

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360001

研究課題名(和文) InGaAs系量子井戸におけるメソスコピック・スピン輸送効果の検証

研究課題名(英文) Confirmation of Mesoscopic Spin Transport in InGaAs Quantum Wells

研究代表者

古賀 貴亮 (Koga, Takaaki)

北海道大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：30374614

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,800,000円、(間接経費) 4,740,000円

研究成果の概要(和文)：InP格子整合系InGaAs量子井戸に関して、ゼロ磁場スピン分離項を定量的明らかにした。これまで定量的な解明に至らなかったRashba項の存在を初めて明確に示すとともに、その大きさについても定量的な解明を行った。具体的には、極低温での磁気伝導度に見られる弱反局在効果の理論解析により、Rasha係数と井戸内電場<Ez>の間の厳密な比例関係を示すことに初めて成功した。また、この系でのDresselhaus項が非常に小さいことも同時に明らかにした。更に、ゲートにより<Ez>が正負に変化するウェハ上に作製したメソ系ループ配列構造での時間反転量子干渉効果を測定し、半古典理論モデルの有効性を実証した。

研究成果の概要(英文)：For InP-lattice-matched InGaAs quantum wells, we have quantitatively revealed the zero-field spin splitting term. Not only in showing the presence of the Rashba term for the first time which has been the target of controversy for long time, but also we have succeeded in elucidating its size quantitatively. More specifically, we have shown for the first time the linear relation between the Rashba coefficient α and the electric field inside the well $\langle E_z \rangle$ from the theoretical analysis of the weak anti-localization effect that is seen in the magneto-conductivity data at dilution temperatures. In addition, we have found that the Dresselhaus term in this system is very small. Finally, we have also measured the time-reversal quantum interference effect in a mesoscopic loop array structure that is fabricated in a wafer whose $\langle E_z \rangle$ can be varied across zero by gate and demonstrated the effectiveness of the semi-classical approach in theory.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物性・結晶工学

キーワード：スピントロニクス メソスコピック物理 ラシュバ効果 スピン軌道相互作用 半導体量子井戸 化合物半導体 スピンデバイス スピン物性

1. 研究開始当初の背景

半導体の電子状態 (ブリルアンゾーンのΓ点近傍) は、多くの場合、有効質量を使った実効ハミルトニアン

$$H = -\frac{\hbar^2}{2m^*} \nabla^2 + V_{\text{hetero}}(z)$$

でよく記述される。ここで、 m^* は有効質量、 $V_{\text{hetero}}(z)$ は伝導体オフセットやバンドの曲りによる伝導電子に対する実効的なポテンシャルである。このような半導体ヘテロ構造系では、系の構造反転対称性や結晶反転対称性の崩れから、Rashba 項 $H_R = \alpha(k_y \sigma_x - k_x \sigma_y)$ や Dresselhaus 項 $H_D = \gamma \{k_x(k_y^2 - k_z^2) \sigma_x + \text{その巡回置換の和}\}$ が、実効ハミルトニアンの高次の項として出現するはず、ということ是对称性の議論からは明らかであった (Rashba 1960, Dresselhaus 1955) が、決定論的に直接測定する方法がなかった。そして、これらのスピン分離項は、時折見られる、シュブニコフドハース (SdH) 振動のピーティング現象や極低温で見られる正の磁気抵抗 (弱反局在) の起源であろうと考えられた以外、大きな注目を集めていなかった。

時代の空気が変わったのが、1990 年の Datta-Das によるスピン FET の提案 (APL 1990) である。この提案では、当時、存在自体が未確立であった Rashba 項が取り上げられ、それによるスピン回転のメカニズム及び Rashba 係数 α のゲート電場による変調可能性が論じられたが、実験では未確認の事柄だった。

Rashba 係数 α がゲートによって制御可能であるという有力な証拠は、SdH ピーティングのゲート依存 (PRL1997) と弱反局在効果のゲート依存 (PRL2002) によって最初に示された。また、これらのスピン分離項は、InGaAs 量子井戸では、エネルギーにして meV 程度となることもこのころ明らかとなった。このように、「Rashba 項のゲート変調可能性」がほぼ確立したのは 2000 年代始め頃であり、それ以降、これらゼロ磁場スピン分離項 (Rashba 項、Dresselhaus 項) に起源を求める物理現象の研究が大きく進むことになる。一例を挙げると、スピンガルバニック効果 (Science2002)、スピン回転効果の直接観察 (Nature2004)、スピンホール効果 (Science2003, 2004)、スピン軌道場を使ったスピン量子ビット制御 (Science2007) アハラノフ・キャッシャー効果と幾何学位相存在の実証 (PRB2006, PRL 2006, 2012)、永久らせんスピン旋回状態の実現 (Nature2009a)、パリスティックスピンレゾナンス (Nature2009b)、Datta-Das のスピン FET 動作の実証 (Science 2009) 等である。

2000 年代は、これらの研究の進展と並行して、Datta-Das の論文中で述べられた「狭ギャ

ップ半導体では、Dresselhaus 項は通常小さい」ことの根拠 / 証拠が改めて問われた。というのは、 $k \cdot p$ モデルから予測される Dresselhaus 項は、必ずしも Rashba 項に比べて無視できるほど明らかに小さなものではなかったからだ。つまり、Rashba 項と Dresselhaus 項は共存するはずで、その分離は必ずしも容易でないだろうと考えられた。また、Rashba 係数 α の値が本当に (厳密に) 量子井戸内部電場 (面直方向) の期待値 $\langle E_z \rangle$ に比例するのか? そうであれば、その比例係数はサンプル依存なく、材料固有の物性値として定量的に求まるか? といった素朴 (であるが重要) な問いへの回答は、どの半導体材料に対しても与えられていなかった。

さて、自由電子に対するスピン軌道相互作用 (SOI) は、Dirac 方程式から導かれ、そのハミルトニアンは、 $H_{\text{SO}} = \frac{\hbar}{4m^2 c^2} (\nabla V \times \mathbf{p}) \cdot \boldsymbol{\sigma}$ と与えられる。つまり、自由電子の SOI まで含めた正しいハミルトニアンは、

$$H = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{r}) + \frac{\hbar}{4m^2 c^2} (\nabla V \times \mathbf{p}) \cdot \boldsymbol{\sigma}$$

である。ここで $V(\mathbf{r})$ を $V_{\text{hetero}}(z)$ で置き換え、 xy 方向の波動関数を平面波にとることによって Rashba 項と同じ形式の SOI 項が出現する。このように、自由電子での SOI 項は、固体電子の実効ハミルトニアン中の Rashba 項を受け入れる素地を与えるが、自由電子での SOI 項はエネルギーにして高々 10^{-10} eV 程度の無視されるべき小さなものでしかない。固体物理学的効果を含めた半導体ヘテロ構造での (実効ハミルトニアンとしての) Rashba 項は、実は 1974 年の大川ら (JPSJ1974) による $k \cdot p$ ハミルトニアンを用いた有効質量近似的取扱いにより、大きさの予測も含めほぼ正しい結果が得られていたが、本研究が開始される以前には、その理論式の定量的 / 実験的な検証は、なされていなかった。次節以降で述べるとおり、本研究の準備研究である若手研究 A (19684009) から本研究に至る継続的な研究により初めて大川らの予測が定量的に検証され、半導体ヘテロ構造での Rashba 項の起源が確かに固体物理学的なものであると実証されたといえる (PRB2011)。

参考文献

- Rashba1960** E. I. Rashba, SOVIET PHYSICS-SOLID STATE 2, 14 (1960). **Dresselhaus1955** G. Dresselhaus, Phys. Rev. **100**, 580 (1955). **APL1990** S. Datta and B. Das, Appl. Phys. Lett. **56**, 3 (1990). **PRL1997** J. Nitta, T. Akazaki, H. Takayanagi and T. Enoki, Phys. Rev. Lett. **78**, 1335 (1997). **PRL2002** T. Koga, J. Nitta, T. Akazaki and H. Takayanagi, Phys. Rev. Lett. **89**, 046801 (2002). **Science2002** S. D. Ganichev, et al., Nature **417**, 153 (2002). **Nature2004** Y. Kato, et al., Nature **427**, 50 (2004). **Science2003** S. Murakami, et al., Science **301**, 1348 (2003). **Science2004** Y. K. Kato, et al., Science **306**, 1910 (2004). **Science2007** K. C. Nowack, et al., Science **318**, 1430 (2007). **PRB2006** T. Koga, et al., Phys. Rev. B **74**, 041302(R) (2006).

PRL2006 T. Bergsten, *et. al.*, Phys. Rev. Lett. **97**, 196803 (2006). PRL2012 F. Nagasawa, *et. al.*, Phys. Rev. Lett. **108** (2012). Nature2009a J. D. Koralek, *et. al.*, Nature **458**, 610 (2009). Nature2009b S. M. Frolov, *et. al.*, Nature **458**, 868 (2009). Science2009 H. C. Koo, *et. al.*, Science **325**, 1515 (2009). JPSJ1974 F. J. Ohkawa and Y. Uemura, Journal of the Physical Society of Japan **37**, 9 (1974). PRB2011 S. Faniel, *et. al.*, Phys. Rev. B **83**, 115309 (2011).

2. 研究の目的

背景で述べたような実効ハミルトニアン中のゼロ磁場スピン分離項を定量的に明らかにすることが本研究の目的である。また、これらの値は、材料系ごとに異なるはずであり、また、格子歪の影響も強く受ける。更に、同一の材料でも $\langle E_z \rangle$ の値は試料毎に異なる上に $\langle E_z \rangle$ を直接測定する術もなく、 α 値は激しく試料依存せざるを得ないと一般的には思われていた。また、このことは、Rashba項の大きさを材料毎に定量的に定めようとする研究者の努力を阻害する要因にもなっていた。そういった背景の中、本研究では、当時より最も研究が進んでいた(001) $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Al}_{0.47}\text{As}$ 量子井戸材料に関して、「 α $\langle E_z \rangle$ の関係が本当に成り立っているか？また、その場合の比例係数 a_{SO} の値は定量的に(サンプル依存なく)求まるか？」ということを明らかにすることが最大の目的であった。その上で、例えば、量子井戸の障壁層を $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ から InP に変える(格子整合を保ちながら材料のみを変える)(主に結晶歪の効果を調べるために)量子井戸層の組成を僅かに変化させる ($\text{In}_{0.53+x}\text{Ga}_{0.47-x}\text{As}$ の x を ± 0.1 程度変化させる)など、固体物理学的基礎物性の観点からゼロ磁場スピン分離項の本質を明らかにすることである。

本研究では、 $\text{InGaAs}/\text{InAlAs}$ 系でのゼロ磁場分離項を明らかにすると共に、ゼロ磁場スピン分離項を使ったデバイス応用(半導体スピン工学)を開拓することをも目的とする。具体的には、メソスコピックループ配列構造で見られる波動関数の時間反転経路間での干渉効果を調べることにより準弾道的な電子軌道で起きるスピン回転効果を明らかにする、内部電場 $\langle E_z \rangle$ の符号が異なる(大きさは等しい)2つの量子井戸を結合した2重量子井戸を用いてスピンプロック素子を実現する、などである。

3. 研究の方法

本研究で目指す、ゼロ磁場スピン分離項の定量的評価を達成するに当たって留意した点を以下に列挙する。

試料(図1)に関しては以下の性質を満たしている。

- (1) 質の高いエピタキシャル技術で成長したものであり、電子は第一サブバンドのみを占有している。

- (2) 量子井戸層以外の部分に伝導キャリアがなく、平行コンダクションがない。
- (3) 原子層堆積法(ALD)で製膜したゲート酸化膜を導入することにより、ゲートリークなくゲート操作することが可能である。
- (4) ドーピングを調整することにより、量子井戸内部の $\langle E_z \rangle$ の値をゲートにより正負に変化させられるようになっている。つまり、ゲートなしの状態でも $\langle E_z \rangle$ の値が零付近であるような試料である。

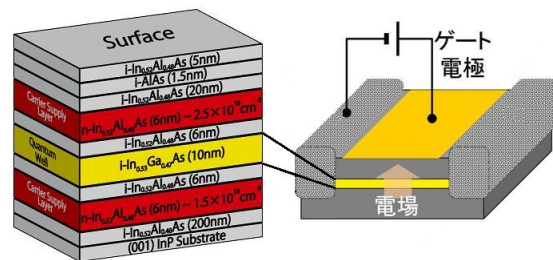


図1: 本研究で用いた試料構造とデバイス

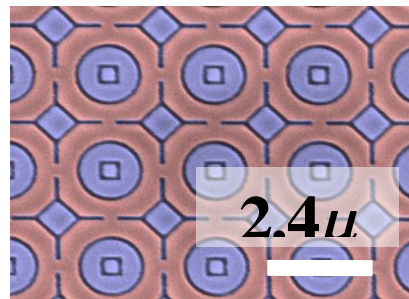


図2: 電子線リソグラフィ法によって作製したメソスケール配列の電子顕微鏡写真。この構造で電子が流れるのは、赤で色づけされた部分である。青で色づけされた部分は、孤立しており電気は流れない。実験では、このようなメソ構造を図1のゲート電極直下の $125 \times 250 \mu\text{m}^2$ の領域に作り込み、磁気コンダクタンス効果を測定する。

測定に関するポイントを以下に述べる。

- (1) 希釈冷凍機を用いて試料を極低温(電子温度 100mK 程度)に冷却してDCコンダクタンスを測定する。ここでは、低周波数の交流を用いるロックインアンプ法を用いる。極低温では、電子の相緩和時間 τ_ϕ は、およそ T^{-1} に比例する形で長くなる。弱反局在効果のフィッティングによる解析で求まるスピン緩和時間(の逆数) τ_{SO}^{-1} は、ゼロ磁場スピン分離エネルギーに直接関係のあるパラメータだが、この値は、 τ_ϕ^{-1} の精度で決まるため、測定温度が低いほど精密にゼロ磁場スピン分離項の大きさを決定することができる。
- (2) 図2に示すようなメソスコピックループ配列構造(メソ構造)をリソグラフィ技術で作製し、そこでの時間反転干渉項を希釈冷凍機温度で測定する。メソ構造内の電子は、メソ構造の形状により内因的にカオスになるようにしてある。つまり、ディスオーダーや不純物を考慮しない理想的なメソ構造形状のみで決まる電子のビリヤー

ド軌跡がカオスになるということである。それにより、実験において不可避である外因的な不純物散乱に対してもロバストな実験結果が得られるため、その理論的解釈が容易になる。これにより、メゾ構造の実寸のみの情報からスピン分離項に関する定量的な情報（物性値）が抽出できることとなる。物性値測定に関するこのようなアプローチは、これまでに前例のない全く新しい試みである。

4. 研究成果

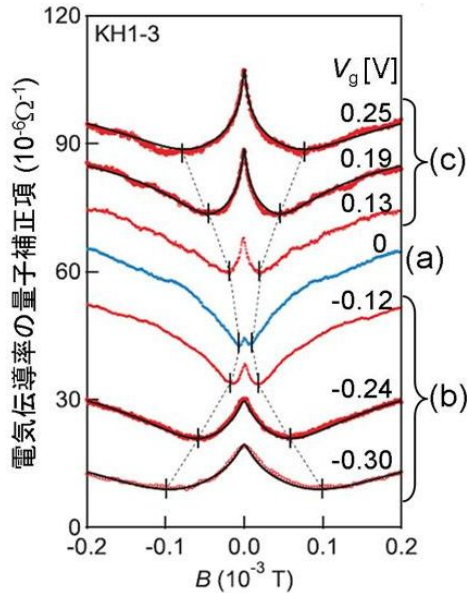


図3：極低温での磁気コンダクタンス（弱局在/弱反局在）の測定結果（各曲線は上下にシフトしている）。点線で繋がれた短い垂直線は B_{\min} の位置を表す。この図での(a)~(b)は図4での(a)~(b)に対応している。

図1に示した試料の極低温での磁気コンダクタンス測定結果を図3に示す。ここでは、複数のゲート電圧 (V_g) 下での磁気コンダクタンス曲線を示している。これらの全曲線に共通して言えることは、零磁場付近に鋭いカスプ上のピークが現れていることである。これは、「電子系に何らかの「スピン軌道相互作用」が生じていることを意味している。また、このピークは $V_g=0V$ のときに最小となっていて、 $|V_g|$ の増加とともに大きくなっている。これらの磁気コンダクタンス曲線は、 $V_g=0V$ 付近のものを除いて、Golub の理論 [L. Golub, Phys. Rev. B **71**, 235310 (2005)] でフィッティング可能である（図3中の $V_g=0.25, 0.19, -0.24, -0.30V$ のデータに重なっている黒の実曲線）。そこから抽出されるスピン軌道磁場 B_{SO} の値は、経験的な帰結ではあるが、磁気曲線の極小値を与える磁場 B_{\min} （異なる曲線の間で、点線で結ばれた短い鉛直線の印）とほぼ同じ値となる。さて、我々の用いた Golub の理論では、その前提として Rashba 型のスピン分離

項を仮定している。そのようなモデルで実験結果を精度よくフィッティング出来たという事実は、 $|V_g| > 0.19V$ では、試料のスピン分離項は Rashba 型であると考えてよい。ところが、 B_{\min} が最小となる $V_g=0V$ のデータは、我々の用いた Golub 理論ではフィッティングできない。よって、 $V_g=0V$ のデータに関しては、試料のスピン分離項は Rashba 型ではなく、 B_{SO} 値も抽出できない。このような問題を回避するために、我々は、実効ハミルトニアン中のゼロ磁場スピン分離項の現象論的な大きさのみを問題とし、その大きさの指標に B_{\min} を用いることを提案する。実際には、 α と B_{SO} の間の関係式 $\alpha = \sqrt{e\hbar^3 B_{SO}} / m^*$ を形式的に摸して $\tilde{\alpha} = \sqrt{e\hbar^3 B_{\min}} / m^*$ （ここでの単位は Jm）で実験的（現象論的）なスピン軌道相互作用係数 $\tilde{\alpha}$ を定義する。

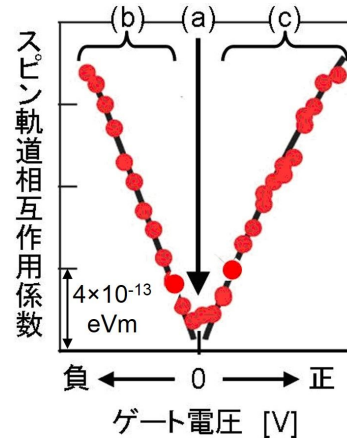


図4：図3のデータから抽出した現象論的なスピン分離係数 $\tilde{\alpha}$ （赤丸印）のゲート電圧依存。 $\alpha < E_c >$ の関係を仮定した場合に、Golub の理論から得られる $\tilde{\alpha}$ の理論値を黒の実曲線で示してある。この図での(a)~(b)は図3での(a)~(b)に対応している。

図3に示すデータからこのようにして求めた $\tilde{\alpha}$ を図4に示す。この図の中に示した黒の実曲線は、 $\alpha < E_c >$ の関係（正確には $\alpha < V_g >$ の関係）を仮定した場合に、Golub の理論から抽出される $\tilde{\alpha}$ の理論値である。 $V_g=0V$ 近傍を除き、実験データと理論値が良く一致することは、 $\alpha < E_c >$ の関係が成り立っていることの確かな証しである。

さて、ここまでで、図1に示すような試料に関して極低温での磁気コンダクタンスを測定し、弱反局在効果を解析することにより、Rashba 係数に関して $\alpha < E_c >$ の関係が実験的にも成り立っていることが示された。ところで、ここで用いられた Golub の理論では、（理論を解析的に取り扱うために）伝導電子の動力学としてブラウン運動（拡散）を仮定している。一方、本研究で用いた半導体量子井戸での電子の平均自由行程は $1 \sim 2\mu\text{m}$ 程度であ

り、試料中の電子の実際の動力学は、準弾道的な軌跡とランダムな散乱を繰り返す“カオス”と考えるのが適当である。このようなカオス系の電子輸送効果を記述するには、メゾ構造中(図2)でのビリヤード軌跡(古典粒子軌道)を数値的に計算し、その軌道に量子力学的な情報を付与する半古典的手法が有効である。我々の研究でもこのようなアプローチをとり、実験結果を解析した例を図5に示す。実験結果と我々の半古典モデルの結果は完全に一致することがわかる。このような一致は、メゾ構造内での伝導電子の動力学がカオスであるがために得られたものであると考えてよい。

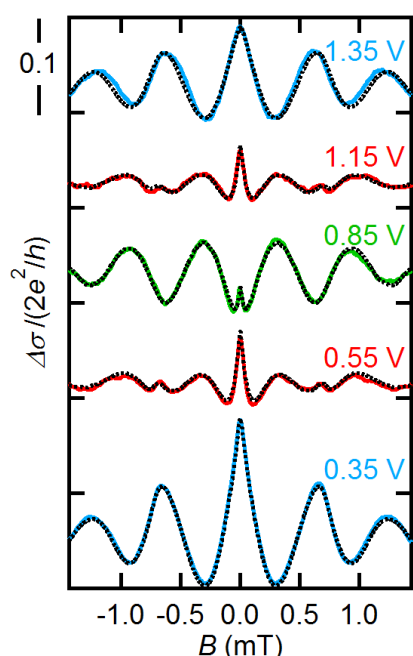


図5：図2で示すメゾ構造内での電子波動関数の時間反転経路間での干渉を反映した磁気伝導度の実験データ(ゲート電圧毎に色の異なる曲線)。実験結果と我々の半古典モデル(黒点線)の完全な一致は、メゾ構造内での伝導電子の動力学がカオスであることを意味している。

最後に、我々の研究でメゾ構造配列構造を用いた実験及び理論解析を行うメリットを2つ挙げる。一つ目は、Golub理論(拡散を仮定)を用いて解析したことから得られた結論が、準弾道的な電子系に対しても有効か?という検証(=修正の必要性の有無)ができること。もう一つは、半古典論的カオス解析(準弾道的軌道を仮定)で必要になるパラメータは、「単位長さ当たりのスピン回転角」という、物理的に直接の意味を持ったものだけであるため、有効質量やフェルミ速度など別の実験などから得られる量を介在させずにスピン分離項の大きさを直接定量的に評価できることである。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計7件)すべて査読有

- 1 T. Koga and Y. Sekine, Electron Spin Rotation and Quantitative Determination of Spin-Orbit Coefficients, NTT Technical Review, 査読有, Vol. 10, No. 9, 2012, 1-7
<https://www.ntt-review.jp/archive/ntttechnical.php?contents=ntr201209fa4.pdf>
- 2 古賀貴亮, 関根佳明, 電子スピン回転とスピン軌道係数の定量的決定, NTT 技術ジャーナル, Vol. 24, No. 6 2012, 22-26
<http://www.ntt.co.jp/journal/1206/files/jn201206022.pdf>
- 3 T. Koga, T. Matsuura, S. Faniel, S. Souma, S. Mineshige, Y. Sekine, H. Sugiyama, Beating analysis of Shubnikov de Haas oscillation in $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ double quantum well toward spin filter applications, IEICE TRANSACTIONS on Electronics, **E95-C**, 2012, 770-776
DOI: 10.1587/transele.E95.C.770
- 4 H. Nakamura, T. Koga, and T. Kimura, Experimental Evidence of Cubic Rashba Effect in an Inversion-Symmetric Oxide, Physical Review Letters, **108**, 2012, 206601 (5pp)
DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.206601
- 5 S. Faniel, T. Matsuura, S. Mineshige, Y. Sekine and T. Koga, Weak localization/antilocalization in a nearly symmetric $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ quantum well, AIP Conference Proceedings, **1399**, 2011, 649-650
DOI: 10.1063/1.3666544
- 6 T. Koga, S. Faniel, T. Matsuura, S. Mineshige, Y. Sekine, and H. Sugiyama, Determination of Spin-Orbit Coefficients and Phase Coherence Times in $\text{InGaAs}/\text{InAlAs}$ Quantum Wells, AIP Conference Proceedings, **1416**, 2011, 38-41
DOI: 10.1063/1.3671692
- 7 S. Mineshige, S. Kawabata, S. Faniel, J. Waugh, Y. Sekine and T. Koga, Semiclassical interpretation of spin interference effect observed in square loop arrays of $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ quantum wells, Physical Review B, **84**, 2011, 233305 (5pp)
DOI: 10.1103/PhysRevB.84.233305

[学会発表](計34件)

JPS=日本物理学会; APS=APS March Meeting

- 1 横田昇一郎, “対称な二重量子井戸におけるシュブニコフピーティングの解析”, JPS 第69回年次大会, 東海大学(2014/3/27)
- 2 澤田淳, “ $\text{InGaAs}/\text{InAlAs}$ ダブルヘテロ量子井戸基板上的メソスコピックループアレイにおける量子補正項の定量的解析”, JPS 第69回年次大会, 東海大学(2014/3/27)
- 3 山士家貴志, “非磁性半導体スピンフィルター実現に向けた二重量子井戸の改善”, 第61回応用物理学会春季学術講演会, 青山学院大学(2014/3/19)
- 4 古賀貴亮, “単一メソスコピックループにおける時間反転干渉の半古典ビリヤード解析”, JPS 秋季大会, 徳島大学(2013/9/26)

- 5 澤田淳, “ピリヤード・シミュレーションを用いたメソスコピックループアレイにおけるスピン軌道相互作用の決定”, JPS 第 68 回年次大会, 広島大学(2013/3/29)
- 6 相馬聡文, “Spin blocking effect in InGaAs/InAlAs double quantum wells due to Rashba spin-orbit coupling”, 第 60 回応用物理学学会学術講演会, 神奈川工科大学(2013/3/28)
- 7 澤田淳, “Rashba 場反転によるメソスコピック系時間反転量子干渉振動一致度の定量的評価”, JPS 秋季大会 横浜国立大学(2012/9/21)
- 8 峰重俊介, “InGaAs 量子井戸メソスコピック構造における磁気抵抗量子振動の半古典ピリヤード解析”, JPS 第 67 回年次大会, 関西学院大学(2012/3/27)
- 9 澤田淳, “InGaAs 量子井戸メソスコピックループ構造における磁気抵抗量子振動の Rashba 電場対称性”, JPS 第 67 回年次大会, 関西学院大学(2012/3/27)
- 10 古賀貴亮, “InGaAs/InAsAs 2 重量子井戸におけるシュブニコフピーティング”, JPS 第 67 回年次大会, 関西学院大学(2012/3/27)
- 11 松浦徹, “InGaAs 二重量子井戸系でのスピン分離とスピントラップ効果”, JPS 秋季大会, 富山大学(2011/9/21)
- 12 向井肇, “InGaAs 二重量子井戸系におけるスピントラップ効果に関する理論解析”, JPS 秋季大会, 富山大学(2011/9/21)
- 13 峰重俊介, “InGaAs メソスコピックループ配列における時間反転干渉効果の半古典ピリヤードシミュレーションによる再現”, JPS 秋季大会, 富山大学(2011/9/21)
- 14 S. Faniel, “弱局在 / 反局在測定による InGaAs 量子井戸のスピン軌道相互作用係数の定量的決定”, JPS 秋季大会, 富山大学(2011/9/21)
- 15 T. Koga, “Properties of InGaAs/InAlAs double quantum wells toward spin-filtering application”, APS, Denver 会議場 (2014/3/4)
- 16 T. Koga, “Semiclassical simulation of time-reversal quantum interference in mesoscopic loop arrays in the presence of spin-orbit interaction” (invited), Dynamics Days-Central Asia, Hotel Asia Samarkand (2013/10/12)
- 17 S. Souma, “Proposal of spin-filtering device using InGaAs/InAlAs double quantum wells”, 16th International Conference on Narrow Gap Systems, Zhejiang Hotel, China (2013/8/5)
- 18 T. Koga, “Semi-classical billiard analysis of magneto-conductance oscillation in mesoscopic loop arrays as a function of the Rashba spin-orbit interaction in InGaAs/ InAlAs quantum wells”, (invited plenary), Symposium on Nanostructured Materials, Rzeszow 大学, Poland (2013/5/22)
- 19 T. Koga, “Experimental Investigation of the Rashba spin-orbit coupling in InGaAs/InAlAs double quantum wells”, The 40th International Symposium on Compound Semiconductors, Kobe Convention Center (2013/5/20)
- 20 S. Souma, “Spin blocking effect in symmetric double quantum well due to Rashba spin-orbit coupling”, APS March Meeting, Baltimore Convention Center (2013/3/20)
- 21 A. Sawada, “Semiclassical interpretation of time-reversal spin interference in regular and chaotic structures”, The 7th International Conference on Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductors, Eindhoven 工科大学 (2012/8/8)
- 22 T. Koga, “Separation between the subband and spin splittings detected in the beatings of the Shubnikov de Haas oscillations in $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ double quantum wells”, The 7th International Conference on Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductors, Eindhoven 工科大学 (2012/8/6)
- 23 S. Faniel, “Determination of Rashba and Dresselhaus coefficient in InGaAs quantum wells”, APS, Boston 国際会議場 (2012/2/29)
- 24 T. Koga, “Determination of Spin-Orbit Coefficients in InGaAs/InAlAs Quantum Wells”, 15th International Conference on Narrow Gap Systems, Virginia 工科大学 (2011/8/1)
- 25 T. Koga, “Suppression of weak localization peak in circle dot array due to spin-orbit interaction”, The 19th international conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems, Florida State University (2011/7/26)
- 26 T. Koga, “Determination of spin-orbit coefficients and application to the spin-filter devices using InGaAs/InAlAs hetero-structures” (invited), 2011 Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices, Legend Hotel, Korea (2011/6/29)

6. 研究組織

(1)研究代表者

古賀 貴亮 (Koga, Takaaki)
北海道大学・大学院情報科学研究科・准教授
研究者番号：30374614

(2)研究分担者

川畑 史郎 (Kawabata, Shiro)
独立行政法人産業技術総合研究所・電子光技術研究部門・主任研究員
研究者番号：30356852

(3)連携研究者

相馬 聡文 (Souma, Satofumi)
神戸大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：20432560

(4)連携研究者

齋藤 圭司 (Saito, Keiji)
慶應義塾大学・理工学部・准教授
研究者番号：90312983

(5)連携研究者

松浦 徹 (Matsuura, Toru)
北海道大学・工学研究院・助教
研究者番号：60534758