曲面への電子ビーム描画による光学素子用金型の作製技術

The Fabrication of Optical Element Molds through the Use of Electron Beam Lithography

増	⊞	修*	森	Ш	雅	弘*	茜	部	祐	-*	古	Ħ	和	$\Xi *$
Masu	uda,	Osamu	Mor	ikaw	a, N	Nasahiro	Aka	nabe	e, Yi	uichi	Fur	uta,	Kaz	umi

要旨

電子ビーム描画は、ブレーズ型回折格子や反射防止構 造、構造性複屈折素子などのサブ波長オーダーの微細構 造を実現するために有望な手段として注目されている。

我々はこの電子ビーム描画技術を応用することで、こ れらサブ波長オーダーの微細構造を曲面上に形成するこ とを可能にし、今回、高密度ブレーズ型回折格子付レン ズの試作を行ったので報告する。

Abstract

Electron beam lithography (EBL) has drawn great attention as a promising technique for the production of fine structures of sub-wavelength dimensions, such as blazed diffraction gratings, anti-reflection structures, and devices employing structural birefringence. This paper presents a new EBL technique that obtains fine structure on any curved surface of an optical element mold. This EBL technique has led to the successful fabrication of a densely blazed diffraction-grating lens.

1 はじめに

近年、ブレーズ型回折格子や反射防止構造、構造性複 屈折素子など、サブ波長オーダーの微細構造を製作する 方法が数多く提案されている。しかしながら、安定性、 製造コストなどの面で多くのものは製品としての実用化 に未だ至らないのが現状である。また、平面上であれば 半導体の製造技術を応用してパターニングすることは可 能であり、ブレーズ型回折格子においてはすでに報告さ れているものもある¹¹が、曲面上においては、コスト以 上に製作自体に困難を伴う。そこで我々は微細なパター ン形成が可能な電子ビーム描画技術に着目し、それを曲 面上に応用することを試みた。更にその形状を転写し金 型にすることで、表面に微細構造をもつ光学素子を1プ ロセスで製作し、これにより安定且つ低価格に実現する ことを考えた。

今回は、次世代のピックアップレンズで要求される高 密度ブレーズ型回折格子付レンズを、本技術を用いて試 作し、評価を行ったので報告する。

2 全体の加工プロセス

素子製作の全体の流れをFig.1に示す。まず機械加工で 母材に光学面を加工した。次に光学面にスピンコートで 均一なレジスト膜を得た後、電子ビーム描画装置でパ ターンを描画し、現像を経て母材光学面上に微細構造を 得た。尚、今回ここで用いた描画装置は、3次元基材上 への描画を可能にするために特別な改造を行ったもので ある。更に得られた微細構造付き母材上に電鋳を行い、 母材を取り外して周囲を精密加工することで金型を得た 後、射出成形により、目標の素子を試作した。



Fig.1 Process flow chart

3 レジスト塗布

曲面上でのスピンコートによるレジスト塗布のモデル は、円柱座標上任意の点 (r, θ ,z)においてラジアル 方向の速度 v、角速度 ω とした場合、次式で与えられる²⁾。

 $-\eta \frac{\partial v}{\partial z^2} = \rho \omega^2 r \text{Cos} \left[\theta\right] + \rho g \text{Sin} \left[\theta\right]$

ここで、 η はレジストの粘度、 ρ は濃度を表す。即 ち、遠心力と重力から受ける力のバランスがカギとな る。Fig. 2 は実際にスピンコートにより得られた曲面基材 表面上のレジスト膜厚の分布であるが、基板中心からの 距離2mm~2.5mmにかけて大きく膜厚の変動する領域が 存在することが分かる。これは遠心力と重力との力関係 が反転する位置が存在するために必ず発生する現象であ る。従って、有効径外にこの位置を持ってくることとそ の点に至るまでの聞いかに均一な膜を得るかにポイント を絞り塗布を行った。結果、有効径内においては膜厚変 化20nm、収差換算するとコマ収差、非点収差、球面収差 いずれも0.001 λ (λ =405nm)以内の均一な膜が得られた。

^{*}コニカミノルタテクノロジーセンター(株)

デバイス技術研究所 ナノ加工開発室



Fig.2 Result of resist film thickness measurement on curved surface

4 ブレーズ形成

4.1 平面上回折格子

まず、平面上へのブレーズ型回折格子の描画を試み た。初回はブレーズに強いムラが発生しφ4mmの回折格 子を描画するのに16時間もの時間を要した。そこで生産 性や安定性を考え少なくとも一晩で描画することを目標 に電子ビームのスキャン方式の改善を行った。結果、ム ラの無い回折格子を4時間で描画することに成功した。 現像後、得られた回折格子の観察像をFig.3に示す。

描画された輪帯は真円度及び偏心ともに100nm以内を得た。また、ブレーズの高さは設計値に対し平均5%以内、且つバラツキ5%以内で、回折効率に換算して99.5% 相当の形状精度を得ている。



(a) Microscope image



Fig.3 Images of blazed diffraction-grating pattern on the concavity surface with EBL

4.2 凹面上回折格子

曲面上に描画を行う場合、母材と描画パターンとの位 置合せや電子ビームのフォーカス位置の合せ込みなど、平 面上での描画と比較し格段に高いアライメント精度が要 求される。そこで描画装置内での母材の位置や傾きを正 確に計測し、ステージ位置及び電子ビームの偏向に フィードバックして描画を行った。Fig.4に (4 約 2 mm最 大傾斜角20°凹曲面上に描画した結果を示す。写真に見 られるように平面上回折格子に対して遜色なく良好な描 画形状が得られている。尚、本回折格子については金型 まで製作し、素子の成形まで行っておりその結果は後述 で報告する。



(a) Appearance form



(b) Microscope image



Fig.4 Images of blazed diffraction-grating pattern on the concavity surface with EBL

4. 3 高角度傾斜面上回折格子

ブレーズ回折格子において、溝部の形状が回折効率を 大きく左右する。通常、レンズ上に回折格子を形成する 場合には光軸から離れるほど傾斜角度は大きく、回折格 子のピッチは狭くなるため、より鋭角な溝部が必要とさ れるが、近接効果により設計値通りの溝形状を得るのは 非常に困難になる。実際に平面でブレーズを得る場合と 同じドーズ分布をFig. 5-(a)に、そのドーズで電子ビーム 入射角45°のシミュレーションをした結果をFig. 5-(b)に 示す。この結果から通常のドーズ分布では鋭角な溝部を形 成することができないことが分かる。そこで、Fig. 6-(a)の ように溝部に対応する部分に強いドーズを与えその近傍 に周期的な変動を与えることを考えた。これにより現像 の進行を電子ビームの入射方向に進むように誘導させる ことが可能となる。Fig. 6-(b)に示すシミュレーション結 果から見られるように深くまでブレーズの壁面に沿って 現像が進むことが分かる。



(b) resist development simulation

Fig.5 Result of blazed grating pattern simulation on the slope



Fig.6 Result of blazed grating pattern simulation on the slope by the new technique

ここで最大傾斜角50°の凸曲面上への回折格子を試み た。この角度まで達するとアライメントに微小な誤差があ ると電子ビームのフォーカスずれを生じ、ドーズ分布によ るブレーズ形状の補正も全く意味をなさなくなる。描画し た結果はFig.7に示すように、シミュレーションとほぼ一 致する確りとしたオーバーハングを持つブレーズが確認で きることから、3次元的に正確なアライメントとその補正 がなされていることが分かる。



(a) Appearance form



(b) Expansion image of the inclination part



- (c) Cross-sectional image of blazed grating
 - Fig.7 Images of blazed diffraction-grating pattern on the convexity surface with EBL

5 金型性能評価

前述Fig.3の凹面上ブレーズ構造を型として電鋳により メタルに転写し、周囲を精密に加工して得られた金型の ブレーズ形成面をFig.8に示す。レジストとは逆パターン のブレーズ構造が細部に渡り正確に転写されていること が分かる。



Fig.8 Images of blazed diffraction-grating pattern fabricated on the metallic mold

電鋳により懸念される歪を評価するため、転写された光 学面を干渉計で測定した。その干渉パターンを**Fig.9**に、 測定結果を**Table 1**に示す。 3 次収差成分はMAX0.006 λ (λ = 405nm)、金型形状誤差換算でいずれも20nm以内と 非常に高精度に仕上がっていることが分かる。



Fig.9 Interference pattern

Table 1 Result of aberration measurement (λ =405nm)

CO	MA3	A	S3	SA3			
Form error	Aberration	Form error	Aberration	Form error	Aberration		
[nm]	[λrms]	[nm]	[λrms]	[nm]	[λrms]		
10	0.002	10	0.003	-16	-0.006		

6 光学性能評価

前述の金型を使って射出成形を行い、回折格子を1面 にもつレンズを試作した。得られたレンズを含む光学系 を、評価した結果を**Table 2**に示す。収差成分はいずれも 0.02 λ (λ = 405nm)が得られた。更に、レーザーを集光 させたときのフォーカス位置でのビーム形状を測定し

Table 2 Result of aberration measurement (λ =405nm)

Aberration	COMA	AS	SA3		
$[\lambda rms]$	0.018	0.013	0.018		

た。Fig.10に示す結果から、X方向Y方向のバランス良 く、形状も整っており、ビーム径430nm(1/e²)で製品 としても使用可能と思われるレベルに達していることが 分かった。また瞳透過率はダブルパスで90%以上得られ ることを確認している。



Fig.10 Data of beam shape at the point of focus position

7 おわりに

電子ビーム描画技術を応用し、曲面上に微細パターン を形成し量産まで結び付ける方法として、まずはブレー ズ構造付レンズをターゲットととして射出成形まで試み た。得られた素子の回折効率や収差はほぼ製品レベルに 到達しており、直接量産に結び付けられる可能性を得 た。今後、この技術を応用し別の光学素子にも展開して いく予定である。

8 謝辞

本技術開発に当り、多大なご協力を頂いたコニカミノ ルタオプト株式会社の皆様に紙面を借りて感謝致しま す。

●参考文献

- 1) 墙野照弘,佐藤和鋲 都也: OJ2003 議稿集, 6pC7(2003).
- Dylan E. Haas, Jorge N. Quijada, Stephen J. Picone, and Dunbar P. Birnie III : SPIE Proc. 3943, Sol-Gel Optics V (2000) 280-284.