

# 高功率垂直外腔面发射半导体激光器 增益设计及制备\*

张继业<sup>1)2)</sup> 张建伟<sup>1)†</sup> 曾玉刚<sup>1)</sup> 张俊<sup>1)</sup> 宁永强<sup>1)</sup>  
张星<sup>1)</sup> 秦莉<sup>1)</sup> 刘云<sup>1)</sup> 王立军<sup>1)</sup>

1) (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 发光学及应用国家重点实验室, 长春 130033)

2) (中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049)

(2019年11月25日收到; 2019年12月31日收到修改稿)

垂直外腔面发射半导体激光器 (vertical external cavity surface emitting laser, VECSEL) 兼具高功率与良好的光束质量, 是半导体激光器领域的持续研究热点之一. 本文开展了光抽运 VECSEL 最核心的多量子阱增益区设计, 对量子阱增益光谱及其峰值增益与载流子浓度及温度等关系进行系统的理论优化, 并对 5 种不同势垒构型的量子阱增益特性进行对比, 证实采用双侧 GaAsP 应变补偿的发光区具有更理想的增益特性. 对 MOCVD 生长的 VECSEL 进行器件制备, 实现了 VECSEL 在抽运功率为 35 W 时输出功率达到 9.82 W, 并且功率曲线仍然没有饱和; 通过变化外腔镜的反射率, VECSEL 的激光波长随抽运功率的漂移系数由 0.216 nm/W 降低至 0.16 nm/W, 证实外腔镜反射率会影响 VECSEL 增益芯片内部热效应, 从而影响 VECSEL 激光输出功率. 所制备 VECSEL 在两正交方向上的发散角分别为 9.2° 和 9.0°, 激光光斑呈现良好的圆形对称性.

**关键词:** 光抽运垂直外腔面发射半导体激光器, 量子阱, 增益芯片, 高功率

**PACS:** 42.55.-f, 42.55.Px, 42.60.By, 42.60.Lh

**DOI:** 10.7498/aps.69.20191787

## 1 引言

半导体激光器具有体积小、效率高、波长范围广、可靠性高等独特优势<sup>[1]</sup>, 在激光通信、激光加工、传感等领域得到大规模应用. 目前应用最为广泛的两类半导体激光器为边发射半导体激光器与垂直腔面发射半导体激光器 (vertical cavity surface emitting laser, VCSEL)<sup>[2,3]</sup>. 边发射半导体激光器能够实现高功率、高效率输出, 但其快慢轴发散角差异大, 输出光斑为椭圆形, 需要复杂的光束整形系统<sup>[4]</sup>, 并且腔面易于出现损伤. VCSEL 可以实现

圆形对称光斑输出, 然而其发光区单模工作面积小, 导致其单模功率只有毫瓦量级<sup>[5]</sup>, 采用二维列阵结构可以有效提升 VCSEL 的功率水平, 但是 VCSEL 二维列阵的光束质量又难以得到保证.

采用外腔方式制备的面发射激光器结构在实现高功率输出的同时, 还能保证激光具有高的光束质量与良好的光斑形貌, 解决上述边发射半导体激光器及 VCSEL 激光器在实际应用中遇到的问题<sup>[6]</sup>. 同时, 由于这种结构拥有一个灵活的外腔, 可以在腔内放置频率转换、波长调谐或锁模功能的各种光学元件<sup>[7-9]</sup>, 结合半导体材料宽的激光光谱范围, 这种外腔式的面发射激光器结构具有极宽的光谱

\* 国家重点研发计划 (批准号: 2017YFB0503200)、国家自然科学基金 (批准号: 61874117, 11674314, 61434005, 11774343, 61727822)、装备预研领域基金 (批准号: 61404140107) 和吉林省科技发展计划重点项目 (批准号: 20180201119GX) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zjw1985@ciomp.ac.cn

覆盖范围, 并可实现诸如腔内锁模、脉冲调制等功能. 因此, 垂直外腔面发射半导体激光器 (vertical external cavity surface emitting laser, VECSEL) 技术一经出现, 即获得了人们的广泛关注<sup>[10]</sup>. 采用外部光注入的方式使 VECSEL 产生激光激射被称为光抽运 VECSEL 激光器, 这种结构所用的增益芯片内部各个材料层无需掺杂, 避免了半导体材料掺杂带来的光吸收等问题<sup>[11]</sup>, 但是 VECSEL 的关键在于要有高增益的内部发光区结构.

Kuznetsov 等<sup>[6]</sup>在 1997 年首次系统介绍了光抽运 VECSEL 的发光区量子阱设计方法, 实现了 980 nm VECSEL 激光输出功率超过 0.5 W. 随后, Yoo 等<sup>[12]</sup>通过在多量子阱势垒之间插入高势垒非吸收层的方法, 有效减小饱和载流子寿命, 将光抽运 VECSEL 功率提升到 5 W. 2008 年, Rudin 等<sup>[13]</sup>通过 InGaAs 两侧增加 GaAsP 势垒的方法, 采用 7 个量子阱发光区, 实现 -20 °C 下 VECSEL 激光功率达 23 W. 近几年随着金刚石热沉散热技术<sup>[14]</sup>、双面散热<sup>[15]</sup>等技术的提出, 以及腔内多增益芯片抽运方案<sup>[16]</sup>的出现, VECSEL 性能水平不断得到提升. 目前, 国内的科研机构也在 VECSEL 方面取得了一些成果, 例如, 重庆师范大学利用后端抽运方式, 获得了调谐范围为 4 nm 的 65 mW 的绿光输出<sup>[17]</sup>, 以及搭建共振 Y 形腔, 实现最大功率达到 293 mW 的双波长输出<sup>[18]</sup>. 虽然如此, 关于如何系统设计 VECSEL 增益区量子阱结构及势垒结构的研究报道仍然很少, 而实现一个高增益的发光区是实现 VECSEL 高性能工作的前提.

本文从 VECSEL 增益芯片的增益区设计出发, 对增益区量子阱的材料组分、厚度变化引起的增益光谱差异进行对比分析, 并对不同载流子浓度下量子阱的增益系数以及其温漂特性进行深入分析, 确定合适的量子阱材料参数. 在此基础上, 对不同构型的势垒限制结构引起的量子阱增益谱差异进行对比, 得到合适的增益区势垒结构. 对 MOCVD 外延生长的 VECSEL 晶圆进行了腔模位置的验证, 所制备的 VECSEL 实现了激光输出功率达到 9.82 W, 光功率曲线斜率效率达到 35.5%, 并且在功率最高点功率曲线并未饱和. 结果发现, 采用不同反射率的外腔镜, VECSEL 系统的激光波长随抽运功率的漂移速度有明显差异, 说明采用不同反射镜会导致 VECSEL 增益芯片内部热效应有差异, 这也是不同反射镜组成的 VECSEL 系统激光输出功率有较大差异的原因.

## 2 器件结构

图 1(a) 是本文所用 VECSEL 系统的工作原理图, 主要由热沉、增益芯片、外腔镜及抽运光源组成. 本研究所用的抽运光激光波长为 808 nm, 所用增益芯片由分布布拉格反射镜 (distributed bragg reflector, DBR) 以及量子阱增益区组成. 图 1(b) 为本研究设计的增益芯片部分 DBR 结构和全部的量子阱发光区的折射率分布情况, 以及采用传输矩阵理论模拟的内部光场分布情况. DBR 反射镜由 28 对 GaAs/AlAs 周期性堆叠组成, 以获取高的反射率和热导率. 发光区采用 InGaAs 量子阱作为发光层, 采用 GaAsP 作为量子阱的势垒层. GaAsP 势垒层一方面可以实现载流子限制, 另一方面还可以补偿 InGaAs 量子阱带来的压应变效应. 增益芯片采用 9 个发光区结构以提供足够高的增益, 发光区之间用 GaAs 吸收层隔开, 确保各个量子阱位于振荡驻波的波峰位置, 在增益芯片工作时为激光光提供有效的光增益.

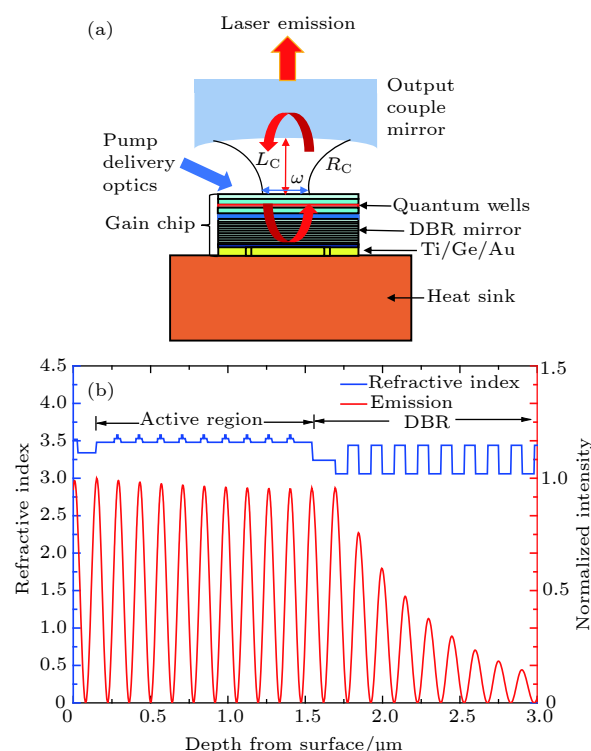


图 1 (a) VECSEL 系统工作原理图; (b) 增益芯片内各层折射率及光场分布

Fig. 1. (a) Schematic diagram of the VECSEL system; (b) distributions of the refractive index of each layer and the optical field within the gain chip.

### 3 理论设计

增益芯片中的量子阱结构为 VECSEL 腔内的振荡光提供高的光学增益, 因此, 设计高增益的量子阱结构是实现 VECSEL 系统高性能工作的关键. 量子阱的增益特性需要系统的理论模拟, 以保证在高的抽运光功率密度和高的温度下增益芯片仍然能够高性能工作. 采用  $k \cdot p$  理论计算量子阱能级的分立情况<sup>[19]</sup>, 然后采用各个子能带的波函数积分求和后, 就可以得到量子阱增益系数<sup>[20]</sup>:

$$g(E) = \frac{g_0}{2\pi t E} \times \sum_{i,j} \int_0^\infty \frac{\left(\frac{\pi}{\Gamma}\right) f_{\text{dip}}(k_t) M_b(f_j - f_i) dk_t^2}{1 + (E_{c_j}(k_t) - E_{k_{pi}}(k_t) - E)^2 / \Gamma^2}, \quad (1)$$

其中求和是对所有可能的价带和导带子能级求和;  $E$  为本征能量;  $t$  为量子阱的厚度;  $\Gamma = h/\tau_{\text{scat}}$  为由带内散射弛豫时间  $\tau_{\text{scat}}$  引起的展宽系数;  $k_t$  是波矢  $k$  的横向分量;  $E_{c_j}$  和  $E_{k_{pi}}$  是  $k \cdot p$  计算的第  $j$  个导带子带和第  $i$  个价带子带能级;  $M_b$  是材料的体偶极子动量;  $f_j$  和  $f_i$  是材料导带及价带的费米能级;  $f_{\text{dip}}$  是材料导带和价带的费米能级之差,  $g_0$  是一个为常数, 定义为

$$g_0 = \frac{\pi q^2 h}{\varepsilon_0 c m_0^2 n}, \quad (2)$$

其中  $q$  是自由电子电荷;  $n$  是折射率;  $m_0$  为有效载流子质量;  $c$  为光速;  $\varepsilon_0$  为真空介电常数;  $h$  为普朗克常数.

InGaAs 量子阱是 980 nm 波段最常使用的量子阱结构, 这是因为 InGaAs 量子阱带来的压应变效应可以使得价带的轻重空穴带有效分离, 实现低的透明载流子密度和高的材料增益. 因此, 本研究 VECSEL 增益区采用 InGaAs 量子阱, 并首先开展量子阱的组分及厚度设计. 在模拟中采用  $\text{Al}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{As}$  作为势垒层材料. 使用 PICS3 D 软件中基于上述增益计算方法的理论模型, 对不同组分及厚度 InGaAs 量子阱的能带波长进行筛选.

图 2(a) 为计算的 InGaAs 量子阱能级分立后发光波长分别在 970, 975 以及 980 nm 的量子阱 In 组分、量子阱厚度关系. 可以看出, 这 3 个出光波长所对应的 3 条量子阱组分与厚度关系的变化趋势相一致. 对于同一种发光波长, 当量子阱厚度

增加时, 需要降低 In 组分的含量以保持发光波长不变. 当量子阱的厚度小于 6 nm 时, In 组分的含量随量子阱厚度的增加快速降低; 而当量子阱厚度大于 6 nm 后, 该趋势较为平缓. 这是因为量子阱厚度较大时, 材料的量子效应弱化, 能级分立效应不明显, 导致能带的变化主要依靠 In 组分来调节. 对比 3 种不同波长所对应的量子阱 In 组分和厚度曲线, 可以看出, 对于相同厚度的量子阱, 增加量子阱 In 组分可以得到更长的出光波长.

图 2(b) 为出光波长在 980 nm 的 InGaAs 量子阱增益谱曲线. 可以看出, 不同组分及厚度的 InGaAs 量子阱增益谱差异非常明显. 随着量子阱厚度的增加, 量子阱的增益谱峰值不断降低. 同时, 对于厚度超过 9 nm 的量子阱结构, 其增益谱左侧出现一个次级的增益峰. 这是因为厚度增加, 量子阱能级分立效应变弱, 第一子能级和第二子能级分立不足, 导致两个子能级同时发光. 而第二子能级对应的能带宽度要大于第一子能级, 因此, 出现的次级增益峰所对应的波长比主增益峰要短. 总体看来, 使用窄的量子阱厚度, 可以实现高的增益峰值, 然而增益谱的宽度也在不断缩小. 并且, 量子阱厚度由 4 nm 增加至 5 nm 时, 增益峰值相差不大, 但是量子阱的增益谱宽度明显增加. 增益谱宽度的增加, 伴随着纵模限制因子的增加, 将进一步地限制光场和载流子, 防止其泄露<sup>[21]</sup>. 此外, 当量子阱厚度从 5 nm 继续增加至 6 nm 时, 增益谱宽度没有特别明显的变化, 但是增益峰强度却在降低. 因此, 从增益谱看来, 采用 5 nm 的量子阱厚度是比较理想的选择.

量子阱的组成和厚度在保持增益峰值为 980 nm 的情况下被进行了调整, 以优化增益特性. 在图 2(c) 中, 自上往下依次是第一重空穴带 (HH1)、第一轻空穴带 (LH1). 选取 5, 8, 12 nm 厚的不同的 In 组成的 InGaAs 量子阱系列的计算价带子带被绘成平面内波长  $k_t$  的函数. 随着 QWs 中 In 含量的增加, 压缩应变增大, 导致价带的态密度降低. 同时, 第一重空穴 HH1 的曲率随着 In 组成的增加而增大, 使得价带和导带的态密度更加匹配. 这些效应有望导致更高的差分增益和更低的透明载流子密度. 这更加确定了量子阱的厚度为 5 nm 较为理想的推论.

量子阱的增益谱可以看出量子阱工作时可提



供的各波长增益情况, 而量子阱的峰值增益随载流子浓度的变化可以看出量子阱实际工作时的增益输出能力. 图 3(a) 为模拟的 InGaAs 量子阱峰值

增益随量子阱内部载流子浓度的变化关系, 增益峰值波长在 980 nm. 可以看出, 不同厚度的量子阱结构随载流子浓度的变化曲线具有明显差异. 在图 3(a) 中, 当量子阱的厚度从 4 nm 增加到 12 nm 时, 载流子密度明显降低. 这是因为为了保持设计的波长不变, 量子阱中的 In 成分相应地降低, 此时量子阱材料带隙的增加导致价带顶能态密度的减小, 进而导致载流子流密度减小 [22]. 此外, 量子阱厚度大于 9 nm 时, 很低的载流子浓度就可以产生光增益, 然而随着载流子浓度的增加, 量子阱的增益曲线快速饱和. 随着量子阱厚度不断减小, 增益曲线的饱和值不断增加, 同时, 量子阱的微分增益  $dg/dn$  不断增加. 这说明随着量子阱厚度的降低, 量子阱在高的抽运功率下可以提供的增益更高, 并且单位载流子产生的光增益也更高. 从图 3(a) 可以看出, 5—6 nm 的量子阱厚度可以在很大的载流子注入浓度范围下获取高的增益.

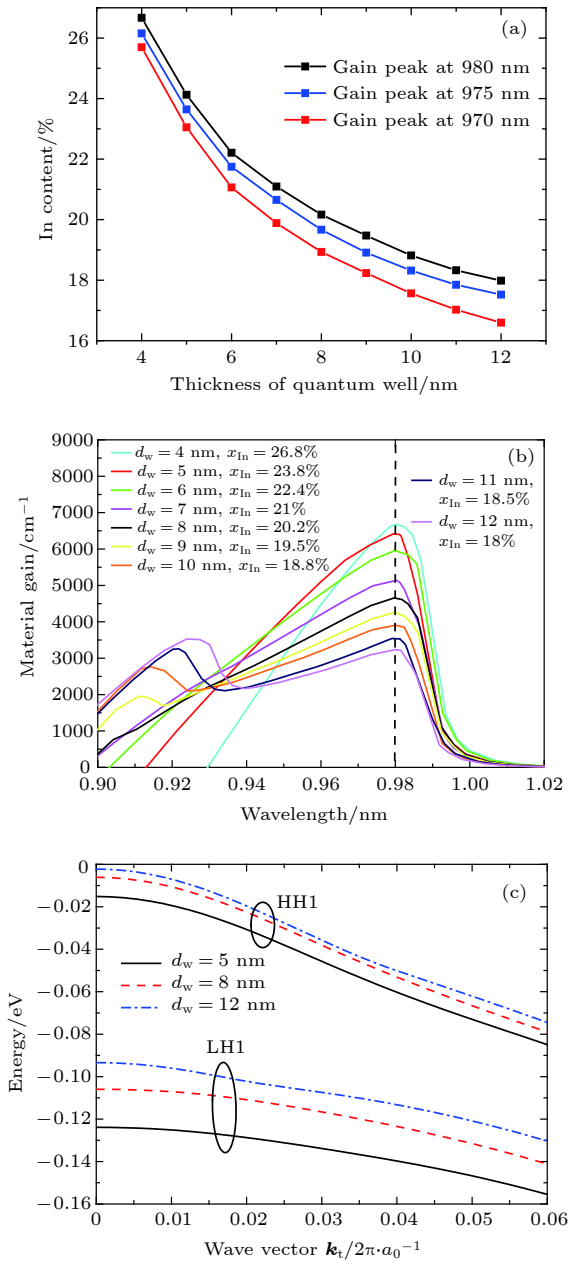


图 2 (a) 室温下 InGaAs 量子阱的发光波长为 970, 975, 980 nm 时, 量子阱中 In 组分与厚度的关系; (b) 增益峰值在 980 nm InGaAs 量子阱增益光谱对比; (c) 对应 980 nm 波长的 InGaAs 量子阱的价带结构 (HH1, 第一重空穴; LH1, 第一轻空穴);

Fig. 2. (a) Relationships between the In content and thickness of quantum wells when its emitting wavelength is 970, 975, 980 nm; (b) the gain spectra of different quantum wells with the same gain peak wavelength of 980 nm; (c) the valence subband structures of InGaAs QWs corresponding to a wavelength of 980 nm (HH1, the first heavy hole subband; LH1, the first light hole subband.).

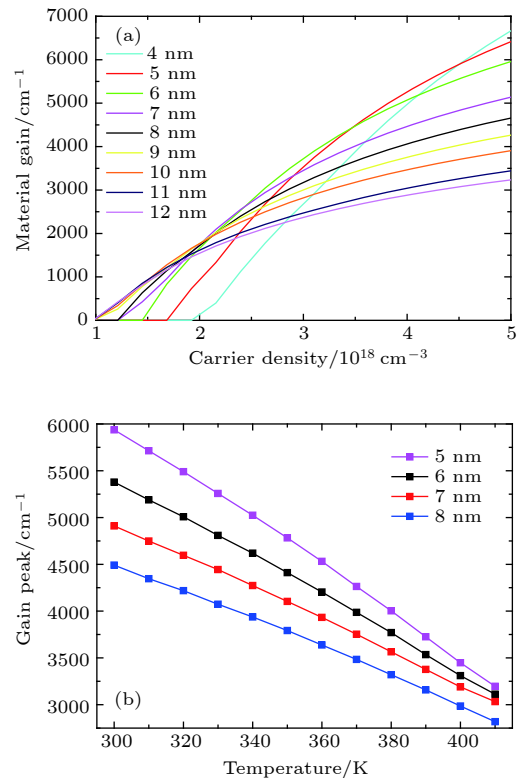


图 3 (a) InGaAs 量子阱的峰值增益随载流子浓度的变化关系 (增益谱峰值波长位于 980 nm); (b) 不同 InGaAs 量子阱的材料增益随工作温度变化

Fig. 3. (a) The change of gain peak with the carrier density within quantum wells when the gain peak wavelength is 980 nm; (b) the change of material gain with the operating temperature.

图 3(b) 为不同量子阱的峰值增益随工作温度的变化曲线. 随着工作温度的增加, 量子阱的峰值增益不断降低. 可以看出, 量子阱的厚度越小, 其峰值增益随工作温度的变化越明显, 也就是说, 在高温下量子阱的增益衰减就越明显. 这是因为随着工作温度的增加, 薄的量子阱厚度更容易产生注入载流子的泄露, 从而降低载流子利用效率. 然而从图 3(b) 的曲线可以看出, 即使薄的量子阱厚度具有更快的增益衰减速度, 在相同的工作温度下, 薄的量子阱仍然能提供更高的光增益.

根据上述对量子阱增益谱及增益-载流子浓度关系的分析, 可以确定量子阱的最佳厚度在 5 nm 左右. 上述设计是量子阱增益峰值位于 980 nm 的设计结果, 在实际器件工作时, 由于自产热效应, VECSEL 的增益区往往工作在较高的工作温度. 为了保证工作时增益峰值波长与激光器的实际出光波长实现较好的匹配, 对量子阱的增益谱及增益峰值波长随工作温度的漂移情况进行了模拟, 如图 4 所示.

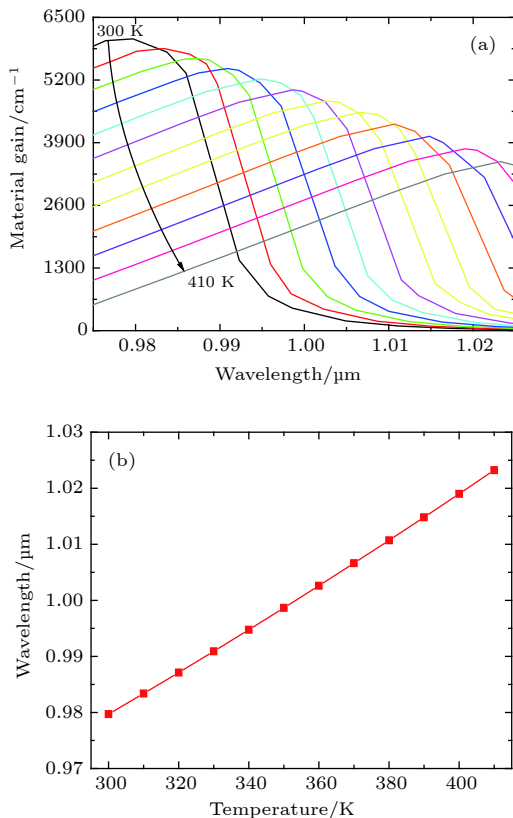


图 4 (a) 5 nm 厚度的 InGaAs 量子阱的增益光谱随工作温度的变化; (b) 增益峰值波长随工作温度的变化

Fig. 4. (a) The gain spectra and (b) the gain peak wavelength of 5 nm InGaAs quantum well at different operating temperatures.

图 4(a) 为模拟的量子阱增益谱随工作温度的变化. 随着工作温度的增加, 量子阱的整个增益谱向着长波长漂移, 并且增益峰值也随之快速降低. 图 4(b) 为统计的量子阱增益峰值波长随工作温度的变化. 图 4(b) 中增益谱峰值波长随工作温度的增加呈现线性关系, 温漂系数为 0.36 nm/K. 根据该系数及芯片内部的实际工作温度后, 可以根据所需要的 VECSEL 激光出光波长, 确定出量子阱在室温下的增益谱峰值波长位置.

量子阱的势垒层可以限制载流子在量子阱内复合, 提高量子阱发光效率. 为保证量子阱结构具有良好的限制特性, 实现高的增益, 对量子阱两侧的势垒结构进行优化. 表 1 列出了 5 种较为常见的 980 nm 波段所用的量子阱/势垒发光区结构.

表 1 模拟的 5 种发光区材料结构  
Table 1. Simulated material structures of 5 kinds of luminous zone.

1	Al <sub>0.06</sub> Ga <sub>0.94</sub> As barrier/InGaAs QW/ Al <sub>0.06</sub> Ga <sub>0.94</sub> As barrier
2	GaAs barrier/InGaAs QW/GaAs barrier
3	GaAsP barrier/InGaAs QW/GaAsP barrier
4	GaAsP/GaAs barrier/InGaAs QW/GaAs barrier/GaAsP
5	GaAs barrier/InGaAs QW/GaAsP barrier

在上述结构中, 前 4 种为对称势垒结构的发光区, 其中第 2 种和第 4 种的区别在于第 4 种结构的 GaAs 外部又增加了 GaAsP 的应变补偿层. 第 3, 4, 5 种中结构带有 GaAsP 应变补偿层, GaAsP 势垒的组分和厚度设计可以保证完全补偿 InGaAs 量子阱带来的应变. 第 5 种为由 GaAs 和 GaAsP 组成的非对称势垒结构. 图 5 为模拟的上述 5 种发光区结构的增益谱以及增益系数随载流子浓度的变化关系. 从图 5(a) 中可以看出, 这 5 种发光区的材料结构的增益峰值波长都小于 980 nm. 如图 4(b) 所示, 在高温操作下, 输出波长会以 0.36 nm/K 的速度进行红移. 而芯片内的温度在高功率操作下约为 340 K<sup>[23]</sup>, 经计算需要对设计的波长进行蓝移 15 nm 左右. 此外, 第 5 种非对称的势垒结构的增益峰值波长明显短于其他结构, 而其增益峰值与第 4 种结构相差不大, 这是由于 GaAs 和 GaAsP 的非对称势垒造成量子阱内部波函数的非对称分布, 从而使得量子阱的整体量子效应增强, 能级宽度增加. 在图 5(a) 中, 第 1 种至第

4种结构的增益谱形状相差不大, 增益峰值有明显区别; 第3种结构的发光区增益峰值明显高于其他几种结构, 这一方面是因为 GaAsP 与 InGaAs 具有较大的价带带阶, 更好地限制了载流子. 另外, 由于 GaAsP 与 InGaAs 的应变方向相反. 因此, 紧邻 InGaAs 的 GaAsP 在一定程度上增强了 InGaAs 的应变效应, 使得其增益水平得到提升.

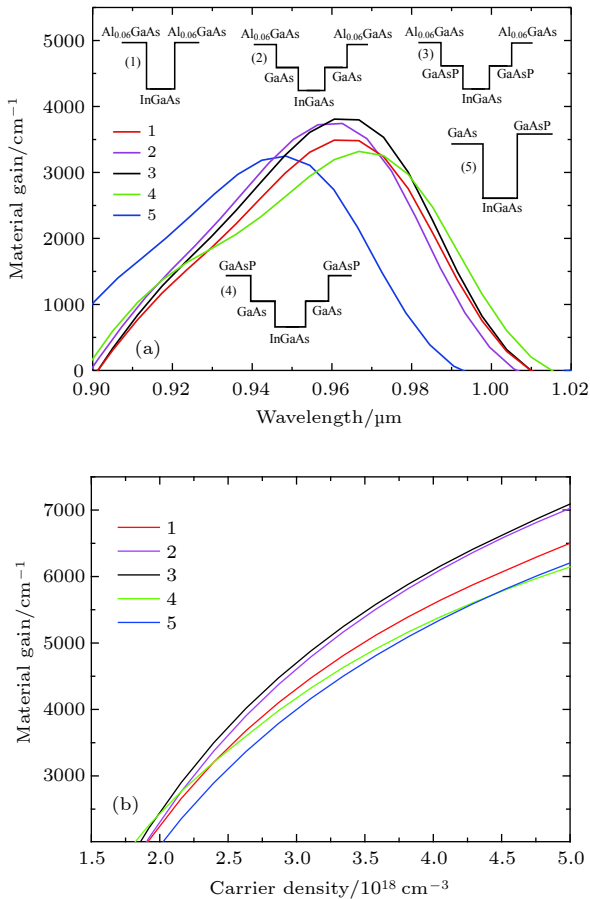


图 5 (a) 5 种不同量子阱/势垒层结构的增益光谱对比; (b) 5 种不同量子阱/势垒层结构的增益谱峰值随载流子浓度的变化关系

Fig. 5. (a) The gain spectra of InGaAs quantum well with different barrier layers; (b) the gain peak changing with the carrier density for different structures.

图 5(b) 中为 5 种不同量子阱结构的峰值增益随载流子浓度的变化. 可以看出, 这 5 种结构的峰值增益随载流子浓度的变化关系曲线的趋势是一致的, 在功率较高时有一定的饱和效应出现. 但是相比其他 4 种结构, 第 3 种结构的发光区一直可以实现更高的饱和增益, 并且在较低的载流子浓度下就可以产生光增益. 因此, 采用第 3 种结构的发光区, 即 GaAsP barrier/InGaAs QW/GaAsP barrier

结构, 可以为激光振荡提供较好的光增益特性. 除此之外, GaAsP 结构带来了反向应变补偿, 可以有效补偿多个量子阱带来的应变效应, 使得量子阱及两侧吸收区的材料质量更好.

## 4 实验结果

采用金属有机化合物化学气相沉淀技术在 GaAs 衬底上依次生长了选择性腐蚀阻挡层、多量子阱发光区结构与 DBR 反射镜结构. 之后, 将生长的晶圆切割成  $4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$  的芯片, 并在芯片的 DBR 反射镜上蒸镀 Ti-Pt-Au 金属层后, 通过钢焊料倒装焊接到镀金的铜热沉上. 采用机械减薄的方式将芯片衬底减薄至  $100\text{ }\mu\text{m}$  左右后, 用柠檬酸溶液和双氧水配比为 10:1 的选择性腐蚀液将剩余衬底去除后, 再在增益芯片表面蒸镀增透膜, 完成增益芯片的制备工作. 最后, 该封装后的增益芯片主要用半导体制冷器 (thermoelectric cooler, TEC) 进行散热, 而 TEC 的冷端和热沉接触, 热端和水冷装置接触. 该装置不仅能有效地散热, 而且还可以实现结构紧凑、小型化的 VECSEL.

首先对制备的 VECSEL 增益芯片表面腔模特性进行验证, 采用椭偏仪测试的增益芯片反射谱如图 6 所示. 图 6 中测试了 3 个不同角度入射光的反射光谱,  $0^\circ$  表示垂直入射. 可以看出, 反射带带宽超过  $100\text{ nm}$ , 并且随着入射光角度的减小, VECSEL 腔模波长增加; 垂直入射时, 腔模位置约在  $970\text{ nm}$ . 当入射角度较大时, 中心反射带的反射率降低, 并且腔模位置蓝移. 对于直型腔来说, 垂直入射的反射光谱腔模位置就是其出光波长位置. 在本实验中拟采用直行腔结构, 这就说明所制备的增益芯片出光波长在  $970\text{ nm}$  附近. 为了达到最佳的操作, 量子阱的发射光谱相对于微腔谐振波长要轻微地蓝移, 以解决积累在高抽运功率下量子阱 ( $0.3\text{ nm/K}$ ) 和微腔谐振 ( $0.1\text{ nm/K}$ ) 的不同发射热漂移<sup>[10]</sup>. 因此,  $970\text{ nm}$  的腔模位置确认了增益芯片的准确生长. 特别需要注意的是, 对于  $808\text{ nm}$  的抽运光来说, 其入射角度必须在合适的位置. 入射角度过大, 虽然能够相对降低 VECSEL 芯片表面对  $808\text{ nm}$  抽运光的反射率, 但是在高功率输出的情况下, 聚焦在芯片表面的抽运光斑直径较大, 因而抽运功率密度分布不均匀, 进而影响 VECSEL 的激射<sup>[24]</sup>; 入射角度过小时, 抽运系统可能会阻挡激光振荡.



因此, 抽运光的入射度在  $0^\circ$ — $30^\circ$  范围内最合适. 由图 6 可以看出, 所制备的增益芯片对抽运光的反射率较高, 达到 20% 左右, 这将在一定程度上影响整个系统的抽运效率.

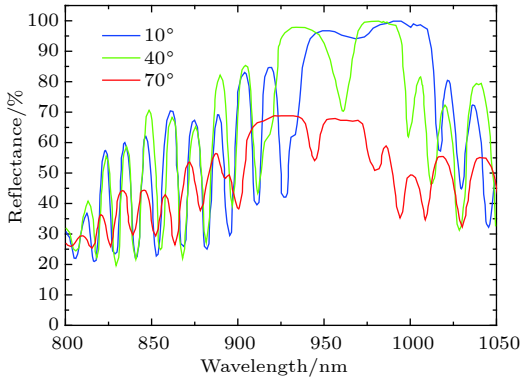


图 6 所制备的增益芯片对不同入射角度入射光的反射光谱

Fig. 6. The measured reflection spectra of the gain chip when the optical incident angle is  $0^\circ$ ,  $40^\circ$ , and  $70^\circ$ .

搭建如图 1(a) 所示的直型腔 VECSEL 系统, 铜热沉底部采用高功率 TEC 控温, 控温温度为  $-10^\circ\text{C}$ . 抽运光源采用高功率的 808 nm 光纤输出激光模块, 光纤纤芯为  $300\ \mu\text{m}$ . VECSEL 系统采用 3 种不同反射率的外腔镜, 外腔镜反射率分别为 96.3%, 97.7% 和 99.1%, 采用 3 种不同外腔镜搭建的 VECSEL 系统输出功率曲线如图 7(a) 所示. 可以看出, 外腔镜反射率为 97.7% 时, VECSEL 系统的功率输出水平明显优于其他两种反射镜系统. 当抽运光功率在 35 W 时, VECSEL 系统的输出功率达到了 9.82 W, 光光斜率效率达到 35.5%, 并且 VECSEL 系统的功率曲线并没有出现饱和现象, 而只是受限于抽运光功率水平. 这 3 种外腔镜的反射率对 VECSEL 系统的阈值光功率也有影响, 采用 99.1% 反射率的外腔镜可以得到更低的阈值光功率, 约为 5.5 W; 而采用 96.3% 和 97.7% 反射率的外腔镜, VECSEL 系统的阈值光功率非常接近, 约为 8 W.

为评估 3 种不同反射率的反射镜对 VECSEL 系统内部热效应的影响, 测量了 3 种反射镜输出的激光波长随抽运功率的变化关系, 如图 7(b) 所示. 图中激光波长随抽运光功率的变化基本呈现线性关系, 并且不同反射率的外腔镜所输出的激光波长漂移速度不一样. 很明显, 采用反射率为 97.7% 的外腔镜, VECSEL 系统的激光波长随抽运功率的

变化系数最小, 为  $0.16\ \text{nm/W}$ ; 而采用另外两种反射率的外腔镜, VECSEL 系统的激光波长随抽运功率的变化系数为  $0.172\ \text{nm/W}$  和  $0.216\ \text{nm/W}$ . 这说明采用反射率为 97.7% 的外腔镜, 增益芯片的热积累更小, 这也是图 7(a) 中该外腔镜输出的激光功率与光光斜率效率更高的原因. 我们还发现, 虽然图 7(a) 中反射率为 96.3% 与反射率为 99.1% 的两种外腔镜输出功率曲线类似, 然而在图 7(b) 中, 这两种反射率的外腔镜组成的 VECSEL 系统的激光波长随抽运光的漂移速度却不一样, 采用反射率为 99.1% 的外腔镜会有更大的波长漂移速度 ( $0.216\ \text{nm/W}$ ), 也就是其增益芯片的热效应更明显. 这或许是因为虽然输出的功率类似, 但是更高的反射率意味着有更多的光在腔内振荡而无法输出, 因此增益芯片内部的光能量更高, 由此产生的光子再吸收更明显, 相应的自产热效应更强.

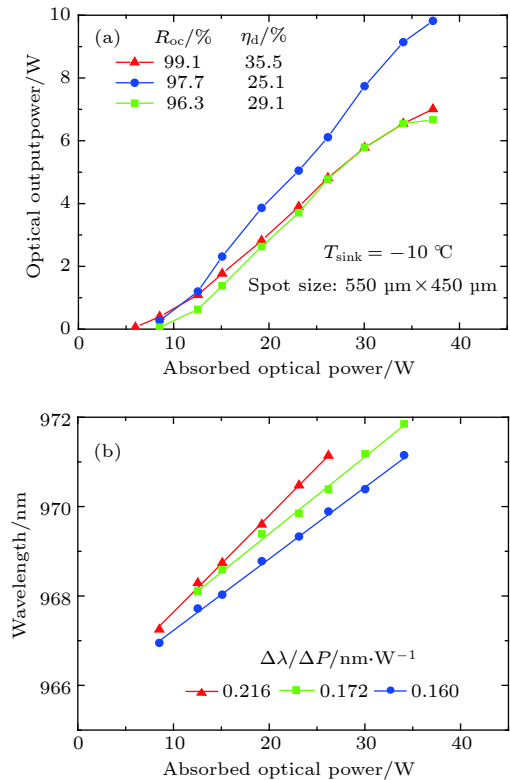


图 7 外腔镜的反射率分别为 96.3%, 97.7%, 99.1% 时 (a) VECSEL 系统的输出功率随着抽运功率的变化曲线, (b) 激光波长随着抽运功率的变化曲线

Fig. 7. (a) The output power of VECSEL and (b) the lasing wavelength changing with the pump power, with the output mirror reflectivity of 99.1%, 97.7%, and 96.3%.

采用 CCD 相机观察外腔镜为 97.7% 反射率的 VECSEL 系统的输出光斑情况, 激光功率为

9.82 W 时的光场发散角测试结果见图 8 所示, 插图所示为所捕获的 VECSEL 系统输出光斑形貌. 由图 8 可以看出, VECSEL 系统输出的光斑在正交方向上的发散角全角分别为  $9.2^\circ$  和  $9.0^\circ$  ( $1/e^2$  全角), 具有良好的对称性, 并且激光光斑呈现良好的高斯分布. 由插图中捕获的激光光斑可以看出, 光斑呈现良好的圆形对称性, 并且分布非常均匀.

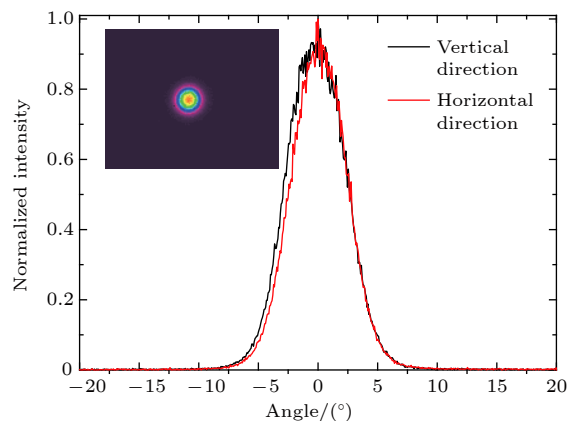


图 8 VECSEL 系统输出的激光光束在两个正交方向上的发散角, 插图为激光光斑二维彩图

Fig. 8. The divergence angles of VECSEL along the orthogonal direction, inserted is the measured 2D optical spot pattern.

## 5 结 论

系统研究了 VECSEL 增益区量子阱的结构设计方法, 综合考虑量子阱材料参数、载流子浓度、工作温度等参数对量子阱增益特性的影响, 并对 5 种不同的量子阱/势垒层分布形式引起的增益差异进行分析, 确定了合适的量子阱参数及其两侧势垒的分布形式. 所制备的 VECSEL 系统实现了输出功率达 9.82 W, 光光斜率效率达 35.5%. 通过分析外腔镜反射率对激光波长漂移速度的影响, 证实优化外腔镜反射率可以优化增益芯片的热效应, 提升 VECSEL 系统性能. 所搭建的 VECSEL 系统实现了圆形对称的高斯光场分布, 远场发散角仅为  $9.2^\circ$  和  $9.0^\circ$ .

## 参考文献

[1] Wang L J, Ning Y Q, Qin L, Tong C Z, Chen Y Y 2015

*Chin. J. Lumin.* **36** 1 (in Chinese) [王立军, 宁永强, 秦莉, 佟存柱, 陈泳屹 2015 *发光学报* **36** 1]

[2] Hall R N, Fenner G E, Kingsley J D, Soltys T J, Carlson R O 1962 *Phys. Rev. Lett.* **9** 366

[3] Soda H, Iga K, Kitahara C, Suematsu Y 1979 *Jpn. J. Appl. Phys.* **18** 2329

[4] Tian Z N, Wang L J, Chen Q D, Jiang T, Qin L, Wang L J, Sun H B 2013 *Opt. Lett.* **38** 5414

[5] Cui J J, Ning Y Q, Jiang C Y, Wang F, Gao J, Zhang X, Wang Z F, Wu X D, Tan X H 2011 *Chin. J. Lasers* **38** 0102002 (in Chinese) [崔锦江, 宁永强, 姜琛昱, 王帆, 高静, 张星, 王贞福, 武晓东, 檀慧明 2011 *中国激光* **38** 0102002]

[6] Kuznetsov M, Hakimi F, Sprague R, Mooradian A 1997 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **9** 1063

[7] Hein A, Demaria F, Kern A, Menzel S, Rinaldi F, Rösch R, Unger P 2011 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **23** 179

[8] Zhang P, Jiang M H, Men Y B, Zhu R J, Liang Y P, Zhang Y 2015 *Opt. Quantum Electron.* **47** 423

[9] Tilma B W, Mangold M, Zaugg C A, Link S M, Waldburger D, Klenner A, Mayer A S, Gini E, Golling M, Keller U 2015 *Light Sci. Appl.* **4** e310

[10] Tropper A C, Hoogland S 2006 *Prog. Quantum Electron.* **30** 1

[11] Rahimi-Iman A 2016 *J. Opt.* **18** 093003

[12] Yoo J, Kim K, Lee S, Lim S, Kim G, Kim J, Cho S, Lee J, Kim T, Park Y 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 131125

[13] Rudin B, Rutz A, Hoffmann M, Maas D J H C, Bellancourt A R, Gini E, Stüdmeyer T, Keller U 2008 *Opt. Lett.* **33** 2719

[14] Mereuta A, Nechay K, Caliman A, Suruceanu G, Rudra A, Gallo P, Guina M, Kapon E 2019 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **25** 1700605

[15] Broda A, Kuz'micz A, Rychlik G, Chmielewski K, Wójcik-Jedlin'ska A, Sankowska I, Gołaszewska-Malec K, Michalak K, Muszalski J 2017 *Opt. Quantum Electron.* **49** 287

[16] Guoyu H, Kriso C, Zhang F, Wichmann M, Stolz W, Fedorova K A, Rahimi-Iman A 2019 *Opt. Lett.* **44** 4000

[17] Qiu X L, Chen X H, Zhu R J, Zhang P, Guo Y H Y, Song Y R 2019 *Chin. J. Lasers* **46** 14 (in Chinese) [邱小浪, 陈雪花, 朱仁江, 张鹏, 郭于鹤洋, 宋晏蓉 2019 *中国激光* **46** 14]

[18] Qiu X L, Wang X X, Zhang X J, Zhu R J, Zhang P, Guo Y H Y, Song Y R 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 114204 (in Chinese) [邱小浪, 王爽爽, 张晓健, 朱仁江, 张鹏, 郭于鹤洋, 宋晏蓉 2019 *物理学报* **68** 114204]

[19] Kouznetsov D, Bisson J F, Ueda K 2009 *Opt. Mater.* **31** 754

[20] Chang C S, Chuang S L 1995 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **1** 218

[21] Corzine S W, Geels R S, Scott J W, Yan R H, Coldren L A 1989 *IEEE J. Quantum Electron.* **25** 1513

[22] Zhang J, Ning Y, Zeng Y, Zeng Y, Zhang J, Zhang J, Fu X, Tong C, Wang L 2013 *Laser Phys. Lett.* **10** 045802

[23] Zhu R J, Pan Y J, Zhang P, Tai T L, Fan S Q, Liang Y P 2014 *J. Infrared Millim. Waves* **33** 272 (in Chinese) [朱仁江, 潘英俊, 张鹏, 戴特力, 范嗣强, 梁一平 2014 *红外与毫米波学报* **33** 272]

[24] Laurain A, Schelle M, Wang T L, Hader J, Moloney J V, Koch S W, Heinen B, Koch M, Kunert B, Stolz W 2012 *High-Power Lasers 2012: Technology and Systems* (Edinburgh: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers) p85470 I-1



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

Zhang Ji-Ye<sup>1)2)</sup> Zhang Jian-Wei<sup>1)†</sup> Zeng Yu-Gang<sup>1)</sup> Zhang Jun<sup>1)</sup>  
Ning Yong-Qiang<sup>1)</sup> Zhang Xing<sup>1)</sup> Qin Li<sup>1)</sup> Liu Yun<sup>1)</sup> Wang Li-Jun<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> (State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics,  
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

<sup>2)</sup> (Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)  
( Received 25 November 2019; revised manuscript received 31 December 2019 )

## Abstract

The vertical external cavity surface emitting laser (VECSEL) is one of the hottest research fields of semiconductor lasers, due to its high power and good beam quality. However, there are few reports about how to systematically design the active region of VECSEL. In this paper, the gain design of quantum wells, which are the most important region within the VECSEL, is carried out.

To achieve low power consumption under high temperature condition, epitaxial structure of the VECSEL is optimized by using the commercial software PICS3D. Firstly, the relationship between the structure of quantum well and the gain is simulated by the  $k\cdot p$  method. Then, the gain spectra of quantum wells at different carrier densities and temperatures are compared with each other, and the optimal composition and thickness of quantum well are thus determined. The temperature drift coefficient is 0.36 nm/K, obtained by simulating the drift of the gain peak wavelength at the working temperature. Finally, the gain spectra of quantum wells with five different barriers are compared with each other. The slight blue shift of the gain peak in the quantum well with five different barriers accommodates the different emission thermal drifts of the quantum well at high temperature operation. With the GaAsP barriers on both sides of quantum well the gain characteristics of quantum wells can be improved efficiently.

The designed structure is deposited by the MOCVD system. According to the reflection spectrum of the gain chip, measured by ellipsometer, the stop-band over 100 nm is centered at the about 970 nm wavelength, confirming accurate growth of the VECSEL. The 808 nm pump laser is focused on the surface of VECSEL chip at an incident angle from 30° to 50°. The VECSEL light-light characteristics are tested under the output coupling mirror with different reflectivity. The output power of VECSEL with a 97.7% reflectance output coupling mirror reaches 9.82 W at the pumping power of 35 W, without saturating the power curve. By using the external mirrors with different reflectivity, there appears the wavelength shift with the pumping power changing from 0.216 nm/W to 0.16 nm/W. Thus, the internal heating effects are different for VECSEL with different mirrors. The divergence angles at two orthogonal directions are 9.2° and 9.0°, respectively. And the circle profile of optical field shows good symmetry.

**Keywords:** optically-pumped vertical external cavity surface emitting semiconductor laser, quantum well, gain chip, high power

**PACS:** 42.55.-f, 42.55.Px, 42.60.By, 42.60.Lh

**DOI:** 10.7498/aps.69.20191787

\* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2017YFB0503200), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61874117, 11674314, 61434005, 11774343, 61727822), the National Defense Equipment Fund of China (Grant No. 61404140107), and the Key Projects of Jilin Province Science and Technology Development Plan, China (Grant No. 20180201119GX).

† Corresponding author. E-mail: [zjw1985@ciomp.ac.cn](mailto:zjw1985@ciomp.ac.cn)