

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「情報社会を支える新しい高性能情報処理技術」
研究課題「量子情報処理ネットワーク要素技術」

研究終了報告書

研究期間 平成14年11月～平成19年10月

研究代表者：武藤俊一
(北海道大学 大学院工学研究科・教授)

1 研究実施の概要

構想

提案当時、量子暗号通信の発展とともに量子情報処理全般への機運が高まり、特に究極の情報処理である量子コンピューティング(QC)について種々の提案が出ていた。半導体の電子スピンは固体量子ビット(Qubit)の候補として最も期待されており、すでにLoss-DiVincenzoによる普遍量子ゲートの提案[1]もあった。量子ドットの電子スピンを研究するものとして我々も何らかの貢献をできないかと思っていたが、Loss-DiVincenzo スキームを実施するには不可能とも思える障壁が見えた。その矢先、大学院初年度の学生が全く異なる電子スピン普遍ゲートの提案を持ち込んできた。本質的な障壁が見当たらないだけでなく、原理的には多ビット化も期待できる素晴らしい考案であった。先ず少数の Qubit で実証する必要があったが、研究のためのリソースが不足していた。Loss-DiVincenzo を実現するといえれば研究費が稼げるかもしれないが、固有の普遍ゲートを実現するというのはリスクが高いと判断されるようではなかなか資金が得られなかった。

単に原理実証をするだけでなく、少数の Qubit で可能なデバイスの提案が必要と感じ、注目したのが量子中継器である。量子中継器は量子テレポーテーションを基本とする。量子テレポーテーションについては Zeilinger らが既に種々の実験デモを報告したが、光子 Qubit のみを用いたものであった。光子にはメモリ効果がないためにそのまま量子中継器に発展することができない。一方、Yablonovitch らは電子スピンを用いた量子中継器の提案をしていた。電子スピンにはメモリ機能を持たせることができるので光子の欠点を補うことができる。そこで提案者の笹倉君を富士通に派遣し、我々の量子ゲートの中継器に応用可能かどうかを検討した。代表者、提案者、および富士通研究員の協議の結果、可能という結論を得たので、本研究を提案することにした。

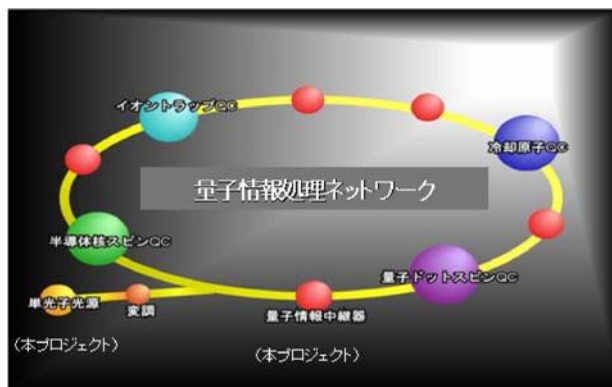


図1. 量子情報処理ネットワークのイメージ

提案した CREST プログラムでは、将来の量子情報処理ネットワークに必要な要素技術として、特に量子中継器と単一光子源に注目し、その基礎研究を行った。中継器は出来栄によっては量子暗号通信の通信距離を飛躍的に増大させるものであるが、むしろ QC 間のネットワークのための中継を念頭に置いていた。したがって必ずしも遠方の QC を結ぶ必要はなく、現実的には近接した異種の QC を接続し個々の利点を活かすことに意味があると考えた。光子の伝送には長距離ファイバー通信というよりも、むしろ光接続のようなものを念頭に置いていた。

中継器スキーム

我々が念頭においた中継器のイメージを図2に示す。Yablonovitch らが既に提案していたものに近いが[2]、彼らの方法は単光子光トランジスタを必要とし、光子の到着のみを検出して、スピンは計測しないという機能が必要なものであった。我々の方法では、Repeater I から光子を Alice に送ることにより、そのようなトランジスタを不要にしている。

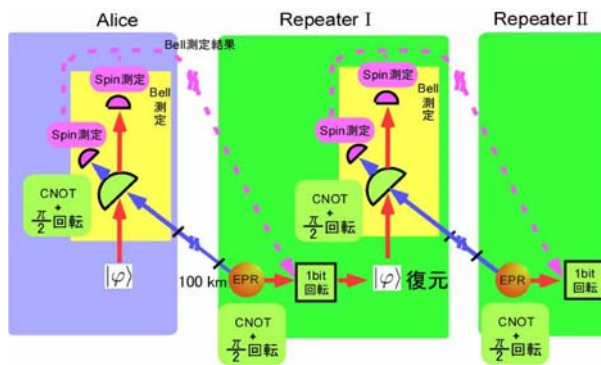


図2. 量子中継器のイメージ.

①Repeater Iで電子スピンのEPR ペアを生成し、一方をそのまま保持し、他方を光子に変換して Alice に戻してやる. ②この光子が届いた際にその量子情報を電子スピに変換し、Alice が保持している電子スピンとの間で Bell 測定を行う. ③その結果は2ビットのデジタル信号なので、これを古典的通信手段(例えば電話)で Repeater I に伝える. ④Repeater I では、そのデジタル信号に従って、保持していた EPR ペアの片割れに「Qubit (量子ビット) の回転」といわれる量子演算を施してやる. これにより Alice に保持されていた電子スピンの量子情報は Repeater I の電子スピンに復元される (量子テレポーテーションの完成).

このような中継器の物理的なプロトタイプとして図3のようなものを考えた.

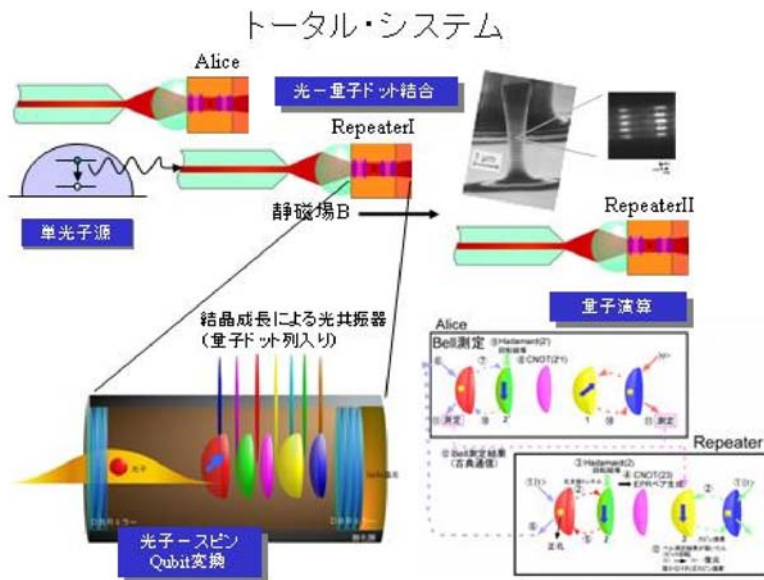


図3. ハードウェアのイメージ

単光子光源から出た光子は光ファイバー, 自由空間などを経由して中継器に送られる. 中継器において光子は半導体でできた光キャビティに集光される. 光キャビティの内部には半導体量子ドットの列があり, 光子はそのうちの, 例えば最上部の量子ドットに完全に吸収されて電子スピに変換される. 電子スピンは他の量子ドットに送られて, もうひとつの電子スピンとの間で2 Qubit までの量子演算が行われる. 2 Qubit までの量子演算

で, EPR 対の生成, Bell 測定などの量子テレポーテーションに必要な全ての量子演算をまかなうことができる.

この中継器を実現するための要素技術を, 以下の4つに大別した.

- a) 単光子光源
- b) 光を量子ドットに結合する技術
- c) 光子の重ね合わせ状態を電子スピンの重ね合わせ状態に変換する (Qubit 変換) 技術
- d) 電子スピンを用いた2量子ビットの普遍量子演算

提案時の研究体制を図4に示す.

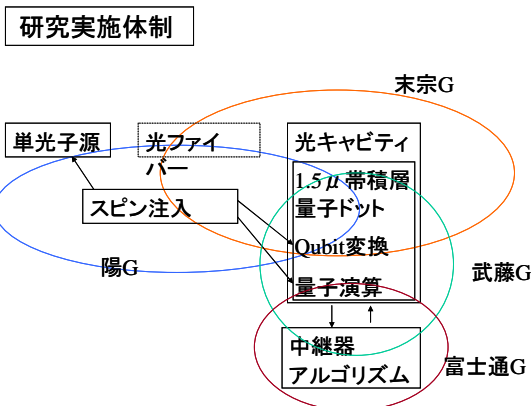


図4. 提案時の研究体制

当初は 1.5 μ 帯での試作を念頭に置いていた。1.5 μ 帯の量子ドットは末宗グループ(G)が担当した。単光子源は陽 G のスピン注入を用いたものを用いる予定であった。富士通の担当は中継器アルゴリズムであった。但し分担は縦割りとせずオーバーラップを含み冗長性を持たせることにした。

単一光子光源については、当初スピン注入を用いることを考えていた。すなわち強磁性体から半導体へスピンを注入することによってスピンの揃った電子を半導体中に電気的に生成することができる。光学遷移の選択則によりこの電子スピンは円偏光に変換されるが、円偏光は進行方向が電子スピンの向きに確定しているため、効率よくファイバーに取り込むことができ、高効率の光子源になるだろうというアイデアである。これについては検討の結果、実現に時間を要することがわかったため、より現実的な方法として、量子ドットを光励起するという方法を中心とすることになった。

中間時点までの経過

単一光子源としては、磁性金属 (Fe) から半導体(InAs) へのスピン注入による円偏光光源を検討、これは単光子源としては用いないことになったが、スピン注入をより直接的に全電氣的に評価するために Datta-Das 型スピントランジスタを実現した。また、スピン注入に代わるものとして InAlAs 量子ドットを用いた光子源を開発、高感度の光子検出が可能な 0.7-0.8 ミクロンでのオンデマンド光源の可能性をもつ光子発生を確認している。核磁場を用いた光子から電子への Qubit 変換について検討し、核磁場の形成と制御を確認し、Qubit 変換の見通しをつけた。電子スピンを用いた量子演算用の結晶成長技術を立ち上げ、スピン緩和の新しい計測手法を開発した。尚、末宗 G では早い段階で GaNAs 歪補償層を用いた 1.5 μ 帯発光の量子ドットを開発したが、これは用いないこととなった。

中期以降

単一光子源以外の要素 b-d) についても中間時点までに目標を達成し、これらを統合して中継器を実現することが当初の目標であった。しかしながら、それまでの検討の結果、中継器の実現にはクリアすべき「項目ごとの要素技術」があり、それらのハードルが高いことが分かって来た。これは世界的にも依然として中継器がデモンストレーションされていないことから裏付けられた。逆に項目ごとの要素技術の実現が十分なポテンシャルを持つ成果であることも分かって来た。そこで中間評価以降では以下の項目毎の目標達成を目指してきた。このために富士通 G はアルゴリズムよりも単一量子ドットの切り出しなどの加工プロセス面に専念することとなった。

- 1) 量子演算 (スピン反転) の実証
- 2) Qubit 変換用バンド構造の実証
- 3) 1 光子-1 電子の量子非破壊変換
- 4) スピントランジスタによるスピン検出

本報告の時点 (2007. 10. 2) ではプロジェクトは進行形であるが、項目 1), 4) の達成度は高くない。現時点で項目 1) の達成度は 30%、項目 4) の達成度は 50%程度と考える。

項目 2) については光励起した InAlAs 量子ドットで縮退した電子状態への核分極スイッ

チングを実測し、解析した結果、Qubit 変換用のバンド構造（電子状態）が実現していることが明らかとなった。90%の達成度と考えている。

項目3)については、中期までに開発したオン・デマンド単光子光源の研究を発展させた結果、極めて高い偏光保存率を持つ純粋な発光をともに単一のInAlAs量子ドットから観測した。まだ重ね合わせ状態の変換を確認していないが、ゼロ磁場で観測できたことにより、60%程度まで達成されたと考えている。

要素技術とはいえ、項目2, 3)共に同じInAlAs量子ドットで達成しつつあることは特筆に値する。これにより単一光子光源を含めた全てを中継器の中に集積する可能も示された。

2 研究構想及び実施体制

(1) 研究構想

ここでは、研究概要で述べなかった部分について補足する。まず研究開始時の計画線表を以下に示す。

項目	平成14年度(5ヶ月)	平成15年度	平成16年度	平成17年度	平成18年度	平成19年度(7ヶ月)
量子演算	1スピントラップ 1スピントラップ 1スピントラップ 2スピントラップ	量子もつれ 2ビットCNOT	デコヒーレンス解明	1スピントラップ検出 量子テレポーテーション	量子相関純粋化	
Qubit 変換	核スピントラップ形成	有効磁場制御				
光キャビティ	1.5μm歪補償積層量子ドットの波長制御 ならびに結合ドットの制御			光キャビティの製作と 量子ドットとの結合		
	光ファイバー結合光部品の調達と 結合量子効率の検討					
中継器アルゴリズム	要素技術の仕様検討	アルゴリズム、モデルの作成	モデルの実験検証	1.5μm化の仕様検討		中継器試作
M/S スピン注入	半導体ヘテロ接合によるスピン 偏極率の向上	ハーフメタル材料の探索		1.5μm化検討		
まとめ						まとめ

次に、研究グループ毎の役割分担を提案時の所属、研究項目に従って示す。

武藤グループ

北海道大学 大学院工学研究科 量子物理工学専攻 (武藤俊一)

研究実施項目：結合量子ドットでの Gate 動作の実証 (量子演算)

概要：半導体量子ドットの電子スピンを Qubit とした量子コンピューティングの検討を行う。量子ドット間のテラヘルツ光支援トンネル効果とそのクーロンブロッケイドを用いた量子演算を行う。実験としては、単一量子ドットでの 1 スピン回転、3 重量子ドットを用いた制御 NOT 演算を実証する。これらの結果に基づいて、光量子情報中継器に必要とされる量子情報復元の実証を富士通白杵グループと協力して行う。またスピンのデコヒーレンスの軽減の検討、演算の高速化の検討を通じて、光量子情報中継器の室温動作の検討も行う。

研究実施項目：キャビティでの 1 光子から 1 電子への量子情報の変換 (Qubit 変換)

概要：キャビティでの 1 光子から 1 電子への量子情報の変換の手法を特に末宗グループと協力して開発する。核スピンの分極により生じた局所磁場を用いて、スピン偏極した軽い正孔を動的或いは静的にトンネルさせることによる量子情報の変換を計画している。III-V 族半導体量子ドットは光との整合性が極めて良く、変換の手法は多々考えられるため、更により単純で確実な変換手法を他の全てのグループと協力して検討する。

【註釈】その後、変換の手法について全体でディスカッションした結果、外部磁場を核磁場で相殺する手法がベストという結論に達し、Qubit 変換にはトンネルは必ずしも必要でないということとなった。

末宗グループ

北海道大学 電子科学研究所 光材料研究分野 (末宗幾夫)

研究実施項目：長波長帯結合量子ドットの作製・評価と高 Q 値キャビティの形成 (単光子源)

概要：本研究では、InAs/GaAs 歪量子ドットに GaNAs 歪補償層を導入することにより光通信用 1.55 ミクロン帯長波長量子ドットを実現する。さらに 1 光子の量子情報を電子スピンの量子情報に変換するのに最適な結合量子ドット系を実現するため、量子ドット発光波長、発光線幅、ならびにドット間結合度の制御に関する研究を進める。また微細加工を用いたメサエッチや選択成長などの技術を駆使して、単一光子を扱うために必要な単一結合量子ドット系を実現し、その評価を進める。さらに 1 光子の量子情報を効率よく電子スピンの量子情報に変換するために必要な、このような量子ドットを内包した高い Q 値を持つ 3 次元微小光共振器を形成する。

【註釈】以上は当初の計画であるが、光通信用 1.55 ミクロン帯長波長量子ドットの開発、高 Q 値キャビティの開発を達成した後、スピン注入を用いた単光子源の進捗状況、InAlAs 量子ドットでの核磁場を用いた Qubit 変換研究の進展に合わせて、0.7-0.8 μm 帯の InAlAs 量子ドットを用いた単一光子源に集中することとなった。また、中期以降は、この研究を発展させて光-電子スピンの量子非破壊 (量子情報保存) 変換への応用を検討した。

研究実施項目：光ファイバー—キャビティ間の結合の形成

概要：DBR を用いたピラー型光共振器にファイバーの近接場光によって光子を結合させる方法を検討する。ファイバーは円偏波を保存し易く、また SIL (solid immersion

lens) 等により高効率で光キャビティに結合することができる。

【註釈】以上は、当初の計画であるが、SILによる光結合の検討の後、上記のように光-電子スピンの量子非破壊（量子情報保存）変換に集中することとなった。

臼杵グループ

富士通株式会社 厚木分室 (臼杵達哉)

研究実施項目：量子情報再生のアルゴリズム及びシステム研究（中継器アルゴリズム）

概要：本グループでは、主にシステム動作検証を目的とした研究に理論・実験両面から取り組むことになる。量子通信では現在 60 km 程度が上限となっている光ファイバーによる量子ビット伝送距離を延長する目的で、アルゴリズムや各要素技術のスペック検討が理論面で先ず重要となる。一方で、市販の光量子ビットデバイスあるいは他チームで試作された量子ビットデバイスなどを用いて実証実験にも取り組む。更に、各グループの研究が円滑に進むように武藤グループへの量子ドット作製供給も適時行う予定である。

【註釈】以上は当初計画であるが、ハードウェアイメージをつくるのための量子中継アルゴリズムの設計、またインジウムフラッシュ法を用いた量子ドット作製支援の後、主として単一量子ドット分光のためのメサ加工（少数量子ドット切り出し）プロセス、および DBR キャビティ加工プロセスなどの加工プロセス支援に集中することとなった。

陽グループ

北海道大学 量子集積エレクトロニクス研究センター

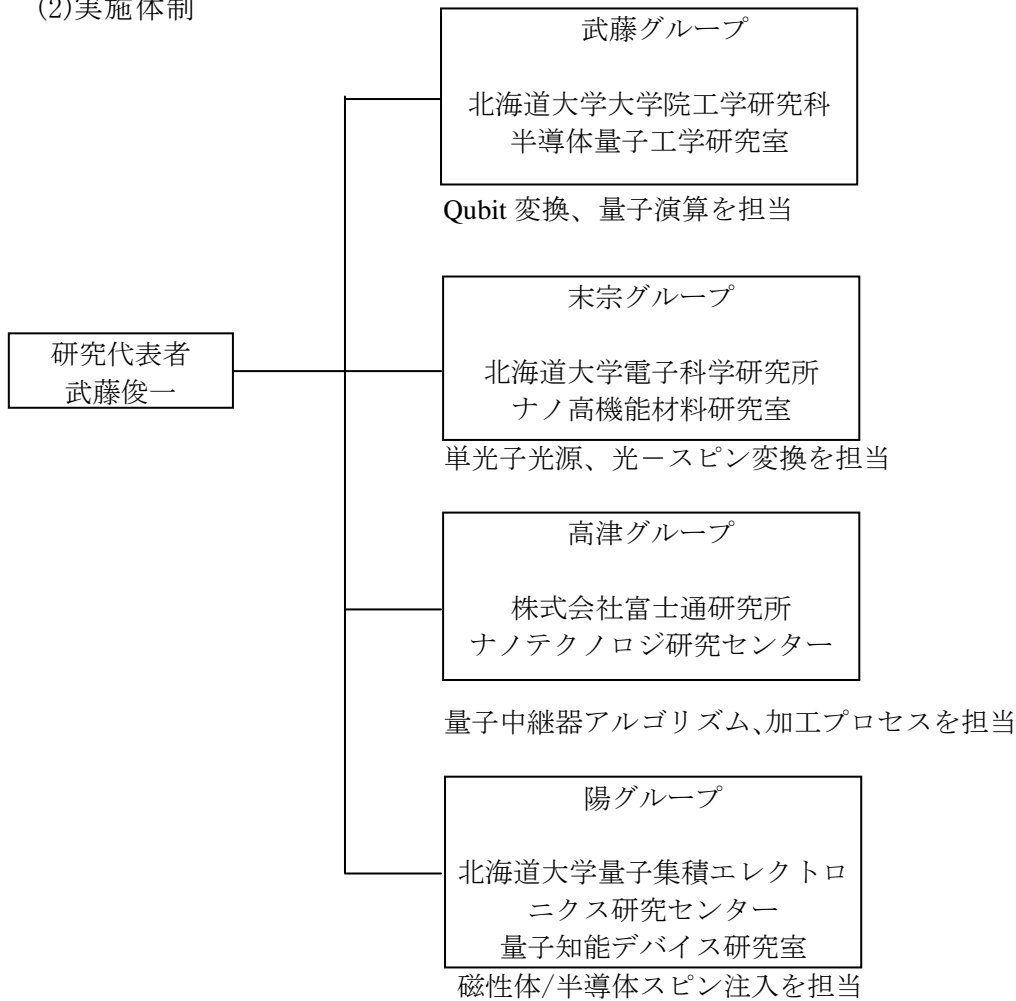
量子知能デバイス研究分野（陽 完治）

研究実施項目：高偏極率電子スピンの半導体への注入（スピン注入）

概要：強磁性金属から半導体へのスピン偏極電子の注入について、偏極度の向上の研究を行う。100%の偏極度を持つスピンの注入が実現すれば、1/4 波長板を用いることなくスピン偏極電子による指向性円偏光の発生が可能になる。円偏光はスピン偏極の方向に進行するため、指向性をもった光子が形成されることになる。これを光ファイバーに導くことにより、極めて効率の良い単光子光源が実現する。単光子源は、量子中継器と並んで量子通信の鍵を握る要素である。また量子演算用のドット列に強磁性金属から $|1\rangle$ 状態スピンを注入することも検討する。スピン注入は円偏光によるスピン生成と並んで量子ビット初期化のための有力手段である。

【註釈】以上は当初計画であるが、鉄から半導体（InAs）で 20%程度の当時最高の円偏光度を達成した後、時間的な制約から単一光子源には末宗 G による光励起した量子ドットを用いることになり、スピン注入は用いないこととなった。尚、スピン注入の全電氣的検証のために Datta-Das 型のスピントランジスタを実現した。その後、このトランジスタを高度化して量子ドットと結合し、高感度のスピン検出を目指すこととなった。

(2)実施体制



3 研究実施内容及び成果

3.1 サブテーマ名「Qubit 変換」(北海道大学 武藤グループ)

(1) 研究実施内容及び成果

①研究のねらい

光子は量子ドットにおいて同じエネルギーの電子-正孔対に変換されるが、Qubit の変換には更に工夫が必要である。図 5 に Yablonovitch らの提案を示す[2]。Qubit 変換には光子の重ね合わせ状態をスピンの重ね合わせ状態と正孔との直積に変換すればよく、そのためには電子スピンの up と down の状態が縮退していて、逆に正孔はひとつの状態のみが分離していることが必要となる。Yablonovitch らはこのための g 因子工学を提案した。すなわち適当な半導体材料、或いは半導体の組み合わせを用いることによって、電子の g 因子のみをゼロにすることができる。この半導体に磁場を印加すると、縮退した電子状態とエネルギー分離した正孔状態を作り出すことができる。

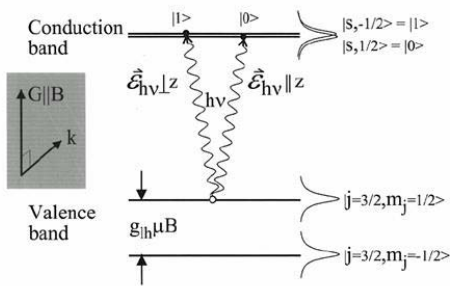


図5. Yablonovitch らによる提案 [8]

この有効磁場、「核磁場」は通常、核のスピンのバラバラの場合にはきわめて弱いが、核のスピンを揃えることによりテスラ級の大きなものになる。興味深いことに、この核磁場は電子に対してのみ強く働き、正孔に対する影響は桁違いに小さい。そこで我々はこの核磁場の性質を利用して必要なバンド構造を実現することにした。すなわち、外部磁場と核磁場を相殺させることで、正孔のみが磁場を感じる状態を実現し、縮退した電子状態とエネルギー分離した正孔状態を作り出すことができるというものである[3]。

②実施内容（核磁場の形成実験と Qubit 変換用バンド構造の実証）

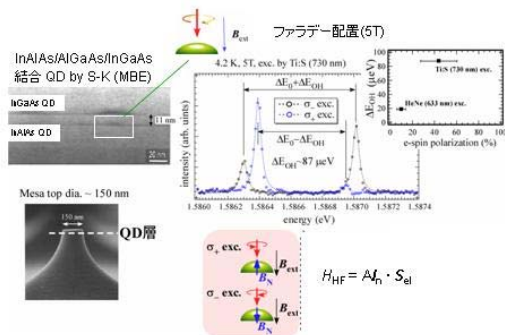


図6. 核磁場の形成によるゼーマン分離の変化

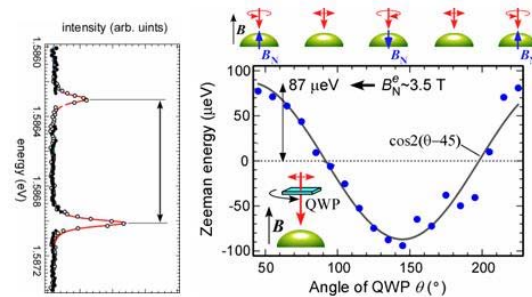


図7. 励起光の円偏光度による核磁場の制御

この手法の正当性をみるために行った光による核磁場の形成実験を図6に示す。

ここで、用いたのは AlGaAs に囲まれた InAlAs 量子ドットである。富士通においてメサ構造にして少数のドットのみを切り出した。これに円偏光を照射すると、個々の InAlAs 量子ドットからの発光が観測できる。磁場を印加しているの、発光は電子スピンの up, down に対応して 2 本に分かれるが、その際右向き円偏光を用いた場合と左向き円偏光を用いた場合とで、2 本のエネルギー間隔に差が生じる。これが核磁場の効果である。つまり、核磁場が外部磁場と平行か反並行かによって 2 本の間隔が変わってくる。偏光を右円偏光から直線偏光、左円偏光と連続的に変化させた場合に、この間隔が変化の様子を図7に示す。正弦曲線になっていることがわかり、この方法で核磁場を制御する見通しが得られた。この正弦曲線の振幅（オーバーハウザーシフトと呼ばれる）は最大で 87 μeV に達した。得られた核磁場が十分大きいのか否かについて実験、理論の両面から検討を行った。その結果、核磁場は 3.5 テスラという大きなもので、これを Qubit 変換に用いた場合、正孔のエネルギー分離は 100 μeV 程度に達することがわかった。Qubit 変換に用いる光子エネルギーの不確定性は大きくても 10 μeV 以下であり、また量子ドットの準位の不確定性は 4 μeV といわれ

ている。従って十分に大きなエネルギー分離が実現できる見通しを得た。光の円偏光度を用いてこのシフトを制御できることを示したのは我々が最初である[4]。

更に我々は励起円偏光の強度による核磁場の変化を調べ、InAlAs 量子ドットでは初めて、いわゆる核スピンのスイッチングが起こっていることを見出した [5]。スイッチングの一端では Qubit 変換に必要なバンド構造（縮退した電子状態とエネルギー分離した正孔状態）が実現していると考えられる [5, 6]。理由を以下に述べる（図 8 参照）。

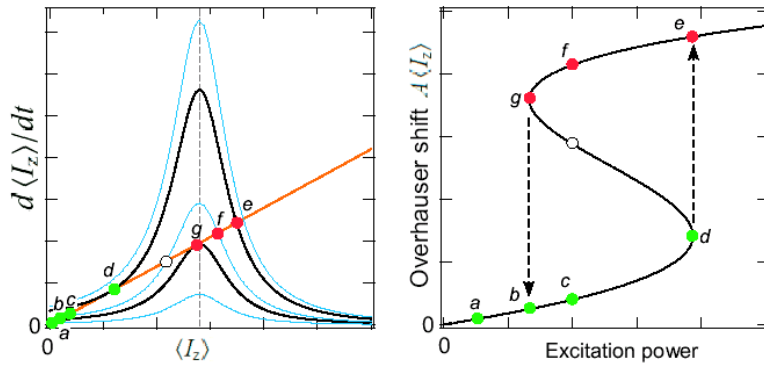


図 8. 核分極スイッチングの原理. 左図で $\langle I_z \rangle$ を中心とした凸型の曲線が分極形成レート、直線が分極破壊レートを示す。両者の交点が定常状態で実現する。右図は励起光強度を変えた場合に交点がどのように動くかを示す（分極のヒステリシス）。スイッチング後は左右の e 点の状態が実現している。凸型の曲線の幅は電子状態の寿命で決まるため極めて狭い。

スイッチングの機構は次のように考えられている。核分極の平衡値は、核分極が形成される速度と、逆に核分極が破壊される速度の一致する条件で決まる。核分極の形成は微細構造相互作用による電子スピンと核スピンの同時反転（フリップフロップ）によるが、外部磁場が大きい場合、電子スピンの大きなゼーマンエネルギーにより、エネルギーが保存されない。このため、この同時反転過程は著しく抑制される。しかしながら、核分極による実効的磁場、いわゆる核磁場が外部磁場を打ち消す方向に形成されると、このエネルギーは減少し、特に両者が完全に打ち消すところでは、核分極の形成レートが特異的に増大する。この増大は、電子状態の寿命で決まるエネルギー幅の範囲で顕著となる。これに対し核分極の破壊レートはこのような特異性を示さず、ほぼ分極に比例して増大する。従って、ある程度に分極が形成されると分極形成が破壊を上回り、分極が増大して（正のフィードバックが働き）ゼーマンエネルギーが減少し、分極形成は加速される。これに対し核磁場が外部磁場を打ち消す点を過ぎると分極形成は激減して分極破壊と釣り合って平衡に達する。結果的に核磁場が外部磁場を打ち消す状態が実現していることになる。これは Qubit 変換用バンド構造、すなわち縮退した電子状態とエネルギー分離した正孔状態が実現していることに他ならない。（電子状態のエネルギーの一致は正確には、 ΔE (10 μeV 程度) の誤差を伴うが、光子 Qubit としても同じエネルギー幅を持つものを使うことになるので、光子からみると電子準位は縮退していることになる）。

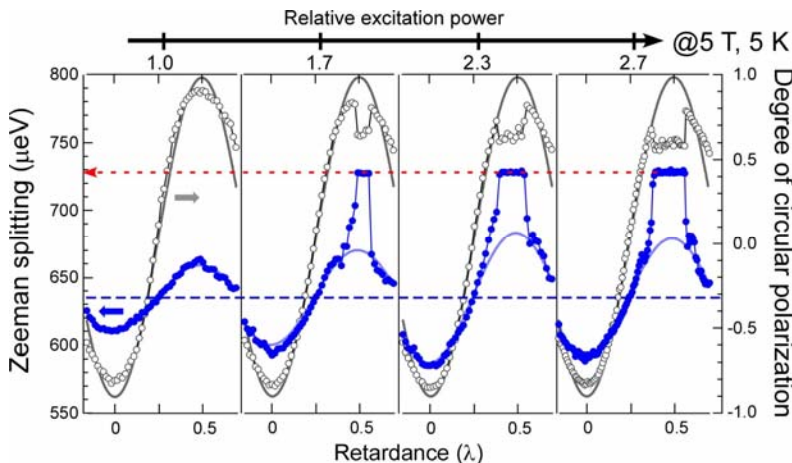


図 9. 核磁場の励起円偏光度によるスイッチング（核スピンスイッチ）。黒丸はゼーマン分離の実験値で位相差 $\lambda=0.5$ 付近のとびがスイッチングを表す。スイッチング後の値はほぼ一定（点線）であり外部磁場と核磁場が打ち消しあっていることを意味する。

実際に円偏光度に対するゼーマン分離のスイッチングの様子を図9に示す。偏光度の高い部分でゼーマン分離が円偏光度にも励起光強度にも依存しない一定の値（図の点線）に保持（ピン留め）されていることがわかる。ここで Qubit 変換用バンド構造が実現されている。自動的に実現するために極めて安定性が高いと考えられる。

核スピンスイッチングの報告は InGaAs 量子ドットについて既にシェフィールド大から報告されているが、InAlAs 量子ドットでは初めてである。高感度の光子検出が可能な発光波長をもつ InAlAs 量子ドットで実現されたことは量子中継器の実現に向けて重要な意味をもつ。更に、より学術的な側面として、我々は、核スピンのスイッチングに対応して電子分極のスイッチングを観測している。これは、電子スピンの平衡分布の形成に核-電子間のフリップフロップが重要な役割を果たしていることを示唆するもので、従来の定説である「電子スピン系は核とは別個に平衡に達し、その分布が核スピンの分極を決める。」を覆すものである。

③成果の纏めと位置づけ：

量子ドットの核磁場を用いた光子と電子スピンの Qubit 変換を提案し、その実験的検証を行った。その結果、InAlAs 量子ドットにおいて光励起によりテスラ級の大きな核磁場が実現すること、またこれを励起光の円偏光度により制御できることを世界で初めて示した。更に、核分極のスイッチングを実現し、この現象により Qubit 変換に必要なバンド構造が自動的に従って安定的に実現することを初めて示した。

更に、核スピンのスイッチングに対応して電子分極のスイッチングを観測した。これは、電子スピンの平衡分布の形成に核-電子間のフリップフロップが重要な役割を果たしていることを示唆するもので、従来の定説である「電子スピン系は核とは別個に平衡に達し、その分布が核スピンの分極を決める。」を覆すものである。

尚、核スピンスイッチングの報告は InGaAs 量子ドットについて既にシェフィールド大から報告されているが、InAlAs 量子ドットでは初めてである。

(2)研究成果の今後期待される効果

今後は後に述べるゼロ磁場の光-スピン変換と組み合わせて光子-電子スピン間の Qubit 変換を実証する。Qubit 変換には提案は多数あるが、我々の知る限りでは、初めての実現となり科学技術や社会への波及効果は多大なものと考えられる。

3.2 サブテーマ名「量子演算」（北海道大学 武藤グループ）

(1)研究実施内容及び成果

①研究のねらい（新しい量子演算スキームの提案）

量子ドットの電子スピンは将来の大規模量子コンピューティング実現へ向けての有力候補の一つである。半導体の電子スピンは核スピンに比べ散乱の影響を受け易く、デコヒーレンスが桁違いに短いとの指摘がある。しかしながら量子ドットでは電子のスピン緩和機構の殆どが抑制されることが理論的には予測でき、デコヒーレンスの抑制が期待できる。

笹倉弘理君（現在、CREST 博士研究員）が、これとは全く異なる量子演算を独自に提案した[7]（図10）。量子ドットの電子スピンの光支援トンネルとそのクーロンブロッケイドを用いたもので、テラヘルツ光による共鳴トンネル過程と共鳴磁場によるスピン反転というエネルギー選択的なプロセスを用いているために、以下に述べるように、外部からの tuning が可能で、Loss-DiVincenzo よりも遥かに実現し易い提案と考えている。先ずこの提案について説明する。分かり易さのためにテラヘルツ光と振動磁場を用いたプロトタイプで説明する。

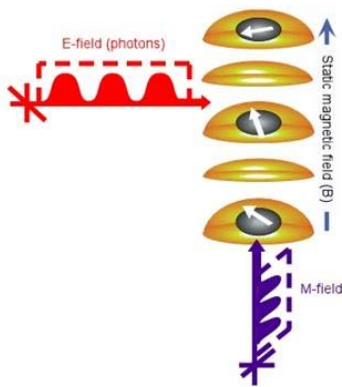


図 10. 提案した量子コンピューティングのイメージ

基本となるユニットは図 11 の 3 重結合量子ドットである。それぞれのドットの 3 つの基底準位のみを使うが、静磁場を印加しているのでスピンの **up**, **down** に対応して 6 つの準位が形成されている。この構造に 2 個の電子を入れると、熱平衡では電子が両側のドットに 1 個ずつ居る（中央のドットを両側のドットより小さめにして量子準位を高くしている）。同じドットの中の **up** と **down** の 2 つの準位は回転磁場を印加することにより行き来することができる。また隣り合うドット間でのスピンの同じ準位は、振動電場（光の π パルス）を印加することにより、いわゆるフォトン支援トンネルにより行き来することができる。これを用いると図 12 のように量子演算が可能になる。

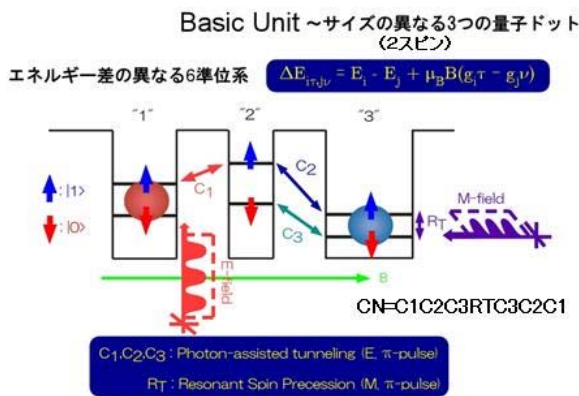


図 11. 3 重結合量子ドットでのバンド構造と量子操作

ここで注目すべきは量子ドットのサイズを適当に変えることにより、遷移に必要な回転磁場、振動電場の振動数を全て異なるようにすることができることである。これは、量子ドットの量子化エネルギーとゼーマンエネルギーが共にサイズ依存性を示す[8]ことによる。従って、これらの遷移を我々は外部から診断して回転磁場、振動電場の振動数をこれに **tuning** することにより遷移が制御できることになる。尚、「条件つきトンネリング」、すなわち電子スピンの **up down** により電子がトンネルするか、しないかを用いて演算を行うという発想は、従来にない固有な考えであるとともに、他の演算手法にも応用が可能であり、重要な新概念であると考えている。

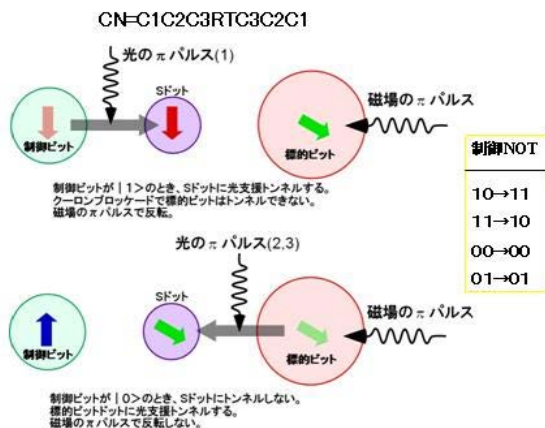


図 12. 制御 NOT (CNOT) の動作原理

3 重結合量子ドットに局在した 2 つの電子についてのシミュレーションを行った。回転磁場、テラヘルツ光のパルス印加して制御 NOT 演算 (CNOT) を試みた場合のリュウヴィル方程式 (密度行列の時間発展) を数値的に追ったところ、100 ps 程度で CNOT 演算が完結するという結論を得た。

②実施内容

1) 結合量子ドットの作製とスピン操作

以上を実証し、量子テレポーテーションに応用すべく、量子ドットの作製とスピン操作の準備を進めた。量子ドット(QD)としては単光子光源、Qubit 変換と整合させるべく、InAlAs QD を基本として作製をすすめた。またスピン操作には、前述のシミュレーションの結果、テラヘルツ光や振動磁場の実現が容易でないことが分かったため、可視光の組み合わせで、おなじ機能を実現できる STIRAP (誘導ラマン断熱通過) という方法を採用することとした。STIRAP は原子・分子では良く知られた量子操作技術であるが、半導体への適用は例がなく、チャレンジングではあるが応用範囲も広く将来性の高いものである。現時点ではスピントネル、スピン反転ともに再現性のあるデータが得られていない(未確認のデータを補足資料に掲げる)。

これまでに確認できたものとして、量子ドットにおいて連続準位を介した STIRAP が十分なスピン操作の能力を有することが分かった。図 13, 14 に予備実験の結果を示す。この実験では波長が同じで偏光方向が直交する 2 つの直線偏光光パルスを 1 つの量子ドットに照射し、量子ドットにスピンの分極がコヒーレントに形成されることを確認した。残念ながら電子スピンのコヒーレント振動ではないが、左右円偏光励起子のコヒーレント振動を差分で見ていることに相当する。

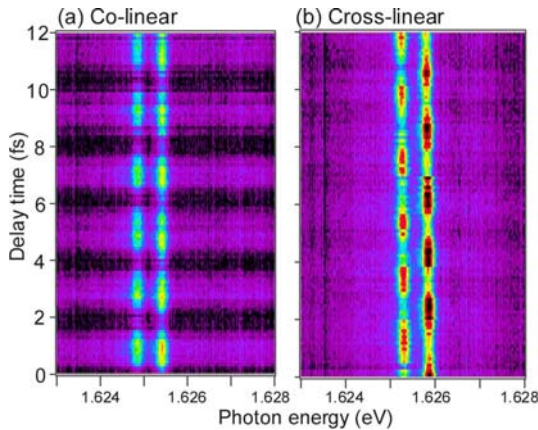


図 13. 単一量子ドットの励起子コヒーレンス制御
(a) 2 つの励起パルスの偏光が同じ場合, (b) 直交する場合

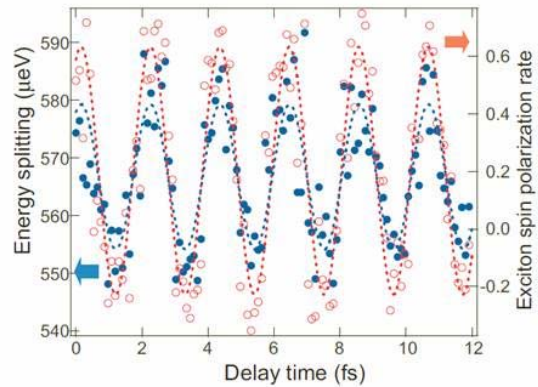


図 14. 左の(b)の場合のスピン分極(白抜き)と核分極によるオーバーハウザーシフト(黒丸)

2) 電子スピンドコヒーレンスの実測

量子演算のみならず中継器の動作においても、電子スピンのデコヒーレンス、すなわち量子的重ねあわせ状態がどれだけの時間維持されるかがポイントとなる。InAlAs QD における電子スピンの緩和を測定しデコヒーレンスを評価した。従来、電子スピンの緩和測定はストリークカメラを用いたものが主流である。この場合、高いエネルギーで量子ドットを光励起し、生成された電子-正孔対がエネルギー緩和して基底状態に落ちた後、再結合により発光する際の円偏光度を測定する。従ってエネルギー緩和過程を伴う非共鳴励起の計測となっている。より直接的な手法として、我々はスピン回折 4 光波混合という共鳴励起の手法を用いた。これは 2 つの光パルスにより半導体上にスピンの回折格子をつくり、それがスピンの緩和により消失してゆく様子を別の光パルスで計測するというものである。半導体量子井戸ではすでに確立している技術であるが、量子ドットに試みるのは初めてであった。InAlAs 量子ドットにおいて電子-正孔の再結合よりも遅い、スピン緩和が観測された[9]。特筆すべきことに、得られたスピン緩和時間は、並行して行われた従来の非共鳴励起によるものよりも 3-10 倍程度長くなった。従って従来報告されているスピン緩和時間の扱いには注意が必要であることがわかった。得られたスピン緩和時間の絶対値には誤差

も多いが、7 ns 程度が得られており、これは量子演算の実証に十分な長い値である。

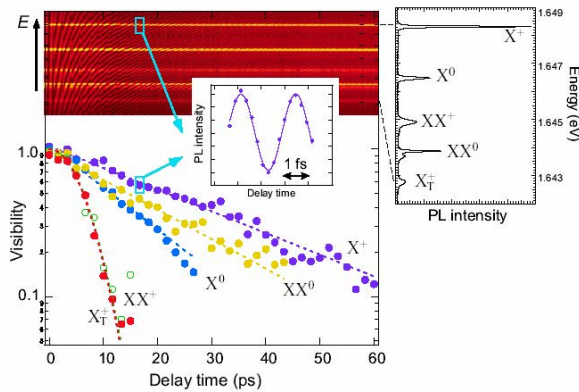


図 15. 単一の量子ドットからの発光のコヒーレンス
同じドットからの異なる励起子ではコヒーレンスが大きく異なり、電子-正孔間の交換相互作用によるスピン緩和が重要な寄与をしていることがわかった。

以上は量子ドットの集団による平均化されたスピン緩和である。単一の InAlAs 量子ドットでの電子-正孔の、しかも個々の励起子のコヒーレンスを別々に調べるために単一ドットからの発光の自己相関測定を行った (図 15)。非共鳴励起の結果であるため、前者の四波混合法での結果に比べてコヒーレンスの値は短い、同じ量子ドットでも形成される励起子の種類に大きく依存し、正孔が 2 つ存在して電子との交換相互作用が働かない励起子では、正孔が奇数個存在する励起子に比して長いことがわかった[10]。今後の量子演算、Qubit 変換のための量子ドットの具体的な設計に重要な知見が得られた。

③成果の纏めと位置づけ

量子ドットの電子スピンを用いた独自の量子演算スキームを提案、更に実現のための 2 光子過程を用いた STIRAP を提案した。この手法の妥当性まで明らかにした。量子演算の実証はできなかったが、量子ドットの電子スピンを用いた提案はどこでも順調でない。Loss と DiVincenzo[1]による交換相互作用を使う方向の最近の発展においても、up spin と down spin の 2 電子状態 (の対称結合と反対称結合) を Qubit として交換相互作用を用いたラビ振動、つまり 1 ビットの回転が観測されたに留まる。

電子スピンのデコヒーレンスについて実験的検討を行った。四光波混合による共鳴励起測定で量子ドットの電子スピンを計測する手法を立ち上げることにより従来の非共鳴励起の測定よりも、実際のデコヒーレンスが遥かに長くなることを初めて見出した。更に InAlAs 量子ドットで実測したナノ秒のデコヒーレンス時間から我々の量子演算の実証が可能であることも確認した。更に単一の量子ドットについてデコヒーレンスの測定を行い、交換相互作用を消すことにより長いデコヒーレンスを得られることを見出した。初めての成果であるとともに、Qubit 変換、量子演算の際の具体的な光制御プロセスに対する指針を与えるものである。

(2)研究成果の今後期待される効果

今後はデコヒーレンスについて得られた知見も活かして遅れている量子演算の実証を行う。先ず電子スピンの回転を実証するが、電子スピンの回転については、2 電子スピンを 1 Qubit として用いたものがあるのみで 1 電子スピンの実現できれば初のことである。更に、2 Qubit の制御 NOT を実証し、普遍量子ゲートの笹倉スキームを実証する。条件つきトンネリングを演算に用いることができれば「観測の問題」にも実験の面から肉薄でき、21 世紀の物理学の入り口に迫ることが可能になる。

3.3 サブテーマ名「単一光子光源」(北海道大学 末宗グループ)

(1)研究実施内容及び成果

①研究のねらい

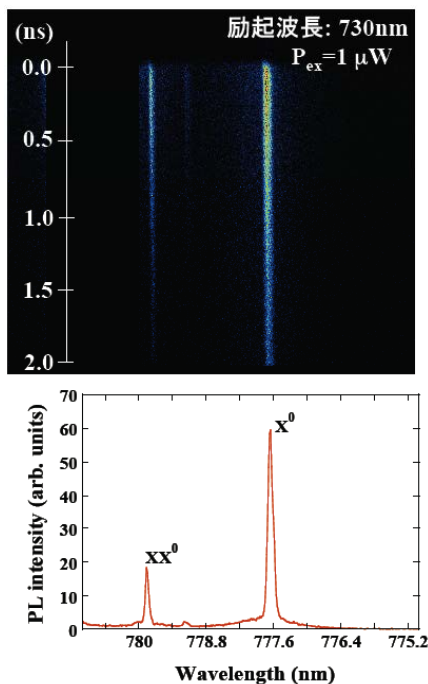
量子暗号通信の研究では、これまで光源としてコヒーレントなレーザ光を強く減衰させた擬似的な単一光子源を用いた量子鍵配送の研究がファイバー系、および自由空間で進められてきている。擬似的な単一光子源の場合、単一光子発生効率が低い、また、複数光子の同時発生が完全には抑制できない等の問題がある。これらの問題は、コヒーレント光の

光子統計がポアソン分布で記述される揺らぎを持つことに起因しており、高効率な量子鍵配送の実現には、任意のタイミング（オン・デマンド）で決定論的に光子数揺らぎのない単一の光子を送出可能な、真の単一光子発生源の実現が強く望まれている。本研究では、シリコン単一光子検出器が高い量子効率を持ちかつ自由空間減衰の少ない750 nm帯波長領域で光子発生が期待されるInAlAs自己形成量子ドットに着目し、その光子生成過程について検討を進めた。特に単一光子のエネルギーとスピンQubitを量子演算する量子ドットの遷移エネルギーを一致させるためにも、Qubit変換の検討が進んでいるInAlAs量子ドットを光源とした単一光子光源を開発することを目指した。

②研究実施内容

InAlAs量子ドットを光励起することにより放出される励起子発光を光源とすることとし、そのために顕微分光により単一量子ドットの発光特性を調べた。さらに光子相関測定によりフォトンのアンチバンチングを調べ、光励起により1つのフォトンしか放出されていないことを確かめた。さらに光子から電子へ量子状態を保存した変換を実現するために、光子偏光状態から電子スピン状態への変換、電子スピン状態から光子偏光状態への変換量子効率の検討を進めた。

1) InAlAs 単一量子ドットと顕微分光



In_{0.75}Al_{0.25}As量子ドットをGaAs(100)基板上に分子線エピタキシー法により作製した。単一の量子ドットを空間的に分離するため、電子線リソグラフィとウェットエッチングにより直径~150 nmのメサ構造を形成した。光学測定は22 Kで行い、対物レンズ(NA=0.42)により単一のメサ構造を空間分離し、波長730 nmのチタンサファイアレーザーで励起、発光をストリークカメラで時間分解分光した。メサ構造にすることにより、単一の量子ドットから励起子(X⁰), 励起子分子(XX⁰)の鋭い発光線が観測された(図16) [11]。

図 16. 単一量子ドットからの励起子(X⁰), 励起子分子(XX⁰)の発光

2) 光子相関測定

Hanbury-Brown and Twiss (HBT)光学系を用いた強度相関関数の測定により単一光子発生の検証を行った[11,12]。図17は、こうして得られたヒストグラムであり、これを規格化することで二次の強度相関関数g⁽²⁾(τ)が得られる。図16で測定した単一量子ドットを含むメサ領域で測定した。信号列の周期は、チタンサファイアレーザーの繰り返し12 nsに対応している。光子相関測定系の二つの検出器に、同時に光子が入射する同時計数確率は、零遅延(光子ペアの検出時間差=0)での計数が強く抑制されている。これは光子アンチバンチングと呼ばれ、一つのドットで生じる励起子遷移により、束になっていない単一の光子が発生することを反映している。いいかえると、パルス励起された量子ドットは一度にただ一つの励起子発光した光子を発生していることになり、励起するごとにオンデマンドで光

子を発生する光源を実現できる可能性を示している。現時点では、光子の収率の問題があり、オンデマンドにはなっていないが、量子ドットを中心とした光学構造を最適化すれば高い収率が得られると期待できる。実際、本CRESTの産物ではないが、富士通が開発したInAs/InP量子ドットを用いた通信波長(1.5 μ)帯単光子光源[13]では、基板裏面から光子を取り出すことにより、90%程度の裏面放出が確認されている。

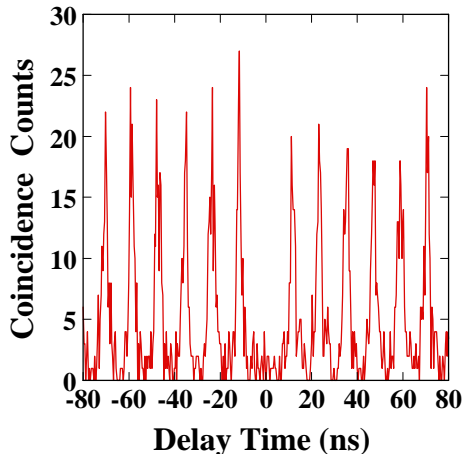


図 17. 光子のアンチバンチングの観測 (強度相関関数)

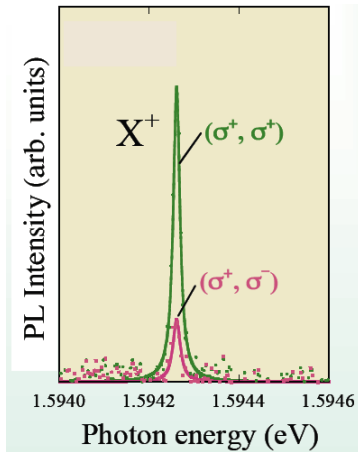


図 18 荷電励起子(X^+)を右円偏光(σ^+)励起した際の σ^+ 発光と左円偏光(σ^-)発光スペクトル。

量子状態が保存される確率は 97%と高く、励起子から光子へ変換されるまでにスピン反転する確率が 13%と見積もられ、磁場が印加されていない状態では世界最高の特性を得ている[14].

③ 成果の纏めと位置づけ

Qubit 変換の検討が進んでいる InAlAs 量子ドットを光源とした単一光子光源について、Qubit 変換と両立するオンデマンド光子源を実現できる可能性が示された。また光子偏光と電子スピンの量子状態を高い量子効率で変換できることが示された。InAlAs 量子ドットを用いて単一光子源の可能性を示したのは世界初。またゼロ磁場で 65%に及ぶ高い偏光度の保存は世界最高の特性である。

(2)研究成果の今後期待される効果

今後励起子発光寿命 ~ 1 ns を共振器効果でより短くすることによってスピン反転する確率をさらに低下させることが可能である。また既に述べた InAlAs 量子ドットでの核磁場のスイッチング現象と組み合わせて光子-電子スピン間の Qubit 変換を実証する。3.1

3)量子状態(偏光)を保った1光子-1電子-1光子変換

量子中継器の動作には、光子を使った量子情報通信系と、電子スピンを使った量子情報処理系へ量子情報を変換する必要がある。その重要なステップの一つに、光子の偏光状態を電子スピンの変換し、さらに保存した電子スピンを光子の偏光状態に変換する制御技術の確立が必要である。これまでに外部磁場を印加した状態ではそのような変換が可能であることは報告されているが、磁場を印加すると励起子のスピン状態の縮退が溶け、励起子スピンの重ね合わせ状態が維持されなくなる課題があった。そこで、磁場を印加しない状態での光子と電子スピン変換の検討を行った。

通常量子ドットでは磁場が印加されていなくても励起子スピン状態のエネルギー分裂が生じてしまうが、単一の量子ドットにおける荷電励起子(X^+)を1光学フォノンだけ上のエネルギーで共鳴励起することにより、図 18 に示す発光線幅 20 μ eV の非常に鋭い単一の X^+ 発光線を観測した。さらに X^+ を右円偏光(σ^+)励起した際の σ^+ 発光強度と左円偏光(σ^-)発光強度の比は 20% (円偏光度にして 65%)であり、円偏光の反転は低く抑えられている。レート方程式による解析では、 σ^+ 励起して光子の偏光から励起子スピンの量

で述べたように Qubit 変換の提案は多数あるが、我々の知る限りでは、実現したものはなく、初めての実現となり科学技術や社会への波及効果は多大なものがある。

3.4 サブテーマ名「光を量子ドットに結合する技術」(北海道大学 末宗グループ)

①研究のねらい

光を量子ドットで電子スピンの変換するには、光ファイバーを伝送された光子が量子ドットに完全に吸収されることが理想である。このための光キャビティ(微小光共振器)およびその周辺部の作製技術を立ち上げる。

②研究実施内容

本命の DBR ミラーを用いたピラー型キャビティとともに保険としてより Q 値の高いディスク型キャビティの検討も行った。

光を量子ドットに結合するには種々の側面があるが、その 1 つが光キャビティの Q 値である。1 つの光子がキャビティにうまく誘導されたと仮定すると、これがスピンに変換される、より正確には 1 対の電子-正孔対に変換されるためのキャビティの Q 値は意外に小さく、大雑把な試算では数百と見積もられた。従って半導体多層膜を用いたいわゆる DBR キャビティで十分と考えられ、これを軸に研究を進めた。キャビティと外部光との結合が課題であったが DBR キャビティの場合、ファイバを通った光をレンズでキャビティに集光することを考えた。Weierstrass 球型の solid immersion lens (SIL) で真空中の光の解像度を超える高い分解能を確認して、大気と半導体の屈折率の差をカバーする結合が可能であることがわかった。念のためより高い Q 値のディスク型のキャビティを用いることも考慮し、その試作も行った。量子ドットを内包したディスク型キャビティを試作し、5000 を超える高い Q 値を実測した。

③ 成果の纏めと位置づけ：

SIL により、大気中の波長とサブミクロン径の光キャビティを繋ぐ可能性が示された。量子ドットを内包したディスク型キャビティを試作し、5000 を超える高い Q 値を実測した。

(2)研究成果の今後期待される効果

特になし (2(1)研究構想で述べたように本テーマは中間時点で中止した)

3.5 サブテーマ名「中継器アルゴリズム」(富士通研究所 高津グループ)

(1)研究実施内容及び成果

①研究のねらい

量子ドットの電子スピンを用いた中継器の設計を行う。量子演算、Qubit 変換などの成果により柔軟に変更する必要があるため、先ずハードウェアイメージ形成のためのたたき台を必要とする。

中継器は量子テレポーテーションにより Qubit を次段に転送する。光子を用いた量子テレポーテーションはすでに多く報告されているが、光子にメモリー機能を付加することが難しいために、単純に中継器へ活用することはできない。光子を電子スピンに変換して用いることができれば、電子スピンの形でメモリーを保持することができる。量子ドットの電子スピンを用いた量子演算をベースとした中継器のアルゴリズムを開発する。

このような中継器は Yablonovitch らが既に提案しているが、彼らの方法は単光子光トランジスタを必要とし、光子の到着のみを検出して、スピンは計測しないという難しい機能が必要なものであった。そこで単光子トランジスタを用いないアルゴリズムを模索する。

②研究内容

我々が中間時点までに作り上げた中継器のイメージは研究概要の図 2 に示した。

具体的には

- ① Repeater I で電子スピンの EPR ペアを生成し、一方をそのまま保持し、他方を光子に変換して Alice に戻してやる。例えば両者の間が 100 km もある場合には、Alice に到着する光子は少ないが、例えば 1/100 の確率で到着する。
- ② この光子が届いた際にその量子情報を電子スピンに変換し、Alice が保持している電子スピンとの間で Bell 測定を行う。
- ③ その結果は 2 ビットのデジタル信号なので、これを古典的通信手段（例えば電話）で Repeater I に伝える。
- ④ Repeater I では、そのデジタル信号に従って、保持していた EPR ペアの片割れに「Qubit の回転」といわれる量子演算を施してやる。これにより Alice に保持されていた電子スピンの量子情報は失われるが、同じ情報が Repeater I の電子スピンに復元される。いわゆる量子テレポーテーションの完成である。

このような処理を繰り返すことにより量子情報は元の場所では失われながら次々に送られてゆくことになる。このような中継器の物理的なプロトタイプとして図 3 のようなものを考えた。

単光子光源から出た光子は光ファイバーなどを經由して中継器に送られる。中継器において光子は半導体でできた光キャビティに集光される。光キャビティの内部には半導体量子ドットの列があり、光はそのうちの、例えば最上部の量子ドットにおいて電子スピンに変換される。電子スピンは他の量子ドットに送られて、もうひとつの電子スピンとの間で 2 Qubit までの量子演算が行われる。2 Qubit までの量子演算で、EPR 対の生成、Bell 測定などの量子テレポーテーションに必要な全ての量子演算をまかなうことができる。

③ 成果の纏めと位置づけ

量子ドットの電子スピンを用いた量子演算をベースとした中継器のアルゴリズムのプロトタイプを開発した。量子ドット 5 つからなる量子ドット列における 2 つの電子スピン（2 量子ビット）の量子演算の組み合わせで構成されるシンプルなものである。このような中継器は Yablonovitch らが既に提案しているが、彼らの方法は単光子光トランジスタを必要とし、光子の到着のみを検出して、スピンは計測しないという難解な機能が必要なものであった。我々のものは単光子トランジスタを用いない点でより現実的なものになっている。

(2)研究成果の今後期待される効果

特になし

3.6 サブテーマ名「単一量子ドット分光のためのメサ加工」（富士通研究所 高津グループ）

(1)研究実施内容及び成果

①研究のねらい

単一ドットを取り出すためのメサ加工プロセスを立ち上げる。ドットの形状がどの様に分布しているのか、取り出したドットがどの程度の収率で光学的に活性なのか、これらの品質を調べることは供給元として重要な課題である。

②研究内容

AFM によるドットの形状測定データを蓄積し、このデータと単一ドットの光学データをつき合わせることで、光学的に活性なドットの収率を求め、使用可能なメサ加工技術を立ち上げた。AFM によるドットの形状測定データを蓄積し数値処理を行うことで、ドットの高さ及び直径の統計的な分布を捕らえることに成功した。このデータと単一ドットの光学データをつき合わせることで、光学的に活性なドットの収率が 100% 近くに達することを突き止めた。

③成果の纏めと位置づけ：

リソグラフィとウェットエッチングを用いたメサ加工で光学的に活性なドットの収率が100%近くに達することを突き止め、単一量子ドットの計測・制御に有効であることを見出した。

(2)研究成果の今後期待される効果

特になし

3.7 サブテーマ名「半導体へのスピン注入とスピントランジスタ」(北海道大学 陽グループ)

(1)研究実施内容及び成果

①研究のねらい

強磁性体と半導体を用いた効率のよいスピンドायオードが実現できれば円偏光を効率よく取り出すことが可能となり有効な単光子光源となりうる。本研究において、まずFeからInAsへのスピン注入を用い、20%の円偏光度の発光を達成した[15,16]。効率のよいスピンドायオードの実現は量子情報通信の一部として有用である。一方、そのような高効率のスピン注入が実現するとチャンネル中の電子スピンそのものを制御するスピントランジスタの開発にもつながる。また、100%近いスピン注入効率が期待される磁性材料の検討をおこなう。スピントランジスタは当初の目標にはなかった副産物であるが、魅力あるデバイスであり、また高感度のスピン検出に用いるため研究を継続した。これを用いた電子スピン間の量子もつれ形成も提案しており、これは量子演算や光を用いない量子テレポーテーションへの応用の可能性もある。

②研究内容

1) Datta-Das 型スピントランジスタ-動作の計算機実証

中期までに Datta-Das 型スピントランジスタ[17]の動作と信じられる実験的結果を報告したが、学会発表と簡単なプロシーディング (AIP Conference Proceedings, **772**, pp. 1315-1316, 2005) のみの公表のため世界的に認識されているとはいえなかった。これには、研究分野の背景として、スピンフィルタとしての障壁のない構造でのスピン注入や伝導度のミスマッチの議論やスピン拡散長と移動度、スピン伝導の次元の問題といった点で未だに統一的なスピン伝導制御に関する研究者の意見が一致していないということもある。このような背景のもとで、2次元のスピン伝導とそのスピン緩和に関するこれらの疑問を計算機実験により解決し、さらに実験結果を裏付けることができた[15]。これについて解説する。

通常電界効果型トランジスタのような2次元電子系におけるスピン制御には、2次元中でのスピン緩和が問題となる。図 19 に実験で用いたスピントランジスタの模式図を示す。室温におけるスピン緩和機構は、いわゆる Dyakonov-Perel 機構 (DP 機構) が主に効いて、大別すると構造反転非対称(SIA) およびバルク反転非対称(BIA)から来る効果に分けられ、それぞれ Rashba 効果, Dresselhaus 効果とも呼ばれる。これらの効果の強さ α , β の比をパラメータにして、チャンネル中の2次元電子の全スピンの平均値の動きを図 20 に示した。これらのスピン緩和機構は方位依存性が異なるため、[1-10]方向にソース/ドレイン方向をとり、その方向に電子が進行しているとすると $\alpha=\beta$ の条件のときは、進行方向に関しては減衰せずにスピン歳差運動を続けることになる。このことはこれまで指摘されていた時間分解の議論で見落とされていた重要な点である。要約すると $\alpha=\beta$ の条件のときは、2次元電子が散乱を繰り返してその方向を変えるが、あらゆる方向でスピン緩和が抑制される状態が実現されるため、Datta-Das 型スピントランジスタに適用すると長距離にわたってスピン歳差運動が制御可能であることが明らかになった[18]。このことは Datta-Das の原論文では (Rashba 効果しか考慮されなかったので) 考えられていなかった新しい知見である。また。

これはわれわれのスピントランジスタでの電流振動のゲート電圧依存性を説明するものである。

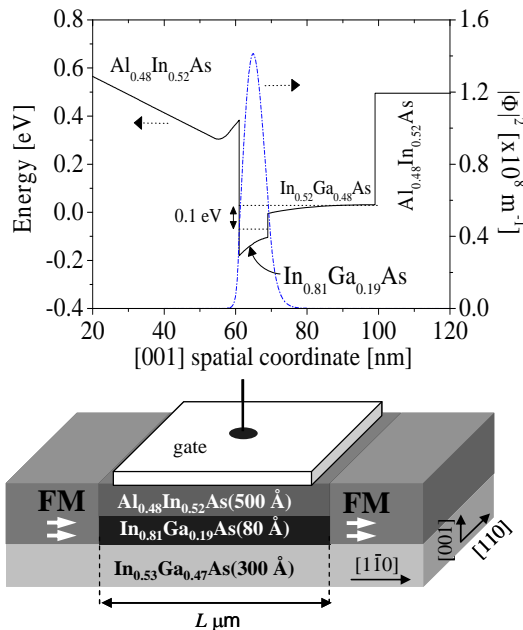


図 19. スピントランジスタのヘテロ接合。電圧ゼロポルトにおける波動関数がバンド図に描かれている。

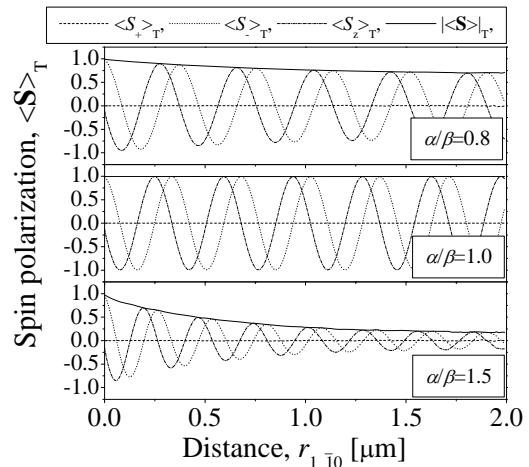


図 20. スピン偏極の空間分布。横軸はソースエンドからドレイン側へ見た空間距離を表し、振動は伝導電子のスピンの平均値（進行方向に向いているときを 1、反対側に向いている場合を -1、90 度の方向に向いているとき 0 と表している。パラメータとして 2 つのスピ軌道相互作用を表す指標の比 (a/b) を取っている。真ん中の場合には 2 つの大きさが一致している状態を表しており、その平均スピンは減衰せずに進行していることがわかる。

2) 単一量子ドットへの単電子注入 — スピントランジスタでのスピン検出を目指して —

GaAs/AlGaAs トランジスタの障壁に埋め込んだインジウム砒素量子ドットへの単電子注入の様子を量子ドットに隣接したトランジスタのチャンネルコンダクタンスの変化として捉えることに成功した [19]。InAs 単一ドットへの単電子注入およびそのチャンネルコンダクタンスによる検出は初めての報告である。図 21 は、デバイス構造の SEM 写真とその電圧電流特性を示す。量子細線上の単一量子ドットの殻構造が見えている。また、積層ドットでは電子同士の量子もつれを実現できる。その際に電子スピン共鳴により特定のドットの

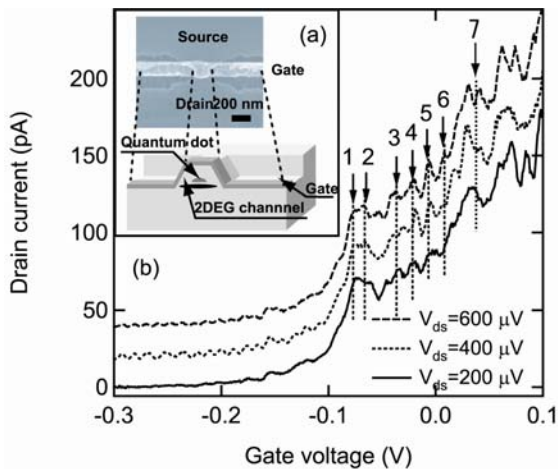


図 21. InAs 単一量子ドットデバイスの電圧電流測定。人口原子としての量子ドットの殻構造が見える。挿入図は InAs 単一量子ドットデバイスの模式図と SEM 写真。

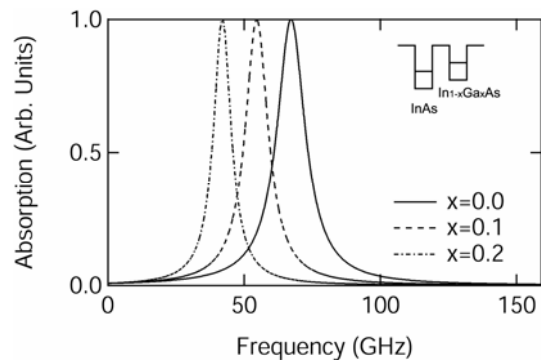


図 22. 電子スピン共鳴による高周波磁場の吸収スペクトルの構造依存性。InGaAs 量子ドットの構造パラメータ x は、混晶のガリウムの混晶比を表す。x=0 のとき InAs、x=1 の場合は GaAs を表す。

スピンを反転させる必要があるが、これに要求される2つのインジウムガリウム砒素ドットの組成を見積もった。図22にインジウム成分がわずかに異なる量子ドット構造に対して予想される電子スピン共鳴のピークを示す。図から明らかなように、ほぼ10%程度のインジウム成分差があればよいことが判明した。

3) 高品質なマグネタイト薄膜の半導体上への形成 —高スピン注入効率を目指して—

Feのスピン偏極率は40%に留まるが、室温で理論的に100%のスピン偏極率が予測されている材料系の一つに鉄酸化物の一種であるマグネタイト (Fe_3O_4) がある。これはスピネル構造を持ちインジウム砒素系の半導体に極めて近い格子定数を持つ。マグネタイトを45度傾けるとInAs[110]方向の格子定数 ($a_{[110]}=8.57\text{\AA}$) にきわめて近い格子定数 ($a_{[100]}=8.40\text{\AA}$) を持つためそのミスマッチは1.9%にすぎない。(ガリウム砒素基板上のマグネタイトの格子ミスマッチは大きく、5%に達する)。マグネタイトを用いると半導体へ注入された電子についても高いスピン偏極率が期待されるが、これまでは、あまり報告がなかった。今回インジウム砒素のエピタキシャル成長基板を真空中でマグネタイト成長チャンバーに移動することにより、良好なマグネタイト薄膜が成長することを見いだした[20]。図23は、InAs およびその上に成長したマグネタイト表面のRHEED 写真である。InAs 成長時に安定な 2×4 表面再構成条件をたもったままメタルチャンバーに移動したこと、酸素から吸着させて酸素原子をサーファクタントとして働かせたことにより、1層目から明瞭なRHEED ストリークパターンを得ることができるほどの、平坦な成長が可能となった。更に酸素分圧を制御することにより鉄酸化物薄膜 ($\text{Fe}_{3-\delta}\text{O}_4$) の成分を制御することもわかった。 $\delta=0$ のときマグネタイトになり、 $\delta=0.33$ のときマゲマイト (Fe_2O_3) になる。図24はX線光電子分光(XPS)によるインジウム砒素上の鉄酸化物薄膜のXPS スペクトルである。明らかに成長時の酸素分圧で鉄酸化物薄膜 ($\text{Fe}_{3-\delta}\text{O}_4$) の成分が制御されていることがわかる。

インジウム砒素上にこのようにして形成したマグネタイトの磁化特性を超伝導量子干渉デバイス(SQUID)で測定した。(図25)。面内方向に強磁性体特有のヒステリシスが現れている。保持力は約0.022Tである。面内方向が磁化容易軸であり面直方向が磁化困難軸であることがわかる。磁化容易軸では0.5T、困難軸では1Tで飽和磁化が得られた。これまでの他グループの報告では、磁化がなかなか飽和しないが、われわれの場合、低磁場で磁化が飽和した。これは、ステップフロー成長により結晶性がよく単一ドメインが得られているからと推察される。今後の展望は、この結果をインジウム砒素系のスピンドायオードおよびスピントランジスタ構造に応用し、高効率のスピン注入を実証し、スピントランジスタ、量子もつれを実現することである。

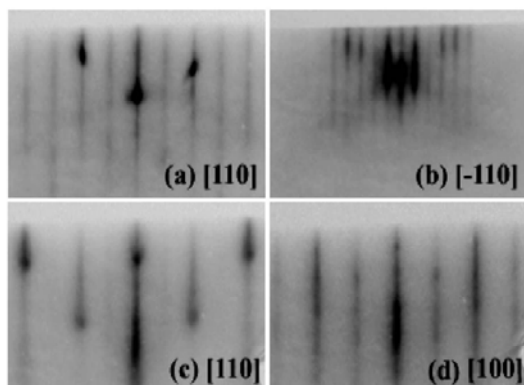


図23. InAs およびその上に形成したマグネタイトのRHEED 写真。(a)InAs[110] 方向 (b) InAs [-110] 方向 (c)マグネタイト表面[110]方向 (d) マグネタイト表面[100] 方向。

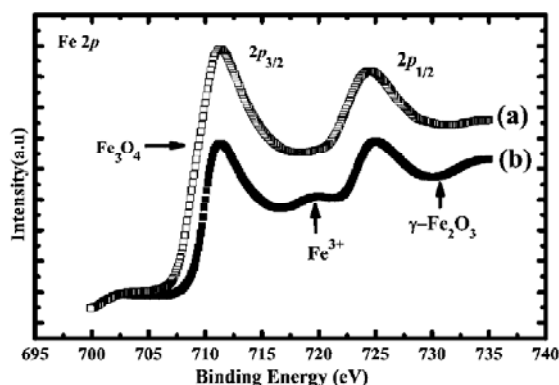


図24. インジウム砒素上の鉄酸化物薄膜の鉄2pからのXPS スペクトル。基板温度は300°Cで酸素分圧はそれぞれ(a) 7.5×10^{-7} Torr. (b) 4×10^{-6} Torrである。

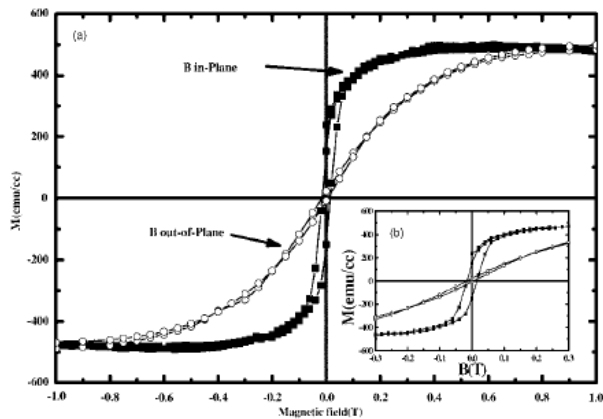


図 25. InAs 上に形成した膜厚 20nm のマグネタイトの SQUID による室温における磁化特性。挿入図はヒステリシスループの拡大図。

③成果の纏めと位置づけ

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

(2) 研究成果の今後期待される効果

開発したマグネタイト形成技術を用いてスピントランジスタを試作する。Datta-Das 型のスピントランジスタの実現を確認し、ゲートに量子ドットを埋め込むことにより高感度スピン検出、電子スピン間の量子もつれの形成を確認、更にこれを発展させて全電氣的量子演算を試みる。

参考文献

- [1] D. Loss and D. P. DiVincenzo, *Phys. Rev. A* **57**, 120 (1998).
- [2] E. Yablonovich et. al., *ROCEEDINGS OF THE IEEE* **91**, 761 (2003).
- [3] S. Muto, S. Adachi, T. Yokoi, H. Sasakura, I. Suemune, *Appl. Phys. Lett.* **87**, 112506 (2005).
- [4] T. Yokoi, S. Adachi, H. Sasakura, S. Muto, H. Z. Song, T. Usuki, S. Hirose, *Phys. Rev. B* **71**, 041307(R) (2005).
- [5] R. Kaji, S. Adachi, H. Sasakura, S. Muto, cond-mat. 0709.1382, cond-mat. 0710.0119.
- [6] P. Maletinsky, C. W. Lai, A. Badolato, and A. Imamoglu, *Phys. Rev. B* **75**, 035409 (2007).
- [7] H. Sasakura and S. Muto, quant-ph/9910100 (1999), H. Sasakura, S. Muto, and T. Ohshima, *Physica E* **10**, 458 (2001).
- [8] A. A. Kiselev, E.L. Ivchenko, and U. Roessler, *Phys. Rev. B* **58**, 16353 (1998).
- [9] T. Watanuki, S. Adachi, H. Sasakura, S. Muto, *Appl. Phys. Lett.* **86** 063114 (2005).
- [10] S. Adachi, H. Sasakura, N. Yatsu, R. Kaji, and S. Muto, accepted for publication in *Appl. Phys. Lett.*
- [11] H. Kumano, S. Kimura, M. Endo, H. Sasakura, S. Adachi, S. Muto, and I. Suemune, *J. Nanoelectron. Optoelectron.* **1**, 39 (2006).
- [12] S. Kimura, H. Kumano, M. Endo, I. Suemune, T. Yokoi, H. Sasakura, S. Adachi, S. Muto, H. Z. Song, S. Hirose and T. Usuki, *Jpn. J. Appl. Phys.* **44**, L793 (2005).
- [13] K. Takemoto, M. Takatsu, S. Hirose, N. Yokoyama, Y. Sakuma, T. Usuki, T. Miyazawa, Y. Arakawa, *J. Appl. Phys.* **101**, 081720 (2007).
- [14] H. Kobayashi, H. Kumano, M. Endo, M. Jo, I. Suemune, H. Sasakura, S. Adachi, and S. Muto, *Microelectron. J.* (to be published).
- [15] H. Ohno, K. Yoh, K. Sueoka and K. Mukasa, A. Kawaharazuka, and M. E. Ramsteiner, *Jpn. J. Appl. Phys. Express Lett.* **42**, L87 (2003).
- [16] K. Yoh, H. Ohno, Y. Katano, K. Sueoka, K. Mukasa, and M. E. Ramsteiner,

- Semi.Sci.Technol.**19**, 1 (2004).
- [17] S. Datta and B. Das, Appl. Phys. Lett. **56**, 665 (1990).
 - [18] M. Ohno and K. Yoh, Phys. Rev. B **75**, 241308(R) (2007).
 - [19] S. Kashiwada, T. Matsuda and K. Yoh, J. Crystal Growth, **301-302**, 785 (2007).
 - [20] M. Ferhat and K. Yoh, Appl. Phys. Lett. **90**, 112501 (2007).
 - [21] H. Tekasue et. al., Nature Photonics **1**,343 (2007).
 - [22] R. P. Feynman, Opt. News **11**, 11 (1985).
 - [23] D. Deutsch, Proc. R. Soc. London A **400**, 97 (1985).
 - [24] P. W. Shor, in *Proceedings of the 35th Annual Symposium on the Foundations of Computer Science, Los Alamitos, CA* (IEEE Computer Society Press, New York, 1994), p. 124.
 - [25] L. K. Grover, Phys. Rev. Lett. **79**,325 (1997).
 - [26] Lieven M. K. Vandersypen et. al., Nature **414**, pp.883-887 (2001).
 - [27] T. Yamamoto, Yu A. Pashkin, O. Astafiev, Y. Nakamura, and J. S. Tsai, Nature **425**, 941 (2003).
 - [28] C. Gobby, Z. L. Yuan, A. J. Shields, Appl. Phys. Lett., **84**, 3762 (2004).
 - [29] W. T. Buttler, R. J. Hughes, P. G. Kwiat, G. G. Luther, G. L. Morgan, J. E. Nordholt, C. G. Peterson, C. M. Simmons, Phys. Rev. A **57**, 2379 (1998).
 - [30] C. Kurtsiefer, P. Zarda, M. Halder, H. Weinfurter, P. M. Gorman, P. R. Tapster, J. G. Rarity, Nature **419**, 450 (2002).
 - [31] R. J. Hughes, J. E. Nordholt, D. Derkacs, C. G. Peterson, New J. of Phys. **4**, 43 (2002).
 - [32] 15H. J. Carmichael, Phys. Rev. Lett., **55**, 2790 (1985).
 - [33] J. McKeever, A. Boca, A. D. Boozer, R. Miller, J. R. Buck, A. Kuzmich, H. J. Kimble, Science **303**,1992 (2004).
 - [34] B. Lounis, W. E. Moerner, Nature **407**, 491 (2000).
 - [35] C. Kurtsiefer, S. Mayer, P. Zarda, H. Weinfurter, Phys. Rev. Lett. **85**, 290 (2000).
 - [36] J. I. Gonzalez, Tae-Hee Lee, M. D. Barnes, Y. Antoku, R. M. Dickson, Phys. Rev. Lett. **93** 147402 (2004).
 - [37] E. Moreau, I. Robert, J. M. Gérard, I. Abram, L. Manin, V. Thierry-Mieg, Appl. Phys. Lett. **79**, 2865 (2001).
 - [38] A. Kiraz, P. Michler, C. Becher, B. Gayral, A. Imamoglu, L. Zhang, E. Hu, W. V. Schoenfeld, P. M. Petroff, Phys. Rev. B **63**, 121312 (2001).
 - [39] C. Santori, M. Pelton, G. Solomon, Y. Dale, Y. Yamamoto, Phys. Rev. Lett. **86**, 1502 (2001).
 - [40] V. Zwiller, T. Aichele, W. Seifert, J. Persson, O. Benson, Appl. Phys. Lett. **82**, 1509 (2003).
 - [41] X. Brokmann, E. Giacobino, M. Dahan, J. P. Hermier, Appl. Phys. Lett. **85** 712 (2004).
 - [42] C. Couteau, S. Moehl, F. Tinjod, J. M. Gérard, K. Kheng, H. Mariette, J. A. Gaj, R. Romestain, J. P. Poizat, Appl. Phys. Lett. **85**, 6251 (2004).
 - [43] C. Santori, S. Götzinger, Y. Yamamoto, S. Kako, K. Hoshino, Y. Arakawa, Appl. Phys. Lett. **87**, 051916 (2005).
 - [44] K. Takemoto, Y. Sakuma, S. Hirose, T. Usuki, N. Yokoyama, T. Miyazawa, M. Takatsu, Y. Arakawa, Jpn. J. Appl. Phys. **43**, 993 (2004).
 - [45] T. Miyazawa, K. Takemoto, Y. Sakuma, S. Hirose, T. Usuki, N. Yokoyama, M. Takatsu and Y. Arakawa, Jpn. J. Appl. Phys. **44**, L 620 (2005).
 - [46] S. Ganapathy, X. Q. Zhang, I. Suemune, K. Uesugi, B.-J. Kim, and T.-Y. Seong, Jpn. J. Appl. Phys. **42**, 5598 (2003).
 - [47] S. Fafard, K. Hinzer, S. Raymond, M. Dion, J. McCaffrey, Y. Feng, S. Charbonneau, Science **274**, 1350 (1996).
 - [48] H. Sasakura, S. Adachi, S. Muto, H.Z. Song, T. Miyazawa, Y. Nakata, Physica E **21**, 511 (2004).
 - [49] E. Waks, E. Diamanti, Y. Yamamoto, quant-ph/ 0308055.
 - [50] R. Hanbury Brown and R. Q. Twiss, Nature **177**, 27 (1956).

- [51] W. Loeffler, M. Hetterich, C. Mauser, S. Li, T. Passow, and H. Kalt, Appl. Phys. Lett. **90**, 232105 (2007).
- [52] R. Winkler, Phys. Rev. B **69**, 045317 (2004).
- [53] T. Ohshima, Phys. Rev. A **62**, 062316 (2000).
- [54] R. Vrijen, E. Yablonovitch, K. Wang, H. W. Jiang, A. Balandin, V. Roychowdhury, T. Mor, and D. DiVincenzo, Phys. Rev. A **62**, 012306 (2000).
- [55] P. van Loock, T. D. Ladd, K. Sanaka, F. Yamaguchi, K. Nemoto, W. J. Munro, and Y. Yamamoto, Phys. Rev. Lett. **96**, 240501(2006).

4 研究参加者

①武藤グループ(量子演算と量子ビット変換)

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
武藤 俊一	北海道大学大学院工学研究科	教授	全体の統括	平成14年11月～平成19年10月
足立 智	北海道大学大学院工学研究科	准教授	量子ドットの光計測	平成14年11月～平成19年10月
土家 琢磨	北海道大学大学院工学研究科	准教授	励起子スピンの理論	平成14年11月～平成19年10月
白峰 賢一	北海道大学大学院工学研究科	助教	結晶成長, 構造観察	平成14年11月～平成19年10月
笹倉 弘理	北海道大学大学院工学研究科	CREST 研究員	スピンの計測と制御	平成16年4月～平成19年10月
鳥海 郁夫	北海道大学大学院工学研究科	CREST 研究補助員	結晶成長装置のメインテナンス, 及び実験補助	平成15年10月～平成19年10月
松村 直樹	北海道大学大学院工学研究科	CREST 研究員	InAs/GaAs 歪み量子ドットおよびGaAs 歪み補償層の歪みと拡散の評価	平成15年4月～平成15年7月
小山 正孝	北海道大学大学院工学研究科	CREST 研究員	量子ドットの成長	平成18年2月～平成19年3月
今野 真奈	北海道大学大学院工学研究科	研究補助員	チーム事務	平成14年11月～平成19年10月

②末宗グループ(単一光子光源, 光ースピン変換)

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
末宗 幾夫	北海道大学電子科学研究所	教授	共振器モードと単一量子ドットとの結合効率の向上	平成14年11月～平成19年10月
熊野 英和	北海道大学電子科学研究所	准教授	3次元光共振器との結合効率の向上	平成14年11月～平成19年10月
遠藤 礼暁	北海道大学電子科学研究所	学術研究員	微小光共振器と量子ドットの結合による励起子状態制御	平成16年6月～平成19年10月
植杉 克弘	北海道大学電子科学研究所	助教	単一結合量子ドットの形成と制御	平成14年11月～平成18年8月
サシカラ・ガナパシー	北海道大学電子科学研究所	CREST研究員	GaNAs 歪補償層を用いた1.55ミクロン帯量子ドット列の形成	平成15年2月～平成16年12月

③高津グループ(中継器アルゴリズム, 加工プロセス)

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
高津 求	富士通(株)電子デバイス事業部 デバイス開発統括部	統括部長付	量子情報再生のシステム研究	平成17年1月～平成19年10月
竹本 一矢	富士通(株)電子デバイス事業部 デバイス開発統括部	研究員	量子情報再生のシステム研究	平成14年11月～平成19年10月
宋 海智	富士通(株)電子デバイス事業部 デバイス開発統括部	研究員	量子情報制御研究及び量子ドット評価	平成16年6月～平成19年10月
臼杵 達哉	富士通(株)電子デバイス事業部 デバイス開発統括部	研究員	量子情報再生のシステム研究	平成14年11月～平成17年6月
宮澤 俊之	富士通(株)電子デバイス事業部 デバイス開発統括部	研究員	量子情報再生のシステム研究	平成15年4月～平成15年9月

④陽グループ(金属/半導体スピン注入)

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
陽 完治	北海道大学量子集積エレクトロニクス研究センター	教授	高偏極率電子スピンの半導体への注入, 量子計算検討	平成14年11月～平成19年10月
大野 宗一	北海道大学量子集積エレクトロニクス研究センター	非常勤研究員	スピンドYNAMICKSのシミュレーション	平成19年4月～平成19年10月
末岡 和久	北海道大学量子集積エレクトロニクス研究センター	教授	高偏極率電子スピンの半導体への注入	平成14年11月～平成19年3月
フェルハット・マルフォン	北海道大学量子集積エレクトロニクス研究センター	CREST 研究員	ホイスラー合金・半導体ヘテロ構造の作製とスピン注入	平成15年9月～平成19年6月

5 招聘した研究者等

氏名(所属、役職)	招聘の目的	滞在先	滞在期間
大野英夫(東北大学電気通信研究所・教授)	CREST 共同研究に関する議論	北海道大学・工学研究科	H17.7.7～7.8
大野英夫(東北大学電気通信研究所・教授)	Workshop on Photons and Spins-Their Generation, Manipulation, and Detection-にて講演. 「強磁性半導体における電流誘起磁壁移動」 ”Current-induced Domain Wall Motion in Ferromagnetic Semiconductors”	北海道大学・工学研究科	H18.12.12-12.13
江藤幹男(慶応大学理工学部・准教授)	CREST 共同研究に関する議論	北海道大学・工学研究科	H18.7.10-7.11
大野裕三(東北大学電気通信研究所・准教授)	Workshop on Photons and Spins-Their Generation, Manipulation, and Detection-にて講演. 「ポンププローブ法による半導体量子井戸における局所核スピンのコヒーレンスの光検出」 “Optical Pump-probe Detection of Local Nuclear Spin Coherence in Semiconductor Quantum Wells”	北海道大学・工学研究科	H18.12.12-12.13
Valery ZWILLER (Kavli Institute of Nanoscience Delft, Delft University of Technology, Netherlands, Assistant Professor)	光子生成過程に関する研究討論	北海道大学・電子科学研究所	H18.12.10-12.16

6 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内誌 0 件, 国際誌 84 件)

1. H. Sasakura, R. Kaji, S. Adachi, and S. Muto, "Discrimination of quantum dots using an optically created nuclear field", *Appl. Phys. Lett.* **92**, 041915 (2008)
2. R. Kaji, S. Adachi, H. Sasakura, and S. Muto, "Precise measurements of electron and hole g factors of single quantum dots by using nuclear field", *Appl. Phys. Lett.* **91**, 261904 (2007)
3. S. Adachi, H. Sasakura, N. Yatsu, R. Kaji, S. Muto, "Decoherence of exciton complexes in single InAlAs quantum dots measured by Fourier spectroscopy", *Appl. Phys. Lett.* **91**, 16910 (2007).
4. S. Adachi, H. Sasakura, N. Yatsu, R. Kaji, K. Yamada, S. Muto, H. Kumano, I. Suemune, "Fourier spectroscopy of decoherence of exciton and exciton complexes in single InAlAs quantum dots", *phys. stat. sol. (c)* (accepted) (2007).
5. R. Kaji, S. Adachi, H. Sasakura, S. Muto, "Excitation power dependence of optically pumped nuclear spin polarizations in single InAlAs QDs" *phys. stat. sol. (c)* (accepted) (2007).
6. R. Kaji, S. Adachi, H. Sasakura, S. Muto, H. Kumano, I. Suemune, "Detailed measurements of nuclear spin polarization in a single InAlAs quantum dot through Overhauser shift of photoluminescence", *J. Supercond. Nov. Magn.* **20**, pp.447-451 (2007).
7. H. Sasakura, S. Kayamori, S. Adachi, S. Muto, "Effect of Indium-flush method on the control of photoluminescence energy of highly uniform self-assembled InAs quantum dots by slow molecular beam epitaxy growth", *J. Appl. Phys.* **102**, pp. 013515/1-4 (2007).
8. P. Thilakan, G. Sasikala, and I. Suemune, "Fabrication and characterization of a high Q microdisc laser using InAs quantum dot active regions", *Nanotechnology* **18**, pp. 055401-1/4 (2007).
9. M. Ferhat and K. Yoh, "High quality $\text{Fe}_{3.8}\text{O}_4$ /InAs hybrid structure for electrical spin injection" *Appl. Phys. Lett.* **90**, pp. 112501-1/3 (2007).
10. S. Kashiwada, T. Matsuda and K. Yoh, "Feasibility study of a semiconductor quantum bit structure based on a spin FET embedded with self-assembled InAs quantum dots", *J. Crystal Growth*, **301-302**, pp.785-788 (2007).
11. R. Peters, W. Keune, E. Schuster, S. Kashiwada, M. Ferhat and K. Yoh, "Nanoscaled systems studied by Mössbauer spectroscopy: Fe/Tb multilayer contacts on InAs(001)", *Superlattices and Microstructures*, doi:10.1016/j.spmi.2006.10.004 (2006).
12. K. Yuasa, K. Okano, H. Nakazato, S. Kashiwada, and K. Yoh, "State tomography of layered qubits via spin blockade measurements on the edge qubit in a spin field-effect transistor structure embedded with quantum dots", *AIP Conference Proceedings*, **893**, pp. 1109-1110 (2007).
13. M. Ohno and K. Yoh, "Vanishing of inhomogeneous spin relaxation in InAs-based

field-effect transistor structure” Phys.Rev. **B75**, 241308(R) (2007)

14. K. Yamaguchi, Y. Toda, T. Ishiguro, S. Adachi, K. Hoshino, K. Tadatomo, “Time-resolved four-wave mixing studies of excitons in GaN”, *phys. stat. sol. (c)* **4**, pp. 2752-2755 (2007).
15. T. Ishiguro, Y. Toda, S. Adachi, K. Hazu, T. Sota, S. F. Chichibu, “Coherent manipulation of A and B excitons in GaN”, *phys. stat. sol. (c)* **4**, pp. 2776-2779 (2007).
16. T. Ishiguro, Y. Toda, S. Adachi, “Exciton spin relaxation in GaN observed by spin grating experiment”, *Appl. Phys. Lett.* **90**, pp. 011904/1-3 (2007).

2006 年

17. H. Nishida, S. Kayamori, H. Sasakura, S. Adachi, S. Muto, I. Suemune, “Time-resolved photoluminescence in annealed self-assembled InAs quantum dots”, *phys. stat. sol. (c)* **3**, pp. 4299-4302 (2006).
18. S. Abe, H. Sasakura, S. Adachi, S. Kayamori, S. Muto, “Stimulated Raman adiabatic passage for photon-assisted tunneling in a double quantum dot”, *phys. stat. sol. (c)* **3**, pp. 4295-4298 (2006).
19. T. Mukumoto, R. Kaji, H. Sasakura, S. Adachi, H. Kumano, S. Muto, I. Suemune, “Overhauser shift in photoluminescence of excitons with fine structure from a single self-assembled InAlAs quantum dot”, *phys. stat. sol. (c)* **3**, pp. 4372-4375 (2006).
20. H. Kumano, S. Kimura, M. Endo, I. Suemune, H. Sasakura, S. Adachi, S. Muto, H. Z. Song, S. Hirose, and T. Usuki, “Triggered single photon emission and cross-correlation properties in InAlAs quantum dot”, *Physica E* **32**, pp. 144-147(2006).
21. I. Suemune, G. Sasikala, H. Kumano, K. Uesugi, Y. Nabetani, T. Matsumoto, J.-T. Maeng, and T.-Y. Seong, “Role of a nitrogen precursor supplied on InAs quantum dots surfaces in their emission wavelengths”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **45**, pp. L529-L532 (2006).
22. W. Zhang, K. Uesugi, and I. Suemune, “Application of InGaAs/GaAsN strain-compensated superlattice to InAs quantum dots”, *J. Appl. Phys.* **99**, pp. 103103 1-7 (2006).
23. H. Kumano, S. Kimura, M. Endo, H. Sasakura, S. Adachi, S. Muto, and I. Suemune, “Deterministic single-photon and polarization-correlated photon-pair generations from a single InAlAs quantum dot”, *J. Nanoelectron. Optoelectron.* **1**, pp. 39-51 (2006).
24. I. Suemune, H. Kumano, S. Kimura, H. Sasakura, S. Adachi, S. Muto, H. Z. Song, S. Hirose, and T. Usuki, “Origin of asymmetric splitting of a neutral exciton in a single semiconductor quantum dot”, *phys. stat. sol. (c)* **3**, pp. 3908-3911 (2006).
25. H. Z. Song, T. Usuki, Y. Nakata, N. Yokoyama, H. Sasakura, and S. Muto, “Formation of InAs/GaAs quantum dots from a subcritical InAs wetting layer A reflection high-energy electron diffraction and theoretical study”, *Phys. Rev. B* **73**, pp. 115327-1/8 (2006).
26. M. Ebihara, I. Suemune, H. Kumano, T. Nakashita, and H. Machida, “Formation of CdO dots on atomically flat ZnO surfaces”, *phys. stat. sol. (c)* **3**, pp. 933-937 (2006).
27. X. Q. Zhang, Z. G. Yao, S. H. Huang, I. Suemune, and H. Kumano, “Intrinsic exciton transitions in high-quality ZnO thin films grown by plasma-enhanced molecular-beam epitaxy on sapphire substrates”, *J. Appl. Phys.* **99**, pp. 063709-1/4 (2006).
28. S. Adachi, Y. Toda, and T. Ishiguro, “Four-wave mixing measurements of biexcitons in

uniaxially-strained GaN films”, *phys. stat. sol. (b)* **243**, pp. 1568-1571 (2006). Also, *phys. stat. sol. (b)* **243**, 1361 (2006) (Journal cover).

29. S. Adachi, Y. Toda, T. Ishiguro, K. Hoshino, Y. Arakawa, “In-plane anisotropy in uniaxially-strained GaN films detected by optical diffraction technique”, *phys. stat. sol. (c)* **3**, pp. 1595-1598, (2006).
30. T. Ishiguro, Y. Toda, S. Adachi, T. Mukai, K. Hoshino, Y. Arakawa, “Degenerate four-wave mixing spectroscopy of GaN films on various substrates”, *phys. stat. sol. (b)* **243**, pp. 1560-1563 (2006).
31. T. Ishiguro, Y. Toda, S. Adachi, M. Arita, Y. Arakawa, “Transient pump-probe measurements for polarized excitons in strained GaN epitaxial layers”, *phys. stat. sol. (b)* **243**, pp. 1564-1567 (2006).

2005 年

32. S. Muto, S. Adachi, T. Yokoi, H. Sasakura, and I. Suemune, “Photon-spin qubit-conversion based on Overhauser shift of Zeeman energies in quantum dots”, *Appl. Phys. Lett.* **87**, pp. 112506-1/3 (2005).
33. T. Yokoi, S. Adachi, H. Sasakura, S. Muto, H. Z. Song, T. Usuki, and S. Hirose, “Polarization-dependent shift in excitonic Zeeman splitting of self-assembled InAlAs quantum dots”, *Phys. Rev. B* **71**, pp. 041307(R)-1/4 (2005).
34. T. Watanuki, S. Adachi., H. Sasakura, and S. Muto, “Long spin relaxation in self-assembled InAlAs quantum dots observed by heterodyne four-wave mixing”, *Appl. Phys. Lett.* **86**, pp. 063114/1-3 (2005).
35. S. Adachi., T. Watanuki, H. Sasakura, and S. Muto, “Observation of spin relaxation in self-assembled InAlAs quantum dots by using four-wave mixing technique”, *phys. stat. sol. (c)* **2**, pp. 854-857 (2005).
36. T. Yokoi, S. Adachi, H. Sasakura, S. Muto, H. Z. Song, T. Usuki, S. Hirose, “Observation of Overhauser shift in a self-assembled InAlAs quantum dot”, *Physica E* **29**, pp. 510-514 (2005).
37. S. Adachi, T. Yokoi, H. Sasakura, S. Muto, H. Kumano, I. Suemune, “Dynamic nuclear polarization in a self-assembled InAlAs quantum dot”, *phys. stat. sol. (c)* **2**, pp.3838-3842 (2005).
38. S. Kimura, H. Kumano, M. Endo, I. Suemune, T. Yokoi, H. Sasakura, S. Adachi, S. Muto, H. Z. Song, S. Hirose, and T. Usuki, “ Photon antibunching observed from an InAlAs single Quantum dot”, *Jpn. J. Appl. Phys. Express Lett.* **44**, pp. L793-L796 (2005).
39. Y. Nabetani, T. Matsumoto, G. Sasikala, X. Q. Zhang, and I. Suemune, “Theoretical studies of strain states in InAs quantum dots and dependence on their capping Layers”, *J. Appl. Phys.* **98**, pp. 063502/1-7 (2005).
40. S. Kimura, H. Kumano, M. Endo, I. Suemune, T. Yokoi, H. Sasakura, S. Adachi, S. Muto, H. Z. Song, S. Hirose, and T. Usuki, “ Single-photon generation from InAlAs single quantum dot”, *phys. stat. sol. (c)* **2**, pp. 3833-3837 (2005).
41. G. Sasikala, I. Suemune, P. Thilakan, H. Kumano, and K. Uesugi, N. Shimoyama and H. Machida, “Improved structural and luminescence homogeneities of InAs quantum dots with nitrogen-precursor supplies on their surfaces”, *Jpn. J. Appl. Phys. Lett.* **44**, pp. L1512-L1515 (2005).

42. K. Yoh, M. Ferhat, A. Riposan, and J. M. Millunchick, "Room temperature spin dependent current modulation in an InGaAs-based spin transistor with ferromagnetic contact" AIP Conf. Proc. **772**, 1315 (2005)
43. K. Yoh, K. Yuasa, and H. Nakazato, "Quantum entanglement formation by repeated spin blockade measurements in a spin field-effect transistor structure embedded with quantum dots" Physica E **29**, 674-678 (2005)
44. S. Adachi and Toda, "Spectrally-resolved nonlinear spectroscopy of in-plane anisotropy in uniaxially-strained GaN epilayers", phys. stat. sol. (c) **2**, pp. 3936-3940 (2005).
45. S. Adachi, K. Hazu, T. Sota, S.F. Chichibu, G. Cantwell, D. C. Reynolds, and C. W. Litton, "Biexcitons and their dephasing processes in ZnO", phys. stat. sol. (c) **2**, pp. 890-895 (2005).
46. Y. Toda, S. Adachi, Y. Abe, K. Hoshino, and Y. Arakawa, "Optical diffraction spectroscopy of excitons in uniaxially-strained GaN films", Phys. Rev. B **71**, pp. 195315/1-4 (2005).
47. S. Adachi, "Polarization and wave-vector dependent measurements by four-wave mixing in ZnO: Valence-band ordering and biexcitons", J. Lumin. **112**, pp. 34-39 (2005).
48. K. Hazu, T. Sota, S. Adachi, S.F. Chichibu, "Measurements of exciton-polariton dynamics in ZnO by using nonlinear spectroscopic techniques", J. Lumin. **112**, pp. 7-10 (2005).

2004 年

49. H. Sasakura, S. Adachi, S. Muto, H. Song, T. Miyazawa, and Y. Nakata, "Carrier tunneling in asymmetric double quantum dots", Physica E. **21**, pp. 511-515 (2004).
50. H. Sasakura, S. Adachi, S. Muto, T. Usuki, M. Takatsu, "Coulomb interaction in asymmetric triple-coupled quantum dots", Semicond. Sci. Technol. **19**, pp. S409-S411(2004)
51. H. Sasakura, S. Adachi, S. Muto, H. Z. Song, T. Miyazawa, T. Usuki, "Spin depolarization via tunneling effects in asymmetric double quantum dot structure", Jpn. J. Appl. Phys. **43**, pp. 2110-2113 (2004).
52. K. Shiramine, T. Itoh, and S. Muto, "Critical cluster size of InAs quantum dots formed by Stranski-Krastanow mode", J. Vac. Sci. Technol. B **22**, pp.642-646 (2004).
53. S. Ganapathy, P. Thilakan, M. Kurimoto, H. Kumano, K. Uesugi, I. Suemune, H. Machida and N. Shimoyama: "Observation of reflection high-energy electron diffraction oscillation during MOMBE growth of AlAs and related modulated semiconductor structures", Physica E **21**, pp. 756-760 (2004).
54. G. Sasikala, P. Thilakan, M. Kurimoto, H. Kumano, K. Uesugi, I. Suemune, H. Machida and N. Shimoyama, "Observation of reflection high-energy electron diffraction oscillation during MOMBE growth of AlAs and related modulated semiconductor structures", Physica E **21**, pp. 756-760 (2004).
55. K. Yoh, H. Ohno, Y. Katano, K. Sueoka, K. Mukasa, and R. M. Ramsteiner, "Spin polarization in photo-and electro-luminescence of InAs and metal/InAs hybrid structures," Semicond. Sci. Technol **19**, pp.S386-S389 (2004)
56. K. Yoh, H. Ohno, K. Sueoka, and M. E. Ramsteiner, "Reduced interface reaction during the epitaxial Fe growth on InAs for high efficiency spin injection", J. Vac. Sci. Technol. B **22**, pp.1432-1435 (2004).

57. X. Q. Zhang, I. Suemune, H. Kumano, J. Wang, and S. H. Huang, "Surface-emitting stimulated emission in high-quality ZnO thin films", *J. Appl. Phys.* **96**, pp. 3733-3736 (2004).
58. M. Kurimoto, A. B. M. A. Ashrafi, M. Ebihara, K. Uesugi, H. Kumano, and I. Suemune, "Formation of ohmic contacts to p-type ZnO", *phys. stat. sol. (b)* **241**, pp. 635-639 (2004).
59. I. Suemune, ABM. A. Ashrafi, M. Ebihara, M. Kurimoto, H. Kumano, T.-Y. Seong, B.-J. Kim, and Y.-W. Ok, "Epitaxial ZnO growth and p-Type doping with MOMBE", *phys. stat. sol. (b)* **241**, pp. 640-647 (2004).
60. K. Hazu, K. Torii, T. Sota, S. Adachi, SF. Chichibu, D. C. Reynolds, C. W. Litton and G. Cantwell, "Impact of the k-linear term on nonlinear optical response of the C-exciton manifold in ZnO", *J. Appl. Phys.* **95**, pp. 5498-5501 (2004).
61. K. Hazu, K. Torii, T. Sota, S. Adachi, SF. Chichibu, D. C. Reynolds, C. W. Litton and G. Cantwell, "Phonon scattering of excitons and biexcitons in ZnO", *J. Appl. Phys.* **96**, pp. 1270-1272 (2004).
62. S. Adachi, K. Hazu, T. Sota, S.F. Chichibu, G. Cantwell, D.B. Eason, D.C. Reynolds, C.W. Litton, "Biexciton formation and exciton-exciton correlation effects in bulk ZnO", *Semicond. Sci. Technol* **19**, pp. S276-S278 (2004).
63. Y. Watanabe, S. Muto, and M. Tabata, "Peculiar field-cycle dependence of magnetization observed for poly(phenyl)acetylene prepared with a Rh complex catalyst". *Jpn. J. Appl. Phys.* **43**, pp. L300 - L302 (2004).
64. K. Uesugi, M. Kurimoto, I. Suemune, M. Yamamoto, T. Uemura, H. Machida, and N. Shimoyama: "Observation of clear negative differential resistance characteristics in GaAsNSe/GaAs and GaAsNSb/GaAs multiple quantum wells at room temperature", *Physica E* **21** pp. 727-731 (2004).
65. H. Kumano, Y. Hitaka, and I. Suemune: "Dynamical properties of atom-like emissions from single localized states in ZnCdS ternary mesa-shaped structures" *phys. stat. sol. (b)* **241**, pp. 503-506 (2004).
66. D. Nakaya, Y. Hitaka, S. Kimura, H. Kumano, and I. Suemune: "Study of optimal coupling of ZnS pyramidal microcavities with distributed Bragg reflectors" *phys. stat. sol. (c)* **1**, pp. 1034-1037 (2004).

2003 年

67. O. Ikeuchi, S. Adachi, H. Sasakura, and S. Muto, "Observation of population transfer to dark exciton states by using spin-diffracted four-wave mixing", *J. Appl. Phys.* **93**, pp. 9634-9638 (2003).
68. H. Sasakura, S. Adachi, and S. Muto, "Quantum gates based on electron spins of triple quantum dot", *Jpn. J. Appl. Phys.* **42**, pp. 6308-6313 (2003).
69. S. Ganapathy, X. Q. Zhang, I. Suemune, K. Uesugi, B.-J. Kim, and T.-Y. Seong: "GaNAs as strain compensating layers for 1.55 μm light emission from InAs quantum dots", *Jpn. J. Appl. Phys.* **42**, pp.5598-5601 (2003).
70. S. Ganapathy. M. Kurimoto, P Thilakan, K. Uesugi, I. Suemune, H. Machida and N. Shimoyama, "Observation of reflection high-energy electron diffraction oscillation during metalorganic-molecular-beam epitaxy of AlAs and control of carbon incorporation", *J. Appl.*

Phys. **94**, pp. 4871-4875 (2003).

71. X. Q. Zhang, S. Ganapathy, I. Suemune, H. Kumano, K. Uesugi, Y. Nabetani, and T. Matsumoto, "Improvement of InAs quantum-dots optical properties by strain compensation with GaNAs capping Layers", Appl. Phys. Lett. **83**, pp. 4524-4526 (2003).
72. K. Yoh, H. Ohno, Y. Katano, K. Mukasa, "Spin injection from a ferromagnetic electrode into InAs surface inversion layer," J. Crystal Growth **251**, pp.337-341 (2003).
73. I. Suemune, K. Uesugi, S. Ganapathy, X. Q. Zhang, M. Kurimoto, B.-J. Kim, T.-Y. Seong, H. Machida and N. Shimoyama, "III-V-N-related quantum structures for 1.5 μm emission", IEE, Optoelectronics **150**, pp. 52-55 (2003).
74. K. Uesugi, I. Suemune, H. Machida, and N. Shimoyama, "Metalorganic molecular-beam epitaxy and characterization of GaAsNSe/GaAs superlattices emitting around 1.5 μm -wavelength region", Appl. Phys. Lett. **82**, pp.898-900 (2003).
75. W. Zhou, K. Uesugi, and I. Suemune, "1.6- μm emission from GaInNAs with Indium-induced Increase of N composition", Appl. Phys. Lett. **83**, pp. 1992-1994 (2003).
76. S. Ganapathy, X. Q. Zhang, I. Suemune, K. Uesugi, B.-J. Kim, and T.-Y. Seong, "GaNAs as strain compensating layers for 1.55 μm light emission from InAs quantum dots", Jpn. J. Appl. Phys. **42**, pp.5598-5601 (2003).
77. H. Ohno, K. Yoh, K. Sueoka and K. Mukasa, A. Kawaharazuka, and M. E. Ramsteiner, "Spin-polarized electron injection through an Fe/InAs junction", Jpn. J. Appl. Phys. Express Lett. **42**, pp. L87-L89 (2003).
78. I. Suemune, H. Yoshida, H. Kumano, T. Tawara, A. Ueta, and S. Tanaka, "II-VI quantum dots grown by MOVPE", J. Cryst. Growth **248**, pp. 301-309 (2003).
79. B.-J. Kim, Y.-W. Ok, T.-Y. Seong, A. B. M. A. Ashrafi, H. Kumano, I. Suemune, "Structural properties of CdO layers grown on GaAs (001) substrate by metalorganic molecular-beam epitaxy", J. Cryst. Growth **252**, pp. 219-225 (2003).
80. H. Kumano, Y. Hitaka, and I. Suemune, "Emissions from single localized states observed from ZnCdS ternary alloy mesa structures", Appl. Phys. Lett. **82**, pp. 4277-4279 (2003).
81. S. Adachi, S. Muto, K. Hazu, T. Sota, K. Suzuki, SF. Chichibu, and T. Mukai, "Exciton-exciton interaction and hetro-biexciton in GaN", Phys. Rev. B **67**, pp. 205212/1-5 (2003).
82. S. Adachi, H. Sasakura, S. Muto, K. Hazu, T. Sota, SF. Chichibu, and T. Mukai, "Exciton-exciton correlation effects on FWM in GaN", phys. stat. sol. (b) **240**, pp. 348-351(2003).
83. K. Hazu, T. Sota, K. Suzuki, S. Adachi, SF. Chichibu, G. Cantwell and D. B. Eason, D. C. Reynolds and C. W. Litton, "Strong biexcitonic effects and exciton-exciton correlations in bulk ZnO", Phys. Rev. B **68**, pp. 033205/1-4 (2003).
84. J. Kato, S. Tanaka, S. Yamada, and I. Suemune, "Structural anisotropy in GaN films grown on vicinal 4H-SiC surfaces by metalorganic molecular-beam epitaxy", Appl. Phys. Lett. **83**, pp. 1569-1571 (2003).

(2)その他の著作物 (総説, 書籍など)

1. I. Suemune, "Quantum Structure of Wide Bandgap Semiconductors" in "Modern Wide Bandgap Semiconductors and Related Optoelectronic Devices", Edited by K. Takahashi, A. Sandhu, and A. Yoshikawa (Chapter 2, 2.2.2, pp. 63-67, Springer-Verlag, 2007).
2. H. Kumano and I. Suemune, "Wide bandgap single photon device" in "Modern Wide Bandgap Semiconductors and Related Optoelectronic Devices", Edited by K. Takahashi, A. Sandhu, and A. Yoshikawa (Chapter 55.1.1, pp. 281-287, Springer-Verlag, 2007).
3. 武藤俊一「スピントロニクスと量子情報処理」
第41回応用物理学会スクール（2007年秋季）テキスト.
4. 松田喬, 陽 完治「InAs系 HEMTにおけるスピントラッキング相互作用の垂直電界依存性」
信学技報 IEICE Technical Report ED2006-248, SDM2006-236 (2007-02) pp.47-50.
5. 小西敬太, 陽 完治「シリコン酸化膜上に形成したナノグラファイトの電子輸送特性」
信学技報 IEICE Technical Report ED2006-251, SDM2006-239 (2007-02) pp.63-66.
6. 末宗幾夫, "ワイドギャップ半導体の量子構造" (第2章 ワイドギャップ半導体の基本特性, 2.2.4節 pp. 79-84), 「ワイドギャップ半導体 光・電子デバイス」(森北出版 高橋清監修, 2006) .
7. Ikuo Suemune, Katsuhiko Uesugi, and Sasikala Ganapathy, "MOMBE Growth and Characterization of III-V-N Compounds and Application to InAs Quantum Dots", Chapter 4 (pp. 137-156) in "Dilute Nitride Semiconductors" Edited by M. Henini, 2005 Elsevier Ltd.
8. 足立 智, "コヒーレントフォノン計測", レーザーハンドブック第2版, 26章レーザーによる科学計測 第4節 (レーザー学会編, オーム社, 2005).
9. S. Adachi, S. Maki, O. Ikeuchi, H. Sasakura, and S. Muto, "Spin-diffracted four-wave mixing measurements of exciton spin relaxation and population transfer to dark states", Proceedings of SPIE vol. 4992, Ultrafast Phenomena in Semiconductors VII, K-T. F. Tsen and J.-J. Song and H. Jiang Eds., pp. 241-248 (2003).
10. S. Adachi, K. Hazu, T. Sota, S.F. Chichibu, T. Mukai, S. Muto, and K. Suzuki, "Scattering processes and dynamics of exciton-biexciton system in GaN", Proceedings of SPIE vol. 4992, Ultrafast Phenomena in Semiconductors VII, K-T. F. Tsen and J.-J. Song and H. Jiang Eds., pp. 188-201 (2003).
11. K. Hazu, T. Sota, K. Suzuki, S. Adachi, and S. F. Chichibu, "Optical nonlinearities of excitons in ZnO single crystal", Proceedings of SPIE vol. 4992, Ultrafast Phenomena in Semiconductors VII, K-T. F. Tsen and J.-J. Song and H. Jiang Eds., pp. 257-263 (2003).
12. S. Adachi, S. Sasakura, S. Muto, K. Hazu, T. Sota, S.F. Chichibu, G. Cantwell and D.B. Eason, D.C. Reynolds, C.W. Litton, "Strong heterobiexciton effects in bulk ZnO", Extended Abstracts of The 9th Symposium on Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductors, pp. 97-100 (2003).
13. H. Sasakura, S. Adachi, S. Muto, H. Song, T. Miyazawa, T. Usuki, "Spin depolarization via tunneling effects in asymmetric double quantum dot structure", Extended Abstracts of The 9th Symposium on Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductors, pp. 87-88 (2003).

14. K. Yoh, H. Ohno, Y. Katano, K. Sueoka and K. Mukasa, "Spin injection from a ferromagnetic electrode into a semiconductor through an Fe/InAs junction," Towards the Controllable Quantum States -Mesoscopic Superconductivity and Spintronics (World Scientific 2003) H. Takayanagi and J. Nitta Eds. pp.22-26 (2003).

(3)学会発表(国際学会発表及び主要な国内学会発表)

招待講演 (国内会議 7 件, 国際会議 24 件)

1. I. Suemune, S. Ganapathy, K. Uesugi, and H. Kumano, "Low-energy-gap III-V-N Semiconductors and Related Quantum Nanostructures for Optical-fiber Communications", International Conference on Optoelectronics Technology: ICOT-2004 (January 12-14, 2004, Jalgaon (Maharashtra), India). (**Plenary**)
2. I. Suemune and K. Kumano, "II-VI Quantum Dots, Physics and Applications" The 12th International Workshop on the Physics of Semiconductor Devices (Chennai, India, Dec. 16-20, 2003). (**Plenary**)
3. S. Muto, H. Sasakura and S. Adachi, "Photon-spin qubit-conversion based on dynamic nuclear polarization of a single quantum dot", RCIQE International Seminar on "Advanced Semiconductor Materials and Devices" (February 8-10, 2007, Sapporo, Japan).
4. S. Muto, "Optical orientation of nuclear spins in a quantum dot and its application to qubit conversion", 4th NIMS Conference (March 8-10, 2006, Tsukuba, Japan).
5. S. Muto, H. Sasakura and S. Adachi, "Photonic Manipulation of Spin States in Quantum Dots for Quantum Information Processing", The 8th RIES-Hokudai International Symposium "bi" (Dec.11-12, 2006, Sapporo, Japan).
6. S. Adachi, K. Hazu, T. Sota, SF. Chichibu, G. Cantwell, D. C. Reynolds, and C. W. Litton, "Biexcitons and their dephasing processes in ZnO", The 4th International Conference on Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures: PLMCN4, (June 29 - July 3 2004, St. Petersburg, Russia).
7. S. Adachi, "Biexciton formation and exciton-exciton correlation effects in bulk ZnO", The 6th International Conference on Excitonic Processes in Condensed Matter: EXCON6 (6 - 9 July 2004, Cracow, Poland).
8. S. Adachi, K. Hazu, T. Sota, SF. Chichibu, T. Mukai, S. Muto, K. Suzuki, "Scattering processes and dynamics of exciton-biexciton system in GaN", SPIE Ultrafast Phenomena in Semiconductors VII in Photonic West 2003 (January 25-31, 2003, San Jose, California, USA)
9. 武藤俊一「スピンエレクトロニクスと量子情報処理」
第 41 回応用物理学会スクール (2007 年秋季).
10. 横井伴紀, 足立智, 笹倉弘理, 棕元崇, 武藤俊一, 宋海智, 廣瀬真一, 臼杵達哉, 熊野英和, 末宗幾夫, 「自己集合量子ドットでのオーバーハウザーシフトの観測 (応用物理学会奨励賞受賞記念講演)」, 第 66 回応用物理学会学術講演会, 徳島(2005 年 9 月).
11. 武藤俊一, 「固体量子コンピューティング最前線」, 電子情報通信学会技術研究会 (CAS2004) (2004 札幌).
12. 武藤俊一, 笹倉弘理, 綿貫丈雄, 足立智, 「電子スピンを用いた量子演算とネットワークへの応用」 JST 量子情報処理シンポジウム (第一回公開シンポジウム) (2004 東京).
13. 武藤俊一, 末宗幾夫, 陽完治, 「量子ドットの電子スピンを用いた量子情報処理ネットワーク」, 第 8 回量子情報技術研究会, (2003 年 6 月 30 日-7 月 2 日).
14. 武藤俊一, 末宗幾夫, 陽完治, 「量子ドットの電子スピンを用いた量子コンピューティング」, 日本物理学会領域 10 第 13 回格子欠陥フォーラム, 2003 年 9 月 23 日.
15. I. Suemune, H. Kumano, Y. Hayashi, K. Tanaka, T. Akazaki, M. Jo, and Y. Idutsu, " Controlled Photon Generation Processes from Semiconductor Quantum Dots and Their Applications" The International Photonics Technology Conference: IPTC2007 (September 4-5, 2007, Gwangju,

- Korea).
16. I. Suemune: “Prospects of Superconducting Photonics”, Ninth International Symposium on Contemporary Photonics Technology (January 11-13, 2006 Tokyo, Japan).
 17. I. Suemune, H. Kumano, and K. Uesugi, “Control of Photon Wavelength and Correlations Emitted from Single Quantum Dots”, 4th NIMS Conference (March 8-10, 2006, Tsukuba, Japan).
 18. I. Suemune, “Coupling of Quantum Dots and Microcavities: Towards Quantum Information Communications and Processing”, RCIQE International Seminar on “Advanced Semiconductor Materials and Devices” (February 8-10, 2005, Sapporo, Japan).
 19. H. Kumano, S. Kimura, M. Endo and I. Suemune, “Single-photon and Correlated-photon-pair Generations Based on Semiconductor Quantum Dots for Quantum Information Devices” the 13th International Workshop on the Physics of Semiconductor Devices (New Delhi, India, Dec. 13-17, 2005).
 20. I. Suemune, K. Uesugi, and H. Kumano, “Coupling of Quantum Dots and Microcavities, Towards Quantum Information Communications and Processing”, RCIQE International Seminar (February 8-10, 2005, Sapporo, Japan).
 21. I. Suemune, “Growth of p-Type ZnO by MOMBE and Formation of Ohmic Contacts”, Topical Seminar on Oxides Materials, Gwangju Institute of Science and Technology (November 4, 2004, Gwangju, Korea).
 22. H. Kumano and I. Suemune, “Pyramidal-shaped Optical Microcavities and Preparation of Atom-like States”, Pre-Conference of IEEE International Semiconductor Laser Conference 2004: IEICE LQE/OPE Technical Meeting (December 18-20, 2003, Kobe, Japan).
 23. I. Suemune and H. Kumano, “Nanofabrication of pyramidal optical microcavities”, International Symposium on Nanotechnology for Photonics and Opto-Electronics: NPO (March 5-6, 2003, Tokyo, Japan).
 24. I. Suemune, A. B. M. A. Ashrafi, H. Kumano, B.-J. Kim, Y.-W. Ok, and T.-Y. Seong, “Properties of ZnO and Related Materials Grown by MOMBE”, 1st International NIMS Conference, Material Solutions for Photonics (March 17 to 19, 2003, Tsukuba, Japan).
 25. I. Suemune, A. B. M. A. Ashrafi, M. Ebihara, M. Kurimoto, H. Kumano, T.-Y. Seong, B.-J. Kim, and Y.-W. Ok, “Epitaxial ZnO Growth and p-Type Doping with MOMBE”, 11th II-VI International Conference on II-VI Compounds (September 22-27, 2003, Niagara Falls, New York).
 26. I. Suemune, K. Uesugi, S. Ganapathy, and W. Zhou, “MOMBE Growth of III-V-N-based Quantum Wells and Quantum Dots Emitting above 1.3 μ m”, The 16th Annual Meeting of the IEEE Lasers & Electro-Optics Society: LEOS 2003 (Oct. 26-30, 2003 at Tucson, AZ, USA).
 27. I. Suemune, G. Sasikala, K. Uesugi, and P. Thilakan, “InAs Quantum Dots, Self-organization and Strain-issue”, RIES-Symposium, (December 1-2, 2003, Sapporo, Japan).
 28. I. Suemune, M. Kurimoto, A. B. M. A. Ashrafi, M. Ebihara, and H. Kumano, “Growth of p-Type ZnO by MOMBE and Study of Ohmic Contacts”, International Symposium on Scientific and Industrial Nanotechnology 2003: ISSIN-2003 (8-9 December, 2003, Osaka, Japan).
 29. K. Yoh, “Spin transport in InGaAs/AlInAs heterostructures structures”, International Symposium on Structure and Dynamics of Heterogeneous Systems: SDHS (November 25 and 26, 2004, University of Duisburg-Essen, Germany).
 30. K. Yoh, “Electrical transport of a spin transistor”, Advanced Heterostructure Workshop (December 5-10, 2004, Kohala-Coast, Hawaii, U.S.A.).
 31. 陽 完治: 「室温動作スピントランジスタ」, 文部科学賞科学研究費補助金特定領域研究「半導体ナノスピントロニクス」平成16年度報告会, 東京工業大学, 平成17年1月28日.

1. N. Yatsu, S. Adachi, H. Sasakura, S. Muto, H. Kumano, I. Suemune, “Fourier spectroscopy of decoherence of exciton and exciton complexes in single InAlAs quantum dots”, 15th International Conference on Nonequilibrium Carrier Dynamics in Semiconductors: HCIS15 (July 23-27, 2007, Tokyo, Japan).
2. R. Kaji, H. Sasakura, S. Adachi, S. Muto, “Excitation power dependence of optically pumped nuclear spin polarizations in single InAlAs QDs”, 15th International Conference on Nonequilibrium Carrier Dynamics in Semiconductors: HCIS15 (July 23-27, 2007, Tokyo, Japan).
3. T. Ishiguro, Y. Toda, S. Adachi, K. Hoshino, Y. Arakawa, “Dephasing studies of exciton fine structure in uniaxially-strained GaN”, 7th International Conference on Nitride Semiconductors: ICNS7 (September 16-21, 2007 Las Vegas, Nevada, USA).
4. H. Kobayashi, H. Kumano, M. Endo, M. Jo, I. Suemune, H. Sasakura, S. Adachi, S. Muto, “Highly circular-polarized single photon generation from a single quantum dot at zero magnetic field”, The 6th International Conference on Low Dimensional Structures and Devices (15-20, April, 2007, San Andrés Island, Colombia).
5. H. Kumano, H. Kobayashi, Y. Hayashi, M. Endo, I. Suemune, H. Sasakura, S. Adachi, S. Muto, “High degree of circular polarization single photon emission from a single quantum dot under non-resonant excitation and zero magnetic field”, 13th International Conference on Modulated Semiconductor Structures: MSS13 (Genova Magazzini del Cotone, July 15-20, 2007).
6. K. Yoh, T. Ishizaki, K. Konishi, S. Tanaka, “Electrical properties of nano-graphite grown on silicon carbide”, 2007 RCIQE International Seminar on “Advanced Semiconductor Materials and Devices (February 8-9, 2007, Sapporo, Japan).
7. K. Yoh, T. Ishizaki, K. Konishi, T. Matsuda, S. Tanaka, “Fabrication and Characterization Graphene Transistor Grown on 6H-SiC”, Electronic Materials Conference (University of Notre Dame, Indiana, U.S.A., June 20- 22, 2007).
8. T. Matsuda, K. Yoh, “Enhanced Spin-Orbit Interaction in Strained InGaAs/AlGaAs Heterostructure for Spin Transistors”, Electronic Materials Conference (University of Notre Dame, Indiana, U.S.A., June 18- 20, 2007).
9. S. Adachi, T. Yokoi, H. Sasakura, H. Kumano, I. Suemune, S. Muto, “Optically pumped nuclear spin polarization in a self-assembled quantum dot”, 28th International Conference on Physics of Semiconductors: ICPS28 (July 24-28, 2006, Vienna, Austria).
10. H. Kumano, S. Kimura, M. Endo, S. Adachi, H. Sasakura, S. Muto, and I. Suemune, “Polarization preservation between a photon pair from biexciton-exciton cascaded decay process in a single InAlAs quantum dot”, 28th International Conference on Physics of Semiconductors: ICPS28 (July 24-28, 2006, Vienna, Austria).
11. K. Yamaguchi, Y. Toda, S. Adachi, T. ishiguro, K. Hoshino, K. Tadamoto, “Time-resolved four-wave-mixing of UV exciton emissions using a spatial interference technique”, 7th International Conference on Excitonic Process in Condensed Matter: EXCON7 (June 26-30, 2006, Winston-Salem, NC, USA).
12. S. Adachi, T. Yokoi, H. Sasakura, H. Kumano, I. Suemune, S. Muto, “Optical pumping of nuclear polarization in a single self-assembled InAlAs quantum dot”, 7th International Conference on Excitonic Process in Condensed Matter: EXCON7 (June 26-30, 2006, Winston-Salem, NC, USA).
13. H. Kumano, S. Kimura, M. Endo, I. Suemune, H. Sasakura, S. Adachi, S. Muto, H. Z. Song, S. Hirose, T. Usuki, “Relations of neutral and charged excitons in a single quantum dot studied with dynamic and photon correlation measurements”, 9th Optics of Excitons in Confined Systems, and 2nd International Conference on Spontaneous Coherence in Excitonic Systems (September 5-11, 2005, Southampton, UK).
14. H. Kumano, S. Kimura, M. Endo, I. Suemune, H. Sasakura, S. Adachi, S. Muto, H. Z. Song, S. Hirose, T. Usuki, “Single Photon Emission from a Single InAlAs Quantum Dot”, International Conference on Nanoelectronics, Nanostructures and Carrier Interactions (January 30-February 2, 2005, Atsugi, Japan).

15. I. Suemune, S. Ganapathy, K. Uesugi, N. Matsumura, Y. Nabetani, and T. Matsumoto, "Role of Nitrogen on Emission Wavelength of InAs Quantum Dots, InAs/GaAs Interfaces and Strain-compensating GaAsN Burying Layers", APS March Meeting, Symposium on Dilute Nitride Semiconductors, from Atoms to Devices (March 21-25, 2005, LA, USA).
16. N. Matsumura, S. Muto, S. Ganapathy, I. Suemune, K. Numata, and K. Yabuta, "Anisotropic Lattice Deformation of InAs Self-assembled Quantum Dots Strain Compensated with GaAsN Burying Layers", 47th TMS 2005 Electronic Materials Conference (June 22-24, 2005, University of California Santa Barbara, USA).
17. M. Ebihara, H. Kumano, I. Suemune, T. Nakashita, and H. Machida, "Control of Crystalline Structure of CdO Layers Grown on c-Plane (0001) ZnO", 47th TMS 2005 Electronic Materials Conference (June 22-24, 2005, University of California Santa Barbara).
18. W. Zhang, K. Uesugi, N. Matsumura, and I. Suemune, "Strain-compensation of InAs Quantum Dots, Dot Size Dependence", International Conference on Quantum Electronics 2005 and the Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics 2005: IQEC/CLEO-PR 2005 (July 11-15, 2005, Tokyo, Japan).
19. K. Yoh, M. Ferhat, A. Riposan, J. M. Millunchick, "Current bi-stability of an InGaAs spin transistor observed at room temperature", the March Meeting of American Physical Society (March 20-25, 2005, Los Angeles, USA).
20. K. Yoh, "High Efficiency Spin Injection from a Ferromagnetic Metal into a Semiconductor Through Fe/InAs Junction", the 2005 RCIQE International Seminar for 21st Century COE Program, "Quantum Nanoelectronics for Membrane-Based Information Technology (III)" (February 8-11, 2005, Sapporo, Japan).
21. K. Yoh, M. Ferhat, A. Riposan, J. M. Millunchick, "Observation of current bi-stability in an InGaAs spin transistor at room temperature", 1st International Symposium on Nanometer-scale Quantum Physics (January 26-28, 2005, Tokyo, Japan).
22. S. Adachi, T. Yokoi, H. Sasakura, S. Muto, H. Kumano, I. Suemune, "Dynamic nuclear polarization in a self-assembled InAlAs quantum dot", 5th International Conference on the Physics of Light Matter Coupling in Nanostructures: PLMCN5 (June 8-11, 2005, Glasgow, Scotland).
23. S. Adachi, Y. Toda, T. Ishiguro, "In-plane anisotropy in uniaxially-strained GaN films detected by optical diffraction technique", 6th International Conference of Nitride Semiconductors: ICNS6 (August 29-September 3, 2005, Bremen, Germany).
24. S. Adachi, and Y. Toda, "Spectrally-resolved nonlinear spectroscopy of in-plane anisotropy in uniaxially-strained GaN epilayers", 5th International Conference on the Physics of Light Matter Coupling in Nanostructures: PLMCN5 (June 8-11, 2005, Glasgow, Scotland).
25. S. Kimura, H. Kumano, M. Endo, I. Suemune, T. Yokoi, H. Sasakura, S. Adachi, S. Muto, H. Z. Song, S. Hirose, T. Usuki, "Highly pure single photon generation from single quantum dot", 5th International Conference on the Physics of Light Matter Coupling in Nanostructures: PLMCN5 (June 8-11, 2005, Glasgow, Scotland).
26. S. Muto, S. Adachi, T. Yokoi, H. Sasakura, I. Suemune, "Photon-spin qubit-conversion based on Overhauser shift of Zeeman energies in quantum dots", 13th International Symposium Nanostructures, Physics and Technology (June 20-25, 2005, St. Petersburg, Russia).
27. T. Yokoi, S. Adachi, H. Sasakura, S. Muto, H. Z. Song, T. Usuki, S. Hirose, "Observation of Overhauser shift in a self-assembled InAlAs quantum dot", 1st International Symposium on Nanometer-scale Quantum Physics (January 26-28, 2005, Tokyo, Japan).
28. T. Yokoi, T. Mukumoto, S. Adachi, H. Sasakura, H. Kumano, S. Muto, I. Suemune, Overhauser shift in a self-assembled quantum dot (oral), 3rd international conference on spintronics and quantum information technology: SPINTECH III (August 1-5, 2005, Awaji, Japan).
29. S. Muto, S. Adachi, H. Sasakura, "Quantum data processing using electron spins in quantum", International Symposium on Quantum Info-Communications and Related Quantum Nanodevices (March 11-12, 2004, Tokyo, Japan).
30. P. Thilakan, G. Sasikala, H. Kumano, and I. Suemune, "Room Temperature Emission from InAs QDs/GaNAs (SCL) Active Region Embedded in GaAs Microdisk Cavity", 7th International Symposium on Contemporary Photonics Technology (January 14-16, 2004, Toshi Center Hotel,

- Tokyo, Japan).
31. I. Suemune, S. Ganapathy, H. Kumano, K. Uesugi, Y. Nabetani, and T. Matsumoto, "Improved Luminescence Efficiency of InAs Quantum Dots by Nitrogen-induced Strain Compensation with GaNAs Burying Layers" 16th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials: IPRM'04 (May 31-June 4, 2004, Kagoshima, Japan).
 32. P. Thilakan, G. Sasikala, H. Kumano and I. Suemune, "Improved Optical Quality in GaAsN-strain-compensated InAs Quantum Dots and Room Temperature Stimulated Emission from InAs QDs Embedded in a GaAs Microdisk Cavity", 5th International Conference in Low Dimensional Structures and Devices: LDSD2004 (December 12-17, 2004, Cancun-Mayan Riviera, Mexico).
 33. I. Suemune, "Coupling of Quantum Dots and Microcavities, Towards Quantum Information Communications and Processing" RCIQE International Seminar (February 8-10, Sapporo, Japan).
 34. K. Yoh, M. Ferhat, A. Riposan, J. M. Millunchick, "Gate controlled spin current in an Fe/InGaAs based field-effect transistor fabricated by molecular beam epitaxy ", 22nd North American Molecular Beam Epitaxy Conference (October 11-13, 2004, Banff, Canada).
 35. K. Yoh, M. Ferhat, A. Riposan, J. M. Millunchick, "Room temperature spin dependent current modulation in an InGaAs-based spin transistor with ferromagnetic contact", 27th International Conference on Physics of Semiconductors (July 26-30, 2004, Flagstaff, Germany).
 36. K. Yoh, M. Ferhat, A. Riposan, J. M. Millunchick, "Current bi-stability of an InGaAs spin transistor observed at room temperature" Presented in the International Conference on Physics and Application of Spin-Related Phenomena in Semiconductors (July 21- 23, 2004, Santa Barbara, California, USA).
 37. K. Yoh, M. Ferhat, A. Riposan, J. M. Millunchick, "Fabrication and characterization of an In₈₁Ga₁₉As channel spin transistor with Fe electrodes as spin injector/detector ", the 46th Electronic Materials Conference, Technical Program and Abstracts, pp.41 (June 26-28, 2004, Santa Barbara, California, USA).
 38. S. Adachi, Y. Umemura, H. Sasakura, S. Muto, "Exciton spin dynamical processes in quantum structures", 11th International Conference of Modulated Semiconductor Structures: MSS11, (July 14-18, 2003, Nara, Japan).
 39. S. Ganapathy, M. Kurimoto and I. Suemune, "Long-wavelength light emission from InAs quantum dots embedded in GaNAs strain compensating layer", 6th International Symposium on Contemporary Photonic Technology (January 15-17, 2003, Tokyo, Japan).
 40. A. B. M. A. Ashrafi, I. Suemune, H. Kumano, Y.-W. Ok, and T.-Y. Seong, "Role of stoichiometry in growth of CdO layers on GaAs substrates", 1st International Symposium on Point Defect and Nonstoichiometry, ISPN 2003 (March 20-22, 2003, Sendai, Japan).
 41. H. Kumano, Y. Hitaka, and I. Suemune, "Sharp and Discrete Excitonic Emissions from Single Localized States in Selectively-Grown ZnCdS Ternary Mesa Structures", 1st Asia-Pacific Workshop on Widegap Semiconductors, APWWS-2003 (March 9-12, 2003, Awaji, Hyogo, Japan).
 42. X. Q. Zhang, S. Ganapathy, I. Suemune, H. Kumano, K. Uesugi, B.-J. Kim, T.-Y. Seong, "Dependence of InAs Quantum Dots Optical Properties on Capping Materials, GaNAs Strain Compensating Layers (SCL) and GaAs Layers", 2003 TMS Electronic Materials Conference (June 25-27, 2003, Salt Lake City, USA).
 43. K. Uesugi, M. Kurimoto, I. Suemune, T. Uemura, M. Yamamoto, H. Machida, and N. Shimoyama, "Observation of Large Room-temperature Negative Differential Resistance in GaAsNSe/GaAs and GaAsNSb/GaAs Superlattices Grown on (001) GaAs", 11th International Conference on Modulated Semiconductor Structures: MSS11 (July 14-18, 2003, Nara, Japan).
 44. G. Sasikala, M. Kurimoto, P. Thilakan, K. Uesugi, H. Machida and N. Shimoyama and I. Suemune, "Observation of reflection high-energy electron diffraction oscillation during MOMBE of AlAs and related modulated semiconductor structures", 11th International Conference on Modulated Semiconductor Structures: MSS11 (July 14-18, 2003, Nara, Japan).
 45. W. Zhou, K. Uesugi, and I. Suemune, "Emission Extended into 1.55 μm Range from GaInNAs/GaAs MQW by Indium-induced Increase of N composition", 11th International

- Conference on Modulated Semiconductor Structures: MSS11 (July 14-18, 2003, Nara, Japan).
46. M. Kurimoto, A. B. M. A. Ashrafi, M. Ebihara, H. Kumano and I. Suemune, "Formation of ohmic contacts to p-type ZnO", 11th II-VI International Conference on II-VI Compounds (September 22-27, 2003, Niagara Falls, New York).
 47. D. Nakaya, Y. Hitaka, S. Kimura, H. Kumano, and I. Suemune, "Study of Optimal Coupling of ZnS Pyramidal Microcavities with Distributed Bragg Reflectors", 11th II-VI International Conference on II-VI Compounds (September 22-27, 2003, Niagara Falls, New York).
 48. H. Kumano, Y. Hitaka, I. Suemune, "Sharp and Discrete Emission Lines from Single Localized States in Selectively Grown ZnCdS Compound Semiconductors", 11th II-VI International Conference on II-VI Compounds, (September 22-27, 2003, Niagara Falls, New York).
 49. G. Sasikala, P. Thilakan, H. Kumano, K. Uesugi, I. Suemune, Y. Nabetani, and T. Matsumoto, "Control of InAs/GaAs Heterointerfaces in InAs Quantum Dots Using Nitrogen Purge Technique", 7th International Conference on Atomically Controlled Surfaces and Interfaces of Nanostructures: ACSIN-7 (November 16-20, 2003, Nara).
 50. K. Yoh, H. Ohno, K. Sueoka, and M. E. Ramsteiner, "Reduced interface reaction during the epitaxial Fe growth on InAs for high efficiency spin injection", 2003 North American Conference on Molecular Beam Epitaxy, NAMBE (September 28-October 1, 2003, Keystone, Colorado, USA).
 51. K. Yoh, H. Ohno, Y. Katano, K. Sueoka, K. Mukasa, and M. E. Ramsteiner, "Spin polarization in photo- and electro-luminescence of InAs and metal/InAs hybrid structures", International Conference on Non-equilibrium in Semiconductors, HCIS-13 (July 28 -August 1, 2003, Modena, Italy).
 52. K. Yoh, H. Ohno, K. Sueoka, K. Mukasa, and M. E. Ramsteiner, "High efficiency spin injection from a ferromagnetic metal into a semiconductor through Fe/InAs junction", 45th Electronic Materials Conference: EMC (June 25-27, 2003, Salt Lake City, Utah, USA).
 53. 足立智, 鍛治怜奈, 笹倉弘理, 武藤俊一, 熊野英和, 末宗幾夫, 「単一InAlAs量子ドットにおける核磁場形成と外部磁場補償」, 第68回応用物理学会学術講演会 6a-S-13 (2007年9月4日-9月8日, 北海道工業大学).
 54. 林 雄二郎, 田中和典, 赤崎達志, 熊野英和, 末宗幾夫, 「Nb/n-InGaAs/Nbジョセフソン接合をもったJFET-LEDの特性」第68回応用物理学会学術講演会 7a-C-11 (2007年9月4日-9月8日, 北海道工業大学).
 55. 定 昌史, 林 雄二郎, 熊野英和, 末宗幾夫, 「ZnSe中のTe等電子中心における励起子-格子相互作用の観測」第68回応用物理学会学術講演会 5a-E-9 (2007年9月4日-9月8日, 北海道工業大学).
 56. 小西敬太, 石崎翼, 陽 完治, 「ナノグラファイト超薄膜における強磁性電極からのスピン注入」, 第68回応用物理学会学術講演会 4p-Q-5 (2007年9月4日-9月8日, 北海道工業大学).
 57. 石崎翼, 松田喬, 小西敬太, Valla Fatemi, 陽 完治, 「SiC基板上に生成したカーボン超薄膜の電子輸送特性(3)」, 第68回応用物理学会学術講演会 4p-Q-4 (2007年9月4日-9月8日, 北海道工業大学).
 58. 大野宗一, 陽 完治, 「スピントランジスタ構造におけるスピン緩和異方性の消失」, 第68回応用物理学会学術講演会 6a-S-11 (2007年9月4日-9月8日, 北海道工業大学).
 59. 陽 完治, 大野宗一, 「持続的スピン回転運動の制御とその超低消費電力スピントランジスタ回路への応用」, 第68回応用物理学会学術講演会 6a-S-10 (2007年9月4日-9月8日, 北海道工業大学).
 60. 山口一春, 戸田泰則, 足立 智, 石黒哲郎, 星野勝之, 只友一行, 「GaIn薄膜における励起子位相緩和の空間分解測定」, 第68回応用物理学会学術講演会 4a-ZK-3 (2007年9月4日-9月8日, 北海道工業大学).
 61. 岡 由樹, 足立 智, 戸田泰則, 若生周治, 金 大貴, 中山正昭, 「RFマグネトロンスパッタリング法で作製したZnO薄膜の時間分解分光」, 第68回応用物理学会学術講演会 4a-ZK-5 (2007年9月4日-9月8日, 北海道工業大学).

62. 戸田泰則, 石黒哲郎, 足立 智, 只友一行, 星野勝之, 荒川泰彦, 「エピタキシャル成長GaN薄膜の高精度一軸歪計測」, 第68回応用物理学会学術講演会 4a-ZK-4 (2007年9月4日-9月8日, 北海道工業大学)
63. 石黒哲郎, 戸田泰則, 足立 智, 星野勝之, 荒川泰彦, 「一軸歪薄膜を用いたGaN励起子微細構造の位相緩和ダイナミクス」, 第68回応用物理学会学術講演会 4a-ZK-2 (2007年9月4日-9月8日, 北海道工業大学).
64. 笹倉弘理, 鍛冶怜奈, 足立智, 武藤俊一, 「InAlAs 量子ドットの荷電励起子分子状態の微細構造分裂」, 第54回応用物理学関係連合講演会 29p-T-7 (2007年3月27日-3月30日, 青山学院大学).
65. 谷津直樹, 笹倉弘理, 足立智, 武藤俊一, 末宗幾夫, 「単一InAlAs 量子ドットにおける励起子, 励起子分子, 荷電励起子の位相緩和時間」, 第54回応用物理学関係連合講演会 29p-T-7 (2007年3月27日-3月30日, 青山学院大学).
66. 鍛冶怜奈, 笹倉弘理, 足立智, 武藤俊一, 末宗幾夫, 「単一InAlAs量子ドットでの核スピン偏極の形成機構」, 第54回応用物理学関係連合講演会 29p-T-12 (2007年3月27日-3月30日, 青山学院大学).
67. 柏田沙織, 陽 完治, 「逆HEMT構造における自己形成InAs量子ドットの電子状態測定」第54回応用物理学関係連合講演会 29a-S-7 (2007年3月27日-3月30日, 青山学院大学).
68. 松田喬, 小西敬太, 陽 完治 「InAs系HEMT中のチャンネル電子のスピン軌道相互作用へ及ぼす波動関数分布の影響」第54回応用物理学関係連合講演会 30a-ZS-6 (2007年3月27日-3月30日, 青山学院大学).
69. 小西敬太, 松田喬, 陽 完治, 「シリコン酸化膜上に形成したグラファイト超薄膜の電子輸送特性」第54回応用物理学関係連合講演会 30a-P10-3 (2007年3月27日-3月30日, 青山学院大学).
70. 石崎翼, 松田喬, 小西敬太, 藤井政弘, 田中悟, 陽 完治, 「SiC基板上に生成したカーボン超薄膜の電子輸送特性(2)」, 第54回応用物理学関係連合講演会 30a-P10-4 (2007年3月27日-3月30日, 青山学院大学).
71. 大野宗一, 陽 完治, 「細線上の鉄薄膜における磁化反転過程及び漏れ磁場のシミュレーション」第54回応用物理学関係連合講演会 30a-ZT-6 (2007年3月27日-3月30日, 青山学院大学).
72. 遠藤礼暁, 植杉克弘, 熊野英和, 定 昌史, 木村 聡, 末宗幾夫, 笹倉弘理, 足立 智, 武藤俊一, 宋海智, 廣瀬真一, 臼杵達哉, 「近赤外-可視光領域量子ドット形成基板へのナノ微細加工」, 第53回応用物理学関係連合講演会 24p-B-11 (2006年3月22日-3月26日, 武蔵工業大学).
73. 木村聡, 熊野英和, 遠藤礼暁, 末宗幾夫, 横井伴紀, 笹倉弘理, 足立 智, 武藤俊一, 宋海智, 廣瀬真一, 高津 求, 「単一InAlAs量子ドットのドットサイズと面内異方性に関する検討」, 第53回応用物理学関係連合講演会 24p-B-3 (2006年3月22日-3月26日, 武蔵工業大学).
74. 熊野英和, 木村聡, 遠藤礼暁, 末宗幾夫, 笹倉弘理, 足立 智, 武藤俊一, 宋海智, 廣瀬真一, 高津 求, 「単一量子ドットによる偏光相関光子対発生」, 第53回応用物理学関係連合講演会 24p-B-2 (2006年3月22日-3月26日, 武蔵工業大学).
75. 石黒哲郎, 佐々木英二, 戸田泰則, 足立 智, 星野勝之, 只友一行, 荒川泰彦, 「四光波混合分光法によるGaN励起子・励起子分子のコヒーレント制御」, 第53回応用物理学関係連合講演会 26p-E-2 (2006年3月22日-3月26日, 武蔵工業大学).
76. 小林 創, 熊野英和, 遠藤礼暁, 末宗幾夫, 笹倉弘理, 足立智, 武藤俊一, 「単一量子ドットにおける中性励起子発光のスピン分裂」, 第67回応用物理学会学術講演会 31a-RE-8 (2006年8月29日-9月1日, 立命館大学).
77. 笹倉弘理, 足立智, 武藤俊一, 「光パルス対によるInAlAsドットの励起子及び核スピン偏極」, 第67回応用物理学会学術講演会 31p-RE-7 (2006年8月29日-9月1日, 立命館大学).

78. 鍛冶怜奈, 椋元崇, 笹倉弘理, 足立智, 武藤俊一, 熊野英和, 末宗幾夫, 「励起子微細構造をもつ単一InAlAs量子ドットでの核スピン偏極」, 第67回応用物理学会学術講演会 31p-RE-8 (2006年8月29日-9月1日, 立命館大学).
79. 阿部慎司, 笹倉弘理, 足立智, 武藤俊一, 「STIRAPによるInAlAs結合量子ドット内での光支援トンネリング」, 第67回応用物理学会学術講演会 31p-RE-6 (2006年8月29日-9月1日, 立命館大学).
80. 西田裕士, 足立智, 笹倉弘理, 萱森壮一, 菊池健太, 武藤俊一, 末宗幾夫, 「アニーリングによる自己集合InAs量子ドット発光の短波長化」, 第52回応用物理学関係連合講演会 30a-ZM-6 (2005年3月29日-4月1日, 埼玉大学).
81. 横井伴紀, 足立智, 笹倉弘理, 椋本崇, 武藤俊一, 宋海智, 廣瀬真一, 臼杵達哉, 「自己集合半導体ドットでの大きなオーバーハウザーシフトの観測」, 第52回応用物理学関係連合講演会 29a-V-5 (2005年3月29日-4月1日, 埼玉大学).
82. 綿貫丈雄, 足立智, 笹倉弘理, 武藤俊一, 宋海智, 竹本一矢, 臼杵達哉, 「自己集合半導体ドットのスピン緩和時間の四光波混合による観測」, 第52回応用物理学関係連合講演会 31a-V-18 (2005年3月29日-4月1日, 埼玉大学).
83. 熊野英和, 木村聡, 遠藤礼暁, 末宗幾夫, 横井伴紀, 笹倉弘理, 足立智, 武藤俊一, 宋海智, 廣瀬真一, 臼杵達哉, 「InAlAs単一量子ドットの顕微PL分光と単一光子発生」, 第52回応用物理学関係連合講演会 31a-V-16 (2005年3月29日-4月1日, 埼玉大学).
84. 木村聡, 熊野英和, 遠藤礼暁, 末宗幾夫, 笹倉弘理, 足立智, 武藤俊一, 宋海智, 廣瀬真一, 臼杵達哉, 「CW励起での光子antibunchingの励起光強度依存性」, 第52回応用物理学関係連合講演会 31a-V-17 (2005年3月29日-4月1日, 埼玉大学).
85. 萱森壮一, 笹倉弘理, 西田裕士, 足立智, 臼杵達哉, 中田義昭, 「In-flush法を用いたInAs量子ドットの発光エネルギー制御」, 第52回応用物理学関係連合講演会 30a-ZM-5 (2005年3月29日-4月1日, 埼玉大学).
86. 石黒哲郎, 阿部泰裕, 戸田泰則, 足立智, 星野勝之, 荒川泰彦, 「四光波混合分光法を用いた一軸歪GaN薄膜における光学異方性の観測」, 第52回応用物理学関係連合講演会 30a-L-4 (2005年3月29日-4月1日, 埼玉大学).
87. 谷津直樹, 笹倉弘理, 足立智, 武藤俊一, 熊野英和, 末宗幾夫, 廣瀬真一, 臼杵達哉, 「単一InAlAs量子ドットの発光寿命の温度依存性」, 第66回応用物理学会学術講演会 9p-W-3 (9月7~11日, 徳島大学).
88. 熊野英和, 木村聡, 遠藤礼暁, 末宗幾夫, 横井伴紀, 笹倉弘理, 足立智, 武藤俊一, 宋海智, 廣瀬真一, 臼杵達哉, 「光子相関測定を用いた量子ドットにおける荷電励起子発光の同定」, 第66回応用物理学会学術講演会 10p-W-4 (9月7~11日, 徳島大学).
89. 木村聡, 熊野英和, 末宗幾夫, 笹倉弘理, 足立智, 武藤俊一, 宋海智, 廣瀬真一, 臼杵達哉, 「量子ドットからの単一光子発生に関する多励起子効果の影響」, 第66回応用物理学会学術講演会 9p-W-4 (9月7~11日, 徳島大学).
90. 椋元崇, 足立智, 横井伴紀, 笹倉弘理, 武藤俊一, 「自己集合InAlAs量子ドットにおける電子と正孔のg因子の観測」, 第66回応用物理学会学術講演会 9p-W-2 (9月7~11日, 徳島大学).
91. 石黒哲郎, 戸田泰則, 足立智, 有田宗貴, 星野勝之, 荒川泰彦, 「四光波混合分光法によるGaN励起子スピン緩和の観測」, 第66回応用物理学会学術講演会 11a-X-4 (9月7~11日, 徳島大学).
92. 足立智, 「酸化亜鉛における非線形光学分光」, II-VIワークショップ, (2005年3月3-4日, 北海道登別市第一滝本館).
93. 横井伴紀, 足立智, 笹倉弘理, 武藤俊一, 宋海智, 臼杵達哉, 廣瀬真一, 「自己集合InAlAs量子ドットでのゼーマン分裂幅の励起偏光依存性」, 第65回応用物理学学術講演会 2p-ZK-9 (2004年9月1-4日, 東北学院大学).
94. 羽豆耕治, 宗田孝之, 鈴木克生, 足立智, 秩父重英, 「ZnOにおける四光波混合シグナルの温度依存性」, 日本物理学会2003年秋季大会 20a-WB-2 (2003年9月20-23日, 岡山大

学).

95. 綿貫丈雄, 梅村雄二, 足立智, 笹倉弘理, 辻見裕史, 八木駿郎, 武藤俊一, 「四光波混合法による量子ドットのスピン緩和の観測」, 日本物理学会2003年秋季大会 22p-PSA-68 (2003年9月20-23日, 岡山大学).
96. 宮澤俊之, 宋海智, 廣瀬真一, 竹本一矢, 臼杵達哉, 高津求, 横山直樹, 笹倉弘理, 足立智, 武藤俊一, 「自己形成InAlAs/AlGaAs単一量子ドットの光学特性」, 第64回応用物理学会学術講演会 1p-ZF-3 (2003年8月30日-9月2日, 福岡大学).
97. 笹倉弘理, 足立智, 武藤俊一, 宋海智, 宮澤俊之, 臼杵達哉, 中田義昭, 「非対称結合量子ドットにおける励起子スピン緩和の観測」, 第64回応用物理学会学術講演会 31p-K-13 (2003年8月30日-9月2日, 福岡大学).

ポスター発表 (国内会議 5 件, 国際会議 45 件)

1. M. Ohno and K. Yoh “Micromagnetic simulation of magnetization behavior in Fe thin film wire”, 2007 RCIQE International Seminar on “Advanced Semiconductor Materials and Devices (February 8-9, 2007, Sapporo, Japan).
2. S. Kashiwada and K. Yoh “Single electron measurements of a self-assembled InAs quantum dot embedded in Inverted HEMT structure”, 2007 RCIQE International Seminar on “Advanced Semiconductor Materials and Devices (February 8-9, 2007, Sapporo, Japan).
3. T. Matsuda, M. Ohno and K. Yoh, “Band-gap Engineering of enhanced spin-orbit interactions in InGaAs/AlGaAs heterostructures for Datta-Das spin transistor”, Device Research Conference (University of Notre Dame, Indiana, U.S.A., June 20- 22, 2007).
4. M. Ohno and K. Yoh, “Time-resolved and space-resolved Monte-Carlo analysis on spin relaxation anisotropy in InAs heterostructure”, International Conference on Electronic Properties of Two-dimensional systems: EP2DS (Genova, Italy, July 15-20, 2007).
5. S. Kashiwada and K. Yoh “Single electron charging measurements of a self assembled InAs quantum dot embedded in inverted HEMT structure”, International Conference on Modulated Semiconductor Structures: MSS13 (Genova, Italy, July 15-20, 2007).
6. S. Adachi, Y. Toda, T. Ishiguro, K. Hoshino, “Biexciton binding energy of GaN films grown on various substrates”, 7th International Conference on Nitride Semiconductors: ICNS7 (Sept. 16-21, 2007 Las Vegas, Nevada, USA).
7. Y. Toda, S. Adachi, T. Ishiguro, K. Tadatomo, K. Hoshino, “Sensitive optical probe for uniaxial strain in GaN epitaxial films”, 7th International Conference on Nitride Semiconductors: ICNS7 (Sept. 16-21, 2007 Las Vegas, Nevada, USA).
8. H. Nishida, S. Kayamori, H. Sasakura, S. Adachi, S. Muto, and I. Suemune, “Time-resolved photoluminescence in annealed self-assembled InAs quantum dots”, 4th International Conference on Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductors: PASPS4 (August 15-18, 2006, Sendai, Japan).
9. H. Sasakura, T. Yokoi, S. Adachi, S. Muto, H. Z. Song, S. Hirose, and M. Takatsu, “Optical manipulation of exciton spin in a single self-assembled quantum dot”, 28th International Conference on Physics of Semiconductors: ICPS28 (July 24-28, 2006, Vienna, Austria).
10. H. Sasakura, S. Adachi, and S. Muto, “Optical manipulation of exciton spin in a single self-assembled quantum dot”, 4th International Conference on Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductors: PASPS4 (August 15-18, 2006, Sendai, Japan).
11. K. Yamaguchi, T. Ishiguro, Y. Toda, S. Adachi, K. Hoshino, and K. Tadatomo, “Time-resolved four-wave mixing studies of excitons in GaN”, International Workshop on Nitride Semiconductor: IWN06 (October 26-30, 2006, Kyoto, Japan).
12. S. Abe, H. Sasakura, S. Adachi, S. Kayamori, and S. Muto, “Stimulated Raman adiabatic passage for photon-assisted tunneling in a double quantum dot”, 4th International Conference on Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductors: PASPS4 (August 15-18, 2006, Sendai, Japan).
13. T. Ishiguro, Y. Toda, S. Adachi, K. Hazu, T. Sota, and S.F. Chichibu, “Coherent manipulation of A and B excitons in GaN”, International Workshop on Nitride Semiconductor: IWN06

- (October 26-30, 2006, Kyoto, Japan).
14. T. Ishiguro, E. Sasaki, Y. Toda, S. Adachi, K. Hazu, T. Sota, and S.F. Chichibu, "Polarization control of excitons in bulk GaN", 7th International Conference on Excitonic Process in Condensed Matter:EXCON7 (June 26-30, 2006, Winston-Salem, NC, USA).
 15. T. Mukumoto, T. Yokoi, S. Adachi, H. Sasakura, S. Muto, H. Kumano, and I. Suemune, "Optically pumped nuclear polarization in a single self-assembled InAlAs quantum dot", 4th International Conference on Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductors: PASPS4 (August 15-18, 2006, Sendai, Japan).
 16. S. Adachi, T. Watanuki, H. Sasakura, S. Muto, "Experimental studies of spin and orbital coherences in self-assembled quantum dots", First International Symposium on Nanometer-scale Quantum Physics (January 26-28, 2005, Tokyo, Japan).
 17. S. Adachi, Y. Toda, "Four-wave mixing measurements of biexcitons in uniaxially-strained GaN films", 6th International Conference of Nitride Semiconductors: ICNS6 (August 29 - September 3, 2005, Bremen, Germany).
 18. Y. Toda, S. Adachi, T. Ishiguro, T. Mukai, K. Hoshino, Y. Arakawa, "Degenerate four-wave mixing spectroscopy of GaN films on various substrates", 6th International Conference of Nitride Semiconductors: ICNS6 (August 29 - September 3, 2005, Bremen, Germany).
 19. Y. Toda, S. Adachi, T. Ishiguro, M. Arita, Y. Arakawa, "Transient pump-probe measurements for polarized excitons in strained GaN epitaxial layers", 6th International Conference of Nitride Semiconductors: ICNS6 (August 29 - September 3, 2005, Bremen, Germany).
 20. G. Sasikala, I. Suemune, H. Kumano, and K. Uesugi, Y. Nabetani, and T. Matsumoto, "Improved Structural Homogeneities and Luminescence Efficiencies of InAs Quantum Dots with Nitridation on Dots Surfaces", 8th International Symposium on Contemporary Photonics Technology (January 12-14, 2005, Tokyo, Japan).
 21. H. Kumano and I. Suemune, "Formation of Single Localized States in ZnCdS Alloys Semiconductor and Their Time-resolved Properties", 1st International Symposium on Nanometer-scale Quantum Physics (January 26-28, 2005, Tokyo, Japan).
 22. K. Uesugi, W. Zhang, and I. Suemune, "Bright Luminescence from InAs/GaAs Open Quantum Dots at Room Temperature, Dependence on GaAs Surface Reconstructions", 23rd International Conference on Defects in Semiconductors, ICDS-23 (July 24-29, 2005, Awaji Island, Hyogo, Japan).
 23. H. Kumano, S. Kimura, M. Endo, I. Suemune, H. Sasakura, S. Adachi, S. Muto, H. Z. Song, S. Hirose, and T. Usuki, "Correlations and Anti-bunching of a Charged Exciton State and Exciton and Biexciton States in a Single Quantum Dot", Modulated Semiconductor Structure: MSS12 (July 10-15, 2005, Albuquerque, USA).
 24. M. Ebihara, I. Suemune, H. Kumano, T. Nakashita, and H. Machida, "Formation of CdO Dots on Atomically Flat ZnO Surfaces", 12th International Conference on II-VI Compounds (September 12-16, 2005, Warsaw, Poland).
 25. K. Yoh, K. Yuasa, H. Nakazato, "Quantum entanglement formation by spin-blockade measurements in a spin field-effect transistor structure embedded with quantum dots", 1st International Symposium on Nanometer-scale Quantum Physics (January 26-28, 2005, Tokyo, Japan).
 26. I. Suemune, S. Ganapathy, P. Thilakan, K. Uesugi, and H. Kumano, "III-V-N-Related Semiconductor Quantum Nanostructures for Optical-fiber Communications", 2nd Asia-Pacific Conference of Transducers and Micro-Nano Technology (July 4-7, 2004, Sapporo, Japan).
 27. M. Ebihara, H. Kumano, and I. Suemune, "Growth of CdO Quantum Dots on Zn-polar ZnO Substrates", 6th RIES-Hokudai Symposium (December 4-5, 2004, Sapporo, Japan).
 28. S. Kimura, H. Kumano, and I. Suemune, "Study of Enhancement of Photon Extraction Efficiency from Single Microsphere", 6th RIES-Hokudai Symposium (December 4-5, 2004, Sapporo, Japan).
 29. S. Muto, S. Adachi, and H. Sasakura, "Quantum data processing using electron spins in quantum", International Symposium on Quantum Info-Communications and Related Quantum Nanodevices, Tokyo (March 2004).
 30. T. Watanuki, S. Adachi, H. Sasakura, S. Muto, "Long spin relaxation in self-assembled InAlAs quantum dots observed by heterodyned four-wave mixing", Extended Abstracts of The 10th

- Symposium on Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductors: PASPS10 (June 10-11, 2004, Tokyo, Japan).
31. T. Yokoi, S. Adachi, H. Sasakura, S. Muto, "Polarization-dependent shift in excitonic Zeeman splitting of self-assembled InAlAs quantum dots", Extended Abstracts of The 10th Symposium on Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductors: PASPS10 (June 10-11, 2004, Tokyo, Japan).
 32. S. Adachi, T. Watanuki, H. Sasakura, S. Muto, "Observation of spin relaxation in self-assembled InAlAs quantum dots by using four-wave mixing technique", The 4th International Conference on Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures, (June 29 - July 3 2004, St. Petersburg, Russia).
 33. S. Adachi, K. Hazu, T. Sota, S. F. Chichibu, "Recombination dynamics of bound excitons in ZnO investigated by time-resolved photoluminescence", 6th International Conference on Excitonic Processes in Condensed Matter: EXCON6 (July 6 - 9, 2004, Cracow, Poland).
 34. K. Hazu, S. Adachi, T. Sota, S. F. Chichibu, "Measurements of exciton-polariton dynamics in ZnO by using nonlinear spectroscopic techniques", 6th International Conference on Excitonic Processes in Condensed Matter: EXCON6 (July 6 - 9, 2004, Cracow, Poland).
 35. T. Watanuki, S. Adachi, H. Sasakura, and S. Muto, "Exciton recombination and spin relaxation in quantum dots observed by transient grating four wave mixing", 6th International Conference on Excitonic Processes in Condensed Matter: EXCON6 (July 6 - 9, 2004, Cracow, Poland).
 36. K. Yoh., H. Ohno, Y. Katano, K. Sueoka, K. Mukasa, and M. E. Ramsteiner, "High efficiency spin injection from a ferromagnetic metal into a semiconductor through an Fe/InAs junction", International Conference on Modulated Semiconductor Structures: MSS-11 (July 14-18, 2003, Nara, Japan).
 37. S. Adachi, S. Maki, O. Ikeuchi, H. Sasakura, and S. Muto, "Spin-diffracted four-wave mixing measurements of exciton spin relaxation and population transfer to dark states", SPIE Ultrafast Phenomena in Semiconductors VII in Photonic West 2003 (January 25-31, 2003, San Jose, California, USA).
 38. S. Adachi, S. Sasakura, S. Muto, K. Hazu, T. Sota, S. F. Chichibu, G. Cantwell and D. B. Eason, D. C. Reynolds, and C. W. Litton, "Strong heterobiexciton effects in bulk ZnO", Extended Abstracts of The 9th Symposium on Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductors: PASPS9 (11-12 June, 2003, Tokyo, Japan).
 39. H. Sasakura, S. Adachi, S. Muto, H. Song, T. Miyazawa, and T. Usuki, "Spin depolarization via tunneling effects in asymmetric double quantum dot structure", Extended Abstracts of The 9th Symposium on Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductors: PASPS9 (11-12 June, 2003, Tokyo, Japan).
 40. H. Sasakura, S. Adachi, S. Muto, H. Song, T. Miyazawa, and Y. Nakata, "Carrier tunneling in asymmetric coupled quantum dots", Second International Conference and School on Spintronics and Quantum Information Technology (August 4-6, 2003, Brugge, Belgium).
 41. H. Sasakura, S. Adachi, S. Muto, H. Song, T. Miyazawa, and T. Usuki, "Spin depolarization via tunneling effects in asymmetric quantum dot structure", 2003 International Conference on Solid State Devices and Materials (September 16-18, 2003, Tokyo, Japan).
 42. H. Sasakura, S. Adachi, S. Muto, H. Song, T. Miyazawa, and Y. Nakata, "Carrier tunneling in asymmetric coupled quantum dots", The 11th International Conference of Modulated Semiconductor Structures: MSS11 (July 14-18, 2003, Nara, Japan).
 43. S. Adachi, K. Hazu, T. Sota, S. F. Chichibu, G. Cantwell, D. B. Eason, D. C. Reynolds and C. W. Litton, "Biexciton formation and exciton-exciton correlation effects in bulk ZnO", The 13th International Conference on Nonequilibrium Carrier Dynamics in Semiconductors: HCIS13 (July 28-31, 2003, Modena, Italy).
 44. H. Sasakura, S. Adachi, S. Muto, T. Usuki, and M. Takatsu, "Coulomb interaction in asymmetric triple-coupled quantum dots", The 13th International Conference on Nonequilibrium Carrier Dynamics in Semiconductors: HCIS13 (July 28-31, 2003, Modena, Italy).
 45. S. Adachi, H. Sasakura, S. Muto, K. Hazu, T. Sota, S. F. Chichibu, and T. Mukai, "Exciton-exciton correlation effects on FWM in GaN", The 5th International Conference on Nitride Semiconductors: ICNS5 (May 25-30, 2003, Nara, Japan).
 46. 定 昌史, 林 雄二郎, 熊野英和, 末宗幾夫, 笹倉弘理, 足立 智, 武藤俊一, S

- Sraprapapich, C.W. Tu, 「InAs/GaAs 量子リング構造の単一分光測定」,第 68 回応用物理学会学術講演会 6a-N-18 (2007 年 9 月 4 日-9 月 8 日, 北海道工業大学).
47. 鍛冶怜奈, 笹倉弘理, 足立 智, 武藤俊一, 末宗幾夫, 「単一 InAlAs 量子ドットでの核スピン偏極の双安定特性」,第 68 回応用物理学会学術講演会 6a-N-13 (2007 年 9 月 4 日-9 月 8 日, 北海道工業大学).
48. 笹倉弘理, 足立 智, 鍛冶怜奈, 武藤俊一, 末宗幾夫, 「単一 InAlAs 量子ドットにおける核磁場形成時間」,第 68 回応用物理学会学術講演会 6a-N-14 (2007 年 9 月 4 日-9 月 8 日, 北海道工業大学).
49. 小林 創, 熊野英和, 末宗幾夫, 笹倉弘理, 足立 智, 武藤俊一, 「単一量子ドット起源の円偏光単一光子発生及びその励起波長依存性」,第 68 回応用物理学会学術講演会 6a-N-7 (2007 年 9 月 4 日-9 月 8 日, 北海道工業大学).
50. 柏田沙織, 陽 完治, 「量子ドット積層 HEMT 構造でのスピンのブロッケード測定におけるスピン緩和」, 第 68 回応用物理学会学術講演会 5a-N-2 (2007 年 9 月 4 日-9 月 8 日, 北海道工業大学).

(4)特許出願

①国内出願 (5 件)

発 明 者 : 武藤 俊一

発明の名称 : 光子-スピン量子ビット変換方法及び変換装置 特願2004-337992

出 願 人 : 国立大学法人北海道大学

出 願 日 : 平成 16 年 11 月 22 日

発 明 者 : 陽 完治

発明の名称 : 超高感度画像検出装置およびその製造方法 特願 2005-020265

出 願 人 : 国立大学法人北海道大学

出 願 日 : 平成 17 年 1 月 27 日

発 明 者 : 陽 完治

発明の名称 : 核スピンメモリ回路およびその製造方法 特願 2005-080626

出 願 人 : 国立大学法人北海道大学

出 願 日 : 平成 17 年 3 月 18 日

発 明 者 : 戸田 泰則, 足立 智

発明の名称 : 光計測評価方法及び光計測評価装置 特願2004-331123,

出 願 人 : 国立大学法人北海道大学

出 願 日 : 平成 16 年 11 月 16 日

発 明 者 : 戸田泰則, 足立 智, 山口一春

発明の名称 : 位相干渉計測手法及び位相干渉計測装置 特願2006-128277

出 願 人 : 国立大学法人北海道大学

出 願 日 : 平成 18 年 5 月 2 日

その他 0 件

②海外出願 (1 件)

1. “光計測評価方法及び光計測評価装置”, 戸田 泰則・足立 智, 国立大学法人北海道大学, 平成 17 年 11 月 8 日, PCT/JP2005/020410

その他 0 件

(5)受賞等

- ①受賞 応用物理学会奨励賞、横井伴紀, 足立智, 笹倉弘理, 椋元崇, 武藤俊一, 宋海智, 廣瀬真一, 臼杵達哉, 熊野英和, 末宗幾夫, 「自己集合量子ドットでのオーバーハウザーシフトの観測」

②新聞報道 なし

③その他 なし

(6)その他特記事項 なし

7 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
平成 15 年 2 月 21 日	チーム内 ミーティング	北大工学部 内 CREST 室	4	北大グループ研究計画打 ち合わせ
4 月 11 日	チーム内 ミーティング	北大工学部 内 CREST 室	4	北大グループ研究計画打 ち合わせ
4 月 18 日	チーム内 ミーティング	北大工学部 内 CREST 室	2	北大グループ研究計画打 ち合わせ
5 月 1 日	チーム内 ミーティング	富士通厚木 分室	6	富士通グループとの打ち 合わせ
7 月 9 日	チーム内 ミーティング	北大工学部 内 CREST 室	4	北大グループ研究計画打 ち合わせ
平成 16 年 1 月 7 日	チーム内 ミーティング	北大工学部 内 CREST 室	4	北大グループ研究計画打 ち合わせ
5 月 10 日	チーム内 ミーティング	北大工学部 内 CREST 室	4	北大グループ研究計画打 ち合わせ
7 月 2 日	チーム内 ミーティング	北大工学部 内 CREST 室	3	北大グループ研究計画打 ち合わせ
8 月 6 日	チーム内 ミーティング	富士通厚木 分室	4	富士通グループとの打ち 合わせ

10月1日	チーム内 ミーティング	富士通厚木 分室	4	富士通グループとの打ち 合わせ
10月1日	チーム内 ミーティング	富士通厚木 分室	4	富士通グループとの打ち 合わせ
11月8日	チーム内 ミーティング	北大工学部 内 CREST室	4	北大グループ研究計画打 ち合わせ
平成17年 4月13日	チーム内 ミーティング	ナノテクセ ンター末宗 研会議室	6	末宗, 武藤グループ打ち合 わせ
7月6日	チーム内 ミーティング	北大工学部 内CREST室	4	北大グループ研究計画打ち 合わせ
10月12日	チーム内 ミーティング	北大工学部 内CREST室	4	研究計画打ち合わせ
10月28日	チーム内 ミーティング	北大工学部 内CREST室	4	研究計画打ち合わせ
11月25日	チーム内 ミーティング	北大工学部 内CREST室	4	研究計画打ち合わせ
平成18年 1月5日	チーム内 ミーティング	北大工学部 内CREST室	4	研究計画打ち合わせ
平成18年 12月12日～ 13日	Workshop on Photons and Spins~ Their Generation, Manipulation , and Detection ~	北海道大学 創成科学研究棟5階大 会議室)	65	光子とスピンの生成と操作, 検 出に関する最先端の研究者を 招き, 研究の現状について講演 していただくと共に, CREST の現状について説明し, 今後に ついての助言を頂く.
平成18年 12月18日	チーム内 ミーティング	北大工学部 内CREST室	4	研究計画打ち合わせ
平成19年 7月3日	チーム内 ミーティング	北大工学部 内CREST室	4	研究計画打ち合わせ
平成19年 8月22日	チーム内 ミーティング	富士通厚木 分室	4	富士通グループとの打ち 合わせ

8 結び



量子ドット作製装置 (MBE 装置) のクリーンルーム (北大電子科学研究所ナノテクノロジー研究センター) への導入風景 (H15 年 12 月 22 日、クリスマス前の 2 コマ)。

単一光子光源として InAlAs 量子ドットを用いた光子源を開発、高感度の光子検出が可能な 0.7-0.8 ミクロンでのオンデマンド光子発生の可能性を確認している。また予期しない成果として 1990 年から提案されていた Datta-Das 型スピントランジスタを実現した。InAlAs 量子ドットの荷電励起子を選択励起することにより、ゼロ磁場で 65% の円偏光度を実測した。世界最高の特性であると共に、光子-電子スピンの量子情報保存変換の可能性が示された。また核磁場を用いた量子ビットの変換手法を提案し、InAlAs 量子ドットの実験により十分な核磁場の大きさが得られ、これが制御可能であることを示したことは世界初であった。更に核分極のスイッチングを実測し、データを分析した結果、変換に必要な電子のエネルギー構造が自動的に、したがって安定して実現していることも世界で初めて見出した。ゼロ磁場で円偏光度のデータと合わせるとこの条件で量子ビット変換が可能であることを強く示唆すると考えられる。以上は個々の要素に関する成果であるが、単光子光源も含めてすべて InAlAs 量子ドットで実現したことは、すべてを共振器の中に集積化できる可能性を示している。量子情報処理ネットワークの基礎技術を開発したと考えている。

特に、核磁場については、それまでは、量子ドットといっても量子井戸の界面での凹凸を用いた研究が殆どであった。InAlAs 自己集合量子ドットにおいて光照射により大きな核磁場が形成できること、またその大きさが照射する光の円偏光度により制御できることを示したことは、その後の自己集合量子ドットでの核磁場研究の世界的な流れを作ったものと自負している。核分極スイッチングに関するシェフィールド大学の報告 (A. I. Tartakovskii et al., Phys. Rev. Lett. **98** 026806 (2007)) もこの流れの中にある。更に科学的インパクトとして、核分極スイッチング時に電子スピン分極も同時にスイッチングをすることを見出したことにより、電子スピンの分極は核スピンに無関係に決まるという従来の定説を覆したと考えている。

成果発表に関しても、全体として欧文誌掲載 84 件 (うち Applied Physics Letters 7 件、Physical Review B (Rapid Communication) 2 件)、国際会議招待講演 23 件 (うち 2 件は基調講演) は十分な成果と考えられる (他に、国内招待講演 7 件、国際会議口頭発表 52 件、国内会議口頭発表 45 件、国際会議ポスタ 45 件、国内会議ポスタ 5 件)。

以上のように研究参加者の努力により、材料サイドの研究として見た場合、十分な成果は出ているが、研究の性格から Nature, Science への掲載を期待できるテーマと考えられ、現時点ではそれが無いのは寂しく感じる。これは当初、中継器の試作に拘泥したた

めに時間を節約するため外部発表を軽視したせいである。中期以降は、個々の要素技術に分割して研究を進める許可を得たので、学術的な成果も出るようになった。

最後になるが、量子演算の筐倉スキーム実証を本 CREST 内で達成できなかったのは心残りである。これに限らず総じて研究所要時間の見積もりが甘かった部分があり、今後蓄積したデータ、設備等を活かして当初の目標を達成して行きたいと考えている。