

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25年 3月 31日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22310061

研究課題名（和文） カー回転ゆらぎのスペクトル測定による磁気共鳴測定法の開発と半導体ナノ構造への応用

研究課題名（英文） Development of Spin Noise Measurement System through a Kerr Rotation Fluctuation and Application to Semiconductor Nano-Structure.

研究代表者

室 清文（MURO KIYOFUMI）

千葉大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：90112028

研究成果の概要（和文）：狭線幅波長可変レーザを用いてファラデー（カー）回転の揺らぎのスペクトルを測定するスピンノイズ計測システムを開発し、Cs 原子ガスの核磁気共鳴スペクトルの高感度測定に成功した。更に、800MHz の高速デジタルと FPGA によるリアルタイム FFT を用いるシステムにより、光子情報の利用効率を向上させ、量子ノイズ極限下における測定の高感度化・高速化を図った。低温において顕微スポット下で InAs 量子ドットにおける単一電子スピンの磁気共鳴の観測を目指したが届かなかった。

研究成果の概要（英文）：We developed a spin noise spectroscopy system, which measures the fluctuation spectra of Faraday (Kerr) rotation by a spectrum analyzer, and the nuclear magnetic resonance of Cs atoms was observed by using a tunable diode laser with a narrow line width at 852nm. The sensitivity was improved by replacing the spectrum analyzer with a real-time FFT system, realized by a combination of FPGA and 14bit-800MHz digitizer. We challenged single spin detection in an InAs quantum dot in a microscopic spot at low temperature, but the signal was below the observation limit.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|------------|-----------|------------|
| 2010年度 | 10,300,000 | 3,090,000 | 13,390,000 |
| 2011年度 | 3,500,000 | 1,050,000 | 4,550,000 |
| 2012年度 | 1,400,000 | 420,000 | 1,820,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 15,200,000 | 4,560,000 | 19,760,000 |

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学・ナノ構造科学

キーワード：ナノプローブ、光物性、半導体物性、スピンエレクトロニクス

1. 研究開始当初の背景

スピンと電磁波の相互作用は弱く、高周波技術による電子スピン共鳴の観測には、通常、 10^{12} 個以上の電子スピンが必要である。一方、光検知磁気共鳴では量子光学的測定により、スピン軌道相互作用を通して、超高感度な電

子スピンの計測が可能となる。従来の光検知磁気共鳴は交差緩和に伴う発光効率の変化をモニターするもので、有機マトリックス中のペンタセン；Physics Reports **310**, 261-339 (1999)や、ダイヤモンド中の NV センター；Science **314**, 281(2006)等において、単一分子での磁気共鳴の観測に成功している。しかし、

こうした計測は条件に恵まれた幾つかの分子やセンターで例外的に実現されているに過ぎない。一方、Awschalom等はフェムト秒レーザを用いるポンプ・プローブ法により、光誘起 Faraday (Kerr)回転を時間分解で測定し、電子スピンの歳差運動の光学的計測に成功した;Science 287,473 (2000)。TRKR法は有効な方法だが、1) 時間スケールがモードロックの周期(~10ns)で制限され、長いスピン緩和には対応できない。2) 装置が大掛かりになり、計測には熟練が要る。3)ポンプ光が被測定系のスピン状態を乱してしまう、等の問題を有している。本研究では研究室で開発したコヒーレントな波長可変レーザを用い、小型・簡便な装置で無擾乱な磁気共鳴の観測が可能で、半導体ナノ構造における高感度な磁気共鳴測定に応用した。

2. 研究の目的

磁気共鳴は物質科学、生命科学において重要な役割を演じており、更に高感度な測定法の開発が求められている。本研究では、ポンプ・プローブ法に代わる新しい超高感度・高分解能な磁気共鳴測定法として、磁気光カー回転の揺らぎを量子光学的手法により周波数ドメインで計測する測定法を開発する。尖鋭な吸収線を有する半導体ナノ構造では共鳴効果が期待できる他、少数の電子を計測する顕微分光においては、量子揺らぎが顕在化する。量子ホール系や量子ドットなどの半導体ナノ構造において、自発スピンノイズ測定に基づく、新しい磁気共鳴測定法を開発する。また、この方法を実際に半導体量子デバイスにおける、スピンコヒーレンスの無擾乱計測や磁気共鳴マッピング、更には、単一量子ドットにおける磁気共鳴計測に適用し、その物性を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

- ①独自に開発した狭線幅波長可変レーザを用いて、ファラデー(カー)回転の揺らぎ計測による磁気共鳴測定法を開発する。
- ②高速デジタルと FPGA を用いるリアルタイム FFT により計測光子情報の利用効率を上げ、スピンノイズ測定を高感度化する。
- ③顕微スポット化のカー回転揺らぎの計測により単一量子ドットでの磁気共鳴測定を実現する。

4. 研究成果

先ず Rb 気体での先行事例にならない図 1 に示すファラデー回転の揺らぎ測定によるスピンノイズ計測システムを構築した。CW 光源には研究室で開発した 850nm 帯の狭線幅波長可変レーザを用い、Cs ガスをサンプルに用いてシステムの最適化を進めた。

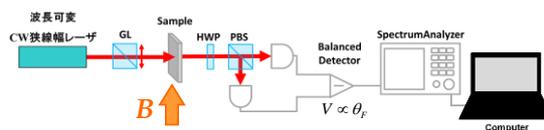


図 1 スピンノイズ計測システム

当初、光通信用に開発された 30GHz 帯の広帯域光検知器を使用した。実際には、光検知器の出す電子ノイズが大きく、光検知器が飽和する数 mW の光を入射しても、光子の揺らぎによるショットノイズを観測することが出来なかった。スピンノイズは光のショットノイズ以下であることが予想される。様々な広帯域光検知器を調べた結果、1GHz 以下の広帯域差動検知器であればショットノイズの観測が可能であることが分かった。

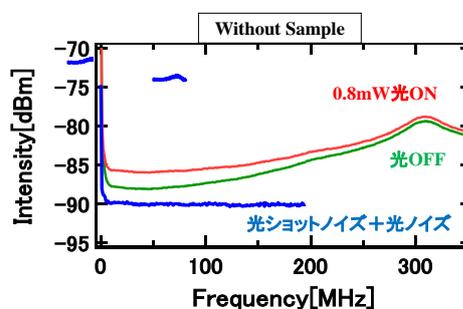


図 2 光ショットノイズの観測

図 2 にスペクトルアナライザで測定した光検知器出力のノイズスペクトルを示す。緑色のトレースが光 OFF での計測系の電子ノイズスペクトルで、赤色のトレースが 0.8 mW のレーザ光の入力下でのノイズスペクトルである。dB 表示であることに注意して、光が ON と OFF の状態の差を取り出すと青色のトレースで示す光のショットノイズに対応するホワイトスペクトルを得る。スピンノイズは一般に光ショットノイズ以下であるが、磁場印加の“有”、“無”で測定したノイズスペクトルの差を取り出すことによりスピンノイズを抽出することが出来る。

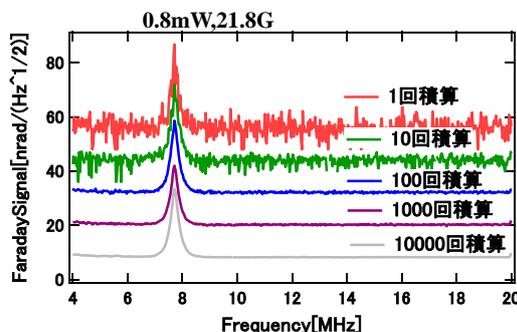


図 3 Cs ガスのスピンノイズ

図3に852nmのCsガス吸収線から2GHzだけずらせた0.8mWの波長可変レーザービームを用いて測定した、Csガスのファラデー回転揺らぎのスペクトルの周波数依存性を示す。印加した磁場は21.8Gで、Cs原子核のg因子(-0.0003985)に対応する周波数に核スピンの磁気共鳴が明瞭に観測されている。測定を繰り返し、データを積算するとランダムノイズ(ショットノイズ)が減少し、測定の感度が向上する。

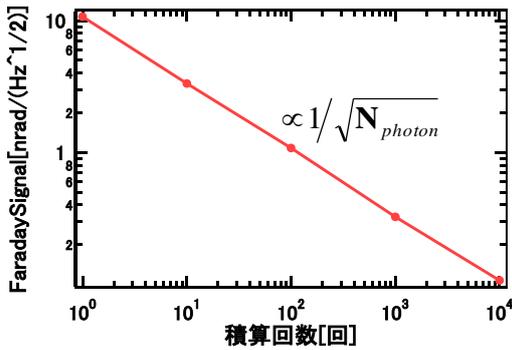


図4 測定の積算によるノイズの低減

図4に積算によるバックグラウンドノイズの減少を示す。ノイズは計測光子数(測定時間)の平方根に比例して減少しており、ファラデー回転揺らぎのノイズレベルを0.1rad/Hz^{0.5}まで測定出来た。Cs原子の核スピンノイズの測定については研究開始当初は報告がなかったが2011年にChalupczak等により報告されている。Phys. Rev., A83, 032512 (2011) 我々の測定データの精度は彼らを凌ぐレベルであることが分かった。

しかしながら、数十時間にもわたるデータ積算は実用的でない。より短時間で高感度な測定を可能にするため、スペクトルアナライザーを図5に示す広帯域デジタイザーとFPGA内蔵のリアルタイムFFTに置き換えることにより光子情報の有効利用が可能なシステムを開発した。このシステムでは800MHzで14Bitの高速デジタイザーと内蔵のFPGAを用いることで、入射する光子情報の60%

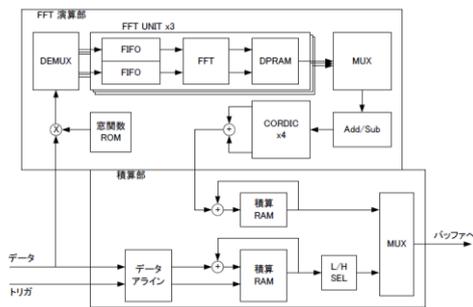


図5 FPGAによるリアルタイムFFT

を計測に利用することができる。図6 a)にスペクトルアナライザーを用いるシステム、b)にリアルタイムFFTを用いるシステムで測定したノイズスペクトルの積算依存性を示す。リアルタイムFFTのシステムを用いることにより測定に要する時間は2桁程度縮減することが出来た。しかしながら、リアルタイムFFT系ではデータの積算とともに、デジタル系固有のスペクトル構造が現れ、測定精度の向上には必ずしも繋がらなかった。

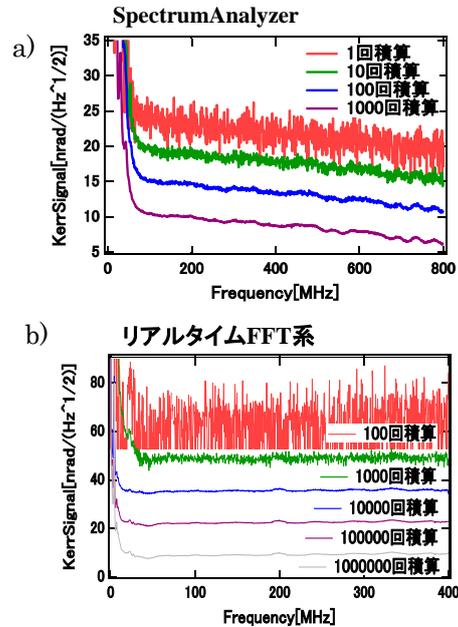


図6 スペアナとリアルタイムFFTの比較

量子ホール系や量子ドットにおけるスピンノイズの観測に向けて、図7に示すような極低温におけるカー回転揺らぎによるスピンノイズ計測システムを構築した。量子ホール系に対応できる800nm帯の波長可変レーザーは開発が間に合わなかったため、良好な低ノイズ動作の得られる1060nm帯波長可変レーザーを用いて、InAs量子ドットにおけるスピンノイズ測定を行った。

単一ドットでの磁気共鳴を計測するため、光学窓付きクライオスタットの中に高NAの対物レンズを用いる顕微分光システムにおいて、更に、半球ソリッドイマージョンレンズを用いることによりサブマイクロメートルスポットでの測定が行えるようにした。また、量子ドットの発光線にプローブ光を近接させ共鳴効果が最大限に利用した。

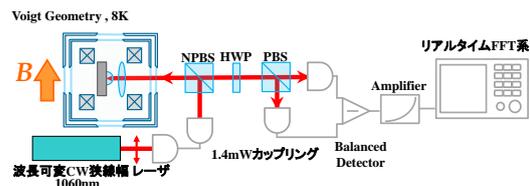


図7 低温でのスピンノイズ測定系

測定に用いた InAs 量子ドットサンプルの 10%程度は正に荷電しており、正孔のスピンノイズを期待したが、光学窓での多重干渉によるノイズなどにマスクされ目的とするスピンノイズの観測には至らなかった。

一般に緩和時間が長く共鳴周波数が数十 MHz 領域にある核磁気共鳴はスピンノイズ測定の良いターゲットになるが、緩和時間が比較的短く共鳴周波数が数十 GHz レベルになる電子スピン共鳴のスピンノイズ計測は光検知器の電子ノイズが高く、直接計測することは困難である。この問題を克服する方法としてヘテロダイン検波によるスピンノイズ計測を検討した。2 台の波長可変レーザの波長を外部共振器のモード次数の異なるモードにロックし、一方の波長をカー回転のモニター光に使用し、一方をヘテロダイン検波用のローカルオシレータとして用いることにより、磁気共鳴周波数を高感度な光検知が可能な周波数へ下方変換できる。こうした手法を用いてもスピン緩和時間は十分に長い必要がある。スピン軌道相互作用が小さく、電子スピン緩和が長いカーボンナノチューブやダイヤモンドの NV 中心におけるスピンノイズ計測を検討したが、実際に実施するまでは至らなかった。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① 伊藤裕紀、山崎剛資、福岡大輔、音賢一、室清文、平山祥郎、熊田倫雄、”High sensitive optical measurement of spin polarization in a quantum Hall system” Journal of Physics, Conference Series, 査読有, 334, 012021-012026, 2011
- ② 伊藤裕紀、瀬尾宗則、福岡大輔、音賢一、室清文、平山祥郎、熊田倫雄、” Spin polarization in quantum Hall state obtained by Kerr rotation spectra”, AIP Conference Proceeding、査読有、1399, 637- 638, 2011

[学会発表] (計 6 件)

- ① 室清文、韓琳、伊藤裕紀、佐藤匡史、音賢一、柴田憲治、平川一彦、”Magnetic Field Effect on the Photoluminescence Excitation Spectra of Single InAs/GaAs Quantum Dots” Intern. Conf. on the Physics of Semiconductors、2012.08.02 ETH, Zurich, Swaziland
- ② 室清文、岡田圭介、泉咲希、平井宏昌、音賢一、Photoluminescence excitation spectroscopy of a suspended carbon nanotube near the fundamental absorption edge”、Intern. Conf. on the Physics of Semiconductors、2012.07.31、

ETH, Zurich, Swaziland

- ③ 室清文、岡田圭介、泉咲希、平井宏昌、音賢一、”Aharonov-Bohm effect on the exciton state of a suspended single-wall carbon nanotube”、HMF-20 High Magnetic Fields in Semiconductor Physics、2012.07.26、Chamonix, France
- ④ 室清文、韓琳、伊藤裕紀、佐藤匡史、音賢一、柴田憲治、平川一彦、”Magnetic Field Effect on the excited states of self-assembled InA/GaAs quantum dots”、HMF-20 High Magnetic Fields in Semiconductor Physics、2012.07.24、Chamonix, France
- ⑤ 佐藤匡史、永山達也、室清文 “磁気光学効果を用いたスピンノイズ測定システムの開発”、日本物理学会、2012. 03. 27、関西学院大学
- ⑥ 韓琳、伊藤裕紀、佐藤匡史、音賢一、室清文、柴田憲治、平川一彦、”磁場中 PLE 測定による InAs 量子ドットの励起状態への光学遷移の同定”、日本物理学会、2012. 03. 27、関西学院大学

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ

<http://physics.s.chiba-u.ac.jp/ssphoto/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

室清文 (MURO KIYOFUMI)
千葉大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：90112028

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

小堀洋 (KOHORI YOU)
千葉大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：10153660

音賢一 (OTO KENICHI)
千葉大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：30263198

三野弘文 (MINO HIROFUMI)
千葉大学・普遍教育センター・准教授
研究者番号：40323430