

モアレパターンに生じるトポロジカル位相の 電磁場への転写による光渦配列の生成と観測

所属：東北大学 理学研究科 物理学専攻

助成対象者：大野誠吾

概要

光への渦度の付与方法として、モアレパターンに生じるトポロジカルな位相を電磁場へ転写する方法を提案し、光渦配列の生成とその直接観測を目指した。トポロジカルな性質が発現すれば渦度の付与に波長分散がないことが見込まれる。モアレと電磁波を相互作用させるためのメタ表面として、2次元周期構造を重ね合わせた回転モアレと拡大縮小モアレの2種類のモアレ型メタ表面を金属メッシュを用いたリフトオフプロセスにより作製した。モアレ型メタ表面に対し、電場分布の分光イメージングをTHz時間領域分光法を用いて行った。その結果、モアレパターンに生じたベクトル場の特異点に対応した点において光の位相特異点が生じ光渦配列が観測できた。

abstract

We proposed a novel method to provide vorticity to light by projecting the topological phase appeared in moiré pattern. Our goal of this research was direct observation of it. It is expected that the vorticity can be provided without wavelength dispersion due to the topological feature. We fabricated two kinds of moiré type meta-surface, which is consists of superposed two dimensional periodic metal structures, to suppose the interaction between a moiré pattern and electromagnetic wave. One is rotational moiré and another is scaling one. The electromagnetic field distribution of

the transmitted light was measured by using a terahertz time domain spectrometer with two dimensional scanning of meta-surfaces. We successfully observed periodic distribution of optical vortices corresponding to the topological singularity shown in the moiré pattern.

研究内容

背景 モアレは一般に周期的な構造が互いに干渉するときに生じる新たなパターンであり、干渉の際のわずかなずれによりパターンが大きく変化する。このことは、モアレトポグラフィ[1]やモアレ顕微鏡[2]、より身近な例ではノギスのバニアスケールなどに見るように多くの精密測定の測定原理にも用いられている。また、物質科学の分野では2層グラフェン系に対して層間にずれがある場合、モアレが生じ新たな電子状態を形成する[3]として注目を集めている。一方で、微細加工の分野でモアレは位置合わせやプロセス精度が不十分だと生じる厄介者でもあり、その抑制のために厳密な加工精度が求められる。様々な場面に現れて一見、捉えどころのないモアレパターンであるが2次元周期系に生じるモアレは、ある種のベクトル場を形成し[4]、それは後に示すようにトポロジカルに安定な性質を示す。このベクトル場を電磁場へ転写することができれば周期的に並んだトポロジカルチャージを持つ光（光渦）の生成など独自の空間変調素子へと展開できる可能性がある。

モアレと電磁場をつなぐ役割としてメタ表面に注目している。メタ表面は、2次元的に構造を作製、分布させることで物質表面（界面）の光学的特性を制御する。これにより光のスピンホール効果など基礎科学の面でも興味深い現象も示されている[5]。応用面では非常に薄い領域で光学素子としての機能を持つことから、光波帯だけでなく、光学素子の不足するテラヘルツ帯の光学素子としても研究が進んでいる[6]。メタマテリアル、メタ表面は多くの場合、電子ビームリソグラフィなど半導体

加工技術を転用することもあり周期的に構造が作製されることが多く、モアレとも相性が良い。すなわち、金属周期構造により電磁波との結合を担保し、その作成時に何らかの方法でわずかなずれを導入することで構造パラメータにモアレによる分布を付加できる。これまで、金属円盤を2次元的に配列した構造を少し回転させて重ねたモアレ型メタ表面について数値的な検討を行ってきた。2層間の金属円盤の重なりによりモアレが生じ、透過光の位相分布に光の渦度を付与できる可能性が示唆されていた[4]。

目的 本研究では、位相測定が可能なテラヘルツ帯において実際に機能を有するモアレ型メタ表面の作成手法を確立し、モアレの持つトポロジカルな性質の電磁場への転写を実験的に調べることを目的とした。モアレに生じるベクトル場の定義と作製したモアレパターンの種類を図1に示す。重ねる二次元周期構造のうち1層目のある格子点に着目したとき、その点から2層目にある格子点のうち最近接の格子点に向かったベクトルを2次元面内で定義することができる(図1(a))。2つの層をわざとずらして重ねた場合、モアレが生じ、ベクトルは格子点の位置によって向きが異なり空間的な分布をもった「ベクトル場」を形成する。図1(b),(c)に、二次元三角格子の上に円を配置し重ねた場合のモアレパターン(各図左半面)およびベクトル場(各図右半面)を示す。それぞれ、

ずらし方を(b)回転させた場合、(c)格子定数を拡大縮小させた場合に対応する。(以下それぞれ回転モアレ、拡大縮小モアレと呼ぶ。)いずれのベ

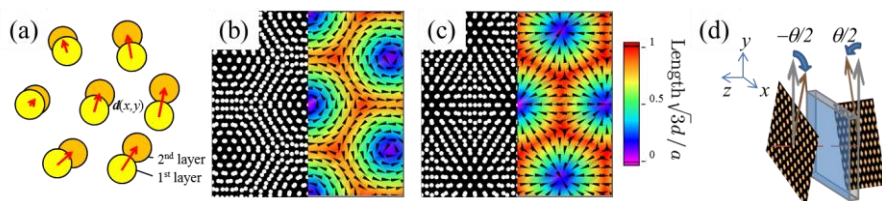


図1 モアレパターンに生じるずれのベクトル場とモアレ型メタ表面。(a)ずれベクトルの定義。格子定数 a の2次元三角格子に対してずらし方を(b)回転、(c)格子定数のスケールによるモアレパターンと対応するベクトル場。(d)モアレ型メタ表面。フィルムの両面に金属円盤配列をずらして作製。

クトル場においても、方向が定められない特異点が 2 種類生じており、特異点の周りのトポロジカルチャージはずらし方によらず変わらない。それぞれトポロジカル数 $l=1, -1/2$ の特異点として特徴づけることができる。このようなトポロジカルな性質をもつメタ表面（モアレ型メタ表面）を用いて光の場へ転写することが可能か、直接観測により明らかにすることが本研究の目的である。そのため、図 1(d)に示すようにフィルムの両面に金属構造を 2 次元周期的に配列させるメタ表面の作製手法を開発した。

結果 実際に回転モアレと拡大縮小モアレを作成した。金属円盤構造の作製には、メタルマスクを使用したリフトオフプロセスを開発した。誘電体層としてはポリイミドフィルムとし、作りたい金属円盤配列と相補的な金属メッシュを密着させる。その上からイオンビームスパッタリング法により接着層クロム 3 nm の上に金を 150 nm 製膜したのち金属メッシュを取り除く。両面に製膜処理をする際、回転モアレ型メタ表面ではメッシュを 3° 回転させた。拡大縮小モアレの方は、メッシュの格子間隔が表面 $380\mu\text{m}$ 、裏面 $400\mu\text{m}$ の金属メッシュを用いることでそれぞれのモアレパターンを生じさせた。その他の設計値は以前の数値的検討時の構造パラメータにそろえてある。図 2(a),(b)に作製した回転、拡大縮小モアレ型メタ表面の写真を示す。モアレが生じていることが目視でも確認できる。

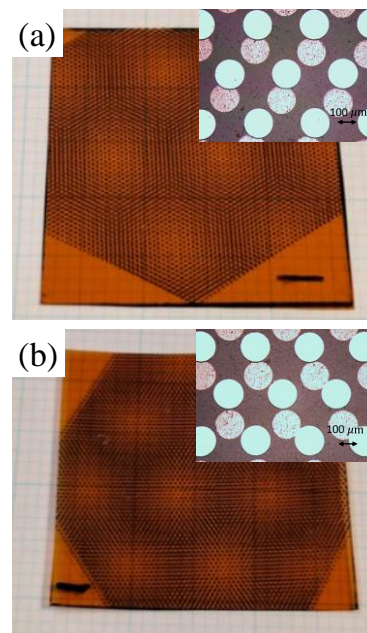


図 2 作成したモアレ型メタ表面 (a) 回転モアレ (b) 拡大縮小モアレ。挿入は光学顕微鏡像。

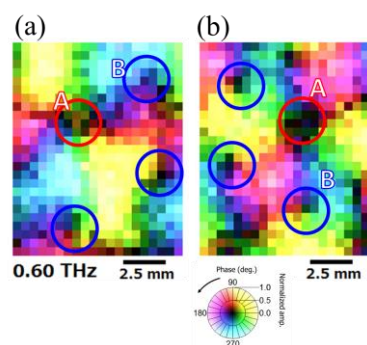


図 3 0.6 THz における透過振幅位相分布 (a) 回転モアレ (b) 拡大縮小モアレ。

モアレ型メタ表面の THz 帯透過率の THz 光学応答の測定には THz 時間領域分光法を用いた。モアレ型メタ表面により電磁場は構造による Pancharatnam-Berry 位相[7]を通して影響を受ける。その測定には円偏光クロスニコル配置が必要であるが、そのための円偏光板、円偏光検光子の代わりとして、独立した直線偏光の位相も含めた測定結果から円偏光に対する応答を再構成した。直線偏光の方向の調整にはフィルムワイヤーグリッドを用いた。透過強度、位相の面内分布を調べるために、2次元透過分光イメージング測定を行った。イメージングには試料の各位置に THz パルスを照射し各部分の透過電場の分布を測定した。0.6THz における透過振幅位相分布を図 3 に示す。図の色は位相を、明るさは振幅を表す。これを見ると回転、拡大縮小いずれのモアレ型メタ表面に対しても、2種類の暗点が見えておりその周囲で位相が変化している。A(赤丸)で示した円周の周りに位相が左回りに 4π 変化しているのに対し、B(青丸)では -2π 変化していることがわかる。これは図 3 に見た 2 種類の特異点に対応している。この位相変化はそれぞれ、モアレに生じたベクトル分布のトポロジカル数 $l=2,-1$ に対応している。また、トポロジカルな性質として各特異点の周辺での位相変化量は波長変化に対して比較的ロバストあるという結果も得ている。これらのことからモアレ場の持つトポロジカルな性質が電磁場へと転写され、それにより電磁場に周期的な渦構造が観測できたと言える。

まとめと今後 モアレパターンに生じる幾何学的位相の情報をメタ表面を使うことで、電磁場へ転写可能であることが、回転、拡大縮小モアレ型メタ表面を作製し、THz 分光透過イメージングを行うことで明らかとなった。これにより、波長無依存な性質を持つ光渦配列の生成など新規な波長板として応用できる可能性がある。また今後、ベクトル場の積極的な設計、制御を行い新たなる電磁波の制御技術へと発展させたい。さらには THz 帯以外の波長帯の電磁波、電磁波以外の波動現象への転写の可能性も調査したい。

謝辞 実験の推進には千葉大学・宮本克彦先生のご尽力、東北大学・脇本啓太郎、理化学研究所・金村卓郎、両氏のご協力、及び理化学研究所・緑川克美先生、大谷知行先生よりご支援を頂いた。東北大学・石原照也先生および同研究室メンバーより多角的な指摘を頂いた。

引用文献

- [1] D. M. Meadows, W. O. Johnson, and J. B. Allen, Appl. Opt. 9, 942 (1970).
- [2] N.-S. Liou and V. Prakash, Exp. Mech. 40, 351 (2000).
- [3] J. Jung, A. Raoux, Z. Qiao, and A. H. MacDonald, Phys. Rev. B 89, 205414 (2014).
- [4] S. Ohno, Appl. Phys. Lett. 108, 251104 (2016)
- [5] Xiaobo Yin, Ziliang Ye, Junsuk Rho, Yuan Wang, Xiang Zhang, Science 339, 1405 (2013).
- [6] Dan Hu, Xinke Wang, Shengfei Feng, Jiasheng Ye, Wenfeng Sun, Qiang Kan, Peter J. Klar, Yan Zhang, Advanced Optical Materials 1, 186 (2013).
- [7] G. Biener, A. Niv, V. Kleiner, E. Hasman, Opt. Lett. 27, 1875-1877 (2002)

本助成に関わる成果物

[口頭発表]

- 「モアレ型メタ表面により発現する位相特異点の観測」、大野誠吾，保科宏道，南出泰亜，石原照也、第78回応用物理学会秋季学術講演会、福岡、2017.9
- 「モアレ型メタ表面のテラヘルツ光学特性」、大野誠吾、シンポジウム テラヘルツ科学の最先端 IV、熱海、2017.12 (**招待講演**) (予定：2017年11月現在)

[ポスター発表]

- 「モアレ型メタ表面における円偏光度モアレの発現」大野誠吾，脇本啓太郎，石原照也，第64回応用物理学会春季学術講演会，横浜，2017.3
第9回（2017年春季）Poster Award 受賞