

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 単一光子から単一電子スピンへの量子メディア変換

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

小坂 英男 (東北大学電気通信研究所 准教授)

主たる共同研究者

大野圭司 ((独)理化学研究所河野低温物理研究室 専任研究員)

高河原俊秀 (京都工芸繊維大学工芸学部 教授)

今村裕志 (産業技術総合研究所ナノテクノロジー研究部門 主任研究員)

3. 研究実施概要

本研究の目的は、量子通信に適した光子キュービットから量子演算に適した電子スピנקュービットへの量子メディア変換の実現である。この最終目的に向け、本プロジェクトでは、光の偏光重ね合わせ状態から半導体中の電子のスピン重ね合わせ状態への転写(書き込み)を、集団(アンサンブル)に対してではあるが、世界で始めて実験的に示した。またこれとは逆に、光による電子スピン重ね合わせ状態のトモグラフィー測定(読み出し)の原理を考案、実証し、理論的にもその妥当性を証明した。これらの光子集団と電子スピン集団に対する結果は、単一電子スピンから単一光子への量子状態転写、あるいは単一光子と単一電子スピンのもつれ生成が原理的には可能であることを示唆する。さらに、量子状態転写の条件を満たす量子メディア変換デバイスを作製し、この素子を用いて、単一光子から単一電子への変換の非破壊検出、二つの電子スピン間の量子相関検出、単一電子スピンの電氣的なコヒーレント操作を実現した。これら一連のデバイス技術開発を更に発展させることにより、将来は、スケーラブルなスピン量子プロセッサの要素となる初期化、メモリー、操作、読み出しを実現し、量子中継ノードとなることが期待される。

このような量子中継ノードを構成する量子プロセッサの実現は、量子通信と量子計算の両方を含む量子情報処理技術のスケール拡大に大きく貢献する。量子通信においては、量子中継によって通信距離を光子が到達しえない距離にまで拡大することができる。量子計算においては、量子転送による分散処理化によって、集中型では不可能な大規模集積化を実現することができる。

本研究チームは、量子情報の実用化に不可欠な光電量子メディア変換を実現する原理を生み出すとともに、多岐にわたる分野の融合が必要なデバイス化技術の育成に努めた。本研究成果の達成には、ナノテクノロジー、スピントロニクス、量子光学の三領域にまたがる技術的・学術的要素が必要であり、これらを融合したナノスピントロニクス量子情報と呼ぶ新領域の開拓に貢献した。

本チームは東北大の小坂と理研の大野が実験を担当し、産総研の今村と京都工繊大の高河原が理論を担当した。理論グループと実験グループがそれぞれの独自性を発揮しつつも、一つの目的に向けて緊密に連携して研究を遂行した結果、挑戦的な課題を比較的シンプルな実験に還元し、基本原理の実証に成功することができた。また、途中年度より今村グループのポスドク研究員であった力武を独立した研究グループリーダーとし、小坂グループの学生の稲垣を JST リサーチアシスタントとするなど、若手研究者や学生の育成にも努めた。

4. 事後評価結果

4-1. 研究の達成状況及び得られた研究成果(論文・口頭発表等の外部発表、特許の取得状況等を含む)

本研究テーマは、当初単一光子と単一電子スピン間の量子状態転写を実現し、これにより量子中継技術の中核要素を確立することを目指した。これには、新原理の実験的実証のみならず、新デバイス技術の開拓も必要となるため、5年間の研究目標としては達成が不可能と思われた。このような状況に鑑み、領域総括は、光子集団と電子スピン集団を用いるアンサンブル実験へ戦略を切り変えることを提案し、研究代表者もこれに同意した。

今回、アンサンブル実験ながら、光子の偏光重ね合わせ状態から、電子のスピン重ね合わせ状態への転写(書き込み)の原理が実験的に確認できたのは大きな前進である。この成果は *Physical Review Letters* 誌に掲載された。また、これとは逆に電子スピンの重ね合わせ状態を光子によりトモグラフィー測定(読み出し)する

原理についても実験的な確認ができた。この成果は Nature 誌に掲載された。

一方、単一量子の制御を目指すデバイス技術開発においても着実な進展があった。InAs 量子ドットによる単一光子の吸収と非破壊検出、二重量子ドットにおける電子スピンの  $g$  因子の制御と量子相関検出、単一電子スピンの電气的コヒーレント操作、などである。

更に、理論面では、2電子スピンのエンタングル状態の光を用いた測定法の提案、電子スピンと核スピンのハイパーファイン結合による特有のデコヒーレンス機構の解明、などユニークな成果が得られている。

外部発表は、国際的に高く評価されている論文誌を中心に 42 件の論文を刊行し、国際会議での招待講演は 19 件、報道発表も 13 件と多い。特許出願はないが、研究が原理実証という基礎的なレベルにあることから相応と考えられる。本研究チームは、地域的にも離れた5つの研究機関が実験と理論の両面にまたがり有効な連携協力を実現し、優れた成果を上げた。特に、理論チームは実験に則した形で研究が進められ、結果として優れた新原理が提案されている。

#### 4-2. 研究成果の科学技術や社会へのインパクト、戦略目標への貢献

アンサンブルながら光子-電子スピン間の量子状態転写の原理確認に成功したことは、本研究の目的に沿った大きな成果である。デバイス技術に関しても、新原理の理論的探索についても、将来性の高い成果が得られている。これを上手く組み合わせ、量子情報転写の原理を、アンサンブル実験から単一量子ビットの実験へと展開できれば、本領域の戦略目標の一つである量子中継、量子テレポーテーションへ貢献するものと期待される。

#### 4-3. 総合的評価

当初目標としていた、単一量子ビットの光子-電子スピン量子状態転写は極めてハードルの高いもので、今回のアンサンブル実験はそれへ向けての重要な一歩(原理の確認)と位置付けられる。今回の CREST 研究の目標は十二分に達成したと評価できる。今後、単一量子ビットの実験へ移行する足がかりとなるデバイス技術の開発、種々の新原理の提案も、本プロジェクトから出てきており、将来が期待される。5つの研究グループをまとめた研究代表者のリーダーシップは十分に発揮され、それを支えた研究室の長の支援も見逃せない。

ただ、単一量子ビットの実験に成功するためには、“単一光子波動関数を単一電子スピン系に高い成功確率でどう捕獲するのか”という大問題が解決されなければならない。競合する量子中継方式である、光子のポストセレクションによる方法は、この大問題を回避できるために現在、世界の潮流となっている。この世界的な流れを変えるような単一光子捕獲のアイデアが出現し、単一光子の量子状態が単一電子スピンの量子状態に転写されたときに、世界的なブレイクスルーとの評価が得られるものと思う。