

熱酸化 Si 表面へ形成した 2 次元周期構造からの可視回折光挙動評価  
 Evaluation of Visible Diffracted Light Behavior  
 from 2D Periodic Structures Formed on Thermally Oxidized Si Surface

○鮫島晴哉<sup>1</sup>, 大家幸太<sup>1</sup>, 吉川大貴<sup>2</sup>, 塚本新<sup>2</sup>

Haruya Samejima<sup>1</sup>, Kouta Daiké<sup>1</sup>, Hiroki Yoshikawa<sup>2</sup>, Arata Tsukamoto<sup>2</sup>

Abstract: As a fundamental study for the realization of reflective chiral magneto-optical metamaterials using visible diffracted light, we focused on the emission behavior of diffracted light. We fabricated a periodic structure with a swastika structure in a single cell, which was designed to have diffractive properties in visible light, and experimentally observed the emission behavior of diffracted light and compared it with the calculation results using a square lattice model. Experimental results showed that the diffracted light traveled in an arc-like trajectory and showed direction dependence, which was well reproduced by the square lattice model calculations.

### 1. 背景

サブマイクロメートルスケールのカイラルメタマテリアルは、可視光域において自然物質を凌ぐ強い円二色性や光学活性を示し<sup>[1]</sup>、バイオセンシング、偏光制御素子などへの応用が期待されている。特に反射型での活用は追加的に光学機能を付与できる。一方カイラルメタマテリアルへの磁気光学効果の活用は磁場による制御や光を介した磁気秩序の制御などが期待される。本研究では、反射型カイラル磁気光学メタマテリアルの実現に向け、まず周期構造に起因する回折光の干渉効果を積極的に利用することでカイラル光学応答の増強・制御を試みる。本報告では、まず、2次元周期構造における回折光の光軸挙動を把握するための検討を行った。平面内で鏡面対称性を欠く典型例である卍構造を有する周期構造を、次数を限定するために光波長と同程度の格子周期で微細加工により作製し、可視光領域において波長 532 nm を用いて回折光軸の軌跡と試料への光入射方向の関係を実験的に評価した。

### 2. 実験方法

二次元平面格子状に配置した卍型構造パターンは、熱酸化 Si 基板を対象に集束イオンビーム装置（Focused Ion Beam : FIB, Hitachi FB2200）による直接加工のみで作製を行った。Fig. 1 に示す構造設計の通り、格子周期は 700 nm、ユニットサイズは一辺 600 nm 高さ約 150 nm とし、加工領域はおおよそ 50  $\mu\text{m}$  四方とした。

測定光学系の模式図を Fig. 2 に示す。作製した構造に対して光源に 532 nm のレーザーを用い、入射角  $\theta$  を法線から 50 deg. に固定し、試料面内で方位角  $\Phi$  を回転させながら照射を行った。この際、試料面から法線方向へ出射したものを  $\Phi=0$  deg. とし、-70 deg. から 70 deg. まで  $\Phi$  を 5 deg. 刻みで方位角を回転させた。試料から 5 cm の位置に基板面に平行にスクリーンを設置し、構造からの回折光の軌跡を記録した。得られた座標データ ( $z$ ,  $x$ ) をもとに座標系変換を行い、構造からの出射角 ( $\theta_{\text{out}}$ ,  $\Phi_{\text{out}}$ ) に換算し、各回折光の出射挙動を定量的に評価した。この際、 $\theta_{\text{out}}$  は法線からの傾き、 $\Phi_{\text{out}}$  は  $x$  軸からの傾きとする。また、Mathematica 上で卍構造と同様の周期間隔を持つ正方格子をモデルとした、入射波長、入射角についても同様の条件下での回折光の光軸挙動について計算を行い、実験結果との比較も行った。

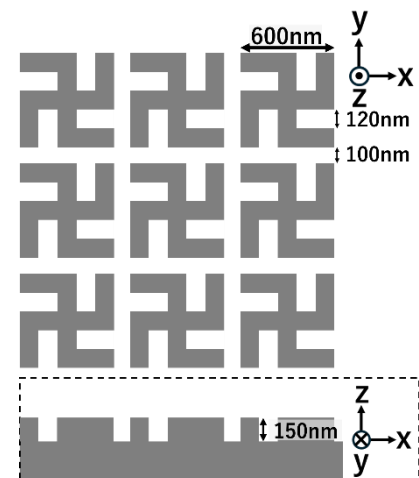


Fig. 1 Structural Design

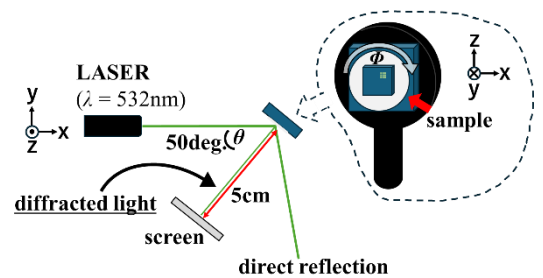


Fig. 2 Investigation system of diffracted light behavior using lasers

### 3. 実験結果・考察

Fig. 3 に作製した構造の電子顕微鏡像を示す。表面像から、作製した構造が設計通りの格子間隔を持つ円構造パターンとなっていることを確認した。

スクリーン上には、正反射成分のみならず、構造からの回折光を確認することができた。プロットの段階では、円弧状の軌跡を描いて光点が移動し、構造に対する入射方向の依存性が現れた。Fig. 4 にその際記録した回折スポット座標を構造からの反射角 ( $\theta_{out}$ ,  $\Phi_{out}$ ) に変換を行った結果を示す。次に、Fig. 5 には Mathematica により同様の条件 (波長  $\lambda = 532 \text{ nm}$ , 入射角  $\theta = 50 \text{ deg.}$ , タイルパターン周期  $700 \text{ nm}$ ) における正方格子パターンモデルでの回折光 ( $\pm 1$  次回折) の光軸挙動を実験と同様に反射角に変換した計算結果を示す。実験結果と計算結果は同様の反射光軸の変化傾向において良好に一致していることが分かる。これにより、実験で得られた回折スポットの移動がタイルパターン構造の格子周期に基づくものであることを示した。Fig. 4 と Fig. 5 の結果を比較すると、試料面内回転角度  $\Phi$  が  $0 \text{ deg.}$  から増大ないし減少するに伴い、 $\theta_{out}$  の実験値と計算値に差が生じる傾向が確認され、 $\Phi = 70 \text{ deg.}$  では実験値と計算値に  $6 \text{ deg.}$  の差があった。一方で、 $\Phi_{out}$  については、試料面内回転角度  $\Phi$  の変化に対して顕著な傾向は認められなかった。また、Fig. 6 に Mathematica による試料面内回転 ( $0 \text{ deg.} \sim 355 \text{ deg.}$ ) に伴う 1 回の回折光の出射方向をベクトル表示した計算結果の図を示す。図中の中央に位置する  $\Phi = 0$  の矢印は構造から法線方向への光軸のベクトルである。光点は試料の回転角に応じて扇状の軌跡を描いて分布し、入射方位角依存性がみられることを確認した。

### 4. まとめ

本研究では、可視回折光を用いた反射型カイラル磁気光学メタマテリアルの実現に向けた基礎検討として、回折光の光軸挙動につき検討した。可視光で回折特性を持つ大きさとして設計した、単一セルに円構造を有する周期構造の作製を行い、回折光の出射挙動を実験的に観察し、正方格子タイルパターンモデルによる計算結果と比較した。実験では回折光が円弧状の軌跡を描いて移動し、入射方向依存性を示すことを確認し、正方格子タイルパターンモデルによる計算と一致した。本モデルにより波長・入射角・偏光状態など外部からのアプローチによる回折光光軸挙動の評価基盤を得た。

### 5. 参考文献

- [1] 小西邦昭, 「擬二次元人工キラル構造における旋光性」, 東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻, 博士論文, 2008 年 8 月.
- [2] Qian-Mei Deng, Xin Li, Meng-Xia Hu, Feng-Jun Li, Xiangping Li & Zi-Lan Deng, "Advances on broadband and resonant chiral metasurfaces" npj Nanophotonics, 2024.



Fig.3 SEM image of the fabricated structure

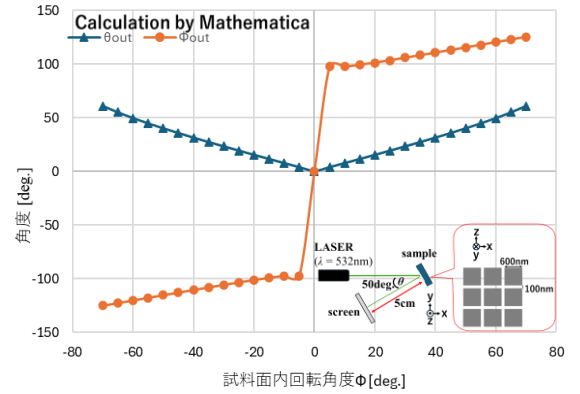


Fig.4 Dependence of the emission direction of diffracted light on the sample in-plane rotation angle

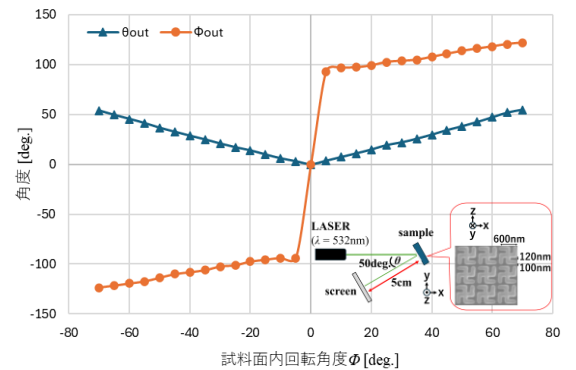


Fig.5 Dependence of diffracted light emission direction on sample in-plane rotation angle by simulation of square lattice model

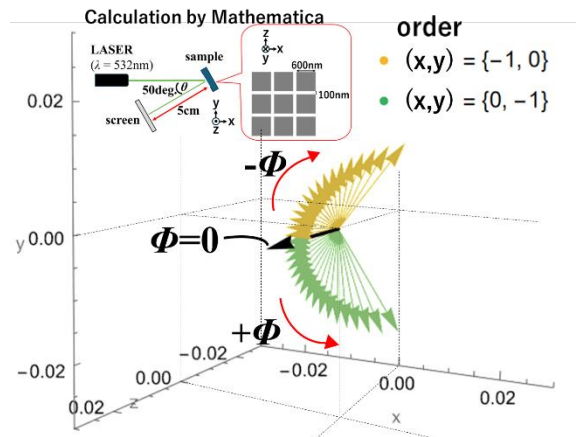


Fig.6 3D vector simulation of diffracted light spot during in-plane rotation of a square lattice ( $0 \text{ deg.} \sim 355 \text{ deg.}$ )