

光子のスピン角運動量を軌道角運動量に変換する素子の電子線露光による作製
宮本研究室 關 奏太

1. 序論

本研究の目的は、電子線露光装置を用いて光子のスピン角運動量を軌道角運動量に変換すると期待される素子を作製し、作製した素子の特性を調査することである。本研究では電子線露光による電子線レジストへの凹凸の加工により、光子のスピン角運動量を軌道角運動量に変換する素子の実現を目指す。微細構造の加工深さを決定して露光に必要なドーズ量を求め、その条件で露光を行う。最初に 0.1π の位相遅延を生じさせる素子を作製し、徐々に生じさせる位相遅延が大きい素子を作製する。最終的には π の位相遅延を生じさせる素子を作製することを目指す。

2. 原理

2.1 0.1π の位相遅延を生じさせる q-plate

実験台の水平方向に設定した x 軸に対する進相軸の傾き α が以下の式で表せるような複屈折素子を q-plate と呼ぶ。

$$\alpha(r, \varphi) = q\varphi + \alpha_0$$

ここで、 φ は x 軸を基準とする方位角、 q と α_0 は定数である。位相遅延が π かつ $q = 1$ のとき、この素子は光子のスピン角運動量を軌道角運動量にちょうど変換する。

次に、 0.1π の位相遅延を生じさせる q-plate の動作について述べる。 0.1π の位相遅延をもつ q-plate のジョーンズ行列 \mathbf{M} は

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha + \exp\left(i\frac{\pi}{10}\right) \sin^2 \alpha & \cos \alpha \sin \alpha - \exp\left(i\frac{\pi}{10}\right) \cos \alpha \sin \alpha \\ \cos \alpha \sin \alpha - \exp\left(i\frac{\pi}{10}\right) \cos \alpha \sin \alpha & \exp\left(i\frac{\pi}{10}\right) \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha \end{bmatrix}$$

となる。したがって、この q-plate に左回り円偏光を入射するときの出射光 \mathbf{E}_{out} は、以下で表わされる。

$$\mathbf{E}_{\text{out}} = \mathbf{M} \cdot E_0 \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} = E_0 \left\{ \frac{(1 + 0.15i)}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} + \frac{-0.3i \exp[i2(\varphi + \alpha_0)]}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} \right\}$$

したがって、 E_{out} は平面波の左回り円偏光成分とらせん面状の波面を持つ右回り円偏光成分をもつことがわかる。また、q-plateが生じさせる位相遅延が大きくなるに伴い、出射光がもつ左回り円偏光成分は小さくなり、生じさせる位相遅延が π のときにゼロになる。

2.2 構造的複屈折

屈折率の異なる2つの等方性媒質を光の波長より小さいピッチで交互に積層すると、電場が層に平行な光と垂直な光に対して異なる屈折率をもつようになり、複屈折材料であるかのように振る舞う。この現象を構造的複屈折と呼ぶ。

3. 実験

3.1 露光パターン設計

本研究で作成する露光パターンの画素数は10000 pixel × 10000 pixelであり、これを2 mm × 2 mmの領域に露光する。このとき1画素が200 nmである。本研究では露光パターンの周期が400nmのものと600nmのものを設計した。作製したい露光パターンの概念図(図1)と、実際に設計した露光パターンの中心部(図2,3)を以下に示す。



図1. 作製したい露光パターンの概念図
(L. Marrucci, C. Manzo, and D. Paparo,
Phys. Rev. Lett. **96**, 163905 (2006))

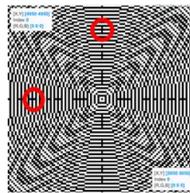


図2. 露光パターン(周期400 nm)の
中心付近100pixel × 100pixelの様子

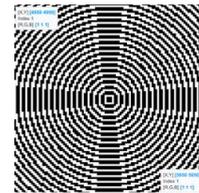


図3. 露光パターン(周期600 nm)の
中心付近100pixel × 100pixelの様子

設計した周期400nmの露光パターンについて、赤丸で示した動径方向の構造が存在することを確認した。設計した周期600nmの露光パターンについて、太さが一様でなく太い部分と細い部分が存在することを確認した。

3.2 加工深さとドーズ量の導出

作製する素子について、加工しない電子線レジストの部分の屈折率を $n_1 = 1.5$ 、加工する部分の屈折率を $n_2 = 1.0$ とする。構造的複屈折の原理より、 0.1π の位相遅延を生じさせる素子を作製するために必要な加工深さ L は $L \cong 3.23 \times 10^3 \text{ \AA}$ と求めた。先行研究より、加工深さ $3.23 \times 10^3 \text{ \AA}$ の素子を作製するために必要なドーズ量は $26 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ と求めた。[3]

3.3 素子の作製

本研究では電子ビーム露光装置（日本電子社, JSM-7100F 型）を用いて電子線レジスト膜（グルーオンラボ社製, gL1000-5, 2020/03/26 開封）に露光し、素子を作製した。作製した素子を光学顕微鏡で観察した結果を図 5,6,8,9 に示す。参考のため露光パターンを図 4,7 に示した。

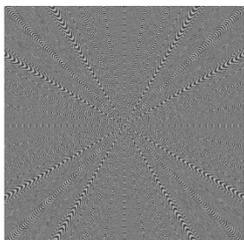


図4. 周期400nmの露光パターン全体を低解像度で表示したもの

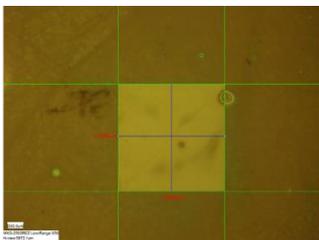


図5. 作製した周期400nmの素子 (1986 $\mu\text{m} \times 2004\mu\text{m}$, 観察倍率50倍)

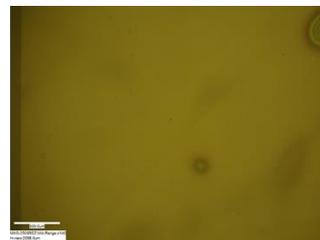


図6. 作製した周期400nmの素子 (観察倍率140倍)

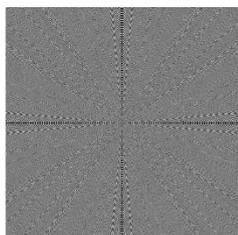


図7. 周期600nmの露光パターン全体を低解像度で表示したもの



図8. 作製した周期600nmの素子 (2001 $\mu\text{m} \times 1993\mu\text{m}$, 観察倍率50倍)

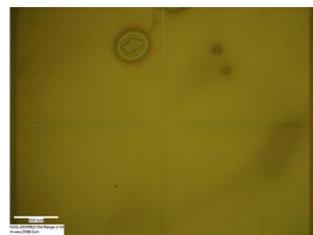


図9. 作製した周期600nmの素子 (観察倍率140倍)

観察倍率を 140 倍に上げて同心円状の様子は確認できなかった。しかし、図 8 と図 10 より、周期600 nm の微細構造をもつ素子を光学顕微鏡で観察したところ、露光パターンを低解像度で表示したときに観察されるパターンと類似の十字状のパターンが観察できた。

3.4 作製した素子の特性調査

以下の光学系を用いて、作製した素子に左回り円偏光を入射するとき出射光に右回り円偏光成分が含まれているか調査する実験を行った。光学系を図 10 に示す。

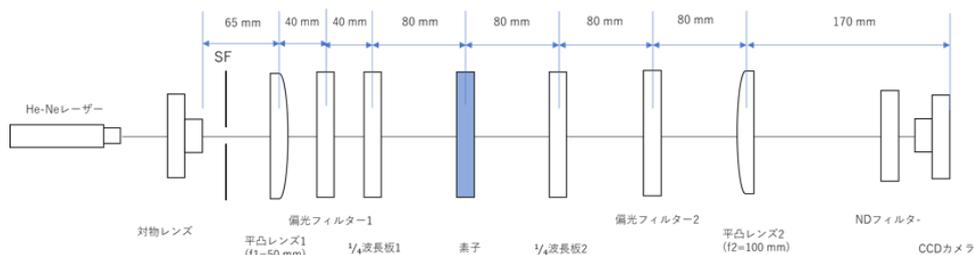


図 10. 作製した素子の特性調査に用いた光学系

ここで、対物レンズと平凸レンズ 1 でビーム径を 5 mm にし、偏光フィルター 1 は p 偏光を、偏光フィルター 2 は s 偏光を透過するよう設置した。また、1/4波長板 1 で

p 偏光を左回り円偏光に変換し、1/4波長板 2 で右回り円偏光を s 偏光に変換した。そして、素子上の 1 点から出た光が CCD カメラ上の 1 点に集光するように平凸レンズ 2 を設置した。

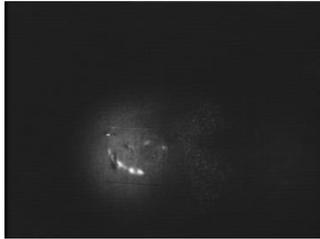


図11. 作製した周期400nmの素子 (2mm×2mm) を透過した光



図12. 作製した周期600nmの素子 (2mm×2mm) を透過した光

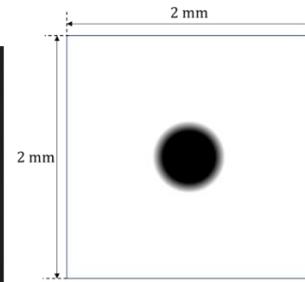


図13. 理想的な結果
白い部分：明るく見える場所
黒い部分：位相特異点が生じて暗くなる場所

図 11,12 にカメラで撮影した透過光の分布、図 13 にらせん面状の波面の光が出射した場合に期待される強度分布を示す。図 11,12 より出射光に右回り円偏光成分が含まれていることがわかる。らせん面状の波面の光が出射した場合は理論上、図 14 に示したような像が観測されるはずである。しかし、図 11, 12 からはそのような像は観測されなかった。このことから、らせん面状の波面をもつ右回り円偏光成分は生じていないと考えた。

4. 結論

電子線露光装置を用いて光子のスピン角運動量を軌道角運動量に変換すると期待される素子を作製し、作製した素子の特性を調査した。左回り円偏光の一部を右回り円偏光に変換できたが、軌道角運動量をもつらせん面状の波面をもつ光は確認できなかった。

今後は本研究の露光パターンの設計を変更し、同様の露光条件で新たな素子を作製しようと考えている。また、作製した素子から出射した光の軌道角運動量を測定する実験を行い、光子のスピン角運動量を軌道角運動量にちょうど変換する素子を電子線露光によって作製できるか明らかにしたいと考えている。

5. 参考文献

- [1] L. Marrucci, C. Manzo, and D. Paparo, "Optical Spin-to-Orbital Angular Momentum Conversion in Inhomogeneous Anisotropic Media", *Phys. Rev. Lett.* **96**, 163905(2006)
- [2] 菊田久雄, 岩田耕一, 「波長より細かな格子構造による光制御」, *光学*, **27** 巻 1 号, p12 p17, (1998)
- [3] 早瀬茂法, 「光子の軌道角運動量重ね合わせ状態検出用ホログラム作製のための電子線レジストの多重露光特性の研究」, 電気通信大学修士論文, (2019)