光電子放出法による結果も再度合わせてプロットしてある。このように、全組成領域で、混晶の E_c はベガード則に従って変化し、組成によってこれを制御できることが明らかになった。半導体とは異なる材料系でもこのようなバンドエンジニアリングが可能であることは大変興味深く、また、高障壁構造が可能な系でそれを自由に制御できることは、結合量子ドットの特性を材料組成で広範囲に可変できることになり、応用上の大きな利点である。

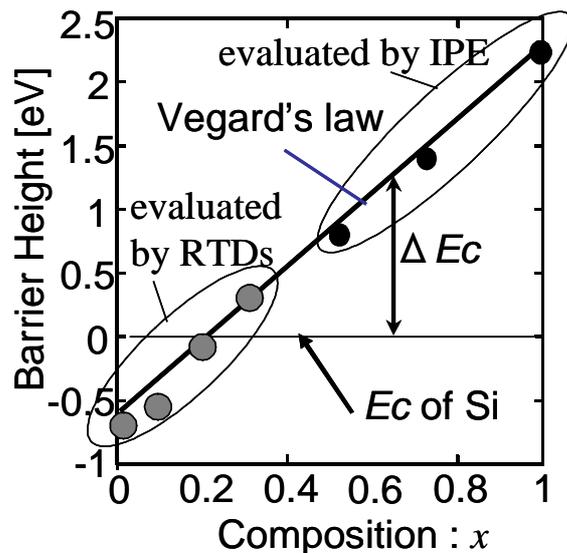


図11 $\text{Ca}_x\text{Cd}_{1-x}\text{F}_2$ の全組成領域における E_c レベルの組成依存性。内部光電子放出法 (IPE) と共鳴トンネルダイオード特性 (RTD) を合わせた結果

C まとめ

結合量子ドットのための新しい材料系として、電子に対するエネルギー障壁が高く、かつ、それが自由に制御できることが期待できる、 $\text{Ca}_x\text{Cd}_{1-x}\text{F}_2$ 混晶系の超薄膜ヘテロ構造を研

究した。その結果、次のことが明らかにできた。

- 1) $\text{Ca}_x\text{Cd}_{1-x}\text{F}_2$ は、Si(111)基板上に薄い CaF_2 バッファを利用する方法によって、全組成領域で均一で結晶品質の良いヘテロエピタキシャル成長が可能である。
- 2) $\text{Ca}_x\text{Cd}_{1-x}\text{F}_2$ の E_c レベルが、全組成領域でベガード則に沿って可変できる。すなわち、Si の E_c を基準として、伝導帯不連続が -0.6eV から $+2.3\text{eV}$ まで連続可変できる。
- 3) CaF_2 組成が小さい Cd-rich 混晶は、従来の純粋 CdF_2 に比べて、量子井戸として充分低い E_c を維持しながら、Si との化学反応性が抑制され、高い成長温度で良質のエピタキシャル層を得ることができた。

以上より、本ヘテロ系は、電子の閉じこめポテンシャル障壁が高く、結合度の制御性のよい結合量子ドットの形成材料として新しい有用な材料系といえる。

D 研究の自己評価および今後の展望

$\text{CaF}_2/\text{CdF}_2$ ヘテロ系による量子井戸構造やその素子応用は、我々のグループの他、東工大の浅田・渡辺らのグループ、ロシア科学アカデミーの N.S.Sokolov らのグループにより継続的に研究されてきた。その中で、本研究の主要な成果である両材料の混晶化は、その提案から成長の実証、エネルギーバンド構造の可変性とその定量評価など、いずれも本研究成果のオリジナリティは高く、新規性、先進性は明らかに高いといえる。これらの成果は、以下の3論文での発表に集約されている。

- H. Kambayashi, T. Gotoh, H. Maeda and K. Tsutsui, "Growth Characteristics of $\text{Ca}_x\text{Cd}_{1-x}\text{F}_2$ Films on Si Substrates Using CaF_2 Buffer Layer", J. of Crystal Growth, vol.237-239, 2061-2064 (2002)
- M. Maeda, H. Kambayashi, S. Watanabe and K. Tsutsui, "Heteroepitaxy of Cd-rich $\text{Ca}_x\text{Cd}_{1-x}\text{F}_2$ Alloy on Si Substrates and Its Application to Resonant Tunneling Diodes", Jpn. J. Appl. Phys., 42(4B), 2453 - 2457 (2003)
- M. Maeda, S. Watanabe and K. Tsutsui, "Evaluation of Variable Energy Level of Conduction Band Edge on Fluoride Resonant Tunneling Diodes", Jpn. J. Appl. Phys., 42(10A), L1216-L1218 (2003)

本研究では、量子演算素子としての結合量子ドット形成のための新規なヘテロ材料系とそのポテンシャルを提示した。今後の方向としては、実際に結合量子ドットをこの材料系で製作し、電子状態の評価を行うことである。これは本研究の実施期間では達成できなかったが、現在、Si 基板上の SiO_2 層に微細なホールを形成し、その中に本ヘテロ構造を埋め込み成長する技術の開発を進めている。これにより、縦型の結合量子ドット構造を実現することが可能になる。そして、高障壁とその可変による結合度制御などの期待される特徴を実証し、量子演算素子の集積形成の実現に有力な選択肢を提供することになると考える。

3-3-5 結晶成長を利用した多重量子ドット作製の可能性

(研究主担当 静岡大学 天明二郎)

A はじめに

結晶成長を用いたナノ構造制御には、いわゆる自己形成法を用いたもの、選択成長を用いたもの等があるが、ここでは我々が検討してきた自己組織化による量子ディスク形成を中心に述べる。

B 研究結果

B-1 InGaAs 量子ディスクの形成

まず、図 1(a), (b), (c)に GaAs (311)B、(311)A 並びに(100)基板の上に成長した as-grown の 10nm 厚歪 InGaAs/AlGaAs の表面 SEM (走査電子顕微鏡) 写真を示す。また、断面 SEM 写真並びに断面模式図も併せ示している。特徴を一言で言えば、(100)はフラット

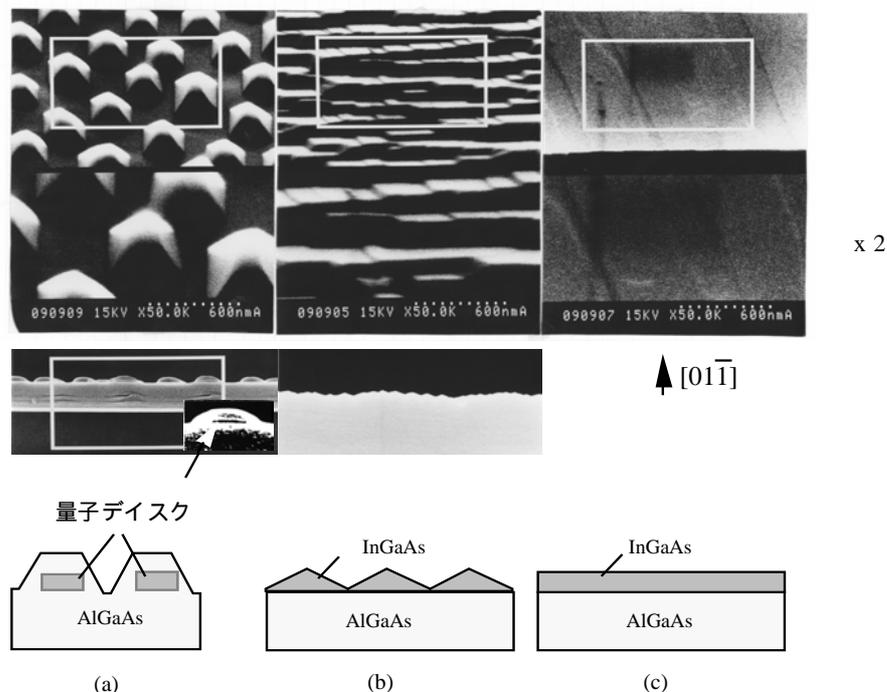


図1 As-grown InGaAs/AlGaAs の表面モホロジー (a) GaAs (3 1 1) B, (b) GaAs(311)A, (c) GaAs(100)

であるが、(311)B 面は秩序性をもったナノクリスタル・アレー、(311)A 面は、1次元周期的に modulate されたコラゲーション表面モホロジーで、それぞれ非常に異なっている。さらに(311)B の断面 SEM 写真よりナノクリスタル内に閉じ込め構造、即ち量子ディスクの存在が認められる。結晶成長として MOVPE 成長法を用い、シーケンスの特徴は、成長温度が 700-800 °C と通常の InGaAs 系成長としては非常に高い点と InGaAs 成長後の 2 分 30 秒程度の成長中断である。

次に、量子ディスクのサイズ制御性について述べる。。In 組成を 20-40% の範囲で制御することで、そのサイズを概略 130-30nm のナノメータ・スケールで制御できる。ナノ

クリスタル間の平均的な間隔は In 組成の増加にともない短くなり 30%で 250nm 程度、40%で 150nm となる。また、低次元的な横方向閉じ込めを実現する際、重要となるサイズゆらぎは、絶対サイズにあまりよらず、約 10%と見積もられている。

さらに基板温度と In 濃度をパラメータとして GaAs(311)B 面上の as-grown InGaAs 表面モホロジ相図を求めると、孤立した歪 InGaAs 量子ディスクを内蔵したナノクリスタル三角格子パターンを中心に、ジグザグストライプパターン、ハニカム格子パターン等様々な周期的パターンが得られる。この表面再構成を決める要因は、InGaAs の In 組成並びに膜厚と成長温度である。このように、成長温度が高く ($\sim 800^\circ\text{C}$) かつ In 濃度が比較的低い (20%) 状況下でも起こり、下地の AlGaAs の影響も受けるこの現象は、InAs/GaAs 等の高歪エピタキシャル低温成長系で見られる Stranski-Krastanov 成長による島形成とその形成メカニズムが根本的に異なる。

B-2 形成メカニズム

(311)B 上の表面再構成は、現象論的には、一旦ある構造を持ち成長した InGaAs 膜が周期的に混晶化を起こし、分離、独立しさらに、マストランSPORTを誘起しながら孤立したディスク状の InGaAs 部、即ち、微小ディスク構造を内蔵するナノクリスタルが形成され自己組織化が完了すると考えられる。

周期的な空間的パターンを生じる非平衡散逸系のメカニズムとして、古く 1952 年、A. Turing の自己組織の数学的モデルが提案されている。これは自己触媒型非線形性をベースに持つ反応拡散系とよばれ、自己組織現象を支配している典型的な一つのタイプと考えられている。散逸系の自己組織化を表現する方程式は非線形反応項と拡散項からなる連立非線形偏微分方程式で記述される。ここで、活性化因子と抑制因子の 2 粒子モデルで活性化因子の拡散係数に比べ抑制因子の拡散係数がはるかに大きい場合、周期的空間パターンが生じることが数学的に求められる。2 種類の粒子の反応拡散の競合による自己組織化現象を特徴づける長さ (波長) は、それぞれの拡散長の幾何平均のオーダーになる。自己組織化現象は一般に構造を発展させようとする因子と抑制する因子の競合で形成される。実際、生物学の分野で、チータ、ゼブラ等の動物の色々な表皮パターンがこの Turing のモデルで現象論的にシミュレートされている。

ここで、この Turing 不安定性が GaAs(311) 基板上の表面再構成 (量子ディスクとクラゲーション) を支配する可能性を考えてみる。(311) 面の特長は、ミクロ的に見ると (100) 面と (111) 面とで等比率に構成され、そのステップ密度が最大な点にある。ここで、GaAs(111)B 面は MOVPE エピ成長の観点からは極めて特異な面で、As 安定化面のため通常の成長温度、V/III 比では、GaAs あるいは AlGaAs 等の膜は全く成長せず、ヒルロック成長することが知られている。(311)B 面の特異なモホロジはこのマイクロステップに含まれる (111)B 特有のエピ成長困難の性質が反映されていると考えている。(311)B 面の構成要素である (100) と (111)B の adatom 吸着確率の逆数が拡散係数に比例すると考えると抑制因子の拡散係数が大きくなり Turing の不安定性の条件を定性的に満足することになる。分岐特性を持つ様々なパターン相図は、反応拡散パラメータを変えることにより得られる Turing 不安定性空間に対応すると考えられる。

B-3 共鳴自己組織化と結合量子ディスクへの展開

上記で述べた配列性を持つ自己組織化量子ディスクに、さらに外部からある一定の制御を試み、サイズ、配列の制御並びに結合量子ディスクへの展開を試みた。

基板表面に前もって形成された格子状 SiN 微小核をテンプレートに選択成長と自己組織化の組み合わせた方法で、非線形現象特有の共鳴現象を利用できることがわかった。

図 2 に示す様に下地の正方格子並びに六方格子ピッチに同期したナノクリスタルアレーを得ている。例えば、In 濃度が 30% の場合ナノクリスタル間の平均的なピッチは

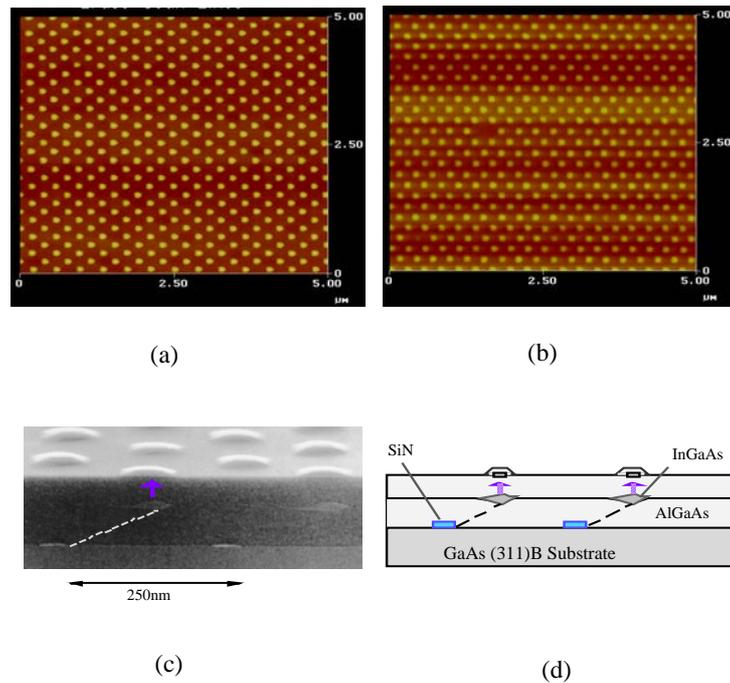


図2 下地パタンに共鳴配列した自己組織化量子ディスク

250-300nm 程度であるが、核となる SiN 格子のピッチがこの範囲からはずれるときちんとした六方格子が乱れてきて、外部同期される範囲はある一定の範囲にかぎられる。ここで、図 1 で示される様な、ある程度の配列揺らぎを伴う自己組織化量子ディスクを ”内部同期型” と呼ぶことにすると、ここで述べた様な SiN 核をベースに用いた外部ピッチに同期させ、固有のピッチ近傍で強制的に配列させる自己組織化現象は ”外部同期型” と呼べる。

しかし光学特性を調べてみると共鳴自己組織化の場合混晶化により内部の量子ディスクが内部同期型に比べさらに微細化するため本来の μ -PL 特性の非常にシャープな発光強度が大きく減少する傾向がみられた。In 組成が 40% の場合の方が 30% の場合に比べ減少の程度が大きい。一方 In が 25% の場合は量子ディスクのサイズがもともと大きいため発光スペクトルは量子井戸のように比較的広い PL スペクトルであるが、ピッチが最適化され揃うに従い、内部の量子ディスクも微細化され低次元閉じ込めの影響から非常にシャープな PL スペクトルに変化する。図 3 にその様子を示す。共鳴配列されたサイズの大きな量子ディスク (In が 25%) が強制的に下からの歪みエネルギーで配列化

される際、ディスクの混晶化が進みサイズが小さくなり低次元性が現れてきたものと考えられる。このように自己組織化と選択成長を組み合わせることにより配列、サイズ

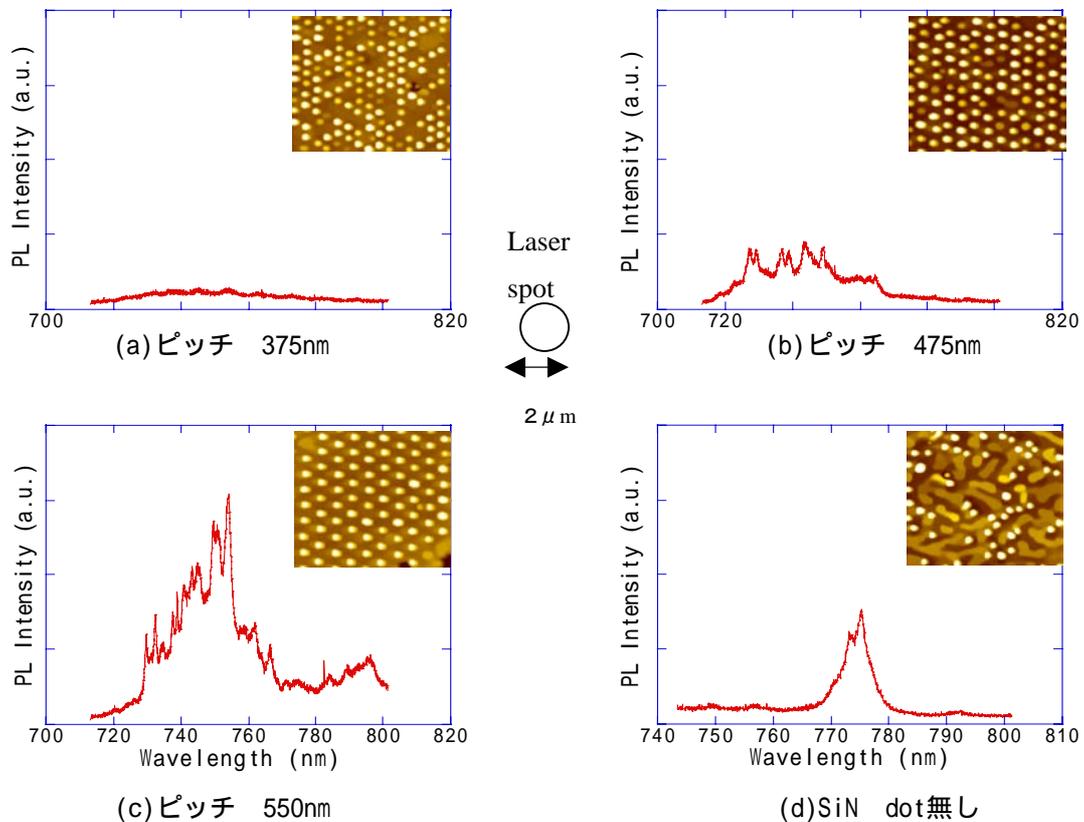


図3 配列状態に対応したPLスペクトル

ともある程度制御できることがわかった。またシャープなPLのピーク数と10個程度と思われるレーザ照射領域の量子ディスク数との数があわない問題があるが、一つの可能性として一つのナノクリスタル内に複数の量子ディスクが緩やかに結合形成されている可能性があることを示唆している。現在、 μ -PL特性で近接したシャープなPLピークを示す異なるピークが、同一ナノクリスタル内部に形成された2個の量子ディスクからの発光を示唆する極めて類似した μ -PLE特性を示す結果が観測されている。従ってこのようなテンプレートを用いた量子ディスクの形成法は制御NOTゲート形成に必要な結合量子ディスク形成の可能性を与えられと考えられる。しかしそのためにはさらにファインな外部からのサイズ制御が今後必要になってくる。

C まとめ

自己組織化現象を用いて高品質な極微ナノ構造即ち量子ディスクを形成できることを明らかにした。また微細量子ディスクからの励起子発光は非常にシャープな零次元の特性を示し、量子ビットへの適用の可能性があることがわかった。実際に励起子ラビ振動を観測でき、回転ゲートの基本動作を確認できた。また選択成長と自己組織化を組み

合わせることにより量子ディスクの配列並びに内部構造をファイナに制御できることもわかり、結合量子ディスク実現へ一定の進展をみた。

D 研究の自己評価および今後の展開

我々の自己組織化量子ディスクの研究はその後の半導体ナノ構造研究の端緒を切り開くものであった。今回のプロジェクトではこの量子ディスクを量子情報処理の基本エレメントである量子ビットへ展開ができるのではないかと考え(このアイデアも新しいものだが)、いくつかの成長実験、エキシトンを用いた光学実験を試みてきた。作成に関しては再現性、テンプレートをを用いたディスクの制御について着目して検討し一定の前進を見たが、難関と思われた結合量子ディスクについては一つの可能性を見つけた段階で、そのものの作成には成功していない。成長実験はかなり困難なものであった。光学評価に関しては ディスクの基本的な光学特性を明らかにしさらに急峻なエキシトン発光を用いてラビ振動の観測に成功した。回転ゲートの可能性を示唆するもので大きな前進であったが、制御 NOT 動作にはいたらなかった。この間の論文のサイテーションは比較的最近でもあり多くはないが、エキシトンを用いた量子ディスクの光量子情報処理への応用に関しては何回か招待講演を受けるなどこの分野の進展に一定の寄与は果たせたと考えている。この様に結晶成長の巧みな自然構造形成を利用した ”自己組織化プロセス” はこの分野の研究での一つのブレークスルーと認識されている。しかし、その微細構造の十分な理解 / 把握とその制御性はまだ十分とは言えず、さらなる技術的な進展が期待される。作成上の困難さもあり道は険しいが、さらに量子ナノ構造も異なる材料 ZnO 系などでの検討もくわえ始めており今後研究を進めていきたい。

3 - 4 量子相関機能の理論的検討

3 - 4 - 1 . 結合量子ドット系のコヒーレントダイナミクスの理論的検討

研究主担当： 広島工業大学 塚田 紀昭

A はじめに

半導体量子ドット中の電子、光ポテンシャル格子中の原子あるいは超伝導ジョセフソン接合のクーパ対電子など結合量子構造中の電子・原子のコヒーレントな振る舞いを将来の量子情報処理のための基本操作として利用することが検討されている。なかでも結合量子構造に発現するコヒーレント量子振動(ラビ振動)は量子コンピュータの基本動作である量子ビット(qubit)操作に不可欠な機能であり近年活発に研究されている[1]。また、量子結合構造は量子コンピュータのハードウェアのとして現在最も有望視されているもののひとつである。ここでは線形結合および非線形結合量子構造における電子・原子のコヒーレントダイナミクスについて理論的に解析した結果について要約報告する。

B 研究結果

B - 1 線形結合量子構造のコヒーレントダイナミクス

光学遷移が可能な2準位を励起すると、その2準位のエネルギー差で固有振動する分極が生成される。異なる量子状態間の干渉に伴うこの現象は、量子ビートあるいはラビ振動と呼ばれている。同様な現象はトンネル結合した2つの量子構造の間の電子・原子の運動についても起こる。これはブロッホ振動あるいはコヒーレント振動と呼ばれ、超高速レーザパルスによる電子波束の生成によって実験でも観測されている。

本研究ではこのコヒーレント量子振動をレーザ光によって制御する方法について理論的に検討し、2つの方法を提案した。1つはレーザ光の電場ポテンシャルによって量子準位をエネルギー的に変調しトンネル係数を実効的に変化する方法[2]、他の1つはレーザ光で1つの量子構造のサブレベル間遷移を誘起し、この遷移に関与するエネルギーレベルをシフト(ダイナミックシュタルク効果あるいは交流(ac)シュタルク効果と呼ばれる)させることにより、このレベルとトンネル結合しているもう一方の量子構造ポテンシャル中の量子レベルとの間のコヒーレント電子振動を制御する方法である。このような振動場による量子レベルのシフトは弱い振動場にたいしては直線的に増加し、原子分光分野ではブロッホ・シーゲルトシフトとして知られている。数値解析ではこのシフトが振動場の強さにたいして振動するという新しい結果が得られた[3]。

2つの結合量子構造の一方には基底準位と励起準位の2つのレベルを、他方は基底レベル1つだけの三準位系において、一方の基底準位と励起準位を非共鳴パルスで励起するとその基底準位の電子数(ポピュレーション)は変化しないが、その電子波束の位相を変化させることができる。これにより2つの基底準位間のトンネル振動を効果的に制御できることも示した[4]。これと同様なことは2つの結合量子構造の基底準位に電界パルスで時間的なエネルギーシフトを誘起することでも得られる。これは電界印加が容易な半導体結合量子構造にはレーザが不要で、量子計算のエンタングルメント状態の作製や論理ゲートへの応用上有用と考えられる。

また、正三角形の頂点に配置された3つの量子ドットに回転電場を印加することによ

り、この結合量子構造内の電子をコヒーレントに回転させ得ることを示した[5]。回転周波数がトンネル結合係数に比べて十分小さい(adiabatic)場合は電子の回転は回転電場に同期して回転し、3つのドットの基底レベルが順次交差する Landau-Zener 遷移で説明できる。一方、回転周波数がトンネル係数に比べて大きい(nonadiabatic)場合には、特定の回転周波数と強度において電子は外場の回転周波数よりもゆっくりした速度で外部電場の回転方向あるいは逆方向に巡回する。

量子構造中のエネルギーの高い準位は一般に隣接するサイトへの波動関数のしみ出しが大きくなりトンネル係数も大きくなる。このことを利用して励起準位を介したコヒーレント・トンネル振動を解析し、実際にトンネル振動の周波数がエンハンスされることを示した[6]。

B - 2 非線形結合量子構造のコヒーレントダイナミクス

帯電エネルギーが無視できない微小な半導体量子ドット[7]、オンサイトエネルギーが無視できない非線形格子結晶[8]、ジョセフソン接合アレイ[9]、光格子中のレーザ冷却(ボーズ・アインシュタイン凝縮)原子[10]、そして非線形光導波路[11]などの非線形結合系は下記の離散型非線形結合方程式でそのダイナミクスが解析できる[12]。

$$i \frac{dc_j}{dt} = \left(\varepsilon_j - \Lambda |c_j|^2 \right) c_j + \kappa (c_{j+1} + c_{j-1}), \quad (1)$$

ここで $c_j(t)$ は時間 t でのサイト j ($j=1,2,\dots,M$) の電子あるいは原子の存在確率振幅、 ε_j はサイトエネルギーと外部から印加されたポテンシャルエネルギー、 κ は隣接するサイト間のトンネル(ホッピング)係数、 Λ は非線形係数をそれぞれ表す。円形状に配置された結合量子構造を解析する場合は $c_0 = c_M$ and $c_{M+1} = c_1$ と置く必要

がある。サイト j の電子・原子の数は $n_j = |c_j|^2$ で与えられる。

まず始めに2つの量子ドット中の電子あるいは2つの磁気光学トラップ中のレーザ冷却原子のトンネル結合について解析した結果の要点について述べる。サイト1に全ての電子(原子)があるという初期条件で計算すると、非線形係数 Λ が比較的小さい ($\Lambda/\kappa < 2$) ととき2つのサイト間を全電子(原子)が完全交換トンネル振動する。非線形係数 Λ が増加するに従いその振動周期が次第に長くなり、ついに $\Lambda/\kappa = 2$ でその周期は相転移にともなう critical slowing down により無限大となる。それよりわずかに Λ/κ を増加すると全電子の半数がサイト2にトンネルしたところでもとのサイト1に戻り始める。つまり $\Lambda/\kappa = 2$ を境に電子のトンネル振動の様態に相変化が起きる。さらに Λ/κ を増加させると電子の振動は次第に抑制され電子はサイト1に局在するようになる。大きな非線形係数にたいしてトンネル振動が抑えられるこの現象はセルフ・トラッピング効果と呼ばれる。

線形結合量子構造で解析したレーザ光の電場ポテンシャルによるトンネル係数を実

効的に変化する方法[2]を非線形結合量子系に拡張した解析を行った。具体的には2つのトラップ中のレーザー冷却原子がトンネル結合しており、その零点エネルギーが外場によって変調を受ける場合を解析した。零点エネルギーの変調は振動磁場あるいはポテンシャル障壁を作り出す非共鳴レーザー光シートの位置を光偏光器によって振動することによって実現可能である。零点エネルギーが $\Delta E + E_\omega \cos \omega t$ (ΔE は変調がないときの

2つのトラップの零点エネルギーの差、 E_ω は変調振幅)で変調を受け、変調周波数がトンネル周波数に比べて十分に大きい($\omega/\kappa \gg 1$)と仮定し、さらに原子間相互作用(非線形係数)が無視できる場合の解析は高周波電磁波中に置かれた半導体超格子や量子ドットのトンネル現象と等価な問題となる[13]。この場合 $\Delta E = n\hbar\omega$ ($n=1,2,3,\dots$)で光子支援トンネリング(photon assisted tunneling: PAT)に共鳴現象が見れる振動振幅が極大を示す。これはジョセフソン接合に高周波電磁波を照射した場合に現れるシャピロステップと類似の現象である。この場合($\Lambda = 0$)の共鳴曲線はローレンツ形を示し、その線幅は $J_n(E_\omega/\omega)\kappa$ で与えられる。非線形係数を大きくしていくと共鳴曲線は次第にシフトしつつ非対称性を増し、ある値を超えると振動振幅に飛び(相変化)が見られるようになる。この現象は n 次($\Delta E = n\hbar\omega$)の共鳴トンネル係数が実効的に $\kappa \rightarrow \kappa_n^{eff} = J_n(E_\omega/\omega)\kappa$ で与えられるとし、セルフ・トラッピングの閾値が $\Lambda/\kappa_n^{eff} = 2$ で与えられるものとするれば説明できる[14]。

次にレーザーパルスによりトラップ間にトンネルがない独立した2つの基底準位が励起準位を介して結合する場合を考える。この場合は(1)式で $j=1,2$ の2サイトのみを考え、トンネル結合係数 κ をレーザー光による誘導ラマン結合によるものとし、

$\kappa \rightarrow \Omega_{eff} = \Omega^2/\Delta$ と置き換えればよい。ここで Ω はレーザーパルスのラビ周波数、 Δ は

離調で励起準位と基底準位のエネルギー差 ω_0 とレーザー周波数 ω との差($\Delta = \omega_0 - \omega$)

で与えられる。(1)式の c_1, c_2 を新しい変数 $u = c_1c_2^* + c_2c_1^*$ 、 $v = -i(c_1c_2^* - c_2c_1^*)$ 、 $w = c_1c_1^* - c_2c_2^*$ を用いて書き換えると、下記のブロッホ方程式が得られる。この式はダイポール・ダイポール相互作用する原子とレーザーパルスとの相互作用を解析する式[15]と同形である。

$$du/dt = \Lambda wv, \quad (2a)$$

$$du/dt = \Omega_{eff} \sec h[(t-t_0)/T_p] w - \Lambda wu, \quad (2b)$$

$$du/dt = \Omega_{eff} \sec h[(t-t_0)/T_p] v, \quad (2c)$$

ここで、 u 、 v 、 w はブロッホベクトルの成分である。(2)式の解は単位球(ブロッホ

球)上の軌跡として表される。レーザパルスの波形は sech でそのパルス幅は T_p として
いる。

$w=1$ ($w=-1$)は原子が全てトラップ 1 (2)に存在する状態、 $w=0$ は原子が2つのトラップに等しく分配された状態に対応する。 $t=0$ で全原子がトラップ 1にあるとして(2)式を数値計算するとき、非線形係数が無視できる場合、結合の大きさ Ω_{eff} の増加に対して $w(t)$ は正弦波的に変化する。これに対して非線形係数が大きくなると矩形波的に変化するようになり、レーザパルスによって全原子がいずれか一方のトラップに捕獲され、決して2つのトラップに分配して捕獲されることはない。この現象はトラップ 1に全原子が捕獲された状態を 0 に、トラップ 2 に捕獲された状態を 1 に対応させた 2 値論理ゲートへの応用が考えられる [16]。

レーザ光や振動磁場によってトンネル係数を実効的に変化でき、 $J_n(E_\omega/\omega)=0$ の条件ではそれを実効的にゼロにできることを先に述べた。では、これと逆にトンネル結合係数を実効的に大きくすることはできないのであろうか。これは線形結合系では不可能であることがブロッホ方程式(あるいは線形シュレディンガー方程式)から容易にわかる。しかし、非線形結合系では可能であることが分かった [17]。トンネル振動数が増加するメカニズムは非線形係数によるエネルギーシフトとトンネル係数が非線形性によって結合するためである。言い換えれば振動の 1 周期がトンネル係数だけでなく非線形係数の大きさにも依存するようになるからである。このことは(2)式によりブロッホ・ベクトルを描いてみればよく分かる [17]。最大振動周波数と最大振動振幅にはトレードオフの関係があり、周波数が大きくなると振幅は減少する。ちなみに、振幅が 0.6 (0.4) 倍となれば周波数は約 2 (3) 倍となる。

直線状に配置された量子ドットあるいは光格子(ドット数 2~30)中の電子あるいは原子分布のダイナミクスを(1)式により解析した。中央のドットにのみ電子を入れた初期条件では非線形係数 $\Lambda=0$ の場合、時間とともに電子は他のドットに拡散していく。 Λ が正の方に増加するに従って中央のドットに局在するようになる。また、全てのドットに一樣に電子が分布するという初期条件のもとでは負の Λ に対して明るいソリトンが形成されるという新しい結果が得られた [18]。一般に明るいソリトンは正の非線形性に対して得られるが、ここで見出された負の非線形性にたいする明るいソリトンの出現は量子ドットや光格子などの周期ポテンシャルの存在が本質的であると考えられる。このソリトンは結合量子構造の両端から発生し、負の非線形性の増加とともに速度が増加するが振幅も減少する。

円形状に配置された量子ドットにおける電子分布のダイナミクスについても解析した [18, 19]。リング 1 周の位相差を $2n\pi$ ($n=0,1,2,\dots$) とし、外部回転ポテンシャル $\varepsilon_j = \varepsilon f_j(t) = \varepsilon \cos[\omega t - 2\pi s(j-1)/M]$ ($s=1,2,3,\dots, M-1$) を導入した。ここで ε はポテンシャル振幅、 ω は周波数、 s はリング 1 周に入る正弦波の数である。 $s=1$ のときはコインを机上で回転させたときに見られる搦粉木運動に対応する。 $s=1$ 、 $\omega=0$

のときは単にリングを傾けたポテンシャルを表す。 $s=1$ のときリングの固有周波数と外部回転場の周波数が一致したときリング中に1個の回転ソリトンが発生する。正の非線形では明るいソリトンが、負の非線形では暗いソリトンが現れる。 $s=2$ のときはリングに2つのソリトンが、 $s=3$ のときは3つのソリトンが形成される。一般に s の値のソリトンが形成されるがソリトンの数が多くなるに従い振幅は小さくなる。各位相差 $2n\pi$ ($n=0,1,2,\dots$) にたいしてソリトンの励起スペクトルは非線形係数 Λ にたいして放物線的に変化する2つの固有値を持つ。これらの回転ソリトン間の遷移は位相書き込みパルス(phase-imprinting pulses)によって角運動量を変化させることで実現できる。また、非線形係数を変化させることで明るいソリトンから暗いソリトンへ、あるいは逆に暗いソリトンから明るいソリトンへと変換できることも示した[18]。

C まとめ

量子ゲートや量子コンピュータのハードウェアなど量子情報処理技術への適用を考えた半導体結合量子系・非線形結晶格子中の電子および光格子中のレーザー冷却されたボーズ・アインシュタイン凝縮原子が示すコヒーレント・ダイナミクスを離散型線形・非線形シュレディンガー方程式を用いて解析した。ここでは解析結果の主要な成果について報告した。まだまだ、検討不足の感があるが、一方において新しい課題、今後進むべき方向性も見えてきた。

参考文献

- [1] P. W. Shor, *Algorithms for Quantum Computation: Proceedings of the 35th Annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Science*, 1994.
- [2] N. Tsukada, M. Gotoda, T. Isu, M. Nunoshita, and T. Nishino, *Jpn. J. Appl. Phys.* **35**, L1490 (1996); *ibid.* **37**, 2476 (1998)
- [3] N. Tsukada, M. Gotoda, T. Isu, M. Nunoshita, and T. Nishino, *Phys. Rev. B* **56**, 9231 (1997).
- [4] N. Tsukada, Y. Nomura, and T. Isu, *Phys. Rev. A* **59**, 2852 (1999); *Jpn. J. Appl. Phys.* **37**, L1433 (1998).
- [5] N. Tsukada, M. Gotoda, T. Isu, M. Nunoshita, and T. Nishino, *Solid State Electronics* **42**, 273 (1998).
- [6] N. Tsukada, M. Gotoda, T. Isu, M. Nunoshita, and T. Nishino, *Jpn. J. Appl. Phys.* **36**, L834 (1997).
- [7] N. Tsukada, M. Gotoda, and M. Nunoshita, *Phys. Rev. B* **50**, 5764 (1994); N. Tsukada, M. Gotoda, M. Nunoshita, and T. Nishino, *Phys. Rev. B* **52**, R17005 (1995); *ibid.* **53**, R7603 (1996).
- [8] A. M. Morgante et al., *Phys. Rev. Lett.* **85**, 550 (2000); F. Geniet and J. Leon, *ibid.* **84**, 745 (2000).
- [9] E. Trias, J. J. Mazo, and T. P. Orland, *Phys. Rev. Lett.* **84**, 741 (2000); P. Binder et al., *ibid.* **84**, 745 (2000).
- [10] A. Trombettoni, A. Smerzi, and R. Bishop, *Phys. Rev. Lett.* **88**, 173902 (2002).

- [11] J. C. Eilbeck, P. S. Lomdahl, and A. C. Scott, *Physica D* **16**, 318 (1985); A. Sukhorukov, T. S. Kivshar, H. S. Eisenberg, and Y. Silberberg, *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-39**, 31 (2003) and references therein.
- [12] M. I. Molina, *Phys. Rev. B* **58**, 12547 (1998); Yu. S. Kivshar and M. Peyrard, *Phys. Rev. A* **46**, 3198 (1992); K. O. Rasmussen et al., *Phys. Rev. Lett.* **84**, 3740 (2000); J. C. Bronski et al., *ibid.* **86**, 1402 (2001).
- [13] P. K. Tien and J. P. Gordon, *Phys. Rev.* **129**, 647 (1963).
- [14] N. Tsukada, M. Gotoda, Y. Nomura, and T. Isu, *Phys. Rev. A* **59**, 3862 (1999).
- [15] M. E. Cresshaw, M. Scalora, and C. M. Bowden, *Phys. Rev. Lett.* **68**, 911 (1992).
- [16] N. Tsukada, *Phys. Rev. A* **61**, 063602 (2000).
- [17] N. Tsukada, *Phys. Rev. A* **64**, 033601 (2001).
- [18] N. Tsukada, *Phys. Rev. A* **65**, 063608 (2002).
- [19] N. Tsukada, submitted to *Phys. Rev. A*.

D 研究の自己評価および今後の展開

量子計算のためのハードウェアとして現在最も期待されているものは半導体量子ドットやトラップされたイオン、あるいはトラップ中のレーザー冷却原子、ジョセフソン接合など離散型の結合量子構造である。これらの系は離散型非線形シュレディンガー方程式(DNLSE)で記述できる。一方、非線形光導波路の結合を記述する非線形結合方程式はDNLSEと同形の微分方程式で与えられる。近年この2つの分野の研究者がDNLSEを用いて光格子中のレーザー冷却原子(ボーズ・アインシュタイン凝縮原子)の振る舞いを活発に研究しており、多くの研究成果が報告されている。なかでもこれまで非線形光導波路の研究をしていた N. Christodoulides (University of Central Florida)、Y. S. Kivshar (Australian National University)、Y. Silberberg (Weizmann Institute of Science)、J. S. Aichison (University of Glasgow) 等のグループが光格子中のレーザー冷却原子を対象とした研究に参入し、多くの成果を報告している。これは、2つの分野に共通の物理的概念が成立することに加えて、レーザー冷却原子系では非線形係数の大きさを自由に制御できることや位相プリンティングで角運動量を時間的に変化できるなど光導波路系では実現困難な条件が比較的容易に実現できるためである。本研究もこの流れに沿った研究であり、量子ドット系のコヒーレントダイナミクスに関して多くの知見が得られたと評価している。今後、さらにこの方向の研究を継続し、レーザー冷却原子系の大きな自由度から光導波路系では考えられなかった新たな現象を探索したい。

また、DNLSEは非線形結晶の振る舞いを研究するときに用いられるボーズ・ハバードモデル(Bose-Hubbard model)とも類似しており、先の2つの分野に加えて固体物理学の基本問題である電子の局在、超伝導-モット絶縁体相転移、超伝導・超流動渦、非線形格子のソリトンなどとの関連性は物理として興味深いだけでなく、量子情報処理の基本機能探索の意味からも非常に興味深い課題である。最近始めた円形リング状に配置された結合量子ドット系の解析から、この系に発現する多様な回転ソリトンが見出されているが、今後これらのソリトンと超伝導・超流動との関連性についても考察する計画である。

3 - 4 - 2 新しい量子相関機能を求めて量子ドットによる反応拡散系の構成

(研究主担当：北海道大学 雨宮好仁)

A はじめに

次世代の量子集積システムに向けた先端テーマの一つは「生命ダイナミクスの一端をLSIの上で模倣することにより新しい情報処理デバイスを創り出す」ということである。その第一歩として、ここでは量子ナノ集積構造で生じる物理現象を利用して反応拡散系---化学的な複雑系---を電子的に模倣することを考える。

反応拡散系とは化学反応と物質拡散が混在した非平衡-開放状態の化学系のことをいう。そこでは多種類の化学物質が関与する多くの素反応が進行している。その結果として反応拡散系は高次の非線形挙動を示し、平衡系からは予想もつかない動的で多様性に富む現象を生じる。反応拡散系の大きな特徴は「散逸構造」を発生することにある。すなわち、化学物質の濃度パターンが空間的・時間的に均一ではなく、巨視的な秩序をもった構造をつくる。自然界には多くの反応拡散系が存在し、時間的・空間的な秩序とリズムをもった多種多様の散逸構造を生み出している。生命そのものが地球という反応拡散系の生み出した散逸構造である、という説も提唱されるようになった。

反応拡散系は非線形な化学振動子の集合体として近似モデル化できることが知られている。集合した化学振動子は物質拡散を介して相互に作用を及ぼし合い、系全体として秩序ある散逸構造を発生する。反応拡散系を集積回路上で模倣するためには、化学振動子に代えて電子デバイスによる非線形振動子を使えばよい。化学系に匹敵する反応拡散LSIを構成するためには、集積規模を大きくできる量子ナノデバイスを使う必要がある。ここでは量子ナノデバイスの一種、単電子デバイスの使用を考えた。単電子デバイスはトンネル効果にもとづく非線形振動を簡単な構成で発生する。化学振動子のかわりにこの単電子トンネル振動子を使用し、その振動子を二次元配列して電子的な反応拡散系をつくる。近接する振動子の間には、トンネル待ち時間を利用して拡散現象に似た相互作用を発生させる。この反応拡散系のダイナミクスをシミュレーション解析し、化学的な反応拡散系に類似した散逸構造が生じることを示した。この反応拡散系LSIを発展させることにより、電子的な「疑似生命体」を創り出すことができるかもしれない。

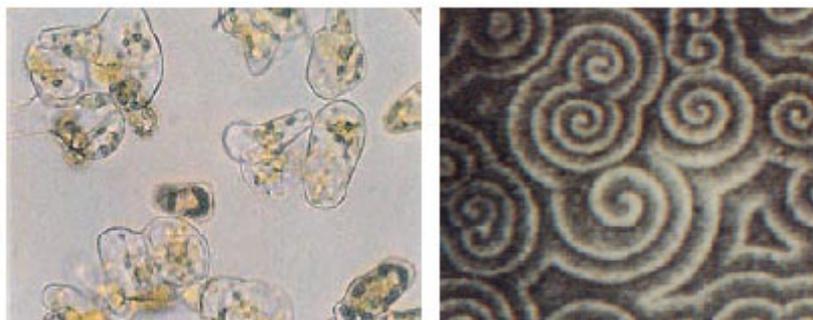
B 研究結果

B—1 生命のダイナミクスと反応拡散系

近年、生命科学---生命現象を物理化学的に説明しようとする試み---の進展には著しいものがあり、とくにDNA関連分野を中心とする分子生物学/分子遺伝学がその主流となっている。これはいわば生命体を組み立てる部品の研究を通して生命現象に迫ろうとするものである。しかし一方で、それだけでは「生命の全体像---成長・分化・形態形成などの生き生きとしたダイナミクス」を説明することができない、という問題が指摘されている。「生きもの」が「もの」と違うところは、自ら時間的・空間的な秩序を創り出していることにある(図1)。この生命の本質を理解するためには別のアプローチが必要になる。そのような観点から反応拡散系の非線形科学が研究されるようになった。

反応拡散系とは化学反応と物質拡散が混在した非平衡-開放状態の化学系のことをいう。そこでは複数種類の化学物質が関与する多くの素反応が進行している。その結果として反応拡散系は高次の非線形挙動を示し、平衡系からは予想もつかない動的で多様性に富む現象を生じる。反応拡散系の大きな特徴は「散逸構造」を発生することにある。すなわち、各化学物質の濃度パターンが空間的・時間的に均一ではなく、巨視的な秩序をもった構造をつくる。系パラメータの変化にともなって多種多様で複雑な散逸構造---物質濃度の時空間パターン---が現れる。この反応拡散系の挙動は、自然界に現れる現象の多様性を理解するための重要な手がかりを与える。反応拡散系は秩序ある時空間パターンを自ら創り出すことから、それによって生命ダイナミクス的一端を説明できるのではないかと、という期待が高まっている。生命物理学の分野では「生命は地球という反応拡散系の中に生じた散逸構造の一つである」という考えを持つ研究者が少なくない。

反応拡散系の挙動(物質濃度の時空間パターン)は反応拡散方程式と呼ばれる連立偏微分方程式で表される。変数の個数が多いほど複雑なダイナミクス、したがって複雑な散逸構造が発生する。しかし変数が少ない簡単な反応拡散系においても、生命活動に似たダイナミクスを生じることがある。2変数系における例を図2に示した。図1との類似性に注目されたい。



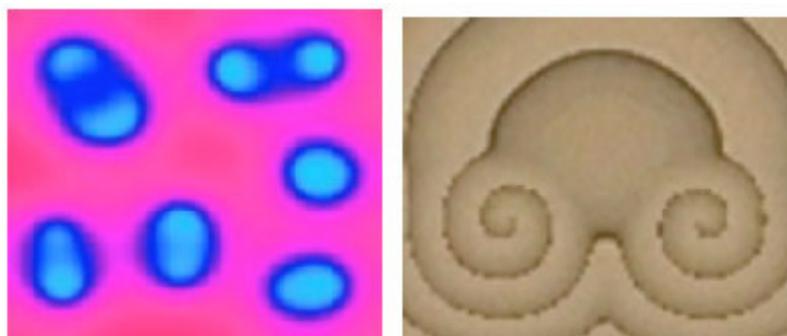
(a)

(b)

図1 生命現象が示す生き生きとした挙動の例

(a) アスペルガスの細胞が分裂増殖する様子 [http://www.agr.nagoya-u.ac.jp/]

(b) 細胞性粘菌が集合して移動体になるときに描くラセンパターン [Nature, Vol. 311, pp.611-615 (1984).]



(a)

(b)

図2 反応拡散系が示すダイナミクスの例。二次元の系で物質濃度を濃淡表現したもの
(a) グレイスコット反応系が描く自己複製パターン, (b) プリュセレータ反応系が描くラセンパターン

(付記) 図1と図2の類似性について。図1の生命現象---とくに細胞の分裂増殖---のメカニズムが図2のモデルで直ちに説明できる、と述べているわけではない。反応拡散系の非線形科学はまだ初歩的な段階にあり、生命の本質を解き明かすには到っていない。ただ生命現象をとらえるアプローチとして反応拡散系の非線形科学が有力な手法であることの一端をよく表した例といえる。

B - 2 反応拡散系の電子デバイス化

反応拡散系は多くの単位セル---化学振動子---が集合した反応場として近似モデル化できる。これを図3に示す。各セルは微小な空間領域内の化学反応に対応する非線形振動子である。近接する振動子どうしは物質拡散を介して相互に影響し共鳴や引き込みを生じる。反応拡散系は相互結合した非線形振動子の集合体であり、系全体として複雑なダイナミクス---形態形成や自己組織化などの時空間パターン---を生み出す。

反応拡散系を電子デバイスで実現するためには以下のアプローチをとればよい。まず多数の非線形振動子を用意して配列する。次に、近接する振動子の中に「拡散現象」と類似の相互作用が生じるような工夫を設ける。この非線形振動子を電子デバイスでつくれば電子的な反応拡散系を構成することができる。しかし、既存の電子デバイスは面積が大きいので、化学的な反応拡散系に匹敵する多数個の振動子を集積することが難しい。そこで、量子ナノ構造による単電子デバイスの使用を考える。次章で述べるように、単電子デバイスの物理現象を利用すると簡単に非線形振動子をつくることことができる。そのため複雑な回路構成を必要とせず、容易に高い集積度を得ることができる。

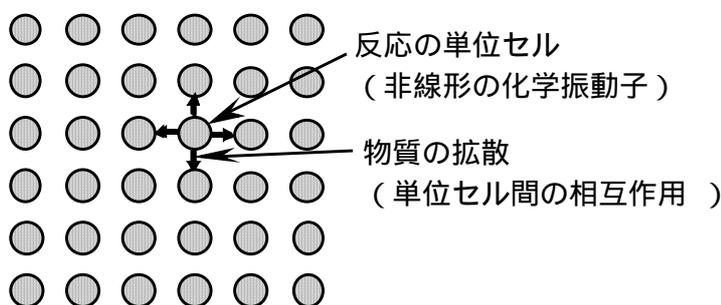


図3 反応拡散系のモデル。多数の化学振動子が集合したものの。振動子は物質拡散により相互に作用する

B - 3 単電子回路の非線形振動子

単電子回路とは、電子ひとつ一つの動きを制御して機能を出すように構成された電子回路である。トンネル接合を使用し、クーロンブロックードという物理現象を利用して電子の動きを制御する。単電子回路を用いるとCMOS-LSIよりはるかに大規模・極低消費電力の集積回路を構成できる可能性がある。クーロンブロックード現象を発現させるためには、回路の容量を小さい値(数十 aF以下)にしなければならない。そのため回路要素のトンネル接合とキャパシタをいずれも微小寸法(数十 nm)以下)につくる必要がある。このような微細加工も最近のナノテクノロジーの進歩により可能となってきた。現在では、単電子回路の論理ゲートやメモリセルなど単電子LSIに向けた要素デバイスがつくられるようになってきている。

最も簡単な単電子回路は図4に示すものである。クーロンブロッケード現象が生じる条件下において、この回路はこれだけで非線形振動を生じる。その動作はバイアス電圧 V_{dd} の値によって自励振動と単安定振動に分かれる。バイアス電圧がしきい値---トンネル接合の容量で決まる値---より大きいときは自励振動の状態となる。すなわち、トンネル接合を通じた電子移動（電子トンネル）が連続的に生じてノードの電荷量が変化し、自励的な非線形振動を生じる。したがってノードの電位が図5 (a) のように変化する。振動波形の不連続部は電子トンネル現象のために生じる。一方、バイアス電圧がしきい値より小さいときは図5 (b) のような単安定振動の状態になる。このときは外部擾乱がなければ回路は安定状態に落ち着き、ノード電位はバイアス電圧に等しくなる（休止期）。外部からノードに電圧擾乱（トリガ）が加わると1回だけ電子トンネルが発生し（興奮期）それから再び安定状態（休止期）に戻る。なお、電子トンネルが起きた後しばらくはノードの電位が低くなっているので、そのとき多少の電圧擾乱がノードに加わっても再度の電子トンネルは起こらない。そのため、興奮期と休止期の間には外部擾乱に感応しない期間（不応期）が生じる。

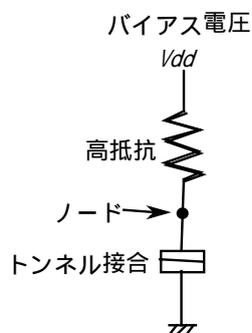


図4 単電子回路の振動子。ノードの電位が非線形振動を示す。

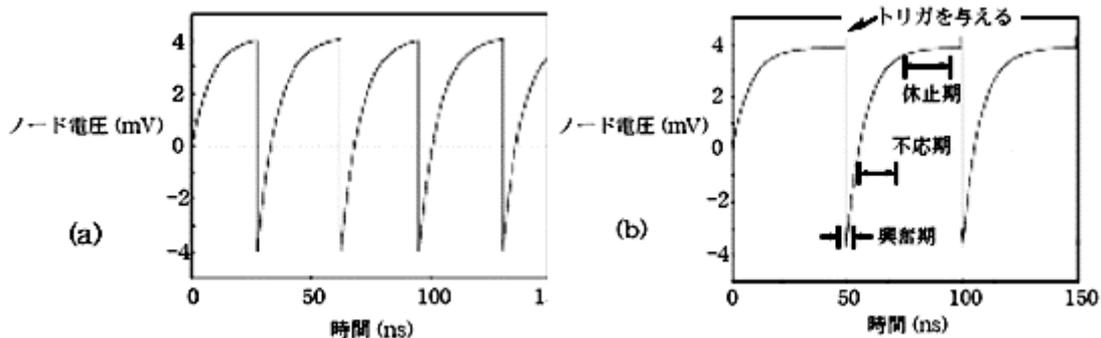


図5 単電子振動子の非線形振動。数値シミュレーション

(a) 自励振動、および (b) 単安定振動。回路パラメータは以下のとおり：トンネル接合の容量 = 20 aF, トンネル抵抗 = 1 M Ω , 高抵抗の値 = 400 M Ω , バイアス電圧は自励振動のとき $V_{dd} = 4.2$ mV, 単安定振動のときは $V_{dd} = 3.8$ mV。

(波形の立ち上がり部分は連続曲線。印刷上の都合で刻みがあるように見えている。立ち下がり部分は不連続であり、これは電子トンネルによる)

B - 4 単電子回路による反応拡散 L S I

この非線形振動子を多数用意してマトリクス状に連結することにより、二次元の反応拡散系に似たシステム---反応拡散 L S I---をつくることができる。その構造を図6に示す。各々の振動子のノードを隣接する振動子4個のノードに結合容量 C で連結する。そのとき隣接振動子の間ではバイアス電圧が逆極性となるように設定する。なお場合に応じて自励振動子と単安定振動子を使い分ける。

このように振動子を結合させると、一つの振動子で電子トンネルが生じたとき、その振動子のノード電位変化が結合容量を介して周囲に伝搬し、隣接振動子の電子トンネルを誘発する。ここで電子のトンネル現象には「トンネル待ち時間」という時間遅れの要素があるので、隣接振動子の電子トンネルはある時間を経た後にはじめて発生する。電子トンネルが時間遅れを伴って周りに伝わっていくという動きは拡散現象に類似している。すなわち図6の構造は、非線形振動子を「拡散的」に結合したものと見える。そして、回路パラメータ（結合容量、抵抗値、バイアス電圧、結合容量）に応じて多様な散逸構造---時間・空間的に変化するノード電位の二次元パターン---が現れる。

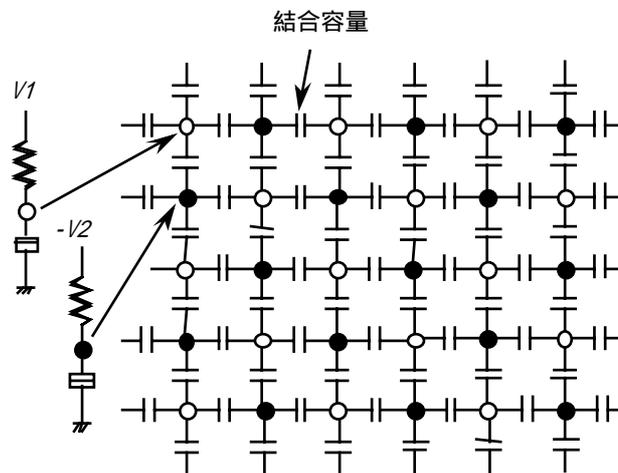
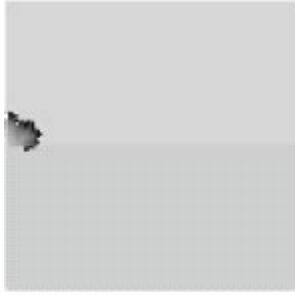


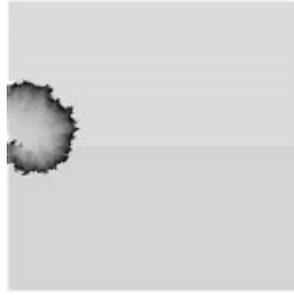
図6 単電子振動子で構成した二次元の反応拡散系。バイアス電圧の極性が異なる2種類の振動子を交互に配列し、それらのノード（白丸と黒丸）を結合容量で結んでネットワーク構造とする。

一例として、先に挙げた図2 (b) に類似するラセンパターンの発生を図7に示す。回路パラメータを変えることで、図2 (a) のような自己複製パターンを発生させることもできる。その例を図8に示す。このようにして、化学的な反応拡散系に類似したシステムを L S I 上に構成することができる。

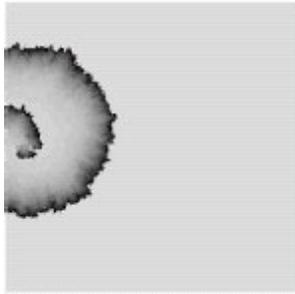
この研究の最終の目的は、上記の反応拡散 L S I をさらに高度なものに改良して新しい情報処理ハードウェアを創ることにある。まだ具体的な着想を考へつくりには到らないが、生物のもつ自己組織化やホメオスタシスの機能を模擬した柔軟な制御システムの構築などに応用分野があると考えている。



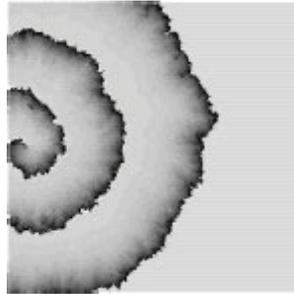
(a) トリガを与えると電位パターンが発生



(b) ラセンを巻き始める



(c) 成長しながらラセンを巻いていく



(d) かなり大きくなったラセンパターン

図7 単電子の反応拡散系に発生するラセンパターン。201×201個の単安定振動子からなる系の数値シミュレーション結果。ノード電位がつくる二次元パターンを濃淡表現したもの。明色が高電位、暗色が低電位



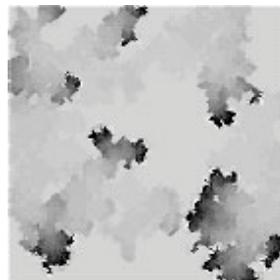
(a) トリガによって電位パターンが発生



(b) 少し大きくなると分裂を始める



(c) 分裂しながら周囲に広がっていく

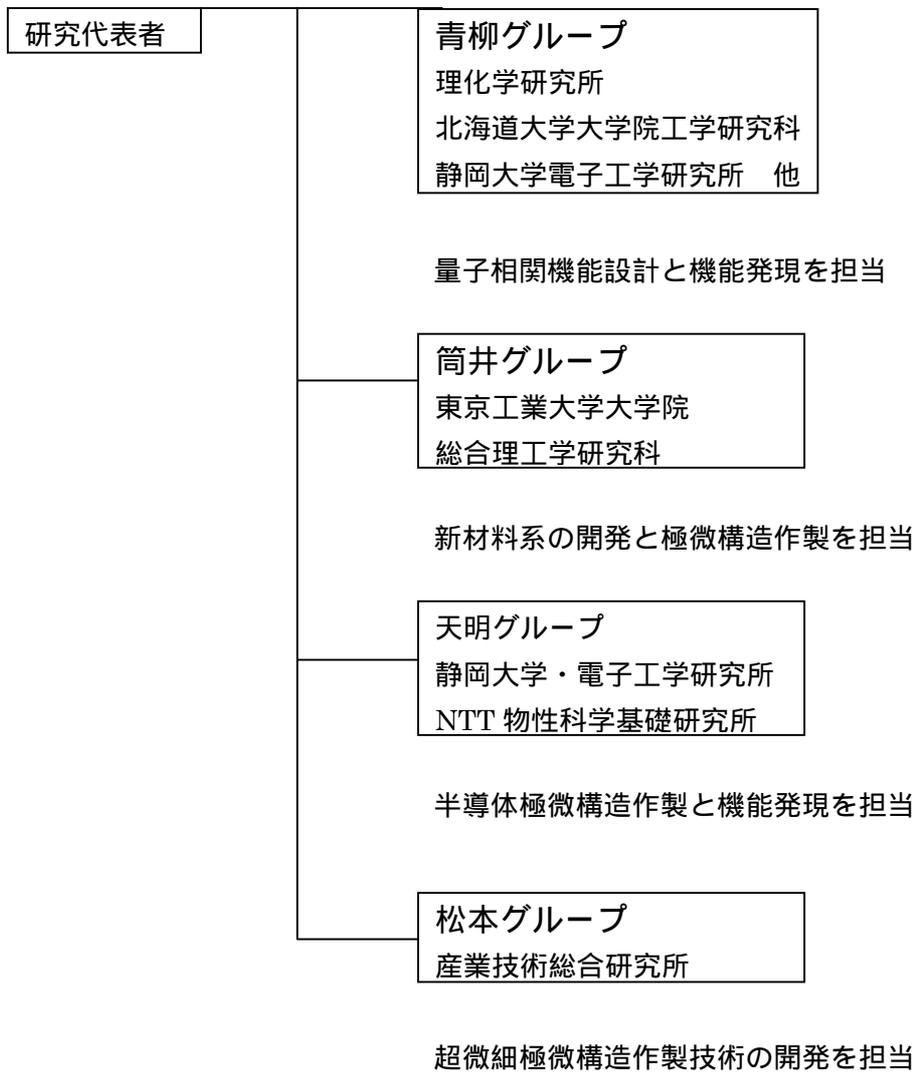


(d) 旺盛に繁殖中

図8 単電子の反応拡散系に発生する分裂増殖パターン。201×201個の単安定振動子からなる系の数値シミュレーション。明色が高電位、暗色が低電位

4 . 研究実施体制

(1) 体制



(2) メンバー表

青柳グループ

氏名	所属	役職	担当する研究項目	参加時期	備考
青柳克信	理研	主任研究員	総括・構造制御	H10.12.1 - H15.11.30	
石橋幸治	理研	主任研究員	機能制御 (電荷・ス ピン)	H10.12.1 - H15.11.30	
平山秀樹	理研	研究員	構造制御 (GaN)	H10.12.1 - H15.11.30	
塩川高雄	理研	前任研究員	構造制御 (CNT)	H10.12.1 - H15.3.31	
岩井荘八	理研	前任研究員	構造制御 (GaN)	H12.1.1 - H15.3.31	
野村新太郎	理研	前任研究員	構造制御	H10.12.1 - H15.11.30	
青野友祐	理研	基礎科学特別研 究員	構造制御 (理論解析)	H10.12.1 - H11.3.31	
渡部道生	理研	基礎科学特別研 究員	機能制御 (電荷)	H13.4.1 - H15.3.31	
井田徹哉	理研	協力研究員	機能制御 (電荷)	H10.12.1 - H15.3.31	
冬暁	理研	基礎科学特別研 究員	構造制御	H11.4.1 - H12.3.31	
村尾美緒	理研	基礎科学特別研 究員	機能設計	H11.4.1 - H13.3.31	
理崎智光	東洋大.工	学生	構造制御	H11.4.1 - H13.3.31	
鈴木正樹	理研	協力研究員	機能制御 (CNT)	H11.4.1 - H15.3.31	
中尾敬一郎	千葉大.工	学生	物性探索	H11.4.1 - H12.3.31	
会田征徳	千葉大.工	学生	物性探索	H11.4.1 - H13.3.31	
虎谷健一郎	千葉大.工	学生	物性探索	H12.4.1 - H14.3.31	
大野隆裕	CREST 研究 員	ポスドク	機能探索	H11.4.1 - H13.3.31	
塚越一仁	理研	研究員	機能制御	H12.9.1 - H13.3.31	

牛頭信一郎	JST	CREST 研究員	構造制御 (スピン)	H12.4.1 - H15.3.31	
石渡洋一	理研	基礎科学特別研究員	機能制御 (CNT)	H14.4.1 - H15.11.30	
新井宏一郎	理研	基礎科学特別研究員	機能制御 (スピン)	H14.4.1 - H15.11.30	
牧英之	理研	基礎科学特別研究員	構造制御 (CNT)	H14.4.1 - H15.11.30	
南不二雄	東工大.理	教授	機能制御 (光)	H10.12.1 - H15.11.30	
落合勇一	千葉大.工	教授	物性探索 (電荷・波)	H10.12.1 - H15.11.30	
山田省二	北陸先端大	教授	構造制御 (スピン)	H14.4.1 - H15.11.30	
武内道一	事業団	CREST 研究員	機能制御 (GaN)	H14.4.1 - H15.11.30	
津谷大樹	千葉大・工	学生	機能制御 (CNT)	H14.4.1 - H15.11.30	
渡辺考太郎	千葉大・工	学生	構造制御 (スピン)	H14.4.1 - H15.3.31	
雨宮好仁	北大.工	教授	量子相関機能の設計	H10.12.1 - H15.11.30	
宮永喜一	北大.工	教授	量子相関機能の探索	H10.12.1 - H15.11.30	
浅井哲也	北大.工	助手	量子相関機能の設計	H10.12.1 - H15.11.30	
赤沢正道	北大・工	助教授	量子相関機能の設計	H10.12.1 - H15.11.30	
椿光太郎	東洋大.工	教授	量子相関機能の設計 および機能発現	H10.12.1 - H15.11.30	
塚田紀昭	広島工大	教授	量子相関機能の理論	H10.12.1 - H15.11.30	
田部道晴	静岡大	教授	Si ナノ構造形成	H10.12.1 - H15.11.30	
池田浩也	静岡大	助教授	Si ナノ構造形成	H14.4.1 - H15.11.30	

筒井グループ

筒井一生	東工大・総理工	助教授	構造制御 (フッ化物)	H10.12.1 - H15.11.30	
川崎宏治	東工大・総理工	助教授	構造制御 (GaN)	H10.12.1 - H15.11.30	
八木巖	東工大・総理工	助手	構造制御	H13.4.1 - H15.11.30	
井上振一郎	東工大・総理工	学生	構造制御	H13.4.1 - H15.11.30	
森山悟士	東工大・総理工	学生	構造制御	H12.4.1 - H15.11.30	
渡辺英一郎	東工大・総理工	学生	構造制御	H12.4.1 - H15.11.30	
河野圭太郎	東工大・総理工	学生	構造制御	H13.4.1 - H15.3.31	
布施智子	東工大・総理工	学生	構造制御	HH14.4.1 - H15.3.31	

天明グループ

氏名	所属	役職	担当する研究項目	参加時期	備考
天明二郎	静大	教授	構造作製	H10.12.1 - H15.11.30	
鎌田英彦	NTT 基礎研	主任研究員	機能測定	H10.12.1 - H15.11.30	
後藤秀樹	NTT 基礎研	主任研究員	機能測定	H10.12.1 - H15.11.30	
斉藤正	NTT 基礎研	主幹研究員	機能測定	H10.12.1 - H15.11.30	
安藤弘明	甲南大学	教授	機能測定	H10.12.1 - H15.11.30	
玉村敏明	NTT エレクトロニクス	技師長	構造作製	H10.12.1 - H15.11.30	

松本グループ

氏名	所属	役職	担当する研究項目	参加時期	備考
松本和彦	産総研	総括研究員	CNT ナノ構造形成	H10.12.1 - H15.11.30	
安藤淳	産総研	主任研究員	CNT ナノ構造形成	H10.12.1 - H15.11.30	
坂本邦博	産総研	主任研究員	CNT ナノ構造形成	H10.12.1 - H15.11.30	
上村崇史	筑波大学	学生	CNT ナノ構造形成	H14.4.1 - H15.11.30	
倉知孝介	明治大学	学生	CNT ナノ構造形成	H14.4.1 - H15.11.30	

5. 研究期間中の主な活動

(1) ワークショップ・シンポジウム等

年月日	名称	場所	参加人数	概要
H11.6.15 ~ 16	第1回『量子相関機能ダイナミクス制御』研究会	伊豆熱川 ハイツ	17名	量子相関機能の 基本原理に関する 議論
H12.10.11 ~ 12	第2回『量子相関機能ダイナミクス制御』研究会	伊豆熱川 ハイツ	15名	研究進捗状況の 発表と今後の方 向の議論
H13.7.5~7	第3回『量子相関機能ダイナミクス制御』研究会	伊豆熱川 ハイツ	16名	研究進捗状況の 発表と今後の方 向の議論
H14.10.18 ~ 19	第4回『量子相関機能ダイナミクス制御』研究会	伊豆熱川 ハイツ	12名	研究進捗状況の 発表と研究方針 に関する議論

(2) 招聘した研究者等

氏名(所属、役職)	招聘の目的	滞在先	滞在期間
高橋庸夫 (NTT 物性基礎研急 所)	研究会講師	伊豆熱川ハイツ	H13.7.5~7
川畑史郎 (産総研)	研究会講師	伊豆熱川ハイツ	H13.7.5~7

6 . 主な研究成果物、発表等

(1) 論文発表 (国内 8 件、海外 142 件)

1. T. Aono, K. Ishibashi and Y. Aoyagi: “Phenomenological theory of the Rabi oscillations in coupled quantum dots”, *Physica B*272, 39-41 (1999)
2. Kanda, M. C. Geisler, K. Ishibashi, Y. Aoyagi and T. Sugano: “Suppression of the Little-Parks oscillation in a mesoscopic superconducting ring”, *Physica B* 284, 1870-1871 (2000)
3. F. Ge, C. Prasad, A. Andressen, J. P. Bird, D. K. Ferry, L. H. Lin, N. Aoki, K. Nakao, Y. Ochiai, K. Ishibashi, Y. Aoyagi and T. Sugano: “Insulating state in open quantum dots and quantum dot arrays”, *Ann. Phys. (Leipzig)* 9 (2000) 1, 65-68
4. T. Ida, K. Ishibashi, K. Tsukagoshi, B. Alphenaar and Y. Aoyagi: “Quantum dot transport in carbon nanotubes”, *Superlattices and Microstructures*, Vol.27, No.5/6, 551-554 (2000)
5. Shailos, M. Elhassen, C. Prasad, J. P. Bird, D. K. Ferry, L. H. Lin, N. Aoki, K. Nakao, Y. Ochiai, K. Ishibashi, Y. Aoyagi and T. Sugano: “Metal-Insulator transition in quantum dot arrays”, *Superlattices and Microstructures*, Vol.27, No.5/6, 311-314 (2000)
6. Prasad, A. Andresen, F. Ge, J. P. Bird, D. K. Ferry, L. H. Lin, N. Aoki, K. Nakao, Y. Ochiai, K. Ishibashi, Y. Aoyagi, T. Sugano: “Phase-breaking time variations with temperature and current in an open quantum dot array”, *Superlattices and Microstructures*, Vol.27, No.5/6, 315-318 (2000)
7. K. Ishibashi, M. Suzuki, T. Ida, K. Tsukagoshi and Y. Aoyagi: “Quantum dots in carbon nanotubes”, *Jpn. J. Appl. Phys.* 39, 7053-7057 (2000)
8. 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”, *Nanotechnology* 11, 365-369 (2000)
9. 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, 15356-15358 (2000)
10. 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
11. A. 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. B*63, 241302(R) (2001)
12. 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)
13. 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. B*64, 085325-1-085325-7 (2001)

14. 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)
15. 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. B* 64, 193302-1-193302-4 (2001)
16. 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. B* 19 (6), 2770-2774 (2001)
17. K. Ishibashi, M. Suzuki, T. Ida and Y. Aoyagi: "Coupled quantum dots in single-wall carbon nanotubes", *Physica E* 13, 782-785 (2002)
18. K. Ishibashi and Y. Aoyagi: "Interaction of electromagnetic wave with quantum dots", *Physica B* 314, 437-443 (2002)
19. N. Aoki, D. Oonishi, Y. Iwase, Y. Ochiai, K. Ishibashi, Y. Aoyagi and J. P. Bird: "Influence of interdot coupling on electron-wave interference in an open quantum-dot array", *Appl. Phys. Lett.* 80, 2970-2972 (2002)
20. K. Ishibashi, M. Suzuki, T. Ida and Y. Aoyagi, "Classical microwave response of coupled quantum dots in single-wall carbon nanotubes", *Appl. Phys. Lett.* 80 (22) 4238-4240 (2002)
21. M. Suzuki, K. Ishibashi, T. Toratani, D. Tsuya, and Y. Aoyagi: "Tunnel barrier formation using Argon ion irradiation and single quantum dots in multi-wall carbon nanotubes", *Appl. Phys. Lett.* 81, 2273-2275 (2002)
22. K. Ishibashi, M. Suzuki, S. Moriyama, T. Ida, Y. Aoyagi: "Single and Coupled Quantum Dots in Single-Wall Carbon Nanotubes", *Superlattices and Microstructures*, 31, 141-149 (2002)
23. J. P. Bird, A. Shailos, M. Elhassan, C. Prasad, K. M. Indlekofer, L. Shifren, R. Akis, D. K. Ferry, . H. Lin, N. Aoki, Y. Ochiai, K. Ishibashi and Y. Aoyagi: "Can Kondo-like behavior occur in open quantum dots ?", *Microelectronic Engineering*, 63, 277-286 (2002)
24. N. Aoki, D. Onishi, Y. Iwase, K. Ishibashi, Y. Aoyagi and Y. Ochiai: "Low temperature conductance fluctuations in double-dot system", *Microelectronic Engineering*, 63, 57-61 (2002)
25. Oswald J, Ochiai Y, Aoki N, Lin LH, Ishibashi K, Aoyagi Y, Bird JP, Ferry DK: "Numerical simulations of magneto transport in dot array systems at high magnetic fields", *Microelectronic Engineering*, 63, 91-95 (2002)
26. K. Ishibashi, M. Suzuki, K. Toratani, T. Ida and Y. Aoyagi, "Low temperature transport in single and coupled quantum dots in single-wall carbon nanotubes", *Physica E* 16, 35-41 (2002)
27. C. Prasad, D. K. Ferry, A. Shailos, M. Elhassan, J. P. Bird, L. H. Lin, N. Aoki, Y. Ochiai, K. Ishibashi and Y. Aoyagi, "Variation of the temperature of the energy-relaxation time with magnetic field in open quantum dot arrays at low temperatures", *Physica B* 314, 486-489

- (2002)
28. N. Aoki, J. Takayama, M. Kida, K. Horiuchi, S. Yamada, T. Ida, K. Ishibashi and Y. Ochiai, "Bonding process for nanoscale wiring using carbon nanotube by STM tip", *Jpn. J. Appl. Phys.* 42, 2419-2421 (2003)
 29. Watanabe M, Ishibashi K, Aoyagi Y, "Superconducting SET with tunable electromagnetic environment", *Physica E* 18, 25-26 (2003)
 30. H. Gotoh, H. Kamada, T. Saitoh, H. Ando, and J. Temmyo, "Electric-field-induced Anisotropy of Excitonic Optical Properties in Semiconductor Quantum Dots", *J. Appl. Phys.*, vol.94, no.1, pp.342-347 (2003).
 31. H. Gotoh, H. Kamada, H. Ando, and J. Temmyo, "Exciton Spin Relaxation Properties in Zero Dimensional Semiconductor Quantum Dots", *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 42, No. 6A, pp.3340-3349 (2003).
 32. H. Kamada, H. Gotoh and J. Temmyo, T. Takagahara, and H. Ando, "Exciton Rabi Oscillation in Single Isolated Quantum Dots", *phys. stat. sol. (a)* 190, No. 2, pp.485-490 (2001).
 33. H. Kamada, H. Gotoh and J. Temmyo, T. Takagahara, H. Ando, "Exciton Rabi Oscillation in Single Quantum Dot", *Phys. Rev. Lett.* 87, 246401 (2001).
 34. H. Kamada, T. Takagahara, H. Ando, J. Temmyo, and T. Tamamura, "Quantum interference in photo-luminescence excitation processes in a single semiconductor quantum dot", *Phys. Stat. Sol. (a)*, Vol. 178, pp. 291, 2000.
 35. H. Gotoh, H. Kamada, H. Ando, and J. Temmyo, "Lateral electric-field effects on excitonic photoemissions in InGaAs quantum disks", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 76, No. 7, pp. 867-869, 2000.
 36. H. Kamada, H. Ando, T. Takagahara, J. Temmyo, T. Tamamura, "Spectroscopies of exciton and biexciton in InGaAs quantum disk", *J. Lumin.*, Vol. 87-89, pp. 46, 2000.
 37. H. Kamada, H. Ando, H. Gotoh, J. Temmyo, and T. Tamamura, "Spin selective excitation spectroscopy of exciton and biexciton in InGaAs quantum disks: Suppression of spin flip in semiconductor zero-dimensional system," *Phys. Rev. B*, vol. 60, no.8, pp. 5791-5796, 1999.
 38. H. Kamada, H. Ando, T. Tamamura, and J. Temmyo, "InGaAs quantum disk: Fabrication via self-organization and spectroscopies," *Bull. Mater. Sci.* vol. 22, 1999, pp.543-552.
 39. H. Kamada, H. Ando, T. Tamamura, and J. Temmyo, "Excited-state optical transitions of exciton and biexciton in single InGaAs quantum disks", *Phys. Rev. B*, vol. 58, no. 24, pp. 16243-16251, 1998.
 40. 鎌田 英彦, 「半導体量子ドット中の励起子のコヒーレント光制御」*応用物理* 第 71 巻 9 号, pp.678-684, 2002.
 41. 鎌田 英彦, 「単一量子ドット励起子の光励起過程と量子干渉効果」, *物理学会誌* Vol.57, No.2, pp. 101-104, 2002.
 42. 鎌田 英彦, 「半導体量子ドットの線形, 非線型分光」, *光学* (2000)
 43. 鎌田 英彦, 「半導体量子ドット励起子のコヒーレント制御と量子コンピューティン

- グ」, 固体物理 vol.38 no.11 pp. 105-118 (pp.827-840) (2003)
44. T. Komori, T. Ishikawa, T. Kuroda, J. Yoshino, F. Minami, S. Koshihara, “Carrier-density dependence of magnetic and magneto-optical properties of (Ga,Mn)As”, Phys. Rev. B67 115203 (2003).
 45. T. Kuroda, S. Sanguinetti, M. Gurioli, K. Watanabe, F. Minami, N. Koguchi, “Picosecond nonlinear relaxation of photoinjected carriers in a single GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As quantum dot”, Phys. Rev. B 66 121302 (2002).
 46. S. Sanguinetti, K. Watanabe, N. Koguchi, T. Kuroda, F. Minami, “Role of the wetting layer in the carrier relaxation in quantum dot”, Appl. Phys. Lett. 81 613-615 (2002).
 47. Y.Mitsumori, F.Minami, “Transient coherent emission from anisotropic semiconductors studied with phase-locked pulse pairs”, J. Luminescence 94-95 663-666 (2001).
 48. 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}MnxTe”; J. Crystal Growth 214-215 140-149 (2000).
 49. K. Tsubaki “Longitudinal magnetoresistance in magnetic barrier systems” Physica B 456-458 392-396 1998.
 50. K. Tsubaki “Quantized magnetotransport through magnetic barrier systems” Inst Phys Conf Ser 162 7 373-378 1999.
 51. N. Maeda, T. Saitoh, K. Tsubaki, T. Nishida, N. Kobayashi “Enhanced two-dimensional electron gas confinement effect on transport properties in AlGa_N/InGa_N/AlGa_N double-heterostructures” Physica Status Solidi (b) 216 1 727-731 1999.
 52. N. Maeda, T. Saitoh, K. Tsubaki, T. Nishida, N. Kobayashi “Enhanced electron mobility in AlGa_N/InGa_N/AlGa_N double-heterostructures by piezoelectric effect” Jpn J. Appl. Phys. 38 7B L799-L801 1999.
 53. N. Maeda, T. Saitoh, K. Tsubaki, T. Nishida, N. Kobayashi “Superior pinch-off characteristics at 400 C in AlGa_N/Ga_N heterostructures field effect transistor” Jpn J. Appl. Phys. 38 9A/B L987-989 1999.
 54. N. Maeda, T. Saitoh, K. Tsubaki, T. Nishida, N. Kobayashi “Two-dimensional Electron Gas Transport Properties in AlGa_N/(In)Ga_N/AlGa_N Double-heterostructure Field Effect Transistor” Material Research Soc. Symp. Proceeding 595 W4.7.1 2000.
 55. N. Maeda, T. Saitoh, K. Tsubaki, T. Nishida, N. Kobayashi “Enhanced effect of polarization on electron transport properties in AlGa_N/Ga_N Double-heterostructure Field Effect Transistors” Appl. Phys. Lett. 76 21 3118-3120 2000.
 56. N. Maeda, T. Saitoh, K. Tsubaki, T. Nishida, N. Kobayashi “Two-dimensional Electron Gas Transport Properties in AlGa_N/Ga_N Single- and Double-heterostructure Field Effect Transistor” Materials Science & Engineering B B82 232-237 2001.
 57. N. Maeda, T. Saitoh, K. Tsubaki, T. Nishida, N. Kobayashi “Electron transport properties in AlGa_N/Ga_N heterostructure field effect transistors at high electron densities” IPAP Conference series. 1 953-956 2000.
 58. K. Tsubaki, N. Maeda, T. Saitoh, N. Kobayashi “Electronic subbands of two-dimensional

- electron gas in AlGaIn/GaN heterostructure” Proceedings of the 25th Int. Conf. Phys. Semiconductors, ed. Miura (Springer, Berlin) 1593-1594 2001.
59. K. Tsubaki “Aharonov-Bohm Oscillation in Rings with Permalloy” Jpn J. Appl. Phys. 40 3B 1902-1905 2001.
 60. N. Maeda, T. Saitoh, K. Tsubaki, T. Nishida, “AlGaIn/GaN Heterostructure FET” NTT R&D 50 1 8-11 2001.
 61. N. Maeda, T. Saitoh, K. Tsubaki, T. Nishida, N. Kobayashi “High-Temperature Electron Transport Properties in AlGaIn/GaN Heterostructure Field Effect Transistors” Material Research Soc. Symp. Proceeding 639 G11.14 2001.
 62. N. Maeda, T. Saitoh, K. Tsubaki, T. Nishida, N. Kobayashi “High-Temperature Electron Transport Properties in AlGaIn/GaN Heterostructure Field Effect Transistors” Appl. Phys. Lett. 79 11 1634-1636 2001.
 63. N. Maeda, T. Saitoh, K. Tsubaki, T. Nishida, N. Kobayashi “AlGaIn/GaN Heterostructure Field Effect Transistor with High Al Compositions Fabricated with Selective Area Regrowth” Physica Status Solidi (a) 188 1 223-226 2001.
 64. K. Tsubaki, N. Maeda, T. Saitoh, T. Nishida, N. Kobayashi “Gate voltage dependence of subband structure in a two-dimensional electron gas in AlGaIn/GaN heterostructures” Physica E 13 2-4 1111-1114 2002.
 65. K. Prabhakaran, K. V. M. Shafi, Y. Yamauchi, K. Tsubaki, A. Ulman, Y. Honma “Nanoparticle Induced Multi-functionalization of Silicon: A Plug and Play Approach” Applied Surface Science 190 1-4 161-165 2002.
 66. N. Maeda, T. Saitoh, K. Tsubaki, N. Kobayashi “Two-dimensional Electron Gas Transport Properties in AlGaIn/GaN HFETs with high Al compositions” Inst. Phys. Conf. Ser. 170 1 107-112 2002.
 67. N. Maeda, T. Saitoh, K. Tsubaki, T. Nishida, N. Kobayashi “Back-doping design in AlGaIn/GaN heterostructure field-effect transistor for high-power applications” Material Research Soc. Symp. Proceeding 2002.
 68. K. Tsubaki, N. Maeda, T. Saitoh, N. Kobayashi “Spin Splitting in modulation-doped AlGaIn/GaN two-dimensional electron gas” Appl. Phys. Lett. 80 17 3126-3128 2002.
 69. K. Tsubaki, N. Maeda, T. Saitoh, N. Kobayashi “Hall Plateau at small magnetic field in AlGaIn/GaN” Towards the Controllable Quantum States: The mesoscopic superconductor and spintronics (World Scientific) 111-116 2002.
 70. K. Tsubaki, N. Maeda, T. Saitoh, N. Kobayashi “ Spin Splitting in modulation-doped AlGaIn/GaN two-dimensional electron gas” Proceedings of the 26th Int. Conf. Phys. Semiconductors (IOP, London) D118 2002.
 71. N. Maeda, K. Tsubaki, T. Saitoh, T. Tawara, N. Kobayashi “ Two-dimensional electron gas transport properties in AlGaIn/GaN heterostructure field-effect transistors designed for high-power applications” Optical Materials 23 1-2 211-217 2003.
 72. E.B. Cooper, S.R. Manalis, H. Fang, H. Dai, K. Matsumoto, S. C. Minne, T. Hunt, and C. F. Quate, “Terabit per square inch data storage with the atomic force

- microscope," *Appl. Phys. Lett.*, 75, 3566 (1999).
73. 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 α -alumina substrate" *Appl. Phys. Lett.* Vol.76, No.2, p.239 (2000).
 74. 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).
 75. 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).
 76. Kurachi, Takahumi Kamimura, Masatoshi Maeda, Kazue Sakamoto, Masashi Kuwahara, Nobuhumi Atoda, and Yuji Awano, "Single Electron Transistor with Ultra-High Coulomb Energy of 5000K Using Position Controlled Grown Carbon Nanotube as Channel" *Jpn.J. Appl. Phys.* Vol.42, Part 1, No.4B, p.2415-2418 (2003).
 77. M. Tabe, Y. Terao, Ratno Nuryadi, Y. Ishikawa, N. Asahi and Y. Amemiya: "Simulation of Visible Light Induced Effects in a Tunnel Junction Array for Photonic Device Applications", *Jpn. J. Appl. Phys.* 38 (1B), pp. 593 - 596 (1999).
 78. M. Tabe, M. Kumezawa, T. Yamamoto, S. Makita, T. Yamaguchi, Y. Ishikawa: "Formation of high-density silicon dots on a silicon-on-insulator substrate", *Appl. Surf. Sci.* 142, pp. 553 - 557 (1999).
 79. Yasuhiko Ishikawa, Shigenori Makita, Jianhua Zhang, Toshiaki Tsuchiya and Michiharu Tabe: "Capacitance-Voltage Study of Silicon-on-Insulator Structure with an Ultrathin Buried SiO₂ Layer Fabricated by Wafer Bonding", *Jpn. J. Appl. Phys.* 38 (7B), pp. L789 - L791 (1999).
 80. R. Nuryadi, Y. Ishikawa, M. Tabe: "Formation and ordering of self-assembled Si islands by ultrahigh vacuum annealing of ultrathin bonded silicon-on-insulator structure", *Appl. Surf. Sci.* 159 - 160, pp. 121 - 126 (2000).
 81. Yasuhiko Ishikawa, Masaaki Kosugi, Minoru Kumezawa, Toshiaki Tsuchiya, Michiharu Tabe: "Capacitance-voltage study of single-crystalline Si dots on ultrathin SiO₂ formed by nanometer-scale local oxidation", *Thin Solid Films* 369 (1 - 2), pp. 69 - 72 (2000).
 82. Yasuhiko Ishikawa, Masaaki Kosugi, Michiharu Tabe: "Effect of nanometer-scale corrugation on densities of gap states and fixed charges at the thermally-grown SiO₂/Si interface", *J. Appl. Phys.* 89 (2), pp. 1256 - 1261 (2001).
 83. Michiharu Tabe, Minoru Kumezawa and Yasuhiko Ishikawa: "Quantum-Confinement Effect in Ultrathin Si Layer of Silicon-on-Insulator Substrate", *Jpn. J. Appl. Phys.* 40 (2B), pp. L131 - L133 (2001).
 84. Yasuhiko Ishikawa, Masaaki Kosugi, Toshiaki Tsuchiya and Michiharu Tabe: "Concentration of Electric Field near Si Dot/Thermally-Grown SiO₂ Interface", *Jpn. J.*

- Appl. Phys. 40 (3B), pp. 1866 - 1869 (2001).
85. 田部道晴、川崎隆弘、上村崇史、石川靖彦、水野武志：「シリコンナノ構造の KFM による電位測定」, 表面科学 22 (5), pp. 301 - 308 (2001).
 86. Michiharu Tabe, Minoru Kumezawa, Yasuhiko Ishikawa, and Takeshi Mizuno: “Quantum confinement effects in Si quantum well and dot structures fabricated from ultrathin silicon-on-insulator wafers”, Appl. Surf. Sci. 175 - 176, pp. 613 - 618 (2001).
 87. Kazuaki Sawada, Michiharu Tabe, Makoto Iwatsuki, Yasuhiko Ishikawa and Makoto Ishida: “Field Electron Emission from Si Nano Protrusions”, Jpn. J. Appl. Phys. 40 (8A), pp. L832 - L834 (2001).
 88. Y. Ishikawa, T. Ishihara, M. Iwasaki and M. Tabe: “Negative differential conductance due to resonant tunneling through SiO₂/single-crystalline-Si double barrier structure”, Electron. Lett. 37 (19), pp. 1200 - 1201 (2001).
 89. Ratno Nuryadi, Yasuhiko Ishikawa, Yukinori Ono, Michiharu Tabe: “Thermal agglomeration of single-crystalline Si layer on buried SiO₂ in ultrahigh vacuum”, J. Vac. Sci. Technol. B 20 (1), pp. 167 - 172 (2002).
 90. 田部道晴、石川靖彦、水野武志：「極薄 SOI を用いたシリコンナノ構造デバイス」, 応用物理 71 (2), pp. 209 - 213 (2002).
 91. Yasuhiko Ishikawa, Minoru Kumezawa, Ratno Nuryadi, Michiharu Tabe: “Effect of patterning on thermal agglomeration of ultrathin silicon-on-insulator layer”, Appl. Surf. Sci. 190, pp. 11 - 15 (2002).
 92. K. Sawada, M. Tabe, Y. Ishikawa and M. Ishida: “Field Electron Emission Device Using Silicon Nano-Protrusions”, J. Vac. Sci. Technol. B 20 (3), pp. 787 - 790 (2002)
 93. 田部道晴、澤田和明、ラトノ・ヌルヤディ、杉木幹生、石川靖彦、石田誠：「シリコンナノ構造からの電子の電界放出」, 電子情報通信学会 和文論文誌 解説論文 J85-C (9), pp. 803 - 809 (2002).
 94. Hiroya Ikeda, Masanori Iwasaki, Yasuhiko Ishikawa, and Michiharu Tabe: “Resonant tunneling characteristics in SiO₂/Si double-barrier structures in a wide range of applied voltage”, Appl. Phys. Lett. 83 (7), pp. 1456 - 1458 (2003).
 95. Yasuhiko Ishikawa, Yasuhiro Imai, Hiroya Ikeda, and Michiharu Tabe: “Pattern-induced alignment of silicon islands on buried oxide layer of silicon-on-insulator structure”, Appl. Phys. Lett. 83 (15), pp. 3162 - 3164 (2003).
 96. Ratno Nuryadi, Hiroya Ikeda, Yasuhiko Ishikawa and Michiharu Tabe: “Ambipolar Coulomb blockade characteristics in a two-dimensional Si multi-dot device”, accepted for publication in IEEE Trans. on Nanotechnology, (2003)
 97. Takuji Gotoh, Hiroshi Kambayashi and Kazuo Tsutsui, “Epitaxial Growth of Ca_xCd_{1-x}F₂ Mixed Crystal Films on Si Substrates”, Jpn. J. Appl. Phys., 39(5B), L476-L478 (2000)
 98. Toshimitsu Kobori and Kazuo Tsutsui, “Molecular-beam epitaxy of conductive CdF₂ films on Si substrates by simultaneous Cd exposure”, Appl. Phys. Lett., 78(10), 1406-1408 (2001)
 99. Hiroshi Kambayashi, Takuji Gotoh, Hiroshi Maeda and Kazuo Tsutsui, “Growth

- Characteristics of $\text{Ca}_x\text{Cd}_{1-x}\text{F}_2$ Films on Si Substrates Using CaF_2 Buffer Layer”, *J. of Crystal Growth*, vol.237-239, 2061-2064 (2002)
100. Toshiaki Terayama, Hiroshi Sekine and Kazuo Tsutsui, “Fluoride Resonant Tunneling Diodes Co-Integrated with Si-MOSFETs”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 41(4B), 2598-2601 (2002).
 101. Motoki Maeda, Hiroshi Kambayashi, So Watanabe and Kazuo Tsutsui, "Heteroepitaxy of Cd-rich $\text{Ca}_x\text{Cd}_{1-x}\text{F}_2$ Alloy on Si Substrates and Its Application to Resonant Tunneling Diodes", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 42(4B), 2453 - 2457 (2003)
 102. Motoki Maeda, So Watanabe and Kazuo Tsutsui, “Evaluation of Variable Energy Level of Conduction Band Edge on Fluoride Resonant Tunneling Diodes”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 42(10A), L1216-L1218 (2003)
 103. H. Gotoh, H. Ando, H. Kamada, A. Chavez-Pirson, and J. Temmyo, ”Spin relaxation of excitons in zero dimensional InGaAs quantum disks”, *Appl. Phys. Lett.*, vol.72, pp.1341-1343, 1998
 104. J. Temmyo and T. Tamamura, ”Self-organizing semiconductor epitaxial films by Turing instability,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.37, pp.1487-1492, 1998.
 105. E. Kuramochi, J. Temmyo, H. Kamada, and T. Tamamura, ”Perfect spatial ordering of self-organized InGaAs/AlGaAs quantum disks on GaAs(311)B substrate with silicon-nitride dot array,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.37, pp. 1559-1564, 1998.
 106. H. Kamada, H. Ando, J. Temmyo, and T. Tamamura, ”Excited state optical transitions of exciton and biexciton in single InGaAs quantum disk”, *Phys. Rev. B.*, vol.58, pp.16243-16251, 1998.
 107. A. Chavez-Pirson, J. Temmyo, H. Kamada, H. Gotoh, and H. Ando, “Near-field optical spectroscopy and imaging of InGaAs/AlGaAs quantum dots”, *Appl. Phys. Lett.*, vol.72, pp.3494-3496, 1998.
 108. 天明二郎、玉村敏昭、”半導体結晶成長における自己集合と自己組織化 - GaAs(311)B 面上の InGaAs ナノ構造形成 - ”, *表面科学*, vol.195, pp.546-550, 1998.
 109. J. Temmyo and T. Tamamura, ”Self-assembly and self-organization for nanostructures”, *J. Surface Analysis*, vol.4, pp.185-191, 1998.
 110. J. Temmyo, E. Kuramochi, H. Kamada, and T. Tamamura, ”Resonant self-organization in semiconductor growth”, *J. Crystal Growth*, vol.195, pp.516-523, 1998.
 111. H. Kamada, H. Gotoh, H. Ando, T. Tamamura, and 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.
 112. H. Kamada, J. Temmyo, E. Kuramochi, H. Ando, and T. Tamamura, ”InGaAs quantum disk: Fabrication via self-organization and spectroscopies”, *Bull. Mater. Sci.*, vol.22, pp.543-552, 1999.
 113. A.Chavez-Pirson, 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*, vol.7, pp.367-372, 2000.

114. H. Gotoh, H. Kamada, H. Ando, and J. Temmyo, "Lateral electric-field effects on excitonic photoemissions in InGaAs quantum disks", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 76, pp.867-869, 2000.
115. H. Kamada, H. Gotoh, J. Temmyo, T. Takagahara, and H. Ando, "Exciton Rabi oscillation in single isolated quantum dots", *Phys. Stat. Sol. (a)*, vol.179, pp.353-357, 2001.
116. 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 (2001.12)*.
117. 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.*, vol.39, pp.S368-S371, 2001.
118. J. Temmyo, H. Kamada, E. Kuramochi, H. Ando, and T. Tamamura, " Self-organized quantum disks for a two-state system", *Materials Science and Engineering*, vol.B88, pp.153-156, 2001.
119. H. Kamada, H. Gotoh, J. Temmyo, T. Takagawara, and H. Ando, "Exciton Rabi Oscillation in single quantum dot", *Phys. Rev. Lett.*, vol.87, pp.246401-1, 2001.
120. J. Temmyo, "Self-organization of semiconductor nanostructures", *Encyclopedia of materials: Science and technology*, pp.8335-8339, 2002.
121. A.Nakamura, S. Shigemori, Y. Shimizu, T. Aoki, A. Tanaka, and J. Temmyo, "OH radical activation of ZnO growth in remote plasma metalorganic chemical vapor deposition", *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.42, pp.L775-L777, 2003
122. H. Gotoh, H. Kamada, T. Saitoh, H. Ando, and J. Temmyo, "Electric-field-induced anisotropy of excitonic optical properties in semiconductor quantum dots", *J. Appl. Phys.*, vol.94, pp.342-347, 2003
123. H. Gotoh, H. Kamada, H. Ando, and J. Temmyo, "Exciton spin relaxation properties in zero dimensional semiconductor quantum dots", *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.42, pp.3340-3349, 2003
124. Asai T., Adamatzky A., and Amemiya Y., "Towards reaction-diffusion computing devices based on minority-carrier transport in semiconductors," *Chaos, Solitons & Fractals*, Vol. 20, No. 4, pp. 863-876 (2004). (掲載決定)
125. Nakada K., Asai T., and Amemiya Y., "An analog central pattern generator for interlimb coordination in quadruped locomotion," *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol. 14, No. 5, pp. 1356-1365 (2003).
126. Asai T., Kanazawa Y., and Amemiya Y., "A subthreshold MOS neuron circuit based on the Volterra system," *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol. 14, No. 5, pp. 1308-1312 (2003).
127. Oya T., Asai T., and Amemiya Y., "Single electron logic device with simple structure," *Electronics Letters*, Vol. 39, No. 13, pp. 965-967 (2003).
128. Kanazawa Y., Asai T., and Amemiya Y., "Basic circuit design of a neural processor: analog CMOS implementation of spiking neurons and dynamic synapses," *Journal of Robotics and Mechatronics* , Vol. 15, No. 2, pp. 208-219 (2003).

129. Oya T., Asai T., Fukui T., and Amemiya Y., "A majority-logic device using an irreversible single-electron box," *IEEE Transactions on Nanotechnology*, Vol. 2, No. 1, pp. 15-22 (2003).
130. Asai T., Nishimiya Y., and Amemiya Y., "A CMOS reaction-diffusion circuit based on cellular-automaton processing emulating the Belousov-Zhabotinsky reaction," *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer*, Vol. E85-A, No. 9, pp. 2093-2096 (2002).
131. Oya T., Asai T., Fukui T., and Amemiya Y., "A majority-logic nanodevice using a balanced pair of single-electron boxes," *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 2, No. 3/4, pp. 333-342 (2002).
132. Inokuchi T., Yamada T., Asai T., and Amemiya Y., "Analog computation using quantum-flux parametron devices," *Physica C*, Vol. 357, pp. 1618-1621 (2001).
133. Yamada T., Kinoshita Y., Kasai S., Hasegawa H., and Amemiya Y., "Quantum-dot logic circuits based on the shared binary decision diagram," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 40, No. 7, pp. 4485-4488 (2001).
134. Asai T., Sunayama T., Amemiya Y., and Ikebe M., "A CMOS vision chip based on the cellular automaton processing," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 40, No. 4B, pp. 2585-2592 (2001).
135. 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).
136. 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).
137. 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).
138. 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).
139. Sunayama T., Ikebe M., Asai T., and Amemiya Y., "Cellular CMOS circuits performing edge detection with difference-of-Gaussian Filters," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 39, No. 4B, pp. 399-407 (2000).
140. Morie T., Uchimura K., and Amemiya Y., "Analog LSI implementation of self-learning neural networks," *Computers and Electrical Engineering*, Vol. 25, No. 5, pp. 339-355 (1999).
141. Wu N.-J., Lee H., Amemiya Y., and Yasunaga H., "Analog computation using coupled-quantum-dot spin glass," *IEICE Transactions on Electronics*, Vol. E82-C, No. 9, pp. 1623-1629 (1999).
142. Yamada T. and Amemiya Y., "A multiple-valued Hopfield network device using single-electron circuits," *IEICE Transactions on Electronics*, Vol. E82-C, No. 9, pp.

- 1615-1622 (1999).
143. azawa M., Kanaami K., Yamada T., and Amemiya Y., "Multiple-valued inverter using a single-electron-tunneling circuit," *IEICE Transactions on Electronics*, Vol. E82-C, No. 9, pp. 1607-1614 (1999).
 144. Tabe M., Terao Y., Nuryadi R., Ishikawa Y., Asahi N., and Amemiya Y., "Simulation of visible light induced effects in a tunnel junction array for photonic device applications," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 38, Part 1, No. 1B, pp. 593-596 (1999).
 145. Wu N.-J., Lee H., Amemiya Y., and Yasunaga H., "Method for determining weight coefficients for quantum Boltzmann machines," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 38, No. 1B, pp. 439-442 (1999).
 146. N. Tsukada, Spatiotemporal dynamics of Bose-Einstein condensates in linear- and circular-chain optical lattices, *Phys. Rev. A* 65, 063608-1~6 (2002).
 147. N. Tsukada, Enhancement of quantum tunneling oscillations due to nonlinear interactions, *Phys. Rev. A* 64, 033601-1~5 (2001).
 148. N. Tsukada, Complete population transfer between two Bose-Einstein condensates induced by nonlinear laser coupling, *Phys. Rev. A* 61, 063602-1~5 (2000).
 149. N. Tsukada, M. Gotoda, Y. Nomura, and T. Isu, Laser-assisted coherent atomic tunneling between two trapped Bose-Einstein condensates, *Phys. Rev. A* 59, 3862-3967 (1999).
 150. N. Tsukada, Y. Nomura, and T. Isu, Complete population transfer between nonresonant tunneling states induced by a train of laser pulses, *Phys. Rev. A* 59, 2852-2857 (1999).
- (2) 口頭発表 (国内会議・研究会等 306 件、国際会議 202 件)
: 国際会議招待講演
1. K. Ishibashi (invited): "On the Possibility of Quantum Computing with Coupled Quantum Dots", The 12th Japan-Germany Workshop on Information Technology, Dresden, Germany, May 2-6, 1999
 2. K. Ishibashi, M. Suzuki, T. Ida, K. Tsukagoshi and Y. Aoyagi (invited): "Quantum dots in carbon nanotubes" 2000 International Microprocesses and Nanotechnology Conference, Tokyo, Japan, July 11-13, 2000
 3. J. P. Bird, M. Elhassan, A. Shailos, C. Prasad, R. Akis, D. K. Ferry, L.-H. Lin, N. Aoki, Y. Ochiai, K. Ishibashi, and Y. Aoyagi (invited): "Phase-coherent electron transport in open quantum dots and quantum dot arrays", Eighth International Symposium on Nanostructures: Physics and Technology, St. Petersburg, Russia, June 2000
 4. K. Ishibashi and Y. Aoyagi (invited): "Quantum state control with coupled quantum dots", 2000 ATR Workshop on Quantum and Laser Chaos, Kyoto, Japan, November 7-10, 2000
 5. J. P. Bird, M. Elhassan, A. Shailos, C. Prasad, R. Akis, D. K. Ferry, L.-H. Lin, N. Aoki, Y. Ochiai, K. Ishibashi, and Y. Aoyagi (invited): "Open quantum dots: a non-RMT system", 2000 ATR Workshop on Quantum and Laser Chaos, Kyoto, Japan, November 7-10, 2000
 6. J. P. Bird, M. Elhassan, J. P. Bird, A. Shailos, C. Prasad, R. Akis, D. K. Ferry, L.-H. Lin, N. Aoki, Y. Ochiai, K. Ishibashi, and Y. Aoyagi (invited): "The metal-insulator transition in open quantum-dot arrays", Advanced Research Workshop on Quantum Transport in

Semiconductors, Maratea, Italy, June 2001

7. K. Ishibashi, M. Suzuki, D. Tsuya, K. Toratani, S. Moriyama, T. Ida, and Y. Aoyagi (invited): "Formation and electrical transport of single and coupled quantum dots in carbon nanotubes", First International Workshop on Quantum Nonplanar Nanostructures and Nanoelectronics '01, Tsukuba, Japan, July 2-4, 2001
8. K. Ishibashi and Y. Aoyagi (invited): "Interaction of electromagnetic wave with coupled quantum dots", The 12th International Conference on Nonequilibrium Carrier Dynamics in Semiconductors (HCIS-12), Santa Fe, New Mexico, USA, August 27-31, 2001
9. J. P. Bird, M. Elhassan, J. P. Bird, A. Shailos, C. Prasad, R. Akis, D. K. Ferry, L.-H. Lin, N. Aoki, Y. Ochiai, K. Ishibashi, and Y. Aoyagi (invited): "Interference and interactions in open quantum dots and quantum-dot arrays", Fifth International Symposium on New Phenomena in Mesoscopic Structures, Hawaii, November 25-30, 2001
10. K. Ishibashi (invited) "Quantum dots in carbon nanotubes and their application to quantum devices", The Third Takayanagi Kenjiro Memorial Symposium - Nanotechnology and Nanomaterials -, Hamamatsu, December 6-7, 2001
11. K. Ishibashi, M. Suzuki, S. Moriyama, T. Ida and Y. Aoyagi (invited): "Single and coupled quantum dots in single-wall carbon nanotubes", The First International Workshop on Quantum Dots for Quantum Computing and Classical Size Effect Circuits, Kochi, Japan, 26 - 28, January, 2002
12. K. Ishibashi (invited): "Single and coupled quantum dots in single-wall carbon nanotubes", 12th International Winterschool on New Developments in Solid State Physics, Mauterndorf, Province of Salzburg, Austria. 25 February - 01 March, 2002
13. K. Ishibashi, M. Suzuki and Y. Aoyagi: "Tunnel barrier formation in carbon nanotubes for quantum dot devices", Quantum Sensing: Evolution and Revolution from Past to Future (OE15), Part of SPIE's International Symposium on Optoelectronics, San Jose, USA, 25-31, January 2003
14. K. Ishibashi, M. Suzuki, D. Tsuya, Y. Ishiwata and Y. Aoyagi (invited): "Carbon nanotubes for quantum dot devices", Second International Conference on "Molecular Electronics and Bioelectronics (M&BE2)", Tokyo, Japan, March 5-7
15. K. Ishibashi (invited): "Carbon nanotube quantum dots for functional nanodevices", International Symposium on Nanoscience and Nanotechnology on Quantum Particles (NNQP2003), Dec. 15-17, 2003, Tokyo, Japan
16. H. Kamada, H. Gotoh, H. Ando, T. Takagahara, J. Temmyo "Quantum computation with quantum dot excitons", HCIS13, Modena (2003), Th10-1 (invited).
17. H. Kamada, "Quantum Computation with Quantum Dot Excitons", FST2003, Chiba (2003), TB-7 (invited).
18. H. Kamada, H. Gotoh, H. Ando, and T. Takagahara, "Quantum dot exciton Rabi oscillation and quantum gate operation", APF8, Tsukuba (2003) 4-3 (invited).
19. H. Kamada, H. Gotoh, H. Ando, T. Takagahara and J. Temmyo, "Single Quantum Dots Exciton : Application to Quantum Optics", QD2002, Tokyo (2002) C-2 (invited).

20. H. Kamada, H. Ando, T. Takagahara, H. Gotoh, and J. Temmyo, "Quantum Mechanical Time-Evolution of Exciton States in Semiconductor Quantum Dots: Quantum Gate Operation of Exciton Qubits", SSDM2002, Tokyo (2002) F-9-4 (invited).
21. H. Kamada, H. Gotoh, H. Ando, and T. Takagahara, and J. Temmyo, "Exciton Rabi oscillation: Coherently manipulate zero-dimensional quantum states by light ", CLEO/QELS2002, Long Beach (2002) QThK1 (invited).
22. H. Kamada, H. Gotoh, H. Ando, and T. Takagahara, "Coherent optical control of single dot exciton wavefunction", The first International Workshop on Quantum Dots for Quantum Computing and Classical Size Effect Circuits (IWQDQC),21, Kochi (2002), (invited).
23. H. Kamada, H. Gotoh, H. Ando, T. Takagahara and J. Temmyo, "Quantum gate operation of exciton qubits in semiconductor quantum dots", Photonics West 2003, San Jose (2003) 4992-02 (invited).
24. Michiharu Tabe and Yasuhiko Ishikawa: "SOI-based Si nanostructures and their applications", Frontier Science Research Conference (FSRC) in Materials Science and Technology Series, Science and Technology of Silicon Materials, La Jolla, August, 2001 (Invited).
25. Michiharu Tabe, Kazuaki Sawada, Yasuhiko Ishikawa and Makoto Ishida: "Electron Field Emission from Silicon Nano-Protrusions", Sixth International Conference on Solid-State and Integrated-Circuit Technology (ICSICT-2001), Shanghai, October, 2001 (Invited).
26. Michiharu Tabe and Yasuhiko Ishikawa: "Si/SiO₂ Resonant Tunneling Diodes Based on Ultrathin SOI Structure", 2002 Silicon Nanoelectronics Workshop, Honolulu, June, 2002 (Invited).

国際会議一般講演

1. L. H. Lin, N. Aoki, K. Nakao, K. Ishibashi, Y. Aoyagi, T. Sugano, J. P. Bird, D. K. Ferry and Y.Ochiai: "Magneto-transport in corrugated quantum wires", The 9th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS9), Fukuoka, Japan, July, 1999
2. T. Aono, K. Ishibashi and Y. Aoyagi : "Rabi oscillation in coupled quantum dots", The 11th International conference on Nonequilibrium Carrier Dynamics in Semiconductors (HCIS-11), Kyoto, Japan, July 19-23, 1999
3. T. Ida, K. Ishibashi, K. Tsukagoshi, B. W. Alphenaar and Y. Aoyagi: "Quantum dot transport in carbon nanotubes", International Symposium on Surface and Interfaces of Mesoscopic Devices 1999, Hawaii, USA, Dec 1999
4. F. Ge, A. Andresen, C. Prasad, J. P. Bird, D. K. Ferry, L.-H. Lin, N. Aoki, K. Nakao, Y. Ochiai, K. Ishibashi, Y. Aoyagi, and T. Sugano: "A metal-insulator transition in a quantum dot array", International Symposium on Surface and Interfaces of Mesoscopic Devices 1999, Hawaii, USA, Dec, 1999
5. Prasad, F. Ge, A. Andresen, J. P. Bird, D. K. Ferry, L.-H. Lin, N. Aoki, K. Nakao, Y. Ochiai, K. Ishibashi, Y. Aoyagi, and T. Sugano: "Measurements of the phase breaking time in quantum dot arrays", International Symposium on Surface and Interfaces of Mesoscopic Devices 1999, Hawaii, USA, Dec, 1999

6. K. Ishibashi and Y. Aoyagi: "Toward quantum state control with coupled quantum dots", The Third SANKEN International Symposium on Advanced Nanoelectronics : Devices, Materials and Computing, Osaka, Japan, Mar.14-15, 2000
7. T. Ida, K. Ishibashi, K. Tsukagoshi and Y. Aoyagi: "Effect of microwave irradiation on carbon nanotube quantum dots", The 25th International Conference on the Physics of Semiconductors, Osaka, Japan, September 17-22, 2000
8. Shailos, C. Prasad, M. Elhassan, J. P. Bird, D. K. Ferry, L. H. Lin, N. Aoki, Y. Ochiai, K. Ishibashi and Y. Aoyagi: "Possible enhancement of the carrier-carrier interaction in confined quantum dots", The 25th International Conference on the Physics of Semiconductors, Osaka, Japan, September 17-22, 2000
9. Prasad, A. Shailos, M. Elhassan, D. K.Ferry, J. P. Bird, L. H. Lin, N. Aoki, Y. Ochiai, K. Ishibashi and Y. Aoyagi: "Phase breaking and energy relaxation in quantum dot array", 25th International Conference on the Physics of Semiconductors, Osaka, Japan, September 17-22, 2000
10. M. Suzuki, K. Ishibashi, T. Ida, K .Tsukagoshi and Y. Aoyagi: "Quantum dot formation in single wall carbon nanotubes", 2000 International Symposium on Formation, Physics and Device Application of Quantum Dot Structures, Sapporo, Japan, September 10-14, 2000
11. K. Ishibashi: "Coupled Quantum Dots in Carbon Nanotubes and Possible Application to Quantum Computing Device", The First International Conference on Molecular Electronics and Bioelectronics (M&BE1), Hyogo, Japan, March 5-7, 2001
12. K. Ishibashi, M. Suzuki, T. Ida and Y. Aoyagi: "Single and coupled quantum dots in single-wall carbon nanotubes", The First International Conference on Molecular Electronics and Bioelectronics (M&BE1), Hyogo, Japan, March 5-7, 2001
13. K. Ishibashi: "Single electron transport in quantum dots", The 5th RIKEN International Conference on Coherent Control in Matter, Shonan, Japan, April 22-25, 2001
14. M. Suzuki, K. Ishibashi, T. Ida and Y. Aoyagi: "Fabrication of single and coupled quantum dots in single-wall carbon nanotubes", The 45th International Conference on Electron, Ion and Photon Beam Technology & Nanofabrication, Washington DC, USA, May 29- June 1, 2001
15. K. Ishibashi, M. Suzuki, T. Ida and Y. Aoyagi: "Coupled quantum dots in single-wall carbon nanotubes", The 10th International Conference on Modulated Semiconductor Structures, Johannes Kepler University, Linz, Austria, July, 23-27, 2001
16. Shailos, C. Prasad, M. Elhassan, J.P. Bird, R. Akis, D.K. Ferry, L.-H. Lin, N. Aoki, Y. Ochiai, K. Ishibashi and Y. Aoyagi: "Non-weak-localization signature in the average conductance of open quantum-dot arrays", The 14th International Conference on the Electronic Properties of Two-Dimensional Systems , Praha, Czech Republic, July 30 - August 3, 2001
17. R. Akis, M. Elhassan, J.P. BIRD, A. Shailos, C. Prasad, D.K. Ferry, L.-H. Lin, N. Aoki, Y. Ochiai, K. Ishibashi and Y. Aoyagi: "Molecular states in quantum-dot arrays", The 14th International Conference on the Electronic Properties of Two-Dimensional Systems,

Praha, Czech Republic, July 30 - August 3, 2001

18. Prasad, D. K. Ferry, A. Shailos, M. Elhassan, J. P. Bird, L. H. Lin, N. Aoki, Y. Ochiai, K. Ishibashi and Y. Aoyagi: "Variation of the energy-relaxation time temperature dependence with magnetic field", The 12th International Conference on Nonequilibrium Carrier Dynamics in Semiconductors (HCIS-12), Santa Fe, New Mexico, USA, August 27-31, 2001
19. J. P. Bird, M. Elhassan, J. P. Bird, A. Shailos, C. Prasad, R. Akis, D. K. Ferry, L.-H. Lin, N. Aoki, Y. Ochiai, K. Ishibashi, and Y. Aoyagi (invited): "Interference and interactions in open quantum dots and quantum-dot arrays", Fifth International Symposium on New Phenomena in Mesoscopic Structures, Hawaii, November 25-30, 2001
20. M. Suzuki, K. Ishibashi, T. Ida and Y. Aoyagi: "Transport properties of coupled quantum dots in carbon nanotubes under microwave irradiation", Fifth International Symposium on New Phenomena in Mesoscopic Structures, Hawaii, November 25-30, 2001
21. Y. Ochiai, N. Aoki, L. Lin, K. Ishibashi, Y. Aoyagi, J. P. Bird, D. K. Ferry and J. Oswald: "Numerical simulations of the magneto conductance in dot array systems at high magnetic fields", Fifth International Symposium on New Phenomena in Mesoscopic Structures, Hawaii, November 25-30, 2001
22. R. Brunner, R. Meisels, F. Kuchar, D. K. Ferry, J. P. Bird, M. Elhassan, K. Ishibashi and Y. Aoyagi: "High frequency response of open quantum dots", 12th International Winterschool on New Developments in Solid State Physics, Mauterndorf, Province of Salzburg, Austria. 25 February - 01 March, 2002
23. M. Suzuki, K. Ishibashi, T. Ida and Y. Aoyagi: "Formation of coupled quantum dots in carbon nanotubes for qubit application", The 10th JST International Symposium on Quantum Computing -Nanoscience and Technology for implementation of quantum computers-", Tokyo, Japan, March 12-14, 2002
24. K. Ishibashi, M. Suzuki, T. Ida and Y. Aoyagi: "Microwave response of quantum dots in single-wall carbon nanotubes", The 10th JST International Symposium on Quantum Computing -Nanoscience and Technology for implementation of quantum computers-", Tokyo, Japan, March 12-14, 2002
25. K. Ishibashi, M. Suzuki, T. Ida and Y. Aoyagi: "Artificial tunnel barrier formation and quantum dots in carbon nanotubes", The 7th International Conference on Nanometer-scale Science and Technology (NANO-7), Malmo, Sweden, June 24-28, 2002
26. M. Elhassan, J. P. Bird, R. Meisels, K. Ishibashi and Y. Aoyagi: "Probing the energy-band structure of one-dimensional quantum-dot superlattices", 26th International Conference on the Physics of Semiconductors", Edinburgh, Scotland, UK, July 29 – August 2, 2002
27. R. Brunner, R. Meisels, F. Kuchar, M. Elhassan, J. P. Bird, D. K. Ferry, K. Ishibashi, and Y. Aoyagi: "High-frequency investigations of backscattering in open quantum dots", 26th International Conference on the Physics of Semiconductors", Edinburgh, Scotland, UK, July 29 – August 2, 2002
27. N. Aoki, D. Onishi, Y. Iwase, K. Ishibashi, Y. Aoyagi, J. P. Bird, D. K. Ferry, and Y. Ochiai:

- “The role of molecular trajectories in electron-wave interference in a coupled quantum dot”, 26th International Conference on the Physics of Semiconductors”, Edinburgh, Scotland, UK, July 29 – August 2, 2002
28. Y. Ochiai, Y. Iwase, N. Aoki, L. H. Lin, K. Ishibashi, J. P. Bird, D. K. Ferry and Y. Takagaki: “Self-similarity in the low temperature magnetotransport in a single quantum dot”, 26th International Conference on the Physics of Semiconductors”, Edinburgh, Scotland, UK, July 29 – August 2, 2002
 29. D. Tsuya, M. Suzuki, K. Ishibash, Y. Ochiai, and Y. Aoyagi: “Effect of Ar ion irradiation on the tunnel barrier formation in carbon nanotubes and its application to quantum dot devices”, The Second International Workshop on Quantum Nonplanar Nanostructures & Nanoelectronics ‘02”, Tsukuba, Japan, September 9-11, 2002
 30. K. Watanabe, S. Gozu, T. Ida , Y. Ochiai , S. Yamada , K. Ishibashi, and Y. Aoyagi: “Fabrication and electrical properties of free-standing GaAs/AlGaAs 2DEG structures”, The Second International Workshop on Quantum Nonplanar Nanostructures & Nanoelectronics ‘02”, Tsukuba, Japan, September 9-11, 2002
 31. S. Gozu, K. Watanabe, K. Ishibashi and Y. Aoyagi, “Very shallow two-dimensional electron gas realized by $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}/\text{InAs}$ single quantum well grown on GaAs (111)A substrate”, MBE2002, San Francisco, USA, September, 15-20, 2002
 32. M. Suzuki, K. Ishibashi, D. Tsuya and Y. Aoyagi: “Tunnel barrier formation in carbon nanotubes using Ar ion irradiation”, International Conference on Micro-and Nanoengineering 2002”, Lugano, Switzerland, September 16-19, 2002
 33. N. Aoki, J. Takayama, M. Kida, K. Horiuchi, S. Yamada, T. Ida, K. Ishibashi, and Y. Ochiai: “Bonding process for nanoscale wiring using carbon nanotube by scanning tunneling microscope tip”, 2002 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2002)”, Nagoya, Japan, September 17-19, 2002
 34. R. Brunner, R. Meisels, F. Kuchar, M. Elhassan, J. P. Bird, D. K. Ferry, K. Ishibashi: “High-frequency investigations of backscattering in open quantum dots”, 2nd International Conference on Semiconductor Quantum Dots (QD2002)”, Tokyo, Japan, September 30-October 3, 2002
 35. K. Ishibashi, K. Toratani, M. Suzuki and Y. Aoyagi: “Electrical transport in semiconducting single-wall carbon nanotubes”, Fourth International Symposium on Control of Semiconductor Interfaces, Karuizawa, Japan, October 21-25, 2002
 36. K. Ishibashi, M. Suzuki, D. Tsuya, K. Kono, T. Fuse and Y. Aoyagi: “Fabrication of single electron devices in carbon nanotubes”, International symposium on “Nanostructures and Mesoscopic Systems (NanoMES2003)”, Tempe, Arizona, USA, February 17-21, 2003
 37. Roland Brunner, Ronald Meisels, Friedemar Kuchar, Koji Ishibashi, “Interaction of microwaves with backscattering orbits in open quantum dots”, The 15th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-15), Nara, Japan, 14-18 July, 2003
 38. Nobuyuki Aoki, Li-hung Lin, Takahiro Morimoto, Takahiko, Sasaki, Jun-feng Song, Koji

- Ishibashi, Jonathan Bird, Agung, Budiyo, Katsuhiro Nakanura, Ochiai Yuichi, "Fractal Behavior in Magnetoconductance in a Coupled Quantum Dot", , The 15th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-15), Nara, Japan, 14-18 July, 2003
39. R. Brunner, R. Meisels, F. Kuchar, M. Elhassan, J. P. Bird, D. K. Ferry, and K. Ishibashi, "Investigation of backscattering peaks and of the nature of the confining potential in open quantum dots", The 11th International Conferences on Modulated Semiconductor Structures (MSS11)", July 14-18, 2003, Nara, Japan
 40. S. Moriyama, T. Fuse, M. Suzuki, Y. Aoyagi, and K. Ishibashi, "Classical microwave response of quantum dots in single-wall carbon nanotubes", CREST & QNN'03 Joint International Workshop, 21-23, July, 2003, Awaji, Japan
 41. T. Fuse, S. Moriyama, M. Suzuki, Y. Aoyagi, and K. Ishibashi, "Effect of the large current flowing process on the transport properties in a bundle of single-wall carbon nanotubes", CREST & QNN'03 Joint International Workshop, 21-23, July, 2003, Awaji, Japan
 42. H. Maki, M. Suzuki, Y. Ishiwata and K. Ishibashi, "Observation of the spin related even-odd effect in single-wall carbon nanotube quantum dots", 2003 International Conference on Solid State Devices and Materials, September 16-18, 2003, Tokyp, Japan
 43. M. Suzuki, T. Fuse, D. Tsuya, S. Moriyama, H. Maki, Y. Ishiwata, and K. Ishibashi, "Carbon nanotubes as a building block of quantum-dot based nanodevices", International Symposium on Functional Semiconductor NanoSystems (FSNS2003), Nov. 12-15, 2003, NTT Atsugi R&D Center, Tokyo
 44. S. Moriyama, K. Toratani, M. Suzuki, D. Tsuya, Y. Aoyagi, and K. Ishibashi, "Electrical transport in semiconducting single-wall carbon nanotubes", International Symposium on Functional Semiconductor NanoSystems (FSNS2003), Nov. 12-15, 2003, NTT Atsugi R&D Center, Tokyo
 45. D. Tsuya, M. Suzuki, S. Moriyama, Y. Aoyagi, and K. Ishibashi, "Observation of the discrete quantum levels in multi-wall carbon nanotubes", International Symposium on Functional Semiconductor NanoSystems (FSNS2003), Nov. 12-15, 2003, NTT Atsugi R&D Center, Tokyo
 46. T. Fuse, S. Moriyama, M. Suzuki, Y. Aoyagi and K. Ishibashi, "Observation of even-odd effect and four-fold degeneracy in single-wall carbon nanotube quantum dots", The 6th International Symposium on New Phenomena in Mesoscopic Structures, and The 4th International Symposium on Surfaces and Interfaces in Mesoscopic Devices, Dec. 1-5, 2003, Maui, Hawaii, USA
 47. H. Gotoh, H. Kamada, T. Saitoh, H. Ando, and J. Temmyo, "Exciton-Biexciton Coherent Coupling Effects on Exciton Absorption in Quantum Dots, Quantum Electronics and Laser Science Conference (CLEO/QELS2003), QThE2, Baltimore, June (2003).
 48. H. Kamada, H. Gotoh, H. Ando, T. Takagahara, and J. Temmyo, Proc. of SPIE 4992, 15 (2003).
 49. H. Kamada, NTT Tech. Rev. 1, 31 (2003).

50. H. Kamada, H. Gotoh, H. Ando, and T. Takagahara, "Quantum Mechanical Interference in Single Dot Exciton Driven by Number of Photons in Single Photon Regime", ICPS2002, Edinburgh (2002) H135.
51. H. Gotoh, H. Kamada, T. Saitoh, H. Ando, and J. Temmyo, "Importance of Biexcitonic Scattering in Exciton Dephasing in Quantum Dots", Quantum Electronics and Laser Science Conference (CLEO/QELS2002), QWD1, Long Beach, May (2002).
52. H. Kamada, H. Gotoh, H. Ando, and T. Takagahara, "Quantum gate operation of quantum dot exciton", International symposium on quantum computing, 5-3, Tokyo (2002).
53. H. Kamada, H. Ando, T. Takagahara, H. Gotoh, and J. Temmyo, "Exciton Rabi oscillation in a single self-organized InGaAs quantum dot", 7th International Conference of Optics and Excitons in Confined System (OECS7) We_02, Montpellier, September (2001).
54. H. Kamada, H. Ando, T. Takagahara, H. Gotoh and J. Temmyo, "Exciton Rabi Oscillation in Single Quantum Dot: Temporal Measurement of Oscillation and Corresponding Energy Level Splitting", The Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO Pacific Rim 2001), ThG4-3, Chiba, July (2001).
55. 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", in Proceedings of 25th International Conference of Physics of Semiconductors, Osaka (2000).
56. H. Gotoh, H. Kamada, H. Ando, and J. Temmyo, "Lateral Electric-field Effects on Excitonic Optical Properties of InGaAs Quantum Disks", Fifth Optoelectronics and Communication Conference (OECC 2000), 12P-62, Chiba, July (2000).
57. H. Gotoh, H. Ando, T. Sogawa, H. Kamada, T. Kagawa and H. Iwamura, "Effect of Electron-Hole Interaction on Electron Spin Relaxation in GaAs/AlGaAs Quantum Wells", The Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO/Pacific Rim'99), FX4, Seoul, September (1999).
58. P. Ye, S. Tarucha, K. Tsubaki "Magnetoresistance in a Ballistic Cavity with a Micromagnet on Top" 1998 March Meeting of the American Physical Society Los Angeles. March 1998.
59. K. Tsubaki "Quantum Confinement in a Magnetic Barrier Structure" Int. Symp. On Formation, Physics and Device Application of Quantum Dot Structures Sapporo May 1998.
60. K. Tsubaki "Longitudinal magnetoresistance in magnetic barrier systems" High Magnetic Fields in Semiconductor Physics Niemengen August 1998.
61. K. Tsubaki "Quantized magnetotransport through magnetic barrier systems" 25th Int. Symp. Compound Semiconductors Nara Oct. 1998.
62. K. Tsubaki "Study of electron transport properties using Dy Micro-magnet" Q-Computing Pal Alto 1999.
63. K. Tsubaki "Nonequilibrium Effects due to Magnetic Barriers in Two Dimensional Electron Gas" 11th Nonequilibrium Carrier Dynamics in Semiconductor Kyoto July 1999.
64. K. Tsubaki "Sub-Micron Vertical Magnetic Barrier" Device Int. Conf. on Solid State Devices and Materials Tokyo Sep. 1999.

65. N. Maeda, T. Saitoh, K. Tsubaki, T. Nishida, N. Kobayashi "Electron transport properties in AlGa_N/InGa_N/AlGa_N double-heterostructure field effect transistors" The 3rd Int. Conf. On Nitride Semiconductors Montpellier June 1999.
66. N. Maeda, T. Saitoh, K. Tsubaki, T. Nishida, N. Kobayashi "Two-Dimensional Electron Gas Transport Properties in AlGa_N/(In)Ga_N/AlGa_N Double-Heterostructure Field Effect Transistors" MRS 1999 Fall Meeting Boston Nov.29 1999.
67. N. Maeda, T. Saitoh, K. Tsubaki, T. Nishida, N. Kobayashi "Two-dimensional Electron Gas Transport Properties in AlGa_N/Ga_N Single- and Double-heterostructure Field Effect Transistor" Proc. 2000 E-MRS Spring Meeting Strasbourg May 30 2000 C-VIII.4 Invited.
68. K. Tsubaki "Extraordinary Hall effect in Dy/2DEG hybrid system" Symposium on Spin-Electronics Halle Jul.3 2000 WE-10.
69. K. Tsubaki "Aharonov-Bohm Oscillation in Rings with Permalloy" 2000 Int. Symp. On Formation, Physics and Device Application of Quantum Dot Structures Sapporo Sep. 2000 Tu1-17.
70. K. Tsubaki, N. Maeda, T. Saitoh, T. Nishida, N. Kobayashi "Electronic subbands of two-dimensional electron gas in AlGa_N/Ga_N heterostructure" 25th Int. Conf. On the Physics of Semiconductors Osaka Sep.18 2000 H248.
71. N. Maeda, T. Saitoh, K. Tsubaki, T. Nishida, N. Kobayashi "Electron transport properties in AlGa_N/Ga_N heterostructure field effect transistors at high electron densities" International Workshop on Nitride Semiconductors 2000 Nagoya Sep. 2000 Th_10.
72. N. Maeda, T. Saitoh, K. Tsubaki, T. Nishida, K. Kobayashi "High-Temperature Electron Transport Properties in AlGa_N/Ga_N Heterostructure Field Effect Transistor" MRS 2000 Fall Meeting Boston Nov. 2000 G11.14.
73. K. Tsubaki "Aharonov-Bohm Oscillation Induced by a Coil" Current Carrier Interactions in Mesoscopic Systems Atsugi Feb. 2001 TP-17.
74. N. Maeda, T. Saitoh, K. Tsubaki, T. Nishida, N. Kobayashi "AlGa_N/Ga_N Heterostructure Field Effect Transistor with High Al Compositions Fabricated with Selective Area Regrowth" Int. Conf. On Nitride Semiconductors Denver July 2001 B12.4.
75. K. Prabhakaran, K. V. M. Shafi, Y. Yamauchi, K. Tsubaki, A. Ulman, Y. Honma "Nanoparticle Induced Multi-functionalization of Silicon: A Plug and Play Approach" 8th Int. Conf. on the Formation of Semiconductor Interface Sapporo June 2001 TuP-3.
76. K. Tsubaki, N. Maeda, T. Saitoh, T. Nishida, N. Kobayashi "Gate voltage dependence of subband structure in a two-dimensional electron gas in AlGa_N/Ga_N heterostructures" Modulated Semiconductor Structure (MSS-10) Linz July 2001 TuP12.
77. N. Maeda, T. Saitoh, K. Tsubaki, T. Nishida, N. Kobayashi "Two-dimensional Electron Gas Transport Properties in AlGa_N/Ga_N HFETs with high Al compositions" 28th Int. Symp. Compound Semiconductors Tokyo Oct. 2001 MoP-38.
78. N. Maeda, T. Saitoh, K. Tsubaki, T. Nishida, N. Kobayashi "Back-doping design in AlGa_N/Ga_N heterostructure field-effect transistor for high-power applications" MRS 2001 Fall Meeting Boston Nov. 2001 I12.8.

79. K. Tsubaki, N. Maeda, T. Saitoh, N. Kobayashi "Hall resistance anomaly at low temperature in AlGaIn/GaN heterostructure" The mesoscopic superconductor and spintronics Atsugi Mar. 2002 P55.
80. K. Tsubaki, N. Maeda, T. Saitoh, N. Kobayashi "Hall Plateau near magnetic field in AlGaIn/GaN" The MAR02 Meeting of the American Physical Society Indianapolis Mar. 2002 Q19.3.
81. N. Maeda, K. Tsubaki, T. Saitoh, T. Tawara, N. Kobayashi "Two-dimensional electron transport properties in AlGaIn/GaN Heterostructure Field-effect transistors designed for high-power applications" The 8th International Conference on Electronic Materials Xi'an June 2002 Invited.
82. K. Tsubaki, N. Maeda, T. Saitoh, K. Kobayashi "Spin Splitting in modulation-doped AlGaIn/GaN two-dimensional electron gas" 26th Int. Conf. On the Physics of Semiconductors Edinburgh Jul. 2002.
83. N. Maeda, K. Tsubaki, T. Saitoh, T. Tawara, N. Kobayashi "Doping Design and Two-Dimensional Electron Gas Density in AlGaIn/GaN Heterostructure Field-Effect Transistors for High-Power Applications" Solid State Device and Meterial Nagoya Sep. 2002.
84. N. Maeda, K. Tsubaki, T. Tawara, N. Kobayashi "AlGaIn/GaN Heterostructure Field-effect trasistors with back-doping for high-power applications: High current density with high transconductance" MRS 2002 Fall Meeting Boston Dec. 2 2002.
85. K. Tsubaki, N. Maeda, T. Saitoh, N. Kobayashi "Hall Plateau near magnetic field in AlGaIn/GaN" The MAR03 Meeting of the American Physical Society Austin Mar. 2003 Q19.3.
86. K. Tsubaki, N. Maeda, T. Saitoh, N. Kobayashi "Hall resistance hysteresis in AlGaIn/GaN 2DEG" Modulated Semiconductor Structure (MSS-11) Nara July 14 2003 PA52.
87. Yasuhiko Ishikawa, Masaaki Kosugi, Minoru Kumezawa and Michiharu Tabe: "Capacitance-Voltage Study of Single-Crystalline Si Layer and Si Dots on Ultrathin Buried SiO₂", 1999 Silicon Nanoelectronics Workshop, Kyoto, June, 1999.
88. Yasuhiko Ishikawa, Masaaki Kosugi, Minoru Kumezawa, Toshiaki Tsuchiya, Michiharu Tabe: "C-V study of single-crystalline Si dots on ultrathin buried SiO₂ formed by nano-LOCOS process", International Joint Conference on Silicon Epitaxy and Heterostructures (IJC-Si), Zao, September, 1999.
89. Ratno Nuryadi, Yasuhiko Ishikawa and Michiharu Tabe: "Formation and ordering of self-assembled Si islands by UHV annealing of ultrathin bonded SOI", Third International Symposium on Control of Semiconductor Interfaces (ISCSI-III), Karuizawa, October, 1999.
90. Yasuhiko Ishikawa, Masaaki Kosugi, Toshiaki Tsuchiya and Michiharu Tabe: "Fowler-Nordheim Tunneling Induced by Enhanced Local Electric Field in Si Dot Structure", 2000 Silicon Nanoelectronics Workshop, Honolulu, June, 2000.
91. Michiharu Tabe, Minoru Kumezawa, Yasuhiko Ishikawa and Takeshi Mizuno: "Study on

- Si Quantum Well and Dot Structures Fabricated from Ultrathin SOI Wafers”, 10th International Conference on Solid Films and Surfaces (ICSFS-10), Princeton, July, 2000.
92. Ratno Nuryadi, Yasuhiko Ishikawa and Michiharu Tabe: “Thermally-Induced Structural Changes of Ultrathin Silicon-on-Insulator Structure”, 2000 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2000), Sendai, August, 2000.
 93. Yasuhiko Ishikawa, Masaaki Kosugi, Toshiaki Tsuchiya and Michiharu Tabe: “Enhancement of Local Electric Field at Si Dot/Thermally-Grown SiO₂ Interface”, 2000 International Symposium on Formation, Physics and Device Application of Quantum Dot Structures (QDS’2000), Sapporo, September, 2000.
 94. Michiharu Tabe, Ratno Nuryadi and Yasuhiko Ishikawa: “Morphological Instability in Ultrathin SOI Structure: Ordered Arrangement of Si Islands”, Workshop on Selective and Functional Film Deposition Technologies as Applied to ULSI Technology (29th International Union for Vacuum Science, Technique, and Applications (IUVSTA) Workshop), Mie, November, 2000.
 95. K. Sawada, M. Tabe, M. Iwatsuki, Y. Ishikawa, M. Ishida: “Field Electron Emission from Silicon Nano Pillars”, 2000 International Display Workshop (IDW2000), Kobe, November, 2000.
 96. Yasuhiko Ishikawa, Takuma Ishihara, Toshiaki Tsuchiya and Michiharu Tabe: “XPS and I-V Studies on Quantum Mechanical Effects in Ultrathin Si Layer of SOI Structure”, 2001 Silicon Nanoelectronics Workshop, Kyoto, June, 2001.
 97. Ratno-Nuryadi, M. Iwatsuki, K. Sawada, M. Ishida, Y. Ishikawa and M. Tabe: “Field Electron Emission from Si Nano-Protrusions”, 2001 Silicon Nanoelectronics Workshop, Kyoto, June, 2001.
 98. Yasuhiko Ishikawa, Ratno Nuryadi and Michiharu Tabe: "Effect of Patterning on Thermal Agglomeration of Ultrathin SOI Layer", 8th International Conference on the Formation of Semiconductor Interfaces (ICFSI-8), Sapporo, June, 2001.
 99. Yasuhiko Ishikawa, Takuma Ishihara, Masanori Iwasaki and Michiharu Tabe: “Resonant Tunneling Effect in Si/SiO₂ Double Barrier Structure”, 2001 International Conference on Solid State Device and Materials (SSDM2001), Tokyo, September, 2001.
 100. K. Sawada, M. Tabe, Y. Ishikawa and M. Ishida: “Field Electron Emission Device Using Silicon Nano-Protrusions”, 21st International Display Research Conference (Asia Display / IDW’01), Nagoya, October, 2001.
 101. M. Tabe, Y. Ishikawa and T. Mizuno: “Silicon Nanostructured Tunneling Devices”, The 3rd Takayanagi Kenjiro Memorial Symposium, Hamamatsu, December, 2001.
 102. M. Tabe, R. Nuryadi, Y. Homma, Y. Hirakawa and Y. Ishikawa: “Ordered Arrangement of Thermally-Agglomerated Si Islands on Buried SiO₂ Layer”, 11th International Conference on Solid Films and Surfaces (ICSFS-11), France, July, 2002.
 103. Masanori Iwasaki, Yasuhiko Ishikawa, Hiroya Ikeda and Michiharu Tabe: “Tunneling Mode Dependence of Current-Voltage Characteristics in Si/SiO₂ Resonant Tunneling Diodes”, 2002 International Conference on Solid State Device and Materials (SSDM2002),

Nagoya, September, 2002.

104. Hiroya Ikeda, Masanori Iwasaki, Yasuhiko Ishikawa and Michiharu Tabe: "Effect of Structural Imperfection on Resonant Tunneling in SiO₂/Si Diodes", 2002 International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2002), Tokyo, November, 2002.
105. Ratno Nuryadi, Y. Ishikawa, H. Ikeda and M. Tabe: "Single charge tunneling in two-dimensional coupled dot Si devices", 2003 Silicon Nanoelectronics Workshop, Kyoto, June, 2003.
106. Hiroya Ikead, Kazuaki Yamauchi, Yasuhiko Ishikawa and Michiharu Tabe: "Hot-Electron-Induced Charge Storage in Si/SiO₂ Double Barrier Diodes", 2003 Silicon Nanoelectronics Workshop, Kyoto, June, 2003.
107. Michiharu Tabe, Ratno Nuryadi, Hiroya Ikeda and Yasuhiko Ishikawa: "Single-Electron and Single-Hole Tunneling in Si Coupled-Dot FETs Fabricated from Ultrathin SOI", 2003 Korea-Japan Joint Workshop on Advanced Semiconductor Processes and Equipments (ASPE2003), Gangneung, Korea, August, 2003.
108. Ratno Nuryadi, Hiroya Ikeda, Yasuhiko Ishikawa and Michiharu Tabe: "Photon-induced effect on single-charge-tunneling in a Si multidot Schottky FET", 2003 International Conference on Solid State Device and Materials (SSDM2003), Tokyo, September, 2003.
109. Hiroya Ikeda, Yasuhiko Ishikawa, Yoshikazu Homma and Michiharu Tabe: "In-situ observation of formation process of self-assembled Si islands on buried SiO₂ and their crystallographic structures", 2003 International Microprocesses and Nanotechnology Conference, Tokyo, October, 2003.
110. Hiroya Ikeda, Ratno Nuryadi, Makoto Ito, Yasuhiko Ishikawa and Michiharu Tabe: "Circuit modeling of photo-induced effects on single-charge-tunneling system", Sixth International Conference on New Phenomena in Mesoscopic Systems / Forth International Conference on Surfaces and Interfaces of Mesoscopic Devices (NPMS6/SIMD4), Hawaii, December, 2003.
111. Yasuhiko Ishikawa, Yasuhiro Imai, Hiroya Ikeda and Michiharu Tabe: "Formation of one-dimensionally-aligned Si islands on buried oxide layer od silicon-on-insulator structure", Sixth International Conference on New Phenomena in Mesoscopic Systems / Forth International Conference on Surfaces and Interfaces of Mesoscopic Devices (NPMS6/SIMD4), Hawaii, December, 2003.
112. Patrick Le Maitre, Toshiaki Terayama and Kazuo Tsutsui, "Simulation of an SRAM cell using co-integration of fluoride-based resonant tunneling diodes and Si-MOSFET", 2001 Silicon Nanoelectronics Workshop, Kyoto, June 10-11, 2001
113. Hiroshi Kambayashi, Takuji Gotoh, Hiroshi Maeda and Kazuo Tsutsui, "Growth Characteristics of Ca_xCd_{1-x}F₂ Films on Si Substrates Using CaF₂ Buffer Layer"(01a-SB3-13), 13th Int. Conf. on Crystal Growth/11th Int. Conf. on Vapor Growth & Epitaxy(ICCG-13/ICVGE-11), Kyoto, July 30-Aug.4, 2001
114. Kazuo Tsutsui, Toshiaki Terayama, Hiroshi Sekine, Patrick Le Maitre, and Hiroshi Kambayashi, "Fluoride-Si Resonant Tunneling Diodes Co-integrated with Si- MOSFETs",

115. Kazuo Tsutsui, Hiroshi Kambayashi and Hiroshi Maeda, "Growth of $\text{Ca}_x\text{Cd}_{1-x}\text{F}_2$ alloy on Si substrates using very thin CaF_2 buffer layer"(S5), 43rd 2001 Electronic Materials Conference, Notre Dame, USA, June 27-29, 2001
116. Kazuo Tsutsui, Toshiaki Terayama, Hiroshi Sekine and Hiroshi Kambayashi, "Fluoride Resonant Tunneling Diodes Co-integrated with Si-MOSFETs"(D-10-4), 2001 Int. Nat. Conf. on Solid State Devices and Materials (SSDM2001), Tokyo, Sept.26-28, 2001
117. Kazuo Tsutsui, Hiroshi Sekine, Motoki Maeda and So Watanabe, "Fluoride Resonant Tunneling Diodes for Co-integration with Si Devices"(10-2), IEEE 2002 Silicon Nanoelectronics Workshop, Honolulu, Hawaii, USA, June 9-10, 2002
118. Motoki Maeda, Hiroshi Kambayashi, So Watanabe and Kazuo Tsutsui, "Fluoride Resonant Tunneling Diodes Using Cd-rich $\text{Ca}_x\text{Cd}_{1-x}\text{F}_2/\text{CaF}_2$ Heterostructures on Si Substrates"(P7-8), Int. Conf. on Solid State Devices and Materials, Nagoya, 2002
119. Motoki Maeda, So Watanabe and Kazuo Tsutsui, "Resonant Tunneling Devices on Si(111) Substrates Using Fluoride Alloy Heterostructures"(D-8-4), 33rd European Solid-State Device Research Conference (ESSDERC2003), Estoril, Portugal, September 16-18, 2003
120. Chavez, J. Temmyo, H. Ando, "Spectroscopy and imaging of InGaAs quantum dots using near-field optical probing", CLEO/QELS99, Baltimore, 1999.05.25, A No. QThF5.
121. A.Chavez, J. Temmyo, H. Ando, "Strain induced modulation of the confinement in self-organized quantum dots produced and detected by a near-field optical probe", MSS99, Fukuoka, 1999.07.16, No. Q03.
122. H. Kamada, T. Takagawara, H. Ando, J. Temmyo, T. Tamamura, "Quantum interference in photoluminescence excitation processes in a single semiconductor quantum dot", 6th Conf. in Optics of Excitons in Confined System (OECS-VI), Ascona, 1999.08.30., No. Th07.
123. A.Chavez Temmyo Ando "Pressure - induced electronic coupling of self-organized quantum dots by a near-field optical probe" QELS2000, SanFransisco, 2000. 5.8-
124. 後藤 鎌田 安藤 天明 「Lateral Electric-field effects on excitonic optical properties in InGaAs quantum disks" OECC, 幕張、2000. 7.11-7.14.
125. 鎌田 高河原 安藤 天明 玉村 "Optically induced energy splitting of exciton states in single self-organized InGaAs quantum dot" ICPS2000, 大阪、2000. 9.03-9 . 7.
126. A.Chavez Temmyo Ando "Near - field optical probing of multi-exciton emission from single InGaAs quantum dots" ICPS2000, 大阪、2000. 9.03-9 . 7
127. J. Temmyo H. Kamada H. Ando T. Tamamura" Semiconductor nanostructures via self-organization for a two-state sytem" ISPSA2000, Cheju Island, Korea, 2000. 11.1-3.
128. J. Temmyo, H. Kamada, E. Kuramochi, H. Ando, and T. Tamamura: Self-organized quantum disks for a two-state system, E-MRS 2001 Spring Meeting, Strasbourg , I-III.2(2001. 6. 5 - 8).
129. H. Kamada, H. Ando, T. Takagahara, H. Gotoh and J. Temmyo: Exciton Rabi oscillation in single quantum dot: Temporal measurement of oscillation and corresponding energy level

- splitting, CLEO Pacific Rim. Chiba, ThG4-3 (2001.7.15-19).
130. H. Kamada, H. Ando, T. Takagahara, H. Gotoh, and J. Temmyo: Exciton Rabi oscillation in a single self-organized InGaAs quantum dot, The Seventh International Conference of Optics and Excitons in Confined System (OECS 7), Montpellier, We-02 (2001.9.3-7).
 131. H. Kamada, H. Ando, T. Takagawara, H. Gotoh and J. Temmyo: Quantum mechanical evolution of exciton states in semiconductor quantum dots: Quantum gate operation of exciton qubits, 2002 International conference on solid state device and materials, F-9-4, Nagoya (2002.9).
 132. Y. Shimizu, T. Aoki, A. Nakamura, Y. Momose, A. Tanaka and J. Temmyo, Effects of hydrogen plasma radicals in remote plasma assisted MOCVD ZnO growth from diethylzinc and oxygen, 2nd International Workshop on ZnO, p.70, Dayton(2002.10).
 133. A. Nakamura, S. Shigemori, T. Aoki, J. Temmyo, ZnO growth using remote plasma MOCVD, 11th Int. Conf. on II-VI compounds, (Niagara Falls, USA), Tu5.4 (2003.9)
 134. Nakada K., Asai T., and Amemiya Y., "A novel analog cellular neural network for biologically-inspired walking robot," The 46th IEEE Midwest Symposium on Circuits and Systems, Cairo, Egypt (Dec. 27-30, 2003). (発表決定)
 135. Oya T., Kanazawa Y., Takahashi Y., Asai T., and Amemiya Y., "Single-electron device imitating reaction-diffusion systems," 6th International Conference on New Phenomena in Mesoscopic Systems and 4th 6th International Conference on Surfaces and Interfaces in Mesoscopic Devices, P2.27, Hawaii, USA (Nov. 30-Dec. 5, 2003).
 136. Takahashi Y., Oya T., Asai T., and Amemiya Y., "Single-electron circuit as a discrete dynamical system," 6th International Conference on New Phenomena in Mesoscopic Systems and 4th 6th International Conference on Surfaces and Interfaces in Mesoscopic Devices, P2.29, Hawaii, USA (Nov. 30-Dec. 5, 2003).
 137. Nakada K., Asai T., and Amemiya Y., "An analog CMOS circuit for locomotion control in quadruped walking robot," The 1st International Workshop on Ubiquitous Knowledge Network Environment, Sapporo, Japan (Nov. 25-27, 2003).
 138. Asai T. and Amemiya Y., "Nature-inspired analog computing on silicon," The 1st International Workshop on Ubiquitous Knowledge Network Environment, Sapporo, Japan (Nov. 25-27, 2003).
 139. Kanazawa Y., Asai T., and Amemiya Y., "A hardware depressing synapse and its application to contrast-invariant pattern recognition," The Society of Instrument and Control Engineers (SICE) Annual Conference 2003, TAI-11-2, Fukui, Japan (Aug. 4-6, 2003).
 140. Nakada K., Asai T., and Amemiya Y., "An analog neural oscillator circuit for locomotion control in quadruped walking robot," Proceedings of the 2003 International Joint Conference on Neural Networks, Vol. 2, pp. 983-988, Oregon, USA (Jul. 20-24, 2003).
 141. Oya T., Ueno T., Asai T., and Amemiya Y., "Reaction-diffusion systems using single-electron oscillators," Abstract of 2003 Silicon Nanoelectronics Workshop, pp. 82-83, Kyoto, Japan (June 8-9, 2003).

142. Takahashi Y., Oya T., Asai T., and Amemiya Y., "A single-electron oscillator with a multiple tunneling junction," Abstract of 2003 Silicon Nanoelectronics Workshop, pp. 98-99, Kyoto, Japan (June 8-9, 2003).
143. Kanazawa Y., Asai T., and Amemiya Y., "An analog CMOS circuit emulating the Belousov-Zhabotinsky reaction," Proceedings of the 11th International IEEE Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems, pp. 117-120, Scuol, Switzerland (May 18-21, 2003).
144. Asai T. and Amemiya Y., "Biomorphic analog circuits based on reaction-diffusion systems," Proceedings of the 33rd International Symposium on Multiple-Valued Logic, pp. 197-204, Tokyo, Japan (May 16-19, 2003). (invited talk)
145. Nakada K., Asai T., and Amemiya Y., "An analog CMOS circuit implementing CPG controller for quadruped walking robot," Proceedings of the 2nd International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines , WeP-II-2, Kyoto, Japan (Mar. 4-8, 2003).
146. Asai T. and Amemiya Y., "Reaction-Diffusion Systems on Excitable Semiconductor Medium," Collected Abstracts of 2003 RCIQE International Seminar on Quantum Nanoelectronics for Meme-Media-Based Information Technologies, pp. 64-71, Sapporo, Japan (Feb 12-14, 2003). (invited talk)
147. Asai T. and Amemiya Y., "Natural computation with analog reaction-diffusion circuits," Proceedings of 2002 International Symposium on New Paradigm VLSI Computing, pp. 117-120, Sendai, Japan (Dec. 12-14, 2002).
148. Daikoku T., Asai T., and Amemiya Y., "An analog CMOS circuit implementing Turing's reaction-diffusion model," Proceedings of the 2002 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, pp. 809-812, Xi'an, People's Republic of China (Oct. 7-11, 2002).
149. Kanazawa Y., Yamada T., Asai T., and Amemiya Y., "Wireless synaptic / neuro devices based on interactions of local electric-fields and CDMA communication technology," 2002 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, WA1P3, Hammamet, Tunisia (Oct. 6-9, 2002).
150. Yamada T., Honma Y., Asai T., and Amemiya Y., "Reaction-diffusion chip implementing analog cellular-automaton model," Extended Abstracts of the 2002 International Conference on Solid State Devices and Materials, pp. 368-369, Nagoya, Japan (Sep. 17-20, 2002).
151. Asai T., Hayashi H., and Amemiya Y., "Analog integrate-and-fire neurochips: neural competition in frequency and time domains," World Automation Congress 2002, IFMIP-037, Orlando, Florida, USA (Jun. 9-13, 2002).
152. Oya T., Asai T., Fukui Y., and Amemiya Y., "A majority-logic device using a single-electron box," Proceedings of the 2002 Silicon Nanoelectronics Workshop, pp. 79-80, Honolulu, USA (Jun. 9-10, 2002).
153. Yamada T., Asai T., and Amemiya Y., "An excitable membrane device using minority carrier transport in semiconductors," Proceedings of the 6th International Conference on

- Cognitive and Neural Systems, P2-37, Boston, USA (May 29 - Jun. 1, 2002).
154. Asai T. and Amemiya Y., "Frequency- and temporal-domain neural competition in analog integrate-and-fire neurochips," Proceedings of the 2002 International Joint Conference on Neural (22) Asai T., Nishimiya Y., and Amemiya Y., "A novel reaction-diffusion system based on minority-carrier transport in solid-state CMOS devices," Proceedings of the International Semiconductor Device Research Symposium, pp. 141-144, Washington DC, USA (Dec. 5-7, 2001).
 155. Nishimiya Y., Sunayama T., Asai T., and Amemiya Y., "Reaction-diffusion chip based on cellular-automaton processing," Proceedings of the International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, Vol. 2, pp. 593-596, Miyagi, Japan (Oct. 28-Nov. 1, 2001).
 156. Nishimiya Y., Asai T., and Amemiya Y., "Reaction-diffusion devices using minority-carrier transport in semiconductors," Extended Abstract of the 2001 International Conference on Solid State Devices and Materials, pp. 404-405, Tokyo, Japan (Sep. 25-28, 2001).
 157. Asai T., Kato H., and Amemiya Y., "Analog CMOS implementation of diffusive Lotka-Volterra neural networks," INNS-IEEE International Joint Conference on Neural Networks, P-90, Washington DC, USA (Jul. 15-19, 2001).
 158. Kato H., Asai T., and Amemiya Y., "Reaction-diffusion neuro chips: analog CMOS implementation of locally coupled Wilson-Cowan oscillators," Proceedings of the 5th International Conference on Cognitive and Neural Systems, P2-41, Boston, USA (May 30 - Jun. 2, 2001).
 159. Kasai S., Amemiya Y., and Hasegawa H., "GaAs Schottky wrap-gate binary-decision-diagram devices for realization of novel single-electron logic architecture," Technical Digest of the International Electron Device Meeting, pp. 585-588, San Francisco, USA (Dec. 11-13, 2000).
 160. Koutani M., Asai T., and Amemiya Y., "Analog-digital CMOS circuits for motion detection with direction-selective neural networks," Proceedings of the 7th International Conference on Neural Information Processing, Vol. 1, pp. 624-629, Taejon, Korea (Nov. 14-18, 2000).
 161. Akazawa M., T. Fujiwara, and Amemiya Y., "A three-dimensional cellular neural network circuit system using a MOS circuit," Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems, Vol. 2 (D8-3-4), pp. 1061-1066, Honolulu, USA (Nov. 5-8, 2000).
 162. Inokuchi T., Yamada T., and Amemiya Y., "Analog Computation Using Quantum-Flux Parametron Devices," Abstracts of the 13th International Symposium on Superconductivity, EDP-9, p. 233, Tokyo, Japan (Oct. 14-16, 2000).
 163. Kinoshita Y., Yamada T., Kasai S., Amemiya Y., and Hasegawa H., "Quantum-dot logic systems based on the shared binary-decision diagram," Collected Abstracts of the 2000 International Symposium on Formation Physics and Device Applications of Quantum Dot Structures, Tu2-7, p.124, Sapporo, Japan (Sep. 10-14, 2000).
 164. Sunayama T., Asai T., Amemiya Y., and Ikebe M., "A MOS vision chip based on the cellular-automaton processing," Extended Abstracts of the 2000 International Conference

- on Solid State Devices and Materials, pp. 364-365, Sendai, Japan (Aug. 30-31, 2000).
165. Asai T., Koutani M., and Amemiya Y., "An analog-digital hybrid CMOS circuit for two-dimensional motion detection with correlation neural networks," Proceedings of the IEEE-INNS-ENNS International Joint Conference on Neural Networks, Vol. 3, pp. 494-499, Como, Italy (Jul. 24-27, 2000).
 166. Asai T. and Amemiya Y., "An analog-digital hybrid LSI for Hough transformation," Proceedings of the 4th International Conference on Cognitive and Neural Systems, p. 32, Boston, USA (May 24-27, 2000)
 167. Asai T., Amemiya Y., and Koshiha M., "A photonic-crystal logic circuit based on the binary decision diagram," International Workshop on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures, T4-14, Sendai, Japan (Mar. 8-10, 2000).
 168. Yamada T. and Amemiya Y., "Multiple-valued logic devices using single-electron circuits," The International Workshop on Surfaces and Interfaces of Mesoscopic Devices, session 9 (no. 5), Kaanapali, USA (Dec. 6-10, 1999).
 169. Sunayama T., Ikebe M., and Amemiya Y., "A MOS cellular-automaton device for differential-of-Gaussian Filtering," Extended Abstracts of the 1999 International Conference on Solid State Devices and Materials, pp. 110-111, Tokyo, Japan (Sep. 20-24, 1999).
 170. Wong Z.S., Ikebe M., and Amemiya Y., "A MOS cellular-automaton device for picture processing," Proceedings of the 8th International Symposium on Integrated circuits, Devices & Systems, pp. 331-334, Singapore (Sep. 8-11, 1999).
 171. Yamada T., Ikebe M., and Amemiya Y., "A current-mode MOS circuit for cellular automaton devices," Proceedings of the International Symposium on Future of Intellectual Integrated Electronics, pp. 383-388, Sendai, Japan (Mar. 14-17, 1999).
 172. Ikebe M. and Amemiya Y., "A MOS cellular-automaton circuit for picture processing," Proceedings of the International Symposium on Future of Intellectual Integrated Electronics, pp.377-382. Sendai, Japan (Mar. 14-17, 1999).
 173. N. Tsukada, Rotational solitons in a ring-array of Bose-Einstein condensates and their modulation by phase imprinting pulses. Bose-Einstein Condensation, EuroConference on the New Trends in Physics of Quantum Gases, San Feliu de Guixols, Spain, 13-18 September 2003.
 174. N. Tsukada, Spatiotemporal dynamics of cold Bosonic atoms in linear- and circular-chain optical lattices. Australasian Conference on Optics, Laser and Spectroscopy 2001, 3-6, December 2001, University of Queensland, Brisbane, Queensland, Australia, Conference Proceedings M32 p. 114.
 175. N. Tsukada, Control of tunneling oscillations between two coupled Bose-Einstein condensates by 2 pulse excitations. International Quantum Electronics Conference 2000, Nice Acropolis, Nice, France, 10-15 September 2000, Conference Digest QtuE35 p.58.
 176. N. Tsukada, Coherent atomic tunneling and its laser pulse control in coupled Bose-Einstein condensates. European Science Foundation; Research Conference on

Bose-Einstein condensation - Bose-Einstein Condensation in Atomic Vapours - , San Feliu de Guixols, Spain, 11-16 September 1999.

国内会議招待講演

1. 石橋幸治 (招待): “連結型量子ドットの基礎物性”、日本物理学会第54回年会特別講演、1999年3月28日 - 31日
2. K.Ishibashi (招待): “Quantum Computing with Solid State Devices”、The 18th Electronic Materials Symposium, Kii-Shirahama, June 30-July 2 1999
3. 石橋幸治 (招待): “結合量子ドットを用いた量子相関機能”、日本学術振興会極限構造電子物性第151委員会第51回研究会、神戸市、1999年9月5, 6日
4. 石橋幸治 (招待): “半導体極微構造における量子状態制御 量子コンピューティングデバイスへの応用可能性”、第2回量子情報技術研究会 (QIT2)、大阪 1999年11月
5. 石橋幸治 (招待): “半導体極微構造における量子状態制御 量子コンピューティングデバイスへの応用可能性”、名古屋大学若手プロジェクトシンポジウム、名古屋、1999年12月2日
6. 石橋幸治 (招待): “固体デバイスによる量子状態制御-量子コンピューティングデバイスへの可能性-”、精密工学会超精密加工専門委員会第41回研究会「有機エレクトロニクス発展と今後の展望」大阪、平成12年7月25日
7. 石橋幸治・青柳克信 (招待): “半導体量子ドットの現状 -量子計算デバイスへ向けて-”、応用物理学会応用電子物性分科会特別研究会 東京 2001年1月18日
8. 石橋幸治、鈴木正樹、井田徹哉、青柳克信 (招待): “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”、電子情報通信学会特別ワークショップ「カーボンナノチューブの作製とデバイス応用」、東京 2001年3月12日
9. 石橋幸治 (招待): “カーボンナノチューブにおける量子ドットの電気伝導”、日本物理学会第56回年次大会シンポジウム、中央大学多摩キャンパス、2001年3月27日-30日
10. 石橋幸治、青柳克信 (招待): “カーボンナノチューブ結合量子ドットの形成と応用”、ナノインテリジェント材料シンポジウム、青学会館、東京、平成13年11月13日
11. 青柳克信・石橋幸治 (招待): “量子ドットを用いた量子相関素子製作の試み”、電子情報通信学会・ED/QIT 共催特別ワークショップ「量子情報処理--その実現にむけて」、機械振興会館 (東京)、平成14年3月15日
12. 石橋幸治 (招待): “カーボンナノチューブによる量子ドットデバイス”、日本学術振興会第151委員会第61回研究会「カーボンナノチューブとその応用」、アルカデア市ヶ谷 (東京)、平成14年7月18日
13. 石橋幸治 (招待): “カーボンナノチューブを用いた量子ドットの形成”、日本学術振興会第154委員会第37回研究会「次世代デバイス開発の最前線」、弘済会館 (東京)、平成14年7月22日
14. 石橋幸治 (招待): “ナノデバイスを用いた量子ビット・量子ゲート”、第31回応用物理学会スクールB「量子コンピュータ入門」、新潟大学、平成14年9月24日

日

15. 青柳克信、石橋幸治、塚越一仁(招待):“カーボンナノチューブのナノデバイスへの応用”、第63回応用物理学学会学術講演会、新潟大学、平成14年9月24日
27
16. 石橋幸治、鈴木正樹、津谷大樹、青柳克信(招待):“カーボンナノチューブを用いた量子ドットデバイス” 電子情報通信学会SDM/ED合同研究会「量子効果デバイスおよび関連技術」、北海道大学、平成15年2月10-11日
17. 石橋幸治(招待):“カーボンナノチューブの量子ドットデバイスへの応用”、電気学会「超微細集積デバイス調査専門委員会」研究会、東京、平成15年2月24日
18. 石橋幸治(招待):“カーボンナノチューブの量子ドットデバイスへの応用”、電気学会「カーボンナノ材料調査専門委員会」研究会、東京、平成15年6月2日
19. 石橋幸治(招待):“カーボンナノチューブ量子ドットを用いたスピン操作の可能性”、応用物理学学会スピンエレクトロニクス研究会「ナノと磁気」、東京工業大学(大岡山)、平成15年10月23日
20. 田部道晴、石川靖彦[招待講演]:「Siナノ構造の形成とデバイス応用」、第18回表面科学講演大会、東京、平成10年12月。
21. 田部道晴、石川靖彦[招待講演]:「選択酸化によるシリコン量子ドットの形成とデバイス応用」、東京大学物性研究所・短期研究会「表面新物質・表面ナノ構造・化合物表面の物理・化学・応用物理～自然な、あるいは人工的な表面特殊構造とその物性～」、東京、平成11年1月。
22. 田部道晴、池田浩也、石川靖彦[招待講演]:「シリコンナノ構造トンネルデバイス～共鳴トンネル、単電子トンネル、フィールドエミッション～」、山口大学電気電子工学科講演会、宇部、平成14年11月。
23. 田部道晴、池田浩也、石川靖彦[招待講演]:「量子SOI構造の作製とトンネルデバイスへの応用」、応用物理学学会中国四国支部研究会「SOIおよびTFTデバイス技術の現状と将来展望」、松江、平成14年11月。
24. 池田浩也、水野武志、石川靖彦、田部道晴[招待講演]:「SOI基板を用いたシリコン量子トンネルデバイス」、応用物理学学会シリコンテクノロジー分科会「シリコン新機能デバイス・シリコンナノテクノロジー研究委員会」合同研究会、東京、平成14年11月。
25. 田部道晴、池田浩也、石川靖彦[招待講演]:「シリコンナノ構造トンネルデバイス～共鳴トンネル、単電子トンネル、フィールドエミッション～」、奈良先端科学技術大学院大学特別講演、奈良、平成15年2月。

国内会議一般講演

1. 石橋幸治、青野友祐、青柳克信:“結合量子ドットを用いた量子ビット・量子ゲートの可能性”、第60回応用物理学学会学術講演会、神戸市、1999年9月1日
4日
2. 青野友祐、石橋幸治、青柳克信:“結合量子ドットにおけるラビ振動”、第60回応用物理学学会学術講演会、神戸市、1999年9月1日 4日

3. 石橋幸治、井田徹哉、塚越一仁、B.L.Alphenaar、青柳克信：“カーボンナノチューブにおける単一電子輸送（1）DC特性”、第47回応用物理学関係連合講演会、東京、2000年3月28-31日
4. 井田徹哉、石橋幸治、塚越一仁、B.L.Alphenaar、青柳克信：“カーボンナノチューブにおける単一電子輸送（2）電磁波応答”、第47回応用物理学関係連合講演会、東京、2000年3月28-31日
5. 石橋幸治、鈴木正樹、井田徹哉、塚越一仁、青柳克信：“単層カーボンナノチューブを用いた量子ドットの形成”、日本物理学会第55回年次大会、新潟、2000年9月22日-25日
6. 落合勇一、L.H.Lin、青木伸行、M.Elhassan、J.P.Bird、D.K.Ferry、石橋幸治、青柳克信：“量子ドットにおける分子的挙動”、日本物理学会第55回年次大会、新潟、2000年9月22日-25日
7. 鈴木正樹、石橋幸治、井田徹哉、塚越一仁、青柳克信：“カーボンナノチューブにおけるストカスティッククーロンブロックの観測”、第61回応用物理学学会学術講演会、北海道工業大学、2000年9月3日-7日
8. 塩川高雄、塚越一仁、井田徹哉、石橋幸治、青柳克信：“AFMマニピュレーションによるナノチューブのI-V特性の制御”、第61回応用物理学学会学術講演会、北海道工業大学、2000年9月3日-7日
9. 鈴木正樹、石橋幸治、井田徹哉、青柳克信：“カーボンナノチューブ量子ドットのためのトンネル障壁形成”、The 12th Symposium of the Materials Research Society of Japan, Kanagawa Science Park, December 7-8, 2000,
10. 虎谷健一郎、津屋大樹、鈴木正樹、井田徹哉、落合勇一、石橋幸治、青柳克信：“カーボンナノチューブを用いた2重結合量子ドット（1）作製プロセス”、第48回応用物理学関係連合講演会、明治大学、2001年3月28日-31日
11. 鈴木正樹、井田徹哉、落合勇一、石橋幸治、青柳克信：“カーボンナノチューブを用いた2重結合量子ドット（2）特性”、第48回応用物理学関係連合講演会、明治大学、2001年3月28日-31日
12. 塩川高雄、塚越一仁、渡辺英一郎、米屋伸英、石橋幸治、青柳克信：“AFMマニピュレーションによるナノチューブのI-V特性の制御（2）”、第48回応用物理学関係連合講演会、明治大学、2001年3月28日-31日
13. 塩川高雄、塚越一仁、石橋幸治、青柳克信：“AFMマニピュレーションによるナノチューブのI-V特性の制御（ ）”、第62回応用物理学学会学術講演会、愛知工業大学、2001年9月11日-2001年9月14日
14. 鈴木正樹、虎谷健一郎、津谷大樹、石橋幸治、青柳克信：“半導体単層カーボンナノチューブの電気伝導特性”、第49回応用物理学関係連合講演会、東海大学、神奈川、平成14年3月27日-30日
15. 石橋幸治、鈴木正樹、井田徹哉、青柳克信、“単層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”、第49回応用物理学関係連合講演会、東海大学、神奈川、平成14年3月27日-30日
16. 落合勇一、J. Oswald、岩瀬義和、大西大介、青木伸之、石橋幸治、青柳克信、J. P. Bird、

- D. K. Ferry, “量子ドットアレイにおける高磁場磁気輸送現象の数値シミュレーション”, 日本物理学会第57回年次大会、立命館大学、滋賀、平成14年3月24日-27日
17. 石橋幸治, “結合量子ドットの電磁波応答”, 理研シンポジウム、第4回コヒーレント科学-凝縮系のコヒーレンス-, 和光、埼玉 平成14年4月25日
 18. M. Suzuki, K. Ishibashi and Y. Aoyagi: “On the fabrication process of the quantum dots in carbon nanotubes”, 21st Electronic Materials Symposium, Izu-Nagaoka, June19-21, 2002
 19. 渡部道生, 石橋幸治, 青柳克信: “超伝導単電子トランジスタにおける e 周期性と $2e$ 周期性”, 日本物理学会 2002 年秋季大会、平成14年9月6日-9日、中部大学、愛知
 20. 河野圭太郎, 鈴木正樹, 津谷大樹, 石橋幸治, 青柳克信: “トンネル障壁制御によるカーボンナノチューブ量子ドット形成(1) 金属酸化膜の利用”, 第63回応用物理学会学術講演会、新潟大学、平成14年9月24日-27日
 21. 鈴木正樹, 津谷大樹, 石橋幸治, 青柳克信: “トンネル障壁制御によるカーボンナノチューブ量子ドットの形成(2) Ar イオン照射”, 第63回応用物理学会学術講演会、新潟大学、平成14年9月24日-27日
 22. 津谷大樹, 鈴木正樹, 落合勇一, 石橋幸治, 青柳克信: “カーボンナノチューブ量子ドットを用いた相補型単電子インバータの作製と評価”, 第63回応用物理学会学術講演会、新潟大学、平成14年9月24日-27日
 23. 牛頭信一郎, 渡邊考太郎, 石橋幸治, 青柳克信: “GaAs(111)A 基板上 InAlAs/InAs 量子井戸の輸送特性”, 第63回応用物理学会学術講演会、新潟大学、平成14年9月24日-27日
 24. 渡邊考太郎, 牛頭信一郎, 井田徹哉, 落合勇一, 山田省二, 石橋幸治, 青柳克信: “Free-standing GaAs/AlGaAs2 次元電子ガス構造の作製と電気伝導特性評価”, 第63回応用物理学会学術講演会、新潟大学、平成14年9月24日-27日
 25. K. Ishibashi “Carbon nanotubes for quantum-dot nanodevices”, 第1回理研ナノサイエンスシンポジウム、和光、平成15年5月26日, 27日
 26. 石渡洋一, 牧英之, 鈴木正樹, 津谷大樹, 石橋幸治: “単層カーボンナノチューブにおける磁気抵抗効果”, 第64回応用物理学会学術講演会、福岡大学、平成15年8月30日-9月2日
 27. 牧英之, 石渡洋一, 鈴木正樹, 石橋幸治: “単層カーボンナノチューブ量子ドットにおける電子数の偶奇性効果”, 第64回応用物理学会学術講演会、福岡大学、平成15年8月30日-9月2日
 28. 布施智子, 森山悟士, 鈴木正樹, 青柳克信, 石橋幸治: “過電流ヒーティング法を用いた単層カーボンナノチューブ量子ドットにおける伝導特性の制御”, 第64回応用物理学会学術講演会、福岡大学、平成15年8月30日-9月2日
 29. 森山悟士, 布施智子, 鈴木正樹, 青柳克信, 石橋幸治: “単層カーボンナノチューブ量子ドットのマイクロ波応答”, 第64回応用物理学会学術講演会、福岡大学、平成15年8月30日-9月2日
 30. 石橋幸治: “カーボンナノチューブ量子ドットを用いた量子相関制御”, 科学技術

振興機構・戦略的創造研究「電子・光子等の機能制御」シンポジウム、品川、平成
15年10月30 - 31日

31. 布施智子、森山悟士、鈴木正樹、石橋幸治、青柳克信：“Two and four-fold degeneracy in carbon nanotube quantum dots”、科学技術振興機構・戦略的創造研究「電子・光子等の機能制御」シンポジウム、品川、平成15年10月30 - 31日
32. 椿 光太郎 「サブミクロン縦型二重磁気障壁素子」 第60回応用物理学学術講演会 神戸 9/1-9/4 1999
33. 前田 就彦、斉藤 正、椿 光太郎、西田 敏夫、小林 直樹 「AlGaIn/GaN/AlGaIn ダブルヘテロ構造 FET の静特性」 第60回応用物理学学術講演会 神戸 9/1-9/4 1999
34. 前田 就彦、斉藤 正、椿 光太郎、西田 敏夫、小林 直樹 「GaN 系ヘテロ構造の電気伝導度及び FET 静特性」 信学会電子デバイス電子研究会 京都 10/21-10/22 1999
35. 前田 就彦、斉藤 正、椿 光太郎、西田 敏夫、小林 直樹 「AlGaIn/(In)GaN/AlGaIn ダブルヘテロ構造 FET の電子輸送及びデバイス特性」 応用電子物性分科会研究会 東京 11/24-11/24 1999
36. 前田 就彦、斉藤 正、椿 光太郎、西田 敏夫、小林 直樹 「AlGaIn/GaN シングル及びダブルヘテロ構造電子輸送および FET 特性」 SiC 及び関連ワイドギャップ半導体研究会 つくば 12/16-12/17 1999
37. 前田 就彦、斉藤 正、椿 光太郎、西田 敏夫、小林 直樹 「GaN 系ヘテロ構造高温デバイス」 第10回高温エレクトロニクス研究会 相模原 3/16-3/16 2000
38. 椿 光太郎 「2DEG 系における Dy 磁気障壁に起因する横磁気抵抗」 第47回応用物理関係連合講演会 東京 3/28-3/31 2000
39. 前田 就彦、斉藤 正、椿 光太郎、西田 敏夫、小林 直樹 「AlGaIn/GaN/AlGaIn シングル及びダブルヘテロ構造 FET における2次元電子移動度の電子濃度依存性」 第47回応用物理関係連合講演会 東京 3/28-3/31 2000
40. 前田 就彦、斉藤 正、椿 光太郎、西田 敏夫、小林 直樹 「AlGaIn/GaN/AlGaIn 系 HFET の結晶工学とデバイス物理」 応用物理学会結晶工学分科研究会 東京 4/27 2000
41. 前田 就彦、斉藤 正、椿 光太郎、西田 敏夫、小林 直樹 「AlGaIn/GaN/AlGaIn シングルおよびダブルヘテロ構造 FET における電子輸送特性」 第19回電子材料シンポジウム運営委員会 伊豆長岡 6/28-6/30 2000 S6 Invited
42. 前田 就彦、斉藤 正、椿 光太郎、西田 敏夫、小林 直樹 「AlGaIn/GaN/AlGaIn シングルおよびダブルヘテロ構造 FET における電子輸送特性」 第61回応用物理学学術講演会 札幌 9/3-9/7 2000 7a-H-7
43. 椿 光太郎 「強磁性体 Permalloy を中央に持つリングの A-B 効果」 第61回応用物理学学術講演会 札幌 9/3-9/7 2000 4p-ZN-13
44. 前田 就彦、斉藤 正、椿 光太郎、西田 敏夫、小林 直樹 「AlGaIn/GaN 系ヘテロ構造の電気伝導特性と FET 特性」 電気通信学会 全国大会 名古屋 9/30-10/3 2000 SC-7-10
45. 前田 就彦、斉藤 正、椿 光太郎、西田 敏夫、小林 直樹 「AlGaIn/GaN ヘテロ構造 FET の高温電子輸送特性」 第48回応用物理関係連合講演会 東京 3/28-3/31

2001 31a-K-8

46. 前田 就彦、斉藤 正、椿 光太郎、西田 敏夫、小林 直樹 「選択再成長を用いた AlGaIn/GaN HFET の作製」 第 4 8 回応用物理関係連合講演会 東京 3/28-3/31 2001 29a-YC-6
47. 前田 就彦、斉藤 正、椿 光太郎、西田 敏夫、小林 直樹 「AlGaIn/GaN ヘテロ構造 2 次元電子ガスの電気伝導特性」 第 4 8 回応用物理関係連合講演会 東京 3/28-3/31 2001 28p-L-5
48. 椿 光太郎前田 就彦、斉藤 正、西田 敏夫、小林 直樹 「AlGaIn/GaN/AlGaIn 系におけるサブバンド」 第 4 8 回応用物理関係連合講演会 東京 3/28-3/31 2001 30p-M-4
49. 椿 光太郎 「磁気障壁 2DEG 系におけるホール抵抗」 第 4 8 回応用物理関係連合講演会 東京 3/28-3/31 2001 31p-YE-8
50. 前田 就彦、椿 光太郎、斉藤 正、小林 直樹 「高 Al 組成 AlGaIn/GaN ヘテロ構造 FET の 2 次元電子輸送特性」 第 6 2 回応用物理学学術講演会 名古屋 9/11-9/14 2001 12a-Q-8
51. 椿 光太郎 「磁気障壁 2DEG 系におけるホール抵抗」 第 6 2 回応用物理学学術講演会 名古屋 9/11-9/14 2001 14a-YB-14
52. 椿 光太郎、前田 就彦、斉藤 正、小林 直樹 「AlGaIn/GaN 2DEG 系におけるスピントリニクス」 第 4 9 回応用物理学学術関係連合講演会 平塚 3/27-3/30 2002 27p-YH-10
53. 前田 就彦、椿 光太郎、斉藤 正、小林 直樹 「バックドローピング設計による高電子濃度 AlGaIn/GaN ヘテロ構造 FET」 第 4 9 回応用物理学関係連合講演会 平塚 3/27-3/30 2002 29a-ZM-21
54. 椿 光太郎、前田 就彦、斉藤 正、小林 直樹 「AlGaIn/GaN ヘテロ構造におけるホール抵抗プラト化」 第 6 3 回応用物理学学術講演会 新潟 9/24-9/27 2002
55. 前田 就彦、椿 光太郎、斉藤 正、小林 直樹 「バックドローピング設計による高電子濃度 AlGaIn/GaN ヘテロ構造 FET」 第 6 3 回応用物理学学術講演会 新潟 9/24-9/27 2002
56. 前田就彦、椿光太郎、斉藤正、小林直樹 「AlGaIn/GaN ヘテロ構造 FET の高低温高周波特性」 第 6 3 回応用物理学学術講演会 新潟 9/24-9/27 2002
57. 椿光太郎、前田就彦、斉藤正、小林直樹 「AlGaIn/GaN 2DEG 系におけるホール抵抗のヒステリシス」 第 5 0 回応用物理学関係連合講演会 横浜 3/27-3/30 2003 29p-ZE-18
58. 前田就彦、俵毅彦、斉藤正、椿光太郎、小林直樹 「Al₂O₃/Si₃N₄ 薄層絶縁ゲートをもつチャンネルドープ AlGaIn/GaN ヘテロ構造 FET」 第 5 0 回応用物理学関係連合講演会 横浜 3/27-3/30 2003 30p-ZF-3
59. 前田就彦、椿光太郎、俵毅彦、斉藤正、小林直樹 「高濃度 2 次元電子を有する薄層チャンネル AlGaIn/GaN ダブルヘテロ構造」 第 5 0 回応用物理学関係連合講演会 横浜 3/27-3/30 2003 28a-V-9
60. 王成新、前田就彦、椿光太郎、小林直樹 「MOVPE 成長 n-InGaIn 薄膜の電気伝導特性」 第 5 0 回応用物理学関係連合講演会 横浜 3/27-3/30 2003 28a-V-4

61. 椿光太郎、前田就彦、斉藤正、小林直樹 「AlGaIn/GaN 2DEG の低温磁化率測定」 第 6 4 回応用物理学学術講演会 福岡 8/30-9/2 2003 30p-ZF-3
62. 前田就彦、椿光太郎、俵毅彦、斉藤正、小林直樹 「Al₂O₃/Si₃N₄ 薄層絶縁ゲート・チャンネルドープ AlGaIn/GaN ヘテロ構造 FET の大電流動作」 第 6 4 回応用物理学学術講演会 福岡 8/30-9/2 2003 1a-P7-16
63. 川崎隆弘、ラトノ・ヌルヤディ、石川靖彦、田部道晴 : 「熱凝集させた SOI 表面の KFM による電位測定」 第 46 回応用物理学関係連合講演会、野田、平成 11 年 3 月 .
64. ラトノ・ヌルヤディ、石川靖彦、田部道晴 : 「貼り合わせ SOI における極薄 Si 層の熱凝集現象」 第 46 回応用物理学関係連合講演会、野田、平成 11 年 3 月 .
65. 久米澤稔、石川靖彦、田部道晴 : 「極薄 SOI 基板表面の XPS 測定」 第 46 回応用物理学関係連合講演会、野田、平成 11 年 3 月 .
66. 小杉真章、牧田繁典、久米澤稔、石川靖彦、田部道晴 : 「極薄埋め込み SiO₂ 上高密度 Si ドットの C-V 特性」 第 46 回応用物理学関係連合講演会、野田、平成 11 年 3 月 .
67. 石川靖彦、牧田繁典、田部道晴 : 「極薄埋め込み SiO₂ 層をもつ SOI 構造の C-V 特性」 第 46 回応用物理学関係連合講演会、野田、平成 11 年 3 月 .
68. 石川靖彦、牧田繁典、小杉真章、水野武志、田部道晴 : 「トンネル埋め込み酸化膜をもつ極薄 SOI 構造の C-V 特性」 電子情報通信学会電子デバイス研究会、宇部、平成 11 年 4 月 .
69. 川崎隆弘、久米澤稔、石川靖彦、田部道晴 : 「シリコンドットを有する SOI 表面の KFM による電位測定」 第 60 回応用物理学学会学術講演会、神戸、平成 11 年 9 月 .
70. 小杉真章、久米澤稔、石川靖彦、田部道晴 : 「ナノメータラフネスを形成した Si 表面の MOSC-V 特性」 第 60 回応用物理学学会学術講演会、神戸、平成 11 年 9 月 .
71. ラトノ・ヌルヤディ、石川靖彦、田部道晴 : 「SOI における Si アイランドの自己形成とその配列化」 第 60 回応用物理学学会学術講演会、神戸、平成 11 年 9 月 .
72. 石川靖彦、水野武志、田部道晴 : 「トンネル埋め込み SiO₂ 層をもつ極薄 SOI 構造の C-V 測定による評価」 第 60 回応用物理学学会学術講演会、神戸、平成 11 年 9 月 .
73. 田部道晴、石川靖彦、久米澤稔、ラトノ・ヌルヤディ [シンポジウム講演] : 「SOI 基板を利用した Si/SiO₂ ナノ界面の形成」 第 60 回応用物理学学会学術講演会、神戸、平成 11 年 9 月 .
74. 石川靖彦、小杉真章、久米澤稔、ラトノヌルヤディ、田部道晴 : 「高密度 Si 量子ドットの形成と電気的特性評価」 平成 11 年表面科学会中部支部研究会、浜松、平成 11 年 12 月 .
75. 小杉真章、岩月誠、石川靖彦、田部道晴 : 「成長モード選択酸化を利用した Si ドット形成」 第 47 回応用物理学関係連合講演会、東京、平成 12 年 3 月 .
76. ラトノ・ヌルヤディ、久米澤稔、水野武志、石川靖彦、田部道晴 : 「極薄 SOI 層の熱凝集初期過程」 第 47 回応用物理学関係連合講演会、東京、平成 12 年 3 月 .
77. 石川靖彦、小杉真章、田部道晴 : 「ナノスケールのラフネスをもつ Si/SiO₂ 界面の C-V 測定による評価」 第 47 回応用物理学関係連合講演会、東京、平成 12 年 3 月 .
78. 石川靖彦 : 「Si 量子ドット構造への単電子トンネル注入の光応答特性」 平成 11 年

- 度第7回新世代研究所研究助成成果報告会、東京、平成12年7月。
79. 川崎隆弘、水野武志、石川靖彦、田部道晴：「KFMによる極薄SOI層の表面電位測定」、第61回応用物理学会学術講演会、札幌、平成12年9月。
 80. Ratno Nuryadi、石川靖彦、田部道晴：「極薄SOI基板における熱誘起構造変化とその機構」、第61回応用物理学会学術講演会、札幌、平成12年9月。
 81. 澤田和明、岩月誠、田部道晴、石川靖彦、石田誠：「ナノスケールのシリコンフィールドエミッタの制作と電子放出特性」、第61回応用物理学会学術講演会、札幌、平成12年9月。
 82. 岩月誠、澤田和明、石川靖彦、石田誠、田部道晴：「Siナノ突起の電界集中効果と電子放出」、第61回応用物理学会学術講演会、札幌、平成12年9月。
 83. 石川靖彦、久米澤稔、田部道晴：「SOIを用いて形成したSi量子井戸およびSi量子ドット構造のXPS測定」、第61回応用物理学会学術講演会、札幌、平成12年9月。
 84. 田部道晴、ラトノ・ヌルヤディ、石川靖彦：「貼り合わせSOI構造における極薄Si層の熱凝集現象」、応用物理学会シリコンテクノロジー分科会第5回ミニ学術講演会、東京、平成12年10月。
 85. 石川靖彦、田部道晴：「Siナノ構造における電界集中効果」、第2回高柳健次郎記念シンポジウム、浜松、平成12年12月。
 86. 田部道晴、澤田和明、石川靖彦、石田誠：「シリコンナノ構造からの電子放出」、平成12年表面科学会中部支部研究会、浜松、平成12年12月。
 87. 澤田和明、田部道晴、石川靖彦、岩月誠、石田誠：「シリコンナノ突起からの電界電子放出」、電子情報通信学会電子デバイス研究会、仙台、平成12年12月。
 88. 石川靖彦、田部道晴、澤田和明、石田誠：「Siナノ構造における電界集中とトンネル電流」、電子情報通信学会電子デバイス研究会、シリコンデバイス・材料研究会合同研究会、札幌、平成13年2月。
 89. 田部道晴、石川靖彦：「シリコンのナノスケール選択酸化とデバイス応用」、応用物理学会シリコンテクノロジー分科会第27回研究会、東京、平成13年3月。
 90. 岩月誠、杉木幹生、澤田和明、石田誠、石川靖彦、田部道晴：「Siナノ突起からの電子放出とその形状効果」、第48回応用物理学関係連合講演会、東京、平成13年3月。
 91. ラトノ・ヌルヤディ、石川靖彦、田部道晴：「SOI基板における極薄Si層の熱凝集現象とその機構」、第48回応用物理学関係連合講演会、東京、平成13年3月。
 92. 川崎隆弘、上村崇史、水野武志、石川靖彦、田部道晴：「KFMによるSOI-MOS構造の表面電位測定」、第48回応用物理学関係連合講演会、東京、平成13年3月。
 93. 石原大阿、岩崎正憲、土屋敏章、石川靖彦、田部道晴：「シリコン量子井戸構造の作製と評価」、電子情報通信学会電子デバイス研究会、シリコンデバイス・材料研究会、電子部品・材料研究会合同研究会、浜松、平成13年5月。
 94. 石原大阿、岩崎正憲、石川靖彦、田部道晴：「単結晶Si/SiO₂二重障壁構造の作製とI-V特性」、第62回応用物理学会学術講演会、豊田、平成13年9月。
 95. 上村崇史、溝口昌史、水野武志、石川靖彦、田部道晴：「KFMによるSOI上pn接

- 合の表面電位測定」, 第 62 回応用物理学学会学術講演会、豊田、平成 13 年 9 月 .
96. 杉木幹生、澤田和明、石田誠、石川靖彦、田部道晴 : 「熱酸化膜で覆われた Si ナノ突起からの電子放出」, 第 62 回応用物理学学会学術講演会、豊田、平成 13 年 9 月 .
97. 伊藤雄一、杉木幹生、横井清人、澤田和明、石田誠、石川靖彦、田部道晴 : 「複合構造をもつ Si ナノ突起からの電子放出」, 第 62 回応用物理学学会学術講演会、豊田、平成 13 年 9 月 .
98. 上村崇史、溝口昌史、ラトノ・ヌルヤディ、水野武志、石川靖彦、田部道晴 : 「極薄 SOI を用いた連結量子ドットの作製と I-V 測定」, 第 49 回応用物理学関係連合講演会、東京、平成 14 年 3 月 .
99. ラトノヌルヤディ、平川祐介、本間芳和、石川靖彦、田部道晴 : 「薄い SOI 層熱凝集領域中心部の観察」, 第 49 回応用物理学関係連合講演会、東京、平成 14 年 3 月 .
100. 岩崎正憲、山内一晃、石川靖彦、池田浩也、田部道晴 : 「Si/SiO₂ 二重障壁構造における電子輸送過程の解明」, 第 63 回応用物理学学会学術講演会、新潟、平成 14 年 9 月 .
101. 池田浩也、ラトノ・ヌルヤディ、本間芳和、石川靖彦、田部道晴 : 「極薄 SOI 層熱凝集過程のその場観察」, 第 63 回応用物理学学会学術講演会、新潟、平成 14 年 9 月 .
102. Masanori Iwasaki, Yasuhiko Ishikawa, Takeshi Mizuno, Hiroya Ikeda and Michiharu Tabe: "Electrical Characteristics of Si/SiO₂ Resonant Tunneling Diodes", 7th Joint International Conference on Advanced Science and Technology (JICAST2002), Hamamatsu, October, 2002.
103. Ratno Nuryadi, Yasuhiko Ishikawa, Takeshi Mizuno, Hiroya Ikeda and Michiharu Tabe: "Fabrication of a Si Single-Electron Transistor with Coupled Dots", 7th Joint International Conference on Advanced Science and Technology, Hamamatsu, October, 2002.
104. 田部道晴、岩崎正憲、池田浩也、石川靖彦 : 「FN tunneling-induced decoherence in Si/SiO₂ resonant tunneling」, CREST 量子相関機能研究会、伊豆熱川、平成 14 年 10 月 .
105. M. Tabe, H. Ikeda, Y. Ishikawa: "Si/SiO₂ Resonant Tunneling Diodes and Hot Electron Scattering Effect", The Third CREST Symposium on Functional Evolution of Materials and Devices based on Electron / Photon Related Phenomena, October, 2002.
106. 今井泰宏、石川靖彦、池田浩也、田部道晴 : 「細線状に加工した極薄 SOI 層の熱凝集現象」, 第 50 回応用物理学関係連合講演会、横浜、平成 15 年 3 月 .
107. ラトノ・ヌルヤディ、水野武志、石川靖彦、池田浩也、田部道晴 : 「薄い SOI 層を用いた Si 連結ドットデバイスの作製と電気的特性」, 第 50 回応用物理学関係連合講演会、横浜、平成 15 年 3 月 .
108. 杉木幹生、澤田和明、石川靖彦、池田浩也、石田誠、田部道晴 : 「SOI 型シリコンナノフィールドエミッタの電子放出特性」, 第 50 回応用物理学関係連合講演会、横浜、平成 15 年 3 月 .
109. 石川靖彦、今井泰宏、ラトノ・ヌルヤディ、池田浩也、田部道晴 : 「極薄 SOI 構造の熱凝集現象とパターンニングの効果」, 電子情報通信学会 ED/CPM/SDM 合同研究会、豊橋、平成 15 年 5 月 .

110. 石川靖彦、今井泰宏、平川祐介、池田浩也、田部道晴：「パターン加工による熱凝集 Si アイランドの配列制御」、第 64 回応用物理学会学術講演会、福岡、平成 15 年 8 月。
111. ラトノ・ヌルヤディ、池田浩也、石川靖彦、田部道晴：「2 次元 Si 連結ドットデバイスにおける単電子・単正孔特性」、第 64 回応用物理学会学術講演会、福岡、平成 15 年 9 月。
112. 池田浩也、長田浩平、山内一晃、石川靖彦、田部道晴：「Si/SiO₂ 二重障壁ダイオードにおける電荷蓄積現象」、第 64 回応用物理学会学術講演会、福岡、平成 15 年 9 月。
113. 後藤卓司、神林宏、筒井一生、「Si 基板上への CaCdF₂ 混晶層のエピタキシャル成長」、第 47 回応用物理学関係連合講演会、30p-ZK-6, 2000 年 3 月（東京・青山学院大）
114. 基板方位オフ角依存性」、第 47 回応用物理学関係連合講演会、30p-ZK-5, 2000 年 3 月（東京・青山学院大）
115. 神林宏、寺山俊明、筒井一生、「Si 基板上への CaCdF₂ 混晶のエピタキシャル成長 (2) -CaF₂ パッファ層の効果-」、第 61 回応用物理学会学術講演会、4a-R-2, 2000 年 9 月（札幌・北海道工業大学）
116. 寺山俊明、熊谷史裕、筒井一生、「高濃度イオン注入層上 CdF₂/CaF₂ 共鳴トンネルダイオードの作製」、第 61 回応用物理学会学術講演会、4a-R-1, 2000 年 9 月（札幌・北海道工業大学）
117. 関根広志、寺山俊明、筒井一生、「CdF₂/CaF₂ 共鳴トンネルダイオードと Si-MOSFET の混載回路の製作」、第 62 回応用物理学会学術講演会、12p-ZD-10, 2001 年 9 月（愛知工業大学）
118. 神林宏、前田寛、筒井一生、「Si 基板上のエピタキシャル CaCdF₂ 混晶層の電気的特性」、第 62 回応用物理学会学術講演会、14a-YB-7, 2001 年 9 月（愛知工業大学）
119. 寺山俊明、関根広志、筒井一生、「弗化物共鳴トンネルダイオードと Si-MOSFET の混載集積」、電子情報通信学会技術研究報告、(2002, January)
120. 前田元輝、神林宏、筒井一生、「Cd-rich Ca_xCd_{1-x}F₂ 混晶の Si(111)基板上へのエピタキシャル成長」、第 49 回応用物理学関係連合講演会、27p-YH-2, 2002 年 3 月（東海大学）
121. 渡邊聡、神林宏、関根広志、筒井一生、「Si 基板上の活性層埋め込み型弗化物共鳴トンネルダイオードの製作」、第 49 回応用物理学関係連合講演会、28a-K-1, 2002 年 3 月（東海大学）
122. 渡邊聡、前田元輝、筒井一生、「弗化物ヘテロ共鳴トンネルダイオードにおけるバリアハイト制御」、第 63 回応用物理学会学術講演会、25p-P-12, 2002 年 9 月（新潟大学）
123. 前田元輝、渡邊聡、筒井一生、「Cd-rich Ca_xCd_{1-x}F₂ 混晶超薄膜の Si(111)基板上へのエピタキシャル成長特性」、第 63 回応用物理学会学術講演会、25p-P-13, 2002 年 9 月（新潟大学）
124. 渡邊聡、前田元輝、筒井一生、「弗化物混晶系ヘテロ構造を用いたシリコン基板上への共鳴トンネルダイオード」、電子情報通信学会電子デバイス研究会、札幌、2003

- 年 2 月、ED2002-300/SDM2002-263、(2003)
125. 渡邊聡、前田元輝、筒井一生、「弗化物共鳴トンネルダイオードの特性におけるバイアス履歴依存現象の解明」、第 50 回応用物理関係連合講演会、29a-ZE-2、2003 年 3 月 (神奈川大学)
 126. 前田元輝、渡邊聡、筒井一生、「Cd-rich $\text{Ca}_x\text{Cd}_{1-x}\text{F}_2$ 混晶超薄膜の Si(111)基板上における成長安定化機構」、第 50 回応用物理関係連合講演会、30a-ZE-3、2003 年 3 月 (神奈川大学)
 127. 前田元輝、渡邊聡、筒井一生、「Cd-rich $\text{Ca}_x\text{Cd}_{1-x}\text{F}_2$ 混晶を量子井戸層に用いた共鳴トンネルダイオードの電気特性評価」、第 64 回応用物理学学会学術連合講演会、30p-ZF-10、2003 年 8-9 月 (福岡大学)
 128. 鎌田 安藤 天明 玉村、「InGaAs 量子ディスクの励起子/励起子分子光励起における Fano 共鳴、” 1999 年春季応物講演会、野田、3 月 28 - 31 日、1999 年.
 129. A.Chavez-Pirson, J. Temmyo, and H. Ando, ”Strain-induced modulation of the confinement in self-organized quantum dots produced and detected by a near-field optical probe,” 1999 年春季応物講演会、野田、3 月 28 - 31 日、1999 年.
 130. 天明「自然形成による半導体ナノ構造の現状」日本電子工業振興協会 量子相関エレクトロニクス専門委員会、東京、1999.6.22.
 131. A. Chavez, J. Temmyo, H. Ando, “Optical nanoprobng of self-organized quantum dots”, 8th Meeting of the Near Field Optics Workshop, Kawasaki, 1999.06.30.
 132. H. Kamada, H. Ando, K. Takagahara, J. Temmyo, T. Tamamura, “Spectroscopies of exciton and biexciton in InGaAs quantum disk”, ICL99, 大阪, 1999.08.23, No. S1-4.
 133. 天明, 鎌田, 倉持, 玉村「化合物半導体ナノディスク形成における界面のダイナミクス」,第 60 回秋季応物講演会, 神戸, 1999. 9.1-9.4, No. p-N-3
 134. 鎌田, 高河原, 安藤, 天明, 玉村「InGaAs 量子ドットの励起子/励起子分子光過程における量子干渉効果」, 日本物理学会 1999 年秋の分科会, 盛岡, 1999. 9.13, No. 27pYC-7.
 135. 鎌田, 高河原, 安藤, 天明, 玉村「単一 InGaAs 量子ドット励起子におけるスピン依存量子干渉」, 第 47 回春季応物講演会, 東京, 2000. 3.28-3.31, No. 31a-K-6.
 136. 後藤, 鎌田, 安藤, 天明 「InGaAs 量子ディスクにおける励起子シュタルク効果」, 第 47 回春季応物講演会, 東京, 2000. 3.28-3. 31, No. 31a-K-7.
 137. A.Chavez, J. Temmyo, H. Ando, “Pressure - induced electronic coupling of self-organized quantum dots by a near-field optical probe”, 第 47 回春季応物講演会, 東京, 2000. 3.28-3.31, No. 31a-K-9.
 138. 天明 鎌田 安藤 玉村 「Self-organized quantum disks for a two-level system」CREST NewsLetter, 2000. 6 月号.
 139. 鎌田 高河原 安藤 天明 玉村「単一 InGaAs 量子ドット励起子発光の光誘起エネルギー分裂」第 61 回秋季応物講演会 札幌、2000. 9.03-9 . 7 No. 5p-ZR-7.
 140. 後藤 鎌田 天明 齊藤 安藤 「量子ディスク構造における電界誘起偏光依存性の解析」"第 61 回秋季応物講演会 札幌、2000. 9.03-9 . 7 No. 5p-ZR-4.
 141. A.Chavez Temmyo Ando "Pressure - induced electronic coupling of self-organized

- quantum dots by a near-field optical probe" 第61回秋季応物講演会 札幌、2000. 9.03-9. 7 No. 5p-ZR-9.
142. 鎌田 高河原 安藤 後藤 天明「単一 InGaAs 量子ドット励起子発光の光誘起 population 振動」第48回春季応物講演会, 東京, 2001. 3.28-3. 31, No. 31a-K-7
 143. 天明二郎, 鎌田英彦, 倉持栄一, R. Notzel, 玉村敏昭: 自己集合化ならびに自己組織化による半導体ナノ構造形成, 第29薄膜・表面物理セミナー(2001), 京都, pp. 9-17(2001.7.23-24).
 144. 後藤秀樹, 鎌田英彦, 齋藤 正, 安藤弘明, 高河原俊秀, 天明二郎: 高分解能 PLE による InGaAs 量子ディスクの励起子コヒーレンス評価, 第62回応用物理学会学術講演会, 愛知工業大学, 12a-YB-9(2001. 9. 11-14).
 145. 鎌田英彦, 安藤弘明, 後藤秀樹, 齋藤 正, 天明二郎: 単一 InGaAs 量子ドット励起子 population のコヒーレント光制御, 第62回応用物理学会学術講演会, 愛知工業大学, 12a-YB-1(2001. 9. 11-14)
 146. H. Kamada, H. Gotoh, H. Ando, J. Temmyo, T. Saitoh, and T. Tamamura: Coherent control of single dot exciton wavefunctions, The Second CREST Symposium on "Function Evolution of Materials and Devices based on Electron/Photon Related Phenomena", (第2回「電子・光子等の機能制御」シンポジウム 戦略的基礎研究推進事業, Kokuyo Hall (Shinagawa), pp.16 (2001.10.25).
 147. 天明二郎: 化合物半導体におけるナノテクノロジーの展開, 電子情報通信学会東海支部, 浜松(2001.10.30).
 148. H. Kamada, H. Gotoh, H. Ando, T. Takagahara and J. Temmyo: Quantum gate operation of quantum dot exciton, 第5回量子情報技術研究会 (QIT5), QIT2001-41, pp.223 (2001.11.10).
 149. J. Temmyo, H. Kamada, E. Kuramochi, H. Ando, and T. Tamamura: Self-organized InGaAs quantum disks for a two-state system, The Third Takayanagi Kenjiro Memorial Symposium, Hamamatsu , pp.30-34(2001.12.6).
 150. H. Kamada, H. Gotoh, H. Ando, and T. Takagahara: Coherent optical control of single dot exciton wavefunction, IWQDQC , Kochi, 21 (2002).
 151. H. Kamada, H. Gotoh, H. Ando, and T. Takagahara: Quantum gate operation of quantum dot exciton, International symposium on quantum computing, Tokyo, 5-3 (2002).
 152. 鎌田英彦, 後藤秀樹, 安藤弘明, 高河原俊秀, 天明二郎: 量子ドット励起子のラビ振動とコヒーレント操作, 日本物理学会 第57回年次大会, 立命館大学, 25aYE-2(2002.3)
 153. 鎌田英彦, 後藤秀樹, 安藤弘明, 高河原俊秀, 天明二郎: 単一半導体量子ドット励起子のコヒーレント光制御光誘起 population 振動, 第49回応用物理学関係連合講演会, 東海大学, 27p-YM-3 (2002.3.27-30).
 154. 重森聡, 天明二郎, 後藤秀樹, 鎌田英彦, 齋藤正, 倉持栄一: テンプレートを用いた自己組織化 InGaAs 量子ディスクの制御, 第49回応用物理学関係連合講演会, 東海大学, 28a-YH-2 (2002.3.27-30).
 155. 後藤秀樹, 鎌田英彦, 齋藤正, 安藤弘明, 高河原俊秀, 天明二郎: 0次元量子ディス

- ク構造における励起子コヒーレンスに対する励起子間相互作用の影響, 第 49 回応用物理学関係連合講演会, 東海大学, 28a-YH-3 (2002.3.27-30).
156. 中村篤志, 清水克美, 重盛聡, 青木徹, 田中昭, 天明二郎: リモートプラズマ MOCVD 法による ZnO 薄膜の成長, 第 63 回応用物理学学会学術講演会, 24a-YE-1, 新潟大学 (2002.9) .
157. 鎌田英彦, C. Santori, 山本喜久, 後藤秀樹, 天明二郎, 向井孝彰: 単一 InGaAs 量子ドット励起子を用いた単一光子の発生, 第 63 回応用物理学学会学術講演会, 26p-P13-14, 新潟大学 (2002.9) .
158. 後藤秀樹, 鎌田英彦, 斉藤正, 安藤弘明, 天明二郎: 量子ドットにおける励起子励起子分子結合による Electromagnetically induced transparency, 第 63 回応用物理学学会学術講演会, 26p-P13-15, 新潟大学 (2002.9) .
159. H. Kamada, H. Gotoh, H. Ando and J. Temmyo: Nonlinear photonic function in single photon regime, 第 3 回「電子・光子等の機能制御」シンポジウム 戦略的基礎研究推進事業, p.19, Kokuyo Hall (Shinagawa) (2002.10).
160. H. Matsui, T. Aoki, A. Tanaka and J. Temmyo: Epitaxial growth and doping of ZnSeTe alloy films by remote hydrogen plasma assisted MOCVD for green LED, Proceedings of JICAST 2002, pp. 405-408, Hamamatsu (2002.10).
161. Y. Shimizu, T. Aoki, A. Nakamura, Y. Momose, A. Tanaka and J. Temmyo, The effect of hydrogen plasma radicals in ZnO growth from diethylzinc, Proceedings of JICAST 2002, pp. 409-412, Hamamatsu (2002.10).
162. H. Kamada, H. Gotoh, H. Ando, T. Takagawara and J. Temmyo: Single quantum dot exciton: Application to quantum optics, QD2002, Tokyo(2002.10).
163. 中村篤志, 重盛聡, 清水克美, 青木徹, 田中昭, 天明二郎: 酸素リモートプラズマを用いた ZnO の MOCVD 成長, 電子情報通信学会, 信学技報 EID2002-102(2003-01).
164. 松井宏樹, 青木徹, 天明二郎, 畑中義式: リモートプラズマ励起 MOCVD による ZnTe 系薄膜の成長と伝導性制御, 信学技報 EID2002-103(2003-01).
165. 清水克美, 中村篤志, 青木徹, 天明二郎: 水素リモートプラズマ CVD 法による ZnO の成長と発光特性, 信学技報 EID2002-104(2003-01).
166. 鎌田英彦, 後藤秀樹, 安藤弘明, 高河原俊秀, 天明二郎: 量子ドット励起子量子コンピュータ, 第 50 回応用物理学関係連合講演会, 神奈川大学, 29p-ZE-13 (2003.3.27-30).
167. 重森聡, 中村篤志, 青木徹, 天明二郎: リモートプラズマ MOCVD 法による ZnCdO 薄膜成長の試み, 第 50 回応用物理学関係連合講演会, 神奈川大学, 28p-X-4 (2003.3.27-30).
168. 中村篤志, 清水克美, 重盛聡, 青木徹, 田中昭, 天明二郎: 酸素リモートプラズマを用いた ZnO の MOCVD 成長, 第 50 回応用物理学関係連合講演会, 神奈川大学, 27p-X-2 (2003.3.27-30)..
169. 中村篤志, 清水克美, 青木徹, 天明二郎, リモートプラズマ MOCVD による ZnO の成長, 電子情報通信学会 (豊橋技科大), ED2003-17, 信学技報, 7-12 (2003.5)

170. 重盛聡, 中村篤志, 青木徹, 天明二郎, リモートプラズマ MOCVD による ZnCdO 混晶の成長, 電子情報通信学会 (豊橋技科大), ED2003-16, 信学技報, 1-5 (2003.5) (2003.9)
171. 小山貴士, 青木徹, 天明二郎, リモートプラズマ励起 MOCVD 法を用いた CdSe/ZnSe 量子ドットの形成, 第 64 回応用物理学会学術講演会 (福岡大学), 30p-B-7 (2003.8)
172. 中村篤志, 重盛聡, 青木徹, 天明二郎, 酸素リモートプラズマ MOCVD による $Zn_xMg_{1-x}O$ 薄膜の成長, 第 64 回応用物理学会学術講演会 (福岡大学), 31p-B-3 (2003.8)
173. 重盛聡, 中村篤志, 青木徹, 天明二郎, 酸素リモートプラズマ MOCVD による $Zn_xCd_{1-x}O$ 混晶の成長, 第 64 回応用物理学会学術講演会 (福岡大学), 31p-B-4 (2003.8)
174. 大黒 高寛, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "Turing 反応拡散系を模擬するアナログ CMOS 回路," 電子情報通信学会 非線形問題研究会, (北九州), 2003 年 11 月.
175. 中田 一紀, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "生物規範型の移動運動を制御するアナログ CMOS 回路~センサフィードバックに対する周波数/振幅変調特性~, " 電子情報通信学会 ニューロコンピューティング研究会, (北九州), 2003 年 11 月.
176. 加賀谷 亮, 金澤 雄亮, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, *池辺 将之, *大住 勇治, **金高 達也, "CMOS イメージセンサに適した機能的リセット方式," 第 7 回システム LSI ワークショップ, (北九州), 2003 年 11 月. (*大日本印刷, **大日本 LSI デザイン)
177. *池辺 将之, *大住 勇治, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "CMOS イメージセンサに適した機能的リセット方式の検討," 電子情報通信学会 集積回路研究会, (豊橋), 2003 年 9 月. (*大日本印刷)
178. 雨宮 好仁, "生命ダイナミクスと次世代集積回路," 日本光学会 (応用物理学会) 情報フォトニクス研究グループ 第 2 回情報フォトニクス研究会「情報フォトニクスの新展開」, (札幌), 2003 年 9 月.
179. 中田 一紀, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "Wilson-Cowan 神経振動子モデルに基づくアナログ CPG 回路の構成," 日本神経回路学会第 13 回全国大会, (東京), 2003 年 9 月.
180. 金澤 雄亮, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "減衰シナプスのハードウェア化とパターン認識への応用," 日本神経回路学会第 13 回全国大会, (東京), 2003 年 9 月.
181. 大矢 剛嗣, 上野 友邦, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "量子ドット集積体を用いた反応拡散デバイス," 応用物理学会秋季大会講演, (福岡), 2003 年 9 月.
182. 高橋 良幸, 大矢 剛嗣, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "単電子回路における非線形写像," 応用物理学会秋季大会講演, (福岡), 2003 年 9 月.
183. 金澤 雄亮, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "フリーソフトで構築する VLSI 設計環境と VDEC-MOSIS チップ共同試作プロジェクト," 平成 15 年度 VDEC デザイナーズフォーラム, (北海道石狩郡), 2003 年 8 月
184. 中田 一紀, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "生物規範型の移動運動を制御するアナログ CMOS 回路~Amari-Hopfield アナログ CPG 回路と Wilson-Cowan アナログ CPG 回路の比較~, " 電子情報通信学会 ニューロコンピューティング研究会, (玉川), 2003 年 3 月.
185. 金澤 雄亮, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "減衰シナプスを用いた適応型スパイクニュー

- ラルネットのアナログ CMOS 回路化," 電子情報通信学会 ニューロコンピューティング研究会, (玉川), 2003 年 3 月.
186. 大矢 剛嗣, 上野 友邦, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "量子ドットによる反応拡散系の構成," 応用物理学会春季(14) 高橋 良幸, 大矢 剛嗣, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "多重トンネル接合による量子ドット振動子," 応用物理学会春季大会講演, (神奈川), 2003 年 3 月.
 187. 大黒 高寛, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "チューリング反応拡散系を模擬するアナログ CMOS 回路の設計," 電子情報通信学会総合大会講演, (仙台), 2003 年 3 月.
 188. 神谷 泰史, 金澤 雄亮, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "サブスレッショルド領域で動作するアナログ CMOS 回路によるカオス発生器," 電子情報通信学会総合大会講演, (仙台), 2003 年 3 月.
 189. (解説記事) 雨宮 好仁, "生命ダイナミクスと次世代集積デバイス," 日本神経回路学会誌, Vol. 10, No. 2, pp. 77-83 (2003).
 190. 大矢 剛嗣, 上野 友邦, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "量子ドット集積体による反応拡散系," 電子情報通信学会 シリコン材料・デバイス研究会, (札幌), 2003 年 2 月.
 191. 大矢 剛嗣, 山田 崇史, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "単電子回路による多値ホップフィールドネットワーク," 電子情報通信学会 ニューロコンピューティング研究会, (札幌), 2003 年 2 月.
 192. 中田 一紀, *秋田 純一, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "スパイクソーティングをオンラインで行う多チャンネル独立成分解析システム," 第6回システムLSIワークショップ, (滋賀), 2002 年 11 月. (*はこだて未来大)
 193. 中田 一紀, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "生物規範型の移動運動を制御するアナログ CMOS 回路~リズム協調運動を制御する CPG の集積回路化~, " 電子情報通信学会 ニューロコンピューティング研究会, (北九州), 2002 年 11 月.
 194. 山田 崇史, 本間 慶正, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "アナテジ混載オシレータ LSI による分散 PLL ネットワークのハードウェアエミュレーション," 電子情報通信学会 集積回路研究会, (浜松), 2002 年 9 月.
 195. 上野 友邦, 浅井 哲也, 福井 孝志, 雨宮 好仁, "量子ドット結合振動子系における動的パターンの形成," 応用物理学会秋季大会講演, (新潟), 2002 年 9 月.
 196. 大矢 剛嗣, 浅井 哲也, 福井 孝志, 雨宮 好仁, "単電子箱を用いた多数決論理デバイス," 応用物理学会秋季大会講演, (新潟), 2002 年 9 月.
 197. 金澤 雄亮, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "CDMA 方式を使ったホップフィールドネット集積アーキテクチャ," 日本神経回路学会第 12 回全国大会, (鳥取), 2002 年 9 月.
 198. 浅井 哲也, 中田 一紀, 雨宮 好仁, "モダンニューラルネットのハードウェアエミュレーション ~スパイクニューロンとダイナミックシナプスをアナログ VLSI 化する~, " 日本神経回路学会第 12 回全国大会, (鳥取), 2002 年 9 月.
 199. 山田 崇史, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "半導体の少数キャリア拡散を利用した神経細胞デバイスの構成," 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演, (宮崎), 2002 年 9 月.
 200. 大黒 高寛, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "拡散現象を模擬するアナログ CMOS 回路," 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演, (宮崎), 2002 年 9 月.

201. 本間 慶正, 山田 崇史, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "アナログ抵抗回路網を用いたセルオートマトンLSIの設計," 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演, (宮崎), 2002年9月.
202. 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "非線形アナログ集積回路と反応拡散チップ: 指紋画像修復を行うインテリジェント視覚センサ," 映像情報メディア学会 画像センシング研究会, (東京), 2002年6月.
203. 浅井 哲也, 金澤 雄亮, 大黒 高寛, 雨宮 好仁, "スパイクタイミングに基づく脳型競合プロセッサの試作と評価," ロボティクス・メカトロニクス講演会 2002, (島根), 2002年6月.
204. 浅井 哲也, 山田 崇史, 雨宮 好仁, "半導体の少数キャリア拡散を利用した CMOS 反応拡散デバイス," 電子情報通信学会総合大会講演, (東京), 2002年3月.
205. 山田 崇史, 本間 慶正, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "BZ 反応拡散チップ: アナログセルオートマトンモデルとそのハードウェア実装," 電子情報通信学会総合大会講演, (東京), 2002年3月.
206. 上野 友邦, 浅井 哲也, 福井 孝志, 雨宮 好仁, "量子ドット結合振動子系におけるパルス波の伝搬," 応用物理学会春季大会講演, (神奈川), 2002年3月.
207. 大矢 剛嗣, 浅井 哲也, 福井 孝志, 雨宮 好仁, "単電子回路による多数決論理デバイス," 応用物理学会春季大会講演, (神奈川), 2002年3月.
208. 林 秀樹, 山田 崇史, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "時間領域の神経競合を模するアナログVLSI ," 電子情報通信学会 ニューロコンピューティング研究会, NC2001-172, (玉川), 2002年3月.
209. 金澤 雄亮, 山田 崇史, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "近接電場作用および CDMA 通信方式に基づく無線シナプス/ニューロデバイス ," 電子情報通信学会 ニューロコンピューティング研究会, NC2002-173, (玉川), 2002年3月.
210. 山田 崇史, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "半導体の少数キャリアを利用した反応拡散デバイス," 電子情報通信学会 非線形問題研究会, NLP2001-132, (東京), 2002年3月.
211. 大黒 高寛, 西宮 優作, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "CMOS 反応拡散回路によるチューリングパターンの発生," 電子情報通信学会 非線形問題研究会, NLP2001-131, (東京), 2002年3月.
212. 大矢 剛嗣, 浅井 哲也, 福井 孝志, 雨宮 好仁, "単電子回路による多数決論理デバイス," 電子情報通信学会 電子デバイス/シリコン材料・デバイス研究会, ED2001-245, (札幌), 2002年1月.
213. 林 秀樹, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "超低消費電力シリコン神経細胞: アナログ VLSI 化と時間領域での競合動作," 日本神経回路学会第 11 回全国大会, P2-19(68), (奈良), 2001年9月.
214. 浅井 哲也, 福井 孝志, 雨宮 好仁, "量子ナノ構造による反応拡散デバイス," 応用物理学会秋季大会講演, (豊田), 2001年9月.
215. 上野 友邦, 浅井 哲也, 福井 孝志, 雨宮 好仁, "量子ドットによる結合振動子~非線形振動と引き込み現象~, " 応用物理学会秋季大会講演, (豊田), 2001年9月.
216. 山田 崇史, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "電流モード PWM 回路を用いた方位検出アナ

- ログビジョンチップの開発," 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演, (東京), 2001年9月.
217. 加藤 博武, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "非一様な空間構造を自己生成する Volterra 反応拡散チップの開発," 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演, (東京), 2001年9月.
218. 林 秀樹, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "スパイクタイミングに基づく神経競合網のアナログ CMOS 回路設計," 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演, (東京), 2001年9月.
219. 西宮 優作, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "チューリングモデルの回路化," 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演, (東京), 2001年9月.
220. 花田 康平, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "アナログ・デジタル混載視覚回路: 時間差加重フィルタリングによる動き検出," 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演, (東京), 2001年9月.
221. 山田 崇史, 幸谷 真人, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "局所画像の特徴抽出に特化した Hough 変換応用モデルとその集積回路化," 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス研究会, 2P1-N6, (高松), 2001年6月.
222. 雨宮 好仁, "半導体の物理現象を利用した反応拡散デバイス~少数キャリア拡散素子と量子ドット素子~, " 応用物理学会春季大会シンポジウム講演, (東京), 2001年3月.
223. 山田 崇史, 雨宮 好仁, "量子ドット回路のための MOS 出力バッファの構成," 応用物理学会春季大会講演, (東京), 2001年3月.
224. 加藤 博武, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "画像のラベル付けを行う Lotka-Volterra 拡散振動系の CMOS 回路化," 電子情報通信学会総合大会講演, (滋賀), 2001年3月.
225. 林 秀樹, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "散逸的な縞状パターンの生成と修復を行うアナログ反応拡散回路," 電子情報通信学会総合大会講演, (滋賀), 2001年3月.
226. 西宮 優作, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "半導体の少数キャリアを利用した反応拡散デバイス," 電子情報通信学会総合大会講演, (滋賀), 2001年3月.
227. 浅井 哲也, 加藤 博武, 雨宮 好仁, "超低消費電力 CMOS 神経振動子ネットワークのアナログ集積回路化," 電子情報通信学会 ニューロコンピューティング研究会, NC2000-154, (玉川), 2001年3月.
228. 葛西 誠也, 雨宮 好仁, 長谷川 英機, "GaAs ショットキーラップゲートによる単電子 BDD デバイス," 電子情報通信学会 電子デバイス研究会, ED2000-260, (札幌), 2001年3月.
229. 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "非線形アナログ集積回路と反応拡散チップ~自然界の生き生きとした非線形現象を模倣する~, " 第4回システム LSI ワークショップ, (滋賀), 2000年11月.
230. 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "神経緩和振動子を具現する超低消費電力 CMOS アナログ集積回路," 第23回日本神経科学大会 第10回日本神経回路学会大会 合同大会, (横浜), 2000年9月.
231. 浅井 哲也, 砂山 辰彦, 雨宮 好仁, "非線形アナログ集積回路と反応拡散チップ~反応拡散系をシリコンチップ上に実現する," 電子情報通信学会 非線形問題研究会,

- NLP2000-79, (京都), 2000 年 10 月.
232. 加藤 博武, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "CMOS デバイスの非線形特性を利用した反応拡散システム ~ Wilson-Cowan 型回路と Lotka-Volterra 回路 ~," 電子情報通信学会非線形問題研究会, NLP2000-81, (京都), 2000 年 10 月.
 233. 西宮 優作, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "化学反応系のアナログ回路化手法 ~ プリュセレータの回路化 ~," 電子情報通信学会 非線形問題研究会, NLP2000-80, (京都), 2000 年 10 月.
 234. 加藤 博武, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "非線形振動子を用いた反応拡散回路 I : Lotka-Volterra 型振動子," 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演, (名古屋), 2000 年 9 月.
 235. 林 秀樹, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "非線形振動子を用いた反応拡散回路 II: Wilson-Cowan 神経振動子," 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演, (名古屋), 2000 年 9 月.
 236. 西宮 優作, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "非線形アナログ回路による反応拡散システム ~ プリュセレータの回路化 ~," 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演, (名古屋), 2000 年 9 月.
 237. 砂山 辰彦, 西宮 優作, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "BZ 反応を模擬するセルオートマトン LSI ~ 反応拡散系をシリコンチップ上に実現する ~," 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演, (名古屋), 2000 年 9 月.
 238. 藤原 孝信, 赤澤 正道, 雨宮好仁, "機能変更の可能な三次元セルラーニューラルネットワーク LSI," 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演, (名古屋), 2000 年 9 月.
 239. 幸谷 真人, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "局所画像の特徴検出に特化したアナログ Hough 変換チップ," 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演, (名古屋), 2000 年 9 月.
 240. 猪口 誉敏, 山田 崇史, 雨宮 好仁, "磁束量子パラメトロンによるアナログコンピューティング," 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演, (名古屋), 2000 年 9 月.
 241. 山田 崇史, 雨宮 好仁, "量子ドット回路のための CMOS 出力インターフェースの構成," 応用物理学会秋季大会講演, (東京), 2000 年 9 月.
 242. 木下 純臣, 山田 崇史, 葛西 誠也, 雨宮 好仁, 長谷川 英機, "量子ドット論理システムのための単電子レジスタ回路," 応用物理学会秋季大会講演, (東京), 2000 年 9 月.
 243. 浅井 哲也, 幸谷 真人, 雨宮 好仁, "生体様ビジョンチップを用いた動き検出システム," 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス研究会, 1A1-50-065, (熊本), 2000 年 5 月.
 244. 浅井 哲也, 雨宮 好仁, 小柴正則, "二分決定グラフにもとづくフォトニック結晶集積デバイス," 電子情報通信学会総合大会シンポジウム講演, (広島), 2000 年 3 月.
 245. 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "アナログ-デジタル混載型ハフ変換 LSI の設計," 電子情報通信学会総合大会講演, (広島), 2000 年 3 月.
 246. 藤原 孝信, 赤澤 正道, 雨宮好仁, "機能変更の可能な三次元セルラーニューラルネットワーク回路," 電子情報通信学会総合大会講演, (広島), 2000 年 3 月.

247. 砂山 辰彦, 池辺 将之, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "MOS 画像処理システムによる移動物体の検出," 電子情報通信学会総合大会講演, (広島), 2000 年 3 月.
248. 猪口 誉敏, 山田 崇史, 雨宮 好仁, "磁束量子回路によるアナログコンピューティング," 電子情報通信学会総合大会講演, (広島), 2000 年 3 月.
249. 幸谷 真人, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "アナログ-デジタル混載型 CMOS 回路による二次元動き検出," 電子情報通信学会総合大会講演, (広島), 2000 年 3 月.
250. 林 秀樹, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "アナログ電子回路化に適した相対奥行き検出モデル," 電子情報通信学会総合大会講演, (広島), 2000 年 3 月.
251. 加藤 博武, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "視覚対象に追従するアナログ電子回路の試作と評価," 電子情報通信学会総合大会講演, (広島), 2000 年 3 月.
252. 山田 崇史, 葛西 誠也, 雨宮 好仁, 長谷川 英機, "量子ドットアレイによるグラフ論理システム," 応用物理学会春季大会講演, (東京), 2000 年 3 月.
253. 木下 純臣, 山田 崇史, 葛西 誠也, 雨宮 好仁, 長谷川 英機, "共有二分決定グラフにもとづく量子ドット回路の設計," 応用物理学会春季大会講演, (東京), 2000 年 3 月.
254. 赤澤 正道, 金網 健太郎, 葛西 誠也, 雨宮 好仁, 長谷川 英機, "ショットキーラップゲート構造を用いた単電子インバータの作成と評価," 応用物理学会春季大会講演, (東京), 2000 年 3 月.
255. 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "視覚対象の方位選択を行うアナログハフ変換 LSI の設計," 電子情報通信学会 ニューロコンピューティング研究会, NC99-179, (玉川), 2000 年 3 月.
256. 山田 崇史, 木下 純臣, 葛西 誠也, 雨宮 好仁, 長谷川 英機, "量子ドットアレイによるグラフ論理システム," 電子情報通信学会 電子デバイス研究会, ED99-306, 2000 年 2 月.
257. 金編 健太郎, 赤澤 正道, 雨宮 好仁, "単電子インバータ回路の設計と多値特性の導出," 電子情報通信学会 回路とシステム研究会, CAS99-101, (石川), 2000 年 1 月.
258. 幸谷 真人, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "二次元局所速度の重み付けスカラー和による動き方向検出モデルのアナログ集積回路設計," 第3回システムLSIワークショップ, (滋賀), 1999 年 11 月.
259. 山田 崇史, 井口 誉敏, 雨宮 好仁, "磁束量子回路によるアナログコンピューティング~磁束量子パラメトロンで組み合わせ問題を解く~, " 電子情報通信学会 超伝導エレクトロニクス研究会, SCE99-26, 1999 年 10 月.
260. 雨宮 好仁, "量子コンピュータの基礎~エレクトロニクスの立場から~, " 日本学術振興会 第151委員会 第51回研究会, 1999 年 9 月.
261. 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "相関型動き検出アナログ電子回路による三次元奥行き計測," 日本神経回路学会第9回全国大会, P1-30, (札幌), 1999 年 9 月.
262. 浅井 哲也, 幸谷 真人, 雨宮 好仁, "二次元局所速度の重み付けスカラー和による動き方向検出神経場モ (91) 砂山 辰彦, 池辺 将之, 雨宮 好仁, "Difference-of-Gaussian 処理を行う MOS セルオートマトン回路," 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演, (船橋), 1999 年 9 月.

263. 幸谷 真人, 浅井 哲也, 雨宮 好仁, "二次元動き方向選択性を持つ神経ネットワークのアナログ電子回路設計," 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演, (船橋), 1999年9月.
264. 猪口 誉敏, 山田 崇史, 雨宮 好仁, "磁束量子を信号担体とするグラフ論理回路," 電子情報通信学会ソサ(93) 藤原 孝信, 赤澤 正道, 雨宮好仁, " MOSを用いた三次元セルラーニューラルネットワーク," 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演, (船橋), 1999年9月.
265. 赤澤 正道, 雨宮好仁, "多種の終端を持つ BDD にもとづく磁束転送論理回路," 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演, (船橋), 1999年9月.
266. 金網 健太郎, 赤澤 正道, 雨宮 好仁, "単電子多値回路の温度特性," 応用物理学会秋季大会講演, (東京), 1999年9月.
267. 木下 純臣, 赤澤 正道, 雨宮 好仁, "電荷転送形単電子デバイスの転送クロック設計," 応用物理学会秋季大会講演, (東京), 1999年9月.
268. 藤原 孝信, 赤澤 正道, 雨宮 好仁, "ニューロン MOS を用いた 3 次元セルラーニューラルネットワーク回路の設計," 電子情報通信学会 回路とシステム研究会, CAS99-26, 1999年6月.
269. 山田 崇史, 赤澤 正道, 雨宮 好仁, "単電子回路によるボルツマンデバイス," 電子情報通信学会 ニューロコンピューティング研究会, NC98-113, 1999年3月.
270. 徳田 恵理子, 朝日 昇, 赤澤 正道, 雨宮 好仁, "量子ホップフィールドネットワークによる最適化問題の求解," 電子情報通信学会 ニューロコンピューティング研究会, NC98-163, 1999年3月.
271. 山田 崇史, 朝日 昇, 雨宮 好仁, "磁束量子を利用したペトリネットデバイス," 電気学会 計測研究会, IM-99-11, (東京), 1999年2月.
272. (解説記事) 雨宮 好仁, "量子コンピューティング---回路アーキテクチャとデバイスの基礎---," FED ジャーナル, Vol. 10, No. 2, pp. 18-29 (1999).
273. 塚田紀昭、光格子リングにおけるソリトンの磁場・電場制御日本物理学会第 58 回年次大会予稿集 (29aYA-1) 2003年3月29
274. 塚田紀昭、光格子におけるボーズ・アインシュタイン凝縮原子のダイナミクス(3) 日本物理学会第 2002 年秋期大会予稿集 (8pWE-12) 2002年9月8日
275. 塚田紀昭、光格子におけるボーズ・アインシュタイン凝縮原子のダイナミクス、第 4 回レーザー冷却研究会、ホテルニューアワジプラザ淡路島、9月22日(2001).
276. 塚田紀昭、光格子におけるボーズ・アインシュタイン凝縮原子のダイナミクス、日本物理学会 2001 年秋の分科会予稿集、徳島文理大学、9月19日
277. 塚田紀昭、原子間相互作用によるボーズ凝縮系のジョセフソントンネル結合のエンハンスメント、日本物理学会第 56 回年次大会予稿集、中央大学多摩キャンパス、2001年3月30日
278. 塚田紀昭、Enhanced atomic tunneling in two Bose-Einstein condensates due to atomic interactions, 第 3 回レーザー冷却研究会、湘南国際村会議場、2000年1月8日~10日
279. 塚田紀昭、二成分ボーズ・アインシュタイン凝縮系のレーザーラマン・ジョセフソン結合とシンメトリブレイキング、日本物理学会 2000 年秋の分科会予稿集、新潟

大学、9月22日

280. 塚田紀昭、2つのポーズ・アインシュタイン凝縮系のレーザパルス結合、日本物理学会1999年秋の分科予稿集、岩手大学、9月26日塚田紀昭、レーザパルスによる結合2重トラップ中ポーズ・アインシュタイン凝縮原子のトンネル振動制御、日本物理学会第54回年次大会予稿集、広島大学、1999年3月29日
281. 塚田紀昭、結合2重トラップのポーズ・アインシュタイン凝縮原子のトンネル現象とそのレーザ光制御、文部省科研究費特定領域研究「多重度系としての原子集団及び原子のトンネル現象」第3回理論研究会、大阪大学、1999年3月2日

(3) 特許出願(国内2件)

- 1) 椿 光太郎、「電子波干渉素子」、JST, 2001.11.29, 特願 2001-365080, 特開 2003-168804(2003.6.13)
- 2) 椿 光太郎、「電子波干渉素子」、JST, 2002.11.26, 特願 2002-342334

7 . 結び

本研究を提案した 1998 年頃には、量子相関機能の具体的なイメージとしては量子状態の時間発展という、固体デバイスではこれまで注目されてこなかった概念を新しいエレクトロニクスへ持ち込もうというということを考えた。具体的なエレクトロニクス応用として量子コンピューティングが日本でも注目を始めつつあった頃である。しかし、それは原子物理・量子光学の分野であり、固体デバイスでそのようなことを行おうという考えはまだほとんどなかった。本プロジェクトは、その意味では初めて具体的には固体量子コンピューティングデバイスを想定した量子相関機能に関する初めてのプロジェクトであったといえる。研究を開始した時点では量子コンピューティングデバイスの基本要素デバイス(量子ビット)として、2重結合量子ドットと電子波導波路型を具体的な目標とした。研究開始当初は最も経験があり、制御性が優れている GaAs 系化合物半導体を対象にしていたが、研究を進めるにつれ、量子コンピューティングという量子相関機能は全く新しく、材料的にもこれまでよく用いられている材料が必ずしも最適ではないと考え、また、量子ビットの実現手法もこの2つに限るべきではないと考えた。この様に、材料的視点と機能的視点を統一的に検討することを研究の手法とし、新機能(量子ビット型)を実現するための新材料・プロセス開発という考え方のもとに研究を進めた。実験を進めるうちに、様々な候補を取捨選択し、本研究期間の中では、カーボンナノチューブを用いた電荷型量子ビットとスピン型量子ビット、InGaAs 量子ドットを用いた励起子型量子ビットに関し、大きな成果を上げることができた。前者については、残念ながら量子ビットのマニピュレーションまで達成することはできなかったが、全く新しい材料で2準位系の形成だけでも示せたことは大きな成果であると考えている。後者においては、世界で初めて量子ビットのマニピュレーション(ラビ振動の観測)に成功したことは大変大きな成果である。これらの成果のほかにも、新たな量子ドット材料としてカーボンナノチューブをはじめ、ナイトライド系材料、Si、フッ化物系材料などのにおいても、そのヘテロ接合の形成から共鳴トンネル特性の発現に初めて成功したことは大きな成果である。カーボンナノチューブでは特に単電子トランジスタの室温動作に成功し、ナノエレクトロニクスの1つである単電子エレクトロニクスの可能性を大きく進めたという点で、大変大きな成果であった。ナイトライド系では単電子動作にも初めて成功したことも注目に値すると考えている。また、研究を進めるうちに、量子相関機能とは量子コンピューティングしかないのかという議論がチーム内からおこり、その成果として、量子ドット系の反応拡散デバイスという全く新しい領域でのデバイス・システムへの展開の糸口を開くことができたことも大きな成果である。この様に、最終的に量子相関機能の1つである量子コンピューティングデバイスに関し、その基本デバイスである量子ビットの固体での実現に大きく寄与したとともに、新しい量子相関機能の提案、さらに偶発的ではあるがカーボンナノチューブデバイスにバイオ・化学の分野からの思わぬ反響を得ることにもなり新しい分野へ発展する可能性が示されたことなどから、本プロジェクトは成功裡に終了できたと自己評価している。

本研究は、量子相関機能という全く新しい機能のエレクトロニクスへの応用を探索したプロジェクトであり、その指針を新機能に最適な新材料・プロセスの開発、機能の実

証という点に目標を置いたために、これまで各研究室で有している装置が必ずしも十分に利用できるとは限らない状況であった。たとえば、量子ビットの機能実証では、量子コヒーレンスというこれまで気にされなかった環境を実現せねばならず、そのための極低温システムを整備しなめればならなかった。また、カーボンナノチューブという新しい材料を扱うために、そのためのプロセス装置を用意しなければならなかった。その点で、かなりの装置的投資が必要であったわけであるが、CREST プロジェクトでそれをかなえていただけたのは大変ありがたかった。また、アドバイザーの先生方の助言は常に厳しく、特にこのプロジェクトでは何を指すのかを常に問いかけられ、まさに戦略的に研究対象を集中することを常に考えながらプロジェクトを行うために、ある意味では企業的な考え方も導入せざるを得ず、これまでの一般的な大学の基礎研究スタイルとはひと味異なる経験をできたことも幸いであった。