

焦点距離と焦点深度を同時制御可能な レーザー加工用焦点制御バイナリ回折レンズ

三重大学 大学院工学研究科 電気電子工学専攻
准教授 元垣内 敦司
(平成 29 年度 一般研究開発助成 AF-2017213)

キーワード：焦点分布制御，回折レンズ，レーザー加工

1. 研究の目的と背景

レーザー光は、指向性が高いため、通信、記録、加工、計測など様々な分野で利用できる。このように、レーザー光を制御するための光学素子は、大きな注目を集めている。凸レンズやアキシコンレンズなどの光学レンズは、屈折によってレーザー光の分布を任意に制御するために使用される。

レンズの焦点距離は、その屈折率と曲率半径の関数である。レンズの組み合わせにより、さまざまなビームパターンを生成できる。レーザービームが凸レンズに入射すると、すべての光は単一の点に集束される。対照的に、アキシコンレンズを透過したレーザービームの波面は、回転対称軸によって伝播軸が与えられる円錐面によって与えられるので、円筒状またはリング状のビームを得ることができる。高い光強度の領域は、伝播軸上の干渉によって生成される。さらに、アキシコンレンズは焦点深度が深いため、アキシコンレンズの焦点距離を正確に制御する必要はなく、焦点深度は、円錐面の頂角のサイズによって制御される。

光学レンズは、曲率があるため、小型化が困難である。対照的に、回折レンズの焦点距離は屈折率と曲率半径に依存せず、レンズの表面に形成された構造によって制御できる。したがって、回折レンズは、光学レンズよりも焦点分布を制御する自由度が高い。さらに、回折レンズは曲率がないため、光学レンズよりも薄くできる。さらに、紫外領域の材料で製造することもできる。そこで本研究では、回折レンズの特徴に注目しながら、回折レンズの作製に関する研究を行ってきた。回折レンズは電子線リソグラフィーを使用して製造できる。さらに一度構造の形状が決まれば、大量生産および大面積構造の製造を行うために、ナノインプリント技術に移行するのが比較的簡単である[1]。さらに、波長のオーダーの厚さを有する回折レンズを作製することが可能である。

回折レンズは 1875 年にゾーンプレートとして Solet らによって最初に開発された[2]。光の回折効率を改善するために、キノフォームは Lesem らによって開発された[3, 4]。その後、断面が階段状のマルチレベル回折光学素子の開発により、コンピュータ支援設計と大面積集積技術に基づくバイナリ光学素子が開発された[5]。マルチレベルグレーティングの構造により、キノフォームと同様の光学効果を得ることが可能である[6, 7]。ブレース構造と同

等のサブ波長構造は、Lalanne らによって提案されたフレネルレンズをバイナリサブ波長構造に変換することによってレンズ構造を作製することを可能にした[8, 9]。さらに、この構造により、色消し回折レンズを製造することができ[10]。

我々の研究グループでは、発光ダイオード (LED) の配光を制御するためのバイナリ型回折レンズとして LED 光を集束するバイナリ回折凸レンズ[1, 11]と LED 照明を拡散するバイナリ回折凹レンズ[12] の 2 種類のレンズを作製した。これらのレンズにはいくつかのサブミクロン構造が含まれているため、その製造には電子ビームリソグラフィー技術を使用する必要がある[1, 11, 12]。一般に、フォトリソグラフィとナノインプリント技術は、大面積で低コストの量産に向いているが、モールドやマスクを必要とする。電子線リソグラフィーを使用すると、作製には時間を要するが、トライ&エラーを繰り返しながら、目標となる最適な構造を得ることができる。

レーザー加工では、532nm や 355nm などの YAG レーザーの高次高調波の短波長レーザーを使用して、高アスペクト比で高アスペクト比の高深度に穴をあけることは困難である。これは、凸レンズの曲率半径またはアキシコンレンズの頂角を介して焦点距離と焦点深度を制御することが困難なためである。

これに対して我々の研究グループでは 1 枚の平らな基板上に凸レンズとアキシコンレンズの両方として機能する回折レンズ構造を設計、製作した。このレンズを、焦点分布制御型回折レンズと呼ぶ。これは、焦点距離と焦点深度を同時に制御できる光学素子である。バイナリ回折構造を持つアキシコンレンズは以前に報告されている[13-17]。これまでのほとんどの研究では、アキシコンレンズの焦点距離は輪帯半径の二乗に比例する。しかし、我々が提案した構造は、同じ基板上で凸レンズとアキシコンレンズの両方の機能をハイブリッド化するものである。本研究ではこのような焦点分布制御型回折レンズの構造について設計、作製、光学的特性評価を行い、レジストパターンのレンズ構造で焦点距離と焦点深度が制御できることを確認することを目的として研究を行う。更に、レーザー加工用レンズへの応用を目指し、石英ガラス基板をドライエッチングした石英ガラス製の焦点分布制御型回折レンズの作製も行ったので、これについても報告する。

2. レンズの設計及びシミュレーション

2.1 レンズの設計

回折格子と回折レンズの両方を使用する理想的なフレネル回折レンズに基づいて、焦点分布制御バイナリ回折レンズを設計した。図1に、設計したレンズの断面図と上面図の概略図を示す。

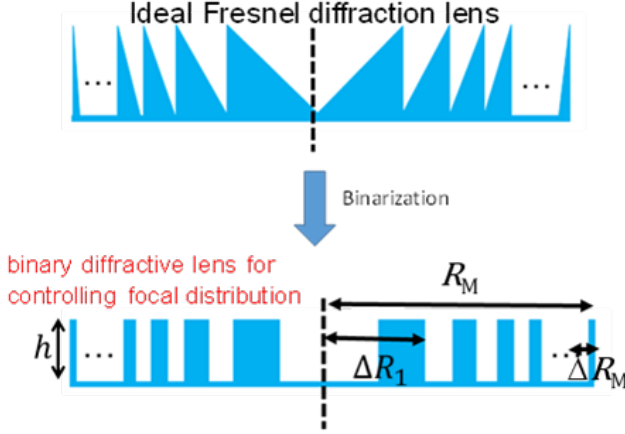


図1 焦点分布制御型回折レンズの模式図

この構造はフレネルレンズに基づいており、バイナリ構造で構成されている。フレネルレンズ構造からバイナリ構造への変換方法の詳細は、[11, 12]の研究に記載されている。この図では、中心にある第1輪帯の輪帯間隔 ΔR_1 と、レンズの M 番目の輪帯を表す最外周位置にある輪帯間隔 ΔR_M は、シミュレーションで使用される独立変数で、 R_M はレンズの半径である。入射光の波長は $\lambda_0 = 532 \text{ nm}$ である。レンズの高さ h は次のように表すことができる。

$$h = \frac{\lambda_0}{2(n-1)} \quad (1)$$

ここで、 n はレンズ媒体の屈折率である。これは、高さ方向の位相差を π に調整して0次光を除去することに相当する。

考案したレンズ構造によって生成される1次回折光の位相シフトは、 ΔR_1 、 ΔR_M 、 R_{\max} 、および λ_0 の独立したパラメータの組み合わせで計算した。位相シフトの輪帯半径 r の依存性は、次の関係によって与えられる。

$$\phi_d(r) = k_0(ar + br^2) \quad (2)$$

ここで、 $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ は波数を示す。(2)式で表されるレンズは回折格子と回折レンズの位相シフトを組み合わせたもので、第1項は回折格子の1次回折光の位相シフトを表し、第2項は回折レンズの位相シフトを表す。係数 a および b は、 ΔR_1 、 ΔR_M 、 R_M 、および λ_0 によって決定される。 m 番目の輪帯の輪帯半径 r_m は、 2π に調整された

半径方向の位相差を表す次の式によって満たされる。

$$\phi_d(r_m) = 2\pi m \quad (3)$$

式(2)、(3)から、輪帯半径 r_m は次式で求まる。

$$r_m = \frac{-a + \sqrt{a^2 + 4bm\lambda_0}}{2b} \quad (4)$$

輪帯間隔 Δr_m は次式で表される。

$$\Delta r_m = r_m - r_{m-1} \quad (5)$$

(5)式から、それぞれ $\Delta R_1 = \Delta r_1$ および $\Delta R_M = \Delta r_M$ である。 m の最大値 M の場合、位相シフト ϕ_d は次の式で表される。

$$\phi_d(R_M) = \frac{2\pi}{\lambda_0}(aR_M + bR_M^2) = 2\pi M \quad (6)$$

$$aR_M + bR_M^2 = M\lambda_0 \quad (7)$$

同様に $M-1$ に対して、

$$R_{M-1} = R_M - \Delta R_M \quad (8)$$

$$\phi_d(R_{M-1}) = \frac{2\pi}{\lambda_0}(aR_{M-1} + bR_{M-1}^2) = 2\pi(M-1) \quad (9)$$

$$a(R_M - \Delta R_M) + b(R_M - \Delta R_M)^2 = (M-1)\lambda_0 \quad (10)$$

(6)式と(7)式の差から、係数 b が次式のように求まる。

$$a\Delta R_M + b(2R_M \cdot \Delta R_M - \Delta R_M^2) = \lambda_0 \quad (11)$$

$$b = \frac{\lambda_0 - a\Delta R_M}{\Delta R_M(2R_M - \Delta R_M)} \quad (12)$$

逆に、中央部の回折条件は次のとおりである。

$$\phi_d(r_1) = \frac{2\pi}{\lambda_0}(ar_1) = \frac{2\pi}{\lambda_0}(a\Delta R_1) = 2\pi \quad (13)$$

$$a = \frac{\lambda_0}{\Delta R_1} \quad (14)$$

回折限界のため、 ΔR_M は入射光の波長よりも大きくなる。対照的に、 ΔR_1 は、レンズ構造内の0次光の透過しない程度の大きさにする。位相シフト ϕ_d と r の関係を図2(a)

に示す。(2)式から、 r_m が増加すると回折格子構造の位相シフトは線形的に増加する。逆に、回折レンズ構造の位相シフトは、 r_m が増加するにつれて放物線状に増加する。これらの位相シフトは、図2(a)に示すように、設計されたバイナリ回折レンズの位相シフトを生成するために足し合わせる。バイナリ回折レンズ構造の中央部分はグレーティング構造に似ているが、外側の部分は回折レンズ構造に似ている。

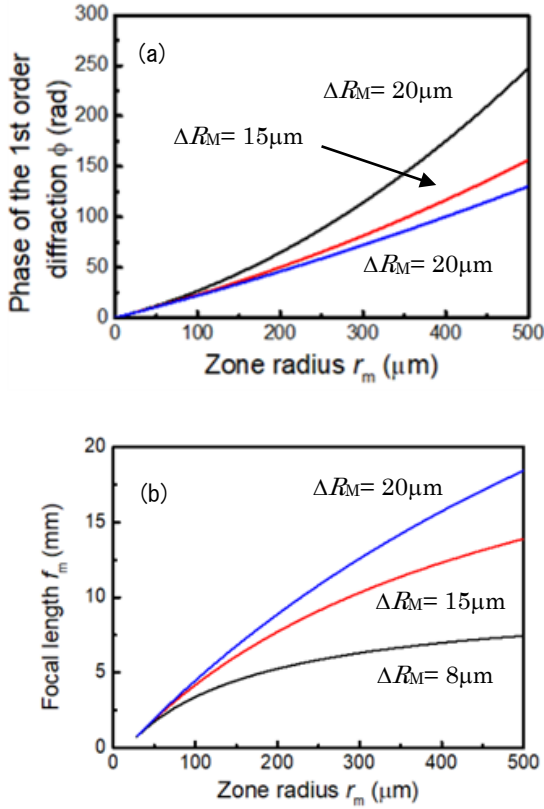


図2 輪帯半径と1次回折の位相シフト(a)と焦点距離(b)の関係

r_m と r_{m-1} のそれぞれについて、各輪帯からの光路 P_m と P_{m-1} の差は、(15)式を満たす。したがって、輪帯間隔 $\Delta r_m = r_m - r_{m-1}$ の焦点距離 f_m は、(17)式から得られる。焦点距離は(17)式によって決定される。(17)式から、各輪帯の焦点距離は r_m 、 r_{m-1} 、および λ_0 によって決定される。一方、焦点深度は b の値に依存し、(12)式に示すように、 b の値は R_M 、 ΔR_1 、 ΔR_M および λ_0 によって決定される。 R_M 、 ΔR_1 、 ΔR_M が決定されると、レンズ内のすべての構造が決定される。したがって、焦点距離と焦点深度は独立して決定することができない。図2(b)は、焦点距離とゾーン半径の関係を示す。 $\Delta R_M = 8\mu\text{m}$ の場合、焦点距離は輪帯半径に対してほぼ一定(6.8 mm)である。逆に、 $\Delta R_M = 15\mu\text{m}$ および $20\mu\text{m}$ の場合、焦点距離は輪帯半径とともに徐々に増加する。これらの結果から、 ΔR_M の値が小さいほど、回折レンズの効果が強いと推測できる。

$$P_m - P_{m-1} = \lambda_0 \quad (15)$$

$$(f_m + r_m)^{\frac{1}{2}} - (f_m + r_{m-1})^{\frac{1}{2}} = \lambda_0 \quad (16)$$

$$f_m = \frac{1}{2\lambda_0} \sqrt{(r_m^2 - r_{m-1}^2)^2 - 2\lambda_0^2 (r_m^2 + r_{m-1}^2) + \lambda_0^4} \quad (17)$$

2・2 シミュレーション結果

数値計算ソフトMATLABで3次元高速フーリエ変換ビーム伝搬法(FFT-BPM)によりシミュレーションを行った。この方法では、ヘルムホルツ方程式を近軸近似で解く。

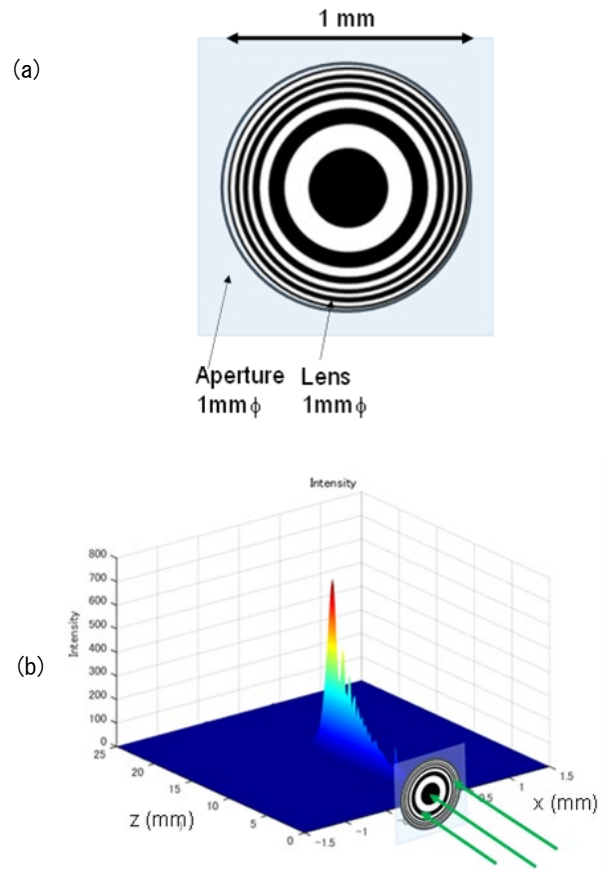


図3 レンズとアパーチャの配置(a)とシミュレーションの例(b)

図3(a)は、 $\Delta R_1 = 30\mu\text{m}$ 、 $\Delta R_M = 15\mu\text{m}$ 、 $\lambda_0 = 532\text{ nm}$ 、および $R_M = 500\mu\text{m}$ の場合についての3次元シミュレーションの結果を示す。図3(a)に示すように、回折レンズの表面に直径1mmのアパーチャを取り付け、入射光には平面波を使用した。図3(b)に示すように、 $x = -0.5 \sim 0.5\text{ mm}$ の範囲でBPMシミュレーションを実行した($\Delta R_M = 15\mu\text{m}$)。シミュレートされたレンズは、 $x = 0\text{ mm}$ 、 $z = 12.8\text{ mm}$ の位置で強い強度が観測された。 $z = 12.8\text{ mm}$ を超えると、強度は急速に減少する。一方、 $z = 12.8\text{ mm}$ の前では、

強度は z とともに徐々に増加する。これは、アパーチャの端でのフレネル回折によるものと考えられる。異なる ΔR_M ($\Delta R_M = 8, 15, \text{および } 20\mu\text{m}$) の $x = 0$ における z 方向の詳細な分布を図 4(a) に示す。

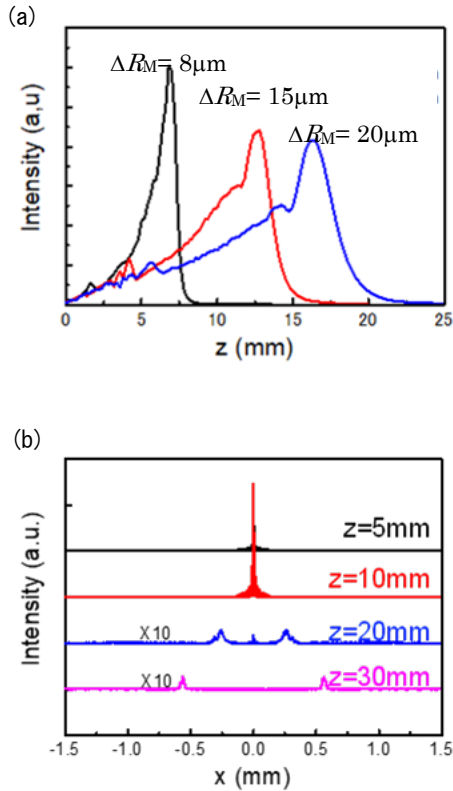


図 4 シミュレーション結果、 z 方向 ($x = 0 \text{ mm}$) (a) と x 方向 (b)

図 3(b) に示すように、各 ΔR_M の強度分布には強いピークがあり、強度分布は左右非対称である。たとえば、 $\Delta R_M = 15\mu\text{m}$ の場合、ピークは 12.8 mm にある。 $z = 0 \text{ mm}$ と $z = 12.8 \text{ mm}$ の間では、アパーチャの端でのフレネル回折の影響により、 z とともに強度が徐々に増加する。 $\Delta R_M = 8$ および $20 \mu\text{m}$ でも同様の結果が得られる。 ΔR_M が増加すると、ピーク位置はレンズから遠方に離れてシフトする。 $\Delta R_M = 8\mu\text{m}$ の場合、鋭いピークが得られる。これらの結果から、 $\Delta R_M = 8\mu\text{m}$ の場合、回折レンズの効果が支配的となり、 6.8 mm でシャープなピークが得られた。一方、 $\Delta R_M = 15$ および $20 \mu\text{m}$ の場合、回折格子の効果は徐々に増加して、より広い分布が z 方向に得られる。図 4 (b) は、 $z = 5, 10, 20, 30 \text{ mm}$ の x 方向の強度分布を示す。 $z = 5$ および 10 mm の場合、光軸上に 1 つのピークが得られる。一方、 $z = 20$ および 30 mm の場合、光軸の外側に非常に弱い 2 つのピークが得られる。

3. レンズの作製と光学的特性評価

3.1 レンズの作製方法及び評価方法

本研究では電子線描画と現像により作製したレジスト製レンズ (以下レジストレンズと呼ぶ。) と電子線描画と反応性イオンエッチングにより作製した石英ガラス製レンズ (以下ガラスレンズと呼ぶ。) の 2 種類を作製した。作製には厚さ 1 mm の石英ガラス基板を使用した。まずレジストレンズの作製方法について述べる。電子ビーム (EB) レジストをスピコーティングする前に、ヘキサメチルジシラザン (HDMS) を石英ガラス基板の表面にスピコーティングして、基板と EB レジストの間の密着性を向上させる。表面に EB ポジ型レジスト (ゼオン、ZEP-520A) をスピコートした後、プリバークを行った。続いて、EB レジストに帯電防止剤をスピコートした。電子ビームリソグラフィ (EBL) 装置 (Crestec 製 CABL-8000、三重大学所有) には、 ZrO / W 熱電界放出陰極を使用し、加速電圧は 30 kV である。電子線を露光後、レジストを現像して、所望のレジストレンズができる。

一方、ガラスレンズはガラス基板に EB レジストを塗布する前に反応性イオンエッチング用のマスクとして Cr を堆積した。この Cr 薄膜上に EB レジストを塗布して、EBL 装置 (日本電子製、JBX-6300FS、 ZrO / W 熱電界放出陰極、加速電圧 100 kV 、名古屋大学所有) によりレンズパターンを作製した。その後、反応性イオンエッチング装置 (サムコ製、RIE-10NR、名古屋大学所有) を用い、 CF_4 により石英ガラスをエッチングした後、残った Cr マスクと EB レジストを除去してガラスレンズを作製した。

光学的特性評価は図 5 に示すように、 x 方向と z 方向の遠視野透過強度分布を、緑色レーザー ($\lambda = 532 \text{ nm}$) を用いて測定した。 x 方向では、光の強度分布を明確に測定するために、ナイフエッジ法により行った。レンズの表面に直径 $1000\mu\text{m}$ のピンホールを取り付けてレンズの中心に合わせ、入射光がレンズ領域のみを照らすようにした。 x 方向と z 方向の解像度は、それぞれ 0.02 mm と 0.25 mm である。

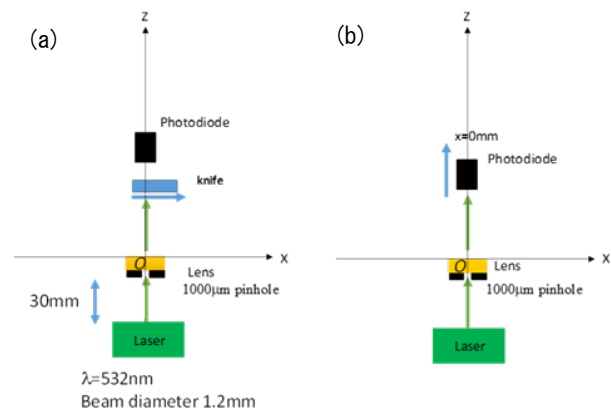


図 5 光学的特性評価の模式図 x 方向の測定(a) と z 方向の測定(b)

3.2 実験結果と考察

図 6 にレジストレンズの中央部と端部の走査型電子顕微鏡 (SEM) 画像を示す。設計値は $\Delta R_1 = 30\mu\text{m}$ および $\Delta R_M = 15\mu\text{m}$ でしたが、測定値は $\Delta R_1 = 29.9\mu\text{m}$ および $\Delta R_M = 15.0\mu\text{m}$ であり、設計通りのレジストレンズが作製できた。同様に、 $\Delta R_M = 8\mu\text{m}$ および $\Delta R_M = 20\mu\text{m}$ の設計値を持つレンズも作製できた。レジストの膜厚は、非接触式膜厚計を用いて 555nm と測定された。焦点分布測定用の光源には、ビーム径 1.2mm の緑色レーザーを使用した。 z 方向の測定では、フォトダイオードに $50\mu\text{m}$ のピンホールを取り付けた。

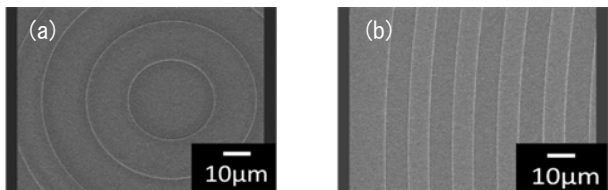


図 6 作製したレジストレンズの表面 SEM 像 中心部(a)と末端部(b)

図 7(a)は、 $\Delta R_M = 20, 15, \text{および } 8\mu\text{m}$ の 3 つのレンズの z 方向の強度分布を示す。図 3(c)で得られたものと同様に、非対称なプロファイルで 2 つのピークが観察された。16.4、12.0、および 7.0 mm のピークは、それぞれ、 $\Delta R_M = 20, 15, \text{および } 8\mu\text{m}$ のレジストレンズの焦点を表す。 ΔR_M が増加すると、ピーク位置はレンズから遠ざかる。この結果は、焦点距離が ΔR_M に依存することを示唆する。その他のピークは、アパーチャの縁によるフレネル回折によるものと考えられる。ナイフエッジ法では、光軸に垂直な面にナイフを置き、ナイフを x 方向に 10 mm 動かして強度を測定した。光の分布を測定する系は積分系であるため、実際の空間強度分布は、ナイフの変位を微分することによって取得できる。測定は、ナイフとレンズの間の距離を $z = 5, 10, 20, \text{および } 30\text{ mm}$ と変えながら行った。図 2(b)に示すように、前者のピーク位置はレンズの構造で制御できる。 $\Delta R_M = 8\mu\text{m}$ では、位相シフトが輪帯半径に対してほぼ一定であるため、ピーク位置はほぼ一定になり、鋭いピークが得られた。逆に、 $\Delta R_M = 15 \text{ および } 20\mu\text{m}$ では、各構造の回折によってピーク位置が徐々に変化する。このように、位相シフトはリングの半径によって徐々に変化するため、幅広いピークを得ることができる。図 7(a)では、図 4(a)のピークとショルダーに対応する 2 つのピークが存在している。ピークはレンズの焦点であり、ショルダーはアパーチャのエッジのフレネル回折から生じる。従って、レンズの構造を変えることで光軸上での強度分布が実現できることを確認できた。フレネル回折に起因するピークのため、半値全幅を正確に見積もることができていない。フレネル回折によるピークをなくす方法は今後検討する必要がある。

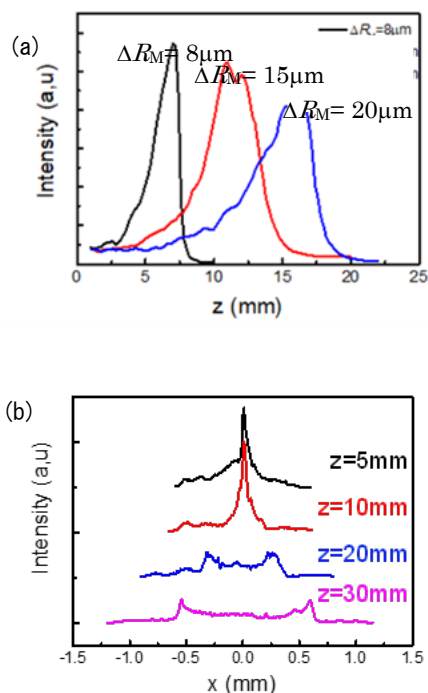


図 7 $\Delta R_M = 15\mu\text{m}$ のレジストレンズにおける光学的特性評価結果 z 方向 ($x=0\text{ mm}$) (a)と x 方向 (b)

一方、ガラスレンズについて、図 8 に中央部と端部の表面の原子間力顕微鏡 (AFM) 像を示す。中央部の輪帯間隔は $29.4\mu\text{m}$ 、端部の輪帯間隔は $7.4\mu\text{m}$ 、深さは 510nm で、設計値通りのレンズ構造を得ることができた。

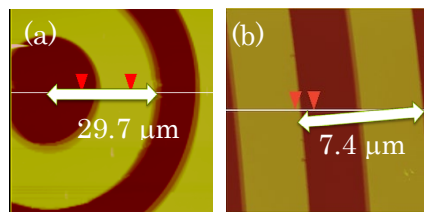


図 8 ガラスレンズの表面 AFM 像 中央部(a)と末端部(b)

図 9 に z 方向の強度分布を示す。レジストレンズの場合と同様に、 $z=6\text{mm}$ の焦点を得ることができ、シミュレーション結果とも同様の結果となった。以上の結果より、レジストレンズで得られた焦点分布特性がガラスレンズでも実現できたことから、レーザー加工用レンズとして応用できる可能性があることを示すことができた。

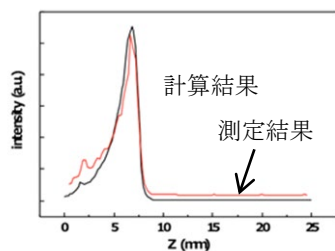


図9 ガラスレンズの光学的特性評価 (z 方向)

4. 結論

回折レンズと回折格子で実現した位相シフトにより、焦点分布を制御できるバイナリ型回折レンズを実現した。レンズ構造は、3次元FFT-BPM法を使用してシミュレーションを行い、レンズ端の輪帯間隔 ΔR_M の変化に関して、z軸に沿った強度分布の変化を調べた。 $x = 0 \text{ mm}$ で強い強度を確認し、 ΔR_M が増加すると、 $x = 0 \text{ mm}$ でのピーク位置がレンズからさらに遠方にシフトする。これらの結果は、レンズの周期構造を変更することにより、光軸上の強度分布を単一の平面レンズで制御できることを示している。実際にレジストレンズを作製して強度分布を測定し、シミュレーション通りの結果を得ることができた。更に、実際のレーザー加工にレンズを適用するには、ドライエッチングプロセスを使用して、 SiO_2 ガラス製のレンズを作製する必要があるため、ガラスレンズの作製も行ったところ、レジストレンズと同様の結果を得ることができ、レーザー加工用レンズとして応用できる可能性があることを示すことができた。

謝辞

本研究を実施するにあたり、設計、実験、結果のディスカッションでご協力いただいた三重大学 平松和政名誉教授、三重大学大学院工学研究科 井口陽介氏、加藤秀治氏、加藤亮氏、松尾和樹氏に感謝いたします。

本研究のうち、ガラスレンズ作製に関する部分については、名古屋大学微細加工プラットフォーム事業 (F-18-NU-0068, F-19-NU-0018) の支援を受けて行ったものである。電子線描画装置、反応性イオンエッチング装置、原子間力顕微鏡の利用に関してご協力いただいた名古屋大学大学院工学研究科加藤剛志教授、大島大輝助教に感謝いたします。

参考文献

1. A. Motogaito and K. Hiramatsu, "Fabrication of binary diffractive lens on optical films by electron beam lithography," G. Kostovski, Ed., *Advances in Unconventional Lithography (In Tech, Croatia)*, 139–148 (2011).
2. J. L. Soret, "Concerning diffraction by circular gratings," *Ann. Phys. Chem.* 156, 99–113 (1875) (in

German).

3. L. B. Lessem, P. M. Hirsch, and J. A. Jordan Jr., "The Kinoform: A new wavefront reconstruction device," *IBM J. Res. Dev.* 13(2), 150–155 (1969).
4. J. A. Jordan Jr., P. M. Hirsch, L. B. Lessem, and D. L. Van Rooy, "Kinoform lenses," *Appl. Optics* 9(8), 1883–1887 (1970).
5. G. J. Swason and W. B. Veldkamp, "Diffractive optical elements for use in infrared systems," *Opt. Eng.* 28(6), 605–608 (1989).
6. Y. Orihara, W. Klaus, M. Fujino, and K. Kodate, "Optimization and application of hybrid-level binary zone plates," *Appl. Optics* 40(32), 5877–5885 (2001).
7. K. Yamada, W. Watanabe, Y. Li, and K. Itoh, "Multilevel phase-type diffractive lenses in silica glass induced by filamentation of femtosecond laser pulses," *Opt. Lett.* 29(16), 1846–1848 (2004).
8. P. Lalanne, S. Astilean, P. Chavel, E. Cambril, and H. Launois, "Design and Fabrication of Blazed Binary Diffractive Elements with Sampling Periods Smaller than the Structural Cutoff," *J. Opt. Soc. Am. A* 16(5), 1143–1156 (1999).
9. P. Lalanne, "Waveguiding in Blazed-Binary Diffractive Elements," *J. Opt. Soc. Am. A* 16(10), 2517–2520 (1999).
10. B. H. Kleemann, M. Seesselberg, and J. Rudoff, "Design concepts for broadband high-efficiency DOEs," *J. Eur. Opt. Soc.* 3, 08015 (2008).
11. A. Motogaito, N. Machida, T. Morikawa, K. Manabe, H. Miyake, and K. Hiramatsu, "Fabrication of a binary diffractive lens for controlling the luminous intensity distribution of LED light," *Opt. Rev.* 16(4), 455–457 (2009).
12. A. Motogaito and K. Hiramatsu, "Fabrication of binary diffractive lenses and the application to LED lighting for controlling luminosity distribution," *Opt. Photon. J.* 3, 67–73 (2013).
13. Y. Matsuoka, Y. Kizuka, and T. Inoue, "The characteristics of laser micro drilling using a Bessel beam," *Appl. Phys. A* 84, 423–430 (2006).
14. Y. Kizuka, M. Yamauchi, and Y. Matsuoka, "Characteristics of a laser beam spot focused by a binary diffractive axicon," *Opt. Eng.* 47(5), 053401 (2008).
15. A. Sabatyan and S. A. Hoseini, "Diffractive performance of a photon-sieve-based axilens," *Appl. Opt.* 53(31), 7331–7336 (2014).

16. N. Davidson, A. A. Friesem, and E. Hasman, "Holographic axilens: high resolution and long focal depth", *Opt. Lett.* 16(7), 523–525 (1991).
17. J. Sochacki, S. Bara, Z. Jaroszewicz and A. Kolodziejczyk, "Phase retardation of the uniform-intensity axilens", *Opt. Lett.* 17(1), 7–9 (1992).
18. A. Vijayakumar and S. Bhattacharya, "Design of multifunctional diffractive optical elements," *Opt. Eng.* 54(2), 024104 (2015).
19. K. Huang, F. Qin, H. Liu, H. Ye, C. -W. Qiu, M. Hong, B. Luk'yanchuk, and J. Teng, "Planar diffractive lenses: Fundamentals, functionalities, and applications," *Adv. Mater.* 30, 1704556 (2018).
20. P. Wang, N. Mohammad and R. Menon, "Chromatic-aberration-corrected diffractive lenses for ultrabroadband focusing," *Sci. Rep.* 6, 21545 (2016).
21. C. Williams, Y. Montelongo, and T. D. Wilkinson, "Plasmonic metalens for narrowband dual-focus imaging," *Adv. Optical Mater.* 5, 170081 (2017).
22. C. Zheng, H. Zang, Y. Du, Y. Tian, Z. Ji, J. Zhang, Q. Fan, C. Wang, L. Cao, and E. Liang, "Realization of arbitrarily long focus-depth optical vortices with spiral area-varying zone plates," *Opt. Commun.* 414, 128–133 (2018).
23. P. Lalanne and P. Chavel, "Metalenses at visible wavelengths: past, present, perspectives," *Laser Photonics Rev.* 11(3), 1600295 (2017).
24. E. Arbabi, A. Arbabi, S. M. Kamali, Y. Horie, M. Faraji-Dana, and A. Faraon, "MEMS-tunable dielectric metasurface lens," *Nat. Commun.* 9, 812 (2018).