## 戦略的創造研究推進事業 発展研究(SORST)

## 研究終了報告書

## 研究課題「キャリア相関を用いた量子コヒー レントシステム」

### 研究期間:平成 15 年 12 月 1 日~ 平成 20 年 3 月 31 日

# 平山 祥郎 (東北大学、教授)

#### 1. 研究課題名

"キャリア相関を用いた量子コヒーレントシステム"

#### 2. 研究実施の概要

本研究の目的は電荷、電子スピン、核スピンなどを半導体中でコヒーレントに制御し、半 導体における量子ビット動作、さらには複数の量子ビットが相互作用する多量子ビット動 作を追究することにある。プロジェクトを通して、十分とは言えないがそれぞれの量子ビ ットに対して着実な進展が見られた。特に半導体中での核スピン制御に関しては大きな進 展があり、この分野では本 SORST チームが世界の研究をけん引している。また、これら の量子ビットの基本になる半導体構造の技術的な改善や物性の理解が進み、本 SORST で 開発した新しい NMR を用いた新展開も得られた。さらに、ナノプローブや量子情報処理 に関しても進展が見られた。SORST プロジェクトで得られた成果は Science、Nature、 PRL など知名度の高い雑誌に多く掲載され、招待講演も多数行うなど、関連する分野にお いて世界的な存在感を示すことができたと思う。

本 SORST では半導体量子ビットに向けた直接的な研究とそれを支える基礎的な研究の両 面でプロジェクトを推進した。半導体量子ビットに向けた研究では、結合量子ドットを用 いた電荷量子ビットの実現を受けて、その技術の高度化、結合量子ドットを集積して2量 子ビットを実現することに力を入れた。特に、結合量子ドットを横方向に集積化した構造 では、隣接する結合量子ドット間のクーロン相互作用を実験から見積もり、その大きさが 2量子ビット動作を実現するために十分な大きさであることを確認した。一方で、電荷量 子ビットならびに次に述べるスピン量子ビットの読み出し技術として期待されている高感 度単電子読み出し技術に関しても大きな進展を得た。具体的には、単純に単電子の有無を 読みだすだけでなく電子がどちらから来て、どちらに出て行ったかまで検出できる仕組み を整えた。これは、いわば交通量調査のように電子の動きを1個単位で測定できるもので あり、電子の動きの統計処理など伝導特性の基礎評価にも大いに貢献するものである。ま た、動く方向も含めた単電子検出を実現したことで、はじめて、アトアンペアを測定でき る電流計を実証することにも成功した。

電子スピンを用いた量子ビットに向けた研究も、特に量子ドット中の電子スピンを操作す る方向で研究を推進した。電子スピン量子ビットに向けては、アンテナやコイルを用いた 交流磁場印加よりさらに集積化に向いた局所的な制御として、傾斜磁場中で電子を動かす 新しい手法を提案し、実験的に 10mT の振動磁場という従来のアンテナを用いたものより 高い振動振幅が実現できることを示した。さらに、単一電子スピン共鳴(単一電子スピン ESR)を実現した。同実験を通して、この手法が核スピン揺らぎやスピン・軌道相互作用を 利用する他グループの方法に比べて優位であることも確認した。スピン状態の読み出し技 術に関しては、少数電子縦型量子ドットの高磁場下での電子スピン状態が厳密対角化によ る計算と電気伝導測定の結果とを合わせることで同定できることを示すとともに、横型量 子ドットにおいては、スピン偏極した量子細線をリードとして用いることによって量子ド ット中の電子スピン状態の同定が可能になることを示した。最近では、横型量子ドットに おいて電子スピン状態に依存して負の微分抵抗が観測されることも確認した。また、二つ の量子ドットが量子細線をはさんで対向した構造において、ひとつの量子ドットのスピン 状態がもう一つの量子ドットのスピンを介した伝導現象に影響を与えることを確認し、量 子ドット中の電子スピン状態の非局所的な制御や読み出しが可能になることを示した。 半導体中の核スピンを用いた量子ビットに関しては、この SORST が世界をリードした。半 導体で異なるスピン状態が同じエネルギーで共存する(縮退する)時に、電子スピンと核 スピンのフリップ・フロップ相互作用が促進され、核スピンの動的な偏極ならびに核スピ ン偏極度の伝導特性評価が可能になることを追究し、半導体ヘテロ構造、ポイントコンタ クト構造、量子ドット構造において世界を代表する成果を上げた。特に、半導体ポイント コンタクトにおいてはポイントコンタクト領域での核スピンの偏極、集積したアンテナゲ ートによる核スピンのコヒーレント制御、コヒーレント制御による核スピンの回転の抵抗 検出に成功した。単純な抵抗検出ではないが同様の核スピンの偏極、コヒーレント制御、

伝導特性からの読み出しに関しては量子ドットに関しても成功した。GaAs を構成している Ga、As 核はそれぞれ F-3/2の核であり、核スピン状態は4つに分裂する量子4準位系であ る。SORST での成果はこの4 つの状態間の任意の二つの状態間で理想的なコヒーレント制 御が実現できることを示しており、2 量子ビット動作に相当する。 2 量子ビット動作に向 けて、計算の初期状態にあたる等価的な純粋状態を実験的に作成するとともに、具体的な 量子演算に向けたシミュレーションも行った。また、これらの系における核スピンの緩和 時間の実験を進め、縦緩和時間 I,が数百秒のオーダーに至ること、また、横緩和時間 I,は 0.6 ミリ秒に達することがわかった。さらに、Taには伝導電子や近接する核スピンからのデ コヒーレンスが効いてくることを確認し、これらを取り去ることで T<sub>o</sub>が 2 ミリ秒近くに伸 びることも確認した。さらに、量子ドットを用いた実験では動的な核スピン偏極による偏 極率が 50-60%に達することを確認した。また、抵抗検出ではなく、標準的なコイル検出 による NMR (標準 NMR) においてもその高感度化を図り、特に、パルス列のコヒーレント性 への影響を調べる実験を中心的に行った。実験では多重反転パルス列の照射により核スピ ンコヒーレント時間が大幅に増大する現象を確認した。この結果は量子コンピュータで制 御のために打つパルス列により、実効的にコヒーレント時間が増大できる可能性を示唆し ており、半導体中核スピンを用いた量子ビットに向けて勇気づけられる成果である。標準 NMR 実験では、スピンの局所制御に向けて重要になる微小磁石が作る局所磁場の直接観察に も成功している。

一方で、半導体量子コンピュータ実現をサポートする基礎研究として、キャリア相関を含 む物性研究、半導体ナノ構造/ヘテロ構造の構造作製、ナノプローブ技術、量子情報処理に 関する研究を推進した。この分野でも核スピンを含む物性研究では大きなインパクトのあ る成果を達成した。すでに述べた半導体ナノ構造での核スピン制御は、言い方を変えれば 半導体ナノ構造での NMR(核磁気共鳴)である。通常の標準 NMR は最高感度でも 10¹¹-10¹³ 個の核スピンが必要であり、これに比較して画期的に感度の高い NMR が実現されており、 チップ上でできる NMR とうことで"NMR on a chip"とも呼ばれている。これを用いると、 ナノスケールの特性を高感度に NMR で検出することができる。例えば四重極分離にはナ ノ領域での歪みの情報が入っていることが明らかになった。さらに、通常の測定では観察 が困難な電子スピンの振る舞いを半導体ヘテロ構造で明確にすることにも成功した。具体 的には二層系において出現することが期待されている傾いた電子スピン状態が確かに存在 することを NMR スペクトルのナイトシフトから明らかにするとともに平面方向の成分が 有する自発的回転対称性の破れによる二次元電子スピンの低周波揺らぎを核スピンの緩和 時間から非常に明瞭に検出した。同様の測定は分数量子ホール系での複合フェルミオンン のスピン偏極を観測したり、GaAs 系量子井戸でのポテンシャル閉じ込めの対称性の乱れに よりわずかに生じるスピン・軌道相互作用を高感度に検出したりするのにも応用された。 その他にもこの SORST プロジェクトでは多くの物性実験が進展した。インパクトの高いも のとして、横型量子ドットおよび縦型二重量子ドットにおける電子スピン緩和時間の実時

間電荷読み出し及びポンプ&プローブ法による測定、電子スピンの緩和へのスピン - 軌道 相互作用や核スピン揺らぎの影響の確認、量子細線を近接して並べた結合量子細線におけ るクーロンドラッグ測定と世界初の一次元ウィグナー結晶の検出などがある。

すべての研究の基本になる半導体ナノ構造/ヘテロ構造の構造作製についても継続して研究を進めた。GaAs系半導体ヘテロ構造では分数量子ホール効果の研究に十分に耐えられる高移動度ヘテロ構造の結晶成長を維持するとともに、バックゲートなど制御性に優れた構造設計を進めた。さらにポイントコンタクトや量子ドット構造に関しても、デバイス設計、基本特性測定の両面で研究を継続した。さらに、GaAs系とは全く異なり核スピンの影響がなく集積化にも向いていると期待されているSi系の量子井戸に関しても研究を開始し、Si量子構造の谷分離の特性、特にゼロ磁場での谷分離とその制御の可能性を明らかにするとともに、Si系できちんと制御された量子ドット、結合量子ドットがうまく作製できる条件を検討し、スピンブロケードなどの基本特性を明確にした。

ナノスケールでの測定・制御を目指したナノプローブの研究にも着実な進展があった。ナ ノプローブによる光学的測定として低温で強磁場中で動作する走査型近接場光学顕微鏡技 術(SNOM)を開発し、半導体ヘテロ構造の局所的な光学特性測定に応用した。また、高 速で電気信号をナノスケール検出できる走査型マクスウェル応力顕微鏡(SMM)の開発を行 い、GHzに近い高速で電気信号を検出できる基盤を整えた。さらに、電子状態のナノスケ ール測定としては InAs 量子井戸中に閉じ込められた二次元系の STM、STS 測定を実現し、 理論計算で予測される通りの井戸型ポテンシャル中に閉じ込められた電子状態が明瞭にナ ノプローブ観察できることを示した。量子情報処理に関した基礎研究も継続して推進し、4 準位系の量子計算に向けて、特に計算結果を読みだす量子状態トモグラフィに関して理論 的研究を推進するとともに、量子情報処理の基礎的な事項に向けて、光学的な基礎実験と 理論的な検討を並列して進めた。

各グループの研究実施の概要としては、東北大・NTT グループ(平山・藤澤グループ)で は半導体量子ビットに向けた研究として、集積化した結合量子ドットを用いた 2 量子電荷 ビットに向けた研究を推進し、2 量子ビット動作に十分なクーロン相互作用を確認すると ともに、量子ビットの読み出しとして重要な単電子、特に、動く方向まで含めた単電子測 定を世界に先駆け実現した。さらに、スピン量子ビットに向けて非局所的なスピン制御の 可能性を示すとともに、半導体ヘテロ構造、ポイントコンタクト構造で核スピンのコヒー レント制御が可能であることを示した。特に、ポイントコンタクトとアンテナを集積化し たデバイスでは Ga、As 核の 4 つに分裂する核スピン状態間での極めて明瞭なコヒーレン ト制御を抵抗検出 NMR で測定することに成功し、等価的な 2 量子ビットが実現できるこ とを示した。半導体量子ビットに向けた基礎研究としては、核スピン測定を用いることに より半導体ヘテロ構造のスピン状態をこれまでにない高感度で明らかにすることに成功す るとともに、高移動度ヘテロ構造の結晶成長、高品質ナノ構造の構造作製に関する基礎研 究を継続した。特に、GaAs 系とは異なる特徴を有する Si 系のシステムに着目し、Si 系に 特徴的な谷分離に関して新しい知見を開くとともに、Si 系量子ドットに関するスピン、軌 道、谷状態の基礎的な検討を着実に推進した。また、ナノプローブ測定に関しても研究を 継続し、低次元電子系の量子閉じ込め状態を STM、STS で直接観察する試みを推進した。 東大グループ(山本グループ)では電子スピン量子ビットに向けた研究に力を入れ、特に 傾斜磁場中で量子ドット内の電子の存在位置を交流電場で駆動することにより、ESR 実験 が可能になることを示した。これはアンテナで交流磁場を加える通常の ESR に比べて局所 的制御に優れた手法であり、将来の集積化にも期待が持たれる。また、量子ドット中で電 子スピンと核スピンの相互作用を利用し核スピンを制御する研究も推進し、核スピン量子 ビット動作を実現するとともに、動的核スピン偏極により偏極度 50%以上が実現されるこ とを示した。半導体量子ビットに向けた基礎研究としては、縦型・横型の量子ドットの構 造作製に関して基礎的な検討を進めるとともに、単一電子スピンからドット内核スピン集 団への量子情報転写を目指した高速電圧制御の準備を進めた。さらに、結合量子細線を用 いて細線間のドラッグ効果を世界に先駆け精密測定し、一次元ウィグナー結晶の存在を示 唆するデータを得た。さらに、電子の粒子性や統計的な性質を観測することを目的として、 世界最高水準で電流雑音および電流雑音相関の測定を行える系を希釈冷凍機に立ち上げた。 新潟大グループ(佐々木グループ)では東北・NTT グループならびに東大グループで進めて いる抵抗検出 NMR と相補的になる通常のコイルを用いる標準的な NMR を用いて、特に NMR で進んでいる様々なパルス列の研究を進めた。研究にあったっては、感度を上げる意味か らも、抵抗検出との比較の意味からも標準的な NMR において 100mK 以下という極低温を実 現することが不可欠となるため、標準 NMR 仕様の希釈冷凍機の設計を行い導入した。新し い装置などを用い、特に連続的に核スピン制御パルスを加える研究を進め、短い間隔でパ ルスを与えることにより T2時間が大幅に増大すること、さらに、この現象が F=1/2の核ス ピンに限らず、*I*=3/2のGaやAs核でも生じることを明確にした。さらに、磁場勾配の測定 や様々な固体材料の NMR 測定を推進した。産総研グループ(時崎グループ)では、半導体 量子ビットの局所的制御、局所的測定に対応できる高速動作に適したナノプローブの開発 を進めた。高速動作に向いた走査型マクスウェル応力顕微鏡(SMM)の研究を進め、カンチレ バーや測定系に工夫を加えることで高速で電気信号を検出できる基盤を整えた。また、も

ともと高速動作に適している走査型近接場光学顕微鏡技術(SNOM)の改良を進め、低温・ 磁場中での測定を実現するとともに、デュアルプローブの研究も推進した。<u>阪大グループ</u> (オズデミールグループ)では量子情報処理の基礎的な検討に集中し、核スピンを用いた 量子演算スキームについて量子状態トモグラフィを中心に研究を進めるとともに、量子情 報処理の基礎的な事項に関して光子を用いた基本的な実験や様々な理論的な検討を推進し た。

#### 3. 研究構想

本 SORST プロジェクトは前進の CREST 「相関エレクトロニクス」の研究で半導体中で電 荷、励起子などのコヒーレント制御が実現されたことを受けて、半導体量子コンピュータ に向けた基礎研究の重要性から延長が認められたものである。特に半導体中での電子スピ ン・核スピン相互作用の研究が新たに進展したことを受けて、核スピン量子ビットも重要 な目標に含めて、電荷、電子スピン、励起子、核スピンの半導体構造中でのコヒーレント 制御を追究し半導体量子コンピュータの実現につなげるために SORST 研究プロジェクト を構想した。特に、伝導特性を中心に研究を進めるチーム構成から電荷、電子スピン、核 スピンのコヒーレント制御に焦点をあて、SORST チームが世界に先駆け実現した半導体ナ ノ構造中での核スピン制御や自ら提案した電荷量子ビットの発展、電子スピン量子ビット の新手法に重点を置いて研究を進めた。具体的には、1 量子ビットの基礎をしっかり捕ら えること、コヒーレント操作や操作結果の読み出し技術を拡充することに重点を置いた。 多量子ビット化に向けて量子ビット間の相互作用(エンタングルメント)を実現するため に必要な様々な制御手法に関してその可能性を検討するとともに、多量子ビット化に不可 欠な新しい量子構造の設計と作製、ならびにそれらの構造でのキャリア相関の理解を目指 した。量子演算に適したパルス操作方法、デコヒーレンスのメカニズム、デコヒーレンス が少ないパルスの加え方、数量子ビットでできる量子情報処理の検討も将来の研究発展に 向けた重要な研究目標と考えた。半導体量子コンピュータの実現に不可欠な高品質半導体 の成長、ナノ構造作製技術の維持、将来の半導体量子コンピュータ構成要素になる様々な ナノ構造の特性の改善と基本的な物性の理解も並行して追究した。材料系として、GaAs 系は品質の高さ、量子ドットの優れた制御性、豊富な核スピンの観点から大変面白い系で あるが、逆に核スピンの存在が電子スピン量子ビットの障害になる点も指摘されたことか ら、核スピンの影響のほとんどない Si 系の量子構造にも研究を展開した。さらに、半導体 中で生じている現象をナノスケールで理解すること、将来の量子サーキットテスタの基礎 を築くことを目指してナノプローブの研究も推進した。

研究体制については、東北大(平山)とNTT(平山→藤澤)チームで研究総括ならびに量 子コヒーレント構造の作製と物性測定を推進した。具体的には電荷量子ビット、核スピン 量子ビット、核スピンを用いた物性測定、高品質へテロ構造・ナノ構造の作製と基本特性 評価、Si系量子構造の評価、半導体低次元物性のナノプローブ計測の研究を進めた。2006 年7月に研究代表者の平山がNTTから東北大に異動したため2チームに分かれたが、異動 後1・2年は東北大の実験装置が立ち上がっていないこともありSORST期間中は実質的に 一体化して研究を推進した。東大(山本)チームは半導体ナノ量子構造の伝導特性研究と して、縦型・横型量子ドットの物性研究、量子ドットを用いた電子スピン量子ビット、核 スピン量子ビットの研究を推進した。新潟大(佐々木)チームは標準的なNMRを用いた 研究に集中し、特にコヒーレント制御用のパルス列の研究を進めた。産総研(時崎)チー ムは高速ナノプローブ技術を開発すべく走査型マクスウェル応力顕微鏡(SMM)と走査型近 接場光学顕微鏡技術(SNOM)の技術開発に集中して研究を進めた。阪大(オズデミール) チームでは量子情報処理の基礎研究を理論と光子を用いた基礎検討の立場から推進すると ともに、核スピン量子ビットを念頭に量子4準位系さらには量子多準位系の量子操作に関 する理論的な検討を進めた。

#### 4. 研究実施内容

#### 4.1 量子コヒーレント構造研究グループならびに量子コヒーレント物性研究グループ (東北・NTT グループ)

量子コヒーレント物性研究グループは研究代表者の平山が2006年7月に東北大学に異動したことにより、それまでのNTT物性科学基礎研究所にあった量子コヒーレント構造研究グループから別れて東北大学に設置したものである。量子コヒーレント物性研究グループの設置期間は短くほとんどの研究は量子コヒーレント構造研究グループと共同で遂行されたので、この報告書には二つのチームの実施内容と成果を東北・NTTグループの成果としてまとめて記載する。

#### (1) 実施の内容

#### a. 電荷量子ビットに向けた研究

CREST で実現した電荷量子ビットや励起子量子ビットを集積化して多量子ビットを目指 して研究を進めた。励起子量子ビットに関しては積層ドット構造などで研究を進めたが大 きな進展は得られなかった。一方で、電荷量子ビットに関しては当初計画よりは遅れてい るものの着実な成果が得られている。具体的には電荷量子ビット(Hayashi *et al.*, Phys. Rev. Lett. 91, 226804 (2003))の実現に用いた結合量子ドット構造を並列に並べた構造を



図1 作製された結合量子ドット(a)とその等価回路(b)。 金 色に色づけされた部分はショ トキーゲートであり、このゲートに適度な負のバイアスを加 えることで並列に近接した結 合量子ドットが実現される。

作製した(図1)。この構造では上側と下側の結合量子ドットのゲート電圧を制御することで 等価的に電子がどちらにも入っていない状態(0)、左のドットに電子が1個入っている状態 (L)、右のドットに電子が1個入っている状態(R)、両方のドットに電子がひとつずつ入っ ている状態(2) をそれぞれ上側、下側の結合量子ドットに実現することができる。さらに、 結合量子ドットに少し大きなバイアスを加えることで左右の量子ドット内の零次元電子状 態が共鳴するときに結合量子ドットを通して電流を流すことができる。すなわち、結合量 子ドットの電流を測定することで量子ドット中の零次元状態がどこに現れるかを測定する ことができる。この実験では上側の結合量子ドットを流れる電流 Lと下側の結合量子ドッ トを流れる電流 Leを上下のドットのゲート電圧を同時に走査することで上下の結合ドット の電荷状態を制御しながら測定した。得られた結果を図2に示す。例えば I<sub>1</sub>に表れる上側 の量子ドットの零次元状態の共鳴による電流のラインに着目すると、下側の結合量子ドッ トの電荷状態が変わるところでジャンプしていることがわかる。同じことは下側の結合量 子ドットを流れる L2に関しても測定される (Shinkai et al., APL2007)。 このジャンプ量か ら結合量子ドット間の静電結合の大きさを測定することができ、実験から得られた結合の 大きさはエネルギー準位にして 70uev 程度であり、ドット間の容量から推定される値に良 く合致している。Hayashi らの電荷量子ビットの実証では結合量子ドット間のトンネル結 合が 10µev 程度のところで電子1個の電荷のコヒーレント振動が観測されており、得られ た結合量子ドット間の結合の大きさは電荷量子ビットで2量子ビット動作を実現するのに 十分な値であることが確認できる。同様に、この結合の大きさは量子ドット系でスピンが 結合した2量子ビットを実現するのにも十分な値である。現在、この系にパルスを加える ことによりコヒーレント振動が静電結合によりどのように変調されるかという2量子ビッ ト実現に向けた実験を進めている。



図2 上下の結合量子ドット に流れる電流 *I*,, *I*,のゲート電 圧による変化。実験では上下の 結合ドットのゲート電圧を同 時に制御している。電流ピーク を示すラインのジャンプから 二つの結合量子ドット間に静 電結合が存在することが分か る。

#### b. 方向も含めた単電子カウント

a. で議論したように近接した半導体ナノ構造には静電結合が生じる。この結合は電荷量子 ビットの2量子ビット化に向けて利用されるのみならず、電子1個の電荷がナノ構造中に 存在するかしないかを読み出す手段としても用いることができる。この高感度に単電子を 検出する技術は電荷量子ビットあるいは電子スピン量子ビットの読み出しに不可欠な技術 である。我々はこの技術をさらに進展させて、電子の存在のみならず電子の動いた状況を 丁度道路の交通量調査のように電子1個の単位で測定し、電子1個の精度を持った高感度 電流検出を実現することを試みた。

これまでの高感度電流計では fA などの測定が実現されているが、この電流でも数万個の電子が流れている。逆に言えば、少なくとも数万個の電子が流れない限り電流として検出することは困難であった。本研究では、単電子電流計を実現するために、図3のように結合量子ドットと電荷計として働く半導体ポイントコンタクトが隣接した構造を作製した。ポイントコンタクトを流れる電流は周囲の電荷状況を敏感に反映するため、量子ドットの中にいる電子の数が1個でも増減すると、その電荷の変化に対応してポイントコンタクトを流れる電流が変化する。すなわち、量子ドットに電子が出入りしたことが分かる。しかし、それだけでは電子が出入りしたことは分かっても、その電子がどちらから来たか、またどちらへ行ったかは分からない。今回開発した単電子電流計では、量子ドットが2つ直列に並んだ結合量子ドットを用いており、左右二つの量子ドットでポイントコンタクトまでの距離が異なるため、同じように電子1個が量子ドットをたかしましたの量子ドットのでもたろの量子ドットのでもたちらに入るかでポイントコンタクトに流れる電流値は変わってくる。このことをうまく利用することにより、電子の存在のみならず電子がどちらの方向に動いたかが分かるようになり、はじめて単電子電流計が実現された(Fujisawa *et al.*, Science2006)。



実際に結合量子ドットを通して電流を流すと、電子が結合量子ドットの左右のドットを行 き来する。隣接するポイントコンタクトを流れる電流は、左右二つの量子ドットとポイン トコンタクトの距離が異なるため、電子が左のドットに存在する状態(L)、右のドットに 存在する状態(R)、どちらにも存在しない状態(0)に対応した3つのとびとびの値をと り、その間を飛び移るような変化を示す(図4)。LからRへのジャンプは電子が左のドッ トから右のドットに移動したことを示す。Rから0へのジャンプはさらに電子が右のドッ トから電極に抜けたことを示している。LとRの間のジャンプは電子が左右のドットを行 き来していることを示している。このようにして電子1個の動きを正確に



時間

図4 単電子カウンティングの測定例。

捉えることにより、二重量子ドットを通り抜けた正味の電子数をカウントすることが可能 になり、極めて微小な電流の測定が実現される。

超高感度電流計としての性能を実証するため、別の単電子トランジスタを直列につなぎ、 流れる電流をこの単電子電流計で測定した(図5挿入図)。その結果、数十 aA(アトアン ペア、アトは 100 京分の 1)から数 aA という、従来の高感度電流計では測定不可能な微小 電流領域においても、単電子トランジスタに特徴的な電流ピークが明瞭に観測され(図5)、 このときの電流雑音はピーク値で約3 aA と、従来の高感度電流計の感度を3桁以上も上ま わっていることが確認された。さらにこの単電子電流計では、電子の行き来をすべてカウ ントできる特長がある。このような電流の揺らぎ、すなわち電流雑音は、電流が電子とい う粒(=量子)の流れであることや、電子間の相互作用によって生じる電子の流れの規則 性なども反映しており、この単電子電流計にはそのような量子の世界を探る新たなツール としても大きな期待が持たれている。



#### c. 非局所的な電子スピン制御

NTT・東北グループでは電荷量子ビットと次に述べる核スピン量子ビットに向けた研究を 集中的に進めたが、電子スピン量子ビットを視野に入れた半導体ナノ構造中での電子スピンの制御に関する研究も推進した。特に、非局所的な手法で電子スピンが制御できる可能 性を探るために空間的に離れた量子ドット間での電子スピン相関の研究を実験的に行なっ た。用いたデバイスの SEM 写真を図6に示す。このデバイスでは左右の二つの量



**図6** 非局所的なスピン制御実 験に用いた量子ドット-細線-量 子ドット構造

子ドットが中央の細線を挟んで対向している。実験では特に量子ドットを形成するバリア を低くして近藤効果が観測される領域で実験を行った。得られた測定結果の一例を図7(a) に示す。ここでは右側の量子ドットを通して流れた電流をカラープロットしている。青が 電流の少ない領域であり赤が電流の多い領域を表している。Vor=-0.78Vから-0.75Vに見ら れるほぼ水平な電流の大きな帯は近藤効果で右側のドットに電流が流れている領域である。 単純なモデルではクーロンブロッケードにより電流が流れない領域であるが、右側のドッ ト内の電子数が奇数であることに対応して近藤効果による電流の増大が生じている。一方 でこの図の横軸は反対側に位置する左側のドットのゲートで電圧 VoL である。電流の大き なほぼ水平な帯の中に VoLにより変調される微細な縦縞が観測されている。この縞模様の 第一の理由は VpLの変調によりドットと細線の間の Fano 共鳴が変調されるため細線のコ ンダクタンスが周期的に変化することにある。図6の配置では右側の量子ドットを流れる 電流を細線部分のコンダクタンスも含めて測定しているため、この周期的な振動が明瞭に 図7(a)に表れている。ここでさらに着目したいのは量子ドットと細線が分離していて Fano 散乱の影響が少ない電流の大きな(白から赤い色で示されている)領域である。Fano 共鳴 が生じるたびに左側の量子ドットの電子数はひとつずつ変化しているはずであるが、良く 見ると電流が大きい縞と小さい縞が交互に繰り返されていることがわかる。図7(b)はそ れぞれ▼ならびに▽のところで測定した dLp/dVacのバイアス(Vac)依存性である。電流の大 きい▽のところでは V<sub>de</sub> =0 近傍にピークが残っており、明瞭な近藤効果が生じていること が確認できる。これに対して、その両側の▼のところではこのようなピークが消失し、近



**図7** (a) 近藤効果の非局所的制御を 示した実験結果、(b)  $\nabla$ で見られる近藤 効果の特徴である $V_{dc}$ =0近傍のピーク が $\nabla$ では消失している。

藤効果が抑制されている。ゲートバイアスを様々に振った実験結果から▼のところでは左

側の量子ドットの電子数が奇数になり、▽のところでは偶数になっていることがわかる。 この実験結果は空間的に離れた左側の量子ドットの電子数の偶奇を変化させることにより 右側の量子ドットの近藤効果が変調できることを示しており、空間的に離れたドット間の スピン相関を測定したものとしてインパクトの高い成果である(Sasaki *et al.*, PRB2006)。 可能性のあるスピン相関のメカニズムとしては RKKY (Runderman- Kittel- Kasuya-Yoshida) 相互作用による近藤効果の抑制が考えられるが、Fano-Kondo 効果で細線の状 態密度が変調されそれが近藤効果に間接的に影響していることも考えられる。現在、この 二つの効果を見分けるために各量子ドットの近藤効果を間に挟んだ細線に電流を流すこと なく測定できるデバイス配置を考案し測定を進めている。

#### d. 半導体ナノ構造での核スピン制御

半導体ナノ構造における核スピン制御に関しては当初の予想を超える高いレベルの成果が 得られており、本 SORST プロジェクトが世界をリードしている。一般的な NMR 分析法は、 構造のイメージ化や基礎研究のために、バイオから物理の分野まで、広範囲に渡って使わ れているが、これは原子核スピンの量子力学的性質を検出することに基づいている。SORST での研究成果は、この核スピンを直接、しかも高感度に検出するもので、半導体ナノ構造 に対して全電気的に実現した。さらに、普通の NMR では通常「観測できない」多スピン準 位間の重ね合わせ状態によって作られる量子力学的状態をも検出し、制御することが可能 となった。得られた成果は核スピン量子ビットに向けた研究成果としても画期的であるが 少数核スピンの高感度検出法として固体 NMR にも革新をもたらすものである。

NTT・東北グループでは CREST 時代から半導体ヘテロ構造における電子系と核スピン系の相 互作用の研究、さらにこれを利用した核スピン偏極、核スピン偏極の抵抗検出の研究を精 力的に進め、特に充填率 2/3 の分数量子ホール効果における電子・核スピン相関を研究し てきたが、SORST ではこの成果を半導体ナノ構造に発展させることを試みた。具体的には 充填率 2/3 の電子・核スピン相関が生じる状態を量子ポイントコンタクト中に実現し、系 に電流を流すことにより電流密度が高くなるポイントコンタクト領域の核スピンのみを局 所的に偏極すること、偏極された核スピンをポイントコンタクト上に集積したアンテナゲ ートに流す交流電流(言い換えればアンテナゲートが作る交流磁場)によりコヒーレント に回転させること、核スピンのコヒーレント振動による垂直磁化の変化をポイントコンタ クトの抵抗で読み出すことを実現した。図8に実際に実験に用いたデバイスの概略図を示 す。



**図8** ナノスケール領域での核スピンのコヒーレント制御に用いた半導体ポイントコン タクトデバイスの概略図。



**図9**<sup>75</sup>AsのNMR周波数近傍で観測された *I*=3/2核の4つに分裂したスピン準位間の様々な 遷移に基づくコヒーレント振動。アンテナゲートに流す電流を増やし高周波電磁波の強度 を強くすると2スピンさらには3スピン間隔のコヒーレント振動も測定された。

図9はアンテナにパルス RF 電流を流したときに測定されたポイントコンタクトの抵抗変 化の一例である。横軸が RF 電流の周波数、縦軸がパルス電流印加時間であり、抵抗の変 化がカラープロットで示されている。青は変化がない領域、赤は大きな抵抗変化を示して いる。このデータは As の共鳴周波数付近を拡大したものであるが、核スピンのコヒーレン ト振動による抵抗の振動が明確に測定されていることがわかる。Ga ならびに As は F=3/2 の核であり、図9右側に示したように4つの準位に分裂する。実際のデバイスで存在する 四重極分離を考えると各準位間のエネルギー差はわずかに変化する。このエネルギー準位 と図9左側の実験データを比較すると I、II、IIIの振動はそれぞれ隣接した準位間のコヒ ーレント振動であることがわかる。共鳴周波数からずれたときにより小さい振動の振幅、 より早い周期で振動する様子も良く観測されている。さらに特筆すべきことは、Iと II な らびに II と III の間に振動が明瞭に観測される点である。IV/2 ならびに V/2 と名付けられ たこの振動は2スピン間隔離れた準位間のコヒーレント振動が2光子により引き起こされ るもので、さらに、アンテナに流す RF 電流を大きくすることで3スピン間隔離れた準位 間のコヒーレント振動 VI/3 も観測された。この測定例は As の共鳴周波数近傍であるが、 同様のコヒーレント振動はデバイスを構成する Ga、As のすべての核種において、Ga、As を特徴付ける4つに分裂した核スピン準位(量子4準位系)に可能なすべての遷移に対し て明瞭に測定された。これらの実験はナノスケールでの少数核スピンの精密なコヒーレン ト制御を世界で初めて実現したものとして高い評価を得た(Yusa et al. Nature2005)。ポ イントコンタクト領域に含まれる核スピンの数をカウントすると10<sup>8</sup>個以下で、通常の NMR 技術の感度極限 10<sup>11</sup>-10<sup>13</sup> 個より 3~5 桁少ない核スピンを検出している。また、垂 直磁化を直接測定するために従来の NMR 技術では測定できない多スピン間隔の遷移が 明確に測定できていることからも得られた成果は高感度・高精度 NMR としても画期的で あることがわかる。

Ga、Asの核は量子4準位系を形成しており、各準位間の完璧なコヒーレント制御は実効的 な2量子ビット動作に他ならない。量子ビットとしての様々な基礎実験を行うためにまず ポイントコンタクトデバイスにおける核スピンのデコヒーレンスを検討した。デコヒーレ ント時間(*T*2時間)はAs核スピンに対するIIIの振動のパルス時間による振動振幅の減衰 を指数関数にフィッティングすることにより評価した。図10に示すように特に何も decoupling を行なわない場合  $T_2$ は約0.6ms であるが、Ga 核スピンをランダムにするヘテ ロ核 decoupling を行なうと1.2msにさらにコヒーレント操作中にポイントコンタクトを空 乏化して伝導電子による影響を無くすと  $T_2$ 時間は1.5ms にのび、両方の decoupling を行 なうと最大で  $T_2$ =1.8ms になることがわかった。それぞれの測定を比較することでデコヒ ーレンスの機構を検討することができるが、得られた結果は隣接する Ga と As の核間の直 接的なダイポール結合によるデコヒーレンスが小さいことを示している。この一見意外な 結果は GaAs が閃亜鉛鉱型の結晶構造を持ち、磁場を(100)方向に印加している場合、隣接 する Ga と As の結合はいわゆるマジックアングル ( $\theta$ =54.7347deg)を満たし結合が実効 的にゼロになることで説明される (Ota *et al.*, APL2007)。実際に磁場の印加方向を変えた 実験では Ga と As の直接的なダイポール相関による  $T_2$ 時間の減少が確認されている。得 られた  $T_2$ 時間は核スピンの特性を反映してかなり長いものになっているが、SORST で得 られた研究成果はさらに磁場の印加方向や伝導電子密度などを制御することで $T_2$ が大きく 変化することを示しており興味深い。これは、逆に言えば核スピン間の結合を磁場の印加 方向や伝導電子の状態を変えることで制御できる可能性を示唆している。

もうひとつ将来の量子演算に向けて必要な前提条件として核スピンの初期状態を演算に適 したものに揃える初期化がある。理想的には純粋状態と呼ばれるひとつのスピン状態にす べての密度が集中した状態が好ましいが、電流による核スピンの動的偏極でこれを実現す ることは不可能である。一方で、ひとつのスピン状態だけが大きい(あるいは小さい)密 度を示し、残りのスピン状態がすべて同じ密度を持っていればこの状態を等価的な純粋状 態として捉えることができる。我々は実際にポイントコンタクトに電流を流し核スピンを 偏極し、さらにこの偏極状態に適当な RF 周波数のパルス列を加えることにより実験的に 等価的な純粋状態を形成することに成功している。なお、これらの半導体ポイントコンタ クトデバイスを用いた核スピン量子ビットに向けた研究はレビュー論文にまとめられてい る (Hirayama *et al.*, JPCM2006)。



**図10**<sup>75</sup>Asで測定されたラビ型のコヒ ーレント振動の様子。(a) decoupling プロセスがない場合、(b) ヘテロ核 decouplingを施した場合、(c) 伝導電子 の影響をdecoupleした場合、(d) ヘテロ 核decouplingと伝導電子decouplingの 両方を施した場合。

#### e. 半導体の電子スピン状態の核スピン計測

SORSTの研究を通してAlGaAs/GaAs半導体量子井戸やナノ構造で電気的な手法で核スピンの偏極が可能であり、抵抗値を測定することで核スピンの情報が得られること、さらにこれらを組み合わせることで核磁気共鳴(NMR)が可能であることが明らかになった。これらは核スピン量子ビットに向けた成果として画期的なだけではなく、新しい NMR 技術としても大変有望である。NMR スペクトルや核スピンの緩和は周囲の構造変化や電子スピン状態に大変敏感であり化学、物理、医学の世界で強力な測定手法として広く用いられているが、一層の半導体やナノ構造では通常の NMR では感度が足りないため、NMR が半導体の解析に広く用いられることはなかった。これは半導体の場合、一層の量子構造やナノ

構造でゲート電圧を変化させての測定がデバイス応用上も物性物理的な観点からも不可欠 だったからである。抵抗検出の新しい高感度核スピン測定手法がこの SORST プロジェク トで開発されたことで状況は大きく変化し、様々な半導体へテロ構造での核スピン測定が 可能になってきた。ここでは SORST の研究期間中に行なった二層系の電子スピン状態と 量子井戸の閉じ込めポテンシャルが電子スピン状態へ与える影響を測定した例を紹介する。 核スピンの緩和時間(*T*<sub>1</sub>時間)を主に測定したものであるが、核スピン測定の特徴を反映 して通常の測定では把握できない電子スピンの振る舞いの変化が世界で初めて高感度に検 出されている。

図11はこの測定手法を二層二次元系に利用したものである。二次元系が垂直方向に近接 した二層系では層内でのキャリア相関に加えて層間のキャリア相関が重要な役割を果たし、 スピンの自由度と層間の自由度が競合して面白い物理が出現する。ここでは総充填率vtot=2 の場合を考える。上下の層が対称な場合( $\delta = \delta n / n_{tot} = 0$ )、すなわち上下共に丁度 $\nu = 1$ の場合 はトンネル結合により基底サブバンドは Antisymmetric (A)と Symmetric (S) 状態に分 裂するがその大きさはゼーマン分離より小さくスピンの方向が揃った強磁性状態 (ferromagnetic)が実現される。一方で、二層のバランスを崩し片方の層にキャリアを集め ていくことを考える。極限状態ではキャリアはすべてどちらかの層にあり、これはレ2の 一層系に他ならない。この状態では通常ASAS はゼーマン分離より大きくなりアップとダ ウンのスピンがそれぞれ入ったトータルでスピンが偏極していない状態(spin-singlet)が 実現される。理論的にはこの両者の中間で面白い状態、すなわしトータルのスピンは面内 成分を持たないが各層のスピンは面内成分を有しスピンが傾いた状態(canted antiferromagnetic)が存在することが予想されているが、この状態の存在を明確に示す実験 データは存在しなかった。特に、スピンが傾いた状態ではスピンは面内の回転対称性を自 発的に破ることになり、スピン間に相関がある場合、自発的対称性の乱れによるゴールド ストーンモードが発生することが予測される。図11(b)の実験結果は二層系のバラスを崩 していったときに核スピンの緩和時間がどのように変化するかを測定したものである。緩 和時間の測定は次の手順で行った。まず、トップならびにバックゲートを制御し片方の層 をv=2/3の核スピンが偏極できる状態にして、ここで電流を流すことにより核スピンを偏極 しこれを抵抗の増大として読み出す。次にゲートバイアスを変えて測定したいバランス状 態の二層系を実現しこの状態で一定時間 ttemp待つ。その後、再び最初の状態に戻し抵抗値 がどれだけ緩和したかを測定する。最後に抵抗値の緩和と trempの関係から T1時間が計算



図11 (a) Past=2の二層系のエネルギー準位の概略図、ならびに三つの位相、強磁性状態(F)、傾角 反強磁性状態(CAF)、スピン一重項状態(S)における電子スピン状態の概略図、(b)各状態で測定された 核スピン線和時間(II)。

される。これまでの実験から我々の測定条件では抵抗値が核スピン偏極度にほぼ比例する ことが確認されおり、この測定で精度良く緩和時間が求まる。

測定された T<sub>1</sub>は F 状態ならびに SS 状態では長い時間になっているが、スピンが傾いた傾 角状態(CAF)が予想されるところで急激に短くなっていることがわかる。ゴールドスト ーンモードがある場合は低周波の電子スピン揺らぎが予想されているが、この揺らぎによ り核スピンが効率的に緩和されることがわかる。通常の測定では三つの位相の差はほとん ど見えないが、T<sub>1</sub>時間を測定することにより最大 4 桁の変化が測定され、二次元系での傾 角状態の存在ならびにゴールドストーンモードによる揺らぎの存在がはじめて明確になっ た(Kumada *et al.*, Science 2006)。



図12 GaAs単一量子井戸で測定された核スピン緩和。(a) v=2/3における核スピン偏極と抵抗の増大ならびに2秒間v=0.5にスイッチした時の抵抗の変化例。(b)同様の実験を様々な充填率で行った場合の抵抗の変化。この実験では閉じ込めポテンシャルの非対称性は $\delta n_{temp}$ で示されている。この値は等価的に上下から供給される電子密度の差であり。 $\delta n_{temp} = 2(4)$ はそれぞれ密度差2(4) x10<sup>11</sup> cm<sup>-2</sup>に相当する。

さらに単層の量子井戸中での電子スピンの振る舞いも核スピン測定で明確にすることがで きる。図12に単層の GaAs 量子井戸に閉じ込められた二次元系で測定された核スピン緩 和の特性を示す。実験の基本的な行い方は二層系と同様だが、ここでは都合上、2 秒間の ttempで抵抗がどのように変化したかを測定している。図12(a)はv=2/3で核スピンを偏極 後、u=0.5 に 2 秒間スイッチして再び元に戻した時の抵抗の変化を表している。 $\delta n_{temp}$ =0 は v=0.5の状態での閉じ込めポテンシャルが対称な場合、 *Sntemp* =4 は閉じ込めが強く非対 称で上下から量子井戸に供給される電子密度が4x1011cm²異なる状態を示している。 同じ 充填率で同じ2秒待っても抵抗の緩和は大きく異なり閉じ込めポテンシャルが非対称な場 合に核スピン緩和が促進されることを示している。図12(b)は t<sub>temp</sub>が2秒の時に測定され た抵抗の緩和の充填率依存性である。閉じ込めポテンシャルが非対称になるにつれ広い範 囲で核スピン緩和の促進が見られる。また、v=1の両側に見られる核スピン緩和の促進は、 いわゆる Skyrmion によるものであるが、この二重構造が閉じ込めポテンシャルを非対称 にすると消えることもわかる。 ⊭1 の両側に存在する Skyrmion の特性はいろいろな実験 で測定されているが、↓−1 をはさんで二重構造が明瞭に見られ場合とブロードなピークが 見られる場合が報告により異なり、閉じ込めポテンシャルが大きな役割を果たしている可 能性が示唆される。非対称状態での核スピン緩和の促進は非対称閉じ込めポテンシャル中 でのスピン・軌道相互作用の促進で説明することができる。すなわち、スピン・軌道相互 作用が強いと二次元電子中の電子スピンはふらつくことになり、このふらつきにより核ス ピンの緩和が促進される(Hashimoto et al., PRL2005)。SORST で得られた成果は通常スピ ン・軌道相互作用が大きくないと思われている GaAs でも高感度な核スピン緩和時間で評 価するとスピン・軌道相互作用による電子スピンの揺らぎが測定できることを示しており、 核スピン測定が半導体の電子スピン系、とりわけ電子スピンの揺らぎを観測するのに格好 の手段であることを示している。

#### f. シリコン量子構造の伝導特性

SORST の研究においては主に GaAs を中心にした高移動度半導体ヘテロ構造で多くの研究を行ってきた。低温で不純物の影響の少ない高品質な特性が得られること、単電子レベルで軌道やスピンの状態が精密に制御できる点では GaAs 系は抜群な材料であるが、その

リッチな核スピン特性が電子スピンのコヒーレント制御に悪影響を与えており、核スピン の影響が少なく、現在の最先端電子デバイスに用いられている Si で電子スピンや電荷のコ ヒーレント操作を実現したいという要望も強い。しかし、Si 系では室温で動作するデバイ ス開発に向けた技術研究は大変進歩しているが、基本的な物理についてはまだ解明すべき 点が多数残っているのが現状である。重要なものとして GaAs 系には存在しない谷の自由 度と谷分離の解明があり、低温での Si 系量子ドットの精密制御の検討がある。SORST で は Si 系材料を用いた半導体量子ビットの可能性を探るためにこれらの研究にも挑戦した。 谷分離に関しては量子ドットで実験を進める前に、その基礎となる量子井戸で実験を行っ た。実験には埋め込み SiO2と表面側 SiO2にサンドイッチされた Si 量子井戸を用い、量子 井戸中の二次元電子密度はバックゲートならびにフロントゲートで制御した。表面側 SiO2 は通常の熱酸化で作られており、埋め込み SiO₂は酸素のイオン注入による手法(SIMOX) ならびに通常の熱酸化とウェハボンディングを組み合わせた手法(UNIBOND)で作製さ れた。Si は伝導帯の最小値がガンマ点にないため、三次元状態では6つの等価な谷が存在 する。量子井戸で二次元に閉じ込めるとこれが高いエネルギー状態を有する 4 つの谷と低 いエネルギー状態を有する2つの谷に分離する。この普通のモデルでは縮退する基底状態 の谷がどのように振舞うかは、Si 中で電子のコヒーレント制御を行う場合には大変重要な 課題である。我々は SIMOX 構造を用いた場合にこれまで報告されているよりずっと大き な谷分離が得られ、さらにそれがゲートバイアスにより制御できることを世界に先駆けて 見出した(Takashina *et al.*, PRL2006)。

我々の実験ではシンプルな伝導特性からバンドの情報を検出することを試みた。ゲート電 圧などを制御して新しいサブバンドが占有されはじめると新しいサブバンドが散乱体のよ うに働きコンダクタンスが変調される現象が良く知られている。これを利用すると例えば ゲート電圧を変えた時のコンダクタンスの変化をプロットするとその変化にキンクやへこ みが出現することになり、その位置からサブバンドの位置の情報が得られる。キンクの位 置はコンダクタンスの2階微分を取ることで明瞭に示すことができる。図13(a)はフロン トゲートとバックゲートで電子密度を制御できる SIMOX-Si 量子井戸で測定されたソー ス・ドレイン間のコンダクタンスから求めた d<sup>2</sup>GspldVFG<sup>2</sup>のプロットである。二次元電子 が蓄積されはじめるライン(〇)ならびに新しいサブバンドに電子の蓄積がスタートする ライン (A、B) が明瞭に観測されている。垂直磁場を印加すると SdH 振動が生じるため この振動に基づくラインが  $d^2G_{sp}/dV_{PG^2}$ のプロットに表れる。図13(b)と(a)を比べると Vrg が大きく電子が表面側の熱酸化膜に押しつけられている場合はこれまでに良く報告さ れているようにスピン、谷の分離は見られず、SdH 振動の周期は電子密度でそれぞれのラ ンダウ準位の密度の4倍に対応している。一方で、電子をSIMOXの埋め込み酸化膜に押 し付けた場合、新しい領域の存在が図13(a)のBとCの間に明確に見られ、(b)を見ると この領域でのSdH振動の周期はVrgが大きく電子が表面側の熱酸化膜に押しつけられてい る場合の半分になっていることがわかる。測定されている 5.5T でのスピン分離は小さいこ とから、ゼロ磁場(図13(a))でも観測される Bと Cの間の領域は谷分離した領域を示



図13 SIMOX-Si量子井戸で フロントゲートバイアス $V_{FG}$ 、 バックゲートバイアス $V_{FG}$ を変 化させて二端子コンダクタン ス $G_{SD}$ を測定した時の $dG_{SD}/dV_{FG}^2$ の( $V_{FG}$   $V_{BG}$ )面プロット。(a)ゼ ロ磁場中、(b)5.5Tの垂直磁場 中。測定温度はともに4.2K。 していることが確認できる。谷分離の大きさは VBGを大きくするにつれ明瞭に広がっている。このデータは SIMOX-Si 量子井戸で電子を埋め込み酸化膜側に押し付けると通常よりはるかに大きい谷分離が観測され、その大きさがゲートバイアスで制御できることを示している。埋め込み酸化膜も熱酸化膜で構成されている UNIBOND-Si 量子井戸ではこのような大きな谷分離は観測されておらず、酸素イオン注入による酸化膜と熱酸化膜でシリコン・酸化膜界面の特性が大きく異なることに関連していると思われるが、大きな谷分離のメカニズムはまだ不明である。

谷分離がゲート電圧で制御できることから、谷分離とスピン分離の競合を制御することも でき、これらの特性を利用することで異なるランダウ準位で異なるスピン、谷が競合する 場合に新しい量子ホール効果が発見されている(Takashina *et al.*, PRL2007)。また、シン プルなコンダクタンスの変化から新しいサブバンド位置を測定する手法は、図13にも表 れているように空間的なセカンドサブバンドの測定、さらには、強磁場中でのスピン分離 の測定にも応用されている。

Si 量子ドットの低温での物性測定に関しては予想外の問題点があり進捗は思ったほどには 進まなかった。Si の場合室温で動作する単電子トランジスタもできていることから小さな 構造を作製することは比較的容易であったが、低温できちんとした測定を行うためには周 囲に余計なドットが存在しない状況が必要であるが、この実現が困難であった。例えば図 14(c)に示すようなデバイスを作製すると酸化膜と Si 界面の原子オーダーのラフネスに より本来の量子ドット以外に直列、並列に量子ドットが発生してしまい極めて複雑な特性 になる場合が大部分であった。Si 量子井戸の厚みが薄いほどこの状況は厳しくなり、図1 4(c)の構造でゲートにより定義された設計通りの結合量子ドットが得られるのは比較的 Si 量子井戸の厚みがあり、量子ドットの寸法が大きい場合に限定された。この場合には Si 中 の電子は有効質量が大きいため量子ドット中の閉じ込め状態を反映した様々な準位の同定 には至らなかった。一方で、図14(c)に白い点で示したたまたま形成された小さなサイズ



図14 結合Si量子ドット構造で測定されたスピンブロケード特性。(a) 電流の流れる三重点 付近で正負のバイアスを加えた時の電流値のプロット。励起状態を通しての電流が測定され ている。(b) 各状態での量子ドットの準位の概略図。(c)素子のSEM写真。白丸の位置に結合量 子ドットが構成されていると思われる。(d) スピンブロッケードによる整流特性。(e) S、Tエ ネルギー間隔の磁場による変化。

を有する結合量子ドットを用いて Si 系でははじめての面白い測定が実現された。得られた 結果は図14に示されている。図14(a)に示すように結合量子ドットで少し大きいバイア スを加えた時に量子ドットの閉じ込めから来る励起状態が明確に観測されている。さらに 面白いことにバイアスが正の時と負の時で特性が異なっている。磁場依存性など詳細な測 定をすることで、この系では谷が分離してひとつの谷しか占有されていないこと、異なる スピン状態が含まれていることが明瞭であり、各状態での伝導状況は図14(b)のモデルで 説明される。結合量子ドット間で電子が移動するにあたりスピンが反転することが要求さ れる移動は抑制される現象、すなわちスピンブロケードが表れていると結論付けられる。 スピンブロケードは CREST の時代に我々の共同研究チームで GaAs の結合量子ドットを 用いて世界に先駆け実証したものであるが、その後単一電子スピンの読み出し手法として GaAs 量子ドット系のスピン量子ビットに向けた取り組みの中で広く用いられている。図1 4(d)にはスピンブロケードによるダイオード特性、さらに(e)には T(Triplet)-S(Singlet)分 離幅の磁場依存性も示されており、Si 系でも同様なスピン制御、スピン読み出しが可能で あることがはじめて示された(Liu *et al.*, Phys.Rev.B(RC)2008)。これらの成果は Si 量子 ドットでスピンを GaAs 系のように精密に制御できることを示したもので大きなインパク トを有している。

#### g. 局所状態密度のナノプローブ

ナノプローブを用いて局所的な電子状態を測定する努力は SORST プロジェクトを通して 東北・NTT チームでも遂行した。最終目標はナノプローブを用いたナノスケールでのコヒ ーレント状態の制御、読み出しであり、そこに到達するにはまだ多くの改善が必要な状況 ではあるが電子状態のナノスケール検出に向けてインパクトのある成果を得ることができ た。具体的にはキャリアが表面に蓄積される InAs 系の半導体を中心に STM 測定を行った。 InAs 層表面の二次元電子蓄積層を用いて STM、STS 測定を継続し、さらにドナ不純物の 周りに束縛されるゼロ次元電子状態を直接測定した。さらに、InAs/GaSb ヘテロ構造のへ き界面を利用して量子井戸に閉じ込められた電子の局所状態密度を直接観察した。量子井 戸に閉じ込められた電子系は物理の教科書に出てくる典型的な系であり、その解は理論的 にはよく知られているが、実験で明瞭に観察した例はほとんどなかった。



図15は実際にこの実験で観測した InAs/GaSb 超格子構造とその STM トポグラフィック イメージである。MBE による結晶成長後、試料は真空中でへき開され、その後大気にさら すことなく低温 STM 観察が行われている。図15のイメージから原子層レベルで平坦で急 峻な界面が実現されていることが確認できる。図16は局所状態密度に相当する (dl dV)/(l V)を各試料バイアス、言い換えれば各エネルギーにおいて測定した実験結果のプ ロットである。エネルギーが増加するにつれ高次のサブバンドが寄与するようになり(b)の 理論計算に示したように空間的に局所状態密度の細かい分布が出てくることになる。測定 しているデータはすべてのサブバンドの寄与の足し算になるが(b)に示すようにそのエネル ギーで満たされている一番エネルギーの高いサブバンド数に対応した山の数が観測される ことになる。図16(c)は測定された振動データの谷の値を引いて振動をより際立させたデ



図 1 6 (a) 17nm/23nm InAs/GaSb 招格子断面のInAs 伝導帯領域で測定された各試 料バイアスにおける (*dI/dV*)/(*I/V*)。(b)計算され た局所状態密度。各サブバン ドからの寄与の合計が計算さ れている。(c)(a)から各サブ バンドの寄与を強調して作成 したカラープロット。(d)(a) の各バイアスにおける値の InAs層を通しての平均値のバ イアス依存性。 (e)(f)12nm/15nm ならびに 6nm/7nm超格子断面における (*dI*/*dV*)/(*I*/*V*)から得られた (c)と同様のカラープロット。

ータで、エネルギーが増加するにつれ高次のサブバンドが寄与し、高次のサブバンドは教 科書の計算通り次数に対応した山の数を持つ空間的に分布した局所状態密度分布を示すこ とがわかる。(e)(f)は異なる膜厚の InAs/GaSb 超格子に対して(c)と同様のプロットを行った ものであるが、InAs の井戸幅が狭くなるにつれサブバンド間のエネルギー間隔がひらいて 行くことが明瞭に観察されている。これらはある意味で量子力学の基本であり当たり前の データであるが、これらがきちんと実際の試料で測定された価値は高い(Suzuki *et al.*, PRL2007)。

#### h. 高品質ヘテロ構造、ナノ構造の基礎技術

上記に示した様々な研究を遂行するために、その基礎となる高品質半導体結晶成長、高品 質半導体ナノ構造作製技術の研究も継続して推進した。高移動度半導体に関しては AlGaAs/GaAs 系の構造で分数量子ホール効果などの研究が十分にできる移動度、 ル>5x10<sup>6</sup>cm<sup>2</sup>/Vs を維持した。また、ゲートによる制御性を高めるために CREST から継続 して進めてきたバックゲートの利用を促進し、ほぼすべての実験でバックゲートを使用し てキャリア密度を最適状態に持っていく技術を採用した。また、バックゲートに貫通する ことなく二次元電子系に低密度までオーミックコンタクトが取れる金属の組み合わせなど 地道なプロセス、デバイスパラメータの改善にも努めた。

ー例として量子ポイントコンタクトの中央にセンターゲートを入れた例を図17に示す。 量子ポイントコンタクトは様々なナノ構造のビルディングブロックであり、この特性の改 善は大変重要である。図17に示したようにセンターゲートに正の電圧を印加することで より横方向の閉じ込めが急峻な一次元チャネルが形成され、サブバンド間隔も広がること がわかる。さらに、少し長めのバリスティックチャンネルを用いた場合、センターゲート を加えることにより量子化コンダクタンスの形、位置に明らかな改善が見られ不純物の散 乱効果が抑制される結果も得られた。さらに、二層系にスプリットゲート構造を適用した



図17 (a)センターゲートを含む量子ポ イントコンタクトの実験に用いた構造の 概略図とデバイス中心部のSEM写真。(b) 測定された量子化コンダクタタンスの一 例。横軸はスプリットショットキーゲート に印加した電圧(左右のゲートに同じ電圧 を印加)、縦軸は量子ポイントコンタクト を通してのコンダクタンスである。細い線 はセンターゲートがない場合、太い線はセ ンターゲートがある場合に対応している。 センターゲートバイアスがゼロでもこの 図に示すように中央部の空乏化が抑制さ れ量子化特性が改善される。センターゲー トに正のバイアスを加えると量子化特性 はより明瞭になる。

場合、上側のチャンネルが先に空乏化されるが、センターゲートがあればこれを防ぐこと ができ、垂直方向に積層したバリスティックチャネルも可能になる。 結晶成長技術、プロセス技術は地味ではあるが研究を差別化する重要な要素であり、東北・ NTT グループでは今後も継続してこの研究を進める予定である。

#### (2)得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

結合量子ドットを用いた電荷量子ビットに関しては CREST 時代から常に世界をリードしてきた。Si 系の量子ドットを用いた同様の構造で電荷量子ビットを作製したとの報告もあるが、正しく単電子のコヒーレント振動を見ているのかどうか疑わしい点が多く、我々のデータの方が格段に信頼性が高い。横方向に結合量子ドットを集積化した構造を作製し2 量子ビットを実現する試みは当初予定したスケジュール通りには進まなかったが、着実に 進展している。結合量子ドット間の相互作用が2量子ビット動作に十分であることは実験 的に確認されており、SORST 終了時にほぼ2量子ビットが完成したと言える。今後、実際 に適当なパルス列を加えることにより世界で初めての電荷2量子ビットが NTT グループを 中心に稼働することはほぼ確実であり、半導体量子コンピュータに向けた研究として注目 を集め続けると考えられる。

単電子の読み出し技術として、量子ドット中の単電子電荷の変化を隣接する量子ドットあるいはポイントコンタクトで高感度に検出する技術は我々も含めて複数の機関で実現されてきたが、この技術をもう一段発展させて単電子の動く方向も含めた測定を実現したのはSORST研究チームが世界ではじめてである。さらなる高速化は必要であるが、電子の移動方向まで含めた高精度測定は当初の予定を上回る高いレベルの成果と言える。光の最小単位である光子(=フォトン)一個一個を検出するフォトンカウンターはすでに実用化され、さまざまな分野で極微弱光の計測に用いられているのみならず光子の統計的な分布から様々なシステムの量子状態を計測するのに広く応用されている。今回開発した単電子電流計は、電流の最小単位である電子一個一個をカウントすることができ、これにより、光と電気の量子カウンターが両方そろったことになる。従って、この単電子カウンターは、電荷量子ビットなど半導体量子ビットのデータ読み出しに重要な役割を果たすのみならず、フォトンカウンター同様、様々な分野での広範な応用が期待される。特に、ナノ構造・単一分子・生体を用いたナノエレクトロニクスでは微弱な電流の測定が必要とされており、単一電子の挙動を鮮明に観測することにより、様々な物理現象・化学反応・生体反応が計測できるようになることが期待される。電子スピンや光子の状態を電流に変換することに

より、磁場や光の高感度センサーとしての応用も期待される。さらに、単電子電流計に現 れる量子雑音を観測することにより、「量子もつれ」と呼ばれる遠く離れた電子のペアが共 有する量子情報を読み出すことも可能になると考えられる。ボゾンである光子と異なりフ ェルミオンである電子の統計測定が進めば物理的にも大きなインパクトが生まれることが 期待される。

非局所的なスピン制御は世界のいくつかのグループで研究が進められているが、我々の成 果はその中でもトップレベルに位置する。得られた実験成果から隣接する量子ドットのス ピン間に相関が存在することは明確に確認されたが、相関のメカニズムがファノ・近藤的 なものか RKKY 相互作用的なものかはまだ不明である。今後、NTT を中心に構造に工夫 を加えてスピン相関のメカニズムを明確にするとともに、東大グループとも協力して電子 スピン量子ビットにつなげていく予定である。

ナノスケール領域の核スピンを全電気的に、しかも半導体デバイスでコヒーレントに制御 できることを確認した成果は、多量子遷移まで正確にコヒーレントに制御されたこと、ナ ノスケール半導体で高感度 NMR が実現されたことから、核スピン量子ビットとしても新し い高感度 NMR としても世界的に非常に高く評価されている。同様の半導体における核スピ ン制御はエッジチャネルを用いるものや、光を用いるものが他グループで積極的に進めら れているが、多数のコヒーレント振動を明瞭に示した点で一歩リードした成果と考えてい る。今後、東北大を中心にパルス列を工夫することで固体素子での量子アルゴリズムの実 証、さらには量子コンピュータの実現に一歩近づくことができると考えられる。また、得 られた成果は核スピンの磁化情報を抵抗で高感度に検出する抵抗検出 NMR 技術としても 大変ユニークな成果であり、ナノスケールの NMR を可能にする新しい固体 NMR 技術へ の展開も期待されている。今後、ナノスケール領域の NMR による特性評価、いろいろな ナノ材料への展開、核スピン情報のイメージ化などへの発展が期待される。

核スピンの制御を利用して核スピンが関連する測定から半導体ヘテロ構造の電子状態を探 る研究は、2005年から継続して PRL3 件、Sciencel 件を含む多数の論文に掲載されるなど 我々のチームが世界をリードしている。これまでの測定でははっきり見えなかった特性が 核スピン測定では明瞭に観測されており高い評価を得ている。今後、この種の NMR 測定は 半導体ヘテロ構造、ナノ構造の評価技術として定着することが見込まれる。これらの核ス ピン絡みの研究は東北大ならびに新たにスタートする ERATO 核スピンエレクトロニクス プロジェクトで積極的に研究を進展させる予定であり、新しい研究分野の確立につながる ことが見込まれる。

SIMOX-Si 量子構造における谷分離に関する成果も世界で初めてゼロ磁場での谷分離の存在 と谷分離の電界制御の可能性を示したものとして、特にSi を量子コンピュータに応用しよ うと考えている多数のグループから大きな注目を集めている。Si 系にはまだ物理的に不明 な点が多く、次世代Si 系の材料として歪Si などが着目を集めていることから、今後これ らの系で谷分離の振る舞いを研究する方向へ発展することが見込まれる。谷自由度を用い た新しいデバイス原理が出現する可能性もある。

ナノプローブによる低次元電子状態の直接観察は、理論的には当たり前のことであるが、 実際に観察されるとそのインパクトは大きい。これらのナノプローブ計測をより低温、磁 場中での測定に発展させることで新しい進展が見込まれる。

最後に、高品質半導体ヘテロ構造の結晶成長、高品質半導体ナノ構造の作製はすべての研 究の基礎になるものである。移動度に関しては残念ながら世界のトップを行くベル研には 水をあけられたが、国内では最高水準を維持し、通常の分数量子ホール効果測定には十分 なレベルを維持した。NTT で技術スタッフが減る中でこのレベルを維持したことは高く評 価したい。また、今後とも ERATO プロジェクトとの協力のもと高いレベルを維持しさら に移動度の増大を図る計画である。また、SORST 研究期間に開発したスプリットショット キーゲート、センターゲート、バックゲートを組み合わせたポイントコンタクト、細線構 造は垂直方向に集積した構造の基本になるものであり、今後 NTT、東北大の両方で新しい 三次元ナノ構造に展開していくことが期待される。

- 4.2 半導体ナノ量子構造の伝導特性研究グループ
- (1) 実施の内容
- a. 単一電子スピンのコヒーレント制御



図18 (a)傾斜磁場を用いた単一電子スピンのコヒーレント制御の概念図。傾斜磁場中で交流 電場を用いて電子を動かすことによって実質的な交流磁場を与え、電子スピン共鳴を引き起こ す。(b)単一電子スピンのコヒーレント制御に用いた試料のSEM写真。横型二重量子ドットの 上に絶縁層を挟んでコバルト電極を取り付け、静磁場を印加することによって傾斜磁場を与え る。(コバルト電極は写真ではずらしてあり、実際には二重量子ドットの直上にある。)

単一電子スピンのコヒーレント制御に関しては、従来、交流電流で誘起される交流磁場を 印加する方法を検討してきたが、これは将来的には集積化に向かないという欠点がある。 これを回避すべく、スピン軌道相互作用のゲート電圧変調と傾斜磁場中で電子を動かす方 法の検討を進めた。両者ともに交流電圧駆動であり、集積化と発熱の抑制に適している。 特に後者は、新しく提案したもので、本プロジェクトの前半でその理論的な研究を完了し、 平成 19 年度に実現にこぎつけた。この手法は核スピン揺らぎやスピン・軌道相互作用を利 用する方法に比べて集積化やパワー効率の点で有利である。また、微小磁石には 2 つのド ットで共鳴振動数を少しだけ変える効果があり、これを利用して各ドットのスピンを別々 に回転させられることも明らかになった。

図18に測定試料を示す。横型二重量子 ドットにおいてスピンブロッケード状態 を形成し、コバルト電極によって傾斜磁 場を与え、交流ゲート電圧 V<sub>AC</sub>を与えるこ とによって電子の位置を動かす。電子ス ピン共鳴が起こるときにスピンブロッケ ードが破れてリーク電流が生じることか ら電子スピン共鳴を測定することができ る。

図19にスピンブロッケード状態におけ るリーク電流の磁場依存性を示す。交流 ゲート電圧の周波数に比例した大きさの 磁場で、電流のピークが出ており、これ が電子スピン共鳴に対応する。ここから 見積もられるg因子は0.41であり、この ようなデバイスにおける典型的な値とな っている。尚、二つのピークは、それぞ れ二つのドットにおける電子スピン共鳴



**図19** スピンブロッケード状態におけるリー ク電流の磁場依存性。

に対応している。また、実効的な交流磁場は 10 mT に達し、従来の交流電流によって作ら れる場合の 500 倍にも達しており、コバルトを厚くしたり、別の強磁性電極を用いたりす ることで更に改善できる可能性がある。当面の課題はラビ振動を測定することであるが、 その先には集積化という大きな課題がある。

#### b. 核スピン偏極率の定量評価

核スピンに依存した電気伝導の基本メカニズムを探るため、スピンブロッケード状態下の リーク電流の詳細な研究を行い、核スピン揺らぎエネルギーと電子スピン間の交換エネル ギーとの大小により核スピンのオーダーがまったく異なることが見いだされた。前者が大 きい場合、核スピンはゼロ磁場付近において電子スピンに対するランダムな散乱を引き起 こすだけであるが、後者が大きな場合、有限磁場において、核スピンは電子のスピン角運 動量を減らす方向にのみ散乱を引き起こす。この反作用として核スピン集団のスピン角運 動量は増えつづけ、ついには核スピンが分極した状態を作り出す。この"核スピンポンピン グ"は電子スピン間の交換エネルギーを電子のゼーマン分裂が補償する外部磁場で起こる。

より変化させることができるため、一定の外部 磁場の元素子の Vsd のスイッチにより核スピ ンポンピングを起こすことも可能である。操作 速度の遅い外部磁場にくらべ Vsd の電気的操 作はより簡単であり、核スピン緩和時間より十 分短い時間での核スピンポンピングのオン・オ フ、および偏極核スピンにより起こる Overhauser 効果の定量的評価が可能となった。 本研究では核スピンポンピングを制御する電 場印加シーケンスを工夫することで核スピン 分極の値を正確に見積もることに成功した。

図20に外部磁場をパラメータとして核スピ ン磁場の大きさを評価した結果を示す。外部磁 場が小さいときは、核スピン磁場の寄与は小さ いが外部磁場が大きくなると核スピン磁場の寄 与は急激に大きくなり、最大 4.2T に達する。こ れは、Vsd 操作中の核スピン偏極減衰時定数(約 10秒)、及び電子スピンg因子(|g|=0.25)を考 慮すると、最大偏極率 50%に相当する。





#### c. 電気検出 NMR

核スピンの電気的変極手法では素子のソース・ドレイン電圧のオン・オフにより核スピン のポンピングをオン・オフすることができる。ポンピングがオフの状態では核スピン系は 電子スピン系からほぼ切り離され、パルスおよび連続波 RF 交流磁場を用いた通常の NMR 制御が可能である。 またポンピングを開始してから核スピン変極が飽和するまでの"回復時 間"は、ポンピングを開始したときの偏極状態に依存する。したがって、ソース・ドレイン 電圧のオン・オフと rf 交流磁場、回復時間

測定を組み合わせることにより、核スピン の初期化、操作、および観測という一連の 量子操作シーケンスが可能となる。 測定は1.5K 冷凍機において0.5T 程度のDC 磁場を印可して行った。試料は前節と同様 な縦型2重量子ドットであり、2重量子井 戸が In0.05Ga0.95As からなるものと GaAs からなるものを用いた。RF 交流磁場は試料 直近に置かれた直径 1mm のコイルにより 印可した。図 21 に GaAs 2 重量子井戸から なるドット試料を用いた NMR 結果を示す。 連続波 NMR(図 21a)において四重極相互 作用によるピークの3 重分裂が観測された。 3 重ピークの高さは均一ではなく左側のピ ークのみ突出している。これは核スピンが 分極しておりスピン 3/2 の基底状態の占有が 支配的であることを示している(図 21b)。図 4に GaAs 試料での遷移選択パルス NMR の 結果を示す。図 21c に基底 3/2 および第1励



連続波および遷移選択パルス 図 2 1 **NMR**の結果

起スピン順位 1/2 間のラビ振動を示す。ここで用いた周波数の rf パルスを以後"赤"パルス

と呼ぶ。図 21d は第1 および第2励起スピン順位 1/2、-1/2 間の遷移("緑"パルスによって 起こる)を示す。緑パルスのみではラビ振動は観測されないがこれば初期状態では 1/2 順 位の占有がほとんどないからである。そこでます赤のπパルスを印可し 3/2 と 1/2 の占有率 を反転したのち緑パルスを印可するとラビ振動が現れる(図 21e)。この結果はコンディシ ョナルな量子操作を実証したものであり量子論理操作の一例である。さらに第2 および第 3励起スピン順位-1/2、-3/2 間の遷移("青"パルスによって起こる)を含めた結果を図 1f-i に示した。結果をほぼ予想通りであり、量子 4 順位系の任意のコヒーレント操作を実証し たことになる。

量子 4 順位系はいうまでもなく 2 量子ビット相当の量子情報を処理できるため今後はより 複雑な 2 量子ビット量子アルゴリズムの実証や電子スピン量子ビットにたいする 2 量子ビ ット量子メモリへの展開が期待される。

#### d. ナノ秒電圧制御とスピン1重項過渡電流

100%偏極した核スピン集団を電子スピンに対する長寿命量子メモリとして用いる可能性 が理論的に提案されている。ミリ秒に達する核スピン集団の長いコヒーレンス時間は、電 子スピン単体では不可能であるような長時間にわたる量子情報の保持を可能にする。しか しスキームは単一ドットにおける単一のスピンと核スピン集団の相互作用を取り扱ってお り、両者間の結合のオン・オフには数テスラの磁場をスイッチする必要がある。スワップ 操作を行うにはナノ秒程度の時間でこのスイッチングを行う必要があり、現実的なのもで はなかった。一方で我々が見いだした2重量子ドットの2電子スピン状態と集団核スピン との結合はソース・ドレイン電圧によって制御可能であり、1秒オーダーのスイッチング操 作はすでに実証済みである。量子ドットにおけるナノ秒オーダーの電圧スイッチングは

我々のグループを含めいくつかの研究機関で すでに成功しており、この技術を応用するこ とで核スピン集団量子メモリの実現へ向けた 研究を進めた。現在スピンブロッケード状態 の量子ドットにナノ秒以下の高速 DC パルス を印加することに成功しており、量子メモリ 実現に向けた技術的バックグラントは整った ものの、量子メモリ実証に必要な複雑なナノ 秒 DC パスルシーケンスと rf パルスの開発に 時間がかかり、プロジェクト中の実現には至 らなかった。一方でスピンブロッケード量子 ドットのナノ秒以下 DC パルス応答実験では この系に特有のスピン1重項過渡電流の観測 が観測された(図22)。これはスピンブロッケー ド状態においてトンネル時間(ナノ秒程度)と 同等な時間スケールで電圧が変化する場合に予 想される電流であり、我々がナノ秒スケールの 電圧変調に成功していることの確かな証拠とな るものである。



図22 スピンブロッケード状態のバイア ス電圧1(左上模式図)とそれが解除される 電圧2(同右上)との間を20ナノ秒周期で スイッチしたときの過渡電流のデューティ ー比依存性。中間の領域でスピンが1重項に リセットされることで流れる有限の電流が 観測される。

#### e. 電荷検出器を備えた縦型量子ドット

縦型量子ドットは、原子的な規則で電子状態を制御できる、軌道やスピン状態を厳密に特 定できる、電子数を零から順に正確に変えられる、といった優れた性質をもつが、構造的 に a. の横型ドットの場合のような電荷検出ができないという問題がある。しかし、電荷検 出が量子ビットの重要な要素技術であることを考えると、その克服は重要な意味をもつ。 本研究では、量子ドットの直下に電荷検出用の狭窄チャネルを作りこむという工夫により、 縦型量子ドットの安定な電荷読み出しを始めて実現した。

図23は電荷検出器を内包する縦型量子ドットの模式図(a)と形状の電子顕微鏡写真(b)を 示す。ドットの下には薄い n-AlGaAs からな導電層(電荷検出チャネル)があり、ドライエ ッチングによって、横方向には、ドット直下の領域のみを電子が流れるように加工してある。この電荷検出チャネルのさらに下には高絶縁層を介して n+-GaAs 層があり、電荷検出 チャネルのゲート(バックゲート)として働く。バックゲートに負電圧を印加することに より電荷検出チャネルの縦方向の狭窄が起こり、より高感度にドットの電荷検出ができる。 なお、電荷検出チャネルとドットの間隔は約0.1 μm と小さいので、両者は静電的に結合し



図23 (a)電荷検出器を埋め込んだ縦型量子ドット:(a)試料構造と(b)形状の電子顕微 鏡写真。ドット電流I<sub>DOT</sub>は上部電極(黄色)からドット、n-AlGaAs層(電荷検出チャネ ルと兼用)へと流れる。電荷検出チャネルの電流I<sub>DET</sub>は同じn-AlGaAs層を、ドット直下 に制限されて流れる。n-AlGaAs層の下には、電流ブロックのための高絶縁層を介して n+-GaAs層がある。これは、I<sub>DET</sub>を縦方向に狭窄するために用いられる。

ている。なお、この n-AlGaAs 層は、ドットを透過して上下に流れる電流(ドット電流)の 電極としても使う。実験では、まずドット電流をドット周囲に取り付けたサイドゲートの 電圧の関数として測定し (クーロン振動測定)、ドット中の電子数が零から順に変わる様子 を確認した後、電荷検出チャネルを使ってドット中の電荷を検出した。

図 24 (a) はドット電流 I<sub>DOT</sub> で測定したクーロンピー クを示す。このクーロンピークは電子数が零から3 まで変わることに対応して現れる。(b)図は同様な測 定を電荷検出チャネルを用いて行ったもので、(a)の ドット電流がピークを迎えるごとに電荷検出チャネ ルの電流 IDET は階段状に変化する。これはドット内 の電子数が変化することによって電荷検出チャネル の狭窄部分の静電ポテンシャルが変化し、それが IDET の増減となって出力されたことを示す。IDET はサイ ドゲート電圧が負に大きくなるにつれて、全体的に 減少するが、これはサイドゲート電圧自身が電荷検 出チャネルの静電ポテンシャルに影響を及ぼしてい るためである。この影響を点線で示すような直線で 近似して、(b)のデータから差し引いた後の電流 <I<sub>DFT</sub>>を(c)図に示す。<I<sub>DFT</sub>>は隣り合うステップの間 でほぼ一定であり、ドット中の電子数が変化してい ないことを意味する。

なお、縦型量子ドットの電荷検出については、以前 に横方向に静電的に結合した縦型ドットを用いて試 みた。この場合には、一方のドットを単一電子トラ ンジスタ型の電荷計として用いることにより電荷検 出を行った。しかし、静電結合用ゲートのリーク電 流などの問題で被測定ドットの電子を零まで測定す



図24 ドット電流I<sub>DOT</sub>(a)と電 荷検出電流I<sub>DET</sub>(b)のサイドゲー ト電圧変化。(c)は(b)のI<sub>DET</sub>からサ イドゲート電圧の変化のみの(即 ち、ドットの電子数変化を伴わな い)電荷検出チャネル電流への影 響を差し引いた電流<I<sub>DET</sub>>。

るには至らなかった。

ここで実現した電荷検出技術は、縦型ドットを用いたスピン量子ビットの応用に有用であ るだけでなく、電子スピン緩和や核スピン結合などの基礎物理の研究にも役立つ。今後は、 まず同技術を2重ドット構造に適用して、ドット間での電荷の移動とその実時間での検出、 さらに、それを用いたスピンコヒーレンス緩和の実験を行うことを予定している。

#### f. g因子ミスマッチ

III-V属半導体においてはその組成を変 えることによりバンドギャップのみな らずそのg因子をも制御することが可能 である。単一の量子井戸からなる横型ド ット素子では電極や各ドットを含む回 路は全て等しいg因子を持つが、積層多 重量子井戸からなる縦型多重量子ドッ ト系においては例えばドットごとにg因 子が異なる新しい人工スピン系の創出 が可能となる。縦型3重障壁構造におい



てドットを形成する各 InGaAs 量子井戸層の厚み、および In 混晶比を変えることにより各 ドットのg因子が互いに異なる2重ドット素子を作製し、温度 100mK において最大 15T ま での磁場を量子井戸に垂直に印加しつつ、各ドットのゼロ次元準位を共鳴透過する電流を 測定した。図25にこの系に特徴的な状態を示す。上向きスピン準位が揃いこれらの準位 のみが電子輸送を担う場合(図25a)には電流が流れることが確認された。しかし上向き スピン準位が揃い、かつ下向きスピン準位の占有も可能である場合(図25b)、および下 向きスピン準位が揃った場合(図25c)では電流が流れなかった。これはスピンに依存し た新しいブロッケード現象であり以下の用に説明できる。一方のスピン(たとえば図25b では上向きスピン)を持った電子は揃った2つの準位を共鳴通過することができるものの、 もう一方のスピンを持つ電子は準位が不揃いなためドット間をトンネルできない。従って 定常状態では遅かれ早かれもう一方のスピン準位が占有されることで電流がブロックされ る。この現象はパウリスピンブロッケードと同様にスピンに依存した伝導現象であり、ス ピンの高速な初期化や ESR の電気的検出に応用が可能である。

#### g. 量子ドット - 量子細線結合系におけるスピンフィルター効果

量子ドット中の電子スピン状態は、電子の占 有する軌道や電子間相互作用に深く関係して いる。例えば偶数個の電子を有する量子ドッ トの基底状態は、二次元電子ガスに対して垂 直な磁場をかけると、スピン一重項状態 (singlet)かスピン三重項状態(triplet)のいずれ かを遷移する。本研究では量子ドットの両端 に配置した量子細線をスピンフィルターとし て利用する(図26(a))ことにより、量子ドッ ト中の電子スピン状態を調べた。量子細線の ゲート電圧を G=ne<sup>2</sup>/h (n=1,2)となるように変



 $V_{aL}$  VaTL VaP VaTR VaR 図26 (a)試料の SEM 写真。量子ドット (QD)と2つの量子細線(QWL, QWR)はシ ョットキーゲートにより構成される。

化させることで、スピン偏極した状態(n=1)としていない状態(n=2)の2つの状態を形成でき る。両者のトンネリング現象を比較することで、量子ドットを流れる電流を抑制する現象 が、軌道に因るかスピンに因るかを区別した。量子細線をスピン偏極させた状態でクーロ ンピークの磁場依存性を調べた結果を図27(a)に示す。量子ドット中の最低ランダウ軌道 によるクーロンピークの高さに増減が見られ、これがスピンフィルターの効果である。こ れは、図27(b)に模式的に示したような電子スピン状態に対応している。また、量子細線 を介した電流の偏極率も求め、量子ドットにフィリングファクタが2より下の状態では、 磁場の増加とともに増大する様子を観察した。



図27 (a) $n_L=1$ ,  $n_R=1$ のときのクーロンピークの磁場依存性。各クーロンピークはオフ セットをつけて表示している。図のバーは $0.025e^2/h$ を表している。(b) $2 < \nu < 4$ における スピン配置を磁場、エネルギーの関数として模式的に示したもの。

#### h. 量子ドットトンネル電子のダイナミクスとスピン緩和

量子ポイントコンタクト (QPC)は、近接量子ドットに 出入りする電子の実時間電 荷計として用いることがで きる。この手法を利用して、 横型量子ドットで電子占有 率 2<v<4 の領域におけるス ピン緩和(縦緩和)の挙動 を明らかにする実験を行っ た。



電子占有率 2<v<4 の領域で

は、電子数が偶数のとき、スピンー重項状態(|S>)とスピン三重項状態(|T>)のどちらかが基 底状態となる。まず、このような、|S>と|T>が交差する磁場領域においてドットを作るトン ネル障壁をトンネルする電子の時間的挙動を測定し、|T>のトンネル時間が|S>のトンネル時 間の10分の1程度となることを確認した。次に、この結果を踏まえて、ポンプアンドプロ ーブ法によって単一電子スピンの同定および緩和時間の測定を行った。ここで、量子ドッ トのプランジャーゲート(GateP)に印加する電圧を図28(a)に、そのときのドットの電子 状態とQPCを流れる電流の変化を模式的に示したものを図28(b)に示す。|S>が基底状態、 |T>が励起状態となる磁場領域(1.25 T < B < 1.29 T)で、励起状態に上向きスピンとして入っ た電子が待ち時間(twait)の後に、スピン緩和をして|S>から下向きスピンとして抜けるか、緩 和をせずに|T>から上向きスピンとして抜けるかを調べた。

|T>のトンネル時間がパルスの立ち上がり時間(100µsec 程度)より短ければ、パルスの立ち下がり後の電流の変化は|S>の場合に限って現れる。このような時間分解測定の平均を取ると、ΔIQPCはパルスの立ち下がり後、指数関数的に減少するので、その曲線をフィッティングすることによって緩和時間を得ることができる。実験結果では、|T>から|S>への緩和時間は数100µsec 程度であり、|S>と|T>のエネルギー間隔が増大すると短くなる。この傾向はスピン軌道相互作用による緩和の理論予測と一致する。今後はより広いエネルギー領域で緩和時間を求めることが課題である。また、スピン・軌道相互作用のうちのドレッセルハウス項は磁場の角度に依存するので、角度に依存した緩和時間を調べることも課題として挙げられる。

#### i. 縦型二重量子ドットにおける電気的 pump&probe 法を用いたスピン緩和測定

縦型単一量子ドットにおける緩和時 間測定に用いられる電気的ポンプア ンドプローブ法を縦型二重量子ドッ トに応用する手法を開発し、2電子ス ピンブロッケード状態におけるスピ ン緩和時間の測定に成功した。

この実験では、ソースドレイン電圧を 図29(a)のようにスイッチさせる。ク ーロンブロッケード状態(図29(b) の左図)で時間t<sub>1</sub>だけスピン緩和を待 ち、パルス電圧によって図29(b)の右 図の状態に移すと、緩和が起こってい れば電流が検出される。その後、同じ 電圧でドットと電極のトンネル時間



図29 (a)ポンプアンドプローブ法で、ソースドレインに印加する周期的な電圧 (b) クーロンブロッケードで緩和を待つ状態( $V = V_1$ )と、電流で読み出しを行う状態 ( $V = V_h$ )。

より十分長い時間  $t_h$ 待つと、ドット中状態は再度スピンブロッケード状態になる。このとき、 $t_h$ を固定すれば $t_l$ の長さに応じて電流値が変化するので、その振る舞いから緩和時間 $\tau_{relax}$ を求めた。磁場を印加しない場合、 $\tau_{relax} = 16$  µsec が得られた。この値は、スピンブロッケード状態での定常電流値から予想される時間 $\sim 1$ µsec (=トリプレット状態が壊れる時間と仮定)に比べて 10 倍程度大きい。これは、今回の測定ではクーロンブロッケード領域での

スピン緩和だけを検出 しているために、コトン ネリングの影響が押さ えられているからだと 考えられる。このように して求められた緩和時 間を説明すべく、核スピ ン結合による緩和を検 討した。実際、磁場依存 性の測定では、核スピン ポンプ領域の前後での 漏れ電流の変化と緩和 時間の変化がよく対応 する(図30)。このこと は主要な緩和メカニズ ムが核スピンによるこ とを示唆している。



図30 (a)緩和時間の磁場依存性。0T と 0.2T の間で 8µsec 程度変化している。(b)スピンブロッケード領域での漏れ電流の磁場依存性。核スピンポンプ領域の前後で 14fA 程度変化しており、そこから見積もられる緩和時間の変化は 9µsec 程度である。

#### j. 自己形成 InAs 量子ドットにおける近藤効果

分子線エピタキシーによって n<sup>+</sup>-GaAs 基板上に成長された直径約 90nm の InAs ドットに、10~50nm のギャップを持つソース・ドレインコンタクトを電子線描画によってパターニングし、Ti/Au ノーマルメタルを直接蒸着することによって、単一量子ドットの電気伝導を測定できるようにした。ドット中の電子数 Nはバックゲートによって変調することができる。まず、希釈冷凍機のベース温度で、N=3と5のクーロン谷において近藤効果を確認した。温度依存性の測定と、近藤ピークの半値幅から見積もった近藤温度は共に~2Kになった。また、近藤ピークの横磁場による分裂幅から見積もったところ、電子 g 因子の値 |g|~4 を得た。これはバルク InAs の g 因子の値 (|g|~14) に比べてずっと小さな値である。N=1のクーロンバレーでは近藤効果を観測することはできなかったが、励起スペクトロスコピー測定によって見積もった電子 g 因子は上記の値とほぼ一致している。

高磁場下では、従来とはタイプの異なる近藤効果の観測に成功した。図32は上記試料の クーロン振動の縦磁場依存性を示す。▲で示した点に着目すると、軌道反交差遷移のポイ ントが高磁場にシフトしていることが分かる。これは、磁場-ゲート電圧平面で正の傾きを 持つある一つの軌道(上向きス ピンに対応)が、次々と負の傾 きを持つ軌道(下向きスピンに 対応)と交差していく様子を示 唆す。(△の点においても、別の 軌道遷移の痕跡が見られる。)こ こで、N=12の軌道交差点(軌道 縮退磁場)においてクーロンギ ャップ内のコンダクタンスが高 くなっている部分に注目し、同 条件でクーロンダイヤモンドを 測定した(図32b)。N=12のク ーロンダイヤモンド内において、 (ゼロ磁場における近藤効果と 同様に)近藤効果のゼロバイア



ス異常に起因するコンダクタンスピークが、クーロンブロッケードを破って出現している ことが分かる。先ほどと同様に、この近藤ピークコンダクタンスの温度依存性を測定した 結果、見積もられた近藤温度はゼロ磁場における近藤温度とほぼ一致した。軌道縮退によ る近藤効果の発現自体は、カーボンナノチューブのデバイス(軌道の効果がない)や縦型 量子ドット(一重項三重項縮退)等で既に報告されているが、私たちのデバイスでは InAs 特有の非常に大きなg因子と軌道の効果が相まって、異なるランダウ準位の軌道が高磁場 下で軌道縮退した点でスピンハーフ近藤効果を観測した点においてやや趣を異にする。

#### k. InAs ドット- 超伝導接合系における近藤効果と超伝導状態の競合



自己形成 InAs 量子ドットに超伝導電極として Al を取り付けた試料(図32)を用い、超伝 導状態と近藤効果の競合を調べた。この競合は近藤温度と超伝導ギャップの相対比  $\Delta/k_BT_K$ で特徴付けられる。 $\Delta > k_BT_K$ の場合は、量子ドット中の不純物スピンを遮蔽して得られる エネルギー利得はクーパー対を壊すには十分でなく、近藤効果は抑制される。しかし反対 の場合には超伝導電極が付いていても近藤効果が発現する。 図33(a)はクーロンダイアモンドである。ドット を偶数個の電子が占有している場合には、ソース ドレイン電流にはソースドレイン電圧が VsD = ± 2Δの位置に準粒子トンネルによるピークが観測 される。しかしドットの静電エネルギーが大きい ためアンドレーエフ反射は抑制され、1次のアン ドレーエフ反射を除いて、その内側に現れるサブ ギャップ構造は観測されていない。しかし奇数電 子の近藤領域では振る舞いが大きく異なる。

1次のアンドレーエフ過程は近藤効果の共鳴状態によって増強される。こうして VsD = ±∆における非平衡近藤伝導度は常伝導電極に比べて増強され、図33(b)に示すようにゼロバイアス異常が3つに分裂するように見える。磁場をかけると常伝導電極領域では通常の近藤効果のゼーマン分裂が観測される。この分裂から InAs 量子ドットのg因子として|g|=6.6が得られた。超伝導状態での3つのピークのうち、中央のゼロバイアス付近のピークは近藤共鳴ピークであると考えら



図34  $G^{SC}/G^{N}_{0}$ の片対数プロット。  $\Delta/k_{B}T_{K}$ でプロットすると異なる近藤領 域、磁場で測定されたデータは1つの 曲線で表されることが分かる。インセ ットは同じデータを $T_{K}$ でプロットした もの。

れるが、その高さは近藤温度 T<sub>K</sub> に強く依存する。ところで室温までの温度サイクルにより、 ドットパラメタを変えることができる。この方法を使って近藤温度 T<sub>K</sub> が異なる 10 の近藤領 域の伝導度を調べた。Δ/k<sub>B</sub>T<sub>K</sub> が大きい場合、ゼロバイアス伝導度はほとんど消失しており、 超伝導相関により近藤効果が抑制されている。しかしΔ/k<sub>B</sub>T<sub>K</sub> が1よりも小さい場合、ゼロバ イアス共鳴ピークが再び大きくなり近藤効果が顕著になるという傾向があることを見出し、 超伝導相関と近藤相関の競合を実験的に明確に示した。

超伝導ギャップムは磁場をかけることによって、近藤相関の強さを変えることなく、変調 することができる。これによって、 $\Delta/k_BT_k$ を変えることができる。 異なる磁場で、常伝 導電極状態での近藤伝導度  $G_0$ との比  $G/G_0$ が抑制される様子を異なる磁場で測定した。そ の結果を $\Delta/k_BT_k$ の関数としてプロットするとすべてのデータ点は唯一の曲線に乗ることを 見出した(図34)。これは $\Delta/k_BT_k$ が超伝導と近藤効果の競合を表す良いパラメタである ことを示す。従来、近藤効果は近藤温度のみをパラメターとして例えば温度依存性など良 く知られた経験式を使って記述することができるが、超伝導電極と結合した系では $\Delta/k_BT_k$ をパラメータとする普遍スケーリング関数が存在することを示唆している。



L 結合量子細線における負のクーロンドラッグとウィグナー結晶化

図35 クーロンドラッグの測定系。クーロンドラッグの大きさは、ドラッグ抵抗  $R_D = V_{drag} / I_{drive}$ で与えられ、正のドラッグの場合には  $R_D > 0$ 、負のドラッグの場合には  $R_D < 0$ となる。



図36 (a): 長さ4 µm の結合量子細線で、 $V_{g_{center}} = -0.90$  V,  $V_{g_{drive}} = -0.80$  V, B = 7 T において観測され るドラッグ抵抗と各細線のコンダクタンス。(b): 電子 密度と垂直磁場の関数としての量子細線の電子状態 およびそれに関連するクーロンドラッグ効果。(c): 負 のドラッグ効果のメカニズム。ドライブ細線の電子が ドラッグ細線のリードによって遮蔽され、相関ホール を誘起する様子。ドライブ細線の電子と相関ホールと の双極子場によって、ウィグナー結晶がリード側へと 力を受ける。



ー次元電子系はクーロン相互作用の効果が大きく、低電子密度、低温ではウィグナー結晶 の形成が期待できる。しかし、遮蔽効果のより小さな希薄な領域で強く現れるクーロン相 互作用の効果をコンダクタンスなどのマクロな物理量に反映することは、これまで難しか った。本研究では、量子細線を平行に近接して並べた結合量子細線におけるクーロンドラ ッグ測定に着目し、「結晶格子を組んだ電子は静電遮蔽に関与しない」というウィグナー結 晶の基礎的な性質に立ち返り、強い静電遮蔽効果を有するフェルミ液体との違いを利用し た。それにより、電流の向き(クーロンドラッグの符号)の違いという明らかな違いによ ってウィグナー結晶の検出が可能となった。

図35にクーロンドラッグの測定系を示す。クーロンドラッグではドライブ細線からドラ ッグ細線へと運動量が遷移するため、運動量の保存則から通常は正のドラッグのみが期待 される。ところが、量子細線中の電子のウィグナー結晶化と二次元電極による静電遮蔽の 効果により、実験的には負のドラッグが観測される。図36(a)に長さ4umの対称形の結合 **量子細線において観測されたドラッグ抵抗の一例を示す。この実験では、7Tの垂直磁場が** 印加されており、Vgdriveをドライブ細線の電子密度が非常に低くなるように固定して、Vgdrag の関数としてドラッグ抵抗が測定されている。ドラッグ抵抗は強い Vgdrag 依存性を持って おり、負のクーロンドラッグは-0.9 V < Vgdrag < -0.5 Vの限られた領域でしか観測されない。 このような振る舞いを詳細に調べると、図36(b)で示されるように、負のドラッグが起き る条件が、ドラッグ細線内にウィグナー結晶が形成される条件と一致することがわかる。 図36(c)に、負のドラッグが起こるメカニズムを示した。ドライブ細線中の粒子がドラッ グ細線とそのリードとの境界近くを通過する際、ドラッグ細線側の二次元リードに相関ホ ールを誘起する。ドラッグ細線中にウィグナー結晶が形成されている場合には、相関ホー ルはドラッグ細線内には入れないため、ドラッグ細線中の電子は、二次元リードに形成さ れた相関ホールから引力を受けることになる。このようなドラッグ効果は、量子細線およ びそのリードの形状に依存する。その形状に対する依存性を調べることにより、ウィグナ 一結晶の存在をよりはっきりと確認することにも成功した。

#### (2)得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

電子スピンの制御に関しては、横型二重量子ドットにおいて傾斜磁場下で交流電圧駆動の 単一電子スピン共鳴に成功した。これは非常に大きな成果であり、単一電子スピンを用い た量子計算の実現に向けて、その基礎が固まったと言える。また、本プロジェクトによっ て電子スピンの緩和時間が詳細に調べられ、特に磁場下では、この緩和時間が非常に長い (msのオーダー)ことが明らかになった。こうした結果も、電子スピンが量子ビットの 有力な候補であることを裏付けている。今後は、ラビ振動の観測に加え、集積化が課題と なる。量子もつれの検出も当面の課題となっており、本研究で開発した電流雑音測定の技 術が大きな役割を果たすと期待される。本プロジェクト期間中には、海外のグループでも 電子スピンのコヒーレント操作に成功しているが、現段階では微小磁石による傾斜磁場を

用いる当グループの方法はその中の最良であり、将来的には単一電子スピン操作の標準的 な技術へと発展する可能性がある。 縦型量子ドットにおいては、電子スピンの基礎的な性質に対する理解は充分に進んでいる ものの、それを高速で制御し、実時間で読み出す技術はまだ開発途上にある。しかし、最 近では縦型量子ドットにおける単一電荷の読み出しにも成功しており、近い将来には横型

近では縦型量子ドットにおける単一電荷の読み出しにも成功しており、近い将来には横型 量子ドットと同様な制御が可能になると期待される。縦型量子ドットには横型量子ドット にはない多くの長所がある。特に、対称性やドット間結合の安定性に優れており、核スピ ンの偏極度が横型量子ドットの場合に比べて格段に高いため、デコヒーレンスの要因とな る電子 - 核スピン間の相互作用を抑えることもできる。縦型量子ドットは他グループでは 未だに開発されておらず、横型量子ドットとは別のシステムとして研究を進める価値があ る。

核スピンの制御に関しては、最大で 60%の核スピン偏極度が得られた。理論的には最大偏 極率はドット間のトンネル結合の大きさで決まり、より強いトンネル結合をもつ系におい ては 100%の偏極が可能であるといわれている。今後素子構造の最適化を行うことでこの理 論の実証が可能である。四重極分裂した偏極核スピンの制御は4つの量子準位のコヒーレ ント制御であり、実効的な2量子ビットを構成する。より高度なRfパスルシーケンスを開 発することで平山グループの量子ホール系と同様、二量子ビットアルゴリズムのデモンス トレーションが可能である。研究計画で提案した電子スピン・核スピン量子状態転写につ いては実現には至らなかったものの、転写に必要なナノ秒オーダーの電圧制御に成功して いるため、今後は適切なナノ秒電圧印加シーケンスとrfパスルシーケンスを組み合わせる ことで、現有設備での状態転写の実現は十分可能である。共鳴トンネルで観測されたg因 子ミスマッチを示す素子をスピンブロッケード状態にすることができれば、ESRによって 各ドットの電子スピンを独立に制御することが可能である。

本研究では、量子ドット、量子細線における基礎電子物性の理解においても大きな進展が あった。特に、量子ドット中の電子スピン状態が明らかにされ、近藤効果やウィグナー結 晶を初めとする電子相関の物理を捉えることに成功した。近藤効果において重要な役割を 果たす近藤雲の検出など、電子相関の物理にはいまだに未解明な課題が多く残っており、 こうした研究を継続して続けていくことは大切である。

31

4.3 高速・光ナノプローブ研究グループ(産総研グループ)

#### (1) 実施の内容

#### a. 2次元電子ガス系(2DEG)の局所光学観測

要素技術として極低温強磁場下での観測と2探針による相関観測技術の開発を行った。 極低温強磁場 SNOM 観測では、光励起キャリアの拡散効果が大きいため、試料内の広範囲 測定が課題であった(前プロジェクト CREST の成果に基づく)。そこで、水平方向の粗動



機構、並びにピエゾスキャナの改良により走査範囲の拡大を行った。極低温 SNOM の粗動 範囲は 2mm となり、また走査範囲は  $2 \mu m$  から  $4 \mu m$  に拡大された。これにより、キャリ アの拡散距離(数 $\mu m$ )以上の範囲の測定が可能となった。図 3 7 は開発した装置の全景 であり、図 3 8 は、その SNOM ヘッド部分である。本装置のもう一つの特徴は、光ファイ



**図39** 幅 3µm のメサ構造の 凹凸像(TOPO)と光学像 (SNOM)。強磁場(6T)にお いても試料の移動は見られない。

バー干渉計を用いて外部から試料の位置をモニターできるところにある。超伝導マグネット中では目視での調整が出来ないため、このような機構は必須である。光源に近赤外レー ザーを用いることで、光学観測に影響を与えることなく、距離分解能 100nm の測定が可能 となった。

装置の動作を確認するため、温度 5K において、平山グループから提供された2次元電子 ガス系(2DEG)を含む GaAs 単一ヘテロ試料(幅3µm)に対して磁場を印加しながら測 定を行った(試料構造については図51を参照)。図39にその結果を示す。メサ像の右側 に見えるゴミの位置が変化していないことからも、磁場印加に対して安定な計測が可能で あることが実証された。光学像(SNOM)にはメサ構造内で発光(フォトルミネッセンス: PL)が観測されており、2DEGと光励起ホールとの再結合による発光であることがわかる。 また、磁場 0T において PL 強度が低いのは、CREST において報告したとおり、光励起ホ ールの拡散によるものであり、幅(3μm)の広いメサ構造においても発光強度の磁場依存 性が強いことが分かった。

次に試料内の PL スペクトルを詳細に観測した。その結果、ラインストライプ状のメサ構 造に閉じ込められた 2DEG からの PL スペクトルは、プローブがメサエッジに接近する (300nm 以内)につれて高エネルギー側にシフトすることが見出された。図40にその様 子を示す。スペクトル変化の特徴は、発光ピークから低エネルギー側の部分のみ狭帯域化 (ナロウイング)することである。ここで、ピーク強度の半値の位置でのシフト量をδE と



**図40** 幅 1µm のメサ構造の SNOM 像。メサ中心付近(A) とエッジ近傍(C)では発光ス ペクトルに違いが見られた。C では、スペクトル低エネルギー 側にナロウイングが起きている (ブルーシフト)。

する。

PL 発光の位置依存性について図41にまとめる。PL 強度がメサ中心からエッジに向かっ て減少し、エッジ部分では PL 強度はゼロになる。これは、エッジにおいて 2DEG が消滅 していることを意味している。一方、スペクトルシフト(δE)はエッジ近傍にて増大する ことが分かり、PL 強度との間に相関のあることが分かった。また、幅 1μm の試料に対す る測定では、スペクトルシフトに磁場依存性のあることも分かった。6T では明瞭に観測さ



**図41** 幅3µmのメサ構造のSNOM像に おけるスペクトルの位置依存性。スペクト ルの低エネルギー側だけが位置によって変 化していることが判る。



**図42** 幅 1µm のメサ構造の SNOM 像におけ る発光強度とスペクトルシフト量の位置依存性。 発光強度はメサ中心からエッジに向かって減少 している。一方、スペクトルはエッジに向かって ブルーシフト量が増大している。

#### れるシフトはゼロ磁場では観測することが出来なかった。

上記のスペクトルシフトは、2DEG がメサエッジに存在する負ポテンシャルによって閉じ 込められているとするモデルで定性的には説明できる。このモデルを仮定するとポテンシ ャルの影響は遠方まで及ぶはずであり、そのためメサ幅を変えればポテンシャルがどの様 に 2DEG 分布に影響を与えるか、理解できるはずである。そこで幅 3µm の試料に対して 同様の解析を行った。図41は磁場 4T、温度 5K において測定された結果である。メサ構 造の中心部(A)ではスペクトルピーク近傍では非対称な広がりを見せている。エッジから 1µm の位置(B)では中心部と大きな変化はないが、エッジ部分(C)ではほぼ対称となっており、A、 Bのスペクトルとは異なる。スペクトルが変化する領域はエッジから0.5~1µm 程度の範囲であり、幅 1µm の試料に対する結果と同程度であるが、シフト量は約 1meV と大きいことが分かった。また、本 試料においてはゼロ磁場でも僅かにスペクトルシフトが観測された。従って、スペクトルシフトは本 来、磁場とは関係なく生じるものであるが、磁場印加によってさらに強調されていると考えられる。



図43 スペクトルシフトのモ デル。バンド構造はエッジ部分 でエネルギーが上昇する。 2DEGによるスクリーニング効 果で価電子帯のフラット化が起 きると、エッジ部分での低エネ ルギー側スペクトル変化が説明 できる。

図43は上記の実験結果を説明するモデルである。2DEG はヘテロ接合界面に生じる伝導帯のミニ マム中に、バンド端(Ec)からあるエネルギー幅を持って存在している。これをメサストライプの断面 方向(x)に沿って見ると、2DEG がメサに閉じ込められていることから、エッジ付近で Ec が上昇して いることが考察される。Ec の上昇に伴い、価電子帯のバンド端(Ev)も平行して上昇するはずである。 光励起ホールは Ev 付近に蓄積するため、発光スペクトルはこのエネルギー差で決定される。もし、 Ec と Ev が平行に上昇するならば、スペクトルの低エネルギー端は Ec-Ev なので位置には依存し ないはずであるが、実験結果ではこの予想に反している。実験結果を説明するためには、Ev の位 置依存性がないと考える必要がある。

Paassen らは、2DEG の横方向閉じ込めについて理論的に議論しているが(PRL. 83(1999)3033)、 2DEG によるスクリーニング(ポーラロニック効果)により、Ec、Ev が変化する結果を得ている。とくに Ev についてはフラット化が起き、Ec-Ev はエッジ部分で 1.5meV 程度増加すると計算されており、 本実験の結果と定性的には一致した。

平成 19 年度は、光ファイバー干渉計の光源を高安定なレーザーに交換するとともに、多チャンネル化(3チャネル)することにより、試料位置を分解能100nm程度で3次元的モニターできるように改良を加えた。

#### b. 二探針型(デュアルプローブ)SNOM

これまで既に内部全反射型および射光・集光ペアの SNOM を開発してきた。物性計測に実



**図44** デュアルプローブ SNOM の模式図。探針1から光 を入射し、探針1,及び2から 近接場光成分を観測する。 用できると考えられる後者に研究を集中させ、その性能を理論的・実験的に評価した。 近接する 2 探針から別々の波長の光を射出して伝搬波を遠方で波長分離して観測すれば、 両探針の位置を独立に、したがって回折限界以上の精度で決定できる。その後、探針 1 の 戻り光の減少 I1 と、光の注入を止めた探針 2 への集光 I2 を測定することで、SNOM 測定 2 つを同時におこなえる(図44)。

各々の探針単独では十分な精度で撮像できるデュアルプローブ SNOM であっても、デュア ルプローブ計測の際にはノイズに悩まされることになる。この原因を数値シミュレーショ ンの力を借りて考察した。すると、二探針の相対位置や方向のごくわずかな変動が信号の 大きな変化をもたらすことが分かった。とりわけ、伝搬光成分が共鳴条件を満たすような 領域では、探針間距離が数 10nm 程度変化するだけで、どちらの探針からの像もまったく 別の描像となってしまう(図45)。このことからも、探針の相対位置制御をより向上させて



**図45** 探針1と2の距離を1250nmから1350nmまで変化させた際の探針2信号の変化の計算結果。

いくという、今後の装置開発の方向性が示された。

また、本研究の初期には、デュアルプローブ SNOM の各探針の信号は、基本的には相対位 置だけずれた二つの SNOM 信号であると考えていたが、実際の測定データをしらべてみる と、両探針の信号には質的な差があることが分かった。そのため、両探針の信号がどのよ うなものになるかを数値シミュレーションの結果なども参考に考察した。

平成 19 年度は、射光・集光ペアのデュアルプローブ SNOM で、2 探針を数波長程度まで 近づけると、射光探針信号が普通の SNOM と大差ないのに対し、集光探針信号はそこから ゆるやかなトポロジー変化を除去したようになることを見出した。(図46)。集光探針は専 ら射光探針から直接光を得るようになり、試料はその撹乱要因に過ぎなくなる。そのため 集光探針信号はゆっくりとしたトポロジー変化に鈍感で、試料の何らかの構造を選択的に 捕えることになる。

実際、傾斜ガラス表面をデュアルプローブ SNOM で見た場合のシミュレーションをしてみ



ると(図47)、射光探針から集光探針に向けてガラス面が下り坂になっている場合(すなわち傾斜が探針間の伝達に直接影響しない場合)には、広い探針間距離の範囲で、集光探針信号が集光探針の高さに極度に鈍感であることが分かる。

射光・集光ペアのデュアルプローブ SNOM は、射光探針で通常の SNOM 測定を行い、集 光探針で試料がトポロジー以外の要因で光の伝搬に与える影響を計測することになる。

#### c. 高速ナノプローブ技術の開発

結合量子構造の電気的相関現象の観測やナノメカニカル構造特性の評価を目的として、走 査型マクスウェル応力顕微鏡(SMM)を用いたマイクロ波周波数領域での半導体量子構造個 別の電気応答を非破壊で解析可能なナノプローブシステムの開発を進めた。

ここではまず、高速ナノプローブの基本技術である SMM の動作原理について簡単に触れ ておく。SMM では、観測対象である電荷 $Q_s$  に対して、プローブ電荷 $Q_t$  を距離rの位置 におき、そのときにプローブ電荷にかかるクーロン力  $F = Q_s Q_t / 4\pi \epsilon r^2$ を計測すること で対象電荷を検出するという原理に基づいている。実際の計測では、探針上にプローブ電 荷を置き、探針と試料との距離を制御しながら試料電荷が及ぼすクーロン力を、原子間力 顕微鏡と同様にカンチレバーのたわみとして検出する。操作的には、複数の周波数成分の 外部電場により探針の振動を誘起し、試料の局所的な電位、電荷などの情報を表面形状と 同時に、振動の周波数分析により検出する。ここで観察される表面電位は、平衡状態では、 金属や半導体表面の仕事関数や、表面構造・分子分極などに関係づけられる。特に半導体 材料では、ドーピングによるフェルミ準位のシフトが表面電位に反映することから、表面 電位を介した n 型/p型の判定が可能である。一方、外部からの電圧印加もむろん表面電 位の変化を引き起こすので、SMM を用いたデバイス内の電圧信号のプロービングが可能と なる。SMM の利点は、これらの電気情報が形状と対応させながら局所的に観測できること である。

マイクロ波帯域の計測には、同軸構造またはこれに類する構造を有する高周波プローブが 不可欠であり、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、高周波プローブでは、試料表面を走査することができ ないため、測定対象が制約される。さらに、プローブ自体が、半導体量子構造のような微 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るため、破壊的計 測をともなうという技術的課題があった。そこで、我々はプローブと給電線とのインピー ダンス整合の関係を改善するために、図48に示すような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 SMM カンチレバーをセイコー電子工業と共同で開 発した。



図48 マイクロストリップラインを備えた高周波用カンチレバー先端部の SEM 像(左図)とハンドルピース部分を含んだ光学顕微鏡像(右図)。グランドーグランド間隙は 3W (W はシグナルライン幅)以上とし、カンチレバー側のグランドはその背面のグランドと短絡させ、ハンドルピース前面下部(右写真の右端部)に RF プローブとの接合部分を形成した。

高周波でのデバイスの計測はヘテロダイン力検出法により行った。単発現象の観測を含む 実時間分解能の向上は、カンチレバーの共振周波数を上げる以外に路はないが、検出対象 を繰り返し現象に限定すれば、電気力が電場の2乗に比例する性質を利用するヘテロダイ
ン力検出法によりその目的を達することができる。具体的には、探針に二つの異なる周波 数成分から成る交流電圧を印加し、電気力の非線型性により周波数の混合が引き起こされ、 その差周波数を持つビート力が探針に働くことを利用する。これを用いて高電子移動度ト ランジスタ(HEMT)デバイスの高速電圧サンプリングを行った結果を図49に示す。



図49 高電子移動度トランジスタの SMM 形状像(左図)と同時に計測されたヘテロダ インビート信号像(中図)。印加周波数は0.5 GHz、RF 出力は15 dBm。SMM 形状像(左 図)には電極の厚さに対応した段差が観察される。右図は今回測定に使用した高電子移動 度トランジスタの構造の模式図。

今回測定に使用した HEMT デバイスは平山チームにより作製され図49の右図に示す構造を有する試料である。SMM による高周波電圧の計測は、電極とデバイス界面の部分で行った。図49の SMM 形状像(左図)には電極の厚さに対応した段差が観察される。同時に計測されたヘテロダインビート信号像(中図)ではこの電極とデバイスの界面で電圧の落ち込みが観測された。また、電極から離れるにしたがい、デバイス内部での電圧は減少することが明らかとなった。

次に、半導体ナノカンチレバーの GHz 帯域での機械的な特性を高速 SMM を用いて計測す るために、平山チームにより作製されたサブマイクロカンチレバー個別の機械的共振周波 数の測定を行った。図50左図に示すように作製されたレバーの幅は約340 nm、厚さ 240nm、長さは0.5~2µm で、たとえば、2µ長のカンチレバーではその共振周波数は理論 的には約25MHz程度と予想される。サブミクロンカンチレバーは、電気的にグランドし、 SMM モードでサンプルを走査し、SMM プローブの位置決めを行った。



Frequency(MHz)

図50 平山チームより作製されたサブマイクロカンチレバーの SEM 像(左図) とスペクトル解析の結果(右図)。

プローブーサンプル間の距離制御は SMM の容量勾配一定モードで行い、それと同時に、 SMM プローブに MHz 帯の交流電圧を印加した。高周波電圧の周波数を SMM プローブの 共振周波数ずつステップし、それぞれの印加周波数で、プリアンプからの信号を SMM プ ローブの振動周波数帯域でスペクトル解析を行った。その結果、図50右図に示すように 22MHz 近傍にサブミクロンカンチレバーの共振周波数と思われるピークを観測した。 さらに、半導体ナノデバイスの電気的相関現象を極低温・高分解能で計測することを目指 して、液体ヘリウム温度で動作可能な低温 SMM システムの構築を行った。今回開発した 低温用 SMM ヘッドの構成を模式的に図51に示す。SMM ヘッド部分は、市販の液体ヘリ ウム連続フロー式マイクロスタット (MicrostatHe:Oxford Instruments)の窓フランジ部 分と交換可能な設計とした。これにより、フランジの交換のみで、一般的な低温での光学 測定とナノメートルオーダーの非破壊電気応答計測を1台のクライオスタットで実現可能 である。また、真空チャンバー内に設置されたカンチレバーの振動計測を行う光学ユニッ トを全て大気側に設置することによって、測定中のレーザー光および光受光素子の位置決 め調整は格段に容易となった。今回、低温 SMM 測定に使用した試料は、平山グループで 作成されたヘテロ変調ドープ構造を有する2次元電子ガス系(2DEG)を含む GaAs 試料 である(図51右図)。



図51 低温 SMM ヘッドの構成図(左図)と測定に使用した2次元電子ガス系(2DEG) を含む GaAs ヘテロ試料の詳細図(右図)

図52に、2次元電子ガス系試料の室温でのSMM 形状像と同時に計測された表面電位像 を示す。表面電位像で観察された細線部分の電位は溝部分のそれに比較して約50mV高い 電位を示しており、その電位分布は細線内では均一である。表面電位は、平衡状態では、 金属や半導体表面の仕事関数や、表面構造・分子分極などに関係づけられる。ここで観察 された電位差は、ノンドープ GaAs 層と細線構造部分の仕事関数の違いによるものと考え られる。



図52 室温で観察された2次元電子ガス系試料のSMM形状像(左図)と同時に計測された表面電位像(右図)。走査範囲は $3\mu m \times 3\mu m$ であり、形状像で観察された細線の高さは約150nm、幅約 $1\mu m$ 、表面電位像で観察された細線部分の電位は溝部分のそれに比較して約50mV高い電位を示している。

次に、同じ試料を液体ヘリウム温度(4.2K)で計測した結果を図53に示す。液体ヘリウム温度で観察された2次元電子ガス系試料の電位像(中図)では細線内に約100mV程度の電位の不均一な分布が明瞭に観察された。さらに、バックゲートに電圧を印加した場合の電位像にも細線内部での電位の落ち込みや不均一な電位分布が観察された。室温での表面電位像では、細線内部の電位分布は均一であったのに対し、4.2Kでは、このように不均一な電位分布が明瞭に観察されている。これらの不均一な電位分布の存在は、低温でのGaAs表面への電子のトラップによる電位の乱れやGaAsヘテロ細線試料中のトラップなどに起因するものと考えられる。



図53 液体ヘリウム温度(4.2K)で観察された2次元電子ガス系試料のSMM形状像(左図)と細線部分の表面電位像(中図)、等価的にバックゲートに電圧を印加した場合の細線部分の表面電位像(右図)。走査範囲は約2µm×2.5µm。電位像(中図)では細線内に約100mV程度の電位の不均一な分布が観察される。さらに、右図の電位像にも細線内部での電位の落ち込みや特徴的な電位分布が観察される。

以上のように、高速ナノプローブ技術の開発においては、マイクロ波周波数領域での非破 壊で解析可能なナノプローブ技術および極低温で動作する SMM プローブシステムの開発 を進めた。最終的には、これらプローブ技術を融合することにより、半導体量子サーキッ トのナノスケールテスタを実現することが可能となった。

## (2)得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

極低温強磁場 SNOM 開発においては、測定温度 5K、磁場 6T で、空間分解能 100nm 程度 にて局所発光分光が可能である測定系が開発された。また、試料には電界を印加すること も可能である。さらに本装置は低温で動作可能な 3 次元ステージとともに、100nm 程度の 精度を持つ位置計測系を有する。今後、位置制御の自動化などの改良により、mm サイズ の大型試料の局所分光にも応用できるものと期待できる。これにより実際のホール素子な どの実際のデバイスに対して応用することで、量子伝導に対する局所的な光励起効果など の計測への応用が考えられる。

デュアルプローブ SNOM 開発においては、射光・集光探針ペアが単に2つの SNOM 計測 を同時に行うものではなく、SNOM 計測と、トポロジーを度外視した局所伝搬性とを同時 に計測できるものであることが分かった。これを利用して具体的に局所伝搬が重要と考え られる系の評価応用が期待される。

高速ナノプローブ技術の開発においては、走査型マクスウェル応力顕微鏡(SMM)を用いた マイクロ波周波数領域での半導体量子構造個別の電気応答を非破壊で解析可能なナノプロ ーブシステムの開発を進めるために、以下の要素技術を開発した。

- 1. マイクロストリップ導波路よりなる高周波帯域用 SMM カンチレバーの開発
- 2. ヘテロダイン力検出法に基づくデバイスの高速電圧サンプリング技術の開発
- 3. 半導体ナノメカニカル構造特性の評価技術の開発
- 4. 液体ヘリウム温度で動作可能な低温 SMM システムの開発

以上のように、高速ナノプローブ技術の開発においては、マイクロ波周波数領域での非破 壊で解析可能なナノプローブ技術および極低温で動作する SMM プローブシステムを開発 した。今後は、本研究で独自に開発したこれらプローブ技術を融合することにより、半導 体量子サーキットのナノスケールテスタを実現することが期待される。

## 4.4 コヒーレント制御パルス研究グループ

### (1)研究実施の内容

## a. 標準 NMR 仕様の希釈冷凍機の設計,導入と稼働

現在では、希釈冷凍機は市販されており、複数のモデルも用意されている。これら汎用的 な希釈冷凍機では、いずれも混合器(液体の<sup>3</sup>He と<sup>4</sup>He を混合させる容器で、ここで試料か ら熱を奪い極低温を作り出す)が金属製で、試料は混合器の外側に設置されている。そし て,抵抗検出 NMR を初め殆どの極低温実験では,この仕様で十分に事足りる。しかしなが らこの仕様は標準 NMR では不十分である。まず、標準 NMR では、試料を混合器内に設置す ることで不可欠である。入力する RF パルスのエネルギーが 1mK 程度であることから、10mK 程度の試料にパルスを照射すれば試料温度が上昇する。この温度上昇を速やかに解消する ために試料を混合器内に設置する。しかし金属製混合器内に試料を設置することは許され ない。標準 NMR では試料に高磁場を印加し磁場を掃引するため,金属製の混合器では,金 属に渦電流が発生し,混合器の温度が上昇するからである。したがって,**プラスチック製 混合器内に試料を設置できる仕様の希釈冷凍機**を設計し導入し、稼働させた。プラスチッ クで混合器を作成しているため、低温で超流動となるヘリウム混合液のリークに苦労した が、大きな遅延も無く無事に検収された。写真は導入された冷凍機の本体と混合器の写真 である。平成16年3月に入札説明会を行い,平成17年3月に納品された。混合器近傍 には NMR 測定のための可変コンデンサを設置するため, 混合器にとっては負荷となるが, この状況でも最低到達温度 26mK を実現した。





図54 標準 NMR 仕様希釈冷凍機(左:冷凍機本体,右;プラスチック製混合器)

#### b. GaAs 基板中の Ga, As 核スピンの標準 NMR

バルク GaAs の基板中の核スピンの基礎的振舞は、意外にも標準 NMR による報告が殆どなかった。これは、(i)標準 NMR が主に分子液体、磁性体、超伝導体を対象にしてきたこと、(ii) 半導体の緩和時間がこれらの物質に比べて少なくとも1桁以上長く測定が困難であったこと、(iii)研究者の保守性、であると考えられる。そこで当サブグループでは、高分解能 NMR マグネットを用い、バルク GaAs 基板の室温における標準 NMR の基礎データを精密に測定した。具体的には、すべての核スピン<sup>69</sup>Ga, <sup>71</sup>Ga, <sup>75</sup>As に対して、NMR スペクトル・縦緩和時間 T<sub>1</sub>・核スピンコヒーレント時間 T<sub>2</sub>を、精度良いデータを基に詳細な解析を行った。その結 果、以下の知見を得た。

①図55に示すように、室温での縦緩和時間T<sub>1</sub>は数100ミリ秒と比較的短いが、3種の核スピンのT<sub>1</sub>の解析から、主として電場勾配の揺らぎが縦緩和の原因であることが分かった。このことは、4K以下の低温ではT<sub>1</sub>が非常に長くなり、例えばドットの核スピンをフリップさせても周辺のGaAsの核スピンに拡散してゆく可能性は少ないことを強く示唆するものである。

②室温での核スピンコヒーレント時間 T<sub>2</sub>は,3種の核スピンの磁気回転比と自然存在比に

正確にスケールされることが分かった。これより,デコヒーレンスを引き起こすものが磁 気的なものであると共に,局所的なサイトに依存しない空間的に均一な局所磁場の揺らぎ によってコヒーレンスが失われていることがわかった。



# c. 多重反転パルス列の照射による核スピンコヒーレント時間の増大

バルクのシリコン結晶中の<sup>29</sup>Si 核スピンについては,反転パルス(核スピンの向きを反転 させるパルス,180°パルスともいう)を複数回照射する(以下,「多重反転パルス」) ことで T<sub>2</sub>が異常に長くなる(すなわち量子コヒーレンスが破壊されにくくなる)ことを, 平成15年10月に Yale 大学 Barrett グループと当サブグループとがほぼ同時に報告して いた。図56は当サブグループの結果で,左上の数字は,反転パルスの間隔を示す。パル ス間隔が短いほど核スピンのデコヒーレンスは抑制されることがわかる。間隔1ミリ秒で 多重反転パルスを照射した場合のT<sub>2</sub>は,本来の値に比べて約200倍も長くなることがわ かった。

これは、一般的な物理的感覚と全く逆の現象である。なぜなら、パルスを照射することは 一般に、ある物理系(この場合には<sup>69</sup>Ga などの核スピン系)に対して外界から"刺激"を 与えることであり、これは通常、その物理系に乱れを与えることになるからである。これ に対し本結果では、反転パルスの照射頻度を大きくすればするほど、核スピン系の位相が 乱れにくくなることを示しているのである。(なお、この報告以前に Stanford 大学グルー プが、同じくシリコン結晶中の<sup>29</sup>Si 核スピンのT<sub>2</sub>が増大することを報告しているが、これ はデカップリング・パルスという、核スピン同士の相互作用を実効的に消失させる効果を 及ぼすものであり、今回の現象とは物理的な本質が全く異なる。)



**図56** 反転多重パルス列によるシ リコン結晶中の<sup>29</sup>Si 核スピンのコヒ ーレンスの増大。



**図57** 反転多重パルス列による GaAs 基板中の<sup>75</sup>As 核スピンのコヒー レンスの増大。

Yale 大学グループは、この多重反転パルスの照射による T<sub>2</sub>の増大は、核スピンが 1/2 であることが本質であると考え、他の物質の 1/2 核スピンについて系統的な研究を展開しつつあった。しかし我々は、これはより本質的な現象であると考え、スピンが 3/2 であるバルク GaAs 基板に対して、同様に核スピンのデコヒーレンス過程を詳細に調べた。その結果、GaAs 中の全て核スピン<sup>69</sup>Ga、<sup>71</sup>Ga、<sup>75</sup>As (スピン量子数はすべ 3/2) に対して、<sup>29</sup>Si (スピン量子数 1/2) と全く同様の結果が得られた (図 5 7)。つまり、当初の我々の予想通り、スピン量子数に依らない普遍的な現象であることがわかった。

このことは何よりも,NMR 量子計算に非常に有望な情報をもたらすものであることを示して いる。一般に,NMR 量子計算においては,核スピン系の初期化・演算・結果の読み出しに際 して複数の反転パルスを照射する必要があるが,多くの理論がパルスを頻繁に照射するこ とが核スピン計算に対して"有害"であると主張していた。ところが,今回の我々の結果 はこれら理論の危惧とは全く逆の事実を提示しており,NMR 量子計算を実行するためのパル ス列(反転パルスで構成されている)そのものが,同時にコヒーレンス時間を伸ばす効果 があることを意味しているからである。

この T<sub>2</sub>延長の効果の本質を調べるため, 独自に新たに開発した別の多重パルス列を照射し, 本実験と比較・検討した。その結果,この現象は,通常の意味での T<sub>2</sub>に対して十分短い時 間内に核スピンを反転させれば,その核スピンが感じる"雑音"(核スピンのコヒーレンス を乱す原因となるランダムな局所磁場の揺らぎ)を実効的に相殺するためであることを突 き止めた。

また、これまで「核スピンの量子コヒーレンスは、キャリア濃度に依存しない」と Yale 大 学グループによって報告されてきた。今回我々は、より高精度の実験を行うことにより、 量子コヒーレンスの延長効果は低キャリア濃度でより顕著であることを見いだした。

これらの知見は,量子計算に非常に明るい展望を与えるという実効的な意義と共に,「揺動 が散逸を引き起こす」という極めて普遍的な現象の理論の展開に対して重要な実験的指針 を与えるものである。

## d. 標準 NMR による GaAs/GaAlAs ヘテロ構造界面の歪みの直接観察

これまで、GaAs ヘテロ構造界面においては歪みが存在することが示唆されてきた。当サブ グループでは、AlGaAs 中の Al-NMR スペクトルの分離によって、直接的に観測することに成 功した。界面の歪みによって電場勾配が発生し、これが Al-NMR の共鳴スペクトルを5本に 分離させている様子が図58より見て取れる。



# **図58** Al-NMR スペクトルによる GaAs/GaAlAs ヘテロ構造界面の歪みの直接観察

### e. 微小磁石が作る局所磁場の標準 NMR スペクトルによる直接観察

NMR は、量子計算の手段としては最も進んでおり、液体を用いて 11 ビットの量子計算に成 功している。しかし本格的な量子計算の実現には、人工的に多ビット化することが不可欠 であった。これを実現する有力な方法が、局所磁場により磁場勾配を発生させてスペクト ル上で多ビット化するものである。その第一歩として当サブグループでは、局所磁場の勾 配ではなく、局所磁場の存在そのものを標準 NMR により直接観察することを試み、本事業 において世界で初めて成功した。図59左端と中央に、試料の構造を示す。シリコンで作 成したピラー構造の最上部にあるパーマロイが局所磁場を発生する。この局所磁場を,そ の直下にある厚さ 20nm のアルミ層が感じ、A1-NMR のスペクトルとして観察するものである。 図59右端に、そのスペクトルを示す。右端の青矢印で示した共鳴線が、局所磁場を感じ たアルミ層の信号、黒矢印で示した共鳴線が試料と共に入れた参照用のアルミ金属による ものである。図59中央の拡大図からも明らかなように、外部磁場とは反対方向の局所磁 場を感じていること、および外部磁場と発信 RF 周波数を変化させて得られた一連のスペク トルから、確かにこの信号が局所磁場を感じたアルミ核スピンからの信号であることが結 論づけられた。



## 図59 微小磁石が作る局所磁場の Al-NMR による直接観察

この研究は、これまで MIT, Stanford 大学なども同様の試みをしてきたが、今までのところ成功したとの報告は無い。今回我々が成功した最大の要因は、通常の NMR 測定では観測 され得ない極めて微弱な信号を検出する感度と、それを分離する実験的技術にある。この 実験の高い感度を証明するのが、検出コイル内に全く存在しない銅核スピンからの信号が 検出されている(右端図の赤矢印および緑矢印)という点である。なお、この銅核スピン の信号は、(外界の電磁雑音を遮断する目的で)試料とコイルを託っているパイプ中の銅核 スピンからの信号であることが確認されている。

この成功は、固体 NMR 量子計算において不可欠となる量子ビットを増やすための基盤技術 であるとともに、MRI(磁気共鳴イメージング)の空間分解能をナノ・スケール化するため の基盤技術を提供するものである。

このスペクトルは高感度化の実現のため低温(1.7K)で実施したが、既に稼働している希 釈冷凍機によれば 50mK 程度の極低温が実現でき、より明瞭なスペクトルが観測されると期 待される。しかしながら、意外にも 100mK での結果は、1.7K よりもブロードなスペクトル であった。当初は実験上の誤謬と考え、あらゆる可能性を検討したが、本質的なものであ ることがわかった。一般にバルクのアルミニウム金属が 1.14K で超伝導転移することと、 本実験のアルミ層が 20nm の超薄膜であることから、現時点では、超伝導揺らぎに起因する メゾスコピック・サイズ効果である考え、これを検証する簡単な実験を開始した。

## f. GaAs 基板の歪みの標準 NMR スペクトルによる直接観察

これまで「バルク基板では歪みに起因する効果は見られない」と考えられてきた。しかし 今回,標準 NMR において検出感度をさらに向上させ,外部磁場に対する基板の方向を変化 させることで,基板全体ではなく,ごく局所的に歪みが存在することを明らかにした。一 連の標準 NMR スペクトルから,この歪みは dopant の近傍の局所歪みであると考えている。

# g. カゴ状物質中の核スピンによる固体2量子ビット NMR 計算の試み

カゴ状物質 La<sub>3</sub>Pd<sub>20</sub>Ge<sub>6</sub>は,図60左の結晶構造に示すように,隣接するカゴに内包された2 種類のLa 核スピン(4a サイトと8c サイト)が存在する。そのLa-NMR スペクトルから,両 La 核スピンは弱く結合した良い量子状態であることがわかった。さらに最近,この物質を 希釈冷凍機で1K以下まで冷却すると,両核スピンのT<sub>2</sub>は10ミリ秒にも達することを見い だした(図60右)。一般に,T<sub>2</sub>はエネルギー保存のプロセスであるため,温度に依存しな い。従って,この現象そのものが異常物性として興味深いことはもちろん,低温において 固体の2量子ビットNMR 演算を実行させる可能性が高いことを意味している。



図60 カゴ状物質  $La_3Pd_{20}Ge_6$ の結晶構造(左)と内包 La 核スピンの  $T_2$ の温度依存性

## (2)得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

b. GaAs 基板中の Ga, As 核スピンの標準 NMR に関しては、標準 NMR の基礎データである縦緩 和時間 T<sub>1</sub>・核スピンコヒーレント時間 T<sub>2</sub>を系統的に調べたのは我々のみである。より詳細 な解析により、ナイトシフトから伝導電子による分極率を評価すれば、GaAs 系ナノ構造の 研究に重要な基礎データを与えることになる。

C. 多重反転パルス列の照射による核スピンコヒーレント時間の増大に関しては、たとえば、 Yale 大学グループでは核スピン強度が 20%程度に減少する精度でしか測定していないのに 対し,我々は図 2 からわかるように 3%程度に減少するまで精密に測定している。この精度 の違いが,多重反転パルスの間隔に対して系統的にデータを得ることが可能となり,この 現象の理解に繋がった。さらに、Yale 大学グループがスピン量子数 1/2 の核スピンのみを 調べているのに対し,我々はいち早く,スピン量子数 3/2 の核スピンに対して <sup>29</sup>Si と同様 の結果を得ており,これも現象の理解に繋がった。Stanford 大学グループは Yale 大学グル ープや我々よりも早く,多重パルスによる T2 の延長効果を報告しているが、これは既に良 く知られた現象(反転パルスではなく、核スピンを 90°回転させる"デカップリング・パ ルス"を照射することにより、核スピン同士の結合を実効的に消失させる操作をしている) であり、今回の現象とは本質的に異なる。また、90°パルスと異なり、反転パルスは NMR 量子計算の基本パルスであるため、「計算するためにパルスを照射することが同時に核ス ピンのコヒーレンスを延ばしている」という知見を得たことになり、量子計算の実現をめ ざす応用研究への意義は多大である。

d. 標準 NMR による GaAs/GaAlAs ヘテロ構造界面の歪みの直接観察に関しては、これまで示 唆されてきた界面の歪みを、半導体の分野では全く斬新な標準 NMR という実験手法によっ て、直接観察できるということを初めて示したという意義は大きい。国内外で初めての報告である。

e. 微小磁石が作る局所磁場の標準NMRスペクトルによる直接観察に関しては、これはまず、 固体 NMR 量子計算の多ビット化を実現するために不可欠な要素技術であった。このため、 世界の著名な研究機関が試みてきたが、現時点で成功したのは我々だけでる。さらに、MRI

(磁気共鳴イメージング)の分解能を,現在のサブミリ程度からサブミクロンまで向上させるための基盤技術となるものである。現段階では局所磁場の大きさのみを直接観察したにとどまっているが,アルミ層を2層にすれば,局所磁場の勾配を直接観察したことになる。

f. GaAs 基板の歪みの標準 NMR スペクトルによる直接観察に関しては、これまで半導体の研 究者・技術者にとって馴染みのなかった NMR という手法が,バルク半導体中の(たとえば dopant の存在による)極めて局所的な歪みを検出することができるということを示してお り,NMR が半導体の物性・特製評価に新たな手法となる可能性を示唆するものである。

g. **カゴ状物質中の核スピンによる固体2量子ビット NMR 計算の試みに関しては、**これまで 標準 NMR では,「T<sub>2</sub>は温度に依存しない」というのが常識であった。実際,たとえば金属が 超伝導転移する際にも,T<sub>2</sub>は温度変化しない。これは,デコヒーレンス過程では核スピン 系は外界とエネルギーを授受しないためである。したがって今回の知見(極低温まで冷却 することで,2桁近くもT<sub>2</sub>が長くなるという現象)は,如何に新規で異常なものであるか を示している。

# 4.5 量子情報処理研究グループ

### (1)研究実施の内容

量子情報処理研究グループでは量子情報および量子光学に関する理論および実験的研究。 特に量子ビットの状態発生および確認、量子トモグラフィ、量子ゲーム理論、エンタング ルメントとデコヒーレンス、核スピン系による量子情報処理の研究を推進した。

## a. 多体量子系におけるデコヒーレンス

デコヒーレンスとは系の量子干渉性が無くなって行くことであり、量子デバイスの不完全 性を表す重要な概念である。本研究では多体量子系におけるデコヒーレンスについて理論 的研究を行い、下記のような結果を得た。

- a1. デコヒーレンスの原因と結果をコンパクトに表現する理論的方法を提唱した。手法と して便利でよく用いられる「クラウス表現」での解析を可能とするものである。その 応用として、「コヒーレント状態の重ね合わせの偶奇性に及ぼす損失の効果」を明ら かにした。(たとえば偶状態は影響を受けないが奇状態は影響を受けるなど。)
- a2. 量子テレポーテーションに用いる系がダンピングにさらされた場合の忠実度の劣化 を解析し、古典限界を破るための条件や、忠実度の劣化量のダンピング依存性を明ら



図61 テレポーテーションプロセスにおける雑音チャンネル。AliceとBobでエンタングル 状態が取り交わされたとき量子チャンネルが形成される。エンタングル状態、ローカル操作、 古典的なコミュニケーションでテレポーテーションが達成できる。a, phase damping channel, b, amplitude damping channel, c, depolarization channelの場合の異なるシナ リオ (I) (II) に対する結果が(III) (IV) である。(V)にはstate-dependent fidelityが示 されている。破線は (I) に対するもので、実線は(II) に対するものである。

かにした。(図61)

## b. 固体中エキシトンのエンタングルメント

半導体量子ドット中のエキシトンのエンタングルメントについて(1)相互作用しあう複数 の量子ドット中のエキシトンのエンタングルメントの度合いと(2)エンタングルメントの 発生と制御の方法について研究し、以下のことを明らかにした。(図 62-64)

b1. ドットごとのエキシトンの数で言うと、それが1つの場合、簡単な物理操作で正確に 「最大エンタングル状態」を実現できる。2つないし3つの場合、正確には「最大エ ンタングル状態」ではないがそれに非常に近い状態が得られる。

- b2. ドット中エキシトンが一つの場合、エンタングルメントの度合いと「占有数の不均衡 の度合い」はトレードオフ関係となるが、二つ以上の場合その関係は崩れる。
- b3. 以上のようなエンタングルメントの制御は、光共振器中に量子ドット群を置くことに より実現できることがわかった。



図62 エキシトンの総数としてのVon Neumannエントロピー(左)とエキシトン数が2ならびに3の場合のmicrocrytallite間のポピュレーションの変化による総エンタングルメントの変化(右)。



図63 N個の等価的な量子ドットが存在する時のサブシステムAとBの間の様々な bipartite エンタングルメント。



図64 ひとつの量子ドットがスピンアップ(M = 1)である状態からスタートしたときのN 量子ドットのconcurrenceの発展。

## c. 量子トモグラフィの理論的研究

量子トモグラフィとは「同じ状態が多数与えられたときにその状態を特定する物理的手段」 である。これは或る「状態発生器」が期待通り動作しているかを物理的に確認する手段で、 これは「量子状態トモグラフィ」とも呼ばれる。これを進め「あるデバイスの入出力関係 が期待通りか」を確認することを「量子プロセストモグラフィ」と言うが、既知状態を入 力したときの出力状態を見るので、いずれにせよ基本は「状態トモグラフィであり、非常 に重要な技術である。

本研究で固体の核スピン系のトモグラフィと光の直交位相成分のトモグラフィを行った。 前者は平山グループと協力する形で理論の部分を担当した。後者は光特有のトモグラフィ に関する理論を実証する実験を行った。

- c1. 平山グループとの共同研究として、ナノスケール固体NMRデバイスの量子情報的側面 について研究した。実質的に4準位系のこのデバイスは、二つの量子ビット系と同等 の表現力があるが、それを可能とする制御法およびトモグラフィの方法を提案した。 密度行列の対角・非対角すべての成分を決めるための測定法のみならず、磁場をかけ て状態を任意に変換する方法も提案した。
- c2. 光の直交位相成分のトモグラフィとしてバランスホモダイン検波の装置を開発した。 これを用い、ガウス状態(コヒーレント状態や黒体輻射状態)のみならず非ガウス状態(位相分布コヒーレント状態や振幅分布コヒーレント状態)のトモグラフィ実験に 成功した。下記の図65、66では(a)~(c)がガウス状態での(d)~(g)が非ガウス状態での発生・トモグラフィ実験結果である。





図65 バランスしたホモダイン検波から得られた実験的な統計データを基に作成された reconstructed Wigner functionsの断面: (a) 真空状態, (b) コヒーレント状態, (c) rotating ground glass により作成された熱状態, (d)-(e)  $\pi$ 、2 $\pi$ 位相ランダム状態、(f)-(g) 振幅ランダムコヒーレント状態。

(b)

(c)

(a)



図66 バランスしたホモダイン検波から得られた実験的な統計データを基に作成された density-matrices: (a) 真空状態, (b) コヒーレント状態, (c) rotating ground glass に より作成された熱状態, (d)-(e)  $\pi$ 、2 $\pi$ 位相ランダム状態、(f)-(g) 振幅ランダムコヒーレ ント状態。

# d. 量子ゲーム理論:

量子ゲーム理論は D. A. Meyer [Phys. Rev. Lett., 82, 1052, (1999)] と Eisert et al., [Phys. Rev. Lett., 83, 3077, (1999)] が「量子コイン投げおよび囚人のジレンマゲーム において古典戦略より量子戦略の方がプレーヤーにとって有利であること」が示されたこ とにより始まった。我々はエンタングルメントや量子測定などの「量子道具」を様々なゲ ームに適用し、以下のような結果を得た。

- d1. 与えられた古典ゲームを包含する量子ゲームを見いだことを目的とし、そのための必要十分条件を初めて求めた。これまで提唱された例を、その条件を満たすものと満た さないものに分類した。
- d2. 不完全なエンタングルメントが多者ゲームに及ぼす影響はJohnson [Phys. Rev. A, 63, 020302 (2001)]により論じられたが、我々はそれを一般化した。特に、量子的手段の 優位性を保証するための「雑音の閾値」があることを見いだした。その効果は「pay-off 関数」の値を変えるのみならず、ナッシュ平衡点の数を無用に増やしてしまう場合も ある。(図 6 7)
- d3. ゲーム理論における量子相関(=エンタングルメント)と古典相関の違いを明らかに した。ナッシュ平衡がない場合にそれを出現させる効果はどちらにもあるが、pay-off 関数の値を(望み通り)変えるのはエンタングルメントだけであることがわかった。



図67 Prisoners Dilemma (PD) とSamaritan's Dilemma (SD)ゲームにおける雑音の影響。

## 5. 類似研究の国内外の研究動向・状況と本研究課題の位置づけ

半導体電荷量子ビットは SORST グループの成果が最も信頼性のあるものとして世界的に 受け入れられている。ケンブリッジで Si 結合量子ドットを用いた電荷量子ビットが報告さ れたが、正しく単電子のコヒーレント振動を見ているのかどうか疑わしい点が多い。結合 量子ドットを集積化した構造を作製し 2 量子ビットを実現するのに十分な相互作用を確認 したのは SORST チームが世界ではじめてである。読み出し技術として重要な単電子電荷 検出に関しては、量子ドット中の単電子電荷の変化を隣接する量子ドットあるいはポイン トコンタクトで高感度に検出する技術は我々も含めて複数の機関で実現されてきたが、も う一段発展させて単電子の動く方向も含めた測定に成功したのは SORST 研究チームが世 界ではじめてである。

半導体電子スピン量子ビットに関しては、SORST チームは他グループとは異なる独自のア プローチを取っている。開発環境のひとつである縦型量子ドットは、その対称性や安定性 に優れるが、他グループではまだ作成に成功していない。また、横型量子ドットにおいて も、微小磁石による傾斜磁場を利用する方法は独自のものである。本プロジェクトの期間 中には、海外のグループによる電子スピンのコヒーレント操作も報告された。Harvard 大 学のグループは、パウリスピンブロケード状態にある二重量子ドットの2電子系に対して、 ドット間トンネル結合の電圧制御を利用して、コヒーレント操作と読み出しに成功した。 これは単一電子スピンの制御ではなく、2電子の swap 演算になっているが、|↑→>と|↑ ↑>の2状態でできる量子ビットに対するユニタリ演算と見なす事もできる。その後、デル フト大学のグループがドット近くに作った微小コイルを利用して単一電子のスピン共鳴と 量子ビット操作を達成した。しかし、これらの実験は、次の段階に進むにはスケーラビリ ティや読み出しの信頼性・速度に問題が残っている。このような観点では、微小磁石による 傾斜磁場を用いる当グループの方法は最良であり、近い将来、この分野で標準的な技術と なる可能性がある。

ナノスケール領域の核スピンを全電気的に半導体デバイスでコヒーレントに制御した 核スピン量子ビットは多量子遷移を正確にコヒーレント制御したこと、ナノスケールで 高感度 NMR が実現されたことから非常に高く評価され、Nature 掲載に合わせて News&Views でも"NMR on a chip"として紹介された。同様の半導体における核スピン 制御はエッジチャネルを用いるものや、光を用いるものが東大や UCSB で積極的に進め られているが、多数のコヒーレント振動を明瞭に示した点で一歩リードしている。量子 ドットにおける核スピンコヒーレント制御も、他に例が無く、他研究グループの追随を許 さない状況にある。SORST チームに追随すべく、内外のいくつかのグループで横型2重ド ットにおけるスピンブロッケードの研究が始まっている。しかしこれらの実験では核スピ ン揺らぎの効果は報告されているものの、当グループのような核スピン偏極を作り出すこ とにはいまだに成功していない。2 重ドット間の結合を核スピン偏極に最適な大きさに安 定して維持できるのは我々がノウハウを有する縦型2 重ドット構造のみであるからだと思 われる。核スピンのコヒーレント制御に関してはコヒーレンス時間の検討も進められ、特 に制御パルスを短い間隔で印加し続けることでコヒーレント時間が増大するという核スピ ン量子ビットに向けて勇気づけられる結果が得られたが、この成果も SORST チームでは じめて明確に実験的に証明されたものである。

半導体の量子ビットとして Harvard 大、Stuttgart 大、UCSB などでダイヤモンドの NV セン ターを用いたものが大きく進展し2量子ビットが実現されているが、将来の集積化には欠 陥の配置の問題が残る。量子ビット全体を見渡すと現時点で一番進んでいる固体量子ビッ トは超伝導をベースにしたもので、NEC、デルフト工科大などで研究が進んでいる。しか し、最終的にどのような量子ビットが本命になるかはまだ不明であり、コヒーレント操作 の研究はナノデバイスの進展、新しい物理につながることから半導体でこれらの研究を推 進することは重要な意味があると考える。また、SORST では電荷、電子スピン、核スピン の量子ビットの研究を並列に進めたが、理論的には電子スピンと核スピンのコンビネーシ ョンなど異なる量子ビット間の量子情報交換も提案されている。

量子情報処理を支える基礎研究に関しても内外の研究機関と比較してインパクトのある高 いレベルの成果を上げた。核スピンの制御を利用して核スピンが関連する測定から半導 体ヘテロ構造の電子状態を探る研究はこの SORST チームが世界に先駆けスタートした ものである。得られた成果は Sciencel 件を含む多数のインパクトファクターの高い論 文に掲載され、関連する国際会議で多くの招待講演を受けるなどこの分野のトップを走 るグループとして高い評価を得ている。量子構造の基礎研究として進めた分数量子ホー ル状態や二層系の研究、様々なナノ構造の物性研究、様々なタイプの近藤効果の発見で も SORST チームの研究は世界のトップレベルにあり、特に、SIMOX-Si 量子構造におけ る大きな谷分離のゼロ磁場での発見とその電界制御や一次元ウィグナー結晶のドラッグ 効果による検証などは、他に類似の研究がない独創的なものである。

極低温強磁場 SNOM に関しては、本研究開始当時は国内外を通してほとんど皆無であった が、その後、数件の開発の報告が見られる。他機関の装置では主に量子ドット材料等の評 価が目的であり、試料位置制御への配慮が少ないのに対して、本 SORST で開発した装置 はデバイス構造の試料への適用を前提として考えており、試料の確実な冷却(測定ヘッド 全体の低温ヘリウム中での冷却)、低温下でも作動する位置モニターを有する3次元粗動機 構などの点で優位性がある。 デュアルプローブ SNOM に関しては、 独立した二本の探針に よるデュアルプローブ SNOM は他にまだあまりない。高速ナノプローブ技術に関しては、 非接触原子間力顕微鏡(NC-AFM)の距離制御をそのまま適用した走査型ケルビン力顕微 鏡を用いて、半導体清浄表面の電位の解析を行った研究例はいくつか報告されているが、 デバイス構造のナノメータースケールでのポテンシャル分布解析を極低温で行った研究は ほぼ皆無である。また、GHz 帯域用に AFM カンチレバーを開発するなど定量的な解釈を 目指した研究もほぼ皆無である。ナノプローブに関しては、ナノプローブを利用した低次 元電子状態の測定に関しても世界的に注目される成果を上げた。特に、InAs 量子井戸中に 束縛された二次元電子状態の観察は量子効果の基本中の基本であるにもかかわらずきちん と局所的な状態密度分布が測定された例は無く PRL 掲載時に editor's suggestion に選択さ れた。

# 6. 研究実施体制

(1)体制

平成 15 年 SORST 開始当時



操作に必要なパルス列の研究を担当



半導体核スピンのNMR と重ナコピーレン 操作に必要なパルス列の研究を担当

# (2)メンバー表

# ①量子コヒーレント物性研究グループ

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
平山 祥郎	東北大学 大学院 理学研究科	教授 研究代表 者、GL	薄膜・ナノコヒーレント構 造の物性評価	平成 18 年 7 月~ 平成 20 年 3 月
遊佐 剛	東北大学 大学院 理学研究科	准教授	固体中での核スピン制御	平成 18 年 7 月~ 平成 20 年 3 月
橋本 克之	東北大学 大学院 理学研究科	助教	固体中での伝導特性のナ ノ領域制御	平成 18 年 11 月~ 平成 20 年 3 月
渡辺 信嗣	東北大学 大学院 理学研究科	助教	半導体中2次元電子状態に おける核スピン制御	平成 19 年 3月~ 平成 20 年 3月
太田 剛	東北大学 大学院 理学研究科	JST 研究員	半導体中での核スピンコヒーレン ト制御	平成 18 年 月~ 平成 19 年 2 月
小林 嵩	東北大学 大学院 理学研究科	大学院生	半導体コヒーレント物性 測定	平成 18 年 7月~ 平成 20 年 3月
伊藤 大介	東北大学 大学院 理学研究科	大学院生	半導体コヒーレント物性 測定	平成 18 年 7 月~ 平成 20 年 3 月
鎌田雄二	東北大学 大学院 理学研究科	大学院生	電界・SAW による核スピ ン制御	平成 19 年 4 月~ 平成 20 年 3 月
髙道 洋行	東北大学 大学院 理学研究科	大学院生	核スピンのコヒーレント 制御	平成 19 年 4 月~ 平成 20 年 3 月
新井田 佳孝	東北大学 大学院 理学研究科	大学院生	シリコン量子井戸の伝導 特性評価	平成 19 年 4 月~ 平成 20 年 3 月
早川 純一朗	東北大学 大学院 理学研究科	大学院生	半導体微細領域での核ス ピン制御	平成 18 年 7 月~ 平成 20 年 3 月
岡崎 雄馬	東北大学 大学院 理学研究科	大学院生	電荷スピンのダイナミク ス制御	平成 19 年 7 月~ 平成 20 年 3 月
笹谷 いずみ	東北大学 大学院 理学研究科	チーム事 務員		平成 18 年 11 月~ 平成 19 年 1 月
イートン 宇美	東北大学 大学院 理学研究科	チーム事 務員		平成 19 年 1月~ 平成 19 年 12 月

# ② 量子コヒーレント構造研究グループ

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	薄膜・ナノ相関構造の伝導 特性	平成 15 年 12 月~ 平成 18 年 6 月
山口 浩司	同上	主幹研究 員	メカニカルフローティン グ構造の作製と伝導特性	平成 15 年 12 月~ 平成 20 年 3 月
都倉康弘	同上	主幹研究 員、GL	量子相関構造の物性理論	平成 15 年 12 月~ 平成 16 年 3 月
藤澤 利正	同上	主幹研究 員、GL	量子ドット相関構造の キャリアタ゛イナミクス	平成 15 年 12 月~ 平成 20 年 3 月
村木 康二	同上	主任研究 員	薄膜相関構造の作製と伝 導特性	平成 15 年 12 月~ 平成 20 年 3 月
蟹沢 聖	同上	主任研究 員	電子状態のナノプロービ ング	平成 15 年 12 月~ 平成 20 年 3 月
佐々木 智	同上	主任研究 員	量子ドット相関構造のスヒ <sup>°</sup> ンタ <sup>°</sup> イナミクス	平成 15 年 12 月~ 平成 20 年 3 月
田口 明仁	同上	主任研究 員	フローティング構造の基 礎理論	平成 15 年 12 月~ 平成 16 年 3 月
鎌田 英彦	同上	主任研究 員	量子ドット励起子のコヒー レント制御	平成 15 年 12 月~ 平成 20 年 3 月
後藤 秀樹	同上	主任研究 員	量子ドット励起子のコヒー レント制御	平成 16 年 4 月~ 平成 20 年 3 月
鈴木 恭一	同上	研究主任	電子状態のナノプロービ ング	平成 15 年 12 月~ 平成 20 年 3 月
林 稔晶	同上	社員	量子ドット相関構造のキャリ アタ <sup>゙</sup> イナミクス	平成 15 年 12 月~ 平成 20 年 3 月
熊田 倫雄	同上	社員	薄膜相関構造のコヒーレ ント制御	平成 15 年 12 月~ 平成 20 年 3 月
高品 圭	同上	ポスドク	シリコン系相関構造の作 製と伝導特性評価	平成 15 年 12 月~ 平成 20 年 3 月
遊佐 剛	同上	ポスドク	薄膜相関構造のコヒーレ ント制御	平成 15 年 12 月~ 平成 18 年 6 月
川口 晃	同上	ポスドク	量子相関構造の物性理論	平成 15 年 12 月~ 平成 16 年 3 月
橋本 克之	同上	研究員	薄膜相関構造のコヒーレ ント制御	平成 15 年 12 月~ 平成 16 年 3 月
Hongwe Liu	同上	JST 研究 員	シリコン系量子ドット相 関構造の伝導制御	平成 16 年 2 月~ 平成 20 年 3 月

太田 剛	NTT 物性基 礎研	研究員	薄膜相関構造のコヒーレ ント制御	平成 19 年 3 月~ 平成 20 年 3 月
Paula Giudici	同上	ポスドク	薄膜二層構造の伝導特性	平成 18 年 4 月~ 平成 20 年 3 月
Huang-Ming Lee	同上	実習生	薄膜相関構造の伝導特性	平成 17 年 4 月~ 平成 18 年 3 月
Simon Perraud	同上	実習生	電子状態のナノプロービ ング	平成 17 年 4 月~ 平成 20 年 3 月
Vincent Renard	同上	ポスドク	薄膜相関構造の伝導特性 とナノプローブ	平成 18 年 4 月~ 平成 20 年 3 月
吉田 幸子	同上	チーム事 務員		平成 15 年 12 月~ 平成 16 年 10 月
長谷川 香織	同上	チーム事 務員		平成 16 年 11 月~ 平成 18 年 10 月

③ 半導体ナノ量子構造の伝導特性研究グループ

氏 名	所属	役職	研究項目	参加時期
山本 倫久	東京大学工 学部物理工 学科	助手(助 教) GL	結合量子細線における電 子相関	平成 16 年 4 月 ~ 平成 20 年 3 月
樽茶 清悟	東京大学工 学部物理工 学科	教授	結合量子ドット相関効果 の磁場特性の評価	平成 15 年 12 月~ 平成 20 年 3 月
大岩 顕	物理	講師	量子ドットにおける電子 ダイナミクスと光学的核 スピンポンピング	平成 17 年 4 月~ 平成 20 年 3 月
大野 圭司	理化学研究 所	研究員	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 15 年 12 月~ 平成 20 年 3 月
小寺 哲夫	物理	大学院生	量子ドットの電子スピン 制御	平成 15 年 12 月~ 平成 19 年 3 月
五十嵐 悠一	物理	大学院生	結合量子ドットの電子状 態	平成 15 年 12 月~ 平成 20 年 3 月
高橋明雄	物理	大学院生	結合量子ドットのスピン 相関	平成 15 年 12 月~ 平成 17 年 3 月
西義史	物理	大学院生	量子ドットの電子ダイナ ミクス	平成 15 年 12 月~ 平成 17 年 3 月
栖川 淳	物理	大学院生	量子ドットの電子スピン 読み出し	平成 17 年 4 月~ 平成 18 年 3 月
日達 研一	物理	大学院生	量子細線 - 量子ドット結 合系のスピン相関	平成 17 年 4 月~ 平成 20 年 3 月

北村 陽介		大学院生	結合量子ドットにおける 電子相関	平成 17 年 4 月~ 平成 19 年 3 月
相馬 章宏		大学院生	量子ドットの電子ダイナ ミクス	平成 17 年 4 月~ 平成 19 年 3 月
十時 詠吾		大学院生	量子ドットのスピンダイ ナミクス	平成 18 年 4 月~ 平成 20 年 3 月
小田穰		大学院生	量子ドットのスピン制御	平成 18 年 4 月~ 平成 20 年 3 月
木村 啓太	東京大学工 学部物理工 学科	大学院生	量子ドットの電子スピン 相関	平成 19 年 4 月~ 平成 20 年 3 月
高橋 駿	東京大学工 学部物理工 学科	大学院生	結合量子ドットにおける 電子スピン操作	平成 19 年 4 月~ 平成 20 年 3 月
李 相潤	東京大学工 学部物理工 学科	大学院生	量子ドットにおける電子 スピン操作	平成 19 年 4 月~ 平成 20 年 3 月
伊藤雅浩	東京大学工 学部物理工 学科	大学院生	半導体量子ドット構造の 作製と電気伝導評価	平成 19 年 4 月~ 平成 20 年 3 月
高橋 諒	東京大学工 学部物理工 学科	大学院生	量子ドットの電子スピン 制御	平成 19 年 4 月~ 平成 20 年 3 月
黄 日華	理化学研究 所中央研究 所	連携大学 院生	結合量子ドット構造にお けるスピン・核スピン効果	平成 18 年 4 月~ 平成 19 年 3 月
黄旭明	理化学研究 所中央研究 所	アジア連 携大学院 生	結合量子ドット構造のス ピン励起状態	平成 18 年 4 月~ 平成 20 年 3 月
高橋 宏輔	理化学研究 所中央研究 所	連携大学 院生	結合量子ドット構造にお けるスピン・核スピンダイ ナミクス	平成 18 年 4 月~ 平成年 3 月
クリスト バウ ザート	東京大学工 学部物理工 学科	研究生	InAs量子ドットにお ける近藤 – 超伝導競合現 象	平成 19 年 1 月~ 平成 19 年 12 月
ジョナサン バ ウ	東京大学工 学部物理工 学科	客員研究 員	結合量子ドットにおける 核スピン効果	平成 19 年 1 月~ 平成 19 年 12 月
ダニー キム	東京大学工 学部物理工 学科	JSPS 研 究員	単一光子-単一電子スピ ン変換の研究	平成 19 年 9 月~ 平成 20 年 3 月

# ④ 量子情報処理研究グループ

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
井元 信之	大阪大学大 学院	教授	光子と固体のハイブリッ ド量子情報処理の研究	平成 15 年 12 月~ 平成 20 年 3 月
Sahin Kaya Ozdemir	同上	客員助教 授 JST 研究 員、GL	量子状態加工実験および 量子ゲーム理論、量子トモ グラフィーの実験	平成 15 年 12 月~ 平成 20 年 3 月
小芦 雅斗	同上	助教授 (准教授)	エンタングルメント形成 および評価の理論	平成 15 年 12 月~ 平成 20 年 3 月
島村 淳一	同上	JST 研究 補助員 大学院生	量子ゲーム理論の研究	平成 15 年 12 月~ 平成 16 年 3 月
田嶌俊之	同上	JST 研究 補助員 大学院生	非古典的状態の形成と量 子状態トモグラフィ	平成 17 年 4 月~ 平成 20 年 3 月
篠原 祥太	同上	大学院生	ランダムコヒーレント状 態の解析	平成 18 年 4 月~ 平成 20 年 3 月
三谷理恵	同上	大学院生	量子トモグラフィの研究	平成 19 年 4 月~ 平成 20 年 3 月

# ⑤ 高速・光ナノプローブ研究グループ

氏名		所 属	役職	研究項目	参加時期
時崎	高志	産業技術総 合研究所・ナノ テゥノロジー研究 部門	近接場ナノ 工学グルー プリーダー、 GL	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 15 年 12 月~ 平成 20 年 3 月
重藤 矢	叩夫	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 15 年 12 月~ 平成 20 年 3 月
井上 貴	11	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 15 年 12 月~ 平成 20 年 3 月
河島 鏨		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 15 年 4 月~ 平成 17 年 3 月

横山	浩	産業技術総 合研究所・ナ/ <sup>テクノロシ<sup>・</sup>-研究 部門</sup>	研究部門 長	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 15 年 12 月~ 平成 20 年 3 月
高見	和宏	同上	JST 研究 員 AIST 研究 員(H19.4~)	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 17 年 11 月~ 平成 20 年 3 月

# ⑥ コヒーレント制御パルス研究グループ

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
佐々木 進	新 潟 大 学 工 学部	助教授(准 教授) GL	パルス技術による量子コ ヒーレント操作	平成 15 年 12 月~ 平成 20 年 3 月
渡辺 信嗣	同上	大学院生 JST 研究 員	2 次元電子系の核スピン 操作とスピン偏極電流注 入による初期化	平成 15 年 12 月~ 平成 19 年 2 月
山崎悟	同上	大学院生	2次元電子系の <b>T2</b> 測定	平成 15 年 12 月~ 平成 16 年 3 月
星野 友孝	同上	大学院生	2次元電子系の T1 測定	平成 15 年 12 月~ 平成 17 年 3 月
小野 俊彦	同上	大学院生	2次元電子系のスペクト ル	平成 15 年 12 月~ 平成 17 年 3 月
坂下 忠	同上	大学院生	2次元電子系の緩和時間 測定	平成 16 年 4 月~ 平成 18 年 3 月
長井 智	同上	大学院生	GaAs のパルス列の開発	平成 16 年 4 月~ 平成 20 年 3 月
原田 純二	同上	大学院生	<ol> <li>2 次元電子系の核スピン操作</li> </ol>	平成 16 年 4 月~ 平成 18 年 3 月
金子雅一	同上	大学院生	<ol> <li>2 次元電子系の核スピン操作</li> </ol>	平成 18 年 4 月~ 平成 20 年 3 月
佐藤 真哉	同上	大学院生	スピン偏極電流注入によ る初期化	平成 18 年 4 月~ 平成 20 年 3 月
工藤 将倫	同上	大学院生	多重パルスのよる核スピ ン操作	平成 19 年 4 月~ 平成 20 年 3 月
Nabil Hassan	同上	大学院生	抵抗検出 NMR の多重パルス 操作	平成 19 年 4 月~ 平成 20 年 3 月
三宅 浩子	同上	チーム事 務員		平成 18 年 4 月~ 平成 19 年 10 月

# 7.研究期間中の主な活動

年月日	名称	場所	参加人数	概要
H16.6.2	チームミーティング	<b>JST</b> 東京 展示館	22 名程度	<b>SORST</b> 平山チーム、各グ ループ取り組みの現状紹 介と将来の方向性につい て討論する。
H17.1.31~ 2.2	NNCI2005	NTT 物性 基礎研	150 名程 度	半導体ナノ構造のエレク トロニクス、物性、キャリ ア相関、コヒーレント制 御、ナノメカニクスに関し て、世界的に著名な招待講 演者を含む国際シンポジ ウムを開催し、我々の研究 成果のアピールに努める とともに、様々な討論を通 じて将来の研究に役立て る。
H17.1.18	ミーティング	新潟大学	10 名程度	GaAs バルク、エピ層を用 いた NMR 研究に関して 討論した。
H17.5.12	研究ミーティング	NTT 物性 基礎研	4人	核スピンコヒーレント制 御、NMR 関係の研究討論 を行った。
H17.7.29~ 30	チームミーティング	群馬県「紫 明荘」	27 人	ほとんどすべてのチーム 構成メンバーが集まり、量 子コンピュータに向けた 研究、それをサポートする 基礎研究、量子情報処理に 関して議論した。またスピ ントロニクス、ウェハボン ディングに関する招待講 演を行った。
H17.12.13	研究ミーティング	産総研(筑 波)	4人	ナノプローブ関係の研究 推進に関して討論を行っ た。
H18.1.26-2 8	チームミーティング	FNST(サ ンフラン シスコ)	13 人	SORST 平山チームも共 催に加わった FNST にお いて、量子コヒーレント制 御、物性研究を中心に参加 メンバーで議論した。
H18.2.16-1 7	研究ミーティング	NTT 物性 基礎研	5 人	核スピンコヒーレント制 御、NMR 関係の研究討論 を行った。
H18.7.4	研究ミーティング	NTT 物性 基礎研	6人	SAW を用いたキャリア相 関制御に関する研究討論を

(1)ワークショップ・シンポジウム等

				行った。
H18.7.22	研究ミーティング	NTT 物性 基礎研	6人	核スピンコヒーレント制 御、Si 量子ドットに関する 研究討論を行った。
H18.8.28	研究ミーティング	NTT 物性 基礎研	7人	核スピン制御、Si 量子ドッ ト、ナノ構造における核ス ピン緩和に関する研究討論 を行った。
H18.10.16	研究ミーティング	NTT 物性 基礎研	11 人	核スピン関係、Si 量子伝導 関係の研究討論ならびに国 際会議(NNCI2007)打ち合 わせを行った。
H18.11.10	研究ミーティング	NTT 物性 基礎研	10 人	核スピン制御、Si 量子ドッ ト、ナノ構造における核ス ピン緩和に関する研究討論 を行った。
H19.2.20-23	チーム主催国際会議	NTT 物性 基礎研	全体で約 150人、 SORSTか ら約25人	国際会議 NNCI2007 を開 催し、SORST の研究成果 を外部にアピールすると共 に世界的に著名な招待講演 者、一般講演者と関連する 研究に関して討論した。
H19.6.18	研究ミーティング	NTT 物性 基礎研	5 人	核スピン制御、Si量子伝導、 Si量子ドットに関する研究 討論を行い、東北大での実 験用のウェハについて議論 した。
H19.8.10	研究ミーティング	NTT 物性 基礎研	5 人	Si量子構造の輸送特性に関 する討論。今後のNTTと の共同研究に関する討論を 行なった。
H19.10.5	研究ミーティング	NTT 物性 基礎研	5 人	東北大と NTT グループの 今後の共同研究に関する討 論を行なった。
H19.3.6-7	研究ミーティング	東北大学	4人	Liu 氏と Si 系量子ドットの 研究の今後の進め方、Jilin 大学との共同研究の将来展 望を討論した。

(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
Marc-Aurele Brun	量子電子物性研究 部、量子固体物性研 究グループにて半導 体量子構造における キャリア相関の研究 を行う。	NTT 物性科学基 礎研究所	H16年7月8日~ H17年1月4日
Paulo Santos	量子電子物性研究 部、量子固体物性研 究グループにて半導 体量子構造における キャリア相関とその フォノン制御の研究 を行う。	NTT 物性科学基 礎研究所	H16年9月5日~ H16年9月14日
Pawel Hawrylack	量子電子物性研究 部、量子固体物性研 究グループにて半導 体量子構造における キャリア相関の研究 を行う。	NTT 物性科学基 礎研究所	H16年11月28日 ~H16年12月4 日
Klaus Ploog	高品質半導体結晶 成長・ナノ構造作成 に関する討論、スピン注入制御などに 関する討論、これま でならびに今後の 共同研究に関する 討論を行なう。	NTT 物性科学基 礎研究所	H16 年 12 月 17 日~H16 年 12 月 18 日
Adam Miranowicz	非古典的量子状態 の線形光学による 実現、ならびに固 体での量子アルゴ リズムの実現に関 する共同研究を行 う。	大阪大学大学院	H17年2月6日~ H17年2月20日
Klaus-Juergen Friedland	ウェアボンディングへ半中半ッ性るミアインがの本部でで、 やの体構関した、 がで、 がで、 やで、 やで、 やで、 やの本 が した、 ので、 が、 で、 でで、 が、 た の に、 、 が で、 で、 に、 、 が で、 に、 、 が で、 に、 、 が で、 に、 、 が で、 に、 、 が で、 に、 、 が で、 に、 、 が で、 に、 、 が で、 に、 、 が で、 に、 、 が で、 に、 、 が で、 に、 、 が 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、	NTT 物性科学基 礎研究所	H17年7月19日 ~H17年8月2日

	究進捗に役立てる ため。		
Adam Miranowiccz	NMRスピントモグラ フィをはじめとす る当 SORST テーマ の共同研究のため。	大阪大学、NTT 物性科学基礎間 研究所	H18年9月4日 ~H18年10月2 日

## 8. 発展研究による主な研究成果

(1) 論文発表(英文論文 166件 邦文論文 12件)

## Appl. Phys. Lett.

T. Fujisawa, T. Hayashi, and Y. Hirayama, "Electron counting of single-electron tunneling current", Appl. Phys. Lett. 84, 2342 (2004)

S. W. Jung, T. Fujisawa, Y. Hirayama, and Y. H. Jeong, "Background charge fluctuation in a GaAs quantum dot device", Appl. Phys. Lett. 85, 768 (2004)

H. Yamaguchi, Y. Hirayama, S. Miyashita, and S. Ishihara, "Force/displacement detection using quantum transport in InAs/AlGaSb two-dimensional heterostructures", Appl. Phys. Lett. 86, 052106 (2005)

N. I. Cade, H. Gotoh, H. Kamada, T. Tawara, T. Sogawa, H. Nakano and H. Okamoto "Charged exciton emission at 1.3 mm from single InAs quantum dots grown by metalorganic chemical vapour deposition" Appl. Phys. Lett. 87, 172101 (2005).

H.Gotoh, H.Kamada, T.Saitoh, H.Ando and J.Temmyo "Optical nonlinearity induced by exciton-biexciton coherent effects in InGaAs quantum dots" Appl. Phys. Lett. 87, 172101 (2005).

K. Tateno, H. Hibino, H. Gotoh, and H. Nakano, "Vertical GaP Nanowires Arranged at Atomic Steps on Si(111) Substrates", Appl. Phys. Lett, 89,033114 (2006)

O. Klochan, W. R. Clarke, R. Danneau, A. P. Micolich, L. H. Ho, A. R. Hamilton, K. Muraki, and Y.Hirayama, "Ballistic transport in induced one-dimensional hole systems", Appl. Phys. Lett., 89, 092105 (2006).

T. Akasaka, H. Gotoh, Y. Kobayashi, H. Nakano, and T. Makimoto, "InGaN quantum wells with small potential fluctuation grown on InGaN underlying layers", Appl. Phys. Lett., 89, 1101110 (2006).

N. I. Cade, H. Gotoh, H. Kamada, H. Nakano, S. Anantathanasarn, and R. Nötzel, "Optical characteristics of single InAs/InGaAsP/InP(100) quantum dots emitting at 1.55  $\cdot$  m", Appl. Phys. Lett. 89, 181113 (2006).

Simon Perraud, Kiyoshi Kanisawa, Zhao-Zhong Wang, and Yoshiro Hirayama, "Unpinning of the Fermi level at (111)A clean surfaces of epitaxially grown n-type In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As", Appl. Phys. Lett. 89, 192110 (2006).

H. Gotoh, T. Akasaka, T. Tawara, Y. Kobayashi, T. Makimoto, and H. Nakano, "Effects of nonradiative centers on localized excitons in InGaN quantum well structures", Appl. Phys. Lett., 89, 222110 (2006).

Y.C. Lin, H. Yamaguchi, Y.-C. Hsieh, M. Ueki, Y. Hirayama, and C. Chang, "Growth of Very High Mobility AlGaSb/InAs HEMT Structure on Si Substrate for High-Speed Electronic Applications", Appl. Phys. Lett. 90, 023509 (2007).

T. Ota, G. Yusa, N. Kumada, S. Miyashita, and Y. Hirayama, "Nuclear spin population and its control toward initialization using an all-electrical submicron nuclear magnetic resonance device", Appl. Phys. Lett. 90, 102118 (2007).

Gou Shinkai, Toshiaki Hayashi, Yoshiro Hirayama, and Toshimasa Fujisawa, "Controlled resonant tunneling in a coupled double-quantum-dot system", Appl. Phys. Lett. 90, 103116 (2007).

Tetsuomi Sogawa, Hideki Gotoh, Yoshiro Hirayama, Paulo V. Santos, and Klaus Ploog, "Dimensional oscillation in GaAs/AlAs quantum wells by two-dimensional standing surface acoustic waves", Appl. Phys. Lett. 91, 141917 (2007).

T. Ota, G. Yusa, N. Kumada, S. Miyashita, T. Fujisawa, and Y. Hirayama, "Decoherence of nuclear spins due to dipole-dipole interactions probed by resistively detected nuclear magnetic resonance", Appl. Phys. Lett. 91, 193101 (2007).

## Appl. Surface Science

H. Yamaguchi, S. Miyashita, and Y. Hirayama, "Mechanical and piezoresistive properties of InAs/AlGaSb cantilevers", Applied Surface Science (ACSIN-7). Vol 237, No1-3, 645-649 (2004)

#### IEEE Trans. Nanotech.

T.Hayashi, T.Fujisawa, H.D.Cheong, Y.H.Jeong and Y.Hirayama "Coherent charge oscillation in a semiconductor double quantum dot" IEEE Trans. Nanotech. 3, 300 (2005).

Kei Takashina, Yukinori Ono, Akira Fujiwara, Yasuo Takahashi, and Yoshiro Hirayama, "Intersubband Scattering in Double-Gate MOSFETs", IEEE Trans. On Nanotechnology 5, 430 (2006).

## IEEE LEOS Newsletter

T. Yamamoto, S. K. Ozdemir, M. Koashi, and N. Imoto, "Faithful Quantum

Communication Over Noisy Environment", IEEE LEOS Newsletter 20/6, 4 (2006).

# Chem. Physics

Ryuzi Yano, Hideki Gotoh, Yoshiro Hirayama, Toshiaki Hattori, and Sen Miyashita, "Synthesis of terahertz electromagnetic wave pulses using amplitude-and-phase masks", Chem. Physics, 326, 577 (2006).

## e-J. Surf. Sci. Nanotech.

S. K. Özdemir, A. Miranowicz, T. Ota, G. Yusa, N. Imoto, and Y. Hirayama, "Nuclear spins in a Nanoscale Device for Quantum Information Processing" e-J. Surf. Sci. Nanotech. 4, 669 (2006).

A. Miranowicz, S. K. Özdemir, Yu-xi Liu, G. Chimczak, M. Koashi, and N. Imoto, "Quantum entanglement and teleportation of quantum-dot states in microcavities," e-J. Surf. Sci. Nanotech. 5, 51 (2007).

### Inst. Phys. Conf. Ser.

H.Yamaguchi, S.Miyashita and Y.Hirayama "Force/displacent Detection Using Quantum Effects in InAs/AlGaSb Two-dimensional Electron Systems" Inst. Phys. Conf. Ser. 184, 187 (2005).

#### Int. J. of Modern Physics

K. Takashina, A. Fujiwara, Y. Takahashi, and Y. Hirayama, "Resistance Spikes Induced by Gate-Controlled Valley-Splitting in Silicon", International Journal of Modern Physics B, Vol. 18, Nos. 27-29 (2004)

### Int. J. of Quantum Chemistry

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).

# Int. J. of Quant. Inf.

J. Shimamura, S. K. Ozdemir, F. Morikoshi and N. Imoto, "Quantum and classical correlations between players in game theory," Int. J. of Quant. Inf., 2/1, 79 (2004)

# J. Appl. Phys.

R. Yano, H. Gotoh, Y. Hirayama, S. Miyashita, Y. Kadoya and T. Hattori "Terahertz wave detection performance of photoconductive antennas: role of antenna structure and gate oulse intensity", J. Appl. Phys. 97, 103103 (2005).

W. R. Clarke, A. P. Micolich, A. R. Hamilton, M. Y. Simmons, K. Murali and Y. Hirayama, "Fabrication of induced two-dimensional hole systems on (311)A GaAs" J. Appl. Phys. 99, 023707 (2006).

H.-M. Lee, K. Muraki, E.-Y. Chang, and Y. Hirayama "Electronic transport characteristics in a one-dimensional constriction defined by a triple-gate structure", J. Appl. Phys. 100, 043701 (2006).

K. Suzuki, K. Kanisawa, S. Perraud, M. Ueki, K. Takashina, and Y. Hirayama, "Observation of subband standing waves in superlattices by low-temperature scanning tunneling spectroscopy", J. Appl. Phys. 101, 081705 (2007).

# J. Crystal Growth

Kyoichi Suzuki, Kiyoshi Kanisawa, Simon Perraud, Mineo Ueki, Kei Takashina, and Yoshiro Hirayama, "Imaging of subbands in InAs/GaSb double quantum wells by low-temperature scanning tunneling spectroscopy", J. Crystal Growth 301-302, 97 (2007).

Simon Perraud, Kiyoshi Kanisawa, Zhao-Zhong Wang, and Yoshiro Hirayama, "Dramatic dependence of the Fermi level pinning strength on crystal orientation at clean surfaces of n-type In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As grown by molecular beam epitaxy", J. Crystal Growth 301-302, 148 (2007).

Hidenori Joe, Toru Akiyama, Kohji Nakamura, Kiyoshi Kanisawa, and Tomonori Ito, "An empirical potential approach to the structural stability of InAs stacking-fault tetrahedron in InAs/GaAs(111)", J. Crystal Growth 301-302, 837 (2007).

## J. Magnetism and Magnetic Materials

S. Watnabe, J. Harada, S. Sasaki, and Y. Hirayama, "Dynamic suppression of nuclear-spin decoherence time in Si and GaAs using inversion pulses", J. Magnetism and Magnetic Materials 310, 2167 (2007).

Susumu Sasaki, Shinji Watanabe, and Yuh Yamada <sup>"</sup>Superconductivity Driven by Zigzag Chain in Pr-Based Copper-Oxide Evidenced by Cu-Nuclear Resonance", J. Magnetism and Magnetic Materials 310, 696-697 (2007)

A. Miranowicz, S. K. Özdemir, Jirí Bajer, Masato Koashi, and Nobuyuki Imoto, "Selective truncations of an optical state using projection synthesis," JOSA
B, 24, 379 (2007).

### J. Phys.

H. Yamaguchi, H. Okamoto, S. Miyashita, M. Ueki, and Y. Hirayama, "Micro/Nanomechanical Quantum Electron Transport", J. Phys. 38, 152 (2006).

# J. of Phys. A

Yu-xi Liu, S. K. Ozdemir, A. Miranowicz, M. Koashi, and N. Imoto, "Exciton entanglement in two coupled semiconductor microcrystallites," J. of Phys. A: Math. and Gen., 37/15,4423 (2004)

## J. Phys. Chem. Solid

Kazuki Iwata, Masayuki Morino, Michiro Suzuki, Akira Fukuda, Anju Sawada, Zyun F. Ezawa, Norio Kumada and Yoshiro Hirayama, "Anisotropic magnetotransport around the  $\nu$ =1 bilayer quantum Hall state" J. Phys. Chem. Solid 66, 1556 (2005).

Daiju Terasawa, Shinsuke Kozumi, Akira Fukuda, Anju Sawada, Zyun F. Ezawa, Norio Kumada and Yoshiro Hirayama, "Pseudospin domain of  $\nu = 1$  double-layer quantum Hall state near commensurate-incommensurate transition" J. Phys. Chem. Solid 66, 1560 (2005).

## J. Phys.: Cond. Matt.

T. Fujisawa, D. G. Austing, Y. Tokura, Y. Hirayama and S. Tarucha, "Inelastic spin relaxation in a quantum dot", J. Phys.: Cond. Matt. 15, R1395 (2003).

Y. Hirayama, A. Miranowicz, T. Ota, G. Yusa, K. Muraki, S. K. Ozdemir, and N. Imoto, "Nanometre-scale nuclear-spin device for quantum information processing", J. Phys.: Condens. Matter 18, S885 (2006).

# J. Phys.: Conf. Ser.

Yasuhiro Niimi, Kiyoshi Kanisawa, Haruki Kojima, Hiroshi Kambara, Yoshiro Hirayama, Seigo Tarucha, and Hiroshi Fukuyama, "STM/STS Measurements of Two-Dimensional Electronic States in Magnetic Fields at Epitaxially Grown InAs(111)A Surfaces", J. Phys.: Conf. Ser. (2006).

Simon Perraud, Kiyoshi Kanisawa, Zhao-Zhong Wang, and Yoshiro Hirayama, "Low-temperature scanning tunneling spectroscopy study of two-dimensional electron systems confined in semiconductor heterostructures", J. Phys.: Conf. Ser. (2006).

## J. Phy. Soc. Jpn.

Satoshi Sasaki, and Seigo Tarucha, "The Kondo Effect Enhanced by State Degeneracy", J.Phy.Soc.Jpn., Vol.74No.1, 88-94 (2005)

# J. Optics B

A. Miranowicz "Journal of Optics B: Quantum and Semiclassical Optics" Journal of Optics B: Quantum and Semiclassical Optics Opt.7, 142 (2005).

# Jpn. J. Appl. Phys.

Lionel F. Houlet, Hiroshi Yamaguchi, Sen Miyashita, Yoshiro Hirayama, "InAs/AlGaSb Piezoresistive Cantilever for Sub-Angstrom Scale Displacement Detection", Jpn. J. Appl. Phys. 43, L424 (2004).

Go Yusa, Katsushi Hashimoto, Koji Muraki, Tadashi Saku, and Yoshiro Hirayama "Resistance Oscillations by Electron-Nuclear Spin Coupling in Microscopic Quantum Hall Devices", 44, 2669 (2005)

H. Okamoto, T. Yamada, H. Miyazaki, T. Nakanishi, K. Takeda, K. Usui, I. Obataya, H. Mihara, H. Azehara, W. Mizutani, K. Hashimoto, H. Yamaguchi and Y. Hirayama "Difference in Self-Assembling Morphology of Peptide Nanorings" Jpn. J. Appl. Phys. 44, 8240 (2005).

H. Gotoh, T. Akasaki, T. Tawara, Y. Kobayashi, T. Makimoto and H. Nakano "Efficient Observation of Narrow Isolated Photoluminescence Spectra from Spatially Localized Excitons in InGaN Quantum Wells" Jpn. J. Appl. Phys. 44, L1381 (2005).

Toshiaki Hayashi, Toshimasa Fujisawa, Ritsuya Tomita, and Yoshiro Hirayama, "Real-Time Observation of Charge States and Energy Relaxation in a Double Quantum Dot", Jpn. J. Appl. Phys. 45, 3629 (2006).

Kyoichi Suzuki, Kiyoshi Kanisawa, Simon Perraud, Mineo Ueki, Kei Takashina, and Yoshiro Hirayama, "Imaging of interference between incident and reflected electron waves at an InAs/GaSb heterointerface by low-temperature scanning tunneling spectroscopy", Jpn. J. Appl. Phys. 46, 2618-21 (2007).

K. Takashina, B. Gaillard, Y. Ono and Y. Hirayama, "Low Temperature Characteristics of Ambipolar Si02/Si/Si02 Hall-bar Devices", Jpn. J. Appl. Phys. 46, 2545-53 (2007). S. M. Huang, H. Akimoto, K. Kono, J. J. Lin, S. Tarucha and K. Ono, "The study of spin transport from doublet to triplet states in quantum dots", Jpn. J. Appl. Phys. (2007) (accepted).

#### J. Vac. Sci. Technol.

K. Onomitsu, H. Fukui, T. Maeda, Y. Hirayama, and Y. Horikoshi, "Mn and Be codoped GaAs for high hole concentration by low-temperature migration-enhanced epitaxy", J. Vac. Sci. Technol. B22, 1746 (2004)

T. Fujisawa, T. Hayashi, and Y. Hirayama, "Controlled decoherence of a charge qubit in a double quantum dot", J. Vac. Sci. Technol. B22, 2035 (2004)

S. Sasaki, S. Kang, K. Kitagawa, M. Yamaguchi, S. Miyashita, T. Maruyama, H. Tamura, T. Akazaki, Y. Hirayama, and H. Takayanagi, "Spin manipulation in a double quantum-dot-quantum-wire coupled system", J. Vac. Sci. Technol. B24, 2024 (2006).

### Nature

Go Yusa, Koji Muraki, Katsushi Hashimoto, and Yoshiro Hirayama, "Controlled Multiple Quantum Coherences of Nuclear Spins in a Nanometre-Scale Device", Nature. 434, 7039,1001-1005 (2005)

#### Nature Physics

M. Byszewski, B. Chwalisz, D. K. Maude, M. L. Sadowski, M. Potemski, T. Saku, Y. Hirayama, S, Studenikin, D. G. Austing, A. S. Sachrajda, P. Hawrylak "Optical probing of composite fermions in a two-dimensional electron gas", Nature Physics. 2, 239-234 (2006).

W. R. Clarke, C. E. Yasin, A. R. Hamilton, A. P. Micolich, M. Y. Simmons, K. Muraki, Y. Hirayama, M. Pepper, and D. A. Ritchie, "Impact of long- and short-range disorder on the metallic behavior of two-dimensional systems", Nature Physics 4. 55-59 (2008).

## New J. Phys.

WG van der Wiel, M. Stopa, T. Kodera, T. Hatano and S. Tarucha "Semiconductor quantum dots for electron spin qubits" New J. Phys. 8, 28 (2006).

S. K. Ozdemir, J. Shimamura, and N. Imoto, "A necessary and sufficient condition to play games in quantum mechanical settings" New J. of Phys. 9, 43 (2007).

## NTT Technical Review

H.Gotoh and H.Kamada "Coherent Nonlinear Optical Properties in Quantum Dots" NTT Technical Review 3, 19 (2005).

## Microelectronics Journal

W. R. Clarke, A. P. Micolich, A. R. Hamilton, M. Y. Simmons, K. Muraki and Y. Hirayama "Fabrication and characterization of a 2D hole system in a novel (311)A GaAs SISFET", Microelectronics Journal 36, 327 (2005).

## Phys. Rev. A

M. Koashi and A. Winter, "Monogamy of quantum entanglement and other correlations", Phys. Rev. A69, 022309 (2004).

Yu-xi Liu, S. K. Ozdemir, A. Miranowicz, and N. Imoto, "Kraus representation of a dampe harmonic oscillator and its application," Phys. Rev. A70, 042308 (2004).

K.Azuma, J.Shimamura, M.Koashi and N.Imoto "Probabilistic cloning with supplementary information" Phys. Rev. A72, 32335 (2005).

Y. Kinoshita, R. Namiki, T. Yamamoto, M. Koashi, and N. Imoto, "Selective entanglement breaking," Phys. Rev. A75, 032307 (2007).

#### Phys. Rev. B

R. Ravishankar, P. Matagne, J.P. Leburton , R.M. Martin, S. Tarucha, "Three-dimensional self-consistent simulations of symmetric and asymmetric laterally coupled vertical quantum dots", Phys. Rev. B69, 035326 (2004).

M. Rontani, S. Amaha, K. Muraki, F. Manghi, E. Molinari, S. Tarucha, D. G. Austing, "Molecular phases in coupled quantum dots", Phys. Rev. B69, 085327 (2004).

G. Yusa, K. Muraki, T. Saku, and Y. Hirayama, "Intra-Layer Backscattering in Narrow Bilayer Channels", Phys. Rev. B69, 085823 (2004).

K. Hashimoto, T. Saku, and Y. Hirayama, "Nuclear-Spin-Related Resistance Enhancements observed in the wide range of magnetic field", Phys. Rev. B69, 153306 (2004)

N. Kumada, D. Terasawa, M. Morino, K. Tagashira, A. Sawada, Z. F. Ezawa, K. Muraki, Y. Hirayama, and T. Saku, "Phase diagrams of  $\nu=2$  and  $\nu=2/3$  quantum Hall states in bilayer systems", Phys. Rev. B69, 155319 (2004)

G. Yusa, K. Hashimoto, K. Muraki, T. Saku, and Y. Hirayama, "Self-sustaining

resistance oscillations: Electron-nuclear spin coupling in mesoscopic quantum Hall devices", Phys. Rev. B69, 161302(RC) (2004)

K. Takashina, A. Fujiwara, S. Horiguchi, Y. Takahashi, and Y. Hirayama, "Valley splitting control in SiO2/Si/Si2 quantum wells in the quantum Hall regime", Phys. Rev. B69, 161304(RC) (2004)

H. Gotoh, H. Kamada, T. Saitoh, H. Ando and J. Temmyo "Exciton absorption properties of exciton-biexciton coherently coupled system in quantum dots" Phys. Rev. B71, 195334 (2005).

H.W.Liu, T.Fujisawa, T.Hayashi and Y.Hirayama "Pauli spin blockade in cotunneling transport through a double quantum dot" Phys.Rev. B72, 161305 (2005).

N. I. Cade, H. Gotoh, H. Kamada, H. Nakano, and H. Okamoto, "Fine Structure and magneto-optics of exciton, trion, and charged biexciton states in single InAs quantum dots emitting at  $1.3 \ \mu$ m", Phys. Rev. B73, 115322 (2006).

S. Sasaki, S. Kang, K. Kitagawa, M. Yamaguchi, S. Miyashita, T. Maruyama, H. Tamura, T. Akazaki, Y. Hirayama, and H. Takayanagi, "Nonlocal control of the Kondo effect in a double quantum dot-quantum wire coupled system", Phys. Rev. B73, 161303(R) (2006).

H. Gotoh, H. Sanada, H. Kamada, H. Nakano, S. Hughes, H. Ando, and J. Temmyo, "Detecting coupled excitons with micro-photoluminescence techniques in bilayer quantum dots", Phys. Rev. B74, 115322 (2006).

H. Hughes, H. Gotoh, and H. Kamada, "Classical and quantum optical correlation effects between single quantum dots: The role of the hopping photon", Phys. Rev. B74, 115334 (2006).

K. Hitachi, M. Yamamoto, and S. Tarucha, "Spin selective spectroscopy of a quantum dot using tunnel-coupled quantum wires as spin filters", Phys. Rev. B74, 161301 (2006).

Yukinori Ono, Jean-Francois Morizur, Katsuhiko Nishiguchi, KeiTakashina, Hiroshi Yamaguchi, Kazuma Hiratsuka, Seiji Horiguchi, Hiroshi Inokawa, and Yasuo Takahashi, "Impurity conduction in phosphorus-doped buried-channel silicon-on-insulator field-effect transistors at temperatures between 10 and 295K", Phys. Rev. B74, 235317 (2006).

Y. Igarashi, M. Jung, M. Yamamoto, A. Oiwa, T. Machida, K. Hirakawa and S. Tarucha, "The spin-half Kondo effect in a single self-assembled InAs quantum dot with and without magnetic field", Phys. Rev. B76, 081303(R) (2007).

S. Nomura, M. Yamaguchi, T. Akazaki, H. Tamura, T. Maruyama, S. Miyashita, and Y. Hirayama, "gEnhancement of electron and hole effective masses in back-gated GaAs/AlxGa1-xAs quantum wellsh", Phys. Rev. B76, 201306 (2007)

Phys. Rev. Lett.

K. Ono and S. Tarucha, "Nuclear-spin-induced oscillatory current in spin-blockaded quantum dots", Phys. Rev. Lett 92, 256803 (2004).

K. Suzuki, K. Takashina, S. Miyashita, and Y. Hirayama, "Landau-level hybridization and the quantum Hall effect in InAs/(AlSb)/GaSb electron-hole systems", Phys. Rev. Lett. 93, 016803 (2004).

S. Sasaki, S. Amaha, N. Asakawa, M. Eto, S. Tarucha, "Enhanced Kondo effect via orbital degeneracy in a spin 1/2 artificial atom", Phys. Rev. Lett. 93, 017205 (2004).

H. Yamaguchi, Y. Tokura, S. Miyashita, and Y. Hirayama, "Quantum Interference Effects in the Magnetopiezoresistance of InAs/AlGaSb Quasi-One-Dimensional Electron Systems", Phys. Rev. Lett. 93, 036603 (2004).

N. Kumada, K. Muraki, K. Hashimoto, and Y. Hirayama, "Spin degree of freedom in the  $\nu$ -1 bilayer electron system investigated by nuclear spin relaxation", Phys. Rev. Lett. 94, 096802 (2005).

K. Hashimoto, K. Muraki, N. Kumada, T. Saku, and Y. Hirayama, "Effects of inversion asymmetry on electron-nuclear spin coupling in semiconductor heterostructures: a possible role of spin-orbit interactions", Phys. Rev. Lett. 94, 146601 (2005).

T.Yamamoto, J.Shimamura, S.K.Ozdemir, M.Koashi and N.Imoto "Faithful Qubit Distribution Assisted by One Additional Qubit against Collective Noise" Phys. Rev. Lett. 95, 040503 (2005).

S. Sasaki, T. Fujisawa, T. Hayashi and Y. Hirayama "Electrical pump-and-probe study of spin singlet-triplet relaxation in a quantum dot" Phys. Rev. Lett. 95, 056803 (2005).

Y. Tokura, W. G. van der Wiel, T. Obata and S. Tarucha "Coherent Single Electron Spin Control in a Slanting Zeeman Field" Phys. Rev. Lett. 96, 047202 (2006).

W.J.M.Naber, T.Fujisawa, H.W.Liu and W.G.van der Wiel "Surface acoustic wave induced transport in a double quantum dot" Phys. Rev. Lett. 96, 136807 (2006).

K. Takashina, Y. Ono, A. Fujiwara, Y. Takahashi, and Y. Hirayama, "Valley polarization in Si (100) at zero magnetic field", Phys. Rev. Lett. 96, 236801 (2006).

Kyoichi Suzuki, Kiyoshi Kanisawa, Camille Janer, Simon Perraud, Kei Takashina, Toshimasa Fujisawa, and Yoshiro Hirayama, "Spatial imaging of two-dimensional electronic states in semiconductor quantum wells", Phys. Rev. Lett. 98, 136802 (2007).

Y. Zhang, L. DiCarlo, D. T. McClure, M. Yamamoto, S. Tarucha, C. W. Marcus, M.
P. Hanson, and A. C. Gossard, "Noise Correlations in a Coulomb Blockade Quantum Dot", Phys. Rev. Lett. 99, 036606 (2007).

K. Takashina, M. Brun, T. Ota, K. Maude, A. Fujiwara, Y. Ono, Y. Takahashi and Y. Hirayama, "Anomolous Resistance Ridges along Filling Factor v=4i", Phys. Rev. Lett. 99, 036803 (2007).

N. Kumada, K. Muraki, and Y. Hirayama, "NMR Evidence for Spin Canting in a Bilayer v=2 Quantum Hall System", Phys. Rev. Lett. 99, 076805 (2007).

Jonathan Baugh, Yosuke Kitamura, Keiji Ono, and Seigo Tarucha, "Large Nuclear Overhauser Fields Detected in Vertically Coupled Douyble Quantum Dots", Phys. Rev. Lett. 99, 096804 (2007).

C. Buizert, A. Oiwa, K. Shibata, K. Hirakawa, and S. Tarucha, "Kondo Universal Scaling for a Quantum Dot Coupled to Superconducting Leads", Phys. Rev. Lett. 99, 136806 (2007).

## Phys. Lett.

S. K. Ozdemir, J. Shimamura, and N. Imoto, "Quantum advantage does not survive in the presence of a corrupt source: Optimal strategies in simultaneous move games," Phys. Lett. A, 325,104 (2004).

J. Shimamura, S. K. Ozdemir, F. Morikoshi and N. Imoto, "Entangled states that cannot reproduce original classical games in their quantum version," Phys. Lett. A, 328, 20 (2004).

S. K. Ozdemir, J. Shimamura, F. Morikoshi, and N. Imoto, "Dynamics of a discoordination game with classical and quantum correlations,"Phys. Lett. A, 333, 218 (2004).

#### Physica

K. Suzuki, S. Miyashita, K. Takashina, Y. Hirayama, "Quantum hall effect in back-gated InAs/GaSb heterostructures under a tilted magnetic field", Physica E20, 232 (2004).

N. Goel, S. J. Chung, M. B. Santos, K. Suzuki, S. Miyashita, and Y. Hirayama, "Ballistic transport in InSb quantum wells at high temperature", Physica E20, 251 (2004).

T. Sato, T. Yamaguchi, W. Izumida, S. Tarucha, H. Z. Song, T. Miyazawa, Y. Nakata, T. Ohshima, N. Yokoyama, "Single-electron transport through an individual InAs SAQD embedded in a graded-dope semiconductor nano-pillar", Physica E21, 506-510 (2004)

H. Yokoyama, T. Sato, K. Ono, Y. Hirayama and S. Tarucha, "Tunable quantum dot

resonator embedded in a quantum wire", Physica E21, 527 (2004).

K. Ono, K. Uchida, N. Miura, Y. Hirayama, K. Ohdaira, and Y. Shiraki, "Exciton recombination process in GaAs/AlAs type-II heterostructures in pulsed high magnetic field and a uniaxial pressure", Physica E21, 698 (2004)

N. Goel, S. J. Chung, M. B. Santos, K. Suzuki, S. Miyashita, and Y. Hirayama, "Effect of temperature of ballistic transport in InSb quantum wells", Physica E21, 761 (2004).

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 E21, 1046 (2004).

Hiroshi Yamaguchi, Sen. Miyashita, and Yoshiro Hirayama, "Quantum-mechanical displacement sensing using InAs/AlGaSb micromechanical cantilevers", Physica E21, 1053 (2004).

N. Kumada, K. 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 E22, 36 (2004).

K. Takashina, Y. Hirayama, A. Fujiwara, S. Horiguchi, and Y. Takahasi, "A silicon bi-layer system", Physica E22, 72 (2004).

T. Ota, T. Hatano, K. Ono, S. Tarucha, H. Z. Song, Y. Nakata, T. Miyazawa, T. Ohshima, N. Yokoyama, "Single electron spectroscopy in a single pair of weakly coupled self-assembled InAs quantum dots", Physica E22, 510-513 (2004).

T. Kodera, 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 22, 518-521 (2004).

T. Hatano, M. Stopa, W. Izumida, T. Yamaguchi, T. Ota and S. Tarucha, "Gate-voltage dependence of inter dot coupling and Aharanov-Bohm oscillation in laterally coupled vertical double dot", Physica E22, 534-537 (2004).

H. Yamaguchi, K. Kanisawa, S. Miyashita, and Y. Hirayama, "InAs/GaAs (111)A Heteroepitaxial Systems, Physica E23, 285-292 (2004).

A. Richter, K. Matsuda, T. Akazaki, T. Saku, H. Tamura, Y. Hirayama, and H. Takayanagi, "Transport properties of a lateral semiconductor quantum dot defined by a single connected metallic front-gate", Physica E25, 472 (2005).

N. Goel, J. Graham, J. C. Keay, K. Suzuki, S. Miyashita, M. B. Santos, and Y. Hirayama, "Ballistic transport in InSb mesoscopic structures", Physica E26, 455 (2005).

T.Kudo and Y.Tokura "Electron transport in magnetic-field-induced quasi-one-dimensional electron systems in semiconductor nanowhiskers", Physica E 29, 525 (2005).

S. Moreau, M. Byszewski, M. L. Sadowski, M. Potemski, S. A. Studenikin, G. Austing, A. S. Sachrajba, T. Saku and Y. Hirayama "Optically detected cyclotron resonance in a high mobility 2D electron gas", Physica E32, 203 (2006).

N. Kumada, K. Muraki, and Y. Hirayama, "Nuclear-spin-lattice relaxation in a v=1 bilayer quantum Hall system", Physica E34, 164 (2006).

Shintaro Nomura, Masumi Yamaguchi, Tatsushi Akazaki, Hiroyuki Tamura, Hideaki Takayanagi, and Yoshiro Hirayama, "Electron-hole states in the fractional quantum Hall regime probed by photoluminescence", Physica E34, 292 (2006).

A. R. Dedigama, D. Deen, S. Q. Murphy, N. Goel, J. C. Keay, M. B. Santos, K. Suzuki, S. Miyashita, and Y. Hirayama, "Current focusing in InSb heterostructures", Physica E34, 647 (2006).

K. Iwata, M. Morino, A. Fukuda, M. Suzuki, Z.F. Ezawa, A. Sawada, N. Kumada, and Y. Hirayama, "Effects of in-plane magnetic field direction on the nuclear-spin relaxation in the nu=2/3 quantum Hall state", Physica E40, 1175-77 (2008).

A. Fukuda, M. Morino, K. Iwata, D. Terasawa, S. Kozumi, N. Kumada, Y. Hirayama, Z.F. Ezawa, and A. Sawada, "Anisotropic magnetotransport by the pseudospin soliton in the bilayer v=1 quantum Hall system", Physica E40, 1255-57 (2008).

A. Fukuda, K. Iwata, T. Sekikawa, T. Arai, N. Kumada, Y. Hirayama, Z.F. Ezawa, and A. Sawada, "Activation study of the bilayer v=1/3 quantum Hall state", Physica E40, 1261-63 (2008).

S. Sasaki, H. Tamura, S. Miyashita, T. Maruyama, T. Akazaki, Y. Hirayama, and H. Takayanagi, "Interplay between electrostatic and tunnel couplings in an independently contacted double quantum well-quantum wire coupled device", Physica E40, 1292-94 (2008).

Shintaro Nomura, Masumi Yamaguchi, Tatsushi Akazaki, Hiroyuki Tamura, Tatsuhi Maruyama, Sen Miyashita, and Yoshiro Hirayama, "Density dependent electron effective mass probed by photoluminescence down to dilute electron density limit", Physica E40, 1467-69 (2008).

Nobuaki Hayashi, Kohei Tsumura, Shintaro Nomura, Masumi Yamaguchi, Hiroyuki Tamura, Tatsushi Akazaki, and Yoshiro Hirayama, "Optical mapping of properties of two-dimensional electron system in magnetic fields", Physica E40, 1533-35 (2008).

W. R. Clarke, C. E. Yasin, A. R. Hamilton, A. P. Micolich, M. Y. Simmons, K. Muraki, Y. Hirayama, M. Pepper, and D. A. Ritchie, "Metallic behavior in low-disorder two-dimensional hole systems in the presence of long- and short-range disorderh, Physica E40, 1599-1601 (2008).

V. T. Renard, O. A. Tkachenko, V. A. Tkachenko, T. Ota, N. Kumada, J. C. Portal, and Y. Hirayama, "Electron-electron interactions in clean quantum point contacts in the large conductance regime", Physica E40, 1684-86 (2008).

## Phys. Stat. Sol.

S. Tarucha, Y. Kitamura, T. Kodera, and K Ono "Lifting of spin blockade by hyperfine interaction in vertically coupled double quantum dots" Phys. Stat. Sol, (b) 243, 3673 (2006).

Yoshiro Hirayama, Go Yusa, and Satoshi Sasaki, "Electron spin and nuclear spin manipulation in semiconductor nanosystems", Phys. Stat. Sol. (b) 243, 3764 (2006).

Yoshiro Hirayama, Tetsuomi Sogawa, Kyoichi Suzuki, Kiyoshi Kanisawa, and Hiroshi Yamaguchi, "Semiconductor heterostructure studies using emerging technologies", Physica Status Solidi (b), 244, 2988-3001 (2007).

S. Tarucha, K. Hitachi, J. Sugawa, and M. Yamamoto, "Spin-dependent electron tunneling and spin relaxation in quantum dots near the regime of filling factor = 2" Phys. Stat. Sol. (b) 313, 2950 (2007).

K.Suzuki, K.Kanisawa, S.Perraud, M.Ueki, K.Takashina, and Y.Hirayama "Imaging of electron standing waves in InAs/GaSb superlattices by low-temperature scanningtunneling spectroscopy" Phys. Stat. Sol. (c) 3, 643 (2006).

H. Yamaguchi, S. Miyashita, and Y. Hirayama "Giant Magnetopiezoresistance at the Localized-extended Electronic State Transition in a High-mobility 2DEG System" Phys. Stat. Sol. (c) 3, 663 (2006).

H. Yamaguchi, S. Miyashita, and Y. Hirayama, "Giant magnetopiezoresistance at the localized-extended electronic state transition in a high-mobility 2DEG system", Phys. Stat. Sol. (c) 3, 663 (2006).

H. Gotoh, T. Tawara, Y. Kobayashi, N. Kobayashi, Y. Yamauchi, T. Makimoto, and T. Saitoh, "Modifying optical properties of InGaN quantum wells by a large piezoelectric polarization", Phys. Stat. Sol. (c) 3, 1974 (2006).

H. W. Liu, T. Fujisawa, T. Hayashi, Y. Hirayama, "Pauli blockade transport in the cotunneling regime through a double quantum dot", Phys. Stat. Sol. (c) 3, 3766 (2006).

K. Hitachi, J. Sugawa, M. Yamamoto, and S. Tarucha "Spin filtering and spin relaxation time in a GaAs quantum dot" Phys. Stat. Sol. (c) 3, 4342 (2007).

Jonathan Baugh, Yosuke Kitamura, Keiji Ono, and Seigo Tarucha, "Dynamic nuclear polarization in a double quantum dot device: electrical induction and detection",

Phys. Stat. Sol. (c) 5, 302 (2007).

## Quantum Computation: solid state systems

Toshimasa Fujisawaa, Toshiaki Hayashia, Sung Woo Junga, Yoon-Ha Jeongc, and Yoshiro Hirayama, "Single-electron charge qubit in a double quantum dot", Quantum Computation: solid state systems (2004).

# Science

T. Fujisawa, R. Tomita, T. Hayashi, and Y. Hirayama, "Bidirectional counting of single electrons", Science 312, 1634 (2006).

M. Yamamoto, M. Stopa, Y. Tokura, Y. Hirayama, and S. Tarucha, "Negative Coulomb Drag in a One-Dimensional Wire", Science 313, 204 (2006).

N. Kumada, K. Muraki, and Y. Hirayama, "Low-Frequency Spin Dynamics in a Canted Antiferromagnet", Science 313, 329 (2006).

## Semicond. Science and Technol.

K. Takashina, R. J. Nicholas, B. Kardynal, N. J. Mason, D. K. Maude, and J. C. Portal, "Current-driven breakdown of the quantized Hall states of a broken-gap 2D electron-hole system", Semicond. Science and Technol., 21, 1758 (2006).

C. Petchsingh, R. J. Nicholas, K. Takashina, and N. J. Mason, "Temperature-dependent Cyclotron Resonance in a Hybridized Electron-hole System in InAs/GaSb Heterostructures", Semicond. Science and Technol. 22, 194 (2007).

## Solid State Comm.

H. Gotoh, T. Akasaka, T. Tawara, Y. Kobayashi, T. Makimoto, and H. Nakano, "Detecting spatially localized excitons in InGaN quantum well structures with a micro-photoluminescence technique", Solid State Comm. 138,590 (2006).

#### Superlattices and Microstructures

T. Ota, M. Stopa, M. Rontani, T. Hatano, K. Yamada, S. Tarucha, H.Z. Song, Y. Nakata, and T. Miyazawa, "Moleculer states observed in a single pair of strongly coupled self-assembled InAs quantum dots", Superlattices and Microstructures, 34, 159-164 (2004).

K. Yamada, M. Stopa, T. Hatano, T. Ota, T. Yamaguchi, and S. Tarucha, "Variation of co-tunneling and Kondo effect by control of coupleing strength between a

vertical dot and a two-dimensional electron gas", Superlattices and Microstructures, 34, 185-189 (2004).

T. Hatono, M. Stopa, T. Yamaguchi, T. Ota, K. Yamada, and S. Tarucha, "Delocalization energy probed by asymmetry of Coulomb diamond in double dot system", Superlattices and Microstructures, 34, 191-194 (2004).

# Turkish Journal of Physics

S. K. Ozdemir, T. Yamamoto, M. Koashi, and N. Imoto, "Quantum state and entanglement manipulation with linear optics". Turkish Journal of Physics, 27, 459 (2003).

# World Scientific Publishing

T. Kodera, W.G. van der Wiel, T. Maruyama, Y. Hirayama and S. Tarucha, "Fabrication and characterization of quantum dot single electron spin resonance device", accepted by World Scientific Publishing (2004)

# **Conference Proceedings**

T. Hayashi, T. Fujisawa, Y. Hirayama, "Coherent charge oscillation in a semiconductor double quantum dot", Moriond proceeding, (2004)

Takahito Inoue, Shuhei Nishida, Hiroshi Yokoyama, "Biomolecular detection based on magneticallyoscillating cantilevers and low-cost fabrication process of micro cantilever arrays", Conference Proceedings of Scanning Probe Microscopy, Sensors and Nanostructures, 311 (2004)

G. Yusa, K. Hashimoto, K. Muraki, T. Saku, and Y. Hirayama, "Self-Sustaining Resistance Oscillations by Electron-Nuclear Spin Coupling in Mesoscopic Quantum Hall Systems", ICPS Proceeding, (2004)

N. Kumada, K. Muraki, K. Hashimoto, T. Saku, and Y. Hirayama, "Strong to weak correlation phase transition at  $\nu_{T}$  =1 in a bilayer system detected by nuclear-spin-relaxation time", ICPS Proceeding, (2004)

Kiyoshi Kanisawa, Hiroshi Yamaguchi, and Yoshiro Hirayama, "Imaging of Local Tunneling Barrier Height of InAs Nanostructures Using Low-Temperature Scanning Tunneling Microscopy", ICPS Proceeding, (2004)

T.Kodera, Y.Iwai, W.G. van der Wiel, T.Obata, T.Hatano and S.Tarucha "Charge readout of a vertical quantum dot using laterally weakly coupled quantum dot as

a detector " AIP conference proceedings (2005).

K.Hitachi, M.Yamamoto and S.Tarucha "Probing Spin States in Quantum Dots by Spin-resolved One-dimensional Contacts" AIP conference proceedings (2005).

M. Yamamoto, H. Takagi, W. Stopa, and S. Tarucha, "Rectified Coulomb drag induced by Wigner crystallization in quantum wires", Proceedings of 28<sup>th</sup> International Conference on the Physics of Semiconductors (2007).

## [国内]

- 平山祥郎、「半導体量子構造における新しい物性」応用物理 第72号第12巻 1522 (2003)
- 2. 平山祥郎、「ナノテクノロジー」、イミダス,集英社,2004年度版
- 4. 蟹澤聖,山口浩司,平山祥郎, "InAs積層欠陥 0 次元構造の電子状態の低温STS評価",応用物理、第3号74巻 349 (2005)
- 5. 平山祥郎、「ナノテクノロジー」、イミダス、集英社、2005年度版
- 6. 蟹澤 聖,平山 祥郎 "化合物半導体表面の量子現象" 表面科学,27巻(2006)
- 7. 平山 祥郎, 鳥光 慶一、「ナノテクノロジー」、 イミダス、集英社、 2006 年度版
- 8. 平山 祥郎 "New Technology: Qubits arrow" The Japan Journal, 2005 年 11 月号
- 9. 山本倫久、Michael Stopa、平山祥郎、都倉康弘、樽茶清悟 "結合量子細線にお けるクーロンドラッグ" 固体物理(2006.10.05)
- 10. 山本俊、小芦雅斗、 Sahin Kaya Ozdemir 、井元信之、"量子もつれ光子対の蒸 留と雑音下での量子情報通信"、応用物理 第75巻, 第11号, 1359 (2006).
- 11. 平山祥郎、鳥光慶一、「ナノテクノロジー」、イミダス、集英社、2007年度版
- 山本俊、小芦雅斗、Sahin Kaya Ozdemir、井元信之:「量子もつれ光子対の蒸留」、
   第4章 2006年 11月刊行

# (2) 口頭発表 ①学会 国内 214 件, 国際 297 件 ②その他 国内 件, 国際 件

[海外]

- N. Goel, J. Graham, J. C. Keay, M. B. Santos, K. Suzuki, S. Miyashita, Y. Hirayama, "Quantized Conductance Observed in InSb Point Contacts", Annual APS March Meeting, Mar. 22-26, Montreal, Canada (2004)
- 2. S. Tarucha, "Manipulation of Electron Spin and Nuclear Spin in Double Quantum Dot System", "Heraeus-Seminar: Correlation, Coherence and Spin Effect in Simple and Complex Quantum Dot Systems", Oct. 23-25, Bad Honnef (2003). [invited]
- K. Kanisawa, S. Perraud, H. Yamaguchi, and Y. Hirayama, "Characterization of InAs nanostructures using low-temperature scanning tunneling microscopy", International Workshop on Microspectroscopy of Quantum, Magnetic and Biological Nanostructures (nanoSPEC 2003), Oct. 22, Osaka (2003)
- 4. S. Tarucha, "Spin Effects and Spin Qubits in Quantum Dot Systems", Colloquium at the Max-Planck-Institute for Solid-State Research, the Max-Planck-Institute for Metal Research, and the Physics Department of the University of Stuttgart, Oct. 21, Stuttgart (2003). [invited]
- H. Yamaguchi, K. Kanisawa, S. Miyashita, and Y. Hirayama, "InAs/GaAs (111)A Heteroepitaxial System", Epitaxial Semiconductors on Patterned Substrates and Novel Index Surfaces (ESPS-NIS), Oct. 13, Stuttgart (2003).
- K. Takashina, Y. Hirayama, A. Fujiwara, S. Horiguchi, and Y. Takahashi, "Valley Splitting Control in SIMOX based Si02/Si/Si02 Quantum Wells", International Symposium on Functional Semiconductor Nanosystems (FSNS2003), Nov. 12-14, Kanagawa (2003)
- S. W. Jung, T. Fujisawa, Y. H. Jeong, Y. Hirayama, "1/f noise in single-electron tunneling current through a GaAs quantum dot", International Symposium on Functional Semiconductor Nanosystems (FSNS2003), Nov. 12-14, Kanagawa (2003)
- 8. K. Kanisawa, S. Perraud, H. Yamaguchi, and Y. Hirayama, "Scanning tunneling spectroscopy study of coupled InAs nanostructures", International Symposium on Functional Semiconductor Nanosystems (FSNS2003), Nov. 12-14, Kanagawa (2003)
- 9. H. Yamaguchi, Y. Tokura, S. Miyashita, and Y. Hirayama, "Piezoresistive Cantilevers using InAs-based 2D Heterostructures", International Symposium on Functional Semiconductor Nanosystems (FSNS2003), Nov. 12-14, Kanagawa (2003)
- K. Suzuki, K. Takashina, S. Miyashita, and Y. Hirayama, "Landau level crossing and the quantum Hall effect in InAs/GaSb heterostructures", International Symposium on Functional Semiconductor Nanosystems (FSNS2003), Nov. 12-14, Kanagawa (2003)
- 11. K. Hashimoto, K. Muraki, T. Saku and Y. Hirayama, "Effects of Confinement Potential Asymmetry on the  $\nu = 2/3$  Quantum Hall Ferromagnet", International Symposium on Functional Semiconductor Nanosystems (FSNS2003), Nov. 12-14, Kanagawa (2003)
- Y. Hirayama, K. Hashimoto, K. Muraki, G. Yusa and T. Saku, "Anomalous transport characteristics in the fractional quantum Hall regime induced by nuclear spin polarization", International Symposium on Functional Semiconductor Nanosystems (FSNS2003), Nov. 12-14, Kanagawa (2003)
- S. Tarucha, "Spin Manipulation and Spin Qubits with Quantum Dots", Photonics and Spintornics in Semiconductor Nanostractures towards Quantum Information Proceeding, Nov. 2-4, Kyoto (2003). [invited]
- S. Tarucha, "Electron Spins and Qubits with Semiconductor Quantum Dots", "Int. Conf. On Quantum Information 2003 -mathematical, physical engineering and industrial aspects- (ICQI03)", Nov. 5-7, Kyoto (2003) [invited]
- 15. Hiroshi Yamaguchi, Sen Miyashita, and Yoshiro Hirayama, Mechanical and piezoresistive properties of InAs/AlGaSb cantilevers, ACSIN7, Nara, Nov. 20

(2003).

- N. Imoto, "Entanglement manipulation by photonic quantum-information processing," International Conference on Quantum Information, Nov. 1-3, 2003, Tokyo (2003). [Invited]
- 17. S. Tarucha, "Spin Effects in Semiconductors Quantum Dots", Int. Symp. On Quantum Dots and Photonic Crystals, Nov. 17-18, Tokyo (2003) [invited]
- 18. S. Tarucha, "Electrical Control of Hyperfine Coupling in Quantum Dots: Coherence of Electron Spin and Nuclear Spin", "Solid State Quantum Information Processing Conference", Dec. 15-18, Amsterdam, (2003). [invited]
- 19. N. Imoto, "Entanglement manipulation with realizable linear and nonlinear optics", Budmerice Focus Meeting, Dec. 12, Bratislava, Slovakia (2003). [Invited]
- Yoshiro Hirayama, and Toshimasa Fujisawa, "Carrier Dynamnics and Coherent Oscillation in Quantum Dots", 6th Int. Conf. on New Phenomena in Mesoscopic Syst., Dec. 1-5, Maui (2003) [Invited]
- 21. S. Tarucha, "Control of Electron and Nuclear Spin Coupling in Double Quantum Dot", "6th JAPAN-SWEDEN JOINT QNANO WORKSHOP", Dec. 15-16, Sigtuna (2003). [invited]
- Toshiaki Hayashi, Toshimasa Fujisawa, Yoshiro Hirayama, "Coherent charge oscillation and decoherence in a semiconductor double quantum dot", Rencontres De Moriond, Jan. 31, La Thuile, Italy (2004) [Invited]
- 23. S. Tarucha, "Spin Qubits with Quantum Dots", Japan German Colloquium 2004 on Quantum Optics, organised by JSPS and MPG, Feb. 9-12, Wildbad Kreuth (2004). [invited]
- 24. Lionel F. Houlet, Hiroshi Yamaguchi, Yoshiro Hirayama, "Scanning Probe Lithography on InAs Substrates", Nanotech 2004, Mar. 7-11, Boston (2004)
- N. Imoto, "Quantum information processing with photons, MS+S2004 (Int. Symposium on Mesoscopic Superconductivity and Spintronics 2004), Mar. 1, Kanagawa, (2004). [Invited]
- 26. Satoshi Sasaki, Toshimasa Fujisawa, Toshiaki Hayashi and Yoshiro Hirayama, "Electrical pump and probe measurement of the spin relaxation time in a lateral quantum dot", MS+S2004 (Int. Symposium on Mesoscopic Superconductivity and Spintronics 2004), Mar. 2, Kanagawa (2004)
- 27. Hiroshi Yamaguchi, Sen Miyashita, and Yoshiro Hirayama, "Piezoresistive InAs/AlGaSb Micromechanical 2DEG Cantilevers", MS+S2004 (Int. Symposium on Mesoscopic Superconductivity and Spintronics 2004), Mar. 1, Kanagawa (2004)
- N. Imoto: "Entanglement manipulation with realizable linear and nonlinear optics", International Symposium on Quantum Info-Communications and Related Quantum Nanodevices, Mar. 11-12, Tokyo, (2004). [Invited]
- 29. Hajime Okamoto, Tsutomu Nakanishi, Yukiko Nagai, Tetsuo Yamada, Hiroshi Miyazaki, Kyozaburo Takeda, Yukio Furukawa, Ikuo Obataya, Hisakazu Mihara, Hiroaki Azehara, 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.
- 30. Y. Hirayama, T. Hayashi, and T. Fujisawa, "Semiconductor charge qubit", ITAMP workshop on Mesoscopic Physics, Quantum Optics, and Quantum Information, Boston, U.S.A., 2004.5.10
- K. Ono S. Yamaguchi, and S. Tarucha, "Nuclear spin manipulation in quantum dots", QD2004 Quantum Dots Conference, Banff, Alberta, 2004.5.10
- 32. A.Miranowicz, Yu-xiLiu, G. Chimczak, R. Tanas, S. K. Ozdemir, M. Koashi, N. Imoto,

"Generation and manipulation of quantum entanglement of quantum dots in microcavities," 11th Central-European Workshop on Quantum Optics' (CEWQO), University of Trieste, Italy, 2004.5.24

- 33. Takahito Inoue, Shuhei Nishida, Hiroshi Yokoyama, "Biomolecular detection based on magnetically oscillating cantilevers and low-cost fabrication process of micro cantilever arrays", Scanning Probe Microscopy, Sensors and Nanostructures, Beijing-TEDA China, 2004.5.26
- 34. K. Ono S. Yamaguchi, and S. Tarucha, "Self-sustained current oscillation and nuclear spin effects in quantum dots", Fluctuations and Noise 2004, Gran Canaria, Spain, 2004. 5. 25
- 35. Shinji Watanabe, Tomotaka Hoshino, Toshihiko Ono, Susumu SasakiI, "Nuclear-Spin Decoherence Process of 29Si in Carrier-Less Silicon", International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies, 朱鷺メッセ,新潟, 2004.6.8
- 36. S. Tarucha, "Electronic Spin and Nuclear Spin in Semiconductor Quantum Dots", Workshop on Quantum Systems Out of Equilibrium, Abdus Salam ICTP, Trieste, Italy, 2004. 6. 14
- 37. Satoshi Sasaki, Toshimasa Fujisawa, Toshiaki Hayashi, and Yoshiro Hirayama, "Electrical pump and probe study of the spin relaxation mechanism in a lateral quantum dot", The 3<sup>rd</sup> International Conference on Physics and Applications of Spin-Related Phenomena in Semiconductors (PASPS III), Santa Barbara, U.S.A., 2004.7.21
- Yoshiro Hirayama, "Manipulation of nuclear spin polarization and relaxation by two-dimensional electron systems", International Conference on Superlattices, Nano-structures and Nano-devices (ICSNN2004), Cancun, Mexico, 2004.7.23
- H. Yamaguchi, Y. Tokura, S. Miyashita, and Y. Hirayama, "InAs-based Micromechanical Two-dimensional Electron Gas Systems", 27<sup>th</sup> International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS27), Flagstaff, U.S.A., 2004. 7.26
- 40. G. Yusa, K. Hashimoto, K. Muraki, T. Saku, and Y. Hirayama, "Self-Sustaining Resistance Oscillations by Electron-Nuclear Spin Coupling in Mesoscopic Quantum Hall Systems", 27<sup>th</sup> International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS27), Flagstaff, U.S.A., 2004.7.26
- 41. K. Suzuki, K. Takashina, S. Miyashita, Y. Hirayama, "Landau-level hybridization and the quantum Hall effect in InAs/(AlSb)/GaSb electron-hole systems", 27 <sup>th</sup> InternationalConference on the Physics of Semiconductors (ICPS27), Flagstaff, U. S. A., 2004. 7. 26
- 42. Kiyoshi Kanisawa, Hiroshi Yamaguchi, Yoshiro Hirayama, "Imaging of local tunneling barrier height of InAs nanostructures using low-temperature scanning tunneling microscopy", 27<sup>th</sup> International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS27), Flagstaff, U.S.A., 2004.7.26
- 43. Norio Kumada, Koji Muraki, Katsushi Hashimoto, Tadashi Saku, Yoshiro Hirayama, "Strong to weak correlation phase transition at  $\nu$ T =1 in a bilayer system detected by nuclear-spin-relation time", 27 <sup>th</sup> International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS27), Flagstaff, U.S.A., 2004.7.26
- 44. N. Imoto, "Mirrors in time domain" The 7th Int. Conf. on Quantum Communication, Measurement and Computing, Glasgow, UK, 2004.7.28
- 45. M. Yamamoto, Y. Tokura, Y. Hirayama, M. Stopa, K. Ono, and S. Tarucha, "Tunneling between parallel quantum wires", ICPS27, Flagstaff, Arizona, 2004.7.30
- 46. N. Imoto, "Quantum information processing with realistic linear and nonlinear optics," Nonlinear Optics: OSA Topical Meeting on Nonlinear Optics: Materials,

Fundamentals and Applications" (NLO 2004), Waikoloa, Hawaii, 2004.8.2

- 47. K. Takashina, Y. Hirayama, T. Fujiwara, and Y. Takahashi, "Transport studies of Landau level coincidences in valley-tunable silicon", 16th International Conference on High Magnetic Fields in Semiconductor Physics (SemiMag16), Tallahassee, U. S. A., 2004. 8.2
- 48. Hiroshi Yamaguchi, Sen Miyashita, Yoshiro Hirayama, "Fabrication and characterization of ultra-thin rolled cantilevers based on MBE-grown InAs/AlGaSb 2D heterosutructures", MBE 2004, エジンバラ, 2004.8.24
- 49. Susumu Sasaki, Shinji Watanabe, Toshihiko Ono, Tomotaka Hoshino, Yoshiro Hirayama, "Promise of Si and GaAs Solid-State NMR to Quantum Computing", ERATO Conference on Quantum Information Science 2004, 一橋記念ホール, 2004.9.4
- 50. Go Yusa, Katsushi Hashimoto, Koji Muraki, Tadashi Saku, and Yoshiro Hirayama, "Resistance Oscillations by Electron-Nuclear Spin Coupling in Microscopic Quantum Hall Devices", Solid State Devices and Materials (SSDM), Tokyo, 2004. 9. 14
- 51. Satoshi Sasaki, Toshimasa Fujisawa, Toshiaki Hayashi, and Yoshiro Hirayama, "Long spin relaxation time observed in a lateral quantum dot", Solid State Devices and Materials(SSDM), Tokyo, 2004.9.14
- 52. Yoshiro Hirayama, "Experimental Implementation of Semiconductor Qubit", Esaac Newton Institute, Cambridge, U.K., 2004.9.26
- 53. K. Hashimoto, G. Yusa, K. Muraki, N. Kumada, T. Saku, and Y. Hirayama, "Electron-nuclear spin coupling in the fractional quantum Hall regime", Quantum Hall Systems and Quantum Materials, Hamburg, Germany, 2004.9.22
- 54. Yoshiro Hirayama, "Manipulation of nuclear spins in GaAs based hetero-and nano-structures", FNST2004, ボストン, 2004.10.25
- 55. T.Hayashi, T.Fujisawa, and Y.Hirayama, "Coherent charge manipulation in a semiconductor double quantum dot", FNST2004, ボストン, 2004.10.25
- 56. N. Imoto, "Useful linear and nonlinear optics in quantum information processing," Photonics ASIA 2004, China, 2004. 11.10
- 57. Takahito Inoue, "Biomolecular detection using cantilever based sensors and low-cost fabrication process of plastic cantilever arrays" 1st WORKSHOP ON NANOMECHANICAL SENSORS, Madrid Spain , 2004.11.15
- 58. Susumu Sasaki, Shinji Watanabe, Yuh Yamada, "Cu-Spin Dynamics at Zigzag Chain of Superconducting- and Nonsuperconducting-Pr247 Compounds", 17th International Symposium On Superconductivity, 朱鷺メッセ,新潟, 2004.11.25
- 59. T. Kodera, W.G. van der Wiel, K. Ono, T. Maruyama, Y. Hirayama and S. Tarucha, "Electron spin manipulation in semiconductor vertical quantum dots", The 2nd COE international Workshop 2004 "New Horizons in Condensed-Matter Physics", Tokyo, 2004. 11. 29
- 60. Tadashi Sakashita, Sstoshi Nagai, Toshihiko Ono, Tomotaka Hoshino, Shinji Watanabe, Susumu Sasaki, Yoshiro Hirayama, "Nuclear-Spin Behavior in Bulk and 2DEG GaAs", A11th Advanced Heterostructure Workshop (AHW2004), Hapuna Beach Hotel, Hawai, 2004. 12. 9
- Yoshiro Hirayama, Go Yusa, Koji Muraki, "Coherent control of nuclear spins in mesoscopic scale semiconductors", 11th Advanced Heterostructure Workshop (AHW2004), Hapuna Beach Hotel, Hawai, 2004. 12.9
- 62. N. Imoto, "Sending entangled photons: noisy-channel experiments and beyond QKD" 1<sup>st</sup> Asia-Pacific Conf. on Quantum Information Science, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan, 2004. 12. 11
- 63. K. Suzuki, K. Kanisawa, M. Ueki, K. Takashina, and Y. Hirayama, "Evidence of broken-gap

formation in InAs/GaSb electron-hole hybridized superlattices characterized by cross-sectional low-temperature scanning tunnel microscopy and spectroscopy", The 32nd Conference on the Physics and Chemistry of Semiconductor Interfaces (PCSI-32) Bozeman, Montana, USA, 2005.1.27

- 64. Tadashi Sakashita, Satoshi Nagai, Toshihiko Ono, Tomotaka Hoshino, Shinji Watanabe, Susumu Sasaki, Yoshiro Hirayama, "Nuclear-Spin Decoherence Process in GaAs and Si", International Conference on Nanoelectronics, Nanostructure and Carrier Interactions (NNCI 2005), NTT 物性科学基礎研究所, 2005.1.30
- 65. S.Perraud, K.Kanisawa, Z.Z.Wang, and Y.Hirayama, "Onservation of electron standing waves at the MBE-grown InGaAs/InP(111)A surface using LT-STM", International Conference on Nanoelectronics, Nanostructure and Carrier Interactions(NNCI 2005), NTT 物性科学基礎研究所, 2005.1.30
- 66. 時崎高志,大貫哲平,横山浩, "Microscopic observation of magneto-photoluminescence from two-dimensional electron gas systems" International Conference on Nanoelectronics, Nanostructure and Carrier Interactions(NNCI 2005), NTT 物性科学基礎研究所, 2005.1.31
- 67. 井上貴仁, 時崎高志, 横山浩, "Ultrafast electrical nanoprobing by heterodyne force-detected scanning Maxwell-stress microscopy" International Conference on Nanoelectronics, Nanostructure and Carrier Interactions(NNCI 2005), NTT 物 性科学基礎研究所, 2005.1.31
- 68. 島村淳一, S. K. Ozdemir, 森越文明明,井元信之 "The role of entanglement in quantum versions of classical games," International Conference on Nanoelectronics, Nanostructure and Carrier Interactions(NNCI 2005), NTT 物性 科学基礎研究所, 2005.1.31
- 69. K.Kanisawa, S.Perraud, and Y.Hirayama, "Local Density of States of InGaAs Nanostructures Characterized using Low-Temperature Scanning Tunneling Microscopy", International Conference on Nanoelectronics, Nanostructure and Carrier Interactions(NNCI 2005), NTT 物性科学基礎研究所, 2005.1.31
- 70. K.Suzuki, K.Kanisawa, M.Ueki, K.Takashina, and Y.Hirayama, "Low-temperature scanning tunnel microscopy and spectroscopy studies of the cleaved surface of InAs/GaSb superlattices", International Conference on Nanoelectronics, Nanostructure and Carrier Interactions (NNCI 2005), NTT 物性科学基礎研究所, 2005.1.31
- 71. H. W. Liu, T. Fujisawa, T. Hayashi, and Y. Hirayama, "Singlet-Triplet Spin Blockade in the Cotunneling Regime through a Double Quantum Dot", International Conference on Nanoelectronics, Nanostructure and Carrier Interactions (NNCI 2005), NTT 物性科学基礎研究所, 2005.1.31
- 72. 井元信之, "Photonic Quantum Information Processing and Entanglement Manipulation" International Conference on Nanoelectronics, Nanostructure and Carrier Interactions (NNCI 2005), NTT 物性科学基礎研究所, 2005.2.1
- 73. S. K. Ozdemir, 小芦雅斗,井元信之"Watermarking of a qubits," International Conference on Nanoelectronics, Nanostructure and Carrier Interactions (NNCI 2005), NTT 物性科学基礎研究所, 2005.2.1
- 74. Tadashi Sakashita, Satoshi Nagai, Toshihiko Ono, Tomotaka Hoshino, Shinji Watanabe, Susumu Sasaki, Yoshiro Hirayama, "NMR Observation of Anomalous Behavior in Bulk and Modulation-Doped GaAs", International Conference on Nanoelectronics, Nanostructure and Carrier Interactions(NNCI 2005), NTT 物性科学基礎研究所, 2005.2.2
- 75. M.Brun, K.Takashina, T.Ota, Y.Ono, Y.Hirayama, "Inter-subband interactions and Landau-level coincidences in Si02/Si/Si02 quantum-wells", International

Conference on Nanoelectronics, Nanostructure and Carrier Interactions(NNCI 2005), NTT 物性科学基礎研究所, 2005.2.2

- 76. T. Hayashi, T.Fujisawa, R.Tomita, and Y.Hirayama, "Time-resolved single charge detection in a double quantum dot via a quantum point contact", International Conference on Nanoelectronics, Nanostructure and Carrier Interactions(NNCI 2005), NTT 物性科学基礎研究所, 2005.2.2
- 77. G.Yusa, K.Muraki, K.Takashina, K.Hashimoto, and Y.Hirayama, "Electron-nuclear spin coupling in nano-scale devices:self-sustaining resistance oscillations and controlled multiple quantum coherences", International Conference on Nanoelectronics, Nanostructure and Carrier Interactions(NNCI 2005), NTT 物性 科学基礎研究所, 2005.2.2
- 78. S.Sasaki, T.Fujisawa, T.Hayashil, and Y.Hirayama, "Singlet-triplet spin relaxation mechanism in a quantum dot studied by electrical pump-and-probe", International Conference on Nanoelectronics, Nanostructure and Carrier Interactions(NNCI 2005), NTT 物性科学基礎研究所, 2005.2.2
- 79. Y. Hirayama, G. Yusa, N. Kumada, K. Hashimoto, and K. Muraki, "Electronic and unclear spin interactions in semiconductor systems", International Conference on Nanoelectronics, Nanostructure and Carrier Interactions(NNCI 2005), NTT 物性 科学基礎研究所, 2005.2.2
- 80. K. Ono, A. Takahashi, Y. Nishi, Y. Hirayama, and S. Tarucha, "Coherent manipulation of quadrupoler nuclei in GaAs quantum dots", International Conference on Nanoelectronics, Nanostructure and Carrier Interactions(NNCI 2005), NTT 物性科学基礎研究所, 2005.2.2
- 81. K.Takashina, Y.Ono, A.Fujisawa, Y.Takahashi, and Y.Hirayama, "Intersubband scattering in double-gate MOSFETs", 2005 Silicon Nanoelectronics Workshop, 京都, 2005.2.12
- 82. Y. Hirayama, "Coherent Control in Semiconductor Nanostructures", Japan Germany Colloquium (日独コロキウム), ドレスデン, 2005.2.14
- 83. T. Kodera, W.G. van der Wiel, K. Ono, T. Obata, Y. Iwai, T. Maruyama, Y. Hirayama, and S. Tarucha, "Quantum dot devices for realizing electron spin qubits", 2005 Gordon Research Conference on Quantum Information Science, Ventura, California, 2005. 2. 27
- 84. K. Ono, "Nuclear spin effects in GaAs", Gordon Research Conferences on Quantum Information Science, Ventura, CA, USA. 2005. 2. 27
- 85. K. Ono, A. Takahashi, Y. Nishi, Y. Hirayama, and S. Tarucha, "Coherent manipulation of I = 3/2 nuclei in GaAs quantum dots", ISQDPC 2005, Toranomon Pastoral, 2005.3.7
- 86. Susumu Sasaki, "Cu-NQR Evidence of Superconductivity at Double Chains in Pr247", Condensed Matter Physics Seminar at the Geballe Laboratory for Advanced Materials, Stanford University, Stanford, CA, USA, 2005. 3.10
- 87. Kodera, W.G. van der Wiel, K. Ono, T. Obata, T. Maruyama, Y. Hirayama, and S. Tarucha, "Semiconductor vertical quantum dot devices for realizing electron spin qubits", ESF-JSPS Frontier Science Conference for Young Researchers on Quantum Information and Qantum Physics, Kanagawa, 2005. 3. 12
- K. Ono, "Nuclear Spin Induced Oscillatory Current in Spin Blockaded Quantum Dots", APS March Meeting 2005, Los Angeles, CA, USA, 2005. 3.21
- 89. Go Yusa, Koji Muraki, Kei Takashina, Katsushi Hashimoto, and Yoshiro Hirayama, "Electron-nuclear spin coupling in nano-scale devise: self-sustaining resistance oscillations and controlled multiple quantum coherences", Annual APS March Meeting,アメリカ, 2005.3.261

- 90. Toshimasa Fujisawa "Dynamics of single electron charge in a double quantum dot", Quantum Dots Conference (QD2004), カナダ・バンフ, 2004.5
- 91. N. Goel, K. Suzuki, S. Miyashita, S. J. Chung, M. B. Santos, and Y. Hirayama, "Ballistic Transport in InSb Mesoscopic Structures", Quantum Dots Conference (QD2004), カナダ・バンフ, 2004.5 (WP32)
- 92. T.Tokizaki and H.Yokoyama "Near-Field Observation of Magneto-Photoluminescence of Two-Dimensional Electron Gas System" Frontiers in Nanoscale Science and Technology, アメリカ サンフランシスコ, 2005.1.27.
- 93. T. Inoue, K. Takami, T. Tokizaki and H. Yokoyama "Ultrafast electrical nanoprobing by scanning Maxwell-stress microscopy" Frontiers in Nanoscale Science and Technology, アメリカ サンフランシスコ, 2005.1.27.
- 94. S.Tarucha "Control of Tunnel and Exchange Coupling in Coupled Quantum Dots" 2005 Sweden -Japan Workshop on Quantum Nano-Physics and Electronics, 東京, 2005.4.7 (invited).
- 95. S. Tarucha "Manipulation of Electron and Nuclear Spin in Quantum Dots" Spin Transport and Dynamics in Nanostructure (STDN) Workshop 2005, アメリカ ミネ アポリス, 2005.5.6 (invited).
- 96. S.Tarucha "Manipulation of Electron and Nuclear Spin in Quantum Dots" Spin Transport and Dynamics in Nanostructures, アメリカ ミシガン州立大学, 2005.5.9 (invited)
- 97. N. Imoto "Entanglement Manipulation with Linear Optics" CLEO/QELS 2005, アメ リカ, 2005.5.23 (invited).
- 98. Y.Hirayama "Quantum information technology" Spin and Qubits 2005, デンマー ク コペンハーゲン, 2005.6 (invited).
- 99. M. Koashi "Unconditional security of quantum key distribution and the uncertainty principle" 12th central European Workshop on Quantum Optics, トルコ アンカラ, 2006.6.6.
- 100. S.K.Ozdemir, T.Yamamoto, M.Koashi and N.Imoto "Tamper assessment in qubit-string watermarking based on quantum error correction coding" 12th central European Workshop on Quantum Optics, トルコ アンカラ, 2006.6.6.
- 101. K.Kanisawa, S.Perraud and Y.Hirayama "Fermi level shift and Friedel oscillation characterized at highly Si-doped epitaxial InGaAs(111)A surfaces usin-g low-temperature scanning tunneling microscopy" ACSIN-8/ICTF-13, スウェーデン ストックホルム, 2005.6.19.
- 102. S. Tarucha "Probing and manipulating spin effects in quantum dots" 13th International Symposium NANOSTRUCTURES: PHYSICS AND TECHNOLOGY, ロシア サンク トペテルブルク, 2005.6.21 (invited).
- 103. K.Takashina, Y.Ono, A.Fujiwara, Y.Takahashi and Y.Hirayama "Control of Valley and Spatial Subbands in Double-Gate MOSFETs -Electronic States in a Silicon Quantum Well-" AWAD, 韓国 ソウル, 2005.6.28.
- 104. N. Kumada and Y. Hirayama "Nuclear-Spin-Lattice Relaxation in a nu=1 Bilayer Quantum Hall System" Electronic Properties of Two-Dimensional Systems(ep2ds-16), アメリカ アルバカーキ, 2005.7.10.
- 105. S. Moreau, M. Byszewski, M. L. Sadowski, M. Petemski, S. Studenikin, G. Austing, A. S. Sachrajda, T. Saku and Y. Hirayama "Optically detected cyclotron resonance in a high mobility 2DEG" Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (ep2ds-16), アメリカ アルバカーキ, 2005.7.11.
- 106. M. Yamamoto, M. Stopa, Y. Tokura, Y. Hirayama and S. Tarucha "Hydrodynamic electronic motion in coupled quantum wires" アメリカ アルバカーキ, 2005.7.12.
- 107. S.K. Ozdemir, T.Yamamoto, M.Koashi and N.Imoto "Embedding watermark in qubit

strings using error correction coding" IQEC/CLEO-PR 2005, 東京都 日本都市センターホテル, 2005.7.14.

- 108. T.Yamamoto, J.Shimamura, R.Nagase, S.K.Ozdemir, M.Koashi and N.Imoto "A Distribution Scheme for Qubit Over Collective-Noise Channel" IQEC/CLEO-PR 2005, 東京都 日本都市センターホテル, 2005.7.14.
- 109. Y. Igarashi, T. Ota, K. Ono, Y. Nakata, H. Z. song, T. Miyazawa, N. Yokoyama and S. Tarucha "Observation of Hund's first rule in strongly coupled InAs self-assembled dots" Modulated Semiconductor Structures (MSS-12), アメリカ ア ルバカーキ, 2005.7.15.
- 110. S.K.Ozdemir, I.Ohno and S.Shinohara "Measurement of blood flow over skin surface with a self-mixing laser interferometer" IQEC/CLEO-PR 2005, 東京都 日 本都市センターホテル, 2005.7.15.
- 111. S. Tarucha "Control of spin effects and the Kondo effect in quantum dots" The International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES' 05), オーストリア ウィーン, 2005.7.26.
- 112. Y.Hirayama, G.Yusa and K.Muraki "Coherent control of nuclear spins in a mesoscopic fractional-quantum-Hall device" Spintech3, 兵庫県淡路島, 2005.8.1 (invited).
- 113. S.Tarucha"Spins in Quantum Dots" Spintech3, 兵庫県淡路島, 2005.8.1 (invited).
- 114. S.Tarucha "Spins in Quantum Dots" The 6th International Wilhelm and Else Heraeus Summerschool "Spinelectronics", ドイツ Wittenberg, 2005.8.1 (invited).
- 115. S. Watanabe, Y. Yamada and S. Sasaki "Evidence of antiferromagnetic order on CuO2 planes in superconducting Pr2Ba4Cu7013.5" LT24, アメリカ フロリダ, 2005.8.12.
- 116. T. Kodera, Y. Iwai, W.G. van der Wiel, T. Obata, T. Hatano and S. Tarucha "Charge readout of a vertical quantum dot using laterally weakly coupled quantum dot as a detector" 24th International Conference on Low Temperature Physics (LT24), アメリカ フロリダ, 2005.8.16.
- 117. K. Hitachi, M. Yamamoto and S. Tarucha "Probing Spin States in Quantum Dots by Spin-resolved One-dimensional Contacts" 24th International Conference on Low Temperature Physics (LT24), アメリカ フロリダ, 2005.8.16.
- 118. S.Tarucha "Spin Effects and Spin Qubits with Quantum Dots" The 8th International Symposium on Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology (ISQM-TOKYO '05), 埼玉, 2005.8.22 (invited).
- 119. Y.Hirayama "Qubits and unclear spin polarization" ISCS2005, ドイツ ルス ト, 2005.9.1 (invited).
- 120. T.Yamamoto, J.Shimamura, S.K.Ozdemir, M.Koashi and N.Imoto "A qubit distribution scheme over collective-noise channel" Kochi Summer School on Quantum Information Science, 高知県 高知工科大学, 2005.9.1.
- 121. S.K.Ozdemir, T.Yamamoto, M.Koashi and N.Imoto "Qubit watermarking with quantum error correction coding" Kochi Summer School on Quantum Information Science, 高知県 高知工科大学, 2005.9.2.
- 122. Yosuke Kitamura, Keiji Ono and Seigo Tarucha"Electrical control of Pauli spin blockade in double quantum dot devices" Kochi Summer School on Quantum Information Science, 高知県 高知工科大学, 2005.9.5.
- 123. K.Kanisawa, S.Perraud and Y.Hirayama "Properties of conduction electrons in the InGaAs surface quantum wells characterized using low-rwmperature scan-ning tunneling microscopy" ECOSS23, ドイツ ベルリン, 2005.9.7.
- 124. H. M. Lee, K. Muraki, E. Y. Chang and Y. Hirayama "Independent tuning of the

confinement and density in a quantum point contact using a center gate and a back gat-e" SSDM, 神戸, 2005.9.12.

- 125. T.Hayashi, T.Fujisawa, R.Tomita and Y.Hirayama "Real-time observation of charge state transitions in a double quantum dot" SSDM, 神戸, 2005.9.13.
- 126. S. Suzuki, K. Kanisawa, S. Perraud, M. Ueki, Katakashina and Y. Hirayama "Imaging of electron standing waves in InAs/GaSb superlattices by low-temperature scanning tunneling spectroscopy" ISCS2005, ドイツ ルスト, 2005.9.21.
- 127. N. Imoto "Quantum Information Processing in view of Optics and Material Physics" Osaka University Asia Pacific Vietnam National University, Hanoi Forum, ベトナム ハノイ International Convention Center, 2005.9.28 (invited).
- 128. S. Tarucha"Probing and manipulating spin effects in quantum dots" Symposium on Nanosciences University of Tokyo Munich University of Technology, 東京, 2005.10.5 (invited).
- 129. G.Yusa, K.Muraki, K.Takashina, K.Hashimoto and Y.Hirayama "Controlled multiple quantum coherences of nuclear spins in a nanometer-scale device" 50th Magnetism and Magnetic Materials Conference, アメリカ サンノゼ, 2005.11.2 (invited).
- 130. T.Ota, G.Yusa, K.Muraki, S.Miyashita and Y.Hirayama "High sensitive resistively-detected NMR experiments using all-electrical semiconductor GaAs nano-scale device" Asia-Pacific NMR Symposium, 横浜 大さんばしホール, 2005.11.9.
- 131. T.Tokizaki and H.Yokoyama "Near-Field Observation of Magneto-Photoluminescence of Two-Dimensional Electron Gas System in GaAs Single Heterostructures" APNF0-5,新潟コンベンションセンター朱鷺メッセ,2005.11.15
- 132. S. Tarucha "Control over Single Spins in Quantum Dots" International Symposium on Quantum Dots and Nanoelectronics, 東京, 2005.11.18 (invited).
- 133. S. Tarucha "Spins and International in Quantum Dots-Toward Quantum Computing" NPMS7, アメリカ ハワイ, 2005.11.25 (invited).
- 134. S. Sasaki, S. Kang, K. Kitagawa, M. Yamaguchi, S. Miyashita, T. Maruyama, H. Tamura, T. Akazaki, Y. Hirayama and H. Takayanagi "Spin correlation in a double quantum dot quantum wire coupled system" NPMS7 アメリカ ハワイ, 2005.11.27.
- 135. S.Tarucha "Detection and manipulation of single electron charge and spin with quantum dots" 21st Century COE mini-workshop on "Advances in Strongly Correlated Electronics", 東京大学柏, 2006.1.13 (invited).
- 136. H. Takayanagi, S. Sasaki, S. Kang, K. Kitagawa, M. Yamaguchi, S. Miyashita, T. Maruyama, H. Tamura, T. Akazaki and Y. Hirayama "Manipulation and control of spin in Ⅲ-V semiconductors by gated structures" 33rd Conference on the Physics and Chemistry of Semiconductor Interfaces, アメリカ フロリダ, 2006.1.15.
- 137. S. Tarucha "Quantum dots for implementing quantum computing" 33rd Conference on the Physics and Chemistry of Semiconductor Interfaces, アメリカ フロリダ, 2006.1.15 (invited).
- 138. T. Hayashi, T. Fujisawa, R. Tomita and Y. Hirayama "Charge detection measurement of a double quantum dot" Frontiers in Nanoscale Science and Technology, アメ リカ サンフランシスコ, 2006.1.26.
- 139. K.Takashina, Y.Ono, A.Fujiwara, H.Inokawa, Y.Takahashi and Y.Hirayama "Control of Valley-Splitting in Silicon-On-Insulator MOSFET's" Frontiers in Nanoscale Science and Technology, アメリカ サンフランシスコ, 2006.1.26.
- 140. T. Kodera, Y. Iwai, Y. Kitamura, W. G. van der Wiel, T. Obata, T. Hatano, K. Ono and S. Tarucha "Charge detection of weakly coupled vertical quantum dots" Frontiers in Nanoscale Science and Technology, アメリカ サンフランシスコ,

2006.1.26.

- 141. K. Hitachi, M. Yamamoto and S. Tarucha "Probing Spin States in Quantum Dots by Spin-resolved One-dimensional Contacts" Frontiers in Nanoscale Science and Technology, アメリカ サンフランシスコ, 2006.1.26.
- 142. J. Sugawa and S. Tarucha "Real time measurement of spin-dependent tunneling and electronic elaxation in a lateral quantum dot" Frontiers in Nanoscale Science and Technology, アメリカ サンフランシスコ, 2006.1.27.
- 143. T.Ota, G.Yusa, K.Muraki, S.Miyashita and Y.Hirayama "Creation of effective pure states using all-electrical GaAs nano-scale device toward NMR quantum computing" Frontiers in Nanoscale Science and Technology, アメリカ サンフラ ンシスコ, 2006.1.27.
- 144. S.Perraud, K.Kanisawa, Z.Z.Wang and Y.Hirayama "Low-temperature scanning tunneling microscopy of InGaAs thin films epitaxially grown on lattice-matched substrates" Frontiers in Nanoscale Science and Technology, アメリカ サンフ ランシスコ, 2006.1.27.
- 145. M.Yamamoto "Electron pump of one-dimensional Wigner crystal" Frontiers in Nanoscale Science and Technology, アメリカ サンフランシスコ, 2006.1.27 (invited).
- 146. Y. Kitamura, K.Ono and S. Tarucha "Gate Control of Pauli Spin Blockade in Vertical Quantum Dot Devices" Frontiers in Nanoscale Science and Technology, アメリカ サンフランシスコ, 2006.1.27.
- 147. Y.Igarashi, T.Ota, K.Ono, Y.Nakata, H.Z.song, T.Miyazawa, N.Yokoyama and S.Tarucha "Zeeman effect and Hund's first rule in strongly coupled InAs self-assembled dots" Frontiers in Nanoscale Science and Technology, アメリカ サンフランシスコ, 2006.1.27.
- 148. S. Sasaki, S.Watanabw, S.Nagai, T.Sakashita and J.Harada "Dynamical Enhancement of Nuclear-Spin Coherence in GaAs and Si" Frontiers in Nanoscale Science and Technology, アメリカ サンフランシスコ, 2006.1.27.
- 149. Y.Hirayama "Polarization, relaxation, and coherent control of nuclear spins in semiconductor systems" Frontiers in Nanoscale Science and Technology, ア メリカ サンフランシスコ, 2006.1.27 (invited).
- 150. S.K.Ozdemir, J.Shimamura and N.Imoto "Entanglement in multi-party games" Workshop on theory of quantum computation, communication and cryptography (TQC 2006), 神奈川県厚木市 NTT 物性科学基礎研究所, 2006.2.22.
- 151. S.Sasaki, S.Kang, S.Miyashita, T.Maruyama, H.Tamura, T.Akazaki, Y.Hirayama and H.Takayanagi "Spin correlation in a double quantum dot-quantum wire coupled system" Workshop on theory of quantum computation, communication and cryptography (TQC 2006), 神奈川県厚木市 NTT 物性科学基礎研究所, 2006.2.27.
- 152. N. Kumada, K. Muraki and Y. Hirayama "Canted Antiferromagnet in a Bilayer Quantum Hall System Investigated by Nuclear Spin Relaxation" Workshop on theory of quantum computation, communication and cryptography (TQC 2006), 神奈川県厚木 市 NTT 物性科学基礎研究所, 2006.2.27.
- 153. T.Ota, G.Yusa, K.Muraki, S.Miyashita and Y.Hirayama"Initialization of nuclear spin states using all-electrical GaAs NMR device for quantum information processing" Workshop on theory of quantum computation, communication and cryptography (TQC 2006), 神奈川県厚木市 NTT 物性科学基礎研究所, 2006.2.28.
- 154. S. Tarucha "Electron Spins in Coupled Vertical Quantum Dots" KITP, Four-month Program on Spintronics (invited) 2006.03.13-06.23
- 155. S. K. Ozdemir, I. Ohno, and S. Shinohara, "Assessment on self-mixing laser interferometry for blood flow measurement over skin surface," Proceedings of

the 2006 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, IMTC 2006, Sorrento, Italy, 2006. 4.24-27

- 156. T. Fujisawa, "Counting statistics of single-electron transport through a double quantum dot", Capri Spring School on Transport in Nanostructures (invited), Capri, Italy, 2006. 4. 24-27
- 157. H. Gotoh, H. Sanada, H. Kamada, H. Nakano, H. Ando, and J. Temmyo, "Detecting Coupled Excitons by Photoluminescence Excitation in Bi-layer Quantum Dots", Quantum Electronics and Laser Science Conference (CLEO/QELS2006), Long Beach, 2006. May
- 158. A. Ishizawa, H. Gotoh, H. Nakano, A. Nakamura, and J. Temmyo, "Dependence of Interference Spectrum between Harmonics from a ZnO Thin Film on the Carrier-envelope Phase of Few-cycle Laser Pulses", Conference on Lasers and Electro-optics (CLEO/QELS2006), Long Beach, 2006. May
- 159. S. Tarucha, "Single electron tunneling spectroscopy of a single InAs self-assembled quantum dot molecule" The 4th International Conference on Semiconductor Quantum Dot(QD2006) (invited), 2006.05.01-15
- 160. S. Tarucha, "Probing And Manipulating Single Spins In Quantum Dots Within The Scheme Of Quantum Computing" Workshop on Spintronics (invited), 2006.05.08-12
- 161. S. Tarucha, "Probing and manipulating spin effects in vertical quantum dots" Quantum Coherence, Noise and Decoherence in Nanostructures (invited), 2006.05.15-26
- 162. A. Miranowicz, S. K. Özdemir, M. Koashi, and N. Imoto, "Multiport interferometry for optical-state truncation and teleportation," 13th Central European Workshop on Quantum Optics, Vienna, Austria, 2006. 5. 23-27
- 163. Yoshiro Hirayama, "Nuclear Spin Polarization and Relaxation in Semiconductors", International Center for Quantum Structures (ICQS) Workshop on Novel Quantum Phenomena in Condensed Matters(invited), Beijing, 2006. 6.5-7
- 164. Yoshiro Hirayama, "Single Electron Manipulation and Detection in a Quantum Dot System", International Center for Quantum Structures (ICQS) Workshop on Novel Quantum Phenomena in Condensed Matters (invited), Hangzou, 2006.6.7-9
- 165. Susumu Sasaki, "Chain-driven superconductivity evidenced by nuclear resonance", Materials and Mechanisms of Superconductivity (M<sup>2</sup>S), 2006.07.06.
- 166. H. Yamaguchi, H. Okamoto, Y. Marutal, S. Ishihara, S. Miyashita, and Y. Hirayama, "Mechanically detected electron energy dissipation in two-dimensional electron systems", 28th International Conference on the Physics of inSemiconductors (ICPS-28), Vienna, 2006. 7. 24-28
- 167. Kyoichi Suzuki, Kiyoshi Kanisawa, Simon Perraud, Mineo Ueki, Kei Takashina, and Yoshiro Hirayama, "Observation of subband standing waves in superlattices by low-temperature scanning tunneling spectroscopy", 28th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS-28) (invited), Vienna, 2006. 7. 24-28
- 168. G. Yusa, K. Muraki, K. Takashina, N. Kumada, K. Hashimoto, and Y. Hirayama, "Nuclear spin control by a point contact", 28th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS-28) (invited), Vienna, 2006.7.24-28
- 169. M. Yamamoto, H. Takagi, M. Stopa, and S. Tarucha "Rectified Coulomb Drag Induced by Wigner Crystallization in Quantum Wires", 28th International Conference on the Physics of Semiconductors, (ICPS-28), Vienna, 2006.07.24-28
- 170. S. Tarucha "Probing and manipulating individual spins in vertical quantum

dots" 28th International Conference on the Physics of Semiconductors, (ICPS-28) (invited), Vienna, 2006.07.24-28

- 171. S. Sasaki, S. Kang, S. Miyashita, T. Maruyama, H. Tamura, T. Akazaki, Y. Hirayama, and H. Takayanagi, "Non-local spin control in a doublequantum dot ?quantum wire coupled system", 28th InternationalConference on the Physics of Semiconductors (ICPS-28), Vienna, 2006. 7.26
- 172. T. Fujisawa, T. Hayashi, R. Tomita, Y. Hirayama, "Counting statistics of single electron transport through a double quantum dot", 28th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS-28), Vienna, 2006.7.24-28
- 173. Kyoichi Suzuki, Kiyoshi Kanisawa, Simon Perraud, Mineo Ueki, Kei Takashina, and Yoshiro Hirayama'Observation of subband standing waves in superlattices by low-temperature scanning tunneling spectroscopy' 28th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS-28) (invited), Vienna, 2006.7.24-28
- 174. .K. Takashina, M. Brun, T. Ota, D.K. Maude, A. Fujiwara, Y. Ono, H. Inokawa and Y. Hirayama "Resistance ridges along filling factor  $\nu = 4i$  in SiO2/Si/SiO2 quantum wells" 28th International Conference on the Physics of Semiconductors, (ICPS-28), Vienna, 2006.7.24-28
- 175. Simon Perraud, Kiyoshi Kanisawa, Zhao-Zhong Wang, and Yoshiro Hirayama 'Low-Temperature Scanning Tunneling Spectroscopy Study of Two-Dimensional ElectronGas onfined in Semiconductor Heterostructures' International Conference on Nanoscience and Technology (ICN+T2006), Basel, Switzerland 2006.7.30-8.4
- 176. Yasuhiro Niimi, Kiyoshi Kanisawa, Haruki Kojima, Hiroshi Kambara, Yoshiro Hirayama, Seigo Tarucha, and Hiroshi Fukuyama'STM/STS Measurements of Two-Dimensional Electronic States in Magnetic Fields at Epitaxially Grown InAs(111)A Surfaces'International Conference on Nanoscience and Technology (ICN+T2006), Basel, 2006. 7. 30-8. 4
- 177. S. Tarucha "Quantum Dot Spin Qubits with Slanting Zeeman Field" International Conference on Nanoscience and Techonolagy (ICN+T2006) (invited), Basel, 2006.07.30-8.4
- 178. Y. Igarashi, M. Jung, M. Yamamoto, A. Oiwa, T. Machida, K. Hirakawa, and S. Tarucha "Kondo resonance in a single InAs quantum dot probed by nanogap electrodes" International Conference on Nanoscience and Techonolagy (ICN+T2006), Basel, 2006. 7. 30-8. 4
- 179. Kiyoshi Kanisawa, Simon Perraud, and Yoshiro Hirayama'Donor Surface States on Electron Accumulation at Epitaxial InAs(111)A Surface'International Conference on Nanoscience and Technology (ICN+T2006), Basel, 2006.7.30-8.4
- 180. Susumu Sasaki, "Superconductivity driven by zigzag chain in Pr-doped copper-oxide evidenced by copper nuclear resonance", International Conference on Magnetism (ICM), 2006.8.22.
- 181. Shinji Watanabe, "Superconductivity driven by zigzag chain in Pr-doped copper-oxide evidenced by copper nuclear resonance", International Conference on Magnetism (ICM), 2006.08.22.
- 182. Y. Hirayama, "High precision control of nuclear spins in semiconductor nanostructures", Int. Conf. On Superlattices, Nano-structures and Nano-devices (ICSNN2006) (invited), Instanbul, 2006.7.30-8.4
- 183. K. Muraki, "Electron-nuclear spin interaction in quantum wells" The 17th Int. Conf. on High Magnetic Fields in Semiconductor Physics, (invited), Wuerzburg, 2006. 7. 30-8. 4
- 184. S. Tarucha and M. Yamamoto, "Coulomb Drag of a Wigner Crystal State in Quantum

Wires" 17th International Conference on High Magnetic Fields in Semiconduntor Physics(HMF) 2006.7.30-8.4

- 185. K. Ono, Y. Kitamura, A. Takahashi, S. Yamaguchi, T. Inoshita, Y. Hirayama, and S. Tarucha, "Electrical manipulation of electron and nuclear spins in quantum dots" 6th Rencontres du Vietnam Nanophysics: from fundamentals to applications (Vietnam2006) 2006.08.06-12
- 186. T. Yamamoto, R. Nagase, J. Shimamura, S. K. Ozdemir, M. Koashi, N. Imoto, "Faithful transmission scheme for unknown photonic qubit against correlated noise" Conf. On Quantum Information and Quantum Control II (CQIQC-II), Toronto, 2006. 8. 7-11
- 187. S. K. Özdemir, A. Miranowicz, M. Koashi, N. Imoto, "Projection synthesis in multiport interferometer for selective manipulation of an optical field in the Fock-state space," Conf. On Quantum Information and Quantum Control II (CQIQC-II), Toronto, 2006. 8. 7-11.
- 188. H. Yamaguchi, S. Miyashita, and Y. Hirayama, "Strain-induced electro-motive force in a two-dimensional electron system", 2006 International Symposiumon Compound Semiconductors (ISCS2006), Vancouver, 2006.8.16
- 189. T. Fujisawa, "Counting statistics of single electron transport through a double quantum dot", Nanophysics: from fundamentals to applications (invited), Hanoi, 2006 Aug.
- 190. K. Hitachi, J. Sugawa, M. Yamamoto, and S. Tarucha "Spin filtering and spin relaxation in a GaAs quantum dot" 4th International Conference on Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductors (PASPS 4th), Sendai, 2006. 8. 15-15
- 191. G. Yusa, K. Muraki, K. Takashina, K. Hashimoto, and Y. Hirayama, "Controlled multiple quantum coherences of nuclear spins", The 11<sup>th</sup> Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductors (PASPS-11) (invited), Sendai, 2006. 8. 15-18
- 192. S. K. Özdemir, A. Miranowicz, T. Ota, G. Yusa, K. Muraki, N. Imoto and Y. Hirayama, "Quantum gate operations and state tomography in a nanometre-scale NMR," AQIS 2006 Asian Conference on "Quantum Information Science", Beijing, China, 2006. 9. 1-4
- 193. T. Tokizaki, H. Yokoyama, "Near-Field Observation of Magnetophotoluminescence from Two-Dimensional Electron Gas Systems in GaAs Single Heterostructures", 24th Europian Conference on Surface Science (ECOSS 24), Paris, 2006. 9. 4-8
- 194. K. Onomitsu, H. Yamaguchi, Y. Hirayama, K. Yanagisawa, S. Takeuchi, H. Yoshitake, and Y. Horikoshi, "The strain effects in spin-related transport properties of ferromagneticGaMnAs" 14th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (MBE2006), Tokyo, 2006. Sep
- 195. Y. Lin, Y. Hsieh, M. Ueki, H. Yamaguchi, Y. Hirayama, and E. Chang, "Growth of AlGaSb/InAs HEMT Structure on Si Substrate for High-SpeedElectronic Applications", 14th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (MBE2006), Tokyo, 2006. Sep
- 196. Hidenori Joe, Toru Akiyama, Kohji Nakamura, Kiyoshi Kanisawa, and Tomonori Ito, "An empirical potential approach to the structural stability of InAs stacking-fault tetrahedron in InAs/GaAs(111)", 14th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (MBE2006), Tokyo, 2006. Sep

- 197. Simon Perraud, Kiyoshi Kanisawa, Zhao-Zhong Wang, and Yoshiro Hirayama, "Dramatic dependence of the Fermi level pinning strength on crystal orientation at clean s urfaces of n-type InGaAs grown by molecular beam epitaxy", 14th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (MBE2006), Tokyo, 2006.Sep
- 198. Kiyoshi Kanisawa, Simon Perraud, and Yoshiro Hirayama, "Imaging two-dimensional states of InGaAs/InAlAs surface quantum wells grown on GaAs(111)A substrates ", 14th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (MBE2006), Tokyo, Japan 2006. Sep
- 199. Kyoichi Suzuki, Kiyoshi Kanisawa, Simon Perraud, Mineo Ueki,Kei Takashina, and Yoshiro Hirayama "Imaging of subbands in InAs/GaSb double quantum wells by low-temperature scanning tunneling spectroscopy" 14th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (MBE2006), Tokyo, 2006. Sep
- 200. T. Fujisawa, "Nanotechnology for quantum devices" [PANELIST], Ramp session, Solid State Devices and Materials, (SSDM2006), Yokohama 2006.Sep
- 201. Shinkai, T. Fujisawa, T. Hayashi and Y. Hirayama, "Electrostatic coupling between two double- quantum dots studied by resonant tunneling current", Solid State Devices and Materials, (SSDM2006), Yokohama 2006.Sep.
- 202. Kyoichi Suzuki, Kiyoshi Kanisawa, Simon Perraud, Mineo Ueki, Kei Takashina, and Yoshiro Hirayama'Imaging of interference between incident and reflected electron waves at an InAs/GaSb heterointerface by lowtemperature scanning tunneling spectroscopy' (A-1-4)2006 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2006), Yokohama, 2006. Sep
- 203. H. Gotoh, S. W. Chang, S. L. Chuang, H. Okamoto, and Y. Shibata, H. Sanada, "Tunable Slow Light of 1.3  $\mu$ m Region in Quantum Dots at Room Temperature", International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2006), Yokohama, 2006. Sep
- 204. H. Sanada, H. Gotoh, K. Tateno, and H. Nakano, "Exciton and Biexciton Emissions from Single GaAs Quantum Dots in (Al, Ga)As Nanowires", International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2006), Yokohama, 2006. Sep
- 205. T. Sogawa, H. Gotoh, Y. Hirayama, T. Saku, S. Miyashita, P. V. Santos, and K. H. Ploog, "Optical Properties of Dynamically-modulated Dots and Wires Formed by Surface Acoustic Waves", International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2006), Yokohama, 2006. Sep
- 206. K. Takashina, B. Gaillard, Y. Ono and Y. Hirayama "Low temperature characteristics of ambipolar Si02/Si/Si02 Hall-bar Devices" International Conference on Solid State Devices and Materials(SSDM2006), Yokohama, 2006. Sep
- 207. K. Muraki, "Spin/charge fluctuations in quantum Hall bilayers-Nuclear spin relaxation and Coulomb drag" Interactions, excitations, and broken symmetry in quantum Hall systems (QHSyst06) (invited), Dresden, 2006.10.2-7
- 208. S. Tarucha, "Application of slanting Zeeman field for implementing spin qubits and spin raedout with quantum dots" 2006 US-Japan Workshop on Quantum Information Science in Hawaii (invited), Hawaii, 2006.10.16-20
- 209. Y. Hirayama, S. Sasaki, and T. Fujisawa, "Non-local charge and spin interactions in semiconductor quantum dot systems", Int. Workshop on Tera- and Nano-Devices (IWTND06), (invited), Aizu-Wakamatsu, 2006.10.16-19
- 210. Yoshiro Hirayama, "NMR in a Point Contact Device", IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference (NMDC2006) (invited), Gyeongju, 2006.10.22-25
- 211. T. Fujisawa, "Counting statistics of single electron transport through a double quantum dot", IEEE-Nanotechnology Materials and Devices Conference

(NMDC2006) (invited), Gyeongju, 2006.10.22-25

- 212. S. Tarucha, "New scheme of spin qubits driven by ac electric field" IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference (NMDC2006) (invited), Gyeongju, 2006. 10. 22-25
- 213. Yoshiro Hirayama, "Control of charge, spin, and nuclear spins in semiconductor nanodevices", JST-DFG Japan-Germay Joint Workshop, 2006 "Nano-Electronics" Tokyo, 2006.10.30-11.1
- 214. Kiyoshi Kanisawa, Simon Perraud, and Yoshiro Hirayama 'Imaging valence band states at InAs(111)A surface' 13th International Conference on Solid Films and Surfaces (ICSFS-13), San Carlos de Bariloche, Argentina 2006.Nov
- 215. A. Miranowicz, S. K. Özdemir, Y. Liu, G. Chimczak, M. Koashi, and N. Imoto, "Quantum Entanglement, Decoherence and Teleportation of Quantum-Dot States in Microcavities," Handai Nanoscience and Nanotechnology International Symposium, Osaka, 2006. 11. 20-22
- 216. S. K. Özdemir, A. Miranowicz, T. Ota, G. Yusa, K. Muraki, N. Imoto, and Y. Hirayama, "Nuclear spins in a nano-scale device for quantum information processing," Handai Nanoscience and Nanotechnology International Symposium (invited), Osaka, 2006. 11. 20-22
- 217. R. Namiki, S. K. Ozdemir, and N. Imoto, "Entanglement distillation and continuous-variable quantum key distribution using postselection," The 8th International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing (QCMC 2006), Tsukuba, 2006. 11. 28-12. 03
- 218. S. K. Ozdemir, T. Yamamoto, M. Koashi, and N. Imoto, "Embedding classical watermark on qubit-strings using error correctioncoding: adversary detection and tamper assessment," The 8th International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing (QCMC 2006), Tsukuba, 2006. 11. 28-12. 03
- 219. H. Yamaguchi, H. Okamoto, S. Miyashita, and Y. Hirayama, "Internal Friction and Electron Energy Dissipation in Two-dimensionalElectron Systems", Advanced Heterostructure Workshop 2006 (AHW2006), Hawaii, 2006. 12. 4-8
- 220. Yoshiro Hirayama, Takeshi Ota, Norio Kumada, and Koji Muraki, "Nuclear spin as a sensitive detector of semiconductor nanosystems", Advanced Heterostructure Workshop (AHW2006), Hawaii, 2006. 12. 4-8
- 221. Susumu Sasaki, "Direct observation of local magnetic-field gradient generated by sub-micro-scale magnet" Advanced Heterostucture Workshop (AHW2006), Hawaii, 2006.12.4-8.
- 222. G. Shinkai, T. Hayashi, and T. Fujisawa, "Electrostatic dipolar coupling of a pair of double quantum dot", Second International Symposium on Nanometer-Scale Quantum Physics (nanoPHYS'07), Tokyo, 2007. Jan
- 223. Masakazu Kaneko, "Superconductivity driven by double chains in Pr-based cuprate" International Symposium on Fusion Tech 2006-2007at Niigata, 2007. 01. 18.
- 224. Shinji Watanabe, "Observation of antiferromangetic nuclear resonace at CuO<sub>2</sub> plane site in superconducting Pr<sub>2</sub>Ba<sub>4</sub>Cu<sub>7</sub>O<sub>14.5</sub>" International Symposium on Fusion Tech 2006-2007at Niigata, 2007.01.18.
- 225. Y. Hirayama, "Quantum Computing Using III-V Nanotechnology", 34<sup>th</sup> Conf. on the Physics and Chemistry of Semiconductor Interfaces (PCSI-34) (invited), Salt Lake City, 2007. 1. 14-18
- 226. S. Tarucha, "Dynamical nuclear spin polarization induced by hyperfine mediated singlet-triplet transition in coupled quantum dots" 2007Aspen Winter Conference on Condensed Matter Physics (invited), 2007.1.14-20
- 227. S. Tarucha, "The Kondo effect for a semiconductor quantum dot with

superconducting contact leads" UBC-Tokyo Conference on Novel Quantum Matter PITP/AMPEL/University of Tokyo conference 2007.1.28-31

- 228. K. Ono, N. Ko, K. Takahashi, K. Kono, S. Tarucha, and H. Kosaka "Electrically detected indirect exciton photo-absorption in semiconductor double quantum dot" International Conference on Nanoelectronic, Nanostructures, and Carrier Interactions (NNCI2007), Atsugi, 2007. 2. 20-23
- 229. S. M. Huang, H. Akimoto, K. Kono, J. J. Lin, S. Tarucha, and K. Ono "Doublet-triplet spin selection rules in a excitation spectrum of vertical quantum dots" International Conference on Nanoelectronic, Nanostructures, and Carrier Interactions (NNCI2007), Atsugi, 2007. 2. 20-23
- 230. N. Ko, K. Takahashi, K. Kono, S. Tarucha, K. Ono "Reentrant behavior of singlet-triplet exchange energy proved by onset magnetic field of nuclear spin polarization" International Conference on Nanoelectronic, Nanostructures, and Carrier Interactions (NNCI2007), Atsugi, 2007.02.20-23
- 231. Y. Igarashi, M. Jung, M. Yamamoto, A. Oiwa, T. Machida, K. Hirakawa, and S. Tarucha "Large g-factor anisotropy observed for a single InAs self-assembled quantum dot" International Conference on Nanoelectronic, Nanostructures, and Carrier Interactions (NNCI2007), Atsugi, 2007.02.20-23
- 232. M. Yamamoto, M. Stopa, Y. Hirayama, Y. Tokura, and S. Tarucha "Direction Controlled Coulomb Drag in Coupled One-Dimensional Quantum Wires" International Conference on Nanoelectronic, Nanostructures, and Carrier Interactions (NNCI2007), Atsugi, 2007.02.20-23
- 233. T. Kodera, K. Ono, S. Amaha, Y. Tokura, and S. Tarucha "Inter-dot tunneling through two-electron states under the influence of environments" International Conference on Nanoelectronic, Nanostructures, and Carrier Interactions (NNCI2007), Atsugi, 2007.02.20-23
- 234. Y. Kitamura, J. Baugh, K. Ono, S. Tarucha "Determining Effective Nuclear Fields in Dynamically-Polarized Double Quantum Dots" International Conference on Nanoelectronic, Nanostructures, and Carrier Interactions (NNCI2007), Atsugi, 2007.02.20-23
- 235. Christo Buizert, Akira Oiwa, Kenji Shibata, Kazuhiko Hirakawa, Seigo Tarucha "Scaling behavior in the competition between superconductivity and the Kondo effect in a Quantum Dot" International Conference on Nanoelectronic, Nanostructures, and Carrier Interactions (NNCI2007), Atsugi, 2007.02.20-23
- 236. K. Ono, N. Ko, S. Toyokawa, K. Kono, and H. Kosaka "Photo-transport properties of zero-g-factor quantum well devices" International Conference on Nanoelectronic, Nanostructures, and Carrier Interactions (NNCI2007), Atsugi, 2007.02.20-23
- 237. Susumu Sasaki, "NMR observation of local magnetic field generated by nano-scale Magnet" International Conference on Nanoelectronic, Nanostructures, and Carrier Interactions (NNCI2007), Atsugi, 2007.02.20-23
- 238. H. Yamaguchi, H. Okamoto, S. Miyashita, and Y. Hirayama, "Piezovoltaic effects in a two-dimensional electron systemInternational Conference onNanoelectronics, Nanostructure, and Carrier Interaction (NNCI2007), Atsugi, 2007.2.22-23
- 239. K. Takami, T. Inoue, T. Tokizaki, S. Miyashita, H. Yamaguchi, Y. Hirayama, and H. Yokoyama, "Electronic properties of heterojunction transistor investigated

withscanningMaxwell-stressmicroscopy", InternationalConferenceonanoelectronic s, Nanostructure, and Carrier Interaction (NNCI2007), Atsugi, 2007.2.20-23

240. D. Fukuoka, N, Tanaka, T. Yamazaki, K. Oto, K. Muro, Y. Hirayama, and H.

Yamaguchi, "Observation of electron spin resonance and dynamic nuclear spin polarization in quantum Hall regime by a time-resolved Kerr rotation spectrosocpy", International Conference on Nanoelectronics, Nanostructure, and Carrier Interaction (NNCI2007), Atsugi, 2007.2.20-23

- 241. S. Sasaki, H. Tamura, S. Miyashita, T. Maruyama, T. Akazaki, Y. Hirayama, and H. Takayanagi, "Transport properties of an independently contacteddouble quantum dot-quantum wire coupled device", InternationalConference on Nanoelectronics, Nanostructures and Carrier Interaction (NNCI2007), Atsugi, 2007. 2. 20-23
- 242. T. Kobayashi, S. Tsuruta, S. Kang, S. Sasaki, H. Tamura, T. Fujisawa, Y. Tokura, and T. Akazaki, "Ballistic current injection into asemiconductor quantum dot", International Conference on Nanoelectronics, Nanostructures and Carrier Interaction (NNCI2007), Atsugi, 2007. 2. 20-23
- 243. T. Kobayashi, S. Tsuruta, S. Kang, S. Sasaki, H. Tamura, T. Fujisawa, Y. Tokura, and T. Akazaki, "Ballistic current injection into a semiconductor quantum dot", International Conference on Nanoelectronics, Nanostructures and Carrier Interaction (NNCI2007), Atsugi, 2007. 2. 20-23
- 244. Simon Perraud, Kiyoshi Kanisawa, Zhao-Zhong Wang, and Toshimasa Fujisawa, "Imaging the Percolation of Localized Electronic States in Semiconductor Quantum Wells", International Conference on Nanoelectronics, Nanostructures and Carrier Interaction (NNCI2007), Atsugi, 2007. 2. 20-23
- 245. Kiyoshi Kanisawa, Simon Perraud , Yoshiro Hirayama, and Toshimasa Fujisawa, "Correlation Between Densities of Two-Dimensionally Accumulated Electrons and Point Defects at the Epitaxial InAs(111)A Surface", International Conference on Nanoelectronics, Nanostructures and Carrier Interaction (NNCI2007), Atsugi, 2007. 2. 20-23
- 246. Kyoichi Suzuki, Camille Janer, Kiyoshi Kanisawa, Simon Perraud, Kei Takashina, and Toshimasa Fujisawa, "Dephasing in Electron Interference around InAs/GaSb Heterointerfaces" (Fr-06) International Conference on Nanoelectronics, Nanostructures and Carrier Interaction (NNCI2007), 2007. 2. 20-23
- 247. N. Kumada, K. Muraki, and Y. Hirayama, "Canted Antiferromagnetic Spin Order in a Bilayer nu=2 System Investigated by NMR", International Conference on Nanoelectronics, Nanostructures and Carrier Interaction (NNCI2007), Atsugi, 2007. 2. 20-23
- 248. 94. K. Takashina, V. Renard, Y. Niida, A. Fujiwara, Y. Hirayama and T. Fujisawa, "Temperature Dependent Resistivity of a Two-Dimensional Electron System in a Si02/Si/Si02 Quantum Well", International Conference on Nanoelectronics, Nanostructures and Carrier Interactions (NNCI2007), Atsugi, 2007. 2. 20-23
- 249. Y. Ono, J.-F. Morizur, K. Nishiguchi, K. Takashina, H. Yamaguchi, A. Fujiwara, K. Hiratsuka, S. Horiguchi, H. Inokawa and Y. Takahashi Hopping conduction in buried-channel SOI MOSFETs with shallow impurities International onference on Nanoelectronics, Nanostructures and Carrier Interactions (NNCI2007), Atsugi, 2007. 2. 20-23
- 250. T.Tokizaki and H.Yokoyama "Near-Field Spectroscopy of Two-Dimensional Electron Gas Systems in GaAs Single Heterostructures under Magnetic Fields", International Conference on Nanoelectronics, Nanostructures and Carrier Interactions (NNCI2007), Atsugi, 2007. 2. 20-23
- 251. S. Shinohara, S. K. Ozdemir, T. Yamamoto, M. Koashi, N. Imoto, "Quantum State Tomography of Phase and Amplitude Randomized Coherent States," Int. Conf. on Nanoelectronics, Nanostructures and Carrier Interactions (NNCI2007), Atsugi,

2007.2.20-23

- 252. S. K. Ozdemir, A. Miranowicz, T. Ota, G. Yusa, N. Imoto, Y. Hirayama, "NMR Quantum State Tomography Based on Longitudinal Magnetization Measurement," Int. Conf. on Nanoelectronics, Nanostructures and Carrier Interactions (NNCI2007), Atsugi, 2007. 2. 20-23
- 253. S. K. Ozdemir, "Measurement of Qubits in Photonic and NMR Systems," Int. Conf. on Nanoelectronics, Nanostructures and Carrier Interactions (NNCI2007), Atsugi, 2007. 2. 20-23
- 254. M. Yamamoto "Direction Controlled Coulomb Drag in Coupled One-Dimensional Quantum Wires" 2007 APS March Meeting, Denver, 2007.3.5-9
- Y. Zhang, L. DiCarlo, D. T. McClure, M. Yamamoto, S. Tarucha, C. M. Marcus, M. P. Hanson, A. C. Gossard "Tunable Noise Cross-Correlations in a Double Quantum Dot" 2007 APS March Meeting, Denver, 2007. 3. 5-9
- 256. T. Kodera, Y. Kitamura, K. Ono, S. Amaha, Y. Tokura, and S. Tarucha "Exchange energy in vertically coupled double quantum dots" 2007 APS March Meeting, Denver, 2007. 3. 5-9
- 257. K. Muraki "Low-frequency spin dynamics in a quantum Hall canted antiferromagnet"

A. 2007 APS March Meeting (invited), Denver, 2007.3.5-9

- 258. 104. N. Kumada, K. Muraki, and Y. Hirayama, "Spin Polarization of Bilayer nu=2 Quantum Hall States Probed by NMR" 2007 APS March Meeting, Denver, 2007. 3. 5-9
- 259. Yoshiro Hirayama, "Nuclear Spintronics in Semiconductor Hetero and Nanostructures", 3<sup>rd</sup> Nano and Giga Challenge in Electronics and Photonics (NGC2007) (plenary), Phoenix, 2007. 3. 12-16
- 260. Masanori Kudo, "Direct observation of local magnetic field produced by nanoscale magnet", 2007 Frontiers in Nanoscale Science and Technology Workshop (FNST2007), Tokyo, 2007. 03. 29-31
- 261. S. M. Huang, H. Akimoto, K. Kono, J. J. Lin, S. Tarucha, and K. Ono "The spin selection rules in a excitation spectrum of vertical quantum dots" 2007 Frontiers in Nanoscale Science and Technology workshop (FNST2007), Tokyo, 2007. 3. 29-31
- 262. N. Ko, K. Takahashi, K. Kono, S. Tarucha, K. Ono "Reentrant behavior of two-electron spin exchange energy proved by onset magnetic field of nuclear spin polarization" 2007 Frontiers in Nanoscale Science and Technology workshop (FNST2007), Tokyo, 2007. 3. 29-31
- 263. K. Takahashi, N. Ko, K. Kono, S. Tarucha, and H. Kosaka, and K. Ono "Electrically detected indirect exciton in semiconductor double quantum dot" 2007 Frontiers in Nanoscale Science and Technology workshop (FNST2007), Tokyo, 2007. 3. 29-31
- 264. K. Ono, K. Takahashi, N. Ko, K. Kono, Y. Hirayama, and S. Tarucha "Spin-singlet transient currents in Pauli-spin-blocked double quantum dots" 2007 Frontiers in Nanoscale Science and Technology workshop (FNST2007), Tokyo, 2007. 3. 29-31
- 265. Y. Igarashi, M. Jung, M. Yamamoto, A. Oiwa, T. Machida, K. Hirakawa, and S. Tarucha "Observation of strongly anisotropic g-factor for a single self-assembled InAs quantum dot" 2007 Frontiers in Nanoscale Science and Technology workshop (FNST2007), Tokyo, 2007. 3. 29-31
- 266. M. Yamamoto, M. Stopa, Y. Hirayama, Y. Tokura, and S. Tarucha "Direction Controlled Coulomb Drag in Coupled One-Dimensional Quantum Wires" 2007 Frontiers in Nanoscale Science and Technology workshop (FNST2007), Tokyo, 2007. 3. 29-31

- 267. T. Kodera, K. Ono, S. Amaha, Y. Tokura, and S. Tarucha "Zeeman-induced singlet-triplet transition in vertical double quantum dots" 2007 Frontiers in Nanoscale Science and Technology workshop (FNST2007), Tokyo, 2007. 3. 29-31
- 268. K. Hitachi, M. Pioro-Ladriere, C. Buizert, E. Totoki, A. Pioda, A. Oiwa, Y. Tokura, and S. Tarucha "Single electron spin resonance with a quantum dot under a dc current induced slanting Zeeman field" 2007 Frontiers in Nanoscale Science and Technology workshop (FNST2007), Tokyo, 2007. 3. 29-31
- 269. J. Baugh, Y. Kitamura, K. Ono, S. Tarucha "Large nuclear Overhauser fields observed in vertically-coupled GaAs double quantum dots" 2007 Frontiers in Nanoscale Science and Technology workshop (FNST2007), Tokyo, 2007. 3. 29-31
- 270. K. Zaitsu, Y. Kitamura, and S. Tarucha "Charge Read-out of a Vertical Quantum Dot" 2007 Frontiers in Nanoscale Science and Technology workshop (FNST2007), Tokyo, 2007. 3. 29-31
- 271. T. Kajiyama, A. Oiwa, C. Buizert, K. Yoshida, K. Hirakawa, and S. Tarucha "Spin-Dependent Electron Transport through Single Self-Assembled InAs Quantum Dot Coupled to Ferromagnetic Leads" 2007 Frontiers in Nanoscale Science and Technology workshop (FNST2007), Tokyo, p 2007. 3. 29-31
- 272. Christo Buizert, Akira Oiwa, Kenji Shibata, Kazuhiko Hirakawa, Seigo Tarucha "Scaling behavior in the competition between superconductivity and the Kondo effect in a Quantum Dot" 2007 Frontiers in Nanoscale Science and Technology workshop (FNST2007), Tokyo, 2007. 3. 29-31
- 273. Kiyoshi Kanisawa, "Imaging Donor States in Semiconductor Structures", 2007 Frontiers in Nanoscale Science and Technology workshop (FNST2007) (invited), Tokyo, 2007. 3. 29-31
- 274. S. Tarucha, "Kondo effect and spin correlation in single InAs self-assembled quantum dots with nanogap electrodes of normal, superconducting and ferromagnetic metal", Conference on Quantum Phenomena in Confined Dimensions (invited), イタリア トリエステ, 2007.06.04-08
- 275. S. Tarucha, "Electrical and Magnetic Control of Dynamical Nuclear Spin Polarization in Quantum Dots", SpintechIV (invited), アメリカ ハワイ, 200 7.06.17-22
- 276. Oiwa, C. Buizert, K. Shibata, K. Hirakawa, and S. Tarucha, "Competition between Kondo correlation and superconductivity in a single InAs quantum dot coupled to superconducting leads", Modulated Semiconductor Structures (MSS13), イタリア ジェノバ, 2007.07.15-20
- 277. S. Tarucha, "Self-assembled InAs quantum dot coupled to normal/superconducting/ferromagnetic contacts", International Symposium: SPIN&QUBIT2007 (invited), デンマーク コペンハーゲン, 2007.08.28.
- 278. S. Tarucha, "Physics and Technology for Solid-state Quantum Computing -Spin Qubits with Quantum Dots", IBM Day at UT (invited), 東京大学, 2007.09.12.
- 279. S. Tarucha, "Voltage driven single electron spin resonance and spin qubits with quantum dots", NEC Quantum Computing Workshop (invited), NEC Laboratories America, 米国 プリンストン, 2007.09.20-21.
- 280. S. Tarucha, "Electrical control of nuclear spin and electronic spin in quantum dots", International Symposium on Strongly-Correlated Applied Physics (invited), 東京, 2007.09.27-29
- 281. S. Tarucha, "Electrical control of electron spin and nclear spin in quantum dots", The 34th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS 2007) (invited), 京都, 2007.10.15-18
- 282. T. Kodera, K. Ono, S. Amaha, Y. Tokura, Y. Arakawa, and S. Tarucha, "Assignment

of influence of phonons and nuclei on resonant tunneling in vertical double quantum dots", The 34th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS 2007), 京都, 2007.10.15-18

- 283. S. Tarucha, "Electrical control of electronic spin and nuclear spin in quantum dots", The 3rd RIEC International Workshop on Spintronics Solid-State Quantum Information Technology -Spin, Photon and Superconductivit (invited), 仙台, 2007. 10. 31-11. 01
- 284. 樽茶清悟, "量子構造の基礎:量子ドットの電子状態の検出と制御",第36回薄 膜・表面物理基礎講座(2007)「量子構造の基礎から応用まで」(invited),東京 理科大学,2007.11.08-09
- 285. S. Tarucha, "Large dynamical nuclear spin polarization in GsAs double quantum dots", Yukawa International Seminar 2007(YKIS2007), Interaction and Nanostructural Effects in Low-Dimensional Systems, Yukawa Institute for Theoretical Physics (invited), 京都大学, 2007.11.12-20.
- 286. S. Tarucha, "Electrical Control of Electron Spin and Nuclear Spin in Quantum Dots", International Workshop on Electronic Coherence and Correlations (invited), 韓国 Pohang 工科大学, 2007.11.29-12.1
- 287. Susumu Sasaki, "Direct NMR Observation of Local Magnetic Field Generated by Microscopic Magnet", 量子情報研究センターセミナー, Waterloo 大学(カナダ), 2007.12.13
- 288. Yoshiro Hirayama "Nano-scale NMR Based on Resistance-Detection" (invited), 48th Experimental Nuclear Magnetic Resonance Conference (48th ENC) Daytona Beach, USA, April, 2007
- 289. Y. Hirayama "Quantum transport in silicon quantum wells and dots" (invited), Lorentz Center Workshop, Silicon Nanoelectronics Leiden, The Netherlands, May, 2007
- 290. Yoshiro Hirayama "Nuclear-spintronics in semiconductor nanostructures" (Keynotes) Trends in Nanotechnology (TNT) 2007 San Sebastian, Spain, September, 2007
- 291. Y. Niida, K. Takashina, A. Fujiwara, T. Fujisawa, and Y. Hirayama, "Spin resolved spectroscopy of upper subbands in two-dimensional electron systems by direct transport measurements" Int. Conf. on Solid State Devices and Materials (SSDM) 2007 Tsukuba, September, 2007
- 292. E. Y. Chang, H. Yamaguchi, Y. C. Lin, M. Ueki, Y. Hirayama, and C. Y. Chang (invited), "Groeth of InAs Channel HEMT Structure on Si substrate and It's Possible Application for Low Power Logic" Int. Conf. on Solid State Devices and Materials (SSDM) 2007 Tsukuba, September, 2007
- 293. T.Ota, N. Kumada, G. Yusa, S. Miyashita, T. Fujisawa, and Y. Hirayama, "Decoherence of nuclear spins in a GaAs quantum well probed by a submicron scale all-electrical NMR device" Int. Conf. on Solid State Devices and Materials (SSDM) 2007 Tsukuba, September, 2007
- 294. Go Yusa, Koji Muraki and Yoshiro Hirayama(invited), "Electrically controlled quantum coherences of nuclear spins in GaAs point contacts" The 34th Int. Symp. on Compound Semiconductors (ISCS2007) Kyoto, October, 2007
- 295. Go Yusa, Koji Muraki and Yoshiro Hirayama(invited), "Nuclear spin resonance induced by radio frequency electric field"The 34th Int. Symp. on Compound

Semiconductors (ISCS2007) Kyoto, October, 2007

- 296. Katsushi Hashimoto, "The 17<sup>h</sup> Int. Conf. on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems" (EP2DS-17), Genova, Italy, July 2007
- 297. Shinji Watanabe, "International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology" (ISANN2007), Waikaloa, Hawaii, December 2-7, 2007

[国内]

- 井元信之、「光を用いた量子情報処理」、第一回COEコヒーレント光科学セミナー、10月 28日、電気通信大学 (2003) [Invited]
- 2. 山本俊、井元信之、「エンタングルメントのデコヒーレンスと再構成」、物性研短期研 究会『短波長光などのコヒーレンスの生成・消滅に関する新しい知見と構想』、11月 14-15日、東京大学物性研究所 (2003) [Invited]
- 大野圭司、「量子ドット中の電子スピン・核スピン制御」、文部科学省科学研究費補助 金特定領域研究「半導体ナノスピントロニクス」平成15年度成果報告会、1月27-28日、 京都 (2004) [invited]
- 4. 井元信之、「量子情報処理と光学素子」、日本オプトメカトロニクス協会技術研修会、1 月23日、機械振興会館 (2004) [Invited]
- 5. 重藤知夫, 「デュアルプローブSNOMにおける探針の傾き角の微小変化の影響」, 2004 年春季第51回応用物理学会、3月29日、東京 (2004)
- 6. 藤澤利正、林稔晶、平山祥郎、S. W. Jung, Y. H. Jeong、「単一量子ドットおよび二 重量子ドットの電荷測定」、2004年春季第51回応用物理学会、3月29日、東京 (2004)
- 7. 山口浩司、都倉康弘、宮下宣、平山祥郎、「低次元電子系における量子効果を用いた高 感度メカニカル変位検出」、2004年春季第51回応用物理学会、3月30日、東京 (2004)
- 鈴木恭一、宮下宣、平山祥郎、N. Goel, J. Graham, J. C. Keay, M. B. Santos、「I n S b 系量子ポイントコンタクトの量子化コンダクタンス」、2004年春季第51回応用物 理学会、3月30日、東京 (2004)
- 9. Lionel Fabrice Houlet、山口浩司、平山祥郎、「AFMリソグラフィーを用いた I n A s のナノパターニング」、2004年春季第51回応用物理学会、3月29日、東京 (2004)
- 島村淳一、S. K. Ozdemir、森越文明、井元信之、「量子版ゲーム理論における多体間 エンタングルメントの性質」、 日本物理学会第59回年次大会、3月28日、福岡 (2004) 28pXG-4.
- 11. 川口晃、清水薫、都倉康弘、井元信之、「波動関数のテンソル積分解を用いた量子計 算機シミュレータ」、日本物理学会第59回年次大会、3月28日、福岡 (2004) 28pXG-5.
- 12. 小芦雅斗、Andreas Winter、「Monogamy of entanglement and other correlations」、 日本物理学会第59回年次大会、3月28日、福岡 (2004) 28pXG-6.
- 13. 大野圭司、「量子ドットにおける電子スピン・核スピン制御」、日本物理学会第59回年 次大会、3月28日、福岡 (2004) [invited]
- 14. 山口晋平,大野圭司, 樽茶清悟、「導体二重量子ドットにおける核スピンのコヒーレン ト制御」、日本物理学会第59回年次大会、3月29日、福岡 (2004)
- 15. 山口智弘,大野圭司,樽茶清悟,上村崇史,松本和彦熱、「CVD法により成長したサス ペンデッドカーボンナノチューブの低温伝導特性」、日本物理学会第59回年次大会、3 月29日、福岡 (2004)
- 16. 佐藤俊彦, 樽茶清悟, 宮澤俊之, 中田義昭, 臼杵達哉, 高津求, 横山直樹、「独自己形 成InAs量子ドットのトンネルスペクトロスコピー」、日本物理学会第59回年次大会、3 月30日、福岡 (2004)
- 17. 小寺哲夫, 佐々木智, W.G. van der Wiel, 山田和正, 佐藤俊彦, 丸山達朗, 太田剛, 樽茶清悟、「縦型横結合直列ドットのスタビリティダイアグラムとスピン効果」、日本

物理学会第59回年次大会、3月30日、福岡 (2004)

- 18. 羽田野剛司, M. Stopa, 山口智弘, 太田剛, 山田和正, 樽茶清悟、「縦型並列ダブルド ットのトンネル結合特性」、日本物理学会第59回年次大会、3月30日、福岡 (2004)
- 19. 西義史,山田和正,大野圭司,樽茶清悟、「半導体人工原子の励起スペクトルにおける ゼーマン効果」、日本物理学会第59回年次大会、3月30日、福岡 (2004)
- 20. 佐々木進,渡辺信嗣,平山祥郎、「GaAs基板のGa-,As-NMRスペクトルと緩和時間」、日本物理学会第59回年次大会、、3月29日、福岡 (2004)
- 21. 熊田倫雄、村木康二、橋本克之、平山祥郎、「2層量子ホール系における強相関ー弱相 関相転移による電子スピンー核スピン相互作用の変化」、日本物理学会第59回年次大会、 3月29日、福岡 (2004)
- 22. 鈴木恭一、高品圭、宮下宣、平山祥郎、「InAs/GaSbヘテロ構造の量子ホール効果
   -2DEGのQHEとネットキャリアのQHEの交錯-」、日本物理学会第59回年次大会、3月29日、福岡 (2004)
- 23. 山口浩司、都倉康弘、宮下宣、平山祥郎、「InAs/A1GaSbピエゾ抵抗カンチレバーにおける量子効果」、日本物理学会第59回年次大会、3月29日、福岡 (2004)
- 24. 林稔晶、藤澤利正、平山祥郎、「半導体量子ドットを用いた量子ビット、日本物理学会 第59回年次大会、3月28日、福岡 (2004) [Invited]
- 25. 高品圭、平山祥郎、藤原聡、高橋庸夫、「量子ホール領域におけるSIMOX MOSFETの温度 と磁場依存性」、日本物理学会第59回年次大会、3月28日、福岡 (2004)
- 26. 佐々木智、藤澤利正、林稔晶、平山祥郎、「横型量子ドットにおけるスピン緩和のパル ス測定」、日本物理学会第59回年次大会、3月30日、福岡 (2004)
- 27. 蟹澤聖、山口浩司、平山祥郎、「四面体InAsナノ構造における局所ポテンシャル分布の 低温STM測定」、日本物理学会第59回年次大会、3月30日、福岡 (2004)
- 28. 橋本克之、村木康二、熊田倫雄、佐久規、平山祥郎、「非対称ポテンシャルによる核ス ピン緩和速度の増大」、日本物理学会第59回年次大会、3月29日、福岡 (2004)
- 29. 樽茶清悟、「半導体量子ドットの電子スピン?核スピン結合制御」、東京工業大学21世紀 COEプログラム「量子ナノ物理学」第1回公開シンポジウム、3月17-18日、東京 (2004) [invited]
- 30. S. K. Ozdemir, "Playing quantum games in quantum settings," 第10回量子情報技術研究会(QIT10),学習院大学,25, 2004.5.24
- 島村淳一, S. K. Ozdemir, 森越文明, 井元信之 "Original classical games cannot be reproduced in their quantum version with W state," 第10回量子情報技術研 究会 (QIT10), 学習院大学, 151, 2004.5.24
- 32. 佐々木進,渡辺信嗣, "29Si核スピン・デコヒーレンス過程の直接観測",第10回量 子情報技術研究会 (QIT2004),学習院大学,2004.5.25
- 33. T. Kodera, W.G. van der Wiel, K. Ono, T. Maruyama, Y. Hirayama and S. Tarucha "Electron spin manipulation in semiconductor quantum dots", 量子情報未来デ ーマ開拓研究会、沖縄県知念村 ホテルサンライズ知念、2004.8.1
- 34. 井元信之"量子情報処理入門",第42回茅コンファレンス,宮城蔵王ロイヤルホテル,2004.8.22
- 35. 井元信之"光子を用いた量子情報処理",第42回茅コンファレンス,宮城蔵王ロイヤル ホテル,2004.8.23
- 36. 大野圭司、山口晋平、樽茶清悟、"量子ドットにおける電子スピン核スピン制御"、第 42回茅コンファレンス、宮城蔵王ロイヤルホテル、2004.8.22
- 37. 高橋明雄, "Manipulation of Electronic State in Multiple Gated Vertical Double Quantum Dots", 第42回茅コンファレンス, 宮城蔵王ロイヤルホテル, 2004.8.22
- 38. T. Kodera, W.G. van der Wiel, K. Ono, Y. Iwai, T. Maruyama, Y. Hirayama and S. Tarucha, "Electron-spin manipulation in semiconductor quantum dots", 第42回

茅コンファレンス,宮城蔵王ロイヤルホテル,2004.8.22

- 39. 熊田倫雄,村木康二,平山祥郎,"核スピンを用いた2層量子ホール系における電子ス ピン状態の観測",第42回茅コンファレンス,宮城蔵王ロイヤルホテル,2004.8.23
- 40. 平山祥郎, "量子ホール効果とスピン", 第42回茅コンファレンス, 宮城蔵王町ロイヤ ルホテル, 2004.8.24
- 41. 41. 遊佐剛,村木康二,橋本克之,平山祥郎,"ナノスケール分数量子ホールデバイスにおける核ス ピンのコヒーレント制御",応用物理学会,宮城県仙台市,2004.9.1
- 42. 時崎高志、小貫哲平、横山浩,"近接場光学顕微鏡によるメサ構造中2次元電子ガス系の観測" 日本物理学会2004年秋季大会,青森大学,12pXD-6, 2004.9.12
- 43. 渡辺信嗣,小野俊彦,星野友孝,増田雄一郎,山本繁,佐々木進,山田裕, "超伝導体 Pr2Ba4Cu7015のCu-NQR測定",日本物理学会2004年秋季大会,青森大学,2004.9.12
- 44. 遊佐剛,村木康二,橋本克之,平山祥郎, "分数量子ホールデバイスにおける電子-核 スピンを用いたナノ領域での核スピンのコヒーレント制御",日本物理学会2004年秋 季大会,青森大学,2004.9.12
- 45. 小野俊彦, 星野友孝, 渡辺信嗣, 佐々木進, 平山祥郎, "多重パルス列によるGa, As 核 スピンのT2", 日本物理学会2004年秋季大会, 青森大学, 2004.9.13
- 46. 星野友孝,渡辺信嗣,小野俊彦,佐々木進,阿部英介,伊藤公平,"多重パルス列によるSiの NMR測定",日本物理学会2004年秋季大会,青森大学,2004.9.13
- 47. 高品圭,平山祥郎,藤原聡,高橋庸夫,"シリコン二次元電子系のランダウ準位交差に おける抵抗スパイク",日本物理学会2004年秋季大会,青森大学,2004.9.13
- 48. 熊田倫雄,村木康二,平山祥郎,"核スピン緩和速度によって測定された2層系 v =1 量 子ホール状態における励起状態の電子密度差による変化",日本物理学会2004年秋季 大会,青森大学,2004.9.13
- 49. 村木康二,熊田倫雄,平山祥郎,"二重量子井戸における v=1/2量子ホール状態の総電 子密度・密度差依存性",日本物理学会2004年秋季大会,青森大学,2004.9.13
- 50. 高橋明雄,大野圭司, 樽茶清悟, "半導体縦型二重量子ドットにおける二重ゲートに よる電子状態の制御",日本物理学会2004年秋季大会,青森大学,2004.9.14
- 51. 51. 佐々木進,小野俊彦, 星野友孝,渡辺信嗣,山口隆,根本裕一,後藤輝孝, "カ ゴ状物質3Pd20Ge6のNMR測定,日本物理学会2004年秋季大会,青森大学,2004.9.14
- 52. 井元信之 "光による量子通信の実現性"電子情報通信学会シンポジウム「量子通信・ 量子計算の可能性と情報セキュリティへのインパクト」AT-4-1,徳島大学, 2004.9.23
- 53. 井元信之"量子情報通信研究の現状"電子情報通信学会チュートリアルシンポジウム 「量子暗号通信の最新状況とそれを支える光デバイス」CS-1-1,徳島大学, 2004.9.23
- 54. 井元信之"エンタングルメントと量子情報処理"岡山光量子科学研究所セミナー,岡山 理科大学,岡山,2004.9.24
- 55. 佐々木進, "核磁気共鳴の新しい展開---半導体中核スピンのコヒーレンス", 早稲田 大学理工学部大場・中里研セミナー, 早稲田大学理工学部, 2004.10.5
- 56. 井元信之"量子情報処理の現状と展望"奈良先端科学技術大学院大学セミナー,奈良先端科学技術大学院大学,生駒,2004.11.4
- 57. S. K. Ozdemir, 小芦雅斗, 井元信之, "Fragile watermarking of a qubit for access control," 第11回量子情報技術研究会 (QIT11), 京都, 66, 2004.12.6
- 58. 井元信之 "線形光学を用いた量子情報処理"量子情報処理シンポジウム,一橋記念講 堂,東京,2004.12.20
- 59. 平山祥郎, "Semiconductor Quantum Coherent Systems", 量子情報処理シンポジウム, 一橋記念講堂, 東京, 2004.12.20
- 60. 佐々木進, "T1 of La-NMR in clathrate compound La3Pd20Ge6", 科学研究費充填ス クッテルダイト研究会, 神戸大学瀧川記念ホール, 2005.1.6

- 61. 大野圭司, "量子ドットにおける核スピン制御", 第17回佐々木シンポジウム電子物性の新展開:ナノ構造,スピン,超伝導,東京大学弥生講堂, 2004.12.23
- 62. 井元信之"量子コンピューティングと物性科学"第54回分子科学フォーラム,分子科学 研究所,岡崎,2005.1.25
- 63. 重藤知夫, "デュアルプローブ近接場光学顕微鏡", 光関連研究者フォーラム, 産総研, つくば, 92005.2.28
- 64. 井元信之"量子情報処理に向けた光と物質の相互作用",第7回AMOS懇談会,東京大学 理学部化学本館,2005.3.13
- 65. 五十嵐 悠一,大野圭司,太田剛,中田義昭,宋海智,宮澤俊之,臼杵達哉,高津求, 横山直樹,樽茶清悟,"自己形成強結合InAsドットにおける電子g因子の測定とフント 則の観測",日本物理学会 第60回年次大会,東京理科大学野田キャパス,2005.3.24
- 66. 平山祥郎, 遊佐剛, 村木康二, "量子ホール系における核スピン制御", 日本物理学会 第60回年 次大会, 東京理科大学野田キャンパス, 2005. 3. 24
- 67. Hongwu Liu, Toshimasa Fujisawa, Toshiaki Hayashi, Yoshiro Hirayama, "Spin Blockade in theCotunneling Regime through a Double Quantum Dot",物理学会年次大会,野 田, 2005.3.24
- 68. 渡辺信嗣,小野俊彦,星野友孝,長井智,坂下忠,原田純二,佐々木進,山田裕, "超 伝導体 Pr2Ba4Cu7015Cu-NQR測定 II",日本物理学会 第60回年次大会,東 京理科 大学野田キャンパス,2005.3.25
- 69. 時崎高志、小貫哲平、横山浩, "近接場光学顕微鏡によるメサ構造中2次元電子ガス系の観測Ⅱ",日本物理学会 第60回年次大会,東京理科大学野田キャンパス,2005.3.26
- 70. 高橋明雄、大野圭司、西義史、平山祥郎、樽茶清悟、"量子ドットにおける核四重極相 互作用とコヒーレント制御"、日本物理学会第60回年次大会,東京理科大学野田キャ ンパス,2005.3.26
- 71. 佐々木進,坂下忠,長井智,小野俊彦,星野友孝,渡辺信嗣,平山祥郎,
   "GaAs-A10. 2Ga0. 8AsのA1-NMR",日本物理学会第60回年次大会,東京理科大学野田 キャンパス, 2005. 3. 26
- 72. 蟹澤 聖, Simon Perraud, 平山 祥郎, "InGaAs四面体ナノ構造中の局所状態密度分布の低温STM観察", 応物学会, さいたま市, 2005.3.29
- 73. S. Perraud, K. Kanisawa, Z. Z. Wang, and Y. Hirayama, "LT-STM characterization of electron standing waves at the MBE-grown InO.53GaO.47As/InP(111)A surface", 応物学会, さいたま市, 2005.3.29
- 74. 鈴木恭一, 蟹澤聖, 植木峰雄, 高品圭, 平山祥郎, "低温STM/STSによる電子-正孔共 存系InAs/GaSb 超格子バンド構造の観測", 応物学会, さいたま市, 2005.3.29
- 75. 富田律也,林稔晶,藤澤利正,平山祥郎,"二重量子ドット電荷状態の時間分解測定と エネルギー緩和",応物学会,さいたま市,2005.3.29
- 76. 井元 信之"量子情報通信の展望"第25回研究プロジェクト研究推進会議 研究討論 会, 東京都 東京大学生産技術研究所, 2005.4.18 (招待講演).
- 77. 佐々木 進, 渡辺 信嗣, 平山 祥郎 "反転パルスによる核スピンデコヒーレンスの制御" QIT12, NTT 物性科学基礎研究所, 2005.5.12.
- 78. Sahin Kaya Ozdemir, Adam Miranowicz, 小芦 雅斗, 井元 信之"Selective truncation of coherent state using projection synthesis" QIT12, NTT 物性科学基礎研究所, 2005.5.13.
- 79. 平山 祥郎, 遊佐 剛, 村木 康二 "半導体ナノデバイスにおける核スピンのコヒーレント制御"特定領域研究会「半導体ナノスピン」夏の研究会, 仙台, 2005.6.8 (招待講演).
- 80. 井元 信之"量子情報の神秘に迫る今日の光学技術"光波シンセシス研究会第10回研 究会「量子情報のための光波シンセシス」,東京都 東京大学生産技術研究所, 2005.6.24(招待講演).
- 81. 佐々木 進"Nuclear-Spintronics and Quantum Computation" 超域研究機構 物質科

学量子セミナー,新潟市 胎内パークホテル, 2005.9.1.

- 82. 渡辺 信嗣 "NMR Studies on the Electronic Properties of Superconducting Pr2Ba4Cu7013.5" 超域研究機構 物質科学量子セミナー,新潟市 胎内パークホテル, 2005.9.2.
- 83. 樽茶 清悟"量子スピンエレクトロニクスの現状" POST-ICMM 2004-分子磁性の新しい 動向を探る研究会-, 那須, 2005.9.5.
- 84. 高品 圭, 小野 行徳, 藤原 聡, 猪川 洋, 高橋 庸夫, 平山 祥郎 "SIMOX MOSFET にお ける谷分離の効果と制御"応用物理学会, 徳島, 2005.9.7.
- 85. 藤澤 利正,林 稔晶,富田 律也,平山 祥郎"二重量子ドットによる単一電子カウン ティング素子"応用物理学会,徳島,2005.9.7.
- 86. 鈴木 恭一, 蟹澤 聖, Simon Perraud, 植木 峰雄, 高品 圭, 平山 祥郎 "低温 STM/STS による InAs/GaSb 超格子における電子状態定在波の観測"応用物理学会, 徳島, 2005.9.11.
- 87. 林 稔晶,藤澤 利正,平山 祥郎"二重量子ドット中のエネルギー緩和機構"日本物理 学会 秋季大会,京都 同志社大学京田辺キャンパス, 2005.9.19.
- 88. 北村 陽介,大野 圭司,平山 祥郎, 樽茶 清悟"二重量子ドットにおけるパウリスオ インブロッケードの電気的制御" 日本物理学会 秋季大会,京都 同志社大学京田辺 キャンパス,2005.9.19.
- 89. 遊佐 剛, 熊田 倫雄, 村木 康二, 平山 祥郎 "GaAs ナノ構造における核スピンのデコ ヒーレンス機構" 日本物理学会 秋季大会, 京都 同志社大学京田辺キャンパス, 2005.9.19.
- 90. 佐々木 智, 姜 承求、北川 広野,山口 真澄,宮下 宣,丸山 達朗,田村 浩之,赤崎 達志,平山 祥郎,高柳 英明"2重量子ドットー量子細線結合系におけるファノー近藤 効果" 日本物理学会 秋季大会,京都 同志社大学京田辺キャンパス,2005.9.19.
- 91. 時崎 高志, 横山 浩 "磁場中におけるメサ構造中2次元電子ガス系の局所光学観測" 日本物理学会 秋季大会, 京都 同志社大学京田辺キャンパス, 2005.9.19.
- 92. 坂下 忠,長井 智,渡辺 信嗣,佐々木 進,田中 弘隆,平山 祥郎 "多重パルス列に よる Ga,As 核スピンの T2Ⅱ"日本物理学会 秋季大会,京都 同志社大学京田辺キャ ンパス,2005.9.19.
- 93. 坂下 忠,長井 智,渡辺 信嗣,佐々木 進,田中 弘隆,平山 祥郎 "多重パルス列に よる 29Si の NMR 測定 2" 日本物理学会 秋季大会,京都 同志社大学京田辺キャンパ ス,2005.9.19.
- 94. 北村 陽介,大野 圭司,平山 祥郎, 樽茶 清悟"二重量子ドットにおけるパウリスピ ンブロッケードの電気的制御" 日本物理学会 秋季大会,京都 同志社大学京田辺キ ャンパス, 2005.9.19.
- 95. 小寺 哲夫, 岩井 泰章, W. G. van der Wiel, 小幡 利顕, 羽田野 剛司, 樽茶 清悟 "縦 型横結合量子ドットにおける電荷検出" 日本物理学会 秋季大会, 京都 同志社大学 京田辺キャンパス, 2005.9.19.
- 96. 日達 研一,山本 倫久, 樽茶 清悟 "伝播モード可変量子細線中の量子ドットの電気伝 導"日本物理学会 秋季大会,京都 同志社大学京田辺キャンパス, 2005.9.19.
- 97. 山本 倫久, 樫服 亜矢, M. Stopa, 樽茶 清悟 "非対称結合量子細線における負のクー ロンドラッグ" 日本物理学会 秋季大会, 京都 同志社大学京田辺キャンパス, 2005.9.20.
- 98. 太田 剛, 遊佐 剛, 村木 康二, 熊田 倫雄, 宮下 宣, 平山 祥郎 "GaAs ナノデバイス を用いた v=2/3 分子量子ホール状態における NMR スペクトルの観測"日本物理学会 秋 季大会, 京都 同志社大学京田辺キャンパス, 2005.9.20.
- 99. 高品 圭, ブルン マークオレル, モード ダンカン,太田 剛,藤原 聡,小野 行徳,猪 川 洋,高橋 庸夫,平山 祥郎 "シリコン二次元電子系における占有率4の倍数に沿っ た抵抗のリッジ"日本物理学会 秋季大会,京都 同志社大学京田辺キャンパス, 2005.9.20.

- 100. 蟹澤 聖, 平山 祥郎"半導体ナノ構造の電子状態の低温 STM 観測"日本物理学会 秋季大会, 京都 同志社大学京田辺キャンパス, 2005.9.20.
- 101. 熊田 倫雄, 村木 康二, 平山 祥郎 "核スピンを用いた 2 層系 v=2canted antiferromangnet 状態における Goldstone mode の観測"日本物理学会 秋季大会, 京都 同志社大学京田辺キャンパス, 2005.9.20.
- 102. 渡辺 信嗣,長井 智,坂下 忠,原田 純仁,佐々木 進,山田 裕 "超伝導体 Pr2Ba4Cu7015-6のCu-NQR 測定Ⅲ"日本物理学会 秋季大会,京都 同志社大学京田辺 キャンパス,2005.9.20.
- 103. 長瀬 竜嗣,山本 俊,島村 淳一, Sahin Kaya Ozdemir,小芦 雅斗,井元 信之"相 関のある雑音下での光子 qubit 送信実験" 日本物理学会 秋季大会,京都 同志社大 学京田辺キャンパス, 2005.9.21.
- 104. Simon Perraud, 蟹澤 聖, Zhano Zhong Wang, 平山 祥郎 "LT-STM Study of the surface Fermi level position of MBE-grown InO. 53GaO. 47As On (011) and (111) A oriented InP s-ubstrates" 日本物理学会 秋季大会, 京都 同志社大学京田辺キャンパス, 2005.9.22.
- 105. 井元 信之"量子情報処理の原理と可能性"甲南大学量子ナノテクノロジー研究所 第1回シンポジウム,兵庫県 甲南大学 ,2005.10.1 (招待講演).
- 106. 平山 祥郎"Toward Semiconductor Qubits" CREST-FEMD シンポジウム, 東京, 2005.10.18.
- 107. 太田 剛, 遊佐 剛, 村木 康二, 熊田 倫雄, 宮下 宣, 平山 祥郎 "Initialization conditions and decoherence mechanisms of nuclear spins in nano-scale GaAs NMR device" CREST-FEMD シンポジウム, 東京, 2005.10.18.
- 108. 劉 洪武, 藤澤 利正, 林 稔晶, 平山 祥郎 "Pauli spin blockade in cotunneling transport through a double dot" CREST-FEMD シンポジウム, 東京, 2005.10.18.
- 109. 田嶌 俊之, Sahin Kaya Ozdemir, 並木 亮,山本 俊,小芦 雅斗,井元 信之 "光 の量子状態トモグラフィ(Tomography of optical quantum states)"第1回大阪大学 Σ・NICT 基礎先端部門連携公開シンポジウム 「情報通信技術の未来を切り拓く」,大 阪府 大阪大学中之島センター,2005.10.21.
- 110. 田嶌 俊之, Sahin Kaya Ozdemir, 並木 亮, 山本 俊, 小芦 雅斗, 井元 信之"量 子状態トモグラフィーのためのパルスホモダイン検出器の開発 (Constructing pulsed homodyne detector for quantum state tomography)"第 13 回量子情報技術研究会 (QIT13), 宮城県 東北大学, 2005.11.24.
- 111. 田嶌 俊之, Sahin Kaya Ozdemir, 並木 亮, 山本 俊, 小芦 雅斗, 井元 信之 "パ ルスホモダイン検出器を用いた量子状態トモグラフィ (Quantum state tomography using pulsed homodyne detector)" JST/CREST 量子情報領域ワークショップ, 神奈 川県足柄下郡 リゾーピア箱根, 2005.12.12.
- 長瀬 竜嗣,山本 俊,島村 淳一, Sahin Kaya Ozdemir,小芦 雅斗,井元 信之"相 関のある雑音下での光子 qubit 送信実験" JST/CREST 量子情報領域ワークショップ, 神奈川県足柄下郡 リゾーピア箱根, 2005.12.12.
- 113. Sahin Kaya Ozdemir, 島村 淳一, 井元 信之 "Classical games in quantum mechanical settings" JST/CREST 量子情報領域ワークショップ, 神奈川県足柄下郡 リゾーピア箱根, 2005.12.12.
- 114. 高柳 英明, 佐々木 智, 姜 承求, 宮下 宣, 丸山 達朗, 田村 浩之, 赤崎 達志, 平山 祥郎 "Manipulation and control of spins in I I I-V semiconductors by gated structures" 2006 RCIQE International Seminar, 北海道 北海道大学, 2006.2.9.
- 115. 太田 剛,遊佐 剛,熊田 倫雄,村木 康二,宮下 宣,平山 祥郎 "全電気的 GaAs 核スピン偏極デバイスにおける擬純粋状態の生成"応用物理学会 2006 春季,東京都 武蔵工業大学,2006.3.24.
- 116. 劉 洪武, 藤澤 利正, 小野 行徳, 藤原 聡, 猪川 洋, 平山 祥郎 "Resonant

tunneling between discrete energy levels in a silicon double quantum dot formed in a gated MOS transistor" 応用物理学会 2006 春季, 東京都 武蔵工業大学, 2006.3.24.

- 117. 藤澤 利正, 劉 洪武, W.J.M. Naber, W.G. van der Wiel "表面弾性波照射による二 重量子ドットの電子輸送特性"応用物理学会 2006 春季, 東京都 武蔵工業大学, 2006.3.24.
- 118. 新海 剛,藤澤 利正,林 稔晶,平山 祥郎 "静電的に結合した二組の二重量子ドットの共鳴トンネル特性"応用物理学会 2006 春季,東京都 武蔵工業大学, 2006.3.24.
- 119. 蟹澤 聖, Simon Perraud, 平山 祥郎 "InGaAs/GaAs(111)A 表面量子井戸中の局所状 態密度分布の低温 STM 観察"日本物理学会 年次大会,愛媛県 愛媛大学・松山大学, 2006.3.27.
- 120. 佐々木 進"半導体中核スピンのデコヒーレンス--物理的起源とキャリア依存性 ---"日本物理学会 年次大会,愛媛県 愛媛大学・松山大学,2006.3.27(招待講演).
- 121. 熊田 倫雄,村木 康二,平山 祥郎 "核スピンでみる半導体中二次元電子系:量子 ホール系におけるスピン状態" 日本物理学会 年次大会,愛媛県 愛媛大学・松山大 学,2006.3.27 (招待講演).
- 122. 鈴木 恭一, 蟹澤 聖, Simon Perraud, 植木 峰雄, 高品 圭, 平山 祥郎"低温 STM/STS による InAs/GaSb 超格子中の局所状態密度分布の層厚依存性" 日本物理学会 年次大 会, 愛媛県 愛媛大学・松山大学, 2006. 3. 27.
- 123. 大岩顕,元島勇太,栖川淳,十時詠吾,北村陽介,樽茶清悟 "GaAs 系量子ドットに おける近赤外光照射下での電気伝導特性"日本物理学会 年次大会,愛媛県 愛媛大 学・松山大学,2006.3.27.
- 124. 時崎 高志, 横山 浩 "メサ構造中2次元電子ガス系の強磁場中局所光学観測" 日本物理学会 年次大会, 愛媛県 愛媛大学・松山大学, 2006.3.27.
- 125. 時崎 高志, 横山 浩 "メサ構造中2次元電子ガス系の強磁場中局所光学観測" 日本物理学会 年次大会,愛媛県 愛媛大学・松山大学,2006.3.27.
- 126. Simon Perraud, 蟹澤 聖, Zhano Zhong Wang, 平山 祥郎 "LT-STS study of two-dimensional quantization in InO. 53GaO. 47As/InO. 52AlO. 48As heterostructures epitaxially grown on lattice-matched InP(111)A substrates" 日本物理学会 年 次大会,愛媛県 愛媛大学・松山大学, 2006. 3. 28.
- 127. 村木 康二, Huang-Ming Lee, Edward Yi Chang, 平山 祥郎 "縦結合二重量子細線 におけるクーロンドラッグの観測" 日本物理学会 年次大会, 愛媛県 愛媛大学・松 山大学, 2006.3.28.
- 128. 藤澤 利正,林 稔晶,富田 律也,平山 祥郎 "電荷測定による二重量子ドットの計数統計" 日本物理学会 年次大会,愛媛県 愛媛大学・松山大学,2006.3.29.
- 129. Sahin Kaya Ozdemir, 島村 淳一, 井元 信之 "Reproducibility of classical games in quantum mechanical settings" 日本物理学会 年次大会, 愛媛県 愛媛大学・松 山大学, 2006.3.29.
- 130. 栖川 淳,日達研一,樽茶清悟"量子ドットにおける単一電子緩和の時間的挙動" 日本物理学会 年次大会,愛媛県 愛媛大学・松山大学,2006.3.29.
- 131. 小寺哲夫,大野圭司,北村陽介,樽茶清悟"2重量子ドットスピンブロッケード条 件でのマイクロ波照射効果"日本物理学会 年次大会,愛媛県 愛媛大学・松山大学, 2006.3.29.
- 132. 山本 俊, 長瀬 竜嗣, 島村 淳一, Sahin Kaya Ozdemir, 小芦 雅斗, 井元 信之 "相 関のある雑音下での忠実な光子 qubit の送信実験" 日本物理学会 年次大会, 愛媛県 愛媛大学・松山大学, 2006.3.30.
- 133. 小寺哲夫,北村陽介,岩井泰章,大野圭司,樽茶清悟 「縦型半導体二重量子ドットにおける電荷検出および核磁場効果」ナノ光・電子デバイスシンポジウム ~量子ドットとフォトニック結晶~(2006.05.29.)
- 134. 小寺哲夫,北村陽介,岩井泰章,大野圭司,樽茶清悟 「半導体量子ドット中の電

荷・スピン状態操作」 COE-RA 研究(2006.05.30.)

- 135. 原田純二,「カゴ状物質 La<sub>3</sub>Pd<sub>20</sub>Ge<sub>6</sub>の NMR 測定,富山連携物性研究会」富山大学, (2006.09.04)
- 136. 渡辺信嗣,「微小磁石による局所磁場勾配の直接観察」第67回応用物理学会学術講 演会、草津市 (2006.8.29-9.1)
- 137. 原田純二,「カゴ状物質 La<sub>3</sub>Pd<sub>20</sub>Ge<sub>6</sub>の NMR 測定 II」第67 回応用物理学会学術講演会、 草津市 (2006.8.29-9.1)
- 138. 城秀典,秋山亨,中村浩次,蟹澤聖,伊藤智徳 「InAs stacking-fault tetrahedron の構造安定性に関する理論的検討」(29a-ZF-3) 第 67 回応用物理学会学術講演会、 草津市 (2006.9.29-9.1)
- 139. 眞田治樹、後藤秀樹、鎌田英彦、中野秀俊、安藤弘明、天明二郎「2 層量子ドット における励起子対の結合制御」第 67 回応用物理学術講演会、31p-RE-15、草津市 (2006.8.29-9.1)
- 140. 後藤秀樹、Shu-Wei Chang、Shun-Lien Chuang、岡本浩、柴田泰夫「Dot in Well 型 InAs 量子ドットを用いた 1.3・・m 帯での室温における Slowlight の観測」第67回 応用物理学術講演会、31p-RE-14、草津市,(2006.8.29-9.1)
- 141. Nicholas Cade, Hideki Gotoh, Hidehiko Kamada, Takehiko Tawara, Hiroshi Okamoto, Hidetoshi Nakano「On Demand Single Photon Emission at 1.3 •m from Individual InAs Quantum Dots」第 67 回応用物理学術講演会、31p-RE-13、草津市、(2006. 8. 29-9. 1)
- 142. 寒川哲臣、後藤秀樹、平山祥朗、佐久規、宮下宣、P. Santos、K. Ploog「表面弾 性波による動的変調 GaAs 量子井戸における次元性制御」第67回応用物理学術講演会、 31p-RE-10、草津市、(2006.8.29-9.1)
- 143. 後藤秀樹、赤坂哲也、俵毅彦、小林康之、牧本俊樹、中野秀俊「レーザ構造中の InGaN 量子井戸構造における局在励起子の発光特性」第67回応用物理学術講演会、30p-C-15、 (2006.8.29-9.1)
- 144. 舘野功太、眞田治樹、日比野浩樹、後藤秀樹、中野秀俊「Si (111) 基板上 GaP ナノ ワイヤ及びナノヘテロ構造の成長」第 67 回応用物理学術講演会、30p-RE-6、草津市、 (2006.8.29-9.1)
- 145. 中村篤志、大橋俊哉、山本兼司、青木徹、後藤秀樹、天明二郎「p型SiC基板を用 いた ZnCd0/MgZn0 EL 素子作製」」第 67 回応用物理学術講演会、31p-ZE-2、草津市、 (2006.8.29-9.1)
- 146. 山口貴雄、俵毅彦、後藤秀樹、鎌田英彦、中野秀俊、岡本浩、三上修「2 段階エッ (2006.8.29-9.1)
  - (ア) チングによるハイブリッド型微小共振器ピラー構造の作製」第67回応用物 理学術講演会、29p-ZD-4、草津市、(2006.8.29-9.1)
- 147. 蟹澤聖, Simon Perraud, 平山祥郎 'GaAs(111)A 基板上に形成した InGaAs/InAlAs 表面 QW 中の 2DEG の低温 STM 観察' (1a-RE-3) 第 67 回応用物理学会学術講演会、草津 市 (2006.8.29-9.1)
- 148. Simon Perraud, 蟹澤聖, Zhao-Zhong Wang, 平山祥郎 'Observation of shallow impurity states in semiconductor quantum well structures by low-temperature scanning tunneling spectroscopy'第 67 回応用物理学会学術講演会、(1a-RE-5) 草 津市 (2006.8.29-9.1)
- 149. 平山祥郎 「核スピンが関連したスピントロニクス」第 67 回応用物理学会学術講 演会 30p-ZK-2、シンポジウム講演(招待講演)、草津市 (2006.8.29-9.1)
- 150. Y. Ono, J.-F. Morizur, K. Nishiguchi, K. Takashina, H. Yamaguchi, S. Horiguchi and Y. Takahashi 「Impurity conduction in phosphorus doped SOI MOSFETs」第67 回応用物理学会学術講演会、草津市(2006.8.29-9.1)
- 151. 伊藤哲、志智亘、森定慎介、市田正夫、後藤秀樹、鎌田英彦、安藤弘明「GaAs および InGaAs 量子井戸における電子g因子(I)―実験―」第67回応用物理学術講演会、 (1a-RE-7)草津市(2006.8.29-9.1)

- 152. 志智亘、伊藤哲、森定慎介、市田正夫、後藤秀樹、鎌田英彦、安藤弘明「GaAs および InGaAs 量子井戸における電子g因子(II)一計算一」第67回応用物理学術講演会、 (1a-RE-8) 草津市(2006.8.29-9.1)
- 153. 大野圭司,黄日華、河野公俊、平山祥郎、樽茶清悟 「量子ドットにおけるパウリ スピンブロッケードとスピン1重項過渡電流」日本物理学会2006年秋季大会、千 葉市、(2006.9.23-26)
- 154. 五十嵐悠一, Minkyung Jung, 山本倫久, 大岩顕, 町田友樹, 平川一彦, 樽茶清悟「ナ ノギャップ電極間の InAs ドットにおける近藤効果の観測」 日本物理学会 2006年 秋季大会、千葉市(2006.9.23-26)
- 155. 山本倫久,都木宏之, M. Stopa, 樽茶清悟 「結合量子細線における整流ドラッグ 効果」 日本物理学会2006年秋季大会、千葉市(2006.9.23-26)
- 156. 北村陽介,小寺哲夫,大野圭司, 樽茶清悟 「縦型二重量子ドットにおけるスピン 一重項- 三重項のミキシング制御」 日本物理学会 2006年秋季大会、千葉市 (2006.9.23-26)
- 157. 山口 浩司・岡本 創・宮下 宣・平山 祥郎 「GaAs/AlGaAs 二次元電子系にお けるピエゾ電圧効果」 日本物理学会 2006 年秋季大会、千葉市 (2006.9.23-26)
- 158. 鈴木恭一, 蟹澤聖, Simon Perraud, 植木峰雄, 高品圭, 平山祥郎 「低温 STM/STS による半導体ヘテロ界面における入射・反射電子波の干渉観察」日本物理学会 2006 年 秋期大会、(24aXL-4)、千葉市(2006.9.23-26)
- 159. 新見康洋, 蟹澤聖, 小島治樹, 神原浩, 平山祥郎, 樽茶清悟, 福山寛 「エピタキ シャル成長させた InAs 薄膜上のトンネル分光測定」日本物理学会 2006 年秋期大会、 (24aXL-13)、千葉市(2006.9.23-26)
- 160. 熊田倫雄、村木康二、平山祥郎 「ナイトシフトによる 2 層量子ホール系の電子ス ピン偏極率測定」 日本物理学会 2006 年秋期大会、千葉市(2006.9.23-26)
- 161. 山本俊、Sahin Kaya Ozdemir、小芦雅斗、 井元信之「量子もつれ光子対の蒸留」 日本光学会年次学術講演会・日本分光学会秋季講演会 Optics & Photonics Japan 学 術総合センター(一橋記念講堂) (2006.11.08)
- 162. A.Miranowicz, S. K. Özdemir, M. Koashi, and N. Imoto, [Optical state engineering and teleportation using multiport interferometry] 15th Quantum Information Technology Symposium (QIT15), Kyoto, Japan, November. (2006. 11. 21-22)
- 163. 藤澤利正、「二重量子ドットの単一電子トンネル計数統計」、第 19 回佐々木学術講 演会、東京(2006.12)
- 164. K. Hayashi, T. Yamamoto, S. K. Ozdemir, M. Koashi, and N. Imoto, 「Faithful photonic qubit transmission through a single polarization maintaining fiber」 JST/CREST quantum optics and information workshop, Hakone, (2006.12.14)
- 165. S. Shinohara, S. K. Ozdemir, T. Yamamoto, M. Koashi, and N. Imoto, [Experimantal study on pulsed homodyne detector for quantum state tomography] JST/CREST quantum optics and information workshop, Hakone, (2006.12.14)
- 166. 大野圭司,黄日華、高橋宏輔、河野公俊、樽茶清悟、小坂英男 「量子ドットにおける電圧依存光吸収の電気的観測」 JST/CREST 量子情報ワークショップ (2006.12.11-15)
- 167. 熊田倫雄、村木康二、平山祥郎「 NMR による 2 層系 v = 2 における量子ホール磁性の観測」物性研究所短期研究会(PASPS11), 柏(2006.12.15)
- 168. 佐々木進 「微小磁石が作る局所磁場の高感度 NMR による直接観察」物性研究所短期研究会 (PASPS11),柏 (2006.12.15)
- 169. 佐々木進 「La<sub>3</sub>Pd<sub>20</sub>Ge<sub>6</sub>における内包原子の T<sub>2</sub>異常」科研費スクッテルダイト特定 領域研究会,(2007.01.09)
- 170. 佐々木進 「NMR と量子コンピューター」科研費特別推進研究会,新潟大学物質科 学量子センター(新潟市)(2007.01.26.)
- 171. 佐々木進 「La<sub>3</sub>Pd<sub>20</sub>Ge<sub>6</sub>の T<sub>2</sub>と量子計算への展開」科研費スクッテルダイト特定領 域理論班研究会,(2007.03.02.)
- 172. 佐々木進 「カゴ状化合物La<sub>3</sub>Pd<sub>20</sub>Ge<sub>6</sub>の核磁気共鳴」日本物理学会 2007 年春季大会、 鹿児島 (2007. 3. 18-21)
- 173. 大野圭司、 黄日華、 高橋宏輔、 河野公俊、 樽茶清悟、小坂英男 「縦型2重量 子ドットにおける間接励起子の電気的検出」 日本物理学会 2007 年春季大会、鹿児島 (2007.3.18-21)
- 174. 黄日華、高橋宏輔、河野公俊、樽茶清悟、大野圭司 "オフセット可変2重量子ド ットにおけるピンブロッケードと核スピン効果" 日本物理学会 2007 年春季大会、鹿 児島 (2007.3.18-21)
- 175. 五十嵐悠一, Minkyung Jung, 山本倫久, 大岩顕, 町田友樹, 平川一彦, 樽茶清悟「ナ ノギャップ電極間の InAs ドットにおける g 因子の角度依存性の観測」 日本物理学会 2007 年春季大会、鹿児島 (2007.3.18-21)
- 176. 北村陽介, Jonathan Baugh, 大野圭司, 大岩顕, 樽茶清悟 「縦型二重量子ドット を用いた動的核スピン偏極率の測定」 日本物理学会 2007 年春季大会、鹿児島 (2007.3.18-21)
- 177. 相馬章宏,北村陽介,小寺哲夫,大岩顕,大野圭司,樽茶清悟 「縦型二重量子ド ットにおけるスピンブロッケード緩和時間測定」 日本物理学会 2007 年春季大会、鹿 児島 (2007.3.18-21)
- 178. 日達研一,十時詠吾, M. Pioro-Ladriere, A. Pioda,大岩顕,都倉康弘, 樽茶清 悟「スピン軌道相互作用および傾斜磁場を利用した単一量子ドットにおける電子スピ ン共鳴」 日本物理学会 2007 年春季大会、鹿児島 (2007.3.18-21)
- 179. Christo Buizert, Akira Oiwa, Kenji Shibata, Kazuhiko Hirakawa, Seigo Tarucha 「Scaling behavior in the competition between superconductivity and the Kondo effect in a Quantum Dot」 日本物理学会 2007 年春季大会、鹿児島 (2007.3.18-21)
- 180. T. Kodera, K. Ono, S. Amaha, Y. Tokura, and S. Tarucha 「Quantitative estimation of the exchange energy in vertical double quantum dots」 公開シンポジウム「ナ ノ光電子デバイスと量子情報エレクトロニクス」日本物理学会 2007 年春季大会、鹿児 島 (2007.3.18-21
- 181. 佐々木智、田村浩之、宮下宣、丸山達朗、赤崎達志、平山祥郎、高柳英明、「独立 コンタクトを有する2重量子ドットー量子細線結合系の電気伝導特性」日本物理学会 2007 年春季大会、鹿児島(2007.3.18-21)
- 182. 小寺哲夫,北村陽介,大野圭司,天羽真一,都倉康弘,樽茶清悟 「縦型二重量子 ドットにおける交換エネルギー」 日本物理学会 2007 年春季大会、鹿児島 (2007.3.18-21)
- 183. 小林俊之、鶴田尚英、姜承求、佐々木智、田村浩之、藤澤利正、都倉康弘、赤崎達志、「電子フォーカシングにより電流注入された量子ドットの伝導特性」日本物理学会2007年春季大会、鹿児島 (2007.3.18-21)
- 184. 新海 剛,林稔晶,藤澤利正、「ベクトル磁場印加による少数電子系の量子ドットの 軌道とスピン分裂の測定」日本物理学会 2007 年春季大会、鹿児島 (2007.3.18-21)
- 185. 蟹澤聖, Simon Perraud, 平山祥郎,藤澤利正 「MBE 成長した InAs (111) A 表面にお けるドナー型欠陥と二次元電子蓄積層'」日本物理学会 2007 年春季大会 (18aTG-6)、 鹿児島 (2007.3.18-21)
- 186. 鈴木恭一, Camille Janer, 蟹澤聖, Simon Perraud, 植木峰雄, 高品圭, 平山祥郎, 藤澤利正 「低温 STS による InAs/GaSb 二重量子井戸中の局所状態密度分布の観測」日本物理学会 2007 春期大会 (18pTA-12)、鹿児島市 (2007.3.18-21)
- 187. Simon Perraud, 蟹澤聖, Zhao-Zhong Wang, 藤澤利正 「Observation of percolation transition from localized to extended states in semiconductor quantum-well structures」 (18pTA-13) 日本物理学会 2007 春期大会 (18pTA-13)、鹿児島市 (2007.3.18-21)

188. 熊田倫雄、村木康二、平山祥郎 「2 層系 v =2 強磁性状態におけるスピンテクスチャ」 日本物理学会 2007 春期大会,鹿児島(2007.3.18-21)

- 189. 山本俊、林浩大、S. K. Ozdemir、小芦雅斗、井元信之「補助光子を使った量子情報 通信実験」日本物理学会 2007 春期大会, 鹿児島(2007.3.18-21)
- 190. K. Takashina, V. Renard, Y. Niida, A. Fujiwara, Y. Hirayama and T. Fujisawa 「Temperature Dependent Resistivity of a Two-Dimensional Electron System in a Si02/Si/Si02 Quantum Well」日本物理学会 2007 春期大会, 鹿児島 (2007.3.18-21)
- 191. 林 稔晶,藤澤 利正「パルス電圧を用いた制御エレクトロマイグレーション」第 54回応用物理学関係連合講演会,青山学院大学相模原キャンパス,(2006.3.27-30)
- 192. 重藤知夫(産総研)「デュアルプローブ SNOM 集光探針信号の評価」 第 54 回応用物 理学関係連合講演会,青山学院大学相模原キャンパス,(2006.3.27-30)
- 193. 大野圭司,黄日華、黄旭明、河野公俊、樽茶清悟、「量子ドットにおけるスピン 選択則と電気伝導」 ナノ学会第5回大会(招待講演)、 つくば国際会議場 (2007.05.21-26)
- 194. 五十嵐悠一,中岡俊裕,渡邉克之,山本倫久,大岩顕,荒川泰彦,樽茶清悟、「2 次元チャネルによる InAs 自己形成ドットのコンダクタンススペクトロスコピー」 日 本物理学会、 北海道大学 (2007.09.21-24)
- 195. 山本倫久, Yiming Zhang, Leonard DiCarlo, Douglas McClure, Charles Marcus, Micah Hanson, Art Gossard, 樽茶清悟、「量子ドットにおける多準位伝導と電流雑音 相関」 日本物理学会、北海道大学 (2007.09.21-24)
- 196. Pioda, E. Totoki, T. Asayama, A. Oiwa, S. Tarucha、「Photon polarization to electron spin conversion: Detection scheme, devices and experimental status」 日本物理学会、北海道大学 (2007.09.21-24)
- 197. 十時詠吾, Alessandro Pioda, 浅山徹哉, 大岩顕, 樽茶清悟、「量子ポイントコン タクトによる光励起電荷検出の安定性」 日本物理学会、北海道大学 (2007.09.21-24)
- 198. 樽茶清悟、「固体量子情報物性の現状と展望」 ナノ量子情報エレクトロニクスシンポジウム(招待講演)、東京 (2007.10.24-25)
- 199. 樽茶清悟、「電子の量子性を操る」 第 20 回(最終回) 佐々木シンポジウム(招待 講演)、東京大学 山上会館(2007.12.21-22)
- 200. 日達 研一、井上 敦文、大岩 顕、樽茶 清悟、「単一量子ドット中の電子占有 率における負性微分抵抗」 日本物理学会、近畿大学 (2008.03.22-26)
- 201. 李相潤, ミシェルーピオロラドリエル, 吉田勝治,小幡利顕, 申潤錫, 谷山智康, 勝本 信吾, 樽茶清悟、「電子フォーカシングを用いた Stern-Gerlach 効果の観測」 日本物 理学会、近畿大学 (2008.03.22-26)
- 202. 大野圭司,黄旭明,秋元彦太,河野公俊,都倉康弘,平山祥郎,樽茶清悟、「異なるg因子をもつ2重量子ドットにおけるスピン依存共鳴トンネル」 日本物理学会、近畿大学 (2008.03.22-26)
- 203. 高橋宏輔,高橋諒,河野公俊,樽茶清悟,小坂英男,大野圭司、「縦型量子ドット における光生成キャリアの電気的検出」 日本物理学会、近畿大学 (2008.03.22-26)
- 204. 小寺哲夫、都木宏之、熊谷直人、渡邊克之、天羽真一、中岡俊裕、樽茶清悟、荒川 泰彦、「1.3μm 帯光伝導測定による g 因子の見積もり」 日本物理学会、近畿大学 (2008.03.22-26)
- 205. 大岩顕、A. Pioda、十時詠吾、浅山徹哉、樽茶清悟、「電荷検出器を備えた横型量 子ドットにおける微弱光応答実験」 日本物理学会、近畿大学 (2008.03.22-26)
- 206. R.S. Deacon, A. Oiwa, Y. Kanai, R. Yoshida and S. Tarucha、「Electrical transport in single InAs quantum dots coupled to ferromagnetic electrodes」 日本物理学会、近畿大学 (2008.03.22-26)
- 207. 重藤知夫、「デュアルプローブ SNOM 集光探針信号と試料表面形状」 第55回 応用

物理学関係連合講演会 (2008.3.29)

- 208. 井上 貴仁 、藤田 泰之、高見 和宏、時崎 高志、横山 浩、「走査型マクスウェル 応力顕微鏡による表面電気物性計測」 第7 回メゾテクノロジーフォーラム (2008.2.29)
- 209. 佐々木 進、「カゴの中の La 核スピンの NMR 異常」 理研セミナー(招待講演)、 理化学研究所 埼玉県和光市 (2007.06.22)
- 210. 佐藤真哉,金子雅一,工藤将倫,佐々木進,平山祥郎、「GaAs 基板における NMR スペクトルの四重極分離」 日本物理学会、 北海道大学 北海道札幌市 (2007.09.21)
- 211. 佐々木進,金子 雅一,佐々木 賢史,松下能孝,D. Andreas,北澤英明,小林陽 樹,根本祐一,後藤輝孝、「La-NMR による La3Pd20X6(X=Ge,Si)のラットリング」 研 究会「ラットリングが誘起する新物性」、広島大学大学院先端物質科学研究科 広島県 東広島市 (2008.03.2)
- 212. 渡辺信嗣、高道洋行、五十嵐玄、橋本克之、熊田倫雄、平山祥郎、「不均一なゼーマン磁場中におけるスカーミオンによる核スピン緩和」 ニホン物理学会、近畿大学東大阪 (2008. 3.22-26)
- 213. 小笠原良晃、福田昭、岩田一樹、関川貴史、新井敏一、江澤潤一、熊田倫雄、平山 祥郎、澤田安樹、「電子密度差のある2層系v=1量子ホール状態における2層独立化と 磁気抵抗異常」 日本物理学会、近畿大学 東大阪 (2008. 3.22-26)
- 214. 大野圭司、黄旭明、秋元彦太、河野公俊、都倉康弘、平山祥郎、樽茶清悟、「異なるg因子をもつ2重量子ドットにおけるスピン依存共鳴トンネル」 日本物理学会、 近畿大学 東大阪 (2008. 3.22-26)

(3)特許出願(SORST研究の成果に関わる特許(出願人がJST以外のものを含む))

	件数
国内出願	3
海外出願	0
計	3

- 2. 遊佐 剛、平山祥郎、「多量子ビット化装置、多量子ビット化方法、多量 子ビット情報処理装置、多量子ビット情報処理方法」、特願 2004-321930
- 3. 熊田倫雄,遊佐剛,平山祥郎 「原子核スピン間の相関強度制御方法」、 日本電信電話株式会社、平成17年8月18日.

(4) その他特記事項

 報道発表
2005年4月20日 報道発表「核スピン量子コンピュータに向けた核スピンの精密 制御に成功」
日経産業、日刊工業(4月21日)、朝日新聞(5月2日)などに掲載
2006年6月15日 報道発表「単電子電流計」
朝日新聞、日本経済新聞、日刊工業新聞(6月16日)などに掲載

## ○国際会議の開催

International Conference on Nanoelectronics, Nanostructures and Carrier Interactions (NNCI)を2005年と2007年にNTT物性科学基礎研究所と共同で開催。

内外から150名近い参加者(SORSTからは約25人)を集めて成功裏に終了。



図68 2005年ならびに 2007年に開催された国際会 議NNCI2005、NNCI2007のロ ゴならびにNNCI2005の集合 写真。

## 9. 結び

当初の目標から比較すると量子ビットを集積化してエンタングルさせると言う点では足り ないところがあったが、電荷量子ビット、電子スピン量子ビット、核スピン量子ビットで それぞれに世界を代表する研究を推進することができた。また、核スピンを用いた基礎物 性や低次元電子状態のナノプローブ測定でもインパクトのある研究を推進することができ、 全体として合格点を与えられる成果が得られたと自己評価している。チーム間の共同研究 という意味では時崎グループとオズデミールグループが少し他のグループから離れてしま った感があった。しかし、時崎グループとNTTはナノスケールメカニカル構造を用いて SMM による本格的な高速測定に入ったところであり、オズデミールグループと東北・NTT グルー プは共同で提案した量子トモグラフィのナノスケール核スピンデバイスによる実証実験を 進めようと計画を立てている最中である。いずれも、あと1年あればもう少し共同研究の 成果が見えてくると考えられ、SORST 終了後もどちらの研究も継続して進める予定である。 面白い成果が出てくることを期待したい。また、東大の山本氏や阪大のオズデミール氏を サブグループのリーダにすることで若手研究者の育成にも貢献できたと考えているし、遊 佐氏、熊田氏をはじめ多くの若手研究者がこのプロジェクトで大活躍してくれたことも嬉 しいことである。

最後に、プロジェクト全般にわたりご指導頂いた三谷先生、予算の執行や運営に関して大変な手助けをして頂いた、JST 事務所の三上技術参事、宮田事務参事に深い感謝の意を表したい。また、縁の下で SORST プロジェクトを支えて頂いた吉田さん、長谷川さん、笹谷さん、イートンさんにもお礼を申し上げたい。

おかげさまで SORST プロジェクトでは常に楽しい暖かい雰囲気で研究を進めることができた。最後に、本 SORST の代表グループである NTT グループと東北グループの集合写真を載せる。プロジェクトの雰囲気が伝われば幸いである。



図69 NTTグループの 集合写真(2005年11月 頃)。



**図70** 東北グループの 集合写真(2007年10月頃)。