

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 7 日現在

機関番号：12102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011 ～ 2012

課題番号：23654113

研究課題名（和文） 磁気光学効果を用いた蓄積スピンの逆空間観察

研究課題名（英文） Observation of accumulated spins through magneto-optical effect in reciprocal space

研究代表者

柳原 英人 (YANAGIHARA, HIDETO)

筑波大学・数理物質系・准教授

研究者番号：50302386

研究成果の概要（和文）：本研究では、電流を流した回折格子状の Pt 試料に対して磁気カー効果 (MOKE) を用いて Pt 端面に蓄積するスピン情報を検出することを試みた。2 軸 X 線回折計を改造し、簡便かつ高感度である偏光変調法をもちいて可視光用の MOKE 回折計を作製した。偏光変調に加えて回折格子に印加する電流を交流電流とすることで二重変調法によるロックイン検波を試みた。1 次の回折線に関する磁気カー信号は、電流による変化を示さず、スピン蓄積に起因した応答は得られなかった。今後、S/N を改善するためには、交流電流の増大および、レーザーダイオード強度のゆらぎに対する対策を講じる必要があることがわかった。

研究成果の概要（英文）：In this study, we attempted to detect spin accumulation signal at the edges of platinum gratings with electric current through magneto-optical effect (MOKE). An optical diffractometer equipped with a MOKE detector based upon a polarization modulation technique was built. A blue laser diode is chosen as a light source and the gratings were designed by taking account of the wavelength. A double modulation technique of the ac current and polarization modulation was adopted. The distinct of spin accumulation signal has not been observed yet, suggesting that other improvements are needed to reduce the background noise and to enhance the spin accumulation signal.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：磁性薄膜、微粒子

科研費の分科・細目：磁性

キーワード：スピンのホール効果、磁気光学効果、スピン蓄積

## 1. 研究開始当初の背景

スピンのホール効果とは、非磁性金属や半導体内を流れる電流がスピン軌道相互作用により、その電流に直交する方向にスピン分極した電子のスピン角運動量の流れ（スピン流）の生じる現象である[1]。近年、これに付随した逆スピンのホール効果や熱電現象など様々な現象が発見されつつあり、これは新たな物理現象であるばかりでなく、画期的な電子デバイスに発展する可能性が広く認識されている。さらにスピンのホール効果は、本質

的に散逸を伴わないスピン流[2]の発生機構として捉えることが可能であり、理想的な情報伝達手段としての可能性も指摘されている。

実験的には非磁性金属や非磁性半導体に電流を印加し引き起こされるスピンのホール効果により、その端面にスピンが蓄積する事を用いてその測定が行われてきた。これまでにこのスピンのホール効果は、半導体細線端面に生じるスピン蓄積を磁気光学効果[3]、LED型素子での円偏光発光[4]、強磁性電極を用い

たスピン依存化学ポテンシャルの直接測定 [5] といった方法により実験的に確認されてきた。いずれの手法も高度な素子加工技術や測定技術が要求され、観測の成否は特に電極と被測定導体との界面状態に強く依存する。そこで電極や界面を用いず無電極でスピン蓄積を容易に観測できる技術が確立されれば、非磁性体におけるスピンホール効果や強磁性体における異常ホール効果などのスピン蓄積現象の理解が深まり、これらの効果をしめす材料の評価・探索にも有用となるであろう。このスピン蓄積が生じる特徴的な長さはスピン拡散長で与えられるが、一般に金属におけるスピン拡散長は、半導体のそれに比べて桁小さい事が知られている。したがって金属系において無電極でスピン蓄積を観測するためには、従来の手法では困難であると予想される。

## 2. 研究の目的

本研究では、磁気光学効果を用いて金属端面に蓄積したスピン情報を検出することを試みた。磁気光学効果は光学系の幾何学的な配置から幾つかに分類される。なかでも反射光の偏光を読み出す磁気カー効果 (MOKE) は、表面の磁気的な情報に敏感であるばかりでなく、極めて高感度に磁化過程を測定することが可能である [6]。スピンホール効果や異常ホール効果によって引き起こされるスピン蓄積の密度は、電流密度に比例することから、細線に大電流を流すことで端面に蓄積するスピンの効果的に観測可能となることを期待して、試料を回折格子状に加工して測定を試みた。MOKE における高次の回折光は、回折格子の形状のみならずスピン密度に関する情報も含んでおり、原理的には表面に蓄積したスピンの密度分布まで再構成可能である。さらに、近年発展著しいフェムト秒レーザーのような光源を用いることで、スピンホール効果に伴うスピン蓄積の時分割測定が可能となり、回折強度の時間変化と併せることで将来的にはスピン蓄積の時空間の変化を直接観測する手段となり得る。

## 3. 研究の方法

スピンホール効果によって生じるスピン蓄積は僅かであり、このためスピンホール効果の大きな物質として知られている Pt を試料として選択した。金属 Pt のスピンホール効果については Guo らによって計算されており、Pt のバンド構造のバンド交差が、大きな効果をもたらしていることが指摘されている [7]。バンド計算によって求めたスピンホール伝導度は n 型半導体の  $10^4$  倍と大きいことから、本研究で対象とするのに適切な物質であると考えた。また常磁性金属である Pt の帯磁率は高いことが知られており、Pt のカーズベ

クトルが報告されている [8]。大きなカー回転角が期待される  $\lambda=405$  nm の波長のレーザーダイオード (LD) を光源とした。

MOKE をもちいて微小なスピン蓄積を観測す

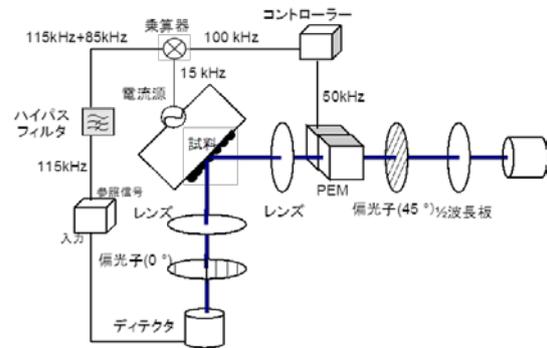


図 1 測定系の全体図

るために磁化が反射面内にありかつ入射面に含まれる縦カー配置となるように装置の設計を行った。上で述べたように Pt を回折格子状に微細加工したものを試料とし、高次の回折線の磁気カー信号を測定できる装置が必要であるため、現有の X 線 2 軸粉末用回折計を改造し光学用の回折計とした。2θ 軸、θ 軸は独立に回転可能となるようにし、駆動系はナショナルインスツルメンツ社製 LabVIEW により制御した。

光源には、Mitsubishi 社製 120 mW 出力レーザー (ML320G2-11;  $\lambda=405$  nm) を、またディテクタには Si フォトダイオードを使用した。また高感度の MOKE 測定を行うために光学遅延変調法をもちいた。光弾性変調器には Hinds 社製 PEM をもちいて、直線偏光に  $f_M=50$  kHz の光学学変調をかけた。偏光変調法では、カー楕円率は、 $f_M$  で変調している成分に比例し、カー回転率は  $2 f_M$  の成分に比例することから、2 つの磁気光学効果を同じ測定系で同時に測定できる。偏光子と検光子には消光比の高い直線偏光子としてグラネーラ偏光子を用いた。測定系の全体図を図 1 に示す。

Pt の回折格子は、厚さ 50 nm の Pt 薄膜をスパッタで Si (001) ウエーハ-上に成膜し、リフトオフによって作製した。電極には Au のパッドを用意し 2 つの電極間の距離は 500  $\mu$ m となるように設計した。作製した回折格子の光学顕微鏡写真を図 2 に示す。周期を一定 (1200 nm) となるようにし、それぞれ 500 本の細線から構成された回折格子を 21 個作製した。回折格子の細線幅と線間 (line & space) は、300 nm/900 nm から 900 nm/300 nm まで異なるものを 7 種類用意した。

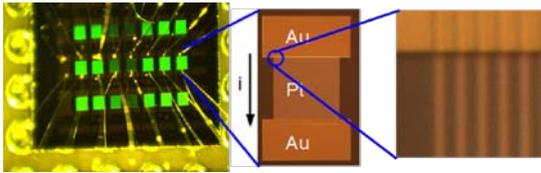


図 2 作製した回折格子の光学顕微鏡像

測定には、ロックイン検波法を用いた。交流電流源 (Keithley 6221) をもちいて回折格子に AC 電流を印加し、前述のとおり偏光変調法を重畳する二重変調法により実験を行った。

AC 電流は最大 95 mA とし、 $f_i = 15$  kHz とした。したがって Pt 細線端面では  $f_i$  の周波数でスピン蓄積の符号が反転することとなる。さらに上述の偏光変調法では  $2 f_M = 100$  kHz でカー回転の信号を測定することとなるため、 $f_i \pm 2 f_M$  にスピン蓄積に起因したカー回転の信号が現れる。そこで、PEM コントローラから出力される  $2 f_M$  の信号と AC 電流源から出力される  $f_i$  の信号を乗算器に通した後、ハイパスフィルタを通じて  $f_i + 2 f_M = 115$  kHz の周波数信号を抽出し、これをロックインアンプの参照信号とした。一方プリアンプを通して増幅したフォトダイオードディテクタの信号を入力信号としてロックイン検波をおこなった。光学系では、PEM を通したあと凸レンズを設置することにより、特定の回折格子上に集光するようにした。

#### 4. 研究成果

回折格子の line & space が 900 nm/300 nm の試料の実験結果を図 3 に示す。

この電流依存性は、1 次の回折線における結果である。和周波である 115 kHz の参照信号に対して in-phase の成分と  $90^\circ$  遅れた成分 (out-of-phase) の 2 成分をしめしている。In-phase の成分も out-of-phase の成分も AC 電流の変化に対して一定であった。スピンホール効果に起因するスピン蓄積は電流に対して比例することがから、これに対応した何らかの直線的な変化が期待されたが、今回の測定条件ではバックグラウンドのノイズに埋もれ、スピンホール効果にともなうスピン蓄積によると考えられるような有意な信号は見られなかった。

これまでに得られた結果から今後改善すべき点を述べたい。第一に回折格子に印加した電流が小さいことが挙げられる。回折格子を構成する Pt 細線のサイズ (幅 900 nm × 長さ 500 nm × 厚さ 50 nm) では、一桁以上大きな電流が流せるはずであり、これにより信号強度の増大が期待できる。より大きな出力が可能な電流源を用いて更に実験を行う必要がある。次に光源のゆらぎが挙げられる。レーザ強度を安定化するために LD 素子をペルチ

エ冷却することで光強度の長時間のゆらぎを抑制したが、短時間での強度ゆらぎに関して何らかの対策を取る必要があると考えられる。具体的には、LD の出力をビームスプリタで分けて直接ディテクタで読んだ信号をもちいて回折線の信号を規格化することで LD のゆらぎをキャンセルした後ロックイン検波をする、あるいは LD 強度と回折線の信号との差をとることでコモンモードノイズを低減し S/N の改善が期待される。この手法

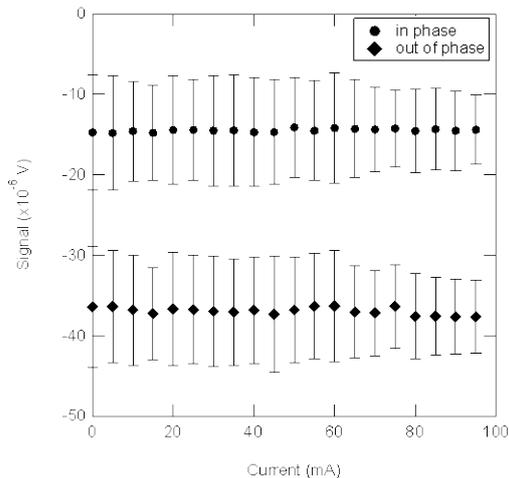


図 3 測定結果

を用いることで、磁気光学効果の測定において S/N を向上させる事が知られている。本測定では、回折格子の形状を有する試料を用いることが重要であるが、回折格子自体も偏光光学素子であることを考慮していなかった。今後、磁気円二色性等の磁気光学効果を用いることも試みたい。

#### 参考文献

1. Murakami, S., Nagaosa, N. & Zhang, S. C., *SCIENCE* **301**, 1348-1351 (2003).
2. Sinova, J. *et al.*, *PHYSICAL REVIEW LETTERS* **92**, (2004).
3. Kato, Y. K., Myers, R. C., Gossard, A. C. & Awschalom, D. D., *SCIENCE* **306**, 1910-1913 (2004).
4. Wunderlich, J., Kaestner, B., Sinova, J. & Jungwirth, T., *PHYSICAL REVIEW LETTERS* **94**, (2005).
5. Valenzuela, S. O. & Tinkham, M. Direct electronic measurement of the spin Hall effect. *NATURE* **442**, 176-179 (2006).
6. 佐藤勝昭 光と磁気 [改訂版]. (朝倉書店: 2001).
7. Guo, G. Y., Murakami, S., Chen, T.-W. & Nagaosa, N., *PHYSICAL REVIEW LETTERS* **100**, (2008).
8. Uba, L., Uba, S., Antonov, V. N., Yaresko, A. N. & Gontarz, R., *PHYSICAL REVIEW B* **62**, 16510-16521 (2000).

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)

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柳原 英人 (YANAGIHARA, HIDETO)

筑波大学・数理物質系・准教授

研究者番号：50302386

(2) 研究分担者

長浜 太郎 (NAGAHAMA, TARO)

北海道大学・工学研究院・准教授

研究者番号：20357651