



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 103326240 B

(45)授权公告日 2018.09.18

(21)申请号 201310091688.4

(22)申请日 2013.03.21

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 103326240 A

(43)申请公布日 2013.09.25

(30)优先权数据

13/427105 2012.03.22 US

(73)专利权人 帕洛阿尔托研究中心公司

地址 美国加利福尼亚州

(72)发明人 J.E. 诺尔思拉普 T. 万德雷尔

N.M. 约翰逊

(74)专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公

司 72001

代理人 郑冀之 王忠忠

(51)Int.Cl.

H01S 5/183(2006.01)

(56)对比文件

US 7856043 B2, 2010.12.21, 附图3, 说明书第2栏第39行, 第4栏第20-29行, 第5栏第12-13, 33-35, 41-43行, 第6栏第49-53行.

US 2009/0207873 A1, 2009.08.20, 第8栏表1.

US 2005/0232327 A1, 2005.10.20, 说明书第0093段.

CN 1677779 A, 2005.10.05, 全文.

审查员 何理

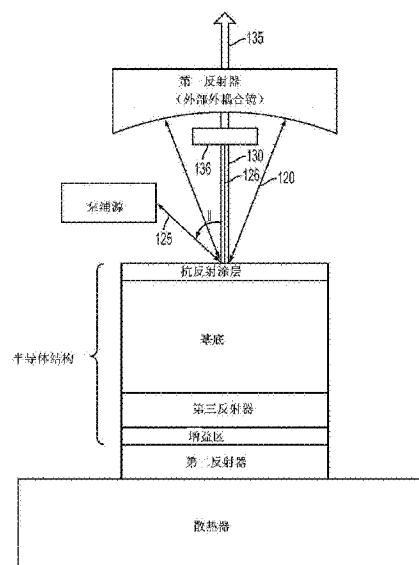
权利要求书1页 说明书12页 附图10页

(54)发明名称

合并第三反射器的表面发射激光器

(57)摘要

公开了一种包括设置在激光器光学空腔中的部分反射元件的表面发射激光器结构。垂直外部空腔表面发射激光器(VECSEL)结构包括:泵浦源,其构造为以泵浦波长 λ_{pump} 发射辐射;外部外耦合反射器;分布式布拉格反射器(DBR);以及有源区,其布置在所述DBR与所述外耦合反射器之间。所述有源区构造为以激光波长 λ_{lase} 发射辐射。所述VECSEL结构还包括部分反射元件(PRE),其布置在增益元件与所述外部外耦合反射器之间。所述PRE对于以所述激光波长的辐射而言具有在大约30%和大约70%之间的反射率并且对于以所述泵浦波长的辐射而言具有在大约30%和大约70%之间的反射率。



1. 一种垂直外部空腔表面发射激光器结构,包括:
泵浦源,其构造为以泵浦波长 λ_{pump} 发射辐射;
外部外耦合反射器;
分布式布拉格反射器;
有源区,其布置在所述分布式布拉格反射器与所述外部外耦合反射器之间,所述有源区构造为以激光波长 λ_{lase} 发射辐射;以及
部分反射元件,其布置在增益元件与所述外部外耦合反射器之间,所述部分反射元件对于以所述激光波长的辐射而言具有在30%和70%之间的反射率并且对于以所述泵浦波长的辐射而言具有在30%和70%之间的反射率。
2. 根据权利要求1所述的结构,其中,所述部分反射元件包括III-V材料层的晶格。
3. 根据权利要求1所述的结构,其中,在所述垂直外部空腔表面发射激光器结构的操作期间,所述部分反射元件构造为在所述有源区中提供峰值 E^2 场,其是在基底中的平均 E^2 场的2倍以上。
4. 根据权利要求1所述的结构,其中,所述泵浦源被布置以便由所述泵浦源发射的辐射以角 θ 入射在基底的表面上以致 $\sin(\theta) = n_{\text{sub}} \sin[\cos^{-1}(\lambda_{\text{pump}}/\lambda_{\text{lase}})]$,其中基底的折射率是 n_{sub} 。
5. 根据权利要求1所述的结构,其中,所述部分反射元件包括许多层对,每个层对包括第一层AlGaIn和第二层GaIn。
6. 根据权利要求5所述的结构,其中,所述层对数在2和20之间。
7. 根据权利要求1所述的结构,其中,抗反射涂层被设置在基底和所述外部外耦合反射器之间,并且,所述抗反射涂层具有折射率 n_{AR} 和厚度 t_{AR} 以致 $t_{\text{AR}} = (\lambda_{\text{pump}}/4n_{\text{AR}}) \cos[\sin^{-1}((1/n_{\text{AR}}) \sin\theta)]$ 。
8. 根据权利要求1所述的结构,其中,所述有源区包括:
一个或更多量子阱结构,每个量子阱结构包括:
一个或更多 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 量子阱,其中 $0.10 \leq x \leq 0.5$,每个量子阱具有厚度 W 并且构造为发射具有波长 λ_{lase} 的激光辐射。
9. 根据权利要求8所述的结构,其中:
每个量子阱结构包括两个或更多个量子阱,且在每对量子阱之间设置有具有厚度 T 的薄GaIn间隔物层;并且
每个有源区元件包括两个或更多个量子阱结构,且在每对量子阱结构之间设置有具有厚度 L 的厚GaIn间隔物层,其中 L 大于 T 。
10. 根据权利要求9所述的结构,还包括具有厚度 IS 的GaIn末端间隔物层,所述GaIn末端间隔物层设置在所述部分反射元件与所述量子阱结构的一个之间,其中所述厚度 W 、 T 、 L 、 IS 构造为使得所述激光辐射的驻波波腹与所述量子阱结构的量子阱重叠。

合并第三反射器的表面发射激光器

发明内容

[0001] 公开了一种表面发射激光器结构,其包括设置在激光器光学空腔中的部分反射元件。一些实施例涉及垂直外部空腔表面发射激光器(VECSEL)结构,其包括构造为以泵浦(pump)波长 λ_{pump} 发射辐射的泵浦源、外部外耦合反射器、分布式布拉格反射器(DBR)以及布置在DBR与外耦合反射器之间的有源区,所述有源区构造为以激光波长 λ_{lase} 发射辐射。所述结构还包括布置在增益元件与所述外部外耦合反射器之间的部分反射元件(PRE)。所述部分反射元件(PRE)对于以所述激光波长的辐射而言具有在大约30%和大约70%之间的反射率并且对于以所述泵浦波长的辐射而言具有在大约30%和大约70%之间的反射率。

[0002] 在一些实施方式中,所述PRE对于以所述激光波长的辐射而言具有在大约40%和大约60%之间的反射率并且对于以所述泵浦波长的辐射而言具有在大约40%和大约60%之间的反射率。在一些结构中,所述PRE包括III-V材料层的晶格。

[0003] 在VECSEL结构的操作中,所述部分反射元件可以构造为在所述有源区中提供峰值 E^2 场,其是所述基底中的平均 E^2 场的不止2、3、4倍或甚至更大。

[0004] 在一些构造中,所述泵浦源被布置以便由所述泵浦源发射的辐射以角 θ 入射在所述基底的表面上以致 $\sin(\theta) = n_{\text{sub}} \sin[\cos^{-1}(\lambda_{\text{pump}}/\lambda_{\text{lase}})]$,其中所述基底的折射率是 n_{sub} 。所述外部外耦合镜、DBR、增益区和PRE可以被布置为使得多于大约50%或甚至多于大约75%的泵浦辐射在所述有源区中被吸收。

[0005] 根据一些方面,所述PRE包括分布式布拉格反射器,其包括许多层对,每个层对包括第一层AlGaIn和第二层GaIn。所述第一层和第二层可以外延生长在GaIn基底上。例如,所述PRE可包括在2和20之间的层对或在大约10和12之间的层对。所述第一层的厚度可以是大约 $\lambda_{\text{lase}}/4n_{\text{AlGaIn}}(\lambda_{\text{lase}})$ 并且所述第二层的厚度可以是大约 $\lambda_{\text{lase}}/4n_{\text{GaIn}}(\lambda_{\text{lase}})$ 。例如,在一个实施方式中,所述第一层的厚度是大约50nm并且所述第二层的厚度是大约46nm。在一些情况下抗反射涂层被设置在所述基底和所述外耦合反射器之间。所述抗反射涂层可以具有折射率 n_{AR} 和厚度 t_{AR} 以致 $t_{\text{AR}} = (\lambda_{\text{pump}}/4n_{\text{AR}}) \cos[\sin^{-1}((1/n_{\text{AR}}) \sin\theta)]$ 。

[0006] 一些实施例旨在表面发射激光器结构,其包括第一反射器、第二反射器和布置在第一反射器与第二反射器之间的有源区,所述有源区构造为以激光波长 λ_{lase} 发射辐射。基底的至少一部分被布置在增益元件和第一反射器之间。所述基底具有靠近所述增益元件的第一表面和靠近第一反射器的第二表面。部分反射元件(PRE)外延生长在所述基底的第一表面上。所述部分反射元件对于以所述激光波长的辐射而言具有在大约40%和大约60%之间的反射率并且对于以泵浦波长的辐射而言具有在大约40%和大约60%之间的反射率。在一些实施方式中,所述基底部分具有大约100 μm 的厚度。

[0007] 本发明公开以下技术方案:

[0008] 1. 一种垂直外部空腔表面发射激光器(VECSEL)结构,包括:

[0009] 泵浦源,其构造为以泵浦波长 λ_{pump} 发射辐射;

[0010] 外部外耦合反射器;

[0011] 分布式布拉格反射器(DBR);

[0012] 有源区,其布置在所述DBR与所述外耦合反射器之间,所述有源区构造为以激光波长 λ_{lase} 发射辐射;以及

[0013] 部分反射元件(PRE),其布置在增益元件与所述外部外耦合反射器之间,所述部分反射元件对于以所述激光波长的辐射而言具有在大约30%和大约70%之间的反射率并且对于以所述泵浦波长的辐射而言具有在大约30%和大约70%之间的反射率。

[0014] 2.根据技术方案1所述的结构,其中,所述PRE对于以所述激光波长的辐射而言具有在大约40%和大约60%之间的反射率并且对于以所述泵浦波长的辐射而言具有在大约40%和大约60%之间的反射率。

[0015] 3.根据技术方案1所述的结构,其中,所述PRE包括III-V材料层的晶格。

[0016] 4.根据技术方案1所述的结构,其中,在所述VECSEL结构的操作期间,所述PRE构造为在所述有源区中提供峰值 E^2 场,其是在所述基底中的平均 E^2 场的2倍以上。

[0017] 5.根据技术方案1所述的结构,其中,在所述VECSEL结构的操作期间,所述PRE构造为在所述有源区中提供峰值 E^2 场,其是在所述基底中的平均 E^2 场的3倍以上。

[0018] 6.根据技术方案1所述的结构,其中,所述泵浦源被布置以便由所述泵浦源发射的辐射以角 θ 入射在所述基底的表面上以致 $\sin(\theta) = n_{\text{sub}} \sin[\cos^{-1}(\lambda_{\text{pump}}/\lambda_{\text{lase}})]$,其中所述基底的折射率是 n_{sub} 。

[0019] 7.根据技术方案6所述的结构,其中,所述外部外耦合镜、DBR、增益区和PRE被布置为使得多于大约50%的泵浦辐射在所述有源区中被吸收。

[0020] 8.根据技术方案6所述的结构,其中,所述外部外耦合镜、DBR、增益区和PRE被布置为使得多于大约75%的泵浦辐射在所述有源区中被吸收。

[0021] 9.根据技术方案1所述的结构,其中,所述PRE包括分布式布拉格反射器,其包括许多层对,每个层对包括第一层AlGaIn和第二层GaIn。

[0022] 10.根据技术方案9所述的结构,其中,所述层对数在大约2和20之间。

[0023] 11.根据技术方案9所述的结构,其中,所述层对数在大约10和12之间。

[0024] 12.根据技术方案9所述的结构,其中,所述第一层的厚度是大约50nm并且所述第二层的厚度是大约46nm。

[0025] 13.根据技术方案9所述的结构,其中,所述第一层的厚度是大约 $\lambda_{\text{lase}}/4n_{\text{AlGaIn}}(\lambda_{\text{lase}})$ 并且所述第二层的厚度是大约 $\lambda_{\text{lase}}/4n_{\text{GaIn}}(\lambda_{\text{lase}})$ 。

[0026] 14.根据技术方案9所述的结构,其中,所述PRE外延生长在GaIn基底上。

[0027] 15.根据技术方案1所述的结构,其中,抗反射涂层被设置在所述基底和所述外耦合反射器之间。

[0028] 16.根据技术方案15所述的结构,其中,所述抗反射涂层具有折射率 n_{AR} 和厚度 t_{AR} 以致 $t_{\text{AR}} = (\lambda_{\text{pump}}/4n_{\text{AR}}) \cos[\sin^{-1}((1/n_{\text{AR}}) \sin\theta)]$ 。

[0029] 17.根据技术方案1所述的结构,其中,所述有源区包括:

[0030] 一个或更多量子阱结构,每个量子阱结构包括:

[0031] 一个或更多 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 量子阱,其中 $0.10 \leq x \leq 0.5$,每个量子阱具有厚度 W 并且构造为发射具有波长 λ_{lase} 的激光辐射。

[0032] 18.根据技术方案17所述的结构,其中:

[0033] 每个量子阱结构包括两个或更多个量子阱,且在每对量子阱之间设置有具有厚度

T的薄GaN间隔物层;并且

[0034] 每个有源区元件包括两个或更多个量子阱结构,且在每对量子阱结构之间设置有具有厚度L的厚GaN间隔物层,其中L大于T。

[0035] 19.根据技术方案18所述的结构,还包括具有厚度IS的GaN末端间隔物层,所述GaN末端间隔物层设置在所述PRE与所述量子阱结构的一个之间,其中所述厚度W、T、L、IS构造为使得所述激光辐射的驻波波腹与所述量子阱结构的量子阱重叠。

[0036] 20.一种表面发射激光器结构,包括:

[0037] 第一反射器;

[0038] 第二反射器;

[0039] 有源区,其布置在所述第一反射器与所述第二反射器之间,所述有源区构造为以激光波长 λ_{lase} 发射辐射;

[0040] 基底的至少一部分,其布置在增益元件与所述第一反射器之间,所述基底具有靠近所述增益元件的第一表面和靠近所述第一反射器的第二表面;

[0041] 部分反射元件(PRE),其外延生长在所述基底的第一表面上。所述部分反射元件对于以所述激光波长的辐射而言具有在大约40%和大约60%之间的反射率。

[0042] 21.根据技术方案20所述的结构,其中,所述第一反射器包括外部外耦合镜。

[0043] 22.根据技术方案21所述的结构,还包括设置在所述基底的第二表面上的抗反射涂层。

[0044] 23.根据技术方案20所述的结构,其中,所述基底具有大约100 μm 的厚度。

[0045] 24.根据技术方案20所述的结构,其中,所述基底是GaN并且所述PRE包括许多层对的AlGaIn和GaIn。

[0046] 25.根据技术方案24所述的结构,其中,所述数量处在10和12之间。

[0047] 26.一种表面发射激光器结构,包括:

[0048] 第一反射器;

[0049] 第二反射器;

[0050] 有源区,其包括设置在所述第一反射器与所述第二反射器之间的一个或更多有源区元件,每个有源区元件包括:

[0051] 包括一个或更多 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 量子阱的一个或多个量子阱结构,其中 $0.10 \leq x \leq 0.5$,所述量子阱具有厚度W并且构造为发射具有波长 λ_{lase} 的激光辐射;以及

[0052] 预应变层,其包括InGaIn;以及

[0053] GaN末端间隔物层,其设置在所述第二反射器与所述量子阱结构的一个之间,其中所述有源区和所述末端间隔物构造为使得所述辐射的波腹与所述有源区元件的量子阱结构重叠。

[0054] 27.根据技术方案26所述的结构,其中,每个有源区元件包括AlGaIn限制和应变管理层。

[0055] 28.根据技术方案27所述的结构,其中:

[0056] 所述一个或更多 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 量子阱包括至少两个 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 量子阱并且在每个量子阱结构中的每对量子阱之间设置有具有厚度T的薄GaIn间隔物;以及

[0057] 每个有源区元件包括至少两个量子阱结构和具有厚度L的一个或更多厚GaIn间隔

物,其中在每对量子阱结构之间设置有一个厚GaN间隔物。

附图说明

[0058] 图1是合并三个反射元件的光泵浦垂直外部空腔表面发射激光器 (VECSEL) 装置的图解;

[0059] 图2更详细地显示了图1的半导体结构和第二反射器的部分;

[0060] 图3显示了在有源区中对于具有445nm的波长和38度入射角的泵浦辐射的驻波;

[0061] 图4显示了在有源区中对于垂直于有源区表面发射的并且具有460nm波长的激光辐射的驻波;

[0062] 图5显示了对于VECSEL结构实例的一部分的折射率,其包括邻近于最后PRE层的末端间隔物Ga_N、由薄的Ga_N间隔物分开的三重InGa_N量子阱以及在每周期的三重量子阱之间的厚Ga_N间隔物;

[0063] 图6显示了对于在图1和图2中示出的用于VECSEL装置所计算的折射率和 E^2 场强度的图表;

[0064] 图7显示了作为波长的函数的反射率(R)、透射(T)和吸收(A)的绘图。泵浦光束的吸收(A)发生在VECSEL的有源区;

[0065] 图8是显示实现作为 Γ_{rel} 函数的激光所要求的估计泵浦功率的绘图;

[0066] 图9是采用部分反射元件(PRE)的VECSEL结构的更详细视图;

[0067] 图10显示了对于合并具有20对AlGa_N/Ga_N的PRE的VECSEL的A(λ);

[0068] 图11显示了作为PRE层对数的函数的有源区中泵浦辐射的吸收;

[0069] 图12显示了用来模拟AlGa_N/Ga_N PRE的反射率的结构;以及

[0070] 图13是作为PRE层数的函数的反射率的曲线图。

具体实施方式

[0071] 表面发射激光器(SEL),诸如垂直空腔表面发射激光器(VCSEL)和垂直外部空腔表面发射激光器(VECSEL)由于高质量的光谱和空间光学激光特性而受到关注。SEL在III-氮化物材料系统内的实现具有挑战性,这是因为产生足够的功率输出用于许多应用所需的泵浦功率的缘故。文中讨论的实施例涉及SEL,其包括三个反射元件。除了为激光器形成光学空腔的反射元件之外,部分反射的第三反射器设置在激光器的光学空腔内。第三反射器增加了通过激光器的有源区的激光辐射的再循环,降低了在SEL中激光发射所需的阈值功率并且导致更大的激光发射的效率。下面提供的一些实施例示出了在光学泵浦激光器的激光器光学空腔内设置的第三反射器的操作。由这些实施例例证的这些方法可以延伸到使用二极管电流注射作为激励机制的激光器。

[0072] 文中讨论的一些实施例使用构造为以两个不同波长共振的有源区,两个波长为激光辐射的波长和泵浦辐射的波长。在有源区内的量子阱结构定位成使得它们与泵浦驻波场的波腹和激光驻波场的波腹两者都重叠。

[0073] 图1是合并三个反射元件的光学泵浦VECSEL装置的简图。VECSEL包括:光学泵浦源;第一反射器,其是对于装置而言的外部外耦合镜;第二反射器,其例如包括分布式布拉格反射器(DBR);以及半导体结构,其包括增益结构和作为部分反射元件的第三反射器。激

光光学空腔由外部外耦合镜和第二反射器界定。第三反射器设置在光学空腔内。

[0074] 泵浦源发射泵浦辐射125,其朝向基底聚焦。例如,VECSEL装置可包括聚焦光学器件,其构造为通过聚焦光学器件将泵浦辐射聚焦到基底(或抗反射涂层,如果存在的话)的光斑上。泵浦辐射可相对于由虚线126指示的装置的光轴以角 θ 入射在半导体结构上。在一些情况下,基底可被变薄到便于处理装置的厚度,例如为大约100 μm 的数量级。在半导体结构的有源区内产生的一些辐射130(文中表示为激光辐射)穿过基底,从半导体结构出来,并且朝向被指定为第一反射器的外部外耦合镜。在有源区中产生的一些辐射经过凹面外耦合镜并且从VECSEL装置输出,如箭头135所指示,其指定为输出激光辐射。大多数激光辐射被反射回到半导体结构,如箭头120所指示的那样。基底可选择地涂有抗反射涂层来减少再循环激光辐射120和/或泵浦辐射125的反射。抗反射涂层可具有折射率 n_{AR} 和厚度 t_{AR} 以致 $t_{\text{AR}} = (\lambda_{\text{pump}}/4n_{\text{AR}}) \cos[\sin^{-1}((1/n_{\text{AR}}) \sin\theta)]$,其中 λ_{pump} 是泵浦辐射的波长。

[0075] 一些实施方式包括可选的变频器136,诸如非线性光学晶体,其以谐波或以激光辐射的和频或差频产生辐射,并且设置在外腔内。使用变频器,可以从小于600nm的激光波长获得深UV频谱中,例如,小于300nm,或甚至小于大约250nm的激光输出135。

[0076] 在一个实施例中,泵浦源是基于氮化镓(GaN)的激光二极管(或可选择地,多个激光二极管),其在370-460nm的范围中发射,在一些实施例中,在405nm或445nm发射。泵浦源的输出功率可以处在1-10瓦的范围中。泵浦源可包括光学器件,其提供包括一个或更多透镜的聚焦系统来将泵浦辐射聚焦到50-200 μm 直径的泵浦光束光斑大小以便实现多于50kW/ cm^2 的功率密度。泵浦源的输出形成驱动有源区的光学泵浦。有源区以期望波长,例如在440nm-550nm的范围中,输出激光辐射光束。外部外耦合镜可被介电层覆盖以便以99.5%或更多的半导体增益区的输出波长提供镜面反射率。

[0077] 在操作期间,半导体结构可以变热。为了减小由于过量发热而导致的对装置损坏的可能性,可将装置安装在散热器上且第二反射器靠近散热器。散热器例如可由铜、金刚石或其他热传导材料组成。在一些情况下,可使用激光发射技术添加可选的第二散热器。在此情况下,进行激光发射来除去基底,或将基底变薄到剩余的薄基底。然后将第二散热器安装到第三反射器或剩余的薄基底的暴露背面。完整结构包括两个散热器,一个靠近第二反射器并且一个靠近第三反射器,且基底被除去。在后面的实例中,第二散热器包括孔,通过该孔泵浦装置并且发射激光辐射。

[0078] 图2更详细地显示了半导体结构201和第二反射器230的结构的部分。在此实例中,半导体结构201包括具有足以允许VECSEL装置被操作的厚度的基底,例如,大约100 μm 的数量级。用于基底适当的材料包括GaN、AlN、AlGaIn、InGaIn、InAlN、AlInGaIn或除了在泵浦和激光发射两者的波长均具有低吸收的其他材料。

[0079] 第三反射器210,在文中指定为部分反射元件(PRE),对泵浦辐射和激光辐射两者而言是部分反射的。第三反射器210生长在基底上并且可包括III-V材料的超晶格,诸如5-20对211的AlGaIn/GaN或InAlN/GaN的III-氮化物超晶格。例如,在图2的实例中,每对211的第一层212可包括GaN并且每对211的第二层213可包括AlGaIn或InAlN。第三反射器可包括 $\text{In}_x\text{Al}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}/\text{In}_u\text{Al}_v\text{Ga}_{1-u-v}\text{N}$ 的层对。在激光光学空腔内设置有PRE的装置,由于在有源区中泵浦辐射的较高吸收和相对于基底(在基底中可能发生损耗)的强度而言在有源区中激光发射光束增加的电场强度,而降低了获得激光发射所需的泵浦功率。

[0080] 在一些实施方式中,第二反射器230可包括非传导性的DBR,其包括许多对的介电材料来获得指定量的反射率。例如,非传导性DBR可包括8对52nm TiO₂/79nm SiO₂1/4波长层,其在大约460nm的激光和泵浦波长处产生99.9%的反射率。第二反射器230可通过如电子束蒸发 (EBE) 之类的方法和/或通过溅射而形成在增益结构上方。

[0081] 半导体结构201包括在部分反射元件210上方生长的外延增益区220。在一些实施方式中,增益区220包括被间隔物层225、227分隔开的多个(例如5-20)量子阱224。量子阱结构221可包括一个量子阱或多个紧密隔开的量子阱。图2显示了每个量子阱结构221包括被薄间隔物层225分隔开的双量子阱层224的实施例。在量子阱结构221中设置在量子阱224之间的薄间隔物225比量子阱结构221之间的间隔物层227更薄。因此,在量子阱之间设置的间隔物225在文中被称为薄间隔物并且在量子阱结构221之间的间隔物227在文中被称为厚间隔物,来表示在两种间隔物之间的相对厚度差异。在量子阱结构和反射镜之间也可存在末端间隔物层。这些末端间隔物层的厚度一般将不同于厚或薄间隔物层的厚度。

[0082] 在一些实施方式中,每个量子阱结构221包括一对In_xGa_{1-x}N量子阱层224,其中 $0.10 \leq x \leq 0.5$ 被Ga_{0.1}N的薄间隔物分隔开。一般来说,量子阱结构可以具有一个或更多量子阱。每个量子阱层224具有大约3nm的厚度并且设置在量子阱层224之间的薄Ga_{0.1}N间隔物层225具有大约5nm的厚度。量子阱结构221被具有大约80nm厚度的厚Ga_{0.1}N间隔物227彼此分隔开。有源区220的第一量子阱结构可被具有大约87nm厚度的Ga_{0.1}N层222从第三反射器210分隔开并且有源区220的最后量子阱结构可被具有大约87nm厚度的Ga_{0.1}N层223从第二反射器230分隔开。

[0083] 泵浦辐射光束在增益区220内用多个固定的第一波腹形成驻波。激光辐射也在有源区220内用多个固定的第二波腹形成驻波。量子阱结构221被相互隔开以致每个量子阱结构221位于激光辐射260和泵浦辐射250的驻波图案的腹点位置。

[0084] 增益结构220,由总共N层组成,具有光学厚度OT,被确定为:

$$[0085] \quad OT = \sum_{n=1}^N [(thickness_n)(refractive\ index_n)],$$

[0086] 其中层n包括量子阱层224、薄间隔物层225、厚间隔物层227和将第一和最后量子阱层与反射器230、210分隔开的两个末端间隔物层221、222。也就是说,增益区220具有光学厚度,其是每层厚度与该层的折射率相乘的乘积的总和。有源区被设计为使得它的光学厚度接近 $1/2\lambda_{lase}$ 的整数倍数,其中 λ_{lase} 是激光辐射波长。因为光学厚度取决于折射率,折射率可随着波长变化,因此光学厚度可随着波长变化。有源区的可能设计因此是 $OT(\lambda_{lase}) = (N_{pairs}+1)1/2\lambda_{lase}$,其中 N_{pairs} 是整数对的量子阱。在此设计中,激光辐射的驻波图案的波腹具有与量子阱大的重叠。通过适当选择入射的角度和泵浦激光的波长,可能获得具有与量子阱重叠的波腹的驻波图案。

[0087] PRE230可包括III-V材料的超晶格。在一个实例中,PRE230包括10层的AlGa_{0.3}N,其具有2.3的目标折射率。每个AlGa_{0.3}N层的厚度是大约50nm。AlGa_{0.3}N层被具有46.4nm厚度的Ga_{0.1}N层分隔开。对于AlGa_{0.3}N的指数与对于AlGa_{0.3}N/Ga_{0.1}N DBR的反射率测量一致。也可以采用其他III-V或III-氮化物组合用于部分反射元件。例如,如先前所讨论的,可使用InAlN代替AlGa_{0.3}N来形成PRE。InAlN的使用可促进在InAlN和Ga_{0.1}N之间形成良好的晶格匹配,导致减少的应变和增

强的结晶质量和性能。一般来说,PRE被设计为使得它允许泵浦辐射和激光辐射光束两者一定量的透射率,其在量子阱中提供最佳吸收。例如,在一些实施例中,PRE可被设计为对于泵浦波长而言具有大约50%的透射率并且对于具有波长的激光辐射而言具有大约50%的透射率,如下面更详细地讨论。

[0088] 如先前所提到的,如果有源区(量子阱和间隔物层)以泵浦波长显示基频谐振,则吸收效率被大大提高。有源区厚度可覆盖几个周期的激光模式驻波和/或泵浦模式驻波。

[0089] 图3和图4显示了作为与PRE相距的距离的函数的 E^2 电场和折射率。图3显示了对于以38度入射并且在有源区中具有波长445nm的泵浦激光辐射的驻波图案350和固定波腹351。图4显示了对于在与图3相同的增益区中具有波长460nm的激光辐射的驻波图案460和固定波腹461。对于此实例的有源区具有 $N_{\text{pair}}=4$ 、厚度为5nm的薄GaN间隔物层(薄间隔物的厚度在图3和图4中由“T”表示)、具有3nm宽度的InGa量子阱(量子阱的厚度由“W”表示)、厚度为80.6nm的厚GaN间隔物层(厚间隔物的厚度由“L”表示)以及厚度为86.3nm的末端GaN间隔物层(末端间隔物的厚度由“IS”表示)。如在图3和图4中所示,在此增益区中泵浦激光辐射驻波350和发射的激光辐射驻波460两者的波腹351、461与量子阱(W)重叠。

[0090] 图5显示了对于VECSEL结构实例的一部分的折射率,该VECSEL结构包括邻近于最后PRE层的GaN末端间隔物、由薄的GaN间隔物分开的三重InGa量子阱以及在每周期的三重量子阱之间的厚GaN间隔物。图5指示一个周期的有源区为在量子阱结构之间的中心对中心距离。在此实例中,

$$[0091] \quad OT(\text{末端间隔物}) + \frac{1}{2}N_{\text{wells}}OT(\text{阱}) + \frac{1}{2}(N_{\text{wells}}-1)OT(\text{薄间隔物}) = \frac{1}{2}\lambda_{\text{lase}}*m'$$

[0092] 并且,

$$[0093] \quad OT(\text{厚间隔物}) + N_{\text{wells}}OT(\text{阱}) + (N_{\text{wells}}-1)OT(\text{薄间隔物}) = \frac{1}{2}\lambda_{\text{lase}}*m$$

[0094] 其中OT(末端间隔物)、OT(厚间隔物)、OT(薄间隔物)和OT(阱)分别表示末端间隔物、厚间隔物、薄间隔物和光学阱的光学厚度, N_{wells} 在这里是每个周期中量子阱的数量,并且 m' 和 m 是大于或等于1的整数。典型地 $m'=m=1$ 。在一些实例中,增加 m 或 m' 到2或更多是有利的。

[0095] $OT(\text{末端间隔物}) = IS \cdot n_{\text{GaN}}$,其中 n_{GaN} 是GaN的折射率,

[0096] $OT(\text{阱}) = W \cdot n_{\text{InGa}}$,其中 n_{InGa} 是InGa的折射率,

[0097] $OT(\text{薄间隔物}) = T \cdot n_{\text{GaN}}$ 并且 $OT(\text{厚间隔物}) = L \cdot n_{\text{GaN}}$ 。

[0098] 对于 $m'=m=1$,将OT代入到上面的等式,

$$[0099] \quad IS \cdot n_{\text{GaN}} + \frac{1}{2}N_{\text{wells}}W \cdot n_{\text{InGa}} + \frac{1}{2}(N_{\text{wells}}-1)T \cdot n_{\text{GaN}} = \frac{1}{2}\lambda_{\text{lase}}, \text{ 并且}$$

$$[0100] \quad L \cdot n_{\text{GaN}} + N_{\text{wells}}W \cdot n_{\text{InGa}} + (N_{\text{wells}}-1)T \cdot n_{\text{GaN}} = \frac{1}{2}\lambda_{\text{lase}}。$$

[0101] 最小末端间隔物厚度是: $IS = \frac{1}{2}\lambda_{\text{lase}} - \frac{1}{2}N_{\text{wells}}W \cdot n_{\text{InGa}} - \frac{1}{2}(N_{\text{wells}}-1)T \cdot n_{\text{GaN}}$ 。在一些情况下,可使用更厚的末端间隔物。可通过将整数倍 K 的 $\frac{1}{2}\lambda_{\text{lase}}/n_{\text{GaN}}$ 添加到末端间隔物的厚度来增加末端间隔物的厚度。

[0102] 图6显示了对于如在图1和图2中示出的为VECSEL装置所计算的折射率和 E^2 场强的图表。此VECSEL以460nm沿着大体上平行于增益结构的光轴的方向发射激光辐射。用以 $\theta=38$ 度的角度入射在半导体结构的表面(在其上可设置抗反射涂层)上的445nm泵浦辐射来泵浦有源区。在泵浦波长 λ_{pump} 、激光波长 λ_{lase} 、基底的折射率 n_{sub} 和泵浦最佳入射角 θ 之间存在关系。此条件源于强制让泵浦光束和激光光束两者的波腹与有源区中的量子阱的最佳重叠的

条件。该关系如下： $\sin(\theta) = n_{\text{sub}} \sin[\cos^{-1}(\lambda_{\text{pump}}/\lambda_{\text{lase}})]$ 。因此，如果 $\{\lambda_{\text{pump}}, \lambda_{\text{lase}}, n_{\text{sub}}\}$ 是 $\{445\text{nm}, 460\text{nm}, 2.45\}$ ，那么 $\theta=38^\circ$ 。如果 $\{\lambda_{\text{pump}}, \lambda_{\text{lase}}, n_{\text{sub}}\}$ 是 $\{400\text{nm}, 460\text{nm}, 2.45\}$ ，那么不存在满足条件的 θ 。如果 $\{\lambda_{\text{pump}}, \lambda_{\text{lase}}, n_{\text{sub}}\}$ 是 $\{400\text{nm}, 420\text{nm}, 2.45\}$ ，那么 $\theta=48^\circ$ 。一些构造涉及这样的VECSEL装置，其中泵浦源布置为使得由泵浦源发射的辐射以角 θ 入射在基底的表面上以致 $\sin(\theta) = n_{\text{sub}} \sin[\cos^{-1}(\lambda_{\text{pump}}/\lambda_{\text{lase}})]$ ，其中泵浦波长是 λ_{pump} ，激光波长是 λ_{lase} ，并且基底的折射率是 n_{sub} 。尽管此条件是最佳的，但即使没有获得最优 θ 也可发生激光发射。对于GaN基底，其中 $n=2.45$ ，那么 $\lambda_{\text{pump}}/\lambda_{\text{lase}}$ 之比应该大于大约0.91以便以某入射角获得最佳重叠。

[0103] 在一个设计实例中，增益发生在包括如先前关于图2描述的10x2列的InGaN量子阱的有源区中。第三反射器PRE包括10层对的AlGaIn/GaN的超晶格，其具有2.30的目标折射率。每个AlGaIn层的厚度是大约50nm并且每个GaN层的厚度是大约46.4nm。在有源区中，末端间隔物GaN层具有大约87nm的厚度，厚间隔物层具有大约80nm的厚度，薄间隔物层具有大约5nm的厚度并且InGaIn量子阱具有3nm的厚度。

[0104] 图6显示了作为与基底表面相距的距离的函数的装置的折射率 $n(z)$ 510。在此实例中，基底被涂有抗反射涂层。同样在图5中示出的是作为与基底表面相距的距离的函数的电场 $E^2(z)$ 520的绘图。 E^2 场相当于真空中波长460nm的激光辐射。对于此特别设计的单独计算表明以38度入射的445nm泵浦辐射的吸收是大约94.5%。

[0105] 在图6中注意到，与可预期到损耗的GaN基底中的平均场相比，InGaIn增益区中的峰值 E^2 场被提高至因素 $\Gamma_{\text{rel}} \approx 7$ 的倍数。尽管吸收系数在GaN基底中相当地小，例如，大约 1cm^{-1} 的数量级，但如果基底足够厚来获得机械稳定性，例如，大约400 μm ，则可能存在重大损耗。因为在结构的任何特定区域中的增益或损耗将与该区域中的 E^2 成比例，所以相比于损耗区域而言在有源区中的场强中产生增强的设计是有益的。因数 Γ_{rel} 输入到获得激光所需的泵浦功率的计算。对于为了克服损耗并且允许激光发生的增益， E^2 的大小在有源区中相比于在GaN基底中的大小应该是大的。为了减少损耗，尽可能减少GaN基底的厚度同时仍然维持对于机械稳定性足够的结构支撑也是有益的。

[0106] 如将从图6领会到的， E^2 场的重大增加发生在PRE区域中，并且在光学空腔中PRE的使用可在基底的 E^2 场上将参数 Γ_{rel} 增加至2、3、4或更高倍，例如大约为7倍。

[0107] 在GaN基底中的损耗可由于子带隙辐射的微弱吸收或散射而发生。在一些GaN基底中消光系数 k 可被预估为 $k=5 \times 10^{-6}$ 。基于此消光系数、GaN基底中的吸收常数 α 可以被预估为 1.4cm^{-1} ，($\alpha=2\omega k/c=4\pi k/\lambda$ ，其中 ω 是辐射的频率， λ 是辐射的波长并且 c 是辐射在真空中的速度)。使用 $\alpha=1.4\text{cm}^{-1}$ 和 $T_{\text{loss}}=\exp(-2\alpha L_{\text{GaN}})$ ，在表1中所示可以针对GaN基底的各种厚度 L_{GaN} 来计算由于此吸收而导致的损耗。

[0108] 表1

GaN 的厚度 (μm)	T_{loss}
100	0.97
250	0.93
400	0.89

[0109]

[0110] 在装置中获得激光所需的预估泵浦功率通过下述公式给出：

$$P_{th} = N_{th} E_{ph} N_w L_w A_p / f_{abs} \tau(N_{th}) \quad [1]$$

[0112] 其中 N_{th} 是阈值处的载流子密度， E_{ph} 是光子能， N_w 是InGaIn量子阱的数量， L_w 是阱的厚度， A_p 是聚焦泵浦光束的面积， f_{abs} 是所吸收功率的部分并且 $\tau(N_{th})$ 是在载流子密度阈值处的载流子寿命。在载流子密度上增益的相关性可以被确定为：

$$g = g_0 \ln(N/N_0) \quad [2]$$

[0114] 其中 g_0 是材料增益， N 是载流子密度并且 N_0 是透明载流子密度。对于InGaIn， g_0 可以被预估为 2400cm^{-1} 。完成激光所需的功率取决于在共振周期增益区中吸收多少辐射。在有源区中吸收的辐射部分作为泵浦辐射波长的函数通过仿真而被预估，并且结果在图7中示出。包括如结合图2和图3所讨论的（以38度入射的445nm泵浦辐射）第三反射器的设计允许在有源区中的共振吸收并且多于90%。

[0115] 图7显示了作为诸如在图1和图2中示出的装置等装置的有源区中波长的函数的反射率(R)、透射(T)和吸收(A)的绘图。在此实例中，装置包括第三反射器PRE，其中泵浦辐射以38度入射。PRE包括10Å AlGaIn/GaN层对并且有源区具有如先前讨论的被GaN间隔物分隔开的 10×2 InGaIn量子阱。如在图7中表明的，对于此装置，对于接近445nm的泵浦波长而言多于90%的辐射在InGaIn量子阱中被吸收。

[0116] 作为载流子密度 N 的函数的载流子寿命 τ 给出如下：

$$1/\tau(N) = A + BN + CN^2, \quad [3]$$

[0118] 其中可以测量对于A、B和C的系数。例如，如在Applied Phys. Lett. 91, 141101 (2007)中所报告的通过Y.C. Shen等人已针对 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x \approx 15\%$) 测量了A、B和C。

[0119] 阈值载流子密度是：

$$N_{th} = N_0 [1 / (R_1 R_2 T_{loss})]^{1/G}, \quad [4]$$

[0121] 其中 N_0 是透明载流子密度， R_1 是外部外耦合镜（第一反射器）的反射率并且 R_2 是非传导性DBR（第二反射器）的反射率，并且 T_{loss} 是由于GaN基底中的损耗而引起的因数。

[0122] 在指数中增益因数 G 取决于量子阱的材料增益 g_0 、阱的数量 N_w 、每个阱的厚度 L_w 。 Γ_{rel} 等于在量子阱中的峰值 E^2 与损耗区域中 E^2 的平均值之比，如在图6中所指示，其可以被表达为：

$$G = 2 \Gamma_{rel} g_0 N_w L_w, \quad [5]$$

[0124] 在激光光学空腔中设置的第三反射器使获得 Γ_{rel} 的大值成为可能。图8显示了使用上面等式[1]计算的阈值泵浦功率 P_{th} 。用于激光发射所需的泵浦功率随着 Γ_{rel} 的增加而迅速下降。如在图8中所指示的，带有 $\Gamma_{rel} \approx 4$ 的泵浦功率要求小于1瓦特的泵浦功率。在表2中提供了用于计算的参数。

[0125] 表2

[0126]

E 光子能	2.7 eV
D 聚焦泵浦光束的直径($A_p = \pi D^2/4$)	80 μm
材料增益参数(g_0)	2400 cm^{-1}
N_0 (透明载流子密度)	$0.8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
Γ_{rel}	4
N_w (InGaN 阱的数量)	20
L_w (InGaN 阱的厚度)	3 nm
f_{abs} (在有源区中吸收的泵浦功率的部分)	95%
GaN 基底厚度	100 μm
GaN 中的吸收系数	1.4 cm^{-1}
T_{loss} (分布的损耗因数)	97%
对于 $R_1 = R_2$ 的镜面反射率	99.5%
P_{th}	0.8 瓦
g_{th}	840 cm^{-1}
N_{th}	$1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
τ	$2 \times 10^{-9} \text{ sec}$

[0127] 注意到, 尽管就特定材料、有源区的构造, 例如量子阱区域的类型、数量和厚度而言描述了用作上面实例的光泵浦VECSEL装置, 但将理解其他材料系统和装置构造也可以结合如文中讨论的第三反射器而被使用。因此, 本公开不限于文中描述的材料系统和装置构造。预期采用各种材料系统, 例如, 其他III-V或III-氮化物材料系统的装置将得益于第三反射器。此外, 有源区的具体结构可以变化, 例如, 可使用一组三个量子阱来代替所描述的量子阱对。此外, 尽管仅仅描述了一个光学泵浦源, 但将理解可以使用多个泵浦源。

[0128] 图9是采用PRE的VECSEL结构的更详细视图。从GaN基底开始从左到右形成装置层。第三反射器, 其是PRE, 包括以激光和泵浦波长部分反射的DBR, 生长在GaN基底上。PRE可包括10周期的 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$, 其中 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 层是大约48.8nm厚并且GaN层是大约46.8nm厚。例如, AlGaIn 层的厚度可以是大约 $\lambda_{\text{lase}}/4n_{\text{AlGaIn}}(\lambda_{\text{lase}})$ 并且GaN层的厚度可以是大约 $\lambda_{\text{lase}}/4n_{\text{GaN}}(\lambda_{\text{lase}})$ 。

[0129] 有源区包括多个有源区元件, 诸如大约10周期的有源区元件, 生长在PRE上。每个有源区元件包括基于InGaN的双量子阱结构。每个有源区元件可依次包括下述层: InGaN预应变层($\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}$, 35.3nm厚)、第一薄间隔物(GaN, 5nm厚)、第一量子阱, ($\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}$, 3nm厚)、第二薄间隔物(GaN, 5nm厚)、第二量子阱($\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}$, 3nm厚)、厚间隔物(GaN, 21.7nm厚)以及 AlGaIn 载波限制和应变管理层($\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$, 20nm厚)。

[0130] 第二反射器可包括布置为DBR的一个或更多外延半导体层和非外延介电层。例如, 在一些构造中, 第二反射器可包括含有GaN/ AlGaIn 的外延DBR, 诸如10.5周期的GaN/

$\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$, 其中GaN层是大约46.8nm厚并且AlGaN层是大约48.8nm厚。包括非外延介电DBR的第二反射器部分可沉积在外延DBR上。例如, 介电DBR可包括4周期的 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$, 其中 SiO_2 层是78.8nm厚并且 TiO_2 层是52.3nm厚。如果两个DBR镜被连接到一起来产生单一混合DBR, 那么当第一DBR的高折射率材料与第二DBR的低折射率材料接触时, 可获得在目标波长的最高反射率。因此, 混合DBR将在GaN和 SiO_2 之间具有接触, 这是因为GaN具有比AlGaN更高的折射率并且 SiO_2 具有比 TiO_2 更低的折射率。双DBR, 其包括外延半导体部分和非外延电介质, 可以被用来获得指定的热导率和反射率。外延半导体部分可以具有比非外延介电部分更高的热导率, 而非外延介电部分提供比外延半导体部分更高的反射率。在一些情况下, 外延DBR和非外延DBR两者都是1/4波长DBR。

[0131] 在GaN中嵌入的绝缘PRE的反射率的分析(如在图12中描述)显示了用于在有源区获得高吸收的PRE的最佳反射率接近50%。(在下面描述该分析。)预计可将此设计标准转移到采用任何类型材料的其他光泵浦激光器。PRE可改善VECSEL性能的其他材料包括III-V砷化物和磷化物。

[0132] PRE可被设计来获得预定量的反射率, 其在有源区中产生指定的泵浦和/或激光辐射的吸收。在分析中使用两步式过程。在第一步骤中, 基于作为波长的函数 $A(\lambda)$ 和作为PRE层数的函数的在有源区中吸收的计算来确定PRE层对的数量。在第二步骤中, 计算嵌入在GaN中的绝缘PRE的反射率(例如如在图12中所描述的)。

[0133] 与步骤1有关, 图7显示了在装置的 $10 \times 2 \text{ InGaN}$ 增益区中 $A(\lambda)$ 的计算, 该装置包括包含10对AlGaN/GaN的PRE, 其结构和构成类似于如关于图9所讨论的装置的结构和构成。图10示出了当将PRE层增加到20对的AlGaN/GaN时对于相同结构的 $A(\lambda)$ 。在此情况下, 装置性能将降低, 这是因为对于 $\lambda_{\text{pump}}=445\text{nm}$ 的泵浦波长而言在有源区仅仅吸收大约55%的泵浦辐射。在图11的曲线图中描绘了延伸这些计算来包括对于PRE的不同数量层的结果。图11显示了作为PRE层对数的函数的在有源区中泵浦辐射的吸收。将从图13理解到, 泵浦辐射的吸收对于大约2到大约20层而言大于大约50%, 对于大约4到大约18层而言大于大约60%, 并且在大约10到大约12层对时大于大约90%。

[0134] 关于步骤2, 可以通过在GaN中嵌入PRE和对于入射辐射模拟反射率 R 来获得PRE反射率的测量。下面作为在PRE中AlGaN层数的函数计算作为波长的函数的反射率。在图12中示出模拟的结构, 图12示出了在两侧具有GaN的大约 $30\mu\text{m}$ 的层的AlGaN/GaN PRE。包括大约70nm的 SiO_2 的抗反射涂层设置在顶部GaN层上。作为 λ 的函数的反射率 $R(\lambda)$ 被计算作为AlGaN PRE的层数的函数。图13显示了对于以38度入射的445nm辐射和以垂直入射(0度)的460nm辐射两者而言作为AlGaN层数的函数的PRE的反射率。对于在图12中所示结构进行计算。图11表明AlGaN的最佳层数处在从10到12的范围内。图13显示了一般来说, PRE应该具有对于通常入射辐射而言在大约40%和大约60%之间的反射率。尽管我们通过特定系统的分析已经得出此结果, 但我们预期它对其中采用PRE和增益区的其他系统是有效的。从结合图10到图13所讨论的分析来看, 显然具有在大约2和大约20之间的AlGaN/GaN对的PRE增加在有源区中的吸收。为了最佳吸收, 可使用在大约2到大约20之间或大约10和大约12之间的对数。

[0135] 在所述实施方式的各种方面中提供了许多数值和范围。这些数值和范围仅被视为实例, 并且无意于限制权利要求的范围。例如, 可以在所公开的所有数值范围中实践在本公

开中描述的实施例。此外,许多材料被识别为适用于实施方式的各个方面。这些材料将被视为示例性的,并且无意于限制权利要求的范围。

[0136] 出于例示和说明而非限制性的目的呈现了各个实施例的前述说明。所公开的实施例无意于是穷举的或限制所公开的实施例的可能实施方式。鉴于以上教导可实现许多变型和修改。

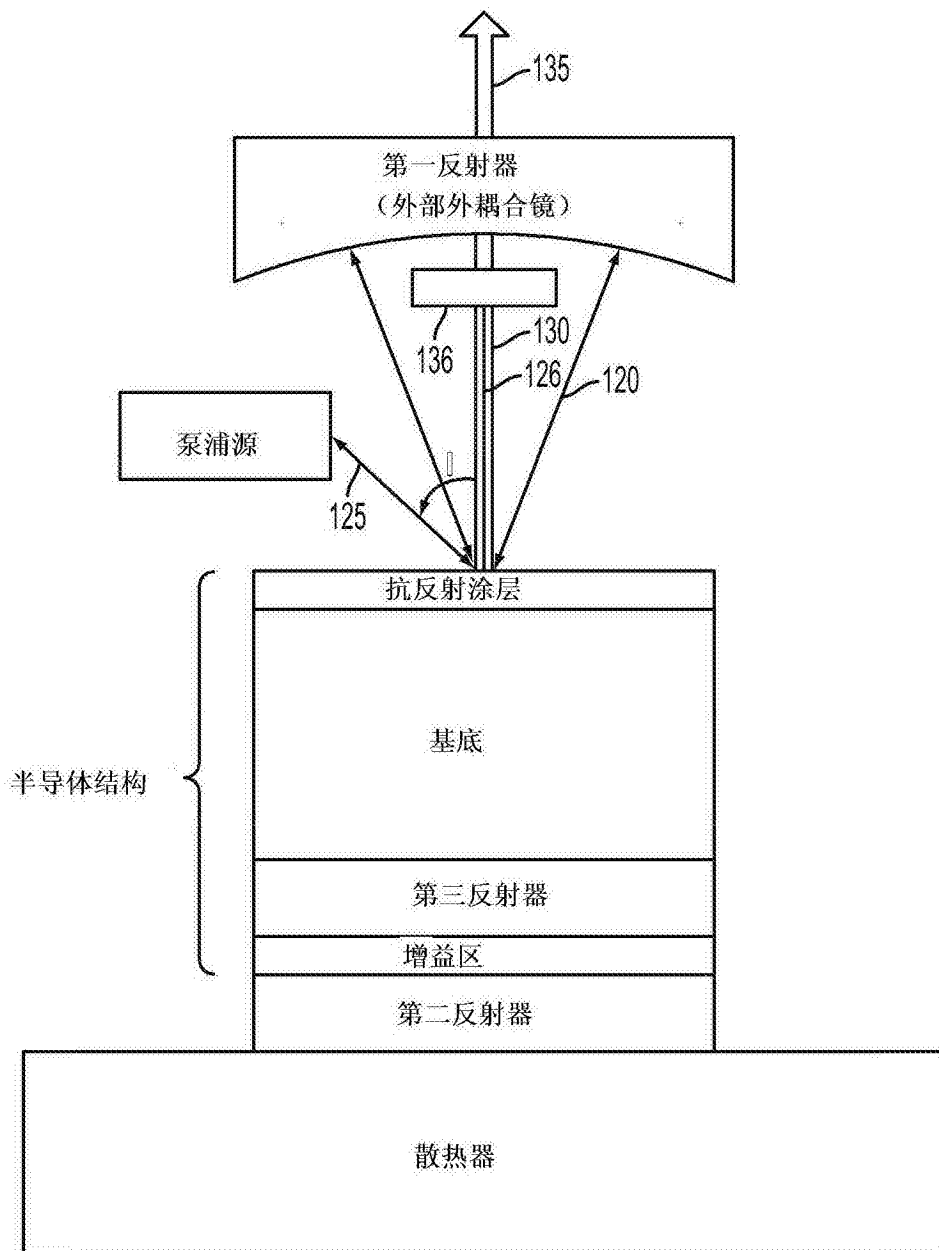


图1

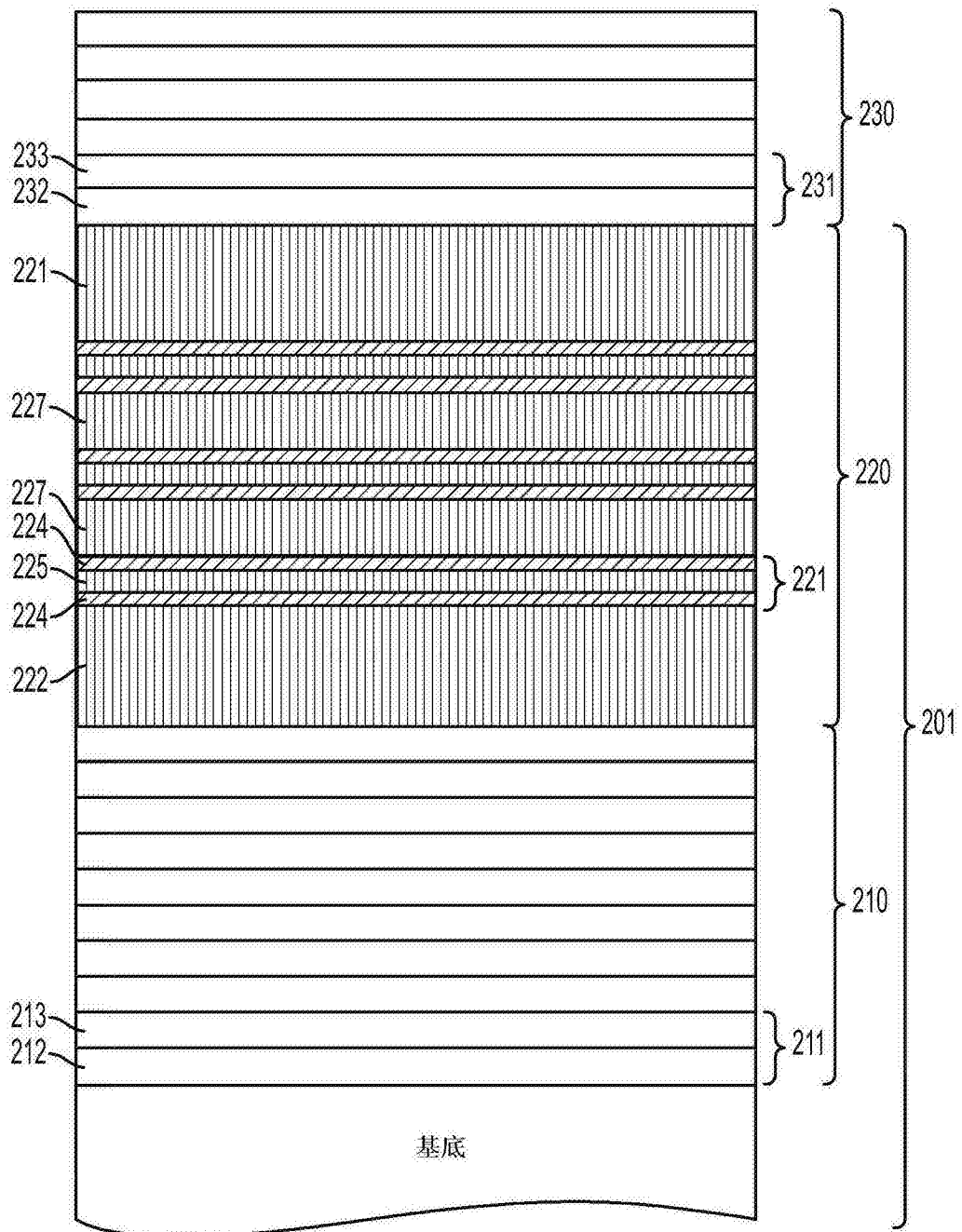


图2

对于增益区中的泵浦激光（38度，445nm）的驻波

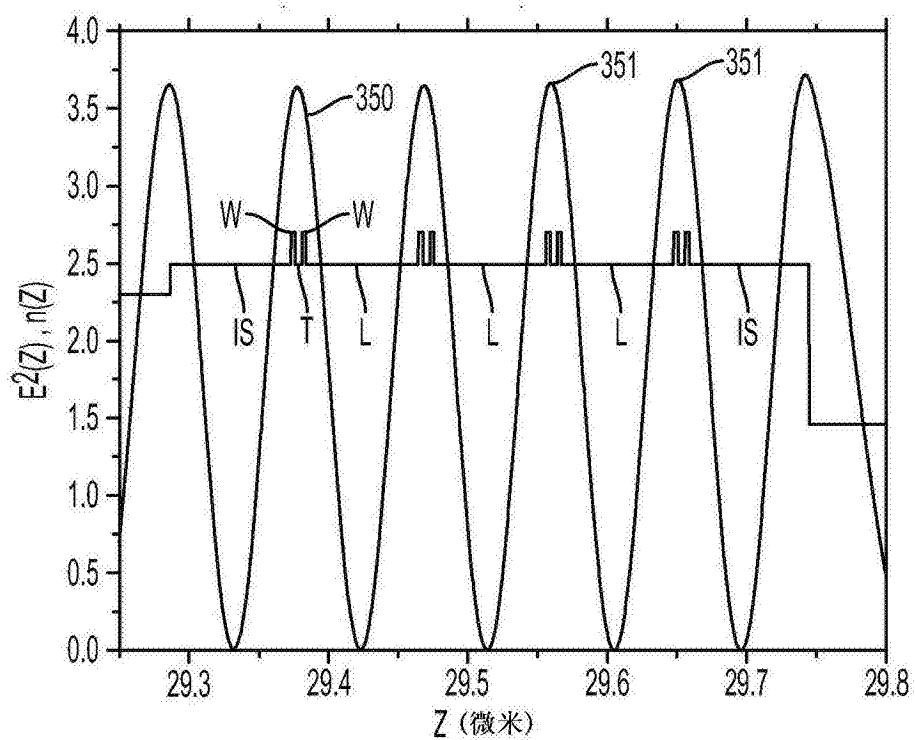


图3

对于增益区中的所发射激光辐射（0度，460nm）的驻波

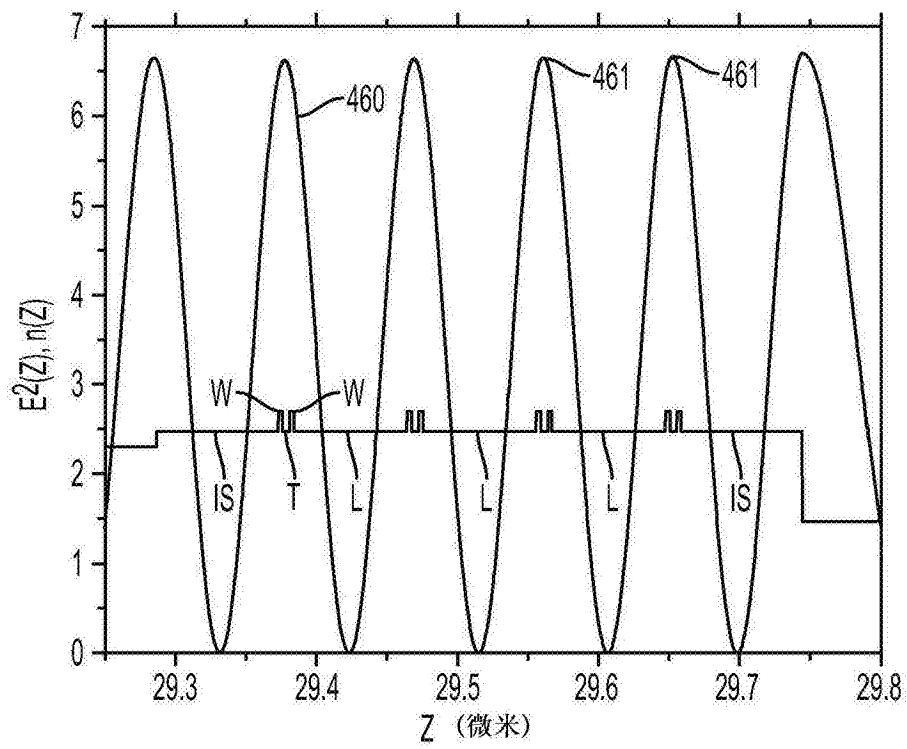


图4

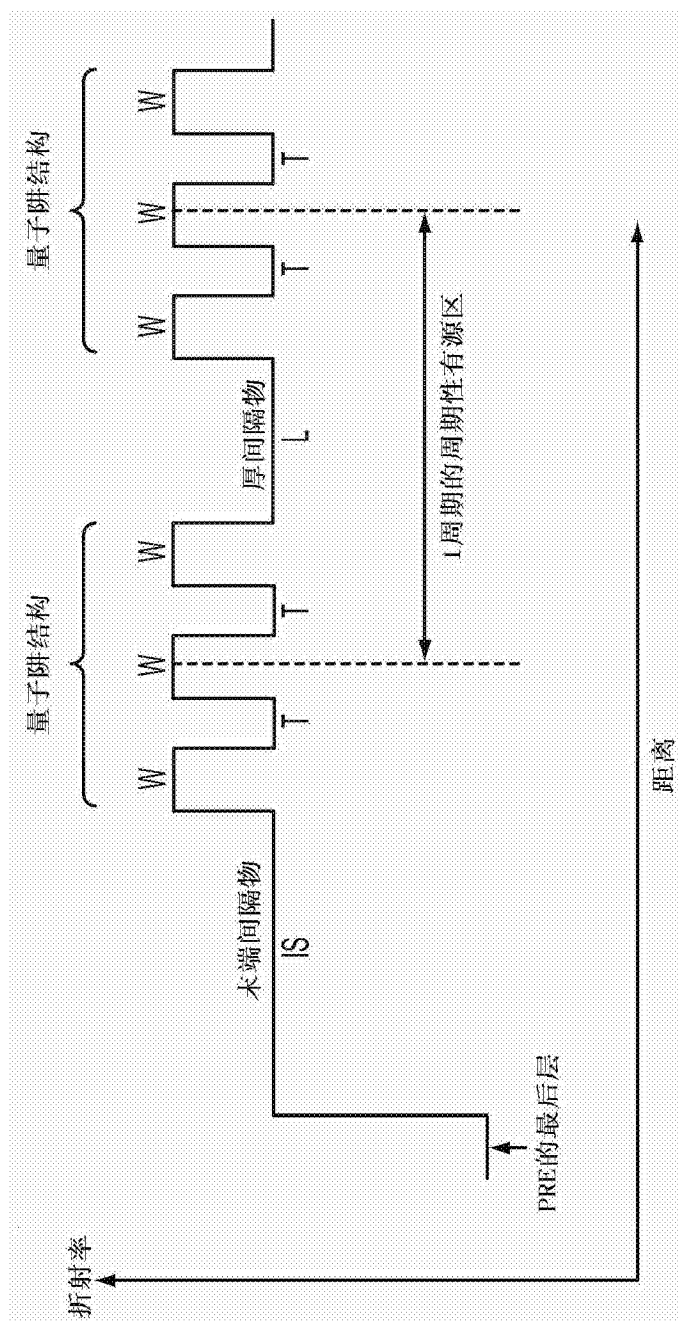


图5

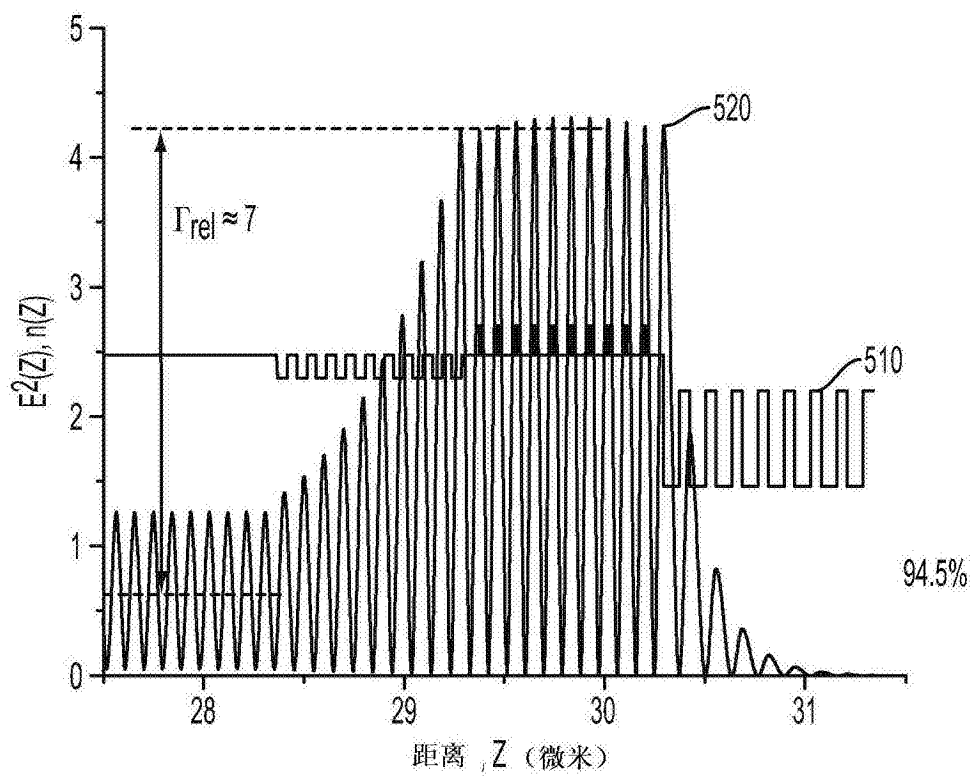


图6

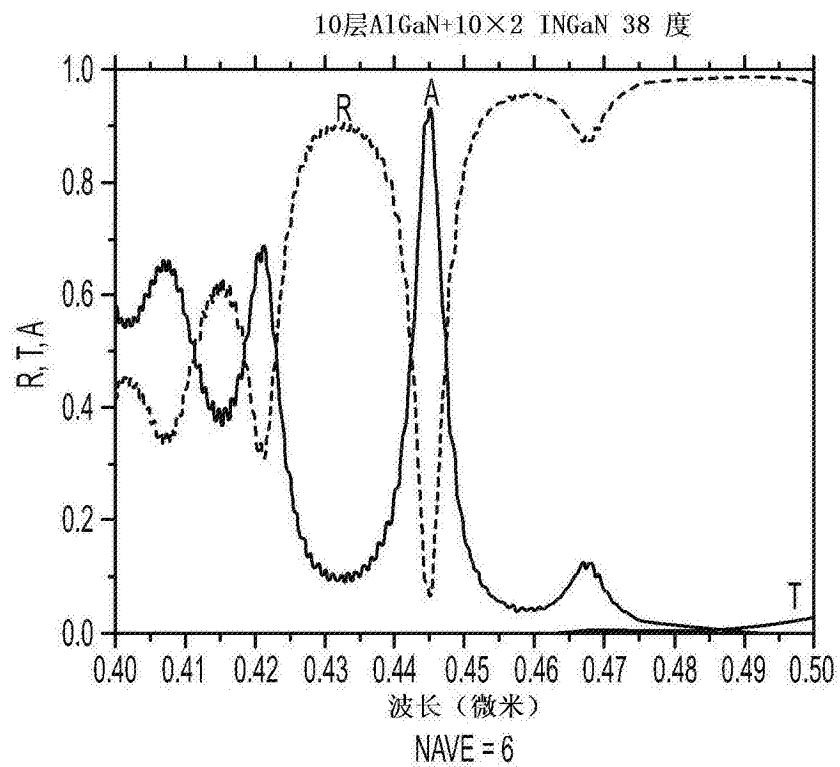


图7

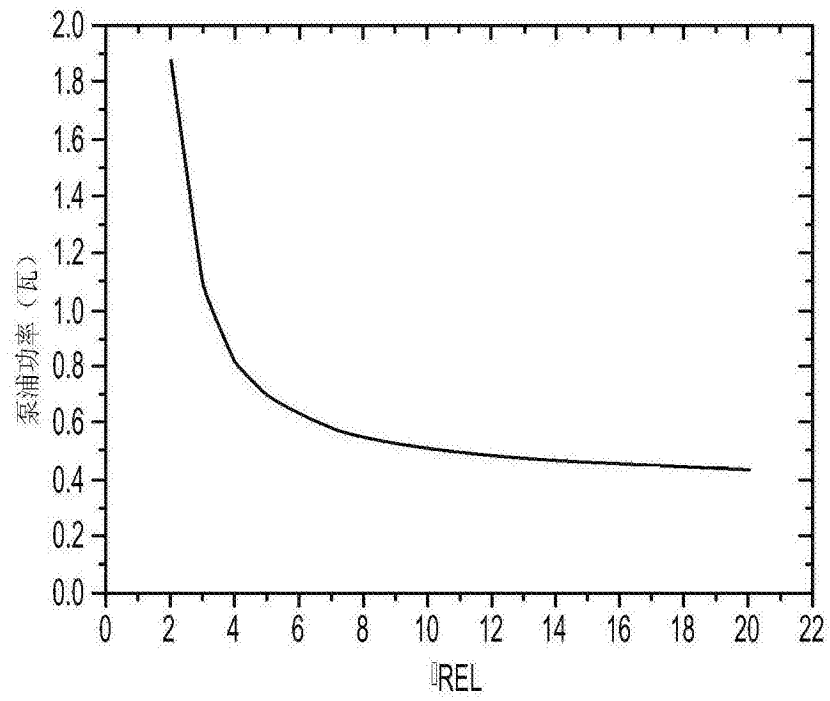


图8

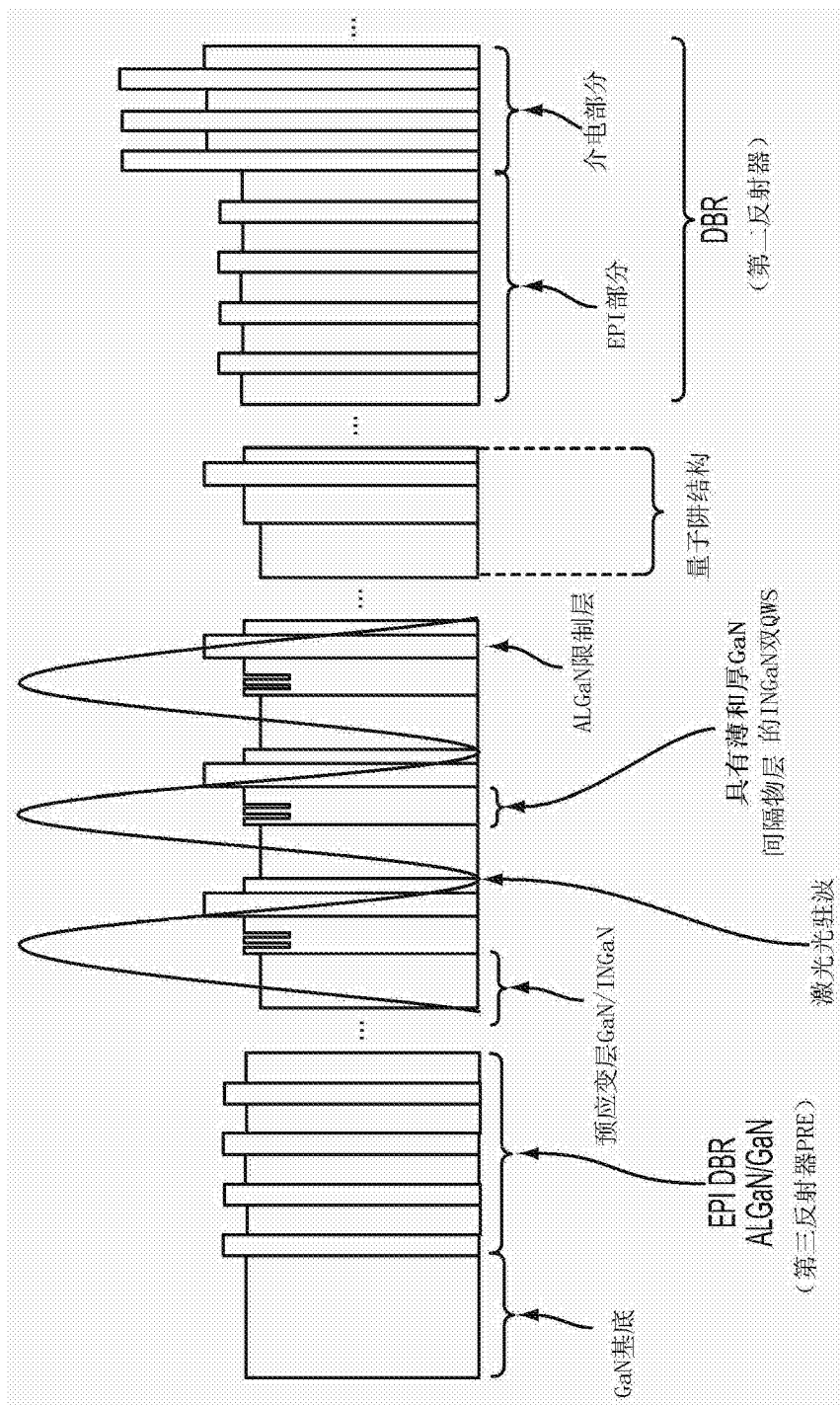


图9

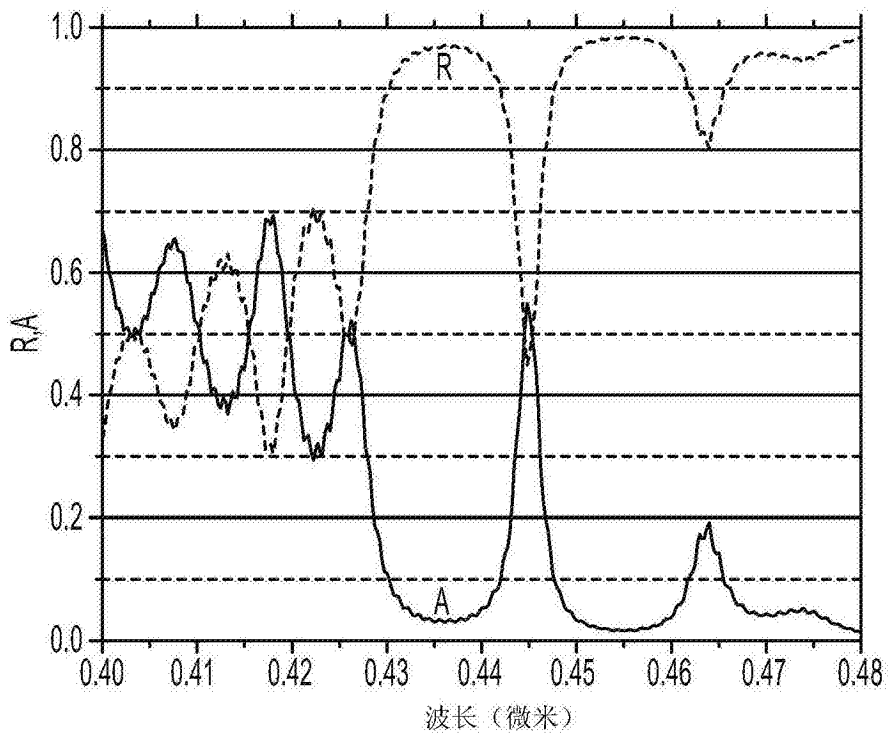


图10

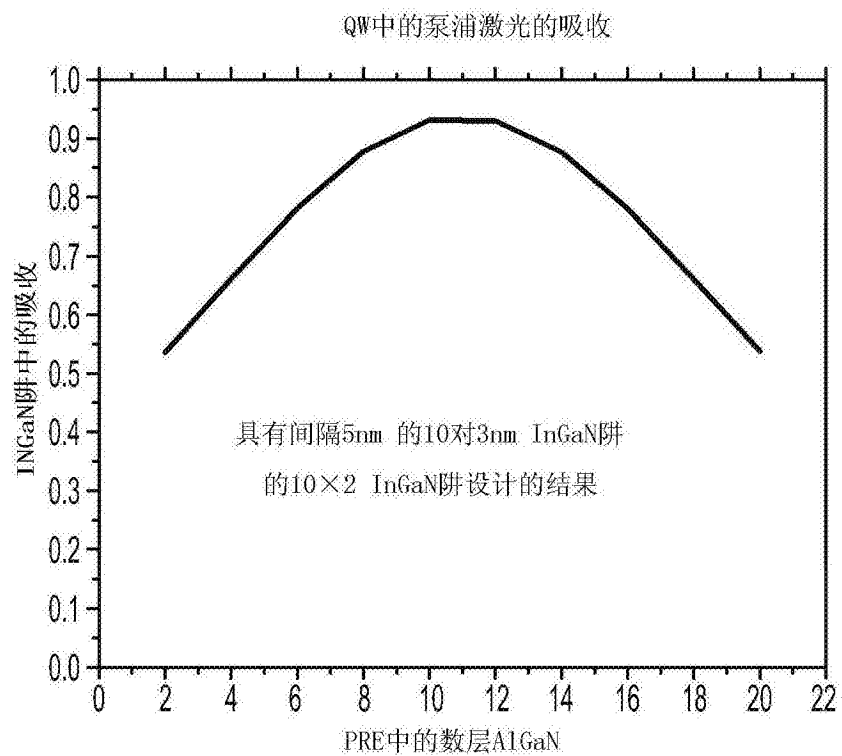


图11

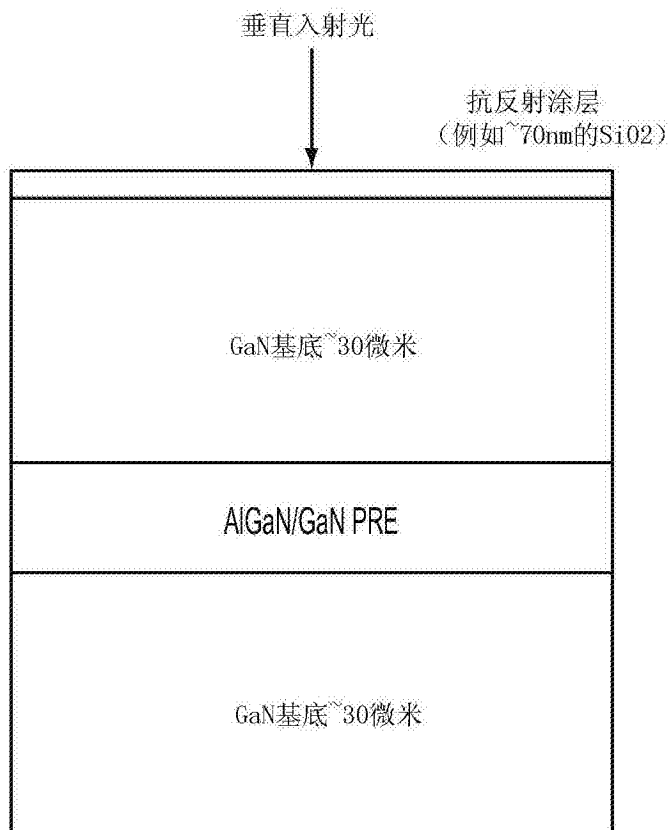


图12

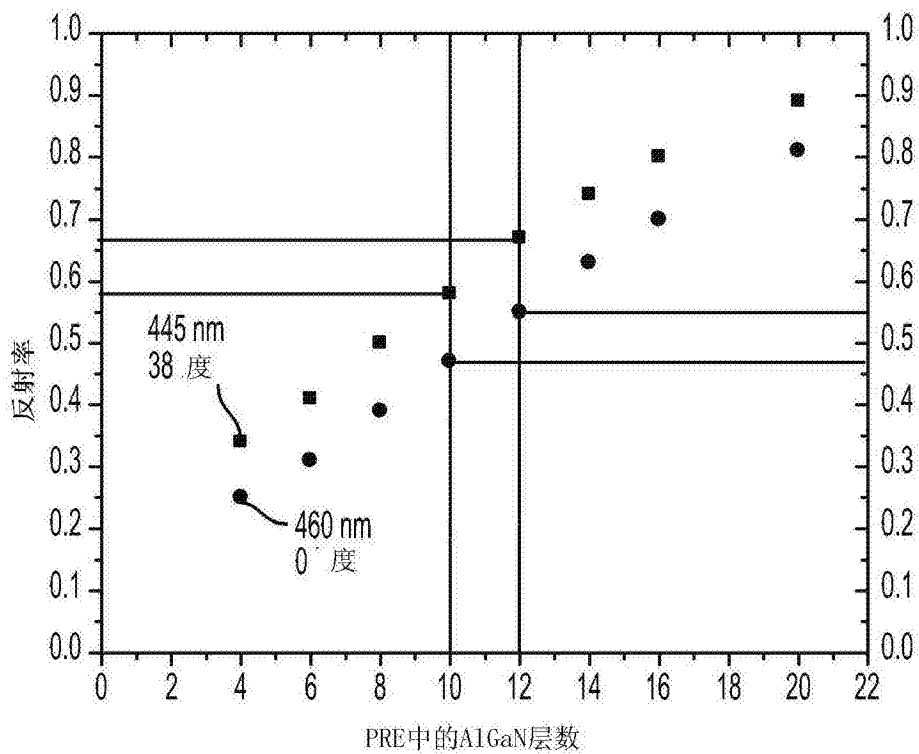


图13