

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 10 月 21 日現在

機関番号：34406

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26600012

研究課題名(和文)2次元電子ガス2層系における結合共鳴スピホール効果の研究

研究課題名(英文)Study of coupled resonant spin-Hall effect in two-dimensional electron gas bilayer system

研究代表者

山田 省二 (Yamada, Syoji)

大阪工業大学・教育センター・教授

研究者番号：00262593

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、スピン軌道相互作用(SOI)を有し結合する2次元電子ガス2層系でスピホール効果が共鳴的に増大するという提案を契機とし、その実証を試みたものある。試料は強いRashba型SOIをもつ狭ギャップ半導体で、スピン流発生部、拡散部、検出部にゲートをもつ多端子ホールバーを作製し、共鳴スピホール効果の、非局所配置における逆スピホール電圧による観測を試みた。その結果、結合条件付近で、層間散乱による大きい背景抵抗を除いた状態で、トップゲート電圧に対し再現性良く共鳴ピークが観測できた。そのスピン起源については未確定だが、逆スピホール効果関連である可能性は高い。また理論についても検討を進めた。

研究成果の概要(英文)：In this study, starting from the theoretical work proposing the resonant spin-Hall effect in two-dimensional bilayer system with spin-orbit interaction (SOI), we have tried to observe such a phenomenon. The material is a narrow-gap semiconductor hetero-junction which has a strong Rashba type SOI and fabricate multi-terminal Hall bar which has three regions, spin-injection, -diffusion and -detection, with a top gate in each. We have measured inverse spin-Hall (ISHE) voltage in a detection region in a non-local measurement configuration due to the spin diffusion flow created by spin-Hall effect in a injection region. As a result, we confirmed resonant peak in a sum of voltages from top- and side-probes, indicating the existence of the ISHE signal, although the final conclusion is not yet obtained. We also studied theoretical aspects of this problem.

研究分野：半導体物理学、半導体工学

キーワード：スピホール効果 2次元電子系 2層系 スピントランジスタ

1. 研究開始当初の背景

半導体スピントロニクスに関する研究は、その材料に関する検討が本格化した以降でも既に25年が経過しようとしているが、磁性半導体、磁性体と半導体との複合系いずれの場合もデバイス実用化にはまだ多くのハードルがある。他方、スピントロニクスデバイスへの応用が有望視され、今世紀に入って研究が精力的に開始されたスピンホール効果[1]についても金属では研究が進んだものの、半導体特に電子系[2]については、損失がある場合は抑圧されるという予想[3]もあり、電気的確認の例は極めて少なく[4, 5]実用化を展望する突破口が見えない状態が続いている。

2. 研究の目的

このような背景のもと、本研究では半導体中電子系におけるスピンホール効果を強く発現させる方法を実験的に探索・検証し、デバイス応用への展望を切り開くことにある。

3. 研究の方法

具体的には、近年の理論的提案、即ち、「スピン軌道相互作用の強い2次元2層系を適切に結合させると、スピンホール効果が共鳴的に増大しうる」という仮説[6]の検証を試みる。

(1) 概略の方針

図1は、そのときの2層の2次元電子系の分散関係の「適切な」結合を表したもので、わずかに非対称な2層系を作製し、スピン軌道相互作用でこの程度にスピン分裂したサブバンド間の結合を実現する。このような系で、この結合点を横切るようにフェルミレベルを変化させると、図2に示すようなスピンコンダクタンス σ_s の共鳴現象が期待できる。重要な点は、この図にある運動量緩和時間 τ 依存性で、その値がかなり小さい(損失が大きい)ときでも $(e/8\pi)$ の数倍のピーク値を持つことが判る。 $(e/8\pi)$ は、系に損失が無いときの σ_s の最大値である[2]。従ってこのような試料を実現できれば実際に損失がある電子系でもノイズを越える大きさでスピンホール効果を観測できる見通しがある。

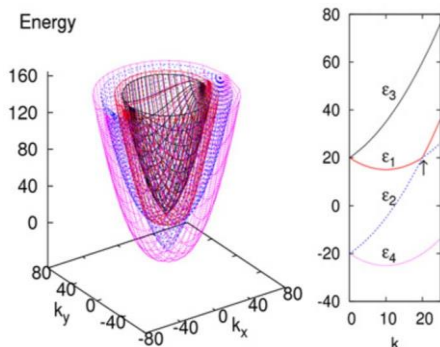


図1 非対称2層2DEGの分散関係におけるスピン結合状態の生成。 ϵ_1, ϵ_3 は例えば上側2DEGのup、downスピンサブバンド、 ϵ_4, ϵ_2 は下側2DEGのものに相当する。結合波数を矢印で示す(右パネル)。

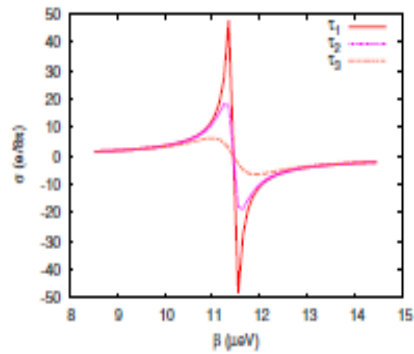


図2 スピンコンダクタンスの運動量緩和時間 (τ) 依存性の理論予測。 $\tau_1=6.6$ 、 $\tau_2=2.1$ 、 $\tau_3=0.66$ nsを仮定したときの共鳴特性。横軸は2層間のトンネル確率である。 $\tau_3=0.66$ nsのときでも $(e/8\pi)$ の数倍のピーク値をもつ。

(2) 2次元電子ガス2層系ウェハ[7]

図3に既に分子線エピタキシーで作製済みの半絶縁性基板2次元電子ガス(2DEG)2層系の層構造を示す。InGaAs量子井戸(厚み $t_{QW} = 40$ nm)に上側からのみ変調ドーピング(Si: 1.2×10^{12} / cm^2)することにより、量子井戸の上下界面に局在するほぼ同じ電子濃度(5×10^{11} / cm^2)の2DEG2層系を実現している。スペーサ層厚は10 nmである。

In _{0.75} Ga _{0.25} As 10 nm
In _{0.75} Al _{0.25} As 50 nm
Si δ -doping
In _{0.75} Ga _{0.25} As 10 nm
In _{0.75} Ga _{0.25} As 40 nm
In _{0.75} Al _{0.25} As 200 nm
In _x Al _{1-x} As SGB 1400 nm X = 0.15 - 0.8 ($\Delta X = 0.05, 100$ nm) /step
AlAs 20 nm
GaAs 300 nm
S.I. GaAs sub. (001)

図3 変調ドーブ幅広量子井戸(厚み $t_{QW} = 40$ nm)で実現した弱結合2層2DEG試料の層構造。

(3) スピンホール効果観測用デバイスの概念

図4(a)は、この目的のために設計・作製した2DEG2層系から作った多端子ホールバーのマスク概念図である。黄色はメサの上にかぶせたゲート電極で、メサ(グレー)は、スピン流発生注入部、拡散制御部、検出部の3つに分かれていて、それぞれに独立なトップゲート電極[黄色]をもつ。スピン検出部には短いピッチ(2 μm)でメサの横と上に電圧プローブが3組取り付けられている(それぞれグレーと赤に対応)。

スピン流注入部でメサの長手方向に垂直に電流 i_c を流す(例えば a_{SE} から a_{NE} : 実線 \uparrow) とスピンホール効果により電流パスの左右にスピン偏極が生じる。このスピン偏極はメサの長手方向=左右に拡散する (i_s) が、緩和する前にスピン流検出部の電圧プローブで逆スピンホール電圧を検出する。スピン流

は面に平行なため、この電圧は面に垂直になるので、これを検出するために、検出部の同じ場所にある一対の上プローブと横プローブ（例えば a_{S1} と a_{T1} ）を用いる。3組のプローブ対を用いることにより、スピン流拡散に対応した逆スピンホール電圧の空間的減衰も観測できるはずである。

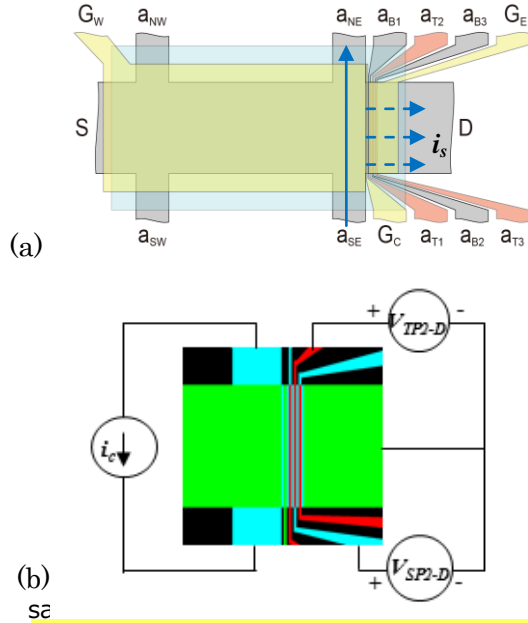


図4 (a)スピンホール効果測定用多端子ホールバーの設計概念図。2DEG 2層系メサは、3つの部分（スピン注入部、制御部、検出部）に分けられそれぞれトップゲートが配置されている。(b) 素子中心部（3部分含む）のマスクパターンと非局所測定系構成図。メサ幅は $50 \mu\text{m}$ 。最小線幅（横、上プローブのアーム幅）は $1 \mu\text{m}$ である。メサ縦方向の電圧は、 $V_{TP2-D} + V_{SP2-D}$ から評価できる。

(4) 作製した非局所電圧測定用多端子ホールバー素子

図4(b)に、実際の素子のマスクパターンを示す。メサ幅は $50 \mu\text{m}$ 、最小線幅は横プローブのアーム部と上プローブの電極幅で $1 \mu\text{m}$ である。拡散制御部は $3 \mu\text{m}$ 長あるので、注入部から $3.5, 5.5, 7.5 \mu\text{m}$ のところに上・横のペアプローブが存在することになる。これらの寸法は、以前われわれがスピンバルブ測定で電極間隔依存性 [8] から得た、約 $5 \mu\text{m}$ というスピン拡散長の値を参考に決定した。

この図に、非局所測定の配置も併せて示す。拡散部に近い2カ所の電圧端子を用いてスピンホール効果を駆動する電流 i_c を流す。すると、電流パスの両側にスピン偏極が生じ、左右にスピン流の拡散が起こる。

4. 研究成果

(1) 極低温での測定結果

①用いた2DEG 2層系の磁気抵抗

スピンホール効果の測定を始める前にまず、多端子ホールバー作製に用いた2DEG 2層系試料の基本的な磁気抵抗特性とそれから推測できる、2つの2DEGのシート電子濃度 $n_{s,upper}$, $n_{s,lower}$ のトップゲート電圧 V_g 依存

性を確認しておく必要がある。

測定は、簡略なゲート付6端子ホールバーを作製し 1.5 K で行った。図5は、ピーク分離が十分でないため確定的ではないが、磁気抵抗のフーリエ解析から推測した、上下の n_s の V_g 依存性で、約 $V_g \sim 1 \text{ V}$ 付近で、 $n_{s,upper} \sim n_{s,lower}$ が実現されているようである。このとき2層系のバンドプロファイルは、 $V_g \sim 0 \text{ V}$ で既に井戸内でほぼ対称と考えられるので、図1の右パネルに近い状況が実現されている筈である。この試料で V_g を変化させれば、2層2DEG間の結合共鳴状態の出現が期待できる。ここで注目すべきは、同時にプロットしている磁気抵抗振動フーリエピークの相対強度で、 $n_{s,upper} \sim n_{s,lower}$ のときピークを示している。これは、そのとき2DEG層間の相互作用が大きくなり層間散乱の増大が観測されていると考えられ、共鳴状態の検証に使える見通しがある。

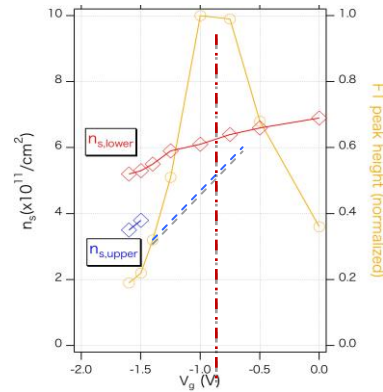


図5 変調ドープ幅広量子井戸（厚み t_{qw} ）で実現した弱結合2層2DEG試料の層構造。

②スピンホール効果実験（逆スピンホール効果観測）

図4の配置では、まず左側（スピン流発生源）で、ホールバー長手方向に垂直に流す電流 i_c により電流経路の両側にスピン偏極が生成される。それを源とするスピン流は左右に拡散するが、ここでは右側に拡散して、スピン制御部を通過しスピン検出部に到達したスピン流により生じる、逆スピンホール電圧の検出を試みる。このときスピン流は層界面に平行なため、逆スピンホール電圧は界面に垂直な方向に発生する。これを観測するために、図4に示すような同一場所に作製した上プローブと横プローブの組合せを用いる。

図4に示すように、本測定では磁場を使わず、スピン流発生源、検出部に印加するトップゲート電圧を独立に制御して目的の信号検出を試みる。即ち、それぞれの場所で独立に共鳴条件を実現し、両方が同時に共鳴になったとき、スピンホール効果、即ち逆スピンホール電圧が最大化することを確認する。従って、ゲート電圧を多端子ホールバーの複数部に印加するので、磁場を用いる場合と異なり、ホールバー内の拡散電流の流れも存在し、非局所測定は複雑になることが予想される。

この素子で非局所測定を行うときの等価回路を図7に示す。緑の線は、スピン流発生部から拡散する電子流・スピン流を模式的に表すが、両者とも検出部に流入後、2DEG部、(i番目の)トッププローブ端子(TPi)部、(i番目の)サイドプローブ端子(SPi)部に拡散する。これらはいずれも逆方向に拡散するホール流、逆向きスピン流によって打ち消されるため実質的な電流としては寄与しない。但しここでは、構造的な非対称性により完全には消滅しない小さな電流の流れが残ると仮定しそれらを δi とする。また、上プローブ抵抗(InAlAsバッファ層抵抗)両端に発生すると予測される逆スピンホール効果電圧を δv_{ISPE} とする。すると、上プローブ(TPi)及び横プローブ(SPi)とドレイン(D)の間で測定される電圧 V_{TPi-D} 、 V_{SPi-D} はそれぞれ次のように書ける。

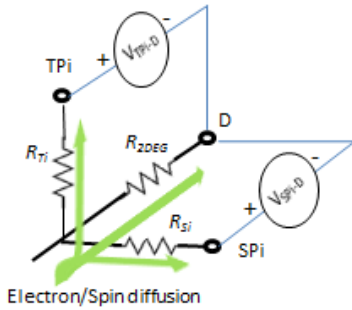


図6 (a)スピンホール効果測定用多端子ホールバースピン検出部の等価回路。2DEG 2層系メサには、スピン拡散部からの距離が異なる上プローブと横プローブの組が3セット用意されているが、その一組を表している。各プローブ部の抵抗を R_{Ti} 、 R_{Si} と仮定。

$$V_{SPi-D} = R_{Si}\delta i_S - R_{2DEG}\delta i_{2DEG} \quad (1)$$

$$V_{TPi-D} = \delta v_{ISPE} + R_{Ti}\delta i_T - R_{2DEG}\delta i_{2DEG} \quad (2)$$

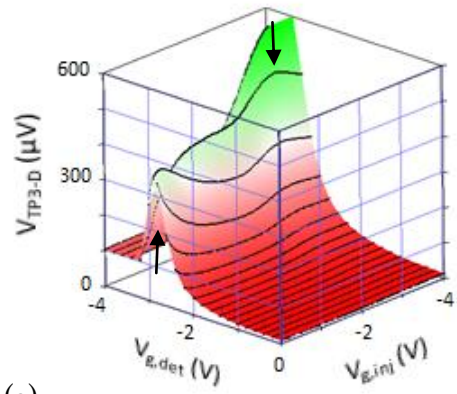
非共鳴時には、 $R_{Ti} \sim R_{Si} \sim R_{2DEG} \sim$ 数 $k\Omega$ かつ $\delta v_{ISPE} \sim 0$ なので、 $V_{SPi-D} \sim V_{TPi-D} \sim 0$ であるが、共鳴時には、 R_{Ti} 、 $R_{Si} \gg R_{2DEG}$ と仮定できて $\delta i_S \sim \delta i_T$ であるから、結局式(1)(2)から

$$V_{TPi-D} \sim \delta v_{ISPE} - V_{SPi-D}$$

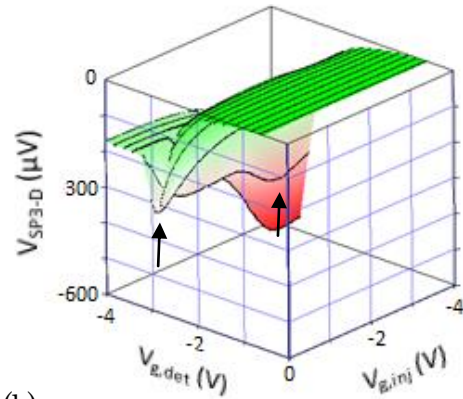
$$\text{i.e., } \delta v_{ISPE} \sim V_{TPi-D} + V_{SPi-D} \quad (3)$$

従って、2つの非局所電圧 V_{SPi-D} 、 V_{TPi-D} の和を取れば、共鳴時に発生する逆スピンホール効果電圧 δv_{ISPE} が観測できる見通しがある。

図7に、 V_{SPi-D} 、 V_{TPi-D} の測定例を示す。測定は交流ロックイン法で行い、 $i_c = 0.5 \mu A$ 、温度は3.8 Kである。ここでは、注入部から最も遠い3番目の上、横プローブのセットでの結果を示す。この図から $V_{g,inj} \sim -3.2 V$ 、 $V_{g,det} \sim 2.9 V$ で V_{TP3-D} はピーク、 V_{SP3-D} はディップをそれぞれもつことがわかる。また図8には、上の2つの非局所電圧の和を示す。電圧値は $V_{g,inj} \sim -3.0 V$ 、 $V_{g,det} \sim 2.7 V$ にピークをもつ。



(a)



(b)

図7 スピンホール効果測定用多端子ホールバースピン検出部で測定した(a)上プローブ、及び(b)横プローブによる非局所電圧信号。スピン流拡散部から最も遠い3番目のプローブの組を使用。 $V_{g,inj}$ 、 $V_{g,det}$ はそれぞれ、注入部、検出部に設置したトップゲート電極に印加した電圧を表す。

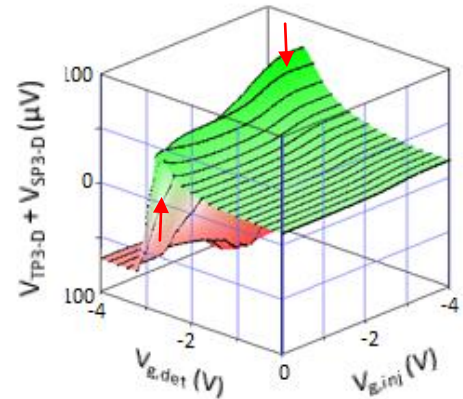


図8 図7の2つの非局所電圧信号 V_{TP3-D} 、 V_{SP3-D} の和を表示したもの。 $V_{g,inj} \sim -3.0 V$ 、 $V_{g,det} \sim 2.7 V$ にピーク(矢印)が観測される。

(2) 実験結果の考察

図7のピーク、ディップは基本的には、図5で観測されている2層の2DEGのフェルミ面が一致する付近での2DEG層間散乱の共鳴的増大と関連していると考えられる。実際、非局所測定プローブが存在するスピン流検出部のゲート電圧 $V_{g,det}$ に対しては、図5のような比較的鋭い、 $V_{g,inj}$ に対しては、かなりなだらかであるが、それぞれピーク(ディップ)

が得られている。また、 V_{TP3-D} と V_{SP3-D} の極性は、殆どの試料でほぼ逆 ($V_{TP3-D} \sim -V_{SP3-D}$) になっていることも確認された (式(3))。図5と図7でピークを与えるゲート電圧が数倍異なるのは、素子作製プロセスの違いによるもので本質的なものではない。即ち、後者の多端子ホールバーでは、微細構造部の作製歩留まりを上げるためゲート絶縁膜の後処理温度を下けている故に、ゲート絶縁性が若干劣化していると考えられる。

2つの非局所電圧の和信号 (図8) では、やはり、 $V_{g, inj}$ と $V_{g, det} \sim 2.7V$ に対してピークをもつが、そのゲート電圧値は、図7に比べて、 $V_{g, inj}$ 、 $V_{g, det}$ とも約 $0.2V$ 低いことが確認できる。この「ずれ」は background と異なる信号=逆スピンホール電圧の存在を示唆する。この信号がスピンに源をもつことの検証には、 i_c の方向に対する依存性が重要である。これに関しては、低 V_g の多くの場合で i_c の方向逆転に対し信号の反転が見られたが、高 V_g (共鳴付近) では、その反転ははっきりしなかった。このことは、ゲート電圧依存性があるものの、非局所電圧の和信号のかなりの部分は逆スピンホール電圧であることを示唆するが、background の除去が不完全である可能性もある。

(3) 理論的検討

上記と並行して、Rashba 系を積層した場合にできるバンド構造について理論的に研究した。Rashba 系はトポロジカル絶縁体表面のディラックコーンとほぼ同じハミルトニアンで記述されるため、同様の理論の枠組みで記述することができる。トポロジカル絶縁体と通常の絶縁体の積層の研究により、Rashba 相互作用を持つ系の積層で新奇なバンド構造が出現する可能性と、それらの起源について解明した。

Rashba 系やトポロジカル絶縁体表面ディラックコーンにはカイラリティという自由度があり+ (プラス) と- (マイナス) の2通りを取り得る。こうしたラシュバ系の積層順について通常は++++の順となるが、積層する物質の種類や積層の方向を工夫することで、+---+---のようなパターンでの積層 (図9上) ができたと仮定して、そのバンド構造を計算した。この場合は、積層の層の厚さによって、通常の絶縁体ないしノーダルライン半金属となることが分かった。

なおこのノーダルライン半金属は摂動に対して不安定であり、摂動の入れ方により種々のバンド構造へと変化しうることも分かった。その様子は例えば面内の3回回転対称性をもつ結晶場を表すワーピング項の入れ方により異なる。例えばワーピング項の符号を積層方向に+ - - +の順に入れるとノーダルライン半金属となりギャップが図8左下のような k 点で閉じるが、ワーピング項を全て+で入れると「ノーダルプレーン半金属」となり、 k 空間の曲面上 (図9右下) でギャ

ップが閉じる特異なバンド構造を示す。

またこのような様々なトポロジカル半金属が起こる原因について理論的に解明した。ここで起こるノーダルラインやノーダルプレーンはある種の行列のパフィアンのゼロ点で表せることを示し、こうしたことが起こるのはある種のカイラル対称性がある場合であることを示した。従ってこうした対称性が近似的に存在する場合には、バンド間のギャップが一般の k 点で閉じるトポロジカル半導体的な振る舞いが現れることが分かった。

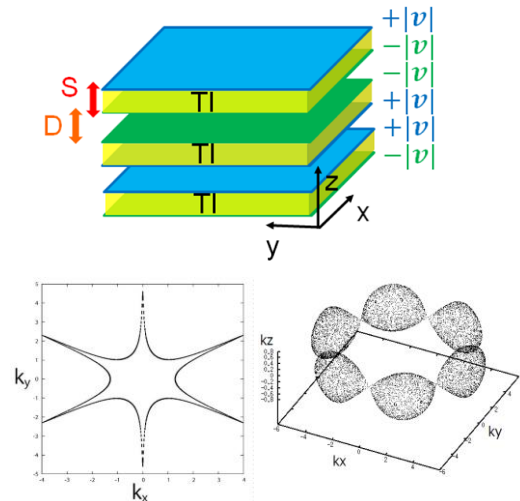


図9 (上図) トポロジカル絶縁体と通常の絶縁体の積層の例。トポロジカル絶縁体表面のスピнкаイラリティが交互に変わるように積層している。(下図) 上図の積層において、左下図: ワーピング項の符号を速度の符号と同様に+ - - +とした場合のノーダルライン、右下図: ワーピング項の符号を++++とした場合のノーダルプレーン、を示す。

以上まとめると、本研究は、スピン軌道相互作用を有し適切に分散関係が結合する2DEG 2層系でスピンホール効果が共鳴的に増大するという提案の実証を目指した試みである。選んだ試料は強い Rashba 型スピン軌道相互作用を有する半導体狭ギャップ (高 In 組成) ヘテロ構造で、間のごく短い ($3\mu m$ 以下) スピン流拡散部を含む3つの領域にゲートをもつ多端子ホールバーを作製し、共鳴スピンホール効果の、非局所電圧における逆スピンホール効果での観測を試みた。

その結果、層間散乱と思われる大きい背景抵抗を除いた状態で、2つの2DEGが結合している条件付近で、トップゲート電圧に対し、再現性良く(共鳴)ピークが観測できた。そのスピン起源についてはまだ確定的ではないが、逆スピンホール効果関連の信号である可能性は高い。理論との比較については現在検討中である。

参考文献

- [1] S. Murakami et al, Science 301, 1348 (2003).
- [2] J. Sinova et al, Phys. Rev. Lett., 92, 126603 (2004).
- [3] J. I. Inoue et al, Phys. Rev. B, 70, 041303(R) (2004).

- [4] Y. Kato, Science 306, 1910 (2004).
 [5] S. Tewari et al, New J. Phys. 13, 065004 (2011).
 [6] P. Q. Jin et al, Phys. Rev. B76, 235311 (2007).
 [7] M. Akabori et al, J. Appl. Phys. 112, 113711 (2012)
 [8] S. Hidaka et al., Appl. Phys. Express, 5, 113001 (2012).

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件) (全て査読有り)

- 1) K. Nakajin and S. Murakami, **Theory of unconventional spin states in surfaces with non-Rashba spin-orbit interaction**, Phys. Rev. B91, 245428-1-9.
- 2) K. Hayashi, N. Uchitomi, K. Yamagami, A. Suzuki H. Yoshizawa, J. T. Asubar, N. Happo, S. Hosokawa, **Large As sublattice distortion in sphalerite ZnSnAs₂ thin films revealed by x-ray fluorescence**, J. Appl. Phys. 119, 125703-9.
 [学会発表] (計 16 件)
- 1) S. Murakami, **Topological control of band structures in surfaces, interfaces and superlattices**, European Phase Change and Ovonic Symposium (EPCOS2014) (invited), Marseille, France, Sep. 2014.
- 2) 中陳巧勤、村上修一、**非 Rashba 型スピン軌道相互作用の接合、積層系におけるスピン物性の理論**、日本物理学会 2014 年秋季大会、2014 年 9 月、愛知県、中部大学
- 3) 中陳巧勤、村上修一、**非 Rashba 型スピン軌道相互作用をもつ系の接合や積層でのバンド構造とスピン分布**、日本物理学会第 70 回年次大会、2015 年 3 月、東京都、早稲田大学
- 4) K. Nakajin and S. Murakami, **Spin textures for surface states with non-Rashba-type spin-orbit interaction**, APS March Meeting, San Antonio, Texas, USA, March, 2015.
- 5) 胡ガイ、張儲君、日高志郎、岩瀬比宇麻、赤堀誠志、山田省二、**中心に InAlAs 障壁層をもつ 2 次元電子ガス 2 層系のサブバンド構造**、日本物理学会第 70 回年次大会、2015 年 3 月、東京都、早稲田大学
- 6) 大堀高寛、赤堀誠志、日高志郎、山田省二、**高 In 組成メタモルフィック InGaAs/InAlAs ヘテロ接合を用いたゲート付細線構造の評価**、日本物理学会第 70 回年次大会、2015 年 3 月、東京都、早稲田大学
- 7) M. Akabori, T. Ohori, S. Hidaka, S. Yamada, A. Yasaka, **Top-down fabrication and electrical characterization of InGaAs/InAlAs quantum nanostructures**, Int. Symp. On Nano-Materials, Technology and Applications (invited), Hanoi, Vietnam, Oct. 2014.
- 8) S. Hidaka, H. Iwase, M. Akabori, S. Yamada, Y. Imanaka, K. Takehana, **Traces of fractional quantum Hall plateaus in asymmetric two-dimensional bilayer system in wide InGaAs well**, 21st Int. Conf. on Electronic Properties of Two-dimensional System (EP2DS21), Sendai, Japan, July 2015.
- 9) T. Ohori, M. Akabori, S. Hidaka, S. Yamada, **Fabrication and characterization of gated**

parallel wire structures having a metamorphic InGaAs / InAlAs heterojunction with high In content well, 21st Int. Conf. on Electronic Properties of Two-dimensional System (EP2DS21), Sendai, Japan, July 2015.

- 10) K. Hu, S. Hidaka, H. Iwase, M. Akabori, S. Yamada, **Subband transport in two-dimensional electron gas bilayer system in narrow InGaAs well with center InAlAs barrier**, 21st Int. Conf. on Electronic Properties of Two-dimensional System (EP2DS21), Sendai, Japan, July 2015.
- 11) Y. Imanaka, K. Takehana, S. Hidaka, H. Iwase, M. Akabori, S. Yamada, **Cyclotron resonance in InGaAs Rashba bilayer system**, 21st Int. Conf. on Electronic Properties of Two-dimensional System (EP2DS21), Sendai, Japan, July 2015.
- 12) 山田省二、藤元章、赤堀誠志、**高 In 組成 InGaAs/InAsAs 2 次元電子ガス 2 層系スピンホール効果観測の基礎検討**、日本物理学会 2015 年秋季大会、2015 年 9 月、大阪府、関西大学
- 13) 山田省二、今中康貴、竹端寛治、赤堀誠志、**InGaAs/InAlAs 2 次元電子ガス 2 層系における分数量子プラトーの痕跡**、日本物理学会 2015 年秋季大会、2015 年 9 月、大阪府、関西大学
- 14) 山田省二、藤元章、添田幸伸、赤堀誠志、**InGaAs 2 次元電子ガス 2 層系における共鳴スピンホール効果測定**、日本物理学会第 71 回年次大会、2016 年 3 月、宮城県、東北学院大学
- 15) 添田幸伸、赤堀誠志、藤元章、山田省二、今中康貴、竹端寛治、**表面反転層高 In 組成 InGaAs 2 次元電子ガス 2 層系におけるサブバンド構造と量子ホール効果**、日本物理学会第 71 回年次大会、2016 年 3 月、宮城県、東北学院大学
- 16) 添田幸伸、日高志郎、赤堀誠志、山田省二、**高 In 組成 InGaAs 2 次元電子ガスにおけるスピンバルブ特性の結晶方位依存性**、日本物理学会第 71 回年次大会、2016 年 3 月、宮城県、東北学院大学

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
 山田 省二 (Yamada Shoji)
 大阪工業大学・教育センター・教授
 研究者番号：00262593
- (2) 研究分担者
 村上 修一 (Murakami Shuichi)
 東京工業大学・理工学研究科・教授
 研究者番号：30282685
- (3) 研究分担者
 岩瀬 比宇麻 (Iwase Hiuma)
 北陸先端科学技術大学院大学・ナノマテリアルテクノロジーセンター・助教
 研究者番号：10709132
- (4) 研究分担者
 内富 直隆 (Uchitomi Naotaka)
 長岡科学技術大学・工学研究科・教授
 研究者番号：20313562