

「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。これまで量子情報の光中継器の試作と単光子光源の開発を目指してきた。しかしながら中継器の試作は時間的に難しいことがわかり、今年度途中から中継器のための個々の要素技術にブレークダウンして開発を行うこととなった。

今年度は、量子演算のための量子ドットでの 2 光子過程に連続準位が使える見通しを得た。また核磁場の形成において核スピンのスイッチング現象を確認し、Qubit 変換のためのバンド構造が自動的に実現している可能性を見出した。1 光子-1 電子の量子非破壊変換に関して、昨年度見つけた、線幅の狭い量子ドットでは光の吸収と発光との間で円偏光度と電子スピンの関係が良好に保存されることが分かった。

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。特に昨年度兆候のみられたスピン反転について確認実験を行っている。一つの量子ドットの連続状態を用いて 2 光子過程 STIRAP によるスピン操作を行える十分な光学遷移が実現していることを確認した。

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(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の強度および偏光度による核磁場の変化を調べ、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。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)が実現している可能性が示唆された。

単一量子ドットの作製と光子生成過程の制御：

InAlAs 量子ドットからの光子生成過程の制御に関しては、光子から電子スピンへ、電子スピンか

ら光子へコヒーレントに変換することが Qubit 変換には必要不可欠である。そのためには円偏光した光子と電子スピンとの効率のよい変換を実現する必要がある。Qubit 変換には電子状態のスピン縮退を維持し、その状態を変換するまで安定に保つ必要があるが、スピン反転時間が発光寿命より3倍長いことが確認され、かつ零磁場でも-60%の高い円偏光光子の発生が確認された。

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きた。今年度は InAlAs ドットを埋め込むための共振器の試作プロセスの条件出しを行った。今後は条件をさらに詰め、実際にデバイスを試作する。

高偏極率電子スピンの半導体への注入:

スピントランジスタを用いたスピン検出に研究を絞ることとなった。このためにスピン偏極電子の半導体への注入のための 100%のスピン偏極率をもつ強磁性体を探索している。理論的には100%のスピン偏極率を有する鉄酸化物の一種であるマグネタイト( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )の InAs 上への結晶成長とその組成確認、磁化特性評価を行った。その結果、InAs 上に高品質のマグネタイトの生成を確認した。

## 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。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。昨年度はこれらの実験的検討を開始した。パルスレーザを用いて量子ドットにスピンを生成する励起用の光パルス、および2光子過程によりこのスピンを光制御する制御用の二つの光パルスの、計三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。単一量子ドットでのスピン反転の実験を試みたところ、スピン反転の兆候を示すデータを取得できた。

今年度は、確認実験として、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た。特に 2 パルスで量子ドットの連続状態を介した2光子過程を利用するために、時間差をつけた二つの光パルスを用いて連続状態を制御することを試みた。光パルスが同じ向きの直線偏光の場合には、二つの励起子スピン状態が同時に振動するのに対し、光パルスが直交する直線偏光の場合には、励起子スピン状態は交互に振動することが確認された。このことは、量子ドットの連続状態を現行のレーザパルスで十分に励起できることを示しており、連続状態を用いた STIRAP 実現の可能性を示唆するものである。更に荷電励起子分子においても同様の実験が行えることが分かった。

#### 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  $100 \text{ ps}$  以上の持続時間をもつ光子 Qubit がスピン Qubit に変換できる見通しを得た。

また、核磁場の励起光変化に対する応答速度を検討した結果、実験の時間分解能( $10 \text{ s}$ ) 以下であることがわかり、将来の量子中継の律速条件とならないことを確認した。

今年度は更に、核磁場形成における励起光強度依存性、および励起光の円偏光度依存性を詳細に調べた。その結果、一方の円偏光励起において、励起光強度に対する核磁場の変化にヒステリシスが現れる(いわゆる核スピンスイッチ現象)が見出された(図1)。さらにスイッチした後の核磁場の大きさは、励起光の円偏光度或いは励起光の強度を変えても殆ど変わらない一定の値になることが分かった。この原因は、スイッチした先で外部磁場と核磁場が打ち消し合って、電子スピンと核スピンが反転する際の電子の磁気エネルギー変化がない状態が実現しているものと解釈できる。これは、Qubit 変換に必要な状態: 電子スピンが縮退し、正孔のスピンがエネルギー分離した状態が実現されていることを示唆する。今後、この確認を理論的、実験的に行い、Qubit 変換のデモに結びつける。

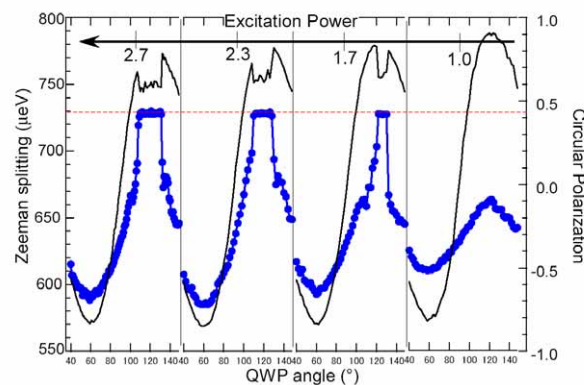


図1 核磁場の励起円偏光度によるスイッチング(核スピンスイッチ)

黒丸はゼーマン分離の実験値で、1/4 波長板(QWP)の角度  $120^\circ$  付近の値がスイッチングを表す。スイッチング後の値はほぼ一定である。

#### 単一量子ドットの作製と光子生成過程の制御:

InAlAs 量子ドットからの光子生成過程の制御に関連して、特に光子から電子スピンへ、電子スピンから光子へコヒーレントに変換することが Qubit 変換には必要不可欠である。そのためには、円偏光した光子と電子スピンとの効率のよい変換を実現する必要がある。そこで、光励起された電子スピン状態がどの程度安定に保たれるかを確認する目的で、単一量子ドットにおける励起分子(XX)-励起子(X)の時系列発光において生成する光子の、光子偏光状態相関測定を行った。その

結果、XXとXからの縦偏光状態(V)間の強いバンチングと、XXからの横偏光(H)とXからの縦偏光(V)のアンティバンチングを観測した。これから励起子状態におけるスピン反転時間が 3.6ns と見積もられた。別の測定から励起子寿命は 1.0ns と見積もられているので、励起子状態として励起された電子スピンは、その寿命内では安定にその状態を保つことがわかった。

このように、スピン状態を保存した励起子状態から光子を発生する過程を検討するために、円偏光励起してその励起子発光の円偏光保存状態の確認を行った。図2の( $\sigma^+$ ,  $\sigma^+$ )は右円偏光励起した場合に右円偏光で観測される発光スペクトルを示し、( $\sigma^+$ ,  $\sigma^-$ )は左円偏光で観測される発光スペクトルを示す。図2では通常の中性励起子発光( $X^0$ )と思われるスペクトル領域を示すが、高波長分解能の分光器で測定すると150meV離れたシャープなピークが観測され、このピークに関しては零磁場でも60%の高い円偏光光子の発生が確認された。現在その詳細を検討中である。

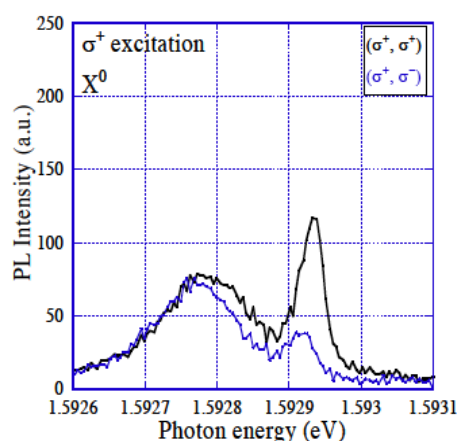


図2 右円偏光励起( $\sigma^+$ )した場合に観測される右円偏光スペクトルと左円偏光スペクトル

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。昨年度から北大)武藤グループと協力して行っている InAlAs ドットを量子中継器に必要とされる共振器構造へ埋め込むための実験を引き続き行った。ドット成長条件をさらに詰めるとともに、ミラー多層膜のエッチング等のプロセスの条件出しを開始した。また、成長した InAlAs ドットの性質を調べるため、積層ドットの PLE 測定等も行った。

共振器構造へドットを埋め込むためのミラー多層膜のエッチング条件出しにおいて、材料によるエッチングレートの差はあるものの、ピラー形状の形成を可能とするおおよその条件が得られた。また、積層結合ドットの PLE 測定に於いて、各結合状態からの発光強度の比が励起光のエネルギーにより大きく変わるなど興味深い結果が得られた。

高偏極電子スピンの半導体への注入:

室温で動作するスピン注入素子やスピントランジスタの動作、さらにスピンチャンネルから量子ドットへのスピントロニクス実証のためには、キュリー温度が高く、半導体への高スピン偏極電子の注入が可能な強磁性体を探索することが不可欠である。理論的には 100% のスピン偏極率を有する鉄酸化物の一種であるマグネタイト ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) は知られていたが、半導体上への満足できる結晶成長は報告されていなかった。今年度は、InAs 上へ InAs 薄膜をホモ成長し、そのまま真空搬送した半導体上への  $\text{Fe}_{3-d}\text{O}_4$  の結晶成長を行った。その結果、InAs 上をステップフロー成長している高品質のマグネタイトが生成できていることがわかった。下の左図に示すように InAs 表面再構成パターン (a, b) の上に成長したマグネタイトの表面再構成パターン (c, d) が成長初期から明瞭に現れることから強磁性/半導体界面の原子レベルでの急峻性、結晶の完全性が示唆されており、これは成長初期に島状成長してしまう Fe 結晶の成長の場合と異なる特徴である。また成長したマグネタイトは面内に磁化容易軸を有する強磁性体であることが SQUID により確認された。従って、磁場を印加せずに光学的なスピン注入評価も可能である。X 線光電子分光により組成分析を行った結果、成長条件により酸素の組成比を制御でき、メガイト ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) からマグネタイト ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) まで変化させることが可能であることがわかった (右図参照)。結晶や界面の完全性から高いスピン偏極率が期待される。今後、極低温での相変化をさけるため高温でスピン偏極率やスピン注入効率を確認すること、および磁気抵抗やスピントランジスタ構造でのスピン伝導評価を行う。

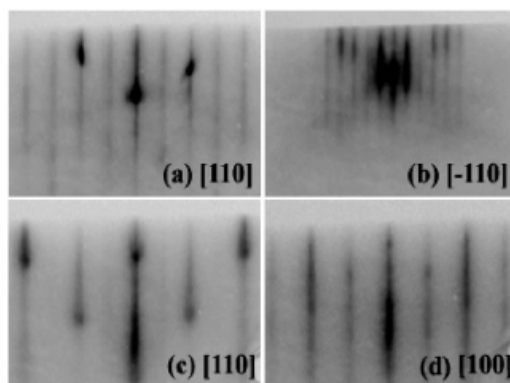


FIG. 1. RHEED patterns for bare (001) InAs along (a) the  $\langle 110 \rangle$  and (b)  $\langle -110 \rangle$  just before the growth and for 20-nm-thick  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  along (c) the  $\langle 110 \rangle$  and (d) the  $\langle 100 \rangle$  azimuths. All azimuths are referred to the InAs substrate.

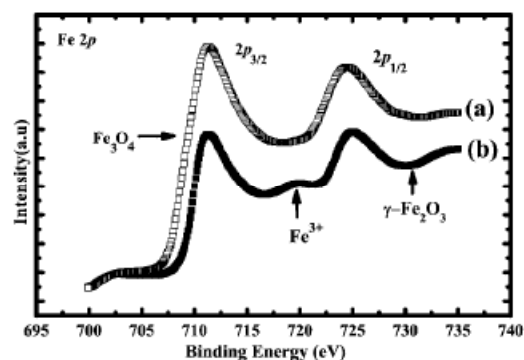


FIG. 3. Fe 2p high-resolution XPS spectra for 20-nm-thick  $\text{Fe}_{3-d}\text{O}_4/\text{InAs}$  grown at 300 °C under oxygen partial pressures of (a)  $7.5 \times 10^{-7}$  Torr and (b)  $4 \times 10^{-6}$  Torr. The compositions obtained are indicated in the figure.

### 3. 研究実施体制

#### (1)「武藤」グループ

##### ①研究者名

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

(2)「末宗」グループ

①研究者名

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

(3)「高津」グループ

①研究者名

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

(4)「陽」グループ

①研究者名

陽 完治(北海道大学 教授)

②研究項目

- ・研究項目,強磁性体から半導体へのスピン注入

## 4. 研究成果の発表等

### (1)論文発表(原著論文)

- 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, 144-147(2006)
- 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). Vol.3, Issue11, 3908-3911(2006)
- 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. Vol. 45, No. 21 (2006) pp. L529-L532.
- W. Zhang, K. Uesugi, and I. Suemune, "Application of InGaAs/GaAsN Strain-compensated Superlattice to InAs Quantum Dots" J. Appl. Phys. Vol. 99, No.10 (2006) pp. 103103 1-7.
- 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* Vol. 32 (2006) pp. 144-147.
- 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* Vol. 1 (2006) pp. 39-51.
- 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.* Vol. 99 (2006) 063709-1~4.
- I. Suemune, H. Kumano, S. Kimura, H. Sasakura, S. Adachi, S. Muto, H. Z. Song, S. Hirose, and T. Usui, “Origin of Asymmetric Splitting of a Neutral Exciton in a Single Semiconductor Quantum Dot” *phys. stat. sol. (c)* 3, No. 11 (2006) pp. 3908-3911.
- P. Thilakan, G. Sasikala, and I. Suemune, “Fabrication and Characterization of a High Q Microdisc Laser Using InAs Quantum Dot Active Regions” *Nanotechnology* Vol. 18 (2007) 055401-1~4.
- 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).
- Marhoun Ferhat and Kanji Yoh, “High quality  $\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$  /InAs hybrid structure for electrical spin injection” *Appl.Phys.Lett.* 90, 112501 (2007)
- Saori Kashiwada, Takashi Matsuda and Kanji 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 (2007)785-788
- 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)
- 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*, Vol. 893 (March, 2007) 1109-1110

## (2)特許出願

平成 18年度特許出願:0 件(CREST 研究期間累積件数:4 件)