

平成 21 年 05 月 18 日現在

研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19760034
 研究課題名 (和文) フェムト秒レーザーリソグラフィによる無機光学材料での立体構造形成とその素子応用
 研究課題名 (英文) Femtosecond laser 3-D microfabrication of inorganic materials and its photonic application
 研究代表者
 西山 宏昭 (NISHIYAMA HIROAKI)
 大阪大学・大学院工学研究科・助教
 研究者番号：80403153

研究成果の概要：本研究では、非線形光プロセスを用いることで、半導体プロセスの適用範囲を従来の平面から立体基板上へと拡張した。フェムト秒レーザーパルスをフォトレジスト内部に集光することで形成した複雑かつ微細なパターンを反応性プラズマによって下地に転写し、無機光学材料の立体的表面構造を形成した。レジストの非線形光学特性評価を行うとともに、SiO₂ 屈折・回折複合マイクロレンズを試作し、設計通りの光学特性を得た。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,400,000	0	2,400,000
2008 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	270,000	3,570,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎，応用光学・量子光工学

キーワード：フェムト秒レーザー，非線形光吸収，立体的表面構造，集積光学素子

1. 研究開始当初の背景

回折型微小光学素子は、その優れた光学特性と集積性から近年、注目が高まっている。光学部材表面に波長あるいはそれ以下のオーダーの微細周期構造を形成することで、波長分散や偏光特性を制御することができる。従来多用されてきた屈折/反射型素子に比べて機能設計上の自由度が大幅に増し、光学素子の高機能化に有用である。中でも、シリカガラスなどの無機光学材料をベースとした素子は、透過性はもとより、物理的・化学的安定性に優れ、また現行の光デバイスとの高い親和性から有望である。これら微小光学素子の多くは、半導体プロセスによって作製され

てきた。同プロセスは、機械加工、レーザー直接加工などに比べて、微細かつ高品質な構造を形成できるが、一方で、従来、その適用範囲は平面基板上に制限されており、屈折と回折機能の融合に有効な立体的表面構造を形成することは困難であった。

この問題を解決するため、これまでにスプレーコート法や、多軸自由度を有するステージシステムの開発などが報告されている[1,2]。しかしながら、これらの手法では、入射光の線形吸収プロセスを利用しているため、立体基板上で生じるレジスト変形の影響を直接に受ける。そのため、精密かつ微細なパターンニングを行うためには複雑なシステ

ムの導入が必要であった。

2. 研究の目的

本研究では、フェムト秒レーザーが誘起する非線形光プロセスを半導体プロセスへと導入することで、その適用範囲を立体基板上へと拡張することを目的とする。これにより、高品位かつ微細な立体的表面構造の形成が可能となる。具体的には、フェムト秒レーザーの非線形光吸収特性・感光特性の評価、立体基板上でのパターニング特性の評価、立体的表面を有する屈折・回折複合マイクロレンズの作製・光学特性評価に取り組む。

3. 研究の方法

フォトリソとして化学増幅型ネガレジスト KMPR-1050 およびポジレジスト PMER を用いた。これらレジストのパターニング光源として、フェムト秒ファイバーレーザー（中心波長 780 nm, パルス幅 127 fs, 繰り返し周波数 100 MHz）を用いた。プラズマエッチングは、電子サイクロトロン共鳴プラズマ（ CHF_3/O_2 混合ガス）でいった。 SiO_2 薄膜および SiN 薄膜はプラズマ化学気相堆積法で合成した。

4. 研究成果

(1) プロセス提案

図 1 は、本研究で提案するフェムト秒レーザー支援マイクロマシニング (FLAM) を模式的に示している。まず、立体基板上にポジレジスト PMER を塗布し、その後、フェムト秒レーザー誘起非線形光吸収を介してレジスト内部に直接パターンを書き込む。PEB および現像によって得たパターンを反応性プラズマによって下地の層へと転写し、立体的表面を

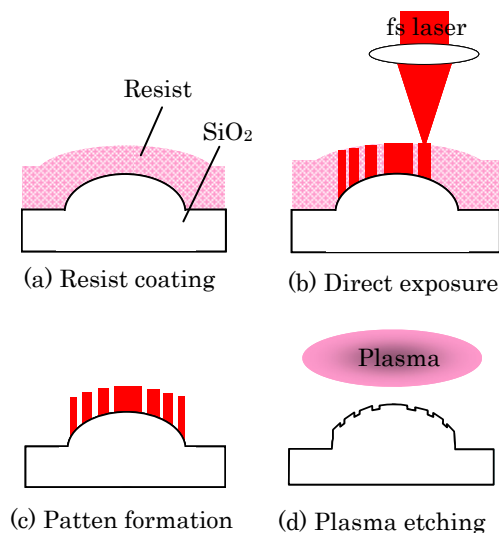


Figure 1 Schematic image of FLAM for microfabrication on non-flat substrates.

得る。通常の半導体プロセスにおいては、紫外光はランバートビア則に従い、レジスト表面から吸収されていく。このため、精密なパターンを得るためには、均一膜厚でのレジスト塗布が必須である。しかしながら、立体基板上では、レジストはその表面張力のために著しく変形する。このことが半導体プロセスの立体基板への適用を阻害している。これに対し、本プロセスでは、光吸収領域は、レジスト表面からの距離にはほとんど依存せず、入射光強度とレジストの持つ強度閾値によって決まる。このため、基板反射の影響も小さく、立体基板上であっても精密な構造形成が期待できる。

(2) パターニング特性評価

レジスト中に形成したパターンの断面図を図 2(a) に示す。基板表面を原点としたときの各パターン形成時のレーザー焦点位置を図中に示している。レーザー平均出力と走査速度は、それぞれ 18 mW と 150 $\mu\text{m}/\text{s}$ である。パターンがレジスト内部に形成されたことが分かる。PMER はレーザー発振波長 780 nm ではほとんど吸収を持たないが、480 nm 以下の波長域で光酸発生剤に起因した強い吸収帯を有する。レーザー焦点位置がパターン高さを与える影響を図 2(b) に示した。図中の点線は、レジスト膜厚である。パターン高さは、焦点

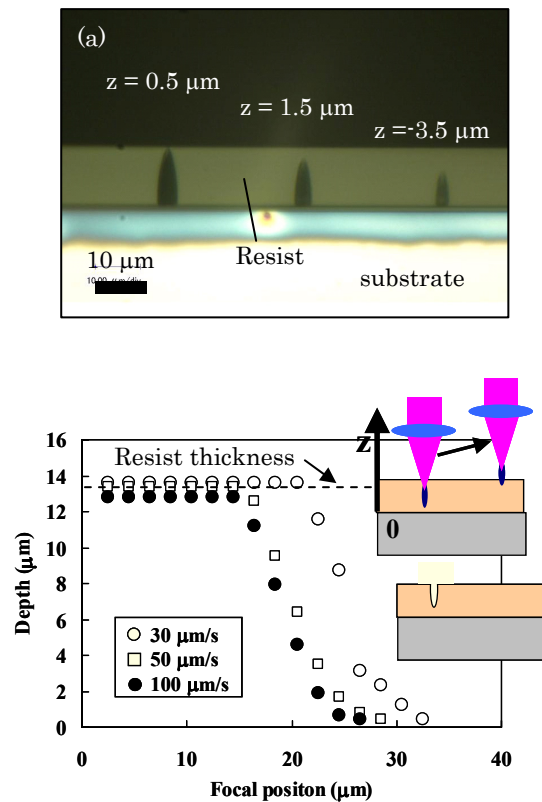


Figure 2 (a) Cross-sectional images of the resist line patterns and (b) dependence of focal position on pattern height.

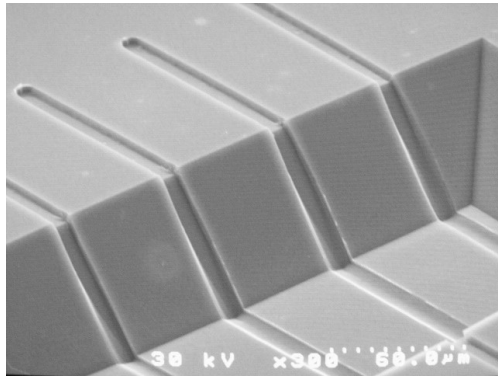


Figure3 SEM image of Si line structures across a 65- μm -high step.

位置の光軸方向での移動に伴い、ほぼ線形に減少した。レジスト表面近傍でやや傾向が異なるのは、空気とレジスト間での屈折率差によるものである。出力と走査速度が一定のとき、レジスト中の位置によらず、パターン幅は、ほぼ同じ値であった。本実験で用いたセットアップでは、平均出力 21 mW、走査速度 1500 $\mu\text{m}/\text{s}$ のとき、最小線幅 900 nm を得た。

このような非線形リソグラフィ特性を用いて、高低差 65 μm の段差を有する Si 基板上に溝構造を形成した。段差試料は KOH 溶液を用いた異方性エッチングによって作製した。図 3 にパターン転写後の SEM 像を示す。溝の高差位置によらず、5 μm の均一ラインが得られていることが分かる。この線幅は、スプレーコート法で作製したラインの、およそ 10 分の 1 に相当する。

(3) SiO₂ 屈折・回折複合レンズ

SiO₂ 屈折・回折複合レンズを形成するために、凸レンズ上に調和回折レンズを形成する。複合レンズの焦点距離は、式 (1) から決定することが出来る。

$$1/f_h = (1/f_p) + (1/f_m), \quad (1)$$

ここで、 f_p , f_m , f_h は、それぞれ複合レンズ、調和レンズ (1 次)、凸レンズの焦点距離を示している。本研究では、焦点距離 2420 μm の回折レンズを凸レンズ上に形成することで焦点距離 618 μm の複合レンズとした。このとき、最外郭半径は、波長 633 nm 光に対して 247.5 μm である。回折レンズは、異なる半径を有するリングの重ね合わせで構成されており、隣り合うリング間距離は、ビーム集光径とほぼ同じ 2.0 μm とした。厚いレジストを貫通したパターンを得るため、平面描画パターンを 3.0 μm 間隔で積層した。図 4(a) - (c) は、反応性プラズマによって転写した SiO₂ 複合レンズと、転写前のレジストパターンの SEM 像である。下地のレンズ高さによらず、鋭いエッジを有するパターンが得られていることが分かる。得られたレジストパター

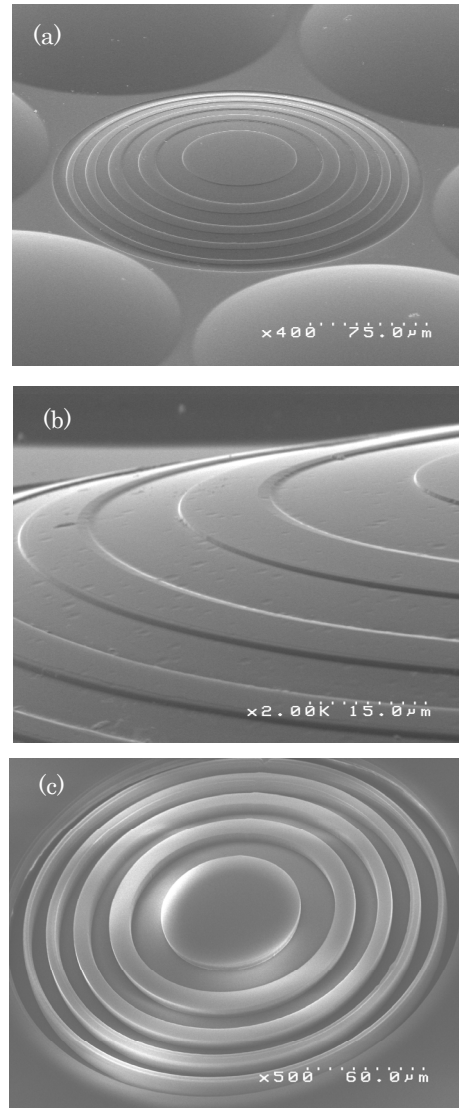


Figure4 SEM images of (a) an overview and (b) a side view of SiO₂-based hybrid lens, and (c) a resist structure.

ン半径は設計値よりも 2.4% 大きくなったが、これは、露光領域のオーバーラップによるものであろう。SiO₂ 構造の表面は滑らかであり、エッチング深さはおよそ 1 μm であった。波長 633 nm の He-Ne レーザ光を複合レンズに垂直入射したところ、焦点距離は 630 μm であった。これは複合化前の凸レンズの焦点距離が 200 μm レンズ側にシフトしたことを意味しており、設計値 212 μm に近い。パターン描画時にリング間距離を 2.0 μm と比較的大きくしたために、このような集光位置に差異が生じたと考えられる。FLAM では、非線形光吸収を利用しているため、回折限界以下の高い空間分解能 (~ 100 nm) を得ることが出来る。また、プラズマでエッチング可能な種々の材料 (Si, SiN, GaAs など) に適用が可能である。今後、FLAM の高い空間分解能と

フレキシビリティを利用することで、数百 μm の高低差を有する立体的表面構造の形成も可能となろう。

(4) 結論

無機光学材料の立体的表面構造形成のために、非線形リソグラフィとプラズマエッチングの複合プロセスである FLAM を報告するとともに、 SiO_2 屈折・回折複合レンズを試作した。立体基板上のレジスト内部にフェムト秒レーザー誘起非線形光吸収を利用してパターンを直接に書き込み、それを反応性プラズマによって転写することで立体的表面を得た。65 μm の高低差を有する段差上であっても均一線幅のラインが形成可能であり、また、 SiO_2 複合レンズにおいては、ほぼ設計値通りの焦点シフト量 200 μm が確認され、FLAM の有効性が示された。今後、露光条件や転写条件の最適化により、更に微細で複雑な立体構造の形成が期待できる。

参考文献

- [1] V. K. Singh, M. Sasaki, K. Hane, Y. Watanabe, H. Takamatsu, M. Kawakita, and H. Hayashi: J. Micromech. Microeng. 15 (2005) 2339.
[2] D. Radtke and U. D. Zeitner: Opt. Express 15 (2007) 1167.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 9 件)

- ① H. Nishiyama, M. Mizoshiri, J. Nishii, Y. Hirata, “Microlens arrays of high refractive index glass fabricated by femtosecond laser lithography”, Applied Surface Science (in press), 査読有.
- ② H. Nishiyama, I. Miyamoto, Y. Hirata, J. Nishii, “Periodic structures of $\text{GeO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ glass films fabricated using ultraviolet laser pulses”, Journal of Physics: Conference Series (in press), 査読有.
- ③ M. Mizoshiri, H. Nishiyama, J. Nishii, Y. Hirata, “ SiO_2 -based microstructures fabricated by femtosecond laser lithography”, Journal of Physics: Conference Series (in press), 査読有.
- ④ H. Nishiyama, “Femtosecond-laser nanolithography for photonic applications”, Journal of Nanophotonics, Vol. 3 (2009) art. no. 030301, 査読有.
- ⑤ M. Mizoshiri, H. Nishiyama, T. Kawahara, J. Nishii, Y. Hirata, “ SiO_2 -based hybrid diffractive-refractive lenses fabricated

by femtosecond laser-assisted micromachining”, Applied Physics Express, Vol. 1 (2008) art. no. 127001, 査読有.

- ⑥ H. Nishiyama, M. Mizoshiri, T. Kawahara, J. Nishii, Y. Hirata, “ SiO_2 -based nonplanar structures fabricated by femtosecond laser lithography”, Optics Express, Vol. 16 (2008) 17288-17294, 査読有.
- ⑦ M. Mizoshiri, H. Nishiyama, J. Nishii, Y. Hirata, “ SiO_2 -based variable microfluidic lenses fabricated by femtosecond laser lithography-assisted micromachining”, Proceedings of SPIE, Vol. 7039 (2008) art. no. 70390E, 査読有.
- ⑧ H. Nishiyama, M. Mizoshiri, J. Nishii, Y. Hirata, “Silica-based diffractive-refractive hybrid lenses fabricated by femtosecond laser lithography”, Proceedings of SPIE, Vol. 7056 (2008) art. no. 70561F, 査読有.
- ⑨ H. Nishiyama, M. Mizoshiri, J. Nishii, Y. Hirata, “Nonplanar surface structures of inorganic optical materials fabricated by femtosecond laser lithography”, Proceedings of SPIE, Vol. 6883 (2008) art. no. 68830E, 査読有.

〔学会発表〕(計 6 件)

- ① 西山宏昭, 伊庭知宏, 溝尻瑞枝, 平田好則, “フェムト秒レーザーリソグラフィによる針構造先端へのカーボンナノチューブ合成”, レーザー学会学術講演会第 29 回年次大会, 2009 年 1 月, 徳島大学.
- ② 溝尻瑞枝, 西山宏昭, 西井準治, 平田好則, “フェムト秒レーザーリソグラフィによるマイクロ流路内へのシリカガラス製微小光学素子の作製”, レーザー学会学術講演会第 29 回年次大会, 2009 年 1 月, 徳島大学.
- ③ 溝尻瑞枝, 西山宏昭, 西井準治, 平田好則, “フェムト秒レーザー支援マイクロマシニングによるマイクロ流路内への無機材料製微小光学素子の作製”, 第 25 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 2008 年 10 月, 沖縄コンベンションセンター.
- ④ 菅原晃佳, 西山宏昭, 溝尻瑞枝, 西井準治, 笠 春也, 平田好則, “フェムト秒レーザーリソグラフィによる無機高屈折率材料での微小光学素子形成”, 第 69 回応用物理学学会学術講演会, 2008 年 9 月, 中部大学.

- ⑤ 伊庭知宏, 西山宏昭, 溝尻瑞枝, 西井準治, 平田好則, “カーボンナノチューブの針状電極先端への合成とその電界放出特性評価”, 第 69 回応用物理学会学術講演会, 2008 年 9 月, 中部大学.
- ⑥ 伊庭知宏, 西山宏昭, 溝尻瑞枝, 西井準治, 平田好則, “フェムト秒レーザーリソグラフィーによる針状電極先端へのカーボンナノチューブ合成”, 第 70 回レーザー加工学会講演会, 2008 年 5 月, 大阪大学.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西山 宏昭 (NISHIYAMA HIROAKI)
大阪大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：80403153