

日本電信電話(株)

物性科学基礎研究所 量子物性研究部 部長

平山 祥郎

「 相関エレクトロニクス 」

研究期間：平成 1 0 年 1 2 月 1 日～平成 1 5 年 1 1 月 3 0 日

目 次

1 . 研究実施の概要	1
2 . 研究構想	4
3 . 研究成果	
3.1. チーム全体の成果	4
3.2. 薄膜構造におけるキャリア相関	6
3.2.1. 薄膜ヘテロ構造の研究	6
3.2.2. 二層構造におけるキャリア相関	6
3.2.3. 二次元電子系と核スピンの相関	9
3.2.4. フェムト秒レーザを用いた薄膜中のキャリアダイナミクスの研究	12
3.2.5. 薄膜構造におけるキャリア相関研究のインパクト	18
3.3. ナノ構造におけるキャリア相関	20
3.3.1. 人工原子の電子間相互作用	20
3.3.2. 量子ドットの近藤効果	20
3.3.3. 結合ドットのパウリ効果とスピンプロケード	21
3.3.4. 量子ドットのキャリアダイナミクス	21
3.3.5. 結合ドットを利用した電荷量子ビットの実現	25
3.3.6. 電荷のシングルショット測定	29
3.3.7. 量子ドットにおける電子スピン・核スピン結合	30
3.3.8. その他のナノ構造におけるキャリア相関	31
3.3.9. ナノ構造のキャリア相関研究のインパクト	32
3.4. ナノプロービング	34
3.4.1. 極低温・強磁場近接場光学顕微鏡の開発と2次元電子ガス系の評価	34
3.4.2. 二探針型近接場光学顕微鏡の開発	35
3.4.3. 高速ナノプローブの開発	37
3.4.4. 低温STMによる局所状態密度の直接観察	38
3.4.5. ナノプローブに関する研究のインパクト	47
3.5. 量子情報処理の基礎研究	48
3.5.1. 多体エンタングルメント理論	48
3.5.2. 量子情報理論	49
3.5.3. 線形光学による量子演算	49
3.5.4. エンタングルメント抽出実験	50
3.5.5. 量子暗号の安全性の証明	51
3.5.6. 量子情報処理の基礎研究のインパクト	51

4 . 研究実施体制	53
5 . 研究期間中の主な活動	57
6 . 主な研究成果	
(1) 論文発表	60
(2) 口頭発表	74
(3) 特許出願	113
(4) 新聞報道等	114
7 . 結び、その他	115

1．研究実施の概要

半導体デバイスにおいては多くのキャリアが用いられているが、このプロジェクトをスタートした時点（1998 年）ではそのほとんどがキャリアを単体の粒子として扱うものであり、大きな進展が得られたメソスコピック系の研究においても、特定の境界条件下での単一キャリアの振る舞いを取り扱うものが大半であった。半導体物性の分野では、キャリア相関なしには説明できないものとして、分数量子ホール効果があり、さらに量子ドット中のキャリア相関として人工原子の振る舞いが着目されていたものの、物理現象の研究にとどまっており、様々な材料の超伝導や液体ヘリウムの超流動のように、明瞭で工学的にもインパクトのある相関現象の研究は半導体ではほとんど存在しないのが実情であった。そこで、この「相関エレクトロニクス」プロジェクトでは半導体中の様々なキャリア相関、さらにはそのコヒーレント制御の基礎研究を遂行し、その中から将来の画期的な半導体デバイスコンセプトに繋がるような相関現象をピックアップすることを目標に研究を進めた。

分数量子ホール効果に代表されるように、不純物や欠陥の影響を受けずにキャリア相関の研究を進めるには、高品質半導体薄膜ならびにナノ構造を実現することが不可欠と考え、NTT が維持していた高品質半導体作製技術を維持、発展させながら研究を進めた。当初、5 年計画で期待した野心的な目標は、二層間のキャリア相関による超流動現象の実現と半導体をベースにした量子コンピュータに向けた量子ビット動作の完成であったが、二層系では確実に超流動現象に近づくような強いキャリア相関を確認することができ、量子ドット構造では電子 1 個のコヒーレント制御、すなわち量子ビットの実現に成功した。さらに、当初予定していなかった成果として電子スピンと核スピンの相関という面白い研究が出現した。これは半導体でこれまでほとんど考えられたことのない核スピンを含めたシステムに道を拓く研究で、今後、核スピンを用いた量子コンピュータとも関連して大きな進展が期待される。

さらに、本プロジェクトでは半導体中でのキャリア相関研究を推進することにより、新しい分野である(量子)相関エレクトロニクスを確立することを目指した。この研究分野は固体物理でトップレベルにある世界の研究機関を中心に着実に広がっており、1998 年当時下火になっていた個々の半導体デバイスの研究が、キャリア相関やスピン制御をキーワードに、再び盛り上がる気配を見せている。NTT、東大、総研大、産総研がチームを組んだ「相関エレクトロニクス」プロジェクトは、この(量子)相関エレクトロニクスの研究に 1998 年と言う早い時期から取り組んだこともあり、世界のトップレベルを行く成果を上げ、本プロジェクトが主催した 2 回の国際会議（Carrier Interactions in Mesoscopic Systems (CIM2001、2001/2/13-14）、Carrier Interactions and Spintronics in Nanostructures (CISN2003、2003/3/10-12)）などを通して、日本のこの分野の研究推進に貢献することができた。プロジェクトの成果を通して、半導体中でのキャリア相関、特にその量子コヒーレント制御が将来の新しい半導体技術、量子情報処理技術として大きな可能性を持っていることを実証できたと確信している。

本プロジェクトでは(量子)相関エレクトロニクスの確立を目指して、全体の総括、薄膜・ナノ相関構造の作製とその伝導特性評価を担当する NTT 物性科学基礎研究所平山グループ、ナノ構造相関効果の磁場特性評価を担当する東大理学部樽茶グループ、相関構造中のキャリアコヒーレン

ス性の評価を担当する東大生研平川グループ、関連構造評価用ナノプローブ技術の開発を担当する産業技術総合研究所横山グループ、関連エレクトロニクスを量子計算につなげる理論、原理の検討を担当する総合研究大学院大学井元グループが協力して研究を推進した。

薄膜構造におけるキャリア関連の研究は主に平山グループと平川グループで推進した。まず、高品質半導体構造の基礎として半導体ヘテロ構造の成長に力を入れ、移動度 $5 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 以上の国内では最高移動度、世界的にもトップレベルの移動度を維持し、量子ホール効果状態の測定やナノ構造作製のスタート材料として役立てた。さらに、制御性を増すためにヘテロ構造に工夫を加え、ノンドープヘテロ構造にバックゲートからの電界でキャリアを誘起するシステムを完成し、これを密度制御性に優れた二層構造などに応用した。こうして得られた二層系を用いて、一定磁場で二層の電子密度を自由に広範囲で制御して量子ホール効果を測定する実験を行い、二層系のキャリア関連による強磁性状態の形成を明らかにした。特に、二層系のパラメータを制御することにより、二種類の強磁性状態（easy-axis 型、easy-plane 型）が同じ二層系で実現されることを示した。また、分数量子ホール状態などで電子のスピン状態が転移する近傍で、電子スピンと核スピンの相互作用が生じ、核スピンの緩和時間が二次元電子系の状態により大きく制御できることを示した。これは、全電気型核スピン制御に道を拓く画期的な成果である。また、希釈磁性半導体におけるキャリア関連に関して研究を進め、超格子中でのキャリアのコヒーレント振動を THz スペクトロスコピーで測定することに成功した。後者では、フェムト秒レーザにより誘起される伝導電流の瞬時波形を読み取ることで、THz 領域に及ぶ伝導率スペクトルの測定を可能にする新しい手段を開発し、超格子中をブロッホ振動する電子に利得があることを世界で初めて実験的に証明した。これは、江崎らによる提案から 30 年間議論されてきた問題に、一つの答えを出したものである。

半導体ナノ構造におけるキャリア関連の研究は樽茶グループと平山グループで推進した。量子ドット関連の研究では特に両グループの共同研究が活発に進められた。まず、量子ドットにおける代表的なスピン相関である近藤効果の物理を明らかにした。量子ドットの様々なパラメータ（磁場、電子数、外部電極との結合度）を操作することにより近藤効果を自在に制御できることを示し、スピン 1 重項-3 重項縮退での近藤効果の発見、ユニタリー極限の近藤効果の検証に繋がった。なお、近藤効果は電子スピンを用いた量子情報処理に必須の概念である電子スピンの"量子もつれ"の発現に等しく、ユニタリー極限の近藤効果は、量子ドットで理想的なスピン量子もつれを作れることを実証したことを意味している。また、単一電子スピンの読み出しを可能にするスピンプロケードによる整流特性を見出すことにも成功した。さらに、希釈冷凍機中に電氣的なパルスを送り、キャリアのダイナミクスを測定する電氣的ポンプ・プローブ法を確立し、量子ドット中での電子 1 個のダイナミクスを正確に測定した。量子ドットの励起状態から基底状態への緩和を測定し、スピン反転を伴う遷移が禁制遷移であり、緩和時間が非常に長くなることを確認した。これは、半導体で作られた、人工原子と呼ばれることもある量子ドット中で、実際の原子と同様の禁制遷移と許容遷移がきちんと成立していることを実験的に示したものであり、量子ドット中のスピンが外界から良く隔離されていることを意味している。さらに、この手法を利用して、結合量子ドット中で電子がドット間をコヒーレントに振動する様子を観測することに成功し、さらに、

パルス技術を用いてこの振動を制御することにも成功した。これは、世界最初の半導体電荷量子ビットの実現である。微細電極を用いて形成した半導体結合量子ドットを用いて、電極に印加するパルス列のみで制御できる量子ビットは、現在の半導体デバイスに最も近い形的全電気制御量子ビットとして画期的なものである。その他に、量子細線におけるキャリア相関、ドットアレイにおけるキャリア相関、分数量子化コンダクタンスを中心にした量子ポイントコンタクトにおけるキャリア相関、さらには量子ドットにおける電子スピンと核スピンの相関に関しても相関現象の理解、新現象の発見があった。

キャリア相関の研究をサポートする重要な研究として、シングルショット測定、ナノプロービング、量子情報処理の基礎研究にも力を入れ、それぞれ大きな成果を得た。シングルショット測定に関しては平山グループを中心に研究を進め量子ドットの単電子トンネル特性を高速高感度の電荷計に応用する研究を進め、量子ドット近傍に位置するトラップに電子が出入りする様子をリアルタイムで測定した。さらに、量子ドット構造を電子がひとつずつ流れる様子をリアルタイムで観測することにも成功した。

ナノプローブに関しては横山グループと平山グループで研究を推進した。低温磁場中で動作する光ナノプローブを確立し、半導体中でのキャリア特性評価に役立てるとともに、高速ナノプローブに向けて確実な進歩を得た。さらに、InAs 表面に蓄積する伝導電子と低温走査電子顕微鏡（LT-STM）の組み合わせにより、転位の周囲に形成されるフリーデル振動や量子ドットとして働くピラミッド型の結晶欠陥に閉じ込められたゼロ次元状態の電子分布の直接観測に世界に先駆け成功した。さらに、得られた観測結果と理論計算を付き合わせることで、量子ドットの閉じ込め状態などをきちんと理解するためにはナノスケールでの観察が不可欠であることを示した。量子情報処理の基礎研究に関しては「エンタングルメントの抽出実験」の具体的方法を提案し、そのために最小限必要な「2ペア（4光子）の発生および4光子干渉実験」を実現し、これを用いたエンタングルメント抽出実験を行った。これは、複数の量子ビットの一括量子測定を用いたエンタングルメントの抽出実験として世界初である。さらに、多体エンタングルメントの上限値の研究を進め、上限値への数学的証明を与えた。また、上限値が量子ドットと光の相互作用で実現可能であることを明らかにしたが、これは今後の半導体量子ドットの研究と光を用いた量子情報処理研究の融合に一步を踏み出す成果である。さらに、多体エンタングルメント量とフィデリティ（忠実度）の関係に関する理論を確立し、前述のエンタングルメント抽出実験におけるエンタングルメント量の実験的評価に役立てた。また、実現可能な線形光学によるエンタングルメント制御の提案として C-NOT や上述のエンタングルメント蒸留や W 型発生法を提案するとともに、より実際の提案の一つとして「量子切断器」を実際の不完全な実験器具で実現する方法を提案・評価した。

2．研究構想

半導体におけるキャリア相関は物性研究においては重要な役割を果たしていたが、様々な材料で得られている超伝導や液体ヘリウムの超流動のように、工学的にもインパクトを持つ相関現象の発現には至っていなかった。「相関エレクトロニクス」プロジェクトでは半導体中の様々なキャリア相関、さらにはそのコヒーレント制御の基礎研究を遂行し、その中から将来の画期的な半導体デバイスコンセプトに繋がるような相関現象をピックアップすることを目指し研究を進めた。具体的には、キャリア超流動のような強い相関、将来の量子コンピュータに繋がるような相関現象を見つけ、それらを実現する半導体システムを構築することを目指した。当初、キャリア相関として、クーロン相互作用とキャリアスピンの相関を考えていたが、研究の途中で核スピンを含む新展開があり、キャリアスピンと核スピンの相関も含めて研究を展開した。不純物や欠陥の影響を受けずにキャリア相関の研究を進めるために、高品質半導体薄膜構造ならびにナノ構造の作製技術の確立にも力を注いだ。また、キャリア相関の研究に不可欠なサポート技術として、低温におけるパルス測定法の確立、シングルショット測定、ナノプローブの開発、キャリア特性のナノスケール評価、量子情報処理理論と光子を用いた基礎実験の研究を進めた。プロジェクトはNTT、東大理学部、東大生研、産総研、総研大の5チームから構成され、NTT物性基礎研平山チームが薄膜・ナノ構造のキャリア相関、東大理学部樽茶グループが相関効果の磁場特性、東大生研平川グループがTHzを中心にしたコヒーレンス評価、産業技術総合研究所研横山グループがナノ評価技術開発、総合研究大学院大学井元グループが量子情報処理の基礎研究を分担し、NTT物性基礎研平山が全体を統括した。

3．研究成果

3.1. チーム全体の成果

本プロジェクトでは半導体中の様々なキャリア相関、さらにはそのコヒーレント制御の基礎研究を遂行し、その中から将来の画期的な半導体デバイスコンセプトに繋がるような相関現象をピックアップすることを目指し研究を進めた。目標のひとつは新しい分野である(量子)相関エレクトロニクスを確立することであったが、5年間のプロジェクトで、世界のトップレベルを行く成果を上げ、半導体中でのキャリア相関、特にその量子コヒーレント制御が将来の新しい半導体技術、量子情報処理技術として大きな可能性を持っていることを実証した。

薄膜構造におけるキャリア相関の研究では、ノンドーパヘテロ構造にバックゲートからの電界でキャリアを誘起するシステムを完成し、これを密度制御性に優れた二層構造に応用した。特に、二層系のパラメータを制御することにより、二種類の強磁性状態が同じ二層系で実現されることを示した。当初、設定した野心的な目標である超流動現象の実現には至らなかったが、二層系で

は確実に超流動現象に近づくような強いキャリア相関を確認することができた。また、分数量子ホール状態などで電子のスピン状態が転移する近傍で、電子スピンと核スピンの相互作用が生じ、核スピンの緩和時間が二次元電子系の状態により大きく制御できることを示した。これは、当初予定していなかった成果であるが、全電気型核スピン制御に道を拓く画期的な成果である。また、超格子中でのキャリアのコヒーレント振動を THz スペクトロスコピーで測定することにも成功し、超格子中をプロッホ振動する電子に利得があることを世界で初めて実験的に証明した。これらの成果は IF の高い PRL に数件掲載され、von Klitzing 博士の 60 歳を祝う、量子ホール効果国際会議において、最近の量子ホール効果を代表する話題として招待講演に選ばれた。

半導体ナノ構造におけるキャリア相関の研究では、量子ドットにおける代表的なスピン相関である近藤効果の物理を明らかにした。量子ドットのさまざまなパラメータを操作することにより近藤効果を自在に制御できることを示し、新しい近藤効果の発見、ユニタリー極限の近藤効果の検証に繋げた。また、単一電子スピンの読み出しを可能にするスピンプロケードによる整流特性を見出すことにも成功した。さらに、キャリアのダイナミクスを測定する電氣的ポンプ・プローブ法を確立し、量子ドット中での電子 1 個のダイナミクスを正確に測定した。特に、量子ドットにおいてスピン反転を伴う遷移が禁制遷移であり、緩和時間が非常に長くなることを確認した。これは、量子ドット中のスピンが外界から良く隔離されていることを意味している。これらの成果は IF の高い Nature、Science、PRL に数件掲載され、近藤効果の論文を中心に被引用回数も多く、100 回近くに達する論文もあった。さらに、この手法を利用して、結合量子ドット中で電子がドット間をコヒーレントに振動する様子を観測することに成功し、パルス技術を用いてこの振動を制御することにも成功した。これは、当初、設定した野心的な目標のひとつである半導体電荷量子ビットの実現であり、IF の高い PRL に掲載された。

キャリア相関の研究をサポートする研究として、シングルショット測定、ナノプロービング、量子情報処理の基礎研究にも力を入れ、それぞれ大きな成果を得た。シングルショット測定に関しては量子ドットの単電子トンネル特性を高速高感度の電荷計に応用する研究を進め、半導体中を単電子が動く様子をリアルタイムで観測することにも成功した。ナノプローブに関しては低温磁場中で動作する光ナノプローブを確立し、半導体中でのキャリア特性評価に役立てるとともに、高速ナノプローブに向けて確実な進歩を得た。さらに、InAs 表面に蓄積する伝導電子と低温走査電子顕微鏡 (LT-STM) の組み合わせにより、転位の周囲に形成されるフリーデル振動や量子ドットとして働くピラミッド型の結晶欠陥に閉じ込められたゼロ次元状態の電子分布の直接観測に世界に先駆け成功した。これらの成果は IF の高い PRL に 2 件掲載され、電子の波のパターンは新聞や様々な雑誌に取り上げられた。量子情報処理の基礎研究に関してはエンタングルメントの抽出実験の具体的方法を提案し、実際に光子を用いた実験を行った。これは、複数の量子ビットの一括量子測定を用いたエンタングルメントの抽出実験として世界初であり、IF の高い Nature に掲載された。さらに、量子情報処理の基礎理論の研究を進め、この分野でも数件の論文が IF の高い PRL に掲載された。

以下、各項目毎の詳細な成果を図、表を交えて説明し、各項目の最後に、波及効果、類似研究との比較、今後の展開などを成果のインパクトに関する議論も含めて紹介する。

3.2. 薄膜構造におけるキャリア相関

3.2.1. 薄膜ヘテロ構造の研究

本プロジェクトの目標は不純物や欠陥に邪魔されることなく半導体薄膜構造、ナノ構造におけるキャリア相関を研究することであり、高品質薄膜構造の成長は、薄膜構造におけるキャリア相互作用の研究のためにも、また高品質ナノ構造の作製の基礎としても極めて重要である。この目的のために、NTT グループが中心になり高品質ヘテロ構造作製技術を維持した。AlGaAs/GaAs 変調ドープ構造では移動度 5×10^6 から $8 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ を維持した。これは、世界最高品質のベルグループのウェハには及ばないが、国内で最高、世界でもトップレベルであり、分数量子ホール効果などキャリア相関を研究するのに十分な品質である。さらに、バックゲートによるノンドープ構造中へのキャリアの誘起などヘテロ構造に工夫を加え、二層のキャリア密度が広い範囲で自由に制御できる二層構造やキャリア密度がバックゲートで自由に制御可能なメゾスコピック構造に応用した。また、ノンドープ構造へのキャリア誘起特性を利用して、低温における GaAs 表面の振る舞いを明確にした。ナノプローブやフローティング構造の研究のために、InAs をベースにしたヘテロ構造の研究も進め、(111)A 面を用いると格子定数の相違がほとんど界面に沿って走る転位に吸収され、原子レベルで平坦な InAs (InSb) 薄膜が GaAs 上に成長できることを示した。

3.2.2. 二層構造におけるキャリア相関

量子ホール効果は、低温で 2 次元電子系に垂直に強い磁場を加えたときに生じる現象であり、その主たる舞台は半導体である。近年、その量子ホール系において、さまざまな場面で現象を説明するため強磁性の概念が用いられ、これをひとまとめに「量子ホール強磁性」と呼んでいる。その背景にあるエッセンスは、通常の強磁性体と同様、電子のスピン自由度（あるいはより一般的な自由度を表す「擬スピン」）と電子間の相互作用である。一般に「整数量子ホール効果」=「一体問題」、「分数量子ホール効果」=「多体問題」と思われがちであるが、系に自由度が存在する場合には、整数・分数に関わらず、相互作用は重要となる。電子のスピン自由度に加えて軌道状態の自由度も関与している場合、系は複雑で面白いキャリア相関を反映したふるまいを示す。本プロジェクトでは、二層系、分数系において、スピンの向きが異なる準位がフェルミ準位上で交差する場合におこる量子ホール強磁性について研究を進めた。これらの系のふるまいは、特に電子スピンのドメイン構造を考えることによって理解することができる。

図 1 (a) のように、2 次元電子系二層を障壁層を隔てて 10 ~ 20 nm 程度の距離で近接させた系(二層系)を考える。このような系では、電子がどちらの層にいるかという自由度によって、1 層系にはない、

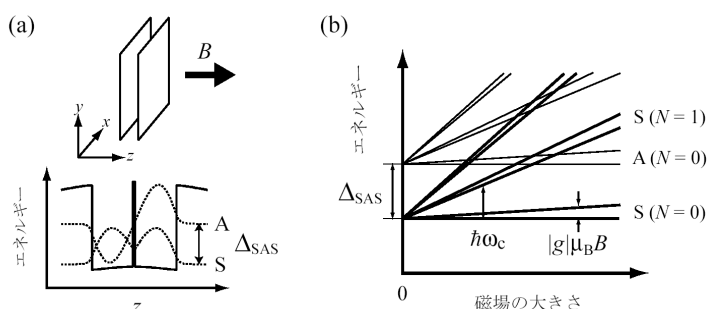


図1 (a) 二層系の模式図(上)と二層系を実現するための二量子井戸ポテンシャル(下)。点線は、対称状態(S)と反対称状態(A)の波動関数。(b) 二層系におけるランダウ準位、太い線は対称(S)状態、細い線は反対称(A)状態を表す。

2層系特有の現象が現れる。障壁が薄く電子が2層間をトンネルできる場合、電子のエネルギー準位は対称状態と反対称状態に分裂し、そのため2層系では図1(b)に示すように多くの準位交差がおこる。図からわかるように、 $\nu = 1, 2$ では $N = 0$ の最低ランダウ準位のみが関与するのに対し(ここで二層系の占有率は二層合計の電子密度に対して定義する)、 $\nu = 3, 4$ では対称状態(S)の $N = 1$ ランダウ準位と反対称状態(A)の $N = 0$ ランダウ準位が交差する。このように二層系でランダウ量子数の異なる準位が関与する場合、交差する準位のスピンやポテンシャルの対称性、二層間の距離によって、easy-plane (XY)型と easy-axis (Ising)型の強磁性のいずれも可能であることが Jungwirth & MacDonald[Phys. Rev. B63, 035305 (2000)] らにより示されている。

様々な測定を幅広く実現するためには、図1に示した交差を $B \sim 1$ T程度で実現する必要がある。具体的には、 $\nu = 4$ に対し交差を $B \sim 1$ Tの磁場で起こすには、 $\Delta_{\text{SAS}} \sim 20$ K程度の強いトンネル結合が必要となり、この条件を満たす高移動度二層系を成長し低温磁場中で測定を行った。図2(a)に、厚さ1 nmの $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x = 0.3$)を障壁層としたGaAs 2重量子井戸(井戸幅: 20 nm)構造の縦抵抗 R_{xx} をカラースケールで示す。電子密度を変える際、フロントゲートとバックゲートを同時に掃引し、量子井戸のポテンシ

ャルが常に対称となるようにしている。フェルミ準位における準位交差によってエネルギーギャップが減少し、整数占有率において R_{xx} が有限の領域が生じる。そのため図2(a)のデータは、図1(b)の2層系のランダウ準位構造をそのまま反映した形になっている。図中の白い矢印は、 $\nu = 3, 4$ において占められている一番上の準位のスピンの向きを表す。 $\nu = 4$ は、2つの準位交差によって低磁場側から(I)スピン無偏極状態 $\rightarrow$ (II)偏極状態 $\rightarrow$ (III)無偏極状態と遷移する(図2(b))。 $\Delta_{\text{SAS}} = 26.0$ Kとすると単純な一体問題で計算される遷移磁場は1.33 Tと1.38 Tとなるが、(II)のスピン偏極状態が交換エネルギーによって安定化するため、実際に遷移が起こっているのは1.22 Tと1.52 Tである。この図で際立っているのは、 $\nu = 4$ に代表される偶数の充填率に対しては準位交差に伴う R_{xx} のピークが鋭く狭く、一方、 $\nu = 3$ に代表される奇数の充填率に対しては準位交差に伴

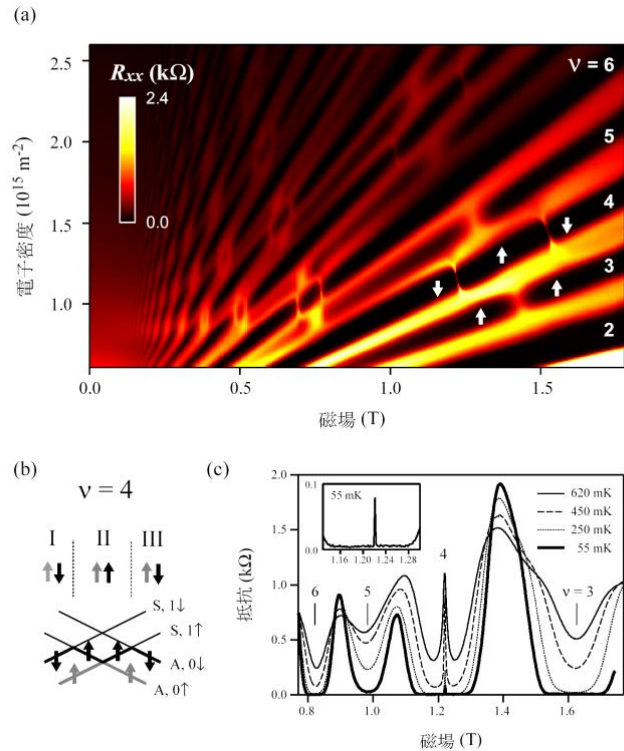


図2 (a) 対称二重量子井戸における縦抵抗のカラースケールプロット(測定温度50 mK)。白い矢印は、 $\nu = 3, 4$ において占められている一番上の準位のスピンの向きを表す。(b) $\nu = 4$ の準位交差における、フェルミ準位付近のエネルギー準位。太線は電子によって占められている準位を、矢印はその準位のスピンの向きを表す。 $\nu = 4$ は、低磁場側から、(I)スピン無偏極状態(II)偏極状態(III)無偏極状態と遷移する。(c) 電子密度 $1.18 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ における縦抵抗。 $\nu = 4$ ($B = 1.22$ T)において、準位交差によるスピン転移が起きている。挿入図： $\nu = 4$ 付近の拡大図。

う R_{xx} のピークが幅広くなることである。この両者の違いは交差するスピン状態の違いにより説明される。すなわち、 $\nu = 4$ に代表される偶数の充填率に対しては交差する準位は異なるスピン状態を有しており、交換相互作用の項が重要になり、交差点で easy-axis 型の強磁性が実現するのに対して、 $\nu = 3$ に代表される奇数の充填率に対しては交差する準位間のスピン状態が同じであり、交差点では easy-plane 型の強磁性が実現しているものと考えられる。同じ偶数充填率でも二層間の対称性を崩していくと、チャージングエネルギーの項が重要になり、easy-axis 型の振る舞いから easy-plane 型に変化していくことが観測されており、二層系でキャリア相関により強磁性が生じること、さらにその強磁性の振る舞いを二層系の様々なパラメータで制御できることを示している。

ここでは対称な二層系の、 $\nu = 4$ の交差点で観測される easy-axis 強磁性に関してさらに詳細に検討する。図 2 (c) に示すように、これらのスピン転移でも低温では R_{xx} はほぼ消失し、量子ホール効果は崩壊しない。この説明として、フェルミ準位にある電子はいっせいにスピンを反転するため転移の前後でつねに量子ホール状態が保たれる、と考えることができる。しかし、転移点で見られる非常に鋭いスパイク状のピークは、そのような一様なスピフロップからは説明できない。以下に議論するように、これは電子系がスピンの向きが異なるドメインに分かれており、その境界、すなわち磁壁の移動によってスピン反転が進行していることを示唆している。

図 3 (a) に模式的に示すように、電子系がスピンの向きが異なるドメインに分かれているとする。左右の図が示すように、転移点から離れた領域では、エネルギー的に不利な相のドメインは小さくなるはずである。したがって、占有率が整数に近く、各ドメインの内部が量子ホール状態にあるとすると、転移点から離れた領域では試料両端のエッジを結ぶ散乱過程は存在せず、 $R_{xx} = 0$ となる。いっぽう転移点では、中央の図のようにドメイン境界が試料両端を結び、これを介してエッジ間に散乱が起こると考えられる。理論では、ドメイン境界中の擬粒子の励起エネルギーがドメイン内部の励起エネルギーの半分以下となることが示されているが、図 3 (b) は、測定された転移点における活性化エネルギーが、ドメインが存在せず、系が一様であるとした場合に予想される値(図の実線)の約 $1/4$ 程度まで減少していることを示している。

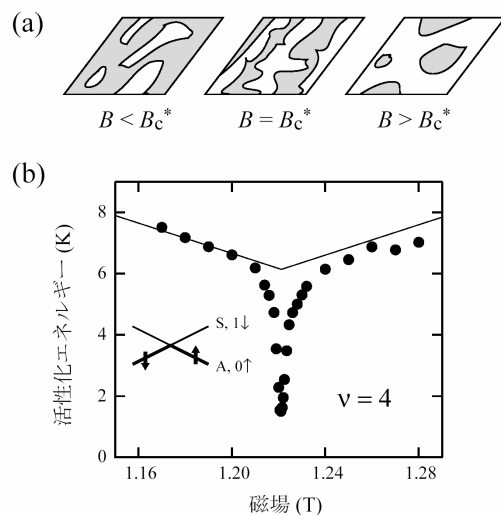


図 3 (a) スピン転移付近で考えられるドメイン構造の模式図。白とグレーの領域は、スピンの向きが異なる領域を表す。実際のドメイン構造がどのようなになっているかはわかっていない。(b) 占有率 $\nu = 4$ (一定)における活性化エネルギーの磁場依存性。実線はドメイン構造を考えない、一様な状態の場合に予想される活性化エネルギーのふるまいを表す。準位交差(挿入図)における活性化エネルギーの急激な減少は、ドメイン境界における低エネルギーの励起によるものと考えられる。

3.2.3. 二次元電子系と核スピンの相関

当初予定していなかった研究の進展として分数量子ホール系での核スピンと電子スピンの相互作用がある。将来の核スピンをベースにした半導体量子ビットの電子系による制御に繋がる可能性のあるこの現象に関して、それが電子系の強磁性とどのように結びついているかを中心に述べる。3.2.2 では電子の一粒子準位交差によるスピン転移について述べた。しかし、電子の一粒子準位交差が存在しない $\nu < 1$ の分数領域においても、スピン偏極度の異なる基底状態間の遷移は存在する。例えば、 $\nu = 2/3, 2/5$ では、ゼーマン分裂が小さい場合、基底状態はスピン無偏極であり、電子密度を上げるか横磁場を加えるなどしてゼーマン分裂を大きくしていくとスピン偏極状態へと遷移する。このようなスピン転移は以前から磁気輸送を用いて調べられていたが、最近、転移点近傍で抵抗がヒステリシスを示したり、数分から数時間という非常に長いスケールで時間変化したりするなど興味深い現象が見出された。また、これらの系では多くの場合、核スピンの関与が明らかにされている。ここでは、このプロジェクトで中心的に研究した $\nu = 2/3$ について複合フェルミオン描像を基にした解釈を含めて得られた成果を議論する。

複合フェルミオン描像では、電子に h/e の磁束 $2m$ 本 (m : 整数) を貼り付けた仮想粒子(複合フェルミオン)を考える。複合フェルミオンの占有率 ν_{CF} は、外部磁場から貼り付けた磁束分を差し引いた有効磁場 $B^* = B - 2m(h/e)n_s$ を用いて $\nu_{CF} = n_s h/e |B^*|$ と定義される。 $\nu = 2/3, 2/5$ はいずれも磁束 2 本を伴う複合粒子にとって $\nu_{CF} = 2$ であり、 B^* の符号だけが異なる。さて、仮に複合フェルミオンのエネルギーが有効磁場 B^* によって量子化され、各準位が外部磁場 B に比例してスピン分裂するとすると、エネルギー準位は図 4 (a) のようになり、スピンの向きが異なる準位が交差することになる。図 4 (a) は電子密度を一定とした場合であるが、占有率を一定とした場合は図 4 (b) のようになる。複合フェルミオンの量子化エネルギー $\hbar\omega_{CF}$ は $B^{1/2}$ に比例し、いっぽうゼーマン分裂は B に比例するため、 $\nu_{CF} = 2$ は、低磁場ではスピン無偏極、高磁場ではスピン偏極となることがわかる。 $\nu_{CF} = 2$ では、複合フェルミオンのランダウ準位 $0\downarrow$ と $1\uparrow$ が交差しており、3.2.2. と同様の議論から、この交差点で easy-axis 強磁性が実現することが期待される。

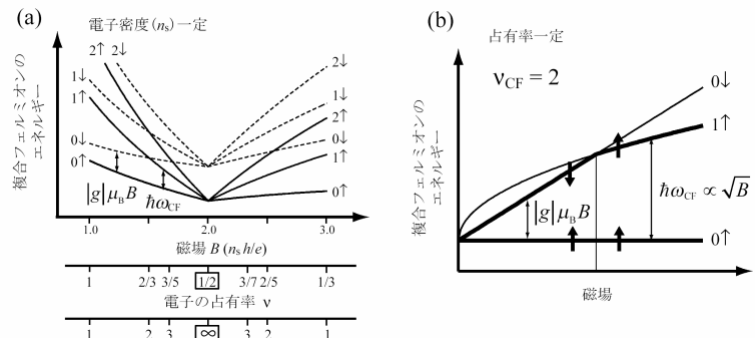


図4 複合フェルミオンのエネルギー準位。(a) 電子密度一定の場合。実線は上向きスピン、破線は下向きスピンの準位を表す。図では複合フェルミオンの有効質量が $B^{1/2}$ に比例すると仮定している。(b) 占有率一定の場合。図は $\nu_{CF} = 2$ の場合で、太線は占められている準位を表す。

図 5 (a) に、幅 20 nm の AlGaAs/GaAs 量子井戸構造における縦抵抗 (R_{xx}) をカラースケールで示す。 $\nu = 2/3$ の量子ホール領域は低磁場側のスピン無偏極状態と強磁場側の偏極状態に分かれ、その境界では R_{xx} が有限となっている。図 5 (b) に示すように、一定磁場においてゲート電圧を掃引した場合、掃引速度によって結果は大きく異なり、抵抗が非常に長い時間スケールで増大していることが分かる。図 5 (a) の白丸は、このような特異なふるまいが見られる領域とその大きさを示して

おり、 $\nu=2/3$ のスピンの転移近傍でこのような抵抗の異常が起こることがわかる。同様の振る舞いは、 $\nu=3/5$ のスピンの転移近傍でも見られる。また、図5(c)に示すように、このような領域で磁場、あるいはゲート電圧を掃引した場合、抵抗はヒステリシスを示す。

このように抵抗がヒステリシスや時間変化を示す原因として、まず電子系の easy-axis 強磁性が考えられる。転移点ではスピン偏極状態と無偏極状態がエネルギー的に縮退

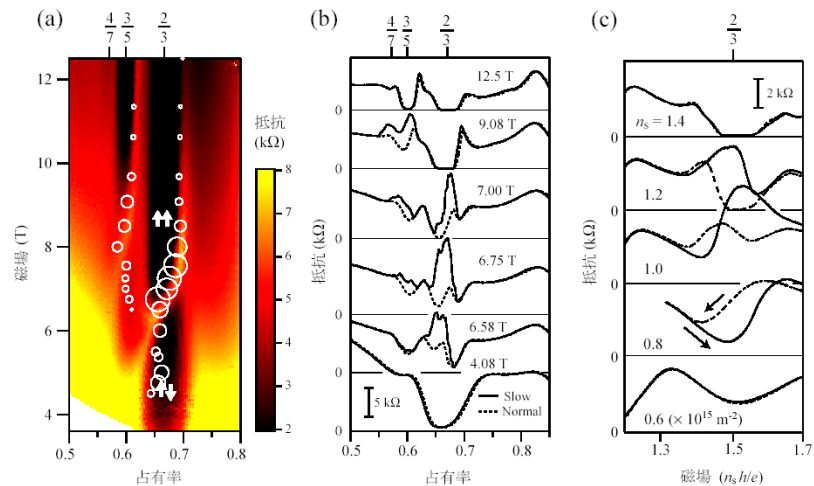


図5 (a) 幅20 nmのAlGaAs/GaAs単一量子井戸の縦抵抗のカラースケールプロット(温度: 80 mK、電流: 0.5 nA)。試料は幅50 μm のホールバー。白い丸は電流を大きく(10 nA)した場合に抵抗が異常を示す領域とその強さを表す。(b) 電流10 nAの場合の各磁場におけるゲート電圧掃引の結果(温度: 80 mK)。実線: 非常に遅い掃引速度($d\nu/dt = 2.4 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$)。破線: 通常の掃引速度($d\nu/dt = 0.6 \sim 1.8 \text{ min}^{-1}$)。 (c) 電子密度一定の場合の磁場掃引の結果。実線: 磁場を上げる方向、破線: 磁場を下げる方向(温度: 50 mK, 電流: 20 nA, 掃引速度: 0.06 T/min.)。

するため、その近傍では2つの相がドメインを作って共存していると考えられる。各ドメインの内部は量子ホール状態であるから、転移点において R_{xx} が有限となるのは、ドメイン境界を介して、試料両端のエッジチャンネル間に散乱が起こるためと考えられる。この場合、 R_{xx} の大きさはドメインの大きさや形状などを反映しているはずである。抵抗の時間変化は、磁場あるいはゲート電圧を系の緩和時間よりも早く変化させたことによって準安定的なドメイン構造が生じ、それがより安定な構造に向かってゆっくりと緩和していくことによって起こっている可能性がある。

これに加え、抵抗が異常を示すもうひとつのメカニズムとして、核スピンとの相互作用がある。電子スピンと核スピンの間には超微細相互作用が働く。電流によって電子系に非平衡が生じると、電子スピンの緩和する際に、核スピンを動的に偏極させる。こうして生じた非平衡な核スピン偏極は、電子スピンの作用し、ドメイン構造、あるいは輸送特性に影響を及ぼす可能性がある。

図6(a)は、単一ヘテロ接合の試料において、占有率を $\nu = 0.69$ に長時間 (~2000 秒) 保ち、その後、ゲートを用いて30秒間だけ電子を空乏化させて元に戻し

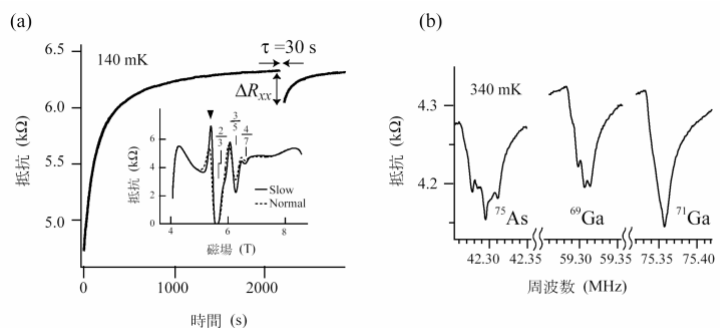


図6 (a) 占有率を $\nu=0.69$ に保った場合の縦抵抗の時間変化(電流: 100 nA)。試料はAlGaAs/GaAs単一ヘテロ構造。挿入図: 縦抵抗の磁場依存性 (実線: 0.003 T/min.、破線: 0.2 T/min.)。 (b) 抵抗が飽和した後に高周波磁場を加えた場合の抵抗の変化。

た場合の抵抗の時間変化を示す。抵抗ははじめゆっくりと増大し、2000 秒程度でほぼ飽和するが、この値は電子を 30 秒間空乏化させた後もほとんど緩和しない。抵抗の大きさは電子系のドメイン構造によって決まっているはずであるから、この結果は、核スピンの局所的な偏極により、電子が受けるゼーマンエネルギーの分布が生じ、電子スピンのドメイン構造が記録・再現されていることを示している。実際、抵抗が飽和した状態で試料に高周波磁場を加えると、 ^{69}Ga 、 ^{71}Ga 、 ^{75}As に共鳴する周波数で抵抗の減少が見られる。

このように、分数系では電子系の強磁性と核スピンとの相互作用が複雑に絡み合っているため、それらを切り離して議論することは難しい。核スピンのゼーマンエネルギーは電子スピンのそれに比べ 3 桁ほど小さく、本来、量子ホール系では電子のエネルギーが量子化されているため、単体の電子と核の同時スピン反転はエネルギー保存を満たさない。分数系のスピン転移において電子系と核スピンの結合が顕著となるのは、図 4 (b) に示すように、電子のクーロンエネルギーがゼーマンエネルギーとちょうどバランスするためであり、したがって電子相関の結果ともいえる。この分数状態での核スピン偏極による抵抗の増大と、我々のシステムでは電子密度がゲートで自由に制御できることを利用すると、様々な電子状態、充填率における核スピンの緩和を測定することができる。具体的には、 $\nu = 2/3$ で核スピンの偏極による R_{xx} の増大が飽和した後、一定時間 (τ) の間、ことなる充填率に保持し、再び $\nu = 2/3$ に戻して R_{xx} の増大がどの程度維持されているかを確認する。 τ を変化させてこの測定を繰り返すことにより核スピンの緩和時間が全電氣的に測定される。ここでは結果の詳細を省略するが、 $\nu = 1$ の両側で電子系に電子相関を反映した低エネルギーのスピン励起が存在する場合（スカーミオンと呼ばれるスピントクスチャが存在する場合）、核スピンの緩和速度が著しく速くなることが測定された。

さらに、最近の実験結果は核スピン-電子スピン相関が二次元電子系のスピン状態のわずかな変化に敏感であることを示している。例えば、通常 GaAs 系では弱いとされている、閉じ込めポテンシャルの対称性によるスピン・軌道相互作用の小さな変化が核スピンの偏極に大きな影響を与えることが明らかになった。図 7 の実験結果は閉じ込めポテンシャルが大きく非対称な場合、核スピン偏極が生じないことを示している。詳細な実験の結果、非対称閉じ込め状態では核スピンの緩和が電子スピンのスピン軌道相互作用による不安定性を反映して大幅に促進され、結果的に電流による核スピン偏極が抑圧されることが分かった。

これらの成果は核スピンの偏極、緩和が二次元電子系の様々な状態により変調できることを示しており、デコヒーレンス時間が長く将来の量子ビットとしても有望な半導体中核スピンの全電気制御を実現する技術として今後の発展が期待される。

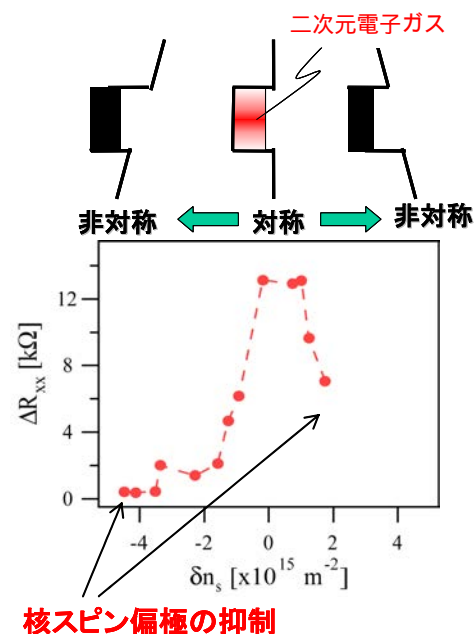


図7 核スピン偏極に基づく $\nu = 2/3$ における抵抗増大の閉じ込めポテンシャルによる変化。 $\delta n_s = 0$ が対称な閉じ込めを意味している。

3.2.4. フェムト秒レーザを用いた薄膜中のキャリアダイナミクスの研究

近年、電子デバイスの極微細化は著しく進み、従来の超高速トランジスタにおいてはチャネル長が約 30nm、量子井戸を用いた量子効果デバイスでは典型的な活性層厚さが約 10nm、さらに分子 1 個を用いたデバイスでは活性領域は約 1nm 程度であり、そのような極微領域の伝導がデバイスを特徴づけている。このような極微領域では、電子の量子力学的な波束のコヒーレンスが保たれやすい状況にある。ところが一方、完全に散乱がなくコヒーレントな系の伝導は回路論的には”reactive”であり、直流の伝導もなければ、電気信号に対する損失も利得もない。従って、ナノデバイスが機能を果たすためには、適度な散乱・散逸が必要であり、ナノ構造デバイス中の電子波束のデコヒーレンスと伝導特性の理解が必要不可欠である。

サブピコ秒の時間スケールで高速に運動する電子は、その速度の微分に比例する電磁波を放出・吸収し、一般にその周波数はテラヘルツ (THz) 領域にある。従って、電子が放出・吸収する THz 電磁波を検出・解析することにより、電子の実時間領域における運動に関する情報が得られるはずである。本研究においては、THz 電磁波の放射をプローブとして、半導体超格子中を伝導する電子について、そのキャリアダイナミクスや伝導率・利得を測定する新しい手法を開発するとともに、それを用いて半導体超格子中をブロッホ振動する電子に利得があることを世界で初めて示し、新たな THz 光源の開発に向けて大きな知見を得た。

3.2.4.(a) 半導体超格子中のブロッホ振動

異なる半導体を積層した周期的に積層した半導体超格子中では、通常のバンドは複数のミニバンド、ミニギャップ分裂する。基底ミニバンドに対する電子の分散は、cosine 的なものとなり、直流電界を印加すると、電子は等速で分散上を加速され、運動量空間でも実空間でも edF/h の周波数で振動する (ブロッホ振動)。ここに、 d, F は、それぞれ超格子の周期と印加した直流電界である。適当な値を d, F に入れてみると、容易にブロッホ周波数がテラヘルツ (THz) 領域に達することがわかり、ブロッホ発振器は超高周波の発振器として注目を集めた。

しかし、一方、超格子中をブロッホ振動する電子は本当に電磁波に対して利得を有するのか、という根本的な疑問が理論家より上がった。一般に、散乱のない理想的な超格子中に直流電界を印加すると、ミニバンドはブロッホ周波数 ν_B にプランク定数 h を掛けたブロッホエネルギーで等間隔な準位に分裂する (シュタルク梯子状態) (図 8 参照)。超格子には並進対称性があるので、各シュタルク準位上の電子密度は均一であるし、そのエネルギー間隔も均一である。従って、光の放射と吸収が全く同じ周波数で、しかも同じ強度で起こり、完全に相殺しあってしまう。この状態では、電子は光に対して、完

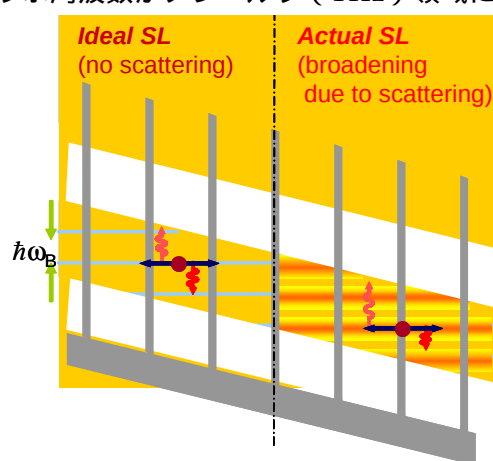


図 8 散乱のない理想的な超格子構造と散乱がある実際の超格子中のシュタルク梯子と光遷移過程。

全に回路論的に reactive になり、利得も損失もない媒質となってしまう。

しかし、実際の系には必ず散乱があり、新たな遷移機構が許される。図 9 は、シュタルク梯子準位の面内の分散を模式的に表したものである。散乱のない理想的な状態では、垂直遷移のみが許されるが、それらは上記の理由で完全に相殺してしまう。ところが散乱がある現実の系では、散乱を介した発光、吸収過程も許されるようになる。図 9 よりわかるように、大ざっぱに言えば、散乱を介した発光はブロッホ周波数 ν_B 以下で起きるのに対して、散乱を介した吸収は ν_B 以上で起きる。つまり、ブロッホ周波

数以下では発光が勝り、利得が発生するのに対して、ブロッホ周波数以上では吸収が支配的となり、損失が発生する。このように、超格子はブロッホ周波数に利得を持つデバイスではなく、ブロッホ周波数は利得と損失の境界を与えるというのが正しい理解である。この散乱を介した利得により、超格子においては無反転分布でも利得が発生する可能性がある。

3.2.4(b) THz 領域におけるキャリア伝導率測定の新手法の開発

THz 領域の利得を見るためには、伝導率 $\sigma(\omega)$ の実部が負であることを示す必要があるが、THz 領域までの伝導率スペクトルを、試料に高電界を印加した状態で測定することは、従来ほとんど不可能と考えられてきた。我々は、時間分解 THz 分光法を用いて時間ドメインで電気伝導に関する情報を瞬時によみとるという新しい手法を開発し、超格子中の THz 利得を世界で初めて測定することに成功した。

時間分解 THz 分光法では、バイアスを印加したアンドープ超格子に、フェムト秒光パルスを照射し、ミニバンド中に光励起されたキャリアが電界で加速されるときに放射する電磁波を検出する。しかし見方を変えると、フラットバンド状態でキャリアを生成し、瞬時にステップ関数的な電界を印加すると思っても、同じ THz 電磁波が放射されることがわかる。このことは、時間分解 THz 分光実験が、キャリアの電界に対するステップ応答を測定していると理解してもよく、THz 電磁波の時間波形を Laplace 変換すれば、キャリアの伝導率を求めることができる。これが今回開発した THz 領域における新しい伝

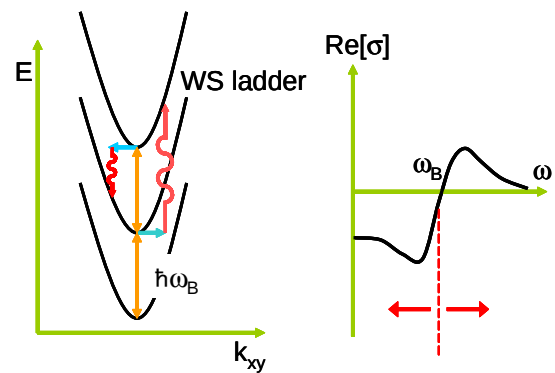


図 9 超格子中のシュタルク準位の面内分散の模式図（左）と期待されるキャリア伝導率の実部の周波数特性（右）。

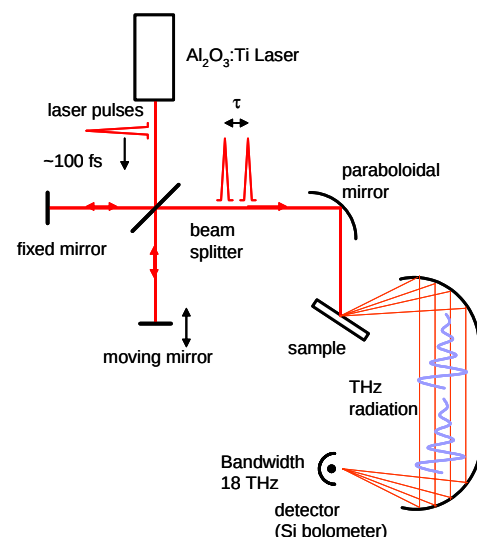


図 10 ボロメータを用いた時間分解 THz 自己相関測定系。

導率の測定法である。

図 10 に時間分解 THz 自己相関測定系の概略を示す。この測定系では、時間差 τ をつけた 2 発のフェムト秒レーザーパルスにより励起放射される 2 発の THz 電磁波のパワーを、時間差 τ の関数として測定することにより、THz 電磁波の自己相関波形を求めることができる。

図 11(a)は、試料の評価のために測定したバンド間吸収スペクトルの等高線図である。8 kV/cm 以上の電界で明瞭なシュタルク梯子状態が形成されていることがわかる。Fig. 11(b)は、放射される THz 電磁波の積分パワーの電界依存性を示している。散乱による不確定性により、シュタルク梯子が形成されていない低電界では電界の増加とともに THz 強度が強くな

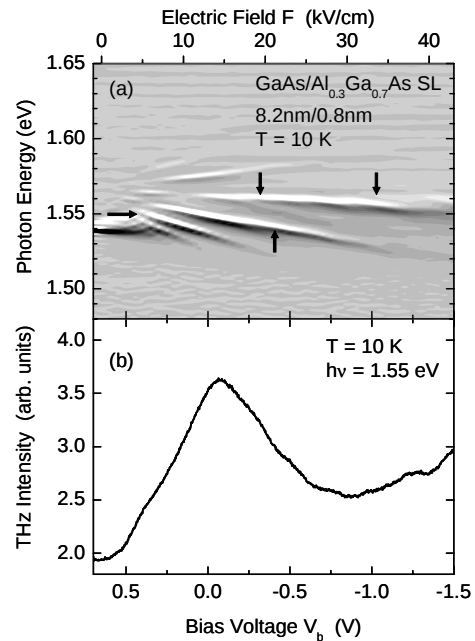


図 11 (a)超格子試料のバンド間吸収スペクトルの等高線図、(b)超格子から放射される THz 電磁波のパワーの電界依存性。

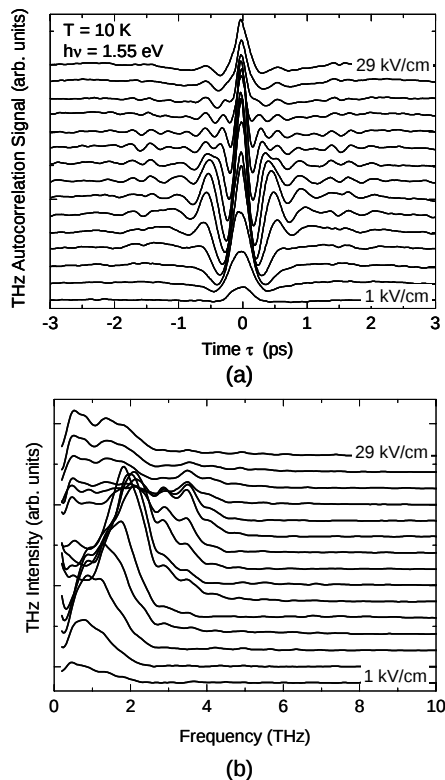


図 12 超格子から放射される THz 電磁波の自己相関波形(a)とそのフーリエスペクトル(b)の電界強度依存性。

る。これは、電界が強いほど、電子が強く加速されることに対応している。ところが、電界をさらに増加させると、やがて THz 電磁波は弱くなる。これは、電界の増加に伴い、各シュタルク準位上の電子の波動関数の空間的広がりが減少し、1 回のホップで移動できる距離が減少するためである(シュタルク局在)。図 12(a)に放射された電磁波の自己相関波形を示す。電界を増加して、プロッホエネルギー $\hbar\omega_B$ が散乱による準位のボケ以上になると、明瞭な振動波形が観測される。またその周期より、この振動がプロッホ振動と確認された。また、図 12(b)に自己相関波形のフーリエスペクトルを示す。電界の上昇に従って、次第に高周波側にシフトするピークがプロッホ振動による THz 放射である。しかし、20 kV/cm 以上の電界ではスペクトルは非常にブロードになる。この効果は、Zener トンネル効果に

よるものであるが、これについては後述する。

3.2.4(c) 超格子中のプロッホ利得の観測

3.2.4(b)での議論によれば、図 12(b)に示す THz 電磁波のパワースペクトルは $|\sigma(\omega)|^2$ に比例するはずである。そこで、測定により得られた THz パワースペクトルと理論的にミニバンド伝導により期待される電子の伝導率の比較を行った。

図 13 は、その結果を示す。散乱によるエネルギーの不確定性に比べてプロッホエネルギーが小さい 1 kV/cm では、伝導率はほぼドルーデ的な振る舞いを示す。また、THz 放射のスペクトルと $|\sigma(\omega)|^2$ スペクトルの一致もよい。自己相関波形にプロッホ振動が見られる 11 kV/cm の時 (Fig.13(b)) では、伝導率の実部 $\text{Re}(\sigma(\omega))$ は、約 2 THz まで負の領域を持つことが予想される。一方、伝導率の虚部 $\text{Im}(\sigma(\omega))$ は、プロッホ周波数でシャープな極小値を示す。また、THz 放射のスペクトルと期待される $|\sigma(\omega)|^2$ スペクトルは、極めてよい一致を示す。このよい一致は、我々が提案した高電界下の電子伝導率を THz 領域まで測定する新しい手法が、非常に定量性に優れている方法であるということを物語ると同時に、超格子のミニバンド中を伝導する電子が約 2 THz まで利得を有していることを強く示唆している。この成果は、江崎らによる提案以来 30 年間も議論され続けてきた超格子中のプロッホ利得が、確かに数 THz まで存在することを世界で初めて示したものである。

この段階では、測定系が THz 電磁波のパワーを測っているため、電子伝導率の絶対値の 2 乗 $|\sigma(\omega)|^2$ しか測定できず、本当に伝導率の実部 $\text{Re}(\sigma(\omega))$ が負になっているかの証明としてはやや弱い。そこで、さらに測定系を改良して、電気光学結晶に THz 電磁波を集光し、THz 電磁波による複屈折率の変化をプローブ光で読

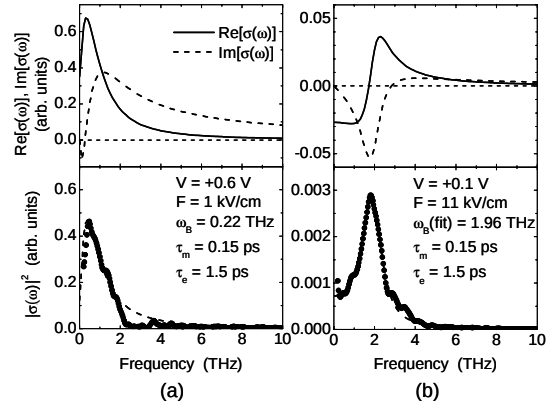


図 13 上図：期待される電子伝導率の実部（実線）と虚部（点線）の理論値、下図： $|\sigma(\omega)|^2$ の理論値と実験で得られた THz スペクトル（黒点）。(a)印加電界 $F = 1$ kV/cm の場合と(b) $F = 11$ kV/cm の場合。

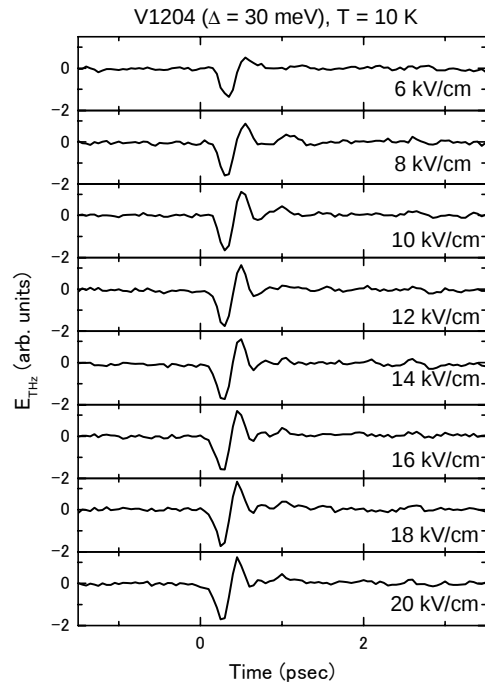


図 14 THz 電気光学サンプリング法で測定した超格子から放射される THz 電磁波の電界波形。

み出すという THz 電気光学サンプリング法により、THz 電磁波の電界の時間波形を測定した。測定系の詳細は割愛するが、図 14 は、ミニバンド幅 30 meV の超格子構造から放射される THz 電界の時間波形を測定したものである。THz 電界はキャリアの加速度に比例す

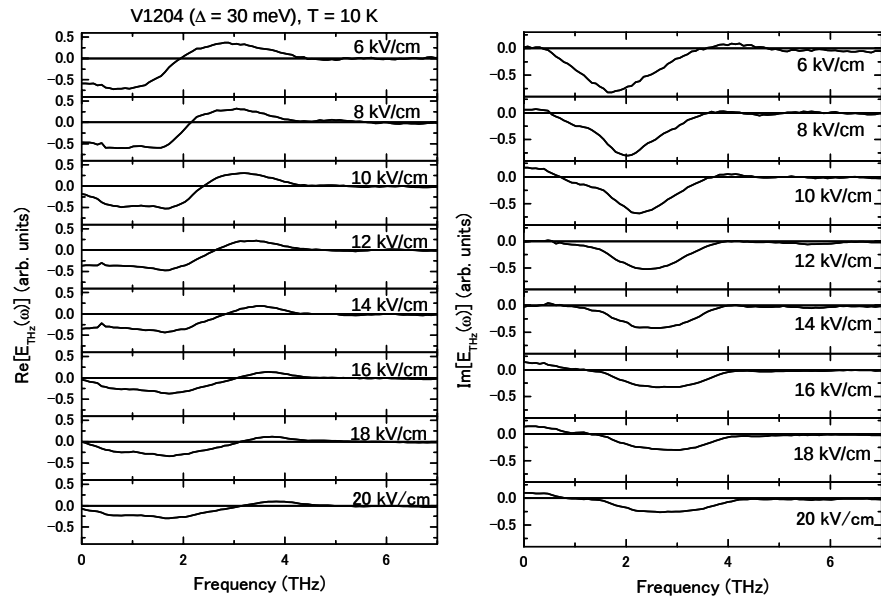


図 15 超格子から放射される THz 電界のフーリエスペクトルの実部(左)と虚部(右)。

るので、図 14 はミニバンド中で電子が交互に加速・減速されている様子を示している。この THz 電界波形のフーリエスペクトルをとると、3.2.4(b)の議論より、その実部は $\text{Re}(\sigma(\omega))$ に、また虚部は $\text{Im}(\sigma(\omega))$ に比例するはずである。そのような解析を行った結果を、図 15 に示す。図 13 の計算から期待されるとおり、 $\text{Re}(E_{\text{THz}}(\omega))$ は $\text{Re}(\sigma(\omega))$ に比例した分散特性を示し、確かに低周波数側で負になるとともに、負から正に移る周波数が電界とともに増加している。この振る舞いは、ブロッホ利得の実験的な証拠と言ってよい。また、 $\text{Im}(E_{\text{THz}}(\omega))$ がブロッホ周波数でディップになるのも予想通りである。本内容は、ブロッホ利得の証拠やミニバンドの伝導の時間発展を示した世界初の論文であり、しかるべきところに投稿する予定である。

3.2.4(d) ブロッホ振動の緩和機構

3.2.4(a)で議論したように、超格子中の電子のブロッホ利得は、散乱を介した 2 次の遷移により発生する。従って、ブロッホ振動における支配的な散乱機構を明らかにすることは極めて重要である。そのために、ブロッホ振動の緩和の様子をバイアス電界や温度の関数として、系統的に調べた。図 16 は、超格子試料のバンド間遷移吸収スペクトルの電界依存性(等高線図)と THz

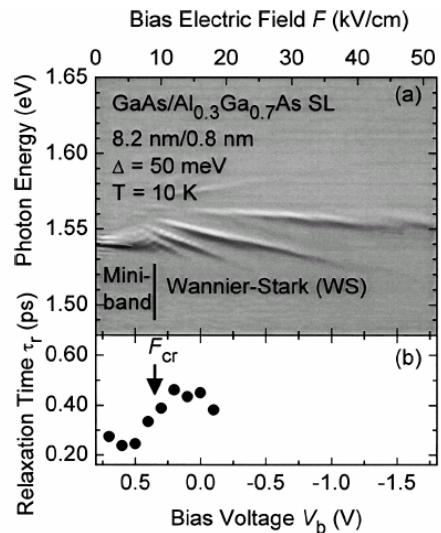


図 16 バンド間遷移吸収スペクトルのバイアス電界依存性(等高線図、上図)とブロッホ振動の緩和時間の電界依存性(下図)。

放射スペクトルの半値半幅から求めたブロッホ振動の緩和時間 τ_r の電界依存性を示す。図からわかるように、約 8 kV/cm を境にして、低電界側では τ_r は約 0.25 ps、高電界側では約 0.45 ps と大きく変化する。また、ちょうど 8 kV/cm あたりの電界からシュタルク梯子が明瞭に見え始める。このことは、8 kV/cm を境にして、支配的な散乱機構が移り変わっていることを示唆している。

さらに、3つの異なる試料について、低電界側と高電界側で散乱時間の温度依存性をまとめたものを図 17 に示す。図からわかるように、低電界領域では散乱時間は全く温度依存性を示さない。このことは、弾性散乱が支配的なことを物語っている。また、3つの試料について、全く試料依存性が見られないことから、散乱体はすべての試料に共通なものである。これらのことは、低電界領域での支配的な散乱が界面ラフネス散乱であることを強く示唆している。

一般に、ラフネス散乱では、界面の凹凸の典型的な横方向サイズ Λ としたとき、電子の面内散乱波数 $k_{||}$ が、 $k_{||} < \Lambda$ を満たす場合に散乱が起こる。従って、印加電界を増加させて、シュタルク梯子準位の間隔を大きくすると、やがて散乱に必要な $k_{||}$ が $1/\Lambda$ よりも大きくなり、散乱することができなくなる。図 17 より、ちょうど 8 kV/cm 程度でこのクロスオーバーが起きていると考えられる。ちなみに、この臨界電界から逆にラフネスの大きさ Λ を求めると、約 8 nm となり、量子井戸中の移動度から求められるラフネスのそれとよく一致する。

一方、高電界領域(図 17(b))ではさらに大きな $k_{||}$ が必要となるため、散乱体はさらに short range のものでなければならない。この条件を満たす散乱体は、超格子のポテンシャル障壁中の Al による合金散乱である。そのことを裏付けるように、高電界領域では障壁が厚く、Al の統計的なばらつきが小さい試料ほど、低温での散乱時間が長くなっている。また、散乱時間の温度依存性は小さく、室温までであれば、フォノン散乱は支配的ではないと結論することができる。

3.2.4(e) ブロッホ利得の周波数上限

電界を増加すると、ブロッホ周波数も増大するが、ブロッホ利得の周波数上限の決定機構を議論したい。図 12 に示すように、ブロッホ振動による明瞭な THz 放射は約 15 kV/cm 以下で観測され、それ以上の電界を印加すると、THz 放射スペクトルは非常にブロードになる。さらに電界を増加させ、30 kV/cm に近づくと、スペクトルはドルーデ的なものに戻り、ブロッホ利得が失われていることを示している。

我々は、このような振る舞いは、基底ミニバンドから上位ミニバンドへの共鳴および非共鳴の Zener tunneling によるものと考えている。実際、図 11 のバンド間遷移スペクトルの高電界領域には、矢印で示したところで、anti-crossing が見られる。これは、基底ミニバンドのシュタルク

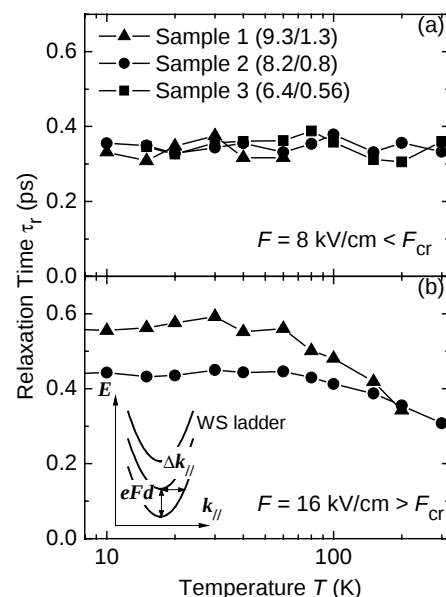


図 17 低電界領域(a)と高電界領域(b)における緩和時間の温度依存性。

梯子と第1励起ミニバンドのシュタルク梯子が交差していることを意味しており、共鳴的に電子が下のミニバンドから上のミニバンドへトンネルし、プロッホ振動が起こらなくなる。

また、そのような振る舞いは、放射される THz 電磁波パワーのバイアス依存性にも現れ、図 18 に示すような THz 放射強度が印加電界の逆数で周期的に振動するという現象が観測された。これは、共鳴 Zener tunneling により理解することができる。これらのことより、電子伝導が、Zener tunneling により、ミニバンド内の往復運動（プロッホ振動）から上位ミニバンドへのトンネル・緩和モードに切り替わることが、超格子のプロッホ利得の周波数上限を決定していることがわかる。

3.2.5. 薄膜構造におけるキャリア相関研究のインパクト

高品質半導体ヘテロ構造は世界トップのベル研には及ばないものの、世界でトップレベル、国内ではトップの品質をプロジェクトの全期間を通して維持した。これらのヘテロ構造は本プロジェクトに用いた様々な薄膜・ナノ構造の基礎をなしており、研究進展に大きく貢献した。特に、高移動度は低磁場で二層系の特性を明確にし、分数量子ホール効果領域での電子スピンと核スピンの相関を明瞭に観察するのに貢献した。また、バックゲート構造はキャリア密度のバックサイドからの制御を実現し、二層系、バックゲート制御ナノ構造の研究に貢献した。さらに、本プロジェクトとの直接のかかわりは少ないが、高移動度ヘテロ構造は希少価値のウェハとして国内外の様々な共同研究に重要な波及効果をもたらした。高品質ヘテロ構造の成長、様々なヘテロ構造への取り組みは、説得力のあるきれいな測定データに不可欠な研究として、今後も継続してその維持、推進に努める。また、InAs、InSb の GaAs(111)A 面上への成長も、そのフリースタンディング状態での特性に着目して研究を進めた。これらの成果はユニークな構造と言うこともあり積極的に論文発表、国際会議発表を行い、その成果は主に IF=4.2 の APL 誌に掲載され（Kanisawa 他、APL76、589(2000)、Yamaguchi 他、APL78、2372(2001)）ともに被引用回数は 10 件を超えている。今後、フリースタンディング構造に関しては AlGaAs/GaAs 系も含め、将来のフォノン制御に向けて研究を継続する予定である。

二層構造に関してはその電子相関、特にランダウ準位交差に伴う量子ホール強磁性性に関して世界的に認められる成果を上げ、インパクトファクタの高い（IF=7.3）PRL 誌に 2 件掲載された（Muraki 他、PRL87、196801(2001)、Kumada 他、PRL89、116802(2002)）。本プロジェクトでは計画が少し遅れたが、二層の独立コンタクト形成にも成功しており、継続してキャリア相関の研究を、超流動の実現も含めて推進する。すでにアメリカのグループがキャリア相関による超流動を示唆する素晴らしい実験データを得ているが、二層系のキャリア相関は半導体物理、デバイスの大きな進展に繋がる可能性がある重要な研究である。また、二層系は量子ドット構造などを縦型に積層し

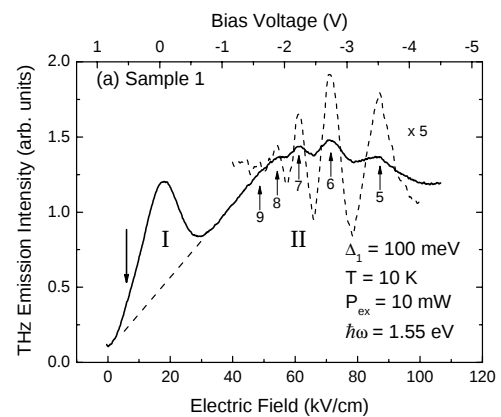


図 18 THz 放射パワーのバイアス電界依存性。

た構造への拡張も期待される。本プロジェクトでは分数量子ホール効果領域における電子スピンと核スピンの相互作用を明らかにし、全電気型の核スピン制御の可能性を示したが、この成果も $IF=7.3$ の PRL 誌に掲載された (Hashimoto 他、PRL88、176601(2002))。この論文はその後の当該分野の定番の引用文献となっており、まだ掲載から 1 年半しか経ていないが被引用回数は 10 回を超えている。核スピンはデコヒーレンスの時間が長く、将来の量子コンピュータに向けた量子ビットとしても大きな期待が持たれている。この核スピンを半導体中でしかも電子系で制御する技術は大変興味深く、今後も半導体中核スピンを用いた量子ビットを視野に入れて研究を継続する。量子ビット以外にも半導体システムに核スピンという新しいパラメータを導入する研究は様々な波及効果が見込まれる。なお、我々の成果は 2003 年 7 月にシュツットガルトで開催された von Klitzing 教授の 60 才を祝う量子ホール国際会議において招待講演に選ばれた。このことも、量子ホール効果に関する研究で、世界を代表するグループのひとつとして、本プロジェクト内のヘテロ構造に関する研究チームが認められていることを示している。

一方で、本プロジェクトで行った超格子中のキャリアダイナミクスに関する研究の成果には 2 つの意義がある。第 1 は、今まで不可能と考えられてきた、高電界印加状態での THz 領域に及ぶ伝導率スペクトルの測定を可能にする新しい手段を開発したことである。この手法は、フェムト秒レーザにより誘起される伝導電流の瞬時波形を読み取るというものであり、電子の時間領域での動きと、伝導率という周波数領域での概念を結びつけ、トンネル効果や電子波のコヒーレンスと言った非古典的な概念がデバイス特性に及ぼす影響を議論する新しい手段を提供したと考えている。また、この手法は、超格子のような量子効果デバイスのみならず、一般の超高速トランジスタなどにも容易に応用でき、現在のネットワークアナライザーで測定不可能な 100 GHz 以上の遮断周波数も測定できる新しい評価装置の実現へと発展すると考えている。第 2 の意義は、この新しい手法を半導体超格子に応用し、超格子中をプロッホ振動する電子に利得があることを世界で初めて実験的に証明したことにある。江崎らによる提案から 30 年間議論されてきた問題に、一つの答えが出せたと考えている。今後、実際にプロッホ振動を用いて、電磁波を増幅させる実験に発展させようと考えているが、一方、プロッホ利得は 2 次の遷移を利用したものであり、反転分布による利得に比べて約 $1/10$ 程度と考えられる。従って、超格子構造で反転分布を実現した方が有効であるのは明らかである。我々は、シュタルク梯子の間隔により大きく散乱時間が制御できることを見いだした。例えば厚さの異なる量子井戸 2 つを 1 ユニットとする変調超格子を適当に設計することにより、量子カスケードレーザではカバーしきれない低周波の THz 光源が開発できる可能性も秘められている。

これらの成果は $IF=7.3$ の PRL 誌に掲載された (Shimada 他、PRL90、46806(2003))。その他、関連の論文が $IF=4.2$ の APL 誌 (Shimada 他、APL81、1642(2002)) に掲載されているほか、 $IF=3.3$ の Physical Review 誌などにも掲載されており、今後の APL 誌への掲載も予定されている。まだ最新の成果であり被引用件数は現時点では少ないが、超格子のキャリアダイナミクスを扱った論文として、今後被引用件数は大きく伸びると期待される。なお、InAs 量子ドットの束縛状態と連続状態の遷移を議論した論文 (Lee 他、APL75、1428(1999)) は被引用回数が 65 を超えていることを付記する。

3.3. ナノ構造におけるキャリア相関

3.3.1. 人工原子の電子間相互作用

電子の占有する量子準位がエネルギー的に縮退している場合には、電子のスピンはフント則に従って強磁性的になることが知られている。このことは、我々が、回転対称性の高い閉じ込めポテンシャルをもつ人工原子を用いて検証した。この研究を継続し、磁場と電子数の関数として、量子準位の縮退、非縮退を厳密に調節することにより、強磁性的相互作用と反強磁性的相互作用の影響を制御できることを初めて実証した。具体的には、磁場中で軌道ランダウ縮退がおこる時(即ち電子充填率が2となる時)2電子状態はスピン1重項(反強磁性状態)と3重項(強磁性状態)の間で縮退する。この様子を詳細に調べることにより、スピン状態に対する交換項と直接項の寄与を明らかにした。

一般に、強磁場を印加すると電子準位はランダウ縮退するので、電子系の全エネルギーへの寄与は、運動エネルギーに比べて相互作用エネルギーが次第に大きくなる。これに伴って、電子相関に関係する様ざまな電子状態の遷移が起こることが期待される。我々はランダウ充填率が1前後、及びそれ以下の強磁場領域に注目して実験を行い、スピン相互作用、クーロン相互作用に起因する多彩な電子状態の遷移を見出した。スピン反転によるスピン偏極と最大密度電子液滴の形成、電子液滴の再構成、また、ごく最近では、古典的電荷分布を反映する角運動量魔法数状態の形成、強磁場極限で3角格子(古典的電荷配置)の存在を特徴付ける魔法数の存在などを確認した。

3.3.2. 量子ドットの近藤効果

外部電極と強くトンネル結合した量子ドットでは、ドット中の局在スピンと外部電極中の伝導電子の1重項結合に起因して近藤効果が出現することが知られている。量子ドットの近藤効果は、通常、ドットが奇数個の電子を含み、従って不對の電子スピンを持つ場合(全スピン $S=1/2$)に起こる。一方、電子数が偶数の場合には、不對の電子スピンがない($S=0$)ので近藤効果は起こらない。その典型として2電子系を考えると、軌道の自由度があるので、2電子スピンは1重項($S=0$)か3重項($S=1$)の状態をとる。一般に1重項では近藤効果は起こらず、3重項では弱い近藤効果が起こると期待される。しかし、我々は、縦型量子ドットを使ってスピンと軌道を厳密に制御することにより1-3重項を縮退させると、1重項は3重項の近藤効果を強めるように働き、結局、通常の $S=1/2$ の場合より強い近藤効果を発現するという新奇な現象を見出した(図19)。これは、多重チャネルの近藤効果として解釈される。

また、横型量子ドットを使って、弱い磁場中でドット中の電子の充填率、及びドットと電極の結合度を制御することにより、完全な近藤効果(ユニタリー極限)を初めて観測した。

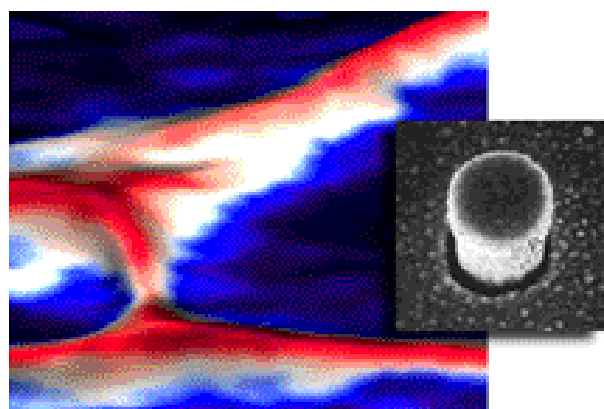


図19 縦型量子ドットにおける伝導度のゲート電圧(縦軸)・磁場(横軸)依存性とドット概観。横方向に走る上下2本の線をつなぐ縦線上で、電子数6の近藤効果が起こっている。

これは完全なスピン相関が起こっていることを意味している。このほか、2種類の近藤結合が共存する現象、非平衡電極電子の関与する近藤効果などを観測した。

3.3.3. 結合ドットのパウリ効果とスピンプロケード

パウリ則はフェルミ粒子の基本則であり、伝導現象にも影響を及ぼすと考えられるが、その検証実験は難しい。これは、理想的な直列接続の準位系を作ることが難しいためである。我々は結合量子ドットを使って、実験に適した系を実現した。まず、直列に結合した2個の量子ドットに2電子が存在し、スピン3重項を形成している場合を考えよう。ここで、電子は各量子ドットの最低準位の軌道(1s軌道)を占有するものとする。この3重項は励起状態であるが、基底状態であるスピン1重項に緩和しない限り、3重項状態にある電子は、パウリ効果のためにドット間を動くことができない。これは、この結合ドットを通しては、電流が流れないことを意味する。我々は、このような結合ドットを、2次元円盤のドットを縦に重ねることによって作成した(図20)。結合ドットに取り付けたゲート電極の電圧、結合ドットの両外側にある外部電極(ソース、ドレイン)間の電圧を調整することによって、電子スピン3重項状態を実現した。図2は、この時に測定した電流-電圧特性で1から6 mVの間で電流が著しく小さい領域が見られる。これが、パウリスピンプロケードである。

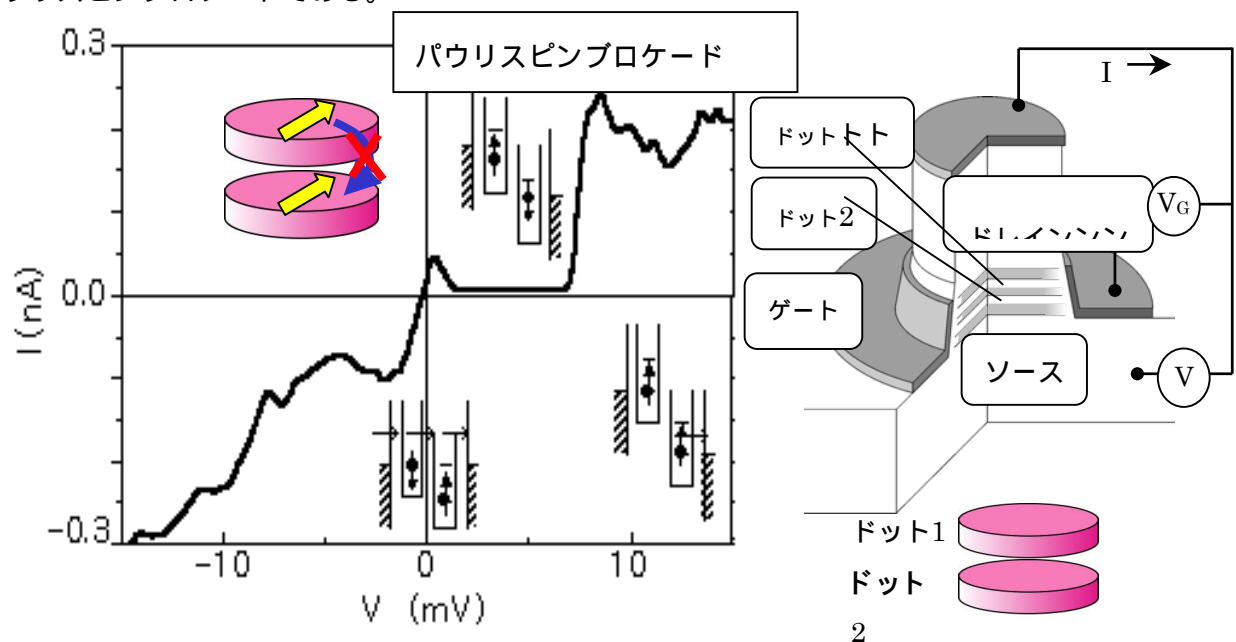


図20 スピンプロケード現象と試料構造。左のリードからの電子注入によって1重項、あるいは3重項ができる。1重項ができれば電子は左から右のドットへとトンネルする。一方、一度3重項ができるとパウリ原理が効いて電子のトンネルは禁止される。これを反映して正バイアス側にスピンプロケード領域が現れる(1-6 mV)。

3.3.4. 量子ドットのキャリアダイナミクス

量子ドットにおける電子のダイナミクスに関する研究は半導体量子コンピュータの実現などに向けて必要不可欠な研究であり、研究期間を通してその推進に努めた。この項では、我々の高速パルスを利用した電氣的ポンプ・プローブ測定を紹介し、量子ドット中の電子の軌道自由度

とスピン自由度に関するエネルギー緩和時間の測定、および長寿命のスピン状態を反映して単一電子トンネル描像が破れる様子について述べる。

量子ドットでは、多体効果によって全スピンの異なる離散準位が形成されることから、電氣的ポンプ・プローブ法を用いて、これらの緩和機構をきちんと議論することを試みた。以下の測定では、図 21(a)のように GaAs/InGaAs/GaAs 共鳴トンネル構造をピラー型に狭窄した縦型量子ドットを用いて詳細な測定を行った。このしばしば人工原子と呼ばれる素子では、電子数とスピン状態を明確に特定することのできる、調和振動子型のポテンシャルで閉じこめられているため、理論との比較が容易であるという特徴がある。

最も単純な機構は、スピンの変化を伴わずに、電子格子相互作用によってフォノンを放出するものである。1 電子の量子ドット（人工水素原子）で、2p 軌道を電子が占有する励起状態から、1s 軌道を占有する基底状態への緩和[図 21(b)]を考える。この緩和過程を測定するために用いたのが図 21(c)の二段階からなる電氣的ポンプ・プローブ法であり、最初のパルスで基底状態も励起状態も空にしたあと、次のパルスで励起状態のみを電流の流れる領域にセットする。電流は量子ドットの励起状態を通して流れるが、電子が励起状態から基底状態に緩和するとクーロンブロッケードにより電子の流れはストップする。縦型量子ドットにこの二段パルスを適用した結果を図 21(d)に示す。この図で、縦軸は過渡電流を単位パルスあたりに流れる平均のトンネル電子数に変

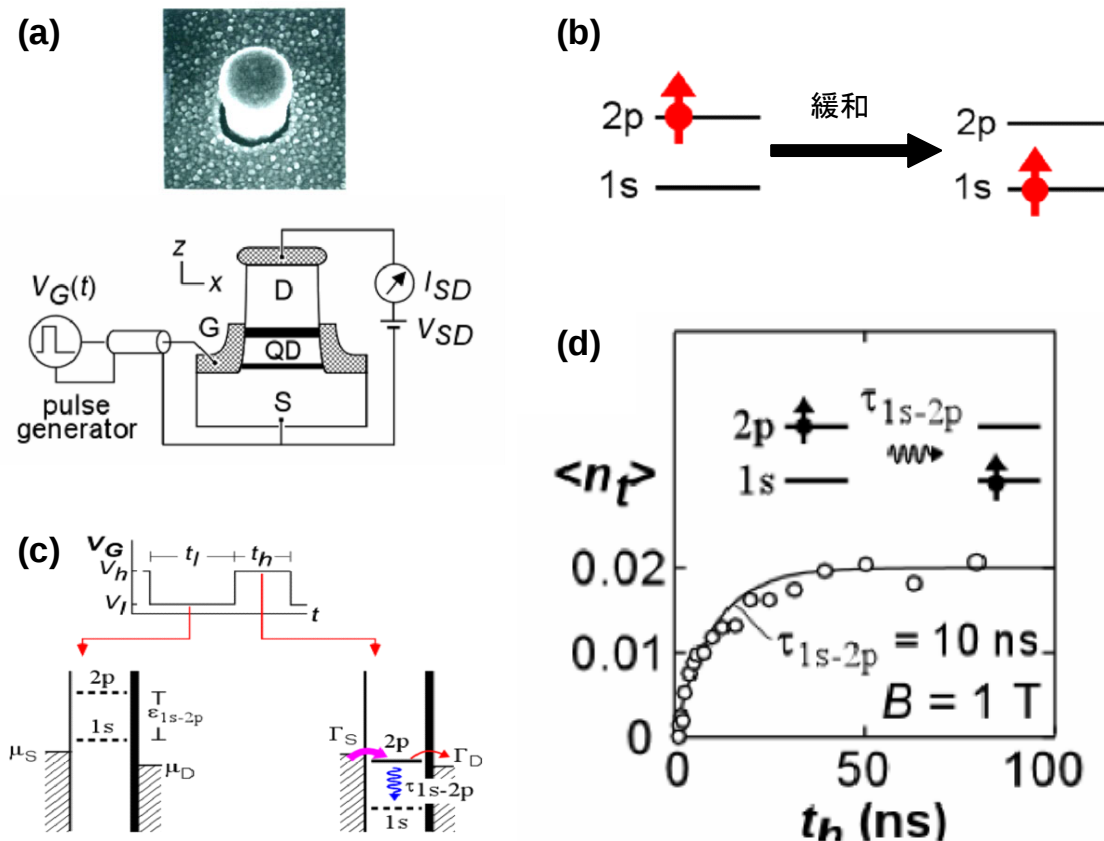


図 2 1 (a)縦型量子ドットの S E M 写真とパルス測定回路。(b) 1 電子量子ドットの軌道角運動量緩和過程。(c)測定に用いたパルス列。(d)過渡電流測定から得られた平均的なトンネル電子数。

換した値である。このパルス時間依存性から、緩和時間が約 10 ns であることがわかる。この緩和時間はスピンの反転しないフォノン放出による許容遷移の緩和時間として理論的に予想されている値と良く一致する。

一方、スピン反転を伴う緩和過程では、スピン反転機構を必要とするため、緩和時間はさらに長くなる。2 個の電子が入った縦型量子ドット（人工ヘリウム原子）の場合には、図 22(a)のように基底状態がスピン一重項(S)で、第一励起状態はスピン三重項(T)となる。この場合の緩和時間は、図 21(c)で述べた矩形パルスによる方法では測定できないほど長い（数 μs 以上）。そこで、改良した三段からなるパルス測定を用い、緩和のみが起こる時間領域と、緩和せずに残った電子を電流として測定する時間領域を分離した測定を行い、非常に長い緩和時間を測定することに成功した。図 22(b)はその結果を示しており、パルス時間を 100 μs にしても、半分程度の電子しか基底状態に緩和していないことを示している。このスピン緩和時間（200 μs 程度）は、磁場によって一重項-三重項間のエネルギー差を変化させても、温度を 0.5K 程度まで上昇させても、大きな変化はない。温度を 1K まで上昇すると減少するが、これは量子ドットから電極への熱的励起に起因すると考えられる。ただし、低温でも励起状態のエネルギーと電極のフェルミエネルギーの差により緩和時間が変化する現象が測定されている。これは高次のトンネル過程（コトンネリング）によってドット内の電子スピンと電極の電子スピンが入れ替わりエネルギー緩和が生じることで説明される。

この実験でのスピン緩和時間はコトンネルにより決定されていると思われるが、コトンネルによる影響はトンネル障壁を厚くするなどにより容易に軽減できる。その結果、スピン軌道相互作用などの本質的な量子ドットのスピン緩和機構が支配的になると考えられる。逆に、今回の結果は

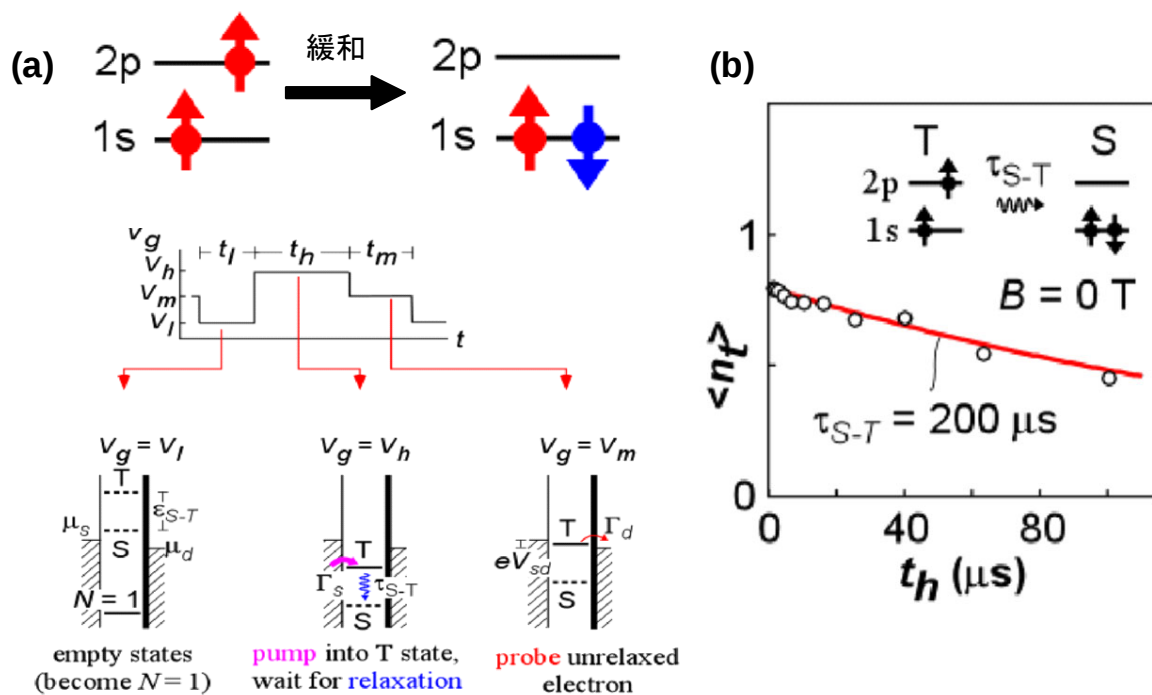


図22 (a) 2 電子量子ドットのスピン緩和過程と緩和時間測定に用いたパルス列。(b) 2 段パルス測定による平均的なトンネル電子数。

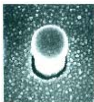
スピン軌道相互作用などの寄与が十分弱い(緩和時間で $200\ \mu\text{s}$ 以上である)ことを意味しており、GaAs のスピン軌道相互作用による理論計算と一致している。なお、本実験は全スピンを変化させる遷移に関するスピン緩和であるが、ゼーマン分裂した準位間のスピン緩和過程においても、緩和時間が十分に長くなると考えられる。これらの緩和時間は典型的なスピン操作に要する時間よりも十分に長く、量子ドットの電子スピンを用いたメモリ(特に量子ビット)への応用の可能性を示唆している。

さて、量子ドットは人工原子とも呼ばれるが、どの程度、自然の原子と似ているのであろうか。表 1 は、(ゼーマン分裂を除く)第一励起状態から基底状態への緩和過程を比較したものである。自然の水素原子では良く知られた発光過程による許容遷移がおこるが、量子ドットではエネルギーが非常に低いことから電磁波との結合は非常に弱い。しかし、電子格子相互作用によって、1 電子系の量子ドット(人工水素原子)では、フォノン放出に関する許容遷移が支配的である。メカニズムもエネルギー領域も全く異なる人工原子と自然の原子で、緩和時間がほぼ同程度であることは、偶然にしても興味深い。一方、2 電子系の量子ドット(人工ヘリウム)では、スピンに関する選択則によって禁制遷移とみなすことができ、単純に禁制遷移と許容遷移の緩和時間の比(選択比)をとると 3×10^4 以上である。自然のヘリウム原子の場合は、スピンとパリティによって二重に禁制されているため、人工原子とは比べものにならないくらい長い緩和時間を示す。ところが、量子ドットの母体元素(Ga, As)とほぼ同じ原子番号(スピン軌道相互作用は原子番号とともに大きくなる)の 1・2 電子原子である Ca と K の比較でみると、選択比 1.5×10^5 と量子ドットの値に近い。人工的に作られた量子ドットでも、自然の原子と同程度の選択則が成り立っていることは興味深い発見であった。

最後に、量子ドットのスピン緩和時間が非常に長いことを述べたが、長寿命スピン状態に起因して非平衡トンネル現象も生じる。ここでは詳細は省略するが単純な単電子トンネルの理論は電子がすべて基底状

態に存在することを暗黙に仮定しており、これが崩れる現象が実際に観察されている。量子ドットにおいて単一電子・スピンを操作する場合にはこのような過程が存在することも考慮に入れて実験データを解析する必要がある。

表 1 人工原子と自然の原子のエネルギー緩和過程。

	 artificial atoms (quantum dots)	 real atoms	
one-electron system	$2p - 1s$ allowed for phonon emission $\tau = 3 - 10 \text{ ns}$ ($\hbar\nu \sim 2 \text{ meV}$)	$\text{H } 2p - 1s$ (Lyman α) allowed for photon emission $\tau = 1.6 \text{ ns}$ ($\hbar\nu = 10.2 \text{ eV}$)	$\text{K } 4p - 4s$ allowed for photon emission $\tau = 2.6 \text{ ns}$ ($\hbar\nu = 1.61 \text{ eV}$)
two-electron system	$(1s)(2p) ^3P - (1s)^2 ^1S$ forbidden by spin conservation $\tau \sim 200 \text{ }\mu\text{s}$ ($\hbar\nu \sim 0.5 \text{ meV}$)	$\text{He } (1s)(2s) ^3S - (1s)^2 ^1S$ forbidden by spin & parity $\tau = 7860 \text{ s}$ ($\hbar\nu = 19.8 \text{ eV}$)	$\text{Ca } (4s)(4p) ^3P - (4s)^2 ^1S$ forbidden by spin $\tau = 385 \text{ }\mu\text{s}$ ($\hbar\nu = 1.89 \text{ eV}$)
$\frac{\tau_{\text{forbidden}}}{\tau_{\text{allowed}}}$	> 3x10⁴	4.5x10¹²	1.5x10⁵

Spin states in artificial atom are almost ideal, comparable to real atoms.

3.3.5. 結合ドットを利用した電荷量子ビットの実現

実用レベルの量子計算には多数の量子ビットを集積化する必要があり、固体素子を用いた量子コヒーレンスの研究が盛んに進められている。本プロジェクトでは特に半導体の特徴を活かした量子ビットの実現を目指し研究を進めてきた。最近我々は前項で報告した電氣的ポンプ・プローブ測定を用いて結合ドットのどちらに電子が存在するかが量子ビットとして作用する電荷量子ビットの実証に成功したのでその概論を示す。

3.3.5(a) 半導体人工分子の二準位系（量子ビット）

ここでは、図 23(a)のように、ソース（S）・ドレイン（D）電極間に2個の量子ドット（LとR）を直列接続した構造を考える。電子は3つのトンネル障壁を介して、ソース電極からドレイン電極へ流れることができるが、それらのトンネルは、各々のドット内のクーロン相互作用（帯電エネルギー）およびドット間のクーロン相互作用（静電結合エネルギー）による影響を強く受ける。その結果、トンネル電流は、3つのトンネル過程がエネルギー的に許される「三重点」でのみ有限な値をとることが知られている。また、ドット間のトンネルのみが可能で、ソース電極またはドレイン電極へ出入りするトンネルが禁止される条件を選ぶと、過剰の電子1個が右のドットまたは左のドットを占有する2つの電荷状態のみを考えることができる。実際には、同じ電荷状態であっても、電子占有が異なる基底状態や励起状態が各々のドットに存在するが、ある特定の2つの電荷状態（ $|L\rangle$, $|R\rangle$ で表す）のエネルギー（それぞれ E_L , E_R ）が比較的近く、他の状態への励起を無視できれば、これらの電荷状態を二準位系（量子ビット）とみなすことができる。

この条件では、(近似的に)電極を無視することができ、孤立した二準位系のハミルトニアン

$$H = \varepsilon\sigma_z/2 + \Delta\sigma_x/2 \quad (1)$$

を考えることができる。ここで σ_z , σ_x は、基底を $|L\rangle, |R\rangle$ とする擬スピンのパウリ行列、 ε は局在した電荷状態のエネルギー差 $\varepsilon = E_R - E_L$ で、 Δ はトンネル結合による反交差エネルギーを表す。このときの系の固有状態は結合軌道($|b\rangle$)と反結合軌道($|a\rangle$)で、それらのエネルギー(それぞれ、 E_b , E_a とする)は、

$$E_{a/b} = \pm(\varepsilon^2 + \Delta^2)^{1/2} / 2 \quad (2)$$

で与えられる。この様子を図 23(b)に示した。また、二準位系の任意の重ね合わせ状態は、図 23(c)

のブロッホ球上の点で表すことができる。ハミルトニアン(1)は、仮想的な磁場(Δ , 0, ε)中の擬スピンの運動と考えることができ、仮想磁場の周りを擬スピンの歳差運動すると理解できる。

このような二準位系は、例えば、AlGaAs/GaAs 変調ドープヘテロ構造中の二次元電子ガスをエッチング及びゲート電極によって狭窄することにより形成する二重量子ドット（横型二重量子ドット）中にみることができる。以下に示す実験で用いた二重量子ドットでは、各々の量子ドットに数十個程度の伝導電子を有し、帯電エネルギーは 1 - 2 meV 程度、ドット内の典型的な準

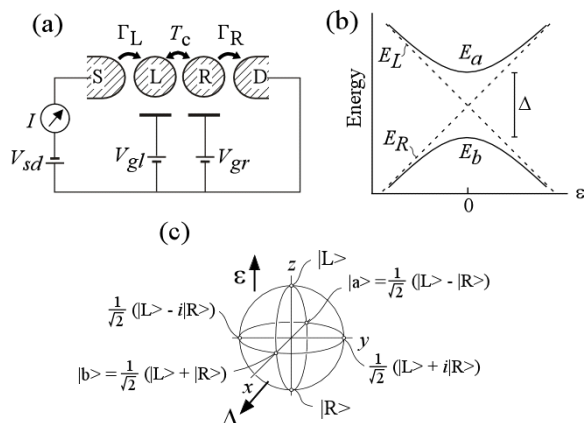


図23 (a)二重量子ドットデバイスの概念図。(b)二準位系のエネルギーダイヤグラム。(c)二準位系の量子状態を示すブロッホ球。

位間隔は $100 \mu\text{eV}$ 程度である。また、ドット間の静電結合エネルギーは $200 \mu\text{eV}$ 程度である。従って、ある特定の二準位に対して、 $|\epsilon|, \Delta$ が上記の特性エネルギーよりも小さい場合に、近似的に二準位系と見なすことができる。横型二重量子ドットでは、ゲート電圧によって ϵ 及び Δ を独立に変化させることができ、全電氣的な制御が可能な人工的な量子ビットを形成することができる。

3.3.5(b) 高速電圧パルスによる測定

半導体二重量子ドットに高速パルス電圧を印可することによって、 ϵ を高速で変調すると同時に、系のデコヒーレンスを変調することができる。実際の実験では図 24(a) のような実験配置により、図 24(b) のようにソース・ドレイン間電圧 V_{sd} を $V_p (= 650 \mu\text{V})$ と 0 との間で変調した。ここで、 $V_{sd} = V_p$ では二重量子ドットは伝導領域にあり、電極とのトンネルによって量子ビットは著しいデコヒーレンスをうける。しかし、 $V_{sd} = 0$ では、クーロン閉塞状態にあり、電極とのトンネルによるデコヒーレンスを抑制することができる。このデコヒーレンスの制御によって、効率的な初期化が実現できるとともに、コヒーレント振動を誘起することができる。実際には、電極と量子ドットとの間の静電的結合があるために、二準位のエネルギー差 ϵ も変調されるため、これらの複合的な効果が観測されることになる。パルスの印可によって量子ビットの初期化、コヒーレント制御、観測が以下のように実行されるように、各パラメーターを決定した。

まず、量子ビットの初期化のために、比較的大きなソース・ドレイン電圧 $V_{sd} = V_p$ を印加し、電極の電気化学ポテンシャル (μ_L, μ_R) の間に、二準位系がくるように制御した ($\mu_L > E_L, E_R > \mu_R$) [図 24(c)]。このときの二準位系のエネルギー差を $\epsilon = \epsilon_0$ とする。この場合、電極とのトンネルにより、電子は左の量子ドットに入りやすく、右側の量子ドットは空になりやすい。ドット間のトンネルは図 24(c) のような非共鳴条件 ($\epsilon_0 < 0$) であっても、電子格子相互作用によって僅かな非共鳴トンネル (この速度を Γ_i とする) が生じる事が知られている。しかし、左右のトンネルレートを比較的大きく ($\hbar\Gamma_L, \hbar\Gamma_R \gg \hbar\Gamma_i$) 選ぶことにより、電子は左のドットに長く留まり、実効的に $|L\rangle$ に初期化することができる。

ここで、共鳴条件 ($\epsilon_0 = 0$) であっても、初期化を実現することが可能であることを強調したい。電極へのトンネルレートが十分に大きく ($\hbar\Gamma_L, \hbar\Gamma_R \gg \Delta$)、トンネルによるデコヒーレンスが顕著な場合、結合・反結合状態は形成されず、ほぼ左の量子ドットに局在した状態 ($|L\rangle$) を実現できる。我々の実験はほぼこのような条件になっていることを後で述べる。なお、逆の非共鳴条件 ($\epsilon_0 > 0$) では、共鳴トンネルも非共鳴トンネルもおこらない為、ほぼ完全な初期化を実現することが期待できる。

次に、ソース・ドレイン電圧をゼロにすることにより、コヒーレントな制御を行うことができる。このとき、ドット間のクーロン相互作用によって、電子が電極にトンネルして出ていくことも、電極から別の電子が入ってくることもできないクーロン閉塞領域に設

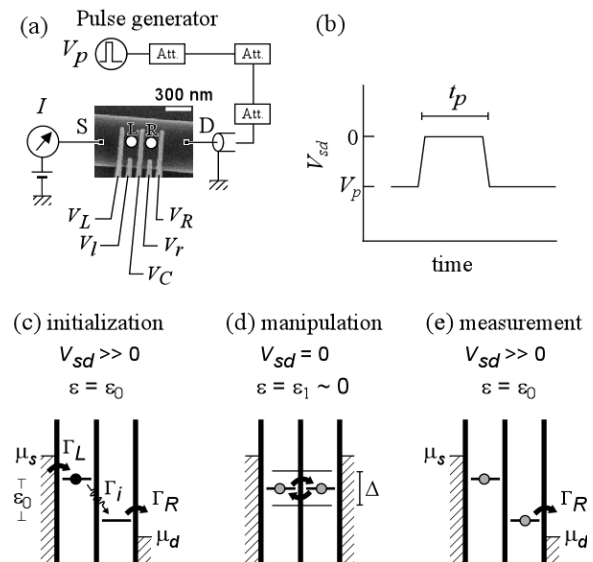


図24 (a)二重量子ドットのSEM写真と高速パルス測定系。(b)高速パルス波形の概念図。(c-e)初期化(c)、コヒーレント操作(d)、観測(e)におけるエネルギーダイアグラム。

定する。従って、量子ビットは実効的に電極と絶縁され、測定によるデコヒーレンスを無視することができる。また、エネルギー差は $\epsilon = \epsilon_1$ ($> \epsilon_0$) に変化する[図 24(d)]。従って、初期化によって準備された $|L\rangle$ の状態は、ハミルトニアン(1)に従って運動する。ブロッホ球上では、 ϵ_1 と Δ によって与えられる仮想的な磁場の周りをラーモア振動する。

再び、ソース・ドレイン電圧を大きな電圧 $V_{sd} = V_p$ に戻すことによって、量子ビットの測定を行うことができる[図 24(e)]。初期化の説明で述べたように Γ_L 、 Γ_R が大きい領域では、余剰電子はどちらかの量子ドットに局在する。電子が右のドットにいれば、ドレイン電極に電子がトンネルすることによって電流に寄与し、新たに別の電子が左のドットに入ることによって、初期状態 $|L\rangle$ に戻る。しかし、電子が左のドットにいる場合には、すでに初期状態あり、電流には寄与しない。従って、トンネル電流を測定することによって量子ビットの測定を行うことができる。

実際には、パルス(繰り返し時間 $t_{rep} = 10$ ns)を繰り返して印加し、多くのトンネル電子(測定)を積算してその電流を測定する必要がある。また、SN比を稼ぐために、パルス列の ON/OFF を低い周波数(100 Hz)で変調し、ロックインアンプによってパルス印可による電流変化 I_{mod} を測定し、単位パルスあたりに流れる電子数 $n_p = I_{mod}/e$ を見積もった。

3.3.5(c) コヒーレント制御

図25は、 n_p のパルス時間 t_p 依存性を示しており、明瞭なコヒーレント振動が観測されている。図25(a)は、上記の条件(図24の(c-e)のエネルギーダイヤグラムに相当)に一致させた場合で、初期化のときに非共鳴条件($\epsilon_0 \neq 0$)にあり、共鳴条件($\epsilon_1 = 0$)でコヒーレント操作を行っている。この場合、挿入図に示したように擬スピンはブロッホ球上を大きく運動し、最大振幅(=1)が期待される。実際には、パルスの立ち上がりが急峻でないことや、初期化や測定が理想的でないことなどにより、振動の振幅は約0.5にとどまっているが、二重量子ドットにおける電荷量子ビットの回転ゲートを実現できたことを示している。また、振動の減衰は、 $\epsilon_1 = 0$ におけるデコヒーレンス時間を示しており、その要因については、あとで述べる。

一方、図25(b)は、初期化のときに共鳴条件($\epsilon_0 = 0$)にあり、非共鳴条件($\epsilon_0 \neq 0$)でコヒーレント操作を行った場合に観測されるトンネル電子数 n_p を示している。この場合、非共鳴条件での歳差運動のため、挿入図に示したように、振幅は図25(a)の場合よりも小さくなる。また、デコヒーレンス時間も後で述べる低周波揺らぎの効果により、(a)の場合に比較して短い。しかしながら、十分に明瞭な振動が観測されていることは、初期化が期待通りに行われていることを示している。先に述べたように、初期化中に共鳴条件($\epsilon_0 = 0$)であつても、十分大きな Γ_L 、 Γ_R を選ぶことにより、左のドットに電子を初期化できていることを示している。逆に、 Γ_L 、 Γ_R が小さい場合には、初期化が働かず結合状態と反結

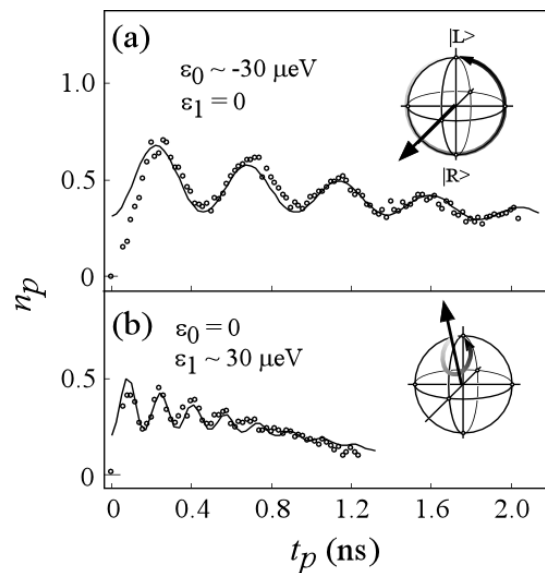


図25 コヒーレント電荷振動の測定結果。(a)コヒーレント振動中に共鳴条件にある場合と、(b)初期化中に共鳴条件にある場合。

合状態との混合状態が生成されてしまうため、 $\epsilon_0 = 0$ で振動は消失する。このような振る舞いは、初期化における密度行列を用いた計算結果と定性的に一致しており、パルス電圧によって、デコヒーレンスを変調できていることを示している。

次に、電荷量子ビットの位相シフトゲートに関する実験について述べる。二準位系のエネルギー差が十分大きい場合($\epsilon = \epsilon_2 \gg \Delta$)には、擬スピンの運動は近似的にz軸周りの回転運動となり、時間 t によって $|L\rangle$, $|R\rangle$ の基底に対する位相シフト $\theta = \epsilon_2 t / \hbar$ を与える。位相シフト自体は $|L\rangle$ と $|R\rangle$ の占有(ポピュレーション)

を変化しないが、以下のようなパルスシーケンスによって位相シフトの働きを確認することができる。

図 26(a)は、回転ゲートにおいて $1/2$ 周期(π パルス)となるパルス波形 I と、その中央に位相シフトを与える極短パルス波形を重畳した波形 II を示している。波形 II の前半の $\pi/2$ パルス(i)で重ね合わせ状態 ($(|L\rangle - i|R\rangle)/\sqrt{2}$) を作り、極短パルス(ii)で位相をシフトした後 ($(|L\rangle - ie^{i\theta}|R\rangle)/\sqrt{2}$) に、後半の $\pi/2$ パルスを引加すると、位相シフト θ に依存した電流の振動が期待できる。図 26(b)はそれを観測したもので、極短パルスの大きさ(ϵ_2)を変化することにより、位相を制御できていることがわかる。このように、制御パルスの波形を設計することにより、1量子ビットの状態を任意に設定することができる。

但し、位相ゲートの実験で、極短パルスが印可されている短い時間においては、二重量子ドットは伝導領域にあることから大きなデコヒーレンスを受ける。本実験では、このデコヒーレンス時間よりも短い時間で位相ゲートを実行することにより、デコヒーレンスの問題を回避している。図 26(b)で、パルス時間が一定にもかかわらず大きな ϵ_2 で振動の振幅が若干減少しているのは、 Γ_L や Γ_R が若干変化していることを反映しているものと思われる。この問題は、ゲート電極にパルスを印可し、クーロン閉塞領域に保ったまま ϵ を変調することによって容易に回避できると考えられる。

3.3.5(d) デコヒーレンス

以上のように、量子ビットのコヒーレント操作がある程度可能であるものの、デコヒーレンス時間は 1ns 程度に留まっている。より多くのゲート操作を行うためには、量子ビットと環境との結合を理解し、その対策をたてる必要がある。ここでは、電荷量子ビットに対するデコヒーレンスのメカニズムとして、低周波ノイズ、電子格子相互作用、コトンネル過程などについて考える。

低周波ノイズは、試料に起因する背景電荷ゆらぎ ($1/f$ ノイズ) や信号線に含まれる低周波のノイズであり、パラメーター ϵ や Δ を時間的に変化させるため、振動周波数 $\Omega = (\epsilon^2 + \Delta^2)^{1/2}$ を揺する。従って、例えば、 ϵ の揺らぎ $\delta\epsilon$ に対して、デコヒーレンスレートは、近似的に $\Gamma_\epsilon = |d\Omega/d\epsilon|\delta\epsilon$ で与えられる。揺らぎの量 $\delta\epsilon$ は、非常に低周波のものに関しては電流の低周波ノイズから見積もることができ、0.1 - 5 Hz 程度の周波数範囲において $\delta\epsilon = 1.6 \mu\text{eV}$ 程度であると見積られる。実際、 $\epsilon \neq 0$ の領域では、低周波ノイズに起因するデコヒーレンスが支配的になっていると思われる。測定系からくる低周波ノイズはフィルターなどの工夫によって取り除くことができると考えられるが、試料の背景電荷揺らぎについてはその微視的な起源についても明らかになっておらず重要な課題である。

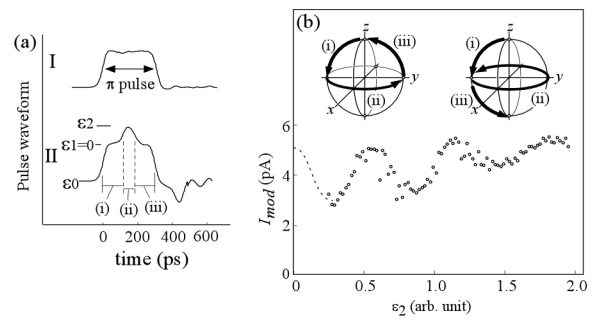


図26 (a)電圧パルスの波形。Iは π パルス。IIは位相ゲートのための極短パルスを重畳したもの。(b)位相シフトの動作を示すコヒーレント振動。

また、我々の実験では、コヒーレント操作する際に電極とのトンネルが抑制されていることを述べたが、高次のトンネル過程(コトンネル)を無視することはできない。これは、電子が電極へトンネルすると同時に、別の電子が二重量子ドットに入ることにより、可干渉性を失うもので、先に述べたデコヒーレンス制御を行うために比較的大きなトンネル速度 Γ_L 、 Γ_R を選んでいたため、コトンネル効果は顕著に表れる。しかし、コトンネルのレートは Γ の二乗に比例するため、 Γ を十分に低く保つことによって回避することができる。また、 Γ を電氣的に高速に変調することも原理的には可能である。

さらに、電子格子相互作用による効果も無視できない。GaAs のような極性半導体では、ピエゾ型の電子格子相互作用が低エネルギー(数百 μeV 程度以下)で支配的になることが知られている。単一量子ドットにおける実験でも、ナノ秒程度のエネルギー緩和時間を示すことが知られており、電子格子相互作用で良く理解することができる。今回の実験でも、非共鳴電流の大きさから見積もられるフォノン放出時間は数ナノ秒程度であり、共鳴時には波動関数の重なりが大きいいためフォノン放出速度が早くなることを考慮すると、電子格子相互作用が重要であることがわかる。現時点では電子格子相互作用を簡単に防ぐ手段はない。しかし、量子ドットの寸法とフォノンの波長を考慮してフォノン放出を軽減する方法(フォノンボトルネック効果)や、ミクロンサイズの微小の構造(フォノン共振器)中に量子ドットを作り込むことにより電子格子相互作用を制御できる可能性がある。また、Si などの無極性半導体を利用することによりピエゾ型相互作用を無視することもできるであろう。

その他、測定回路の電磁環境や、電極電子とのクーロン相互作用などによるデコヒーレンスが影響している可能性もある。また、今回の測定では、制御信号からのノイズ流入を防ぐことにより、明瞭なコヒーレント振動の観測に至った経緯があり、まだ外因的な要素が支配的である可能性も高い。

3.3.6. 電荷のシングルショット測定

上記の量子ビットの実験ではトンネル電流によって電荷量子ビットを読み出した。この方法では、電流測定の検出感度限界により、 10^5 回程度以上のパルス「測定」をくり返し、平均して得られる電流を測定する必要があった。しかし、将来の量子コンピュータでは 1 回の操作で答えを読み出すために、電子 1 個の有無をシングルショットで測定する技術が必要になる。これに向けて量子ドットをベースにした単電子トランジスタを高感度高速電荷計として働かせることを検討した。

ここで用いた高周波(ラジオ周波数)単一電子トランジスタ(RF-SET)は、通常の単一電子トランジスタと高周波 LC 共振器とを組み合わせることによって、高周波伝導度を測定するもので、高速かつ高感度な電荷計として機能する。図27は AlGaAs/GaAs システム上に作製した単電子トランジスタを RF-SET として働かせ、電子が偶然にドットのそばに存在するトラップに出入りすることで RF-SET のピー

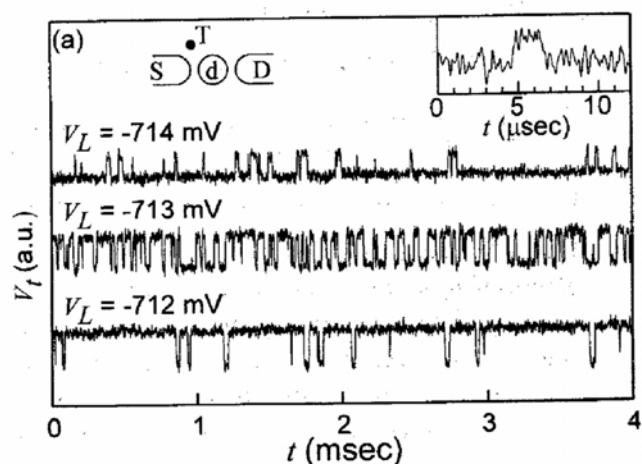


図27 量子ドットのそばに位置するトラップに電子が捕獲、放出される様子のRF-SETによるリアルタイムモニタ。

クがシフトすることを利用してトラップへの電子の出入りをリアルタイムで測定したものである。 V_L によりトラップに電子が捕獲されている状態が安定な状態から、捕獲されていない状態が安定な状態にスイッチすることができ、丁度その中間になる $V_L = -713\text{mV}$ で捕獲確立がほぼ50%になり、電子がトラップに出入りする様子が観測されている。挿入図に示したように現在の時間分解能は約 $1\mu\text{sec}$ であるが、これは将来さらに短くできることが期待される。RF-SET単体での電荷ノイズは、 $\delta q \sim 10^{-6}e/\sqrt{\text{Hz}}$ 程度(帯電エネルギー 1meV ,トンネル抵抗 $100\text{k}\Omega$,温度 100mK の場合)が期待されるが、この実験では、 $\delta q \sim 10^{-5}e/\sqrt{\text{Hz}}$ 程度の高感度が実現されている。将来的には、RF-SETと電荷量子ビットの組み合わせにより、シングルショット測定による量子ビットの読み出しが可能になるものと考えられる。また、RF-SET技術は量子ドットなどの構造を電子が流れる様子を実時間で測定するものであり、ナノ構造における電子フローの統計を理解するのに重要であるばかりか、超高感度の電流計としても期待される。

3.3.7. 量子ドットにおける電子スピン-核スピン結合

3.3.3 で議論したスピンプロケード状態下にある2電子2重量子ドットにおいては(図28左、図20参照)ドット内の電子はスピン3重項状態にあり、これがスピン散乱されて1重項状態にならない限りソース・ドレイン間の電流はほとんど流れない。したがってスピンプロケード状態でソース・ドレイン間に観測されるわずかな"リーク電流"はドット内のスピン散乱を調べるよいプローブとなりうる。現在までに我々はこのリーク電流の面内磁場依存性を研究し、(a) $0.5\text{--}0.6\text{ T}$ 程度で急峻な電流ステップが観測され電流値が 0.4 pA 程度増加し、(b)さらに $0.7\text{--}0.8\text{ T}$ では電流が時間に対してほぼ周期的に振動する、ことを見いだした。このうち(b)の電流振動に関しては ^{69}Ga および ^{71}Ga の核磁気共鳴(NMR)を引き起こすような交流磁場のもとで同様な測定を行うと振動振幅および周期が減少することが観測され、この現象とドット内核スピン状態の異常との関連が示唆されている。

続いて、我々は上記核スピン状態の異常を解明し、さらにこの現象を利用して量子ドット内の核スピンを制御・観測することを目的とし、(a)の電流ステップに関して以下のような測定を行

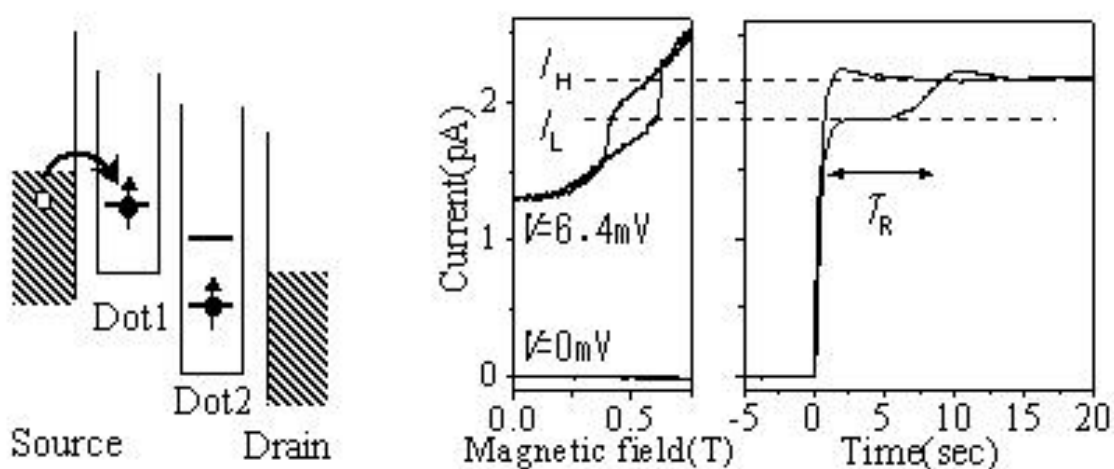


図28 スピンプロケード領域の核スピン応答

った。図 28 中央はソース・ドレイン電圧 $V = 6.4 \text{ mV}$ におけるリーク電流の磁場依存性で、磁場の上昇時に約 0.6 T において電流値 $I_L = 1.8 \text{ pA}$ から $I_H = 2.2 \text{ pA}$ へのステップが観測される。 I_H へ遷移した後 $V = 0 \text{ mV}$ にしてスピンプロックードを解除し、待ち時間 $T_{\text{dwell}} = 1 \text{ min}$ (8 min) 待った後再び 6.4 mV へもどす。図 28 右にこのときの電流の時間変化を示す。待ち時間が短いときには電流値はただちに I_H へ戻るが長い場合には一度 I_L へと遷移し回復時間 T_R の後 I_H へと遷移する。上述の NMR 条件下で同様な測定を行うと十分短い待ち時間においても回復時間が共鳴的に増大することが観測された。この結果は回復時間の測定によってドット内核スピンの CW (連続波) NMR がなされたことを示している。

3.3.8. その他のナノ構造におけるキャリア相関

本プロジェクトでは量子ドットを中心に研究を行ったが、量子細線、ポイントコンタクト、量子ドットアレイなどのナノ構造に関してもそのキャリア相関の研究を推進した。

近接した 2 本の量子細線では、一次元電子系の強いクーロン相互作用に起因して、クーロンドラッグ (片方の細線の電子が他方の細線の電子を引っ張る現象) が起こる。この現象は、クーロン相互作用を直接反映することから注目されているが、試料作製が難しく実験が進んでいなかった。我々は、微細加工技術を駆使して 30 nm の金属ゲート電極分離された長さ数ミクロンの並列結合量子細線を作製し、明瞭な 1 次元クーロンドラッグを観測することに成功した。2 つの細線が最低次の 1 次元モードを持つ場合には、1 次元相互作用電子系の特徴である朝永—ラッティンジャー液体のクーロンドラッグ現象が起こることを観測した。これは、ドラッグ抵抗の温度依存性が、通常のフェルミ電子液体と全く逆になることから確認された。また、細線が非常に低い電子密度をもつ場合には、負のドラッグ (電子 - 正孔のドラッグ) が起こることを見出した。その起源を実験、理論の両面から研究し、一方の細線がウィグナー結晶状態になることにより、もう一方の細線中に逆向きの電子の流れが誘起される現象 (電流ミラー現象に類似) として理解できることが分かった。

また、キャリア密度がバックゲートで自由に制御できる本プロジェクトで開発した高移動度ヘテロ構造の特徴を活かし、その表面に分離ショットキーゲート型のポイントコンタクトを作製し、理想的な量子化特性が得られるバックゲートポイントコンタクトを作製した。このデバイスで量子化されたコンダクタンスを確認するとともに、電子間相互作用による“0.7 構造”が見られることを確認した。図 29 は 0.7 構造が常に 0.7 に観測されるわけではなく、電子密度により、その見え方、位置が変化することを明確に示している。0.7 構造は電子密度を下げるにつれステップが明確になり、さらに電子密度を減少させた

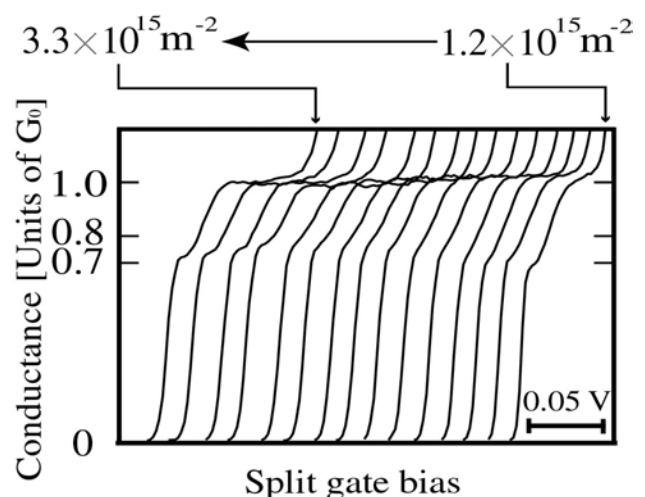


図29 バックゲートポイントコンタクトの伝導特性の電子密度による変化。 $G < 1.2 G_0$ の領域を拡大している。

別の測定では 0.7 構造の位置が 0.5 に近づき、振動がコンダクタンスに乗ることが確認された。これらの伝導異常のメカニズムには未だ多くの議論が残されているが定性的には一次元準位が埋まるとともに電子相関によりスピン分離が生じ、それが一次元電子密度の増大とともに解消するとするモデルで説明されることを示した。

ドットアレイを目指した実験では、アンチドットアレイを作製した。これをバックゲートで制御することにより、各サイトに入る電子の数によるクーロン相互作用の変化に基づくと考えられる伝導特性の振動を見出した。最終的には各サイトに電子がひとつずつ入る状態の実現を目指したが、二次元電子への微細加工の限界、低電子密度でのオーミックコンタクトの難しさから、この実現は今後の課題として残った。

3.3.9. ナノ構造のキャリア相関研究のインパクト

我々は本プロジェクトでの研究を通して電子スピンの制御可能であること、電気伝導に大きく影響することを他に先駆けて示した。従来、非磁性半導体の電子スピンの研究は重要視されてこなかったが、我々の研究はその重要性を再認識させるもので、以来、スピン効果・制御の研究は、量子ドットの分野で広く注目されている。このプロジェクトでの成果を含む研究業績、とくに、2 電子状態のスピン 1 重項-3 重項縮退の制御、新奇な近藤効果の発見やパウリ効果の検証実験などが認められて、東大理学部の高橋賞は平成 14 年度に物理関係で最も権威のある賞のひとつである仁科記念賞を授与された。

単一量子ドットにおける 2 電子スピン状態 (1 重項-3 重項) 制御は、フント則の一般性を実証した初めての实验で、デルフト工科大との共同研究が IF=7.3 の PRL 誌に掲載された (Tarucha 他, PRL84,1066(2000))。この論文を参照して、スピンプロケードや近藤効果など、新しいアプローチの实验、理論が内外において展開されている。そのため引用回数も 55 回以上と多い。

量子ドットの代表的なスピン相関である近藤効果については、従来、バルク中の磁性不純物を中心とした研究がなされていたが、1998 年に MIT から、量子ドットの近藤効果の観測が報告されて以来、盛んに研究された。大抵の場合、近藤効果が見られるのは、ドットに奇数個の電子、すなわち 1 個の不対電子スピン ($S=1/2$) が存在する場合に限られていた。我々の研究はこの常識を覆したもので、量子ドットのさまざまなパラメータ (磁場、電子数、外部電極との結合度) を操作することにより近藤効果を自在に制御できることを示した。スピン 1 重項-3 重項縮退での近藤効果の発見、ユニタリー極限の近藤効果の検証のインパクトは大きく、それぞれ IF=30.4 の Nature (Sasaki 他, Nature405,764(2000)) や IF=26.7 の Science (van der Wiel 他, Science289,2105(2000)) に掲載された。これを契機として近藤効果の研究は一大ブームとなっている。その後、カーボンナノチューブや分子接合など多くのナノ構造で近藤効果が確認され、同時に、新しい近藤効果の理論も急速に進展している。このような波及効果の大きさを反映して、上記両論文の引用回数は、100 回前後と多い。なお、近藤効果はスピナー重項結合を要因とするもので、量子情報処理の必須の概念である"量子もつれ"の発現に等しい。とくに "ユニタリー極限の近藤効果"は、量子ドットで理想的なスピン量子もつれを作れることを実証したことを意味しており、量子ドットを用いた量子情報処理の研究に物理的な妥当性を与えている。なお、近藤効果の研究の大半はデルフト工科大、慶応大との共同研究である。

結合ドットの研究は、基礎物理、応用の両面で重要であるが、実験が難しいので、世界的にも 3、4 の研究機関（デルフト工科大（共同研究の関係）、ハーバード大、マックスプランク固体研究所など）でしか行われていない。その中で、我々の研究は、縦型結合ドットという他にはない特徴をもっており、これを活かして先駆的な実験を行うことができた。パウリ則による電流整流作用の実験はその例で、フェルミ粒子の統計性が電気伝導を支配し得ることを初めて検証することができた。この研究業績の普遍性は極めて高く、分子接合、原子列などのナノ構造の電気伝導に対しても共通の作用が期待できる。このような普遍性の要素が認められて、その業績は IF=26.7 の Science (Ono 他, Science297,1313(2002)) に掲載された。加えて、我々のパウリ効果はスピンの自由度に極めて敏感なので、これまで測定が難しかったスピンに関わる相互作用を高感度に捉えることができる。実際、我々は、最近核スピンとの結合の情報を捉えることに成功している。さらに、非公式ながら、電子スピンと核スピンの結合をうまく制御することにも成功している。このように、このプロジェクトの成果を通して電子スピン・核スピン結合系の物理分野に新しい展開が開けそうな状況にある。

量子ドットのダイナミクスに関しては電氣的ポンプ・プローブ法という新手法を世界に先駆け開発し、世界的に注目される成果を出した。まず、量子ドット内の電子緩和に関して、スピンの反転する緩和は禁制になり、非常に長い緩和時間になることを人工原子を用いた実験で明らかにした。この成果は量子ドット内の電子スピンが外界から良く遮断されていることを明瞭に示した世界最初の実験であり IF=30.4 の Nature に掲載された (Fujisawa 他、Nature419、278(2002))。この成果は量子ドット内の電子スピンのスピントロニクス、量子コヒーレントシステムへの応用を勇気付けるものであり、発行後 1 年以内に引用回数は 10 回に迫っている。その他、これに関連した論文は IF=7.3 の PRL 誌にも掲載されている (Fujisawa 他、PRL88、236802(2002))。これらの業績が高く評価され、研究の中心になった NTT の藤澤特別研究員は若手物理学者に与えられる権威ある賞である、サー・マーティン・ウッド賞を 2003 年に受賞した。

さらに、結合量子ドットにおける単一電子のコヒーレント制御の実験にも成功した。これは、半導体構造を用いて全電氣的に制御するタイプの量子ビットの世界で最初の実現であり、半導体量子コンピュータに向けた大きな一歩である。この成果はこの 11 月に IF=7.3 の PRL 誌に掲載され (Hayasi 他、PRL91、226804(2003))。様々な量子コンピュータ、ナノテクノロジー関連の国際会議から招待講演の依頼が相次いでいる。

単電子トランジスタを用いた電子 1 個の挙動の測定も、物性的にも、量子コンピュータの読み出し技術としても重要で、大きな成果である。初期のデータは IF=4.2 の APL 誌に掲載され (Fujisawa 他、APL77、543(2000))。この分野の文献には必ず引用される論文として、引用回数は 10 回を超えている。その他のナノ構造に関しても、結合量子細線において"クーロンドラッグ"が有用であることを他に先駆けて示し、朝永—ラッティンジャー液体効果のために、クーロンドラッグが顕著に現れることを確認した。量子ポイントコンタクトに関しても電子相関による 0.7 構造に早くから着目し、Nuttinck 他、JJAP39、L655(2000)は当該分野の論文によく引用され JJAP ながら引用回数は 10 回に迫っている。一次元電子系の研究も、これらの成果により、新たな局面を迎えるものと期待される。

3.4. ナノプローピング

3.4.1. 極低温・強磁場近接場光学顕微鏡の開発と2次元電子ガス系の評価

相関エレクトロニクスに必要な量子構造の微視的評価を行うために、極低温（5K）・強磁場（6T）にて動作可能な走査型近接場光学顕微鏡（SNOM）を開発した。低温にて動作するために、小型クライオスタット（直径 5cm）に挿入可能な極小化した SNOM ヘッドを開発した（図 30）。クライオスタットは超伝導マグネットに挿入され、磁場が印加される。本装置では、クライオスタット外部から AFM 制御を行うため、光ファイバーを用いた光干渉計を新たに開発し、温度に依存することなく安定な AFM 制御が可能となった。

上記の SNOM を用いて、NTT 平山グループにて作製された 2 次元電子ガス（2DEG）系を有する半導体量子構造（GaAs/AlGaAs 単一ヘテロ構造）の局所発光分光を行った。図 31 は、本装置にて低温で観測された $1\mu\text{m}$ 幅のライン&スペース構造を有する試料の AFM 像と SNOM 像である。2 つの像の対比から、ライン部にのみ存在する 2DEG が発光に参与していることが分かる。また、この結果から本装置の空間分解能が 200nm に達していることが確認できた。ライン部の各点の発光強度はほぼ一定しており（ $\pm 10\%$ ）また、発光スペクトルのピーク波長、半値幅についても観測位置に対する依存性は見られないことから、2DEG の密度、ポテンシャル分布が均一であることが示された。

これに対して、磁場を印加した場合には、ライン部の発光強度は均等に増大すること、磁場に伴って単調に増大すること、が分かった。図 32 の発光スペクトルに示すように、強度増大に伴って、ピーク位置は高エネルギー側へシフトするが、形状に変化はなかった。シフトは磁場中における励起子の反磁場効果で説明できる量であり、2DEG の密度変化や強度増大とは本質的に無関係であると考えられた。そこで、光学顕微鏡を用いた顕微分光（分解能 $\sim 1\mu\text{m}$ ）によって、発光スポットを観察し

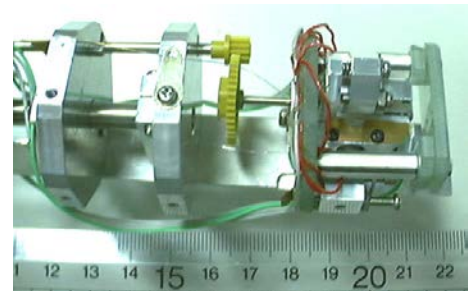


図 30 開発した極低温・強磁場対応 SNOM のヘッド部分

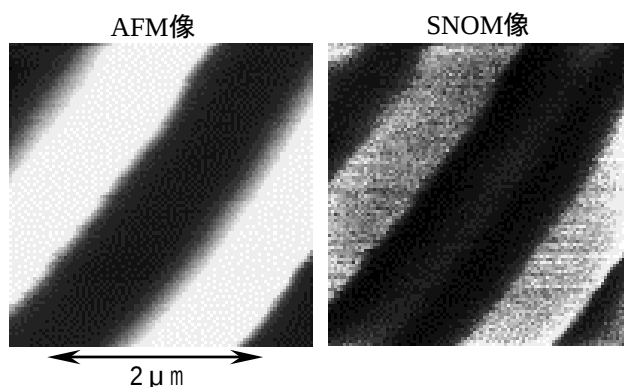


図 31 $1\mu\text{m}$ -line & space を有する試料の AFM 像と発光 SNOM 像。2DEG の存在する line 構造にて発光が観測される。

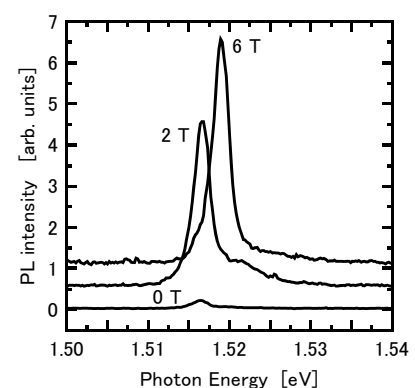


図 32 2DEG からの発光スペクトルの磁場依存性

たところ、無磁場ではホール拡散に伴う発光スポットの拡がり観測されるのに対し、磁場中では拡がり抑えられることが分かった。SNOM では、微小開口により局所的に光励起し、同じ開口から発光を観測するため、発光スポットの拡がりがある場合には相対的に強度低下があると考えられる。そこで、光励起ホールの拡散長が磁場に反比例するというモデルを採用したところ、発光強度の磁場依存性をうまく説明することができた(図 33)。拡散長が磁場に反比例するのは、電荷が磁場中にてサイクロトロン運動することに対応しており、光励起されたホールが磁場によってローレンツ力を受けている結果と推定された。そこで、これまでに測定されている電子と励起子の拡散長と今回の結果を比較した(図 34)。電子の拡散長と今回の結果は磁場に対する依存性は一致しており、電荷と磁場の相互作用を裏付けている。しかし、同強度の磁場中で、拡散長は、今回の結果が電子より 4 倍大きく、有効質量から予想される結果とは逆の関係となった。一方、励起子は全体として中性であるため、磁場に対する拡散長の影響は小さいことが知られている。ところが、無磁場における拡散長は今回の結果とほぼ等しいことが分かった。

以上の結果から、光励起されたホールはヘテロ界面近くに存在し、2DEG と相互作用するために高い易動度を有し

ていると解釈することが妥当と考えられる。また、近年注目されるようになった荷電励起子(電子 2 個とホール 1 個の複合粒子)とも関係している可能性を示唆している。

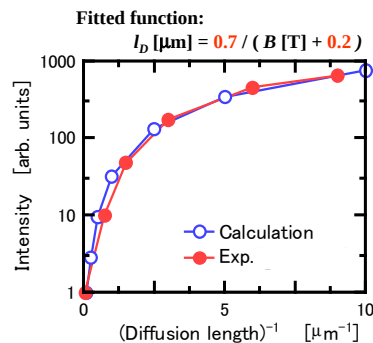


図 33 拡散距離 (l_D) を磁場に反比例すると仮定してフィッティングした SNOM 発光強度の変化

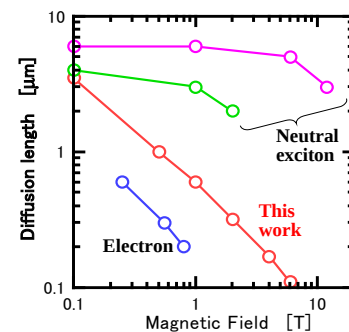


図 34 磁束密度に対する拡散距離の変化。2DEG 系と GaAs 量子井戸中の電子、中性励起子との比較

3.4.2. 二探針型

近接場光学顕微鏡の開発

空間的な相関を評価するためには観測する 2 点を正確に決める必要があり、そのために二探針型(デュアルプローブ)近接場光学顕微鏡(SNOM)を開発した。SNOM を用いれば、試料表面の局所的な光学的情報が得られ、またその探針から近接場を照射することで試料表面の微小領域を操作あるいは励起できる。しかし、通常の SNOM では、微小領域内の複数の点での光学情報の相関を取ったり、探針からの励起への他点の応答を測定したりはできない。このような測定のため、二本の SNOM 探針を互いに近接されるようにした測定系がデュアルプローブ SNOM である。これを用いれば、近接二点で同時に SNOM 測定を行う、一方の探針から照射した近接場に対する試料系の応答を他探針への集光信号として測定する、などの相関測定が可能となる。ここで問題なのが、二探針の位置制御である。二探針を回折限界未満の領域に近接させるには、相対位置を回折限界以上の精度で計測する必要がある。単に通常の光学系で見るとは、二探針は回折により「一点」に見えてしまう。そこで、一方には 633nm 他方には 532nm の異なる波長の光を注入

し(図 35(a))、それぞれ一方の波長にのみ感度をもつカメラで位置を個別に計測し、光点の中心(光強度の重心)を開口の位置とした。独立に測定すれば光点の中心位置は回折による「ぼけ」で移動しないから、相対位置が回折限界を超える精度で決定できる。

まずは試料がない状態で、波長に比較して大きな探針間距離 Δx での測定を行った。

一方の探針に波長 633nm の光を注入し(図 35(b))、他方の探針に集光される光強度 I の Δx への依存性を図 36(a)に示す。実線が測定値、破線が FDTD 法によるシミュレーションの値である。シミュレーション値が受光探針開口部中心の光強度であり、測定値が開口全体からの信号の総和であることから、シミュレーションでは実測データでは見えていない細かい依存性まで見えてしまっているが、ピーク位置などにはよい一致が見られる。この二つのピークは、その位置から、双方の探針の先端の間での多重反射による干渉縞であると考えられる。干渉縞が見えているということは、一般の SNOM では無視できる伝搬光が測定にかかってくることを意味している。これは開口の周囲に伝搬光を反射する比較的大きな物体(他方の探針)が存在することによって考えられる。

次に、1000nm 間隔の溝が掘ってある回折格子の断面を同程度の探針間距離 Δx で測定し、このような状況では I が Δx のごくわずかな変化に非常に敏感であるとの結果を得た。シミュレーションによっても、図 36(b)に示すように、わずか 50nm の Δx の増大が像を反転させるほどの信号変化をもたらしていることが分かる。ここでは、近接場の伝搬が、回折格子のひとつの山を使うモードから二つの

山を使うモードへと変化していると考えられる。換言すれば、デュアルプローブ SNOM は、探針間距離程度の大きさの構造に極端に敏感であるということが結論できる。

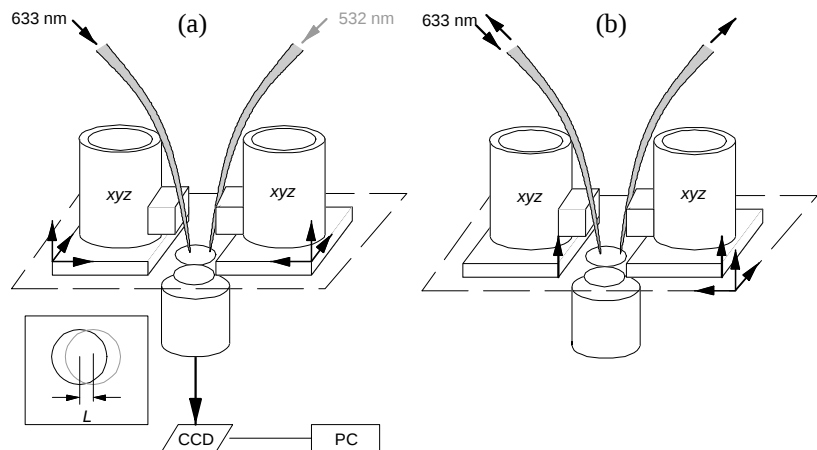


図 35 デュアルプローブ近接場光学顕微鏡の装置系。(a)プローブ間距離計測の原理。(b)両プローブからの光検出。

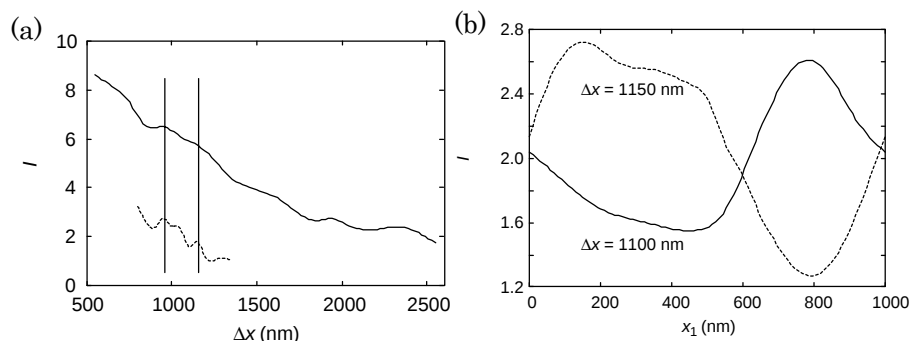


図 36 (a)探針間距離 Δx に対する出力光強度 I の変化(実線:測定値、破線:計算値)。(b)プローブ位置に対する出力光強度の変化(計算値)。

3.4.3. 高速ナノプローブの開発

マイクロウェーブ領域での量子相関解析のための技術として、ヘテロダイン型の走査型マクスウェル応力顕微鏡を開発した。従来技術では、検査対象装置のテストパッドに接触させる高周波プローブが用いられてきた。しかしながら、高周波プローブで

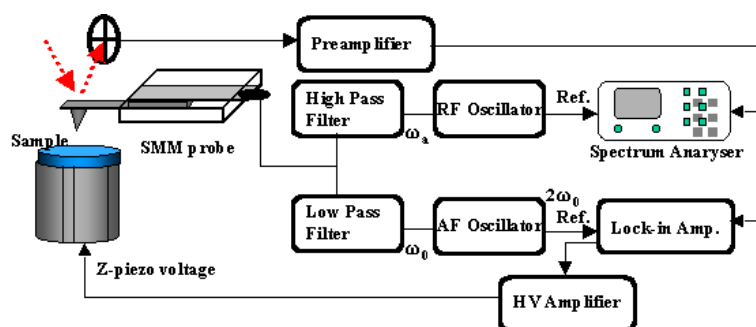


図 37 マクスウェル応力顕微鏡の構成。

は試料表面を走査することができないので、検査対象が制約される。さらに、プローブ自体、微細なデバイスに比較すると桁違いに大きく、また、リジッドな構造であり、微細デバイスの評価には不向きである技術課題があった。そこで本研究では原子間力顕微鏡のカンチレバーを高周波プローブとして用い、プローブと試料間の電気力を検出する走査顕微鏡（マクスウェル応力顕微鏡）を利用した。

電気力顕微鏡を高速動作させる際の問題点は、カンチレバーを通じてマイクロ波電圧を減衰させることなく探針先端に導波することである。従来、カンチレバーの導波効率の評価は行われておらず、我々はまず、マイクロストリップライン系をリファレンスとして、13.5GHz までの導波特性を実際の動作状態で評価した。使用した評価系を図 37 に示す。探針接触時のプローブ顕微鏡導電性探針 - サンプル系の回路特性はマイクロ波帯ネットワークアナライザー（アンリツ社製、40MHz ~ 13.5GHz）により、また、非接触時の探針先端の電圧 - 周波数特性は電気力振動に基づくヘテロダイン力検出法により解析した。その結果、図 38 に示すように、市販の導電性探針では数 GHz 以上の周波数で実際の探針電圧の落込みが明らかになった。

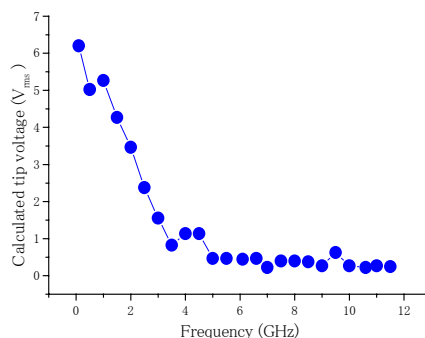


図 38 探針非接触時の探針先端の電圧 - 周波数特性。

また、露出した半導体量子構造の測定に対応するために、超高真空対応の走査型マクスウェル応力顕微鏡を開発した。本装置の実際の電子デバイス計測への応用として、シリコンエミッターアレイ、ダイヤモンドエミッターなどのフラットパネルディスプレイ素子の電位分布、形状、電解放射特性の同時計測を行い、電界放射特性と局所的な

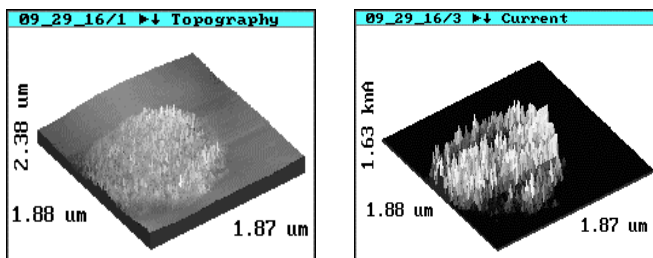


図 39 ダイヤモンド電界放射素子の表面形状(左)と電子放出特性(右)。

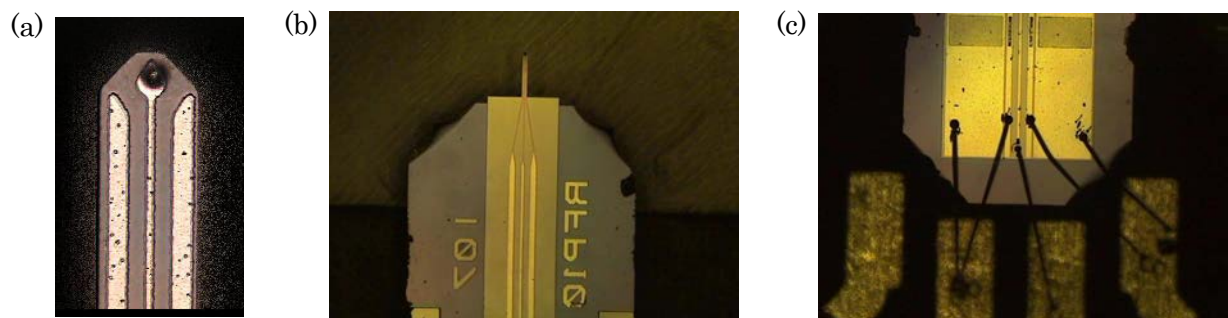


図 40 (a)マイクロストリップ導波路付きカンチレバーの写真。(b)カンチレバーへの導入部。(c)ベース部分とのボンディング。

電気物性の相関を明らかにした (図 39)。

より高い RF 帯域の計測にはカンチレバー自体に同軸構造またはこれに類する構造が不可欠となる。そこで、本研究では、マイクロ波帯域での電気応答をナノメートルオーダーの空間分解能で計測するために、マイクロストリップ導波路よりなる全く新しいタイプの高周波帯域用 AFM カンチレバーをセイコーインスツルメンツの協力を得て開発した。図 40 は、今回試作したマイクロストリップ導波路付き AFM カンチレバーの写真である。レバーの幅は約 $30\ \mu\text{m}$ 、探針先端へ伸びるシグナルラインの幅は約 $2\ \mu\text{m}$ 、両側のグランドラインの幅は約 $7\ \mu\text{m}$ である。現在、非接触および接触モードでの高周波電圧の減衰特性を評価している段階である。

3.4.4. 低温 STM による局所状態密度の直接観察

本プロジェクトでは、III-V 族化合物半導体の一つである InAs の (111)A 清浄表面 (In 原子で終端された表面) に自然形成される電子蓄積層中の伝導電子状態の LDOS 分布を LT-STM を用いて視覚化することに成功した。ここでは、測定に関する基本事項について概説した後、欠陥近傍において二次元電子ガス (2DEG) が見せる Friedel 振動の様子や、その 2DEG がナノ結晶欠陥中で量子サイズ効果によりゼロ次元量子化された際のゼロ次元電子ガス (0DEG) の電子状態について述べる。

3.4.4(a) InAs/GaAs(111)A 表面の特徴

本稿で紹介する実験は、 $100\sim 200\text{nm}$ 厚さの InAs 薄膜を高純度な III-V 族化合物半導体薄膜を形成可能な分子線エピタキシャル成長法 (MBE) によって成長した後、 $5\ \text{K}$ 近傍まで試料を冷却可能な LT-STM を使用して表面観察することにより行われた。2DEG 及び 0DEG の LT-STM 測定実験では、n 型 GaAs(111)A 基板上に形成した InAs 薄膜の清浄表面を用いたので、次にその試料の特徴を説明する。

通常良く用いられる、面方位が (001) の GaAs 基板上の InAs の結晶成長では、

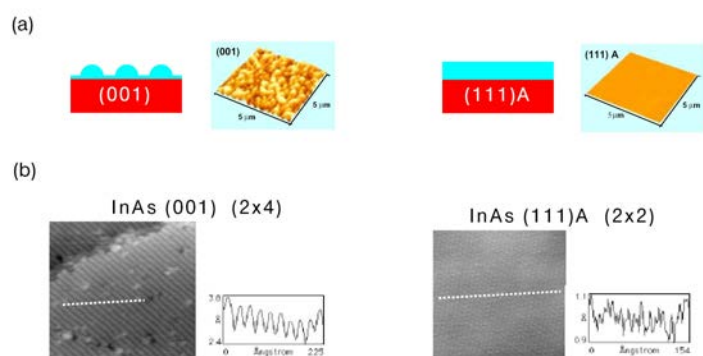


図 41 InAs/GaAs(111)A 表面の特徴。(a) GaAs(001) 基板上と GaAs(111)A 基板上の InAs の成長様式の違い。(b) InAs(001) 面の (2×4) 再構成表面と InAs(111)A 面の (2×2) 再構成表面の平坦性の比較。

基板と 7.2%の格子不整合がある InAs は、Stranski-Krastanow 型の成長様式で成長する。2ML 以下といわれる層状成長の臨界膜厚を越えると、InAs の三次元島が自己形成される。ところが GaAs(111)A 面上のエピタキシャル成長では、misfit 転位の形成による歪み緩和が界面で早期に発生するため、InAs は初期段階よりずっと層状を保った成長様式で成長する。この違いを図 41(a) に示す。ある程度以上膜厚が厚くなると、平坦な InAs 清浄表面には電子蓄積層が自然形成されるようになる。この表面蓄積層形成は、表面における E_F が伝導帯中に入りこむ '異常' が発生する、という InAs 表面の特異性に原因があるとされる。金属-半導体界面と同様の表面蓄積層が清浄表面に存在するののかについては議論があったが、近年いくつかの研究グループによりその存在が確かめられ、InAs(001)面及び InAs(111)A 面の各清浄表面において電子蓄積層の存在が指摘されている。理論的にはこの InAs 表面の特異性は、半導体の E_F が一致するべき電荷中性を満たすエネルギー位置が、InAs では伝導帯中に存在するためと説明されている。このような InAs の電荷蓄積層中で二次元量子化された伝導電子の物性は、初期にはトンネル分光法で調べられたが、そのミクロスコピックな振る舞いの理解のためには、本プロジェクトで進めた STM による研究が必要であった。

もう一つ、InAs(111)A 表面の持つ原子間隔スケールの平坦性という特徴について述べる。表面を構成する原子の科学量論比は表面再構成構造に依存する。MBE 成長で多く用いられる結晶面は、V 族原子が過剰な 0.1 nm 前後の凹凸 (corrugation) を持つ (001) 面である。一方、InAs(111)A 面は、In 原子の空孔が存在する vacancy-buckling 構造とよばれる半導体的な (2×2) の再構成表面になっており、図 41(b) に示す様に 0.02～0.05 nm 程度の凹凸である。STM で自由電子の定在波が初めて観察された表面の一つである Au(111)面は、面心立方格子をなす Au 結晶の稠密面で、原子間隔スケールの LDOS がつくる凹凸は 0.005～0.05 nm 程度と報告されているから、InAs(111)A 面はこの Au 表面と同様の平滑性を有することになる。このような平滑性は、表面近傍に存在する二次元伝導電子の LDOS 変化検出の際には、最表面原子による原子間隔スケールの LDOS の影響を相対的に小さくするので都合がよいと考えられる。

3.4.4(b) 伝導電子系の LDOS 測定と Friedel 振動

同じ印加電圧における STM 像では、探針が表面に近いほど表面の原子配列が、遠いほど長周期の LDOS が強調されて観察されている。従って、探針-試料間距離を変えて LDOS 測定感度を調整すると、LDOS をある程度選択的に検出できそうなのがわかる。さらに、STM による LDOS の測定では、STM 像や測定された LDOS 分布及び自由電子波長の測定精度の、測定試料バイアス電圧依存性も考慮する必要がある。探針-試料間隔が一定の場合、トンネル電流から求めた微分伝導度 (dI / dV) は低温・低試料バイアス電圧の条件において、

$$dI / dV(V) \propto \rho_{tip}(E_F) \cdot \rho_{sample}(E_F + eV) \cdot T(V, z)$$

が良い近似で成立する。探針に先端の状態密度 $\rho_{tip}(E)$ がエネルギー依存性を持たない ($\rho_{tip}(E) = \text{一定}$) とみなせる形状と材質の探針を使用し、トンネル確率 $T(V, z) \propto I(V, z) = \text{一定}$ が近似的に成り立つ低試料バイアス電圧領域を使用すれば、トンネル電流一定制御で測定する場合

$dI/dV \propto \rho_{\text{sample}}(E_F + eV)$ となり、微分伝導度は試料の LDOS である $\rho_{\text{sample}}(E_F + eV)$ に比例する。よって測定条件を上手に選択すれば、原子間隔スケールの LDOS で決まる表面構造は STM 像で、試料バイアス電圧 V (電子エネルギー $E_F + eV$) における自由電子波長スケールの LDOS 分布は dI/dV 像で、波長とピーク位置共に精度良く測定できる。ただし金属表面の様に自由電子状態密度が高く STM 像に自由電子定在波が現れやすい材料の場合には、トンネル電流一定制御で使用する試料バイアス電圧が低すぎると必ずしも $dI/dV \propto \rho_{\text{sample}}(E_F + eV)$ とはならない。そのため、自由電子状態の LDOS が高さ一定モードに与える影響を抑える工夫が必要な様である。半導体では、自由電子状態密度が金属に比べて桁違いに低いことが幸いして、必ずしもこのような操作を必要とせず、最初から $T(V, z) \propto I(V, z)$ が成立する低い試料バイアス電圧で高さ一定制御を行っても $dI/dV \propto \rho_{\text{sample}}(E_F + eV)$ となると期待できる。実際の LDOS 測定では、数十 mV から数百 mV の試料バイアス電圧範囲を用いることが多い。ここで述べる実験では、印加バイアス電圧領域を LDOS が dI/dV に良く比例すると考えられる低試料バイアス電圧 $0.02 \leq |V| \leq 0.2$ V 及び定電流モードにおけるトンネル電流設定値を $0.2 \sim 0.4$ nA を用いた。この条件で測定した dI/dV 像に現れる定在波のピーク間隔から測定した電子波長 λ と、それを用いて求めた $E - k_{\parallel}$ 分散関係は InAs 中の伝導電子の性質を精密に反映することが後ほど示される。同時に、この dI/dV 分布が後述する様に小さいナノ構造中の LDOS 分布を忠実に再現することも忘れてはならない肝心な点である。

dI/dV 信号により LDOS 分布を視覚化する方法には、STS で得られた $I-V$ 特性から dI/dV (又は $dI/dV/(I/V)$) 信号を数値的に計算して二次元図にする方法と、ロックイン検出により dI/dV 信号を探针-試料間隔一定モードによる STM 像と同時に直接測定する方法の二つが主に用いられる。ここで述べる実験では、LDOS をより敏感に検出できると考えられる後者を採用した。ロックイン検出による dI/dV (LDOS) 測定では、定電流モードでの STM 測定時に、トポグラフィ観察に影響を及ぼさない程度小さい変調信号を、振幅 δV 及び周波数 f で試料バイアス電圧 V に重畳させると共に、トンネル電流の f 成分をロックインアンプを用いて検出する。今回の観察では、タングステン探针を使用し、 $V_m = 5 \sim 7$ mV r.m.s. ($f = 400 \sim 600$ Hz)、ロックイン検出の時定数 10 ms で行った。本稿で示す dI/dV 像は、基本的には明るい領域ほど高い状態密度に対応している。

最初に散乱体の周囲に観察される電子波の干渉パターン (Friedel 振動) について考える。長距離遮閉が散乱体近傍で LDOS 分布に与える影響は、実空間では $\text{LDOS}(k_{\parallel}, r) \propto \cos(2k_{\parallel} r + \delta)/r$ となる振動的振る舞い (二次元自由電子の Friedel 振動) として観察されることがわかる。ここで現れる $2k_{\parallel}$ は、波数ベクトル $\mathbf{k}_{\parallel}$ を含む波動関数 $\psi(\mathbf{k}_{\parallel}, \mathbf{r})$ で定まる存在確率 ($\psi\psi^*$) に、LDOS が比例することに基づく。従って、実際に STM で観測されるのは波数 $2k_{\parallel}$ (波長 $\lambda/2$) の定在波である。

なお、電荷密度分布に現れる本来の意味での Friedel 振動は、二次元の場合は $\cos(2k_F r + \delta)/r^2$ に比例する振動となる。同様の方法で点状散乱体周囲における 3DEG の状態密度分布の漸近解を求めると、エネルギー分解された Friedel 振動では $\cos(2k_{\parallel} r + \delta)/r^2$ 、電荷密度分布の Friedel 振動では $\cos(2k_F r + \delta)/r^3$ に比例する振動が得られる。これら Friedel が見いだした関係式の比較

から、2DEG の Friedel 振動は 3DEG の場合に比べて減衰が遅く、遠くまで振動が及ぶことがわかる。

ここではデータの分かりやすさから、試料の非占有状態の LDOS の測定結果について述べる。この状態の測定では、 $0 < V$ である。この試料バイアス電圧領域では探針の状態に比べて試料の LDOS が強く反映される傾向にあることから、伝導電子の性質はもとより、散乱体の形状や性質をより明瞭に反映した波紋が観察できると

期待される。この非占有状態には厳密には 2DEG と 3DEG の状態が共存しているはずであるが、これから示すように、主に観察されるのは 2DEG の状態である。

図 42 に STM 像と dI/dV 像を示す。貫通転位によると考えられる、面内で点状と見なせる欠陥（矢印）周囲には同心円上の定在波が観察される。この定在波の測定電圧依存性は図 43(a) に示すように、電圧が高いほど波長が短くなる。この定在波の振動振幅を散乱中心からの距離 r の関数として示したのが図 43(b) である。実験値から求めた電子波長を用いて計算した 2DEG の Friedel 振動の様子も併せて示してある。理論値は、散乱の中心から数えて二番目の実験値の振動ピーク付近で理論値の振動ピーク及び振幅を実験値に一致する様にしている。理論から求めた振動が、散乱体直近の振動ピーク付近を除いて、実験値の振動の様子を非常に良く再現することがわかる。この比較からわかるように、振動減衰の因子は $1/r$

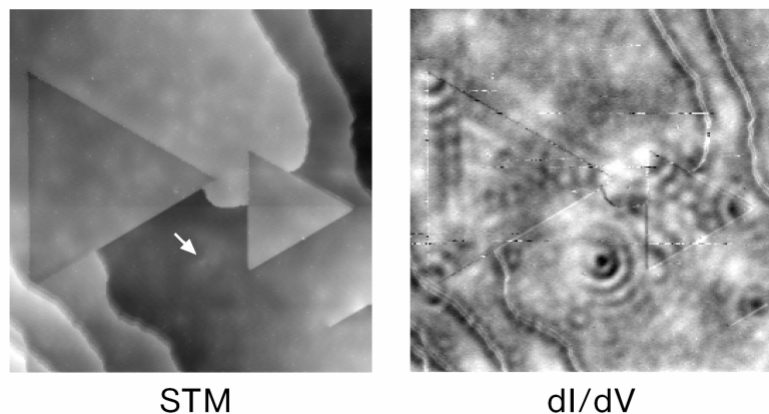


図42 伝導帯(非占有状態)におけるInAs(111)A表面のSTM像と像中の2DEGの干渉による波紋。試料バイアス電圧は+0.10 V。STM像中の矢印は貫通転位による点状欠陥、三角形は露出した積層欠陥四面体の表面。大きい三角形の一辺の長さは128.8 nm、小さい方は70.5 nm。観察領域は214 nm × 214 nm。測定温度は5.3 K。

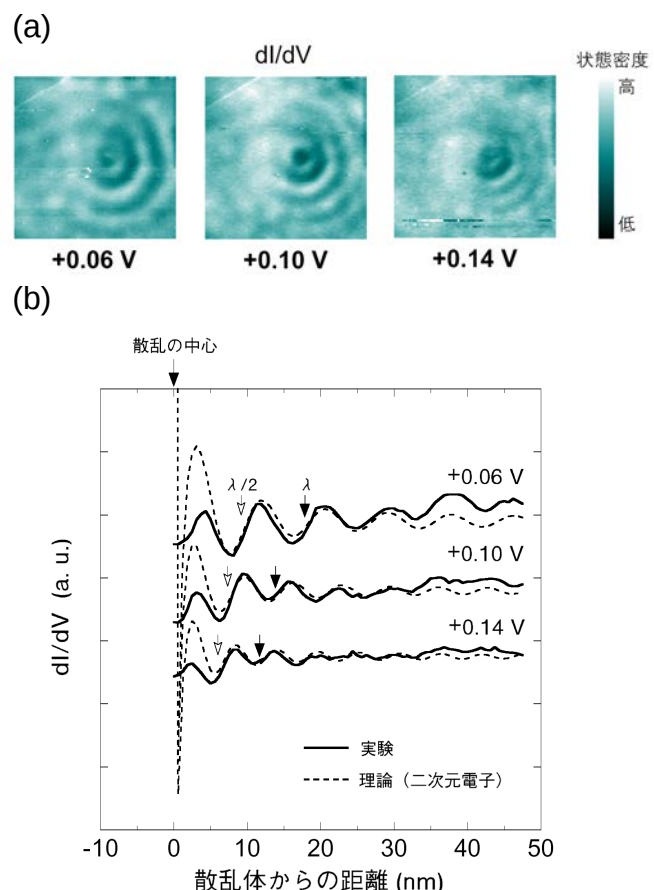


図43 (a)第42図の点状欠陥の周囲で観察されたFriedel振動の試料バイアス電圧依存性。観察領域は67 nm × 67 nm。測定温度は5.3 K。(b) Friedel振動プロファイルの欠陥からの距離依存性(実線)と2DEGのFriedel振動の計算結果(破線)との比較。

に一致している。点状あるいは線状の散乱体による 3DEG の定在波を考えると、減衰の因子は $1/r^2$ (点状散乱体の場合) または $1/r^{3/2}$ (線状散乱体の場合) となり、2DEG の場合よりいずれも強い減衰を示すはずであるから、実験によって得られた LDOS 分布中の減衰振動は、2DEG の Friedel 振動である。なお、図 43 中の Friedel 振動の波紋は、同心円上ながらも散乱体周囲で異方性を持つ振動振幅分布を示している。これは、散乱体である貫通転位が {111} すべり面上に横たわり、(111)A 面の法線とは平行ではないことに原因があり、蓄積層中に存在する伝導電子系ならではの波紋であると考えられる。

図 42 の STM 像にある正三角形は後述する積層欠陥四面体の表面で、この構造の境界は電子を強く散乱する。正三角形をした欠陥表面内部では三角格子状に規則的にピークが分布した LDOS 定在波が観察される。先程の Friedel 振動と同様に、測定電圧が高いほど、ピーク間隔が短くなる。始めに述べた Friedel 振動や積層欠陥四面体の表面で干渉している LDOS の波紋から直接はかった波長、及び非占有状態の dI/dV 像の FFT 図形から求めた $k_{//}$ から計算した $k_{//}^2$ の試料バイアス電圧依存性を図 44 に示す。これより、同じ電子エネルギーにおける電子波長は、散乱体の形状に関わらず全て同じであることがわかる。 $0 < V$ と $V < 0$ のそれぞれの領域で観察された定在波の波数は連続的に接続される。 $k_{//}^2$ の電圧依存性は下に少し湾曲する傾向を示しており、いわゆる禁止帯の狭い半導体特有の $E-k_{//}$ 分散関係における非放物線性があらわれている。InAs の伝導帯における非放物線性の原因については諸説ある様だが、ここでは 2DEG の場合によく用いられる式 $\hbar^2 k_{//}^2 / 2m_0^* = E(1 + E/E_g)$ で近似する。InAs の禁止帯幅 $E_g = 0.42$ eV (5.3 K) 及び伝導電子の $k_{//} = 0$ における有効質量 $m_0^* = 0.024m_0$ を用いると、大体 2DEG のサブバンド準位 E_0 の辺りに起点 ($k_{//} = 0$) をおくと実験結果が良く説明でき、観察された波紋は、これまで考察してきた様に、全て表面蓄積層中で二次元量子化された伝導電子状態のつくる定在波であることが結論できる。観察で主に用いた試料バイアス電圧 +0.1 V 近傍の電子有効質量 m^* は $0.043m_0$ で、非放物線性の効果により $k_{//} = 0$ における値より重くなっている。これは InAs 単結晶中あるいは InAs 薄膜の電子蓄積層中における m^* の電子濃度依存性として報告されている値と照らし合わせると解釈に矛盾がないことが確認される。

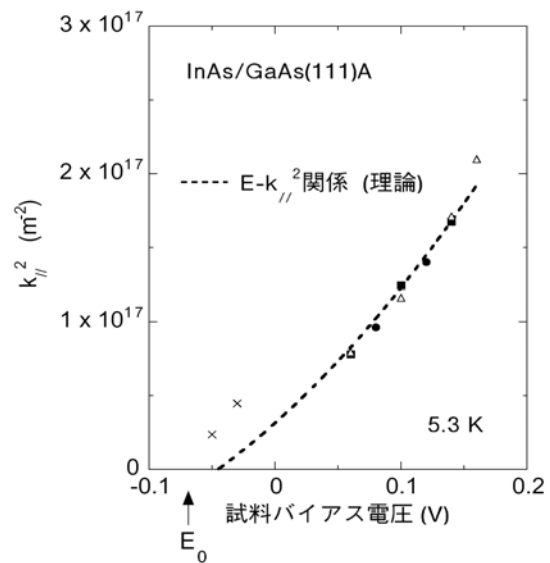


図44 InAs(111)A表面蓄積層中の2DEGが形成する定在波の波長から求めた $k_{//}^2$ の試料バイアス電圧依存性。■はfriedel振動、及び●は積層欠陥四面体内部の定在波から測定した波長、×はFFT図形から求めた波数からそれぞれ求めた。破線は非放物線性を考慮した2DEGの分散関係から計算した関係。 E_0 は、実験から求めた2DEGの電子密度から予想される2Dサブバンド準位。

3.4.4(c) 積層欠陥四面体

InAs/GaAs(111)A 表面の STM 像中では、しばしば正三角形をした欠陥が観察される。これは、積層欠陥として形成された正四面体の結晶欠陥（積層欠陥四面体）の底面が、表面に露出したものである。積層欠陥四面体は、面心立方格子の結晶構造を持つ結晶、ダイヤモンド型構造または閃亜鉛鉱型構造の半導体結晶の中に析出することが知られている。(111)A 面に平行な As 原子層と In 原子層の二原子層からなる表面に露出した単分子ステップの段差を 1 分子層 (1ML) とすると、この構造は、周囲のテラスとの段差が $1/3\text{ML}$ または $2/3\text{ML}$ という分数層高で表面に現れる。露出した(111)A 面と表面下に存在する{111}面上に存在する正三角形の積層欠陥で囲まれている正四面体構造の透視図を図 45 に示す。{111}積層欠陥面では局所的に、結合がウルツ鉱型構造と同じ In-As ボンドでできており、本来は閃亜鉛鉱型構造をとる InAs 中で結晶境界を形成している。ウルツ鉱型結合は、周囲の閃亜鉛鉱型結合とは異なる分極状態になっていることが予想されるから、積層欠陥は自由な Bloch 波の反射面となることが考えられる。また、各正三角形の接線は Lomer-Cottrell 不動転位 (Frank 部分転位) になっている。この不動転位はダングリングボンドを持ち、帯電した欠陥列になっていることが知られているから、やはりここにも電子波を散乱するポテンシャルが生じていると考えられる。従って、積層欠陥四面体は、空間的に完全に電子状態を閉じこめられる構造になっている。特徴的なのは、積層欠陥四面体もその周囲も同じ InAs で形成されており、表面に存在する積層欠陥四面体は、周囲の二次元電子蓄積層とは原子層程度の “薄皮一枚” の境界で隔てられていることである。この様な構造では、周囲に存在する自由電子状態の構造内部への透過確率が高い。つまり、構造内部の閉じこめ状態は、共鳴トンネル構造内部と同様に、構造外部に存在する自由電子状態と強く相互作用している。

この四面体構造が InAs 表面にある場合、構造の大きさと蓄積層厚さ z_d ($\sim \lambda$) の大小関係が、内部に閉じ込められた電子状態に大きな影響を及ぼす。この様子を図 46 に示す。四面体の一辺の長さを ℓ とするとき、 $\ell \gg z_d$ の場合には、表面蓄積層は表面に露出した四面体の表面下のみ存在するから、蓄積層中の 2DEG はあたかも正三角形の檻に閉じ込められた状態になる。一方、 $\ell \sim z_d$ の

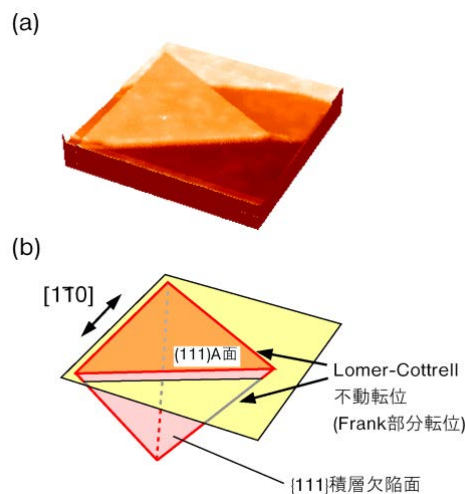


図45 積層欠陥四面体のSTM像とその透視図。STM像の観察領域は134 nm × 134 nm。

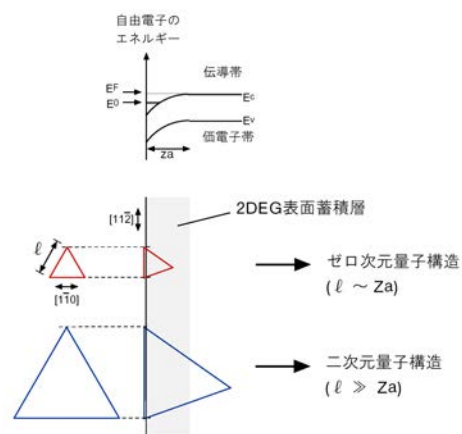


図46 積層欠陥四面体の大きさと電子蓄積層の厚さで決まる2DEGに対する正四面体閉じ込め構造の性質の違いの説明図。正四面体の表面図と断面図をエネルギー帯のプロファイルと共に示す。

場合には、2DEG は正四面体の中に立体的に閉じ込められて、構造内部の電子状態はゼロ次元状態に変化する。もっともこの場合でも、 $\ell \ll z_d$ でない限りはゼロ次元状態は表面蓄積層中の電界により表面側（真空側）に押しつけられ偏平な状態分布に変形していると考えられるから、2DEG が面内の量子サイズ効果によって 0DEG になったと見なす方が適当であろう。わずかに表面近傍に存在する 3DEG も、四面体内部で同様に三次元的に閉じ込められているが、前述のように 2DEG に比べて電子波長が長く状態密度がずっと低いので、LDOS 観察ではバックグラウンドとしてその存在が確認される程度にとどまり、主に検出されるのはもともと表面電子蓄積層中で 2DEG であった電子状態である。

3.4.4(d) ゼロ次元電子状態

自由電子状態に対する量子サイズ効果の実空間観察については、金属表面の二次元島や原子層ステップ、アトムマニピュレーションでつくられた量子の檻及び表面の再構成構造などにおいて報告されている。しかし、実空間は三次元空間であるから、二次元島の様な表面構造は、実際には量子箱の様に三次元的に電子を閉じ込める構造ではないことが多い。面内では電子を閉じ込めることができるものの、表面と垂直方向には閉じ込めることができないから、電子状態のうち、面に垂直方向の散乱波の成分は依然として自由に運動することができる。従って、本当のゼロ次元電子の性質を調べるためには、三次元的に電子を閉じ込め可能な構造を用いることが必要である。積層欠陥四面体は、上記で述べたとおり、ゼロ次元構造の条件を満たしながらも電気伝導度が高い共鳴構造であり、しかも平坦な底面側が表面に露出する配置のため、STM を用いた実験には好都合である。

STM で観測された LDOS 分布をよく見ると、正三角形の境界直近における LDOS は高く、電子が集まり易い傾向にあることから、境界が正に帯電していることを考慮する必要があることがわかる。この状況を、モデル化によりバンドプロファイルとして示したのが図 47 である。境界において無限高さの障壁と共に正電荷の存在を仮定したことにより、バンドは境界近傍で下側に湾曲し、連続的であった二次元電子状態は構造内部に閉じ込められてゼロ次元量子化され、離散化された準位が形成される。計算は、正三角形の内部に強く束縛された準位と LDOS 分布を Schrödinger 方程式を数値的に解いて求め、それが構造内部の共鳴状態をよく近似すると仮定した。ここで、境界近傍におけるバンドの湾曲は、 $-(h-d)^2$ であらわされるとし、正三角形の中心が $E \equiv 0 \text{ eV}$ となるとした。 h と d はそれぞれ中心と各辺までの距離及び内部の任意の点と最寄りの辺までの距離である。障壁と正三角形の中心とのバンド曲がりに起因するポテンシャル差は $0.2 \pm 0.1 \text{ eV}$ と

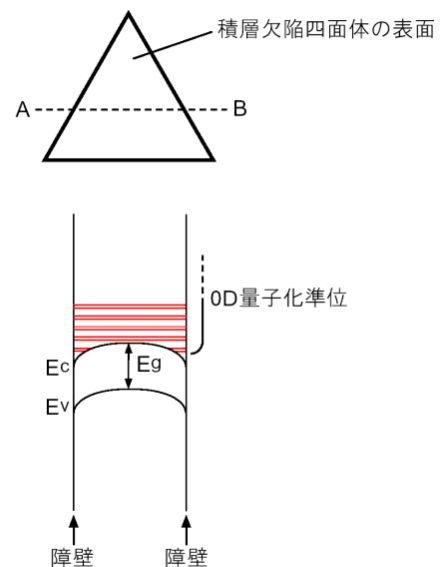


図47 電子波長と同程度の大きさの積層欠陥四面体(上图)内部で仮定したエネルギー帯構造A-B断面プロファイル(下图)とゼロ次元量子化準位。

した。これは、Fermi 準位のピンニングによる表面におけるバンド湾曲と同程度の湾曲を考慮したことになる。電子の有効質量には、四面体構造を取り囲む表面蓄積層中の 2DEG が +0.1 eV 近傍において持つ値と同じ $0.043 m_0$ を用いた。

図 48 の STM 像中にある大きい四面体 L は露出した (111)A 表面蓄積層中の 2DEG を正三角形の境界内部に閉じ込める構造として機能する。その

ため、内部の LDOS 分布は 2DEG の散乱と干渉による周期的で対称的な状態密度分布であり、正三角形の量子の檻の内部に閉じ込められた二次元表面状態と同様の波紋になっている。ここで肝心なことは、大きい四面体 L の内部の LDOS は 2DEG の電子状態を主に反映するから、検出される dI/dV 信号強度の電圧依存性は外部と同様であり、Friedel 振動の状態密度と同じ傾向を見せるということである。その様子は図 48 の P1, P2, L における電圧依存性に示されている。一方、小さい四面体 S は図 46 に示したように、構造は表面電子蓄積層の中にほぼ完全に浸っており、2DEG を四面体の内部に三次元的に閉じ込める構造として機能する。従って、閉じ込められた 2DEG は内部で強くゼロ次元量子化され、外部の二次元状態とは異なった性質を帯びるようになる。電圧依存性においては、

大きい四面体の場合と異なり、LDOS 測定を行うと外部の 2DEG の状態密度より明らかに構造内部の状態密度が高く、ある試料バイアス電圧では極大値を示すような共鳴状態を観察することができる

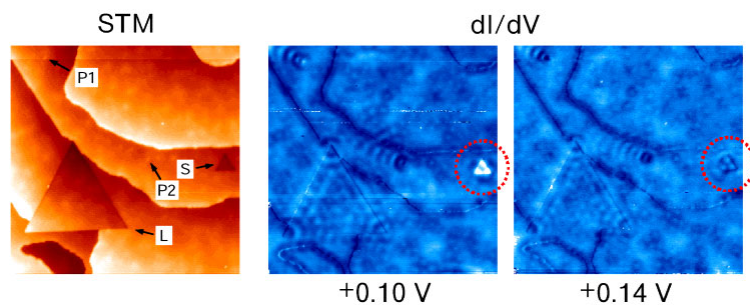


図48 大きさの異なる二つの積層欠陥四面体のSTM像と異なる試料バイアス電圧における像。貫通転位による点状散乱体(P1及びP2)、大きい積層欠陥四面体L(一辺の長さ97.7 nm)、小さい積層欠陥四面体S(一辺の長さ17.3 nm)が観察される。小さい四面体Sの内部(破線の円で囲んだ部分)では共鳴状態(+0.10 V)と非共鳴状態(+0.14 V)における状態密度の大きな違いが現れている。観察領域は214.4 nm × 214.4 nm。測定温度は5.3 K。

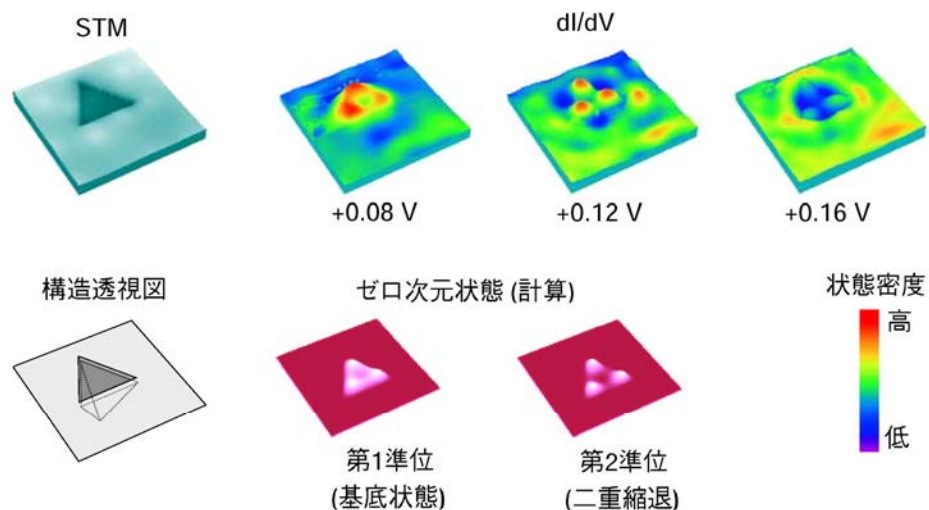


図49 図48中の小さい四面体SのSTM像とその透視図、及び観察された像とゼロ次元固有状態の確率分布の比較。観察領域は40.2 nm × 40.2 nm。測定温度は5.3 K。確率分布は正三角形の領域内部で規格化した。

る。図 48 からわかる様に、明らかに 2DEG の波紋とは異なる性質を示すことが一目瞭然である。この小さい構造 S をさらに拡大し試料バイアス電圧を変えて観察すると図 49 に示す様な結果が得られる。電圧が +0.12 V では各頂点近傍に密度が極大となる領域が、+0.08 V では三角形に歪み中央がくぼんだ環状の dI/dV 信号ピークが、外部の dI/dV 信号に比べて明らかに高い状態密度で観測されている。ところが、試料バイアス電圧が +0.16 V では状況が逆転し、内部の状態密度は外部に比べてあきらかに低く測定されている。この傾向は、外部の 2DEG の LDOS では観測されない。この様に測定電圧が増大したにもかかわらず、構造外部と異なって内部の状態密度が減少する傾向は、小さい四面体 S の内部においてゼロ次元量子化の効果により電子状態が離散化したことに対応すると考えられる。従って、 $V=+0.08$ V、及び +0.12 V では、ゼロ次元準位近傍での共鳴状態の測定、+0.16 V では逆に共鳴準位から離れた非共鳴状態に対応し +0.12 V における共鳴状態の“裾”が痕跡として残るに留まっていると考えられる。

先に示したモデルに基づくゼロ次元固有状態の状態密度分布の計算結果を図 49 に示す。これより、+0.08 V で観察された LDOS は第 1 準位（基底状態）の密度分布によく一致することがわかる。この状態は、スピンによる縮退のみを持ち、最大で 2 個の電子を受け入れることができる。一方、+0.12 V での LDOS は第 2 準位の密度分布によく一致している。この状態は二重縮退しているため、観察される LDOS 分布は各状態分布の和によって成り立っており、スピンの縮退を含めれば最大で 4 個まで電子を受け入れることができる。計算で得られた第 1 準位と第 2 準位のエネルギー差は 0.066 eV であるが、この値は測定電圧差によって決まる電子エネルギー差 0.04 eV に比較的良く一致する。使用した試料バイアス電圧差は変調電圧の振幅より十分大きいから、用いたモデルは現象をよく説明することがわかる。ここで、第 3 準位は、第 2 準位より約 0.21 eV 上方に位置しており、+0.16 V において得られた LDOS は共鳴準位から離れた非共鳴状態に相当し、最も近接した第 2 準位の共鳴状態の“裾”が検出されているとした予想が改めて支持される。なお、第 1 及び第 2 のゼロ次元共鳴状態が非占有状態 ($0 < V$) において観測されたこと、及び構造内部の E_c が E_F より低エネルギー側にあることも考え合わせると、構造の境界における障壁高さは少なくとも数百 meV 程度に及ぶであろうと見積もれる。

より高次の固有状態を視覚化するため、次に構造のサイズが少し大きくなった四面体を実験に用いた。図 50 に一辺が 33.9 nm の積層欠陥四面体の LT-STM 像とその表面で観察された LDOS 分布を示す。構造の内部では、先ほど同様に三回対称の波紋が観察される。これらの異なる分布は、0.02 V の試料バイアス電圧差で測定された。一方、計算によって求めたゼロ次元の各固有状態と比較してみると、丁度基底状態から数えて 3 番目と 4 番目の準位に属する固有状態の分布によく一致している、ここで、3 番目の状態は縮退しておらず異なるスピンを持つ電子が 2 つまで、4 番目の準位に属する状態は二重縮退しており、4 つまで電子を受容できる状態である。計算におけるエネルギー準位の差は 0.014 eV で、試料バイアス電圧差によるエネルギー差 0.02 eV に大体合っていることがわかる。ロックイン測定において 5 mV r.m.s. の変調を印加したから、各 dI/dV 分布から求めた LDOS 分布は、約 14 meV のエネルギー幅（測定した電子エネルギーを中心に約 ± 7 meV の領域）に含まれる状態の積分になっているが、3 番目と 4 番目のエネルギー間隔はそれと同等以上である。従って、図 50 の各 LDOS は先程と同様に各々のエネルギー準位に属するゼロ次元固有

状態を個別に視覚化したものに相当するといえる。ここまでの結果を総合すると、基底状態から順にエネルギーの低い 4 つの準位の各固有状態が、それぞれ個別に視覚化できたことになる。

3.4.5. ナノプローブに関する研究のインパクト

国内外において強磁場中で動作する SNOM はほとんど存在しない。しかし、スピントロニクスや光エレクトロニクスの進展に伴い、磁場中での半導体量子構造の評価への関心が高まっている。各国の機関で、こ

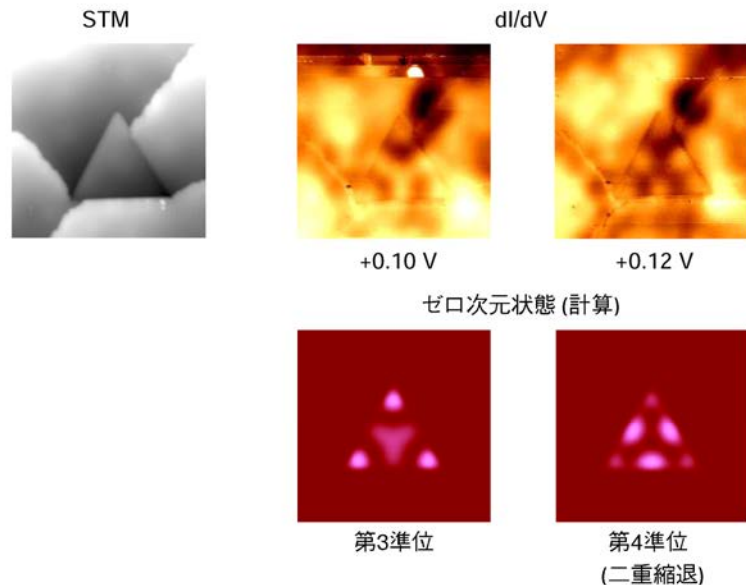


図50 一辺の長さ33.9 nmの四面体のSTM像及び観察された像とゼロ次元固有状態の確率分布の比較。観察領域は67 nm × 67 nm。測定温度は5.3 K。確率分布は正三角形の領域内部で規格化した。

のような理由から低温・磁場 SNOM の開発が聞かれるようになっている。そのような情勢の中で、当グループはいち早くから本装置の開発を進めており、世界的にもトップグループに入っている。投稿論文 (Tokizaki 他、J. Microsc.194、321(1999)) はそれらのグループからも引用されている。今後は、磁場中において、局所的に発現する量子効果の評価を行っていく。また、試料に電極を取り付け、静電場・磁場中に光励起されたキャリアの挙動を調べる。また、2次元電子ガス系に対しては、磁場中で量子化された電子のドリフトと光励起キャリアとの相互作用を探索する。高速プローブは既に 1GHz を越える電気特性の評価が可能であることから、産業分野からも高い評価を受けており、新たなプローブ構造の採用で 10GHz を越える領域が期待されている。今後は、導波路構造の最適化とともにシステムとしての利便性を高めることを予定している。さらに、このプローブを利用して、これまで測定されることの無かった微小電子デバイスや、微小カンチレバーなどの高周波特性評価に取り組んでいく予定である。

零次元状態などの電子分布の測定は IBM 等を中心に金属表面の局在電子を用いて行われてきたが、半導体の伝導電子に対する測定例は壁界面の測定などに限られていた。本プロジェクトで行った、InAs 表面のユニークな特性を利用した電子分布のナノスケール直接観察はフリーデル振動や零次元状態など様々な低次元状態の可視化を実現した研究として、極めてユニークなものであり、その成果は IF=7.3 の PRL 誌に続けて掲載された (Kanisawa 他、PRL86、3384(2001)、Kanisawa 他、PRL87、196804(2001))。この分野は各グループが独自のシステムを採用しており引用回数はそれほど多くないが、それでも 10 回近くに達している。また、多くの国際会議に招待されたほか、電子波の特性のきれいな可視化として日経本紙に写真入で紹介された。今後はこれらのナノスケール測定を磁場中での測定や結合ドットの測定に拡張し、マクロスコピックな測定では見えない一面に光を当てて行きたいと考えている。

3.5. 量子情報処理の基礎研究

井元グループでは、量子ビットを用いた量子演算構成の研究として、量子演算レジスターを目指した様々な配置の量子ビット群におけるエンタングルメントの可能な形態について、また光を用いた実現可能なエンタングルメント制御について、それにシャノン理論の量子力学版の構築や量子暗号の様々なレベルにおける安全性について、主に理論的研究と光の量子ビットを用いた実験的研究を行った。その結果、多体エンタングルメントの上限値、その上限値が量子ドットと光の相互作用で実現可能であること、実現可能な線形光学によるエンタングルメント制御の提案および実証実験、それにシャノンの情報源情報量（圧縮・解凍）理論の完全な量子力学版の構築、不完全光源 BB84 量子暗号の安全性証明および完全光子源 B92 量子暗号の無条件安全性の証明、など数多くの成果を上げることができた。これらの成果により、量子情報処理のより大きな可能性に対する原理的証明と実験的見通しに資する知見を得ることができた。

3.5.1. 多体エンタングルメント理論

様々な配置の量子ビット群におけるエンタングルメントの可能な形態について、多体エンタングルメントの上限値を明らかにした。状況としては例えば、受け取ったエンタングルメントを、デコヒーレンスによるエンタングルメント壊滅のリスク分散を図るためレジスター全体に（いわばホログラム的に）分散するような場合に、個々の2量子ビット間に形成されるエンタングルメントを平均してどの程度まで薄められるか、という問題を考えればよい。多数の量子ビットの配置として(1)全ての量子ビットが対等にエンタングルしている配置、(2)一列に並び（イジングモデルのように）隣同士のみエンタングルしている場合、(3)一つのマスター量子ビットとそれ以外のスレイヴ量子ビットが平等にエンタングルしている場合を扱った。このうち特に我々のオリジナルとなるのは(1)の場合で、 $2/N$ （ N は量子ビットの数）まで薄められるという答を予測すると共に数学的に厳密に証明した。

またこの値が量子ドット系と光の相互作用で物理的に実現されることを示した。これは光共振器モードを介した複数ドット間のエンタングルメント形成について、7つ程度までなら理論限界に近い最大エンタングル状態が達成できることがわかった。またエキシトンの有無でなく、多数のエキシトンのコヒーレント状態の重ね合わせの偶奇性を qubit とする方法も有効であることを示した。

また多粒子系で何個までエンタングルしているかを判定する不等式を提案し、特に3体の場合の忠実度条件を求めた。その忠実度を推定するのに適した測定を提案し、Pan 達の実験が確かに GHZ 状態発生になっていることを示した。また、通常の一次不等式でなく二次不等式の証明の不備を補い、より優れた不等式を導いた。

量子 bit は光子のみならず物質によっても実現される。一つの試みとして半導体中の電子と正孔の結合体であるエキシトンに量子状態を搭載する試みが考えられているが、この場合任意のエキシトン同士を相互作用させることが難しい。我々は光の場を媒介として相互作用を制御することを念頭に置き、 Q 値の高いすなわち残響時間が長いエコールームのような光共振器に置いた複数のエキシトンについて、光子との相互作用によって起こる共振周波数のシフトについて理論的に明らかにした。これは今後エキシトン qubit を含む共振器の設計に役立つ。

3.5.2. 量子情報理論

情報理論は 1948 年 Shannon が「情報の量」の単位を bit として理論的に定量化したことに始まるが、その骨子は (1)「与えられた文字列をどれほど少数の bit 数に圧縮できるか」をその文字列の情報量と見なせることを明らかにしたことと、(2) 雑音のある通信路でどれほどの情報量を送れるかについて明らかにした点にある。数ある現在のデータの圧縮・解凍法や誤り訂正符号は Shannon の理論限界に近づくために考えられた実際の方法である。Shannon 理論の量子力学版すなわち「与えられた量子状態の列をどれほど少数の量子ビット (qubit) に圧縮できるか?」「雑音のある量子通信路でどれほどの量子状態を運べるか?」についても長いこと研究されて来たが、完成していなかった。我々は前者すなわち「量子状態の列をどれほど圧縮できるか?」について初めて最終解答を与えた。

この理論を応用して、混合状態の broadcasting 条件、無痕跡読み出し条件、複合系の複写と無痕跡読み出し条件、量子暗号の原理分類について明らかにした。以上は「いくらでも 0 に近づけられるが 0 でない誤差」を認める状況での圧縮理論であるが、誤差完全 0 を要求すると圧縮できない場合があり、それが純粋の量子情報を表すことを示した。

3.5.3. 線形光学による量子演算

量子コンピューティングや量子テレポーテーションを行うには qubit 同士の演算すなわち相互作用が不可欠であるが、これを行うには光子一個程度の微弱光でも起こる強い非線形光学効果 (光 Kerr 効果等)が必要と考えられていた。しかし我々は「演算に成功したことさえ分かれば成功確率が小さくても良い」という確率的演算が許される場合は、線形光学でもできる演算もあることを明らかにした。この実験研究を念頭に置き、そのような演算の具体例としてエンタングルメント濃縮法を提案した。複数の qubit の間のエンタングルした状態と呼ばれる特種な相関関係は量子コンピューティングや量子テレポーテーションに不可欠である。エンタングルメント濃縮とは、何かの理由でエンタングルの度合いが劣化した qubit のペアが N 個あるとき、それらから完全にエンタングルした n 個のペア ($n < N$) を作り出す演算である。これはまた N 個全部のペアを同時に演算するのではなく、2 ペアだけから完全な 1 ペアを作る方法になっている。図 5 1 にその応用の概念を示す。

上記は 2 体のエンタングルメントに対する考察であるが、3 体のエンタングルメントには GHZ 型と W 型がある。このうち GHZ 発生法は種々提案されているが W の方は実際可能な方法はない。我々は実際可能と考えられる簡単な線形光学素子を用いた確率的 W 状態発生法を提案した。

また、quantum scissors device (量子切断器: ヒルベルト空間の量子状態から特定の次元の成分を切り落とす)というアイデアがあるが、これは実は線形光学でできる確率的演算の一例として、確率的量子テレポーテーションや量子状態整形器として使える。今回我々は、現実的な光学素子のいろいろな不完全性を理論的に取り扱い、それらが量子テレポーテーションや量子状態整形器としての性能に与える悪影響を明らかにした。現実の不完全な光源や光子カウンターを用いてできる限度、および入力光と作業用に準備した光のパルスモードミスマッチの影響を明らかにした。その結果、今日の実験器具でも高い忠実度 (たとえば 90% など) で動作させることが可能であることが明らかになった。

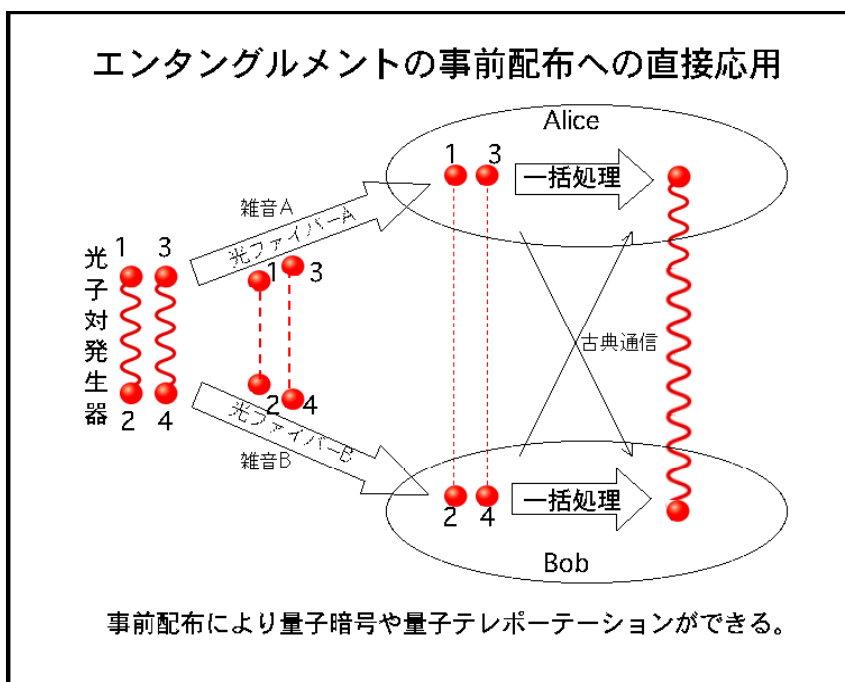


図51 伝送路雑音によるエンタングルメント消失を回復するための「エンタングルメント抽出系」の直接応用。

3.5.4. エンタングルメント抽出実験

上述のように我々は線形光学でできる量子情報処理の例として「確率的エンタングルメント抽出法」を理論的に提案した。

これは保管または伝送中にエンタングルメントが劣化した複数のペアから元のエンタングルメントに復帰した一つのペアを抽出するものである。「確率的」とは、常に成功するとは限らないが成功した場合はそれがわ

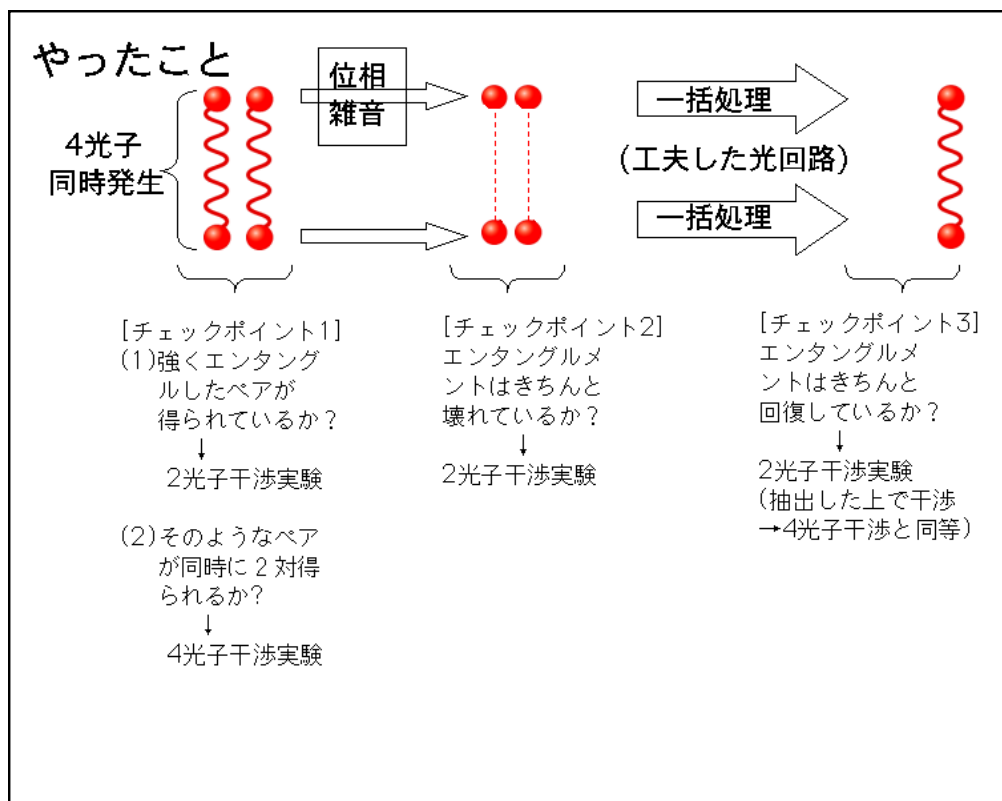


図52 「エンタングルメント抽出確認実験」の各ステップとチェックポイント。

かるという意味である。一方その実験的検証の準備も平行して行って来た。このために必要な4光子干渉実験は現時点で世界でも数ヶ所で行われていないが、我々の実験もそのレベルまで到達した。そしてそれを用い、エンタングルメント抽出実験に初

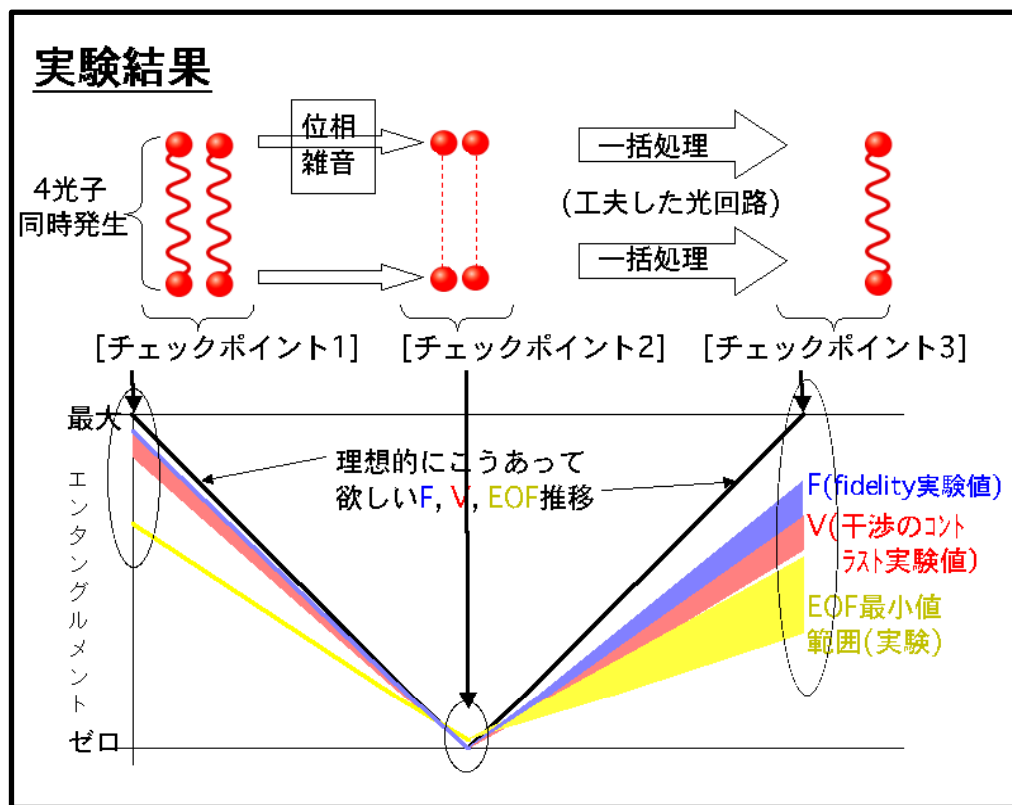


図53 「エンタングルメント抽出確認実験」の結果。

めて成功した。これは図 52、53 のような実験手順とポイントをチェックする実験である。

3.5.5. 量子暗号の安全性の証明

量子暗号の安全性の証明は量子暗号理論の重要なテーマで、これまで最も有名な BB84 方式については「装置が全て完全な場合の安全性」から「コヒーレント光源を使い、個別パルス盗聴でしか盗聴されない場合の安全性」や「受信者の受光器も盗聴者の仲間が操作している場合」まで安全性成立条件が求められて来た。我々は BB84 量子暗号について「受光器は安全だが光源を盗聴者の仲間が操作している場合」も安全であることを明らかにするとともに、光源も不完全な場合の安全性についての証明を行った。

BB84 の次に有名な B92 暗号についての安全性については、BB84 に比べ未解明であった。まず、単一光子を用いた偏光の B92 で通信路に雑音と減衰がある場合について、個別盗聴に対する安全性の条件を求めた。一般に BB84 より小さな誤り率が要求されることがわかったが、BB84 に無いパラメータ(直交度)依存性等、新たな知見を得た。次に、個別盗聴に限らず一般の盗聴に対しても安全であることの証明を(1)伝送路が完全である場合と(2)伝送路が多少不完全である場合の両方に関して行った。

3.5.6. 量子情報処理の基礎研究のインパクト

我々は「エンタングルメントの抽出実験」の具体的方法を提案し IF=3.0 の Phys. Rev. A に掲載し (Yamamoto 他、Phys. Rev. A64, 12304(2001))、そのために最小限必要な「2 ペア (4 光子) の発生および 4 光子干渉実験」を日本で初めて実現した。さらに、これを用いたエンタングルメン

ト抽出実験を世界で初めて実現した。これは「複数の量子ビットの一括量子測定(個々の量子ビットに対する測定でなく全量子ビットが張るヒルベルト空間内での測定)を用いたエンタングルメントの抽出実験」としてはまぎれもなく世界初である。当時学生(プロジェクト最後の半年はCREST 研究員)だった筆頭著者の山本俊はいくつかの学会招待講演に招待され、また総合研究大学院大学の最優秀学生に与えられる「長倉研究奨励賞」を受賞するとともに、井元・小芦・Ozdemir も国際会議講演に多数招待された。この研究は実験装置に関して NTT 物性科学基礎研究所の協力も得て行われた。なおこの成果は IF=30.4 の Nature に発表され(Yamamoto 他、Nature421、343(2003))、発表後ただちに朝日新聞、日刊工業新聞、日本工業新聞、日本経済新聞、化学工業日報、科学新聞の各紙に紹介された。この研究を突破口として、今後より規模の大きいエンタングルメント操作へと研究が進むであろう。

シャノンの情報源情報量理論は「純粋状態の量子信号」に対してはシューマッハーによる理論があり長らく君臨していたが、「混合状態あるいは他とエンタングルした場合も含めた一般量子信号」に対しては我々が初めて完全回答を与えた。この成果は IF=7.3 の PRL 誌に掲載され(Koashi 他、PRL87、017902(2001)、Koashi 他、PRL89、097904 (2002))、小芦を始め数多くの国際会議に招待された。

また多体エンタングルメントの上限値の研究は客員の Buzek 教授の関連研究に端を発し、その数学的証明を与えた。また上限値が量子ドットと光の相互作用で実現可能であることを明らかにしたが、これは今後の半導体量子ドットの研究と光を用いた量子情報処理研究の融合に一步を踏み出す研究である。この成果は IF=3.0 の Phys. Rev. A に掲載された(Miranowicz 他、Phys. Rev. A65、062321(2002))。また、IF=7.3 の PRL 誌に掲載された多体エンタングルメント量とフィデリティ(忠実度)の関係に関する理論(Nagata 他 PRL89、260401(2002))は、前述のエンタングルメント抽出実験におけるエンタングルメント量の実験的評価に実際に役立った。

実現可能な線形光学によるエンタングルメント制御の提案として C-NOT や上述のエンタングルメント蒸留や W 型発生法を提案するとともに、より実際的提案の一つとして「量子切断器(ヒルベルト空間の部分空間の数学的切断を物理的に実現する、応用の広い装置)」を実際の不完全な実験器具で実現する方法を提案・評価した。この理論はその後欧州での実験研究に寄与している。

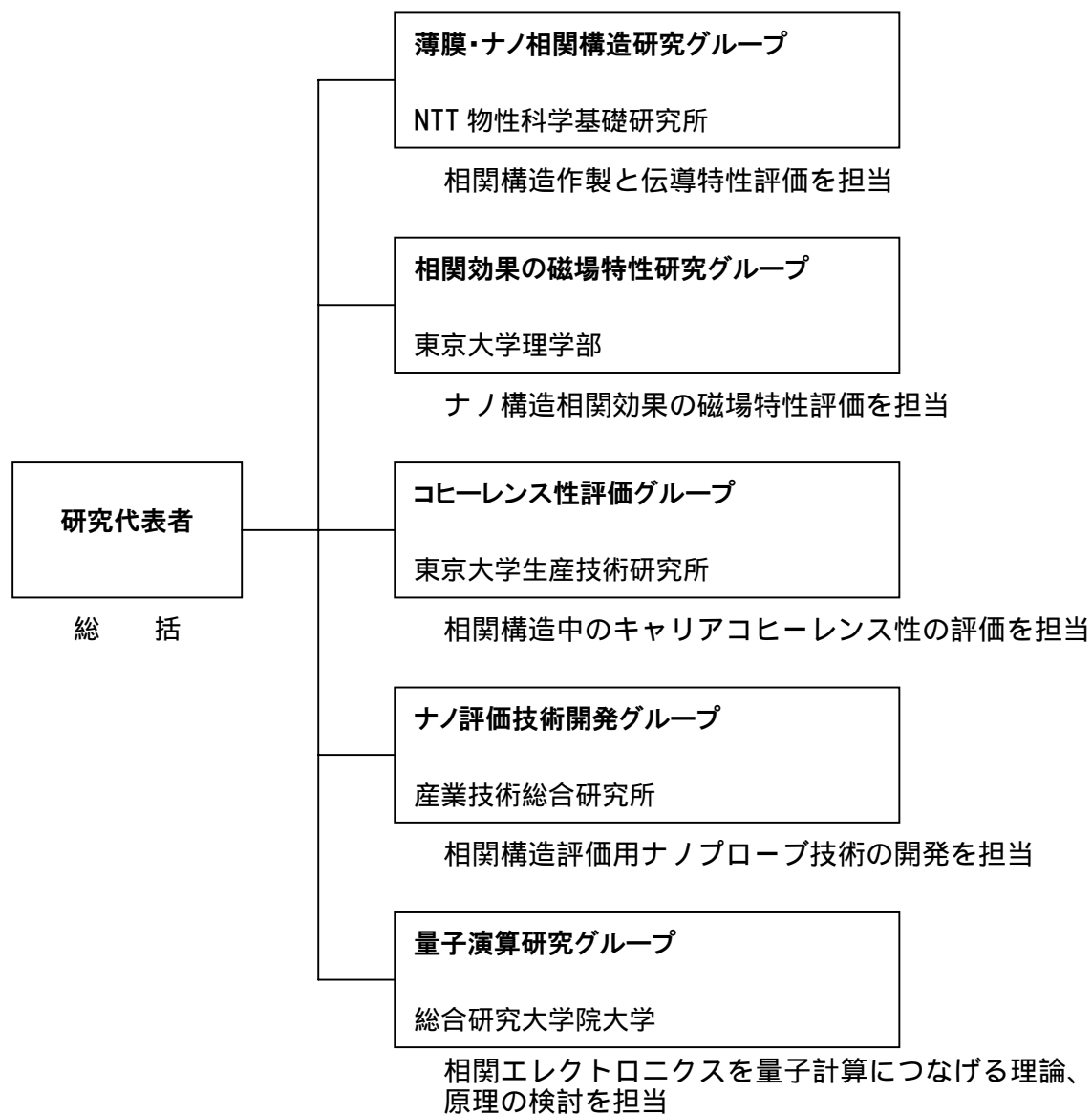
「量子暗号の安全性の証明」は今や一つの重要分野となっており、我々の成果は IF=7.3 の PRL 誌に掲載され(Koashi 他、PRL90、167904(2003)、Tamaki 他、PRL90、167904(2003))、小芦を始め国際会議に多数招待されるとともに、玉木は学生でありながら国際会議に招待されている。

関連研究として本プロジェクトの成果に挙げた中性原子の BEC における理論(IF=7.3 の PRL 誌に掲載(Koashi 他、PRL84、1066 (2000)))はわずか数年前の理論の論文であるにもかかわらず 30 回以上という被引用数を得ている。

その他、この分野の牽引者として井元は報道機関に多数回紹介されている。プロジェクト期間中では(上述の CREST 成果紹介 6 件の他に)読売新聞に 1 回、日本経済新聞に 3 回、日経産業新聞に 5 回、テレビ東京に 1 回紹介された。小芦も日経産業新聞に紹介された。

4 . 研究実施体制

(1)体制



(2)メンバー表

薄膜・ナノ相関構造研究グループ

氏 名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
平山 祥郎	NTT 物性基礎研	物性部部長、GL	総括：薄膜・ナノ相関構造の伝導特性	平成 10 年 12 月～平成 15 年 11 月
山口 浩司	同上	主幹研究員	InAs 系薄膜構造の作成と伝導特性	平成 12 年 8 月～平成 15 年 11 月
都倉 康弘	同上	主幹研究員、GL	相関構造の物性理論	平成 10 年 12 月～平成 15 年 11 月
村木 康二	同上	主任研究員	薄膜相関構造の伝導特性	平成 10 年 12 月～平成 15 年 11 月
藤澤 利正	同上	主任研究員	量子ドット相関構造のキャリアダイナミクス	平成 10 年 12 月～平成 15 年 11 月
蟹沢 聖	同上	主任研究員	薄膜相関構造のナノスケール評価	平成 10 年 12 月～平成 15 年 11 月
佐々木 智	同上	主任研究員	量子ドット相関構造の伝導特性	平成 10 年 12 月～平成 15 年 11 月
鈴木 恭一	同上	研究主任	薄膜相関構造の伝導特性	平成 10 年 12 月～平成 15 年 11 月
D. Austing	同上	研究主任	量子ドット相関構造の伝導特性	平成 10 年 12 月～平成 13 年 10 月
林 稔晶	同上	社員	量子ドット相関構造のキャリアダイナミクス	平成 12 年 4 月～平成 15 年 11 月
板倉 利文	同上	ポスドク	相関構造のコヒーレンス理論	平成 13 年 4 月～平成 15 年 11 月
遊佐 剛	同上	ポスドク	相関構造のコヒーレンス制御	平成 14 年 4 月～平成 15 年 11 月
高品 圭	同上	ポスドク	薄膜相関構造の伝導特性	平成 14 年 4 月～平成 15 年 11 月
熊田 倫雄	同上	社員	相関構造のコヒーレント制御	平成 15 年 4 月～平成 15 年 11 月
橋本 克之	同上	CREST 研究員	薄膜相関構造のナノスケール評価と伝導特性評価	平成 11 年 4 月～平成 15 年 11 月
吉田 幸子	同上	研究補助員		平成 11 年 1 月～平成 15 年 11 月

相関効果の磁場特性研究グループ

氏 名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
樽茶 清悟	東京大学理学部物理	教授	総括：結合量子ドット相関効果の磁場特性の評価	平成 10 年 12 月～平成 15 年 11 月
大野 圭司	同上	助手	結合量子ドット構造におけるスピンに関する相互作用	平成 10 年 12 月～平成 15 年 11 月
天羽 慎一	同上	D3	結合量子ドットのスピン相関	平成 14 年 4 月～平成 15 年 11 月
山本 倫久	同上	D3	量子細線のクーロンドラッグ	平成 14 年 4 月～平成 15 年 11 月

西 義史	同上	D2	量子ドットのウィグナー結晶化	平成 14 年 4 月～平成 15 年 11 月
------	----	----	----------------	--------------------------

コヒーレンス性評価グループ

氏 名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
平川 一彦	東京大学生産技術研究所	教授	総括： テラヘルツ分光を用いた量子構造中のコヒーレンス性評価	平成 10 年 12 月～平成 15 年 11 月
島田 洋蔵	同上	助手	テラヘルツ分光を用いた量子構造中のコヒーレンス性評価	平成 10 年 12 月～平成 15 年 11 月
マダビ シェタム シュ	同上	CREST 研究員	テラヘルツ分光を用いた量子構造中のコヒーレンス性評価	平成 10 年 4 月～平成 13 年 8 月
サン ハイユ	同上	CREST 研究員	テラヘルツ分光を用いた量子構造中のコヒーレンス性評価	平成 14 年 11 月～平成 15 年 11 月

ナノ評価技術開発グループ

氏 名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
横山 浩	産業技術総合研究所・ナノテクノロジー研究部門	研究部門長	総括： 走査プローブ顕微鏡を用いた量子構造のナノ評価技術の開発	平成 10 年 12 月～平成 15 年 11 月
時崎 高志	同上	近接場ナノ工学グループリーダー	近接場光学顕微鏡(SNOM)を用いた量子構造のナノ評価技術の開発	平成 10 年 12 月～平成 15 年 11 月
重藤 知夫	同上	同研究員	近接場光学顕微鏡(SNOM)を用いた量子構造のナノ評価技術の開発	平成 10 年 12 月～平成 15 年 11 月
井上 貴仁	同上	単一分子・界面技術グループ主任研究員	走査型応力顕微鏡(SMM)を用いた量子構造のナノ評価技術の開発	平成 10 年 12 月～平成 15 年 11 月
河島 整	光技術研究部門	主任研究員	近接場光学顕微鏡(SNOM)を用いた量子構造のナノ評価技術の開発	平成 10 年 12 月～平成 15 年 11 月

量子演算研究グループ

氏 名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
井元 信之	総合研究大学院大学	教授	総括： 量子演算構成法の研究	平成 10 年 12 月～平成 15 年 11 月
小芦 雅斗	同上	助教授	量子情報処理基礎理論の研究	平成 10 年 12 月～平成 15 年 11 月
シャヒン カハル デミル	同上	CREST 研究員	量子演算構成法の研究	平成 12 年 4 月～平成 15 年 4 月
山本 俊	同上	CREST 研究員	光子系による量子情報基礎実験	平成 11 年 7 月～平成 15 年 11 月
長田 宏二	同上	研究補助員	量子演算構成法の研究	平成 13 年 5 月～平成 15 年 3 月

玉木 潔	同上	研究補助員	量子演算構成法の研究	平成 13 年 5 月～平成 15 年 3 月
島村 淳一	同上	研究補助員	量子演算構成法の研究	平成 15 年 4 月～平成 15 年 11 月
角田 洋祐	同上	研究補助員	量子情報処理基礎理論の研究	平成 14 年 5 月～平成 15 年 11 月

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
H11.4.14	総括、アドバイザとの 現地討論	NTT物性基 礎研(厚木)	10名	今後の研究方針、特にNTT での研究について現場研 究設備の見学を含め討論
H11.5.31	チーム内打合せ	東大生研 (東京)	5名	THz、サイクロトロン共 鳴関連の打合せ
H11.11.15	関連エレクトロニクス プロジェクトチームミ ーティング	JST東京展 示館(東京)	25名	チーム全体会合として各 チームの研究状況ならび に将来の研究計画を討論
H12.10.26	第1回領域シンポジウ ム	JAホール (東京)		チームメンバーと会合、討 論、研究打合せ
H12.11.17	チーム内打合せ	NTT物性基 礎研(厚木)	7名	量子コンピュータに向け た研究打合せ
H13.1.9	チーム内打合せ	NTT物性基 礎研(厚木)	4名	量子コンピュータに向け た研究打合せ
H13.2.13 ~ 14	国際シンポジウム Carrier Interactions in Mesoscopic Systems (CIM2001)	NTT厚木研 究開発セン タ(厚木)	142名	外部の関連研究者との交 流、CREST関連エレクトロ ニクスチームの研究成果 のアピール、ならびにチー ム内での討論
H13.7.6	チーム内打合せ	NTT物性基 礎研(厚木)	9名	量子コンピュータに向け た研究打合せ
H13.8.23	関連エレクトロニクス プロジェクト中間審査	JST東京展 示館(東京)	8名(チー ムからの 参加者)	研究評価ならびに統括、ア ドバイザーによる今後の 研究展開へのアドバイス
H13.10.25	第2回領域シンポジウ ム	コクヨホー ル(東京)		チームメンバーと会合、討 論、研究打合せ
H13.11.30	チーム内打合せ	NTT物性基 礎研(厚木)	4名	量子コンピュータに向け た研究打合せ
H14.2.26	関連エレクトロニクス プロジェクトチームミ ーティング	JST東京展 示館(東京)	10名	チーム全体会合として各 チームの研究状況ならび に将来の研究計画を討論
H14.3.12 ~ 14	JST国際シンポジウム (ISQC)	科学未来館 (東京)		チームメンバーと会合、討 論
H14.10.25	第3回領域シンポジウ ム	コクヨホー ル(東京)		チームメンバーと会合、討 論、研究打合せ
H15.3.10 ~ 12	国際シンポジウム Carrier Interactions and Spintronics in Nanostructures (CISN2003)	NTT厚木研 究開発セン タ(厚木)	162名	外部の関連研究者との交 流、CREST関連エレクトロ ニクスチームの研究成果 のアピール、ならびにチー ム内での討論

H15.4.11	関連エレクトロニクス プロジェクトチームミ ーティング	JST東京展 示館(東京)	15名	チーム全体会合として各 チームの研究状況ならび にプロジェクト終了に向 けた研究計画を討論
H15.10.30 ~ 31	終了シンポジウム	コクヨホー ル(東京)		チームメンバーと会合、討 論、研究打合せ

(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
Vladimir Bužek (Slovak Academy of Science, 教授)	共同研究	総研大	H12.1.31 ~ H12.3.28
Adam Miranowicz (Adam Mickiewicz Univ., 講師)	共同研究	総研大	H12.6.9 ~ H13.3.30
Yurii E. Lozovik (Institute of Spectroscopy, Russian Academy of Sciences, 所長)	CIM2001招待講演	NTT物性基礎研	H13.2.11 ~ H13.2.15
Dieter Weiss (Universitat Regensburg, 教授)	CIM2001招待講演	NTT物性基礎研	H13.2.11 ~ H13.2.15
高品 圭 (Univ. of Oxford Dept. of Physics)	CIM2001招待講演	NTT物性基礎研	H13.2.11 ~ H13.2.15
江澤 潤一 (東北大学大学院、教授)	CIM2001招待講演	NTT物性基礎研	H13.2.12 ~ H13.2.15
Michael B. Santos (University of Oklahoma, 教授)	共同研究	NTT物性基礎研	H13.3.13 ~ H13.7.14
Jeremy O'Brien (Univ. of New South Wales)	研究成果発表、研 究打合せ	NTT物性基礎研	H13.8.27 ~ H13.8.28
Adam Miranowicz (Adam Mickiewicz Univ., 講師)	共同研究	総研大	H13.9.16 ~ H13.12.15
Werner Dietsche (Max-Planck-Institute, 研究員)	CISN2003招待講演	NTT物性基礎研	H15.3.7 ~ H15.3.13
L. J. Sham (UCSB, 教授)	CISN2003招待講演	NTT物性基礎研	H15.3.8 ~ H15.3.12
D. D. Awschalom (UCSB, 教授)	CISN2003招待講演	NTT物性基礎研	H15.3.8 ~ H15.3.12
Robert H. Blick (University of Wisconsin-Madison, 助教授)	CISN2003招待講演	NTT物性基礎研	H15.3.8 ~ H15.3.12
A. H. MacDonald (University of Texas at Austin, 教 授)	CISN2003招待講演	NTT物性基礎研	H15.3.8 ~ H15.3.13
澤田 安樹 (東北大、助教授)	CISN2003招待講演	NTT物性基礎研	H15.3.9 ~ H15.3.12
K. H. Ploog (Paul Drude Institute, 所長)	CISN2003招待講演	NTT物性基礎研	H15.3.9 ~ H15.3.12
Lars Samuelson (Lund University, 教授)	CISN2003招待講演	NTT物性基礎研	H15.3.9 ~ H15.3.13
Joachim Wolter (The Technische Universiteit Eindhoven, 教授)	講演、研究打合せ	NTT物性基礎研	H15.8.19 ~ H15.8.20

6 . 主な研究成果

研究成果のインパクトがより明確になるように、論文発表に関しては、ジャーナル別の掲載としました。主なジャーナルのインパクトファクタ(IF)は Appl. Phys. Lett.: 4.2、Nature: 30.4、Phys. Rev. A: 3.0、Phys. Rev. B: 3.3、Phys. Rev. Lett.: 7.3、Science: 26.7 などです。なお、プロシーディング、本、国際会議発表、国内会議発表につきましては従来通り年次別の掲載としました。

(1)論文発表 (国内 3 0 件、海外 1 9 8 件)

Appl. Phys. Lett.

1. N. Sekine, K. Yamanaka, K. Hirakawa, M. Vosseburger, P. Haring-Bolivar, and H. Kurz, "Observation of terahertz radiation from higher-order two-dimensional plasmon modes in GaAs/AlGaAs single quantum wells", Appl. Phys. Lett. 74, 1006 (1999).
2. S.-W. Lee, K. Hirakawa, and Y. Shimada, "Bound-to-continuum intersubband photoconductivity of self-assembled InAs quantum dots in modulation-doped heterostructures", Appl. Phys. Lett. 75, 1428 (1999).
3. K. Kanisawa, H. Yamaguchi, Y. Hirayama, "Two-dimensional growth of InSb thin films on GaAs(111)A substrates", Appl. Phys. Lett. 76, 589 (2000).
4. Takahito Inoue, D.F. Ogletree, M. Salmeron, "Field emission study of diamond-like carbon films with scanned-probe field-emission force microscopy" Appl. Phys. Lett. 76, 2961 (2000).
5. T. Fujisawa, Y. Hirayama, "Charge noise analysis of an AlGaAs/GaAs quantum dot using transmission-type radio-frequency single-electron transistor technique". Appl. Phys. Lett. 77, 543 (2000).
6. H. Yamaguchi, R. Dreyfus, Y. Hirayama, and S. Miyashita, "Excellent electric properties of free-standing InAs membranes", Appl. Phys. Lett. 78, 2372 (2001).
7. A. Kawaharazuka, T. Saku, Y. Tokura, Y. Horikoshi, and Y. Hirayama, "Transport characteristics of electrons in weak short-period two-dimensional potential arrays", Appl. Phys. Lett. 79, 427 (2001).
8. Y. Kawaguchi, K. Hirakawa, M. Saeki, K. Yamanaka, and S. Komiyama, "Performance of high-sensitivity quantum Hall far infrared photodetectors", Appl. Phys. Lett. 80, 136 (2002).
9. O. Astafiev, S. Komiyama, T. Kutsa, V. Antonov, Y. Kawaguchi, and K. Hirakawa, "A single-photon detector in the microwave range", Appl. Phys. Lett. 80, 4250 (2002).
10. H. Yamaguchi and Y. Hirayama, "Fabrication of conductive single-crystal semiconductor nanoscale electromechanical structures", Appl. Phys. Lett. 80, 4428 (2002).
11. M. Abe, S. Madhavi, Y. Shimada, Y. Otsuka, K. Hirakawa, and K. Tomizawa, "Transient carrier velocities in bulk GaAs: quantitative comparison between terahertz data and ensemble Monte Carlo calculations", Appl. Phys. Lett. 81, 679 (2002).
12. Y. Shimada, K. Hirakawa, and S.-W. Lee, "Time-resolved terahertz emission spectroscopy of wide miniband GaAs/AlGaAs superlattices", Appl. Phys. Lett. 81, 1642 (2002).
13. H. D. Cheong, T. Fujisawa, T. Hayashi, Y. Hirayama, and Y. H. Jeong, "Impedance analysis of a radio-frequency single-electron transistor", Appl. Phys. Lett. 81, 3257 (2002).
14. Hiroshi Yamaguchi, Sen Miyashita, Yoshiro Hirayama, "Microelectromechanical

Displacement Sensing using InAs/AlGaSb Heterostructures", *Appl. Phys. Lett.* 82, 394 (2003)

Appl. Phys.

15. S. Tarucha, D. G. Austing, S. Sasaki, Y. Tokura, W. van der Wiel, L.P. Kouwnhoven, "Effects of Coulomb interactions on spin states in vertical semiconductor quantum dots", *Appl. Phys. A* 71, 367 (2000).

IEEE Journal

16. S. K. Ozdemir, and G. T. Sayan, "Temperature effects on surface plasmon resonance: Design considerations for an optical temperature sensor", *IEEE J. of Lightwave Technology* 21, 805 (2003)

Inst. Phys. Conf. Ser.

17. N. Sekine, K. Hirakawa, M. Vosseburger, P. Haring-Bolivar, and H. Kurz: "Coherent and incoherent excitation of two-dimensional plasmons in AlGaAs/Gas quantum wells by femtosecond laser pulses", *Inst. Phys. Conf. Ser.*, 162, 845 (1999).
18. J. H. Roslund, H. Yamaguchi, Y. Hirayama, "Electrical properties of InAs/AlSb/GaSb double quantum well structures", *Inst. Phys. Conf. Ser.* 166, 127 (2000).
19. A. Kawaharazuka, T. Saku, Y. Horikoshi, Y. Hirayama, "Channel depth dependent transport characteristics of a two-dimensional electron gas in an undoped GaAs/AlGaAs heterostructure", *Inst. Phys. Conf. Ser.* 166, 151 (2000).
20. H. Yamaguchi and Y. Hirayama, "Novel Fabrication Method of Semiconductor Nanoelectromechanical Structures using Controlled Surface Step Distribution", *Inst. Phys. Conf. Ser.* 170, 335 (2002).
21. Y. Shimada and K. Hirakawa: "Time-resolved THz spectroscopy of miniband transport in biased GaAs/AlGaAs superlattices", *Inst. Phys. Conf. Ser.* 170, 395 (2002)
22. K. Suzuki, S. Miyashita, and Y. Hirayama, "Transport properties in back-gated InAs/GaSb heterostructures", *Inst. Phys. Conf. Ser.* 179, 339 (2002).

Int. J. of Quantum Chemistry

23. S. Tarucha, D. G. Austing, S. Sasaki, K. Muraki, K. Ono, M. Barranco, A. Emperador, M. Pi, F. Garciasd, "A density-functional-theory application to double quantum dots: influence of mismatch on the addition anergy spectra of vertical diatomic artificial molecules", *Int. J. of Quantum Chemistry* 91, 498 (2003).

J. Crystal Growth

24. K. Hoshino, T. Someya, K. Hirakawa, and Y. Arakawa: "Low-pressure MOCVD growth of GaN/AlGaN multiple quantum wells for intersubband transitions". *J. Crystal Growth* 237, 1163 (2002)
25. Hiroshi Yamaguchi and Yoshiro Hirayama, "Application of Multistep Formation during Molecular Beam epitaxy for Fabricating Novel Nanomechanical Structures", *J. Crystal*

Growth 251, 281 (2003)

26. Hiroshi Yamaguchi, Sen Miyashita, and Yoshiro Hirayama, "InAs/AlGaSb heterostructure stress sensor for MEMS/NEMS applications", J. Crystal Growth 251, 556 (2003)

J. Microsc.

27. T. Tokizaki, K. Sugiyama, T. Onuki, and T. Tani, "Optical-fibre scanning near-field microscope for cryogenic operation" J. Microsc. 194, 321, (1999).
28. H. Kawashima, M. Furuki, and T. Tani, "Interferometric measurement of femtosecond optical pulses emitted from a fibre probe" J. Microsc. 194, 516 (1999).
29. T. Tokizaki, T. Onuki, T. Tsuchiya, H. Yokoyama, "Near-field observation of carrier diffusion in GaAs quantum structures under high magnetic fields", J. Microsc. 210, 315 (2003).

J. Optics

30. J. Bajer and A. Miranowicz: "Quantum vs classical descriptions of sub-Poissonian light generation in three-wave mixing", J. Optics B 3, 251(2001).

J. Phys.

31. A. Miranowicz, J. Bajer, M. R. B. Wahiddin and N. Imoto: "Wehrl information entropy and phase distributions of Schrodinger cat and cat-like states", J. Phys. A34, 3887 (2001).
32. M. Hayashi, M. Koashi, K. Matsumoto, F. Morikoshi, and A. Winter, "Error exponent for entanglement concentration", J. Phys. A: Math. Gen. 36, 527 (2003).
33. Y. Tokura, D. G. Austing, and S. Tarucha: "Single electron tunneling in two vertically coupled quantum dots", J. Phys. Cond. Matt. 11, 6023, (1999).
34. T. Fujisawa, D. G. Austing, Y. Tokura, Y. Hirayama and S. Tarucha, "Electrical pulse measurement, inelastic relaxation, and non-equilibrium transport in a quantum dot", J. Phys.: Cond. Matt. 15, R1395 (2003) (Topic Review)
35. T. Fujisawa, D. G. Austing, Y. Tokura, Y. Hirayama and S. Tarucha, "Inelastic spin relaxation in a quantum dot", J. Phys.: Cond. Matt. (to be published)

J. Vac. Sci. Technol.

36. Takahito Inoue, Frank Ogletree, Miquel Salmeron, "Scanning field-emission force microscopy and spectroscopy of chemical-vapor-deposited carbon field-emission cathodes", J. Vac. Sci. Technol. B19, 675 (2001).

J. Appl. Phys.

37. A. Kawaharazuka, T. Saku, Y. Hirayama Y. Horikoshi: "Formation of a two-dimensional electron gas in an inverted undoped heterostructure with a shallow channel depth", J. Appl. Phys. 87, 952 (2000).
38. R.J.A. Hill, A. Patane, P.C. Main, M. Henini, L. Eaves, S. Tarucha and D.G. Austing: Controlling the electron tunneling through InAs self-assembled dots, J. Appl. Phys. 91,

- 3474 (2002).
39. R. Yano, Y. Hirayama, S. Miyashita, N. Uesugi, S. Uehara, "Arsenic pressure dependence of carrier lifetime and annealing dynamics for low-temperature grown GaAs studied by pump-probe spectroscopy", *J. Appl. Phys.* 94, 3966 (2003)

Japan J. Appl. Phys.

40. T. Fujisawa, Y. Hirayama: "Transmission type rf single electron transistor operation of a semiconductor quantum dot" *Jpn. J. Appl. Phys.* 39, 2338 (2000).
41. K. Muraki, N. Kumada, T. Saku, Y. Hirayama: "n+-GaAs back-gated double-quantum-well structures with full density control", *Jpn. J. Appl. Phys.* 39, 2444, (2000).
42. J. H. Roslund, K. Saito, K. Suzuki, H. Yamaguchi, Y. Hirayama: "Electron and hole Proximity effects in the InAs/AlSb/GaSb system", *Jpn. J. Appl. Phys.* 39, 2448 (2000).
43. S. Nuttinck, K. Hashimoto, S. Miyashita, T. Saku, Y. Yamamoto, Y. Hirayama: "Quantum Point Contacts in a Density-Tunable Two-Dimensional Electron Gas", *Jpn. J. Appl. Phys.* 39 L655, (2000).
44. W. G. van der Wiel, T. Fujisawa, S. Tarucha, and L. P. Kouwenhoven, "A double quantum dot as artificial two-level system", *Japan. J. Appl. Phys.* 40, 2100 (2001).
45. Katsushi Hashimoto, Sen Miyashita, Tadashi Saku and Yoshiro Hirayama, "Back-gated point contact", *Japan. J. Appl. Phys.* 40, 3000 (2001).
46. Y. Shimada, T. Matsuno, and K. Hirakawa: "THz emission due to miniband transport in GaAs/AlGaAs superlattices", *Japan. J. Appl. Phys.* 40, 3009 (2001).
47. H. Yamaguchi, R. Dreyfus, S. Miyashita, and Y. Hirayama, "Application of InAs Freestanding Membranes to Electromechanical Systems", *Jpn. J. Appl. Phys.* 41, 2519 (2002).
48. Toshimasa Fujisawa, David Guy Austing, Yoshiro Hirayama, and Seigo Tarucha, "Electrical Pump and Probe Measurements of a Quantum Dot in the Coulomb Blockade Regime", *Jpn. J. Appl. Phys.* 42, 4804 (2003)
49. Vladimir Seleznev, Hiroshi Yamaguchi, Yoshiro Hirayama, "Single-turn GaAs/InAs nanotubes fabricated using the supercritical CO₂ drying technique", *Jpn. J. Appl. Phys.* 42, L791 (2003)

Journal of Materials Science and Engineering

50. S. Katsumoto, T. Hayashi, Y. Hashimoto, Y. Iye, Y. Ishiwata, M. Watanabe, R. Eguchi, T. Takeuchi, Y. Harada, S. Shin, and K. Hirakawa: "Magnetism and metal-insulator transition in III-V based diluted magnetic semiconductors", *Journal of Materials Science and Engineering* B84, 88 (2001).

Journal of Modern Optics

51. S. K. Ozdemir, A. Miranowicz, M. Koashi and N. Imoto: "Optical qubit generation by state truncation using an experimentally feasible scheme," *Journal of Modern Optics*, 49, 977 (2002).

J. Phys. Soc. Japan

52. N. Kumada, A. Sawada, Z. F. Ezawa, S. Nagahama, H. Azuhata, K. Muraki, T. Saku, Y. Hirayama, "Doubly Enhanced Skyrmions in $\nu=2$ Bilayer Quantum Hall States", J. Phys. Soc. Jpn. 69, 3178 (2000)

Mat. Sci. Eng.

53. S. Tarucha, D. G. Austing, S. Sasaki, T. Fujisawa, Y. Tokura, J. M. Elzerman, W. van der Wiel, S de Franceschi, and L. P. Kouwenhoven, "Novel Kondo anomaly in quantum dots", Mat. Sci. Eng. B 84,10 (2001).

Meas. Sci. Technol.

54. S. K. Ozdemir, S. Takamiya, S. Shinohara, and H. Yoshida, "A speckle velocimeter using a semiconductor laser with external optical feedback from a moving surface: effects of system parameters on the reproducibility and accuracy of measurements," Meas. Sci. Technol. 11, 1447 (2000).

Microelectronic Engineering

55. S. Tarucha, T. Fujisawa, K. Ono, D. G. Austing, T. H. Oosterkamp, W. G. van der Wiel, and L. P. Kouwenhoven: "Elastic and inelastic single electron tunneling in coupled two dot system", Microelectronic Engineering, 47, 101 (1999).
56. N. Sekine, K. Hirakawa, M. Vosseburger, P. Haring-Bolivar, and H. Kurz: "Excitation process of two-dimensional plasmons excited by femtosecond laser pulses", Microelectronic Engineering, 47, 289, (1999).

Nature

57. S. Sasaki, S. De Franceschi, J. M. Elzerman, W. G. van der Wiel, M. Eto, S. Tarucha, & L. P. Kouwenhoven: "Kondo effect in an integer-spin quantum dot", Nature 405, 764 (2000).
58. T. Fujisawa, D. G. Austing, Y. Tokura, Y. Hirayama, and S. Tarucha, "Allowed and forbidden transitions in artificial hydrogen and helium atoms", Nature 419, 278 (2002).
59. T. Yamamoto, M. Koashi, S. K. Ozdemir, and N. Imoto, "Experimental extraction of an entangled photon pair from two identically decohered pairs", Nature 421, 343 (2003).

Optical Review

60. S. K. Ozdemir, S. Shinohara, and H. Yoshida, "Effect of linewidth enhancement factor on doppler beat waveform obtained from a self-mixing laser diode", Optical Review 7, 550 (2000)

Phys. Rev. A

61. K. Shimizu, N. Imoto, and T. Mukai: "Dense coding in photonic quantum communication with enhanced information capacity", Phys. Rev. A 59, 1092 (1999).

62. K. Shimizu and N. Imoto: "Communication channels secured from eavesdropping via transmission of photonic Bell states", *Phys. Rev. A* **60**, 157 (1999).
63. M. Koashi, V. Buzek, and N. Imoto, "Entangled webs: Tight bound for symmetric sharing of entanglement," *Phys. Rev. A* **62**, 050302(R) (2000).
64. V. Buzek, P. L. Knight, and N. Imoto, "Multiple observations of quantum clocks," *Phys. Rev. A* **62**, 062309 (2000).
65. M. Koashi, T. Yamamoto, and N. Imoto, "Probabilistic manipulation of entangled photons," *Phys. Rev. A* **63**, 030301(R) (2001).
66. T. Yamamoto, M. Koashi, and N. Imoto: "Concentration and purification scheme for two partially entangled photon pairs", *Phys. Rev. A* **64**, 012304 (2001).
67. F. Morikoshi and M. Koashi: "Deterministic entanglement concentration", *Phys. Rev. A* **64**, 022316 (2001).
68. S. K. Ozdemir, A. Miranowicz, M. Koashi, and N. Imoto: "Quantum-scissors device for optical state truncation: A proposal for practical realization", *Phys. Rev. A* **64**, 063818 (2001).
69. K. Nagata, M. Koashi, and N. Imoto: "Observable suitable for restricting the fidelity to multipartite maximally entangled states," *Phys. Rev. A* **65**, 042314 (2002).
70. Yu-xi Liu, S. K. Ozdemir, M. Koashi, and N. Imoto: "Dynamics of entanglement for coherent excitonic states in a system of two coupled quantum dots and cavity QED," *Phys. Rev. A* **65**, 042326 (2002).
71. A. Miranowicz, S. K. Ozdemir, Yu-xi Liu, M. Koashi, N. Imoto, and Y. Hirayama: "Generation of maximum spin entanglement induced by a cavity field in quantum-dot systems," *Phys. Rev. A* **65**, 062321 (2002).
72. M. Ueda and M. Koashi: "Theory of spin-2 Bose-Einstein condensates: Spin correlations, magnetic response, and excitation spectra," *Phys. Rev. A* **65**, 063602 (2002).
73. M. Koashi and N. Imoto: "Operations that do not disturb partially known quantum states," *Phys. Rev. A* **66**, 022318 (2002).
74. S. K. Ozdemir, A. Miranowicz, M. Koashi, and N. Imoto, "Pulse-mode quantum projection synthesis: Effects of mode mismatch on optical state truncation and preparation", *Phys. Rev. A* **66**, 053809 (2002).
75. Yu-xi Liu, A. Miranowicz, M. Koashi, and N. Imoto, "Realization of symmetric sharing of entanglement in semiconductor microcrystallites coupled by a cavity field", *Phys. Rev. A* **66**, 062309 (2002).
76. K. Nagata, "Classification of mixed high-dimensional multiparticle systems", *Phys. Rev. A* **66**, 064101 (2002).
77. T. Yamamoto, K. Tamaki, M. Koashi, and N. Imoto, "Polarization-entangled W state using parametric down-conversion", *Phys. Rev. A* **66**, 064301 (2002).
78. K. Tamaki, M. Koashi, and Nobuyuki Imoto : " Security of the Bennett 1992 quantum-key distribution protocol against individual attack over a realistic channel, " *Phys. Rev. A* **67**, 032310 (2003).
79. Yu-xi Liu, A. Miranowicz, S. K. Ozdemir, M. Koashi, and N. Imoto, "Size-dependent decoherence of excitonic states in semiconductor microcrystallites", *Phys. Rev. A* **67**, 034303 (2003)

Phys. Rev. B

80. T. Fujisawa, Y. Tokura, Y. Hirayama: "Transient current spectroscopy of a quantum dot

- in the Coulomb blockade regime". Phys. Rev. B 63, 081304(R), (2001).
81. K. Hirakawa, K. Yamanaka, M. Endo, and S. Komiyama: "Far-infrared photoresponse of the magnetoresistance of the two-dimensional electron systems in the integer quantized Hall regime", Phys. Rev. B63, 85320 (2001).
 82. A. Kawaharazuka, T. Saku, C. A. Kikuchi, Y. Horikoshi and Y. Hirayama, "Free GaAs surfaces studied using a back-gated undoped GaAs/Al_xGa_{1-x}As heterostructure", Phys. Rev. B63, 245309 (2001).
 83. N. Sekine, K. Hirakawa, M. Vossebuerger, P. Haring Bolivar, and H. Kurz: "Crossover from coherent to incoherent excitation of two-dimensional plasmons in GaAs/AlGaAs single quantum wells by femtosecond laser pulses", Phys. Rev. B64 (Rapid Communication), 201323 (R) (2001).
 84. P. Matagne, J. P. Leburton, D. G. Austing, and S. Tarucha, "Shell charging and spin-filling sequences in realistic vertical quantum dots", Phys. Rev. B65, 085325 (2002).
 85. A. Patane, R.J.A. Hill, L. Eaves, P.C. Main, M. Henini, M.L. Zambrano, A. Levin, N. Mori, C. Hamaguchi, Yu. V. Dubrovskii, E.E. Vdovin, D.G. Austing, S. Tarucha and G. Hill: "Probing the quantum states of self-assembled InAs dots by magnetotunneling spectroscopy", Phys. Rev. B65, 165308 (2002).
 86. S. Madhavi, M. Abe, Y. Shimada, and K. Hirakawa: "Non-equilibrium electron transport in wide miniband GaAs/AlGaAs superlattices at room temperature", Phys. Rev. B 65, 193308 (2002)
 87. K. Hirakawa, S. Katsumoto, T. Hayashi, Y. Hashimoto, and Y. Iye: "Double-exchange-like interaction in Ga_{1-x}Mn_xAs investigated by infrared absorption spectroscopy", Phys. Rev. B 65, 193312 (2002)
 88. T. Machida, S. Ishizuka, T. Yamazaki, S. Komiyama, K. Muraki, and Y. Hirayama, "Spin polarization of fractional quantum Hall edge channels studied by dynamic nuclear polarization", Phys. Rev. B65, 233304 (2002).
 89. F. Ancilotto, D. G. Austing, M. Barranco, R. Mayol, K. Muraki, M. Pi, S. Sasaki, S. Tarucha, "Vertical diatomic artificial molecule in the intermediate-coupling regime in a parallel and perpendicular magnetic field", Phys Rev B 67, 05311(2003).
 90. W. G. van der Wiel, Yu. V. Nazarov, S. De Franceschi, T. Fujisawa, J. M. Elzerman, E. W. G. M. Huizeling, S. Tarucha, and L. P. Kouwenhoven, "Electro-magnetic Aharonov-Bohm effect in a 2-D electron gas ring", Phys. Rev. B 67, 033307 (2003).
 91. J. M. Elzerman, R. Hanson, J. S. Greidanus, L. H. W. van Beveren, S. De Franceschi, L. M. K. Vandersypen, S. Tarucha, L. P. Kouwenhoven, "Few-electron quantum dot circuit with integrated charge read out", Phys Rev B 67, 161308 (2003).
 92. Kyoichi Suzuki, Sen Miyashita, Yoshiro Hirayama, "Transport properties in asymmetric InAs/(AlSb)/GaSb electron-hole hybridized systems", Phys. Rev. B67, 195319 (2003)
 93. Toshifumi Itakura and Yasuhiro Tokura, "Dephasing due to background charge fluctuations", Phys. Rev. B 67, 195320 (2003)
 94. K. Jin, M. Odnoblioudov, Y. Shimada, K. Hirakawa, and K. A. Chao: "Terahertz frequency radiation from Bloch oscillations in GaAs/AlGaAs superlattices", Phys. Rev. B 68, 1953315 (2003)
 95. N. Kumada, D. Terasawa, M. Morino, K. Tagashira, A. Sawada, and Z. F. Ezawa, K. Muraki, Y. Hirayama, T. Saku, "Study of interactions between composite fermions by a comparison of integer and fractional quantum Hall states in bilayer systems", Phys. Rev. B. (submitted)

Phys. Rev. Lett.

96. M. Koashi and M. Ueda: "Exact eigenstates and magnetic response of spin-1 and spin-2 Bose-Einstein condensates," Phys. Rev. Lett. 84, 1066 (2000).
97. S. Tarucha, D. G. Austing, Y. Tokura, W. G. van der Wiel and L. P. Kouwenhoven: "Exchange and direct Coulomb interactions in artificial atoms", Phys. Rev. Lett. 84, 2485 (2000).
98. S. De Franceschi, S. Sasaki, J. M. Elzerman, W. G. van der Wiel, S. Tarucha, L. P. Kouwenhoven: "Electron Cotunneling in a Semiconductor Quantum Dot", Phys. Rev. Lett. 86, 878 (2001).
99. K. Kanisawa, M. J. Butcher, H. Yamaguchi and Y. Hirayama, "Imaging of Friedel Oscillation Patterns of Two-Dimensionally Accumulated Electrons at Epitaxially Grown InAs(111)A Surfaces" Phys. Rev. Lett. 86, 3384 (2001).
100. M. Koashi and N. Imoto: "Compressibility of quantum mixed-state signals", Phys. Rev. Lett. 87, 017902 (2001).
101. M. Pi, A. Emperador, M. Barranco, F. Garcias, K. Muraki, S. Tarucha, D. G. Austing, "Dissociation of Vertical Semiconductor Diatomic Artificial Molecules" Phys. Rev. Lett. 87, 066801(2001).
102. Koji Muraki, Tadashi Saku and Yoshiro Hirayama, "Charge Excitations in Easy-Axis and Easy-plane Quantum Hall Ferromagnets", Phys. Rev. Lett. 87, 196801 (2001).
103. K. Kanisawa, M. J. Butcher, Y. Tokura, H. Yamaguchi, and Y. Hirayama, "Local Density of States in Zero-Dimensional Semiconductor Structures", Phys. Rev. Lett. 87, 196804 (2001).
104. Y. Avishai, Y. Tokura, "Resonant Electron Transmission through a Finite Quantum Spin Chain", Phys. Rev. Lett. 87, 197203 (2001).
105. W. G. van der Wiel, S. De Franceschi, J. M. Elzerman, S. Tarucha, L. P. Kouwenhoven, J. Motohisa, F. Nakajima, and T. Fukui, "Two-stage Kondo effect in a quantum dot at high magnetic field", Phys. Rev. Lett. 88, 126803 (2002).
106. K. Hashimoto, K. Muraki, T. Saku, and Y. Hirayama, "Electrically controlled nuclear spin polarization and relaxation by quantum-Hall states", Phys. Rev. Lett. 88, 176601(2002).
107. T. Fujisawa, Y. Tokura, D. G. Austing, Y. Hirayama, and S. Tarucha, "Non-equilibrium transport through a vertical quantum dot when spin-flip energy relaxation is absent", Phys. Rev. Lett. 88, 236802 (2002)
108. M. Koashi and N. Imoto: "Quantum Information is Incompressible Without Errors, " Phys. Rev. Lett. 89, 097904 (2002).
109. S. De Franceschi, R. Hanson, W. G. van der Wiel, J. M. Elzerman, J. J. Wijkema, T. Fujisawa, S. Tarucha, and L. P. Kouwenhoven, "Out-of-Equilibrium Kondo Effect in a Mesoscopic Device", Phys. Rev. Lett. 89, 156801(2002).
110. K. Nagata, M. Koashi, and N. Imoto, "Configuration of Separability and Tests for Multipartite Entanglement in Bell-Type Experiments", Phys. Rev. Lett. 89, 260401 (2002).
111. N. Kumada, D. Terasawa, Y. Shimoda, H. Azuhata, A. Sawada, Z. F. Ezawa, K. Muraki, T. Saku, and Y. Hirayama, "Phase diagram of interacting composite Fermions in the bilayer $\nu=2/3$ quantum Hall effect", Phys. Rev. Lett. 89, 116802 (2002).
112. Y. Shimada, K. Hirakawa, M. Odnobliudov, and K. A. Chao: "Terahertz conductivity and possible Bloch gain in semiconductor superlattices", Phys. Rev. Lett. 90, 46806 (2003)

- 113.M. Koashi and J. Preskill :“ Secure Quantum Key Distribution with an Uncharacterized Source, ” Phys. Rev. Lett. 90, 057902 (2003).
- 114.T. Hayashi, T. Fujisawa, H. D. Cheong, Y. H. Jeong, Y. Hirayama, "Coherent manipulation of electric states in a double quantum dot", Phys. Rev. Lett. 91, 226804 (2003).

Physica B

- 115.K. Tamura, K. Hirakawa, and Y. Shimada: “Drude absorption and electron localization in GaAs/AlGaAs superlattices”, Physica B 272, 183 (1999).
- 116.Y. Kawano, S. Komiyama, and K. Hirakawa: “Suppression of electron-hole pair recombination in edge states in quantum Hall regimes”, Physica B 298, 33 (2001).
- 117.T. Machida, S. Ishizuka, S. Komiyama, K. Muraki and Y. Hirayama, “Nonequilibrium population in fractional edge states”, Physica B 298, 150 (2001).
- 118.T. Machida, S. Ishizuka, S. Komiyama, K. Muraki and Y. Hirayama, “Scaling in fractional quantum Hall transitions”, Physica B 298, 182 (2001).
- 119.K. Hashimoto, K. Muraki, T.Saku and Y.Hirayama, “Longitudinal resistance anomaly around the $2/3$ filling factor observed in a GaAs/AlGaAs single heterostructure”, Physica B 298, 191(2001).
- 120.Y. Tokura, S. Sasaki, D. G. Austing, and S. Tarucha, “Excitation spectra and exchange interactions in circular and elliptical quantum dots”, Physica B 298, 260 (2001).
- 121.Toshimasa Fujisawa, Yasuhiro Tokura, and Yoshiro Hirayama, “Energy relaxation process in a quantum dot studied by DC current and pulse-excited current measurements”, Physica B 298, 573 (2001).
- 122.T. Fujisawa, Y. Tokura, D. G. Austing, Y. Hirayama, and S. Tarucha, “Spin-dependent energy relaxation inside a quantum dot”, Physica B314, 224 (2002)
- 123.K. Ono, D. G. Austing, Y. Tokura and S. Tarucha, “Angular momentum selectivity in tunneling between two quantum dots”, Physica B 314, 450 (2002)

Physica C

- 124.K. Suzuki, S. Miyashita, and Y. Hirayama, "Back-gate control in an InAs-based two-dimensional system", Physica C 352, 125 (2001).

Physica E

- 125.T. Machida, S. Ishizuka, K. Muraki, Y. Hirayama, S. Komiyama: "Resistance fluctuations in integer quantum-Hall transitions", Physica E 6, 152 (2000).
- 126.Z. F. Ezawa, A. Sawada, K. Muraki, Y. Hirayama: "Quantum coherence and skyrmion textures in bilayer quantum Hall systems", Physica E 6, 640 (2000).
- 127.Ph. Lelong, S.-W. Lee, K. Hirakawa, and H. Sakaki: "Fano profile in intersubband transitions in InAs quantum dots", Physica E 7, 174 (2000).
- 128.S.-W. Lee, K. Hirakawa, and Y. Shimada: "Modulation-doped quantum dot infrared photodetectors using self-assembled InAs quantum dots", Physica E 7, 499 (2000).
- 129.S. Tarucha, D. G. Austing, S. Sasaki, Y. Tokura, J. M. Elzerman, W. van der Wiel, S de Franceschi, and L. P. Kouwenhoven, “Spin effects in semiconductor quantum dot structures”, Physica E 10, 45 (2001).

130. D. G. Austing, H. Tamura, Y. Tokura, K. Muraki, S. Amaha, K. Ono, and S. Tarucha, "Single dot and strongly coupled double dots at high magnetic fields", *Physica E* 10, 112 (2001).
131. K. Hirakawa, A. Oiwa, and H. Munekata: "Infrared optical conductivity of $\text{In}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ ", *Physica E* 10, 215 (2001).
132. D. Austing, Y. Tokura, S. Tarucha, P. Matagne, J. P. Leburton, "Addition energy spectrum of a quantum dot disk up to the third shell", *Physica E* 11, 63 (2001).
133. K. -J. Friedland, T. Saku, Y. Hirayama, and K. H. Ploog, "Electron coupling in weakly and strongly coupled quantum point contacts", *Physica E* 11, 144 (2001).
134. Y. Hirayama, K. Muraki, A. Kawaharazuka, K. Hashimoto, and T. Saku, "Backgated layers and nanostructures", *Physica E* 11, 155 (2001).
135. Koji Muraki, Tadashi Saku, and Yoshiro Hirayama, "Activation studies of pseudospin quantum Hall ferromagnets in double quantum wells", *Physica E* 12, 8 (2002).
136. N. Kumada, D. Terasawa, Y. Shimoda, H. Azuhata, A. Sawada, Z. F. Ezawa, K. Muraki, T. Saku, and Y. Hirayama, "Various phase transitions in $\nu=2/3$ bilayer quantum Hall states", *Physica E* 12, 32 (2002).
137. T. Machida, S. Ishizuka, and K. Muraki, "Spin polarization in fractional quantum Hall edge channels", *Physica E* 12, 76 (2002).
138. T. Asayama, Y. Tokura, S. Miyashita, M. Stopa and S. Tarucha, "1D Bragg reflector in the Tomonaga-Luttinger liquid regime and Fermi liquid regimes", *Physica E* 12, 186 (2002).
139. Y. Tokura and A. Khaetskii, "Towards a microscopic theory of the 0.7 anomaly", *Physica E* 12, 711 (2002).
140. M. Yamamoto, M. Stopa, Y. Tokura, Y. Hirayama, and S. Tarucha, "Coulomb drag between quantum wires: magnetic field effects and negative anomaly", *Physica E* 12, 726 (2002).
141. S. Sasaki, Y. Kitamura, W. Izumida, K. Ono, and S. Tarucha, "The Kondo effect in a one- and two-electron quantum dot", *Physica E* 12, 806 (2002).
142. D.G. Austing, S. Sasaki, K. Muraki, K. Ono, S. Tarucha, M. Barranco, A. Emperador, M. Pi, and F. Garciasd, "Influence of mismatch on the addition energy spectra of vertical diatomic artificial molecules", *Physica E* 12, 896 (2002).
143. S. -W. Lee and K. Hirakawa: "Lifetime of photoexcited carriers in modulation-doped quantum dot infrared photodetectors", *Physica E* 13, 305 (2002).
144. R. J. A. Hill, A. Patane, P. C. Main, L. Eaves, B. Gustafson, M. Henini, S. Tarucha, D. G. Austing, "Measuring the energy levels and wave functions in a single quantum dot", *Physica E* 13, 634 (2002).
145. K. J. Friedland, R. Hey, O. Bierwagen, H. Kostial, Y. Hirayama, and K. H. Ploog, "Conductance anisotropy of high-mobility, modulation-doped GaAs single quantum wells", *Physica E* 13, 642 (2002).
146. A. Kawaharazuka, T. Saku, C. A. Kikuchi, Y. Horikoshi, and Y. Hirayama, "Study of free GaAs surfaces using a back-gated undoped GaAs/AlGaAs heterostructure", *Physica E* 13, 663 (2002).
147. H. Yamaguchi, R. Dreyfus, S. Miyashita, and Y. Hirayama, "Fabrication and elastic properties of InAs freestanding structures based on InAs/GaAs (111) a heteroepitaxial systems", *Physica E* 13, 1163 (2002).
148. H. Yokoyama, T. Sato, K. Ono, Y. Hirayama and S. Tarucha, "Tunable Quantum Dot Resonator Embedded in a Quantum Wire", *Physica E*. (submitted)
149. Hiroshi Yamaguchi, Sen. Miyashita, and Yoshiro Hirayama, "Quantum-mechanical

- Displacement Sensing using InAs/AlGaSb Micromechanical Cantilevers", *Physica E*. (to be published)
150. K. Suzuki, S. Miyashita, K. Takashina, Y. Hirayama, "Quantum Hall effect in back-gated InAs/GaSb heterostructures under a tilted magnetic field", *Physica E*. (to be published)
 151. K. Takashina, Y. Hirayama, A. Fujiwara, S. Horiguchi and Y. Takahashi, "A Silicon Bi-layer System", *Physica E*. (to be published)
 152. M. Jung and K. Hirakawa: "Lateral electron transport through single InAs quantum dots", *Physica E*. (to be published)
 153. N. Goel, S. J. Chung, M. B. Santos, K. Suzuki, S. Miyashita, and Yoshiro Hirayama, "Ballistic Transport in InSb Quantum Wells at High Temperature", *Physica E*. (to be published)
 154. N. Goel, S.J. Chung, M.B. Santos, K. Suzuki, S. Miyashita, and Yoshiro Hirayama, "Effect of Temperature of Ballistic Transport in InSb Quantum Wells", *Physica E*. (to be published)
 155. N. Kumada, A. Tagashira, K. Iwata, A. Sawada, Z. F. Ezawa, K. Muraki, T. Saku and Y. Hirayama, "Effects of In-plane Magnetic Fields on spin Transitions in Bilayer Quantum Hall States", *Physica E*. (to be published)
 156. N. Sekine, Y. Shimada, and K. Hirakawa: "Bloch Gain in AlGaAs/GaAs Semiconductor Superlattices", *Physica E* (to be published)
 157. T. Koder, W. G. van der Wiel, K. Ono, S. Sasaki, T. Fujisawa and S. Tarucha: "High-frequency manipulation of few-electron double quantum dots- toward spin qubits –", *Physica E*. (to be published)
 158. Toshimasa Fujisawa, Toshiaki Hayashi, H. D. Cheong, Y. H. Jeong, and Yoshiro Hirayama, "Rotation and phase-shift gates for a charge qubit in a double quantum dot", *Physica E*. (to be published)
 159. Y. Shimada, N. Sekine, and K. Hirakawa: "Inter-miniband Resonant Zener Tunneling in Wide-Miniband GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As Superlattices Investigated by THz Emission Spectroscopy", *Physica E* (to be published)
 160. Yoshiro Hirayama, Koji Muraki, Katsushi Hashimoto, Kei Takashina and Tadashi Saku, "Quantum Hall Effects at Landau Level Crossings", *Physica E*. (to be published)

Physica Status Solidi

161. K. Hoshino, T. Someya, K. Hirakawa, and Y. Arakawa: "Observation of intersubband transition from the first to the third subband (e1-e3) in GaN/AlGaN quantum wells", *Physica Status Solidi A-Applied Research* 192, 27 (2002)
162. K. Ono, D.G. Austing, Y. Tokura, and S. Tarucha, "Spin selective tunneling and blockade in two-electron double quantum dot", *Physica Status Solidi A-Applied Research* 238, 335 (2003).

Rep. Prog. Phys.

163. L. P. Kouwenhoven, D. G. Austing, and S. Tarucha, "Few-electron quantum dots", *Rep. Prog. Phys.* 64, 701 (2001).

Rev. Mod. Phys.

164. W. G. van der Wiel, S. De Franceschi, J. M. Elzerman, T. Fujisawa, S. Tarucha, and L. P. Kouwenhoven, "Electron transport through double quantum dots", *Rev. Mod. Phys.* 75, 1(2003).

Science

165. W. G. van der Wiel, S. De Franceschi, T. Fujisawa, J. M. Elzerman, S. Tarucha, L. P. Kouwenhoven: "The Kondo Effect in the Unitary Limit", *Science* 289, 2105 (2000).
166. K. Ono, D.G. Austing, Y. Tokura, and S. Tarucha, "Current Rectification by Pauli Exclusion in a Weakly Coupled Double Dot Hubbard System", *Science* 297, (2002).

Solid State Communications

167. K. Muraki, T. Saku, Y. Hirayama, N. Kumada, A. Sawada, Z. F. Ezawa: "Interlayer charge transfer in bilayer quantum hall states at various filling factors", *Solid State Communications*, 112, 625 (1999).
168. A. Taguchi, Y. Hirayama: "Stable site and stable charge state of a fluorine atom in Si". *Solid State Communications* 116, 595 (2000),
169. S. Amaha, D. G. Austing, Y. Tokura, K. Muraki, K. Ono, and S. Tarucha, "Magnetic field induced transitions in the few-electron ground states of artificial molecules", *Solid State Communications* 119, 183 (2001).

Books

170. S. K. Ozdemir, S. Shinohara, and G. Lai, "Speckle signal generation in self-mixing laser diodes and its use for speckle velocimetry," *Interferometry in Speckle Light: Theory and Applications*, Edited by P. Jacquot and J.-M. Fournier, Springer, 41 (2000).
171. S. Tarucha, D. G. Austing, T. Fujisawa and L.P. Kouwenhoven, "Electron Transport in Semiconductor Quantum Dots" in "Optical and electronic process of Nano-matters", KTK Scientific Publishers/Kluwer Academic Publishers ISBN 0-7923-6987-4 (Kluwer) (2001) Chapter 2 (57-92).
172. S. Tarucha, D.G. Austing, S. Sasaki, L.P. Kouwenhoven, S. Reimann, M. Koskinen and M. Manninen: Electronic states in circular and ellipsoidally deformed quantum dots, Chapter 9, p194-p216, to "Physics and Applications of Semiconductor Quantum Structure", ed. by T. Yao, IOP Publishing Co., Bristol, UK. (2001).

Conference Proceedings

173. A. Miranowicz, S. K. Ozdemir, M. Koashi, and N. Imoto, "Classical information of Schrödinger cat and cat-like states," *Proc. of the IEICE Quantum Information and Technology Workshop (QIT 4)* (Tokyo Inst. Tech.) 15 (2000)
174. K. Ozdemir, A. Miranowicz, M. Koashi, and N. Imoto, "Experimental Scheme for State Truncation and Teleportation using Quantum Scissors", *Proc. of the IEICE Quantum Information and Technology Workshop (QIT 4)* (Tokyo Inst. Tech.) 9 (2000)
175. S.-W. Lee, K. Hirakawa, and Y. Shimada: "Mid-Infrared Photodetector using

- self-assembled InAs quantum dots embedded in modulation doped GaAs quantum wells", MRS Symposia Proceedings, 607 Infrared Applications of Semiconductors III, 147, (2000).
176. T. Onuki, Y. Watanabe, T. Tokizaki and T. Tani, "Anodic oxidation and optical observation of metal thin film using scanning near-field optical microscope", *Near-Field Optics: Principles and Applications*, World Scientific, Singapore, 246 (2000).
 177. K. Kanisawa, M. J. Butcher, H. Yamaguchi, Y. Hirayama, "Imaging of Friedel oscillations at epitaxially grown InAs(111)A surfaces using scanning tunneling microscopy", *Proceedings of the 25th International Conference on the Physics of Semiconductors Part I*, 427 (2001).
 178. K. Hashimoto, T. Saku, Y. Hirayama, "Slow resistance enhancements in the fractional quantum Hall regime observed in a GaAs/AlGaAs single heterostructure", *Proceedings of the 25th International Conference on the Physics of Semiconductors Part II*, 937 (2001).
 179. K. Muraki, T. Saku, Y. Hirayama, "Effects of spin and charge profiles on the phase transition in bilayer quantum Hall systems", *Proceedings of the 25th International Conference on the Physics of Semiconductors Part II*, 983 (2001).
 180. S. Sasaki, D. G. Austing, Y. Kitamura, S. Tarucha, S. De Franceschi, J. M. Elzerman, W. G. van der Wiel, L. P. Kouwenhoven, "A novel Kondo effect in a vertical quantum dot", *Proceedings of the 25th International Conference on the Physics of Semiconductors Part II*, 1025 (2001).
 181. T. Fujisawa, Y. Tokura, Y. Hirayama, "Relaxation time of excited state in a quantum dot studied by pulse-excited current", *Proceedings of the 25th International Conference on the Physics of Semiconductors Part II*, 1031 (2001).
 182. M. Yamamoto, M. Stopa, Y. Tokura, Y. Hirayama, S. Tarucha, "Coulomb Drag in Parallel Quantum wires – Tomonaga-Luttinger liquid effect of Coulomb drag", *Proceedings of the 25th International Conference on the Physics of Semiconductors Part II*, 1051 (2001).
 183. Ph. Lelong, K. Hirakawa, K. Hirotsu, S.-W. Lee, and H. Sakaki: "Fano profiles in bound-to-continuum intersubband transitions in negatively charged InAs quantum dots", *Proceedings of the 25th International Conference on the Physics of Semiconductors Part II*, 1163 (2001).
 184. A. Kawaharazuka, T. Saku, Y. Tokura, Y. Horikoshi, Y. Hirayama, "Transport characteristics of electrons in weak short-period two-dimensional potential arrays", *Proceedings of the 25th International Conference on the Physics of Semiconductors Part II*, 1341 (2001).
 185. K. Hoshino, T. Someya, K. Hirakawa, and Y. Arakawa, "Observation of Intersubband Transition in AlGaIn/GaN Single Heterostructures", *Proceedings of the 25th International Conference on the Physics of Semiconductors Part II*, 1527 (2001).
 186. S. Katsumoto, T. Hayashi, Y. Hashimoto, Y. Iye, Y. Ishiwata, M. Watanabe, R. Eguchi, T. Takeuchi, Y. Harada, S. Shin and K. Hirakawa: "Nature of Magnetism in III-V based Diluted Magnetic Semiconductors", *IPAP Conference Series 2* *Proceedings of the 10th International Conference on Narrow Gap Semiconductors and Related Small Energy Phenomena, Physics and Applications -NGS10-*, 261 (2001).
 187. A. Miranowicz, J. Bajer, M. Koashi, and N. Imoto: "Photon bunching and antibunching effects in non-stationary fields", in *Modern Nonlinear Optics*, ed. M. Evans, *Advances in Chem. Phys.*, 119 (I) (Wiley, New York) 515 (2001).
 188. A. Miranowicz, W. Leonski, and N. Imoto: "Quantum-optical states in finite-dimensional Hilbert space. I. General formalism", in *Modern Nonlinear Optics*, ed. M. W. Evans, *Adv.*

- Chem. Phys., 119 (I) (Wiley, New York) 15 (2001)
189. J. Bajer and A. Miranowicz: "Quantum, classical and semiclassical analyses of photon statistics in harmonic generation", in Modern Nonlinear Optics, ed. M. W. Evans, Adv. Chem. Phys., 119 (I) (Wiley, New York) 493 (2001)
 190. W. Leonski and A. Miranowicz: "Quantum-optical states in finite-dimensional Hilbert space. II. State generation", in Modern Nonlinear Optics, ed. M. W. Evans, Adv. Chem. Phys., 119 (I) (Wiley, New York) 195 (2001)
 191. D. G. Austing, S. Sasaki, K. Muraki, Y. Tokura, K. Ono, S. Tarucha, M. Barranco, A. Emperador, M. Pi, and F. Garcias, Vertical diatomic artificial quantum dot molecules, pp13-32, "Advanced Luminescent Materials and Quantum Confinement II", Eds. M. Cahay, J. P. Leburton, D. J. Lockwood, S. Bandyopadhyay, N. Koshida and M. Zacharias, by The Electrochemical Society, Pennington, USA (2002), ISBN 1-56677-330-X.
 192. K. Hirakawa and Y. Shimada: "Crossover of miniband, Wannier-Stark quantization, and Zener tunneling regimes in wide miniband superlattices investigated by time-domain terahertz spectroscopy", Proceedings of the 26th International Conference on the Physics of Semiconductors (2002)
 193. M. Yamamoto, M. Stopa, Y. Hirayama, Y. Tokura, and S. Tarucha: "Negative drag in Quantum Wires", proceeding of 26th International conference on the Physics of semiconductors (World Scientific, edinburgh. editor A.R. Long and J.H. Davies (2003)).
 194. S. Sasaki, N. Asakawa, S. Amaha, W. Izumida and S. Tarucha: "The Kondo effect in a $S=1/S=0$ Quantum Dot", Proceeding of the International Conference on Quantum Transport and Quantum Coherence (The Physical Society of Japan, Editors Y. Ono, A. Kawabata and S. Komiyama (2003)).
 195. A. Miranowicz, S. K. Ozdemir, Yu-xi Liu, M. Koashi, N. Imoto: "Physical realizations and Wigner representations of coherent states of finite-dimensional Hilbert spaces," in Analytical Study of Quantum Information and Related Fields, RIMS 1266, 9 (2002).
 196. Kiyoshi Kanisawa, Yasuhiro Tokura, Hiroshi Yamaguchi, Yoshiro Hirayama, "Direct Probing of local-density-of states in semiconductor nanostructures", SPIE Proceedings 4999, 379 (2003)
 197. A. Miranowicz, S. K. Ozdemir, W. Leonski, M. Koashi, and N. Imoto, "Optical qubit generation by linear and nonlinear quantum scissors", SPIE Proceedings 5259 (2003).
 198. A. Miranowicz, S. K. Ozdemir, Yu-xi Liu, W. Leonski, M. Koashi, N. Imoto, Y. Hirayama, and J. Bajer, "Maximally entangled spin states in equivalent-neighbor systems of quantum dots in a microcavity", SPIE Proceedings 5259 (2003).

国内

1. 平川一彦 「量子電子デバイス」 量子工学ハンドブック (分担執筆), 朝倉書店 (1999)
2. 平川一彦、川口 康、山中宏治、小宮山進 「量子ホール効果を用いた超高感度遠赤外光検出」 応用物理 vol. 68, No. 9, 1027 (1999)
3. 井上、伊藤、横山 「走査型プローブ顕微鏡による電子電界放射の計測」 固体物理第 34 巻 12 号, 949 (1999)
4. 樽茶清悟、藤澤利正 「半導体人工分子」 固体物理 Vol.34、No.5 (1999)
5. 平山祥郎他 「半導体大辞典 (分担執筆)」 監修: 菅野卓雄、川西 剛、工業調査会 (1999)
6. 平川一彦 「半導体大辞典 (分担執筆)」 監修: 菅野卓雄、川西 剛、工業調査会 (1999)

7. 樽茶清悟 「人工原子分子のユニークな物理」 パリティ 6月号、15 (2000)
8. 佐々木智, 樽茶清悟 「縦型量子ドットにおける新型近藤効果」 固体物理 vol35, 887 (2000)
9. 横山、井上、他 森田編 「走査型プローブ顕微鏡-基礎と未来予測-」 丸善 (2000)
10. 井元信之 「量子情報処理への道」 学術月報第 54 巻第 10 号, 56 (2001)
11. 樽茶清悟、佐々木智 「量子ドットの近藤効果」 学術月報, vol.54, No.10, 984(2001)
12. 小芦雅斗 「量子暗号とその背後にある原理」 数理科学第 456 巻第 6 号, 15 (2001)
13. 井元信之 「量子工学」 イミダス 2002 (集英社), 821 (2002)
14. 平山祥郎 「ナノテクノロジー - 極限の微細制御技術 - 」イミダス 2002 (集英社), 818 (2002)
15. K. Suzuki, S. Miyashita, and Y. Hirayama, "Correlation between electrons and holes in InAs/GaSb heterostructures", Technical Report of IEICE (2002) ED2001-230, SDM2001-233 (in Japanese)
16. S. Sasaki and S. Tarucha, "The Kondo effect in semiconductor quantum dots", Technical Report of IEICE (2002) ED2001-225, SDM2001-228 (in Japanese)
17. 平山 祥郎 「ナノスケールの物理」, ナノテクノロジーハンドブック(オーム社)未定 (accept 済み)
18. 井元信之 「量子情報通信」, 三木・須藤編「光通信技術ハンドブック」(オプトロニクス社), 57 (2002)
19. 樽茶清悟 「ナノテクノロジーと物理」 学術の動向, No8, 18 (2002)
20. 蟹澤聖、M. J. Butcher、都倉康弘、山口浩司、平山祥郎 「量子化された伝導電子の局所状態密度の直接観察」 固体物理 37, 81 (2002)
21. Adam Miranowicz, 玉木潔 「量子テレポーテーション」, 数理科学第 40 巻第 11 号, 28 (2002)
22. 平川一彦 「電気工学ハンドブック (分担執筆)」 電気学会 (2002)
23. 平川一彦 「人工原子が拓く量子情報科学 (翻訳)」 パリティ 3月号、26 (2002)
24. 平川一彦 「新著紹介: C. Hamaguchi "Basic Semiconductor Physics", Springer」 日本物理学会誌 4月号 (2002)
25. 井上貴仁, 南條弘, 横山浩 「走査型電気力顕微鏡による金属表面の観察」 日本金属学会誌までりあ Vol.41 No.12, (2002)
26. 平川一彦 「応用物理学ハンドブック (分担執筆)」 丸善 (2002)
27. 平山 祥郎 「ナノテクノロジー」, イミダス 2003 (集英社), 42 (2003)
28. 村木康二、橋本克之、平山祥郎 「量子ホール効果とスピン: ランダウ準位交差における Ising 量子ホール強磁性と電子スピン-核スピン相互作用」, 固体物理 Vol. 38, 406 (2003)
29. 平山 祥郎 「量子ホール系とスピン」, パリティ 1月号、25 (2003)
30. 山本俊, 小芦雅斗, Sahin Kaya Ozdemir, 井元信之 「雑音に埋もれたエンタングルメントの抽出」 日本物理学会誌 10月号 (2003)

(2)口頭発表

口頭・ポスター講演(うち招待講演)

(国内 302 (17)件、海外 339 (66)件)

海外

1. K. Hirakawa, K. Yamanaka, M. Saeki, Y. Kawaguchi, and S. Komiyama: "Quantum Hall Far-Infrared Photodetector", 4th International Symposium on Advanced Physical Fields "Quantum Phenomena in Advanced Materials at High Magnetic Fields", Mar. 9-12,

- Tsukuba (1999).[invited]
2. S. Tarucha: "Correlated Electrons in Quantum Dot Atoms and Molecules", 7th Int. Symp. on Nanostructures, Physics and Technology, June, St Petersburg (1999). [invited]
 3. K. Hirakawa, N. Sekine, M. Vosseburger, P. Haring-Bolivar, and H. Kurz: "THz emission from impulsively excited two-dimensional plasmons in AlGaAs/GaAs quantum wells", 6th International Workshop on Femtosecond Technology, July 13-15, Makuhari (1999).
 4. Y. Shimada, T. Matsuno, and K. Hirakawa: "Broadband detection of THz radiation from semiconductor surfaces generated by femtosecond laser pulses", 6th International Workshop on Femtosecond Technology, July 13-15, Makuhari (1999).
 5. S. -W. Lee, K. Hirakawa, and Y. Shimada: "Modulation-Doped Quantum Dot Infrared Photodetectors Using Self-Assembled InAs Quantum Dots", 9th International Conference on Modulated Semiconductor Structures, July 12-16, Fukuoka (1999).
 6. T. Inoue, D.F. Ogletree, M. Salmeron "Scanning Polarization Force Microscope Study of Electron Field Emission from Diamond-Like Carbon Films" 10th Int'l Conference on Scanning Tunneling Microscopy/Spectroscopy and Related Techniques (STM'99), July 21 We1-05(1999).
 7. K. Tamura, K. Hirakawa, and Y. Shimada: "Drude absorption and electron localization in GaAs/AlGaAs superlattices", 11th International Conference on Nonequilibrium Carrier Dynamics in Semiconductors, July 19-23, Kyoto (1999).
 8. T.Tokizaki, K.Sugiyama, T.Onuki, and T.Tani, "Temporal and spatial analysis of electric field in probe tip of femtosecond scanning near-field optical microscope", Int. Workshop on Femtosecond Technol. '99, July 15 (1999).
 9. A. Kawaharazuka, T. Saku, Y. Horikosi, Y. Hirayama: "Channel depth dependent transport characteristics of a two dimensional electron gas in an undoped heterostructure", 26th International Symposium on Compound Semiconductors, Aug. 25, Berlin (1999)
 10. J. H. Roslund, H. Yamaguchi, Y. Hirayama: "Electrical properties of InAs/AlSb/GaSb double quantum well structures", 26th International Symposium on Compound Semiconductors, Aug. 23, Berlin (1999)
 11. S. Tarucha: "Transport in Quantum Dots and Quantum Wires", Electron Transport in Mesoscopic Systems, Aug., Goeteborg (1999).[invited]
 12. T.Tokizaki, K.Sugiyama, T.Onuki, Y.Watanabe, T.Tsuchiya, and T.Tani, "Near-field observation of luminescence of silicon phthalocyanine dye aggregates at low temperature", Int. Conf. Lumin. Opt. Spec. Cond. Matter, Aug. 25 (1999).
 13. K. Ono, D. G. Austing, Y. Tokura, S. Tarucha: "Transport properties of a weakly coupled vertical double quantum dot", 22nd Int. Conf. on Low Temperature Physics, Aug., Espoo & Helsinki (1999)
 14. S. Tarucha: "Spectroscopy of Artificial Atoms and Molecules", 22nd Int. Conf. on Low Temperature Physics, Aug., Espoo & Helsinki (1999) plenary [invited]
 15. Ph. Lelong, S. -W. Lee, K. Hirakawa, and H. Sakaki: "Fano profile in intersubband transitions in self-assembled InAs quantum dots", 5th International Conference on Intersubband Transitions in Quantum Wells, Sep. 7-11, Bad Ischl (1999).
 16. S.-W. Lee, K. Hirakawa, and Y. Shimada: "Bound-to-continuum intersubband transition in self-assembled InAs quantum dots and its application to mid-infrared photodetectors", 5th International Conference on Intersubband Transitions in Quantum Wells, Sep. 7-11,

- Bad Ischl (1999).
17. J. H. Roslund, K. Saito, K. Suzuki, H. Yamaguchi, Y. Hirayama: "Coupled electron and hole gases in the InAs/AlSb/GaSb system", 1999 International Conference on Solid State Devices and Materials, Sep. 21-24, Tokyo (1999).
 18. K. Muraki, N. Kumada, T. Saku: "n-GaAs back-gated double-quantum-well structures with full density control", 1999 International Conference on Solid State Devices and Materials, Sep. 21-24, Tokyo (1999).
 19. S.-W. Lee, Ph. Lelong, K. Hirakawa, Y. Shimada, and H. Sakaki: "Mid-infrared detection and Fano resonance in bound-to-continuum intersubband transition in self-assembled InAs quantum dots", 1999 International Conference on Solid State Devices and Materials, Sep. 21-24, Tokyo (1999).
 20. T. Fujisawa, Y. Hirayama: "Transmission type rf single electron transistor operation of a semiconductor quantum dot", 1999 International Conference on Solid State Devices and Materials, Sep. 21-24, Tokyo (1999).
 21. K. Hirakawa, N. Sekine, Y. Shimada, M. Vosseburger, P. Haring-Bolivar, and H. Kurz: "Impulsive Excitation of Two-dimensional Plasmons by Femtosecond Laser Pulses", CREST Workshop on "Physics and Application of Quantum Dots", Oct. 14-16, Hakone (1999).
 22. K. Hirakawa, S.-W. Lee, Ph. Lelong, and H. Sakaki: "Mid infrared detection and Fano resonance in Bound-to-Continuum intersubband transitions in self-assembled InAs quantum dots", CREST Workshop on "Physics and Application of Quantum Dots", Oct. 14-16, Hakone (1999).
 23. Y. Kawaguchi, K. Hirakawa, K. Yamanaka, and S. Komiyama: "Quantum Hall far-infrared detector--mechanism, responsivity, and noise" CREST Workshop on "Physics and Application of Quantum Dots", Oct. 14-16, Hakone (1999).
 24. T. Inoue, D.F. Ogletree, M. Salmeron "Field Emission from Flat, Diamond-Like Carbon Films Characterized by Scanning Force Microscopy" American Vacuum Society 46th National Symposium, Oct. 25, TF+VM-MoM10 (1999).
 25. T. Onuki, T. Tokizaki, Y. Watanabe, and T. Tani, "Anodic oxidation and optical observation of metal thin film using scanning near-field optical microscope", 2nd Asia-Pacific Workshop on Near-Field Optics, Oct. 22, Beijing (1999).
 26. K. Hirakawa, N. Sekine, M. Vosseburger, P. Haring-Bolivar, and H. Kurz: "Crossover from Impulsive to Step-Function-Like Excitation of Two-Dimensional Plasmons in AlGaAs/GaAs Quantum Wells by Femtosecond Laser Pulses", 7th International Conference on Terahertz Electronics (THz99), Nov. 25-26, Nara (1999)
 27. T. Matsuno, Y. Shimada, and K. Hirakawa: "Intense broadband terahertz radiation from biased GaAs p-i-n structures generated by femtosecond laser pulses", 7th International Conference on Terahertz Electronics (THz99), Nov. 25-26, Nara (1999)
 28. Y. Kawaguchi, K. Hirakawa, M. Saeki, I. Hosako, and S. Komiyama: "Performance of high-sensitivity quantum Hall far-infrared photodetector", 7th International Conference on Terahertz Electronics (THz99), Nov. 25-26, Nara (1999)
 29. K. Hirakawa, S.-W. Lee, Ph. Lelong, and H. Sakaki: "Bound-to-continuum intersubband transition in self-assembled InAs quantum dots and its application to mid-infrared photodetectors", Sweden-Japan Workshop on Nanoelectronics, Dec. 13-14, Kyoto (1999).
 30. M. Koashi: "Operation that preserves the marginal states of a subsystem", The NEC Workshop on Quantum Cryptography, Dec. 13-15, Princeton (1999).

31. N. Imoto and M. Koashi: "Possibility of quantum magic protocols," The NEC Workshop on Quantum Cryptography, Dec. 13-15, Princeton (1999).
32. Y. Hirayama: "Growth and characterization of bilayer systems", Phase transition in Coupled Electron-Hole and Electron-Electron Layers, Feb. 25, Delft (2000). **[invited]**
33. S. Tarucha: "Spin Effects in Vertical Single Dot and Double Dot structures", APS March Meeting 2000, Mar., Minneapolis M E7. DCMP (2000).**[invited]**
34. K. Kanisawa, H. Yamaguchi, Y. Hirayama: "Local density of states of two dimensional electrons at InAs surfaces observed by LT-STM", Int. Symposium on Mesoscopic Superconductivity (SM2000), Mar. 8, Atsugi (2000)
35. K. Suzuki, S. Miyashita, Y. Hirayama: "Back-gate control in an InAs-based two-dimensional system", Int. Symposium on Mesoscopic Superconductivity (SM2000), Mar. 8, Atsugi (2000)
36. K. Hoshino, J. C. Harris, T. Someya, K. Hirakawa, and Y. Arakawa: "Lifetime and intersubband transition in thin GaN/AlGaIn quantum wells", 4th Symposium on Atomic-Scale Surface and Interface Dynamics, Mar. 2-3, Tsukuba (2000).
37. M. Koashi and N. Imoto, "Quantum Cryptography and no-cloning theorem for pure, mixed, and entangled states", Fifteenth European Meeting on Cybernetics and Systems Research, Apr. 25-28, Vienna, (2000).**[invited]**
38. M. Yamashita, M. Tonouchi, and M. Hangyo, Y. Shimada, and K. Hirakawa: "THz radiation imaging of GaAs-MIN structures", The 7th International Workshop on Femtosecond Technology (FST2000), June 29-30, Tsukuba (2000).
39. S. Tarucha: "Many-body States in Semiconductor Quantum Dots", Int. Symp. On Strong Correlations in Many-body Systems, June 26-30, Tokyo / Mount Nikko (2000).
40. S. Tarucha: "Spin Singlet and Triplet in Quantum Dot Atoms and Molecules", Spin Effects in Mesoscopic Systems Euro conference Cortona, June 28-July 2, Italy (2000).
41. N. Imoto, "General principle and possible applications of quantum cryptography", 5th International Conference on Quantum Communication Measurement and Computing, July 3-8, Capri (2000).**[invited]**
42. S. Tarucha: "Spin Effects in Quantum Dot Structures", The 8th Asia Pacific Physics Conference, Aug. 7-10, Taipei (2000).
43. M. Koashi and N. Imoto, "A principle behind no-cloning and no-imprinting theorems", Fourth International Conference on Computing Anticipatory Systems (CASYS'2000), Aug. 7-12, Liege (2000) **[invited]**.
44. K. Hashimoto, S. Miyashita, T. Saku, Y. Hirayama: "Back-gated Point Contact", SSDM2000, Aug. 30, Sendai (2000).
45. Y. Shimada, T. Matsuno, and K. Hirakawa: "THz Emission due to Miniband Transport in GaAs/AlGaAs Superlattices", 2000 International Conference on Solid State Devices and Materials, Sendai, Miyagi, Aug. 29-Sep. 1, 2000.
46. K. Hashimoto, K. Muraki, T. Saku, Y. Hirayama, "Longitudinal resistance anomaly around the 2/3 filling factor observed in a GaAs/AlGaAs single heterostructure", 14th International Conference on High Magnetic Fields in Semiconductor Physics, Sep. 25-29, Matsue (2000).
47. Y. Kawano, S. Komiyama, and K. Hirakawa: "Suppression of electron-hole pair recombination in edge states in quantum Hall regimes", 14th International Conference on High Magnetic Fields in Semiconductor Physics, Sep. 25-29, Matsue (2000).
48. A. Kawaharazuka, T. Saku, Y. Tokura, Y. Horikoshi, Y. Hirayama, "Transport

- characteristics of electrons in weak short-period two-dimensional potential arrays". 25th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS25), Sep. 17-22, Osaka (2000).
49. K. Hashimoto, T. Saku, Y. Hirayama, "Slow resistance enhancements in the fractional quantum Hall effect regime observed in a GaAs/AlGaAs single heterostructure", 25th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS25), Sep. 17-22, Osaka (2000).
 50. K. Hoshino, T. Someya, K. Hirakawa, and Y. Arakawa: "Observation of intersubband transition in AlGaIn/GaN single heterostructures", 25th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS25), Sep. 17-22, Osaka (2000).
 51. K. Kanisawa, M. J. Butcher, H. Yamaguchi, Y. Hirayama: "Imaging of Friedel oscillations at epitaxially grown InAs(111)A surfaces using scanning tunneling microscopy", 25th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS25), Sep. 17-22, Osaka (2000).**[invited]**
 52. K. Muraki, T. Saku, Y. Hirayama, "Effects of spin and charge profiles on the phase transitions in bilayer quantum Hall systems", 25th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS25), Sep. 17-22, Osaka (2000).
 53. M. Yamamoto, M. Stopa, Y. Tokura, Y. Hirayama, S. Tarucha: "Coulomb Drag in Parallel Quantum Wires", 25th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS25), Sep. 17-22, Osaka (2000).
 54. Ph. Lelong, K. Hirakawa, K. Hirotsu, S.-W. Lee, and H. Sakaki: "Fano profiles in bound-to-continuum intersubband transitions in negatively charged InAs quantum dots", 25th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS25), Sep. 17-22, Osaka (2000).
 55. T. Fujisawa, Y. Tokura, Y. Hirayama, "Non-equilibrium current through an excited state in a quantum dot", 25th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS25), Sep. 17-22, Osaka (2000).
 56. S. Sasaki, D.G. Austing, Y. Kitamura, S. Tarucha, S. De Franceschi, J. M. Elzerman, W. G. van der Wiel, L. P. Kouwenhoven: "A novel Kondo effect in a vertical quantum dot", 25th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS25), Sep. 17-22, Osaka (2000).
 57. K. Hoshino, T. Someya, K. Hirakawa, and Y. Arakawa: "Effect of strain relaxation and screening on intersubband transitions in GaN/AlGaIn multiple quantum wells", International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN2000), Sep. 24-27, Nagoya (2000).
 58. K. Ono, D.G. Austing, Y. Tokura, S. Tarucha: "Spin selective tunneling and spin blockade in vertically coupled double dot systems", 25th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS25), Sep. 17-22, Osaka (2000).
 59. S. Tarucha: "Spin Effects in Semiconductor Quantum Dots", The International Conference on the Physics and Application of Spin-Related Phenomena in Semiconductors, Sep. 13-15, Sendai (2000).
 60. K. Hirakawa, A. Oiwa, and H. Munekata: "Infrared Optical Conductivity of In_{1-x}Mn_xAs", The International Conference on the Physics and Application of Spin-Related Phenomena in Semiconductors, Sep. 13-15, Sendai (2000).
 61. K. Hirotsu, S.-W. Lee, Ph. Lelong, and K. Hirakawa: "Electronic states and intersubband transition spectra in InAs/GaAs self-assembled quantum dots", 3rd International

- Symposium on Formation, Physics and Device Application of Quantum Dot Structures (QDS2000), Sep. 10-14, Sapporo (2000).
62. K. Ono, D. G. Austing, Y. Tokura, S. Tarucha: "Angular Momentum Selection Rule for Resonant Tunneling Through Two Discrete Energy States", 3rd International Symposium on Formation, Physics and Device Application of Quantum Dot Structures (QDS2000), Sep. 10-14, Sapporo (2000).
 63. S.-W. Lee, K. Hirakawa, and H. Sakaki: "Long-Lifetime of Photoexcited Carriers in Modulation-Doped Quantum Dot Infrared Photodetectors", 3rd International Symposium on Formation, Physics and Device Application of Quantum Dot Structures (QDS2000), Sep. 10-14, Sapporo (2000).
 64. Y. Hirayama, "Carrier interaction in semiconductors: toward quantum computing and -----", Int. Workshop on Spintronics and Quantum Computing, Sep. 12, Tokyo (2000) [invited]
 65. M. Koashi, "A principle behind no-cloning and no-imprinting theorems", US-Japan Seminar 2000 on Coherent Quantum Systems, Sep. 18-21, Rhode Island (2000). [invited]
 66. N. Imoto, "Quantum key distribution and its variations", US-Japan Seminar 2000 on Coherent Quantum Systems, Sep. 18-21, Rhode Island (2000). [invited]
 67. S. Tarucha, K. Ono, D.G. Austing: "Spin Dependent Transport in Coupled Two Quantum Dot System", Poland-Japan Seminar, Sep. 11-12, Sendai (2000).
 68. S. Tarucha, K. Ono, S. Amaha, D.G. Austing, Y. Tokura, S. Sasaki: "Spin Effects on a Few-electron States in Strongly and Weakly Coupled Quantum Dot Molecules", Japan-Israel Symposium, Sep. 11-12, Wako (2000).
 69. S. Tarucha: "Interaction Effects and Transport Properties of Quantum Dots and Wires", GDR Systems Fortement Correlas, Interactions et Physique Mesoscopique, Sep. 25-27, Reunion de Aussois (2000).
 70. S. Tarucha: "Interaction Effects and Transport Properties of Semiconductor Quantum Dots", Int. Workshop on Artificial Atoms and Related Finite Fermion and Boson Systems, ECT, Sep. 25-Oct. 6, Trento (2000).
 71. H. Sakaki, K. Hirakawa, G. Yusa, Ph. Lelong, T. Kawazu, H. Kim, T. Noda, and G. Bastard: "Quantum dot and wire structures: Will they be work horses in advanced electronics?", German-Japan Nanotechnology Symposium, Oct. 30-31, Berlin (2000).
 72. S. Tarucha: "Two-electron Spin States and Related Physics in Quantum Dot Structures", The 8th NEC Symposium on Fundamental Approaches to New Material Phases "SPIN-RELATED QUANTUM TRANSPORT IN MESOSCOPIC SYSTEMS", Oct. 22-26, Nasu (2000).
 73. S. Katsumoto, T. Hayashi, Y. Hashimoto, Y. Iye, Y. Ishiwata, M. Watanabe, R. Eguchi, T. Takeuchi, Y. Harada, S. Shin, and K. Hirakawa: "Magnetism and metal-insulator transition in III-V based diluted magnetic semiconductors", The 8th NEC Symposium on Fundamental Approaches to New Material Phases "SPIN-RELATED QUANTUM TRANSPORT IN MESOSCOPIC SYSTEMS", Oct. 22-26, Nasu (2000).
 74. S. Tarucha, K. Ono, D.G. Austing, Y. Tokura, T. Fujisawa: "Spin Dependent Tunneling in Coupled Two Quantum Dot System", MRS 2000 Fall Meeting Symposium I "Semiconductor Spintronics-Physics, Materials and Applications", Boston, 2000.11.28-29.
 75. K. Ono, S. Tarucha: "Spin-selective tunneling in double quantum dots", FRONTIER SCIENCE RESEARCH CONFERENCE: SCIENCE and TECHNOLOGY of NANOSTRUCTURES, Nov., Lajolla (2000).

76. S. Tarucha, D.G. Austing, S. Sasaki, Y. Tokura, T. Fujisawa, S. De Franceschi, W. van der Wiel, J. Elzerman, L. P. Kouwenhoven: "Control Over Two-electron Spin States and Kondo Effect in Quantum Dots", 4th Int. Workshop on Quantum Functional Devices, Nov. 15-17, Kanazawa (2000).
77. S. Tarucha: "Spin Effects and Transport Properties of Semiconductor Quantum Dots", Int. Symp. on New Developments in "Strongly Correlated Electron Phase under Multiple Environment", Nov. 6-8, Osaka (2000).
78. Y. Hirayama, "Nanoprobing of 2-DEG and 0-DEG accumulation at InAs surface", Advanced Heterostructure Workshop 2000 (AHW2000), Dec. 5, Hawaii (2000).
79. Y. Hirayama, "Transport characteristics of backgated point contacts", Advanced Heterostructure Workshop 2000 (AHW2000), Dec. 6, Hawaii (2000).
80. K. Hoshino, T. Someya, M. Helm, K. Hirakawa, and Y. Arakawa: "Sharp Intersubband Absorption Spectra in AlGaIn/GaN Multiple Quantum Wells" CLEO 2000, San Francisco, U.S.A. (2000).
81. K. Kanisawa, M. J. Butcher, H. Yamaguchi, Y. Hirayama, "Oscillations of local density of states at the epitaxially grown InAs(111)A surfaces characterized by low-temperature scanning tunneling microscopy", Sixth International Conference on Nanometer Science and Technology (NANO6) in conjunction with the 47th International Symposium of the American Vacuum Society (AVS47), Boston (2000) SC+EL+SS-TUM2.
82. K. Kanisawa, M. J. Butcher, Y. Tokura, H. Yamaguchi, Y. Hirayama, "Imaging of zero-dimensional states in semiconductor nanostructures using scanning tunneling microscopy", 1st International Workshop on Nano-scale Spectroscopy and its Applications to Semiconductor Research (NSS1), Trieste (2000).
83. K. Hirakawa, S.-W. Lee, Ph. Lelong, K. Hirotsu, and H. Sakaki, "High-sensitivity mid infrared detection by modulation-doped quantum dot infrared photodetectors", International Photonics Conference 2000, Dec. 13-15, Hsinchu (2000).**[invited]**
84. Y. Hirayama, K. Kanisawa, T. Fujisawa: "Temporal and spatial characterization of semiconductor quantum dots", IQC01, Jan. 17, Sydney (2001).**[invited]**
85. A. Kawaharazuka, T. Saku, Y. Tokura, Y. Horikoshi, Y. Hirayama, "Transport characteristics of electrons in weak short period two-dimensional potential arrays", International Symposium on Carrier Interactions in Mesoscopic Systems 2001(CIM2001), Feb. 13-14, Atsugi (2001).
86. A. Miranowicz, S. K. Ozdemir, M. Koashi, N. Imoto, Y. Hirayama, "Entanglement of quantum dots in the spin van der Waals model", International Symposium on Carrier Interactions in Mesoscopic Systems 2001(CIM2001), Feb. 13-14, Atsugi (2001).
87. D.G. Austing, R. Hill, A. Patane, M. Henini, P. Main, L. Eaves, S. Tarucha: "Influence of different starting materials on transport through self assembled dots", International Symposium on Carrier Interactions in Mesoscopic Systems 2001(CIM2001), Feb. 13-14, Atsugi (2001).
88. H. Yamaguchi, R. Dreyfus, S. Miyashita, Y. Hirayama, "Electro-mechanical properties of freestanding InAs membranes fabricated from InAs/GaAs (111)A heterostructures", International Symposium on Carrier Interactions in Mesoscopic Systems 2001(CIM2001), Feb. 13-14, Atsugi (2001)..
89. K. Hashimoto, S. Miyashita, T. Saku, Y. Hirayama, "Quantum point contact with a widely tunable range for the electron density", International Symposium on Carrier Interactions in Mesoscopic Systems 2001(CIM2001), Feb. 13-14, Atsugi (2001).

90. K. Hirakawa, S. Katsumoto, H. Munekata, A. Oiwa, T. Hayashi, Y. Hashimoto, Y. Iye, J. Szczytko, and A. Twardowski: "Ferromagnetic transition mechanisms in III-V diluted magnetic semiconductors", International Symposium on Carrier Interactions in Mesoscopic Systems 2001(CIM2001), Feb. 13-14, Atsugi (2001).
91. K. Kanisawa, M. J. Butcher, Y. Tokura, H. Yamaguchi, Y. Hirayama, "Imaging of zero-dimensional states in InAs nanostructures using low-temperature scanning tunneling microscopy", International Symposium on Carrier Interactions in Mesoscopic Systems 2001(CIM2001), Feb. 13-14, Atsugi (2001).
92. K. Muraki, T. Saku, Y. Hirayama, "Quantum Hall ferromagnet: integer quantum Hall effect due to Coulomb interactions", International Symposium on Carrier Interactions in Mesoscopic Systems 2001(CIM2001), Feb. 13-14, Atsugi (2001).
93. K. Suzuki, S. Miyashita, Y. Hirayama, "Transport properties in InAs/AlSb/GaSb heterostructures", International Symposium on Carrier Interactions in Mesoscopic Systems 2001(CIM2001), Feb. 13-14, Atsugi (2001).
94. M. Koashi, V. Buzek, and N. Imoto, "Bounds on bipartite entanglement shared among many qubits," International Symposium on Carrier Interactions in Mesoscopic Systems 2001(CIM2001), Feb. 13-14, Atsugi (2001).
95. N. Imoto, "Collective/individual manipulation and entanglement for qubit information control," International Symposium on Carrier Interactions in Mesoscopic Systems 2001(CIM2001), Feb. 13-14, Atsugi (2001).
96. N. Kumada, H. Azuhata, S. Nagahama, D. Terasawa, Y. Shimoda, A. Sawada, Z. F. Ezawa, K. Muraki, T. Saku, Y. Hirayama, "Various $\nu=2/3$ quantum Hall states in bilayer systems", International Symposium on Carrier Interactions in Mesoscopic Systems 2001(CIM2001), Feb. 13-14, Atsugi (2001).
97. S. Amaha, D.G. Austing, Y. Tokura, K. Muraki, K. Ono, S. Tarucha: "Magnetic field induced transitions in the few-electron ground states of artificial molecules", International Symposium on Carrier Interactions in Mesoscopic Systems 2001(CIM2001), Feb. 13-14, Atsugi (2001).
98. S. K. Ozdemir, A. Miranowicz, M. Koashi, and N. Imoto, "Optical State Truncation: A Proposal for Experimental Realization," International Symposium on Carrier Interactions in Mesoscopic Systems 2001(CIM2001), Feb. 13-14, Atsugi (2001).
99. S. Tarucha: "Control and Applications of Two-electron States in Quantum Dot Structures", International Symposium on Carrier Interactions in Mesoscopic Systems 2001(CIM2001), Feb. 13-14, Atsugi (2001).
100. T. Asayama, Y. Tokura, S. Miyashita, M. Stopa, S. Tarucha: "Magnetic Minibands and Conductance Oscillations in a Quantum Wire with Short Period Potential Modulation", International Symposium on Carrier Interactions in Mesoscopic Systems 2001(CIM2001), Feb. 13-14, Atsugi (2001).
101. T. Fujisawa, Y. Tokura, Y. Hirayama, D.G. Austing, S. Tarucha: "Transient current spectroscopy of lateral and vertical quantum dots", International Symposium on Carrier Interactions in Mesoscopic Systems 2001(CIM2001), Feb. 13-14, Atsugi (2001).
102. T. Tokizaki, H. Kawashima, T. Shigefuji, T. Inoue and H. Yokoyama, "Luminescence spectroscopy of modulation-doped AlGaAs/GaAs quantum structures using low-temperature scanning near-field optical microscope", International Symposium on Carrier Interactions in Mesoscopic Systems 2001(CIM2001), Feb. 13-14, Atsugi (2001).
103. W.G. Van der Wiel, E.W.G.M. Huizeling, J.M. Elzerman, S. De Franceschi, T. Fujisawa,

- S. Tarucha, L.P. Kouwenhoven: "Electro-magnetic Aharonov-Bohm effect in a 2-D electron gas ring", International Symposium on Carrier Interactions in Mesoscopic Systems 2001(CIM2001), Feb. 13-14, Atsugi (2001).
104. W.G. Van der Wiel, S. De Franceschi, S. Sasaki, J.M. Elzerman, T. Fujisawa, S. Tarucha, L.P. Kouwenhoven: "The Kondo Effect in lateral and vertical Quantum Dots", International Symposium on Carrier Interactions in Mesoscopic Systems 2001(CIM2001), Feb. 13-14, Atsugi (2001).
105. Y. Hirayama, K. Hashimoto, K. Muraki, T. Saku, "Nuclear spin polarization/relaxation via interactions with two-dimensional electron systems", International Symposium on Carrier Interactions in Mesoscopic Systems 2001(CIM2001), Feb. 13-14, Atsugi (2001).
106. Y. Kitamura, S. Sasaki, W. Izumida, K. Ono, S. Tarucha: "The Kondo effect in a quantum dot with only one electron", International Symposium on Carrier Interactions in Mesoscopic Systems 2001(CIM2001), Feb. 13-14, Atsugi (2001).
107. Y. Shimada, S. Madhavi, and K. Hirakawa: "THz emission from Bloch oscillations in wide miniband superlattices", International Symposium on Carrier Interactions in Mesoscopic Systems 2001(CIM2001), Feb. 13-14, Atsugi (2001).
108. S. Katsumoto, T. Hayashi, Y. Hashimoto, Y. Iye, Y. Ishikawa, M. Watanabe, R. Eguchi, T. Takeuchi, Y. Harada, S. Shin, and K. Hirakawa, "Nature of magnetism in III-V based diluted magnetic semiconductors", The 10th Int. Conf. on Narrow Gap Semiconductor and Related Small Energy Phenomena, Physics and Applications@ (NGS-10)", May 27-31, Ishikawa (2001).
109. Y. Hirayama, K. Muraki, A. Kawaharazuka, K. Hashimoto, T. Saku: "Backgated layers and nano structures", Advanced Research Workshop on Semiconductor Nanostructures, Feb. 5, Queenstown (2001). [invited]
110. N. Imoto: "Quantum technologies and protocols other than QKD", The European Commission Conference on Quantum Interference and Cryptographic Keys: novel physics and advancing technologies (QUICK'01), Apr. 7-13, Corsica (2001).
111. S. Tarucha: "Control and Applications of Spin States in Quantum Dot Structures", The First Korea-U.S.-Japan Workshop on Nanostructure Science and Technology, Apr. 23-25, Seoul (2001).
112. S. Tarucha: "Two-Electron Physics in Artificial Atoms and Molecules", 15th Int. Conf. on Laser Spectroscopy, June 10-15, Utah (2001).
113. K. Hirakawa: "Photoionization of self-assembled InAs quantum dots and its application to high-sensitivity mid infrared detection", 4th Sweden-Japan Q-NANO Workshop, June 13-15, Stockholm (2001).
114. S. Tarucha: "Kondo Effect in Semiconductor Dot", xxx International School on the Physics of Semiconducting Compounds "Jaszowiec 2001", June 1-8, Ustron, Poland (2001).
115. S.-W. Lee and K. Hirakawa: "Extremely large photoconductive gains in modulation-doped quantum dot infrared photodetectors", 2001 Asia-Pacific Workshop on Fundamental and Application of Advanced Semiconductor Devices, July 4-7, Cheju (2001). [invited]
116. A. Miranowicz, S. K. Ozdemir, M. Koashi, N. Imoto, and Y. Hirayama: "Maximum entanglement of quantum dot systems with single excitation in the spin van der Waals model", The Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO Pacific Rim'01), July 15-19, Chiba (2001) P1-36.
117. S. K. Ozdemir, A. Miranowicz, M. Koashi and N. Imoto: "Analysis of mode mismatch in quantum scissors device", The Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics

- (CLEO Pacific Rim'01), July 15-19, Chiba (2001) WG2-4.
- 118.T. Yamamoto, M. Koashi and N. Imoto: "Concentration/purification scheme for two partially entangled photon pairs", The Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO Pacific Rim'01), July 15-19, Chiba (2001) WG2-3.
 - 119.S. Sasaki, Y. Kitamura, W. Izumida, K. Ono, and S. Tarucha: "The Kondo Effect in One- and Two-Electron Quantum Dots", The 14th Int. Conf. on the Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-14), Jul.30-Aug.3, Prague (2001).
 - 120.K. Hoshino, T. Someya, K. Hirakawa, and Y. Arakawa: "Low-pressure MOCVD growth of GaN/AlGa_N multiple quantum wells for intersubband transitions", 13th International Conference on Crystal Growth, Jul.30-Aug.4, Kyoto (2001).
 - 121.S. Tarucha: "Physics and Applications of Quantum Dot Structure", QDN-2 2nd International School on Quantum Devices and Nanostructures, Jul.19-27, Trapani, Italy (2001).
 - 122.S. K. Ozdemir, A. Miranowicz, M. Koashi and N. Imoto: "Qubit State Generation with Solid Crystal Lattice", The 7th International Symposium on Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology: Quantum Coherence and Decoherence (ISQM-Tokyo'01), Aug.27-30, Hatoyama, Saitama (2001).
 - 123.F. Morikoshi and M. Koashi: "Deterministically distillable entanglement", ERATO Workshop on Quantum Information Science (EQIS'01), Sep. 6-8, Tokyo (2001).
 - 124.M. Koashi and N. Imoto: "Compressibility of quantum mixed-state signals", ERATO Workshop on Quantum Information Science (EQIS'01), Sep. 6-8, Tokyo (2001).
 - 125.M. Koashi and N. Imoto: "Synthesizing and processing of quantum states", ERATO Workshop on Quantum Information Science (EQIS'01), Sep. 6-8, Tokyo (2001).
 - 126.N. Imoto: "Synthesizing and processing of quantum states", ERATO Workshop on Quantum Information Science (EQIS'01), Sep. 6-8, Tokyo (2001).
 - 127.A. Miranowicz, S. K. Ozdemir, M. Koashi, and N. Imoto: "New information-entropic measure of quantum optical fields", International Conference on Quantum Electronics and Photonics 15/Photonics 2001 (QEP-15), Sep. 3-6, Glasgow (2001); Technical Digest, p.172.
 - 128.S. K. Ozdemir, A. Miranowicz, M. Koashi, and N. Imoto: "Optical qubit by state truncation", International Conference on Quantum Electronics and Photonics 15/Photonics 2001 (QEP-15), Sep. 3-6, Glasgow (2001); Technical Digest, p.73.
 - 129.H. Yamaguchi and Y. Hirayama, "Novel fabrication method of semiconductor nano-electromechanical structures using controlled surface step distribution", 28th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2001), Oct. 1-4 (2001) WeP-38.
 - 130.K. Suzuki, S. Miyashita, and Y. Hirayama, "Quantum-Hall-effect in back-gated InAs/GaSb electron-hole proximity systems", 28th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2001), Oct. 1-4 (2001) MoP-23.
 - 131.Y. Shimada and K. Hirakawa: "Time-resolved THz spectroscopy of miniband transport in biased GaAs/AlGaAs superlattices", 28th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2001), Oct. 1-4 (2001).
 - 132.S. Tarucha: "Interactions and Spin Effects in Quantum Dot Structures", ISSP 8 Symposium on Correlated Electrons, Oct.1-5, Kashiwa (2001).
 - 133.S. Tarucha: "Control Over Spin Effects in Quantum Dot Structures", IUVSTA 15th International Vacuum Congress, AVS 48th International Symposium, Oct.28-Nov.2, San

- Fransisco (2001).
134. S. Tarucha: "Double quantum dots for tuning spin effects", 7th International Symposium on Advanced Physical Fields "Fabrication and Characterization of Nano-structured Materials", Nov. 12-15, Tsukuba (2001).
 135. K. Hashimoto, J. Delmas, K. Muraki, T. Saku, and Y. Hirayama, "Nuclear spin related resistance enhancement near filling factors of $2/3$ and $3/5$ ", 5th International Symposium on New Phenomena in Mesoscopic Structures, Nov. 25-30, Hawaii (2001). E2.
 136. K. Hirakawa, S. W. Lee, Ph. Lelong, S. Fujimoto, K. Hirotsu, and H. Sakaki: "Photoionization and recombination process in modulation-doped quantum dot infrared photodetectors", 5th International Symposium on New Phenomena in Mesoscopic Structures, Nov. 25-30, Hawaii (2001). [invited]
 137. K. Hirakawa, Y. Shimada, S. Madhavi, and M. Abe: "Time-domain THz spectroscopy of miniband transport in GaAs/AlGaAs superlattices", 5th International Symposium on New Phenomena in Mesoscopic Structures, Nov. 25-30, Hawaii (2001).
 138. T. Machida, T. Yamazaki, S. Komiyama, K. Muraki, and Y. Hirayama, "Dynamic nuclear-spin polarization induced by scattering between fractional quantum Hall edge channels", 5th International Symposium on New Phenomena in Mesoscopic Structures, Nov. 25-30, Hawaii (2001). E3.
 139. S. Tarucha: Spin Effects in Quantum Dot Structures and the Applicability for Making Spin Qu-bits, Workshop on Quantum Computation and Quantum Information, Nov. 5-6, Postech (2001).
 140. N. Ikuma, S. K. Ozdemir, S. Shinohara, and H. Yoshida: "Detection of object velocity using multiply scattered speckles in external cavity laser diodes", the First SICE/JEMIMA/ISA Joint Conference, Nov. 7-9, Tokyo (2001).
 141. S. K. Ozdemir, I. Ohno, S. Shinohara, and H. Yoshida: "Short time autocorrelation of speckle signals from external cavity laser diode for length measurement", the First SICE/JEMIMA/ISA Joint Conference, Nov. 7-9, Tokyo (2001).
 142. S. Shinohara, I. Ohno, S. K. Ozdemir, and H. Yoshida: "Non-contact in-vivo measurement of time varying skin blood flow using semiconductor laser speckle veloc-imeter", the First SICE/JEMIMA/ISA Joint Conference, Nov. 7-9, Tokyo (2001).
 143. T. Tokizaki, T. Onuki, Y. Watanabe, T. Tsutiya, T. Tani, and H. Yokoyama, "Near-field spectroscopy of modulation-doped GaAs quantum structures under high magnetic fields", 3rd Asia-Pacific Workshop on Near-field Optics, Nov. Melbourne (2001).
 144. Y. Hirayama, "Spin related phenomena in semiconductor layer and dot structures" CIAR (The Canadian Institute for Advanced Research) Nanoelectronics Program Meeting, Victoria, Canada (2001).
 145. H. Yamaguchi, R. Dreyfus, S. Miyashita, and Y. Hirayama, "Application of InAs/GaAs (111)A heterostructures for electromechanical systems", 13th International conference on Crystal Growth (ICCG13), Kyoto (2001) 04a-SB3-11.
 146. D. G. Austing, S. Sasaki, K. Ono, S. Tarucha, M. Barranco, A. Emperador, M. Pi, and F. Garcias, "Influence of mismatch on the addition energy spectra of vertical diatomic artificial molecules", The 9th International Conference on the Application of the Density Functional Theory in Chemistry and Physics (DFT 2001), El Escorial, Spain (2001) PA-59.
 147. S. Tarucha, K. Ono, D. G. Austing, S. Sasaki, T. Fujisawa, Y. Tokura, and L. P. Kouwenhoven, "Tunable two-electron spin states in quantum dot structures and

- applicability for making spin qubits”, The 59th Annual Device research Conference (DRC), Notre Dame, (2001), Va-1.
- 148.D.G. Austing, S. Sasaki, K. Muraki, K. Ono, S. Tarucha, M. Barranco, A. Emperador, M. Pi, and F. Garciasd, “Influence of mismatch on the addition energy spectra of vertical diatomic artificial molecules”, The 14th Int. Conf. on the Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-14), Jul.30-Aug.3, Prague (2001).
 - 149.K. Muraki, T. Saku, and Y. Hirayama, “Activation studies of anisotropic quantum Hall ferromagnets with zero single-particle gap”, The 14th Int. Conf. on the Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-14), Jul.30-Aug.3, Prague (2001) MA3.
 - 150.P. C. Main, A. Patane, R. J. A. Hill, A. Levin, L. Eaves, M. Henini, D. G. Austing, S. Tarucha, Yu V. Dubrovskii, and JE. E. Vdovin, “Mapping the wave functions in quantum dots”, The 14th Int. Conf. on the Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-14), Jul.30-Aug.3, Prague (2001) TC1.
 - 151.S. Sasaki, Y. Kitamura, W. Izumida, K. Ono, and S. Tarucha, “The Kondo effect in a one- and two-electron quantum dot”, The 14th Int. Conf. on the Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-14), Jul.30-Aug.3, Prague (2001) RB4.
 - 152.T. Asayama, Y. Tokura, S. Miyashita, M. Stopa, and S. Tarucha, “1D Bragg reflection in the Tomonaga-Luttinger liquid regime and Fermi liquid regimes”, The 14th Int. Conf. on the Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-14), Jul.30-Aug.3, Prague (2001) TD5.
 - 153.T. Machida, S. Ishizuka, and K. Muraki, “Spin polarization in fractional quantum Hall edge channels”, The 14th Int. Conf. on the Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-14), Jul.30-Aug.3, Prague (2001) TP66.
 - 154.Y. Tokura and A. Khaetskii, “Towards a microscopic theory of the 0.7 anomaly”, The 14th Int. Conf. on the Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-14), Jul.30-Aug.3, Prague (2001) RP77.
 - 155.Y. Yamamoto, M. Stopa, Y. Tokura, Y. Hirayama, and S. Tarucha, “Coulomb drag between quantum wires: magnetic field effects and negative anomaly”, The 14th Int. Conf. on the Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-14), Jul.30-Aug.3, Prague (2001) TB3.
 - 156.S. Sasaki, “Kondo effect in quantum dots”, The August Society Mini-Symposium, (ERATO-JST), Tokyo (2001).
 - 157.T. Fujisawa, T. Tokura, D. G. Austing, Y. Hirayama, and S. Tarucha, "Inelastic spin reaxation in a vertical quantum dot", The August Society Mini-symposium (ERATO-JST), Tokyo (2001).
 - 158.T. Itakura and Y. Tokura, “Decoherence due to background charge fluctuations”, The August Society Mini-symposium (ERATO-JST), Tokyo (2001).
 - 159.K. Ono, D. G. Austing, Y. Tokura, and S. Tarucha, “Angular momentum selectivity in tunneling between two quantum dots”, 12th International Conference on Nonequilibrium Carrier Dynamics in Semiconductors (HCIS-12), Aug. 27-31, Santa Fe (2001).
 - 160.K. Ono, D. G. Austing, Y. Tokura, and S. Tarucha: LO-phonon assisted single electron tunneling in weakly coupled double quantum dot structures, 12th International Conference on Nonequilibrium Carrier Dynamics in Semiconductors (HCIS-12), Aug. 27-31, Santa Fe (2001).
 - 161.M. Abe, S. Madhavi, Y. Shimada, K. Hirakawa, and K. Tomizawa: "Transient velocity of electrons in GaAs investigated by time-domain THz spectroscopy", 12th International

- Conference on Nonequilibrium Carrier Dynamics in Semiconductors (HCIS-12), Aug. 27-31, Santa Fe (2001).
162. S. Madhavi, M. Abe, Y. Shimada, and K. Hirakawa: "Room temperature miniband transport in GaAs/AlGaAs superlattice structures", 12th International Conference on Nonequilibrium Carrier Dynamics in Semiconductors (HCIS-12), Aug. 27-31, Santa Fe (2001).
 163. T. Fujisawa, T. Tokura, D. G. Austing, Y. Hirayama, and S. Tarucha, "Long-lived spin state and spin blockade in a vertical quantum dot", 12th International Conference on Nonequilibrium Carrier Dynamics in Semiconductors (HCIS-12), Aug. 27-31, Santa Fe (2001).
 164. A. Kawaharazuka, T. Saku, C. A. Kikuchi, Y. Horikoshi, and Y. Hirayama, "Study of free GaAs surfaces using a back-gated undoped GaAs/AlGaAs heterostructure", 10th International Conference on Modulated Semiconductor Structures, Jul. 23-27, Linz (2001).
 165. H. Yamaguchi, R. Dreyfus, S. Miyashita, and Y. Hirayama, "Fabrication and elastic properties of InAs freestanding structures based on InAs/GaAs (111)A heteroepitaxial systems", 10th International Conference on Modulated Semiconductor Structures, Jul. 23-27, Linz (2001).
 166. K. Hirakawa, Ph. Lelong, K. Hirotani, S.-W. Lee, S. Fujimoto, and H. Sakaki: "Quantum interference effect in photoionization spectra of self-assembled InAs quantum dots", 10th International Conference on Modulated Semiconductor Structures, Jul. 23-27, Linz (2001).
 167. K. -J. Friedland, R. Hey, H. Kostial, Y. Hirayama, and K. H. Ploog, "Anisotropy in the conductance of high mobility modulation-doped quantum wells on GaAs (001) substrates", 10th International Conference on Modulated Semiconductor Structures, Jul. 23-27, Linz (2001).
 168. P. Matagne, J. P. Leburton, D. G. Austing, and S. Tarucha, "Hund's rule and addition energy spectra of cylindrical quantum dots", 10th International Conference on Modulated Semiconductor Structures, Jul. 23-27, Linz (2001).
 169. R. J. A. Hill, P. C. Main, A. Patane, B. Gustafson, L. Eaves, M. Henini, S. Tarucha, and D. G. Austing, "Magnetotunneling spectroscopy in multiple gated self-assembled quantum dots", 10th International Conference on Modulated Semiconductor Structures, Jul. 23-27, Linz (2001).
 170. S. Fujimoto, S.-W. Lee, K. Hirotani, and K. Hirakawa: "Determination of binding energies of electron and hole bound states in self-assembled InAs quantum dots", 10th International Conference on Modulated Semiconductor Structures, Jul. 23-27, Linz (2001).
 171. S.W. Lee and K. Hirakawa: "Lifetime of photoexcited carriers in modulation-doped quantum dot infrared photodetectors", 10th International Conference on Modulated Semiconductor Structures, Jul. 23-27, Linz (2001).
 172. H. Yamaguchi, R. Dreyfus, S. Miyashita, Y. Homma, and Y. Hirayama, "Electrical and mechanical properties of freestanding InAs membranes", 10th International conference on Narrow-gap Semiconductors (NGS10), Kanazawa (2001).
 173. K. Kanisawa, M. J. Butcher, Y. Tokura, H. Yamaguchi, and Y. Hirayama, "Imaging of wave phenomena at InAs(111)A Surfaces using scanning tunneling microscopy", First International Workshop on Quantum Nonplanar Nanostructures & Nanoelectronics '01

- (QNN '01), Tsukuba (2001).
174. H. Yamaguchi, R. Dreyfus, S. Miyashita, and Y. Hirayama, "Application of InAs free-standing membranes for electromechanical systems", 2001 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2001), Tokyo (2001).
 175. K. Kanisawa, M. J. Butcher, Y. Tokura, H. Yamaguchi, and Y. Hirayama, "Two-dimensional Friedel oscillations and electron confinement to nanostructures at a semiconductor surface", 2001 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2001), Tokyo (2001).
 176. D. G. Austing and S. Tarucha, "Addition energy spectra of practical artificial atom and artificial molecule vertical quantum dot structures", The Nano-Physics & Bio-Electronics Workshop, Dresden (2001).
 177. K. Hashimoto, T. Saku, K. Muraki, and Y. Hirayama, "Anomalous Resistance Enhancement in the Fractional Quantum Hall Regime Studied with a Gated Heterostructure", Int. Symp. Roentgen's Heritage Quantum Hall Effect and Heterostructures, Dec, Wuerzburg (2001).
 178. K. Kanisawa, M.J. Butcher, Y. Tokura, H. Yamaguchi, and Y. Hirayama, "Real-space imaging of electron waves in InAs nanoscale crystals using cryogenic scanning tunneling microscopy", International Conference on Quantum Hall Effect and Heterostructures, Wurtzburg (2001).
 179. K. Hirakawa, Y. Shimada, S. Madhavi, M. Abe, N. Sekine, and K. Tomizawa: "Ultrafast Carrier Dynamics in Bulk and Low-dimensional Semiconductor Structures Investigated by Time-domain THz Spectroscopy", 2002 RCIQE International Seminar on "Quantum Nanostructures and Their Device Applications", Feb. 6-7, Sapporo (2002). **[invited]**
 180. Y. Hirayama, K. Hashimoto, K. Muraki, and T. Saku, "Possible Control of Nuclear Spin Polarization by Two-dimensional Electron Gas", 2002 RCIQE International Seminar on "Quantum Nanostructures and Their Device Applications", Feb. 6-7, Sapporo (2002).
 181. S. Tarucha: Electronic properties of low-dimensional semi- and superconductor structures, XIV Ural International Winter School on the Physics of Semiconductors, Feb. 18-22, Ekaterinburg (2002).
 182. D.G. Austing, R.J.A. Hill, A. Patane, P.C. Main, M. Henini, L. Eaves, and S. Tarucha: Controlling the electron tunneling through InAs self assembled dots, Annual APS March Meeting 2002, Mar. 18-22, Indianapolis (2002).
 183. J.P. Leburton, P. Matagne, D.G. Austing, and S. Tarucha: Spin Filling Sequences and Addition Energy in Realistic Vertical Quantum Dots, Annual APS March Meeting 2002, Mar. 18-22, Indianapolis (2002).
 184. M. Rontani, F. Manghi, E. Molinali, S. Amaha, S. Tarucha, and D.G. Austing: Quantum phases in coupled dot: Theory and experiment, Annual APS March Meeting 2002, Mar. 18-22, Indianapolis (2002).
 185. N. Goel, S.J. Chung, M.B. Santos, K. Suzuki, S. Miyashita, and Y. Hirayama, "Ballistic electron transport in InSb quantum wells", Annual APS March Meeting 2002, Mar. 18-22, Indianapolis (2002).
 186. S. Tarucha: Control of spin effects in semiconductor double dot systems, Annual APS March Meeting 2002, Mar. 18-22, Indianapolis (2002).
 187. T. Fujisawa, "Time-dependent phenomena of charge state and spin state in quantum dots", Int. Workshop on Quantum Dots for Quantum Computing and Classical Size Effect Circuits (IWQDQC), Kochi (2002).

- 188.S. Tarucha: Control of spins in Quantum Dots and the ability for Making Spin Qubits,he 10th JST Int. Symp. on Quantum Computing, Mar. 12-14, Tokyo (2002).
- 189.T. Fujisawa, "Time-dependent phenomena of a quantum dot in the Coulomb blockade rehgame" The 10th JST Int. Symp. on Quantum Computing, Mar. 12-14, Tokyo (2002).
- 190.T. Itakura and Y. Tokura, "Decoherence due to background charge fluctuations", The 10th JST Int. Symp. on Quantum Computing, Mar. 12-14, Tokyo (2002).
- 191.S. Sasaki, S. Amaha, N. Asakawa, W. Izumida, K. Ono, K. Muraki, and S. Tarucha, "The Kondo effect in vertical quantum dots with orbital degeneracy", International Symposium on mesoscopic superconductivity and spintronics, Mar. 4-6, Atsugi (2002).
- 192.S. Tarucha: Interactions and spin effects in two-site quantum dot hubbard system, International Symposium on mesoscopic superconductivity and spintronics, Mar. 4-6, Atsugi (2002).
- 193.K. Hirakawa: " Photoionization of Self-Assembled InAs Quantum Dots and Its Application to High-Sensitivity Infrared Photodetection ", International Workshop on "Nano-Physics and Electronics" "Quantum Dots and Related Nanostructures: Physics and Electronics Applications ", Komaba, Tokyo, March 8 (2002).
- 194.K. Hoshino, K. Hirakawa, and Y. Arakawa: "Observation of intersubband transition from the first to the third subband (e1-e3) in GaN/AlGaIn quantum wells", 4th International Symposium on Blue Laser and Light Emitting Diodes, Mar. Cordoba, Spain, (2002).
- 195.M. Koashi: "Compressibility and teleportation cost of quantum mixed-state signals", EURESCO Conference on Qunatum information: Quantum Entanglement, Mar. 23-28, San Feliu, Spain (2002).
- 196.S. Tarucha: Control over spin effects in semiconductor Quantum dots, International workshop on "Nano-Physics & Electronics"" Quantum Dots & Related Nanostructures"" Physics and Electronics Applications",Mar. 8, Tokyo(2002).
- 197.Y. Hirayama and Y. Tokura, "Point contact conductance in backgated heterostructures", Electro-Chemical Society Centennial Celebration 201st Meeting (ECS201), Philadelphia (2002). [invited]
- 198.S. Tarucha, "Interactions and spin effects in coupled quantum dot structures", Spin and Interactions in Mesoscopic Systems, May 10-12, University of Minnesota (2002). [invited]
- 199.H. Yamaguchi and Y. Hirayama, "Fabrication and Characterization of Novel Semiconductor Nanomechanical Structures", 7th International Conference on Nanometer-scale Science and Technology (NANO-7), Jun. 24-28, Malmo (2002).
- 200.K. Kanisawa, T. Kita, Y. Tokura, H. Yamaguchi, S. Yamada, and Y. Hirayama, "Scanning Tunneling Spectroscopy Study of Zero-dimensional States of Semiconductor Nanostructures", 7th International Conference on Nanometer-scale Science and Technology (NANO-7), Jun. 24-28, Malmo(2002).
- 201.T. Fujisawa, "Spin relaxation in semiconductor artificial atoms -- energy relaxation time and nonequilibrium transport", 7th International Conference on Nanometer-scale Science and Technology (NANO-7), Jun. 24-28, Malmo (2002). [invited]
- 202.M. Koashi : "What can be done without disturbing states of a system? / Compressibility of general mixed-state signals," KIAS-APCTP Workshop on Quantum Information, Jun. 28-29, Seoul (2002).[invited]
- 203.K.Ono, "Energy and spin relaxation in tunneling between quantum dot", RATO symposium, Jul. 26-27, Delft. [invited]
- 204.S. Amaha, M. Rontani, F. Manghi, M. Molinari, D.G. Austing, K. Ono, S. Tarucha,

- "Molecular Phases in vertically coupled quantum dots", RATO symposium, Jul. 26-27, Delft.
- 205.S. Sasaki, "The Kondo effect in quantum dots with novel spin configurations", RATO symposium, Jul. 26-27, Delft.
 - 206.T. Fujisawa, "Inelastic spin relaxation and non-equilibrium tunneling in a quantum dot", RATO symposium, Jul. 26-27, Delft. [invited]
 - 207.Y. Hirayama, "Electrical manipulation of nuclear spin polarization by quantum Hall states", ERATO symposium, Jul. 26-27, Delft. [invited]
 - 208.K. Hoshino, T. Someya, K. Hirakawa, and Y. Arakawa: "Observation of normally forbidden transition from the first to the third conduction subband in GaN/AlGaIn quantum wells", 26th Int. Conf. Phys. Semicond. (ICPS26), Jul.29-Aug.1, Edinburgh (2002).
 - 209.K. Muraki, J. G. S. Lok, S. Kraus, W. Dietsche, K. von Klitzing, D. Schuch, M. Bichler, and W. Wegscheider, "Low-temperature anomalies in magnetotransport at higher Landau levels", 26th Int. Conf. Phys. Semicond. (ICPS26), Jul.29-Aug.1, Edinburgh (2002).
 - 210.K. Ono, "Transport Detection of NMR in Spin-blocked Double Quantum Dot", 26th Int. Conf. Phys. Semicond. (ICPS26), Jul.29-Aug.1, Edinburgh (2002).
 - 211.K. Ono, K. Uchida, N. Miura, and Y. Hirayama, "Photoluminescence of GaAs/AlAs heterostructures in high magnetic fields and uniaxial pressure", 26th Int. Conf. Phys. Semicond. (ICPS26), Jul.29-Aug.1, Edinburgh (2002).
 - 212.M. Yamamoto, M. Stopa, Y. Tokura, Y. Hirayama, and S. Tarucha, "Negative drag in parallel quantum wires", 26th Int. Conf. Phys. Semicond. (ICPS26), Jul.29-Aug.1, Edinburgh (2002).
 - 213.S. Amaha, M. Rontani, F. Manghi, M. Molinari, D.G. Austing, K. Ono, S. Tarucha, "Molecular Phases in vertically coupled quantum dots", 26th Int. Conf. Phys. Semicond. (ICPS26), Jul.29-Aug.1, Edinburgh (2002).
 - 214.T. Fujisawa, "Inelastic spin relaxation in a quantum dot", 26th Int. Conf. Phys. Semicond. (ICPS26), Jul.29-Aug.1, Edinburgh (2002).[invited]
 - 215.Y. Harada, T. Akazaki, H. Tamura, K. Matsuda, T. Kimura, Y. Hirayama, H. Takayanagi, "Observations of Magnetoresistance Oscillations in a Quantum Dot Array System", 26th Int. Conf. Phys. Semicond. (ICPS26), Jul.29-Aug.1, Edinburgh (2002).
 - 216.Y. Nishi, S. Amaha, H. Imamura, D.G. Austing, K. Ono, L.P. Kouwenhoven, and S. Tarucha, "Magic number states and shell structure of a few-electron vertical quantum dot under high magnetic field", 26th Int. Conf. Phys. Semicond. (ICPS26), Jul.29-Aug.1, Edinburgh (2002).
 - 217.Y. Shimada and K. Hirakawa: "Crossover of miniband, Wannier-Stark quantization, and Zener tunneling regimes in wide miniband superlattices investigated by time-domain terahertz spectroscopy", 26th Int. Conf. Phys. Semicond. (ICPS26), Jul.29-Aug.1, Edinburgh (2002).
 - 218.Y. Tokura, "Spin fluctuation and transport anomaly in a quantum point contact", 26th Int. Conf. Phys. Semicond. (ICPS26), Jul.29-Aug.1, Edinburgh (2002).
 - 219.S. Sasaki, N. Asakawa, S. Amaha, W. Izumida and S. Tarucha, "The singlet-triplet Kondo effect in a vertical quantum dot holding two electrons", Physics and Application of spin Related Phenomena in Semiconductors (PASPS2002), July 23-26, Wurzburg (2002).
 - 220.N. Imoto, M. Koashi, S. K. Ozdemir, and T. Yamamoto : "Quantum Information and its Manipulation using Linear Optics, " International Conference on Quantum

- Communication, Measurement and Computing, July 22-26, Boston (2002). [invited]
221. K. Hirakawa, Y. Shimada, and S. Madhavi, "Dynamical carrier transport and terahertz emission in semiconductor superlattices - searching for terahertz gain in semiconductor superlattices-", 10th MEL-ARI/NID Workshop, July 1-3, Helsinki, Finland (2002) [invited].
 222. S. Tarucha, "Interactions and Spins in Quantum Dot Atoms and Molecules," Chaos and Interactions: from Nuclei to Quantum Dots, Jul.-Sep., Seattle (2002) [invited]
 223. S. Tarucha: "Control of Spin Effects in Artificial Semiconductor Molecules and the Ability for Making Quantum Bits and Entanglement", The Second Asia Pacific Conference on Few-Body Problems in Physics (APFB02), Aug.27-30, Shanghai (2002).
 224. A. Sawada, D. Terasawa, N. Kumada, Z. F. Ezawa, K. Muraki, T. Saku, and Y. Hirayama, "Continuous Change from Skyrmion- to Pseudospin-type Excitation", The 23rd International Conference on Low Temperature Physics (LT-23), Aug. 21-27, Hiroshima, (2002).
 225. K. Muraki, T. Saku, and Y. Hirayama, "Charge excitation and transport in pseudospin quantum Hall ferromagnets", The 23rd International Conference on Low Temperature Physics (LT-23), Aug. 21-27, Hiroshima, (2002).
 226. N. Asakawa, S. Sasaki, W. Izumida, S. Amaha, S. Tarucha, "Singlet-triplet and Triplet Kondo Effect in a Two-electron Quantum Dot", The 23rd International Conference on Low Temperature Physics (LT-23), Aug. 21-27, Hiroshima, (2002).
 227. S. Tarucha, "Spins and Interactions in Semiconductor Double Dot Systems", The 23rd International Conference on Low Temperature Physics (LT-23), Aug. 21-27, Hiroshima, (2002). [invited]
 228. T. Yamazaki, T. Machida, K. Ikushima, K. Muraki, Y. Hirayama, and S. Komiyama, "Pulsed-mode operation of nuclear spin polarization in integer quantum Hall systems", The 23rd International Conference on Low Temperature Physics (LT-23), Aug. 21-27, Hiroshima, (2002).
 229. T. Sigehuzi, "Development of Dual-probe Scanning Near-field Optical Microscope", The 7th Int. Conf. on Near-field Optics and Related Techniques, Aug. 13, Rochester (2002).
 230. T. Tokizaki, T. Onuki, T. Tsuchiya and H. Yokoyama, "Near-field observation of carrier diffusion in GaAs quantum structures under high magnetic fields", The 7th Int. Conf. on Near-field Optics and Related Techniques, Aug. 12, Rochester (2002).
 231. K. Hashimoto, K. Muraki, T. Saku and Y. Hirayama, "Effect on Confinement Potential Symmetry on the Nuclear Spin Polarization at the $\nu = 2/3$ Spin Transition", 15th International Conference on High Magnetic Fields in Semiconductor Physics (SemiMag 15), Oxford (2002).
 232. K. Suzuki, S. Miyashita and Y. Hirayama, "Quantum-Hall-Effect in back-gated InAs/(AlSb)/GaSb heterostructures", 15th International Conference on High Magnetic Fields in Semiconductor Physics (SemiMag 15), Oxford (2002).
 233. K. Hirakawa, Y. Shimada, and S. Madhavi: "High-frequency conductivity in semiconductor superlattices -THz gain due to Bloch oscillations-", UK-Japan10+10 Meeting on Semiconductor Physics and Devices, Aug. 2-4, Durham, U. K., (2002).
 234. S. Sasaki, N. Asakawa, S. Amaha, W. Izumida and S. Tarucha: "The Kondo effect in a $S=0/S=1$ quantum dot", International conference on quantum transport and quantum coherence, Aug.16-19, Tokyo (2002).
 235. K. Nagata, M. Koashi, N. Imoto : " The maximum expectation of Bell's operators and

- confirming multipartite entanglement, " ERATO Quantum Computation and Information Symposium, Sep. 5-8, University of Tokyo, Tokyo (2002).
236. K. Tamaki, M. Koashi, N. Imoto : " A counter-intuitive phenomenon in Eve's information gain in two-state quantum communication, " ERATO Quantum Computation and Information Symposium, Sep. 5-8, University of Tokyo, Tokyo (2002).
237. M. Koashi : " Compressibility and nature of information, " ERATO Quantum Computation and Information Symposium, Sep. 5-8, University of Tokyo, Tokyo (2002). [invited]
238. S. K. Ozdemir, Yu-xi Liu, A. Miranowicz, M. Koashi, N. Imoto : " Fidelity of teleportation through noisy channels, " ERATO Quantum Computation and Information Symposium, Sep. 5-8, University of Tokyo, Tokyo (2002).
239. T. Yamamoto, M. Koashi, S. K. Ozdemir, N. Imoto : " Experimental study of entanglement manipulation using parametric down-conversion, " ERATO Quantum Computation and Information Symposium, Sep. 5-8, University of Tokyo, Tokyo (2002).
240. H. Yamaguchi and Y. Hirayama, "Application of Multistep Formation during Molecular Beam Epitaxy for Fabrication Novel Nanomechanical Structures", 12th International Conference of Molecular Beam Epitaxy (MBE-XII), Sept.15-20, San Francisco (2002).
241. H. Yamaguchi, S. Miyashita, and Y. Hirayama, "InAs/AlGaSb Heterostructure Stress Sensor for MEMS/NEMS Applications", 12th International Conference of Molecular Beam Epitaxy (MBE-XII), Sept. 15-20, San Francisco (2002).
242. K. Ono, "Electron and nuclear spin dependent transport in double quantum dot", 2nd International Conference on Semiconductor Quantum Dots -QD2002- , Sep 30-Oct 3, Tokyo (2002). [invited]
243. M. Rontani , S. Amaha , D.G. Austing , K. Ono , D. Bellucci , G. Goldoni , F. Manghi , E. Molinari , S. Tarucha, "Molecular Phases in Coupled Quantum Dots, 2nd International Conference on Semiconductor Quantum Dots -QD2002- , Sep 30-Oct 3, Tokyo (2002).
244. T. Hayashi, T. Fujisawa, and Y. Hirayama, "Spin state in a quantum dot with asymmetric barriers", 2nd International Conference on Semiconductor Quantum Dots -QD2002- , Sep 30-Oct 3, Tokyo (2002).
245. W.G. van der Wiel , S. De Franceschi , J. Motohisa , F. Nakajima , J.M. Elzerman, R. Hanson, T. Fujisawa , T. Fukui, S. Tarucha , L.P. Kouwenhoven, "Novel aspects of the Kondo effect probed by quantum dots", 2nd International Conference on Semiconductor Quantum Dots -QD2002- , Sep 30-Oct 3, Tokyo (2002). [invited]
246. H. D. Cheong, T. Fujisawa, T. Hayashi, Y. H. Jeong and Y. Hirayama, "Impedance Analysis of a Radio-Frequency Single Electron Transistor", International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM), Sep. 17-19, Nagoya (2002)
247. K. Hirakawa: "Dynamical carrier transport in semiconductor superlattices - gain in the THz regime -", 2nd International Workshop on Quantum Nonplanar Nanostructures and Nanoelectronics, Sep. 9-11, Tsukuba (2002) [invited].
248. S. Tarucha, "Spin effects in quantum dot atoms and molecules", COST P5 Workshop- Mesoscopic Electronics-, Oct.17-19, Catania, Italy (2002). [invited]
249. T. Fujisawa, "Dynamics of single-electron charge and spin in quantum dots", Int. Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM10), Hawaii (2002). [invited]
250. H. Yamaguchi, S. Miyashita, and Y. Hirayama, "InAs/AlGaSb Heterostructure Displacement Sensors", 29th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2002), Oct.7-10, Lausanne (2002).

251. K. Kanisawa, Y. Tokura, H. Yamaguchi, and Y. Hirayama, "Characterization of zero-dimensional resonance states in an InAs quantum structure using scanning tunneling spectroscopy", 29th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2002), Oct.7-10, Lausanne (2002).
252. S. Tarucha, "Spin effects in quantum dots with the ability for making spintronic devices", 29th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2002), Oct.7-10, Lausanne (2002). [**invited**]
253. H. Yamaguchi, K. Kanisawa, Y. Tokura, and Y. Hirayama, "Structural and Electrical Characterization of InAs/GaAs (111)A Heterostructures by Scanning Tunneling Microscopy and Spectroscopy", 2nd International Workshop on Nano-scale Spectroscopy and Nanotechnology, Tokyo (2002) [**invited**].
254. S. Tarucha, "Interactions and spins in Quantum dot molecules", The 6th Symposium on Spin-Charge-Photon (SCP) Coupled Systems, Nov. 18-20, Tokyo (2002). [**invited**]
255. N. Imoto, "Preparation and Mode Matching Problem", Waseda International Symposium on Fundamental Physics - New Perspectives in Quantum Physics, Waseda University, Nov.12-15, Tokyo (2002) [**invited**]
256. H. Yamaguchi, K. Kanisawa, Y. Tokura, and Y. Hirayama, "Structural and Electrical Characterization of InAs/GaAs (111)A Heterostructures by Scanning Tunneling Microscopy and Spectroscopy", 2nd International Workshop on Nano-scale Spectroscopy and Nanotechnology, Tokyo (2002) [**invited**].
257. M. Koashi : "Indistinguishability and compressibility of quantum states," Workshop on Quantum Information, Nov. 4-8, Cryptography and Error Correction Mathematical Sciences Research Institute, Berkeley, USA (2002). [**invited**]
258. H. Yamaguchi, S. Miyashita, and Y. Hirayama, "InAs-based MEMS/NEMS systems", 10th Advanced Heterostructure Workshop (AHW2002), Dec.1-6, Hawaii (2002).
259. Y. Hirayama, K. Hashimoto, K. Muraki and T. Saku, "Electrical control of electron spin - nuclear spin interaction in semiconductor heterostructures", 10th Advanced Heterostructure Workshop (AHW2002), Dec.1-6, Hawaii (2002).
260. Wataru Izumida, Osamu Sakai, and Seigo Tarucha: "Singlet-triplet Kondo effect in tunneling through a quantum dot", FOM meeting, Dec.17-18, Veldhoven (The Netherlands) (2002).
261. S. Tarucha (representative K. Ono), "Spin Effects In Hydrogen-Molecule Like Quantum Dot Systems", MRS2002 Fall Meeting, Dec.1-6, Boston (2002). [**invited**]
262. H. Yamaguchi and Y. Hirayama, "Novel Semiconductor Nanomechanical Structures using Self-organized Growth Technique", 1st International Conference and School on Nanoscale/Molecular Mechanics (N/M2), Maui (2002).
263. W.G. van der Wiel, "Microwave electron spin manipulation in semiconductor artificial atoms and molecules", The 8th Symposium on the Physics and Application of Spin Related Phenomena in Semiconductors (PASPS8), Dec. 19-20, Sendai (2002).
264. Y. Tokura, "Slow spin fluctuation and transport anomaly in a quantum point contact", the workshop on Mesoscopic Physics and Electron Interaction, Trieste (2002).
265. Kiyoshi Kanisawa, Yasuhiro Tokura, Hiroshi Yamaguchi, and Y. Hirayama, "Scanning tunneling spectroscopy study of zero-dimensional structures at the InAs surface", PCSI-30, Jan. 22, Salt Lake City, U.S.A. (2003) [**invited**]
266. K. Hirakawa, Y. Shimada, M. Odnoblioudov, and K. A. Chao: "Dynamical carrier transport and terahertz gain in semiconductor superlattices", Photonics West (Ultrafast

- Phenomena in Semiconductors VII), Jan. 25-31, San Jose. (2003) [invited]
267. K. Kanisawa, Y. Tokura, H. Yamaguchi, and Y. Hirayama, "Direct probing of local-density-of-states in semiconductor nanostructures", Photonics West (Ultrafast Phenomena in Semiconductors VII), 4999-43, Jan.25-31, San Jose (2003). [invited]
 268. S. Tarucha, "Technology Build - up for Implementing Quantum dot Spin Qubits", Workshop on Quantum Computing, Joint meeting of the DARPA and NCCR, Feb. 12-16, Lenzerheide, Switzerland (2003) [invited]
 269. S. Tarucha, "Spins and Kond effect in quantum dots", The 4th International Symposium on Nanostructure and Mesoscopic System, Feb.17-22, Arizona (2003) [invited]
 270. H. Yamaguchi, S. Miyashita, and Y. Hirayama, "Fabrication and Characterization of InAs-based Electromechanical Systems", 2003 RCIQE International Seminar on Quantum Nanoelectronics, Sapporo (2003). [invited]
 271. G. Yusa, K. Muraki, T. Saku, Y. Hirayama, "Transport Properties of Coupled Quantum Wires in the Magnetic Field", International Symposium on Carrier Interactions and Spintronics in Nanostructures (CISN2003), March 10 - 12, Atsugi (2003).
 272. H. Yokoyama, T. Sato, K. Ono, Y. Hirayama, S. Tarucha, "Transport Properties of a Quantum Wire with a Tunable Double Potential Barrier", International Symposium on Carrier Interactions and Spintronics in Nanostructures (CISN2003), March 10 - 12, Atsugi (2003).
 273. Hiroshi Yamaguchi, Sen Miyashita, Yoshiro Hirayama, "Piezoresistivity in InAs/AlGaSb Heterostructures", International Symposium on Carrier Interactions and Spintronics in Nanostructures (CISN2003), March 10 - 12, Atsugi (2003).
 274. K. Hashimoto, K. Muraki, T. Saku, Y. Hirayama, "Suppression of the Interaction between Nuclear Spins and the Fractional Quantum Hall State by the Confinement Potential Asymmetry", International Symposium on Carrier Interactions and Spintronics in Nanostructures (CISN2003), March 10 - 12, Atsugi (2003).
 275. K. Hirakawa, Y. Shimada, and S. Madhavi: "Bloch oscillations and inversionless gain in semiconductor superlattices", International Symposium on Carrier Interactions and Spintronics in Nanostructures (CISN2003), March 10 - 12, Atsugi (2003).
 276. K. Ono, "All-Electrical Nuclear Spin Manipulation in Quantum Dots", International Symposium on Carrier Interactions and Spintronics in Nanostructures (CISN2003), March 10 - 12, Atsugi (2003).
 277. K. Tamaki, M. Koashi, and N. Imoto, "Unconditionally secure key distribution based on two nonorthogonal states", International Symposium on Carrier Interactions and Spintronics in Nanostructures (CISN2003), March 10 - 12, Atsugi (2003).
 278. Kiyoshi Kanisawa, Yasuhiro Tokura, Hiroshi Yamaguchi, Yoshiro Hirayama, "Scanning Tunneling spectroscopy Study of Zero-Dimensional States in InAs Nanostructures", International Symposium on Carrier Interactions and Spintronics in Nanostructures (CISN2003), March 10 - 12, Atsugi (2003).
 279. Kyoichi Suzuki, Sen Miyashita, Kei Takashina, Yoshiro Hirayama, "Boundaries of Quantum Hall Effect in InAs/GaSb Electron-Hole Systems", International Symposium on Carrier Interactions and Spintronics in Nanostructures (CISN2003), March 10 - 12, Atsugi (2003).
 280. M. Jung, S.-W. Lee, and K. Hirakawa: "Lateral Single Electron Transistors using InAs Self-Assembled Quantum Dots", International Symposium on Carrier Interactions and Spintronics in Nanostructures (CISN2003), March 10 - 12, Atsugi (2003).

281. M. Stopa, W. van der Wiel, S. De Franceschi, S. Tarucha and L. Kouwenhoven, "Magnetically induced chessboard pattern in the conductance of a Kondo quantum dot", International Symposium on Carrier Interactions and Spintronics in Nanostructures (CISN2003), March 10 - 12, Atsugi (2003).
282. N. Imoto, "Multi-qubit operation with linear optics and state reduction", International Symposium on Carrier Interactions and Spintronics in Nanostructures (CISN2003), March 10 - 12, Atsugi (2003).
283. S. K. Ozdemir, T. Yamamoto, Y. X. Liu, M. Koashi and N. Imoto, "Performance of quantum nonlinear sign change gates", International Symposium on Carrier Interactions and Spintronics in Nanostructures (CISN2003), March 10 - 12, Atsugi (2003).
284. Satoshi Sasaki, Shinichi Amaha, Naoaki Asakawa, Seigo Tarucha, "Singlet-Triplet and Doublet-Doublet Kondo Effect in an Artificial Atom", International Symposium on Carrier Interactions and Spintronics in Nanostructures (CISN2003), March 10 - 12, Atsugi (2003).
285. Soichiro Teraoka, Aihiko Numata, Shin-ichi Amaha, Keiji Ono, Seigo Tarucha, "Electron spin resonance and nuclear spin pumping in 2DEG Quantum Hall system", International Symposium on Carrier Interactions and Spintronics in Nanostructures (CISN2003), March 10 - 12, Atsugi (2003).
286. T. Hayashi, T. Fujisawa, H. D. Cheong, Y. H. Jeong, Y. Hirayama, "Coherent Oscillation of an electric Dipole in a Double Quantum Dot", International Symposium on Carrier Interactions and Spintronics in Nanostructures (CISN2003), March 10 - 12, Atsugi (2003).
287. T. Onuki, T. Tokizaki, H. Yokoyama, "Spatial and Temporal Observation of Photocarrier Diffusion in Two-Dimensional Electron Systems under Magnetic Fields", International Symposium on Carrier Interactions and Spintronics in Nanostructures (CISN2003), March 10 - 12, Atsugi (2003).
288. T. Tokizaki, H. Yokoyama, "Microscopic Observation of Carrier Diffusion in GaAs Quantum Structures under Magnetic Fields", International Symposium on Carrier Interactions and Spintronics in Nanostructures (CISN2003), March 10 - 12, Atsugi (2003).
289. T. Yamamoto, M. Koashi, S. K. Ozdemir, and N. Imoto, "Experimental extraction of entangled pair from decohered photon pairs", International Symposium on Carrier Interactions and Spintronics in Nanostructures (CISN2003), March 10 - 12, Atsugi (2003).
290. Takeshi Inoshita and Seigo Tarucha, "Theory of hyperfine-induced current instability in double quantum dots in the spin blockade regime", International Symposium on Carrier Interactions and Spintronics in Nanostructures (CISN2003), March 10 - 12, Atsugi (2003).
291. W. G. van der Wiel, "Single-electron spin manipulation in quantum dots", International Symposium on Carrier Interactions and Spintronics in Nanostructures (CISN2003), March 10 - 12, Atsugi (2003).
292. Yoshiro Hirayama, "Semiconductor Qubits", International Symposium on Carrier Interactions and Spintronics in Nanostructures (CISN2003), March 10 - 12, Atsugi (2003).
293. S. Tarucha, "Spins and Exchange Coupling in Quantum Dot Structures", Gordon Research Conference on Quantum Information Science, Mar. 23-28, Ventura (2003).

[invited]

294. W.G. van der Wiel, "High-frequency single-electron spin manipulation in semiconductor quantum dots", Gordon Research Conference on Quantum Information Science, Mar. 23-28, Ventura (2003).
295. W.G. van der Wiel: "Coherent electron spin phenomena in quantum dots", Stanford University solid state seminar, Stanford University (USA) Mar.20 (2003).
296. T. Fujisawa, "Single electron dynamics in quantum dots", Sweden-Japan Nanotechnology Colloquium, Lund (2003). [invited]
297. S. Tarucha, "Dynamical Properties of Spin States in Quantum Dot Structures", Materials Research Society Spring Meeting 2003, Apr. 21-25, San Francisco (2003). [invited]
298. S. K. Ozdemir, T. Yamamoto, M. Koashi, and N. Imoto, "Quantum state and entanglement manipulation with linear optics", Summer school on Quantum computation at the atomic scale (QCAS 2003), June 1-11, Istanbul (2003) [invited]
299. S. Tarucha, "Manipulation of Spin Effects in Quantum Dot Structures", CREST & QNN '03 Joint International Workshop, July 21-23, Awaji (2003). [invited]
300. K. Takashina, Y. Hirayama, A. Fujiwara and Y. Takahashi, "A Silicon Bi-layer System", The 15th Int. Conf. on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-15), July 14-18, Nara (2003).
301. P.A. Maksym, Y. Nishi, S. Tarucha, and H. Aoki, "Addition spectrum of few-electron quantum dots: Electron molecule, MDD and FQH states", The 15th Int. Conf. on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-15), July 14-18, Nara (2003).
302. S. Tarucha, "Manipulation of Electron Spin and Nuclear Spin in Double Quantum Dot System", The 15th Int. Conf. on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-15), July 14-18, Nara (2003). [invited]
303. S. Teraoka, I. Numata, S. Amaha, K. Ono, and S. Tarucha, "Electron Spin Resonance and Nuclear Spin Pumping in 2 DEG Quantum Hall System", The 15th Int. Conf. on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-15), July 14-18, Nara (2003).
304. T. Hayashi, T. Fujisawa, H. D. Cheong, Y. H. Jeong, Y. Hirayama, "Decoherence of electric dipole rotation in a double quantum dot", The 15th Int. Conf. on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-15), July 14-18, Nara (2003).
305. Hiroshi Yamaguchi, Sen. Miyashita, and Yoshiro Hirayama, "Quantum-mechanical Displacement Sensing using InAs/AlGaSb Micromechanical Cantilevers", 11th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS11), Nara, July 14-18 (2003)
306. M. Jung and K. Hirakawa: "Lateral electron transport through single InAs quantum dots", 11th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS11), Nara, July 14-18 (2003)
307. N. Sekine, Y. Shimada, and K. Hirakawa: "Bloch Gain in AlGaAs/GaAs Semiconductor Superlattices", 11th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS11), Nara, July 14-18 (2003)
308. S. Teraoka, A. Numata, S. Amaha, K. Ono, S. Tarucha, "Electron Spin Resonance and Nuclear Spin Pumping in 2DEG Quantum Hall System", 11th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS11), Nara, July 14-18 (2003)
309. Y. Shimada, N. Sekine, and K. Hirakawa: "Inter-miniband Resonant Zener Tunneling in

- Wide-Miniband GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As Superlattices Investigated by THz Emission Spectroscopy", 11th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS11), Nara, July 14-18 (2003)
- 310.K. Suzuki, S. Miyashita, K. Takashina, and Y. Hirayama, "Quantum Hall effect in back-gated InAs/GaSb heterostructures under a tilted magnetic field", NGS-11, July 18, Baffalo, U.S.A. (2003)
 - 311.K. Muraki, K. Hashimoto, T. Saku, and Y. Hirayama, "Hysteretic transport due to a single potential barrier in the $\nu=2/3$ quantum Hall state", International Symposium on Quantum Hall Effect, July 3, Stuttgart, (2003)
 - 312.Y. Hirayama, "Quantum Hall effects at Landau Level Crossings", International Symposium on Quantum Hall Effect, July 4, Stuttgart, (2003) [invited]
 - 313.K. Hirakawa, N. Sekine, and Y. Shimada: "Bloch gain in semiconductor superlattices", UK-Japan 10+10 Meeting on Nanoelectronics, Jul. 18–19, Toba (2003)
 - 314.K. Hirakawa: "Bloch gain in semiconductor superlattices", US-Japan Workshop on "Frontiers of Nanoscale Science and Technology", July 10-12, Tokyo (2003) [invited]
 - 315.M. Jung and K. Hirakawa: "Single electron transport through single InAs quantum dots probed by nanogap electrodes", US-Japan Workshop on "Frontiers of Nanoscale Science and Technology", July 10-12, Tokyo (2003)
 - 316.N. Sekine, Y. Shimada, and K. Hirakawa: "Bloch gain in semiconductor superlattices", US-Japan Workshop on "Frontiers of Nanoscale Science and Technology", July 10-12, Tokyo (2003)
 - 317.S. Tarucha, "Electron Spins and Nuclear Spins in Semiconductor Quantum Dots", US-Japan Workshop on "Frontiers of Nanoscale Science and Technology", July 10-12, Tokyo (2003) [invited]
 - 318.Yoshiro Hirayama, "Carrier Interaction and Carrier Coherent Control in Semiconductor System", US-Japan Workshop on "Frontiers of Nanoscale Science and Technology", July 10-12, Tokyo (2003) [invited]
 - 319.Keiji Ono and Seigo Tarucha, "Spin and nuclear spin dependent transport in quantum dots", Int. Summer School of ISSP, Aug. 15, Kashiwa. (2003)
 - 320.M. Yamamoto, M. Stopa, Y. Hirayama, Y. Tokura and S. Tarucha, "Coulomb drag between parallel quantum wires", Int. Summer School of ISSP, Aug. 18, Kashiwa. (2003)
 - 321.S. Tarucha, "Fabrication, Transport Properties and Interaction Effects of Quantum Wires", Int. Summer School of ISSP, Aug. 18, Kashiwa. (2003) [invited]
 - 322.Yoshiro Hirayama, "Physics and technology in quantum point contacts", Int. Summer School of ISSP, Aug. 18, Kashiwa. (2003) [invited]
 - 323.T. Hayashi, T. Fujisawa, H.D. Cheong, Y.H. Jeong, and Y. Hirayama, "Coherent charge oscillation in a semiconductor double quantum dot", IWQDQC, Aug. 7, South Bend City, U.S.A. (2003)
 - 324.S. Tarucha, "Manipulation of Electron Spin and Nuclear Spin in Semiconductor Quantum Dots", 2nd Int. Workshop on Quantum Dots for Quantum Computing and classical Size Effect Circuits, Aug.7-9, Univ. of Notre Dame, USA (2003). [invited]
 - 325.S. Tarucha, "Control of Electron Spin in Quantum Dots Current status and prospects - of technologies", Spintech 2 Int. Conf. and School, Panel discussion, Aug.4-8, Brugge (2003). [invited]
 - 326.Jun-ichi Shimamura, Sahin Kaya Ozdemir, Fumiaki Morikoshi, and Nobuyuki Imoto, "Effect of a corrupted source in Samaritan's Dilemma", ERATO Conference on Quantum

- Information Science, Sep. 5, (2003)
327. K. Hirakawa, N. Sekine, Y. Shimada, M. Odnoblioudov, and K. A. Chao: "Bloch gain in semiconductor superlattices", 28th International Conference on Infrared and Millimeter Waves (IRMMW2003), Otsu, Japan Sep. 29 - Oct. 2 (2003)
 328. N. Sekine, Y. Shimada, and K. Hirakawa: "Relaxation mechanism of Bloch oscillations in AlGaAs/GaAs superlattices investigated by time-domain terahertz spectroscopy", International Conference on Intersubband Transitions in Quantum Wells (ITQW2003), Sep. 1-5, Evolene (2003)
 329. N. Imoto, "Quantum information processing by linear optics", The 9th Japan-US Joint Seminar Quantum Correlation and Coherence, Sep.17-19, Yamanashi (2003). **[invited]**
 330. T. Yamamoto, M. Koashi, S. K. Ozdemir and N. Imoto, "Experimental extraction of an entangled photon pair from two decohered pairs", The 9th Japan-US Joint Seminar Quantum Correlation and Coherence, Sep.17-19, Yamanashi (2003).
 331. Hiroshi Yamaguchi, Sen Miyashita, Yoshiro. Hirayama, "Displacement sensing using Quantum Mechanical Interference", International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM), Sep. 16-18, Tokyo (2003)
 332. Kiyoshi Kanisawa, Simon Perraud, Hiroshi Yamaguchi, Yoshiro. Hirayama, "Molecular states of coupled zero-dimensional structures imaged using low-temperature scanning tunneling spectroscopy", International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM), Sep. 16-18, Tokyo (2003)
 333. Lionel Houlet, Hiroshi Yamaguchi, Sen Miyashita, Yoshiro. Hirayama, "Piezoresistive Nanomechanical Cantilever based on InAs/AlGaSb Heterostructure", International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM), Sep. 16-18, Tokyo (2003)
 334. M. Jung and K. Hirakawa: "Single electron transport through single InAs quantum dots probed by nanogap electrodes", International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM), Sep. 16-18, Tokyo (2003)
 335. N. Sekine, Y. Shimada, and K. Hirakawa: "Bloch gain in AlGaAs/GaAs superlattices investigated by time-domain THz emission spectroscopy", 11th IEEE International Conference on Terahertz Electronics (THz2003), Sep. 24-26, Sendai (2003)
 336. Y. Shimada, N. Sekine, and K. Hirakawa: "Inter-miniband Resonant Zener Tunneling in Wide-Miniband GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As Superlattices Investigated by THz Emission Spectroscopy", 11th IEEE International Conference on Terahertz Electronics (THz2003), Sep. 24-26, Sendai (2003)
 337. Yoshiro Hirayama, "Electronic States and Their Control in Semiconductor Quantum Dots", Trends in Nanotechnology (TNT2003), Sep. 18, Spain (2003) **[invited]**
 338. Hiroshi Yamaguchi, Sen Miyashita, and Yoshiro Hirayama, Mechanical and piezoresistive properties of InAs/AlGaSb cantilevers, ACSIN7, Nov. 16-20, Nara (2003) (to be presented)
 339. Hajime Okamoto, Tsutomu Nakanishi, Yukiko Nagai, Tetsuo Yamada, Hiroshi Miyazaki, Kyozauro Takeda, Yukio Furukawa, Ikuo Obataya, Hisakazu Mihara, Hiroaki Azebara, Wataru Mizutani, Katsushi Hashimoto, Hiroshi Yamaguchi, and Yoshiro Hirayama, "A Study of the Self-Assembling Morphology in Peptide Nanorings and Nanotubes", MRS Conference Boston, U.S.A. (to be presented)

国内

1. 時崎高志, "有機薄膜の新しい評価法-高機能近接場光学顕微鏡の開発"平成12年度電気学会全国大会シンポジウム S8, "有機薄膜の構造制御と機能および評価法の新展開", 3月21日(1999)
2. 平川一彦、関根徳彦、M. Vosseburger, P. Haring-Bolivar, and H. Kurz: "フェムト秒レーザパルスによる量子井戸中2次元電子プラズマ振動の励起と緩和", 電子情報通信学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会、5月21日、金沢(1999)。
3. 樽茶清悟: "半導体人工分子の電子状態", 特別講演、超微粒子とクラスター懇談会第3回研究会、5月、東京(1999)。
4. 井上貴仁、横山浩: "走査型電気力顕微鏡", 電気学会分子超薄膜・有機薄膜及び界面の構造と機能調査専門委員会、6月3日(1999)
5. 李 承雄、平川一彦、島田洋蔵: "自己組織化 InAs 量子ドットを用いた変調ドープ横方向伝導型赤外光検出器", 電子情報通信学会技術研究報告(レーザ・量子エレクトロニクス研究会)、6月23日、東京 LQE-99、p29, (1999)。
6. 小貫、時崎、谷, "SNOM プローブチップによる金属薄膜のナノサイズ陽極酸化加工とその光学的観測", 第8回近接場光学研究グループ討論会、6月30日(1999)
7. 樽茶清悟: "人工分子の電子状態", 豊田工業大学コンボン研究所、8月(1999)。
8. 佐久 規、村木 康二、熊田 倫雄、平山 祥郎: "n-GaAs バックゲート二層 2DEG 構造の作製と伝導特性", 第60回応用物理学会学術講演会、9月1~4日、神戸(1999)
9. 川口 康、平川一彦、寶迫 巖、小宮山進: "量子ホール効果遠赤外光検出器の雑音特性", 第60回応用物理学会学術講演会、9月1~4日、神戸(1999)
10. 井上、伊藤、横山: "走査型マクスウェル応力顕微鏡用プローブのマイクロ波帯特性解析", 第60回応用物理学会学術講演会、9月1~4日、神戸(1999)
11. 関根徳彦、平川一彦、M. Vosseburger, P. Haring-Bolivar, and H. Kurz: "フェムト秒レーザパルスによる量子井戸中2次元電子プラズマ振動の励起機構", 第60回応用物理学会学術講演会、9月1~4日、神戸(1999)
12. 重藤 知夫、横山 浩: "デュアルプローブ近接場光学顕微鏡 IV", 第60回応用物理学会学術講演会、9月1~4日、神戸(1999)
13. 小貫、時崎、渡邊、谷, "SNOM プローブチップによる金属薄膜のナノサイズ陽極酸化加工と光学的観測", 第60回応用物理学会学術講演会、9月1~4日、神戸(1999)
14. 河島、古木、谷 "近接場プローブによるフェムト秒光スイッチ動作の観測", 第60回応用物理学会学術講演会、9月1~4日、神戸(1999)
15. 李 承雄、平川一彦、島田洋蔵: "自己組織化 InAs 量子ドットを用いた Bound-to-Continuum サブバンド間遷移赤外光検出", 第60回応用物理学会学術講演会、9月1~4日、神戸(1999)
16. Ph. Lelong、李 承雄、平川一彦、榊 裕之: "自己組織化 InAs 量子ドット中のサブバンド間遷移における Fano 共鳴", 第60回応用物理学会学術講演会、9月1~4日、神戸(1999)
17. 島田洋蔵、松野哲也、平川一彦: "フェムト秒レーザ照射による InAs からの THz 光発光の広帯域検出", 第60回応用物理学会学術講演会、9月1~4日、神戸(1999)
18. 松野哲也、島田洋蔵、平川一彦: "フェムト秒レーザ励起による PIN 構造からの THz 電磁波の発生", 第60回応用物理学会学術講演会、9月1~4日、神戸(1999)
19. 島田洋蔵、松野哲也、関根徳彦、平川一彦: "フェムト秒レーザー照射による半導体表面からの超短パルステラヘルツ光発光", 第3回テラフォトンクス研究会、9月16~17日、松島海岸(1999)。
20. 時崎、小貫、渡邊、谷, "近接場光学顕微鏡像における試料誘電率の影響", 日本物理学会秋の

- 分科会, 9月24~26日、岩手 (1999)
21. 樽茶清悟、D. G. Austing、都倉康弘、Wilferd van der Viel、Leo Kouwenhoven: “磁場中の人工原子におけるクーロン直接項と交換項-フント第一則との関係-”, 日本物理学会秋の分科会, 9月24~26日、岩手 (1999)
 22. 大野圭司、D. G. Austing、都倉康弘、樽茶清悟: “弱結合2重量子ドットの電気伝導II”, 日本物理学会秋の分科会, 9月24~26日、岩手 (1999)
 23. 平川一彦、榊原秀樹、田村航一: “遠赤外分光法を用いた電子の散乱と相互作用の研究-結合2重量子井戸系、超格子系-”, 戦略的基礎研究平山プロジェクト第一回関連エレクトロニクス研究会、11月15日、東京 (1999)
 24. 平川一彦、関根徳彦、島田洋蔵、松野哲也: “時間分解テラヘルツ分光法を用いたトンネル効果、プラズマ振動の実時間観測”, 戦略的基礎研究平山プロジェクト第一回関連エレクトロニクス研究会、11月15日、東京 (1999)
 25. 井元信之: “量子情報処理と qubit 制御精度”, 戦略的基礎研究平山プロジェクト第一回関連エレクトロニクス研究会、11月15日、東京 (1999)
 26. 清水薫: “光子の量子力学的性質をもちいた署名認証”, 戦略的基礎研究平山プロジェクト第一回関連エレクトロニクス研究会、11月15日、東京 (1999)
 27. 小芦雅斗: “データベース検索量子アルゴリズムの効率限界”, 戦略的基礎研究平山プロジェクト第一回関連エレクトロニクス研究会、11月15日、東京 (1999)
 28. 山本俊: “qubit 情報の転送について”, 戦略的基礎研究平山プロジェクト第一回関連エレクトロニクス研究会、11月15日、東京 (1999)
 29. 藤澤利正: “二準位系としての結合ドット-量子コンピュータに向けて-”, 戦略的基礎研究平山プロジェクト第一回関連エレクトロニクス研究会、11月15日、東京 (1999)
 30. 樽茶清悟: “単一量子ドット構造の電子相関とスピン制御”, 戦略的基礎研究平山プロジェクト第一回関連エレクトロニクス研究会、11月15日、東京 (1999)
 31. D. Austing: “Quantum dots with con-circular lateral confining potential”, 戦略的基礎研究平山プロジェクト第一回関連エレクトロニクス研究会、11月15日、東京 (1999)
 32. 大野圭司: “縦型二重量子ドット構造の共鳴トンネル”, 戦略的基礎研究平山プロジェクト第一回関連エレクトロニクス研究会、11月15日、東京 (1999)
 33. 平山祥郎: “バックゲートキャリアシステム”, 戦略的基礎研究平山プロジェクト第一回関連エレクトロニクス研究会、11月15日、東京 (1999)
 34. 鈴木恭一: “二次元電子ガス、正孔ガス、InAs/GaSb 電子・正孔近接系のサイクロトロン共鳴”, 戦略的基礎研究平山プロジェクト第一回関連エレクトロニクス研究会、11月15日、東京 (1999)
 35. 村木康二: “二層二次元電子系の伝導特性”, 戦略的基礎研究平山プロジェクト第一回関連エレクトロニクス研究会、11月15日、東京 (1999)
 36. 蟹沢聖: “低温 STM による InAs 表面二次元電子の直接観察”, 戦略的基礎研究平山プロジェクト第一回関連エレクトロニクス研究会、11月15日、東京 (1999)
 37. 時崎高志: “極低温強磁場下測定を目指した近接場光学顕微鏡”, 戦略的基礎研究平山プロジェクト第一回関連エレクトロニクス研究会、11月15日、東京 (1999)
 38. 重藤知夫: “デュアルプローブ近接場光学顕微鏡”, 戦略的基礎研究平山プロジェクト第一回関連エレクトロニクス研究会、11月15日、東京 (1999)
 39. 河島整: “フェムト秒時間分解近接場光学顕微鏡”, 戦略的基礎研究平山プロジェクト第一回関連エレクトロニクス研究会、11月15日、東京 (1999)
 40. 井上貴仁: “マイクロ波帯域計測用走査型マクスウェル応力顕微鏡”, 戦略的基礎研究平山プロジェクト第一回関連エレクトロニクス研究会、11月15日、東京 (1999)
 41. 平川一彦、李 承雄、Ph. Lelong、島田洋蔵、榊 裕之: “自己組織化 InAs 量子ドット中の

- サブバンド間遷移と Fano 共鳴", 特定領域研究 A(1)「単電子デバイスとその高密度集積化」平成 11 年度第 2 回研究会、11 月 4~5 日、東京 (1999) (チュートリアル講演)。
42. 平川一彦: "GaMnAs の光学伝導度", 下田ワークショップ、11 月 17~19 日、軽井沢 (長野) (1999)。
 43. 川口 康、平川一彦、山中宏治、小宮山進: "量子ホール効果を用いた超高感度遠赤外光検出", 第 7 4 回微小光学研究会「極限光学技術 -遠くを見る、極限に迫る-」、12 月 3 日、東京 (1999)。
 44. K. Hirakawa, S. Katsumoto, Y. Hasimoto, T. Hayashi, and Y. Iye: "Infrared Optical Conductivity of GaMnAs" 5th Symposium on the Physics and Application of Spin-Related Phenomena in Semiconductors, Dec. 16-17, Miyagi, p174 (1999)。
 45. 平川一彦、李 承雄、Ph. Lelong、榊 裕之: "自己組織化 InAs 量子ドット中のサブバンド間遷移を用いた高感度中赤外光検出と Fano 共鳴", 第 3 回「量子効果等の物理現象」シンポジウム、12 月 21~22 日、東京 (1999)。
 46. 樽茶清悟: "半導体人工原子/分子の電子相関", 第 12 回佐々木学術シンポジウム、12 月、茨城 (1999)。
 47. 平川一彦、川口 康、山中宏治、小宮山進: "量子ホール効果による高感度遠赤外光検出", センシング技術応用研究会第 47 回薄膜センサ技術分科会、1 月 12 日、神戸 (2000)。
 48. 宮下 宣、鈴木 恭一、平山 祥郎: "InAs 系二次元電子ガスのバックゲートによる制御", 第 47 回応用物理学関係連合講演会、3 月 28~31 日、東京 (2000)。
 49. 鈴木 恭一、佐久 規、村木 康二、平山 祥郎: "AlGaAs/GaAs 2 次元ガスの遠赤外光伝導", 第 47 回応用物理学関係連合講演会、3 月 28~31 日、東京 (2000)。
 50. 橋本 克之、宮下 宣、佐久 規、平山 祥郎: "バックゲートポイントコンタクト", 第 47 回応用物理学関係連合講演会、3 月 28~31 日、東京 (2000)。
 51. 河原塚 篤、佐久 規、都倉 康弘、堀越 佳治、平山 祥郎: "GaAs/AlGaAs アンダープロヘテロ構造上に形成したアンチッドトアレイの輸送特性", 第 47 回応用物理学関係連合講演会、3 月 28~31 日、東京 (2000)。
 52. 平川一彦、大岩 顕、宗片比呂夫: "III-V 族希薄磁性半導体 InMnAs の光学伝導度", 第 47 回応用物理学関係連合講演会、3 月 28~31 日、東京 (2000)。
 53. 広谷仁寿、李 承雄、Ph. Lelong、平川一彦: "InAs/GaAs 自己形成量子ドット中のサブバンド間遷移スペクトルと電子状態", 第 47 回応用物理学関係連合講演会、3 月 28~31 日、東京 (2000)。
 54. 松野哲也、島田洋蔵、平川一彦、荒川泰彦: "低温成長 GaAs MIN 構造からのフェムト秒レーザー励起による THz 電磁波の発生", 第 47 回応用物理学関係連合講演会、3 月 28~31 日、東京 (2000)。
 55. 蟹沢 聖、山口 浩司、平山 祥郎: "InAs 表面二次元電子の局所状態密度の低温 STM 観察", 第 47 回応用物理学関係連合講演会、3 月 28~31 日、東京 (2000)。
 56. 島田洋蔵、松野哲也、平川一彦、荒川泰彦: "GaAs/AlGaAs 半導体超格子構造中のミニバンド伝導とテラヘルツ放射", 第 47 回応用物理学関係連合講演会、3 月 28~31 日、東京 (2000)。
 57. 星野勝之、染谷隆夫、M. Helm、平川一彦、荒川泰彦: "AlGaIn/GaN 多重量子井戸サブバンド間光吸収スペクトルの井戸数依存性", 第 47 回応用物理学関係連合講演会、3 月 28~31 日、東京 (2000)。
 58. 李 承雄、平川一彦、島田洋蔵: "横方向伝導型量子ドット赤外光検出器: 光励起キャリアの寿命と感度", 第 47 回応用物理学関係連合講演会、3 月 28~31 日、東京 (2000)。
 59. 平山 祥郎、S. Nuttinck、橋本 克之、宮下 宣、山本 喜久、佐久 規: "ポイントコンタクトの $0.7(2e^2/h)$ 構造", 日本物理学会春の分科会、3 月 22~25 日、大阪 (2000)。
 60. 井元信之、小芦雅斗、山本俊: "コイン投げ的量子プロトコル", 日本物理学会春の分科会、

- 3月22～25日、大阪(2000).
61. 大野圭司、D. G. Austing、都倉康弘、樽茶清悟：“縦型2重量子ドットにおけるドット間トンネルのスピンプロセッサ”、日本物理学会春の分科会、3月22～25日、大阪(2000).
 62. 時崎、小貫、渡邊、谷、“低温強磁場下観測のための近接場光学顕微鏡”、日本物理学会春の分科会、3月22～25日、大阪(2000).
 63. 小芦雅斗、上田正仁：“スピン1および2のボーズ・アインシュタイン凝縮体の固有状態と磁場応答”、日本物理学会春の分科会、3月22～25日、大阪(2000).
 64. 井上貴仁、横山浩：“電気力顕微鏡”、日本学術振興会第167委員会シンポジウム、3月3日(2000).
 65. 島田洋蔵、松野哲也、平川一彦：“相関測定法を用いたGaAs空乏層からの広帯域テラヘルツ光検出”、電子情報通信学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会(信学技報)5月22日、福井(2000).
 66. K. Kanisawa, M. J. Butcher, H. Yamaguchi, Y. Hirayama: "Local density of states of conduction electrons at the epitaxially grown InAs(111)A surfaces"、第19回電子材料シンポジウム、6月28～30日、静岡(2000).
 67. S.-W. Lee, K. Hirotsu, Ph. Lelong, K. Hirakawa, and H. Sakaki: "High-sensitivity mid infrared detection by bound-to-continuum intersubband transition in self-assembled InAs quantum dots"、第19回電子材料シンポジウム、6月28～30日、静岡(2000).
 68. K. Hoshino, T. Someya, K. Hirakawa, and Y. Arakawa: "Intersubband transition in GaN/AlGaN multiple quantum wells"、第19回電子材料シンポジウム、6月28～30日、静岡(2000).
 69. 李 承雄、広谷仁寿、Ph. Lelong、平川一彦、榊 裕之：“変調ドープ横方向伝導型赤外光検出器—構造、感度、スペクトル—”、電子情報通信学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会(信学技法)、6月21日、東京(2000).
 70. 平川一彦：“時間と周波数の接点—テラヘルツ電磁波”、第22回生研公開講座イブニングセミナー「ひと・もの・ことをむすぶエレクトロニクス技術の研究動向」6月30日、東京(2000).
 71. 蟹沢聖、M. J. Butcher、山口浩司、平山祥郎：“InAs表面における局所状態密度定在波の低温STM観察”、第61回応用物理学会学術講演会、9月3～7日、札幌(2000).
 72. 平山祥郎、K. J. Friedland、宮下宣、佐久規：“バックゲート結合量子ポイントコンタクトの伝導特性”、第61回応用物理学会学術講演会、9月3～7日、札幌(2000).
 73. 宮下宣、山口浩司、平山祥郎：“InAs薄膜ブリッジ構造の作製”、第61回応用物理学会学術講演会、9月3～7日、札幌(2000).
 74. 河原塚篤、佐久規、堀越佳治、平山祥郎：“バックゲート型GaAs/AlGaAsアンドープヘテロ構造を用いたGaAs表面状態の評価”、第61回応用物理学会学術講演会、9月3～7日、札幌(2000).
 75. 平川一彦、島田洋蔵、松野哲也、関根徳彦：“半導体中の超高速電子ダイナミクスとテラヘルツ電磁波”、第61回応用物理学会学術講演会、9月3～7日、札幌(2000).
 76. 村木康二、佐久規、熊田倫雄、澤田安樹、江澤潤一、平山祥郎：“二層系量子ホール遷移におけるスピンと電荷分布の効果”、日本物理学会第55回年次大会、9月22～25日、新潟(2000).
 77. 河原塚篤、佐久規、都倉康弘、堀越佳治、平山祥郎：“弱い二次元短周期ポテンシャルアレイ中の電子の輸送特性”、日本物理学会第55回年次大会、9月22～25日、新潟(2000).
 78. 藤澤利正、都倉康弘、平山祥郎：“量子ドットの長寿命励起準位の非平衡トンネル電流”、日本物理学会第55回年次大会、9月22～25日、新潟(2000).
 79. 蟹沢聖、M. J. Butcher、都倉康弘、山口浩司、平山祥郎：“InAs表面における二次元電子状態密度定在波の低温STM観察”、日本物理学会第55回年次大会、9月22～25日、新潟(2000).

80. 玉木潔、押川正毅、小芦雅斗、井元信之, "雑音下における B92 量子暗号の条件付き安全性について", 日本物理学会第 55 回年次大会、9 月 22 ~ 25 日、新潟 (2000)
81. 長田宏二、小芦雅斗、井元信之, "GHZ 状態発生実験における量子状態の推定", 日本物理学会第 55 回年次大会、9 月 22 ~ 25 日、新潟 (2000)
82. S. K. Ozdemir, A. Miranowicz, 井元信之、小芦雅斗: "Limitations and efficiency of optical state truncation by projection synthesis", 日本物理学会第 55 回年次大会、9 月 22 ~ 25 日、新潟 (2000)
83. A. Miranowicz, S. K. Ozdemir, 井元信之、小芦雅斗, "Nonclassical states generated by optical state truncation", 日本物理学会第 55 回年次大会、9 月 22 ~ 25 日、新潟 (2000)
84. 山本俊、小芦雅斗、井元信之, "部分的にエンタングルした光子対の purification 法の提案", 日本物理学会第 55 回年次大会、9 月 22 ~ 25 日、新潟 (2000)
85. 小芦雅斗、V. Buzek, 井元信之, "複数の qubit 間でのエンタングルメントの分配", 日本物理学会第 55 回年次大会、9 月 22 ~ 25 日、新潟 (2000)
86. 樽茶清悟、佐々木智、江藤幹雄、Silvano De Fransechi, Leo Kouwenhoven: "量子ドット原子における近藤効果", 日本物理学会第 55 回年次大会、9 月 22 ~ 25 日、新潟 (2000)
87. 天羽真一、D.G. Austing, 佐々木智、都倉康弘、大野圭司、樽茶清悟: "半導体人工分子の磁場による状態遷移", 日本物理学会第 55 回年次大会、9 月 22 ~ 25 日、新潟 (2000)
88. 山本倫久、大野圭司、M. Stopa, 都倉康弘、平山祥郎、樽茶清悟: "結合量子細線におけるクーロンドラッグの温度特性", 日本物理学会第 55 回年次大会、9 月 22 ~ 25 日、新潟 (2000)
89. Y. Hirayama, "Interacting Carrier Electronics", The 1st FEMD Symposium, Tokyo, 2000.10.26
90. K. Hashimoto, K. Muraki, T. Saku, Y. Hirayama, "Interaction between two-dimensional electron gas and nuclear spins", The 1st CREST Symposium on Function Evolution of Materials and Devices based on Electron/Photon Related Phenomena (FEMD), Oct. 26, Tokyo (2000).
91. Y. Shimada, S. Madhavi, T. Matsuno, M. Abe, K. Hirakawa, "Ultrafast transient electron transport in semiconductor depletion layers and superlattices investigated by time-domain THz spectroscopy", The 1st CREST Symposium on Function Evolution of Materials and Devices based on Electron/Photon Related Phenomena (FEMD), Oct. 26, Tokyo (2000).
92. T. Tokizaki, H. Kawashima, T. Shigefuji, T. Inoue, H. Yokoyama, "Luminescence Spectroscopy of Modulation-doped AlGaAs/GaAs Quantum Structures with a Low-temperature Scanning Near-field Optical Microscope", The 1st CREST Symposium on Function Evolution of Materials and Devices based on Electron/Photon Related Phenomena (FEMD), Oct. 26, Tokyo (2000).
93. S. Tarucha, D. G. Austing, S. Sasaki, Y. Tokura, M. Eto, L. Kouwenhoven, "Tunable Singlet-triplet States and Related Condo-Effect in Artificial Atoms", The 1st CREST Symposium on Function Evolution of Materials and Devices based on Electron/Photon Related Phenomena (FEMD), Oct. 26, Tokyo (2000).
94. M. Koashi, V. Buzek, N. Imoto, "Qubit connectivity comparison - entanglement bound in linear qubit array, equi-distance configuration, and star configuration", The 1st CREST Symposium on Function Evolution of Materials and Devices based on Electron/Photon Related Phenomena (FEMD), Oct. 26, Tokyo (2000).
95. 平川一彦: "量子ホール効果検出器", 次世代遠赤外・サブミリ波検出器ワークショップ、10 月 11 ~ 12 日、東京 (2000) .
96. K. Ozdemir, A. Miranowicz, M. Koashi, and N. Imoto, "Experimental Scheme for State

- Truncation and Teleportation using Quantum Scissors", 第 4 回量子情報技術研究会(QIT4)、11 月 29 ~ 30 日、東京 (2000)
97. A. Miranowicz, S. K. Ozdemir, M. Koashi, and N. Imoto, "Classical information of Schrödinger cat and cat-like states", 第 4 回量子情報技術研究会(QIT4)、11 月 29 ~ 30 日、東京 (2000)
 98. 樽茶清悟: "人工の原子や分子を半導体中に作る", 第 15 回「大学と科学」公開シンポジウム -電気と磁気の新しい交わり- スピンが拓く 21 世紀のエレクトロニクス、11 月 22 ~ 23 日、大阪 (2000).
 99. 樽茶清悟: "半導体人工分子の電子状態", 第 12 回日本 MRS 学術シンポジウム、12 月 7 日、神奈川 (2000) .
 100. 平山祥郎: "量子情報処理に向けた半導体量子ドット研究"、JST 異分野研究者交流 (井元) フォーラム、1 月 13 日、神奈川 (2001)
 101. 小芦雅斗, "量子暗号の原理と雑音下での安全性", 応用物理学会量子エレクトロニクス研究会、1 月 25 ~ 27 日、軽井沢 (2001)
 102. 井元信之, "通信における量子情報処理の物理的実現に向けて", 応用物理学会量子エレクトロニクス研究会 (2001.1.25-27 上智大軽井沢セミナーハウス)
 103. N. Imoto, A. Miranowicz, S. K. Ozdemir, and M. Koashi, "Wigner representation of optical states in finite-dimensional Hilbert spaces", Research Meeting on "Analytical Study of Quantum Information and Related Fields", Jan. 18-19, Kyoto (2001)
 104. 蟹沢聖, M. J. Butcher, 都倉康弘, 山口浩司, 平山祥郎: "半導体における表面量子化電子状態によるフリーデル振動の低温 STM 観察", 第 48 回応用物理学関係連合講演会、3 月 28 ~ 31 日、東京 (2001)[invited]
 105. 河原塚篤、クレア キクチ、佐久規、堀越佳治、平山祥郎: "GaAs/AlGaAs アンダーブ逆ヘテロ構造における表面への電荷の移動", 第 48 回応用物理学関係連合講演会、3 月 28 ~ 31 日、東京 (2001)
 106. 橋本克之、村木康二、佐久規、平山祥郎: "バックゲートシングルヘテロ構造中の二次元電子ガスによる核スピン操作", 第 48 回応用物理学関係連合講演会、3 月 28 ~ 31 日、東京 (2001)
 107. 樽茶清悟: "半導体ドット構造における二電子スピン状態の制御と応用", 第 48 回応用物理学関係連合講演会、3 月 28 ~ 31 日、東京 (2001)
 108. 李 承雄、平川一彦: "変調ドープ量子ドット赤外光検出器の光励起キャリア寿命", 第 48 回応用物理学関係連合講演会、3 月 28 ~ 31 日、東京 (2001)
 109. 広谷仁寿、李 承雄、Ph. Lelong、平川一彦: "InAs 自己形成量子ドットの電子状態とドットサイズ依存性", 第 48 回応用物理学関係連合講演会、3 月 28 ~ 31 日、東京 (2001)
 110. 藤本真一、李 承雄、広谷仁寿、平川一彦: "p 型変調ドープ量子ドット赤外光検出器の赤外光応答", 第 48 回応用物理学関係連合講演会、3 月 28 ~ 31 日、東京 (2001)
 111. 島田洋蔵、平川一彦: " 広ミニバンド GaAs/AlGaAs 超格子中のプロッホ振動によるテラヘルツ放射 ", 第 48 回応用物理学関係連合講演会、3 月 28 ~ 31 日、東京 (2001)
 112. S. Madhavi, M. Abe, Y. Shimada, and K. Hirakawa: "Electro-optic detection of miniband transport in GaAs/AlGaAs superlattices", 第 48 回応用物理学関係連合講演会、3 月 28 ~ 31 日、東京 (2001)
 113. 平川一彦、勝本信吾、宗片比呂夫、大岩 顕、林 岳、橋本義昭、家 泰弘: "III-V 族希薄磁性半導体 GaMnAs と InMnAs の類似点・相違点", 第 48 回応用物理学関係連合講演会、3 月 28 ~ 31 日、東京 (2001)
 114. 平川一彦、Ph. Lelong、李 承雄、広谷仁寿: "自己組織化 InAs 量子ドットの電子状態と光イオン化過程", 第 48 回応用物理学関係連合講演会、3 月 28 ~ 31 日、東京 (2001)
 115. 星野勝之、染谷隆夫、平川一彦、荒川泰彦: "減圧成長 GaN/AlGaN 多重量子井戸におけるサ

- ブバンド間光吸収スペクトル"、第 48 回応用物理学関係連合講演会、3 月 28～31 日、東京 (2001)
116. 鈴木恭一、宮下宣、平山祥郎: "InAs/GaSb ヘテロ構造の電機伝導特性"、第 48 回応用物理学関係連合講演会、3 月 28～31 日、東京 (2001)
 117. 藤澤利正、都倉康弘、平山祥郎、DG オースチン、樽茶清悟: "過度電流スペクトルによる縦型量子ドットのスピン状態とエネルギー"、日本物理学会第 56 回年次大会、3 月 27～30 日、東京 (2001)
 118. 橋本克之、村木康二、佐久規、平山祥郎: "量子ホール状態における電子スピン・核スピン相互作用の電子充填率依存性"、日本物理学会第 56 回年次大会、3 月 27～30 日、東京 (2001)
 119. 村木康二、佐久規、平山祥郎: "二層量子ホール系における擬スピン強磁性と磁気異方性"、日本物理学会第 56 回年次大会、3 月 27～30 日、東京 (2001)
 120. A. Miranowicz, S. K. Ozdemir, M. Koashi, and N. Imoto, "Quantum information properties of quantum dots in the spin van der Waals model"、日本物理学会第 56 回年次大会、3 月 27～30 日、東京 (2001)
 121. 小芦雅斗、井元信之, "What is possible without disturbing quantum signals?"、日本物理学会第 56 回年次大会、3 月 27～30 日、東京 (2001)
 122. 長田宏二、小芦雅斗、井元信之, "A particular property of GHZ state estimated by means of Jaynes principle"、日本物理学会第 56 回年次大会、3 月 27～30 日、東京 (2001)
 123. S. K. Ozdemir, A. Miranowicz, M. Koashi, and N. Imoto, "On the verification of truncation process in quantum scissors device"、日本物理学会第 56 回年次大会、3 月 27～30 日、東京 (2001)
 124. 井元信之, "量子情報の進展と今後"、日本物理学会第 56 回年次大会、3 月 27～30 日、東京 (2001)
 125. 天羽真一、D.G. Austing、都倉康弘、佐々木智、大野圭司、樽茶清悟: "半導体人工分子の磁場による少数電子の状態遷移"、日本物理学会第 56 回年次大会、3 月 27～30 日、東京 (2001)
 126. 山本倫久、大野圭司、M. Stopa、都倉康弘、平山祥郎、樽茶清悟: "結合量子細線におけるクーロンドラッグとフォノンドラッグ"、日本物理学会第 56 回年次大会、3 月 27～30 日、東京 (2001)
 127. 浅山徹哉、大野圭司、都倉康弘、宮下宣、M. Stopa、樽茶清悟: "短周期ポテンシャル変調を持つ量子細線における磁気ミニバンドとコンダクタンス振動"、日本物理学会第 56 回年次大会、3 月 27～30 日、東京 (2001)
 128. 大野圭司、D.G. Austing、都倉康弘、樽茶清悟: "2 重量子ドットにおける LO フォノン介在トンネリング"、日本物理学会第 56 回年次大会、3 月 27～30 日、東京 (2001)
 129. 北村吉隆、佐々木智、泉田渉、大野圭司、樽茶清悟: "少数電子を含む人工原子の近藤効果とコトンネリング"、日本物理学会第 56 回年次大会、3 月 27～30 日、東京 (2001)
 130. 時崎、小貫、渡辺、谷、横山, "低温強磁場近接場光学顕微鏡による変調ドーピング GaAs 量子構造の発光分光"、日本物理学会第 56 回年次大会、3 月 27～30 日、東京 (2001)
 131. H. Yamaguchi, R. Dreyfus, S. Miyashita, and Y. Hirayama, "Electromechanical structures based on InAs/GaAs (111)A heteroepitaxial systems", 20th Electronic Material Symposium, June 20-22, Nara (2001).
 132. K. Suzuki, S. Miyashita, and Y. Hirayama, "Barrier width dependence on transport properties in InAs/AlSb/GaSb electron-hole proximity systems", 20th Electronic Material Symposium, June 20-22, Nara (2001).
 133. S.-W. Lee, K. Hirotani, S. Fujimoto, Ph. Lelong, and K. Hirakawa: "Mid-infrared photodetection using photoionization process of self-assembled quantum dots", 20th Electronic Material Symposium, June 20-22, Nara (2001).

134. 平川一彦、李 承雄、Ph. Lelong、広谷仁寿、藤本真一：”量子ドットを用いた高感度赤外光検出”、日本学術振興会光電相互変換第 125 委員会第 173 回研究会資料、6 月 1 日、東京 (2001)。
135. 藤本真一、李 承雄、広谷仁寿、Ph. Lelong、平川一彦：”自己組織化 InAs 量子ドット中の電子状態と光イオン化過程”、電子情報通信学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会(信学技法)、6 月 15 日、東京 (2001)。
136. 平川一彦：”遠赤外 (THz) 光を用いた量子構造、新電子材料の物性評価”、放射光・ナノリンク合同ワークショップ - IT 革命を支える放射光ナノリンク -、7 月 2 日、東京 (2001)。
137. 井元信之：「量子情報処理と物理の新概念」科学技術振興事業団異分野研究者交流 ワークショップ、8 月 4～6 日、長野 (2001)。
138. 藤澤利正、都倉康弘、D. G. Austing、樽茶清悟、平山祥郎、“縦型量子ドットの長寿命スピン状態と非平衡トンネル過程”、第 62 回応用物理学会学術講演会、9 月 11～14 日、愛知 (2001)
139. 平山祥郎、“III-V 族二次元系と表面・界面”、第 62 回応用物理学会学術講演会、9 月 11～14 日、愛知 (2001)
140. D. G. Austing, R. J. A. Hill, P. C. Main, A. Patane, B. Gustafson, M. Henini, L. Eaves, and S. Tarucha, “Magneto-tunneling spectroscopy in multiple gated self-assembled quantum dots”、第 62 回応用物理学会学術講演会、9 月 11～14 日、愛知 (2001)
141. 鈴木恭一、宮下宣、平山祥郎、“電子 - 正孔近接系の量子ホール効果”、第 62 回応用物理学会学術講演会、9 月 11～14 日、愛知 (2001)
142. 重藤知夫、横山浩、“回折格子をもちいたデュアルプローブ走査型近接場光学顕微鏡の評価”、第 62 回応用物理学会学術講演会、9 月 11～14 日、愛知 (2001)
143. 井元信之、小芦雅斗：「量子計算の使い道」、東北大学電気通信研究所共同プロジェクト「大規模量子コンピュータの実現に向けて」研究会、9 月 27～28 日、宮城 (2001)。
144. 樽茶清悟：結合量子ドットを使ったスピン、量子ゲートへのアプローチ、東北大学電気通信研究所共同プロジェクト「大規模量子コンピュータの実現に向けて」研究会、9 月 27～28 日、宮城 (2001)。
145. 山本倫久、M. Stopa、大野圭司、都倉康弘、平山祥郎、樽茶清悟、“結合量子細線における負のドラッグ抵抗”、日本物理学会秋季大会、9 月 17～20 日、徳島 (2001)
146. 板倉利文、都倉康弘、“背景電荷の揺らぎによるデコヒーレンス”、日本物理学会秋季大会、9 月 17～20 日、徳島 (2001)
147. 佐々木智、天羽真一、村木康二、樽茶清悟、“縦型円形量子ドットにおける準位交差と近藤効果”、日本物理学会秋季大会、9 月 17～20 日、徳島 (2001)
148. 山崎智幸、町田友樹、小宮山進、村木康二、平山祥郎、“分数エッジチャネルによる核磁気共鳴の観測”、日本物理学会秋季大会、9 月 17～20 日、徳島 (2001)
149. 町田友樹、石塚進、山崎智幸、小宮山進、村木康二、平山祥郎、“分数エッジチャネルにおける電子スピン - 核スピン相互作用”、日本物理学会秋季大会、9 月 17～20 日、徳島 (2001)
150. 藤澤利正、都倉康弘、オースチン、樽茶清悟、平山祥郎、“三相パルス印加測定による縦型量子ドットのスピン緩和”、日本物理学会秋季大会、9 月 17～20 日、徳島 (2001)
151. 藤澤利正、“量子ビットの電荷状態とスピン状態”、日本物理学会秋季大会、9 月 17～20 日、徳島 (2001)
152. 都倉康弘、A. Khaetskii、“ポイントコンタクトの伝導に対するスピン揺らぎの効果()”、日本物理学会秋季大会、9 月 17～20 日、徳島 (2001)
153. 大野圭司、D.G. Austing、樽茶清悟：スピンプロケード状態下の量子ドットにおける動的核スピン分極、日本物理学会秋季大会、9 月 17～20 日、徳島 (2001)
154. 天羽真一、D.G. Austing、都倉康弘、佐々木智、大野圭司、樽茶清悟：半導体人工分子の電子状態と横磁場効果、日本物理学会秋季大会、9 月 17～20 日、徳島 (2001)

- 155.西義史、天羽真一、D.G. Austing、都倉康弘、佐藤俊彦、山口智弘、大野圭司、樽茶清悟：弱閉じ込め量子ドットの少数電子状態、日本物理学会秋季大会、9月17～20日、徳島（2001）
- 156.横山弘泰、大野圭司、D.G. Austing、樽茶清悟：多重ゲート縦型二重量量子ドットにおける面内閉じ込め異方性の制御、日本物理学会秋季大会、9月17～20日、徳島（2001）
- 157.時崎高志、小貫哲平、渡邊裕一、土谷敏雄、谷俊朗、横山浩、“変調ドープGaAs量子構造の磁場中における近接場分光”、日本物理学会秋季大会、9月17～20日、徳島（2001）
- 158.S. K. Ozdemir、A. Miranowicz、小芦雅斗、井元信之：「A study on teleporting qubit states with quantum scissors device using pulse-mode analysis」, 日本物理学会秋季大会、9月17～20日、徳島（2001）
- 159.玉木潔、小芦雅斗、井元信之：「二状態量子暗号に対する量子ビット別盗聴の限界と安全性」, 日本物理学会秋季大会、9月17～20日、徳島（2001）
- 160.A. Miranowicz、S. K. Ozdemir、小芦雅斗、井元信之：「Entanglement and information properties of the optical fields generated by Kerr effect」, 日本物理学会秋季大会、9月17～20日、徳島（2001）
- 161.長田宏二、小芦雅斗、井元信之：「尤度原理によるGHZ状態への推定」, 日本物理学会秋季大会、9月17～20日、徳島（2001）
- 162.小芦雅斗、井元信之：「混合状態信号の量子圧縮限界」, 日本物理学会秋季大会、9月17～20日、徳島（2001）
- 163.樽茶清悟：量子ドットの近藤効果とスピン相関、量子相エレクトロニクス研究センターシンポジウム、9月26日、東京（2001）
- 164.S. K. Ozdemir, A. Miranowicz, M. Koashi, and N. Imoto: “Preparation and manipulation of optical qubit states by quantum scissors device”, The second CREST Symposium on Function Evolution of Materials and Devices based on Electron/Photon Related Phenomena (FEMD), Oct. 25, Tokyo (2001)
- 165.Y. Shimada, S. Madhavi, M. Abe, and K. Hirakawa : "Time-domain THz spectroscopy of miniband transport in GaAs/AlGaAs superlattices", The second CREST Symposium on Function Evolution of Materials and Devices based on Electron/Photon Related Phenomena (FEMD), Oct. 25, Tokyo (2001)
- 166.N. Imoto: “Processing/transforming quantum states”, Japan-Italy Joint Forum, Chiba Workshop on Quantum Information, Quantum Computer and Complex System 2001, Oct. 1-2, Chiba (2001).
- 167.樽茶清悟：メゾスコピック物理、ナノ加工技術とその応用、財団法人神奈川技術アカデミー教育講座、10月24日、厚木（2001）
- 168.阿部真理、S. Madhavi、島田洋蔵、平川一彦、富澤一隆：“THz EO サンプリング法を用いた半導体の超高速キャリア速度評価”、電子情報通信学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会(信学技法)、10月12日、東京（2001）。
- 169.S. K. Ozdemir, A. Miranowicz, M. Koashi, and N. Imoto: “Comparative study of resources for state preparation by projection synthesis”, 第5回量子情報技術研究会 (QIT5)、11月12～13日、厚木（2001）。
- 170.玉木潔、小芦雅斗、井元信之：「Security of B92 quantum key distribution against individual attack」, 第5回量子情報技術研究会(QIT5)、11月12～13日、厚木（2001）。
- 171.小芦雅斗、井元信之：「混合状態を含む量子信号の圧縮限界」第5回量子情報技術研究会(QIT5)、11月12～13日、厚木（2001）。
- 172.A. Miranowicz, S. K. Ozdemir, M. Koashi, N. Imoto, and Y. Hirayama: “Comparative study of quantum information properties of the spin van der Waals models”, 第5回量子情報技術研究会(QIT5)、11月12～13日、厚木（2001）。

173. Yu-xi Liu, S. K. Ozdemir, A. Miranowicz, M. Koashi, and N. Imoto: "Entanglement of excitonic states in coupled dots", 第5回量子情報技術研究会(QIT5)、11月12~13日、厚木 (2001).
174. 長田宏二、井元信之: 「Estimation of fidelity to multiparticle maximally entangled state using the maximum likelihood principle」, 第5回量子情報技術研究会(QIT5)、11月12~13日、厚木 (2001).
175. T. Itakura and Y. Tokura, "The effect of background charge fluctuations on decoherence", 第5回量子情報技術研究会(QIT5)、11月12~13日、厚木 (2001).
176. K. Kanisawa, M. J. Butcher, Y. Tokura, H. Yamaguchi, and Y. Hirayama, "Friedel oscillations of the two-dimensional conduction electrons and the quantized states in the nanostructures", 21st annual meeting of the Surf. Sci. Soc. of Jpn., Tokyo (2001) 1A03 [invited].
177. 井元信之: 「量子情報処理と量子状態の発生・演算・検出」東京大学生産技術研究所 COE 研究プロジェクトシンポジウム「量子ドット構造の物理と応用」, 12月7日、東京 (2001).
178. S. Sasaki and S. Tarucha, "The Kondo effect in semiconductor quantum dots", The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, ED/SDM Technical Meeting, Sapporo (2002) ED2001-225.
179. M. Yamamoto, M. Stopa, Y. Hirayama, Y. Tokura, K. Ono, and S. Tarucha, "Coulomb drag in coupled quantum wires", The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, ED/SDM Technical Meeting, Sapporo (2002) ED2001-227.
180. K. Suzuki, S. Miyashita, and Y. Hirayama, "Correlation between electrons and holes in InAs/GaSb heterostructures" The Institute of Electronics, Information and Communication Engineerings, ED/SDM Technical Meeting Sapporo (2002) ED2001-230.
181. H. D. Cheong、藤澤利正、林稔晶、Y. H. Jeong、平山祥郎、"Impedance analysis of radio-frequency single electron transistor (RFSET)", 第49回応用物理学関係連合講演会、3月27~30日、神奈川 (2002).
182. 北智洋、蟹沢聖、都倉康弘、山口浩司、山田省二、平山祥郎、"InAs/GaAs(111)A 表面におけるInAsナノ構造中のゼロ次元状態の低温STS測定", 第49回応用物理学関係連合講演会、3月27~30日、神奈川 (2002).
183. 山口浩司、平山祥郎、"ステップバンチングを用いた新しいナノメカニカル構造の作製手法", 第49回応用物理学関係連合講演会、3月27~30日、神奈川 (2002).
184. 山田和正、太田剛、羽田野剛司、山口智弘、樽茶清悟: 少数電子を含む縦型量子ドットにおけるドット・リード間結合強度の制御と輸送特性、第49回応用物理学関係連合講演会、3月27~30日、神奈川 (2002).
185. 李 承雄、藤本真一、平川一彦: "自己組織化 InAs 量子ドットの光電流分光と電子状態", 第49回応用物理学関係連合講演会、3月27~30日、神奈川 (2002).
186. 阿部真理、S. マダビ、島田洋蔵、平川一彦、富澤一隆: "時間分解 THz 分光法によるキャリア速度評価とモンテカルロ計算の比較", 第49回応用物理学関係連合講演会、3月27~30日、神奈川 (2002).
187. 島田洋蔵、平川一彦: "時間分解テラヘルツ分光法による GaAs/AlGaAs 超格子中のプロッホ振動の評価", 第49回応用物理学関係連合講演会、3月27~30日、神奈川 (2002).
188. 星野勝之、平川一彦、荒川泰彦: "GaN/AlGaN 量子井戸における $e1 \rightarrow e3$ サブバンド間遷移の観測", 第49回応用物理学関係連合講演会、3月27~30日、神奈川 (2002).
189. 平川一彦、島田洋蔵、阿部真理、S. マダビ: "テラヘルツ電磁波放射で探る半導体中の超高速キャリアダイナミクス", 第49回応用物理学関係連合講演会、3月27~30日、神奈川 (2002).

- 190.井元信之:「量子情報技術の基礎」,第49回応用物理学関係連合講演会、3月27~30日、神奈川 (2002).
- 191.橋本克之、村木康二、佐久規、平山祥郎、“分数量子ホール領域での電子スピン共存状態による核スピン偏極”、日本物理学会第57回年次大会、3月24-27日、滋賀 (2002)
- 192.板倉利文、都倉康弘、“トンネル確率の揺らぎによるデコヒーレンス”、日本物理学会第57回年次大会、3月24-27日、滋賀 (2002)
- 193.都倉康弘、A. Khaetskii、“ポイントコンタクトにおける電子間相互作用の効果”、日本物理学会第57回年次大会、3月24-27日、滋賀 (2002)
- 194.浅山徹哉、都倉康弘、大野圭司、横山弘泰、羽田野剛、佐藤俊彦、樽茶清悟、“2重障壁ポテンシャル変調を持つ量子細線の電気伝導性”、日本物理学会第57回年次大会、3月24-27日、滋賀 (2002)
- 195.佐々木智、天羽真一、浅川直輝、樽茶清悟、“電極と強く結合した縦型量子ドットにおける少数電子の近藤効果”、日本物理学会第57回年次大会、3月24-27日、滋賀 (2002)
- 196.藤澤利正、D. G. Austing、都倉康弘、樽茶清悟、平山祥郎、“縦型量子ドットの軌道角運動量緩和とスピン緩和”、日本物理学会第57回年次大会、3月24-27日、滋賀 (2002)
- 197.蟹沢聖、M. J. Butcher、都倉康弘、山口浩司、平山祥郎、“量子化された伝導電子の局所状態密度の低温STM観察”、日本物理学会第57回年次大会、3月24-27日、滋賀 (2002)[invited]
- 198.鈴木恭一、宮下宣、平山祥郎、“InAs/(AlSb)/GaSbヘテロ構造の量子ホール効果”、日本物理学会第57回年次大会、3月24-27日、滋賀 (2002)
- 199.西義史、天羽真一、今村裕志、佐藤俊彦、大野圭司、樽茶清悟:強磁場中における量子ドットの少数電子状態、日本物理学会第57回年次大会、3月24-27日、滋賀 (2002)
- 200.W.G. van der Wiel: Kondo Effects in Semiconductor Quantum Dots、日本物理学会第57回年次大会、3月24-27日、滋賀 (2002)
- 201.大野圭司、樽茶清悟:スピンプロックード状態下の量子ドットにおける動的核スピン分極II、日本物理学会第57回年次大会、3月24-27日、滋賀 (2002)
- 202.佐々木智、天羽真一、浅川直輝、樽茶清悟:電極と強く結合した縦型量子ドットにおける少数電子の近藤効果、日本物理学会第57回年次大会、3月24-27日、滋賀 (2002)
- 203.藤澤利正、D.G.Austing、都倉康弘、平山祥郎、樽茶清悟:縦型量子ドットの軌道角運動量緩和とスピン緩和、日本物理学会第57回年次大会、3月24-27日、滋賀 (2002)
- 204.時崎高志、小貫哲平、土谷敏雄、横山浩、“変調ドープGaAs量子構造の磁場中における時空間分光”、日本物理学会第57回年次大会、3月24-27日、滋賀 (2002)
- 205.A. Miranowicz、S. K. Ozdemir、Yu-xi Liu、小芦雅斗、井元信之、平山祥郎:「Stabilization of electron-spin entanglement in quantum-dot systems by nonresonant interactions」,日本物理学会第57回年次大会、3月24-27日、滋賀 (2002)
- 206.小芦雅斗、井元信之:「量子信号のテレポートに必要なエンタングルメント量」,日本物理学会第57回年次大会、3月24-27日、滋賀 (2002)
- 207.S. K. Ozdemir、A. Miranowicz、小芦雅斗、井元信之:「Nonclassicality of optical states prepared by quantum scissors device with dissipative quantum channel」,日本物理学会第57回年次大会、3月24-27日、滋賀 (2002)
- 208.山本俊、小芦雅斗、Sahin Kaya Ozdemir、井元信之:「Entanglement purificationのためのPDC光源」,日本物理学会第57回年次大会、3月24-27日、滋賀 (2002)
- 209.長田宏二、小芦雅斗、井元信之:「Multipartite systemにおけるBell-type inequalityとSeparability」,日本物理学会第57回年次大会、3月24-27日、滋賀 (2002)
- 210.井元信之:「量子情報の基礎」量子情報技術研究会・電子デバイス研究会との共催臨時研究会、3月15日 (2002).
- 211.K. Nagata, M. Koashi, and N. Imoto:「Classifying multiqubit systems by Bell-type

- experiments with symmetric measurement」第 6 回量子情報技術研究会 (QIT6), 5 月 27 ~ 28 日、京都 (2002).
212. 平川一彦、阿部真理、S. マダビ、島田洋蔵、大塚由紀子、富澤一隆: "テラヘルツ放射分光による半導体中のキャリア速度の実計測", 日本学術振興会第 154 委員会第 36 回研究会, 5 月 9 日、東京 (2002)
213. T. Hayashi, T. Fujisawa and Y. Hirayama, "Excitation current spectra in a quantum dot with symmetric barriers: characteristics of total spin", 第 21 回電子材料シンポジウム、6 月 19 ~ 21 日、静岡 (2002)
214. W.G. van der Wiel: "The Kondo effect out of equilibrium in a quantum dot and the ability for implementing quantum Computation" NTT BRL Summer camp, Aug. 28- Sep.4, Hakone (2002).
215. 蟹澤聖、都倉康弘、山口浩司、平山祥郎、"InAs/GaAs(111)A 表面における微細 InAs ゼロ次元構造の低温 STS 評価", 第 63 回応用物理学会学術講演会、9 月 24 ~ 27 日、新潟 (2002)
216. 山口浩司、宮下宣、平山祥郎、"InAs/AlGaSb ヘテロ構造を用いたメカニカル変位センサー", 第 63 回応用物理学会学術講演会、9 月 24 ~ 27 日、新潟 (2002)
217. 重藤知夫、"デュアルプローブ近接場光学顕微鏡における探針間信号伝達", 第 63 回応用物理学会学術講演会、9 月 24 ~ 27 日、新潟 (2002)
218. 藤澤利正、H. D. Cheong、林稔晶、Y. H. Jeong、平山祥郎、"単一電子トンネル現象の実時間観測", 第 63 回応用物理学会学術講演会、9 月 24 ~ 27 日、新潟 (2002)
219. 平川一彦、島田洋蔵: "半導体超格子からの THz 放射とプロッホ振動電子の高周波伝導度", 第 63 回応用物理学会学術講演会、9 月 24 ~ 27 日、新潟 (2002)
220. 平川一彦、島田洋蔵: "半導体超格子中のプロッホ振動電子と電磁波に対するゲイン", 第 63 回応用物理学会学術講演会、9 月 24 ~ 27 日、新潟 (2002)
221. 遊佐剛、宮下宣、佐久規、村木康二、平山祥郎、"二重量子細線の作成と電気伝導特性", 第 63 回応用物理学会学術講演会、9 月 24 ~ 27 日、新潟 (2002)
222. 下田雄一、森野正行、澤田安樹、江澤潤一、村木康二、佐久規、平山祥郎、"2 層系における整数量子ホール効果と分数量子ホール効果の比較", 日本物理学会秋季大会、9 月 6 ~ 9 日、愛知 (2002)
223. 橋本克之、村木康二、佐久規、平山祥郎、"閉じ込めポテンシャル対称性の $\nu=2/3$ における核スピン偏極への影響", 日本物理学会秋季大会、9 月 6 ~ 9 日、愛知 (2002)
224. 佐々木智、樽茶清悟: "縦横複合 2 重量子ドットの伝導特性", 日本物理学会秋季大会、9 月 6 ~ 9 日、愛知 (2002)
225. 山本倫久、大野圭司、M. Stopa、都倉康弘、平山祥郎、樽茶清悟: "結合量子細線における負のドラッグ効果とその磁場依存性", 日本物理学会秋季大会、9 月 6 ~ 9 日、愛知 (2002)
226. 時崎高志、小貫哲平、土谷敏雄、横山浩、"変調ドープ GaAs 量子構造の磁場中における時空間分光 II", 日本物理学会秋季大会、9 月 6 ~ 9 日、愛知 (2002)
227. 小芦雅斗、井元信之: "量子信号と古典信号の誤りなしのデータ圧縮限界", 日本物理学会秋季大会、9 月 6 ~ 9 日、愛知 (2002)
228. 小埜和夫、内田和人、三浦登、平山祥郎、大平圭介、白木靖寛、"GaAs/AlAs 隣接閉じ込め構造からの励起子磁気発光", 日本物理学会秋季大会、9 月 6 ~ 9 日、愛知 (2002)
229. 森越文明、林正人、小芦雅斗、松本啓史、Andreas Winter: "エンタングルメント凝縮における誤り指数", 日本物理学会秋季大会、9 月 6 ~ 9 日、愛知 (2002)
230. 西義史、天羽真一、大野圭司、羽田野剛司、樽茶清悟: "電子密度の低い人工原子の電子相関", 日本物理学会秋季大会、9 月 6 ~ 9 日、愛知 (2002)
231. 大野圭司、小寺哲夫、W.G. van der wiel、藤澤利正、樽茶清悟: "単一電子 2 重量子ドットにおける光介在トンネリング", 日本物理学会秋季大会、9 月 6 ~ 9 日、愛知 (2002)

232. 長田宏二、小芦雅斗、井元信之：「Classification of mixed high-dimensional multipartite systems」, 日本物理学会秋季大会、9月6～9日、愛知 (2002)
233. 天羽真一、D.G.Austing、佐々木智、西義史、都倉康弘、大野圭司、樽茶清悟：「人工分子のドット間オフセットと結合反結合電子状態」, 日本物理学会秋季大会、9月6～9日、愛知 (2002)
234. 田頭邦弘、熊田倫雄、下田雄一、森野正行、澤田安樹、江澤潤一、村木康二、佐久規、平山祥郎、"2層系における整数量子ホール効果と分数量子ホール効果の比較", 日本物理学会秋季大会、9月6～9日、愛知 (2002)
235. 都倉康弘、"ポイントコンタクトにおけるショットノイズとゼロバイアスアノマリ", 日本物理学会秋季大会、9月6～9日、愛知 (2002)
236. 平山祥郎、「量子ホール効果とスピン」, 日本物理学会秋季大会、9月6～9日、愛知 (2002) [invited]
237. 林稔晶、藤澤利正、平山祥郎、"非対称壁を有する横型半導体量子ドットの励起電流スペクトル", 日本物理学会秋季大会、9月6～9日、愛知 (2002)
238. 平川一彦: "半導体量子構造を用いた THz 電磁波の検出と発生", 新技術協会セミナー「次世代光材料とデバイス」, JST 東京本部ホール、9月17日、東京 (2002)
239. K. Hirakawa, Y. Shimada, and S. Madhavi, "Bloch oscillations and inversionless gain in semiconductor superlattices", The Third CREST Symposium on Function Evolution of Materials and Devices based on Electron/Photon Related Phenomena (FEMD), Oct. 25, Kokuyo Hall, Tokyo (2002)
240. K. Ono, T. Kodera, W.G. van der Wiel, T. Fujisawa, S. Tarucha, "Photon and Phonon Assisted Tunneling in Double Quantum Dot", The Third CREST Symposium on Function Evolution of Materials and Devices based on Electron/Photon Related Phenomena (FEMD), Oct. 25, Kokuyo Hall, Tokyo (2002)
241. T. Fujisawa, T. Hayashi, Y. Tokura, S. Tarucha, and Y. Hirayama, "Single electron dynamics in quantum dots", The Third CREST Symposium on Function Evolution of Materials and Devices based on Electron/Photon Related Phenomena (FEMD), Oct. 25, Kokuyo Hall, Tokyo (2002)
242. T. Tokizaki, H. Kawashima, T. Shigefuji, T. Inoue and H. Yokoyama, "Microscopic Observation of Photocarrier Diffusion in Modulation-doped GaAs Heterostructures under Magnetic Fields", The Third CREST Symposium on Function Evolution of Materials and Devices based on Electron/Photon Related Phenomena (FEMD), Oct. 25, Kokuyo Hall, Tokyo (2002)
243. Takashi Yamamoto, Masato Koashi, Sahin Kaya Ozdemir, Nobuyuki Imoto, "Experimental Study of Entanglement Manipulation using Parametric Down-Conversion", The Third CREST Symposium on Function Evolution of Materials and Devices based on Electron/Photon Related Phenomena (FEMD), Oct. 25, Kokuyo Hall, Tokyo (2002)
244. Yoshiro Hirayama, "Outline of Interacting Carrier Electronics project", The Third CREST Symposium on Function Evolution of Materials and Devices based on Electron/Photon Related Phenomena (FEMD), Oct. 25, Kokuyo Hall, Tokyo (2002)
245. 平山祥郎、「電気物性」, 第5回薄膜講座、10月24～25日、東京 (2002) [invited]
246. 井元信之、「情報処理における量子コンピューティングのインパクト」, 新機能素子 研究開発協会・第2回量子コンピュータサロン、10月10日、東京 (2002). [invited]
247. 井元信之、「量子情報処理と原子分子」, 第2回 原子分子光科学 (AMOS) 懇談会、10月19日、東京 (2002). [invited]
248. S. K. Ozdemir, Yu-xi Liu, A. Miranowicz, T. Yamamoto, M. Koashi, and N. Imoto,

- 「Teleportation fidelity of noisy states」, 第7回量子情報技術研究会 (QIT7)、11月12日、東京 (2002).
249. 山本俊, 小芦雅斗, S. K. Ozdemir, 井元信之, 「Experimental extraction of an entangled pair from decohered photon pairs」, 第7回量子情報技術研究会 (QIT7)、11月12日、東京 (2002).
250. 大野圭司, 「2重量子ドットにおけるスピン依存伝導」, 第15回佐々木シンポジウム 電子物性 — 最近の成果と将来展望 — 11月29日、東京大学物性研究所 (2002) [invited]
251. 樽茶清悟, 「特別講演」量子ドット中のスピン効果と量子計算への応用に向けて、第3回ナノと物性領域会議、科学技術振興事業団 さきがけプログラム「ナノと物性」, 11月29日、神戸 (2002) [invited]
252. 井元信之, 「量子暗号・量子プロトコル」, 第5回代数幾何・数論及び符号・暗号研究集会, 東京大学数理科学研究科, 1月17日、東京 (2003). [invited]
253. 大野圭司, 「2重量子ドットにおけるスピン依存伝導」, 電子情報通信学会・北海道大学量子集積エレクトロニクス研究センター共催研究会, 2月11日、札幌 (2003) [invited]
254. 樽茶清悟, 「メソスコピック物理、教育講座『ナノテクノロジーの最前線』コース」, 財団法人神奈川科学技術アカデミー, 2月24日、東京 (2003) [invited]
255. Lionel Houlet, 山口 浩司, 宮下 宣, 平山 祥郎, 「InAs/AlGaSb ナノスケールピエゾ抵抗カンチレバーによる変位検出素子」, 第50回応用物理関係連合講演会, 3月27~30日、神奈川 (2003)
256. M. Jung, 李 承雄, 平川一彦: "Electron Transport through Single Self-Assembled InAs Quantum Dots Grown by Molecular Beam Epitaxy", 第50回応用物理関係連合講演会, 3月27~30日、神奈川 (2003)
257. 関根徳彦, 島田洋蔵, 平川一彦: "半導体超格子中のプロッホ振動における緩和時間の温度依存性", 第50回応用物理関係連合講演会, 3月27~30日、神奈川 (2003)
258. 山口 浩司, 宮下 宣, 平山 祥郎, 「InAs/AlGaSb 2DEG ホール素子カンチレバーの作製と評価」, 第50回応用物理関係連合講演会, 3月27~30日、神奈川 (2003)
259. 長嶋知行, 島田洋蔵, S. マダビ, 平川一彦: "半導体超格子中のプロッホ電子の過渡伝導解析", 第50回応用物理関係連合講演会, 3月27~30日、神奈川 (2003)
260. 島田洋蔵, 関根徳彦, 平川一彦: "GaAs/AlGaAs 超格子中のミニバンド間共鳴ツェナートンネリング", 第50回応用物理関係連合講演会, 3月27~30日、神奈川 (2003)
261. 李 承雄, 瀬上 剛, 平川一彦: "変調ドープ量子ドット赤外光検出器の感度および光励起キャリアの緩和過程", 第50回応用物理関係連合講演会, 3月27~30日、神奈川 (2003)
262. 林 稔晶, 藤澤 利正, H.D.Cheong, Y.H.Jeong, 平山 祥郎, 「二重量子ドットによる電荷量子ビットのコヒーレント制御」, 第50回応用物理関係連合講演会, 3月27~30日、神奈川 (2003)
263. S. K. Ozdemir, T. Yamamoto, Y.-x. Liu, M. Koashi, and N. Imoto, 「Effects of photo counting on the implementation of nonlinear phase shift gates」, 日本物理学会第58回年次大会, 3月28~31日、仙台 (2003).
264. 井下猛, 大野圭司, 樽茶清悟, 「2重量子ドットにおける電子-核相互作用とトンネル電流不安定性」, 日本物理学会第58回年次大会, 3月28~31日、仙台 (2003)
265. 横山弘泰, 都倉康弘, 平山祥郎, 樽茶清悟, 「可変トンネル障壁を有する量子細線の電気伝導」, 日本物理学会第58回年次大会, 3月28~31日、仙台 (2003)
266. 玉木潔, 小芦雅斗, 井元信之: 「B92 量子暗号の任意の盗聴に対する安全性について」, 日本物理学会第58回年次大会, 3月28~31日、仙台 (2003)
267. 熊田倫雄, 田頭邦弘, 岩田一樹, 澤田安樹, 江澤潤一, 村木康二, 佐久規, 平山祥郎, 「2層系量子ホール状態における準位交差 - 反交差現象」, 日本物理学会第58回年次大会, 3月28

- ～31 日、仙台（2003）
268. 佐久規、村木康二、平山祥郎、“結合量子細線の磁場中電気伝導特性”、日本物理学会第 58 回年次大会、3 月 28～31 日、仙台（2003）
 269. 佐々木智、天羽真一、浅川直輝、樽茶清悟、「人工原子における高スピン状態の近藤効果」、日本物理学会第 58 回年次大会、3 月 28～31 日、仙台（2003）
 270. 山田和正、泉田渉、山口智弘、羽田野剛司、樽茶清悟、「2 次元電子ガスと横に結合した縦型ドットの輸送特性」、日本物理学会第 58 回年次大会、3 月 28～31 日、仙台（2003）
 271. 山本俊、小芦雅斗、S. K. Ozdemir, 井元信之、「攪乱をうけた二光子対からの Bell-pair 抽出実験」、日本物理学会第 58 回年次大会、3 月 28～31 日、仙台（2003）
 272. 山本倫久、大野圭司、都倉康弘、平山祥郎、M. Stopa、樽茶清悟:「結合量子細線における細線間のトンネル電流」、日本物理学会第 58 回年次大会、3 月 28～31 日、仙台（2003）
 273. 寺岡総一郎、沼田愛彦、天羽真一、大野圭司、樽茶清悟、「2 次元電子量子ホール系における電子スピン共鳴と核スピンポンピング」、日本物理学会第 58 回年次大会、3 月 28～31 日、仙台（2003）
 274. 時崎高志、小貫哲平、土谷敏雄、横山浩、“2 次元電子ガス系におけるキャリア拡散の磁場中顕微観測”、日本物理学会第 58 回年次大会、3 月 28～31 日、仙台（2003）
 275. 島村淳一、小芦雅斗、井元信之、「多体間エンタングルメントシェアリングと協力的量子テレポーテーション」日本物理学会第 58 回年次大会、3 月 28～31 日、仙台（2003）
 276. 平川一彦、島田洋蔵、K. A. チャオ: “半導体超格子中のプロッホ振動と inversionless gain ”, 日本物理学会第 58 回年次大会、3 月 28～31 日、仙台（2003）
 277. 林稔晶、藤澤利正、H.D. Cheong, Y. H. Jeong, 平山祥郎、“結合量子ドットにおける電荷コヒーレンス振動”、日本物理学会第 58 回年次大会、3 月 28～31 日、仙台（2003）
 278. 鈴木恭一、宮下宣、平山祥郎、“InAs/GaSb ヘテロ構造の量子ホール効果—斜め磁場の効果—”、日本物理学会第 58 回年次大会、3 月 28～31 日、仙台（2003）
 279. 平川一彦、島田洋蔵、阿部真理、S. マダビ、クンアン チャオ、富澤一隆: “テラヘルツ分光を用いた半導体中のキャリアダイナミクスと超高周波伝導率の計測”、電子情報通信学会総合大会シンポジウム「フォトンクスが創りだす未来の電波とその応用」, 3 月 19～22 日、仙台（2003）
 280. 樽茶清悟、「量子ドットのスピンと多体効果」、物性研談話会、4 月 14 日、東京（2003）
[invited]
 281. 樽茶清悟、「量子コンピュータを作る、公開講演会「物理学とは何だろうか量子コンピュータ～量子物理学の新たな挑戦」、日本物理学会名古屋支部、5 月 24 日、名古屋（2003）[invited]
 282. 樽茶清悟、「(A03 スピントロニクス量子操作) 半導体量子ドットの電子スピンと核スピン制御」、文部科学賞科学研究費補助金 特定領域研究「半導体ナノスピントロニクス」平成 15 年度研究会プログラム、6 月 10-11 日、東京（2003）
 283. 樽茶清悟、「量子計算・量子情報処理」量子ドットの電子スピン・核スピン制御、「物質科学とシステムデザイン」量子スピントロニクス分科学及び有機・分子スピントロニクス分科会合同分科会、高等研特別研究・日本学術振興会研究開発専門協会、6 月 20-21 日、国際高等研究所（2003）[invited]
 284. 山本俊、「攪乱をうけた二光子対からの Bell-pair 抽出実験」第 8 回量子情報技術研究会 (QIT8)、6 月 30 日、札幌（2003）[invited]
 285. 島村淳一、Sahin Kaya Ozdemir, 森越文明、井元信之、「Classical versus Quantum correlations in game theory」、第 8 回量子情報技術研究会 (QIT8)、6 月 30 日～7 月 2 日、札幌（2003）
 286. 藤澤利正、林稔晶、H.D. Cheong, Y.H. Jong, 平山祥郎、「半導体二重量子ドットの電荷量子ビット」、第 8 回量子情報技術研究会 (QIT8)、6 月 30 日～7 月 2 日、札幌（2003）

- 287.板倉利文、川口晃、都倉康弘、「スピン鎖の効果によるスピン量子ビット系の位相緩和」、第8回量子情報技術研究会 (QIT8)、6月30日～7月2日、札幌 (2003)
- 288.T. Hayashi, T. Fujisawa, H.D. Cheong, Y.H. Jeong, and Y. Hirayama, "Coherent gate operations on single charge qubit in double quantum dot"、電子材料シンポジウム 7月3日、滋賀 (2003)
- 289.M. Jung、平川一彦: "単一自己組織化 InAs 量子ドットにおけるクーロンブロッケード効果", 第64回応用物理学会学術講演会、8月30日～9月2日、福岡 (2003)
- 290.S.W. Jung、T. Fujisawa、Y.H.Jeong, and Y. Hirayama, "Analysis of 1/f noise in single electron tunneling current through a GaAs quantum dot", 第64回応用物理学会学術講演会、8月30日～9月2日、福岡 (2003)
- 291.蟹澤 聖、S. Perraud, 山口 浩司、平山 祥郎、「InAs ナノ結晶による結合ゼロ次元構造中の電子状態の低温 STS 評価」、第64回応用物理学会学術講演会、8月30日～9月2日、福岡 (2003)
- 292.関根徳彦、平川一彦、島田洋蔵: "テラヘルツ電気光学サンプリング法による半導体超格子中のプロッホ振動の観測", 第64回応用物理学会学術講演会、8月30日～9月2日、福岡 (2003)
- 293.平山祥郎、「電気物性」、第6回薄膜講座、8月4～5日、中央大学 (2003) [invited]
- 294.橋本 克之、村木 康二、佐久 規、平山 祥郎、「非対称ポテンシャルによる $\nu = 2/3$ 核スピン偏極抑制効果の電流依存性」、日本物理学会秋季大会、9月20-23日、岡山 (2003)
- 295.高品 圭、平山 祥郎、藤原 聡、堀口 誠二、高橋 庸夫、「SIMOX MOSFET 中量子井戸の二次元電子系 - 谷分離と二層系」、日本物理学会秋季大会、9月20-23日、岡山 (2003)
- 296.山口 浩司、宮下 宣、平山 祥郎、「InAs/AlGaSb ピエゾ抵抗カンチレバーにおける量子干渉効果」、日本物理学会秋季大会、9月20-23日、岡山 (2003)
- 297.山田和正、マイケルストーバ、山口智弘、羽田野剛司、樽茶清悟、「2次元電子ガスと横に結合した縦型ドットの輸送特性 II」、日本物理学会秋季大会、9月20-23日、岡山 (2003)
- 298.時崎高志、小貫哲平、横山浩、「2次元電子ガス系に光励起されたキャリアの静電磁場中における移動」、日本物理学会秋季大会、9月20-23日、岡山 (2003)
- 299.村木 康二、橋本 克之、佐久 規、平山 祥郎、「 $\nu = 2/3$ における単一ポテンシャル障壁によるヒステリシス」、日本物理学会秋季大会、9月20-23日、岡山 (2003)
- 300.大野圭司、樽茶清悟、「スピントロニクス状態下の量子ドットにおける核スピン制御」、日本物理学会秋季大会、9月20-23日、岡山 (2003)
- 301.遊佐 剛、橋本 克之、村木 康二、佐久 規、平山 祥郎、「ナノ構造中の分数量子ホール電子による核スピンの制御」、日本物理学会秋季大会、9月20-23日、岡山 (2003)
- 302.林 稔晶、藤澤 利正、H.D. Cheong、Y.H. Jeong、平山 祥郎、「結合量子ドット中の電荷ダイポール回転のディコヒーレンス」、日本物理学会秋季大会、9月20-23日、岡山 (2003)

(3)特許出願 (国内 1 件、海外 0 件)

国内

発明者: 橋本 克之、平山 祥郎

発明の名称: 二次元電子ガスによる核スピン操作方法、及び、その方法を用いた核スピン操作装置

出願番号: 特願2002 - 221505号

出願人： 科学技術振興機構、日本電信電話株式会社

出願日： 2002年7月30日

海外

なし

(4)新聞報道等

新聞報道

1. 日本経済新聞「『電子の波』見えた」(2001年4月27日)
2. 日本工業新聞「量子ドットで電子の波の性質 世界初、直接観察に成功」(2001年11月2日)
3. 日本経済新聞「電子が波打つ様子 NTT 研が確認 半導体研究に有効」(2001年11月2日)
4. 科学新聞「ナノ構造半導体の電子の波 NTT が世界で始めて観察」(2001年11月15日)
5. 日本工業新聞「『人工原子』を『量子ビット』に応用」(2002年9月19日)
6. 日刊工業新聞「情報記憶保持1ミリ秒に」(2002年9月19日)
7. 日経産業新聞「人工原子をメモリーに」(2002年9月24日)
8. 日刊工業新聞「量子連結相関を復元」(2003年1月23日)
9. 日本工業新聞「量子連結相関の抽出実験-総研大などが成功」(2003年1月23日)
10. 朝日新聞「光子がカギ『無敵の暗号』基礎実験成功」(2003年1月23日)
11. 日本経済新聞「量子暗号通信へ前進-光子の対使い伝送」(2003年1月27日)
12. 化学工業日報「エンタングルメント完全抽出に成功」(2003年1月27日)
13. 科学新聞「基本的要素 “エンタングルメント” 抽出実験に成功」(2003年1月31日)
14. 日経産業新聞「量子コンピューター 基本素子に半導体使用 NTT など回路の拡大容易に」(2003年8月12日)

受賞

1. 橋本克之 (CREST 研究員) 応用物理学会奨励賞「バックゲートシングルヘテロ構造中の二次元電子ガスによる核スピン操作」(2001年5月11日)
2. 樽茶清悟 (東京大学) 第48回仁科記念賞「人工原子・分子の実現」(2002年11月)
3. 藤澤利正 (NTT 物性基礎研) サー・マーティン・ウッド賞 (2003年11月25日)

7. 結び、その他

将来工学に進展するような半導体システムにおけるキャリア相関の抽出を目指し、半導体薄膜、ナノ構造のキャリア相関の研究を推進した。また、キャリア相関の研究を促進するためのサポート技術として電氣的ポンプ・プローブ法を確立し、シングルショット測定、ナノプロービング、量子情報処理の基礎研究に関しても大きな進展を得た。特に、結合量子ドットを利用して電子1個のコヒーレント制御を実現し、半導体量子ビットを実現することに成功したこともあり、達成率は80%程度と考えている。(量子)相関エレクトロニクスに関する研究は、この5年間に国内外で大きく進展した。本プロジェクトも優れた研究成果、論文、国際会議での成果発表、国際会議の開催などを通して、研究の進展に貢献しており、目標とした(量子)相関エレクトロニクスという新しい研究分野の確立も、ある程度達成できたと考えている。今後は、幸いに発展・継続プロジェクトに選択して頂いたこともあり、半導体量子コンピュータに向けた研究を中心に、電荷、電子スピン、核スピンの量子相関エレクトロニクスの研究をさらに発展させる計画である。

最後に、全員の紹介はできないが、本プロジェクトに貢献して頂いた方々の一部を紹介する。

平山グループ



平山祥郎
相関エレクトロニクスプロジェクト研究代表
NTT物性科学基礎研究所量子物性研究部長



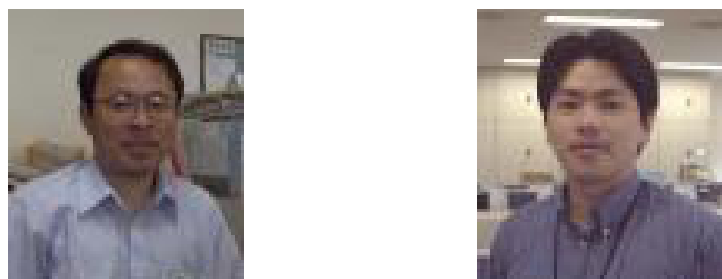
橋本克之
CREST-JSTの専属研究員として、装置の保守管理、研究の両面で活躍。



吉田幸子
チーム事務員として、様々な業務を正確にこなし、少しおしゃれでソフトな人柄でチーム内、領域事務所との事務連絡を潤滑に進め、研究推進に貢献。



NTT平山チームの山口浩司、都倉康弘、村木康二、藤澤利正、蟹沢聖（上段） 佐々木智、鈴木恭一、林稔晶、板倉利文、遊佐剛（中段） 高品圭、熊田倫雄、 Dr.D.G.Austing（現在、カナダNRC）（下段）の各氏は日夜研究に努力し、様々な成果の達成に尽力した。



メンバーではないが、本プロジェクトの基本になる高品質半導体ヘテロ構造の成長に貢献し、その高品質半導体ヘテロ構造で世界的に知られる佐久規氏(NTT-AT)（左）半導体微細加工を中心に貢献した宮下宣氏(NTT-AT)(右)に深く感謝したい。

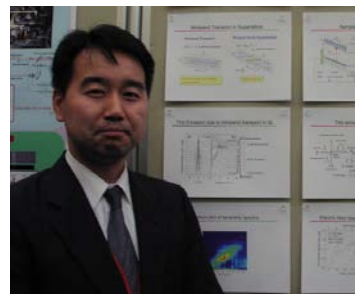
平川グループ



東京大学生産技術研究所
教授 平川一彦



東京大学生産技術研究所
助手 関根徳彦



元東京大学生産技術研究所
助手 島田洋蔵
現在：産業技術総合研究所



JST CREST 研究員
Madhavi Seetamuraju
現在：University of
California, Riverside



JST CREST 研究員
Haiyu Sang