

様式 C-19

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月14日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21340075

研究課題名（和文）金属フォトニック結晶スラブにおける電磁場位相と光起電力

研究課題名（英文） Electromagnetic phase and photo-induced voltage in metallic photonic crystal slabs

研究代表者

石原 照也（ISHIHARA TERUYA）

東北大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：60168250

研究成果の概要（和文）：

厚さ 40nm 程度の半透明な Au の薄膜に周期 500nm 程度、半径 100nm 程度の丸い穴を周期的にあけた系、あるいは誘電体で周期的に変調した系に種々の偏光の近赤外域の光を当てると 2 次の光学非線形性によって起電力が発生する。このような実験を行い、そのメカニズムを電磁場の位相という観点から考察を試みた。さらに全く対象は異なるもののアナロジーが成りたつ系として、トポロジカル絶縁体を取り上げ、類似点と相違点に注目して解析して光学系への拡張を考察した。

研究成果の概要（英文）：

Photo-induced voltage is generated due to the second order optical nonlinearity in 40nm-thick semi-transparent Au film with regular array of holes or dielectrically modulated structures. Experiments on these artificial structures are performed and investigated from the view point of electromagnetic field phase in the structure. Furthermore topological insulators are considered theoretically and discussed because some analogy can be found from completely different our systems.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	7,300,000	2,190,000	9,490,000
2010年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2011年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
年度			
年度			
総計	14,900,000	4,470,000	19,370,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性 I

キーワード：光物性、フォトニック結晶、プラズモニクス、角運動量

1. 研究開始当初の背景

金属の光学応答は単調であるため、光物性の研究対象としては従来捉えられていなかった。しかし、光波長程度の周期でパターン化すると、表面プラズモンの励起が可能となり、多様なスペクトル応答を示すようになる。特に最近、負の屈折率など様々な異常な特性を示すメタマテリアルの構成要素として、

注目されている。研究代表者の石原らはこのような系で、表面プラズモンの波数が大きいことを反映したサブ波長光リソグラフィの提案と実証を行ったほか、金属グレーティングに光を入射して表面プラズモンを励起した際に光起電力が発生することを見出し、2 次の光学非線形性による光整流の効果であると示した。さらに、円偏光励起では光入射

面に対して垂直の方向に光起電力が発生し、そのスペクトルは縦方向のものとは定性的に異なったふるまいをしている。また光誘起横起電力の表式を研究分担者である小野田の助けを借りて、金属中の自由電子に働く場に関する2次の力が電磁場位相に関係し、これが電磁並進運動量と電磁角運動量で表されることを導いた。これまで、縦横の光起電力がこれらと関係があると直感的に予想してきたことに理論的な基礎がえられたことになる。一方、研究分担者の小野田らは反転対称性の破れたフォトニック結晶のブロッホ状態が、ブリルアン端で Berry 曲率をもち、これに対応して電磁場が渦状の運動量分布を持つことを理論的に示し、光トルネードと名づけた。この論文ではフォトニック結晶中の電磁場分布による、液体中の微粒子の運動を議論しているが、金属フォトニック結晶スラブにおいては、金属内の自由電子がこの力を受けて、電位差が発生すると考えることが予想される。

2. 研究の目的

本研究ではこの論文を発展させ、光起電力と Berry 曲率の関係を議論してゆく。そこで本研究ではまず、実験的に光起電力が発生する場合の反射、透過、回折光、試料内の電磁場の間の並進運動量および角運動量の保存を調べ、光起電力の起源を理解する。本研究では横光起電力と光トルネードの関係を調べ、現象の統一的理解をめざすとともに、スピントロニクスにおける異常ホール効果やスピンホール効果との関連も議論する。

3. 研究の方法

まず、角運動量のやりとりを実験的に測定するため、可動部のない4検光子エリプソメトリ装置を試作し、人工構造に対して、ストークスパラメタの測定を行った。電子線描画装置で穴径を交互に変化させて、ベリー曲率を持つように設計した蜂の巣構造を作製し、光学評価を行った。理論面に関しては、前年度にひきつづき周期構造による電磁角運動量の生成と幾何学的位相の関係性の問題について電子系スピントロニクスとの類推から取り組んだ。また、周期性の異なる領域が存在する開放系においてベリー曲率のような幾何学量をどのように定義すべきか自明でないため、無限周期系における知見が有限系での伝搬特性においてどの程度有効性をもつのか検討した。

4. 研究成果

金属薄膜にハニカム状に大小二つの円孔をあけた系に、光を斜め入射した際の、電磁場状態を種々の入射偏光に対して、数値計算に

より考察した。また、金属内の自由電子に働く力についても検討を行い、光起電力の実験の可能性について検討した。

金属薄膜に誘電体で周期的に変調をかけた系に対して、光起電力を測定し、垂直入射で回折がないような長波長の場合にも、光起電力が発生することを実験的に実証した。またこの場合の電磁場を数値的に計算し、表面プラズモン励起における電磁場分布が生じる Maxwell 応力テンソルを計算することにより、界面に生じた電荷分布を表面プラズモンが引きずることによって生じる、表面プラズモンドラッグ効果と呼ぶべき現象であることが明らかになった。

これまでは主に理想的な2次元周期構造を想定して、周期構造による電磁場角運動量の生成とその制御について調べてきたが、フォトニック結晶スラブなどの有限系への応用を考えた場合、端モードや表面モードとの結合等についても考慮しなければならない。また、周期性の異なる領域が存在する開放系において、無限周期系における知見がどの程度有効性をもつのかを明らかにする必要がある。そこで本年は、電子物性の分野において注目を集めているトポロジカル絶縁体を取り上げ、その界面での反射過程における量子波束の振る舞いを調べた。非自明な位相幾何学的性質を有すると考えられる有限結晶の開放系における特異なスピンドYNAMIXを明らかにし、光学系へ拡張した場合に期待される新たな電磁モード制御の可能性を示した。

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9件)

1. Hiroyuki Kurosawa, Teruya Ishihara, Naoki Ikeda, Daiju Tsuya, Masayuki Ochiai, and Yoshimasa Sugimoto, “Optical rectification effect due to surface plasmon polaritons at normal incidence in non-diffraction regime” Optics Letters 査読有, (accepted).

2. Hiroyuki Kurosawa and Teruya Ishihara, “Surface plasmon drag effect in a dielectrically modulated metallic thin film”, Optics Express, 査読有, 20, 1561-1574(2012).

3. 小野田勝, 電子スピン輸送現象の実空間シミュレーション -スピンHall効果への応用-, 文部科学省認定社会通信教育 TEXNE,

査読無, 87 巻, 2011 年, 66-75

4. 小野田勝, 量子輸送現象における幾何学的位相の効果, 物性研究, 査読無, 93 巻, 2010 年, 715-752

5. Hiroyuki Kurosawa, Takafumi Hatano, Teruya Ishihara, Nikolai A. Gippius and Sergei G. Tikhodeev, Transverse Photovoltage Induced by Circularly Polarized Light, 査読有, 103 巻, 2009 年, 103906-1-103906-4, Physical Review Letters

6. K. Miyamoto, S. Ohno, M. Fujiwara, H. Minamide, H. Hashimoto and H. Ito, Optimized terahertz-wave generation using BNA-DFG, Optics Express, 査読有, 17 巻, 2009 年, 14832-14838

7. Tetsuyuki Ochiai and Masaru Onoda, Photonic analog of graphene model and its extension: Dirac cone, symmetry, and edge states, Physical Review B, 査読有, 80 巻, 2009 年, 155103-1-155103-9

8. K. S. Takahashi, M. Onoda, M. Kawasaki, N. Nagaosa, and Y. Tokura, Control of the Anomalous Hall Effect by Doping in $\text{Eu}_{1-x}\text{La}_x\text{TiO}_3$ Thin Films, Physical Review Letters, 査読有, 103 巻, 2009 年, 057204-1-057204-4

9. Masaru Onoda and Tetsuyuki Ochiai, Designing Spinning Bloch States in 2D Photonic Crystals for Stirring Nanoparticles, Physical Review Letters, 査読有, 103 巻, 2009 年, 033903-1-033903-4

[学会発表] (計 18 件)

1. 黒澤裕之, 池田直樹, 落合雅幸, 杉本喜正, 石原照也, 磁気共鳴による光誘起起電力効果 III, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011 年 9 月 24 日, 富山大学

2. 大村幸憲、小野田勝, トポロジカル絶縁体界面における電子波束のスピンダイナミクス, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011 年 9 月 21 日, 富山大学

3. 大村幸憲、小野田勝, トポロジカル絶縁体-導体界面における量子波束ダイナミクスの解析, 平成 23 年度電気関係学会東北支部連合大会, 2011 年 8 月 25 日, 東北学院大学

4. T. Ishihara, H. Kurosawa, T. Hatano, Y. Kurami and N. Nishimura, Longitudinal and Transverse Photo-Induced Voltage in Metallic Photonic Crystal Slabs, Japan-Korea Metamaterial Forum, Seoul, 2011 年 7 月 8 日, Ewha Women's University, Seoul, Korea

5. T. Hatano, H. Kurosawa, T. Ishihara, Y. Kurami and N. Nishimura, Optical rectification in plasmonic crystals, Surface Plasmon Photonics 5, 2011 年 5 月 9 日, BEXCO, Busan, Korea

6. 黒澤裕之, 池田直樹, 津谷大樹, 落合雅幸, 杉本喜正, 石原照也, 磁気共鳴による光誘起起電力効果 II, 日本物理学会 2011 年年次大会, 2011 年 3 月 25 日, 新潟大学

7. 周防裕政, 森竹勇斗, 大野誠吾, 石原照也, 黒澤裕之, 円偏光励起横起電力が発生するための幾何学的条件, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 2011 年 3 月 25 日, 新潟大学

8. 石原照也, 周期構造を利用した光メタマテリアルの作製と物理 (招待講演), 応用物理学会 2011 年春季講演会, 2011 年 3 月 24 日, 神奈川大学

9. 黒澤裕之, 池田直樹, 津谷大樹, 落合雅幸, 杉本喜正, 石原照也, 磁気共鳴による光誘起起電力効果, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 2010 年 9 月 25 日, 大阪府立大学

10. H. Kurosawa, T. Hatano, N. Ikeda, D. Tsuya, M. Ochiai, Y. Sugimoto and T. Ishihara, Optical rectification effect at normal incidence in asymmetric metamaterial, Metamaterials2010, 2010年9月6日, Karlsruhe, Germany

11. 黒澤裕之, 畑野敬史, 大野誠吾, 津谷大樹, 池田直樹, 杉本喜正, 石原照也, 非回折領域かつ垂直入射における光誘起起電力効果, 日本物理学会 2010年年会, 2010年3月21日, 岡山大学

12. 畑野敬史, 黒澤裕之, 倉見洋輔, 西村直志, 石原照也, 金属 2 次元フォトニック結晶スラブにおける光誘起起電力効果の解釈, 日本物理学会 2010年年会, 2010年3月21日, 岡山大学

13. T. Hatano, T. Ishihara, Y. Kurami and N. Nishimura, Transverse photo-voltage induced by circularly polarized lig

ht in metallic fishnet structures: experiment and simulation, META2010, 2010年2月23日, Marriott Hotel, Cairo, Egypt

14. 小野田勝, 光トルネードとベリ一位相 (招待講演), 日本物理学会 2009年秋季大会, 2009年9月27日, 熊本大学黒髪キャンパス

15. 黒澤裕之, 畑野敬史, 石原照也, 金属グレーティングスラブにおける光誘起起電力: 微視的観点からのアプローチ, 日本物理学会 2009年秋季大会, 2009年9月26日, 熊本大学黒髪キャンパス

16. 畑野敬史, 倉見洋輔, 大谷佳広, 西村直志, 石原照也, 金属フォトニック結晶スラブにおける内部電磁場分布と光誘起起電力, 日本物理学会 2009年秋季大会, 2009年9月26日, 熊本大学黒髪キャンパス

17. Teruya Ishihara, Circularly polarized light induces transverse voltage in metallic photonic crystal slabs (invited), Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, 2009年9月2日, Shanghai International Convention Center, Shanghai, China

18. Takafumi Hatano, Yosuke Kurami, Yoshihiro Otani, Naoshi Nishimura and Teruya Ishihara, Photo induced voltage due to circularly polarized light in 2D metallic photonic crystal slabs, International Conference on Photo and Electromagnetic Crystal Structures, 2009年4月5日, Darling Harbour, Sydney, Australia

[その他]

ホームページ等

<http://sspp.phys.tohoku.ac.jp/research.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石原 照也 (ISHIHARA TERUYA)
東北大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 60168250

(2) 研究分担者

大野 誠吾 (OHNO SEIGO)
東北大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号: 70435634
小野田 勝 (ONODA MASARU)

秋田大学・工学資源学部・准教授
研究者番号: 80425727

(3) 連携研究者
()

研究者番号: