

# 940 nm 垂直腔面发射激光器 单管器件的设计与制备\*

潘智鹏<sup>1)2)</sup> 李伟<sup>1)†</sup> 吕家纲<sup>1)2)</sup> 聂语葳<sup>1)2)</sup>  
仲莉<sup>1)</sup> 刘素平<sup>1)</sup> 马骁宇<sup>1)</sup>

1) (中国科学院半导体研究所, 光电子器件国家工程研究中心, 北京 100083)

2) (中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049)

(2023 年 3 月 1 日收到; 2023 年 4 月 1 日收到修改稿)

计算了 InGaAs/AlGaAs 量子阱的激射波长与阱垒厚度的关系, 并通过 Rsoft 软件计算了不同温度下的材料增益特性. 计算并分析了渐变层厚度对分布布拉格反射镜 (distributed Bragg reflectors, DBRs) 势垒尖峰及反射谱的影响, 通过传输矩阵理论得到 P-DBR 和 N-DBR 的反射谱和相位谱. 模拟了垂直腔面发射激光器 (vertical surface emitting lasers, VCSEL) 结构整体的光场分布, 驻波波峰与量子阱位置符合, 基于有限元分析模拟了氧化层对电流限制的影响. 通过计算光子晶体垂直腔面发射激光器 (photonic crystal vertical cavity surface emitting lasers, PC-VCSEL) 中不同的模式分布及其品质因子  $Q$ , 证明该结构可以有效地实现基横模输出. 通过光刻、刻蚀、沉积、剥离等半导体工艺成功制备出氧化孔径为 22  $\mu\text{m}$  的 VCSEL 和 PC-VCSEL, VCSEL 的阈值电流为 5.2 mA, 斜率效率 0.67 mW/mA, 在不同电流光谱测试中均是明显的多横模输出; PC-VCSEL 的阈值电流为 6.5 mA, 基横模输出功率超过 2.5 mW, 不同电流下的边模抑制比超过 25 dB, 光谱宽度小于 0.2 nm.

**关键词:** 垂直腔面发射激光器, 光子晶体垂直腔面发射激光器, 基横模, 大功率

**PACS:** 42.55.Px, 42.55.Tv,

**DOI:** 10.7498/aps.72.20230297

## 1 引言

近年来, 垂直腔面发射激光器 (vertical surface emitting lasers, VCSEL) 在消费市场的应用越来越广泛, 包括激光雷达、3D 传感、材料加工、虚拟现实以及汽车辅助驾驶等<sup>[1–5]</sup>. 传统的 VCSEL 由于横向尺寸较大, 对横向模式限制能力较弱、易于激射出多横模, 严重影响了器件的光束质量, 限制了其在光通信、激光互联、气体测量等方面的进一步应用. 实现 VCSEL 基横模输出的主要方法包括

缩小氧化孔径、表面刻蚀、扩展谐振腔、反型波导、Zn 扩散孔径、高对比度光栅以及光子晶体等方法, 其中, 通过在 VCSEL 中引入光子晶体结构来实现基横模输出与其他方法相比, 其制造工艺更简单、可重复性高、制造容差更大<sup>[6–15]</sup>. 2001 年德国乌尔姆大学首次报道了光子晶体垂直腔面发射激光器 (photonic crystal vertical cavity surface emitting lasers, PC-VCSEL) 结构, 在 12  $\mu\text{m}$  的大氧化孔径下实现了基横模激射<sup>[10]</sup>. 伊利诺伊大学在 2009 年通过理论计算与实验结果的比较, 验证了 PC-VCSEL 中光子晶体孔对模式的损耗作用和由此导

\* 国家自然科学基金 (批准号: 62174154) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: liwei66@semi.ac.cn

致的横向限制作用, 并提出有效的设计单模 PC-VCSEL 的方法<sup>[11]</sup>. 2017 年设计制备出可以相干耦合的离子注入型 PC-VCSEL 阵列, 其调制带宽超过 30 GHz, 证明了其反向耦合和同相耦合都能明显地提高调制带宽<sup>[12]</sup>. 同年, 北京工业大学从理论和实验上证明了七孔缺陷相比单孔缺陷可以引入更大的高阶模损耗和更低的低阶模损耗, 通过理论设计的优化后获得了阈值电流 0.9 mA 和单模功率 3.1 mW 的七孔缺陷 PC-VCSEL<sup>[13]</sup>. 2020 年, 报道了利用菱形氧化孔和光子晶体结构实现偏振双稳态的 PC-VCSEL, 11 mW 时实现了 TM 和 TE 模式的转换<sup>[14]</sup>. 同年, 通过优化模式滤波器的厚度和直径, 并将谐振腔长度调整为半波腔长, 实现了 1.4 mW 的 940 nm VCSEL 基横模输出<sup>[15]</sup>.

本文计算了压应变  $\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{As}/\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}$  量子阱厚度跟其激射波长之间的关系, 并应用 Rsoft 软件模拟了不同温度下多量子阱有源区的材料增益特性, 其温度漂移系数为 0.3 nm/K. 通过求解泊松方程以及传输矩阵计算分析了分布布拉格反射镜 (distributed Bragg reflectors, DBRs) 中渐变层厚度对价带势垒以及反射谱的影响, 渐变层厚度增加会导致势垒尖峰降低、反射谱带宽变小. 本文模拟了 VCSEL 整体结构的光场分布, 其中驻波波峰与量子阱有源区位置重合, 可以获得最大的增益; 基于有限元分析法模拟了氧化层对注入电流的限制作用, 有源区中的电流被有效地限制在氧化孔所对应的位置, 并且其电流密度更强、更均匀. 本文模拟了 PC-VCSEL 中不同模式下的光场分布, 其不同模式所对应的波长有所区别, 并计算了 VCSEL 和 PC-VCSEL 不同模式下的品质因子  $Q$ , 证明光子晶体空气孔结构可以通过增大对高阶横模的损耗来实现基横模输出. 通过光刻、刻蚀、沉积、剥离等半导体工艺, 成功制备出光子晶体周期为 5  $\mu\text{m}$ 、空气孔直径为 2.5  $\mu\text{m}$  的 PC-VCSEL, 最大基横模输出达到 2.55 mW, 边模抑制比超过 25 dB, 光谱宽度小于 0.2 nm. 为了研究光子晶体空气孔对横向模式的限制作用, 制作了相同规格的氧化限制型 VCSEL, 其氧化限制孔直径为 22  $\mu\text{m}$ , 最大斜率效率为 0.66 mW/mA, 22 mA 时输出功率为 9.3 mW, 从其光谱来看, 存在多个输出波长且光谱宽度较大, 是明显的多横模输出.

## 2 VCSEL 结构的设计模拟

### 2.1 有源区模拟

有源区作为 VCSEL 的核心区域, 可以将注入载流子转化为光子并进行输出, 激光的激射波长、功率、阈值和斜率效率都会受到有源区参数的影响. 多量子阱有源区相较于体材料异质结有源区具有更高的增益、更低的损耗和更强的偏振选择特性, 能够使 VCSEL 实现低阈值、高效率、高功率工作. 基于克龙尼克-潘纳模型以及固体能带理论对有源区结构进行了设计, 通过对本征方程求解可以得到量子阱中的子能级<sup>[16]</sup>:

$$\cos(k(L_w + L_b)) = \cos(k_b L_b) \cos(k_w L_w) - \frac{k_w^2 + k_b^2}{2k_w k_b} \sin(k_b L_b) \sin(k_w L_w), \quad (1)$$

$$k_b = i\sqrt{2m_b(V - E)}/\hbar, \quad k_w = \sqrt{2m_w E}/\hbar, \quad (2)$$

其中  $L_b$  和  $L_w$  分别是势垒和势阱的宽度;  $m_b$  和  $m_w$  为相应的有效质量;  $V$  是价带或者导带的带阶;  $E$  是量子化的子能级;  $\hbar = h/(2\pi)$ ,  $h$  是普朗克常数. 由于  $\text{InGaAs}$  压应变量子阱结构, 可以实现更低的透明载流子密度和更高的材料增益, 因此选择  $\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{As}/\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}$  作为量子阱结构. 计算了该量子阱的厚度以及势垒的厚度对激射波长的影响, 如图 1 所示, 随着量子阱厚度以及势垒厚度的增加, 其激射波长会往红移方向移动. 这是因为随着势阱或势垒厚度的增加, 阱中的量子化效应减弱, 使得导带以及价带的第一子能级均会降低, 直至分离的能级变为能带, 由跃迁定则可知, 子能级的降低会导致激射波长红移. 考虑到 VCSEL 在连续或准连续工作条件下其有源区温度有所上升, 选择势阱  $\text{In}_{0.18}\text{GaAs}$  的厚度为 6 nm、势垒  $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}$  的厚度为 8 nm, 在图 1 中对应的激射波长为 929 nm. 为了获得更高的往返增益, 有源区由三对应变补偿量子阱组成, 有源区两侧为 114 nm 的  $\text{Al}_x\text{GaAs}$  限制层, 其中铝组分  $x$  从 0.22 到 0.55 线性变化, 既能很好地限制载流子又能起到减小电阻的作用, 有源区与两侧的限制层共同构成光学长度为一个  $\lambda$  的谐振腔. 利用 Rsoft 软件对整个有源区的增益特性进行了计算, 图 2 为不同温度下有源区的增益特性曲线. 从图 2 中可以看到, 温度为 300 K 时所对应的峰值波长为 929 nm、峰值材料

增益为  $3300 \text{ cm}^{-1}$ , 随着温度的升高会导致峰值增益波长红移并会导致材料增益有所下降, 峰值波长的红移速度为  $0.32 \text{ nm/K}$ ; 当温度达到  $340 \text{ K}$  时, 其峰值波长为  $941 \text{ nm}$ , 且峰值材料增益仍然超过  $2700/\text{cm}$ , 满足我们的设计需求.

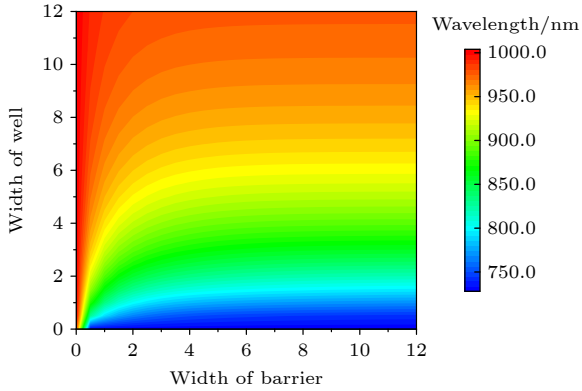


图 1 不同量子阱宽和量子垒宽对应的激光波长

Fig. 1. Lasing wavelength under different quantum well widths and barrier widths.

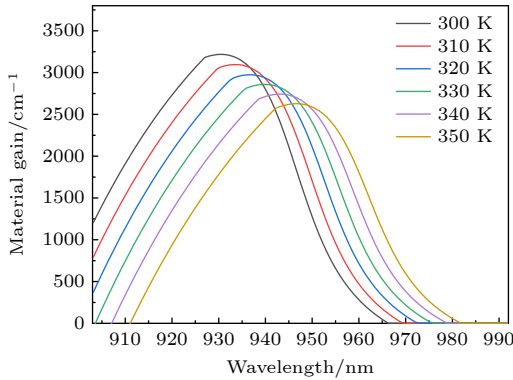


图 2 不同温度下的材料增益特性

Fig. 2. Material gain spectra at different temperatures.

## 2.2 DBR 模拟

DBR 是由光学厚度为  $\lambda/4$  的高低折射率材料交替堆叠而成, 其中高折射率材料为  $\text{Al}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{As}$ 、低折射率材料为  $\text{Al}_{0.89}\text{Ga}_{0.11}\text{As}$ <sup>[17]</sup>, 由于 VCSEL 谐振腔很短, 所以位于谐振腔两侧的 N-DBR 和 P-DBR 需要具有很高的反射率. P-DBR 形成的同型异质结在界面处存在很大的势垒, 会导致较高的串联电阻<sup>[18,19]</sup>, 进而造成严重发热、阈值升高、内量子效率下降等影响, 为了降低 P-DBR 之间的串联电阻, 在 DBR 各层材料之间均插入  $20 \text{ nm}$  的渐变层. 图 3 为突变 DBR 即渐变层厚度为  $0$ 、渐变层厚

度从  $5$  到  $30 \text{ nm}$  的渐变 DBR 的价带能带图, 从图 3 中可以看到, 在异质结的右侧即窄带隙 ( $\text{Al}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{As}$ ) 处产生向上的势垒尖峰 A, 在异质结的左侧即宽带隙 ( $\text{Al}_{0.89}\text{Ga}_{0.11}\text{As}$ ) 处产生向下的势垒尖峰 B. 对于空穴来说, 价带位置越往上能量越低, 所以尖峰 A 处是空穴的低能量处, 容易形成空穴积累, 对空穴的迁移阻碍较小; 尖峰 B 处形成的是空穴的耗尽区, 对空穴形成势垒, 空穴要想流通, 需要越过势垒尖峰 B. 从图 3 中可以明显看到, 随着渐变层厚度的增加, 可以有效地降低价带势垒尖峰 B 的高度, 从而降低 P-DBR 的串联电阻, 但是当渐变层厚度超过  $20 \text{ nm}$  后, 价带的势垒尖峰 B 已经很小了, 基本不再有明显的下降.

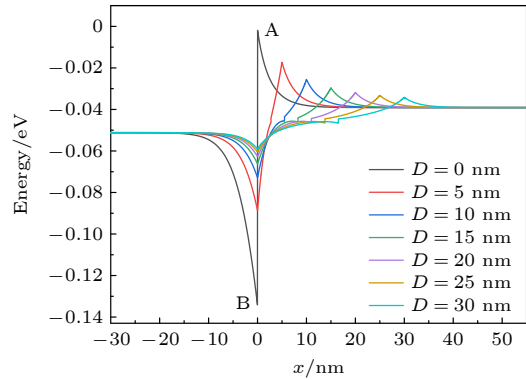


图 3 不同渐变层厚度下的 DBR 价带图

Fig. 3. Valence-band diagram of DBR under different gradient layer thickness.

利用传输矩阵法以及等效剖分模型计算了不同渐变层厚度下 DBR 的反射谱, 利用 Sellmeier 等式计算了  $\text{Al}_x\text{GaAs}$  的材料折射率, 并与铝组分  $x$  的关系进行线性拟合, 可以得到折射率  $n$  与铝组分  $x$  的关系:  $n = -0.572x + 3.544$ <sup>[17]</sup>,  $x$  的取值范围为  $0-1$ . 图 4 为计算的  $\text{Al}_{0.09}\text{Ga}_{0.81}\text{As}/\text{Al}_{0.89}\text{Ga}_{0.11}\text{As}$  不同渐变层厚度下的 DBR 反射谱, 从图中可以明显地看到, 渐变层厚度的增加会导致 DBR 反射谱的高反带宽会不断减小, 这是因为渐变 DBR 中等效的高低折射率层之间的折射率差值随着渐变层厚度的增加越来越小, 等效布拉格反馈系数降低. 但是, DBR 反射率受渐变层厚度变化的影响较小, 随着渐变层厚度的增加, 中心波长处的反射率有很小程度的降低,  $20 \text{ nm}$  渐变层的 DBR 在保持较高反射率的同时能有效地降低价带势垒, 满足我们的设计需求.



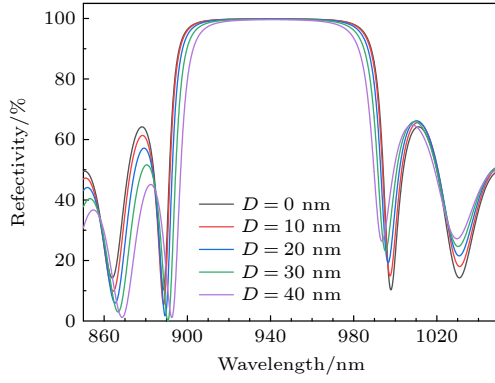


图4 不同渐变层厚度下的DBR反射谱

Fig. 4. DBR reflection spectrum under different gradient layer thickness.

计算了上下DBR的反射谱和相位谱,其中上DBR为23对、下DBR为40对,高低折射率层的光学厚度为 $\lambda/4$ ,  $\lambda = 940$  nm. 图5为计算的P-DBR和N-DBR的反射谱和相位谱,其中黑线为反射谱,红线为相移谱;虚线代表23对DBR,实线代表40对DBR. 由图5可以看到,当N-DBR为40对时,其反射率超过99.9%,并且在940 nm处的相位为0;当P-DBR为23对时,其反射率超过99.0%,并且在940 nm处的相位同样为0,其上下DBR的反射率及相位均满足我们顶发射VCSEL的设计需要. VCSEL实现激射的谐振条件为

$$\Phi_1 + \Phi_2 + \frac{4\pi n_s}{\lambda} L_c = 2\pi N, \quad (N = 1, 2, \dots). \quad (3)$$

当上下DBR的相位为0时,即 $\Phi_1 = \Phi_2 = 0$ ,其谐振条件可以简化为

$$\frac{4\pi n_s}{\lambda} L_c = 2\pi N, \quad (N = 1, 2, \dots), \quad (4)$$

其中 $L_c$ 是谐振腔的长度, $n_s$ 是谐振腔的等效折射率,所以谐振腔的光学厚度可以表示为 $n_s L_c =$

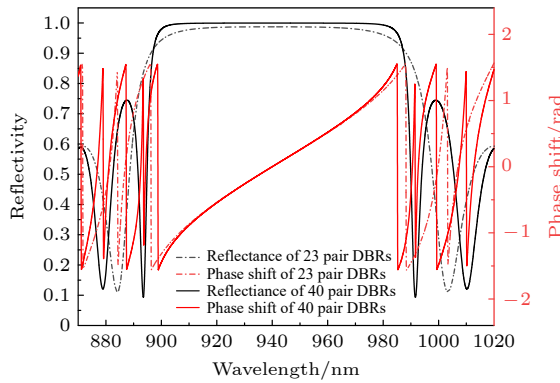


图5 P-DBR和N-DBR的反射谱和相移谱

Fig. 5. Reflection spectrum and phase shift spectrum of P-DBR and N-DBR.

$N\lambda/2$ ,即谐振腔的光学厚度为半波长的整数倍.但是,当上下DBR的相移不为0时,会对谐振波长(3)式造成一定的影响,在设计谐振腔结构时还要考虑相移的影响,这无疑会增加计算难度.为了与P面电极实现良好的欧姆接触,在P-DBR的上面生长一层重掺杂的GaA盖层,其厚度为20 nm,该层除了制作P面电极时可以通过隧穿效应实现欧姆接触,还可以起到防止芯片氧化的保护作用.

### 2.3 电场分布及电流分布模拟

有源区的电子和空穴有更强的相互作用,为了使光子和电子之间有更好的耦合,多量子阱有源区应该位于谐振腔中心,使得驻波波腹与有源区重合,保证量子阱的增益最大.图6为模拟的整个VCSEL结构的折射率以及归一化电场分布,为了更详细地观察多量子阱有源区附近的电场分布,对该区域进行放大,如图6中的插图所示.由图6中的插图可以明显地看出,在有源区附近的电场强度明显高于两侧DBR中的电场强度,DBR离有源区距离的增加其电场强度会呈周期性指数衰减,并且有源区的位置和驻波波峰相重合,如此可以获得相对较高的光学增益.在外延结构设计中,通过减小有源区附近的DBR掺杂浓度来降低光学损耗,这是由于靠近有源区的DBR也位于驻波的波峰位置,会导致此处的自由载流子散射损耗相对较大.光场纵向限制因子,即有源区中的光场能量占整体结构的比值,可以通过对能量的积分来表示[20]:

$$\Gamma = \frac{\int_{l_a} n_a^2 |E|^2 dl}{\int_L n^2 |E|^2 dl}, \quad (5)$$

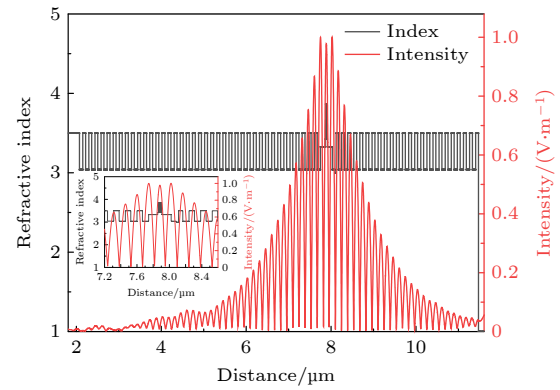


图6 VCSEL的折射率及归一化电场强度分布

Fig. 6. Refractive index and normalized electric field distribution of VCSEL.

其中  $l_a$  为多量子阱有源区的厚度;  $L$  为包括 DBR 在内的整个 VCSEL 的厚度;  $n_a$  是多量子阱有源区的折射率;  $n$  是其他各层的折射率;  $E$  是电场强度, 通过 (4) 式计算得到的光场纵向限制因子为 7.68%, 说明有源区对光场有较好的限制效果.

氧化工艺的引入, 使得 VCSEL 的阈值电流进一步降低<sup>[21]</sup>, 选择 30 nm 厚的  $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$  材料作为湿法氧化工艺中的高铝组分, 既能保证稳定的氧化速度, 又能在氧化后维持良好的机械稳定性<sup>[22]</sup>. 为了获得最小的散射损耗, 将氧化层设置在第一对 P 型 DBR 的波结位置, 这是因为氧化层放置在驻波波结处, 其有效折射率的改变相对于放置驻波波腹处更小. 由于氧化产物  $\text{AlO}_x$  具有较小的折射率及其绝缘特性, 因此, 对光场和电场都能实现很好的限制作用, 通过有限元分析的方法对器件的电流分布进行了模拟. 模拟过程中, 考虑到 DBR 这种多层结构对电导率在不同方向的影响, 将其等效为具有各向异性电导率的体材料, 其电导率可以表示为<sup>[23]</sup>

$$\sigma_r = \frac{d_1\sigma_1 + d_2\sigma_2}{d_1 + d_2}, \quad \sigma_z = \frac{d_1 + d_2}{d_1/\sigma_1 + d_2/\sigma_2}, \quad (6)$$

其中  $\sigma$  和  $d$  分别是两个层的电导率及其厚度;  $\sigma_r$  是径向电导率;  $\sigma_z$  是纵向电导率; 设置其 P 面电极的注入方式为环形电极注入, 注入电流为 30 mA. 如图 7 所示, 模拟了不同位置处的电流密度分布和有源区中的光场分布, 其中实线代表有源区、P-DBR 以及 N-DBR 中间位置的电流密度分布, 虚线表示有源区径向的光场分布. 从图 7 中可以明显地看到, 经过氧化限制孔之后, 电流横向密度分布发生了明显的变化, 氧化层限制层对电流有很强的限制作用, 使有源区电流密度比 DBR 区更集中、更高, 并且在氧化限制孔外基本没有电流密度分布. 电流刚从电极注入时, 其电流分布的峰值对应于环形电极的位置, 由于 P 型电极环内径尺寸要大于氧化限制孔, 所以图 7 中 P-DBR 的电流密度分布要比有源区中的更宽. 随着注入电流继续向下扩散, 由于电流的横向扩展以及电流限制通道的影响, 电流只能从氧化限制孔中间从 P-DBR 区域流入到有源区, 所以从注入电极开始到氧化限制层位置, 越靠近氧化限制层的注入电流密度分布越集中. 而有源区以下随着传输距离的增加, 对电流的限制作用也会逐渐减弱, 所以 N-DBR 中的电流密度分布会更加均匀, 这种现象也能从侧面说明氧化

限制孔对注入电流具有很好的限制作用. 由于  $\text{AlO}_x$  引起的有效折射率降低, 使得有源区中的光场基本被限制在氧化限制孔所对应的区域内, 基本与有源区中的电流密度分布一致, 从而实现比较高的增益, 有效地降低了器件的阈值电流.

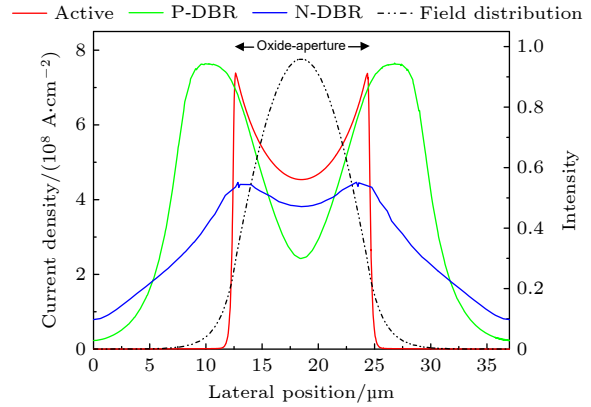


图 7 电流分布及光场分布

Fig. 7. Current distribution and light field distribution.

## 2.4 基横模结构模拟

PC-VCSEL 通过氧化限制孔结构和二维光子晶体结构分别实现对载流子和光场的控制, 可以在较大氧化孔径下实现大功率的基横模输出. 我们已经对 PC-VCSEL 中光子晶体空气孔的作用进行了详细的研究, 对其横向模式的控制作用进行了讨论<sup>[24]</sup>. 如图 8 所示, 模拟了 PC-VCSEL 不同的横向模式分布, 器件左右两侧均采用散射边界条件来模拟边界的散射损耗, 其中光子晶体结构的周期为 5  $\mu\text{m}$ , 空气孔直径为 2.5  $\mu\text{m}$ . 图 8(a) 是 PC-VCSEL 基横模的模式分布, 可以明显地观察到, 基横模被有效地限制在光子晶体结构的缺陷区域, 并没有泄露到光子晶体空气孔中, 其对应的波长为 937.26 nm; 图 8(b) 和图 8(c) 是 PC-VCSEL 高阶横模的模式分布, 此时的模式有一部分进入到光子晶体空气孔中, 说明高阶横模被衍射损耗掉一部分, 从而增加了高阶横模的激射阈值, 一阶横模和二阶横模所对应的波长分别为 936.85 nm 和 936.14 nm, 由于不同的横向模式所代表的波长并不相同, 所以能够通过精度较高的光谱仪来判断是否为基横模输出. 从模拟结果来看, PC-VCSEL 中基横模光场分布主要集中在光子晶体的缺陷区域, 即没有刻蚀空气孔的部分, 因此造成的损耗较小; 而高阶横模光场分布不如基横模集中, 并且高阶模式会通过光子晶体

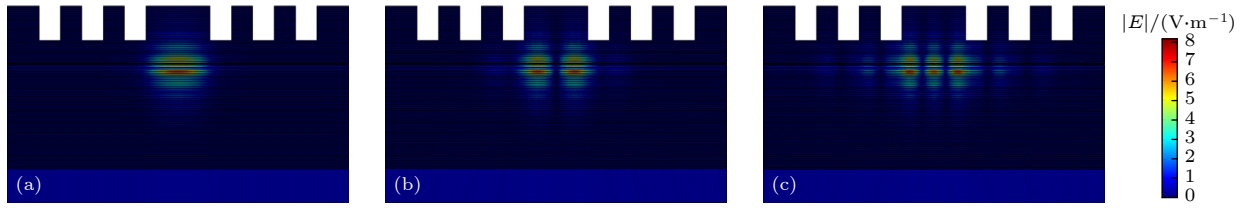


图 8 PC-VCSEL 的不同模式 (a) 基横模, 谐振波长为 937.25 nm; (b) 一阶横模, 谐振波长为 936.84 nm; (c) 二阶横模, 谐振波长为 936.14 nm

Fig. 8. Different modes of PC-VCSEL: (a) The fundamental transverse mode with resonant wavelength of 937.25 nm; (b) the first order transverse mode with resonant wavelength of 936.84 nm; (c) the second order transverse mode with resonant wavelength of 936.14 nm.

空气孔结构耗散掉, 使得高阶横模的激射阈值增大, 从而实现基横模输出. 为了进一步研究光子晶体空气孔结构对不同模式损耗的影响, 计算了不同结构下各模式的品质因子  $Q$ , 品质因子  $Q$  可以表示波导模式中的损耗情况,  $Q$  值越大说明该模式的损耗越低、越容易激射. 表 1 为相同氧化限制孔径的 VCSEL 和 PC-VCSEL 前三阶横模的品质因子  $Q$ , 对于氧化限制 VCSEL 结构来说, 其基横模及其他高阶模式的品质因子几乎一样, 因此很难实现基横模输出; 对于 PC-VCSEL 结构来说, 将电学限制和光学限制进行分别控制, 利用光子晶体空气孔对横向模式实现进一步的控制, 使得基横模的品质因子  $Q$  明显高于其他高阶模式, 说明高阶横模相对于基横模有更大的激射阈值、更容易被耗散掉, 使得器件的基横模很好地抑制了高阶模, 从而实现一个稳定的基横模输出.

表 1 不同结构下各个模式对应的品质因子  
Table 1. The quality factor of each mode under different structure.

	基横模	一阶横模	二阶横模
PC-VCSEL	6238	2646	1373
VCSEL	10614	10612	10602

### 3 器件制备与测试

#### 3.1 VCSEL 单管器件的制备

实验中使用 AIXTRON 公司的 AIX200 型 MOCVD 外延设备, 外延结构生长在 3 in (1 in = 2.54 cm) GaAs 衬底上, 衬底偏转角度为 4°. 图 9 为 VCSEL 外延片的电致发光 (EL) 谱和白光反射谱, 图 9(a) 为 EL 谱, 峰值增益波长为 935.5 nm, 半高全宽 FWHM 为 2.9 nm; 图 9(b) 为 VCSEL 的白光发射谱, 其腔模 (DIP) 波长为 944.2 nm. 与

模拟结果相比, EL 和 DIP 以及白光反射谱均向长波长的方向移动, 这可能是由于 MOCVD 过程中源流量的波动以及托盘转动等原因, 导致多量子阱有源区以及 DBR 中每层材料的厚度发生微小的变化, 进而会引起材料增益谱和白光反射谱的偏移.

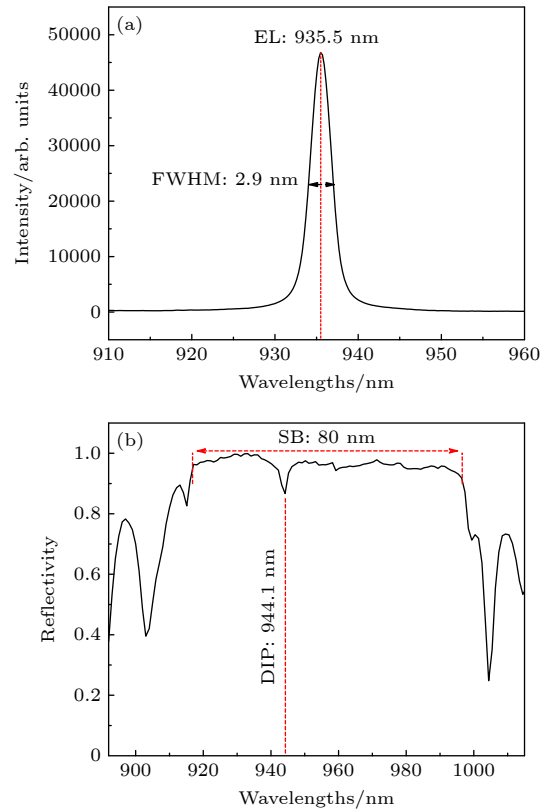


图 9 VCSEL 外延结构 (a) 电致发光谱; (b) 白光反射谱  
Fig. 9. (a) EL spectrum and (b) white light reflection spectrum of VCSEL epitaxial structure.

外延生长之后, 通过紫外光刻、介质膜沉积、干法刻蚀、湿法氧化、金属电极等工艺制备 940 nm VCSEL 单管以及 PC-VCSEL 芯片. 器件制备的工艺流程如图 10 所示, 首先用 ICP 对外延片进行台面刻蚀, 掩膜为 400 nm 的  $\text{SiO}_2$ , 其中刻蚀 AlGaAs



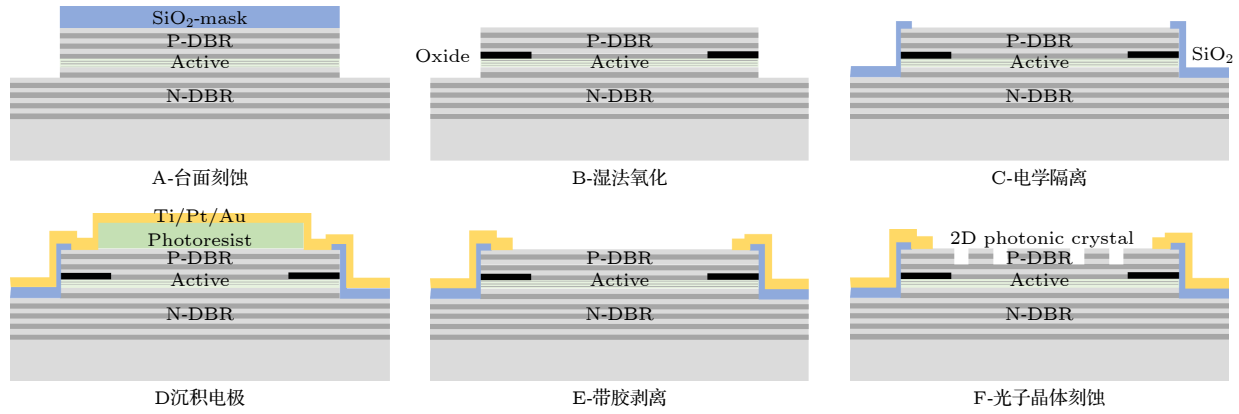


图 10 PC-VCSEL 工艺流程

Fig. 10. PC-VCSEL process flow.

材料的气体组分为  $\text{Cl}_2/\text{BCl}_3/\text{Ar}$ , 刻蚀深度为  $4.0\ \mu\text{m}$ , 超过有源区两对 DBR. 在湿法氧化过程中, 先将外延片随管式炉一起升温至  $440\ ^\circ\text{C}$ , 随后在  $2\ \text{L/min}$  的氮气以及  $92\ ^\circ\text{C}$  的水汽环境下进行氧化, 氧化时间为  $20\ \text{min}$ , 氧化限制孔径为  $22\ \mu\text{m}$ . 等离子体增强化学气相沉积 (plasma enhanced chemical vapor deposition, PECVD) 生长  $300\ \text{nm}$  厚的  $\text{SiO}_2$  介质膜, 然后通过紫外光刻和电感耦合等离子体 (inductively coupled plasma, ICP) 刻蚀制备电学隔离层以及出光窗口, 其中刻蚀  $\text{SiO}_2$  材料的气体组分为  $\text{Ar}/\text{CH}_3\text{F}_3$ . 由于单管器件出光口径的限制, 输出功率一般在  $\text{mW}$  量级, 需要注入的电流最大也才几十  $\text{mA}$ , 对注入电极厚度的要求不高. 利用电子束蒸发以及带胶剥离技术同时制备 P 型面环形电极、电流注入电极以及之间的连接区,  $\text{Ti}/\text{Pt}/\text{Au}$  的厚度为  $35/35/270\ \text{nm}$ , 由于用电子束蒸发沉积的电极在侧壁的覆盖性较差, 测量过程中常常出现开路的情况, 将第一版的台面刻蚀结构设计为非闭合环结构. 在制备光子晶体空气孔之前, 将外延片分成两块, 其中一块用于制备 VCSEL, 另一块用于制备 PC-VCSEL, 这样可以保证前几步工艺均相同, 极大程度地降低了工艺中存在的误差. 由于光子晶体刻蚀深度较浅, 直接利用光刻胶作为 ICP 刻蚀的掩膜, 其中光子晶体的周期为  $5\ \mu\text{m}$ 、空气孔直径为  $2.5\ \mu\text{m}$ 、刻蚀深度为  $2\ \mu\text{m}$ . 利用减薄抛光技术将衬底减到  $120\ \mu\text{m}$ , 然后在衬底背面溅射  $\text{AuGeNi}$  背面电极, 其厚度为  $300\ \text{nm}$ , 最后在  $370\ ^\circ\text{C}$  的氮气氛围下进行快速热退火形成良好的欧姆接触. 如图 11 所示, 分别为图 11(a) VCSEL 和图 11(b) PC-VCSEL 器件在显微镜下的照片.

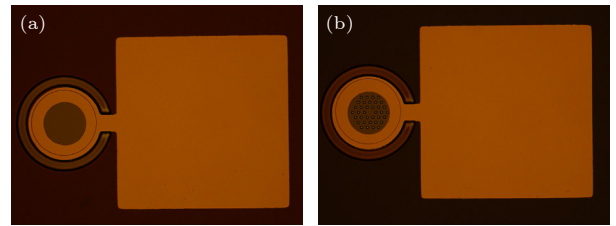
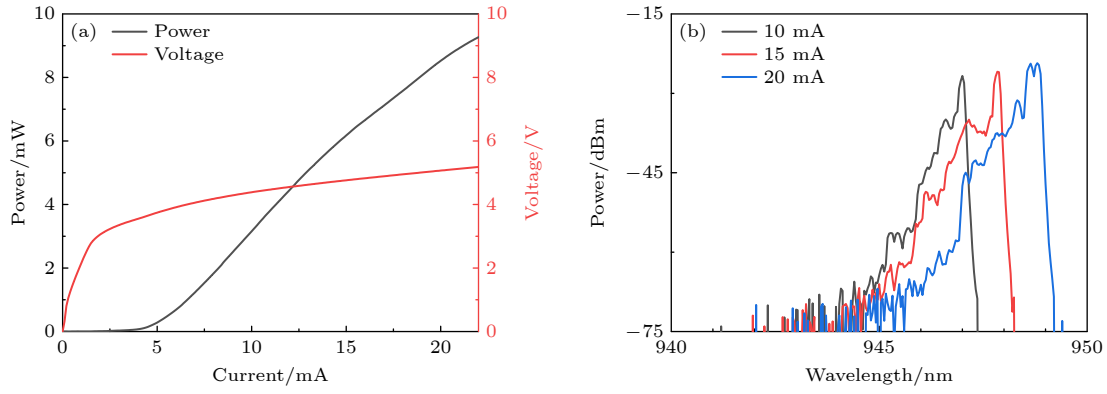
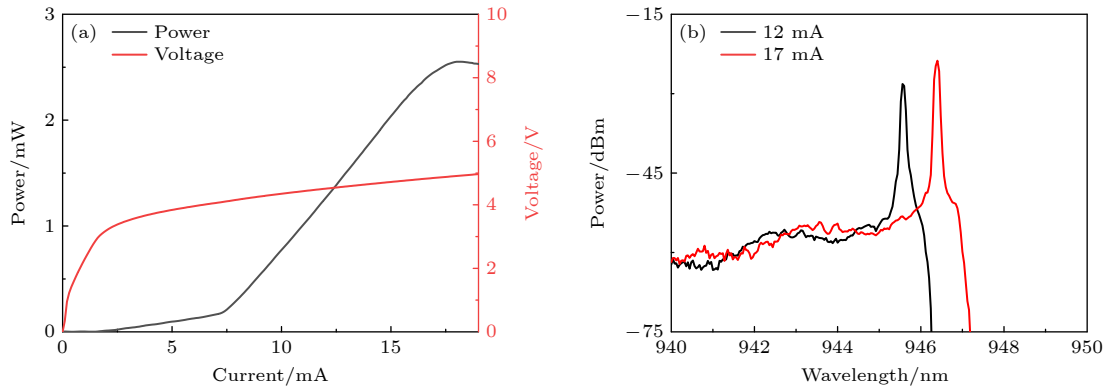


图 11 (a) VCSEL 显微镜照片; (b) PC-VCSEL 显微镜照片

Fig. 11. Microscope images of (a) VCSEL and (b) PC-VCSEL.

### 3.2 器件测试

在连续驱动电流工作下, 分别测量了相同氧化孔径下 VCSEL 和 PC-VCSEL 的功率电压特性以及不同输入电流下的光谱特性. 图 12 为 VCSEL 的  $P-I-V$  光学特性测试曲线以及不同注入电流下的光谱输出, 其阈值电流为  $5.2\ \text{mA}$ , 斜率效率最大为  $0.67\ \text{mW}/\text{mA}$ ,  $22\ \text{mA}$  时输出功率为  $9.3\ \text{mW}$ ,  $10\ \text{mA}$  对应的激射波长为  $947\ \text{nm}$ ,  $20\ \text{mA}$  对应的激射波长为  $948.6\ \text{nm}$ , 激射波长随注入电流变化速率为  $0.16\ \text{nm}/\text{mA}$ . 由图 12 可以明显地看到, 在光谱上存在多个峰值是明显的多横模输出, 整个光谱可以看作是一个包络线, 这是因为我们制备的 VCSEL 其氧化限制孔较大, 会同时激发多个横向模式. 图 13 为 PC-VCSEL 的  $P-I-V$  光学特性测试曲线以及不同注入电流下的光谱输出, 由于光子晶体空气孔会对注入电流造成散射损耗, 所以相同氧化孔径下其阈值电流从  $5.2\ \text{mA}$  增大为  $6.5\ \text{mA}$ , 斜率效率降低为  $0.22\ \text{mW}/\text{mA}$ ,  $18\ \text{mA}$  时输出功率为  $2.55\ \text{mW}$ . 从其光谱特性来看, 在不同注入电流下的边模抑制比 (SMSR) 均超过  $25\ \text{dB}$ , 光谱线宽  $< 0.2\ \text{nm}$ , 判断其是基横模输出, 这是因为光子

图 12 VCSEL 单管 (a)  $L$ - $I$ - $V$  测试; (b) 光谱测试Fig. 12. VCSEL single-emitter: (a)  $L$ - $I$ - $V$  test curves; (b) spectrum test results.图 13 PC-VCSEL (a)  $L$ - $I$ - $V$  测试; (b) 光谱测试Fig. 13. PC-VCSEL: (a)  $L$ - $I$ - $V$  test curves; (b) spectrum test results.

晶体空气孔进一步对光场的横向模式进行了限制, 使得高阶横模被损耗掉, 17 mA 注入电流下的激励波长为 946.4 nm.

从图 12 和图 13 的测试结果来看, 相同氧化孔径下 PC-VCSEL 的斜率效率要明显比 VCSEL 低, 且阈值电流更大. 这是由于 PC-VCSEL 特殊的器件结构导致的: 一方面通过在顶部 DBR 刻蚀光子晶体空气孔增加对高阶横模的损耗从而实现基横模输出; 另一方面刻蚀的空气孔对注入电流也会产生散射从而增加了电流损耗, 使得阈值电流增加. 从图 8 PC-VCSEL 的模式分布中可以明显看出, PC-VCSEL 的基横模主要被限制光子晶体缺陷中, 而高阶横模会通过光子晶体结构被损耗掉, 我们认为这是斜率效率降低的部分原因. 另外, PC-VCSEL 的发光区域位于光子晶体缺陷内, 有效发光面积较小, 只有这部分区域的载流子产生有效增益, 导致 PC-VCSEL 的增益和功率较低, 这也会导致斜率效率有所降低. 相比于传统 VCSEL, PCSEL 可以有效地实现基横模输出, 但要想实现

低阈值、大功率的基横模输出, 后续还需要对 PC-VCSEL 的结构进行进一步优化.

## 4 结 论

本文计算了压应变 InGaAs/AlGaAs 量子阱的激励波长与阱垒厚度的关系, 并通过 Rsoft 软件计算了材料增益特性与温度的关系, 温度漂移系数为 0.3 nm/K. 计算并分析了 DBR 中渐变层厚度对其串联电阻及反射谱的影响, 通过传输矩阵模型计算了 P-DBR 和 N-DBR 的反射谱和相位谱, 其反射率超过 99%, 且在 940 nm 处的相移均为零. 模拟了整体 VCSEL 的光场分布, 量子阱与驻波波峰重合实现了较大的增益, 基于有限元分析模拟了氧化层对有源区中电流的限制作用. 通过模拟 PC-VCSEL 中不同的模式分布并计算其品质因子  $Q$ , 证明该结构通过高阶横模损耗可以有效地实现基横模输出. 成功制备出氧化孔径 22  $\mu\text{m}$  的单管 VCSEL 和 PC-VCSEL, 单管 VCSEL 阈值电流为



5.2 mA, 斜率效率 0.67 mW/mA, 在不同电流光谱测试中均是明显的多横模输出; PC-VCSEL 的阈值电流为 6.5 mA, 基横模输出功率超过 2.5 mW, 不同电流下的边模抑制比超过 25 dB.

## 参考文献

- [1] Yu H Y, Yao S, Zhang H M, Wang Q, Zhang Y, Zhou G Z, Lü Z C, Cheng L W, Lang L G, Xia Y, Zhou T B, Kang L H, Wang Z Y, Dong G L 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 064207 (in Chinese) [于洪岩, 尧舜, 张红梅, 王青, 张扬, 周广正, 吕朝晨, 程立文, 郎陆广, 夏宇, 周天宝, 康联鸿, 王智勇, 董国亮 2019 *物理学报* **68** 064207]
- [2] Cheng L H, Yang G W, Liu Y X 2020 *Chin. J. Lasers* **47** 0500001 (in Chinese) [陈良惠, 杨国文, 刘育衡 2020 *中国激光* **47** 0500001]
- [3] Zhang J Y, Li X, Zhang J W, Ning Y Q, Wang L J 2020 *Chin. J. Lumin.* **41** 1443 (in Chinese) [张继业, 李雪, 张建伟, 宁永强, 王立军 2020 *发光学报* **41** 1443]
- [4] Warren M E, Podva D, Dacha P, Block M K, Helms C J, Maynard J 2018 *Conference on Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XXII* San Francisco, USA, January 31–February 1, 2018 pUNSP 105520 E
- [5] Xun M, Pan G, Zhao Z, Sun Y, Yang C, Kan Q, Zhou J, Wu D 2021 *IEEE Trans. Electron Devices* **68** 158
- [6] Khan Z, Ledentsov N, Chorchos L, Shih J C, Chang Y H, Ledentsov N N, Shi J W 2020 *IEEE Access* **8** 72095
- [7] Liu A J 2020 *Chin. J. Lasers* **47** 0701005 (in Chinese) [刘安金 2020 *中国激光* **47** 0701005]
- [8] Liu A J, Wolf P, Lott J A, Bimberg D 2019 *Photonics Res.* **7** 02000121
- [9] Wang X Y, Cui B F, Li C F, Xu J R, Wang H J 2021 *Laser Optoelectron. Prog.* **58** 0700008 (in Chinese) [王翔媛, 崔碧峰, 李彩芳, 许建荣, 王豪杰 2021 *激光与光电子学进展* **58** 0700008]
- [10] Unold H J, Golling M, Michalzic R, Supper D, Ebeling K J 2001 *27th European Conference on Optical Communication* Amsterdam, Netherlands, September 30–October 4, 2001 p520
- [11] Siriani D F, Leisher P O, Choquette K D 2009 *IEEE J. Quantum Electron.* **45** 762
- [12] Fryslye S T M, Gao Z H, Dave H, Thompson B J, Lakomy K, Lin S Y, Decker P J, McElfresh D K, Schutt-Aine J E, Choquette K D 2017 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **23** 1700409
- [13] Xie Y Y, Kan Q, Xu C, Xu K, Chen H D 2017 *Chin. Phys. B.* **26** 014203
- [14] Wang Q H, Xie Y Y, Xu C, Pan G Z, Dong Y B 2020 *Conference on Lasers and Electro-Optics* San Jose, USA, May 10–15, 2020 p2021-03-02
- [15] Ren Q H, Wang J, Yang M, Wang H J, Cheng Z, Huang Y Q 2020 *Quantum Electron.* **50** 714
- [16] Yan C L, Qin L, Ning Y Q, Zhang S M, Wang Q, Zhao L M, Liu Y, Wang L J, Zhong J C 2004 *Laser J.* **25** 29 (in Chinese) [晏长岭, 秦莉, 宁永强, 张淑敏, 王青, 赵路民, 刘云, 王立军, 钟景昌 2004 *激光杂志* **25** 29]
- [17] Pan Z P, Li W, Lü J G, Wang Z N, Chang J Y, Liu S P, Zhong L, Ma X Y 2023 *Chin. J. Lasers* **50** 0701007 (in Chinese) [潘智鹏, 李伟, 吕家纲, 王振诺, 常津源, 刘素平, 仲莉, 马骁宇 2023 *中国激光* **50** 0701007]
- [18] Li P F, Deng J, Chen Y Y, Yang L P, Wu B, Xu C 2013 *Semicond. Optoelectron.* **34** 190 (in Chinese) [李鹏飞, 邓军, 陈永远, 杨立鹏, 吴波, 徐晨 2013 *半导体光电* **34** 190]
- [19] Xun X X, Deng J, Li J J, Zang L Y, Ren K B, Feng Y Y, He X, Song Z, Nie X 2022 *Semicond. Optoelectron.* **43** 332 (in Chinese) [许晓芳, 邓军, 李建军, 张令宇, 任凯兵, 冯媛媛, 贺鑫, 宋钊, 聂祥 2022 *半导体光电* **43** 332]
- [20] Qiao P F, Cook K T, Li K, Chang-Hasnain C J 2017 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **23** 1700516
- [21] Huffaker D L, Deppe D G, Kumar K 1994 *Appl. Phys. Lett.* **65** 97
- [22] Choquette K D, Geib K M, Chui H C, Hammons B E, Hou H Q, Drummond T J, Hull R 1996 *Appl. Phys. Lett.* **69** 1385
- [23] Qi Y Y, Li W, Liu S P, Ma X Y 2019 *J. Appl. Phys.* **126** 193101
- [24] Pan Z P, Li W, Qi Y Y, Lv J G, Liu S P, Zhong L, Ma X Y 2022 *Acta Opt. Sin.* **42** 1414002 (in Chinese) [潘智鹏, 李伟, 戚宇轩, 吕家纲, 刘素平, 仲莉, 马骁宇 2022 *光学学报* **42** 1414002]

# Design and fabrication of 940 nm vertical cavity surface emitting laser single-emitter device<sup>\*</sup>

Pan Zhi-Peng<sup>1)2)</sup> Li Wei<sup>1)†</sup> Lü Jia-Gang<sup>1)2)</sup> Nie Yu-Wei<sup>1)2)</sup>

Zhong Li<sup>1)</sup> Liu Su-Ping<sup>1)</sup> Ma Xiao-Yu<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> (National Engineering Research Center for Optoelectronic Devices, Institute of Semiconductors, Beijing 100083, China)

<sup>2)</sup> (College of Materials Science and Optoelectronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

( Received 1 March 2023; revised manuscript received 1 April 2023 )

## Abstract

As a key part of vertical cavity surface emitting laser (VCSEL), active region will seriously affect the threshold and efficiency of the device. To obtain the appropriate laser wavelength and material gain, the design of  $\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{As}$  strain compensated quantum well is optimized. The relationship between the lasing wavelength of multiple quantum wells (MQWs) and the thickness is calculated. Considering the influence between the active region temperature and the lasing wavelength, the thickness of the quantum well is chosen as 6 nm, and the quantum barrier thickness is chosen as 8 nm, corresponding to the lasing wavelength of 929 nm. The material gain characteristics of the MQWs at different temperatures are simulated by Rsoft. The material gain exceeds 3300/cm at 300 K, and the temperature drift coefficient of the peak wavelength is 0.3 nm/K. In this work,  $\text{Al}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{As}$  and  $\text{Al}_{0.89}\text{Ga}_{0.11}\text{As}$  are chosen as the high- and the low-refractive index material of distributed Bragg reflector (DBR), and 20 nm graded layer is inserted between two types of materials. The influence of the graded layer thickness of DBR on the valence band barrier and reflection spectrum are calculated and analyzed. The increase of graded layer thickness can lead the band barrier peak and the reflection spectrum bandwidth to decrease. The reflection spectrum and phase spectrum of P-DBR and N-DBR are calculated by the transmission matrix mode (TMM): the reflectance of DBR is over 99% and the phase shift is zero at 940 nm. The optical field distribution of the whole VCSEL structure is simulated, in which the standing wave peak overlaps with the active region, and the maximum gain can be obtained. Using the finite element method (FEM), the effect of oxidation confined layer on the injection current is simulated. The current in the active region is effectively limited to the position corresponding to the oxidation confined hole, and its current density is stronger and more uniform. The optical field distributions in different modes of photonic crystal-vertical cavity surface emitting laser (PC-VCSEL) are simulated, and different modes have different resonant wavelengths. The values of quality factor  $Q$  in different modes of VCSEL and PC-VCSEL are calculated,  $Q$  of the fundamental mode is higher than that of higher transverse mode. It is demonstrated that the photonic crystal air hole structure can realize the output of basic transverse mode by increasing the loss of high order transverse mode. The VCSEL and PC-VCSEL with oxidation hole size of 22  $\mu\text{m}$  are successfully fabricated, in which the photonic crystal period is 5  $\mu\text{m}$ , the air pore diameter is 2.5  $\mu\text{m}$ , and the etching depth is 2  $\mu\text{m}$ . Under continuous current test, the maximum slope efficiency of VCSEL is 0.66 mW/mA, the output power is 9.3 mW at 22 mA, and the lasing wavelength is 948.64 nm at 20 mA injection current. Multiple wavelengths and large spectrum width are observed in the spectrum of VCSEL, which is an obvious multi-transverse mode. The maximum fundamental transverse mode output of PC-VCSEL reaches 2.55 mW, the side mode suppression ratio (SMSR) is more than 25 dB, and the spectrum width is less than 0.2 nm, indicating that the photonic crystal air hole has a strong control effect on the transverse mode, and the laser wavelength is 946.4 nm at 17 mA.

**Keywords:** vertical cavity surface emitting laser, photonic crystal-vertical cavity surface emitting laser, fundamental transverse mode, high power

**PACS:** 42.55.Px, 42.55.Tv,

**DOI:** 10.7498/aps.72.20230297

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 62174154).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [liwei66@semi.ac.cn](mailto:liwei66@semi.ac.cn)

## 940 nm 垂直腔面发射激光器单管器件的设计与制备

潘智鹏 李伟 吕家纲 聂语薇 仲莉 刘素平 马骁宇

### Design and fabrication of 940nm vertical cavity surface emitting laser single-emitter device

Pan Zhi-Peng Li Wei Lü Jia-Gang Nie Yu-Wei Zhong Li Liu Su-Ping Ma Xiao-Yu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 114203 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230297

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230297>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 表面液晶-垂直腔面发射激光器阵列的热特性

Thermal characteristics of surface liquid crystal vertical cavity surface emitting laser arrays

物理学报. 2020, 69(6): 064203 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191793>

#### 795 nm亚波长光栅耦合腔垂直腔面发射激光器的超窄线宽特性

Ultra-narrow linewidth characteristics of 795-nm subwavelength grating-coupled cavity vertical cavity surface emitting laser

物理学报. 2021, 70(22): 224207 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210293>

#### 940 nm垂直腔面发射激光器的设计及制备

Design and fabrication of 940 nm vertical-cavity surface-emitting lasers

物理学报. 2019, 68(6): 064207 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181822>

#### 基于单向注入垂直腔面发射激光器系统的密钥分发

Key distribution based on unidirectional injection of vertical cavity surface emitting laser system

物理学报. 2018, 67(20): 204202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181038>

#### 内腔亚波长光栅液晶可调谐垂直腔面发射激光器

Liquid crystal tunable vertical cavity surface emission laser with inner cavity sub-wavelength grating

物理学报. 2021, 70(22): 224208 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210957>

#### 高功率垂直外腔面发射半导体激光器增益设计及制备

Design of gain region of high-power vertical external cavity surface emitting semiconductor laser and its fabrication

物理学报. 2020, 69(5): 054204 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191787>