

# 複素変調透過板による三次元ビーム加工

大阪府立大学 工学研究科 電子・数物系専攻  
教授 平井 義彦

(平成 27 年度 重点研究開発助成 A フリーテーマ AF-2015201)

キーワード：三次元加工, 波面, 複素振幅, フォトマスク, 多重焦点

## 1. 研究の目的と背景

マイクロ・ナノ構造を、多様な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、その典型的な事例であり、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、よく知られた構造の産業応用が期待されている。

しかし、これらの構造はマイクロサイズからナノサイズの複雑な三次元構造がその殆どを占めており、従来の微細加工技術では作製困難な構造が多い。従来の加工技術である三次元プリンターに見られるように、多くの構造を大面積にわたって一括して加工するためには、多くの時間と費用を要し、極めて非効率となる。

一方、地球規模のエネルギー消費量の抑制は、国際的な技術課題のひとつとなっている。このうち、金属材料等の界面で発生する摩擦を抑制することで、自動車をはじめ船舶、航空機など幅広い分野でのエネルギー消費量抑制効果が期待される。また、サメの体表面や、ヤモリの足裏構造などの生体模倣構造に代表される材料表面の特殊な微細形状は、摩擦や密着の制御が可能で、近年活発に研究されている。

例えば、鮫の皮膚のくさび型突起状のマイクロ構造物は、流体抵抗を低減する機能がある。これを、航空機の翼、エンジン部分のブレード、船舶用スクリュー、船底などの金属表面に直接加工することにより、不必要な摩擦によるエネルギー消費量を抑制することが期待される。しかし、金属表面への特異な形状のマイクロ加工は、プレス加工などの従来の塑性加工では困難である。

レーザープロセッシングは有効な加工方法の一つであるが、従来の方法では、生体模倣構造のような任意のマイクロ形状の直接加工は、レーザー強度を局所的にきめ細かく制御する必要があり、極めて困難である。このためには、ミクロン精度で、かつ広範囲にわたり任意の照射強度分布を瞬時に実現できるレーザー光源あるいは照射光学系が必要となり、新しい方式の創出によるブレークスルーが不可欠とされる。

生体模倣構造に代表される三次元構造を含む機能性マイクロ・ナノ構造を、金属等の表面への直接レーザープロセッシングにより形成する技術を創出する。このため、照

射面において、任意のレーザー照射強度分布を得るための新しい概念によるビーム照射システムを開発し、これを用いた金属表面への三次元マイクロ・ナノ構造の直接加工の原理的な検証を行うことを目的とする。

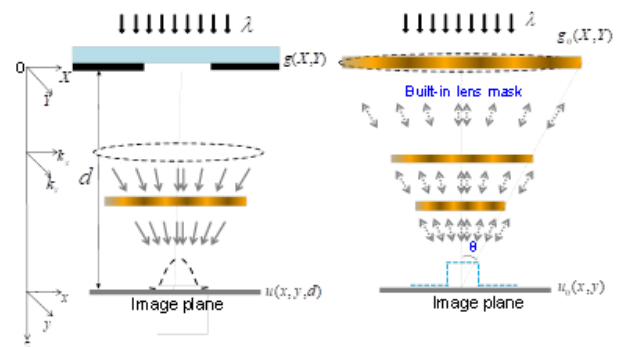
具体的には、コヒーレントなビームを、透過板を通過する際に、波面の複素振幅を変調することにより、焦点面で任意の強度分布をもつ波面に変えることで、透過板を通ったビームが、レンズを通して結像する状態と同等の波面を得る。このような結像機能をもたせた透過板を、複素変調透過板(ビルトインレンズマスク)と呼ぶことにする。

ここでは、三次元空間での結像が可能な複素変調透過板の設計と、それを用いた三次元結像実験を行い、三次元ビーム加工の可能性を検証することを目的とする。

## 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

複素変調透過板とは、従来のフォトマスクにレンズ機能をもたせたマスクで、解像性を改善するとともに、焦点深度も確保できる。さらに、焦点面で任意の像強度分布を得ることができる新しいマスク技術である。ここでは、レンズ効果を組み入れたマスクという意味で、複素変調透過板をビルトインマスクレンズと呼ぶことにする。



a) 従来の露光 b) 複素変調透過板による露光

図 1. 複素変調透過板(ビルトインレンズマスク)による光ビーム露光の原理

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露光光学系では、図 1 a) に示すようにマスクを通過した光は、従来の幾何光学ではレンズにより屈折し、焦点面で結像すると説明されている。一方で、光は

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。

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レジストなどの露光が可能となる。この点が、ホログラムとの違いとなる。ビルトインレンズマスクは、マスクを透過する波面の振幅と位相を平面内で変化させ、レンズを透過した光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結像させようとするものである。さらに、マスクパターンは明暗の二値の強度分布であるが、後で述べるように任意の光強度分布を焦点面で再現できる機能を持ち合わせる。

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、複数の焦点位置を持つ多重焦点ビルトインレンズマスクや、これを利用した三次元露光についても可能性が生まれる。

続いて、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布  $u_0(x, y)$  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  $\bar{A}_0$  は、

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

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、

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

で表される。したがってマスク面での複素振幅  $g_0(X, Y)$  は、

$$g_0(X, Y) = \begin{cases} 1/(2\pi)^2 \iint_{\sqrt{k_x^2 + k_y^2} \leq 2\pi/\lambda \sin \theta} \bar{A}_0(k_x, k_y, z) \exp[-i(k_x X + k_y Y)] dk_x dk_y \\ 0: \text{for } \sqrt{k_x^2 + k_y^2} > \frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta \end{cases} \quad (3)$$

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、レンズの開口径 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(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。

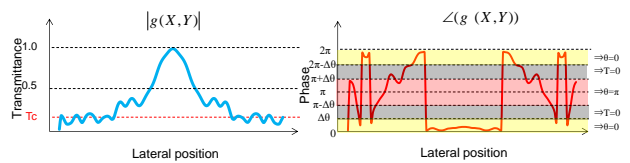
先ほど求めた連続複素振幅分布  $g_0(X, Y)$  は連続透過率分布  $|g_0(X, Y)|$ 、連続位相分布  $\angle g_0(X, Y)$  から成る連続の関数であり、マスク上で再現することは現在の技術では不可能である。そこで、連続複素振幅分布の離散化を行うことで、作製可能な位相シフトマスクを用いて複素振幅を再現することができる。以下にその手法について述べる。

位相シフトマスク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、石英基盤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  $|g_0(X, Y)|$  に(4)式を用いて離散化透過率分布  $|G_0(X, Y)|$  を導く。閾値  $T_c$  以上を透過部分、 $T_c$  以下を遮光部分となる。

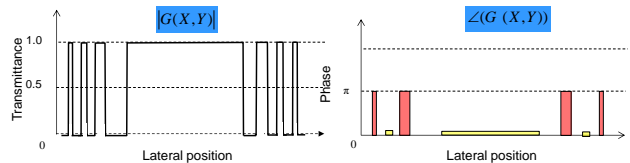
$$|G_0(X, Y)| = \begin{cases} 1: |g_0(X, Y)| \geq T_c \\ 0: |g_0(X, Y)| \leq T_c \end{cases} \quad (4)$$

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)。これにより石英に多段差を加えることにより離散化位相分布  $\angle G_0(X, Y)$  は再現できる。しかし、複数の段差が必要になるほどマスク作製プロセスが複雑になるため、基本的に式(5)を用いた二値化を行った。連続複素振幅分布を二値化した例を、図 2 に示す。

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



(a) 連続複素振幅分布



(b) 離散化複素振幅分布(二値化)

図 2. 連続複素振幅分布の二値化例

この手法により、設計したビルトインレンズマスクが実際に作製可能となる。ビルトインレンズマスクの断面図を図3に示す。

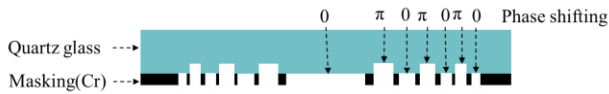


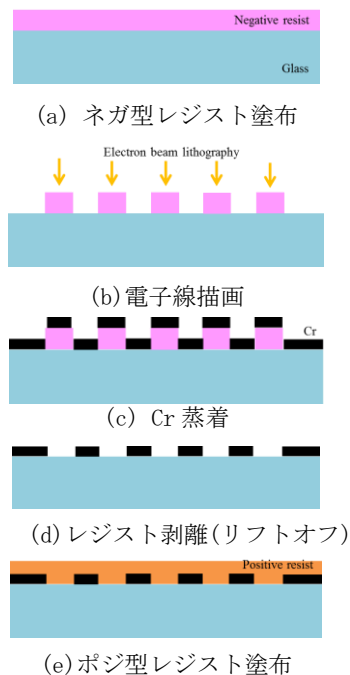
図3. ビルトインレンズマスクの断面図

## 2・2 二次元結像原理の検証

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。ここで、式(3)で得られる連続的な複素透過率の分布  $g_0(X,Y)$ は、従来のマスク作製技術では実現が極めて難しい。しかし、透過率と位相を離散化することにより、従来の位相シフトマスク作製技術によって作製可能なマスクとなる。 $g_0(X,Y)$ を、適切な閾値により、透過率を1 or 0, 位相  $\theta$  を0 or  $\pi$ となるように離散化を行い、 $G_0(x,y)$ とした。

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4 a)~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。



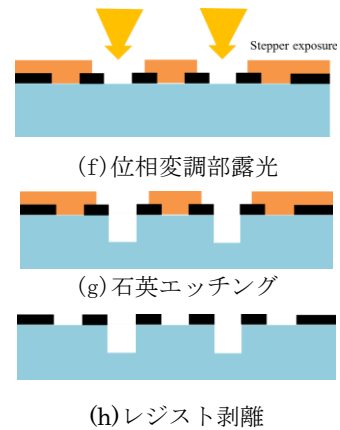
(a) ネガ型レジスト塗布

(b) 電子線描画

(c) Cr 蒸着

(d) レジスト剥離(リフトオフ)

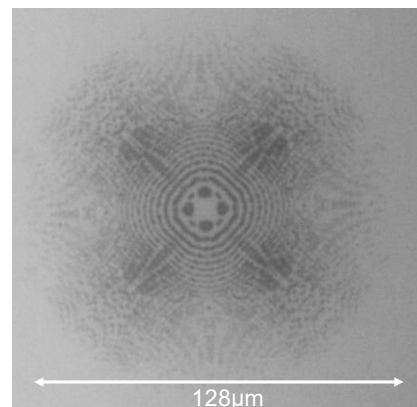
(e) ポジ型レジスト塗布



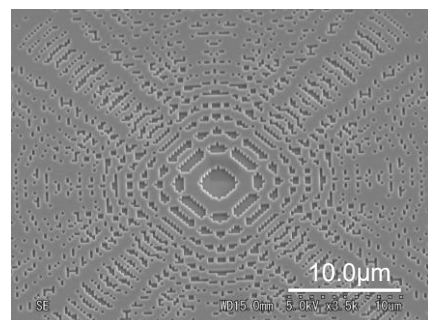
(h) レジスト剥離

図4 マスク位相シフト部分加工のプロセス図

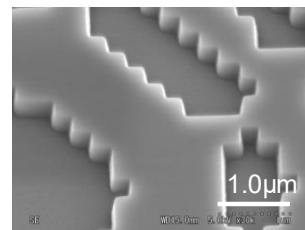
図5に、以上のような方法で試作した、ビルトインレンズマスクの一例を示す。図5(a)は、金属顕微鏡写真で、黒い部分が光の透過部分で、白い部分が遮光部のCrにより光が反射した部分である。また、図5(b),(c)は、走査型電子顕微鏡写真である。位相変調部分が、彫り込まれている。



(a) 金属顕微鏡写真



(b) 走査型電子顕微鏡写真



(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

つぎに、近接露光装置を用いて、波長 365nm、焦点距離  $d=50\mu\text{m}$  とし、線幅  $2\mu\text{m}$  の T 字型のパターンを露光した場合について、図 6 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  $2.0\mu\text{m}$  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  $5.8\mu\text{m}$  であるのに対して、ビルトインレンズマスクでは約  $3.0\mu\text{m}$  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、ビ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。

この実験では、従来の近接露光装置を用いているため、コリメーション角と露光光源の可干渉性を改善することにより、さらに解像度の向上が期待できる。

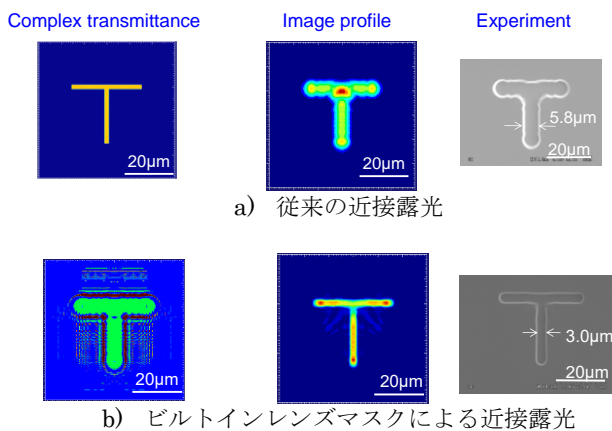


図6 ビルトインレンズマスクの効果検証

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:  $2.0\mu\text{m}$ , マスクからの距離(焦点位置):  $50\mu\text{m}$ )

### 3. 複素変調透過板による三次元結像方法の提案<sup>2)</sup>

#### 3・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し、一枚のマスクを透過させることにより、異なる複数の焦点位置に結像するパターンを形成する多重焦点機能が期待できる。これを利用することにより、三次元結像が期待できる。

まず、シミュレーション解析によりその可能性を検証した。図7に、多重焦点機能の基本的検証概念を示す。

ここでは、2つの焦点位置に結像するパターンを重畳させたときの強度分布を求めた、

図7 a)は、焦点位置  $z_1$  におけるパターン  $u_1$  に対応する複素透過率  $g_1$ , b)は 焦点位置  $z_2$  におけるパターン  $u_2$  に対応する複素透過率  $g_2$ , c)は複素透過率  $g_1$  と  $g_2$  を単純に重畳した複素透過率  $g_1+g_2$  の概念を示す, d) は複素透過率  $g_2$  の位相をシフトさせて  $g_1$  と重畳させた複素透過率  $g_1+g_2^*$  の概念を示す。ここで、それぞれのパターン  $u$  を、シードパターン(種パターン)と呼ぶことにする。

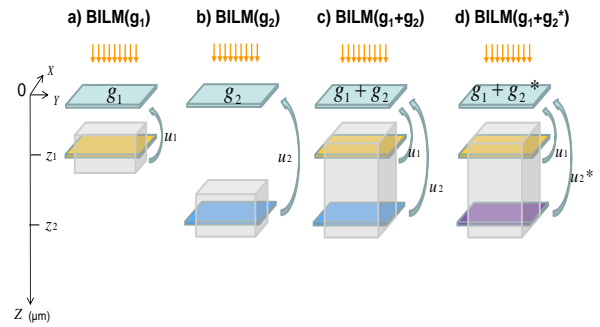


図7. シードパターンによる多重焦点露光

図8に、線幅  $2.0\mu\text{m}$  のシードパターンに対し、図7で示したビルトインレンズマスクを通して露光を行った場合に、焦点位置が  $30\sim 70\mu\text{m}$  での光強度分布のシミュレーション結果を示す。

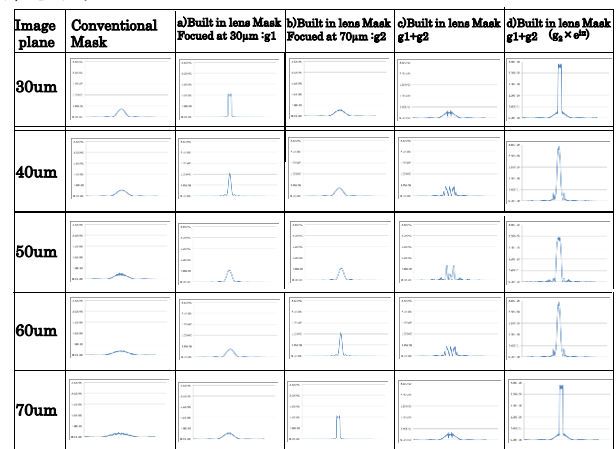


図8. シードパターンの転写結果予測

ここで、各グラフの横軸は水平方向の位置で、縦軸は光強度 (任意単位) である。単一焦点のマスク a), b) では、焦点位置からずれると強度分布が劣化する。また、焦点位置の異なるビルトインレンズマスクを単純に重畳した c) では、波面の相互干渉により相殺され、解像しない、しかし、d) では一方のシードパターンの位相を調整させることで、相互干渉が緩和され、それぞれの焦点位置でシードパターンが解像するとともに、両者の中間部分の深度においても連続して照射されることが示される。

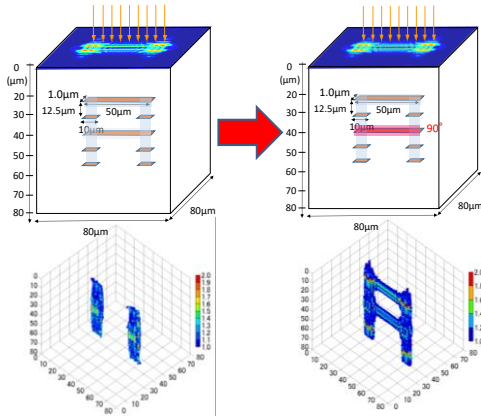
このように、複数の異なる焦点位置に対してパターンを結像させる露光が可能となることが予測できる。

つぎに、三次元構造の露光を実現するため、目的とする三次元構造を複数のシードパターンに分割してビルトインレンズマスクを設計した。図9に、A字型構造の結像結果を示す。図9.a) に示すように、シードパターンの位相シフトを施さない場合は、平行する二本のパターンが消失している。

そこで、図9.b)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している。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

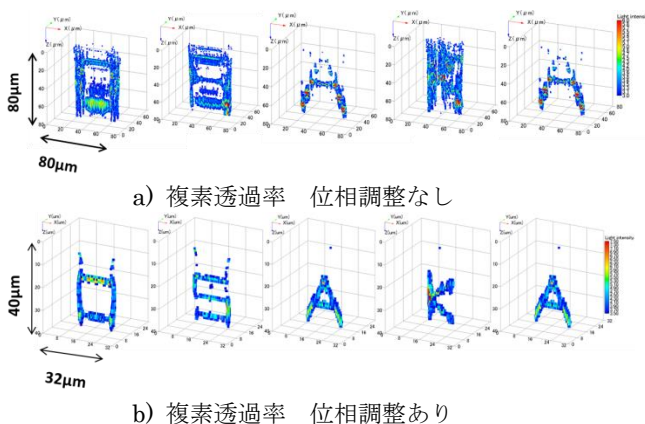
ーンの相互の干渉を回避することで、一枚のマスクによる一括露光により、三次元結像が実現できることが示された。

この方法を用いると、従来の三次元造形技術で必要であった複数回の露光や基板の移動を必要とせず、一回の照射(露光)により一括して効率的に三次元構造加工が実現できることが示された。



a)位相調整なし      b) 位相調整あり  
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)

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8 a)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8 b)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。



a) 複素透過率 位相調整なし  
b) 複素透過率 位相調整あり  
図10 文字パターンの三次元結像結果

以上のように、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. 複素変調透過板による三次元加工の検証<sup>3)</sup>

##### 4・1 実験方法

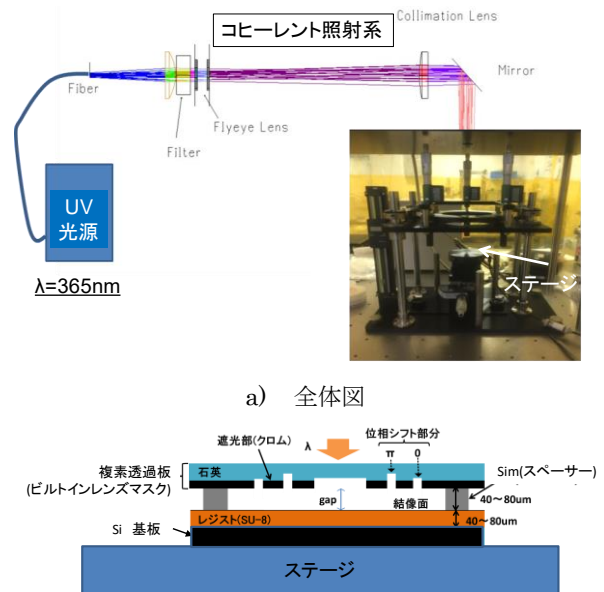
ここでは、三次元結像を実験的に検証するため、ビーム光源に紫外線を持ちて、ネガ型の紫外線感光性樹脂レジストに紫外線を照射し、これを現像してその形状を調べた。レジストは、半導体リソグラフィ用の厚塗りレジストSU8(日本化薬)を用い、シリコン基板上に回転塗布し、複素変調透過板(ビルトインレンズマスク)との間にはギャップを設けて露光した。露光。現像後のレジスト形状を、あらかじめ計算した三次元光強度分布と比較することにより、三次元結像性を検証した。

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、ピラミッド型の骨組み構造を用いた。

##### 4・2 ビーム照射系

ここでは、複素透過板とビーム軸、照射対照の位置的精度を確保するために、専用の光学照射系を作製した。

図11 a)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11 b)に示すマウント部に照射した。複素変調透過板によるビーム照射では、マスク、被照射材料と光源の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 Gap とした。



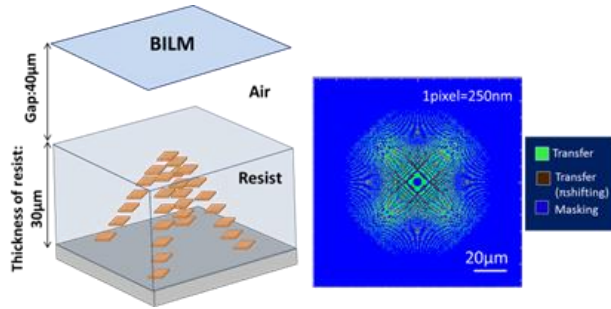
a) 全体図  
b) マスクマウント部  
図11 ビーム照射系

##### 4・3 露光実験

複素変調透過板(ビルトインレンズマスク)による三次元結像を検証するため、図12 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 12 b)に示すような複素変調透過板の構造を設計・作製し、これを用いて、露光実験を行った。

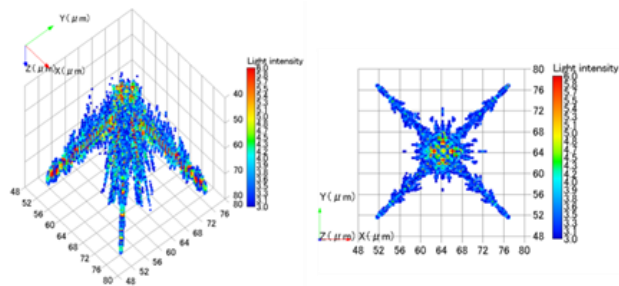
ピラミッドの高さや、レジスト膜厚、マスクとレジストとのギャップを変化させたものを設計・作製した。シードパターンパターンのサイズは  $500\text{nm}$  角とし、四角錐の高さは  $30\mu\text{m}$ 、底辺の 1 辺は  $25\mu\text{m}$  とした。マスクの最小ピクセルサイズは  $250\text{nm}$  とし、複素変調は、 $0$  度ならびに  $180$  度の二段階に二値化した。



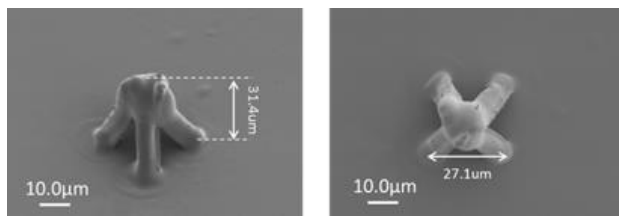
a) シードパターン      b) 位相分布  
図 12 複素変調透過板の設計例

図13に、ギャップ $40\mu\text{m}$ 、レジスト厚さ $30\mu\text{m}$ で設計・作製した結果を、図14に、ギャップ $60\mu\text{m}$ 、レジストの厚みを $45\mu\text{m}$ とした場合の結果を示す。

図 13 a),14 a) 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 13 b),14 b)には、実験結果を示す。

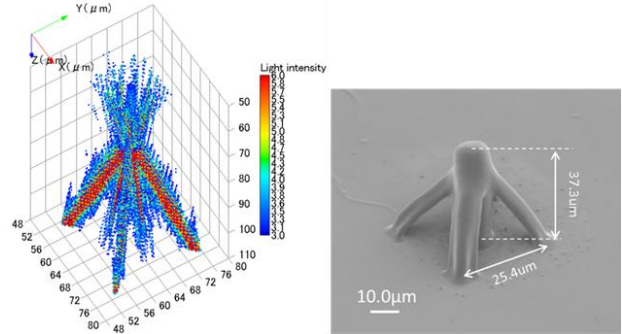


a) 光強度分布のシミュレーション結果



b) 実験結果

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  $40\mu\text{m}$ 、レジスト膜厚  $30\mu\text{m}$ )



a) 光強度分布

b) 実験結果

図 14 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  $60\mu\text{m}$ 、レジスト膜厚  $45\mu\text{m}$ )

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よく一致している。これより、複素変調透過板による三次元結像が検証できた。

## 5. まとめ

複素透過率分布を持つ複素変調透過板(ビルトインレンズマスク)を用いた三次元結像方法を新しく提案し、計算機シミュレーションにより、その効果を検証した。

これに基づき、ピラミッド骨格状の三次元構造に対応する複素変調透過板の設計と作製を行った。

紫外線ビームと紫外線感光性樹脂を用いて、実験ならびに光学像の計算結果より、複素変調透過板用いた一括照射により、三次元構造体の形成を実験的に確認した。

この方法により、可干渉性のあるレーザーによる無機材料の三次元的なアブレーション加工の可能性が示され、金属表面への生体模倣構造などの加工の可能性が検証できた。

## 謝 辞

複素変調透過板の作製にあたり、JST ナノテクノロジーハブ拠点 (京都大学) に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) N. Ueda, M. Sasago, H. Kikuta, H. Kawata, Y. Hirai, J. Vac. Sci. Technol B 32 (2014) 06F702.
- 2) T. Tanaka, H. Kikuta, H. Kawata, M. Yasuda, M. Sasago, Y. Hirai, Microelectronic Engineering 158 (2016) 85–90.
- 3) T. Tanaka, D. Sugihara, M. Sasago, H. Kikuta, H. Kawata, and Y. Hirai, J. Vac. Sci. Technol. B 35(2017) 06G308.