

令和 6 年 5 月 30 日現在

機関番号：24405

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K05289

研究課題名（和文）三次元フォトリソグラフィ

研究課題名（英文）3-dimensional photolithography

研究代表者

笹子 勝（Sasago, Masaru）

大阪公立大学・大学院工学研究科・客員研究員

研究者番号：40727145

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：三次元構造体を、シード要素に分割し、各要素を結像するための複素振幅波面を算出したのち、これらを重畳して一枚の複素透過板（ビルトインレンズマスク）とし、このマスクに光を照射することにより、レジスト中に三次元の結像構造を焼き付ける三次元フォトリソグラフィの実現を図った。シードの配置と複素振幅分布を最適化するシステムを構築した。その結果、立体交差する線パターンでの相互干渉の低減、リングおよびスパイラル状の構造での軸構造発生の抑制に効果があった。これに基づき、三次元構造の露光現象実験を行った。その結果、ピラミッドのフレーム構造など単純に傾斜し、立体的な交差のない構造では三次元構造が得られた

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでの三次元微細加工では、一括露光による加工が不可能であったが、本研究で開発・検証した新しいフォトリソグラフィでは、従来の半導体リソグラフィとの整合性が図られた一括露光方式である。従来のフーリエ光学理論を光学的に応用した新しい三次元結像方法を検証できた学術的意義とともに、現在欧米で研究開発が熾烈に展開されている半導体チップレット技術の中でも、このコアとなる半導体後工程、三次元半導体製造プロセスへの実装への産業応用が期待できる

研究成果の概要（英文）：The three-dimensional structure was divided into seed elements, and complex amplitude wavefronts for imaging each element were calculated. The mask is irradiated with light to realize three-dimensional photolithography in which three-dimensional image structures are baked into the resist. A system was constructed to optimize the seed arrangement and complex amplitude distribution. As a result, the system was effective in reducing mutual interference in three-dimensionally intersecting patterns and in suppressing the generation of axial structures in ring and spiral structures. Based on this, exposure and development experiments of three-dimensional structures were conducted. As a result, three-dimensional structures were obtained in structures such as pyramid frame structures that were simply inclined without intersecting structures.

研究分野：半導体微細加工

キーワード：フォトリソグラフィ 3次元加工 波面 複素振幅 マスク

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

三次元リソグラフィは、複雑化する電子デバイスやバイオチップなどの作製に将来的には必要となる技術として様々な方法が提唱されてきた。しかし、いずれもビームを一筆書きするなど三次元の構造を要素ごとに逐次描いていく方式であり、産業的には生産効率は十分ではなかった。このため、大面積で一括して三次元構造の作製が可能で、従来の半導体リソグラフィプロセスとの整合性の良い方式を創成することが、新しい集積化チップ技術に有用と考えられた。

### 2. 研究の目的

本研究は、三次元の実像として結像する光の波面を、結像位置から離れた面内の光の複素振幅波面として合成することにより、三次元結像を実現する新しい方法(ビルトインレンズマスクリソグラフィ)による三次元結像手法の構築に取り組む。

このため、三次元構造をシードパターンと呼ぶ構成要素に分割し、このシードパターンを投影露光した際の空間像を再合成することにより、三次元構造を結像させる方法を提案した。

本研究では、シードパターンを用いたビルトインレンズによる三次元結像方法について、加工限界を見極めるとともに、シードパターンの配置を最適化する方法を創出し、三次元形リソグラフィの実験的検証する。

### 3. 研究の方法

#### a) 結像シミュレーションによる三次元結像性の検証

シードパターンに分割し、合成した全体像の検証をおこなった。このため、複数の焦点面での二次元強度分布を、薄膜レジストに転写・現像することで、三次元投影されていることを検証する。

#### b) 三次元構造からのシードパターンの自動配置手法の構築

上記のデザインルールに基づき、所望の三次元構造をシードパターンに分割・設計する自動シードパターン発生システムを構築し、シミュレーションにより結像結果を予測・評価する。

#### c) 実験検証

設計したシードパターンにより、三次元結像波面の位相と透過率を多値化して再現するため、複素透過率分布を有するビルトインレンズマスクを作製する。これを用いて、三次元リソグラフィ実験を行い、検証する。

### 4. 研究成果

#### a) 結像シミュレーションによる三次元結像性の検証

三次元結像状態を検証するために、図1のピラミッドフレーム構造について実験検証を行った。図2に示すように、ビルトインレンズマスクから一定距離離れた面内の光強度分布を実験的に検証した。基板上に塗布した薄膜レジストを露光し、計算で求めた強度分布と比較した結果、ピラミッドフレーム状の光強度分布が空間中で得られていることが検証できた。

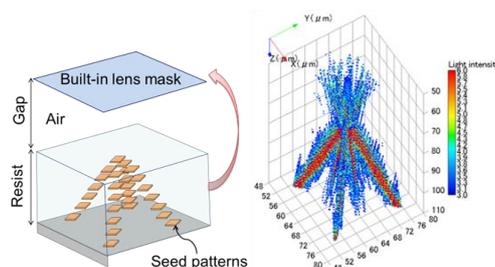


図1 ピラミッドフレーム構造のシードパターンと空間光強度分布

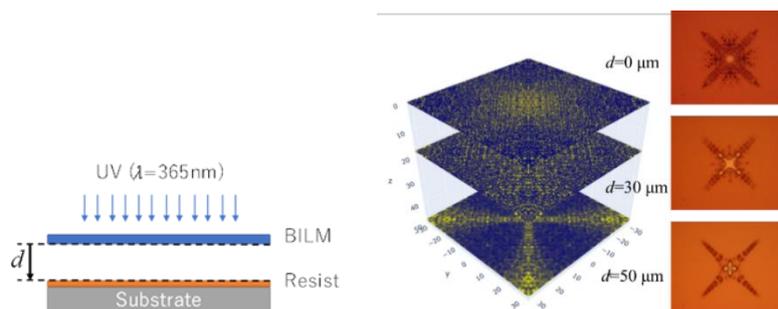


図2. 結像面を変化させて薄膜レジストを露光した場合のレジスト現像結果と計算結果

( $\lambda=365\text{nm}$ , Resist: TSMR)

b) 三次元構造からのシードパターンの自動配置手法の構築

シード最適化の手順は以下の通りである：まず、与えられたシードパターンに対して、空間内の画像強度プロファイル  $I_i(x,y,z)$  を計算する。次に、所望のプロファイル  $I_0(x,y,x)$  と  $I_i(x,y,z)$  の誤差  $\delta I$  を式(1)のように評価する：

$$\delta I(x,y,z) = I_0(x,y,x) - I_i(x,y,z) \quad (1).$$

期待される画像強度が弱い、欠けている場合、シードの強度  $I_{seed}(x,y,x)$  は式(2)のように修正する：

$$I_{seed}(x,y,x)^{n+1} = I_{seed}(x,y,x)^n + \delta I(x,y,z) * f_1/n \quad (2),$$

ここで、 $n$  は反復回数である。

逆に、予期しない領域に画像が生成された場合、シードパターンの強度は式(3)のように修正する：

$$I_{seed}(x,y,x)^{n+1} = I_{seed}(x,y,x)^n + \delta I(x,y,z) * f_2/n \quad (3).$$

ここで、 $f_1$  と  $f_2$  はフィードバック係数である。

シードの強度修正に加えて、シードの位相反転も行われ、シードパターンの追加による相互干渉を防いだ。

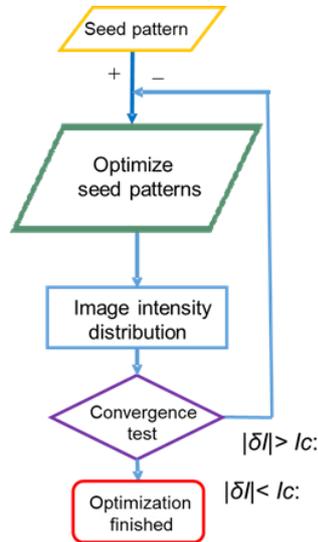
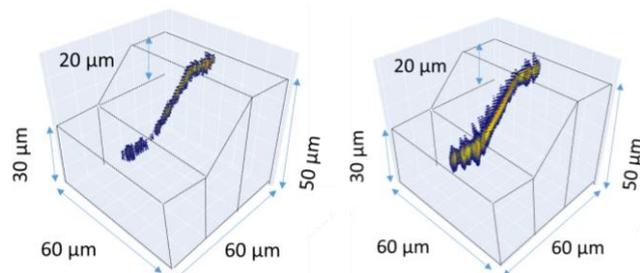


図3 シード最適化のフローチャート

このような、シードパターンの最適化設計に基づき、様々な複雑構造の三次元結像状態をコンピュータ解析により予測した。以下にそのいくつかを示す。



(a) 最適化無し (b) 最適化後

図4 段差基板上的の線パターンの結像状態

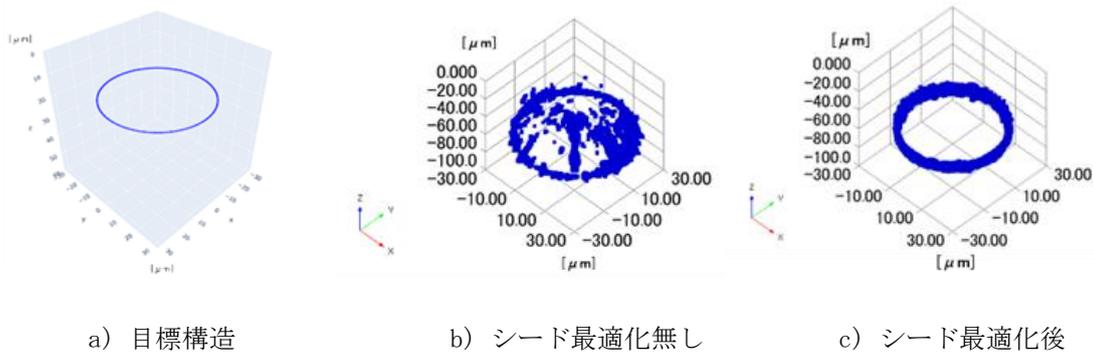


図5 リング状構造の結像状態

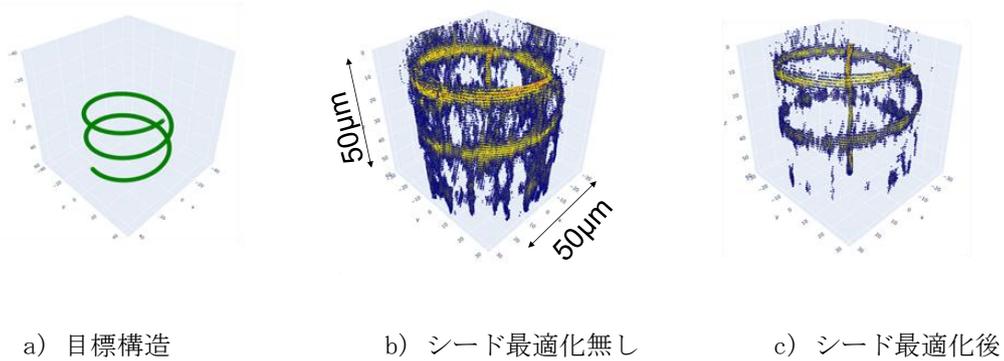


図6 スパイラルコイル構造の結像状態.

シード配置の最適化によりシード間の干渉が抑制され、段差構造、短い繰り返しらせん構造、傾斜格子構造に対するイメージングでは、欠落構造や不要な構造の顕在化が回復した。一方、リングが連続するスパイラル構造では干渉を抑制することが困難であることがわかった。これより、深さき方向に重なりがある構造やパターン干渉が起こりやすい構造では困難であることがわかった。そのような状況にない構造では、最適化によって干渉による画像の欠落や不要な画像を排除できることが示された。

c) 実験検証

ここでは、深さ方向に重なりがない構造として図1で示したピラミッドフレーム構造と、重なりがある構造として図6で示したスパイラル構造について、実験検証を行った。

図7にその結果を示す。ピラミッド構造は良好に形成できているが、スパイラル構造は、干渉などにより光強度が計算機予測によると不連続になっていることに加え、解像した構造が現像時に基板にスティッキングすることにより、三次元構造は現像後には確認できなかった。

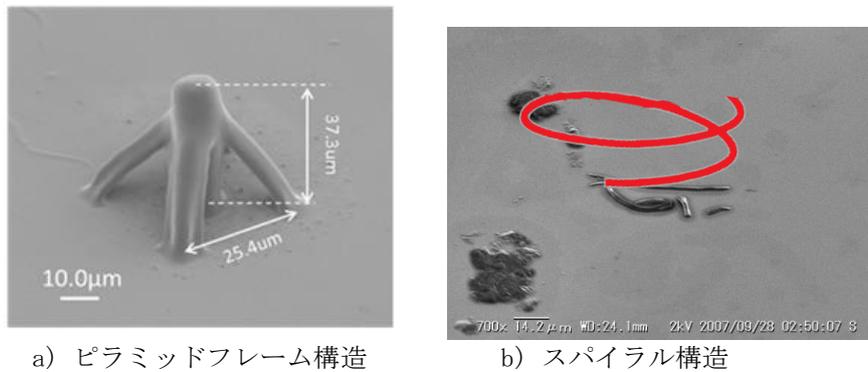


図7 ビルトインレンズマスクにより一括露光による三次元フォトリソグラフィ結果 (レジスト: SU8,  $\lambda=365\text{nm}$ )

以上より、ビルトインレンズマスクを用いた一括露光により、三次元構造の結像が可能であるが、深さ方向に重なりが多い構造では、干渉による光強度の低下が生じ、困難となることなどの課題が示された。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hirai Yoshihiko, Osumi Tomoaki, Tanaka Toshiaki, Yasuda Masaaki, Sasago Masaru	4. 巻 12497
2. 論文標題 Computational study of 3-dimensional photo lithography on limitations and possibility for novel structures	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of SPIE Advanced Lithography + Patterning	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2658128	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Osumi Tomoaki, Misaka Akio, Sato Kousuke, Yasuda Masaaki, Sasago Masaru, Hirai Yoshihiko	4. 巻 34
2. 論文標題 Computational Lithography for 3-Dimensional Fine Photolithography using Sophisticated Built-in Lens Mask	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Photopolymer Science and Technology	6. 最初と最後の頁 123 ~ 126
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2494/photopolymer.34.123	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Osumi Tomoaki, Sasago Masaru, Yasuda Masaaki, Hirai Yoshihiko	4. 巻 11908
2. 論文標題 Automatic design of the build-in lens mask for three-dimensional photo lithography	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings Volume 11908, Photomask Japan 2021: XXVII Symposium on Photomask and Next-Generation Lithography Mask Technology	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2598156	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 1件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Yoshihiko Hirai
2. 発表標題 Novel 3-dimensional photo lithography using modulated complex index mask
3. 学会等名 International workshop on micro-systems and materials (March, 2024, XI'an) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 田中 敏章, 安田 雅昭, 笹子 勝, 平井 義彦
2. 発表標題 ビルトインレンズマスクを用いた三次元フォトリソグラフィによる パターン形成
3. 学会等名 第71回応用物理学会春季学術講演会(3月,2024,東京)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Hirai Yoshihiko, Osumi Tomoaki, Tanaka Toshiaki, Yasuda Masaaki, Sasago Masaru
2. 発表標題 Computational study of 3-dimensional photo lithography on limitations and possibility for novel structures
3. 学会等名 SPIE Advanced Lithography + Patterning (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Osumi, M. Sasago, M. Yasuda, Y. Hirai
2. 発表標題 Automatic Design of the Built-in Lens Mask for ThreeDimensional Photo Lithography
3. 学会等名 Photomask Japan 2021: XXVII Symposium on Photomask and Next-Generation Lithography Mask Technology (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Osumi, A. Misaka, K. Sato, M. Yasuda, M. Sasago, Y. Hirai,
2. 発表標題 Computational Lithography for 3-Dimensional Fine Photolithography using Sophisticated Built-in Lens Mask
3. 学会等名 The 38th International Conference of Photopolymer Science and Technology (ICPST-38) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Osumi, M. Sasago, M. Yasuda, Y. Hirai
2. 発表標題 Optimization of the Built-in Lens Mask for Three-Dimensional Photo Lithography
3. 学会等名 The 64th International Conference on Electron, Ion, and Photon Beam Technology and Nanofabrication (EIPBN 2021), (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大住知暉、安田雅昭、笹子勝、平井義彦、
2. 発表標題 ビルトインレンズマスクによる三次元フォトリソグラフィ(マスクパターンの最適化検討)
3. 学会等名 68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	平井 義彦 (Hirai Yoshihiko)  (50285300)	大阪公立大学・大学院工学研究科 ・客員研究員  (24405)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------