

「電子・光子等の機能制御」
平成10年度採択研究代表者

平山 祥郎

(NTT物性科学基礎研究所 量子物性研究部部長)

「相関エレクトロニクス」

1. 研究実施の概要

半導体薄膜構造およびナノ構造におけるキャリア相関は物性物理として大変面白いのみならず、量子コヒーレント制御や超流動現象、さらには半導体をベースにした量子コンピュータに繋がる可能性から大きな期待がもたれている。相関エレクトロニクスプロジェクトでは、半導体中でのキャリア相関が工学的にも役立つ画期的な効果を生み出す可能性を探るために、高品質半導体構造を用いて半導体中でのキャリア相関現象を追究してきた。具体的には、薄膜構造での強いキャリア相関や結合したドット間のキャリア相関を利用した量子ビットなどを目指した。H14年度は核スピンの相互作用の解明、電子スピンのコヒーレント制御の基礎となる二次元電子系の電子スピン共鳴 (ESR) 測定、超格子構造中のキャリアのブロッホ振動特性、量子ドットのキャリアダイナミクス測定に大きな進展があり、さらに世界最初の半導体電荷量子ビットの実現に成功した。また、キャリア特性のナノプローブ評価、光子によるエンタングルメント基礎実験でも大きな成果が得られた。これらの成果は半導体中でのキャリア相関、特にその量子コヒーレント制御が将来の新しい半導体技術、量子情報処理技術として大きな可能性を持っていることを示している。

2. 研究実施内容

H14年度は半導体ナノ構造のキャリア相関を中心に量子コヒーレント制御さらには量子コンピュータに繋がるインパクトの大きな成果が得られた。以下に薄膜構造のキャリア相関、ナノ構造のキャリア相関、ナノプローブ、量子情報処理に分けてH14年度に得られた主な成果を紹介する。

2. 1. 薄膜構造におけるキャリア相関

2. 1. 1. 半導体ヘテロ構造におけるキャリア相関

強いキャリア相関が確認された半導体二層二次元系において、異なる量子ホール状態が交差する場合のキャリア

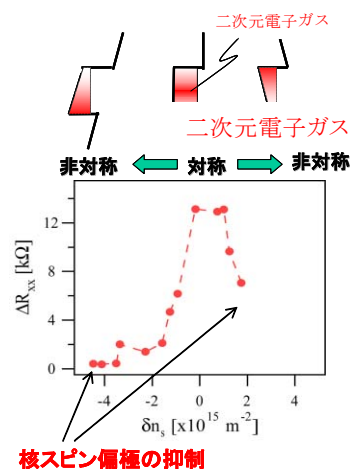


図1 核スピン偏極に基づく $\nu=2/3$ における抵抗増大の閉じ込めポテンシャルによる変化。 $\delta n_s=0$ が対称な閉じ込めを意味している。

関連の詳細を調べた。また、二層系のキャリア相関研究をより発展させるために検討してきた、集束イオンビーム注入による局所的なバックゲートを用いた独立コンタクトの形成がうまく動作することを確認した。さらに、一層系でも異なる量子ホール状態の交差が生じる分数量子ホール状態（特にランダウ充填率 $2/3$ ）において、電子スピンと核スピンの相互作用を引き続き研究した。H14年度は核スピンを用いた量子コヒーレントデバイスに有望な全電氣的な核スピン操作の可能性を示すとともに、核スピン-電子スピン相関が二次元電子系のスピン状態のわずかな変化に敏感であり、通常GaAs系では弱いとされている閉じ込めポテンシャルの対称性によるスピン・軌道相互作用の小さな変化が核スピンの偏極には大きな影響を与えることを明らかにした。図1の実験結果は閉じ込めポテンシャルが大きく非対称な場合、核スピン偏極が生じないことを示している。

2.1.2. 二次元電子系の電子スピン共鳴 (ESR)

ESRは電子の周りの局所的状態を敏感に反映するため、個々のドットの電子スピンのアクセスするための手法となり、量子ビットの電子スピンを用いた量子コンピュータに向けた基本的な研究である。また、ESRスペクトルは、超微細結合を介して、核スピンの偏極状態を反映するので、核スピン-電子スピン相互作用の知見を得るためにも有用な手法である。今回、4Heクライオスタットに共振器型ESR装置（10-30GHz対応）を組み込んだ。これを用いて、n-AlGaAs/GaAs中の二次元電子系が、電子充填率 $\nu=3$ の整数量子ホール状態にある場合について実験した。ESR共鳴ピークが明瞭に観測され、この特性から、g因子の磁場依存性を明らかにした（図2）。また、共鳴ピークの明瞭なOverhauser shift を観測し、これをもとに、核スピンの縦緩和時間を求めることができた。従来の同様な測定では、緩和時間は800秒程度とされていたが、今回の実験では、800秒と200秒の2重の緩和が観測された。これは、異なる核種（例えば、GaとAs）に関係するものと考えられる（図3）。

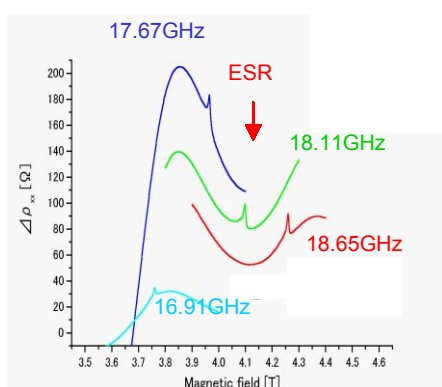


図2 縦抵抗の変化分で測定したESRピーク。

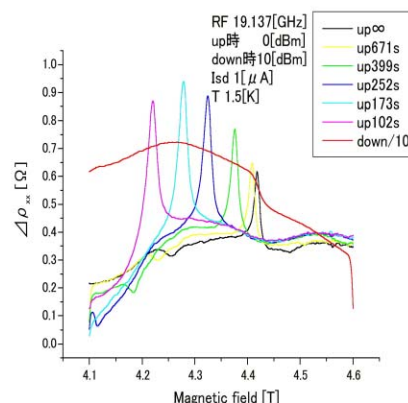


図3 ESRピークのOverhauserシフト。

2.1.3. 半導体超格子中のブロッホ振動のコヒーレンスと電磁波に対する利得・損失

江崎らによる半導体超格子中の電子波束のブロッホ振動を利用した超高周波発振器（ブロッホ発振器）は、提案から30年を経た現在でも実現に至っていない。ブロッホ振動は、

周期的なポテンシャルを持つ超格子中の電子の固有振動モードであり、その存在や緩和時間などが超高速レーザ分光技術を用いて調べられてきた。しかし、完全にコヒーレントな固有振動モード自身は、外場に対して損失も利得も持たない。従って、ブロッホ振動が電磁波に対して利得を有し、電磁波の発生・増幅が可能になるためには、電子波束の適度なコヒーレンスと散逸が必要である。

一方、超格子のブロッホ振動が、実験的に利得を持つことを証明した報告は未だない。主な理由は、バイアスを印加した超格子の伝導度をテラヘルツ領域まで測定する技術が無かったからである。

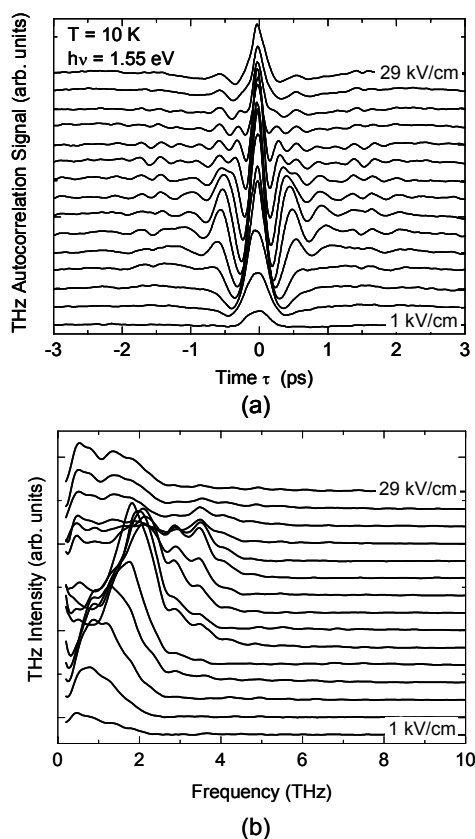


図4 (a)バイアス電界を印加した超格子からのTHz放射の自己相関波形と(b)そのフーリエスペクトル。

図4は、バイアス電界を印加した超格子中でブロッホ振動する電子が放射するテラヘルツ電磁波の自己相関波形とそのフーリエスペクトルである。このTHz放射スペクトルが、電子伝導率の情報を含んでいるため、ミニバンド伝導する電子に対して求められた伝導度の理論値と比較したところ、図5に示すように非常によい一致を示した。また、その結果より、ブロッホ振動する電子がおおよそ2 THz程度まで電磁波に対して利得を持つことが明らかになった。さらに、上位のミニバンドへのジーナートンネル効果が、ブロッホ利得

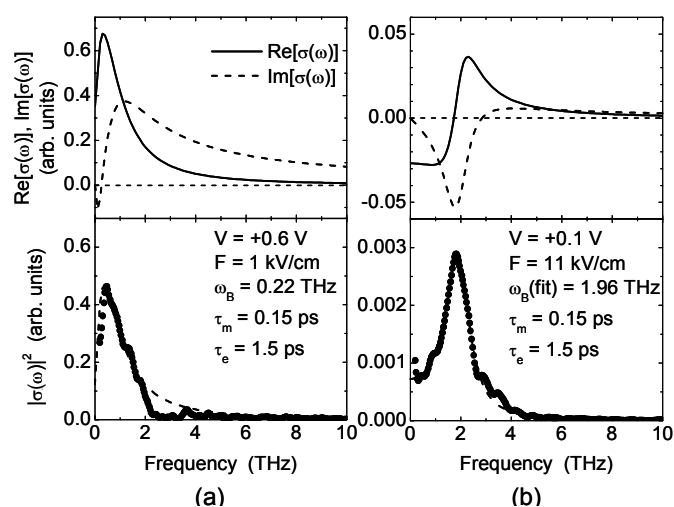


図5 低電界(1 kV/cm)と高電界(11 kV/cm)におけるTHz放射スペクトル(シンボル)と伝導度の理論値。伝導度の実部が負の領域は、利得を示す。

我々は、線形応答理論によれば、フェムト秒レーザパルスにより励起した電子が電界により加速されるときに放射する電磁波が伝導度の情報を含んでいることに着目し、その放射電磁のスペクトルより、ブロッホ振動する電子の伝導度をテラヘルツ (THz) 領域まで測定する技術を開発した。

の最高周波数を制限していることも見出した。

2.2. ナノ構造におけるキャリア相関

2.2.1. 結合細線のクーロンドラッグ

近接した2本の量子細線では、一次元電子系の強いクーロン相互作用に起因して、クーロンドラッグ（片方の細線の電子が他方の細線の電子を引っ張る現象）が起こる。今回、この予測に反して、一方の細線が非常に低い電子密度をもつ場合には、負のドラッグ（電子 - 正孔のドラッグ）が起こることを見出した。その起源を実験、理論の両面から研究し、一方の細線がウィグナー結晶状態になることにより、もう一方の細線中に相関正孔が誘起されると考えることによって観測された負のドラッグ効果を理解できることが分かった。

3.2.2. 量子ドットにおける核スピンメモリー操作

昨年度、結合量子ドットを用いて、電子スピン-核スピンの結合の影響を観測した。今回、結合のオン、オフを電圧、磁場を使って制御する手法を開発し、これを利用して核スピンメモリーの実験に成功した。

2.2.3. 量子ドットのキャリアダイナミクス

これまでに蓄積してきた電氣的ポンプ・プローブ技術を量子ドット（人工原子）の電子緩和時間の精密測定に応用した。励起状態から基底状態への緩和時間は緩和が電子スピンの反転を伴わない場合は、フォノン放出で支配され、約10nsecになることが分かった。一方、緩和が電子スピ



	 artificial atoms (quantum dots)	 real atoms
one-electron system	2p - 1s allowed for <i>photon</i> emission $\tau = 3 - 10 \text{ ns}$ ($h\nu \sim 2 \text{ meV}$)	H 2p - 1s (Lyman α) allowed for <i>photon</i> emission $\tau = 1.6 \text{ ns}$ ($h\nu = 10.2 \text{ eV}$)
two-electron system	(1s)(2p) $^3P - (1s)^2 1S$ forbidden by <i>spin</i> conservation $\tau \sim 200 \mu\text{s}$ ($h\nu \sim 0.5 \text{ meV}$)	He (1s)(2s) $^3S - (1s)^2 1S$ forbidden by <i>spin</i> & <i>parity</i> $\tau = 7860 \text{ s}$ ($h\nu = 19.8 \text{ eV}$)
$\frac{\tau_{\text{forbidden}}}{\tau_{\text{allowed}}}$	> 3×10^4	4.5×10^{12}
		1.5×10^5

表1 半導体量子ドット人工水素、人工ヘリウムと実際の原子における電子の緩和時間の比較。

ンの反転を伴う場合、緩和時間は非常に長くなり200 μsec に達することが判明した。表1に関連する緩和時間の人工原子と本物の原子の比較を載せるが、半導体で作成した人工原子においても本物の原子と同様にスピン反転を伴う遷移は禁制になっていることが分かる。これは、半導体量子ドット中の電子スピンの量子コヒーレントデバイス、スピントロニクスへの応用を勇気づけるものである。この成果はNatureに掲載され報道発表を行った。

2.2.4. 結合量子ドット電荷量子ビットの実現

電氣的ポンプ・プローブ技術をさらに拡張して、結合量子ドットにおける電子のコヒーレント振動を測定することを試みた。実際の実験では左右に量子ドットが並んだ結合量子ドットを作製し、最初に左側のドットに電子を蓄積した状態でパルスを加え、パルスを加えている間、左右のドットの電子準位が共鳴するように設計した。さらに、パルス印加後に電子が左のドットに存在するか右のドットに存在するかを流れる電流の変化から測定し

た。（電子がドレインに近いドットに存在するほうが、電子がドレインに抜けやすくなり電流が増大する）図6に得られた電流振動の様子を示す。振動の周期はドット間の結合強度を変えることにより制御可能であり、コヒーレント振動が確かに生じており、その振動が全電氣的にゲートで制御できることが分かる。これは、半導体量子ドットを用いた電荷量子ビットの世界最初の実現例であり、相関エレクトロニクスの研究がその目標である半導体量子コンピュータに向けて第一歩を踏み出したことを示している。コヒーレント振動の減衰時間は1nsec程度であり、まだ十分とは言えない。今後はコヒーレント時間を決定するメカニズムを追究するとともに、さらに複雑なパルスを用いた電子のコヒーレント制御に研究を発展させる予定である。

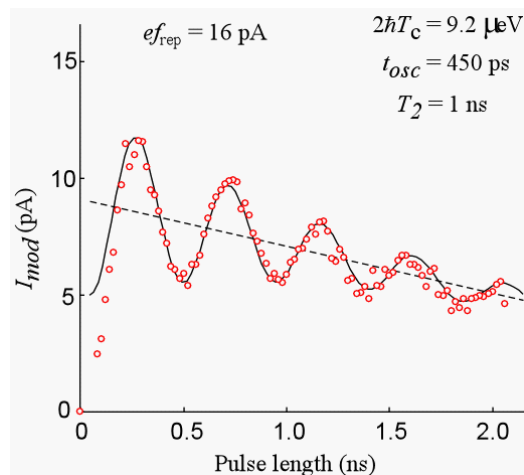


図6 結合量子ドットで観測された電子のコヒーレント振動に基づく電流の振動。

2.3. ナノプロービング

2.3.1 ナノ構造中の電子分布の直接観察

昨年度までに引き続きInAs結晶成長中に自然に形成されるナノ構造に関して、内部の局所状態密度分布を低温STMを用いて直接観察した。特に三角形の量子ドットに関して、一辺14nm以下の微小ドットでは基底状態の電子分布が三角形の閉じ込め状況に関係なく円形に近づくことを確認するとともに、ゼロ次元状態への共鳴的な状態密度の集中を観測することにも成功した。さらに、三角形の量子ドットが近接して存在する結合量子ドットに関しても、状態密度分布の測定をスタートした。

2.3.2. 高速ナノプローブの開発

RF帯域の計測には同軸構造またはこれに類する構造が不可欠である。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ので、検査対象が制約される。さらに、プローブ自体、微細なデバイスと比較すると桁違いに大きく、また、リジッドな構造であるという技術課題があった。そこで、本研究では、マイクロ波帯域での電気応答をナノメートルオーダーの空間分解能で計測するために、マイクロストリップ導波路よりなる全く新しいタイプの高周波帯域用AFMカンチレバーを開発した。図7は、今回試作したマイクロストリップ導波路付きAFMカンチレバーの写真である。レバーの幅は約30 μm、探針先端へ伸びるシグナルラインの幅は約2 μm、両側のグラウンドラインの幅は約7 μmである。現在、非接触および接触モードでの高周波電圧の

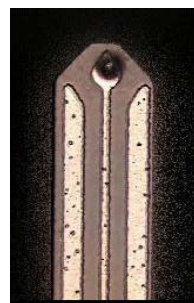


図7 マイクロストリップ導波路付きAFMカンチレバーの写真。レバーの幅は約30 μm、探針先端へ伸びるシグナルラインの幅は約2 μm、両側のグラウンドラインの幅は約7 μm。先端部分に丸く見えているのが探針。

減衰特性を評価している。

2.3.3. 二探針型近接場光学顕微鏡の開発

近接した二探針の一方を照射・集光モードで、他方を集光モードで用い、 $1\mu\text{m}$ 間隔の回折格子に対して同時に二つのSNOM測定を行った。単走査(図8)の結果から分かるように、基本的には探針間距離だけでなく信号が得られるが、探針が一本の場合よりノイズ

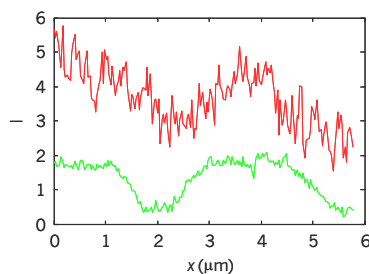


図8 回折格子を対象として測定した場合の探針からの出力。

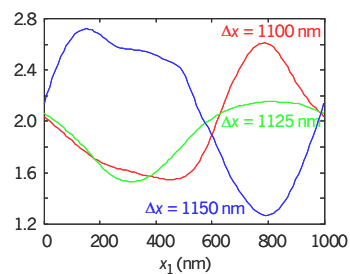


図9 2つの探針間距離を変えた場合の受光側探針信号の計算結果。

が大きい。計算機シミュレーションの結果、探針間距離が 50nm 変化するだけで、受光探針の信号強度の位置依存性がほぼ反転するほど変化することが分かった(図9)。探針間距離を大きくしていくと、探針間の光伝達が、主に回折格子の一つの山を利用するモードから二つの山を利用するモードに移るからだと思われる。単探針では問題にならないわずかな探針の位置のぶれが大きな信号変化をもたらしたわけで、精度の高い位置決めが求められると同時に、この現象の積極的利用も考えられる。

2.3.4 2次元電子ガス系に光励起されたキャリアの顕微分光観測

低温($\sim 5\text{K}$)におけるAlGaAs/GaAs単一ヘテロ構造の2次元電子ガス(2DEG)系に対して、近接場光学顕微鏡(SNOM)と時間分解光学顕微鏡(TROM)を用いて発光分光を行った。SNOM観測では発光強度が磁場とともに増強し、SNOM空間分解能が高いほど磁場依存性が強くなった。TROMでは光励起後の発光パターンが時間変化が観測され、弱磁場下($< 0.5\text{T}$)でも発光パターン広がり抑制が観測された。この結果は光励起キャリア拡散と磁場による拡散抑制の直接的観測であり、SNOMが拡散したキャリア分布の一部分からの発光を捉えると考え

ことで、強度の磁場依存性が説明できた。次に、キャリア拡散長が磁束密度に反比例するという電子に対するモデルを用いてフィッティングを行った結果、実験をよく再現することができた(図10)。この結果をGaAs量子井戸中の電子、中性励起子に対する結果と比較したところ、磁場依存性は電子と同程度に強いが、拡散長の絶対値は電子の4倍も大きく、ゼロ磁場における値は中性励起子と同程度であることが分かった(図11)。これは光励起されたキャリアが励起子を形成

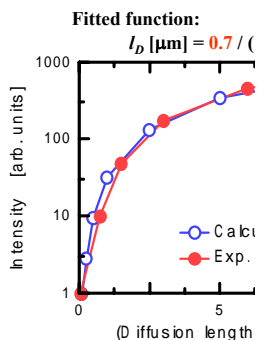


図10 拡散距離(l_D)を磁場に反比例すると仮定してフィッティングしたSNOM発光強度の変化。

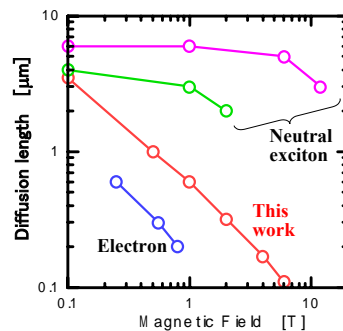


図11 磁束密度に対する拡散距離の変化。2DEG系とGaAs量子井戸中の電子、中性励起子との比較。

しながらも、2DEGの影響によって等価的に電荷を有しているためと解釈できた。

2.4. 量子情報処理

2.4.1. 固体のデコヒーレンス機構の解明

半導体を含む固体量子コンピュータで最大の問題になるデコヒーレンスについて理論的な検討を進めた。特にテレグラム雑音の原因になる電荷揺らぎが背景にある場合を検討し、緩和時間はテレグラム雑音の時定数より長くなること、エネルギー緩和時間と位相緩和時間がほぼ同じ時間オーダーになり、さらに不純物間に相互作用がある場合には、相互作用によりデコヒーレンスが抑えられることを示した。

2.4.2 光子を用いた量子情報処理基礎実験

エンタングルメントは量子コンピュータなど量子情報処理のキー要素である。光子系は電子系、スピン系に比べエンタングルメントを作成することが比較的容易であり、エンタングルメントの基本特性を実験的に確認し、将来の量子情報処理に向けた知識を蓄積するのに適した系である。このプロジェクトでは不完全にエンタングルした二つの光子対から完全にエンタングルした光子対を一括処理により作成する方法を理論的に提案してきたが、H14年度は光子系を用いてその提案を実証することに成功した。具体的には同時に生成したエンタングルした二組の光子対のエンタングルメントをそれぞれアッテネータを用いて人為的に不完全にし、この不完全にエンタングルメントした光子対から完全にエンタングルメントした光子対を生成することができることを実験的に示した。この成果はNatureに掲載され報道発表された。

2.5. 国際シンポジウム 「ナノ構造におけるキャリア相関とスピントロニクス」

平成15年3月10日から
12日まで162人の参加者

を集めて International Symposium on Carrier Interactions and Spintronics in Nanostructures (CISN2003)を開催した。このシンポジウムを通して半導体を中心とした固体のキャリア相関、スピン制御、さらには量子ビット、量子情報処理へ向けた研究が世界的に大きく進展していることを示すと共に、その中でCREST関連エレクトロニクスチームが中心的な役割を果たしていることを示した。

3. 研究実施体制

薄膜・ナノ相関構造研究グループ

① 研究分担グループ長：平山 祥郎（NTT物性科学基礎研究所、量子物性研究部部长、

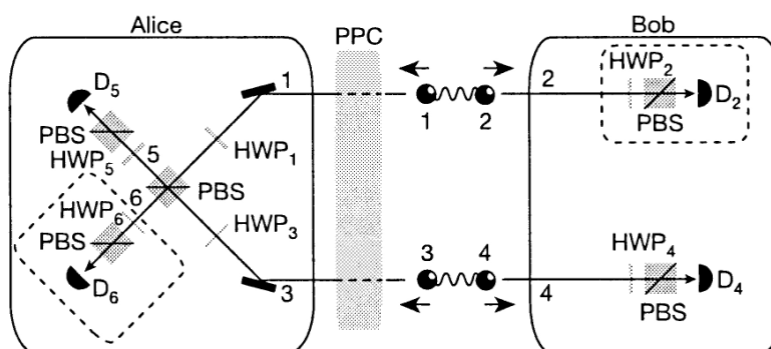


図12 二つの不完全にエンタングルした光子対を一括処理して、完全にエンタングルした光子対を作成する実験系。

GL)

②研究項目：相関構造作成と伝導特性評価

相関効果の磁場特性研究グループ

①研究分担グループ長：樽茶 清悟（東京大学理学部、教授）

②研究項目：ナノ構造相関効果の磁場特性評価

コヒーレンス性評価グループ

①研究分担グループ長：平川 一彦（東京大学生産技術研究所、教授）

②研究項目：相関構造中のキャリアコヒーレンス性の評価

ナノ評価技術開発グループ

①研究分担グループ長：横山 浩（産業技術総合研究所、研究部門長）

②研究項目：相関構造評価用ナノプローブ技術の開発

量子演算研究グループ

①研究分担グループ長：井元 信之（総合研究大学院大学、教授）

②研究項目：量子情報処理基礎原理の検討

4. 主な研究成果の発表（論文発表および特許出願）

（1）論文（原著論文）発表

- O. Astafiev, S. Komiyama, T. Kutsua, V. Antonov, Y. Kawaguchi, and K. Hirakawa: "A single-photon detector in the microwave range", Applied Physics Letters 80, 4250 (2002).
- H. Yamaguchi and Y. Hirayama, "Fabrication of conductive single-crystal semiconductor nanoscale electromechanical structures", Appl. Phys. Lett. 80, 4428 (2002).
- M. Abe, S. Madhavi, Y. Shimada, Y. Otsuka, K. Hirakawa, and K. Tomizawa: "Transient carrier velocities in bulk GaAs: quantitative comparison between terahertz data and ensemble Monte Carlo calculations", Applied Physics Letters 81, 679 (2002).
- Y. Shimada, K. Hirakawa, and S.-W. Lee: "Time-resolved terahertz emission spectroscopy of wide miniband GaAs/AlGaAs superlattices", Applied Physics Letters 81, 1642 (2002).
- H. D. Cheong, T. Fujisawa, T. Hayashi, Y. Hirayama, and Y. H. Jeong, "Impedance analysis of a radio-frequency single-electron transistor", Appl. Phys. Lett 81, 3257(2002).
- H. Yamaguchi and Y. Hirayama, "Novel Fabrication Method of Semiconductor Nanoelectromechanical Structures using Controlled Surface Step Distribution", Inst. Phys. Conf. Ser. **170**, 335(2002).
- Y. Shimada and K. Hirakawa: "Time-resolved THz spectroscopy of miniband

transport in biased GaAs/AlGaAs superlattices”, Inst. Phys. Conf. Ser. No. 170: Chapter 6, 395 (2002)

- K. Suzuki, S. Miyashita, and Y. Hirayama, “Transport properties in back-gated InAs/GaSb heterostructures”, Inst. Phys. Conf. Ser. 179, 339(2002).
- K. Hoshino, T. Someya, K. Hirakawa, and Y. Arakawa: “Low-pressure MOCVD growth of GaN/AlGaN multiple quantum wells for intersubband transitions”. Journal of Crystal Growth 237, 1163 (2002)
- H. Yamaguchi, R. Dreyfus, S. Miyashita, and Y. Hirayama, “Application of InAs Freestanding Membranes to Electromechanical Systems”, Jpn. J. Appl. Phys. 41, 2519(2002).
- S. K. Ozdemir, A. Miranowicz, M. Koashi and N. Imoto: “Optical qubit generation by state truncation using an experimentally feasible scheme,” Journal of Modern Optics, 49, no:5/6, pp. 977 (2002).
- R. J. A. Hill, A. Patane, P. C. Main, M. Henini, L. Eaves, S. Tarucha and D. G. Austing: Controlling the electron tunneling through InAs self-assembled dots, J. Appl. Phys. 91, 3474 (2002).
- T. Fujisawa, D. G. Austing, Y. Tokura, Y. Hirayama, and S. Tarucha, “Allowed and forbidden transitions in artificial hydrogen and helium atoms”, Nature 419, 278 (2002).
- T. Fujisawa, Y. Tokura, D. G. Austing, Y. Hirayama, and S. Tarucha, “Spin-dependent energy relaxation inside a quantum dot”, Physica B314, 224 (2002)
- K. Ono, D. G. Austing, Y. Tokura and S. Tarucha, “Angular momentum selectivity in tunneling between two quantum dots”, Physica B314, 450 (2002)
- N. Kumada, D. Terasawa, Y. Shimoda, H. Azuhata, A. Sawada, Z. F. Ezawa, K. Muraki, T. Saku, and Y. Hirayama, “Various phase transitions in $\nu=2/3$ bilayer quantum Hall states”, Physica E 12, 32 (2002).
- T. Machida, S. Ishizuka, and K. Muraki, “Spin polarization in fractional quantum Hall edge channels”, Physica E 12, 76 (2002).
- T. Asayama, Y. Tokura, S. Miyashita, M. Stopa and S. Tarucha, “1D Bragg reflector in the Tomonaga-Luttinger liquid regime and Fermi liquid regimes”, Physica E12, 186 (2002).
- M. Yamamoto, M. Stopa, Y. Tokura, Y. Hirayama, and S. Tarucha, “Coulomb drag between quantum wires: magnetic field effects and negative anomaly”, Physica E 12, 726 (2002).
- S. -W. Lee and K. Hirakawa: “ Lifetime of photoexcited carriers in modulation-doped quantum dot infrared photodetectors ” , Physica E13, 305 (2002) .

- K. J. Friedland, R. Hey, O. Bierwagen, H. Kostial, Y. Hirayama, and K. H. Ploog, "Conductance anisotropy of high-mobility, modulation-doped GaAs single quantum wells", *Physica E13*, 642(2002).
- A. Kawaharazuka, T. Saku, C. A. Kikuchi, Y. Horikoshi, and Y. Hirayama, "Study of free GaAs surfaces using a back-gated undoped GaAs/AlGaAs heterostructure", *Physica E13*, 663 (2002)
- H. Yamaguchi, R. Dreyfus, S. Miyashita, and Y. Hirayama, "Fabrication and elastic properties of InAs freestanding structures based on InAs/GaAs (111) a heteroepitaxial systems", *Physica E13*, 1163 (2002)
- K. Nagata, M. Koashi, and N. Imoto: "Observable suitable for restricting the fidelity to multipartite maximally entangled states," *Phys. Rev. A65*, 042314 (2002).
- A. Miranowicz, S. K. Ozdemir, Yu-xi Liu, M. Koashi, N. Imoto, and Y. Hirayama: "Generation of maximum spin entanglement induced by a cavity field in quantum-dot systems," *Phys. Rev. A65*, 062321 (2002).
- Yu-xi Liu, S. K. Ozdemir, M. Koashi, and N. Imoto: "Dynamics of entanglement for coherent excitonic states in a system of two coupled quantum dots and cavity QED," *Phys. Rev. A65*, 042326 (2002).
- M. Ueda and M. Koashi: "Theory of spin-2 Bose-Einstein condensates: Spin correlations, magnetic response, and excitation spectra," *Phys. Rev. A65*, 063602 (2002).
- M. Koashi and N. Imoto: "Operations that do not disturb partially known quantum states," *Phys. Rev. A66*, 022318 (2002).
- S. K. Ozdemir, A. Miranowicz, M. Koashi, and N. Imoto: "Pulse-mode quantum projection synthesis: Effects of mode mismatch on optical state truncation and preparation," *Phys. Rev. A66*, 053809 (2002).
- Yu-xi Liu, A. Miranowicz, M. Koashi, and N. Imoto: "Realization of symmetric sharing of entanglement in semiconductor microcrystallites coupled by a cavity field," *Phys. Rev. A66*, 062309 (2002).
- K. Nagata: "Classification of mixed high-dimensional multiparticle systems," *Phys. Rev. A66*, 064101 (2002).
- T. Yamamoto, K. Tamaki, M. Koashi, and N. Imoto: "Polarization-entangled W state using parametric down-conversion," *Phys. Rev. A66*, 064301 (2002).
- A. Patane, R.J.A. Hill, L. Eaves, P.C. Main, M. Henini, M.L. Zambrano, A. Levin, N. Mori, C. Hamaguchi, Yu. V. Dubrovskii, E.E. Vdovin, D.G. Austing, S. Tarucha and G. Hill: "Probing the quantum states of self-assembled InAs dots by magnetotunneling spectroscopy", *Phys. Rev. B65*, 165308 (2002).

- T. Machida, S. Ishizuka, T. Yamazaki, S. Komiyama, K. Muraki, and Y. Hirayama, "Spin polarization of fractional quantum Hall edge channels studied by dynamic nuclear polarization", Phys. Rev. **B65**, 233304(2002).
- W.G. van der Wiel, S. De Franceschi, J.M. Elzerman, S. Tarucha, L.P. Kouwenhoven, J. Motohisa, F. Nakajima, and T. Fukui, "Two-stage Kondo effect in a quantum dot at high magnetic field", Phys. Rev. Lett, 88, 126803 (2002).
- K. Hashimoto, K. Muraki, T. Saku, and Y. Hirayama, "Electrically controlled nuclear spin polarization and relaxation by quantum-Hall states", Phys. Rev. Lett 88, 176601(2002).
- M. Koashi and N. Imoto : "Quantum Information is Incompressible Without Errors," Phys. Rev. Lett. 89, 097904 (2002).
- N. Kumada, D. Terasawa, Y. Shimoda, H. Azuhata, A. Sawada, Z. F. Ezawa, K. Muraki, T. Saku, and Y. Hirayama, "Phase diagram of interacting composite Fermions in the bilayer $\nu=2/3$ quantum Hall effect", Phys. Rev. Lett. 89, 116802 (2002).
- S. De Franceschi, R. Hanson, W. G. van der Wiel, J. M. Elzaeman, J. J. Wijkema, T. Fujisawa, S. Tarucha, and L. P. Kouwenhoven, "Out-of-Equilibrium Kondo Effect in a Mesoscopic Device", Phys. Rev. Lett 89, 156801(2002).
- K. Nagata, M. Koashi, and N. Imoto : "Configuration of Separability and Tests for Multipartite Entanglement in Bell-Type Experiments," Phys. Rev. Lett. 89, 260401 (2002).
- K. Hoshino, T. Someya, K. Hirakawa, and Y. Arakawa: "Observation of intersubband transition from the first to the third subband ($e1-e3$) in GaN/AlGaN quantum wells", Physica Status Solidi A-Applied Research 192, 27(2002)
- A. Miranowicz, S. K. Ozdemir, Yu-xi Liu, M. Koashi, N. Imoto: "Physical realizations and Wigner representations of coherent states of finite-dimensional Hilbert spaces," in Analytical Study of Quantum Information and Related Fields, RIMS 1266, 9-20 (2002).
- K. Ono, D.G. Austing, Y. Tokura, and S. Tarucha, "Current Rectification by Pauli Exclusion in a Weakly Coupled Double Dot Hubbard System", Science 297, (2002).
- D G Austing, S Sasaki, K Muraki, Y Tokura, K Ono, S Tarucha, M Barranco, A Emperador, M Pi, and F Garcias, Vertical diatomic artificial quantum dot molecules, pp13-32, "Advanced Luminescent Materials and Quantum Confinement II", Eds. M Cahay, J P Leburton, D J Lockwood, S Bandyopadhyay, N Koshida and M Zacharias, by The Electrochemical Society, Pennington, USA (2002), ISBN 1-

56677-330-X.

- M. Yamamoto, M. Stopa, Y. Hirayama, Y. Tokura, and S. Tarucha: "Negative drag in Quantum Wires", proceeding of 26th International conference on the Physics of semiconductors (World Scientific, edinburgh. editor A.R. Long and J.H. Davices (2003)).
- S. K. Ozdemir and G. T. Sayan : "Temperature Effects on Surface Plasmon Resonance: Design Considerations for an Optical Temperature Sensor", IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 21, No. 3. March 2003.
- M. Hayashi, M. Koashi, K. Matsumoto, F. Morikoshi, and A. Winter : "Error exponent for entanglement concentration," J. Phys. A: Math. Gen. 36, 527 (2003).
- S Tarucha, D G Austing, S Sasaki, K Muraki, K Ono, M Barranco, A Emperador, M Pi, and F Garcias: "A density-functional-theory application to double quantum dots: influence of mismatch on the addition energy spectra of vertical diatomic artificial molecules", Int. J. of Quantum Chemistry **91**, 498 (2003).
- T. Yamamoto, M. Koashi, S. K. Ozdemir, and N. Imoto : " Experimental extraction of an entangled photon pair from two identically decohered pairs, " Nature 421, 343 (2003).
- K. Tamaki, M. Koashi, and Nobuyuki Imoto : "Security of the Bennett 1992 quantum-key distribution protocol against individual attack over a realistic channel," Phys. Rev. A67, 032310 (2003).
- Yu-xi Liu, A. Miranowicz, S. K. Ozdemir, Masato Koashi, and Nobuyuki Imoto : " Size-dependent decoherence of excitonic states in semiconductor microcrystal-lites," Phys. Rev. A67, 034303 (2003).
- W.G. van der Wiel, Yu.V. Nazarov, S. De Franceschi, T. Fujisawa, J.M. Elzerman, E.W.G.M. Huizeling, S. Tarucha, and L.P. Kouwenhoven: "Electromagnetic Aharonov-Bohm effect in a 2-D electron gas ring", Phys. Rev B67, 033307 (2003).
- Y. Shimada, K. Hirakawa, M. Odnoblioudov, and K. A. Chao: "Terahertz conductivity and possible Bloch gain in semiconductor superlattices", Phys. Rev. Lett. **90**, 46806 (2003)
- M. Koashi and J. Preskill : "Secure Quantum Key Distribution with an Uncharacterized Source," Phys. Rev. Lett. 90, 057902 (2003).
- S. Sasaki, N. Asakawa, S. Amaha, W. Izumida and S. Tarucha: "The Kondo effect in a S=1/S=0 Quantum Dot" , Proceeding of the International Conference on Quantum Transport and Quantum Coherence (The Physical Society of Japan, Editors Y. Ono, A. Kawabata and S. Komiyama (2003)).

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

(2) 特許出願

H14年度特許出願件数： 1件 (研究期間累積件数： 1件)