

平成22年5月14日現在

研究種目：若手研究(A)
 研究期間：2007～2010
 課題番号：19684009
 研究課題名(和文) 半導体量子井戸における零磁場スピン分離の定量的研究とメゾスコピック物理への応用
 研究課題名(英文) Quantitative investigation of the zero-field spin splitting in semiconductor quantum wells and its application to mesoscopic physics
 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

研究成果の概要(和文)：半導体におけるスピン軌道相互作用は、量子情報素子を初めとする次世代エレクトロニクスの基本原則として注目を浴びている。本研究では、その基本舞台とも言える $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 量子井戸を取り上げ、スピン干渉効果をはじめとする低温での電気伝導測定によりスピン軌道相互作用定数を定量的に決定することに成功した。

研究成果の概要(英文)：Spin-orbit interaction in semiconductor can be considered as a fundamental principle on which next generation electronics, such as quantum information devices, are based. In this research, we chose the $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ quantum well system as a standard material for spintronics and revealed the spin-orbit parameters quantitatively by electron transport measurements at low temperatures including spin interference effect.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	12,700,000	3,810,000	16,510,000
2008年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
2009年度	1,900,000	570,000	2,470,000
年度			
年度			
総計	18,900,000	5,670,000	24,570,000

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：メゾスコピック系, 半導体物性, スピンエレクトロニクス, 半導体超微細化

1. 研究開始当初の背景

スピン自由度を含めた電子による次のような2重スリットの思考実験を考える(図1)。

(i) 電子の初期スピン状態を $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ で表す。

(ii) 電子波動関数を2重スリットにより2つの部分波に分け、磁場等により左の電子部分

波のスピン軸を角度 θ 回転させる。その結果、左側の電子部分波のスピン波動関数は $\begin{pmatrix} \cos(\theta/2) \\ \sin(\theta/2) \end{pmatrix}$ となる。

(iii) 位置 $x=0$ での波動関数はこれら2つの電子部分波の和 $\Psi_{\text{final}} = \frac{1}{2} \left\{ \begin{pmatrix} \cos(\theta/2) \\ \sin(\theta/2) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right\}$

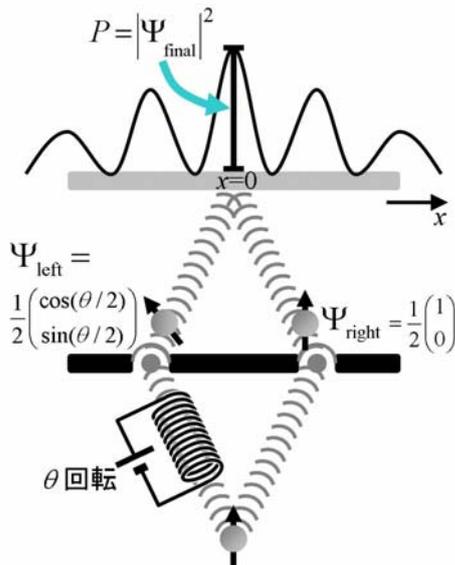


図1：電子の2重スリット実験

で表され、干渉強度は $|\Psi_{\text{final}}|^2 = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(\theta/2)$

に比例する。

この思考実験の帰結は、2重スリット実験の干渉縞の強度がスピン回転角 θ の関数として振動し、その周期は 2θ ではなく 4θ となるということ、1975年に S. A. Werner らによって、電子と同様にスピン $1/2$ を持つ中性子線を用いた実験により実証された [S.A.Werner *et al.*, Phys. Rev. Lett. **35**, 1053 (1975)]。

研究代表者は、NTT 物性科学基礎研究所での研究期間中に、このような電子スピンの量子力学的対称性に基づく干渉効果を極低温でメゾスコピック物理領域にある半導体固体素子で観測可能であるとの着想に至り、InGaAs/InAlAs 量子井戸系材料を用いて、スピン分離、スピン・フィルター、スピン干渉効果についてのデバイス応用を含めた一連の研究を行ってきた [T. Koga *et al.*, Phys. Rev. Lett. **88**, 126601 (2002); T. Koga *et al.*, Phys. Rev. Lett. **89**, 046801 (2002); T. Koga *et al.*, Phys. Rev. B **70**, 161302(R) (2004); T. Koga *et al.*, Phys. Rev. B **74**, 041302(R) (2006)]。

本研究で取り扱う半導体素子中での電子スピンの回転に関しては、図2に示すようなスピン軌道相互作用を利用する。この効果は、固体物理学的には、2次元電子のエネルギー

分散が $E(\mathbf{k}_{\parallel}) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*} \pm \alpha k$ の形でスピン分離していることと等価である。半導体中電子のこのような性質に関する研究は理論先行で進み、Datta のスピン FET [S. Datta *et al.*, Appl. Phys. Lett. **56**, 665 (1990)] をはじめとす



図2：半導体ヘテロ界面でのスピン軌道相互作用 [半導体ヘテロ界面上を運動する2次元電子は、相対論的效果により“界面電場”及び電子の運動方向双方に垂直な方向に有効磁場を感じ、それによりスピンの回転する。]

る様々なスピンドバイス応用が提案された。ところが、実験的には、スピン分離効果についての定量的な評価をすること自体が非常に難しく、様々な理論提案の実証には、実験の面での大きなハードルがある。そのような中で、研究代表者らの行った固体素子中でのスピン干渉実験 [Koga *et al.*, PRB (2004), (2006)] は、国内外で高く評価された。

2. 研究の目的

半導体スピン物性の研究では実験に使用する各材料系でのスピン分離効果を(1)ゲート電圧依存性、(2)ヘテロ構造界面及びドーピング依存性、(3)結晶方位依存性、の3つを含めて詳細に研究することが非常に重要である。そこで、本研究では、以下の3つについて具体的に明らかにする。

(1)これまで研究代表者らが長期間継続的に研究してきた、InGaAs/InAlAs 量子井戸系でのスピン分離効果においては、特定の試料を用いた実験では理論的予測とほぼ完全な一致を示す一方、他の試料を用いた実験では必ずしも理論予測とは一致しないことがある。本研究ではこの原因を解明し、InGaAs/InAlAs 量子井戸系でのスピン分離効果を定量的に完全に明らかにする。

(2) GaAs/AlGaAs 量子井戸系は半導体メゾスコピック物理の標準材料となっており、再現性の高いゲート制御が可能等の利点がある。そこで、この系でのスピン分離効果をスピン干渉測定により明らかにし、デバイス応用の基礎データを蓄積する。

(3)これらの研究と同時並行的に、研究代表者自らが理論提案した3重障壁共鳴トンネル・スピンフィルター[T. Koga *et al.*, Phys. Rev. Lett. **88**, 126601 (2002)]の実験的検証を念頭に置きながら、スピン分離効果が大きく、その制御性にも優れている InAs/AlSb 量子井戸系でのスピン分離効果を明らかにし、Peak to Valley 比の高い共鳴トンネルダイオード (RTD) を試作する。

3. 研究の方法

(1) トップダウン手法によるナノ構造作製

本研究では精度の高い半導体微細加工技術が要求される。具体的には、

- ①精度の高い電子線描画の技術と
- ②シャープで緻密な半導体ドライエッチング技術、の2つが必要である。

本研究では、①電子線描画技術に関しては、研究代表者の研究室現有の装置、共同実験装置を用いる。②半導体ドライエッチングに関しては、鏡面的な電子反射が起こるようなエッチング界面が要求されるが、そのための半導体加工には処理の難しい有害ガスの使用が必要になるなど、大学での実施が難しい。そこで、民間企業で優れた微細加工技術を有するNTT物性科学基礎研究所と協力して、大学単独では難しい半導体ドライエッチング・プロセスを実施する。微細加工後の試料は大学にてフォトリソグラフィ（マスクアライナー、真空蒸着装置を新規購入）によりデバイス素子に加工し、希釈冷凍機システム（現有装置）を用いて電子輸送特性の測定を行う。

(2) 共同研究者が提供する質の高いエピ成長基板の使用

本研究成功のためのもう一つの鍵は、素性のよく良く知れた良質のエピウェハを実験に使用することである。そこで、世界最高水準のエピ成長技術を有する共同研究者からカスタムな要求に応じたGaAs/AlGaAs、InAs/AlSb エピ成長基板の提供を受ける。

(3) 波動関数のスピン干渉効果により2次元電子のスピン分離現象を調べる。

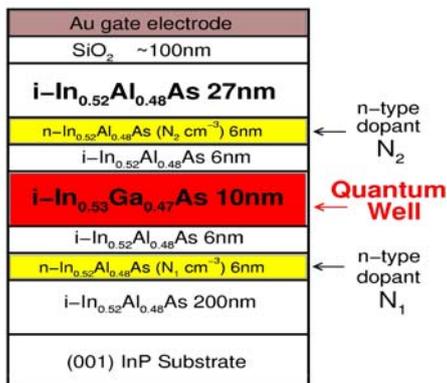


図3：本研究で用いた量子井戸試料の断面(In_{0.53}Ga_{0.47}As/In_{0.52}Al_{0.48}As 量子井戸)。

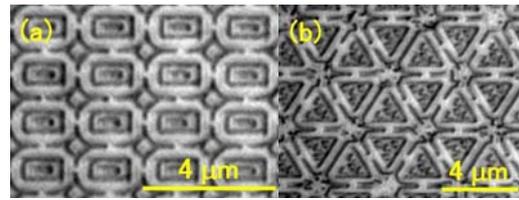


図4：微細加工により作製した(a)長方形や(b)三角形のスピン干渉素子のUV顕微鏡写真（色の薄い部分に電子が存在）。

本研究では量子井戸中電子のスピン分離効果を調べるために、次のような電子輸送測定を用いる。

①シュブニコフ・ド・ハース振動（比較的高磁場で見られる磁気抵抗の振動）に見られる“うねり（ビーティング）現象”の解析（従来型の方法）。

②極低温・弱磁場環境中に見られる反弱局在効果（正の磁気抵抗効果）を解析する方法（研究代表者らによって有効な実験方法であると実証）[Koga *et al.*, PRL **89** (2002)]。

③人工ナノ構造（図4）中での波動関数の干渉に起因する磁気抵抗の振動（図4）を解析する方法（研究代表者らが独自に開発）[Koga *et al.*, PRB (2004), (2006)]。

①の方法に関してはスピン分離効果が非常に大きいときのみ利用可能であり、スピン分離効果の小さいGaAs/AlGaAs系、InGaAs/InAlAs系材料の測定には不向きである。本研究においては、ドライエッチング技術が確立しているGaAs/AlGaAs、InGaAs/InAlAs量子井戸に関しては②③の手法、ドライエッチング技術が確立していないがスピン分離効果が大きいInAs/AlSb量子井戸に関しては①②の手法を用いる。

4. 研究成果

本研究の最大の成果として、InGaAs/InAlAs量子井戸系でのスピン軌道相互作用係数の値が定量的に決定されたことが上げられる。そこで、本報告書ではその点を中心に述べる。当初の目的の一つであったGaAs/AlGaAs量子井戸系でのスピン干渉効果の検証に関しては、スピン軌道相互作用係数が、当初の予想と比べて非常に小さいということが最近明らかになってきており、その研究意義そのものが疑われた。そこで、本研究では、研究目的をInGaAs/InAlAs量子井戸系でのスピン軌道相互作用係数の理解に集中することと

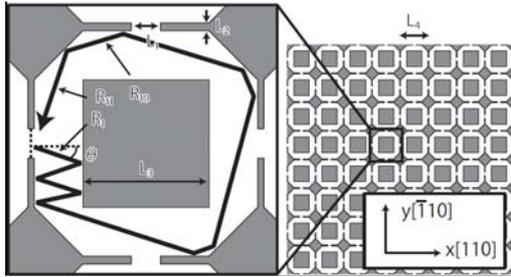


図5：半古典ビリヤードシミュレーションに使用した正方形ループ配列構造。実際の試料と同一のサイズ／形状を用いている。

した。

(1) 正方形ループナノ構造におけるスピン干渉効果の半古典ビリヤード解析

これまで、(001)InP 基板に格子整合した $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 量子井戸を用いた正方形ループナノ構造でのスピン干渉効果は、実験的に観察され [T. Koga *et al.*, Phys. Rev. B **74**, 041302(R) (2006)], その実験結果は、Rashba 分離のみを仮定したスピン干渉計モデル [T. Koga *et al.*, Phys. Rev. B **70**, 161302(R) (2004)] により定性的に説明されてきた。そこで、本研究では、Dresselhaus 係数のパラメータ値の抽出を念頭に、微細加工技術で作製した長方形ループ配列構造におけるスピン干渉効果の結晶方位依存性を検出することを目標として実験を行った (雑誌論文 [3][5])。得られた実験結果は、Dresselhaus 分離を含めたスピン干渉モデルで解析し、定性的な理解を得ることには成功したが、パラメータ値の抽出までは至らず、新たな精度の高い理論モデルの活用を模索した。この点に関して、(独) 産業技術総合研究所の川畑史郎博士から、半古典シミュレーションの助言を頂き、スピン軌道相互作用係数の決定を含む、実験結果の定量的理解を目指し、半古典ビリヤードシミュレーションを行った。

半古典ビリヤードシミュレーションに使用したナノ構造の模式図を図5に、半古典シミュレーションの結果と、比較すべき実験結果を図6(a)-(d)に示す。半古典シミュレーションでわかったことの一つは、図6(c)に示すような正のスピン干渉効果 ($-\Delta\sigma$ が正なること) が得られるためには Dresselhaus のスピン軌道相互作用係数 b_{41}^{6c6c} の値が $8 \text{ eV}\text{\AA}^3$ 以下である必要があることである。この点に関しては、 $\mathbf{k}\cdot\mathbf{p}$ 理論により従来から知られている GaAs や InAs でのバルク状態での b_{41}^{6c6c} の値は $27 \text{ eV}\text{\AA}^3$ と言われているが、本研究での結果は、この値と比べて $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 量

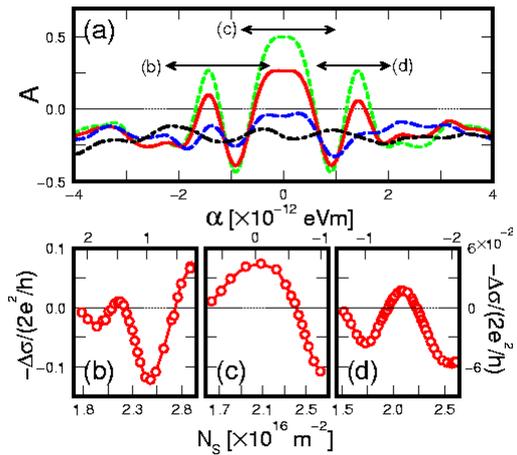


図6：(a) 正方形ループ配列構造におけるスピン干渉効果の半古典ビリヤードシミュレーション結果。緑、赤、青、黒のそれぞれの曲線は、Dresselhaus 係数 b_{41}^{6c6c} の値を 0、4、8、27 $\text{eV}\text{\AA}^3$ とした場合のものである。(b)-(d) スピン干渉効果の実験結果 (正方形ループ配列構造試料の低温での磁気抵抗に見られる Al'tshuler-Aronov-Spivak (AAS) 振動の振幅の電子濃度依存性)。(b)-(d) はそれぞれ、ドーピングの違う別々の試料。Dresselhaus 係数 b_{41}^{6c6c} の値が小さい場合にのみ実験結果とシミュレーション結果がよく一致する。

子井戸での b_{41}^{6c6c} の値は非常に小さいことを示している。この点に関しては、以下で述べる弱局在／反弱局在の実験／解析でも同様の結果を示しており、本研究によりはじめて明らかになった極めて重要な知見といえる。

(2) スピン軌道相互作用最小点での弱局在／反弱局在解析

正方形ループ配列構造でのスピン干渉効果の観測及び半古典ビリヤードシミュレーションにより、図6(c)の実験で使われたウエハの Rashba、Dresselhaus スピン軌道相互作用は、共に、非常に小さいことが示された。そこで、このウエハに関して、弱局在／反弱局在効果を希釈冷凍機温度で詳細に調べる実験を行った。その結果、あるゲート電圧において、スピン軌道相互作用の大きさが最小となることを観察した。また、Golub のモデル [Golub, PRB (2005)] を用いて弱局在／反弱局在効果を示す磁気抵抗曲線のフィッティングから Rashba 係数 α をキャリア濃度 N_s の関数としてプロットした。その結果は、ある N_s で最小値を取るため、V字型の振る舞いとなり、ここから α 値及び α 値の内部電場 $\langle E_z \rangle$ に対する比例定数を曖昧さなく決定することに成

功した。

(3) シュブニコフ・ド・ハース振動のピーティングとスピン分離の関係

半導体 2 次元電子系において時折観察されるシュブニコフ・ド・ハース(SdH)振動のピーティングは、スピン軌道相互作用による零磁場スピン分離エネルギーと関係があるであろうという提案は古くからなされている。本研究で使われた一部のウェハでも SdH 振動のピーティングが観測された (図 7)。この結果を Rashba モデルを使って解析し、スピン分離エネルギーを求めると、同一試料に関して反局在解析で求めた α 値と非常に良く一致した。このように同一試料において、弱局在/反弱局在効果と SdH 振動のピーティングが同時に観察されたこと、また、その解析結果が一致したことは、これまでに前例がなく本研究で明かされた新しい結果である。

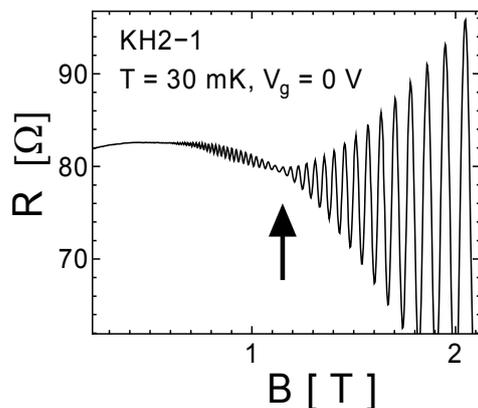


図 7 : 観測されたシュブニコフ・ド・ハース振動のピーティング

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)

- [1] J. Ni, B. Chen and T. Koga, “Ballistic spin interferometer based on the Rashba and Dresselhaus spin-orbit interactions”, *Physics Letter A* **372**, 6026-6031 (2008).
- [2] Ni Jia-Ting, Liang Xiao-Wan, Chen Bin and T. Koga, “Spin Interference in Rectangle Loop Based on Rashba and Dresselhaus Spin-Orbit Interactions”, *Chinese Physics Letters*. **26**, 127302 (2009).
- [3] S. Faniel, T. Matsuura, S. Mineshige, Y. Sekine and T. Koga, “Anisotropic spin interference in InGaAs/InAlAs rectangular loop

arrays”, *Physica E* **42** (2010) 990–993.

[4] T. Matsuura, S. Faniel, N. Monta and T. Koga, “Magnetic control of Rashba splittings in symmetric InAs quantum wells”, *Physica E*, accepted (2010).

[5] T. Koga, S. Faniel, S. Mineshige, T. Matsuura and Y. Sekine, “Rectangular model of a ballistic spin interferometer in (001) InGaAs/InAlAs quantum wells”, *Physics Procedia* **3** (2010) 1325-1328. (Proceedings of the 14th International Conference on Narrow Gap Semiconductors and Systems)

[6] S.Q. Jin, J. Waugh, T. Matsuura, S. Faniel, H.Z. Wu and T. Koga, “Spin dependent electronic structure and level crossings as a function of magnetic field in InAs nanowire”, *Physics Procedia* **3** (2010) 1321-1324. (Proceedings of the 14th International Conference on Narrow Gap Semiconductors and Systems)

[学会発表] (計 22 件)

- [1] 西尾和晃, 章黎, 古賀貴亮, 小林俊之, 赤崎達志, “スピン干渉実験に向けた GaAs/AlGaAs 量子井戸の物性評価と量子細線の作製”, 第 55 回応用物理学関係連合講演会(2008 春)
- [2] 章黎, 古賀貴亮, 西尾和晃, 小林俊之, 赤崎達志, “GaAs/AlGaAs ヘテロ構造を使ったスピン干渉実験の提案”, 第 55 回応用物理学関係連合講演会(2008 春)
- [3] S. Faniel, 章黎, 古賀貴亮, 関根佳明, “InGaAs/InAlAs 長方形ループスピン干渉計における Rashba, Dresselhaus スピン軌道相互作用”, 第 69 回応用物理学学会学術講演会(2008 秋)
- [4] Sebastien Faniel, Takaaki Koga, Yoshiaki Sekine, “Experimental study of spin interference phenomena in InGaAs/InAlAs rectangular loop arrays”, 日本物理学会 第 64 回年次大会 (2009 年 3 月 27 日 pTX-9)
- [5] 松浦徹, Sebastien Faniel, 古賀貴亮, “InAs 対称量子井戸におけるラッシュバースピン分離の面内磁場依存性”, 日本物理学会 2009 年秋季大会 (2009 年 9 月 25 日 25aXG-4)
- [6] 峰重俊介, ファニエルセバスチャン, 古賀貴亮, “(001)InAlAs/InGaAs/InAlAs 量子井戸ナノ構造におけるスピン干渉強度のビリヤードシミュレーション”, 日本物理学会 2009 年秋季大会 (2009 年 9 月 25 日 25aXG-2)

[7] 古賀貴亮, ファニエル セバスチャン, 松浦徹, 峰重俊介, 関根佳明, “InGaAs 量子井戸長方形ループ配列における異方的なスピ干涉効果”, 日本物理学会 2009 年秋季大会 (2009 年 9 月 25 日 25aXG-1)

[8] ファニエル セバスチャン, 古賀貴亮, 松浦徹, 峰重俊介, 関根佳明, “InGaAs 量子井戸におけるスピ軌道相互作用最小点での弱局在/反局在とスピ干涉効果”, 日本物理学会 第 65 回年次大会 (2010 年 3 月 23 日 23aHW-9)

[9] 松浦徹, ファニエル セバスチャン, 峰重俊介, 関根佳明, 古賀貴亮, “InGaAs 量子井戸におけるラッシュバスピ軌道相互作用が大きい領域での反局在解析”, 日本物理学会 第 65 回年次大会 (2010 年 3 月 23 日 23aHW-8)

[10] 峰重俊介, ファニエルセバスチャン, 松浦徹, 古賀貴亮, “古典ビリヤードシミュレーションによる正方形ループ配列構造におけるジェネリックなスピ干涉パターン”, 日本物理学会 第 65 回年次大会 (2010 年 3 月 23 日 23aHW-7)

[11] J. Russom, K. Stone, T. Koga, “Measurement and simulation of AlSb/InAs triple barrier resonant tunneling diodes. NanoJapan program summer 2007”, APS March Meeting 2008 (New Orleans) (2008).

[12] M. Kim, T. Koga, K. Otani, Y. Ohno, H. Ohno, “Electron Spin Splitting Effect in AlSb/InAs/AlSb Quantum Wells”, APS March Meeting 2008 (New Orleans) (2008).

[13] K. Nishio, L. Zhang, T. Koga, T. Kobayashi, T. Akazaki, “Proposal of Spin Interference Experiment Using GaAs/AlGaAs Heterostructures”, APS March Meeting 2008 (New Orleans) (2008).

[14] T. Koga, M. Kim, Y. Sekine, “Separation of the Rashba and Dresselhaus terms using the Square and Rectangular Loop Arrays in InGaAs/InAlAs Quantum Wells”, APS March Meeting 2008 (New Orleans) (2008).

[15] T. Koga, M. Kim, S. Faniel, K. Otani, Y. Ohno and H. Ohno, “Investigation of the Spin Splitting Energies and Electron g-factor in AlSb/InAs/AlSb Quantum Well”, Fifth International Conference on Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductors (PASPS-V), Foz do Iguacu, Brazil (2008).

[16] T. Koga, M. Kim, S. Faniel and Y. Sekine, “Demonstration of Spin Interference in Rectangular Loop Arrays Using InGaAs/InAlAs Quantum Wells”, Fifth International Conference on Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductors (PASPS-V), Foz do Iguacu, Brazil (2008).

[17] S. Faniel, T. Koga, Y. Sekine, “Experimental investigation of spin interference phenomena in InGaAs/InAlAs rectangular loop arrays”, APS March Meeting 2009 (Pittsburgh) (2009/3/18).

[18] T. Koga, S. Faniel, S. Mineshige and Y. Sekine, “Anisotropic spin-orbit interaction detected by the rectangular spin interference in (001) InGaAs/InAlAs quantum wells”, 14th International Conference on Narrow Gap Semiconductors and Systems, 13th - 17th July 2009, Sendai, Japan.

[19] S.Q. Jin, T. Matsuura, J. Waugh, S. Faniel, H. Z. Wu and T. Koga, “Spin dependent electronic structure and level crossings as a function of magnetic field in InAs nanowire”, 14th International Conference on Narrow Gap Semiconductors and Systems, 13th - 17th July 2009, Sendai, Japan.

[20] T. Matsuura, N. Monta and T. Koga, “Magnetic control of Rashba splittings in symmetric InAs quantum wells”, The 14th International Conference on Modulated Semiconductor Structures, Kobe International Conference Center, 2009/7/19-24.

[21] S. Faniel, S. Mineshige, Y. Sekine and T. Koga, “Spin interference effects in InGaAs/InAlAs rectangular loop arrays”, The 18th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-18), Kobe International Conference Center, 2009/7/19-24.

[22] T. Koga, S. Faniel, S. Mineshige, T. Matsuura and Y. Sekine, “Billiard simulation and FFT analysis of AAS oscillations in nanofabricated InGaAs” (Q35.00007), APS March Meeting 2010 (Portland) (2010/3/17).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

古賀 貴亮 (KOGA TAKA AKI)

北海道大学・大学院情報科学研究科・准教授
研究者番号：30374614