

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名

関連エレクトロニクス

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：平山 祥郎 日本電信電話（株）物性科学基礎研究所 部長

主たる共同研究者：

樽茶 清悟 東京大学理学部物理 教授

平川 一彦 東京大学生産技術研究所 教授

横山 浩 産業技術総合研究所 ナノテクノロジー研究部門 部門長

井元 信之 総合研究大学院大学 教授

3. 研究内容及び成果

NTT、東大、総研大、産総研がチームを組んだ「関連エレクトロニクス」プロジェクトでは半導体中の様々なキャリア関連、さらにはそのコヒーレント制御の基礎研究を遂行し、その中から将来の画期的な半導体デバイスコンセプトに繋がるような関連現象をピックアップすることを目標に研究を進めた。目標のひとつは新しい分野である(量子)関連エレクトロニクスを確立することにあつたが、5年間のプロジェクトで、世界のトップレベルを行く成果を上げ、半導体中でのキャリア関連、特にその量子コヒーレント制御が将来の新しい半導体技術、量子情報処理技術として大きな可能性を持っていることを実証した。

薄膜構造におけるキャリア関連の研究では、ノンドープヘテロ構造にバックゲートからの電界でキャリアを誘起するシステムを完成し、これを密度制御性に優れた二層構造に応用した。特に、二層系のパラメータを制御することにより、強いキャリア関連を確認し、二種類の強磁性状態が同じ二層系で実現されることを示した。また、分数量子ホール状態などで電子のスピン状態が転移する近傍で、電子スピンと核スピンの相互作用が生じ核スピンを偏極できること、さらに、核スピンの緩和時間が二次元電子系の状態により大きく制御できることを示した。これは、全電気型核スピン制御に道を拓く大きな成果である。また、超格子中でのキャリアのコヒーレント振動を THz スペクトロスコーピで測定することにも成功し、超格子中をブロッホ振動する電子に利得があることを世界で初めて実験的に証明した。これらの成果はインパクトファクター(IF)の高い PRL に数件掲載され、量子ホール効果国際会議などにおいて、最近の量子ホール効果を代表する話題として招待講演に選ばれている。

半導体ナノ構造におけるキャリア関連の研究では、量子ドットにおける代表的なスピン関連である近藤効果の物理を明らかにした。量子ドットのさまざまなパラメータを操作することにより近藤効果を自在に制御できることを示し、新しい近藤効果の発見、ユニタリー極限の近藤効果の検証に繋がった。また、単一電子スピンの読み出しを可能にするスピンプロケードによる整流特性を見出すことにも成功した。さらに、キャリアのダイナミクスを測定する電氣的ポンプ・プローブ法を確立し、量子ドット中での電子1個の

ダイナミクスを正確に測定した。量子ドットにおいてスピン反転を伴う遷移が禁制遷移であり、緩和時間が非常に長くなることをきちんと確認したことは、量子ドット中のスピンが外界から良く隔離されていることを証明した特筆すべき成果である。これらの成果は IF の高い Nature、Science、PRL に数件掲載され、近藤効果の論文を中心に被引用回数も多く、100 回近くに達する論文もあった。

この手法を利用して、結合量子ドット中で電子がドット間をコヒーレントに振動する様子を観測することに成功し、パルス技術を用いてこの振動を制御することにも成功した。これは、明確なかたちでの半導体電荷量子ビットの実現であり、IF の高い PRL に掲載され、現在の半導体集積回路に近い形の量子ビットの世界最初の実現例として多くの国際会議に招待されている。

キャリア関連の研究をサポートする研究として、シングルショット測定、ナノプロービング、量子情報処理の基礎研究にも力を入れた。シングルショット測定に関しては量子ドットの単電子トンネル特性を高速高感度の電荷計に応用する研究を進め、半導体中を単電子が動く様子をリアルタイムで観測することに成功した。ナノプローブに関しては低温磁場中で動作する光ナノプローブを確立し、半導体中でのキャリア特性評価に役立てるとともに、高速ナノプローブに向けて確実な進歩を得た。さらに、InAs 表面に蓄積する伝導電子と低温走査電子顕微鏡の組み合わせにより、転位の周囲に形成されるフリーデル振動や量子ドットとして働くピラミッド型の結晶欠陥に閉じ込められたゼロ次元状態の電子分布の直接観測に世界に先駆け成功した。これらの成果は IF の高い PRL に数件掲載され、電子の波のパターンは新聞や雑誌に多く取り上げられた。量子情報処理の基礎研究に関してはエンタングルメントの抽出実験の具体的方法を提案し、実際に光子を用いた実験を行った。これは、複数の量子ビットの一括量子測定を用いたエンタングルメントの抽出実験として世界初であり、IF の高い Nature に掲載された。さらに、量子情報処理の基礎理論の研究を進め、この分野でも数件の論文が IF の高い PRL に掲載された。

キャリア関連、コヒーレント制御の研究は固体量子計算への期待から、固体物理でトップレベルにある研究機関を中心に世界中に広がっている。その中で、本プロジェクトは 1998 年と言う早い時期から取り組んだこともあり、すでに述べたように世界のトップレベルに行く成果を上げることができた。また、本プロジェクトが主催した 2 回の国際会議 (Carrier Interactions in Mesoscopic Systems (CIM2001、2001/2/13-14)、Carrier Interactions and Spintronics in Nanostructures (CISN2003、2003/3/10-12)) を通して、日本のこの分野の研究推進にも貢献できたと評価される。将来の新しい半導体技術、量子情報処理技術として大きな可能性を持つことが明らかになり、半導体中でのキャリア関連、特にその量子コヒーレント制御について研究を今後継続し、さらに発展させていく事を期待する。

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

論文発表は英文198件、和文30件、口頭発表(ポスター発表含む)は国際会議339件、国内

会議302件、そのうち招待されたものが夫々66件、17件、特許出願は国内1件と非常に多くの優れた研究成果を国際的にも権威のある学会誌、国際会議等に発表しており、量子物性物理の分野で以下に列挙する如き画期的な成果を挙げた。

- ① 薄膜構造におけるキャリア相関に関しては、二層系におけるキャリア相関（スピン状態に依存した量子ホール強磁性）、ヘテロ構造における電子スピン-核スピン相関の発見、また半導体超格子においてテラヘルツ利得を世界で始めて得たこと。
- ② ナノ構造におけるキャリア相関に関しては、量子ドットの電子スピン状態の制御による新しい近藤効果の発見、非対称結合量子ドットの単一電子伝導におけるパウリ則の検証と単一電子スピン読み出しの提案、量子ドット中の核スピン結合の制御と核スピンメモリ動作の確認、2次元量子ホール系の電子スピン共鳴による g 因子、 T_2 下限値の導出、結合量子細線の朝永-ラッティンジャー-液体効果による“正”のクーロンドラッグと古典粒子による“負”のクーロンドラッグの観測。
- ③ ナノプロービングに関しては低温走査型トンネル顕微鏡を使用したInAs (111) A面上の局所電子状態密度の直接観察、走査型マックスウエル・ストレス顕微鏡の動作周波数のヘテロダイナミクス法によるテラヘルツ領域までの拡大、強磁場・極低温近接場光学顕微鏡の開発と時間分解光学顕微鏡併用による拡散の観測と理論的検討。
- ④ Shannonの「情報源情報量の理論」の完全な量子力学半の構築、様々な量子ドット配置でのエンタングルメント形成に対する理論的検討、光子対エンタングルメントの純化に対する実験的検討、B92量子暗号の無条件安全性証明。

4-2. 成果の戦略目標・科学技術への貢献

全般的に世界第一級の成果であり、特に物理現象の追求に関し圧倒的に優れた、普遍性の高い成果を報告しており、世界中の物理学会等から注目されている。特に電子系による核スピン制御の可能性を示したこと、半導体量子ドット中でスピンの選択則が原子と同様に存在することを見出したことは当初予測しなかったことであり、スピン状態に依存した量子ホール強磁性や朝永-ラッティンジャー-液体効果による“正”のクーロンドラッグの観測など直接的なキャリア相関に関わる新現象の発見のほか、半導体ドットで量子ビット動作を実証し、電子スピンによる核スピン制御の可能性の実証、量子情報処理分野で新展開が期待できる新学問分野「相関エレクトロニクス」を開拓した功績は大きい。

また量子通信においてエンタングルメントの濃縮を実験的に示したこと、マイクロ波電気力顕微鏡、強磁場・極低温近接場光学顕微鏡の開発によるナノプロービングの技術的インパクトも大きい。

4-3. その他の特記事項

国際シンポジウムの開催：Carrier Interactions in Mesoscopic Systems(CIM2001) H13. 2. 13~14 参加者142名、Carrier Interactions and Spintronics in Nanostructures (CISN2003) H15. 3. 10~12 参加者162名。NTT厚木研究開発センタで開催。外部の関連研究者との交流、CREST相関エレクトロニクスチームの研究成果のアピール他。

応用物理学会講演奨励賞：橋本克之（2001. 5）、「バックゲートシングルヘテロ構造中の二次元電子ガスによる核スピン操作」

サー・マーティン・ウッド賞：藤澤利正（2003.11）