

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 量子情報処理ネットワーク要素技術

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

武藤 俊一 (北海道大学大学院工学系研究科 教授)

主たる共同研究者

末宗 幾夫 (北海道大学電子科学研究所 教授)

臼杵 達哉 ((株)富士通研究所ナノテクノロジー研究センター 部長付 ~平成17年6月)

高津 求 ((株)富士通研究所ナノテクノロジー研究センター 部長付 平成17年7月~)

陽 完治 (北海道大学量子集積エレクトロニクス研究センター 教授)

3. 研究内容及び成果

1) 研究課題全体

将来の量子情報処理ネットワークに必要な要素技術として、特に量子中継器と単一光子源に注目し、これを半導体量子ドット中の電子スピンを用いて実現するための基礎研究を行った。中継器は出来栄によっては量子暗号通信の通信距離を飛躍的に増大させ得るものであるが、むしろ量子コンピューティング間のネットワークのための中継を念頭に置いた。

単一光子光源として InAlAs 量子ドットを用いた光子源を開発、光子相関測定による光子アンチバンチングの確認を行い、高感度の光子検出が可能な 0.7-0.8 ミクロンでのオンデマンド光子発生の可能性を確認した。また予期しない成果として 1990 年から提案されていた Datta-Das 型スピントランジスタを実現した。InAlAs 量子ドットの荷電励起子を選択励起することにより、ゼロ磁場で 73%の円偏光度を実測した。世界最高の特性であると共に、光子 - 電子スピンの量子情報保存変換の可能性を示すことができた。また核磁場を用いた量子ビットの変換手法を提案し、InAlAs 量子ドットの実験により十分な核磁場の大きさが得られ、これが制御可能であることを示したことは世界初であった。更に核分極のスイッチングを実測し、データを分析した結果、変換に必要な電子のエネルギー構造が自動的に、したがって安定して実現していることも初めて見出した。ゼロ磁場での円偏光度のデータと合わせると、この条件で量子ビット変換が可能であることを強く示唆すると考えられる。以上は個々の要素に関する成果であるが、単光子光源も含めてすべて InAlAs 量子ドットで実現したことは、すべてを共振器の中に集積化できる可能性を示している。量子情報処理ネットワークの基礎技術を開発したと考えている。

特に、核磁場については、それまでは、量子ドットといっても量子井戸の界面での凹凸によるものを用いた研究が殆どであった。InAlAs 自己集合量子ドットにおいて光照射により大きな核磁場が形成できること、またその大きさが照射する光の円偏光度により制御できることを示したことは、その後の自己集合量子ドットでの核磁場研究の世界的な流れを作ったものと自負している。更に科学的インパクトとして、核分極スイッチング時に電子スピン分極も同時にスイッチングをすることを見出したことにより、「電子スピンの分極は核スピンの無関係に決まる」という定説を覆したと考えている。

2) サブグループ毎

武藤グループ(北海道大学大学院工学研究科)

量子ビット変換: 量子ドットの核磁場を用いた光子と電子スピンの Qubit 変換を提案し、その実験的検証を行った。その結果、InAlAs 自己集合量子ドットにおいて光励起によりテラ級の大きな核磁場が実現すること、またこれを励起光の円偏光度により制御できることを世界で初めて示した。更に、核分極のスイッチングを実現し、こ

の現象により Qubit 変換に必要なバンド構造が自動的に従って安定的に実現することを初めて示した。

更に、核スピンのスイッチングに対応して電子分極のスイッチングを観測した。これは、電子スピンの平衡分布の形成に核 - 電子間のフリップフロップが重要な役割を果たしていることを示唆するもので、従来の定説を覆すものと考えている。尚、核スピンスイッチングの報告は InGaAs 量子ドットについて既にシェフィールド大から報告されているが、InAlAs 量子ドットでは初めてである。

量子演算:量子ドットの電子スピンの光支援トンネリングとそのクーロン・ブロックードを用いた独自の量子演算スキームを提案、更に実現のための 2 光子過程を用いた STIRAP を提案し、この手法の妥当性まで明らかにした。また電子スピンのデコヒーレンスについて実験的検討を行った。四光波混合による共鳴励起測定で量子ドットの電子スピンを計測する手法を立ち上げるにより従来の非共鳴励起の測定よりも、実際のデコヒーレンスが遥かに長くなることを初めて見出した。更に InAlAs 量子ドットで実測したナノ秒のデコヒーレンス時間から、我々の提案している電子スピンの光支援トンネリングを用いた量子演算の実証が可能であることも確認した。更に単一の量子ドットについてデコヒーレンスの測定を行い、交換相互作用を消すことにより長いデコヒーレンスを得られることを見出した。初めての成果であるとともに、Qubit 変換、量子演算の際の具体的な光制御プロセスに対する指針が得られた。

末宗グループ(北海道大学電子科学研究所)

Qubit 変換の検討が進んでいる InAlAs 量子ドットを光源とした単一光子光源について、光子相関測定による光子アンチバンチングの確認等を行うことにより Qubit 変換と両立するオンデマンド光子源を実現できる可能性を示した。また光子偏光と電子スピンの量子状態を高い量子効率で変換できることが示された。InAlAs 量子ドットを用いて単一光子源の可能性を示したのは世界初。またゼロ磁場で 73% に及ぶ高い円偏光度の保存は世界最高の特性である。

富士通グループ(富士通株式会社厚木分室)

量子ドットの電子スピンの量子演算をベースとした中継器のアルゴリズムのプロトタイプを開発した。またリソグラフィとウェットエッチングを用いたメサ加工を開発。このメサ加工を単一光子光源、量子ビット変換などへ向けての単一量子ドット研究の全てにおいて使用した。

陽グループ(北海道大学量子集積エレクトロニクス研究センター)

半導体/金属の良好なヘテロ界面作製技術を用いて、Fe/InAs において 20% におよぶ高い円偏光度を確認、これを電氣的に確認する研究の中から Datta-Das 型のスピントランジスタを実現した。データの再現性を高め、量子ドットをゲート中に持つスピントランジスタによる高感度スピン検出を行うため、半導体への高品質マグネタイト薄膜の形成技術を立ち上げ、室温での良好な磁化特性を確認した。低磁場での磁化の飽和がよく、世界最高品質と考えられる。

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

1) 外部発表、特許出願等

欧文論文誌 82 件、国際会議招待講演 23 件(内、基調講演 2 件)、国際会議口頭発表 52 件であり、論文誌発表数はかなり多く、また講演や口頭発表数は、デバイス系の発表数としては妥当である。

国内出願 6 件、国際出願 1 件である。余り多いとはいえないが、基本的な手法の出願がなされ、比較的妥当である。

2) 研究成果の状況

単一光子光源を開発し、0.7-0.8 μ 波長でのオンデマンド光源の可能性を確認した。また、以前から提案されていたスピントランジスタをほぼ実現したと考えられる。光子偏光 電子スピン間の量子情報を保存した変換手法については、InAlAs 量子ドットの荷電励起子を選択励起することで実現する可能性を示した。量子ビットの変換手法に関しては、核磁場を用いた方式を提案し、自己集合量子ドットで初めて核磁場を観測してそれが制御可能であることを示すとともに、変換に必要な電子のエネルギー構造の実現法を見出し、量子ビット変換手法の高い実現性を与えた。最終目的である量子中継器を実現するには、この他に量子演算の手法を実証する必要があるが、それに向けて、着実な成果を出していると考えられる。

また、これらすべての成果はInAlAs量子ドットで実現しており、すべてを集積化することが容易という優れた特性を備えている。

3) 当初の研究計画に対する、成果の妥当性

当初の研究計画では、量子中継器を実現するという大変チャレンジングな目標を与えていた。しかし、途中でその完成が困難であることが明確になり、それをあきらめ、中間段階で実現のための要素技術開発に目標を変更した。そういう意味では、当初目標を実現していないが、元々この目標は大変高い目標であり、困難な課題に挑戦すること自体は推奨されるべきであって、この変更は妥当である。また、単一光子源、バンド構造検証、スピントランジスタはほぼ達成し、量子演算、1光子 1電子量子非破壊変換、スピン検出は未だであるが、要素技術としてはかなり実現されていると考えられる。当該グループは、本プロジェクトで整備された研究資産を活用し、今後さらにこの分野の研究に邁進し成果を上げて貰いたい。

4 - 2 . 成果の戦略目標・科学技術への貢献

1) 得られた研究成果の科学的・技術的インパクト

単一光子光源の可能性を与えた。スピントランジスタをほぼ実現した。核磁場を用いた光 - スピン間の量子ビット変換手法を提案しその高い実現性を与えた、など。これらは世界で初の成果である。特に、核磁場の方式については、世界で自己集合量子ドットを用いた研究の流れを作ったことはかなり大きなインパクトである。また、励起子における核スピン反転や円偏光との結合など、丁寧な実験によって新しい現象を見いだしている。

これらの成果は、それぞれに今後発展が期待できる。具体的には、単一光子源は量子暗号通信に、スピントランジスタは non-volatile 素子として、量子ドットのバンド構造解明は、スピン系のコヒーレンス時間の増長に、それぞれインパクトを与えるであろう。

テーマ領域は挑戦的であるが、実証可能な範囲を探索しながら要素技術を研究し困難さを明確化したといえる。

2) 国内外の類似研究成果と比較した、研究成果のレベルと重要度

InAlAs を用いて量子情報処理に向けた一連の研究で、かなり多くの要素技術を開発した。中でも核磁場を用いた研究の先鞭を付けたことは高い成果である。また、国際会議での招待講演を少なからず受けている。特に、世界的に見て優れているのは、量子ビット変換用バンド構造の実現であろう。

しかしながら、量子情報処理の研究自体は世界でも数多く、他の成果は、他と比較して同等レベルである。

3) 研究成果のさらなる展開

今まで開発してきた成果を更に固めて、要素技術を確定するとともに、未だ可能性が見えていない量子演算を実現すること、そして、総合的に全体の技術をまとめて量子中継器を実現して見せることなどが今後期待される。また、個々の要素技術の成果は、独立して考えたときには、それぞれ展開が期待できる。

しかし、要素技術をまとめたの実現には、各要素技術の実現性に対する細かな詰めのデータ集積とプロセス技術の開発が必要であり、工学として磨き上げることが重要で、未だ多くの手間と時間がかかるものと思われる。

4 - 3 . その他の特記事項(受賞歴など)

1)総合的評価

当初目標である量子中継器は実現できなかったが、それは目標自体が高すぎたと言え、目標をその要素技術開発と置き換えたことは妥当である。要素技術の研究という目で見れば、単光子光源、核磁場を用いた量子ビット変換手法、円偏光度が 73%保存される世界最高レベルの量子ドットの作成、スピントランジスタの作成など、世界でも優れた成果を挙げている。