

研究

アキシコンを用いた超長焦点深度フォトリソグラフィー

田中 拓男・河田 聡

大阪大学工学部応用物理学科 〒565 吹田市山田丘 2-1

(1995年5月8日受付, 1995年6月22日受理)

Increasing the Depth-of-Focus Using an Axicon in Photolithography

Takuo TANAKA and Satoshi KAWATA

Department of Applied Physics, Faculty of Engineering, Osaka University,
2-1, Yamadaoka, Suita 565

(Received May 8, 1995; Accepted June 22, 1995)

We propose a photolithography system that incorporates an axicon as a focusing lens. This system attains an extremely long depth of focus compared with a conventional photolithography system. We designed an axicon and developed a photolithography system with the axicon. Experimental results are shown to demonstrate that the developed system provides a super long depth of focus as well as high lateral resolution. The effects of spherical aberration for the three-dimensional imaging in high-refractive index material like as photoresist are theoretically analyzed to verify the advantage of the photolithography with an axicon.

1. はじめに

近年、半導体デバイスの高密度化、回路の微細化に伴い、より高い解像力をもったフォトリソグラフィー装置の開発が要求されている。これは、現在一般に使用されている縮小露光装置(ステッパー)では、最小線幅 $0.5\mu\text{m}$ 程度のパターンしか記録することができず、64 MBit~1 GBit D-RAM等の次世代のデバイスでは、線幅 $0.3\sim 0.1\mu\text{m}$ のパターンを加工する技術が必要とされるからである。このような高密度なパターンの加工を実現する方法として、1)光源の短波長化、具体的には、KrFエキシマーレーザー(波長 248nm)や、ArFエキシマーレーザー(193nm)、さらにはX線等の、より波長の短い光源を用いる手法、2)パターン結像レンズの高NA化、そして、3)変形照明法、位相シフト法等の部分コヒーレント照明法や、輪帯瞳などの変形瞳を用いる空間周波数フィルタリング法といった超解像技術^{*1}

を用いる手法などが提案されている。

しかしながら、1)の短波長光源を用いる方法では、レーザー光源の安定化や長寿命化が困難なことや、紫外光用の光学部品の開発等の、多くの問題が残っている。また、2)のより大きなNAのレンズを用いるという手法では、光学系の焦点深度が浅くなってしまい、基板のわずかな傾きや、基板のフォトレジスト膜の膜厚内でさえ、露光パターンがデフォーカスし、正確なパターンの露光ができなくなる可能性がある。さらに、アスペクト比の高いパターンの記録や多層構造のリソグラフィーにおいては、露光パターンのデフォーカスの影響が避けられない。

このように、高い面内分解能と深い焦点深度は、通常は、トレードオフの関係にあるが、これらを同時に実現する手法として最近研究されているのが、3)の超解像技術を用いた手法である。

超解像技術の中でも、変形瞳法のひとつである輪帯瞳光学系は、焦点深度が深く、高い面内分解能をもつことが古くから知られている²⁻⁵⁾。しかしながら、輪帯瞳系では、瞳面において細い輪帯内のみしか光の透過が許さ

*1 正確には、これらの手法も回折限界による帯域制限を受けているので、超解像と呼ぶのは不適切であると考えられることが多いが¹⁾、ここでは、フォトリソグラフィーの慣例に従い、超解像技術と呼ぶことにする。

れず、光学的スルーputが低いことが問題であった。

この問題に対し、レンズの代りにアキシコンを使用すれば、輪帯瞳を用いた場合と等価な結像特性で、かつ入射ビームの蹴られない、光の利用効率が非常に高い露光光学系を実現できる。筆者らはすでに、アキシコンを深度の深い走査顕微鏡の対物レンズとして用いることについて報告している⁶⁾。

本論文では、アキシコン光学系のフォトリソグラフィシステムへの応用を試みたので、その結果について示す。

2. アキシコンと0次ベッセルビーム

アキシコンは非球面レンズの一種であり、円錐形状をしている⁷⁾。このプリズムに、Fig. 1(a)に示すように、コリメートしたレーザー光を垂直入射させると、アキシコンの後方に、複素振幅分布

$$u(r, z) = E(R) \left(\frac{4\pi^2 R \sin \beta}{\lambda \cos^2 \beta} \right)^{1/2} \exp \left[i \left(\frac{2\pi}{\lambda} z \cos \beta + \frac{\pi}{4} \right) \right] J_0 \left(\frac{2\pi r \sin \beta}{\lambda} \right) \quad (1)$$

が生成され、したがって強度分布

$$I(r, z) = |u(r, z)|^2 = \frac{4\pi^2 E^2(R)}{\lambda} \frac{R \sin \beta}{\cos^2 \beta} J_0^2 \left(\frac{2\pi r \sin \beta}{\lambda} \right); \quad z \leq z_0 \text{ and } R \leq R_0 \quad (2)$$

が得られる⁸⁾。ただし、 r は光軸からの距離、 z はアキシコン先端からの光軸上の距離を表す。また、 λ は光源の波長、 z_0 は焦点深度(干渉領域)、 R は入射ビームの半径、 R_0 と n はそれぞれアキシコンの半径と屈折率である。 $E^2(R)$ は入射光のパワーを示す。

ここで、Fig. 1(a)で示される角度 α と β 、ならびに z_0 には、スネルの屈折の法則と簡単な幾何学より、

$$n \sin \alpha = \sin(\alpha + \beta) \quad (3)$$

$$z_0 = R(\cot \beta - \tan \alpha) \quad (4)$$

の関係がある。

式(1)は、アキシコンによって生成されるビームスポットの複素振幅が z に独立に、0次のベッセル関数($J_0(r)$)で与えられることを示している。このような光軸方向にその複素振幅分布が変化しないビームは非回折ビームと呼ばれ^{9,10)}、非常に深い焦点深度をもつ。非回折ビームの中でも、アキシコンによって生成されるビームは、0次ベッセルビーム(J_0 ビーム)と呼ばれ、Fig. 1(b)のように、輪帯開口をレンズによってフーリエ変換することによっても与えられることが知られている。

アキシコン光学系(a)と輪帯開口光学系(b)の違いは、輪帯開口光学系では入射光のほとんどが輪帯以外の部分によって遮蔽されるのに対し、アキシコンを用いた光学系では光量のロスなく等価なビームプロファイルを生成することができることである。

Fig. 2に、アキシコンがつくる J_0 ビームが面内の光強度分布を保存したまま伝播することを示す実験結果を示す。これは、頂角160度、屈折率 $n=1.522$ 、直径10mmのアキシコンに、コリメートした Ar^+ レーザー($\lambda=488\text{ nm}$)を垂直入射させ、アキシコンの後方に生じたビームスポットを顕微鏡を用いて400倍に拡大した後、CCD(charge coupled device)カメラ(XC-77, SONY, ピクセルサイズ $11 \times 13 \mu\text{m}$)を用いて測定した結果である。Fig. 2(a)~(f)は、それぞれアキシコンの先端から、16 mm, 26 mm, 36 mm, 46 mm, 53 mm, 56 mmの位置での中心スポットの強度分布である。写真は、サイドロープリングを強調して示すために、中心スポット部は過露光になっている。

Fig. 2(a)~(e)は、干渉領域においてアキシコンのスポットがデフォーカスせずに、元の強度分布を保ったまま伝播していることを示している。光強度が最大強度の80%に低下するところまでを焦点深度と定義すると、アキシコンの J_0 ビームスポットの焦点深度は約52 mmとなった。使用したアキシコンが生成する波面が光軸となす角(β)は、式(3)より5.32度であり、これはレンズの開口数(NA)に換算すると $\text{NA}=0.09$ に対応する。もし、同じNAの球面レンズを用いてスポットを形成すると、その焦点深度は、 $\Delta z = \lambda/(\text{NA})^2$ として、 $59.1 \mu\text{m}$ となり、アキシコンは球面レンズに対して約880倍深い焦点深度を与えることがわかる。

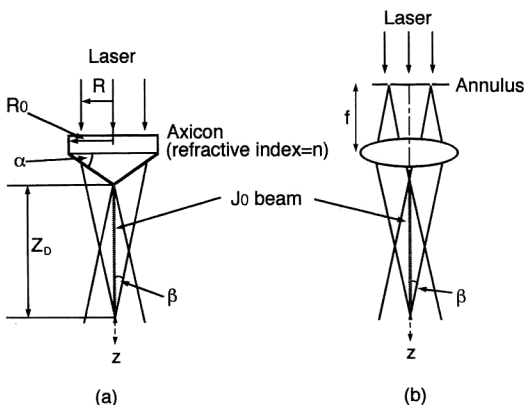


Fig. 1 (a) The principle for producing the J_0 beam with an axicon, (b) the optics equivalent to (a) using an annular pupil.

アキシコンあるいは等価的に輪帯開口のもつもうひとつの光学的特徴は、スポットサイズが球面レンズあるいは円形開口がつくるそれに比べて小さいことである。これは、光学系が高い空間周波数をもつ、大きな見込み角

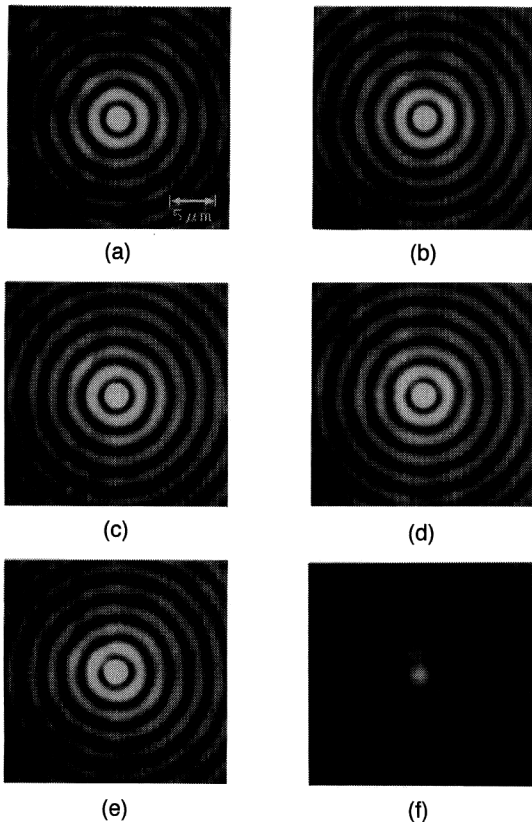


Fig. 2 Intensity distributions of the J_0 beam spot produced by an axicon, at (a) $z=16$ mm, (b) $z=26$ mm, (c) $z=36$ mm, (d) $z=46$ mm, (e) $z=53$ mm, and (f) $z=56$ mm. The intensity of the center spot on the photograph is saturated to make the outer ring appear.

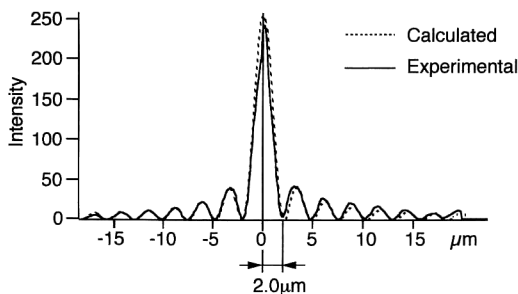


Fig. 3 Intensity profile of the central spot of the J_0 beam at $z=16$ mm.

の波面のみを生成し、これらが干渉スポットをつくるためである。ただし、系がバンドパスフィルター特性をもつため、円形開口がつくるスポットと比較すると、中心スポットの周りのサイドローブが大きくなる。

Fig. 3 に、Fig. 2(a)のスポットの断面の光強度分布を示す。図中の破線は、式(2)に実験パラメーターを導入して計算した結果である。中心スポットの半径は約 $2 \mu\text{m}$ である。もし、同じ NA の球面レンズを用いてスポットを形成したとすると、その半径は $3.2 \mu\text{m}$ となり、アキシコンの方がより小さいスポットを形成する。逆に、半径 $2.0 \mu\text{m}$ の中心スポット半径を通常の球面レンズでつくるためには、 $\text{NA}=0.15$ のレンズが必要である。

3. アキシコンを用いたフォトリソグラフィシステム

以上に述べたように、アキシコンは、通常のレンズがつくるスポットより小さな中心半径をもつスポットをきわめて長い焦点深度で実現する。そこで、これを用いて多層の基板に対し、上層から下層まで同時にパターンを露光することを試みた。

Fig. 4 (a)および(b)に、それぞれ、その実験系、およびアキシコンとレジスト基板の立体配置図を示す。光源

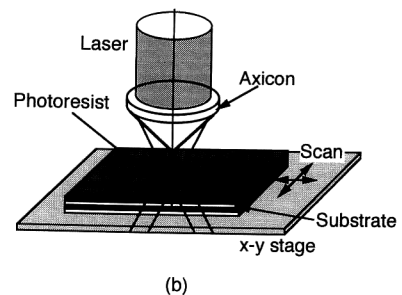
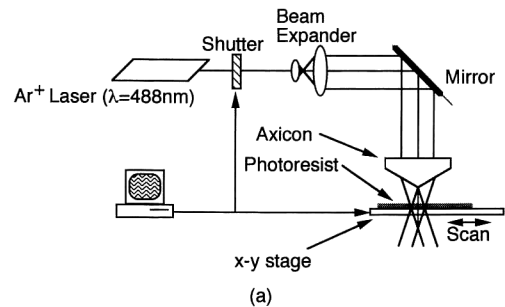


Fig. 4 (a) Configuration of the photolithography system with an axicon developed by us, (b) the detailed geometry near the photoresist.

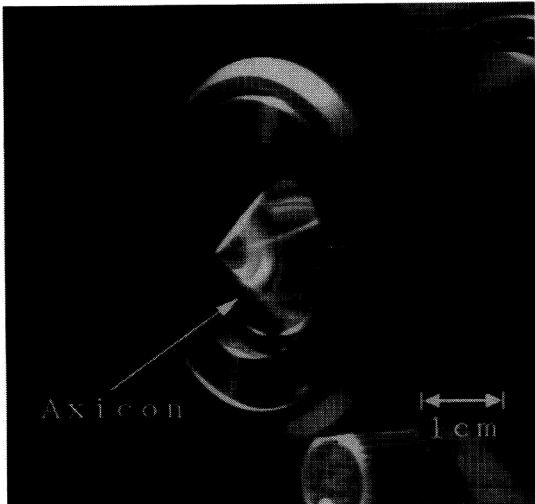


Fig. 5 The axicon we used for the photolithography system. The diameter, refractive index, and the cone angle of the axicon are 20 mm, 1.522, and 100 deg, respectively.

には、 Ar^+ レーザー (波長 488 nm) を用いた。レーザー光は、ビームエキスパンダーでコリメートされた後、顕微鏡にマウントされたアキシコンに対して垂直に入射される。そして、アキシコンによって J_0 ビームに変換された後、フォトレジスト基板に集光される。レーザー光は、コンピューターからの信号に応じてシャッターにより強度変調される。フォトレジスト基板は、 x - y - z モーターステージ上に置かれ、コンピューターコントロールにより x - y 平面内で走査される。そして、ステージの走査とシャッターによるレーザー光の強度変調を同期させることにより、フォトレジストに直接パターンを描画する。

使用したアキシコンは頂角 100° ($\text{NA}=0.61$ 相当)、直径 20 mm, BK-7 (波長 488 nm に対する屈折率 $n=1.522$) である。Fig. 5 にこのアキシコンの写真を示す。式(2)より、このアキシコンが生成する J_0 ビームスポットの半径は $0.3 \mu\text{m}$ であり、これは、 $\text{NA}=0.99$ のレンズが生成するスポット径と同じ大きさである。また焦点深度は式(4)より 4.39 mm である。

フォトレジストは、厚さ 1 mm のガラス基盤上にスピンコートし、このガラス基板を 2 層重ねて x - y ステージ上に設置した。そして、上から直接アキシコンで J_0 ビームを集光することによりパターンを露光した。使用したフォトレジストは、富士ハントエレクトロニクステクノロジー(株)社製のポジ型フォトレジスト HPR 204 である。スピンコートは、回転数 1000 rpm で 10 秒間

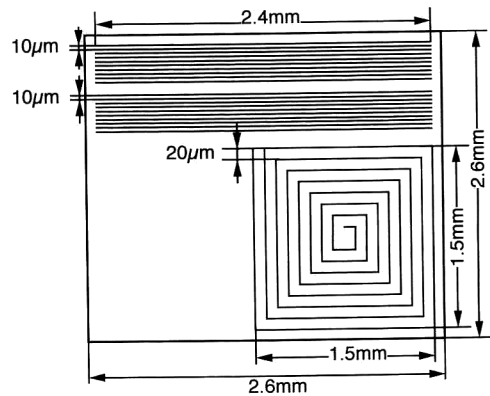


Fig. 6 A pattern we designed for the exposure with the developed system.

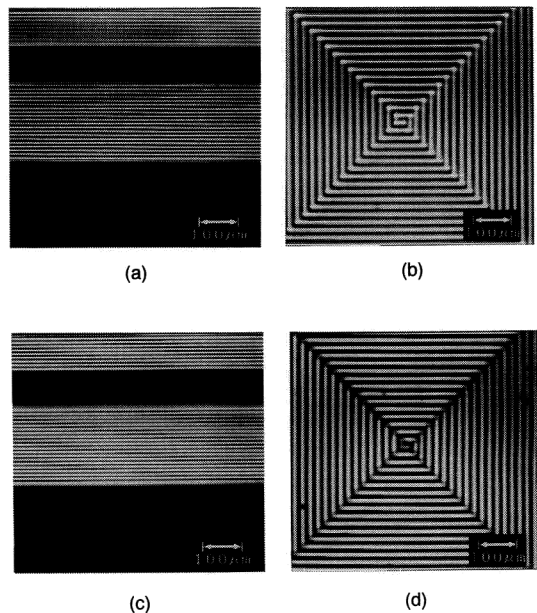


Fig. 7 The pattern exposed by the photolithography system developed by us: (a) and (b) are the patterns in the upper region of the photoresist; (c), and (d) are the patterns in the lower one. The separation between the two region is about 1 mm.

行い、膜厚は $1.8 \mu\text{m}$ であった。

この実験系によって、Fig. 6 のパターン ($2.6 \text{ mm} \times 2.6 \text{ mm}$) をコンピューター制御により描画した。パターンの記録結果を Fig. 7 に示す。これらは、 $\text{NA}=0.3$ 、倍率 10 倍のダークコントラスト位相差対物レンズを用いて観察したものであり、屈折率の高い部位すなわちレジストが残っている部位が暗く現れる。Fig. 7(a), (b) は上層のレジストの記録結果であり、(c), (d) は上層

から1 mm 下層のレジストの記録結果である。両方のフォトリソに全く同じパターンが記録されていることから、集光されたレーザービームスポットが1 mmの距離でも、デフォーカスしていないことがわかる。これは、試作したフォトリソグラフィシステムが深い焦点深度を有しており、多層に配置されたフォトリソに同じパターンを同時に刻むこと、あるいは深い凹凸をもつ媒体にデフォーカスすることなくパターンを刻めることができることを示している。

4. 収差の解析

対物レンズを用いて、多層の基板に対し、同時にパターンを露光したり深い凹凸を形成したりするには、厚い媒体の内部深くにスポットを絞込まないといけない。このときに問題となるのは、焦点深度の浅さに加えて、球面収差が発生することである^{11,12)}。この球面収差は、空気と媒体、基板の屈折率の違いにより発生する。そして、この収差によるボケはフォトリソ等のように高い屈折率をもつ媒体では特に顕著である。

そこで、通常のレンズとアキシコンにおけるこの収差の影響について解析と比較を行った。レンズにおける収差の解析は、まず対物レンズによって生成される収束球面波を平面波に展開し、各々の平面波について光線追跡法を用いてその光路長を求める。そして、この光路長から各波面の位相ずれを求めた後、各波面を振幅で足し合わせることによって計算した¹³⁾。計算に用いたモデルは、フォトリソの屈折率を1.48と仮定し、 $NA=0.75$ の対物レンズを用いてレーザーを集光するとし、このときレンズは、レジスト表面にレーザーを集光する場合に無収差となるよう、収差補正されていると仮定する。この対物レンズを用いて媒体内部の $0\ \mu\text{m}$ 、 $10\ \mu\text{m}$ 、 $20\ \mu\text{m}$ 、 $50\ \mu\text{m}$ の位置にレーザー光を集光したときに生じる収差スポットの光強度分布を求めた。その計算結果をFig. 8に示す。Fig. 8は光軸を含む面内の断面であり、各々についてスポットのサイドローブを強調して示してある。Fig. 8より、 $0\ \mu\text{m}$ 、 $20\ \mu\text{m}$ 、…と媒体内部へレーザーを集光するにつれて、スポットは主に光軸方向へ大きくデフォーカスしていることがわかる。これは、空気とレジストの屈折率が異なるために、対物レンズが生成する収束球面波がその境界面で屈折し、その際に波面が球面からずれるために生じる球面収差である^{11,12)}。

このような収差は、ふつう補正環を備えた対物レンズを用いることによって補正される。しかし、補正すべき波面の位相ずれはスポットを集光する深さに応じて変化

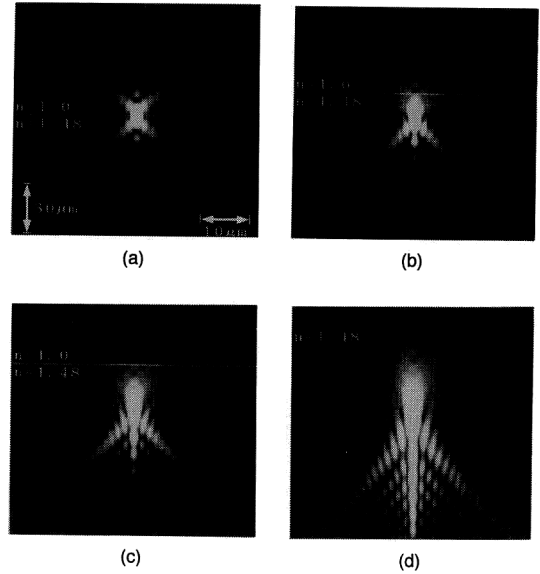


Fig. 8 Aberrated patterns seen in photoresist with objective lens of $NA=0.75$, at (a) $z=0$ (surface of the photoresist), (b) $z=10\ \mu\text{m}$, (c) $z=20\ \mu\text{m}$, and (d) $z=50\ \mu\text{m}$. The intensity of each pattern is saturated to make sidelobes appear.

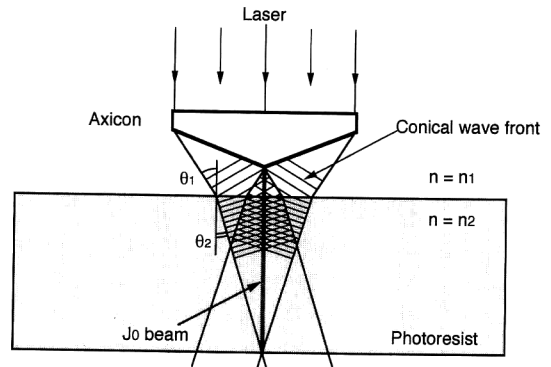


Fig. 9 The generation of the J_0 beam in high refractive index material with an axicon.

するため、光軸方向すべての位置において同時に収差を補正することは不可能である。すなわち、記録面が1層なら補正可能であるが、多層同時に補正することはできない。

収差を厚み全域にわたって同時に完全に補正するには、屈折率の不整合そのものを除去するしか方法はなく、そのためには、フォトリソと同じ屈折率をもつ媒質を対物レンズと試料との間に入れなければならない。しかし、フォトリソの現象ならびに基板のエッチング処理等のウェットプロセスが必要であるから、レ

ジスト基板を直接屈折率整合させるためのオイル等と接触させることは適切ではない。結論として、通常のレンズ光学系を用いたフォトリソグラフィシステムでは、いずれの方法においても、深い深度にわたって一度に収差を除去する方法はない。

一方、アキシコンの生成するベッセルビームは、Fig. 9に示すように円錐波面により形成されている。この円錐波面を平面波展開すると、均一媒質中ではすべての波数ベクトルが光軸に対し常に一定の角度 θ_1 をもっている。したがって、異なる媒質に入射する際に媒質の境界面で屈折しても、その屈折角 θ_2 はやはりすべての波面について等しくなる。したがって境界面で屈折しても、媒質 1 中の円錐波面は媒体 2 中で頂角の異なる円錐波面に交換されるので、波面の位相ずれは生じない。したがって、アキシコン光学系ではレンズ光学系にみられたような球面収差は発生せず、生成された J_0 ビームは媒質の屈折率にかかわらず、一定のスポット径を保ったまま無収差で伝播する。

5. ま と め

アキシコンを用いた光学系は、レンズ光学系と比較して、高い面内分解能と深い焦点深度をもちながら、なおかつ輪帯光学系と比べて高いエネルギー伝達効率をもつことを明らかにした。そして、この光学系を走査型フォトリソグラフィシステムに応用し、奥行数 mm オーダーに及ぶ深い構造を記録できることを確認した。筆者らは、このアキシコン光学系の応用範囲が、半導体製造分野のみならず、たとえば 3 次元光造形法による 3 次元微小デバイスの製造などにも応用できると考える。

0 次ベッセルビームの唯一の欠点は、レンズのスポットと比較して、サイドローブが大きいことである。このサイドローブは、0 次ベッセルビームをフォトリソグラフィやその他のシステムに応用した場合、面内分解能

の低下を招く可能性がある。しかし、分解能の低下が起こるのは記録媒質の吸収が光強度に対して線形にตอบสนองする場合であり、もし吸収感度の光強度に対する非線形応答をうまく利用すれば、サイドローブの影響を小さくすることができ、中心ピークのみをレジストに記録することができる。

文 献

- 1) 河田 聡：“超解像を実現する回折格子”，O plus E, No. 154 (1992) 73-80.
- 2) E. H. Linfoot and E. Wolf: “Diffraction images in systems with an annular aperture,” Proc. R. Soc. London, **B66** (1953) 145-149.
- 3) W. T. Welford: “Use of annular aperture to increase focal length,” J. Opt. Soc. Am., **50** (1960) 749-753.
- 4) J. T. McCrickerd: “Coherent processing and depth of focus of annular aperture imagery,” Appl. Opt., **10** (1971) 2226-2230.
- 5) R. Arimoto and S. Kawata: “Laser-scan fluorescence microscope with annular excitation,” Optik, **86** (1990) 7-10.
- 6) R. Arimoto, C. Saloma, T. Tanaka and S. Kawata: “Imaging properties of axicon in a scanning optical system,” Appl. Opt., **31** (1992) 6653-6657.
- 7) J. H. McLeod: “The axicon: a new type of optical element,” J. Opt. Soc. Am., **44** (1954) 592-597.
- 8) R. Herman and T. Wiggins: “Production and uses of diffractionless beams,” J. Opt. Soc. Am. A, **8** (1991) 932-942.
- 9) J. Durnin: “Exact solutions for non-diffracting beams. I. The scalar theory,” J. Opt. Soc. Am. A, **4** (1987) 651-654.
- 10) J. Durnin, J. J. Miceli, Jr. and J. H. Eberly: “Diffraction-free beam,” Phys. Rev. Lett., **58** (1987) 1499-1501.
- 11) S. Hell, G. Reiner, C. Cremer and E. H. K. Stelzer: “Aberrations in confocal fluorescence microscopy induced by mismatches in refractive index,” J. Microsc., **169**, Pt3 (1993) 391-405.
- 12) S. F. Gibson and F. Lanni: “Experimental test of an analytical model of aberration in an oil-immersion objective lens used in three-dimensional light microscopy,” J. Opt. Soc. Am. A, **9** (1992) 154-166.
- 13) 川田善正, 田中拓男, 河田 聡：“共焦点顕微鏡におけるデフォーカス効果”，レーザ顕微鏡研究会第 12 回講演会論文集 (1993) pp. 46-53.