

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2007-57622

(P2007-57622A)

(43) 公開日 平成19年3月8日(2007.3.8)

(51) Int. Cl.	F I	テーマコード (参考)
G02B 5/18 (2006.01)	G02B 5/18	2H049
B23K 26/36 (2006.01)	B23K 26/36	4E068
B23K 26/04 (2006.01)	B23K 26/04	C

審査請求 未請求 請求項の数 40 O L (全 40 頁)

(21) 出願番号	特願2005-240457 (P2005-240457)	(71) 出願人	000006747 株式会社リコー 東京都大田区中馬込1丁目3番6号
(22) 出願日	平成17年8月22日 (2005.8.22)	(74) 代理人	100090103 弁理士 本多 章悟
		(74) 代理人	100067873 弁理士 樺山 亨
		(72) 発明者	山田 泰史 東京都大田区中馬込1丁目3番6号・株式会社リコー内
		(72) 発明者	増田 浩二 東京都大田区中馬込1丁目3番6号・株式会社リコー内

最終頁に続く

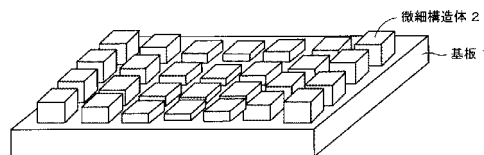
(54) 【発明の名称】 光学素子及びその製造方法、光学素子用形状転写型の製造方法及び光学素子用転写型

(57) 【要約】

【課題】単一の高さのサブ波長構造と同様の透過光の位相変調をアスペクトの低い構造により実現し、光利用効率の高い位相変調型の光学素子を提供する。

【解決手段】本発明の光学素子は、少なくとも一部の構造体2の高さを空間的に変調させることにより透過光の位相を変化せしめるものであり、使用する光の波長よりも微細な構造を有するので、高さの異なる入射波長よりも周期の狭い微細構造により、透過光の位相変調を実現することができる。また、使用する光の波長を、入射角を、入射媒体の屈折率をn1、構造体2の屈折率をn2とした場合、構造体の周期が $\lambda / (n1 \sin \theta + n2)$ 以下であることにより、高次の回折による透過光の発生がなくなり、光利用効率の高い光学素子を実現することができる。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

微細構造を有する光学素子であって、
少なくとも一部の構造体の高さを空間的に変調させることにより透過光の位相を変化せしめることを特徴とする光学素子。

【請求項 2】

請求項 1 記載の光学素子において、
使用する光の波長よりも微細な構造を有することを特徴とする光学素子。

【請求項 3】

請求項 2 記載の光学素子において、
使用する光の波長を λ 、入射角を θ 、入射媒体の屈折率を n_1 、構造体の屈折率を n_2 とした場合、前記構造体の周期が、 $\lambda / (n_1 \sin \theta + n_2)$ 以下であることを特徴とする光学素子。

10

【請求項 4】

請求項 2 または 3 記載の光学素子において、
使用する光の波長を λ 、入射媒体の屈折率を n_1 、構造体の屈折率を n_2 とした場合、構造体の高さの差 h が、

$$h = 2 \lambda \times (n_1^2 + n_2^2) / (n_1 + n_2)^2$$

の近傍とすることを特徴とする光学素子。

【請求項 5】

請求項 1 ~ 4 のいずれか一つに記載の光学素子において、
前記微細構造が同一周期の概矩形格子あるいは柱状構造もしくは多段構造であることを特徴とする光学素子。

20

【請求項 6】

請求項 2 ~ 5 のいずれか一つに記載の光学素子において、
使用する波長以下の微細構造が複数の領域に分割されており、該領域内の構造が同一ピッチ、同一高さであることを特徴とする光学素子。

【請求項 7】

請求項 1 ~ 6 のいずれか一つに記載の光学素子において、
前記微細構造が素子の両面に形成されていることを特徴とする光学素子。

30

【請求項 8】

請求項 1 ~ 7 のいずれか一つに記載の光学素子において、
前記微細構造が曲面上に形成されていることを特徴とする光学素子。

【請求項 9】

請求項 2 ~ 8 のいずれか一つに記載の光学素子において、
波長以下の構造体により入射光の位相が変調され、該入射光の少なくとも一部が集光されることを特徴とする光学素子。

【請求項 10】

請求項 2 ~ 8 のいずれか一つに記載の光学素子において、
波長以下の構造体により入射光の位相が変調されることにより、透過光のビームを整形することを特徴とする光学素子。

40

【請求項 11】

請求項 2 ~ 9 のいずれか一つに記載の光学素子において、
少なくとも一面に設けられた波長以下の構造体により入射光の位相が変調されることにより、透過光の収差を補正することを特徴とする光学素子。

【請求項 12】

請求項 1 ~ 11 のいずれか一つに記載の光学素子を製造する際の製造方法において、
レーザの干渉により構造を形成するレーザ干渉露光法を用い、干渉光強度変調手段により干渉光強度を変調することにより空間的に構造の高さを変調させ、微細構造を形成することを特徴とする光学素子の製造方法。

50

【請求項 13】

請求項 1 ~ 11 のいずれか一つに記載の光学素子を製造する際の製造方法において、レーザブレーション法により微細な構造を形成するレーザブレーション加工法を用い、加工用レーザ光を干渉させ、さらに干渉光強度変調手段により干渉強度を変調するとにより空間的に構造の高さを変調させ、微細構造を形成することを特徴とする光学素子の製造方法。

【請求項 14】

請求項 1 ~ 11 のいずれか一つに記載の光学素子を製造する際の製造方法において、レーザブレーション法により微細な構造を形成するレーザブレーション加工法を用い、加工用レーザ光に対して透過性を示す薄膜と吸収性を示す薄膜を積層した構造体に対して加工用レーザ光を照射し、薄膜を空間選択的に除去することにより、微細構造を形成することを特徴とする光学素子の製造方法。

10

【請求項 15】

請求項 1 ~ 11 のいずれか一つに記載の光学素子を製造する際の製造方法において、光を集光して集光点近傍において材料を硬化して構造を形成する光硬化方式を用い、照射レーザ光の多光子吸収により構造を形成し、かつ構造体の高さを変調することにより、微細構造を形成することを特徴とする光学素子の製造方法。

【請求項 16】

請求項 13 ~ 15 のいずれか一つに記載の光学素子の製造方法において、加工用のレーザ光は、パルス幅が 10 ピコ秒以下である超短パルスレーザであることを特徴とする光学素子の製造方法。

20

【請求項 17】

請求項 1 ~ 11 のいずれか一つに記載の光学素子を製造する際の製造方法において、基板上に光反応性材料を塗布し、前記材料中にレーザ光を集光して集光点近傍でのみ多光子吸収を起こし、集光点を基板面上で走査することで基板面上に微細構造を形成せしめる方法であり、走査中に集光点中心と基板表面との距離を変化させることで、形成される構造体の高さを変化させ、空間的に高さの異なる構造体を作製することを特徴とする光学素子の製造方法。

【請求項 18】

請求項 17 記載の光学素子の製造方法において、前記レーザ光を照射中、レーザ光のパワーおよび、集光点を走査するスピードは略一定とすることを特徴とする光学素子の製造方法。

30

【請求項 19】

請求項 17 または 18 記載の光学素子の製造方法において、前記レーザ光を照射中、基板と集光点との位置は常にモニタリングされており、モニタリングの結果から集光点の位置を調整することを特徴とする光学素子の製造方法。

【請求項 20】

請求項 17 ~ 19 のいずれか一つに記載の光学素子の製造方法において、前記レーザ光が超短パルスレーザ光であることを特徴とする光学素子の製造方法。

【請求項 21】

請求項 17 ~ 20 のいずれか一つに記載の光学素子の製造方法において、前記光反応性材料中にレーザ光を集光する手段として、液浸対物レンズを利用することを特徴とする光学素子の製造方法。

40

【請求項 22】

請求項 17 ~ 21 のいずれか一つに記載の光学素子の製造方法において、平面内の少なくとも一部において作製する構造物のピッチ（構造物と構造物の最小距離幅）を、波長以下としたことを特徴とする光学素子の製造方法。

【請求項 23】

請求項 22 記載の光学素子の製造方法において、光学素子として機能する領域において前記構造物が等ピッチで作製されることを特徴と

50

する光学素子の製造方法。

【請求項 24】

請求項 17 ~ 23 のいずれか一つに記載の光学素子の製造方法において、前記構造物を、少なくとも一部に曲面を有している構造体の上に形成することを特徴とする光学素子の製造方法。

【請求項 25】

請求項 12 ~ 24 のいずれか一つに記載の光学素子の製造方法によって製造されたことを特徴とする光学素子。

【請求項 26】

請求項 1 ~ 11 のいずれか一つに記載の光学素子を製造する際に用いられ、前記微細構造を転写する光学素子用形状転写型の製造方法において、

レーザの干渉により構造を形成するレーザ干渉露光法を用い、干渉光強度変調手段により干渉光強度を変調することにより空間的に構造の高さを変調させ、微細構造を形成することを特徴とする光学素子用形状転写型の製造方法。

【請求項 27】

請求項 1 ~ 11 のいずれか一つに記載の光学素子を製造する際に用いられ、前記微細構造を転写する光学素子用形状転写型の製造方法において、

レーザブレーション法により微細な構造を形成するレーザブレーション加工法を用い、加工用レーザ光を干渉させ、さらに干渉光強度変調手段により干渉強度を変調するとにより空間的に構造の高さを変調させ、微細構造を形成することを特徴とする光学素子用形状転写型の製造方法。

【請求項 28】

請求項 1 ~ 11 のいずれか一つに記載の光学素子を製造する際に用いられ、前記微細構造を転写する光学素子用形状転写型の製造方法において、

レーザブレーション法により微細な構造を形成するレーザブレーション加工法を用い、加工用レーザ光に対して透過性を示す薄膜と吸収性を示す薄膜を積層した構造体に対して加工用レーザ光を照射し、薄膜を空間選択的に除去することにより、微細構造を形成することを特徴とする光学素子用形状転写型の製造方法。

【請求項 29】

請求項 1 ~ 11 のいずれか一つに記載の光学素子を製造する際に用いられ、前記微細構造を転写する光学素子用形状転写型の製造方法において、

光を集光して集光点近傍において材料を硬化して構造を形成する光硬化方式を用い、照射レーザ光の多光子吸収により構造を形成し、かつ構造体の高さを変調することにより、微細構造を形成することを特徴とする光学素子用形状転写型の製造方法。

【請求項 30】

請求項 26 ~ 29 のいずれか一つに記載の光学素子用形状転写型の製造方法において、加工用のレーザ光は、パルス幅が 10 ピコ秒以下である極短パルスレーザであることを特徴とする光学素子用形状転写型の製造方法。

【請求項 31】

請求項 1 ~ 11 のいずれか一つに記載の光学素子を製造する際に用いられ、前記微細構造を転写する光学素子用形状転写型の製造方法において、

基板上に光反応性材料を塗布し、前記材料中にレーザ光を集光して集光点近傍でのみ多光子吸収を起こし、集光点を基板面上で走査することで基板面上に微細構造を形成せしめる方法であり、走査中に集光点中心と基板表面との距離を変化させることで、形成される構造体の高さを変化させ、空間的に高さの異なる構造体を作製することを特徴とする光学素子用形状転写型の製造方法。

【請求項 32】

請求項 31 記載の光学素子用形状転写型の製造方法において、

前記レーザ光を照射中、レーザ光のパワーおよび、集光点を走査するスピードは略一定とすることを特徴とする光学素子用形状転写型の製造方法。

【請求項 3 3】

請求項 3 1 または 3 2 記載の光学素子用形状転写型の製造方法において、

前記レーザ光を照射中、基板と集光点との位置は常にモニタリングされており、モニタリングの結果から集光点の位置を調整することを特徴とする光学素子用形状転写型の製造方法。

【請求項 3 4】

請求項 3 1 ~ 3 3 のいずれか一つに記載の光学素子用形状転写型の製造方法において、

前記レーザ光が超短パルスレーザ光であることを特徴とする光学素子用形状転写型の製造方法。

【請求項 3 5】

請求項 3 1 ~ 3 4 のいずれか一つに記載の光学素子用形状転写型の製造方法において、

前記光反応性材料中にレーザ光を集光する手段として、液浸対物レンズを利用することを特徴とする光学素子用形状転写型の製造方法。

【請求項 3 6】

請求項 3 1 ~ 3 5 のいずれか一つに記載の光学素子用形状転写型の製造方法において、

平面内の少なくとも一部において作製する構造物のピッチ（構造物と構造物の最小距離幅）を、波長以下としたことを特徴とする光学素子用形状転写型の製造方法。

【請求項 3 7】

請求項 3 6 記載の光学素子用形状転写型の製造方法において、

光学素子として機能する領域において前記構造物が等ピッチで作製されることを特徴とする光学素子用形状転写型の製造方法。

【請求項 3 8】

請求項 3 1 ~ 3 7 のいずれか一つに記載の光学素子用形状転写型の製造方法において、

前記構造物を、少なくとも一部に曲面を有している構造体の上に形成することを特徴とする光学素子用形状転写型の製造方法。

【請求項 3 9】

請求項 2 6 ~ 3 8 のいずれか一つに記載の光学素子用形状転写型の製造方法によって製造されたことを特徴とする光学素子用形状転写型。

【請求項 4 0】

請求項 3 9 記載の光学素子用形状転写型を用いて光学材料に微細構造を転写し、製造したことを特徴とする光学素子。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、レーザ記録装置、表示装置、画像形成装置、光通信、光情報処理等に用いられる薄型の光学素子に関し、特に、集光、分岐、回折、ホログラム等の機能を有する光学素子や、レンズ機能、分波/合波機能、光強度分布変換機能、偏光分離機能、あるいはこれらの複合機能を有する光学素子に関し、さらには、多段階あるいは連続的な構造を有しており、高い回折効率を示す表面レリーフ型の回折光学素子に関する。さらに本発明は、その光学素子の製造方法に関し、さらには、その光学素子を作製する際に用いられる光学素子用形状転写型の製造方法及び、その製造方法で作製した光学素子用形状転写型に関する。

【背景技術】

【0002】

近年、屈折率の異なる 2 つの媒質（例えば一方が空気、もう一方が等方性媒質）が光の波長よりも小さい周期構造を持つような構造（ SWS = Subwavelength Structure；サブ波長構造）を利用した光学素子が広く開発されている。これらの構造は回折理論における共鳴回折領域から等価屈折率領域にあたり、従来のスカラー回折理論による波長以上の構造体での回折光学素子とは原理的に大きく異なる特性を示す。

【0003】

10

20

30

40

50

このように周期が波長よりも短い回折格子はサブ波長格子と呼ばれ、その中でもさらに周期が短く透過・反射ともに0次回折光しか存在しない周期をもつ格子が0次格子と呼ばれる。これら0次回折素子は高次の回折光が存在しないことから、従来の波長以上の構造による回折光学素子での高次回折光によるエネルギー損失を生じない、光利用効率の高い素子の実現が可能であると考えられる。

【0004】

これらサブ波長構造を透過した0次回折光は、格子構造に起因する屈折率変化により位相変調を起こすことが知られており、図35に示すように、同一の高さ・ピッチで構造体の幅のみを変調（フィルファクター変調）することで、光を集光する素子の実現されている（例えば、非特許文献1（Journal of the Optical Society of America A, Vol14(4), 901-906(1997)）参照）。

10

【0005】

また、特許文献1（特開2001-318217号公報）では、同様に構造体のフィルファクターのみを変調し、かつ構造体の領域を分割することで空間的に位相を変調した回折光学素子を実現している。

さらに、特許文献2（特開2004-61905号公報）では円柱状のサブ波長構造体を用い、同様に構造体の幅（面積）のみを変調することにより位相変調光学素子を実現している。

【0006】

[サブ波長構造の製造方法]

入射光の波長以下の構造の製造方法は、利用する波長により大きく異なる。波長が1マイクロン（ μm ）よりもかなり長い領域に関しては光リソグラフィーや機械加工、エッチング等の多くの製造方法が利用可能である。

20

しかしながら、可視光程度の波長領域では構造体の周期はサブマイクロンオーダーとなり、製造方法も限定される。特に数百nm程度の構造の製造方法としては、レーザー光の干渉を利用した干渉露光法と電子ビーム露光法が主に用いられてきた。

【0007】

レーザー干渉露光法では、通常、青から紫外のレーザー光を干渉させて、感光性の高分子材料（レジスト）に照射し、その干渉ピッチの構造を形成する。このとき構造はレジストに形成され、高さはレジスト厚で規定される。

30

また、電子ビーム露光法では、電子ビームを集光・走査してレジスト材料に照射し、レジスト材料の微細な構造を作製する。このときも同様に、高さはレジスト厚みで規定される。

これらの手法によりレジスト以外の材料に微細構造を作製する場合は、このレジスト構造を利用して、反応性ドライエッチングや金属蒸着等の手法を用いて構造を作製していた。

【0008】

[積層薄膜を利用した微細構造の製造方法]

特許文献3（特開2003-181678号公報）に記載の光学素子の製造方法では、多層に配置した透過・吸収薄膜にレーザー光を照射することで、高さの異なる平坦面を有する微細構造を形成する。このとき微細構造の加工位置を制御することで、バイナリー型構造の回折光学素子を形成している。

40

【0009】

これら従来のサブ波長構造を有する光学素子では、構造の高さを一定にし、構造の幅あるいは面積により透過光の位相を変調していた。図35は従来の位相変調型サブ波長素子であり、このようにピッチが一定の微細な構造のフィルファクターのみを変調して透過0次光の位相制御を行っていた。

このサブ波長領域での材料の屈折率は多くの場合、以下の有効屈折率法（式1）によって近似されることが知られている。

【0010】

50

(式1)

$$n_{TE} = \{f n_2^2 + (1 - f) n_1^2\}$$

$$n_{TM} = \{[n_1^2 n_2^2] / [f n_1^2 + (1 - f) n_2^2]\}$$

$$f = w / p$$

【0011】

ここで、 n_{TE} は図36において電場が構造に平行に振動する垂直な偏光成分に対する屈折率、 n_{TM} は電場が構造に垂直な方向に振動する成分に対する屈折率を示す。 f は構造体の幅 w と周期(ピッチ) p との比であるフィルファクターを示す。

【0012】

図37には $n_1 = 1$ 、 $n_2 = 1.5$ とした場合のフィルファクターによる有効屈折率(n)を示す。このようにTE波、TM波とも n_1 から n_2 までフィルファクターによって制御可能であることが分かる。このとき偏光の異なる入射光での有効屈折率は、偏光成分によりこのTE波、TM波による有効屈折率の中間の値となる。

このとき、透過0次光の位相変調は、この有効屈折率 n を用いて入射光波長を、透過光路長を d とすると、位相変調量は、

$$= 2 n d / \quad (\text{式2})$$

で与えられる。

【0013】

このとき、例えば図38の構造体を考える。入射する光の波長を800nm、構造体のピッチ p を400nm、屈折率を $n_1 = 1$ 、 $n_2 = 1.5$ とし、フィルファクター f が1と0.2の間で2の位相変調を与えるとした場合、高さ d は約2ミクロンとなる。フィルファクターが0.2の時の構造体の幅は80nmであり、非常にアスペクトの高い構造が要求されることになる。このような構造を作製することは非常に困難であり、従来のフィルファクターによる変調のみでは、透過光の大きな位相変調を得ることは困難であった。サブ波長領域の位相変調光学素子では、このように微細かつ高い構造を要求される場合が多く、大きな問題となっていた。

さらに、このような高いアスペクトを有する構造体は機械的強度が弱く、外力に対して弱い問題があった。

【0014】

[製造方法の課題]

これら高さの異なる微細構造を有する素子を実現するために、従来のレーザ干渉を利用した微細構造の製造方法は、干渉強度の高い領域と低い領域の2値の構造を形成する手法であり、通常、加工高さがレジスト厚みで規定されるため、高さの制御が困難であるという問題があった。

従来の電子ビーム露光法では、露光量で高さを制御することは可能ではあるが、基本的に点描画による加工であるため加工速度が非常に遅く、数mm角の構造形成に何日もかかるなど製造上大きな問題となっていた。

また、これらの手法では構造体をレジストにしか作製することができず、他の材料で構造を作製する場合は、さらに反応性ドライエッチング等の他のプロセスを利用する必要があり、複雑でコストが高くなり、かつ形状の変化が起きることが問題となっていた。

【0015】

[回折光学素子及びその製造方法と、従来の製造方法における問題点]

回折光学素子は、素子に入射されるレーザ光の空間的な位相分布をコントロールすることにより、ビームの集光機能、強度分布変換機能、ビーム分波/合波機能など、様々な形態の光制御を行うことが可能な素子のことである。本発明に係る製造方法では、高い回折効率を得ることが可能な多段階構造あるいは連続的でなめらかな構造を有する表面レリーフ型回折光学素子を対象としている。以下では、これを単に回折光学素子と言う。

【0016】

本発明に係る多段階の構造を持つ回折光学素子の例を図25に示す。多段階の回折光学素子の構造は図25(a)のように回折格子を元にしたものや、図25(b)のように段

10

20

30

40

50

差が2次元的にランダムに配置されたものなどがある。回折光学素子は一般的に、高さ数百nm～数 μ mの構造が数百nm～数十 μ mのピッチで形成されており、この作製に必要な分解能は、用途によって異なるが、水平方向に数十nm～1 μ m、高さ方向に数十nmである。

【0017】

回折光学素子及びその製造方法に関しては、非特許文献2（最新 回折光学素子技術全集 技術情報協会（2004）pp107 - 160）などに詳細に記されている。

製造方法及び、それぞれの製造方法における問題点に関して、以下に簡単に記す。

【0018】

回折光学素子の製造方法として、最も一般的にはダイヤモンドバイトなどを利用した機械加工によって成されてきた。しかし、機械加工による手法では、面内の分解能がバイト先端部の大きさで規定されるため、高分解能とすることが難しい。また、ガラスのような脆性材料や、樹脂のようなやわらかい材料を高精度に機械加工することは困難である。

【0019】

それに対して、近年、面内の分解能が高い手法として、半導体製造技術であるリソグラフィによる手法がとられている。リソグラフィによる手法としては以下のようなものが挙げられる。

【0020】

(1) フォトリソグラフィによる製造方法

レジストの塗布、フォトリソグラフィによるマスクパターンの転写、パターン現像、エッチング、レジスト除去、といった一連のプロセスを複数回繰り返すことで、多段階の構造を作製する手法である。

しかし、この製造方法では、工程が非常に多く、コストが高い。また、複数回リソグラフィを繰り返す際に精密な位置合わせが必要となり、位置合わせの誤差が素子の性能劣化の原因となる。

【0021】

(2) グレースケールマスクを用いた製造方法

(1)の手法に対して、1回のフォトリソグラフィ工程で回折光学素子を作製する方法として、グレースケールマスクを用いる方法がある。グレースケールマスクは光の透過率が階調を持って空間的に異なっており、これによって1度のマスクパターン転写で立体形状を有するレジストを作製することができる。

【0022】

(3) 電子線露光による作製手法

電子線を集光しレジストに照射し、集光点を移動させることでパターンを形成する方法であり、電子線の強度を変調させながら作製を行うことで、深さ方向が場所によって異なる立体形状を作製することができる。

【0023】

(4) レーザ光の集光走査による作製手法

上記電子線の変わりにレーザー光（主に紫外線領域のレーザー光）を用いることで、より簡易に形状を作製することが可能である。

【0024】

上記の(1)、(2)の手法に関しては、マスクが必要であり、特にグレースケールマスクはコストが高く、半導体素子と比較して同種のを大量に生産することが少ない回折光学素子の生産には適していなかった。

また、(2)～(4)の製造方法に関しては、レーザー光あるいは電子線の強度に対してレジストの感度が一般的には線形ではなく、高さを精密に制御することが非常に困難であった。

【0025】

これらの手法のように面内の高い分解能を維持しつつ、高さ方向を精密に制御する方法として、多層構造を利用する手法が以下のように提案されている。

例えば、複数種類のレジストを多層に塗布した後に複数回露光を行う手法が特許文献4

10

20

30

40

50

(特開平5-333204号公報)に示されている。

また、あらかじめ多層構造を用意し、これらをレーザーブレーションによって選択的に除去することで、多段形状を作製する方法が前述の特許文献3(特開2003-181678号公報)に示されている。

これら多層構造を利用する方法では、構造体の深さを精密に制御することが可能であるが、多層膜を作製するのに工程が必要である、多層構造の層数に限りがある、高さ分解能が多層膜作製時の精度に依存するため限界がある、などの問題点がある。

【0026】

【特許文献1】特開2001-318217号公報

【特許文献2】特開2004-61905号公報

10

【特許文献3】特開2003-181678号公報

【特許文献4】特開平5-333204号公報

【特許文献5】特表2004-503413号公報

【特許文献6】特開2001-158050号公報

【非特許文献1】Journal of the Optical Society of America A, Vol14(4), 901-906(1997)

【非特許文献2】最新 回折光学素子技術全集 技術情報協会(2004) pp107-160

【非特許文献3】Appl.Phys.Lett.83, 819-821(2003)

【非特許文献4】Opt.Lett.22,132-134(1997)

【非特許文献5】Appl.Phys.Lett.74, 786-788(1999)

20

【非特許文献6】Appl.Opt. 33,863-867(1994)

【非特許文献7】Opt.Eng. 19, 297-305(1980)

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0027】

本発明は以上の背景技術の問題点に鑑みなされたものであり、その第1の課題は、前述の素子構造の問題を解決し、単一の高さのサブ波長構造と同様の透過光の位相変調をアスペクトの低い構造により実現する光学素子を提供することである。

第2の課題は、第1の課題に加え、光利用効率の高い光学素子の提供を行うことである。

30

第3の課題は、第1、第2の課題に加え、設計が簡便で製造が容易な位相変調型の光学素子構造を提供することである。

第4の課題は、第1～3の課題に加え、入射角変化に柔軟で設計、製造が容易な光学素子を提供することである。

第5の課題は、第1～4の課題に加え、透過光の位相変調による回折型光学素子、ホログラム光学素子の提供を行うことである。

第6の課題は、第1～5の課題に加え、安定な構造で大きい位相変調の実現及び2つの位相変調によるより複雑な変調を可能とする光学素子の提供を行うことである。

第7の課題は、第1～6の課題に加え、集光レンズ、投影レンズとしての利用を容易とする光学素子の提供を行うことである。

40

第8の課題は、第1～7の課題に加え、位相変調機能を利用して、平板あるいは薄型の集光レンズ、投影レンズ等の集光光学素子の提供を行うことである。

第9の課題は、第1～7の課題に加え、位相変調機能を利用して、入射光の分割、整形等を行う平板あるいは薄型の回折光学素子の提供を行うことである。

第10の課題は、第1～7の課題に加え、位相変調機能を利用して、薄型の収差補正用光学素子の提供を行うことである。

【0028】

第11の課題は、高速で高精度な複数の高さを有する微細構造体からなる光学素子の製造方法あるいは光学素子用形状転写型の製造方法を提供することである。

第12の課題は、高速で高精度な複数の高さを有する微細構造体からなる光学素子の製

50

造方法あるいは光学素子用形状転写型の製造方法を提供することであり、さらには、付加工を施すことなく、直接光学素子あるいは光学素子用形状転写型の製造が可能な製造方法を提供することである。

第13の課題は、高速で高精度な複数の高さを有する微細構造体からなる光学素子の製造方法あるいは光学素子用形状転写型の製造方法を提供することであり、さらには、高さの制御性が高く、平坦な加工面を有する光学素子の製造方法あるいは光学素子用形状転写型の製造方法を提供することである。

第14の課題は、高速で高精度な複数の高さを有する微細構造体からなる光学素子の製造方法あるいは光学素子用形状転写型の製造方法を提供することであり、さらには、アスペクトの高い微細構造を有する光学素子の製造方法あるいは光学素子用形状転写型の製造方法を提供することである。

10

第15の課題は、高速で高精度な複数の高さを有する微細構造体からなる光学素子の製造方法あるいは光学素子用形状転写型の製造方法を提供することであり、さらには、高精度で微細化が容易で構造の制御性の高い光学素子の製造方法あるいは光学素子用形状転写型の製造方法を提供することである。

【0029】

ところで、近年、3次元の空間分解能を有する加工法として、2光子または多光子プロセスを用いた工法が種々提案されている。

例えば、非特許文献3 (Appl. Phys. Lett. 83, 819-821 (2003)) において示されるように、多光子プロセスを用いることによって、通常のレーザ加工における回折限界よりも微小な構造体を作製することが可能である。また、一回の集光照射で形成される構造体は基板垂直方向に長く、基板水平方向には短い、アスペクト比の高い構造が作製される。

20

また、非特許文献4 (Opt. Lett. 22, 132-134 (1997)) や、特許文献5 (特表2004-503413号公報) では、ステージを移動させることで焦点位置を変化させ、一筆書きで構造物、特に導波路を作製する方法が示されている。

さらに、非特許文献5 (Appl. Phys. Lett. 74, 786-788 (1999)) では、基板水平方向のステージ移動で構造物を作製した後に、基板垂直方向にステージを移動させ、再び水平方向で構造物を作成する、といった工程を繰り返す、積層型の立体形状製造方法が示されている。

また、ミラースキャナーとステージとを組み合わせることで、より高速に構造物を作製する手法が特許文献6 (特開2001-158050号公報) に示されている。

30

【0030】

これらの手法において、作製される構造物の高さを制御する手法としては、作製する構造物を積層することで実現されている。この手法では、積層させる必要があるため作製に時間がかかり、また、構造物の高さは積層時の送りで限定されるため、高さ方向に高い分解能を有する構造を作製するためにはさらに時間がかかることになる。

そこで、以下の課題では、これらの問題を解決し、多光子吸収を利用して簡単にかつ高精度で高さが制御された構造の製造方法を提供することである。ここで、多光子吸収とは2光子以上の吸収過程のことを指すものである。

【0031】

より具体的には、本発明の第16の課題は、多光子吸収を利用して高さが精密に制御された多段階あるいは連続的な表面レリーフ型の回折光学素子あるいは光学素子用形状転写型を、少ない工程数で作製可能とする製造方法を提供することである。

40

第17の課題は、第16の課題に加え、より精度の高い回折光学素子の製造方法あるいは光学素子用形状転写型の製造方法を提供することである。

【0032】

ところで、多光子吸収過程は非線形過程であるため、通常起こりにくく高いパワーのレーザが必要である。しかし、高パワーのレーザを局所的に集光することによって、光反応性材料中にバブルが発生する、アブレーションによって材料が破壊される、などの現象が生じ、作製される構造体に悪影響を及ぼす。

50

【 0 0 3 3 】

そこで、第 18 の課題は、第 16、17 の課題に加え、より効率的に多光子吸収過程を生じせしめ、高いパワーを必要としない回折光学素子の製造方法あるいは光学素子用形状転写型の製造方法を提供することであり、さらには、水平方向により細かい構造を有する回折光学素子の製造方法あるいは光学素子用形状転写型の製造方法を提供することである。

【 0 0 3 4 】

ところで、レーザ光の集光点を水平方向に走査する際に、集光点の水平方向移動量と 1 回の走査で形成される構造の幅との関係が最適になっていないと、構造体の間に溝ができ、作製された構造体は例えば図 3 1 (b) のような構造となる。図 3 1 (a) のように所望の回折光のみを得る構造に対して、この構造では図 3 1 (b) に示すように不要な回折光を生じ、光学素子の性能に悪影響を及ぼす。

また、製造方法によっては、図 3 2 に示すように、作製条件によってはこのような溝がなくとも構造体の頂部に微細な凹凸が形成されることがありうる。これによっても、不要な回折光が生じる。

【 0 0 3 5 】

そこで第 19 の課題は、このような溝が存在していても作製された光学素子の光学性能に影響を及ぼさないような構造とし、より性能の高い回折光学素子の製造方法あるいは光学素子用形状転写型の製造方法を提供することである。

さらに第 20 の課題は、第 19 の課題に加え、より高い光学性能を有する回折光学素子の製造方法あるいは光学素子用形状転写型の製造方法を提供することである。

また、第 21 の課題は、第 19、20 の課題に加え、より複合的な機能を有する光学素子の製造方法あるいは光学素子用形状転写型の製造方法を提供することである。

さらに第 22 の課題は、第 19 ~ 21 の課題に加え、回折効率の高い、高性能な回折光学素子の製造方法あるいは光学素子用形状転写型の製造方法を提供することである。

【課題を解決するための手段】

【 0 0 3 6 】

上記の課題を解決するため、本発明では以下のような技術的手段を採っている。

本発明の第 1 の手段は、微細構造を有する光学素子であって、少なくとも一部の構造体の高さを空間的に変調させることにより透過光の位相を変化せしめることを特徴とする（請求項 1）。

また、本発明の第 2 の手段は、第 1 の手段の光学素子において、使用する光の波長よりも微細な構造を有することを特徴とする（請求項 2）。

【 0 0 3 7 】

本発明の第 3 の手段は、第 2 の手段の光学素子において、使用する光の波長を λ 、入射角を θ 、入射媒体の屈折率を n_1 、構造体の屈折率を n_2 とした場合、前記構造体の周期が $\lambda / (n_1 \sin \theta + n_2)$ 以下であることを特徴とする（請求項 3）。

また、本発明の第 4 の手段は、第 2 または第 3 の手段の光学素子において、使用する光の波長を λ 、入射媒体の屈折率を n_1 、構造体の屈折率を n_2 とした場合、構造体の高さの差 h が、

$$h = 2 \lambda \times (n_1^2 + n_2^2) / (n_1 + n_2)^2$$

の近傍とすることを特徴とする（請求項 4）。

【 0 0 3 8 】

本発明の第 5 の手段は、第 1 ~ 第 4 のいずれか一つの手段の光学素子において、前記微細構造が同一周期の概矩形格子あるいは柱状構造もしくは多段構造であることを特徴とする（請求項 5）。

また、本発明の第 6 の手段は、第 2 ~ 第 5 のいずれか一つの手段の光学素子において、使用する波長以下の微細構造が複数の領域に分割されており、該領域内の構造が同一ピッチ、同一高さであることを特徴とする（請求項 6）。

【 0 0 3 9 】

10

20

30

40

50

本発明の第 7 の手段は、第 1 ~ 第 6 のいずれか一つの手段の光学素子において、前記微細構造が素子の両面に形成されていることを特徴とする（請求項 7）。

また、本発明の第 8 の手段は、第 1 ~ 第 7 のいずれか一つの手段の光学素子において、前記微細構造が曲面上（例えばレンズ上等）に形成されていることを特徴とする（請求項 8）。

【0040】

本発明の第 9 の手段は、第 2 ~ 第 8 のいずれか一つの手段の光学素子において、波長以下の構造体により入射光の位相が変調され、該入射光の少なくとも一部が集光されることを特徴とする（請求項 9）。

また、本発明の第 10 の手段は、第 2 ~ 第 8 のいずれか一つの手段の光学素子において、波長以下の構造体により入射光の位相が変調されることにより、透過光のビームを整形することを特徴とする（請求項 10）。

さらに本発明の第 11 の手段は、第 2 ~ 第 9 のいずれか一つの手段の光学素子において、少なくとも一面に設けられた波長以下の構造体により入射光の位相が変調されることにより、透過光の収差を補正することを特徴とする（請求項 11）。

【0041】

本発明の第 12 の手段は、第 1 ~ 第 11 のいずれか一つの手段の光学素子を製造する際の製造方法において、レーザの干渉により構造を形成するレーザ干渉露光法を用い、干渉光強度変調手段により干渉光強度を変調することにより空間的に構造の高さを変調させ、微細構造を形成することを特徴とする（請求項 12）。

【0042】

本発明の第 13 の手段は、第 1 ~ 第 11 のいずれか一つの手段の光学素子を製造する際の製造方法において、レーザブレーション法により微細な構造を形成するレーザブレーション加工法を用い、加工用レーザ光を干渉させ、さらに干渉光強度変調手段により干渉強度を変調するとにより空間的に構造の高さを変調させ、微細構造を形成することを特徴とする（請求項 13）。

【0043】

本発明の第 14 の手段は、第 1 ~ 第 11 のいずれか一つの手段の光学素子を製造する際の製造方法において、レーザブレーション法により微細な構造を形成するレーザブレーション加工法を用い、加工用レーザ光に対して透過性を示す薄膜と吸収性を示す薄膜を積層した構造体に対して加工用レーザ光を照射し、薄膜を空間選択的に除去することにより、微細構造を形成することを特徴とする（請求項 14）。

【0044】

本発明の第 15 の手段は、第 1 ~ 第 11 のいずれか一つの手段の光学素子を製造する際の製造方法において、光を集光して集光点近傍において材料を硬化して構造を形成する光硬化方式を用い、照射レーザ光の多光子吸収により構造を形成し、かつ構造体の高さを変調することにより、微細構造を形成することを特徴とする（請求項 15）。

【0045】

本発明の第 16 の手段は、第 13 ~ 第 15 のいずれか一つの手段の光学素子の製造方法において、加工用のレーザ光は、パルス幅が 10 ピコ秒以下である超短パルスレーザであることを特徴とする（請求項 16）。

【0046】

本発明の第 17 の手段は、第 1 ~ 第 11 のいずれか一つの手段の光学素子を製造する際の製造方法において、基板上に光反応性材料を塗布し、前記材料中にレーザ光を集光して集光点近傍でのみ多光子吸収を起こし、集光点を基板面上で走査することで基板面上に微細構造を形成せしめる方法であり、走査中に集光点中心と基板表面との距離を変化させることで、形成される構造体の高さを変化させ、空間的に高さの異なる構造体を作製することを特徴とする（請求項 17）。

【0047】

本発明の第 18 の手段は、第 17 の手段の光学素子の製造方法において、前記レーザ光

を照射中、レーザ光のパワーおよび、集光点を走査するスピードは略一定とすることを特徴とする（請求項18）。

また、本発明の第19の手段は、第17または第18の手段の光学素子の製造方法において、前記レーザ光を照射中、基板と集光点との位置は常にモニタリングされており、モニタリングの結果から集光点の位置を調整することを特徴とする（請求項19）。

【0048】

本発明の第20の手段は、第17～第19のいずれか一つの手段の光学素子の製造方法において、前記レーザ光が超短パルスレーザ光であることを特徴とする（請求項20）。

また、本発明の第21の手段は、第17～第20のいずれか一つの手段の光学素子の製造方法において、前記光反応性材料中にレーザ光を集光する手段として、液浸対物レンズを利用することを特徴とする（請求項21）。

10

【0049】

本発明の第22の手段は、第17～第21のいずれか一つの手段の光学素子の製造方法において、平面内の少なくとも一部において作製する構造物のピッチ（構造物と構造物の最小距離幅）を、波長以下としたことを特徴とする（請求項22）。

また、本発明の第23の手段は、第22の手段の光学素子の製造方法において、光学素子として機能する領域において前記構造物が等ピッチで作製されることを特徴とする（請求項23）。

さらに本発明の第24の手段は、第17～第23のいずれか一つの手段の光学素子の製造方法において、前記構造物を、少なくとも一部に曲面を有している構造体の上に形成することを特徴とする（請求項24）。

20

【0050】

本発明の第25の手段は、光学素子であって、第12～第24のいずれか一つの手段の光学素子の製造方法によって製造されたことを特徴とする（請求項25）。

【0051】

本発明の第26の手段は、第1～第11のいずれか一つの手段の光学素子を製造する際に用いられ、前記微細構造を転写する光学素子用形状転写型の製造方法において、レーザの干渉により構造を形成するレーザ干渉露光法を用い、干渉光強度変調手段により干渉光強度を変調することにより空間的に構造の高さを変調させ、微細構造を形成することを特徴とする（請求項26）。

30

【0052】

本発明の第27の手段は、第1～第11のいずれか一つの手段の光学素子を製造する際に用いられ、前記微細構造を転写する光学素子用形状転写型の製造方法において、レーザブレーション法により微細な構造を形成するレーザブレーション加工法を用い、加工用レーザ光を干渉させ、さらに干渉光強度変調手段により干渉強度を変調するとにより空間的に構造の高さを変調させ、微細構造を形成することを特徴とする（請求項27）。

【0053】

本発明の第28の手段は、第1～第11のいずれか一つの手段の光学素子を製造する際に用いられ、前記微細構造を転写する光学素子用形状転写型の製造方法において、レーザブレーション法により微細な構造を形成するレーザブレーション加工法を用い、加工用レーザ光に対して透過性を示す薄膜と吸収性を示す薄膜を積層した構造体に対して加工用レーザ光を照射し、薄膜を空間選択的に除去することにより、微細構造を形成することを特徴とする（請求項28）。

40

【0054】

本発明の第29の手段は、第1～第11のいずれか一つの手段の光学素子を製造する際に用いられ、前記微細構造を転写する光学素子用形状転写型の製造方法において、光を集光して集光点近傍において材料を硬化して構造を形成する光硬化方式を用い、照射レーザ光の多光子吸収により構造を形成し、かつ構造体の高さを変調することにより、微細構造を形成することを特徴とする（請求項29）。

【0055】

50

本発明の第30の手段は、第27～第29のいずれか一つの手段の光学素子用形状転写型の製造方法において、加工用のレーザー光は、パルス幅が10ピコ秒以下である極短パルスレーザーであることを特徴とする（請求項30）。

【0056】

本発明の第31の手段は、第1～第11のいずれか一つの手段の光学素子を製造する際に用いられ、前記微細構造を転写する光学素子用形状転写型の製造方法において、基板上に光反応性材料を塗布し、前記材料中にレーザー光を集光して集光点近傍でのみ多光子吸収を起こし、集光点を基板面上で走査することで基板面上に微細構造を形成せしめる方法であり、走査中に集光点中心と基板表面との距離を変化させることで、形成される構造体の高さを変化させ、空間的に高さの異なる構造体を作製することを特徴とする（請求項31）。

10

【0057】

本発明の第32の手段は、第31の手段の光学素子用形状転写型の製造方法において、前記レーザー光を照射中、レーザー光のパワーおよび、集光点を走査するスピードは略一定とすることを特徴とする（請求項32）。

また、本発明の第33の手段は、第31または第32の手段の光学素子用形状転写型の製造方法において、前記レーザー光を照射中、基板と集光点との位置は常にモニタリングされており、モニタリングの結果から集光点の位置を調整することを特徴とする（請求項33）。

【0058】

本発明の第34の手段は、第31～第33のいずれか一つの手段の光学素子用形状転写型の製造方法において、前記レーザー光が超短パルスレーザー光であることを特徴とする（請求項34）。

20

また、本発明の第35の手段は、第31～第34のいずれか一つの手段の光学素子用形状転写型の製造方法において、前記光反応性材料中にレーザー光を集光する手段として、液浸対物レンズを利用することを特徴とする（請求項35）。

【0059】

本発明の第36の手段は、第31～第35のいずれか一つの手段の光学素子用形状転写型の製造方法において、平面内の少なくとも一部において作製する構造物のピッチ（構造物と構造物の最小距離幅）を、波長以下としたことを特徴とする（請求項36）。

30

また、本発明の第37の手段は、第36の手段の光学素子用形状転写型の製造方法において、光学素子として機能する領域において前記構造物が等ピッチで作製されることを特徴とする（請求項37）。

さらに本発明の第38の手段は、第31～第37のいずれか一つの手段の光学素子用形状転写型の製造方法において、前記構造物を、少なくとも一部に曲面を有している構造体の上に形成することを特徴とする（第38の手段）。

【0060】

本発明の第39の手段は、光学素子用形状転写型であって、第26～第38のいずれか一つの手段の光学素子用形状転写型の製造方法によって製造されたことを特徴とする（請求項39）。

40

また、本発明の第40の手段は、光学素子であって、第39の手段の光学素子用形状転写型を用いて光学材料に微細構造を転写し、製造したことを特徴とする（請求項40）。

【発明の効果】

【0061】

第1、第2の手段の光学素子では、高さの異なる入射波長よりも周期の狭い構造により、透過光の位相変調を実現することができる。

ここで、高さが異なる周期構造では、前述したように、有効屈折率 n を用いて入射光波長を λ 、透過光路長を d とすると、位相変調量 ϕ は、

$$\phi = 2\pi n d / \lambda \quad (\text{式2})$$

で与えられるので、ピッチ、フィルファクターが同一の場合、高さにのみ依存した位相変

50

調が可能となる。これにより同一ピッチで同一フィルファクターの構造においても位相の変調が可能となる。これは例えば高さを1/2とすることで、透過光の位相差をとすることに対応する。これは例えば等ピッチのフィルファクター0.2の構造を、高さ1/2、フィルファクター約0.6の構造にすることと同等の位相変調が可能で、アスペクトを大幅に低下させることが可能となる。これによりアスペクトの低い構造においても大きな位相変調が可能となり、安定した構造を有する光学素子を実現することができる。

【0062】

また、第1、第2の手段の光学素子の構成に加え、使用する波長と入射角、媒体の屈折率を第3の手段の条件とすることにより、高次の回折による透過光の発生がなくなり、光利用効率の高い光学素子を実現することができる。

10

【0063】

さらに第4の手段の光学素子では、第2または第3の手段の構成に加え、使用する光の波長を、入射媒体の屈折率をn1、構造体の屈折率をn2とした場合、構造体の高さの差hが、

$$h = 2 \times \frac{(n1^2 + n2^2)}{(n1 + n2)^2}$$

の近傍とする。すなわち、サブ波長構造体の最大高さと最小高さの差を上記の関係としている。

【0064】

図37からわかるように、構造体に対して平行な入射光であるTE偏光の有効屈折率は同一のフィルファクターを持つ垂直なTM偏光に対しての有効屈折率よりも高くなる。この平均の屈折率を有し、0.5のフィルファクターを持つ構造で位相変調を定義する。

20

この条件は、前述の(式1)から下記の(式3)の(b)に示される値となる。これにより円偏光あるいはランダム偏光の入射光を用いる場合、あるいは中心対称な構造である場合、フィルファクター0.5の構造で2の位相変調を実現できる。これによりアスペクトが低く安定な構造で、設計および作製のもっとも容易な構造を有する光学素子の実現が可能となる。

【0065】

(式3)

$$n1 \sin \theta_i + n2 \sin \theta_o = m \left(\frac{\lambda}{p} \right) \quad (a)$$

$$p \left(\frac{\lambda}{p} \right) / (n1 \sin \theta_i + n2) \quad (b)$$

30

θ_i : 構造体への光の入射角

n1 : 入射媒体の屈折率

n2 : 構造体の屈折率

p : 構造体のピッチ

m : 回折次数

θ_o : 回折角

【0066】

第5の手段の光学素子では、第1～第4の手段の構成に加え、構造体を概矩形の同一周期の格子構造あるいは同一周期の柱状構造もしくは同一周期の多段構造とする。これにより製造が容易で安定的製造が可能な素子を実現することができる。さらに前述の(式1)に記載の有効屈折率の式を満足する位相変調が実現できる。さらに対称構造のため入射方向による変化が少なく、安定な光学素子を実現することができる。

40

【0067】

第6の手段の光学素子では、第2～第5のいずれか一つの手段の構造を、任意な位置に任意な位相変調領域を作製する。このように位相変調を空間的に分割して行うことで、それぞれの領域ごとの位相変調が可能となる。この領域ごとの位相変調を利用することで、現在一般的に利用されているバイナリー型の回折光学素子と同様の機能を果たすことが可能となる。これは単一の素子のみでなく、他のレンズ等と組み合わせて回折光学素子として利用することも可能である。

【0068】

50

第7の手段の光学素子では、透過性基板の両面に第1～第6のいずれか一つの手段の構造を形成する。これは同一の構造でも異なる構造でもかまわない。透過0次光を用いるため、その両面での位相変調は透過光路中の各面での位相変調量の足し合わせとすることができる。これにより片面での位相変調量の拡大が可能で、それによりよりフィルファクターの低い安定した構造での位相変調の実現及び、位相変調の足し合わせによる複雑な位相変調の実現が可能となる。

【0069】

第8の手段の光学素子では、第1～第7のいずれか一つの手段の構成に加え、微細構造を曲面上（例えばレンズ上）に形成することにより、レンズのもつパワーに加えて微細構造による位相変調を利用した透過光の位相変調が可能となる。これは位相の足し合わせと同様の効果をもつ。これにより、例えば微細構造をレンズと組み合わせた一体の回折光学素子として利用することも可能である。

10

【0070】

第9の手段の光学素子では、第2～第8のいずれか一つの手段の構成に加え、透過光の位相を空間的に変調し、或る一点あるいは線状に等位相面を形成するように位相変調量を調整することにより、透過光の集光を行うことが可能となる。これにより波長オーダーの高さの構造体により、薄型で集光可能な光学素子を実現することができる。

【0071】

第10の手段の光学素子では、第2～第8のいずれか一つの手段の構成に加え、透過光の位相を空間的に変調し、ある平面上の複数の点あるいは任意形状に等位相面を形成するように位相変調量を調整することにより、透過光のビーム形状を整形することが可能となる。これにより波長オーダーの高さの構造体により、薄型の回折光学素子を実現することができる。

20

【0072】

第11の手段では、第2～第9の手段の構成に加え、透過光の位相を空間的に変調し、任意空間位置の位相を変調する。これにより波長オーダーの高さの構造体により、光の位相を制御することができ、伝播光の波面を制御した収差補正用の光学素子を実現することができる。

【0073】

第12の手段の光学素子の製造方法、あるいは第26の手段の光学素子用形状転写型の製造方法においては、レーザ光の干渉を行う際、レーザ光の干渉強度の変調を行い、望ましくはポジ型レジスト用い、空間選択的に露光する。ここで、干渉強度とは図39の干渉最大強度と干渉最小強度と非干渉強度との割合を示し、干渉具合によって変化させることが可能な値である。これによりレジスト厚み以下の微細な構造を製造することが可能となる。

30

【0074】

第13の手段の光学素子の製造方法、あるいは第27の手段の光学素子用形状転写型の製造方法においては、ピーク強度の強いレーザを干渉させ、レーザブレーション法によって微細構造を形成する。これにより、微細な構造を高速に大面積に作製することが可能となる。また、プロセスがシンプルであり、直接多くの材料に作成可能なことから大幅なコストの低下につながる。さらに本手法は、電子ビーム露光法に比べ大幅に高速に加工を行うことが可能であり、溶液処理やガスを必要としないクリーンなプロセスである利点を有する。

40

【0075】

第14の手段の光学素子の製造方法、あるいは第28の手段の光学素子用形状転写型の製造方法においては、多層膜構造材料に対して選択的なレーザ照射を行う。多層膜中に加工用レーザ光に対して吸収性を示す層と透過性を示す層を交互に配置することにより、選択的に除去層を選択して加工を行うことが可能となる。また、照射位置を制御しながらレーザ照射を繰り返すことで、空間的に高さの異なる微細な構造体を製造することが可能となる。このとき、通常のアブレーション法に比較して高さの制御性が高く、平坦な加工形

50

状を得ることができる。さらには、レーザ光 1 パルスで層を除去するため、高速な加工が実現できる。また、各層の厚みを初期に調整することで、多段の構造を形成することが可能となる。

【0076】

第15の手段の光学素子の製造方法、あるいは第29の手段の光学素子用形状転写型の製造方法においては、高さの異なる微細構造をレーザ光の集光点における多光子吸収過程を利用した光硬化法によって作成する。これにより高さの高精度制御が可能な微細構造を高速に製造することが可能となる。

【0077】

第16の手段の光学素子の製造方法、あるいは第30の手段の光学素子用形状転写型の製造方法においては、第13～15の手段あるいは第27～29の手段における加工用レーザに、10 ps 以下の超短パルスレーザを用いる。これにより低エネルギー光源による加工やエネルギー利用効率の高い加工が可能であり、高い精度を有する微細構造の形成が可能となる。

【0078】

第17の手段の光学素子の製造方法、あるいは第31の手段の光学素子用形状転写型の製造方法においては、図20に示すように、基板上に光反応性材料を塗布し、前記材料中にレーザ光を集光して集光点近傍でのみ多光子吸収を起こし、集光点を基板面上で走査することで基板面上に微細構造を形成せしめる方法であり、走査中に集光点中心と基板表面との距離を変化させることで、形成される構造体の高さを変化させ、空間的に高さの異なる構造体を作製するので、非特許文献3において示されるように、多光子プロセスを用いることによって、通常のレーザ加工における回折限界よりも微小な構造体を作製することが可能である。また、一回の集光照射で形成される構造体は基板垂直方向に長く、基板水平方向には短い、アスペクト比の高い構造体を作製される。さらに、本発明の製造方法では、図21(a), (b)に示すような従来手法に比べて、少ない工程数で空間的に高さの異なる構造体を作製することができる。

【0079】

本発明者らの研究では、開口数(NA)0.8の対物レンズによって波長800 nmのレーザ光を集光することにより、水平方向の幅が400 nm、垂直方向2 μm程度の構造を作製することが可能である。構造体の高さは下記の(式4)によって規定されるため、例えば回折光学素子の使用対象となる波長が650 nmであれば、高さは1.3 μmあれば2 の位相変調を出すことができるため、本発明の手法で作製される構造は十分であると言える。

【0080】

(式4)

$$h(x, y) = [\quad / (n - 1)] \times [\quad (x, y) / 2 \quad]$$

$h(x, y)$: 任意の位置 x, y における回折光学素子の高さ

(x, y) : 制御される光の任意の位置 x, y における位相変調量

n : 材質の屈折率

: 回折光学素子として使用する際に対象となる光の波長

【0081】

作製される構造体の高さは、レーザの集光点と基板との距離によって決定される。このため、例えばピエゾステージを用いれば、ステージの位置分解能は数 nm であるため、作製される構造の高さも数 nm の精度で形成することが可能である。

これによって、高い性能を有する回折光学素子あるいは光学素子用形状転写型の作製が可能となる。

【0082】

第18の手段の光学素子の製造方法、あるいは第32の手段の光学素子用形状転写型の製造方法においては、第17の手段あるいは第31の手段の製造方法に加え、レーザ光の強度及び走査スピードを一定に保つことで、同じ高さの構造物を正確に作製することが可

能となる。これによって集光点と基板との距離が作製する構造物の高さと同様に正確に対応することになる。この対応関係は以下のようにして表すことができる。

一回の走査で作製される構造物の高さの最大値が H であるとき、集光点と基板との距離は $H/2$ である。集光点と基板との距離を d としたとき、形成される構造物の高さ h は、

$$h = H/2 + d \quad (\text{ただし、} -H/2 < d < H/2 \text{ であるとき})$$

となる。

【0083】

ここで、回折光学素子は面内で相対的な高さのみが特性に影響をおよぼすので、本発明の方法で作製する際には、集光点と基板との距離 d の場所による変化のみが特性に影響をおよぼす。

すなわち、一回の走査で作製される構造物の高さの最大値 H に関係なく所望の特性を有する回折光学素子を作製することが可能となる。

H の値は周辺の温度や湿度など環境要因によって変化するため再現しにくい値であるが、本発明の方法では、 H の値の影響を受けないためより環境変化に対して有利な製造方法である。

【0084】

第19の手段の光学素子の製造方法、あるいは第33の手段の光学素子用形状転写型の製造方法においては、第17または18の手段の製造方法、あるいは第31または32の手段の製造方法に加え、基板と集光点との距離を測定しながら、基板垂直方向への集光点移動量へその結果をフィードバックすることにより、基板の反りやうねりの影響を受けず、より精度の高い回折光学素子、あるいは光学素子用形状転写型の作製が可能となる。

【0085】

第20の手段の光学素子の製造方法、あるいは第34の手段の光学素子用形状転写型の製造方法においては、第17～19のいずれかの手段の製造方法、あるいは第31～33のいずれかの手段の製造方法に加え、パルス幅が 1 ps 以下である、いわゆる超短パルスレーザを光源として用いることにより、より低いパワーで構造を作製することが可能となる。これによって、高強度のレーザ光を集光することによって生じる、バブルの発生や、構造のアブレーションによる破壊を避けることができる。

【0086】

第21の手段の光学素子の製造方法、あるいは第35の手段の光学素子用形状転写型の製造方法においては、第17～20のいずれかの手段の製造方法、あるいは第31～34のいずれかの手段の製造方法に加え、光反応性材料中にレーザ光を集光する手段として、液浸対物レンズを利用することにより、水平方向分解能がより細かい構造を作製することができる。

【0087】

ところで、第17～21の手段の製造方法、あるいは第31～35の手段の製造方法においては、レーザ光の集光点を水平方向に走査する際に、集光点の水平方向移動量に対して、1回の走査で形成される構造の幅が小さいとき、構造体の間に溝ができ図31(b)に示すような構造となる。このような溝が存在することにより、不要な回折光が生じ、回折効率が低下する不具合が生じる。

これに対して、第22の手段の光学素子の製造方法、あるいは第36の手段の光学素子用形状転写型の製造方法においては、平面内の少なくとも一部において作製する構造物のピッチ（構造物と構造物の最小距離幅）を、波長以下としたことにより、作製する構造のピッチが使用する波長より細かい構造となっている。

このような構造では周期的なピッチ構造が存在していても回折光は生じないが、入射光の位相分布を変化させることが可能である（なお、サブ波長構造を利用した、空間位相分布制御に関しては、特許文献1に示されている）。

すなわち、本発明の製造方法では、作製される構造のピッチが波長より細かい構造となっており、これによって作製時に構造体の間に溝が存在しても、不要な回折光が生じることなく所望の機能を得ることが可能な回折光学素子あるいは光学素子用形状転写型を作製

10

20

30

40

50

することができる。

【0088】

なお、上記の製造方法では、特に集光するレーザ光の強度が等しく、走査スピードが等しいとき、作製される構造体の幅は常に一定となるため、ピッチが異なるいわゆるデューティ比が変化する。デューティ比が変化するることによって、有効屈折率が変化するため作製する構造の高さに補正が必要となる。

そこで、より簡易に高さのみによって回折光学素子の機能を制御するために、第23の手段の光学素子の製造方法、あるいは第37の手段の光学素子用形状転写型の製造方法においては、第22の手段の製造方法、あるいは第36手段の製造方法に加え、光学素子として機能する領域において前記構造物が等ピッチで作製されるようにしている。

10

【0089】

第24の手段の光学素子の製造方法、あるいは第38の手段の光学素子用形状転写型の製造方法においては、第17～23のいずれかの手段の製造方法、あるいは第31～37のいずれかの手段の製造方法に加え、集光点を曲面上に沿って変化させることで、曲面上に構造体を作製することができる。これにより、球面レンズ上に構造体を作製して非球面化をしたり、回折格子を作製してレンズの色収差補正機能を追加したり、などの複合機能を有する光学素子、あるいはその形状転写型を作製することが可能となる。

【0090】

第25の手段の光学素子においては、第12～第24のいずれか一つの手段の製造方法によって製造されたことにより、使用する光の波長よりも微細で空間的に高さの異なる微細構造を有する光学素子を容易に得ることができ、高性能な光学素子を提供することができる。

20

【0091】

第39の手段の光学素子用形状転写型においては、第26～第38のいずれか一つの手段の製造方法によって製造されたことにより、使用する光の波長よりも微細で空間的に高さの異なる微細構造を有する光学素子用形状転写型を容易に得ることができる。

また、第40の手段の光学素子においては、第39の手段の光学素子用形状転写型を用いて光学材料に微細構造を転写し、製造したことにより、使用する光の波長よりも微細で空間的に高さの異なる微細構造を有する光学素子を容易に且つ低コストに複製することが可能となり、高性能な光学素子を安価に提供することができる。

30

【発明を実施するための最良の形態】

【0092】

以下、本発明を実施するための最良の形態を図示の実施例に基づいて詳細に説明する。

【実施例】

【0093】

[実施例1]

第1、第2の手段の光学素子の一実施例を図1を用いて説明する。この光学素子は、使用する光の波長よりも微細な構造を有し、少なくとも一部の構造体2の高さを空間的に変調させることにより透過光の位相を変化せしめるものである。

具体的には、図1に示すように、使用する波長以下の高さの異なる微細構造体2をガラスや透明高分子からなる基板1上に形成する。この微細構造体2は基板1と異なる材料でも、基板1と同一の材料を用いてもよい。この構造体2に光を入射することで、透過光は通常の高次の回折光ではなく、主に0次の回折光を発生させる。このとき空間的に0次回折光(透過光)の位相を変調することで、レンズや回折格子と同様の作用をする。入射する光が偏光を有する場合には、前述の(式1)から偏光に合わせた有効屈折率 n となるように構造体2の高さを決定することで、集光や回折を行うことができる。また、ここでは構造体2は高さのみを変調しているが、従来技術(例えば非特許文献1、特許文献1,2等)と同様に幅を合わせて変調することもできる。これにより、加工や複製が容易な0次回折光を利用した光学素子を実現することができる。

40

【0094】

50

[実施例 2]

第 3 の手段の光学素子の一実施例を図 2 を用いて説明する。本実施例では、図 1 に示すような微細構造体 2 を有する光学素子において、使用する光の波長を λ 、入射角を θ_i 、入射媒体の屈折率を n_1 、構造体の屈折率を n_2 とした場合、構造体の周期が、 $\lambda / (n_1 \sin \theta_i + n_2)$ 以下となるように構成したものである。

ここで、図 2 に示すように、基板 1 上に形成された構造体 2 への光の入射角を θ_i としたとき、回折公式から回折角は媒体の屈折率を n_1 、構造体 2 の屈折率を n_2 とし、回折次数を m 、構造ピッチを p としたとき、下記の (式 5) の (a) で示される角度に伝播する。このとき + 1 次の回折光が発生しない条件は、 θ_i が正で、 $m = + 1$ での回折角 θ_o が 90 度以上となることであり、これから下記の (式 5) の (b) の条件が導かれる。このように第 3 の手段の構造とすることで、高次の回折による入射光のロスなしに、透過 0 次光での位相変調光学素子を実現することができる。

【 0 0 9 5 】

(式 5)

$$n_1 \sin \theta_i + n_2 \sin \theta_o = m (\lambda / p) \quad (a)$$

$$p \leq \lambda / (n_1 \sin \theta_i + n_2) \quad (b)$$

θ_i : 構造体への光の入射角
 n_1 : 入射媒体の屈折率
 n_2 : 構造体の屈折率
 p : 構造体のピッチ
 m : 回折次数
 θ_o : 回折角

【 0 0 9 6 】

[実施例 3]

第 4 の手段の光学素子の一実施例を図 3 を用いて説明する。本実施例では、実施例 1 または実施例 2 の光学素子において、使用する光の波長を λ 、入射媒体の屈折率を n_1 、構造体の屈折率を n_2 とした場合、構造体の高さの差 h を、

$$h = 2 \lambda^2 \times (n_1^2 + n_2^2) / (n_1 + n_2)^2$$

の近傍となるように構成したものである。

加工の容易さ、設計の容易さから、微細構造を作成する場合、等ピッチで等幅の構造が望ましい。この条件で高さの変調を行うと、光の有効屈折率を n としたとき、位相差は上記の高さの差 h により、 $2 \pi n h / \lambda$ で与えられる。作成された構造の最小高さとも最大高さをこの値とすることで、位相変調の必要量である 2π の変調が可能となる。

【 0 0 9 7 】

この値をサブ波長素子で実現する際、入射光がランダム偏光であるいは円偏光であれば、異方性は発現せず、その屈折率の平均値を用いればよい。また、構造が該中心対象の場合も同様に平均値を利用することが可能となる。このような構造では、前述の (式 1) から求められる 2π の位相変調を本実施例の値とすることで実現することができる。これにより必要な位相変調をもった構造体を単純な構造で実現することができる。

【 0 0 9 8 】

[実施例 4]

第 5 の手段の光学素子の一実施例を図 4 を用いて説明する。本実施例では、実施例 1 ~ 3 のいずれかの光学素子の構成に加えて、前記微細構造が同一周期の概矩形格子あるいは柱状構造もしくは多段構造であることを特徴としている。

図 4 は微細構造体の形状例を示しており、位相変調のための波長以下の微細構造体 2 は、図 4 (A) のような矩形が代表的であるが、矩形である必要はなく、図 4 (B) に示すような幅が上下で異なる構造や、図 4 (C) ~ (E) に示すような四角柱に近い構造、あるいは図示しない円柱構造、あるいは図示しない階段状等の多段構造等を利用することができる。

これらの構造体 2 を高さを変えて空間的に配置することで、透過 0 次光の位相を変調す

10

20

30

40

50

ることが可能となる。また、このような構造体 2 はレーザー干渉加工法等で作成が比較的容易であり、大面積加工に適した構造として優位である。

【0099】

[実施例 5]

第 6 の手段の光学素子の一実施例を図 5 を用いて説明する。本実施例では、実施例 1 ~ 4 のいずれかの光学素子の構成に加えて、使用する波長以下の微細構造が複数の領域（セル）3 に分割されており、該領域（セル）内の構造体 2 が同一ピッチ、同一高さとなるように構成したものである。

位相変調型の回折光学素子では、位相変調は構造体で個々に制御する必要はなく、それらの集合構造で制御することが可能である。図 5（a）、（b）はその構造の一例を示したものであり、同一構造の構造体 2 をセル 3 内に複数作成し、構造体 2 の高さやピッチ、方向等を変化させてそれぞれのセル 3 毎に透過光の位相変調を起こす。これにより通常の波長以上の構造を有する回折光学素子と同様の機能を果たし、それぞれの位相変調を精密に制御することが可能な回折型光学素子とすることができる。

【0100】

[実施例 6]

第 7 の手段の光学素子の一実施例を図 6 を用いて説明する。本実施例では、実施例 1 ~ 5 のいずれかの光学素子の構成に加えて、微細構造が素子（基板）1 の両面に形成されている構成としたものである。

図 6 に示すように、微細な構造体 2 を基板 1 の両面に作成することにより、一面のみの加工では困難な微細構造と同様の効果を二面の構造を利用することで実現することができる。このとき二面の微細構造は透過光の進行方向に対して同一である必要はなく、異なる構造で、異なる位相変調の重ね合わせとすることも可能である。これにより、より高度な位相の変調が可能となる。

【0101】

[実施例 7]

第 8 の手段の光学素子の一実施例を図 7 を用いて説明する。本実施例では、実施例 1 ~ 6 のいずれかの光学素子の構成に加えて、微細構造が曲面（例えばレンズ 4 上）に形成されている構成としたものである。

図 7 に示すように、微細な構造体 2 をレンズ 4 上に形成することにより、レンズ 4 のパワーに加えて位相の変調を透過光に付加することが可能となる。また、図 7 のように、この微細な構造体 2 はレンズ 4 の全面に形成する必要はなく、レンズ 4 の一部に形成して一部の位相を変化させることも可能である。

【0102】

次に図 7 のような構造の光学素子の作製方法の一例を図 8 を参照して説明する。

まず、レンズ 4 上に感光性のレジスト 5 を回転塗布し（図 8（1））、次にレーザー干渉光 6 を照射する（図 8（2））。このとき照射部がレーザーの可干渉領域となるように、照射範囲を調整する。必要があれば、その操作を位置を移動して繰り返すことで、任意の位置に微細構造を形成することが可能となる。

レーザー干渉露光後、レジスト 5 を現像することにより微細構造が得られ（図 8（3））、この微細構造は、そのまま光学素子として用いることが可能であるが、このレジスト 5 の構造体をエッチングマスクとして、ドライエッチング法等を利用し、レンズ側の凹構造として微細構造体 2 を形成することも可能である（図 8（4））。

【0103】

[実施例 8]

第 9 の手段の光学素子の一実施例を図 9 を用いて説明する。本実施例では、実施例 1 ~ 7 のいずれかの光学素子の構成に加えて、波長以下の微細構造体 2 により入射光の位相が変調され、該入射光の少なくとも一部が集光される構成としたものである。

すなわち、図 9（a）に示す光学素子では、微細構造による位相変調を集光機能として利用した集光光学素子を実現している。これは微細構造による位相変調により、図 9（b

10

20

30

40

50

)に示すように位相変化量が素子上の位置によって異なるようにし、透過光をある一点、あるいはラインになるような球面波に変換することで実現することができる。また、図9に示す光学素子の例では、このような集光のために、素子の中心部で位相が大きく遅れるような位相変調型サブ波長素子を示している。

【0104】

[実施例9]

第10の手段の光学素子の一実施例を図10を用いて説明する。本実施例では、実施例1～7のいずれかの光学素子の構成に加えて、波長以下の構造体により入射光の位相が変調されることにより、透過光のビームを整形するように構成したものである。

回折光学素子、ホログラフィック素子と呼ばれる素子は、透過光の波面を変調することによりレーザの形状整形、分離などの機能を果たすことができる。例えば図10の(a)に示すような、反復フーリエ変換法(非特許文献6参照)によって計算した位相変調を上記の微細構造により実現することで、フラウンホーファー回折領域(ファースフィールド)では図10(b)に示すような構造が再生されることを確認している。このように透過光の位相を変調することで、任意の形状を作成可能な回折光学素子を実現することができる。

【0105】

[実施例10]

第11の手段の光学素子の一実施例を図11を用いて説明する。本実施例では、実施例1～8のいずれかの光学素子の構成に加えて、少なくとも一面に設けられた波長以下の構造体により入射光の位相が変調されることにより、透過光の収差を補正するような構成としたものである。

一例として、本実施例では図11(a),(b)に示すような微細構造の構造体2を有する位相変調型の光学素子を収差補正素子として用いる。例えば単一の球面レンズで発生する収差を、微細構造体2の位相変調によって低減することが可能であり、図のようなリング状の微細構造体2を設けた位相変調素子を光路中に配置する、あるいはレンズと一体に作成することで、波面収差を低減した素子を安価に提供することが可能となる。

【0106】

以上の実施例1～10では、本発明に係る光学素子の構成例について説明したが、以下の実施例では、本発明に係る光学素子の製造方法及び、光学素子用形状転写型の製造方法について説明する。また、これらの製造方法で製造される光学素子及び形状転写型、さらには形状転写型を用いた光学素子の複製方法についても説明する。

【0107】

[実施例11]

第12の手段の光学素子の製造方法及び、第26の手段の光学素子用形状転写型の製造方法に係る、微細構造体の製造方法の一実施例を図12を用いて説明する。

この製造方法では、レーザの干渉により構造を形成するレーザ干渉露光法を用い、干渉光強度変調手段により干渉光強度を変調することにより空間的に構造の高さを変調させ、高さの異なる微細構造を形成するものである。

図12は、レーザ干渉露光に用いる装置の一例を示しており、このレーザ干渉露光装置は、光源であるレーザ装置(例えば紫外レーザ)11と、空間フィルター12、1/2波長板(1/2位相板)13、無偏光ビームスプリッタ14、ミラー15a,15b、コントローラ16、1/2波長板13を回転する回転ステージ17などで構成されている。

【0108】

この装置を用いたレーザ干渉露光法では、レーザ装置(例えば紫外レーザ)11からの干渉性の高いレーザ光を空間フィルター12等で整形し、1/2波長板13を通して無偏光ビームスプリッタ14で1:1の強度となるようにビームを分割する。その後、分割されたレーザ光をミラー15a,15bで偏向し、基板1上のレジスト5に照射し、レジスト上でレーザ光を干渉させ、加工位置に干渉強度を作成する。このとき、例えばコントローラ16で回転ステージ17を回転し、回転ステージ17に保持された1/2波長板13

10

20

30

40

50

の角度を調整することにより、干渉光の S, P 偏光成分の違いから干渉強度が変調され、図 13 (a), (b) に示すように、ある中心値から強度が変調される。

【0109】

干渉強度の変調は、上記分岐したレーザ光の偏光方向を制御する手段や分岐したレーザ光の強度比を制御する手段、可干渉距離内で分岐したレーザ光の照射遅延を制御する手段等を利用して行うことができる。これにより図 39 に示すように、レーザ強度が干渉により強度変調された部分と非干渉部分との足し合わせとなり、このような強度分布を有する光によりポジ型レジストを露光し、さらに照射位置を変え干渉強度を変化させることで空間的に高さの異なる微細な構造を形成することが可能となる。

【0110】

レーザ干渉は 2 本のレーザのみでなく、複数のレーザ光の干渉を利用することも可能であり、その場合は格子形状のみでなく、円柱形状や複雑な干渉縞構造を有する微細構造体を製造することも可能となる。このとき一度の干渉領域を制御規定して露光することが望ましく、領域が重ならないように露光を繰り返すことで干渉領域の重なりなしに、空間的に選択された高さの異なる微細構造を形成することが可能となる。

【0111】

本手法は一度の露光で複数の格子あるいは円柱状構造体を形成することが可能であり、電子ビーム露光法に比べ大幅に高速に加工を行うことが可能となる。

また、このような強度分布でポジ型レジストを露光した場合、露光量、現像時間等を制御することで、高さの異なる構造体を作製することが可能となる。

このように形成された微細構造は、そのまま光学素子として利用することが可能であるが、この構造を金属構造に転写することで金型として利用することが可能である。また、このような構造を用いて、図 14 に示すように、基板 1 上に形成したレジスト 5 の微細構造をマスクとして用いるか、あるいはレジスト上に蒸着した金属をリフトオフ法等でパターン形成させたものをマスクとして用い、ドライエッチング法等でドライエッチングを行い、石英ガラス等の基板 1 へ微細構造を転写することで、光学素子用形状転写型として利用することも可能となる。

【0112】

[実施例 12]

次に第 13 の手段の光学素子の製造方法及び、第 27 の手段の光学素子用形状転写型の製造方法に係る、微細構造体の製造方法の一実施例を図 15 を用いて説明する。

この製造方法では、レーザブレーション法により微細な構造を形成するレーザブレーション加工法を用い、加工用レーザ光を干渉させ、さらに干渉光強度変調手段により干渉強度を変調するとにより空間的に構造の高さを変調させ、微細構造を形成するものである。

図 15 は、レーザブレーション加工に用いる装置の一例を示しており、この加工装置は、光源であるレーザ装置（例えばパルスレーザ）21 と、1/2 波長板（1/2 位相板）22、グランレーザプリズム 23、空間フィルター 24、ミラー 25、マスク 26、回折格子 27、レンズ 28、コントローラ 29、1/2 波長板を回転する回転ステージ 30、基板 1 を移動する移動ステージ 31 などで構成されている。

【0113】

本実施例では、レーザブレーションを利用して微細構造を作製するが、レーザブレーション法は透明高分子、金属、セラミクス等、多くの材料に対して、直接加工が可能な工法として知られている。図に示すようにレーザ装置（例えばパルスレーザ）21 からのレーザ光を、1/2 波長板（1/2 位相板）22 とグランレーザプリズム 23 を介して空間フィルター 24 で整形した後、ミラー 25 で光路を偏向し、回折格子 27 で 2 光束に分割してレンズ 28 により干渉させる。このとき加工領域をマスク 26 等で制限することが望ましい。この加工時のレーザ照射強度を図に示した 1/2 波長板 22 とグランレーザプリズム 23 等で高速に変調する。レーザの入射光強度による加工形状変化を図 16 に示す。レーザブレーション法では加工にしきい強度があるため、ある強度以下では基板 1 の変化は実質的にない。強度を上げることで基板 1 に穴が形成される。このように空間選択的に強

10

20

30

40

50

度を変調して干渉型のレーザブレーションを行うことで、加工ピッチの揃った高さの異なる微細構造を簡便に安価に製造することが可能となる。

【0114】

このように照射レーザ光の強度あるいは照射数、照射パルス幅等を制御することで、空間選択的に高さの異なる微細構造を基板1に直接形成することが可能となる。また、実施例11に示したレーザ干渉露光の制御手法を用い、レーザブレーション法によって同様に高さの異なる微細構造を形成することも可能である。レーザブレーション法では、金属、ガラス、光学素子に用いられる透明有機高分子材料などを含む多くの材料の直接加工が可能であり、蒸着やドライエッチング等の付加加工を施すことなく、直接光学素子あるいは形状転写型の製造が可能となる。これにより、高速で安価な素子及び形状転写型の製造が可能となる。

10

このとき一度のレーザ照射領域を規定して加工することが望ましく、領域が重ならないように加工を繰り返すことで、空間的に選択された高さの異なる微細構造を形成することが可能となる。

【0115】

[実施例13]

次に第14の手段の光学素子の製造方法及び、第28の手段の光学素子用形状転写型の製造方法に係る、微細構造体の製造方法の一実施例を図17を用いて説明する。

この製造方法では、レーザブレーション法により微細な構造を形成するレーザブレーション加工法を用い、加工用レーザ光に対して透過性を示す薄膜と吸収性を示す薄膜を積層した構造体に対して加工用レーザ光を照射し、薄膜を空間選択的に除去することにより、微細構造を形成するものである。

20

【0116】

具体的には図15と同様な装置を用い、基板1上には図17に示すように、加工用レーザ光に対して吸収を示す薄膜からなる吸収層41と透過する薄膜からなる透過層42を交互に積層する。このような積層薄膜構造体40に対して、二光束干渉光を加工しきい値以上の照射フルエンスで入射することで、一度の照射で吸収層41と透過層42を各一層のみ選択的に加工することができる。さらに移動ステージ31で加工位置を移動させる、あるいは加工領域を変化させることで、さらなる加工を行う。このとき同一位置へのレーザ照射数を制御することにより加工高さを制御することが可能となる。また、このときの加工幅はレーザ照射幅でほぼ規定されるため、干渉露光等を用いることで加工用レーザ光の波長以下の微細構造を作成することが可能である。このとき加工用のレーザ光と、光学素子に利用される波長は同一である必要はなく、使用波長以下の微細な構造の加工が可能でレーザを利用できる。

30

レーザ光の照射はこのように微細な構造を形成するために利用されるものであり、干渉以外に集光、投影法を利用することができる。

【0117】

積層薄膜構造体40の吸収層41は、特に加工用レーザ光を吸収する材料であればよく、ポリカーボネート、ポリエステル、ポリイミドや、吸収材料を付加したゾル・ゲル材料等を利用できる。透過層42に関しては、加工用レーザ光に対して吸収の少ない材料で、シリコン酸化物、金属酸化物、これらを主成分とするゾル・ゲル材料、アクリル等の透明高分子材料などが利用できる。

40

また、加工用レーザとしては、エキシマレーザやNd:YAGレーザや、その高調波等の高出力レーザが利用できる。

【0118】

なお、積層薄膜構造体40の薄膜が、全てレーザ光を透過する材料の場合は、これを微細構造体2として直接光学素子として利用することが可能である。また、それ以外の材料に構造体を形成することで、その複製を作製することも可能である。図18は複製方法の一例を示したものであり、図17に示したような積層薄膜構造体40を利用して(図18(1))、レーザ加工した後(図18(2))、必要であればその表面に金属膜43から

50

なる導電層を蒸着やスパッタ等により付加する(図18(3))。その後、電鍍処理を行うことで、素子の反転形状44を有する金型44を作製する(図18(4))。この素子の反転形状を有する金型44を光学素子用形状転写型として利用し(図18(5))、透明高分子材料(例えばポリカーボネートやアクリル等の透明樹脂)などの光学材料を用いた射出成形、熱プレス、2P法等の複製(転写)技術により複製することで(図18(6))、微細構造を有する光学素子45を作製することが可能となる(図18(7))。

なお、このように、レーザ加工等により作製した微細構造体を用いて形状転写型を作製し、その形状転写型を用いて光学素子を複製する方法は、前述の実施例11, 12に記載の微細構造体や、後述の実施例に示す微細構造体に対しても同様に用いることができる。

【0119】

10

[実施例14]

次に第15の手段の光学素子の製造方法及び、第29の手段の光学素子用形状転写型の製造方法に係る、微細構造体の製造方法の一実施例を図19を用いて説明する。

この製造方法では、光を集光して集光点近傍において材料を硬化して構造を形成する光硬化方式を用い、照射レーザ光の多光子吸収により構造を形成し、かつ構造体の高さを変調することにより、微細構造を形成するものである。

図19は、光硬化方式に用いる装置の一例を示しており、この装置は、光源であるレーザ装置(例えばフェムト秒レーザ)51と、空間フィルター52、ガルバノミラー53a, 53b、レンズ54、基板1を移動する移動ステージ55、コントローラ56などで構成されており、微細構造体を形成する基板1上には光硬化樹脂57が積層されている。

20

【0120】

本実施例では、微細な構造を多光子吸収を利用した光硬化法により実現するものであり、レーザ装置(例えばフェムト秒レーザ)51から出た光は空間フィルター52で整形され、ガルバノミラー53a, 53b等の光制御手段と集光用のレンズ54により、空間選択的に光硬化樹脂57にレーザ光を照射する。このときレーザ光の波長を光硬化樹脂57の感光波長以上とすることで、樹脂内部にまで光を浸透させることができる。また、このときに、レンズ54による集光点近傍で多光子吸収が可能な光強度とすることで、集光点近傍で照射レーザ波長以下の構造を形成することが可能である。さらに、硬化点を基板表面から移動させることで、微細かつアスペクトの高い構造を形成することが可能となる。

【0121】

30

このような多光子吸収を利用した光硬化法では、硬化用の照射レーザ光の波長より微細な構造を作製できることが知られており、本実施例の方法を用いることで微細な構造を製造することが可能である。このとき、特に照射レーザ光を走査し、集光点を空間選択的に移動させながら硬化させることで、さらに任意位置に任意高さの構造を形成することができる。集光点の移動は、移動ステージ55による基板1の移動や、ガルバノミラー53a, 53bを利用することで容易に実現でき、他の露光法に比べ高さを制御した立体形状の形成が容易となる。このとき光硬化材料を透明高分子材料や光硬化型ゾル・ゲル材料等にするすることで、直接光学素子の形成が可能である。また、例えばレジスト材料で微細構造体を形成することで、微細構造体を形成した形状転写型を製造することも可能となる。

【0122】

40

本実施例の製造方法は、多光子吸収を利用した光硬化であるため、硬化用レーザ光に対して透明な材料中の任意の位置での光硬化が可能であり、非常にアスペクトの高い構造を作成することが可能である。

また、高さの制御は露光量や照射時間等で制御することが可能であり、これにより高精度な高さ制御が可能となる。

【0123】

[実施例15]

次に第16の手段の光学素子の製造方法及び、第30の手段の光学素子用形状転写型の製造方法に係る、微細構造体の製造方法の一実施例を説明する。

この製造方法では、実施例12~14のいずれかの製造方法において、加工用のレーザ

50

光は、パルス幅が10ピコ秒（ps）以下の超短パルスレーザとするものである。

例えば超短パルスレーザを実施例12、13に記載のレーザブレーション加工に用いた場合、光照射時の材料内部の熱伝導幅は片側で下記の（式6）に示される量となる。

$$L = D \tau \quad (\text{式6})$$

ここで、Lは拡散距離、Dは熱拡散率、 τ は時間を示す。

また、下記の表1には代表的な材料と、その熱拡散率（D）を示し、表2には、その材料の上記（式6）で求めた片側熱拡散距離（熱拡散範囲）Lを示す。

【0124】

【表1】

材料	熱拡散率（D）
金属	$20 \sim 200 \times 10^{-6}$
ガラス	$0.3 \sim 2 \times 10^{-6}$
ポリマー	$0.2 \sim 0.5 \times 10^{-6}$

10

【0125】

【表2】

材料	熱拡散範囲		
	$\tau = 1\text{ps}$	$\tau = 10\text{ps}$	$\tau = 1\text{ns}$
金属	$\sim 0.01 \mu\text{m}$	$\sim 0.03 \mu\text{m}$	$\sim 0.3 \mu\text{m}$
ガラス	$\sim 0.001 \mu\text{m}$	$\sim 0.003 \mu\text{m}$	$\sim 0.03 \mu\text{m}$
ポリマー	$< 0.001 \mu\text{m}$	$0.002 \mu\text{m}$	$0.02 \mu\text{m}$

20

30

【0126】

本実施例では、光学素子あるいは形状転写型の微細構造体の製造に超短パルスレーザを用いることで、例えばアルミニウム（Al）、ステンレススチール（SUS）等の金属材料加工を行った場合、熱伝導率が 10^6 オーダであり、10psで伝播範囲がnm程度となる金属以外の材料での熱伝播距離はほとんどそれ以下であることから、10ps以下とすることでnmオーダの精度での加工の実現が可能となる。これは可視光の波長である400～800nmに対して十分に狭い熱影響範囲であり、サブ波長領域の加工に効果的であると云える。これがナノ秒（ns）オーダとなると拡散が大きく、加工形状変化により光学素子の機能低下につながる。

40

【0127】

なお、実施例14の多光子吸収での光硬化の場合、単位時間当りのレーザ強度が高いことが望ましく（ピーク出力の高いレーザが望ましい）、その実現には、現在簡便に利用可能なレーザ光源としてTi:Sapphireレーザや短パルス出力可能な固体レーザが上げられる。これらレーザの代表的パルス幅は10ピコ秒以下程度であり、これらレーザ光を10ピコ秒以下とすることで、高精度な微細構造の光学素子や形状転写型を作製することが可能となる。この場合も熱伝播が少ないことから、高精度な構造を形成することが可能となる。

50

以上のように、本実施例では、実施例 1 2 ~ 1 4 の手法の利点に加え、より高精度化した製造方法とすることができる。

【 0 1 2 8 】

[実施例 1 6]

次に第 1 7 の手段の光学素子の製造方法及び、第 3 1 の手段の光学素子用形状転写型の製造方法に係る、微細構造体の製造方法の一実施例を説明する。

本実施例の製造方法は、前述の実施例 1 4 の手法を改良して、より高精度に所望の形状の微細構造を形成できるようにしたものであり、基本的には図 2 0 に示すように、基板上に光硬化樹脂等の光反応性材料を塗布し、前記材料中にレーザ光を集光して集光点近傍でのみ多光子吸収を起こし、集光点を基板面上で走査することで基板面上に微細構造を形成せしめる方法であり、走査中に集光点中心と基板表面との距離を変化させることで、形成される構造体の高さを変化させ、空間的に高さの異なる構造体を作製するものである。

10

【 0 1 2 9 】

具体的な製造方法の実施例を、図 2 2 ~ 2 4 を用いて説明する。図 2 2 に示すように、レーザ光は、対物レンズ 7 0 によって集光し、基板 1 上に塗布されている光反応性材料 6 0 中にスポットを形成する。さらに、スポットを基板 1 に対して水平方向に走査することで、基板上の光反応性材料 6 0 の全面に渡って構造を作製する。この走査中に、構造物が所望の高さとなるように、スポットの基板表面からの距離を変化させる。これによって、例えば図 2 3 (a) のように集光点を基板 1 から遠ざけながら水平方向に移動させれば、図 2 3 (b) のように階段形状の構造体を作製することができる。

20

作製される構造物の高さの最大値が H であるとすると、集光点と基板との距離 d は、

$$- H / 2 < d < H / 2$$

の範囲でなければならない。なお、集光点が基板より下の位置に来ることも有りえる。

【 0 1 3 0 】

図 2 4 を用いて本実施例のより具体的な製造方法を説明する。図 2 4 は本実施例の製造方法で用いる加工装置の一例を示しており、この装置は、光源であるレーザ装置 6 1 と、1 / 2 波長板 6 2、グラントムソンプリズム 6 3、ミラー 6 4、空間フィルター 6 5、ガルバノミラー 6 6、リレーレンズ 6 7、ビームサンプラー 6 8、結像レンズ 6 9、対物レンズ 7 0、ピエゾステージ 7 1、基板 1 を載置する移動ステージ 7 2、モニター用の CCD 7 3 など構成されており、微細構造体を形成する基板 1 上には光反応性材料 6 0 が塗布されている。

30

【 0 1 3 1 】

レーザ装置 6 1 より出されたレーザ光は 1 / 2 波長板 6 2 とグラントムソンプリズム 6 3 によって強度を最適に調整した後に、ミラー 6 4 を介して空間フィルター 6 5 によって強度分布の均一化、及びビーム径の調整がなされる。

レーザ装置 6 1 としては、瞬間的なピークパワーの強いパルスレーザが好ましく、Nd : YAG レーザや、Ti : Sapphire レーザなどを用いることが可能である。波長に関しては、光反応性材料 6 0 は紫外線によって反応する材料が多く、近赤外領域の波長を持つレーザ光が適している。レーザの強度調整には他に、偏光板を使用する方法や可変 ND フィルターによって為す方法がある。また、レーザ光の強度調整や、空間フィルター 6 5 は有ったほうが好ましいが、必ず無くてはならないというわけではない。

40

【 0 1 3 2 】

その後、レーザ光は、ガルバノミラー 6 6 からなるスキャナーによって光路を変えられた後に、リレーレンズ 6 7、ビームサンプラー 6 8、結像レンズ 6 9、対物レンズ 7 0 を通して基板 1 上の光反応性材料 6 0 中に集光される。集光点は、ピエゾステージ 7 1 によって基板垂直方向に位置を調整しながら、ガルバノミラー 6 6 の角度を変えることによって基板水平方向で走査される。

【 0 1 3 3 】

対物レンズ 7 0 は、形成される構造物の水平方向分解能を上げるために、開口数 (NA) が高いものを用いることが望ましい。

50

リレーレンズ 67 には、いわゆる f レンズを用いることが好ましい。 f レンズを用いることによって、ガルバノミラー 66 だけを動かして基板水平内で走査したときに、基板垂直方向に集光位置がずれる現象を防ぐことができる。ただし、 f レンズを用いなくても、基板垂直方向の位置ずれをピエゾステージ 71 によって補正することも可能である。

【0134】

水平・垂直方向の移動には、基板 1 を移動ステージ 72 によって移動する方法でも良い。特に水平方向の移動として、移動ステージ 72 に、回転ステージと並進ステージを組み合わせた、いわゆる $x \cdot$ ステージを用いることもできる。 $x \cdot$ ステージを用いることにより、連続的な動きにより基板面全体を走査することができるようになり、作製時間の短縮を図ることができる。

10

また、図 24 に示すように、光路にビームサンプラー 68 を設置することによって、C D 73 に作製中の画像を取り込みモニタリングすることも可能である。

【0135】

以上のようにして、材料中にレーザ光を集光し、集光点中心と基板表面との距離を変化させながら、集光点を基板水平方向に走査することがなされる。

これによって、図 25 (a) に示すような、基板 1 上に階段状の構造体 2 を周期的に配置した回折格子や、図 25 (b) に示すように、高さの異なる構造体 2 を空間的に配置して、2 次元的に位相変調を行うことが可能な回折光学素子が作製される。

【0136】

20

回折光学素子の高さ $h(x, y)$ は、回折光学素子として使用する際に対象となる光の空間位相分布を変調するものであり、所望の位相変調量 (x, y) に対応して以下のような関係式で決定される。

【0137】

(式 7)

$$h(x, y) = [\lambda / (n - 1)] \times [\phi(x, y) / 2\pi]$$

$h(x, y)$: 任意の位置 x, y における回折光学素子の高さ

(x, y) : 制御される光の任意の位置 x, y における位相変調量

n : 材質の屈折率

λ : 回折光学素子として使用する際に対象となる光の波長

30

【0138】

位相変調量 (x, y) は、いわゆる計算機合成ホログラムといった手法を用いることによって計算することが可能である。計算方法としては、反復フーリエ変換法やシミュレーテッドアニメーリング法などがある。これらの計算方法に関してはそれぞれ非特許文献 6、非特許文献 7 に詳しく記載されている。

【0139】

反復フーリエ変換法は大きな画素数のホログラムもシミュレーテッドアニメーリング法に対して短時間で計算できるため、より好ましい。反復フーリエ変換法によって計算した結果の一例を図 10 (a) に示す。図 10 (a) は計算によって算出された高さの 2 次元データを表しており、白い部分ほど高さが高いことを表している。このような構造を本実施例の製造方法によって作製することで、この構造に所定の波長を有するレーザ光を入射するとフラウンホーファー回折領域で図 10 (b) に示すようなレーザ光パターンを得ることができる。

40

【0140】

構造体の作製に用いる光反応性材料 60 とは、光硬化性樹脂、レジスト材料、光硬化性を有する有機・無機ハイブリッド材料、などを指す。光反応性材料 60 として、所定の波長範囲に対して透明であることが望まれる。また、2 光子または多光子吸収を利用するため、作製に用いるレーザ光の波長に対しては透明、あるいはほぼ透明であることが好ましい。また、レーザ光の照射後、光反応性材料の種類によっては、特定の後処理を実行することで所望の構造を得る。例えば、光硬化性樹脂を光反応性材料として用いる際には、レ

50

ーザ光照射後に未硬化部分の樹脂を溶液で洗い流す、あるいは、レジスト材料を用いる際には、いわゆる現像と呼ばれる工程が必要となる。本実施例では、これら後処理工程も含めた回折光学素子の製造方法、あるいは回折光学素子用形状転写型の製造方法と考えることができるものである。

【0141】

作製された構造体は、それ自体を回折光学素子として用いても良いし、その構造を形状転写のための型として用いても良い。形状転写型として用いて複製を作製する方法としては、以下の(A)~(C)のような方法が考えられる。

【0142】

(A) 図26に示す工程例のように、まず基板1上の光反応性材料60に前述の方法で微細構造体を作製する。次に、これを形状転写型として用い、作製された型をエッチングして削ることにより、基板1上に微細構造を転写して光学素子とする。このとき、エッチングはウェットエッチングでもドライエッチングでも可能であるが、より垂直にエッチングを行うためにはドライエッチングのほうが好ましい。

10

【0143】

(B) 図27に示す工程例のように、まず基板1上の光反応性材料60に前述の方法で微細構造体を作製する。次に、これを形状転写型として用い、作製された型に、樹脂80などの光学材料を流し込み成形し、離型することで微細構造を有する光学素子の複製品を作り出す。

【0144】

(C) 図28に示す工程例のように、まず基板1上の光反応性材料60に前述の方法で微細構造体を作製する。次に、これを形状転写型として用い、作製された型に金属膜81を蒸着する。次に金属膜81を蒸着した型を電鍍し、微細構造を転写した金属の型82を新たに作り出す。さらに、この金属型82を新たな形状転写型として用い、この型82に樹脂80などの光学材料を流し込み成形し、離型することで微細構造を有する光学素子の複製品を作り出す。

20

【0145】

以上の(A)~(C)のような方法で微細構造を転写した光学素子を得ることができるが、形状転写型としての使い方はこれらに限定されるわけではない。

【0146】

[実施例17]

次に第18の手段の光学素子の製造方法及び、第32の手段の光学素子用形状転写型の製造方法に係る、微細構造体の製造方法の一実施例を説明する。

本実施例の製造方法では、前述の実施例16の製造方法に加え、レーザ光を照射中、レーザ光のパワー及び、集光点を走査するスピードは略一定とするものである。

すなわち、実施例16で述べた構造体の作製時には、レーザ光の強度は精密に一定に保たれていることが好ましく、レーザ光の強度は常にモニタリングされていることが望ましい。このため、本実施例で用いる加工装置では、図29に示すように、図24の加工装置を改良し、レーザ光の一部をハーフミラー75等に取り出して光量をフォトダイオード76でモニタリングし、その結果を1/2波長板62の回転ステージ・コントローラ74へフィードバックすることで、光量の調整を行いながら素子の作製を行うことができるようにした。

40

【0147】

このように、本実施例では、実施例16の製造方法に加え、レーザ光の強度及び走査スピードを一定に保つことで、同じ高さの構造物を正確に作製することが可能となる。これによって集光点と基板との距離が作製する構造物の高さと正確に対応することになる。この対応関係は以下のようにして表すことができる。

一回の走査で作製される構造物の高さの最大値がHであるとき、集光点と基板との距離はH/2である。集光点と基板との距離をdとしたとき、形成される構造物の高さhは、

$$h = H / 2 + d \quad (\text{ただし、} - H / 2 < d < H / 2 \text{ であるとき})$$

50

となる。

【0148】

ここで、回折光学素子は面内で相対的な高さのみが特性に影響をおよぼすので、本実施例の方法で作製する際には、集光点と基板との距離 d の場所による変化のみが特性に影響をおよぼす。

すなわち、一回の走査で作製される構造物の高さの最大値 H に関係なく所望の特性を有する回折光学素子を作製することが可能となる。

H の値は周辺の温度や湿度など環境要因によって変化するため再現しにくい値であるが、本実施例の方法では、 H の値の影響を受けないためより環境変化に対して有利な製造方法である。

【0149】

[実施例18]

次に第19の手段の光学素子の製造方法及び、第33の手段の光学素子用形状転写型の製造方法に係る、微細構造体の製造方法の一実施例を説明する。

本実施例の製造方法では、前述の実施例16または17の製造方法に加え、レーザ光を照射中、基板と集光点との位置は常にモニタリングされており、モニタリングの結果から集光点の位置を調整するようにしたものである。

基板1と集光点との距離を計測する手段としては、一般的に用いられているいわゆるオートフォーカスシステムを利用することができる。これには、例えば図30に示すように、図29の加工装置の対物レンズ70にレーザ測距計77等を取り付け、基板表面との距離を計測する方法などを用いることができる。

そして、レーザ測距計77で基板1と集光点との距離を測定しながら、基板垂直方向への集光点移動量へその結果をフィードバックすることにより、基板1の反りやうねりの影響を受けず、より精度の高い回折光学素子、あるいは光学素子用形状転写型の作製が可能となる。

【0150】

[実施例19]

次に第20の手段の光学素子の製造方法及び、第34の手段の光学素子用形状転写型の製造方法に係る、微細構造体の製造方法の一実施例を説明する。

本実施例の製造方法では、前述の実施例16～18のいずれかの製造方法に加え、パルス幅が 1 ps 以下である、いわゆる超短パルスレーザを光源として用いるものである。

すなわち、作製に用いるレーザ光としては、短いパルス幅を持つレーザ光が適しており、特に一般的に入手が比較的容易である、パルス幅が 1 ps のいわゆるフェムト秒パルスレーザを用いることが望ましい。そして、このような超短パルスレーザを光源として用いることにより、より低いパワーで構造を作製することが可能となる。これによって、高強度のレーザ光を集光することによって生じる、バブルの発生や、構造のアブレーションによる破壊を避けることができる。

【0151】

[実施例20]

次に第21の手段の光学素子の製造方法及び、第35の手段の光学素子用形状転写型の製造方法に係る、微細構造体の製造方法の一実施例を説明する。

本実施例の製造方法では、前述の実施例16～19のいずれかの製造方法に加え、光反応性材料中にレーザ光を集光する手段として、液浸対物レンズを利用するものである。このように集光手段として液浸対物レンズを利用することにより、水平方向分解能がより細かい構造を作製することができる。

【0152】

[実施例21]

次に第22、第23の手段の光学素子の製造方法及び、第36、第37の手段の光学素子用形状転写型の製造方法に係る、微細構造体の製造方法の一実施例を説明する。

本実施例の製造方法では、前述の実施例16～20のいずれかの製造方法に加え、平面

10

20

30

40

50

内の少なくとも一部において作製する構造物のピッチ（構造物と構造物の最小距離幅）を、波長以下としたものであり、さらには、光学素子として機能する領域において前記構造物が等ピッチで作製されるようにしたものである。

【0153】

前述の実施例16～20の製造方法においては、レーザ光の集光点を水平方向に走査する際に、集光点の水平方向移動量に対して、1回の走査で形成される構造の幅が小さいとき、構造体の間に溝ができ図31(b)に示すような構造となる。このような溝が存在することにより、不要な回折光が生じ、回折効率が低下する不具合が生じる。

これに対して、本実施例の製造方法においては、平面内の少なくとも一部において作製する構造物のピッチ（構造物と構造物の最小距離幅）を、波長以下としたことにより、作製する構造のピッチが使用する波長より細かい構造となっている。

このような構造では周期的なピッチ構造が存在していても回折光は生じないが、入射光の位相分布を変化させることが可能である。

すなわち、本実施例の製造方法では、作製される構造のピッチが波長より細かい構造となっており、これによって作製時に構造体の間に溝が存在しても、不要な回折光が生じることなく所望の機能を得ることが可能な回折光学素子あるいは光学素子用形状転写型を作製することができる。

【0154】

なお、上記の製造方法では、特に集光するレーザ光の強度が等しく、走査スピードが等しいとき、作製される構造体の幅は常に一定となるため、ピッチが異なるいわゆるデューティ比が変化する。デューティ比が変化するることによって、有効屈折率が変化するため作製する構造の高さに補正が必要となる。

そこで、より簡易に高さのみによって回折光学素子の機能を制御するために、本実施例では、光学素子として機能する領域において前記構造物が等ピッチで作製されるようにしている。

【0155】

作製する構造の一例としては、例えば図33に示すような構造とする。ここで、構造は面内のある方向に等ピッチで形成されており、そのピッチは対象となる波長より短く、望ましくは波長の半分以下である。

波長800nmの近赤外領域のレーザ光による2光子吸収の光硬化によって、幅200nm以下の構造を作製することが可能であることが知られており、このような構造は本実施例の製造方法によって形成可能である。

【0156】

[実施例22]

次に第24の手段の光学素子の製造方法及び、第38の手段の光学素子用形状転写型の製造方法に係る、微細構造体の製造方法の一実施例を説明する。

本実施例の製造方法では、前述の実施例16～21のいずれかの製造方法において、前記構造物を、少なくとも一部に曲面を有している構造体の上に形成するようにしたものである。

【0157】

実施例16～21の製造方法では、曲面上に構造体を作製することが可能であり、これは、あらかじめ基板の曲面データを測定するか、あるいは基板表面との距離を計測しながら作製を行うことで、基板面の情報を垂直方向に集光点を移動させる際に入力し、補正することで可能となる。曲面上の構造としては、例えば図34のような構造が考えられるが、より具体的には、実施例7で述べたようなレンズ4上に微細構造体2を形成したものがあり、これは基板にレンズ4を用い、実施例16～21の製造方法でレンズ4の曲面に微細構造体2を形成することにより実現することができる。

【0158】

このように、本実施例では曲面に微細構造体を形成することにより、球面レンズ上に構造体を作製して非球面化をしたり、回折格子を作製してレンズの色収差補正機能を追加し

10

20

30

40

50

たり、などの複合機能を有する光学素子、あるいはその形状転写型を作製することが可能となる。また、この形状転写型を用いて光学素子を複製することにより、複合機能を有する光学素子を安価に提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【0159】

【図1】本発明の一実施例を示す光学素子の要部斜視図である。

【図2】本発明に係る光学素子の微細構造による回折作用の説明図である。

【図3】本発明の別の実施例を示す光学素子の要部断面図である。

【図4】本発明に係る光学素子の微細構造の形状例を示す図である。

【図5】本発明の別の実施例を示す光学素子の構成説明図である。

10

【図6】本発明の別の実施例を示す光学素子の要部断面図である。

【図7】本発明の別の実施例を示す光学素子の要部断面図である。

【図8】図7に示す光学素子の作製方法の一例を示す工程説明図である。

【図9】本発明の別の実施例を示す光学素子の説明図である。

【図10】(a)は反復フーリエ変換法によって計算した微細構造の高さの2次元データを表す図、(b)は(a)の構造を本発明の製造方法によって作製し、この構造に所定の波長を有するレーザ光を入射したときにフラウンホーファー回折領域(ファースフィールド)で得られるレーザ光パターンを表す図である。

【図11】本発明の別の実施例を示す光学素子の説明図である。

【図12】微細構造の作製に用いられる加工装置の一例を示す概略構成図である。

20

【図13】(a)は図12に示す装置における波長板回転角とレジストへの入射光強度の関係を示す図、(b)はレーザ強度比とレジストへの入射光強度の関係を示す図である。

【図14】レジストで形成した微細構造を基板に転写する方法の説明図である。

【図15】微細構造の作製に用いられる加工装置の別の例を示す概略構成図である。

【図16】レーザの入射光強度による加工形状変化を示す図である。

【図17】レーザブレーション加工法を用いて微細構造を作製する方法の一例を示す図である。

【図18】微細構造の形状転写型を作製して光学素子の複製を作製する製造方法の一例を示す工程説明図である。

【図19】微細構造の作製に用いられる加工装置の別の例を示す概略構成図である。

30

【図20】本発明に係る微細構造の作製方法の一例を示す図である。

【図21】従来の作製方法の一例を示す図である。

【図22】本発明に係る微細構造の作製方法の一例を示す図である。

【図23】本発明に係る微細構造の作製方法の一例を示す図である。

【図24】微細構造の作製に用いられる加工装置の別の例を示す概略構成図である。

【図25】本発明に係る製造方法で作製される微細構造の一例を示す図である。

【図26】本発明に係る方法で作製した微細構造を形状転写型として用いて複製を作製する方法の一例を示す工程説明図である。

【図27】本発明に係る方法で作製した微細構造を形状転写型として用いて複製を作製する方法の別の例を示す工程説明図である。

40

【図28】本発明に係る方法で作製した微細構造を形状転写型として用いて複製を作製する方法の別の例を示す工程説明図である。

【図29】微細構造の作製に用いられる加工装置の別の例を示す概略構成図である。

【図30】図29の加工装置の対物レンズにレーザ測距計を取り付け、基板表面との距離を計測する方法の説明図である。

【図31】本発明の作製方法で作製された回折光学素子による回折の様子を示す説明図である。

【図32】不適切な形状の微細構造の例を示す図である。

【図33】波長より短く等ピッチな微細構造体の一例を示す図である。

【図34】曲面に形成された微細構造体の一例を示す図である。

50

【図 3 5】従来の位相変調型サブ波長素子の微細構造の一例を示す図である。

【図 3 6】従来の高さが同一で等ピッチの微細構造の説明図である。

【図 3 7】従来の微細構造におけるフィルファクターと有効屈折率の関係を示す図である。

【図 3 8】従来の高さが同一で幅が異なる微細構造の説明図である。

【図 3 9】干渉露光を行う場合の位置と光強度の関係を示す図である。

【符号の説明】

【 0 1 6 0 】

1 : 基板

2 : 微細構造体

3 : セル (領域)

4 : レンズ

5 : レジスト

1 1 , 2 1 , 5 1 , 6 1 : レーザ装置

1 2 , 2 4 , 5 2 , 6 5 : 空間フィルター

1 3 , 2 2 , 6 2 : 1 / 2 波長板

1 4 : 無偏光ビームスプリッタ

1 5 a , 1 5 b : ミラー

1 6 , 2 9 , 5 6 : コントローラ

1 7 , 3 0 : 回転ステージ

2 3 : グランレーザプリズム

2 5 , 6 4 : ミラー

2 6 : マスク

2 7 : 回折格子

2 8 , 5 4 : レンズ

3 1 , 5 5 , 7 2 : 移動ステージ

4 0 : 積層薄膜構造体

4 1 : 吸収層

4 2 : 透過層

4 3 : 金属膜

4 4 : 金型 (形状転写型)

4 5 : 光学素子

5 3 , 6 6 : ガルバノミラー

5 6 : 光硬化樹脂

6 0 : 光反応性材料

6 3 : グラントムソンプリズム

6 7 : リレーレンズ

6 8 : ビームサンプラー

6 9 : 結像レンズ

7 0 : 対物レンズ

7 1 : ピエゾステージ

7 3 : C C D

7 4 : 回転ステージ・コントローラ

7 5 : ハーフミラー

7 6 : フォトダイオード

7 7 : レーザ測距計

8 0 : 樹脂

8 1 : 金属膜

8 2 : 金型 (形状転写型)

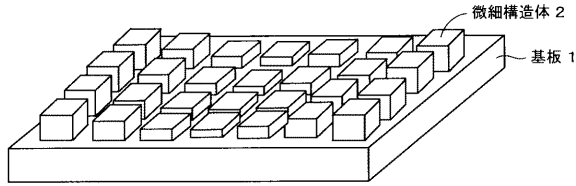
10

20

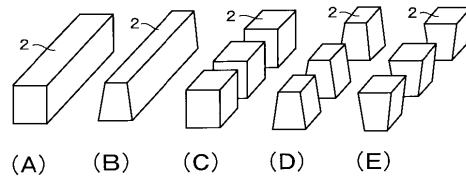
30

40

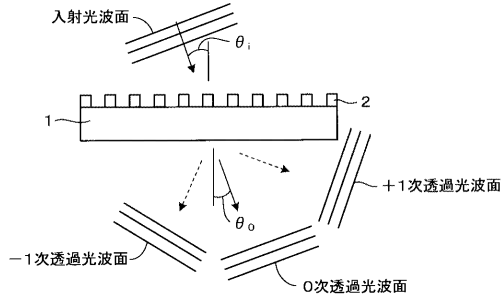
【 図 1 】



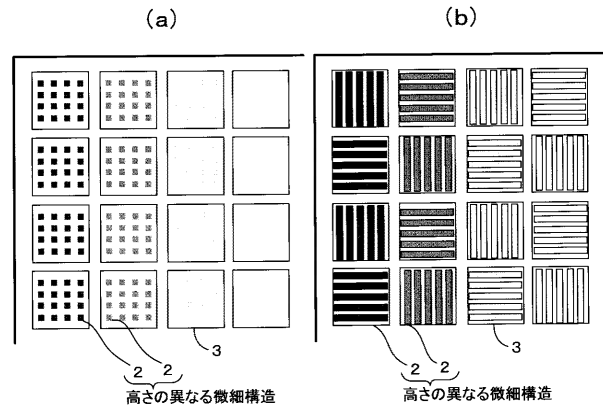
【 図 4 】



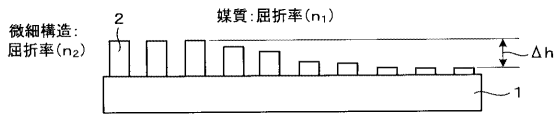
【 図 2 】



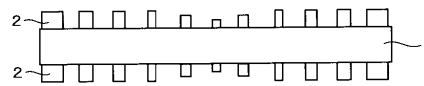
【 図 5 】



【 図 3 】



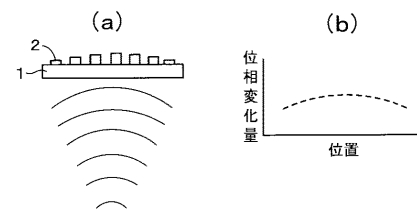
【 図 6 】



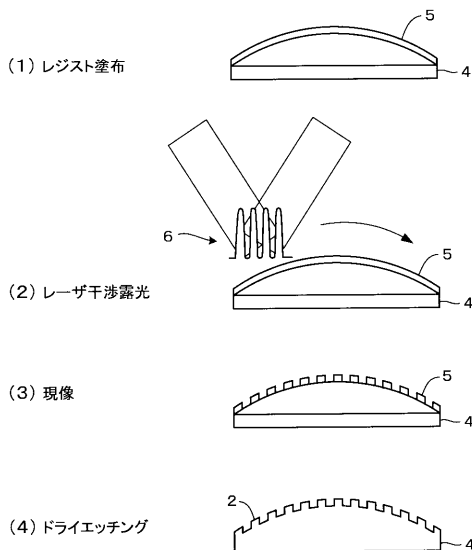
【 図 7 】



【 図 9 】



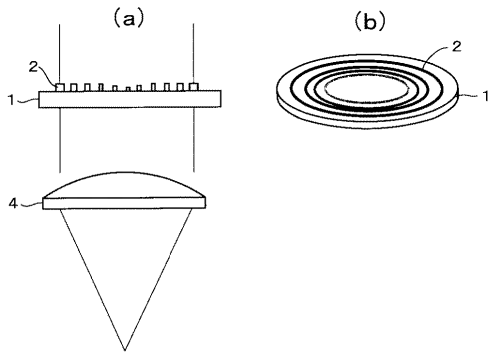
【 図 8 】



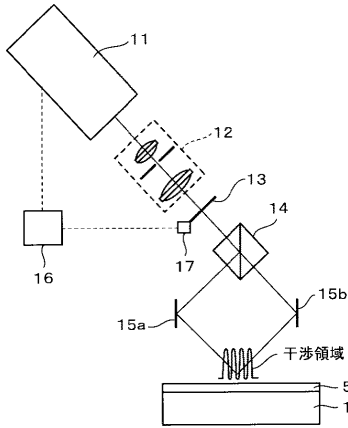
【 図 10 】



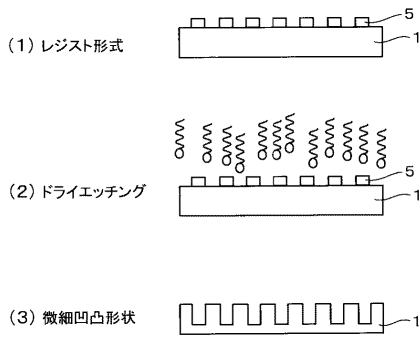
【図 1 1】



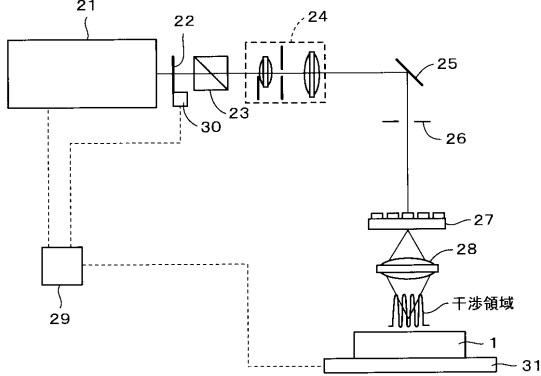
【図 1 2】



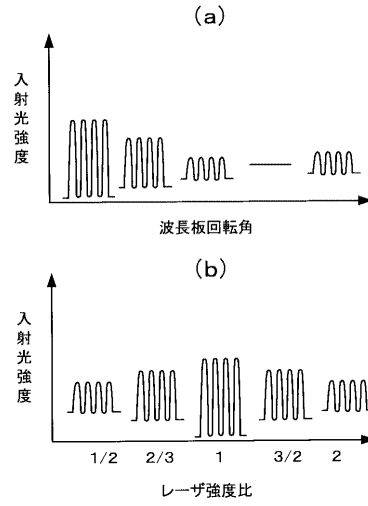
【図 1 4】



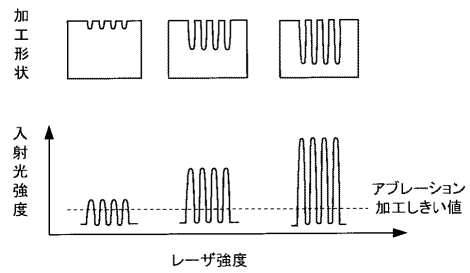
【図 1 5】



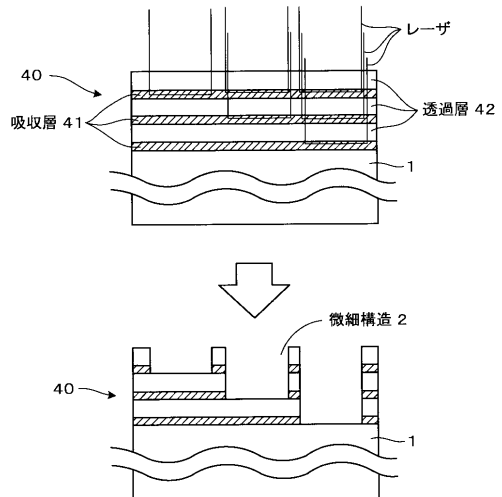
【図 1 3】



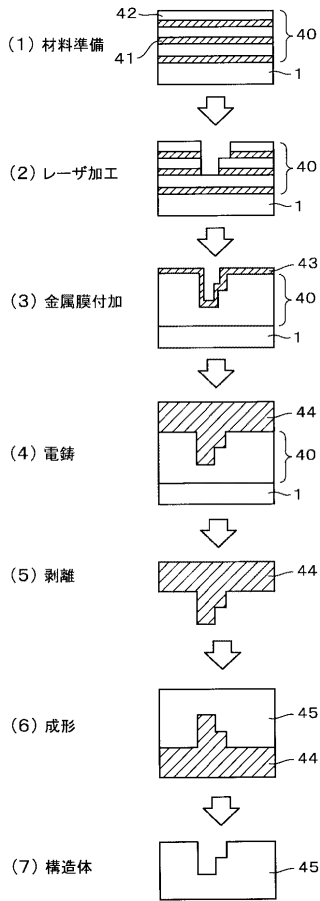
【図 1 6】



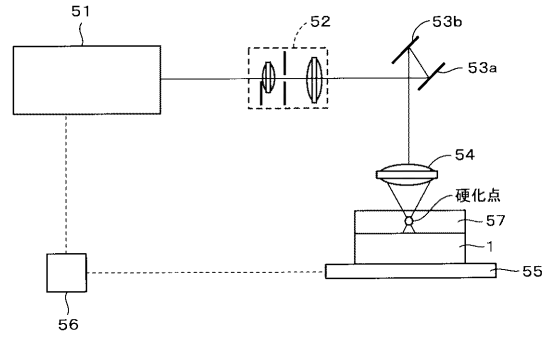
【図 1 7】



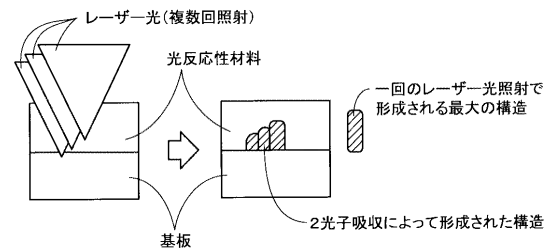
【図18】



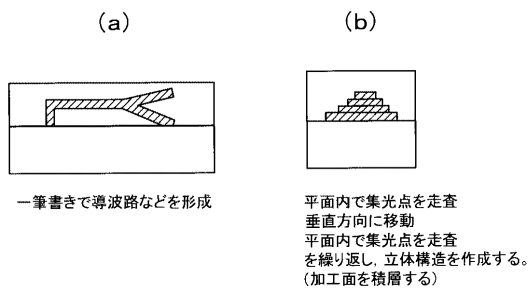
【図19】



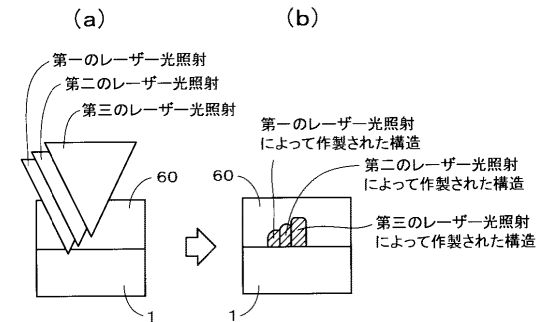
【図20】



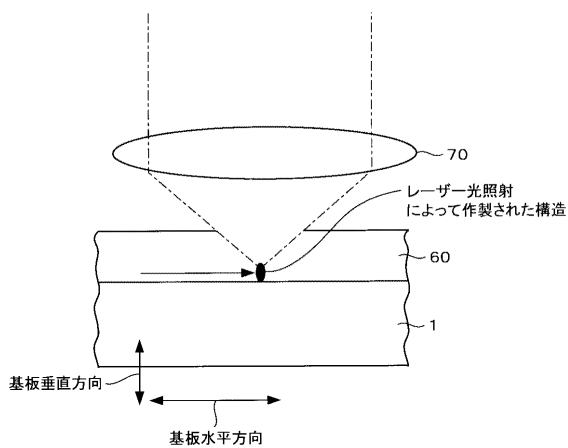
【図21】



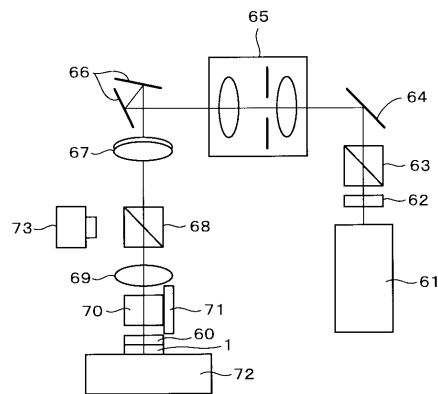
【図23】



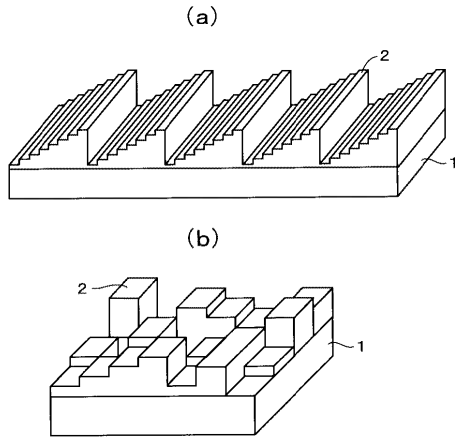
【図22】



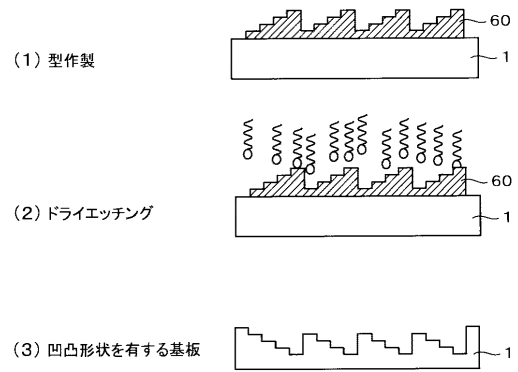
【図24】



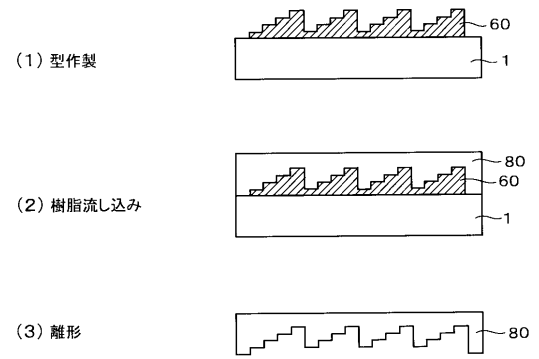
【図 25】



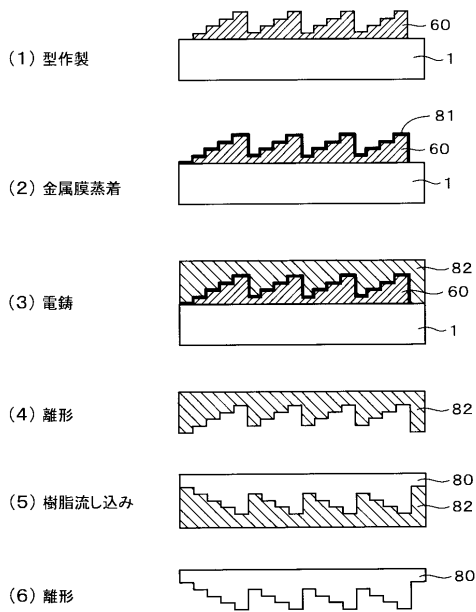
【図 26】



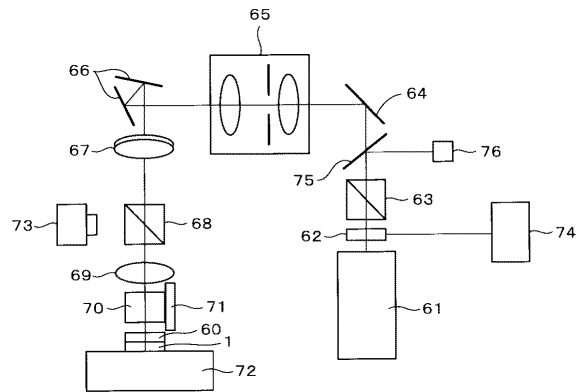
【図 27】



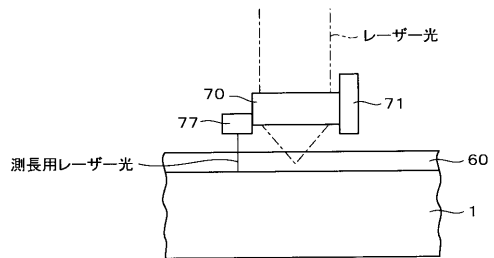
【図 28】



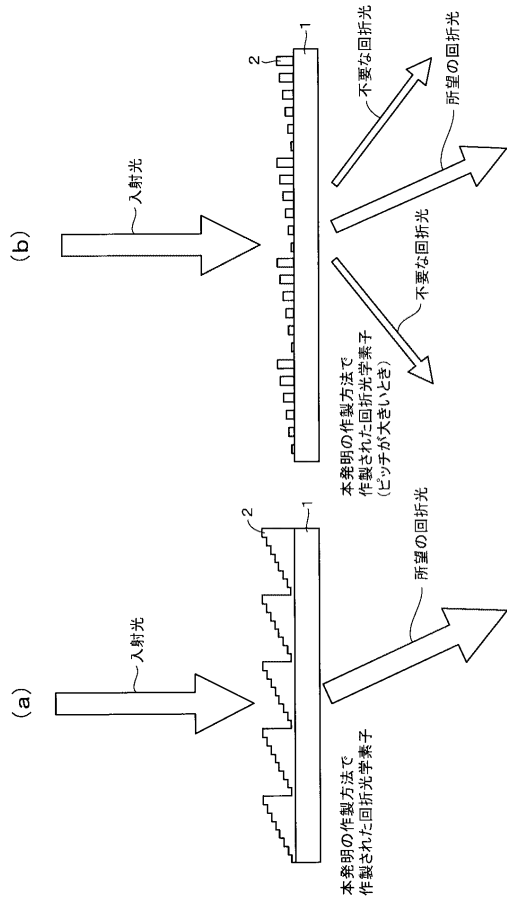
【図 29】



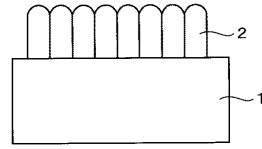
【図 30】



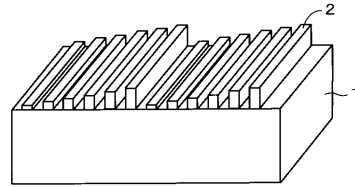
【 図 3 1 】



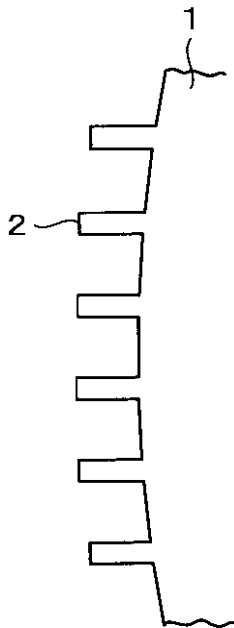
【 図 3 2 】



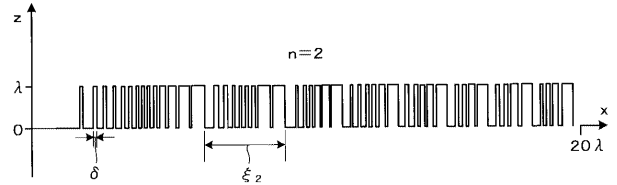
【 図 3 3 】



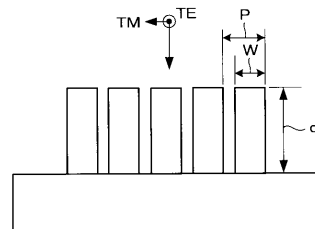
【 図 3 4 】



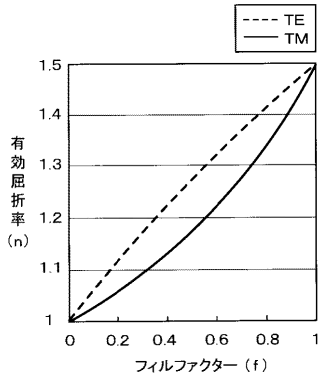
【 図 3 5 】



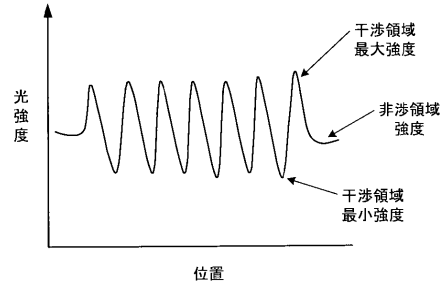
【 図 3 6 】



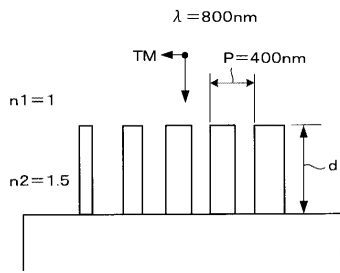
【 図 3 7 】



【 図 3 9 】



【 図 3 8 】



フロントページの続き

- (72)発明者 岸 秀信
東京都大田区中馬込 1 丁目 3 番 6 号・株式会社リコー内
- (72)発明者 今井 重明
東京都大田区中馬込 1 丁目 3 番 6 号・株式会社リコー内
- (72)発明者 佐藤 新治
東京都大田区中馬込 1 丁目 3 番 6 号・株式会社リコー内
- (72)発明者 橋口 強
東京都大田区中馬込 1 丁目 3 番 6 号・株式会社リコー内
- (72)発明者 峯岸 大生
東京都大田区中馬込 1 丁目 3 番 6 号・株式会社リコー内
- (72)発明者 伊藤 泉
東京都大田区中馬込 1 丁目 3 番 6 号・株式会社リコー内
- (72)発明者 瀬尾 学
東京都大田区中馬込 1 丁目 3 番 6 号・株式会社リコー内
- (72)発明者 中谷 任良
東京都大田区中馬込 1 丁目 3 番 6 号・株式会社リコー内
- F ターム(参考) 2H049 AA03 AA31 AA34 AA52 AA63 AA65
4E068 CA02 CA03 CA11 CB08 CC06 CD13