

「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 17 年度は光子検出量子効率の高いシリコン光子検出器が使える 700~800nm 波長帯で発光する InAlAs 量子ドットを用い、光子相関測定によって InAlAs 量子ドットからこの系では初めての単一光子生成を実証した。一方、量子演算については 2 光子過程によるスピン制御実験を開始しスピン反転の兆候を見出した。またスピントランジスタにおいてスピン制御による電流の双安定動作を実測した。

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クイドを用いた手法の実証を目的としている。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、実験を開始した。特にスピン反転についてその兆候とみられるデータを得た。

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（核磁場）を用いることを検討している。今年度は励起円偏光を切り替えた際の核磁場の応答を調べ、実験の時間分解能（10 s）よりも高速で応答していることを確認した。

長波長帯結合量子ドットの作製・評価：

InAs/GaAs 量子ドットの、より高い制御性を目指し、各種超薄膜周期層を用いてドットを埋め込み、その埋め込みプロセスの解明を進めた。さらにひずみ補償した超薄膜層を用いることによってドットの発光波長が系統的に長波長化することを見出した。

一方、光子検出量子効率の高いシリコン光子検出器が使える単光子源として、700~800nm

波長帯で発光する InAlAs 量子ドットを用い、光子相関測定によって InAlAs 量子ドットからこの系では初めて単一光子生成を実証した。

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、実際に量子ドットの作製を行ないながら物性の詳細を調べている。今年度は InAs ドットに加え、InAlAs ドットの成長および共振器中への埋め込みのための基礎技術の立ち上げを行なった。

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。昨年度までに InAs バルク結晶で良好な偏極度を確認している。また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。本年度はテルビウム／鉄の超格子構造を半導体（GaAs および InAs）上に結晶成長し、面直磁化の形成を確認した。またスピントランジスタにおいて電流の双安定性が現れることを見出し、その原因を理論的に解明した。

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。このためにはスピンのトンネル過程およびスピンの回転を光により制御する技術の立ち上げが必須である。16年度はこれら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。今年度はこれらの実験的検討を開始した。パルスレーザーを用いて量子ドットにスピンを生成する励起系、2光子過程によりこのスピンを光制御する制御系2系の3つの光パルスを単一の量子ドットに集光する光学系を形成した。次にドット間のスピンをトンネル効果により移動する（スピントンネル）は磁場を印加しない形で試みた。スピントンネルの兆候と見られるデータを得られたが、より詳細な検討の結果、これは2つの量子ドットの異なる物性（具体的にはレーザー光の照射強度依存性）を反映したみかけのトンネル現象と解釈できることが分かった。次に、単一量子ドットでのスピン反転の実験を試みた。スピントンネルと異なり磁場を印加する必要があるため、後回しにしていた実験であるが、むしろ1つの量子ドットのみを扱うため見通しが良い可能性もあると判断したためである。この結果、スピン反転の兆候を示すデータを取得できた。しかしながらスピントンネルの例もあり、確認実験を進行中である。特に、励起パルスを排除した際の2パルスのみで起こる現象について精査している。確証が得られれば、固体における初めての STIRAP の実証となり画期的であると共に、量子演算の実証のための大きなステップとなる。

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。昨年度までに単一ドットからの発光のゼーマン分裂の挙動から $89 \mu\text{eV}$ のオーバーハウザーシフト（核磁場によるエネルギーシフト）を確認するとともに量子ドットを励起する光の偏光によりこのシフトを制御できることを確認した。また理論的考察から 100 ps 以上の持続時間をもつ光子 Qubit がスピン Qubit に変換できることを示した。

今年度は、核磁場の励起光変化に対する応答速度を検討した。実験の時間分解能（10 s）以下で核磁場をスイッチングできることがわかり、将来量子中継のデモにおいて律速条件とならないことを確認した。

長波長帯結合量子ドットの作製・評価：

InAs/GaAs 量子ドットのより高い制御性を目指し、各種超薄膜周期層を用いてドットを埋め込み、その埋め込みプロセスの解明を進めた。その結果、埋め込み初期はドット上部は埋まらずに、基板表面に平行に超薄膜層が成長してゆき、ドットの側面から埋まっていくことを確認した。さらにひずみ補償した超薄膜層を用いることによってドットの発光波長が系統的に長波長化することを見いだした。

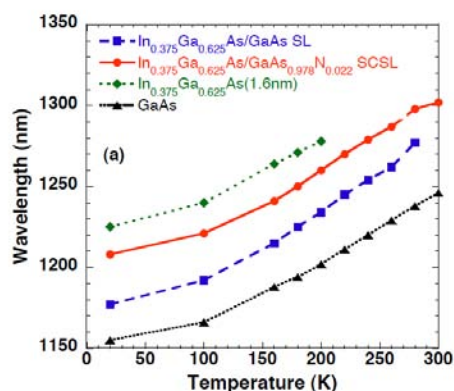


図 1(a)

量子ドット発光波長の温度変化
(埋め込み層依存性)

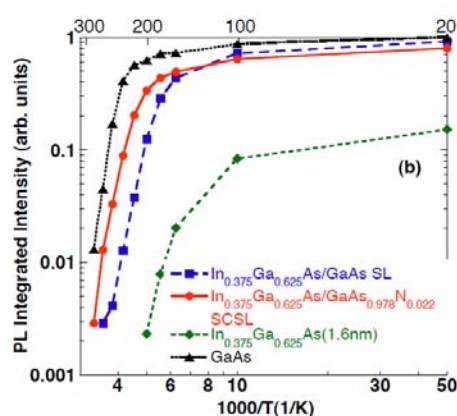


図 1(b)

量子ドット発光強度の温度変化
(埋め込み層依存性)

図 1(a)に示すように、InAs 量子ドットを InGaAs/GaAsN ひずみ補償超格子で埋め込んだ場合、GaAs で埋め込むよりも長波長化が実現できる。InGaAs の薄い層で埋め込んだ場合にも長波長化できることがわかるが、図 1(b)に示すように欠陥の発生により発光効率が低下する。InGaAs/GaAsN ひずみ超格子ではそのような顕著な特性劣化を防ぎながら $1.3\mu\text{m}$ まで長波長化することができることがわかった。

一方、プロジェクトにおける量子演算、Qubit 変換のための単一光子源としては、特に光子検出量子効率の高いシリコン光子検出器が使える 700~800nm 波長帯で発光するものとしては、InAlAs 量子ドットが最も有効であるとの結論に達した。光子-電子スピン変換を効率よく行うために、単一光子源、量子演算共に同じ半導体系で構成することが有利であることから、当面、InAlAs を研究の中心とすることにした。光子相関測定によって InAlAs 量子ドットからこの系では初めて単一光子生成を実証した。(図 2)

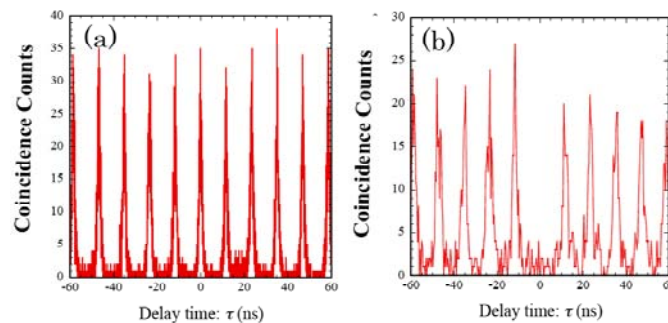


図 2. 光子のアンチバンチングの観測（強度相関関数）

量子情報再生のアルゴリズム及びシステム研究：

富士通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。昨年度より行っている InAs ドットの低密度化の条件出し、成長機構の解析を進めるとともに、量子中継器の実証実験に必要なとされる InAlAs ドットの成長の条件出しも行った。その結果、検出器の感度が高い 760 nm 付近で発光するドットを得るための成長条件を得ることが出来た。さらに、このドットを 760 nm 付近に共振モードを持つ DBR キャビティ中に埋め込むための基礎実験を行なった。

高偏極電子スピンの半導体への注入：

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ので、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というアイデアである。

これまでに円偏光度としてバルクで 20% という高い値を得ているが、強磁性体として用いた鉄では、磁化を面直方向に揃えるために高い磁場を必要とし、その結果円偏光度が劣化していた。この対策として面直方向に磁化する強磁性金属多層膜から半導体へのスピン注入の検討を行った。さらに、強磁性電極から半導体へのスピン注入を電気的に解析するためにスピントランジスタを試作した。

面直磁化についてはテルビウム／鉄の超格子構造を半導体 (GaAs および InAs) 上に結晶

成長し、基板面に垂直に磁化していることを確認した。またスピントランジスタについては昨年度試作に成功し初めて電流の振動を観測したが、スピン注入効率が大きいときは電流振動よりもむしろ電流の双安定性が現れることを見出し、更に電流の双安定性の原因を理論的に解明した。またその際のトランスコンダクタンスは普遍定数 e^2/h の整数倍になることなどを見出した。

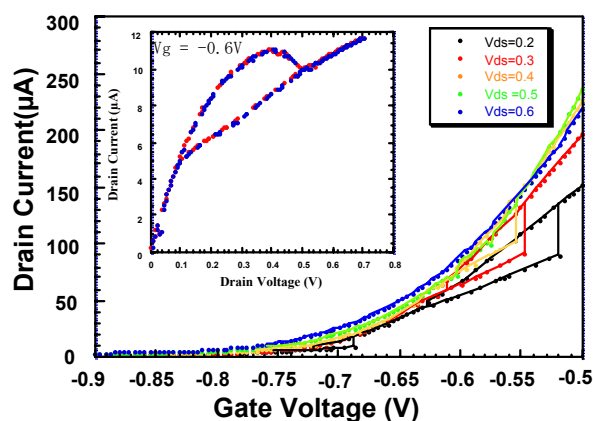


図 3. スピントランジスタにおける電流の双安定性

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、教授）
- ②研究項目：結合量子ドットでのゲート動作の実証
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、教授）
- ②研究項目：長波長帯結合量子ドットの作製・評価

「高津」グループ

- ①研究分担グループ長：高津 求（富士通株式会社、部長付）
- 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、教授）
- ②研究項目：強磁性体から半導体へのスピン注入

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

- N. Matsumura, S. Muto, S. Ganapathy, I. Suemune, K. Numata, and K. Yabuta: “Anisotropic Lattice Deformation of InAs Self-assembled Quantum Dots Embedded in GaNAs Strain Compensating Layers” Jpn. J. Appl. Phys. Lett. Vol. 45, No. 2 (2006) pp. L57-L59.
- 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, 112506 (2005).
- 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, 510-514 (2005).
- 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, 3838-3842 (2005).
- S. Adachi and Toda, “Spectrally-resolved nonlinear spectroscopy of in-plane anisotropy in uniaxially-strained GaN epilayers”, phys. stat. sol. (c) 2, 3936-3940 (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, 854-857 (2005).
- S. Adachi, Y. Toda, “Four-wave mixing measurements of biexcitons in uniaxially-strained GaN films”, phys. stat. sol. (c). (in press).
- 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). (in press).
- Y. Toda, S. Adachi, T. Ishiguro, T. Mukai, K. Hoshino, Y. Arakawa, “Degenerate four-wave mixing spectroscopy of GaN films on various substrates”, phys. stat. sol. (c). (to be published).
- Y. Toda, S. Adachi, T. Ishiguro, M. Arita, Y. Arakawa, “Transient pump-probe measurements for polarized excitons in strained GaN epitaxial layers”, phys. stat. sol. (c). (to be published).
- 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. Vol. 44, No. 25 (2005) pp. L793-L796.
- 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. Vol. 98, No. 6, 063502-1~7 (2005).
- 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) No. 11 (2005) pp. 3833-3837.
- G. Sasikala, I. Suemune, P. Thilakan, H. Kumano, and K. Uesugi, Y. Nabetani, T. Matsumoto and H. Machida: “Improved Structural and Luminescence Homogeneities of InAs Quantum Dots with Nitrogen-precursor Supplies on Their Surfaces” Jpn. J. Appl. Phys. Lett. Vol. 44, No. 50 (2005) pp. L1512-L1515.
 - 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: Low-Dimensional Systems & Nano-Structures. (in press)
 - W. Zhang, K. Uesugi, and I. Suemune: “Application of InGaAs/GaAsN Strain-compensated Superlattice to InAs Quantum Dots” J. Appl. Phys.(in press)
 - Hidekazu Kumano, Satoshi Kimura, Michiaki Endo, Hirotaka Sasakura, Satoru Adachi, Shunichi Muto, and Ikuo Suemune: “Deterministic Single-photon and Polarization-correlated Photon-pair Generations from a Single InAlAs Quantum Dot” Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics(in press)
 - 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. Lett. (in press)
 - 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, 115327 (2006).
 - Kanji Yoh, Marhoun Ferhat, Alexandru Riposan, and Joanna M. Millunchick, “Room temperature spin dependent current modulation in an InGaAs-based spin transistor with ferromagnetic contact” AIP Conf. Proc. 772, 1315 (2005)
 - Kanji Yoh, Kazuya Yuasa, Hiromichi Nakazato, “Quantum entanglement formation by repeated spin blockade measurements in a spin field-effect transistor structure embedded with quantim dots” Physica E 29, 674-678 (2005)

(2) 特許出願

H17 年度出願件数 : 0 件 (CREST 研究期間累積件数 : 4 件)