

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 6 日現在

機関番号：82401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K13705

研究課題名（和文）近接場光磁気効果によるスピン制御

研究課題名（英文）Spin control via near-field optomagnetic effects

研究代表者

小川 直毅（OGAWA, NAOKI）

国立研究開発法人理化学研究所・創発物性科学研究センター・ユニットリーダー

研究者番号：30436539

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：高屈折率プリズムを用いた典型的な光近接場励起配置において光の横スピンを発生し、隣接した物質中のスピン偏極電子との相互作用を電流（スピン偏極電流）として検出することを試みた。初期試料として、バルクで巨大ラシュバ型スピン分裂効果が知られているBiTeBrを用い、その後表面平坦性の追求のためトポロジカル絶縁体薄膜、またCdSe単結晶と実験を進めたが、試料の機械的な特性やスピン偏極の程度、またスピン偏極物性の発現する温度/励起波長などの問題により、光の横スピンの検出には至らなかった。

研究成果の概要（英文）：We aimed at detecting the transverse spin moment of optical near-field, by detecting the spin-polarized photocurrent in the adjacent materials having large spin-split electronic states. We used SiO<sub>2</sub> prisms to prepare the optical near-field with varying spin states, and employed cleaved crystals of BiTeBr, single crystalline films of (Bi,Sb)<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, and single crystals of CdSe as detectors with spin-split band structures. It is found that a flat exposed surface with a large spin-splitting is crucial to realize this experiment. The (Bi,Sb)<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> films may have potentials after an appropriate cryostat modification, to finely control the distance between the film and prism surface.

研究分野：光物性

キーワード：スピン偏極光電流

## 1. 研究開始当初の背景

近年のスピン트로ニクス研究においては、スピン偏極した電子やスピン波を高速/任意に発生し、またその運動を自由に制御する技術が重要となっている。光によるスピンの制御は最も期待される手法の一つであり、光磁気効果を中心にこれまでに多くの研究が行われてきた (F. Meier, *Optical Orientation* (1984) 等)。特に円偏光はスピン角運動量の自由度を持ち、物質中の電子をスピン偏極し、また有効磁場を印可することができる。これらは円偏光ガルバニック効果や逆ファラデー効果として知られており、特に後者はフェムト秒の時間分解能でスピン系を制御する可能性を秘めている。加えて近年、「光の量子化スピンホール効果」等、本質的に光波に付随する「横スピンの自由度」を用いた物理が議論されている。光の横スピンは近接場や集光スポットの周囲、プラズモンポラリトン、光干渉波中などで顕在化する。しかしその物質中電子/スピン系への作用はほとんど試みられていなかった。

## 2. 研究の目的

量子力学的粒子の状態は運動量とスピン状態によって表される。例えば光子は波数ベクトルと円偏光/ベクトル偏光によって運動量と角運動量(スピン/軌道)を有し、さらに物質/物質中の粒子と相互作用することにより、その状態を変化させることができる。本研究では、「横スピン」に代表される光の局所自由度を物質系の電子/スピン自由度に転写することにより、双方向の作用として、その検出と物質中電子/スピン系の制御を試みる。

## 3. 研究の方法

トポロジカル絶縁体やラシュバ型スピン分裂物質では、波数空間においてスピンの方位と運動量がロックしているため、直流電流/電圧印可によるスピン蓄積、スピン注入による電流の発生[(正/逆)Edelstein 効果]が知られている。このスピン偏極電子を円偏光励起するとスピン偏極電流が発生し(円偏光ガルバニック効果)、そのダイナミクスは光子エネルギー、偏光のヘリシティ、また入射光  $k$  ベクトルの方位によって制御可能である。これは特定波数のスピン偏極電子を選択励起することに対応し、直流の電場/磁場では探索できない物理現象であるとともに、非磁性体からなる高速反転可能なスピン源としての応用が期待されている。本

研究ではこのような物質系を局所光偏光センサーとして応用することを試みた。

高屈折率プリズムを用いた典型的な光近接場励起配置において光の横スピンを発生し、隣接した物質中のスピン偏極電子との相互作用を電流(スピン偏極電流)として検出する(図 1)。これら光近接場では、入射光の偏光(直線/円偏光等)によって界面での光のスピン角運動量が大きく変化するため、入射偏光の変調によって光のスピン角運動量と軌道角運動量等、各自由度の選択検出が可能になると考えられる。初期試料として、バルクでの巨大ラシュバ効果が知られている BiTeBr を用いた。

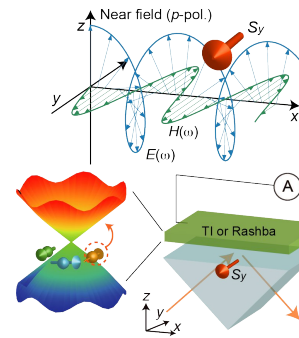


図 1. 界面近接場における光の横スピンの発生と、プリズム/スピン偏極電子系物質によるその検出の模式図。

また各種偏光の光波を高倍率の対物レンズで集光した際にその焦点周囲の光の局所場で励起されるスピン系を観測するため、油浸対物レンズを用いた高分解能磁気光学顕微鏡と低温ブリュアン散乱測定系の立ち上げを行った。後者は 100 nm から数十  $\mu\text{m}$  の波長を有するスピン波の分散検出が可能である。

## 4. 研究成果

通常の光照射によって大きなスピン偏極光電流の発生が知られている極性ラシュバ型スピン分裂半導体 BiTeBr を劈開し、 $c$  面においてバンドギャップ直上(0.6-1.0 eV)の光子エネルギー(波長)のパルス光での近接場励起を試みた(図 2)。プリズム材質としてはル

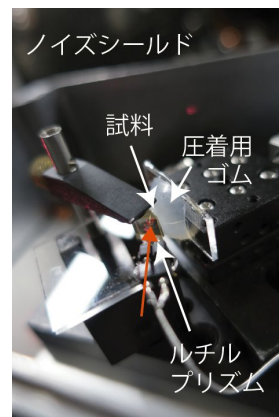


図 2. ノイズシールド内において薄片試料をルチルプリズム上に配置し、圧着用のゴム半球にて押し付ける。応力を調整しながら、パルス光照射時の光電流を、入射偏光の関数として測定。橙矢印は入射光の方位を表す。

チル(SiO<sub>2</sub>)を使用した。

まず通常の遠距離場励起による円偏光/直線偏光ガルバニック効果を確認し(図 3(b)), その後プリズムを配置し近接場励起配置とした。ρ 偏光の入射に対して, 界面において y 方向の横スピンを持った光近接場が励起され(図 1), これがラシュバスピン分裂した電子バンドを選択励起することにより x 方向に (y 方向にスピン偏極した)電流が流れると期待される。しかし実際の実験においては, 約 3 mm サイズの積層薄膜状試料において劈開面の平坦性が制御できず(図 3(a)), 界面光励起の局所スポットに選択制的に試料を近接することが困難であり, 有意な光電流が検出できなかつた。数十 μm 厚の劈開薄片試料に対して裏面からゴム半球を用いた圧着等も試みたが(図 2), 結論として, BiTeBr ではこのようなオット光学配置における近接場励起は確認できなかつた。

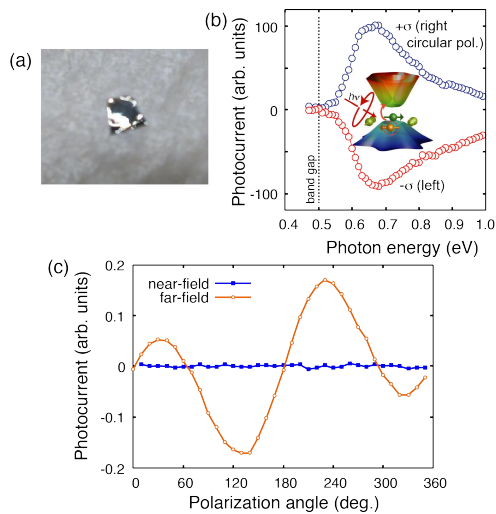


図3. ラシュバ型スピン分裂半導体 BiTeBr 劈開試料 (一辺約 3 mm). 箔状であり, 表面は平坦でない。本試料を図 2 の配置にて, ルチルプリズムの有無(近接場/遠距離場励起に対応)の状態にて測定した光電流。遠距離場の照射においては, スピン偏極電子励起に対応する明瞭なゼロバイアス光電流とその入射偏光依存性が確認されるが, 近接場励起においては光電流が見られていない。

そこで, 表面が原子レベルで平坦であり, これまでにスピン偏極電流の発生が確認されている InP 基板上トポロジカル絶縁体薄膜 (BiSe)<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> を用いて実験を進めた。本実験においては表面におけるディラック電子状態を用いるため, バルク部分の熱励起キャリアが凍結する低温での測定が必要となったが, 真空/クライオスタット中でのルチルプリズムと試料の精密位置制御が困難であることが判明した。

そこで, 室温での可視 CW 光励起が可能であるラシュバ型スピン分裂半導体 CdSe 単結晶

を用いた検証を行った。まず c 面を用いた実験を行ったが, 界面における近接場励起に際して光電流は検出されたものの, CdSe はそのスピン分裂が小さいため, そのスピン偏極性の確認, つまり入射光の横スピンの検出には至らなかつた。加えて量子干渉による  $\chi_{yyz}$  成分の光電流 (y 方向と z 方向の偏光成分を含んだ励起光に対し, y 方向の電流が発生) についても実験を行ったが, 同様に横スピンの検出には至っていない。

以上より, より平坦でプリズムに (距離を制御して) 密着できる巨大スピン分裂物質の作製が必要であると結論された。BiTeX 系のラシュバ型スピン分裂半導体は基板上での薄膜成長が現在まで報告されておらず, また大きなスピン分裂が知られている半導体量子井戸系はその 2 次元電子が試料表面に無いため, 本研究での利用は難しいと考えられる。基板上トポロジカル絶縁体薄膜を用いた実験は, 今後クライオスタット低温部の機械的な改造により可能になると期待される。

トポロジカル絶縁体薄膜においては, 予備実験において, 試料界面や表面面内の反転対称性の破れに起因して, 円偏光ガルバニック効果に加え, 同様に偏光に依存する直線偏光ガルバニック効果(シフト電流)の発生が明らかになった。光電流の結晶方位依存性を検証した結果, シフト電流の寄与が支配的になる励起波長域の存在が確認された。今後, 本研究に類似した光電流による入射光偏光の検出/解析を行う際の知見として重要となる。

光回折限界スケールでの逆ファラデー効果等による光磁気励起は, スピン波とのモード整合も含め未知の実験領域である。特に (時間/空間) 反転対称性の破れた結晶中で局所的に励起されたスピン波やスピン偏極電子の流れは一般に異方的になりうる。スピン波の空間伝搬の観測法として, 冷凍機光学クライオスタットを用いたブリュアン散乱測定と高分解能磁気光学顕微鏡の立ち上げを行った。これにより高精度でスピン波の分散情報を得ることができるようになった。カイラル磁性体のフェリ磁性相/磁場誘起強磁性相において, 波長 100 nm スケールのスピン波の明瞭な方向二色性を確認し, また波数は限定されるがスピン波分散の観測にも成功している。主に熱励起されたスピン波の観測を行なったため, 現状では集光パルスを用いた近接場励起との組み合わせには至っていないが, 多くの実験ノウハウが蓄積された。例えば, 金属磁性試料の

光学研磨を行った際には表面磁性がバルクの物性を再現しないことがしばしば問題となるが、コロイド等を用いた研磨条件により、バルクに近いスピン波が回復することが明らかになった。

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0件)

〔学会発表〕(計2件)

(1) 小川直毅、関真一郎、十倉好紀  
「磁気スキルミオン物質非相反応答のブリルアン分光」日本物理学会 2017 年秋期大会

(2) N. Ogawa, "Directional photocontrol of electron/spin", The 5th RIKEN-NCTU Symposium on Physical and Chemical Sciences(invited) (2017)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者  
小川 直毅 (OGAWA NAOKI)  
国立研究開発法人理化学研究所  
創発物性科学研究センター  
ユニットリーダー

研究者番号：30436539

(2)研究分担者  
( )

研究者番号：

(3)連携研究者  
( )

研究者番号：

(4)研究協力者  
( )