

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域
「量子情報処理システムの実現を目指した新技術の創出」
研究課題
「単一光子から単一電子スピンへの
量子メディア変換」

研究終了報告書

研究期間 平成16年10月～平成22年3月

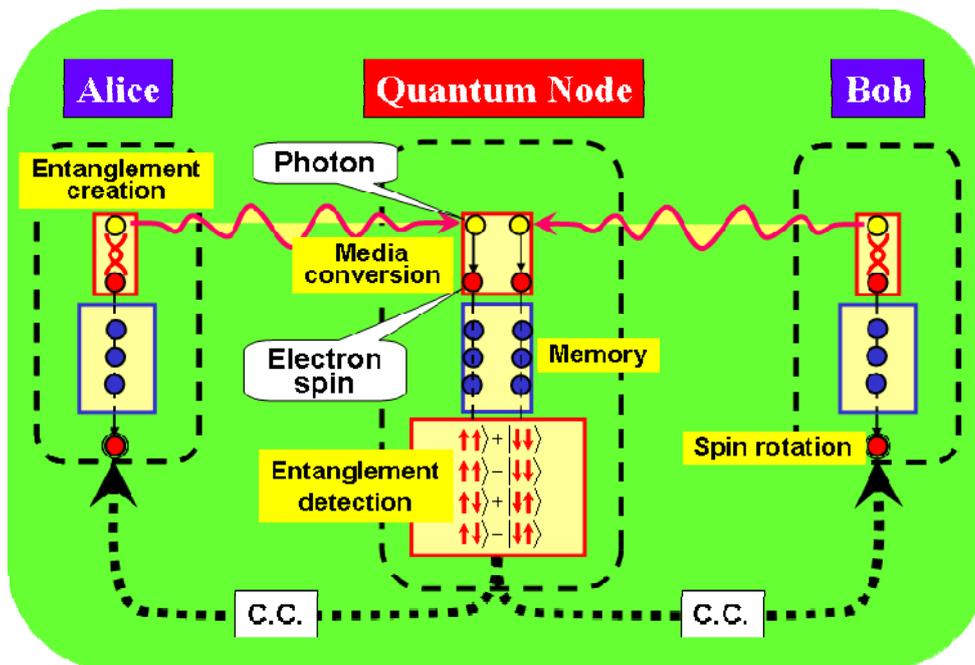
研究代表者：小坂 英男
(東北大学 電気通信研究所、准教授)

§ 1 研究実施の概要

本研究の目的は、通信に強い光子キュービットから演算に強い電子スピンキュービットへの量子メディア変換の実現である。この目的に向け、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、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。この結果は、電子スピンから光への量子状態転写、あるいは光子と電子スピンのもつれ生成が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証した。これら一連の機能は、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、読み出しに対応し、図1に示す量子中継ノードの構成要素となる。

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のブレークスルー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ノフォニクス量子情報と呼ぶ新領域の開拓に貢献した。



本チームは東北大学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、提案時は不可能と言われた挑戦的な課題を克服し、インパクトの高い研究成果をあげることができた。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。

各チームの主要成果を以下にまとめる。

小坂グループ：光子から電子スピンへの量子メディア変換の研究

代表者グループとして主課題に取り組んだ。主な成果は、光から電子スピンへの量子メディア変換の原理実証である。この原理を応用した光による電子スピン状態トモグラフィは、世界中で大きな反響があった。光と電子の量子コヒーレンスが相互に交換可能であることを示唆している。これらを組み合わせた実験により、光から電子スピンへの転写の忠実度を評価し、良好な結果を得た。さらに、単一光子から単一電子への量子状態転写の条件を満たした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の検出、単一電子スピンの電氣的なコヒーレント操作を実証した。これら一連の実験により、スケーラブルなスピン量子プロセッサの要素機能である、初期化、メモリー、操作、読み出しを全て原理実証した。

大野グループ：縦型量子ドット素子におけるスピン相関と光応答の研究

量子ナノ構造の低温輸送特性研究、とりわけ量子ドット素子におけるスピン自由度が関わる現象の研究に従事してきた経験と技術を生かし、小坂グループの“電子ドット”研究部門と協力して光子-電子スピン量子メディア変換のための素子の開発と評価を行った。特に g 因子のドットごとの制御が可能な縦型 2 重ドットにおける間接励起子吸収の電氣的観測に成功したことは、量子メディア変換素子の自由度拡張を可能とする意味で重要である。また、自己形成 InAs ドット内容縦型ドットにおける光伝導、ゼロ g 因子量子ドットでのスピンプロケード、異種 g 因子 2 重ドットでのスピンプロケードの観測に世界で始めて成功するなど、独自性の高い研究テーマで量子情報技術のデバイス化に必要な要素技術を育成した。

今村・力武グループ：光子電子スピン量子相関ダイナミクスの理論

小坂グループと密接に協力し、本研究の課題である”光子から電子スピンへの量子メディア変換”の原理実証実験を理論的に支援すべく、量子状態転写の効率と忠実度を最適化する素子構造の設計、量子状態転写が可能な電子と正孔の g 因子を持つ量子井戸構造の設計、この条件を満たしながら正孔の引き抜き速度を調節可能な素子構造の設計を行った。また、電子スピン状態トモグラフィ、二電子スピン位相の電氣的読み出し、 g 因子制御による完全ベル状態測定など、量子中継の基本機能を実現する上で重要な理論構築において格段の貢献があった。

高河原グループ：光・電子・核スピン量子素過程の理論

スピン緩和の基礎物理に関する経験を活かし、スピン緩和機構の量子メディア変換に対する影響を詳細に理論検討した。また、二電子スピンの光による量子相関測定の提案、電子・核スピン結合系の量子ダイナミクスなど一歩先を見た先見的研究において大きな貢献があった。さらに、IV 族、II-VI 族半導体中の少数電子、単一原子核スピン結合系を用いた量子メモリー、二電子スピンの STIRAP によるユニタリ回転など、量子中継の実用化に不可欠な室温化、長時間メモリー化につながる理論検討を行った。

§ 2 研究計画に対する成果

(1) 当初の研究構想

本研究は、半導体ナノテクノロジー、スピントロニクス、量子光学を基礎とする”ナノスピノフォトニクス量子情報”という新分野を開拓し、光キュービットから電子スピンキュービットへのメディア変換とエンタングルメント転写の実現を目指すものである。キュービットとして数多くの提案があるが、各々長短あり適材適所の利用が望まれる。本研究では伝送に適した光子と他のキュービットとの橋渡しとなる電子スピンとの変換の実現を目標とした。具体的には、電子スピンを自在に操る g 因子エンジニアリング、デコヒーレンスの主因となる正孔の電子からの速やかな分離法、零次元単一電子スピンの緩和時間測定、単一電子スピン共鳴、電子スピン間のエンタングルメント検出など世界に例のない技術確立し、実用的な素子構造の提案、作製、評価を通して目標を達成する方針を進めた。5年間の研究計画としては、下記表1に示した線表に従い、前半で電子スピン物性の評価と量子メディア変換素子作製、後半でスピンコヒーレンス転写の実証と量子相関の検出、単一電子スピン操作の実証を行い、最終的に量子中継に必要な全ての基本機能実現に目処を立てることを立案した。本研究により、量子通信を飛躍的に長距離化する量子中継器や並列量子コンピュータ間の光量子インターフェース実現に貢献することが期待される。

表1. 本プロジェクト提案時に提示した研究線表

項目	H16年度 (2004)	H17年度 (2005)	H18年度 (2006)	H19年度 (2007)	H20年度 (2008)	H21年度 (2009)
準備	電子スピン物性評価	g因子理論 		g因子制御カー回転 		
	スピンコヒーレンス実証	←			スピン状態転写 (PRL) 	スピントモグラフィ (Nature) 
主課題	素子作製	←		単電子検出 	単光子検出 	
	量子相関検出			←	スピンプロケード 	基底変換 
	単一スピン操作	←	←		スピン共鳴 	ラビ振動 
挑戦課題	スピンエンタングルメント実証		←		2電子スピン相関 光学的測定理論 	
	量子中継基本機能素子		←	核スピン結合ダイナミクス理論 	←	タイムピン転写理論  完全ベル測定理論 

 提案時計画
  追加延長
  成果
  実証
  達成

(2)新たに追加・修正など変更した研究構想

概ね上記計画通り 5 年間研究が進展し、当初立案した研究計画から大きな変更はない。ただし、実験を進める中で素子材料に関する見直しを行った。また、電子スピン状態の光トモグラフィ測定に関して期待していなかった新たな展開があった。

1) 材料系の適応： 素子材料系として提案当初は、通信帯の波長特性を持つ InGaAs/InP を量子井戸層とする長波系材料を想定していたが、より結晶性が良く転写効率が高い GaAs/AlAs を量子井戸とする短波系材料へと移行した。これが可能となった背景には、提案当初にはなかった波長変換による光子間量子情報インターフェースの研究 (Nature 437, 116-120 (2005)) が現実味を帯びてきたことがある。その後、通信帯光子 (1.55 μm) から GaAs 帯光子 (0.8 μm) への単一光子波長変換も可能となり、受光後再度発光を必要としない我々の中継システムの提案では、素子波長を通信帯に合わせる必然性はなくなった。特に、通信帯の約半分の波長に変換することは技術的にも都合が良く、波長が小さいことは量子ドットの微小領域に光注入する際にも有利である。また、波長変換を介在させることにより、通信容量の飛躍的拡大が図れる波長多重 (WDM) 量子通信に容易に対応することができ、これら意味において本材料系は長波系材料より有利であると判断した。

2) 電子スピン状態のトモグラフィ測定： 当所予想しなかった成果として、電子スピンの状態トモグラフィ測定がある。従来の光カー (あるいはファラデー) 回転測定では、スピンの一方向への射影測定しかできなかったが、我々は任意方向への射影を実験的 (小坂グループ) 及び理論的 (今村グループ) に初めて示した。これは、任意状態への転写と射影が本質的に同一であることの帰結である。これにより、量子状態転写の忠実度が定量的に評価できるだけでなく、量子スピントロニクスや量子スピンコンピュータなどスピンの量子性を利用した様々な分野への波及効果が期待される。また、これまで固体中ではスピンの純粋状態しか議論されてこなかったが、原子系あるいは光子系で行われているスピンスクイズなどの非古典状態の生成と観測が固体中でも可能となり、量子情報の新たな展開が期待される。

§3 研究実施体制

(○：研究代表者または主たる共同研究者)

(1) 小坂グループ

① 研究参加者

	氏名	所属	役職	参加時期
○	小坂英男	東北大学	准教授	H16.10～H22.3
	三森康義	東北大学	助教	H16.10～H22.3
	久津輪武史	東北大学	CREST 研究員	H17.4～H22.3
	新井宏一郎	東北大学	CREST 研究員 (H19 離脱)	H18.4～H19.2
	桑原真人	東北大学	CREST 研究員 (H21 離脱)	H19.4～H21.3
	執行英樹	東北大学	M2 (H19 離脱)	H16.10～H19.3
	金城英人	東北大学	M2 (H19 離脱)	H17.4～H19.3
	今野貴支	東北大学	M2 (H20 離脱)	H18.4～H20.3
	上野若菜	東北大学	D3 (H21 離脱)	H18.4～H21.3
	稲垣卓弘	東北大学	D1 (JST-RA)	H19.4～H22.3
	上平健太郎	東北大学	M1 (H21 離脱)	H20.4～H21.3
	人見隆太	東北大学	M2	H21.4～H22.3
	馬場いづみ	東北大学	事務員	H18.4～H22.3

② 研究項目 光子から電子スピンへの量子メディア変換の研究

- ・光子から電子スピンへの状態転写とトモグラフィ測定
- ・単一光子により生成された単一電子の検出
- ・電子スピンの量子相関検出
- ・単一電子スピンのコヒーレント操作

(2) 大野グループ

① 研究参加者

	氏名	所属	役職	参加時期
○	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	H16.10～H22.3
	黄旭明	台湾交通大学	アジア連携大学 院生 (H19 離脱)	H19.4～H19.10
	黄日華	東京工業大学	研修生 (H19 離脱)	H17.10～H19.3
	豊川聖子	東京理科大学	研修生 (H18 離脱)	H17.10～H18.3
	高橋宏輔	東京工業大学	研修生 (H20 離脱)	H19.4～H20.3
	伊藤雅浩	東京理科大学	研修生	H19.4～H22.3
	高橋諒	東京工業大学	研修生	H19.4～H22.3
	Sun Yu-chan	台湾交通大学	アジア連携大学 院生	H20.10～H22.3

② 研究項目 縦型量子ドット素子におけるスピン相関と光応答の研究

- ・InGaAs/InP 量子井戸素子による通信波長帯光伝導
- ・GaAs/AlGaAs 系縦型 2 重ドットにおける間接励起子吸収、および単一光子吸収の観測
- ・自己形成 InAs ドット内容縦型ドットにおける光伝導の研究
- ・ゼロ g 因子量子ドット及び異種 g 因子 2 重量子ドットにおけるスピンプロックードの観

測

(3) 今村グループ

①研究参加者

	氏名	所属	役職	参加時期
○	今村裕志	産業技術総合研究所	主任研究員	H16.10~H22.3
	力武克彰	産業技術総合研究所	CREST 研究員	H16.10~ H20.3 (H20.4より力武グループとして独立)
	余越伸彦	産業技術総合研究所	CREST 研究員	H20.3~H22.3
	谷口知大	筑波大学	D2	H20.04~H22.3
	大鳥博之	筑波大学	M2	H20.04~H22.3

②研究項目 光子電子スピン量子相関ダイナミクスの理論

- ・量子状態転写における正孔引き抜き過程の理論解析
- ・量子状態転写に用いる半導体量子ドットの g 因子解析
- ・量子状態転写における転写効率と忠実度の理論解析、および最適パラメータの探索
- ・光学応答による電子スピン状態トモグラフィについての理論解析
- ・2電子スピン量子状態の電氣的測定手法の理論提案
- ・異なる g 因子を持つ2重量子ドットを用いた量子情報処理デバイスの理論提案

(4) 力武グループ

①研究参加者

	氏名	所属	役職	参加時期
○	力武克彰	仙台高等専門学校	助教	H20.4~H22.3

②研究項目

- ・光学応答による電子スピン状態トモグラフィについての理論解析
- ・タイムビンを用いた量子状態転写についての理論提案と解析

(5) 高河原グループ

①研究参加者

	氏名	所属	役職	参加時期
○	高河原俊秀	京都工芸繊維大学	教授	H16.10~H22.3
	Ozgur Cakir	京都工芸繊維大学	CREST 研究員 (H21 離脱)	H17.10~H21.9
	横岩良太	京都工芸繊維大学	D3	H17.4~H22.3
	岡本和浩	京都工芸繊維大学	M2	H17.4~H22.3

②研究項目 光・電子・核スピン量子素過程の理論

- ・ゲート制御量子ドットを用いた量子状態転写実験における励起子生成、正孔解離のダイナミクスに関する理論検討
- ・電子スピンの縦緩和、デコヒーレンス時間の理論的極限の検討
- ・カー（ファラデー）回転に基づく二電子の量子相関測定に関する理論検討
- ・誘導ラマン過程による二電子のスピン状態操作の理論検討
- ・電子・核スピン結合系の量子ダイナミクスの理論検討
- ・IV 族、II-VI 族半導体における少数電子・単一原子核スピン結合系からなる量子メモリの理論検討

§ 4 研究実施内容及び成果

4.1 光子から電子スピンへの量子メディア変換の研究（東北大学 小坂グループ）

(1) 研究実施内容及び成果

① 研究のねらい

本グループの使命は、本研究の課題である“光子から電子スピンへの量子メディア変換”を含む量子中継器を構成する要素機能の原理実証である。この要素機能とは、量子状態転写、単一電子検出、量子相関検出、単一電子スピン操作の4段階であり、表1に示した研究計画の主課題の部分に対応する。以下各段階について概要を説明する。

第一段階は量子状態転写である。光子は電子と正孔の対を生成するが、光子の量子状態を電子のみに転写するためには、電子の横磁場によるゼーマン分裂（g因子）はゼロでなければならない。一方、排除すべき正孔は一つの固有状態に定める必要があり、横磁場分裂が可能な軽い正孔の一つの固有状態を選択的に励起しなければならない。**第二段階**は単一光子によって生成された単一電子の**非破壊検出**である。量子メディア変換が完了したことを通知するこの機能により、量子中継器のスケラビリティが保証される。このとき電子のスピン量子状態を破壊せず電荷数のみを正確に読み出す必要がある。この機能は量子ドットに隣接して、単一電荷計を配置する素子作製により可能となる。**第三段階**は電子スピンの**量子相関検出**である。光子から転写された電子スピン間の量子相関を検出することで実効的に光子間の量子相関を測定することができ、量子中継の基本原理解である量子もつれの拡張を行うことができる。この量子相関検出はパウリの排他律に基づくスピンプロックードの応用で可能となり、量子中継などの応用につながる。**第四段階**は**単一電子スピン操作**である。パウリの排他律では、ベルの4基底のうち一重項状態に対応する1基底しか識別できない。これでは量子中継の効率が非常に低くなり現実的ではない。4基底全てを利用するためには、単一電子スピンのコヒーレント操作が不可欠となる。これによりベル基底の変換が可能となり、4状態全てが量子中継できる。

② 研究実施方法

第一段階の量子状態転写には量子井戸を用い、偏光の位相情報（コヒーレンス）が電子スピンの位相情報（コヒーレンス）へと一対一に対応付けられることを示せば良い（図1-1a）。これは**軽い正孔励起子**の利用と電子及び正孔のg因子制御が可能となる（図1-1b）。**第二段階**の電子検出は、上記同様の量子井戸上に形成した単一の電子ドットとその近傍に形成した**量子ポイントコンタクト**を用いて実証できる。このとき正孔は負に印加したゲート電極直下に引き寄せられる。量子ポイントコンタクトは一点で狭窄された2次元電子ガスであり、その伝導度は近傍にある量子ドットの電荷数に敏感に依存する単一電荷検出器となる。**第三段階**の量子相関検出は、電子間交換相互作用の大きな結合二重量子ドットを用いて実証できる。最初に生成された電子と

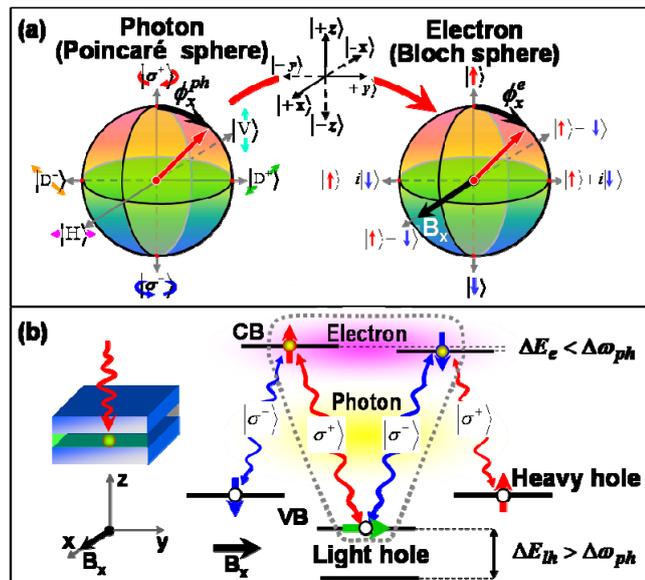


図 1-1. 光子から電子スピンへの量子状態転写の仕組み (a) と転写に必要なバンド構造の条件 (b)。

次に生成された電子のパウリ反発（スピントロッキング）により、2光子偏光相関を電子スピンの一重項あるいは三重項として分別するものである。第四段階の単一電子スピン操作は、量子ドット内の電子のスピントラッキング相互作用を利用したゲート操作によるのみ可能となる。電子のg因子はゼロであるため、通常のマイクロ波を用いたスピン共鳴の技術は利用できない。以上4段階の実証により、量子中継の要素機能実証が完結する。

③研究成果

上記各段階は以下に挙げる本グループの研究項目にそのまま対応する。

- ・ 第一段階 → 光子から電子スピンへの状態転写とトモグラフィ測定
- ・ 第二段階 → 単一光子により生成された単一電子の検出
- ・ 第三段階 → 電子スピンの量子相関検出
- ・ 第四段階 → 単一電子スピンのコヒーレント操作

これらの研究成果について以下順に説明する。

③-1 量子状態転写（第一段階）

量子メディア変換の基本機能である量子状態転写の実証について説明する。量子状態転写とは、光子の偏光状態を示すポアンカレ球上のストークスベクトルから電子スピンの偏極状態を示すブロッホ球上のブロッホベクトルへのユニタリ変換（一対一写像）である（図1-1a）。光のスピンは1であるが、真空中の光は縦波成分 ($S_z = 0$) を持たず、横波成分の $S_z = 1, -1$ だけが許されるため、光子の偏光状態は電子スピンと同様に二値の固有関数で記述できる。したがって、いずれも $SU(2)$ と呼ぶ等価なヒルベルト空間となり、ユニタリ変換が可能である。この量子状態転写の条件は、エネルギー保存則と角運動量（位相）保存則である。エネルギー保存則から、磁場を印加してもゼーマン分裂しないよう電子のg因子はゼロでなければならない。このため、正負のg因子を持つ材料で構成されたGaAs/AlGaAs量子井戸（図1-2a）の井戸厚を調整し、g因子を通常より小さく設計した（図1-2b）。この量子井戸の面内方向に

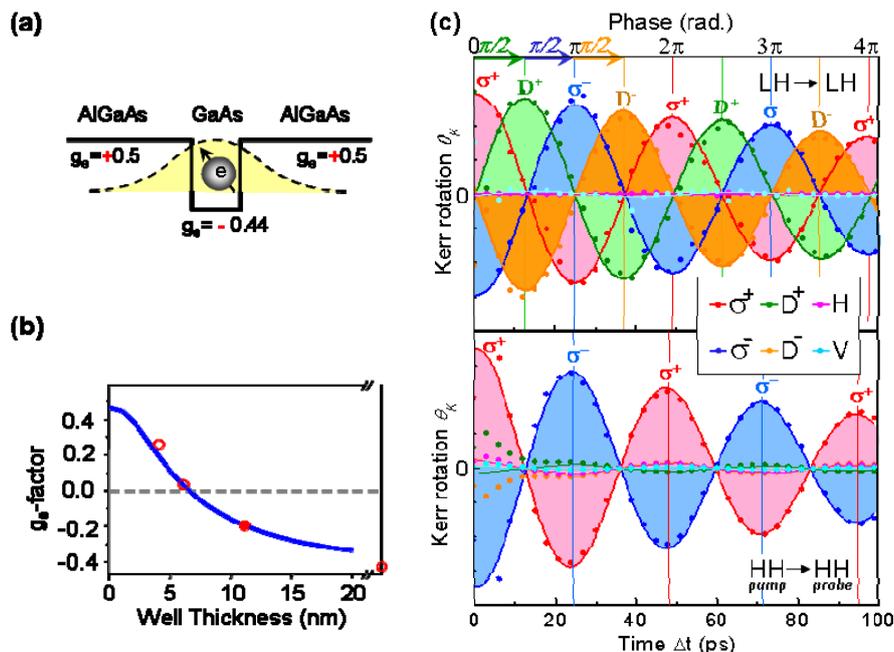


図1-2. (a)量子井戸構造 (b) g 因子の井戸厚依存性 (c) 量子状態転写の実証をするための時間分解カー回転の実験結果。上段はポンプ、プローブともに軽い正孔励起子を生成する波長の場合。下段はともに重い正孔励起子を生成する波長の場合。直線偏光 (D+, D-) に大きな違いが生じる。

磁場を印加し、光子のエネルギー幅よりも十分に大きなゼーマン分裂をさせた軽い正孔の片方の準位のみを光学励起した。これにより、縮退した電子スピンと軽い正孔との間に V 型の遷移が形成される (図 1-1b)。正孔スピンは偏光によらず決まった状態にあるが、電子スピンは偏光に依存して変化するため、偏光状態の位相は電子スピンの位相のみに転写される。

通常のカー回転測定では基板に垂直なスピン成分しか測定することができないが、電子の g 因子をエネルギー保存を大きくは破らない程度にゼロからずらすことにより、転写された電子スピンの歳差運動し、その初期位相から転写直後のスピン位相を測定することができる。

図 1-2c にスピン状態転写の実験結果を示す。軽い正孔の励起子を励起した場合 (図 1-2c 上図) には、円偏光励起、直線偏光励起に対する測定結果が共にほぼ同じ振幅の振動構造を示す。右回り (σ^+) 左回り (σ^-) 円偏光励起では最大値あるいは最小値から始まる周期振動を示し、生成された電子スピンの初期状態では上向きあるいは下向きであったことが分かる。一方、ポアンカレ球上で $\pm y$ 方向を向いていた直線偏光 (D^+/D^-) 励起では、右/左回り円偏光励起の場合より $\pi/2$ だけ位相シフトしており、生成された電子スピンのブロッホ球上で $\pm y$ 方向を向いていたことを示唆する。一方、H や V 偏光では磁場に平行な方向に電子スピンの生成されスピンの歳差運動しないため、正孔のコヒーレンスが多少残っている初期の時間領域を除き信号はほとんど観測されない。つまり、偏光の位相が電子スピンの位相に忠実に転写されていることを示している。

これに対し、重い正孔の励起子を励起した場合 (図 1-2c 下図) には、円偏光励起のときのみ振動構造を示し、直線偏光励起のときには振動構造が現れない。この場合、正孔は横磁場分裂しないため、電子スピンは正孔スピンともつれ合った状態として生成される。そのため、転写はコヒーレンスを保存しない不完全なものとなる。これは、従来から行われてきた左右回り円偏光 (σ^+ , σ^-) から左右回り電子スピン (\uparrow , \downarrow) への射影的な転写であり、各基底状態の占有率 (ポピュレーション) のみを保存する古典的な転写である。

本実験は、光子の偏光量子状態が電子のスピン量子状態へと一対一に転写できることを示唆している。固体系で量子状態転写を示したのは本実験が初めてであり、Physical Review Letters に掲載された。本成果の詳細については以下を参照されたい。

- [1] Hideo Kosaka, Hideki Shigyou, Yasuyoshi Mitsumori, Yoshiaki Rikitake, Hiroshi Imamura, Takeshi Kutsuwa, Koichiro Arai and Keiichi Edamatsu, "Coherent transfer of light polarization to electron spins in a semiconductor", *Physical Review Letters*, **100**, 096602 (2008).
- [2] 小坂英男、「光から電子スピンへの量子コヒーレンス転写」、*固体物理* vol. 43, no. 8 トピックス, pp. 489-497 (2008) .
- [3] 小坂英男、「光子と電子スピンの量子情報交換」、*日本物理学会誌 BUTURI 解説*, vol. 65, no. 10, pp. 2-9 (2009).

③-1a タイムビン量子状態転写 (第一段階追加成果)

現状では軽い正孔励起子の選択励起に限るという転写条件を格段に緩和し、離散準位を持つ一般的な電子系に適用できる新たな量子状態転写の原理を理論グループと協力して考案した。この転写手法では、実際の量子情報通信に用いられるタイムビン (Time-bin) 量子情報を直接電子スピンの量子情報に変換できる。本手法では、これまでの転写に必要なであった V 型遷移のような特殊性を材料に要求しない。このような転写ルールの一般化により、材料選定・デバイス設計の自由度を格段に緩和するとともに、将来の室温動作化・長寿命化・高信頼化への指針を得た。実際に GaAs 量子井戸を用いた実験を行い、基本特性の実証に成功した。原理の詳細は今村グループの③-7 を参照されたい。

③-1b スピン状態トモグラフィ (第一段階追加成果)

上記の転写実験では転写の忠実度について正確な議論ができない。これは従来のカー回転測定などの光学的なスピン状態計測では、電子と正孔のもつれ合った状態を仮想励起するために、スピンの量子化軸（ここでは量子井戸に垂直な方向）に対して上向きか下向きかという区別しかできないためである (図 1-3a)。これでは量子状態として特徴的な上下スピンの重ね合わせ状態である横向きスピンを直接計測することができない。我々は、カー回転測定に量子状態転写の手法を応用することにより、この横向きのスピンを直接計測し、電子スピンの状態トモグラフィ観察を可能とする“トモグラフィックカー回転測定”の手法を世界で初めて開発した。スピンの量子コヒーレンスを直接計測することは、これまで光学的にも電氣的にも不可能であった。本手法を用い光から状態転写された電子スピンのコヒーレンスを測定し、光の偏光コヒーレンスと電子のスピンコヒーレンスが一対一に対応することを初めて明らかにし、転写の忠実度を評価した。

トモグラフィックカー回転 (TKR) では、光から電子スピンへの状態転写と同様に、横磁場中の軽い正孔励起子を利用した V 型の三準位構造を利用する。正孔の状態が常に既知であるため、電子だけの重ね合わせ状態を仮想励起することができ、任意の方向への射影測定が可能である (図 1-3b)。電子のスピン状態 J はプローブ光 P の反射 (散乱) 光 S の偏光状態に反映されるが、この反射光の偏光を射影基底 M における変化分として抽出することにより、電子スピンの状態を測定できる。この際、散乱光 S のプローブ光 P から射影基底 M 方向への回転角 θ_K が、電子スピン J の P と M に直交する基底 (基底直交であって状態直交ではないので注意) における成分に比例する。TKR で任意の方向へのスピン射影が可能となるのは、プローブ光の電子スピンへの転写が基底に依存しないためである。従来のカー回転の場合には円偏光しか電子スピンに転写できないため、右回りと左回り円偏光の位相変化として電子スピンの σ_z 成分を測定するしかなかった。つまり、転写が古典的であるため、スピン測定も古典的なものに留まる。量子性を特徴付ける σ_x , σ_y 成分は、電子と正孔の量子もつれのために打ち消されてしまう。

相互作用ハミルトニアンで説明すると、 $S_1 \cdot S_2 = S_1^x S_2^x + S_1^y S_2^y + S_1^z S_2^z$ で表せるハイゼンベルグ模型の交換相互作用から、上下スピンのポピュレーション (占有率差) に対応する $S_1^z S_2^z$ だけのイジング模型に次元落ちしたのが従来のカー回転であり、コヒーレンス (位相差) に対応する $S_1^x S_2^x + S_1^y S_2^y = S_1^- S_2^+ + S_1^+ S_2^-$ が簡約されず残るのが TKR である。ここ

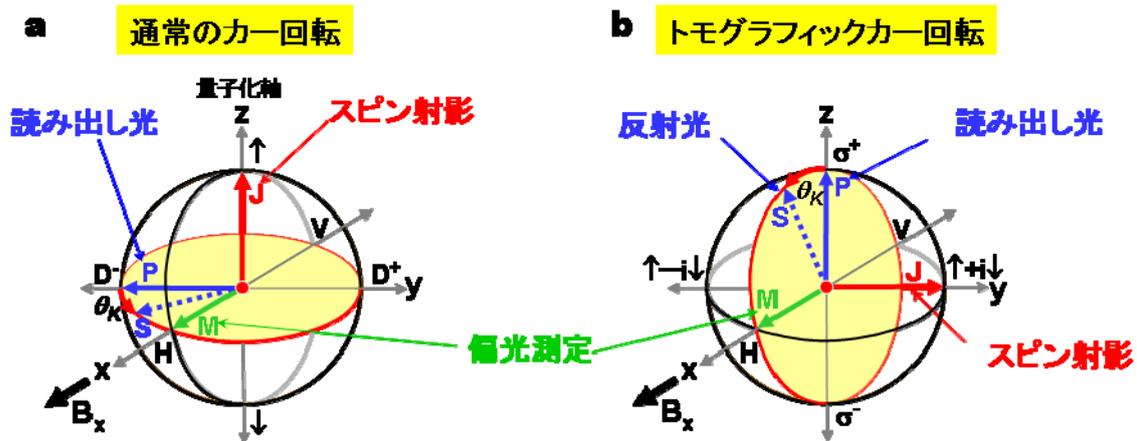


図 1-3. ポアンカレブロッホ球を用いたカー回転測定の説明。(a) 従来のカー回転測定。スピン射影の方向 J は z 方向に限られる。(b) 新たに開発したトモグラフィックカー回転測定。任意の方向 J に射影測定できる。 P はプローブ光の偏光、 S はその散乱 (反射) 光の偏光、 M は偏光の射影基底を、 J は結果的に測定される電子スピンの射影基底をそれぞれ示す。偏光はあたかも電子スピンによってトルク回転を受けたかのように振舞う。

で S_1 は測定対象の実電子の、 S_2 はプローブ光から転写された仮想電子のスピ演算子を示す。

電子の g 因子がゼロではない場合、スピン歳差運動をするが、この場合は z 方向と y 方向への射影測定が出来るために、単なる振動ではなく首振り運動として観察することができる。そのため、各時間の位相を一意的に決定できる(図1-4a)。この図より、電子スピンの初期状態は、注入光の偏光(D^+)と一致する $|+y\rangle_e$ となっていることがわかる。

このTKR測定の結果から、電子スピンの状態密度行列を再構成した。これを入射光の偏光状態密度行列と比較することにより、転写の忠実度は86%と見積もられた。光および電子の密度行列を ρ_{ph} および ρ_e とすると、転写忠実度は $Tr(\sqrt{\rho_{ph}} \cdot \rho_e \cdot \sqrt{\rho_{ph}})$ と表せる。ここで得られた忠実度はコヒーレンスの経時劣化を含み、変換直後の忠実度はさらに高い。ただし、軽い正孔励起子の生成における偏光選択則を100%と仮定しており、忠実度の絶対値評価には別の実験が必要である。

g 因子が極めて小さく歳差運動が観測できない場合(井戸6nm)でも、スピン方向(位相)を決定できることが、本TKR測定の大きな利点である。図1-4bは、ポンプ光の偏光状態をポアンカレ球の $y-z$ 面内で連続的に変化させたときの、生成された電子のスピンのブロッホ球における $y-z$ 面内への射影測定結果である。 ϕ_x^{ph} 、 ϕ_x^e はそれぞれポアンカレ球、ブロッホ球における偏光のストークスベクトルあるいは電子スピンのブロッホベクトルの $y-z$ 面内での z 軸からの傾き角である。例えば斜め 45° 直線偏光の $|D^+\rangle$ は $\cos(\phi_x^{ph}/2)|\sigma^+\rangle + i\sin(\phi_x^{ph}/2)|\sigma^-\rangle$ ($\phi_x^{ph} = \pi/2$)のように表される。このようにして得られた入力と出力の位相相関は、 $\cos(\phi_x^{ph} - \phi_x^e)$ で表される位相ずれのない理想的なユニタリ変換を示している。磁場方向のスピン成分 σ_x がないことも本測定法により確認した。このような凍結した電子スピンは、エネルギーと量子位相の両方を完全に保存して光子から転写することが可能であり、高い転写の忠実度が期待される。本成果はH21年Natureに掲載された。詳細については以下を参照されたい。

- [1] Hideo Kosaka, Takahiro Inagaki, Yoshiaki Rikitake, Hiroshi Imamura, Yasuyoshi Mitsumori and Keiichi Edamatsu, "Spin coherence tomography of optically imprinted electrons in a semiconductor", *Nature*, **457**, 702 (2009).
- [2] 小坂英男, 「光で生成した電子スピンの状態トモグラフィー」、固体物理 トピックス、vol. 44, no. 9, pp. 603-612 (2009).

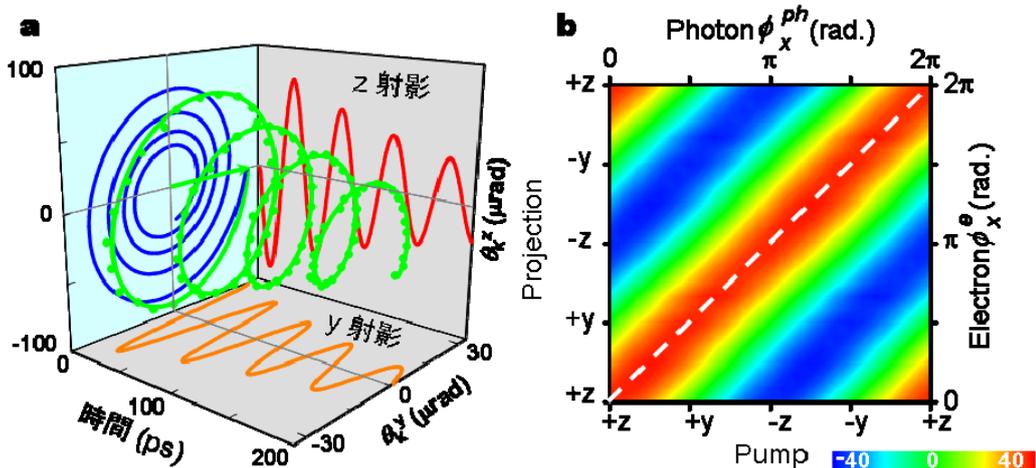


図1-4. 電子スピン状態トモグラフィ測定の実験結果。(a) 歳差運動する電子スピンの状態ベクトル(ブロッホベクトル)の時間変化。通常のカー回転測定でも測定可能な z 射影に加え、トモグラフィックカー回転測定で初めて可能となった y 射影により、ブロッホベクトルが一意的に決定できる。初期状態は書き込み光の偏光(D^+)と一致している。(b) トモグラフィックカー回転測定によって明らかになった、書き込み光の偏光コヒーレンスと生成電子のスピンのコヒーレンスの対応関係。下軸および上軸はそれぞれ偏光のポアンカレ球上での状態と位相角を、左軸と右軸はそれぞれ電子スピンのブロッホ球上での状態と位相角を示す。破線は両位相が一對一に対応することを示す。

③-1c 転写とトモグラフィの組み合わせによる量子メディア変換の実証（第一段階）

量子メディア変換の原理実証で最も重要なことは、量子コヒーレンスの光から電子への変換である。これまでの実験では、ポアンカレブロッホ球における子午線（ $y-z$ 面）の転写を示してきた。最大重ね合わせ状態はポアンカレブロッホ球の赤道面（ $x-y$ 面）で最大となり、この面全体の転写を証明しなければ完全とは言えない。我々は、転写とトモグラフィの両方の技術を合わせ、従来は不可能であった位相空間全体の転写を最終年度に実証した（図 1-5）。 z は量子井戸の面直方向、 x は面内磁場方向である。赤で示した矢印は入射する偏光のストークスベクトルを、青で示した矢印は生成される電子スピンのブロッホベクトルを示す。赤道面が少々回転しているが、これはコヒーレントノイズのために時間ゼロで測定できなかったためである。 g 因子はゼロに設計してあるが、実際には0.02程度と若干の g 因子を持ち、このため測定までの20psで15度程回転したと思われる。

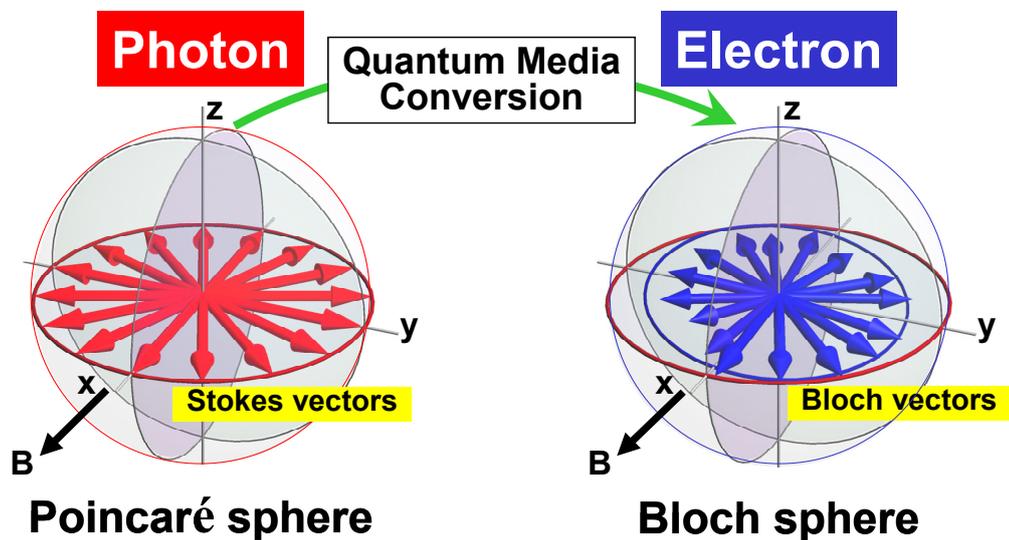


図 1-5. ポアンカレブロッホ球における $x-y$ 面内でのスピン状態転写の実験結果。 g 因子をゼロに設計した井戸厚 6nm の GaAs/AlGaAs 量子井戸を用いてある。実測した g 因子は 0.02 以下である。 z は面直方向を、 x は磁場方向を示す。ブロッホベクトルの長さは最大を 1 に規格化した。

③-2 単一光子生成電子非破壊検出 (第二段階)

電子の g 因子がほぼゼロとなる GaAs 量子井戸上に電界閉じ込め型の量子ドットを形成した量子メディア変換素子 (図 1-6a) を作製し、単一光子から単一電子への変換とその単一電子検出に成功した。このような電界閉じ込め量子ドットでは、単一光子吸収によって生成された電子・正孔対 (励起子) のうち、正孔は自動的に引き抜かれ、電子のみがドットに捕獲される。この捕獲された単一電子を、ドットに隣接した単一電荷計で検出した。本素子は、半導体表面に直径 200nm のゲート開口を有するドットを形成し、その両側に単一電子検出器となる量子ポイントコンタクト (QPC) を形成してある。この QPC でドット中の電子数が確実にゼロとなるゲート条件をまずは探索した。完全に電子を排除したドット内に 1 秒間に数光子レベルの微弱光を照射することにより、QPC 電流の急峻な減少を確認し、単一光子により生成された単一電子の非破壊検出に成功した (図 1-6b)。この現象の励起波長依存性を測定したところ、別に測定した同一構造の量子井戸の発光励起スペクトルの励起子吸収波長と数 meV の精度で一致した (図 1-6c)。波長分解能および S/N 比が十分ではないが、軽い正孔励起子と重い正孔励起子も区別できた。ゲート開口で補正した光電変換の量子効率 2.7% となった (量子井戸の吸収率約 1% を見込んだ場合)。このような高い効率には、ゲート電極によるプラズマアンテナ効果も寄与していると思われる。

上記実験では、多くの試行錯誤の上、以下に示すデバイス構造の改良が行われている。量子メディア変換素子では、量子井戸の g 因子をゼロとするため、通常使われる量子輸送素子の量子井戸層 (20nm) よりも格段に薄い層厚 (6nm) のものを必要とする。このため、量子輸送測定を安定かつ確実にを行うことが困難であった。この問題の解決のため、井戸厚を 15nm とし g 因子がゼロとなるよう井戸の AlGaAs 組成を設計した。さらに、電荷ゆらぎの原因となるキャップ層をゲート電極蒸着直前に除去し、半絶縁性であったエピ基板を n 型ドープとした。このため、特に素子表面にマスキングなどの処理をしなくとも、量子ドット内に注入された光子だけを極めて安定に検出することが可能となった。量子ドットの外に照射される光が信号に与えるノイズ影響は、改良前の素子に比較して 3 桁落ち以下に低減できた。

実際のデバイス応用では、高速かつ完全なデバイス初期化が不可欠である。これにはドット近傍に残された電子及び正孔を完全に排除する必要がある。我々は独自の初期化シーケンスの工夫によりこれを実現し、光注入後の初期化時間をミリ秒以下に短時間化することに成功した。これは装置の応答速度に律速されており、さらの高速の応答が期待できる。

これらの工夫により、単一光子から単一電子への変換の実時間計測が可能となった。ドット内に二つの電子が順に光生成される事象の個数時間分解頻度分布を計測し、ドット内の二電子の相関を反映した平均捕獲時間の違いを得た (図 1-6d)。二番目の検出時間は一番目の検出時間の約 2 倍となり、無偏光光子により生成された電子対のスピンの相関を示唆している。

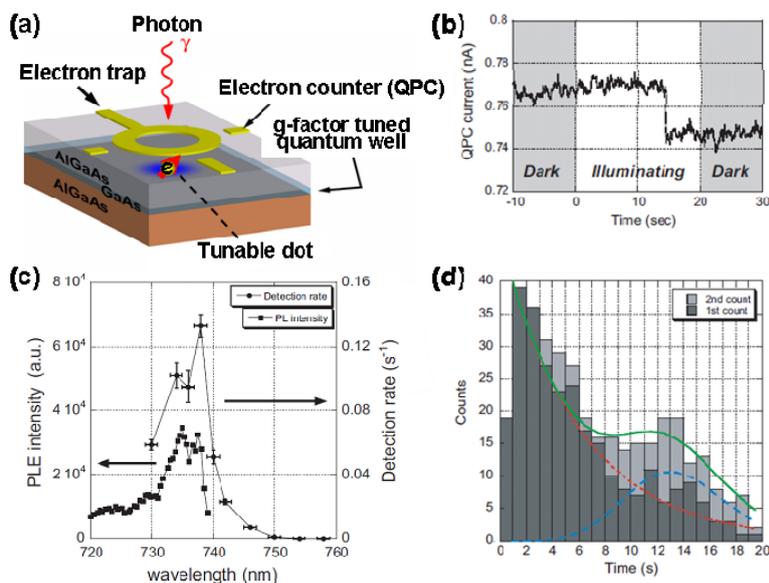


図 1-6. (a)量子ドットと量子ポイントコンタクト (QPC) からなる量子メディア変換素子。ドット中の電子 g 因子をゼロに制御した量子井戸を持つ。(b)QPC 電流の量子ドットへの光生成電子捕獲による急峻な減少。(c) 光生成電子検出頻度の波長依存 (右軸) と同一試料の発光励起スペクトル (左軸)。励起子ピークがほぼ一致する。(d)一回目 (赤線) および二回目 (青線) の光子吸収時間の頻度プロット。これらの頻度分布の相違は量子ドット内の二電子相関を反映している。

③-3 二電子スピン量子相関検出 (第三段階)

電子 g 因子がゼロとなるように量子井戸構造を設計した量子メディア変換素子を用い、スピンもつれ合い状態の識別を行う スピンプロッケードの観測 を行った。スピンプロッケード現象とはひとつの量子ドットに同一のスピン状態 (一重項状態 S) の二つの電子が入らないというパウリ排他律を直接観測するものである。このスピンプロッケードは、縦型の結合量子ドット構造では既に報告があるが、我々は電子 g 因子がゼロとなるよう設計した 横型の二重結合量子ドット からなる量子メディア変換素子において (図 1-7a)、同様のスピンプロッケード現象を初めて観測した。結合量子ドットの左右に入る電子数が (1, 1) と (0, 2) でほぼ平衡状態となるゲート電圧条件 (図 1-7b 中の拡大領域) において、右から左方向には電流が流れるが、反対に左から右方向には電流が流れない領域がある (図 1-7c)。この現象は、左右のドットに一つずつスピン三重項状態 (T) の電子が占有した場合、電流を流すためには右側のドットに三重項の 2 電子状態を一旦形成しなければならないが、パウリ排他律のためにこれが禁止されることが動作原理となる。この実験は、パウリの排他律によりスピン一重項は許容するが、スピン三重項は拒絶する S - T 識別機能の具現と捉えることができ、二電子スピン量子相関を検出するのに利用できる。

量子中継器の基本動作である二光子もつれ合い検出の際、単一量子ドットを用いた場合には一重項となる二電子だけが許容され、効率が最大でも 25% となってしまふ。ベルの 4 状態全てを検出し量子中継の効率を最大 1 にまで上げるためには、まずはほぼ独立な二つの量子ドットに光子を吸収させる必要があり、上記実験のような横型の二重量子ドットの利用が不可欠である。ここで示したスピンプロッケード現象は一重項だけを識別するものであるが、次節で示すベル基底間の変換を合わせれば、4 状態全てを識別する完全ベル測定を実現できる。

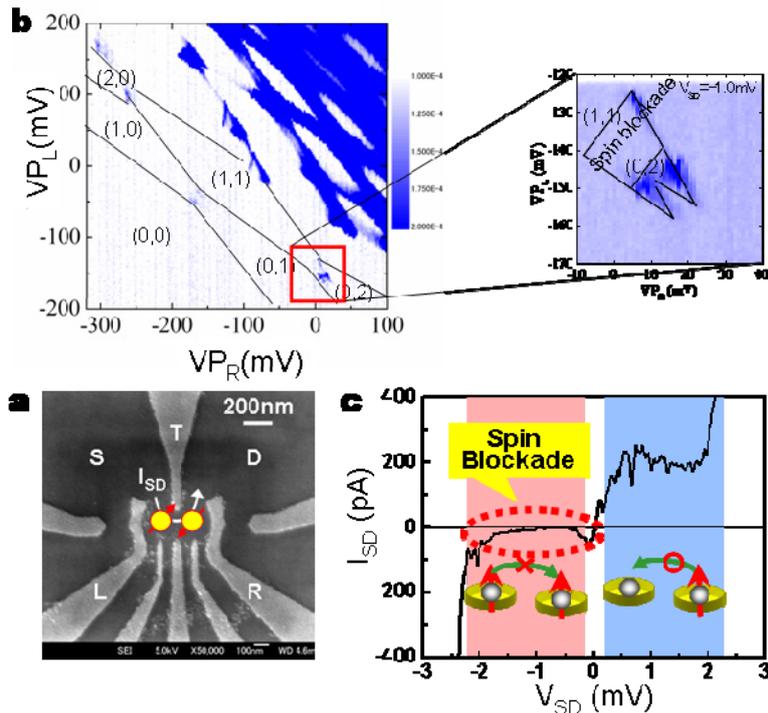


図 1-7. 電子の g 因子をゼロに設計した結合量子ドットにおけるスピンプロッケード現象を利用した電子スピン相関測定。(a) 結合量子ドットのゲート構造 (SEM 写真)。(b) ドット内電子数のゲート電圧による条件設定。拡大領域で電子数が (1, 1) と (0, 2) でほぼ平衡状態となる (c) ドット間貫通電流のソース・ドレイン電圧依存性。ソース・ドレイン電圧に対して電流が非対称となっている。電流の流れない領域がスピンプロッケード現象を示している。この領域では、2つのドット内の 2 電子相関が三重項状態となっており、パウリ排他律によりスピン緩和するまでの間貫通電流が阻害される。この現象を応用し、光生成した二電子スピン間の量子相関を測定できる。

③-4 単一電子スピン操作（第四段階）

量子中継の基底無依存化のためには、完全ベル測定が必要であり、ベル基底間の変換が必要となる。これは、二つの量子ドット間の結合がゲート操作により制御できる結合量子ドットを用い（図 1-8a）、それぞれの量子ドット内にひとつずつ入った二電子スピンのうち少なくとも片方の電子スピンをブロッホ球上で回転操作することで可能となる。この一般的な方法は、片方のドットにあるひとつの電子スピンだけをマイクロ波で回転させる電子スピン共鳴である。ところが、交流磁場でスピン回転を行う一般的な手法を、ゼロに近い g 因子制御を必要とする我々の量子メディア変換素子に直接適用することは不可能である。我々は g 因子がゼロ近くに制御された量子井戸上に作製された結合量子ドットを用い、一般的な微小コイルも微小磁石も用いないゲート操作だけの手法で、単一電子スピン共鳴およびスピン操作（ラビ振動）を実現した（図 1-8b-d）。図 1-8a に示した右側のゲート電圧に高周波変調を加えることにより、電子の軌道に加わる変調がスピン軌道相互作用を介してスピンの回転につながる。本方法では電子スピンの磁気モーメントを利用するのではなく、スピン軌道相互作用を利用するため、操作および検出の効率は電子スピンの g 因子には原理的に依存しない。

我々の量子ドットは極めて小さな g 因子に制御された量子井戸上に作り込まれているのが特徴であり、一般的な GaAs/AlGaAs ヘテロ界面に作られた量子ドットの場合の固定された g 因子（約 0.4）では不可能な g 因子スイッチが行えるのも大きな利点である。実際に本手法により見積もった g 因子は 0.05 となり、光学的手法で評価した値とよく一致した（図 1-8c）。この g 因子スイッチを利用すれば、簡単な操作で完全ベル測定が可能であることを理論的にも明らかにした（今村グループとの共同研究）。

さらに、量子中継の実際の有効性を発揮するのに不可欠な量子メモリーについても材料および構造を最適化し、スピン緩和時間のより長いものを探索した。具体的には、室温においてもミリ秒という長いスピン緩和時間の得られるダイヤモンド中の窒素-空孔欠陥（NV 中心）を用い、本プロジェクトで開発した量子メディア変換のスキームが適用できないかを検討した。軽い正孔のような特殊な電子状態を利用できないこの系では、V 型遷移を介した光子から電子スピンへの転写は不可能である。しかしながら、本転写スキームの本質は依然として有効であり、少々の条件変更で転写が可能であることが分かった（③-1a 参照）。

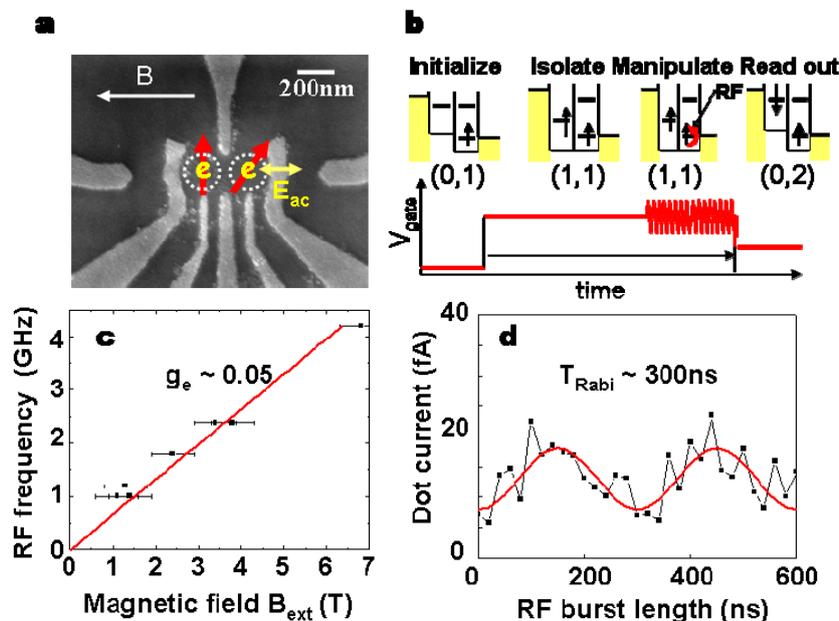


図 1-8. 電子の g 因子を通常より一桁小さく制御した結合二重量子ドットを用いた単一電子スピン操作の実験。(a) 素子構造と磁場方位。右側のゲート電圧を高周波変調し、右側ドットの電子スピンを回転操作する。ドット間を貫通する電流を測定し、二電子相関を評価する。(b) 初期化・操作・読み出しのためのゲート電圧のパルスシーケンス。(c) 単一電子共鳴を示す共鳴周波数の磁場依存性。(d) コヒーレント振動（ラビ振動）を示すドット間貫通電流の高周波パルス幅依存性。

④成果の位置づけ

本研究課題である光一電子間の量子メディア変換の実現は、量子情報処理の中核技術として重要である。これまでの量子情報技術は主に光子、原子、スピン、超伝導を中心とする個別の量子メディアを扱い、量子操作の原理実証を競い合ってきた。これに対し量子メディア変換は、この競争の歴史を共存へと変える重要な意義を持つ。本来、量子メディアは適材適所に使われるべきで、特に伝送に絶対適する光子と、処理に適する電子との間の量子メディア変換が可能であることを初めて示したのが本研究の最大の功績である。

光子から電子へのエネルギー変換はアインシュタインが光量子仮説で説明した光電効果で可能であるが、この光電変換は量子のもつエネルギーの最小単位としての特性しか利用していない。これに対して本研究成果の量子メディア変換は、量子のもつ情報の最小単位としての特性が媒体を超えて変換することを示したものであり、科学技術に革新的なインパクトを与える。この意味において本研究成果は、量子におけるエネルギー革命から情報革命への進展を決定付けるものとして位置づけられる。

⑤類似研究との比較

本研究は独自の発想によるものであり、世界中でも類似研究はない。敢えて類似研究を挙げるとすれば、我々とほぼ同時期に実証が進んだ“光から原子集団への量子状態転写”がある。対象も原理も全く異なるため比較は難しいが、本研究の最も重要な点は、固体中の電子への転写を示した点にある。真空中の原子よりも固体中の電子の方が集積化に有利であるの言うまでもない。固体中では原子とは異なり、光励起によって電子と正孔の二粒子が対生成されるために、特別な工夫が必要であった。本研究では光子から半導体電子スピンへの量子メディア変換の可能性を示したが、その後別の系ではあるが、固体中の電子スピンから核スピンへの量子メディア変換が実証されており、量子メモリー時間の点でも原子系と比較して不利ではない。

本課題の遂行には、ナノテクノロジー、半導体スピントロニクス、量子輸送、量子光学という多岐にわたる技術領域の全てにおいて、世界最高レベルに達する必要があった。5年間という限られた研究期間内でこれを実現すること自体が、白紙の状態から研究室を立ち上げた研究代表者には大きな挑戦課題であったが、これを成し遂げた。特に、これらの融合技術においては世界最高峰に達したという自信がある。この技術課題の達成と提案自体の新規性・独創性により、世界を圧倒的にリードする研究成果を挙げることができた。我々の示した新しい研究の方向性は、世界中の様々な関連分野において大きな共感を呼び、追従機関の多さからもその重要度は疑うべくもない。ナノスピントロニクス量子情報分野の先駆者として、類似研究の追従を許さない独走状態を維持した。最終年度に行った世界主要機関の訪問を通し、あらためて我々の研究の方向性の正しさ、レベルの高さ、重要度に確信を持った。

(2)研究成果の今後期待される効果

[成果の今後の展開]

本研究課題では光子から電子スピンへの量子メディア変換を主目的としたが、副産物である電子スピントモグラフィの成功は、電子スピンから光子への量子メディア変換も同様の原理で可能であることを示唆している。同様の原理の応用により、電子スピンと光子との間の量子もつれ生成、電子スピン状態の光による任意軸のコヒーレント回転（制御）も可能であり、まさに光子と電子にまつわる量子性を自在に操ることが可能となる。このように、発光部にも受光部にも量子メモリー機能を持たせることにより、離れたスピンメモリー間に量子もつれを容易に形成することができ、量子通信の応用展開を一気に加速することが期待できる。特に、量子中継システムにおいては、各中継器の中間部にもつれ光子源を設置する必要がなくなり、システムコストを圧倒的に抑える効果がある。

本研究で得られた量子メディア変換の基本原則および技術は、様々な材料系、システム、応用分野へと展開が期待できる。材料に関しては、GaAs 半導体を本研究では用いたが、室温動作などの点で現状ではダイヤモンドなどの欠陥を利用したものが有利である。ここで考案した量子メディア変換の方法はそのままでは転用できないが、基本的な概念はこのような系へも応用可能である。量子情報システムの例として量子通信および量子計算があるが、ここで得られた成果はこれら両方に応用可能である。量子通信には中継器として長距離化に、量子計算機にはルータとして分散処理化に貢献する。応用分野としても、金融・医療・政治・環境と様々な分野への展開が期待される。特に量子中継システムに関しては、本成果を基盤として今後より現実的かつ具体的な研究が展開されるであろう。

[科学技術や社会への波及効果]

従来の電子デバイスが、真空管や電球のような気体デバイスから I C や L E D のような固体デバイスに取って代わったように、量子情報デバイスも固体化するのは必然である。本研究はこの流れを作り出すのに大きく貢献したと思われる。本研究が発展し量子中継ネットワークが現実のものとなれば、その社会的意義は計り知れない。現在の高度情報化社会は個人情報、企業情報、国家情報の漏えいの危機という裏面を持っているが、量子中継ネットワークの実現により、機密情報の絶対的な安全性が保障され、安全な情報化社会が推進される。現在の量子暗号システムは高々 1 0 0 k m 程度の点と点を結ぶものであるが、量子中継の実現は数 1 0 0 0 k m の範囲の多地点ネットワークを可能とする。絶対に安全な大規模情報ネットワークの確立により、量子決済などの普及により安心して商取引が行えるため経済活動活性化への波及効果が絶大である。また、現在は安全性の問題で普及が進んでいない電子投票も量子投票の形で一般化し、国民の政治参加の形態を変化させる波及効果も期待できる。さらに DNA バンクなどの医療情報も漏えいの心配なくデータベース化できるような量子医療も可能になり、新産業・新サービスの創出につながる。これにより、いつでもどこでも個人に最適の医療が享受できる安心で快適な社会生活が営める。

4.2 縦型量子ドット素子におけるスピン相関と光応答の研究(理研 大野グループ)

(1)研究実施内容及び成果

①研究のねらい

量子ナノ構造の低温輸送特性研究、とりわけ量子ドット素子におけるスピン自由度が関わる現象の研究に従事してきた経験と技術を生かし、小坂グループの“電子ドット”研究部門と協力して光子-電子スピン量子メディア変換のための素子の開発と評価を行った。

②研究実施方法

小坂グループが量子光学的手法と量子輸送的手法に等しく重点を置きつつ両者の融合を測るのに対し、大野グループでは量子輸送研究分野で近年発達した電荷・スピン等自由度の電氣的コヒーレント制御手法に技術的重点を置き、そこへ比較的シンプルな光学系を導入することで量子状態変換へのアプローチを行う。自己形成 InAs ドットを含む GaAs 系縦型ドット素子の光応答特性を中心に研究を進めた。

目的達成のための研究サブテーマを 1) 量子情報転写スキームの第 1 - 3 段階である光吸収、電子-正孔対の分離メカニズムの研究と、2) 第 4 段階のもつれ合い検出に関する研究との 2 つに大別し、両者の融合を視野に入れた研究を行った。各研究サブテーマとその結果は③研究結果で述べる。

③研究結果

InGaAs/InP 量子井戸層を有する横型ドット素子は提案時点での最有力候補であったが、平成 16・17 年度に行った基礎特性評価の結果(光吸収波長および g 因子は理想的であることが確認できたものの)現状では材料の結晶性に問題があることが判明した。このため 18 年度以降は GaAs/AlGaAs 系素子および自己形成 InAs 内包素子へ移行して研究を継続した。

上述したサブテーマ 1) は基本的に光照射下での量子ドットの量子輸送特性の研究であり、極低温冷凍機へ光ファイバを導入し、制御された単色光を照射しつつ輸送現象を測定した。サブテーマ 2) に関しては現状では光を照射しない状態で行った。また単にもつれ合い検出のみでなく、各電子スピンの電氣的制御を視野に入れたテーマ設定も行った。以下各サブテーマについて述べる。

サブテーマ 1) 光吸収、電子-正孔対の分離メカニズムの研究

③-1 InGaAs/InP 量子井戸素子による通信波長帯光伝導

当初提案にあるとおり InGaAs/InP 量子井戸は g 因子がゼロであり、通信波長帯のバンドギャップを持つ理想的な系である。光生成電子捕獲層として働くこの量子井戸に電子ドープした 2 次元電子系を作製し、その基礎特性を調べた。単色光照射下でのホール測定の結果、電子濃度はほぼ設計通りであり、またほぼ設計通りの波長で光吸収による電子濃度変化が観測された。光照射による電子濃度変化は微細表面ゲートを備えた量子ポイントコンタクト素子におけるピンチオフ電圧の変化としても観測された。しかしながらその移動度は $1000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 程度と低く、GaAs 系素子のような良く定義された量子ドットの形成には不向きであることがわかった。今後結晶成長パラメータの最適化により高移動度の結晶が得られればより制御されたドット素子の作製も可能である。

③-2 GaAs/AlGaAs 系縦型 2 重ドットにおける間接励起子吸収、および単一光子吸収の観測

光照射がドット素子の輸送現象に与える影響は単純ではなく、素子を流れる電流が変化したからといって必ずしもそれは光誘起キャリアが“ドットに”生成されたことを意味するわけではない。例えばドット部分以外で生成され、欠陥等に捕獲された光誘起キャリアが基板の誘電率を変化させ、その結果電界閉じ込め量子ドットに印可される電界強度を変化させることも考えられる。確実にドット内で光誘起キャリアが生成されていること保証する現象と

して、我々は GaAs/AlGaAs 系縦型 2 重ドットにおける間接励起子の電気伝導による検出を行った (図 2-1)。2 重量子ドットに約 500mV までのソース・ドレイン電圧 V_S を印加し、波長 850nm–1100nm の単色光を照射しつつ素子の電氣的な応答を調べた。その結果、光吸収端波長は V_S に対しリニアに減少しその減少量は V_S 印加時の 2 つの量子井戸間のエネルギー差に一致した。従ってこの光吸収は一方のドットに電子が、他方のドットに正孔が生成される間接励起子によるものといえる。間接励起子の生成後、電子はドットに捕獲されるが、正孔は負に印加されたサイドゲートによりドット中央部から 200nm 程度引き離され素子側面近傍の欠陥に捕獲されると考えられる。この正電荷の蓄積によりドットの静電エネルギーが変化することで電氣的に検出される。この手法は光吸収に対応する波長を同一素子で、しかも低温量子輸送を行う環境下そのまま正確に決定できる利点がある。

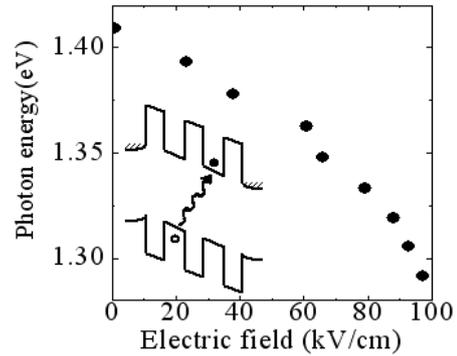


図2-1. 縦型2重ドットにおける間接励起子吸収 (挿入図) と間接励起子吸収端における光子エネルギーの電界依存性。

光誘起正電荷によるドットの静電エネルギー変化はドットを流れる電流の変化により測定されるが、これは量子ドットが単一電子トランジスタ電荷計として光誘起正電荷の検出を行っていることにほかならず、その感度は単一光子レベルの感度を持つ。上述した実験をごく弱い単色光のもとで行うことで単一光子を電氣的に測定することに成功した。図 2-2 は上述した正電荷の蓄積が単一正孔レベルで起こるによりドットの静電エネルギーが離散的に変化する様子を示している。離散的静電エネルギー変化のヒストグラムから単一光子吸収時のドットの静電エネルギー変化は約 50meV であり、これは上述したドット中央部から 200nm 程度波離れた素子側面近傍欠陥に正孔が捕獲されるモデルとよく一致する。

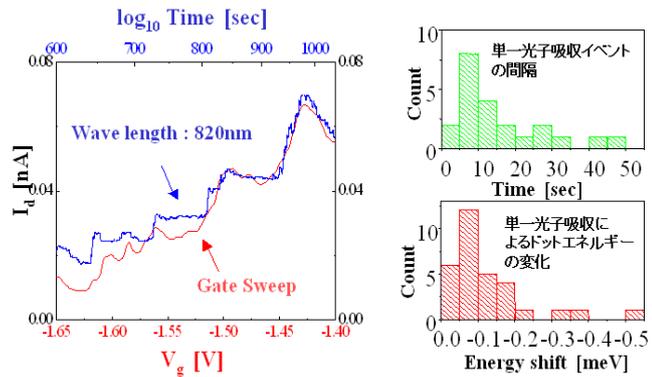


図2-2. 左：ダークにおけるソース・ドレイン電流のゲート依存性 (赤線) および、ゲート電圧固定で820nmの微弱光を照射した際の電流の時間変化 (青線)。離散的な電流の変化が起こる。右：単一光子吸収イベントおよびドットエネルギー変化のヒストグラム。

③-3 自己形成 InAs ドット内容縦型ドットにおける光伝導の研究

GaAs/AlGaAs 系縦型 2 重ドットでは光生成された正孔はドット・ゲート界面近傍にランダムに存在する欠陥に捕獲されるためその補角箇所や、捕獲される正孔の数は十分に制御されているとはいえなかった。これに対し InAs 自己形成量子ドット では正孔捕獲サイトが InAs ドット自身でありよく定義されている。また正孔間のクーロン反発のため InAs ドットに捕獲できる正孔の数は単一正孔レベルで制御可能である。そこで GaAs/AlGaAs 系縦型 2 重ドットにかわり InAs 自己形成量子ドットを内包する縦型構造 (図 2-3) を用いて光伝導の研究を行った。この素子に於いてはドットの励起エネルギーが GaAs 電極部分のそれから大きく異なるため間接励起子に頼らずともドットのみを選択的に励起することが可能である。実際我々は GaAs 電極部分の励起波長 850nm から十分離れた波長 1025nm において、光励起正孔捕獲による大きな光応答を電氣的に検出することに成功した (図 2-3)。単一正孔捕獲によるドットの静電エネルギー変化は、10meV 以上あり、その吸収帯幅は光学系でリミットされる 2nm であった。これは単一 InAs ドットに光生成された正孔がドット自体、もしくは InAs ドット・GaAs 界面に存在する単一のサイトに捕獲されていることを示唆している。

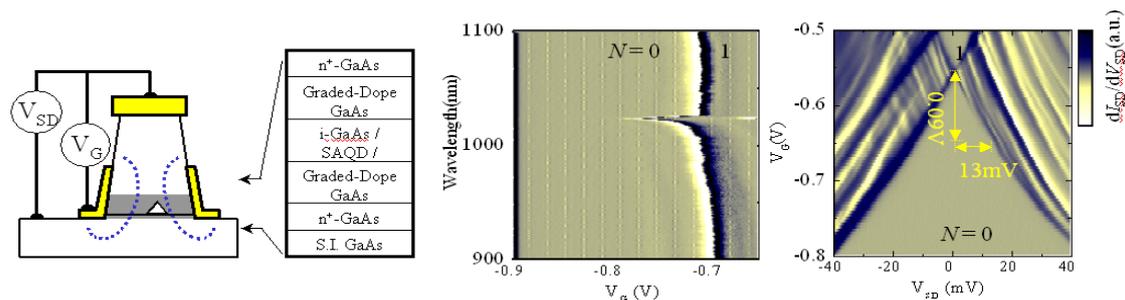


図2-3. 左：InAsドット内包縦型素子模式図と基板の構造。中央電子数1のクーロン振動ピーク位置の照射波長依存性。照射波長・1025nmにおいてクーロンピーク位置が0.09Vシフトする。右：素子のクーロンダイヤモンド特性、ゲート電圧で0.09Vの変化は13meVのドットポテンシャルの変化に相当する。

サブテーマ2) もつれ合い検出に関連する研究

③-4 ゼロ g 因子量子ドットでのスピンプロケードの観測

上記 InGaAs/InP 量子井戸からなる量子ポイントコンタクト素子のなかにはそのピンチオフ近傍において量子ドットの伝導特性が観測されるものが存在する。これは量子井戸の膜厚揺らぎに起因する自然形成量子ドットによるものである。この量子ドットに1つの電子が内包された状態での磁場中励起電子スペクトロスコピーにより、g 因子が実際に非常に小さく観測不可能であることを確認した。さらに一部の素子では表面ゲート電圧を最適化することにより、自然形成2重量子ドット構造を形成することができ、クーロンダイヤモンド特性の一部に明瞭なスピンプロケードを観測することができた (図 2-4)。この結果は電子 g 因子がゼロの系であってもパウリの排他律によるスピン状態の観測が可能であることを示している。

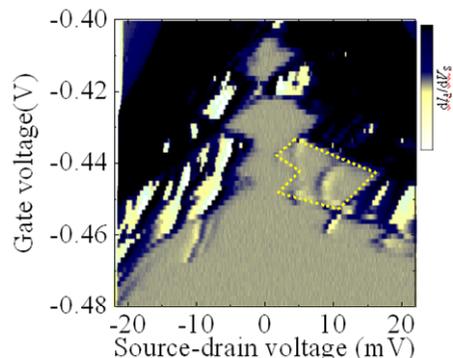


図2-4. InGaAs/InP量子ドットのクーロンダイヤモンド特性。点線で囲まれた領域がスピンプロケード。

③-5 異種 g 因子2重ドットでのスピンプロケード、およびゼーマン分裂に起因するスピン依存共鳴トンネルの抑制現象の観測

III-V 族半導体においてはその組成を変えることによりバンドギャップのみならずその g 因子をも制御すること (g 因子エンジニアリング) が可能である。単一の量子井戸からなる横型ドット素子では電極や各ドットを含む回路は全て等しい g 因子を持つ。一方、積層多重量子井戸からなる縦型多重量子ドット系にこの g 因子エンジニアリングを適用することで、ドットごとに g 因子が異なる新しい人工スピン量子系の創出が可能となる。縦型素子においてドットを形成する InGaAs 量子井戸はその厚み、および In 混晶比を変えることにより g 因子を変調し、各ドットの g 因子が互いに大きく異なる2重ドット素子を作製し、スピンプロケードを観測することに成功した。

異種 g 因子2重ドットの高磁場特性において、各ドットのゼーマン分裂が異なる (ゼーマン mismatches) ことに起因する特異的な現象を見いだした。

2つのドットにそれぞれ一つの軌道準位があり、その軌道準位が異なる大きさにゼーマン分裂している場合を考える。各ドットの相対的エネルギーを変えても、例えば上向きスピン準位が一致している場合には下向きスピン準位は一致しない。この不一致により上向きスピン電流が流れ続けることはできず、いずれ下向きスピンの一方のドットを占有し電流はブロックされる。このときドットを占有するスピンが向きを変えない限り電流は流れないため、スピンに依存した新しい伝導抑制現象といえる。

この現象は単一スピンの高速な初期化および観測に応用可能であり、従来の提案と比較してパウリの排他律を用いることなく、また有限温度の影響を受けにくい点で有利なものである。

③-6 ドット軌道に依存した g 因子の観測とスピン z 成分の選択則

g 因子エンジニアリング以外にドット内電子の g 因子を変える方法として伝導電子のスピン・軌道相互作用および電子電子相互作用の利用が考えられる。我々は $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{As}$ 量子井戸からなる縦型単一量子ドットの磁場中励起電子スペクトルの測定により、各電子数に対するゼーマン分裂を測定した。その結果電子数 1 の基底状態である 1s 軌道の g 因子は -0.52 であるのに対し、高磁場中の 2 電子基底状態である 1s2p 軌道状態の g 因子は -0.36 であることを見いだした。この結果はドット内電子の g 因子はその構成材料や量子井戸厚のみならず、占有する軌道の角運動量、あるいは電子間相互作用にも大きく依存することを示している。

1s2p 状態のスピンは三重項状態であり、3つのゼーマンサブレベルが存在するが、実験では2つのゼーマン準位しか現れない。この結果は電子数 1 から 2 への遷移を通して励起準位を観測する輸送現象に特有なスピン選択則として理解できる。電子数 1 の 1s 状態ではそのスピン状態の磁場方向成分 S_z は $1/2$ と $-1/2$ であり、電子数 2 の 1s2p 状態では S_z は $1, 0$ および -1 である。このうち電子 1 つの増減で遷移可能な変化は S_z を $1/2$ 増減させるだけであり、 $1/2$ から -1 および $-1/2$ から 1 は禁制となる。残り 4 種の許容遷移のエネルギー差は 2 種類しかなく、従ってゼーマン分裂準位は 2 つしか現れない。

③-7 スピンブロックードの過渡現象観測

ドットに捕獲された電子スピンに対する様々な電気的操作はそのコヒーレンス時間内に完了しなければならない。核スピン等によるデコヒーレンスを避けるためにはナノ秒オーダーの高速な電気的制御が必要となる。我々は量子ドットに印可される電圧を 0.1 ナノ秒程度の分解能で高速に制御することに成功した。さらにこの技術をスピンプロケード状態の量子ドットに応用し、スピンプロケードが確定するまでの数ナノ秒程度の間だけ流れることが予想されていた スピナー重項過渡電流 を観測することに成功した (図 2-5)。クーロンブロックード状態とスピンプロケード状態はともに電流値はほぼゼロであるが、これらの間を高速スイッチすることでより大きな電流が流れる。

この原因は以下のように説明できる。ソース・ドレイン電圧がゼロで電子数 2 のクーロンブロックード状態からバイアスを印加してスピンプロケードが成立するまでには以下のような確率的な課程がある。クーロンブロックード状態のスピンが 1 重項であるとする、電圧印加後にそのうち 1 つのスピンがドレインに放出され、変わって別のスピンのソースから注入される。このとき新たに注入されたスピンにより $3/4$ の確率でスピン 3 重項が形成されスピンプロケードが成立するが、 $1/4$ の確率でスピン 1 重項を形成し、この場合には再びそのスピンはドレインに放出される。こうしたスピン 1 重項過渡電流により運ばれる電荷の総量は素電荷 e を単位として $1/4 + (1/4)2 + (1/4)3 + \dots = 1/3$ であり、パルス繰り返し周波数を f として、最大過渡電流 I_{max} は $ef/3$ と見積もられる。これは実際に観測された最大過渡電流の繰り返し周波数依存性の実験結果と一致している。

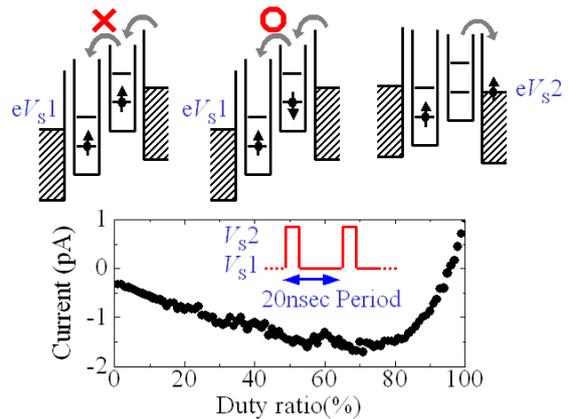


図2-5. スピンプロケード状態のバイアス電圧 V_{s1} (左上模式図) とそれが解除される電圧 V_{s2} (同右上) との間を 20 ナノ秒周期でスイッチしたときの過渡電流のデューティ比依存性。中間の領域でスピンが 1 重項にリセットされることで流れる有限の電流が観測される。

③-8 2電子交換相互作用の最適制御ポイント

半導体量子ドットの2電子状態における交換相互作用はスピン一重項-三重項交換エネルギー差 J で与えられ、2電子スピンもつれ合いの電氣的生成と制御のための重要なパラメータである。この交換相互作用の値をスピントロケード状態下の量子ドットにおいて各種印加電圧を変化させることで詳細に調べた。図 2-6(a)-(d)にスピントロケード近傍のダイヤモンドを示す。ゲート電圧差 $V_{g1}-V_{g2}$ を減らすと $V_s=0$ でのオフセットは大きくなり、スピントロケード領域が狭くなってゆく様子がわかる。とりわけ図 2-6(b)-(d)の白点線で示した線より大きい V_s では(1, 1)3重項のスピントロケード状態にあるドットが $1s2p$ 軌道配置をもつ(0, 2)3重項へのトンネルによりスピントロケードが解除される領域である。各図の赤線で示した位置に V_{g1} を固定し、線上の各 V_s において測定したスピン一重項-三重項交差が生じる磁場 B_c を図 2-6(e)-(h)に示した。 B_c は J に比例する量である。図右縦軸では g 因子を 0.5 を仮定した場合の J を示してある。 $V_s=0$ でのオフセットが小さい場合 (図 2-6(e))、 B_c は V_s に対し単調減少するが、 $V_s=0$ でのオフセットが大きくなるにしたがい J は一度減少したあとに再び増加するようになる (図 2-6(f)-(h))。増加に転ずる地点は $V_s=0$ でのオフセットが大きくなるほどより低 V_s 側に移動し、その位置は上述の (0, 2) 3重項トンネルによりスピントロケードが解除される地点と一致している。以上の結果は J がオフセットの増加と共に一度減少し、その後再び増加に転ずることを示している。スピントロケード領域においては2電子スピンの基底状態は(0, 2)1重項であり、スピントロケードの解除に重要なのは第一励起状態である(1, 1)3重項と(1, 1)1重項の差 J である。この差 J は(0, 2)1重項と(1, 1)1重項のトンネル結合による半交差が支配的な領域で最大値をとり、その後オフセットの増加とともに減少する。しかしさらにオフセットが増加すると、(1, 1)3重項と $1s2p$ 軌道配置をもつ(0, 2)3重項がトンネル結合による半交差をおこし、 J は再び増加することになる。この結果は交換相互作用 J には印加電圧の変動などの外乱を受けにくいスイートスポットと呼ばれる領域が存在することを示している。

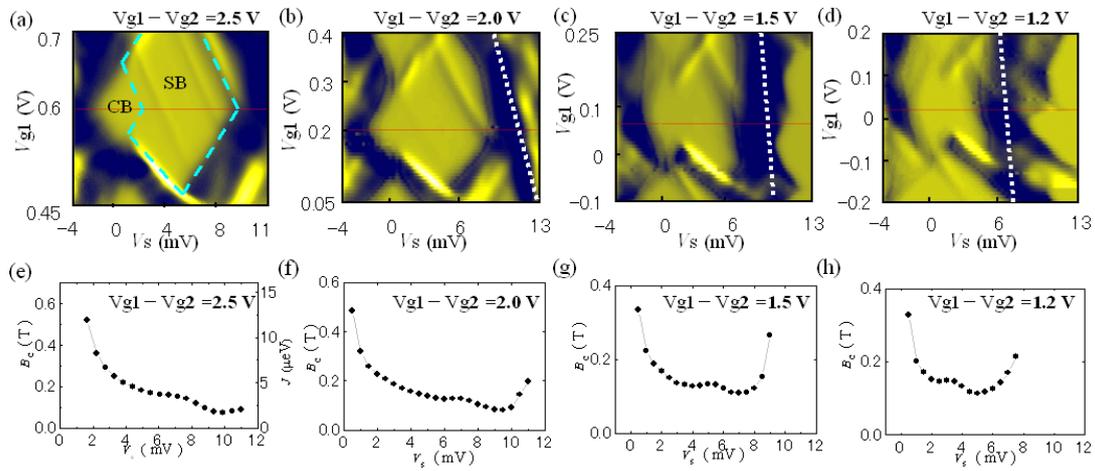


図2-6. 各ゲート電圧におけるスピントロケード近傍の様子 (a-d)と B_c の V_s 依存性 (e-h)

④成果の位置づけ

本研究課題は、いままでダーク状態でのみ測定されてきた量子ドット等の量子輸送素子を光照射下においていかに安定に動作させ、電子素子であるこれらを光電子素子として有効に機能させるかであった。従来フェルミレベル近傍の低エネルギー励起伝導電子のみを考慮すれば良かったダーク状態での測定と異なり、光照射下での素子には eV オーダーの励起が起るため、低エネルギー励起伝導電子のみを扱う従来の量子輸送のモデルが適応できないケースが多い。その意味で量子輸送の研究を長年行ってきたものにとって大変チャレンジングな課題であり、今回得られた成果は今後量子輸送分野の一つとして成長するであろう光量子輸送実験の先駆けとなるものであると自負している。

⑤類似研究との比較

本研究課題のうち光伝導実験に関しては極めて独創性が高く、ごく最近他機関で開始された追従研究を除けば類似研究はない。一方ダーク状態でのスピン相関実験の一部に関しては世界のいくつかの研究機関で比較的近い系を用いた実験が行われている。例えば異種 g 因子 2 重ドット系に類似の系として、同種 g 因子 2 重ドットのごく近傍に強磁性体を設置し、各ドットサイトでの外部磁場が異なるような系がハーバード大、および東大・NTT チームにより研究されている。しかしこの場合の各ドットの有効磁場の違いはわずか数 10mT 程度であり、本研究課題の有効磁場差（外部磁場 15T で最大 9T 程度）に遠く及ばない。

(2) 研究成果の今後期待される効果

光吸収、電子-正孔対の分離メカニズムの研究に関しては、単一光子から変換された単一電子は一度はドットに捕獲されるものの、数ナノ秒程度の時間で電極にトンネルして逃げてしまう。この問題の解決には単一光子吸収実験と③-8 で述べたナノ秒パルス制御を組み合わせることで解決可能である。さらに g 因子制御技術を組み合わせることで捕獲電子のスピンを制御することが可能になると思われる。もつれ合い検出に関連する研究に関しては、今後これらの実験を光照射下で安定して再現することが課題となろう。そのためにはドット素子に光導波路等を集積し、局所的・効率的に光とドットを相互作用させることが有効だと考える。

4.3 光子電子スピン量子相関ダイナミクスの理論 (産総研 今村グループおよび仙台高専 力武グループ)

(1)研究実施内容及び成果

①研究のねらい

今村グループおよび力武グループでは本研究の課題である“光子から電子スピンへの量子メディア変換”の原理実証実験を理論的に支援すべく、量子状態転写のために必要となる量子構造の詳細設計および実験結果の解析を行う。量子メディア変換の第一段階は光子の量子状態から電子のスピン状態への量子状態転写である。この段階を実現するためには、電子の横磁場によるゼーマン分裂 (g 因子) はゼロであり、かつ軽い正孔の g 因子が 3 程度となるような量子井戸構造を作成しなければならない。今村グループおよび力武グループでは $k \cdot p$ ハミルトニアンを数値的に解くことにより半導体ヘテロ構造における波動関数の染み出しを計算し、量子状態転写が可能な電子と正孔の g 因子を持つ量子井戸の設計を行う。量子メディア変換の第二段階である正孔の引き抜きについては、共鳴トンネル構造を用いた正孔の引き抜きについて数値シミュレーションを行い、量子状態転写が可能な g 因子の条件を満たしながら正孔の引き抜き速度を調節可能な素子構造の設計を行う。また、密度行列の時間発展を数値解析することにより、量子状態転写の効率と忠実度を最適化する素子の設計も行う。この 2 段階で光子から電子スピンへの量子状態の転写は実現されるのであるが、本プロジェクトの原理実証実験では、この段階で量子状態の転写が成功したかどうかを確認する必要がある。今村グループおよび力武グループでは光学応答によるスピン状態トモグラフィについての理論解析を行い、量子状態転写の確認実験の支援を行う。また量子メディア変換における第三段階の単電子検出、最終段階の電子スピンのもつれ合い検出において定量的な理論解析を行い、“光子から電子スピンへの量子メディア変換”の原理実証実験を理論面から支援する。

②研究実施方法

今村グループおよび力武グループでは、小坂グループと大野グループの実験を支援すべく、実験結果の解析や実験手法の提案など、理論研究の結果と実験研究の結果をお互いにフィードバックさせることを心がけて研究を実施した。また、半導体中の励起状態の計算など高河原グループが得意な研究分野に係る研究を行う際には、高河原グループと議論し助言を受けながら連携して研究を進めた。

今村グループおよび力武グループでは主に 1. 量子状態転写における正孔引き抜き過程の理論解析、2. 量子状態転写に用いる半導体量子ドットの g 因子解析、3. 量子状態転写における転写効率と忠実度の理論解析、および最適パラメータの探索、4. 光学応答による電子スピン状態トモグラフィについての理論解析、5. スピンブロッケードを用いたエンタングルメント検出の理論解析、6. 異なる g 因子を持つ 2 重量子ドットを用いた量子情報処理デバイスの理論提案、7. タイムビン量子状態転写の理論提案を行った。1. の正孔の引き抜き過程の理論解析では共鳴トンネル構造を作ることによって、電子-正孔交換相互作用の影響を最小にでき、高い転写の忠実度が得られることを示した。2. の g 因子解析では有限要素法を用いたバンド計算により、転写に用いることのできる有望な系として AlGaAs/GaAs/AlGaAs および InAlAs/GaAs/InAlAs からなる量子ドット(量子井戸)構造を提案した。3. 量子状態転写の効率と忠実度の解析では、光共振器と結合した量子ドットにおいて、高い転写効率と忠実度を得るためのデバイス条件を明らかにした。4. 光学応答によるスピン状態トモグラフィの解析は、転写で用いる遷移での光学応答を用いることで量子ドット中のスピン状態を検出しようとするものであり、プローブ光の偏光と測定する偏光基底をうまく組み合わせることにより、電子スピンのトモグラフィ測定が可能であることを明らかにした。このトモグラフィ測定は小坂グループにおいて実験的に実証された。5. 2 電子スピン量子状態の電氣的測定手法の理論

提案では、あるゲート操作の後に2重量子ドットの各量子ドットに存在する電子数の期待値を電氣的に測定することにより、2電子スピンの量子状態が測定可能であることを示した。6.異なるg因子を持つ2重量子ドットを用いた量子情報処理デバイスの理論提案では、g因子の符号が異なる2重量子ドットを用いることにより、完全ベル測定が可能であることを明らかにした。また、JST-ERATO 研究員小島邦裕氏との共同で、異なるg因子を持つ2重量子ドットを利用した量子非破壊光子検出装置の理論提案を行った。7.タイムビン量子状態転写の理論提案では実際の量子情報通信に用いられるタイムビン (Time-bin) 量子情報を電子スピンへと転写する手法の理論提案を行った。転写の忠実度を解析することによりタイムビン量子状態転写を可能とするための条件を明らかにした。

③研究結果

③-1 量子状態転写における正孔引き抜き過程の理論解析

量子状態転写の第二段階である正孔の引き抜きについて理論的な解析を行った。光子が入射することで量子ドットに励起子が励起されるが、励起子を構成する電子と正孔の間には交換相互作用が働くため正孔を放置しておくとう電子スピンの状態が変化し転写の忠実度が下がってしまう懸念がある。我々は正孔準位に対する共鳴トンネル構造を用いてドットから正孔を速やかに引き抜くことを提案し、その際の転写の忠実度を解析した。共鳴トンネル構造は、転写が行われる量子ドット(dot1)、dot1とトンネル障壁を介して正孔準位がコヒーレントに結合しているdot2、及びdot2に結合した正孔の連続準位からなる。dot1とdot2の正孔のエネルギー準位を揃えると共鳴トンネルにより正孔が量子ドットから素早く引き抜かれるが、さらにdot1-dot2間の結合強度とdot2から連続準位へ正孔が抜けていくレートが等しくなる構造をつくることで、最も早く正孔が引き抜かれることがわかった。電子スピンのg因子が0となり、軽い正孔が重い正孔より低エネルギーとなるInAlAs/GaAs/InAlAs量子ドット構造においては、共鳴トンネル構造にすることで正孔をpsのオーダーで引き抜くことができ、99.6パーセントと非常に高い忠実度が得られることを示した。

③-2 g因子解析

本研究で提案している量子状態転写においては、横磁場に対する電子のg因子はゼロで、かつ軽い正孔のg因子が3程度となるような量子井戸構造を作製しなければならない。我々のグループでは有限要素法を用いてk・pハミルトニアンを対角化し、半導体ヘテロ構造でのバンド構造およびg因子を求める数値解析プログラムを作成した。本数値解析により、量子状態転写に適したAlGaAs/GaAs/AlGaAsおよびInAlAs/GaAs/InAlAs量子井戸の設計及びg因子解析を行い、小坂グループの量子状態転写、スピン状態トモグラフィの実験で使用する構造において実験結果との良い一致を得た。

③-3 量子状態転写の効率と忠実度

③-1で行った正孔の引き抜きの解析は、量子ドットに励起子が生成された後の過程のみを考慮したものであった。ここでは新たに、光子によって励起子が励起される過程も含めた転写の全過程を考えると、転写の効率と忠実度の解析を行った(図3-1)。一光子レベルで行われる転写を効率的に行うには、光子と量子ドット励起子との強い双極子相互作用が必要であるため、光共振器と結合した量子ドットから

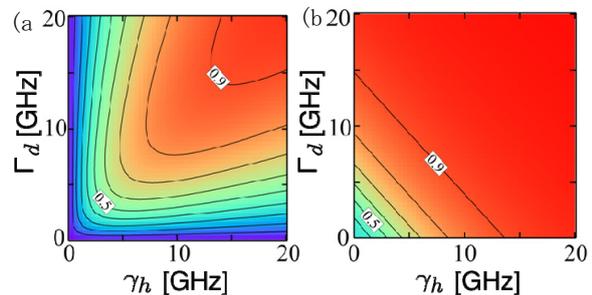


図 3-1. (a) 転写効率及び(b)転写の忠実度のパラメータ依存性。横軸 γ_h は正孔の引き抜きレート、縦軸 Γ_d は量子ドット-光子間結合強度。対角線上で高い転写効率が得られる(整合条件)。正孔の高速な引き抜きあるいは励起子と光子の強い結合により、忠実度を1に限りなく近づけることができる。

なる系を解析モデルとして用いた。光子量子ビットが入射してきた状態を初期状態とし、入射光子による共振器モード光子の励起過程、共振器モード光子による量子ドット励起子の励起過程、及び量子ドットからの正孔の引き抜き過程をシュレディンガー方程式により求めた。転写効率は、終状態として量子ドットに電子スピンの残っている確率として与えられる。解析の結果、高い転写効率を得るためには、量子ドットに励起子が生成される速度をあらゆる有効的な双極子相互作用強度と、正孔の引き抜きレートを同程度にするという整合条件が必要であることを見出した。また、高い忠実度を得るには正孔をできるだけ早く引き抜けばよいという③-1 と、矛盾のない結果を得た。ただし、高い忠実度を得ようとして、正孔の引き抜きレートだけをいたずらに大きくすると整合条件を満たすことができなくなり転写効率が下がってしまうため、双極子相互作用も同時に大きくとることが重要である。Q 値が 10,000 程度のピラー型共振器と結合した系での見積もりでは、効率が 91% で忠実度が 97% の転写が得られることを示した。

③-4 光学応答によるスピン状態トモグラフィ

量子状態転写の可否をみるためには、ドット中に生成された電子スピンの状態を測定する必要がある。小坂グループではカー回転測定を行うことで、励起したスピンの観測を行っている。従来行われているカー回転測定では重い正孔状態からの遷移による光学応答を用いるため、量子井戸に対し面直の z 軸方向へのスピンの射影成分だけが得られ、x 軸および y 軸方向への射影成分は得られなかった。しかし、量子状態転写は光子の偏光状態を適切に選ぶことで任意の向きのスピン状態を作ることができるため、その転写で用いる選択則をプローブとして用いることで任意の向きのスピンを測定できる可能性がある。そこで、転写で用いられている軽い正孔準位からの遷移による光学応答の理論解析を行った。その結果、量子ドットの電気感受率テンソルが、量子ドットにあらかじめ生成している電子スピンの x, y, z 軸方向成分すべてに依存することを明らかにした。得られた電気感受率テンソルを用いてプローブ光のファラデー回転の解析を行ったところ、ファラデー回転角はスピンの z 軸射影成分、ファラデー楕円率は y 軸射影成分に比例することがわかった。また入射するプローブ光の偏光および、試料を透過したプローブ光の偏光の観測基底を様々に変えてやることによって、スピンのトモグラフィ測定が可能であることを示した (図 3-2)。 この結果は小坂グループにより実験的に実証され、Nature 誌に出版された。

プローブの偏光	測定の基底	信号強度の差
$E_H = E_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$	$D-\bar{D}$	$I_{DD}^H = I_0 \bar{\sigma}_z$
	$R-L$	$I_{RL}^H = -I_0 \bar{\sigma}_y$
$E_D = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$	$R-L$	$I_{RL}^D = -I_0 \bar{\sigma}_x$
	$H-V$	$I_{HV}^D = -I_0 \bar{\sigma}_z$
$E_R = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix}$	$H-V$	$I_{HV}^R = I_0 \bar{\sigma}_y$
	$D-\bar{D}$	$I_{DD}^R = I_0 \bar{\sigma}_x$

図 3-2. スピン状態トモグラフィの理論解析結果。軽い正孔を利用したカー回転測定により、通常の面直方向だけでなく任意の方向への射影測定が可能であることを明らかにした。プローブ光の偏光基底と測定の偏光基底に互いに (ブロッホ球上で) 直交する基底へスピンの射影できる。

③-5 2電子スピン量子状態の電氣的測定手法の理論提案

2重量子ドットの左右の量子ドット上（図3-3左のLとR）と量子ドット間（図3-3左のB）に配置されたゲート電極の電圧を断熱的に調整した後、左右の量子ドットに滞在する電子数を測定するという方法を提案した。ここでゲートLとRの操作は2つの量子ドット内の静電エネルギーを、ゲートBの操作は電子の量子トンネル確率をそれぞれ変化させることに相当する。半導体中電子のスピン-軌道相互作用を考慮した量子トンネル過程を取り入れ、理論解析を行った結果、図3-3(中)に示すような一連のゲート操作を行なったあとで、2つの量子ドットに滞在する電子数をそれぞれ測定し、電子の集団として処理するアンサンブル平均を取ると、左右の電子数差は重ね合わせ状態における一重項と三重項の相対位相の関数として振動することを見いだした。これによりスピン一重項・三重項が現れる確率と2状態間の相対位相を同時に測定することが可能となる。

量子ビットとして利用するスピン一重項（ S ）と三重項（ T_0 ）の任意の重ね合わせ状態は、ブロッホ球の球面上の点として表現できる（図3-3右）。従来の手法で得られる情報は球面の緯度のみであったが、本提案の手法では球面上の点の位置（緯度と経度の両方）を特定し量子状態の全体像を推定することが可能となる。現在は限定された条件下で解析的な表式を得た段階であるが、今後より詳細な解析を行い、2電子スピン状態のコヒーレンス測定の実験を行うための条件を明らかにし、実験グループに実証実験の提案を行いたい。

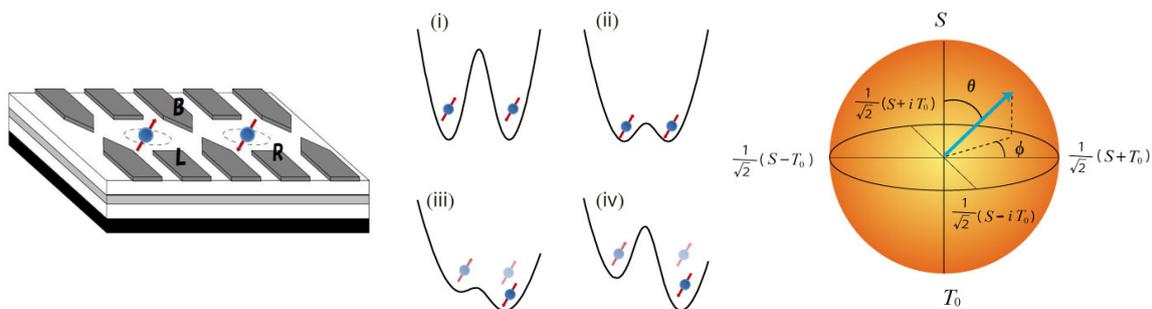


図3-3. (左) 2重量子ドットの概念図。青い球が1個の電子を、赤い矢印がスピンの向きを、点線は電子が存在し得る範囲を表す。(中) 一連のゲート操作。(i)測定される2電子は初めに左右の量子ドットに1つずつ閉じ込めておく。(ii)中央の障壁を引き下げ、量子ドット間の電子の移動を可能にする。(iii)電圧をかけることで右の量子ドットにいる電子はスピン-軌道相互作用によるスピン反転を起こしながら確率的に左の量子ドットへ移動する。(iv)再び障壁を引き上げた後、左右の量子ドットに存在する電子数を測定する。(右) スピン量子ビットのブロッホ球。

③-6 異なる g 因子を持つ 2 重量子ドットを用いた量子情報処理デバイスの理論提案

異なる g 因子を持つ量子ドットを結合した 2 重量子ドットの外部磁場に対する応答、およびスピンに依存した電気伝導（スピントロニクス）について詳細な解析を行い、その結果 2 つの量子ドットが絶対値は同じであるが符号の異なる g 因子を持つ場合には、交流磁場を外部から印加することにより 3 つのトリプレット状態の中の 1 つの状態を他の 2 つの状態に影響を与えずシングレット状態と入れ替えることが可能であることを明らかにした。従って図 3-4 で示すように交流磁場の印加とスピントロニクス測定を連続して行うことにより 2 電子スピン量子状態の完全ベル測定を電氣的に行うことが可能となる。

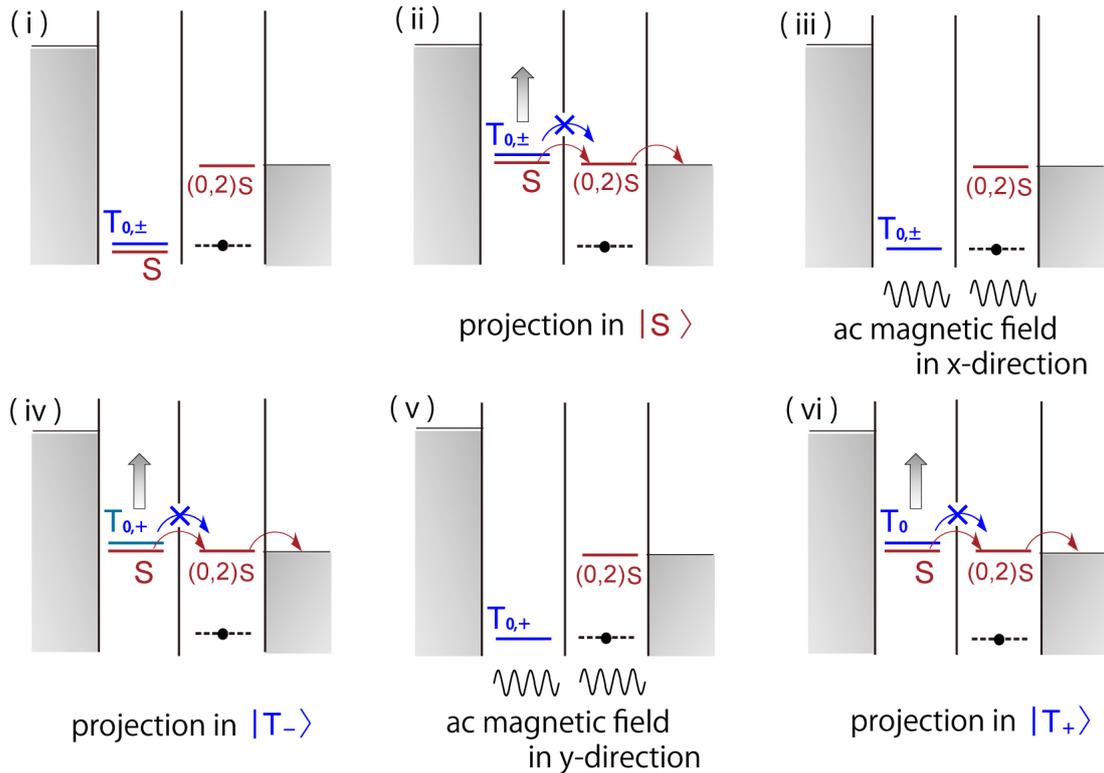


図 3-4. 提案した完全ベル測定の手順を表すエネルギーダイアグラム図。(i) 初期状態。(ii) スピントロニクスを用いてシングレット $|S\rangle$ であるかどうかの測定を行う。(iii) シングレット状態でなければ、 x 方向に交流磁場を印加しトリプレット状態の 1 つ $|T-\rangle$ とシングレット $|S\rangle$ とを入れ替える。(iv) スピントロニクスを用いて $|S\rangle$ の測定を行う。この測定で量子ドット内のスピン状態が $|S\rangle$ であると分かると、初期状態が $|T-\rangle$ であったことが分かる。(v, vi) 同様の手順により初期状態が $|T+\rangle$ であったかどうかを測定する。

また、JST-ERATO 研究員小島邦裕氏との共同で、量子状態転写の選択則を利用した光学デバイスの提案及び解析についても研究を行い、異なる g 因子を持つ 2 重量子ドットを利用することにより量子非破壊光子検出装置の作成が可能となること、及びサブポアソニアン光子数分布光生成装置の作成が可能であることを明らかにした。この研究成果については、JST と産総研共同で特許出願(特願 2008-296160)を行った。

③-7 タイムビン量子状態転写の理論提案

本グループのこれまでの研究においては、偏光状態に量子情報が符号化された光子から電子スピンへの量子状態転写について考えてきた。しかし、光ファイバによる長距離間伝送では安定的に偏光状態を保つことが非常に困難であるため、実際の量子情報通信においてはタイムビン符号化と呼ばれる、光子の波束形状に量子情報を載せて伝送する手法がとられている。そこで新たに、タイムビン符号化された光子から直接電子スピンへと量子状態転写を行うための手法について理論的提案を行った。タイムビン符号化では、光子は遅延時間 τ_d の2パルスからなる波束形状を持ち、2つのパルスの相対強度と相対位相に量子情報 (α , β) が載せられる (図 3-5 (a))。転写を行う系は GaAs 量子ドットのように特定のスピンの状態を持つ電子を励起できるような光学遷移を持つものとする。ここで用いる光学遷移は重い正孔状態から \uparrow スピンを立てるような、ただ1通りの電子スピンを励起する遷移であれば良い。また、量子ドットには磁場が印加されているものとする。光子により量子ドットに励起された電子スピンは印加磁場の方向を回転軸とした歳差運動を行なう。2つのパルスによるスピン励起のタイミング (遅延時間 τ_d) とラーモア歳差運動の半周期とを合わせることで、光子の持つ量子状態 (α , β) に対応した量子状態をもった電子スピンを量子ドットに励起することが可能となる。

このタイムビン量子状態転写において、高い転写忠実度を得るためのデバイス条件を明らかにするため、③-3 と同様の解析モデルを用いて転写過程の解析を行った。ただし、1通りのスピンだけを立てる光学遷移を用いる点と、磁場により電子スピンのラーモア歳差運動するという点について、前回のモデルとの変更をおこなっている。転写忠実度の解析 (図 3-5 (b)) より、光子-励起子間結合強度 (励起子生成の速度) と正孔の引き抜き速度がともにタイムビンの遅延時間 τ_d の逆数よりも小さくなるようなデバイス条件のもとで、1に近い転写忠実度が得られることがわかった。このことは転写を行うシステム及び環境が二つのパルスを識別できないような状況において初めて量子的なコヒーレンスを保った転写が可能であることを示唆している。

なお、今回提案を行ったタイムビン量子状態転写の手法は、従来の偏光状態からの転写で用いた軽い正孔状態を選択制御することで得られる V 型遷移 といった特殊な構造は必要とせず、離散準位と単純な光学遷移をもつ一般的な電子系に適用可能である。今後は GaAs 系以外の固体素子において、各系ごとの具体的な転写手法について提案を行いたい。

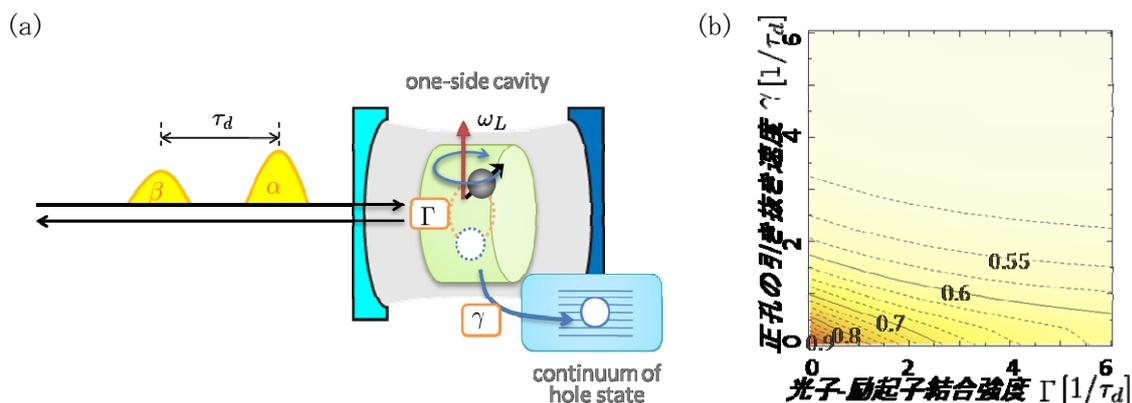


図 3-5. (a) タイムビン量子状態転写の解析モデル。光子にはタイムビン符号化により量子情報が載せられている。量子ドットには磁場が印加されており、光子により励起された電子スピンはラーモア歳差運動をする。パルスの遅延時間とラーモア歳差の半周期とを一致させることで、光子の量子状態に対応したスピン状態を持つ電子を量子ドットに生成することができる。(b) $\alpha = \beta$ とした場合の転写忠実度のパラメータ依存性。縦軸 γ は正孔の引き抜きレート、縦軸 Γ は光子-励起子間結合強度を表わす。 $\Gamma, \gamma \ll 1/\tau_d$ となる原点付近において1に近い転写忠実度を得ることができる。

④成果の位置づけ

今村グループおよび力武グループで得られた研究成果は大きく、単一光子から単一電子スピンへの量子状態転写に関するものと、少数電子(1及び2電子)のスピン状態の測定手法に関するものとに大別される。前者の量子状態転写についての成果は、量子中継において、伝令量子ビットとなる光子から情報処理機能を担う固体素子量子ビットへの変換インターフェース部を実現する際に重要なものとなる。光から電子スピンへという異種メディア間での量子情報転写の実現可能性を示すとともに、高効率な変換を可能とするデバイス設計の指針を与えた。また後者の少数電子のスピン状態の測定に関しての成果は、量子中継において、離れたノード間での量子エンタングルメント共有の実現に必須なものとなる。これら本研究の成果は、量子中継システムを固体素子によって構築していく際の理論的基盤を与えるものとして位置づけることができる。

(2)研究成果の今後期待される効果

今村グループおよび力武グループの研究成果によって、量子状態転写および転写後の量子状態測定について新たな手法の理論的提案と、その基礎理論を構築することができた。特殊な光学遷移を必要としないタイムビンによる量子状態転写の概念は、一般的な系に適用可能な手法でもあり、様々な物理系において量子状態転写の実現性を探ることが可能となる。また、スピン状態トモグラフィおよび2電子スピン量子状態の手法は、高速かつ効率的に電子のスピン状態及びエンタングルメント状態を測定する手段を与える。転写効率の高い系を見だし、提案したスピン状態測定手法をエンタングル共有のプロトコルに適用させることで、効率的な量子中継器を構築出来ると考えられる。本研究で得られた基礎理論を今後の量子中継システムの研究開発の指導原理とすることにより、非常に高効率な研究開発が可能となることが期待される。

4. 4 光・電子・核スピン量子素過程の理論(京都工芸繊維大 高河原グループ)

(1)研究実施内容及び成果

①研究のねらい

量子中継器を実現するには、伝令キュービットとしての光子と演算キュービットとしての電子スピンの間の量子状態転写、及び異なる光子から量子状態転写を受けた電子間の相関測定の二つが不可欠である。更に、量子中継器を実現する上では本質的ではないが、装備できることが強く望まれるものとして核スピンメモリがある。ここでは、これらの三つの要素について物理的素過程を考察し、実験を行う上で最適な材料、配置条件等についての提言に結び付けてゆく。量子状態転写を実現するための物理的条件を明らかにするため、まずは理想的な量子ドット構造について、次に実験グループが採用している単一量子井戸構造に形成した電界形成量子ドットについて、励起子生成、正孔解離のダイナミクスを考察する。2つの光子により個別に生成された2つの電子間の量子相関測定を光学的に行う方法を考察する。具体的には、非共鳴直線偏光のファラデー(カー)回転による方法の実現可能性を考察する。核スピンメモリについては、単一電子スピンから1個または少数の原子核スピンへの量子状態転写を行い、長いコヒーレンス時間を持つ原子核スピンを量子メモリとして用いる方法を考察する。

また、演算キュービットとしての電子スピンのコヒーレンス時間は重要な物理パラメータである。量子中継器は究極的には室温で動作できることが望ましいが、そのためにはコヒーレンス時間の温度依存性の知見が必要である。量子ドットにおける電子スピンの縦緩和、デコヒーレンスの主要な機構は、スピン軌道相互作用と電子格子相互作用、原子核との超微細相互作用であることがすでに議論されているが、具体的な縦緩和、デコヒーレンス時間の温度依存性、磁場強度依存性、構造パラメータ依存性は系統的には解明されていない。これらを解明し、縦緩和、デコヒーレンス時間の理論的極限を探る。

②研究実施方法

量子状態転写を実現する際の物理的条件を明らかにするために、密度行列に基づく数値解析を行う。励起子生成後の正孔引き抜き過程をモデル化し、引き抜き過程の途中で電子および正孔のスピン状態を乱雑化する電子正孔交換相互作用を考慮に入れる。これは最も簡単なモデル化ではあるが、満たすべき物理的条件を定性的に理解させてくれる。実験で用いられる電界形成量子ドットについては、できるだけ現実的な要素を取り込むために、電子および正孔の離散準位のみならず連続準位をも考慮して解析を行う。

電子スピンの縦緩和、デコヒーレンスの主要な機構は、低温の極限では、フォノン放出過程と原子核スピンとの超微細相互作用によるゆらぎである。ここでは前者による縦緩和、デコヒーレンスを定量的に解析する。量子ドットにおける単一電子のエネルギー準位が求まれば、スピン縦緩和率はフェルミの黄金律により計算される。通常は1フォノン過程として計算されることが多いが、スピン分裂エネルギーが小さい場合には、2フォノン過程を考慮に入れる必要がある。次に、一般の非対角コヒーレンス(密度行列の非対角成分)の減衰時間を評価するための二重ファインマンダイアグラム法を開発し、それを電子スピンのデコヒーレンス時間の評価に適用する。

量子中継の基幹部分である量子相関測定においては、異なる光子から量子状態転写を受けた2つの電子のスピン量子相関を測定する必要がある。電子の量子状態を乱さずかつ簡便に行うために、非共鳴直線偏光のファラデー回転を用いる光学的方法を考える。光子から電子への量子状態転写においては、軽い正孔準位を使うことが重要なポイントであるが、正孔の引き抜き後に用意された2個の電子のスピン状態を測定するには、必ずしも軽い正孔準位を使う必然性はなく、面直方向の磁場のもとでの重い正孔準位にもとづくファラデー回転を利用すればよい。

量子中継において装備できることが強く望まれるものとして、核スピンメモリがある。こ

の実現に向けての提言を行うことが目標であるが、その前段階として、電子・核スピン結合系の量子ダイナミクスを調べる。特に、2重量子ドットにおける2個の電子と核スピンとの間の超微細相互作用により、系に蓄積される量子メモリの効果を考察する。実現可能な核スピンメモリとしては、1個または少数の核スピンに基づくものが有利と考えられる。多数の核スピンからなる系では、核スピン間の双極子相互作用によるデコヒーレンスが無視できないからである。そのため、III-V族半導体にはこだわらず、IV族及びII-VI族半導体も含めて量子メモリに最適な核スピン系を探索する。

③研究結果

③-1. 光子から電子スピンへの量子状態転写の忠実度

量子状態転写の素過程は、光子によって量子ドット内に作られた励起子のうち、正孔を引き抜き、電子のみを残すことである。この正孔の引き抜きの途中で、電子正孔交換相互作用により、電子および正孔のスピン状態が乱雑化される。光子の量子情報を受け取った電子のコヒーレンスが、この引き抜き過程により劣化して行く様子を密度行列を用いて解析した。その結果、高い忠実度の量子状態転写を実現するためには、正孔の引き抜き時間を電子正孔交換相互作用の逆数より短くすることが要請されることがわかった。この解析は、電子・正孔がともに離散的な準位を持ち、特定の準位間が共鳴的に励起されるという仮定のもとで行われている。より現実的な状況での解析を行うため、量子井戸面内にゲート電極で形成した電界形成量子ドットを考えた。ここでは電子 T_1 は2次元的な閉じ込めを受けているが、正孔は閉じ込められてはならず連続スペクトルを持つ。従って、1光子により作られた励起子の位相緩和と同時に正孔は電極の方に吸い込まれて行く。解析の結果、電子への量子状態転写に際して、正孔が連続準位をなすことは致命的ではないこと、励起光のスペクトル幅のため多数の電子準位が励起される場合、それらの準位間の緩和がコヒーレンスの劣化をもたらすこと、がわかった。従って、高い忠実度の量子状態転写を行うには、離散的な電子準位を選択的に励起すること、電子正孔交換相互作用が十分小さいことが要請される。

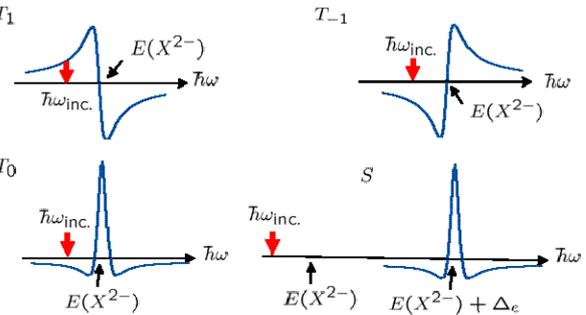


図4-1. 直線偏光のプロブ光に対するFaraday(Kerr)回転角のプロブ光エネルギー($\hbar\omega$)依存性。 $E(X^{2-})$ は荷電励起子のエネルギー。singlet状態Sに対する共鳴は、 $E(X^{2-})$ より軌道状態の励起エネルギー(Δ_e)だけ高エネルギー側に現れる。例えば、プロブ光のエネルギー位置を矢印の位置に選ぶと、2電子のスピン状態(singlet状態S、triplet状態 T_1 , T_0 , T_{-1})を区別できる。

③-2. 電子スピンの縦緩和、デコヒーレンス時間の理論的極限

量子ドットにおける単一電子のエネルギー準位を求め、2フォノン過程まで考慮に入れて、スピン縦緩和率を計算した。その結果、1フォノン過程と2フォノン過程のクロスオーバーが起り、数T以下の磁場下では1フォノン過程が失効し2フォノン過程が主要となることがわかった。この理論検討により、1K以下の低温かつ1T程度の低磁場下において1sの電子スピン縦緩和時間(T_1)と数10msのデコヒーレンス時間(T_2)を得る可能性のあることがわかった。電界形成量子ドットでは電子閉じ込めが弱く、電子格子相互作用の結合強度が小さくなることから、フォノン過程のみを考える限り秒オーダーの T_2 が予想される。

③-3. ファラデー回転を用いる2電子の量子相関測定

単一量子ドットに2個の電子が用意されている状態から議論を始める。磁場は量子井戸面に垂直に印加されているとし、電子・重い正孔間の遷移にもとづくファラデー回転を考察した。その結果、三重項 T_1 , T_{-1} (磁気量子数が各々1, -1)の状態については、ファラデー回転角の符号が異なること、三重項 T_0 と一重項の状態については、左、右円偏光がいずれも光学許容であるため、ファラデー回転角の波長分散(入射光エネルギーに対する依存性)が特徴的な形状を示すこと、一重項状態に関する共鳴エネルギーは三重項状態に関するものより高エ

エネルギー側にあること、がわかった (図 4-1)。以上の考察をまとめると、一重項と 3 つの三重項状態の計 4 つの状態を、ファラデー回転角の大きさと向きにより原理的には区別できる。

③-4. 電子・核スピン結合系の量子ダイナミクス

電子のスピン状態の観測が核スピンの状態分布に影響を及ぼし、それがまた次の電子スピンの観測結果に影響を及ぼすという、反作用の連鎖を見出した。ゲート制御型 2 重量子ドットにおける 2 電子の一重項(S)、三重項(T_0)状態を区別する観測において、核スピン系が量子コヒーレンスを保持する場合にのみ、観測結果のバンチング現象(例えば、一重項状態を続けて観測する確率が高くなること)が発現することを見出した (図 4-2)。また、同様な実験配置で電子スピン状態の観測を繰り返し、その観測結果において一重項又は三重項が連続する場合、次の観測で同じ結果(S 又は T_0)を得る確率が時間的に振動する (リバイバル) ことを見出した。これらの現象の物理的起源は、電子スピン状態の繰り返し測定による核スピン状態の スクイーミング である。実際核スピン系の状態純度を計算してみると、測定回数と共に純度が上昇することがわかった。これは電子スピンと核スピンとの相互作用による量子メモリ効果と見ることもでき、電子スピンから核スピンへの状態転写と逆転写 (読み出し) の可能性を示唆するものである。

③-5. IV 族、II-VI 族半導体中の少数電子、単一原子核スピン結合系を用いた量子メモリ

III-V 族半導体では母体原子がすべて核スピンを持っており、核スピン間の双極子相互作用による デコヒーレンス が避けられないため、量子メモリとして用いるには不利である。むしろ、IV 族、II-VI 族のようにスピンを持つ同位体が数%である半導体が有利である。1 個又は 2 個の電子と 1 個の原子核スピンを含む量子ドット、又はバルク結晶中の核スピンを持つ中性ドナー原子を考える。2 個の電子を含む量子ドットの場合は、一重項と三重項状態の交差点において超微細相互作用による状態転写を行う。この時、核スピン状態の初期化が必要であるが、これは上記③-4 の原理に基づく probabilistic な方法により可能である。また、スピン軌道相互作用により一重項と三重項状態の交差点が反交差となるが、ドナーの束縛電子を用いる場合はその大きさは超微細相互作用に比べて無視できることが示される。一方、1 個の電子と 1 個の原子核スピンからなる系においては、超微細相互作用による状態転写は状態の swap に他ならず、核スピン状態の初期化は必要ない。いくつかの実例についてメリット、デメリットを比較したのが表 4-1 である。これから、核スピン状態の初期化が必要でない点、電子・原子核スピン間の状態転写の高速性、スピン軌道相互作用に影響されない点、光とのインターフェースの良好性などから、量子ドットまたはバルク結晶中の核スピンを持つ 中性ドナー原子が量子メモリとして有望であると考えられる。

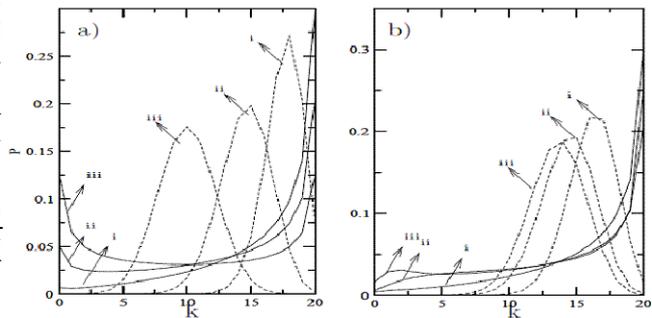


図 4-2. 核スピンの量子メモリ効果を示す計算結果。ゲート制御型量子ドットにおいて 2 個の電子のスピン状態 (一重項又は三重項) の観測を、20 回連続して行う場合に、一重項を k -回 (三重項は $20-k$ 回) 観測する確率をプロットしたもの。 $k=0$ は、20 回すべて三重項状態、 $k=20$ は 20 回すべて一重項状態を観測する場合に対応。実線は核スピンのコヒーレンスが 20 回の観測の間保たれている場合に対応、破線は 1 回の観測ごとに核スピンが熱平衡化されると仮定した場合に対応。i, ii, iii は 2 個の電子を別々のドットに引き離れた状態に保持する時間 t の大小を表わす。核スピンによる有効磁場を表わすパラメーター σ を用いて $\sigma t = 0.5$ (i), 1.5 (ii), ∞ (iii) と対応。2 電子間の実効的な交換相互作用を J とし、 $J=0$ (a)、 $J/\sigma = 0.5$ (b) と選んである。(b) では、一重項状態がエネルギー的に有利なため、一重項状態を観測する確率が三重項状態を観測する確率より高くなっている。

③-6. 2 電子スピンの STIRAP によるユニタリ回転

電子スピンを 光学的方法 で操作することは、その 高速性 から極めて有利である。実際、1 電子については STIRAP (STIMulated Raman Adiabatic Passage) 法によるユニタリ回転が実現されている。一方で、2 重量子ドット中の 2 電子のスピン状態操作が実現され、2 電子からなる qubit も量子情報処理の

building block として重要である。ここでは、2 電子からなる qubit のユニタリ回転を光学的に行う方法を考察した。3 電子と 1 正孔からなる荷電励起子状態を中間状態とする STIRAP 過程が可能である。量子ドットを形成する量子井戸面に平行に磁場を印加し、光は井戸面に垂直に入射する Voigt 配置を考える。この場合の光学選択則を図 4-3 に示す。例えば、S と T1 の 2 状態からなる pseudospin は、任意の方向に任意の角度だけ回転する操作が可能である。一般に、x-偏光と y-偏光の相対強度比、位相差を制御して回転方向を、励起光の detuning を制御して回転角を調節できる。一方、S と T₀ の 2 状態からなる pseudospin は、この方法では回転できず、別の方法が必要である。

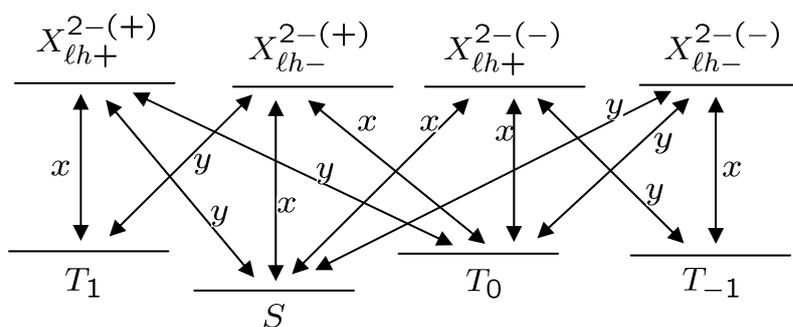


図 4-3. 2 電子のスピンの状態を回転するための光学遷移の選択則。量子ドットが形成される量子井戸面に平行に磁場が印加され (Voigt 配置)、光は井戸面に垂直に入射する (z-方向)。X²⁻_{lh} は 3 個の電子と 1 個の軽い正孔からなる荷電励起子状態、(+), (-) は、励起状態にある 3 個目の電子のスピンの向きを表わす。x, y は偏光方向を表わす。

	two-electron qubit			single-electron qubit		
	(a) Si QD	(b) ZnSe QD	(c) Si:P QD	(d) Si:P	(e) ZnSe:F	(f) ZnSe QD
Nuclear spin initialization	necessary	necessary	necessary	unnecessary	unnecessary	unnecessary
Electron-nuclear QST time	~ 1 ms	~ 1 ms	~ 20 ns	~10 ns	~ 10 ns	~ 1 ms
Spin-orbit vs. hyperfine coupling	V _{SO} ~ V _{hf}	V _{SO} ~ V _{hf}	V _{SO} ≪ V _{hf}	irrelevant	irrelevant	irrelevant
S-T _± crossing	unfavorable	unfavorable	favorable	irrelevant	irrelevant	irrelevant
Optical Interface	hard	possible	good	good	good	possible

表 4-1 : 1 電子 qubit と 2 電子 qubit について、核スピン量子メモリーを実現する上でのメリット、デメリットを比較したもの。量子状態転写の高速性、核スピンの初期化が不要な点、スピン軌道相互作用に影響されない点、光とのインターフェースが良好である点から、ドナー原子に局在した一電子 qubit が有利と考えられる。

(2) 研究成果の今後期待される効果

高河原グループの研究成果によって、電子スピンの初期化、回転、状態測定をすべて光学的に実行するための基礎理論を構築することができた。次のステップは、空間的に離れた電子スピン間の相関生成、相関状態の制御と測定であり、量子中継をはじめ量子ネットワーク形成のための基盤技術となるものである。これらもすべて光学的に実行できることが望ましい。核スピン量子メモリーについては、局在電子系などの単一電子、単一核スピン系が望ましいことが我々の研究でわかっている。従って、これらの局在した qubit 群を光でつなぐ量子ネットワークが有望と考えられる。今後はこれらの実現に向けた考察を展開する。

本理論グループは、新現象の予言、新しい実験スキームの提案などを通して貢献してきた。これらの新現象が実験的に確認されれば、これまでの理論的考察が見落とししていた側面が明らかになって更に理解が進み、新しい応用に向けた発展が期待される。

§ 5 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内(和文)誌 0件、国際(欧文)誌 46件、投稿中 3件)

- [1] Y. Mitsumori, A. Hasegawa, M. Sasaki, H. Maruki, and F. Minami, “Local field effect on Rabi oscillations of excitons localized to quantum islands in a single quantum well”, *Phys. Rev. B* 71, 233305/1-4 (2005).
- [2] A. Takamizawa, G. Yonezawa, H. Kosaka, and K. Edamatsu, “Littrow-type external-cavity diode laser with a triangular prism for suppression of the lateral shift of output beam”, *Rev. Sci. Instr.* 77, 046102/1-4 (2006).
- [3] T. Kutsuwa, K. Arai, H. Shigyo, H. Kinjo, K. Ono, Y. Mitsumori, H. Kosaka and K. Edamatsu, “Single photon response in GaAs quantum transport devices for photon-spin quantum state transfer”, *Phys. Stat. Sol. (c)* 3, pp. 4326-4329 (2006).
- [4] K. Arai, T. Kutsuwa, H. Kinjo, K. Ono, H. Kosaka, and K. Edamatsu, “Evaluation of g-factor by quantum transport measurement for photon-spin quantum state transfer”, *Phys. Stat. Sol. (c)* 3, pp. 4334-4337 (2006).
- [5] Yoshiaki Rikitake, Hiroshi Imamura, Hideo Kosaka, “Fidelity analysis of the photon-spin quantum state transfer”, *Phys. Stat. Sol. (c)* 3, pp. 4350-4353 (2006).
- [6] O. Cakir and T. Takagahara, “Electron spin dynamics and hyperfine interaction in coupled quantum dots”, *Phys. Stat. Sol. (c)* 3, pp. 4392-4395 (2006).
- [7] A. Tackeuchi, T. Kuroda, K. Yamaguchi, Y. Nakata, N. Yokoyama and T. Takagahara, “Spin relaxation and antiferromagnetic coupling in semiconductor quantum dots”, *Physica E* 32, pp. 354-358 (2006).
- [8] Y. Mitsumori, A. Hasegawa, M. Sasaki, and F. Minami, “Anomalous photon echoes and Rabi oscillations of quantum dot excitons”, *Proc. SPIE* 6115, 61151J/1-6 (2006).
- [9] Yoshiaki Rikitake and Hiroshi Imamura, “Effect of exchange interaction on the fidelity of quantum state transfer from a photon qubit to an electron-spin qubit”, *Phys. Rev. B*, 74, 081307(R) (2006).
- [10] S. Tarucha, Y. Kitamura, T. Kodera, K. Ono, “Lifting of spin blockade by hyperfine interaction in vertically coupled double quantum dots”, *Phys. Stat. Sol. B* 243, 3673 (2006).
- [11] H. Kosaka, Y. Mitsumori, Y. Rikitake, and H. Imamura, “Polarization Transfer from Photon to Electron Spin in g factor Engineered Quantum Wells”, *Appl. Phys. Lett.* 90, 113511 (2007).
- [12] H. Kosaka, T. Kutsuwa, K. Arai, Y. Rikitake, K. Ono, H. Imamura, T. Takagahara, Y. Mitsumori, K. Edamatsu, “A quantum device interfacing photons and spins for quantum repeaters”, *Proc. of 28th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2006)*, pp.1099-1100, 2007.
- [13] Yoshiaki Rikitake, Hiroshi Imamura, and Hideo Kosaka, “Effect of the electron-hole exchange interaction on the photon-spin quantum state transfer”, *Proc. of 28th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2006)*, pp.1103-1104 (2007).
- [14] T. Takagahara, “Non-Markoffian Theory of Electron Spin Decoherence in a Single Quantum Dot”, *Proc. of 28th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2006)*, pp.1333-1334 (2007).
- [15] O. Cakir and T. Takagahara, “Spin Dynamics of Electron Nuclei Coupled System in a Double Quantum Dot”, *Proc. of 28th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2006)*, pp.1107-1108 (2007).
- [16] O. Cakir and T. Takagahara, “Estimation of Nuclear Spin State in a Double Quantum Dot via Hyperfine Interaction”, *Proc. of International Conference on Nanoscience and Technology (ICN&T 2006)*, *J. Phys.: Conf. Ser.* 61, pp.175-179 (2007).
- [17] H. Kosaka, T. Kutsuwa, K. Arai, Y. Rikitake, K. Ono, H. Imamura, T. Takagahara, Y. Mitsumori, K. Edamatsu, “Quantum state transfer from a photon to an electron spin for building a quantum repeater”, *Proc. of 8th International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing (QCMC-8)*, pp. 575-578, (2007).
- [18] Yoshiaki Rikitake, Hiroshi Imamura and Hideo Kosaka, “Fidelity of the photon-spin quantum state transfer”, *Proc. of 8th International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing (QCMC-8)*, pp. 583-586 (2007).
- [19] R. Shimizu, T. Yamaguchi, Y. Mitsumori, H. Kosaka and K. Edamatsu, “Generation of polarization entangled photons using a spatial correlation in spontaneous parametric down-conversion”, *Proc. of 8th International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing (QCMC-8)*, pp.43-46, (2007).
- [20] J. Baugh, Y. Kitamura, K. Ono, S. Tarucha, Large nuclear Overhauser fields detected in

- vertically-coupled double quantum dots, *Phys. Rev. Lett.* 99, 096804 (2007).
- [21] Yoshiaki Rikitake Hiroshi Imamura and Hideo Kosaka, “Theoretical Analysis of the Optimal Conditions for Photon-Spin Quantum State Transfer”, *Journal of the Physical Society of Japan* Vol. 76, No. 11, November, 114004 (2007).
- [22] O. Cakir and T. Takagahara, “Quantum Dynamics of Electron-Nuclei Coupled System in Quantum Dots”, *Proc. of Second International Conference on Nanometer-Scale Quantum Physics (NanoPhys, Tokyo Institute of Technology COE21)*, *Physica E* 40, pp. 379-382 (2007).
- [23] Hideo Kosaka, Hideki Shigyou, Yasuyoshi Mitsumori, Yoshiaki Rikitake, Hiroshi Imamura, Takeshi Kutsuwa, Koichiro Arai and Keiichi Edamatsu, “Coherent transfer of light polarization to electron spins in a semiconductor”, *Physical Review Letters*, 100, 096602 (2008).
- [24] Ryosuke Shimizu, Takashi Yamaguchi, Yasuyoshi Mitsumori, Hideo Kosaka, and Keiichi Edamatsu, “Generation of polarization entanglement from spatially correlated photons in spontaneous parametric down-conversion”, *Phys. Rev. A* 77, 032338 (2008).
- [25] T. Koder, K. Ono, S. Amaha, Y. Tokura, Y. Arakawa, and S. Tarucha, “Elastic and Inelastic Tunneling through One-electron and Two-electron”, *States in Vertical Double Quantum Dot*, *physica status solidi(c)* 5, 2854-2857, (2008).
- [26] S. M. Huang, H. Akimoto, K. Kono, J. J. Lin, S. Tarucha, and K. Ono, The study of spin transport from doublet to triplet states in Quantum Dots, *Jpn. J. Appl. Phys.* 47, No. 4, 3257 (2008).
- [27] S. Amaha, C. Payette, J. A. Gupta, T. Hatano, K. Ono, T. Koder, Y. Tokura, D. G. Austing, and S. Tarucha, “Two level mixing effects probed by resonant tunnelling through vertically coupled quantum dots”, *physica status solidi (c)* 5, 174 (2008).
- [28] T. Koder, K. Ono, S. Amaha, Y. Tokura, Y. Arakawa, and S. Tarucha, “Singlet-triplet transition induced by Zeeman energy in weakly coupled vertical double quantum dots”, *Physica E*, 40 (5), 1139(2008).
- [29] K. Zaitzu, Y. Kitamura, K. Ono, and S. Tarucha, “Vertical quantum dot with a vertically coupled charge detector”, *Appl. Phys. Lett.* 92, 033101 (2008).
- [30] J. Baugh, Y. Kitamura, K. Ono, S. Tarucha, “Dynamic nuclear polarization in a double quantum dot device: electrical induction and detection”, *Phys. Stat. Sol. (c)* 5, No.1, 302 (2008)
- [31] O. Cakir and T. Takagahara, “Quantum dynamics in electron-nuclei coupled spin system in quantum dots: Bunching, revival, and quantum correlation in electron-spin measurements”, *Phys. Rev. B* 77, 115304 (2008).
- [32] Hideo Kosaka, Takahiro Inagaki, Yoshiaki Rikitake, Hiroshi Imamura, Yasuyoshi Mitsumori and Keiichi Edamatsu, “Spin coherence tomography of optically imprinted electrons in a semiconductor”, *Nature*, 457, 702 (2009).
- [33] Nobuyuki Matsuda, Ryosuke Shimizu, Yasuyoshi Mitsumori, Hideo Kosaka, and Keiichi Edamatsu, “Observation of optical-fiber Kerr nonlinearity at the single-photon level”, *Nature Photonics*, 3, 95-98 (2009).
- [34] H. Kosaka, H. Shigyou, Y. Mitsumori, Y. Rikitake, H. Imamura, T. Kutsuwa, K. Edamatsu, “Coherent spin state transfer from light to electrons in a semiconductor”, *Proc. of International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing (QCMC2008)*, pp. 245-248 (2009).
- [35] N. Matsuda, R. Shimizu, Y. Mitsumori, H. Kosaka and K. Edamatsu, “Measurement of cross-Kerr nonlinearity induced by a single-photon-level coherent pulse in a photonic crystal fiber”, *Proc. of International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing (QCMC2008)*, 228-231 (2009).
- [36] Y. Mitsumori, N. Kato, H. Kosaka, K. Edamatsu, N. Yamamoto, K. Akahane, “Time-resolved photoinduced Kerr rotation in semiconductor microcavity”, *Phys. Stat. Sol. (c)*, 6, 292-295 (2009).
- [37] Nobuhiko Yokoshi, Hiroshi Imamura and Hideo Kosaka, “Electrical Measurement of a Two-Electron Spin State in a Double Quantum Dot”, *Phys. Rev. Lett.*, 103, 046806 (2009).
- [38] T. Koder, K. Ono, Y. Kitamura, Y. Tokura, Y. Arakawa, S. Tarucha, “Quantitative estimation of exchange interaction energy using two-electron vertical double quantum dots”, *Phys. Rev. Lett.* 102, 146802 (2009).
- [39] Y. Tokura, K. Ono, and S. Tarucha, “Tunneling current through g-factor engendered series quantum dots”, *Phys. Stat. Sol. B* 246, No.4, pp. 740-743 (2009)
- [40] Ozgur Cakir and Toshihide Takagahara, “Proposals of nuclear spin quantum memory in group-IV elemental and II-VI semiconductors”, *Phys. Rev. B* 80, 155323 (2009). *Phys. Rev. B* 80, Oct. 15 issue (2009).
- [41] S. Amaha, T. Koder, T. Hatano, K. Ono, Y. Tokura, S. Tarucha, J. A. Gupta and D.G. Austing, “Pauli spin blockade and singlet-triplet mixing effects in many-electron weakly coupled quantum dots”,

- accepted to Appl. Phys. Exp.
- [42] T. Inagaki, H. Kosaka, Y. Rikitake, H. Imamura, Y. Mitsumori, K. Edamatsu, “Optical measurement of electron spin coherence in a semiconductor quantum well”, accepted to Physica E (2009).
 - [43] S. M. Huang, Y. Tokura, H. Akimoto, K. Kono, J. J. Lin, S. Tarucha, K. Ono, “Spin bottleneck in resonant tunneling through double quantum dots with different Zeeman splittings”, Phys. Rev. Lett. in press (2010).
 - [44] Y. Rikitake, H. Imamura, H. Kosaka, “Scheme for magneto-optical tomographic measurement of an electron spin state in a semiconductor quantum dot”, submitted to Phys. Rev. Lett. (2009).
 - [45] Nobuhiko Yokoshi, Hiroshi Imamura, and Hideo Kosaka, “Proposal of a full Bell state analyzer for spin qubits in a double quantum dot”, submitted to Phys. Rev. Lett. (2009).
 - [46] Matsuda, Nobuyuki; Shimizu, Ryosuke; Mitsumori, Yasuyoshi; Kosaka, Hideo; Sato, Aya; Yokoyama, Hiroyuki; Yamada, Koji; Watanabe, Toshifumi; Tsuchizawa, Tai; Fukuda, Hiroshi; Itabashi, Seiichi; Edamatsu, Keiichi, “All-optical phase modulations in a silicon wire waveguide at ultralow light levels” Appl. Phys. Lett., 95, 171110 (2009).
 - [47] Nobuyuki Matsuda, Ryosuke Shimizu, Yasuyoshi Mitsumori, Hideo Kosaka, Aya Sato, Hiroyuki Yokoyama, Koji Yamada, Toshifumi Watanabe, Tai Tsuchizawa, Hiroshi Fukuda, Seiichi Itabashi, Keiichi Edamatsu, “All-optical phase modulations in a silicon wire waveguide at ultralow light levels” Appl. Phys. Lett., 95, 171110 (2009).
 - [48] T. Takagahara, “Theory of Unitary Spin Rotation and Spin State Tomography for a Single Electron and Two Electrons”, submitted to JOSA B (2009).
 - [49] Makoto Kuwahara, Takeshi Kutsuwa, Keiji Ono and Hideo Kosaka, “Single charge detection of an electron created by a photon in a g-factor engineered quantum dot”, Appl. Phys. Lett. accepted.

(2) その他の著作物（総説、書籍など）（11 件）

- [1] 小坂英男、「光子キュービットから電子スピンキュービットへの量子メディア変換と g 因子エンジニアリングー量子中継器の実現に向けてー」、固体物理 vol. 39, no. 2 トピックス, pp. 106-116 (2004).
- [2] 小坂英男、「光子と電子スピンを用いた量子リピーター・量子メモリーへ向けた取り組み」、応用物理（応用物理学会誌）、vol. 75, no.11 最近の展望 欄, pp.1335-1339 (2006).
- [3] 小坂英男、「光から電子スピンへの量子コヒーレンス転写」、固体物理 vol. 43, no. 8 トピックス, pp. 489-497 (2008).
- [4] 小坂英男、「量子中継と量子転写」、電子情報通信学会誌、2008 年 11 月特集号「量子情報処理技術の新展開」、vol. 91, no.11, pp. 946-951 (2008).
- [5] Hideo Kosaka, “The light way to quantum computers”, Nature Asia Materials, featured highlights, May 13, 2008.
- [6] T. Takagahara and Ozgur Cakir, “Quantum State Transfer from a Photon, to an Electron Spin in Quantum Dots and Quantum Dynamics of Electron-Nuclei Coupled System,” in Semiconductor Quantum Bits, eds. F. Henneberger and O. Benson, pp. 179-198 (World Scientific, Singapore, 2008).
- [7] 小坂英男、「スピントロニクスによる量子メディア変換デバイス」、オプトロニクス、2009 年 2 月特集号「ナノフォトニックデバイスの挑戦」、No. 326, pp. 145-152 (2009).
- [8] 小坂英男、「光と量子情報（光子偏光を電子スピンに転写する技術：スピンと光の橋渡し）」、まぐね（日本磁気学会誌）、2009 年 第 4 巻 6 号。
- [9] 小坂英男、「光子と電子スピンの量子情報交換」、日本物理学会誌 BUTURI 解説、vol. 65, no. 10, pp. 2-9 (2009).
- [10] 小坂英男、「光で生成した電子スピンの状態トモグラフィー」、固体物理 トピックス、vol. 44, no. 9, pp. 603-612 (2009).
- [11] 小坂英男、「知識ベース」、電子情報通信学会 2010 年刊行予定、S 2 群「ナノ・量子・バイオ」5 編「量子通信と量子計算」2 章「量子ネットワーク」1 節「量子中継」執筆

(3)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 5件、国際会議 14件)

- [1] H. Kosaka, “A single photon-electron device for quantum state transfer from a photon qubit to an electron-spin qubit” (Invited talk), 11th RIKEN International Nanoscience and Technology Conference, pp. 24-25, 2005, Hotel Arcadia, Iizuna Kogen, Nagano, Japan, Jun. 21-24, 2005.
- [2] H. Kosaka, “Nano spin photonics for quantum information” (Invited talk), 24th Electronic Materials Symposium (EMS), pp.29-30, 2005, Mielparque Matsuyama, Dogo-Himeduka, Japan, July 4-6, 2005.
- [3] 今村裕志, 「Rashba 効果を介した相互作用量子ドットシステム」(招待講演), 日本物理学会 2005 年秋季大会, 領域 4 シンポジウム「Rashba スピン工学に関連する諸問題の現状と展望」, 同志社大学京田辺キャンパス, 2005 年 9 月 21 日.
- [4] Y. Mitsumori, A. Hasegawa, M. Sasaki, and F. Minami, “Anomalous photon echoes and Rabi oscillations of quantum dot excitons”(Invited talk), Optoelectronics 2006 PHYSICS AND SIMULATION OF OPTOELECTRONIC DEVICES XIV, (Photonics West 2006) ,San Jose, CA, USA,Jan.25,2006.
- [5] T. Takagahara, “Theory of Quantum State Transfer from Photon to Electron Spin and Electron Spin Decoherence” (Invited talk), 4th NIMS International Conference on Photonic Processes in Semiconductor Nanostructures, Tsukuba, March 8-10, 2006
- [6] K. Ono, Y. Kitamura, A. Takahashi, S.Yamaguchi,T. Inoshita, Y. Hirayama, and S. Tarucha, “Electrical manipulation of electron and nuclear spins in quantum dots” (Invited talk), 6th Rencontres du Vietnam Nanophysics: from fundamentals to applications (Vietnam2006) , Hanoi, Vietnam, Aug. 6-12, 2006.
- [7] Hideo Kosaka, “Quantum repeaters and quantum memories” (Invited talk), Optics & Photonics Japan 2006 (OPJ2006), Tokyo, Japan, Nov. 8, 2006.
- [8] Hideo Kosaka, “Quantum state transfer from a photon to an electron spin for building a quantum repeater” (Invited talk), Nara Advanced Interdisciplinary Workshop on Quantum Information Science, Nara, Japan, Jan. 25-26, 2007.
- [9] 大野圭司, 黄日華, 黄旭明, 河野公俊, 樽茶清悟, 「量子ドットにおけるスピン選択則と電気伝導」(招待講演)、ナノ学会第 5 回大会, つくば国際会議場 2007 年 5 月 21-26 日.
- [10] Keiji Ono , “Spin and Photo-induced effects in semiconductor quantum dots”, 第 5 回なのはな量子伝導国際ワークショップ, 千葉大学, 2007 年 10 月 20 日
- [11] 小坂英男, 「光子とスピンの量子メディア変換」(招待講演)、第 68 回応用物理学会学術講演会シンポジウム 22pTH-12、北海道工業大学、2007 年 9 月 4-8 日.
- [12] T. Takagahara, “Theoretical Aspects of Quantum State Transfer, Correlation Measurement and Electron-nuclei Coupled Dynamics in Quantum Dots” (Invited talk), Japan-Germany Nanophotonics Seminar, Yonago, Japan, Sep.24- 28, 2007.
- [13] Hideo Kosaka, H. Shigyou, Y. Mitsumori, Y. Rikitake, H. Imamura, T. Kutsuwa, K. Edamatsu, “Coherent transfer of light polarization to electron spins in a semiconductor-toward quantum media conversion-” (Invited talk), The 3rd RIEC International Workshop on Spintronics Solid-State Quantum Information Technology -Spin, Photon and Superconductivity-, Sendai, Japan, Oct.31-Nov.1, 2007.
- [14] Hideo Kosaka, “Coherent transfer of light polarization to electron spins in a semiconductor quantum well”(Invited talk), 8th International conference on Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures (PLMCN8), Tokyo, Japan, Apr. 7-10, 2008.
- [15] T. Takagahara, “Theory of Electron Spin Manipulation and Nuclear Spin Quantum Memory in Quantum Dots” (Invited talk), Japan-US Nanophotonics Seminar, Miyazaki, September 23-27, 2008.
- [16] 小坂英男, 「光の偏光から電子スピンへのコヒーレンス転写とスピン状態トモグラフィ」(招待講演)、日本物理学会 2009 年春季大会シンポジウム、29pTX-8、立教大学、2009 年 3 月 27-30 日.
- [17] Hideo Kosaka, “Spin state tomography of optically injected electrons in a semiconductor” (Invited talk), AMO 第 6 回討論会, 大阪大学 豊中キャンパス Σホール, 2009 年 6 月 12 日-13 日.
- [18] Hideo Kosaka, “Coherent spin injection and spin state tomography by light in a semiconductor quantum well” (Invited talk), The 18th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS), Kobe, Japan, Jul. 19-24, 2009.
- [19] H. Kosaka, H. Shigyou, T. Inagaki, Y. Mitsumori, K. Edamatsu, T. Kutsuwa, M. Kuwahara, Keiji Ono, Y. Rikitake, H. Imamura, “Coherent spin injection, tomography and manipulation in a

semiconductor quantum well” (Invited talk), The 4th RIEC International Workshop on Spintronics Solid-State Quantum Information Technology -Spin, Photon and Superconductivity-, Sendai, Japan, Oct.22-23, 2009.

②口頭発表 (国内会議 80 件、国際会議 43 件)

- [1] 力武克彰、今村裕志、海老澤丕道 (東北大学大学院情報科学研究科)、「RKKY 相互作用で結合する 2 スピン系のデコヒーレンス」、第 11 回量子情報技術研究会 (QIT11)、京都大学百周年時計台記念館、(2004 年 12 月 6-7 日)。
- [2] 大野圭司 (東京大学)、「量子ドットにおける核スピン制御」、第 17 回佐々木シンポジウム電子物性の新展開：ナノ構造,スピン,超伝導、東京大学弥生講堂、2004 年 12 月 23 日。
- [3] Y. Igarashi(u-tokyo), T. Ota(ERATO), K. Ono(u-tokyo), Y. Nakata(Fujitsu), H.Z. Song(Fujitsu), T. Miyazawa(Fujitsu), T. Usuki(Fujitsu), N. Yokoyama(Fujitsu) and S. Tarucha(u-tokyo), “Zeeman splitting and Hund’s rule in strongly coupled InAs quantum dots”, NNCI2005, NTT Atsugi R&D center, January 31-February 2, 2005.
- [4] K. Ono(u-tokyo), A. Takahashi(u-tokyo), Y. Nishi(u-tokyo), Y. Hirayama(NTT), and S. Tarucha(u-tokyo), “Coherent manipulation of quadrupole nuclei in GaAs quantum dots”, International conference on nanoelectronics, nanostructure and carrier interaction (NNCI2005), Atsugi, January 31-February 2, 2005.
- [5] Yoshiaki Rikitake, Hiroshi Imamura and Hiromichi Ebisawa (東北大学大学院情報科学研究科), “Decoherence of localized spins interacting via RKKY interaction”, Nanoelectronics, Nanostructures and Carrier Interactions (NNCI2005), NTT Atsugi R&D Center, (January 31-February 2, 2005).
- [6] K. Ono(u-tokyo), “Nuclear spin effects in GaAs, Gordon Research Conferences on Quantum Information Science”, February 27 - March 4, 2005, Ventura, CA, USA.
- [7] K. Ono(u-tokyo), A. Takahashi(u-tokyo), Y. Nishi(u-tokyo), Y. Hirayama(u-tokyo), and S. Tarucha(u-tokyo), “Coherent manipulation of I = 3/2 nuclei in GaAs quantum dots”, ISQDPC 2005, Toranomon Pastoral, March 7-8, 2005.
- [8] Y. Igarashi(u-tokyo), T. Ota(ERATO), K. Ono(u-tokyo), Y. Nakata(Fujitsu), H.Z. Song(Fujitsu), T. Miyazawa(Fujitsu), T. Usuki(Fujitsu), N. Yokoyama(Fujitsu) and S. Tarucha(u-tokyo), “Spin effect in strongly coupled InAs quantum dots”, ISQDPC 2005, Toranomon Pastoral, March 7-8, 2005
- [9] 小坂英男 (東北大学)、「光子-半導体電子スピン量子メディア変換」、日本物理学会、千葉県野田市、千葉大学、2005 年 3 月 26 日。
- [10] 高橋明雄(東京大学)、大野圭司(東京大学)、西義史(東京大学)、平山祥郎 (NTT)、樽茶清悟(東京大学)、「量子ドットにおける核四重極相互作用とコヒーレント制御」、日本物理学会 第 60 回年次大会、東京理科大学、2005 年 3 月。
- [11] 五十嵐悠一(東京大学)、大野圭司(東京大学)、太田剛(ERATO)、中田義昭(富士通)、宋海智 (富士通)、宮澤俊之 (富士通)、臼杵達哉 (富士通)、高津求 (富士通)、横山直樹 (富士通)、樽茶清悟(東京大学)、「自己形成強結合 InAs ドットにおける電子 g 因子の測定とフント則の観測」、日本物理学会 第 60 回年次大会、東京理科大学野田キャンパス、2005 年 3 月 24-27 日。
- [12] K. Ono(u-tokyo), “Nuclear Spin Induced Oscillatory Current in Spin Blockaded Quantum Dots”, APS March Meeting 2005, Los Angeles, CA, USA, March 21-25, 2005.
- [13] 高河原俊秀 (京都工芸繊維大学)、「量子コヒーレンスとナノフォトニクス-電子スピン・光子変換を中心として」、応用物理学会 (埼玉県大宮市) (2005 年 3 月 29 日)。
- [14] 力武克彰、今村裕志、海老澤丕道 (東北大学大学院情報科学研究科)、「量子ドットからの正孔の共鳴トンネル条件の理論的解析」、日本物理学会 (千葉県野田市) (2005 年 3 月 24-27 日)。
- [15] 三森 (東北大、CREST)、田中 (東北大)、小林 (東北大)、小坂 (東北大、CREST)、枝松 (東北大、CREST)、赤羽 (NICT)、山本 (NICT)、「InGa 系自己形成量子ドット中の励起子四光波混合」、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、21aYD-2, p.608, 2005 年 9 月 22 日。
- [16] 力武克彰(CREST)、今村裕志(東北大,CREST)、「光子-電子スピン量子メディア変換の理論的解析」、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 22 日。
- [17] K. Ono(RIKEN,CREST), Y. Kitamura(U. Tokyo), A. Takahashi(U. Tokyo), S. Yamaguchi(U. Tokyo), T. Inoshita(JST), Y. Hirayama,(NTT) S. Tarucha(U. Tokyo), “Electron spin and nuclear spin manipulation in quantum dots”, The 11th RIKEN International Nanoscience and Technology Conference-Exploring a future direction in the field -, Hotel Arcadia Iizuka Kogen, Nagano, Japan.

23th June 2005.

- [18] Yosuke Kitamura(U. Tokyo), Keiji Ono(RIKEN), CREST, and Seigo Tarucha(U. Tokyo), “Electrical Control of Pauli Spin Blockade in Double Quantum Dot Devices”, 第2回量子情報未来テーマ開拓研究会, 高知工科大, 2005年8月31日~9月10日.
- [19] 北村陽介(東大)、大野圭司(理研,CREST)、平山祥郎(NTT)、樽茶清悟(東大)、「二重量子ドットにおけるパウリスピンブロックの電氣的制御」、日本物理学会、同志社大学、2005年9月19日
- [20] 力武克彰(CREST), 今村裕志(東北大,CREST) 「光子-電子スピン量子メディア変換の理論的解析」 第13回量子情報技術研究会 (QIT13), 東北大学電気通信研究所, 2005年11月24日-25日.
- [21] 三森(東北大、CREST)、田中(東北大)、小林(東北大)、小坂(東北大、CREST)、枝松(東北大、CREST)、赤羽(NICT)、山本(NICT)、「InAs系自己形成量子ドット中の励起子四光波混合」、第16回光物性研究会論文集、p.401-404、2005年12月9-10日.
- [22] 米澤元(東北大)、執行英樹(東北大)、久津輪武史(CREST)、新井宏一郎(ERATO)、三森康義(東北大、CREST)、小坂英男(東北大、CREST)、枝松圭一(東北大、CREST)、「時間分解カー回転測定による半導体量子井戸中の電子スピンの動的特性」、第16回光物性研究会論文集、p.267-270、2005年12月9-10日.
- [23] 松田信幸(東北大)、清水亮介(CREST)、三森康義(東北大、CREST)、小坂英男(東北大、CREST)、枝松圭一(東北大、CREST)、「偏光サニャック干渉計を用いた相互位相変調誘起位相シフトの測定」、第16回光物性研究会論文集、p.255-258、2005年12月9-10日.
- [24] 中村春樹(東北大)、大畠悟郎(東北大、ERATO)、三森康義(東北大、CREST)、小坂英男(東北大、CREST)、枝松圭一(東北大、CREST)、山本直克(NICT)、赤羽浩一(NICT)、「半導体マイクロキャビティにおける光パラメトリック散乱」、第16回光物性研究会論文集、p.425-528、2005年12月9-10日.
- [25] 田中隆介(東北大)、三森康義(東北大、CREST)、南不二雄(東工大)、小坂英男(東北大、CREST)、枝松圭一(東北大、CREST)、「半導体量子構造の励起子の時間分解フォトンエコー」、第16回光物性研究会論文集、p.263-266、2005年12月9-10日.
- [26] 小坂英男(東北大,CREST)、「Quantum Optics and Quantum Transport for Quantum State Transfer from a Photon to an Electron Spin」, JST/CREST量子情報ワークショップ(箱根、2005年12月12日~16日).
- [27] 大野圭司(理研,CREST)、黄日華(理研)、豊川聖子(理研)、河野公俊(理研)、小坂英男(東北大)、「InP/InAs複合量子井戸ホール素子および量子ドット素子の光伝導」、JST/CREST量子情報ワークショップ、箱根、2005年12月12日~16日.
- [28] 高河原俊秀(京都工繊大,CREST)、「Analysis of Quantum State Transfer and Theory of Electron Spin Decoherence」, JST/CREST量子情報ワークショップ、箱根、2005年12月12日~16日.
- [29] 今村裕志(東北大,CREST)、力武克彰(CREST) 「Theoretical Analysis of Quantum State Transfer from a Photon to an Electron Spin」, JST/CREST量子情報ワークショップ、箱根、2005年12月12日-16日(発表14日).
- [30] H. Kosaka, T. Kutsuwa, K. Arai, Y. Rikitake, K. Ono, H. Imamura, T. Takagahara, Y. Mitsumori, K. Edamatsu, “Quantum photonics and quantum transport approach for realizing photon-spin quantum state transfer device”; International Symposium on Mesoscopic Superconductivity and Spintronics - MS+S2006, NTT R&D Center, Atsugi, Kanagawa, Japan, February 27-March 2, 2006.
- [31] 力武克彰(CREST), 今村裕志(東北大,CREST), 小坂英男(東北大,CREST) 「光子スピン量子状態転写のための量子力学的デバイス設計」, 日本物理学会第61回年次大会, 愛媛大学・松山大学, 2006年3月27日.
- [32] Hideki Shigyou(東北大), Gen Yonezawa(東北大), Takeshi Kutsuwa(CREST), Koichiro Arai(ERATO), Yasuyoshi Mitsumori(東北大、CREST), Hideo Kosaka(東北大、CREST), Keiichi Edamatsu(東北大、CREST), “Quantum optical g-factor measurement in GaAs quantum structure for photon-spin quantum state transfer”, International Symposium on Bio- and Nano-Electronics, Mar. 2006.
- [33] Nobuyuki Matsuda(東北大), Ryosuke Shimizu(CREST), Yasuyoshi Mitsumori(東北大、CREST), Hideo Kosaka(東北大、CREST), Keiichi Edamatsu(東北大、CREST), “Measurement of nonlinear

- phase shifts induced by optical Kerr effect using a polarization Sagnac interferometer”, International Symposium on Bio- and Nano-Electronics, Mar. 2006.
- [34] 久津輪武史(CREST), 新井宏一郎(ERATO), 執行英樹(東北大), 金城英人(東北大), 大野圭司(理研), 三森康義(東北大、CREST), 小坂英男(東北大、CREST), 枝松圭一(東北大、CREST), 「光子スピン量子状態転写のための GaAs 系量子トラスポート素子の単一光子応答」、日本物理学会 2006 年第 61 回年次大会、松山大学 2006 年 3 月 27 日.
- [35] 新井宏一郎(ERATO), 久津輪武史(CREST), 金城英人(東北大), 大野圭司(理研), 小坂英男(東北大、CREST), 枝松圭一(東北大、CREST), 「光子スピン量子状態転写のための量子トランスポート測定による GaAs 系量子構造の g 因子推定」、日本物理学会 2006 年第 61 回年次大会、松山大学 2006 年 3 月 27 日.
- [36] 執行英樹(東北大), 米澤元(東北大), 久津輪武史(CREST), 新井宏一郎(ERATO), 三森康義(東北大、CREST), 小坂英男(東北大、CREST), 枝松圭一(東北大、CREST), 「光子スピン量子状態転写のための量子光学測定による GaAs 系量子構造の g 因子推定」、日本物理学会 2006 年第 61 回年次大会、松山大学 2006 年 3 月 27 日.
- [37] 松田信幸(東北大), 清水亮介(CREST), 三森康義(東北大、CREST), 小坂英男(東北大、CREST), 枝松圭一(東北大、CREST), 「偏光サニャック干渉計を用いたフォトニック結晶ファイバの非線形位相シフト測定」、日本物理学会 2006 年第 61 回年次大会、松山大学 2006 年 3 月 27 日.
- [38] 三森康義(東北大、CREST), 田中隆介(東北大), 小林恭輔(東北大), 小坂英男(東北大、CREST), 枝松圭一(東北大、CREST), 赤羽浩一(NICT), 山本直克(NICT), 佐々木雅英(NICT), 大谷直毅(NICT), 「InAs 系自己形成量子ドット中の励起子四光波混合 II」、日本物理学会 2006 年第 61 回年次大会、松山大学 2006 年 3 月 27 日.
- [39] 清水亮介(CREST), 山口貴司(東北大), 三森康義(東北大、CREST), 小坂英男(東北大、CREST), 枝松圭一(東北大、CREST), 「パラメトリック下方変換における空間相関効果を利用した量子もつれ光子対の生成」、日本物理学会 2006 年第 61 回年次大会、松山大学 2006 年 3 月 27 日.
- [40] 大野圭司(理研,CREST), 黄日華(理研), 豊川聖子(理研), 河野公俊(理研), 小坂英男(東北大), 「InP/InAs 複合量子井戸ホール素子および量子ドット素子の光伝導」、日本物理学会(松山大学 2006 年 3 月 27 日).
- [41] 小寺哲夫(東大), 大野圭司(理研,CREST), 北村陽介(東大), 樽茶清悟(東大), 「2 重量子ドットスピンプロケード条件でのマイクロ波照射効果」、日本物理学会(松山大学 2006 年 3 月 29 日).
- [42] H. Kosaka, T. Kutsuwa, K. Arai, K. Rikitake, K. Ono, H. Imamura, T. Takagahara, Y. Mitsumori, K. Edamatsu, “Quantum photonics/transport approach for photon-spin quantum state transfer”, The CLEO/QELS and PhAST 2006 Conference, Long Beach, California, USA, May 21-26, 2006.
- [43] T. Takagahara, “Non-Markoffian Theory of Electron Spin Decoherence in a Single Quantum Dot”, The CLEO/QELS and PhAST 2006 Conference, Long Beach, USA, May. 25, 2006.
- [44] H. Kosaka, T. Kutsuwa, K. Arai, Y. Rikitake, K. Ono, H. Imamura, T. Takagahara, Y. Mitsumori, K. Edamatsu, “A quantum device interfacing photons and spins for quantum repeaters”, 28th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2006), Vienna, Austria, Jul. 24-28, 2006.
- [45] R. Shimizu, T. Yamaguchi, Y. Mitsumori, H. Kosaka, and K. Edamatsu, “Generation of polarization entanglement from spatially correlated photon pairs”, 15th International Laser Physics Workshop (LPHYS'06), Lausanne, Switzerland, Jul. 24-28, 2006.
- [46] T. Takagahara, “Non-Markoffian Theory of Electron Spin Decoherence in a Single Quantum Dot”, 28th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2006), Vienna, Austria, Jul. 27, 2006.
- [47] O. Cakir and T. Takagahara, “Estimation of Nuclear Spin State in a Double Quantum Dot via Hyperfine Interaction”, International Conference on Nanoscience and Technology (ICN&T 2006), Basel, Switzerland, Jul. 31, 2006.
- [48] 小坂英男, 上野若菜, 執行英樹, 久津輪武史, 新井宏一郎, 三森康義, 枝松圭一, 今村裕志, 力武克彰, 高河原俊秀, 「光子スピン量子状態転写のための g 因子制御量子構造における負の偏極」、日本物理学会 2006 年秋季大会 23aXJ-5、千葉大学、2006 年 9 月 23-26 日.
- [49] 松田信幸, 清水亮介, 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一, 「偏光サニャック干渉計を用いた光誘

- 起微小位相シフトの測定」、日本物理学会 2006 年秋季大会 25aRB-7、千葉大学、2006 年 9 月 23-26 日。
- [50] 力武克彰, 今村裕志, 小坂英男、「高フィデリティな光子スピン量子状態転写を実現するためのデバイス条件の解析」、日本物理学会 2006 年秋季大会 25pRB-10、千葉大学、2006 年 9 月 23-26 日。
- [51] 山口貴司, 清水亮介, 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一、「パラメトリック下方変換における空間相関効果を利用した量子もつれ光子対の生成 II」、日本物理学会 2006 年秋季大会 26pRB-1、千葉大学、2006 年 9 月 23-26 日。
- [52] 高河原俊秀、「半導体量子ドットにおける電子スピン緩和の理論 -2 フォノン過程の重要性 -」日本物理学会 2006 年秋季大会 25pXJ-8、千葉大学、2006 年 9 月 25 日。
- [53] 高河原俊秀 「半導体量子ドットにおける電子スピンドコヒーレンスの非マルコフ理論」日本物理学会 2006 年秋季大会 25pXJ-9、千葉大学、2006 年 9 月 25 日。
- [54] R. Shimizu, T. Yamaguchi, Y. Mitsumori, H. Kosaka, K. Edamatsu, “Generation of polarization entanglement converted from a spatial correlation in spontaneous parametric down-conversion”, European Conference on Lasers and Electro-Optics and the European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC) Focus Meeting on Nonlinear, Quantum and Chaotic Optics, Cannes, France, Sep. 24-28, 2006.
- [55] O. Cakir and T. Takagahara, “Quantum Dynamics of Electron-Nuclei Coupled System in Quantum Dots”, 15th Symposium on Quantum Information Technology (QIT15), Kyoto, Japan, Nov. 21, 2006.
- [56] H. Kosaka, T. Kutsuwa, K. Arai, Y. Rikitake, K. Ono, H. Imamura, T. Takagahara, Y. Mitsumori, K. Edamatsu, “Quantum state transfer from a photon to an electron spin for building a quantum repeater”, 8th International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing (QCMC-8), Tsukuba, Nov.28-Dec. 3, 2006.
- [57] 執行英樹, 上野若菜, 久津輪武史, 新井宏一郎, 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一, 「光子スピン量子状態転写のための GaAs 系量子井戸における電子スピンの光学応答測定」, 第 17 回光物性研究会論文集 1227、2006 年 12 月 14-15 日。
- [58] 金城英人, 久津輪武史, 新井宏一郎, 小坂英男, 枝松圭一, 「光子-スピン量子状態転写のための量子輸送測定による GaAs 系量子構造の単一電子 g 因子評価」, 第 17 回光物性研究会論文集 1219、2006 年 12 月 14-15 日。
- [59] 小林恭輔, 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一, 「顕微ヘテロダイナミックポンププローブ法による単一量子ドットの時間分解分光」, 第 17 回光物性研究会論文集 1220、2006 年 12 月 14-15 日。
- [60] 加藤範泰, 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一, 山本直克, 赤羽浩一, 「半導体マイクロキャビティにおける光パラメトリック散乱」, 第 17 回光物性研究会論文集 1221、2006 年 12 月 14-15 日。
- [61] 山口貴司, 清水亮介, 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一, 「パラメトリック下方変換における空間相関効果を利用した偏光量子もつれ光子対の生成」, 第 17 回光物性研究会論文集 1222、2006 年 12 月 14-15 日。
- [62] 小林恭輔, 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一, 「顕微ヘテロダイナミックポンププローブ法による単一量子ドットの時間分解分光」, 第 17 回光物性研究会論文集、2006 年 12 月 14-15 日。
- [63] K. Ono, N. Ko, K. Takahashi, K. Kono, S. Tarucha, and H. Kosaka, “Electrically detected indirect exciton photo-absorption in semiconductor double quantum dot”, International Conference on Nanoelectronics, Nanostructures and Carrier Interactions 2007 (NNCI2007) PWe-04, NTT Atsugi R&D Center, Atsugi, Kanagawa, Japan, Feb 20-23, 2007 (Feb 21 presentation).
- [64] Y. Rikitake, H. Imamura, H. Kosaka, “Theoretical Analysis of the Fidelity and Yield of a Spin-Coherent Photo-Detector”, International Conference on Nanoelectronics, Nanostructures and Carrier Interactions 2007 (NNCI2007) Fr-14, NTT Atsugi R&D Center, Atsugi, Kanagawa, Japan, Feb. 20-23, 2007 (Feb 23 presentation).
- [65] 大野圭司, 黄日華, 高橋宏輔, 河野公俊, 樽茶清悟, 小坂英男, 「縦型 2 重量子ドットにおける間接励起子の電気的検出」, 日本物理学会 2007 年春季大会 19aTA-7、鹿児島大学、2007 年 3 月 18-21 日。
- [66] 小坂英男, 執行英樹, 久津輪武史, 三森康義, 枝松圭一, 「光子から電子スピンへの量子状態転写—ポピュレーション転写からコヒーレンス転写へ—」, 日本物理学会 2007 年春季年次大会 19aTA-8、鹿児島大学、2007 年 3 月 18-21 日。
- [67] 久津輪武史, 新井宏一郎, 大野圭司, Oleg Astafiev, 小宮山進, 三森康義, 小坂英男, 枝松圭

- 一、「単一量子ドットによる単一光子から単一電子への変換と非破壊検出」、日本物理学会 2007 年春季大会 19aTA-9、鹿児島大学、2007 年 3 月 18-21 日。
- [68] O. Cakir and T. Takagahara, “Quantum Dynamics of Electron-Nuclei Coupled System in Quantum Dots”, 日本物理学会 2007 年春季大会 21aTA-11、鹿児島大学、2007 年 3 月 21 日。
- [69] Jun Zhang, Ryousuke Shimizu, Yasuyoshi Mitsumori, Hideo Kosaka, Keiichi Edamatsu, “Ultrafast measurement of optical-field statistics and reconstruction of quantum state”、日本物理学会 2007 年春季大会 21aXK-12、鹿児島大学、2007 年 3 月 18-21 日。
- [70] H. Kosaka, H. Shigyo, T. Kutsuwa, Y. Rikitake, H. Imamura, Y. Mitsumori, K. Edamatsu, “Toward All Semiconductor Quantum Repeaters”, Conference on Lasers and Electro-Optics and the Quantum Electronics and Laser Science Conference (CLEO/QELS 2007), Baltimore Convention Center, Baltimore, Maryland, USA, May 6-11, 2007.
- [71] N. Matsuda, R. Shimizu, Y. Mitsumori, H. Kosaka and K. Edamatsu, “Measurement of Cross-Kerr Nonlinearity Induced by a Few Photons in a Photonic Crystal Fiber”, The Ninth Rochester Conference on Coherence and Quantum Optics (CQO9), Rochester, USA, Jun. 10-13, 2007.
- [72] T. Yamaguchi, R. Shimizu, Y. Mitsumori, H. Kosaka, K. Edamatsu, “Generation of polarization entanglement utilizing spatially correlated photon pairs from spontaneous parametric down-conversion”, The European Conference on Lasers and Electro-Optics and the International Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-IQEC), Munich, Germany, Jun. 17–22, 2007.
- [73] N. Matsuda, R. Shimizu, Y. Mitsumori, H. Kosaka, K. Edamatsu, “Measurement of optical cross-Kerr nonlinearity induced by a few photons in a photonic crystal fiber”, The European Conference on Lasers and Electro-Optics and the International Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-IQEC), Munich, Germany, Jun. 17-22, 2007.
- [74] T. Kutsuwa, K. Ono, S. Komiyama, O. Astafiev and H. Kosaka, “Single photon response in a GaAs single quantum dot for photon-spin quantum state transfer”, International Conference on Electronics Properties of Two-dimensional Systems and Modulated Semiconductor Structures (EP2DS17/MSS13), Magazzini del Cotone, Genova, Italy, July 15-20, 2007.
- [75] A. Souma, A. Oiwa, Y. Kitamura, T. Kodera, K. Ono, S. Tarucha, “Electrical pump and probe measurements of triplet-singlet relaxation dynamics in a vertically coupled double dot”, The 15th International Conference on Nonequilibrium Carrier Dynamics in Semiconductors (HCIS15), Tokyo, July 23-27, 2007.
- [76] T. Kodera, S. Amaha, K. Ono, and S. Tarucha, “Pauli spin blockade in few-electron vertical quantum dots”, The 15th International Conference on Nonequilibrium Carrier Dynamics in Semiconductors (HCIS15), Tokyo, July 23-27, 2007.
- [77] J. Baugh, Y. Kitamura, K. Ono, and S. Tarucha, “Large nuclear Overhauser fields observed in a vertically-coupled double quantum dot device”, The 15th International Conference on Nonequilibrium Carrier Dynamics in Semiconductors (HCIS15), Tokyo, July 23-27, 2007.
- [78] Y. Rikitake, H. Imamura and H. Kosaka, “Spin coherent photodetector for high-fidelity and high-yield photon-spin quantum state transfer”, 2007 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2007), Tsukuba International Congress Center, Ibaraki, Japan, September 18-21, 2007
- [79] T. Takagahara and O. Cakir, “Theory of Quantum State Transfer, Correlation Measurement and Quantum Dynamics in a Quantum Dot”, Asian Conference on Quantum Information Science (Kyoto, Japan, 3-6 September, 2007).
- [80] 小坂英男, 久津輪武史, 三森康義, 枝松圭一, 今村裕志, 力武克彰, 高河原俊秀、「光子から電子スピンへの量子状態転写—ポピュレーション転写からコヒーレンス転写へ 2」、日本物理学会 2007 年第 62 回年次大会 22pTH-12、北海道大学、2007 年 9 月 21-24 日。
- [81] 久津輪武史, 桑原真人, 今野貴支, 大野圭司, 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一「光子スピン量子状態転写のための g 因子制御量子ドット構造における量子輸送特性」、日本物理学会 2007 年第 62 回年次大会 22pTH-11、北海道大学、2007 年 9 月 21-24 日。
- [82] 桑原真人, 久津輪武史, 今野貴支, 大野圭司, 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一、「光子スピン量子状態転写のための g 因子制御量子ドット構造における光応答特性」、日本物理学会 2007 年第 62 回年次大会 22pTH-10W、北海道大学、2007 年 9 月 21-24 日。
- [83] 松田信幸, 清水亮介, 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一「フォトニック結晶ファイバにおける少数光子誘起非線形位相シフトの測定」、日本物理学会 2007 年第 62 回年次大会 24aRH-1、北海道大学、2007 年 9 月 21-24 日。
- [84] 山口貴司, 清水亮介, 長能重博, 水津光司, 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一、「パラメトリ

- ック下方変換における空間相関効果を利用した量子もつれ光子対の生成 III」、日本物理学会 2007 年第 62 回年次大会 24aRH-2、北海道大学、2007 年 9 月 21-24 日。
- [85] S.M. Huang, H. Akimoto, K.Kono, J.J. Lin, S. Tarucha, K. Ono, “Measurement of the g factor for different orbital states in the quantum dot”, 日本物理学会 2007 年第 62 回年次大会 24aTH-11、北海道大学、2007 年 9 月 21-24 日。
- [86] 伊藤雅浩、川村稔、大野圭司、池畑誠一郎、河野公俊、「金属ナノギャップ間に挟まれた CdSe 半導体ナノ結晶の電気伝導」、日本物理学会 2007 年第 62 回年次大会 24aTH-4、北海道大学、2007 年 9 月 21-24 日。
- [87] S. M. Huang, H. Akimoto, K. Kono, J. J. Lin, S. Tarucha, and K. Ono, “The Reduction of g factor at different quantum states”, SSDM2007, Tsukuba, September 18-21, 2007.
- [88] H. Kosaka, H. Shigyou, Y. Mitsumori, Y. Rikitake, H. Imamura, T. Kutsuwa, K. Edamatsu, “Coherent transfer of light polarization to electron spins in a semiconductor— toward quantum media conversion —”, Conference on Lasers and Electro-Optics and the Quantum Electronics and Laser Science Conference (CLEO/QELS 2008), San Jose McEnery Convention Center, San Jose, CA, USA, May 4-9, 2008.
- [89] H. Kosaka, H. Shigyou, Y. Mitsumori, Y. Rikitake, H. Imamura, T. Kutsuwa, K. Edamatsu, “Coherent spin state transfer from light to electrons in a semiconductor”, International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing (QCMC2008), TH-11, University of Calgary, Canada, Aug. 19-24, 2008.
- [90] 小坂英男、稲垣卓弘、三森康義、枝松圭一、力武克彰、今村裕志、「光子から電子スピンへのコヒーレンス転写とスピン状態トモグラフィ」、日本物理学会 2008 年秋季大会 22pZA-11、岩手大学、2008 年 9 月 20-23 日。
- [91] 桑原真人、今野貴支、久津輪武史、大野圭司、三森康義、小坂英男、枝松圭一、「g 因子制御量子井戸構造における量子輸送の光応答特性」、日本物理学会 2008 年秋季大会 20aYK-11、岩手大学、2008 年 9 月 20-23 日。
- [92] 余越伸彦、今村裕志、小坂英男、「横型二重量子ドットにおけるチャージポンピングとバリーの位相」、日本物理学会 2008 年秋季大会 21aYF-9、岩手大学、2008 年 9 月 20-23 日。
- [93] 三森康義、加藤範泰、小坂英男、枝松圭一、山本直克、赤羽浩一、「III-V 族半導体キャビティポラリトンにおける光誘起カー効果」、日本物理学会 2008 年秋季大会 23aYH-7、岩手大学、2008 年 9 月 20-23 日。
- [94] 朝倉健太、三森康義、小坂英男、枝松圭一、赤羽浩一、山本直克、佐々木雅英、大谷直毅、「III-V 族半導体量子ドットの励起子フォトンエコー」、日本物理学会 2008 年秋季大会 22aPS-58、岩手大学、2008 年 9 月 20-23 日。
- [95] 松田信幸、セルゲイ・マリノフスキ、松浦心平、清水亮介、三森康義、小坂英男、枝松圭一、「フォトニック結晶ファイバを用いた相関光子対生成：高繰り返し光源による同時計数コントラストの向上」、日本物理学会 2008 年秋季大会 22pZA-9、岩手大学、2008 年 9 月 20-23 日。
- [96] 伊藤雅浩、川村稔、大野圭司、池畑誠一郎、河野公俊、「金属ナノギャップ間に挟まれた CdSe 半導体ナノ結晶の電気伝導 2」、日本物理学会 2008 年秋季大会、山形大学、2008 年 9 月 20 日-23 日。
- [97] 高橋諒、河野公俊、樽茶清悟、大野圭司、「互いに異なる g 因子を持った二重量子ドットにおけるスピンプロケードと核スピン効果」、日本物理学会 2008 年秋季大会、山形大学、2008 年 9 月 20 日-23 日。
- [98] S. Amaha, T. Hatano, Y. Tokura, K. Ono, T. Kubo, D.G. Austing, S. Tarucha, “Spin Blockade Properties of Weakly Coupled Quantum Dots with Orbital Degeneracy”, ISQM, Tokyo, Japan (2008).
- [99] Y. Tokura, K. Ono, S. Tarucha, “g-factor engineered series quantum dots”, The 5th International conference on semiconductor quantum dots QD2008, May 11-16, Gyeongju, Korea (2008).
- [100] H. Kosaka, H. Shigyou, T. Inagaki, Y. Mitsumori, Y. Rikitake, H. Imamura, T. Kutsuwa, M. Kuwahara, K. Edamatsu, “Coherent transfer of light polarization to electron spins in a semiconductor”, IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference 2008 (NMDC2008), TuA I-2, Kyoto, Japan, Oct. 20-22, (2008).
- [101] H. Kosaka, H. Shigyou, T. Inagaki, Y. Mitsumori, Y. Rikitake, H. Imamura, T. Kutsuwa, M. Kuwahara, K. Edamatsu, “Coherent spin state transfer from light to electrons in a semiconductor”, International Symposium on Nanoscale Transport and Technology 2009 (ISNTT2009), Atsugi, Japan, Jan. 20-23, 2009.

- [102] 小坂英男, 執行英樹, 稲垣卓弘, 三森康義, 枝松圭一, 力武克彰, 今村裕志, 「光から電子スピンへのコヒーレンス転写の忠実度についての考察」、日本物理学会 2009 年春季大会、28pVA-13、立教大学、2009 年 3 月 27-30 日.
- [103] 稲垣卓弘, 小坂英男, 三森康義, 枝松圭一, 力武克彰, 今村裕志, 「磁気光学カー効果による電子スピン状態トモグラフィ測定」、日本物理学会 2009 年春季大会、立教大学、2009 年 3 月 27-30 日.
- [104] 力武克彰, 今村裕志, 小坂英男, 「タイムビン光子量子ビットからスピン量子ビットへの量子状態転写」、日本物理学会 2009 年春季大会、30aSK-10、立教大学、2009 年 3 月 27-30 日.
- [105] 久津輪武史, 桑原真人, 大野圭司, 小坂英男, 「g 因子制御電界閉じ込め 2 重量子ドットにおける単一電子スピン共鳴と g 因子検出」、日本物理学会 2009 年春季大会、立教大学、2009 年 3 月 27-30 日.
- [106] 桑原真人, 久津輪武史, 大野圭司, 小坂英男, 「g 因子制御量子ドットにおける単一電子の光生成」、日本物理学会 2009 年春季大会、立教大学、2009 年 3 月 27-30 日.
- [107] 三森康義, 加藤範泰, 小坂英男, 枝松圭一, 山本直克, 赤羽浩一, 「III-V 族半導体キャビティポラリトンにおける光誘起カー効果 I I」、日本物理学会 2009 年春季大会、立教大学、2009 年 3 月 27-30 日.
- [108] 金田文寛, 清水亮介, 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一, 「Yb レーザーによる多光子エンタングル状態の高効率生成」、日本物理学会 2009 年春季大会、立教大学、2009 年 3 月 27-30 日.
- [109] 余越伸彦, 今村裕志, 小坂英男, 「半導体二重量子ドットにおけるスピン状態測定」、日本物理学会 2009 年春季大会、立教大学、2009 年 3 月 27-30 日.
- [110] 高橋諒, 河野公俊, 樽茶清悟, 大野圭司, 「互いに異なる g 因子を持った二重量子ドットにおける核スピン効果と NMR 応答」、日本物理学会 2009 年春季大会、立教大学、2009 年 3 月 27-30 日.
- [111] 高河原俊秀, 「二電子スピン状態のユニタリ回転とトモグラフィの理論」、日本物理学会 2009 年春季大会 30pTX-11、立教大学、2009 年 3 月 27-30 日.
- [112] O. Cakir and T. Takagahara, 「Proposal of nuclear spin quantum memory in group IV elemental and II-VI semiconductors」、日本物理学会 2009 年秋季大会 27pTX-1、立教大学、2009 年 3 月 27-30 日.
- [113] R. Takahashi, K. Kono, S. Tarucha, K. Ono, “Electron spin-nuclear spin interaction in a hetero-g-factor double quantum dot”, The 18th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-18) and the 14th International Conference on Modulated Semiconductor structures (MSS-14), Kobe International Conference Center, Kobe, Japan, July 19 - 24, 2009.
- [114] Y. Tokura, T. Kubo, Y. -S. Shin, K. Ono, S. Tarucha, “Quantum spin transport in magnetic-field-engineered nano-structures”, The 18th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-18) and the 14th International Conference on Modulated Semiconductor structures (MSS-14), Kobe International Conference Center, Kobe, Japan, July 19 - 24, 2009.
- [115] 久津輪武史, 桑原真人, 大野圭司, 小坂英男, 「g 因子制御電界閉じ込め 2 重量子ドットにおける単一電子スピンのコヒーレント制御」、熊本大学黒髪キャンパス、2009 年 9 月 25-28 日.
- [116] 稲垣卓弘, 小坂英男, 力武克彰, 今村裕志, 三森康義, 枝松圭一, 「磁気光学効果による半導体量子井戸の吸収率変化を利用した電子スピンのコヒーレンス測定」、熊本大学黒髪キャンパス、2009 年 9 月 25-28 日.
- [117] 朝倉健太, 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一, 赤羽浩一, 山本直克, 佐々木雅英, 大谷直毅, 「II-V 族半導体量子ドットの励起子フォトンエコー II」、熊本大学黒髪キャンパス、2009 年 9 月 25-28 日.
- [118] 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一, 山本直克, 赤羽浩一, 「III-V 族半導体キャビティポラリトンのポンププローブ分光」、熊本大学黒髪キャンパス、2009 年 9 月 25-28 日.
- [119] 宮原優喜, 三森康義, 上平健太郎, 小坂英男, 枝松圭一, 「ヘテロダイナミクス顕微分光法による単一量子ドットのラビ振動 III」、熊本大学黒髪キャンパス、2009 年 9 月 25-28 日.
- [120] 松田信幸, 清水亮介, 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一, 横山弘之, 山田浩治, 渡辺俊文, 土澤泰, 福田浩, 板橋聖一, 「シリコン細線導波路における微弱光領域での全光位相変調」、

2009 秋期応用物理学会、富山大学 2009 年 9 月 8 日-11 日.

- [121] 小寺哲夫, 大野圭司, 中岡俊裕, 熊谷直人, 樽茶清悟, 小田俊理, 荒川泰彦、「InAs 量子ドットと InGaAs 量子井戸を内包した縦型ピラー構造の電気伝導特性」、2009 秋期応用物理学会、富山大学 2009 年 9 月 8 日-11 日.
- [122] R. Takahashi, K. Kono, S. Tarucha and K. Ono, “Electron - Nuclear Spin Interaction in Vertical Double Quantum Dot with Different g-factor Layers System”, 2009 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2009), Sendai Kokusai Hotel, Miyagi, Japan October 7-9, 2009.
- [123] S. Amaha, T. Hatano, K. Ono, Y. Tokura, S. Tarucha, J. Gupta and D. G. Austing, “Series Coupled Vertical Triple Quantum Dot Structures”, 2009 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2009), Sendai Kokusai Hotel, Miyagi, Japan October 7-9, 2009.

③ポスター発表 (国内会議 21 件、国際会議 51 件)

- [1] 三森康義, 南不二雄, GaAs/AlGaAs 量子井戸中の励起子における四光波混合 24aPS-40 日本物理学会 第 60 回年次大会、東京理科大野田キャンパス、2005 年 3 月.
- [2] Y. Mitsumori, A. Hasegawa, M. Sasaki, F. Minami, “Photon Echoes from Excitons Localized to Quantum Islands in Single Quantum Well” (poster), IQEC/CLEO-PR 2005. QWAB3-P21, 2005 年 7 月 13 日(東京).
- [3] 田中 (東北大)、三森 (東北大、CREST)、南(東工大)、小坂 (東北大、CREST)、枝松 (東北大、CREST)、「GaAs 量子アイランド中の励起子の時間分解フォトンエコー」、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、20pPSA-27, p.587, 2005 年 9 月 22 日.
- [4] Yoshiaki Rikitake (CREST), Hiroshi Imamura (東北大、CREST), “Decoherence of localized spins interacting via RKKY interaction” (poster); Spin-Dependent Transport through Nanostructures - Spintronics05, Mierzecin near Poznan, Poland, September 25-30, 2005.
- [5] Ozgur Cakir(CREST), “Robust Entanglement in Atomic Systems”, JST/CREST 量子情報ワークショップ、箱根、2005 年 12 月 12-16 日).
- [6] Hideo Kosaka, “Quantum State Transfer from a Photon to an Electron Spin for Quantum Repeater”, Frontiers in Nanoscale Science and Technology Workshop, January 26 – 28, 2006, Stanford Court Hotel, San Francisco, CA.
- [7] K. Ono,(RIKEN,CREST) A. Takahashi, (U. Tokyo), Y. Nishi(U. Tokyo), Y. Hirayama(NTT), and S. Tarucha(U. Tokyo), “Coherent manipulation of quadrupole nuclei in GaAs quantum dots”, Frontiers in Nanoscale Science and Technology Workshop, January 26 – 28, 2006, Stanford Court Hotel, San Francisco, CA.
- [8] K. Ono(RIKEN,CREST), N. Ko(RIKEN), S. Toyokawa(RIKEN), K. Kono(RIKEN), and H. Kosaka(Tohoku U.), “Photo-transport properties of zero-g-factor quantum well devices”, International Symposium on Mesoscopic Superconductivity and Spintronics 2006 (MS+S2006), February 27-March 2, 2006, NTT R&D Center, Atsugi, Kanagawa, Japan.
- [9] Yoshiaki Rikitake(CREST), Hiroshi Imamura (東北大、CREST), Hideo Kosaka (東北大、CREST), “Simulation of the photon-spin quantum state transfer process” (poster); International Symposium on Mesoscopic Superconductivity and Spintronics - MS+S2006, NTT R&D Center, Atsugi, Kanagawa, Japan, February 27-March 2, 2006.
- [10] H. Kosaka, K. Ono, H. Imamura, T. Takagahara, T. Kutsuwa, K. Rikitake, K. Arai, Y. Mitsumori, K. Edamatsu, “Quantum state transfer from a photon to spins in semiconductor quantum systems” (poster), Gordon Research Conference, Il Ciocco, Barga, Italy, May 7–12, 2006.
- [11] T. Kutsuwa, H. Kosaka, Y. Rikitake, K. Ono, H. Imamura, T. Takagahara, K. Arai, G. Yonezawa, H. Shigyo, H. Kinjo, Y. Mitsumori and K. Edamatsu “Polarization transfer from photon to nuclear spin through electron spin with zero g-factor quantum well” (poster), The CLEO/QELS and PhAST 2006 Conference, Long Beach, California, USA, May 21-26, 2006.
- [12] Yoshiaki Rikitake, Hiroshi Imamura, Hideo Kosaka, “Simulation of the Photon-Spin Quantum State Transfer Process” (poster), The CLEO/QELS and PhAST 2006 Conference, Long Beach, California, USA, May 21-26, 2006.
- [13] Yoshiaki Rikitake, Hiroshi Imamura, and Hideo Kosaka “Effect of the electron-hole exchange interaction on the photon-spin quantum state transfer” (poster), 28th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2006), Vienna, Austria, Jul. 24-28, 2006.
- [14] O. Cakir and T. Takagahara, “Spin Dynamics of Electron-Nuclei Coupled System in a Double Quantum Dot”(Poster), 28th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2006),

- Vienna, Austria, Jul. 28, 2006.
- [15] T. Kutsuwa, K. Arai, H. Shigyo, H. Kinjo, K. Ono, Y. Mitsumori, H. Kosaka and K. Edamatsu, “Single photon response in GaAs quantum transport devices for photon-spin quantum state transfer” (poster), 24th International Conference on Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductor(PASPS-IV), Sendai, Aug. 15-18, 2006.
 - [16] K. Arai, T. Kutsuwa, H. Kinjo, K. Ono, H. Kosaka, and K. Edamatsu, “Evaluation of g-factor by quantum transport measurement for photon-spin quantum state transfer” (poster), 24th International Conference on Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductor (PASPS-IV), Sendai, Aug. 15-18, 2006.
 - [17] Yoshiaki Rikitake, Hiroshi Imamura, Hideo Kosaka, “Fidelity analysis of the photon-spin quantum state transfer”(poster), 24th International Conference on Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductor (PASPS-IV), Sendai, Aug. 15-18, 2006.
 - [18] O. Cakir and T. Takagahara, “Electron Spin Dynamics and Hyperfine Interaction in Coupled Quantum Dots”(poster), 24th International Conference on Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductor (PASPS-IV) , Sendai, Japan, Aug. 16, 2006.
 - [19] 加藤範泰, 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一, 山本直克, 赤羽浩一、「半導体微小共振器の励起子ポラリトンのポンプ&プローブ分光」(poster)、日本物理学会 2006 年秋季大会 25aPS-20、千葉大学、2006 年 9 月 23-26 日。
 - [20] 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一, 赤羽浩一, 山本直克, 佐々木雅英, 大谷直毅、「InAs 系自己形成量子ドット中の励起子四光波混合 III」(poster)、日本物理学会 2006 年秋季大会 25aPS-35、千葉大学、2006 年 9 月 23-26 日。
 - [21] 小林恭輔, 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一、「顕微ヘテロダイナミクスポンププローブ法による単一量子ドットの時間分解分光」(poster)、日本物理学会 2006 年秋季大会 25aPS-38 2896、千葉大学、2006 年 9 月 23-26 日。
 - [22] 金城英人, 新井宏一郎, 久津輪武史, 大野圭司, 小坂英男, 枝松圭一、「光子スピン量子状態転写のための量子トランスポート測定による GaAs 系量子構造の g 因子測定 II」(poster)、日本物理学会 2006 年秋季大会 25pPSA-13、千葉大学、2006 年 9 月 23-26 日。
 - [23] 久津輪武史 A, 新井宏一郎 A, C, 金城英人 B, 大野圭司 A, D, 三森康義 A, B, 小坂英男 A, B, 枝松圭一、「光子スピン量子状態転写のための単一量子ドットによる単一光子応答」(poster)、日本物理学会 2006 年秋季大会 25pPSA-14、千葉大学、2006 年 9 月 23-26 日。
 - [24] Yoshiaki Rikitake, Hiroshi Imamura and Hideo Kosaka, “Fidelity of the photon-spin quantum state transfer” (poster), 8th International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing (QCMC-8), Tsukuba, Nov. 28-Dec. 3 (presented on 30th), 2006.
 - [25] R. Shimizu, T. Yamaguchi, Y. Mitsumori, H. Kosaka and K. Edamatsu, “Generation of polarization entangled photons using a spatial correlation in spontaneous parametric down-conversion” (poster), 8th International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing (QCMC-8), Tsukuba, Nov. 28-Dec. 3, 2006.
 - [26] O. Cakir and T. Takagahara, “Quantum Dynamics of Electron-Nuclei Coupled System in Quantum Dots” (Poster), Second International Conference on Nanometer-Scale Quantum Physics (NanoPhys, Tokyo Institute of Technology COE21), Jan. 24. 2007.
 - [27] 力武克彰, 今村裕志, 小坂英男、「光学応答による電子スピンコヒーレンス観測の理論解析」(poster)、日本物理学会 2007 年春季大会 20pPSB-5、鹿児島大学、2007 年 3 月 18-21 日(20 日発表)。
 - [28] 加藤範泰, 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一, 山本直克, 赤羽浩一、「半導体微小共振器の励起子ポラリトンのポンプ&プローブ分光 II」(poster)、日本物理学会 2007 年春季大会 19pPSB-19、鹿児島大学、2007 年 3 月 18-21 日。
 - [29] 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一, 赤羽浩一, 山本直克, 佐々木雅英, 大谷直毅、「InAs 系自己形成量子ドット中の励起子四光波混合 IV」(poster)、日本物理学会 2007 年春季大会 19pPSA-44、鹿児島大学、2007 年 3 月 18-21 日。
 - [30] T. Takagahara and O. Cakir, “Theory of Nondestructive Optical Measurements of Two Electron Spins in a Quantum Dot”, CLEO/Europe-IQEC 2007 (Munich, Germany, 17-22 June, 2007).
 - [31] H. Kosaka, H. Shigyou, Y. Mitsumori, Y. Rikitake, H. Imamura, T. Kutsuwa, K. Edamatsu, “Coherent spin quantum state transfer from photons to electrons in a semiconductor” (poster), International Conference on Electronics Properties of Two-dimensional Systems and Modulated Semiconductor Structures (EP2DS17/MSS13), Magazzini del Cotone, Genova, Italy, July 15-20, 2007.

- [32] Y. Rikitake, H. Imamura and H. Kosaka, “Theoretical analysis of optimal conditions for the photon-spin quantum state transfer in a spin-coherent photo-detector”(poster), EP2DS17, July 17, 2007, Genova, Italy
- [33] K. Ono, N. Ko, K. Takahashi, K. Kono, S. Tarucha, and H. Kosaka, “Electrically detected indirect exciton in semiconductor double quantum dot” (poster), The 15th International Conference on Nonequilibrium Carrier Dynamics in Semiconductors (HCIS15), Tokyo, July 23-27, 2007.
- [34] S. Amaha, T. Kodera, T. Hatano, K. Ono, Y. Tokura, S. Tarucha, J. A. Gupta, C. Payette, and D. G. Austing, “Resonant tunneling spectroscopy in weakly coupled vertical quantum dots” (poster), The 15th International Conference on Nonequilibrium Carrier Dynamics in Semiconductors (HCIS15), Tokyo, July 23-27, 2007.
- [35] K. Takahashi, N. Ko, K. Kono, S. Tarucha, H. Kosaka, and K. Ono, “Electrically detected exciton photo-absorption in semiconductor double quantum dot” (poster), SSDM2007, Tsukuba, September 18-21, 2007.
- [36] 今野貴支, 久津輪武史, 桑原真人, 大野圭司, 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一、「光子スピン量子状態転写のための g 因子制御量子井戸構造における光応答特性」(poster)、日本物理学会 2007 年第 62 回年次大会 22aPS-136、北海道大学、2007 年 9 月 21-24 日。
- [37] 稲垣卓弘, 久津輪武史, 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一、「光子から電子スピンへの量子状態転写—スピン状態トモグラフィの検討」(poster)、日本物理学会 2007 年第 62 回年次大会 22aPS-137、北海道大学、2007 年 9 月 21-24 日。
- [38] 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一, 赤羽浩一, 山本直克, 佐々木雅英, 大谷直毅、「InAs 系自己形成量子ドットの励起子四光波混合のドット密度依存性」(poster)、日本物理学会 2007 年第 62 回年次大会 23pPSB-25、北海道大学、2007 年 9 月 21-24 日。
- [39] 加藤範泰, 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一, 山本直克, 赤羽浩一、「半導体微小共振子の励起子ポラリトンのポンプ&プローブ分光 III」(poster)、日本物理学会 2007 年第 62 回年次大会 23pPSA73、北海道大学、2007 年 9 月 21-24 日。
- [40] 力武克彰, 今村裕志, 小坂英男、「電界閉じ込め量子ドットに励起された励起子の電子-正孔乖離過程の解析」(poster)、日本物理学会 2007 年第 62 回年次大会 22pTH-12、北海道大学、2007 年 9 月 21-24 日。
- [41] 小寺哲夫, 大野圭司, 天羽真一, 都倉康弘, 荒川泰彦, 樽茶清悟、「量子ドットの単一電子トンネルに対するフォノン・核スピンの影響」(poster)、ナノ量子情報エレクトロニクスシンポジウム、東大駒場キャンパス、2007 年 10 月 24-25 日。
- [42] T. Kutsuwa, M. Kuwahara, T. Konno, K. Ono, Y. Mitsumori, H. Kosaka and K. Edamatsu, “A number countable electron trap in a quantum dot with nearly-zero g-factor for photon-spin quantum media conversion” (poster), The 3rd RIEC International Workshop on Spintronics Solid-State Quantum Information Technology -Spin, Photon and Superconductivity-, Sendai, Japan, Oct.31-Nov.1, 2007.
- [43] M. Kuwahara, T. Kutsuwa, T. Konno, K. Ono, Y. Mitsumori, H. Kosaka and K. Edamatsu, “Single photon responses in a quantum dot for quantum media conversion from a photon to an electron spin” (poster), The 3rd RIEC International Workshop on Spintronics Solid-State Quantum Information Technology -Spin, Photon and Superconductivity-, Sendai, Japan, Oct.31-Nov.1, 2007.
- [44] Y. Rikitake, H. Imamura and H. Kosaka, “Electron spin tomography using optical responses of quantum dots for photon-spin quantum state transfer” (poster), The 3rd RIEC International Workshop on Spintronics Solid-State Quantum Information Technology -Spin, Photon and Superconductivity-, Sendai, Japan, Oct.31-Nov.1, 2007.
- [45] Y. Mitsumori, N. Kato, H. Kosaka, K. Edamatsu, N. Yamamoto, “Photoinduced Kerr Rotation in Semiconductor Microcavity”(poster), 8th International conference on Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures (PLMCN8), Tokyo, Japan, Apr. 7-10, 2008.
- [46] Y. Miyahara, Y. Mitsumori, H. Kosaka and K. Edamatsu, “Excitonic Rabi Oscillations in a Single Quantum Dot Observed by a Heterodyne Pump-probe Technique”(poster), 8th International conference on Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures (PLMCN8), WeP-8, Tokyo, Japan, Apr. 7-10, 2008.
- [47] Y. Miyahara, Y. Mitsumori, H. Kosaka, K. Edamatsu, “Observation of excitonic Rabi oscillations in a single quantum dot using a heterodyne pump-probe technique”(poster), The 8th International Conference on Excitonic Processes in Condensed Matter (EXCON'08), P-16, Kyoto, Japan, Jun. 22-27, 2008.
- [48] Y. Mitsumori, N. Kato, H. Kosaka, K. Edamatsu, N. Yamamoto, K. Akahane, “Time-resolved photoinduced Kerr rotation in semiconductor microcavity”(poster), The 8th International Conference

- on Excitonic Processes in Condensed Matter (EXCON'08), P-47, Kyoto, Japan, Jun. 22-27, 2008.
- [49] N. Matsuda, R. Shimizu, Y. Mitsumori, H. Kosaka and K. Edamatsu, "Measurement of cross-Kerr nonlinearity induced by a single-photon-level coherent pulse in a photonic crystal fiber"(poster), International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing (QCMC2008), P2-44, University of Calgary, Canada, Aug. 19-24, 2008.
- [50] 上野若菜、小坂英男、久津輪武史、桑原真人、三森康義、枝松圭一、「量子メディア変換構造における荷電励起子のゲート電界制御Ⅱ」(poster)、日本物理学会 2008 年秋季大会 20aPS-12、岩手大学、2008 年 9 月 20-23 日。
- [51] 宮原優喜、三森康義、小坂英男、枝松圭一、「ヘテロダイナミクス顕微分光法による単一量子ドットのラビ振動の観測Ⅱ」(poster)、日本物理学会 2008 年秋季大会 22aPS-59、岩手大学、2008 年 9 月 20-23 日。
- [52] Makoto Kuwahara, Takeshi Kutsuwa, Keiji Ono, Hideo Kosaka, "Optical responses in a quantum dot and quantum point contact for quantum media conversion from a photon to an electron spin"(Poster), IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference 2008 (NMDC2008), TuP14, Kyoto, Japan, Oct. 20-22, 2008.
- [53] 小坂英男、「光子から電子スピンへの コヒーレンス転写とスピン状態トモグラフィ」、第 2 回 東北大学光科学技術フォーラム、東北大学 片平さくらホール、2008 年 11 月 6 日。
- [54] H. Kosaka, H. Shigyou, T. Inagaki, Y. Mitsumori, Y. Rikitake, H. Imamura, T. Kutsuwa, M. Kuwahara, K. Edamatsu, "Coherent transfer of light polarization to electron spins in a semiconductor" (Poster), International Symposium on Physics of Quantum Technology (ISPQT2008), TU-B1, Nara, Japan, Nov. 25-28, 2008.
- [55] Nobuhiko Yokoshi, Hiroshi Imamura and Hideo Kosaka, "Adiabatic charge pumping in laterally-coupled quantum dots" (Poster), International Symposium on Physics of Quantum Technology (ISPQT2008), TU-B2, Nara, Japan, Nov. 25-28, 2008.
- [56] Ozgur Cakir and Toshihide Takagahara, "A New Scheme for Nuclear Spin Quantum Memory in an Isotope-controlled Si Quantum Dot" (Poster), International Symposium on Physics of Quantum Technology (ISPQT2008), TU-B3, Nara, Japan, Nov. 25-28, 2008.
- [57] Hiroshi Imamura, Yoshiaki Rikitake, and Hideo Kosaka, "Magneto-optical Kerr tomography of an electron spin state in a semiconductor quantum dot" (Poster), International Symposium on Physics of Quantum Technology (ISPQT2008), TU-B4, Nara, Japan, Nov. 25-28, 2008.
- [58] Takahiro Inagaki, Hideo Kosaka, Yasuyoshi Mitsumori, Keiichi Edamatsu, Yoshiaki Rikitake, and Hiroshi Imamura, "Electron spin state tomography" (Poster), International Symposium on Physics of Quantum Technology (ISPQT2008), TU-B5, Nara, Japan, Nov. 25-28, 2008.
- [59] Yoshiaki Rikitake, Hiroshi Imamura, and Hideo Kosaka, "Quantum state transfer from a time-bin photon qubit to an electron spin qubit" (Poster), International Symposium on Physics of Quantum Technology (ISPQT2008), TU-G1, Nara, Japan, Nov. 25-28, 2008.
- [60] Makoto Kuwahara, Takeshi Kutsuwa, Keiji Ono and Hideo Kosaka, "Optical responses of quantum transport for single photo-electron detection" (Poster), International Symposium on Physics of Quantum Technology (ISPQT2008), TU-G2, Nara, Japan, Nov. 25-28, 2008.
- [61] Keiji Ono, R. Takahashi, Shin-ichi Amah, Tsuyoshi Hatano, Kimitoshi Kono, Seigo Tarucha, and Hideo Kosaka, "Photon-induced electron transport in single InAs quantum dot devices" (Poster), International Symposium on Physics of Quantum Technology (ISPQT2008), TU-G3, Nara, Japan, Nov. 25-28, 2008.
- [62] Takeshi Kutsuwa, Makoto Kuwahara, Keiji Ono, Hideo Kosaka "Detection of two electron spin state using ESR in a double quantum dot for quantum media conversion" (Poster), International Symposium on Physics of Quantum Technology (ISPQT2008), TU-G4, Nara, Japan, Nov. 25-28, 2008.
- [63] Y. Mitsumori, N. Kato, H. Kosaka, K. Edamatsu, N. Yamamoto, K. Akahane "Time-resolved photoinduced Kerr rotation in semiconductor microcavity" (Poster), International Symposium on Physics of Quantum Technology (ISPQT2008), TU-G5, Nara, Japan, Nov. 25-28, 2008.
- [64] T. Takagahara, "Proposed Method for Quantum Correlation(Bell) Measurement of Two Electrons in a Single Quantum Dot Based on Faraday/Kerr Rotation" (Poster), CLEO/QELS 2008, JTuA115 (San Jose, May 4-9, 2008).
- [65] O. Cakir and T. Takagahara, "A New Scheme for Nuclear Spin Memory in Si Quantum Dot" (Poster), ICQI JMB63 (Boston, July 13-16, 2008).
- [66] Yoshiaki Rikitake, Hiroshi Imamura, and Hideo Kosaka, "Optical Spin State Tomography Using Selection Rules for Photon-Spin Quantum State Transfer" (Poster), CLEO/QELS 2008, JWA114 (San

- Jose, May 4-9, 2008).
- [67] Takeshi Kutsuwa, Makoto Kuwahara, Keiji Ono, and Hideo Kosaka, “Electron spin resonance in a double quantum dot on a g-factor controlled quantum well for quantum media conversion”(Poster), International Symposium on Nanoscale Transport and Technology 2009 (ISNTT2009), Atsugi, Japan, Jan. 20-23, 2009.
 - [68] Makoto Kuwahara, Takeshi Kutsuwa, Keiji Ono, and Hideo Kosaka, “Optical responses of quantum transport for single photo-electron detection”(Poster), International Symposium on Nanoscale Transport and Technology 2009 (ISNTT2009), Atsugi, Japan, Jan. 20-23, 2009.
 - [69] Y. Rikitake, H. Imamura and H. Kosaka, “Optical spin coherence tomography of an electron in a semiconductor quantum dot” (Poster), International Symposium on Nanoscale Transport and Technology 2009 (ISNTT2009), Atsugi, Japan, Jan. 20-23, 2009.
 - [70] K. Ono, R. Takahashi, S. Amaha, T. Hatano, K. Kono, S. Tarucha, and H. Kosaka, “Photo-absorption of single InAs quantum dot proved by single electron transport”(poster), International Symposium on Nanoscale Transport and Technology 2009 (ISNTT2009), Atsugi, Japan, Jan. 20-23, 2009.
 - [71] R. Takahashi, K. Kono, S. Tarucha K. Ono, “Spin blockade and nuclear spin effects in hetero-factor double dot” (Poster) , International Symposium on Nanoscale Transport and Technology 2009 (ISNTT2009), Atsugi, Japan, Jan. 20-23, 2009.
 - [72] 力武克彰, 今村裕志, 小坂英男、「タイムピン量子状態転写の半導体量子構造による実現手法の考察」(poster)、日本物理学会 2009 年秋期大会 25pPSB-1、熊本大学、2009 年 9 月 25 日。

(4)知財出願

- ①国内出願 (0 件)
- ②海外出願 (0 件)
- ③その他の知的財産権
なし

(5)受賞・報道等

- ① 受賞 なし
 - ②マスコミ (新聞・TV等) 報道
- [1] 小坂英男、“量子中継器研究に本腰 テレポーテーションで1000km実現へ”、日刊工業新聞、2007年1月22日
 - [2] 小坂英男、“量子力学の応用 コンピュータと暗号通信へ”、東北大学新聞、2007年6月19日
 - [3] 小坂英男、“東北大一量子暗号通信の中継技術 光から電子に変換成功”、日刊工業新聞、2008年2月27日
 - [4] 小坂英男、“「量子暗号」の通信距離伸長”、日経産業新聞、2008年2月27日
 - [5] 小坂英男、“光子を半導体電子へ転写—東北大 量子暗号通信の長距離化に道”、サンケイビジネスアイ、2008年2月27日
 - [6] 小坂英男、“光の状態を半導体中の電子のスピンの転写 東北大一産総研”、化学工業新聞、2008年2月27日
 - [7] 小坂英男、“光の電子状態を半導体中の電子に転写成功—量子中継器の実現へ道—東北大グループ”、科学新聞、2008年3月7日
 - [8] 小坂英男、“世界初！ 光の状態を電子へ移しかえた-絶対に安全な量子暗号通信。その実用化に大きな前進-”、ニュートン、連載記事「サイバーワールド」、2008年5月号
 - [9] 小坂英男、“量子の状態 光で測定 — 量子コンピュータへ道”、日刊工業新聞、2009年2月5日
 - [10] 小坂英男、“光子から電子に伝達 — 東北大、中継器の基礎技術”、日経産業新聞、2009年2月5日
 - [11] 小坂英男、“電子スピンの量子的状態 光書き込み・光読み出しに成功—東北大”、科学新聞、

2009年2月13日

[12] 今村裕志、余越伸彦、小坂英男、“半導体の人工分子—量子状態を電気測定”、日刊工業新聞、2009年7月22日

[13] 今村裕志、余越伸彦、小坂英男、“量子状態測定に新理論”、日経産業新聞、2009年7月22日

③その他 なし

(6)成果展開事例

特になし

§6 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
2005年7月7日	チームミーティング	東北大学電気通信研究所	12名	各グループの研究進捗報告と研究計画の打ち合わせ
2006年6月23日	チームミーティング	八重洲通りビル9F 小会議室	10名	各グループの研究進捗報告と研究計画の打ち合わせ
2006年11月9日	チームミーティング	八重洲通りビル9F 第一会議室	9名	各グループの研究進捗報告と研究計画の打ち合わせ
2007年7月3日	チームミーティング	理化学研究所、物質科学研究棟3階セミナー室	7名	各グループの研究進捗報告と研究計画の打ち合わせ
2007年11月1日	チームミーティング	東北大学電気通信研究所	9名	各グループの研究進捗報告と研究計画の打ち合わせ
2008年3月27日	チームミーティング	京都工芸繊維大学	9名	各グループの研究進捗報告と研究計画の打ち合わせ
2008年10月30日	小坂 CREST—平山 ERATO 交流研究会	東北大学電気通信研究所	12名	CREST 小坂チームと ERATO 平山チームの各メンバーからの成果発表および討議
2008年11月14日	チームミーティング	理化学研究所	4名	小坂グループと大野グループの研究進捗報告と研究計画の打ち合わせ
2008年11月18-19日	小坂 CREST—枝松学術創成交流研究会	東北大学電気通信研究所	20名	CREST 小坂グループと学術創成交枝松チームの各メンバーからの成果発表および討議
2008年11月26日	チームミーティング	奈良新公会堂	8名	各グループの研究進捗報告と研究計画の打ち合わせ
2009年7月15日	チームミーティング	東北大学電気通信研究所	11名	各グループの研究進捗報告と研究計画の打ち合わせ

§ 7 結び

[達成度と成果の意義]

大筋で当初の計画通りに進捗し、当所立案した研究目標は概ね達成したと思う。光から電子スピンへの量子コヒーレンスの転写は、量子メディア変換の基本機構であり、これを実証した意義は大きい。本プロジェクト採択時点では多くの方が否定的だったことを思い出すと、これに成功したことは飛躍的な科学の進歩ではないかと思う。またこれを応用したスピン量子トモグラフィのアイデア及び実験は、今までに例を見ない全く新しい知見であり、学術的に大きな意義を持つ。散乱光の解析で電子スピンの状態が量子位相を含めて測定できるということは、光と電子スピンが互いの量子状態を交換したり、量子的にもつれ合ったりする可能性を示唆している。伝播を得意とする光子に対して、電子スピンは演算を得意とするとともに他の固体キュービットへの仲介役でもあり、核スピンや超伝導キュービットなどへの橋渡しが可能となる。

応用上では、量子メディア変換は量子暗号通信の距離を飛躍的に延長する量子中継器のインターフェースとしての利用が期待される。本プロジェクトでは、特にこの応用を意識し、量子状態転写後に転写が完了したことを忠実度 1 で通知する非破壊転写検出の機能を実証した。特に長距離量子通信では、光ファイバの伝送効率が 100km で 1%程度と悪く、この伝送損失を補うために量子中継器は多数の量子メモリを内蔵し、転写に成功したビットのみを抽出してもつれ合い検出をする必要がある。これを可能とするのが量子ドットの近傍に設けられた単電子検出器であり、その意義は応用上も大きい。

量子中継器あるいは量子暗号通信の社会的意義はここで改めて説明することはしないが、この普及により我々の得る利益は図りがたい。高度情報化社会の危機を乗り越えるためにも不可欠である。

[今後の研究展開]

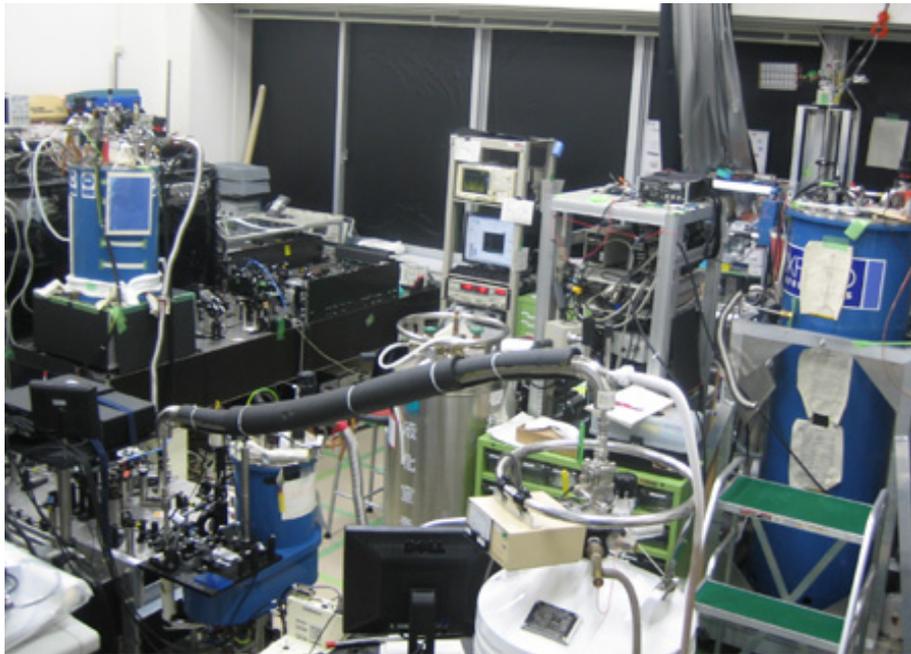
本研究成果は、光子から電子スピンへの量子メディア変換だけでなく、光子と電子スピンの間の量子もつれ生成、光による電子スピン状態の任意制御へと展開できる。発光部、受光部ともに量子メモリ機能を持たせ、任意スピン制御することにより、遠隔地間の量子もつれ生成と制御が自在に行え、量子通信のユビキタス化を加速する。ここで開発した原理は室温中の固体にも展開可能であり、量子通信ネットワークの低コスト化にも貢献する。

[プロジェクト運営]

本チームは2つの実験グループと2つの理論グループから構成され、理論と実験の間の連携を密接に取りながら、一つの目標に向かって短時間でインパクトの高い研究成果をあげた。また、プロジェクト初年度および次年度に大型設備投資を終了し、これらを本プロジェクトの全期間を通して常時フル稼働させることにより、当初計画通りにプロジェクトを遂行した。その後、プロジェクトの進捗に合わせて必要な時に必要最低限の設備投資を効率的に行った。さらに、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。

[意見、要望]

最後に、このような挑戦的な課題をご採択いただいた山本先生を始め関係各位に心よりお礼申し上げます。特に、総括の山本先生には最も簡単な方法で証明できる方法を考えるようご指導いただき、何とかここまで進むことができました。メインアドバイザーの樽茶先生には研究の方向性についてのご指導とご賛同をいただき、また量子輸送実験に関する専門的なご助言もいただきました。アドバイザーの五神先生には提案段階から大変厳しいご指摘をいただき、また立ち上げ段階でも量子光学実験の詳細についてご指導いただきました。和達先生、覧具先生、藪崎先生にも、採択段階から度重なるワークショップやサイトビジットなど貴重なお時間をお割きいただき、また日頃から暖かく見守っていただきました。この場をお借りして深い感謝の意を表したいと思います。



小坂グループ実験室



大野グループ実験室