

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 5 月 30 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2012

課題番号：21340076

研究課題名（和文） 光ゲート法による過渡的量子輸送現象の解明

研究課題名（英文） Investigations of transient quantum transport phenomena with an optical gate method

研究代表者

野村 晋太郎 (NOMURA SHINTARO)

筑波大学・数理物質系・准教授

研究者番号：90271527

研究成果の概要（和文）：

近接場光学顕微鏡を希釈冷凍機温度・強磁場中で動作させることに成功し、従来、光物性にて発展してきた手法を量子輸送現象の解明に適用することに成功した。量子ホール端状態の空間分布測定を行い、圧縮性／非圧縮性液体による縞状構造を観測することに成功した。光ポンプ=プローブ法による超高速測定手法を光ゲートを用いることによって過渡的量子輸送現象の解明に適用する道筋をつけた。

研究成果の概要（英文）：

We have succeeded in operating a near-field scanning optical microscope in a dilution refrigerator in high magnetic field. This enables us to investigate quantum transport phenomena by applying the methods developed for studies of optical properties. We have performed real-space mapping of quantum Hall edge states, and have succeeded in observing strips due to compressible and incompressible quantum liquids. Moreover, we have paved a way to investigate transient quantum transport phenomena by applying an optical pump-probe method to optical gates.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	10,000,000	3,000,000	13,000,000
2010 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2011 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2012 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
総計	15,100,000	4,530,000	19,630,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性 I

キーワード：局所光励起法、量子輸送現象、過渡的光測定

1. 研究開始当初の背景

半導体ナノ構造は、その自由度と品質の高さから量子コヒーレンスやスピンの関わる興味深い現象の舞台となり、大きく研究が発

展してきた。光物性分野と量子輸送分野それぞれにおいて高度に実験手法は深化し、大きな成果に結びついてきた。しかしながら、高度であるが故に両者の分断が進んでいるのが現状である。このことは、次のブレイクス

ルーへの大きな障害となっている。量子輸送測定は、量子コヒーレンスの関わる現象を捉えるための優れた手段である。しかし、過渡的現象の重要性が認識されつつあるにも関わらず、定常か準定常の「遅い現象」の研究に終始しているのが現状である。これは、光物性分野では、フェムト秒からアト秒の時間領域の研究が既に盛んに行われていることと対照的である。

そこで、本研究では、再度、光物性分野と量子輸送分野それぞれにおいて発展してきた高度な実験手法を融合し、半導体ナノ構造中量子輸送の過渡現象の解明を行う新たな学問分野を切り開くことを目的とする。

2. 研究の目的

本研究では、局所光励起法を用いて電子・正孔を半導体ナノ構造に注入する光ゲート法の探求を通じて、半導体ナノ構造中量子輸送の過渡現象に関する新たな知見を得る新たな手法を構築することを目的とする。具体的には、

(1) ホールバー構造、量子ドット構造、量子ポイントコンタクト構造等表面にバンド端に準共鳴した波長の光を局所的に照射することにより電荷注入を行い、その応答を電気伝導により観測して空間イメージングを行う

(2) (1)の結果を踏まえて、円偏光を局所的に照射することによりスピン注入を行い、その応答を電気伝導により検出する。光照射位置とスピン検出を行う構造との位置関係から、光スピンの励起と電気伝導との相関過程についての知見を得る

(3) 光パルスを用いた局所光励起法に適用、超高速光測定技術を量子伝導測定に適用することにより、超高速時間分解量子伝導測定の新たな手法を構築することが本研究の目的である。

3. 研究の方法

本研究では高移動度の III-V 族半導体ヘテロ構造を基に作製された半導体ナノ構造中電子-正孔系を対象にする。ナノメートルサイズの表面電極構造を半導体ヘテロ構造表面に形成して、静電ポテンシャル閉じ込めと近接場光学顕微鏡を用いた局所光照射により、電子-正孔系の量子状態の制御を行う。局所光励起法を用いた電荷を半導体ナノ構

造に注入する光ゲート法の探求を通じて、半導体ナノ構造中量子輸送の過渡現象に関する新たな知見を得る。

具体的には

(1) ホールバー構造、量子ドット構造、量子ポイントコンタクト構造等の局所光照射効果

(2) 光生成スピンの空間イメージング

(3) 光ゲートを用いた超高速過渡的測定を実施した。

4. 研究成果

1、ホールバー構造、量子ドット構造、量子ポイントコンタクト構造等の局所光照射効果

局所光照射されて生成される正孔の状態を合わせて制御するという観点から、ナノメートルサイズの表面電極構造の設計を行い、試料作製を行った。図1に設計作製された結合量子ナノ構造試料の概略図を示す。量子ポイントコンタクト(QPC)、量子ドット(QD)が結合するように配置した。

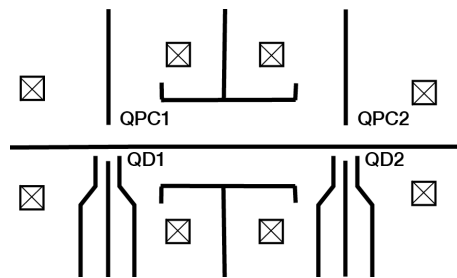


図1、結合量子ナノ構造試料の概略図。量子ポイントコンタクト(QPC)、量子ドット(QD)が結合するように配置されている。

電子線露光法により作製された量子ドットと量子ポイントコンタクトが結合した試料の光照射下での量子輸送特性の評価、および量子系への光照射効果の評価を希釈冷凍機中極低温、強磁場下で引き続き実施した。量子ポイントコンタクトの量子化抵抗のステップの光照射効果を明らかにした。励起光の波長を選ぶことにより、量子ホール端状態のみを光励起するか、もしくは二次元電子系のバルク状態と端状態の双方を光励起するかを選択可能であることを示した。試料端に局所的に光生成された非平衡電子の輸送過程をたどることに成功した。光生成された電子-正孔対を空間分離過程と、輸送過程のボトルネックとなる量子ホール端状態とバルク

状態間の結合の大きさが電子占有数 ν に応じて振動していることを明確に示した。

強磁場中量子ホール状態にある二次元電子系の端には電子間相互作用と閉じ込めポテンシャルにより、電子密度が一定でフェルミ面近傍にエネルギーギャップの存在する非圧縮性液体と、電子密度が空間的に滑らかに変化しエネルギーギャップのない圧縮性液体が交互に存在するとされている。この端状態中の電子は一方向にのみ運動し後方散乱がないため高い量子干渉性を示し、最近注目を集めている。しかしながら、従来、さまざまな試みにも関わらず、圧縮性液体と非圧縮性液体の空間分布は明解ではなかった。本研究では、希釈冷凍機中の近接場光学顕微鏡を用いた局所光励起により、端状態の空間分布を得ることに成功した。局所光励起により、局所的に任意の場所に電子を注入すること、共鳴励起により選択的に準位を励起することが可能となった。

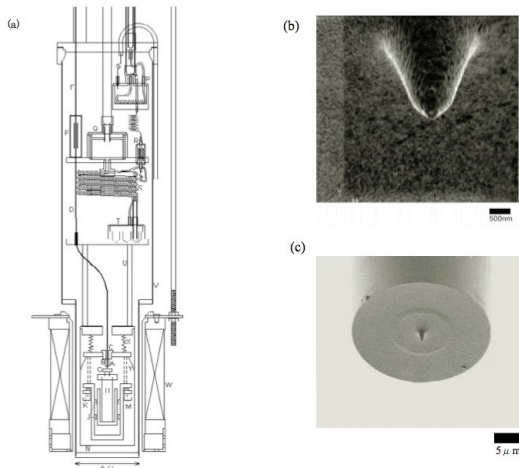


図2 (a) 希釈冷凍機中近接場光学顕微鏡の概略図。(b), (c) 近接場プローブの走査型イオン励起二次電子 (SIM) 像。

二次元電子系の端では伝導電子帯と価電子帯の双方が閉じ込めポテンシャルにより空間分布を持つ。光照射による価電子帯から伝導電子帯のフェルミ面への遷移エネルギーは、試料の外側で小さく、内側に向かうに従って大きくなるのがわかる。従って、入射光の波長を選ぶことにより、端状態のみを光励起するか、または二次元電子系のバルク領域と端状態の双方を光励起するかを選択することが可能である。このことを利用して、近接場光プローブを走査して光照射により試料端子間に生じる電圧のマッピングを行

った。その結果、圧縮性／非圧縮性液体による縞状構造を観測することに成功した。

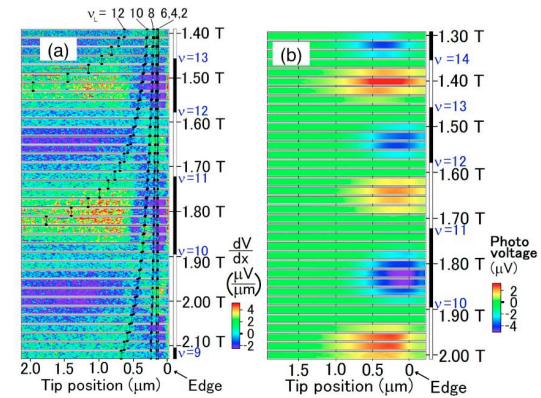


図3、(a)光励起エネルギーが 1.5194 eV の場合の二次元電子系試料端付近の光起電圧の空間微分の磁場依存性。非圧縮性液体の位置を縦線で示す。(b) 光励起エネルギーが 1.5120 eV の場合の二次元電子系試料端付近の光起電圧の空間微分の磁場依存性。走査範囲は $2.1 \mu\text{m} \times 82 \text{nm}$ であった。

さらに、光起電圧の実空間マップ像の磁場依存性を測定し、図3に示すように、圧縮性／非圧縮性液体の縞が磁場に応じて Chklovskii 等のモデルに従い空間変化することを見いだした。さらに、端状態のみを励起する波長を選ぶことにより、試料端に光生成された電子の行方をたどることが可能となった。試料端に光生成された電子が、端状態とバルク領域の間にあるバリアを越えて、光励起した試料端と反対の試料端まで到達する場合と、光励起した試料端にのみ留まる場合とがあることがマッピングにより明らかとなった。この結果は、端=バルク状態間結合の大きさが電子占有数 ν に応じて振動していることを明確に示した。

2、円偏光局所照射によるスピン注入によるスピンの関わる量子伝導現象の解明

局所的に光照射をするために、光近接場プローブには光ファイバーをエッチングにより先端を先鋭化し、金属蒸着をした上で開口部をもうけたものを用いた。高い光透過率を有する2段テーパ型的光近接場プローブを作製した。特に、本研究目的のために素材の改良を進め、さらに集束イオンビーム (FIB) 加工により真円度の高い開口

部を作製して偏光の乱れを極小に留めるようにした。一般に通常のシングルモード光ファイバー中の伝搬光ではファイバーの曲げ等による屈折率の異方性が生じる。また、前述の改良にも関わらず近接場光プローブ先端部の形状の軸対称からのずれによる異方性が残る。これらの異方性は吸収が小さい場合には補正することが可能である。そこで、私達は Berek 補償子を挿入し、屈折率の異方性を補正した。レーザー光源と光プローブまでの経路を全面的に見直し、光プローブから出射される円偏光度の向上を図った。まず、室温において出射光が直線偏光、円偏光となり条件を探索した。次に、スピン偏極している電子占有数奇数近傍において、量子ホール端状態への光照射から円偏光となる条件を探索してスピン注入を行った。

私達の希釈冷凍機中近接場光学顕微鏡システムでは、強磁場下での走査動作に問題があつて最大磁場が約 2.2 T に制限されていたが、このシステムに改良を加えた結果、3.5 T の強磁場下でも安定して動作させることに成功した。200 mK の極低温下にて量子ホール端状態の試料表面にバンド端に共鳴した波長の円偏光励起光を照射し光生成スピンを局所的に照射することに成功した。

3、光パルス局所光励起による超高速時間分解量子伝導測定の新手法の構築

時間分解量子伝導測定には、広帯域オシロスコープを用いた時間軸での電気測定、もしくは広帯域スペクトラムアナライザを用いた周波数軸での電気測定によって従来行われてきた。これらの測定では主に電気パルスの伝送路中での信号の減衰やパルス幅の広がりが生じ、時間分解能に限界が生じていた。一方で、光パルスの計測を行う時間分解光学測定では、伝送路中での光パルスの劣化は小さくフェムト秒代の時間分解測定による研究が幅広く多くの研究グループで実施されている。本研究では、被測定対象の直近の光パルスによって電気信号の on, off を行う光伝導スイッチを用いることにより電気パルスの伝搬長を最小にして、通常の電気測定のみでは困難な時間領域であるナノデバイスのピコ秒物理の解析を試みた。光伝導スイッチは半導体に直流電圧を印加して超短パルス光を照射することにより電子正孔プラズマを光生成し、過渡的に電気抵抗を変化させ

るものである。

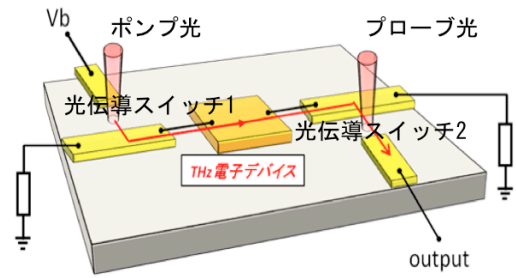


図4、二つの光伝導スイッチを用いた電子デバイスのピコ秒応答測定のための素子の概略図。

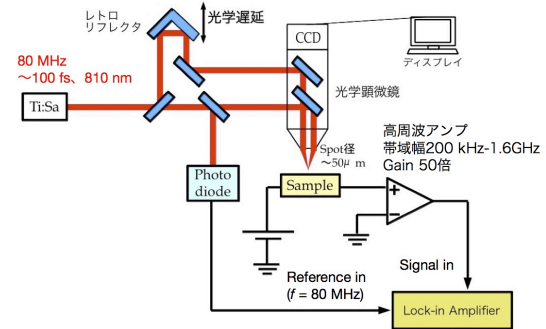


図5、二つの光伝導スイッチを用いた電子デバイスのピコ秒応答測定方法の概略図。ポンプ光、プローブ光に時間差をつけて過渡的応答測定を行う。

図4に示すように光伝導スイッチを2個使うことにより電気パルスのピコ秒時間分解測定が可能となった。光伝導スイッチを用いると1つの半導体チップ上に光伝導スイッチと被測定対象の電子素子を作り込んで時間分解を行えることから、配線を極めて短くすることが可能で、信号の劣化を抑えた測定が可能となった。

具体的には、繰り返し 80 MHz のチタンサファイアモード同期フェムト秒レーザーからのパルス光をポンプ光とプローブ光とに分け、可動ステージによりプローブ光の光路差を変えて時間遅延を与えて、図5に示すようにそれぞれ二つの光伝導スイッチに対物レンズを用いて局所的に照射した。出力信号を直近に設置した高周波アンプで増幅した後、高周波ロックインアンプで検出した。時間分解能はこれらの電気測定機器で決まるのではなく、光伝導スイッチの応答特性で決まる。光照射による抵抗変化が大きい半絶縁性 GaAs を用いた光伝導スイッチを用いた。光伝導スイッチを構成するショットキー電

極の形状、特に対向電極間の間隔の最適化を行った。

図6に、二つの光伝導スイッチを直列に接続した場合の応答特性例を示す。周期約 240 ps の振動的構造が観測された。この周期は光伝導スイッチに印加した直流バイアス電圧 (V_b) が 12 V 以下では一定であった。 $V_b = 10$ V に固定し、ポンプ光の平均パワーを 20 μ W から 10 mW、プローブ光平均パワーを 3 μ W から 1 mW に変化させて応答特性を調べた。ポンプ光の平均パワーが 10 mW の場合は熱によるブロードニングと信号の飽和が見られたが、20 μ W から 2.5 mW の間の平均パワーではそれらは見られず、また振動の周期も一定であった。

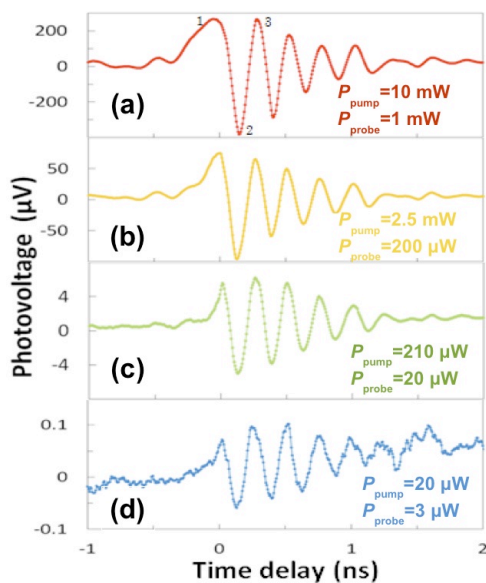


図6、光伝導スイッチの応答特性。直流バイアス電圧 $V_b = 10$ V に固定し、繰り返し 80 MHz 励起パルスレーザーのポンプ光 (P_{pump})、プローブ光 (P_{probe}) 平均パワーを (a) $P_{\text{pump}} = 10$ mW and $P_{\text{probe}} = 1$ mW, (b) $P_{\text{pump}} = 2.5$ mW and $P_{\text{probe}} = 200$ μ W, (c) $P_{\text{pump}} = 210$ μ W and $P_{\text{probe}} = 20$ μ W, and (d) $P_{\text{pump}} = 20$ μ W and $P_{\text{probe}} = 3$ μ W とした。

この結果はポンプ光の平均パワーを 20 μ W でも十分に大きな信号が得られ、ナノデバイスの時間応答測定にこの手法が適用可能であることを示した。次に実際に Si-MOSFET、結合量子ナノ構造試料を対象に図5に示すように二つの光伝導スイッチと被測定対象を近接して配置した試料を作製した。Si-MOSFET のソース、ドレイン電極と光伝導スイッチはワイヤボンディングにより可能な限り短く結線した。ゲート電圧に依

存した時間応答特性を得た。

得られた成果のインパクト、今後の展望

本研究を通じて、光物性分野と量子輸送分野それぞれにおいて発展してきた高度な実験手法を融合し、半導体ナノ構造中量子輸送の過渡現象の解明を行う新たな学問分野を切り開く道筋をつけることに成功した。光の特性を生かした実空間マッピング、過渡的測定は、今後量子輸送現象の解明に大きく寄与すると期待される。

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 7 件)

1. K. Ohtaki, K. Ohmori, and S. Nomura, "Time resolved measurements of ultrafast transport pulses using photoconductive switches", AIP Conf. Proc. (印刷中)、査読あり
2. H. Ito, Y. Shibata, S. Mamyoda, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, T. Akazaki, H. Tamura, Y. Ootuka, and S. Nomura, "Imaging of quantum Hall edge states under quasisonant excitation by a near-field scanning optical microscope", AIP Conf. Proc. (印刷中)、査読あり
3. H. Ito, K. Furuya, Y. Shibata, Y. Ootuka, S. Nomura, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, H. Tamura, and T. Akazaki, "Real-space mapping of compressible and incompressible strips by a near-field scanning optical microscope", AIP Conf. Proc. **1399**, 603 (2011). DOI: 10.1063/1.3666522 査読あり
4. H. Ito, K. Furuya, Y. Shibata, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, T. Akazaki, H. Tamura, Y. Ootuka, and S. Nomura, "Near-Field Optical Mapping of Quantum Hall Edge States", Phys. Rev. Lett. **107**, 256803/1-256803/4 (2011), DOI:10.1103/PhysRevLett.107.256803, <http://hdl.handle.net/2241/114819>, 査読あり。
5. H. Ito, Y. Shibata, K. Furuya, Y. Ootuka S. Nomura, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, H. Tamura, and T. Akazaki, "Mapping of quantum-Hall edge channels by a dilution-refrigerator based near-field scanning optical microscope", Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials **19**,

- (4) 563-569 (2010), DOI: 10.1142/S0218863510005467, 査読あり
6. K. Tsumura, S. Nomura, T. Akazaki, and H. Takayanagi, "Position dependent optical effect on the transport properties of S-Sm-S junctions", *Physics Procedia* **3**, 1177-1181 (2010) www.elsevier.com/locate/procedia, 査読あり
 7. H. Ito, Y. Shibata, K. Furuya, S. Kashiwaya, Y. Ootuka and S. Nomura, "Optical mapping of the boundary of a two-dimensional electron gas by a near-field optical microscopy", *Physics Procedia* **3**, 1171-1175 (2010) www.elsevier.com/locate/procedia, 査読あり

[学会発表] (計 18 件)

1. 野村晋太郎, 伊藤宙陸, 間明田周平, 柴田祐輔, 大塚洋一, 柏谷聡, 山口真澄, 田村浩之, 赤崎達志, 「二次元電子系端状態中非平衡キャリア」第 7 3 回応用物理学会学術講演会、愛媛大学、2012 年 9 月 11 日
2. H. Ito, Y. Shibata, S. Mamyoda, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, T. Akazaki, H. Tamura, Y. Ootuka and S. Nomura, "The optical excitation energy dependence of mapping of quantum Hall edge states", IUMRS-International Conference on Electronic Materials, (Pacifico Yokohama, Yokohama, Sep. 24, 2012).
3. K. Ohtaki, K. Ohmori, and S. Nomura, "Time resolved measurements of ultrafast transport pulses using photoconductive switches", 67.10, International Conference on the Physics of Semiconductors, (Zurich, Switzerland, August 2, 2012).
4. H. Ito, Y. Shibata, S. Mamyoda, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, T. Akazaki, H. Tamura, Y. Ootuka, and S. Nomura, "Imaging of quantum Hall edge states under quasiresonant excitation by a near-field scanning optical microscope", International Conference on the Physics of Semiconductors, (Zurich, Switzerland, July 31, 2012).
5. 大滝 健嗣、大毛利 健治、野村 晋太郎 「光伝導スイッチを用いた超短パルス時間分解測定」第 5 9 回応用物理学会関係連合講演会 東京、2012 年 3 月 17 日。
6. S. Nomura, H. Ito, K. Furuya, Y. Shibata, Y. Ootuka, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, H. Tamura, and T. Akazaki, "Imaging of Quantum Hall Edge States by Near-field Optical Microscopy", *Quantum Nanostructures and Nanoelectronics 2011*, (Tokyo, 3 Oct. 2011).
7. 野村晋太郎、「光パルス励起によるデバイスの応答特性測定」、CRESTチーム内研究会『ナノデバイスのピコ秒物理の解析による揺らぎ最小化設計指針の開発』、東京、2011年9月15日。
8. H. Ito, K. Furuya, Y. Shibata, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, H. Tamura, and T. Akazaki, Y. Ootuka, S. Nomura, "Imaging of edge states in a quantum Hall liquid by quasi-resonant near-field optical excitation" The 19th international conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems, (Tallahassee, USA, 25 July, 2011).
9. H. Ito, Y. Shibata, K. Furuya, Y. Ootuka, S. Nomura, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, H. Tamura, and T. Akazaki, "Real-space mapping of compressible and incompressible strips by a near-field scanning optical microscope", 30th International Conference on Physics of Semiconductors, (29 July, Seoul, Korea, 2010).

[その他]

ホームページ等

<http://www.px.tsukuba.ac.jp/home/ecm/snamura/lab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野村 晋太郎 (NOMURA SHINTARO)
筑波大学・数理物質系・准教授
研究者番号：90271527

(2) 研究分担者

赤崎 達志 (AKAZAKI TATSUHI)
高知工業高等専門学校・電気情報工学科
・教授
研究者番号：10393779