

金属フォトリック結晶における横方向光誘起起電力効果

畑野 敬史、 西川 漢、 黒澤 裕之、 石原 照也
東北大学理学研究科 物理学専攻

Photo voltage induced by circularly polarized light

T. Hatano, B. Nishikawa, H. Kurosawa and T. Ishihara

Tohoku Univ. Department of physics

Abstract

We discovered transverse photo induced voltage in two-dimensional metallic photonic crystal slabs (MPCS). This voltage is generated perpendicularly through the incident plane. Signal is reversed by changing the sense of polarization or incident angle, and the origin of this transverse PIV is ascribed to drift motion of electrons induced by angular momentum of incident light. After experimental results are presented, a possible origin of this effect is discussed.

1. はじめに

近年の技術進歩により、人工的な微細構造を持つ構造体に関する研究が世界中で精力的に行われている。フォトリック結晶はその一例であり、これは光波長と同程度の周期で構造を与えたもので、結晶内での光の状態をさまざまに変えたり、制御したりすることができる。

一方、光は電場と磁場を有し運動量を持つ。そのため、自由電子が介在する物質中に光を照射すると、この運動量により電子は移動し、開回路では起電力を発生する。この現象は状況により「フォンドラッグ効果」や「光整流効果」などと呼ばれるが、ここでは「光誘起起電力」と総称することにする。我々は、この光誘起起電力を自由電子が豊富に存在する金属フォトリック結晶において運用しようと考え、研究を行っている。これまでに Au 膜に 1 次元周期構造（グレーティング）を作製し、そこに光を当てることによってサンプル両端に生じ

る光誘起起電力を発見した。この現象は、サンプル表面のフォトリック構造によって光が反射、回折、屈折される際、光の並進運動量の一部がサンプル中の金属中の電子に受け渡され、ユニットセルの両端に起電力が生じる現象として理解できた[1]。このように、光の並進運動量が起源となる信号が明らかになった。しかし光は円偏光にすることで、内部角運動量を持たせることもできる。この光の角運動量は電子系にどのような影響を及ぼすだろうか。

例えば Au 膜に角運動量をもつ光を入射させる。この際に光の角運動量の一部が電子系に移行したとすると、電子はサンプル表面で周回運動をすると予想される。すなわち光の内部角運動量が、電子の軌道角運動量に譲渡されるのである。そこで今回は、電子の周回運動をより誘起しやすくするため、図 1 AFM 画像に示すような、Au 膜に円孔を周期配列したサンプルを作製し、そこに円偏光の光を入射させ、角運動量に起

因する光誘起起電力を調べることにした。

さて、1次元構造において、起電力発生は光の並進運動量の受け渡しと並行な方向に起こる(図1縦方向)。一方、今回のサンプルでは、電子の周回運動によってサンプル表面に局在磁場が生じると考えられる。この磁場によって電子がローレンツ力を受けるならば、光の入射面と垂直な方向への起電力(横方向起電力)発生が期待できる(図2)。つまり光によって誘起されるホール効果である。本稿では、入射光として円偏光を用いることにより生じる光と自由電子の新しい相互作用を考え、横方向への起電力発生について実験結果とともに議論する。

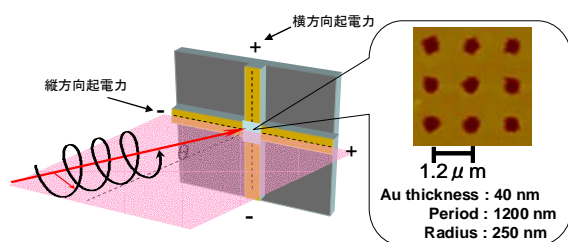


図1. サンプルのAFM画像とサンプル

2. サンプル

サンプルとして、 SiO_2 基板上に厚さ 40 nm の Au 膜を蒸着し、その上に電子線リソグラフィおよびドライエッチングプロセスを用いて半径 300 nm の円孔を周期 1200 nm で正方格子状に配置したものを作製した(図1 AFM 画像参照)。ここにナノ秒パルスレーザーを入射させる。そして縦方向、横方向に生じる起電力を測定するため、サンプルの上下左右にリードを伸ばし、オシロスコープと接続して起電力測定ができるようになっている。サンプル両端の抵抗は 15Ω 程度である。測定系の模式図を図1に

示す。

3. 実験結果

図2に示すのが入射角度 20° における横方向起電力の測定結果である。実線が左円偏光、破線が右円偏光を入射した結果である。図のように、円偏光入射においては横方向への光誘起起電力が存在し、入射波長に依存して信号が変化している。注目すべき点は以下の3点である。

- ① 信号は偏光の向きを変えることで符号反転する。
- ② 1070、1350、1400 nm 付近などにおいてピーク(ディップ)構造をとる。
- ③ 入射光として直線偏光を選んだ場合の横方向起電力を図3に示す。信号は円偏光と比較して弱い、s 偏光においては有意な信号がある。

また図2には 20° 入射の p、s 偏光における透過スペクトルを記載した。透過スペクトル上には金属表面に誘起される表面プラズモンポラリトンモード(SPPモード)に起因するディップ構造が多数存在する。円偏光横方向起電力に見られるピークディップ構造は、これらのSPPモードと対応する位置に生じているように見える。そこでSPPモードについての情報を得るために、さまざまな入射角度における透過スペクトルを測定し、それらにおけるSPPモードの位置を読み取り、図4に示すSPPモードの分散関係を作成した。図中の○はs偏光において確認できるSPPモードである。p偏光では○に加え、●で示したモードも観測できる。SPPモードは、基板側に生じるモード(sモード)と空気側に生じるモード(aモード)の二つに大分され、さらに折り返しに用いられる逆格子ベクトル G_x 、 G_y

によって分類できる。これらは分散上で交差する位置や傾きなどから分類可能である。図中に示す $a(-1,0)$ などの記号は、どの界面側に立つモードなのかということと、折り返しに用いられる逆格子ベクトルを示している。例えば $a(-1,0)$ は、空気側に、 $G_x = -1$ 、 $G_y = 0$ で折り返された SPP モードであることを示している。図 4 中の破線は、入射角度 20° で励起される波数ベクトルの接線成分を表現しており、ここから図 3 中の透過スペクトルのディップが、どの SPP モードに対応するか判断した。

ここでは記載しないが、入射角度を変えて、ピークディップの位置は移動する。さらに入射角度を正負反転させると信号も反転する。また、入射角度を 0° にした場合、信号は出ない。そして横方向だけでなく、縦方向にも波長に依存して変化する同程度の大きさの起電力信号が観測されている。

4. 考察

本結果は円偏光の光によって横方向に起電力が生じることを示している。本稿では、信号発生のメカニズムとして、「光によって誘起されるホール効果」を考える。

円偏光の光によって、Au 膜表面には周回する電磁場モードが誘起されるはずである。今回のように表面に円孔が配列されている場合は、単なる金膜に比べて、そのような周回モードはより起こりやすいと考えられる。そのような電磁場によって、Au 中の自由電子は周回運動し、サンプル表面を貫く方向に局在磁場を誘起すると期待できる。この磁場によって自由電子はローレンツ力を受け、並進運動

量では説明できない横方向への駆動が生じるはずである。ローレンツ力を決定するのは、自由電子の初速度と誘起される磁場である。これらについて、以下のことが言える。

- ①まず、円偏光の向きを逆転させると信号が反転するが、これはサンプル表面における周回の向きが反転し、誘起される磁場の向きが逆になることによると説明できる。
- ②また、SPP モードが励起されるディップ付近において、サンプル表面には局在電場が図 1 の縦方向に励起され、伝播する。自由電子もその電場に駆動されて縦方向に集団運動する。このときの運動の向きは、分散関係における各モードの傾きで決定され、ローレンツ力の初速度になる。ここで図 3 の左円偏光における起電力に

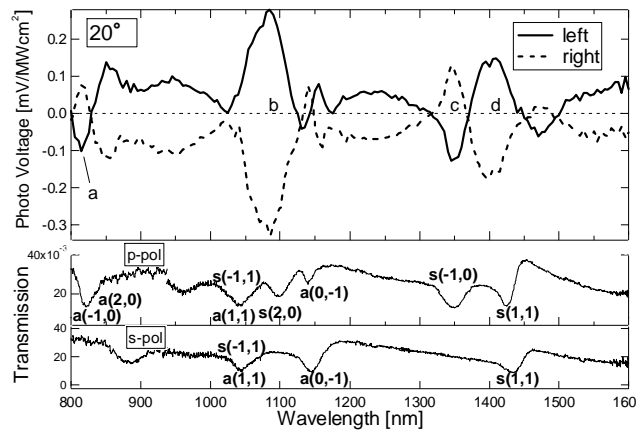


図 2 : 20° 入射 円偏光における横方向起電力

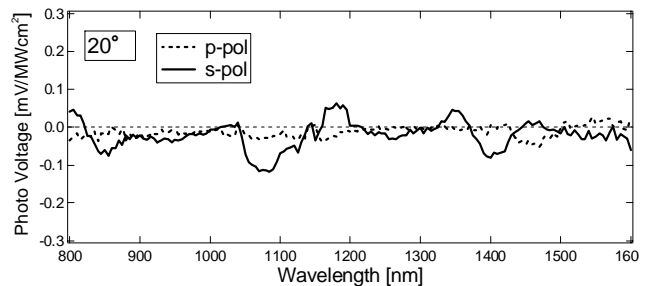


図 3 : 20° 入射 直線偏光における横方向起電

ついて、位置 a, c ではそれぞれ a(-1,0) モードと s(-1,0)モードが対応している。これらの分散の傾きは正であり、このときの起電力信号は負である。これに対して位置 b, d では、傾きが負の分散である s(1,1) , s(2,0)などのモードが対応している。このとき起電力信号は逆転し、正である。すなわち初速度の向きが反転することで、ローレンツ力の向きも反転したと理解できる。

最後に直線偏光を入射した場合の横方向起電力についてであるが、円偏光における信号と比較して弱い。これまでの議論から、直線偏光では磁場の誘起は起こりえないため、本来であれば信号は生じないはずである。ただ、サンプルが入射面に対しわずかでも傾きや歪みを持つ場合は、横方向に並進運動量が流れるため、それに起因する起電力が発生するであろう。図3の信号はそれにあたるものと思われる。

5. まとめと今後の展開

2次元金属フォトニック結晶スラブにおいて、横方向光誘起起電力が観測された。これは円偏光入射によって誘起される信号であり、光の入射面と垂直方向（横方向）に信号が生じる。信号の振る舞いはサンプル表面に生じる SPPモードと密接に関係しており、モードがたつところで起電力が強く誘起される。信号の振る舞いは光誘起のホール効果として説明できる可能性があるが、さらなる検証にはより多くの入射角度における追実験が必須である。

最後に、光のもつ角運動量には、豊富な話題がある。例えば、光の内部角運動量の一部が光の軌道角運動量に移行することに

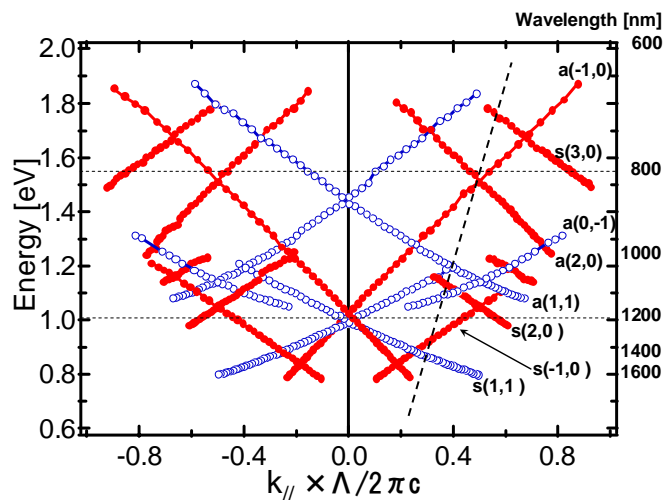


図4. SPPモードの分散関係

よって生じる光の横シフトがある。これは Imbert 効果[2]として知られており、近年では小野田らによって統一的な解釈が与えられた[3]。今回の実験結果との関係性も興味深い。今後は豊富な実験結果のもと、多角的な切り口から光誘起起電力の起源を解明したい。

文献

- [1] 2007 年日本物理学会春季大会 21aZB-11
- [2] Imbert, Phys. Rev. D, 7,787 (1972)
- [3] Onoda et al, Phys. Rev. E 74, 066610 (2006)