



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 108292693 B

(45) 授权公告日 2021.10.22

(21) 申请号 201680072137.5

(72) 发明人 Y.C.M.叶 H.S.艾戈劳里 X.李

(22) 申请日 2016.10.07

J-C.陈 庄奇理

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 108292693 A

(74) 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司 72001

(43) 申请公布日 2018.07.17

代理人 毕铮 申屠伟进

(30) 优先权数据

62/239122 2015.10.08 US

(51) Int.Cl.

15/287384 2016.10.06 US

H01L 33/02 (2006.01)

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2018.06.08

H01L 33/06 (2006.01)

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/US2016/056157 2016.10.07

H01L 33/12 (2006.01)

(87) PCT国际申请的公布数据

W02017/062889 EN 2017.04.13

H01L 33/30 (2006.01)

(73) 专利权人 奥斯坦多科技公司

(56) 对比文件

地址 美国加利福尼亚州

US 2004161006 A1, 2004.08.19

US 2009250686 A1, 2009.10.08

审查员 刘佳秋

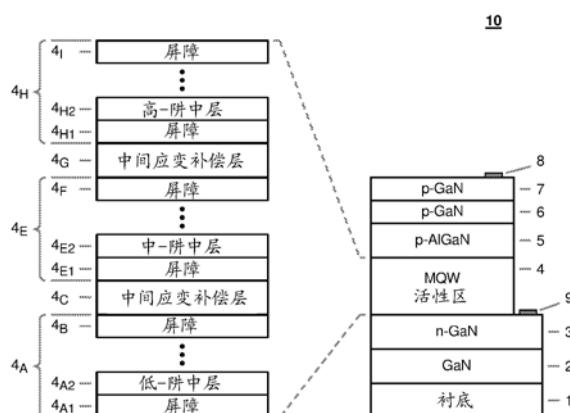
权利要求书3页 说明书7页 附图6页

(54) 发明名称

具有琥珀色到红色光发射(>600nm)的III族氮化物半导体光发射设备以及用于制作所述设备的方法

(57) 摘要

一种III族氮化物半导体光发射设备，其并入了n型III族氮化物覆层、含铟III族氮化物光发射区、以及p型III族氮化物覆层。光发射区被夹在n-和p-型III族氮化物覆层之间，并且包括多个多量子阱(MQW)集合。在n型覆层上形成的第一MQW集合包括相对较低的铟浓度。第二MQW集合包括相对中等的铟浓度。与p型覆层相邻的第三MQW集合并入了三个MQW集合中相对最高的铟浓度，并且能够发射琥珀色到红色光。前两个MQW集合被用作预应变层。在MQW集合之间，添加中间应变补偿层(ISCL)。前两个MQW集合和ISCL的组合防止相位分离并且增强第三MQW集合中的铟摄取。作为结果，第三MQW集合保持足够高的铟浓度以发射高输出功率的琥珀色到红色光，而没有任何相位分离相关联的问题。



1.一种III族氮化物半导体LED,包括:

被堆叠在衬底上的多个多量子阱集合,所述多个多量子阱集合包括第一、第二和顶部多量子阱集合,每个多量子阱集合包括一个或多个量子阱层;

第一多量子阱集合与衬底相邻并且具有低铟浓度;

在第一多量子阱集合上方的每个多量子阱集合具有逐渐增加的铟浓度;

顶部多量子阱集合具有被选择成发射在琥珀色到红色可见光谱区中的光的最高铟浓度;并且

相邻的多量子阱集合被 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0 < x \leq 1$) 中间应变补偿层分离,每个 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0 < x \leq 1$) 中间应变补偿层在相应 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0 < x \leq 1$) 中间应变补偿层上方和下方具有屏障层以降低顶部多量子阱集合中的总应变,

其中 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0 < x \leq 1$) 中间应变补偿层中的Al浓度是变化的,其中最靠近衬底的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0 < x \leq 1$) 中间应变补偿层具有比其它 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0 < x \leq 1$) 中间应变补偿层更高的Al浓度。

2.根据权利要求1所述的III族氮化物半导体LED,还包括:

在第一多量子阱集合下方的屏障层;

在顶部多量子阱集合上方的电子阻挡层;

在电子阻挡层上方的覆层;以及

在覆层上方的接触层。

3.根据权利要求1所述的III族氮化物半导体LED,其中第一、第二和顶部多量子阱集合生成预应变效应。

4.根据权利要求1所述的III族氮化物半导体LED,其中具有低铟浓度的第一多量子阱集合包括具有不大于17%的铟浓度的一个或多个多量子阱层。

5.根据权利要求1所述的III族氮化物半导体LED,其中在第一多量子阱集合和顶部多量子阱集合之间的多量子阱集合包括具有大于20%的铟浓度的一个或多个多量子阱层。

6.根据权利要求1所述的III族氮化物半导体LED,其中顶部多量子阱集合包括具有大于30%的铟浓度的一个或多个多量子阱层。

7.根据权利要求1所述的III族氮化物半导体LED,其中 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0 < x \leq 1$) 中间应变补偿层中至少一个中的Al浓度在该层内以分立梯级或以连续变化而变化。

8.根据权利要求1所述的III族氮化物半导体LED,其中在相应 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0 < x \leq 1$) 中间应变补偿层上方和下方的屏障层中的每一个由GaN组成,并且多量子阱集合的量子阱层中的每一个由InGaN组成。

9.一种形成III族氮化物半导体LED的方法,包括:

通过以下来在衬底上形成具有多个多量子阱层的集合的活性区:

在衬底上形成具有铟浓度的第一多量子阱层的集合;

在第一多量子阱层的集合上形成至少两个附加的多量子阱层的集合,在每个附加的多量子阱层的集合的形成之前在先前的多量子阱层的集合上形成 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0 < x \leq 1$) 中间应变补偿层,使得形成第一 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0 < x \leq 1$) 中间应变补偿层和第二 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0 < x \leq 1$) 中间应变补偿层;

至少两个附加的多量子阱层的集合具有比第一多量子阱层的集合更高的铟浓度,

最靠近衬底的第一 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0 < x \leq 1$) 中间应变补偿层包含比第二 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0 < x \leq 1$) 中间应变补偿层更高的Al浓度。

10. 根据权利要求9所述的方法,其中顶部多量子阱层的集合的铟浓度被选择用于发射在琥珀色到红色可见光谱区中的光。

11. 根据权利要求9所述的方法,其中多量子阱层的集合的数目至少是3,包括在第一多量子阱层的集合上形成的第二多量子阱层的集合以及在第二多量子阱层的集合上形成的第三多量子阱层的集合,其中所述第三多量子阱层的集合具有比所述第二多量子阱层的集合更高的铟浓度,所述方法还包括:

在每个 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0 < x \leq 1$) 中间应变补偿层上方和下方形成屏障层,并且其中屏障层中的每一个由GaN组成,并且多量子阱层中的每一个由InGaN组成;

第一多量子阱层的集合具有不大于17%的铟浓度,第二多量子阱层的集合具有大于20%的铟浓度,并且顶部多量子阱层的集合具有大于30%的铟浓度。

12. 一种多层III族氮化物半导体LED,包括:

第一、第二和第三多量子阱层的集合;

第一多量子阱层的集合具有第一铟浓度;

第二多量子阱层的集合具有大于第一铟浓度的第二铟浓度;

第三多量子阱层的集合具有大于第二铟浓度的第三铟浓度;

被布置在第一和第二多量子阱层的集合之间的由 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0 < x \leq 1$) 组成的第一中间应变补偿层;

被布置在第二和第三多量子阱层的集合之间的由 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0 < x \leq 1$) 组成的第二中间应变补偿层;

第一和第二中间应变补偿层各自被布置在两个屏障层之间;并且

第三多量子阱层的集合被配置成发射具有以范围从近似600nm到近似660nm的波长的峰值发射的光,

其中中间应变补偿层中至少一个中的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0 < x \leq 1$) 组成是变化的,并且第一中间应变补偿层包括比第二中间应变补偿层更高的Al浓度。

13. 根据权利要求12所述的多层III族氮化物半导体LED,其中第一铟浓度小于近似17%。

14. 根据权利要求12所述的多层III族氮化物半导体LED,其中第二铟浓度大于近似20%。

15. 根据权利要求12所述的多层III族氮化物半导体LED,其中第三铟浓度大于近似30%并且被选择成使得第三多量子阱层的集合发射在琥珀色到红色可见光谱区中的光。

16. 根据权利要求12所述的多层III族氮化物半导体LED,其中 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0 < x \leq 1$) 中间应变补偿层中至少一个中的Al浓度在该层内以分立梯级或以连续变化而变化。

17. 根据权利要求12所述的多层III族氮化物半导体LED,其中屏障层中的至少一个由GaN组成,并且其中多量子阱层的集合之一中的多量子阱层中的至少一个由InGaN组成。

18. 一种制造发射在琥珀色到红色可见光谱区中的光的III族氮化物半导体LED的方法,包括:

限定第一屏障层;

在第一屏障层上限定包括第一铟浓度的第一多量子阱层的集合；
在第一多量子阱层的集合上限定第二屏障层；
在第二屏障层上限定由 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0 < x \leq 1$) 组成的第一中间应变补偿层；
在第一中间应变补偿层上限定第三屏障层；
在第三屏障层上限定第二多量子阱层的集合，所述第二多量子阱层的集合包括大于第一铟浓度的第二铟浓度；
在第二多量子阱层的集合上限定第四屏障层；
在第四屏障层上限定由 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0 < x \leq 1$) 组成的第二中间应变补偿层；
在第二中间应变补偿层上限定第五屏障层；以及
限定第三多量子阱层的集合，其包括大于第二铟浓度的第三铟浓度，所述第三铟浓度被配置成发射具有以范围从近似600nm到近似660nm的波长的峰值发射的光，
其中第一中间应变补偿层包括比第二中间应变补偿层更高的Al浓度。
19. 根据权利要求18所述的方法，其中屏障层中的至少一个由GaN组成，并且其中多量子阱层的集合之一中的多量子阱层的至少一个由InGaN组成，并且其中第一多量子阱层的集合包括不大于近似17%的铟浓度，并且其中第二多量子阱层的集合包括大于近似20%的铟浓度，并且其中第三多量子阱层的集合包括大于近似30%的铟浓度。

具有琥珀色到红色光发射(>600nm)的III族氮化物半导体光发射设备以及用于制作所述设备的方法

[0001] 对相关申请的交叉引用

[0002] 本申请要求2015年10月8日提交的、申请号为62/239,122的美国临时专利申请以及2016年10月6日提交的、申请号为15/287,384的美国专利申请的权益。

[0003] 本发明的背景

[0004] 1. 技术领域

[0005] 本文中的发明一般地涉及一种在琥珀色到红色区中发射可见光的III族氮化物半导体光发射设备。公开了一种用于制造所述设备的方法。

[0006] 2. 现有技术

[0007] 现有技术的基于III族氮化物的蓝光发射结构、诸如光二极管(LED)和激光二极管(LD)(为了简明的缘故,LED和LD在本文中可以各自被称为LED)以超过80%的峰值外部量子效率(EQE)而在商业上可得到。在绿光谱区中操作,现有技术LED的EQE下降到蓝色LED的EQE的一半以下。III族氮化物半导体光发射器的EQE非常突然地下降得甚至更多,因此朝向琥珀色和红色光谱区。存在对于III族氮化物光发射器中效率损失的两个常见原因:(1)在III族氮化物光发射结构的InGaN和GaN层之间的大的晶格失配,其中在针对较长波长所需要的高得多的铟浓度的情况下,可混溶性变得突出;以及(2)在c平面极性GaN上生长的InGaN QW不可避免地遭受由强压电场所导致的量子禁闭斯塔克效应(QCSE),其进而造成辐射重组率的降低,尤其是在其中需要较高铟浓度的长波长区中。

[0008] 尽管难以在III族氮化物光发射设备、诸如例如LED中实现基于InGaN的长波长(以大于600nm的波长的琥珀色到红色),这样的设备是非常合期望的,以便实现单个芯片、固态照明和单片多色光调制设备(参见美国专利申请公布No. 2016/0359084、2016/0359086、2016/0359299以及2016/0359300)。此外,由于与其它长波长光发射结构、诸如基于AlInGaP材料系统的光发射器的带隙偏移相比更高的带隙偏移,基于InGaN的光发射结构、诸如LED和LD的设备性能不太取决于温度。另外,基于GaN的红色波长发射型LED材料结构有益地与基于GaN的蓝色和绿色LED温度膨胀相匹配,这使得它与使用晶片接合来创建多色固态光发射器的基于GaN的堆叠式LED光发射结构相兼容(参见美国专利No. 7,623,560、7,767,479以及7,829,902)。因而,基于InGaN的长波长光发射结构、诸如LED和LD在许多应用中可以是优越的。

[0009] 在现有技术的领域内,沿着晶态c轴生长的基于InGaN的红色波长光发射器、诸如LED或LD全部展现“相位分离”(对于本领域技术人员也已知为铟离析),这是由于拙劣的材料品质所致,参见例如R. Zhang等人在公开号为20110237011A1、题为“Method for forming a GaN-based quantum well LED with red light”的美国专利申请中的以及Jong-Il Hwang等人在题为“Development of InGaN-based red LED grown on (0001) polar surface”的App.Phys.Express 7, 071003 (2015)中的内容。该相位分离将自身表现为光谱上较短波长区中的一个或多个额外的发射峰值,这不可避免地降低颜色纯度,如在图2(b)和(c)中所示。因此,用于增加铟并入而同时不损害材料品质和设备性能的途径对

于实现长波长发射、琥珀色到红色、基于III族氮化物的光发射结构(诸如LED和LD)是关键的。本文中公开的方法和设备为用于在固态照明、显示系统、以及需要大于600nm波长固态光发射器的许多其它应用中使用的高性能、长波长的III族氮化物半导体光发射设备铺平道路。

附图说明

[0010] 在下文中,将参考附图描述各种实施例,其中贯穿若干视图,相同的参考标符指明相同或类似的部分。

[0011] 图1是根据本公开内容的III族氮化物半导体LED设备10的说明性、但非限制性实施例的一部分的横截面视图。

[0012] 图2a是一图表,其图示了图1的以30mA的电流注入发射琥珀色和红色光的III族氮化物半导体LED设备10的EL光谱。插图示出了图1的在短波长光谱区内、以30和100mA注入电流的琥珀色和红色这二者LED 10的EL光谱。

[0013] 图2b示出了在现有技术:公开号为20110237011A1的美国专利申请中的光致发光(PL)光谱。

[0014] 图2c示出了在现有技术:App.Phys.Express 7, 071003 (2015) 中的取决于电流的EL光谱。

[0015] 图3是一图表,其图示了针对图1的发射红光的III族氮化物半导体LED设备10的作为电流的函数的输出功率和相对EQE(在晶片上配置中执行的测量)。

[0016] 图4是一图表,其图示了针对图1的发射红光的III族氮化物半导体LED设备10的作为电流的函数的峰值波长移位和半极大处全宽度(FWHM)。

[0017] 图5是一图表,其图示了针对图1的发射琥珀色光的III族氮化物半导体LED设备10的作为电流的函数的输出功率和相对EQE。

[0018] 图6是一图表,其图示了针对图1的发射琥珀色光的III族氮化物半导体LED设备10的作为电流的函数的峰值波长移位和FWHM。

具体实施方式

[0019] 本发明涉及长波长光发射的、基于III族氮化物的半导体光发射结构(诸如LED和LD),其借助于在外延生长过程期间操纵所述结构的光发射活性区内的晶态应变而被构造。在本文中并且无限制地,本发明的III族氮化物半导体光发射器结构在LED设备结构的上下文内被说明,然而,本领域技术人员将认识到如何将本发明的方法应用到其它III族氮化物半导体光发射器——无限制地包括LD——的设计。

[0020] 本发明公开了一种构造不遭受过度相位分离并且因而能够以高光谱纯度来发射琥珀色到红色光的、基于III族氮化物的光发射结构(诸如LED或LD)的创新方法。本发明的附加优点和其它特征在随后的描述中被阐明,并且部分地对于查阅以下的本领域普通技术人员将变得显而易见,或可以从本发明的实践中被学习到。如在对本申请要求优先权的任何申请的后续权利要求中特别指出的那样,可以实现和获得多个优点。

[0021] 根据本发明的一个实施例,在III族氮化物半导体发光二极管(LED)结构中,第一覆盖层由n型III族氮化物半导体层组成。光发射活性区在包含III族氮化物层的、包括铟的n

型覆层上被形成。*p*型AlGaN在充当电子阻挡层(EBL)的光发射活性区上被形成。然后，第二*p*型III族氮化物覆层在AlGaN层上被形成。

[0022] 根据本发明的另外的实施例，III族氮化物光发射器的光发射区包括多个多量子阱(MQW)集合，所述多个多量子阱集合由一个或多个中间应变补偿层(在下文中被称为ISCL)分离用以最小化晶态应变。所述多个MQW集合和/或ISCL可以竖直地堆叠在衬底的表面上，从而在衬底上形成MQW集合的多层堆叠。所述多层堆叠可以包括：具有较低铟浓度的包括GaN/InGaN的第一MQW集合，具有中等铟浓度并且高于第一MQW集合的铟浓度的包括GaN/InGaN的第二MQW集合，以及具有能够发射期望的琥珀色到红色波长光的最高铟浓度的包括GaN/InGaN的第三MQW集合。前两个MQW集合用于在III族氮化物光发射结构的上述III族氮化物半导体层上产生预应变效应。然而，在本文中，具有可变铟浓度的多于两个MQW集合可以用于生成与在本公开内容中作为非限制性示例被展现的两个MQW集合所做的等同的预应变效应。另外，AlGaN层被插入作为中间应变补偿层(ISCL)以最小化光发射区中的总应变。通过两个(在本示例性实施例中)或更多预应变MQW GaN/InGaN集合与分离这些集合的AlGaN ISCL的组合，III族氮化物LED的发射波长可以被扩展到具有高光谱纯度和高输出功率的琥珀色和红色区。

[0023] 在本发明的优选实施例中，本发明的III族氮化物光发射结构的光发射区包括：一个或多个III族氮化物屏障层和较低铟多量子阱层(第一MQW集合)、包含一个或多个III族氮化物屏障层和中等铟多量子阱层(第二MQW集合)的第一ISCL、第二ISCL、一个或多个屏障层和发射琥珀色到红色光的高铟含量多量子阱层(第三MQW集合)、以及顶部屏障层，其中屏障层中的每一个主要由GaN组成；含铟量子阱层中的每一个由InGaN组成；并且ISCL中的每一个由AlGaN组成。

[0024] 在本发明的第一方面中，多层III族氮化物半导体LED被公开，其可以包括分层的MQW集合的第一、第二和第三集合。所述第一集合可以包括第一铟浓度。所述第二集合可以包括大于所述第一铟浓度的第二铟浓度。所述第三集合可以包括大于所述第二铟浓度的第三铟浓度。所述第一和第二集合中的至少一个可以被配置成充当预应变层。第一中间应变补偿层可以被提供，并且可以由被布置在所述第一和第二集合之间的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0 < x \leq 1$)组成。第二中间应变补偿层可以被提供，并且可以由被布置在所述第二和第三集合之间的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0 < x \leq 1$)组成。所述第一和第二中间应变补偿层可以被布置在两个屏障层之间，并且所述第三集合可以被配置成发射具有范围从大约600nm到大约660nm的波长的、在琥珀色到红色可见范围中的光。

[0025] 在本发明的第二方面中，所述第一铟浓度可以小于大约17%。

[0026] 在本发明的第三方面中，所述第二铟浓度可以大于大约20%。

[0027] 在本发明的第四方面中，所述第三铟浓度可以大于大约30%，并且可以被配置成发射具有范围从大约600nm到大约660nm的波长的琥珀色到红色光。

[0028] 在本发明的第五方面中，中间应变补偿层中的至少一个可以包括 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ，其中x的值大于0并且小于或等于1。

[0029] 在本发明的第六方面中，中间应变补偿层中的至少一个中的Al浓度可以变化，并且所述第一中间应变补偿层可以包括比所述第二中间应变补偿层更高的Al浓度。

[0030] 在本发明的第七方面中，屏障层中的至少一个可以由GaN组成，并且集合中的至少

一个可以由InGaN组成，并且中间应变补偿层中的至少一个可以由 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0 < x \leq 1$) 组成。

[0031] 在本发明的第八方面中，公开了一种用于制造发射琥珀色到红色光的III族氮化物半导体LED的方法，包括以下步骤：限定第一屏障层，在所述第一屏障层上限定包括第一铟浓度的MQW集合的第一集合，在所述第一集合上限定第二屏障层，在所述第二屏障层上限定由 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0 < x \leq 1$) 组成的第一中间应变补偿层，在所述第一中间应变补偿层上限定第三屏障层，在所述第三屏障层上限定包括比所述第一铟浓度更大的第二铟浓度的MQW集合的第二集合，在所述第二集合上限定第四屏障层，在所述第四屏障层上限定由 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0 < x \leq 1$) 组成的第二中间应变补偿层，在所述第二中间应变补偿层上限定第五屏障层，以及限定包括比所述第二铟浓度更大的第三铟浓度的MQW集合的第三集合，所述第三铟浓度被配置成发射具有范围从大约600nm到大约660nm的波长的光。

[0032] 在本发明的第九方面中，由所述方法制成的屏障层中的至少一个可以由GaN组成，集合中的至少一个可以由InGaN组成，所述第一中间应变补偿层可以包括比所述第二中间应变补偿层更高的Al浓度，所述第一集合可以包括不大于大约17%的铟浓度，所述第二集合可以包括大于大约20%的铟浓度，并且所述第三集合可以包括大于大约30%、用于发射琥珀色到红色光的铟浓度。

[0033] 本发明提供了一种创新性LED设备，以及用于制造发射琥珀色到红色波长光的III族氮化物固态光发射结构(诸如LED或LD)的方法。所述III族氮化物固态光发射器通过使用本发明的方法而外延地生长，并且因而唯一地实现展现出高输出功率和高光谱纯度的琥珀色和红色波长光发射，并且没有烦扰以长波长的现有技术III族氮化物光发射结构的相位分离。

[0034] 本发明的III族氮化物半导体琥珀色到红色波长光发射器于本文中在作为本发明的说明性示例性实施例而被图示在图1中的LED设备结构的上下文内被描述。图1示出了根据本发明的琥珀色到红色III族氮化物LED 10的说明性实施例的一部分的横截面视图。琥珀色到红色III族氮化物LED设备10可以通过常规的外延方法被制造，例如金属有机气相外延(MOVPE)，也已知为金属有机化学气相沉积(MOCVD)。如图1中所示，近似 $2\mu\text{m}$ 的GaN缓冲层2在例如蓝宝石衬底的衬底1上生长，其中在之间插入了成核层(未示出)。掺杂有Si的近似 $3\mu\text{m}$ 厚度的n型GaN覆层3在GaN缓冲层2上生长。琥珀色到红色III族氮化物LED 10的说明性实施例可以通过使用合适的衬底1晶体定向而以极性、半极性或非极性的晶体定向外延地生长。

[0035] 参考图1，所述III族氮化物LED结构包括光发射区或多量子阱(MQW)活性区4，其包括在n型GaN覆层3上生长的含铟III族氮化物半导体层。如图1中所图示的，所述活性区4可以包括具有从底部 4_{A} MQW集合到顶部 4_{H} 逐渐增长的铟浓度的三种类型的MQW集合。每个MQW集合包括一个或多个2-3nm厚的(取决于晶体定向，它可以更厚) InGaN量子阱层($4_{\text{A}2}, \dots, 4_{\text{E}2}, \dots, 4_{\text{H}2} \dots$)以及主要由GaN组成的一个或多个5-20nm厚的屏障层($4_{\text{A}1}, \dots, 4_{\text{B}}, 4_{\text{E}1}, \dots, 4_{\text{F}}, 4_{\text{H}1}, \dots, 4_{\text{I}}$)，它们交替地堆叠在彼此之上，其中每个InGaN量子阱层被夹在两个屏障层之间。相应地，如图1中所示，MQW集合 4_{A} 、 4_{E} 和 4_{H} 可以竖直地堆叠以产生MQW集合4的多层堆叠。基于III族氮化物的屏障层($4_{\text{A}1}, \dots, 4_{\text{B}}, 4_{\text{E}1}, \dots, 4_{\text{F}}, 4_{\text{H}1}, \dots, 4_{\text{I}}$)在需要时可以包括附加量的铟和/或铝以便调节它们相应的量子阱层($4_{\text{A}2}, \dots,$

4_{E_2} , ..., 4_{H_2} ...)的量子禁闭水平。针对第一MQW集合 4_A 和第二MQW集合 4_E 的铟浓度优选地在7-13%和20-25%的范围中; 分别地在所图示的示例中。前两个MQW集合 4_A 和 4_E 产生针对顶部MQW集合 4_H 的预应变效应, 所述顶部MQW集合 4_H 可以包含如优先用于琥珀色到红色光发射的大于30%的铟浓度。

[0036] 在本发明的一个实施例中, 通过小心地控制图1的III族氮化物琥珀色到红色光发射结构的顶部MQW集合 4_H 的高铟含量量子阱层(4_{H_2} , ...)的应变, 在不引发相位分离的情况下实现高铟浓度。在该实施例中, 引入具有逐渐提高的铟浓度的下部两个MQW集合 4_A 和 4_E 生成对屏障层的预应变效应, 因而促进在最上部MQW集合 4_H 内的高铟摄入量。强调的是, 在III族氮化物光发射结构内包括仅仅一个或甚至两个具有低铟浓度的MQW集合可能不产生在高光谱纯度和高输出功率的情况下以琥珀色到红色区发射的全功能的III族氮化物半导体LED。因此, 根据本发明的另一实施例, 并且如图1中所示, 中间应变补偿层(ISCL) 4_C 和 4_G 被插入在每两个接连的MQW集合之间。

[0037] ISCL被夹在每两个接连的MQW集合的屏障层之间, 并且优选地由 $Al_xGa_{1-x}N$ ($0 < x \leq 1$)合金组成, 所述 $Al_xGa_{1-x}N$ ($0 < x \leq 1$)合金具有变化的Al浓度, x 在大约17%到大约25%的范围中。ISCL 4_C 和 4_G 中的厚度和Al浓度优选不同。在本发明的一个实施例中, 下部ISCL 4_C 中的Al浓度 x 可以高于上部ISCL 4_G 中的Al浓度, 以便防止层破裂, 并且避免由于那些层所致的LED设备10的过度串联电阻。在本发明的另一实施例中, 下部ISCL 4_C 中的Al浓度 x 可以低于上部ISCL 4_G 中的Al浓度, 以便抑制往下部两个低铟浓度MQW集合 4_A 和 4_E 中的载流子注入, 这有利于促进往高铟浓度顶部MQW集合 4_H 中的较高水平的载流子注入, 从而增加从顶部MQW集合 4_H 的LED设备光发射率, 并且因而降低本发明的III族氮化物半导体光发射器的琥珀色到红色光发射的半极大处全宽度(FWHM)。通常, Al浓度随ISCL变化, 尽管可替换地, 在单独的中间应变补偿层中的Al浓度可以在该中间应变补偿层内变化、在层内分立的梯级(分级的)中变化, 或作为相应层中的连续变化而变化。

[0038] 本领域技术人员将认识到使用本发明的先前提及的方法来取决于III族氮化物半导体光发射器的琥珀色到红色光发射的目标性能参数, 而选择ISCL 4_C 和 4_G 中的最适当的厚度和Al浓度。

[0039] 参考回到图1, 覆盖在LED设备10的MQW活性区4上面的是p型层, 所述p型层相应地具有大约200nm的组合厚度, 并且包括掺杂了Mg的AlGaN电子阻挡层(EBL)5、掺杂了Mg的GaN覆层6以及掺杂了Mg的GaN接触层7。p型AlGaN和GaN覆层中的Mg的原子浓度优选地在例如从 $1E19\text{ cm}^{-3}$ 到 $1E20\text{ cm}^{-3}$ 的范围内。 p 型GaN接触层中的Mg原子浓度优选在例如 $1E21\text{ cm}^{-3}$ 的范围内。

[0040] 如在现有技术III族氮化物光发射器中那样, 本发明的III族氮化物半导体琥珀色到红色光发射设备通过如下形成: 首先在经外延处理的晶片的顶侧p-GaN层7上沉积欧姆接触金属堆叠以形成p侧电极8, 然后蚀刻侧面沟槽以暴露n-GaN层3, 然后在经蚀刻的沟槽内沉积欧姆接触金属堆叠以形成n侧电极9。经外延处理的晶片然后被切块以形成单独的LED芯片, 每个LED芯片基本上具有图1中所图示的横截面, 所述单独的LED芯片随后被封装并且丝焊到相应的p电极和n电极以形成本发明的LED设备。为了实验室测试, p侧电极(或欧姆接触金属堆叠)8、例如以及铟球(为了快速测试中的简单)被形成在p型GaN接触层7上。

[0041] 另外, 设备10的一个侧面部分从p型GaN接触层7中被蚀刻出来到n型GaN覆层3的一

部分。然后,*n*侧电极(或欧姆接触金属堆叠)9、例如钢球(为了快速测试中的简单)被形成在*n*型GaN覆层的被暴露的部分上。

[0042] 在通过正极*p*侧电极8到*n*侧电极9的电流注入下,通过电子和空穴重组过程,从活性区4发射可见光。根据本发明的方法外延地生长的III族氮化物半导体LED设备10优选地被配置使得仅仅顶部MQW集合_H发射光,而底部两个MQW集合_A和_B主要充当预应变层。具有在大约30mA的电流注入下、在琥珀色到红色(琥珀色-红色)可见光谱区内发射光的~1 mm²区域的III族氮化物半导体LED设备10发射强琥珀色-红色发射。

[0043] 图2a是一图表,其图示了针对图1的以大约30mA驱动的琥珀色-红色LED 10的典型EL光谱。插图示出了本发明的图1的在短波长光谱区、以30和100mA注入电流的III族氮化物LED 10的琥珀色和红色这二者示例性实施例的EL光谱。如在图2(a)的插图中所见,在较短的波长区、甚至在100mA的较高驱动电流下没有附加峰值,这表明在本发明的LED中没有相位分离。相反,如在图示了现有技术LED性能的图2b和2c中所示,在现有技术LED——分别地,美国专利申请20110237011A1和App.Phys.Express 7, 071003 (2015)——中容易地观察到相位分离引起的附加发射峰值(~440 nm)以及大幅更宽的FWHM发射。

[0044] 图3直到图6展示了本发明的琥珀色-红色III族氮化物光发射器10的性能;图3和图4展示了本发明的一个示例性实施例的性能,凭借所述示例性实施例,设备10活性区4被设计用于红色(~625 nm)光发射(~45%钢浓度),而图5和图6展示了本发明的另一示例性实施例的性能,其中设备10活性区结构被设计用于琥珀色(~615 nm)光发射(~40%钢浓度)。

[0045] 图3是一图表,其图示了针对本发明的、使其活性区4被设计成以红色(~625 nm)光发射达峰值的红色发射III族氮化物LED设备10的输出功率和相对EQE的所测量的电流相关性。所有测量在晶片上测试配置中执行,其中钢球分别作为*p*侧和*n*侧电极8和9二者。没有使用特殊的表面处理和/或冷却单元来进行所图示的测试。通过被安置在LED 10下方的积分球来收集光,因此不是所有光都被收集。如图3中所示,遵循如在其它基于III族氮化物半导体的LED中所观察到的功率规则,输出功率随施加的电流而增大。在30mA处,红色III族氮化物半导体LED 10的输出功率达到大约211μW。红色III族氮化物半导体LED 10的相对EQE在大约11mA处达大约35%的峰值,并且然后开始随着增加的电流而单调下降。在100mA处,相对EQE相比于峰值降低大约26%。针对随增加的电流的EQE降低的真实机制在LED设计界仍没有被很好地理解。对于此现象,基本存在两种解释:(1)俄歇(Auger)重组;以及(2)由于不足的空穴输送所致的电子泄露,对此的详细描述超出了本公开内容的范围。

[0046] 图4是一图表,其图示了针对图1的红色III族氮化物LED 10的所测量的发射峰值波长移位和FWHM随电流的示例。发射峰值波长示出了在增加的注入电流的情况下的蓝色移位。该表现是基于III族氮化物的半导体LED中的压电场的载流子屏蔽的特性。带填充效应也是蓝色移位的另一原因。发射峰值波长由于强的带填充而在低电流处移位,但是逐渐地在100mA处饱和到617nm。在30mA处,发射峰值波长是625nm(红色),并且FWHM针对具有~1mm²区域的设备在相同的电流水平处达到49nm的最小值。据申请人所知,这说明了得自迄今为止实现的III族氮化物光发射器的最佳红色发射性能。

[0047] 图5是一图表,其图示了本发明的图1的、使其活性区4被设计成以琥珀色光发射达峰值的III族氮化物半导体LED设备10的输出功率和相对EQE的电流相关性。在与先前的示

例性实施例的红色III族氮化物半导体LED的表现类似的表现中,对于具有~1mm²区域的设备,琥珀色III族氮化物半导体LED的相对EQE在大约9mA处达峰值到45%,并且在100mA处降低到大约33%。针对琥珀色III族氮化物LED的所测量的输出功率在30mA处为大约266μW。

[0048] 图6是一图表,其图示了针对图1的琥珀色III族氮化物半导体LED 10的在随所施加的电流的发射峰值波长和FWHM中的所测量变化的示例。遵循与红色III族氮化物LED的类似趋势,波长在低电流处移位,但是逐渐地在100mA处饱和到599nm。在30mA处,峰值波长是617nm(琥珀色),具有FWHM 54nm。

[0049] 如在前述段落中所描述的,根据本发明的以高输出功率和高光谱纯度发射琥珀色到红色光的III族氮化物半导体LED可以通过对材料应变的小心控制而容易地被制造。外延生长方法与用于获得III-V族化合物半导体的技术兼容。用于在实践本公开内容中使用的合适的外延沉积技术包括但不限于MOVPE、分子束外延(MBE)、和氢化物气相外延(HVPE)。基于III族氮化物的半导体层可以例如由Al_xGa_yIn_{1-x-y}N组成,其中0≤x≤1并且0≤y≤1。衬底1的平面定向可以是c平面、半极性以及非极性的晶态平面。

[0050] 此外,根据本公开内容的LED设备10可以通过利用常规的III-V族化合物半导体制造方法和技术而被容易地构造。

[0051] 虽然已经以示例的方式描述了前述公开内容,但是要理解的是本公开内容不限于此。它意图包括宽范围的修改和类似的排布。本公开内容的特征或组件的修改可以在不偏离本公开内容的核心概念的情况下被做出。作为结果,本公开内容的范围不受前述描述所限制,而是仅仅由如本文中所陈述的随附权利要求来限制。

10

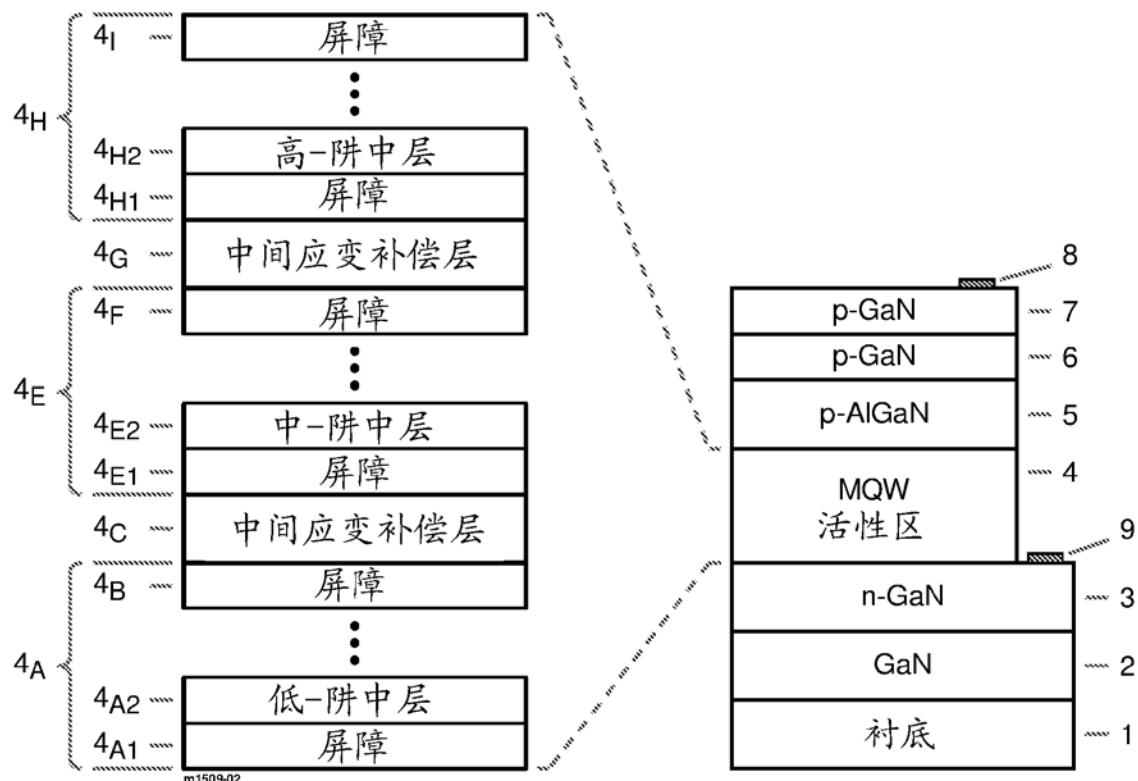


图 1

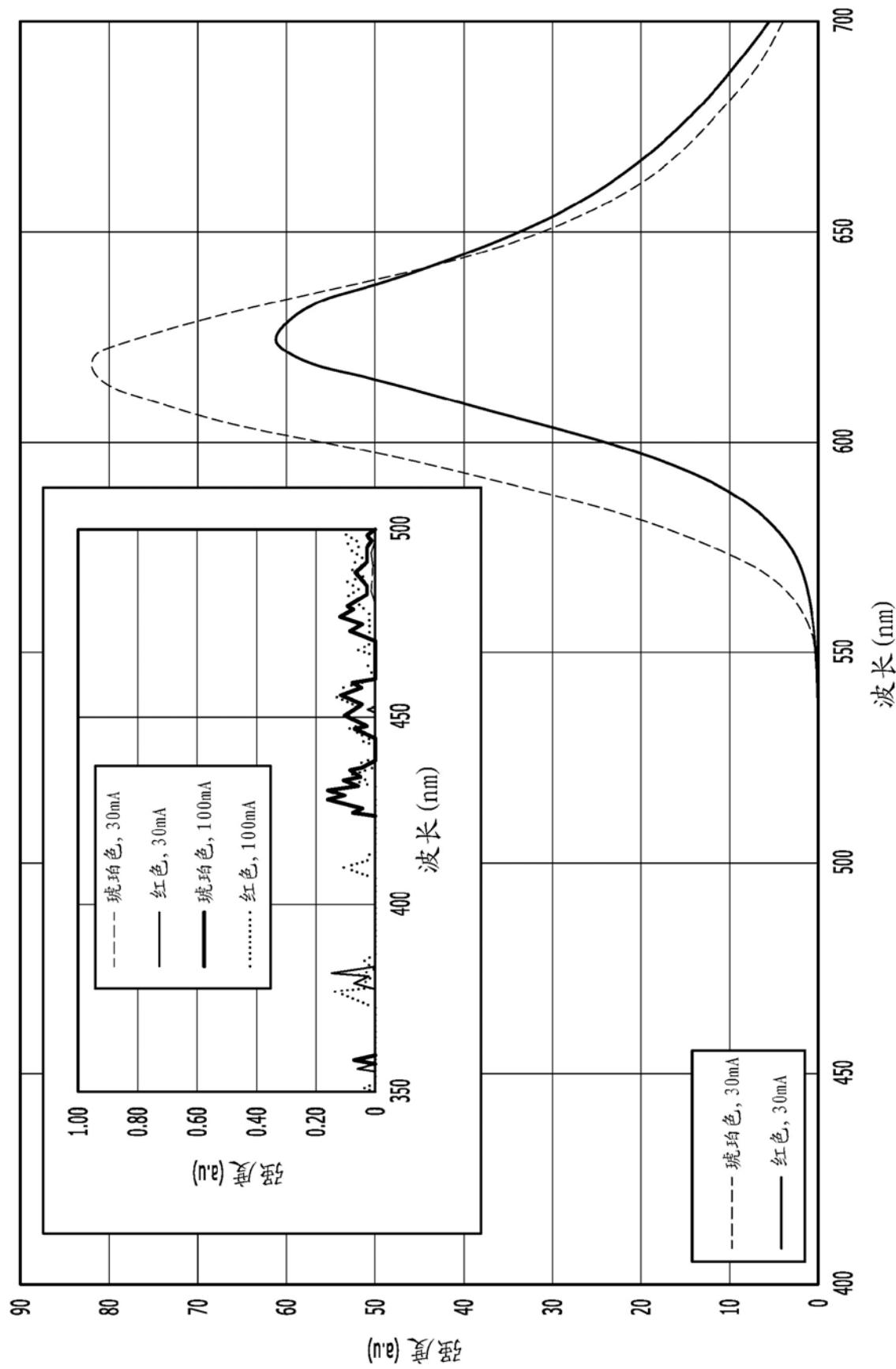


图 2A

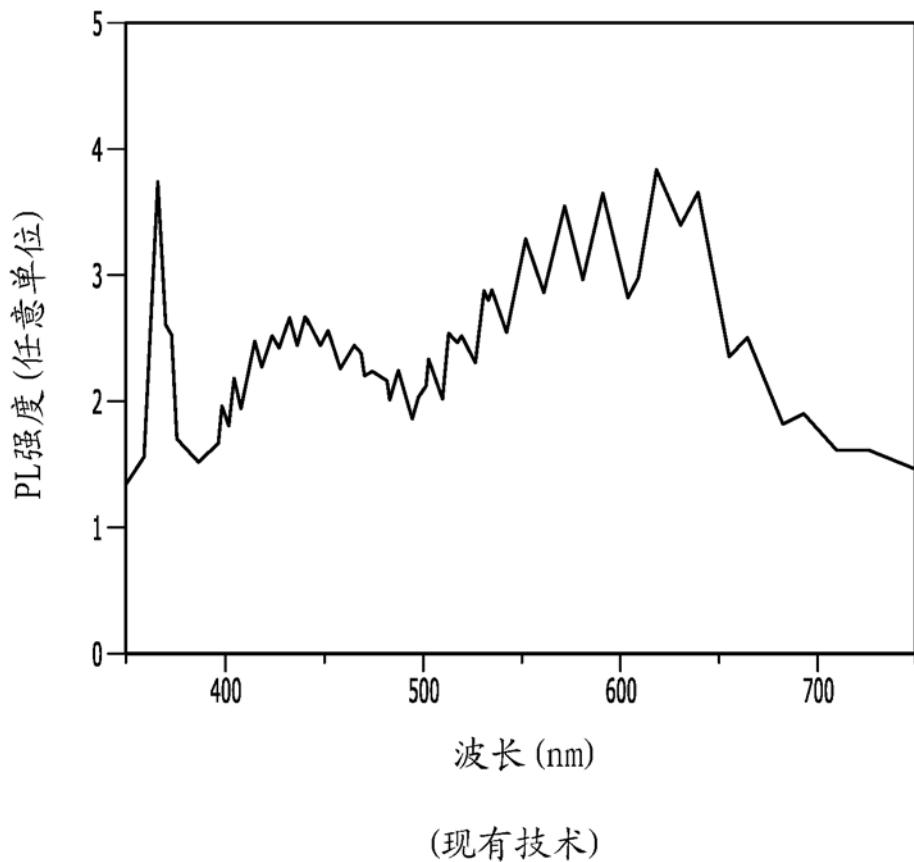
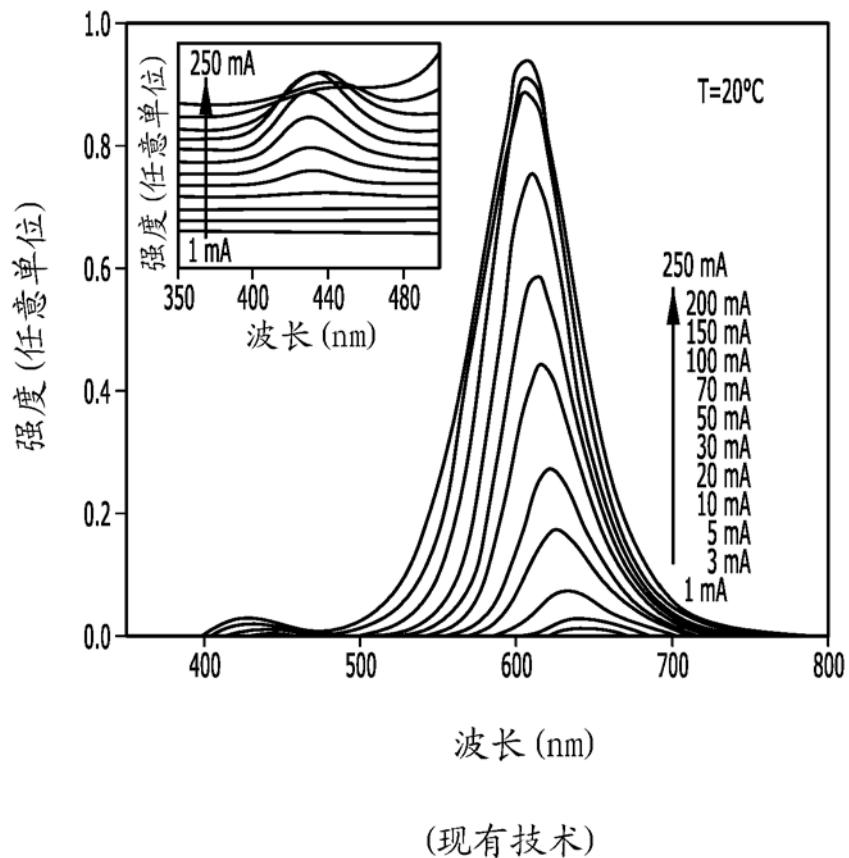


图 2B



(现有技术)

图 2C

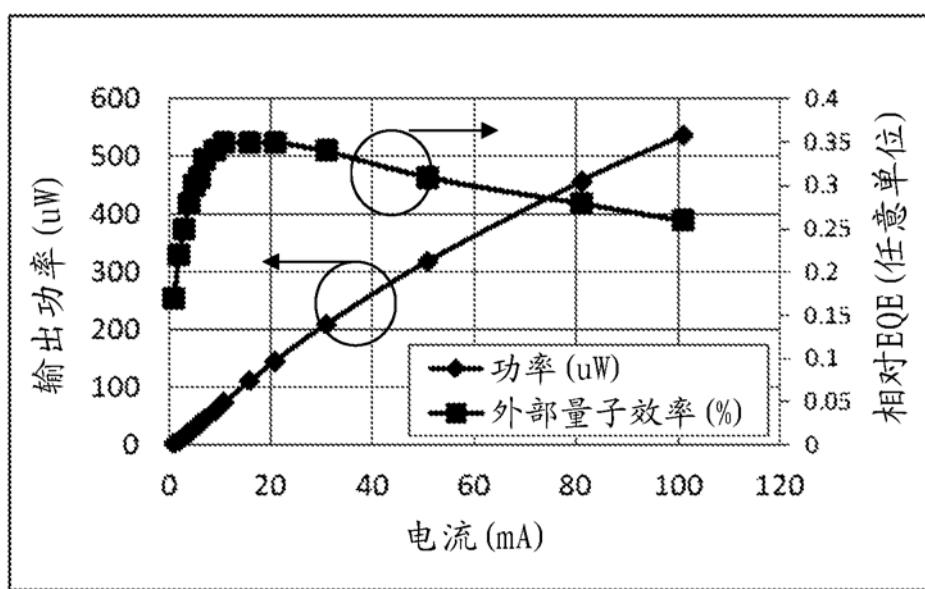


图 3

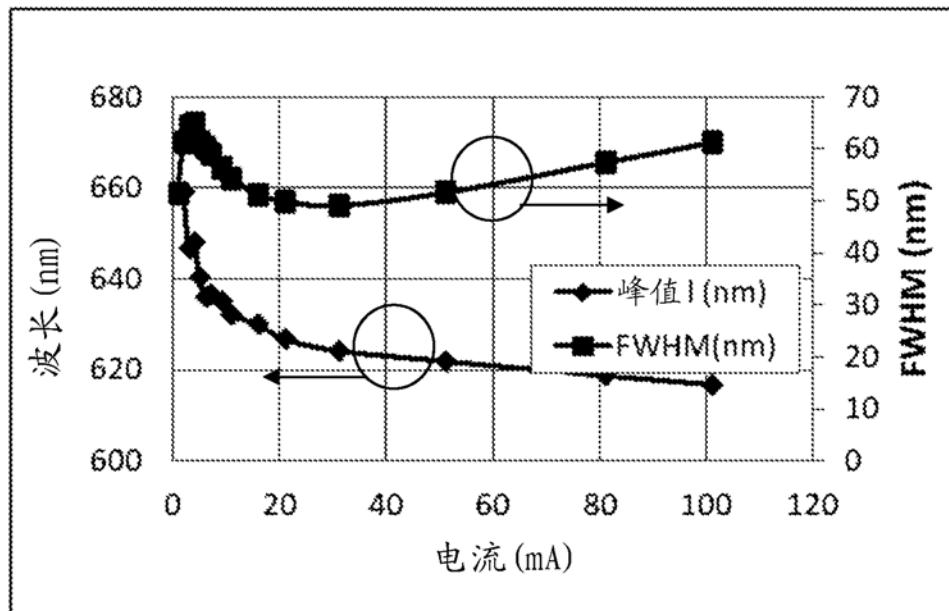


图 4

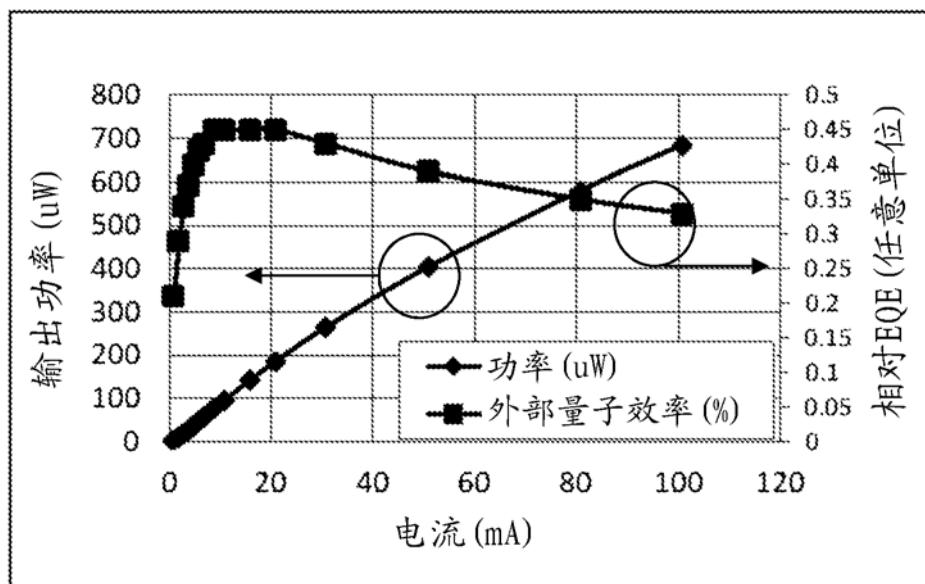


图 5

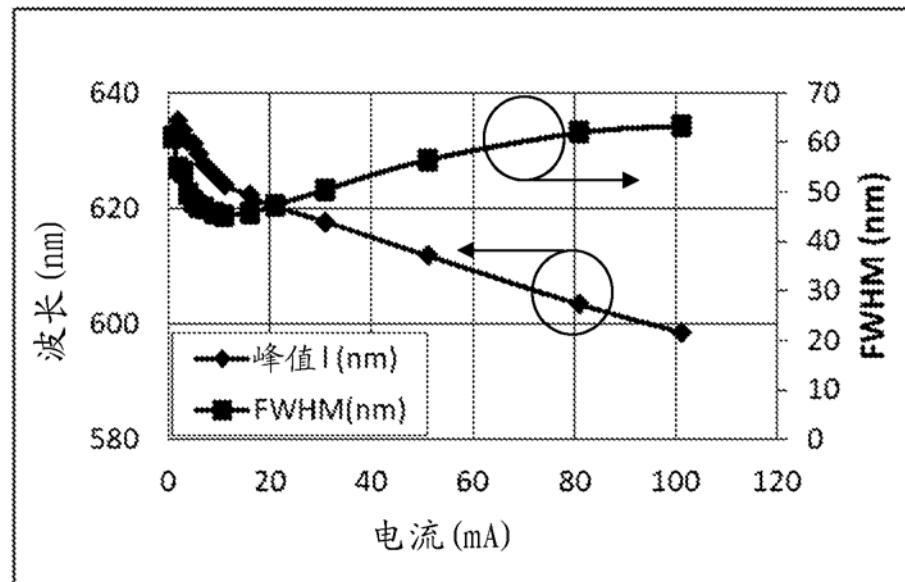


图 6