



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101689594 B

(45) 授权公告日 2012. 03. 28

(21) 申请号 200880024265. 8

H01S 5/32 (2006. 01)

(22) 申请日 2008. 06. 20

H01S 5/343 (2006. 01)

H01S 5/40 (2006. 01)

(30) 优先权数据

102007031926. 8 2007. 07. 09 DE

(85) PCT申请进入国家阶段日

2010. 01. 11

(86) PCT申请的申请数据

PCT/DE2008/001039 2008. 06. 20

(87) PCT申请的公布数据

W02009/006870 DE 2009. 01. 15

(73) 专利权人 欧司朗光电半导体有限公司

地址 德国雷根斯堡

(72) 发明人 马丁·斯特拉斯伯格 卢茨·赫佩尔

马蒂亚斯·扎巴蒂尔

马蒂亚斯·彼得 乌韦·施特劳斯

(74) 专利代理机构 北京集佳知识产权代理有限公司

公司 11227

代理人 陈炜 许伟群

(51) Int. Cl.

H01L 33/00 (2006. 01)

(56) 对比文件

US 2003151042 A1, 2003. 08. 14,

US 2004101012 A1, 2004. 05. 27,

US 2004079947 A1, 2004. 04. 29,

WO 2007049939 A1, 2007. 05. 03,

审查员 刘斌

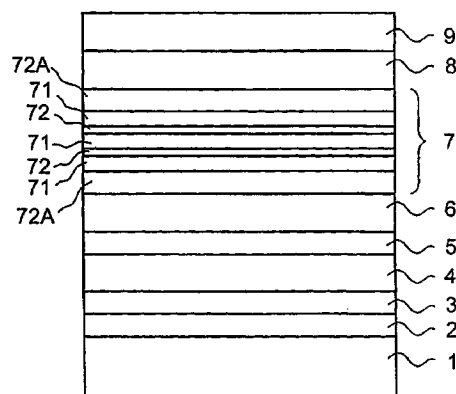
权利要求书 1 页 说明书 11 页 附图 7 页

(54) 发明名称

发射辐射的半导体本体

(57) 摘要

本发明提出了一种发射辐射的半导体本体，其具有接触层 (3) 和有源区 (7)，其中该半导体本体具有设置在接触层与有源区之间的隧道结 (4)，并且有源区具有多量子阱结构，该多量子阱结构包含至少两个有源层 (71)，所述有源层在工作电流注入到半导体本体中时发射电磁辐射。



1. 一种发射辐射的半导体本体,具有接触层 (3) 和有源区 (7),其中所述半导体本体具有设置在接触层与有源区之间的隧道结 (4),隧道结具有至少一个 n 型隧道结层 (41)、至少一个 p 型隧道结层 (43) 和未掺杂的区域 (42),该未掺杂的区域在所述至少一个 n 型隧道结层 (41) 和所述至少一个 p 型隧道结层 (43) 之间,未掺杂的区域 (42) 具有带有不同组分的至少两个中间层 (421,422),以及所述有源区具有多量子阱结构,该多量子阱结构包含至少两个有源层 (71),所述有源层在工作电流注入到半导体本体中时发射电磁辐射。
2. 根据权利要求 1 所述的半导体本体,其中在两个有源层 (71) 之间设置有势垒层 (72),该势垒层具有小于或者等于 9nm 的层厚度 (dB)。
3. 根据权利要求 1 或 2 所述的半导体本体,其具有三个或更多的有源层 (71) 和五个或更少的有源层 (71)。
4. 根据权利要求 1 或 2 所述的半导体本体,其中至少有源区 (7) 基于氮化物-III-化合物半导体材料。
5. 根据权利要求 1 或 2 所述的半导体本体,其中接触层 (3) 是 n 接触层。
6. 根据权利要求 5 所述的半导体本体,其中至少如下的半导体层以所说明的顺序在生长方向上相继:
 - n 接触层 (3);
 - 隧道结 (4),其中所述至少一个 p 型隧道结层 (43) 在生长方向上在未掺杂的区域 (42) 之后,而该未掺杂的区域在所述至少一个 n 型隧道结层 (41) 之后,
 - p 掺杂的封闭层 (5),
 - 有源区 (7),以及
 - 另外的 n 接触层 (9)。
7. 根据权利要求 1 或 2 所述的半导体本体,其中 n 型隧道结层 (41) 和 / 或 p 型隧道结层 (43) 包含由带有不同材料组分和 / 或掺杂材料浓度的交替的层 (431,432) 构成的超晶格。
8. 根据权利要求 1 或 2 所述的半导体本体,其具有 p 掺杂的封闭层 (5),其中在 p 掺杂的封闭层与有源区 (7) 之间设置有针对性 p 掺杂的封闭层的 p 掺杂材料的扩散势垒 (6),该扩散势垒包含超晶格。
9. 根据权利要求 1 或 2 所述的半导体本体,其在有源区 (7) 的背离隧道结 (4) 的侧上具有未掺杂的中间层 (8),该中间层具有在 3nm 到 40nm 之间的层厚度 (d_n)。
10. 根据权利要求 1 或 2 所述的半导体本体,其设计用于借助大于或等于 $100\text{A}/\text{cm}^2$ 的工作电流密度来工作,尤其是借助大于或者等于 $200\text{A}/\text{cm}^2$ 的工作电流密度来工作。
11. 根据权利要求 1 或 2 所述的半导体本体,其在工作中借助工作电流发射电磁辐射,该电磁辐射具有带有强度最大值的光谱分布,其中光谱分布的半值宽度 (FWHM) 基本上与工作电流的电流强度 (I) 无关。
12. 根据权利要求 1 或 2 所述的半导体本体,其包含在生长方向上位于有源区 (7) 之后的另外的隧道结 (4') 和另外的有源区 (7')。

发射辐射的半导体本体

[0001] 本发明涉及一种发射辐射的半导体本体。

[0002] 本专利申请要求德国专利申请 102007031926.8 的优先权,其公开内容通过引用结合于此。

[0003] 随着工作中注入半导体本体中的工作电流的电流密度增加,传统结构类型的发射辐射的半导体本体展现出在工作中发射的辐射功率的饱和,使得效率随着工作电流密度增加而降低。

[0004] 本发明的任务是提出一种发射辐射的半导体本体,其在大的工作电流密度的情况下具有改进的效率。

[0005] 该任务通过根据权利要求 1 所述的发射辐射的半导体本体来解决。半导体本体的有利的扩展方案和改进方案在从属权利要求中予以说明,从属权利要求的公开内容明确地包含在本说明书中。

[0006] 根据本发明的发射辐射的半导体本体具有有源区。该有源区具有多量子阱结构,其包含两个或更多个有源层,它们在工作电流注入到半导体本体中时发射电磁辐射。

[0007] 有源区例如基于六方化合物半导体材料。“基于六方化合物半导体材料”在本上下文中意味着有源区或者有源区的至少一个层、尤其是有源层具有六方化合物半导体材料。也就是说,至少有源区具有六方晶格结构。优选地,整个半导体本体基于六方化合物半导体材料,于是半导体本体的半导体材料具有六方晶格结构。

[0008] 六方化合物半导体材料例如是由化学元素周期表的 II 和 VI 主族的元素的二元、三元和 / 或四元化合物构成的半导体结构。例如,可以是以下化合物之一: ZnO 、 ZnMgO 、 CdS 、 ZnCdS 、 MgBeO 。此外,六方化合物半导体材料可以由 III 和 V 主族的元素的二元、三元和 / 或四元化合物构成的半导体结构,例如可以是氮化物。例如可以是以下半导体结构之一: BN 、 AlGaN 、 GaN 、 AlInGaN 。

[0009] 在此,半导体材料并非一定必须具有根据上式之一的数学上精确的组分,而是可以具有一种或更多种掺杂材料以及附加的组成部分。出于简单原因,上面的式子仅包含晶格的主要组成部分,即使其可以部分被较少量的其他物质替代。

[0010] 在六方化合物半导体(例如基于 III-V 半导体材料系 AlInGaN 、即 $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$, 其中 $0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1$ 且 $x+y \leq 1$ 的半导体本体)的情况下,在例如可以包括 InGaN 量子槽的有源区中由于在有源区中有极性的纤锌矿晶体结构和张力而出现压电场。

[0011] 这些压电场沿着生长方向定向。这些场的极性与半导体本体以其生长的生长模式有关。例如在使用金属有机气相外延(MOVPE)的情况下优选以所谓的 Ga 面(Ga-Face)生长模式来生长。例如对于 GaN 晶体,这意味着在 Ga-N 双层(由其形成晶体)的情况下镓原子朝着晶体的背离于生长衬底的表面的方向。在以 Ga 面生长模式生长的晶体的情况下(其中生长方向平行于晶体学上的 c 轴延伸),晶体学上的 c 轴和电场表现为从衬底离开朝向晶体表面。

[0012] 由于在有源区中的张力,压电场的极化具有相反的方向。通过极化感应的晶格电荷在有源的区域的朝向晶体表面的侧上是负的,而在有源的区域的朝向衬底与生长的晶体

的界面的侧上是正的。在 Ga 面生长模式中难以影响压电场在 c 轴的方向上的极性。

[0013] 在光电子半导体本体的一个有利的扩展方案中,在生长方向上(即平行于晶体学上的 c 轴),p 掺杂的封闭层、有源区和 n 导电的封闭层以该顺序相继。p 掺杂的封闭层和 n 导电的封闭层是半导体本体的半导体层,这些半导体层在生长方向上位于有源区之前或者在其之后。在一个改进方案中,p 掺杂的封闭层和 / 或 n 导电的封闭层是载流子封闭层(“限制层, Confinement Layer”)和 / 或罩层(“包覆层, cladding layer”)。罩层尤其是例如由于其折射率而以本领域技术人员基本已知的方式设置用于引导由有源区在工作中发射的电磁辐射。

[0014] 在围绕有源的区域的层的序列(其中在生长方向上 n 导电的封闭层、有源区和 p 掺杂的封闭层以该顺序相继)中,压电场引起不利的能量势垒结构,该势垒结构使载流子难以注入有源的区域中。这样的光电子半导体本体因此具有如下的内部量子效率:其通常不令人满意并且尤其是随着增加的电流密度而强烈地降低。

[0015] 目前发明人推测的是,当在生长方向上 p 掺杂的封闭层、有源区和 n 导电的封闭层以该顺序相继时,对于这样的半导体本体有利地扩宽其中电子和空穴在工作中进行复合的区域。多量子阱结构的至少两个有源层设置在其中电子和空穴在工作中进行复合的区域中(即在复合区中)并且在半导体本体在工作中发射电磁辐射。

[0016] 在一个合乎目的的扩展方案中,半导体本体具有接触层。该接触层尤其是半导体本体的如下半导体层:在半导体本体在工作中工作电流穿过该半导体层被注入到有源区中。该半导体层优选具有良好的导电性,尤其是良好的横向导电性。在该扩展方案中,该接触层是外延地在生长衬底上产生的半导体层。可替代地,接触层也可以包含在生长衬底中或者由该生长衬底形成。

[0017] 在一个实施形式中,接触层是 p 接触层,其尤其是设置在生长衬底与有源区之间。合乎目的地,在该实施形式中在生长方向上相继是 p 接触层、p 掺杂的封闭层、有源区、n 导电的封闭层和另外的接触层(该接触层尤其是 n 接触层)。在一个变形方案中,p 掺杂的半导体层同时是 p 接触层和 p 掺杂的封闭层。类似地, n 导电的半导体层可以同时是 n 接触层和 n 导电的封闭层。在另一变形方案中,生长衬底和 p 接触层集成地构建。

[0018] 在另一变形方案中,生长衬底被强烈地薄化或者完全从半导体本体中去除。在此情况下,生长方向通常可以借助半导体本体中的原子位置的顺序来确定。如果晶体生长以 Ga 面生长模式来进行,则在生长方向上 Ga 平面至 N 平面的距离大约为 N 平面至 Ga 平面的距离的三倍。尽管原则上可能以 N 面生长模式制造材料,即关于晶格结构以相反的方向或者顺序地生长。在该方向上, N 平面至 Ga 平面的距离大约是 Ga 平面至 N 平面的距离的三倍。为了以 N 面生长模式来生长材料,而通常需要特别的措施。

[0019] 在一个可替代的实施形式中,接触层是 n 接触层。例如 n 接触层沉积在生长衬底上并且在生长方向上位于有源区之前或者生长衬底具有 n 接触层。

[0020] 在一个合乎目的的扩展方案中,该半导体本体在 n 接触层与有源区之间具有隧道结。借助隧道结有利地实现了半导体本体的半导体层的如下顺序:其中在生长方向上(即平行于晶体学上的 c 轴), p 掺杂的封闭层在 n 接触层之后而在有源区之前,并且 n 导电的封闭层在有源区之后。

[0021] 在半导体本体的一个优选的扩展方案中,在两个有源层之间,尤其是在每两个相

邻的有源层之间设置有势垒层。在一个有利的改进方案中,势垒层具有小于或等于 9nm 的层厚度,优选的是势垒层的层厚度为 4nm 或者更小。优选地,有源层和势垒层彼此紧随。多个量子阱结构的量子阱尤其是由有源层、势垒层和封闭势垒层形成。

[0022] 在半导体本体的另一扩展方案中,有源区具有三个或更多个有源层。在一个改进方案中,该有源区具有五个或更少的有源层。

[0023] 发明人已确定的是,借助这种势垒层实现将有源层中的至少两个设置在复合区中。例如,多量子阱结构的三个或更多个的以及特别是五个或更少的有源层设置在复合区中。

[0024] 发明人进一步确定的是,借助具有 9nm 或者更小并且尤其是 4nm 或者更小的层厚度的这种势垒层实现在各个有源层之间的电子耦合。目前,发明人所推测的是,以此方式例如出现载流子在各个有源层之间的谐振的隧穿。这有利地特别是在工作中注入半导体本体中的工作电流的高电流密度的情况下引起将载流子有利地分布到设置在复合区中的各个有源层上,使得实现高的效率。

[0025] 在具有隧道结的半导体本体中,该隧道结也影响了在有源区中的电势分布。一方面,对于载流子而言降低了注入有源区中的能量势垒。另一方面,发明人会展示的是,多量子阱结构的量子阱的有效厚度有利地是特别小的。例如,量子阱的有效厚度小于或等于 1nm。

[0026] 总之确定的是,工作电流相对于生长方向反转的极性与包含具有小的层厚度的势垒层的多量子阱结构的组合能够实现如下半导体本体:其中多量子阱结构的至少两个并且尤其是至少三个有源层对辐射发射有贡献,并且该半导体本体在高的工作电流的情况下具有特别大的效率。工作电流相对于生长方向反转的极性尤其是借助隧道结来实现。

[0027] 在一个有利的扩展方案中,隧道结具有至少一个 n 型隧道结层和至少一个 p 型隧道结层。

[0028] 优选地,在所述至少一个 n 型隧道结层与所述至少一个 p 型隧道结层之间包含至少一个未掺杂的中间层构成的未掺杂的区域。在隧道结中, n 型隧道结层和 p 型隧道结层在该扩展方案中并未彼此紧邻,而是通所述至少一个未掺杂的中间层彼此分离。术语“隧道结层”在此用于区分半导体本体的常用的半导体层,并且意味着这样表示的 n 型隧道结层或 p 型隧道结层设置在隧道结中。

[0029] 由于 n 型隧道结层和 p 型隧道结层通过未掺杂的区域彼此分离,所以防止了不同的载流子在界面上的不利的补偿,要不然由于载流子和 / 或掺杂材料通过界面扩散开而会出现该补偿。

[0030] 尽管也通过在 n 型隧道结层与 p 型隧道结层之间插入未掺杂的区域来在隧道结内产生仅具有低的载流子密度的区域,然而与本发明相结合确定的是,该区域对隧道结的电特性、尤其是对正向电压的不利影响较少。尤其是,以一个或更多个未掺杂的中间层的形式插入的未掺杂的区域比在 n 型隧道结层与紧邻的 p 型隧道结层之间的界面上的如下区域的不利影响更少:在该区域中载流子和 / 或掺杂材料由于在界面上的扩散而相互补偿。这尤其是当半导体本体以在半导体本体中引起高电流密度的工作电流驱动时对于半导体本体工作是重要的。

[0031] 在另一有利的扩展方案中,至少如下的半导体层以所说明的顺序在生长方向上彼

此相随 :n 接触层 ;隧道结,其中优选至少一个 p 型隧道结层在生长方向上在未掺杂的区域之后并且该区域在生长方向上在至少一个 n 型隧道结层之后 ;p 掺杂的封闭层 ;有源区 ;以及另一 n 接触层。

[0032] 在一个改进方案中,隧道结的未掺杂的区域具有带有不同组分的至少两个未掺杂的中间层。例如,该区域具有与有源区远离的 GaN 层和与有源区相邻的 AlGaN 层。

[0033] 未掺杂的区域的厚度例如在 0.5nm 到 15nm 之间,尤其是在 1nm 到 10nm 之间,其中分别包括边界值。在这样的厚度的情况下,未掺杂的区域是对于在 n 型隧道结层和 p 型隧道结层中分别存在的载流子的势垒,该势垒降低了电荷的相互补偿。另一方面,未掺杂的区域还足够薄,以便对隧道结的电子特性没有不利影响。

[0034] 在另一有利的扩展方案中,n 型隧道结层和 / 或 p 型隧道结层包含由交替的、带有不同的材料组分和 / 或掺杂材料浓度的层构成的超晶格 (Uebergitter)。

[0035] 在另一扩展方案中,在 p 掺杂的层和有源区之间设置有利于 p 掺杂的层的 p 掺杂材料的扩散势垒。该扩散势垒在一个改进方案中包含超晶格。

[0036] 在另一扩展方案中,发射辐射的半导体本体在有源区的与隧道结背离的侧上包含未掺杂的半导体层。例如,未掺杂的半导体层是 n 导电的封闭层。合乎目的地,未掺杂的半导体层设置在半导体本体的另一接触层和有源区之间。

[0037] 未掺杂的半导体层例如具有 3nm 到 40nm 之间的层厚度。与传统的半导体本体相比,未掺杂的半导体层的层厚度对半导体本体的效率没有影响或者仅仅有微小的影响。因此,该层厚度实际上可以有利地任意选择并且能够实现在制造半导体本体时的较大的容差。

[0038] 在一个有利的扩展方案中,半导体本体设计用于借助大于或等于 $100\text{A}/\text{cm}^2$ 、特别是大于或等于 $300\text{A}/\text{cm}^2$ 的工作电流密度来工作。在一个改进方案中,半导体本体设计用于借助更高的工作电流密度来工作,例如借助 $500\text{A}/\text{cm}^2$ 或更大、 $1000\text{A}/\text{cm}^2$ 或 $2000\text{A}/\text{cm}^2$ 或更大的工作电流密度来工作。

[0039] 半导体本体在工作中发射带有如下光谱分布的电磁辐射 :该光谱分布具有强度最大值。例如,强度最大值具有在红外、可见或紫外光谱范围中的波长。光谱分布的半值宽度基本上与工作电流的电流强度无关。根据数学定义,半值宽度在此理解为如下两个波长的差 :从强度最大值的波长开始朝着更大的波长和朝着更小的波长在这两个波长的情况下强度降低到强度最大值处的强度的一半。

[0040] 半导体本体可以是发光二极管芯片或者是激光二极管芯片,尤其是边发射的激光二极管芯片。

[0041] 在另一扩展方案中,半导体本体包含至少一个另外的有源区。在该扩展方案中,这些有源区在生长方向上彼此相继。例如,半导体本体包含三个到十个之间的有源区。在每两个相邻的有源区之间合乎目的地设置有另一隧道结。所述另外的有源区和 / 或另外的隧道结优选类似于上面针对有源区或隧道结所描述的扩展方案那样地实施。

[0042] 例如,半导体本体以说明的顺序包含如下的半导体层 :p 掺杂的封闭层、有源区、n 导电的封闭层、另外的隧道结、另一 p 掺杂的封闭层、另外的有源区、另一 n 导电的封闭层。在一个改进方案中,p 掺杂的封闭层位于隧道结之前。在另一改进方案中,在另外的 n 导电的封闭层之后是另外的 n 接触层。在另外的 p 掺杂的封闭层和另外的有源区之间可以设置

有另一扩散势垒。

[0043] 其他优点和有利的实施形式从以下结合图 1 至 11 所描述的实施例中得到。

[0044] 其中：

[0045] 图 1 示出了根据一个实施例的半导体本体的示意性横截面，

[0046] 图 2 示出了根据图 1 的实施例的半导体本体的隧道结的示意性横截面，

[0047] 图 3 示出了根据图 1 的实施例的半导体本体的扩散势垒的示意性横截面，

[0048] 图 4 示出了根据另一实施例的半导体本体的示意性横截面，

[0049] 图 5A 示出了传统的多量子阱结构的带结构的示意图，

[0050] 图 5B 示出了根据图 1 的实施例的多量子阱结构的示意图，

[0051] 图 6 示出了与另外的半导体本体相比在根据图 1 的实施例的半导体本体的情况下所发射的辐射功率与工作电流的相关性，

[0052] 图 7 示出了与另外的半导体本体相比在根据图 1 的实施例的半导体本体的情况下所发射的辐射功率与势垒层的层厚度相关的线性度的示意图，

[0053] 图 8 示出了与另外的半导体本体相比在根据图 1 的实施例的半导体本体的情况下光谱分布的与工作电流相关的半值宽度，

[0054] 图 9 示出了与另外的半导体本体相比在根据图 1 的实施例的半导体本体的情况下发射最大值的与工作电流相关的波长，

[0055] 图 10 示出了在势垒层的不同的层厚度的情况下由根据图 1 的实施例的半导体本体所发射的电磁辐射的强度与工作电流的相关性，

[0056] 图 11 示出了在不同数目的有源层的情况下由根据图 1 的实施例的半导体本体所发射的电磁辐射的辐射功率与工作电流的相关性，

[0057] 图 12 示出了与另外的半导体本体相比在根据图 1 的实施例的半导体本体的情况下所发射的电磁辐射的与未掺杂的半导体层的层厚度相关的相对强度。

[0058] 在这些实施例和附图中，相同或者作用相同的组成部分设置有相同的参考标记。这些附图并且尤其是在这些附图中所示的各个元素的大小关系并不能视为合乎比例的。更确切地说，各个组成部分（譬如层）为了更好的可示性和 / 或为了更好的理解而可以被夸大地或者夸厚地示出。

[0059] 在图 1 中示出了发射辐射的半导体本体的一个实施例。该半导体本体具有半导体层序列，其优选基于六方化合物半导体材料，尤其是基于氮化物-III-化合物半导体材料。特别优选地，氮化物-III-化合物半导体材料是 AlInGaN ，即 $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ ，其中 $0 \leq x \leq 1$ ， $0 \leq y \leq 1$ 且 $x+y \leq 1$ 。

[0060] 半导体本体具有衬底 1，该衬底尤其是包含适合于生长这种氮化物-III-化合物半导体的材料，例如 GaN 、 SiC 和 / 或蓝宝石，或者由这种材料构成。该衬底优选是 n 导电的并且包含例如 n- GaN 、n- SiC 和 / 或 n-Si (111)，或者由这些材料中的至少一种构成。

[0061] 在衬底 1 上可以如图 1 中所示地施加缓冲层 2，例如用于使衬底 1 和随后的半导体层之间的晶格参数匹配。缓冲层例如包含 GaN 或 AlGaN ，即 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ，其中 $0 \leq x \leq 1$ 。尤其是，该缓冲层具有在 20nm 到 1500nm 之间的厚度，其中包括边界值。

[0062] 随后将 n 接触层 3、例如 n 导电的并且尤其是 n 掺杂的 GaN 层、 AlGaN 层或者 AlInGaN 层设置到衬底 1 上或必要时设置到缓冲层 2 上。在此，n 接触层 3 用浓度在 10^{18}cm^{-3}

到 10^{20}cm^{-3} 之间的 Si、尤其是浓度在 $2 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 到 10^{19}cm^{-3} 之间的 Si 来 n 掺杂,其中分别包含边界值。n 接触层之后是隧道结 4。

[0063] 优选地,隧道结 4 是高掺杂的 n-p 隧道结。高掺杂在此理解为大于或等于 10^{19}cm^{-3} 的掺杂,尤其是大于或等于 10^{20}cm^{-3} 的掺杂。在此,隧道结 4 的 n 掺杂的侧朝向 n 接触层 3 而 p 掺杂的侧与 n 接触层 3 背离。

[0064] 如图 2 中所示,隧道结 4 在此包含 n 型隧道结层 41 和 p 型隧道结层 43,其在生长方向上跟随在 n 型隧道结层 41 之后。p 型隧道结层 43 和 / 或 n 型隧道结层 41 在高掺杂的 n-p 隧道结 4 的情况下具有高的掺杂。

[0065] p 型隧道结层 43 在此实施为多层系统。该 p 型隧道结层包含由交替的层 431 和 432 构成的超晶格。在此,超晶格包含十对的层 431、432。例如,超晶格包含高 p 掺杂的 InGa_xN 层 431 和未掺杂的 GaN 层 432,其中 InGa_xN 表示 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$,其中 $0 \leq x \leq 1$ 。

[0066] 超晶格 431、432 的各个层的层厚度优选为 2nm 或者更小,特别优选为 1nm 或者更小。在此,层 431 和 432 的层厚度分别为 0.5nm。p 型隧道结层 43 相应地优选具有 40nm 或更小的、特别优选是 20nm 或者更小的厚度。在此,p 型隧道结层 43 具有 10nm 的层厚度。

[0067] 类似地,n 型隧道结层 41 也可以构建为多层系统。例如在一个扩展方案中,n 型隧道结层 41 具有由交替的高 n 掺杂的层和未掺杂的层构成的超晶格。例如,n 掺杂的层是 InGa_xN 层而未掺杂的层是 GaN 层。特别优选地,所述超晶格是短周期的超晶格结构,其具有 10nm 或者更小、优选 5nm 或者更小、尤其是 2nm 或者更小的周期。超晶格的层的层厚度例如为 0.5 纳米。周期的数目优选小于或者等于 15。

[0068] n 型隧道结层 41 和 / 或 p 型隧道结层 43 构建为超晶格具有如下优点:与高掺杂的单层相比,通过这样的方式改进了晶体结构的形态。尤其是,通过在超晶格结构中包含的多个界面降低了在半导体本体中的位错的蔓延。

[0069] 在图 2 中所示的隧道结 4 的实施例的情况下,在 n 型隧道结层 41 和 p 型隧道结层 43 之间设置有未掺杂的区域 42。未掺杂的区域 42 具有如下优点:通常分别具有高掺杂的 n 型隧道结层 41 和 p 型隧道结层 43 并未彼此紧邻。以此方式防止不同类型的载流子扩散进具有相反掺杂的相应高掺杂的层中,并且减少了载流子的补偿。

[0070] 有利地,未掺杂的区域 42 改进了隧道结 4 的电子特性。尤其是实现了比较低的正向电压。例如,半导体本体的正向电压为 5V 或更小。

[0071] 未掺杂的区域 42 优选包含 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$,其中 $0 \leq x \leq 1$,或者 $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$,其中 $0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1$ 且 $x+y \leq 1$ 。优选地,对于铝成分合适的是 $0.05 \leq x \leq 0.3$ 。当 p 型隧道结层包含镁作为 p 掺杂材料时,AlGa_xN 层特别良好地适合作为扩散势垒。n 型隧道结层 41 的 n 掺杂材料例如是硅。

[0072] 优选地,未掺杂的区域 42 是具有至少两个未掺杂的中间层 421、422 的多层结构。例如,未掺杂的与 n 型隧道结层 41 邻接的第一中间层 421 是未掺杂的 GaN 层。该中间层例如具有大约 2nm 的厚度。在生长方向上在此之后设置有未掺杂的第二中间层 422,其与 p 型隧道结层 43 邻接。未掺杂第二中间层 422 例如是未掺杂的 AlGa_xN 层。该中间层例如具有大约 1nm 到大约 8nm 的层厚度。

[0073] 未掺杂区域 42 的两层或者多层的结构能够有利地实现未掺杂的中间层 421、422 在其材料和其厚度方面与相应邻接的隧道结层 41、43 的掺杂材料的扩散特性相匹配。例

如, AlGa_N 层 422 特别良好地适合作为用于 p 型隧道结层 43 的 p 掺杂材料 (尤其是镁) 的扩散势垒。Ga_N 层 421 特别良好地适合作为用于 n 型隧道结层 41 的 n 掺杂材料 (特别是硅) 的扩散势垒。附加地, 在未掺杂的区域 42 的两层或更多层的结构的情况下, 至少一个附加的界面用作对 n 型和 p 型隧道结层 41、43 的掺杂材料的附加扩散势垒。

[0074] 在一个变形方案中, 未掺杂的区域 42 除了具有未掺杂的中间层 421 之外还具有一个或多个 p 掺杂的中间层 422。在一个有利的扩展方案中, p 掺杂的中间层 422 或者至少一个 p 掺杂的中间层 422 设置在两个未掺杂的中间层 421 之间。在该变形方案中, 可以特别精确地设置隧道结的位置。

[0075] 在生长方向上在隧道结 4 之后设置有 p 掺杂的封闭层 5。例如 p 掺杂的封闭层是载流子封闭层 (“限制层, Confinement Layer”) 和 / 或罩层 (“包覆层, cladding layer”)。在一个扩展方案中, p 掺杂的封闭层 5 是 p 掺杂的 Al_xGa_{1-x}N 层, 其中 $0 \leq x \leq 0.1$ 。p 掺杂的封闭层 5 的层厚度例如在 50nm 到 500nm 之间, 优选为例如 100nm。在一个优选的扩展方案中, 该封闭层用镁作为 p 掺杂材料来 p 掺杂, 例如 p 掺杂材料的浓度在 10^{18}cm^{-3} 到 $5 \times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ 之间, 其中包括边界值, 优选在 $2 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ 到 $2 \times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ 之间, 其中包括边界值。

[0076] 在生长方向上在 p 掺杂的封闭层 5 后设置有有源区 7。在一个有利的改进方案中, 在 p 掺杂的封闭层 5 与有源区 7 之间设置有扩散势垒 6。扩散势垒 6 有利地降低了 p 掺杂的封闭层 5 的 p 掺杂材料侵入有源区 7 的危险。

[0077] 在图 3 中示出了扩散势垒 6 的一个有利的实施例。根据图 3 的实施例, 扩散势垒 6 是由多个扩散势垒层 61、62、63 构成的层序列。

[0078] 相邻于衬底 1 的第一扩散势垒层 61 例如是未掺杂的层, 特别是由 AlGa_N 构成的层, 该层优选具有 10nm 或者更小的层厚度, 例如具有 5nm 的层厚度。

[0079] 在生长方向上在第一扩散势垒层 61 之后是第二扩散势垒层 62, 其优选同样未被掺杂并且尤其是基于 Ga_N。第二扩散势垒层的层厚度例如为大约 20nm。

[0080] 作为在生长方向上在第二扩散势垒层 62 之后的第三扩散势垒层 63, 扩散势垒 6 具有由交替的第一和第二层 631、632 构成的超晶格。超晶格例如是不同材料组分的层, 例如交替的 InGa_N 层 631 和 Ga_N 层 632。该超晶格优选具有十个或者更多个层对 631、632, 优选具有 30 对或者更多对的第一和第二层 631、632。

[0081] 在此, InGa_N 层 631 的铟成分在生长方向上连续地或者分级地下降。第一和 / 或第二层 631、632 的层厚度优选小于或等于 2nm, 特别优选小于或等于 1nm。在此, 第一和第二层 631、632 分别具有 0.5 纳米的层厚度。第三势垒层 63 的总厚度优选在 2nm 到 100nm 之间, 其中包括边界值, 在此为 30nm。

[0082] 有源区 7 是多量子阱结构。其包括多个有源层 71, 在这些有源层之间分别设置有势垒层 72。在生长方向上分别有另一势垒层 72A 位于第一有源层 71 之前和位于最后的有源区 71 之后。

[0083] 有源层 71 例如包含 InGa_N 或者由其构成。有源层 71 的层厚度例如大于或等于 0.8nm 并且尤其是小于或等于 10nm, 优选地该层厚具有在 1.8nm 到 5nm 之间的值, 其中包括边界值。

[0084] 势垒层 72 例如包含 AlInGa_N 或者由其构成。这些势垒层尤其是具有在 1nm 到 20nm 之间、优选 2nm 到 12nm 之间的层厚度, 其中分别包括边界值。优选地, 势垒层 72 是 Ga_N 层。

尤其是,势垒层 72(它们是 GaN 层)优选具有小于或者等于 7nm 的层厚度,特别是优选小于或者等于 4nm 的层厚度。

[0085] 随后在有源区 7 上设置有未掺杂的半导体层,其尤其是 n 导电的封闭层 8,例如未掺杂的 GaN 层。未掺杂的半导体层例如具有在 3nm 到 40nm 之间、特别是在 3nm 到 15nm 之间(其中分别包含边界值)的层厚度。

[0086] 在半导体本体的背离于衬底的上侧上在 n 导电的封闭层之后是另外的 n 接触层 9。该另外的 n 接触层 9 例如是层序列,其由朝向有源区 7 的 n 掺杂的 GaN 层(例如具有大约 120nm 的层厚度)和背离于有源区的 n 掺杂的、尤其是高 n 掺杂的 InGaN 层(例如具有大约 5nm 的层厚度)构成。例如,n 掺杂的 GaN 层以浓度在 10^{18}cm^{-3} 到 $6 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ 之间(包括边界值)的 Si、优选是浓度在 $2 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 到 $8 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 之间(包括边界值)的 Si 掺杂。N 掺杂的 InGaN 层例如以浓度在 10^{18}cm^{-3} 到 10^{21}cm^{-3} 之间(包括边界值)的 Si、优选是浓度大于或等于 $3 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ 的 Si 掺杂。

[0087] 半导体本体(其尤其是发光二极管芯片(LED 芯片)或者激光二极管芯片)于是在两侧具有 n 接触层 3、9。半导体本体的电接触例如在衬底 1 的背离于半导体层序列的侧上和另外的 n 接触层 9 的表面上进行。对此,例如将尤其是结构化的接触金属氧化物和/或例如由透明导电氧化物如铟锡氧化物(ITO)或者 ZnO 构成的透明导电层施加到另外的 n 接触层 9 上。

[0088] 在图 5B 中示出了根据图 1 的实施例的半导体本体的多量子阱结构 7 的能级图,该半导体本体具有根据图 2 的隧道结 4 和根据图 3 的扩散势垒 6。与此相比,图 5A 示出了在没有隧道结的半导体本体中的相同的量子阱结构。价带 VB 和导带 CB 的能量 E 沿着图的垂直轴线以电子伏特(eV)为单位来绘制。

[0089] 水平轴线分别说明了以纳米(nm)为单位在半导体层序列内的相对位置 z。位置 z 的值随着距衬底 1 的距离而增加。在图 5A 的量子阱结构的情况下于是在 n 侧上设置有生长衬底。n 侧在图中用字母 n 标记并且设置在量子阱结构左侧。在图 5B 中,生长衬底设置在用字母 p 标记的 p 侧上(在图右侧)。

[0090] 在不带隧道结的半导体本体的情况下,载流子在从 n 导电的封闭层转入有源区或者从 p 掺杂的封闭层转入有源区时必须克服高能电势势垒。这些电势势垒对应于图 5A 中大约在 -20 纳米和 +5 纳米的位置处的强烈升高。在具有隧道结 4 的半导体本体的情况下,并不出现或者极少出现这样的电势势垒。

[0091] 附加地,图 5A 和 5B 的对比表明:在具有隧道结 4 的半导体本体(图 5B)中的有源区情况下容易降低量子阱深度并且量子阱的形状明显不同于根据图 5A 的量子阱的形状。以此方式降低了在具有隧道结的半导体本体中的有源区 7 情况下的量子阱之间的电势势垒的有效厚度。这样,使载流子在量子阱之间隧穿变得容易并且实现了载流子均匀地分布到各个量子阱。

[0092] 借助电子密度的计算可以表明的是,在图 5A 所示的不带隧道结的半导体体的情况下在有源区和 p 掺杂的封闭层之间的界面附近(大致对应于在图 5A 中的 0nm 的位置)出现最高的电子密度。这允许电子在 p 侧上不发射地复合。

[0093] 而在根据图 5B 的半导体本体的情况下,电子浓度在有源区 7 与 n 导电的封闭层 8 的界面的附近(对应于图 5B 中的在大约 15nm 到 20nm 之间的位置)为最大。由此有利地

降低了电子不发射地复合的危险,这特别是在高的工作电流并且由此特别是在高的载流子浓度的情况下对半导体本体的效率有有利的影响。

[0094] 在图 6 中示出了与相应的工作电流 I 相关的、由不同的半导体本体发射的光的辐射功率 Φ 。

[0095] 曲线 11 示出了根据图 1 的实施例的半导体本体的根据工作电流 I 的辐射功率 Φ 。与此相比,曲线 12 针对具有多量子阱结构而不带有隧道结的半导体本体示出了与工作电流 I 相关的辐射功率 Φ ,而曲线 13 针对具有隧道结和单量子阱结构的半导体本体示出了与工作电流 I 相关的辐射功率 Φ 。在当前的半导体本体的情况下,100mA 的工作电流基本上对应于 $200\text{A}/\text{cm}^2$ 的工作电流密度。图 6 中所示的 0 到 350mA 的范围由此对应于 0 到大约 $700\text{A}/\text{cm}^2$ 的工作电流密度的范围。

[0096] 带有多量子阱结构而不带有隧道结的半导体本体和带有隧道结和单量子阱结构的半导体本体在工作电流 I 在大约 150mA 以上时都达不到根据本发明的半导体本体的效率。

[0097] 在线 12 和 13 的情况下出现强烈的饱和,而与根据图 1 的实施例相关的线 11 在高的工作电流 I 的情况下线性地延伸。

[0098] 由图 6(尤其是基于曲线 12 和 13 的几乎相同的走向)也表明,在没有隧道结而带有多量子阱结构的半导体本体的情况下,多量子阱结构的量子阱中的仅仅一个对发射有贡献。

[0099] 只有将具有小的层厚度的势垒层 72、通过在半导体本体中使用隧道结 4 和将辐射发射分布到多个量子阱 71 上来降低多量子阱结构中的电势势垒与将载流子均匀地分布到有源层 71 上相结合,才引起在高的电流密度的情况下提高发射强度的效率。

[0100] 图 7 示出了实际上仅仅在势垒层 72 的足够小的层厚度的情况下才实现半导体本体发射的光的辐射功率 Φ 的、与工作电流强度 I 相关的基本线性的走向。

[0101] 在带有多量子阱结构而不带隧道结的半导体本体的情况下,势垒层的层厚度 d_B 实际不重要(曲线 12)。在 80mA 的工作电流的情况下的辐射功率 Φ (80mA) 与在 40mA 的工作电流的情况下的强度 Φ (40mA) 的比值以在所有层厚度 d_B 的情况下的大约 1.6 的值而表现出强烈的饱和。

[0102] 而在根据图 1 和 5B 的实施例的半导体本体的情况下,辐射功率的比值 Φ (80mA)/ Φ (40mA) 随着势垒层 72 的层厚度 d_B 减小而强烈地升高。在 4nm 或者更小的势垒层 72 的层厚度 d_B 的情况下,大约 1.8 或者更大的比值(如在该实施例中所实现的那样)表明了改进的线性,并且由此表明在高的工作电流 I 的情况下的半导体本体的发射强度的更高的效率。

[0103] 这个在图 10 中再次表明。在该图中针对根据图 1 的实施例的具有势垒层 72 的半导体本体示出了辐射功率 Φ 与工作电流 I 的相关性,这些势垒层具有 2nm、4nm、7nm 和 15nm 的层厚度 d_B 。当势垒层 72 具有 7nm 或者更小、优选 4nm 或者更小并且尤其是 2nm 或者更小的层厚度 d_B 时,在高的工作电流 I 的情况下提高了效率。

[0104] 图 8 示出了由不同的半导体本体发射的电磁辐射的半值宽度 FWHM。曲线 11、12 和 13 如图 6 那样与根据图 1 的实施例的半导体本体(曲线 11)、带有多量子阱结构而不带隧道结的半导体本体(曲线 12)和带有隧道结和单量子阱结构的半导体本体(曲线 13)相关

联。

[0105] 与其他半导体本体的辐射的半值宽度 FWHM 不同,根据图 1 的实施例的半导体本体的辐射的半值宽度 FWHM 实际上与工作电流 I 无关。根据上面所描述的扩展方案之一的半导体本体因此特别良好地适合于大功率激光二极管。

[0106] 图 9 示出了由不同的半导体本体发射的辐射的强度最大值的波长 L_{dom} 与工作电流 I 的相关性。在带有多量子阱结构而不带隧道结的半导体本体(曲线 12)和带有隧道结和单量子阱结构的半导体本体(曲线 13)的情况下,波长 L_{dom} 随工作电流 I 强烈偏移,而在根据图 1 的实施例的半导体本体(曲线 11)的情况下,强度最大值的波长 L_{dom} 有利地较不强烈地随工作电流 I 而变化。

[0107] 从图 11 可看出的是,半导体本体在高的工作电流 I 的情况下的效率与量子阱结构的量子阱的数目有关。在势垒层 72 的 4nm 的层厚度 d_B 的情况下,如在根据图 1 的实施例的半导体本体的情况那样,具有带有恰好三个有源层 71 的多量子阱结构的有源区 7 是特别高效的。由该半导体本体在工作电流 I 在大约 40mA 以上的情况下所发射的电磁辐射的辐射功率 Φ 在具有三个多重量子阱的多量子阱结构(“3×MQW”)的情况下最大(曲线 11)。

[0108] 有源层 71 的数目的进一步提高对进一步改进所发射的辐射的辐射功率 Φ 没有作用。例如,具有带有 5 个有源层 71 的多量子阱结构(“5×MQW”,曲线 11A)的半导体本体的辐射功率 Φ 甚至略低于具有带有三个有源层 71 的多量子阱结构的半导体本体的辐射功率 Φ (曲线 11)。

[0109] 目前发明人推测的是,这归因于有源区的宽度大于载流子可在其中复合的区域的宽度。提高量子阱的数目于是并不引起在工作中发射辐射的有源层 71 的数目的提高。然而在势垒层 72 的较小的层厚度 d_B (例如两纳米或者更小的层厚度)的情况下可以是合乎目的是,设置具有多于三个有源层 71 的多量子阱结构,例如具有四个或者五个有源层 71 的多量子阱结构。有源区在生长方向上的较小的伸展于是引起在该情况下所有四个或者五个层在半导体本体工作中发射电磁辐射。

[0110] 在工作电流 I 在大约 40mA 以上的情况下,具有单量子阱结构(“SQW”)的半导体本体发射具有最小的辐射功率 Φ (曲线 13)的光,由此再次确定的是,在带有多量子阱结构和隧道结 4 的半导体本体的情况下,有源层 71 中的多个对发射辐射有贡献。

[0111] 在图 12 中示出了由根据图 1 的实施例的半导体本体在工作中发射的相对辐射功率 Φ_{rel} 与未掺杂的 n 导电的层 8 的层厚度 d_n 的相关性(宽条)。与此相比,示出了在衬底与有源区之间具有多量子阱结构而不带隧道结的半导体本体的相对辐射功率 Φ_{rel} (窄条)。

[0112] 在后者情况下所发射的电磁辐射的辐射功率 Φ_{rel} 随未掺杂的 n 导电的层的层厚度 d_n 增加而强烈地降低,而根据图 1 的实施例的半导体本体有利地表现出在工作中所发射的电磁辐射的辐射功率 Φ_{rel} 与未掺杂的 n 导电的层的层厚度 d_n 的低的相关性。

[0113] 图 4 示出了半导体本体的另一示例性实施例。根据该实施例,半导体本体在 n 导电的封闭层 8 与 n 接触层 9 之间包含另外的隧道结 4',另外的 p 掺杂的封闭层 5',另外的扩散势垒 6',另外的有源区 7'和另外的 n 导电的封闭层 8',它们在从 n 导电的封闭层 8 至 n 接触层 9 的方向上以上述顺序相继。

[0114] 所述另外的隧道结 4'、另外的 p 掺杂的封闭层 5'、另外的扩散势垒 6'、另外的有源区 7' 和另外的 n 导电的封闭层 8' 在此与隧道结 4、p 掺杂的封闭层 5、扩散势垒 6、有源区

7 和 n 导电的封闭层 8 相同地实施。各个层的实施例如对应于结合图 1 至 3 的实施例所描述的扩展方案。

[0115] 本发明并未通过借助实施例的描述而局限于此。更确切地说,本发明包括任意新的特征以及特征的任意组合,特别是包含权利要求中的特征的任意组合,即使该特征或者该组合本身并未明确地在权利要求或者实施例中说明。

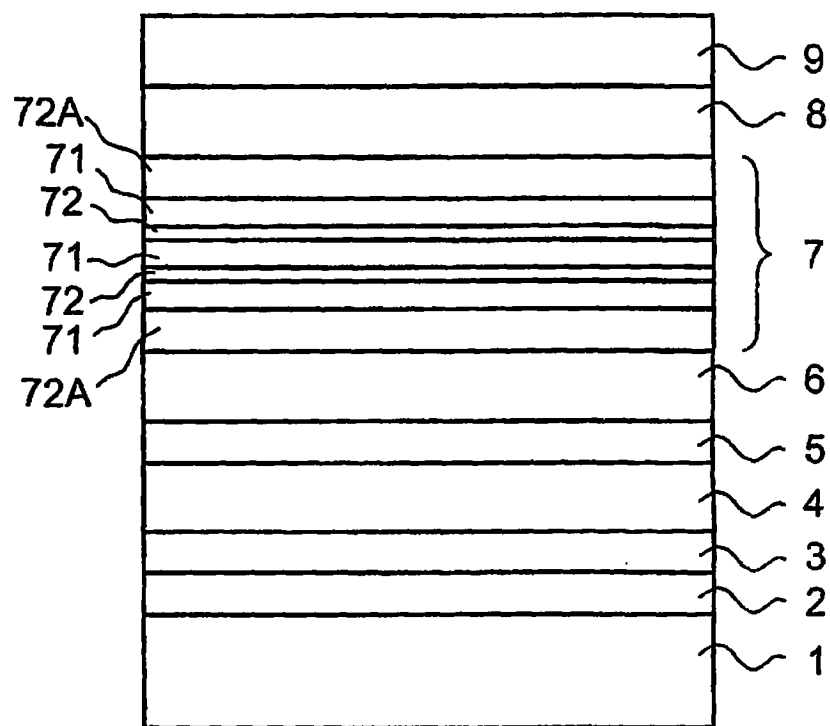


图 1

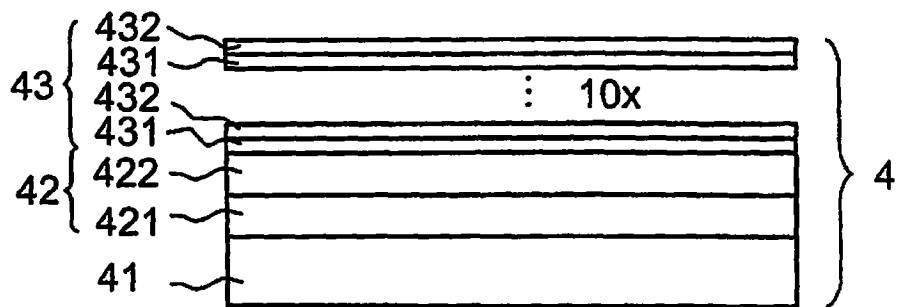


图 2

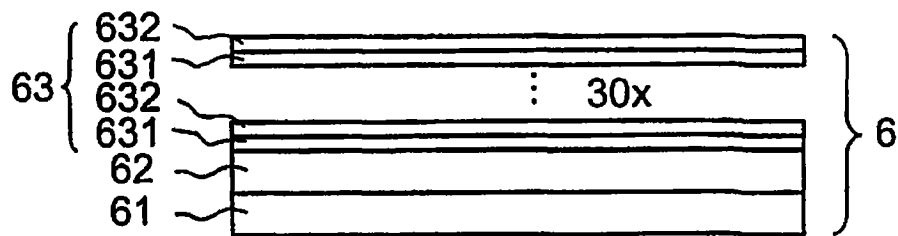


图 3

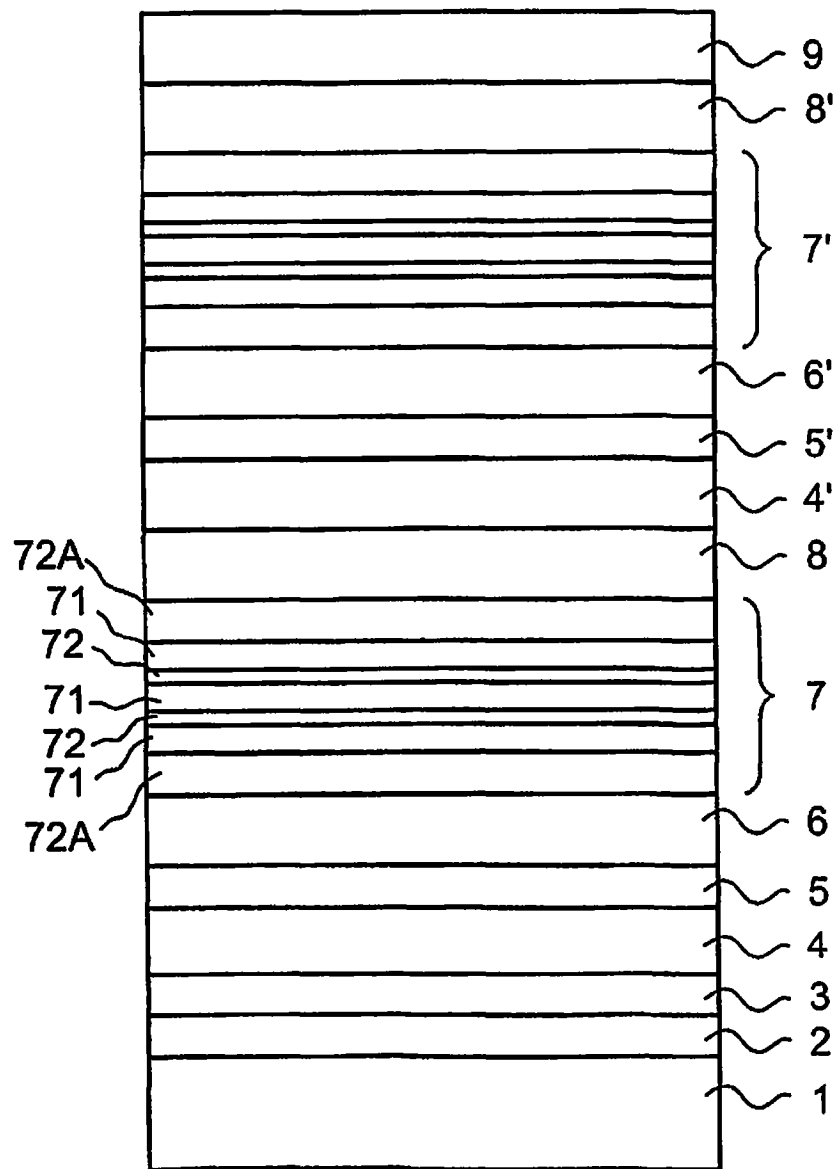


图 4

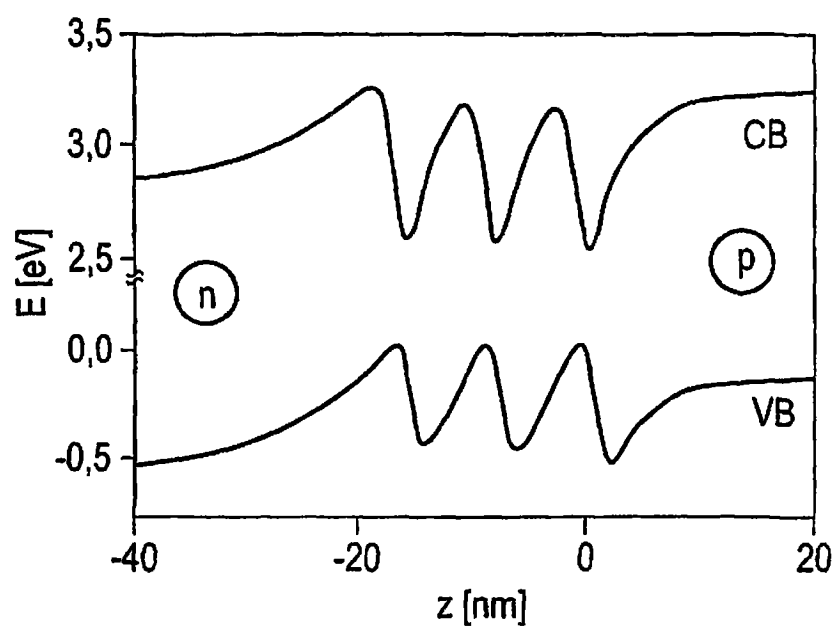


图 5A

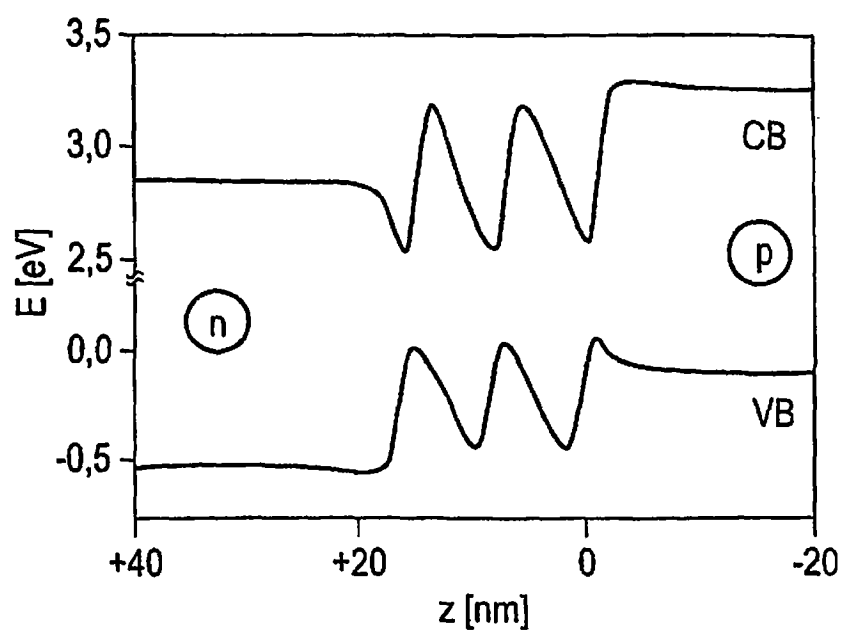


图 5B

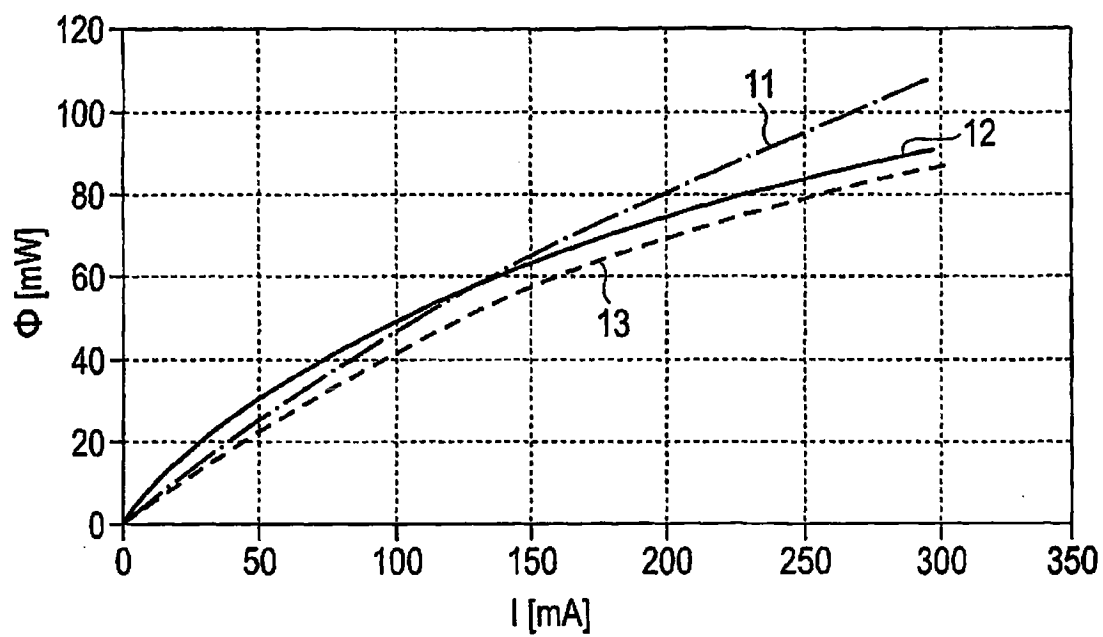


图 6

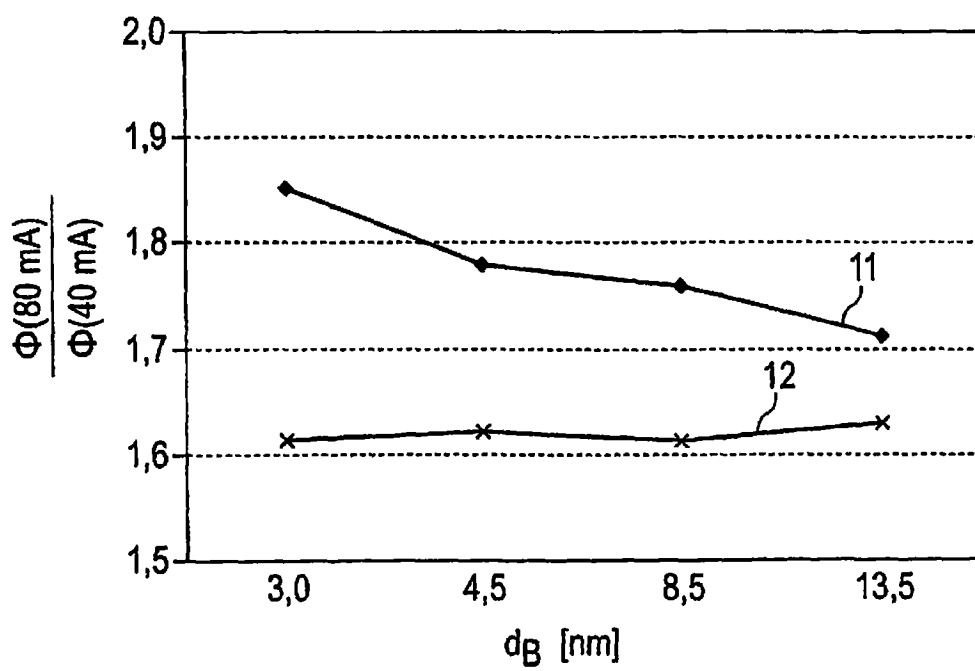


图 7

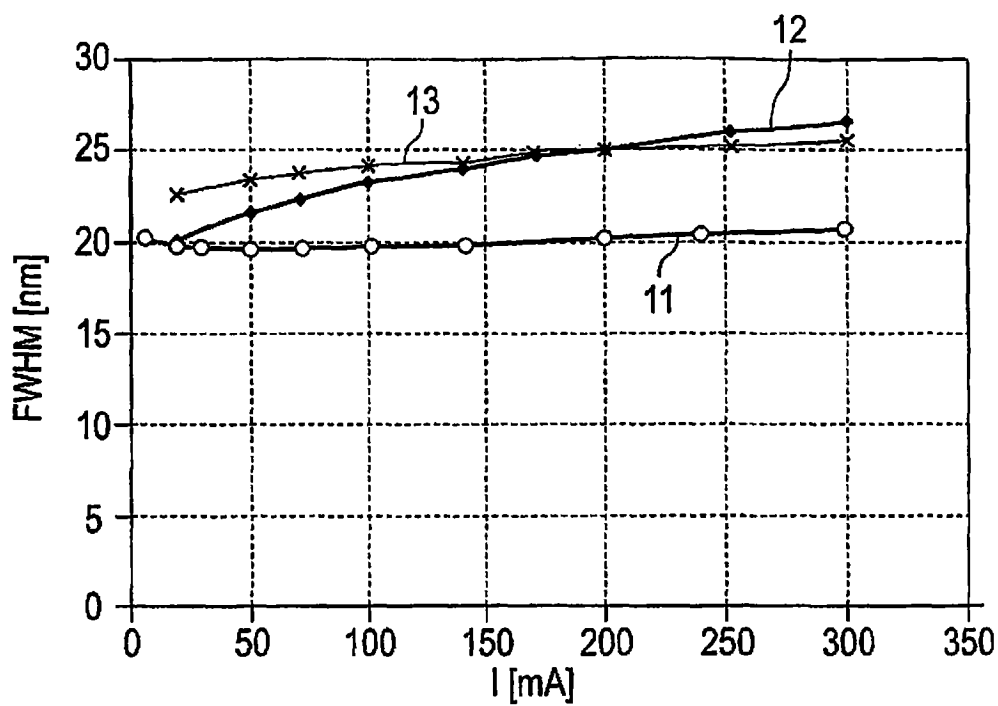


图 8

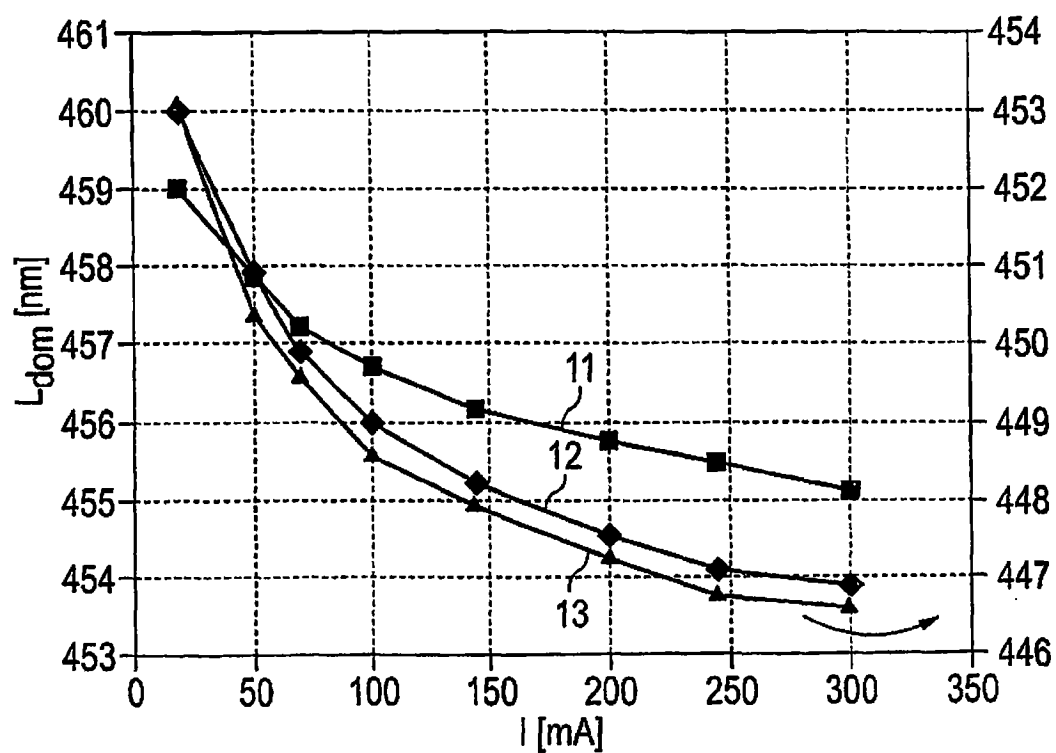


图 9

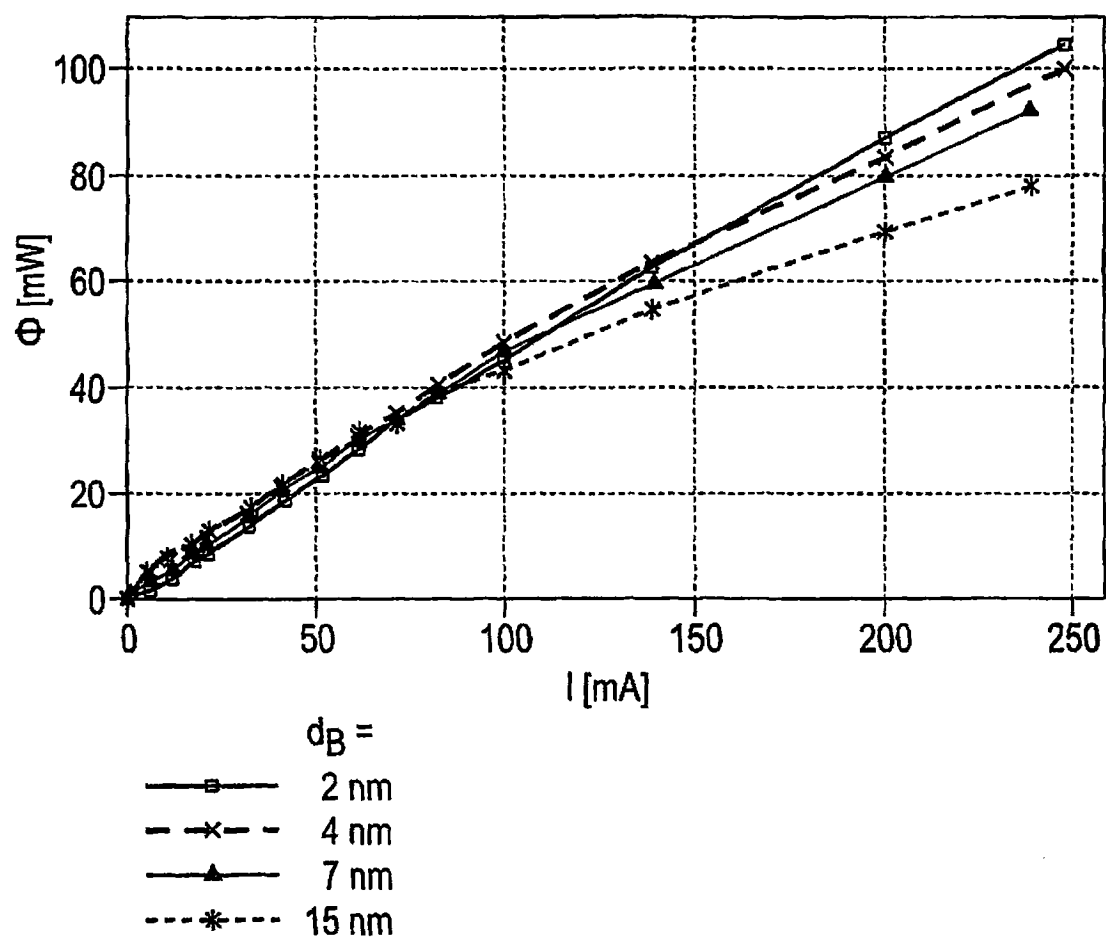


图 10

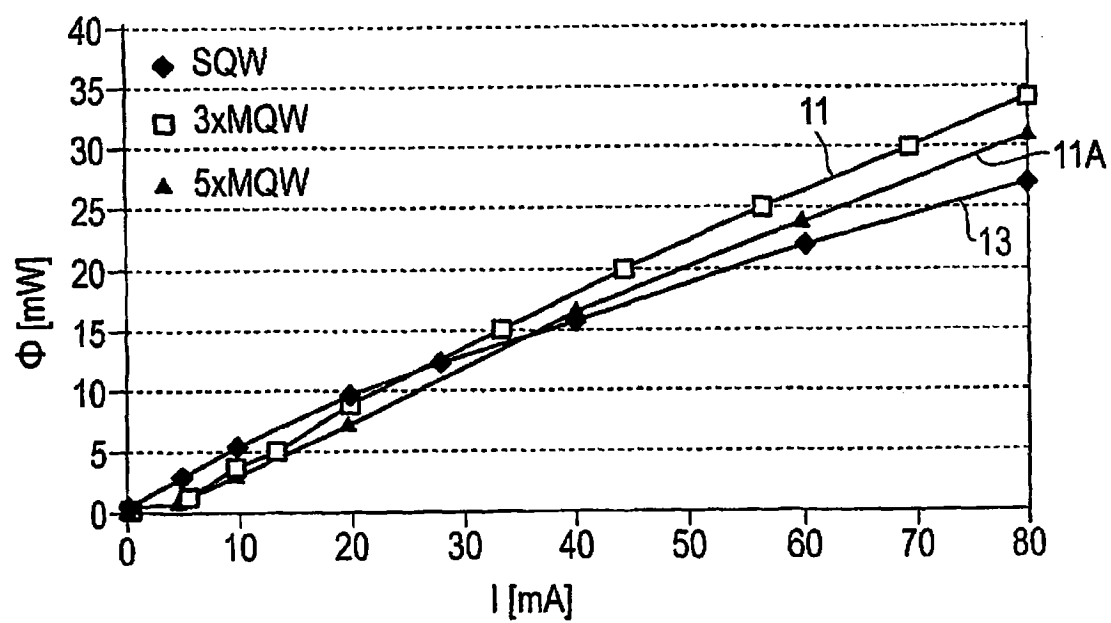


图 11

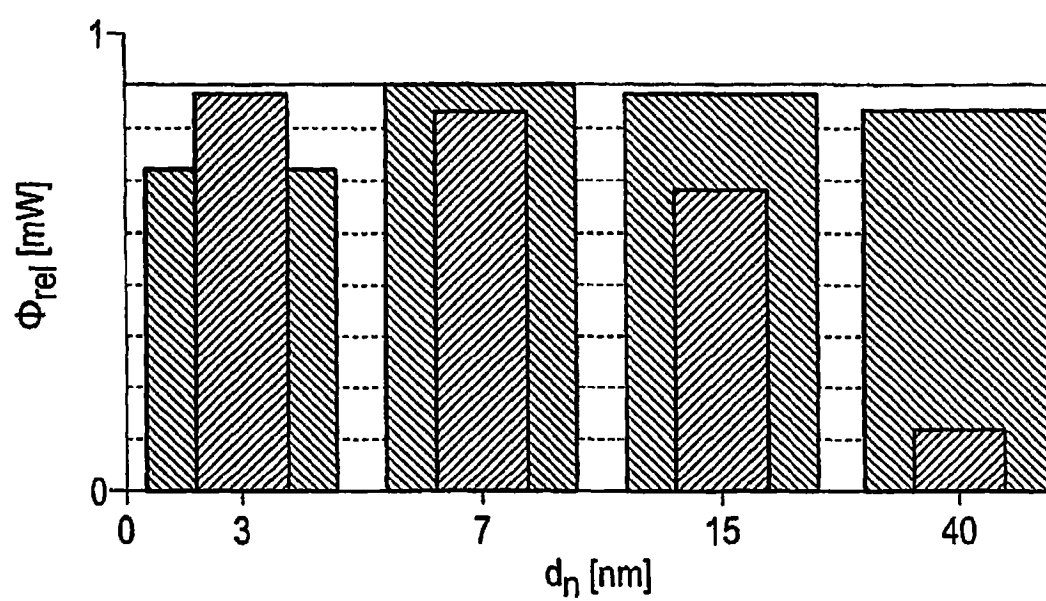


图 12