

# 複素変調透過板(ビルトインレンズマスク) による三次元ビーム加工

義彦\*

平井

Y. Hirai

## 1. まえがき

マイクロ・ナノ構造を樹脂や金属材料の表面に加工する ことにより,多様な機能性表面の実現が期待されている. 生体模倣構造はその代表例であり,これまでに昆虫の眼球 の光反射防止構造,蓮の葉表面の撥水あるいは浸水構造, ヤモリの足裏の吸着構造,モルフォ蝶の構造色,サメの表 皮の流体潤滑構造などが,産業化されている.

レーザーを含むビームプロセッシングは、これらの加工 に有効な方法の一つである.しかし、従来の方法ではビー ムをきめ細かく立体的に照射する必要があるほか、ビーム のブランキングによる逐次加工では、効率が悪くコストを 要する.3Dプリンター技術も同じ問題を抱える.

このため、ミクロン精度で、かつ広範囲にわたる一括照 射が可能な三次元ビーム加工技術の創出が望まれる.

本研究では、三次元空間で任意のビーム強度分布を得る ために、空間に結像しようとするビームの波面を、複素透 過率をもつ透過板により再現する新しい概念による三次 元一括ビーム露光方法を提案し、これを用いた三次元マイ クロ・ナノ構造の直接一括加工の原理的な検証を行った.

# 2. 複素変調透過板(ビルトインレンズマスク) による結像原理<sup>1)</sup>

#### 2.1 結像原理の概要

空間にビームを結像させるためには,結像面あるいは結 像空間に向けて収束する複素波面(振幅と位相をもつ振動 面)を'生成'すればよいことになる.

このような複素波面を人工的に生成するために,ここで はコヒーレントなビームを「透過板」に照射し,透過した ビームの振幅と位相すなわち複素振幅を変調することに より,複素波面を再現することを試みた.

この「透過板」を、透過光の波面を複素変調するという 意味で、複素変調透過板と呼ぶことにする.さらに、あた かも結像性のあるレンズを通して露光したように結像さ せる意味で、ビルトインレンズマスクと名付けた.

#### 2.2 ビルトインレンズマスクの概念

図1に, ビルトインレンズマスクの概念図を示す.レン ズを用いた従来の結像光学系では,図1a)に示すようにマ スクを通過した光ビームは,従来の幾何光学ではレンズに より屈折し, 焦点面で結像する.

一方で,光ビームは振幅と位相をもつ波面として空間を 伝搬するため、レンズは屈折率差を利用して波面を'変調' する機能持つものと見なすことができる.

従って、図1b)に示すように、マスクを透過した後の波 面(振幅と位相)を、レンズを透過した後の波面に置き換え ると、マスク像を焦点面に結像させることができる.



図1 複素変調透過板(ビルトインレンズマスク)による ビーム露光の原理

ここで、類似する技術としてホログラフィを連想するが、ホ ログラフィは物体からの反射光を再現し、実態の無い虚像を得 ているのに対し、ビルトインレンズマスクは実像を結像するた めビーム加工が可能となる.この点が、ホログラフィとの大き な違いとなる.

ビルトインレンズマスクは,透過後の波面の振幅と位相 をマスク平面内で変化させ,レンズを透過した光ビームの 波面をマスク面で再現することにより,あたかもレンズを 通して実像として結像させるものである.

これにより,解像性を損なうことなく任意の焦点位置で, 任意の像強度を得ることができるとともに,複数の焦点位

\*大阪府立大学 大学院 工学研究科 電子・数物系専攻 電子物理工学分野 教授

置を持つ多重焦点機能や、これを利用した三次元露光の可 能性が生まれる.

## 2.3 ビルトインレンズマスクの設計

ビルトインレンズマスクの設計方法について簡単に述べる. 図 1 b)に示すように、焦点面上で得ようとする任意の光強度分  $\pi u_0(x,y)$ を定義する.

ここで、焦点面(x,y)から d だけ離れた光ビーム伝播面(X,Y)の 複素振幅関数を  $g_0(X,Y)$ とすと、波数空間  $k=(k_x,k_y,k_z)$ での平面波 の複素振幅  $\overline{A}_0$  は、

$$\overline{A}_0(k_x, k_y, d) = \iint u_0(x, y, d) \exp[i(k_x x + k_y y)] dx dy \quad (1)$$

と表せる.これより, 焦点面からの位置 z における平面 波の複素振幅  $A_0(k_x,k_y,z)$ は,

$$A_0(k_x, k_y, z) = \overline{A}_0(k_x, k_y, z) \exp\left[i\sqrt{k_x^2 + k_y^2}z\right]$$
(2)

で表される.したがってマスク面(x=0)での複素振幅 g<sub>0</sub>(X,Y)は,

$$g_{0}(X,Y) = \begin{cases} 1/(2\pi)^{2} \iint_{\sqrt{k_{x}^{2} + k_{y}^{2}} \le 2\pi/\lambda \sin\theta} A_{0}(k_{x},k_{y},z) \exp\left[-i(k_{x}x + k_{y}y)\right] dk_{x} dk_{y} \\ 0: for \sqrt{k_{x}^{2} + k_{y}^{2}} > \frac{2\pi}{\lambda} \sin\theta \end{cases}$$
(3)

と表される.

すなわち, 焦点面上で得たい複素振幅分布 $u_0(x, y)$ を与 えると, 焦点面からz離れた光伝播面の複素振幅 $g_0(X, Y)$ すなわちビルトインレンズマスクの複素透過率が求まる. ここで,  $\theta$ はレジスト面から見たマスクの半角であり, レ ンズの開口率 NA に相当する.

以上のように設計したビルトインレンズマスクに、コヒ ーレント光ビーム(可干渉光)を照射すると、焦点面上に光 強度分布 $u_0(x,y)$ の像を得ることができる.ただし、(3)式 に示すように、解像性は $\theta$ の大きさに依存し、マスクの大 きさや焦点距離によっては解像性が劣化する.

このように、レンズ効果をもたらす複素振幅波面を、マ スクの透過率と位相差で再現することにより、レンズレス で任意の転写深さ(焦点面)での解像度を向上させた微細 加工を実現することができる.

#### 2.4 複素透過率の離散化

先ほど求めた複素振幅 $g_0(X,Y)$ は,透過率分布  $|g_0(X,Y)|$ と位相分布 $\angle g_0(X,Y)$ から成る連続関数で あるため、マスク上で連続的に変化する透過率と位相を実 現する必要がある.しかし、現在の技術ではそのような透 過板を作製することは困難である.

そこで,連続的な複素振幅分布を離散化することで,作 製可能なマスクとして,複素振幅を近似して再現した. これには、従来の半導体リソグラフィで用いる位相シフ トマスク技術が利用できる.これは、石英上にクロムパタ ーンを転写し、開口部に掘り込みを加えることで、石英層 と空気層の屈折率の違いにより位相差を発生させるマス クである.

まず透過率について離散化を行った.連続透過率分布 |g<sub>0</sub>(X,Y)| に (4) 式 を 用 い て 離 散 化 透 過 率 分 布 |G<sub>0</sub>(X,Y)|を導く. 閾値 T<sub>c</sub>以上を透過部分, T<sub>c</sub>以下を遮 光部分となる.

$$|G_0(X,Y)| = \begin{cases} 1 : |g_0(X,Y)| \ge T_c \\ 0 : |g_0(X,Y)| \le T_c, \end{cases}$$
(4)

次に、位相分布について離散化を行った.連続位相分布  $\angle g_0(X,Y)$ に (5)式を用いて離散化位相分布  $\angle G_0(X,Y)$ を導く.ここで、 $\Delta \theta$  は位相許容値を表し、透過 させたい位相から  $\Delta \theta$  ずれた位相分布までを光が透過する となる(透過率は 1.0).

$$\angle |G_0(X,Y)| = \begin{cases} 0 : \Delta\theta \le \angle (g_0(X,Y)) \le \pi - \Delta\theta \\ \pi + \Delta\theta \le \angle (g_0(X,Y)) \le 2\pi - \Delta\theta \end{cases}$$
(5)

ここで、複数の位相差を創出するには、複数の段差が必要になり、透過板の作製プロセスが複雑になる.このため、 基本的に式(5)を用いた二値化を行った.連続的に変化す る複素振幅分布を、二値化する例を図2に示す.



この手法により,図3に示すようなビルトインレンズマ スクが作製できる.



図3 離散化したビルトインレンズマスクの断面図 (透過率を(1,0), 位相を(0,π)で離散化している)

## 3. 二次元結像の検証

ここでは、ビルトインレンズマスクの有効性を、シミュ レーション並びに実験により検証した.

#### 3.1 ビルトインレンズマスクの作製

図4に、ビルトインレンズマスクの作製方法を示す. 石英基板に、電子線(EB)露光とリフトオフプロセスにより、 遮光部分となるクロム(Cr)マスク部分を作製したものを 用意する(図4a)~d)). 続いて、電子線露光時に作製した 位置合わせマーク(アライメントキー)を基に、位相変調部 分のパターンを、縮小投影露光装置を用いてフォトリソグ ラフィを行い、これによって形成したレジスト樹脂パター ンを保護膜として、ドライエッチングにより石英基板に溝 を彫り込むことにより、位相変調部分が作製できる(図4e) ~h)).

図5に、この方法で試作した、ビルトインレンズマスク の一例を示す.図5(a)は、光学顕微鏡写真で、黒い部分が 光の透過部分で、白い部分が遮光部のCrにより光が反射 した部分である.また、図5(b),(c)は、走査型電子顕微鏡写 真である.位相変調部分が、彫り込まれている.



図4 ビルトインレンズマスクの作製方法





(a) 光学顕微鏡写真

(b) 走查型電子顕微鏡写真



(c) 走査型電子顕微鏡写真(拡大)図5 試作したビルトインレンズマスク

#### 3.2 ビーム照射系

ビルトインレンズマスクとビーム軸の垂直性,マスクと 被照射材料の平行性を確保するために,専用のビーム照射 系を作製した.



図 6a)に全体図を示す. ここでは、ビーム光源として UV 光源を用い、光ファイバーで照明光学系を通してコヒーレ ント性を確保して約 1 インチ径の平行ビームとし、図 6 b)に示すマウント部に照射した. ビルトインレンズマスク によるビーム照射では、マスクと光軸との垂直性を確保す る必要がある. このため、マウント部のステージからの参 照レーザー光の反射光により、光軸とのずれを調整した. また、ビルトインレンズマスクとレジスト間にシムを挟み 平行性と間隔を確保した.

ここでは,波長 365nm で焦点距離 d=50µm とし,線幅 2µm の T 字型のパターンを露光した.

図 7 に、従来マスクとビルトインレンズマスクを用いて、 感光性樹脂(フォトレジスト)を露光し、現像後の形状観察結果 を示す.設計線幅 2.0µm の T 字パターンに対して、従来露 光方法での解像寸法が約 5.8µm であるのに対して、ビルト インレンズマスクでは約 3.0µm の解像性が得られている. また、実際の露光実験とシミュレーション解析結果はよく 一致し、ヒルトインレンズマスクの効果とシミュレーショ ン解析の信頼性が検証できた.



b) ビルトインレンズマスクによる露光

図7 ビルトインレンズマスクの効果検証

左: マスクレイアウト, 中: 光強度度分布のシミュレーション, 右: レジスト露光実験結果 (設計線幅: 2.0μm, マスクからの 距離(焦点位置): 50μm)

# 4. ビルトインレンズマスクによる三次ビーム 加エ<sup>2)</sup>

#### 4.1 シードパターンを用いた三次元結像方法の提案

ビルトインレンズマスクの機能を利用すると、一枚のマ スクで、異なった複数の焦点位置に結像させる多重焦点機 能が期待できる.これを利用して、三次元結像を試みた.

図8に、多重焦点機能の基本的検証概念を示す.ここでは、3つの焦点位置に結像するバターンを重畳させている. 各焦点位置での種となるパターンをシードパターンと呼ぶことにする.

各焦点 $z_i$ におけるシードパターン $u_i(x, y, z)$ に対応した複素振幅 $g_i(X, Y)$ をそれぞれ導出し、重畳させる.

 $g(X,Y) = \sum w_i g_i(X,Y) e^{i\Delta\theta}$ (6)

ここで、パターン間の相互干渉を防ぐためのパラメータ としてシードパターンの強度 $w_i$ ,位相変調 $\Delta \theta_n$ を与えた. これにより、多重焦点機能を持つビルトインレンズマスク の複素振幅g(X,Y)を得る.

さらに、連続的な複素透過率g(X,Y)に対して適切な閾 値を設け、透過率 T=1 or 0、位相 $\theta$ =0 or  $\pi$  となるように 透過率・位相の二値化を行い、G(X,Y)とすることで作製 可能なマスクとした.



この方法による三次元構造の露光を検証するため、計算機シ ミュレーションによる結像評価を行った. 図9に、A 字型構造 の結像結果を示す. 図9a) に示すように、シードパターン に位相調整を施さない場合は、平行する二本のパターンが 干渉により消失している.

そこで、図9b)のように下段のシードパターンの位相を シフトすることにより、消失することなく上下のパターン が結像できた.また、図で示したように、両横の深い焦点 長さをもつ像も得られている.

このように、シードパターンの相互の干渉を回避するこ とで、一枚のマスクによる一括露光により、三次元結像が 実現できることが、シミュレーション解析により示された.

図10は、文字「OSAKA」に対応するビルトインレンズマ スクの複素透過率を、焦点位置の異なる5層のシードレイ ヤーを用いて設計し、その透過光の三次元空間での露光強 度分布を求めた結果を示す.図10a)は、位相調整しない場 合を示す.文字「K」の斜め部分がシード層に対応して階 段状となっている.また、文字「S」の平行な3本ラインは、 一部で干渉によると思われる分離不良が見られる.このた め、位相を調整した場合の結果を、図10b)に示す.結像性

はやや劣化するが、文字としては判別できるレベルである.



図9 シードパターン用いた A 型文字構造の 三次元転写像(複素透過率の離散化なし)

このように、シードパターンを重畳させたビルトインレ ンズマスクにより、三次元結像の可能性が示された.



4.2 ビルトインレンズマスクによる三次元結像の検証<sup>3)</sup>

三次元結像を実験的に検証するため、ビーム光源に紫外 線をもちいて、ネガ型の紫外線感光性レジストを照射し、 これを現像してその形状を調べた.レジストは、半導体リ ソグラフィ用の厚塗りレジスト SU8(日本化薬)を用いた. 露光現像後のレジスト形状を、あらかじめ計算した三次元 光強度分布と比較することにより、三次元結像を検証した.

検証には、レジスト現像中の現像液の流れや、乾燥度の 表面張力による基板との固着を回避するために、ピラミッ ド型骨組み構造を用いた. 図 11 a)に示すように、複数の シードパターンをピラミッド型の骨組み構造に沿って配 置した. これより図 11 b)に示すようなビルトインレンズマ スクの構造を作製し、これを用いて、露光実験を行った.

ピラミッドの高さや、レジスト膜厚、マスクとレジスト とのギャップを変化させたものを設計・作製した.シード パターンのサイズは 500nm 角とし、四角錐の高さは 30,μm, 底辺の1辺は 25μm とした.マスクの最小ピクセルサイズ は 250nm とし、複素変調は、0 ならびにπに離散化した.





図12に、ギャップ40µm、レジスト厚さ30µmで設計・作 製した結果を、図13に、ギャップ60µm、レジストの厚みを 45µmとした場合の結果を示す.

図 12 a),13a) に、レジスト中での光強度分布のシミュレ ーション結果を、図 12 b),13 b)には、実験結果を示す.

いずれの条件下においても、ピラミッドフレーム状の三 次元構造体が、一回の紫外線照射により形成できており、 シミュレーションによる結像予測結果と一致した.

このように,ビルトインレンズマスクによる三次元結像 が検証できた.



a) 光強度分布のシミュレーション結果



b) 実験結果

 図 12 ピラミッドフレーム構造の結像シミュレーション と実験結果 (設計ギャップ 40µm,レジスト膜厚 30µm)



 図13 ピラミッドフレーム構造の結像シミュレーション
と実験結果 (設計ギャップ 60µm,レジスト膜厚 45µm)

# 4.3 ビルトインレンズマスクによる三次元ビーム加工 の可能性<sup>4-6)</sup>

シミュレーションにより,多様な三次元形状加工の可能 性について検討した.ここでは,円筒構造,交差構造についてシ ミュレーション解析をおこなった.

円筒状にシードを並べて露光すると、光路長が等価となる 円筒の中心軸上にリング状に結像が生じる(図 14(a)). これを 回避するため、螺旋状にシード層を配置 (図 14(b))することに より、不要な干渉を相殺して集光させることができた.





次に、上下に交差する構造について検討した(図 15). 交差に 光を結像させる場合上下パターンの干渉により,構造の分離 を回避するようにパターン間ギャップを最適化した,これによ り,上下に交差した立体構造が作製できることがわかった.



図15 立体交差構造のシミュレーション結果

# 4. あとがき

ー括照射による三次元ビーム加工を実現するため,空間 に結像しようとするビームの波面を,複素透過率をもつ透 過板(ビルトインレンズマスク)により再現する新しい概 念によるビーム照射システムを提案した.

この方法により、ピラミッド型フレーム構造の露光実験 を行い、三次元露光を実験的に検証した.

今後,紫外線,レーザービームをはじめ,超音波の三次 元結像など,干渉性ビームへの多様な応用展開が期待でき るものと考える.

# 謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団からの一般研究助成に より実施した研究に基づいていることを付記するととも に、同財団に感謝いたします.

## 参考文献

- N. Ueda, M. Sasago, H. Kikuta, H. Kawata, Y. Hirai,' Builtin Lens Mask Lithography (Challenge for high-definition lens-less lithography)' J. Vac. Sci. Technol B 32 (2014) 06F702.
- 2) T. Tanaka, H. Kikuta, H. Kawata, M. Yasuda, M. Sasago, Y. Hirai, 'Three-dimensional imaging approach using built-in lensmask lithography' Microelec. Eng., 158 (2016) 85–90.
- 3) T. Tanaka, D. Sugihara, M. Sasago, H. Kikuta, H. Kawata, Y. Hirai, 'Three-dimensional photolithography using built-in lens mask', J. Vac. Sci. Technol. B 35(2017) 06G308.
- 4) T. Tanaka, H. Kikuta, M. Yasuda, H.i Kawata, M. Sasago, Y. Hirai, 'Computational study on novel proximity lithography for deep stepped substrate by Built-in Lens Mask (BILM)', Abstract of The 25th Symposium on Photomask and NGL Mask Technology, (Yokohama, 2018) 10A-4 (Invited).
- 5) D. Sugihara, A. Misaka, K. Sato, H. Kikuta, H. Kawata, M. Yasuda, M. Shirai, M. Sasago, Y. Hirai, 'Computational study on micro 3-dimensional imaging using novel photolithography', 63rd Int. Conf. on Electron, Ion, and Photon Beam Technol. & Nanofabrication (Minneapolis, 2019) P1-15 (Invited).
- 6) A. Misaka, D. Sugihara, K. Sato, M. Sasago Y. Hirai, 'Builtin Lens Mask Technology for Generating Three Dimensional Image based on Computational Lithography' J. Photopolym. Sci. and Technol., 32 (2019) 345-353.