

(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2016-171228

(P2016-171228A)

(43) 公開日 平成28年9月23日(2016.9.23)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
HO 1 L 33/50 (2010.01)	HO 1 L 33/00 4 1 O	2 H 1 4 8
GO 2 B 5/30 (2006.01)	GO 2 B 5/30	2 H 1 4 9
GO 2 B 5/20 (2006.01)	GO 2 B 5/20	2 K 2 0 3
GO 3 B 21/00 (2006.01)	GO 3 B 21/00 F	3 K 2 4 3
GO 3 B 21/14 (2006.01)	GO 3 B 21/14 A	5 F 1 4 2

審査請求 未請求 請求項の数 26 O L (全 97 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2015-50680 (P2015-50680)
 (22) 出願日 平成27年3月13日 (2015.3.13)

(71) 出願人 314012076
 パナソニックIPマネジメント株式会社
 大阪府大阪市中央区城見2丁目1番61号
 (74) 代理人 100101683
 弁理士 奥田 誠司
 (74) 代理人 100155000
 弁理士 喜多 修市
 (74) 代理人 100180529
 弁理士 梶谷 美道
 (74) 代理人 100125922
 弁理士 三宅 章子
 (74) 代理人 100135703
 弁理士 岡部 英隆
 (74) 代理人 100188813
 弁理士 川喜田 徹

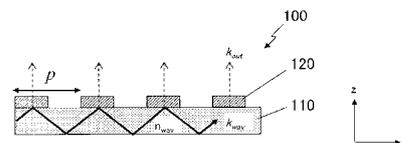
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 発光素子、発光装置および検知装置

(57) 【要約】

【課題】輝度、指向性、または偏光特性を制御することが可能な、新規な構造を有する発光素子、発光装置および検知装置を提供する。

【解決手段】発光素子は、フォトルミネッセンス層と、前記フォトルミネッセンス層または透光層の少なくとも一方に形成された少なくとも一つの周期構造とを有する。前記周期構造は、複数の凸部および複数の凹部の少なくとも一方を含み、前記フォトルミネッセンス層が発する光は、空気中の波長が λ_a の第1の光を含み、隣接する凸部間または凹部間の距離を D_{int} とし、前記周期構造の周期を p_a とし、前記第1の光に対する前記フォトルミネッセンス層の屈折率を n_{wav-a} とすると、 $\lambda_a / n_{wav-a} < D_{int} < \lambda_a$ または $\lambda_a / n_{wav-a} < p_a < \lambda_a$ の関係が成り立つ。前記周期構造を介して前記フォトルミネッセンス層に垂直な方向に出射する光のスペクトルにおいて強度がピークとなる波長Aは、前記フォトルミネッセンス層に含まれるフォトルミネッセンス材料の発光スペクトルにおいて強度がピークとなる波長Bからずれている。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

フォトルミネッセンス層と、
 前記フォトルミネッセンス層に近接して配置された透光層と、
 前記フォトルミネッセンス層および前記透光層の少なくとも一方に形成された少なくとも一つの周期構造と、を有し、
 前記周期構造は、複数の凸部および複数の凹部の少なくとも一方を含み、
 前記フォトルミネッセンス層が発する光は、空気中の波長が λ_a の第 1 の光を含み、
 隣接する凸部間または凹部間の距離を D_{int} とし、前記第 1 の光に対する前記フォトルミネッセンス層の屈折率を n_{wav-a} とすると、 $\lambda_a / n_{wav-a} < D_{int} < \lambda_a$ の関係が成り立ち、
 前記周期構造を介して前記フォトルミネッセンス層に垂直な方向に出射する光のスペクトルにおいて強度がピークとなる波長 A が、前記フォトルミネッセンス層から発せられる光の強度がピークとなる波長 B からずれている、
 発光素子。

10

【請求項 2】

前記波長 A が前記波長 B よりも大きい、請求項 1 に記載の発光素子。

【請求項 3】

前記フォトルミネッセンス層に含まれるフォトルミネッセンス材料の発光スペクトルの半値半幅を HWHM とすると、前記波長 A は、前記波長 B から HWHM 以上ずれている、
 請求項 1 または 2 に記載の発光素子。

20

【請求項 4】

前記フォトルミネッセンス層に含まれるフォトルミネッセンス材料の発光スペクトルにおいて、強度がピークの半分となる波長が 2 つ存在し、
 前記 2 つの波長のうち、前記波長 B との差がより大きい波長 C と、前記波長 B との差を W とすると、前記波長 A は、前記波長 B から W 以上ずれている、請求項 1 から 3 のいずれかに記載の発光素子。

【請求項 5】

前記波長 λ_a は、前記波長 A と一致する、請求項 1 から 4 のいずれかに記載の発光素子。

30

【請求項 6】

透光層と、
 前記透光層に形成された少なくとも一つの周期構造と、
 前記周期構造に近接して配置されたフォトルミネッセンス層と、を有し、
 前記周期構造は、複数の凸部および複数の凹部の少なくとも一方を含み、
 前記フォトルミネッセンス層が発する光は、空気中の波長が λ_a の第 1 の光を含み、
 前記第 1 の光に対する前記フォトルミネッセンス層の屈折率を n_{wav-a} とし、前記周期構造の周期を p_a とすると、 $\lambda_a / n_{wav-a} < p_a < \lambda_a$ の関係が成り立ち、
 前記周期構造を介して前記フォトルミネッセンス層に垂直な方向に出射する光のスペクトルにおいて強度がピークとなる波長 A が、前記フォトルミネッセンス層から発せられる光の強度がピークとなる波長 B からずれている、
 発光素子。

40

【請求項 7】

フォトルミネッセンス層と、
 前記フォトルミネッセンス層よりも高い屈折率を有する透光層と、
 前記透光層に形成された少なくとも一つの周期構造と、を有し、
 前記周期構造は、複数の凸部および複数の凹部の少なくとも一方を含み、
 前記フォトルミネッセンス層が発する光は、空気中の波長が λ_a の第 1 の光を含み、
 前記第 1 の光に対する前記フォトルミネッセンス層の屈折率を n_{wav-a} とし、前記周期構造の周期を p_a とすると、 $\lambda_a / n_{wav-a} < p_a < \lambda_a$ の関係が成り立ち、

50

前記周期構造を介して前記フォトルミネッセンス層に垂直な方向に出射する光のスペクトルにおいて強度がピークとなる波長Aが、前記フォトルミネッセンス層から発せられる光の強度がピークとなる波長Bからずれている、
発光素子。

【請求項8】

前記フォトルミネッセンス層と前記透光層とが互いに接している、請求項1から7のいずれかに記載の発光素子。

【請求項9】

フォトルミネッセンス層と、
前記フォトルミネッセンス層に形成された少なくとも一つの周期構造と、を有し、
前記周期構造は、複数の凸部および複数の凹部の少なくとも一方を含み、
前記フォトルミネッセンス層が発する光は、空気中の波長が λ_a の第1の光を含み、
前記第1の光に対する前記フォトルミネッセンス層の屈折率を $n_{\text{wav-a}}$ とし、前記周期構造の周期を p_a とすると、 $\lambda_a / n_{\text{wav-a}} < p_a < \lambda_a$ の関係が成り立ち、
前記周期構造を介して前記フォトルミネッセンス層に垂直な方向に出射する光のスペクトルにおいて強度がピークとなる波長Aが、前記フォトルミネッセンス層から発せられる光の強度がピークとなる波長Bからずれている、
発光素子。

10

【請求項10】

請求項1から9のいずれかに記載の発光素子と、
前記発光素子から複数の方向にそれぞれ発せられた複数の光線の経路上にそれぞれ配置された複数の透光領域を有する光学シャッタであって、前記複数の透光領域の光透過率を個別に変化させる光学シャッタと、
を備える発光装置。

20

【請求項11】

請求項10に記載の発光装置と、
前記光学シャッタから出射した光を集束させる光学系と、
を備える投影装置。

【請求項12】

請求項1から9のいずれかに記載の発光素子と、
前記発光素子から発せられる光の経路上に配置され、前記発光素子から特定の方向に出射した光線を透過させる透光領域を有する光学フィルタと、
を備える発光装置。

30

【請求項13】

前記光学フィルタは、前記透光領域を含む複数の透光領域を有し、
前記複数の透光領域は、前記発光素子から特定の複数の方向にそれぞれ出射した複数の光線を透過させる、
請求項12に記載の発光装置。

【請求項14】

前記透光領域を、異なる波長の光線が透過するように、前記発光素子を回転させる機構をさらに備える、請求項12または13に記載の発光装置。

40

【請求項15】

前記透光領域を、異なる波長の光線が透過するように、前記光学フィルタを前記光線と交差する方向に移動させる機構をさらに備える、請求項12または13に記載の発光装置。

【請求項16】

請求項1から9のいずれかに記載の発光素子と、
前記発光素子から出射された光の経路上に配置され、被検知物を検知する検知器と、
を備える検知装置。

【請求項17】

50

前記発光素子から前記検知器までの光路上に前記被検知物を保持する保持部材をさらに備える、請求項 16 に記載の検知装置。

【請求項 18】

前記発光素子から発せられる光の経路上に配置され、前記発光素子から特定の方向に出射した光線を透過させる透光領域を有する光学フィルタをさらに備える、請求項 16 または 17 に記載の検知装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本開示は、フォトルミネッセンス層を有する発光素子、発光装置および検知装置に関する。

10

【背景技術】

【0002】

照明器具、ディスプレイ、プロジェクターといった光学デバイスでは、多くの用途において、必要な方向に光を出射することが求められる。蛍光灯、白色 LED などで使用されるフォトルミネッセンス材料は等方的に発光する。よって、このような材料は、特定の方向のみに光を出射させるために、リフレクターやレンズなどの光学部品とともに用いられる。例えば、特許文献 1 は、配光板および補助反射板を用いて指向性を確保した照明システムを開示している。

【先行技術文献】

20

【特許文献】

【0003】

【特許文献 1】特開 2010 - 231941 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

光学デバイスにおいて、リフレクターやレンズなどの光学部品を配置すると、そのスペースを確保するために、光学デバイス自身のサイズを大きくする必要があり、これら光学部品は無くすか、少しでも小型化することが望ましい。

【0005】

30

本開示は、フォトルミネッセンス材料の発光効率、指向性、または偏光特性を制御することが可能な、新規な構造を有する発光素子並びにそれを備える発光装置および検知装置を提供する。

【課題を解決するための手段】

【0006】

本開示の一態様に係る発光素子は、フォトルミネッセンス層と、前記フォトルミネッセンス層に近接して配置された透光層と、前記フォトルミネッセンス層および前記透光層の少なくとも一方に形成された少なくとも一つの周期構造と、を有する。前記周期構造は、複数の凸部および複数の凹部の少なくとも一方を含み、前記フォトルミネッセンス層が発する光は、空気中の波長が λ_a の第 1 の光を含む。隣接する凸部間または凹部間の距離を D_{int} とし、前記第 1 の光に対する前記フォトルミネッセンス層の屈折率を $n_{wav-\lambda_a}$ とすると、 $\lambda_a / n_{wav-\lambda_a} < D_{int} < \lambda_a$ の関係が成り立つ。前記周期構造を介して前記フォトルミネッセンス層に垂直な方向に出射する光のスペクトルにおいて強度がピークとなる波長 A は、前記フォトルミネッセンス層から発せられる光の強度がピークとなる波長 B からずれている。

40

【0007】

上記の包括的または具体的な態様は、素子、装置、システム、方法、またはこれらの任意の組み合わせで実現されてもよい。

【発明の効果】

【0008】

50

本開示のある実施形態による発光素子、発光装置および検知装置は、新規な構成を有し、新規なメカニズムに従って、輝度、指向性、または偏光特性を制御することができる。

【図面の簡単な説明】

【0009】

【図1A】ある実施形態による発光素子の構成を示す斜視図である。

【図1B】図1Aに示す発光素子の部分断面図である。

【図1C】他の実施形態による発光素子の構成を示す斜視図である。

【図1D】図1Cに示す発光素子の部分断面図である。

【図2】発光波長および周期構造の高さをそれぞれ変えて、正面方向に出射する光の増強度を計算した結果を示す図である。

10

【図3】式(10)における $m = 1$ および $m = 3$ の条件を図示したグラフである。

【図4】発光波長およびフォトルミネッセンス層の厚さ t を変えて正面方向に出力する光の増強度を計算した結果を示す図である。

【図5A】厚さ $t = 238 \text{ nm}$ のときに、 x 方向に導波するモードの電場分布を計算した結果を示す図である。

【図5B】厚さ $t = 539 \text{ nm}$ のときに、 x 方向に導波するモードの電場分布を計算した結果を示す図である。

【図5C】厚さ $t = 300 \text{ nm}$ のときに、 x 方向に導波するモードの電場分布を計算した結果を示す図である。

【図6】図2の計算と同じ条件で、光の偏光が y 方向に垂直な電場成分を有するTEモードである場合について光の増強度を計算した結果を示す図である。

20

【図7A】2次元の周期構造の例を示す平面図である。

【図7B】2次元周期構造に関して図2と同様の計算を行った結果を示す図である。

【図8】発光波長および周期構造の屈折率を変えて正面方向に出力する光の増強度を計算した結果を示す図である。

【図9】図8と同様の条件でフォトルミネッセンス層の膜厚を 1000 nm にした場合の結果を示す図である。

【図10】発光波長および周期構造の高さを変えて正面方向に出力する光の増強度を計算した結果を示す図である。

【図11】図10と同様の条件で、周期構造の屈折率を $n_p = 2.0$ とした場合の計算結果を示す図である。

30

【図12】光の偏光が y 方向に垂直な電場成分を有するTEモードであるものとして図9に示す計算と同様の計算を行った結果を示す図である。

【図13】図9に示す計算と同様の条件で、フォトルミネッセンス層の屈折率 n_{wav} を 1.5 に変更した場合の結果を示す図である。

【図14】屈折率が 1.5 の透明基板の上に、図2に示す計算と同じ条件のフォトルミネッセンス層および周期構造を設けた場合の計算結果を示す図である。

【図15】式(15)の条件を図示したグラフである。

【図16】図1A、1Bに示す発光素子100と、励起光をフォトルミネッセンス層110に入射させる光源180とを備える発光装置200の構成例を示す図である。

40

【図17】励起光を擬似導波モードに結合させることで、効率よく光を出射させる構成を説明するための図であり、(a)は x 方向の周期 p_x を有する1次元周期構造を示し、(b)は x 方向の周期 p_x 、 y 方向の周期 p_y を有する2次元周期構造を示し、(c)は(a)の構成における光の吸収率の波長依存性を示し、(d)は(b)の構成における光の吸収率の波長依存性を示している。

【図18A】2次元周期構造の一例を示す図である。

【図18B】2次元周期構造の他の例を示す図である。

【図19A】透明基板上に周期構造を形成した変形例を示す図である。

【図19B】透明基板上に周期構造を形成した他の変形例を示す図である。

【図19C】図19Aの構成において、発光波長および周期構造の周期を変えて正面方向

50

に出力する光の増強度を計算した結果を示す図である。

【図 2 0】複数の粉末状の発光素子を混ぜた構成を示す図である。

【図 2 1】フォトルミネッセンス層の上に周期の異なる複数の周期構造を 2 次元に配列した例を示す平面図である。

【図 2 2】表面に凹凸構造が形成された複数のフォトルミネッセンス層 1 1 0 が積層された構造を有する発光素子の一例を示す図である。

【図 2 3】フォトルミネッセンス層 1 1 0 と周期構造 1 2 0 との間に保護層 1 5 0 を設けた構成例を示す断面図である。

【図 2 4】フォトルミネッセンス層 1 1 0 の一部のみを加工することによって周期構造 1 2 0 を形成した例を示す図である。

【図 2 5】周期構造を有するガラス基板上に形成されたフォトルミネッセンス層の断面 TEM 像を示す図である。

【図 2 6】試作した発光素子の出射光の正面方向のスペクトルを測定した結果を示すグラフである。

【図 2 7】(a) および (b) は、試作した発光素子の出射光の角度依存性を測定した結果 (上段) および計算結果 (下段) を示すグラフである。

【図 2 8】(a) および (b) は、試作した発光素子の出射光の角度依存性を測定した結果 (上段) および計算結果 (下段) を示すグラフである。

【図 2 9】試作した発光素子の出射光 (波長 6 1 0 n m) の角度依存性を測定した結果を示すグラフである。

【図 3 0】スラブ型導波路の一例を模式的に示す斜視図である。

【図 3 1 A】サブミクロン構造から 0 ° 方向に出射する光の強度の波長依存性の一例を示す図である。

【図 3 1 B】サブミクロン構造から 5 ° 方向に出射する光の強度の波長依存性の一例を示す図である。

【図 3 2】サブミクロン構造によって増強される光の波長および角度と、フォトルミネッセンス材料の発光スペクトルとの関係を示す図である。

【図 3 3 A】波長に応じて空間的に分光された光を出射する発光装置 3 0 0 の構成例を模式的に示す図である。

【図 3 3 B】発光装置の変形例を示す図である。

【図 3 3 C】発光装置の他の変形例を示す図である。

【図 3 3 D】発光装置のさらに他の変形例を示す図である。

【図 3 4】投影装置 (プロジェクター) 5 0 0 の構成例を示す図である。

【図 3 5 A】検知装置 4 0 0 の構成を模式的に示す図である。

【図 3 5 B】検知装置の変形例を示す図である。

【図 3 6】フォトルミネッセンス層 1 1 0 上に周期構造 1 2 0 を有する発光素子における発光増強効果を受ける光の波長および出射方向との関係を説明するための模式図である。

【図 3 7 A】(a) ~ (c) は、発光増強効果を示す波長が異なる複数の周期構造を配列した構成の例を示す模式的な平面図である。

【図 3 7 B】マイクロレンズを備える発光素子の模式的な断面図である。

【図 3 8】(a) および (b) は、発光波長が異なる複数のフォトルミネッセンス層を有する発光素子の模式的な断面図である。

【図 3 9】(a) ~ (d) は、フォトルミネッセンス層の下に拡散防止層 (バリア層) を有する発光素子の模式的な断面図である。

【図 4 0】(a) ~ (c) は、フォトルミネッセンス層の下に、結晶成長層 (シード層) を有する発光素子の模式的な断面図である。

【図 4 1】(a) および (b) は、周期構造を保護するための表面保護層を有する発光素子の模式的な断面図である。

【図 4 2】(a) ~ (d) は、透明高熱伝導層を有する発光素子の模式的な断面図である。

。

10

20

30

40

50

【図 4 3】(a) ~ (d) は、放熱特性が改善された発光装置の模式的な断面図である。

【図 4 4】(a) ~ (d) は、高熱伝導部材を有する発光素子の模式図である。

【図 4 5】(a) および (b) は、タイリングされた複数の発光素子における高熱伝導部材の配置の例を示す模式図である。

【図 4 6】(a) および (b) は、インターロック回路を備える発光装置の例を示す模式図である。

【図 4 7】(a) ~ (f) は、ビーズを用いたサブミクロン構造の形成方法を説明するための図である。

【図 4 8】本開示の発光素子をスクリーンとして備える透明ディスプレイの構成を示す模式図である。

10

【発明を実施するための形態】

【0010】

本開示は、以下の項目に記載の発光素子および発光装置を含む。

[項目 1]

フォトルミネッセンス層と、

前記フォトルミネッセンス層に近接して配置された透光層と、

前記フォトルミネッセンス層および前記透光層の少なくとも一方に形成され、前記フォトルミネッセンス層または前記透光層の面内に広がるサブミクロン構造と、を有し、

前記サブミクロン構造は、複数の凸部または複数の凹部を含み、

前記フォトルミネッセンス層が発する光は、空気中の波長が λ_a の第 1 の光を含み、

20

隣接する凸部間または凹部間の距離を D_{int} とし、前記第 1 の光に対する前記フォトルミネッセンス層の屈折率を n_{wav-a} とすると、 $\lambda_a / n_{wav-a} < D_{int} < \lambda_a$ の関係が成り立つ、発光素子。

[項目 2]

前記サブミクロン構造は、前記複数の凸部または前記複数の凹部によって形成された少なくとも 1 つの周期構造を含み、前記少なくとも 1 つの周期構造は、周期を p_a とすると、 $\lambda_a / n_{wav-a} < p_a < \lambda_a$ の関係が成り立つ第 1 周期構造を含む、項目 1 に記載の発光素子。

[項目 3]

前記第 1 の光に対する前記透光層の屈折率 n_{t-a} は、前記第 1 の光に対する前記フォトルミネッセンス層の屈折率 n_{wav-a} よりも小さい、項目 1 または 2 に記載の発光素子。

30

[項目 4]

前記第 1 の光は、前記サブミクロン構造によって予め決められた第 1 の方向において強度が最大になる、項目 1 から 3 のいずれかに記載の発光素子。

[項目 5]

前記第 1 の方向は、前記フォトルミネッセンス層の法線方向である、項目 4 に記載の発光素子。

[項目 6]

前記第 1 の方向に出射された前記第 1 の光は、直線偏光である、項目 4 または 5 に記載の発光素子。

40

[項目 7]

前記第 1 の光の前記第 1 の方向を基準としたときの指向角は、 15° 未満である、項目 4 から 6 のいずれかに記載の発光素子。

[項目 8]

前記第 1 の光の波長 λ_a と異なる波長 λ_b を有する第 2 の光は、前記第 1 の方向と異なる第 2 の方向において強度が最大となる、項目 4 から 7 のいずれかに記載の発光素子。

[項目 9]

前記透光層が前記サブミクロン構造を有する、項目 1 から 8 のいずれかに記載の発光素子。

[項目 10]

50

前記フォトルミネッセンス層が前記サブミクロン構造を有する、項目 1 から 9 のいずれかに記載の発光素子。

[項目 1 1]

前記フォトルミネッセンス層は、平坦な主面を有し、

前記透光層は前記フォトルミネッセンス層の前記平坦な主面上に形成されており、かつ、前記サブミクロン構造を有する、項目 1 から 8 のいずれかに記載の発光素子。

[項目 1 2]

前記フォトルミネッセンス層は、透明基板に支持されている、項目 1 1 に記載の発光素子。

[項目 1 3]

前記透光層は、前記サブミクロン構造を一方の主面に有する透明基板であって、

前記フォトルミネッセンス層は、前記サブミクロン構造の上に形成されている、項目 1 から 8 のいずれかに記載の発光素子。

[項目 1 4]

前記第 1 の光に対する前記透光層の屈折率 n_{t-a} は、前記第 1 の光に対する前記フォトルミネッセンス層の屈折率 n_{wav-a} 以上であって、前記サブミクロン構造が有する前記複数の凸部の高さまたは前記複数の凹部の深さは 150 nm 以下である、項目 1 または 2 に記載の発光素子。

[項目 1 5]

前記サブミクロン構造は、前記複数の凸部または前記複数の凹部によって形成された少なくとも 1 つの周期構造を含み、前記少なくとも 1 つの周期構造は、周期を p_a とすると

、 $p_a / n_{wav-a} < p_a < p_a$ の関係が成り立つ第 1 周期構造を含み、

前記第 1 周期構造は、1 次元周期構造である、項目 1 および 3 から 1 4 のいずれかに記載の発光素子。

[項目 1 6]

前記フォトルミネッセンス層が発する光は、空気中の波長が λ_a と異なる λ_b の第 2 の光を含み、前記第 2 の光に対する前記フォトルミネッセンス層の屈折率を n_{wav-b} とすると、

前記少なくとも 1 つの周期構造は、周期を p_b とすると、 $p_b / n_{wav-b} < p_b < p_b$ の関係が成り立つ第 2 周期構造をさらに含み、

前記第 2 周期構造は、1 次元周期構造である、項目 1 5 に記載の発光素子。

[項目 1 7]

前記サブミクロン構造は、前記複数の凸部または前記複数の凹部によって形成された少なくとも 2 つの周期構造を含み、前記少なくとも 2 つの周期構造は、互いに異なる方向に周期性を有する 2 次元周期構造を含む、項目 1 および 3 から 1 4 のいずれかに記載の発光素子。

[項目 1 8]

前記サブミクロン構造は、前記複数の凸部または前記複数の凹部によって形成された複数の周期構造を含み、

前記複数の周期構造は、マトリクス状に配列された複数の周期構造を含む、項目 1 および 3 から 1 4 のいずれかに記載の発光素子。

[項目 1 9]

前記サブミクロン構造は、前記複数の凸部または前記複数の凹部によって形成された複数の周期構造を含み、

前記フォトルミネッセンス層が有するフォトルミネッセンス材料の励起光の空気中における波長を λ_{ex} とし、前記励起光に対する前記フォトルミネッセンス層の屈折率を n_{wav-ex} とすると、

前記複数の周期構造は、周期 p_{ex} が、 $p_{ex} / n_{wav-ex} < p_{ex} < p_{ex}$ の関係が成り立つ周期構造を含む、項目 1 および 3 から 1 4 のいずれかに記載の発光素子。

[項目 2 0]

10

20

30

40

50

複数のフォトルミネッセンス層と、複数の透光層とを有し、

前記複数のフォトルミネッセンス層の少なくとも2つと前記複数の透光層の少なくとも2つとは、それぞれ独立に、項目1から19のいずれかに記載の前記フォトルミネッセンス層と前記透光層とにそれぞれ該当する、発光素子。

[項目21]

前記複数のフォトルミネッセンス層と前記複数の透光層は、積層されている、項目20に記載の発光素子。

[項目22]

フォトルミネッセンス層と、

前記フォトルミネッセンス層に近接して配置された透光層と、

前記フォトルミネッセンス層および前記透光層の少なくとも一方に形成され、前記フォトルミネッセンス層または前記透光層の面内に広がるサブミクロン構造と、を有し、

前記フォトルミネッセンス層および前記透光層の内部に擬似導波モードを形成する光を出射する、発光素子。

[項目23]

光が導波することができる導波層と、

前記導波層に近接して配置された周期構造と

を備え、

前記導波層はフォトルミネッセンス材料を有し、

前記導波層において、前記フォトルミネッセンス材料から発せられた光が前記周期構造と作用しながら導波する擬似導波モードが存在する、発光素子。

[項目24]

フォトルミネッセンス層と、

前記フォトルミネッセンス層に近接して配置された透光層と、

前記フォトルミネッセンス層および前記透光層の少なくとも一方に形成され、前記フォトルミネッセンス層または前記透光層の面内に広がるサブミクロン構造と、を有し、

前記サブミクロン構造は、複数の凸部または複数の凹部を含み、

隣接する凸部間または凹部間の距離を D_{int} とし、前記フォトルミネッセンス層が有するフォトルミネッセンス材料の励起光の空気中における波長を λ_{ex} とし、前記励起光に対する前記フォトルミネッセンス層または前記透光層に至る光路に存在する媒質の中で最も屈折率の大きい媒質の屈折率を n_{wav-ex} とすると、 $\lambda_{ex} / n_{wav-ex} < D_{int} < \lambda_{ex}$ の関係が成り立つ、発光素子。

[項目25]

前記サブミクロン構造は、前記複数の凸部または前記複数の凹部によって形成された少なくとも1つの周期構造を含み、前記少なくとも1つの周期構造は、周期を p_{ex} とすると、 $\lambda_{ex} / n_{wav-ex} < p_{ex} < \lambda_{ex}$ の関係が成り立つ第1周期構造を含む、項目24に記載の発光素子。

[項目26]

透光層と、

前記透光層に形成され、前記透光層の面内に広がるサブミクロン構造と、

前記サブミクロン構造に近接して配置されたフォトルミネッセンス層と、を有し、

前記サブミクロン構造は、複数の凸部または複数の凹部を含み、

前記フォトルミネッセンス層が発する光は、空気中の波長が λ_a の第1の光を含み、

前記サブミクロン構造は、前記複数の凸部または前記複数の凹部によって形成された少なくとも1つの周期構造を含み、

前記第1の光に対する前記フォトルミネッセンス層の屈折率を n_{wav-a} とし、前記少なくとも1つの周期構造の周期を p_a とすると、 $\lambda_a / n_{wav-a} < p_a < \lambda_a$ の関係が成り立つ、発光素子。

[項目27]

フォトルミネッセンス層と、

10

20

30

40

50

前記フォトルミネッセンス層よりも高い屈折率を有する透光層と、
 前記透光層に形成され、前記透光層の面内に広がるサブミクロン構造と、を有し、
 前記サブミクロン構造は、複数の凸部または複数の凹部を含み、
 前記フォトルミネッセンス層が発する光は、空気中の波長が λ_a の第 1 の光を含み、
 前記サブミクロン構造は、前記複数の凸部または前記複数の凹部によって形成された少
 なくとも 1 つの周期構造を含み、
 前記第 1 の光に対する前記フォトルミネッセンス層の屈折率を $n_{\text{wav}-a}$ とし、前記少な
 くとも 1 つの周期構造の周期を p_a とすると、 $\lambda_a / n_{\text{wav}-a} < p_a < \lambda_a$ の関係が成り立つ
 、発光素子。

[項目 2 8]

フォトルミネッセンス層と、
 前記フォトルミネッセンス層に形成され、前記フォトルミネッセンス層の面内に広がる
 サブミクロン構造と、を有し、
 前記サブミクロン構造は、複数の凸部または複数の凹部を含み、
 前記フォトルミネッセンス層が発する光は、空気中の波長が λ_a の第 1 の光を含み、
 前記サブミクロン構造は、前記複数の凸部または前記複数の凹部によって形成された少
 なくとも 1 つの周期構造を含み、
 前記第 1 の光に対する前記フォトルミネッセンス層の屈折率を $n_{\text{wav}-a}$ とし、前記少な
 くとも 1 つの周期構造の周期を p_a とすると、 $\lambda_a / n_{\text{wav}-a} < p_a < \lambda_a$ の関係が成り立つ
 、発光素子。

[項目 2 9]

前記サブミクロン構造は、前記複数の凸部と前記複数の凹部との双方を含む、項目 1 か
 ら 2 1、2 4 から 2 8 のいずれかに記載の発光素子。

[項目 3 0]

前記フォトルミネッセンス層と前記透光層とが互いに接している、項目 1 から 2 2、2
 4 から 2 7 のいずれかに記載の発光素子。

[項目 3 1]

前記導波層と前記周期構造とが互いに接している、項目 2 3 に記載の発光素子。

[項目 3 2]

項目 1 から 3 1 のいずれかに記載の発光素子と、
 前記フォトルミネッセンス層に励起光を照射する、励起光源と、
 を備える発光装置。

[項目 3 3]

フォトルミネッセンス層と、
 前記フォトルミネッセンス層に近接して配置された透光層と、
 前記フォトルミネッセンス層および前記透光層の少なくとも一方に形成された少なくと
 も一つの周期構造と、を有し、
 前記周期構造は、複数の凸部および複数の凹部の少なくとも一方を含み、
 前記フォトルミネッセンス層が発する光は、空気中の波長が λ_a の第 1 の光を含み、
 隣接する凸部間または凹部間の距離を D_{int} とし、前記第 1 の光に対する前記フォトル
 ミネッセンス層の屈折率を $n_{\text{wav}-a}$ とすると、 $\lambda_a / n_{\text{wav}-a} < D_{\text{int}} < \lambda_a$ の関係が成り立
 ち、

前記周期構造を介して前記フォトルミネッセンス層に垂直な方向に出射する光のスペク
 トルにおいて強度がピークとなる波長 A が、前記フォトルミネッセンス層から発せられる
 光の強度がピークとなる波長 B からずれている、
 発光素子。

[項目 3 4]

前記波長 A が前記波長 B よりも大きい、項目 3 3 に記載の発光素子。

[項目 3 5]

前記フォトルミネッセンス層に含まれるフォトルミネッセンス材料の発光スペクトルの

10

20

30

40

50

半値半幅を H W H M とすると、前記波長 A は、前記波長 B から H W H M 以上ずれている、項目 3 3 または 3 4 に記載の発光素子。

[項目 3 6]

前記フォトルミネッセンス層に含まれるフォトルミネッセンス材料の発光スペクトルにおいて、強度がピークの半分となる波長が 2 つ存在し、

前記 2 つの波長のうち、前記波長 B との差がより大きい波長 C と、前記波長 B との差を W とすると、前記波長 A は、前記波長 B から W 以上ずれている、項目 3 3 から 3 5 のいずれかに記載の発光素子。

[項目 3 7]

前記波長 λ_a は、前記波長 A と一致する、項目 3 3 から 3 6 のいずれかに記載の発光素子。

10

[項目 3 8]

透光層と、

前記透光層に形成された少なくとも一つの周期構造と、

前記周期構造に近接して配置されたフォトルミネッセンス層と、を有し、

前記周期構造は、複数の凸部および複数の凹部の少なくとも一方を含み、

前記フォトルミネッセンス層が発する光は、空気中の波長が λ_a の第 1 の光を含み、

前記第 1 の光に対する前記フォトルミネッセンス層の屈折率を n_{wav-a} とし、前記周期構造の周期を p_a とすると、 $\lambda_a / n_{wav-a} < p_a < \lambda_a$ の関係が成り立ち、

前記周期構造を介して前記フォトルミネッセンス層に垂直な方向に出射する光のスペクトルにおいて強度がピークとなる波長 A が、前記フォトルミネッセンス層から発せられる光の強度がピークとなる波長 B からずれている、
発光素子。

20

[項目 3 9]

フォトルミネッセンス層と、

前記フォトルミネッセンス層よりも高い屈折率を有する透光層と、

前記透光層に形成された少なくとも一つの周期構造と、を有し、

前記周期構造は、複数の凸部および複数の凹部の少なくとも一方を含み、

前記フォトルミネッセンス層が発する光は、空気中の波長が λ_a の第 1 の光を含み、

前記第 1 の光に対する前記フォトルミネッセンス層の屈折率を n_{wav-a} とし、前記周期構造の周期を p_a とすると、 $\lambda_a / n_{wav-a} < p_a < \lambda_a$ の関係が成り立ち、

30

前記周期構造を介して前記フォトルミネッセンス層に垂直な方向に出射する光のスペクトルにおいて強度がピークとなる波長 A が、前記フォトルミネッセンス層から発せられる光の強度がピークとなる波長 B からずれている、
発光素子。

[項目 4 0]

前記フォトルミネッセンス層と前記透光層とが互いに接している、項目 3 3 から 3 9 のいずれかに記載の発光素子。

[項目 4 1]

フォトルミネッセンス層と、

前記フォトルミネッセンス層に形成された少なくとも一つの周期構造と、を有し、

前記周期構造は、複数の凸部および複数の凹部の少なくとも一方を含み、

前記フォトルミネッセンス層が発する光は、空気中の波長が λ_a の第 1 の光を含み、

前記第 1 の光に対する前記フォトルミネッセンス層の屈折率を n_{wav-a} とし、前記周期構造の周期を p_a とすると、 $\lambda_a / n_{wav-a} < p_a < \lambda_a$ の関係が成り立ち、

40

前記周期構造を介して前記フォトルミネッセンス層に垂直な方向に出射する光のスペクトルにおいて強度がピークとなる波長 A が、前記フォトルミネッセンス層から発せられる光の強度がピークとなる波長 B からずれている、
発光素子。

[項目 4 2]

50

項目 3 3 から 4 1 のいずれかに記載の発光素子と、
前記発光素子から複数の方向にそれぞれ発せられた複数の光線の経路上にそれぞれ配置された複数の透光領域を有する光学シャッタであって、前記複数の透光領域の光透過率を個別に変化させる光学シャッタと、
を備える発光装置。

[項目 4 3]

項目 4 2 に記載の発光装置と、
前記光学シャッタから出射した光を集束させる光学系と、
を備える投影装置。

[項目 4 4]

項目 3 3 から 4 1 のいずれかに記載の発光素子と、
前記発光素子から発せられる光の経路上に配置され、前記発光素子から特定の方向に出射した光線を透過させる透光領域を有する光学フィルタと、
を備える発光装置。

[項目 4 5]

前記光学フィルタは、前記透光領域を含む複数の透光領域を有し、
前記複数の透光領域は、前記発光素子から特定の複数の方向にそれぞれ出射した複数の光線を透過させる、
項目 4 4 に記載の発光装置。

[項目 4 6]

前記透光領域を、異なる波長の光線が透過するように、前記発光素子を回転させる機構をさらに備える、項目 4 4 または 4 5 に記載の発光装置。

[項目 4 7]

前記透光領域を、異なる波長の光線が透過するように、前記光学フィルタを前記光線と交差する方向に移動させる機構をさらに備える、項目 4 4 または 4 5 に記載の発光装置。

[項目 4 8]

項目 3 3 から 4 1 のいずれかに記載の発光素子と、
前記発光素子から出射された光の経路上に配置され、被検知物を検知する検知器と、
を備える検知装置。

[項目 4 9]

前記発光素子から前記検知器までの光路上に前記被検知物を保持する保持部材をさらに備える、項目 4 8 に記載の検知装置。

[項目 5 0]

前記発光素子から発せられる光の経路上に配置され、前記発光素子から特定の方向に出射した光線を透過させる透光領域を有する光学フィルタをさらに備える、項目 4 8 または 4 9 に記載の検知装置。

【 0 0 1 1 】

本開示の実施形態による発光素子は、フォトルミネッセンス層と、前記フォトルミネッセンス層に近接して配置された透光層と、前記フォトルミネッセンス層および前記透光層の少なくとも一方に形成され、前記フォトルミネッセンス層または前記透光層の面内に広がるサブミクロン構造とを有し、前記サブミクロン構造は、複数の凸部または複数の凹部を含み、隣接する凸部間または凹部間の距離を D_{int} とし、前記フォトルミネッセンス層が発する光は、空気中の波長が λ_a の第 1 の光を含み、前記第 1 の光に対する前記フォトルミネッセンス層の屈折率を n_{wav-a} とすると、 $\lambda_a / n_{wav-a} < D_{int} < \lambda_a$ の関係が成り立つ。波長 λ_a は、例えば、可視光の波長範囲内（例えば、380 nm 以上 780 nm 以下）にある。

【 0 0 1 2 】

フォトルミネッセンス層は、フォトルミネッセンス材料を含む。フォトルミネッセンス材料は、励起光を受けて発光する材料を意味する。フォトルミネッセンス材料は、狭義の蛍光材料および燐光材料を包含し、無機材料だけでなく、有機材料（例えば色素）を包含し

10

20

30

40

50

、さらには、量子ドット（即ち、半導体微粒子）を包含する。フォトルミネッセンス層は、フォトルミネッセンス材料に加えて、マトリクス材料（即ち、ホスト材料）を含んでもよい。マトリクス材料は、例えば、ガラスや酸化物などの無機材料や樹脂である。

【0013】

フォトルミネッセンス層に近接して配置される透光層は、フォトルミネッセンス層が発する光に対して透過率が高い材料で形成され、例えば、無機材料や樹脂で形成される。透光層は、例えば誘電体（特に、光の吸収が少ない絶縁体）で形成されていることが望ましい。透光層は、例えば、フォトルミネッセンス層を支持する基板であってよい。また、フォトルミネッセンス層の空気側の表面がサブミクロン構造を有する場合、空気層が透光層となり得る。

10

【0014】

本開示の実施形態による発光素子においては、後に計算結果および実験結果を参照して詳述するように、フォトルミネッセンス層および透光層の少なくとも一方に形成されたサブミクロン構造（例えば、周期構造）によって、フォトルミネッセンス層および透光層の内部に、ユニークな電場分布を形成する。これは、導波光がサブミクロン構造と相互作用して形成されるものであり、擬似導波モードと表現することもできる。この擬似導波モードを活用することで、以下で説明するように、フォトルミネッセンスの発光効率の増大、指向性の向上、偏光の選択性の効果を得ることができる。なお、以下の説明において、擬似導波モードという用語を使って、本発明者らが見出した、新規な構成および/または新規なメカニズムを説明することがあるが、1つの例示的な説明に過ぎず、本開示をいかなる意味においても限定するものではない。

20

【0015】

サブミクロン構造は、例えば複数の凸部を含み、隣接する凸部間の距離（即ち、中心間距離）を D_{int} とすると、 $\lambda_a / n_{wav-a} < D_{int} < \lambda_a$ の関係を満足する。サブミクロン構造は、複数の凸部に代えて複数の凹部を含んでもよい。以下では、簡単のために、サブミクロン構造が複数の凸部を有する場合を説明する。 λ_a は光の波長を表し、 λ_a は空気中の光の波長であることを表現する。 n_{wav} はフォトルミネッセンス層の屈折率である。フォトルミネッセンス層が複数の材料を混合した媒質である場合、各材料の屈折率をそれぞれの体積比率で重み付けした平均屈折率を n_{wav} とする。一般に屈折率 n は波長に依存するので、 λ_a の光に対する屈折率であることを n_{wav-a} と明示することが望ましいが、簡単のために省略することがある。 n_{wav} は基本的にフォトルミネッセンス層の屈折率であるが、フォトルミネッセンス層に隣接する層の屈折率がフォトルミネッセンス層の屈折率よりも大きい場合、当該屈折率が大きい層の屈折率およびフォトルミネッセンス層の屈折率をそれぞれの体積比率で重み付けした平均屈折率を n_{wav} とする。この場合は、光学的には、フォトルミネッセンス層が複数の異なる材料の層で構成されている場合と等価であるからである。

30

【0016】

擬似導波モードの光に対する媒質の有効屈折率を n_{eff} とすると、 $n_a < n_{eff} < n_{wav}$ を満たす。ここで、 n_a は空気の屈折率である。擬似導波モードの光を、フォトルミネッセンス層の内部を入射角 θ で全反射しながら伝播する光であると考えると、有効屈折率 n_{eff} は、 $n_{eff} = n_{wav} \sin \theta$ と書ける。また、有効屈折率 n_{eff} は、擬似導波モードの電場が分布する領域に存在する媒質の屈折率によって決まるので、例えば、サブミクロン構造が透光層に形成されている場合、フォトルミネッセンス層の屈折率だけでなく、透光層の屈折率にも依存する。また、擬似導波モードの偏光方向（TEモードとTMモード）により、電場の分布は異なるので、TEモードとTMモードとでは有効屈折率 n_{eff} は異なり得る。

40

【0017】

サブミクロン構造は、フォトルミネッセンス層および透光層の少なくとも一方に形成される。フォトルミネッセンス層と透光層とが互いに接するとき、フォトルミネッセンス層と透光層との界面にサブミクロン構造が形成されてもよい。このとき、フォトルミネッセ

50

ンス層および透光層がサブミクロン構造を有する。フォトルミネッセンス層はサブミクロン構造を有さなくてもよい。このとき、サブミクロン構造を有する透光層がフォトルミネッセンス層に近接して配置される。ここで、透光層（またはそのサブミクロン構造）がフォトルミネッセンス層に近接するとは、典型的には、これらの間の距離が、波長 λ_a の半分以下であることをいう。これにより、導波モードの電場がサブミクロン構造に到達し、擬似導波モードが形成される。ただし、透光層の屈折率がフォトルミネッセンス層の屈折率よりも大きいときには上記の関係を満足しなくても透光層まで光が到達するため、透光層のサブミクロン構造とフォトルミネッセンス層との間の距離は、波長 λ_a の半分超であってもよい。本明細書では、フォトルミネッセンス層と透光層とが、導波モードの電場がサブミクロン構造に到達し、擬似導波モードが形成されるような配置関係にあるとき、両者が互いに関連付けられていると表現することがある。

10

【0018】

サブミクロン構造は、上記のように、 $\lambda_a / n_{\text{wav-a}} < D_{\text{int}} < \lambda_a$ の関係を満足するので、サブミクロンオーダーの大きさで特徴づけられる。サブミクロン構造は、例えば、以下に詳細に説明する実施形態の発光素子におけるように、少なくとも1つの周期構造を含む。少なくとも1つの周期構造は、周期を p_a とすると、 $\lambda_a / n_{\text{wav-a}} < p_a < \lambda_a$ の関係が成り立つ。すなわち、サブミクロン構造は、隣接する凸部間の距離 D_{int} が p_a で一定の周期構造を有する。サブミクロン構造が周期構造を含むと、擬似導波モードの光は、伝播しながら周期構造と相互作用を繰り返すことにより、サブミクロン構造によって回折される。これは、自由空間を伝播する光が周期構造により回折する現象とは異なり、光が導波しながら（即ち、全反射を繰り返しながら）周期構造と作用する現象である。したがって、周期構造による位相シフトが小さくても（即ち、周期構造の高さが小さくても）効率よく光の回折を起こすことができる。

20

【0019】

以上のようなメカニズムを利用すれば、擬似導波モードにより電場が増強される効果によって、フォトルミネッセンスの発光効率が增大するとともに、発生した光が擬似導波モードに結合する。擬似導波モードの光は、周期構造で規定される回折角度だけ進行角度が曲げられる。これを利用することによって、特定の波長の光を特定の方向に出射することができる（指向性が顕著に向上）。さらに、TEとTMモードで有効屈折率 $n_{\text{eff}} (= n_{\text{wav}} \sin \theta)$ が異なるので、高い偏光の選択性を同時に得ることもできる。例えば、後に実験例を示すように、特定の波長（例えば610nm）の直線偏光（例えばTMモード）を正面方向に強く出射する発光素子を得ることができる。このとき、正面方向に出射される光の指向角は例えば15°未満である。なお、指向角は正面方向を0°とした片側の角度とする。

30

【0020】

逆に、サブミクロン構造の周期性が低くなると、指向性、発光効率、偏光度および波長選択性が弱くなる。必要に応じて、サブミクロン構造の周期性を調整すればよい。周期構造は、偏光の選択性が高い1次元周期構造であってもよいし、偏光度を小さくできる2次元周期構造であってもよい。

【0021】

また、サブミクロン構造は、複数の周期構造を含み得る。複数の周期構造は、例えば、周期（ピッチ）が互いに異なる。あるいは、複数の周期構造は、例えば、周期性を有する方向（軸）が互いに異なる。複数の周期構造は、同一面内に形成されてもよいし、積層されてもよい。もちろん、発光素子は、複数のフォトルミネッセンス層と複数の透光層とを有し、これらが複数のサブミクロン構造を有してもよい。

40

【0022】

サブミクロン構造は、フォトルミネッセンス層が発する光を制御するためだけでなく、励起光を効率よくフォトルミネッセンス層に導くためにも用いることができる。すなわち、励起光がサブミクロン構造により回折されフォトルミネッセンス層および透光層を導波する擬似導波モードに結合することで、効率よくフォトルミネッセンス層を励起すること

50

ができる。フォトルミネッセンス材料を励起する光の空気中における波長を λ_{ex} とし、この励起光に対するフォトルミネッセンス層の屈折率を n_{wav-ex} とすると、 $\lambda_{ex} / n_{wav-ex} < D_{int} < \lambda_{ex}$ の関係が成り立つサブミクロン構造を用いればよい。 n_{wav-ex} はフォトルミネッセンス材料の励起波長における屈折率である。周期を p_{ex} とすると、 $\lambda_{ex} / n_{wav-ex} < p_{ex} < \lambda_{ex}$ の関係が成り立つ周期構造を有するサブミクロン構造を用いてもよい。励起光の波長 λ_{ex} は、例えば、450 nm であるが、可視光よりも短波長であってもよい。励起光の波長が可視光の範囲内にある場合、フォトルミネッセンス層が発する光とともに、励起光を出射するようにしてもよい。

【0023】

[1. 本開示の基礎となった知見]

本開示の具体的な実施形態を説明する前に、まず、本開示の基礎となった知見を説明する。上述のように、蛍光灯、白色LEDなどで使われるフォトルミネッセンス材料は等方的に発光するので、特定の方向を光で照らすためには、リフレクターやレンズなどの光学部品が必要である。しかしながら、もしフォトルミネッセンス層自身が指向性をもって発光すれば、上記のような光学部品は不要になるので（若しくは小さくできるので）、光学デバイスや器具の大きさを大幅に小さくすることができる。本発明者らは、このような着想に基づき、指向性発光を得るために、フォトルミネッセンス層の構成を詳細に検討した。

10

【0024】

本発明者らは、まず、フォトルミネッセンス層からの光が特定の方向に偏るようにするため、発光自体に特定の方向性をもたせることを考えた。発光を特徴付ける指標である発光レート Γ は、フェルミの黄金則により、以下の式(1)で表される。

20

【数1】

$$\Gamma(\mathbf{r}) = \frac{2\pi}{\hbar} \langle (\mathbf{d} \cdot \mathbf{E}(\mathbf{r})) \rangle^2 \rho(\lambda) \quad (1)$$

【0025】

式(1)において、 \mathbf{r} は位置を表すベクトル、 λ は光の波長、 \mathbf{d} は双極子ベクトル、 \mathbf{E} は電場ベクトル、 ρ は状態密度である。一部の結晶性物質を除く多くの物質では、双極子ベクトル \mathbf{d} はランダムな方向性を有している。また、フォトルミネッセンス層のサイズと厚さが光の波長よりも十分に大きい場合、電場 \mathbf{E} の大きさも向きに依らずほとんど一定である。よって、ほとんどの場合、 $\langle (\mathbf{d} \cdot \mathbf{E}(\mathbf{r})) \rangle^2$ の値は方向に依らない。即ち、発光レート Γ は方向に依らず一定である。このため、ほとんどの場合においてフォトルミネッセンス層は等方的に発光する。

30

【0026】

一方、式(1)から、異方的な発光を得るためには、双極子ベクトル \mathbf{d} を特定の方向に揃えるか、電場ベクトルの特定方向の成分を増強するかのいずれかの工夫が必要である。これらのいずれかの工夫を行うことで、指向性発光を実現できる。本開示では、フォトルミネッセンス層へ光を閉じ込める効果により、特定方向の電場成分が増強された擬似導波モードを利用するための構成について検討し、詳細に分析した結果を以下に説明する。

40

【0027】

[2. 特定の方向の電場のみを強くする構成]

本願発明者らは、電場が強い導波モードを用いて、発光の制御を行うことを考えた。導波構造自体がフォトルミネッセンス材料を含む構成とすることで、発光を導波モードに結合させることができる。しかし、ただ単にフォトルミネッセンス材料を用いて導波構造を形成しただけでは、発せられた光が導波モードとなるため、正面方向へはほとんど光は出てこない。そこで、フォトルミネッセンス材料を含む導波路と周期構造（複数の凸部およ

50

び複数の凹部の少なくとも一方で形成された)とを組み合わせることを考えた。導波路に周期構造が近接し、光の電場が周期構造と重なりながら導波する場合、周期構造の作用により擬似導波モードが存在する。つまり、この擬似導波モードは、周期構造により制限された導波モードであり、電場振幅の腹が周期構造の周期と同じ周期で発生することを特徴とする。このモードは、光が導波構造に閉じ込められることにより特定方向への電場が強められたモードである。さらに、このモードは周期構造と相互作用することで、回折効果により特定方向の伝播光へと変換されるため、導波路外部へと光を出射することができる。さらに、擬似導波モード以外の光は導波路内に閉じ込められる効果が小さいため、電場は増強されない。よって、発光のほとんどは大きな電場成分を有する擬似導波モードへと結合することになる。

10

【0028】

つまり、本願発明者らは、周期構造が近接して設けられた導波路を、フォトルミネッセンス材料を含むフォトルミネッセンス層(あるいはフォトルミネッセンス層を有する導波層)とすることで、発光を特定方向の伝播光へと変換される擬似導波モードへ結合させ、指向性のある光源を実現することを考えた。

【0029】

導波構造の簡便な構成として、スラブ型導波路に着目した。スラブ型導波路とは、光の導波部分が平板構造を有する導波路のことである。図30は、スラブ型導波路110Sの一例を模式的に示す斜視図である。導波路110Sの屈折率が導波路110Sを支持する透明基板140の屈折率よりも高いとき、導波路110S内を伝播する光のモードが存在する。このようなスラブ型導波路をフォトルミネッセンス層を含む構成とすることで、発光点から生じた光の電場が導波モードの電場と大きく重なりをもつので、フォトルミネッセンス層で生じた光の大部分を導波モードに結合させることができる。さらに、フォトルミネッセンス層の厚さを光の波長程度とすることにより、電場振幅の大きい導波モードのみが存在する状況を作り出すことができる。

20

【0030】

さらに、フォトルミネッセンス層に周期構造が近接する場合には、導波モードの電場が周期構造と相互作用することで擬似導波モードが形成される。フォトルミネッセンス層が複数の層で構成されている場合でも、導波モードの電場が周期構造に達していれば、擬似導波モードが形成されることになる。フォトルミネッセンス層の全てがフォトルミネッセンス材料である必要はなく、その少なくとも一部の領域が発光する機能を有していればよい。

30

【0031】

また、周期構造を金属で形成した場合には、導波モードとプラズモン共鳴の効果によるモードが形成され、上で述べた擬似導波モードとは異なる性質となる。また、このモードは金属による吸収が大きいためロスが大きくなり、発光増強の効果は小さくなる。したがって、周期構造としては、吸収の少ない誘電体を用いるのが望ましい。

【0032】

本発明者らは、まずこのような導波路(例えば、フォトルミネッセンス層)の表面に、周期構造を形成することで、特定の角度方向の伝播光として出射することのできる擬似導波モードに発光を結合させることについて検討を行った。図1Aは、そのような導波路(例えば、フォトルミネッセンス層)110と周期構造(例えば、透光層)120とを有する発光素子100の一例を模式的に示す斜視図である。以下、透光層120が周期構造を形成している場合(即ち、透光層120に周期的なサブミクロン構造が形成されている場合)、透光層120を周期構造120とすることがある。この例では、周期構造120は、各々がy方向に延びるストライプ状の複数の凸部がx方向に等間隔に並んだ1次元周期構造である。図1Bは、この発光素子100をxz面に平行な平面で切断したときの断面図である。導波路110に接するように周期pの周期構造120を設けると、面内方向の波数 k_{wav} をもつ擬似導波モードは、導波路外の伝播光へと変換され、その波数 k_{out} は以下の式(2)で表すことができる。

40

50

【数 2】

$$k_{out} = k_{wav} - m \frac{2\pi}{p} \quad (2)$$

式(2)における m は整数であり、回折の次数を表す。

【0033】

ここで、簡単のため、近似的に導波路内を導波する光を角度 θ_{wav} で伝播する光線であると考え、以下の式(3)および(4)が成立するとする。 10

【数 3】

$$\frac{k_{wav} \lambda_0}{2\pi} = n_{wav} \sin \theta_{wav} \quad (3)$$

【数 4】

20

$$\frac{k_{out} \lambda_0}{2\pi} = n_{out} \sin \theta_{out} \quad (4)$$

【0034】

これらの式において、 λ_0 は光の空気中の波長、 n_{wav} は導波路の屈折率、 n_{out} は出射側の媒質の屈折率、 θ_{out} は光が導波路外の基板または空気に出射するときの出射角度である。式(2)～(4)から、出射角度 θ_{out} は、以下の式(5)で表すことができる。

【数 5】

30

$$n_{out} \sin \theta_{out} = n_{wav} \sin \theta_{wav} - m \lambda_0 / p \quad (5)$$

【0035】

式(5)より、 $n_{wav} \sin \theta_{wav} = m \lambda_0 / p$ が成立するとき、 $\theta_{out} = 0$ となり、導波路の面に垂直な方向(即ち、正面)に光を出射させることができることがわかる。

【0036】

以上のような原理に基づけば、発光を特定の擬似導波モードに結合させ、さらに周期構造を利用して特定の出射角度の光に変換することにより、その方向に強い光を出射させることができると考えられる。 40

【0037】

上記のような状況を実現するためには、いくつかの制約条件がある。まず、擬似導波モードが存在するためには、導波路内で伝播する光が全反射することが必要である。このための条件は、以下の式(6)で表される。

【数 6】

$$n_{out} < n_{wav} \sin \theta_{wav} \quad (6)$$

【0038】

この擬似導波モードを周期構造によって回折させて導波路外に光を出射させるためには、式(5)において $-1 < \sin \theta_{out} < 1$ である必要がある。よって、以下の式(7)を満足する必要がある。

10

【数 7】

$$-1 < \frac{n_{wav}}{n_{out}} \sin \theta_{wav} - \frac{m\lambda_0}{n_{out}p} < 1 \quad (7)$$

【0039】

これに対し、式(6)を考慮すると、以下の式(8)が成立すればよいことがわかる。

【数 8】

$$\frac{m\lambda_0}{2n_{out}} < p \quad (8)$$

20

【0040】

さらに、導波路 110 から出射される光の方向を正面方向 ($\theta_{out} = 0$) にするためには、式(5)から、以下の式(9)が必要であることがわかる。

【数 9】

$$p = m\lambda_0 / (n_{wav} \sin \theta_{wav}) \quad (9)$$

30

【0041】

式(9)および式(6)から、必要な条件は、以下の式(10)であることがわかる。

【数 10】

$$\frac{m\lambda_0}{n_{wav}} < p < \frac{m\lambda_0}{n_{out}} \quad (10)$$

40

【0042】

なお、図 1 A および図 1 B に示すような周期構造を設けた場合には、 m が 2 以上の高次の回折効率は低いため、 $m = 1$ である 1 次の回折光を主眼に設計すると良い。このため、本実施形態における周期構造では、 $m = 1$ として、式(10)を変形した以下の式(11)を満足するように周期 p が決定される。

【数 1 1】

$$\frac{\lambda_0}{n_{wav}} < p < \frac{\lambda_0}{n_{out}} \quad (11)$$

【0043】

図 1 A および図 1 B に示すように、導波路（フォトルミネッセンス層）110 が透明基板に接していない場合には、 n_{out} は空気の屈折率（約 1.0）となるため、以下の式（12）を満足するように周期 p を決定すればよい。

10

【数 1 2】

$$\frac{\lambda_0}{n_{wav}} < p < \lambda_0 \quad (12)$$

【0044】

一方、図 1 C および図 1 D に例示するような透明基板 140 上にフォトルミネッセンス層 110 および周期構造 120 を形成した構造を採用してもよい。この場合には、透明基板 140 の屈折率 n_s が空気の屈折率よりも大きいことから、式（11）において $n_{out} = n_s$ とした次式（13）を満足するように周期 p を決定すればよい。

20

【数 1 3】

$$\frac{\lambda_0}{n_{wav}} < p < \frac{\lambda_0}{n_s} \quad (13)$$

【0045】

なお、式（12）、（13）では、式（10）において $m = 1$ の場合を想定したが、 $m = 2$ であってもよい。すなわち、図 1 A および図 1 B に示すように発光素子 100 の両面が空気層に接している場合には、 m を 1 以上の整数として、以下の式（14）を満足するように周期 p が設定されていればよい。

30

【数 1 4】

$$\frac{m\lambda_0}{n_{wav}} < p < m\lambda_0 \quad (14)$$

40

【0046】

同様に、図 1 C および図 1 D に示す発光素子 100 a のようにフォトルミネッセンス層 110 が透明基板 140 上に形成されている場合には、以下の式（15）を満足するように周期 p が設定されていればよい。

【数 15】

$$\frac{m\lambda_0}{n_{\text{wav}}} < p < \frac{m\lambda_0}{n_s} \quad (15)$$

【0047】

以上の不等式を満足するように周期構造の周期 p を決定することにより、フォトルミネッセンス層 110 から発生した光を正面方向に出射させることができるため、指向性を有する発光装置を実現できる。

10

【0048】

[3. 計算による検証]

[3-1. 周期、波長依存性]

本発明者らは、以上のような特定方向への光の出射が実際に可能であるかを光学解析によって検証した。光学解析は、サイバネット社の DiffractMOD を用いた計算によって行った。これらの計算では、発光素子に対して外部から垂直に光を入射したときに、フォトルミネッセンス層における光の吸収の増減を計算することで、外部へ垂直に出射する光の増強度を求めた。外部から入射した光が擬似導波モードに結合しフォトルミネッセンス層で吸収されるという過程は、フォトルミネッセンス層における発光が擬似導波モードへと結合し、外部へ垂直に出射する伝播光へと変換される過程と逆の過程を計算していることに対応する。また、擬似導波モードの電場分布の計算においても、同様に外部から光を入射した場合における電場を計算した。

20

【0049】

フォトルミネッセンス層の膜厚を $1 \mu\text{m}$ 、フォトルミネッセンス層の屈折率を $n_{\text{wav}} = 1.8$ 、周期構造の高さを 50nm 、周期構造の屈折率を 1.5 とし、発光波長および周期構造の周期をそれぞれ変えて、正面方向に出射する光の増強度を計算した結果を図 2 に示す。計算モデルは、図 1A に示すように、 y 方向には均一な 1 次元周期構造とし、光の偏光は y 方向に平行な電場成分を有する TM モードであるとして計算を行った。図 2 の結果から、増強度のピークが、ある特定の波長と周期との組み合わせにおいて存在することがわかる。なお、図 2 において、増強度の大きさは色の濃淡で表されており、濃い（即ち黒い）方が増強度が大きく、淡い（即ち白い）方が増強度が小さい。

30

【0050】

上記の計算において、周期構造の断面は、図 1B に示すような矩形であるものとしている。式 (10) における $m = 1$ および $m = 3$ の条件を図示したグラフを図 3 に示す。図 2 と図 3 とを比較すると、図 2 におけるピーク位置は $m = 1$ と $m = 3$ に対応するところに存在することがわかる。 $m = 1$ の方が強度が強いのは、3 次以上の高次の回折光よりも 1 次の回折光の回折効率の方が高いからである。 $m = 2$ のピークが存在しないのは、周期構造における回折効率が低いためである。

【0051】

図 3 で示した $m = 1$ および $m = 3$ のそれぞれに対応する領域内において、図 2 では複数のラインが存在することが確認できる。これは、擬似導波モードが複数存在するからであると考えられる。

40

【0052】

[3-2. 厚さ依存性]

図 4 は、フォトルミネッセンス層の屈折率を $n_{\text{wav}} = 1.8$ 、周期構造の周期を 400nm 、高さを 50nm 、屈折率を 1.5 とし、発光波長およびフォトルミネッセンス層の厚さ t を変えて正面方向に出力する光の増強度を計算した結果を示す図である。フォトルミネッセンス層の厚さ t が特定の値であるときに光の増強度がピークに達することがわかる。

50

【 0 0 5 3 】

図 4 においてピークが存在する波長 6 0 0 nm、厚さ $t = 2 3 8$ nm、5 3 9 nm のときに、x 方向に導波するモードの電場分布を計算した結果を図 5 A および図 5 B にそれぞれ示す。比較のため、ピークが存在しない $t = 3 0 0$ nm の場合について同様の計算を行った結果を図 5 C に示す。計算モデルは、上記と同様、y 方向に均一な 1 次元周期構造であるとした。各図において、黒い領域ほど電場強度が高く、白い領域ほど電場強度が低いことを表している。 $t = 2 3 8$ nm、5 3 9 nm の場合には高い電場強度の分布があるのに対して、 $t = 3 0 0$ nm では全体的に電場強度が低い。これは、 $t = 2 3 8$ nm、5 3 9 nm の場合には、導波モードが存在し、光が強く閉じ込められているからである。さらに、凸部または凸部の直下に電場が最も強い部分（腹）が必ず存在しており、周期構造 1 2 0 と相関のある電場が発生している特徴が見て取れる。つまり、周期構造 1 2 0 の配置に従って、導波するモードが得られていることがわかる。また、 $t = 2 3 8$ nm の場合と $t = 5 3 9$ nm の場合とを比較すると、z 方向の電場の節（白い部分）の数が 1 つだけ異なるモードであることが分かる。

10

【 0 0 5 4 】

[3 - 3 . 偏光依存性]

次に偏光依存性を確認するために、図 2 の計算と同じ条件で、光の偏光が y 方向に垂直な電場成分を有する TE モードである場合について光の増強度の計算を行った。本計算の結果を図 6 に示す。TM モードのとき（図 2）に比べ、ピーク位置は多少変化しているものの、図 3 で示した領域内にピーク位置が納まっている。よって、本実施形態の構成は、TM モード、TE モードのいずれの偏光についても有効であることが確認できた。

20

【 0 0 5 5 】

[3 - 4 . 2 次元周期構造]

さらに、2 次元の周期構造による効果の検討を行った。図 7 A は、x 方向および y 方向の両方向に凹部および凸部が配列された 2 次元の周期構造 1 2 0 ' の一部を示す平面図である。図中の黒い領域が凸部、白い領域が凹部を示している。このような 2 次元周期構造では、x 方向と y 方向の両方の回折を考慮する必要がある。x 方向のみ、あるいは y 方向のみの回折に関しては 1 次元の場合と同様であるが、x、y 両方の成分を有する方向（例えば、斜め 4 5 ° 方向）の回折も存在するため、1 次元の場合とは異なる結果が得られることが期待できる。このような 2 次元周期構造に関して光の増強度を計算した結果を図 7 B に示す。周期構造以外の計算条件は図 2 の条件と同じである。図 7 B に示すように、図 2 に示す TM モードのピーク位置に加えて、図 6 に示す TE モードにおけるピーク位置と一致するピーク位置も観測された。この結果は、2 次元周期構造により、TE モードも、回折により変換されて出力されていることを示している。また、2 次元周期構造については、x 方向および y 方向の両方について、同時に 1 次の回折条件を満足する回折も考慮する必要がある。このような回折光は、周期 p の 2 倍（即ち、 $2^{1/2}$ 倍）の周期に対応する角度の方向に出射する。よって、1 次元周期構造の場合のピークに加えて、周期 p の 2 倍の周期についてもピークが発生すると考えられる。図 7 B では、このようなピークも確認できる。

30

【 0 0 5 6 】

2 次元周期構造としては、図 7 A に示すような x 方向および y 方向の周期が等しい正方格子の構造に限らず、図 1 8 A および図 1 8 B のような六角形や三角形を並べた格子構造であってもよい。また、方位方向によって（例えば、正方格子の場合 x 方向および y 方向）の周期が異なる構造であってもよい。

40

【 0 0 5 7 】

以上のように、本実施形態では、周期構造とフォトルミネッセンス層とによって形成される特徴的な擬似導波モードの光を、周期構造による回折現象を利用して、正面方向のみ選択的に出射できることが確認できた。このような構成で、フォトルミネッセンス層を紫外線や青色光などの励起光で励起させることにより、指向性を有する発光が得られる。

【 0 0 5 8 】

50

[4 . 周期構造およびフォトルミネッセンス層の構成の検討]

次に、周期構造およびフォトルミネッセンス層の構成や屈折率などの各種条件を変えたときの効果について説明する。

【 0 0 5 9 】

[4 - 1 . 周期構造の屈折率]

まず、周期構造の屈折率に関して検討を行った。フォトルミネッセンス層の膜厚を 2 0 0 n m、フォトルミネッセンス層の屈折率を $n_{wa v} = 1 . 8$ 、周期構造は図 1 A に示すような y 方向に均一な 1 次元周期構造とし、高さを 5 0 n m、周期を 4 0 0 n m とし、光の偏光は y 方向に平行な電場成分を有する T M モードであるものとして計算を行った。発光波長および周期構造の屈折率を変えて正面方向に出力する光の増強度を計算した結果を図 8 に示す。また、同様の条件でフォトルミネッセンス層の膜厚を 1 0 0 0 n m にした場合の結果を図 9 に示す。

10

【 0 0 6 0 】

まず、フォトルミネッセンス層の膜厚に着目すると、膜厚が 2 0 0 n m の場合 (図 8) に比べ、膜厚が 1 0 0 0 n m の場合 (図 9) のほうが、周期構造の屈折率の変化に対する光強度がピークとなる波長 (ピーク波長と称する。) のシフトが小さいことがわかる。これは、フォトルミネッセンス層の膜厚が小さいほど、擬似導波モードが周期構造の屈折率の影響を受けやすいからである。即ち、周期構造の屈折率が高いほど、有効屈折率が大きくなり、その分ピーク波長が長波長側にシフトするが、この影響は、膜厚が小さいほど顕著になる。なお、有効屈折率は、擬似導波モードの電場が分布する領域に存在する媒質の屈折率によって決まる。

20

【 0 0 6 1 】

次に、周期構造の屈折率の変化に対するピークの変化に着目すると、屈折率が高いほどピークが広がり強度が下がっていることがわかる。これは、周期構造の屈折率が高いほど擬似導波モードの光を外部に放出するレートが高いため、光を閉じ込める効果が減少する、すなわち Q 値が低くなることが原因である。ピーク強度を高く保つためには、光を閉じ込める効果が高い (即ち Q 値が高い) 擬似導波モードを利用して、適度に光を外部に放出する構成にすればよい。これを実現するためには、屈折率がフォトルミネッセンス層の屈折率に比べて大き過ぎる材料を周期構造に用いるのは望ましくないことがわかる。したがって、ピーク強度および Q 値をある程度高くするためには、周期構造を構成する誘電体 (即ち、透光層) の屈折率を、フォトルミネッセンス層の屈折率と同等以下にすればよい。フォトルミネッセンス層がフォトルミネッセンス材料以外の材料を含むときも同様である。

30

【 0 0 6 2 】

[4 - 2 . 周期構造の高さ]

次に、周期構造の高さに関して検討を行った。フォトルミネッセンス層の膜厚を 1 0 0 0 n m、フォトルミネッセンス層の屈折率を $n_{wa v} = 1 . 8$ 、周期構造は図 1 A に示すような y 方向に均一な 1 次元周期構造で屈折率を $n_p = 1 . 5$ 、周期を 4 0 0 n m とし、光の偏光は y 方向に平行な電場成分を有する T M モードであるものとして計算を行った。発光波長および周期構造の高さを変えて正面方向に出力する光の増強度を計算した結果を図 1 0 に示す。同様の条件で、周期構造の屈折率を $n_p = 2 . 0$ とした場合の計算結果を図 1 1 に示す。図 1 0 に示す結果では、ある程度以上の高さではピーク強度や Q 値 (即ち、ピークの線幅) が変化していないのに対して、図 1 1 に示す結果では、周期構造の高さが大きいほどピーク強度および Q 値が低下していることがわかる。これは、フォトルミネッセンス層の屈折率 $n_{wa v}$ が周期構造の屈折率 n_p よりも高い場合 (図 1 0) には、光が全反射するので、擬似導波モードの電場の染み出し (エバネッセント) 部分のみが周期構造と相互作用することに起因する。電場のエバネッセント部分と周期構造との相互作用の影響は、周期構造の高さが十分大きい場合には、それ以上高さが変化しても一定である。一方、フォトルミネッセンス層の屈折率 $n_{wa v}$ が周期構造の屈折率 n_p よりも低い場合 (図 1 1) は、全反射せずに周期構造の表面にまで光が到達するので、周期構造の高さが大きいほ

40

50

どその影響を受ける。図 11 を見る限り、高さは 100 nm 程度あれば十分であり、150 nm を超える領域ではピーク強度および Q 値が低下していることがわかる。したがって、フォトルミネッセンス層の屈折率 n_{wav} が周期構造の屈折率 n_p よりも低い場合に、ピーク強度および Q 値をある程度高くするためには、周期構造の高さを 150 nm 以下に設定すればよい。

【0063】

[4-3. 偏光方向]

次に、偏光方向に関して検討を行った。図 9 に示す計算と同じ条件で、光の偏光が y 方向に垂直な電場成分を有する TE モードであるものとして計算した結果を図 12 に示す。TE モードでは、擬似導波モードの電場の染み出しが TM モードに比べて大きいため、周期構造による影響を受けやすい。よって、周期構造の屈折率 n_p がフォトルミネッセンス層の屈折率 n_{wav} よりも大きい領域では、ピーク強度および Q 値の低下が TM モードよりも著しい。

10

【0064】

[4-4. フォトルミネッセンス層の屈折率]

次に、フォトルミネッセンス層の屈折率に関して検討を行った。図 9 に示す計算と同様の条件で、フォトルミネッセンス層の屈折率 n_{wav} を 1.5 に変更した場合の結果を図 13 に示す。フォトルミネッセンス層の屈折率 n_{wav} が 1.5 の場合においても概ね図 9 と同様の効果が得られていることがわかる。ただし、波長が 600 nm 以上の光は正面方向に出射していないことがわかる。これは、式 (10) より、 $n_0 < n_{wav} \times p / m = 1.5 \times 400 \text{ nm} / 1 = 600 \text{ nm}$ となるからである。

20

【0065】

以上の分析から、周期構造の屈折率はフォトルミネッセンス層の屈折率と同等以下にするか、周期構造の屈折率がフォトルミネッセンス層の屈折率以上の場合には、高さを 150 nm 以下にすれば、ピーク強度および Q 値を高くできることがわかる。

【0066】

[5. 変形例]

以下、本実施形態の変形例を説明する。

【0067】

[5-1. 基板を有する構成]

上述のように、発光素子は、図 1C および図 1D に示すように、透明基板 140 の上にフォトルミネッセンス層 110 および周期構造 120 が形成された構造を有していてもよい。このような発光素子 100a を作製するには、まず、透明基板 140 上にフォトルミネッセンス層 110 を構成するフォトルミネッセンス材料（必要に応じて、マトリクス材料を含む、以下同じ。）で薄膜を形成し、その上に周期構造 120 を形成する方法が考えられる。このような構成において、フォトルミネッセンス層 110 と周期構造 120 とにより、光を特定の方向に出射する機能をもたせるためには、透明基板 140 の屈折率 n_s はフォトルミネッセンス層の屈折率 n_{wav} 以下にする必要がある。透明基板 140 をフォトルミネッセンス層 110 に接するように設けた場合、式 (10) における出射媒質の屈折率 n_{out} を n_s とした式 (15) を満足するように周期 p を設定する必要がある。

30

40

【0068】

このことを確認するために、屈折率が 1.5 の透明基板 140 の上に、図 2 に示す計算と同じ条件のフォトルミネッセンス層 110 および周期構造 120 を設けた場合の計算を行った。本計算の結果を図 14 に示す。図 2 の結果と同様、波長ごとに特定の周期において光強度のピークが現れることが確認できるが、ピークが現れる周期の範囲が図 2 の結果とは異なることがわかる。これに対して、式 (10) の条件を $n_{out} = n_s$ とした式 (15) の条件を図 15 に示す。図 14 において、図 15 に示される範囲に対応する領域内に、光強度のピークが現れていることがわかる。

【0069】

したがって、透明基板 140 上にフォトルミネッセンス層 110 と周期構造 120 とを

50

設けた発光素子 100a では、式 (15) を満足する周期 p の範囲において効果が得られ、式 (13) を満足する周期 p の範囲において特に顕著な効果が得られる。

【0070】

[5-2. 励起光源を有する発光装置]

図 16 は、図 1A、1B に示す発光素子 100 と、励起光をフォトルミネッセンス層 110 に入射させる光源 180 とを備える発光装置 200 の構成例を示す図である。上述のように、本開示の構成では、フォトルミネッセンス層を紫外線や青色光などの励起光で励起させることにより、指向性をもつ発光が得られる。そのような励起光を出射するように構成された光源 180 を設けることにより、指向性をもつ発光装置 200 を実現できる。光源 180 から出射される励起光の波長は、典型的には紫外または青色領域の波長であるが、これらに限らず、フォトルミネッセンス層 110 を構成するフォトルミネッセンス材料に応じて適宜決定される。なお、図 16 では、光源 180 がフォトルミネッセンス層 110 の下面から励起光を入射させるように配置されているが、このような例に限定されず、例えば、フォトルミネッセンス層 110 の上面から励起光を入射させてもよい。

10

【0071】

励起光を擬似導波モードに結合させることで、効率よく光を出射させる方法もある。図 17 は、そのような方法を説明するための図である。この例では、図 1C、1D に示す構成と同様、透明基板 140 上にフォトルミネッセンス層 110 および周期構造 120 が形成されている。まず、図 17(a) に示すように、発光増強のために x 方向の周期 p_x を決定し、続いて、図 17(b) に示すように、励起光を擬似導波モードに結合させるために y 方向の周期 p_y を決定する。周期 p_x は、式 (10) において p を p_x に置き換えた条件を満足するように決定される。一方、周期 p_y は、 m を 1 以上の整数、励起光の波長を λ_{ex} 、フォトルミネッセンス層 110 に接する媒質のうち、周期構造 120 を除く最も屈折率の高い媒質の屈折率を n_{out} とし、以下の式 (16) を満足するように決定される。

20

【数 16】

$$\frac{m\lambda_{ex}}{n_{wav}} < p_y < \frac{m\lambda_{ex}}{n_{out}} \quad (16)$$

30

【0072】

ここで、 n_{out} は、図 17 の例では透明基板 140 の n_s であるが、図 16 のように透明基板 140 を設けない構成では、空気の屈折率 (約 1.0) である。

【0073】

特に、 $m = 1$ として、次の式 (17) を満足するように周期 p_y を決定すれば、励起光を擬似導波モードに変換する効果をより高くすることができる。

【数 17】

$$\frac{\lambda_{ex}}{n_{wav}} < p_y < \frac{\lambda_{ex}}{n_{out}} \quad (17)$$

40

【0074】

このように、式 (16) の条件 (特に式 (17) の条件) を満足するように周期 p_y を設定することで、励起光を擬似導波モードに変換することができる。その結果、フォトル

50

ミネッセンス層 110 に効率的に波長 λ_{ex} の励起光を吸収させることができる。

【0075】

図17(c)、(d)は、それぞれ、図17(a)、(b)に示す構造に対して光を入射したときに光が吸収される割合を波長ごとに計算した結果を示す図である。この計算では、 $p_x = 365 \text{ nm}$ 、 $p_y = 265 \text{ nm}$ とし、フォトルミネッセンス層 110 からの発光波長 λ_{em} を約 600 nm 、励起光の波長 λ_{ex} を約 450 nm 、フォトルミネッセンス層 110 の消衰係数は 0.003 としている。図17(d)に示すように、フォトルミネッセンス層 110 から生じた光だけでなく、励起光である約 450 nm の光に対して高い吸収率を示している。これは、入射した光が効果的に擬似導波モードに変換されることで、フォトルミネッセンス層に吸収される割合を増大させることができているためである。また、発光波長である約 600 nm に対しても吸収率が増大しているが、これは、もし約 600 nm の波長の光をこの構造に入射した場合には、同様に効果的に擬似導波モードに変換されるということである。このように、図17(b)に示す周期構造 120 は、x 方向および y 方向のそれぞれに周期の異なる構造（周期成分）を有する 2 次元周期構造である。このように、複数の周期成分を有する 2 次元周期構造を用いることにより、励起効率を高めつつ、出射強度を高めることが可能になる。なお、図17では励起光を基板側から入射しているが、周期構造側から入射しても同じ効果が得られる。

10

【0076】

さらに、複数の周期成分を有する 2 次元周期構造としては、図18Aまたは図18Bに示すような構成を採用してもよい。図18Aに示すように六角形の平面形状を有する複数の凸部または凹部を周期的に並べた構成や、図18Bに示すように三角形の平面形状を有する複数の凸部または凹部を周期的に並べた構成とすることにより、周期とみなすことのできる複数の主軸（図の例では軸 1 ~ 3）を定めることができる。このため、それぞれの軸方向について異なる周期を割り当てることができる。これらの周期の各々を、複数の波長の光の指向性を高めるために設定してもよいし、励起光を効率よく吸収させるために設定してもよい。いずれの場合も、式(10)に相当する条件を満足するように各周期が設定される。

20

【0077】

[5-3. 透明基板上的周期構造]

図19Aおよび図19Bに示すように、透明基板 140 上に周期構造 120a を形成し、その上にフォトルミネッセンス層 110 を設けてもよい。図19Aの構成例では、基板 140 上の凹凸からなる周期構造 120a に追従するようにフォトルミネッセンス層 110 が形成された結果、フォトルミネッセンス層 110 の表面にも同じ周期の周期構造 120b が形成されている。一方、図19Bの構成例では、フォトルミネッセンス層 110 の表面は平坦になるように処理されている。これらの構成例においても、周期構造 120a の周期 p を式(15)を満足するように設定することにより、指向性発光を実現できる。この効果を検証するため、図19Aの構成において、発光波長および周期構造の周期を変えて正面方向に出力する光の増強度を計算した。ここで、フォトルミネッセンス層 110 の膜厚を 1000 nm 、フォトルミネッセンス層 110 の屈折率を $n_{wav} = 1.8$ 、周期構造 120a は y 方向に均一な 1 次元周期構造で高さを 50 nm 、屈折率を $n_p = 1.5$ 、周期を 400 nm とし、光の偏光は y 方向に平行な電場成分を有する TM モードであるものとした。本計算の結果を図19Cに示す。本計算においても、式(15)の条件を満足する周期で光強度のピークが観測された。

30

40

【0078】

[5-4. 粉体]

以上の実施形態によれば、周期構造の周期や、フォトルミネッセンス層の膜厚を調整することで任意の波長の発光を強調することができる。例えば、広い帯域で発光するフォトルミネッセンス材料を用いて図1A、1Bのような構成にすれば、ある波長の光のみを強調することが可能である。よって、図1A、1Bのような発光素子 100 の構成を粉末状にして、蛍光材料として利用してもよい。また、図1A、1Bのような発光素子 100 を

50

樹脂やガラスなどに埋め込んで利用してもよい。

【 0 0 7 9 】

図 1 A、1 B のような単体の構成では、ある特定の波長しか特定の方向に出射できないため、例えば広い波長域のスペクトルを持つ白色などの発光を実現することは難しい。そこで、図 2 0 に示すように周期構造の周期やフォトルミネッセンス層の膜厚などの条件の異なる複数の粉末状の発光素子 1 0 0 を混ぜたものを用いることにより、広い波長域のスペクトルを持つ発光装置を実現できる。この場合、個々の発光素子 1 0 0 の一方向のサイズは、例えば数 μm ~ 数 mm 程度であり、その中に例えば数周期 ~ 数百周期の 1 次元または 2 次元の周期構造を含み得る。

【 0 0 8 0 】

[5 - 5 . 周期の異なる構造を配列]

図 2 1 は、フォトルミネッセンス層の上に周期の異なる複数の周期構造を 2 次元に配列した例を示す平面図である。この例では、3 種類の周期構造 1 2 0 a、1 2 0 b、1 2 0 c が隙間なく配列されている。周期構造 1 2 0 a、1 2 0 b、1 2 0 c は、例えば、赤、緑、青の波長域の光をそれぞれ正面に出射するように周期が設定されている。このように、フォトルミネッセンス層の上に周期の異なる複数の構造を並べることによっても広い波長域のスペクトルに対し指向性を発揮させることができる。なお、複数の周期構造の構成は、上記のものに限定されず、任意に設定してよい。

【 0 0 8 1 】

[5 - 6 . 積層構造]

図 2 2 は、表面に凹凸構造が形成された複数のフォトルミネッセンス層 1 1 0 が積層された構造を有する発光素子の一例を示している。複数のフォトルミネッセンス層 1 1 0 の間には、透明基板 1 4 0 が設けられ、各層のフォトルミネッセンス層 1 1 0 の表面に形成された凹凸構造が上記の周期構造またはサブミクロン構造に相当する。図 2 2 に示す例では、3 層の周期の異なる周期構造が形成されており、それぞれ、赤、青、緑の波長域の光を正面に出射するように周期が設定されている。また、各周期構造の周期に対応する色の光を発するように各層のフォトルミネッセンス層 1 1 0 の材料が選択されている。このように、周期の異なる複数の周期構造を積層することによっても、広い波長域のスペクトルに対し指向性を発揮させることができる。

【 0 0 8 2 】

なお、層数や各層のフォトルミネッセンス層 1 1 0 および周期構造の構成は上記のものに限定されず、任意に設定してよい。例えば 2 層の構成では、透光性の基板を介して第 1 のフォトルミネッセンス層と第 2 のフォトルミネッセンス層とが対向するように形成され、第 1 および第 2 のフォトルミネッセンス層の表面に、それぞれ第 1 および第 2 の周期構造が形成されることになる。この場合、第 1 のフォトルミネッセンス層および第 1 の周期構造の対と、第 2 のフォトルミネッセンス層および第 2 の周期構造の対のそれぞれについて、式 (1 5) に相当する条件を満足していればよい。3 層以上の構成においても同様に、各層におけるフォトルミネッセンス層および周期構造について、式 (1 5) に相当する条件を満足していればよい。フォトルミネッセンス層と周期構造との位置関係が図 2 2 に示すものとは逆転していてもよい。図 2 2 に示す例では、各層の周期が異なっているが、これらを全て同じ周期にしてもよい。その場合、スペクトルを広くすることはできないが、発光強度を大きくすることができる。

【 0 0 8 3 】

[5 - 7 . 保護層を有する構成]

図 2 3 は、フォトルミネッセンス層 1 1 0 と周期構造 1 2 0 との間に保護層 1 5 0 を設けた構成例を示す断面図である。このように、フォトルミネッセンス層 1 1 0 を保護するための保護層 1 5 0 を設けても良い。ただし、保護層 1 5 0 の屈折率がフォトルミネッセンス層 1 1 0 の屈折率よりも低い場合は、保護層 1 5 0 の内部に波長の半分程度しか光の電場が染み出さない。よって、保護層 1 5 0 が波長よりも厚い場合には、周期構造 1 2 0 に光が届かない。このため、擬似導波モードが存在せず、光を特定方向に放出する機能を

10

20

30

40

50

得ることができない。保護層 150 の屈折率がフォトルミネッセンス層 110 の屈折率と同程度あるいはそれ以上の場合には、保護層 150 の内部にまで光が到達する。よって、保護層 150 に厚さの制約は無い。ただし、その場合でも、光が導波する部分（以下、この部分を「導波層」と呼ぶ。）の大部分をフォトルミネッセンス材料で形成したほうが大きな光の出力が得られる。よって、この場合でも保護層 150 は薄いほうが望ましい。なお、保護層 150 を周期構造（透光層）120 と同じ材料を用いて形成してもよい。このとき、周期構造を有する透光層が保護層を兼ねる。透光層 120 の屈折率はフォトルミネッセンス層 110 よりも小さいことが望ましい。

【0084】

[6. 材料および製造方法]

以上のような条件を満たす材料でフォトルミネッセンス層（あるいは導波層）および周期構造を構成すれば、指向性発光を実現できる。周期構造には任意の材料を用いることができる。しかしながら、フォトルミネッセンス層（あるいは導波層）や周期構造を形成する媒質の光吸収性が高いと、光を閉じ込める効果が低下し、ピーク強度およびQ値が低下する。よって、フォトルミネッセンス層（あるいは導波層）および周期構造を形成する媒質として、光吸収性の比較的低いものが用いられ得る。

【0085】

周期構造の材料としては、例えば、光吸収性の低い誘電体を使用され得る。周期構造の材料の候補としては、例えば、 MgF_2 （フッ化マグネシウム）、 LiF （フッ化リチウム）、 CaF_2 （フッ化カルシウム）、 SiO_2 （石英）、ガラス、樹脂、 MgO （酸化マグネシウム）、 ITO （酸化インジウム錫）、 TiO_2 （酸化チタン）、 SiN （窒化シリコン）、 Ta_2O_5 （五酸化タンタル）、 ZrO_2 （ジルコニア）、 $ZnSe$ （セレン化亜鉛）、 ZnS （硫化亜鉛）などが挙げられる。ただし、前述のとおり周期構造の屈折率をフォトルミネッセンス層の屈折率よりも低くする場合、屈折率が1.3～1.5程度である MgF_2 、 LiF 、 CaF_2 、 SiO_2 、ガラス、樹脂を用いることができる。

【0086】

フォトルミネッセンス材料は、狭義の蛍光材料および燐光材料を包含し、無機材料だけでなく、有機材料（例えば色素）を包含し、さらには、量子ドット（即ち、半導体微粒子）を包含する。一般に、無機材料をホストとする蛍光材料は屈折率が高い傾向にある。青色に発光する蛍光材料としては、例えば、 $M_{10}(PO_4)_6Cl_2:Eu^{2+}$ （ $M=Ba, Sr$ および Ca から選ばれる少なくとも1種）、 $BaMgAl_{10}O_{17}:Eu^{2+}$ 、 $M_3MgSi_2O_8:Eu^{2+}$ （ $M=Ba, Sr$ および Ca から選ばれる少なくとも1種）、 $M_5SiO_4Cl_6:Eu^{2+}$ （ $M=Ba, Sr$ および Ca から選ばれる少なくとも1種）を用いることができる。緑色に発光する蛍光材料としては、例えば、 $M_2MgSi_2O_7:Eu^{2+}$ （ $M=Ba, Sr$ および Ca から選ばれる少なくとも1種）、 $SrSi_5AlO_2N_7:Eu^{2+}$ 、 $SrSi_2O_2N_2:Eu^{2+}$ 、 $BaAl_2O_4:Eu^{2+}$ 、 $BaZrSi_3O_9:Eu^{2+}$ 、 $M_2SiO_4:Eu^{2+}$ （ $M=Ba, Sr$ および Ca から選ばれる少なくとも1種）、 $BaSi_3O_4N_2:Eu^{2+}$ 、 $Ca_8Mg(SiO_4)_4Cl_2:Eu^{2+}$ 、 $Ca_3SiO_4Cl_2:Eu^{2+}$ 、 $CaSi_{12-(m+n)}Al_{(m+n)}O_nN_{16-n}:Ce^{3+}$ 、 $-SiAlON:Eu^{2+}$ を用いることができる。赤色に発光する蛍光材料としては、例えば、 $CaAlSiN_3:Eu^{2+}$ 、 $SrAlSi_4O_7:Eu^{2+}$ 、 $M_2Si_5N_8:Eu^{2+}$ （ $M=Ba, Sr$ および Ca から選ばれる少なくとも1種）、 $MSiN_2:Eu^{2+}$ （ $M=Ba, Sr$ および Ca から選ばれる少なくとも1種）、 $MSi_2O_2N_2:Yb^{2+}$ （ $M=Sr$ および Ca から選ばれる少なくとも1種）、 $Y_2O_2S:Eu^{3+}$ 、 Sm^{3+} 、 $La_2O_2S:Eu^{3+}$ 、 Sm^{3+} 、 $CaWO_4:Li^{1+}$ 、 Eu^{3+} 、 Sm^{3+} 、 $M_2SiS_4:Eu^{2+}$ （ $M=Ba, Sr$ および Ca から選ばれる少なくとも1種）、 $M_3SiO_5:Eu^{2+}$ （ $M=Ba, Sr$ および Ca から選ばれる少なくとも1種）を用いることができる。黄色に発光する蛍光材料としては、例えば、 $Y_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$ 、 $CaSi_2O_2N_2:Eu^{2+}$ 、 $Ca_3Sc_2Si_3O_{12}:Ce^{3+}$ 、 $CaSc_2O_4:Ce^{3+}$ 、 $-SiAlON:Eu^{2+}$ 、 $MSi_2O_2N_2:Eu^{2+}$ （ $M=Ba, Sr$ および Ca から選ばれる少なくとも1種）、 $M_7(SiO_3)_6Cl_2:Eu^{2+}$ （ $M=Ba, Sr$ および Ca から選ばれる

10

20

30

40

50

少なくとも1種)を用いることができる。

【0087】

量子ドットについては、例えば、CdS、CdSe、コア・シェル型CdSe/ZnS、合金型CdSSe/ZnSなどの材料を用いることができ、材質によって様々な発光波長を得ることができる。量子ドットのマトリクスとしては、例えば、ガラスや樹脂を用いることができる。

【0088】

図1C、1Dなどに示す透明基板140は、フォトルミネッセンス層110の屈折率よりも低い透光性材料によって構成される。そのような材料として、例えば、MgF(フッ化マグネシウム)、LiF(フッ化リチウム)、CaF₂(フッ化カルシウム)、SiO₂(石英)、ガラス、樹脂が挙げられる。

10

【0089】

続いて、製造方法の一例を説明する。

【0090】

図1C、1Dに示す構成を実現する方法として、例えば、透明基板140上に蛍光材料を蒸着、スパッタリング、塗布などの工程によってフォトルミネッセンス層110の薄膜を形成し、その後、誘電体を成膜し、フォトリソグラフィなどの方法によってパターニングすることによって周期構造120を形成する方法がある。上記方法の代わりに、ナノインプリントによって周期構造120を形成してもよい。また、図24に示すように、フォトルミネッセンス層110の一部のみを加工することによって周期構造120を形成してもよい。その場合、周期構造120はフォトルミネッセンス層110と同じ材料で形成されることになる。

20

【0091】

図1A、1Bに示す発光素子100は、例えば、図1C、1Dに示す発光素子100aを作製した後、基板140からフォトルミネッセンス層110および周期構造120の部分を剥がす工程を行うことで実現可能である。

【0092】

図19Aに示す構成は、例えば、透明基板140上に半導体プロセスやナノインプリントなどの方法で周期構造120aを形成した後、その上にフォトルミネッセンス層110を構成する材料を蒸着やスパッタリングなどの方法で形成することによって実現可能である。あるいは、塗布などの方法を用いて周期構造120aの凹部をフォトルミネッセンス層110で埋め込むことによって図19Bに示す構成を実現することもできる。

30

【0093】

なお、上記の製造方法は一例であり、本開示の発光素子は上記の製造方法に限定されない。

【0094】

[実験例]

以下に、本開示の実施形態による発光素子を作製した例を説明する。

【0095】

図19Aと同様の構成を有する発光素子のサンプルを試作し、特性を評価した。発光素子は以下の様にして作製した。

40

【0096】

ガラス基板に、周期400nm、高さ40nmの1次元周期構造(ストライプ状の凸部)を設け、その上からフォトルミネッセンス材料であるYAG:Ceを210nm成膜した。この断面図のTEM像を図25に示し、これを450nmのLEDで励起することでYAG:Ceを発光させたときの、正面方向のスペクトルを測定した結果を図26に示す。図26には、周期構造がない場合の測定結果(ref)と、1次元周期構造に対して平行な偏光成分を持つTMモードと、垂直な偏光成分を持つTEモードを測定した結果について示した。周期構造がある場合は、周期構造がない場合に対して、特定の波長の光が著しく増加していることが見て取れる。また、1次元周期構造に対して平行な偏光成分を持

50

つ T M モードの方が、光の増強効果が大きいことが分かる。

【 0 0 9 7 】

さらに、同じサンプルにおいて、出射光強度の角度依存性を測定した結果および計算結果を図 2 7 および図 2 8 に示す。図 2 7 は、1 次元周期構造（周期構造 1 2 0）のライン方向と平行な軸を回転軸として回転させた場合について、図 2 8 は、1 次元周期構造（即ち、周期構造 1 2 0）のライン方向に対して垂直な方向を回転軸として回転させた場合についての測定結果（上段）および計算結果（下段）を示している。また、図 2 7 および図 2 8 のそれぞれにおいて、T M モードおよび T E モードの直線偏光についての結果を示しており、図 2 7（a）は T M モード、図 2 7（b）は T E モード、図 2 8（a）は T E モード、図 2 8（b）は T M モードの直線偏光についての結果をそれぞれ示している。図 2 7 および図 2 8 から明らかなように、T M モードの方が増強する効果が強く、また増強される波長は角度によってシフトしていく様子が見て取れる。例えば、6 1 0 n m の光においては、T M モードでかつ正面方向にしか光が存在しないため、指向性かつ偏光発光していることがわかる。また、各図の上段と下段とが整合していることから、上述の計算の妥当性が実験によって裏付けられた。

10

【 0 0 9 8 】

上記の測定結果から例えば、6 1 0 n m の光において、ライン方向に対して垂直な方向を回転軸として回転させた場合の強度の角度依存性を示したのが図 2 9 である。正面方向に強い発光増強が起きており、そのほかの角度に対しては、ほとんど光が増強されていない様子がみてとれる。正面方向に出射される光の指向角は 1 5 ° 未満であることがわかる。なお、指向角は、強度が最大強度の 5 0 % となる角度であり、最大強度の方向を中心に片側の角度で表す。つまり、指向性発光が実現していることがわかる。さらにこれは、全て T M モードの成分であるため、同時に偏光発光も実現していることがわかる。

20

【 0 0 9 9 】

以上の検証は、広帯域の波長帯で発光する Y A G : C e を使って実験を行ったが、発光が狭帯域のフォトルミネセンス材料で同様の構成としても、その波長の光に対して指向性や偏光発光を実現することができる。さらに、この場合、他の波長の光は発生しないために他の方向や偏光状態の光は発生しないような光源を実現することができる。

【 0 1 0 0 】

[7 . 斜め方向の色純度を向上させる実施形態]

30

次に、本開示の他の実施形態を説明する。

【 0 1 0 1 】

本開示の発光素子によれば、特定の波長の光を特定の方向に出射することができる。例えば、フォトルミネセンス層に垂直な方向（即ち、正面方向）に所望の波長の光を出射させることができる。フォトルミネセンス層に含まれるフォトルミネセンス材料の発光スペクトルにおいてピークとなる波長と、上記所望の波長とを一致させれば、正面方向に所望の波長の光を強く出射させることができる。

【 0 1 0 2 】

一方で、フォトルミネセンス層に垂直な方向から傾斜した方向（以下、「斜め方向」と称することがある。）には、上記所望の波長とは異なる 2 つの波長の光が出射する。図 2 7 の中段および下段の図に示すように、フォトルミネセンス層の法線方向に対する角度が 0 ° 以外の方向には、2 つの波長の光が強く出射する。

40

【 0 1 0 3 】

図 3 1 A は、サブミクロン構造から 0 ° 方向（即ち、正面方向）に出射する光の強度の波長依存性の一例を示す図である。図 3 1 B は、同じ条件で、サブミクロン構造から 5 ° 方向に出射する光の強度の波長依存性の一例を示す図である。これらの例では、0 ° 方向には約 6 2 0 n m のほぼ単色の波長の光が出射するが、5 ° 方向には約 5 8 0 n m の波長の光と約 6 5 0 n m の波長の光とが出射する。このように、斜め方向には、正面方向に強く出射する光の波長から長波長側にシフトした光と、短波長側にシフトした光とが強く出射する。これらのシフト量は、同程度である。これは、フォトルミネセンス層内を一方

50

向に伝播する光と、その逆方向に伝播する光とで、増強される光の出射角度が法線方向に対して対称になるためであると考えられる。

【0104】

このように、斜め方向については、2つの波長の光が同時に増強されるため、異なる2色の光が混じることになる。その結果、斜め方向の色純度が低下するという問題が生じる。

【0105】

そこで、本実施形態では、斜め方向に出射する光の色純度を向上させるため、フォトルミネッセンス層から生じる光が、斜めに強く出射する2つの波長の光の一方のみを多く含むように発光素子が設計される。より具体的には、少なくとも一つの周期構造を含むサブミクロン構造を介してフォトルミネッセンス層に垂直な方向に出射する光のスペクトルにおいて強度がピークとなる波長Aが、フォトルミネッセンス層から発せられる光の強度がピークとなる波長Bから長波長側または短波長側にずれるように設計される。図31Aの例では、約620nmが波長Aに相当する。なお、波長Aおよび波長Bは、いずれも空気中の波長を表す。以下、特に断らない限り、波長は空気中の波長を意味する。

10

【0106】

図32は、サブミクロン構造によって増強される光の波長および角度と、フォトルミネッセンス材料の発光スペクトルとの関係を示す図である。図32(a)は、図27(a)の下の図と同じ角度-波長特性を示している。図32(b)は、本実施形態におけるフォトルミネッセンス層に含まれるフォトルミネッセンス材料の発光スペクトルの一例を示している。

20

【0107】

図32(b)に示す発光スペクトルは、波長B(この例では約540nm)をピークに、ブロードな波長分布を有する。サブミクロン構造を介して正面方向に出射する光のスペクトルにおいて強度がピークとなる波長A(この例では約620nm)は、波長Bに対して長波長側に大きくずれている。波長Aよりも長い波長の光は、フォトルミネッセンス層からほとんど生じない。その結果、図32(a)に矢印で示す、波長Aよりも長い波長の光は、角度0°を超える斜め方向にほとんど出射しない。即ち、斜め方向の2色性を低減させることができる。

【0108】

波長Aの波長Bからのシフト量が大きいほど2色性の低減効果が高い。このシフト量は、例えば、フォトルミネッセンス材料の発光スペクトルの半値半幅(HWHM)以上に設定される。半値半幅は、発光スペクトルにおいて、強度がピークの半分となる2つの波長の幅(即ち、半値全幅)の半分の長さである。ある例では、強度がピークの半分となる2つの波長のうち、波長Bとの差がより大きい波長Cと、波長Bとの差をWとすると、波長Aは、波長BからW以上ずれるように設定される。図32(b)の例では、波長Aと波長Bとの差は、半値半幅(HWHM)および幅Wのいずれよりも大きい。

30

【0109】

このような構成により、正面方向に増強される光の波長Aよりも短波長側の光のみが斜め方向に強く出射する。このため、後述するように、色純度の高い複数の波長の光を利用する様々な応用例に適用することができる。

40

【0110】

この例では、波長Aが波長Bよりも大きい、波長Aが波長Bよりも小さくてもよい。その場合、波長Aよりも長波長側の光のみが斜め方向に強く出射するようにできる。ただし、波長Aを小さくするためには、サブミクロン構造の凸部間または凹部間のピッチ(または周期構造の周期)を短くする必要がある。このため、波長Aを波長Bよりも大きくする方が製造し易い。また、一般的には、図32(b)に示すように、フォトルミネッセンス材料から発せられる光の強度は、短波長側よりも長波長側の方がなだらかに変化する。これは、特に広帯域に発光する場合、発光準位間でのエネルギー緩和により、発光スペクトルが長波長側になだらかに広がる傾向にあるからである。このため、波長Aを波長Bよ

50

りも大きくすることにより、角度の変化に対する波長の変化を小さくできるという利点もある。

【0111】

なお、図32(b)に示す発光スペクトルには、強度がピークの半分となる波長が2つ存在するが、そのような波長が3つ以上存在する発光スペクトルも考えられる。そのような発光スペクトルでは、強度がピークの半分となる複数の波長のうち、ピークに最も近い第1の波長および次に近い第2の波長を、上記の2つの波長として扱えばよい。この場合、第2の波長が上記の波長Cに相当する。

【0112】

本実施形態においても、既に説明した実施形態と同様、周期構造が複数の凸部および複数の凹部の少なくとも一方を含み、周期構造における隣接する凸部間または凹部間の距離を D_{int} とし、フォトルミネッセンス層が発する光に含まれる第1の光(波長 λ_a)に対するフォトルミネッセンス層の屈折率を n_{wav-a} とすると、 $\lambda_a / n_{wav-a} < D_{int} < \lambda_a$ の関係が成り立つ。この条件は、前述のように、正面方向に近い方向に波長 λ_a の光を強く出射するための条件である。この波長 λ_a は、ある例では、サブミクロン構造から正面方向に出射する光のスペクトルにおいて強度がピークとなる波長Aと一致するように設定され得る。

10

【0113】

次に、本実施形態のいくつかの応用例を説明する。

【0114】

本実施形態の発光素子は、波長を変化させることができる発光装置(即ち、波長可変光源)に利用することができる。

20

【0115】

従来の波長可変光源は、白色光源からの光を波長分離フィルタ(例えばダイクロイックミラー)または回折格子などの光学素子を用いて分光し、スリットまたはフィルタを介して波長の取捨選択を行う。そのような装置では、色を分離するための光学素子が必要であるため、装置のサイズが大きくなるという課題がある。

【0116】

本実施形態の発光素子は、波長に応じて空間的に分光された光を出射するので、そのような光学素子を不要にでき、小型化が可能である。

30

【0117】

図33Aは、そのような発光装置300の構成例を模式的に示す図である。発光装置300は、発光素子310と、発光素子310に連結され、発光素子310を回転させる回転機構320と、発光素子310から発せられる光の経路上に配置された光学フィルタ330とを備えている。なお、図33Aでは、各構成要素を簡略化して表しているため、実際の構造とは必ずしも一致していない。以降の図も同様である。

【0118】

光学フィルタ330は、発光素子310から特定の方向に出射した特定の波長の光線を通過させる透光領域332を有する。透光領域332以外の箇所は、遮光領域334である。透光領域332は、例えばスリットまたは透明部材によって形成される。遮光領域334は、発光の一部を遮光または減衰させる。

40

【0119】

回転機構320は、発光素子310におけるサブミクロン構造の複数の凸部または凹部の配列方向に垂直な方向を回転軸として、発光素子310を一方向又は双方向に回転させる。回転機構320は、モータおよびギアなどの部品で構成される。これにより、異なる波長の光線が透光領域332を通過するように調整できる。このような構成により、任意の波長の光を外部に取り出して利用することができる。

【0120】

図33Bは、発光装置の変形例を示す図である。この発光装置300aは、複数の透光領域332を有する光学フィルタ330aを備えている。光学フィルタ330aにおける

50

複数の透光領域 332 は、発光素子 310 から特定の複数の方向にそれぞれ出射した複数の光線を透過させる。このような構成により、同時に複数の波長の光を取り出すことができる。

【0121】

図 33A および図 33B に示す例では、回転機構 320 が設けられているが、回転機構 320 を省略してもよい。特定の波長の光のみを利用する用途では、回転機構 320 は不要である。回転機構 320 は、モータ等で自動で角度を調節できる機構であってもよく、また、手で発光素子 310 の角度を調節できる機構であってもよい。

【0122】

図 33C は、発光装置の他の変形例を示す図である。この発光装置 300b は、少なくとも 1 つのレンズを含む集光光学系 340 と、可動式の光学フィルタ 330b とを備えている。光学系 340 は、発光素子 310 から出射した複数の波長の光線を集光して平行光束にする。スライド機構 320a は、光学フィルタ 330b に連結され、光学フィルタ 330b を一方向又は双方向にスライドさせるモータおよびギアなどの部品で構成される。より具体的には、スライド機構 320a は、透光領域 332 を異なる波長の光線が透過するように、光学フィルタ 330 を、並行光束と交差する（例えば垂直な）方向に移動させる。このような構成によっても、任意の波長の光を外部に取り出すことができる。なお、この例では光学系 340 およびスライド機構 320a を用いているが、光学系 340 およびスライド機構 320a を省略してもよい。

10

【0123】

図 33D は、発光装置のさらに他の変形例を示す図である。この発光装置 300c は、発光素子 310 と、光学系 340 と、光学シャッタ 350 とを備えている。

20

【0124】

光学シャッタ 350 は、複数の透光領域を有する。複数の透光領域は、発光素子 310 から複数の方向にそれぞれ発せられた複数の光線の経路上にそれぞれ配置されている。光学シャッタ 350 は、これらの複数の透光領域の光透過率を個別に変化させることができる。これにより、任意のスペクトルの光を取り出すことができる。この例でも、光学系 340 を省略してもよい。

【0125】

光学シャッタ 350 は、例えば液晶を用いて実現することができる。不図示の駆動回路によって透光領域ごとに液晶分子に印加する電圧を変化させることにより、各透光領域の光の透過率を変化させることができる。複数の透光領域は、1次元に限らず、2次元に配列させてもよい。

30

【0126】

図 34 は、図 33D に示す発光装置 300c の構成を応用した投影装置（プロジェクター）500 の構成例を示す図である。

【0127】

投影装置 500 は、発光装置 300c（発光素子 310、光学系 340、光学シャッタ 350）の他、光学系 540a、540b、540c、ロッドインテグレータ 510、全反射プリズム 520、デジタルミラーデバイス（DMD）530、駆動回路 550、および制御回路 560 を備える。

40

【0128】

投影装置 500 は、発光素子 310 からの発光、または発光と励起光とを利用して映像をスクリーンに投影する。ここでは、励起光が青色光（例えば、波長が 450 nm）であり、発光素子 310 のフォトルミネセンス層が励起光を受けて黄色光（例えば、主波長が 570 nm）を発生させる黄色蛍光体を含む場合を想定する。励起光の一部は、発光素子 310 を通過するものとする。

【0129】

駆動回路 550 は、光学シャッタ 350 に電氣的に接続され、光学シャッタ 350 の各透光領域の透過率を変化させる。駆動回路 550 は、表示される映像のフレームレートよ

50

りも高速に各透光領域の透過率を変化させる。これにより、光学シャッタ350から任意の色の光を出射させることができる。駆動回路550は、例えば、光学シャッタ350から、赤、緑、青の光を1/3フレームごとに順に出射させる。

【0130】

光学系540aは、光学シャッタ350から出射した光を集束させ、ロッドインテグレータ510に入射させる。ロッドインテグレータ510は、入射光の強度を均一にして出射する。光学系540bおよび全反射プリズム520は、ロッドインテグレータ510から出射した光を、DMD530の反射面に集束させる。

【0131】

DMD530は、2次元に配列された複数のミラーを有する。各ミラーの領域を画素と呼ぶと、DMD530は、画素ごとに光を反射する状態と光を吸収させる状態とを切り替える。この切り替えは、各ミラーの背部の電極に印加される電圧を変化させることによって制御される。DMD530を制御する制御回路560は、入力された画像信号に応じて、画素ごとに反射・吸収特性を変化させる。これにより、各色成分について、画素ごとの輝度を調節できるため、画像を構成できる。

10

【0132】

DMD530によって反射された光は、全反射プリズム520を通過し、光学系540cによって集束される。これにより、画像がスクリーンに投影される。

【0133】

従来のプロジェクター（例えば、特開2014-21223号公報および特開2014-160227号公報）では、カラー画像を投影するために、蛍光体ホイールが用いられる。蛍光体ホイールは、蛍光体が塗布された領域と、切り欠きの領域とを有し、モータによって回転させることにより、光を色ごとに分離する。本実施形態によれば、蛍光体ホイールおよびこれを駆動するモータを省略することができるため、小型化が可能である。

20

【0134】

なお、本実施形態では、光学シャッタ350が赤、緑、青の光を時分割で透過させるが、本開示の投影装置はこのような動作に限定されない。例えば、光学シャッタ350を省略し、複数のダイクロイックプリズムなどの素子を用いて赤、緑、青の光をそれぞれ個別にDMDで制御してもよい。その場合、3つのDMDから反射された3色の光を、ミラーを含む光学系によって合成することにより、スクリーンにカラー画像を投影できる。

30

【0135】

次に、被検知物の分光透過率を測定する検知装置への応用例を説明する。

【0136】

図35Aは、そのような検知装置400の構成を模式的に示す図である。この検知装置400は、発光素子310と、光学系340と、検知器（ディテクター）410と、保持部材420とを備える。

【0137】

保持部材420は、発光素子310から検知器410までの光路上に被検知物450（検体とも呼ぶ。）が位置するように被検知物450を保持する。保持部材420は、例えば検知装置400の筐体に設置された、検体を載置する台またはクリップなどの検体を挟む部材を含み得る。検体は、ガス、液体、板状の固体など、あらゆる物質であり得る。ガスを検知する装置においては、保持部材420を省略してもよい。

40

【0138】

検知器410は、発光素子310から出射された光の経路上に配置される。検知器410は、アレイ状に配列された複数の検知セルを有する。複数の検知セルは、発光素子310による光の分離方向に対応する方向に配列される。

【0139】

発光素子310から出射した光は、光学系340によって集光され、検体450を通過して検知器410に入射する。検知器410は、波長ごとの光強度を検知することによって検体450の光の透過特性および吸収特性を測定することができる。

50

【0140】

図35Bは、検知装置の変形例を示す図である。この検知装置400aは、図35Aに示す発光素子310および光学系340の代わりに、図33Aを参照して説明した発光装置300（発光素子310、回転機構320、および光学フィルタ330）を有する。さらに、アレイ状の複数の検知セルを有する検知器410の代わりに、1つの検知セルを有する検知器410aを有する。

【0141】

この例では、検知器410aは、光学フィルタ330における透光領域（例えば、スリット）を通過した単一の波長の光を検知する。回転機構320によって発光素子310を回転させることにより、透光領域を通過する光の波長が変化する。これにより、任意の波長について、検体450の透過率および吸収率を測定できる。

10

【0142】

[8. 他の変形例]

次に、本開示の発光素子および発光装置の変形例を説明する。

【0143】

上述したように、本開示の発光素子が有するサブミクロン構造によって、発光増強効果を受ける光の波長および出射方向は、サブミクロン構造の構成に依存する。図36に示す、フォトルミネッセンス層110上に周期構造120を有する発光素子を考える。ここでは、周期構造120はフォトルミネッセンス層110と同じ材料で形成されており、図1Aに示した1次元周期構造120を有する場合を例示する。1次元周期構造120によって発光増強を受ける光は、1次元周期構造120の周期 p (nm)、フォトルミネッセンス層110の屈折率 n_{wav} 、光が出射される外部の媒質の屈折率 n_{out} とし、1次元周期構造120への入射角を θ_{wav} 、1次元周期構造120から外部の媒質への出射角を θ_{out} とすると、 $p \times n_{wav} \times \sin \theta_{wav} - p \times n_{out} \times \sin \theta_{out} = m$ の関係を満足する（上記の式(5)参照）。ここで、 λ は空気中における光の波長であり、 m は整数である。

20

【0144】

上記式から、 $\theta_{out} = \arcsin[(n_{wav} \times \sin \theta_{wav} - m / p) / n_{out}]$ が得られる。したがって、一般に、波長 λ が異なると、発光増強を受けた光の出射角 θ_{out} が異なることになる。その結果、図37に模式的に示すように、観察する方向によって、見える光の色が異なることになる。

30

【0145】

この視角依存性を低減させるためには、 $(n_{wav} \times \sin \theta_{wav} - m / p) / n_{out}$ が、波長 λ によらず一定となるように、 n_{wav} および n_{out} を選ばばよい。物質の屈折率は、波長分散（波長依存性）を有しているので、 $(n_{wav} \times \sin \theta_{wav} - m / p) / n_{out}$ が波長 λ に依存しないような、 n_{wav} および n_{out} の波長分散性を有する材料を選択すればよい。例えば、外部の媒質が空気の場合、 n_{out} は、波長によらずほぼ1.0なので、フォトルミネッセンス層110および1次元周期構造120を形成する材料として、屈折率 n_{wav} の波長分散が小さい材料を選択することが望ましい。さらに、屈折率 n_{wav} がより短い波長の光に対して屈折率が低くなるような逆分散の材料のほうが望ましい。

40

【0146】

また、図37A(a)に示すように、互いに発光増強効果を示す波長が異なる複数の周期構造を配列することによって、白色光を出射できるようにできる。図37A(a)に示す例では、赤色光(R)を増強できる周期構造120rと、緑色光(G)を増強できる周期構造120gと、青色光(B)を増強できる周期構造120bとがマトリクス状に配列されている。周期構造120r、120gおよび120bは、例えば、1次元周期構造で、それぞれの凸部は互いに平行に配列されている。したがって、偏光特性は、赤、緑、青の全ての色の光について同じである。周期構造120r、120gおよび120bによって、発光増強を受けた三原色の光が出射され、混色される結果、白色光が得られ、かつ、直線偏光である。

【0147】

50

マトリクス状に配列された各周期構造 120 r、120 g および 120 b を単位周期構造（または画素）と呼ぶと、単位周期構造の大きさ（即ち、一辺の長さ）は、例えば、周期の 3 倍以上である。また、混色の効果を得るためには人間の目で単位周期構造が認識されない方が望ましく、例えば、一辺の長さは 1 mm よりも小さいことが望ましい。ここでは、各単位周期構造を正方形に描いているが、これに限られず、例えば、互いに隣接する周期構造 120 r、120 g および 120 b が長方形、三角形、六角形などの正方形以外の形状でもよい。

【0148】

また、周期構造 120 r、120 g および 120 b の下に設けられているフォトルミネッセンス層は、周期構造 120 r、120 g および 120 b に共通であってもよいし、それぞれの色の光に対応して異なるフォトルミネッセンス材料を有するフォトルミネッセンス層を設けてもよい。

10

【0149】

図 37 A (b) に示すように、1次元周期構造の凸部が延びる方位が異なる、複数の周期構造（周期構造 120 h、120 i および 120 j を含む）配列してもよい。複数の周期構造が発光増強する光の波長は、同じでもよいし、異なってもよい。例えば、同じ周期構造を図 37 A (b) のように配列すると、偏光していない光を得ることができる。また、図 37 A (a) における周期構造 120 r、120 g および 120 b のそれぞれについて、図 37 A (b) の配列を適用すると、全体として、非偏光の白色光を得ることができる。

20

【0150】

もちろん、周期構造は、1次元周期構造に限らず、図 37 A (c) に示すように、複数の 2次元周期構造（周期構造 120 k、120 m および 120 n を含む）を配列してもよい。このとき、周期構造 120 k、120 m および 120 n の周期や方位は、上述したように、同じでもよいし、異なってもよく、必要に応じて適宜設定され得る。

【0151】

また、図 37 B に示すように、例えば、発光素子の出射側にマイクロレンズ 130 を配置し、斜め方向に出射される光を法線方向に曲げることによって、混色の効果を得ることができる。

【0152】

図 37 B に示した発光素子は、図 37 A (a) における周期構造 120 r、120 g および 120 b をそれぞれ有する領域 R1、R2 および R3 を有する。領域 R1 においては、周期構造 120 r によって、赤色光 R が法線方向に出射され、例えば緑色光 G は斜め方向に出射される。マイクロレンズ 130 の屈折作用によって、斜め方向に出射された緑色光 G は法線方向に曲げられる。その結果、法線方向においては、赤色光 R と緑色光 G とが混色されて観察される。このように、マイクロレンズ 130 を設けることによって、出射される光の波長が角度によって異なるという現象が抑制される。ここでは、複数の周期構造に対応する複数のマイクロレンズを一体化したマイクロレンズアレイを例示しているが、これに限られない。もちろん、タイリングする周期構造は上記の例に限られず、同じ周期構造をタイリングした場合にも適用できるし、図 37 A (b) または (c) に示した構成にも適用できる。

30

40

【0153】

また、斜め方向に出射される光を曲げる作用を有する光学素子は、マイクロレンズアレイに代えてレンチキュラーレンズを用いることもできる。また、レンズだけでなく、プリズムを用いることもできる。プリズムもアレイとしてもよい。周期構造に対応して個々に配置してもよい。プリズムの形状は、特に制限されず、例えば、三角プリズムまたはピラミッド型プリズムを用いることができる。

【0154】

白色光（あるいは、広いスペクトル幅を有する光）を得る方法は、上述の周期構造によるものの他、例えば、図 38 (a) および (b) に示すように、フォトルミネッセンス層

50

によるものもある。図38(a)に示すように、発光波長が異なる複数のフォトルミネッセンス層110b、110g、110rを積層することによって、白色光を得ることができる。積層順は図示の例に限らない。また、図38(b)に示すように、青色を発光するフォトルミネッセンス層110bの上に、黄色を発光するフォトルミネッセンス層110yを積層してもよい。フォトルミネッセンス層110yは、例えばYAGを用いて形成することができる。

【0155】

この他、蛍色素などマトリクス(ホスト)材料に混合して用いられるフォトルミネッセンス材料を用いる場合には、発光波長が異なる複数のフォトルミネッセンス材料をマトリクス材料に混合し、単一のフォトルミネッセンス層で、白色光を発光するようにできる。この様な白色光を発光できるフォトルミネッセンス層は、図37A(a)~(c)を参照して説明した、単位周期構造をタイリングした構成に用いることができる。

10

【0156】

フォトルミネッセンス層110を形成する材料として、無機材料(例えばYAG)を用いる場合、その製造過程で、1000を超える熱処理を経ることがある。その際、下地(典型的には、基板)から不純物が拡散し、フォトルミネッセンス層110の発光特性を低下させることがある。不純物がフォトルミネッセンス層に拡散するのを防止するために、例えば図39(a)~(d)に示すように、フォトルミネッセンス層の下に、拡散防止層(バリア層)108を設けてもよい。図39(a)~(d)に示すように、拡散防止層108は、これまで例示した種々の構成において、フォトルミネッセンス層110の下層に形成される。

20

【0157】

例えば、図39(a)に示すように、基板140とフォトルミネッセンス層110との間に拡散防止層108が形成される。また、図39(b)に示すように、複数のフォトルミネッセンス層110aおよび100bを有する場合には、フォトルミネッセンス層110aおよび110bのそれぞれの下層に拡散防止層108aまたは108bが形成される。

【0158】

基板140の屈折率がフォトルミネッセンス層110の屈折率よりも大きい場合には、図39(c)、図39(d)に示すように、基板140上に低屈折率層107を形成すればよい。図39(c)に示すように、基板140の上に低屈折率層107を設けた場合、低屈折率層107とフォトルミネッセンス層110との間の拡散防止層108が形成される。さらに、図39(d)に示すように、複数のフォトルミネッセンス層110aおよび100bを有する場合には、フォトルミネッセンス層110aおよび110bの下層に拡散防止層108aおよび108bがそれぞれ形成される。

30

【0159】

なお、低屈折率層107は、基板140の屈折率がフォトルミネッセンス層110の屈折率と同等かそれよりも大きい場合に形成される。低屈折率層107の屈折率は、フォトルミネッセンス層110の屈折率よりも低い。低屈折率層107は、例えば、 MgF_2 、 LiF 、 CaF_2 、 BaF_2 、 SrF_2 、石英、樹脂、HSQ・SOGなどの常温硬化ガラスを用いて形成される。低屈折率層107の厚さは、光の波長よりも大きいことが望ましい。基板140は、例えば、 MgF_2 、 LiF 、 CaF_2 、 BaF_2 、 SrF_2 、ガラス、樹脂、 MgO 、 $MgAl_2O_4$ 、サファイア(Al_2O_3)、 $SrTiO_3$ 、 $LaAlO_3$ 、 TiO_2 、 $Gd_3Ga_5O_{12}$ 、 $LaSrAlO_4$ 、 $LaSrGaO_4$ 、 $LaTaO_3$ 、 SrO 、 $YSZ(ZrO_2 \cdot Y_2O_3)$ 、YAG、 $Tb_3Ga_5O_{12}$ を用いて形成される。

40

【0160】

拡散防止層108、108a、108bは、拡散を防止する対象の元素によって好適に選択されればよく、例えば、共有結合性の強い酸化物結晶や窒化物結晶を用いて形成することができる。拡散防止層108、108a、108bの厚さは、例えば、50nm以下である。

50

【0161】

なお、拡散防止層108や後述する結晶成長層106のような、フォトルミネッセンス層110に隣接する層を有する構成においては、隣接する層の屈折率がフォトルミネッセンス層の屈折率よりも大きい場合、当該屈折率が大きい層の屈折率およびフォトルミネッセンス層の屈折率をそれぞれの体積比率で重み付けした平均屈折率を n_{wav} とする。この場合は、光学的には、フォトルミネッセンス層が複数の異なる材料の層で構成されている場合と等価であるからである。

【0162】

また、無機材料を用いて形成されたフォトルミネッセンス層110においては、無機材料の結晶性が低いために、フォトルミネッセンス層110の発光特性が低いことがある。フォトルミネッセンス層110を構成する無機材料の結晶性を高めるために、図40(a)に示すように、フォトルミネッセンス層110の下地に、結晶成長層(「シード層」ということもある。)106を形成してもよい。結晶成長層106は、その上に形成されるフォトルミネッセンス層110の結晶と格子整合する材料を用いて形成される。格子整合は、例えば $\pm 5\%$ 以内であることが望ましい。基板140の屈折率がフォトルミネッセンス層110の屈折率よりも大きい場合、結晶成長層106または106aの屈折率は、フォトルミネッセンス層110の屈折率よりも小さいことが望ましい。

10

【0163】

基板140の屈折率がフォトルミネッセンス層110の屈折率よりも大きい場合には、図40(b)に示すように、基板140上に低屈折率層107を形成すればよい。結晶成長層106は、フォトルミネッセンス層110と接するので、基板140上に低屈折率層107が形成される場合には、低屈折率層107上に結晶成長層106が形成される。また、図40(c)に示すように、複数のフォトルミネッセンス層110aおよび110bを有する構成においては、複数のフォトルミネッセンス層110aおよび110bのそれぞれに対応する結晶成長層106aまたは106bを形成することが望ましい。結晶成長層106、106aおよび106bの厚さは、例えば、例えば、50nm以下である。

20

【0164】

図41(a)および(b)に示すように、周期構造120を保護するために、表面保護層132を設けてもよい。

【0165】

表面保護層132は、図41(a)に示すように、基板を有しないタイプのものであっても、図41(b)に示すように、基板140を有するタイプのものにも設けられる。また、図41(a)に示した基板を有しないタイプの発光素子においては、フォトルミネッセンス層110の下層にも表面保護層を設けてもよい。このように、表面保護層132は、上述したいずれの発光素子の表面に設けてもよい。周期構造120は、図41(a)および図41(b)に例示したものに限られず、上述したいずれのタイプであってもよい。

30

【0166】

表面保護層132は、例えば、樹脂、ハードコート材、 SiO_2 、 Al_2O_3 (アルミナ)、 $SiOC$ 、 DLC を用いて形成することができる。表面保護層132の厚さは、例えば、100nm~10 μ mである。

40

【0167】

表面保護層132を設けることによって、発光素子を外部環境から保護し、発光素子の劣化を抑制することができる。表面保護層132は、発光素子の表面を傷、水分、酸素、酸、アルカリ、または熱から保護する。表面保護層132の材料や厚さは、用途に応じて適宜設定され得る。

【0168】

また、フォトルミネッセンス材料は熱によって劣化することがある。熱は、主にフォトルミネッセンス層110の非輻射ロスやストークスロスによって生じる。例えば、石英の熱伝導率(1.6W/m \cdot K)は、YAGの熱伝導率(11.4W/m \cdot K)よりも約1桁小さい。したがって、フォトルミネッセンス層(例えばYAG層)110で発生した熱

50

が基板（例えば石英基板）140を通して外部に熱伝導して放熱されにくく、フォトルミネッセンス層110の温度が上昇し、熱劣化を起こすことがある。

【0169】

そこで、図42(a)に示すように、フォトルミネッセンス層110と基板140との間に、透明高熱伝導層105を形成することによって、フォトルミネッセンス層110の熱を外部に効率よく伝導させ、温度上昇を防ぐことができる。このとき、透明高熱伝導層105の屈折率は、フォトルミネッセンス層110の屈折率よりも低いことが望ましい。なお、基板140の屈折率がフォトルミネッセンス層110の屈折率よりも低い場合には、透明高熱伝導層105の屈折率は、フォトルミネッセンス層110の屈折率よりも高くてもよい。ただし、この場合には、透明高熱伝導層105は、フォトルミネッセンス層110とともに導波層を形成するので、50nm以下であることが望ましい。図42(b)に示すように、フォトルミネッセンス層110と透明高熱伝導層105との間に、低屈折率層107を形成すれば、厚い透明高熱伝導層105を利用できる。

10

【0170】

また、図42(c)に示すように、周期構造120を高い熱伝導率を有する低屈折率層107で覆ってもよい。さらに、図42(d)に示すように、周期構造120を低屈折率層107で覆った上に、透明高熱伝導層105を形成してもよい。この構成においては、低屈折率層107が高い熱伝導率を有する必要はない。

【0171】

透明高熱伝導層105の材料としては、例えば、 Al_2O_3 、 MgO 、 Si_3N_4 、 ZnO 、 AlN 、 Y_2O_3 、ダイヤモンド、グラフェン、 CaF_2 、 BaF_2 を挙げることができる。これらの内、 CaF_2 、 BaF_2 は、屈折率が低いので、低屈折率層107として利用することができる。

20

【0172】

次に、図43(a)～(d)を参照して、発光素子100と光源180とを備える発光装置の放熱特性を高めた構造を説明する。

【0173】

図43(a)に示す発光装置は、光源180としてのLEDチップ180と、発光素子100とを有している。発光素子100は、上述のいずれのタイプでもよい。LEDチップ180は、支持基板190上に実装されており、発光素子100は、LEDチップと所定の間隔をあけて配置されている。発光素子100は、LEDチップから出射される励起光を受けて発光する。支持基板190上において、LEDチップ180および発光素子100は、封止部142に覆われている。

30

【0174】

封止部142は、高熱伝導性と透光性とを備えている。封止部142を形成する材料（「封止材料」ということがある）は、例えば、高熱伝導性のフィラーと樹脂材料とを含む複合材料である。高熱伝導性フィラーとしては、 Al_2O_3 、 ZnO 、 Y_2O_3 、グラフェンおよび AlN を例示することができる。また、樹脂材料としては、エポキシ樹脂およびシリコーン樹脂を例示することができる。特に、封止材料として、高熱伝導性フィラーのサイズがナノメートルサイズ（即ち、サブマイクロンサイズ）を用いたナノコンポジット材料を用いることができる。ナノコンポジット材料を用いると、光の拡散反射（または散乱）を抑制することができる。ナノコンポジット材料としては、フィラーとして ZnO または Al_2O_3 を用い、樹脂として、エポキシ樹脂またはシリコーン樹脂を用いたものを例示することができる。

40

【0175】

なお、発光素子100が、図43(a)に例示したように、表面に周期構造が露出しているタイプの場合には、周期構造の周りの媒質の屈折率は、周期構造の屈折率よりも低いことが望ましい。すなわち、封止部142の屈折率は、周期構造が透光層によって形成されている場合は、透光層の屈折率よりも低く、周期構造がフォトルミネッセンス層と同じ材料で形成されている場合は、フォトルミネッセンス層の屈折率よりも低いことが望まし

50

い。

【0176】

封止部142は、図43(b)に示すように、発光素子100の表面近傍(例えば、周期構造を有する透光層またはフォトルミネッセンス層)を露出するように設けてもよい。このとき、封止部142の屈折率は特に制限されない。

【0177】

また、図43(c)に示すように、発光素子100として、周期構造が低屈折率層107(図42(c)参照)で覆われているタイプのものを用いる場合にも、封止部142の屈折率は、周期構造の屈折率よりも高くてもよい。このような構成を採用することによって、封止部142の材料の選択範囲が広がる。

10

【0178】

また、図43(d)に示すように、発光素子100の周辺を高熱伝導性を有するフォルダー152に固定してもよい。フォルダー152は、例えば、金属で形成され得る。例えば、光源として、レーザーダイオード182を用いる場合のように、発光素子100と光源との間に封止材料を充填できない場合に、上記の構造を好適に用いられ得る。例えば、図42(a)~(d)に例示した構成を有する発光素子100は、透明高熱伝導層105または高い熱伝導率を有する低屈折率層107を有するので、素子の面内の熱伝導性が高いので、効果的にフォルダー152を介して放熱することができる。

【0179】

図44(a)~(d)に示すように、発光素子100の表面に、高熱伝導部材144を配置してもよい。高熱伝導部材144は、例えば、金属で形成される。

20

【0180】

例えば、図44(a)に断面図を示し、図44(b)に平面図を示すように、発光素子100の周期構造120の一部を覆うように高熱伝導部材144を配置してもよい。図44(a)および(b)には、1次元周期構造を形成する複数の凸部の1つだけを覆う線状の高熱伝導部材144を示しているが、これに限られない。

【0181】

また、図44(c)に断面図を示し、図44(d)に平面図を示すように、発光素子100の周期構造120の両端の凸部およびフォトルミネッセンス層110の端面を覆うように、高熱伝導部材146を形成してもよい。いずれの場合も、周期構造およびフォトルミネッセンス層の、高熱伝導部材146に覆われる部分の面積が大きくなると、発光素子100の特性に影響する恐れがあるので、発光素子100の表面に形成する高熱伝導部材146の面積は小さい方がよい。

30

【0182】

また、図45(a)に断面図を示し、図45(b)に平面図を示すように、異なる構造を有する複数の発光素子100r、100gおよび100bをタイリングする場合、隣接する発光素子間に、それぞれの発光素子の端部を覆うように、高熱伝導部材148を配置してもよい。例えば、ここで例示するように、赤色光を増強する発光素子100r、緑色光を増強する100gおよび青色光を増強する100bを配列する場合、例えば、金属で形成された高熱伝導部材148を隣接する発光素子間に配置すると、高熱伝導部材148は遮光性を有しているので、混色を抑制することができる。このように、高熱伝導部材148を表示パネルにおけるブラックマトリクスのように使用することもできる。

40

【0183】

図46に、インターロック回路185を備える発光装置の例を示す。図46(a)は発光素子100の裏面を示す模式図であり、図46(b)は発光素子100の断面図を含む、発光装置の模式図である。図46(a)および(b)に示すように、発光素子100が有する基板140の裏面に、環状配線172が形成されている。環状配線172は、発光素子100の裏面の外周近傍に形成されており、基板140が破損したら、断線するように形成されている。環状配線172は、例えば金属材料で形成されている。環状配線172の2つの端部は、インターロック回路185のリレー回路に電氣的に接続されている。

50

環状配線 172 に断線が発生した場合、リレー回路は、光源 182 への電力の供給を遮断する。光源 182 が、特に、レーザーダイオードのように強度の強い光を発する場合には、安全性等の観点から、インターロック回路 185 を設けることが望ましい。

【0184】

上述の実施形態の発光素子が有するサブミクロン構造は、例えば周期構造であり、フォトリソグラフィ技術やナノプリント技術を用いて形成され得る。図 47 (a) ~ (f) を参照して、サブミクロン構造の他の形成方法を説明する。

【0185】

図 47 (a) に示すように、基板 140 に支持されたフォトルミネッセンス層 110 の表面にビーズ 122 を配置する。ビーズ 122 の一部をフォトルミネッセンス層 110 に均等に埋め込むことで、ビーズ 122 をフォトルミネッセンス層 110 に固定することができる。このように、多数のビーズ 122 のそれぞれの一部がフォトルミネッセンス層 110 に均等に埋め込まれて、残りの部分がフォトルミネッセンス層 110 から突き出ている場合、ビーズ 122 の屈折率は、フォトルミネッセンス層 110 の屈折率と等しくてもよいし、小さくてもよい。例えば、ビーズ 122 の屈折率がフォトルミネッセンス層 110 の屈折率よりも小さい場合、多数のビーズ 122 によって形成される層（フォトルミネッセンス層 110 から突き出た部分と埋め込まれた部分の両方）が、サブミクロン構造を有する透光層 120 として機能する。また、ビーズ 122 の屈折率がフォトルミネッセンス層 110 の屈折率と等しい場合、ビーズ 122 とフォトルミネッセンス層 110 とは実質的に一体となり、フォトルミネッセンス層 110 から突き出た部分が、サブミクロン構造を有する透光層 120 として機能する。

【0186】

あるいは、図 47 (b) に示すように、基板 140 上に、多数のビーズ 122 を配置した上に、フォトルミネッセンス層 110 を形成してもよい。このとき、ビーズ 122 の屈折率は、フォトルミネッセンス層 110 の屈折率よりも低いことが望ましい。

【0187】

ここで、ビーズ 122 の直径は例えば上述の D_{int} と等しいかそれよりも小さい。ビーズ 122 が緻密に充填された場合には、ビーズ 122 の直径が D_{int} とほぼ一致する。隣接するビーズ 122 の間に間隙が形成される場合、ビーズ 122 の直径に間隙を加えた長さが D_{int} に対応することになる。

【0188】

また、ビーズ 122 としては、中空のビーズであっても、中実のビーズであってもよい。

【0189】

図 47 (c) ~ (f) は、種々のビーズの充填状態を模式的に示す図と、それぞれ充填状態のビーズから得られる光散乱のパターンを示す図である。図 47 (c) ~ (f) において、黒い部分は中実ビーズまたは中空ビーズ内の中実部分を示し、白い部分は、中空ビーズまたは、中空ビーズ内の空隙部分を示している。

【0190】

図 47 (c) は、卵形の外形を有する中空ビーズが密に充填されている状態と、その光散乱のパターンを示している。この中空ビーズの空隙部分は、ほぼ球形で、卵の底の位置に形成されている。図 47 (d) は、ほぼ球形の外形を有する中空ビーズが密に充填されている状態と、その光散乱のパターンを示している。この中空ビーズの空隙部分は、ほぼ球形で、外形の球に接するように形成されている。図 47 (e) は、ほぼ球形の外形を有する中空ビーズが密に充填されている状態と、その光散乱のパターンを示している。この中空ビーズの空隙部分は、2つのほぼ球形の空隙を含んでおり、2つの球形の空隙は、外形の球の直径にそって配列されている。図 47 (f) は、ほぼ球形の外形を有する中空ビーズとほぼ球形の外形を有する中実ビーズとが密に充填されている状態と、その光散乱のパターンを示している。中空ビーズおよび中実ビーズはほぼ同じ直径を有しており、ほぼ同じ体積比率で混合されている。また、中空ビーズおよび中実ビーズの配置に規則性はな

く、ほぼランダムである。

【0191】

中空ビーズや中実ビーズは、種々のガラスまたは樹脂で形成されたものが市販されている。ここで例示したビーズは、例えば、研磨材料として広く市販されているアルミナの粉体や日鉄鉱業株式会社の中空シリカなどを用い、得られたビーズに分散剤を添加し、溶媒（例えば水やアルコール類など）に分散し、この分散液を基板140上またはフォトルミネッセンス層110上に付与し、乾燥することによって、多数のビーズが密に充填された層を形成することができる。

【0192】

[9. 応用例]

上述したように、本開示の発光素子およびそれを備える発光装置は、種々の利点を有しているので、種々の光学デバイスに適用することによって、有利な効果を奏し得る。以下に、応用例を挙げる。

【0193】

本開示の発光素子は、特定の方向に指向性の高い光を出射することができる。この高い指向性は、例えば、液晶表示装置の導光板を利用するエッジライト型のバックライトとして好適に用いられる。例えば、従来の指向性の低い光源を用いた場合には、光源から出射した光を反射板および/または拡散材により、導光板へ光を導入していた。特定方向の指向性が高い光源の場合、これらの光学部品を省略しても効率よく導光板へ光を導入することができる。

【0194】

また、種々の光学デバイスにおいて、光源からの光を所定の方向に効率よく導く必要があり、そのために例えば、レンズ、プリズムまたは反射板が用いられている。例えば、プロジェクターにおいては、光源からの光を表示パネルに導くために、ライトガイドを用いる構成が知られている（例えば、特開2010-156929号公報）。本開示の発光素子を光源に用いることによって、ライトガイドを省略することができる。

【0195】

また、照明器具においても、等方的に発せられた光を所望の方向に導くために、レンズおよびまたは反射板を含む光学部品を用いているが、本開示の発光素子を用いることによって、これらを省略することが可能となる。あるいは、等方的な光に対する複雑な設計を、指向性の高い光に対する単純な設計に置き換えることができる。その結果、照明器具を小型化、あるいは、設計工程を簡略化することができる。

【0196】

本開示の発光素子は、特定の波長の光だけを增強することができる。したがって、必要とされる波長だけを出力する光源を容易に実現できる。また、フォトルミネッセンス層の材料を変えずに、周期構造を変更するだけで、出力される光の波長を変えることができる。さらに、周期構造に対する角度によって、異なる波長の光を出力させることもできる。このような波長選択性は、例えば、狭帯域イメージング（*narrow band imaging*：NBI、登録商標）という技術に好適に用いられる。また、可視光通信にも好適に用いることができる。

【0197】

また、照明の分野では、彩光色照明および美光色照明という技術が開発されている。これらは、照明の対象の色を美しく見せるもので、彩光色照明は例えば野菜などの食品をよりおいしそうに見せる効果があり、美光色照明は、肌をより美しく見せる効果がある。これらは、いずれも光源のスペクトル（即ち、発光する光の波長の強度分布）を対象物に応じて制御することによって行われる。従来は、光学フィルタを用いて光源から出力された光を選択透過させることによって、照明に用いる光のスペクトルを制御していた。すなわち、不要な光を光学フィルタによって吸収させていたので、光の利用効率を低下させていた。これに対し、本開示の発光素子は、特定の波長の光を增強できるので、光学フィルタを必要とせず、その結果、光の利用効率を向上させることができる。

10

20

30

40

50

【0198】

本開示の発光素子は、偏光（直線偏光）を出射することができる。従来、直線偏光は、光源から出射された非偏光を構成する直交する2つの直線偏光の内的一方を偏光フィルタ（「偏光板」ともいわれる。）を用いて吸収させることによって作られていた。したがって、光の利用効率は50%以下であった。本開示の発光素子を偏光光源として用いれば、偏光フィルタを用いる必要がないので、光の利用効率を向上させることができる。偏光照明は、例えば、ショーウィンドウや展望レストランの窓ガラスなど、反射光を低減させたい場合に用いられる。また、皮膚表面の反射特性が偏光に依存することを利用した、洗面・化粧用の照明、さらには、内視鏡による病変部の観察を容易にするために用いられる。

【0199】

偏光光源は、液晶表示装置のバックライトとして好適に用いられる他、液晶プロジェクターの光源にも好適に用いられる。液晶プロジェクターの光源として用いる場合には、上述の波長選択性と組み合わせて、3原色の偏光を出射できる光源を構成することができる。例えば、赤色の直線偏光を出射する発光素子と、緑色の直線偏光を出射する発光素子と、青色の直線偏光を出射する発光素子とをつなぎあわせて円盤を形成し、この円盤に励起光を照射しながら、円盤を回転させることによって、時系列に赤、緑、青の三原色の偏光を出射する光源とすることができる。

【0200】

また、本開示の発光素子は、図48に模式的に示すように、透明表示装置のスクリーン100Sとして用いることができる。

【0201】

スクリーン100Sは、例えば、赤色光（R）を増強する発光素子と、緑色光（G）を増強する発光素子と、青色光（B）を増強する発光素子とで構成する画素がマトリクス状に配列されている。これらの発光素子は、励起光源180S1から対応する励起光（例えば紫外線）が照射されたときにだけ所定の色光を発光し、画像を表示することができる。各発光素子は、可視光を透過するので、観察者は、スクリーン100Sを介して、背景を観察することができる。スクリーン100Sに励起光が照射されないときは、透明な窓のように見える。励起光源180S1として、レーザーダイオードを用い画像データに合わせて、出力を変えながらスキャンさせることによって、高解像度の表示が可能となる。また、レーザー光はコヒーレント光であるので、周期構造と干渉させることによって、励起効率も高めることができる。また、紫外線などの好ましくない波長の光を励起光として用いる場合には、励起光源をスクリーン100Sの観察者と反対側に設置し、スクリーン100Sの観察者側に励起光をカットするフィルタを設けることによって、不要な光の漏洩を防止することができる。

【0202】

スクリーン100Sは、高い指向性を有し得るので、例えば、所定の方から観察する人だけが画像を観察できるように構成することができる。

【0203】

励起光源180S1に代えて、励起光源180S2を用いることができる。このとき、スクリーン100Sの背面（即ち、観察者側とは反対側）に、導光シートSを配置し、導光シートSに励起光源180S2から励起光を照射する。導光シートSに入射した励起光は、導光シートS内を伝播しながら、スクリーン100Sを裏面から照射する。この時、表示したい画像の部分に合わせて、発光素子を配置すると任意の画像をアクティブに表示することはできないが、励起光が照射されていない場合は、窓のように透明であり、励起光が照射された時にのみ画像あるいは図形や文字などが表示される表示機器を構成することができる。

【0204】

また、本開示の発光素子では、例えば図8および図9を参照して上述したように、周期構造の屈折率が変化すると、増強される光の波長が変化し、増強される光の出射方向も変化する。また、フォトルミネッセンス層の屈折率によっても、増強される光の波長および

10

20

30

40

50

出射方向が変化する。したがって、発光素子の近傍の媒質の屈折率変化を容易に感度良く検知することができる。

【0205】

例えば、以下の様にして、本開示の発光素子を用いて、様々な物質を検出するセンサーを構成することができる。

【0206】

本開示の発光素子の周期構造に近接して、測定対象の物質（タンパク質や匂い分子、ウイルスなど）と選択的に結合する物質（酵素など）を配置しておく。測定対象の物質が結合すると、発光素子の近傍の媒質の屈折率が変化する。この屈折率の変化を、上述の増強される光の波長または出射方向の変化をとって検出することによって、様々な物質の存在を検知することができる。

10

【0207】

本開示の発光素子の応用例は上記に限られず、種々の光学デバイスに適用され得る。

【産業上の利用可能性】

【0208】

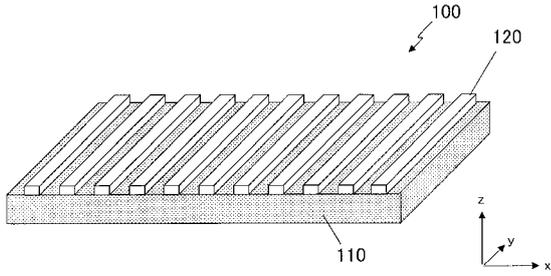
本開示の発光素子および発光装置は、照明器具、ディスプレイ、プロジェクターをはじめ、種々の光学デバイスに適用され得る。

【符号の説明】

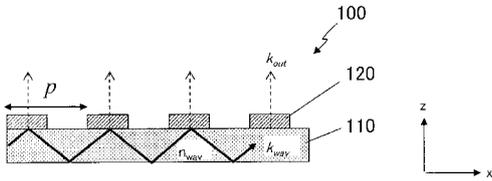
【0209】

100、100 a	発光素子	20
110	フォトルミネセンス層（導波層）	
120、120'、120 a、120 b、120 c	透光層（周期構造、サブマイクロ構造）	
140	透明基板	
150	保護層	
180	光源	
200	発光装置	
300、300 a、300 b	発光装置	
310	発光素子	
320	回転機構	30
320 a	スライド機構	
330	光学フィルタ	
332	透光領域	
334	遮光領域	
340	光学系	
350	光学シャッタ	
400、400 a	検知装置	
410	検知器（ディテクター）	
420	保持部材	
450	被検知物（検体）	40
500	投影装置（プロジェクター）	
510	ロッドインテグレータ	
520	全反射プリズム	
530	デジタルミラーデバイス	
540 a、540 b、540 c	光学系	
550	駆動回路	
560	制御回路	

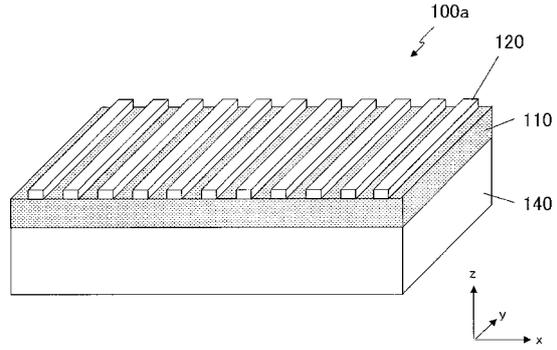
【図 1 A】



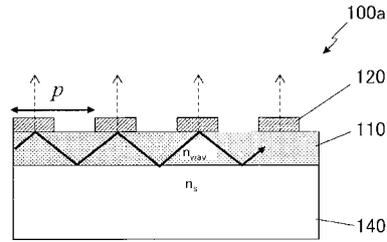
【図 1 B】



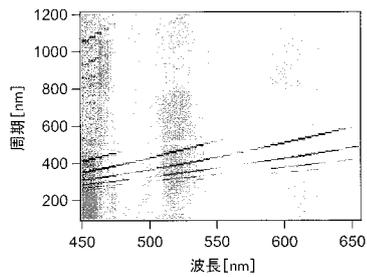
【図 1 C】



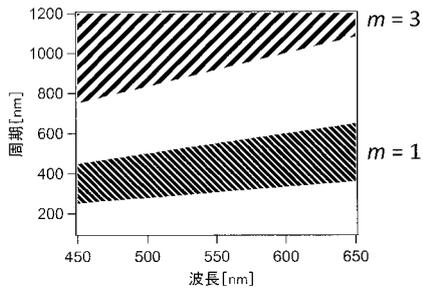
【図 1 D】



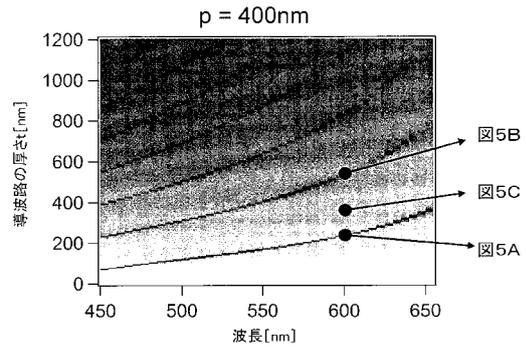
【図 2】



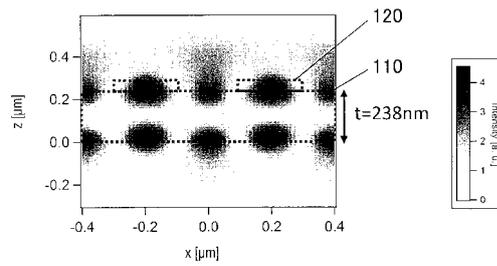
【図 3】



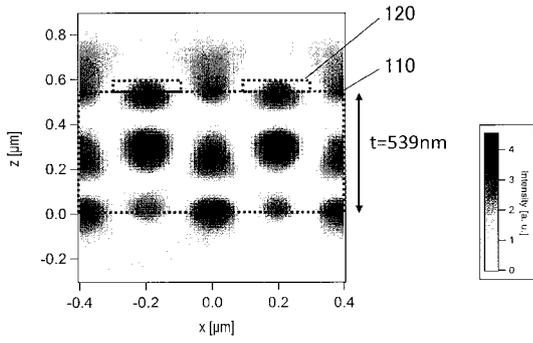
【図 4】



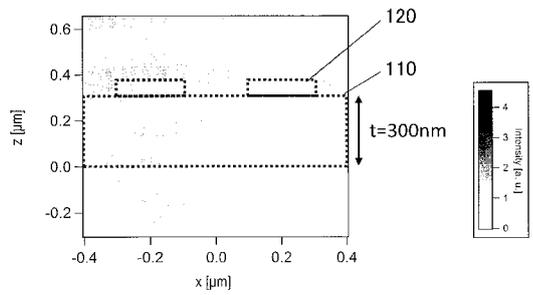
【図 5 A】



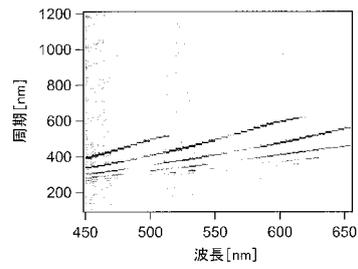
【 図 5 B 】



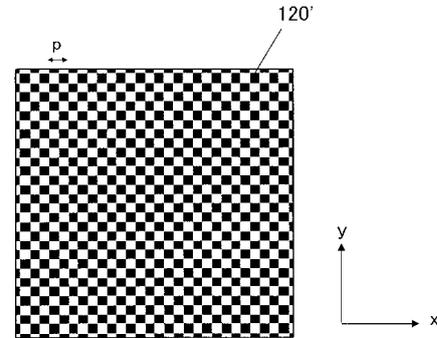
【 図 5 C 】



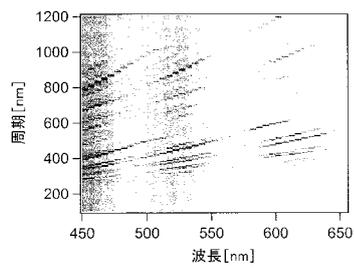
【 図 6 】



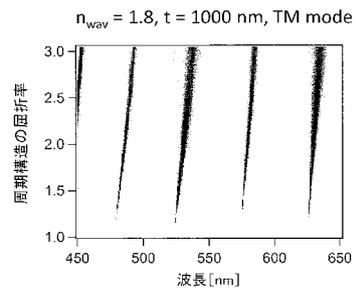
【 図 7 A 】



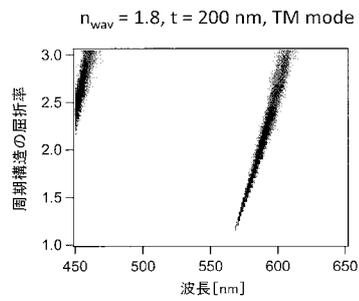
【 図 7 B 】



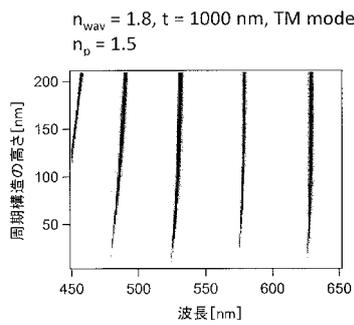
【 図 9 】



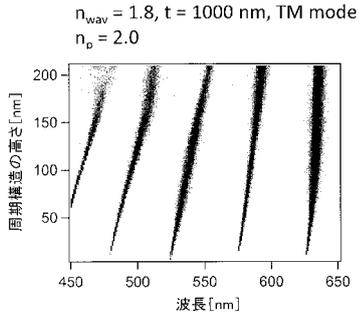
【 図 8 】



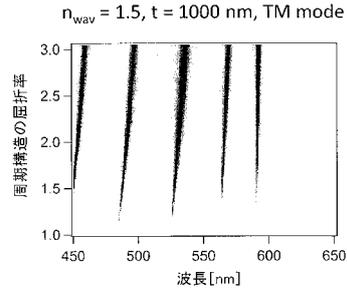
【 図 10 】



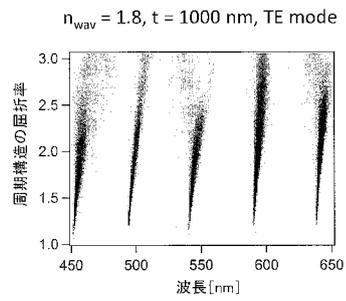
【 図 1 1 】



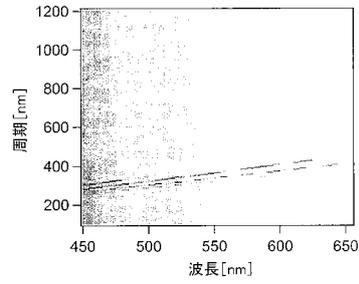
【 図 1 3 】



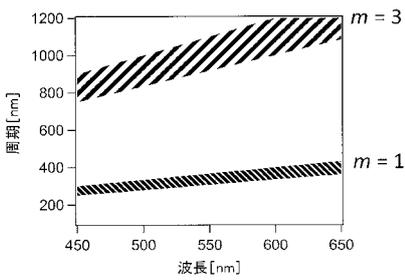
【 図 1 2 】



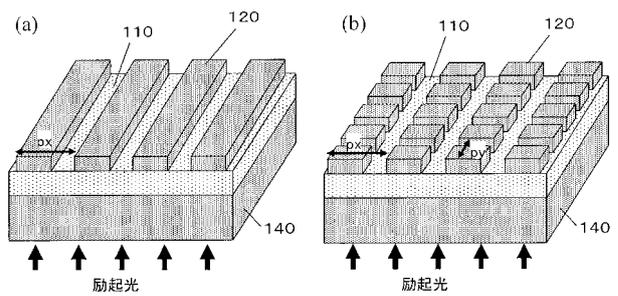
【 図 1 4 】



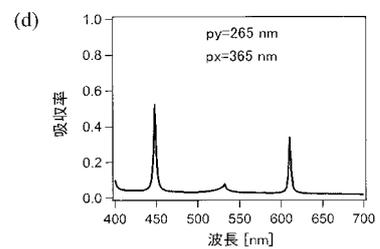
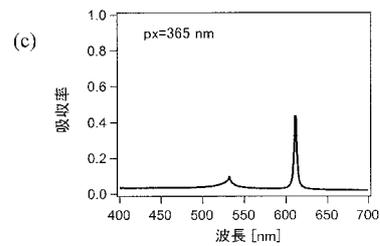
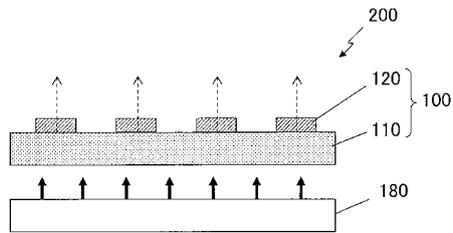
【 図 1 5 】



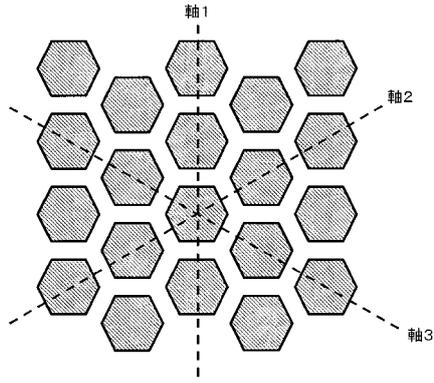
【 図 1 7 】



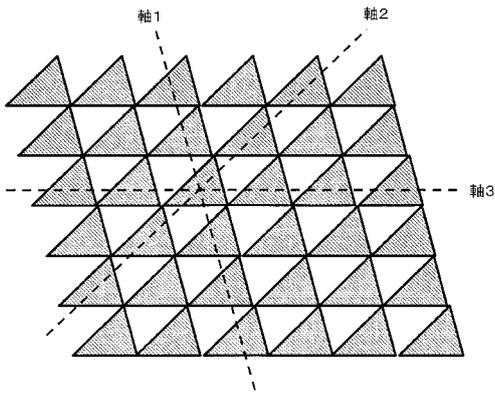
【 図 1 6 】



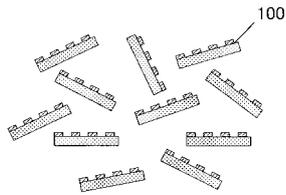
【 図 1 8 A 】



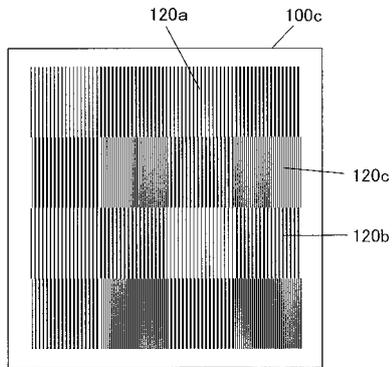
【 図 1 8 B 】



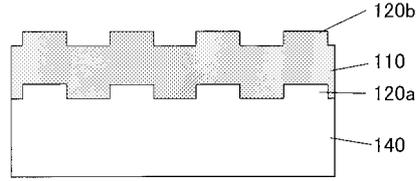
【 図 2 0 】



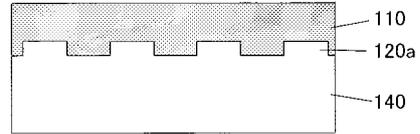
【 図 2 1 】



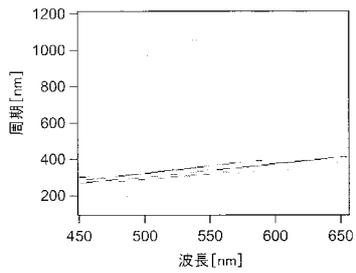
【 図 1 9 A 】



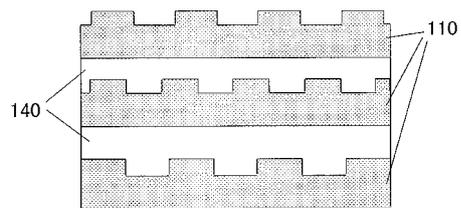
【 図 1 9 B 】



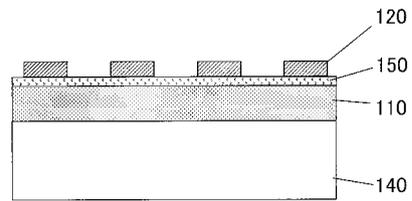
【 図 1 9 C 】



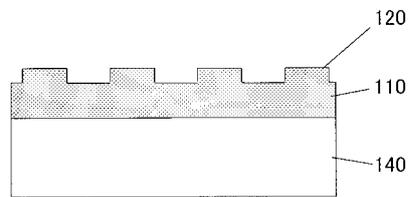
【 図 2 2 】



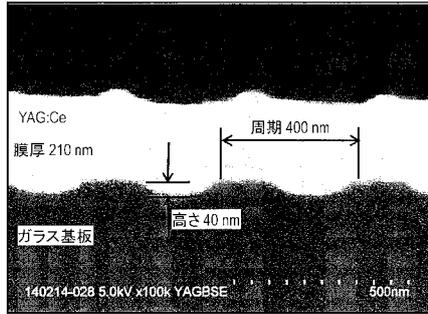
【 図 2 3 】



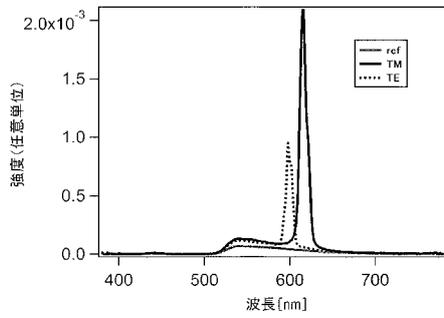
【 図 2 4 】



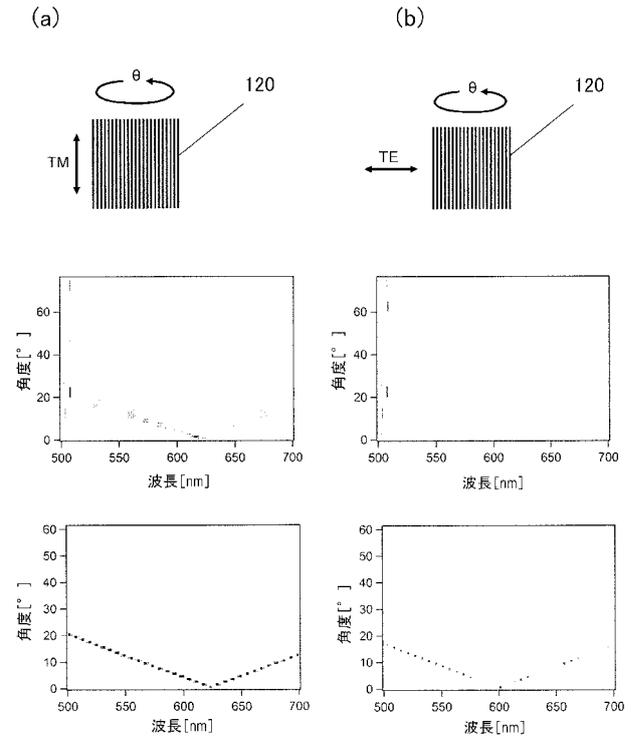
【 図 2 5 】



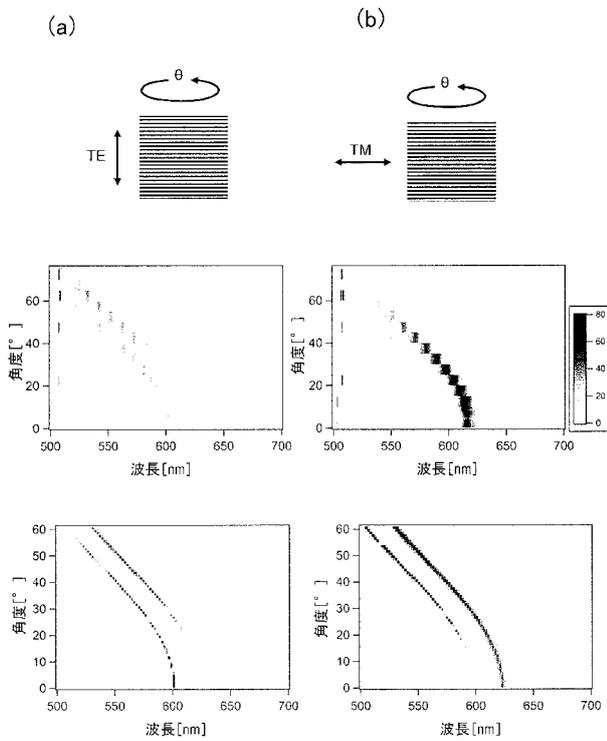
【 図 2 6 】



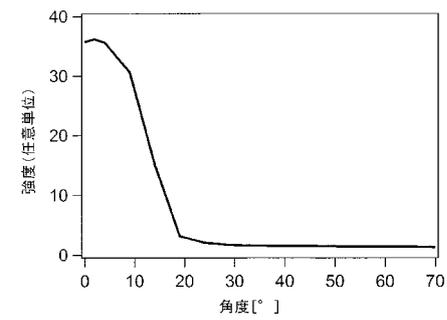
【 図 2 7 】



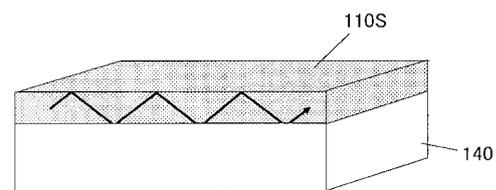
【 図 2 8 】



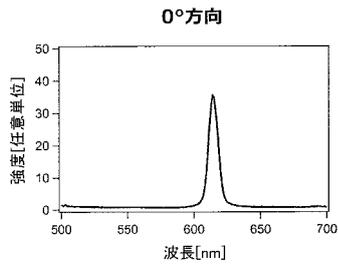
【 図 2 9 】



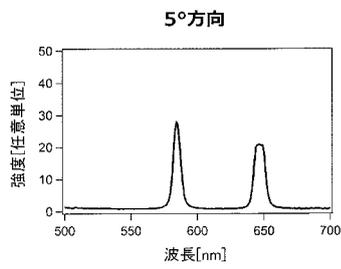
【 図 3 0 】



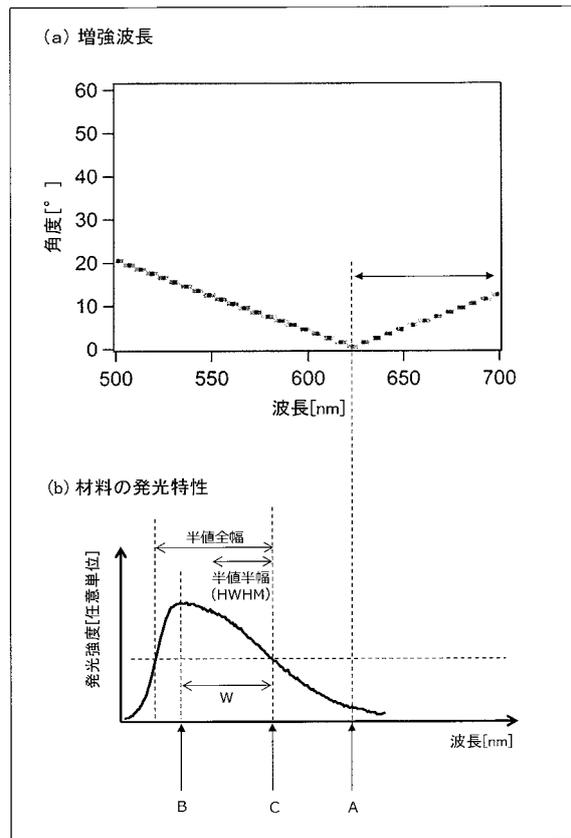
【図 3 1 A】



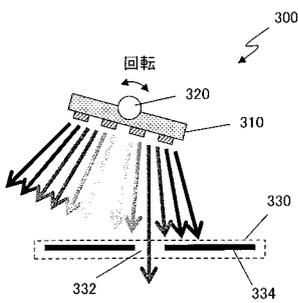
【図 3 1 B】



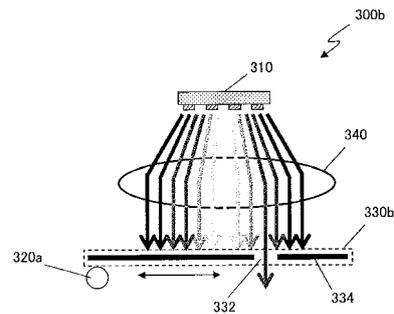
【図 3 2】



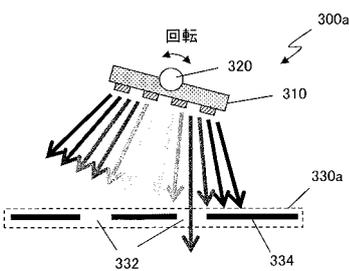
【図 3 3 A】



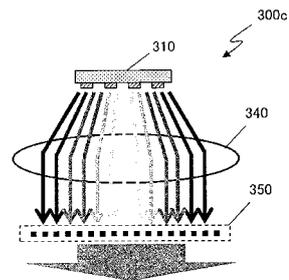
【図 3 3 C】



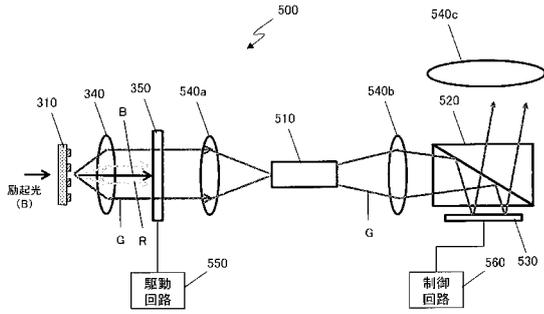
【図 3 3 B】



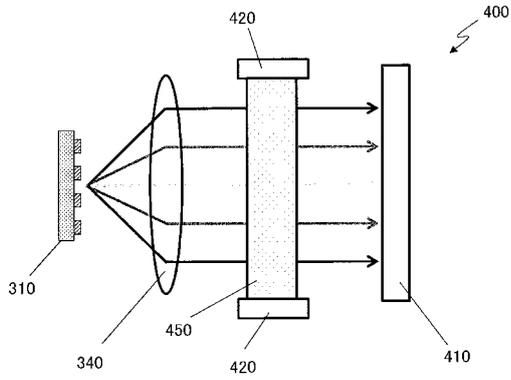
【図 3 3 D】



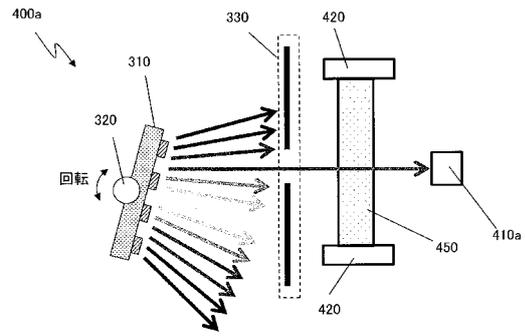
【 図 3 4 】



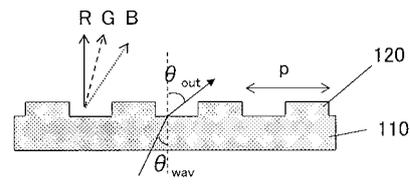
【 図 3 5 A 】



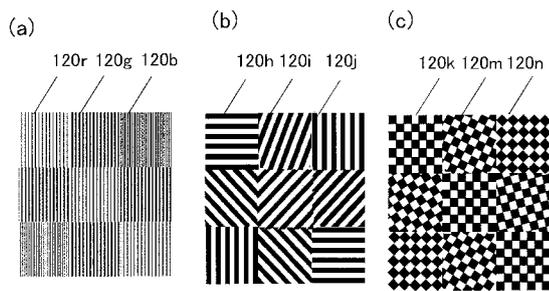
【 図 3 5 B 】



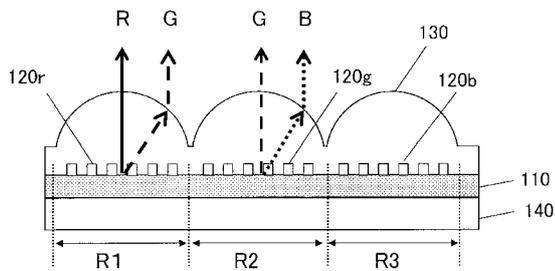
【 図 3 6 】



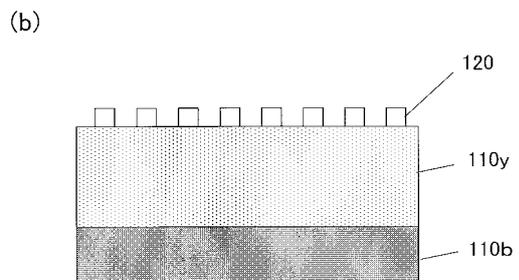
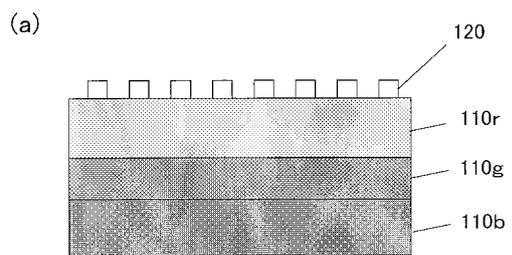
【 図 3 7 A 】



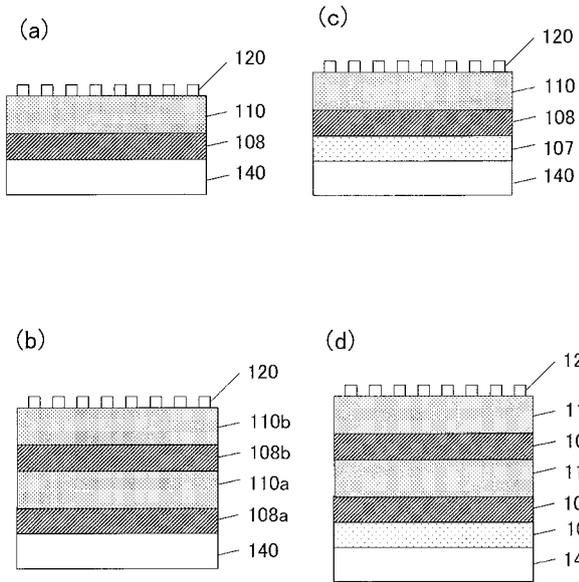
【 図 3 7 B 】



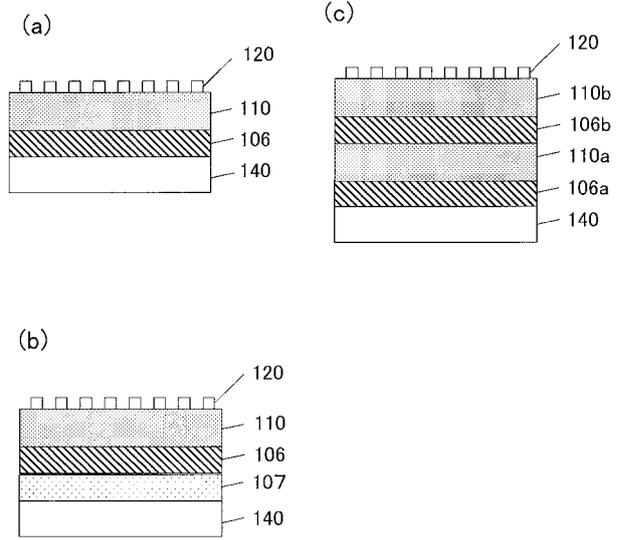
【 図 3 8 】



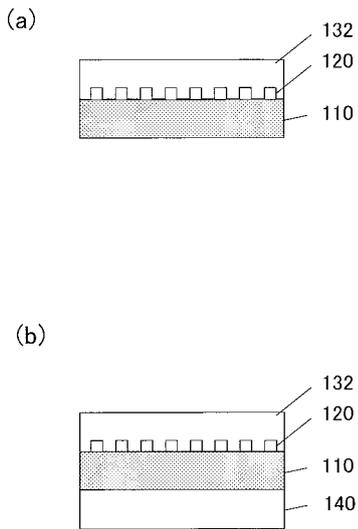
【 図 3 9 】



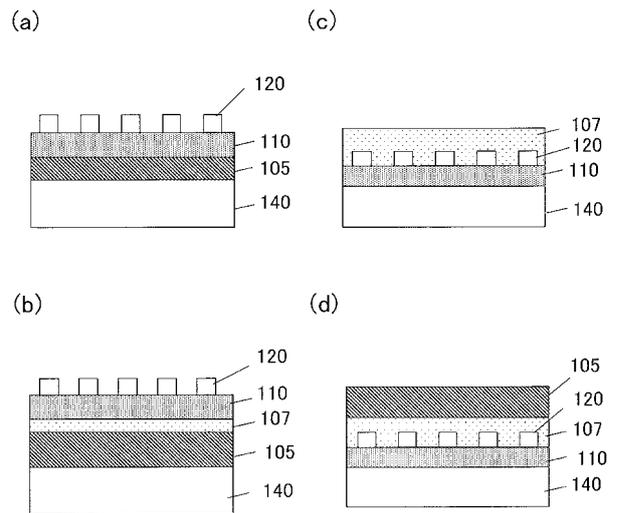
【 図 4 0 】



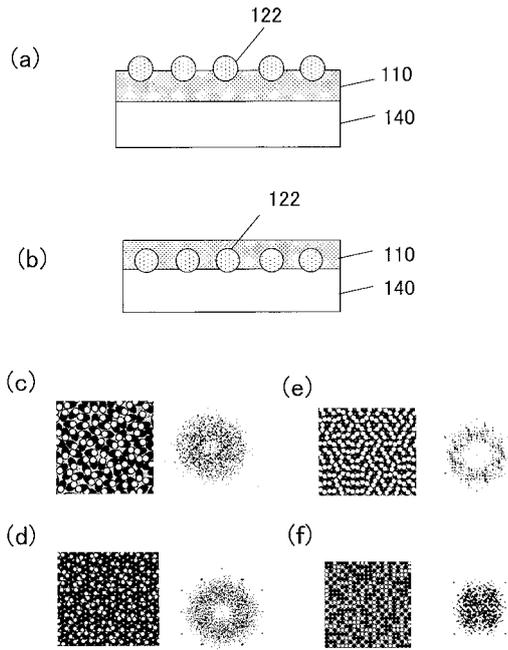
【 図 4 1 】



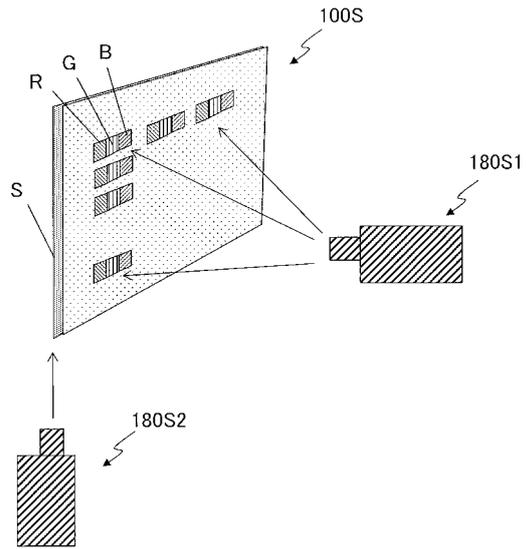
【 図 4 2 】



【図 4 7】



【図 4 8】



【手続補正書】

【提出日】平成28年3月16日(2016.3.16)

【手続補正 1】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】全文

【補正方法】変更

【補正の内容】

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本開示は、フォトルミネッセンス層を有する発光素子、発光装置および検知装置に関する。

【背景技術】

【0002】

照明器具、ディスプレイ、プロジェクターといった光学デバイスでは、多くの用途において、必要な方向に光を出射することが求められる。蛍光灯、白色LEDなどで使用されるフォトルミネッセンス材料は等方的に発光する。よって、このような材料は、特定の方向のみに光を出射させるために、リフレクターやレンズなどの光学部品とともに用いられる。例えば、特許文献1は、配光板および補助反射板を用いて指向性を確保した照明システムを開示している。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0003】

【特許文献1】特開2010-231941号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

光学デバイスにおいて、リフレクターやレンズなどの光学部品を配置すると、そのスペースを確保するために、光学デバイス自身のサイズを大きくする必要があり、これら光学部品は無くすか、少しでも小型化することが望ましい。

【0005】

本開示は、フォトルミネッセンス材料の発光効率、指向性、または偏光特性を制御することが可能な、新規な構造を有する発光素子並びにそれを備える発光装置および検知装置を提供する。

【課題を解決するための手段】

【0006】

本開示の一態様に係る発光素子は、フォトルミネッセンス層と、前記フォトルミネッセンス層および透光層の少なくとも一方に形成された少なくとも一つの周期構造と、を有する。前記周期構造は、複数の凸部および複数の凹部の少なくとも一方を含み、前記フォトルミネッセンス層が発する光は、空気中の波長が λ_a の第1の光を含む。隣接する凸部間または凹部間の距離を D_{int} とし、前記周期構造の周期を p_a とし、前記第1の光に対する前記フォトルミネッセンス層の屈折率を n_{wav-a} とすると、 $\lambda_a / n_{wav-a} < D_{int} < \lambda_a$ または $\lambda_a / n_{wav-a} < p_a < \lambda_a$ の関係が成り立つ。前記周期構造を介して前記フォトルミネッセンス層に垂直な方向に出射する光のスペクトルにおいて強度がピークとなる波長 A は、前記フォトルミネッセンス層から発せられる光の強度がピークとなる波長 B からずれている。

【0007】

上記の包括的または具体的な態様は、素子、装置、システム、方法、またはこれらの任意の組み合わせで実現されてもよい。

【発明の効果】

【0008】

本開示のある実施形態による発光素子、発光装置および検知装置は、新規な構成を有し、新規なメカニズムに従って、輝度、指向性、または偏光特性を制御することができる。

【図面の簡単な説明】

【0009】

【図1A】ある実施形態による発光素子の構成を示す斜視図である。

【図1B】図1Aに示す発光素子の部分断面図である。

【図1C】他の実施形態による発光素子の構成を示す斜視図である。

【図1D】図1Cに示す発光素子の部分断面図である。

【図2】発光波長および周期構造の高さをそれぞれ変えて、正面方向に出射する光の増強度を計算した結果を示す図である。

【図3】式(10)における $m = 1$ および $m = 3$ の条件を図示したグラフである。

【図4】発光波長およびフォトルミネッセンス層の厚さ t を変えて正面方向に出力する光の増強度を計算した結果を示す図である。

【図5A】厚さ $t = 238 \text{ nm}$ のときに、 x 方向に導波するモードの電場分布を計算した結果を示す図である。

【図5B】厚さ $t = 539 \text{ nm}$ のときに、 x 方向に導波するモードの電場分布を計算した結果を示す図である。

【図5C】厚さ $t = 300 \text{ nm}$ のときに、 x 方向に導波するモードの電場分布を計算した結果を示す図である。

【図6】図2の計算と同じ条件で、光の偏光が y 方向に垂直な電場成分を有するTEモードである場合について光の増強度を計算した結果を示す図である。

【図7A】2次元の周期構造の例を示す平面図である。

【図7B】2次元周期構造に関して図2と同様の計算を行った結果を示す図である。

【図8】発光波長および周期構造の屈折率を変えて正面方向に出力する光の増強度を計算

した結果を示す図である。

【図 9】図 8 と同様の条件でフォトルミネッセンス層の膜厚を 1 0 0 0 n m にした場合の結果を示す図である。

【図 1 0】発光波長および周期構造の高さを変えて正面方向に出力する光の増強度を計算した結果を示す図である。

【図 1 1】図 1 0 と同様の条件で、周期構造の屈折率を $n_p = 2.0$ とした場合の計算結果を示す図である。

【図 1 2】光の偏光が y 方向に垂直な電場成分を有する T E モードであるものとして図 9 に示す計算と同様の計算を行った結果を示す図である。

【図 1 3】図 9 に示す計算と同様の条件で、フォトルミネッセンス層の屈折率 n_{wav} を 1.5 に変更した場合の結果を示す図である。

【図 1 4】屈折率が 1.5 の透明基板の上に、図 2 に示す計算と同じ条件のフォトルミネッセンス層および周期構造を設けた場合の計算結果を示す図である。

【図 1 5】式 (1 5) の条件を図示したグラフである。

【図 1 6】図 1 A、1 B に示す発光素子 1 0 0 と、励起光をフォトルミネッセンス層 1 1 0 に入射させる光源 1 8 0 とを備える発光装置 2 0 0 の構成例を示す図である。

【図 1 7】励起光を擬似導波モードに結合させることで、効率よく光を出射させる構成を説明するための図であり、(a) は x 方向の周期 p_x を有する 1 次元周期構造を示し、(b) は x 方向の周期 p_x 、y 方向の周期 p_y を有する 2 次元周期構造を示し、(c) は (a) の構成における光の吸収率の波長依存性を示し、(d) は (b) の構成における光の吸収率の波長依存性を示している。

【図 1 8 A】2 次元周期構造の一例を示す図である。

【図 1 8 B】2 次元周期構造の他の例を示す図である。

【図 1 9 A】透明基板上に周期構造を形成した変形例を示す図である。

【図 1 9 B】透明基板上に周期構造を形成した他の変形例を示す図である。

【図 1 9 C】図 1 9 A の構成において、発光波長および周期構造の周期を変えて正面方向に出力する光の増強度を計算した結果を示す図である。

【図 2 0】複数の粉末状の発光素子を混ぜた構成を示す図である。

【図 2 1】フォトルミネッセンス層の上に周期の異なる複数の周期構造を 2 次元に配列した例を示す平面図である。

【図 2 2】表面に凹凸構造が形成された複数のフォトルミネッセンス層 1 1 0 が積層された構造を有する発光素子の一例を示す図である。

【図 2 3】フォトルミネッセンス層 1 1 0 と周期構造 1 2 0 との間に保護層 1 5 0 を設けた構成例を示す断面図である。

【図 2 4】フォトルミネッセンス層 1 1 0 の一部のみを加工することによって周期構造 1 2 0 を形成した例を示す図である。

【図 2 5】周期構造を有するガラス基板上に形成されたフォトルミネッセンス層の断面 T E M 像を示す図である。

【図 2 6】試作した発光素子の出射光の正面方向のスペクトルを測定した結果を示すグラフである。

【図 2 7】(a) および (b) は、試作した発光素子の出射光の角度依存性を測定した結果 (上段) および計算結果 (下段) を示すグラフである。

【図 2 8】(a) および (b) は、試作した発光素子の出射光の角度依存性を測定した結果 (上段) および計算結果 (下段) を示すグラフである。

【図 2 9】試作した発光素子の出射光 (波長 6 1 0 n m) の角度依存性を測定した結果を示すグラフである。

【図 3 0】スラブ型導波路の一例を模式的に示す斜視図である。

【図 3 1 A】サブミクロン構造から 0 ° 方向に出射する光の強度の波長依存性の一例を示す図である。

【図 3 1 B】サブミクロン構造から 5 ° 方向に出射する光の強度の波長依存性の一例を示す

す図である。

【図 3 2】サブミクロン構造によって増強される光の波長および角度と、フォトルミネッセンス材料の発光スペクトルとの関係を示す図である。

【図 3 3 A】波長に応じて空間的に分光された光を出射する発光装置 3 0 0 の構成例を模式的に示す図である。

【図 3 3 B】発光装置の変形例を示す図である。

【図 3 3 C】発光装置の他の変形例を示す図である。

【図 3 3 D】発光装置のさらに他の変形例を示す図である。

【図 3 4】投影装置（プロジェクター）5 0 0 の構成例を示す図である。

【図 3 5 A】検知装置 4 0 0 の構成を模式的に示す図である。

【図 3 5 B】検知装置の変形例を示す図である。

【図 3 6】フォトルミネッセンス層 1 1 0 上に周期構造 1 2 0 を有する発光素子における発光増強効果を受ける光の波長および出射方向との関係を説明するための模式図である。

【図 3 7 A】(a) ~ (c) は、発光増強効果を示す波長が異なる複数の周期構造を配列した構成の例を示す模式的な平面図である。

【図 3 7 B】マイクロレンズを備える発光素子の模式的な断面図である。

【図 3 8】(a) および (b) は、発光波長が異なる複数のフォトルミネッセンス層を有する発光素子の模式的な断面図である。

【図 3 9】(a) ~ (d) は、フォトルミネッセンス層の下に拡散防止層（バリア層）を有する発光素子の模式的な断面図である。

【図 4 0】(a) ~ (c) は、フォトルミネッセンス層の下に、結晶成長層（シード層）を有する発光素子の模式的な断面図である。

【図 4 1】(a) および (b) は、周期構造を保護するための表面保護層を有する発光素子の模式的な断面図である。

【図 4 2】(a) ~ (d) は、透明高熱伝導層を有する発光素子の模式的な断面図である。

【図 4 3】(a) ~ (d) は、放熱特性が改善された発光装置の模式的な断面図である。

【図 4 4】(a) ~ (d) は、高熱伝導部材を有する発光素子の模式図である。

【図 4 5】(a) および (b) は、タイリングされた複数の発光素子における高熱伝導部材の配置の例を示す模式図である。

【図 4 6】(a) および (b) は、インターロック回路を備える発光装置の例を示す模式図である。

【図 4 7】(a) ~ (f) は、ビーズを用いたサブミクロン構造の形成方法を説明するための図である。

【図 4 8】本開示の発光素子をスクリーンとして備える透明ディスプレイの構成を示す模式図である。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 1 0 】

本開示は、以下の項目に記載の発光素子および発光装置を含む。

[項目 1]

フォトルミネッセンス層と、

前記フォトルミネッセンス層に近接して配置された透光層と、

前記フォトルミネッセンス層および前記透光層の少なくとも一方に形成され、前記フォトルミネッセンス層または前記透光層の面内に広がるサブミクロン構造と、を有し、

前記サブミクロン構造は、複数の凸部または複数の凹部を含み、

前記フォトルミネッセンス層が発する光は、空気中の波長が λ_a の第 1 の光を含み、

隣接する凸部間または凹部間の距離を D_{int} とし、前記第 1 の光に対する前記フォトルミネッセンス層の屈折率を n_{wav-a} とすると、 $\lambda_a / n_{wav-a} < D_{int} < \lambda_a$ の関係が成り立つ、発光素子。

[項目 2]

前記サブミクロン構造は、前記複数の凸部または前記複数の凹部によって形成された少なくとも1つの周期構造を含み、前記少なくとも1つの周期構造は、周期を p_a とすると、 $\lambda_a / n_{\text{wav-a}} < p_a < \lambda_a$ の関係が成り立つ第1周期構造を含む、項目1に記載の発光素子。

[項目3]

前記第1の光に対する前記透光層の屈折率 n_{t-a} は、前記第1の光に対する前記フォトルミネッセンス層の屈折率 $n_{\text{wav-a}}$ よりも小さい、項目1または2に記載の発光素子。

[項目4]

前記第1の光は、前記サブミクロン構造によって予め決められた第1の方向において強度が最大になる、項目1から3のいずれかに記載の発光素子。

[項目5]

前記第1の方向は、前記フォトルミネッセンス層の法線方向である、項目4に記載の発光素子。

[項目6]

前記第1の方向に出射された前記第1の光は、直線偏光である、項目4または5に記載の発光素子。

[項目7]

前記第1の光の前記第1の方向を基準としたときの指向角は、 15° 未満である、項目4から6のいずれかに記載の発光素子。

[項目8]

前記第1の光の波長 λ_a と異なる波長 λ_b を有する第2の光は、前記第1の方向と異なる第2の方向において強度が最大となる、項目4から7のいずれかに記載の発光素子。

[項目9]

前記透光層が前記サブミクロン構造を有する、項目1から8のいずれかに記載の発光素子。

[項目10]

前記フォトルミネッセンス層が前記サブミクロン構造を有する、項目1から9のいずれかに記載の発光素子。

[項目11]

前記フォトルミネッセンス層は、平坦な主面を有し、
前記透光層は前記フォトルミネッセンス層の前記平坦な主面上に形成されており、かつ、前記サブミクロン構造を有する、項目1から8のいずれかに記載の発光素子。

[項目12]

前記フォトルミネッセンス層は、透明基板に支持されている、項目11に記載の発光素子。

[項目13]

前記透光層は、前記サブミクロン構造を一方の主面に有する透明基板であって、
前記フォトルミネッセンス層は、前記サブミクロン構造の上に形成されている、項目1から8のいずれかに記載の発光素子。

[項目14]

前記第1の光に対する前記透光層の屈折率 n_{t-a} は、前記第1の光に対する前記フォトルミネッセンス層の屈折率 $n_{\text{wav-a}}$ 以上であって、前記サブミクロン構造が有する前記複数の凸部の高さまたは前記複数の凹部の深さは 150nm 以下である、項目1または2に記載の発光素子。

[項目15]

前記サブミクロン構造は、前記複数の凸部または前記複数の凹部によって形成された少なくとも1つの周期構造を含み、前記少なくとも1つの周期構造は、周期を p_a とすると、 $\lambda_a / n_{\text{wav-a}} < p_a < \lambda_a$ の関係が成り立つ第1周期構造を含み、
前記第1周期構造は、1次元周期構造である、項目1および3から14のいずれかに記載の発光素子。

[項目 1 6]

前記フォトルミネッセンス層が発する光は、空気中の波長が λ_a と異なる λ_b の第 2 の光を含み、前記第 2 の光に対する前記フォトルミネッセンス層の屈折率を n_{wav-b} とすると

、
前記少なくとも 1 つの周期構造は、周期を p_b とすると、 $\lambda_b / n_{wav-b} < p_b < \lambda_b$ の関係が成り立つ第 2 周期構造をさらに含み、

前記第 2 周期構造は、1 次元周期構造である、項目 1 5 に記載の発光素子。

[項目 1 7]

前記サブミクロン構造は、前記複数の凸部または前記複数の凹部によって形成された少なくとも 2 つの周期構造を含み、前記少なくとも 2 つの周期構造は、互いに異なる方向に周期性を有する 2 次元周期構造を含む、項目 1 および 3 から 1 4 のいずれかに記載の発光素子。

[項目 1 8]

前記サブミクロン構造は、前記複数の凸部または前記複数の凹部によって形成された複数の周期構造を含み、

前記複数の周期構造は、マトリクス状に配列された複数の周期構造を含む、項目 1 および 3 から 1 4 のいずれかに記載の発光素子。

[項目 1 9]

前記サブミクロン構造は、前記複数の凸部または前記複数の凹部によって形成された複数の周期構造を含み、

前記フォトルミネッセンス層が有するフォトルミネッセンス材料の励起光の空気中における波長を λ_{ex} とし、前記励起光に対する前記フォトルミネッセンス層の屈折率を n_{wav-ex} とすると、

前記複数の周期構造は、周期 p_{ex} が、 $\lambda_{ex} / n_{wav-ex} < p_{ex} < \lambda_{ex}$ の関係が成り立つ周期構造を含む、項目 1 および 3 から 1 4 のいずれかに記載の発光素子。

[項目 2 0]

複数のフォトルミネッセンス層と、複数の透光層とを有し、

前記複数のフォトルミネッセンス層の少なくとも 2 つと前記複数の透光層の少なくとも 2 つとは、それぞれ独立に、項目 1 から 1 9 のいずれかに記載の前記フォトルミネッセンス層と前記透光層とにそれぞれ該当する、発光素子。

[項目 2 1]

前記複数のフォトルミネッセンス層と前記複数の透光層は、積層されている、項目 2 0 に記載の発光素子。

[項目 2 2]

フォトルミネッセンス層と、

前記フォトルミネッセンス層に近接して配置された透光層と、

前記フォトルミネッセンス層および前記透光層の少なくとも一方に形成され、前記フォトルミネッセンス層または前記透光層の面内に広がるサブミクロン構造と、を有し、

前記フォトルミネッセンス層および前記透光層の内部に擬似導波モードを形成する光を出射する、発光素子。

[項目 2 3]

光が導波することができる導波層と、

前記導波層に近接して配置された周期構造と

を備え、

前記導波層はフォトルミネッセンス材料を有し、

前記導波層において、前記フォトルミネッセンス材料から発せられた光が前記周期構造と作用しながら導波する擬似導波モードが存在する、発光素子。

[項目 2 4]

フォトルミネッセンス層と、

前記フォトルミネッセンス層に近接して配置された透光層と、

前記フォトルミネッセンス層および前記透光層の少なくとも一方に形成され、前記フォトルミネッセンス層または前記透光層の面内に広がるサブミクロン構造と、を有し、
前記サブミクロン構造は、複数の凸部または複数の凹部を含み、

隣接する凸部間または凹部間の距離を D_{int} とし、前記フォトルミネッセンス層が有するフォトルミネッセンス材料の励起光の空気中における波長を λ_{ex} とし、前記励起光に対する前記フォトルミネッセンス層または前記透光層に至る光路に存在する媒質の中で最も屈折率の大きい媒質の屈折率を n_{wav-ex} とすると、 $\lambda_{ex} / n_{wav-ex} < D_{int} < \lambda_{ex}$ の関係が成り立つ、発光素子。

[項目 25]

前記サブミクロン構造は、前記複数の凸部または前記複数の凹部によって形成された少なくとも1つの周期構造を含み、前記少なくとも1つの周期構造は、周期を p_{ex} とすると、 $\lambda_{ex} / n_{wav-ex} < p_{ex} < \lambda_{ex}$ の関係が成り立つ第1周期構造を含む、項目24に記載の発光素子。

[項目 26]

透光層と、
前記透光層に形成され、前記透光層の面内に広がるサブミクロン構造と、
前記サブミクロン構造に近接して配置されたフォトルミネッセンス層と、を有し、
前記サブミクロン構造は、複数の凸部または複数の凹部を含み、
前記フォトルミネッセンス層が発する光は、空気中の波長が λ_a の第1の光を含み、
前記サブミクロン構造は、前記複数の凸部または前記複数の凹部によって形成された少なくとも1つの周期構造を含み、
前記第1の光に対する前記フォトルミネッセンス層の屈折率を n_{wav-a} とし、前記少なくとも1つの周期構造の周期を p_a とすると、 $\lambda_a / n_{wav-a} < p_a < \lambda_a$ の関係が成り立つ、発光素子。

[項目 27]

フォトルミネッセンス層と、
前記フォトルミネッセンス層よりも高い屈折率を有する透光層と、
前記透光層に形成され、前記透光層の面内に広がるサブミクロン構造と、を有し、
前記サブミクロン構造は、複数の凸部または複数の凹部を含み、
前記フォトルミネッセンス層が発する光は、空気中の波長が λ_a の第1の光を含み、
前記サブミクロン構造は、前記複数の凸部または前記複数の凹部によって形成された少なくとも1つの周期構造を含み、
前記第1の光に対する前記フォトルミネッセンス層の屈折率を n_{wav-a} とし、前記少なくとも1つの周期構造の周期を p_a とすると、 $\lambda_a / n_{wav-a} < p_a < \lambda_a$ の関係が成り立つ、発光素子。

[項目 28]

フォトルミネッセンス層と、
前記フォトルミネッセンス層に形成され、前記フォトルミネッセンス層の面内に広がるサブミクロン構造と、を有し、
前記サブミクロン構造は、複数の凸部または複数の凹部を含み、
前記フォトルミネッセンス層が発する光は、空気中の波長が λ_a の第1の光を含み、
前記サブミクロン構造は、前記複数の凸部または前記複数の凹部によって形成された少なくとも1つの周期構造を含み、
前記第1の光に対する前記フォトルミネッセンス層の屈折率を n_{wav-a} とし、前記少なくとも1つの周期構造の周期を p_a とすると、 $\lambda_a / n_{wav-a} < p_a < \lambda_a$ の関係が成り立つ、発光素子。

[項目 29]

前記サブミクロン構造は、前記複数の凸部と前記複数の凹部との双方を含む、項目1から21、24から28のいずれかに記載の発光素子。

[項目 30]

前記フォトルミネッセンス層と前記透光層とが互いに接している、項目 1 から 2 2、2 4 から 2 7 のいずれかに記載の発光素子。

[項目 3 1]

前記導波層と前記周期構造とが互いに接している、項目 2 3 に記載の発光素子。

[項目 3 2]

項目 1 から 3 1 のいずれかに記載の発光素子と、
前記フォトルミネッセンス層に励起光を照射する、励起光源と、
を備える発光装置。

[項目 3 3]

フォトルミネッセンス層と、
前記フォトルミネッセンス層に近接して配置された透光層と、
前記フォトルミネッセンス層および前記透光層の少なくとも一方に形成された少なくとも一つの周期構造と、を有し、

前記周期構造は、複数の凸部および複数の凹部の少なくとも一方を含み、
前記フォトルミネッセンス層が発する光は、空気中の波長が λ_a の第 1 の光を含み、
隣接する凸部間または凹部間の距離を D_{int} とし、前記第 1 の光に対する前記フォトルミネッセンス層の屈折率を n_{wav-a} とすると、 $\lambda_a / n_{wav-a} < D_{int} < \lambda_a$ の関係が成り立ち、

前記周期構造を介して前記フォトルミネッセンス層に垂直な方向に出射する光のスペクトルにおいて強度がピークとなる波長 A が、前記フォトルミネッセンス層に含まれるフォトルミネッセンス材料の発光スペクトルにおいて強度がピークとなる波長 B からずれている、
発光素子。

[項目 3 4]

前記波長 A が前記波長 B よりも大きい、項目 3 3 に記載の発光素子。

[項目 3 5]

前記フォトルミネッセンス層に含まれるフォトルミネッセンス材料の発光スペクトルの半値半幅を $HWHM$ とすると、前記波長 A は、前記波長 B から $HWHM$ 以上ずれている、
項目 3 3 または 3 4 に記載の発光素子。

[項目 3 6]

前記フォトルミネッセンス層に含まれるフォトルミネッセンス材料の発光スペクトルにおいて、強度がピークの半分となる波長が 2 つ存在し、

前記 2 つの波長のうち、前記波長 B との差がより大きい波長 C と、前記波長 B との差を W とすると、前記波長 A は、前記波長 B から W 以上ずれている、
項目 3 3 から 3 5 のいずれかに記載の発光素子。

[項目 3 7]

前記波長 λ_a は、前記波長 A と一致する、項目 3 3 から 3 6 のいずれかに記載の発光素子。

[項目 3 8]

透光層と、
前記透光層に形成された少なくとも一つの周期構造と、
前記周期構造に近接して配置されたフォトルミネッセンス層と、を有し、
前記周期構造は、複数の凸部および複数の凹部の少なくとも一方を含み、
前記フォトルミネッセンス層が発する光は、空気中の波長が λ_a の第 1 の光を含み、
前記第 1 の光に対する前記フォトルミネッセンス層の屈折率を n_{wav-a} とし、前記周期構造の周期を p_a とすると、 $\lambda_a / n_{wav-a} < p_a < \lambda_a$ の関係が成り立ち、

前記周期構造を介して前記フォトルミネッセンス層に垂直な方向に出射する光のスペクトルにおいて強度がピークとなる波長 A が、前記フォトルミネッセンス層に含まれるフォトルミネッセンス材料の発光スペクトルにおいて強度がピークとなる波長 B からずれている、

発光素子。

[項目 3 9]

フォトルミネッセンス層と、
 前記フォトルミネッセンス層よりも高い屈折率を有する透光層と、
 前記透光層に形成された少なくとも一つの周期構造と、を有し、
 前記周期構造は、複数の凸部および複数の凹部の少なくとも一方を含み、
 前記フォトルミネッセンス層が発する光は、空気中の波長が λ_a の第 1 の光を含み、
 前記第 1 の光に対する前記フォトルミネッセンス層の屈折率を n_{wav-a} とし、前記周期構造の周期を p_a とすると、 $\lambda_a / n_{wav-a} < p_a < \lambda_a$ の関係が成り立ち、
 前記周期構造を介して前記フォトルミネッセンス層に垂直な方向に出射する光のスペクトルにおいて強度がピークとなる波長 A が、前記フォトルミネッセンス層に含まれるフォトルミネッセンス材料の発光スペクトルにおいて強度がピークとなる波長 B からずれている、

発光素子。

[項目 4 0]

前記フォトルミネッセンス層と前記透光層とが互いに接している、項目 3 3 から 3 9 のいずれかに記載の発光素子。

[項目 4 1]

フォトルミネッセンス層と、
 前記フォトルミネッセンス層に形成された少なくとも一つの周期構造と、を有し、
 前記周期構造は、複数の凸部および複数の凹部の少なくとも一方を含み、
 前記フォトルミネッセンス層が発する光は、空気中の波長が λ_a の第 1 の光を含み、
 前記第 1 の光に対する前記フォトルミネッセンス層の屈折率を n_{wav-a} とし、前記周期構造の周期を p_a とすると、 $\lambda_a / n_{wav-a} < p_a < \lambda_a$ の関係が成り立ち、
 前記周期構造を介して前記フォトルミネッセンス層に垂直な方向に出射する光のスペクトルにおいて強度がピークとなる波長 A が、前記フォトルミネッセンス層に含まれるフォトルミネッセンス材料の発光スペクトルにおいて強度がピークとなる波長 B からずれている、

発光素子。

[項目 4 2]

項目 3 3 から 4 1 のいずれかに記載の発光素子と、
 前記発光素子から複数の方向にそれぞれ発せられた複数の光線の経路上にそれぞれ配置された複数の透光領域を有する光学シャッタであって、前記複数の透光領域の光透過率を個別に変化させる光学シャッタと、
 を備える発光装置。

[項目 4 3]

項目 4 2 に記載の発光装置と、
 前記光学シャッタから出射した光を集束させる光学系と、
 を備える投影装置。

[項目 4 4]

項目 3 3 から 4 1 のいずれかに記載の発光素子と、
 前記発光素子から発せられる光の経路上に配置され、前記発光素子から特定の方向に出射した光線を透過させる透光領域を有する光学フィルタと、
 を備える発光装置。

[項目 4 5]

前記光学フィルタは、前記透光領域を含む複数の透光領域を有し、
 前記複数の透光領域は、前記発光素子から特定の複数の方向にそれぞれ出射した複数の光線を透過させる、
 項目 4 4 に記載の発光装置。

[項目 4 6]

前記透光領域を、異なる波長の光線が透過するように、前記発光素子を回転させる機構をさらに備える、項目 4 4 または 4 5 に記載の発光装置。

[項目 4 7]

前記透光領域を、異なる波長の光線が透過するように、前記光学フィルタを前記光線と交差する方向に移動させる機構をさらに備える、項目 4 4 または 4 5 に記載の発光装置。

[項目 4 8]

項目 3 3 から 4 1 のいずれかに記載の発光素子と、

前記発光素子から出射された光の経路上に配置され、被検知物を検知する検知器と、を備える検知装置。

[項目 4 9]

前記発光素子から前記検知器までの光路上に前記被検知物を保持する保持部材をさらに備える、項目 4 8 に記載の検知装置。

[項目 5 0]

前記発光素子から発せられる光の経路上に配置され、前記発光素子から特定の方向に出射した光線を透過させる透光領域を有する光学フィルタをさらに備える、項目 4 8 または 4 9 に記載の検知装置。

【 0 0 1 1 】

本開示の実施形態による発光素子は、フォトルミネッセンス層と、前記フォトルミネッセンス層に近接して配置された透光層と、前記フォトルミネッセンス層および前記透光層の少なくとも一方に形成され、前記フォトルミネッセンス層または前記透光層の面内に広がるサブミクロン構造とを有し、前記サブミクロン構造は、複数の凸部または複数の凹部を含み、隣接する凸部間または凹部間の距離を D_{int} とし、前記フォトルミネッセンス層が発する光は、空気中の波長が λ_a の第 1 の光を含み、前記第 1 の光に対する前記フォトルミネッセンス層の屈折率を n_{wav-a} とすると、 $\lambda_a / n_{wav-a} < D_{int} < \lambda_a$ の関係が成り立つ。波長 λ_a は、例えば、可視光の波長範囲内（例えば、380 nm 以上 780 nm 以下）にある。

【 0 0 1 2 】

フォトルミネッセンス層は、フォトルミネッセンス材料を含む。フォトルミネッセンス材料は、励起光を受けて発光する材料を意味する。フォトルミネッセンス材料は、狭義の蛍光材料および燐光材料を包含し、無機材料だけでなく、有機材料（例えば色素）を包含し、さらには、量子ドット（即ち、半導体微粒子）を包含する。フォトルミネッセンス層は、フォトルミネッセンス材料に加えて、マトリクス材料（即ち、ホスト材料）を含んでもよい。マトリクス材料は、例えば、ガラスや酸化物などの無機材料や樹脂である。

【 0 0 1 3 】

フォトルミネッセンス層に近接して配置される透光層は、フォトルミネッセンス層が発する光に対して透過率が高い材料で形成され、例えば、無機材料や樹脂で形成される。透光層は、例えば誘電体（特に、光の吸収が少ない絶縁体）で形成されていることが望ましい。透光層は、例えば、フォトルミネッセンス層を支持する基板であってよい。また、フォトルミネッセンス層の空気側の表面がサブミクロン構造を有する場合、空気層が透光層となり得る。

【 0 0 1 4 】

本開示の実施形態による発光素子においては、後に計算結果および実験結果を参照して詳述するように、フォトルミネッセンス層および透光層の少なくとも一方に形成されたサブミクロン構造（例えば、周期構造）によって、フォトルミネッセンス層および透光層の内部に、ユニークな電場分布を形成する。これは、導波光がサブミクロン構造と相互作用して形成されるものであり、擬似導波モードと表現することもできる。この擬似導波モードを活用することで、以下で説明するように、フォトルミネッセンスの発光効率の増大、指向性の向上、偏光の選択性の効果を得ることができる。なお、以下の説明において、擬似導波モードという用語を使って、本発明者らが見出した、新規な構成および/または新規なメカニズムを説明することがあるが、1つの例示的な説明に過ぎず、本開示をいかな

る意味においても限定するものではない。

【0015】

サブミクロン構造は、例えば複数の凸部を含み、隣接する凸部間の距離（即ち、中心間距離）を D_{int} とすると、 $\lambda_a / n_{wav-a} < D_{int} < \lambda_a$ の関係を満足する。サブミクロン構造は、複数の凸部に代えて複数の凹部を含んでもよい。以下では、簡単のために、サブミクロン構造が複数の凸部を有する場合を説明する。 λ_a は光の波長を表し、 λ_a は空気中での光の波長であることを表現する。 n_{wav} はフォトルミネッセンス層の屈折率である。フォトルミネッセンス層が複数の材料を混合した媒質である場合、各材料の屈折率をそれぞれの体積比率で重み付けした平均屈折率を n_{wav} とする。一般に屈折率 n は波長に依存するので、 λ_a の光に対する屈折率であることを n_{wav-a} と明示することが望ましいが、簡単のために省略することがある。 n_{wav} は基本的にフォトルミネッセンス層の屈折率であるが、フォトルミネッセンス層に隣接する層の屈折率がフォトルミネッセンス層の屈折率よりも大きい場合、当該屈折率が大きい層の屈折率およびフォトルミネッセンス層の屈折率をそれぞれの体積比率で重み付けした平均屈折率を n_{wav} とする。この場合は、光学的には、フォトルミネッセンス層が複数の異なる材料の層で構成されている場合と等価であるからである。

【0016】

擬似導波モードの光に対する媒質の有効屈折率を n_{eff} とすると、 $n_a < n_{eff} < n_{wav}$ を満たす。ここで、 n_a は空気の屈折率である。擬似導波モードの光を、フォトルミネッセンス層の内部を入射角 θ で全反射しながら伝播する光であると考え、有効屈折率 n_{eff} は、 $n_{eff} = n_{wav} \sin \theta$ と書ける。また、有効屈折率 n_{eff} は、擬似導波モードの電場が分布する領域に存在する媒質の屈折率によって決まるので、例えば、サブミクロン構造が透光層に形成されている場合、フォトルミネッセンス層の屈折率だけでなく、透光層の屈折率にも依存する。また、擬似導波モードの偏光方向（TEモードとTMモード）により、電場の分布は異なるので、TEモードとTMモードとでは有効屈折率 n_{eff} は異なり得る。

【0017】

サブミクロン構造は、フォトルミネッセンス層および透光層の少なくとも一方に形成される。フォトルミネッセンス層と透光層とが互いに接するとき、フォトルミネッセンス層と透光層との界面にサブミクロン構造が形成されてもよい。このとき、フォトルミネッセンス層および透光層がサブミクロン構造を有する。フォトルミネッセンス層はサブミクロン構造を有さなくてもよい。このとき、サブミクロン構造を有する透光層がフォトルミネッセンス層に近接して配置される。ここで、透光層（またはそのサブミクロン構造）がフォトルミネッセンス層に近接するとは、典型的には、これらの間の距離が、波長 λ_a の半分以下であることをいう。これにより、導波モードの電場がサブミクロン構造に到達し、擬似導波モードが形成される。ただし、透光層の屈折率がフォトルミネッセンス層の屈折率よりも大きいときには上記の関係を満足しなくても透光層まで光が到達するため、透光層のサブミクロン構造とフォトルミネッセンス層との間の距離は、波長 λ_a の半分超であってもよい。本明細書では、フォトルミネッセンス層と透光層とが、導波モードの電場がサブミクロン構造に到達し、擬似導波モードが形成されるような配置関係にあるとき、両者が互いに関連付けられていると表現することがある。

【0018】

サブミクロン構造は、上記のように、 $\lambda_a / n_{wav-a} < D_{int} < \lambda_a$ の関係を満足するので、サブミクロンオーダーの大きさで特徴づけられる。サブミクロン構造は、例えば、以下に詳細に説明する実施形態の発光素子におけるように、少なくとも1つの周期構造を含む。少なくとも1つの周期構造は、周期を p_a とすると、 $\lambda_a / n_{wav-a} < p_a < \lambda_a$ の関係が成り立つ。すなわち、サブミクロン構造は、隣接する凸部間の距離 D_{int} が p_a で一定の周期構造を有する。サブミクロン構造が周期構造を含むと、擬似導波モードの光は、伝播しながら周期構造と相互作用を繰り返すことにより、サブミクロン構造によって回折される。これは、自由空間を伝播する光が周期構造により回折する現象とは異なり、光が導波し

ながら（即ち、全反射を繰り返しながら）周期構造と作用する現象である。したがって、周期構造による位相シフトが小さくても（即ち、周期構造の高さが小さくても）効率よく光の回折を起こすことができる。

【0019】

以上のようなメカニズムを利用すれば、擬似導波モードにより電場が増強される効果によって、フォトルミネッセンスの発光効率が増大するとともに、発生した光が擬似導波モードに結合する。擬似導波モードの光は、周期構造で規定される回折角度だけ進行角度が曲げられる。これを利用することによって、特定の波長の光を特定の方向に出射することができる（指向性が顕著に向上）。さらに、TEとTMモードで有効屈折率 $n_{\text{eff}} (= n_{\text{wav}} \sin \theta_{\text{av}})$ が異なるので、高い偏光の選択性を同時に得ることもできる。例えば、後に実験例を示すように、特定の波長（例えば610nm）の直線偏光（例えばTMモード）を正面方向に強く出射する発光素子を得ることができる。このとき、正面方向に出射される光の指向角は例えば15°未満である。なお、指向角は正面方向を0°とした片側の角度とする。

【0020】

逆に、サブミクロン構造の周期性が低くなると、指向性、発光効率、偏光度および波長選択性が弱くなる。必要に応じて、サブミクロン構造の周期性を調整すればよい。周期構造は、偏光の選択性が高い1次元周期構造であってもよいし、偏光度を小さくできる2次元周期構造であってもよい。

【0021】

また、サブミクロン構造は、複数の周期構造を含み得る。複数の周期構造は、例えば、周期（ピッチ）が互いに異なる。あるいは、複数の周期構造は、例えば、周期性を有する方向（軸）が互いに異なる。複数の周期構造は、同一面内に形成されてもよいし、積層されてもよい。もちろん、発光素子は、複数のフォトルミネッセンス層と複数の透光層とを有し、これらが複数のサブミクロン構造を有してもよい。

【0022】

サブミクロン構造は、フォトルミネッセンス層が発する光を制御するためだけでなく、励起光を効率よくフォトルミネッセンス層に導くためにも用いることができる。すなわち、励起光がサブミクロン構造により回折されフォトルミネッセンス層および透光層を導波する擬似導波モードに結合することで、効率よくフォトルミネッセンス層を励起することができる。フォトルミネッセンス材料を励起する光の空気中における波長を λ_{ex} とし、この励起光に対するフォトルミネッセンス層の屈折率を $n_{\text{wav-ex}}$ とすると、 $\lambda_{\text{ex}} / n_{\text{wav-ex}} < D_{\text{int}} < \lambda_{\text{ex}}$ の関係が成り立つサブミクロン構造を用いればよい。 $n_{\text{wav-ex}}$ はフォトルミネッセンス材料の励起波長における屈折率である。周期を p_{ex} とすると、 $\lambda_{\text{ex}} / n_{\text{wav-ex}} < p_{\text{ex}} < \lambda_{\text{ex}}$ の関係が成り立つ周期構造を有するサブミクロン構造を用いてもよい。励起光の波長 λ_{ex} は、例えば、450nmであるが、可視光よりも短波長であってもよい。励起光の波長が可視光の範囲内にある場合、フォトルミネッセンス層が発する光とともに、励起光を出射するようにしてもよい。

【0023】

[1 . 本開示の基礎となった知見]

本開示の具体的な実施形態を説明する前に、まず、本開示の基礎となった知見を説明する。上述のように、蛍光灯、白色LEDなどで使われるフォトルミネッセンス材料は等方的に発光するので、特定の方向を光で照らすためには、リフレクターやレンズなどの光学部品が必要である。しかしながら、もしフォトルミネッセンス層自身が指向性をもって発光すれば、上記のような光学部品は不要になるので（若しくは小さくできるので）、光学デバイスや器具の大きさを大幅に小さくすることができる。本発明者らは、このような着想に基づき、指向性発光を得るために、フォトルミネッセンス層の構成を詳細に検討した。

【0024】

本発明者らは、まず、フォトルミネッセンス層からの光が特定の方向に偏るようにする

ため、発光自体に特定の方向性をもたせることを考えた。発光を特徴付ける指標である発光レートは、フェルミの黄金則により、以下の式(1)で表される。

【数1】

$$\Gamma(\mathbf{r}) = \frac{2\pi}{\hbar} \langle (\mathbf{d} \cdot \mathbf{E}(\mathbf{r})) \rangle^2 \rho(\lambda) \quad (1)$$

【0025】

式(1)において、 \mathbf{r} は位置を表すベクトル、 λ は光の波長、 \mathbf{d} は双極子ベクトル、 \mathbf{E} は電場ベクトル、 $\rho(\lambda)$ は状態密度である。一部の結晶性物質を除く多くの物質では、双極子ベクトル \mathbf{d} はランダムな方向性を有している。また、フォトルミネッセンス層のサイズと厚さが光の波長よりも十分に大きい場合、電場 \mathbf{E} の大きさも向きに依らずほとんど一定である。よって、ほとんどの場合、 $\langle (\mathbf{d} \cdot \mathbf{E}(\mathbf{r})) \rangle^2$ の値は方向に依らない。即ち、発光レートは方向に依らず一定である。このため、ほとんどの場合においてフォトルミネッセンス層は等方的に発光する。

【0026】

一方、式(1)から、異方的な発光を得るためには、双極子ベクトル \mathbf{d} を特定の方向に揃えるか、電場ベクトルの特定方向の成分を増強するかのいずれかの工夫が必要である。これらのいずれかの工夫を行うことで、指向性発光を実現できる。本開示では、フォトルミネッセンス層へ光を閉じ込める効果により、特定方向の電場成分が増強された擬似導波モードを利用するための構成について検討し、詳細に分析した結果を以下に説明する。

【0027】

[2. 特定の方向の電場のみを強くする構成]

本願発明者らは、電場が強い導波モードを用いて、発光の制御を行うことを考えた。導波構造自体がフォトルミネッセンス材料を含む構成とすることで、発光を導波モードに結合させることができる。しかし、ただ単にフォトルミネッセンス材料を用いて導波構造を形成しただけでは、発せられた光が導波モードとなるため、正面方向へはほとんど光は出てこない。そこで、フォトルミネッセンス材料を含む導波路と周期構造(複数の凸部および複数の凹部の少なくとも一方で形成された)とを組み合わせることを考えた。導波路に周期構造が近接し、光の電場が周期構造と重なりながら導波する場合、周期構造の作用により擬似導波モードが存在する。つまり、この擬似導波モードは、周期構造により制限された導波モードであり、電場振幅の腹が周期構造の周期と同じ周期で発生することを特徴とする。このモードは、光が導波構造に閉じ込められることにより特定方向への電場が強められたモードである。さらに、このモードは周期構造と相互作用することで、回折効果により特定方向の伝播光へと変換されるため、導波路外部へと光を出射することができる。さらに、擬似導波モード以外の光は導波路内に閉じ込められる効果が小さいため、電場は増強されない。よって、発光のほとんどは大きな電場成分を有する擬似導波モードへと結合することになる。

【0028】

つまり、本願発明者らは、周期構造が近接して設けられた導波路を、フォトルミネッセンス材料を含むフォトルミネッセンス層(あるいはフォトルミネッセンス層を有する導波層)とすることで、発光を特定方向の伝播光へと変換される擬似導波モードへ結合させ、指向性のある光源を実現することを考えた。

【0029】

導波構造の簡便な構成として、スラブ型導波路に着目した。スラブ型導波路とは、光の導波部分が平板構造を有する導波路のことである。図30は、スラブ型導波路110Sの一例を模式的に示す斜視図である。導波路110Sの屈折率が導波路110Sを支持する透明基板140の屈折率よりも高いとき、導波路110S内を伝播する光のモードが存在する。このようなスラブ型導波路をフォトルミネッセンス層を含む構成とすることで、発

光点から生じた光の電場が導波モードの電場と大きく重なりをもつので、フォトルミネッセンス層で生じた光の大部分を導波モードに結合させることができる。さらに、フォトルミネッセンス層の厚さを光の波長程度とすることにより、電場振幅の大きい導波モードのみが存在する状況を作り出すことができる。

【 0 0 3 0 】

さらに、フォトルミネッセンス層に周期構造が近接する場合には、導波モードの電場が周期構造と相互作用することで擬似導波モードが形成される。フォトルミネッセンス層が複数の層で構成されている場合でも、導波モードの電場が周期構造に達していれば、擬似導波モードが形成されることになる。フォトルミネッセンス層の全てがフォトルミネッセンス材料である必要はなく、その少なくとも一部の領域が発光する機能を有していればよい。

【 0 0 3 1 】

また、周期構造を金属で形成した場合には、導波モードとプラズモン共鳴の効果によるモードが形成され、上で述べた擬似導波モードとは異なる性質となる。また、このモードは金属による吸収が大きいためロスが大きくなり、発光増強の効果は小さくなる。したがって、周期構造としては、吸収の少ない誘電体を用いるのが望ましい。

【 0 0 3 2 】

本発明者らは、まずこのような導波路（例えば、フォトルミネッセンス層）の表面に、周期構造を形成することで、特定の角度方向の伝播光として出射することのできる擬似導波モードに発光を結合させることについて検討を行った。図 1 A は、そのような導波路（例えば、フォトルミネッセンス層）1 1 0 と周期構造（例えば、透光層）1 2 0 とを有する発光素子 1 0 0 の一例を模式的に示す斜視図である。以下、透光層 1 2 0 が周期構造を形成している場合（即ち、透光層 1 2 0 に周期的なサブミクロン構造が形成されている場合）、透光層 1 2 0 を周期構造 1 2 0 ということがある。この例では、周期構造 1 2 0 は、各々が y 方向に延びるストライプ状の複数の凸部が x 方向に等間隔に並んだ 1 次元周期構造である。図 1 B は、この発光素子 1 0 0 を x z 面に平行な平面で切断したときの断面図である。導波路 1 1 0 に接するように周期 p の周期構造 1 2 0 を設けると、面内方向の波数 k_{wav} をもつ擬似導波モードは、導波路外の伝播光へと変換され、その波数 k_{out} は以下の式（ 2 ）で表すことができる。

【 数 2 】

$$k_{out} = k_{wav} - m \frac{2\pi}{p} \quad (2)$$

式（ 2 ）における m は整数であり、回折の次数を表す。

【 0 0 3 3 】

ここで、簡単のため、近似的に導波路内を導波する光を角度 θ_{wav} で伝播する光線であると考え、以下の式（ 3 ）および（ 4 ）が成立するとする。

【 数 3 】

$$\frac{k_{wav}\lambda_0}{2\pi} = n_{wav} \sin \theta_{wav} \quad (3)$$

【 数 4 】

$$\frac{k_{out}\lambda_0}{2\pi} = n_{out} \sin \theta_{out} \quad (4)$$

【0034】

これらの式において、 λ_0 は光の空気中の波長、 n_{wav} は導波路の屈折率、 n_{out} は出射側の媒質の屈折率、 θ_{out} は光が導波路外の基板または空気に出射するときの出射角度である。式(2)～(4)から、出射角度 θ_{out} は、以下の式(5)で表すことができる。

【数5】

$$n_{out} \sin \theta_{out} = n_{wav} \sin \theta_{wav} - m\lambda_0 / p \quad (5)$$

【0035】

式(5)より、 $n_{wav} \sin \theta_{wav} = m\lambda_0 / p$ が成立するとき、 $\theta_{out} = 0$ となり、導波路の面に垂直な方向(即ち、正面)に光を出射させることができることがわかる。

【0036】

以上のような原理に基づけば、発光を特定の擬似導波モードに結合させ、さらに周期構造を利用して特定の出射角度の光に変換することにより、その方向に強い光を出射させることができると考えられる。

【0037】

上記のような状況を実現するためには、いくつかの制約条件がある。まず、擬似導波モードが存在するためには、導波路内で伝播する光が全反射することが必要である。このための条件は、以下の式(6)で表される。

【数6】

$$n_{out} < n_{wav} \sin \theta_{wav} \quad (6)$$

【0038】

この擬似導波モードを周期構造によって回折させて導波路外に光を出射させるためには、式(5)において $-1 < \sin \theta_{out} < 1$ である必要がある。よって、以下の式(7)を満足する必要がある。

【数7】

$$-1 < \frac{n_{wav}}{n_{out}} \sin \theta_{wav} - \frac{m\lambda_0}{n_{out}p} < 1 \quad (7)$$

【0039】

これに対し、式(6)を考慮すると、以下の式(8)が成立すればよいことがわかる。

【数8】

$$\frac{m\lambda_0}{2n_{out}} < p \quad (8)$$

【0040】

さらに、導波路110から出射される光の方向を正面方向($\theta_{out} = 0$)にするためには、式(5)から、以下の式(9)が必要であることがわかる。

【数 9】

$$p = m\lambda_0 / (n_{wav} \sin \theta_{wav}) \quad (9)$$

【0041】

式(9)および式(6)から、必要な条件は、以下の式(10)であることがわかる。

【数10】

$$\frac{m\lambda_0}{n_{wav}} < p < \frac{m\lambda_0}{n_{out}} \quad (10)$$

【0042】

なお、図1Aおよび図1Bに示すような周期構造を設けた場合には、 m が2以上の高次の回折効率は低いため、 $m=1$ である1次の回折光を主眼に設計すると良い。このため、本実施形態における周期構造では、 $m=1$ として、式(10)を変形した以下の式(11)を満足するように周期 p が決定される。

【数11】

$$\frac{\lambda_0}{n_{wav}} < p < \frac{\lambda_0}{n_{out}} \quad (11)$$

【0043】

図1Aおよび図1Bに示すように、導波路(フォトルミネッセンス層)110が透明基板に接していない場合には、 n_{out} は空気の屈折率(約1.0)となるため、以下の式(12)を満足するように周期 p を決定すればよい。

【数12】

$$\frac{\lambda_0}{n_{wav}} < p < \lambda_0 \quad (12)$$

【0044】

一方、図1Cおよび図1Dに例示するような透明基板140上にフォトルミネッセンス層110および周期構造120を形成した構造を採用してもよい。この場合には、透明基板140の屈折率 n_s が空気の屈折率よりも大きいことから、式(11)において $n_{out} = n_s$ とした次式(13)を満足するように周期 p を決定すればよい。

【数13】

$$\frac{\lambda_0}{n_{wav}} < p < \frac{\lambda_0}{n_s} \quad (13)$$

【0045】

なお、式(12)、(13)では、式(10)において $m = 1$ の場合を想定したが、 $m = 2$ であってもよい。すなわち、図1Aおよび図1Bに示すように発光素子100の両面が空気層に接している場合には、 m を1以上の整数として、以下の式(14)を満足するように周期 p が設定されていればよい。

【数14】

$$\frac{m\lambda_0}{n_{wav}} < p < m\lambda_0 \quad (14)$$

【0046】

同様に、図1Cおよび図1Dに示す発光素子100aのようにフォトルミネッセンス層110が透明基板140上に形成されている場合には、以下の式(15)を満足するように周期 p が設定されていればよい。

【数15】

$$\frac{m\lambda_0}{n_{wav}} < p < \frac{m\lambda_0}{n_s} \quad (15)$$

【0047】

以上の不等式を満足するように周期構造の周期 p を決定することにより、フォトルミネッセンス層110から発生した光を正面方向に出射させることができるため、指向性を有する発光装置を実現できる。

【0048】

[3. 計算による検証]

[3-1. 周期、波長依存性]

本発明者らは、以上のような特定方向への光の出射が実際に可能であるかを光学解析によって検証した。光学解析は、サイバネット社のDiffRACTMODを用いた計算によって行った。これらの計算では、発光素子に対して外部から垂直に光を入射したときに、フォトルミネッセンス層における光の吸収の増減を計算することで、外部へ垂直に出射する光の増強度を求めた。外部から入射した光が擬似導波モードに結合しフォトルミネッセンス層で吸収されるという過程は、フォトルミネッセンス層における発光が擬似導波モードへと結合し、外部へ垂直に出射する伝播光へと変換される過程と逆の過程を計算していることに対応する。また、擬似導波モードの電場分布の計算においても、同様に外部から光を入射した場合における電場を計算した。

【0049】

フォトルミネッセンス層の膜厚を $1\mu\text{m}$ 、フォトルミネッセンス層の屈折率を $n_{wav} = 1.8$ 、周期構造の高さを 50nm 、周期構造の屈折率を 1.5 とし、発光波長および周期構造の周期をそれぞれ変えて、正面方向に出射する光の増強度を計算した結果を図2に示す。計算モデルは、図1Aに示すように、 y 方向には均一な1次元周期構造とし、光の偏光は y 方向に平行な電場成分を有するTMモードであるとして計算を行った。図2の結果から、増強度のピークが、ある特定の波長と周期との組み合わせにおいて存在することがわかる。なお、図2において、増強度の大きさは色の濃淡で表されており、濃い(即ち黒い)方が増強度が大きく、薄い(即ち白い)方が増強度が小さい。

【0050】

上記の計算において、周期構造の断面は、図1Bに示すような矩形であるものとしている。式(10)における $m = 1$ および $m = 3$ の条件を図示したグラフを図3に示す。図2と図3とを比較すると、図2におけるピーク位置は $m = 1$ と $m = 3$ に対応するところに存在することがわかる。 $m = 1$ の方が強度が強いのは、3次以上の高次の回折光よりも1次

の回折光の回折効率の方が高いからである。 $m = 2$ のピークが存在しないのは、周期構造における回折効率が低いためである。

【 0 0 5 1 】

図 3 で示した $m = 1$ および $m = 3$ のそれぞれに対応する領域内において、図 2 では複数のラインが存在することが確認できる。これは、擬似導波モードが複数存在するからであると考えられる。

【 0 0 5 2 】

[3 - 2 . 厚さ依存性]

図 4 は、フォトルミネッセンス層の屈折率を $n_{\text{wav}} = 1.8$ 、周期構造の周期を 400 nm 、高さを 50 nm 、屈折率を 1.5 とし、発光波長およびフォトルミネッセンス層の厚さ t を変えて正面方向に出力する光の増強度を計算した結果を示す図である。フォトルミネッセンス層の厚さ t が特定の値であるときに光の増強度がピークに達することがわかる。

【 0 0 5 3 】

図 4 においてピークが存在する波長 600 nm 、厚さ $t = 238 \text{ nm}$ 、 539 nm のときに、 x 方向に導波するモードの電場分布を計算した結果を図 5 A および図 5 B にそれぞれ示す。比較のため、ピークが存在しない $t = 300 \text{ nm}$ の場合について同様の計算を行った結果を図 5 C に示す。計算モデルは、上記と同様、 y 方向に均一な 1 次元周期構造であるとした。各図において、黒い領域ほど電場強度が高く、白い領域ほど電場強度が低いことを表している。 $t = 238 \text{ nm}$ 、 539 nm の場合には高い電場強度の分布があるのに対して、 $t = 300 \text{ nm}$ では全体的に電場強度が低い。これは、 $t = 238 \text{ nm}$ 、 539 nm の場合には、導波モードが存在し、光が強く閉じ込められているからである。さらに、凸部または凸部の直下に電場が最も強い部分（腹）が必ず存在しており、周期構造 120 と相関のある電場が発生している特徴が見て取れる。つまり、周期構造 120 の配置に従って、導波するモードが得られていることがわかる。また、 $t = 238 \text{ nm}$ の場合と $t = 539 \text{ nm}$ の場合とを比較すると、 z 方向の電場の節（白い部分）の数が 1 つだけ異なるモードであることが分かる。

【 0 0 5 4 】

[3 - 3 . 偏光依存性]

次に偏光依存性を確認するために、図 2 の計算と同じ条件で、光の偏光が y 方向に垂直な電場成分を有する TE モードである場合について光の増強度の計算を行った。本計算の結果を図 6 に示す。TM モードのとき（図 2）に比べ、ピーク位置は多少変化しているものの、図 3 で示した領域内にピーク位置が納まっている。よって、本実施形態の構成は、TM モード、TE モードのいずれの偏光についても有効であることが確認できた。

【 0 0 5 5 】

[3 - 4 . 2 次元周期構造]

さらに、2 次元の周期構造による効果の検討を行った。図 7 A は、 x 方向および y 方向の両方向に凹部および凸部が配列された 2 次元の周期構造 $120'$ の一部を示す平面図である。図中の黒い領域が凸部、白い領域が凹部を示している。このような 2 次元周期構造では、 x 方向と y 方向の両方の回折を考慮する必要がある。 x 方向のみ、あるいは y 方向のみの回折に関しては 1 次元の場合と同様であるが、 x 、 y 両方の成分を有する方向（例えば、斜め 45° 方向）の回折も存在するため、1 次元の場合とは異なる結果が得られることが期待できる。このような 2 次元周期構造に関して光の増強度を計算した結果を図 7 B に示す。周期構造以外の計算条件は図 2 の条件と同じである。図 7 B に示すように、図 2 に示す TM モードのピーク位置に加えて、図 6 に示す TE モードにおけるピーク位置と一致するピーク位置も観測された。この結果は、2 次元周期構造により、TE モードも、回折により変換されて出力されていることを示している。また、2 次元周期構造については、 x 方向および y 方向の両方について、同時に 1 次の回折条件を満足する回折も考慮する必要がある。このような回折光は、周期 p の 2 倍（即ち、 $2^{1/2}$ 倍）の周期に対応する角度の方向に出射する。よって、1 次元周期構造の場合のピークに加えて、周期 p の

2倍の周期についてもピークが発生すると考えられる。図7Bでは、このようなピークも確認できる。

【0056】

2次元周期構造としては、図7Aに示すようなx方向およびy方向の周期が等しい正方格子の構造に限らず、図18Aおよび図18Bのような六角形や三角形を並べた格子構造であってもよい。また、方位方向によって（例えば、正方格子の場合x方向およびy方向）の周期が異なる構造であってもよい。

【0057】

以上のように、本実施形態では、周期構造とフォトルミネッセンス層とによって形成される特徴的な擬似導波モードの光を、周期構造による回折現象を利用して、正面方向にのみ選択的に出射できることが確認できた。このような構成で、フォトルミネッセンス層を紫外線や青色光などの励起光で励起させることにより、指向性を有する発光が得られる。

【0058】

[4. 周期構造およびフォトルミネッセンス層の構成の検討]

次に、周期構造およびフォトルミネッセンス層の構成や屈折率などの各種条件を変えたときの効果について説明する。

【0059】

[4-1. 周期構造の屈折率]

まず、周期構造の屈折率に関して検討を行った。フォトルミネッセンス層の膜厚を200nm、フォトルミネッセンス層の屈折率を $n_{\text{wav}} = 1.8$ 、周期構造は図1Aに示すようなy方向に均一な1次元周期構造とし、高さを50nm、周期を400nmとし、光の偏光はy方向に平行な電場成分を有するTMモードであるものとして計算を行った。発光波長および周期構造の屈折率を変えて正面方向に出力する光の増強度を計算した結果を図8に示す。また、同様の条件でフォトルミネッセンス層の膜厚を1000nmにした場合の結果を図9に示す。

【0060】

まず、フォトルミネッセンス層の膜厚に着目すると、膜厚が200nmの場合（図8）に比べ、膜厚が1000nmの場合（図9）のほうが、周期構造の屈折率の変化に対する光強度がピークとなる波長（ピーク波長と称する。）のシフトが小さいことがわかる。これは、フォトルミネッセンス層の膜厚が小さいほど、擬似導波モードが周期構造の屈折率の影響を受けやすいからである。即ち、周期構造の屈折率が高いほど、有効屈折率が大きくなり、その分ピーク波長が長波長側にシフトするが、この影響は、膜厚が小さいほど顕著になる。なお、有効屈折率は、擬似導波モードの電場が分布する領域に存在する媒質の屈折率によって決まる。

【0061】

次に、周期構造の屈折率の変化に対するピークの変化に着目すると、屈折率が高いほどピークが広がり強度が下がっていることがわかる。これは、周期構造の屈折率が高いほど擬似導波モードの光を外部に放出するレートが高いため、光を閉じ込める効果が減少する、すなわちQ値が低くなることが原因である。ピーク強度を高く保つためには、光を閉じ込める効果が高い（即ちQ値が高い）擬似導波モードを利用して、適度に光を外部に放出する構成にすればよい。これを実現するためには、屈折率がフォトルミネッセンス層の屈折率に比べて大き過ぎる材料を周期構造に用いるのは望ましくないことがわかる。したがって、ピーク強度およびQ値をある程度高くするためには、周期構造を構成する誘電体（即ち、透光層）の屈折率を、フォトルミネッセンス層の屈折率と同等以下にすればよい。フォトルミネッセンス層がフォトルミネッセンス材料以外の材料を含むときも同様である。

【0062】

[4-2. 周期構造の高さ]

次に、周期構造の高さに関して検討を行った。フォトルミネッセンス層の膜厚を1000nm、フォトルミネッセンス層の屈折率を $n_{\text{wav}} = 1.8$ 、周期構造は図1Aに示すよ

うな y 方向に均一な 1 次元周期構造で屈折率を $n_p = 1.5$ 、周期を 400 nm とし、光の偏光は y 方向に平行な電場成分を有する TM モードであるものとして計算を行った。発光波長および周期構造の高さを変えて正面方向に出力する光の増強度を計算した結果を図 10 に示す。同様の条件で、周期構造の屈折率を $n_p = 2.0$ とした場合の計算結果を図 11 に示す。図 10 に示す結果では、ある程度以上の高さではピーク強度や Q 値（即ち、ピークの線幅）が変化していないのに対して、図 11 に示す結果では、周期構造の高さが大きいほどピーク強度および Q 値が低下していることがわかる。これは、フォトルミネッセンス層の屈折率 n_{wav} が周期構造の屈折率 n_p よりも高い場合（図 10）には、光が全反射するので、擬似導波モードの電場の染み出し（エバネッセント）部分のみが周期構造と相互作用することに起因する。電場のエバネッセント部分と周期構造との相互作用の影響は、周期構造の高さが十分大きい場合には、それ以上高さが変化しても一定である。一方、フォトルミネッセンス層の屈折率 n_{wav} が周期構造の屈折率 n_p よりも低い場合（図 11）は、全反射せずに周期構造の表面にまで光が到達するので、周期構造の高さが大きいほどその影響を受ける。図 11 を見る限り、高さは 100 nm 程度あれば十分であり、 150 nm を超える領域ではピーク強度および Q 値が低下していることがわかる。したがって、フォトルミネッセンス層の屈折率 n_{wav} が周期構造の屈折率 n_p よりも低い場合に、ピーク強度および Q 値をある程度高くするためには、周期構造の高さを 150 nm 以下に設定すればよい。

【0063】

[4-3. 偏光方向]

次に、偏光方向に関して検討を行った。図 9 に示す計算と同じ条件で、光の偏光が y 方向に垂直な電場成分を有する TE モードであるものとして計算した結果を図 12 に示す。TE モードでは、擬似導波モードの電場の染み出しが TM モードに比べて大きいため、周期構造による影響を受けやすい。よって、周期構造の屈折率 n_p がフォトルミネッセンス層の屈折率 n_{wav} よりも大きい領域では、ピーク強度および Q 値の低下が TM モードよりも著しい。

【0064】

[4-4. フォトルミネッセンス層の屈折率]

次に、フォトルミネッセンス層の屈折率に関して検討を行った。図 9 に示す計算と同様の条件で、フォトルミネッセンス層の屈折率 n_{wav} を 1.5 に変更した場合の結果を図 13 に示す。フォトルミネッセンス層の屈折率 n_{wav} が 1.5 の場合においても概ね図 9 と同様の効果が得られていることがわかる。ただし、波長が 600 nm 以上の光は正面方向に出射していないことがわかる。これは、式 (10) より、 $n_0 < n_{\text{wav}} \times p/m = 1.5 \times 400 \text{ nm} / 1 = 600 \text{ nm}$ となるからである。

【0065】

以上の分析から、周期構造の屈折率はフォトルミネッセンス層の屈折率と同等以下にするか、周期構造の屈折率がフォトルミネッセンス層の屈折率以上の場合には、高さを 150 nm 以下にすれば、ピーク強度および Q 値を高くできることがわかる。

【0066】

[5. 変形例]

以下、本実施形態の変形例を説明する。

【0067】

[5-1. 基板を有する構成]

上述のように、発光素子は、図 1C および図 1D に示すように、透明基板 140 の上にフォトルミネッセンス層 110 および周期構造 120 が形成された構造を有していてもよい。このような発光素子 100a を作製するには、まず、透明基板 140 上にフォトルミネッセンス層 110 を構成するフォトルミネッセンス材料（必要に応じて、マトリクス材料を含む、以下同じ。）で薄膜を形成し、その上に周期構造 120 を形成する方法が考えられる。このような構成において、フォトルミネッセンス層 110 と周期構造 120 とにより、光を特定の方向に出射する機能をもたせるためには、透明基板 140 の屈折率 n_s 、

はフォトルミネッセンス層の屈折率 n_{wav} 以下にする必要がある。透明基板 140 をフォトルミネッセンス層 110 に接するように設けた場合、式 (10) における出射媒質の屈折率 n_{out} を n_s とした式 (15) を満足するように周期 p を設定する必要がある。

【0068】

このことを確認するために、屈折率が 1.5 の透明基板 140 の上に、図 2 に示す計算と同じ条件のフォトルミネッセンス層 110 および周期構造 120 を設けた場合の計算を行った。本計算の結果を図 14 に示す。図 2 の結果と同様、波長ごとに特定の周期において光強度のピークが現れることが確認できるが、ピークが現れる周期の範囲が図 2 の結果とは異なることがわかる。これに対して、式 (10) の条件を $n_{out} = n_s$ とした式 (15) の条件を図 15 に示す。図 14 において、図 15 に示される範囲に対応する領域内に、光強度のピークが現れていることがわかる。

【0069】

したがって、透明基板 140 上にフォトルミネッセンス層 110 と周期構造 120 とを設けた発光素子 100a では、式 (15) を満足する周期 p の範囲において効果が得られ、式 (13) を満足する周期 p の範囲において特に顕著な効果が得られる。

【0070】

[5-2. 励起光源を有する発光装置]

図 16 は、図 1A、1B に示す発光素子 100 と、励起光をフォトルミネッセンス層 110 に入射させる光源 180 とを備える発光装置 200 の構成例を示す図である。上述のように、本開示の構成では、フォトルミネッセンス層を紫外線や青色光などの励起光で励起させることにより、指向性をもつ発光が得られる。そのような励起光を出射するように構成された光源 180 を設けることにより、指向性をもつ発光装置 200 を実現できる。光源 180 から出射される励起光の波長は、典型的には紫外または青色領域の波長であるが、これらに限らず、フォトルミネッセンス層 110 を構成するフォトルミネッセンス材料に応じて適宜決定される。なお、図 16 では、光源 180 がフォトルミネッセンス層 110 の下面から励起光を入射させるように配置されているが、このような例に限定されず、例えば、フォトルミネッセンス層 110 の上面から励起光を入射させてもよい。

【0071】

励起光を擬似導波モードに結合させることで、効率よく光を出射させる方法もある。図 17 は、そのような方法を説明するための図である。この例では、図 1C、1D に示す構成と同様、透明基板 140 上にフォトルミネッセンス層 110 および周期構造 120 が形成されている。まず、図 17(a) に示すように、発光増強のために x 方向の周期 p_x を決定し、続いて、図 17(b) に示すように、励起光を擬似導波モードに結合させるために y 方向の周期 p_y を決定する。周期 p_x は、式 (10) において p を p_x に置き換えた条件を満足するように決定される。一方、周期 p_y は、 m を 1 以上の整数、励起光の波長を λ_{ex} 、フォトルミネッセンス層 110 に接する媒質のうち、周期構造 120 を除く最も屈折率の高い媒質の屈折率を n_{out} とし、以下の式 (16) を満足するように決定される。

【数 16】

$$\frac{m\lambda_{ex}}{n_{wav}} < p_y < \frac{m\lambda_{ex}}{n_{out}} \quad (16)$$

【0072】

ここで、 n_{out} は、図 17 の例では透明基板 140 の n_s であるが、図 16 のように透明基板 140 を設けない構成では、空気の屈折率 (約 1.0) である。

【0073】

特に、 $m = 1$ とし、次の式 (17) を満足するように周期 p_y を決定すれば、励起光を擬似導波モードに変換する効果をより高くすることができる。

【数 17】

$$\frac{\lambda_{ex}}{n_{wav}} < p_y < \frac{\lambda_{ex}}{n_{out}} \quad (17)$$

【0074】

このように、式(16)の条件(特に式(17)の条件)を満足するように周期 p_y を設定することで、励起光を擬似導波モードに変換することができる。その結果、フォトルミネッセンス層 110 に効率的に波長 λ_{ex} の励起光を吸収させることができる。

【0075】

図17(c)、(d)は、それぞれ、図17(a)、(b)に示す構造に対して光を入射したときに光が吸収される割合を波長ごとに計算した結果を示す図である。この計算では、 $p_x = 365 \text{ nm}$ 、 $p_y = 265 \text{ nm}$ とし、フォトルミネッセンス層 110 からの発光波長 λ_{em} を約 600 nm 、励起光の波長 λ_{ex} を約 450 nm 、フォトルミネッセンス層 110 の消衰係数は 0.003 としている。図17(d)に示すように、フォトルミネッセンス層 110 から生じた光だけでなく、励起光である約 450 nm の光に対して高い吸収率を示している。これは、入射した光が効果的に擬似導波モードに変換されることで、フォトルミネッセンス層に吸収される割合を増大させることができているためである。また、発光波長である約 600 nm に対しても吸収率が増大しているが、これは、もし約 600 nm の波長の光をこの構造に入射した場合には、同様に効果的に擬似導波モードに変換されるということである。このように、図17(b)に示す周期構造 120 は、 x 方向および y 方向のそれぞれに周期の異なる構造(周期成分)を有する2次元周期構造である。このように、複数の周期成分を有する2次元周期構造を用いることにより、励起効率を高めつつ、出射強度を高めることが可能になる。なお、図17では励起光を基板側から入射しているが、周期構造側から入射しても同じ効果が得られる。

【0076】

さらに、複数の周期成分を有する2次元周期構造としては、図18Aまたは図18Bに示すような構成を採用してもよい。図18Aに示すように六角形の平面形状を有する複数の凸部または凹部を周期的に並べた構成や、図18Bに示すように三角形の平面形状を有する複数の凸部または凹部を周期的に並べた構成とすることにより、周期とみなすことのできる複数の主軸(図の例では軸1~3)を定めることができる。このため、それぞれの軸方向について異なる周期を割り当てることができる。これらの周期の各々を、複数の波長の光の指向性を高めるために設定してもよいし、励起光を効率よく吸収させるために設定してもよい。いずれの場合も、式(10)に相当する条件を満足するように各周期が設定される。

【0077】

[5-3. 透明基板上的周期構造]

図19Aおよび図19Bに示すように、透明基板 140 上に周期構造 120 a を形成し、その上にフォトルミネッセンス層 110 を設けてもよい。図19Aの構成例では、基板 140 上の凹凸からなる周期構造 120 a に追従するようにフォトルミネッセンス層 110 が形成された結果、フォトルミネッセンス層 110 の表面にも同じ周期の周期構造 120 b が形成されている。一方、図19Bの構成例では、フォトルミネッセンス層 110 の表面は平坦になるように処理されている。これらの構成例においても、周期構造 120 a の周期 p を式(15)を満足するように設定することにより、指向性発光を実現できる。この効果を検証するため、図19Aの構成において、発光波長および周期構造の周期を変えて正面方向に出力する光の増強度を計算した。ここで、フォトルミネッセンス層 110 の膜厚を 1000 nm 、フォトルミネッセンス層 110 の屈折率を $n_{wav} = 1.8$ 、周期構造 120 a は y 方向に均一な1次元周期構造で高さを 50 nm 、屈折率を $n_p = 1.5$

、周期を400 nmとし、光の偏光はy方向に平行な電場成分を有するTMモードであるものとした。本計算の結果を図19Cに示す。本計算においても、式(15)の条件を満足する周期で光強度のピークが観測された。

【0078】

[5-4.粉体]

以上の実施形態によれば、周期構造の周期や、フォトルミネッセンス層の膜厚を調整することで任意の波長の発光を強調することができる。例えば、広い帯域で発光するフォトルミネッセンス材料を用いて図1A、1Bのような構成にすれば、ある波長の光のみを強調することが可能である。よって、図1A、1Bのような発光素子100の構成を粉末状にして、蛍光材料として利用してもよい。また、図1A、1Bのような発光素子100を樹脂やガラスなどに埋め込んで利用してもよい。

【0079】

図1A、1Bのような単体の構成では、ある特定の波長しか特定の方向に出射できないため、例えば広い波長域のスペクトルを持つ白色などの発光を実現することは難しい。そこで、図20に示すように周期構造の周期やフォトルミネッセンス層の膜厚などの条件の異なる複数の粉末状の発光素子100を混ぜたものを用いることにより、広い波長域のスペクトルを持つ発光装置を実現できる。この場合、個々の発光素子100の一方向のサイズは、例えば数 μm ~数mm程度であり、その中に例えば数周期~数百周期の1次元または2次元の周期構造を含み得る。

【0080】

[5-5.周期の異なる構造を配列]

図21は、フォトルミネッセンス層の上に周期の異なる複数の周期構造を2次元に配列した例を示す平面図である。この例では、3種類の周期構造120a、120b、120cが隙間なく配列されている。周期構造120a、120b、120cは、例えば、赤、緑、青の波長域の光をそれぞれ正面に出射するように周期が設定されている。このように、フォトルミネッセンス層の上に周期の異なる複数の構造を並べることによっても広い波長域のスペクトルに対し指向性を発揮させることができる。なお、複数の周期構造の構成は、上記のものに限定されず、任意に設定してよい。

【0081】

[5-6.積層構造]

図22は、表面に凹凸構造が形成された複数のフォトルミネッセンス層110が積層された構造を有する発光素子の一例を示している。複数のフォトルミネッセンス層110の間には、透明基板140が設けられ、各層のフォトルミネッセンス層110の表面に形成された凹凸構造が上記の周期構造またはサブミクロン構造に相当する。図22に示す例では、3層の周期の異なる周期構造が形成されており、それぞれ、赤、青、緑の波長域の光を正面に出射するように周期が設定されている。また、各周期構造の周期に対応する色の光を発するように各層のフォトルミネッセンス層110の材料が選択されている。このように、周期の異なる複数の周期構造を積層することによっても、広い波長域のスペクトルに対し指向性を発揮させることができる。

【0082】

なお、層数や各層のフォトルミネッセンス層110および周期構造の構成は上記のものに限定されず、任意に設定してよい。例えば2層の構成では、透光性の基板を介して第1のフォトルミネッセンス層と第2のフォトルミネッセンス層とが対向するように形成され、第1および第2のフォトルミネッセンス層の表面に、それぞれ第1および第2の周期構造が形成されることになる。この場合、第1のフォトルミネッセンス層および第1の周期構造の対と、第2のフォトルミネッセンス層および第2の周期構造の対のそれぞれについて、式(15)に相当する条件を満足していればよい。3層以上の構成においても同様に、各層におけるフォトルミネッセンス層および周期構造について、式(15)に相当する条件を満足していればよい。フォトルミネッセンス層と周期構造との位置関係が図22に示すものとは逆転していてもよい。図22に示す例では、各層の周期が異なっているが、

これらを全て同じ周期にしてもよい。その場合、スペクトルを広くすることはできないが、発光強度を大きくすることができる。

【0083】

[5-7. 保護層を有する構成]

図23は、フォトルミネッセンス層110と周期構造120との間に保護層150を設けた構成例を示す断面図である。このように、フォトルミネッセンス層110を保護するための保護層150を設けても良い。ただし、保護層150の屈折率がフォトルミネッセンス層110の屈折率よりも低い場合は、保護層150の内部に波長の半分程度しか光の電場が染み出さない。よって、保護層150が波長よりも厚い場合には、周期構造120に光が届かない。このため、擬似導波モードが存在せず、光を特定方向に放出する機能を得ることができない。保護層150の屈折率がフォトルミネッセンス層110の屈折率と同程度あるいはそれ以上の場合には、保護層150の内部にまで光が到達する。よって、保護層150に厚さの制約は無い。ただし、その場合でも、光が導波する部分(以下、この部分を「導波層」と呼ぶ。)の大部分をフォトルミネッセンス材料で形成したほうが大きな光の出力が得られる。よって、この場合でも保護層150は薄いほうが望ましい。なお、保護層150を周期構造(透光層)120と同じ材料を用いて形成してもよい。このとき、周期構造を有する透光層が保護層を兼ねる。透光層120の屈折率はフォトルミネッセンス層110よりも小さいことが望ましい。

【0084】

[6. 材料および製造方法]

以上のような条件を満たす材料でフォトルミネッセンス層(あるいは導波層)および周期構造を構成すれば、指向性発光を実現できる。周期構造には任意の材料を用いることができる。しかしながら、フォトルミネッセンス層(あるいは導波層)や周期構造を形成する媒質の光吸収性が高いと、光を閉じ込める効果が低下し、ピーク強度およびQ値が低下する。よって、フォトルミネッセンス層(あるいは導波層)および周期構造を形成する媒質として、光吸収性の比較的低いものが用いられ得る。

【0085】

周期構造の材料としては、例えば、光吸収性の低い誘電体が使用され得る。周期構造の材料の候補としては、例えば、 MgF_2 (フッ化マグネシウム)、 LiF (フッ化リチウム)、 CaF_2 (フッ化カルシウム)、 SiO_2 (石英)、ガラス、樹脂、 MgO (酸化マグネシウム)、 ITO (酸化インジウム錫)、 TiO_2 (酸化チタン)、 SiN (窒化シリコン)、 Ta_2O_5 (五酸化タンタル)、 ZrO_2 (ジルコニア)、 $ZnSe$ (セレン化亜鉛)、 ZnS (硫化亜鉛)などが挙げられる。ただし、前述のとおり周期構造の屈折率をフォトルミネッセンス層の屈折率よりも低くする場合、屈折率が1.3~1.5程度である MgF_2 、 LiF 、 CaF_2 、 SiO_2 、ガラス、樹脂を用いることができる。

【0086】

フォトルミネッセンス材料は、狭義の蛍光材料および燐光材料を包含し、無機材料だけでなく、有機材料(例えば色素)を包含し、さらには、量子ドット(即ち、半導体微粒子)を包含する。一般に、無機材料をホストとする蛍光材料は屈折率が高い傾向にある。青色に発光する蛍光材料としては、例えば、 $M_{10}(PO_4)_6Cl_2:Eu^{2+}$ ($M=Ba, Sr$ および Ca から選ばれる少なくとも1種)、 $BaMgAl_{10}O_{17}:Eu^{2+}$ 、 $M_3MgSi_2O_8:Eu^{2+}$ ($M=Ba, Sr$ および Ca から選ばれる少なくとも1種)、 $M_5SiO_4Cl_6:Eu^{2+}$ ($M=Ba, Sr$ および Ca から選ばれる少なくとも1種)を用いることができる。緑色に発光する蛍光材料としては、例えば、 $M_2MgSi_2O_7:Eu^{2+}$ ($M=Ba, Sr$ および Ca から選ばれる少なくとも1種)、 $SrSi_5AlO_2N_7:Eu^{2+}$ 、 $SrSi_2O_2N_2:Eu^{2+}$ 、 $BaAl_2O_4:Eu^{2+}$ 、 $BaZrSi_3O_9:Eu^{2+}$ 、 $M_2SiO_4:Eu^{2+}$ ($M=Ba, Sr$ および Ca から選ばれる少なくとも1種)、 $BaSi_3O_4N_2:Eu^{2+}$ 、 $Ca_8Mg(SiO_4)_4Cl_2:Eu^{2+}$ 、 $Ca_3SiO_4Cl_2:Eu^{2+}$ 、 $CaSi_{12-(m+n)}Al_{(m+n)}O_nN_{16-n}:Ce^{3+}$ 、 $-SiAlON:Eu^{2+}$ を用いることができる。赤色に発光する蛍光材料としては、例えば、 $CaAlSiN_3:Eu^{2+}$ 、 $SrAlS$

$i_4O_7:Eu^{2+}$ 、 $M_2Si_5N_8:Eu^{2+}$ ($M = Ba, Sr$ および Ca から選ばれる少なくとも1種)、 $MSiN_2:Eu^{2+}$ ($M = Ba, Sr$ および Ca から選ばれる少なくとも1種)、 $MSi_2O_2N_2:Yb^{2+}$ ($M = Sr$ および Ca から選ばれる少なくとも1種)、 $Y_2O_2S:Eu^{3+}$ 、 Sm^{3+} 、 $La_2O_2S:Eu^{3+}$ 、 Sm^{3+} 、 $CaWO_4:Li^{1+}$ 、 Eu^{3+} 、 Sm^{3+} 、 $M_2SiS_4:Eu^{2+}$ ($M = Ba, Sr$ および Ca から選ばれる少なくとも1種)、 $M_3SiO_5:Eu^{2+}$ ($M = Ba, Sr$ および Ca から選ばれる少なくとも1種)を用いることができる。黄色に発光する蛍光材料としては、例えば、 $Y_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$ 、 $CaSi_2O_2N_2:Eu^{2+}$ 、 $Ca_3Sc_2Si_3O_{12}:Ce^{3+}$ 、 $CaSc_2O_4:Ce^{3+}$ 、 $-SiAlON:Eu^{2+}$ 、 $MSi_2O_2N_2:Eu^{2+}$ ($M = Ba, Sr$ および Ca から選ばれる少なくとも1種)、 $M_7(SiO_3)_6Cl_2:Eu^{2+}$ ($M = Ba, Sr$ および Ca から選ばれる少なくとも1種)を用いることができる。

【0087】

量子ドットについては、例えば、 CdS 、 $CdSe$ 、コア・シェル型 $CdSe/ZnS$ 、合金型 $CdSSe/ZnS$ などの材料を用いることができ、材質によって様々な発光波長を得ることができる。量子ドットのマトリクスとしては、例えば、ガラスや樹脂を用いることができる。

【0088】

図1C、1Dなどに示す透明基板140は、フォトルミネッセンス層110の屈折率よりも低い透光性材料によって構成される。そのような材料として、例えば、 MgF_2 (フッ化マグネシウム)、 LiF (フッ化リチウム)、 CaF_2 (フッ化カルシウム)、 SiO_2 (石英)、ガラス、樹脂が挙げられる。

【0089】

続いて、製造方法の一例を説明する。

【0090】

図1C、1Dに示す構成を実現する方法として、例えば、透明基板140上に蛍光材料を蒸着、スパッタリング、塗布などの工程によってフォトルミネッセンス層110の薄膜を形成し、その後、誘電体を成膜し、フォトリソグラフィなどの方法によってパターンニングすることによって周期構造120を形成する方法がある。上記方法の代わりに、ナノインプリントによって周期構造120を形成してもよい。また、図24に示すように、フォトルミネッセンス層110の一部のみを加工することによって周期構造120を形成してもよい。その場合、周期構造120はフォトルミネッセンス層110と同じ材料で形成されることになる。

【0091】

図1A、1Bに示す発光素子100は、例えば、図1C、1Dに示す発光素子100aを作製した後、基板140からフォトルミネッセンス層110および周期構造120の部分を剥がす工程を行うことで実現可能である。

【0092】

図19Aに示す構成は、例えば、透明基板140上に半導体プロセスやナノインプリントなどの方法で周期構造120aを形成した後、その上にフォトルミネッセンス層110を構成する材料を蒸着やスパッタリングなどの方法で形成することによって実現可能である。あるいは、塗布などの方法を用いて周期構造120aの凹部をフォトルミネッセンス層110で埋め込むことによって図19Bに示す構成を実現することもできる。

【0093】

なお、上記の製造方法は一例であり、本開示の発光素子は上記の製造方法に限定されない。

【0094】

[実験例]

以下に、本開示の実施形態による発光素子を作製した例を説明する。

【0095】

図19Aと同様の構成を有する発光素子のサンプルを試作し、特性を評価した。発光素

子は以下の様にして作製した。

【0096】

ガラス基板に、周期400nm、高さ40nmの1次元周期構造（ストライプ状の凸部）を設け、その上からフォトルミネッセンス材料であるYAG:Ceを210nm成膜した。この断面図のTEM像を図25に示し、これを450nmのLEDで励起することでYAG:Ceを発光させたときの、正面方向のスペクトルを測定した結果を図26に示す。図26には、周期構造がない場合の測定結果（ref）と、1次元周期構造に対して平行な偏光成分を持つTMモードと、垂直な偏光成分を持つTEモードを測定した結果について示した。周期構造がある場合は、周期構造がない場合に対して、特定の波長の光が著しく増加していることが見て取れる。また、1次元周期構造に対して平行な偏光成分を持つTMモードの方が、光の増強効果が大きいことが分かる。

【0097】

さらに、同じサンプルにおいて、出射光強度の角度依存性を測定した結果および計算結果を図27および図28に示す。図27は、1次元周期構造（周期構造120）のライン方向と平行な軸を回転軸として回転させた場合について、図28は、1次元周期構造（即ち、周期構造120）のライン方向に対して垂直な方向を回転軸として回転させた場合についての測定結果（上段）および計算結果（下段）を示している。また、図27および図28のそれぞれにおいて、TMモードおよびTEモードの直線偏光についての結果を示しており、図27（a）はTMモード、図27（b）はTEモード、図28（a）はTEモード、図28（b）はTMモードの直線偏光についての結果をそれぞれ示している。図27および図28から明らかのように、TMモードの方が増強する効果が高く、また増強される波長は角度によってシフトしていく様子が見て取れる。例えば、610nmの光においては、TMモードでかつ正面方向にしか光が存在しないため、指向性かつ偏光発光していることがわかる。また、各図の上段と下段とが整合していることから、上述の計算の妥当性が実験によって裏付けられた。

【0098】

上記の測定結果から例えば、610nmの光において、ライン方向に対して垂直な方向を回転軸として回転させた場合の強度の角度依存性を示したのが図29である。正面方向に強い発光増強が起きており、そのほかの角度に対しては、ほとんど光が増強されていない様子がみてとれる。正面方向に出射される光の指向角は15°未満であることがわかる。なお、指向角は、強度が最大強度の50%となる角度であり、最大強度の方向を中心に片側の角度で表す。つまり、指向性発光が実現していることがわかる。さらにこれは、全てTMモードの成分であるため、同時に偏光発光も実現していることがわかる。

【0099】

以上の検証は、広帯域の波長帯で発光するYAG:Ceを使って実験を行ったが、発光が狭帯域のフォトルミネッセンス材料で同様の構成としても、その波長の光に対して指向性や偏光発光を実現することができる。さらに、この場合、他の波長の光は発生しないために他の方向や偏光状態の光は発生しないような光源を実現することができる。

【0100】

[7. 斜め方向の色純度を向上させる実施形態]

次に、本開示の他の実施形態を説明する。

【0101】

本開示の発光素子によれば、特定の波長の光を特定の方向に出射することができる。例えば、フォトルミネッセンス層に垂直な方向（即ち、正面方向）に所望の波長の光を出射させることができる。フォトルミネッセンス層に含まれるフォトルミネッセンス材料の発光スペクトルにおいてピークとなる波長と、上記所望の波長とを一致させれば、正面方向に所望の波長の光を強く出射させることができる。

【0102】

一方で、フォトルミネッセンス層に垂直な方向から傾斜した方向（以下、「斜め方向」と称することがある。）には、上記所望の波長とは異なる2つの波長の光が出射する。図

27 の中段および下段の図に示すように、フォトルミネッセンス層の法線方向に対する角度が 0° 以外の方向には、2つの波長の光が強く出射する。

【0103】

図31Aは、サブミクロン構造から 0° 方向（即ち、正面方向）に出射する光の強度の波長依存性の一例を示す図である。図31Bは、同じ条件で、サブミクロン構造から 5° 方向に出射する光の強度の波長依存性の一例を示す図である。これらの例では、 0° 方向には約 620 nm のほぼ単色の波長の光が出射するが、 5° 方向には約 580 nm の波長の光と約 650 nm の波長の光とが出射する。このように、斜め方向には、正面方向に強く出射する光の波長から長波長側にシフトした光と、短波長側にシフトした光とが強く出射する。これらのシフト量は、同程度である。これは、フォトルミネッセンス層内を一方方向に伝播する光と、その逆方向に伝播する光とで、増強される光の出射角度が法線方向に対して対称になるためであると考えられる。

【0104】

このように、斜め方向については、2つの波長の光が同時に増強されるため、異なる2色の光が混じることになる。その結果、斜め方向の色純度が低下するという問題が生じる。

【0105】

そこで、本実施形態では、斜め方向に出射する光の色純度を向上させるため、フォトルミネッセンス層から生じる光が、斜めに強く出射する2つの波長の光の一方のみを多く含むように発光素子が設計される。より具体的には、少なくとも一つの周期構造を含むサブミクロン構造を介してフォトルミネッセンス層に垂直な方向に出射する光のスペクトルにおいて強度がピークとなる波長Aが、フォトルミネッセンス層から発せられる光の強度がピークとなる波長Bから長波長側または短波長側にずれるように設計される。図31Aの例では、約 620 nm が波長Aに相当する。なお、波長Aおよび波長Bは、いずれも空気中の波長を表す。以下、特に断らない限り、波長は空気中の波長を意味する。

【0106】

図32は、サブミクロン構造によって増強される光の波長および角度と、フォトルミネッセンス材料の発光スペクトルとの関係を示す図である。図32(a)は、図27(a)の下図と同じ角度-波長特性を示している。図32(b)は、本実施形態におけるフォトルミネッセンス層に含まれるフォトルミネッセンス材料の発光スペクトルの一例を示している。

【0107】

図32(b)に示す発光スペクトルは、波長B（この例では約 540 nm ）をピークに、ブロードな波長分布を有する。サブミクロン構造を介して正面方向に出射する光のスペクトルにおいて強度がピークとなる波長A（この例では約 620 nm ）は、波長Bに対して長波長側に大きくずれている。波長Aよりも長い波長の光は、フォトルミネッセンス層からほとんど生じない。その結果、図32(a)に矢印で示す、波長Aよりも長い波長の光は、角度 0° を超える斜め方向にほとんど出射しない。即ち、斜め方向の2色性を低減させることができる。

【0108】

波長Aの波長Bからのシフト量が大きいほど2色性の低減効果が高い。このシフト量は、例えば、フォトルミネッセンス材料の発光スペクトルの半値半幅（HWHM）以上に設定される。半値半幅は、発光スペクトルにおいて、強度がピークの半分となる2つの波長の幅（即ち、半値全幅）の半分の長さである。ある例では、強度がピークの半分となる2つの波長のうち、波長Bとの差がより大きい波長Cと、波長Bとの差をWとすると、波長Aは、波長BからW以上ずれるように設定される。図32(b)の例では、波長Aと波長Bとの差は、半値半幅（HWHM）および幅Wのいずれよりも大きい。

【0109】

このような構成により、正面方向に増強される光の波長Aよりも短波長側の光のみが斜め方向に強く出射する。このため、後述するように、色純度の高い複数の波長の光を利用

する様々な応用例に適用することができる。

【0110】

この例では、波長 A が波長 B よりも大きい、波長 A が波長 B よりも小さくてもよい。その場合、波長 A よりも長波長側の光のみが斜め方向に強く出射することができる。ただし、波長 A を小さくするためには、サブミクロン構造の凸部間または凹部間のピッチ（または周期構造の周期）を短くする必要がある。このため、波長 A を波長 B よりも大きくする方が製造し易い。また、一般的には、図 3 2 (b) に示すように、フォトルミネッセンス材料から発せられる光の強度は、短波長側よりも長波長側の方がなだらかに変化する。これは、特に広帯域に発光する場合、発光準位間でのエネルギー緩和により、発光スペクトルが長波長側になだらかに広がる傾向にあるからである。このため、波長 A を波長 B よりも大きくすることにより、角度の変化に対する波長の変化を小さくできるという利点もある。

【0111】

なお、図 3 2 (b) に示す発光スペクトルには、強度がピークの半分となる波長が 2 つ存在するが、そのような波長が 3 つ以上存在する発光スペクトルも考えられる。そのような発光スペクトルでは、強度がピークの半分となる複数の波長のうち、ピークに最も近い第 1 の波長および次に近い第 2 の波長を、上記の 2 つの波長として扱えばよい。この場合、第 2 の波長が上記の波長 C に相当する。

【0112】

本実施形態においても、既に説明した実施形態と同様、周期構造が複数の凸部および複数の凹部の少なくとも一方を含み、周期構造における隣接する凸部間または凹部間の距離を D_{int} とし、フォトルミネッセンス層が発する光に含まれる第 1 の光（波長 λ_a ）に対するフォトルミネッセンス層の屈折率を n_{wav-a} とすると、 $\lambda_a / n_{wav-a} < D_{int} < \lambda_a$ の関係が成り立つ。この条件は、前述のように、正面方向に近い方向に波長 λ_a の光を強く出射するための条件である。この波長 λ_a は、ある例では、サブミクロン構造から正面方向に出射する光のスペクトルにおいて強度がピークとなる波長 A と一致するように設定され得る。

【0113】

次に、本実施形態のいくつかの応用例を説明する。

【0114】

本実施形態の発光素子は、波長を変化させることができる発光装置（即ち、波長可変光源）に利用することができる。

【0115】

従来の波長可変光源は、白色光源からの光を波長分離フィルタ（例えばダイクロイックミラー）または回折格子などの光学素子を用いて分光し、スリットまたはフィルタを介して波長の取捨選択を行う。そのような装置では、色を分離するための光学素子が必要であるため、装置のサイズが大きくなるという課題がある。

【0116】

本実施形態の発光素子は、波長に応じて空間的に分光された光を出射するので、そのような光学素子を不要にでき、小型化が可能である。

【0117】

図 3 3 A は、そのような発光装置 3 0 0 の構成例を模式的に示す図である。発光装置 3 0 0 は、発光素子 3 1 0 と、発光素子 3 1 0 に連結され、発光素子 3 1 0 を回転させる回転機構 3 2 0 と、発光素子 3 1 0 から発せられる光の経路上に配置された光学フィルタ 3 3 0 とを備えている。なお、図 3 3 A では、各構成要素を簡略化して表しているため、実際の構造とは必ずしも一致していない。以降の図も同様である。

【0118】

光学フィルタ 3 3 0 は、発光素子 3 1 0 から特定の方向に出射した特定の波長の光線を通過させる透光領域 3 3 2 を有する。透光領域 3 3 2 以外の箇所は、遮光領域 3 3 4 である。透光領域 3 3 2 は、例えばスリットまたは透明部材によって形成される。遮光領域 3

34は、発光の一部を遮光または減衰させる。

【0119】

回転機構320は、発光素子310におけるサブミクロン構造の複数の凸部または凹部の配列方向に垂直な方向を回転軸として、発光素子310を一方向又は双方向に回転させる。回転機構320は、モータおよびギアなどの部品で構成される。これにより、異なる波長の光線が透光領域332を通過するように調整できる。このような構成により、任意の波長の光を外部に取り出して利用することができる。

【0120】

図33Bは、発光装置の変形例を示す図である。この発光装置300aは、複数の透光領域332を有する光学フィルタ330aを備えている。光学フィルタ330aにおける複数の透光領域332は、発光素子310から特定の複数の方向にそれぞれ出射した複数の光線を透過させる。このような構成により、同時に複数の波長の光を取り出すことができる。

【0121】

図33Aおよび図33Bに示す例では、回転機構320が設けられているが、回転機構320を省略してもよい。特定の波長の光のみを利用する用途では、回転機構320は不要である。回転機構320は、モータ等で自動で角度を調節できる機構であってもよく、また、手で発光素子310の角度を調節できる機構であってもよい。

【0122】

図33Cは、発光装置の他の変形例を示す図である。この発光装置300bは、少なくとも1つのレンズを含む集光光学系340と、可動式の光学フィルタ330bとを備えている。光学系340は、発光素子310から出射した複数の波長の光線を集光して平行光束にする。スライド機構320aは、光学フィルタ330bに連結され、光学フィルタ330bを一方向又は双方向にスライドさせるモータおよびギアなどの部品で構成される。より具体的には、スライド機構320aは、透光領域332を異なる波長の光線が透過するように、光学フィルタ330bを、並行光束と交差する（例えば垂直な）方向に移動させる。このような構成によっても、任意の波長の光を外部に取り出すことができる。なお、この例では光学系340およびスライド機構320aを用いているが、光学系340およびスライド機構320aを省略してもよい。

【0123】

図33Dは、発光装置のさらに他の変形例を示す図である。この発光装置300cは、発光素子310と、光学系340と、光学シャッタ350とを備えている。

【0124】

光学シャッタ350は、複数の透光領域を有する。複数の透光領域は、発光素子310から複数の方向にそれぞれ発せられた複数の光線の経路上にそれぞれ配置されている。光学シャッタ350は、これらの複数の透光領域の光透過率を個別に変化させることができる。これにより、任意のスペクトルの光を取り出すことができる。この例でも、光学系340を省略してもよい。

【0125】

光学シャッタ350は、例えば液晶を用いて実現することができる。不図示の駆動回路によって透光領域ごとに液晶分子に印加する電圧を変化させることにより、各透光領域の光の透過率を変化させることができる。複数の透光領域は、1次元に限らず、2次元に配列させてもよい。

【0126】

図34は、図33Dに示す発光装置300cの構成を応用した投影装置（プロジェクター）500の構成例を示す図である。

【0127】

投影装置500は、発光装置300c（発光素子310、光学系340、光学シャッタ350）の他、光学系540a、540b、540c、ロッドインテグレータ510、全反射プリズム520、デジタルミラーデバイス（DMD）530、駆動回路550、およ

び制御回路560を備える。

【0128】

投影装置500は、発光素子310からの発光、または発光と励起光とを利用して映像をスクリーンに投影する。ここでは、励起光が青色光（例えば、波長が450nm）であり、発光素子310のフォトルミネセンス層が励起光を受けて黄色光（例えば、主波長が570nm）を発生させる黄色蛍光体を含む場合を想定する。励起光の一部は、発光素子310を通過するものとする。

【0129】

駆動回路550は、光学シャッタ350に電氣的に接続され、光学シャッタ350の各透光領域の透過率を変化させる。駆動回路550は、表示される映像のフレームレートよりも高速に各透光領域の透過率を変化させる。これにより、光学シャッタ350から任意の色の光を出射させることができる。駆動回路550は、例えば、光学シャッタ350から、赤、緑、青の光を1/3フレームごとに順に出射させる。

【0130】

光学系540aは、光学シャッタ350から出射した光を集束させ、ロッドインテグレータ510に入射させる。ロッドインテグレータ510は、入射光の強度を均一にして出射する。光学系540bおよび全反射プリズム520は、ロッドインテグレータ510から出射した光を、DMD530の反射面に集束させる。

【0131】

DMD530は、2次元に配列された複数のミラーを有する。各ミラーの領域を画素と呼ぶと、DMD530は、画素ごとに光を反射する状態と光を吸収させる状態とを切り替える。この切り替えは、各ミラーの背部の電極に印加される電圧を変化させることによって制御される。DMD530を制御する制御回路560は、入力された画像信号に応じて、画素ごとに反射・吸収特性を変化させる。これにより、各色成分について、画素ごとの輝度を調節できるため、画像を構成できる。

【0132】

DMD530によって反射された光は、全反射プリズム520を通過し、光学系540cによって集束される。これにより、画像がスクリーンに投影される。

【0133】

従来のプロジェクター（例えば、特開2014-21223号公報および特開2014-160227号公報）では、カラー画像を投影するために、蛍光体ホイールが用いられる。蛍光体ホイールは、蛍光体が塗布された領域と、切り欠きの領域とを有し、モータによって回転させることにより、光を色ごとに分離する。本実施形態によれば、蛍光体ホイールおよびこれを駆動するモータを省略することができるため、小型化が可能である。

【0134】

なお、本実施形態では、光学シャッタ350が赤、緑、青の光を時分割で透過させるが、本開示の投影装置はこのような動作に限定されない。例えば、光学シャッタ350を省略し、複数のダイクロイックプリズムなどの素子を用いて赤、緑、青の光をそれぞれ個別にDMDで制御してもよい。その場合、3つのDMDから反射された3色の光を、ミラーを含む光学系によって合成することにより、スクリーンにカラー画像を投影できる。

【0135】

次に、被検知物の分光透過率を測定する検知装置への応用例を説明する。

【0136】

図35Aは、そのような検知装置400の構成を模式的に示す図である。この検知装置400は、発光素子310と、光学系340と、検知器（ディテクター）410と、保持部材420とを備える。

【0137】

保持部材420は、発光素子310から検知器410までの光路上に被検知物450（検体とも呼ぶ。）が位置するように被検知物450を保持する。保持部材420は、例えば検知装置400の筐体に設置された、検体を載置する台またはクリップなどの検体を挟

む部材を含み得る。検体は、ガス、液体、板状の固体など、あらゆる物質であり得る。ガスを検知する装置においては、保持部材 4 2 0 を省略してもよい。

【0138】

検知器 4 1 0 は、発光素子 3 1 0 から出射された光の経路上に配置される。検知器 4 1 0 は、アレイ状に配列された複数の検知セルを有する。複数の検知セルは、発光素子 3 1 0 による光の分離方向に対応する方向に配列される。

【0139】

発光素子 3 1 0 から出射した光は、光学系 3 4 0 によって集光され、検体 4 5 0 を通過して検知器 4 1 0 に入射する。検知器 4 1 0 は、波長ごとの光強度を検知することによって検体 4 5 0 の光の透過特性および吸収特性を測定することができる。

【0140】

図 3 5 B は、検知装置の変形例を示す図である。この検知装置 4 0 0 a は、図 3 5 A に示す発光素子 3 1 0 および光学系 3 4 0 の代わりに、図 3 3 A を参照して説明した発光装置 3 0 0 (発光素子 3 1 0、回転機構 3 2 0、および光学フィルタ 3 3 0) を有する。さらに、アレイ状の複数の検知セルを有する検知器 4 1 0 の代わりに、1 つの検知セルを有する検知器 4 1 0 a を有する。

【0141】

この例では、検知器 4 1 0 a は、光学フィルタ 3 3 0 における透光領域 (例えば、スリット) を通過した単一の波長の光を検知する。回転機構 3 2 0 によって発光素子 3 1 0 を回転させることにより、透光領域を通過する光の波長が変化する。これにより、任意の波長について、検体 4 5 0 の透過率および吸収率を測定できる。

【0142】

[8 . 他の変形例]

次に、本開示の発光素子および発光装置の変形例を説明する。

【0143】

上述したように、本開示の発光素子が有するサブミクロン構造によって、発光増強効果を受ける光の波長および出射方向は、サブミクロン構造の構成に依存する。図 3 6 に示す、フォトルミネッセンス層 1 1 0 上に周期構造 1 2 0 を有する発光素子を考える。ここでは、周期構造 1 2 0 はフォトルミネッセンス層 1 1 0 と同じ材料で形成されており、図 1 A に示した 1 次元周期構造 1 2 0 を有する場合を例示する。1 次元周期構造 1 2 0 によって発光増強を受ける光は、1 次元周期構造 1 2 0 の周期 p (nm)、フォトルミネッセンス層 1 1 0 の屈折率 n_{wav} 、光が出射される外部の媒質の屈折率 n_{out} とし、1 次元周期構造 1 2 0 への入射角を θ_{wav} 、1 次元周期構造 1 2 0 から外部の媒質への出射角を θ_{out} とすると、 $p \times n_{wav} \times \sin \theta_{wav} - p \times n_{out} \times \sin \theta_{out} = m$ の関係を満足する (上記の式 (5) 参照)。ここで、 λ は空気中における光の波長であり、 m は整数である。

【0144】

上記式から、 $\theta_{out} = \arcsin [(n_{wav} \times \sin \theta_{wav} - m / p) / n_{out}]$ が得られる。したがって、一般に、波長 λ が異なると、発光増強を受けた光の出射角 θ_{out} が異なることになる。その結果、図 3 6 に模式的に示すように、観察する方向によって、見える光の色が異なることになる。

【0145】

この視角依存性を低減させるためには、 $(n_{wav} \times \sin \theta_{wav} - m / p) / n_{out}$ が、波長 λ によらず一定となるように、 n_{wav} および n_{out} を選ばばよい。物質の屈折率は、波長分散 (波長依存性) を有しているため、 $(n_{wav} \times \sin \theta_{wav} - m / p) / n_{out}$ が波長 λ に依存しないような、 n_{wav} および n_{out} の波長分散性を有する材料を選択すればよい。例えば、外部の媒質が空気の場合、 n_{out} は、波長によらずほぼ 1.0 なので、フォトルミネッセンス層 1 1 0 および 1 次元周期構造 1 2 0 を形成する材料として、屈折率 n_{wav} の波長分散が小さい材料を選択することが望ましい。さらに、屈折率 n_{wav} がより短い波長の光に対して屈折率が低くなるような逆分散の材料のほうが望ましい。

【0146】

また、図37A(a)に示すように、互いに発光増強効果を示す波長が異なる複数の周期構造を配列することによって、白色光を出射できるようにできる。図37A(a)に示す例では、赤色光(R)を増強できる周期構造120rと、緑色光(G)を増強できる周期構造120gと、青色光(B)を増強できる周期構造120bとがマトリクス状に配列されている。周期構造120r、120gおよび120bは、例えば、1次元周期構造で、それぞれの凸部は互いに平行に配列されている。したがって、偏光特性は、赤、緑、青の全ての色の光について同じである。周期構造120r、120gおよび120bによって、発光増強を受けた三原色の光が出射され、混色される結果、白色光が得られ、かつ、直線偏光である。

【0147】

マトリクス状に配列された各周期構造120r、120gおよび120bを単位周期構造(または画素)と呼ぶと、単位周期構造の大きさ(即ち、一辺の長さ)は、例えば、周期の3倍以上である。また、混色の効果を得るためには人間の目で単位周期構造が認識されない方が望ましく、例えば、一辺の長さは1mmよりも小さいことが望ましい。ここでは、各単位周期構造を正方形に描いているが、これに限られず、例えば、互いに隣接する周期構造120r、120gおよび120bが長方形、三角形、六角形などの正方形以外の形状でもよい。

【0148】

また、周期構造120r、120gおよび120bの下に設けられているフォトルミネッセンス層は、周期構造120r、120gおよび120bに共通であってもよいし、それぞれの色の光に対応して異なるフォトルミネッセンス材料を有するフォトルミネッセンス層を設けてもよい。

【0149】

図37A(b)に示すように、1次元周期構造の凸部が延びる方位が異なる、複数の周期構造(周期構造120h、120iおよび120jを含む)配列してもよい。複数の周期構造が発光増強する光の波長は、同じでもよいし、異なってもよい。例えば、同じ周期構造を図37A(b)のように配列すると、偏光していない光を得ることができる。また、図37A(a)における周期構造120r、120gおよび120bのそれぞれについて、図37A(b)の配列を適用すると、全体として、非偏光の白色光を得ることができる。

【0150】

もちろん、周期構造は、1次元周期構造に限らず、図37A(c)に示すように、複数の2次元周期構造(周期構造120k、120mおよび120nを含む)を配列してもよい。このとき、周期構造120k、120mおよび120nの周期や方位は、上述したように、同じでもよいし、異なってもよく、必要に応じて適宜設定され得る。

【0151】

また、図37Bに示すように、例えば、発光素子の出射側にマイクロレンズ130を配置し、斜め方向に出射される光を法線方向に曲げることによって、混色の効果を得ることができる。

【0152】

図37Bに示した発光素子は、図37A(a)における周期構造120r、120gおよび120bをそれぞれ有する領域R1、R2およびR3を有する。領域R1においては、周期構造120rによって、赤色光Rが法線方向に出射され、例えば緑色光Gは斜め方向に出射される。マイクロレンズ130の屈折作用によって、斜め方向に出射された緑色光Gは法線方向に曲げられる。その結果、法線方向においては、赤色光Rと緑色光Gとが混色されて観察される。このように、マイクロレンズ130を設けることによって、出射される光の波長が角度によって異なるという現象が抑制される。ここでは、複数の周期構造に対応する複数のマイクロレンズを一体化したマイクロレンズアレイを例示しているが、これに限られない。もちろん、タイリングする周期構造は上記の例に限られず、同じ周期構造をタイリングした場合にも適用できるし、図37A(b)または(c)に示した構

成にも適用できる。

【0153】

また、斜め方向に出射される光を曲げる作用を有する光学素子は、マイクロレンズアレイに代えてレンチキュラーレンズを用いることもできる。また、レンズだけでなく、プリズムを用いることもできる。プリズムもアレイとしてもよい。周期構造に対応して個々に配置してもよい。プリズムの形状は、特に制限されず、例えば、三角プリズムまたはピラミッド型プリズムを用いることができる。

【0154】

白色光（あるいは、広いスペクトル幅を有する光）を得る方法は、上述の周期構造によるものの他、例えば、図38(a)および(b)に示すように、フォトルミネッセンス層によるものもある。図38(a)に示すように、発光波長が異なる複数のフォトルミネッセンス層110b、110g、110rを積層することによって、白色光を得ることができる。積層順は図示の例に限らない。また、図38(b)に示すように、青色を発光するフォトルミネッセンス層110bの上に、黄色を発光するフォトルミネッセンス層110yを積層してもよい。フォトルミネッセンス層110yは、例えばYAGを用いて形成することができる。

【0155】

この他、蛍色素などマトリクス（ホスト）材料に混合して用いられるフォトルミネッセンス材料を用いる場合には、発光波長が異なる複数のフォトルミネッセンス材料をマトリクス材料に混合し、単一のフォトルミネッセンス層で、白色光を発光するようにできる。このような白色光を発光できるフォトルミネッセンス層は、図37A(a)～(c)を参照して説明した、単位周期構造をタイリングした構成に用いることができる。

【0156】

フォトルミネッセンス層110を形成する材料として、無機材料（例えばYAG）を用いる場合、その製造過程で、1000を超える熱処理を経ることがある。その際、下地（典型的には、基板）から不純物が拡散し、フォトルミネッセンス層110の発光特性を低下させることがある。不純物がフォトルミネッセンス層に拡散するのを防止するために、例えば図39(a)～(d)に示すように、フォトルミネッセンス層の下に、拡散防止層（バリア層）108を設けてもよい。図39(a)～(d)に示すように、拡散防止層108は、これまで例示した種々の構成において、フォトルミネッセンス層110の下層に形成される。

【0157】

例えば、図39(a)に示すように、基板140とフォトルミネッセンス層110との間に拡散防止層108が形成される。また、図39(b)に示すように、複数のフォトルミネッセンス層110aおよび110bを有する場合には、フォトルミネッセンス層110aおよび110bのそれぞれの下層に拡散防止層108aまたは108bが形成される。

【0158】

基板140の屈折率がフォトルミネッセンス層110の屈折率よりも大きい場合には、図39(c)、図39(d)に示すように、基板140上に低屈折率層107を形成すればよい。図39(c)に示すように、基板140の上に低屈折率層107を設けた場合、低屈折率層107とフォトルミネッセンス層110との間の拡散防止層108が形成される。さらに、図39(d)に示すように、複数のフォトルミネッセンス層110aおよび100bを有する場合には、フォトルミネッセンス層110aおよび110bの下層に拡散防止層108aおよび108bがそれぞれ形成される。

【0159】

なお、低屈折率層107は、基板140の屈折率がフォトルミネッセンス層110の屈折率と同等かそれよりも大きい場合に形成される。低屈折率層107の屈折率は、フォトルミネッセンス層110の屈折率よりも低い。低屈折率層107は、例えば、MgF₂、LiF、CaF₂、BaF₂、SrF₂、石英、樹脂、HSQ・SOGなどの常温硬化ガラ

スを用いて形成される。低屈折率層107の厚さは、光の波長よりも大きいことが望ましい。基板140は、例えば、 MgF_2 、 LiF 、 CaF_2 、 BaF_2 、 SrF_2 、ガラス、樹脂、 MgO 、 $MgAl_2O_4$ 、サファイア(Al_2O_3)、 $SrTiO_3$ 、 $LaAlO_3$ 、 TiO_2 、 $Gd_3Ga_5O_{12}$ 、 $LaSrAlO_4$ 、 $LaSrGaO_4$ 、 $LaTaO_3$ 、 SrO 、 $YSZ(ZrO_2 \cdot Y_2O_3)$ 、 YAG 、 $Tb_3Ga_5O_{12}$ を用いて形成される。

【0160】

拡散防止層108、108a、108bは、拡散を防止する対象の元素によって好適に選択されればよく、例えば、共有結合性の強い酸化物結晶や窒化物結晶を用いて形成されることができる。拡散防止層108、108a、108bの厚さは、例えば、50nm以下である。

【0161】

なお、拡散防止層108や後述する結晶成長層106のような、フォトルミネッセンス層110に隣接する層を有する構成においては、隣接する層の屈折率がフォトルミネッセンス層の屈折率よりも大きい場合、当該屈折率が大きい層の屈折率およびフォトルミネッセンス層の屈折率をそれぞれの体積比率で重み付けした平均屈折率を n_{wav} とする。この場合は、光学的には、フォトルミネッセンス層が複数の異なる材料の層で構成されている場合と等価であるからである。

【0162】

また、無機材料を用いて形成されたフォトルミネッセンス層110においては、無機材料の結晶性が低いために、フォトルミネッセンス層110の発光特性が低いことがある。フォトルミネッセンス層110を構成する無機材料の結晶性を高めるために、図40(a)に示すように、フォトルミネッセンス層110の下地に、結晶成長層(「シード層」ということもある。)106を形成してもよい。結晶成長層106は、その上に形成されるフォトルミネッセンス層110の結晶と格子整合する材料を用いて形成される。格子整合は、例えば $\pm 5\%$ 以内であることが望ましい。基板140の屈折率がフォトルミネッセンス層110の屈折率よりも大きい場合、結晶成長層106または106aの屈折率は、フォトルミネッセンス層110の屈折率よりも小さいことが望ましい。

【0163】

基板140の屈折率がフォトルミネッセンス層110の屈折率よりも大きい場合には、図40(b)に示すように、基板140上に低屈折率層107を形成すればよい。結晶成長層106は、フォトルミネッセンス層110と接するので、基板140上に低屈折率層107が形成される場合には、低屈折率層107上に結晶成長層106が形成される。また、図40(c)に示すように、複数のフォトルミネッセンス層110aおよび110bを有する構成においては、複数のフォトルミネッセンス層110aおよび110bのそれぞれに対応する結晶成長層106aまたは106bを形成することが望ましい。結晶成長層106、106aおよび106bの厚さは、例えば、例えば、50nm以下である。

【0164】

図41(a)および(b)に示すように、周期構造120を保護するために、表面保護層132を設けてもよい。

【0165】

表面保護層132は、図41(a)に示すように、基板を有しないタイプのものであっても、図41(b)に示すように、基板140を有するタイプのものにも設けられる。また、図41(a)に示した基板を有しないタイプの発光素子においては、フォトルミネッセンス層110の下層にも表面保護層を設けてもよい。このように、表面保護層132は、上述したいずれの発光素子の表面に設けてもよい。周期構造120は、図41(a)および図41(b)に例示したものに限られず、上述したいずれのタイプであってもよい。

【0166】

表面保護層132は、例えば、樹脂、ハードコート材、 SiO_2 、 Al_2O_3 (アルミナ)、 $SiOC$ 、 DLC を用いて形成することができる。表面保護層132の厚さは、例えば、100nm~10 μ mである。

【0167】

表面保護層132を設けることによって、発光素子を外部環境から保護し、発光素子の劣化を抑制することができる。表面保護層132は、発光素子の表面を傷、水分、酸素、酸、アルカリ、または熱から保護する。表面保護層132の材料や厚さは、用途に応じて適宜設定され得る。

【0168】

また、フォトルミネッセンス材料は熱によって劣化することがある。熱は、主にフォトルミネッセンス層110の非輻射ロスやストークスロスによって生じる。例えば、石英の熱伝導率(1.6 W/m・K)は、YAGの熱伝導率(11.4 W/m・K)よりも約1桁小さい。したがって、フォトルミネッセンス層(例えばYAG層)110で発生した熱が基板(例えば石英基板)140を通して外部に熱伝導して放熱されにくく、フォトルミネッセンス層110の温度が上昇し、熱劣化を起こすことがある。

【0169】

そこで、図42(a)に示すように、フォトルミネッセンス層110と基板140との間に、透明高熱伝導層105を形成することによって、フォトルミネッセンス層110の熱を外部に効率よく伝導させ、温度上昇を防ぐことができる。このとき、透明高熱伝導層105の屈折率は、フォトルミネッセンス層110の屈折率よりも低いことが望ましい。なお、基板140の屈折率がフォトルミネッセンス層110の屈折率よりも低い場合には、透明高熱伝導層105の屈折率は、フォトルミネッセンス層110の屈折率よりも高くてもよい。ただし、この場合には、透明高熱伝導層105は、フォトルミネッセンス層110とともに導波層を形成するので、50nm以下であることが望ましい。図42(b)に示すように、フォトルミネッセンス層110と透明高熱伝導層105との間に、低屈折率層107を形成すれば、厚い透明高熱伝導層105を利用できる。

【0170】

また、図42(c)に示すように、周期構造120を高い熱伝導率を有する低屈折率層107で覆ってもよい。さらに、図42(d)に示すように、周期構造120を低屈折率層107で覆った上に、透明高熱伝導層105を形成してもよい。この構成においては、低屈折率層107が高い熱伝導率を有する必要はない。

【0171】

透明高熱伝導層105の材料としては、例えば、 Al_2O_3 、 MgO 、 Si_3N_4 、 ZnO 、 AlN 、 Y_2O_3 、ダイヤモンド、グラフェン、 CaF_2 、 BaF_2 を挙げることができる。これらの内、 CaF_2 、 BaF_2 は、屈折率が低いので、低屈折率層107として利用することができる。

【0172】

次に、図43(a)~(d)を参照して、発光素子100と光源180とを備える発光装置の放熱特性を高めた構造を説明する。

【0173】

図43(a)に示す発光装置は、光源180としてのLEDチップ180と、発光素子100とを有している。発光素子100は、上述のいずれのタイプでもよい。LEDチップ180は、支持基板190上に実装されており、発光素子100は、LEDチップと所定の間隔をあけて配置されている。発光素子100は、LEDチップから出射される励起光を受けて発光する。支持基板190上において、LEDチップ180および発光素子100は、封止部142に覆われている。

【0174】

封止部142は、高熱伝導性と透光性とを備えている。封止部142を形成する材料(「封止材料」ということがある)は、例えば、高熱伝導性のフィラーと樹脂材料とを含む複合材料である。高熱伝導性フィラーとしては、 Al_2O_3 、 ZnO 、 Y_2O_3 、グラフェンおよび AlN を例示することができる。また、樹脂材料としては、エポキシ樹脂およびシリコーン樹脂を例示することができる。特に、封止材料として、高熱伝導性フィラーのサイズがナノメートルサイズ(即ち、サブミクロンサイズ)を用いたナノコンポジット材料

を用いることができる。ナノコンポジット材料を用いると、光の拡散反射（または散乱）を抑制することができる。ナノコンポジット材料としては、フィラーとしてZnOまたはAl₂O₃を用い、樹脂として、エポキシ樹脂またはシリコン樹脂を用いたものを例示することができる。

【0175】

なお、発光素子100が、図43(a)に例示したように、表面に周期構造が露出しているタイプの場合には、周期構造の周りの媒質の屈折率は、周期構造の屈折率よりも低いことが望ましい。すなわち、封止部142の屈折率は、周期構造が透光層によって形成されている場合は、透光層の屈折率よりも低く、周期構造がフォトルミネッセンス層と同じ材料で形成されている場合は、フォトルミネッセンス層の屈折率よりも低いことが望ましい。

【0176】

封止部142は、図43(b)に示すように、発光素子100の表面近傍（例えば、周期構造を有する透光層またはフォトルミネッセンス層）を露出するように設けてもよい。このとき、封止部142の屈折率は特に制限されない。

【0177】

また、図43(c)に示すように、発光素子100として、周期構造が低屈折率層107（図42(c)参照）で覆われているタイプのものを用いる場合にも、封止部142の屈折率は、周期構造の屈折率よりも高くてもよい。このような構成を採用することによって、封止部142の材料の選択範囲が広がる。

【0178】

また、図43(d)に示すように、発光素子100の周辺を高熱伝導性を有するホルダー152に固定してもよい。ホルダー152は、例えば、金属で形成され得る。例えば、光源として、レーザーダイオード182を用いる場合のように、発光素子100と光源との間に封止材料を充填できない場合に、上記の構造を好適に用いられ得る。例えば、図42(a)～(d)に例示した構成を有する発光素子100は、透明高熱伝導層105または高い熱伝導率を有する低屈折率層107を有するので、素子の面内の熱伝導性が高いので、効果的にホルダー152を介して放熱することができる。

【0179】

図44(a)～(d)に示すように、発光素子100の表面に、高熱伝導部材144又は146を配置してもよい。高熱伝導部材144又は146は、例えば、金属で形成される。

【0180】

例えば、図44(a)に断面図を示し、図44(b)に平面図を示すように、発光素子100の周期構造120の一部を覆うように高熱伝導部材144を配置してもよい。図44(a)および(b)には、1次元周期構造を形成する複数の凸部の1つだけを覆う線状の高熱伝導部材144を示しているが、これに限られない。

【0181】

また、図44(c)に断面図を示し、図44(d)に平面図を示すように、発光素子100の周期構造120の両端の凸部およびフォトルミネッセンス層110の端面を覆うように、高熱伝導部材146を形成してもよい。いずれの場合も、周期構造およびフォトルミネッセンス層の、高熱伝導部材146に覆われる部分の面積が大きくなると、発光素子100の特性に影響する恐れがあるので、発光素子100の表面に形成する高熱伝導部材146の面積は小さい方がよい。

【0182】

また、図45(a)に断面図を示し、図45(b)に平面図を示すように、異なる構成を有する複数の発光素子100r、100gおよび100bをタイリングする場合、隣接する発光素子の間に、それぞれの発光素子の端部を覆うように、高熱伝導部材148を配置してもよい。例えば、ここで例示するように、赤色光を増強する発光素子100r、緑色光を増強する100gおよび青色光を増強する100bを配列する場合、例えば、金属

で形成された高熱伝導部材 148 を隣接する発光素子間に配置すると、高熱伝導部材 148 は遮光性を有しているため、混色を抑制することができる。このように、高熱伝導部材 148 を表示パネルにおけるブラックマトリクスのように使用することもできる。

【0183】

図 46 に、インターロック回路 185 を備える発光装置の例を示す。図 46 (a) は発光素子 100 の裏面を示す模式図であり、図 46 (b) は発光素子 100 の断面図を含む、発光装置の模式図である。図 46 (a) および (b) に示すように、発光素子 100 が有する基板 140 の裏面に、環状配線 172 が形成されている。環状配線 172 は、発光素子 100 の裏面の外周近傍に形成されており、基板 140 が破損したら、断線するように形成されている。環状配線 172 は、例えば金属材料で形成されている。環状配線 172 の 2 つの端部は、インターロック回路 185 のリレー回路に電氣的に接続されている。環状配線 172 に断線が発生した場合、リレー回路は、光源 182 への電力の供給を遮断する。光源 182 が、特に、レーザーダイオードのように強度の強い光を発する場合には、安全性等の観点から、インターロック回路 185 を設けることが望ましい。

【0184】

上述の実施形態の発光素子が有するサブミクロン構造は、例えば周期構造であり、フォトリソグラフィ技術やナノプリント技術を用いて形成され得る。図 47 (a) ~ (f) を参照して、サブミクロン構造の他の形成方法を説明する。

【0185】

図 47 (a) に示すように、基板 140 に支持されたフォトルミネッセンス層 110 の表面にビーズ 122 を配置する。ビーズ 122 の一部をフォトルミネッセンス層 110 に均等に埋め込むことで、ビーズ 122 をフォトルミネッセンス層 110 に固定することができる。このように、多数のビーズ 122 のそれぞれの一部分がフォトルミネッセンス層 110 に均等に埋め込まれて、残りの部分がフォトルミネッセンス層 110 から突き出ている場合、ビーズ 122 の屈折率は、フォトルミネッセンス層 110 の屈折率と等しくてもよいし、小さくてもよい。例えば、ビーズ 122 の屈折率がフォトルミネッセンス層 110 の屈折率よりも小さい場合、多数のビーズ 122 によって形成される層（フォトルミネッセンス層 110 から突き出た部分と埋め込まれた部分の両方）が、サブミクロン構造を有する透光層 120 として機能する。また、ビーズ 122 の屈折率がフォトルミネッセンス層 110 の屈折率と等しい場合、ビーズ 122 とフォトルミネッセンス層 110 とは実質的に一体となり、フォトルミネッセンス層 110 から突き出た部分が、サブミクロン構造を有する透光層 120 として機能する。

【0186】

あるいは、図 47 (b) に示すように、基板 140 上に、多数のビーズ 122 を配置した上に、フォトルミネッセンス層 110 を形成してもよい。このとき、ビーズ 122 の屈折率は、フォトルミネッセンス層 110 の屈折率よりも低いことが望ましい。

【0187】

ここで、ビーズ 122 の直径は例えば上述の D_{int} と等しいかそれよりも小さい。ビーズ 122 が緻密に充填された場合には、ビーズ 122 の直径が D_{int} とほぼ一致する。隣接するビーズ 122 の間に間隙が形成される場合、ビーズ 122 の直径に間隙を加えた長さが D_{int} に対応することになる。

【0188】

また、ビーズ 122 としては、中空のビーズであっても、中実のビーズであってもよい。

【0189】

図 47 (c) ~ (f) は、種々のビーズの充填状態を模式的に示す図と、それぞれ充填状態のビーズから得られる光散乱のパターンを示す図である。図 47 (c) ~ (f) において、黒い部分は中実ビーズまたは中空ビーズ内の中実部分を示し、白い部分は、中空ビーズまたは、中空ビーズ内の空隙部分を示している。

【0190】

図47(c)は、卵形の外形を有する中空ビーズが密に充填されている状態と、その光散乱のパターンを示している。この中空ビーズの空隙部分は、ほぼ球形で、卵の底の位置に形成されている。図47(d)は、ほぼ球形の外形を有する中空ビーズが密に充填されている状態と、その光散乱のパターンを示している。この中空ビーズの空隙部分は、ほぼ球形で、外形の球に接するように形成されている。図47(e)は、ほぼ球形の外形を有する中空ビーズが密に充填されている状態と、その光散乱のパターンを示している。この中空ビーズの空隙部分は、2つのほぼ球形の空隙を含んでおり、2つの球形の空隙は、外形の球の直径にそって配列されている。図47(f)は、ほぼ球形の外形を有する中空ビーズとほぼ球形の外形を有する中実ビーズとが密に充填されている状態と、その光散乱のパターンを示している。中空ビーズおよび中実ビーズはほぼ同じ直径を有しており、ほぼ同じ体積比率で混合されている。また、中空ビーズおよび中実ビーズの配置に規則性はなく、ほぼランダムである。

【0191】

中空ビーズや中実ビーズは、種々のガラスまたは樹脂で形成されたものが市販されている。ここで例示したビーズは、例えば、研磨材料として広く市販されているアルミナの粉体や日鉄鉱業株式会社の中空シリカなどを用い、得られたビーズに分散剤を添加し、溶媒（例えば水やアルコール類など）に分散し、この分散液を基板140上またはフォトルミネッセンス層110上に付与し、乾燥することによって、多数のビーズが密に充填された層を形成することができる。

【0192】

[9. 応用例]

上述したように、本開示の発光素子およびそれを備える発光装置は、種々の利点を有しているので、種々の光学デバイスに適用することによって、有利な効果を奏し得る。以下に、応用例を挙げる。

【0193】

本開示の発光素子は、特定の方向に指向性の高い光を出射することができる。この高い指向性は、例えば、液晶表示装置の導光板を利用するエッジライト型のバックライトとして好適に用いられる。例えば、従来の指向性の低い光源を用いた場合には、光源から出射した光を反射板および/または拡散材により、導光板へ光を導入していた。特定方向の指向性の高い光源の場合、これらの光学部品を省略しても効率よく導光板へ光を導入することができる。

【0194】

また、種々の光学デバイスにおいて、光源からの光を所定の方向に効率よく導く必要があるため、そのために例えば、レンズ、プリズムまたは反射板が用いられている。例えば、プロジェクターにおいては、光源からの光を表示パネルに導くために、ライトガイドを用いる構成が知られている（例えば、特開2010-156929号公報）。本開示の発光素子を光源に用いることによって、ライトガイドを省略することができる。

【0195】

また、照明器具においても、等方的に発せられた光を所望の方向に導くために、レンズおよびまたは反射板を含む光学部品を用いているが、本開示の発光素子を用いることによって、これらを省略することが可能となる。あるいは、等方的な光に対する複雑な設計を、指向性の高い光に対する単純な設計に置き換えることができる。その結果、照明器具を小型化、あるいは、設計工程を簡略化することができる。

【0196】

本開示の発光素子は、特定の波長の光だけを增強することができる。したがって、必要とされる波長だけを出力する光源を容易に実現できる。また、フォトルミネッセンス層の材料を変えずに、周期構造を変更するだけで、出力される光の波長を変えることができる。さらに、周期構造に対する角度によって、異なる波長の光を出力させることもできる。このような波長選択性は、例えば、狭帯域イメージング(narrow band imaging: NBI、登録商標)という技術に好適に用いられる。また、可視光通信にも

好適に用いることができる。

【0197】

また、照明の分野では、彩光色照明および美光色照明という技術が開発されている。これらは、照明の対象の色を美しく見せるもので、彩光色照明は例えば野菜などの食品をよりおいしそうに見せる効果があり、美光色照明は、肌をより美しく見せる効果がある。これらは、いずれも光源のスペクトル（即ち、発光する光の波長の強度分布）を対象物に応じて制御することによって行われる。従来は、光学フィルタを用いて光源から出射された光を選択透過させることによって、照明に用いる光のスペクトルを制御していた。すなわち、不要な光を光学フィルタによって吸収させていたので、光の利用効率を低下させていた。これに対し、本開示の発光素子は、特定の波長の光を増強できるので、光学フィルタを必要とせず、その結果、光の利用効率を向上させることができる。

【0198】

本開示の発光素子は、偏光（直線偏光）を出射することができる。従来、直線偏光は、光源から出射された非偏光を構成する直交する2つの直線偏光の内の一方を偏光フィルタ（「偏光板」ともいわれる。）を用いて吸収させることによって作られていた。したがって、光の利用効率は50%以下であった。本開示の発光素子を偏光光源として用いれば、偏光フィルタを用いる必要がないので、光の利用効率を向上させることができる。偏光照明は、例えば、ショーウィンドウや展望レストランの窓ガラスなど、反射光を低減させたい場合に用いられる。また、皮膚表面の反射特性が偏光に依存することを利用した、洗面・化粧用の照明、さらには、内視鏡による病変部の観察を容易にするために用いられる。

【0199】

偏光光源は、液晶表示装置のバックライトとして好適に用いられる他、液晶プロジェクターの光源にも好適に用いられる。液晶プロジェクターの光源として用いる場合には、上述の波長選択性と組み合わせ、3原色の偏光を出射できる光源を構成することができる。例えば、赤色の直線偏光を出射する発光素子と、緑色の直線偏光を出射する発光素子と、青色の直線偏光を出射する発光素子とをつなぎあわせて円盤を形成し、この円盤に励起光を照射しながら、円盤を回転させることによって、時系列に赤、緑、青の三原色の偏光を出射する光源とすることができる。

【0200】

また、本開示の発光素子は、図48に模式的に示すように、透明表示装置のスクリーン100Sとして用いることができる。

【0201】

スクリーン100Sは、例えば、赤色光（R）を増強する発光素子と、緑色光（G）を増強する発光素子と、青色光（B）を増強する発光素子とで構成する画素がマトリクス状に配列されている。これらの発光素子は、励起光源180S1から対応する励起光（例えば紫外線）が照射されたときにだけ所定の色光を発光し、画像を表示することができる。各発光素子は、可視光を透過するので、観察者は、スクリーン100Sを介して、背景を観察することができる。スクリーン100Sに励起光が照射されないときは、透明な窓のように見える。励起光源180S1として、レーザーダイオードを用い画像データに合わせて、出力を変えながらスキャンさせることによって、高解像度の表示が可能となる。また、レーザー光はコヒーレント光であるので、周期構造と干渉させることによって、励起効率も高めることができる。また、紫外線などの好ましくない波長の光を励起光として用いる場合には、励起光源をスクリーン100Sの観察者と反対側に設置し、スクリーン100Sの観察者側に励起光をカットするフィルタを設けることによって、不要な光の漏洩を防止することができる。

【0202】

スクリーン100Sは、高い指向性を有し得るので、例えば、所定の方から観察する人だけが画像を観察できるように構成することができる。

【0203】

励起光源180S1に代えて、励起光源180S2を用いることができる。このとき、

スクリーン 100S の背面（即ち、観察者側とは反対側）に、導光シート S を配置し、導光シート S に励起光源 180S2 から励起光を照射する。導光シート S に入射した励起光は、導光シート S 内を伝播しながら、スクリーン 100S を裏面から照射する。この時、表示したい画像の部分に合わせて発光素子を配置すると、任意の画像をアクティブに表示することはできないが、励起光が照射されていない場合は、窓のように透明であり、励起光が照射された時にのみ画像あるいは図形や文字などが表示される表示機器を構成することができる。

【0204】

また、本開示の発光素子では、例えば図 8 および図 9 を参照して上述したように、周期構造の屈折率が変化すると、増強される光の波長が変化し、増強される光の出射方向も変化する。また、フォトルミネッセンス層の屈折率によっても、増強される光の波長および出射方向が変化する。したがって、発光素子の近傍の媒質の屈折率変化を容易に感度良く検知することができる。

【0205】

例えば、以下の様にして、本開示の発光素子を用いて、様々な物質を検出するセンサーを構成することができる。

【0206】

本開示の発光素子の周期構造に近接して、測定対象の物質（タンパク質や匂い分子、ウイルスなど）と選択的に結合する物質（酵素など）を配置しておく。測定対象の物質が結合すると、発光素子の近傍の媒質の屈折率が変化する。この屈折率の変化を、上述の増強される光の波長または出射方向の変化をとして検出することによって、様々な物質の存在を検知することができる。

【0207】

本開示の発光素子の応用例は上記に限られず、種々の光学デバイスに適用され得る。

【産業上の利用可能性】

【0208】

本開示の発光素子および発光装置は、照明器具、ディスプレイ、プロジェクターをはじめ、種々の光学デバイスに適用され得る。

【符号の説明】

【0209】

- 100、100a 発光素子
- 110 フォトルミネッセンス層（導波層）
- 120、120'、120a、120b、120c 透光層（周期構造、サブミクロン構造）
- 140 透明基板
- 150 保護層
- 180 光源
- 200 発光装置
- 300、300a、300b 発光装置
- 310 発光素子
- 320 回転機構
- 320a スライド機構
- 330 光学フィルタ
- 332 透光領域
- 334 遮光領域
- 340 光学系
- 350 光学シャッタ
- 400、400a 検知装置
- 410 検知器（ディテクター）
- 420 保持部材

- 4 5 0 被検知物（検体）
- 5 0 0 投影装置（プロジェクター）
- 5 1 0 ロッドインテグレータ
- 5 2 0 全反射プリズム
- 5 3 0 デジタルミラーデバイス
- 5 4 0 a、5 4 0 b、5 4 0 c 光学系
- 5 5 0 駆動回路
- 5 6 0 制御回路

【手続補正 2】

【補正対象書類名】特許請求の範囲

【補正対象項目名】全文

【補正方法】変更

【補正の内容】

【特許請求の範囲】

【請求項 1】

フォトルミネッセンス層と、
 前記フォトルミネッセンス層に近接して配置された透光層と、
 前記フォトルミネッセンス層および前記透光層の少なくとも一方に形成された少なくとも一つの周期構造と、を有し、
 前記周期構造は、複数の凸部および複数の凹部の少なくとも一方を含み、
 前記フォトルミネッセンス層が発する光は、空気中の波長が λ_a の第 1 の光を含み、
 隣接する凸部間または凹部間の距離を D_{int} とし、前記第 1 の光に対する前記フォトルミネッセンス層の屈折率を n_{wav-a} とすると、 $\lambda_a / n_{wav-a} < D_{int} < \lambda_a$ の関係が成り立ち、
 前記周期構造を介して前記フォトルミネッセンス層に垂直な方向に出射する光のスペクトルにおいて強度がピークとなる波長 A が、前記フォトルミネッセンス層に含まれるフォトルミネッセンス材料の発光スペクトルにおいて強度がピークとなる波長 B からずれている、
 発光素子。

【請求項 2】

前記波長 A が前記波長 B よりも大きい、請求項 1 に記載の発光素子。

【請求項 3】

前記フォトルミネッセンス層に含まれるフォトルミネッセンス材料の発光スペクトルの半値半幅を $HWHM$ とすると、前記波長 A は、前記波長 B から $HWHM$ 以上ずれている、請求項 1 に記載の発光素子。

【請求項 4】

前記フォトルミネッセンス層に含まれるフォトルミネッセンス材料の発光スペクトルにおいて、強度がピークの半分となる波長が 2 つ存在し、

前記 2 つの波長のうち、前記波長 B との差がより大きい波長 C と、前記波長 B との差を W とすると、前記波長 A は、前記波長 B から W 以上ずれている、請求項 1 に記載の発光素子。

【請求項 5】

前記波長 λ_a は、前記波長 A と一致する、請求項 1 に記載の発光素子。

【請求項 6】

透光層と、

前記透光層に形成された少なくとも一つの周期構造と、

前記周期構造に近接して配置されたフォトルミネッセンス層と、を有し、

前記周期構造は、複数の凸部および複数の凹部の少なくとも一方を含み、

前記フォトルミネッセンス層が発する光は、空気中の波長が λ_a の第 1 の光を含み、

前記第 1 の光に対する前記フォトルミネッセンス層の屈折率を n_{wav-a} とし、前記周期

構造の周期を p_a とすると、 $\lambda_a / n_{\text{wav-a}} < p_a < \lambda_a$ の関係が成り立ち、

前記周期構造を介して前記フォトルミネッセンス層に垂直な方向に出射する光のスペクトルにおいて強度がピークとなる波長 A が、前記フォトルミネッセンス層に含まれるフォトルミネッセンス材料の発光スペクトルにおいて強度がピークとなる波長 B からずれている、

発光素子。

【請求項 7】

フォトルミネッセンス層と、

前記フォトルミネッセンス層よりも高い屈折率を有する透光層と、

前記透光層に形成された少なくとも一つの周期構造と、を有し、

前記周期構造は、複数の凸部および複数の凹部の少なくとも一方を含み、

前記フォトルミネッセンス層が発する光は、空気中の波長が λ_a の第 1 の光を含み、

前記第 1 の光に対する前記フォトルミネッセンス層の屈折率を $n_{\text{wav-a}}$ とし、前記周期構造の周期を p_a とすると、 $\lambda_a / n_{\text{wav-a}} < p_a < \lambda_a$ の関係が成り立ち、

前記周期構造を介して前記フォトルミネッセンス層に垂直な方向に出射する光のスペクトルにおいて強度がピークとなる波長 A が、前記フォトルミネッセンス層に含まれるフォトルミネッセンス材料の発光スペクトルにおいて強度がピークとなる波長 B からずれている、

発光素子。

【請求項 8】

前記フォトルミネッセンス層と前記透光層とが互いに接している、請求項 1 に記載の発光素子。

【請求項 9】

フォトルミネッセンス層と、

前記フォトルミネッセンス層に形成された少なくとも一つの周期構造と、を有し、

前記周期構造は、複数の凸部および複数の凹部の少なくとも一方を含み、

前記フォトルミネッセンス層が発する光は、空気中の波長が λ_a の第 1 の光を含み、

前記第 1 の光に対する前記フォトルミネッセンス層の屈折率を $n_{\text{wav-a}}$ とし、前記周期構造の周期を p_a とすると、 $\lambda_a / n_{\text{wav-a}} < p_a < \lambda_a$ の関係が成り立ち、

前記周期構造を介して前記フォトルミネッセンス層に垂直な方向に出射する光のスペクトルにおいて強度がピークとなる波長 A が、前記フォトルミネッセンス層に含まれるフォトルミネッセンス材料の発光スペクトルにおいて強度がピークとなる波長 B からずれている、

発光素子。

【請求項 10】

請求項 1 から 9 のいずれかに記載の発光素子と、

前記発光素子から複数の方向にそれぞれ発せられた複数の光線の経路上にそれぞれ配置された複数の透光領域を有する光学シャッタであって、前記複数の透光領域の光透過率を個別に変化させる光学シャッタと、

を備える発光装置。

【請求項 11】

請求項 10 に記載の発光装置と、

前記光学シャッタから出射した光を集束させる光学系と、

を備える投影装置。

【請求項 12】

請求項 1 から 9 のいずれかに記載の発光素子と、

前記発光素子から発せられる光の経路上に配置され、前記発光素子から特定の方向に出射した光線を透過させる透光領域を有する光学フィルタと、

を備える発光装置。

【請求項 13】

前記光学フィルタは、前記透光領域を含む複数の透光領域を有し、

前記複数の透光領域は、前記発光素子から特定の複数の方向にそれぞれ出射した複数の光線を透過させる、

請求項 1 2 に記載の発光装置。

【請求項 1 4】

前記透光領域を、異なる波長の光線が透過するように、前記発光素子を回転させる機構をさらに備える、請求項 1 2 に記載の発光装置。

【請求項 1 5】

前記透光領域を、異なる波長の光線が透過するように、前記光学フィルタを前記光線と交差する方向に移動させる機構をさらに備える、請求項 1 2 に記載の発光装置。

【請求項 1 6】

請求項 1 から 9 のいずれかに記載の発光素子と、

前記発光素子から出射された光の経路上に配置され、被検知物を検知する検知器と、を備える検知装置。

【請求項 1 7】

前記発光素子から前記検知器までの光路上に前記被検知物を保持する保持部材をさらに備える、請求項 1 6 に記載の検知装置。

【請求項 1 8】

前記発光素子から発せられる光の経路上に配置され、前記発光素子から特定の方向に出射した光線を透過させる透光領域を有する光学フィルタをさらに備える、請求項 1 6 に記載の検知装置。

【請求項 1 9】

前記少なくとも 1 つの周期構造内部の周期は、前記フォトルミネッセンス層の電場振幅の最大値の周期と同じである請求項 1 に記載の発光素子。

【請求項 2 0】

前記少なくとも 1 つの周期構造内部の周期は、前記フォトルミネッセンス層の電場振幅の最大値の周期と同じである請求項 6 に記載の発光素子。

【請求項 2 1】

前記少なくとも 1 つの周期構造内部の周期は、前記フォトルミネッセンス層の電場振幅の最大値の周期と同じである請求項 7 に記載の発光素子。

【請求項 2 2】

前記少なくとも 1 つの周期構造内部の周期は、前記フォトルミネッセンス層の電場振幅の最大値の周期と同じである請求項 9 に記載の発光素子。

【請求項 2 3】

前記フォトルミネッセンス層は、当該フォトルミネッセンス層内に擬似導波モードを発生させる厚みを有する請求項 1 に記載の発光素子。

【請求項 2 4】

前記フォトルミネッセンス層は、当該フォトルミネッセンス層内に擬似導波モードを発生させる厚みを有する請求項 6 に記載の発光素子。

【請求項 2 5】

前記フォトルミネッセンス層は、当該フォトルミネッセンス層内に擬似導波モードを発生させる厚みを有する請求項 7 に記載の発光素子。

【請求項 2 6】

前記フォトルミネッセンス層は、当該フォトルミネッセンス層内に擬似導波モードを発生させる厚みを有する請求項 9 に記載の発光素子。

【手続補正 4】

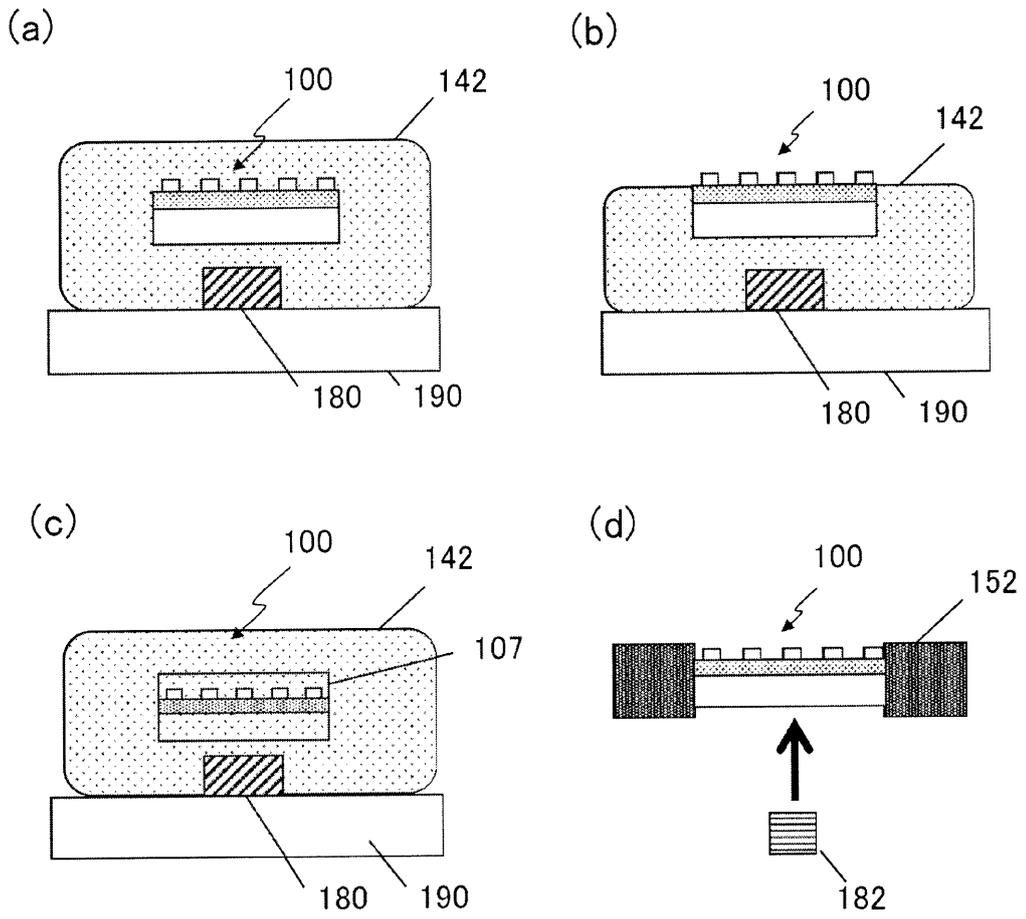
【補正対象書類名】図面

【補正対象項目名】図 4 3

【補正方法】変更

【補正の内容】

【 図 4 3 】



フロントページの続き

(51)Int.Cl.	F I			テーマコード(参考)
F 2 1 V 9/16 (2006.01)	F 2 1 V	9/16	1 0 0	
F 2 1 V 9/10 (2006.01)	F 2 1 V	9/10	3 0 0	
F 2 1 V 9/14 (2006.01)	F 2 1 V	9/14		
F 2 1 S 2/00 (2016.01)	F 2 1 S	2/00	3 1 1	
H 0 1 L 33/58 (2010.01)	H 0 1 L	33/00	4 3 0	
H 0 1 L 33/00 (2010.01)	H 0 1 L	33/00		L
F 2 1 Y 115/10 (2016.01)	F 2 1 Y	101:02		

(74)代理人 100184985

弁理士 田中 悠

(72)発明者 稲田 安寿

大阪府門真市大字門真 1 0 0 6 番地 パナソニック株式会社内

Fターム(参考) 2H148 AA18 AA25

2H149 AA21 AB23 BA04 BA24 FD48

2K203 FA04 FA25 FA32 FA45 GA02 GA26 HA54 HA57 MA04 MA32

3K243 AA01 CD05

5F142 AA01 AA14 AA42 AA62 AA75 BA32 CD01 CF12 CF25 CF33

CF42 CG04 CG05 CG32 CG42 DA01 DA02 DA13 DA15 DA23

DA32 DA35 DA61 DA72 DA73 DB32 DB38 DB40 DB42 DB54

DB60 FA24 FA28 GA01 GA14 GA21 HA01 HA03

【要約の続き】

【選択図】図 1 B