

光子の軌道角運動量重ね合わせ状態検出用反射型ホログラムの作製

宮本研究室 1810253 小林 寛人

1 はじめに

本研究の目的は光子の軌道角運動量重ね合わせ状態検出のために最適化された反射型ホログラムを作製することである。

軌道角運動量に関する量子もつれ合いの検証のためには異なる軌道角運動量状態の重ね合わせ状態で検出を行う必要がある。光子を軌道角運動量状態の重ね合わせ状態で検出するために、中心に欠陥構造を持つ回折格子である軌道角運動量状態検出用のホログラムが用いられる。検出用ホログラムの役割は、1次回折光に回転位相因子 $\exp(im\phi)$ を付加し、かつ0次と1次回折光の回折効率が1:1になるよう分配することである。本研究では最終的な測定対象の光子の波長を810nmとして設計を行うが、今回は加工深さの評価のため波長632.8nmのレーザを用いる。そのため波長632.8nmでの0次光と1次光の回折効率の理論値は1:1とはならない。また回折格子の形状がブレード状と階段構造で回折効率の次数に対する分布が異なることを利用して作製したホログラムの評価を行う。先行研究[1]では反射膜を形成せず透過型ホログラムとして評価を行ったが、本研究では反射型ホログラムとして評価を行う。

2 ホログラムの設計

本研究で作製するホログラムは反射型ブレード状位相ホログラムである。ブレード状ホログラムとは物体光と参照光の位相差を $[0, 2\pi)$ に折り畳み光学的な距離として記録したホログラムである。

2.1 ホログラムパターン

ラゲールガウスビームを発生させるホログラムを設計する。物体光は円筒座標系 (ρ, ϕ, z) に対して複素振幅が $\exp(im\phi)$ であり、 z 方向に伝搬するビームとする。

$$u_o = A_o \exp[i(k_z z + m\phi)] \quad (1)$$

参照光は z 軸に対してわずかに傾いて伝搬する平面波とする。

$$u_r = A_r \exp[i(k_x x + k_z z)] \quad (2)$$

$z = 0$ での物体光と参照光の位相差を $[0, 2\pi)$ の範囲に折り畳んだとき位相差 I は式(3)のように表される。

$$I = (k_x x - m\phi) \bmod 2\pi \quad (3)$$

このときのホログラムは、図1に示すように、中心に欠陥がある回折格子の構造をしている。

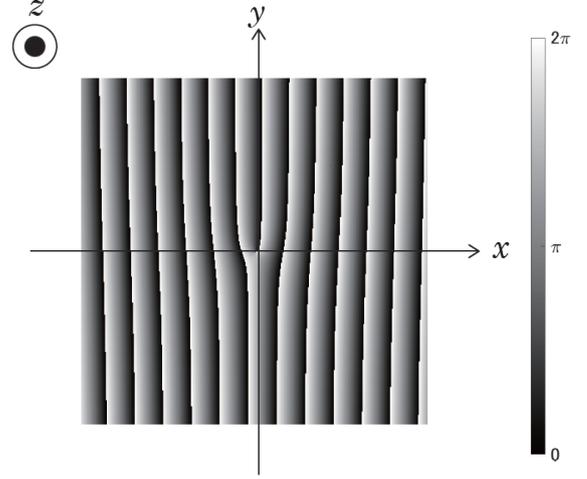


図1: ホログラムによる位相変調 ($k_x < 0, m = -1$)

しかし図1では理論上+1次回折光の回折効率が100%となってしまふ。ここで位相変調量 t を導入してホログラムパターンを式(4)のようにする。

$$I' = \frac{t}{2\pi} [(k_x x - m\phi) \bmod 2\pi] \quad (4)$$

2.2 加工深さの決定

0次光と1次光の回折効率が1:1になるような加工深さを決定する。

ブレード状ホログラムから発生する s 次回折光の回折効率 $\eta(s)$ は式(5)で表される。

$$\eta(s) = \text{sinc}^2 \left(s - \frac{t}{2\pi} \right) \quad (5)$$

式(5)より0次光と1次光の回折効率が1:1つまり $\eta(0) = \eta(1)$ を満たす t は $t = \pi$ である。

本研究では作製に用いる電子線露光装置の制約により4段の階段構造を実現することで理想のブレード構造に近似をする。位相変調量 t はホログラムを加工する凹凸の深さによって決まり、反射型ホログラムにおける必要な加工深さ h_R と位相変調量 t はそれぞれ次の関係式で表される。

$$h_R = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{N-1}{N} \frac{t}{2} \quad (6)$$

ここで、 λ は入射光の波長、 N は段数である。反射型ホログラムを作製する場合、式(6)から $t = \pi$ 、 $N = 4$ 、 $\lambda = 810\text{nm}$ のとき必要な加工深さは 1500\AA となった。波長は発生させる予定のもつれ合い光子対の波長を想定し

た。

したがって1回目、2回目、3回目の露光に必要な加工深さはそれぞれ 500\AA , 1000\AA , 1500\AA となる。

3 ホログラムの作製

3.1 作製方法

ホログラムの作製方法を以下に示す。露光には日本電子社の電子ビーム露光装置 (JSM-7100F 型) を、蒸着にはテクノウェーブ社の真空蒸着装置を用いた。図2は作製手順の概略図である。

1. 片面に酸化インジウムスズ (ITO) が蒸着されているガラス基板を洗浄する。
2. ITO が蒸着されている面に電子線レジスト g L1000-5 (グルーオンラボ社製) をスピコートする。
3. 電子ビーム露光装置を用いて幅の異なる露光パターンを3段階多重露光する。
4. 2-プロパノール (IPA) と 4-メチルケトン (MIBK) を質量比 1:2 で混ぜ合わせた現像液によって露光された部分を溶解させ、凹凸を作る。
5. 反射膜として金膜を蒸着する。

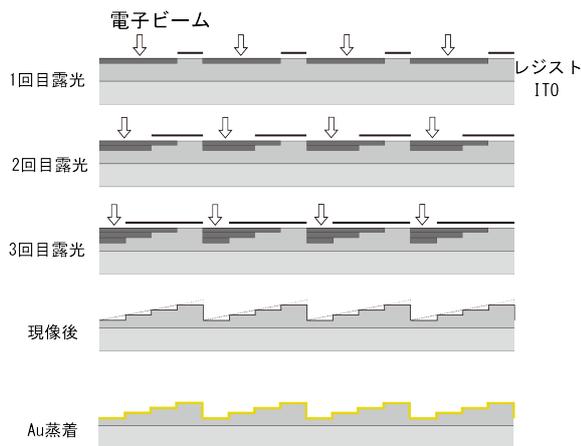


図 2: ホログラム作製の手順

3.2 露光条件

本研究では 1pixel ごとに露光を行うビットマップ露光の方式で行い、露光パターンには $10000\text{ pixel} \times 10000\text{ pixel}$ の画像を用いる。また露光範囲は $2\text{mm} \times 2\text{mm}$ で作製する位相変調の1周期の長さは $6.4\mu\text{m}$ とした。

次に求めた加工深さから必要なドーズ量を決定する。本研究で用いる電子線レジストは gL1000-5 であり、先行研究 [3] によって求められたこの電子線レジストの加工深さと必要なドーズ量の関係を図3に示す。

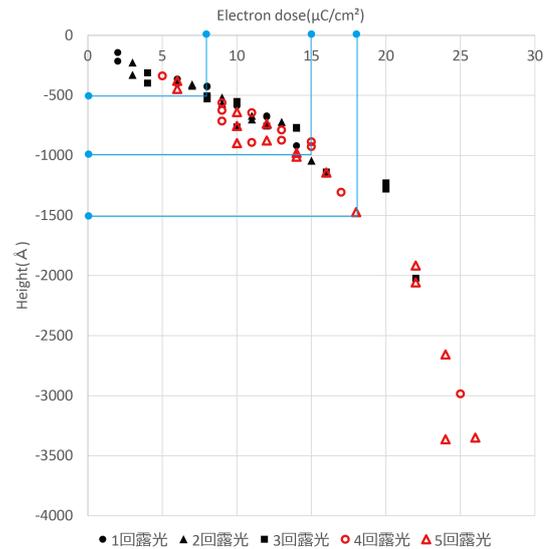


図 3: ドーズ量と加工深さ [3]

図3の加工特性から1~3回目に必要なドーズ量およびドーズ時間は表1のようになる。

表 1: 露光に必要なドーズ量

露光順	ドーズ量 [$\mu\text{C}/\text{cm}^2$]	ドーズ時間 [μs]
1	7.969	4.25
2	7.031	3.75
3	4.031	2.15

現像後、光学顕微鏡で凹凸パターンが作製されているか確認する。観察した画像を図4に示す。

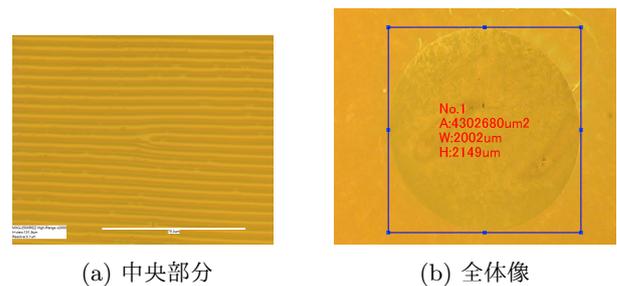


図 4: 光学顕微鏡での観察

図4aより中心に欠陥をもった構造になっていることが観察できる。また図4bより、光学顕微鏡で露光範囲を測定した結果 $2002 \times 2149\text{mm}$ となり、設計の $2000 \times 2000\text{mm}$ とはならなかった。

3.3 蒸着

露光面に金の蒸着を行い反射型ホログラムを作製した。蒸着条件は研究室の過去の資料から反射率が約 88% 得ら

れたときの金線の形状を特定し、同様の形状の金線で蒸着した。蒸着条件を先行研究とともに表 2 に示す。

表 2: 露光に必要なドーズ量

	先行研究	本研究
装置	真空蒸着装置	真空蒸着装置
金線 (直径×長さ [mm])	0.80 × 11	0.80 × 11
ポート	タングステン	モリブデン
金線と試料の間隔/mm	135	125
電流値/A	50	35
真空度	不明	4.5×10^{-4}
反射率	約 88%	約 60%

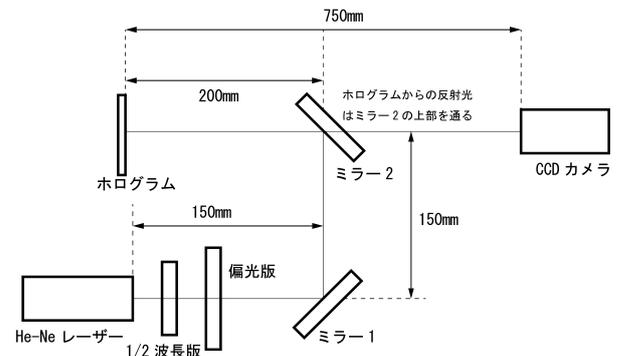


図 6: 強度分布観察の光学系

実際の蒸着後のホログラムの様子を図 5 に示す。

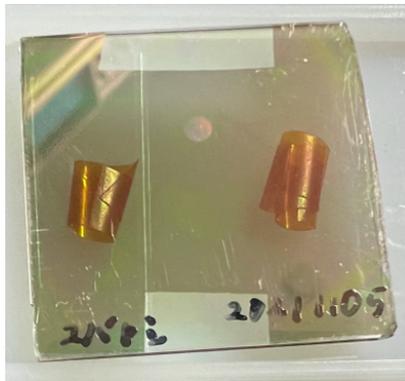


図 5: 実際の作製したホログラム

蒸着後反射率を測定したところ 60%程度となり、先行研究よりも低い値をとった。原因として金が広範囲に蒸着されて膜厚が小さくなったためだと考えられる。今後は蒸着範囲を小さくするため、金線と試料との距離を近づけて蒸着する予定である。

4 強度分布の観察

図 6 の光学系で $-3 \sim +3$ 次回折光強度分布の観察を行った。偏光板で S 偏光、P 偏光の選択をし、1/2 波長板で選択した各偏光成分のパワーを調節した。またホログラムのアライメントは 1 次光の強度分布を CCD カメラで観察し、方位角方向の強度分布が平坦になるように微調節した。

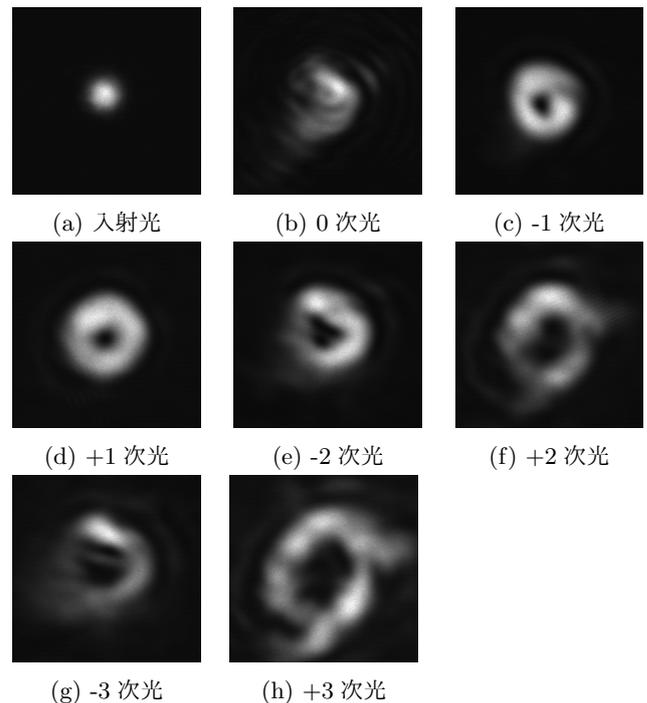


図 7: P 偏光の強度分布

図 7 から各回折光には異方性が現れている -2 次、 -3 次回折光には三角形の異方性が顕著に現れた。0 次回折光では広範囲に光が散乱し、ガウス型の強度分布にはならなかった。

先行研究 [4] では電子線露光装置によって発生したホログラムの歪みを原因の一つとし、露光パターンの補正を行うことで異方性を除去している。加工範囲が真円ではなく縦に長い楕円状となっていたことも露光パターンが正しく露光されていないことを示している。

5 回折効率

5.1 回折効率の理論値

本研究ではブレード状ホログラムを 4 段の階段構造で近似をして加工を行っていた。ここでブレード状と階段構造では回折効率の分布が異なっていることを利用してホログラムの評価を行う。なお評価の際には波長 632.8nm のレーザーを使用する。

ブレード構造での s 次回折光の回折効率 $\eta_N(s)$ は前述の式 (5) であった。階段構造における回折効率 $\eta_N(s)$ は式 (7) のように表される。

$$\eta_N(s) = \left| \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1} \exp\left(-i\frac{t-2\pi s}{N}l\right) \right|^2 \text{sinc}^2\left(\frac{s}{N}\right) \quad (7)$$

次に波長 632.8nm で位相変調量を求める。式 (6) より $h_R = 1500\text{\AA}$, $\lambda = 632.8\text{nm}$, $N = 4$ としたとき $t = 1.26\pi$ となる。このときのブレード構造および階段構造における s 次光の回折効率の理論値は実験値と共に後で示す。

5.2 回折効率の測定

図 6 の光学系の CCD カメラをパワーメータに置き換えた光学系で回折効率の測定を行った。ホログラム部分にビームを照射し、その-3次~+3次回折光のパワーを測定する。未露光部分にビームを照射したときの反射光のパワーに対する回折光のパワーの割合を回折効率とした。測定結果を理論値と共に示す。

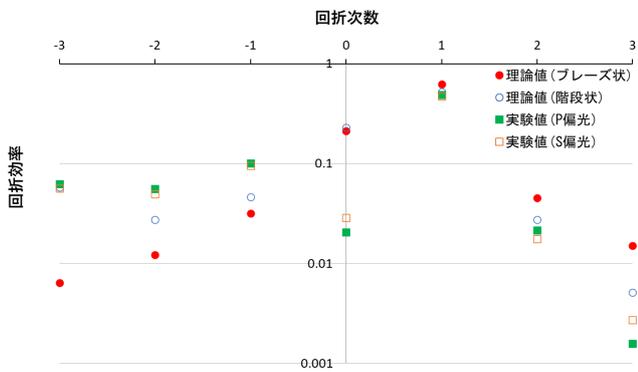


図 8: 回折効率の理論値 (波長 632.8 nm) と実験値

0 次光は広範囲に光が散乱し、正しく測定できていないため、実験値 (2~3%) が理論値 (20%) より小さい。+1 次光は最も回折効率が高く、理論値に近い実験値が得られた。-3 次光の実験値は -2 次光より高く、階段構造の理論値の特徴と一致した。

5.3 理論値との相違について

式 (6) と式 (5), (7) から 0 次と 1 次光の回折効率と加工深さの関係をグラフにすると図 9 のように表される。

測定値では +1 次光の S 偏光の回折効率は 0.49、P 偏光は 0.47 であった。図 9 よりブレード構造、階段構造のいずれの理論値に対しても測定値が低く測定値から推測される加工深さは $h_R = 1500\text{\AA}$ よりも低いと考えられる。2 mm×2 mm の露光範囲中に真円のホログラムを加工する設計に対して、実際の加工範囲は縦に長い楕円であり、露光範囲が縦に拡大している。ドーズ量は 1 ピクセルあたりのドーズ時間によって管理されているため、露光範囲の変化によってピクセル面積が変化するとドーズ量が設計とずれてしまう。このことから加工深さが設計よりも低くなったと考えられる。

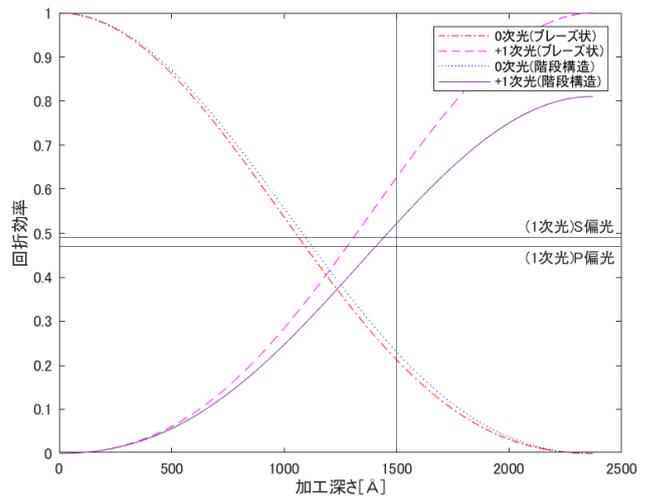


図 9: 回折効率 (波長 632.8 nm) と加工深さの関係

6 まとめ

1. 電子線露光装置を用いて透過型ホログラムを作製した。その後真空蒸着装置を用いて金の蒸着を行い、反射型ホログラムを作製した。
2. ブレード状、階段構造のそれぞれの場合について回折効率の理論値と実験値と比較したところ、階段構造の理論値の特徴と一致した。また加工深さは設計よりも低いと考えられる。
3. 回折光の強度分布には異方性が見られ、ホログラムの歪みによるものと考えられる。

参考文献

- [1] 落合洋介, 「光子の軌道角運動量重ね合わせ状態検出用ホログラムの回折光強度分配の最適化」, 電気通信大学修士論文 (2021)
- [2] Miyamoto et al., “Detection of superposition in the orbital angular momentum of photons without excess components and its application in the verification of non-classical correlation”, J.opt. **13** (2011) 064027.
- [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,(2017).
- [4] 尾藤浩一, 「ホログラムの歪みの補正による異方性の少ないラゲールガウスビームの発生」, 電気通信大学修士論文, (2007)