

## 研究課題別事後評価結果

### 1. 研究課題名：半導体スピンエンジニアリング

### 2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名(研究機関名・職名は研究参加期間終了時点)

#### 研究代表者

新田 淳作 (東北大学大学院工学研究科 教授)

#### 主たる共同研究者

野村 晋太郎 (筑波大学大学院数理物質科学研究科 准教授)

赤崎 達志 (NTT物性科学基礎研究所量子電子物性研究部 主幹研究員)

古賀 貴亮 (北海道大学大学院情報科学研究科 准教授 (平成17年4月~))

### 3. 研究内容及び成果

トランジスタなどの半導体素子の最大の特徴は、第三電極を用いた電氣的制御により三端子動作が可能となる点にある。実際、半導体素子の多くでは、電子が持つ「電荷」の増減を電氣的に制御して、基本機能が実現されてきた。本研究では、電子や正孔の「スピン」が関与する現象、即ち(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、キャリアの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、スピンの自由度に起因した新機能を創出し、超高速性や超省電力性や高機能性を備えた量子情報処理用の基本素子として活用することを目指している。

以下に研究グループごとの研究内容と成果を述べる。

#### (スピン伝導特性研究グループ)

細線を介して結合した2つのドット A と B を含む系において、両者のスピンの近藤効果を発生させ、ドット・細線間の結合を増減させた時に生じる近藤効果の変化を通じ、RKKY 相互作用の有無を観測することを試みた。量子ドット A 中の電子数が奇数のときにだけ、量子ドット B の近藤効果が抑制されることが観測された。これは、空間的に離れた2つの量子ドットにおいて、遠隔的に近藤効果がオン・オフ制御できることを示すものである。

InGaAs 量子井戸を含む InP/InGaAs/InAlAs ヘテロ構造において、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強く影響することを見出した。厚さ 5 nm InGaAs チャンネルでは、スピン軌道相互作用の強さ  $\alpha$  がゲート電界とともに増すが、10 nm の膜ではゲート電界とともに  $\alpha$  は減少した。膜厚により、スピン軌道相互作用のゲート電圧依存性は逆転できることを示した。

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できることを利用して、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。その結果、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が明らかになった。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およびスピンドダイナミクスの物理の基礎的理解に重要な知見を与える。

ゲート電界によりスピン軌道相互作用を制御する素子として、スピン干渉デバイスを提案してきたが、微細加工を用いて多重スピン干渉ループ素子を作製し、スピン干渉効果を実証することに成功した。この結果、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が示された。このスピン干渉効果は、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観測に相当しており、基礎物理としても価値の高い成果である。

InAs 層を挿入した InGaAs チャンネルは、バンドオフセットが小さいため、ゲート電圧により電子の波導関数の分布が大きく変化する。このため、g - 因子の異なった InAs 層から InGaAs 層へと電子が容易にしみだし、g - 因

子の大きな変化が期待できる。試作した素子で、角度変調磁場中での磁気抵抗測定を行い、InAs 層挿入 InGaAs チャンネルの g-因子を評価した結果、g-因子がゲート電圧により大きく制御できることが実証された。

#### (スピン光特性研究グループ)

GaAs 量子井戸構造の上に、周期が 100 nm から 500 nm の格子型ゲートを形成して、電圧を印加して量子ドット列を作り、その中の電子系の量子状態を調べた。100 nm 角の量子ドットに電子が1個存在する場合、電子密度は  $1 \times 10^{10} \text{cm}^{-2}$  となる。この領域で電子密度を制御するために、非ドープの量子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して電子密度を制御した。電子占有数が整数や分数の時に現れる光遷移エネルギーの異常現象の観測、電子系の圧縮率と関連のあるキャパシタンススペクトル計測、円偏光発光分光法を用いたスピン分極度やスピン分裂エネルギーの測定を行い、電子密度の低下に伴って電子間相互作用が増し、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、整数電子が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も見いだした。電子密度を下げ、キャパシタンススペクトルを測定したところ、金属絶縁体転移点の直前に電子圧縮率に異常が生じることも見出した。これらの現象は電子間相互作用に起因したものであり、強磁性転移の前駆現象であると考えられる。

#### 4. 事後評価結果

##### 4 - 1. 外部発表(論文、口頭発表等)、特許、研究を通じての新たな知見の取得等の研究成果の状況

本研究は、半導体中の電子スピンをゲート電界により電氣的に制御することにより、エレクトロニクスの新たな可能性を拓くことを目的としている。スピン制御素子の決定的利点を実証するには至っていないが、スピン制御素子の学術基盤確立に向けて着実に研究を進めている。主な成果には、

[1] InAs/InGaAs-QWチャンネルにおける g-因子のゲート電界制御に成功、

[2] InGaAs-QWのスピン軌道相互作用に対するInP界面の効果検証、

[3] 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、

などがある。これらの成果は、当該分野で中心的な役割を果たしているインパクトファクタの高い学術誌の論文として出版されており、国際会議発表も活発である。著名な国際会議のプレナリや招待講演を多数行っており、学術面で高い評価を受けている。発表論文数は、英文 62 件、口頭発表は、国際会議 30 件、国内会議 66 件、ポスター発表は国際会議 67 件、国内会議 3 件である。この他、国際会議で 25 件、国内会議で 18 件の招待講演を行っている。また、特許は国内 7 件、外国 2 件(内 1 件は 3 カ国)を出願している。

##### 4 - 2. 成果の戦略目標・科学技術への貢献

最近、半導体にスピンの自由度を導入する材料が、世界的に活発化している。但し、その多くは、半導体に磁性元素を導入して希薄強磁性化するか、半導体に磁性金属を接触させてスピン分極した電子を注入するかの手法が使われている。本研究は、非磁性の半導体材料のヘテロ界面やナノ構造を用い、ゲート電圧によるスピン制御を利用しており、極めて独創的である。また、基礎科学の面からも深い検討を進めており、高度な成果を得ている。

これまでの本研究は、ミリケルビン領域の物理を中心にしており、室温動作可能な新機能デバイスに直ちにつながるものではないが、半導体中の電子スピンをゲート電界で制御するという観点は、電子デバイスとして、極めて魅力的である。特に、複数のリングをアレイ化した構造でスピン干渉の電界制御を実現し、低温であるが世界に先駆けて明瞭な振動を観測したことはきわめて貴重な成果と言える。半導体中のスピンの制御は量子情報処理の観点からも重要であり、この分野でインパクトのある成果を達成し、世界を先導してきたことは高く評価できる。研究領域の趣旨にてらして、十分な成果が得られたと判断する。

##### 4 - 3. その他の特記事項(受賞歴など)

2004年と2006年に「メゾスコピック超伝導とスピンエレクトロニクスに関する国際シンポジウム」を開催し内外の研究者との意見交流を図った。本研究の成果は、科学研究費補助金基盤研究 B「結合ナノ構造中 3He 温度電子スピン密度分布のイメージング」、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」、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気的な検出」、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気的な検出」の研究テーマとして発展し研究推進中である。