

# 電子線レジストを用いたダマン回折格子による光渦配列の生成

発表者：1710236 小原 颯平 指導教員：宮本 洋子

## 1 はじめに

本研究は、電子線レジストを用いてダマン回折格子を作製し、光渦配列を生成すること目的とする。ダマン回折格子は、透過光に  $0$  と  $\pi$  の位相変調を加えるバイナリー位相平面回折格子であり、明るさが等しい回折光を 1 次元または 2 次元的に配列させる回折格子である。ダマン回折格子の中心に位相特異点を組み込むと、回折光のそれぞれが次数の異なる位相特異点をもつ光渦となる。位相特異点は光波の位相を定義できない点であり、まわりを囲む閉経路上の位相勾配の積分値を  $2\pi$  で割った整数値が次数である。ダマン回折格子の作製には電子線レジストを塗布したガラス基板を用い、電子線を照射して現像することによって凹凸を作製し、位相変調素子とする。作製したダマン回折格子に光を入射させ、回折光の強度分布および位相分布を観察して、目的の光渦配列の生成を確認する。

## 2 光渦配列を生成するダマン回折格子

ダマン回折格子は入射光に対し、 $0$  と  $\pi$  の 2 値の位相変調を与えて、有限個の明るさが等しい回折格子を生成する平面回折格子である。また、光配列を生成するダマン回折格子の中心に位相特異点を組み込むと、回折光の次数によって異なる次数の位相特異点をもつ光渦配列を生成する。

### 2.1 ダマン回折格子

ダマン回折格子による光配列を生成する原理について示す。平面回折格子の複素振幅透過関数  $T(x)$  は周期関数であり、周期を  $\Lambda$  とすると以下の式で表せる。

$$T(x) = \sum \exp\left(i\frac{2\pi m}{\Lambda}x\right) A_m \quad (1)$$

$g_{in}$  を回折格子入射直前の光波とすると、格子透過直後の光波  $g_{out}$  は以下の式で表せる。

$$g_{out} = T(x)g_{in} = \sum \exp\left(i\frac{2\pi m}{\Lambda}x\right) A_m g_{in} \quad (2)$$

求めた式において  $x$  方向の波数  $k_x (= 2\pi/\Lambda)$  と波数ベクトルの大きさ  $k (= 2\pi/\lambda)$  の値は決まっているので、各次数の回折光の角度  $\theta_m$  が決まる。また、回折次数  $m$  が大きくなるにつれて  $\theta_m$  が大きくなり、配列の位置が変化する。

### 2.2 位相特異点

位相特異点は、光波の位相を定義できない点であり、まわりを囲む閉経路上の位相勾配の積分値  $m$  を次数として、

$$\oint_C \Delta\theta \cdot dl = 2\pi m \quad (m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots) \quad (3)$$

のように表され、位相  $\theta$  の分布上に  $2\pi m$  の段差をつくる。また、位相特異点では位相を定義できないので、光強度がゼロとなる。

## 3 ダマン回折格子の作製

本研究では  $7 \times 7$  の配列を形成するダマン回折格子を作製する。 $7 \times 7$  のダマン回折格子を形成するには、 $\pi$  の位相変調を与え、 $0.23191$  周期、 $0.42520$  周期、 $0.52571$  周期の位置で位相変調量が切り替わることが条件となる。[2]

### 3.1 露光パターン設計

本研究では、ソフトウェア MATLAB を用いてダマン回折格子の露光パターンを作成した。図 1、図 2 に作製するダマン回折格子を示す。

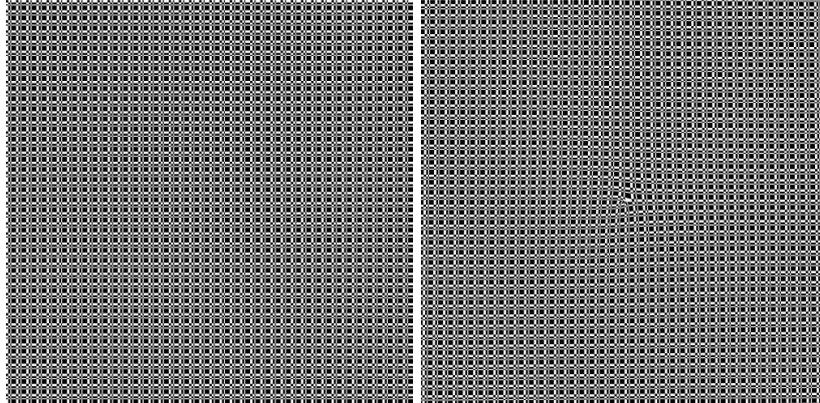


図 1: ダマン回折格子

図 2: 光渦配列を生成する回折格子

### 3.2 必要な加工深さとドーズ量

ガラス基板にレジスト膜を塗布し、電子線露光により加工深さ  $l$  の反射型ホログラムを作製したとすると加工深さ  $l$  は

$$l = \frac{\pi}{2k \cos \theta} = \frac{\lambda}{4 \cos \theta} \quad (4)$$

波長  $\lambda$  を測定に使用する He-Ne レーザーの波長の値、回折格子に入射させる光の角度を  $\theta = 0$  とすると、必要な加工深さは  $l = \lambda/4 = 1582\text{\AA}$  と求められる。

次に求めた加工深さから必要なドーズ量を定める。先行研究によって求められた電子線レジスト (gL1000-5) の加工特性 [5] からドーズ量を  $19\mu\text{C}/\text{cm}^2$  として露光を行った。

## 4 回折光の観察

目的の回折格子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の蒸着の手順が必要となる。しかし、本実験ではこの手順を行わず透過型ホログラムとして測定を行った。

透過型ホログラムとして扱うときの位相変調量  $\phi$  は、式??より加工深さは  $l = \lambda/4$  であるから、電子線レジストの屈折率を  $n_g = 1.5$ 、真空中の屈折率を  $n = 1.0$  とすると  $\phi = 0.25\pi$  と求められる。

### 4.1 強度分布測定

本実験で使用した光学系を図 3 に示す。測定は入射光を p 偏光、s 偏光で行うことから偏光状態を制御するために偏光板を挿入する。

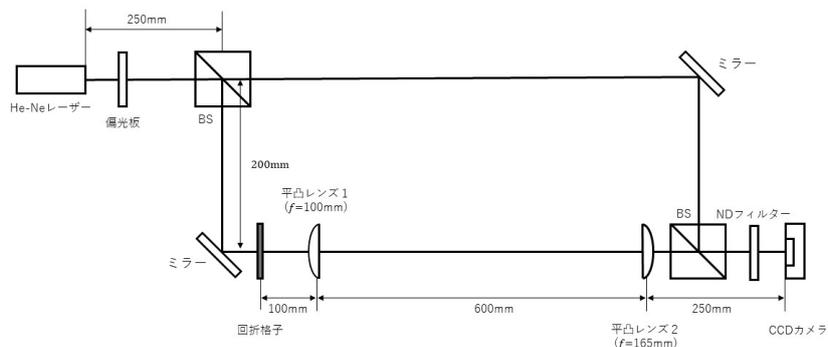


図 3: 強度分布測定に用いる光学系

## 4.2 光配列の強度分布

各偏光状態における光配列を生成するダマン回折格子による強度分布を図4、図5に示す。

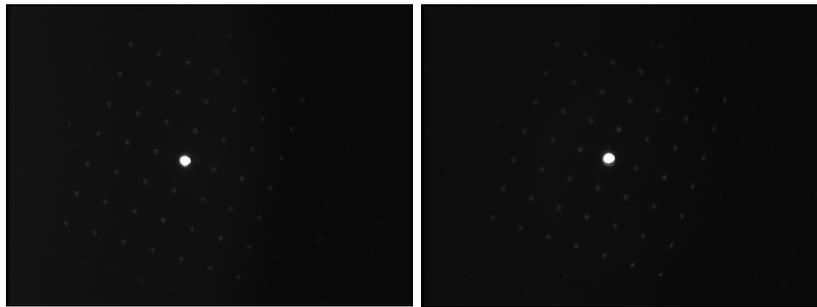


図4: p 偏光での光配列の強度分布 図5: s 偏光での光配列の強度分布

図4、図5より、光配列を生成するダマン回折格子により生じる7×7光配列が観察できた。

各集光位置での輝度値の分布を十分に含む同一の範囲の輝度値の和を求めてパワーとした。p 偏光、s 偏光それぞれの縦軸方向、横軸方向のパワーの値と各偏光でのパワーの最大値との割合を表1にまとめ、回折次数とパワーの関係を図6に示す。

表1: 光配列のパワー分布

次数	(-3,0)	(-2,0)	(-1,0)	(1,0)	(2,0)	(3,0)	(0,-3)	(0,-2)	(0,-1)	(0,1)	(0,2)	(0,3)
p 偏光	3401	3378	3543	3683	3215	2318	3117	3506	3349	3632	3349	3184
割合 (%)	92.3	91.7	96.2	100	87.3	62.9	84.6	95.2	90.9	98.6	90.9	86.5
s 偏光	2923	3202	3541	2986	3105	2476	3044	3277	3219	3721	3049	2846
割合 (%)	78.6	86.1	95.2	80.2	83.4	66.5	81.8	88.1	86.5	100	81.9	76.5

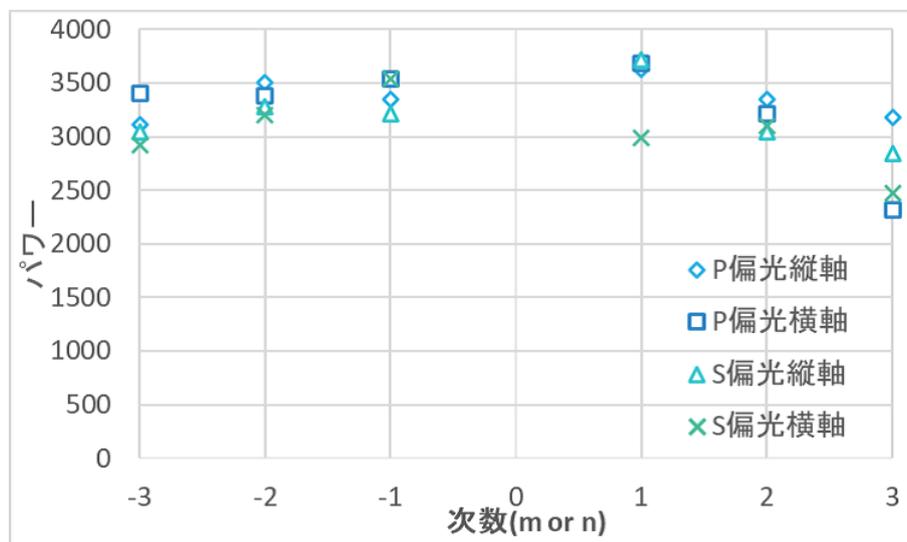


図6: 光配列の強度分布

表1、図6より、作製したダマン回折格子は各偏光での7×7の光配列の最大パワーに対して60%以上のパワーを持つ配列を生成していることが確認できた。

## 4.3 光渦配列の強度分布

光渦配列を生成するダマン回折格子による強度分布を図7、コントラストを調整したものを図8に示す。

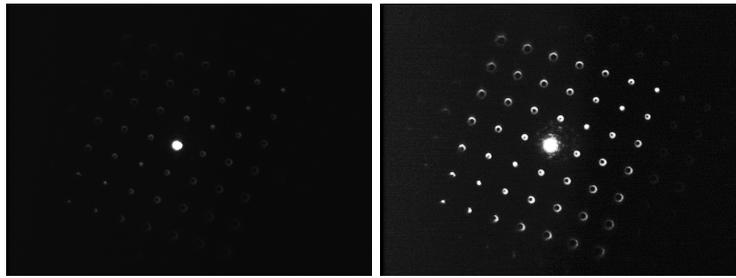


図 7: 光渦配列の強度分布

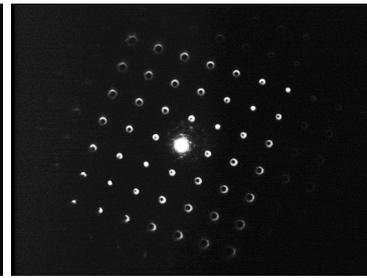


図 8: コントラスト調整強度分布

図 7 より、光渦配列を生成するダマン回折格子により生じる強度分布は、対角線上の回折次数のスポットを除いて中心が暗い強度分布が観察でき、対角線の向きに並ぶスポットのビームの形が似ていることがわかった。

#### 4.4 干渉縞の観察

本実験ではレーザーから出射した光を BS で取り出して参照光とし、この参照光とダマン回折格子を透過した光を干渉させ、CCD カメラで干渉縞を観察した。

光渦配列を生成するダマン回折格子による干渉縞を図 9、干渉縞の拡大図を図 10 に示す。

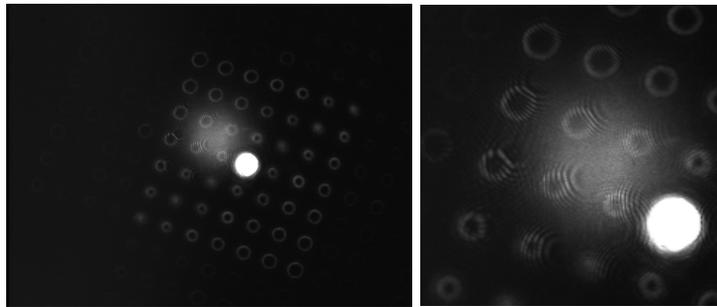


図 9: 光渦配列の干渉縞

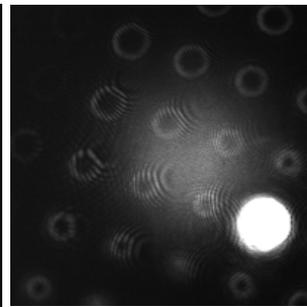


図 10: 干渉縞の拡大図

干渉縞を見ると、ドーナツ型のビームに生じた黒い筋の干渉縞が観察できた。また、 $(-1,0)$  次光では 1 本だった縞が 2 本、 $(-2,0)$  次光では 1 本の縞が 3 本、 $(-3,0)$  次光では 1 本の縞が 4 本に枝分かれした干渉縞が観察することができた。このことから回折光に光渦の発生と位相特異点の次数を確認することができた。

## 5 まとめ

本論文では、電子線レジストを用いてダマン回折格子を作製し、光渦配列を生成を確認した。

光配列を生成するダマン回折格子は、 $7 \times 7$  の光配列の生成を確認し、回折次数間のパワーの比較を行った。

光渦配列を生成するダマン回折格子は、対角線上の回折次数を除くスポットに光渦と考えられる中心の暗い強度分布を確認し、参照光との干渉縞に生じた枝分かれにより、光渦の発生と位相特異点の次数を推定できた。

## 参考文献

- [1] H.Dammann and K.Görtler, "High-efficiency in-line multiple imaging by means of multiple phase holograms", *Optics communications* **3**, 312, (1973)
- [2] Changhe Zhou and Liren Liu, "Numerical study of Dammann array illuminators", *Applied optics* **34**, 5961, (1995)
- [3] Ignacio Moreno, et al., "Encoding generalized phase functions on Dammann gratings", *Optics letters* **35**, 1536, (2010)
- [4] 荒井 雅章, 「空間光変調器を用いたダマン回折格子による光渦配列の生成」, 電気通信大学卒業論文, (2020)
- [5] 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成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)