

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：新学術領域研究

研究期間：2008～2012

課題番号：20104005

研究課題名（和文） 低次元電界効果素子における多体量子相関効果の分光計測

研究課題名（英文） Spectroscopic investigations of many-body correlation effects in low dimensional field effect devices

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）：

低次元電界効果素子の新機能は電子系と正孔系間の多体量子相関効果により発現する。本研究では電子密度の低い場合について不規則性と分離して多体量子相関効果を分光計測により明らかにした。全電荷が整数ではない複合粒子である分数荷電準励起子の存在を分光計測により示した。さらに、近接場光学顕微鏡を用いた新しい分光計測手法を開拓し、非平衡キャリアの振る舞いを調べることに成功した。

研究成果の概要（英文）：

Electron-hole many-body correlation effects lead to novel functions of low dimensional field effect devices. In this research project, we have clarified many-body correlation effects by spectroscopic investigations, in particular, by separating the disorder effects in low electron density regime. We have observed emissions from fractionally charged quasiexcitons, which are composite particles with non-integral total charge. Moreover, we have developed a novel spectroscopic measurement method utilizing a near-field scanning optical microscope, and have succeeded in investigating dynamic correlations of non-equilibrium carriers.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|------------|------------|-------------|
| 2008年度 | 24,700,000 | 7,410,000 | 32,110,000 |
| 2009年度 | 16,900,000 | 5,070,000 | 21,970,000 |
| 2010年度 | 16,900,000 | 5,070,000 | 21,970,000 |
| 2011年度 | 16,900,000 | 5,070,000 | 21,970,000 |
| 2012年度 | 15,200,000 | 4,560,000 | 19,760,000 |
| 総計 | 90,600,000 | 27,180,000 | 117,780,000 |

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：分光、低次元半導体、多体量子相関、電界効果素子

1. 研究開始当初の背景

多体相関効果が期待される低電子密度極限での研究は、Abrahams等のスケーリング理論に端を発し、Finkelstein等により金属

絶縁体転移、強磁性転移等の理論的研究が精力的に開拓されてきた。これに主にシリコンの反転層の二次元電子系を対象に、Kravchenkoをはじめとする研究者により金

属絶縁体転移が電気伝導測定による実証等の先駆的実験的研究が続き、さらに、磁場下でのスピン偏極状態が Pudalov 等により示されてきた。ただし、シリコン反転層では不純物散乱の低減には限界があり、電子移動度は高いものでも 40 万 cm^2/Vs 程度に留まっていた。

この状況に革新をもたらしたのは、AT&T Bell 研究所、NTT 物性基礎研究所から相次いで成功の報告がもたらされた電界効果を用いて二次元電子系を誘起させる GaAs ゲート付非ドープ構造である。通常の GaAs ヘテロ構造は、ヘテロ界面の近傍にシリコンをドープした障壁層を有するいわゆる変調ドープ構造をとっている。これはシリコン反転層よりも電子移動度が高いという特徴があるが、低電子密度極限ではドーパントイオンからの散乱が無視できないという問題があった。この問題に終止符を打ったのが、AT&T Bell 研究所、NTT 物性基礎研究所の GaAs ゲート付非ドープ構造であり、散乱要因となるドーパントイオン層のない構造となっている。これは、非ドープ GaAs 層に直接、オーミック電極を取り、電界効果のみによって電子系、正孔系を誘起するものである。 10^9cm^{-2} 代後半の低電子密度領域から 10^{11}cm^{-2} 代半ばまで電子密度を電圧印加により制御可能で、かつ、ピーク電子移動度は 500 万 cm^2/Vs を超える革新的なものである。この構造を利用して Stormer、Hirayama 等により、低電子密度領域での分数量子ホール効果、スピン感受率の異常等に関する研究が最近盛んに行われるようになった。

2. 研究の目的

本研究は、光励起により少数キャリアを生成することによりはじめて現れる準平衡または非平衡の多体キャリア間相関効果を mK の極低温で光学的に調べることを通じて、動的電子相関の学理を確立することを目的とする。そのために

(1) ゲート付非ドープ量子井戸を基にした電界効果素子を用いてウルトラクリーン二次元電子-正孔系を生成する手法の確立を図る。

(2) 電子-電子間、電子-正孔間相関効果の制御技術を開発し、mK 領域での極低温、強磁場領域での光学特性を調べる。

(3) これにより従来の基底平衡状態のみに着目した輸送現象等の研究では見過ごされてきた動的相関効果の解明を行い、新しい光技術の開拓を行う。

3. 研究の方法

私たちが開発を進めてきたゲート付非ド-

ープ量子井戸試料は既にポテンシャル揺らぎの少ない理想的な系が実現可能であることが示されている。これをさらに発展させて、

(1) クリーンな低次元ナノ構造成長と精緻なデバイスプロセス技術の確立をはかる。

以上の精緻なデバイスプロセス技術の確立を踏まえて、

(2) 電子密度と量子井戸に垂直方向の電場を独立に制御可能な試料構造を生かして、荷電励起子と二次元電子系のクロスオーバー領域のモット転移と金属絶縁体転移の関わりを解明、

(3) 電子-電子間、電子-正孔間相関効果制御によるスピン分裂の解明、

(4) 電子-電子間、電子-正孔間相関効果制御による分数電荷準粒子の解明、

(5) mK 領域での時空間ダイナミクスの研究を実施した。

4. 研究成果

(1) 荷電励起子と二次元電子系のクロスオーバーに関する研究

二次元電子系において、乱雑静電ポテンシャルが支配する低電子密度での局在状態が電子密度の増加に伴って二次元電子ガス状態へと変化することと、光励起下の二次元電子+正孔系において、低電子密度領域で存在する荷電励起子状態が電子密度増加に伴って二次元電子ガス正孔状態へとクロスオーバーすることの対応関係は、両者の生じる電子密度が重なり合っているためこれまで不明瞭であった。本研究では、極低温において電子密度と電場をパラメータとした発光スペクトルを測定し、電子密度の増加に伴う二次元電子系の遮蔽長の減少と、荷電励起子中の電子-正孔間のクーロン引力の遮蔽に伴う荷電励起子半径増大との対応関係を明らかにし、遮蔽長が荷電励起子半径とほぼ一致する電子密度を境にして荷電励起子状態と二次元電子ガス正孔状態がクロスオーバーすることを見出した。

図 1 に示すように、温度 $T=100$ mK において電場下における発光線幅の変化から荷電励起子有効半径 a^* の電子密度依存性を求めた。スクリーニング長は非線形遮蔽モデルにより見積もられる。 a^* はスクリーニング長が減少する電子密度 $2 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ を超えたところで急激に増大することを見いだした。これは二次元電子ガスの遮蔽によって荷電励起子が二次元電子ガス-正孔状態へとクロスオーバーしていることを示している。

[M. Yamaguchi et al., Phys. Rev. B **87** (2013) 081310(R).]

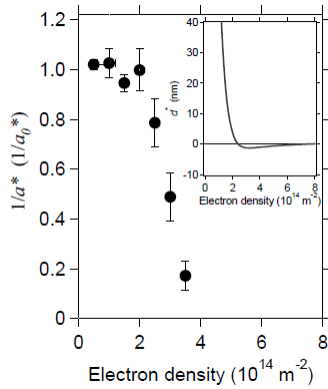


図1 荷電励起半径の逆数の電子密度依存性. 挿入図: スクリーニング長の電子密度依存性.

(2) ゲート付非ドープ量子井戸を用いた分数電荷準粒子解明

分数量子ホール状態では、分数電荷の準電子、準正孔、スピン反転した準電子からなる励起状態があることが知られている。光励起下において、これらの準粒子と価電子帯の正孔とが結合した分数荷電準励起子の存在が議論されているが今まで明確なデータは示されていない。分数量子ホール領域の分光学的研究は従来 10 T 以上の強磁場で行われ、基底状態は完全スピン偏極状態とされていた。私達は、散乱の要因となるドナー層がなくゲート電圧によって高移動度、極低電子密度の二次元電子系を誘起可能な試料を用いて、極低温において電子占有数 $1/3$ 近傍の発光スペクトルを 6 T 以下の比較的小さい磁場において円偏光分解してスピン状態を含めた発光分光の研究を行った。

ランダウ準位占有数 $\nu < 1$ の分数量子ホール効果領域では、一般に電子は上向きスピンの偏極していると仮定されることが多いが、低電子密度では例えば $\nu = 2/3$ 等の特定の ν でスピン偏極度が小さくなることが知られている。さらに光生成された正孔が関わると、キャリア相関に起因して基底状態は電子系の場合と異なる状態を取り得る。実際、図 2 に示すように少数スピンを捉える σ^+ 偏光状態における発光のピークが観測された。発光ピーク強度の電子占有数 ν 依存性が例えば $\nu = 1/3, 2/5, 3/7$ 等の分数占有数によって明確な異常を示し、二次元電子系の相関を反映していることが示された。さらに、 $T = 2.5$ mK における詳細な測定により、 $\nu = 1/3$ 近傍の σ^+ 円偏光発光に明確に分離された 4-5 個の発光ピークを初めて観測した。その内の一つは準電子励起の存在する $\nu \geq 1/3$ においてのみ観測され、 $\nu < 1/3$ には見られなかった。また、この発光ピーク

は $T \geq 700$ mK の高温で消失した。

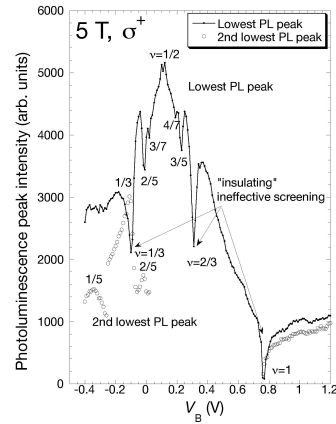


図2 5 T、温度 100 mK、 σ^+ 偏光状態における二つの発光のピーク強度の電子占有数 ν 依存性。

以上の結果を理解するために、球面上のスピン自由度を含む電子と正孔の有限系での厳密対角化に基づく数値計算結果が行われた。その結果、荷電子帯の正孔の存在下において、 $\nu = 1/3$ 近傍で電子系のスピン偏極度が低下すること、電荷 $e/3$ の準電子の関わる発光が $\nu > 1/3$ で見られることが示された。この数値計算結果により、観測された発光ピークを説明された。私たちの設定した実験条件では、従来の観測例と比較して磁場が低いため、光励起下での基底状態の全スピンが低下した状態をとりやすいことが、従来、報告されていない分数荷電準励起子状態の観測につながったと考えられる。 [S. Nomura et al., AIP Conf. Proc. 1399, 615 (2011).]

(3) 二次元電子系端状態の局所光励起による研究

非平衡キャリアの振る舞いを調べるためには、極低温において局所的に共鳴/準共鳴光励起をすることが有効であることが極低温中近接場光学顕微鏡を用いた研究により示された。本研究では、mK 領域での極低温、強磁場領域において近接場顕微鏡を用いた空間マッピング測定を行った。その結果圧縮性・非圧縮性液体が交互分布する端状態による縞状構造を光起電圧の実空間マッピングにおいて示すことに成功した。

従来の手法と比べて私たちの光学的手法の優位点は励起エネルギー選択性にある。実際、図 3 (a) に示すように光励起エネルギーの変化によって光起電圧の実空間プロファイルが変化することが示された。これは、図 3 (b) に示すように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ち、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ためである。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、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することが可能である。図3 (c), (d)に示すように、光起電圧信号の大きさとその実空間プロファイルの半値幅は励起エネルギー依存性を示すことができる。

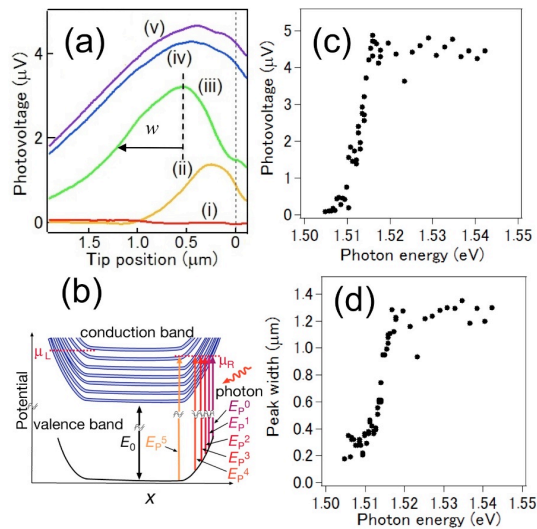


図3 (a) $B=1.64$ T 光励起エネルギー (i) 1.5083, (ii) 1.5120, (iii) 1.5139, (iv) 1.5176, 及び(v) 1.5194 eV における光起電圧の強度分布の断面図。(b) 価電子帯と伝導電子帯の間の光遷移の概略図。伝導電子帯の影をつけた部分が広がったランダウ準位。(c) $B=1.64$ T における光起電圧の光励起エネルギー依存性。(d) $B=1.64$ T における光起電圧の半値幅の励起エネルギー依存性。

このことを利用して、試料端に光生成された非平衡電子の行方をたどることが可能となった。光励起により生成された非平衡電子はバルク状態と端状態の間のトンネル距離の影響を受ける。試料端に光生成された電子が、端状態とバルク状態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近接場光学顕微鏡を用いたマッピングにより明らかとなった。

以上のように、近接場顕微鏡を用い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。本方式はさらに円偏光を用いることにより任意の場所にスピン注入を行うことを可能とする。本研究成果は、半導体スピントロニクス素子、ト

ポロジカル半導体等の研究の向上と強化につながると期待される。

[Ito et al., Phys. Rev. Lett. **107**, 256803 (2011).]

(4) 高品質シリコンナノ構造中の電子正孔状態に関する研究

光強励起された半導体において、再結合時間が十分長い場合は光生成キャリアが熱力学的平衡状態に達して格子温度まで冷却し、電子-正孔系の量子凝縮が起こる。低温において、励起子ガスから液体と気体の共存相である電子正孔液滴相 (EHD) を経て電子-正孔液体相 (EHL) となると考えられ、従来主にバルク半導体において調べられてきた。Si-ナノレイヤやナノワイヤにおいて、閉じ込め効果によって静電遮蔽効果の低減と電子-正孔間のクーロン力の増大が見込まれる一方、バルクで6重に縮退している谷縮退が解けるため、量子凝縮状態の相図がどのようなか自明ではない。閉じ込め構造では量子状態を擾乱すると不規則性が不可避であるため、十分に高品質の試料が欠かせないが、本研究では、半導体先端テクノロジーにて作製された高品質の silicon-on-insulator 試料を得て、閉じ込め系における量子凝縮状態の研究を実施した。

測定に用いた試料のシリコン層の厚さは 2.7 nm - 25.2 nm であった。A03 班金光グループと共同で時間分解発光測定を実施した。バルク Si では液滴相の寿命は 500 ns 以上であるのに対して、シリコン層の厚さが薄くなる程、発光寿命が短くなり 25.2 nm の試料で 46 ns、2.7 nm の試料で 2.7 ns と短くなることを見いだした。さらに、液滴相とプラズマ相との間の臨界温度が 35 K とバルクの値から増大していることを見いだした。ナノレイヤ試料において電子正孔液相への転移が促進されていることを示された

[Y. Sakurai et al., AIP conference Ser. (in press).]

(5) 電子-電子間、電子-正孔間相関効果制御によるスピン分裂の解明

二次元電子系では有効 g 因子が電子間相互作用により変化することが知られている。磁場中ではランダウ準位電子占有率 ν に応じて、上向きスピンと下向きスピンの電子数の差が ν 奇数において極大になり、有効 g 因子が極大となる。これまでの研究では数 T から 20 T 程度の強磁場において行われてきた。低電子密度において移動度の高い試料を用いて、従来研究例の皆無であった $B=1$ T 以下の低磁場にて発光スペクトルから有効 g 因子の ν

依存性を測定した。

ランダウ準位を反映する発光スペクトルから有効 g 因子を求めた。得られた有効 g 因子は図 4 に示すように ν 偶数で極小、 ν 奇数で極大となる振動を示した。この測定結果と自己無撞着ボルン近似の範囲で不純物散乱の影響を取り入れて電子の自己エネルギーを計算した理論との比較を行った。その結果、 $\nu=5, 7$ において観測された有効 g 因子の電子密度依存性は理論で良く説明され、電子間交換相互作用による増大が観測されたことと結論付けられた。 $\nu=3$ において理論との乖離が見られ、そこでは電子間交換相互作用による有効 g 因子の増大が励起子効果により部分的に打ち消されていることがわかった。また、電子密度の低下に伴う ν 偶数における有効 g 因子の大きさの増大は観測されなかった。

[S. Nomura et al., Phys. Rev. B **87**, 085318 (2013).]

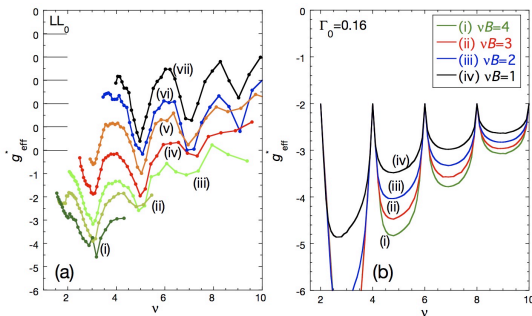


図 4 (a) 電子密度 n_s = (i) 2.9×10^{10} , (ii) 4.0×10^{10} , (iii) 5.0×10^{10} , (iv) 6.0×10^{10} , (v) 7.1×10^{10} , (vi) 8.6×10^{10} , および (vii) $1.0 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ における観測された電子占有数 ν に依存した有効 g 因子 g_{eff}^* (b) $\nu B =$ (i) 4, (ii) 3, (iii) 2 および, (iv) 1, $\Gamma_0 = 0.16$ の場合における計算で求められた有効 g 因子。

(6) 二重量子井戸構造における電子間相互作用と電子-正孔間相互作用

電子密度と縦方向の電場を外部制御可能なように構造を最適化した二重量子井戸構造試料の時間分解発光測定を実施した。二つの量子井戸層に光励起された電子と正孔を分離して、再結合時間を長くし、電子-正孔多励起状態のキャリア温度の低下を図った。表面、裏面電極への電圧印加により電子密度と電子-正孔間距離を制御し、1 ns から数 100 ns へと発光寿命が長くなることを示した。

ゲート制御された GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As 非対称二重量子井戸を用いて、共通の電子系に対して、 d の大きい井戸間遷移と d の小さい井戸内遷移の発光を同時に観測することが可能

となった。その結果 $\nu=1$ において発光エネルギーの跳びが井戸間遷移と井戸内遷移とで異なることが示された。観測された発光エネルギーの跳びの大きさより井戸内遷移、井戸間遷移それぞれの場合について電子と正孔の層間距離が見積もられた。この手法により電子間相互作用と電子-正孔間相互作用を分離して議論することが可能となった。

得られた成果のインパクト、今後の展望

分子線エピタキシー法によって得られる高品質の GaAs を用いた二次元電子系の研究は、分数量子ホール効果、金属絶縁体転移、スカーミオン状態等を始めとした電子系の多体相関効果の理解に世界的に見て主要な役割を果たしている。本研究は、高品質 GaAs 中二次元電子系の物性を理解する上で、多体相関効果と多体乱雑ポテンシャルの寄与が共に重要であることを明らかにした。本研究は、低電子密度領域で電気伝導より優位にたつ発光特性からその一端を明らかにするという独自の視点にたつて、低電子密度領域の二次元電子状態を動的相関の観点から切り込んだものである。信頼性の高い高品質半導体は、この基礎物理の探求において不可欠な舞台となっている。本研究により編み出された極低温、強磁場領域で近接場顕微鏡を用いた局所励起手法は、半導体スピン素子、トポロジカルな量子効果を示す物質系等の研究の向上と強化につながると期待される。さらに、当該研究領域で見いだされた新しい知見は、微細化が進む将来の FET、超高速光変調器等で起こり得る問題の解決に寄与する。当該研究領域の進展は、工学分野を含めた我が国の学術水準の向上・強化につながっている。

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 15 件)

1. S. Nomura, H. Tamura, M. Yamaguchi, and T. Akazaki, and Y. Hirayama, "Exchange energy enhanced g -factors obtained from Landau fan diagrams at low magnetic fields", Phys. Rev. B **87**, (8) 085318 (2013). (DOI: 10.1103/PhysRevB.87.085318), 査読有
2. M. Yamaguchi, S. Nomura, H. Tamura, and T. Akazaki, "Measurement of photoluminescence spectral linewidth of a GaAs quantum well in perpendicular electric fields: Evidence of a crossover from trions to an electron-hole gas", Phys. Rev. B **87**, (8) 081310 (2013). (DOI:

- 10.1103/PhysRevB.87.081310), 査読有
3. S. Nomura, M. Yamaguchi, H. Tamura, T. Akazaki, and Y. Hirayama, "Dynamical correlation of fractionally charged excitons with a two-dimensional electron system", AIP Conf. Proc. **1399**, 615 (2011). 査読有
 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 (2011). (DOI: 10.1103/PhysRevLett.107.256803), 査読有
 5. M. Yamaguchi, S. Nomura, H. Tamura, and T. Akazaki, "Photoluminescence spectra of gated undoped quantum well with lateral potential modulation in low electron density", Physica E **42**, 1167-1171 (2010). (DOI:10.1016/j.physe.2009.10.042), 査読有

[学会発表] (計 79 件)

1. 野村晋太郎, 「分数量子ホール状態からの発光」平山核スピントロニクス ERATO-セミナー、仙台市、東北大学、2012年6月5日。(招待講演)
2. K. Ohtaki, K. Ohmori, and S. Nomura, "Time resolved measurements of ultrafast transport pulses using photoconductive switches", International Conference on the Physics of Semiconductors, (Zurich, Switzerland, August 2, 2012).
3. M. Yamaguchi, S. Nomura, H. Tamura, T. Akazaki, "Narrowing of photoluminescence linewidth in the non-linear screening regime", International Conference on the Physics of Semiconductors, (Zurich, Switzerland, July 31, 2012).
4. Y. Sakurai, T. Tayagaki, K. Ohmori, K. Yamada, Y. Kanemitsu, K. Shiraishi, S. Nomura, "Fast luminescence decay of electron-hole quasi-two dimensional systems in Si nanolayer", International Conference on the Physics of Semiconductors, Zurich, Switzerland, July 31, 2012.
5. 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 quasisresonant excitation by a near-field scanning optical microscope", International Conference on the Physics of Semiconductors, (Zurich, Switzerland, July 31, 2012).
6. S. Nomura, M. Yamaguchi, H. Tamura, T. Akazaki, Y. Hirayama, M. Korkusinski, and P. Hawrylak, "Fine structures in photoluminescence in the fractional quantum Hall regime in low magnetic field", International Conference on the Physics of Semiconductors, (Zurich, Switzerland, July 31, 2012).
 7. S. Nomura, M. Yamaguchi, H. Tamura, T. Akazaki, and Y. Hirayama, "Dynamical correlation of fractionally charged excitons with a two-dimensional electron system", 30th International Conference on Physics of Semiconductors, 27 July, Seoul, Korea, 2010.
 8. S. Nomura, M. Yamaguchi, H. Tamura, T. Akazaki, and Y. Hirayama, "Circular polarization reversal of split photoluminescence peaks at n of slightly less than 1", The 18th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-18), (Kobe, July 20, 2009).

[その他]

ホームページ等

<http://www.px.tsukuba.ac.jp/home/ecm/sn-omura/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

山口 真澄 (YAMAGUCHI MASUMI)
日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所量子電子物性研究部・主任研究員
研究者番号：80393817