

令和 5 年 6 月 10 日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05293

研究課題名(和文) リソグラフィ用立体面投影露光技術の研究

研究課題名(英文) Research on lithography using projection exposure of stereophonic surface

研究代表者

堀内 敏行 (Horiuchi, Toshiyuki)

東京電機大学・工学部・研究員

研究者番号：00297582

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：任意形状の緩い曲面上に線幅50～500ミクロンの大パターンを投影露光リソグラフィにより形成する立体面投影露光技術を提案し、投影露光装置を自作して実際に可能であることを示した。回転放物面ミラーを対向させて上下に重ね、両ミラーの中央部に開口を設け、下ミラーの開口内に置いた透明プラスチック Spoon を用いて製作した曲面レチクルを、斜め下の一方向からコリメートLED光源により照明した。これらの照明の工夫により、曲面レチクルの立体像を上ミラー開口内に置いたレチクルと同形の被露光物に塗布したレジスト上に鮮明に作り、パターンを転写した。曲面レチクルから曲面被露光物への一括投影露光が可能であることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

リソグラフィは通常、平面状のレチクルやマスクを原図として、半導体ウエハなどの平坦な被露光物上に微細パターンを形成する技術として用いられている。主に高開口数の投影露光や密着露光が使われており、原図基板および被露光物表面の平面度が良いことが必要とされ、少しでも凹凸があったり、傾いたり、曲がったりしているとパターンを形成できない。そのため、曲面レチクルのパターンを曲面に投影露光するという発想はこれまで全く無かった。本研究は、その新しい発想を実現するための方法を提案し、実際に可能であることを実証した。リソグラフィに新たな展開先、応用先を切り開いたという学術的意義、社会的意義は非常に大きい。

研究成果の概要(英文)：A novel stereophonic lithography method for replicating 50-500 micron rough patterns on a gently curved reticle to curved articles with the same curvature was proposed. The stereophonic lithography was actually demonstrated using a handmade exposure system. In the system, a pair of parabolic mirrors were faced in the vertical direction, and apertures were opened at the both mirror centers. A curved reticle made with a transparent plastic spoon by pasting a seal with illustrations delineated by black emulsion was placed in the lower mirror aperture, and illuminated obliquely upward from one-side by a collimated LED light source. Owing to these ideas, very clear pattern images were projected on the surface of article coated with a resist film and paced just above the upper mirror. As a result, it was successfully demonstrated that projection lithography from a curved reticle to a curved article in a lump was practicable.

研究分野：光リソグラフィ

キーワード：立体面投影露光 回転放物面ミラー 曲面リソグラフィ 大パターン ヘルスマニタ

### 1. 研究開始当初の背景

リソグラフィはレジストを所望の形状に感光させ、現像を経て微細パターンを得る技術である。主用途は半導体集積回路やMEMS(Micro Electro Mechanical Systems)用の nm~ $\mu\text{m}$  サイズの微細パターン形成である。しかし、20年ほど前から 10~200 $\mu\text{m}$  サイズの大パターンを、従来のウエハのような平坦な物体ではなく、パイプ、軸、円柱面などの表面に簡便安価に形成することが求められ始めた。モータ軸面へのエンコーダマークの形成、ステントの製作、注射針のエコー位置計測用マークの形成、空気軸受溝の形成、等が主な用途である。しかし、円筒面や球面の一部以外の 3 次元的な物体の表面にパターンを形成するためのリソグラフィ技術は全く検討されておらず、円筒面や球面についてもリソグラフィ用露光装置は市販されていなかった。一方、寿命が延び、健康への関心が高まる中、各種ヘルスマニタの開発が進められており、首、胸、手首、指先、足首などにぴったりフィットするウェアラブルセンサや付属する配線部品の製作が必要とされていた。また、不定形カムの溝形成などでも曲面上のパターン形成が必要とされていた。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、回転放物面ミラー2枚を対向して配置したマジックミラー光学系を利用し、緩い任意曲面上のパターンを、同じ形状の曲面を表面または裏面とする別の曲面上に投影露光して転写する簡便安価なリソグラフィ用の立体面投影露光装置を開発することである。

### 3. 研究の方法

回転放物面ミラーを上下に対向させたマジックミラー光学系を利用して、緩い曲表面を有する原図物体面上の原図パターンを、原図物体と同じ形状を有する被露光物体面上に塗布したレジスト膜に投影しレジスト膜を原図パターン形状に感光させ、一括して投影露光する方法を検討した。従来のマジックミラー光学系は上ミラーのみに開口を設けてあり、下ミラー底部に反射物体を置き、その反射立体像が上ミラーの開口内に作る。これをリソグラフィに利用するため、下ミラーにも開口を設け、そこに透過曲面レチクルを置いて斜め下方から照明することを考えた。露光装置を自作して立体面投影露光が可能であることを実証した。また、パターンの解像性を向上させ、露光フィールドを広げるための方策を検討し、コリメート光源による一方向からの照明が有効であることを示した。

### 4. 研究成果

#### (1) まえがき

リソグラフィには、寸法数  $\mu\text{m}$ ~数 100 $\mu\text{m}$  のパターンを曲面上に形成したいという新しい用途が生じて来ている。軸受け溝、コイルばね、ステントなど円筒内外面への加工のほか、体表面にフィットするヘルスマニタや配線部品等の製作用に任意形状の緩い曲面上へのパターン形成が求められている。本研究では、回転放物面ミラー光学系を用いて、任意形状の緩い曲面上に投影露光リソグラフィにより線幅 50~500 $\mu\text{m}$  の大パターンを形成する立体面投影露光技術を提案し、投影露光装置を自作して曲面レチクルから曲面被露光物への一括投影露光を実証した。

#### (2) マジックミラー投影光学系

マジックミラー投影光学系では、図1に示すように、下ミラー底部に物体を置き、開口を設けた上ミラーを被せてある。上ミラーの開口から入った光(照明光)が物体にあたり、その反射立体像が上ミラーの開口内にできる。立体像は鮮明であり、斜めから見るとあたかもそこに実物があるかに見える。

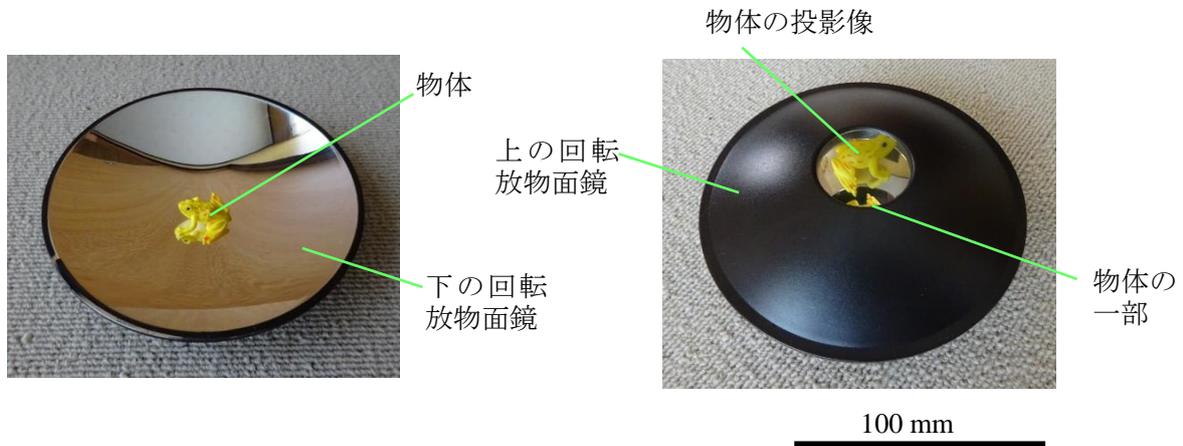


図1 マジックミラー投影光学系

(3) リソグラフィとして利用するための新工夫

感光性を有するレジストを塗布した被露光物体を上ミラー開口に置くと、下ミラー底部の原図物体を上ミラー開口からフリーに照明することができなくなる。また、レジストが照明光により直接感光する懸念も生ずる。そこで、図2に示すように、下ミラー底部にも開口を開け、原図物体を顕微鏡用の白色LEDリングライトにより斜め下方から照明するようにした。物体の位置が上放物面ミラーの焦点、立体像の位置が下放物面ミラーの焦点になるように構成されているので、図示したように光線が進み、上ミラー開口内に立体像が形成される。しかし、斜め下から照明しにくい原図物体上部が暗い状態となり、反射光像はコントラストが悪いことが分かった。そこで、原図物体として、反射物体ではなく透過曲面レチクルを用いることを検討した。図3に示す透過曲面レチクルを設置した結果、下からの照明のみにより、図4に示すように、高コントラストで投影像が得られ、リソグラフィに利用できる見通しを得た。

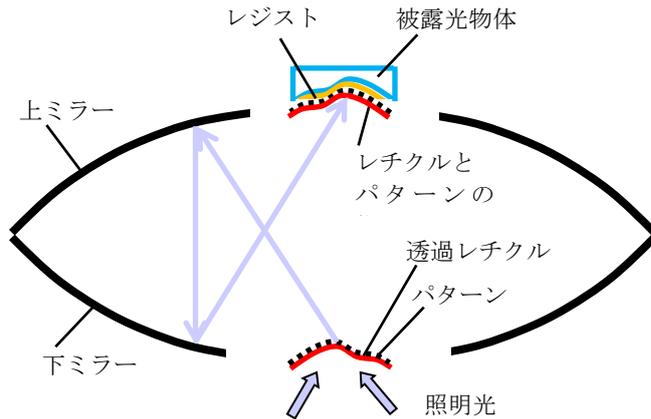


図3 マジックミラー光学系をリソグラフィに利用するために考えた下から照明する方策

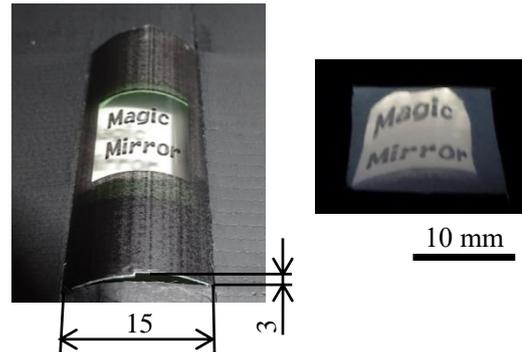


図4 円筒面状透過レチクル

図5 円筒面状透過レチクルの投影像

上記の結果を踏まえ、投影露光装置を自作し、実際に $200\mu\text{m}$ ラインアンドスペース レジストパターンが形成できるかを試した。その結果、パターンを形成できた範囲が投影光像を観察したときより狭く、図6に示すように、露光フィールドの中央付近のみとなった。そのため、光線追跡によりパターン形成の特徴を検討した結果、物点から像点に至る光線の経路により到達点が異なることが分かった。とくに、光線が $+x$ (右)方向に出るか、 $-x$ (左)方向に出るかによって、到達点が大きく異なることが分かった。一例として、光軸からの距離 $r=35\text{mm}$ の位置で光線が反射する場合の到達点位置 $x_R'$ と $x_L'$ を比較した結果を図7に示す。レチクルの中心から遠く離れたパターンは、方向の異なる照明光が像点で同一点に結像しないことが分かる。露光フィールドの周辺では、ずれたL&Sが重畳され、全体的に半分露光量となりL&S状には痕が残らない。

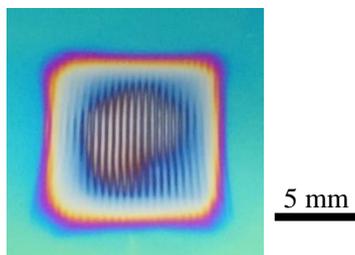


図6 フィールド内でのパターン形成状態

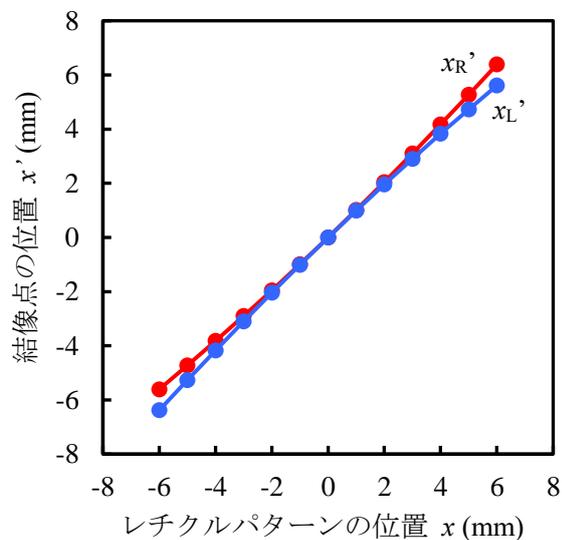


図7 物点の位置と像点の位置との関係

そこで、全方位照明を止め、一方向のみから、中心波長 405nm の青色発光ダイオードを用いたコリメート LED 光源により照明することとし、図 8 に示す露光装置を自作した。この工夫により、図 9 に示すように、鮮明なパターンを形成できるようになり、パターン形成範囲も、10-12mm 程度に広がった。

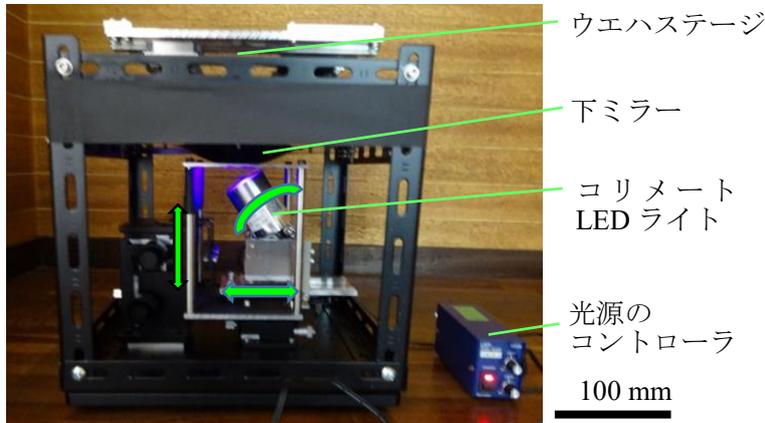


図 8 コリメート LED 光源を使用した片側照明の露光装置

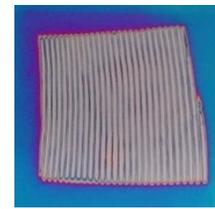


図 9 コリメート光を用いた片側照明により形成した 200 $\mu$ m ライン&スペースパターン

#### (4) 立体面投影露光の実証

コリメート LED 光源による一方向からの照明により、明暗コントラストの高い像を作ることができたので、イラストシートを透明プラスチックスプーンの凹面に貼り付けた図 10 に示す透過曲面レチクル上の原図パターンを、該レチクルと同じ形状を反転した被露光試料面にレジストを塗布して転写できるかどうかを確認した。結果を図 11 に示す。



図 10 透明スプーンを利用して作成した凹面レチクル

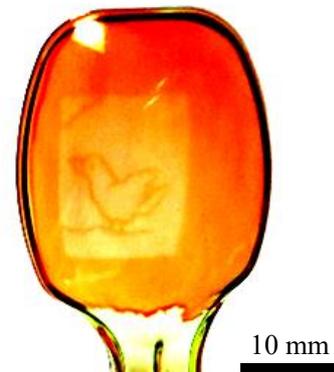
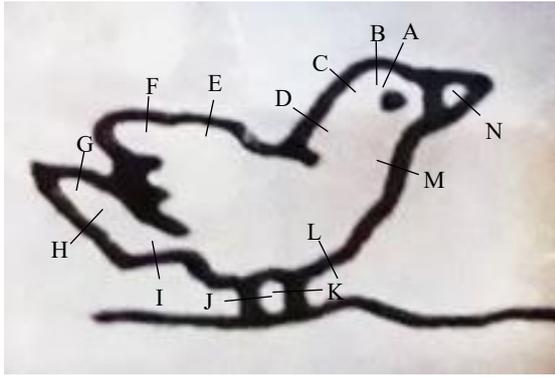
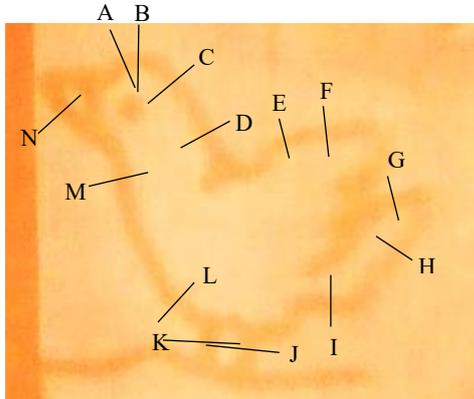


図 11 スプーン凸面に転写したレジストパターン

また、標点 A-N を図 12 に示すように決め、レチクルとパターン線幅の対応を調べた結果を図 13 に示す。最大 $\pm 60\mu\text{m}$  ほどの差があったが、おおむね、レチクルパターンの寸法にレジストパターンの線幅が対応していることが分かった。しかし、図 12 の(a)と(b)を比較すると、レチクルのイラストに対し、得られたレジストパターンは、左右に縮み、上下に伸びているように見えた。そこで、次に、ピッチ 2mm、線幅 200 $\mu\text{m}$  の格子レチクルを転写しフィールド形状の歪を調べた。結果を図 14 に示す。レチクルを右下方から照明するとき、レチクルの右側が転写されるフィールドの左側は横方向に縮み、レチクルの左側が転写されるフィールドの右側は横方向に伸びることが分かった。一方、フィールドの上下方向へは伸びることが分かった。また、格子が真直にならず、右に凸状に反ることが分かった。反りの曲率は左側の方が大きい。パターンの反りや寸法の歪は今後定量的に把握することが必要である。一方、投影露光の焦点深度は非常に深く、レチクルに対する被露光物の位置、高さ、曲率が多少ずれていてもパターン形成可能であることが分かった。



(a) 凹面レチクルの遮光パターン



(b) 凸面スプーン上のレジストパターン

図 12 レチクルとレジストの線幅比較位置

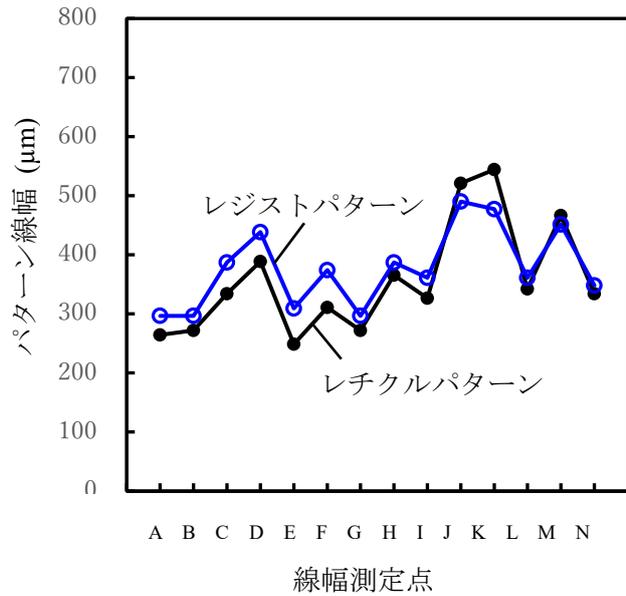


図 13 レチクルパターンとレジストパターンの線幅の対応

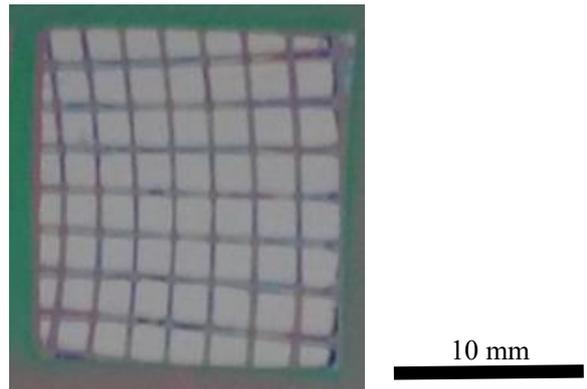


図 14 ピッチ 2 mm の格子パターンを転写して調べたフィールドの歪

(5) まとめ

回転放物面鏡を上下に対向させたマジックミラー光学系を応用し、任意の緩い曲面上のパターンを、フィールド内一括で投影露光して転写する立体面投影露光リソグラフィを提案し、実現できる可能性を示した。

マジックミラー光学系の下ミラーにも開口を設けて透過曲面レチクル上のパターンを斜め下方から照明し、上ミラーの開口中心に置いたレジストを塗布した被露光物体曲面に投影できるようにした。照明光経路により像面への到達位置が異なることが分かったため、レチクルを斜め下方の一方のみから中心波長 405nm の青色 LED コリメート光源で照明できるようにした露光装置を自作した。そして、透明スプーンにイラストシールを貼り付けた透過曲面レチクルで、レジストを塗布したほぼ同形状のスプーン面にレチクルのイラストパターンを転写できるかどうかを調べた。その結果、パターンを転写でき、当初目指した立体面投影露光リソグラフィが可能であることが実証できた。しかし、露光フィールドの形状が歪むことが分かった。今後、歪の特徴を明らかにする予定である。必要に応じて、レチクルを作成する段階でパターン補正が必要になるかもしれないと考えている。一方、歪を度外視すれば、投影露光の焦点深度が非常に深いので、レチクルに対する被露光物の位置、高さ、曲率が多少ずれていてもパターン形成可能であることが分かった。歪を度外視してもよい大パターンを形成する用途に非常に有効である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4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 Horiuchi Toshiyuki, Kobayashi Hiroshi	4. 巻 11908
2. 論文標題 Stereophonic projection lithography using parabolic mirrors	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of SPIE	6. 最初と最後の頁 1190808, 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2597232	査読の有無 無
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 Toshiyuki Horiuchi and Hiroshi Kobayashi	4. 巻 61
2. 論文標題 Feasibility of stereophonic projection lithography applying a parabolic magic mirror system	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SD1042
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac5e4c	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 T. Horiuchi, J. Iwasaki, and H. Kobayashi	4. 巻 14, Issue 5 Ser. II
2. 論文標題 Patterning-Area Expansion of Parabolic-Mirror Projection Optics for Lithography Using One-Sided and Collimated Illumination	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IOSR J. Appl. Phys. (IOSR-JAP)	6. 最初と最後の頁 12-20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9790/4861-1405021220	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 12.Toshiyuki Horiuchi, Jun-ya Iwasaki, and Hiroshi Kobayashi	4. 巻 62
2. 論文標題 Demonstration of stereophonic projection lithography using parabolic mirror optics and collimated illumination from one side	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SG1026
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/acbbd7	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11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Toshiyuki Horiuchi and Hiroshi Kobayashi
2. 発表標題 Stereophonic Projection Exposure Using a Pair of Parabolic Mirrors
3. 学会等名 Photomask Japan 2021, The 27th Symposium on Photomask and NGL Mask Technology (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 堀内敏行, 小林宏史
2. 発表標題 放物面ミラーを用いた立体リソグラフィ投影露光光学系の検討
3. 学会等名 令和3年電気学会基礎・材料・共通部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 堀内敏行, 小林宏史
2. 発表標題 対向放物面ミラープロトタイプ露光装置を用いたレジストパターン形成の実証
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Toshiyuki Horiuchi and Hiroshi Kobayashi
2. 発表標題 INVESTIGATION OF PROJECTION EXPOSURE SYSTEM USING A PAIR OF PARABOLIC MIRRORS
3. 学会等名 MNC 2021, 34th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 堀内敏行, 小林宏史
2. 発表標題 一方向照明の適用による放物面鏡投影露光レジストパターンの改善
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 堀内敏行, 小林宏史
2. 発表標題 マジックミラー光学系を用いた立体面投影露光リソグラフィの基礎検討
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 堀内敏行, 小林宏史
2. 発表標題 透過原図物体を用いた対向放物面ミラー立体投影露光の検討
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Horiuchi, J. Iwasaki, and H. Kobayashi
2. 発表標題 Stereophonic Lithography Using a Parabolic Mirror Projection System and One-sided Illumination
3. 学会等名 ODF ' 22 (Sapporo, Japan), 0ThA4A-03 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 堀内 敏行, 小林 宏史
2. 発表標題 青色発光ダイオードでコリメート照明した対向放物面鏡立体投影 リソグラフィによるスプーン面へのパターン形成の実証
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Horiuchi, J. Iwasaki, H. Kobayashi
2. 発表標題 PERFORMANCES OF STEREOGRAPHIC PROJECTION LITHOGRAPHY USING A PARABOLIC MIRROR SET ILLUMINATED BY COLLIMATED LIGHT
3. 学会等名 MNC 2022, 35th Int. Microprocesses and Nanotechnology Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 堀内 敏行, 小林 宏史
2. 発表標題 平面レチクルを用いた対向放物面ミラー立体投影露光の可能性
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 立体面投影露光装置	発明者 堀内敏行	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-130281	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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	小林 宏史  (Kobayashi Hiroshi)  (80838855)	東京電機大学・工学部・教授     (32657)	

## 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
---------	---------