



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 110148885 B

(45) 授权公告日 2024.05.03

(21) 申请号 201910511848.3

(22) 申请日 2019.06.13

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 110148885 A

(43) 申请公布日 2019.08.20

(73) 专利权人 海南师范大学

地址 571158 海南省海口市琼山区龙昆南路99号

(72) 发明人 李林 曾丽娜 李再金 赵志斌

乔忠良 曲轶 彭鸿雁

(74) 专利代理机构 北京慕达星云知识产权代理

事务所(特殊普通合伙)

11465

专利代理师 崔自京

(51) Int.Cl.

H01S 5/187 (2006.01)

H01S 5/183 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 104488148 A, 2015.04.01

CN 210040877 U, 2020.02.07

JP 2008243954 A, 2008.10.09

US 2004233963 A1, 2004.11.25

US 2015139260 A1, 2015.05.21

CN 108233176 A, 2018.06.29

CN 109066292 A, 2018.12.21

审查员 周亚婷

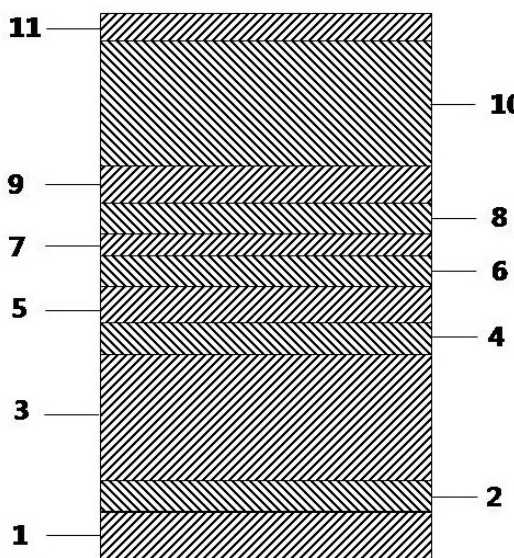
权利要求书1页 说明书5页 附图5页

(54) 发明名称

一种水平空气柱电流注入孔径结构的垂直腔面发射激光器

(57) 摘要

本发明属于半导体光电子技术领域,涉及一种水平空气柱电流注入孔径结构的垂直腔面发射激光器(VCSEL)结构及其制备方法,包括底部同质结分布布拉格反射镜(DBR)和顶部同质结DBR以及电流注入孔径的制作方法,从而实现GaN基VCSEL电注入激光光源。本发明提出一种水平空气柱电流注入孔径结构,包含下电流注入层和上电流注入层,利用电化学刻蚀工艺制备出电流注入孔径。本发明无需二次外延生长顶部DBR结构,只需一次外延生长即可完成GaN VCSEL完整外延结构,从而能够保证获得高质量的外延材料。本发明提出的一种水平空气柱电流注入结构能有效地限制侧向电流的扩散,降低器件的阈值电流密度,解决GaN基VCSEL电流注入孔径的制作难题。



1. 一种水平空气柱电流注入孔径结构的垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 结构, 其特征在于, 包括底部同质结分布布拉格反射镜 (DBR)、下电流注入层、多量子阱有源层、隧道结、上电流注入层以及顶部同质结DBR;

在衬底层上由下至上依次包括: 蓝宝石衬底1, 该衬底用于在其上外延生长垂直腔面发射激光器各层材料; 缓冲层2, 为GaN材料, 该缓冲层制作在衬底上, 用于阻止衬底中缺陷的转移; 底部同质结DBR层3, 为外延生长不同掺杂浓度的n型GaN ($n\text{-GaN}/n^+\text{-GaN}$) DBR同质结材料; 下电流注入层4, 为厚度是50nm的 $n^+\text{-GaN}$ 材料, 掺杂浓度为 $n=5E19/\text{cm}^3$, 该层制作在底部DBR层上; 下势垒层5, 为GaN材料, 制作在下电流注入层上; 有源区6, 为多量子阱, 该层制作在下势垒层上; 隧道结7, 该层制作在多量子阱层上, 上电流注入层8, 为厚度是50nm的 $n^+\text{-GaN}$ 材料, 掺杂浓度为 $n=5E19/\text{cm}^3$, 该层制作在隧道结上, 上势垒层9, 为GaN材料, 制作在有源区上; 顶部DBR层10, 为外延生长不同掺杂浓度的n型GaN ($n\text{-GaN}/n^+\text{-GaN}$) DBR同质结材料, 该DBR层制作在上势垒层上; 欧姆接触层11, 为 $n^+\text{-GaN}$ 材料, 该层制作在顶部DBR层上;

其中, 垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 结构的两次光刻、ICP刻蚀法VCSEL制备工艺, 具体步骤为: 首先GaN垂直腔面发射激光器外延片第一次光刻、ICP刻蚀, 然后利用一种脉冲直流电压电化学刻蚀法, 制作出GaN垂直腔面发射激光器外延片电流注入孔径, 然后进行GaN垂直腔面发射激光器外延片第二次光刻、ICP刻蚀, 制作出GaN垂直腔面发射激光器外延片顶部DBR和底部DBR完整结构。

2. 根据权利要求1所述的一种水平空气柱电流注入孔径结构的垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 结构, 其特征在于引入下电流注入层和上电流注入层, 通过优化电流注入层结构来限制侧向电流的扩散, 提高电流注入多量子阱有源区的均匀性, 降低器件的阈值电流密度, 从而有利于实现电注入VCSEL激光光源。

3. 根据权利要求1所述的一种水平空气柱电流注入孔径结构的垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 结构, 其特征在于只需一次外延生长即可完成包括底部同质结DBR、下电流注入层、多量子阱有源层、隧道结、上电流注入层以及顶部同质结DBR在内的GaN垂直腔面发射激光器完整外延结构, 无需二次外延生长顶部DBR结构, 从而能够保证获得高质量的外延材料。

4. 根据权利要求1中所述的一种水平空气柱电流注入孔径结构的垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 结构, 其特征在于由较低刻蚀电压 (通常根据刻蚀溶液选择合适的刻蚀电压, 刻蚀速率约为 $1\text{nm}/\text{s}$ - $3\text{nm}/\text{s}$) 控制样品开始刻蚀时的反应速率, 刻蚀一段时间达到所设计的刻蚀深度后, 升高电压至原来刻蚀电压的1.5倍以上时, 刻蚀速度急剧下降, 如刻蚀反应终止一样, 不能继续进行有效刻蚀, 即使再降低刻蚀电压至原来的数值, 刻蚀反应同样不能继续进行, 这个过程为电流注入孔径制备工艺。

5. 根据权利要求4中所述的一种水平空气柱电流注入孔径结构的垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 结构, 其特征在于利用在相同刻蚀电压情况下, 刻蚀速率和GaN的掺杂浓度成正比例, 因此样品中GaN的掺杂浓度高, 则对应的刻蚀速率快, 选择合适的刻蚀电压电化学刻蚀至有效电流注入孔径时, 升高刻蚀电压完成电流注入孔径刻蚀钝化处理后, 制作出电流注入孔径。

一种水平空气柱电流注入孔径结构的垂直腔面发射激光器

技术领域

[0001] 本发明涉及一种水平空气柱电流注入孔径结构的垂直腔面发射激光器及其制备方法,属于半导体光电子技术领域。

背景技术

[0002] 近二十年来,GaN基半导体材料在外延生长和光电子器件制备方面均取得了重大科技突破,其中发光二极管(LED)和边发射激光器(EEL)已经实现产业化,但是具有更优越特性的垂直腔面发射激光器(VCSEL)仍处于实验室研究阶段。VCSEL的独特优点包括阈值电流低、易实现单纵模工作、调制频率高、发散角度小、圆形光斑、易与光纤耦合、不必解理即可完成工艺制作和检测,易实现高密度二维阵列及光电集成等。蓝光VCSEL凭借以上优势,在高密度光存储、激光显示、激光打印、激光照明、激光电视、水下通信、海洋资源探测及激光生物医学等领域具有广阔的应用前景。

[0003] 然而由于VCSEL谐振腔短(仅几微米长),导致其单程增益长度也极短,因此就要求制作的分布布拉格反射镜(DBR)材料质量必须良好,还要求DBR的反射率极高(通常要求达到99%以上)。与GaN基边发射激光器(EEL)或者GaAs基垂直腔面发射激光器(VCSEL)相比,GaN基VCSEL的研究开发进展仍相对缓慢,其主要原因是外延生长高质量的氮化物DBR非常困难以及ITO膜内腔电极高吸收损耗导致较高的阈值电流和较低的光输出。研发GaN基VCSEL已经成为国内外光电子领域研究的前沿和热点,国内外许多研发机构都投入了大量的人力和物力进行基础研究和应用开发,期望实现产业化。我国在GaN基电注入蓝光VCSEL研究方面起步较晚,与国际先进水平差距较大。所以,开展基于水平空气柱电流注入孔径结构的蓝光VCSEL研究具有重要的现实意义。

[0004] 为了降低外延生长氮化物异质结双DBR的难度,国内外的研究人员报道了一些混合式DBR结构VCSEL的解决方案。例如,采用氮化物异质结底部DBR(Epitaxial DBR)和介质膜顶部DBR(Dielectric DBR)组成的一种混合式DBR结构VCSEL,在衬底上外延生长底部氮化物异质结DBR与发光层,再镀膜沉积顶部介质膜DBR。由于介质膜DBR不受晶格匹配的限制,可以自由选用折射率差值大的两种介质材料,因此更易于获得高反射率和高反射带宽。1999年《Science》杂志报道了日本东京大学的Arakawa研究组利用外延生长的AlGaIn/GaN底部氮化物DBR和ZrO₂/SiO₂顶部介质膜DBR组成的混合式DBR结构VCSEL,率先实现了室温光注入脉冲激射。2010年中国的台湾交通大学的Hao-Chung Kuo研究组制备了AlN/GaN DBR和Ta₂O₅/SiO₂介质膜DBR的混合式DBR结构VCSEL,实现了室温连续电注入激射,阈值电流密度为12.4KA/cm²;该研究组2015年实现了VCSEL的阈值电流密度为10.6KA/cm²,输出功率达到0.9mW。2012年瑞士洛桑凝聚态物理研究所Cosendey等人研制了GaN衬底上外延生长晶格匹配的AlInN/GaN底部DBR和TiO₂/SiO₂介质膜顶部DBR的混合式DBR结构VCSEL,实现了室温脉冲电注入激射。

[0005] 与此同时,一些研究者提出了双介质膜DBR结构VCSEL解决方案。双介质膜DBR结构(Dielectric DBR)VCSEL,即通过薄膜转移的方式去除原始衬底,制备出由底部和顶部两部

分介质膜DBR构成的VCSEL。日本松下公司和厦门大学张保平研究组均实现了 ZrO_2/SiO_2 双介质膜DBR结构VCSEL室温连续电注入激射,后者阈值电流密度降低至 $1.2KA/cm^2$ 。美国加州大学圣巴巴拉分校的Nakamura研究组采用厚度小于50nm的ITO膜内腔电极, Ta_2O_5/SiO_2 双介质膜DBR结构VCSEL阈值电流密度达到 $8KA/cm^2$;当该研究组进一步采用隧道结代替吸收系数较大的ITO膜内腔电极时,阈值电流密度下降至 $3.5KA/cm^2$ 。2016年日本索尼公司报道了 Ta_2O_5/SiO_2 和 SiN/SiO_2 双介质膜DBR结构VCSEL,器件的发光波长为453.9nm,阈值电流密度为 $22KA/cm^2$,室温连续输出功率最高达到了1.1mW。2018年索尼公司报道了介质膜 Ta_2O_5/SiO_2 双DBR结构VCSEL,并利用单微曲面镜对蓝光VCSEL侧向光场进行了限制,虽然获得了较好的光束质量,但是阈值电流密度却上升至 $141KA/cm^2$ 。

[0006] 为了解决外延生长高质量氮化物异质结DBR的难题,近几年利用电化学刻蚀技术,把较高掺杂浓度的n型氮化镓(n^+-GaN)样品作为阳极,浸泡在酸性或碱性电解质中,在一定电压的作用下, n^+-GaN 会发生电化学刻蚀反应形成纳米多孔氮化镓(nanoporous GaN,简写NP-GaN)结构。2013年中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所和中国的台湾彰化师范大学报道了隧道结GaN基边发射激光器(EEL)的输出特性的模拟研究,结果表明该结构能获得较低的阈值电流密度和串联电阻率,并能提高器件的输出功率。2015年耶鲁大学Jung Han研究组报道了不同掺杂浓度的n型GaN($n-GaN/n^+-GaN$)DBR样品中的 n^+-GaN 在电化学刻蚀工艺过程中形成不同孔径尺寸的纳米多孔GaN结构的变化规律。由于该GaN/NP-GaN结构DBR具有折射率差值较大($\Delta n \geq 0.5$)的优势,因此使用较少对数的DBR就能够获得高反射率($R > 99\%$),并且高反射带宽在红光-蓝光范围内可调。2015年韩国全南大学首次实现了GaN/NP-GaN DBR结构VCSEL光注入激射发光。2017年耶鲁大学Jung Han研究组报道了GaN/NP-GaN DBR结构蓝紫光LED,2018年该组又报道了一种具有纳米多孔氮化镓(NP-GaN)的InGaN/GaN微盘激光器。

[0007] 2015年日本和美国的研究机构报道了隧道结GaN LED器件的I-V特性得到了明显改善。美国加州大学圣巴巴拉分校的Nakamura研究组基于ITO膜内腔电极和 Ta_2O_5/SiO_2 双介质膜DBR结构,研究了离子注入孔径(Ion implanted aperture)的电流注入孔径结构VCSEL,阈值电流密度为 $16KA/cm^2$;以及空气隙孔径(Air-gap aperture)电流注入孔径结构的VCSEL,阈值电流密度为 $22KA/cm^2$ 。2018年该研究组基于 Ta_2O_5/SiO_2 双介质膜DBR结构,研究了离子注入电流输入孔径结构隧道结内腔接触的VCSEL,实现了室温连续输出 $140\mu W$,器件的阈值电流密度为 $42.4KA/cm^2$ 。该研究组又通过优化外延生长VCSEL材料,使器件输出功率提高到 $319\mu W$,阈值电流密度降低至 $10KA/cm^2$ 。

[0008] 综上所述,美国耶鲁大学报道了GaN/NP-GaN结构DBR的制备工艺条件和纳米多孔GaN结构的变化规律,及其在GaN/NP-GaN DBR结构蓝紫光LED和具有纳米多孔氮化镓(NP-GaN)的InGaN/GaN微盘激光器的应用,而基于GaN/NP-GaN双DBR结构的VCSEL研究未见报道。美国加州大学所采用离子注入孔径和空气隙孔径电流注入孔径结构的VCSEL谐振腔均为双介质膜DBR结构。这两种电流注入孔径结构均采用ITO膜内腔电极,ITO膜内腔电极吸收引起的损耗以及ITO/GaN界面带来的损耗导致较高的阈值电流和较低的光输出。

[0009] 本发明提出一种水平空气柱电流注入孔径的GaN蓝光VCSEL新结构及其制备方法,来实现GaN基电注入VCSEL。该方法的优点是只需一次外延生长双DBR的完整VCSEL结构,不需要二次制作顶部DBR,也不采用ITO膜电极,能够避免ITO膜内腔电极高吸收损耗的问题。

这种空气柱电流注入孔径结构能有效地限制侧向电流的扩散,提高电流注入多量子阱有源区的均匀性,降低器件的阈值电流密度,从而实现电注入蓝光VCSEL。本发明将解决VCSEL电流注入孔径的制作难题,突破电注入GaN基VCSEL的技术瓶颈,为GaN基VCSEL(紫外、蓝绿光)的研发提供一种新思路,推进电注入GaN基VCSEL的产业化进展,产生重大的经济效益和社会效益。

发明内容

[0010] 本发明的目的在于提出一种电注入蓝绿光GaN垂直腔面发射激光器外延结构,通过电化学刻蚀方法制备水平空气柱电流注入孔径来实现一种水平空气柱电流注入孔径结构的垂直腔面发射激光器。

[0011] 为了实现上述目的,本发明提出了一种水平空气柱电流注入孔径结构的垂直腔面发射激光器结构,在衬底层上由下至上依次包括:蓝宝石衬底,该衬底用于在其上外延生长垂直腔面发射激光器各层材料;缓冲层,为厚度是1000nm的GaN材料,该缓冲层制作在衬底层上,用于阻止衬底中缺陷的转移;底部DBR层,为外延生长不同掺杂浓度的n型GaN (n-GaN/n+-GaN) DBR同质结材料;下电流注入层,该层制作在底部DBR层上;下势垒层,为厚度是100nm的GaN材料,制作在下电流注入层上;有源区,为多量子阱,该层制作在下势垒层上;隧道结,该层制作在多量子阱层上;上电流注入层,该层制作在隧道结上;上势垒层,为厚度是100nm的GaN材料,制作在有源区上;顶部DBR层,为外延生长不同掺杂浓度的n型GaN (n-GaN/n+-GaN) DBR同质结材料,该DBR层制作在上势垒层上;欧姆接触层,为厚度是300nm的n+-GaN材料,该层制作在顶部DBR层上。

[0012] 本发明提出本发明提出了一种水平空气柱电流注入孔径结构的垂直腔面发射激光器的制作方法。具体步骤如下:首先GaN垂直腔面发射激光器外延片第一次光刻、ICP刻蚀,示意图如图2所示。然后进行GaN垂直腔面发射激光器外延片电流注入孔径制作,示意图如图3所示。在实验过程中,刻蚀电压越大,刻蚀速度越快,多孔GaN尺寸越大。在进行顶部DBR刻蚀钝化工艺过程中,如何选择刻蚀电压是非常重要的因素之一,由较低刻蚀电压(通常根据刻蚀溶液选择合适的刻蚀电压,刻蚀速率约为1nm/s-3nm/s)控制样品开始刻蚀时的反应速率,刻蚀一段时间达到所设计的刻蚀深度后,升高电压至原来刻蚀电压的1.5倍以上,刻蚀速度急剧下降,如刻蚀反应终止一样,不能继续进行有效刻蚀,即使再降低刻蚀电压至原来的数值,刻蚀反应同样不能继续进行,这个过程我们称之为DBR刻蚀钝化工艺。

[0013] 本发明利用DBR刻蚀钝化工艺,选择合适的刻蚀电压电化学刻蚀至有效电流注入孔径时,升高刻蚀电压进行电流注入孔径刻蚀钝化处理工艺,从而保持电流注入孔径尺寸不变。其次进行GaN垂直腔面发射激光器外延片第二次光刻、ICP刻蚀,如图4所示。最后进行GaN垂直腔面发射激光器外延片顶部和底部DBR制作,选择合适的刻蚀电压电化学刻蚀至顶部和底部DBR全部刻蚀完成,示意图如图5所示。

附图说明

[0014] 图1是一种电注入GaN垂直腔面发射激光器外延结构示意图,1为衬底,2为缓冲层,3为底部DBR层,4为下电流注入层,5为下势垒层,6为有源区,7为隧道结,8为上电流注入层,9为上势垒层,10为顶部DBR层,11为欧姆接触层。

[0015] 图2是GaN垂直腔面发射激光器外延片第一次光刻、ICP刻蚀示意图,1为衬底,2为缓冲层,3为底部DBR层,4为下电流注入层,5为下势垒层,6为有源区,7为隧道结,8为上电流注入层,9为上势垒层,10为顶部DBR层,11为欧姆接触层,20为第一次光刻、ICP刻蚀沟道。

[0016] 图3为GaN垂直腔面发射激光器外延片电流注入孔径制作示意图,1为衬底,2为缓冲层,3为底部DBR层,4为下电流注入层,5为下势垒层,6为有源区,7为隧道结,8为上电流注入层,9为上势垒层,10为顶部DBR层,11为欧姆接触层,20为第一次光刻、ICP刻蚀沟道,21为DBR第一次刻蚀区,30为欧姆接触刻蚀区,31为上电流注入孔径区,32为隧道结刻蚀区,33为下电流注入孔径区。

[0017] 图4为GaN垂直腔面发射激光器外延片顶部和底部DBR制作示意图,1为衬底,2为缓冲层,3为底部DBR层,4为下电流注入层,5为下势垒层,6为有源区,7为隧道结,8为上电流注入层,9为上势垒层,10为顶部DBR层,11为欧姆接触层,20为第一次光刻、ICP刻蚀沟道,21为DBR第一次刻蚀区,22为第二次光刻、ICP刻蚀沟道。

[0018] 图5为GaN垂直腔面发射激光器外延片顶部和底部DBR全部刻蚀完成示意图,1为衬底,2为缓冲层,3为底部DBR层,4为下电流注入层,5为下势垒层,6为有源区,7为隧道结,8为上电流注入层,9为上势垒层,10为顶部DBR层,11为欧姆接触层,20为第一次光刻、ICP刻蚀沟道,21为DBR第一次刻蚀区,22为第二次光刻、ICP刻蚀沟道,30为欧姆接触刻蚀区,31为上电流注入孔径区,32为隧道结刻蚀区,33为下电流注入孔径区,34为底部DBR刻蚀区,35为顶部DBR刻蚀区。

[0019] 请参阅图1,图1是本发明的一种具体实施方式:本发明提出了一种水平空气柱电流注入孔径结构的垂直腔面发射激光器外延结构,在衬底层上由下至上依次包括:蓝宝石衬底1,该衬底用于在其上外延生长垂直腔面发射激光器各层材料;缓冲层2,为厚度是1000nm的Ga_N材料,该缓冲层制作在衬底上,用于阻止衬底中缺陷的转移;底部DBR层3,为外延生长不同掺杂浓度的n型Ga_N(n-Ga_N/n⁺-Ga_N) DBR同质结材料,底部DBR总共20对,厚度分别为40nm和55nm,n-Ga_N掺杂浓度为 $n=1E18/cm^3$,n⁺-Ga_N掺杂浓度为 $n=1E19/cm^3$;下电流注入层4,为厚度是50nm的n⁺-Ga_N材料,掺杂浓度为 $n=5E19/cm^3$;下势垒层5,为厚度是100nm的Ga_N材料,制作在底部DBR层上;有源区6,为多量子阱,其发光波长为420nm-430nm,该层制作在下势垒层上;隧道结7,为重掺杂n⁺-Ga_N/p⁺-Ga_N,n⁺-Ga_N和p⁺-Ga_N的掺杂浓度均 $5E19/cm^3$,厚度分别为15nm和10nm,该层制作在多量子阱层上;上电流注入层8,为厚度是50nm的n⁺-Ga_N材料,掺杂浓度为 $n=5E19/cm^3$,该层制作在隧道结上;上势垒层9,为厚度是100nm的Ga_N材料,制作在有源区上;顶部DBR层10,为外延生长不同掺杂浓度的n型Ga_N(n-Ga_N/n⁺-Ga_N) DBR同质结材料,顶部DBR总共15对,厚度分别为40nm和55nm,n-Ga_N掺杂浓度为 $n=1E18/cm^3$,n⁺-Ga_N掺杂浓度为 $n=1 \times E19/cm^3$,该DBR层制作在上势垒层上;欧姆接触层10,为厚度是300nm的n⁺-Ga_N材料,掺杂浓度为 $n=5E19/cm^3$,该层制作在顶部DBR层上。

[0020] 请参阅图2-图5,图2-图5是本发明的一种水平空气柱电流注入孔径结构的垂直腔面发射激光器制备工艺具体实施方式:本发明提出一种水平空气柱电流注入孔径结构的垂直腔面发射激光器DBR和电流注入孔径的制作方法。具体步骤如下:首先Ga_N垂直腔面发射激光器外延片第一次光刻、ICP刻蚀。如图2所示,1为衬底,2为缓冲层,3为底部DBR层,4为下电流注入层,5为下势垒层,6为有源区,7为隧道结,8为上电流注入层,9为上势垒层,10为顶部DBR层,11为欧姆接触层,20为第一次光刻、ICP刻蚀沟道。刻蚀溶液为硝酸(硝酸质量分数

约为68%，以下无特殊说明硝酸质量分数相同)，采用脉冲直流恒压电源，调节刻蚀电压1.5V、矩形波电压脉冲宽度30s和间隔时间10s，刻蚀4.5小时后，升高电压至2.5V，5分钟后反应结束，实现Ga_N垂直腔面发射激光器外延片电流注入孔径制作。如图3所示，20为第一次光刻、ICP刻蚀沟道，21为DBR第一次刻蚀区，30为欧姆接触刻蚀区，31为上电流注入孔径区，32为隧道结刻蚀区，33为下电流注入孔径区。

[0021] 然后进行Ga_N垂直腔面发射激光器外延片第二次光刻、ICP刻蚀，如图4所示，20为第一次光刻、ICP刻蚀沟道，21为DBR第一次刻蚀区，22为第二次光刻、ICP刻蚀沟道。

[0022] 最后进行Ga_N垂直腔面发射激光器外延片顶部和底部DBR制作示意图如图5所示，20为第一次光刻、ICP刻蚀沟道，21为DBR第一次刻蚀区，22为第二次光刻、ICP刻蚀沟道。30为欧姆接触刻蚀区，31为上电流注入孔径区，32为隧道结刻蚀区，33为下电流注入孔径区，34为底部DBR刻蚀区，35为顶部DBR刻蚀区。刻蚀溶液为硝酸，刻蚀电压为1.5V，刻蚀4小时后反应结束，Ga_N垂直腔面发射激光器外延片顶部和底部DBR全部刻蚀完成。

[0023] 以上所述，仅为本发明中的具体实施方式，但本发明的保护范围并不局限于此，任何熟悉该技术的人在本发明所揭露的技术范围内，可轻易想到的变换或替换，都应涵盖在本发明的包含范围之内。因此，本发明的保护范围应该以权利要求书的保护范围为准。

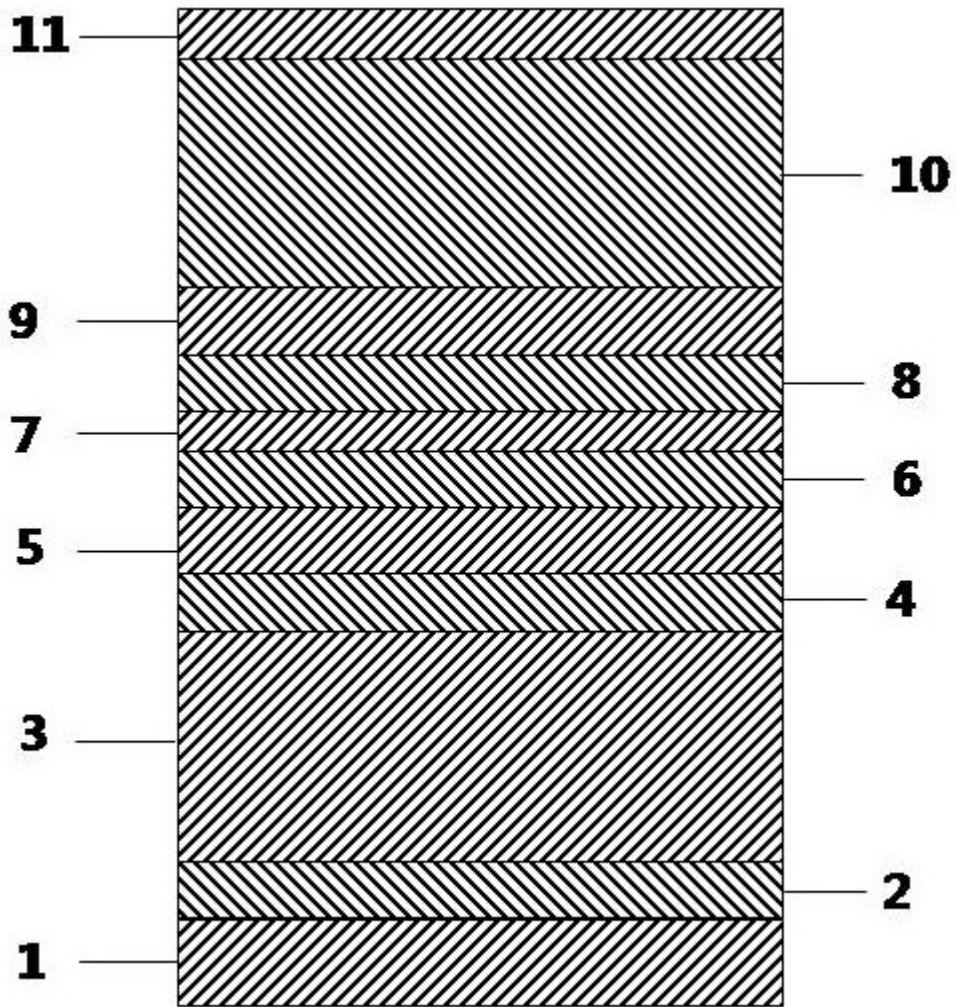


图 1

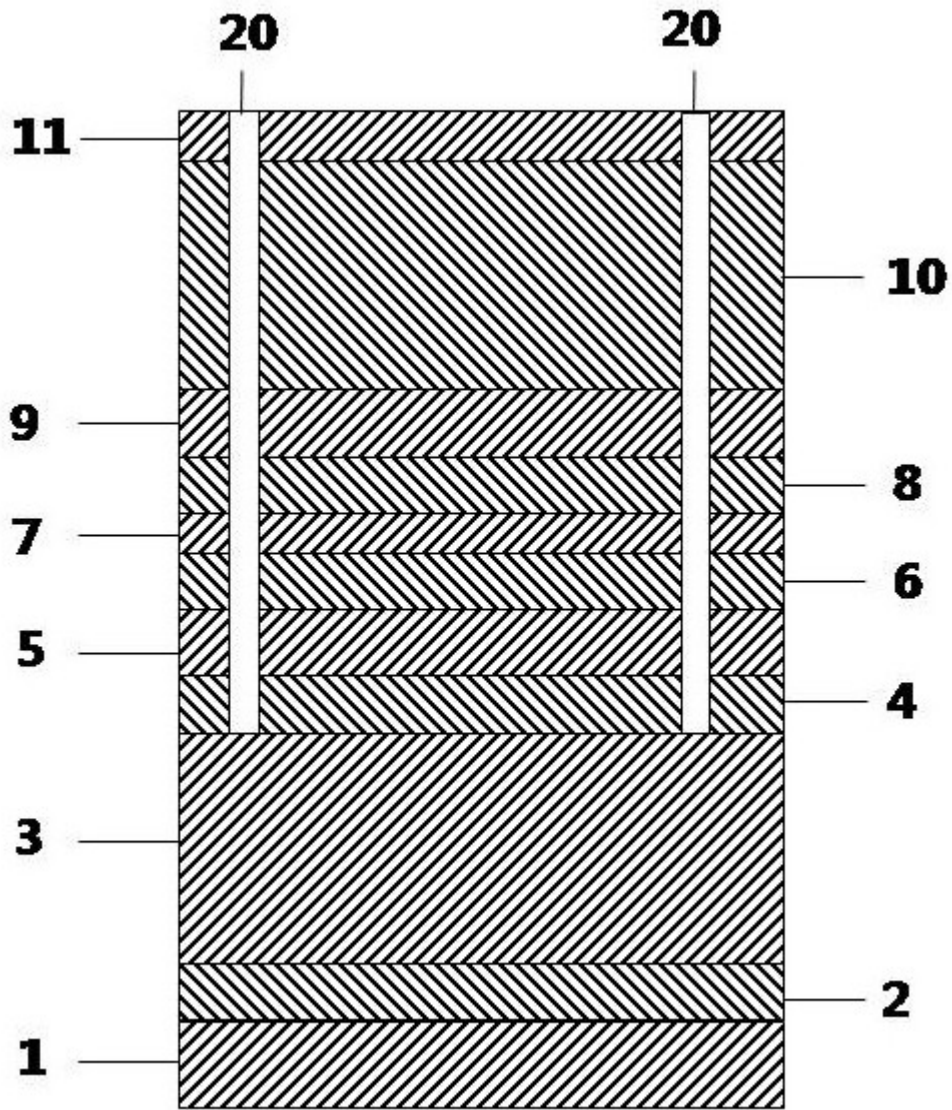


图 2

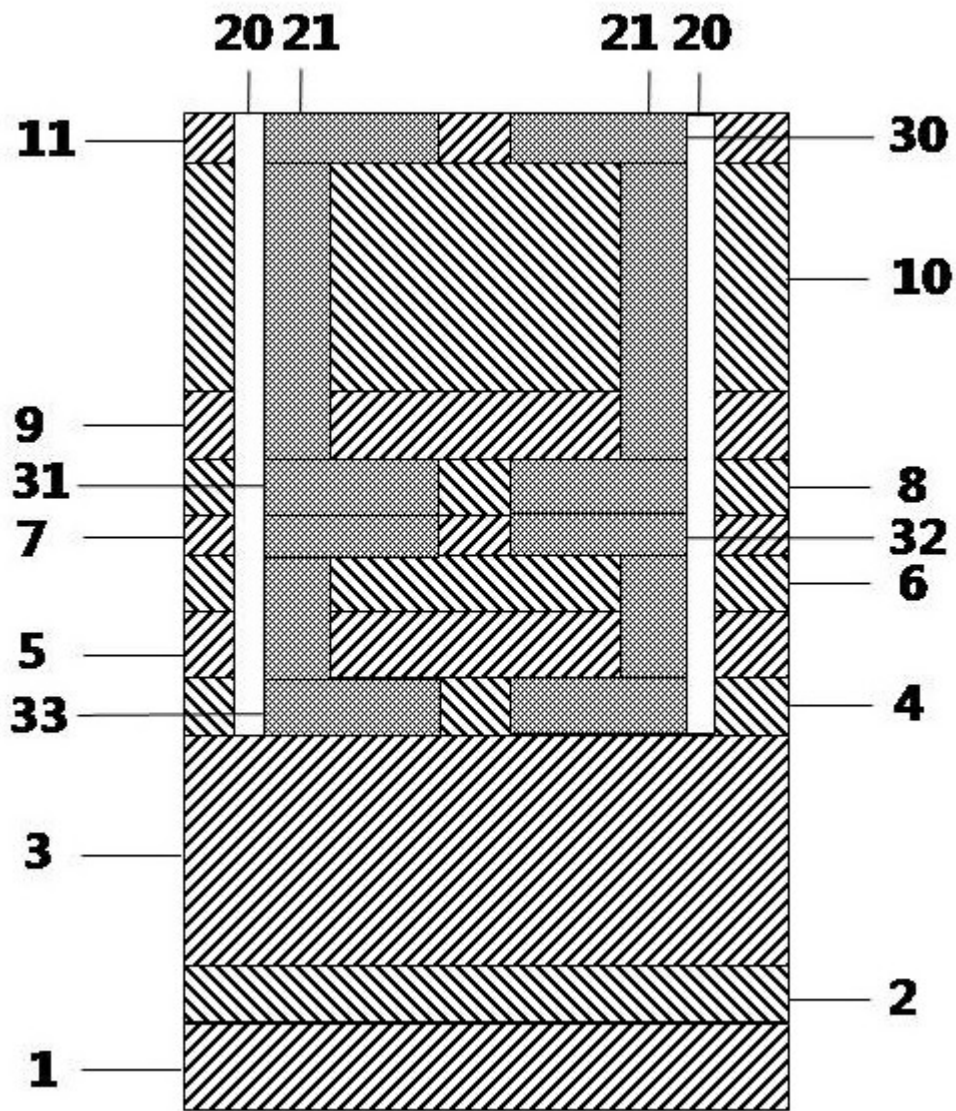


图 3

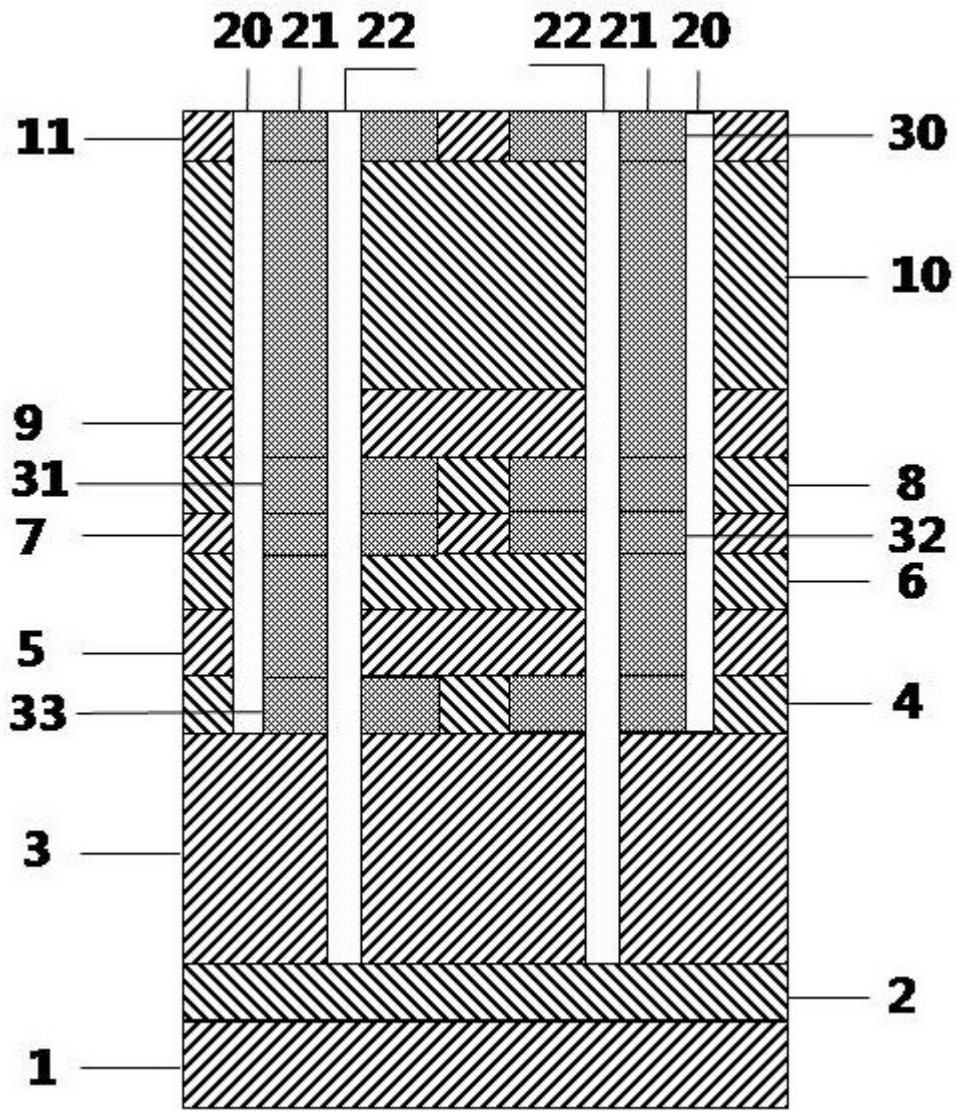


图 4

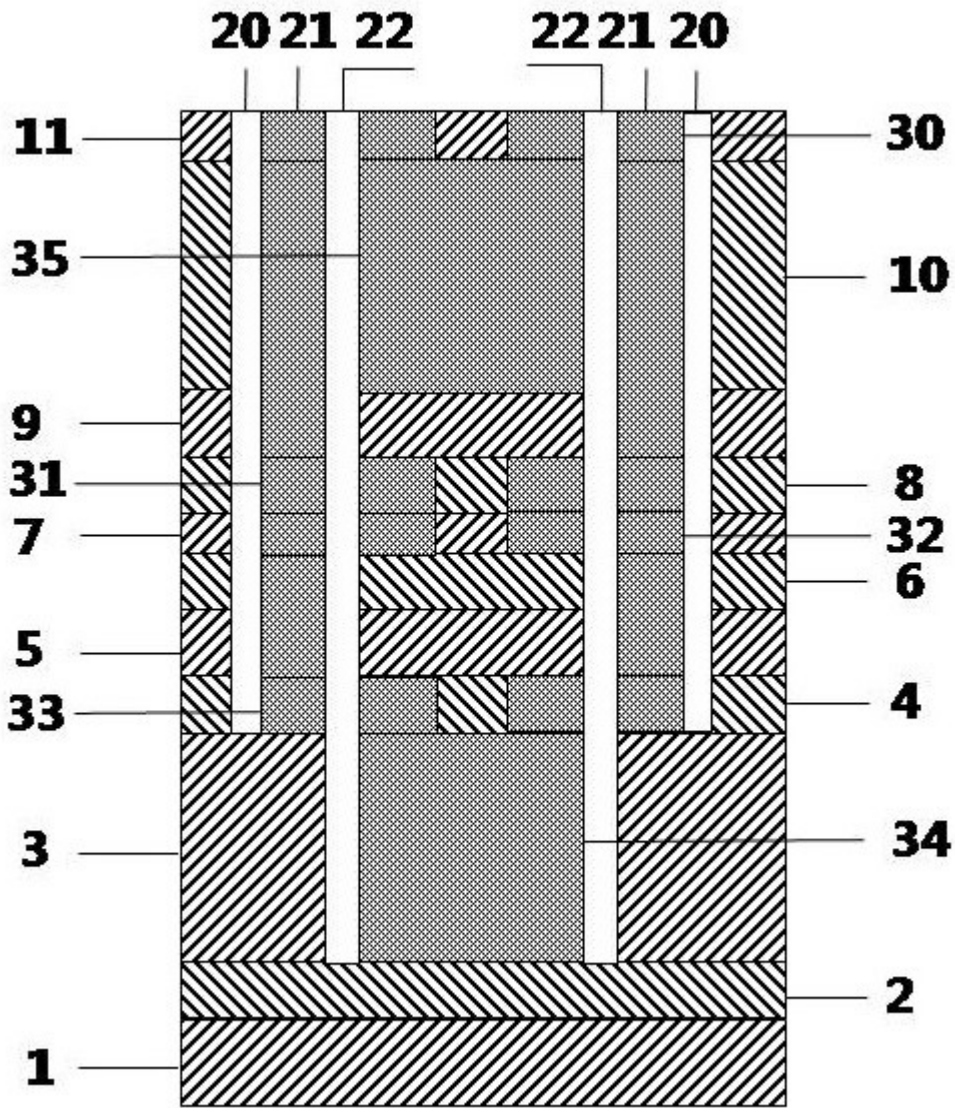


图 5