

「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年度は光子と電子スピンとのQubit変換のための核磁場の形成に成功し、その励起光の円偏光度による制御性を確認することができた。また $1.5\mu\text{m}$ 帯量子ドットの波長制御技術を確立した。一方、量子演算については研究の中核となる結晶成長装置を導入し結合量子ドットを形成したが、またスピントランジスタを試作し、強磁性体から半導体へのスピン注入を電氣的に確認した。

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。フォノン支援トンネルが起こらないように基底状態間のエネルギー差を小さくした結合量子ドット構造を作製しフォトン支援トンネルへの見通しをつけた。

フォトン支援トンネル、スピン回転のための2光子過程について、シミュレーションを行い実験パラメータの抽出を行った。また、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手法を確立した。

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を用いることを検討している。今年度は単一量子ドットからの発光において核磁場形成によるゼーマン分裂のシフトを観測した。さらにこのシフトが量子ドットへ照射する励起円偏光の円偏光度を変化させることにより制御できることを見出した。またこの制御範囲について、当初は $\pm 19\mu\text{eV}$ 程度であったが、励起光の波長を調整することにより $\pm 130\mu\text{eV}$ 程度まで向上させることができた。これは ± 5.2 テスラの強磁場に相当する。

長波長帯結合量子ドットの作製・評価：

昨年度InAs/GaAs歪量子ドットに導入したGaNA歪補償層によって発光波長1.55 μm の波長制御を達成したが、今年度はそのメカニズムについてより明確にした。これと並行して長波長単一量子ドット分光の検討を進めるとともに、これまでに進めてきた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技術を用いて作製した隣接量子ドットを使い、その結合度の光学評価を進めた。

光ファイバー—共振器・量子ドット間の光結合の検討：

昨年度光ファイバー—結合量子ドット間の光結合に関連して、その結合効率を改善するためにソリッドイマルジョンレンズ (SIL) の検討を進めた。その結果、5倍の像拡大を確認し、これに応じた外部入射光の共振器への収束の見通しを得た。ただしSILを用いた結像では背景雑音光が増えてしまい像の明瞭度が劣化してしまうので、今年度はSILを構成するサファイア球の表面反射の抑圧などによって、この課題を解決するとともに、結合効率向上の見通しを示した。さらにより確実に高効率の光結合を実現する方法として、これまで検討を進めてきたマイクロディスクと光導波路を隣接させ、高効率で両者を結合させることを試みた。

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。量子ドットのスピン操作は複雑な物理機構を伴っているため、各要素技術のスペック検討の為、実際に単一ドットの試作を進めて物性の詳細を調べている。今年度はドットの低密度化のための成長条件、および低密度化のメカニズムを調べた。

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。

昨年度までにInAs上に最適温度で強磁性体 (Fe) を成長した場合、基板のバンド構造を考慮することにより注入電子のスピン偏極率が40%程度と見積もられることが分かった。今年度はスピントランジスタを試作することにより、スピン分極した電子が注入されていることを全電氣的に確認した。

2. 研究実施内容

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。15年度は電子のトンネルがLOフォノン放出によって引き起こされる (フォノン支援トンネルによる) 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。この構

造では小さい量子ドットの電子スピンは、大きい量子ドットへLO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る。今年度は本プロジェクト専用の結晶成長装置を用いて2つのドットの大きさ（高さ）を更に精密に制御することによりLOフォノンによる電子スピンのトンネルを抑制し、光パルスでトンネルを制御できる（フォトン支援トンネル）構造の開発を行った。InAs量子ドットにおいて、この条件を満たす結合量子ドットの形成に成功した。

フォトン支援トンネル、スピン回転のために2つの光学遷移を光パルスで制御する「2光子過程」について、STIRAPのシミュレーションを行い実験パラメータの抽出を行った。特に、トンネル、スピン回転ともに、2つの光学過程の遷移の双極子モーメントの値を近づける必要があることがわかった。

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を検討した。これによりエネルギー緩和に伴う電子スピンのデコヒーレンスを排除し、より本質的なデコヒーレンスを抽出できる。ヘテロダイン検波による信号増幅によりスピン緩和による信号を検出し、さらに通常の4光波混合のデータと比較することによりスピン緩和時間を導出した。まだ誤差は大きいものの7 ns程度と、従来よりも遥かに長いスピン緩和時間が得られた（Applied Physics Letters掲載）。今後、更に正孔の影響を除去することにより長いスピン緩和時間、デコヒーレンス時間が得られると思われる。

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を用いる独自の手法を検討している。メサ加工により量子ドットの数を減らした試料での単一ドットからの急峻な発光ピーク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、円偏光励起によるピーク分裂幅の変化として観測される。この変化（オーバーハウザーシフト）を観測し、さらにこのシフトが励起光の円偏光度により、制御可能であることが分かった。この制御範囲は、当初は $\pm 19 \mu\text{eV}$ 程度であった（Physical Review B-Rapid communicationに掲載）。さらに励起光の波長を調整し量子ドットの直下にあるヌレ層にキャリアを生成することにより電子スピンの分極率が従来のバリア励起の場合のほぼ5倍になり、オーバーハウザーシフトも $\pm 130 \mu\text{eV}$ 程度まで向上させることができた（ $89 \mu\text{eV}$ までのデータを図1に示す）。これは ± 5.3 テスラの強磁場に相当する。

Qubit変換におよぼす励起子の交換相互作用の影響について理論的に検討した。交換相互作用エネルギーがオーバーハウザーシフトを上回る場合には、光子Qubitは電子スピンと正孔スピンの量子もつれ状態を形成し、電子スピンQubitには変換されないことがわかった。 $\pm 130 \mu\text{eV}$ のオーバーハウザーシフトを観測した量子ドットでは、横磁場を印加した実験で、 $39 \mu\text{eV}$ の交換相互作用エネルギーが実測されており、得られたオーバーハウザーシフトはすでにこの値を上回っている。精度の高い変換には、電子と正孔を分離して

交換相互作用を弱くするなどの対策が必要であることがわかった。

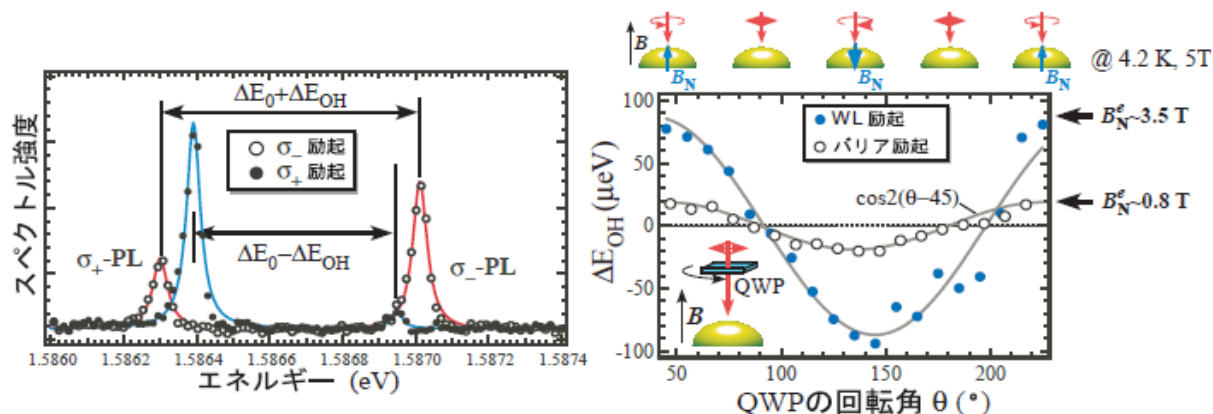


図1. 核磁場によりシフトしたゼーマン分裂スペクトルとシフト量の励起円偏光度による制御

長波長帯結合量子ドットの作製・評価：

ラザフォード後方散乱により，InAs/GaAs歪量子ドットに導入したGa_{0.5}N_{0.5}歪補償層が，InAs格子を表面に垂直に伸ばしてひずみを緩和していることを実験的に確認した。また単一量子ドット分光の検討を進め，単一量子ドットからの発光のストリークカメラによる時間分解測定を可能とし，さらに量子ドットの単一準位から単一光子を発生出来ることを光子相関測定で確認した。現在結合量子ドット間の電子の移動をストリークカメラで確認する準備を進めている。

光ファイバー共振器・量子ドット間の光結合の検討：

昨年度検討を進めたソリッドイマルジョンレンズ（SIL）の半導体との結合をさらに強くする方法として，発光する量子ドット部分を半球面に近い反射ミラー（MgF₂保護膜とAl反射ミラーからなる）で覆い，量子ドットからの取り出し効率を改善する検討を進めた。これにより2倍以上の効率改善を観測した。さらにマイクロディスク型光共振器と高効率の光結合を実現する方法として，光導波路としての光ファイバーを隣接させ，ファイバーを通過する光子と共振器モードの結合が可能であることをまず確認した。現在その高効率化を検討している。

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。昨年度から北大) 武藤グループと協力して単一量子ドット或いは共鳴励起可能な結合量子ドットの作製ができるようになった。富士通で作製した単一量子ドットを用いて、北大グループが核スピン状態の制御や単一光子発生を行なう等の数々の成果が上がっている。このような量子ドットの形成を行うためには、InAsドットの低密度化が重要な条件となる。今年度後半はこれらのドットの

低密度化の諸条件を調べるために、量子ドット形成過程における温度や原料供給量依存性を詳しく調べた。現在、その形成機構に関して解析中である。アルゴリズムや各要素技術のスペック検討の為、量子ドットの物性評価は継続的に続けていく予定である。

半導体への電子スピン注入の高偏極率化：

強磁性金属 (Fe) をソース・ドレイン電極としInGaAs/InAlAsヘテロ接合をチャンネルとするスピントランジスタの試作に成功した。スピントランジスタ動作 (3端子) 評価においてスピン軌道相互作用の直接的検証であるゲート電圧による電流振動が見られた。チャンネル長が3マイクロンのデバイスでは、数%の電流振動が、チャンネル長1マイクロンのデバイスでは数10%の電流振動が観測され、モンテカルロシミュレーションによるスピン輸送の見積もりとほぼ一致した。デバイス特性が不安定なことが懸念材料であるが、これまで測定してきた試料が全て厚さ30 nmの強磁性金属を用いてきたことと、この場合形状によってエッジに小さな磁気ドメインが形成されることと関係していると考えている。単一磁気ドメインの電極を形成し磁気抵抗評価を行えば、統一的なスピン注入、スピン輸送の解釈ができるものと思われる。半導体ヘテロ接合へスピン分極した電子が注入されていることが電氣的に確認された。

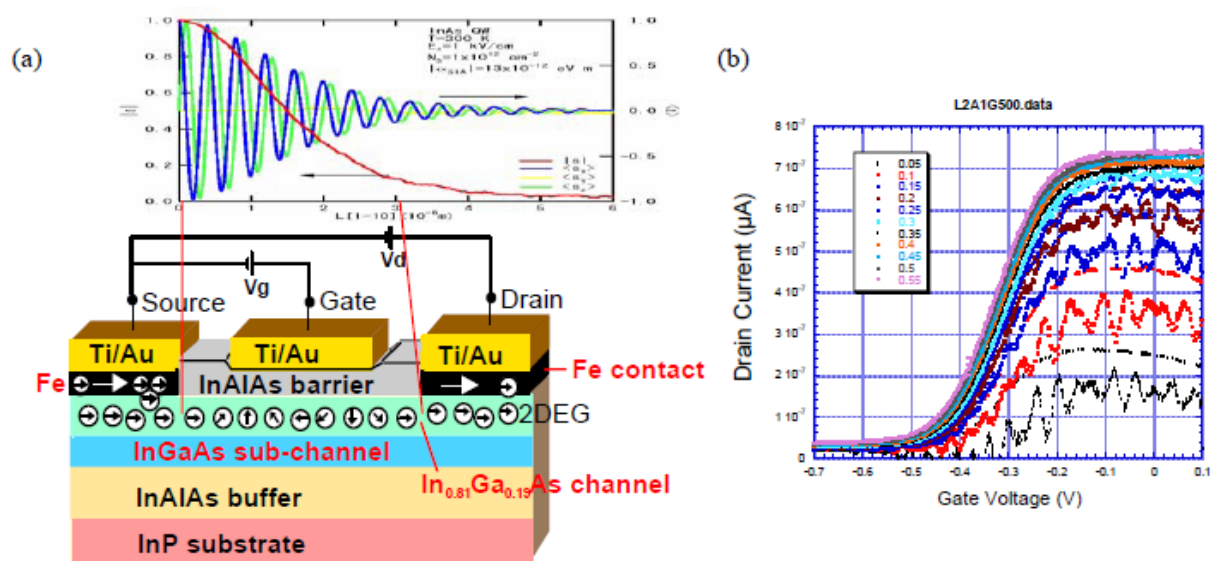


図2. スピントランジスタの模式図とスピンチャンネル中のスピン緩和のシミュレーション結果 (a)、試作したスピントランジスタ (L=1 μ m)での電流の振動 (b)

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 応用物理学専攻、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) 論文発表

- 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. R041307-1/4 (2005).
- 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).
- 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).
- S. Adachi, K. Hazu, T. Sota, SF. 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).
- 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).
- 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).
- 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** (2005), cond-mat/0412559.
 - 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).
 - H. Sasakura, S. Adachi, S. Muto, H. Song, T. Miyazawa, and T. Usuki, "Spin depolarization via tunneling effects in asymmetric double quantum dot structures", *Jpn. J. Appl. Phys.* **43**, pp. 2110-2113 (2004).
 - H. Sasakura, S. Adachi, S. Muto, H. Z. Song, T. Miyazawa, and Y. Nakata, "Carrier tunneling in asymmetric coupled quantum dots", *Physica E* **21**, pp. 511-515 (2004).
 - H. Sasakura, S. Adachi, S. Muto, et al., "Coulomb interaction in asymmetric triple-coupled quantum dots", *Semicond. Sci. Technol* **19**, pp. 409-411 (2004).
 - 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).
 - S. Adachi, "Polarization and wave-vector dependent measurements by four-wave mixing in ZnO: Valence-band ordering and biexcitons", *J. Lumin.* **112**, 34-39 (2005)
 - 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 MOMB growth of AlAs and related modulated semiconductor structures", *Physica E* **21**, pp. 756-760 (2004).
 - 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).
 - 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).
 - 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).
 - Kanji Yoh, Hiroshi 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”, *Semicond. Sci. Technol.* **19**, pp.1-4 (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. B* **22**, pp.1432-1435 (2004).

(2) 特許出願

H16年度特許出願件数：4件（CREST研究期間累積件数：4件）