

(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2019-120946
(P2019-120946A)

(43) 公開日 令和1年7月22日(2019.7.22)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
G02B 5/20 (2006.01)	G02B 5/20	2H148
F21V 9/00 (2018.01)	F21V 9/00 200	2H249
F21V 9/32 (2018.01)	F21V 9/32	4G062
G02B 5/18 (2006.01)	G02B 5/18	4H001
C09K 11/00 (2006.01)	C09K 11/00 D	
審査請求 未請求 請求項の数 20 O L (全 30 頁) 最終頁に続く		

(21) 出願番号 特願2018-243275 (P2018-243275)
 (22) 出願日 平成30年12月26日 (2018.12.26)
 (31) 優先権主張番号 特願2017-250731 (P2017-250731)
 (32) 優先日 平成29年12月27日 (2017.12.27)
 (33) 優先権主張国 日本国 (JP)

(71) 出願人 301021533
 国立研究開発法人産業技術総合研究所
 東京都千代田区霞が関1-3-1
 (71) 出願人 504132272
 国立大学法人京都大学
 京都府京都市左京区吉田本町36番地1
 (74) 代理人 110000796
 特許業務法人三枝国際特許事務所
 (72) 発明者 篠崎 健二
 大阪府池田市緑丘1-8-31 国立研究
 開発法人産業技術総合研究所内
 (72) 発明者 三原 敏行
 大阪府池田市緑丘1-8-31 国立研究
 開発法人産業技術総合研究所内

最終頁に続く

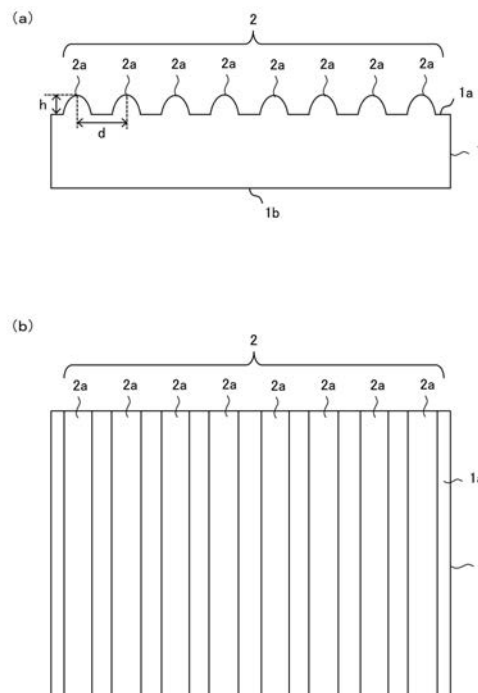
(54) 【発明の名称】 ガラス蛍光体および照明装置

(57) 【要約】 (修正有)

【課題】厚みを大きくすることなく、発光効率の高いガラス蛍光体を提供する。

【解決手段】光の回折現象を利用して、入射光の光路長を増やすことで、ガラス蛍光体の発光効率を高める。波長が (350nm ~ 470nm) の光を照射すると蛍光を発するガラス蛍光体1であって、外面の少なくとも一部に、光を回折させる回折構造2が形成されている。回折構造2は、所定の方に配列された複数の突条である。光の波長が λ であり、前記突条の間隔dは $0.75 \times \lambda < d < 2.00 \times \lambda$ である。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

波長が (3 5 0 n m 4 7 0 n m) の光を照射すると蛍光を発するガラス蛍光体であって、

外面の少なくとも一部に、光を回折させる回折構造が形成されている、ガラス蛍光体。

【請求項 2】

前記ガラス蛍光体は平板形状であり、

前記回折構造は、前記平板形状のガラス蛍光体の少なくとも一方の平板面に形成されている、請求項 1 に記載のガラス蛍光体。

【請求項 3】

前記回折構造は、前記平板形状のガラス蛍光体の両方の平板面に形成されている、請求項 2 に記載のガラス蛍光体。

【請求項 4】

前記回折構造は、所定の方向に配列された複数の突条である、請求項 1 ~ 3 のいずれかに記載のガラス蛍光体。

【請求項 5】

前記光の波長が であり、

前記突条の間隔 d は $0.75 \times d$ $2.00 \times$ である、請求項 4 に記載のガラス蛍光体。

【請求項 6】

前記光の波長が であり、

前記突条の間隔 d は $0.90 \times d$ である、請求項 5 に記載のガラス蛍光体。

【請求項 7】

前記光の波長が 4 0 0 n m ~ 4 1 0 n m であり、

前記突条の間隔は 3 0 0 n m ~ 8 0 0 n m である、請求項 4 に記載のガラス蛍光体。

【請求項 8】

前記光の波長が 4 0 0 n m ~ 4 1 0 n m であり、

前記突条の間隔は 3 6 5 n m ~ 4 0 5 n m である、請求項 7 に記載のガラス蛍光体。

【請求項 9】

前記光の波長が 4 5 0 ~ 4 7 0 n m であり、

前記突条の間隔は 3 4 0 n m ~ 9 0 0 n m である、請求項 4 に記載のガラス蛍光体。

【請求項 10】

前記光の波長が 4 5 0 ~ 4 7 0 n m であり、

前記突条の間隔は 4 0 5 n m ~ 4 5 0 n m である、請求項 9 に記載のガラス蛍光体。

【請求項 11】

請求項 1 ~ 10 のいずれかに記載のガラス蛍光体と、

前記ガラス蛍光体に前記光を照射する光源と、を備えた、照明装置。

【請求項 12】

前記光の波長が であり、

回折次数が m であり、

前記ガラス蛍光体の周囲媒体の屈折率が n_0 であり、

前記ガラス蛍光体の屈折率が n_1 であり、

前記光が入射する平板面に前記突条が形成されており、

前記光が入射する前記平板面に対する角度(°)が、

【数 1】

$$\arcsin \left(1 - \frac{m\lambda}{n_0 d} \right)$$

以上である、請求項 11 に記載の照明装置。

【請求項 13】

10

20

30

40

50

前記光の波長が λ であり、
 回折次数が m であり、
 前記ガラス蛍光体の周囲媒体の屈折率が n_0 であり、
 前記ガラス蛍光体の屈折率が n_1 であり、
 前記光が入射する平板面、または前記平板面の反対側の平板面に前記突条が形成されて
 おり、
 前記光が入射する前記平板面に対する角度が垂直であり、
 前記突条の間隔 d が、

【数 2】

$$\frac{m\lambda}{n_0}$$

10

以下である、請求項 1 1 に記載の照明装置。

【請求項 1 4】

前記光の波長が λ であり、
 回折次数が m であり、
 前記ガラス蛍光体の周囲媒体の屈折率が n_0 であり、
 前記光が入射する平板面の反対側の平板面に前記突条が形成されており、
 前記光が前記ガラス蛍光体から出射する前記平板面に対する角度 ($^\circ$) が、

【数 3】

$$\arcsin\left(\frac{n_0}{n_1} - \frac{m\lambda}{n_1 d}\right)$$

20

以上である、請求項 1 1 に記載の照明装置。

【請求項 1 5】

前記光が入射する前記平板面に対する角度 ($^\circ$) が、
 $\arcsin(1 - m / n_0 d)$ である、請求項 1 2 または 1 4 に記載の照明装置。

【請求項 1 6】

前記光の波長が $400 \text{ nm} \sim 410 \text{ nm}$ であり、
 前記光が入射する平板面に前記突条が $250 \text{ nm} \sim 700 \text{ nm}$ の間隔で形成されており

30

、
 前記光の入射方向の前記平板面に平行な成分が、前記突条の長手方向に垂直であり、
 前記光が入射する前記平板面に対する角度が $0^\circ \sim 33^\circ$ である、請求項 1 1 に記載の
 照明装置。

【請求項 1 7】

前記光の波長が $400 \text{ nm} \sim 410 \text{ nm}$ であり、
 前記光が入射する平板面に前記突条が $900 \text{ nm} \sim 2000 \text{ nm}$ の間隔で形成されてお
 り、

40

前記光の入射方向の前記平板面に平行な成分が、前記突条の長手方向に垂直であり、
 前記光が入射する前記平板面に対する角度が $33^\circ \sim 54^\circ$ である、請求項 1 1 に記載
 の照明装置。

【請求項 1 8】

前記光の波長が $400 \text{ nm} \sim 410 \text{ nm}$ であり、
 前記光が入射する平板面に前記突条が形成されており、
 前記光の入射方向の前記平板面に平行な成分が、前記突条の長手方向に平行であり、
 前記光が入射する前記平板面に対する角度が $30^\circ \sim 80^\circ$ である、請求項 1 1 に記載
 の照明装置。

【請求項 1 9】

前記光の波長が $400 \text{ nm} \sim 410 \text{ nm}$ であり、

50

前記光が入射する平板面と反対側の平板面に前記突条が250nm～2000nmの間隔で形成されており、

前記光の入射方向の前記平板面に平行な成分が、前記突条の長手方向に垂直であり、前記光が入射する前記平板面に対する角度が0°～32°である、請求項11に記載の照明装置。

【請求項20】

前記光の波長が400nm～410nmであり、

前記光が入射する平板面と反対側の平板面に前記突条が形成されており、

前記光の入射方向の前記平板面に平行な成分が、前記突条の長手方向に平行であり、

前記光が入射する前記平板面に対する角度が30°～80°である、請求項11に記載の照明装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、光の波長を変換する波長変換部材に用いられるガラス蛍光体に関する。

【背景技術】

【0002】

白色LEDやプロジェクタなどの照明部材および表示部材などでは、青色LEDあるいは紫外LEDなどの励起光源からの光を、蛍光体を含む波長変換部材に照射して波長を変換することにより、所望の色を得る方法が広く用いられている。現行の波長変換部材としては、結晶蛍光体粉末を樹脂に分散ないし塗布（成膜）したものが広く用いられている。しかし、そのような波長変換部材では、より明るい光を得るため高出力化すると、励起光源の発熱や光による加熱により樹脂が劣化しやすく、透明性、放熱性に乏しいことから、高出力の励起光源には適さない。また、単結晶や透明セラミックスを用いた蛍光部材も存在するが、コストが高く、加工が難しいという問題がある。

【0003】

これに対し、透明性、高耐候性、放熱性において現行の波長変換部材より優位なガラス蛍光体が注目されている（例えば、特許文献1）。ガラス蛍光体は、所望の形状に加工しやすい点で、単結晶や透明セラミックスを用いた蛍光部材に対しても優位性がある。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【特許文献1】特開2016-138020号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

しかし、ガラス蛍光体を薄くすると、光の吸収率が低くなり、外部量子効率（入射光強度と蛍光強度の比）が小さいため、十分な変換効率が得られないという問題がある。

【0006】

具体的には、蛍光の外部量子効率（ E_X ）は以下の式（1）から計算される。

$$E_X = I_{EM} / I_{EX} \quad (1)$$

I_{EM} ：蛍光光子数

I_{EX} ：照射光子数

内部量子効率（ I_N ）は、吸収光子数を I_{ABS} とすると、

$$I_N = I_{EM} / I_{ABS} \quad (2)$$

となる。ここで、透過率を T とすると、

$$I_{ABS} = I_{EX} \cdot (1 - T) \quad (3)$$

であるので、式（1）～（3）より、

$$E_X = \frac{I_N \cdot I_{ABS}}{I_{EX}} = \frac{I_N \cdot I_{EX} \cdot (1 - T)}{I_{EX}} = I_N \cdot (1 - T) \quad (4)$$

10

20

30

40

50

となる。式(4)より、透過率を低減すれば外部量子効率に内部量子効率に漸近することが分かる。Lambert-Beer則より、下記式が成立する。

$$1 - T = 1 - I_1 / I_{EX} - I_r / I_{EX} - I_s / I_{EX} \\ = 1 - \exp(-acl) - I_r / I_{EX} - I_s / I_{EX}$$

I_1 : 透過光強度

I_r : 反射光強度

I_s : 散乱光強度

a : モル吸光係数

c : 吸収イオンの濃度

l : 光路長

【0007】

内部量子効率の高いガラス蛍光体は幾つか報告されているが、吸光係数が低いことによって透過率が大きくなり、外部量子効率を高くすることができないという問題がある。本明細書では、透明なガラスを想定しているので、 I_s はほとんど無視できるとする。外部量子効率を高めるためのアプローチとしては、

- ・光路長、吸収イオン濃度、モル吸光係数のいずれかを増大させることによる吸収量の増大

- ・反射光強度の低減

が挙げられる。

【0008】

まず、吸収量の増大について、モル吸光係数(a)は、賦活イオンとホストで決まるので、変化させることができるパラメータは吸収イオンの濃度(c)である。しかし、吸収イオンの濃度(c)を上げると、濃度消光が起きて内部量子効率が激減するので有効なアプローチではない。

【0009】

次に、反射光強度の低減について、ガラス蛍光体やガラスセラミック蛍光体に反射防止構造を付与することで、反射によって失われる光を低減する技術は存在する。反射率(R)は以下の式により計算される。

$$R = (n_1 - n_0)^2 / (n_1 + n_0)^2 \quad (1)$$

n_0 : 周囲媒体の屈折率

n_1 : ガラス蛍光体の屈折率

よって、 I_r / I_{EX} は屈折率(n)に依存するが、 $n_0 = 1.0$ (空気)とすると、ガラスの屈折率は $n_1 = 1.5 \sim 2.0$ 程度であるため、この範囲であれば I_r / I_{EX} は0.2を越えることはない。そのため、反射光強度の低減効果だけでは、外部量子効率は、せいぜい20%強の増強しか見込めない。

【0010】

以上のように、ガラス蛍光体を実用的な厚みに加工すると、既存の結晶蛍光体に匹敵する蛍光強度を得ることはできないという問題がある。

【0011】

本発明は、上記問題を解決するためになされたものであって、厚みを大きくすることなく、発光効率の高いガラス蛍光体を提供することを課題とする。

【課題を解決するための手段】

【0012】

本発明者らは、鋭意研究を重ねた結果、光の回折現象を利用して、入射光の光路長を増やすことで、ガラス蛍光体の発光効率を高めることができることを見出した。

【0013】

本発明はかかる知見に基づいて完成したものであり、下記の態様を有する。

項1.

波長が (350 nm ~ 470 nm) の光を照射すると蛍光を発するガラス蛍光体であって、

10

20

30

40

50

外面の少なくとも一部に、光を回折させる回折構造が形成されている、ガラス蛍光体。

項 2 .

前記ガラス蛍光体は平板形状であり、

前記回折構造は、前記平板形状のガラス蛍光体の少なくとも一方の平板面に形成されている、項 1 に記載のガラス蛍光体。

項 3 .

前記回折構造は、前記平板形状のガラス蛍光体の両方の平板面に形成されている、項 2 に記載のガラス蛍光体。

項 4 .

前記回折構造は、所定の方向に配列された複数の突条である、項 1 ~ 3 のいずれかに記載のガラス蛍光体。

項 5 .

前記光の波長が λ であり、

前記突条の間隔 d は $0.75 \times d < \lambda < 2.00 \times d$ である、項 4 に記載のガラス蛍光体。

項 6 .

前記光の波長が λ であり、

前記突条の間隔 d は $0.90 \times d < \lambda < d$ である、項 5 に記載のガラス蛍光体。

項 7 .

前記光の波長が $400 \text{ nm} \sim 410 \text{ nm}$ であり、

前記突条の間隔は $300 \text{ nm} \sim 800 \text{ nm}$ である、項 4 に記載のガラス蛍光体。

項 8 .

前記光の波長が $400 \text{ nm} \sim 410 \text{ nm}$ であり、

前記突条の間隔は $365 \text{ nm} \sim 405 \text{ nm}$ である、項 7 に記載のガラス蛍光体。

項 9 .

前記光の波長が $450 \sim 470 \text{ nm}$ であり、

前記突条の間隔は $340 \text{ nm} \sim 900 \text{ nm}$ である、項 4 に記載のガラス蛍光体。

項 10 .

前記光の波長が $450 \sim 470 \text{ nm}$ であり、

前記突条の間隔は $405 \text{ nm} \sim 450 \text{ nm}$ である、項 9 に記載のガラス蛍光体。

項 11 .

項 1 ~ 10 のいずれかに記載のガラス蛍光体と、

前記ガラス蛍光体に前記光を照射する光源と、を備えた、照明装置。

項 12 .

前記光の波長が λ であり、

回折次数が m であり、

前記ガラス蛍光体の周囲媒体の屈折率が n_0 であり、

前記ガラス蛍光体の屈折率が n_1 であり、

前記光が入射する平板面に前記突条が形成されており、

前記光が入射する前記平板面に対する角度 ($^\circ$) が、

【数 1】

$$\arcsin \left(1 - \frac{m\lambda}{n_0 d} \right)$$

以上である、項 11 に記載の照明装置。

項 13 .

前記光の波長が λ であり、

回折次数が m であり、

前記ガラス蛍光体の周囲媒体の屈折率が n_0 であり、

前記ガラス蛍光体の屈折率が n_1 であり、

10

20

30

40

50

前記光が入射する平板面、または前記平板面の反対側の平板面に前記突条が形成されており、

前記光が入射する前記平板面に対する角度が垂直であり、

前記突条の間隔 d が、

【数 2】

$$\frac{m\lambda}{n_0}$$

以下である、項 1 1 に記載の照明装置。

項 1 4 .

10

前記光の波長が λ であり、

回折次数が m であり、

前記ガラス蛍光体の周囲媒体の屈折率が n_0 であり、

前記光が入射する平板面の反対側の平板面に前記突条が形成されており、

前記光が前記ガラス蛍光体から出射する前記平板面に対する角度 ($^\circ$) が、

【数 3】

$$\arcsin\left(\frac{n_0}{n_1} - \frac{m\lambda}{n_1 d}\right)$$

20

以上である、項 1 1 に記載の照明装置。

項 1 5 .

前記光が入射する前記平板面に対する角度 ($^\circ$) が、

$\arcsin(1 - m / n_0 d)$ である、項 1 2 または 1 4 に記載の照明装置。

項 1 6 .

前記光の波長が $400 \text{ nm} \sim 410 \text{ nm}$ であり、

前記光が入射する平板面に前記突条が $250 \text{ nm} \sim 700 \text{ nm}$ の間隔で形成されており、

前記光の入射方向の前記平板面に平行な成分が、前記突条の長手方向に垂直であり、

前記光が入射する前記平板面に対する角度が $0^\circ \sim 33^\circ$ である、項 1 1 に記載の照明装置。

30

項 1 7 .

前記光の波長が $400 \text{ nm} \sim 410 \text{ nm}$ であり、

前記光が入射する平板面に前記突条が $900 \text{ nm} \sim 2000 \text{ nm}$ の間隔で形成されており、

前記光の入射方向の前記平板面に平行な成分が、前記突条の長手方向に垂直であり、

前記光が入射する前記平板面に対する角度が $33^\circ \sim 54^\circ$ である、項 1 1 に記載の照明装置。

項 1 8 .

前記光の波長が $400 \text{ nm} \sim 410 \text{ nm}$ であり、

40

前記光が入射する平板面に前記突条が形成されており、

前記光の入射方向の前記平板面に平行な成分が、前記突条の長手方向に平行であり、

前記光が入射する前記平板面に対する角度が $30^\circ \sim 80^\circ$ である、項 1 1 に記載の照明装置。

項 1 9 .

前記光の波長が $400 \text{ nm} \sim 410 \text{ nm}$ であり、

前記光が入射する平板面と反対側の平板面に前記突条が $250 \text{ nm} \sim 2000 \text{ nm}$ の間隔で形成されており、

前記光の入射方向の前記平板面に平行な成分が、前記突条の長手方向に垂直であり、

前記光が入射する前記平板面に対する角度が $0^\circ \sim 32^\circ$ である、項 1 1 に記載の照明装置。

50

装置。

項 2 0 .

前記光の波長が 4 0 0 n m ~ 4 1 0 n m であり、

前記光が入射する平板面と反対側の平板面に前記突条が形成されており、

前記光の入射方向の前記平板面に平行な成分が、前記突条の長手方向に平行であり、

前記光が入射する前記平板面に対する角度が 3 0 ° ~ 8 0 ° である、項 1 1 に記載の照明装置。

【発明の効果】

【 0 0 1 4 】

本発明によれば、入射光の光路長を増やすことで、ガラス蛍光体の発光効率を高めることができる。

10

【図面の簡単な説明】

【 0 0 1 5 】

【図 1】(a) は、本発明の実施形態に係るガラス蛍光体の断面図であり、図 1 (b) は、当該ガラス蛍光体の平面図である。

【図 2】図 1 (a) に示すガラス蛍光体の部分拡大断面図である。

【図 3】(a) は、屈折率 $n_1 = 1.62$ のガラス蛍光体における、回折光 $L d 1$ (s 偏光) の回折角 と反射率との関係を示すグラフであり、(b) は、入射光の波長 が 4 0 5 (n m) である場合の、回折角と突条の間隔との関係を示すグラフである。

【図 4】(a) ~ (c) は、ガラス蛍光体の製造工程を示す概略図である。

20

【図 5】(a) および (b) は、ガラス蛍光体の変形例を示す断面図である。

【図 6】図 5 (a) に示すガラス蛍光体の部分拡大断面図である。

【図 7】本発明の実施形態に係る照明装置の概略図である。

【図 8】照明装置の変形例である。

【図 9】(a) は、本発明の実施例に係るガラス蛍光体の写真であり、(b) は、当該ガラス蛍光体における回折構造の構造を原子間力顕微鏡 (A F M) で撮影した画像であり、(c) は、当該回折構造の断面形状を示す曲線である。

【図 1 0】(a) は、白色光を照射したときのデジタルカメラの画像であり、(b) は、U V 光を照射したときの前記デジタルカメラの画像である。

【図 1 1】(a) は、間隔 $d = 5 0 0$ n m のガラス蛍光体に波長 4 0 5 n m のレーザ光を入射角 $\theta_i = 5^\circ$ で照射したときの写真であり、(b) は、当該ガラス蛍光体からの出射光の周波数スペクトルである。

30

【図 1 2】突条の間隔と蛍光強度との関係を検証するための実験の概略図である。

【図 1 3】突条の間隔と蛍光強度との関係を示すグラフである。

【図 1 4】入射角と蛍光強度との関係を検証するための実験の概略図である。

【図 1 5】入射角と蛍光強度との関係を示すグラフである。

【図 1 6】入射角と蛍光強度との関係を検証するための実験の概略図である。

【図 1 7】入射角と蛍光強度との関係を示すグラフである。

【図 1 8】入射面だけに回折構造が形成されたガラス平板に、波長 4 0 5 n m の s 偏光を垂直に入射させた場合の、透過光、透過方向への回折光、およびそれらの合計の強度と、突条の間隔との関係を示すグラフである。

40

【図 1 9】反対面だけに回折構造が形成されたガラス平板に、波長 4 0 5 n m の s 偏光を垂直に入射させた場合の、透過光、透過方向への回折光、およびそれらの合計の強度と、突条の間隔との関係を示すグラフである。

【図 2 0】反対面だけに回折構造が形成されたガラス平板に、波長 6 2 0 n m の s 偏光を垂直に入射させた場合の、透過光、透過方向への回折光、およびそれらの合計の強度と、突条の間隔との関係を示すグラフである。

【図 2 1】図 1 3 のグラフと図 1 8 のグラフとを重ねたものである。

【図 2 2】間隔の異なる突条が入射面に形成された各ガラス平板に、波長 4 0 5 n m の s 偏光を入射させた場合の、透過光、透過方向への回折光、およびそれらの合計の強度と、

50

入射角との関係を示すグラフである。

【図 2 3】高さの異なる突条が入射面に形成されたガラス平板に、波長 4 0 5 n m の s 偏光を入射させた場合の、ピークトップ角度と突条の間隔との関係を示すグラフである。

【図 2 4】間隔の異なる突条が反対面に形成された各ガラス平板に、波長 4 0 5 n m の s 偏光を入射させた場合の、透過光、透過方向への回折光、およびそれらの合計の強度と、入射角との関係を示すグラフである。

【図 2 5】高さの異なる突条が反対面に形成されたガラス平板に、波長 4 0 5 n m の s 偏光を入射させた場合の、ピークトップ角度と突条の間隔との関係を示すグラフである。

【図 2 6】ガラス蛍光体の反対面における光の電場分布シミュレーション結果を示す図である。

【図 2 7】入射面のみに回折構造が形成された屈折率の異なるガラス平板に、波長 4 5 0 n m の s 偏光を垂直に入射させた場合の、入射光への回折効率と突条の間隔との関係を示すグラフである。

【図 2 8】反対面のみに回折構造が形成された屈折率の異なるガラス平板に、波長 4 5 0 n m の s 偏光を垂直に入射させた場合の、出射光への回折効率と突条の間隔との関係を示すグラフである。

【図 2 9】入射面のみに回折構造が形成されたガラス平板に、波長 4 0 5 n m の s 偏光を垂直に入射させた場合の、回折効率と突条の間隔との関係を示すグラフである。

【図 3 0】反対面のみに回折構造が形成されたガラス平板に、波長 4 0 5 n m の s 偏光を垂直に入射させた場合の、回折効率と突条の間隔との関係を示すグラフである。

【図 3 1】(a) および (b) は、ガラス蛍光体の変形例を示す断面図および底面図である。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 1 6 】

以下、本発明の一実施形態について添付図面を参照して説明する。なお、本発明は、下記の実施形態に限定されるものではない。

【 0 0 1 7 】

(ガラス蛍光体の構成)

図 1 (a) は、本実施形態に係るガラス蛍光体 1 の断面図であり、図 1 (b) は、ガラス蛍光体 1 の平面図である。ガラス蛍光体 1 は、発光中心を含んでおり、通常、1 . 5 ~ 2 . 0 程度の屈折率を有する。発光中心としては、例えば E u , C e などの希土類イオンや C u などの遷移金属イオン、S n などの重金属イオンを含有した酸化物ガラスやフッ化物ガラスが挙げられる。これにより、ガラス蛍光体 1 は、波長が (本実施形態では、3 5 0 n m ~ 4 7 0 n m) の光を照射すると蛍光を発する。

【 0 0 1 8 】

さらにガラス蛍光体 1 は、外面の少なくとも一部に、光を回折させる回折構造 2 が形成されている。ガラス蛍光体 1 の形状および大きさは特に限定されないが、本実施形態では平面視矩形の平板形状であり、回折構造 2 はガラス蛍光体 1 の少なくとも一方の平板面に形成されている。図 1 (a) に示すように、回折構造 2 は、光が入射する入射面 1 a に形成されており、所定の方向 (図 1 において左右方向) に配列された複数の突条 2 a である。突条 2 a の個数は特に限定されないが、通常は、多数 (数万 ~ 数十万個) 形成される。突条 2 a の断面形状は特に限定されないが、本実施形態では、断面の外形が正弦曲線と近似している。

【 0 0 1 9 】

突条 2 a の間隔 d は、隣り合う突条 2 a の中心間の距離 (図 1 a 参照) である。間隔 d は、光の回折現象が生じるのであれば、特に限定されないが、光の波長が $0 . 7 5 \times d \sim 2 . 0 0 \times d$ であることが好ましく、 $0 . 9 0 \times d \sim 2 . 0 0 \times d$ であることがさらに好ましい。また、複数の波長の光が混ざっている白色光等の波長は、ピーク波長、あるいは光のエネルギーの 3 0 % 以上の成分を含む波長と定義する。例えば、光の波長が 4 0 0 n m ~ 4 1 0 n m である場合、3 0 0 n m < d < 8 0 0 n m であることが好ま

10

20

30

40

50

しく、365 nm d 405 nmであることが特に好ましい。また、光の波長が450 nm~470 nmである場合、340 nm d 900 nmであることが好ましく、405 nm d 450 nmであることが特に好ましい。

【0020】

突条2aの高さhは、光の回折現象に影響を与えない限り特に限定されず、例えば、間隔dの数分の1程度である。

【0021】

(光の挙動)

図2は、図1(a)に示すガラス蛍光体1の部分拡大断面図であり、ガラス蛍光体1の入射面1aに光Lin(波長)が入射した場合の、光の挙動を示している。光Lin(波長)は、ガラス蛍光体1に入射する際に、複数の突条2aによって、回折光Ld1(波長)および透過光Lt(波長)となる。透過光Lt(波長)の一部は、入射面の反対面1bにおいて反射する(反射光Lr1(波長))。また、回折光Ld1(波長)については、回折角(回折光Ld1(波長)と透過光Lt(波長)との角度)がガラス蛍光体1の臨界角以上である場合、回折光Ld1(波長)は、ガラス蛍光体1の界面において突条がない場合は全反射、突条がある場合は高い反射率で反射を繰り返すので、光路長が著しく増大する。これにより、外部量子効率が高くなり、ガラス蛍光体1の厚みを大きくすることなく、ガラス蛍光体1の発光効率を高めることができる。

10

【0022】

ガラス蛍光体1の臨界角 c(deg.)は、ガラス蛍光体1の屈折率をn1、空気の屈折率をn0とすると、

20

【数4】

$$\sin \theta_c = n_0 / n_1$$

により与えられる。例えば、n1 = 1.62、n0 = 1.00とすると、 c = 39(deg.)である。

【0023】

図3(a)は、屈折率n1 = 1.62のガラス蛍光体1における、回折光Ld1(s偏光)の回折角 と反射率との関係を示すグラフである。回折角 が臨界角である39(deg.)以上であれば、反射率が1(全反射)になり、光路長が著しく増大するため好ましい。一方で、 > cであっても、 が大きいほど反射角が小さくなるので、ガラス蛍光体1の単位面積あたりの反射回数が小さくなり、その結果、光路長が小さくなる。よって、 は cより大きく、かつ、 cに近いほど発光量が大きい。

30

【0024】

また、突条2aの間隔をd、回折光Ld1(波長)の入射角を i、回折次数をmとすると、透過方向の回折角 tは、

【数5】

$$\frac{n_1}{\lambda} \sin(\theta_t) \cos(\phi_t) = \frac{n_0}{\lambda} \sin(\theta_i) \cos(\phi_i) + \frac{m}{d_x}$$
$$\frac{n_1}{\lambda} \sin(\theta_t) \cos(\phi_t) = \frac{n_0}{\lambda} \sin(\theta_i) \cos(\phi_i) + \frac{m'}{d_y}$$

40

- n0 : 周囲媒体の屈折率
- n1 : ガラス蛍光体の屈折率
- xi : 入射光の面直角度
- phi_i : 入射光の面内角度
- xt : 透過回折の面直角度
- phi_t : 透過回折の面内角度
- lambda : 波長

50

d_x : x 方向 (光の入射方向の入射面に平行な成分) の突条の間隔

d_y : y 方向の突条の間隔

m : 回折次数

m' : 回折次数

により与えられる。ここで、回折角 θ は透過方向と反射方向の両方に存在するので、これらを区別のため、透過方向の回折角を θ_t 、反射方向の回折角を θ_r とおいた。また、光がガラス蛍光体 1 から周囲媒体へ入射するときの反射方向の回折角 θ_r は、以下の式によって与えられる。

【数 6】

$$\frac{n_1}{\lambda} \sin(\theta_r) \cos(\phi_r) = \frac{n_1}{\lambda} \sin(\theta_i) \cos(\phi_i) + \frac{m}{d_x} \quad 10$$

$$\frac{n_1}{\lambda} \sin(\theta_r) \cos(\phi_r) = \frac{n_1}{\lambda} \sin(\theta_i) \cos(\phi_i) + \frac{m'}{d_y}$$

n_0 : 周囲媒体の屈折率

n_1 : ガラス蛍光体の屈折率

θ_i : 入射光の面直角度

ϕ_i : 入射光の面内角度

θ_t : 透過回折の面直角度

ϕ_t : 透過回折の面内角度

λ : 波長

d_x : x 方向 (光の入射方向の入射面に平行な成分) の突条の間隔

d_y : y 方向の突条の間隔

m : 回折次数

m' : 回折次数

また、レーザー光がガラス蛍光体 1 から周囲媒体へ出射するときの回折角は、以下の式によって与えられる。

【数 7】

$$\frac{n_0}{\lambda} \sin(\theta_t) \cos(\phi_t) = \frac{n_1}{\lambda} \sin(\theta_i) \cos(\phi_i) + \frac{m}{d_x} \quad 30$$

$$\frac{n_0}{\lambda} \sin(\theta_t) \cos(\phi_t) = \frac{n_1}{\lambda} \sin(\theta_i) \cos(\phi_i) + \frac{m'}{d_y}$$

【 0 0 2 5 】

回折角が臨界角を超える場合、回折光はガラス蛍光体内で反射を繰り返すため、見かけの光路長を顕著に増大させることができる。この時の条件は、前記突条が入射面にある場合は、〔数 4〕および〔数 5〕に示した式から、

【数 8】

$$\theta_i \geq \arcsin \left(1 - \frac{m\lambda}{n_0 d} \right)$$

として与えられる。すなわち、垂直入射の場合は、

【数 9】

$$d \leq \frac{m\lambda}{n_0}$$

として与えられる。また、前記突条が入射面の反対面にある場合、ガラス内部での反射方向の回折角 θ_i' が臨界角 θ_c 以上となり入射光を効果的に閉じ込めるときのガラス蛍光体 1 から周囲媒体への出射角 θ_i' は

【数 10】

$$\theta_i' \geq \arcsin\left(\frac{n_0}{n_1} - \frac{m\lambda}{n_1 d}\right)$$

として与えられる。すなわち、垂直出射の場合は、

【数 11】

$$d \leq \frac{m\lambda}{n_0}$$

である。

【0026】

図 3 (b) は、入射光 L_{in} の波長 λ が 405 (nm) である場合の、回折角と突条 2 a の間隔 d との関係を示すグラフである。同グラフにおける破線は、臨界角 θ_c ($= 39$ (deg.)) を示している。回折角が臨界角よりも大きければ (破線と曲線 (特に 1 次回折曲線) との交点に対応する間隔よりも d が小さければ)、回折光 L_{d1} はガラス蛍光体 1 を透過せずに内部で全反射を繰り返す。1 次回折 ($m = 1$) における、この時の全反射の条件は、透過面が空気 ($n_0 = 1$)、入射角 $\theta_i = 0$ (垂直入射) のとき、【数 4】 ~ 【数 8】 に示した式から、突条が入射面にある場合は、 $d \geq m\lambda / n_0$ となり、突条が入射面の反対面にある場合は、 $d \geq m\lambda / n_0 + \lambda$ となる。例えば、波長 $\lambda = 405$ (nm) でガラス蛍光体の屈折率が 1.62 のとき、突条が入射面にある場合は $d \geq 405$ (nm)、入射面の反対面にある場合は $d \geq 810$ (nm) であることが好ましいが、回折角が臨界角に近いほど反射率は高くなるので、 d がこれよりも多少大きくても、発光効率を高めることができる。なお、入射角 $\theta_i = 0$ の場合については、後述する。

【0027】

(ガラス蛍光体の製造方法)

本実施形態に係るガラス蛍光体 1 は、ナノインプリント成型加工によって製造することができる。図 4 (a) ~ (c) は、ガラス蛍光体 1 の製造工程を示す概略図である。

【0028】

まず、平板状のガラス蛍光体 1 1 を作製し、図 4 (a) に示すように、ガラス蛍光体 1 1 を 2 つの型 2 0, 3 0 の間に挟み込み、加熱する。型 2 0 には、多数の溝 2 1 が形成されているため、図 4 (b) に示すように、ガラス蛍光体 1 1 の一部が溝 2 1 に突出する。溝 2 1 によって、ガラス蛍光体 1 1 の一方面には、多数の突条が転写される。その後、型 2 0 および型 3 0 を取り外すことにより、図 4 (c) に示すように、多数の突条 2 a が形成されたガラス蛍光体 1 を製造することができる。

【0029】

なお、ガラス蛍光体 1 を製造する方法は、ナノインプリント成型加工に限定されず、例えば、電子線描画装置を用いて構造をレジストに描画した後にガラス蛍光体をエッチングする方法も可能である。しかし、量産性の観点では、ナノインプリント成型加工が望ましい。

【0030】

(ガラス蛍光体の変形例)

図 1 に示すガラス蛍光体 1 では、回折構造 2 が入射面 1 a のみに形成されているが、本発明はこれに限定されない。例えば、図 5 (a) に示すガラス蛍光体 1' のように、回折構造 2 が入射面 1 a の反対面 1 b のみに形成されてもよい。あるいは、図 5 (b) に示すガラス蛍光体 1'' のように、回折構造 2 が入射面 1 a および反対面 1 b の両面に形成されてもよい。

10

20

30

40

50

【0031】

図6は、図5(a)に示すガラス蛍光体1'の部分拡大断面図であり、ガラス蛍光体1'の入射面1aに光Linが入射した場合の、光の挙動を示している。光Linの大部分は入射後に透過光Ltとなり、その一部は入射面の反対面1bにおいて反射する(反射光Lr1)。また、反対面1bに複数の突条2aが形成されていることにより、透過光Ltが反射する際に、回折現象によって回折光Ld1が生じる。この回折光Ld1の回折角(回折光Ld1と透過光Ltとの角度)がガラス蛍光体1'の臨界角以上である場合は反射率が高いので特に効果大きい。このようにして、回折光Ld1は、ガラス蛍光体1'の界面において反射を繰り返すので、光路長が著しく増大する。これにより、外部量子効率が高くなり、ガラス蛍光体1'の厚みを大きくすることなく、ガラス蛍光体1'の発光効率を高めることができる。

10

【0032】

なお、図5(b)に示すガラス蛍光体1''では、図2および図6において説明した両方の挙動が生じるため、ガラス蛍光体1およびガラス蛍光体1'よりも発光効率を高めることができる。

【0033】

(入射角の調整)

上述の形態では、入射光をガラス蛍光体の入射面に対して垂直に入射させていたが、特に、入射光の指向性が強い場合、入射光をガラス蛍光体の入射面に対して傾斜させてもよい。後述の実施例で説明するように、入射光をガラス蛍光体の入射面に対して所定の範囲で傾斜させたほうが、入射光を垂直に入射させた場合よりも蛍光強度が大きくなる場合もある。

20

【0034】

図7は、本実施形態に係る照明装置10の概略図である。照明装置10は、ガラス蛍光体1、および、ガラス蛍光体1に光を照射する光源3を備えている。ガラス蛍光体1は、図1に示すものと同一であり、入射面1aのみに突条が形成されている。光源3は、レーザ光を出射するレーザ光源である。レーザ光の指向方向はガラス蛍光体1の入射面1aに対して傾斜しており、レーザ光の入射方向の入射面1aに平行な成分が、突条の長手方向に垂直となっている。このときのレーザ光と入射面1aとの角度を入射角 θ_i とする。

30

【0035】

照明装置10では、光源3からの光の波長が λ である場合、入射角 θ_i は、[数8]であることが好ましい。入射面1aのみに突条が形成されている場合、[数8]は、以下のよう導出される。

【0036】

レーザ光が周囲媒体からガラス蛍光体1へ入射するときの回折角は、[数4]の式によって与えられる。

【0037】

ここでは、突条が1次元であると仮定しているため、 $\theta_t = 0$ 、 $\theta_r = 0$ とする。また、 $d_y = \lambda$ とすると $\theta_r = \theta_t$ となり、回折しないので、突条の長さ方向の効果については無視する。回折角が臨界角を超えたとき光を閉じ込めることができるので、[数4]および[数5]から[数8]が導出される。さらに、反射方向の回折角が 90° となる条件のとき、反射方向に最大の回折を示すと仮定すると、回折効率が最大となる条件は[数9]となる。

40

【0038】

例えば、屈折率が1.62のときは臨界角 θ_c は 39° であるから、回折角 θ が 39° 以上の場合に光を好適に閉じ込めることができる。とくに、回折角が 90° となるとときに最大の回折効率を示すとすると、光源3からの光の波長が $400\text{ nm} \sim 410\text{ nm}$ で突条2aの間隔dが 500 nm のとき、 $\theta_{in} = 10^\circ \sim 50^\circ$ であることが好ましく、 $\theta_{in} = 13^\circ$ であることが特に好ましい。

【0039】

50

図8は、図7に示す照明装置10の変形例である照明装置10'の概略図である。照明装置10'は、照明装置10において、ガラス蛍光体1をガラス蛍光体1'に置き換えたものである。ガラス蛍光体1'は、図5(a)に示すものと同一であり、反対面1bのみに突条が形成されている。照明装置10'の他の構成は、照明装置10と同一である。

【0040】

照明装置10'では、光源3からの光の波長が n nmである場合、ガラス蛍光体からの出射角 θ_i' は、[数10]のとき回折光が臨界角を超えるため発光を増強するために好ましい。反対面1bのみに突条が形成されている場合、[数10]は、以下のように導出される。

【0041】

レーザ光がガラス蛍光体1から周囲媒体へ出射するときの反射方向の回折角は、[数8]の式によって与えられる。

【0042】

ここでは、突条が1次元であると仮定しているので、 $t = 0$ 、 $r = 0$ とする。また、 $d_y =$ とすると $r = t$ となり、回折しないので、突条の長さ方向の効果については無視する。透過方向の回折角が臨界角以上になる条件のとき、光の透過強度を著しく低減させるとすると、その条件は $t > c$ である。これを満たすガラス蛍光体1からの出射角は[数10]で与えられる。特に、垂直入射の場合、 θ_i を0とおいて、[数11]のように整理される。

【0043】

同様に、入射面の反対面に上記突条がある場合、見かけの光路長を顕著に増大させる入射角は[数8]で与えられる。特に、垂直入射の場合、 θ_i を0とおいて、[数9]のように整理される。

【0044】

ここでは、突条が1次元であると仮定しているので、 $t = 0$ 、 $r = 0$ とする。また、 $d_y =$ とすると $r = t$ となり、回折しないので、突条の長さ方向の効果については無視する。透過方向の回折角が臨界角を超える条件のとき、反射方向に最大の回折を示すと仮定すると、回折効率が最大となる条件が[数10]で与えられる。

【0045】

θ_i' は、ガラス蛍光体1の内部からの入射角であり、周囲媒体側からの入射方向に対してスネルの法則により屈折しており、周囲媒体側からの入射角 θ_i' ($= \theta_i$) は[数8]のように導出される。特に、垂直入射の場合、 θ_i を0とおいて、[数11]のように整理される。

【0046】

例えば、屈折率が1.62のときは臨界角 c は39°であるから、回折角 θ_i が39°以上の場合に光を好適に閉じ込めることができる。例えば、光源3からの光の波長が400 nm ~ 410 nmで突条2aの間隔 d が500 nmのとき、 $\theta_i = 10^\circ \sim 40^\circ$ であることが好ましく、 $\theta_i = 22^\circ$ であることが特に好ましい。

【0047】

なお、光源3がLED光源である場合、一般に指向性の強い光ではあるが、例えば配光角度は30°程度はあるため、入射光の光軸がガラス蛍光体1またはガラス蛍光体1'の入射面1aに対して垂直であっても、前記 $\theta_i = 10^\circ \sim 40^\circ$ で入射する成分も存在する。そのため、入射光の光軸がガラス蛍光体の入射面に対して傾斜するように光源3を必ずしも配置する必要はない。

【0048】

(付記事項)

以上、本発明の実施形態について説明したが、本発明は上記実施形態に限定されるものではなく、その趣旨を逸脱しない限りにおいて種々の変更が可能であり、例えば、上記実施形態に開示された技術的手段を適宜組み合わせ得られる形態も、本発明の技術的範囲に属する。

10

20

30

40

50

【0049】

また、上記実施形態では、回折構造として、複数の突条を有する構造を説明したが、光を回折させる構造であれば、これに限定されない。例えば、モスアイ状のように周期的に突起構造を配置してもよい。

【0050】

また、突条の間隔は必ずしも一定である必要はない。突条の間隔が一定でない場合、その効果は若干下がるが、同様の効果を得ることはできる。

【実施例】

【0051】

以下、本発明の実施例について説明するが、本発明は下記の実施例に限定されない。

10

【0052】

[実施例1]

(ガラス蛍光体の製造)

実施例1では、図1に示すガラス蛍光体1、図5(b)に示すガラス蛍光体1''および図31(a)、(b)に示すガラス蛍光体1'''を作製した。具体的には、 Eu_2O_3 、 BaCO_3 、 MgF_2 、 MgO 、 B_2O_3 試薬を合計30gになるよう秤量し、混合した。混合物を白金のつぼに入れて1100度で20分間、電気炉中で熔融し、融液を100度に加熱した鉄板に流しだすことで固化した。このようにして、 $2.9\text{Eu}_2\text{O}_3 - 33.0\text{BaO} - 18.9\text{MgF}_2 - 18.9\text{MgO} - 26.3\text{B}_2\text{O}_3$ (mol%)のガラス蛍光体を熔融急冷法により作製した。ガラス蛍光体の屈折率は1.62であった。また、このガラスの内部量子効率を絶対量子効率測定システム(大塚電子製、QE-1100)で求めた結果、励起光405nmにおいて95%であった。このガラス蛍光体を10mm×10mm×3mmの平板状に切断、研磨して、図4(a)に示すガラス蛍光体11に加工した後、ナノインプリント成型加工を施した。

20

【0053】

ナノインプリント成型加工では、図4(a)に示す型20として、縦25mm×横25mm×厚さ2mmのSiCの型を用いた。型20には、中央部を含む6mm×6mmの領域に、回折構造を転写するための溝21が形成されており、溝21の間隔が250nm、300nm、500nm、および1500nmの4種類の型20を用意した。そして、東芝機械株式会社製のナノインプリント装置(型名:GMP-311)を用いて、ガラス蛍光体11を真空下で520度に加熱しながら、型20および型30によって10MPaの圧力で120秒間、押圧することで、突条2aをガラス蛍光体11の一方面または両面に転写した。これにより、間隔が250nm、300nm、500nm、および1500nmの突条2aが入射面1aに形成された4種類のガラス蛍光体1、および、間隔が500nmの突条2aが両面に転写された2種類のガラス蛍光体1''、1'''を作製した。なお、ガラス蛍光体1''では、入射面1aの突条2aの延伸方向と反対面1bの突条2aの延伸方向とが平行である。一方、ガラス蛍光体1'''では、入射面1aの突条2aの延伸方向と反対面1bの突条2aの延伸方向とが直交している。いずれのガラス蛍光体においても、突条2aの高さは180nmであった。

30

【0054】

図9(a)は、ガラス蛍光体1の写真である。回折構造2は、入射面1aの中央を含む6mm×6mmの矩形領域に形成した。図9(b)は、ガラス蛍光体1における回折構造2の構造を原子間力顕微鏡(AFM)で撮影した画像であり、図9(c)は、回折構造2の断面形状を示す曲線である。図9(c)に示すように、回折構造2を構成する突条2aの間隔dは500nmであり、高さhは180nmである。

40

【0055】

(蛍光強度増大の確認)

続いて、間隔d=500nmのガラス蛍光体1の入射面1aに、白色光または波長375nmのUV光を照射し、ガラス蛍光体1からの出射光をデジタルカメラで撮影した。UV光の光源は、紫外LEDを使用した。

50

【0056】

図10(a)は、白色光を照射したときの前記デジタルカメラの画像であり、図10(b)は、UV光を照射したときの前記デジタルカメラの画像である。これらの画像では、回折構造2が形成されている中央の矩形領域の輝度が、平坦な構造である周囲よりも大きくなっており、回折構造2により蛍光強度が増加したことが確認できた。

【0057】

また、図11(a)は、間隔 $d = 500 \text{ nm}$ のガラス蛍光体1に波長 405 nm のレーザー光を入射角 $\theta_i = 5^\circ$ で照射したときの写真であり、図11(b)は、当該ガラス蛍光体1からの出射光の周波数スペクトルである。図11(a)では、レーザー光が入射したガラス蛍光体1の中央部から端面に向かって、赤色の蛍光が帯状に伝搬していることが分かる。図11(b)において、実線は、ガラス蛍光体1からの出射光の周波数スペクトルであり、破線は、従来の平坦なガラス蛍光体からの出射光の周波数スペクトルである。よって、ガラス蛍光体1に回折構造を形成することで、蛍光強度が増大したことが確認できた。

10

【0058】

(突条の間隔と蛍光強度との関係)

続いて、図7に示す照明装置10および図8に示す照明装置10'を用いて、突条2aの間隔と蛍光強度との関係を検証した。ガラス蛍光体としては、突条2aの間隔が 250 nm 、 300 nm 、 500 nm 、 1500 nm の4種類のガラス蛍光体1、突条2aの間隔が 250 nm 、 300 nm 、 500 nm 、 1500 nm の4種類のガラス蛍光体1'、突条2aの間隔が 500 nm の2種類のガラス蛍光体1''、1'''、従来の平坦なガラス蛍光体、および、入射面またはその反対面にモスアイ構造が 300 nm の間隔で形成されたガラス蛍光体を用いた。照明装置10を用いた検証では、図12(a)に示すように、ガラス蛍光体1の光源3側の入射面1aに突条2aが形成されている。照明装置10'を用いた検証では、図12(b)に示すように、ガラス蛍光体1'の光源3の反対面1bに突条2aが形成されている。光源3としては、波長 405 nm のレーザー光を出射するレーザー光源を用いた。光源3とガラス蛍光体1との間に、光源3からのレーザー光のs偏光のみを通過させる偏光板4を配置した。また、ガラス蛍光体1の反対面1b側を直径 150 mm の積分半球6で覆い、積分半球6によってガラス蛍光体1からの蛍光を収集した。そして、積分半球6によって収集された蛍光の強度を、検出器5によって検出した。

20

30

【0059】

図13は、突条2aの間隔 d と、検出器5が検出した蛍光強度との関係を示すグラフである。同グラフにおいて、従来の平滑なガラス蛍光体から出射された蛍光の強度を間隔 0 nm と定義し、当該強度を1.0と規格化している。黒丸印は、入射面1aに突条2aが形成されたガラス蛍光体1から出射された蛍光の強度であり、白丸印は、反対面1bに突条2aが形成されたガラス蛍光体1'から出射された蛍光の強度である。また、黒三角印は、入射面にモスアイ構造が形成されたガラス蛍光体から出射された蛍光の強度であり、白三角印は、入射面の反対面にモスアイ構造が形成されたガラス蛍光体から出射された蛍光の強度である。また、黒四角印はガラス蛍光体1''から出射された蛍光の強度であり、白四角印はガラス蛍光体1'''から出射された蛍光の強度である。図13から、間隔 $d = 250 \text{ nm}$ 、 300 nm および 500 nm の突条2aを入射面1aまたは反対面1bに形成することにより、蛍光強度が1.5倍以上に増大しており、特に、本実施例の範囲では間隔 $d = 500 \text{ nm}$ の突条2aを入射面1aに形成した場合の蛍光強度が最も高くなっている。また、間隔 $d = 500 \text{ nm}$ の突条2aを入射面1aおよび反対面1bの両方に形成することにより、蛍光強度が2倍または3倍以上に増大している。

40

【0060】

(入射角と蛍光強度との関係)

続いて、図7に示す照明装置10を用いて、入射角と蛍光強度との関係を検証した。本実施例では、図14(a)に示すように、照明装置10を用意し、光源3として、波長 405 nm のレーザー光を出射するレーザー光源を用いた。ガラス蛍光体1の入射面1aに形成

50

された突条 2 a の間隔は 500 nm であった。また、光源 3 とガラス蛍光体 1 との間に、光源 3 からのレーザ光の s 偏光のみを通過させる偏光板 4 を設け、さらに、ガラス蛍光体 1 の反対面 1 b 側には、ガラス蛍光体 1 からの出射光を無偏光で検出する検出器 5 を設けた。そして、光源 3 を移動させて、レーザ光と入射面 1 a との入射角 θ_i (θ_i') を変化させながら、ガラス蛍光体 1 からの出射光の強度を検出器 5 によって検出した。

【0061】

また、レーザ光の入射方向と突条 2 a の長手方向との角度を 2 通りに設定した。一方では、図 14 (b) に示すように、レーザ光の入射方向の入射面 1 a に平行な成分 P が、突条 2 a の長手方向に垂直となるように、ガラス蛍光体 1 を配置した。このときのレーザ光と入射面 1 a との角度を入射角 θ_i とする。他方では、図 14 (c) に示すように、レーザ光の入射方向の入射面 1 a に平行な成分 P が、突条 2 a の長手方向に平行となるように、ガラス蛍光体 1 を配置した。このときのレーザ光と入射面 1 a との角度を入射角 θ_i' とする。

10

【0062】

図 15 は、照明装置 10 における、入射角 θ_i (θ_i') と出射光の強度との関係を示すグラフである。このグラフにおいて、破線は、ガラス蛍光体 1 を図 14 (b) に示すように配置した場合を示しており、実線は、ガラス蛍光体 1 を図 14 (c) に示すように配置した場合を示している。この結果から、レーザ光の入射方向の入射面 1 a に平行な成分 P が、突条 2 a の長手方向に垂直であるとき、入射角 θ_i が $10^\circ \sim 30^\circ$ である場合に、出射光の強度が大きくなり、入射角 θ_i が 13° である場合に、出射光の強度が最大となることが確認できた。また、レーザ光の入射方向の入射面 1 a に平行な成分 P が、突条 2 a の長手方向に平行であるとき、入射角 θ_i' が $30^\circ \sim 80^\circ$ である場合に、出射光の強度が大きくなることが確認できた。このことから、 θ_i (θ_i') = $\arcsin(1 - m/n_0 d)^\circ$ が好適であることが確認できた。なお、グラフには示していないが、回折構造が形成されていない従来のガラス蛍光体では、出射光強度は入射角にほとんど依存しなかった。また、レーザ光の入射方向の入射面 1 a に平行な成分 P と突条 2 a の長手方向とが垂直または平行以外の場合、入射角と出射光の強度との関係は、成分 P の突条 2 a の長手方向に垂直な成分と平行な成分との重ね合わせによって決まる。

20

【0063】

同様の検証を、図 8 に示す照明装置 10' を用いて行った。具体的には、図 16 (a) ~ (c) に示すように、図 14 に示すガラス蛍光体 1 をガラス蛍光体 1' に置き換えて、レーザ光と入射面 1 a との入射角 θ_i (θ_i') を変化させながら、ガラス蛍光体 1' からの出射光の強度を検出器 5 によって検出した。

30

【0064】

図 17 は、照明装置 10' における、入射角 θ_i (θ_i') と出射光の強度との関係を示すグラフである。このグラフにおいて、破線は、ガラス蛍光体 1' を図 16 (b) に示すように配置した場合を示しており、実線は、ガラス蛍光体 1' を図 16 (c) に示すように配置した場合を示している。この結果から、レーザ光の入射方向の入射面 1 a に平行な成分 P が、突条 2 a の長手方向に垂直であるとき、入射角 θ_i が $14^\circ \sim 40^\circ$ である場合に、出射光の強度が大きくなることが確認できた。また、出射光強度は入射角 θ_i は 23° 付近を中心とした山成の曲線を描いた。また、レーザ光の入射方向の入射面 1 a に平行な成分 P が、突条 2 a の長手方向に平行であるとき、入射角 θ_i' が $30^\circ \sim 80^\circ$ である場合に、出射光の強度が大きくなることが確認できた。このことから、 θ_i (θ_i') = $\arcsin(1 - m/n_0 d)^\circ$ が好適であることが確認できた。なお、グラフには示していないが、回折構造が形成されていない従来のガラス蛍光体では、出射光強度は入射角にほとんど依存しなかった。

40

【0065】

[実施例 2]

(シミュレーション条件)

実施例 2 では、回折構造を形成することによる蛍光強度の増大を説明するため、光の挙

50

動についてシミュレーションによる解析を行った。本実施例では、DiffRACTMod (RSoft製) のソフトウェアによる厳密結合波解析 (Rigorous Coupled Wave Analysis, RCWA) を用いて解析した。具体的には、複数の突条を有する回折構造が入射面および反対面のいずれかに形成された屈折率 1.62 のガラス平板に、波長 405 nm の s 偏光を入射させたとき (励起光の照射に相当) および入射光と同じ波長の光 (励起光が蛍光変換されずにガラス平板を透過したものに相当) または 620 nm の波長の光が出射するときの挙動を計算した。突条の間隔 d は $175 \text{ nm} \sim 2000 \text{ nm}$ の範囲で変化させ、突条の高さは 130 nm で固定した。突条の断面形状は幅が $d/2$ の正弦波状で設定し、間隔に応じて前記正弦波の周期を変更した。

【0066】

(垂直入射光に対する回折強度と突条の間隔との関係)

図18は、入射面のみに回折構造が形成された上記ガラス平板に、波長 405 nm の s 偏光を垂直に入射させた場合の、透過光、透過方向への回折光、およびそれらの合計の強度と、突条の間隔 d との関係を示すグラフである。同グラフから、間隔 d が $350 \text{ nm} \sim 800 \text{ nm}$ の場合に、回折光の強度が大きくなり、特に、間隔 $d = 390 \text{ nm}$ の場合に、回折光の強度が最大になっている。

【0067】

図19は、反対面のみに回折構造が形成された上記ガラス平板に、波長 405 nm の s 偏光を垂直に入射させた場合の、透過光、透過方向への回折光、および全光量の強度と、突条の間隔 d との関係を示すグラフである。同グラフから、間隔 d が $350 \text{ nm} \sim 800 \text{ nm}$ の場合に、回折光の強度が大きくなり、特に、間隔 $d = 390 \text{ nm}$ の場合に、回折光の強度が最大になっている。

【0068】

図20は、反対面のみに回折構造が形成された上記ガラス平板に、波長 620 nm の s 偏光を垂直に入射させた場合の、透過光、透過方向への回折光、および全光量の強度と、突条の間隔 d との関係を示すグラフである。同グラフから、間隔 d が $450 \text{ nm} \sim 1250 \text{ nm}$ の場合に、回折光の強度が大きくなり、特に、間隔 $d = 600 \text{ nm}$ の場合に、回折光の強度が最大になっている。

【0069】

図18～図20から、回折光の強度を大きくするためには、入射光の波長が λ であるとすると、突条の間隔 d が $0.75 \times \lambda \leq d \leq 2.00 \times \lambda$ であることが好ましく、 $0.95 \times \lambda \leq d \leq 0.97 \times \lambda$ であることが特に好ましいことが分かる。

【0070】

図21は、図13のグラフと図18のグラフとを重ねたものである。図21のグラフから、突条2aの間隔 d と蛍光強度との関係は、実施例1における実証実験と本実施例のシミュレーションとで同様の傾向であることが分かる。

【0071】

(入射角と強度との蛍光関係)

続いて、間隔の異なる突条が入射面または反対面に形成された複数種類のガラス平板に、波長 405 nm の s 偏光を入射角を変えながら入射させたときの挙動をシミュレーションにより計算した。突条の間隔 d は、 250 nm 、 300 nm 、 350 nm 、 400 nm 、 450 nm 、 500 nm 、 700 nm 、 900 nm 、 1500 nm および 2000 nm の10通りを設定した。ガラス平板の屈折率は 1.62 、突条の高さは 180 nm で固定した。突条の断面形状は幅が $d/2$ の正弦波状で設定した。

【0072】

図22は、間隔 $d = 250 \text{ nm}$ 、 300 nm 、 400 nm 、 500 nm 、 900 nm および 2000 nm の突条が入射面に形成された各ガラス平板に、波長 405 nm の s 偏光を入射させた場合の、透過方向への回折光の強度と、入射角との関係を示すグラフである。同グラフから、例えば間隔 $d = 500 \text{ nm}$ の突条が形成されたガラス平板では、入射角が $10^\circ \sim 30^\circ$ である場合に、回折光の強度が大きくなり、前述の[数8]を満たす角

10

20

30

40

50

度である13度を中心として、その周辺角度で回折強度が大きくなった。間隔 $d = 400$ nmの突条が形成されたガラス平板を除き、他のガラス平板においても同様の傾向がみられた。よって、実施例1における検証結果(図15)と同様に、入射光を入射面に対して所定の範囲で傾斜させることで、蛍光強度を増大させることができることを確認できた。

【0073】

図23は、高さ h の異なる突条が入射面に形成されたガラス平板に、波長405 nmのs偏光を入射させた場合の、透過方向への回折光の強度が最大になる時の入射角(以下「ピークトップ角度」と称する)と、突条の間隔との関係を示すグラフである。同グラフにおいて、丸印、三角印および菱形印のプロットは、それぞれ突条の高さ h が90 nm、180 nmおよび360 nmである場合のピークトップ角度であり、破線は、前述の[数8]に基づいて算出したピークトップ角度の計算値である。また、上述のピークトップ角度と、突条の間隔の具体的な数値を表1に示す。

【表1】

突条の間隔 (nm)	ピークトップ角度(°)			
	$h = 90$ nm	$h = 180$ nm	$h = 360$ nm	計算値
250	38	38	38	38.3
300	20	20	20	20.5
350	9	9	9	9.0
400	0	0	0	0.7
450	6	6	8	5.7
500	12	11	14	11.0
700	28	25	30	24.9
900	34	34	39	33.4
1500	47	48	49	46.9
2000	53	53	54	52.9

【0074】

図23および表1から、突条の高さが異なっても、ピークトップ角度と突条の間隔との関係は、[数8]とほぼ同様であることがわかる。よって、突条が入射面に形成されたガラス平板では、突条の高さにかかわらず、入射光を[数8]に基づいて算出したピークトップ角度だけ入射面に対して傾斜させることにより、蛍光強度をほぼ最大限に増大できることを確認できた。また、間隔 $d = 250$ nm~700 nmである場合、入射角を $0^\circ \sim 33^\circ$ とすることが好ましく、間隔 $d = 900$ nm~2000 nmである場合、入射角を $33^\circ \sim 54^\circ$ とすることが好ましいことが分かった。

【0075】

図24は、間隔 $d = 250$ nm、300 nm、400 nm、500 nm、900 nmおよび2000 nmの突条が反対面に形成された各ガラス平板に、波長405 nmのs偏光を入射させた場合の、透過方向への回折光の強度と、入射角との関係を示すグラフである。同グラフから、実施例1における検証結果(図17)と同様に、入射光を入射面に対して所定の範囲で傾斜させることで、蛍光強度を増大させることができることを確認できた。

【0076】

図25は、高さ h の異なる突条が反対面に形成されたガラス平板に、波長405 nmのs偏光を入射させた場合の、透過方向への回折光の強度が最大になる時の入射角(以下「ピークトップ角度」と称する)と、突条の間隔との関係を示すグラフである。このとき、シミュレーション及び計算は、光源がガラス平板内にある状態で計算を行った。同グラフにおいて、丸印、三角印および菱形印のプロットは、それぞれ突条の高さ h が90 nm、180 nmおよび360 nmである場合のピークトップ角度であり、破線は、前述の式[数10]に基づいて算出したピークトップ角度の計算値である。また、上述のピークトップ角度と、突条の間隔の具体的な数値を表2に示す。空欄は明確なピークトップが無い

ことを意味する。

【表 2】

突条の間隔 (nm)	ピークトップ角度 (°)			計算値
	h = 90 nm	h = 180 nm	h = 360 nm	
250		22	33	22.7
300		12	26	12.6
350	25	5	21	5.6
400	7	0	5	0.4
450	0	10	0	3.5
500	0	12	0	6.8
700	11	16	10	15.3
900	16	21	15	20.1
1500	24	30	28	27.1
2000	27	32		29.9

10

【0077】

図 25 および表 2 から、突条の高さが異なっても、ピークトップ角度と突条の間隔との関係は、[数 10] とほぼ同様であることがわかる。よって、突条が反対面に形成されたガラス平板では、突条の高さにかかわらず、ガラス蛍光体からの出射光の角度を [数 10] に基づいて算出したピークトップ角度だけ出射面に対して傾斜させることにより、蛍光強度をほぼ最大限に増大できることを確認できた。また、間隔 $d = 250 \text{ nm} \sim 2000 \text{ nm}$ である場合、入射角を $0^\circ \sim 32^\circ$ とすることが好ましいことが分かった。また、この値は入射光がガラス表面で屈折した後の角度であり、周囲の媒体からガラス試料への入射角は平行なガラス蛍光体であれば [数 8] に一致するため、表 1 の角度とほぼ一致する。

20

【0078】

(電場分布シミュレーション)

図 26 は、ガラス蛍光体 1 の反対面 1b における光の電場分布シミュレーション結果を示す図である。ガラス蛍光体 1 の反対面 1b には、回折角が最大となる 390 nm の間隔で突条 2a が形成されており、光の波長は 405 nm である。図 26 から、光のエネルギーは突条 2a の表面に集中し、外部にあまり放出されていないことが分かる。つまり、突条 2a が形成されていることで、光の大半が反対面において反射し、空間にあまり抜けていない。

30

【0079】

[実施例 3]

(シミュレーション条件)

実施例 3 では、複数の突条を有する回折構造が入射面および反対面のいずれかに形成されたガラス平板に、所定の波長の光を入射させたときの光の挙動をシミュレーションによって解析した。これにより、突条の間隔と回折効率(蛍光強度)との関係が、突条の高さおよびガラス蛍光体の屈折率によって、どのように変化するかを検証した。本実施例では、上述の実施例 2 と同様、DiffRACTMod (RSoft 製) のソフトウェアによる厳密結合波解析 (Rigorous Coupled Wave Analysis, RCWA) を用いて解析した。

40

【0080】

(ガラス蛍光体の屈折率と回折効率との関係)

図 27 は、入射面のみに回折構造が形成された屈折率の異なるガラス平板に、波長 450 nm の s 偏光を垂直に入射させた場合の、入射光への回折効率と突条の間隔 d との関係を示すグラフである。回折構造の突条の高さは 180 nm であり、突条の断面形状は幅が $d/2$ の正弦波状である。同グラフから、ガラス平板の屈折率 $n = 1.9$ のとき、回折効率が最大となる間隔 d は 440 nm であり、ガラス平板の屈折率 $n = 1.7$ のとき、回折効率が最大となる間隔 d は 430 nm であり、ガラス平板の屈折率 $n = 1.5$ のとき、回

50

折効率が最大となる間隔 d は 420 nm であった。入射光への回折効率が大きいほど、光がガラス平板内部を通過せずに戻るため、実質的な光路長が増加する。通常のガラスの屈折率は $1.5 \sim 2.0$ 程度であるため、回折効率を大きくするためには、間隔 d を $405\text{ nm} \sim 450\text{ nm}$ とすればよいことが確認できた。

【0081】

図28は、反対面のみ回折構造が形成された屈折率の異なるガラス平板に、波長 450 nm の s 偏光を垂直に入射させた場合の、出射光への回折効率と突条の間隔 d との関係を示すグラフである。回折構造の突条の高さは 180 nm である。同グラフから、ガラス平板の屈折率 $n = 1.9$ のとき、回折効率が最大となる間隔 d は 450 nm であり、ガラス平板の屈折率 $n = 1.7$ のとき、回折効率が最大となる間隔 d は 440 nm であり、ガラス平板の屈折率 $n = 1.5$ のとき、回折効率が最大となる間隔 d は 440 nm であった。出射光への回折効率が大きいほど、光がガラス平板内部を通過せずに戻るため、実質的な光路長が増加する。通常のガラスの屈折率は $1.5 \sim 2.0$ 程度であるため、回折効率を大きくするためには、間隔 d を $405\text{ nm} \sim 450\text{ nm}$ とすればよいことが確認できた。

10

【0082】

図27および図28に示す結果から、実用上は、入射光の波長が λ である場合、突条の間隔 d は $0.90 \times d$ とすることが好ましいことが分かった。また、屈折率が高いほど、入射光への回折効率は高くなる一方、出射光への回折効率は低くなることが分かった。

20

【0083】

(突条の高さと回折効率との関係)

図29は、入射面のみ回折構造が形成されたガラス平板に、波長 405 nm の s 偏光を垂直に入射させた場合の、回折効率と突条の間隔 d との関係を示すグラフである。ガラス平板の屈折率は 1.62 であり、回折構造の突条の高さ h は 90 nm 、 180 nm および 360 nm の3段階で変化させた。同グラフから、高さ $h = 90\text{ nm}$ のとき、回折効率が最大となる間隔 d は 400 nm であり、高さ $h = 180\text{ nm}$ のとき、回折効率が最大となる間隔 d は 390 nm であり、高さ $h = 360\text{ nm}$ のとき、回折効率が極大となる間隔 d は 490 nm であった。通常のガラスの屈折率は $1.5 \sim 2.0$ 程度であるため、回折効率を大きくするためには、間隔 d を $365\text{ nm} \sim 405\text{ nm}$ とすればよいことが確認できた。

30

【0084】

図30は、反対面のみ回折構造が形成されたガラス平板に、波長 405 nm の s 偏光を垂直に入射させた場合の、回折効率と突条の間隔 d との関係を示すグラフである。ガラス平板の屈折率は 1.62 であり、回折構造の突条の高さ h は 90 nm 、 180 nm および 360 nm の3段階で変化させた。同グラフから、高さ $h = 90\text{ nm}$ のとき、回折効率が最大となる間隔 d は 400 nm であり、高さ $h = 180\text{ nm}$ のとき、回折効率が最大となる間隔 d は 390 nm であり、高さ $h = 360\text{ nm}$ のとき、回折効率が極大となる間隔 d は 370 nm であった。通常のガラスの屈折率は $1.5 \sim 2.0$ 程度であるため、回折効率を大きくするためには、間隔 d を $365\text{ nm} \sim 405\text{ nm}$ とすればよいことが確認できた。

40

【0085】

図29から、突条の高さを大きくするほど、全体的には回折効率が大きくなっているが、実際のナノインプリント成型加工では、突条の高さ h を大きくすることは容易ではなく、間隔 d よりも大きくすることは困難である。そのため、実用的には高さは $90\text{ nm} \sim 360\text{ nm}$ 程度に設計される。そのため、図29および図30に示す結果から、実用上は、入射光の波長が λ である場合、突条の間隔 d は $0.90 \times d$ とすることが好ましいことが分かった。

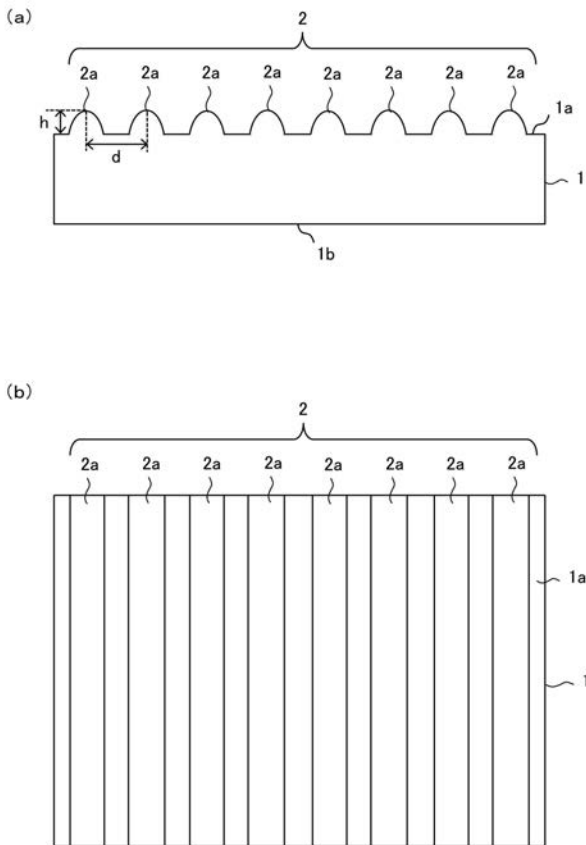
【符号の説明】

【0086】

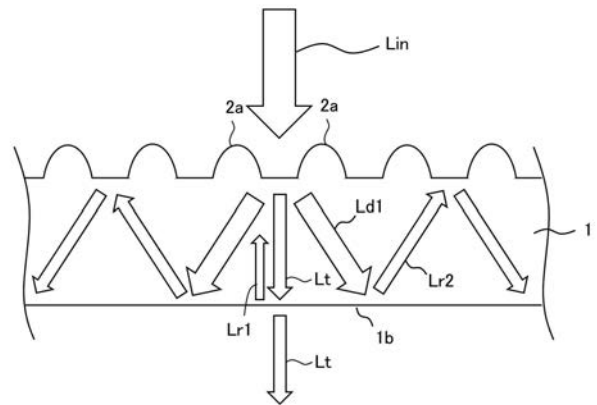
50

- 1 ガラス蛍光体
- 1' ガラス蛍光体
- 1'' ガラス蛍光体
- 1''' ガラス蛍光体
- 1a 入射面
- 1b 反対面
- 2 回折構造
- 2a 突条
- 3 光源
- 4 偏光板
- 5 検出器
- 6 積分半球
- 10 照明装置
- 10' 照明装置
- 11 ガラス蛍光体

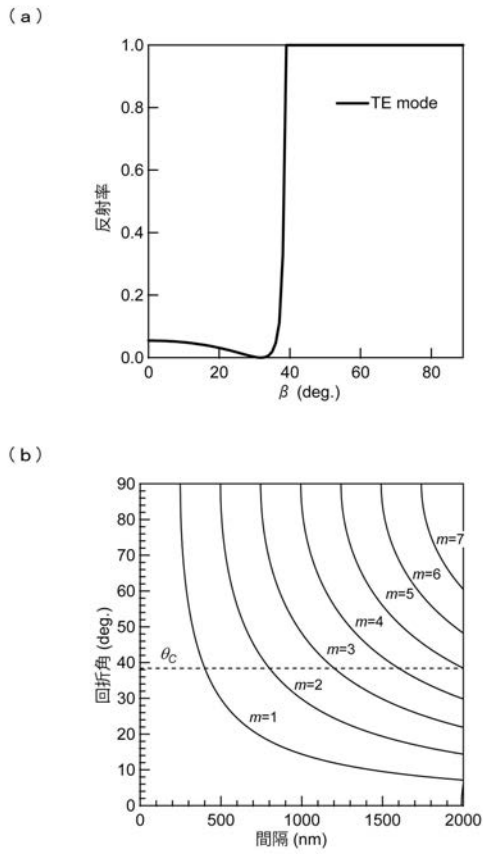
【 図 1 】



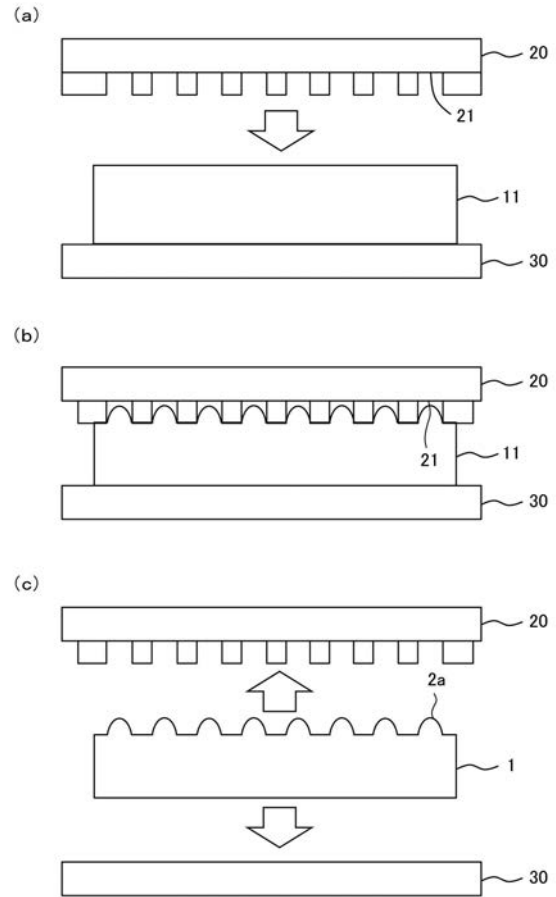
【 図 2 】



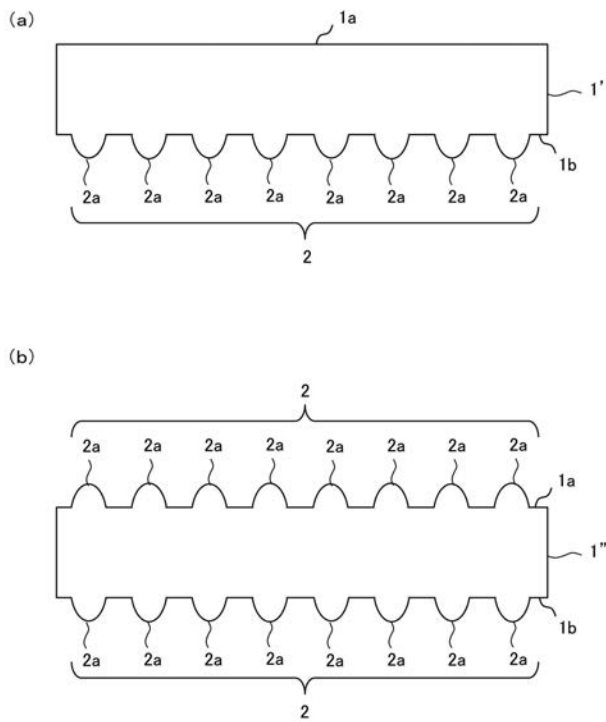
【 図 3 】



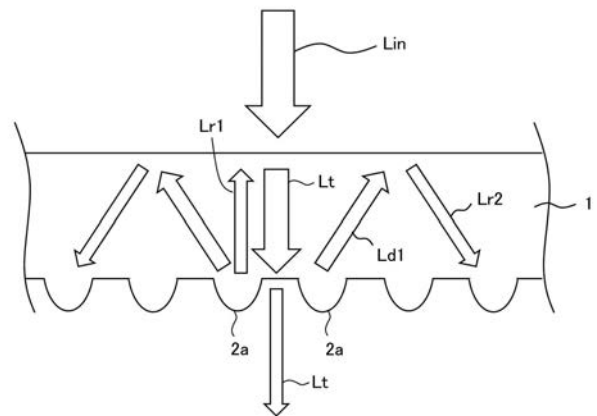
【 図 4 】



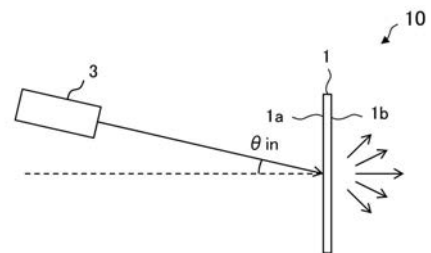
【 図 5 】



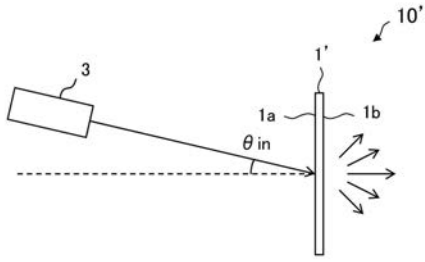
【 図 6 】



【 図 7 】

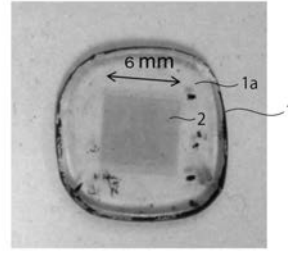


【 図 8 】

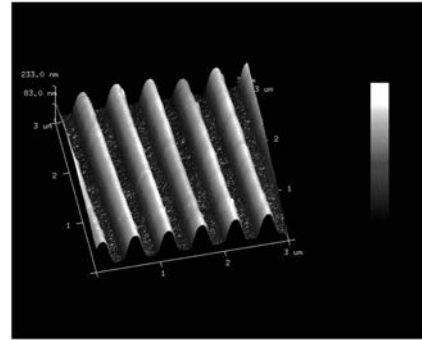


【 図 9 】

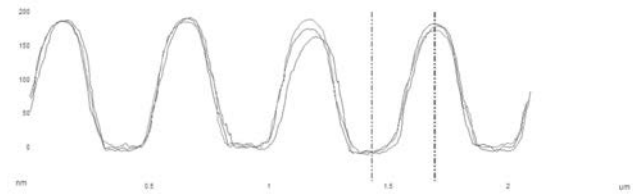
(a)



(b)

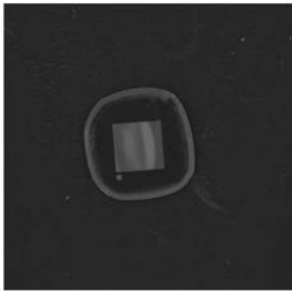


(c)

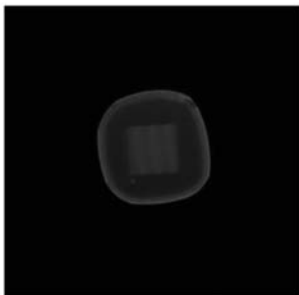


【 図 1 0 】

(a)

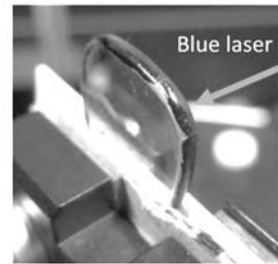


(b)

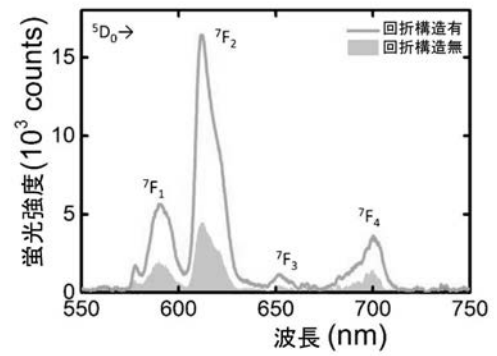


【 図 1 1 】

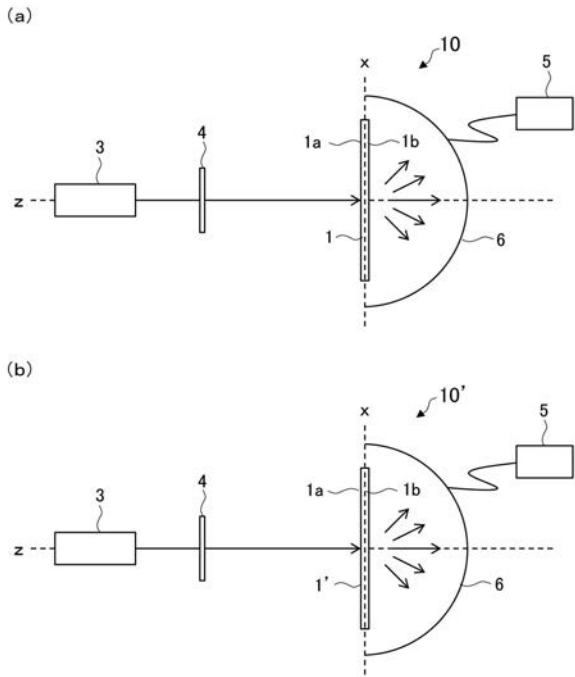
(a)



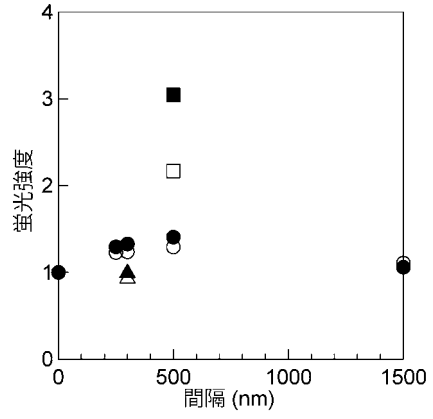
(b)



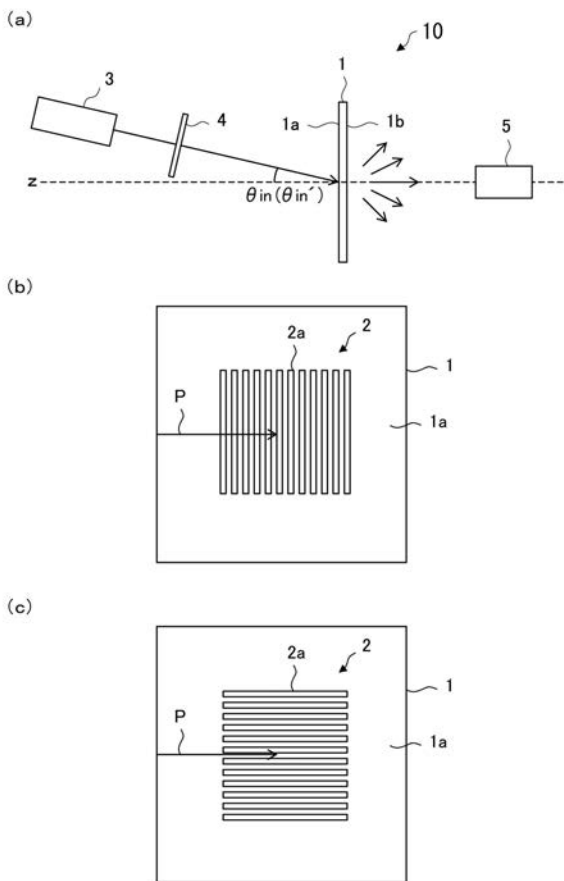
【 図 1 2 】



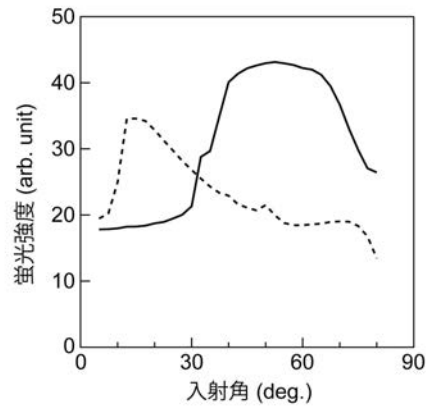
【 図 1 3 】



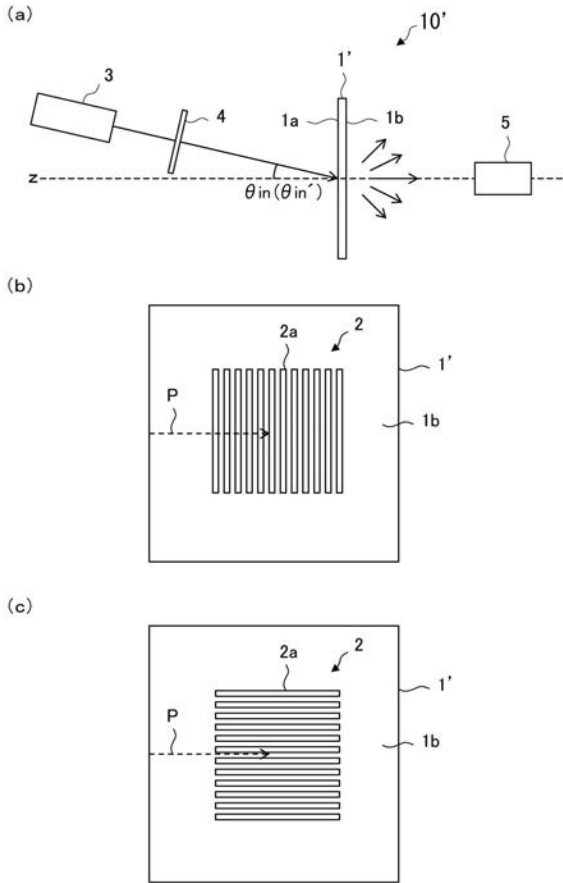
【 図 1 4 】



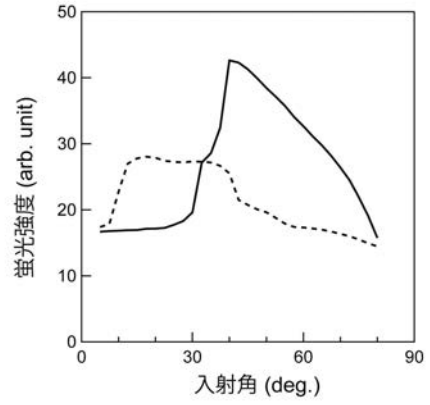
【 図 1 5 】



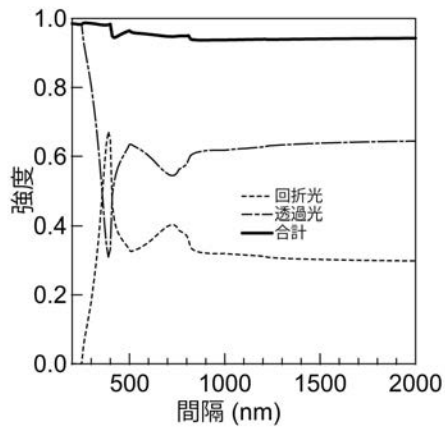
【 図 1 6 】



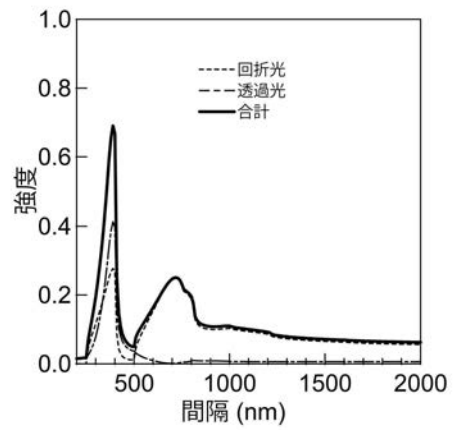
【 図 1 7 】



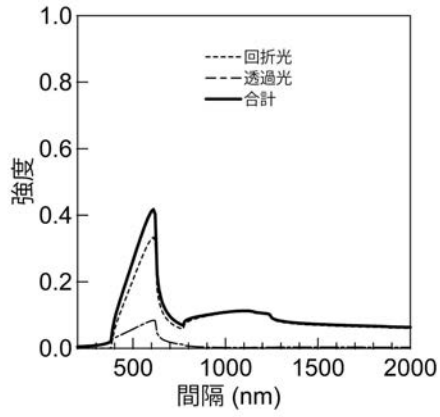
【 図 1 8 】



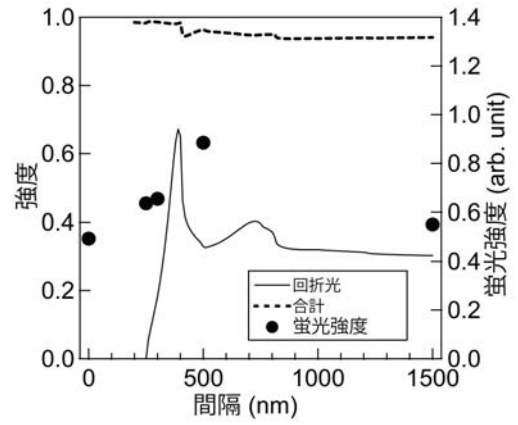
【 図 1 9 】



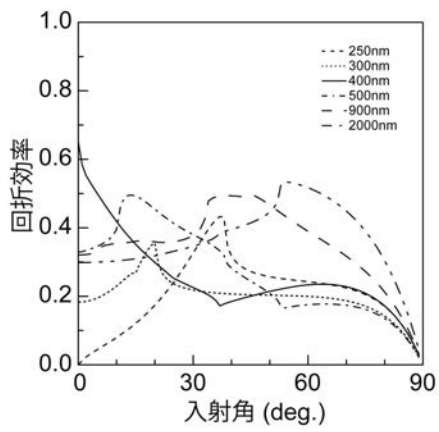
【 図 2 0 】



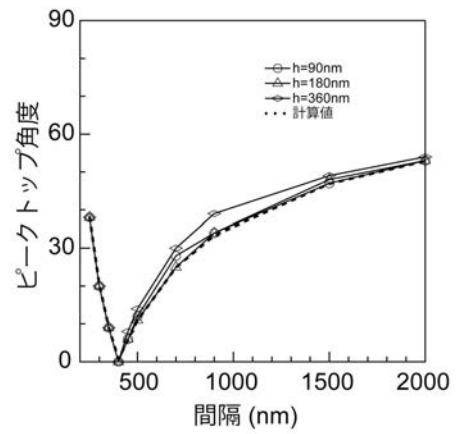
【 図 2 1 】



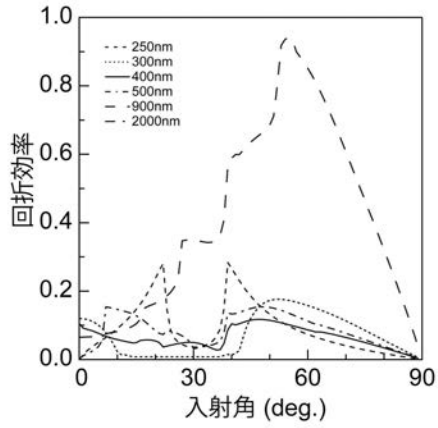
【 図 2 2 】



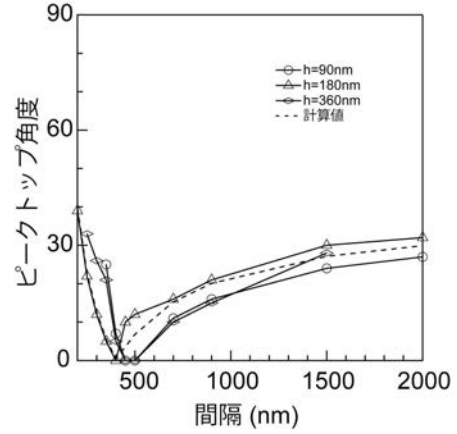
【 図 2 3 】



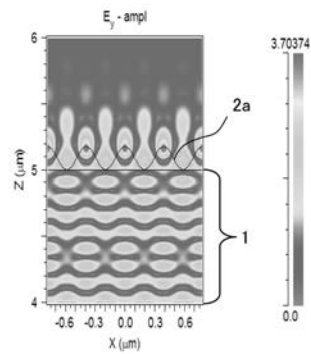
【 図 2 4 】



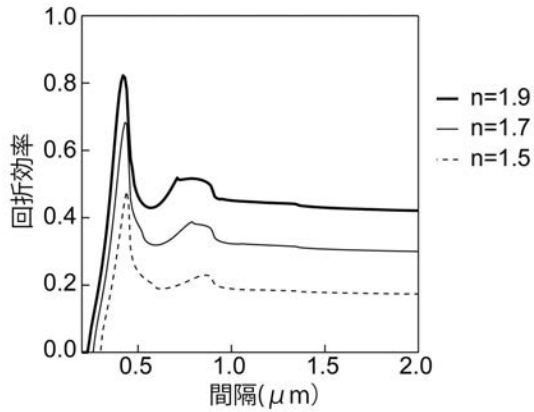
【 図 2 5 】



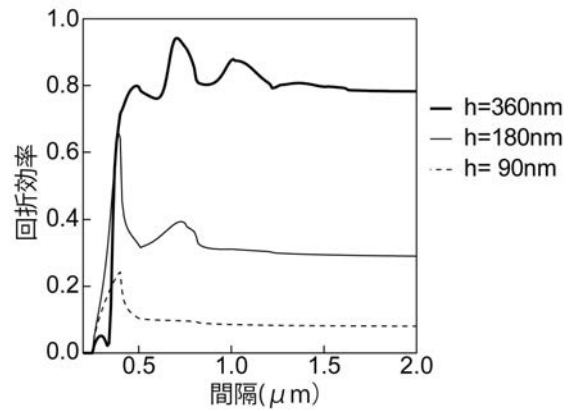
【 図 2 6 】



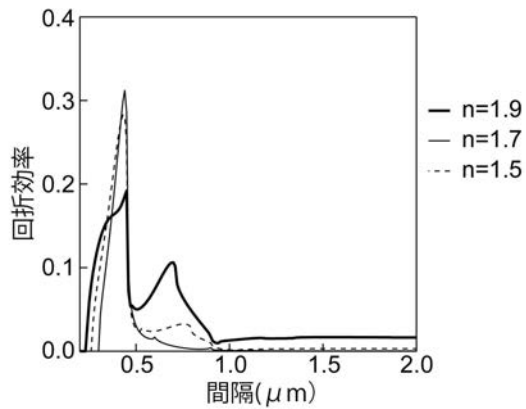
【 図 2 7 】



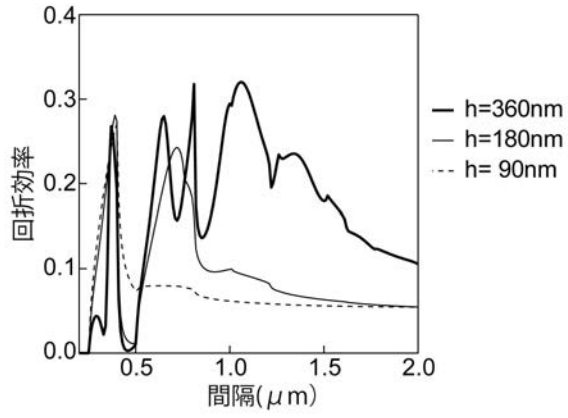
【 図 2 9 】



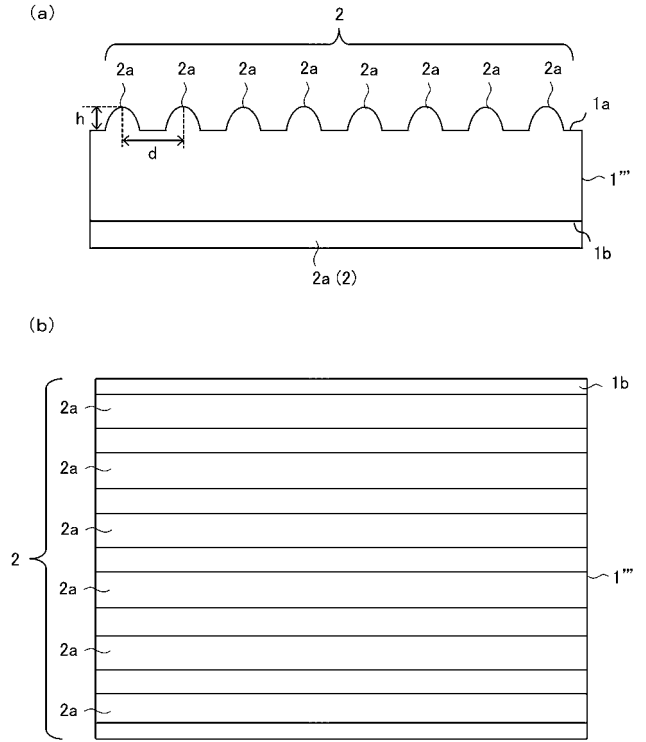
【 図 2 8 】



【 図 3 0 】



【 図 3 1 】



フロントページの続き

(51)Int.Cl.		F I	テーマコード(参考)
C 0 3 C 3/15 (2006.01)		C 0 3 C 3/15	
F 2 1 Y 115/30 (2016.01)		F 2 1 Y 115:30	

(72)発明者 北村 直之
大阪府池田市緑丘 1 - 8 - 3 1 国立研究開発法人産業技術総合研究所内

(72)発明者 赤井 智子
大阪府池田市緑丘 1 - 8 - 3 1 国立研究開発法人産業技術総合研究所内

(72)発明者 村井 俊介
京都府京都市左京区吉田本町 3 6 番地 1 国立大学法人京都大学内

(72)発明者 田中 勝久
京都府京都市左京区吉田本町 3 6 番地 1 国立大学法人京都大学内

Fターム(参考) 2H148 AA07 AA25
2H249 AA13 AA60 AA64
4G062 AA01 BB08 CC04 CC10 DA01 DB01 DC04 DD01 DE01 DF01
EA01 EB01 EC01 ED04 EE01 EF01 EG05 FA01 FA10 FB01
FC01 FD01 FE01 FF01 FG01 FH01 FJ01 FK01 FL01 GA01
GB01 GC01 GD01 GE04 HH01 HH03 HH05 HH07 HH09 HH11
HH13 HH15 HH17 HH20 JJ01 JJ03 JJ05 JJ07 JJ10 KK01
KK03 KK04 KK05 KK07 MM12 MM24 NN21
4H001 XA05 XA08 XA09 XA12 XA56 YA63