

(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2007-328096
(P2007-328096A)

(43) 公開日 平成19年12月20日(2007.12.20)

(51) Int. Cl. F I テーマコード (参考)
GO2B 5/18 (2006.01) GO2B 5/18 2H049

審査請求 未請求 請求項の数 17 O L (全 18 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2006-158469 (P2006-158469) (22) 出願日 平成18年6月7日(2006.6.7)</p>	<p>(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 (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 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 Fターム(参考) 2H049 AA18 AA33 AA40 AA48 AA53 AA60 AA63 AA66</p>
---	--

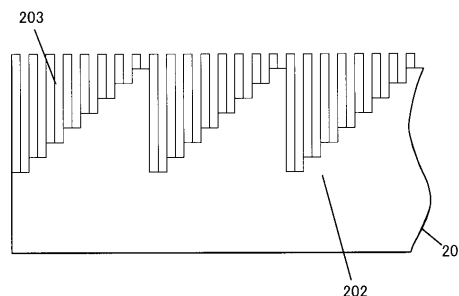
(54) 【発明の名称】 回折光学素子とその作製方法および光学モジュール

(57) 【要約】

【課題】自由度の高い設計が可能であり、かつ広い波長域で高い回折効率を有する回折光学素子を実現する。

【解決手段】本発明は、表面にレリーフパターンが形成されている回折光学素子201において、前記レリーフパターン202上に、使用する波長の最小波長よりも短いピッチを有する微細周期構造203を形成し、該微細周期構造203のピッチ、幅、高さ(または深さ)などのパラメータを変えることにより微細周期構造203における有効屈折率の波長依存性を調整する。これにより、所望の複数波長あるいは波長範囲において回折率がより高い回折光学素子201を実現することが可能となり、また、より自由に設計することが可能な回折光学素子を提供することが可能となる。

【選択図】 図3



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

表面にレリーフパターンが形成されている回折光学素子において、
前記レリーフパターン上に、使用する波長の最小波長よりも短いピッチを有する微細周期構造が形成されており、前記レリーフパターン部の屈折率 n_1 および、前記微細周期構造部における有効屈折率 n_{eff} が、次の式(1)を満たすことを特徴とする回折光学素子。

【数 1】

$$\frac{n_1(\lambda_2) - n_{eff}(\lambda_2)}{n_1(\lambda_1) - n_{eff}(\lambda_1)} > \frac{n_1(\lambda_2) - 1}{n_1(\lambda_1) - 1} \quad \text{式(1)}$$

10

(ただし、 $\lambda_1 < \lambda_2$: λ_1, λ_2 はそれぞれ使用する波長の最小波長および最大波長)

【請求項 2】

請求項 1 記載の回折光学素子において、
前記微細周期構造のピッチおよび幅が全範囲にわたって略等しいことを特徴とする回折光学素子。

【請求項 3】

請求項 1 または 2 記載の回折光学素子において、
前記微細周期構造が、素子平面内で略等しい高さになるよう形成されていることを特徴とする回折光学素子。

20

【請求項 4】

請求項 1 乃至 3 のいずれか 1 項に記載の回折光学素子において、
前記微細周期構造が、1次元の格子周期構造となっていることを特徴とする回折光学素子。

【請求項 5】

請求項 1 乃至 3 のいずれか 1 項に記載の回折光学素子において、
前記微細周期構造が、柱状または空孔の 2次元アレイ状周期構造となっていることを特徴とする回折光学素子。

【請求項 6】

請求項 1 乃至 5 のいずれか 1 項に記載の回折光学素子において、
前記微細周期構造は、表面側がより細くなっていることを特徴とする回折光学素子。

30

【請求項 7】

請求項 1 乃至 6 のいずれか 1 項に記載の回折光学素子において、
前記レリーフパターンは、同心円状の構造であることを特徴とする回折光学素子。

【請求項 8】

請求項 1 乃至 6 のいずれか 1 項に記載の回折光学素子において、
前記レリーフパターンは、1次元または2次元の周期構造であることを特徴とする回折光学素子。

【請求項 9】

請求項 1 乃至 6 のいずれか 1 項に記載の回折光学素子において、
前記レリーフパターンは、鋸歯状の構造であることを特徴とする回折光学素子。

40

【請求項 10】

請求項 1 乃至 6 のいずれか 1 項に記載の回折光学素子において、
前記レリーフパターンが、所定の形状にビームを整形するよう設計された構造であることを特徴とする回折光学素子。

【請求項 11】

表面にレリーフパターンが形成されている回折光学素子において、
前記レリーフパターン上に、使用する波長の最小波長よりも短いピッチを有する微細周期構造が等ピッチで2次元周期状に形成されていることを特徴とする回折光学素子。

50

【請求項 1 2】

請求項 1 乃至 1 1 のいずれか 1 項に記載の回折光学素子において、
2 種類以上の材料によって形成されていることを特徴とする回折光学素子。

【請求項 1 3】

請求項 1 乃至 1 1 のいずれか 1 項に記載の回折光学素子において、
単一の材料により形成されていることを特徴とする回折光学素子。

【請求項 1 4】

請求項 1 乃至 1 3 のいずれか 1 項に記載の回折光学素子において、
少なくとも 1 面が曲面であることを特徴とする回折光学素子。

【請求項 1 5】

請求項 1 乃至 1 4 のいずれか 1 項に記載の回折光学素子において、
少なくとも 1 面に薄膜層が形成されていることを特徴とする回折光学素子。

10

【請求項 1 6】

請求項 1 乃至 1 5 のいずれか 1 項に記載の回折光学素子を作製する作製方法において、
前記回折光学素子の構造を作製する際に、高さが空間的に異なる 1 次元または 2 次元の
周期構造を有する構造体を型として、該型の形状を転写する工程が含まれていることを特
徴とする回折光学素子の作製方法。

【請求項 1 7】

請求項 1 乃至 1 5 のいずれか 1 項に記載の回折光学素子と、少なくとも 1 枚以上のレン
ズと、受光素子とを有することを特徴とする光学モジュール。

20

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、撮像光学系、投影光学系、画像処理装置などの各種の光学機器に応用するこ
とが可能な回折光学素子および光学モジュールに関するものであり、より詳しくは、複数
の波長あるいは特定の波長範囲で使用する回折光学素子、特に可視光全域で高い回折効率
を有する回折光学素子と、その回折光学素子の作製方法、および、前記回折光学素子を有
する光学モジュールに関するものである。

【背景技術】

【0002】

従来、光の屈折を利用した素子としてレンズやプリズムなどが存在したが、回折光学素
子はこれらの機能を平板構造で達成可能ため、小型軽量化を実現することができるもの
である。また、ビーム分岐や強度分布変換など、従来屈折を利用した光学素子では実現不
可能であった機能を持つ素子を作ることにも可能である。これらの機能を有する回折光学素
子としては、例えば図 1 6 に示すような透明材料 1 2 の表面に凹凸の形状を刻んだ構造 1
3 によって達成される（これを、以下、表面レリーフ型回折光学素子とする）。

30

【0003】

しかしながら、図 1 6 に示す表面レリーフ型の回折光学素子 1 1 は単一波長で設計され
るものであり、図 1 7 に示すように、設計波長と異なる波長の光に対して用いると、回折
効率が低下し光の利用効率が下がる、あるいは結像光学系ではフレアとなり画像品質を劣
化させる、といった問題があった。

40

【0004】

これに関して、数式を用いて説明すると以下のようになる。

素子を通過する光の位相変調量の最大値 は、

$$= (n - 1) d /$$
式 (2)

で表される。

ここで、 n は材料の屈折率、 d はレリーフ構造の最大深さである。これを用い、 m 次の
回折効率 η_m は、以下の式 (3) のように表される。

【0005】

【数 1】

$$\eta_m = \left(\frac{\sin(\pi(m-\phi))}{\pi(m-\phi)} \right)^2 \quad \text{式(3)}$$

【0006】

よって、 の波長依存性により、回折効率は図 1 7 に示したとおり設計波長以外で低下することがわかる。

この問題を解決し、広い波長域で利用可能とした回折光学素子が特許文献 1 (特許第 3 7 1 7 5 5 5 号公報) に提案されている。 10

【0007】

特許文献 1 に記載の従来技術では、図 1 8 に示すように、表面レリーフ型の構造 2 3 を有する第一の光学材料 2 2 (屈折率 n_1) の上に、屈折率および波長分散の異なる第二の光学材料 2 4 (屈折率 n_2) を積層することで、広い波長域で効率が高い回折光学素子 2 1 が得られることが示されている。この構造では、位相変調量の最大値 が以下の式(4)で表される。

【0008】

【数 2】

$$\phi = \frac{(n_1 - n_2)d}{\lambda} \quad \text{式(4)}$$

20

【0009】

これによれば、設計波長を λ_0 、設計波長以外の使用したい任意の波長を λ とすれば、における位相変調量 () は、以下の式(5)で表される。

【0010】

【数 3】

$$\phi(\lambda) = m_0 \cdot \frac{n_1(\lambda) - n_2(\lambda)}{n_1(\lambda_0) - n_2(\lambda_0)} \cdot \frac{\lambda_0}{\lambda} \quad \text{式(5)}$$

30

【0011】

この位相変調量 () の波長依存性を表面レリーフ型回折光学素子よりも減らすためには、次の式(6)の条件を満たす屈折率材料を選択することで達成できる。

ただし、 $n_1 > n_2$: λ_1, λ_2 はそれぞれ使用波長の下限および上限の光の波長である。

【0012】

【数 4】

$$\frac{n_1(\lambda_2) - n_2(\lambda_2)}{n_1(\lambda_1) - n_2(\lambda_1)} > \frac{n_1(\lambda_2) - 1}{n_1(\lambda_1) - 1} \quad \text{式(6)}$$

40

【0013】

また、近年、格子周期が使用波長よりも短い微細周期構造(以下、これをサブ波長構造と呼ぶ)による回折光学素子が特許文献 2 (特許第 3 5 4 7 6 6 5 号公報)などで提案されている。このようなサブ波長構造も、通常は単一波長で用いられるものであるが、広い 50

波長域で高い光利用効率を得る手段が特許文献3(特開2001-343512公報)に記載されている。この特許文献3に記載の従来技術では、サブ波長構造に異種材料を埋め込むことで、広い波長域で効率が高い回折光学素子が得られることが示されている。

【0014】

【特許文献1】特許第3717555号公報

【特許文献2】特許第3547665号公報

【特許文献3】特開2001-343512公報

【特許文献4】特開2001-272505公報

【非特許文献1】デジタル回折光学 丸善 p.360-363

【非特許文献2】Sov.Phys.JETP 2 466-(1956)

【非特許文献3】J.Opt.Soc.Am.A 15(6) 1577-1587 (1998)

【非特許文献4】Appl.Opt. 33,863-867 (1994)

【非特許文献5】Opt.Eng. 19, 297-305 (1980)

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0015】

前述の従来技術のように、広い波長域で高い回折効率を得るためには、異なる材料を2つ以上用いる方法が採られてきた。このような方法において、広い波長範囲において高い回折効率を得るためには、複数の材料で分散特性を厳密に最適化する必要があり、既存の材料中からこのような条件を探し出すことは困難であった。

【0016】

本発明は上記事情に鑑みなされたものであり、第1の課題は、従来技術の問題を解決し、より自由度の高い設計が可能であり、かつ広い波長域でより高い回折効率を有する回折光学素子を提供することである。

【0017】

また、本発明の第2の課題は、より作製が容易で、広い波長域で高い回折効率を有する回折光学素子を提供することであり、第3の課題は、特定の偏光に対してのみ、広い波長域で高い回折効率を有する回折光学素子を提供することであり、第4の課題は、無偏光な光に対して、広い波長域で高い回折効率を有する回折光学素子を提供することである。

【0018】

ところで、通常の光学素子は、表面において入射面と出射面の屈折率の違いから生じるフレネル反射によるロスが存在する。フレネル反射は素子の面ごとで生じ、光利用効率の低下、迷光の発生によるフレア、などの原因となっていた。そこで表面反射の影響を低減させるため、単層の反射防止膜、あるいは誘電体膜を多層重ねた多層反射防止膜が一般的に利用される。しかしながら、このような膜によって広い波長域、広い入射角度で反射防止を行うことは容易ではなく、これを達成するためには高精度な膜制御が必要であり、高コストとなるものであった。

そこで本発明の第5の課題は、このような問題を解決し、広い波長域で表面反射が低減されている、高効率な回折光学素子を提供することである。

【0019】

回折レンズはアッペ数が負の値を持つことから、屈折レンズと組み合わせて使用することで効率的に色収差の補正が可能であることが知られている。これに関しては、例えば非特許文献1(デジタル回折光学 丸善 p.360-363)に記載されている。

しかしながら、通常の回折レンズでは単一波長で良い回折効率を有し、他の波長では回折効率が低いため、フレアや色むら、光利用効率の低下、などの原因となっていた。

そこで本発明の第6の課題は、このような問題を解決し、広い波長域で高い回折効率を有する回折光学素子(例えば回折レンズ)を提供することである。

【0020】

さらに本発明の第7の課題は、広い波長域で利用可能な、ビーム分岐機能を有する回折光学素子を提供することであり、第8の課題は、広い波長域で利用可能な、ビーム偏向機

10

20

30

40

50

能を有する回折光学素子を提供することであり、第9の課題は、広い波長域で利用可能な、ビーム整形機能を有する回折光学素子を提供することであり、第10の課題は、偏光依存性が低く、広い波長域で高い回折効率を有する回折光学素子を提供することであり、第11の課題は、設計が容易で、広い波長域で回折効率の高い回折光学素子を提供することである。

【0021】

前述の特許文献1や特許文献3などに記載の、従来の広い波長域で利用可能な回折光学素子は、いずれも複数の材料を用いて作製されるものであった。しかしながら、複数の材料を用いることは、材料費、製造方法の複雑化、などの面から製造に時間がかかり、コストが高くなるものであった。

10

そこで本発明の第12の課題は、低コストで生産性に優れる、広い波長域で利用可能な回折光学素子を提供することである。

【0022】

さらに本発明の第13の課題は、より高い機能を有した回折光学素子を提供することであり、第14の課題は、より耐久性の高い回折光学素子、あるいは光利用効率のより高い回折光学素子など、より高機能な回折光学素子を提供することである。

また、本発明の第15の課題は、量産性に優れた回折光学素子の作製方法を提供することである。

さらに本発明の第16の課題は、高機能であり、かつ小型・軽量化された光学モジュールを提供することである。

20

【課題を解決するための手段】

【0023】

上記の課題を解決するため、本発明では以下のような手段を採っている。

本発明の第1の手段は、表面にレリーフパターンが形成されている回折光学素子において、前記レリーフパターン上に、使用する波長の最小波長よりも短いピッチを有する微細周期構造が形成されており、前記レリーフパターン部の屈折率 n_1 および、前記微細周期構造部における有効屈折率 n_{eff} が、次の式(1)を満たすことを特徴とする。

【0024】

【数5】

$$\frac{n_1(\lambda_2) - n_{eff}(\lambda_2)}{n_1(\lambda_1) - n_{eff}(\lambda_1)} > \frac{n_1(\lambda_2) - 1}{n_1(\lambda_1) - 1} \quad \text{式(1)}$$

30

(ただし、 $\lambda_1 < \lambda_2$: λ_1, λ_2 はそれぞれ使用する波長の最小波長および最大波長)

【0025】

本発明の第2の手段は、第1の手段の回折光学素子において、前記微細周期構造のピッチおよび幅が全範囲にわたって略等しいことを特徴とする。

また、本発明の第3の手段は、第1または第2の手段の回折光学素子において、前記微細周期構造が、素子平面内で略等しい高さになるよう形成されていることを特徴とする。

40

【0026】

本発明の第4の手段は、第1乃至第3のいずれか1つの手段の回折光学素子において、前記微細周期構造が、1次元の格子周期構造となっていることを特徴とする。

また、本発明の第5の手段は、第1乃至第3のいずれか1つの手段の回折光学素子において、前記微細周期構造が、柱状または空孔の2次元アレイ状周期構造となっていることを特徴とする。

さらに本発明の第6の手段は、第1乃至第5のいずれか1つの手段の回折光学素子において、前記微細周期構造は、表面側がより細くなっていることを特徴とする。

【0027】

本発明の第7の手段は、第1乃至第6のいずれか1つの手段の回折光学素子において、

50

前記レリーフパターンは、同心円状の構造であることを特徴とする。

また、本発明の第 8 の手段は、第 1 乃至第 6 のいずれか 1 つの手段の回折光学素子において、前記レリーフパターンは、1 次元または 2 次元の周期構造であることを特徴とする。

さらに本発明の第 9 の手段は、第 1 乃至第 6 のいずれか 1 つの手段の回折光学素子において、前記レリーフパターンは、鋸歯状の構造であることを特徴とする。

さらにまた、本発明の第 10 の手段は、第 1 乃至第 6 のいずれか 1 つの手段の回折光学素子において、前記レリーフパターンが、所定の形状にビームを整形するように設計された構造であることを特徴とする。

【0028】

本発明の第 11 の手段は、表面にレリーフパターンが形成されている回折光学素子において、前記レリーフパターン上に、使用する波長の最小波長よりも短いピッチを有する微細周期構造が等ピッチで 2 次元周期状に形成されていることを特徴とする。

また、本発明の第 12 の手段は、第 1 乃至第 11 のいずれか 1 つの手段の回折光学素子において、2 種類以上の材料によって形成されていることを特徴とする。

さらに本発明の第 13 の手段は、第 1 乃至第 11 のいずれか 1 つの手段の回折光学素子において、単一の材料により形成されていることを特徴とする。

【0029】

本発明の第 14 の手段は、第 1 乃至第 13 のいずれか 1 つの手段の回折光学素子において、少なくとも 1 面が曲面であることを特徴とする。

また、本発明の第 15 の手段は、第 1 乃至第 14 のいずれか 1 つの手段の回折光学素子において、少なくとも 1 面に薄膜層が形成されていることを特徴とする。

【0030】

本発明の第 16 の手段は、第 1 乃至第 15 のいずれか 1 つの手段の回折光学素子を作製する作製方法において、前記回折光学素子の構造を作製する際に、高さが空間的に異なる 1 次元または 2 次元の周期構造を有する構造体を型として、該型の形状を転写する工程が含まれていることを特徴とする。

【0031】

本発明の第 17 の手段は、光学モジュールであって、第 1 乃至第 15 のいずれか 1 つの手段の回折光学素子と、少なくとも 1 枚以上のレンズと、受光素子とを有することを特徴とする。

【発明の効果】

【0032】

前述の従来技術では、複数の材料の分散特性を合わせこむ必要があり困難であったが、第 1 の手段の回折光学素子においては、微細周期構造のピッチ、幅、高さ（または深さ）などのパラメータを変えることにより微細周期構造における有効屈折率の波長依存性を調整することが可能であり、前記の式(1)を満たすようにすることにより、所望の複数波長あるいは波長範囲において回折効率がより高い回折光学素子を実現することが可能となり、また、より自由に設計することが可能な回折光学素子を提供することが可能となる。

【0033】

第 2 の手段の回折光学素子においては、第 1 の手段の構成および効果に加え、微細周期構造のピッチおよび幅が略一定となっていることで、より製造が容易な構造とすることが可能である。

【0034】

第 3 の手段の回折光学素子においては、第 1 または第 2 の手段の構成及び効果に加え、素子表面内で略等しい高さとするすることで、より製造が容易な構造とすることが可能である。これは以下のような理由による。

本発明の回折光学素子の構造を作製するには、凸部の高さが等しいため、凹部のみ深さを制御して作製してやれば良い。よって、リソグラフィによって本発明の形状を作製するには、基板上に平坦に塗布されたレジストに対して、凹部を形成したい箇所に深さに応じ

10

20

30

40

50

て強度を調整した電子線を照射し、現像した後に、エッチングを行えばよい。あるいは、転写によって本発明の構造を作製する際に、型となる構造は底面が等しく高さが異なる構造となる。このような型構造は底面と高さの両方が異なる構造に対して作製が容易である。

【0035】

第4の手段の回折光学素子においては、第1乃至第3のいずれか1つの手段の構成および効果に加え、前記微細周期構造が、1次元の格子周期構造となっているが、1次元周期構造では、有効屈折率が偏光方向によって異なる。これにより、ある一つの偏光状態に対して最適化された回折光学素子構造では、異なる偏光では高い回折効率を持たないので、偏光に対して効率の異なる偏光依存の回折光学素子が可能となる。

10

【0036】

第5の手段の回折光学素子においては、第1乃至第3のいずれか1つの手段の構成および効果に加え、前記微細周期構造が、柱状または空孔の2次元アレイ状周期構造となっているが、2次元アレイ状周期構造では、有効屈折率に偏光による違いが無い。このため、どのような偏光状態の光に対しても使用可能な、広帯域・高効率回折光学素子を実現することが可能となる。

【0037】

第6の手段の回折光学素子においては、第1乃至第5のいずれか1つの手段の構成および効果に加え、前記微細周期構造は、表面側がより細くなっていることにより、広い波長域に対して表面反射をよく低減することが可能となる。これによって、光利用効率がより高い回折光学素子を得ることができる。

20

【0038】

第7の手段の回折光学素子においては、第1乃至第6のいずれか1つの手段の構成および効果に加え、前記レリーフパターンは、同心円状の構造であることにより、回折レンズとして機能させることができる。

回折レンズはアッベ数が負の値を持つことから、屈折レンズと組み合わせて使用することで効率的に色収差の補正が可能であることが知られているが、第7の手段の回折光学素子は、広い波長域で高い回折効率を有する素子であり、フレアや色むらや光利用効率の低下が少ない回折レンズとして使用可能である。

【0039】

第8の手段の回折光学素子においては、第1乃至第6のいずれか1つの手段の構成および効果に加え、前記レリーフパターンは、1次元または2次元の周期構造であることにより、広帯域・高効率なビームスプリッタとして機能させることができる。

30

また、第9の手段の回折光学素子においては、第1乃至第6のいずれか1つの手段の構成および効果に加え、前記レリーフパターンは、鋸歯状の構造であることにより、広帯域・高効率なグレーティングとして機能させることができる。これによって、透過型の素子によって分光することが可能となり、分光光学系の小型化を達成することも可能である。

【0040】

第10の手段の回折光学素子においては、第1乃至第6のいずれか1つの手段の構成および効果に加え、前記レリーフパターンが、所定の形状にビームを整形するよう設計された構造であることにより、特定の波長範囲あるいは複数の波長を有する光に対して、高い光利用効率で任意の形状に整形することが可能となる。

40

このような構造は特に白色光をいわゆるトップハットなビームパターンに均質化するときに有効である。また、波長によって均質領域のずれが生じるが、中心部では広い波長域で均質化された領域を得ることができる。

【0041】

第11の手段の回折光学素子においては、レリーフパターン上に、使用する波長の最小波長よりも短いピッチを有する微細周期構造が等ピッチで2次元周期状に形成されていることにより、より容易に作製可能な構造であり、かつ広い波長域で高い回折効率を有する回折光学素子を提供することが可能となる。また、本発明の回折光学素子は偏光依存性を

50

持たないため、太陽光、ランプの発光、発光ダイオード（LED）の発光、といった無偏光であり、かつ波長域に幅を有する光に対して高い光利用効率で用いることができる。つまり、カメラや投影装置、分光装置など、様々な光学機器に対して利用可能となる。そして、光学機器内部にこのような回折光学素子を用いることで、機器の軽量化、小型化を達成することができる。

【0042】

第12の手段の回折光学素子においては、第1乃至第11のいずれか1つの手段の構成および効果に加え、2種類以上の材料によって形成されていることにより、より設計の自由度が増し、より高効率の回折光学素子を実現することができる。

また、第13の手段の回折光学素子においては、第1乃至第11のいずれか1つの手段の構成および効果に加え、単一の材料で構成されることにより、型からの転写による作製が可能となり、量産性に優れた回折光学素子を実現することができる。

10

【0043】

第14の手段の回折光学素子においては、第1乃至第13のいずれか1つの手段の構成および効果に加え、少なくとも1面が曲面であることにより、回折光学素子としての機能に加えて屈折レンズとしての機能を加えることが可能になる。本発明の回折光学素子では、例えば、広い波長域で高い回折効率を有する回折レンズと、屈折レンズが1枚の構成として提供可能である。これによって、光学系のレンズ枚数を減らすことができ、より小型・軽量化を達成することが可能となる。

【0044】

第15の手段の回折光学素子においては、第1乃至第14のいずれか1つの手段の構成および効果に加え、少なくとも1面に薄膜層が形成されていることにより、より耐久性・信頼性に優れた回折光学素子とすることが可能になる。あるいは、多層膜による光学的な機能を付け加えることも可能であり、より高機能な回折光学素子とすることができる。

20

【0045】

第16の手段の回折光学素子の作製方法においては、第1乃至第15のいずれか1つの手段の回折光学素子の構造を作製する際に、高さが空間的に異なる1次元または2次元の周期構造を有する構造体を型として、該型の形状を転写する工程が含まれていることにより、広い波長域で高い回折効率を有する回折光学素子を、容易に低コストで大量に生産することが可能となる。

30

【0046】

第17の手段の光学モジュールにおいては、第1乃至第15のいずれか1つの手段の回折光学素子と、少なくとも1枚以上のレンズと、受光素子とを有することにより、カメラや分光器などの種々の光学機器に使用可能な、小型・軽量化された光学モジュールを提供することが可能となる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0047】

以下、本発明の構成、動作および作用効果を図示の実施例に基づいて詳細に説明する。なお、図示の実施例は模式的に表したものであり、正確な寸法を表すものではない。

【実施例】

40

【0048】

[実施例1]

まず、第1～第4、第9、第12、第13の手段に係る回折光学素子の実施例について説明する。

本発明の回折光学素子に用いる波長以下の微細周期構造（以下、サブ波長構造と呼ぶ）に関して、その特性を図1のような1次元周期構造を用いて説明する。図1は本発明に係る回折光学素子101の1次元周期構造102の断面を模式的に表した断面図である。通常、図1に示すような周期構造102に光を入射した際には、回折光が生じる。この回折光の回折角 θ は、入射光の波長を λ 、周期構造102のピッチを p として以下のような式(7)で表される。ここで、 m は m 次の回折光を表す。

50

$$\sin \theta = m \lambda / p \quad \text{式(7)}$$

【0049】

式(7)より、周期構造102のピッチpが波長よりも短いときには回折角が実解を持たず、すなわち回折しないことがわかる。このとき、入射光に対して周期構造102は有効屈折率 n_{eff} を持つ均質な媒質として表すことができることが知られている。例えば非特許文献2(Sov.Phys.JETP 2466-(1956))には、有効屈折率 n_{eff} の近似的な解が示されている。これによれば、有効屈折率 n_{eff} は波長依存性を有しており、また、サブ波長構造のピッチpやデューティを変えることにより有効屈折率の波長依存性が変化する。

【0050】

ここで、一例として、SCHOTT社製のガラス：LASF31(主屈折率 $n_d = 1.88$ 、アッペ数 $d = 41$)に関して、図1の周期構造の有効屈折率 n_{eff} を図2に示す。各パラメータとして、ピッチ $p = 300 \text{ nm}$ 、周期構造の幅 $a = 180 \text{ nm}$ とし、波長 400 nm から 700 nm の範囲において計算を行った。図2のグラフの破線は材料本来の屈折率、実線はTM偏光(電場の振動方向が周期方向に直角な成分)における周期構造の有効屈折率を表す。このように、有効屈折率は、材料本来の屈折率と異なる分散特性を有する。

【0051】

本発明では、サブ波長構造のこのような特性を利用することで、回折効率の波長依存性を改善することが可能であることを見出した。すなわち、材料の表面にレリーフパターンが形成されており、レリーフパターン上にサブ波長構造が形成されている回折光学素子において、レリーフパターン部の屈折率 n_1 およびサブ波長構造部における有効屈折率 n_{eff} が、以下の式(1)を満たす構造によって、回折効率の波長依存性が改善可能である。また、サブ波長構造のピッチp、幅a、高さ(または深さ)dなどのパラメータを変えることによりサブ波長構造における有効屈折率の波長依存性を調整することが可能である。

【0052】

【数6】

$$\frac{n_1(\lambda_2) - n_{eff}(\lambda_2)}{n_1(\lambda_1) - n_{eff}(\lambda_1)} > \frac{n_1(\lambda_2) - 1}{n_1(\lambda_1) - 1} \quad \text{式(1)}$$

(ただし、 $\lambda_1 < \lambda_2$: λ_1, λ_2 はそれぞれ使用する波長の最小波長および最大波長)

【0053】

次に図1を用いて具体的な周期構造の例を以下に示す。

材料として、SCHOTT社製のガラス：LASF31($n_d = 1.88$, $d = 41$)を例に設計を行った。サブ波長構造部としては前述したものと同一ピッチ $p = 300 \text{ nm}$ 、周期構造の幅 $a = 180 \text{ nm}$ としたとき、その有効屈折率の波長依存性は前述したとおり図2となる。図3に、このピッチpと幅aを持つサブ波長構造203と階段状の表面レリーフ構造202とを組み合わせた構造を持つ回折光学素子201を示す。このような構造では、入射光を特定次数の回折光のみに集中させることが可能であり、すなわち入射光を特定の方向に偏向させることができる。

【0054】

図3に示す構造のTM偏光に対する1次光の回折効率の理論計算値を図4に示す。図4のグラフで実線は図3に示す構造の回折効率、点線は従来のサブ波長構造なしで最適化された表面レリーフ構造の回折効率である。このように、階段状の表面レリーフ構造202にサブ波長構造203を加えることにより、広帯域で回折効率の高い回折光学素子201を得ることができる。

このとき、TE偏光(TM偏光と直交する偏光成分)においては回折効率が最適化されず、TM偏光でのみ広い波長域で高い回折効率を有することになる。このように、特定の偏光のみに対して高い回折効率を有する回折光学素子の実現可能となる。

【0055】

10

20

30

40

50

ここで、レリーフ構造部とサブ波長構造部は同一の材料を用いて設計を行ったが、異なる材料を用いることも可能である。異なる材料を用いることで、より設計の自由度が増すため、より高効率な回折光学素子の設計も可能である。また、異なる材料によって形成される構造は、例えば次のような方法で作製することが可能である。

石英基板の表面にレリーフ構造をエッチングで形成した後に、光硬化性樹脂でレリーフ構造を埋め平坦化する。その後、微細周期構造状のパターンで露光を行い、光硬化性樹脂を硬化させた後に、未露光部を除去する。これによって、レリーフ構造部は石英で、サブ波長構造部が光硬化性樹脂で出来た構造が作製される。

【0056】

このような2種類の材料を用いた構造に対して、同一の材料を用いる利点としては、作製が容易となる点があげられる。単一材料によって作製するため、1回の転写によって、あるいはリソグラフィによってパターンを形成することが可能となり、量産性に優れた回折光学素子となる。

【0057】

このように、同一材料を用いるか、異なる材料を用いるかは用途に応じて使い分けることが可能である。また、材料としてはガラス材料以外に、高分子樹脂や、金属酸化物を使用することが可能である。

【0058】

なお、このようなサブ波長構造は必ずしも等しいピッチおよび幅で全面形成されている必要は無く、ピッチあるいは幅、あるいはその両方が変調されていても良い。

また、このようなレリーフ構造あるいはサブ波長構造は、素子全面に形成されている必要は無く、光束有効範囲内の一部に形成されているものでも良い。あるいは、素子の両面にこのような構造が形成されているものでも良い。

【0059】

図3では、階段状のレリーフ構造202を示したが、図5に示す回折光学素子301のように、一般的によく使用される鋸歯状のような連続的形狀のレリーフ構造302を用いても良く、このレリーフ構造302の上にサブ波長構造303を設ければ良い。また、図6に示す回折光学素子401のように、レリーフ構造402は凹凸が周期的な構造ではないものであっても良い。

なお、図3、図5では、サブ波長構造203、303が素子上で高さが等しくなるように示したが、素子全体の高さが空間的に異なる構造でも良い。

【0060】

[実施例2]

次に第5、第11の手段に係る回折光学素子の実施例について説明する。

2次元周期のサブ波長構造を用いた回折光学素子501の実施例の全体像を図7(a)に、その断面図を図7(b)に示す。ここでは構造は微細なピッチを有する2次元周期の円状ホールレイ502が、空間的に深さが異なって配置されている構造となっている。このような2次元周期のサブ波長構造においても、前述した実施例1の1次元構造と同様に有効屈折率が波長依存性を示すことが非特許文献3(J. Opt. Soc. Am. A 15(6) 1577-1587 (1998))などに示されている。

よって、このような構造においても、広い波長域で高い回折効率を得ることが可能な回折光学素子を提供することができる。

【0061】

図7に示す実施例では、円筒形をした微細空孔が縦横に2次元アレイ状に並んでいるが、2次元アレイは六方細密に並んでいても良いし、他の並び方でも良い。また、空孔は円形である必要は無く、楕円形状や四角形状など様々な形状をとることが可能である。あるいは、周期構造が空孔である必要はなく、例えば図8に示す回折光学素子601のように、高さが空間的に異なるピラー形状の周期構造602でも良い。

【0062】

[実施例3]

10

20

30

40

50

次に第6の手段に係る回折光学素子の実施例について説明する。

本実施例の回折光学素子を図9に示す。この回折光学素子201は、図3と同様にサブ波長構造203と階段状の表面レリーフ構造202とを組み合わせた構造を持つが、サブ波長構造203の先端部に、先端が徐々に細くなった構造204が設けてある。このような構造とすることで、広い波長域の光に対して素子表面におけるフレネル反射を低減せしめることが可能となる。より望ましくは、サブ波長構造部203において、レリーフ構造202の最も高い点よりも上部で徐々に構造204が細くなっているのがよい。

【0063】

このような構造は例えば以下のような方法で作製することが可能である。

石英基板上にレジストを塗布した後に、電子線の強度を変えながら露光を行う。レジストを現像すると、照射した電子線の強度に応じて微細な凹凸を有する構造が得られる。これをマスクとしてドライエッチングを行い、レジストの凹凸を石英上に転写する。このとき、ドライエッチングの条件を最適化することにより、先端部が細い形状を形成することが可能である。このようにして、図9に示したような、サブ波長構造203の先端部に、先端が徐々に細くなった構造204を作製することができる。なお、エッチングによって先端部がとがった錘形状を有する構造を作製する方法は、例えば特許文献4（特開2001-272505公報）に開示されている。

【0064】

[実施例4]

次に第7、第14の手段に係る回折光学素子の実施例について説明する。

本実施例の回折光学素子701としては、図10(a)に示すように、レリーフ構造部702が同心円状のいわゆる回折レンズ形状を有している。また、レリーフ構造は量子化されていて、階段状の形状となってもよい。

このような回折レンズは、通常利用される屈折レンズと組み合わせることにより色収差を効率的に補正することが可能である。さらには、屈折系のレンズと本実施例の回折レンズとを一体化して、図10(b)に示すように、回折レンズ形状を有する面と反対側の面が曲面704を有した構造であると、その曲面704を屈折レンズ（レンズ面）として機能させることができ、レンズを別に設ける必要がなく、素子数を減らすことが可能となる。

【0065】

[実施例5]

次に第8の手段に係る回折光学素子の実施例について説明する。

本実施例の回折光学素子801を図11に示す。この回折光学素子801では、レリーフ構造802も周期構造をしており、その上にサブ波長構造803が設けられている。このような構造によって入射光は複数の光に分岐することができる。図11のようなレリーフ構造802を持つ回折光学素子801では、0次光と1次光、-1次光の3つに光を分岐することができ、レリーフ構造802の高さを最適に設定することで、3つの強度を同じにすることも可能である。また、レリーフ構造802を2次元的な周期構造とすることで、2次元的に光を分けることも可能である。

【0066】

[実施例6]

次に第10の手段に係る回折光学素子の実施例について説明する。

本実施例の回折光学素子は、レリーフパターンが図12(a)に示すような構造となっている。図12(a)はいわゆる計算機合成ホログラム（CGH）パターンであり、色の濃淡がレリーフパターンの深さを表しているものである。図12(a)の形状を有するレリーフパターン上にサブ波長構造が形成された回折光学素子では、白色の平行光が入射すると、特定の距離において、各波長における図12(b)のような形状が再生されることになる。このように、レリーフパターンにホログラムパターンを用いることで、ビームを任意の形状に整形することが可能な回折光学素子を作製することが可能である。

【0067】

10

20

30

40

50

なお、このようなホログラムパターンの形状を計算する方法には、反復フーリエ変換法やシミュレーテッドアニリング法などを用いることが可能である。

これらの計算方法に関しては、それぞれ非特許文献4 (Appl.Opt. 33,863-867 (1994))、非特許文献5 (Opt.Eng. 19, 297-305 (1980)) に詳しく記載されている。

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。

【0068】

[実施例7]

次に第15の手段に係る回折光学素子の実施例について説明する。

本実施例の回折光学素子901は、図13(a)に示すように、微細なサブ波長構造902が形成されている面上に薄膜903が形成されている構造となっている。サブ波長構造902はアスペクトが比較的高い構造であるため傷つきやすい。これに対して、図13(a)に示すように、サブ波長構造902上に薄膜903が形成されていることで保護膜の役割を果たすことができ、信頼性・耐久性を向上させることが可能である。この薄膜903はどのような組成のもので問題はないが、使用波長域に対して透過率を有することが必要である。あるいは、単なる保護膜に限らず、誘電体や樹脂によって反射防止用の膜を形成することも可能である。あるいは、単層の膜ではなく、図12(b)に示すように多層膜904とすることで、バンドパスフィルタの機能や、偏光分離の機能などを付け加えることも可能であり、より高機能な素子とすることができる。これらの単層膜903や多層膜904は、構造が形成されていない面にも付け加えることができ、これによって回折光学素子を高機能化することができる。

【0069】

以上、本発明に係る回折光学素子の実施例を説明したが、これらの実施例で示した構造のサブ波長構造部は、すべて前述の式(1)の条件を満たす構造となっているものである。

【0070】

[実施例8]

次に第16の手段に係る回折光学素子の作製方法の実施例を図14を用いて説明する。

図14(a)に示すように、金属などによって形成された型1101を用い、これに樹脂等からなる転写材1102を流し込み、さらに転写材1102を硬化させた後に、型1101から離型することで、回折光学素子1103を容易に得ることが可能である。この方法は、型1101を1度作ることができれば、何度も再利用して転写することが可能であるため、非常に量産性に優れており、低コストな作製方法である。

転写材料としては、熱可塑性の樹脂、光硬化性の樹脂などの高分子材料の他、有機・無機の混合材料であるゾル・ゲル材料や、低融点ガラスなどを利用することができる。硬化方法は材料に対して最適なものが選ばれるものであるが、通常は熱インプリント法もしくは光インプリント法のどちらかが用いられる。熱インプリント法では、熱可塑性の材料を用い、高温で型に密着させた後に、温度を下げ離型を行う。光インプリント法では、光硬化性の樹脂またはゾル・ゲル材料などを用い、型に材料を流し込んだ後に、主に紫外線を照射することで材料を硬化させ、その後、離型を行う。

【0071】

型の作製方法としては図14(b)に示すような方法が考えられる。この方法では、基板1201上にレジスト材料1202を塗布し、電子線1203を場所によって強度を変えながら照射することで露光を行う。露光後、レジストを現像すると、照射した電子線の強度に応じて凹凸のあるレジスト1204が形成される。これに金属膜1205を蒸着し、電鍍を行った後、基板1201とレジスト1204を離型することで金属型1206が得られる。そして、この金属型1206を、図14(a)の型1101として用いれば、前述のようにして、回折光学素子1103を容易に得ることができる。なお、上記の型の作製方法は一例であり、この方法に限定されるものではない。

【0072】

[実施例9]

10

20

30

40

50

次に第 17 の手段に係る光学モジュールの実施例について説明する。

上述したような実施例の回折光学素子は、他の光学素子と組み合わせることによって高機能でかつ小型・軽量の光学モジュールとして使用可能である。先に述べたように、屈折レンズと本発明の回折光学素子（例えば回折レンズ）とを組み合わせることで、効率的に色収差低減を行うことが可能な光学モジュールとすることができる。

【0073】

ここでは、光学モジュールの一実施例として、図 15 に示す光学モジュール 5 について説明する。図 15 において、回折光学素子 1 は、偏向機能を有するレリーフ構造にサブ波長構造が形成されており、可視光全域で高い回折効率を有する回折光学素子となっている。この構造の回折光学素子 1 の直後にレンズ 2 を設置し、集光点において受光素子（例えばラインセンサー）3 が配置されている。これによって、複数の波長を有する入射光 4 は高い利用効率で分光され、ラインセンサー 3 上に波長ごとに異なる位置で集光される。このように、光利用効率が高い波長域で高く、小型で、分光機能を有する光学モジュール 5 を実現することができる。

10

【0074】

なお、図 15 は光学モジュールの一例であり、この構成に限るものではなく、実施例 1 ~ 7 で説明した回折光学素子と、少なくとも 1 枚以上のレンズと、受光素子とを適宜組み合わせることにより、様々な機能を持った光学モジュールを構成することができる。

また、実施例 1 ~ 7 で説明した回折光学素子や、それを用いた光学モジュールは、撮像光学系、投影光学系、画像処理装置などの各種の光学機器に応用することができる。

20

【図面の簡単な説明】

【0075】

【図 1】本発明に係る回折光学素子の 1 次元周期構造（サブ波長構造）の断面を模式的に表した断面図である。

【図 2】図 1 に示す回折光学素子のサブ波長構造における有効屈折率の波長依存性の例を示すグラフである。

【図 3】本発明の一実施例を示す回折光学素子の概略要部断面図である。

【図 4】図 3 に示す回折光学素子の構造における回折効率の理論計算値の波長依存性を示すグラフである。

【図 5】本発明の別の実施例を示す回折光学素子の概略要部断面図である。

30

【図 6】本発明に係る回折光学素子のレリーフ構造の別形態を模式的に示す概略要部斜視図である。

【図 7】本発明のさらに別の実施例を示す図であって、(a) は回折光学素子の概略要部斜視図、(b) は回折光学素子の概略要部断面図である。

【図 8】本発明のさらに別の実施例を示す回折光学素子の概略要部斜視図である。

【図 9】本発明のさらに別の実施例を示す回折光学素子の概略要部断面図である。

【図 10】本発明のさらに別の実施例を示す図であって、(a) は回折レンズとして機能する回折光学素子の概略要部断面図、(b) は (a) の回折レンズに屈折レンズを組合わせた回折光学素子の概略要部断面図である。

【図 11】本発明のさらに別の実施例を示す回折光学素子の概略要部断面図である。

40

【図 12】本発明のさらに別の実施例を示す図であって、(a) は計算機合成ホログラムパターンからなるレリーフ構造の深さを階調にして表した図であり、(b) は (a) によって表されるレリーフ構造に単一波長の光を通した際に再生される光のパターンを示した図である。

【図 13】本発明のさらに別の実施例を示す図であって、(a) はサブ波長構造の上に単層膜を設けた回折光学素子の概略要部断面図、(b) はサブ波長構造の上に多層膜を設けた回折光学素子の概略要部断面図である。

【図 14】本発明の回折光学素子の作製方法の一例を示す図であって、(a) は型の構造を転写材に転写する作製工程の手順を示す図、(b) は (a) の作製工程で使用される型の作製工程の手順を示す図である。

50

【図 1 5】本発明のさらに別の実施例を示す光学モジュールの概略断面図である。

【図 1 6】従来の回折光学素子の構造の一例を示す概略要部断面図である。

【図 1 7】図 1 6 に示す従来の回折光学素子における回折効率の波長依存性を示すグラフである。

【図 1 8】従来の回折光学素子の構造の別の例を示す概略要部断面図である。

【符号の説明】

【0076】

1 : 偏向機能を有する回折光学素子

2 : レンズ

3 : 受光素子 (ラインセンサー)

10

4 : 複数の波長を有する光

5 : 光学モジュール

101 : 回折光学素子

102 : 微細周期構造 (サブ波長構造)

201 : 回折光学素子

202 : 階段状の表面レリーフ構造

203 : サブ波長構造

204 : 先端が徐々に細くなった構造

301 : 回折光学素子

302 : 鋸歯状のレリーフ構造

20

303 : サブ波長構造

401 : 回折光学素子

402 : 凹凸が周期的でないレリーフ構造

501 : 回折光学素子

502 : 円状ホールアレイ

601 : 回折光学素子

602 : ピラー形状の周期構造

701 : 回折レンズ形状を有する回折光学素子

702 : 同心円状のレリーフ構造

703 : サブ波長構造

30

704 : 曲面 (レンズ面)

801 : 回折光学素子

802 : 周期構造のレリーフ構造

803 : サブ波長構造

901 : 回折光学素子

902 : サブ波長構造

903 : 単層の薄膜 (単層膜)

904 : 多層膜

1101 : 型

1102 : 転写材

40

1103 : 回折光学素子

1201 : 基板

1202 : レジスト材料

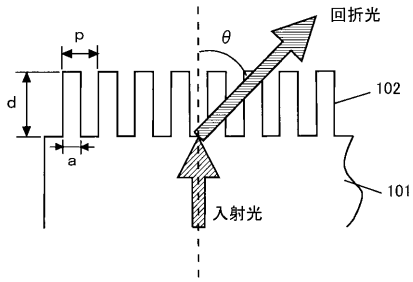
1203 : 電子線

1204 : レジスト

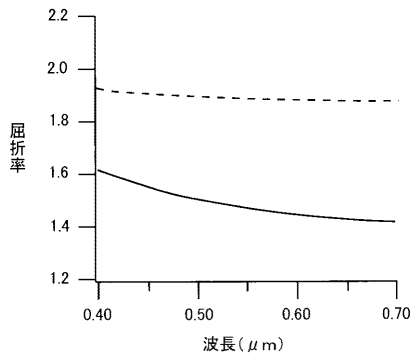
1205 : 金属膜

1206 : 金属型

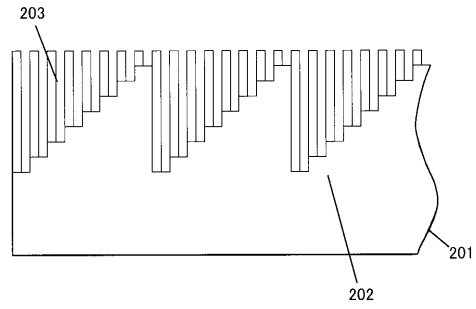
【 図 1 】



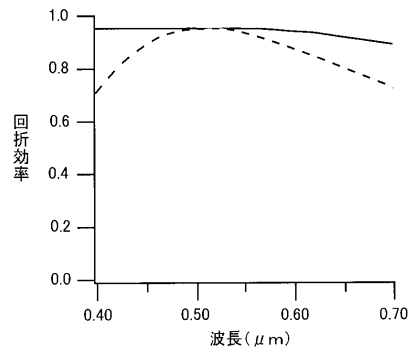
【 図 2 】



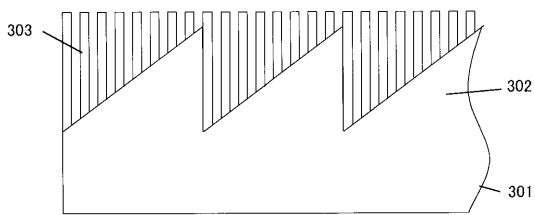
【 図 3 】



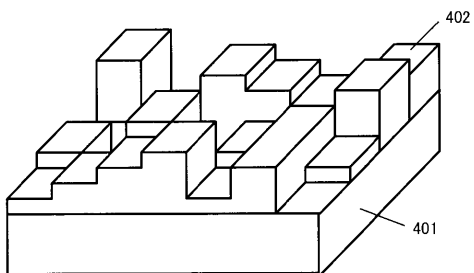
【 図 4 】



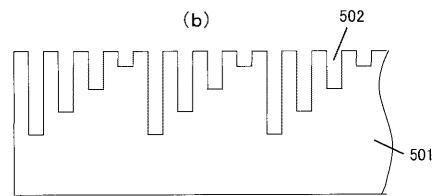
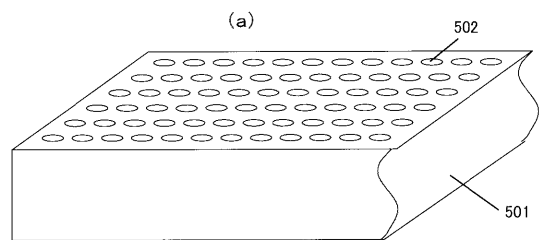
【 図 5 】



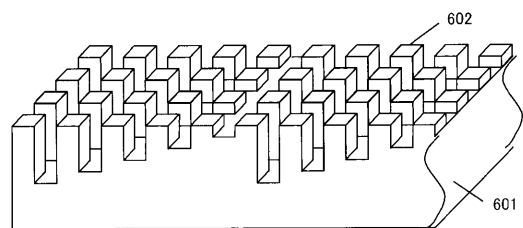
【 図 6 】



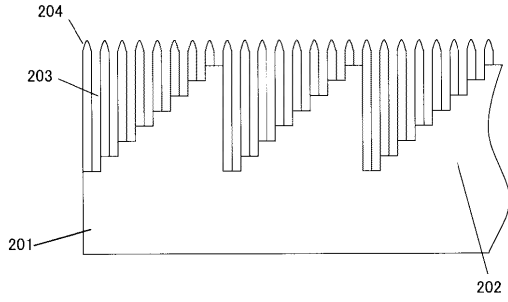
【 図 7 】



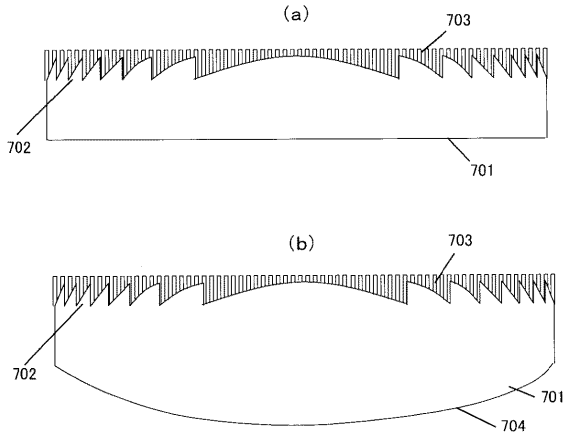
【 図 8 】



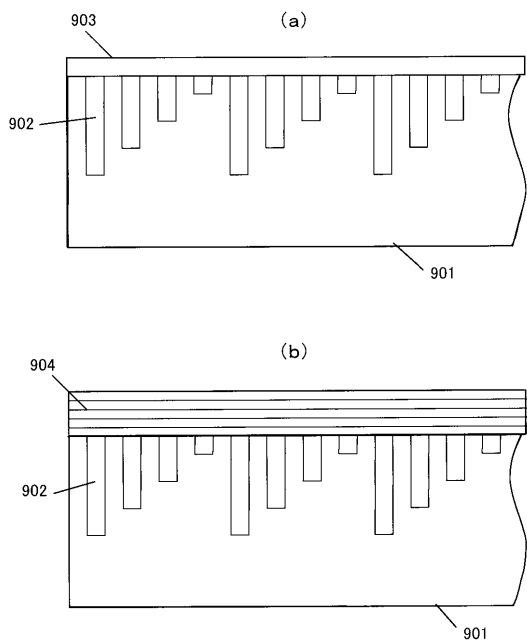
【図 9】



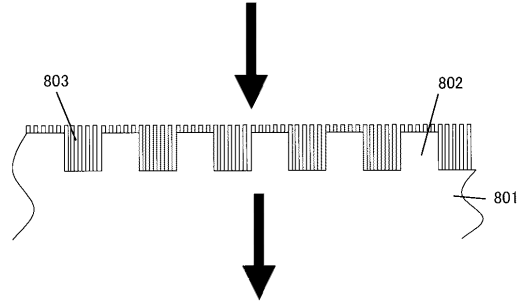
【図 10】



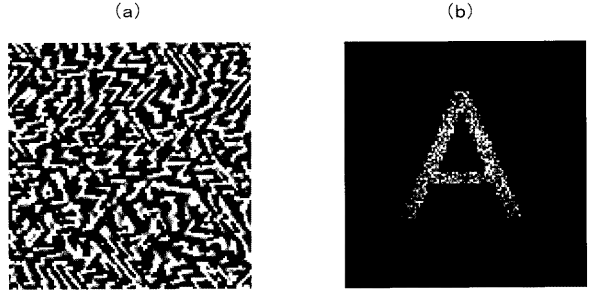
【図 13】



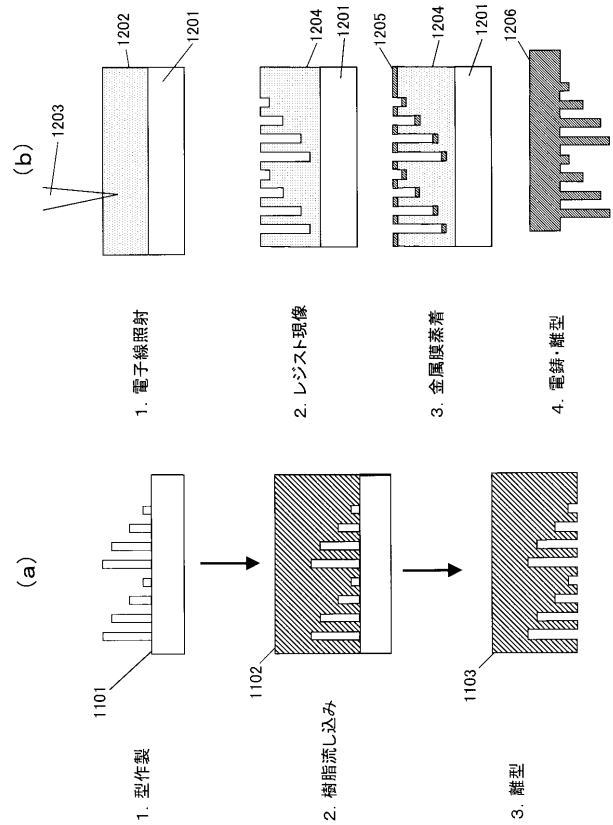
【図 11】



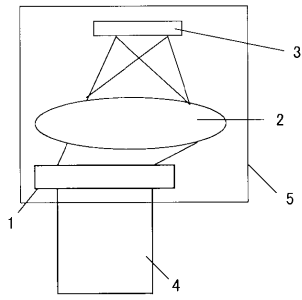
【図 12】



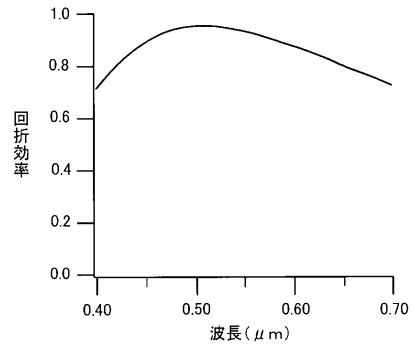
【図 14】



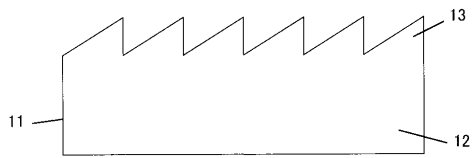
【 図 1 5 】



【 図 1 7 】



【 図 1 6 】



【 図 1 8 】

