

戦略的創造研究推進事業  
ナノテクノロジー分野別バーチャルラボ  
研究領域「超高速・超省電力高性能ナノデバイス・  
システムの創製」  
研究課題「半導体スピンエンジニアリング」

## 研究終了報告書

研究期間：平成14年11月～平成20年3月

研究代表者： 新田 淳作  
(東北大学大学院工学研究科 教授)

## 1 研究実施の概要

半導体の最大の特徴は、第三電極を用いた電氣的な制御（三端子動作）が可能であるところにある。これゆえ、基礎物理からデバイス応用までこれまで重要なブレークスルーが数多くなされてきた。しかしながら、これまで、半導体では、主に電子の有する「電荷」という側面に着目して研究・開発がなされてきた。本研究は、半導体の電子のスピンに関連した特性として（１）交換相互作用、（２）スピン軌道相互作用、（３） $g$ -因子に着目し、これらをゲート電極により電氣的に制御し、半導体中のキャリアスピンを自在に操作、制御する手法を開発することを目的とする。これにより、従来にないスピンの自由度に起因した新しい機能を創出し、将来の超高速、超省電力、高機能化が可能な量子情報処理デバイスの基本素子として貢献することを目指す。本研究プロジェクトは、量子力学的手法により半導体ヘテロ界面及び微細構造を設計し電界により電子スピンを制御する方法を開発するものであり「半導体スピンエンジニアリング」と呼ぶことができる。電子スピンの電界制御方法が確立すれば、これまでの磁界を用いた制御方法に比べて高速にかつ局所的にスピンを制御することが可能となりスピン機能デバイス化、スピンを用いた量子情報処理に不可欠な要素技術となる。

### （１）交換相互作用の電氣的制御方法の確立

交換相互作用の電氣的な制御として、金属磁性で知られている RKKY 相互作用を半導体量子ドット中で実現することを目指して研究を進めた。（１）半導体中量子ドット内に局在スピンができたとして、RKKY 相互作用がどれくらいの大きさになるのか、室温動作が可能かどうかなどを、理論計算により見積もる。（２）単一量子ドットを量子細線に結合させたデバイスを作製し、ドット中電子数の変化により細線の伝導度の変化を観測し、コヒーレントな結合が実現されていることを確認する。（３）２つの量子ドットを量子細線と結合させたデバイスを作製し、その両方に近藤効果が同時に発生させて、RKKY 相互作用の観測を行う。

我々は細線を介して結合した２つのドットスピンに近藤効果を発生させ、ドット・細線間の結合の強さを変えたときに生じる近藤効果の変化を通じて RKKY 相互作用の有無を観測することを試みた。量子ドット１の中の電子数が奇数のときにだけ、量子ドット２の近藤効果が抑制されているをこと実験的に観測した。すなわち、空間的に離れた２つの量子ドットから遠隔的に近藤効果のオン・オフ制御が実現できることを示すことに成功した。以上のように、量子ドットを用いた RKKY 相互作用に関する理論予測から始まり、デバイス設計、測定系立ち上げ、そしてデバイス構造の改良を重ねながら、RKKY 相互作用の端緒を掴むところまで到達した。デバイスの品質向上や構造最適化も進み、確証を得るのは時間の問題と考えている。半導体材料を用いて RKKY 相互作用を通じた２スピン間相互作用が確認できれば、チューニング可能なスピントロニクスデバイス素子として大きな意味があり、我々の成果はそこへ向けてあと一歩まで近づいたと考える。

我々は、半導体二次元電子系に周期ポテンシャルを印可すると自由電子のバンド構造が変調できることを利用して、所望の物性が出るように周期ポテンシャルを設計するアイディアから出発した。これは一種のバンドエンジニアリングであり、ポテンシャルが深ければ量子ドットの周期列からなる量子ドット超格子とも見なすことができる。我々は、カゴメ型格子構造を持った量子

ドット超格子が強磁性を発現することを理論的に提案し、それが実験的に観測可能であることを示した。我々の提案を実験的に実証するためには、ポテンシャル一周期当たり電子が数個という非常に電子密度の低い領域を取り扱う必要があり、周期構造中の極低密度の電子系を研究する手段として光学的手法が有力であると考えられる。

電子線リソグラフィ法を用いてGaAs量子井戸構造上に作成したドット間100 nm周期から500 nm周期の格子型ゲート構造中電子系の状態の研究を行った。100 nm x 100 nmの量子ドットに電子1個存在する場合の電子密度は $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ に相当する。この低電子密度領域で電子密度を制御するために、非ドープの量子井戸の井戸層にオーミックコンタクトを取り、裏面ゲートとの間に電圧を印加する方法で電子密度を制御する手法を採用した。電子状態の評価には、電子占有数 $\nu$ が整数や分数の時に見られる光遷移エネルギーの異常、電子系の圧縮率と相関のあるキャパシタンススペクトル、および円偏光発光分光法を用いたスピン分極度、スピン分裂エネルギーの測定を用いた。電子密度の低下に伴い、電子間相互作用により電子と正孔の有効質量が増大することを見いだした。また、整数電子占有数においてスピン分裂エネルギーが極大値を持ち、その値が電子占有数に依存することを見いだした。電子密度を連続的に低下させてキャパシタンススペクトル測定を行った結果、金属絶縁体転移点の直前に電子圧縮率の異常を観測した。これらの現象は電子間相互作用に起因したもので、強磁性転移の前駆的現象であると考えられる。

## (2) スピン軌道相互作用の電氣的制御とスピン機能デバイス化

スピン軌道相互作用は、電界（電場）中を電子が運動することにより、電界が有効な磁場（磁界）に変換される相対論的な効果である。したがって、もしこの電界が制御できれば、スピンの感じる有効な磁場の強さを変えることができるはずである。これまで、スピンは磁気的な特性を持つことから、スピンと容易に結合する磁場によって制御されてきた。スピン軌道相互作用は磁場や磁性体を用いることなく、電界でスピンを制御したり、スピン偏極したキャリアを生成する有効な手段となる。すなわち、スピン軌道相互作用の強さを電界により制御する方法を確立することはスピントロニクスやスピンを用いた量子情報処理技術に不可欠である。

InGaAs を量子井戸とする InP/InGaAs/InAlAs ヘテロ構造の InGaAs 層の厚さがスピン軌道相互作用のゲート電圧依存性に大きな影響を与えることを見出した。具体的には、5 nm InGaAs チャネルではスピン軌道相互作用の強さ $\alpha$ はゲート電界とともに強くなるが、10 nm InGaAs チャネルではゲート電界とともに $\alpha$ は減少する。すなわち InGaAs の膜厚によりスピン軌道相互作用のゲート電圧依存性を逆転させることに成功した。

固体中でスピンのダイナミクスを司るのはゼーマン効果とスピン軌道相互作用である。ゲート電界によりスピン軌道相互作用を系統的に制御可能であることを利用して、ゼーマン効果とスピン軌道相互作用の競合について調べた結果、ゼーマン効果はスピンの緩和時間を増大する効果をもたらすことを明らかにした。さらに、位相緩和時間がゼーマンエネルギーとスピン軌道相互作用のエネルギーの比によって普遍的な振る舞いを示すことを見出すことに成功した。これは量子干渉デバイスの設計やスピンドダイナミクスの基礎物理の理解に重要な知見を与える。

ゲート電界により制御可能なスピン軌道相互作用を用いたデバイスとしてスピン干渉デバイス提案してきたが、微細加工により多重スピン干渉ループ構造を作製し、スピン干渉効果を観測することに成功した。この結果は、キャリアスピンの歳差回転角度がゲート電界により制御できることを示している。また、スピン干渉効果の観測は、電界によるスピン位相の制御に起因した干渉効果であり電子版アハロノフ・キャッシャー効果の直接的な観測に相当し基礎学問的価値の高い成果である。

「任意多角形におけるスピン軌道相互作用に基づくスピン干渉効果」についての基礎理論的な検討を行った。また、以前より得られていた実験結果である「InGaAs/InAlAs 量子井戸を用いた正方形ループ配列におけるスピン干渉効果」について解析するとともに、理論的にも、(a)構造反転非対称性に基づく Rashba 効果、(b)結晶反転非対称性に基づく Dresselhaus 項、双方の効果をとり入れた詳細な解析を行い、実験結果をほぼ定量的に説明することに初めて成功した。

スピン軌道相互作用を用いて、有効磁場の空間勾配を作ることにより、Stern-Gerlach 効果に起因したスピントロニクスが形成できることを理論提案した。現在、その動作確認に向けた実験を行っているところである。磁性体や磁場を一切用いることなく、半導体中にスピン偏極したキャリアが生成されればスピントロニクスの分野にとどまらずスピンを用いた量子情報処理においてもスピンの初期化、読み出し等、多くの応用と展開が期待できる。

電界効果スピントランジスタへ向けての取り組みとして磁性体から半導体へのスピン注入実験を行った。垂直磁気異方性を持つ FePt を用いて半導体 GaAs 上にエピタキシャル成長させることによりゼロ磁場でスピン注入を確認することに成功した。スピン偏極率は低温で 1%程度であるが、面直スピン偏極キャリアはスピンホール効果の電氣的検出や、GaAs (110) 面では  $z$  軸がスピンの良い量子化軸となるためスピン緩和時間が非常に長くなる特徴を持っており、デバイス応用面からも重要な成果である。

本プロジェクトによって検証された電界によるスピン回転制御とスピン注入技術はスピントランジスタなどスピン機能化デバイスに向けての要素技術を提供するものである。

### (3) $g$ -因子の電氣的制御方法の確立

InAs 層挿入 InGaAs チャネルは、InAlAs に比べバンドオフセットが小さいため、ゲート電圧により電子波導関数の分布が  $g$ -因子の異なった InAs から InGaAs へとすみだすことが容易で、 $g$ -因子の大きな変化が期待できる。 $g$ -因子を評価する方法として、角度変調磁場中での磁気抵抗測定を行い、InAs 層挿入 InGaAs チャネルの  $g$ -因子を評価した。その結果、InAs 層挿入 InGaAs チャネルの  $g$ -因子をゲート電圧により制御することに成功した。 $g$ -因子は、電子スピンを用いた量子情報において重要な役割を果たすことが指摘されている。量子情報は光を用いて伝送されるが、情報処理は量子ドットなど半導体中で行う必要がある。所望の量子ドットの電子スピンのみを反転操作するには、振動磁場に共鳴するスピン分離エネルギーをゲート電界により制御するため、 $g$ -因子をゲート電界により制御する必要がある。本プロジェクトで得られた成果は、 $g$ -因子エンジニアリングへ向けての知見を与えるとともに、量子情報技術への応用を可能にするものである。

## 2 研究構想及び実施体制

### (1) 研究構想

本研究は、半導体の電子のスピンに関連した特性として（１）交換相互作用、（２）スピン軌道相互作用、（３） $g$ -因子に着目し、これらをゲート電極により電氣的に制御し、半導体中のキャリアスピンを自在に操作、制御する手法を開発することを目的とする。これにより、従来にないスピンの自由度に起因した新しい機能を創出し、将来の超高速、超省電力、高機能化が可能な量子情報処理デバイスの基本素子として貢献することを目指す。

### サブテーマ名「半導体中の電子スピン電界制御方法の確立とスピン機能デバイス化の研究」

（東北大学大学院工学研究科 新田グループ）

スピン軌道相互作用や  $g$ -因子のゲート電圧制御のための半導体ヘテロ構造の設計と伝導特性評価を行い、ゲート電界によるスピン制御方法の確立を行う。このスピン制御技術をベースに、スピン干渉デバイス、スピントリカドなどスピン機能デバイスの作製を行いスピン伝導特性、デバイス特性の評価と最適化を行う。スピン軌道相互作用を用いたスピン干渉デバイスは北海道大学古賀グループと協力して研究を進める。また、 $g$ -因子の光学測定、磁性体から半導体へのスピン注入の光学的検出は、筑波大学野村グループと協力して研究を行う。

### サブテーマ名「量子ドット列における平坦バンド強磁性および RKKY 相互作用を用いた強磁性の研究」（NTT 物性科学基礎研究所 赤崎グループ）

交換相互作用の電氣的な制御方法の確立を目指す。具体的には、RKKY 相互作用を半導体量子ドット中で実現、量子ドット超格子構造における強磁性実現を目指し、量子ドット構造の理論的な設計と作製条件の最適化を行い、主に伝導特性からスピン特性を調べる。量子ドット超格子構造の光学的特性は筑波大学野村グループと協力して研究を行う。

### サブテーマ名「量子ドット列、二次元電子系の光学的手法による電子状態の研究」

（筑波大学物理系 野村グループ）

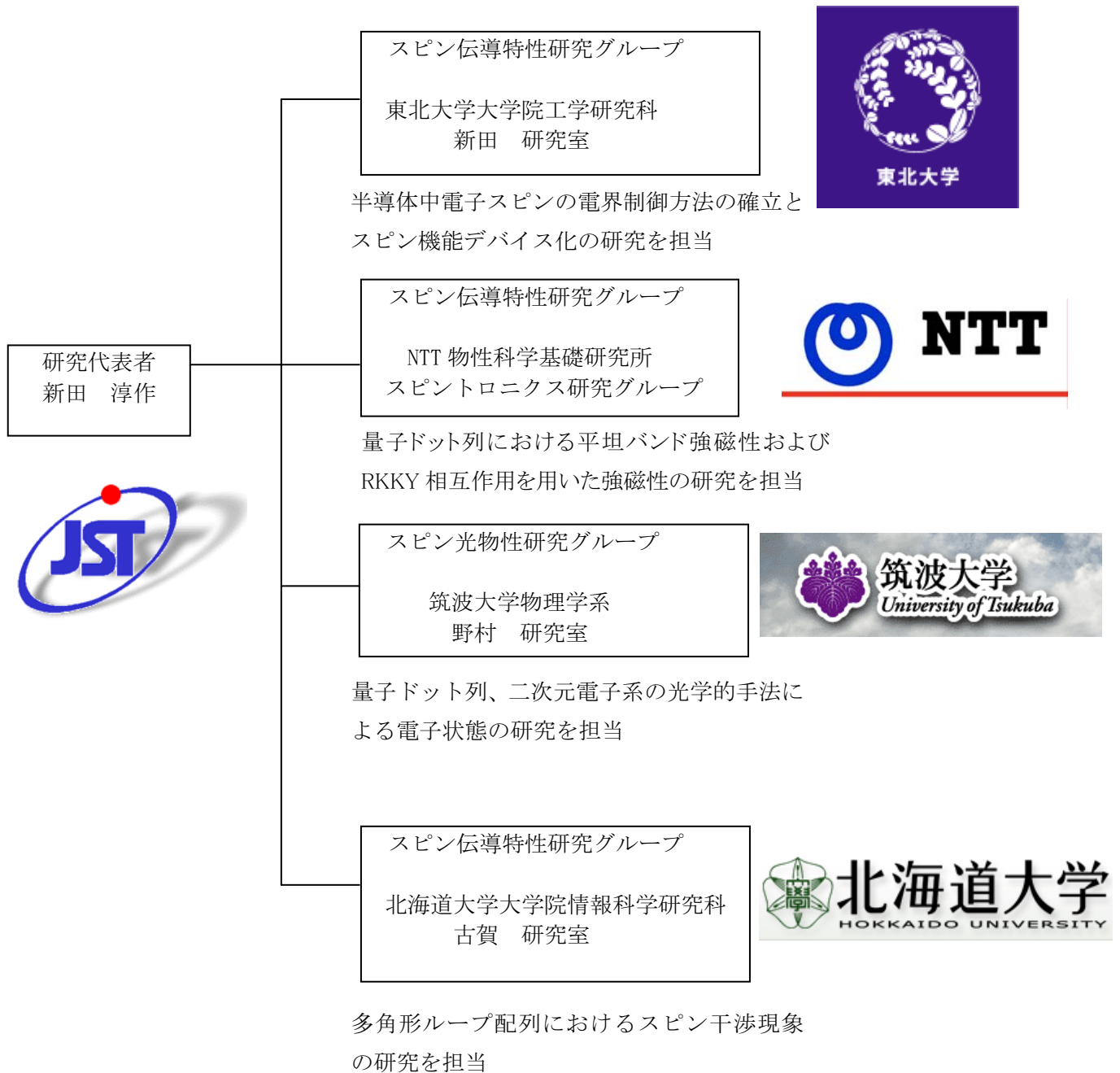
光学的手法により半導体量子ドット中電子系の状態観測、特に偏向分光法を用いたスピン状態の観測を行なう。具体的には（１）円偏向発光分光、ファラデー効果、カー効果測定等による量子ドット超格子中電子系の強磁性状態の検出、（２）スピントリカドやスピン注入などスピン機能デバイスの光学的特性によるスピン特性の評価を実施する。NTT 物性基礎研究所赤崎グループ、東北大学新田グループより提供された試料のスピンの光学的特性評価し、協力して研究を進める。

### サブテーマ名「多角形ループ配列におけるスピン干渉現象の研究」

（北海道大学情報科学研究科 古賀グループ）

ゲート電界により制御可能なスピン軌道相互作用として、構造反転非対称性に基づく Rashba 効果以外に、結晶反転非対称性に基づく Dresselhaus 項の効果を取り入れたスピン干渉効果の理論的、実験的な検討を行う。東北大学新田グループと協力して研究を進める。

(2) 実施体制



### 3 研究実施内容及び成果

#### 3. 1 サブテーマ名「半導体中の電子スピン電界制御方法の確立とスピン機能デバイス化」 (東北大学大学院工学研究科、新田 グループ)

##### (1)研究実施内容及び成果

デバイスの寸法を小さくすると、浮遊容量が小さくなり高速化・低消費電力化が図れることから、半導体エレクトロニクスは微細化を進めることによりその性能を飛躍的に発展させてきた。しかしながら、ムーアのスケーリング則も早晚破綻するであろうと予測されている。そこで、これまでの技術の延長にはない、新しい原理に基づくデバイス機能を追及していくことが求められる。従来の半導体エレクトロニクスは、LSI 論理回路をはじめとして、電子のもつ「電荷」の自由度のみをもちいてきた。一方、スピンを用いた磁気デバイスとして、磁性体金属が安定な磁気履歴特性を示すことから、ハードディスクドライブ (HDD) など不揮発性メモリとして応用されてきた。最近、ランダムアクセスメモリ (DRAM) に代わる不揮発性磁気メモリ (MRAM) が注目されている。しかしながら、これらの磁気デバイスはメモリあるいはセンサーに限られており、スピンを用いた能動デバイスはなかった。その理由は、磁性体金属をベースにしたデバイスであるがゆえに三端子ゲート電圧制御が困難であったことによる。

半導体エレクトロニクスが飛躍的に発展してきた背景には、微細化による高性能化が可能であったという事実とともに、第三電極によりチャンネルの特性を容易に制御できるという特徴を活かして、トランジスタとして機能化、能動デバイス化の道を開拓してきたところにある。そこで、次世代スピントロニクスデバイスを開拓してゆく上で、スピンを第三電極（ゲート電極）によって制御する方法を確立することが重要になってくる。本研究プロジェクトでは、 $g$ -因子及びスピン軌道相互作用をとりあげその起源にさかのぼり電界制御方法の確立を目指す。 $g$ -因子やスピン軌道相互作用は物質固有の定数ではなく、半導体のヘテロ構造の設計とゲート電界により制御可能な量であることを実験的に確認した。特に、ゲート電界制御可能なスピン軌道相互作用を用いたスピン機能デバイス化について行った研究成果を述べる。

##### 3-1. $g$ -因子のゲート電界による制御

$g$ -因子は、電子スピンを用いた量子情報において重要な役割を果たすことが指摘されている。量子情報は光を用いて伝送されるが、情報処理は量子ドットなど半導体中で行う必要がある。そこで、光-電子スピン変換において量子情報を失うことなく情報のやり取りをおこなうためには伝導帯の  $g$ -因子をゼロにすることが不可欠である。また、所望の量子ドットの電子スピンのみを反転操作するには、振動磁場に共鳴するスピン分離エネルギーをゲート電界により制御するため、 $g$ -因子をゲート電界により制御する必要がある。さらに、 $g$ -因子を決定する要因としてエネルギーギャップと価電子帯のスピンスプリットオフエネルギーが重要な役割を果たしており、半導体のバンドパラメータを設計することにより制御可能なパラメータである。しかしながら、 $g$ -因子の値を外部からゲート電界によりどの程度制御可能であるかは、次式に示すように現象論的には異なった  $g$ -因子を有する半導体ヘテロ構造の波動関数のしみだしの割合により決定され

ることが予想されているが、ヘテロ構造の詳細な検討と実験的な検証が必要である。

$$g_{total}(E) = g_{InAs}(E)\langle\Phi_{InAs}\rangle + g_{InGaAs}(E)\langle\Phi_{InGaAs}\rangle \quad (1)$$

$$\langle\Phi_{InAs}\rangle + \langle\Phi_{InGaAs}\rangle = 1$$

InAs 層挿入 InGaAs チャネルは、InAlAs に比べバンドオフセットが小さいため、ゲート電圧により電子波導関数が  $g$ -因子の異なった InAs から InGaAs へとすみだすことが容易で、 $g$ -因子の大きな変化が期待できる。 $g$ -因子は狭ギャップ半導体ほど大きく、バルクの InAs では  $g$ -因子は 15、InGaAs では 4 程度であることが知られている。 $g$ -因子を評価する方法として、コインシデンス法と呼ばれる角度変調磁場中での磁気抵抗測定を行い、InAs 層挿入 InGaAs チャネルの  $g$ -因子を評価した (図 1)。その結果、 $g$ -因子の絶対値はバルク InAs に比べ小さく、InGaAs に近い 4 から 3 までゲート電圧により制御することに成功した (図 2)。一方、上式と  $k \cdot p$  摂動法により求めた理論的に予想される  $g$ -因子のエネルギー依存性を比較したのが図 3-2 中の点線である。実験データは理論値よりやや小さくゲート電界に対する感度は高いことがわかるが、ほぼ定量的に上の現象論的な式で記述してよいことが確認された。このことから、バンドオフセットのより小さなヘテロ界面と大きな  $g$ -因子の異なった材料を組み合わせることによりゲート電界により大きく  $g$ -因子を制御できることを示している。

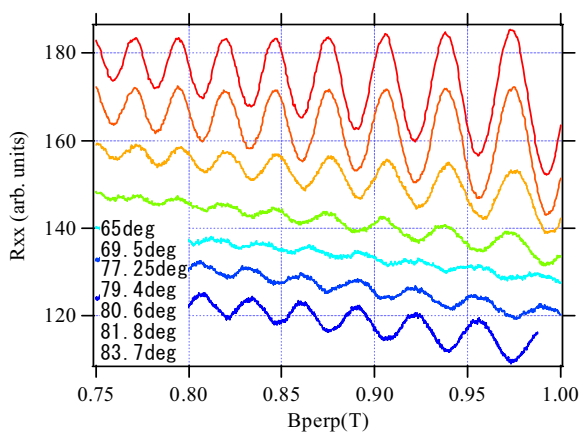


図 1 シュブニコフ・ドハース振動の角度依存性。振動が最小となる角度は、スピン分離したランダウ準位が等間隔になる場合に対応しこの角度より  $g$ -因子を求める。

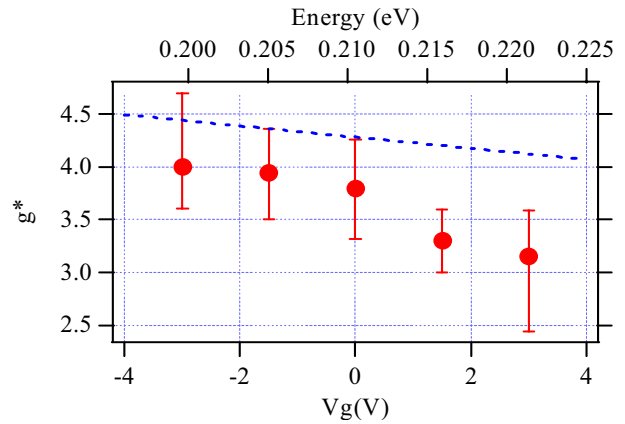


図 2  $g$ -因子のゲート電圧依存性。図中点線は  $k \cdot p$  摂動理論による計算結果を示す。

### 3-2. スピン軌道相互作用のゲート電界制御

スピン軌道相互作用は、電界（電場）中を電子が運動することにより、電界が有効な磁場（磁界）に変換される相対論的な効果である。有効な磁場は電場と電子の運動量に比例する。したがって、もしこの電界が制御できれば、スピンが感じる有効な磁場の強さを変えることができるはずである。これまで、スピンは磁気的な特性を持つことから、スピンと容易に結合する磁場によ



って制御されてきた。スピン軌道相互作用は磁場や磁性体を用いることなく、電界でスピンを制御したり、スピン偏極したキャリアを生成する有効な手段となる。すなわち、スピン軌道相互作用の強さを電界により制御する方法を確立することはスピントロニクスやスピンを用いた量子情報処理技術に不可欠である。

スピン軌道相互作用は、相対論的な効果であるため電子の速度が光速に近い、非常に強い電界でなければほとんどの場合無視できる。しかしながら、半導体の中では、バンドの効果により有効質量が自由電子の質量と比べてずっと小さくなるように、スピン軌道相互作用は無視できなくなる場合がある。実際、III-V 族半導体の価電子帯は、スピン軌道相互作用により、価電子帯より数 100meV 離れたスピンスプリットオフバンドを形成する。原子核の周りに束縛された電子は、電子波動関数の結晶に周期的な部分が、原子の強い電界中を運動するとともに、波動関数は空間的に急激な変化をとまうため、大きな運動量をもつこのため価電子帯のバンド構造に大きな影響を与えるためである。

Rashba のスピン軌道相互作用は、構造の空間反転対称性の破れにより起因するが、伝導帯におけるスピン軌道相互作用のエネルギーの大きさは、 $k \cdot p$  摂動理論によると、(3)式で与えられる。

$$\alpha = \frac{eP^2}{3} \left[ \frac{1}{E_0^2} - \frac{1}{(E_0 + \Delta_0)^2} \right] \sigma \times \langle E \rangle_v \quad (2)$$

$P$  は伝導帯と価電子帯のマトリックス要素、 $E_0$  はバンドギャップ、 $\Delta_0$  価電子帯におけるスピンスプリットバンドのエネルギー、 $\langle E \rangle_v$  は量子井戸のポテンシャルによるマクロスコピックな電界である。すなわち、半導体中では、スピン軌道相互作用のエネルギーは、波動関数が急激に変化している価電子帯からの寄与による比例係数と、量子井戸ポテンシャルによる電界に比例することを意味している。

スピン軌道相互作用の強さ  $\alpha$  を求める方法としていくつかあるが、我々は、シュブニコフ・ドハース振動に現れたビートの解析からスピン軌道相互作用がゲート電圧によって制御可能であることを実験的に確認した。しかしながら、この解析は、比較的高い磁場が必要でありゼーマン効果を考慮する必要がある。一方、弱反局在解析から求める方法は、ゼロ磁場近傍での磁気抵抗測定であり移動度の低い試料でも簡便に  $\alpha$  を求めることが可能である。ここでは、弱反局在解析によりスピン軌道相互作用を評価する。局在現象は電子の時間反転対称な干渉効果によって一種の定在波を形成した状況にある。このため、電気伝導度は定在波の存在によって小さくなった状態にあるが、磁場を印加することにより時間反転対称性が破れ伝導度の増加（正の磁気コンダクタンス）が観測される。一方、スピン軌道相互作用が存在するときはスピンの干渉を含めた量子コンダクタンスの補正を考慮すると負の磁気コンダクタンスを生じることになる。負の磁気コンダクタンスを示す磁場領域が大きいほどスピン軌道相互作用は強くなる。このように弱反局在効果を解析することによりスピン軌道相互作用の強さを評価できる。

本実験では、InGaAs を量子井戸とする InP/InGaAs/InAlAs ヘテロ構造の InGaAs 層の厚さがスピン軌道相互作用のゲート電圧依存性に大きな影響を与えることを見出した。具体的には、5 nm InGaAs チャンネルではスピン軌道相互作用の強さ  $\alpha$  はゲート電界とともに強くなるが、10

nmInGaAs チャンネルではゲート電界とともに $\alpha$ は減少する。すなわち InGaAs の膜厚によりスピン軌道相互作用のゲート電圧依存性を逆転させることに成功した。

この結果は、ポアッソン・シュレディンガー方程式と(3)式を用いて解析した結果、ヘテロ界面の作る電界の効果が極めて重要な役割を果たしていることが判った。これは、同じチャンネル材料を用いても膜厚や界面を含めて非常に注意深くヘテロ構造を設計する必要があることを示している。

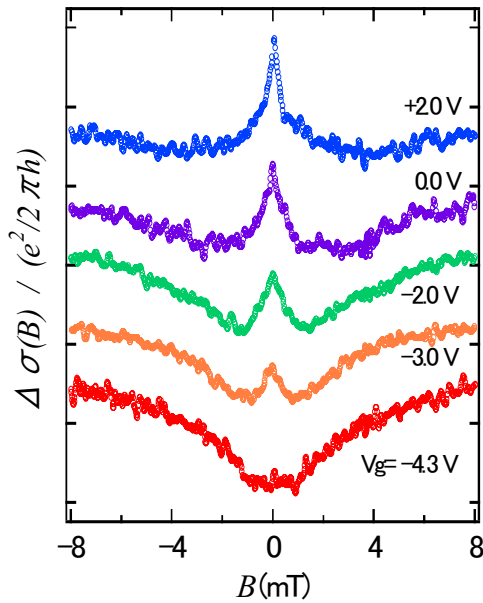


図3 5 nm InGaAs チャンネルにおける磁気コンダクタンス。ゲート電圧を増加するにつれ負の磁気コンダクタンスを示す磁場領域が増大しスピン軌道相互作用が増加することを示している。

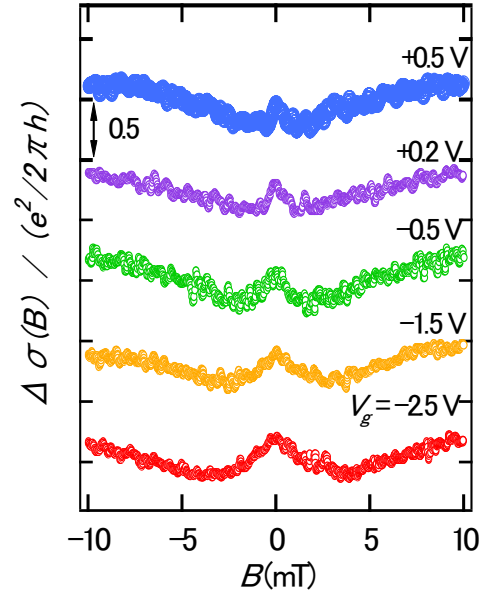


図4 10 nm InGaAs チャンネルにおける磁気コンダクタンス。ゲート電圧を増加するにつれ負の磁気コンダクタンスを示す磁場領域が減少しスピン軌道相互作用が小さくなることを示している。

図3には、InGaAs チャンネル層の膜厚 5 nm の磁気コンダクタンスのゲート電圧依存性を示す。ゲート電圧  $V_g = -4.3$  V では明瞭な負の磁気コンダクタンスは観測されず、局在効果が支配的であるが、ゲート電圧を増加させるに従い、弱反局在効果を示すゼロ磁場でのコンダクタンスのピークが現れ、負の磁気コンダクタンスの磁場領域が増加する。これは、ゲート電圧を増加するに従いスピン軌道相互作用が増加していることを示している。一方、InGaAs チャンネル層の膜厚 10 nm の磁気コンダクタンスのゲート電圧依存性は負の磁気コンダクタンスを示す磁場領域が減少しスピン軌道相互作用が小さくなることを示している(図4)。同じ InGaAs チャンネルであり、抵抗値もほぼ同じであるにもかかわらず、膜厚をわずかに変化させるだけでゲート電圧に対する応答は全く逆になることが判った。

これらの実験結果を D'yakonov-Perel' (DP) 機構に起因するスピン緩和を仮定した、Iordanskii, Lyanda-Geller, Pikus(ILP)による弱反局在理論を用いて解析することによりスピン軌道相互作用 $\alpha$ のゲート電圧依存性を求めたのが図5である。5 nm InGaAs チャンネルではゲート

電圧の増加とともに $\alpha$ は増加する。一方、10 nm InGaAs チャンネルではスピン軌道相互作用は減少することが判る。また、10 nm InGaAs チャンネルのほうがゲート電圧に対する感度（スピン軌道相互作用の変化する割合）が良いことが判る。

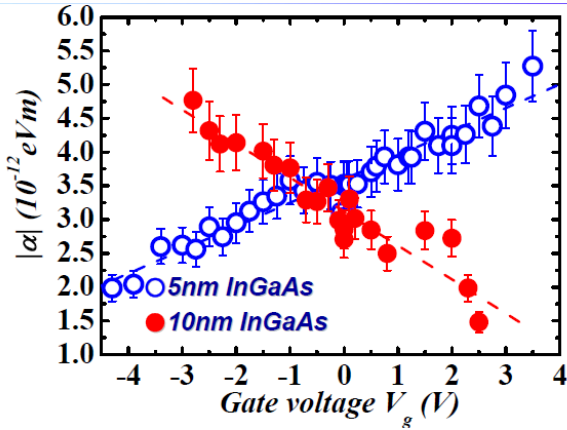


図5 スピン軌道相互作用 $\alpha$ のゲート電圧依存性。5 nm InGaAs チャンネルではゲート電圧の増加とともに $\alpha$ は増加する。一方、10 nm InGaAs チャンネルでは減少することが判る。

この実験結果を解析するため、ポアソン・シュレディンガー方程式を解いて電子波動関数の空間分布を調べ、量子井戸の電界分布、ヘテロ界面での電界の効果を計算し、k, p 摂動理論から導かれる Rashba のスピン軌道相互作用を求めた。5 nm InGaAs チャンネルでは InP/InGaAs 界面と InGaAs/InAlAs 界面の電子分布はほぼ対称であるが、10 nm InGaAs チャンネルでは InGaAs/InAlAs 界面の電子分布が集中し非対称となっている。しかしながら、InP/InGaAs 界面と InGaAs/InAlAs 界面の電界は逆符号でありスピン軌道相互作用をキャンセルするほうに利くため 10 nm InGaAs チャンネルでは量子井戸内の電界の効果が重要となる。一方、5 nm InGaAs チャンネルでは界面の電界と量子井戸の電界の効果の両方がスピン軌道相互作用に大きな影響を与えていることが明らかになった。これらの解析により、実験結果で観測された逆のゲート電圧依存性を説明できる。

この実験の重要なことは、スピン軌道相互作用は物質固有のパラメータではなく、半導体ヘテロ構造の設計や膜厚により変調可能なパラメータであることを実験的に示した点にある。さらにゲート電圧によってスピン軌道相互作用の強さが制御できることは、電界によって電子スピンの感じる有効磁場の強さを制御できることを示している。この事実は、以下に示すさまざまなスピンを用いた機能デバイス化に重要な役割を果たす。

### 3-3. 半導体中のスピンドायナミクス制御（ゼーマン効果とスピン軌道相互作用の競合）

固体中のスピンのダイナミクスを決める要因は、磁気不純物を除くとスピン軌道相互作用とゼーマン効果であるといって過言ではない。前節で、スピン軌道相互作用がゲート電界で制御可能であることを確認したが、ここでは、スピン軌道相互作用が制御可能であることを利用してスピンドायナミクスについてゼーマン効果とスピン軌道相互作用が与える寄与について系統的な実験を行った結果を示す。スピン緩和の問題は、スピンドバイス応用上重要であるとともに位相緩和時間は量子干渉デバイスにおいて重要な役割を果たす。デバイスの寸法が微細になるにつれ電子の波導関数に起因した量子干渉効果は避けられない問題であり、量子干渉効果に及ぼすスピンの

ダイナミクスは量子力学の重要な研究課題であるとともにデバイス設計にも大きな影響をもたらす。

この実験に使用した試料は、InP 基板上に格子整合した、InGaAs を二次元電子ガスチャネルとする InAlAs/10 nm-InGaAs/InAlAs ヘテロ構造である。ゼーマン効果は二次元電子ガス平面に平行になるように印加し、電子の軌道運動に影響を与えないようにした。また、ホールバー試料は、スピン軌道相互作用を制御するためのゲート電極で覆われている。量子干渉効果として局在効果（磁気コンダクタンス）のスピン軌道相互作用とゼーマン効果（平行磁場）依存性を測定した。図 6 にその一例を示す。ゼーマン効果がない場合（平行磁場=0）、スピン軌道相互作用に起因するコンダクタンスのピークがゼロ磁場付近に観測されている。平行磁場を  $B_{\parallel}/= 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 5.0, 8.0, 10.0$  T と徐々に増加しゼーマン効果の影響を強くしていくに従い、コンダクタンスのピークは減少し、約  $B_{\parallel}/= 2.5$  T でほぼ消滅する。この結果は、スピン軌道相互作用による有効磁場の強さは数 T であることを示唆する。さらに平行磁場を増加させると、正の磁気コンダクタンスも小さくなり局在効果も抑制されることが観測された。図中、ドットは実験結果であり、赤い実線は ILP 理論を用いた解析結果である。ILP 理論と実験データの解析よりスピン緩和時間と位相緩和時間を求めることができる。

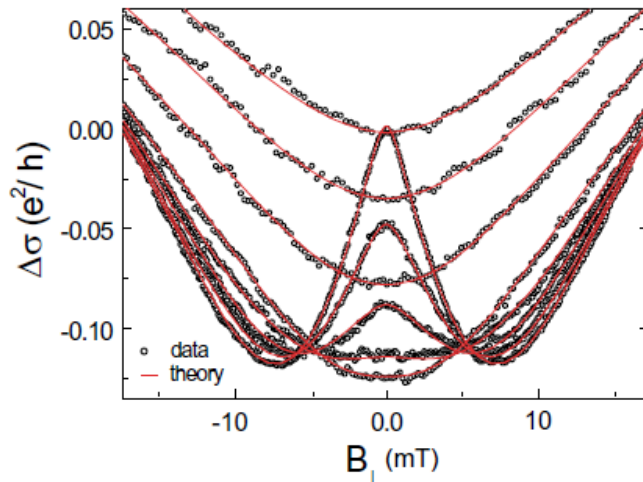


図 6 磁気コンダクタンスの平行磁場（ゼーマン効果）依存性。  $B_{\parallel}/= 0, 0.5, 1.0, 2.5, 5.0, 8.0, 10.0$  T と平行磁場を増加するにつれスピン軌道相互作用に起因するゼロ磁場付近のコンダクタンスピークが減少する。

図 7 には、ILP 理論を用いてフィッティングすることにより得られたスピン緩和時間の平行磁場依存性を示した。スピン緩和時間は、平行磁場がゼロの値で規格化してあるがゼーマン効果の影響が大きくなるにつれてほぼ  $B_{\parallel}^2$  に比例してスピン緩和時間は増加することが確認された。

また、スピン軌道相互作用が小さいほど増大効果は大きい。この結果は、V. A. Frolov (Phys. Rev. B 64 45311 (2001)) の理論とほぼ定量的に一致し説明できる。Rashba のスピン軌道相互作用の作る有効磁場の向きは  $\vec{B}_{\text{eff}} \propto \vec{p} \times \vec{E}$  となるため運動量ベクトルの方向と常に垂直な方向にある。電子スピンはこの有効磁場の周りを歳差運動するが散乱後は運動量方向が変化するため歳差運動の回転軸が変化することになる。一方、ゼーマン効果は、外部磁場に平行で常に一定のスピン歳差回転軸を与えるため運動量方向に依存したスピン回転軸を一定方向にそろえる

働きをする。このため、ゼーマン効果によりスピンの緩和時間は増大するものと考えられる。

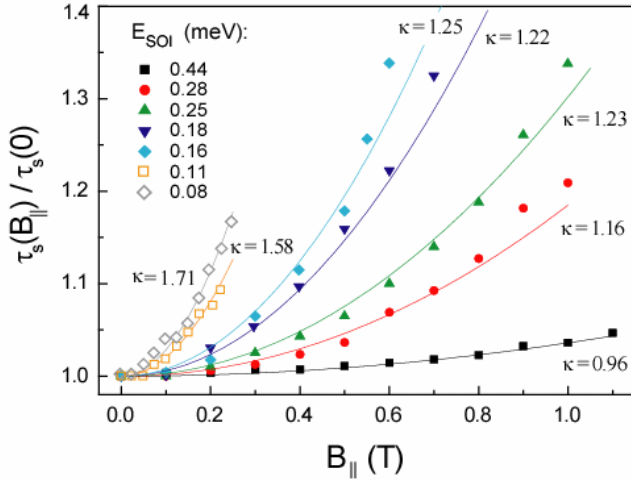


図7 スピン緩和時間の平行磁場依存性。平行磁場の2乗に比例してスピン緩和時間が増大する。この結果は最近の理論によりほぼ定量的に説明できる。

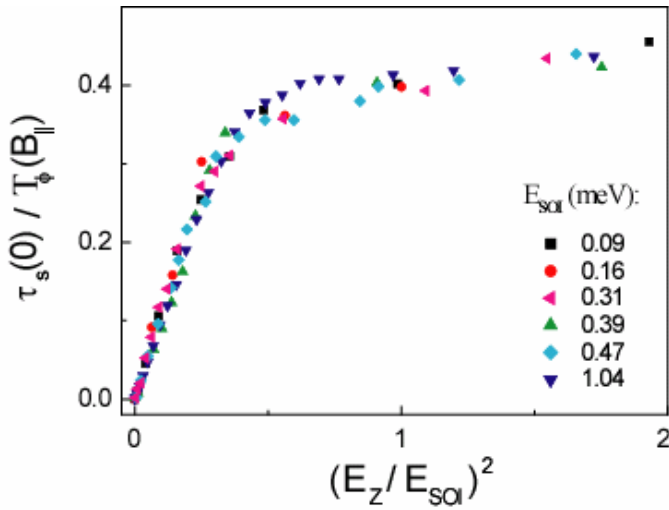


図8 スピン誘起の位相緩和レートはゼーマンエネルギーとスピン軌道相互作用のエネルギー比に対して、キャリア濃度や移動度、スピン軌道相互作用に依存せず普遍的な振る舞いを示すことを発見した。

図6の弱局在効果の実験より、ILP理論を用いて位相緩和時間を評価することができる。位相緩和時間 $\tau_{\phi}$ はスピン緩和時間とは逆にゼーマン効果により減少することが確認された。これは、スピン軌道相互作用とゼーマン効果の共存によりスピン誘起の位相緩和効果が起きているものと解釈される。スピン軌道相互作用は時間反転対称性を破らないため位相緩和時間に直接影響を与えない。また、平行磁場は二次元電子に平行に印加しているためサイクロトロン半径が二次元電子ガスの厚さより充分大きければ電子の軌道運動に影響を与えず、時間反転対称なループを貫く磁束はゼロとなり磁場による位相変化はもたらさない。一方、スピン軌道相互作用とゼーマン効果が共存する場合は、スピンに依存した位相緩和が生じることが指摘されている(A. G. Malshukov et al. Phys. Rev. B 56, 6436 (1997))。本実験は定性的にこのスピンのスピンの誘起の位相緩和が生じているものと解釈できる。一方、スピンにより誘起された位相緩和レート $1/T_{\phi}(B_{\parallel})=1/\tau_{\phi}(B_{\parallel})-1/\tau_{\phi}(0)$ を定義しこれにゼーマン効果のないときのスピン緩和時間 $\tau_{\phi}(0)$ をかけたものをスピン軌道相互作用の特徴的なエネルギー $E_{SOI}$ とゼーマンエネルギー $E_z$ の比でプロットしたのが図8である。すると、全てのデータはひとつの曲線上に存在し、二次元電子ガス



を特徴つける輸送パラメータ（キャリア濃度、移動度、スピン軌道相互作用の強さ）に一切よらず普遍的な振る舞いを示すことがわかった。この普遍的な振る舞いは理論家の注目するところとなり、最近の理論(D. C. Marinescu, Phys. Rev. Lett. 97, 176802 (2006))によって、スピン誘起の位相緩和を一般化した理論を確立することによりほぼ定量的に説明できることが示された。

本実験は、スピン軌道相互作用を系統的にゲート電界で制御可能であることによってはじめて可能となるものであり、スピントロニクスへの応用ばかりでなく、スピンダイナミクスの基礎物理の理解にも、スピン軌道相互作用の電界制御技術の確立は重要な役割を果たすことが示された。

### 3-4. スピン干渉デバイスとアハロノフ・キャシャー効果

スピンの回転は、スピンの位相と密接な関係にある。スピンは2回転( $4\pi$ 回転)して初めてもとの状態に戻るというスピン 1/2 の特性をみごとに捕らえた実験として中性子スピン干渉計がある。中性子のスピン干渉実験は、1975 年 H. Rauch らのグループと A. Overhauser のグループによりほぼ同時に行われた。我々は、ゲート電圧によりスピン軌道相互作用が可能なことを利用して、リング構造や正方形ループ構造を作製すれば、メゾスコピックな半導体系でスピンの歳差運動に起因したスピンの干渉デバイスが可能であることを提案した。このデバイスは、中性子スピン干渉実験がそうであったように、スピン偏極した電子を用いる必要はない。電子スピンのリングを回って干渉する際、スピン偏極していなくとも干渉効果が生じることを示すことができる。ここでは、強磁性体電極からのスピン注入は必要とせず、ゲート電圧によるスピン回転制御という観点からスピン FET のマイルストーンとなるものと考えられる。

図9には、我々の提案したスピン干渉デバイスを示す。リングを伝搬する右周り、左周りの電子スピンは、スピン軌道相互作用による有効磁界により歳差運動を行うが、有効磁界は電子の運動する方向と電界に垂直となるため、それぞれ反対方向に回転する。そこで、分波した電子スピンの出会う干渉ポイントでは相対的なスピンの向きは、ずれておりこの相対的なスピンの角度を、ゲート電圧によって制御すればスピンの干渉によりコンダクタンスが振動することになる。

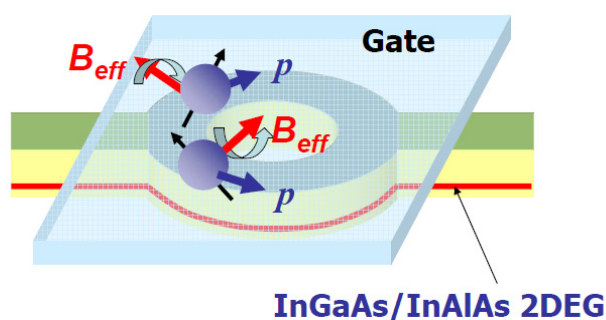


図9. スピン干渉デバイスの模式図と動作原理

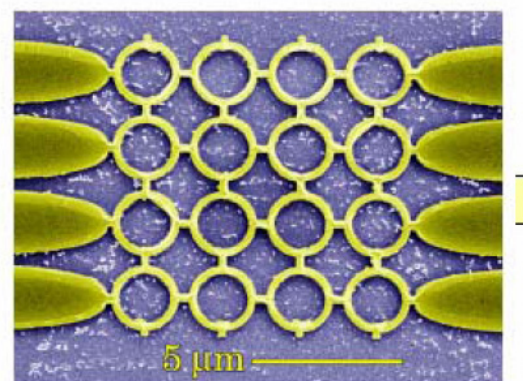


図10. 実際に作製したスピン干渉デバイス。リング列をゲート電極で覆うことによりスピン軌道相互作用を変化させている。

InAlAs/InGaAs ヘテロ構造からなる二次元電子ガスは Rashba のスピン軌道相互作用が重要であり、ゲート電圧によってスピン軌道相互作用の強さが変調できることが実験的に確認されている。我々は、この InAlAs/InGaAs 系二次元電子ガスをループ状に微細化し、ゲート電極をつけた構造でスピン干渉効果が期待できることを理論的、実験的に示した。これまで、単一のリング構造で、多くの実験を行ってきたが、我々の直面した問題は、非常に複雑なゲート電圧（スピン軌道相互作用）依存性を示すことであった。これは、ゲート電圧を印加することによりスピン軌道相互作用とともに電子のキャリア濃度も変化してしまうため、スピン干渉効果以外の干渉効果が存在すること起因する。最近、スピン軌道相互作用の強い HgTe/HgCdTe 系の二次元電子ガスを用いた単一リングで、スピン干渉効果が観測されたとの報告がなされたが、ゲート電圧依存性は大変複雑で実験データの解釈が困難であった。これは、ゲート電圧によりキャリア濃度が変化すると電子の波長が変わってしまうため、リングの右回り、左周りのアームの長さにわずかな違いがあると軌道部分からくる干渉効果により干渉パターンが変化してしまう。さらに、リングが完全にバリストックでない場合は、電子が感じる散乱体の様子が電子波長とともに変化するためユニバーサルコンダクタンス揺らぎ (UCF) が現れスピン干渉効果を乱してしまう問題が生じる。一方、リングを一周回ってもとの位置で干渉する、Al'tshuler, Aronov, Spivak (AAS) 振動は時間反転対称な干渉効果であるため右回りと左回りの電子が得る軌道部分の位相は完全に等しくなってしまう。このため、AAS 振動が強めあう干渉（コンダクタンスを下げる）なのか弱めあう干渉（コンダクタンスをあげる）干渉なのかはスピンの位相によって決定される。すなわち、スピンの干渉効果を観測するには AAS 振動のゲート電圧依存性を詳細に測定する必要がある。当時 IBM いた R. Webb らのグループは、干渉ループの数を増やしていくに従い、アンサンブル平均によりサンプル固有の干渉を示す AB 振動は減少し、AAS 振動のみが生き残ることを実験的に示した。このため、単一リングではなく、図 10 に示すようにリングをアレイ状に並べた素子を作製した。

このリングを  $4 \times 4$  個並べた素子で測定された磁気抵抗は、2つの特徴的な振動周期を持つ。すなわち、振幅の大きな  $h/e$  に相当する周期と、比較的小さな振幅で  $h/2e$  の周期を持つ振動である。この  $h/e$  の周期を持つ振動は AB 振動に対応し、散乱体の様子を依存した試料固有の振動であるためゲート電圧に対して複雑に変動する。フィルターをかけて  $h/2e$  の振動成分を抽出すると磁界の増加とともに振動の振幅は減少する AAS 振動に対応していることが確認された。AAS 振動は時間反転対称な干渉効果であることから、磁界により時間の反転対称性が破れるに従いその干渉も減衰していく。AAS 振動のみを抽出するにはループの数を増やした実験も行い AAS 振動がゲート電圧とともに振動的な振る舞いを示すことを確認している。ここでは、AAS 振動を抽出するためにわずかに異なるゲート電圧で測定した磁気抵抗特性を足し合わせるによりアンサンブル平均をとった。磁気抵抗特性を足し合わせるゲート電圧の範囲がスピンの位相変化に対してずっと小さければスピンの干渉効果は生き残る。一方、 $h/e$  の振動周期を有すサンプル固有の干渉効果は電子の波長変化に対して非常に敏感であるためアンサンブル平均により急激に減衰し磁界に対し  $h/2e$  の周期をもった AAS 振動のみが抽出される。

このようなアンサンブル平均により得られた  $h/2e$  の振動周期をもつ AAS 振動のゲート電圧依存性を示す。この測定に用いたのは、リングの半径は  $r = 1 \mu\text{m}$ 、測定温度は  $T = 0.26 \text{ K}$  である。

AAS 振動の位相がゲート電圧により周期的に変化している様子がわかる。図 1 1 はゲート電圧がそれぞれ  $V_g = 3.2, 3.5, 3.9 \text{ V}$  における AAS 振動の様子を示したものであるが、ゲート電圧を増加するにつれ、 $V_g = 3.5 \text{ V}$  でいったん消滅した AAS 振動の振幅が  $V_g = 3.9 \text{ V}$  では回復するとともに、 $V_g = 3.2 \text{ V}$  では  $B = 0$  で極小であった抵抗が  $V_g = 3.5 \text{ V}$  では極大に変化している。この様に、ゲート電圧によって AAS 振動が変化するのはスピン位相による干渉が電界によって変調されていることを示している。

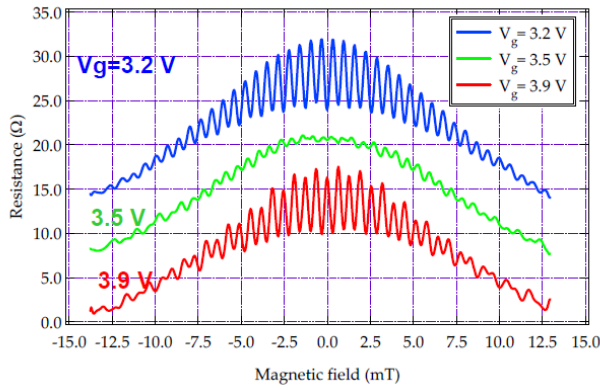


図 1 1. 異なったゲート電圧に対する AAS 振動。AAS 振動がゲート電圧に対して大きく変調される様子が観測される。

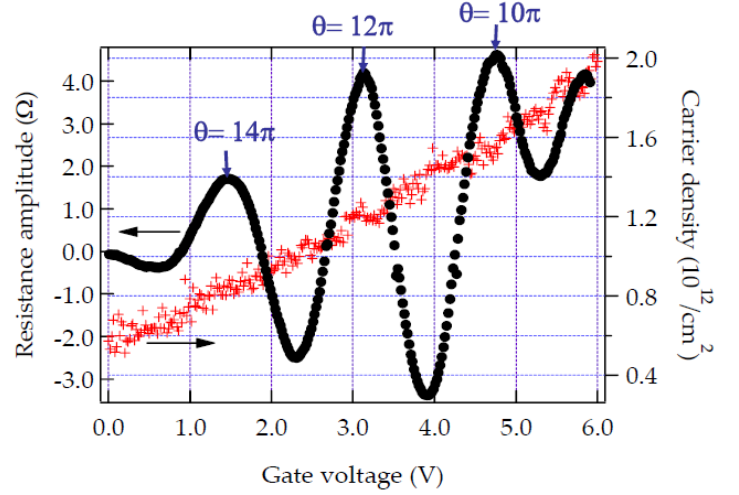


図 1 2.  $B = 0$  における AAS 振動の振幅をゲート電圧に対してプロットしたもの。赤い十字はゲート電圧に対するキャリア濃度依存性。図中  $\theta$  はスピンの歳差回転角度を示す。

図 1 2 にはこの  $B = 0$  の AAS 振動の振幅をゲート電圧に対してプロットしたものであるが、AAS 振動はゲート電圧に対して、規則的にはほぼ正弦的な振動をしていることがわかる。図 1 2 中で赤い十字はキャリア濃度を示しており、ゲート電圧を増加するに従いゲート電圧に正比例してキャリア濃度が増加している。一方、本素子に使用した InAlAs/InGaAs 二次元電子ガスのシュブニコフ・ドハース振動に現れたビートパターンを解析することによりスピン軌道相互作用  $\alpha$  のキャリア濃度依存性がわかっており、スピンの歳差回転角度  $\theta = 2\alpha m^* L / \hbar^2$  を評価することができる。ここで  $L$  は、電子スピンの伝搬距離を表す。一周回ってもとの位置で干渉する  $\hbar/2e$  の振動周期を持つ AAS 振動において期待されるスピン干渉効果により振幅の変調は次式で与えられる。

$$\frac{\delta R_\alpha}{\delta R_{\alpha=0}} = \cos \left[ 2\pi \sqrt{1 + \left( \frac{2\alpha m^*}{\hbar^2} r \right)^2} \right] \approx \cos \left[ 2\pi r \frac{2\alpha m^*}{\hbar^2} \right] \quad (3)$$

上式括弧の中は、スピン軌道相互作用  $\alpha$  もしくはリングの半径  $r$  が大きい場合、右辺となり



$L = 2\pi r$  としてスピン歳差回転角度に一致する。上式はスピンの干渉の周期が AAS 振動の抵抗の振動周期として観測されることを示しているが、スピンの歳差運動の角度は右回りの電子スピンの  $\theta_R = 2\pi \cdot 2\alpha m^* / \hbar^2$  とすると、左周りの電子スピンは反対方向に歳差運動するので、 $\theta_L = -2\pi \cdot 2\alpha m^* / \hbar^2$  となりスピンの相対的な角度差として

$$\theta = \theta_R - \theta_L = 2 \cdot 2\pi \cdot \frac{2\alpha m^*}{\hbar^2} \quad (4)$$

となりスピン干渉の周期として  $2\pi$  の位相差を得るには、右回りと左回りあわせてトータル  $4\pi$  のスピンの回転角度が必要であることがわかる。これは電子スピン  $1/2$  に由来するものである。スピンの回転角度  $\theta = 2\alpha m^* L / \hbar^2$  では、 $L$  を直線とみなして評価されるものであるが、(13) 式でス

ピン干渉を決める位相因子  $\phi = 2\pi \sqrt{1 + (2\alpha m^* r / \hbar^2)^2}$  の平方根中の  $+1$  はリングに起因した回転

座標系の特性によって現れる効果であると解釈できる。図 12 中に示した角度  $\theta$  は、例えば右回りのスピンの歳差運動の角度を示しており、この角度から上式を用いて逆にスピン軌道相互作用を求めることができる。この結果は、シュブニコフ・ドハース振動から求めたスピン軌道相互作用  $\alpha$  のキャリア濃度依存性と良い一致を示すことから AAS 振動のゲート電圧依存性において観測された振動的な振る舞いは、ゲート電圧によってスピンの歳差回転が制御できることを示している。さらに、この実験はスピンの位相を電場により制御したことを意味し電子版 AC 効果の直接的な検証である。Mathur と Stone は、真空中で行われた AC 効果の検証と異なって半導体中のスピン軌道相互作用を用いることにより、数周期にわたる AC 効果による振動が可能であることが指摘してきたが、この実験により初めて実証された。

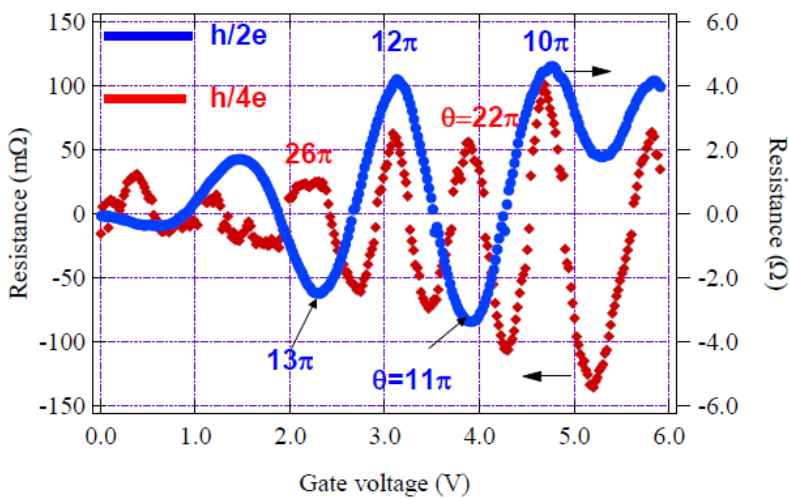


図 13.  $h/2e$  振動（リングを 1 周してもとの位置でスピン干渉）と  $h/4e$  振動（リングを 2 周してもとの位置でスピン干渉）のゲート電圧依存性。

さらに、本素子で得られた磁気抵抗特性を詳細に調べると磁場に対して  $h/4e$  の振動成分も含まれることが確認された。これは、リングを 2 周回って元の位置で干渉したものである。 $h/4e$  成分をデジタルフィルターによって抽出しゲート電圧に対する依存性をプロットしたのが図 13 である。この図には  $h/2e$  のゲート電圧依存性を同時にプロットしているが、ゲート電圧に対して

ようど倍の  $1/2$  の周期できれいに振動している。 $h/4e$  振動では電子スピンは  $h/2e$  の周期を持つ AAS 振動の 2 倍の距離を伝搬することになるためスピンの歳差回転角度もそのちょうど 2 倍となる。抵抗振動の振幅は、数  $10 \text{ m}\Omega$  オーダと極めて小さいが、驚くべきことに距離にして  $L = 4\pi r = 12 \text{ }\mu\text{m}$ 、 $\theta = 20\pi$  以上のスピンの回転後もスピンの干渉効果が観測されることが確認された。このスピン干渉実験は、低温で行われた実験であり実用的なデバイスの実現にはさらなる改善が必要であるが、ゲート電界によってスピンの歳差運動が制御できることを直接的に示しており、半導体を用いたスピン機能デバイスへ向けての第一歩であるといえる。

スピン干渉計の実験結果は、ゲート電界により半導体中の電子スピンの歳差回転運動が制御できることを示すとともに、電界によるスピン位相の制御に起因した干渉効果でありアハロノフ・キャシャー効果に相当する。電界効果スピントランジスタはゲート電界によるスピン回転制御とスピン注入、検出を前提として実現されるものであり、スピントロニクスへの応用・展開に関しても重要な結果である。

### 3-5 スピンフィルター

非磁性半導体のみからスピン偏極した電子が取り出せれば、半導体二次元電子ガスとのマッチングが良く、種々のスピndeバイスの基礎となる。我々は、スピン軌道相互作用によるスピン分離とスピン共鳴トンネル現象を組み合わせることにより、スピンフィルターを提案した。一方、歴史的に初めてスピンフィルターの動作を示したのは、有名な Stern-Gerlach (SG) の実験である。彼らは、電荷をもたないスピン  $1/2$  粒子を磁場勾配の中を通過させることにより、スピンを空間的に分離することに成功した。これは、スピン上向き粒子と下向き粒子は磁場勾配に対して逆向きに力を受けることに起因する。我々は、Rashba スピン軌道相互作用を半導体二次元電子チャンネル中で空間勾配をもたせ、スピン軌道相互作用が作る有効磁場の空間勾配によりスピンフィルターが可能であることを理論計算により示した。これまで電荷を持った粒子に対して SG 効果の観測は困難であることが指摘されてきた。その理由は、マックスウェルの関係  $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$  より、たとえば、 $x$  方向に進む粒子に  $z$  方向に磁場の空間勾配をつけると、 $y$  方向の磁場勾配もできてしまう。 $y$  方向の磁場勾配は、ローレンツ力として働き、 $z$  方向のスピン分離を隠してしまうためである。しかしながら、Rashba スピン軌道相互作用による有効磁場はこのマックスウェルの制約を受けないため、SG 効果を用いたスピンフィルターとして機能することを理論的に確認した。

図 1 4 には、数値解析をもちいて SG 効果スピンフィルターの動作確認をした結果を示す。図中、黄色の部分がスピン軌道相互作用の  $y$  軸方向に空間勾配が存在する領域に対応している。空間勾配の大きさは、幅  $1 \text{ }\mu\text{m}$  の幅のチャンネルに対して、スピン軌道相互作用の変化分  $\Delta\alpha = 6.4 \times 10^{-12} \text{ eVm}$  を仮定した。この値は、実験的に充分達成可能な Rashba スピン軌道相互作用の変化量である。初期状態として 1 つの波束を仮定し、時間発展を計算したのが図 1 4 の右図である。右上図は 1 つの波束が 2 つの波束に分裂することを示している。一方、右下図はスピンの  $y$  軸に関するスピンの偏極を示したものであるが、 $y$  軸に対してスピン上向きと下向きのキャリアが生成されていることが確認された。これは、Rashba のスピン軌道相互作用が作る有効磁場の

空間勾配により SG 効果が生じ無偏極のキャリアからスピン上向き、下向きのキャリアが反対方向に力を受けスピン偏極したキャリアが生成されたものである。

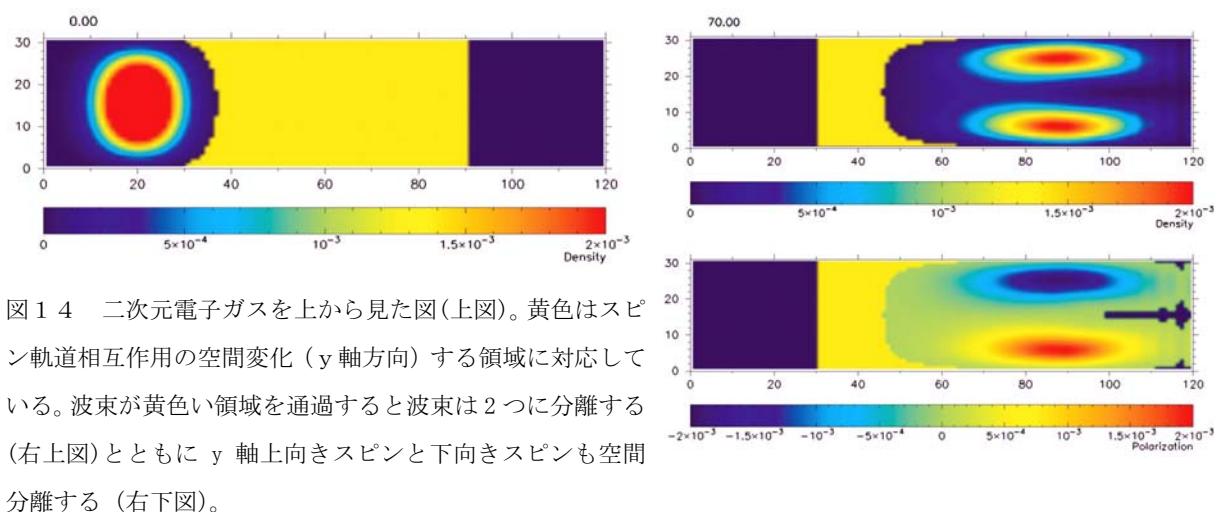


図 1 4 二次元電子ガスを上から見た図(上図)。黄色はスピン軌道相互作用の空間変化 (y 軸方向) する領域に対応している。波束が黄色い領域を通過すると波束は 2 つに分離する (右上図) とともに y 軸上向きスピンと下向きスピンも空間分離する (右下図)。

図 1 5 には、試作した SG 効果スピンフィルターの SEM 写真を示す。2 つのゲート電極  $Vg1$ ,  $Vg2$  によりスピン軌道相互作用に空間勾配を与え、SG 効果によって生成されたスピン偏極キャリアを Y 字分岐によって分離する。上下の Y 字分岐のあとには磁性体電極 FM1, FM2 を配置しスピン偏極しているか否かを確認するものである。今のところ、SG 効果スピンフィルターによりスピン偏極したキャリアが生成された実験的証拠は得られていない。その原因として、磁性体と半導体のスピン注入、スピン検出の問題があると考えられる。磁性体から半導体へのスピン注入はコンダクタンスのミスマッチによりスピン注入が困難であることが指摘されている。この間にトンネルバリアを介することでこの問題は解決されることが示されたため、InP をトンネルバリアとして FeNi/InP/InGaAs 接合を形成しスピン検出を試みているところである。また、磁性体を用いない光を用いたスピンの検出方法について筑波大学野村グループと検討を行う。

磁性体や磁場を一切用いることなく、半導体中にスピン偏極したキャリアが生成されればスピントロニクス分野にとどまらずスピンを用いた量子情報処理においてもスピンの初期化、読み出し等、多くの応用と展開が期待できる。

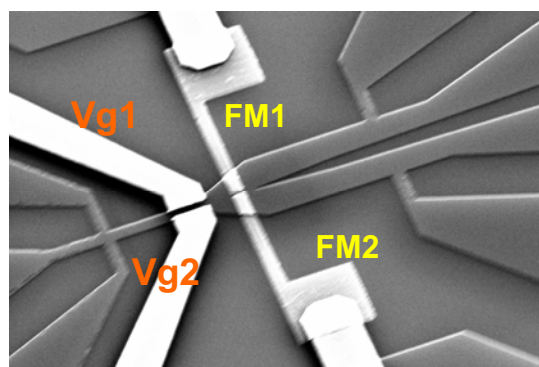


図 1 5 試作した SG スピンフィルターの SEM 写真。2 つのゲート電極  $Vg$  によりスピン軌道相互作用に空間勾配を与える。Y 分岐の後にある磁性体電極 FM によりスピン偏極キャリアを検出する。

### 3-6 垂直磁気異方性を持つ磁性体 FePt から半導体 GaAs へのスピン注入

最近、ランダムアクセスメモリー（DRAM）に代わる不揮発性磁気メモリー（MRAM）が注目されている。しかしながら、これらの磁気デバイスはメモリーあるいはセンサーに限られており、スピンを用いた能動デバイスはなかった。その理由は、磁性体金属をベースにしたデバイスであるがゆえに三端子ゲート電圧制御が困難であったことによる。磁性体中のスピン偏極したキャリアを半導体中にスピン注入すれば、半導体の特徴である三端子制御によりスピンを第三端子により制御することによりスピン能動デバイスを作ることができる。最も、有名なスピン能動デバイスとしてスピン FET が知られている。このスピン FET はスピン注入されたキャリアを半導体のゲート電荷により制御可能なスピン軌道相互作用を用いてスピン反転させコンダクタンスを大きく変化させるものである。スピン FET をはじめとしてスピン機能デバイス化を図る上で磁性体から半導体へのスピン注入は最も重要な要素技術である。

これまで、磁性体から半導体へのスピン注入はコンダクタンスのミスマッチが大きな障害となっていることが指摘されてきた。これを解決する手段として、トンネルバリアを介したスピン注入が多く試みられ一定の成果を挙げている。IBM のグループでは、GaAs 上にトンネルバリア MgO をエピタキシャル成長し、その上に CoFe をさらにエピ成長することにより、室温で 47% のスピン注入が得られている (Phys. Rev. Lett. 94, 056601 (2005))。しかしながらこれまでのスピン注入の実験は面内に磁気容易軸を持つ磁性材料であったためスピン偏極を光学的に検出するため、1-2T 程度の強い磁場を垂直に印加しスピンの向きを垂直に向ける必要があった。そこで、我々は垂直磁気異方性を持つ FePt を用いて半導体 GaAs 上にエピタキシャル成長させることによりゼロ磁場でスピン注入を確認することに成功した。スピン偏極率は低温で 1% 程度であるが、面直スピン偏極キャリアはスピnhall 効果の電氣的検出や、GaAs (110) 面では z 軸がスピンの良い量子化軸となるためスピン緩和時間が非常に長くなる特徴を持っており、デバイス応用面からも重要な成果である。本研究は東北大学金属材料研究所の高梨研究室との共同研究により得られた成果である。

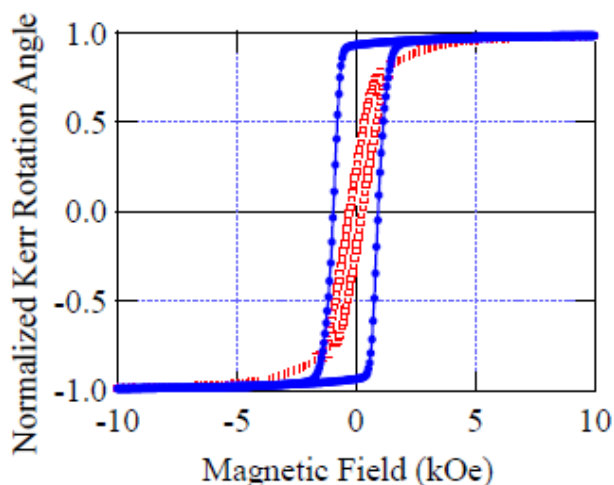


図16 FePt 5nm/ MgO 5 nm/ GaAs 構造における磁気光カー効果測定をもちいた L10-FePt の磁気特性。350℃で60分アニールすることにより磁気特性が大きく改善されることを見出した。

ゼロ磁場面直スピン注入を実現するため、GaAs 上に高残留磁化比を有する L10-FePt 薄膜のエピタキシャル成長を行った。(001)MgO 上にエピタキシャル成長した L10-FePt は膜面直

方向が磁化容易軸となる。このことから(001)GaAs 基板上に(001)MgO 5 nm/FePt 5 nm を基板温度 300℃で成長し、成長後チャンバー内アニール 350℃ (60 分) 行うことにより、残留磁化比ほぼ 1 となる角形性のよいヒステリシスが得られることを確認した。図 1 6 には極カー配置の磁気光カー効果を用いて垂直磁気特性を評価した結果である。図中、赤丸がアニール前、青がアニール後の特性であり、角形特性が大きく改善されることが確認された。

### 3-6-1 スピンLED 構造を用いた電氣的スピン注入の光学的評価

垂直磁気異方性を有する FePt から GaAs への電氣的スピン注入を実験的に評価するため、LED 構造をもつ(001)GaAs 上に MgO/FePt をエピタキシャル成長させた。作製したスピンLED のデバイス構造を図 1 7 に示す。偏光 EL 測定及び、FePt 層の磁気円二色性の影響を評価するため PL 測定を行った(図 1 8)。偏光 EL 測定における偏光率の磁場依存性は FePt 層の磁気カー効果測定とよい一致を示し、約 3 %の偏光率が得られた。また、同様のプロセスで作製した FePt 層の偏光 PL 測定における偏光率は約 2 %程度であり EL 測定より小さい値を示した。偏光 PL 測定における偏光率は FePt スピン注入層の磁気円二色性及び GaAs 活性層のゼーマン分裂に起因するものであり、同様の構造において EL 測定の偏光率が大きいことからスピン注入による偏光率は約 1 %程度であると見積もることができる。従来の Fe や CoFe を用いた GaAs への電氣的スピン注入の光学的検出はこれらの磁性金属が面内に磁気異方性をもつことから、光学的に検出するには 1 ~ 2 T 程度の外部磁場を印加しスピンの向きを面直にそろえる必要があった。一方、この垂直磁気異方性を有する FePt を用いたスピン注入の特徴は、ゼロ磁場においてもスピン注入が観測されることである。この、電氣的スピン注入の光学的評価は筑波大学野村研究室の光学実験施設を用いて行ったものである。

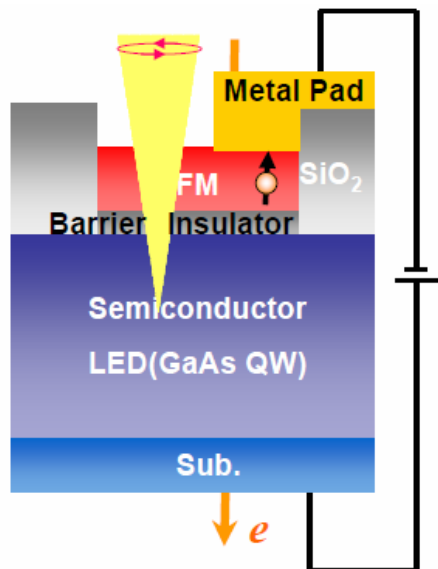


図 1 7 スピンLED 構造と EL 測定の模式図。

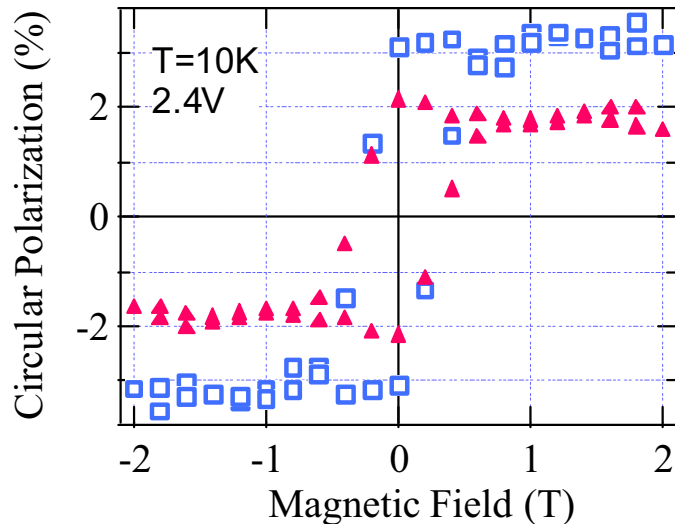


図 1 8 偏光 EL 測定（青）と偏光 PL 測定（赤）の比較。これら信号の差から FePt から GaAs へ約 1 %スピン偏極したキャリアが注入されていると見積もることができる。

FePt/MgO/GaAs 界面を TEM 写真で観測すると、MgO/GaAs 界面に薄いアモルファス層が形成されており、このアモルファス層によってスピン散乱が生じている可能性がある。MgO/GaAs 界面の作製条件を最適化することにより、より高効率でのスピン注入効率が得られるものと期待される。

3-4. スピン干渉デバイスではスピンの回転角度がゲート電界により制御可能であることを実験的に確認することに成功した。この電氣的スピン注入技術と電氣的なスピン制御技術を組み合わせることにより電界効果スピントランジスタへ展開することが可能となる。

## (2)研究成果の今後期待される効果

従来のエレクトロニクスでは電子の持つ「電荷」の部分にのみ着目し機能デバイス化を図ってきた。また、これまでスピンを制御する手法としてスピンと強く相互作用する磁界が主に用いられてきた。高速でしかも局所的にスピンを操作するためには、磁界(磁場)を用いるよりも電界を用いるほうが有利である。本プロジェクトで得られた成果は、スピントロニクスや量子情報処理における要素技術を提供するだけでなく、スピンの関与する基礎物理の解明に向けて重要な知見を与えるものである。

### (2-1) InAs 層挿入 InGaAs チャネルにおける $g$ -因子のゲート電界制御に成功

$g$ -因子の異なった InAs と InGaAs の間で電子分布をゲート電界により変調することにより、 $g$ -因子を制御することに成功した。 $g$ -因子は、電子スピンを用いた量子情報において重要な役割を果たすことが指摘されている。量子情報は光を用いて伝送されるが、情報処理は量子ドットなど半導体中で行う必要がある。所望の量子ドットの電子スピンのみを反転操作するには、振動磁場に共鳴するスピン分離エネルギーをゲート電界により制御するため、 $g$ -因子をゲート電界により制御する必要がある。本プロジェクトで得られた成果は、 $g$ -因子エンジニアリングへ向けての知見を与えるとともに、量子情報技術への応用を可能にするものである。

### (2-2) InGaAs の膜厚によりスピン軌道相互作用のゲート電圧依存性を逆転させることに成功

この実験の重要なことは、スピン軌道相互作用は物質固有のパラメータではなく、半導体ヘテロ構造の設計や膜厚により変調可能なパラメータであることを実験的に示した点にある。さらにゲート電圧によってスピン軌道相互作用の強さが制御できることは、電界によって電子スピンの感じる有効磁場の強さを制御できることを示している。この事実は、スピン干渉デバイス、スピン FET、スピンフィルターなどスピンを用いた機能デバイス化に重要な役割を果たす。スピン軌道相互作用は、「スピン」と「軌道」(=電子の流れ)が密接不可分であることを示している。スピンホール効果や電流誘起スピン偏極効果はスピン軌道相互作用が重要な役割を果たしている。このように、「電子の流れ(=軌道)」を「スピン」により制御したり、逆に「スピン」を「電子の流れ」により制御することを考慮すると、スピントロニクスにおいてスピン軌道相互作用は今後ともますます重要な役割をはたしていくと考えられる。

### (2-3) 半導体中のスピンのダイナミクスを解明することに成功

固体中でスピンのダイナミクスを司るのはゼーマン効果とスピン軌道相互作用である。ゲート電界によりスピン軌道相互作用を系統的に制御可能であることを利用して、ゼーマン効果とスピン軌道相互作用の競合について調べた結果、ゼーマン効果はスピンの緩和時間を増大する効果を



もたらすことを明らかにした。さらに、位相緩和時間がゼーマンエネルギーとスピン軌道相互作用のエネルギーの比によって普遍的な振る舞いを示すことを見出した。これは量子干渉デバイスの設計やスピンドYNAMIKSの基礎物理の理解に重要な知見を与える。

#### (2-4) スピン干渉効果（アハロノフ・キャッシャー効果）の観測に成功

スピン干渉計の実験結果は、ゲート電界により半導体中の電子スピンの歳差回転運動が制御できることを直接示す実験結果である。Datta と Das によって提案された電界効果スピントランジスタのはスピン注入・検出用の磁性体電極が必要であるが、本スピン干渉デバイスでは磁性体や磁場を用いることなくスピンをゲート電界によって回転させコンダクタンスを変調することができるのが特徴である。もちろん、本実験結果は電界効果スピントランジスタへ向けてのマイルストーンとなる。

電荷を持つ粒子が磁束の周りでループを作って干渉する効果としてアハロノフ・ボーム効果が知られている。マックスウェル方程式は、電場と磁場の内在的な対称性を示していることから、1984年 Y. Aharonov と A. Casher は、AB 効果と対称をなす電磁氣的干渉効果としてライン電荷の周りで磁気モーメントを持つ粒子が干渉する効果、すなわちアハロノフ・キャッシャー効果が期待されることを示した。1992年 H. Mathur と A. D. Stone は電場と磁気モーメントの相互作用としてスピン軌道相互作用をとりあげ、電子スピンの位相が電場によって変調される電子的アハロノフ・キャッシャー効果が現れることを理論的に示した。我々の行ったスピン干渉効果の観測は、電界によるスピン位相の制御に起因した干渉効果であり電子版アハロノフ・キャッシャー効果の直接的な観測に相当し基礎学問的価値の高い成果である。

#### (2-5) SG 効果スピントロニクス分野の提案

電界により制御可能なスピン軌道相互作用を用いて、有効磁場の空間勾配を作ることにより、スピントロニクスが形成できることを理論提案した。現在、その動作確認に向けた実験を行っているところである。磁性体や磁場を一切用いることなく、半導体中にスピン偏極したキャリアが生成されればスピントロニクスの分野にとどまらずスピンを用いた量子情報処理においてもスピンの初期化、読み出し等、多くの応用と展開が期待できる。

#### (2-6) 垂直磁気異方性を持つ FePt から GaAs へのゼロ磁場中での電氣的スピン注入

垂直磁気異方性を持つ FePt を用いて半導体 GaAs 上にエピタキシャル成長させることによりゼロ磁場でスピン注入を確認することに成功した。スピン偏極率は低温で1%程度であるが、面直スピン偏極キャリアはスピントロニクス効果の電氣的検出や、GaAs (110) 面では z 軸がスピンの良い量子化軸となるためスピン緩和時間が非常に長くなる特徴を持っており、デバイス応用面からも重要な成果である。



### 3. 2 サブテーマ名「量子ドット列における平坦バンド強磁性および RKKY 相互作用を用いた強磁性の研究」

(NTT 物性科学基礎研究所、赤崎グループ)

(1) 研究実施内容及び成果

#### 3. 2. 1 量子ドット列における平坦バンド強磁性

我々は、半導体二次元電子系に周期ポテンシャルを印可すると自由電子のバンド構造が変調できることを利用して、所望の物性が出るように周期ポテンシャルを設計するアイデアから出発した。これは一種のバンドエンジニアリングであり、ポテンシャルが深ければ量子ドットの周期列からなる量子ドット超格子とも見なすことができる。このような半導体周期ポテンシャル系（あるいは量子ドット列）を用いてバンドエンジニアリングを行うことには様々な利点がある。まず半導体加工技術を用いると格子構造が自由に設計できるので、自然界に存在しないような格子構造も作ることが出来る。また半導体においては電子濃度を変えられるので、電子物性を自在に制御できる。これらの利点のために、通常物質結晶が受けてきた様々な制約にとらわれることなく、意図した物性が発現するように物質設計を行うことが可能となる。我々は、カゴメ型格子構造を持った量子ドット超格子が強磁性を発現することを理論的に提案し、それが実験的に観測可能であることを示した。[K. Shiraishi, H. Tamura, and H. Takayanagi, Appl. Phys. Lett. 78 (2001) 3702; H. Tamura, K. Shiraishi, T. Kimura, and H. Takayanagi, Phys. Rev. B 65 (2002) 085324] 我々の提案を実験的に実証するためには、ポテンシャル一周周期あたり電子が数個という非常に電子密度の低い領域を取り扱う必要があり、それには電子状態光学手法が適している。この実験的成果については、3. 3 サブテーマ名「スピン光学特性」（筑波大学・野村グループ）のセクションにおいて詳しく紹介する。

### 2 次元周期ポテンシャル中の電子バンド構造計算

実験で観測される電子状態を解析するためには、電子濃度を変えたときや磁場を印可したときのバンド構造の変化を理論的に予想しておくことが不可欠である。2 次元周期ポテンシャル中の電子バンド構造の磁場依存性は、ホフシュッターバタフライと呼ばれるフラクタル的な構造を持つ。これまで正方格子の計算例はあったが、我々は現実の様々な人工格子系を再現できるようにプログラムを拡張し、三角格子やカゴメ格子のバタフライ計算とホール伝導度の計算を行った（図 3.2.1）。[H. Tamura, K. Miyakoshi, S. Murakami, H. Takayanagi, "Hofstadter's butterfly energy diagram and the Hall conductance in Kagome lattice potential", ICPS-2006, Vienna, Austria]

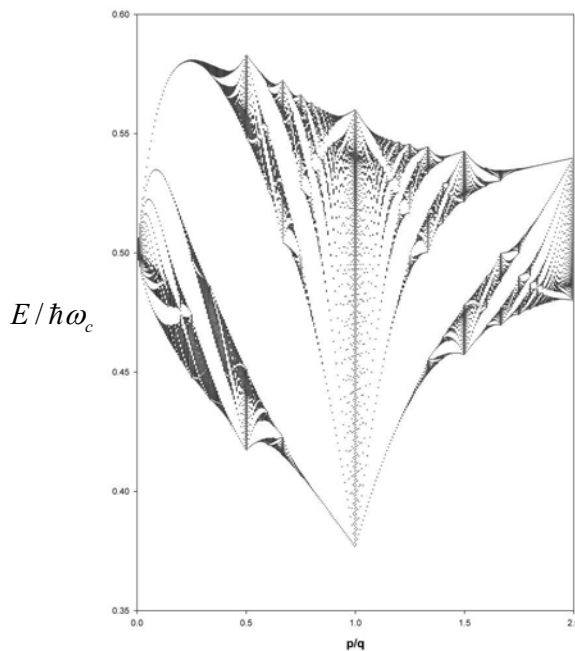


図 3.2.1 三角格子のホフシュ  
タッター・エネルギーバンドの  
磁場依存性の計算例

### 3. 2. 2 量子ドットを用いた RKKY 相互作用の研究

半導体中で強磁性を発生させるもう一つのメカニズムとして、我々は金属磁性で知られている Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida (RKKY) 相互作用に注目した。RKKY 相互作用とは、2つの磁性不純物中の局在スピン同士が、金属中伝導電子を仲介として相互作用ものである。RKKY 相互作用の符号は、2つの局在スピン間の距離  $R$  とフェルミ波数  $k_F$  に対して  $2k_F R$  の周期をもって正（強磁性結合）と負（反強磁性結合）の間を振動しながら減衰するが、距離がフェルミ波長より近い ( $Rk_F^{-1}$ ) スピン間同士は強く強磁性結合することが知られている。半導体量子ドットも電子を閉じ込めることができるので、量子ドットを伝導電子系と結合させると磁性不純物として働くことが知られている。半導体では伝導電子のフェルミ波長が長いという利点を利用すると、半導体量子ドットデバイスではドット間距離を伝導電子のフェルミ波長よりも小さく設計することができるため、ドットスピン間に強磁性 RKKY 相互作用を発生させることができ、さらにゲート電圧を変化させることによって伝導電子系の電子密度（すなわちフェルミ波長）を変化させれば、強磁性・反強磁性スイッチングが可能である。このような 2 ドットデバイスを多ドット列に拡張できれば、スイッチ可能な磁性体が半導体材料だけで実現する可能性が生まれる。

本サブテーマを着実に進展させるために下記の実施計画を立てた。(1) 半導体中量子ドット内に局在スピンができたとして、RKKY 相互作用がどれくらいの大きさになるのか、室温動作が可能かどうかなどを、理論計算により見積もる。(2) 単一量子ドットを量子細線に結合させたデバイスを作製し、ドット中電子数の変化により細線の伝導度の変化を観測し、コヒーレントな結合が実現されていることを確認する。(3) 2つの量子ドットを量子細線と結合させたデバイスを作製し、その両方に近藤効果が同時に発生して、RKKY 相互作用の観測を行う。

#### (a) 量子ドット列における RKKY 相互作用の理論

量子ドットが半導体中の伝導電子系と結合したときにドット中の電子スピンが磁性不純物として働くことを利用して、ドット間に Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida (RKKY) 交換相互作用を生じさせ、半導体材料だけを用いて強磁性の実現・制御が可能となることを理論的に提案した [H. Tamura, K. Shiraishi, and H. Takayanagi, “Tunable Exchange

Interaction in Quantum Dot Devices”, Jpn J. Appl. Phys. 43, L691-693 (2004)」。半導体では伝導電子濃度がゲート電極により制御できるので、RKKY 相互作用の大きさや符号を自在に調節することが出来る。量子ドット間距離が 3nm 程度であれば交換エネルギーの大きさは室温にも達することを示した (図 3.2.2-1)。

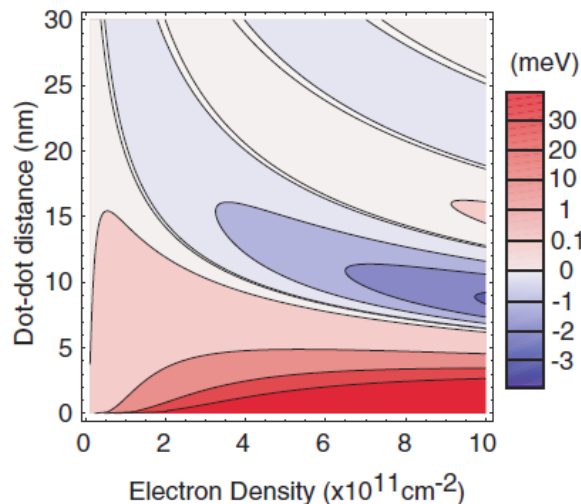


図 3.2.2-1 量子ドット間の距離と 2 次元伝導電子系 (GaAs) の電子濃度に対する RKKY 相互作用結合定数の強さ

#### (b) 単一量子ドット・量子細線結合系における電気伝導測定

実験による検証に関する第一ステップとして、我々は微細加工プロセスのノウハウ蓄積と低温でのナノデバイス測定系の立ち上げを目指して、単一量子ドットが量子細線の側面に結合したデバイス (図 3.1.2-2) を作製し、低温電気伝導測定を行った。[A. Richter et al, “Single-electron charging effects in a semiconductor quantum wire with side-coupled quantum dot”, Jpn. J. Appl. Phys. 43, 7144 (2004)] まずはスプリットゲートを閉じて、量子ドットだけを介した伝導特性 (A-B 間) には明瞭なクーロンブロックード振動が観測され、微細加工プロセスが良好であることが確認できた。細線だけの伝導特性 (C-D 間) に量子化コンダクタンスの観測を期待したが、明瞭な量子化ステップを観測することはできなかった。これは、細線の中央部でスプリットゲートが分離している構造のため、そこで電子が後方散乱が増大しているためであると推測された。次に、スプリットゲートを開いてドットと細線を結合させて測定を行った。量子ドットの電子数を変化させると、ドット内準位と細線フェルミエネルギーが一致したときに量子細線の伝導度が変調されることを確認した (図 3.1.2-3)。この時点では測定系においてノイズ低減技術が十分ではなく、近藤効果の測定には至らなかったが、2 つのドットを細線に結合させるデバイスへ向けて、デバイスデザインの最適化や測定系の改造を進展させることができた。

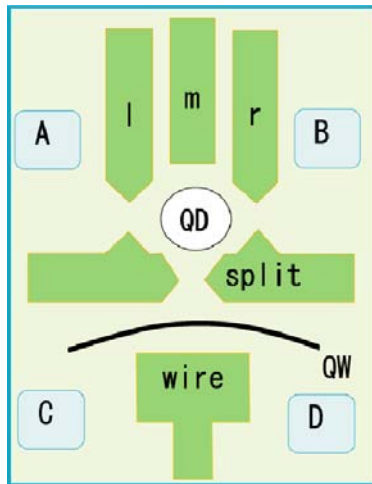


図 3.2.2-2 量子ドット・量子細線が並列につながれた構造。 $V_r$ 、 $V_l$ 、 $V_{split}$ の間にドットを形成し $V_m$ によってドットをクーロン振動をさせたときの量子細線の電気伝導の変化を測定した。

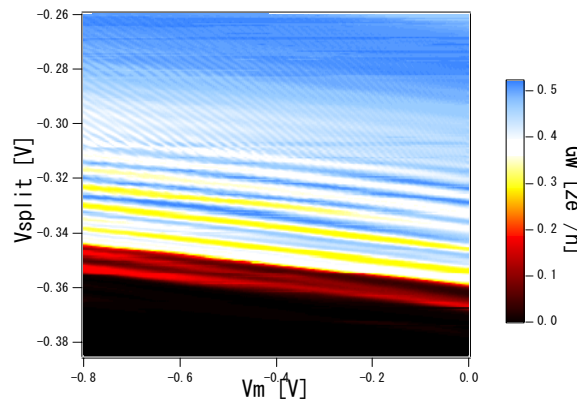


図 3.2.2-3  $V_{split}$  を変えていったときの細線のコンダクタンス振動の変化。上半分に見える細い縞模様が細線と結合したドットのクーロン振動が細線のコンダクタンスに反映したものである。グラフ下部に見える大きな振動は細線中に意図せずできたドットによるもの。

### (c) 二重量子ドット・量子細線結合系における電気伝導測定

第 2 番目のステップとして、我々は細線を介して結合した 2 つのドットスピンに近藤効果が発生させ、ドット・細線間の結合の強さを変えたときに生じる近藤効果の変化を通じて RKKY 相互作用の有無を観測することを試みた。我々は 2 つの半導体量子ドットを電流の流せる量子細線の両脇に結合した構造を用いた (図 3.2.2-4)。電子が閉じ込められている半導体ドットを、電流を流せる半導体に結合すると、伝導する電子が量子ドットの中に入りすることができるようになる。このときドット中のスピンと伝導電子のスピンとの間には、スピンの向きを反対にそろえようとする反強磁性的な磁気相互作用が働く。近藤効果によりドット中のスピンを反対向きのスピンを持った伝導電子系が取り囲んで、低温になるにつれてスピンの大きさを消し隠してしまうのが近藤効果である。半導体中での近藤効果の観測にはドット中電子スピンと伝導電子系との結合を最適な強さに保つため、量子ドットを形成するためにかけるゲート電圧を繊細に調節しておく必要がある。そのため、伝導電子系の電子濃度などを変えると、ドットとの結合の強さも変わってしまい、近藤効果が消えてしまうという不都合があった。本デバイスでは、量子ドット 1 のそばに別の量子ドット 2 を配置し、2 つの量子ドットで同時に近藤効果が発生させることで、この問題点を回避した。測定結果を図 3.2.2-5 に示した。これによると、量子ドット 1 の中の電子数が奇数のときにだけ、量子ドット 2 の近藤効果が抑制されている。すなわち、空間的に離れた場所から遠隔的に近藤効果のオン・オフ制御が実現できることが示された [S. Sasaki et al, "Non-local Control of the Kondo Effect in a Double Quantum Dot - Quantum Wire Coupled System", *Phy. Rev. B* 73, 161303(R) (2006)]。これは、量子ドット 1 の局在スピンの状態が伝導電子系を通して離れた量子ドット 2 に伝えられたからであると考えられる。そのメカニズムとして、我々が理論的に予想した RKKY 相互作用によって近藤効果が抑制されて伝導度が減少する効果と、ドット-1 で生じたファノ・近藤効果によってドット-2 の伝導度が抑制される効果の 2 つの可能性が想定された。本デバイスでは両者を区別することができなかったため、さらなるメカニズム特定のために、デバイス構造を改良する必要がある。なお、これまではデバイスにかかる電圧条件を変えずに近藤効果のオン・オフ制御を行うことは困難だったが、本デバイス構造ではそれを遠隔的に行えるため、本成果

は近藤効果の動的特性の解明にも役立つと考える。

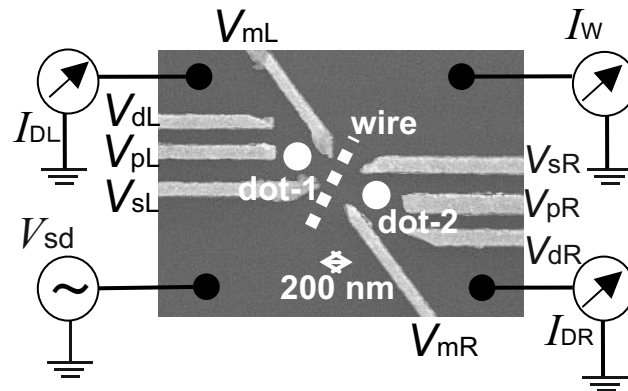


図3.2.2-4 量子細線からなる伝導電子系に結合した2つの量子ドットのSEM 写真。

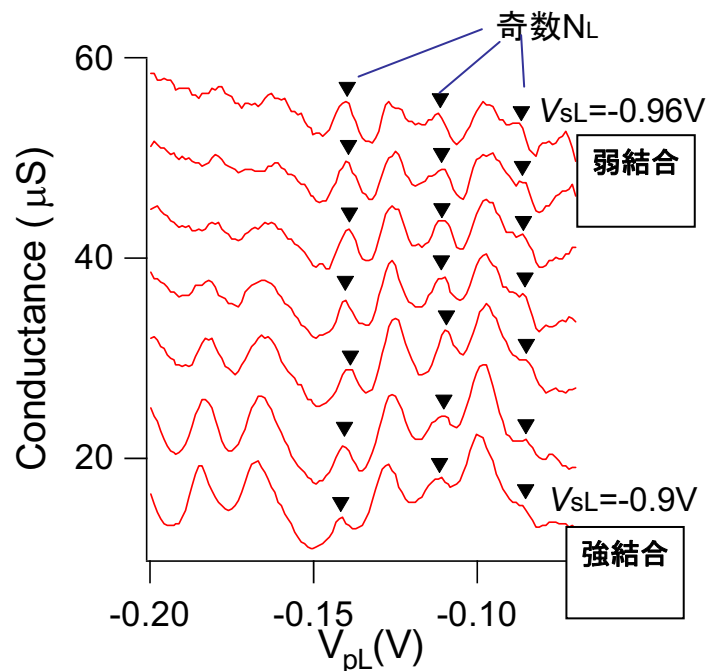


図3.2.2-5 右側のドット-2を介したコンダクタンスを、左側のドット-1の電子数を変えながら測定した結果。右のドット-2 が近藤状態にあるとき、左のドット-1 と細線の結合を強くしていくと、奇数電子数に対応する近藤ピーク（▼印）が抑制される。

#### (d) 我々の成果のまとめと位置づけ

以上のように、量子ドットを用いた RKKY 相互作用に関する理論予測から始まり、デバイス設計、測定系立ち上げ、そしてデバイス構造の改良を重ねながら、RKKY 相互作用の端緒を掴むところまで到達した。デバイスの品質向上や構造最適化も進み、確証を得るのは時間の問題と考えている。半導体材料を用いて RKKY 相互作用を通じた 2 スピン間相互作用が確認できれば、チューニング可能なスピントロニクスデバイス素子として大きな意味があり、我々の成果はそこへ向けてあと一歩まで近づいたと考える。

### (e) 類似研究のまとめ

半導体量子ドットにおいて RKKY 相互作用を用いてスピン相関を制御するという提案は我々が 2003 年に理論的に初めて行い、実験的にも世界に先駆けて取り組み始めた。その後、多くの研究グループがこの分野に参入してきている。

東大物性研の勝本信吾研究グループでは、AB リング構造および単一サイドドット構造のファノ・近藤効果を観測している。最近我々と同一のドット・細線結合系を測定開始し、我々と同一の実験結果を得ている。しかしながら、RKKY 相互作用は未観測である。

Harvard 大の Charlie Marcus グループでは、3 ドット構造において RKKY 相互作用を観測したと報告した (2004 年 Science)。ただしこの実験では 2 ドット局在スピン間の距離がフェルミ波長よりもはるかに長いため、RKKY 相互作用は無視できるほど小さいと思われ、測定結果が RKKY 相互作用であるとする結論には疑問が持たれている。さらに、RKKY 相互作用ではないメカニズムでこの論文の結果を説明する論文も出されているので、本実験によるドット間 RKKY 検証はまだ確定的ではない。

Delft 大の Leo Kouwenhoven のグループは、一つのドットスピンと電極中に存在する磁性不純物スピンの間の RKKY 相互作用を観測したと報告した (2006 年 PRL)。ドット中の局在スピンの RKKY 相互作用の一端を担うことを実証したことには意義がある。しかし、電極中の不純物の位置やスピン間の強磁性・反強磁性を制御することは難しいという金属材料と同じ問題を抱えている。

Cambridge 大の David C. Ritchie のグループでは、ポイントコンタクトの量子化コンダクタンスの I-V 特性に Kondo 効果の分裂した共鳴ピークを観測し、そのメカニズムとして RKKY 相互作用を主張している (2007 年 Nature Physics)。伝導電子系の電子濃度を変えて分裂幅をプロットすると  $2k_F R$  の振動が見られており、確かに RKKY 相互作用の特徴が見られる。しかしながら、試料構造は 2 次元電子系の上につけた金属ゲートによってポイントコンタクトを作っただけの試料であり、そのような単純な試料の、どこにどのようにして 2 つの局在スピンのできるのかなどの詳細が全く不明であり、今後の追試が待たれる。

以上のように、量子ドットを用いた RKKY 相互作用の研究は現在でも世界の主要研究機関で取り組まれており、今後も注目されるトピックスである。

## (2) 研究成果の今後期待される効果

我々の研究で目指したことは、半導体材料を用いていながら、これまで半導体では出すことができなかった物性（ここでは強磁性）を人工的に発生させることであった。そのためのアイデアとして、二次元電子系にカゴメ型周期ポテンシャルをかけて平坦バンドを形成し、そこで強磁性を出すということと、量子ドットを用いて局在スピンを形成し、RKKY 相互作用させるということであった。平坦バンド強磁性の方は、もし実現できれば半導体バンドエンジニアリングが可能となったということで学術的なインパクトは大きいと考えられる。しかしながら、強磁性転移温度があまり高くできない（せいぜい数ケルビン程度である）ために、実用デバイスへの展開は難しいと考えられる。

その一方で、RKKY 相互作用デバイスの方は、多くの研究機関が取り組んでおり、半導体 RKKY 相互作用が実証されれば学術的インパクトは十分高い。また既に我々が理論的に予言しているとおり、ドットサイズを小さくすれば（例えば数ナノメートル）室温動作デバイスの実現も可能である。多数のドット列を制御性よく高密度に並べることができる技術が確立すれば、マクロな数の電子スピンの整列する強磁性を室温で実現できる。そうなれば、半導体材料だけを用いた磁性デバイスの誕生となり、実用的な波及効果は計り知れないものとなるだろう。

### 3. 3 スピン光学特性（筑波大学 野村グループ）

#### (1) 研究実施内容及び成果

##### [1] 量子ドット列、二次元電子系の光学的手法による電子状態の研究

###### 総論

ゲート付非ドープ量子井戸試料構造ではドナーイオンによる散乱がないために、ポテンシャル揺らぎの少ないきれいな界面が存在し、ゲートバイアスによってオーミック電極から電子を供給することにより低電子密度でも高移動度を有する二次元電子系が形成されることが知られている。我々は、ゲートに微細加工を施すことにより面内に人工的なポテンシャルの周期構造によるミニバンドを形成しさらにはバンド強磁性を実現することを目標に研究を開始した。

周期構造中の極低密度の電子系を研究する手段として光学的手法が有力である。光学測定においては量子井戸中に電子が誘起されている領域から誘起されていない領域に渡って連続的に調べることが可能であり、また、電気伝導の測定で問題になるようなオーミックコンタクトの特性に左右されにくいという利点がある。我々は、人工的なポテンシャル周期によって形成されるミニバンドの小さなエネルギーギャップを検出可能にするために、試料を極低温まで冷却できる希釈冷凍機を用い、光ファイバーによって光の照射、検出が出来る測定系を整えた。また、低温の試料直近に偏光子と波長板を供えた光学系を構築することによって光の強度のみでなく円偏光度まで検出できるようにした。

本研究の方針は、非ドープの量子井戸の表面に周期構造を持った金属ゲートを蒸着し、裏面のゲートと量子井戸にとったオーミックコンタクトの 3 つの電位を制御することによって、電子密度とポテンシャル変調の大きさを制御して人工結晶の実現し、発光特性からその端緒をとらえることである。

電場下における量子井戸や量子井戸中に形成される二次元電子系（2DES）の光物性は他の研究グループを含めて非常に精力的に調べられてきている。しかし、極低温、低電子密度、高品質試料という条件の下での研究は限られた研究グループでしか行われていない。本研究では極低温での電子物性に興味を持っていることから発光測定のための光励起密度を極力小さくし、典型的には  $10\text{--}100\ \mu\text{W}/\text{cm}^2$  を用いた。これは、光励起による試料温度の上昇を防ぐと同時に、光によって励起される電子・正孔の密度がゲートによって誘起されている電子密度 ( $1\times 10^9\text{cm}^{-2}$ ) よりも十分に小さくするという要請をみたす。

先にも述べたように、非ドープの量子井戸では低電子密度におけるポテンシャル揺らぎが小さいというところに大きな特長を持っており、このような試料の光学測定がなされた例は今までに無かった。したがって、表面ゲート構造による人工的なポテンシャル変調を印加する前に、極低温、低電子密度、高品質という条件のもとで電子密度を  $1\times 10^9$  から  $1\times 10^{11}\text{cm}^{-2}$  へと変化させたときに非ドープの量子井戸ではどのような発光が現れ、またそれがどのような機構によっているのかを十分に調べてよく理解する必要がある。また、電子密度が一定であっても量子井戸に垂直な一様な電場を加えた場合には発光スペクトルは変化するので、ゲート操作によって量子井戸にどのような電場がかかっているかを知る必要がある。我々は、変調をつけないフラットな表面ゲートの試料を用いて、電子密度と電場をバイアス制御し、非ドープ量子井戸の発光の基本的な特性を詳しく調べた。研究の途中において、試料の表面状態やゲート間の電流リークが試料の光学特性にとって非常に重要であることが改めて明らかになった。特にリークのある試料を用いていると量子井戸に電子の制御性が変化したり、また、ゲート操作による状態の再現性をなくしたりという問題を引き起こした。発光検出の S/N 比を上げるために  $0.5\times 0.5\text{mm}$  あるいは  $1\times 1\text{mm}$  の大面積の試料を用いるため、リーク電流を抑えるということに関しては不利である。我々は、特にリークの少ない素性の良い試料を抽出することを心掛け、現在では  $0.5\times 0.5\text{mm}$  の試料で  $1\times 10^{10}\text{cm}^{-2}$  の電子を誘起して、電場を  $10\text{kV}/\text{cm}$  印加してもリーク電流が  $1\text{nA}$  以下であるような試料を用いている。これらの研究が、分数荷電励起子の光学検出、低電子密度領域における電子・正孔有効質量の増大についての研究成果に結びついた。

低電子密度において量子井戸が理想的であれば、すなわちポテンシャル揺らぎや欠陥な



どが全く存在しなければ、理想的な二次元電子および光励起された正孔の多体系の理想的な舞台を提供してくれる。この場合、極低電子密度では電子の Wigner 結晶化やスピン偏極液体状態なども予測されている。しかしながら、実際には現実の試料で零磁場で Wigner 結晶を実現することは現在でも非常に難しく、低電子密度では程度の差はあれ有限に残るポテンシャルの揺らぎによってポテンシャルの谷に電子が局在していて、実際に観測される発光特性もこのポテンシャル揺らぎの寄与が現れている。この場合、重要になるのは電子密度の増加に伴ってポテンシャル揺らぎが電子によって遮蔽される効果である。残留イオンによるポテンシャル揺らぎは高品質な試料になればより低電子密度で遮蔽され、その大きさは一様な 2DEG が誘起された後ではスクリーニング長とドーパントイオンからの距離に逆比例して小さくなる。非ドーパ量子井戸の場合はこのポテンシャル揺らぎは表面準位にトラップされている電荷によってもたらされるため、通常の構造より有利であることが明らかになった。この研究が、金属絶縁体転移の光学的研究の成果に結びついた。

人工結晶を作る場合には、表面ゲートで作るポテンシャル変調の周期はなるべく小さいことが望まれる。量子井戸の表面からの深さと変調の周期はトレードオフの関係になっている。

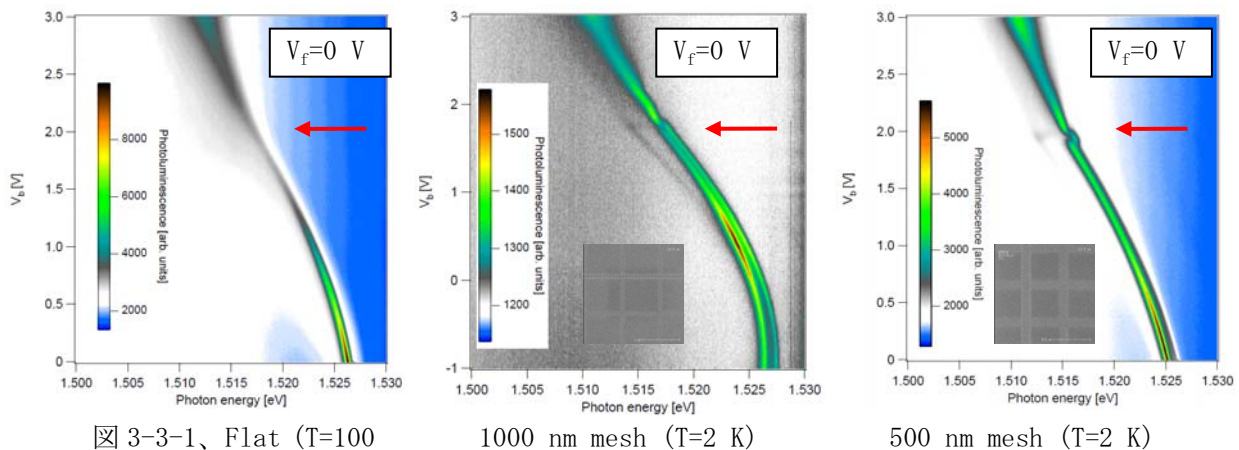


図 3-3-1、Flat (T=100 mK)

1000 nm mesh (T=2 K)

500 nm mesh (T=2 K)

試料の作製においては EB リソグラフィによるリフトオフの方法を用いて最小で 100 nm 周期の網状構造を作製する技術が確立された。実際に測定した試料は深さ 250 nm、131 nm の量子井戸を用いて 1000 nm から 300 nm 周期の正方格子メッシュゲートを作製して行なった。250 nm と 131 nm の試料ではどちらもゲートに構造をつけない試料において電子誘起の閾値電圧やゲート電場による発光のエネルギーシフトにおいてゲートが理想的に働いていることが確認されている。強いゲート変調をかけるためには 131 nm の方が有利であり、実際にメッシュの周期が異なる試料で発光が複雑に変化する様子を観測している。現時点では、その詳細は明らかではなく、今後、慎重に研究を進める必要がある。図には、スペクトルの理解が進んでいる 250 nm の試料の場合について、ゲートをつけたときの発光変化を示す。3 つの図は左からフラットゲート、1000 nm 間隔、500 nm 間隔の正方格子についてオーミックコンタクトと表面ゲート電圧を 0 V にし、裏面ゲートによって電子を誘起していったときの発光スペクトルのカラープロットである。格子のメタルゲート部分の幅は 100 nm である。ゲート金属下の表面準位は約 0.7 eV あるので電子がたまっている状態では、表面ゲートと量子井戸の間には -0.7 V のバイアスがかかっていることになる。また、レーザー照射下ではゲートを蒸着していない領域の表面準位はほぼ 0 V であるので、量子井戸にはポテンシャル変調が出来ている。実験の都合上、フラットゲートのものだけが 100 mK、他のものは 2 K での測定であるが、どの場合にも、図の矢印で示した位置が量子井戸に電子が誘起される閾値であり、矢印より下では荷電励起子の発光が、上では 2DES の広がった発光が観測される様子は共通している。ゲートのポテンシャル変調は量子井戸に誘起された

電子によって遮蔽されるが、閾値付近では遮蔽は小さくなると考えられる。閾値近傍での発光を見比べるとフラットの試料では荷電励起子のピークから連続的に 2DEG につながっているのに対して、1000 nm、500 nm のメッシュ試料では発光ピーク強度が減少し、さらに低エネルギー側にもピークが出現しているのがわかる。前述のように、この電子密度領域では、試料のリーク電流の大小、表面状態等により特性が影響を受けることがわかったため、発光スペクトルの解釈には慎重を要する。しかし、私たちは、低電子密度極限におけるポテンシャル変調効果を他の要因と区別して、観測することが可能となった。さらに、慎重により表面との距離の短くポテンシャル変調の周期の小さい量子井戸試料の発光を調べることにより、人工的なポテンシャルの周期構造によるミニバンドを形成、さらにはバンド強磁性を実現へと繋がるものと考えている。

#### (a) 分数荷電励起子の光学検出

ランダウ準位占有数  $\nu$  が 1 以下の場合、高品質な二次元電子系では特定分数の  $\nu$  で異常を示す分数量子ホール効果が知られている。光励起した場合は、電子に加えて正孔が存在するため、この正孔と分数電荷のラフリンの準粒子との間で形成される分数荷電励起子の存在が Wojs 等に予想されている。これは、電子間相互作用と電子-正孔間相互作用の双方に依存する状態であり、電子-静交換の距離が磁気長より大きい場合にのみ観測されると予想されている。私たちが研究を進めてきたゲート付非ドープ量子井戸試料構造は、電子密度がゲート電圧により制御可能であり、低電子密度領域においても高い電子移動度を保つという特徴をもつ。従って、同じランダウ準位占有数  $\nu$  であってもより磁場を低くすること即ち磁気長を長くすることが可能である。そのため、分数荷電励起子の観測に適した試料である。実際、図(a)に示すように 5 T という比較的に低い磁場においても、分数占有率において発光エネルギーに異常が見られることが示された。この試料の占有率 1/3 近傍の発光スペクトルには図(b)に示すように、3つの発光ピークが見られ、占有率 1/3 をはさんで遷移エネルギーの離散的変化と発光強度の相対比の変化が見られること見いだした。このことは、占有率 1/3 をはさんでラフリンの準電子と準正孔が入れ代わることと関連すると考えられ、この占有率 1/3 をはさんだ発光スペクトルの不連続な跳びは分数荷電励起子状態の存在の兆候であると見られる。

分数荷電励起子状態に関する研究は 2000 年の Wroclaw 大の Wojs 等による理論的予想に端を発する。CNRS の M. Potemski のグループ、Weizmann 研究所の I. Bar-Joseph のグループ等により実験的検証が試みられている。いずれも、Si ドナー層を有する従来型の試料を用いている。低電子密度領域まで連続的に電子密度を変調可能であり、Wojs 等による理論モデルに対応する実験条件に調整可能な試料で研究を進めている点に私たちの独自性がある。

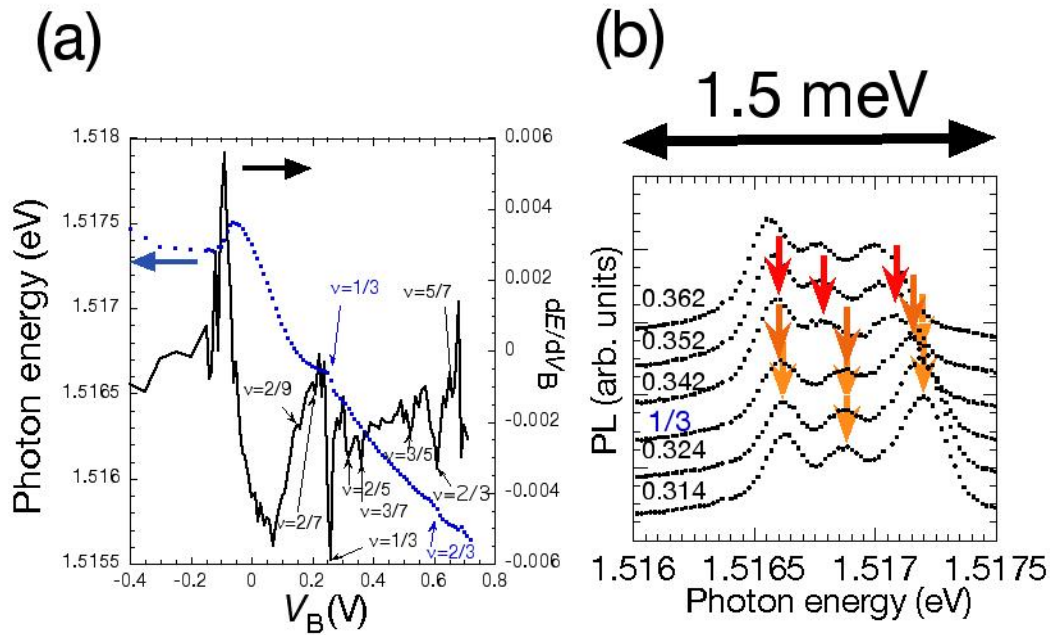


図 3-3-2 (a) 5 T における発光エネルギーおよびその  $I_B$  についての一次微分のバイアス電圧依存性。(b)  $\nu=1/3$  近傍の発光スペクトル。発光ピーク強度比と発光エネルギーの不連続な跳びが  $\nu=1/3$  を境に見られる。

### (b) 金属絶縁体転移

二次元電子密度を連続的に低下させると、金属から絶縁体へ転移することが主に、電気伝導特性により調べられてきた。この金属絶縁体転移付近ではスピン感受率の増大がいく例が報告されている。光学的手法は、電気測定の困難な絶縁体を調べることも可能であるという特徴をもつ。また、キャパシタンススペクトルと組み合わせることにより電子系の状態を明確にすることが可能である。キャパシタンススペクトルは電子系の圧縮率と相関があり、量子ホール状態の局在状態・非局在状態に対応して、ピークを示すことが知られ、また、電場の遮蔽に関連する量であるため、電子系が局在しているか広がっているかについての知見を得ることが可能である。そこで、本研究では裏面ゲートに加えて表面ゲートを形成した非ドープ量子井戸を用いて発光スペクトルとキャパシタンススペクトルの双方から金属絶縁体転移付近の電子系の状態を調べた。

電子密度を連続的に低下させてキャパシタンススペクトル測定を行った結果、図に示すように、金属絶縁体転移点の直前に電子圧縮率の異常を観測した。この点を境に発光スペクトルが二次元電子系発光から荷電励起子発光へといわゆるパーコレーション転移を伴い、移り変わっていることが観測された。これらの結果により、電子密度の低下に伴い、線形スクリーニング領域から非線形スクリーニング領域へ転移し、さらに、単電子局在状態へと転移することが示された。

類似の研究例として、1990 年代中葉に Kravchenko を始めとしてシリコン MOS-FET 中二次元電子系での金属絶縁体転移が報告されてから、多数の研究が活発に行われてきている。さらに最近では、2005 年に Bell 研の電子移動度が 1000 万  $\text{cm}^2/\text{Vs}$  を越える高品質 GaAs 試料での金属絶縁体転移が報告され (PRL94, 136401) 金属絶縁体転移の要因に関する議論が巻き起こってから、キャベンディッシュ研究所の D. A. Ritchie のグループ、プリンストン大の M. Shayegan のグループ等から、報告され、研究が活発化している。その中で、私たちの研究を進めてきた試料の特性と研究手法の優位性を生かし、光学的手法により金属絶縁体転移を進めたが、それは他に類例のないものであり、金属絶縁体転移の要因に関して重要な知見を与えるものである。

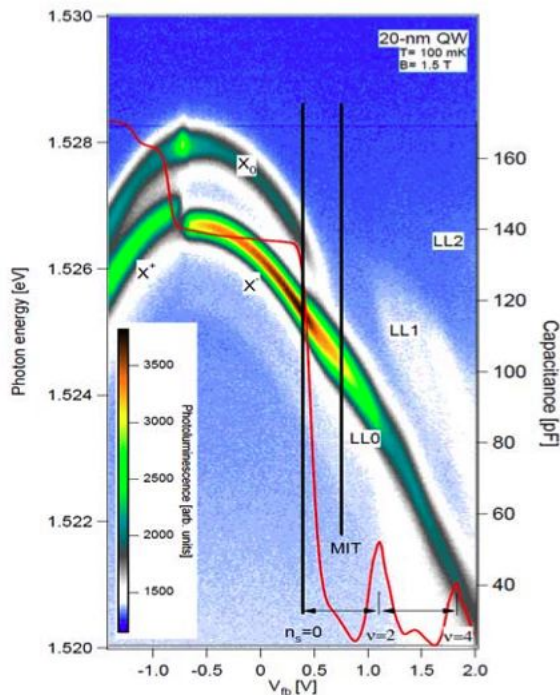


図 3-3-3 発光スペクトル（カラーイメージ）と表面-裏面ゲート間のキャパシタンスのバイアス電圧依存性。

#### (c) 低電子密度領域における電子・正孔の有効質量の増大

二次元電子系において、電子密度が低くなるフェルミ液体が強磁性液体相を経てウィグナー結晶状態へ転移することが予想されている。この現象の予兆現象として、スピン感受率、 $g$  因子、有効質量等に異常が低電子密度領域で起こりうることが理論的に示され、研究が進められてきた。光学的手法は、絶縁体にも適用可能なため、低電子密度極限の研究に有利である。私たちは、構造の改良されたゲート付非ドープ量子井戸試料構造を用いて、 $8.6 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$  の二次元電子密度において、電子占有数  $\nu=1$  での異常を光学的に観測することに成功した。これはこの低電子密度において、二次元電子系が形成されていることを示すものである。この試料を用いて従来よりも広い電子密度領域において、複数のランダウ準位に起因する発光ピークから電子有効質量、正孔有効質量の電子密度依存性を評価した。得られた有効質量はいずれも電子密度の低下に伴い増大を示した。これらの電子有効質量の増大は電子間相互作用に起因するものであると考えられる。正孔有効質量の増大は、電子間相互作用に加えて電子-正孔間相互作用、試料にわずかに残る不純物散乱の効果に起因するものであると考えられる。この正孔有効質量増大は光学測定により初めて見いだされたものである。この研究により、二次元電子密度の低下から電子間相互作用の影響が顕著になる状態が実現されていることが示された。

類似の研究例として、コロンビア大学の H. L. Stormer のグループ (PRL 94, 016405)、プリンストン大の M. Shayegan のグループ (PRL92, 226401) の電気伝導特性による、電子有効質量、スピン感受率の低電子密度領域における増大に関する研究がある。低電子密度領域における諸物理量の異常に関しては、最近、益々活発に研究が進められ、理論的研究を含めて新たな展開が見られる。光学的手法により、電子の有効質量の増大については AT&T ベル研のグループからの報告例がある。しかし、高品質試料を用いて低電子密度領域まで系統的に電子と正孔の有効質量の増大を報告したのは私たちのグループが初めてである。



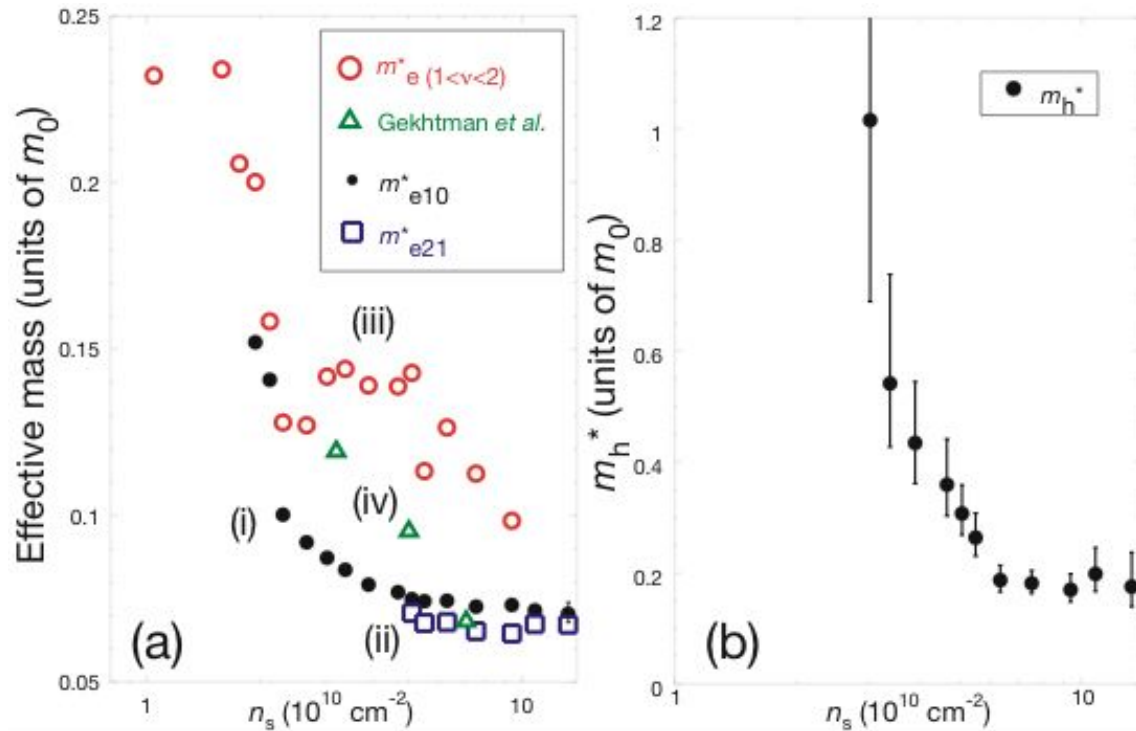


図 3-3-4 (a) 電子有効質量の電子密度依存性、 $m_{e10}^*$ 、 $m_{e21}^*$ はそれぞれランダウ準位の  $N=0$  と  $N=1$  準位、 $N=1$  と  $N=2$  準位から決定した電子有効質量である。 $m_e (1 < \nu < 2)^*$ は電子占有数  $1 < \nu < 2$  の場合における電子有効質量である。(b) 正孔の有効質量の電子密度依存性。

## [2] カゴメ格子構造・アハロノフ・ボームリング構造の光学的手法による干渉効果の研究

### (a) MOVPE 選択成長 GaAs 量子細線カゴメ格子試料の発光の磁気振動

カゴメ格子中の電子系において強磁性の発現等の特異な現象の発現が予想されている。図(a)に示すような選択成長有機金属気相成長法(SA-MOVPE)による GaAs 量子細線カゴメ格子試料を北大の福井氏ら提供いただき、その発光測定を磁場下 60 mK で行った。人工カゴメ格子の研究例は他に知られていない。垂直磁場が 0~3 T における発光ピークのエネルギーシフトから、量子細線の閉じ込めに起因する振る舞いが観測された。さらに、図(b)に示すように 0~0.2 T の低磁場領域における発光強度と発光エネルギーに磁場に対する特有の約 10 mT 周期の振動構造が見られた。この周期はカゴメ格子中の一辺が 350 nm の六角形内を貫く磁束が量子化磁束に相当する磁場 13 mT に近い値であった。この振動はカゴメ格子中の電子の Altshuler-Aronov-Spivak (AAS) 振動によることが示唆された。この研究により、電子のサブバンドの明確な証拠は得られなかったが、少なくともサブバンド構造の形成に必要なコヒーレントな電子状態が実現されていることが示された。人工カゴメ格子に関する類似の研究例は知られていない。試料作製技術、測定技術ともに突出して高水準のものである。

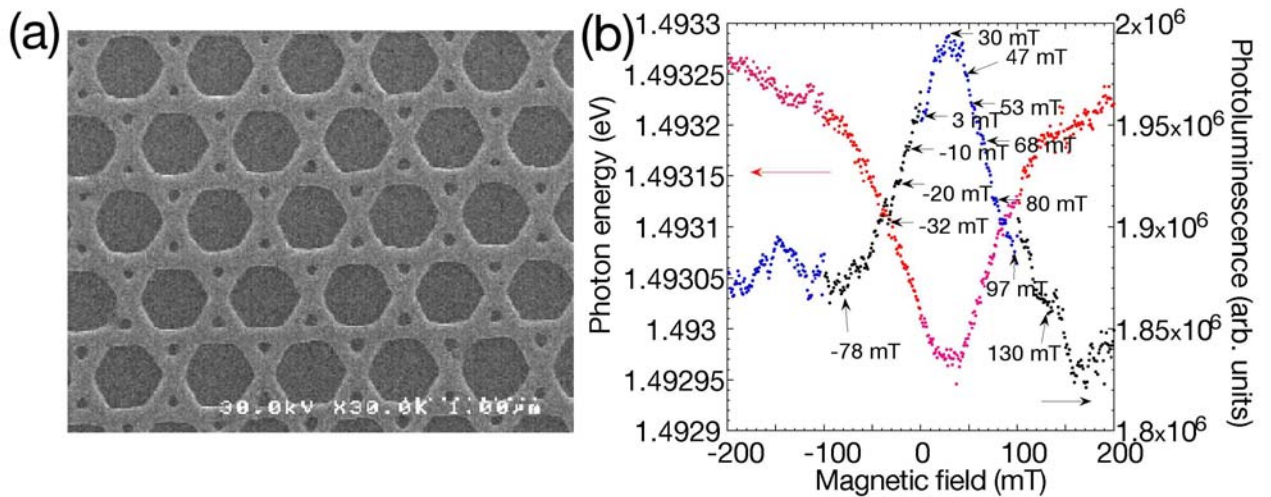


図 3-3-5、(a) MOVPE 選択成長 GaAs 量子細線カゴメ格子試料の走査型顕微鏡写真。(b) 同試料の発光強度と発光エネルギーの磁気振動。

#### (b) InAs 量子チューブ中荷電励起子のアハロノフ-ボーム効果

前項と関連して、InAs アハロノフ・ボーム (AB) チューブ構造を用いた波動関数の干渉実験を光学的手法により試みた。低電子密度領域では荷電励起子発光が強く観測されることが、量子井戸発光の私たちの研究から明らかにされている。干渉効果の光学的検出には、この荷電励起子状態の制御が必要である。量子リング構造ではいつか研究例があるが干渉効果の光学的観測のためにはリングが細くかつ半径が小さいことが必要とされている。しかしながら、細い量子リングは一次元系であり励起子束縛エネルギーが発散するため、AB 効果は消滅する。そこで、私たちは量子チューブに注目し、巻かれた二次元系中の励起子の AB 効果の検出を試みた。

北海道大学福井氏等に提供された半径 35nm の InP コアの側面に InAs 量子井戸を形成した特異な形状の量子チューブ試料(図、左上)を用いて、磁場中顕微フーリエ変換赤外分光測定を行った。図に示すように量子チューブを貫く磁束量子の本数に依存して発光ピークが振動的なエネルギーシフトすることが見いだされた。

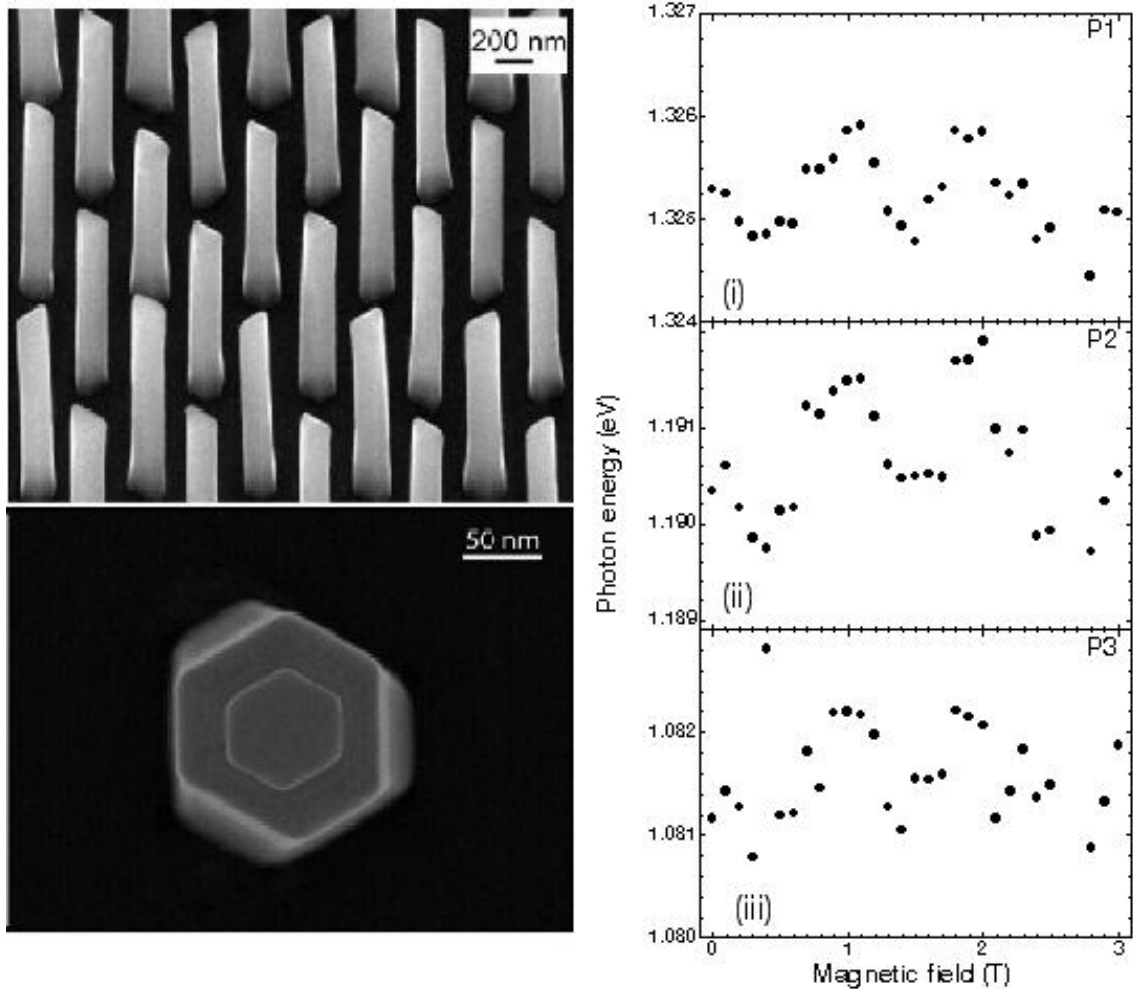


図 3-3-6、(左上) 量子チューブ構造の走査型電子顕微鏡写真、(左下) 同断面図。(右) 3つの荷電励起子発光ピークエネルギーの磁気振動。

得られた測定結果の要因を明らかにするために、磁場中に平行に置かれた量子チューブの中性励起子と荷電励起子のエネルギーを有効質量近似により求めた。その結果、AB 振動は中性励起子の場合、磁束量子の半整数倍の磁束で上に凸のピークを常に示した。一方、荷電励起子の場合、相対運動、重心運動、終状態の電子のそれぞれのエネルギーが磁束に対して振動する。従って、図に示すように、半径を小さくするに従い、下に凸( $R=a_B^*$ )から上に凸( $R=0.25a_B^*$ )の AB 振動に移り変わることが示された。以上により、荷電励起子の量子チューブ構造内での干渉効果である AB 効果を光学的に検出されたことが示された。

類似研究として、量子リング中の励起子の AB 効果の観測に関するものが、Dortmund 大の M. Bayer 等(PRL 90, 186801)、フラジルのグループの E. Ribeiro 等によるものがある。前者の実験は一電子の AB 振動として理解され、後者の結果は正孔の一粒 AB 振動と理解されている。私たちは量子リング中の励起子では励起子 AB 効果の観測は原理的に困難であることを理論的に指摘し、量子リングではなく量子チューブを用いるべきであることを初めて指摘した。さらに、良質な試料を得、実験的検証を行った。



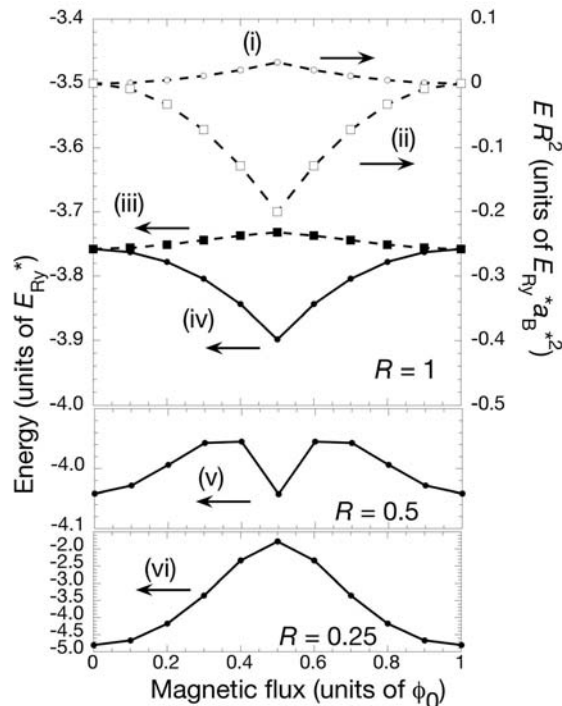


図 3-3-7、量子チューブ中荷電励起子の(i)重心運動、(ii)終状態の一電子、(iii)相対運動、(iv)  $R=a_B^*$  (v)  $R=0.5 a_B^*$  (vi)  $R=0.25 a_B^*$ の光遷移の各エネルギーの磁束依存性。

### [3] 自己組織化ナノ多孔質体を利用したナノ構造列の作製法に関する研究

本研究は、量子ドット列を形成するための表面ゲート構造の作製法のひとつとして開始された。従来から電子ビーム露光法により量子ドット列構造が作製されているが、大面積の試料を作成するには非常に長時間がかかること、リソグラフィーとしての極微細化の限界があることから自己組織化の手法を取り入れることを試みた。自己組織化ナノポーラス構造を用いて網状構造を作成し、GaAs 単一ヘテロ接合基板上に転写を行い、表面ゲート構造を作製した。自己組織化構造を用いているため、周期を 30 nm 程度の小さい構造も比較的容易に作製可能である。こうして作製された試料でゲート電圧が印加され、電子状態が変調されることが光学的に確認された。

この研究の過程で予期しない結果として、ナノ微粒子列が形成されることが見つかった。その形成条件を追求した結果、私たちはポーラス構造の鋳型基板表面の微細孔に微粒子材料を図(a)に示すように「押圧」という新たに開発した手法を用いて、サイズ、配置のそろった微粒子を 1 プロセスで生成することに成功した。この押圧プロセスはこれまでの微粒子生成法と比較すると独特な手法である。類似の手法として、粉碎などのブレイクダウン法と関連するが、微粒子の形状や粒径が制御され最小粒径が 25nm 以下と小さい点に私たちの手法の特徴がある。またこのプロセスは物理的な切断により微粒子化されるため、材料の適応範囲が広いという特徴をあわせもつ。鋳型基板として自己組織化ポーラスアルミナを用い、その基板表面に金薄膜を形成し、押圧することにより図(b)に示すようなナノ微粒子の規則配列が得られた。さらに、図(c)に示すように、ナノリング列を 1 プロセスで得ることに成功した。以上の結果は、ナノ微粒子列、ナノリング列等のナノ構造の作製手法としての「押圧法」の有効性を示すものである。本研究成果は JST より国際特許申請された。

類似の研究例としてはブレイクダウン法や化学合成法が知られているが、「押圧法」は私たちの独自の考案である。

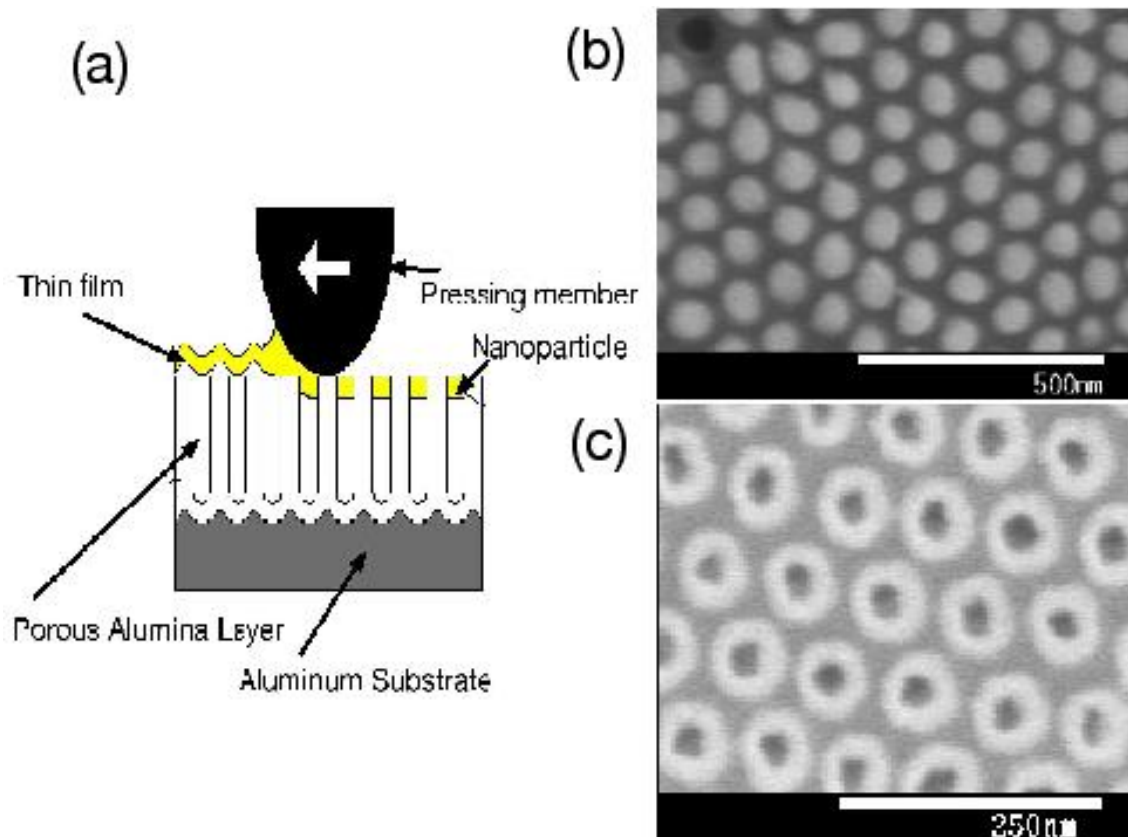


図 3-3-8、(a) 押し圧法の概念図。押し圧法により作製された(b)ナノ微粒子列、および(c)ナノリング列の走査型電子顕微鏡像。

#### [4] 局所光励起による電子・スピン注入に関する研究

本研究では光学顕微鏡を用いて局所的に試料を光準共鳴励起することにより電子を注入し、その応答を電圧プローブにより電氣的に検出する手法を用いた。この手法は円偏光を用いることによりスピン注入可能であり、光励起位置とスピンを検出する二次元電子系端状態との位置関係に関する情報を得られる点、強磁性体を用いずに非磁性体で構成された試料に形成される特性の良く分かった端状態を用いる点に特徴がある。

光励起された電子が量子ホール系のバルク状態を介して端状態に流れ込み、光電流としての寄与がホール電圧の増加として観測されることにより、二次元電子系端状態を反映した信号が得られた。さらに、円偏光励起により円偏光度のイメージの観測を行い、電子スピン偏極度と対応するものと考えられるイメージを取得した。この研究により、局所光励起によるスピン注入と、二次元電子系端状態を用いたスピン検出は有力な手法であることが示された。

類似の研究例として、Eindhoven 工科大学の Wolter のグループ (PRL74, 1198)、Nottingham 大学の Henini のグループ (PRL79, 5114) が挙げられるがいずれも通常の単レンズでレーザー光を集光して試料に入射したため分解能は  $5\ \mu\text{m}$  とあまり良くなく、また、スピン注入は試みられていない。私たちの結果は顕微分光のセットアップを構築し、スピン注入を行い電子スピン偏極度と対応するものと考えられるイメージを取得した点に独自性がある。最近、類似した手法は他の研究機関でも試みられる例（理化学研究所、東京大学、香港大学等）が増えてきており、今後、この手法はひろく活用されていくと見られる。

## (2) 研究成果の今後期待される効果

私たちは、ゲート電圧による電子密度の制御性の非常に高い、非ドープ量子井戸の発光の極低温における特性を理解するということに注力した上で、ゲート変調を施した試料の発光を測定した。その結果、電子密度に依存した効果と周期ポテンシャルによる効果を区別して、電子状態の変調を検出することが可能となった。本研究を通じて、人工結晶の実現に必要な要素技術が確立された。今後の実験により、これらの要素技術を組み合わせることにより、人工バンドの確実な端緒をつかむことが可能である。このことを通じて、人工結晶上にポテンシャル変調により任意のスピン状態を実現されることが可能となろう。これは、電子間相互作用の関わる物性研究の良い「実験場」なり、学術的なインパクトは非常に大きいものとなることが考えられる。これらを通じて、非磁性半導体中に強磁性状態を実現することにつながると考えている。実現されれば、実用半導体デバイスへの波及効果はとても大きなものとなると考えられる。

本研究を通じて、局所的に光励起して空間マッピングする手法の有効性が改めて認識された。偏光励起で電子スピンを注入し、空間的に離れた位置で非磁性半導体のみを用いてスピン偏極度を検出することが可能である。また、分光測定から電子スピンの直接的に観測可能である。これは STM や走査型 SET にない特徴である。この成果は、今後磁場下低温領域でのスピン-軌道相互作用の大きい In 系試料の物性研究の学術的進展に大きく貢献することは期待される。そのためには、継続的に空間分解能を向上させる努力が必要であると考えられる。また、この手法は室温で動作する実用性の高いスピndeバイスの特性評価に有効であり、その開発の進展に寄与するものと考えられる。

### 3. 4 サブテーマ名「多角形ループ配列におけるスピン干渉現象の研究」 (北海道大学 古賀グループ)

#### (1) 研究実施内容及び成果

##### (1)-1 半導体ナノ構造中でのスピン干渉効果の考察

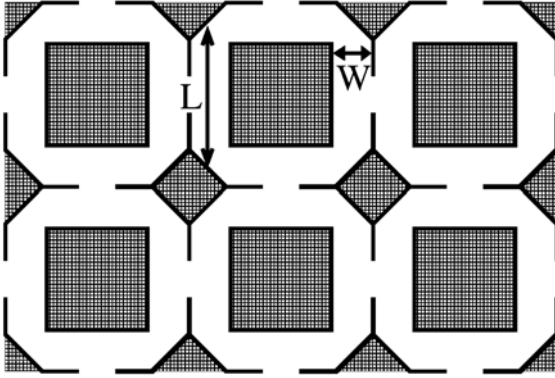


図 3-4-1: スピン干渉現象測定のための人工ナノ構造。

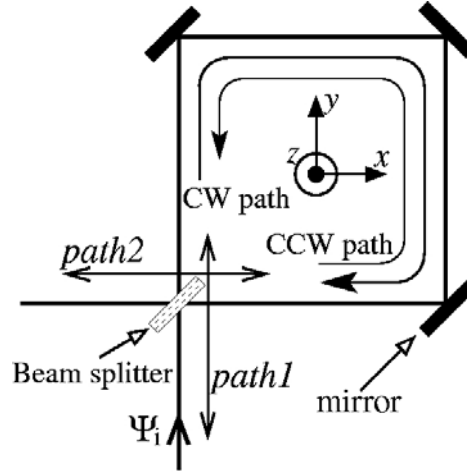


図 3-4-2: 正方形型スピン干渉計の模式図。

本研究で想定するナノ構造は、図 3-4-1 に示すもので、2次元量子井戸構造を持った半導体エピウェハ上に作製することを想定している。ここで、白い部分には2次元電子ガスが存在し、メッシュや黒い部分は、電子線リソグラフィ等によって、2次元電子が空乏層化している。白い部分のチャンネル幅（W）と長さ（L）を  $W < l$ ,  $L \sim l$  が成り立つように（ $l$  は電子の平均自由行程）、それぞれ、 $0.5 \mu\text{m}$  程度、 $1 \sim 2 \mu\text{m}$  程度とする。このような構造の中で起きるスピン干渉効果を考察するための単純化したモデルを図 3-4-2 に示し、これを正方形型スピン干渉計と呼ぶ。このモデルでは、波動関数  $\Psi_i$  の電子が、経路 path1 に沿って、スピン干渉計に入射し、ビーム・スプリッター（Beam splitter）によって、 $\Psi^{CW}$  と  $\Psi^{CCW}$ （部分波）に分けられ、それぞれは3つの鏡（mirror）で定められた正方形の経路を、それぞれ、時計回りと反時計回りで進む。これらの部分波が、再びビーム・スプリッターを通過してスピン干渉計の外に出る際に部分波間でのスピン量子干渉が起きる。その際、電子が path1 に出てくる確率（後方散乱確率）が、

$$P_{\text{back}} = \frac{1}{2} + \frac{1}{4} (\cos^4 \theta + 4 \cos \theta \sin^2 \theta + \cos 2\theta) \cos \phi \equiv \frac{1}{2} + A(\theta) \cos \phi \quad (3)$$

で与えられることが簡単な計算からわかる[論文 1]。ここで、 $\phi$  は、ベクトル・ポテンシャルに起因する波動関数の位相で、図 3-4-2 の  $z$  方向にかけられた磁場  $B$  を使って、 $\phi = 2eBL^2/\hbar$  で与えられる。 $\theta$  は、正方形ループ角辺を電子が通る時に起きる、Rashba 効果によるスピン歳差運動の回転角で、 $\theta = 2cm^*L/\hbar^2$  で与えられる。本研究では、論文 1 の考察を発展させ、①Rashba 効果と Dresselhaus 効果双方を取り入れたモデル、②長方形ループにおけるスピン干渉効果、③三角形ループにおけるスピン干渉効果、の理論考察を行い、実験結果との比較を試みた。

##### (1)-2 半導体ナノ構造中(正方形ループ)でのスピン干渉効果の検証

このようなスピン干渉効果検証の実験は、図 3-4-3(b) のような、真中に図 1 [或いは図 3(a) の電子顕微鏡写真] に示すようなナノ構造が作りこんであるホール・バーの縦抵抗  $R_{xx}$  の磁場依存を測定することにより行うことができる。この場合、(3) 式の  $\cos \phi$  は、縦抵抗  $R_{xx}$  が磁場  $B$  の関数として振動するというを示しており、アハラノフ・ボーム(AB)効果の特別な場合である、

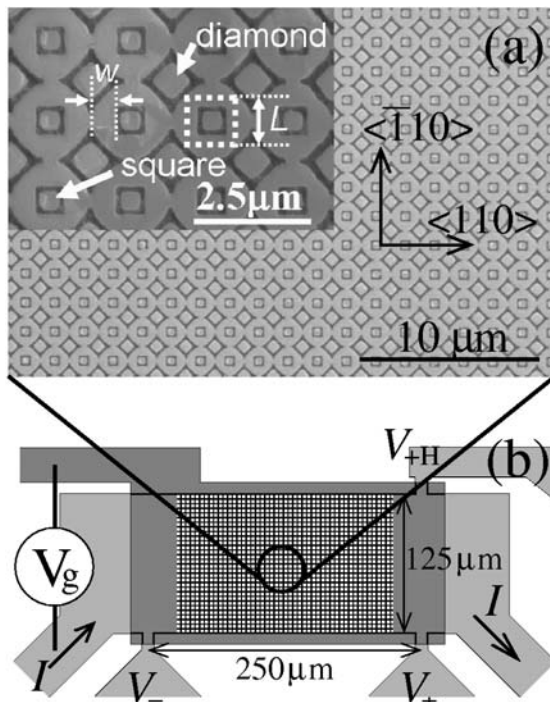


図 3-4-3: 正方形型スピン干渉計の原理検証実験をするために使う実際のサンプル。

Al'tshuler-Aronov-Spivak (AAS) 振動を意味している。(3) 式は、さらに、観察される AAS 振動の振幅が、 $A(\theta)$  によって変調されることを示している。これが、スピン干渉の効果であり、例えば Rashba 効果のみを仮定したモデルで  $A(\theta)$  の値を詳細に調べてみると、 $\theta=0.4245\pi, 0.822\pi, 1.178\pi, 1.5755\pi$  で、 $A(\theta)=0$  になることがわかる。このことにより、実験により、AAS 振動の振幅が零となるゲート電圧を決定すると、そこでの  $\theta$  値、ひいては  $\alpha$  値が、 $\alpha=\theta^2/2m^*L$  によって求まることとなる。

正方形型スピン干渉実験は、以前の弱局在-反弱局在転移の実験[論文3]に用いたものと同様の InAlAs/InGaAs/InAlAs 量子井戸サンプルを用い、フォトリソグラフィ法及び電子線リソグラフィ法により、図 3-4-3 に示すような Hall bar 素子を作製することによって行った。ここでナノ構造が、単一の正方形ループではなく多数のループが配列状に並んだものであるのは、通常の AB 効果(磁気抵抗が  $h/e$  の周期で振動)や普遍的コンダクタンス揺らぎの効果を統計的に平均化して、AAS 振動をより明瞭に観察するためである。また、この素子には、Hall bar 全体を覆うようなゲート電極が蒸着されており、その下の2次元電子ガスの濃度と Rashba パラメータ  $\alpha$  の値をゲート電圧により制御できる。図 3-4-4 に、このような素子の低温(0.3 K)での磁気抵抗測定の結果の一例を示す。ここでは、sample2 のウェハを用い、正方形ループのサイズが  $L=1.5\mu\text{m}$ ,  $W=0.5\mu\text{m}$  の素子を用いている。ゲート電圧( $V_g$ )を 0.0V から、4.0V まで上げていくに従って、AAS 振動の振幅が変化の様子が明瞭に観察された。図 3-4-4 で、 $V_g=0.3, 0.9, 3.1\text{V}$  付近で AAS 振動の位相が  $\pi$  変化している(つまり、 $A(\theta)$  の符号が反転している)ことがわかり、詳細な検討の結果、これらのゲート電圧での  $\theta$  値は、それぞれ、 $1.178\pi, 0.822\pi, 0.4245\pi$  に対応していることがわかった。ここで、 $\alpha=\theta^2/2m^*L$  の関係式を用いると、これらのゲート電圧での  $\alpha$  値を求めることができる。図 3-4-5 示すのは、このようにして、正方形ループ配列にみられる AAS 振動の振幅のゲート電圧依存を解析して得られる  $\alpha$  値を、本実験で使用した全てのウェハに関して求め、論文 2 での反弱局在解析によって求めた  $\alpha$  値と(2)式による理論計算値とともにキャリア濃度の関数としてプロットしたものである。このように、これら3つの方法による  $\alpha$  値は非常に良い一致を示した。

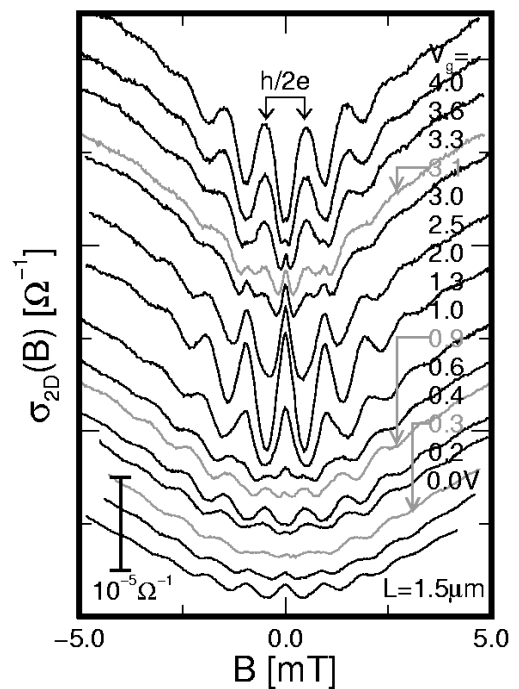


図 3-4-4: 観察された AAS 振動のゲート電圧依存。測定に用いた素子は、エピウェハ sample2 を使用し、 $L=1.5\mu\text{m}$ ,  $W=0.5\mu\text{m}$  の条件で作製された。(測定結果は、比較しやすくするため、上下にシフトしてある。)

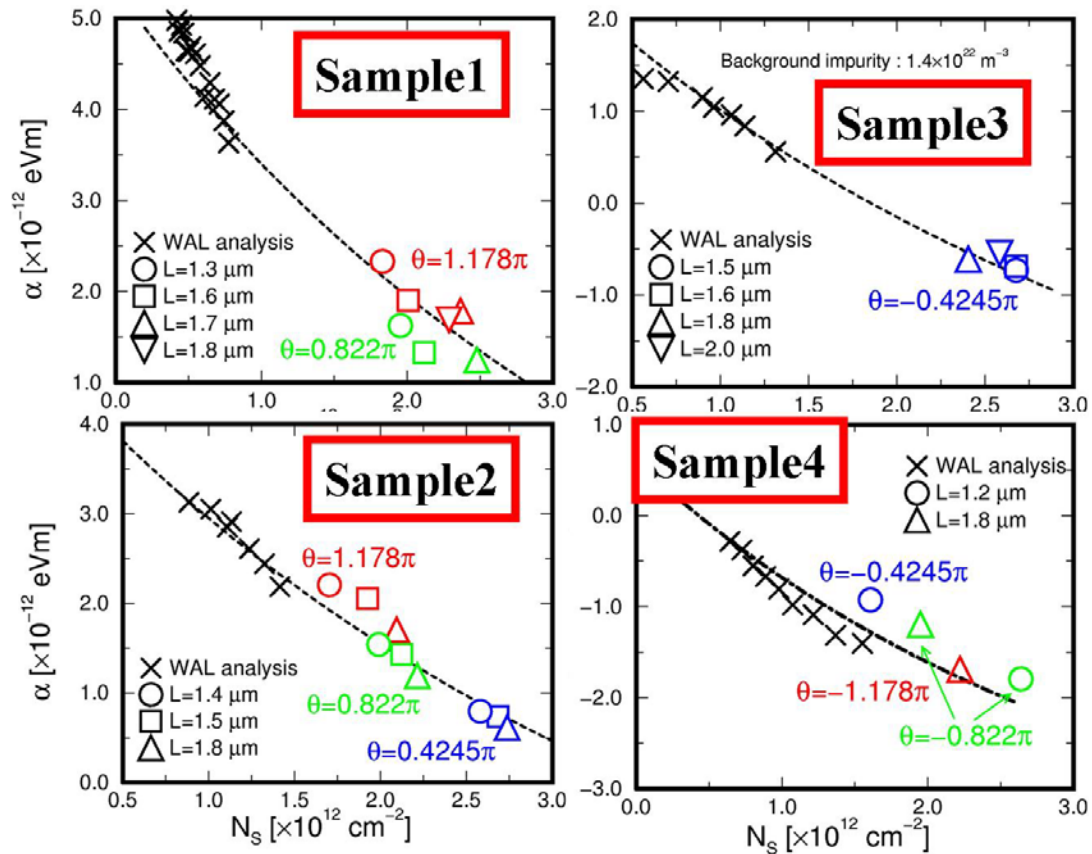


図 3-4-5: 本実験で使用した全エピウェハの  $\alpha$  値。×印は反弱局在解析から見積もった  $\alpha$  値 [論文 3]、曲線は  $\mathbf{k}\cdot\mathbf{p}$  摂動法による理論計算値、その他のシンボルは、正方形ループ配列におけるスピン干渉現象の解析から得られた値。Sample 2、3 の理論計算値は、それぞれ、 $4 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 、 $1.4 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$  の n 型のバックグラウンド不純物の存在を仮定している。

### (1)-3 Dresselhaus 項の効果と長方形、三角形ループでのスピン干渉効果の検証

理論モデルにおいて、正方形型スピン干渉計に Dresselhaus 項の効果を加えることや、長方形型スピン干渉計への拡張を図ることは容易である。具体的には、方形のスピン干渉ループの短辺と長辺に異なるスピン回転角を割り当てることで対応が可能である。その結果、AAS 振動の振幅に対応する上記の  $A(\theta)$  は、2つの角度の関数  $A(\theta_R, \theta_D)$  として与えられることになる。 $\theta_R$ - $\theta_D$  平面を  $A(\theta_R, \theta_D)$  の符号が正となる領域を赤、負となる領域を青でマッピングしたのが図 3-4-6 である。上記実験での正方形ループにおけるスピン干渉効果においても、実際には、Dresselhaus 項による効果により、 $\theta_R, \theta_D$  の双方がゲート電圧の関数として変化し、図 3-4-6 に示す曲線のように  $\theta_R$ - $\theta_D$  平面上を一定の軌跡を描きながら変化することがわかる。本研究では、InAlAs/InGaAs/InAlAs 量子井戸の既存のバンドパラメータを用い、数値計算により  $\theta_R$  及び  $\theta_D$  を求め、実験によって得られた AAS 振動の振幅と計算によって得られた  $A(\theta_R, \theta_D)$  との比較を試みた。その結果、実験結果との一致は、Rashba 効果のみを仮定した計算結果 [図 8(a')(b') の破曲線] と比較して、格段に向上することが示された [図 3-4-7(a')(b') の実曲線] (論文 3)。その後、長方形ループ配列を用いた実験試料も作製し、AAS 振動測定の実験を行い、理論計算結果との比較を行ったが、こちらも、両者は非常によい一致を示した [未発表]。

正方形、長方形ループによるスピン干渉実験に加えて三角形ループを用いたスピン干渉実験も行った。ところが、三角形ループでのスピン干渉効果の計算は、Dresselhaus 項を含めると非常に複雑となり、方形ループの場合に得られたような  $\theta_R$ - $\theta_D$  平面へのマッピングは不可能であった。そこで、数値計算は、それぞれの実験素子に関して個別に行い、実験結果との比較を試みたが、現時点では定性的以上のよい一致は得られていない。



## (2) 研究成果の今後期待される効果

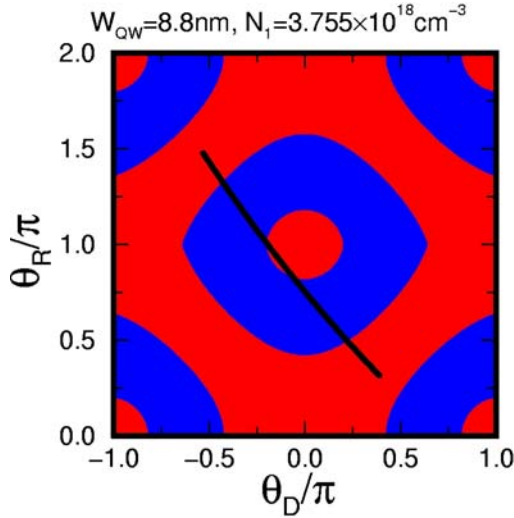


図 3-4-6 :  $A(\theta_R, \theta_D)$  の符号マッピング。赤がプラスの領域で、青がマイナスの領域を表す。曲線は、量子井戸厚 8.8nm、不純物濃度  $N_i=3.76 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$  [量子井戸下側（基板側）のキャリア供給層での値] の試料で、電子濃度を  $1.2 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$  から  $3.0 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$  まで変化させた場合の  $(\theta_R, \theta_D)$  の描く軌跡。[図 3-4-8(b')] の実曲線に対応]

Dresselhaus 項を含めた長方形型スピン干渉計での理論モデル結果と実験結果の一致は、InAlAs/InGaAs/InAlAs 量子井戸におけるスピン操作において、Dresselhaus 項の効果が Rashba 効果に比べて無視できないものであることを意味している。そこで、今後は、InAlAs/InGaAs/InAlAs 量子井戸と同程度の大きさの Dresselhaus 項を有している AlGaAs/GaAs/AlGaAs 量子井戸を用いてスピン干渉実験を行う。得られるスピン干渉効果を方形ループのアスペクト比の関数として詳細に調べることで、GaAs/AlGaAs 界面での Dresselhaus スピン軌道相互作用係数の大きさや異方性を曖昧さなく求めることができる。このようにして得られたデータの信頼性は非常に高く、GaAs/AlGaAs 系ヘテロ界面や量子ドット中でのスピン緩和やスピン制御、量子情報処理を議論する際に必要な基礎データとして、今後100年以上に渡って引用されるものとなることが期待される。

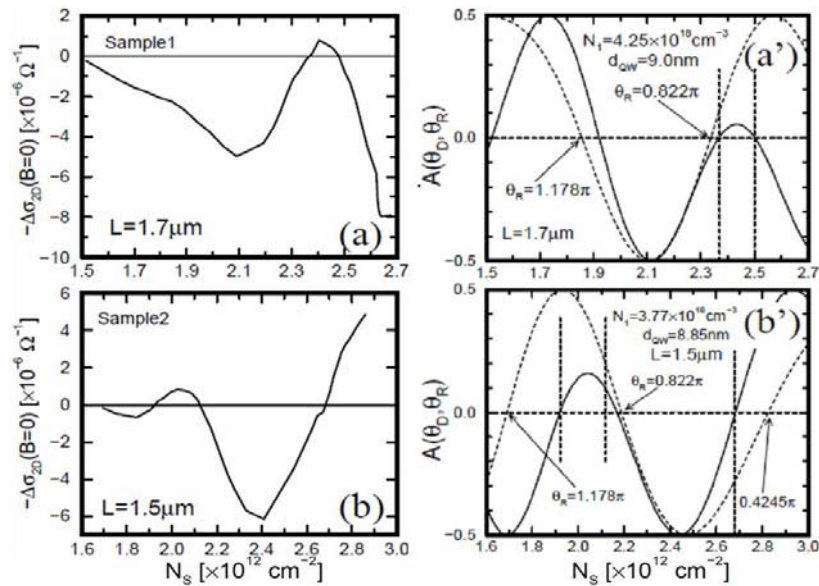


図 3-4-7: (a)(b) AAS 振動の  $B=0$  での振幅の値のキャリア濃度依存 (実験結果)。(a')(b') 実験に使用した試料に適した物性値を用いて計算した  $A(\theta_R, \theta_D)$  のシミュレーション結果。

- [論文 1] **T. Koga**, J. Nitta and M. van Veenhuizen: “Ballistic spin interferometer using the Rashba effect”, Phys. Rev. B **70**, 161302(R) P1-4 (2004).
- [論文 2] **T. Koga**, J. Nitta, T. Akazaki, H. Takayanagi, **Phys. Rev. Lett.** **89**, 046801 P1-4 (2002), “Rashba spin-orbit coupling probed by the weak antilocalization analysis in InAlAs/InGaAs/InAlAs quantum wells as a function of quantum well asymmetry”.
- [論文 3] **T. Koga**, H. Okutani, Y. Sekine, and J. Nitta, “Spin interference effect based on the Rashba and Dresselhaus terms”, phys. stat. sol. (c) **3**, No. 12, 4220–4226 (2006).

## 4 研究参加者

- ① スピン伝導特性研究グループ(半導体中の電子スピン電界制御方法の確立とスピン機能デバイス化の研究)

| 氏 名         | 所 属          | 役 職       | 研究項目                       | 参加時期                         |
|-------------|--------------|-----------|----------------------------|------------------------------|
| 新田 淳作       | 東北大学大学院工学研究科 | 教授        | 研究統括<br>スピン伝導特性、スピン機能デバイス化 | 平成 14 年 11 月～<br>平成 20 年 3 月 |
| 好田 誠        | 東北大学大学院工学研究科 | 助教        | スピン伝導特性、スピン機能デバイス化         | 平成 18 年 4 月～<br>平成 20 年 3 月  |
| T. Bergsten | NTT 物性基礎研    | CREST 研究員 | スピン伝導特性、スピン機能デバイス化         | 平成 15 年 4 月～<br>平成 18 年 3 月  |
| 深谷 泉        | NTT 物性基礎研    | チーム事務員    |                            | 平成 14 年 11 月～<br>平成 17 年 3 月 |
| 佐藤 暁美       | 東北大学大学院工学研究科 | チーム事務員    |                            | 平成 17 年 5 月～<br>平成 20 年 3 月  |

- ② スピン伝導特性研究グループ(量子ドット列における平坦バンド強磁性および RKKY 相互作用を用いた強磁性の研究)

| 氏 名        | 所 属              | 役 職       | 研究項目             | 参加時期                          |
|------------|------------------|-----------|------------------|-------------------------------|
| 高柳 英明      | NTT 物性基礎研、東京理科大学 | 研究所長、教授   | 量子ドットにおけるスピン伝導特性 | 平成 14 年 11 月～<br>平成 18 年 3 月  |
| 赤崎 達志      | NTT 物性基礎研        | 主幹研究員     | 量子ドットにおけるスピン伝導特性 | 平成 14 年 11 月～<br>平成 20 年 3 月  |
| 田村 浩之      | NTT 物性基礎研        | 主任研究員     | 量子ドットにおけるスピン伝導特性 | 平成 14 年 11 月～<br>平成 20 年 3 月  |
| 原田 裕一      | NTT 物性基礎研        | 主任研究員     | 量子ドットにおけるスピン伝導特性 | 平成 14 年 11 月～<br>平成 16 年 8 月  |
| A. Richter | NTT 物性基礎研        | NTT ポストドク | 量子ドットにおけるスピン伝導特性 | 平成 14 年 11 月～<br>平成 15 年 12 月 |
| 山口 真澄      | NTT 物性基礎研        | 社員        | 量子ドットにおけるスピン伝導特性 | 平成 15 年 4 月～<br>平成 20 年 3 月   |

|       |           |       |                  |                             |
|-------|-----------|-------|------------------|-----------------------------|
| 小林 俊之 | NTT 物性基礎研 | 社員    | 量子ドットにおけるスピン伝導特性 | 平成 16 年 4 月～<br>平成 20 年 3 月 |
| 宮越 賢治 | 東京理科大学    | 研究補助員 |                  | 平成 16 年 5 月～<br>平成 18 年 3 月 |
| 北川 広野 | 東京理科大学    | 研究補助員 |                  | 平成 16 年 5 月～<br>平成 18 年 3 月 |
| 姜 承求  | 筑波大学      | 研究補助員 |                  | 平成 17 年 4 月～<br>平成 19 年 3 月 |
| 鶴田 尚英 | 東京理科大学    | 研究補助員 |                  | 平成 18 年 4 月～<br>平成 20 年 3 月 |

③光物性研究グループ(量子ドット列、二次元電子系の光学的手法による電子状態の研究)

| 氏 名   | 所 属     | 役 職 | 研究項目      | 参加時期                         |
|-------|---------|-----|-----------|------------------------------|
| 野村晋太郎 | 筑波大学物理系 | 准教授 | スピン光物性の研究 | 平成 14 年 11 月～<br>平成 20 年 3 月 |

④スピン伝導特性研究グループ(多角形ループ配列におけるスピン干渉現象の研究)

| 氏 名   | 所 属          | 役 職 | 研究項目       | 参加時期                        |
|-------|--------------|-----|------------|-----------------------------|
| 古賀 貴亮 | 北海道大学情報科学研究科 | 准教授 | スピン伝導特性の研究 | 平成 17 年 4 月～<br>平成 20 年 3 月 |

5 招聘した研究者等

なし

## 6 成果発表等

## (1)原著論文発表 (国内誌 0 件、国際誌 62 件)

- [1] J. Nitta, Y. Lin, T. Koga and T. Akazaki, “Gate controlled electron g-factor in an InGaAs/InAlAs heterostructure”, Appl. Phys. Lett. **83**, 4565 (2003).
- [2] K. Matsuda, T. Saiki, S. Nomura, M. Mihara, Y. Aoyagi, S. Nair and H. Takagahara, “Near-field optical mapping of exciton wave functions in a GaAs quantum dot”, Phys. Rev. Lett. **91**, (24) 177401-1-1-4 (2003).
- [3] Y. Lin, J. Nitta, T. Koga and T. Akazaki, “Electron g-factor in a gated InGaAs channel with double InAs-inserted Wells”, Physica E **21**, 656 (2004).
- [4] J. Nitta, Y. Lin, T. Koga and T. Akazaki, “Electron g-factor in a gated InGaAs-inserted-channel InGaAs/InAlAs heterostructure” Physica E **20**, 429 (2004).
- [5] F. Meijer, J. Nitta, T. Koga, A. F. Morpurgo and T. M. Klapwijk, “Experiments on Aharonov-Bohm conductance oscillations: a statistical analysis of the averaged Fourier spectrum”, Physica E **22**, 402 (2004).
- [6] T. Imai and S. Nomura, “Quantum dot array prepared with self-organized nanopore and its photoluminescence spectra”, Physica E **21**, (2-4) 1093-1097 (2004).
- [7] Y. Sekine, J. Nitta, T. Koga, A. Oiwa, S. Yanagi, T. Slupinski, H. Munekata, “Magnetic Properties of Submicrometer p-In<sub>0.97</sub>Mn<sub>0.03</sub>As”, Jpn. Appl. Phys. **43**, 2097 (2004).
- [8] M. Steiner and J. Nitta, “Control of magnetization states in micro-structured permalloy rings”, Appl. Phys. Lett. **84**, 939 (2004).
- [9] F. Meijer, A. F. Morpurgo, T. M. Klapwijk, T. Koga, J. Nitta, “On the significance of fine structure in the frequency spectrum of Aharonov-Bohm conductance oscillations”, Phys. Rev. **B69**, 035308 (2004).
- [10] H. Tamura, K. Shiraishi, and H. Takayanagi, “Tunable Exchange Interaction in Quantum Dot Devices”, Jpn J. Appl. Phys. **43**, L691-693 (2004).
- [11] M. Yamaguchi, A. Richter, H. Tamura, T. Akazaki, and H. Takayanagi, “Conductance oscillations of a quantum wire with a side-coupled quantum dot”, Proceedings of XXXIXth Rencontres de Moriond, Italy, The GIOI publishers, 294-300 (2004).
- [12] A. Richter, M. Yamaguchi, T. Akazaki, H. Tamura, and H. Takayanagi, “Single-electron charging effects in a semiconductor quantum wire with side-coupled quantum dot”, Jpn. J. of Appl. Phys., Vol. **43**, pp.7144-7149 (2004).
- [13] K. Shiraishi, H. Tamura, and H. Takayanagi, “Theoretical design of a semiconductor ferromagnet based on quantum dot superlattices”, Physica E **24**, 107-110 (2004).
- [14] S. Nomura, and Y. Aoyagi, “Optical probing of spin polarization of electrons in quantum dot edge channels”, Phys. Rev. Lett. **93** No. 9 096803-1-4 (2004).
- [15] M. Steiner, G. Meijer, U. Merkt and J. Nitta, “Magnetic transitions of permalloy rings in hybrid devices”, Physica E **24**, 124-128 (2004).
- [16] P. Santos, J. Nitta, and K. H. Ploog, “Stern-Gerlach spin filter using surface acoustic waves”, Solid State Comm. **132**, 631-634 (2004).
- [17] F. E. Meijer, A. F. Morpurgo, T. M. Klapwijk, T. Koga, and J. Nitta, “Competition between Spin-orbit Interaction and Zeeman Coupling in Rashba 2DEGs”, Phys. Rev. **B70**, 210307(R)-210310 (2004).
- [18] Y. Lin, T. Koga, and J. Nitta, “Effect of an InP/InGaAs Interface on Spin-orbit Interaction in InAlAs/InGaAs Hetrostructures”, Phys. Rev. **B71**, 045328-045331 (2005).

- [19] 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 E* **25**, 472-478 (2005).
- [20] F. E. Meijer, A. F. Morpurgo, T. M. Klapwijk, and J. Nitta, “Universal spin-induced time reversal symmetry breaking in two-dimensional electron gases with Rashba spin-orbit interaction”, *Phys. Rev. Lett.* **94**: 186805 (2005).
- [21] J. Ohe, M. Yamamoto, T. Ohtsuki, and J. Nitta, “Mesoscopic Stern-Gerlach spin filter by nonuniform spin-orbit interaction” *Phys. Rev. B* **72**: 041308 (2005).
- [22] A. K. M. Newaz, W. Song, E. E. Mendez, Y. Lin, and J. Nitta, “Shot-noise characteristics of triple-barrier resonant-tunneling diodes”, *Phys. Rev. B* **71**: 195303 (2005).
- [23] J. Nitta and M. Steiner, “Semiconductor/ferromagnet hybrid devices to probe magnetisation states in microstructured NiFe rings”, *IEE PROCEEDINGS-CIRCUITS DEVICES AND SYSTEMS* **152**: 297-300 (2005).
- [24] J. Nitta and M. Steiner, “Magnetization properties of microstructured NiFe rings investigated using semiconductor/ferromagnet hybrid structures” *Journal of Superconductivity* **18**, 331-334 (2005).
- [25] M. Yamamoto, J. Ohe, T. Ohtsuki, and J. Nitta, “Spin-polarization in a 3-terminal conductor induced by Rashba spin-orbit coupling” *Physica E* **29**: 490-494 (2005).
- [26] K. Matsuda, T. Saiki, S. Nomura, and Y. Aoyagi, “Local density of states mapping of a field-induced quantum dot by near-field photoluminescence microscopy”, *Appl. Phys. Lett.* **87**, 043112 (2005).
- [27] M. Yamaguchi, S. Nomura, D. Sato, T. Akazaki, H. Tamura, H. Takayanagi, “Photoluminescence measurements in Be-d-doped back-gated quantum well”, *Surf. Science*, **583**, 94-99 (2005).
- [28] S. Nomura, “Detecting spin polarization of electrons in quantum dot edge channels by photoluminescence”, in “Realizing Controllable Quantum States”, eds. H. Takayanagi and J. Nitta, (World Scientific Publishing, New Jersey, 2005) pp. 457.
- [29] S. Nomura, M. Yamaguchi, D. Sato, T. Akazaki, H. Tamura, H. Takayanagi, T. Saku, and Y. Hirayama, “Negatively charged excitons in a back-gated undoped heterostructure”, *Physics of Semiconductors*, Ed. J. Menendez, and C.G. Van de Walle, (American Institute of Physics, New York, 2005) pp. 1162.
- [30] S. Nomura and Y. Aoyagi, “Optical detection of spin polarization of electrons in quantum dot edge channels”, *Physics of Semiconductors*, Ed. J. Menendez, and C.G. Van de Walle, (American Institute of Physics, New York, 2005) pp. 571.
- [31] M. Yamaguchi, S. Nomura, D. Sato, T. Akazaki, H. Tamura, and H. Takayanagi, “Magneto-optics in Be-d-doped GaAs quantum wells with a back gate”, *Physics of Semiconductors*, Ed. J. Menendez, and C.G. Van de Walle, (American Institute of Physics, New York, 2005) pp. 397.
- [32] H. Tamura and L. I. Glazman, “Tunable Kondo Screening in a Quantum Dot Device”, *Phys. Rev. B* **72**, 121308 (R) (2005).
- [33] T. Bergsten, T. Kobayashi, Y. Sekine, and J. Nitta, “Experimental Demonstration of the Time Reversed Aharonov-Casher Effect”, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 196803 (2006).
- [34] T. Miyawaki, T. Toyoda, M. Kohda, A. Fujita, and J. Nitta, “Magnetic interaction of submicron-sized ferromagnetic rings in one-dimensional array”, *Appl. Phys. Lett.* **89**, 122508 (2006).
- [35] M. van Veenhuizen, T. Koga, and J. Nitta, “Spin-orbit interaction of ballistic electrons in polygon structures”, *Phys. Rev. B* **73**, 235315 (2006).
- [36] T. Koga, Y. Sekine, and J. Nitta, “Experimental realization of a ballistic spin



- interferometer based on the Rashba effect using a nanolithographically defined square loop array”, Phys. Rev. B Rapid Communications **74**, 041302 (2006).
- [37] T. Koga, H. Okutani, Y. Sekine, and J. Nitta, “Spin interference effect based on the Rashba and Dresselhaus terms”, Phys. Stat. Sol. (C) **3**, 4220 (2006).
- [38] T. Nihei, Y. Suzuki, M. Kohda, and J. Nitta, “Gate controlled crossover from weak localization to weak antilocalization in a narrow gap InGaAs/InP heterostructure”, Phys. Stat. Sol. (C) **3**, 4239 (2006).
- [38] M. Abe, M. Kohda, and J. Nitta, “Magnetoresistance oscillations induced by spin orbit interaction and intersubband scattering in a gated InP/InGaAs heterostructure” Phys. Stat. Sol. (C) **3**, 4243 (2006).
- [39] Y. Sekine and J. Nitta, “Measurements of magnetic-domain wall velocity detected by local Hall”, Inst. Phys. Conf. Ser. **187**, 461 (2006).
- [40] S. Sasaki, S. Kang, K. Kitagawa, M. Yamaguchi, S. Miyashita, T. Maruyama, H. Tamura, T. Akazaki, Y. Hirayama, and H. Takayanagi, “Non-local control of the Kondo effect in a double quantum dot-quantum wire coupled system”, Phys. Rev. **B 73**, 161303(R) (2006).
- [41] S. Sasaki, S. Kang, K. Kitagawa, M. Yamaguchi, S. Miyashita, T. Maruyama, H. Tamura, T. Akazaki, Y. Hirayama, H. Takayanagi, “Spin correlation in a double quantum dot-quantum wire coupled system”, J. Vac. Sci. Technol. B **24**, p2024 (2006).
- [42] H. Tamura, S. Nomura, M. Yamaguchi, T. Akazaki, H. Takayanagi, P. Mohan, J. Motohisa and T. Fukui, “Magneto-Optics of GaAs Quantum Wire Lattices Grown by Selective-Area MOVPE”. J. Phys.: Conf. Ser. **38**, p130-133 (2006).
- [43] S. Nomura, M. Yamaguchi, T. Akazaki, H. Tamura, H. Takayanagi, and Y. Hirayama, “Electron-hole states in the fractional quantum Hall regime probed by photoluminescence”, Physica E **34**, 292 (2006).
- [44] M. Yamaguchi, S. Nomura, K. Miyakoshi, T. Akazaki, H. Tamura and H. Takayanagi, “Electric-field control of electron-hole wave functions in a wide quantum well” Physica E **34**, 300 (2006).
- [45] K. Tsumura, S. Nomura, T. Akazaki, and J. Nitta, “Infrared magneto-photoluminescence spectra and electron-hole g-factor of an InAs-inserted-channel InGaAs/InAlAs heterostructure”, Physica E **34**, 315 (2006).
- [46] H. Ito and S. Nomura, “Fabrication of highly ordered arrays of nanoparticles by mechanical process”, Jpn. J. Appl. Phys. **45**, (11) 8997-8999 (2006).
- [47] M. Yamaguchi, S. Nomura, T. Akazaki, H. Tamura, H. Takayanagi, “Controlling electric field and electron density in a double-gated GaAs/AlGaAs quantum well”, J. Appl. Phys. **100**, 113523 (2006).
- [48] S. Nomura and K. Tsumura, “Neutral and charged excitons in a quantum tube”, Surf. Sci. **601** (2) 441-449 (2007).
- [49] J. Nitta and T. Bergsten, “Electrical Manipulation of Spin Precession in an InGaAs-Based 2DEG due to the Rashba Spin-Orbit Interaction”, IEEE Trans. on Electron Devices, **64**(5) 955-960, (2007).
- [50] T. Bergsten and J. Nitta, “Electron Spin Precession and the Aharonov-Casher Effect”, Physics in Canada, **63**(2), 13-16 (2007)
- [51] M. Kohda, K. Takagi, T. Miyawaki, K. Toyoda, A. Fujita, and J. Nitta, “Lateral and Vertical Magnetic Interaction in Submicron-Sized Fe Ring Arrays and Fe/Au/Fe Trilayer Ring Structures”, Jpn. J. Appl. Phys., **46**(4B), 2164 (2007).
- [52] K. Tsumura, S. Nomura, P. Mohan, J. Motohisa, and T. Fukui, “Aharonov-Bohm oscillations in photoluminescence from charged exciton in quantum tubes”, Jpn. J. Appl. Phys. **46** (18) L440 - L443 (2007).

- [53] J. Nitta and T. Bergsten, “Time reversal Aharonov-Casher effect using Rashba spin-orbit interaction”, New Journal of Phys. **9** 341 (2007).
- [54] T. Miyawaki, M. Kohda, A. Fujita, and J. Nitta, “Local hall measurement of magnetization reversal and magnetic interaction in Fe / Au / Fe trilayer rings”, Physica Status Solidi C **5**, 294 (2008)
- [55] Y. Kunihashi, T. Nihei, M. Kohda, and J. Nitta, “Rashba spin-orbit interaction of  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  shallow two-dimensional electron gas by surface etching”, Physica Status Solidi C **5**, 322 (2008).
- [56] S. Nomura, M. Yamaguchi, T. Akazaki, H. Tamura, T. Maruyama, S. Miyashita and Y. Hirayama, “Enhancement of electron and hole effective masses in back-gated GaAs/AlxGa1-xAs quantum wells”, Phys. Rev. B **56** (20) R201306-1-4 (2007).
- [57] M. Kohda, T. Nihei, and J. Nitta, “Quantum thickness dependence of spin orbit interaction in  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  /  $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$  / InP asymmetric quantum wells”, Physica E accepted
- [58] J. Nitta and T. Bergsten, “Spin interference controlled by electric field: Ensemble average effect on AAS and AB oscillation amplitudes”  
Accepted to Physica E
- [59] M. Kohda, T. Bergsten, and J. Nitta, “Manipulating spin-orbit interaction in semiconductors” Accepted to Journal of the Physic Society of Japan.
- [60] M. Kohda, K. Toyoda, T. Miyawaki, A. Fujita, and J. Nitta, “Suppression of stray field between adjacent rings in one-dimensional ferromagnetic ring arrays”  
Accepted to Journal of Applied Physics
- [61] M. Kohda, A. Ohtsu, T. Seki, A. Fujita, J. Nitta, S. Mitani, and K. Takanashi, “High remanent magnetization of  $L_1_0$ -ordered FePt thin film on MgO/(001) GaAs”  
Accepted to Japanese Journal of Applied Physics
- [62] T. Miyawaki, M. Kohda, A. Fujita, and J. Nitta, “Control of inter-layer magnetostatic coupling in submicron-sized Fe/Au/Fe rings”  
Accepted to Applied Physics Letters

## (2)その他の著作物（総説、書籍など）

- [1] 新田 淳作, 「半導体・磁性体ハイブリッド構造とスピン注入 —スピンFETへ向けての進展—」マテリアルインテグレーション Vol.16 No.10 p39 (2003).
- [2] 新田 淳作 「次世代スピンドバイスへのアプローチ —電界効果スピントランジスタの現状と展望—」Electrochemistry Vol.71 p180 (2003).
- [3] J. Nitta, “Semiconductor Spintronics”, NTT Journal **2**, 31 (2004).
- [4] 新田 淳作 “スピンエレクトロニクスの基礎と最前線 (監修 猪俣 浩一郎) 分担執筆 第22章 電界によるスピン制御とスピンFET”, エレクトロニクス材料・技術シリーズ (シーエムシー社) (2004).
- [5] 田村浩之、白石賢二、高柳英明、「量子ドットデバイスにおける調節可能な交換相互作用」、応用物理学会誌、第73巻、第7号、p.971 (2004).
- [6] 田村浩之、「量子ドット中の電子スピンを電氣的に制御」、日経ナノビジネス No.13、p.10-11 (2005).
- [7] 新田 淳作, “半導体スピントロニクス”, NTT 技術ジャーナル **17**, 66 (2005).
- [8] 新田 淳作、古賀 貴亮, “スピン軌道相互作用を持った電界によるスピン制御”, 固体物理 **40**, 37 (2005).
- [9] 田村浩之, 「離れた2つの電子スピンを遠隔制御、近藤効果を用いた素子開発に道」、日経ナノビジネス No.38 p. 23-24 (2006).
- [10] 新田 淳作、トビアス バークステン, “Rashba スピン軌道相互作用を用いたアハロ

ノフ・キャッシャー効果”，固体物理, **42**(495), 49-58 (2007).

[11] 新田 淳作 “ラシュバ効果をめぐる新展開”、パリティ 23, 26-28 (2008).

### (3)学会発表(国際学会発表及び主要な国内学会発表)

#### ① 招待講演 (国内会議 17 件、国際会議 26 件)

[1] J. Nitta, (Invited) “Control of Electron Spins and Characterization of Small Magnets by using Semiconductors”, The 1<sup>st</sup> International Workshop on Ubiquitous Knowledge Network Environment, Sapporo, Nov. 25-27<sup>th</sup> (2003).

[2] J. Nitta, (Invited) “Gate control of electron spins in semiconductor nanostructures”, International Symposium on Phonotics and Spintronics in Semiconductor Nanostructures, Kyoto, 2<sup>nd</sup>-3<sup>rd</sup> November (2003).

[3] J. Nitta (Invited: Ramp Sessions Panelist) “Challenges of Spintronics; from basics to nanoscale devices”, International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2004), Tokyo, Japan, September 15-17 (2004).

[4] J. Nitta (Invited) “Spin controlled transport in semiconductor nano-structures and semiconductor/ferromagnet hybrid structures”, The 7<sup>th</sup> Oxford-Kobe Materials Seminar; Spintronics Materials and Technology, Kobe Institute, Kobe, 1-4 September (2004).

[5] J. Nitta (Invited) “Spin-controlled transport in semiconductor nano-structures”, Taiwan International Conference on Superconductivity and Low Temperature Physics, Penghu, Taiwan, July 5-9<sup>th</sup> (2004).

[6] J. Nitta (Invited) “Spin-related transport in semiconductors and semiconductor/ferromagnet hybrid structures”, International Conference on “Nanospintronics Design and Realization” ICNDR, Kyoto, Japan, May 24-28<sup>th</sup> (2004).

[7] 新田 淳作 (招待講演) 「スピントロニクスへ向けての電界によるスピン制御」応用物理学会スピンエレクトロニクス研究会、スピンエレクトロニクス入門セミナー、2004 年 12 月 10 日 大阪大学中之島センター

[8] 新田 淳作 (招待講演) 「非磁性半導体中の電界によるスピン制御」日本学術振興会 「物質科学とシステムデザインー次世代エレクトロニクスの構築に向けて」研究専門委員会 2004 年 6 月 25 日 国際高等研究所

[9] 新田 淳作 (招待講演) 「スピントランジスタに向けた電界による半導体中のスピン制御」金属学会セミナー「最先端スピンエレクトロニクス技術の基礎と応用」2004 年 6 月 24 日 商工会館。

[10] 田村浩之 (招待講演)、「量子ドット列を用いた電子相関効果の制御」、原子・分子・光科学 (AMO) 討論会 (東京大学理学部、平成 16 年 7 月 8 日～10 日)

[11] H. Tamura, (Invited) “Tunable exchange interaction and Kondo screening in quantum dot devices”, The 2nd Quantum Transport Nano-Hana International Workshop, Chiba, 2004. 3. 24

[12] S. Nomura, M. Yamaguchi, T. Akazaki, H. Tamura, H. Takayanagi, Y. Hirayama, (Invited) “Electron-hole complexes in a back-gated quantum well in the fractional quantum Hall regime”, 351. WE-Heraeus-Seminar, “Electron-Exciton Interactions in Semiconductor Nanostructures” (29 May - 1 June 2005, Bad Honnef)

[13] J. Nitta (Invited) “Spin-controlled Transport and Devices in Semiconductor Heterostructures”, the 60th Annual Congress of the Canadian Association of Physicists, Vancouver, Canada June 5th-8<sup>th</sup> (2005).

[14] J. Nitta (Invited), “Spin-related Transport and Interference Based on the Rashba Spin-orbit Interaction”, 5th IEEE Conference on Nanotechnology, IEEE-NANO 2005, Nagoya Japan July 11-15th (2005).

- [15] J. Nitta (Invited), "Spin-related Transport and Interference in Semiconductor 2DEG with the Rashba Spin-orbit Interaction" Workshop on Semiconductor Nano-Spintronics: Spin Hall Effect and Related Issues, Pohang, Korea Aug. 8-11th (2005).
- [16] J. Nitta (Invited), "Transport in Mesoscopic Systems Affected by the Rashba Spin-orbit Interaction", Science and Applications of Spin Electronics, Hong Kong Aug. 15-20 (2005).
- [17] H. Tamura (Invited), "RKKY interaction and Kondo effect in double quantum-dot devices", International Workshop on Spins and Quantum Transport (12 October - 14 October 2005, Sendai).
- [18] J. Nitta (Invited), "Spin Related Transport in Rashba 2DEG Systems" and "Spin Interference and Mesoscopic Stern-Gerlach Spin Filter in Rashba 2DEG Systems" Workshop on Mesoscopic and Spin Physics 2006, Hsinchu, Taiwan Jan 5-7th (2006).
- [19] Hiroyuki Tamura (Invited), "RKKY interaction and Kondo effect in double quantum-dot devices", International Workshop on Spins and Quantum Transport (12 October - 14 October 2005, Sendai).
- [20] 野村晋太郎 (招待講演), 「格子型ゲートによる量子ドット列とその近接場光イメージング」、領域4、領域5合同シンポジウム「半導体物性研究におけるイメージング計測の現状」日本物理学会 2005年 秋季大会 同志社大学 9月19日-22日。
- [21] 新田 淳作 (招待講演)「ゲート電界によるRashbaスピン軌道相互作用の制御」領域4 シンポジウム「Rashbaスピン工学」日本物理学会 2005年 秋季大会 同志社大学 9月19日-22日
- [22] 古賀 貴亮 (招待講演)「半導体ナノ構造中での Rashba 効果に基づくスピン干渉効果」、日本物理学会 2005 年秋季大会、同志社大学 京田辺キャンパス、2005 年 9 月 21 日
- [23] 古賀 貴亮, 関根 佳明, 新田 淳作, 俵谷 和典, 奥谷 洋, (招待講演)「Rashba 効果を用いたスピン干渉計」第 53 回応用物理学関係連合講演会、武蔵工業大学 (東京都世田谷区)、2006 年 3 月 23 日
- [24] 野村晋太郎 (招待講演)、シンポジウム企画の趣旨、領域4、領域5 合同シンポジウム「光学測定による半導体中のキャリア間相互作用研究の新展開」日本物理学会年次大会、松山市、2006 年 3 月。
- [25] 山口真澄 (招待講演)、半導体低次元キャリア間相互作用の光学検出、領域4、領域5 合同シンポジウム「光学測定による半導体中のキャリア間相互作用研究の新展開」日本物理学会年次大会、松山市、2006 年 3 月
- [26] 新田 淳作 (招待講演)「スピントランジスタに向けてのスピン電界制御」応用物理学会、応用電子物性分科会、スピンエレクトロニクス研究会共同主催研究会、東京 2006 年 10 月 17 日
- [27] 新田 淳作 (招待講演)「スピン軌道相互作用の電界制御とスピンデバイス」新世代研究所 第二回スピントロニクス研究会、東京 2006 年 10 月 21 日
- [28] 新田 淳作 (招待講演)「半導体二次元電子ガスにおけるスピンの電界制御とスピン生成・検出方法の検討」国際高等研究所研究プロジェクト「電子系の新しい機能」第3 回研究会、京都 2007 年 3 月 9 日 ~2007 年 3 月 10 日
- [29] 野村晋太郎 (招待講演)「量子チューブ中荷電励起子のアハロノフボーム効果」東北大プロジェクト研究会「ナノ半導体物理の構築とその作製・計測技術の開拓」、仙台市、2006 年 11 月 17-18 日。
- [30] J. Nitta (Invited) "Spin Related Transport in Rashba 2DEG Systems" Institute of Advanced Studies Workshop on Spintronics, Singapore, May 8th-12<sup>th</sup> (2006)
- [31] J. Nitta (Invited) "Experimental Demonstration of Gate Controlled Spin Precession in the Rashba 2DEG Systems" Advanced Research Workshop on "Mesoscopic and Strongly Correlated Electron Systems - Nanoscale Superconductivity and

- Magnetism” Chernogolovka, Russia, June 14<sup>th</sup> – 19<sup>th</sup> (2006).
- [32] J. Nitta (Invited) “Spin Interference in InGaAs 2DEG rings”, 6th Rencontres Du Vietnam, Nanophysics From Fundamentals to Applications, Hanoi, Vietnam, Aug. 6<sup>th</sup> –12<sup>th</sup> (2006).
- [33] J. Nitta (Invited) “Spin-orbit interaction and its applications for spintronic devices”, 3rd Materials Science School for Young Scientists, Sendai, Japan, Aug. 26<sup>th</sup> –28<sup>th</sup> (2006).
- [34] T. Koga (Invited) “Spin interference devices based on the Rashba and Dresselhaus terms”, The 4th International Conference on Physics and Application of Spin-Related Phenomena in Semiconductors, PASPS IV, (Sendai, 2006) Sendai International Center 8/15–18 (2006).
- [35] J. Nitta (Invited) “Spin Control by Electric Field in Semiconductor 2DEGs”, International Conference on Nanospintronics Design and Realization, Dresden, May 21<sup>st</sup>–25<sup>th</sup> (2007).
- [36] H. Tamura (Invited) “Simultaneous measurement of photoluminescence and capacitance spectra in a GaAs quantum well”, Optical Properties of Low-Dimensional Systems (OPLDS2007), May 30 – June 2, 2007, National Research Council of Canada.
- [37] J. Nitta (Invited) “Spin Transport in Semiconductors”, 4th International School and Conference on Spintronics and Quantum Information Technology, Maui, June 17<sup>th</sup>–22<sup>nd</sup> (2007).
- [38] J. Nitta (Invited) “Electrical Manipulation of Spins and Spin Devices in Semiconductors”, 26th Electronic Materials Symposium, Katada, July 4<sup>th</sup>–6<sup>th</sup> (2007).
- [39] 野村晋太郎、(招待講演)「量子ホール系の発光分光」京都大学研究討論会-高密度励起物質の光物性、京都大学化学研究所、宇治市、2007年7月5日–6日。
- [40] J. Nitta (Plenary) “Electrical manipulation of spin precession based on the Rashba spin-orbit interaction”, 17th Electronic Properties of Two-dimensional Systems and 14<sup>th</sup> Modulated Semiconductor Structures, Genova, July 15<sup>th</sup>–20<sup>th</sup> (2007).
- [41] 野村晋太郎、(招待講演)「二次元系の発光分光研究」千葉大学物性セミナー、千葉大学理学系研究科、千葉市、2007年7月24日。
- [42] 新田 淳作 (招待講演) 「電界スピン制御の基礎と新展開」第41回応用物理学会スクール「スピンエレクトロニクスの基礎—更なる展開と次世代エレクトロニクスデバイスのイノベーションに向けて—」札幌 9月4日–8日 (2007).
- [43] J. Nitta (Invited) “Electrical Manipulation of Spin Precession in an InGaAs 2DEG”, International Workshop on Electron Coherence and Correlations, Pohan, Korea, Nov. 29<sup>th</sup> –Dec. 1<sup>st</sup> (2007).

## ② 口頭発表 (国内会議 66 件、国際会議 30 件)

- [1] A. Richter、原田裕一、田村浩之、赤崎達志、佐久規、平山祥郎、高柳英明、金属表面ゲートによって形成された半導体量子ドット、日本物理学会・春の分科会(東北大学、2003/3/28–31)
- [2] Y. Sekine, J. Nitta, T. Koga, A. Oiwa, S. Yanagi, T. Slupinski and H. Munekata, “Angle Dependence of the Coercive for Ferromagnetic Semiconductors”, 半導体スピン工学の基礎と応用 研究会 (Tokyo, 2003.06.11–06.12).
- [3] M. Steiner and J. Nitta, “局所ホール素子を用いた磁性体微小リングの磁化特性評価”, 応用物理学会 (Fukuoka, 2003.08.30–09.02).
- [4] Y. Sekine, J. Nitta, T. Koga, A. Oiwa, S. Yanagi, T. Slupinski and H. Munekata, “強磁性半導体 p-In<sub>0.97</sub>Mn<sub>0.03</sub>As のサブミクロンサイズの磁気的特性”, 日本物理学会秋季大会 (Okayama, 2003.09.20).

- [5] 田村浩之、レオニード・グラズマン, “量子ドットデバイスにおける調節可能な近藤遮蔽”, 日本物理学会秋季大会 (Okayama, 2003. 09. 22).
- [6] 松田一成、斎木敏治、野村晋太郎、青柳克信, “ホール局在した  $n$  型量子ドットアレーの近接場発光分光”, 日本物理学会秋季大会 (Okayama, 2003. 09. 20).
- [7] 今井剛、山本貴一、野村晋太郎, “規則ポーラス構造を用いた量子ドットアレーの発光分光 II”, 日本物理学会, 秋季大会 (Okayama, 2003. 09. 20).
- [8] 野村晋太郎, “量子ドット超格子の光機能探索”, ナノ成長場制御による構造と機能 (Sendai, 2003. 10. 17-10. 18).
- [9] 山口真澄, Andreas Richter, 田村浩之, 赤崎達志, 高柳英明, “量子ドットが結合した量子細線の電気伝導特性”, 応物年次大会 (Fukuoka, 2004. 3. 27-3. 30).
- [10] 佐藤大輔、野村晋太郎、山口真澄、赤崎達志、田村浩之、高柳英明, “ゲート付 Be- $\delta$  ドープ GaAs 量子井戸発光の電子密度依存性”, 応用物理年次大会 (Fukuoka, 2004. 3. 27-3. 30).
- [11] 野村晋太郎, “量子ドット端状態の電子スピン偏極度の光学検出”, 応用物理年次大会 (Fukuoka, 2004. 3. 27-3. 30).
- [12] マルカス・スタイナー、新田淳作, “半導体・磁性体ハイブリッド構造による微小磁性体リングの特性評価”, 応用物理年次大会 (Fukuoka, 2004. 3. 27-3. 30).
- [13] 山口真澄、A. Richter、田村浩之、赤崎達志、高柳英明、量子ドットが結合した量子細線の電気伝導特性、日本物理学会・春の年次大会(九州大学箱崎地区、2004.3.27)
- [14] Marcus Steiner, Junsaku Nitta, “Magnetization processes in micro-structured NiFe rings probed by local hall effect”, 半導体スピントロニクスに関する研究会(東工大、すずかけ台, 2004. 6. 10-11).
- [15] 田村浩之、白石賢二、高柳英明、量子ドット列における調節可能な RKKY 相互作用、日本物理学会・2004 年秋季大会 (青森大学、2004. 9. 13)
- [16] 山口真澄、野村晋太郎、佐藤大輔、宮越賢治、赤崎達志、田村浩之、高柳英明、「バックゲート付 Be- $\delta$  ドープ GaAs 量子井戸発光の電子密度依存性 II」、日本物理学会・2004 年秋季大会 (青森大学、2004. 9. 14) .
- [17] 野村晋太郎、山口真澄、佐藤大輔、赤崎達志、田村浩之、高柳英明、佐久規、平山祥郎、「バックゲート付き量子井戸中荷電励起子」、日本物理学会秋季大会、青森市、2004 年 9 月.
- [18] イピン・リン、古賀貴亮、新田淳作, 「InGaAs 量子井戸のスピン軌道相互作用に及ぼす InP 界面の効果」, 物理学会 秋季大会(青森, 2004. 9. 12-15).
- [19] 関根佳明、古賀貴亮、新田淳作, 「Rashba スピン軌道相互作用の制御によるスピン干渉計」, 物理学会 秋季大会(青森, 2004. 9. 12-15).
- [20] 野村晋太郎、「量子ドット超格子の光新機能探索」、平成 16 年度・東北大電気通信研究所プロジェクト研究会「ナノ成長場制御による構造と機能」仙台市、2004 年 11 月.
- [21] 宮越賢治、山口真澄、野村晋太郎、田村浩之、赤崎達志、高柳英明、「励起子の量子シーソー効果-発光測定」、2005 年春日本物理学会 (東京理科大野田キャンパス、2005. 3. 27).
- [22] 田村浩之、山口真澄、野村晋太郎、宮越賢治、赤崎達志、高柳英明、「励起子の量子シーソー効果-理論」、2005 年春日本物理学会 (東京理科大野田キャンパス、2005. 3. 27).
- [23] 山口真澄、野村晋太郎、赤崎達志、田村浩之、高柳英明、Premila Mohan、本久 順一、福井孝志、「MOVPE 選択成長 GaAs カゴメ格子からの発光の磁場依存性」、2005 年応用物理学関係連合講演会 (埼玉大、2005/3/31) .
- [24] 野村晋太郎、「半導体ナノ構造中電子状態の光学検出」、豊田工業大学先端フォトテクノロジー研究センター第 6 回シンポジウム、名古屋市、2005 年 3 月.
- [25] 野村晋太郎、山口真澄、佐藤大輔、宮越賢治、赤崎達志、田村浩之、高柳英明、平山祥郎、「分数量子ホール領域におけるバックゲート付き量子井戸中荷電励起子」、日

本物理学学会年次大会、野田市、2005 年 3 月。

[26] 津村公平、野村晋太郎、赤崎達志、新田淳作、「InAs 挿入 In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As/In<sub>0.52</sub>Al<sub>0.48</sub>As ヘテロ構造の磁場中赤外発光スペクトル」、日本物理学学会年次大会、野田市、2005 年 3 月。

[27] 伊藤宙陸、野村晋太郎、「自己組織化ナノ多孔質体を利用したナノ粒子、ナノカプセルの作製」、応用物理学関係連合講演会、2005 年 3 月。

[28] F. Meijer, A. F. Morpurgo, T. M. Klapwijk, 新田淳作, 「InGaAs 二次元電子ガスにおけるゼーマン効果とスピン軌道相互作用の競合」, 日本物理学会(野田市, 2005. 3. 24-27)。

[29] 山口真澄、野村晋太郎、宮越賢治、小野絢哉、丸山達朗、宮下宣、赤崎達志、高柳英明、平山祥郎、表面ゲートによって形成される量子ドット列における発光測定、日本物理学学会秋季大会、京田辺市、2005年9月。

[30] 山口真澄、田村浩之、野村晋太郎、宮越賢治、赤崎達志、高柳英明、アクセプターを  $\delta$  ドープした80nm量子井戸におけるゲートによる電荷誘起と電場効果、日本物理学学会秋季大会、京田辺市、2005年9月。

[31] 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-量子細線結合系におけるファノ近藤効果、日本物理学学会秋季大会、京田辺市、2005 年 9 月。

[32] 宮脇 哲也、豊田 和也、好田 誠、藤田 麻哉、新田 淳作, 「微小磁性体リングアレイの磁化過程における素子間隔の影響」応用物理学 2006 年春季 第 53 回学術講演会 武蔵工業大学 3 月 22 日-26 日。

[33] 古賀 貴亮、奥谷洋、関根佳明、新田淳作, 「正方形ループ配列構造におけるスピン干渉効果のラシュバ、ドレッセルハウス項を含めた解析」日本物理学 第 61 回年次大会 2006 年 3 月 28 日

[34] 奥谷 洋、古賀 貴亮、関根 佳明, 「InGaAs 量子井戸を用いた三角形ループ配列構造におけるスピン干渉効果の検証」, 第 53 回応用物理学関係連合講演会、武蔵工業大学 (東京都世田谷区)、2006 年 3 月 25 日。

[35] 野村晋太郎、山口真澄、宮越賢治、赤崎達志、田村浩之、高柳英明、平山祥郎、バックゲート付き量子井戸における極低電子密度領域での電子有効質量、日本物理学学会年次大会、松山市、2006年3月。

[36] 伊藤宙陸、野村晋太郎、メカニカルプロセスによる高規則ナノリングアレーの作製、第53回応用物理学関係連合講演会、東京都世田谷区、2006年 3 月。

[37] 津村公平、野村晋太郎、P. Mohan、本久順一、福井孝志、InP/InAs コアマルチシェルナノワイヤの磁気光学効果、第53回応用物理学関係連合講演会、東京都世田谷区、2006年 3 月。

[38] 本久順一、P. Mohan、津村公平、野村晋太郎、福井孝志、InP/InAs コア-マルチシェルナノワイヤの発光特性と電子状態、第53回応用物理学関係連合講演会、東京都世田谷区、2006年 3 月。

[39] 豊田和也、宮脇哲也、好田誠、藤田麻哉、新田淳作, 「微小磁性体リングアレイのリング内径変化に伴う磁化過程への影響」第 67 回応用物理学学会学術講演会、立命館大学びわこ・草津キャンパス 8 月 29 日-9 月 1 日 (2006 年)。

[40] 二瓶貴之、好田誠、新田淳作, 「In<sub>0.8</sub>Ga<sub>0.2</sub>As / InP / In<sub>0.52</sub>Al<sub>0.48</sub>As2 次元電子ガスのゲート電界による弱局在から弱反局在への制御」第 67 回応用物理学学会学術講演会、立命館大学びわこ・草津キャンパス 8 月 29 日-9 月 1 日 (2006 年)。

[41] 宮脇哲也、高木健、好田誠、藤田麻哉、新田淳作, 「Fe/Au/Fe3 層リング構造における強磁性層間の静磁的相互作用」, 第 67 回応用物理学学会学術講演会、立命館大学びわこ・草津キャンパス 8 月 29 日-9 月 1 日 (2006 年)。

[42] 津村公平、野村晋太郎、本久順一、福井孝志, 「量子チューブ中アハロノフボーム効果の光学検出」、日本物理学学会秋季大会、千葉市、2006 年 9 月 23 日-26 日。



- [43] 古賀貴亮, “GaAs/AlGaAs 量子井戸系でのスピン干渉現象の検討”, 日本物理学会 2006 年秋季大会 (2006) 千葉大学 9 月 23 日 - 26 日.
- [44] 野村晋太郎、飯高敏晃、「n 型量子ドットのオーダーN 電子状態計算」、日本物理学会 秋季大会、千葉市、2006 年 9 月 23 日 - 26 日.
- [45] 野村晋太郎、量子チューブ中荷電励起子のアハロノフボーム効果、東北大プロジェクト研究会「ナノ半導体物理の構築とその作製・計測技術の開拓」、仙台市、2006 年 11 月 17-18 日.
- [46] Makoto Kohda, Takayuki Nihei, and Junsaku Nitta, “Interface and field contribution of the Rashba spin-orbit interaction in a narrow gap  $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$  /  $\text{InP}$  heterostructure” The 11<sup>th</sup> Symposium on the Physics and Application of Spin-Related Phenomena in Semiconductors (PASPS-11).
- [47] 大津暁彦、好田誠、藤田麻哉、新田淳作、関剛斎、高梨弘毅, 「(001)GaAs 上への  $\text{L1}_0$  -  $\text{FePt}$  /  $\text{MgO}$  エピタキシャル成長とアニール効果」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、3 月 27 日 - 30 日 (2007 年).
- [48] 宮脇哲也、好田誠、藤田麻哉、新田淳作「Fe / Au /  $\text{Fe}_3$  層リング構造の局所ホール効果による測定」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、3 月 27 日 - 30 日 (2007 年).
- [49] 国橋要司、二瓶貴之、好田誠、新田淳作, 「表面エッチングによる  $\text{InGaAs}$  /  $\text{InAlAs}$  2 次元電子ガスのスピン軌道相互作用制御」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、3 月 27 日 - 30 日 (2007 年).
- [50] 二瓶貴之、好田誠、新田淳作「 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  /  $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$  /  $\text{InP}$  非対称量子井戸におけるスピン軌道相互作用の井戸幅依存性」、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、3 月 27 日 - 30 日 (2007 年).
- [51] 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 (鹿児島大学郡元キャンパス、2007/3/18(日)-3/21(水) )
- [52] 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-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 (鹿児島大学郡元キャンパス、2007/3/18(日)-3/21(水) ).
- [53] 野村晋太郎、津村公平、「量子チューブにおける荷電励起子エネルギーの AB 振動」、日本物理学会春季大会、鹿児島市、2007 年 3 月 18 日 - 21 日.
- [54] 林伸明、津村公平、野村晋太郎、山口真澄、田村浩之、赤崎達志、平山祥郎、「空間分解局所光励起下での GaAs/AlGaAs 単一ヘテロ構造の伝導測定」、日本物理学会春季大会、鹿児島市、2007 年 3 月 18 日 - 21 日.
- [55] 山口真澄、野村晋太郎、丸山達朗、赤崎達志、田村浩之、高柳英明、宮下宣、平山祥郎、「非ドープ GaAs 量子井戸におけるキャパシタンスと荷電励起子発光の対応」、日本物理学会春季大会、鹿児島市、2007 年 3 月 18 日 - 21 日.
- [56] 奥谷洋、古賀貴亮、関根佳明, “InGaAs/InAlAs 量子井戸における三角形ループ配列構造を用いたスピン干渉効果”, 日本物理学会 第 62 回年次大会 (2007) 鹿児島大学 3 月 18 日 - 21 日.
- [57] 古賀貴亮、奥谷洋、関根佳明, “三角形ループにおける Rashba、Dresselhaus 項を含めたスピン干渉効果”, 日本物理学会 第 62 回年次大会 (2007) 鹿児島大学 3 月 18 - 21 日.
- [58] 奥谷洋、古賀貴亮、関根佳明, “InGaAs 量子井戸を利用した三角形型スピン干渉計”, 第 54 回応用物理学関係連合講演会 (2007 春) 青山学院大学 3 月 27 - 30 日.
- 金民祐、藤井孝彦、古賀貴亮、大谷啓太, “AlSb/InAs/AlSb 量子井戸における伝導帯スピン分離-ゼーマン分離-”, 第 54 回応用物理学関係連合講演会 (2007 春) 青山学院大学 3 月 27 - 30 日.
- [59] 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、鹿児島大学、2007 年 3 月 18 日～21 日、21pTA-5

[60] 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-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、鹿児島大学、2007 年 3 月 18 日～21 日、21pTA-6

[61] 野村晋太郎、山口真澄、赤崎達志、田村浩之、丸山達朗、宮下宣、平山祥郎、整数量子ホール効果領域での発光の異常と有効質量の増大、CREST 合同研究会「超高速・超省電力高性能光デバイスの創製に向けて」NTT 厚木 R&D センター、厚木市、2007 年 5 月 22 日。

[62] 田村浩之、「量子ドットデバイスにおけるファノ・近藤効果」、次世代ナノ統合シミュレーションソフトウェアの研究開発「次世代ナノ情報機能・材料」成果報告会、2007 年 7 月 13 日（金）－14 日（土）、東京大学理学部 1 号館 小柴ホール

[63] 国橋要司、好田誠、新田淳作「InP / InGaAs / InAlAs 2 次元電子ガスの磁気輸送特性評価」第 68 回応用物理学会学術講演会 北海道工業大学 2007 年 9 月

[64] 野村晋太郎、山口真澄、田村浩之、赤崎達志、丸山達朗、宮下宣、平山祥郎、低電子密度領域二次元電子系発光による電子・正孔有効質量の増大の検出、日本物理学会年次大会、札幌市、2007 年 9 月。

[65] 山口真澄、野村晋太郎、田村浩之、赤崎達志、丸山達朗、宮下宣、平山祥郎、非ドープ GaAs 量子井戸の中性励起子と荷電励起子、日本物理学会年次大会、札幌市、2007 年 9 月。

[66] 山口真澄、野村晋太郎、津村公平、田村浩之、赤崎達志、ゲート付き非ドープ量子井戸の顕微分光スペクトル、第 68 回応用物理学会学術講演会、札幌市、2007 年 9 月。

[67] H. Tamura and L. I. Glazman, “Tunable Kondo effect in a quantum dot device”, 15th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-15), Nara, 2003. 7. 15

[68] Y. Sekine, J. Nitta, T. Koga, A. Oiwa, S. Yanagi, T. Slupinski and H. Munekata, “Magnetic Properties of Submicron-sized p-In<sub>0.97</sub>Mn<sub>0.03</sub>As Ferromagnetic Semiconductors”, Solid State Devices and Materials 2003 (Tokyo, 2003. 09. 16～09. 19).

[69] K. Shiraishi, H. Tamura, and H. Takayanagi, “Design of New Properties and Functions Based on Quantum Wire Networks”, International Symposium on Functional Semiconductor NanoSystems (Atsugi, 2003. 11. 12-14).

[70] H. Tamura and L. Glazman, “Kondo effect in a quantum wire coupled with double side-dots”, 6th International Symposium on New Phenomena in Mesoscopic Structures (Hawaii, 2003. 12. 02).

[71] M. Yamaguchi, A. Richter, H. Tamura, T. Akazaki, and H. Takayanagi, “Conductance oscillations of a quantum wire with a side-coupled quantum dot”, XXXIXth Rencontres de Moriond, Italy, 2004. 1. 25.

[72] J. Nitta, T. Koga, “Gate Control of Electron Spins and Spin Related transport in Semiconductor/Ferromagnet Hybrid Structure”, International Symposium on Mesoscopic Superconductivity and Spintronics, MS+S2004 (Atsugi, 2004. 3. 1-3. 4).

[73] H. Tamura, K. Shiraishi, L. I. Glazman, A. Richter, M. Yamaguchi, T. Akazaki, and H. Takayanagi, “Toward Tunable Magnetism in Quantum Dot Devices”, International Symposium on Mesoscopic Superconductivity and Spintronics, MS+S2004 (Atsugi, 2004. 3. 1-3. 4).

[74] Y. Lin, T. Koga, J. Nitta, “Effect of the InP/InGaAs Interface on Spin-orbit Interaction in InAlAs/InGaAs Hetrostructures”, APS March Meeting (Montreal, 2004. 3. 22-26).

[75] Yoshiaki Sekine, Takaaki Koga, Junsaku Nitta, “Ballistic Spin Interferometer using Square Loop Array”, MRS Meeting (San Francisco, 2004. 4. 12-16)

[76] H. Tamura, K. Shiraishi, and H. Takayanagi, “Tunable Exchange Interaction in

Quantum-Dot-Array Devices”, International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS-27), July 26-30, 2004, Flagstaff, Arizona.

[77] Y. Sekine, T. Koga, J. Nitta, “Electric-Field-Controllable Spin Interferometer Based on the Rashba Spin-Orbit Interaction”, Solid State Devices and Materials (SSDM) 2004 (9.15~09.17, 2004 Tokyo).

[78] J. Ohe, M. Yamamoto, T. Ohtsuki, and J. Nitta, “Spin filtering effect in the nonuniform spin-orbit interaction”, Nanoscale Dynamics and Quantum Conference, Hamburg University (Sept. 19-23, 2004 Hamburg).

[79] M. Yamaguchi, H. Takayanagi, S. Nomura, T. Akazaki and H. Tamura, “Control and Detection of Electron and Hole States in Double-Gated Quantum Wells”, the 11th Advanced Heterostructure Workshop, (5-10 Dec. 2004, Kohala Coast).

[80] S. Nomura, M. Yamaguchi, D. Sato, T. Akazaki, H. Tamura, H. Takayanagi, T. Saku, and Y. Hirayama, “Optical investigation of the electrons in gated quantum wells and quantum-dot arrays”, the 11th Advanced Heterostructure Workshop, (5-10 Dec. 2004, Kohala Coast).

[81] Kenji Miyakoshi, Hiroyuki Tamura, and Hideaki Takayanagi, “Hofstadter’s fractal band diagram in the Kagome quantum-dot-lattice”, 11th Advanced Heterostructure Workshop (AHW-11), December 5-10, 2004, Hawaii, USA.

[82] S. Nomura, M. Yamaguchi, D. Sato, T. Akazaki, H. Tamura, H. Takayanagi, Y. Hirayama, “Photoluminescence spectroscopy of a dilute electron system in a back-gated undoped quantum well”, International Conference on Nanoelectronics, Nanostructures and Carrier Interactions 2005 (30 Jan. - 1 Feb. 2005, Atsugi).

[83] H. Takayanagi, M. Yamaguchi, T. Akazaki, H. Tamura, and S. Nomura, “Control and detection of electron and hole states in double-gated quantum wells”, 2005 RCIQE International Seminar for 21st Century COE Program: “Quantum Nanoelectronics for Meme-Media-Based Information Technologies (III)” (8-10 Feb. 2005, Sapporo).

[84] Yiping Lin, J. Nitta, A.K. Newaz, W. Song, E.E. Mendez, “Anomalous Tunneling Characteristics of Double InGaAs Quantum-well Systems”, APS March Meeting (March 21-25, 2005 Los Angeles).

[85] A.K. Newaz, W. Song, E.E. Mendez, Yiping Lin, J. Nitta, “Shot Noise Characteristics of InGaAs/InAlAs Triple Barrier Resonant Tunneling Diode”, APS March Meeting (Los Angeles, 2005.3.21-25).

[86] M. Yamaguchi, S. Nomura, T. Akazaki, H. Tamura, H. Takayanagi, Y. Hirayama, “Charged excitons in a back-gated undoped quantum well in the integer and the fractional quantum-Hall regimes”, IQEC/Pacific Rim 2005 (11 - 15 July. 2005, Tokyo).

[87] T. Koga, K. Tawaraya, M. Van Veenhuizen, Y. Sekine, J. Nitta, “Scheme of Estimating Dresselhaus Term using the Spin Interference Effect in InAlAs/InGaAs/InAlAs Quantum Wells”, The 12th International Conference on Narrow Gap Semiconductors, NGS12, Toulouse, France, 3-7 July 2005.

[88] 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”, International Conference on New Phenomena in Mesoscopic Structures (27 Nov - 2 Dec, 2005, Hawaii, USA).

[89] J. Nitta, T. Koga, Y. Sekine, T. Bergsten, F. Meijer, A. Morpurgo, and T. Klapwijk “Spin Related Interference in Rashba 2DEG Systems”, International Symposium on Mesoscopic Superconductivity and Spintronics 2006 (MS+S2006) Feb. 27th-Mar. 2nd (2006) Atsugi, Japan

[90] S. Sasaki, S. Kang, S. Miyashita, T. Maruyama, H. Tamura, T. Akazaki, Y. Hirayama, and H. Takayanagi, “Non-local spin control in a double quantum dot-quantum wire

- coupled system”, International Conference on the Physics of Semiconductors, WeAlb.4, 24-28 July, 2006, Vienna, Austria.
- [91] M. Yamaguchi, S. Nomura, K. Miyakoshi, H. Tamura, T. Akazaki, H. Takayanagi, “Controlling electric field and electron density in a double-gated GaAs/AlGaAs quantum well” 12th Advanced Heterostructure Workshop, December 3-8, 2006, Hawaii, USA.
- [92] S. Nomura, K. Tsumura, J. Motohisa and T. Fukui, “Aharonov-Bohm oscillation of a charged exciton in a quantum tube” 12th Advanced Heterostructure Workshop (4 - 8 Dec. 2006, Hawaii).
- [93] H. Okutani, T. Koga, Y. Sekine, APS March Meeting, Colorado Convention Center, 2007 3/5-9.
- [94] S. Nomura, K. Tsumura, P. Mohan, J. Motohisa and T. Fukui, “Aharonov-Bohm Effect of an Electron-Hole Composite System in Quantum Tubes” International Conference on Nanoelctronics, Nanostructures and Carrier Interactions 2007 (20 Jan. - 23 Feb. 2007, Atsugi).
- [95] Takaaki Koga, “Spin Interference Effect in a Triangular Loop Array Using (001)In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As/In<sub>0.52</sub>Al<sub>0.48</sub>As Quantum Wells” Fourth International School and Conference on Spintronics and Quantum (SPINTEC IV) Maui, June 17-22 (2007).
- [96] T. Miyawaki, M. Kohda, and J. Nitta, “Local hall measurement of magnetic interaction in Fe / Au / Fe trilayer ring”, 15th International conference on nonequilibrium carrier dynamics in semiconductors, July 23-27 Tokyo (2007).

### ③ ポスター発表 (国内会議 3 件、国際会議 67 件)

- [1] 林伸明、津村公平、野村晋太郎、山口真澄、田村浩之、赤崎達志、n 型量子井戸の空間分解光伝導測定、日本物理学会秋季大会、千葉市、2006 年 9 月。
- [2] 好田誠、二瓶貴之、新田淳作” Gate controlled crossover from weak anti localization to weak localization in a narrow gap In<sub>0.8</sub>Ga<sub>0.2</sub>As / InP heterostructure”, 第 3 回物質・材料若手学校 仙台 2006 年 8 月 26 日-28 日
- [3] 野村晋太郎、「二次元電子系低電子密度領域の発光分光による研究」、平成 18 年度ナノサイエンス特別プロジェクト研究成果発表会、つくば市、2007 年 3 月 8 日。
- [4] A. Richter, Y. Harada, H. Tamura, T. Akazaki, T. Saku, Y. Hirayama, and H. Takayanagi, “Field-induced Semiconductor Quantum Dots defined by a single metallic Front-gate”, International Symposium on Carrier Interactions and Spintronics in Nanostructures -CISN2003- (Atsugi, March 10-12, 2003)。
- [5] S. Nomura and Y. Aoyagi, “Spin polarization of electrons in lateral periodic potential around filling factor  $\nu=3$ ”, The 15th International Conference on the Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (Nara, 2003.07.14).
- [6] T. Imai and S. Nomura, “Quantum dot array prepared with self-organized nanopore and its photoluminescence spectra”, The 15th International Conference on the Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (Nara, 2003.07.14).
- [7] H. Tamura and L. Glazman, “Tunable Kondo Screening in a Quantum Dot Device”, The 15th International Conference on the Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (Nara, 2003.07.15).
- [8] F. Meijer, J. Nitta, T. Koga, A. F. Morpurgo and T. M. Klapwijk, “Gate-voltage controlled Aharonov-Bohm Oscillations in InAs-inserted InGaAs/InAlAs baed ring”, The 15th International Conference on the Electronic Properties of Two-Dimensional

Systems (Nara, 2003.7.14-18).

[9] Y. Lin, J. Nitta, T. Koga, T. Akazaki, “Electron g-factor in a gated InGaAs channel with double InAs-inserted Wells”, The 11th Modulated Semiconductor Structures MSS11 (Nara, 2003.7.14-18).

[10] M. Steiner, J. Nitta, “Magnetic transitions of permalloy rings in hybrid devices”, International Symposium of Functional Semiconductor Nanosystems (Atsugi, 2003.11.12-11.14).

[11] K. Matsuda, T. Saiki, S. Nomura M. Mihara, and Y. Aoyagi, “Near-field optical spectroscopy of GaAs quantum dots”, The 1st International Tsukuba-Symposium on Nanoeecience (Tsukuba, 2003.11.17-11.18).

[12] S. Nomura and Y. Aoyagi, “Spin polarization of electrons at odd filling factors in quantum dot superlattice”, The 1st International Tsukuba-Symposium on Nanoeecience (Tsukuba, 2003.11.17-11.18).

[13] H. Tamura and L. I. Glazman, “Kondo effect in a quantum wire coupled with double side-dots”, International Symposium on New Phenomena in Mesoscopic Structures, USA, 2003.12.1

[14] M. Yamaguchi, Andreas Richter, H. Tamura, T. Akazaki, H. Takayanagi, “Transport properties of a quantum wire with a side-coupled quantum dot”, International Symposium on Mesoscopic Superconductivity and Spintronics, MS+S2004 (Atsugi, 2004.3.1-3.4).

[15] D. Sato, S. Nomura, M. Yamaguchi, T. Akazaki, H. Tamura, H. Takayanagi, “Electron density dependence of photoluminescence from Be-delta-doped GaAs quantum wells with a back gate”, International Symposium on Mesoscopic Superconductivity and Spintronics, MS+S2004 (Atsugi, 2004.3.1-3.4).

[16] S. Nomura, “Detecting spin polarization of electrons in quantum dot edge channels by photoluminescence”, International Symposium on Mesoscopic Superconductivity and Spintronics, MS+S2004 (Atsugi, 2004.3.1-3.4).

[17] Y. Lin, T. Koga, J. Nitta, “Interface Effect on Spin-Orbit Interaction in InAlAs/InGaAs/InP Systems”, International Symposium on Mesoscopic Superconductivity and Spintronics, MS+S2004 (Atsugi, 2004.3.1-3.4).

[18] F. Meijer, A. F. Morpurgo, T. M. Klapwijk, T. Koga, J. Nitta, “Spin Induced Dephasing in a 2-Dimensional Electron Gas with Strong Rashba Spin-Orbit Interaction”, International Symposium on Mesoscopic Superconductivity and Spintronics, MS+S2004 (Atsugi, 2004.3.1-3.4).

[19] M. Yamaguchi, S. Nomura, D. Sato, T. Akazaki, H. Tamura, and H. Takayanagi, “Magneto-optics in Be-delta-doped GaAs quantum wells with a back gate”, International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS-27), July 26-30, 2004, Flagstaff, Arizona.

[20] S. Nomura, M. Yamaguchi, D. Sato, T. Akazaki, H. Tamura, H. Takayanagi, T. Saku, and Y. Hirayama, “Negatively charged excitons in a back-gated undoped heterostructure”, the 27 th International Conference on Physics of Semiconductors (ICPS27), (26-30 July, 2004, Flagstaff).

[21] S. Nomura and Y. Aoyagi, “Optical detection of spin polarization of electrons in quantum dot edge channels”, the 27 th International Conference on Physics of Semiconductors (ICPS27), (26-30 July, 2004, Flagstaff).

[22] Y. Lin, J. Nitta, A. K. M. Newaz, W. Song, E. E. Mendez, “Unusual Tunneling Characteristics of Double-quantum-well Heterostructures”, International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS-27), July 26-30, 2004, Flagstaff, Arizona.

[23] K. Miyakoshi, H. Tamura, and H. Takayanagi, “Hofstadter’s fractal band diagram

- in Kagome quantum-dot-lattice”, International Workshop on Novel Quantum Phenomena in Transition Metal Oxides (TMO2004), Nov. 22-24, 2004, Sendai, Japan.
- [24] K. Yamamoto and S. Nomura, “Analysis of the optical response of a square-wave metal grating by using the exact eigenmodes”, the 2nd International Tsukuba-Symposium on Nano-Science, (24-28 Nov, 2004, Tsukuba).
- [25] S. Nomura, M. Yamaguchi, D. Sato, T. Akazaki, H. Tamura, H. Takayanagi, T. Saku, and Y. Hirayama, “Charged excitons in a dilute electron gas induced by a back gate bias”, the 2nd International Tsukuba-Symposium on Nano-Science, (24-28 Nov, 2004, Tsukuba).
- [26] K. Tsumura, S. Nomura, T. Akazaki, J. Nitta, “Infrared magneto-photoluminescence spectroscopy of an InAs-inserted-channel InGaAs/InAlAs heterostructure”, International Conference on Nanoelctronics, Nanostructures and Carrier Interactions 2005 (30 Jan. - 1 Feb. 2005, Atsugi).
- [27] K. Miyakoshi, H. Tamura, and H. Takayanagi, “Hofstadter’s butterfly energy band in quantum dot lattices”, International Conference of Nanoelectronics, Nanostructures and Carrier Interactions (NNCI2005), Jan. 31-Feb. 2, 2005, Atsugi, Japan.
- [28] F. Meijer, A. F. Morpurgo, T. M. Klapwijk, J. Nitta, “Universal behavior in time reversal symmetry breaking induced by competition between Rashba spin-orbit interaction and Zeeman effect”, International Conference of Nanoelectronics, Nanostructures and Carrier Interactions (NNCI2005), Jan. 31-Feb. 2, 2005, Atsugi, Japan.
- [29] K. Miyakoshi, H. Tamura, and H. Takayanagi, “Hofstadter’s butterfly energy band in quantum dot lattices”, International Conference of Nanoelectronics, Nanostructures and Carrier Interactions (NNCI2005), Jan. 31-Feb. 2, 2005, Atsugi, Japan.
- [30] M. Yamaguchi, S. Nomura, K. Miyakoshi, T. Akazaki, H. Tamura, H. Takayanagi, “Photoluminescence measurements in a double-gated Be-d-doped GaAs 80-nm quantum well”, 351. WE-Heraeus-Seminar, “Electron-Exciton Interactions in Semiconductor Nanostructures” (29 May - 1 June 2005, Bad Honnef)
- [31] H. Tamura, M. Yamaguchi, S. Nomura, T. Akazaki, H. Takayanagi, “Control of electron-hole wave functions in a wide quantum well by electric fields”, 1st NAREGI International Nanoscience Conference, June 14 - 17, 2005, Nara, Japan.
- [32] M. Yamaguchi, S. Nomura, T. Akazaki, H. Tamura, H. Takayanagi, P. Mohan, J. Motohisa, and T. Fukui, “Magneto-optics of GaAs quantum wire lattices grown by selective-area MOVPE”, The 15th International Conference on the Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (11 July - 15 July 2005, Albuquerque)
- [33] M. Yamaguchi, S. Nomura, K. Miyakoshi, T. Akazaki, H. Tamura, H. Takayanagi, “Electric-field control of electron-hole wave functions in a wide quantum well”, The 15th International Conference on the Electronic Properties of Two-Dimensional Systems, (11 July - 15 July 2005, Albuquerque)
- [34] K. Tsumura, S. Nomura, T. Akazaki, and J. Nitta, “Infrared magneto-photoluminescence spectra and electron-hole g-factor of InAs-inserted-channel InGaAs/InAlAs heterostructure”, The 15th International Conference on the Electronic Properties of Two-Dimensional Systems, (11 July - 15 July 2005, Albuquerque)
- [35] S. Nomura, M. Yamaguchi, T. Akazaki, H. Tamura, H. Takayanagi, Y. Hirayama, “Electron-hole states in the fractional quantum Hall regime probed by photoluminescence”, The 15th International Conference on the Electronic Properties

of Two-Dimensional Systems, (11 July – 15 July 2005, Albuquerque)

[36] F. E. Meijer, A. F. Morpurgo, T. M. Klapwijk, and J. Nitta

“Universal Spin-induced Time Reversal Symmetry Breaking by Competition between Rashba Spin-orbit Interaction and Zeeman Effect”, The 3rd International Scholl and Conference on Semiconductor Spintronics and Quantum Information Technology, SPINTECH III, Aug. 1-5th (2005) Awaji, Japan

[37] T. Bergsten and J. Nitta

“Spin Interference in Mesoscopic Ring Arrays”, The 3rd International Scholl and Conference on Semiconductor Spintronics and Quantum Information Technology, SPINTECH III, Aug. 1-5th (2005) Awaji, Japan

[38] Y. Sekine and J. Nitta

“Domain Wall Velocity Detected by Local Hall Effect”, The 3rd International Scholl and Conference on Semiconductor Spintronics and Quantum Information Technology, SPINTECH III, Aug. 1-5th (2005) Awaji, Japan

[39] H. Tamura, M. Yamaguchi, S. Nomura, T. Akazaki, H. Takayanagi, P. Mohan, J. Motoshisa, and T. Fukui, “Magneto-optical properties of electron-hole states in GaAs quantum wires”, International Conference on New Phenomena in Mesoscopic Structures (27 Nov – 2 Dec, 2005, Hawaii, USA).

[40] H. Tamura, S. Sasaki, S. Kang, S. Miyashita, T. Maruyama, T. Akazaki, Y. Hirayama and H. Takayanagi, “Spin correlation in a double-quantum-dot device”, The 4th International Symposium on Nanotechnology (JAPAN NANO 2006), Tokyo, Feb. 20-21, 2006

[41] S. Nomura, M. Yamaguchi, T. Akazaki, K. Miyakoshi, H. Tamura, H. Takayanagi, and Y. Hirayama, “Density dependent electron effective mass in a back-gated quantum well”, Feb. 27, 2006, International Symposium on Mesoscopic Superconductivity and Spintronics 2006, NTT R&D Center, Atsugi, Kanagawa, Japan.

[42] M. Yamaguchi, S. Nomura, K. Miyakoshi, H. Tamura, T. Akazaki, T. Maruyama, S. Miyashita, Y. Hirayama, and H. Takayanagi, “Photoluminescence measurements on a GaAs quantum well in a modulated potential with a square lattice structure”, Feb. 27, 2006, International Symposium on Mesoscopic Superconductivity and Spintronics 2006, NTT R&D Center, Atsugi, Kanagawa, Japan.

[43] T. Miyawaki, K. Toyoda, M. Kohda, A. Fujita, and J. Nitta, “Effect of the array distance on the magnetization configuration of submicron-sized ferromagnetic rings”, International Symposium on Mesoscopic Superconductivity and Spintronics 2006 (MS+S2006), Feb. 27th-Mar. 2nd (2006) Atsugi, Japan

[44] H. Tamura, K. Miyakoshi, S. Murakami, H. Takayanagi, “Hofstadter’s butterfly energy diagram and the Hall conductance in Kagome lattice potential”, International Conference on the Physics of Semiconductors, TuA3n.20, 24-28 July, 2006, Vienna, Austria.

[45] S. Sasaki, S. Kang, S. Miyashita, T. Maruyama, H. Tamura, T. Akazaki, Y. Hirayama, and H. Takayanagi, “Non-local spin control in a double quantum dot-quantum wire coupled system”, International Conference on the Physics of Semiconductors, WeA1b.4, 24-28 July, 2006, Vienna, Austria.

[46] S. Nomura, M. Yamaguchi, T. Akazaki, K. Miyakoshi, H. Tamura, H. Takayanagi, and Y. Hirayama, “Enhancement of electron effective mass and reduced mass in a dilute electron density regime”, 28th International Conference on Physics of Semiconductors (ICPS28), (24-28 July, 2006, Wien).

[47] S. Nomura and T. Iitaka, “Order-N electronic structure calculation of n-type GaAs quantum dots”, 28th International Conference on Physics of Semiconductors (ICPS28), (24-28 July, 2006, Wien).



- [48] T. Koga, Y. Sekine, H. Okutani, T. Fujii and J. Nitta, “Analysis of Spin Interference Effect in Square Loop Arrays Including both Rashba and Dresselhaus Terms using InGaAs Quantum Wells”, 28th International Conference on the Physics of Semiconductors, ICPS2006 (Vienna, Austria, 2006 7/23 – 28).
- [49] M. Kohda, K. Takagi, A. Fujita, and J. Nitta, “Magnetization reversal process and interlayer coupling of a submicron-sized Fe/Au/Fe trilayer ring array”, 19<sup>th</sup> International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces, Aug. 14<sup>th</sup>–18<sup>th</sup> Sendai (2006).
- [50] M. Abe, M. Kohda, and J. Nitta, “Spin orbit interaction controlled by the gate voltage in an inverted  $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}/\text{InP}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  heterostructure”, 4<sup>th</sup> International Conference on Physics and Application of Spin-related Phenomena in Semiconductors, Aug. 14<sup>th</sup>–18<sup>th</sup> Sendai (2006).
- [51] T. Nihei, Y. Suzuki, M. Kohda, and J. Nitta, “Gate controlled crossover from weak anti localization to weak localization in a narrow gap  $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}/\text{InP}$  heterostructure”, 4<sup>th</sup> International Conference on Physics and Application of Spin-related Phenomena in Semiconductors, Aug. 14<sup>th</sup>–18<sup>th</sup> Sendai (2006).
- [52] H. Okutani, T. Koga, Y. Sekine and T. Fujii, “Investigation of Spin Interference Effect in Triangular Loop Arrays fabricated in InGaAs Quantum Wells”, The 4th International Conference on Physics and Application of Spin-Related Phenomena in Semiconductors, PASPS IV, (Sendai, 2006) Sendai 2006 8/15–18.
- [53] M. Kohda, K. Takagi, T. Miyawaki, K. Toyoda, A. Fujita, and J. Nitta, “Lateral and vertical magnetic interaction in submicron-sized Fe monolayer and Fe/Au/Fe trilayer ring arrays”, International Conference on Solid State Devices and Materials, Sept. 12<sup>th</sup>–15<sup>th</sup> Yohohama (2006).
- [54] T. Kobayashi, S. Tsuruta, S. Kang, S. Sasaki, H. Tamura, T. Fujisawa, Y. Tokura, T. Akazaki, “Ballistic Current Injection into a Semiconductor Quantum Dot”, International Conference on Nanoelectronics, Nanostructures and Carrier Interactions, PWe-05, 20–23 February, 2007, Atsugi, Japan.
- [55] M. Yamaguchi, S. Nomura, T. Maruyama, S. Miyashita, Y. Hirayama, H. Tamura, T. Akazaki, “Simultaneous Measurement of Photoluminescence and Capacitance Spectra in GaAs QW” International Conference on Nanoelectronics, Nanostructures and Carrier Interactions 2007 (20– 23 Feb. 2007, Atsugi).
- [56] S. Sasaki, H. Tamura, S. Miyashita, T. Maruyama, T. Akazaki, Y. Hirayama, H. Takayanagi, “Transport Properties of an Independently Contacted Double Quantum Dot-Quantum Wire Coupled Device”, International Conference on Nanoelectronics, Nanostructures and Carrier Interactions, PWe-06, 20–23 February, 2007, Atsugi, Japan.
- [57] N. Hayashi, K. Tsumura, S. Nomura, M. Yamaguchi, H. Tamura, T. Akazaki, Y. Hirayama, “Conductance Measurement on GaAs/AlGaAs Heterostructure under Local Optical Excitations” International Conference on Nanoelectronics, Nanostructures and Carrier Interactions 2007 (20 Jan. – 23 Feb. 2007, Atsugi).
- [58] N. Hayashi, K. Tsumura, S. Nomura, M. Yamaguchi, H. Tamura, T. Akazaki, Y. Hirayama, “Mapping of two-dimensional electrons system in magnetic fields by local optical excitations”, First International Symposium on Atomic Technology (ISAT-2007), (16–17, Mar. 2007, Tsukuba).
- [59] M. Kohda, T. Nihei, and J. Nitta, “Interface and field contributions of Rashba spin orbit interaction in different width of  $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As} / \text{InP}$  quantum wells”, 4<sup>th</sup> International school and conference on spintronics and quantum information technology (SPINTEC 4) Maui, June 17<sup>th</sup>–22<sup>nd</sup> (2007).
- [60] K. Nishio, T. Koga, ” Consideration of Possible Spin Interference Experiment Using

GaAs/AlGaAs Quantum Wells” , 4<sup>th</sup> International school and conference on spintronics and quantum information technology (SPINTEC 4) Maui, June 17<sup>th</sup>–22<sup>nd</sup> (2007).

[61] Minu Kim, Takaaki Koga, Keita Otani, Yuzo Ohno, Hideo Ohno, “Electron Spin Splitting Effect in AlSb/InAs/AlSb Quantum Wells” , 4<sup>th</sup> International school and conference on spintronics and quantum information technology (SPINTEC 4) Maui, June 17<sup>th</sup>–22<sup>nd</sup> (2007).

[62] 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 dot-quantum wire coupled device”, International Conference on Electronic Properties of Two-dimensional Systems (EP2DS-17), TU-PE109, Genova, Italy, July 15–20 2007.

[63] Hiroyuki Tamura, “Crossover from resonance to anti-resonance Kondo effect in a quantum dot device”, International Conference on Electronic Properties of Two-dimensional Systems (EP2DS-17), TU-PE110, Genova, Italy, July 15–20 2007.

[64] 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”, the 17th International Conference on Electronic Properties of Two-dimensional Systems (EP2DS-17), (15–20, July 2007, Genoa).

[65] S. Nomura, K. Tsumura, P. Mohan, J. Motohisa, and T. Fukui, “Optical evidence for Aharonov-Bohm effect in quantum tubes”, the 17th International Conference on Electronic Properties of Two-dimensional Systems (EP2DS-17), (15–20, July 2007, Genoa).

[66] 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”, the 17th International Conference on Electronic Properties of Two-dimensional Systems (EP2DS-17), (15–20, July 2007, Genoa).

[67] Masumi Yamaguchi, Shintaro Nomura, Tatsuhi Maruyama, Sen Miyashita, and Yoshiro Hirayama, Hiroyuki Tamura, and Tatsushi Akazaki, “Photoluminescence evolution across the metal-insulator transition in an undoped GaAs quantumwell ”, the 17th International Conference on Electronic Properties of Two-dimensional Systems (EP2DS-17), (15–20, July 2007, Genoa).

[68] M. Kohda, T. Nihei, and J. Nitta, “Quantum thickness dependence of spin orbit interaction in  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  /  $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$  / InP asymmetric quantum wells” , the 17th International Conference on Electronic Properties of Two-dimensional Systems (EP2DS-17), (15–20, July 2007, Genoa).

[69] Y. Kunihashi, T. Nihei, M. Kohda, and J. Nitta, “Control of spin orbit interaction in InP / InGaAs / InAlAs heterostructure by surface etching” , 15th International conference on nonequilibrium carrier dynamics in semiconductors, July 23–27 Tokyo (2007)

[70] M. Kohda, A. Ohtsu, T. Seki, A. Fujita, J. Nitta, and K. Takanashi, “Perpendicular magnetized  $\text{Li}_0\text{-FePt}$  / MgO epitaxially grown on GaAs for electrical spin injection” , International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2007) Sept. 18–21 Tsukuba (2007)

(4)特許出願

①国内出願 (7 件)

1. 発明者：田村浩之

発明の名称：磁性体、これを用いた磁性デバイス、およびこの磁性体の製造方法

出願人：日本電信電話株式会社

出願日：特願 2003-295541, 2003. 8. 19

2. 発明者：新田 淳作

発明の名称：トンネル接合体およびトンネル接合を用いたメモリ

出願人：日本電信電話株式会社

出願日：特願平 2004-029863, 2004. 2. 5

3. 発明者：新田 淳作

発明の名称：スピフィルター

出願人：日本電信電話株式会社

出願日：特願 2004-054788, 2004. 2. 27

4. 発明者：野村 晋太郎、伊藤 宙陸

発明の名称：ナノ多孔質体を利用した微粒子、ナノ構造体の製造方法

出願人：独立行政法人科学技術振興機構

出願日：2004/5/31

5. 発明者：新田 淳作、赤崎 達志

発明の名称：スピフィルター及びスピン分離方法

出願人：日本電信電話株式会社

出願日：2004/7 特願 2004-207689

6. 発明者：新田 淳作、赤崎 達志

発明の名称：スピフィルター及びスピン分離方法

出願人：日本電信電話株式会社

出願日：2004/7 特願 2004-207692

7. 発明者：赤崎 達志、高柳 英明、新田 淳作

発明の名称：スピントランジスタ

出願人：日本電信電話株式会社

出願日：2005/7 特願 2005-185332

②海外出願 (2 件、4 カ国)

1-1. 発明者：H. Tamura and H. Takayanagi

発明の名称：Magnetic body, magnetic device using the same, and method of manufacturing the same

出願人：日本電信電話株式会社

出願日：米国特許番号 10/654306, 2003. 9. 2

1-2. 発明者：H. Tamura and H. Takayanagi

発明の名称：Magnetic body, magnetic device using the same, and method of manufacturing the same

出 願 人：日本電信電話株式会社

出 願 日：欧州（英・独・仏）特許番号 03019530.9, 2003.8.29

1-3. 発 明 者：H. Tamura and H. Takayanagi

発明の名称：Magnetic body, magnetic device using the same, and method of manufacturing the same

出 願 人：日本電信電話株式会社

出 願 日：中国特許番号 03157956.6, 2003.9.1

2. 発 明 者：野村晋太郎、伊藤宙陸

発明の名称：ナノ多孔質体を利用した微粒子、ナノ構造体の製造方法

出 願 人：独立行政法人科学技術振興機構

出 願 日：国際出願番号 PCT/JP2005/009990

## (5)受賞等

①受賞

②新聞報道

③その他

## 7 研究期間中の主な活動(ワークショップ・シンポジウム等)

| 年月日                           | 名称                                                      | 場所                      | 参加人数  | 概要                                                                                                                                                 |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2004 年 3 月<br>1-4 日           | メゾスコピック超伝導<br>とスピントロニクスに<br>関する国際シンポジウ<br>ム<br>MS+S2004 | NTT 厚 木<br>R&D センタ<br>ー | 225 名 | この分野の世界的に著名<br>な研究者を招待し最新の<br>研究成果を討論する場を<br>提供することを目的とし<br>て国際会議を開催した。ス<br>ピントロニクスや量子コ<br>ンピュータの最新の成果<br>を討論するとともに CREST<br>プロジェクトの成果をア<br>ピールした。 |
| 2006 年 2 月<br>27 日ー3 月 2<br>日 | メゾスコピック超伝導とス<br>ピントロニクスに関する<br>国際シンポジウム<br>(MS+S2006)   | NTT 厚 木<br>R&D センタ      | 180 名 | C R E S Tプロジェクト<br>「超伝導磁束量子ビット<br>による量子もつれの実現」<br>(代表：高柳英明)と共同<br>で開催した。スピントロ<br>ニクスと量子コンピュータ<br>に関する最新の成果を内<br>外から集め発表・討論する<br>場を提供するとともに両        |

|                    |                                     |                        |      |                                                                                                 |
|--------------------|-------------------------------------|------------------------|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                    |                                     |                        |      | 研究チームの成果を内外にアピールした。                                                                             |
| 2007 年 5 月<br>22 日 | CREST合同研究会「超高速・超省電力高性能光デバイスの創製に向けて」 | NTT 物性科学基礎研究所（神奈川県厚木市） | 11 名 | 榊 CREST プロジェクトの異なる 3 チーム（新田チーム、阪大小川チーム、東大物性研秋山チーム）が集まって、半導体光物性研究の自由な討論の中から相互理解を深め、新たなアイデアを探索した。 |

## 8 研究成果の展開

### (1)他の研究事業への展開

- 極低温強磁場のナノ構造中電子スピン密度の空間分布の光学的検出に関する研究へと展開した。科学研究費補助金基盤研究 B、「結合ナノ構造中  $^3\text{He}$  温度電子スピン密度分布のイメージング」
- 磁性半導体と半導体のハイブリッド構造の研究に展開した。科学研究費補助金基盤研究 A「磁性半導体・半導体ハイブリッド構造におけるスピン三端子デバイス」
- スピンホール効果の電氣的検出の研究に展開した。科学研究費補助金萌芽研究「スピン注入による半導体スピンホール効果の電氣的な検出」
- 電荷の流れを伴わないスピン流の検出の研究に展開した。科学研究費補助金特定領域研究(計画研究)「スピン軌道相互作用を用いたスピン流の電氣的な検出」

### (2)実用化に向けた展開

## 9 他チーム、他領域との活動とその効果

### (1)領域内の活動とその効果

榊 CREST 領域の異なる 3 チーム(新田チーム、阪大小川チーム、東大物性研秋山チーム)が集まって、「超高速・超省電力高性能光デバイスの創製に向けて」と題して CREST 合同研究会を開催した。2007 年 5 月 22 日 NTT 厚木 R&D センターにおいて、1 日かけて 11 件の発表と討論を行った。半導体光物性研究の自由な討論の中から相互理解を深め、新たなアイデアと共同研究の可能性を探索した。

### (2)領域横断的活動とその効果

CREST プロジェクト「超伝導磁束量子ビットによる量子もつれの実現」(代表：高柳英明)と「半導体スピンエンジニアリング」(代表：新田淳作)の 2 つのプロジェクトが共同で「メゾスコピック超伝導とスピントロニクスに関する国際シンポジウム」(MS+S2006)開催した。2006 年 2 月 27 日から 3 月 2 日までの 4 日間、内外からの参加者約 180 名のうち約 50 名が海外からの参加者であり、口頭発表 46 件、約 80 件のポスター発表があり、スピントロニクスと量子コンピュータに関する最新の成果を内外から集め発表・討論する場を提供するとともに両研究チームの成果を内外にアピールした。

## 10 研究成果の今後の貢献について

### (1)科学技術の進歩が期待される成果

(10-1) 空間的に離れた 2 つの量子ドットから遠隔的に近藤効果のオン・オフ制御が実現できることを示すことに成功

半導体材料を用いて RKKY 相互作用を通じた 2 スピン間相互作用が確認できれば、チューニング可能なスピントロニクスデバイス素子として大きな意味があり、我々の成果はそこへ向けてあと一歩まで近づいたと考える。

### (10-2) 平坦バンド強磁性の前駆的現象をつかむ

量子ドット超格子の電子密度の低下に伴い、電子間相互作用により電子と正孔の有効質量が増大することを見いだした。また、整数電子占有数においてスピン分裂エネルギーが極大値を持ち、その値が電子占有数に依存することを見いだした。電子密度を連続的に低

下させてキャパシタンススペクトル測定を行った結果、金属絶縁体転移点の直前に電子圧縮率の異常を観測した。これらの現象は電子間相互作用に起因したもので、強磁性転移の前駆的現象であると考えられる。

半導体材料を用いていながら、これまで半導体では出すことができなかった物性（ここでは強磁性）を人工的に発生させることが可能となる。平坦バンド強磁性が実現できれば半導体バンドエンジニアリングが可能となったということで学術的なインパクトは大きい。

#### (10-3) InAs 層挿入 InGaAs チャンネルにおける $g$ -因子のゲート電界制御に成功

$g$ -因子の異なった InAs と InGaAs の間で電子分布をゲート電界により変調することにより、 $g$ -因子を制御することに成功した。量子情報は光を用いて伝送されるが、情報処理は量子ドットなど半導体中で行う必要がある。所望の量子ドットの電子スピンのみを反転操作するには、振動磁場に共鳴するスピン分離エネルギーをゲート電界により制御するため、 $g$ -因子をゲート電界により制御する必要がある。本プロジェクトで得られた成果は、 $g$ -因子エンジニアリングへ向けての知見を与えるとともに、量子情報技術への応用を可能にするものである。

#### (10-4) InGaAs の膜厚によりスピン軌道相互作用のゲート電圧依存性を逆転させることに成功

この実験の重要なことは、スピン軌道相互作用は物質固有のパラメータではなく、半導体ヘテロ構造の設計や膜厚により変調可能なパラメータであることを実験的に示した点にある。さらにゲート電圧によってスピン軌道相互作用の強さが制御できることは、電界によって電子スピンの感じる有効磁場の強さを制御できることを示している。この電界によるスピン制御技術の確立は、スピン干渉デバイス、スピン FET、スピントランジスタなどスピンを用いた機能デバイス化やスピントロニクス、スピンを用いた量子情報処理に重要な役割を果たす。

#### (10-5) 半導体中のスピンのダイナミクスを解明することに成功

固体中でスピンのダイナミクスを司るのはゼーマン効果とスピン軌道相互作用である。ゲート電界によりスピン軌道相互作用を系統的に制御可能であることを利用して、ゼーマン効果とスピン軌道相互作用の競合について調べた結果、ゼーマン効果はスピンの緩和時間を増大する効果をもたらすことを明らかにした。さらに、位相緩和時間がゼーマンエネルギーとスピン軌道相互作用のエネルギーの比によって普遍的な振る舞いを示すことを見出した。これは量子干渉デバイスの設計やスピンドダイナミクスの基礎物理の理解に重要な知見を与える。

#### (10-6) スピン干渉効果（アハロノフ・キャッシャー効果）の観測に成功

ゲート電界により制御可能なスピン軌道相互作用を用いたデバイスとしてスピン干渉デバイス提案してきたが、微細加工により多重スピン干渉ループ構造を作製し、スピン干渉効果を観測することに成功した。この結果は、キャリアスピンの歳差回転角度がゲート電界により制御できることを示している。電界効果スピントランジスタへ向けてのマイルストーンとなる。また、スピン干渉効果の観測は、電界によるスピン位相の制御に起因した干渉効果であり電子版アハロノフ・キャッシャー効果の直接的な観測に相当し基礎学問的価値の高い成果である。

#### (10-7) Stern-Gerlach 効果に起因したスピントランジスタの提案

スピン軌道相互作用を用いて、有効磁場の空間勾配を作ることにより、Stern-Gerlach 効果に起因したスピントランジスタが形成できることを理論提案した。現在、その動作確認に向けた実験を行っているところである。磁性体や磁場を一切用いることなく、半導体中にスピン偏極したキャリアが生成されればスピントロニクスの分野にとどまらずスピンを用



いた量子情報処理においてもスピンの初期化、読み出し等、多くの応用と展開が期待できる。

## (2) 社会・経済の発展が期待される成果

垂直磁気異方性を持つ FePt を用いて半導体 GaAs 上にエピタキシャル成長させることによりゼロ磁場でスピン注入を確認することに成功した。スピン偏極率は低温で 1%程度であるが、作製条件の最適化により室温でより高いスピン注入効率が期待できる。FePt は垂直磁気異方性と高い磁気異方性エネルギーを有するため、熱エネルギーに対し安定で数 nm になっても磁性は壊れず超高密度磁気メモリ化が可能である。また、このスピン注入技術と電界によるスピン回転制御技術を組み合わせることにより、電界効果スピントランジスタへと展開が期待できる。

## 1 1 結び

榊プロジェクトの研究領域「超高速・超省電力高性能ナノデバイス・システムの創製」で、我々が行ってきた研究はどちらかといえば基礎物性物理に近かったにもかかわらず暖かくご支援いただいたことに感謝します。本プロジェクトで得られた成果は、実用的なレベルに至るには今後いくつかのもののブレークスルーが必要ですが、科学技術の進歩に大いに貢献できたものと自負しています。

私が NTT 物性基礎研究所に所属しているときは、既存の研究設備が整っていましたので、研究費があまりなくともやっていけると思っていました。2005 年より東北大学に異動した際は、ホール素子すら簡単に作製できないことに愕然としました。ちょうど CREST プロジェクト期間中であつたおかげで、素子作製設備を整える予算をご配慮いただきました。榊先生、村井技術参事に感謝申し上げます。このように、タイムリーにしかも柔軟に予算を扱えるのは科学技術振興機構しかないのではないのでしょうか。

シュブニコフ・ドハース振動に現れるビートがゲート電圧に依存することから、Rashba 効果により、InGaAs 二次元電子ガスのスピン軌道相互作用の電界制御可能であることをはじめ発表 (Phys. Rev. Lett. 78, 1335 (1997)) したのは、今から 10 年前のことです。当初は、「ビートの原因は第二サブバンドの影響である」、「スピン軌道相互作用は物質固有のパラメータであり電界制御可能であるはずがない」、あるいは「電子が感じる電界はゼロであるはずであり Rashba 効果は存在しない」等、実験結果を疑問視する研究者も多くいました。しかしながら、CREST プロジェクトにより共同研究者と新たな実験を行い、さまざまな機会に我々の実験結果を発表する討論する機会を与えていただいたおかげで、半導体研究者の間で確固たる事実として認知されるようになりました。実際、CREST プロジェクトが本格的に始まってから、引用件数が格段に増加し、2003 年以降の本論文の引用件数は 420 件を越えています。また、本プロジェクトにより得られた成果である「ゼーマン効果とスピン軌道相互作用の共存により生じる位相緩和時間の普遍的振る舞い」や、「スピン干渉効果の観測 (電子版アハロノフ・キャシャー効果の観測)」は多くの半導体研究者の興味を引くこととなり、本年、イタリアで開催された二次元電子ガスに関する国際会議 (EP2DS-17) と半導体ヘテロ構造に関する国際会議 (MSS-13) の合同会議で、基調講演させていただきました。これも、榊先生をはじめとして領域アドバイザーの先生がたならびに科学技術振興機構の暖かいご支援の賜物であり、心から感謝申し上げます。

今後は、本 CREST プロジェクトで得られた成果である「半導体中のスピン電界制御」をベースに、スピントロニクスやスピンを用いた量子情報処理の研究に展開していきたいと考

えています。



「超伝導磁束量子ビットによる量子もつれの実現」(代表：高柳英明)と「半導体スピンエンジニアリング」(代表：新田淳作)の2つのプロジェクトが共同で「メゾスコピック超伝導とスピントロニクスに関する国際シンポジウム」(MS+S2006)開催した。本プロジェクトのメンバーの大半が参加した。