

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K15162

研究課題名（和文）非慣性系スピントロニクス of 体系的構築に向けたスピン回転結合の直接観測

研究課題名（英文）Observation of spin-rotation coupling for systematic construction of spintronics in non-inertial system

研究代表者

久富 隆佑 (Hisatomi, Ryusuke)

京都大学・化学研究所・助教

研究者番号：80870435

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：表面弾性波（SAW）と電子スピンはスピン回転結合を通して結合することが近年報告された。本研究では、SAWおよび電子スピンの状態を光学的に定量評価することにより、スピン回転結合の結合強度を決定することを目的とした。その要素技術として、2種の光学測定手法を新たに開発した。具体的にはSAWが存在する試料表面に絞った光を入射し、その反射光の偏光および光路に加えられた変調を測定することにより、SAWの状態を特定することを可能にした。加えて、光のショットノイズを利用することにより、SAW振幅の絶対値の推定が可能であることも実証した。これらの成果は本研究の目的を達成する上で重要なステップとなるものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スピントロニクスを記述する法則の体系化は未だ発展途上である。現在の中心的課題の一つに非慣性系スピントロニクスの体系化がある。約100年前、アインシュタインらによって電子スピンを回転させることによりその状態を変化させることができることが実験的に示されたが、理論に関してはおざなりにされてきた。近年ようやく理論側に進展があり、非慣性系スピントロニクス研究が再び加速している。そこで我々は表面弾性波（SAW）が物質中に引き起こす渦と電子スピンの間での相互作用に着目し、その強さを実験的に決定することを目指している。本期間では、目的達成に必須となるSAWの定量的な光学測定手法を2種類確立することに成功した。

研究成果の概要（英文）：It has recently been reported that surface acoustic wave (SAW) and electron spin are coupled through spin-rotational coupling. In this study, we aim to determine the coupling strength of the spin-rotational coupling by optically quantitatively evaluating the states of SAW and electron spin. As fundamental techniques, two new optical measurement methods were developed. Specifically, we have made it possible to identify the SAW state by injecting a focused light onto the device surface where the SAW exists and measuring the modulation applied to the optical polarization or path of the reflected light. In addition, we demonstrated that the absolute value of the SAW amplitude could be estimated by using the optical shot noise. These results are an essential step toward achieving the objective of this study.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：表面弾性波 量子光学 スピントロニクス 量子エレクトロニクス

1. 研究開始当初の背景

これまでの慣性系におけるスピントロニクス研究では、スピンホール効果やスピンゼーベック効果、スピン移行トルクなど多くの重要な物理現象が発見されてきた。その後、研究範囲は回転運動を含む非慣性系にまで広げられ、その結果、電子スピンと格子の回転運動が結合するスピン回転結合の発見に至っている。この結合は、古くはアインシュタインやドハース、バーネットらによって実験的に発見され、現在もそのメカニズムについて議論が続いている電子スピンと剛体回転が結合する現象と深く関係していると考えられている[1]。同時に、これまで常磁性金属中にスピン流を生成する場合、スピンホール効果の大きい(言い換えると、スピン軌道相互作用の大きい)プラチナのような貴金属が使用されてきたが、スピン回転結合を利用することにより、アルミニウムや銅といったありふれた常磁性金属中にスピン流が生成できることが理論的に予想されている[2]。このように基礎応用両面において興味深い特徴を持つスピン回転結合であるが、トランスポート測定を用いたこれまでの研究では SAW そして電子スピンの状態を局所的に観測することが不可能なため、結合強度の定量的な評価ができないなど、その詳細をつまびらかにすることができていない。

2. 研究の目的

そこで本研究では、研究代表者のこれまでの知見を活かし、光と SAW の相互作用である光弾性効果、光と電子スピンの相互作用である磁気 Kerr 効果を用いて、SAW と電子スピンの状態を同時にそして弁別して測定することを目指す。そのために必要となる光学測定系を新たに立ち上げ、スピン回転結合の結合強度を定量評価することを最終的な目的とする。

3. 研究の方法

上記の目標を達成するための第一歩として、SAW デバイスを作製し、その後、光で SAW の状態を定量評価する手法の開発に着手した。研究開始当初は、光弾性効果を用いた評価手法が SAW の光学測定に有効な手段であると考えていた。しかし実際に着手してみると、図 1 のように光を SAW が存在する媒質表面で反射させた際に、反射光の光路と偏光が変調される現象を利用する方が有効であるということに気が付いた。それゆえ、それら 2 種類の原理を用いた手法の確立に方針を変更した。次の「4. 研究成果」でその概要を述べる。

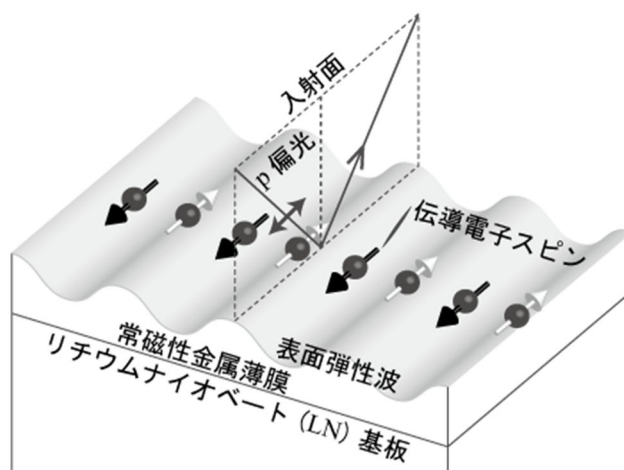


図 1 SAWデバイスと光学測定系の配置

4. 研究成果

(1) SAW デバイス作製と評価

本研究ではスピン回転結合の結合強度を実験的に評価することを目指しているため、SAW デバイス自体の構造はできる限りシンプルに、そしてよく素性の知られた物質を用いて作製を行うことにした。具体的には、構造としてはファブリーペロー型の SAW 共振器構造を採用した。SAW 共振器は、SAW のエネルギー密度を高めることができるため、光学測定で得られる各種信号が大きくなることが予想される。それゆえ、以降の研究に不可欠な要素であると考え採用した。

所属研究室が保有する装置を用いて実際に作製した SAW 共振器デバイスの設計図ならびに光学顕微鏡写真を図 2 に示す。リチウムナイオベート(LN)基板上に Ti(5 nm)/Au(80 nm)の金属薄膜を用いて構造を作製した。2つのブラッグミラーにより SAW 共振器が構成されている。その内部に電気との結合をとるための楕型電極 (IDT) を 2 つ配置し、2 ポート共振器とした。また、ブラッグミラー間の中心に試料薄膜を設置している。今回はミラーや IDT と同じ素材を試料として成膜した。光学顕微鏡で見る限り、作製したデバイスの構造は非常に綺麗であり、工程が妥当であることを確認することができた。

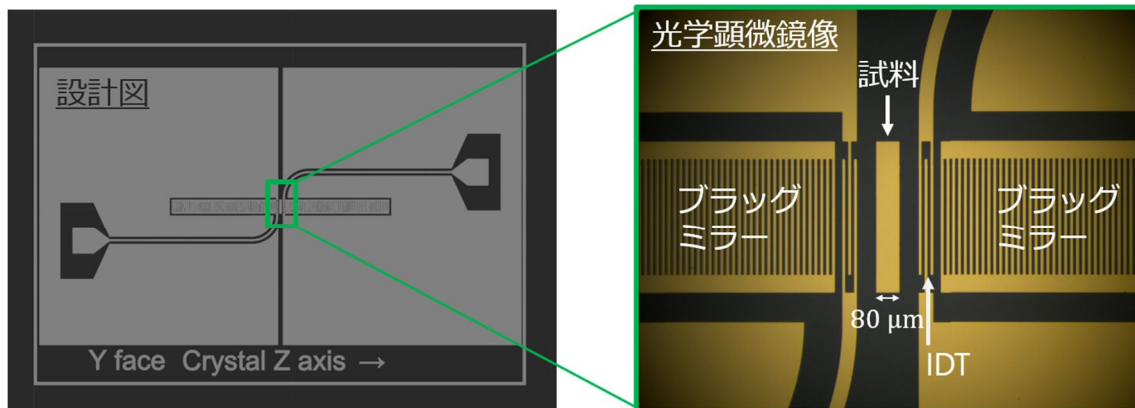


図 2 ファブリーペロー型SAW共振器デバイスの設計図と光学顕微鏡像

作製した SAW 共振器デバイスの透過測定 (S_{21} 測定) の結果を図 3 に示す。青線が実験結果を表しており、典型的な共振ピークが想定していた周波数に見えていることから、SAW 共振器が適切に作製できていることを確認することができた。また、 S_{21} 信号の周波数スペクトルの表式を用いてフィッティングした結果を赤線で示している。フィッティングで得られたパラメータから、SAW 共振器の内部 Q 値が 2000 程度であり、本研究の用途としては十分な性能であることを確認することができた。

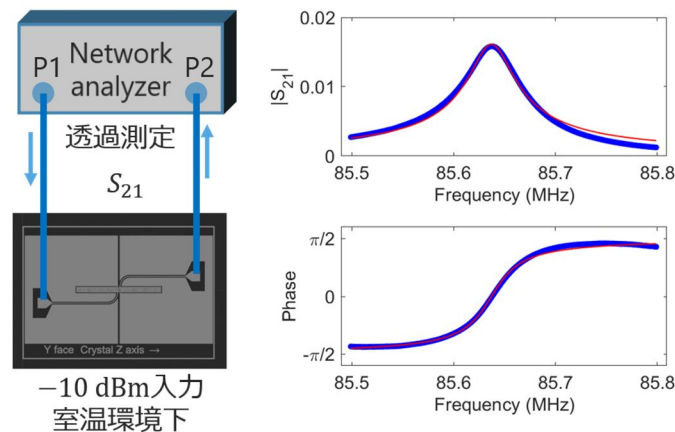


図 3 ファブリーペロー型SAW共振器の電気透過測定

(2) 偏光変調を用いた SAW の定量的な光学イメージング手法の確立

SAW による動的な表面傾きに依存して、反射光の偏光が回転する現象を発見した。共同研究者との議論の結果、フレネル反射係数を適切に考慮することにより、この偏光変調現象が説明できることを突き止めた。さらに、光学測定において原理上逃れることのできない光のショットノイズをあえて利用することにより、偏光回転角の絶対値を割り出せる手法を考案した。その手法を用いることにより、偏光回転角から光スポット位置における表面傾きの大きさが、そしてそこから SAW 振幅の大きさを評価できることを示すことができた。その一連の研究成果は Applied Physics Letters 誌に掲載されている [3]。

(3) 光路変調を用いた SAW の定量的な光学イメージング手法の確立

SAW の定量的な光学イメージング手法として、(2) の偏光変調だけでなく、光路変調を用いることも新たに実証した。図 4 (a) は、作製した SAW のファブリーペロー型共振器を反射率の違いを用いてイメージングした結果である。強誘電性絶縁体であるリチウムナ

イオバート (LN) 基板上に作られた SAW デバイスの金属部と LN 部の配置が可視化されている。実際、上下にブラッグミラーの端が見えており、その間に 2 組の楕型電極と、金属膜が設置されている様子が見取れる。楕型電極は、波長 $40 \mu\text{m}$ の SAW を効率的に励起できるような設計となっている。

図 4 (b) は、RF 信号によって強制励起された SAW によって引き起こされる光路変調信号の振幅を 2 次元カラープロットした結果である。直径 $6 \mu\text{m}$ 程度に絞った光の反射光の光路が、励起された SAW によって変調される現象を用いている。いま、SAW 共振器の共鳴周波数は約 85 MHz であり、赤い部分は 85 MHz で振動する光路変調量が大きい部分を表している。SAW はブラッグミラー間で共振しているため、デバイス表面は定在波のように波打っている状況である。その際、光路変調が最も大きくなるのは表面の傾きが最大の部分であり、それはすなわち定在波の節の位置に相当する。一方で、青い部分は定在波の腹の位置に相当する。 z 方向に隣り合う赤いピーク位置の間隔が $20 \mu\text{m}$ であることから、SAW が想定通りファブリーペロー型共振器になっていることが確認できる。また、赤いピーク構造は x 方向には節を持っていない。つまり、観測している SAW の共振モードが基本モードであることがこの結果からわかる。ちなみに、金属部の方が LN 部に比べ反射率が高いため、相対的に金属部の信号強度が大きくなっていることに注意が必要である。

図 4 (c) は、光路変調信号の位相を観測した結果を示している。定在波の隣り合う節を持つ傾きは常に符号が反転している。つまり、位相で考えると π だけ異なっていることを意味する。図 4 (b) と図 4 (c) を比較すると、定在波の腹の位置で位相が π ずれていることが確認できる。よってこのことから SAW が共振器となっていることを確認することができる。このように、SAW の 2 次元的なイメージングを取得することにより、我々がいままでのようなモードを励起しているのかを特定することが可能となる。

最後に、各光スポット位置における光パワーと、別に独立して求めた光のショットノイズの実験データを用いることにより、各光スポット位置での表面傾きの振幅を割り出すことができる仕組みを考案した。その仕組みを用いて、各光スポット位置での表面傾き振幅の絶対値をプロットした結果が図 4 (d) である。現在、この一連の結果をまとめた論文の投稿準備中である。

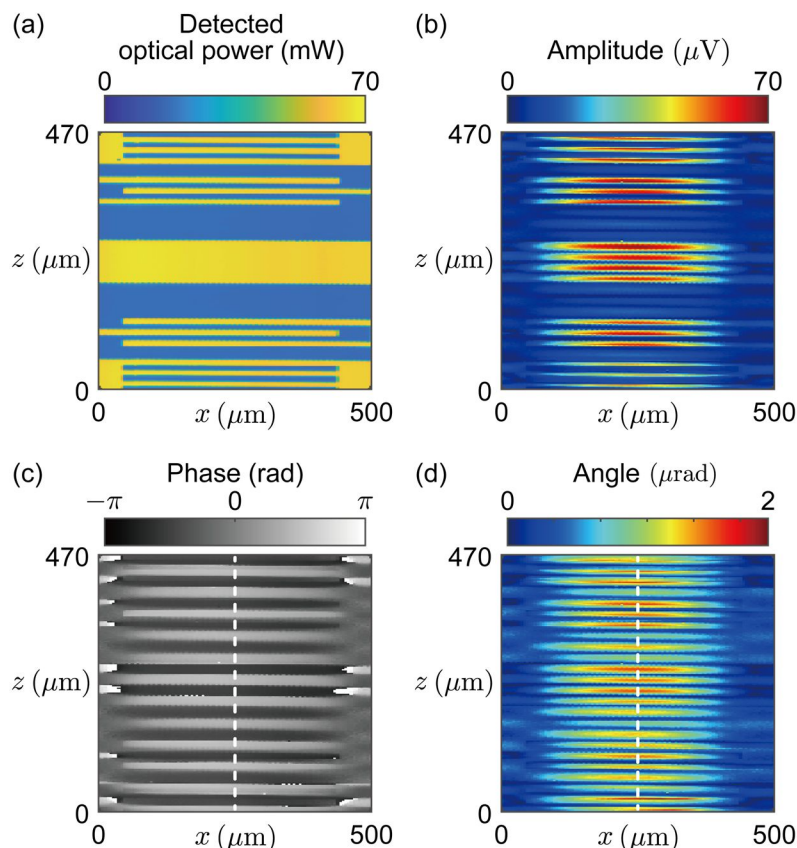


図 4 ファブリーペロー型 SAW 共振器デバイスの 2 次元イメージング結果。カラープロットは、各光スポット位置における (a) 反射率、(b) 光路変調信号の振幅、(c) 光路変調信号の位相、(d) 表面傾きの振幅、をそれぞれ表す。

以上のように、本研究期間において、我々は SAW 共振器デバイスの作製手法の確立、そして SAW の定量的な光学測定手法を確立することができた。特に SAW の局所的な情報を定量的に得ることができるようになった点は、SAW を用いた実験研究において広く有用なツールになることは間違いない。この技術を用いて、今後も本研究の目的達成を目指し研究を推進していく。

<引用文献>

- [1] L. Zhang *et al.*, Phys. Rev. Lett. **112**, 085503 (2014).
- [2] M. Matsuo *et al.*, Phys. Rev. B **87**, 180402(R) (2013).
- [3] K. Taga, R. Hisatomi *et al.*, Appl. Phys. Lett. **119**, 181106 (2021).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Taga K., Hisatomi R., Ohnuma Y., Sasaki R., Ono T., Nakamura Y., Usami K.	4. 巻 119
2. 論文標題 Optical polarimetric measurement of surface acoustic waves	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 181106
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0066362	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 R. Hisatomi, K. Taga, H. Komiyama, Y. Shiota, T. Moriyama, and T. Ono
2. 発表標題 Spatial Imaging of Surface Slope Induced by Surface Acoustic Waves Using Optical Path Modulation
3. 学会等名 ICMFS-2022（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大沼悠一、多賀光太郎、久富隆佑、佐々木遼、小野輝男、中村泰信、宇佐見康二
2. 発表標題 表面弾性波による旋光現象の理論
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 久富隆佑、多賀光太郎、大沼悠一、佐々木遼、宇佐見康二、中村泰信、塩田陽一、森山貴広、小野輝男
2. 発表標題 表面弾性波による旋光現象の定量的観測
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 多賀光太郎、久富隆佑、小野輝男、中村泰信、宇佐見康二
2. 発表標題 非磁性体上の表面弾性波による縦Kerr効果の観測II
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関