

「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 主幹研究員 グループリーダー)

「関連エレクトロニクス」

1. 研究実施の概要

分数量子ホール効果や半導体人工原子に代表されるように、半導体薄膜構造およびナノ構造においてキャリア相関が重要な役割を果たすことは物性物理では明らかである。しかし、超伝導現象や超流動現象などのように工学的にも役立つ、画期的な相関効果は半導体では未だ得られていない。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む可能性を探るために、この研究では高品質半導体構造を用いて半導体中での新しいキャリア相関現象を追究する。具体的には、薄膜構造での強いキャリア相関による超流動現象、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す。H12年度は前年度に引き続きバックゲートヘテロ構造、バックゲートナノ構造についてその作成、キャリア相関につながる特性を研究した。さらに、これらの構造を二層二次元系に応用し二層系に特徴的なキャリア相関を抽出するとともに、スピンのからんだ磁性半導体の物性の検討、核スピンと電子スピンの相互作用の検討を行った。量子ドットにおいては、ドット構造における電子スピン相関の代表的な物理として、近藤効果に着目して研究を進め、新しい実験結果を得た。また、量子ビットに向けたパルス測定技術の蓄積を行うとともに、パルス技術を量子ドット中のキャリアダイナミクスの解明に役立てた。より高速な評価を目指して超格子構造によるTHz帯電磁波の発生についても積極的に研究した。さらに、ナノスケールでのキャリア相関評価の基本技術として、低温STM、低温SNOMの研究を行い、それぞれ半導体構造での測定が可能なレベルに技術を高めるとともに、低温STMについてはInAs表面に蓄積した二次元電子を用いて半導体中電子波の直接観察に成功した。将来の量子ビットの設計に関しては情報理論を含む基礎的な検討が不可欠であり、H12年度も前年度に継続して量子エンタングルメントを含む量子情報処理の基本特性の検討を行った。また、2001年2月13、14日の両日、本共同研究で現在までに得られた成果の報告と、キャリア相関に関する研究の進展を目的に、NEDO、NTT物性科学基礎研究所と共同で国際シンポジウムCarrier Interactions in Mesoscopic Systemsを開催した。このシンポジウムを通して半導体物性を中心とした科学技術をキャリア相関を切り口に議論することの有効性が確認

された。

2．研究実施内容

前年度に引き続き、半導体構造におけるキャリア相関の理解と、量子計算などに応用可能なキャリア相関効果の抽出を目指して研究を進めた。ここではH12年度に得られた薄膜構造のキャリア相関、ナノ構造のキャリア相関、ナノプロービング、キャリアダイナミクス、量子情報処理に関する成果を概説する。

3．1． 薄膜構造におけるキャリア相関

様々なナノ構造の作製に適しており、かつ高移動度が実現できるGaAs/AlGaAsバックゲート型ヘテロ構造について様々な構造パラメータについて実験を行い、そのキャリア蓄積の特性から低温におけるGaAsの表面が通常良く用いられているミッドギャップピンニングモデルではなく、表面電荷が室温での平衡値に固定されるフローズンサーフィスモデルで記述できることを明らかにした。様々なナノ構造では金属などで覆われていないGaAs表面を有するものがほとんどであり、得られた成果はポテンシャル分布のモデル計算などに重要な示唆を与えるものである。

また、バックゲートヘテロ構造の利点を生かして、二次元電子系と核スピンの相関についても研究を進めた。H12年度は特に充填率(ν) $2/3$ の分数量子ホール効果状態で通常のホールバーに電流を流すことにより生じる核スピンの偏極による抵抗値(R_{xx})の増大に着目した。GaAs/AlGaAsバックゲート構造で電子密度を変化させて実験したところ従来の狭い量子井戸での報告と異なり、 $\nu = 2/3$ が7 T以下の低磁場で出現する場合にゆっくりした抵抗の増大が観測されることを確認した。 $\nu = 2/3$ には電子スピンの偏極した状態と偏極していない状態が存在することが知られており、この二つの状態が転移する磁場は二次元電子系の閉じ込めが弱いほど低磁場になることが予想される。従って、閉じ込めの弱い単一ヘテロ構造で測定された低磁場での抵抗増大は、異なる電子系のミックス状態が核スピンの偏極に重要な役割を果たしていることを示唆している。さらに、バックゲートにより電子密度を瞬時に変えられる利点を生かして実験を行った結果を図1に示す。磁場を5.8 Tで一定にし、電子密度を空乏状態からちょうど面白い現象が観測される電子密度($\nu = 0.69$ に相当)に設定すると図1に示したように数十分のオーダーでゆっくりした抵抗の変化が生じる。特徴的なことは、抵抗増加の飽和後、30秒間バックゲート電圧をゼロにして電子系を空乏化し、再び $\nu = 0.69$ に戻しても抵抗の増大が保持されていることである。これは、抵抗増大を引き起こす要因が電子系以外にあることを明確に示している。さらに、抵抗増大が飽和した後マイクロ波を照射すると図1挿入図に示したように構成元素であるGa、Asに対応した核磁気共鳴(NMR)信号が明瞭に観測された。これらの実験結果から、電

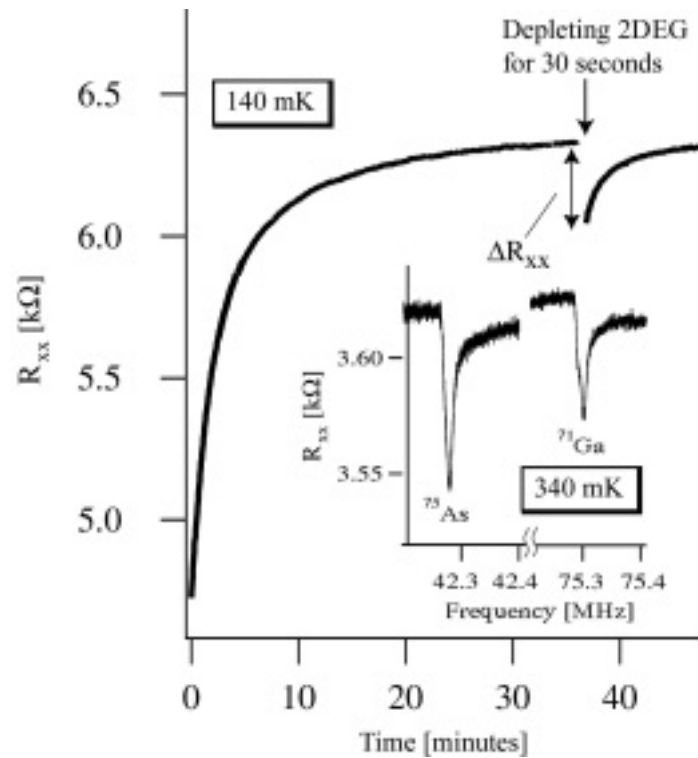


図1 . GaAs/AlGaAsヘテロ構造で $\nu = 2/3$ 付近に観測された抵抗異常。5.8 Tの一定磁場でバックゲートにより電子を誘起し、 $\nu = 0.69$ に設定すると R_{xx} は徐々に増大する。この R_{xx} の増大は電子を一度完全に空乏化して再度 $\nu = 0.69$ に戻しても空乏化した時間が短ければほぼ保たれている。挿入図は R_{xx} の増大が飽和したあとでマイクロ波を照射したときのNMR信号である。

子系により核スピンの偏極が維持され、この核スピン偏極が電子系を空乏化しても維持され、さらに核スピンの偏極度が電子系の抵抗値で読み出せることが確認された。核スピンはコヒーレント時間が長く量子コンピュータの観点からも注目されており、電子系と核スピンの相関は興味ある課題である。

また、バックゲート構造を利用した二層系についてもキャリア相関による新しい物性に着目して研究を進めた。特に同じ全充填率でスピン、擬スピンの異なる量子ホール状態間の転移について研究を進め、二層間の結合が強い時に交換相互作用による極めて急峻な異なる量子ホール状態間の転移を見出した。また、二層系においてはスピントクスチャーであるSkyrmionも層間で相互作用することを傾斜磁場下での実験から確認した。

さらに半導体と磁性体の両方の性質を兼ね備えた物質として、キャリアスピンの観点から興味を持たれるIII-V族希薄磁性半導体について研究を行った。特に

強磁性転移機構の解明を目標にIII-V族希薄磁性半導体の赤外光吸収スペクトルを測定した(図2)。その結果、III-V族希薄磁性半導体の遠赤外吸収スペクトルが、強磁性転移温度以下で非常に特異な温度依存性を示すことを見だし、従来この系の強磁性転移機構として提案されていたRKKY相互作用よりも、むしろMnイオンのd軌道が関与した二重共鳴機構と呼ばれる新しい機構が強磁性転移に深く関与しているのではないかと考えられる。

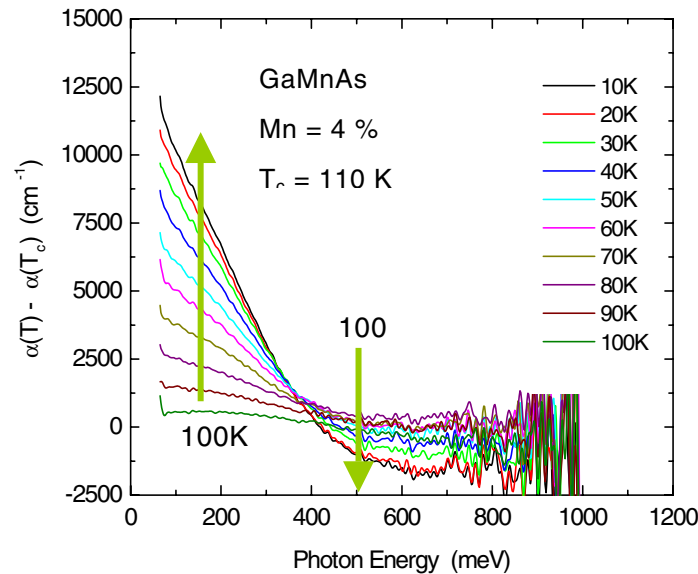


図2 . Mnを4%ドープしたGaMnAs試料について測定した、強磁性転移温度(110K)以下の温度で現れる赤外光吸収スペクトルの変化。400meV以上の光エネルギーでは温度低下とともに吸収が減少するのに対して、400meV以下のエネルギーでは吸収強度の増大が観測された。

3.2. ナノ構造におけるキャリア相関

キャリア相関の基本になるナノ構造についてその作製、物性解明の研究を継続して進めた。バックゲートヘテロ構造をナノ構造に応用するとともに、電子スピン相関による量子ドットの近藤効果について新しい知見を得た。

バックゲートヘテロ構造上のメゾスコピック構造としては、ナノ構造の基本になる量子ポイントコンタクトを作製しその伝導特性を測定した。図3にその特性の一例を示すが、電子密度がバックゲートで任意に制御できるポイントコンタクトが実現されており、バックゲートヘテロ構造に蓄積される電子系の移動度の大きさを反映して広い電子密度範囲で不純物に影響されない理想的な量子化伝導特性が得られていることがわかる。さらに、基底一次元準位に対応する $G=2e^2/h\nu_n$ ($n=1$)のステップのほかにも $\nu=0.7$ の構造が明瞭に観測された。この構造は単一

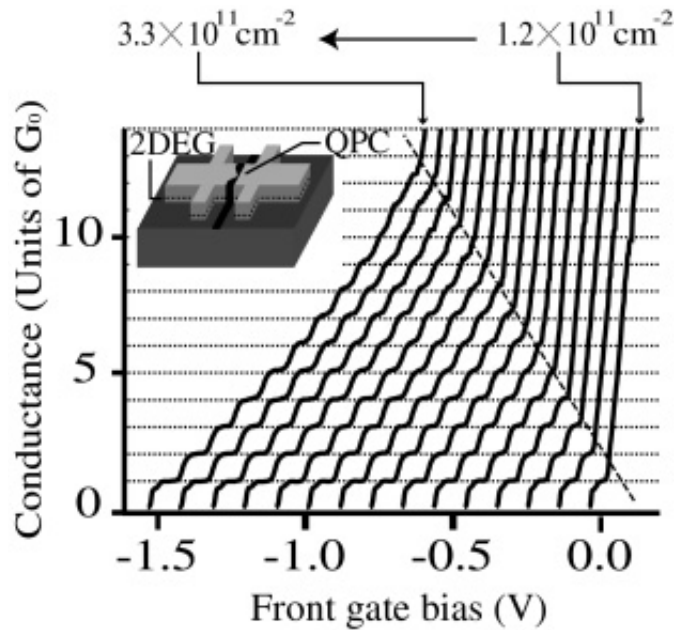


図3 . 100mkで測定されたバックゲート量子ポイントコンタクトの伝導特性。二次元電子ガスの密度はバックゲートにより $3.3 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$ から $1.2 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$ まで制御され、明瞭な量子化ステップと0.7構造が観測されている。挿入図は素子構造の概略図である。

電子モデルでは説明できず、電子間の相関効果に基づくものと考えられている。この0.7構造の起源はまだ不明であるが、私たちの実験データは電子密度を小さくするにつれ異常な構造の位置が0.7から0.5に変化してくること、また、電子密度が大きい場合にも0.7構造が明瞭になり、その位置がやはり下がってくることを示しており興味深い。バックゲートにより電子密度を変えられるナノ構造として、ポイントコンタクト以外にも周期の短いアンチドットアレイを作製しその伝導特性の予備的なデータを得た。この構造は将来電子ドットアレイにつながることを期待されている。

量子ドットのスピン効果は、電子相関を最も端的に反映する効果の一つであり、新型のメモリーやフィルター、あるいは量子計算機への応用が期待される。我々は、2電子状態の関与するスピン効果の制御を目指して実験を行い、典型的なスピン相関現象である近藤効果の新しい制御法を実現するとともに、パウリの排他律に起因するスピンプロケード効果を明らかにした。

外部電極と強くトンネル結合した量子ドットでは、ドット中の局在スピンと外部電極中の伝導電子の結合に起因して近藤効果が発現することが知られている。この近藤効果は、通常、ドットが奇数個の電子を含み、従って単一スピンを持つ場合（全スピン $S=1/2$ ）に起こる。我々は、2電子スピンの縮退を調節するこ

とにより近藤効果を制御することを試みた。2電子状態にはスピン一重項と三重項があり、両者の縮退はゲート電圧、磁場の関数として調節できる。実験では、縦型量子ドットを使ってこの調節を行い、丁度縮退時に、多重チャネル効果に起因した強い近藤効果が現れることを見いだした(図4)。また、横型量子ドットを使って、従来形の近藤効果の実験を行

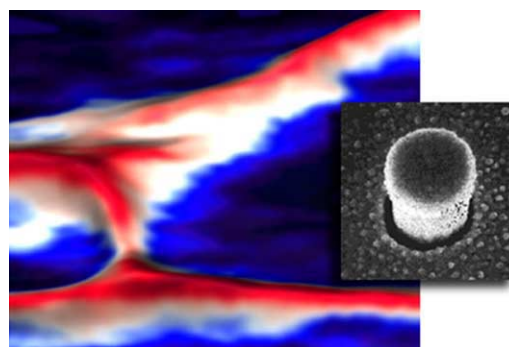


図4 . 縦型量子ドットにおける伝導度のゲート電圧(縦軸)・磁場(横軸)依存性。横方向に走る上下2本の線をつなぐ縦線上で、電子数6の近藤効果が起こっている。

い、弱い磁場中でユニタリー極限の近藤効果を観測した。これは完全なスピン相関が量子ドットで起こっていることを意味している。これらの実験は、量子ドット系スピン相関が、制御可能な物理量であることを示している。

さらに、結合ドットの2電子スピン制御も試みた。電子相関を最も簡単に記述するモデルとして知られているハバードモデルによれば、理想的な単一サイト列を伝導するのは反平行スピンド、平行スピンの伝導はパウリの排他律で禁止される。我々は単一量子準位をもつドットを2個弱結合させた2重ドット作成し理想的な2個の単一サイト列を実現した。具体的には、ポテンシャル差のために右側のドットに1個の電子が局在しているような結合ドット系を作った。このとき、反平行スピン電流のみが基底の一重項を介して流れる。実験では、右側の電極から右側のドットに電子注入すると電流が流れるのに対して、左側の電極から左側のドットに電子注入すると電流が抑圧されるという整流特性を観測した。前者では反平行スピンしか右側のドットに入らず、これがトンネル電流を担う。一方、後者では、平行、反平行いずれのスピンも左側のドットに入り得る。しかし、一度平行スピンが入ると、この電子はパウリの排他律のために右側のドットに入れなくなるので、結果的に電流が流れなくなってしまう。これは、バイアス電圧の極性に依存して、トンネル電流にスピン選択性を持たせられることを意味する。

3.3. ナノプロービング

ナノプローブ技術はキャリア相関のナノスケールでの理解という意味から重要であるのみならず、半導体量子ビットに向けた入出力技術としても重要である。H12年度は相関効果の測定の基礎となる半導体中電子波の直接測定などに成果があった。

低温STMを用いた半導体中電子波の直接測定にはInAs(111)A表面の利点を活

かした。InAs(111)AはGaAsなど格子定数の異なる基板上に原子オーダーで平坦な薄膜が成長できる上に、表面再構成による凹凸が小さく、さらに、二次元電子ガスが表面に自動的に蓄積する利点を有する。この二次元電子ガスはいわゆる表面バンドとは異なり、電気伝導に寄与する伝導帯中の自由電子が表面に閉じ込められたものである。

従って、実際にトランジスタなどに用いられている二次元系と同様の電子系に対して、そのナノスケールでの振る舞いを直接表面からSTMで観測することが可能にな

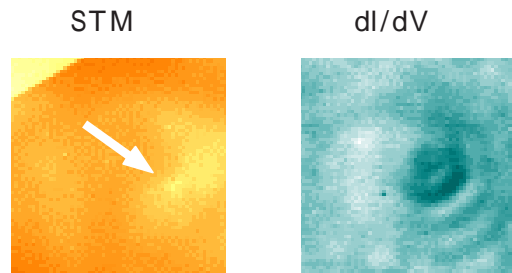


図5 . 5.3Kで得られたInAs(111)A表面の定電流67 nm × 67nm STM像と同時に測定されたdI/dV像。バイアス電圧は0.14Vで、dI/dV像は局所状態密度に対応する。Friedel振動の特徴として点状の散乱体(STM像に矢印で表示)の周囲に同心円状の局所状態密度の振動が現れている。

る。図5はたまたま結晶中に存在する転位(点状の散乱体として振る舞う)の周辺のSTM像と、dI/dV像である。dI/dV像は局所的な状態密度に対応している。得られた局所状態密度はちょうど水面に石を投げ込んだときのような同心円状の波紋を示し、この周期から得られた波長とエネルギーの関係はInAs中の伝導電子の特性を良く反映している。このことから、得られた同心円状の波紋は転位に散乱された二次元電子の電子波が作るFriedel振動と結論でき、電子の波の性質から来る状態密度の局所的振動が直接測定されたことがわかる。今後は、この測定結果を量子ドット構造や、結合量子ドット構造の電子の振る舞いのナノスケールでの測定に応用して行く。

低温ナノプローブ技術では電氣的測定以外に光学的測定も大変興味深い。H12年度は極低温(5K)・強磁場(6T)にて動作する近接場顕微鏡を開発した。極限環境下における高精度測定のために1.5μm光通信部品を用いた干渉式AFMフィードバック装置を導入し、安定したAFM像・SNOM像の取得が可能となった。また、高効率の分光解析のために測定画像範囲内全点のスペクトル測定を行う高速分光計測系を開発した。これを用いて変調ドープGaAs単一ヘテロ構造中の二次元電子系(2DEG)の局所分光観測を行った(図6)。同時に観測される自由励起子発光と比較して2DEG発光には強度の空間分布があること、さらにスペクトルが試料上の位置に依存することを明らかにした。これらの結果は2DEGがヘテロ界面付近のポテンシャル揺らぎ等の影響を強く受けていることを示唆している。また、強磁場中における測定を行い、発光ピーク波長が磁場によりシフト

する現象を観測するとともに、2DEGの発光強度が磁場印加により無磁場時の1000倍にも増大する新現象を見出した。この増大現象は2DEGの高移動度と磁

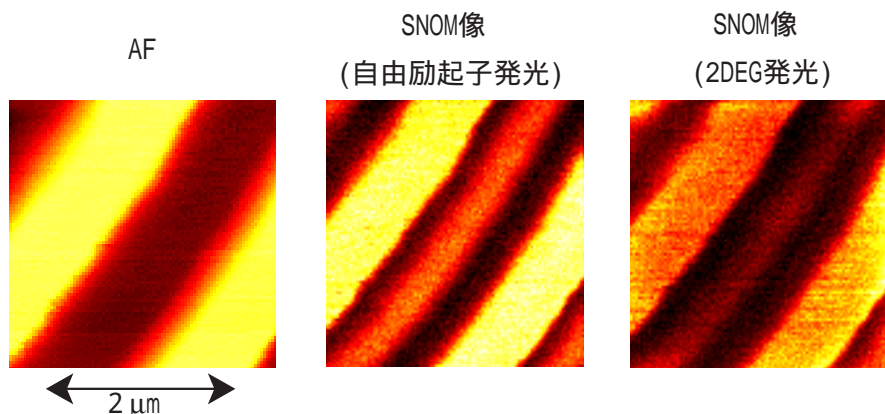


図6 . 1mm-line & space でエッチングされた単一ヘテロ構造のAFM像と発光SNOM像。ヘテロ構造の存在するline構造に対応した部分で強い発光が観測される。自由励起子発光では均一に発光するのに対して、2DEG発光では不均一性の強いことが分かる。

場によるキャリア閉じ込め効果に関係しているものと考えられる。

ナノプローブの高速応答への応用も極めて重要なテーマである。超高速・超微細な電子デバイスの動作解析、あるいは、その基となる半導体量子構造の電子相関現象の観測を目的として、超高真空下で動作する電気力顕微鏡を開発した。探針接触時のプローブ顕微鏡導電性探針 - サンプル系の回路特性はマイクロ波帯ネットワークアナライザ(アンリツ社製、40MHz~13.5GHz)により、また、非接触時の探針先端の電圧 - 周波数特性はヘテロダイナミクス検出法により解析した(図7)。その結果、市販の導電性探針では数GHz以上の周波数で実際の探針電圧の落込みが明らかになった。高周波数帯域での探針の特性を改善するために、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数帯域用カンチレバーを提案し、その作製プロセスの検討を行った。

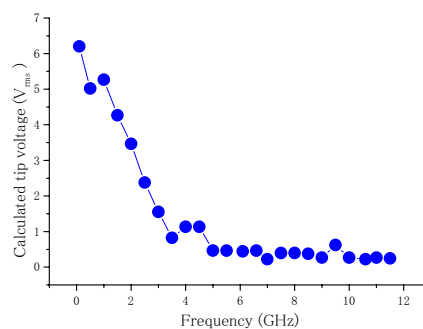


図7 . 探針非接触時の探針先端の電圧 - 周波数特性

3.4. キャリアダイナミクス

キャリアのダイナミクスの測定はキャリア相関の評価、量子ビットとしての振る舞いの測定に必要不可欠なものであり、THz領域でのキャリアダイナミクスの

測定技術、量子ドット構造を用いた低温パルス測定技術の確立、さらにそれら測定の物性研究への応用を中心に研究を進めている。

フェムト秒レーザーパルスにより励起されたキャリアが、急速に加速・減速されると、電子はその加速度に比例した電磁波(多くの場合テラヘルツ(THz)領域に成分を有する)を放射する。このTHz電磁バーストは、半導体中でおきる超高速現象(加速、散乱、トンネル効果など)の情報を含むのみならず、線形応答理論によれば高周波の電気伝導度の情報も含んでいる。我々は、超高速・広帯域テラヘルツ電磁波検出技術の開発、半

導体量子構造中の電子伝導のコヒーレンスや電磁波に対する利得の有無などを明らかにすることを目標に研究を行って来た。H12年度は、ZnTeやGaPなどの電気光学結晶を用いることにより、テラヘルツ電磁波の振幅と位相を検出できるシステムを構築した。さらに、半導体超格子中のミニバンドを伝導する電子が放出するTHz電磁波を実時間領域で検出することにより、超格子中のダイナミクス、およびプロッホ振動を用いたテラヘルツ電磁

波の発生・増幅・検出の可能性について探索を行った(図8)。特に、(1)電子の散乱による通常のバンド伝導から、プロッホ振動を伴うStark梯子伝導への移行の様子を明らかにした。(2)従来、プロッホ振動が起きないと思われていた、光学フォノンエネルギーよりも広いミニバンド幅を有する超格子においても室温でプロッホ振動する様子を確認した。(3)放射されたTHz電磁波のパワースペクトルを検討したところ、Stark梯子の形成とともに特異な低周波成分の減少が見られた。今後、超格子のTHz電磁波に対する利得の議論を展開する予定である。

量子ドットのキャリアダイナミクスにおいてもH12年度は進展があった。まず、パルス測定を繰り返してその平均としてキャリアダイナミクスを求める測定では、nsecオーダーまでのパルスを量子ドットのゲートに加えて、量子ドットに非平衡状態を形成し、その状態が継続する時間から量子ドット中の電子のダイナミクスを測定した。その結果、量子ドット中の励起状態から基底状態への電子の

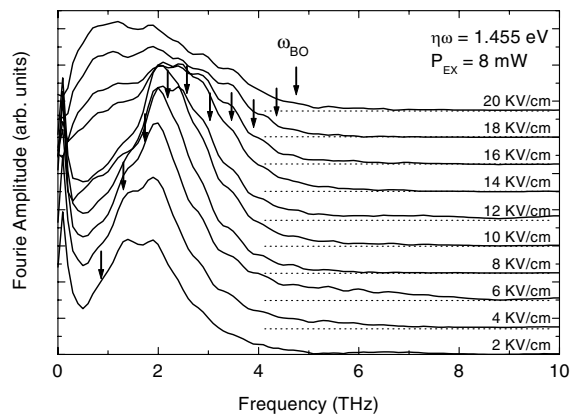


図8 . 室温において測定した、ミニバンド幅100 meVのGaAs/AlGaAs超格子から放射されたTHz電磁波のパワースペクトル。Stark梯子が形成される電界(約15 kV/cm以上)以上では、1 THz以下の周波数領域でスペクトル強度の減少が見られる。

緩和には、通常予想されるnsecオーダーの速い緩和と、 μsec を超える極めて長い緩和が存在することが明らかになった。極めて長い緩和は励起状態と基底状態が異なるスピン状態を有しているときに現れると考えられ、零次元系に特有の現象である。この成果は量子ドット中で電子が励起状態に長く留まれる可能性を示しており、量子ドット中の電子を用いた量子ビットやスピントロニクスデバイスの研究を勇気付けるものである。

さらに、繰り返し測定の平均としてではなく一回の現象を高速で測定するパルス技術も検討した。特に

RF-SET(radio-frequency single-electron-transistor

(SET ; 単電子トランジスタ)

技術を改良して透過型のRF-SETを実現し量子

ドットの近傍に存在するトラップの電子の出入りをリアルタイムでモニタした。

これはトラップに電子が捕獲されている場合としない場合でSETのコンダク

トンスピークの位置が僅かにずれ、このずれが高精度に測定できることを利用した

もので、図9に示したように電子のトラップへの出入りがテレグラム信号として測定される。

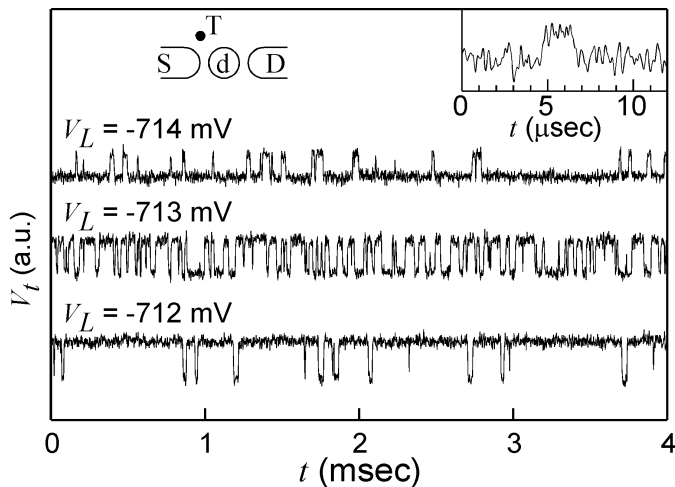
一番短い応答を見ると $1\mu\text{sec}$ より速い時間分解能で単電子の動きをモニタできることがわかる。

$1\mu\text{sec}$ 間隔で電子が1個透過することは直流電流で 0.16pA に相当し、これは通常単電子トランジスタなどで測定されている電流値である。

従って、トラップを量子ドットなどに置きかえれば、量子ドットなどのメソスコピック系を流れる電子を統計的に測定することが可能になることを示している。

時間分解能をさらに一桁以上改善する必要があるが、RF-SET技術は半導体量子ビットの入出力技術としても大変魅力的である。

図9 . 量子ドットの左側のゲート(ソース(s)と量子ドットの間)に与えられたゲート電圧 V_L とランダムテレグラム信号(STM)。 V_L はトラップが電子を捕獲しているとき高くなり、トラップが電子を放出すると低くなる。右側挿入図は測定された一番速い時間応答の拡大図であり、左側挿入図はトラップの位置(Tで表示)も含めた量子ドット構造の概略図である。



3.5. 量子情報処理

量子コンピューティングおよび一般に量子情報処理において最も重要なエレメ

ントであるqubitとは、重ね合わせ状態を保持・操作・read/writeすることが可能な二準位系である。単一qubitでできることは限られており、複数のqubit間の量子相関すなわちエンタングルメントこそが量子コンピューティングおよび多くの量子情報処理において必須の概念となる。現在、二つのqubit間のエンタングルメントは理論的に確立された概念であり実験的にも確認されているが、三つ以上のqubit間のエンタングルメントの分類やその度合いを測る量の概念は理論的にも確立されていない。そこで、量子コンピューティングに必要な多数のqubitの相互作用は専ら二つのqubit間のエンタングルメントの組み合わせで構成されているが、多qubitのエンタングルメントの概念や性質を明らかにできれば量子コンピューティングをより簡単な構成で済ませられる可能性もある。

このような事情のもと、研究すべき方向は多qubitと2qubitになるが、(1)多qubitで実現できる(2qubitの)エンタングルメントの上限やそれを実現する相互作用は何か、(2)重要だが実現困難とされる2qubitエンタングルメント演算である「制御NOT」を簡単に実現できないか、等に関する基本的研究が重要となる。(1)に関しては量子レジスターにおけるドットの配置として一次元配置(近接2ドット間のみ相互作用)、無限次元配置(実際には1次元有限個でも外場を介して任意の2ドットが相互作用するモデル)および放射状スター配置(中枢ドットとそれ以外の各ドットの間だけ相互作用)でどう異なるかに興味を持たれる。特に「無限次元配置ではエンタングルメント上限値はドットの数に反比例」することが明らかとなった。次に具体的相互作用として半導体ドットの理論にも現れるvan-der-Waals相互作用を仮定した場合の上限や達成方法を明らかにし数学的上限に近いエンタングルメントを物理的なドット間の相互作用で達成できることを明らかにした。この研究はプロジェクト内の実験グループと理論グループの共同研究として行った。この成果をさらに半導体系での実験可能性の検討へ進める予定である。

(2)の「制御NOT」実現法については、エンタングルした光子対と線形素子(ビームスプリッターなど)のみを用いる方法を提案した。これは毎回確実にではないが、高い確率で制御NOT作用を引き起こし、それに成功したか否かを毎回モニターできる方法である。これに関連し、より実現の可能性がある「不完全エンタングルメントを有する複数のqubitペアから完全なエンタングルメントを有する1つのペアを発生する方法」の研究を現在進めている。さらに、複数qubitのエンタングルメントに関する(1)(2)以前の問題として、1つのqubitを所望の量子状態に自由に準備することが不可欠である。その一手段として提案された「quantum scissors」と呼ばれる概念を実現する具体的方法も提案した。これはまた「線形素子を使ったテレポーテーション」とも言えるもので、qubitアレイにおける量子状

態のパケツリレー的輸送などへの応用も考えられる。これらに関する基礎実験は光子で行うのが適当であるので、その準備も進めている。

3 . 主な研究成果の発表 (論文発表)

1 - 1 論文発表 (国外)

T. Fujisawa, Y. Hirayama : "Charge noise analysis of an AlGaAs/GaAs quantum dot using transmission-type radio-frequency single-electron transistor technique". Appl. Phys. Lett. 77 p. 543, 2000.

H. Yamaguchi, Remi Dreyfus, Y. Hirayama, S. Miyashita, "Excellent electric properties of free-standing InAs membranes", Appl. Phys. Lett. Vol.78, P.2372, 2001.

Takahito Inoue, D.F. Ogletree, M. Salmeron, "Field emission study of diamond-like carbon films with scanned-probe field-emission force microscopy" Appl.Phys.Lett., 76, p.2961, 2000.

A. Taguchi, Y. Hirayama : "Stable site and stable charge state of a fluorine atom in Si". Solid State Communications Vol. 116 p.595, 2000

T. Fujisawa, Y. Tokura, Y. Hirayama : "Transient current spectroscopy of a quantum dot in the Coulomb blockade regime". Phys. Rev. B Vol. 63, 081304(R), 2001.

K. Hirakawa, K. Yamanaka, M. Endo, and S. Komiyama : "Far-infrared photoresponse of the magnetoresistance of the two-dimensional electron systems in the integer quantized Hall regime", Phys. Rev. B, vol. 63, p. 85320, 2001.

M. Koashi and M. Ueda, "Exact eigenstates and magnetic response of spin-1 and spin-2 Bose-Einstein condensates," Phys. Rev. Lett. 84, No.6, pp.1066-1069, 2000.

S. De Franceschi, S. Sasaki, J. M. Elzerman, W. G. van der Wiel, S. Tarucha, L. P. Kouwenhoven : "Electron Cotunneling in a Semiconductor Quantum Dot", Phys. Rev. Lett. 86, p878, 2001.

K. Kanisawa, M. J. Butcher, H. Yamaguchi, Y. Hirayama : "Imaging of Friedel oscillation patterns of two-dimensionally accumulated electrons at epitaxially grown InAs(111)A surfaces". Phys. Rev. Lett. Vol. 86, No. 15, p.3384, 2001.

M. Koashi, V. Buzek, and N. Imoto, "Entangled webs : Tight bound for symmetric sharing of entanglement," Phys. Rev. A62, 050302(R), 2000.

V. Buzek, P. L. Knight, and N. Imoto, "Multiple observations of quantum clocks," Phys. Rev. A62, 062309, 2000.

M. Koashi, T. Yamamoto, and N. Imoto, "Probabilistic manipulation of entangled

photons," *Phys. Rev. A* 63, 030301(R), 2001.

J. H. Roslund, H. Yamaguchi, Y. Hirayama, "Electrical properties of InAs/AlSb/GaSb double quantum well structures", *Inst. Phys. Conf. Ser.* 166 p.127, 2000.

A. Kawaharazuka, T. Saku, Y. Horikoshi, Y. Hirayama, "Channel depth dependent transport characteristics of a two-dimensional electron gas in an undoped GaAs/AlGaAs heterostructure", *Inst. Phys. Conf. Ser.* 166, p.151, 2000.

S. Sasaki, S. De Franceschi, J. M. Elzerman, W. G. van der Wiel, M. Eto, S. Tarucha, & L. P. Kouwenhoven : "Kondo effect in an integer-spin quantum dot", *NATURE*, 405, p764, 2000.

W. G. van der Wiel, S. De Franceschi, T. Fujisawa, J. M. Elzerman, S. Tarucha, L. P. Kouwenhoven : "The Kondo Effect in the Unitary Limit", *SCIENCE*, 289, p2105, 2000.

S. Tarucha, D.G. Austing, S. Sasaki, Y. Tokura, W. van der Wiel, L.P. Kouwenhoven : "Effects of Coulomb interactions on spin states in vertical semiconductor quantum dots", *Appl. Phys. A* 71, p367, 2000.

A. Miranowicz, J. Bajer, M.R.B. Wahiddin, and N. Imoto, "Wehrl information entropy and phase distributions of macroscopic quantum superpositions," *J. Phys. A*, vol.34, pp.1-10, 2001.

S.-W. Lee, K. Hirakawa, and Y. Shimada : "Modulation-doped quantum dot infrared photodetectors using self-assembled InAs quantum dots", *Physica E*, vol. 7, pp. 499-502 (2000)

Ph. Lelong, S.-W. Lee, K. Hirakawa, and H. Sakaki : "Fano profile in intersubband transitions in InAs quantum dots", *Physica E*, vol. 7, pp. 174-178, 2000.

S. Tarucha, D.G. Austing, S. Sasaki, Y. Tokura, W. van der Wiel, S. de Franceschi and L.P. Kouwenhoven : "Spin effects in semiconductor quantum dot structures", accepted for publication in *Physica E*.

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

S. Tarucha, D.G. Austing, S. Sasaki, Y. Tokura, J.M. Elzerman, W. van der Wiel, S. de Franceschi, and L.P. Kouwenhoven : "Novel Kondo Anomaly in Quantum Dots", accepted for publication in *Journal Materials Science and Engineering B*.

S. -W. Lee, K. Hirakawa, and Y. Shimada : "Mid-Infrared Photodetector using self-

assembled InAs quantum dots embedded in modulation doped GaAs quantum wells", MRS Symposia Proceedings, Vol. 607 Infrared Applications of Semiconductors III, pp. 147-152, 2000.

T.Onuki, Y.Watanabe, T.Tokizaki and T.Tani, "Anodic oxidation and optical observation of metal thin film using scanning near-field optical microscope", Near-Field Optics : Principles and Applications, World Scientific, Singapore, pp.246-250, 2000.

Y. Yamamoto, M. Stopa, Y. Hirayama, Y. Tokura, and S. Tarucha : "Coulomb drag in parallel quantum wires", Proc. of the 25th Int. Conf. on the Physics of Semiconductors, World Scientific, Osaka. Editor Tsuneya Ando, in print, 2001.

1 - 2 論文発表 (国内)

T. Fujisawa, Y. Hirayama : "Transmission type rf single electron transistor operation of a semiconductor quantum dot" Jpn. J. Appl. Phys. Vol.39 p.2338, 2000

K. Muraki, N. Kumada, T. Saku, Y. Hirayama : "n+-GaAs back-gated double-quantum-well structures with full density control", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 39 p.2444, 2000

J. H. Roslund, K. Saito, K. Suzuki, H. Yamaguchi, Y. Hirayama : "Electron and hole Proximity effects in the InAs/AlSb/GaSb system", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 39 p.2448, 2000

S. Nuttinck, K. Hashimoto, S. Miyashita, T. Saku, Y. Yamamoto, Y. Hirayama : "Quantum Point Contacts in a Density-Tunable Two-Dimensional Electron Gas", Jpn. J. Appl. Phys. 39 L655, 2000.

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

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

K. Ozdemir, A. Miranowicz, M. Koashi, and N. Imoto, "Experimental Scheme for State Truncation and Teleportation using Quantum Scissors", Proc. of the IEICE Quantum Information and Technology Workshop (QIT 4) Tokyo Inst. Tech., 2000 pp.9-13.

A. Miranowicz, S. K. Ozdemir, M. Koashi, and N. Imoto, "Classical information of Schrödinger cat and cat-like states," Proc. of the IEICE Quantum Information and Technology Workshop (QIT 4) Tokyo Inst. Tech., 2000 pp.15-20.

樽茶清悟：“人工原子分子のユニークな物理”、パリティ、No.6, p15, 2000.

佐々木智, 樽茶清悟：“縦型量子ドットにおける新型近藤効果”、固体物理、vol35, p887, 2000.

1 - 3 その他

S. K. Ozdemir, S. Shinohara, and G. Lai, "Speckle signal generation in self-mixing laser diodes and its use for speckle velocimetry," Interferometry in Speckle Light : Theory and Applications, Edited by P. Jacquot and J.-M. Fournier, Springer, pp.41-48, 2000.