

スピン注入ホール効果の偏光検出器への応用

伊藤 顕 知

Optical Polarization Detector Using Spin Injection Hall Effect

Kenchi ITO

A new spin-photo-voltaic chip which directly converts circularly polarized light into voltage signals in a semiconductor device is presented. By shining light on a specially designed planar p-n junction photodiode, photo-excited spin-polarized electrons and holes are accelerated in opposite direction. When the spin-polarized electrons propagate through non-magnetic semiconductor, they are deflected by spin orbit interaction, which generates spin Hall voltage. Since the spin Hall voltage is proportional to the degree of polarization of the injected light, we can electrically detect it without any polarizers.

Key words: spin Hall effect, photo-voltaic effect, spin injection

電子のスピンは、材料がもつ磁石の性質（磁性）のミクロな基本単位であり、今日では HDD（ハードディスクドライブ）の情報読みとり用ヘッドに応用され、情報ストレージ技術にきわめて重要な役割を担っている。一方で、磁性をもたない半導体材料は、情報処理や光通信技術を支える基本材料であるが、その情報担体は電荷であり、スピンの性質はまだ応用されるにいたっていない。この理由は、①半導体中に効率よくスピン偏極したスピンの流れ（スピン流）を生成し、②生成したスピン流を電気的手段で変調し、③測定する、といった基本的な技術が確立されていなかったことによる。しかし近年、スピン軌道相互作用を有する半導体に電流を流すと、その電流路の両端に、それぞれ上向き、下向きスピンが別個に蓄積されるスピンホール効果が実証され^{1,2)}、またこれとは独立に、金属強磁性材料と半導体材料をトンネルあるいはショットキー障壁で接合し、強磁性材料から半導体にスピンを注入するスピン注入の技術も開発された^{3,4)}。また、GaAs等の半導体に円偏光を照射すると、光学選移の選択側から、右左の円偏光に対応して、それぞれ上向き/下向きスピンを選択的に励起可能であることが知られている。以上のように、電気的手段あるいは光学的手段によって、半導体の中にスピン流を効率的に生成する環境が整ってきた。

しかし、半導体中でのスピン流の変調は容易ではない。その理由は、スピン流の電気的変調を行うにはスピン軌道相互作用を有する物質を使うことが必須であるが、そのスピン軌道相互作用自体がスピンの向きの一様性を壊すデコヒーレント作用があるためである。2006年に、スタンフォード大学の Bernevig らは、PSH (persistent spin helix) 状態という、スピンの向きの一様性が長距離のスピン流の伝搬によって保持される状態があり得ることを理論的に示した⁵⁾。二次元電子ガスを有する半導体構造では、Rashba タイプのスピン軌道相互作用 α と、Dresselhaus タイプのスピン軌道相互作用 β という2つの異なった起源をもつスピン軌道相互作用が共存しており、もしこの2つのスピン軌道相互作用の大きさを等しくし、かつ特定の結晶軸方向にスピン流を伝搬させた場合、スピンの向きの一様性が保持されるというのが理論の骨子である。日立ケンブリッジ研究所の Wunderlich らは、 $|\alpha| \sim |\beta|$ を実現する二次元電子ガス状態を有する半導体を用いて形成した平面型の pn ダイオードに、円偏光を照射してスピン偏極した電子を励起し、かつ上記の理論に従ってスピン流の伝搬方向を [1-10] 方向に限定したホールバーを用いることで、ミクロンオーダーのスピン流の伝搬と、スピンホール効果を応用したスピン偏極度（すなわち円偏光度）の測定に成功

(株)日立製作所中央研究所 (〒185-8601 国分寺市東恋ヶ窪 1-280) E-mail: kenchi.ito.mb@hitachi.com

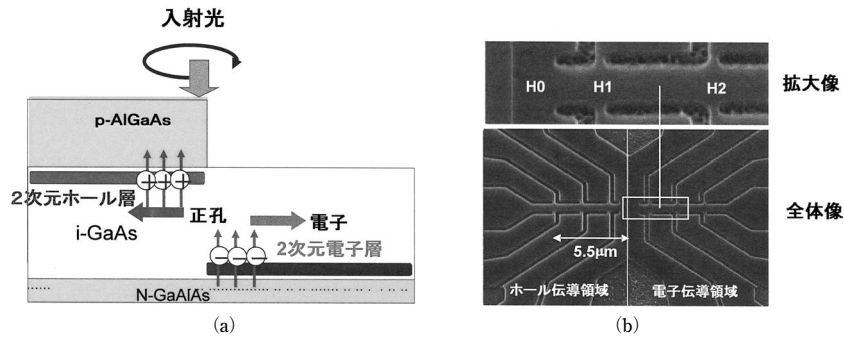


図1 スピン注入ホール効果素子. (a) 素子断面模式図, (b) 素子の光学顕微鏡像.

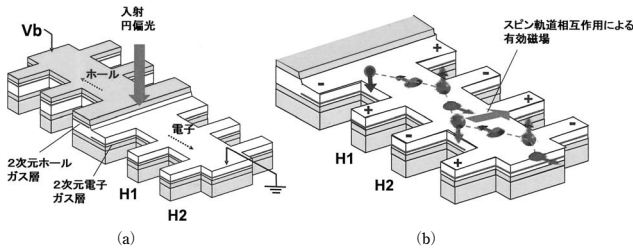


図2 偏光度測定原理. (a) キャリヤーの励起, (b) ホールバー内の電子の伝搬.

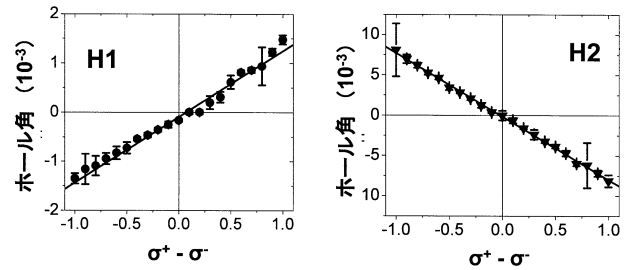


図3 偏光度検出結果.

した⁶⁾. この素子は偏光子を用いず入射光の偏光度を電氣的に測定できる素子であり, スピン注入ホール効果 (spin injection Hall effect; SIHE) 素子とよばれている. 以下にこの素子の構造と動作を紹介する.

1. SIHE 素子の構造

図1に, SIHE 素子の断面構造の模式図 (a) と, 光学顕微鏡写真 (b) を示す. 図1からわかるように, SIHE 素子は一種の平面型 pn ダイオード構造を有している. 図1 (b) の全体像において, 中央より右の部分は, 図1 (a) に示されているように, i-GaAs 層の上部に形成された p-GaAlAs 層が除去された領域であり, この領域の i-GaAs 層の n-GaAlAs 層に近い部分に, 二次元電子ガス層が形成される. 一方, 図1 (b) の拡大像で, 中央より左の部分は, p-GaAlAs 層が残されている領域であり, この領域の i-GaAs 層の p-GaAlAs 層に近い部分に, 二次元ホールガス層が形成される. さらに, 二次元ホールないし電子ガス層が形成されている領域は, それぞれホールバーに加工されている. 図中の H0, H1, H2 は, それぞれホール測定端子の位置を示している.

2. SIHE 素子の動作

SIHE 素子に円偏光の光を照射すると, 図2 (a) のように電子-ホール対が励起される. このとき, 偏光の方向 (右回り / 左回り) を変えることで, 上向きないし下向き

スピンを有する電子を選択的に励起することができる. さらに平面型 pn ダイオードの順方向にバイアスを印加すると, 電子およびホールはそれぞれ反対側にドリフトしていく. 電子がドリフトしていく過程で, 図2 (b) のように, 電子スピンは, スピン軌道相互作用で生じる有効磁場の影響で歳差運動するとともに, スピンホール効果によりスピンの向きに応じて左, ないし右に曲げられる. スピンの向きが電子の空間的な伝搬とともに回転しているので, 電子の軌道は, 図2 (b) のように左右に蛇行する. この蛇行現象によりホールバーの幅方向に電荷の分布が生じ, その分布をホール電圧として検出することができる. 電子の蛇行の周期と, スピンが歳差運動で1回転する周期は一致する. 用いた i-GaAs の材料定数から見積もられる周期は約 $4 \mu\text{m}$ なので, ホールバーの間隔を $2 \mu\text{m}$ としてある. また, 材料定数から見積もられる β は $-0.02 \text{ eV}\text{\AA}$ 程度であり, 二次元電子ガス内の有効電場から生じる α は $0.01 \sim 0.03 \text{ eV}\text{\AA}$ の範囲にあると見積もられるので, 本素子においては, おおむね PSH の条件が成り立っている.

実際の測定に用いる光は, 右回り / 左回りの偏光がある割合で混じっている. この場合, 偏光度に比例した数の上向き / 下向きスピンの励起される. 上向きスピンと下向きスピンは, 互いに逆向きに蛇行するので, 検出されるホール電圧は, 励起された上向き / 下向きスピンの数の差に比例することになる. 図3は, 入射光の円偏光度 ($\sigma^+ - \sigma^-$)

を変化させて、ホールバー H1, ホールバー H2でのホール角度 (=スピンホール電圧 / バイアス電圧) を測定した結果である。ホール電圧が、偏光度に比例し、かつ2つのホールバーでの電圧極性が逆になっていることがわかる。

最後に、この素子の感度について述べる。文献6)の実験では、光源としてチタンサファイヤレーザーが用いられているが、アッテネーターでパワーを減じられ、実際に素子に照射された光のパワーは数 μW である。これによって励起された光励起電流は約 $0.5 \mu\text{A}$ であり、検出されたホール抵抗は、4Kでは波長 870 nm の光に対して 100Ω 程度、室温では波長 930 nm の光に対して 10Ω 程度、電圧としてはそれぞれ $50 \mu\text{V}$, $5 \mu\text{V}$ のレベルであり、室温でも十分実用に供する感度であることがわかる。室温で検出電圧が低下する理由は、温度上昇による電子状態のブロードニング等が考えられている。

実際に SIHE 素子を偏光検出器として用いようとする場合は、通常のフォトダイオードのように、プリアンプなどを含む回路を実装する必要があるが、前述の通り高感度の素子であるので、特別のアンプ系を準備する必要はないと考える。さらに大きなメリットがあると考えられるのは、SIHE 素子をアレイ化した素子ではないかと考える。アレイ化を行うと、偏光を場所ごとに検出できる偏光イメージングセンサーが構成できる。偏光子を一切用いる必要がないので、小型のセンサーが構成でき、いろいろな応用展開が開けるのではないだろうか。

3. 光励起のスピン FET

Wunderlich らは、さらに SIHE 素子のホールバー部にゲート電極を載せ、電圧によってホール電圧信号を変調する光励起の「スピン FET」のデモンストレーションも行った⁷⁾。本解説記事の偏光検出器とは直接関係ないが、めざましい成果なので少し触れておく。

前述したように、半導体中でスピン流を電圧で変調できれば、半導体スピントロニクス素子実現へ大きく前進する。1990年に Datta と Das は、二次元電子ガス層にスピンを注入 / 検出する強磁性体ソース / ドレインを設置し、二次元電子ガスのチャンネル上にゲートを設けた「スピン FET」のアイデアを提案した⁸⁾。ゲートに電圧を印加すると、二次元電子ガスチャンネルの Rashba スピン軌道相互作用の強さが変調され、二次元電子ガスチャンネルを伝搬するスピンのスピン回転角度が変わる。スピンの向きと強磁性ドレイン電極のスピンの向きのなす角度のコサインに比例してドレイン電流が得られるので、FET 動作が可能になる。Wunderlich らは、強磁性体電極の代わりに、円偏

光を用いて二次元電子チャンネルにスピンを注入することに成功しており、さらに材料の最適化によって PSH 状態を実現していたので、次にホールバー上にゲート電界を形成して、スピン FET 動作を検証した。その結果、 $2 \mu\text{m}$ の長さのゲートに 0.5 V の電圧を印加することで、スピン FET 動作が実現できることが示された。この成果も、光とスピントロニクスを結び付けた新しいデバイス探求の端緒を開くと期待される。詳細は文献7)をぜひご一読いただきたい。

本稿では、円偏光度を半導体中で電圧信号に変換する SIHE 素子を紹介した。本素子では、平面型の pn ダイオードに円偏光を照射してスピン偏極した電子とホールを励起する。スピン偏極した電子がスピン軌道相互作用を有する半導体中を伝搬すると、スピンホール効果によって軌道が左右に曲がる。これによって生じた電圧を測定することで、入射光の偏光度が検出できる。この素子を用いれば、偏光子を使わずに、完全に電氣的に光の偏光度が測定できる。最後に、光励起されたスピン流を用いたスピン FET の動作を紹介した。

文 献

- 1) Y. K. Kato, R. C. Myers, A. C. Gossard and D. D. Awschalom: "Observation of the spin Hall effect in semiconductors," *Science*, **306** (2004) 1910-1913.
- 2) J. Wunderlich, B. Kaestner, J. Sinova and T. Jungwirth: "Experimental observation of the spin-Hall effect in a two-dimensional spin-orbit coupled semiconductor system," *Phys. Rev. Lett.*, **94** (2005) 047204.
- 3) H. J. Zhu, M. Ramsteiner, H. Kostial, M. Wassermeier, H.-P. Schönherr and K. H. Ploog: "Room-temperature spin injection from Fe into GaAs," *Phys. Rev. Lett.*, **87** (2001) 016610.
- 4) X. Jiang, R. Wang, R. M. Shelby, R. M. Macfarlane, S. R. Bank, J. S. Harris and S. S. P. Parkin: "Highly spin-polarized room-temperature tunnel injector for semiconductor spintronics using MgO(100)," *Phys. Rev. Lett.*, **94** (2005) 056601.
- 5) B. A. Bernevig, J. Orenstein and S.-C. Zhang: "Exact SU(2) symmetry and persistent spin helix in a spin-orbit coupled system," *Phys. Rev. Lett.*, **97** (2006) 236601.
- 6) J. Wunderlich, A. C. Irvine, J. Sinova, B. G. Park, L. P. Zárbo, X. L. Xu, B. Kaestner, V. Novák and T. Jungwirth: "Spin-injection Hall effect in a planar photovoltaic cell," *Nat. Phys.*, **5** (2009) 675-681.
- 7) J. Wunderlich, B.-G. Park, A. C. Irvine, L. P. Zárbo, E. Rozkotová, P. Nemeč, V. Novák, J. Sinova and T. Jungwirth: "Spin Hall effect transistor," *Science*, **330** (2010) 1801-1804.
- 8) B. Das, S. Datta and R. Reifenberger: "Zero-field spin splitting in at two-dimensional electron gas," *Phys. Rev. B*, **41** (1990) 8278-8287.

(2012年8月7日受理)