

「情報社会を支える新しい高性能情報処理技術」

平成14年度採択研究代表者

武藤 俊一

(北海道大学大学院工学研究科 教授)

## 「量子情報処理ネットワーク要素技術」

### 1. 研究実施の概要

本研究では、代表者らが独自に提案している量子ドットの電子スピンを用いた量子演算の実験的検証を行うとともに、その光量子情報通信との整合性を検証し、量子情報処理ネットワークの要素技術を開発することにより実現の可能性を実証する。中心となるのは量子情報の光中継器の試作であり、これと並行して単光子光源の開発を行う。

平成16年度までに電子スピンを用いた量子演算の実証、光子と電子スピンとのQubit変換手法の確立、 $1.55\mu$ 帯量子ドットの波長制御技術の確立等を目指している。

#### 量子演算：

量子演算についてはスピンのフォトン支援トンネルとそのクーロンブロックイドを用いた手法の実証を目的としている。まず結合量子ドット構造を作製し、スピン緩和時間を測定した。距離の長い20nmの試料では、3nsという従来に比して極めて長いスピン緩和時間が得られた。距離の短い試料では、スピン緩和時間が著しく短くなったが、これはトンネルに伴いスピンの反転する効果によると思われる。この悪影響を抑止する手法についても見通しをつけた。

スピンのデコヒーレンスに関してスピン回折4光波混合による量子ドットの計測の検討を始めた。ヘテロダイン検波による信号増幅を行った結果、スピン緩和によると思われる信号を検出した。

12月下旬に本プロジェクト専用の結晶成長装置を導入し、すでに量子ドット結晶の成長を開始した。今後、この装置を用いて結合量子ドットを成長し、フォトン支援トンネルとスピン操作の研究を行う。

#### Qubit変換：

キュービットの変換については核スピン分極による局所的静磁場形成の検討を行っている。

メサ加工により量子ドットの数を減らした試料で単一ドットからの急峻な発光ピークを確認した。更にこれに磁場を印加したところゼーマン分裂によるピークの分裂を確認した。

また微小ながら核スピン分極による磁場形成によるとみられるシフトを観測した。今後、このシフトの制御性の検討を行う。

長波長帯結合量子ドットの作製・評価：

InAs/GaAs歪量子ドットにGaAs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した。さらに、量子ドット発光波長の系統的なひずみ制御、量子ドット準位間発光の明瞭化と線幅の先鋭化、ならびにドット間結合度のひずみ制御に関する研究を進めた。

光ファイバー—結合量子ドット間の光結合の検討：

光ファイバーと量子ドットを効率よく結合する準備として、SIL (solid immersion lens) による近接場光を用いた量子ドットと測定系との光結合の検討を始め、SILによる～4倍の像拡大、直径100nmのポリスチレン球の蛍光像観測による空間解像度の向上、SIL加工精度と増解像度との関係などを明らかにし、結合量子効率の検討を進めた。

量子情報再生のアルゴリズム及びシステム研究：

量子中継器のためのアルゴリズムおよびシステムの構築を目的としている。各要素技術のスペック検討を理論面から行っている。

高偏極率電子スピンの半導体への注入：

強磁性金属から半導体へのスピン偏極電子の注入により半導体から円偏光を高効率で取り出すことを目的としている。すでにInAsバルク結晶で良好な偏極度を確認している。

今年度はInAsバルク結晶を用いた強磁性金属から半導体へのスピン偏極電子の注入の際の残された問題点を明らかにした。この結果から最適温度でInAs上に強磁性体を成長した場合、正しく基板のバンド構造の影響を差し引くことにより40%程度のスピン偏極率が見積もられた。また、歪InAsを井戸層とする半導体ヘテロ接合の作製を検討し、最適成長条件を見い出した。今後この系でさらに高効率スピン注入実験をすすめる。

## 2. 研究実施内容

本年度は、研究の中核となる結晶成長装置、およびパルスレーザーシステムなどの装置を導入しつつ、既存の設備でも実行可能な研究を推進した。特に、結晶成長については専用装置による成長とともに、臼杵グループおよび末宗グループによる結晶に依存している。

量子演算：

量子演算についてはスピンのフォトン支援トンネルとそのクーロンブロッケイドを用いた手法の実証を目的としている。先ず結合量子ドット構造を作製し、スピンの量子ドット間のトンネルがコヒーレンスに及ぼす影響について実験的検討を行った。小さい量子ドット

トの電子スピンは、大きい量子ドットへフォノンを介したエネルギー緩和によりトンネルすることが可能であり、このことは量子演算に悪影響を与えることが予想される。先ずこの意図しないトンネル（フォノン支援トンネル）の影響を調べるためにドット間の距離を変えた結合量子ドット構造を作製しスピン緩和時間を測定した。距離の長い20nmの試料では、3nsという従来に比して極めて長いスピン緩和時間が得られたが、これは従来と異なりドットの内部にキャリアを励起してスピンの生成と測定のエネルギーを近づけた効果と思われる。距離の短い試料では、スピン緩和時間が著しく短くなったが、これはトンネルに伴いスピンの反転する効果によると思われる。理論的検討により、この悪影響を抑止する手法について見通しをつけた。

スピンのデコヒーレンスに関して共鳴励起（測定波長の光で励起する）のデータを取得するためにスピン回折4光波混合による量子ドットの計測の検討を始めた。量子井戸では実績があるが、量子ドットでは原理的に可能か否かも不明であったが、ヘテロダイナミクスによる信号増幅を行った結果、スピン緩和による信号を検出した。

12月下旬に本プロジェクト専用の結晶成長装置を導入した。これは量子演算の実証、量子テレポーテーションに5-7程度の量子ドットを積層したドット列が必要なためである。層数もさることながら、演算動作のためには単に成長した結晶を評価するだけでなく、評価結果に基づいて成長パラメータ（成長温度、成長層厚、分子線強度、分子線の切り替え、成長中断時間など）を修正して成長するといった繰り返しが必要となる。先ず単一の量子ドット層について成長パラメータの条件だしを行った。

#### Qubit変換：

キュービットの変換については14年度に引き続き核スピン分極による局所的静磁場形成の検討を行う。メサ加工により量子ドットの数を減らした試料を富士通で作製し、北大で計測したところ単一ドットからの急峻な発光ピークを確認した。更にこれに磁場を印加したところゼーマン分裂によるピークの分裂を確認した。核スピン分極による磁場形成は、円偏光励起による発光ピークのシフトとして観測される。微小ながら、これによるシフトを観測した。

#### 長波長帯結合量子ドットの作製・評価：

InAs/GaAs歪量子ドットに導入したGaNAs歪補償層の窒素組成を変えて、量子ドット発光波長を光通信用1.55ミクロン帯まで系統的に制御することが可能となった。さらにひずみ制御によって、従来よりも量子ドット準位間発光の明瞭化と線幅の先鋭化が出来ることを示した。同時に量子ドットの発光量子効率が約5倍まで増大し、ひずみ制御によって量子ドットの高品質化が達成できることを示した。また量子ドット間の結合度を精密に制御するために、反射高エネルギー電子線回折における強度振動を利用した一原子層ごとの精密積層構造の作製を可能にした。これを用いて今後量子ドット間の結合度制御をより精密化する。

光ファイバー—結合量子ドット間の光結合の検討：

1 ミクロン以下の領域を測定できるマイクロPL測定系を用いて、単一の量子ドット（単一量子状態）からの発光を分離して測定することが出来た。これと並行して、光ファイバーと量子ドットを効率よく結合する準備として、SILによる近接場光を用いた量子ドットと測定系との光結合の検討を始め、SILによる～4倍の像拡大、直径100nmのポリスチレン球の蛍光像観測による空間解像度の向上、SIL加工精度と増解像度との関係などを明らかにし、結合量子効率の検討を進めた。

量子情報再生のアルゴリズム及びシステム研究：

富士通白杵グループでは量子中継器のためのアルゴリズムおよびシステムの研究に加え、武藤グループのための結晶成長と微細加工を行っている。本年度は、武藤グループへの量子ドット作製供給を適時行った。更に単一ドットを取り出すためのメサ加工プロセスも行っている。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。我々は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。この結果は秋の応用物理学会で報告済みであり、詳細な検討を今も続けている。今後更に測定波長帯域を広げて量子ドットの光学評価を行うことが、武藤グループが目標とする量子ドットを作製するために不可欠である。その為の環境構築も今年度後半に行った。来年度から装置の調整を経て量子ドット評価を行えるようにする。また、量子ドット-光伝送路-量子ドットの全系を量子力学的に扱えるようモデル化することが、もう一つの大切な課題であるが、量子ドットの物性評価を通じてアルゴリズムや各要素技術のスペック検討が具体的に可能になる。

半導体への電子スピン注入の高偏極率化：

InAsバルク結晶を用いた強磁性金属から半導体へのスピン偏極電子の注入の際の残された問題点を明らかにした。すなわち、強磁性体薄膜の成長時の基板温度の界面に与える影響、および強磁場下におけるInAsバルク結晶のバンド構造の変化がおよぼす円偏極率への影響である。これらの結果から最適温度でInAs上に強磁性体を成長した場合、正しく基板のバンド構造の影響を差し引くことにより40%程度のスピン偏極率が見積もられた。また、歪InAsを井戸層とする半導体ヘテロ接合の作製を検討し、最適成長条件を見出した。今後この系でさらに高効率スピン注入実験をすすめる。

高スピン注入の候補の一つとしてCoソースを用いた強磁性体と適当なInGaAs混晶を用いることを検討し、室温においても80-90%の高効率のスピン注入が期待できることをみいだした。今後この方向でも実験をすすめる。歪InAsを井戸層とする半導体ヘテロ接合の作製を検討し、最適成長条件を見出した。また、鉄シリサイドなどのハーフメタル材

料などの検討をセカンドソースを利用して進めている。

### 3. 研究実施体制

#### 武藤グループ

- ① 研究分担グループ長：武藤 俊一（北海道大学 大学院工学研究科 量子物理工学専攻、教授）
- ② 研究項目1：結合量子ドットでのゲート動作の実証  
研究項目2：キャビティでの1光子から1電子への量子情報の変換

#### 末宗グループ

- ① 研究分担グループ長：末宗 幾夫（北海道大学 電子科学研究所 光材料研究分野、教授）
- ② 研究項目1：長波長帯結合量子ドットの作製・評価  
研究項目2：光ファイバー - 結合量子ドット間の結合の形成

#### 臼杵グループ

- ① 研究分担グループ長：臼杵 達哉（富士通株式会社 厚木分室、主任研究員）
- ② 研究項目：量子情報再生のアルゴリズム及びシステム研究

#### 陽グループ

- ① 研究分担グループ長：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）
- ② 研究項目：高偏極率電子スピンの半導体への注入

### 4. 主な研究成果の発表（論文発表および特許出願）

#### （1）論文（原著論文）発表

- 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).
- 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).
- 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).
- S. Adachi, H. Sasakura, S. Muto, K. Hazu, T. Sota, SF. Chichibu, and T. Mukai, “Exciton-exciton correlation effects on FWM in GaN”, phys. status solidi (b) 240/2, pp348-351(2003).
- 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 (Brief Report) 68,

pp. 033205/1-4 (2003).

- O. Ikeuchi, S. Adachi, H. Sasakura, S. Muto, “Observation of population transfer to dark exciton states by using spin-diffracted four-wave mixing” , J. Appl. Phys, 93/12, pp9634-9638 (2003)
- 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)
- H. Sasakura, S. Adachi, S. Muto , T. Usuki, M. Takatsu, “Coulomb interaction in asymmetric triple-coupled quantum dots” , Semicond. Sci. Tech. 19, pp. S409-S411(2004)
- 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, pp2110-2113, Vol.43 No.4B(2004),
- S. Ganapathy, X. Q. Zhang, I. Suemune, K. Uesugi, B.-J. Kim, and T.-Y. Seong: “GaNAs as strain compensating layers for 1.55  $\mu\text{m}$  light emission from InAs Quantum Dots” Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 42, No. 9A Part1 (2003) pp.5598-5601.
- 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. Vol. 94, No. 8 (2003) pp. 4871-4875.
- 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. Vol. 83, No. 22 (2003) pp. 4524-4526.
- 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 MOMB E growth of AlAs and related modulated semiconductor structures” Physica E Vol. 21 (2004) pp. 756-760.
- Kanji Yoh, Hiroshi Ohno, Y. Katano, K. Mukasa, “Spin Injection from a Ferromagnetic Electrode into InAs Surface Inversion Layer,” J. Crystal Growth, 251, pp.337-341 (2003).
- Kanji Yoh, Hiroshi 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)
- Kanji Yoh, Hiroshi Ohno, Kazuhisa Sueoka, and Manfred E. Ramsteiner, “Reduced interface reaction during the epitaxial Fe growth on InAs for high efficiency spin injection,” J. Vac. Sci. Technol. B23(3) pp.45-48(2004)

(2) 特許出願  
なし