

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

1933027 落合 洋介

主任指導教員：宮本 洋子 指導教員：清水 亮介

1 はじめに

本研究の目的は電子線露光により光子の軌道角運動量重ね合わせ状態検出用ホログラムを作製し、回折光強度分配の最適化を行うことである。

軌道角運動量もつれ合い状態は近年、量子通信や量子コンピュータなどの量子情報分野においても注目されているが、その生成や検出、操作などが応用のための課題として挙げられる。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。

目的のホログラムは反射型ブレイズ状位相ホログラムであり、電子線露光による電子線レジスト gL1000-5(グルーオンラボ社製)への凹凸の加工によって作製する。回折効率はホログラムの位相変調幅 t によって影響を受ける。この位相変調幅 t は電子線レジストに加工する凹凸の深さに関係しているため、回折光強度分配を1:1とするためにはホログラムの加工深さを最適な値にする必要がある。

加工の深さには、ポリマー膜の作製条件や電子線照射後の化学処理である現像液の条件も影響を与えるが、電子線レジストへの単位面積当たりどれくらい電子を照射するかを示すドーズ量の影響が特に大きい。先行研究によって、多重露光におけるドーズ量と電子線レジストへの加工の深さの関係が調査され、加工特性データが得られた。

本研究では、先行研究によって調査された加工特性データを用いて作製したホログラムについて複数の回折次数の回折効率を測定することで加工深さを推定する。この結果をフィードバックすることで、目的の加工深さとなるホログラムの作製を行う。

2 軌道角運動量重ね合わせ状態検出方法

光子の軌道角運動量重ね合わせ状態検出用ホログラムは、1次回折光に位相因子 $\exp(im_H\phi)$ を付加する反射型ホログラムであり、中心に欠陥構造を持つ回折格子の構

造になっている。

図1に経路干渉計法による軌道角運動量重ね合わせ状態の検出系を示す。図中の B_n は回折効率と適切に置かれた減衰器によって決まる振幅である。 ϕ は位相変調器によって決まる位相である。量子状態 $|l(n, r)\rangle$ の l は方位角モード指数、 n は回折次数、 r はホログラムの欠陥位置と光軸の中心との距離である。

測定対象のビームをホログラムの中心に入射する。 m_H 次のホログラムは n 次回折光に $\exp(im_H n\phi)$ の位相変調を与える。ホログラムの中心に $l = m_0$ の光を入射させた場合、ホログラムで反射後の0次回折光は $l = -m_0$ となり、1次回折光は $l = m_H - m_0$ となる。その後、ホログラムの0次回折光と1次回折光をそれぞれシングルモードファイバ(SMF)でフィルタする。SMFは $m = 0$ 成分のみ通過するため、 $m_H = 1$ のホログラムの場合、0次回折光側のSMFは、入射光の $m_0 = 0$ 成分だけを通過させ、1次回折光側のSMFは、入射光の $m_0 = 1$ 成分だけを通過させる。その2つのビームをビームスプリッタによって重ね合わせる。ビームスプリッタ後に検出器を設置することにより、この2つの軌道角運動量重ね合わせ状態を検出することができる。

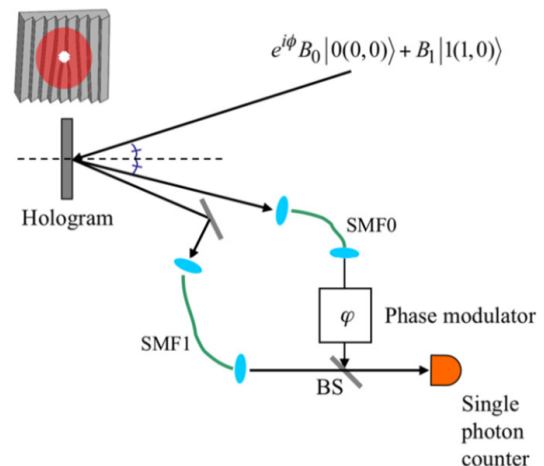


図1: 経路干渉計法の実験系 [?]

3 ホログラムの設計

ホログラムには反射型ホログラムと透過型ホログラムがある。本研究でターゲットとしているホログラムは反射型ブレイズ状位相ホログラムである。ブレイズ状ホログラムとは物体光と参照光の位相差を $(0, 2\pi]$ に折りたたみ、光学的な距離として記録したホログラムである。干渉

縞を記録した正弦波回折格子と比べ、ブレード状位相ホログラムの方が回折効率が高い。また、反射型とする理由はホログラム基板内をビームが通過することがないため、伝搬媒質による影響を考慮しなくてよいためである。

3.1 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作製する。物体光は円筒座標系 (ρ, φ, z) に対して複素振幅が $\exp(im\varphi)$ であり、 z 方向に伝搬するビームとする。

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

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ものをホログラムのパターンとする。

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

このホログラムは、図2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。

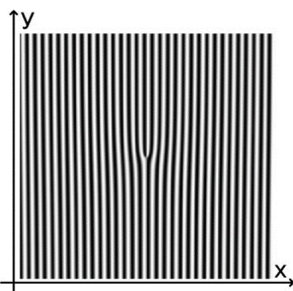


図2: ホログラムによる位相変調構造 ($m = -1, k_x < 0$, 黒～白は $0 \sim 2\pi$ に対応)

3.2 必要な加工深さと加工方法

ホログラムが十分に薄いと仮定し、ブレード状位相ホログラムをブレード状回折格子に近似して回折効率を求めると、1次回折光の回折効率 η_1 と位相変調幅 t との関係は、次のようになる。

$$\eta_1 = \text{sinc}^2 \left(\frac{t}{2\pi} - 1 \right) \quad (4)$$

また、階段状の構造によるブレード構造の近似について検討すると、階段状の回折格子のステップ数 N と s 次回折光の回折効率 $\eta_N(s)$ の関係は次のようになる。

$$\eta_N(s) = \left| \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1} \exp \left(-i \frac{t - 2\pi s l}{N} \right) \right|^2 \text{sinc}^2 \left(\frac{s}{N} \right) \quad (5)$$

軌道角運動量重ね合わせ状態検出用ホログラムは0次回折光と1次回折光の光強度比が1:1になる必要がある。式(4)と式(5)から $t = \pi$ のとき0次回折光と1次回折光の光強度比が1:1となる。位相変調幅はホログラムに加工す

る凹凸の加工の深さによって決まる。反射型ホログラムに必要な加工の深さは次の式で求めることができる。

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

また透過型ホログラムの加工の深さは以下の式で求めることができる。

$$h = \frac{\lambda}{n-1} \frac{N-1}{N} \frac{t}{2\pi} \quad (7)$$

ここで、 n は透過媒質の屈折率、 λ は再生光の波長、 N はステップ数である。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。ここから、1回目、2回目、3回目の露光で必要な加工深さを求めた結果を表1に示す。また、透過型ホログラムを作製する場合、必要な加工深さは、屈折率を1.5とすると式(7)から 6200\AA と求められる。反射型ホログラムの方が、透過型ホログラムに比べて必要な加工深さが浅い利点がある。

表1: 反射型ホログラムの作製に必要な加工深さ

1回目の露光	500 \AA
2回目の露光	1000 \AA
3回目の露光	1500 \AA

ホログラムの作製には日本電子社の電子ビーム露光装置 (JSM-7100F型) を使用する。ガラス基板に酸化インジウムスズ (ITO) を蒸着してその上にレジストをスピコートし、図3の矢印の方向から電子ビームを照射する。基板上に凹凸を作製するため幅の異なる3枚の露光パターンを多重露光する。その後、電子ビームが当たった箇所を取り除くために現像を行う。その結果4段の階段状の構造を実現し、理想のブレード構造に近似する。

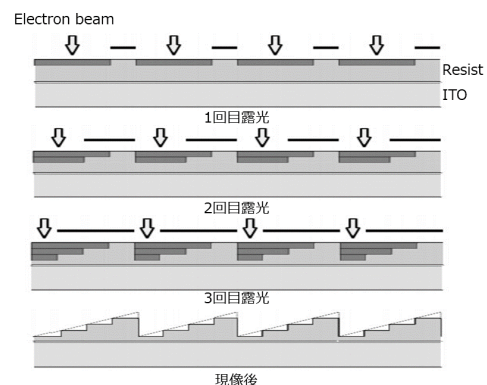


図3: 階段構造で近似されたブレード状回折格子の作製方法

4 ホログラムの作製

4.1 先行研究

電子線レジスト gL1000-5 はスピコートによる膜厚が厚く、光学素子の作製に適しているが、比較的新しいレジストのため加工特性データが少ない。そこで、先行研究で

はホログラム作製に使用する電子線レジスト gL1000-5(グルーオンラボ社製)の多重露光特性について調査された。

実際のホログラム作製では、基板上に凹凸を作製するため幅の異なる3枚の露光パターンを多重露光する。そのため、露光回数に着目し、ドーズ量と加工深さの関係を調査した。得られた加工特性データを図4に示す。

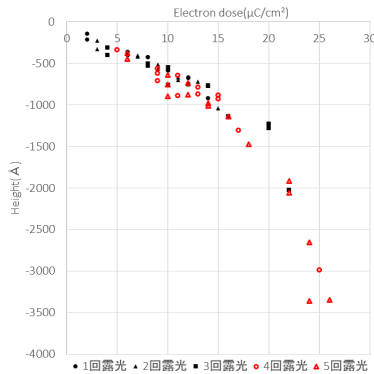


図4: ドーズ量と加工深さ

図4より、加工深さ 2000 Å 程度までは露光回数によって加工深さに大きな影響は出ず、この加工特性データを用いてホログラム作製が可能であることがわかった。

4.2 作製方法と露光条件

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) を使用した。

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 gL1000-5 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、凹凸をつくる
5. 反射膜として金膜を蒸着する

目的のホログラムの加工深さは、1段目が 500Å、2段目が 1000Å、3段目が 1500Å であることから、図??の加工特性より、表2に示す露光条件で露光を行う。

表2: 露光条件

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

4.3 理想的な回折効率

ここでは、目的の加工深さとなった時の理想的な回折効率を算出する。

作製したホログラムの加工深さの測定について、ホログラムピッチが非常に小さいため加工深さの直接的な測定が困難となる。そのため、作製したホログラムによって発生した複数の回折次数の回折効率を測定し、算出結果と比較することで作製したホログラムが目的の加工深さとなっているかを確認する。

目的のホログラムは反射型ホログラムであるが、反射型ホログラムとして扱うためには作製時に金蒸着の手順が必要となる。しかし、ここでは加工深さを調査するためだけであるので、この手順を省略し、透過型ホログラムとして扱う。また、入射光には波長 632.8nm の He-Ne レーザを用いた。

式 (7) より、加工深さ 1500Å の時の位相変調幅 t は以下のようになった。

$$t = \frac{1.5 - 1}{632.8\text{nm}} \frac{4}{4 - 1} \times 1500 \times 10^{-10}\text{m} \times 2\pi = 0.32\pi \quad (8)$$

この時の回折効率を、階段状の回折格子のステップ数 N と s 次回折光の回折効率 $\eta_N(s)$ の関係式より、 ± 3 次光まで算出した。

$$\eta_N(s) = \left| \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1} \exp\left(-i\frac{t - 2\pi s l}{N}\right) \right|^2 \text{sinc}^2\left(\frac{s}{N}\right) \quad (9)$$

結果を図5に示す。

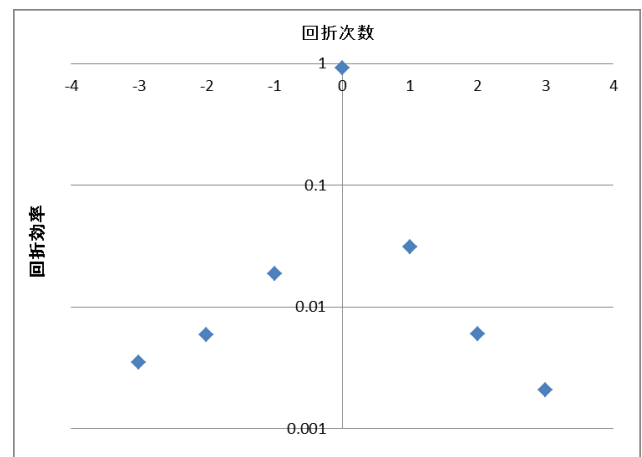


図5: ドーズ量と加工深さ

4.4 光学系

ホログラムによって発生した回折光について、回折効率測定のためのパワー測定およびビームプロファイル観察のための強度分布撮影を行う。そのための光学系を設計した。

ホログラム挿入位置について以下の3点を満たすよう挿入位置を決定した。

- 発生した回折光について先行研究 [4] の結果と比較可能となるよう入射位置でのビーム径が先行研究と近い値となるようにする。
- ホログラム挿入位置でのビーム断面が平面に近くなるようにする。
- 入射光の偏光状態を制御する目的で波長板、偏光板を挿入するスペースが必要。

レーザ出射口から 100mm の位置にホログラムを挿入することに決定した。この位置でのビーム径は、約 $400\mu\text{m}$ であった。

回折効率測定系、および強度分布撮影系をそれぞれ図 6、図 7 に示す。

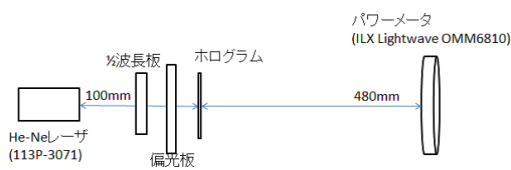


図 6: 回折効率測定系

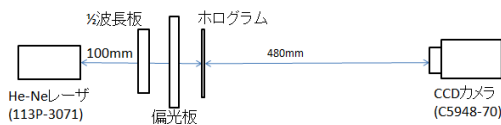


図 7: 強度分布撮影系

5 測定結果

5.1 ホログラム (基板番号 20200610) の測定結果

表 2 に示す露光条件でホログラムの作製を行った。光学顕微鏡によって作製したホログラムの観察を行った。観察結果を図 8 に示す。

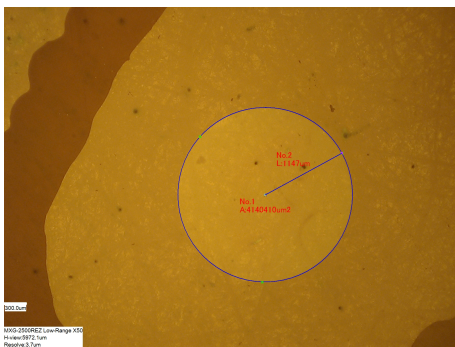


図 8: ホログラム (基板番号 20200610) の観察

作製したホログラムの露光範囲について、観察用ソフト「2D_measure」を用いて露光部分の円周上 3 点をクリック

することで円を指定し、円の中心と円周上の 2 点間の距離を指定し、表示された値を半径を測定したとした。

測定の結果、半径が 1.147mm であった。 $2\text{mm}\times 2\text{mm}$ のフィールドサイズを露光するよう設定し、露光を行ったが観察結果から $2.29\text{mm}\times 2.29\text{mm}$ と目的のホログラムより大きい範囲を露光したことがわかった。

また、光学顕微鏡の倍率を上げて観察することで中心部分の欠陥構造、および凹凸加工を表す縞模様が確認できた。

回折効率の測定結果について、基板未露光部分の透過光を基準として各回折光のパワーを測定し、回折効率を算出した。

結果を算出した理想値とともにグラフにプロットした。図 9 に示す。

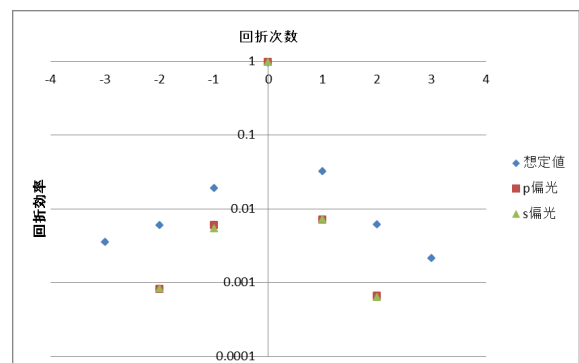


図 9: 作製したホログラム (基板番号 20200610) 回折効率測定結果

図 9 より、作製したホログラムによって発生する各回折光の回折効率は目的の加工深さを得た時の理想値と比較し、小さいという結果になった。

なお、3 次回折光の回折効率については回折光のパワーが小さく、使用したパワーメータでは測定ができなかったためデータがない。

式 (7) と式 (9) より、加工深さが深くなるほど 0 次回折光の回折効率は小さく、1 次回折光の回折効率は大きくなる。よって、作製したホログラム (基板番号 20200610) の加工深さは 1500\AA より浅いことがわかった。

5.2 作動距離 (WD) と露光範囲

その後、基板番号 20200610 と同一露光条件と作製方法で作製したホログラムについて、露光範囲 (ホログラムの直径) が安定しないということがわかった。この原因として、作製時の作動距離 (WD) が一定でないことが考えられた。露光時の WD について、露光面にピントを合わせ

る際、まず試料台ステージ z 軸にて大まかに合わせ、その後細かい調整は WD の値を調整することで行っていた。これは試料台 z 軸は SEM 画像を見ながらの変更ができないためである。そのため作製するごとに WD が異なる値となっていた。

露光範囲が一定でないことは加工深さに影響を与える。加工深さに大きな影響を与えるドーズ量は、単位面積あたりに照射する電荷量であり、Vectorworks 上で設定したドーズ時間から計算されるドーズ量は露光範囲が 2mm×2mm であることを前提として算出されている。そのため、露光範囲が前提と異なると、使用する CAD ソフト (Vectorworks) 上で計算されるドーズ量と実際に露光されるドーズ量が異なってしまう。

以上から、Vectorworks 上で計算されるドーズ量で実際の露光を行うためには、露光範囲が 2mm×2mm となる必要がある。2mm×2mm のフィールドサイズを露光するための条件を確立するため、それまで作製したホログラムについて作製時の WD と作製したホログラムの直径の関係を調査した。

結果を図 10 に示す。

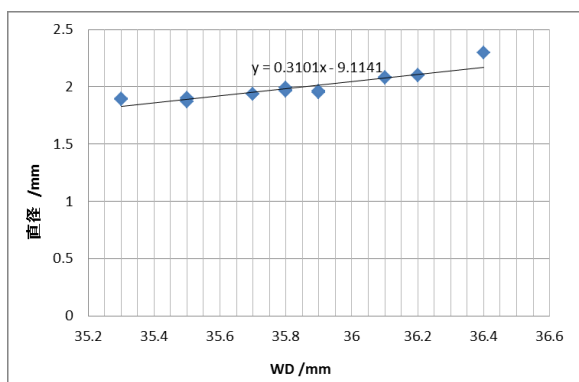


図 10: 作製時の WD とホログラムの直径の関係

WD と露光範囲の関係について、生じるばらつきの原因として、PC-SEM 上では電子ビーム露光装置の WD は少数第一位までしか表示されず、それより小さい値は制御できない。また、装置を使用する日によって装置の調子が変わり、露光に影響を与える。

以上のことを踏まえて、WD と露光範囲の関係を図 10 上に線形近似することで傾向を明らかにした。

線形近似直線から、WD を 35.8mm として露光を行うことで、露光範囲の大きさを設定値の 2mm×2mm の 7% 以内とすることができることがわかった。

5.3 露光範囲と回折効率

電子線レジストへの加工深さに大きな影響を与える露光時のドーズ量について、露光時の露光範囲に影響を受

けると考察した。そこで、作製したホログラムについて露光範囲と回折効率の関係について調査した。

作製したホログラムについて、露光範囲 (ホログラムの直径) と回折効率の関係を図 11、図 12 に示す。

理論値として露光範囲を考慮したときのドーズ量で得られる加工深さを図??から読み取り、その時の回折効率を算出した。同一グラフ上にプロットし、その傾向を比較し評価した。

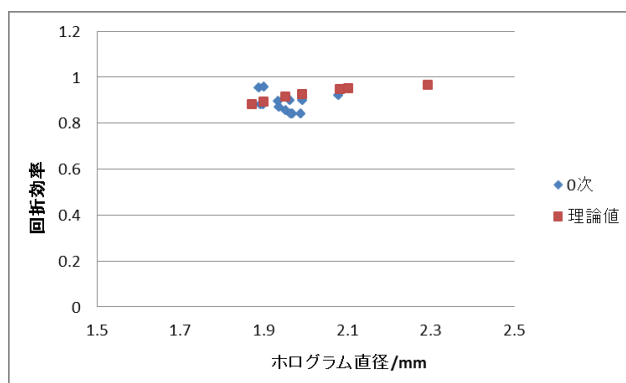


図 11: 露光範囲と回折効率 (0 次回折光)

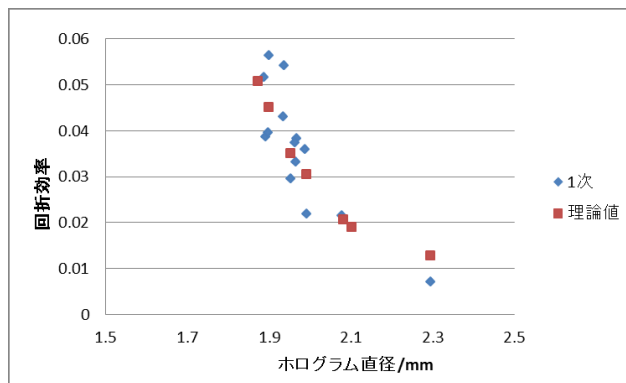


図 12: 露光範囲と回折効率 (1 次回折光)

図 11 より、ホログラムの直径が大きくなるにつれて 0 次回折光の回折効率は大きくなり、図 12 より、+1 次回折光の回折効率は小さくなることが確認できた。これは、加工深さに大きな影響を与える露光時のドーズ量が単位面積あたりに照射される電子の量であることから、露光範囲が大きくなると実際に露光されるドーズ量が小さくなり、加工深さが浅くなる。それにより 0 次回折光の回折効率は大きくなり、+1 次回折光の回折効率は小さくなる。

また、理論値と比較し、特に+1 次光について露光範囲による回折効率についての傾向が一致していることがわかった。

5.4 目的のホログラムの作製

以上をふまえ、目的の加工深さを得るために WD を 35.8mm として露光を行った。
作製したホログラムの観察結果を図 13 に、回折効率の測定結果を図 14 に示す。

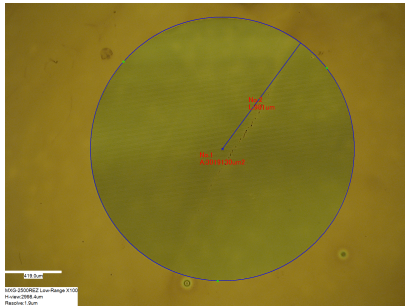


図 13: ホログラムの観察結果 (基板番号 20210115(1))

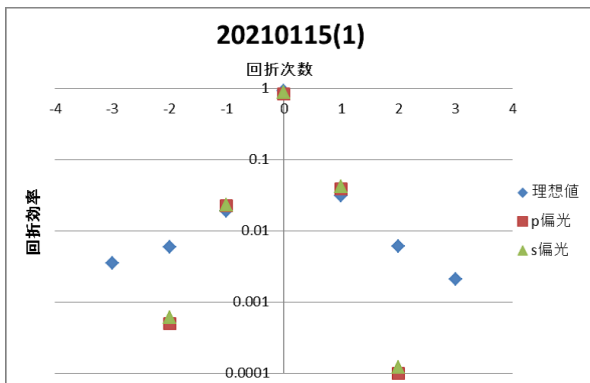


図 14: 回折効率 (基板番号 20210115(1))

WD を 35.8mm として作製したホログラム (基板番号 20210115) について、直径 1.97mm となった。また加工深さについて、回折効率のグラフ図 14 より、+1 次光について、理想値と一致していることから目的の加工深さを得られていると判断した。
この時の回折光の強度分布 (p 偏光入射時+1 次光) を図 15 に示す。

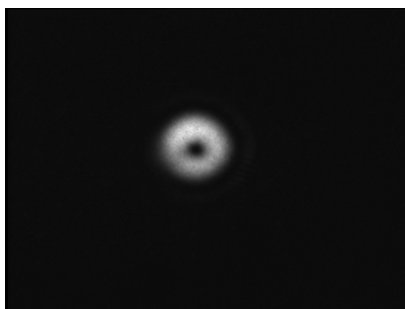


図 15: 強度分布 (基板番号 20210115(1)+1 次光)

目的のホログラムによる理想的な回折光は真円となる。しかし、図 15 より、回折光は真円ではなく、異方性が見られる。先行研究によって、この異方性はホログラムのゆがみによって発生することが明らかにされた。電子ビーム露光装置では、電子ビームの偏向の各軸について独立した歪みが生じるため、これによりホログラムにゆがみが生じてしまう。回折光を理想的な真円とするためには、加工装置の歪みを相殺するようホログラムパターンを補正する必要がある。

6 まとめ

本研究では、電子線露光により光子の軌道角運動量重ね合わせ状態検出用ホログラムを作製し、回折光強度分配の最適化を行った。先行研究によって調査された加工特性データを用いて作製したホログラムについて、加工深さを推定するために複数の回折次数の回折効率の測定を行った。

1. 先行研究を基に作製したホログラムについて回折効率を測定した結果、加工深さが設計に比べて浅いことが分かった。原因について、露光範囲によるドーズ量への影響と推測した。
2. 露光範囲のずれは作動距離 (WD) のずれによるものと推測された。加工時の WD とホログラムの直径の関係を調査した結果、WD を 35.8 mm として露光を行ったとき直径 2 mm のホログラムが作製できることがわかった。
3. 露光範囲と回折効率の関係について調査し、露光範囲が大きくなるにつれて 1 次光の回折効率が低下することを確認した。また、直径が 2 mm の時、回折効率は理想値とほぼ一致した。
4. 強度分布の撮影よりゆがみが現れていることがわかった。

参考文献

- [1] 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)
- [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] 亀井健, 「電子線露光による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作製」, 電気通信大学修士論文, (2015)
- [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)