

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.
H01L 29/22 (2006.01)



[12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200680013748.9

[43] 公开日 2008年6月4日

[11] 公开号 CN 101194365A

[22] 申请日 2006.2.10

[21] 申请号 200680013748.9

[30] 优先权

[32] 2005.2.28 [33] US [31] 11/067,956

[86] 国际申请 PCT/US2006/004719 2006.2.10

[87] 国际公布 WO2006/093653 英 2006.9.8

[85] 进入国家阶段日期 2007.10.23

[71] 申请人 加利福尼亚大学董事会

地址 美国加利福尼亚州

[72] 发明人 奥雷利安·J·F·戴维

克洛德·C·A·魏斯布什

史蒂文·P·登巴尔斯

[74] 专利代理机构 北京律盟知识产权代理有限责任
公司

代理人 刘国伟

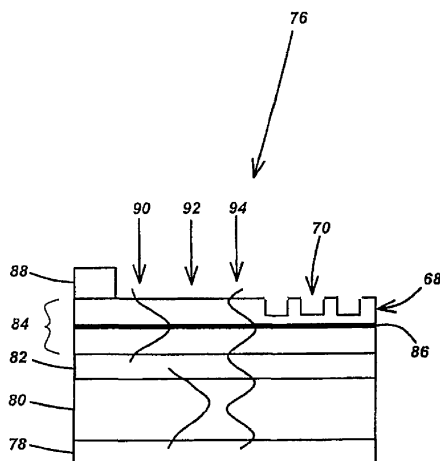
权利要求书 3 页 说明书 10 页 附图 13 页

[54] 发明名称

具有优化的光子晶体提取器的高效发光二极管(LED)

[57] 摘要

本发明揭示一种具有优化的光子晶体提取器(64)的高效且可能高度定向的发光二极管(LED)。所述LED由以下组成:衬底(28);生长在所述衬底上的缓冲层(30)(如果需要的话);包含发射物质的活性层(32);一个或一个以上光学限制层,其定制LED中所导引模式(40)的结构;和一个或一个以上衍射光栅,其中所述衍射光栅是二维光子晶体提取器。可去除所述衬底,且可在所述缓冲层、光子晶体和活性层上沉积金属层,其中所述金属层(42)可充当镜面、电触点和/或有效的衍射光栅。



1. 一种发光二极管 (LED), 其包括:
 - (a) 衬底;
 - (b) 活性层, 其形成在所述衬底上, 其中所述活性层包含一个或一个以上发光物质;
 - (c) 一个或一个以上光学限制层, 其形成在所述活性层下方或周围, 其中所述光学限制层定制所述 LED 内的导引模式的结构; 以及
 - (d) 一个或一个以上衍射光栅, 其形成在所述光学限制层上, 其中所述衍射光栅是从所述 LED 提取光的二维光子晶体。
2. 根据权利要求 1 所述的 LED, 其进一步包括形成在所述衬底上的缓冲层, 其中所述活性层形成在所述缓冲层上。
3. 根据权利要求 1 所述的 LED, 其中所述衍射光栅将发射引导到所述 LED 外部, 且将导引模式转换为提取的光。
4. 根据权利要求 1 所述的 LED, 其进一步包括沉积在所述 LED 的一侧或两侧上的一个或一个以上层, 其中所述层充当镜面、电触点和/或衍射光栅。
5. 根据权利要求 1 所述的 LED, 其中所述光学限制层增强由所述光子晶体进行的光提取。
6. 根据权利要求 5 所述的 LED, 其中所述光学限制层有助于激发局限于所述光学限制层上方的那些模式。
7. 根据权利要求 1 所述的 LED, 其中光主要被发射成与所述光子晶体交互的模式, 使得通常被损耗的导引模式被衍射到所述 LED 外部。
8. 根据权利要求 1 所述的 LED, 其中所述光子晶体交叉所述活性层中的所述发光物质。
9. 根据权利要求 1 所述的 LED, 其中所述光子晶体距所述活性层中的所述发光物质的距离在一个或数个光学长度内。
10. 根据权利要求 1 所述的 LED, 其中所述 LED 保留平坦的单层结构。
11. 根据权利要求 1 所述的 LED, 其中所述光子晶体包含由可变孔排组成的锥形。
12. 根据权利要求 11 所述的 LED, 其中所述锥形包括一个或一个以上周期的经修改的孔, 且所述经修改的孔具有可变的孔深、可变的孔周期或可变的孔直径。
13. 根据权利要求 1 所述的 LED, 其中所述光子晶体的特征沿着其结构发生变化, 以便修改所述光子晶体的特性。

14. 根据权利要求 1 所述的 LED，其中光产生区与所述光子晶体重合或重叠，使得被导引的光不在光子晶体区的界面处遭受反射或散射。
15. 根据权利要求 1 所述的 LED，其中精细地调节所述发光物质的位置，以便精确地控制其发射特性。
16. 根据权利要求 1 所述的 LED，其中通过合适地定制导引模式结构，由所述光子晶体进行的光衍射发生在给定方向范围内，进而形成高度定向的光源。
17. 一种制造发光二极管（LED）的方法，其包括：
 - (a) 在衬底上形成活性层，其中所述活性层包含一个或一个以上发光物质；
 - (b) 在所述活性层下方或周围形成一个或一个以上光学限制层，其中所述光学限制层定制所述 LED 内的导引模式的结构；以及
 - (c) 在所述光学限制层上形成一个或一个以上衍射光栅，其中所述衍射光栅是从所述 LED 提取光的二维光子晶体。
18. 根据权利要求 17 所述的方法，其进一步包括在所述衬底上形成缓冲层，其中所述活性层形成在所述缓冲层上。
19. 根据权利要求 17 所述的方法，其中所述衍射光栅将发射引导到所述 LED 外部，且将导引模式转换为提取的光。
20. 根据权利要求 17 所述的方法，其进一步包括在所述 LED 的一侧或两侧上沉积一个或一个以上层，其中所述层充当镜面、电触点和/或衍射光栅。
21. 根据权利要求 17 所述的方法，其中所述光学限制层增强由所述光子晶体进行的光提取。
22. 根据权利要求 21 所述的方法，其中所述光学限制层有助于激发局限于所述光学限制层上方的那些模式。
23. 根据权利要求 17 所述的方法，其中主要将光发射成与所述光子晶体交互的模式，使得通常被损耗的导引模式被衍射到所述 LED 外部。
24. 根据权利要求 17 所述的方法，其中所述光子晶体交叉所述活性层中的所述发光物质。
25. 根据权利要求 17 所述的方法，其中所述光子晶体距所述活性层中的所述发光物质的距离在一个或数个光学长度内。
26. 根据权利要求 17 所述的方法，其中所述 LED 保留平坦的单层结构。
27. 根据权利要求 17 所述的方法，其中所述光子晶体包含由可变的孔排组成的锥形。

-
28. 根据权利要求 27 所述的方法，其中所述锥形包括一个或一个以上周期的经修改的孔，且所述经修改的孔具有可变的孔深、可变的孔周期或可变的孔直径。
 29. 根据权利要求 17 所述的方法，其中所述光子晶体的特征沿着其结构发生变化，以便修改所述光子晶体的特性。
 30. 根据权利要求 17 所述的方法，其中光产生区与所述光子晶体重合或重叠，使得被引导的光不在光子晶体区的界面处遭受反射或散射。
 31. 根据权利要求 17 所述的方法，其中精细地调节所述发光物质的位置，以便精确地控制其发射特性。
 32. 根据权利要求 17 所述的方法，其中通过合适地定制导引模式结构，由所述光子晶体进行的光衍射发生在给定方向范围内，进而形成高度定向的光源。
 33. 一种根据权利要求 17 所述的方法制成的装置。

具有优化的光子晶体提取器的高效发光二极管（LED）

相关申请案的交叉参考

本申请案涉及以下共同待决和共同转让的申请案：

Claude C.A. Weisbuch、Aurelien J.F. David、James S. Speck 和 Steven P. DenBaars 在 2005 年 2 月 28 日提交的美国实用新型序列号 11/067,910，题为“SINGLE OR MULTI-COLOR HIGH EFFICIENCY LIGHT EMITTING DIODE (LED) BY GROWTH OVER A PATTERNED SUBSTRATE”，代理人案号为 30794.122-US-01 (2004-145-1)；

Claude C.A. Weisbuch、Aurelien J.F. David、James S. Speck 和 Steven P. DenBaars 在 2005 年 2 月 28 日提交的美国实用新型序列号 11/067,957，题为“HORIZONTAL EMITTING, VERTICAL EMITTING, BEAM SHAPED, DISTRIBUTED FEEDBACK (DFB) LASERS BY GROWTH OVER A PATTERNED SUBSTRATE”，代理人案号为 30794.121-US-01 (2005-144-1)；以及

Carole Schwach、Claude C.A. Weisbuch、Steven P. DenBaars、Henri Benisty 和 Shuji Nakamura 在 2004 年 9 月 10 日提交的美国实用新型序列号 10/938,704，题为“WHITE, SINGLE OR MULTI-COLOR LIGHT EMITTING DIODES BY RECYCLING GUIDED MODES”，代理人案号为 30794.115-US-01 (2004-064-1)；

所述申请案以引用的方式并入本文。

关于所发起的研究和开发的申明

在加利福尼亚大学、圣巴巴拉固态发光和显示中心的成员公司的支持下完成本发明，所述成员公司包含 Stanley Electric Co., Ltd., Mitsubishi Chemical Corp., Rohm Co., Ltd., Cree, Inc., Matsushita Electric Works, Matsushita Electric Industrial Co., and Seoul Semiconductor Co., Ltd。

技术领域

本发明涉及发光二极管（LED），且更明确地说，涉及具有优化的光子晶体提取器的高效 LED。

背景技术

发光二极管（LED）是一种当在正向方向上被电偏置时以受激方式发光的半导体装置。这种效应是电致发光的一种形式。

LED 包含由浸渍或掺杂有杂质以形成称为 pn 结的结构半导体材料制成的芯片。当被正向偏置时，电子从 n 型区被注入到所述结中，且从 p 型区注入空穴。当电子和空穴复合时，其以光子形式释放能量。光的波长（且因而其色彩）取决于形成 pn 结的材料带隙能。

随着半导体材料的改进，半导体装置的效率也得以改进，且已使用新的波长范围。基于氮化镓（GaN）的发光器对于多种应用来说可能是最有前途的。举例来说，当 GaN 与不同浓度的铟（In）熔合时，其提供在紫外线到棕黄光谱中的高效照明。

遗憾的是，归因于半导体与空气界面处的全内反射，半导体 LED 材料内发射的大多数光被损耗。典型的半导体材料具有较高的折射率，且因此，根据斯涅耳定律，大多数光将被截留于材料中，进而降低了效率。通过为 LED 选择合适的几何形状，可实现较高的提取效率。

图 1 是同质发光材料 10 的横截面图，其说明材料 14 内发射的光的一部分 12 位于逃离锥体 16 内，且可逃离材料 10，而所发射光的大部分 18 被截留，且在材料 10 内发生反射。在这种情况下，发射的光 18 被称作导光模式或导引模式，因为光 18 被限定在装置 10 中，且在材料 10 内被横向引导。一种用于减少全内反射的影响的方法是通过装置表面的随机纹理化来形成光散射或重新分布，这导致在装置的半导体与空气界面处的多个可变角度的入射。由于非常高的内部效率和较低的内部损耗，已显示这种方法将发射效率提高了 9-30%，这允许在光逃离装置之前有许多通路。

图 2 是说明这样的原理的半导体 LED 20 的横截面图，其中 LED 20 的顶部表面 22 经纹理化，LED 20 的底部表面 24 包含反射器，空气的折射率 $n=1$ ，且 LED 20 的半导体材料的折射率 $n=3.5$ 。LED 20 的带纹理顶部表面 22 用于以几何光学方法来随机化光的轨道。

另一种降低截留的光的百分比的方法是使用谐振腔 LED（RCLED）或微腔 LED（MCLED）。与使用“传统”LED 的现有系统相比，MCLED 提供形成具有更高效率的固态发光系统的机会。由于在谐振腔内并入有增益介质，MCLED 发射出十分致密且定向的光束。这些装置的较高的提取效率和较大的亮度是这些技术优于常规 LED 的主要优点。

提取效率是指由特定系统产生的光子实际上离开所述系统而作为“有用”辐射的能力。然而，由于微腔结构还导致非常高效的发射进入导引模式和泄漏模式，所以这种较高的提取效率限于 40% 范围中的值。因此，如果可提取这些导引模式，那么将会是有用的。

如上文所提及，导引模式是由于结构层之间的折射率差异而在装置平面上引导的模式。泄漏模式是朝着空气或衬底而穿过层（例如，穿过 DBR）进行辐射。当泄漏模式的光在界面处经受多个全内反射，在装置内往返行进，直到其能量由于各种损耗机制（例如，金属镜面损耗、自由载流子吸收、被活性层再吸收，其通过再发射而再循环能量，尽管带有某些损耗，等等。）而耗散时，泄漏模式通常被损耗。

图 3 是半导体 LED 26 的横截面图，其说明辐射、导引和泄漏模式，其中 LED 26 包含衬底 28、缓冲层 30 和包含量子势阱（QW）34 的活性层 32。所发射光的一部分朝着空气被提取 36，并形成辐射模式 36，所发射光的一部分泄漏 38 穿过装置 26 的各种层进入衬底 28，并形成泄漏模式 38，且所发射光的一部分在活性层 32 中（或在活性层 32 和缓冲层 30 两者中）反射 40，并形成导引模式 40。

为获得高效 LED，有必要优化结构外部的引导模式发射 36，最小化泄漏模式发射（如果这些模式存在的话）38，且如果可能的话，再发射导引模式发射 40。本发明旨在以可易于制造的结构来实现这个目标。

图 4A-4B 和 5A-5B 说明氮化镓（GaN）材料系统中的结构（图 4A 和图 5A）和经由底部金属或分布式布拉格反射器（DBR）镜面，以及在顶部与空气的单一界面的微腔发射的模拟（图 4B 和图 5B）。图 4B 和图 5B 是以对数标度的半导体内的角度发射图，其中图 4B 展示图 4A 的结构的发射，且图 5B 展示图 5A 的结构的发射。对于图 4B 和图 5B 来说，图的左半部分展示横向磁性（TM）发射，且其右半部分展示横向电（TE）极化发射。仅假设了面内单色偶极。

在图 4A 中，所述结构包含金属镜面 42 和包含量子势阱 46 的活性层 44，其中所述结构是 $3\lambda/4$ 的腔，量子势阱 46 被放置在金属镜面 42 的 $\lambda/4$ (48) 处。在图 4B 中，箭头 50 展示朝着空气的发射，而箭头 52 展示朝着衬底的发射。同样在图 4B 中，大括弧 36 指示被提取的光，且大括弧 40 指示导引模式。

在图 5A 中，结构包含缓冲器 54、7 个周期的 DBR 镜面 56 和包含量子势阱 60 的活性层 58，其中所述结构是 λ 腔，量子势阱 60 被放置在 7 个周期 DBR 镜面 56 的 $\lambda/2$ (62) 处。在图 5B 中，箭头 64 展示朝着空气的发射，而箭头 66 展示朝着衬底的发射。同样在图 5B 中，大括弧 36 指示被提取的光，大括弧 38 指示泄漏模式，且大括弧 40 指示导引模式。

这些结构的提取效率分别在图 4A 中是 31% 和 24%（在空气中）及在图 5A 中是 44% 和 27%（在环氧树脂中）。

当试图获得 LED 的较大的微腔提取改进时，在大多数系统中会遇到困难。图 4B 和图 5B 展示从中提取优化的 GaN 微腔 LED 的预期效率的发射图，且说明以下问题：

(i) 外延生长的材料的折射率对比非常有限，对于非常重要的氮化物材料尤其如此。这是为什么在图 5A 的 DBR 镜面 56 结构中看到进入许多泄漏模式的发射的缘故，这使得图 5A 的 DBR 镜面 56 结构比图 4A 的金属镜面 42 低效。

(ii) 所显示的效率仅因为考虑到非常薄的结构才是可能的，从而导致低阶腔（如下文参考 10 所描述）。难以获得这样薄的活性层。举例来说，常常有必要在生长良好品质的用于活性层的材料之前在衬底上生长较厚（数微米）的氮化物缓冲层。虽然从衬底剥离氮化物材料（缓冲层和活性层）已经是精密的操作，除此之外，还极难以获得导致图 4A 中所示的薄金属镜面结构的优良性能的由良好的金属镜面定界的较薄的层（即，进一步去除缓冲层的一部分或全部）。

因此，所属领域中需要一种提供增加的光提取效率的改进的 LED 结构。另外，所属领域中需要一种优化结构外部的引导发射，最小化泄漏模式发射，并再发射导引模式发射的改进的 LED 结构。此外，需要在保留平坦结构的同时提供此类改进的 LED，以便使此类结构易于制造。本发明满足这些需要，且尤其针对支持许多导引模式的 LED 的情况（例如，厚度不易于制造得足够薄以使 LED 仅支持一种或少数几种模式的 LED）。最终，本发明可增强光发射的定向性，这对于某些应用来说（例如，LCD 显示器）是非常需要的性质。

发明内容

本发明揭示一种具有优化的光子晶体提取器的高效且可能为高度定向的发光二极管（LED）。所述 LED 包含：衬底；生长在所述衬底上的缓冲层（如果此类层是必要的话）；一个或一个以上光学限制层；包含发射物质的活性层；和一个或一个以上衍射光栅，其中所述衍射光栅是二维光子晶体提取器。可去除所述衬底，且可在所述缓冲层和活性层上沉积金属层，其中所述金属层可充当镜面、电触点和/或衍射光栅。

附图说明

现在参看图式；在所有图式中，相同的参考标号表示相应的部分：

图 1 是半导体发光二极管（LED）的横截面图；

图 2 是半导体发光二极管（LED）的横截面图；

图 3 是半导体发光二极管（LED）的横截面图；

图 4A-4B 和 5A-5B 说明氮化镓（GaN）材料系统中的结构（图 4A 和图 5A）和经由

底部金属或分布式布拉格反射器（DBR）镜面，以及顶部为空气的单一界面的微腔发射的模拟（图 4B 和图 5B）；

图 6 和图 7 分别是根据本发明的优选实施例的光子晶体提取器的俯视图和横截面侧视图；

图 8 是根据本发明的优选实施例的说明具有光学限制层和光子晶体区外的电流注射的结构横截面侧视图，并说明各种支持的导引模式的性质；

图 9 是根据本发明的优选实施例说明具有光学限制层和光子晶体区内的电流注射的结构横截面侧视图；

图 10 根据本发明的优选实施例说明可用作光子晶体中的图案的各种几何形状；

图 11 是根据本发明的优选实施例由一个或一个以上周期的经修改孔组成的锥形效应的横截面侧视图；

图 12 展现角度分解的光致发光实验，其说明光子晶体提取器的波段结构；

图 13 展现与一模拟的比较，其展示光子晶体的某些波段未被提取；以及

图 14 是说明根据本发明的优选实施例执行的制造步骤的流程图。

具体实施方式

在优选实施例的以下描述中，参考形成其一部分的附图，且其中以说明的方式展示其中可实践本发明的特定实施例。应了解，在不脱离本发明的范围的情况下，可利用其它实施例，且可作出结构上的改变。

概述

本发明描述在保留平坦结构的同时提供增加的光提取效率的新 LED 结构。所述新 LED 结构提供结构外的直接发射，且另外使用衍射光栅将导引的光转换为被提取的光。此光栅可放置在活性层的电流注射区的外部，或可将电流注射到光栅区中。此外，衍射光栅由孔阵列组成，所述孔可穿透到活性层的发射物质中，或仅位于 LED 的其它层中。所述衍射光栅是二维光子晶体提取器，且本发明提供对光子晶体提取器的先前实施方案的改进。

所述 LED 由以下组成：衬底；生长在所述衬底上的缓冲层（如果需要此类层的话）；包含发射物质的活性层；一个或一个以上光学限制层，其定制 LED 中的导引模式的结构；和一个或一个以上衍射光栅，其中所述衍射光栅是二维光子晶体提取器。可去除所述衬底，且可在所述 LED 的一侧或两侧（例如，在所述缓冲层、光子晶体和活性层上）沉积一个或一个以上额外层（例如，金属或 DBR），其中所述额外层可充当镜面、电触点和/

或衍射光栅。

为了有效地激发将由光子晶体提取的模式，可将一个或一个以上光限制层放置在活性层的周围。新 LED 结构的高效是由于导引的光仅（或大多数）被发射成将与光子晶体交互的导引模式，使得常被损耗的许多导引模式被衍射到装置外。在支持许多导引模式的 LED 的情况下，例如，基于氮化物材料的 LED（由于考虑到材料生长，所以其常必须为数微米厚），这尤其重要。新 LED 结构保留了平坦的单层结构，从而使得可易于以低成本制造。

在某些配置中，新 LED 结构还显示高度定向的光发射特性。

技术描述

图 6 和图 7 分别是光子晶体提取器 64 的俯视图和横截面侧视图，其说明此类提取器 64 的操作原理。光子晶体提取器 64 包含活性层或激发区 66，以及具有多个孔 70 的 2 维光子晶体 68。在此提取器 64 中，通过使用 2 维光子晶体 68 进行的衍射来执行导引模式 74 的光提取 72。

常遇到的问题是，为了获得良好的提取效率，有必要使用具有良好的光学限制的非常薄的活性层，使得激发区 66 中的发光物质（其通常为半导体量子势阱（但也可为其物质，例如量子点、聚合物、金属簇等））仅激发少数几种模式，且接着光主要被发射成与光子晶体 68 强烈交互的模式，所述模式与光子晶体具有良好的重叠，使得常被损耗的导引模式被衍射到 LED 外部。这在需要较厚的缓冲层来实现元件质量材料（例如，广泛用于蓝色、绿色和紫外线（UV）LED 中的氮化物材料）的生长的材料中尤其难以通过直接生长来实现。

在那种情况下，需要若干独创的措施来抗衡源于光学结构的多模式特性的提取性能降低。这些措施旨在确保优先发射会由光子晶体充分提取的那些模式的光。实际上，在多模式结构中，大量模式（其具有较大的有效指数）常很少与光子晶体有重叠，使得其被微弱地提取。

图 8 是说明结构 76 的横截面侧视图，所述结构 76 包含：衬底 78、缓冲层 80、光学限制层 82、包含发射物质 86 的活性层 84，和顶部金属触点 88，以及具有多个孔 70 的 2 维光子晶体 68。所述结构支持各种光学模式 90、92 和 94，其中模式 90 包含局限于活性层 84 区中的导引模式，模式 92 包括局限于缓冲层 80 区中的导引模式，且模式 94 包括位置不受限的导引模式。在此实施例中，使用光学限制层 82（例如，GaN 中的 AlGaN）可有助于：（1）仅激发主要局限于光学限制层 82 上方的那些模式（模式 90 和 94）；（2）

激发不完全局限于光学限制层 82 上方，但仍显著局限于光学限制层 82 上方的模式（模式 94）。这里，光学限制层 82 应具有小于形成 LED 的材料的材料的光学指数的光学指数。光学限制层 82 可包括同质材料或异质结构（例如，超晶格或甚至 DBR）。

在具有衬底 78 的结构中，仍在所述结构中在衬底 78 界面与光学限制层 82 之间导引某些其它模式，但仅应被微弱激发（例如模式 92），因为其与发射物质 86 的重叠较小。因此，所述模式载运所发射光的较小的部分，鉴于其由光子晶体 68 实现的提取效率差得多，这是一件好事。

通常，活性层 84 在发射物质 86 上方的部分自支持例如模式 90 的模式的波导的厚度可为一至数个光学长度（其中光学长度是活性层 84 的材料中的波长）（这意味着这些模式越过层 82 的穿隧较弱）。光子晶体 68 必须足够靠近发射物质 86（例如，光子晶体 68 交叉活性层 84 中的发光物质 86，或光子晶体 68 距活性层 84 中的发光物质 86 的距离在一个或数个光学长度之内），使得接收大多数所发射光的模式也被光子晶体 68 强烈提取。

依据孔 70 的图案和大小，且还依据对放置在结构 76 的顶部上或底部处的镜面层（金属或 DBR）的使用，发射可发生在装置的顶部或底部。相对于简单的介电光子晶体，在光子晶体 68 上沉积金属也可显著提高其衍射特性。

或者，被注射电流的活性层区 84 可与光子晶体 68 区重合或重叠，如图 9 中的结构 96 所示。这种情况提供以下优点：光产生区与光子晶体 68 重合或重叠，使得在适用于光子晶体 68 的模式中立即发射被导引的光，且不在光子晶体 68 区的界面处遭受反射或散射。

就光子晶体 68 中的穿孔来说，可使用各种几何形状。最简单的几何形状是正方形或矩形阵列，如图 10 中的 98 和 100 分别说明。更复杂的几何形状还导致更有效的光提取，例如阿基米德瓦面（Archimedean tilings），如图 10 中的 102 所说明。最终，甚至具有波长附近的特征性相关长度的随机图案也可用作有效的光散射器。光栅的一个有利轮廓是，其应衍射较大范围的入射方向（理想上是所有方向）上的光。对光子晶体晶格之选择可帮助实现这个目的。

在 LED 的注射电流的活性层 84 区未被光子晶体 68 穿透的情况下（如图 8 中所示），还需要设计光子晶体 68 提取器，以将激发区中发射的被导引的光最佳地耦合到提取光子晶体 68。应避免光反射，因为重新进入非穿孔区的光倾向于被再次吸收。因此，光子晶体 68 可包含由可变的孔排组成的锥形，所述孔排可放置在提取光子晶体 68 区的前方，以使过渡变得平顺。所述锥形可包括一个或一个以上周期的经修改的孔，其中所述经修

改的孔具有可变的孔深（如图 11 中所示），图 11 是通过孔 70 的深度在光子晶体提取器 68 的开始处的渐进增加、或通过可变的孔 70 周期，或通过可变的孔 70 直径（空气填充因数）所实现的对于导引模式 74 的锥形效应的横截面侧视图。

调节孔 70 的参数允许装置在需要时优先朝着结构的顶部或底部发射。另外，反射器可放置在装置的一个或一个以上侧上，使得装置不能从那侧发射光，且将发射的光重新引导朝向所需的方向。

本发明的可能的修改包含以下内容：

- 可在结构内（在与光学长度相比较小的长度尺度上）精细地调节发射物质的位置，以便精确地控制其发射特性，例如定向性、光谱谱线形状、以辐射或导引模式发射的光的部分，等等。
- 例如通过使用合适的材料层可实现关于电子注射的额外优化。本发明仅描述光学特性的增强，且不详细描述实现适当的电特性所需的设计。
- 光子晶体的特征可沿着结构发生变化，以便局部修改光子晶体的发射特性。举例来说，可按所需来定制波长和提取特性。
- 在可结构的顶部上添加额外的层，以便通过所述层中的荧光团进行的能量转换来实现多色彩或白光发射，如上文识别的交叉参考申请案中所述。
- 可添加若干光学限制层以便进一步定制 LED 中的导引模式的结构。这些层可具有小于或高于形成 LED 的主要材料的光学指数的光学指数。较小的指数可在 LED 中界定单独的光学区，如上文所说明，而较高的指数可修改发射物质的发射图案（如下文识别的参考 14 所述）

图 12 和图 13 中展示实验结果。图 12 展现角度分解的光致发光实验，其说明在支持许多导引模式的波导上形成的光子晶体提取器的波段结构。图 13 展现与模拟（例如，图 13 上的点）的比较，其展示光子晶体的某些波段未被提取（它们不会出现在测量中）。凭借本发明提出的结构，在这些波段中几乎不发射光。

如在图 12 和图 13 中由衍射线的宽度可看到，光子晶体的衍射对于给定模式和波长来说非常具有定向性。因此，如果发射物质的发射谱线形状足够窄，且通过合适地定制导引模式结构，那么由光子晶体进行的光衍射可发生在给定方向范围上，进而形成高度定向的光源。

最后，图 14 是说明根据本发明的优选实施例所执行的制造步骤的流程图。

方框 104 表示在衬底上形成缓冲层的步骤、

方框 106 表示在缓冲层上形成活性层的步骤，其中所述活性层包含一个或一个以上发光物质。

方框 108 表示在活性层下方或周围形成一个或一个以上光学限制层的步骤，其中所述光学限制层定制 LED 内的导引模式的结构。

方框 110 表示在光学限制层上形成一个或一个以上衍射光栅的步骤，其中每个衍射光栅是二维光子晶体，且所述衍射光栅将发射引导到 LED 外部，并将导引模式转换为提取的光。光学限制层增强光子晶体的光提取，且有助于激发局限于光学限制层上方的那些模式。

方框 112 表示去除衬底的（可选）步骤。

方框 114 表示在缓冲层和/或活性层上沉积金属层的（可选）步骤，其中所述金属层可充当镜面和/或电触点。

这些步骤的最终结果是具有优化的光子晶体提取器的高效 LED。所述 LED 保留平坦的单层结构。

参考

以下参考文献以引用的方式并入本文：

1. 2003 年 3 月 25 日颁予 Duggal 等人的题为 “White light illumination system with improved color output” 的美国专利第 6,538,371 号。
2. 2003 年 2 月 25 日颁予 Chin 的题为 “Stacked light-mixing LED” 的美国专利第 6,525,464 号。
3. 2003 年 1 月 7 日颁予 Heremans 等人的题为 “Method of manufacturing surface textured high-efficiency radiating devices and devices obtained therefrom” 的美国专利第 6,504,180 号。
4. 2000 年 12 月 19 日颁予 Chen 等人的题为 “White light-emitting diode and method of manufacturing the same” 的美国专利第 6,163,038 号。
5. 1998 年 7 月 14 日颁予 Krames 等人的题为 “Ordered interface texturing for a light emitting device” 的美国专利第 5,779,924 号。
6. 1994 年 11 月 8 日颁予 Hunt 等人的题为 “Single mirror light-emitting diodes with enhanced intensity” 的美国专利第 5,362,977 号。
7. 1993 年 7 月 6 日颁予 Cho 等人的题为 “Light emitting diode” 的美国专利第 5,226,053 号。

8. Shnitzer 等人的“30% External Quantum Efficiency From Surface Textured, Thin Film Light Emitting Diode”, Applied Physics Letters 63, 第 2174 页到第 2176 页, 1993。

9. M. Boroditsky、E. Yablonovitch 的“Light extraction efficiency from light-emitting diodes”, Proceedings of the SPIE - The International Society for Optical Engineering, SPIE-Int. Soc. Opt. Eng., 3002, 第 119 页到第 122 页, 1997。

10. H. Benisty、H.D. Neve 和 C. Weisbuch 的“Impact of planar micro-cavity effects on light extraction / Basic concepts and analytical trends”, IEEE J. Quantum Electron, 第 34 卷, 第 1612 页(1998)。

11. D. Delbeke、R. Bockstaele、P. Bienstman、R. Baets 和 H. Benisty 的“High-efficiency Semiconductor Resonant-Cavity Light-Emitting diodes: A review”, IEEE J. on selected topics in Quantum Electron, 第 8 卷, no. 2, 第 189 页, 2002。

12. M. Rattier、H. Benisty、E. Schwoob、C. Weisbuch、T. Krauss、C.J.M. Smith、R. Houdre 和 U. Oesterle 的“Omnidirectional and compact light extraction from Archimedean photonic lattices”, Appl. Phys. Lett. 83, 1283, 2003。

13. M. Rattier、H. Benisty、R. Stanley、J.F. Carlin、R. Houdre、U. Oesterle、C.J.M. Smith、C. Weisbuch 和 T. Krauss, IEEE Sel. Top. Quantum Electr. 8, 238, 2002。

14. W. Lukosz, J. Opt. Soc. Am. 71, 744, 1981。

总结

本文概括了本发明的优选实施例的描述。展现本发明的一个或一个以上实施例的前述描述以用于说明和描述目的。并未期望这是详尽的或将本发明限于所揭示的精确形式。依照前文教导, 许多修改和变化都是可以的。期望本发明的范围不是由此详细描述限制, 而是由所附权利要求书限制。

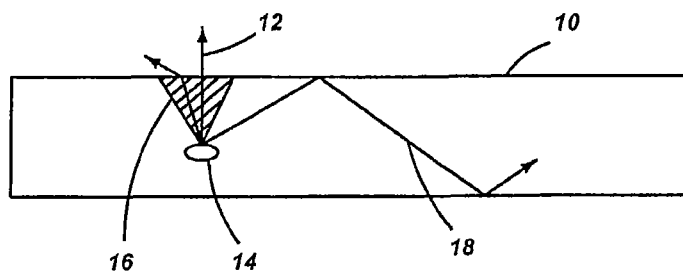


图1

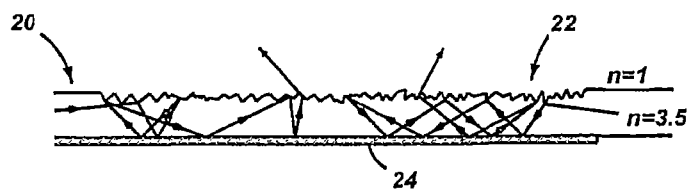


图2

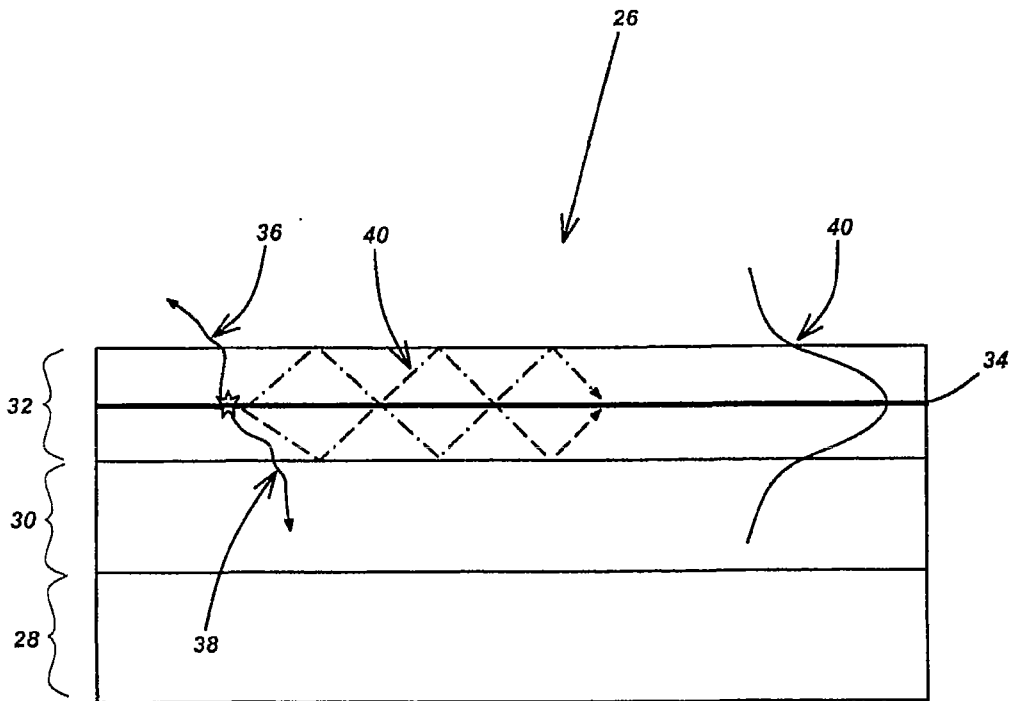


图3

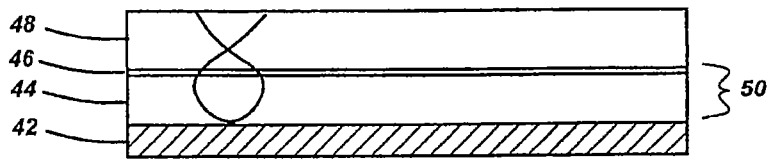


图4A

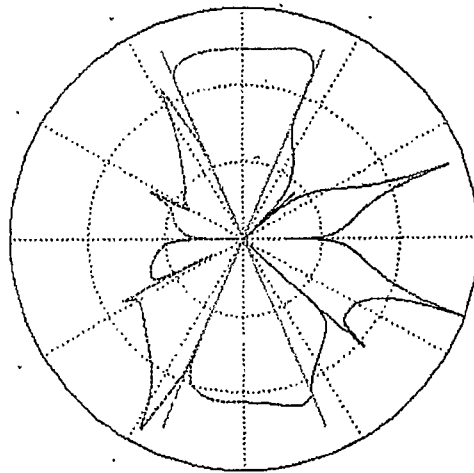


图4B

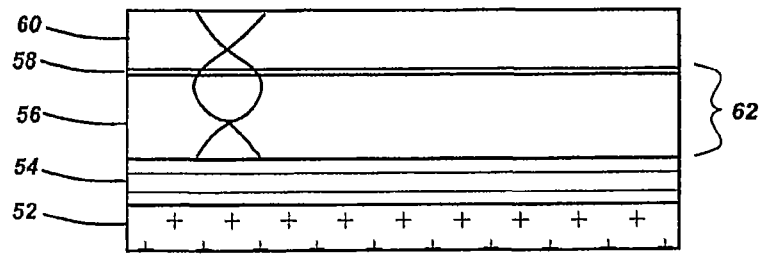


图5A

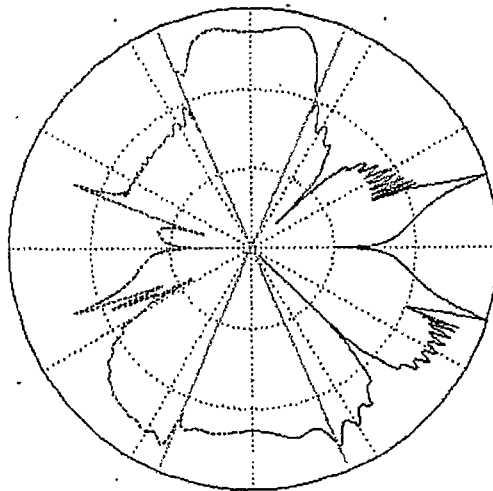


图5B

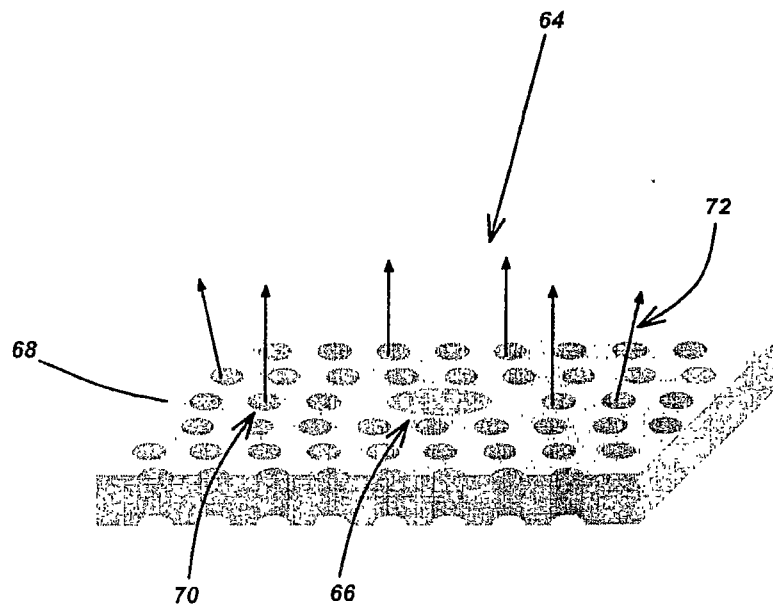


图6

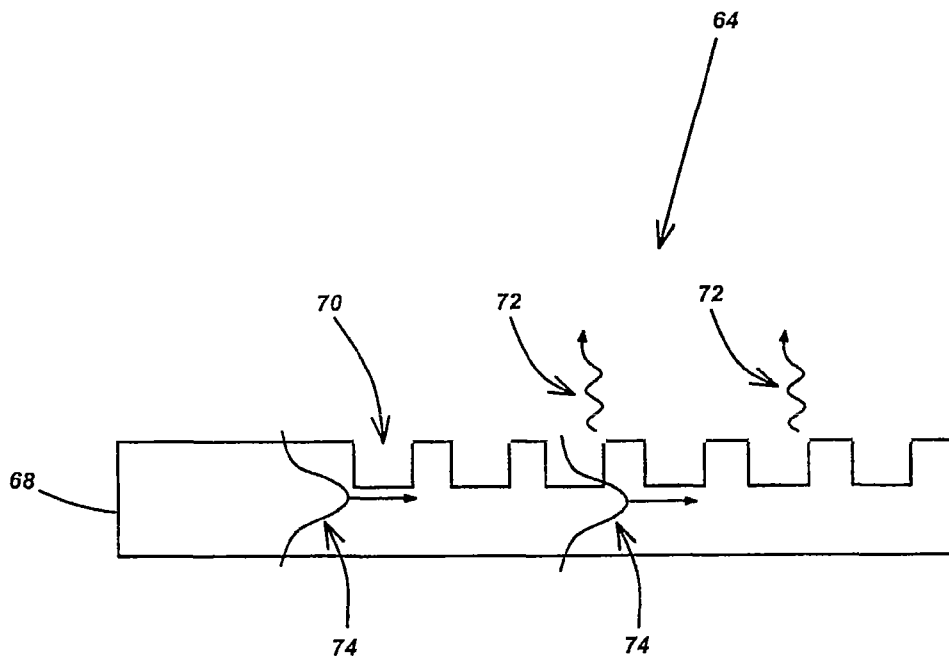


图7

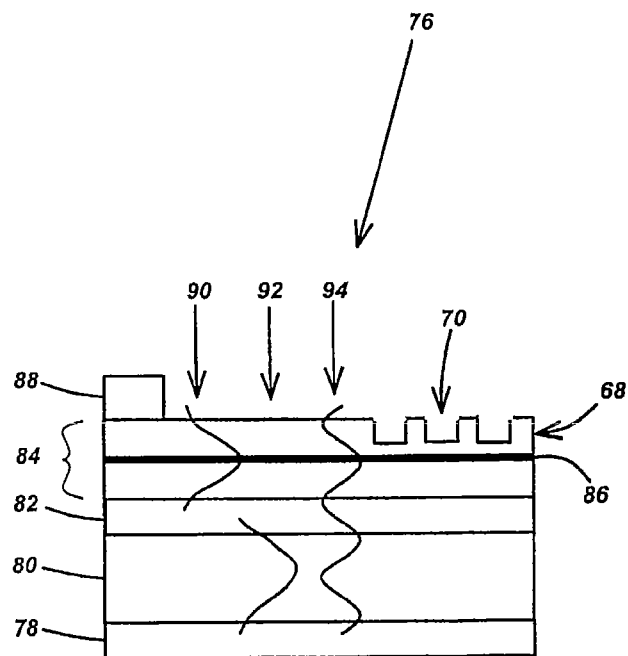


图8

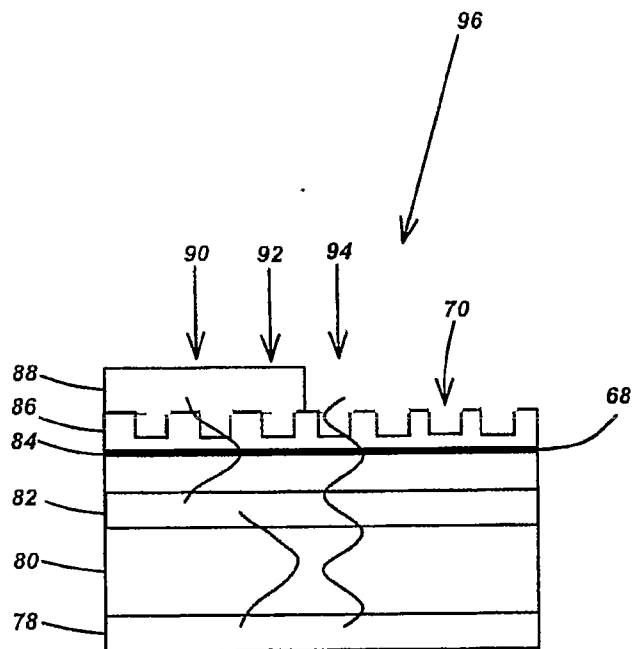


图9

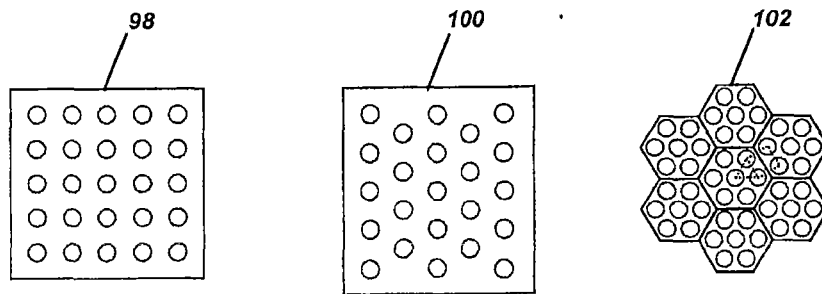


图10

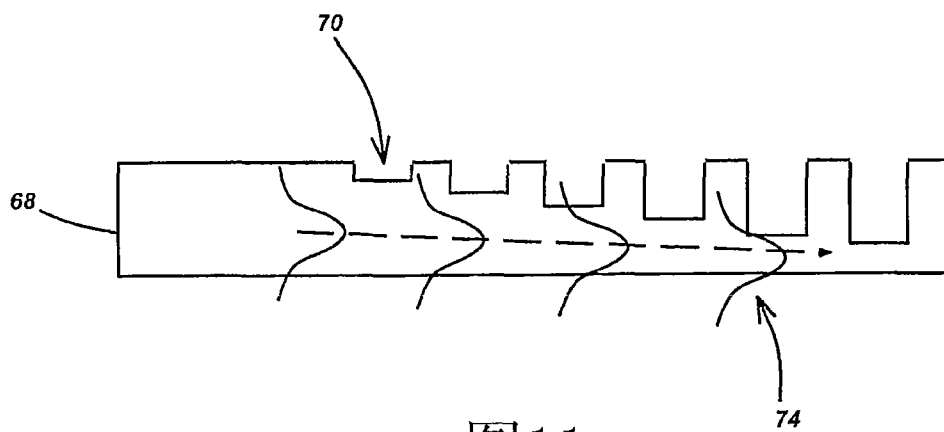


图11

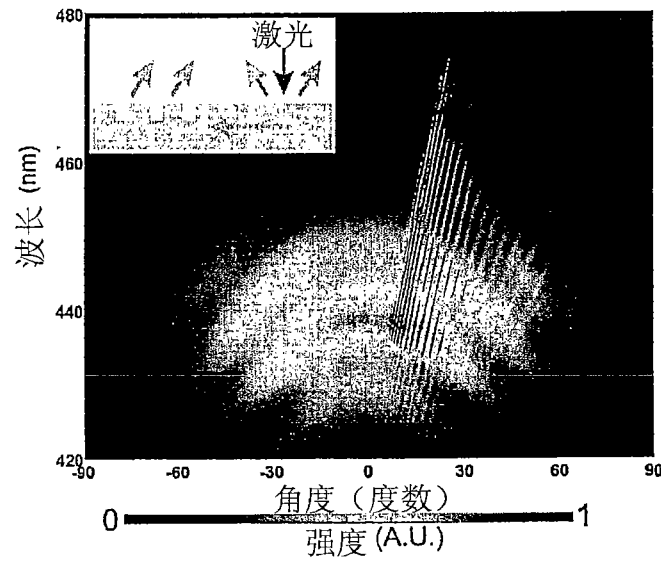


图12

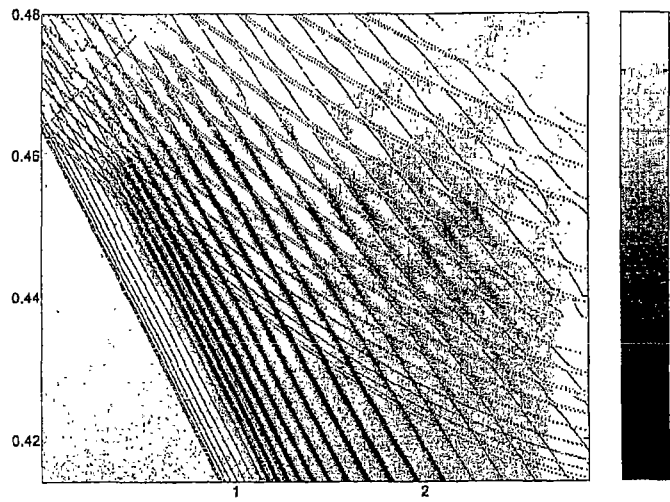


图13

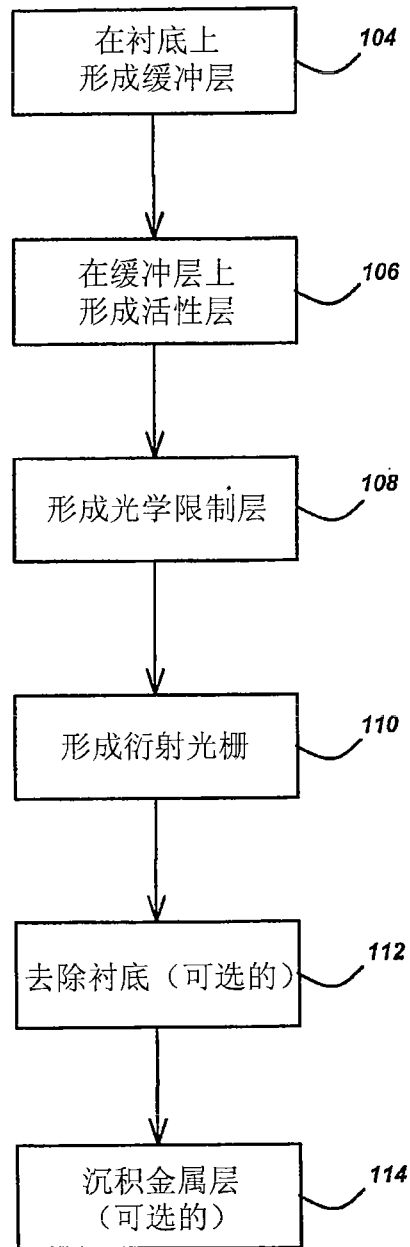


图14