

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24241039

研究課題名(和文)半導体ナノ構造における集団量子情報処理の実証

研究課題名(英文) Demonstration of collective quantum information processes in semiconductor nanostructures

研究代表者

遊佐 剛 (Yusa, Go)

東北大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：40393813

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、量子集団あるいは場の連続自由度の量子力学的性質を生かした量子情報処理を目指すものである。本研究では半導体ナノ構造の二次元あるいは一次元系の電子の電荷やスピン自由度を量子力学的に制御し、本研究で提案した量子プロトコルの実証を目指した。従来距離の制限を受けていた量子エネルギーテレポーションをさらに改良し、スクイズド状態を利用することで距離の制限をなくすことに成功した。また、ナノ構造中の核スピンの電氣的あるいは光学制御検出に関する研究も進め、核スピン集団の空間分布を可視化(光検出マイクロ核磁気共鳴)することが可能となった。

研究成果の概要(英文)：Standard approach for quantum computation and information process is based on two-level systems, qubits. This research project, however, aims for new quantum information processing based on collective quantum system taking advantage of continuous variable of the field. During the project term, we obtained a wide variety of results. We proposed a new approach for quantum energy teleportation to overcome the limitation of distance by introducing a squeezed state between a sender (A) and a receiver (B). We also demonstrated real-space imaging of collective nuclear spins by optically detected micro magnetic resonance.

研究分野：量子情報

キーワード：量子情報 ナノ構造 核磁気共鳴 光物性

1. 研究開始当初の背景

ここ10年程度の量子計算に関する研究は、2準位系の量子力学的な重ね合わせ状態つまり量子ビットを基本単位とした方法が精力的に研究されていた。これはそもそも量子力学が、電子一個、原子一個などのミクロな振る舞いを理解するために生まれた道具であるためであるが、マクロな量子状態である超伝導状態やボーズ凝縮などでは、マクロ状態でも量子力学的な振る舞いが見られることから、マクロな量子集団についても、量子計算のメディアとして注目されるようになっていた。特に冷却原子の集団に関する理論提案 (DLCZ 法)、Julsgaardらによって行われて以来[1,2]、量子の集団を量子情報に応用しようとする研究が量子光学や量子エレクトロニクス分野で活発になってきていた。一方、本研究グループは、核スピンや電子の集団を量子情報の媒体に応用する試みを理論および実験の両面から進めていた。

2. 研究の目的

集団量子に関する研究は量子光学分野で特に進展していた。これは量子光学で扱う原子の内部励起と相互作用が、固体に比べて通常より純粋に理論的に記述できる系であることに起因している。一方将来のデバイス応用を実現されるためには、固体で実装することが集積化の面で極めて有利であるため、本研究では固体のなかでも特に相互作用が理論的に理解しやすい系を選び、電子の電荷あるいはスピン自由度、核スピン集団を媒体とする集団量子情報処理の実証を目指した。

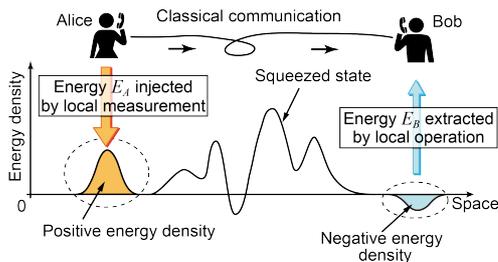


図1. QETの距離の制限を超えるための新プロトコルの模式図。

3. 研究の方法

本研究では特に大きく分けて2つの項目で研究を進めた。まず量子ホール状態のエッジチャンネルを量子多体系とした量子エネルギーテレポーテーション(QET)の実装である。これは特に電子の電荷とスピンの自由度が、量子ホールのエッジでカイラルラッティンジャー液体と呼ばれる擬一次元になることを利用した集団量子情報処理である。二つ目は電子の量子液体状態あるいは核スピンを集団量子とする方法で、特に分数量子ホール状態の特殊な状態で発現する電子と核スピ

ンの結合を、光を用いて制御検出するものである。特に近赤外光のレーザー光を光源とする顕微分光法を用いることで、分数量子ホール状態の実空間観察(分数量子ホール液体のイメージング)、核スピン偏極のイメージング(マイクロ磁気イメージング法)を行った。

4. 研究成果

まずQETの実装に関する研究について述べる。従来のQETではエネルギーを送る側(Alice, A)と受け手側(Bob, B)の間に距離の制限があった。つまりBが取り出せるエネルギー E_B とAB間の距離 L には、

$$E_B < 1/(12\pi L)$$

という関係があり、これがQET実装の上で大きな問題となっていた。この制限を超えるために、図1に示すような新プロトコルを考案した。Aでエネルギーを注入し、Aで得られた情報を古典チャンネルでBに通信するところ

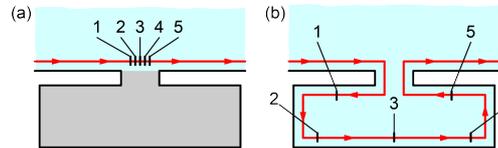


図2. エッジ状態の急激膨張によってスクイーズド状態を生成する模式図。膨張前(図(a))の数字で示したそれぞれの点が膨張後(図(b))の数字に対応している。

までは従来法と共通であるが、今回新たなAとBの間にスクイーズド状態を挿入することで、この距離の制限を緩和できることが明らかになった。さらに、このプロトコルは図2に示すように量子ホールエッジ状態を急激に膨張されることで実現できることが分

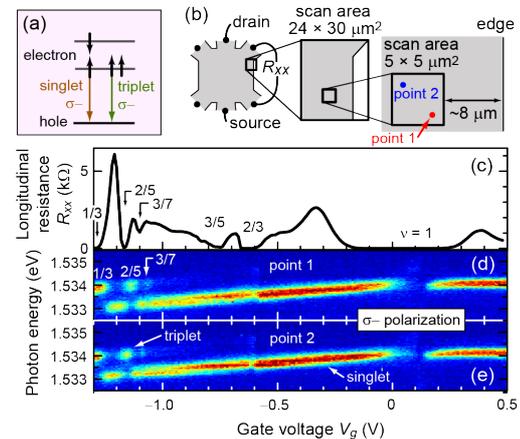


図3. (a) 電子とホールのエネルギーの模式図 (b) 測定試料の模式図 (c) 縦抵抗(R_{xx})のゲート電圧依存性 (d) point 1 および(e) point 2 からの顕微 PL スペクトルのゲート電圧依存性。磁場 7T、温度 40 mK。

った[3]。

この成果は海外のニュースサイトで大きく取り上げられるとともに[4-7]、日本物理学会の会誌にて招待論文として特集記事が掲載され[8]、国際学会でも招待講演を行った。

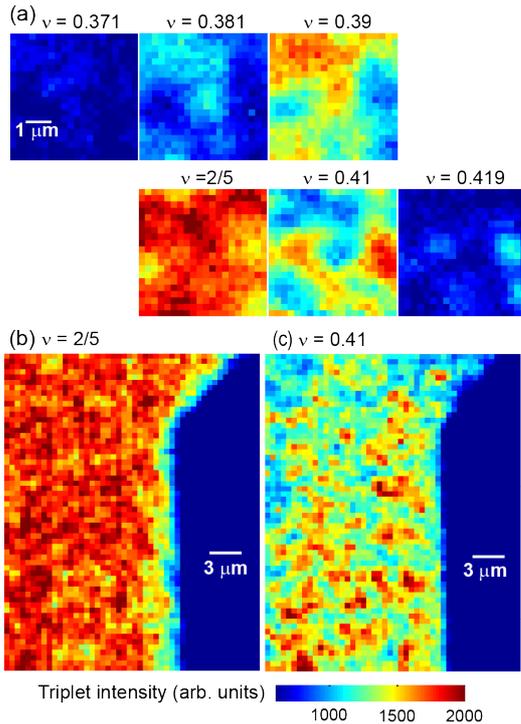


図4. Tripletの積分強度から得られた $\nu = 2/5$ 近傍の実空間イメージ。磁場7 T、温度40 mK。(a)の測定範囲は $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ 、(b)と(c)は $24 \times 30 \mu\text{m}^2$ 。

次に分数量子ホール状態の実空間観察(分数量子ホール液体のイメージング)、核スピン偏極のイメージング(マイクロ磁気イメージング法)について述べる。ここで用いた手法は、光励起された二次元電子からの発光を可視化するものである。二次元電子系に光を照射すると、通常光励起されたホールに対して二つの電子が束縛されたtrionが基底状態となる。磁場中のtrionは電子の全スピンのsingletとtripletの二種類が存在することが知られている[9]。図3(a)に示したように、Zeeman分離した低エネルギー状態にある上向き電子は、ホールと再結合したとき σ^- の円偏光を持った光を生成する(photoluminescence, PL)。したがってsingletとtripletの発光強度によって、二次元電子のスピンの状態を測定し、さらにPLの集光スポットを回折限界近い $1 \mu\text{m}$ 程度まで絞り、スポットを空間的に走査することで発光強度の実空間イメージを構築することが可能となる。実際の実空間観察像を図4に示す。図4(b)の色の赤い領域が電子が多体効果によって量子液体状態という集団量子状

態になっている領域であることが分かった。また、ランダウレベル占有率 ν をわずかに変化させても量子液体状態がランダムポテンシャルによって局所的に残存していることが分かった[10]。さらに、 $\nu = 2/3$ で集団量子状態がスピン相転移の様子を可視化することに成功した(図5参照)。図5(c),(f)が実際に測定された結果、(b),(e)がランダム場イジングモデルを使った数値計算によって求められた理論的に予想される空間パターンを表しており、両者がよく一致している様子が分かる。これらの成果は論文発表するとともに、招待講演、レビュー論文[11]などで成果を広く公開した。

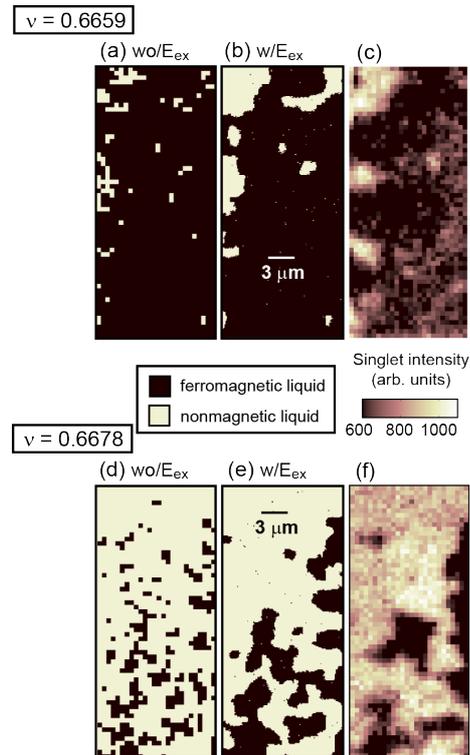


図5. 数値計算によって求められた空間パターン(a), (b), (d), (e)と測定結果(c), (f)の比較。

この他、核スピンの集団偏極状態がどのように空間分布しているかを光検出によって可視化するマイクロ磁気共鳴イメージング法を提案実現し、核スピンの集団の可視化に成功した。本成果は今後論文投稿を行う予定である。

- [1] B. Julsgaard, *et al*, “Experimental long-lived entanglement of two macroscopic objects”, *Nature* **413** 400 (2001).
- [2] D. N. Matsukevich, A. Kuzmich, “Quantum state transfer between matter and light”, *Science* **306** 663 (2004).
- [3] M. Hotta, J. Matsumoto, G. Yusa, “Quantum energy teleportation without limit of distance”, *Phys. Rev. A* **89** 012311 (2014)
- [4] Physicsword, “Energy can be teleported over long distances, say physicists”, Jan. 27 (2014).

- [5] New Scientist, “Squeeze light to teleport quantum energy”, Jan. 23 (2014).
- [6] Txchologist, “Energy Teleport Study Could Unlock Quantum Computer, Black Hole Secrets”, Feb. 10 (2014).
- [7] MIT technology review, “Physicist Discovers How to Teleport Energy”
- [8] 堀田昌寛、遊佐剛, 日本物理学会誌 9月号 613 (2014).
- [9] G. Yusa *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **87** 216402 (2001)
- [10] J. Hayakawa, K. Muraki, G. Yusa, *Nature Nano.* **8** 31 (2013).
- [11] 遊佐剛, 日本真空学会誌 9月号 **58**, 317 (2014).

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計6件)

遊佐剛, 「エキシトン顕微鏡による量子ホール系のスピンの観察」, 日本真空学会誌 9月号 **58**, 317~323 (2014). 査読有

A. Miranowicz, S. K. Ozdemir, J. Bajaj, G. Yusa, N. Imoto, Y. Hirayama, and F. Nori, “Quantum state tomography of large nuclear spins in a semiconductor quantum well: Robustness against errors as described by condition numbers”, *quant-ph* arXiv:1410.2440-1 ~ 1410.2440-20 (2014). 査読無

堀田昌寛、遊佐剛 「量子エネルギーテレポーテーション」日本物理学会誌 9月号 613~622 (2014). 査読有

M. Hotta, J. Matsumoto, G. Yusa, “Quantum energy teleportation without limit of distance”, *Phys. Rev. A* **89** 012311-1-6, 2014 査読有

M. Hotta, J. Matsumoto, G. Yusa, “Quantum energy teleportation without limit of distance”, arXiv quant-ph 1305.1305.3995v1 (2013) 査読無

J. Hayakawa, K. Muraki, G. Yusa, “Real-space imaging of fractional quantum Hall liquids”, *Nature Nano.* **8** 31-35 (2013). 査読有

[学会発表](計13件)うち招待講演8件

遊佐剛, 偏光分光実空間マッピングによる分数量子ホール液体の相転移の解明、日本物理学会第70回年次大会 2015年3月22日 早稲田大学、東京 (招待講演)

G. Yusa, “Implementation of quantum energy teleportation via the quantum Hall system”, *YITP Workshop on Quantum Information Physics (YQIP2014)*, Kyoto University, Kyoto, Japan (Aug. 2014). (招待講演)

山口薫、間野高明、野田武司、遊佐剛、量子ホール系における Edge Magneto Plasmon の輸送特性、日本物理学会第69回年次大会 2014年3月28日、東海大学平塚

G. Yusa, “Real-space imaging of fractional quantum Hall effect”, 17th International workshop on the physics of semiconductor devices, Delhi, India (December 2013). (招待講演)

G. Yusa, “Real-space imaging of fractional quantum Hall effect”, The 3rd Summer School on Semiconductor/Superconducting Quantum Coherence Effects and Quantum Information, Hotel Sunvalley Nasu, Nasu, Japan (September 2013). (招待講演)

堀込康隆、岩田晃、早川純一郎、遊佐剛、高電界印可時の荷電励起子による半導体二次元電子系の実空間観察、日本物理学会秋季大会 2013年9月26日、徳島大学、徳島

J. Hayakawa, K. Muraki, G. Yusa, Real-space imaging of fractional quantum Hall effect, 20th International conference on electronic properties of two-dimensional system (2013年7月1日) ヴロツワフ ポーランド

遊佐剛 荷電励起子でみる二次元系における核スピン偏極現象の空間観察、日本物理学会第68回年次大会 2013年3月広島大学 東広島 (招待講演)

G. Yusa, Quantum Energy Protocol in the Quantum Hall system, International conference on quantum information and quantum computing (2013年1月11日)バンガロール インド (招待講演)

発地暁、大倉佑介、遊佐剛、「CVDによる(111)面ダイヤモンドの選択成長」, 第26回ダイヤモンドシンポジウム 2012年11月19日 青山学院大学 東京

G. Yusa, “Quantum Energy Teleportation in the Quantum Hall system”, Quantum Vacuum Kawatabi 2012年10月21日 川渡宮城県 (招待講演)

発地暁、大倉佑介、遊佐剛、「CVDを用いた(111)面上のダイヤモンド選択成長」, 第73回応用物理学会学術講演会、2012年9月12日、愛媛大学松山大学、松山

G. Yusa, “Real-space imaging of fractional quantum Hall liquids”, DYCE international symposium 2012年8月8日、屈斜路プリンスホテル、北海道 (招待講演)

[図書](計0件)

[産業財産権]
出願状況(計0件)

名称:
発明者:

権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

quantum.phys.tohoku.ac.jp

6. 研究組織

(1)研究代表者 遊佐 剛

(YUSA, Go)

東北大学 大学院理学研究科 准教授

研究者番号：40393813

(2)研究分担者

()

研究者番号：

(3)連携研究者

()

研究者番号：