

計算機合成ホログラムを用いた超解像光リソグラフィーの基礎実験

北條 淳一*・西澤 寛容**・福岡 美紀**・高木 康博***

*日本大学理工学部物理学科 〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14

**日本大学文理学部応用物理学科 〒156-8550 東京都世田谷区桜上水 3-25-40

Preliminary Experiments of Super-Resolution Optical Lithography Using a Computer-Generated Hologram

Junichi HOJO,* Kayo NISHIZAWA,** Miki FUKUOKA** and Yasuhiro TAKAKI***

*Department of Physics, College of Science and Technology, Nihon University, 1-8-14, Kandasurugadai, Chiyoda-ku, Tokyo 101-8308

**Department of Applied Physics, College of Humanities and Sciences, Nihon University, 3-25-40, Sakurajosui, Setagaya-ku, Tokyo 156-8550

The super-resolution intensity pattern generation by use of a computer-generated hologram is applied to photolithography. The proposed technique enables to produce super-resolution intensity patterns with the resolution of $\lambda/4$ NA. The experimental verification of generating two pairs of three super-resolution lines having the width of $\sim 1 \mu\text{m}$ using a He-Cd laser ($\lambda=0.325 \mu\text{m}$) and a lens having moderate NA of 0.070 is presented. The depth of focus of the proposed technique is discussed.

1. はじめに

半導体光リソグラフィーの歴史は微細加工技術の進歩の歴史であり、計算機の主要構成要素である CPU や DRAM をはじめとするさまざまな半導体集積回路の高性能化や大容量化を可能にしてきた。しかし、光リソグラフィーによる微細化にも限界が見えてきた。本論文では、計算機合成ホログラム (computer-generated hologram, 以下 CGH と略す) による超解像技術¹⁾を用いて光リソグラフィーでさらなる微細加工を可能にする方法を提案する。

光リソグラフィーでは、結像レンズの高 NA 化と光源の短波長化により分解能を向上させてきた。最近では、KrF レーザーや ArF レーザーなどの紫外線レーザーを光源として用い、輪帯照明やレベンソン位相シフトマスク等の超解像技術を駆使することで、 $0.18 \mu\text{m}$ 程度の分解能を実現している。しかしながら、次世代の高性能 CPU や大容量 DRAM の作製には $0.1 \mu\text{m}$ 以下の分解能が必要とされている。これを実現するために、電子ビームや X 線を用いて光源をさらに短波長化することが検討されてい

る¹⁾。しかし、電子ビームで半導体ウェハーに付加したレジストに直接描画する方法は大量生産に適さない。電子ビーム描画は、現在のところフォトリソグラフィー用のマスク作製が主な用途である。また、X 線領域では適当な屈折材料が少なく高性能な結像系が実現しにくい、人体に有害であるなどの問題点がある。

われわれは、以前の研究で、CGH を用いて $\lambda/4$ NA の分解能で光強度分布を制御する超解像技術を提案した²⁾。ここで、 λ は光源の波長を表す。この技術を用いれば、X 線や電子ビームを用いずとも紫外線レーザーを用いて $0.1 \mu\text{m}$ 以下の分解能を実現できる。そこで、本研究では、CGH を用いた超解像技術の光リソグラフィーへの適用を試みる。われわれが以前に行った CGH による超解像の実験²⁾では、光強度分布を $15 \mu\text{m}$ 程度の分解能で制御した。これは、再生像の確認に CCD 撮像素子を用いたためで、そのピクセルピッチより分解能を大きくする必要があったためである。今回は、高 NA 化と短波長化を行い分解能を高め、実際にフォトレジストへの露光および現像を行った。なお、今回は、CGH の光リソグラフィーへの適用の可能性を探ることが第一目的であるので、分解能は $1 \mu\text{m}$

*** E-mail: takaki@chs.nihon.ac.jp

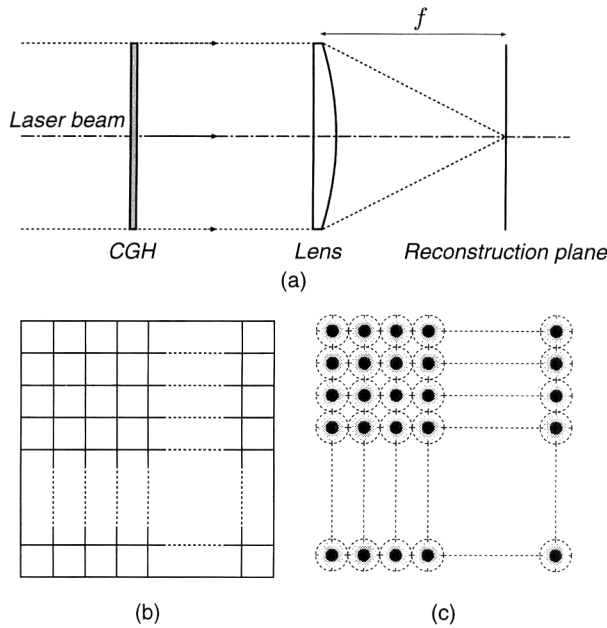


Fig. 1 Fourier-transform type computer-generated hologram (CGH): (a) reconstruction system, (b) CGH consisted of $N \times N$ cells, and (c) reconstructed image consisted of $N \times N$ resolvable points.

程度までとして実験を行った。

2. CGH による超解像

最初に、われわれが以前に提案した CGH を用いた超解像技術²⁾について簡単に説明する。

ここでは、単純化のためフーリエ変換型 CGH を考える。これは、Fig. 1(a) に示すように再生にレンズを用いる CGH で、レンズの焦点面にその再生像が表れる。Fig. 1(b) に示すように全体が $N \times N$ 個の小さな正方形で構成されるポイントオリエンテッド型 CGH を考える。各正方形の一辺の長さを a とする。この場合、レンズの焦点面に表れる再生像は、Fig. 1(c) に示すように、 $N \times N$ 個の解像点の集まりで構成される。レンズの焦点距離を f で表すと、解像点の縦横の間隔は $\lambda f / Na$ で表される。CGH と再生像の間にはフーリエ変換の関係があるため、CGH を構成する各正方形の振幅変調量や位相変調量を適当に選ぶことで再生像の解像点の複素振幅を制御できる。しかし、解像点は空間的に完全に分離しているわけではなく広がりをもっている。そのため、解像点の広がりが互いに重なり合い干渉が生じる。干渉によって生じる光強度は、解像点の位相に依存して強め合ったり弱め合ったりする。解像点の位相を制御しない場合は、解像点間の干渉によって再生像にスペックルが生じる。このようなスペックルを抑制する方法については、以前に研究例がある^{3,4)}。

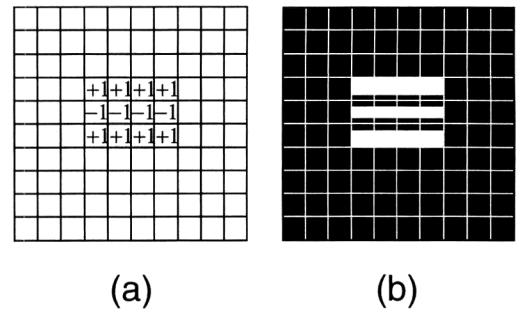


Fig. 2 Super-resolution intensity pattern generated on the CGH reconstruction plane: (a) complex-amplitudes of resolvable points, and (b) resultant intensity distribution.

これに対して、われわれは、この解像点間の干渉を積極的に用いて解像点と解像点の間の光強度をも制御することで、再生像の光強度をより細かく制御することを提案した。この場合、再生像の光強度分布を $2N \times 2N$ 点で間隔 $\lambda f / 2Na$ で制御できることになる。ここでは、隣り合う解像点間の干渉のみを考える単純なモデルを用いて説明する。干渉は、隣り合う解像点の間で最大になるからである。例えば、Fig. 2(a) に示すように再生像の複素振幅分布を制御する。ここで、 -1 は位相が π ずれていることを意味する。そうすると、解像点間の干渉により再生像の強度分布は同図 (b) のようになる。複素振幅 $+1$ と -1 をもつ解像点の間で destructive な干渉が生じ、3 本の超解像線が発生する。中心の明線が最も超解像の効果が大きく幅が細くなる。これに比べると、両側の明線は超解像の効果は半分になるが、超解像を用いない場合に比べれば幅が細くなる。

3. 光リソグラフィへの適用

CGH を用いた超解像技術においても高分解能化のためにはレンズの高 NA 化が必要であるが、レンズの性能を最大限に引き出すためにはレンズの大きさと CGH の大きさを等しくする必要がある。この場合は、再生像の解像点の間隔は $\lambda / 2NA$ で表される。そうすると、再生像の強度分布は $\lambda / 4NA$ の細かさで制御できることになる。このように、CGH を用いた超解像技術では光強度分布を $\lambda / 4NA$ の細かさで制御できるため、ArF レーザー ($\lambda = 0.193 \mu\text{m}$) や KrF レーザー ($\lambda = 0.248 \mu\text{m}$) などの紫外線レーザーを光源として用いることで、 $0.1 \mu\text{m}$ 以下の分解能が実現できることになる。代表的な紫外線レーザーである ArF レーザー、KrF レーザー、そして今回の実験に用いた He-Cd レーザー ($\lambda = 0.325 \mu\text{m}$) を光源として用いた場合について、NA と分解能の関係を Fig. 3 に示す。

従来の光リソグラフィでは、短波長化のために光源と

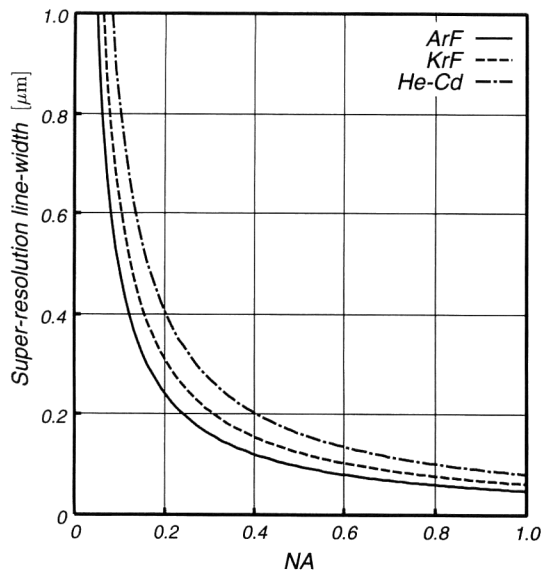


Fig. 3 The super-resolution line-width depending on the NA of the CGH reconstruction lens.

してレーザーを用いる場合はその高いコヒーレンスに起因するスペックルの発生を嫌い、故意に空間的コヒーレンスを低下させる処置が行われてきた。本研究では、逆に、このスペックルの発生を積極的に制御することで光の強度分布をより細かく制御する。また、従来の光リソグラフィーでは結像位置でフォトリソグロフィーへの露光を行うのに対して、本研究ではレンズの焦点位置で露光を行う。以上の点で、本研究で用いるリソグラフィー光学系は従来のものとは異なる。

半導体リソグラフィーでは、分解能のほかに、位置合わせ精度の観点から像の焦点深度の大きさが重要である。CGHによる超解像技術では、超解像線の発生にdestructiveな干渉を用いるため、焦点深度が大きくなることが期待できる。

4. 実験

4.1 CGH の設計

CGH は、シミュレーティッド・アニーリングを用いて最適設計した⁵⁻⁷⁾。これは、CGH を構成する正方形の中からランダムにひとつの正方形を選び出しその状態を変化させる。再生像が目的とする複素振幅分布に近づいた場合は、その変化を受け入れる。そうでない場合は、基本的には変化を受け入れないが、ある程度の確率で受け入れを行うことでローカルミニマムな解に収束することを避ける。このような操作を繰り返し行い、最適化の進行とともに確率的な受け入れの割合を減らすことでグローバルミニマムな解に収束させる。シミュレーティッド・アニーリングを

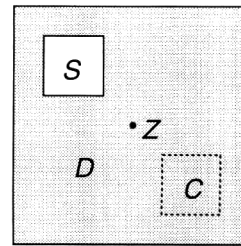


Fig. 4 The diffraction plane is divided into a signal area S and a dummy area D. The signal area corresponds to the reconstructed real image. The conjugate image C and the zero-order diffraction component Z are contained in the dummy area.

用いた CGH の最適化は解像点の強度のみの制御に用いられることが多い^{6,7)}が、解像点の複素振幅を制御することも可能である^{2,5)}。

作製の容易さから、実験には二値振幅型 CGH を用いた。これは、CGH を構成する各正方形を透過と不透過の 2 つの状態に符号化したものである。二値振幅型 CGH の再生面には、実像のほかに 0 次光と共役像が発生する。CGH の最適設計では、再生像をシグナルエリアとダミーエリアに分けて、シグナルエリア内の分布のみを制御してダミーエリア内の制御を放棄することで、シグナルエリア内の制御性が向上することが知られている。そこで、Fig. 4 に示すように再生像をシグナルエリアとダミーエリアに分け、実像をシグナルエリアに対応させ、0 次光と共役像をダミーエリアに含めた。

実験に用いた CGH は、シグナルエリアの解像点の複素振幅が Fig. 5(a) に示す分布になるように最適設計した。解像点間の干渉により、シグナルエリアの強度分布は同図 (b) のようになり、3 本の超解像線が 2 組発生する。CGH は 64×64 個の小さな正方形で構成した。したがって、再生像は 64×64 点の解像点で構成されるが、そのうちの 16×16 点をシグナルエリアとして用いた。したがって、強度は 32×32 点で制御することになる。シミュレーティッド・アニーリングにより最適設計した二値振幅型 CGH パターンを同図 (c) に示す。

最適設計した二値振幅型 CGH パターンをレーザープリンターで印刷し、ミニコピーフィルムに写真縮小したものを CGH として用いた。

4.2 実験装置

実験光学系を Fig. 6 に示す。光源としては、波長 0.325 μm で出力 10 mW の He-Cd レーザーを用いた。スペイシャルフィルタリング光学系によりビームの整形と拡大を行い、CGH をできるだけ均一な光強度で照明するようにした。CGH によって回折された光ができるだけ多くレンズ

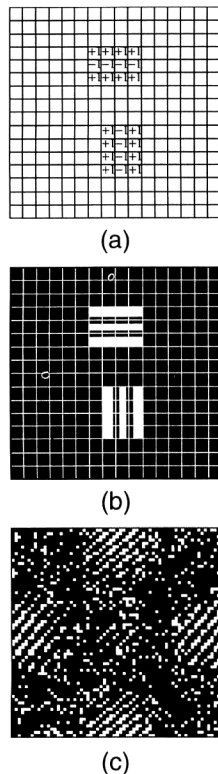


Fig. 5 Test pattern used for the preliminary experiments of the super-resolution lithography: (a) complex-amplitudes of the resolvable points, (b) super-resolution intensity distribution, and (c) binary-amplitude CGH pattern optimized by the simulated annealing algorithm.

に入射するように、CGHを可能な限りレンズに近づけた。

今回の実験ではCGHの再生像によるフォトレジストへの露光および現像の確認が目的であるので、実験で発生させる超解像線の幅は $1\mu\text{m}$ 程度とした。したがって、レンズには大きなNAを必要としない。実際には、ビーム径はCGHの大きさに制限されることになる。そこで、CGHの大きさに決まる有効NAを用い、これを近似的に $Na/2f$ と表した。実験では、 $4\mu\text{m}$ 、 $3\mu\text{m}$ 、 $2\mu\text{m}$ 、および $1\mu\text{m}$ の幅の超解像線の発生を行った。そのために、CGH作製時の縮小率を変化させて大きさの異なる4種類のCGHを用意した。作製したCGHの大きさとレンズの焦点距離と有効NA、および超解像線の幅の関係をTable 1に示す。ただし、Fig. 2(b)の説明で述べたように、超解像の効果の大きさによって超解像線の幅は異なるが、ここでは $\lambda/4$ NA、すなわち、強度での分解能を超解像線の幅と呼ぶことにする。

フォトレジストとしては、ポジ型フォトレジストOFPR-800を用いた。シリコン基板上に厚さ $1\mu\text{m}$ になるようにスピナーで塗布し、温度 110°C で90秒間の

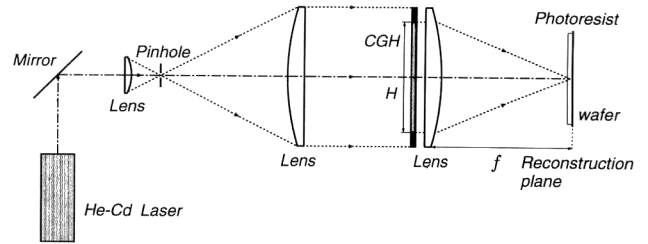


Fig. 6 Experimental system for photolithography using a CGH.

Table 1 The design parameters for CGHs used for experiments.

CGH size (mm ²)	Focal length (mm)	Effective NA	Super-resolution line-width (μm)
4.2×4.2	100.0	0.021	3.9
5.9×5.9	100.0	0.024	2.8
4.2×4.2	50.0	0.042	1.9
4.5×4.5	32.0	0.070	1.1

プリベークを行った。現像後、温度 140°C で5分間のポストベークを行った。現像液としては、NMD-3を用いた。

本手法ではレンズの焦点位置が露光位置となるが、この位置は次のようにして決定した。レンズの焦点付近で粗い間隔で位置を変え数回の露光を行い、像形成がよく行われている位置を割り出す。割り出した位置付近をより細かい間隔で同様の操作を繰り返し、最終的な露光位置を決定した。今回の実験では、位置決めステージの精度から位置合わせ精度は $10\mu\text{m}$ 程度である。CGHの再生像によるレジストの露光時間は、露光時間を変えて露光を繰り返すことで最適な時間を決定した。実験では4種類の大きさのCGHを用いたが、当然、CGHが大きくなると露光時間は短くなる。幅 $1\mu\text{m}$ の超解像線を発生させるCGHを用いた場合の露光時間は約1秒であった。

4.3 実験結果

現像後のレジストパターンの顕微鏡写真をFig. 7に示す。これは、CGHの再生像のシグナルエリアによって露光された部分のみを取り出したものである。特に、destructiveな干渉が生じている部分でレジストがシャープに切れていることがわかる。

5. 考察

計算機によって求めたシグナルエリアでの強度分布をFig. 8(a)に示す。また、CGHの大きさが $3.5\text{mm}\times 3.5\text{mm}$ で焦点距離 300mm のレンズと波長 $0.633\mu\text{m}$ のHe-Neレーザーを用いた場合の再生像をCCDカメラで撮影した結果を同図(b)に示す。計算結果と実験結果がよく一致していることがわかる。これに対して、Fig. 7の実験

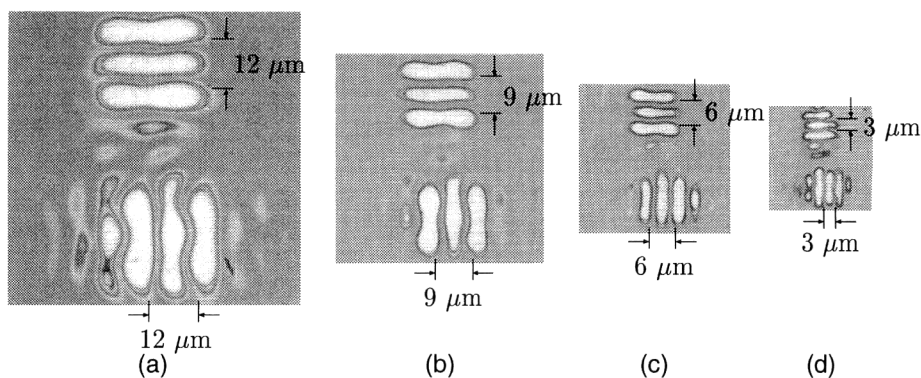


Fig. 7 The resist patterns remained after the development. $\lambda/4NA$ is (a) $4 \mu\text{m}$, (b) $3 \mu\text{m}$, (c) $2 \mu\text{m}$, and (d) $1 \mu\text{m}$.

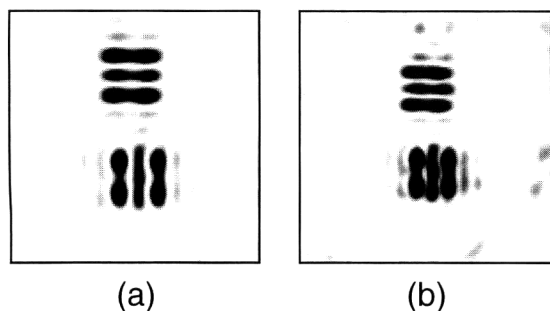


Fig. 8 Reconstructed images: (a) computer simulation result and (b) experimental result captured by a CCD camera.

結果ではパターンの変形が確認できる。今回はフレネル近似が成り立っているとしてCGHを設計したが、実験での有効NAの値は小さいので、この近似はほぼ成り立っている。パターンの変形の原因は、CGHの再生に用いたレンズが単レンズで収差の補正が不十分であったためであると考えている。今後は、収差補正された組み合わせレンズを用いて実験を行う必要がある。

今回の実験では3本の超解像線の発生を試みたが、Fig. 7とFig. 8に示す結果からわかるように3本線の外側にサイドローブの発生が確認できる。これは、解像点の複素振幅の設計に、隣り合う解像点間の干渉のみを考えたといった単純な設計手法を用いたため発生したものである。実際には、解像点の広がりや重なり合いはより広い範囲で生じているためである²⁾。このことを考慮して解像点の複素振幅を設計しサイドローブの発生を抑制することが、今後の課題である。その際に、フォトリソのガンマ特性を考慮することが有効であると考えられる。すなわち、フォトリソの感度に達しない強度をもつサイドローブの発生は許容できる。さらには、より自由なパターン形成を可能にする再生像の解像点の複素振幅の設計法について研究を行う必要があるが、これも今後の課題である。

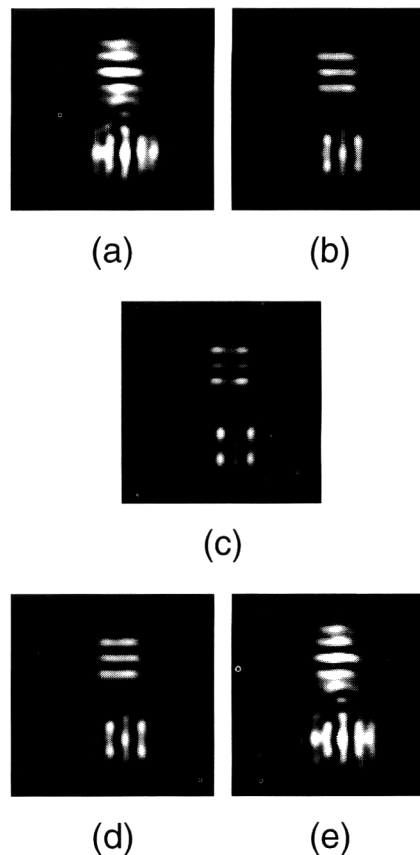


Fig. 9 High-density intensity distributions at different reconstruction distance: The distances from the focal plane are (a) -0.06 mm , (b) -0.04 mm , (c) 0.00 mm , (d) $+0.04 \text{ mm}$, and (e) $+0.06 \text{ mm}$.

今回は、作製の容易さから二値振幅型CGHを実験に用いた。当然、光の位相のみを変調する位相型CGHや光の振幅と位相の両方を変調する複素振幅型CGHを用いることもできる。位相型CGHを用いると、0次光や共役像の発生を除去でき、また光の吸収が原理的にはないため光の利用効率を高くできる。また、複素振幅型CGHを用いると、目的とする解像点の複素振幅のフーリエ変換でCGH

の分布を直接求めることができるため、CGH の設計に最適化手法を用いる必要がなくなる。

本手法は超解像線の発生に destructive な干渉を用いるため、像形成の焦点深度が大きいことが期待できる。このことを評価するために、計算機シミュレーションを行った。超解像線の幅が $1\ \mu\text{m}$ の場合の結果を Fig. 9 に示す。光源の波長やレンズの焦点距離等のシミュレーション条件は、実験の値と同じとした。0.08 mm 程度の焦点深度を有していることがわかる。超解像を用いた場合は、必要な NA の値が半分になることから、焦点深度が大きくなることが理解できる。

従来の光リソグラフィでも、振幅変調を行うマスクパターンに半波長分の位相量を与えるレベンソン位相シフターを付加する超解像技術が用いられている^{8,9)}。本研究の手法は、本質的にはこれと同等な手法であると考えられることができる。レベンソンの手法は実平面での超解像技術であるのに対して、本研究の手法はフーリエ面あるいは瞳面での超解像技術である。また、レベンソンの手法は振幅と位相を両方変調する必要があるのに対して、本研究の手法は今回の実験からもわかるように振幅変調のみで超解像を実現できる。元来、ホログラムは複素振幅分布を振幅分布に変換する技術である。

6. 結 語

CGH を用いた超解像技術を光リソグラフィに適用した基礎実験の結果について報告した。CGH の再生像によるフォトリソグロームへの露光および現像を行い、 $1\ \mu\text{m}$ 程度の幅を有する超解像線の形成を確認した。今後、さらなる

高分解能化を行うためには、CGH の大面積化とレンズの焦点距離の短縮を行う必要がある。また、サイドローブの発生を抑制し、より自由なパターン形成を可能にする CGH の設計手法についても、今後研究を行う予定でいる。

文 献

- 1) 松井安次, 若宮 亙: “リソグラフィ技術”, 応用物理, **66** (1997) 1170-1175.
- 2) Y. Takaki and J. Hojo: “Computer-generated holograms to produce high-density intensity patterns,” Appl. Opt., **38** (1999) 2189-2195.
- 3) J. P. Allebach, N. C. Gallagher and B. Liu: “Aliasing error in digital holography,” Appl. Opt., **15** (1976) 2183-2188.
- 4) N. Yoshikawa, M. Itoh and T. Yatagai: “Interpolation approach to computer-generated holograms,” Proc. SPIE, **2778** (1996) 463-464.
- 5) M. A. Seldowitz, J. P. Allebach and D. W. Sweeney: “Synthesis of digital holograms by direct binary search,” Appl. Opt., **26** (1987) 2788-2798.
- 6) A. G. Kirk and T. J. Hall: “Design of binary computer generated holograms by simulated annealing: Coding density and reconstruction error,” Opt. Commun., **94** (1992) 491-496.
- 7) N. Yoshikawa and T. Yatagai: “Phase optimization of kinoform by simulated annealing,” Appl. Opt., **33** (1994) 863-868.
- 8) M. D. Levenson, N. S. Viswanathan and R. A. Simpson: “Improving resolution in photolithography with a phase-shifting mask,” IEEE Trans. Electron Devices, **ED-29** (1982) 1828-1836.
- 9) M. D. Levenson: “Wavefront engineering for photolithography,” Phys. Today, **46** (1993) 28-36.