

# 850 nm 垂直腔面发射激光器结构优化与制备

冯 源, 郝永芹, 王宪涛, 刘国军, 晏长岭, 张家斌, 李再金, 李 洋

长春理工大学高功率半导体激光国防科技国家重点实验室, 吉林 长春 130022

**摘要** 根据分布布拉格反射镜(DBR)的工作原理,优化量子阱(QW)和DBR结构,采用Crosslight计算机模拟软件模拟了垂直腔面发射半导体激光器(VCSEL)的反射谱和QW增益谱,确定QW组分、厚度以及DBR的对数。采用分子束外延技术外延生长并制备了850 nm顶发射VCSEL。测试结果表明,阱宽为5 nm的 $\text{In}_{0.075}\text{Ga}_{0.925}\text{As}/\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$  QW,在室温下激光波长在840 nm左右,设计的顶发射VCSEL结构通过Ocean Optics Spectra Suite软件验证,得到室温下的光谱中心波长在850 nm附近,证实了结构设计的正确性。

**关键词** 激光器;垂直腔面发射激光器;量子阱;分布布拉格反射镜;反射率;850 nm

中图分类号 TN248.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0301005

## Structural Optimization and Fabrication of 850 nm Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser

Feng Yuan, Hao Yongqin, Wang Xiantao, Liu Guojun, Yan Changling,  
Zhang Jiabin, Li Zaijin, Li Yang

National Key Laboratory on High Power Semiconductor Lasers, Changchun University of Science and Technology,  
Changchun, Jilin 130022, China

**Abstract** According to the principle of distributed Bragg reflector (DBR), the quantum well (QW) and DBR structures are optimized. By employing Crosslight computer simulation software, the reflectance spectrum and the QW gain spectrum of vertical cavity surface emitting laser (VCSEL) are simulated, and the QW composition, width and pairs of the DBR are determined. The high quality epitaxial wafers of 850 nm top-emitting VCSEL are grown by the molecular beam epitaxy technology and processed into devices. The experimental results indicate that the lasing wavelength from the  $\text{In}_{0.075}\text{Ga}_{0.925}\text{As}/\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$  QW structure with well width of 5 nm is approximately 840 nm at room temperature, and the theoretical results obtained by Ocean Optics Spectra Suite software show that the central wavelength of the spectrum is near to 850 nm at room temperature. The results verify the correctness of the design.

**Key words** lasers; vertical-cavity surface-emitting laser; quantum well; distributed Bragg reflector; reflectivity; 850 nm

**OCIS codes** 140.7260; 140.3070; 140.3430; 140.3380; 220.4830

## 1 引 言

近年来,垂直腔面发射半导体激光器(VCSEL)以其低成本,低驱动电流,低发散角,圆形光束及输出功率更有效、线宽更窄,可实现一维、二维高密度集成等优点,在自由空间光通讯、光信息处理、全光通信和激光抽运等领域备受青睐<sup>[1-7]</sup>。目前,垂直腔面发射半导体激光器主要在激光显示、激光测距、激光雷达、高密度存储、海底光通讯以及生物分析等方面广泛应用<sup>[8-10]</sup>。基于850 nm VCSEL的并行光发送模块具有高速率、

收稿日期: 2016-09-06; 收到修改稿日期: 2016-11-07

基金项目: 国家自然科学基金(11474038,61376045)、长春理工大学基金(XJJLG-2015-10)

作者简介: 冯 源(1976—),女,博士,助理研究员,主要从事半导体激光器方面的研究。

E-mail: fengyuan\_1224@163.com

低成本的特点,现已成为传输速率超过 10 Gb/s、传送距离小于 600 m 的短距离高速率光传输领域中具有较强竞争力的解决方案之一。作为核心器件,VCSEL 的稳定性起到举足轻重的作用。

VCSEL 的核心结构分为有源区和上下分布布拉格反射镜(DBR)两部分。因为 GaAs 衬底对 850 nm 波段具有较强的光吸收,所以在这个波段的器件一般采用顶发射结构<sup>[11]</sup>。由于有源区的厚度只有几个到几十纳米,谐振腔的长度为波长量级,通过减小光散射损耗,提高 DBR 的反射率,进而使有源区对激射模式提供较大的光增益效率的方法实现 VCSEL 的正常激射<sup>[12]</sup>。然而反射率的提高会加大 VCSEL 器件的串联电阻,引起器件内部的温度升高,自生热效应改变了材料内部的折射率和禁带宽度,影响器件的光电性能。可见,只有在有源区、谐振腔厚度和上下 DBR 达到精确匹配时,才能保证有源区获得足够的光增益,达到器件在较低电阻的情况下的激射。

本文通过 Crosslight 计算机模拟软件对 VCSEL 的反射谱和增益谱进行模拟,对有源区和 DBR 进行了结构优化设计,详细研究了不同宽度的量子阱(QW)对增益的影响以及增益与环境温度的关系,最终确定渐变抛物线型结构 DBR。采用分子束外延技术(MBE)外延生长了 850 nm VCSEL,并将测试结果与设计模拟结果相比较,设计结果和测试结果基本一致。

## 2 理论与分析

### 2.1 QW 优化设计

VCSEL 的有源区是激光器的核心部分,它的作用是实现载流子的粒子数反转,获得足够的光增益来形成谐振腔内稳定的光振荡。目前,传统的 850 nm VCSEL 的有源区一般都采用 GaAs/AlGaAs 作为 QW 材料,因为这种体系的量子结构简单,易于生长,但该结构属于无应变结构,其态密度较大,因此造成器件的增益和微分增益较低。而要设计的 InGaAs/AlGaAs 材料体系具有应变的 QW 结构,因其具有微分增益大、低阈值、高输出功率、高调制速率等优点,适合用作高速器件的有源区。根据半导体材料晶格常数与禁带宽度的关系曲线,采用具有较少 In 组分的 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料作为 QW 材料,随着  $x$  的增加禁带宽度会减小,随之激射波长也会增大。In 组分含量的多少直接影响光增益的大小,因此确定 In 组分尤为重要。对 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 系阱层材料和不同的垒层材料进行无应变的带隙进行计算,计算如下。

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  体材料的带隙宽度为

$$E_g^0(x) = 1.424 - 1.619x + 0.555x^2. \quad (1)$$

GaAs 体材料的带隙宽度为

$$E_g^0 = 1.519. \quad (2)$$

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  体材料的带隙宽度为

$$E_g^0(x) = \begin{cases} 1.424 + 1.24(x \leq 0.45) \\ 1.9 + 0.125x + 0.143x^2 (x > 0.45) \end{cases}. \quad (3)$$

计算结果确定,In 组分为  $x=0.075$  时,对应的 850 nm VCSEL 的带隙宽度为 1.306 eV,作为阱层,相应的垒层  $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$  禁带宽度为 1.858 eV。

对于 InGaAs/AlGaAs 应变 QW 结构,三元化合物  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  生长在 AlGaAs 衬底上,设 InGaAs 的晶格常数为  $a$ ,AlGaAs 的晶格常数为  $a_0$ ,属于在  $X$ 、 $Y$  方向受到的双轴应变。这里应变张量分量分别定义为

$$\epsilon_{//} = \epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} = \frac{a_0 - a(x)}{a(x)}, \quad (4)$$

$$\epsilon_{\perp} = \epsilon_{zz} = -\frac{2C_{12}}{C_{11}}\epsilon_{//}, \quad (5)$$

$$\epsilon_{xy} = \epsilon_{yz} = \epsilon_{zx} = 0, \quad (6)$$

式中  $C_{11}$ 、 $C_{12}$  为弹性应变系数, $\epsilon_{//}$  和  $\epsilon_{\perp}$  分别表示水平方向上的应变张量分量和垂直方向上的应变张量分量。

由于 InGaAs 应变层对能带结构的影响很大,则导带边的漂移为

$$\delta E_c(x) = P_{ce} = a_c(\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz}) = 2a_c \left(1 - \frac{C_{12}}{C_{11}}\right) \epsilon_{//}, \quad (7)$$

式中  $a_c$  为导带的静压力形变势,  $P_\epsilon$  代表导带边的漂移能带差的符号。

应变所致价带漂移

$$E_c = E_g(x) + \delta E_c, \quad (8)$$

$$\delta E_{HH}(x) = -P_\epsilon - Q_\epsilon, \quad (9)$$

$$\delta E_{LH}(x) = -P_\epsilon + Q_\epsilon, \quad (10)$$

$$P_\epsilon = -a_v(\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz}) = -2a_v\left(1 - \frac{C_{12}}{C_{11}}\right)\epsilon_{//}, \quad (11)$$

$$Q_\epsilon = -\frac{b}{2}(\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} - 2\epsilon_{zz}) = -b\left(1 + 2\frac{C_{12}}{C_{11}}\right)\epsilon_{//}, \quad (12)$$

式中  $b$  为剪切应变势;  $P_\epsilon$  表示由单轴静压力引起的价带漂移分量, 它的作用是使整个价带上升或者下降;  $Q_\epsilon$  表示应变引起的价带飘移的切变分量;  $a_v$  为价带的静压力形变势,  $\delta E_{HH}$  和  $\delta E_{LH}$  分别表示重空穴价带漂移变化量和轻空穴价带漂移变化量。

根据(8)~(10)式可以计算出  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{AlGaAs}$  应变 QW 结构的能带边, 进而得到  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{AlGaAs}$  的能带示意图。  $\text{InGaAs}/\text{AlGaAs}$  应变 QW 能带结构变化示意图, 如图 1 所示。图中的实线为无应变时材料的能带所在位置, 虚线为发生应变时应变层能带的真实位置。  $\text{InGaAs}/\text{AlGaAs}$  具有较深的导带势阱, 对载流子限制作用增强, 当温度升高时, 较高的导带带阶可有效防止热电子的泄漏, 实现器件的低阈值、高功率的输出。

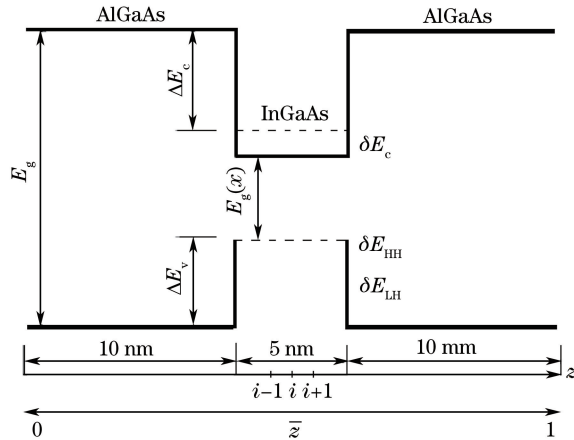


图 1  $\text{InGaAs}/\text{AlGaAs}$  应变 QW 能带结构变化

Fig. 1 Energy band structure of an  $\text{InGaAs}/\text{AlGaAs}$  strained QW

考虑到器件工作时自生热效应会产生波长的红移现象, 因此将波长设计在 840 nm 附近, 并且对不同阱宽 VCSEL 进行模拟。不同阱宽的 850 nm QW 增益谱曲线如图 2 所示。图 2(a) 为阱宽 3 nm 时的波长与增益的关系曲线, 从图 2(a) 可以看出, 激射波长刚接近 800 nm, 光增益接近  $4000 \text{ cm}^{-1}$ , 虽然比 GaAs 阱层要高出很多, 但是即使考虑到波长红移现象, 也不能满足 850 nm 波长的要求, 综合考虑该阱宽不能满足设计要求。图 2(b) 为阱宽 4 nm 时的波长与增益的关系曲线, 从图 2(b) 可以看出, 激射波长在 825 nm 附近, 增益在  $5000 \text{ cm}^{-1}$  附近, 综合波长红移现象, 波长可能会达到 850 nm 的设计要求。图 2(c) 为阱宽 5 nm 时的波长与增益的关系曲线, 从图 2(c) 可以看出, 最大增益接近  $6000 \text{ cm}^{-1}$ , 比 3 nm 和 4 nm 阱宽增益大很多, 激射波长在 840 nm 附近, 考虑红移现象基本能够符合设计要求。图 2(d) 为阱宽 6 nm 时的波长与增益的关系曲线, 从图 2(d) 可以看出, 与阱宽为 5 nm 的增益曲线相比, 增益增加不大, 激射波长超出 850 nm, 加之红移现象, 不能满足设计要求。总之, 由图 2 的 4 种阱宽的增益谱线分析可知, 随着 QW 宽度的增加, 其激射波长和增益也随之增加, 综合考虑最终确定 850 nm VCSEL 的阱宽为 5 nm。一般情况下, DBR 反射率取不同数值时, VCSEL 的 QW 个数为 2~4 的时候, 输出功率有最大值。综合考虑 QW 的个数对器件的阈值电流密度与输出功率的影响, 确定 VCSEL 的 QW 数为 3。

为了验证优化设计后的  $\text{InGaAs}/\text{AlGaAs}$  QW 材料优于传统的  $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$  多 QW VCSEL, 通过模拟

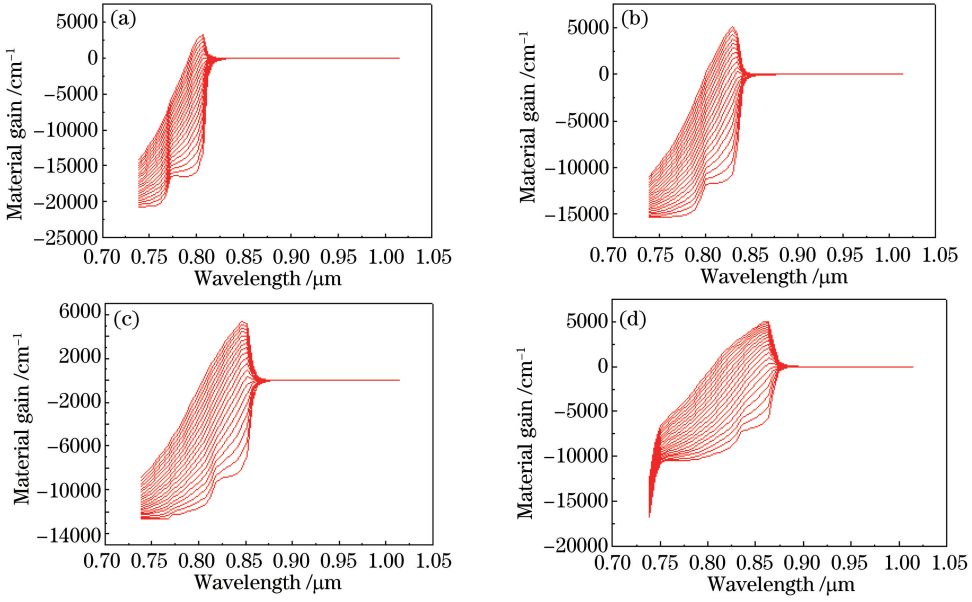


图 2 850 nm VCSEL 的 QW 增益曲线。(a) QW 宽 3 nm; (b) QW 宽 4 nm; (c) QW 宽 5 nm; (d) QW 宽 6 nm  
 Fig. 2 QW gain characteristics curves of 850 nm VCSEL. (a) QW width 3 nm; (b) QW width 4 nm;  
 (c) QW width 5 nm; (d) QW width 6 nm

两种 QW 结构在不同环境温度下的光增益, 绘制出光增益随温度的变化关系曲线, GaAs/AlGaAs 和 InGaAs/AlGaAs QW 增益与环境温度关系曲线如图 3 所示。由图 3 可以知道, 随着温度的升高, 由于 QW 内部自生热, 传统 QW 结构和优化后的结构光增益都会减小。当温度为 350 K 时, 图 3(a) 中的传统材料的 QW 增益几乎为 0, 而图 3(b) 中的新优化 QW 材料的光增益值仍然在  $2000 \text{ cm}^{-1}$ , 器件能够正常发光。优化结果表明, 优化后的 InGaAs/AlGaAs QW 材料的稳定性优于传统 GaAs/AlGaAs。

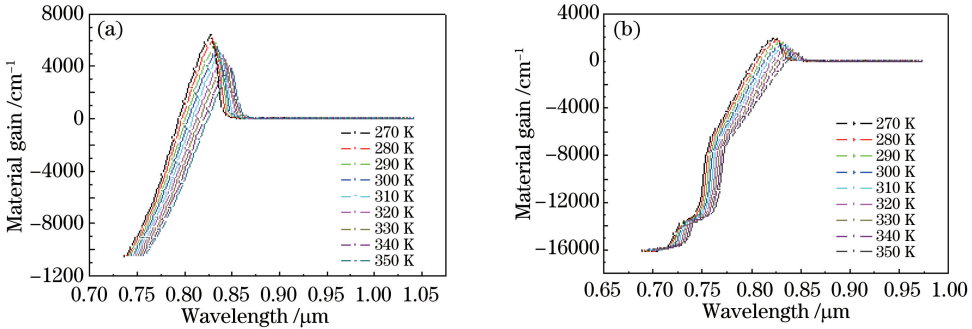


图 3 (a) GaAs/AlGaAs 和 (b) InGaAs/AlGaAs 的 QW 增益与环境温度关系曲线

Fig. 3 QW gain and operating temperature characteristics curves of (a) GaAs/AlGaAs and (b) InGaAs/AlGaAs

## 2.2 DBR 的优化设计

谐振腔波长一般等于激光器的激光波长, 它与 DBR 在器件内部形成驻波场, 由于谐振腔腔长较短, 在谐振腔两侧采用 DBR 结构来提高反射率, 进而提高光增益。在 DBR 的设计过程中, 需要从光学特性和电学特性两方面来考虑, 为了增大光增益, 需要提高 DBR 的反射率, 这就需要增加 DBR 的对数, 而 DBR 的对数越多, 随之带来的串联电阻越大, 这样在器件工作时由于自生热效应就会产生焦耳热, 从而影响器件的光电特性。采用菲涅耳系数矩阵方法研究 DBR 光学特性, 公式为

$$\begin{bmatrix} H_0^+ \\ H_0^- \end{bmatrix} = \frac{1}{t_0 \times t_1 \times \dots \times t_k} \begin{bmatrix} u_{11} H_{k+1}^+ \\ u_{21} H_{k+1}^- \end{bmatrix}, \quad (13)$$

其中,

$$t_k = \frac{2n_k}{n_k + n_{k+1}}, \quad (14)$$

式中  $H_0^+$ 、 $H_0^-$  分别为入射面电场传播正向分量和反向分量,  $H_{k+1}^+$ 、 $H_{k+1}^-$  分别为出射面电场正反向分量,  $u_{11}$ 、 $u_{21}$  为矩阵系数,  $n_k$ 、 $n_{k+1}$  分别为本层和下一层折射率。

根据(13)式并采用 Crosslight 软件模拟了 850 nm VCSEL 的反射谱,由于突变型 DBR 界面处具有较高的势垒,会造成串联电阻较大,而渐变抛物线型 DBR 价带相对平滑,能够极大地减小空穴的势垒,有效降低 DBR 的串联电阻,进而减少器件的热效应,提高 VCSEL 在连续波(CW)条件下的光电性能和可靠性。综合上述考虑,设计出 850 nm 渐变抛物线型 DBR。P 型 DBR 由 24 对  $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$  渐变层交替生长, n 型 DBR 为 34 对,由  $\text{Al}_{0.12-0.9}\text{GaAs}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{Al}_{0.9-0.12}\text{GaAs}/\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$  以及缓冲掺杂层  $\text{Al}_{0.12-0.9}\text{GaAs}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$  组成,谐振腔由 3 个阱宽为 5 nm, 垒宽为 10 nm, 组分为  $\text{In}_{0.075}\text{Ga}_{0.925}\text{As}/\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{AsQW}$  组成,腔长总厚度为 850 nm。

850 nm VCSEL 整体结构理论计算的反射谱如图 4 所示。从图 4 反射谱曲线可知,反射谱的中心波长为 840 nm,高反射带宽为 808~875 nm,在中心波长两侧峰值对称,两侧峰值的反射率也迅速下降。有源区中的上下 DBR 和中间的谐振腔,光程差加上相移使得 DBR 反射相位相反,能够在谐振腔中心处反射率最小。器件工作时,由于自生热效应会产生波长红移现象,红移后的腔面波长能够符合设计要求。

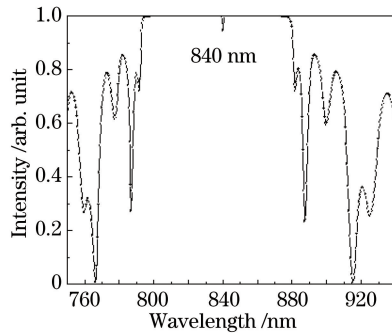


图 4 VCSEL 整体结构理论计算的反射谱

Fig. 4 Theoretical calculation of the reflection spectrum of VCSEL structure

### 2.3 VCSEL 的整体结构设计

在 QW 和 DBR 反射镜优化设计完成后,给出了 850 nm 顶发射 VCSEL 的整体结构如图 5 所示。图中 VCSELQW 的势阱材料为  $\text{In}_{0.075}\text{Ga}_{0.925}\text{As}$ ,阱宽为 5 nm;势垒材料为  $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ ,垒宽为 10 nm;QW 的个数为 3 个,这样的设计可以得到最低的阈值电流密度。为了减小空穴势垒的,同时降低 DBR 的串联电阻, QW 两侧的空间层采用渐变 DBR 结构,氧化层被放置在距离有源区 1/4 波长的第一对 p-DBR 处。在衬底和 P 型 DBR 外表面制作金属接触层,形成欧姆接触,在 P 面制成一个圆形出光窗口,输出圆形光束。

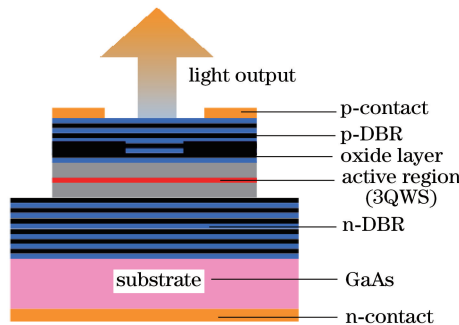


图 5 850 nm 顶发射 VCSEL 结构图

Fig. 5 Schematic of the 850nm top-emitting VCSEL

### 3 测试结果与讨论

#### 3.1 VCSEL 的生长与制备

在生长 VCSEL 外延结构中采用芬兰 DCA 公司的 MBE, 该技术的优点在于: 1) 能够制备超薄层的半导体材料; 外延材料表面形貌好, 而且面积较大, 均匀性较好; 2) 可以制成不同掺杂剂或不同成份的多层结构; 3) 外延生长的温度较低, 有利于提高外延层的纯度和完整性; 4) 生长的外延片所含元素纯度高, 界面处可形成突变的超精细结构和超薄层。因此特别适合生长高精度要求的半导体 QW 材料和超晶格材料。该外延技术具有生长温度低、生长速率慢、能够严格控制外延层的层厚组分等特点。实验中对偏  $\langle 111 \rangle A 2^\circ$  的 GaAs (100) 衬底上进行外延结构生长, 为了尽可能降低衬底缺陷或杂质向下限制层的扩散, 确定缓冲层  $Al_{0.12-0.9} GaAs/Al_{0.9} Ga_{0.1} As$  的厚度为 500 nm, 其缓冲层的生长温度为  $600^\circ C$ , AlGaAs (含有源层) 的生长温度为  $700^\circ C$ , 生长 GaAs 时 Ga 的束流  $1.7 \times 10^{-5} Pa$ , As 的束流  $1.6 \times 10^{-4} Pa$ , V/III 束流比为 9.2。生长阱层  $In_{0.075} Ga_{0.925} As$  时 In 的束流  $2.4 \times 10^{-6} Pa$ , Ga 的束流  $1.7 \times 10^{-5} Pa$ , As 的束流  $2.0 \times 10^{-4} Pa$ , Al:Ga=0.14, V/III 束流比为 10.7。生长垒层  $Al_{0.35} Ga_{0.65} As$  时 Al 的束流  $1.2 \times 10^{-5} Pa$ , Ga 的束流  $1.9 \times 10^{-5} Pa$ , As 的束流  $2.7 \times 10^{-4} Pa$ , Al:Ga=0.64, V/III 束流比为 8.7。P 型 DBR 层的 V/III 束流比为 10, N 型 DBR 层的 V/III 束流比为 10.1。限制层和波导层之间的生长过渡采用双 Al 源接续方法, 缓冲层与下限制层 (含 Al 渐变层) 之间采取间断生长。设备上的在位检测系统, 能够在外延生长的同时对外延片进行在线监测。外延片生长完成之后, 对外延片进行光刻、湿法氧化、刻蚀、镀金等工艺制备了 850 nm VCSEL 器件。最后分别对外延片及器件进行性能指标测试。

#### 3.2 VCSEL 外延片及器件测试

采用 Nanometric RPM2000 光致发光仪对外延片进行测试, VCSEL 样品光致荧光曲线如图 6 所示。从图中光致发光 (PL) 峰由两个峰叠加而成, 其中一个光谱峰位置为 835.6 nm, 半峰全宽为 18.4 nm, 与之前的设计结果基本符合。因为通过理论计算的增益谱应该比测到的 PL 谱要宽; 在 PL 谱中有多个峰, 主要是在测试时存在一定的 DBR 反射谐振的效应, 光谱有所窄化, 同时产生了一定的选模效果, 不过由于谐振效果弱, 谱线还是比激光光谱宽很多。这种效应通过理论计算锁定某一个模式还是很困难, 存在模式竞争选择; 只能是理论计算得出增益谱峰的波长与设计一致, PL 谱在理论计算增益谱的范围内或者接近; 与此同时, 外延材料生长的稳定性造成波长的漂移也是很难控制的。

外延片的 X 射线双晶衍射图如图 7 所示, 样品的 DBR 0 级衍射峰的半峰全宽为  $12.61''$ , 与衬底峰的半峰全宽 ( $11.79''$ ) 很接近, 表明在外延材料的各周期厚度比较均匀、一致, 因为 0 级衍射峰的半峰全宽不仅取决于晶格的完整性, 还取决于各层厚度的波动, 任何波动都会引起衍射峰的展宽。样品的 X 射线双晶回摆曲线中没有出现了明显的衍射峰劈裂的现象, 则说明 DBR 结构中组分几乎没有偏差, 并且有源层也没有使上下 DBR 产生位相差。

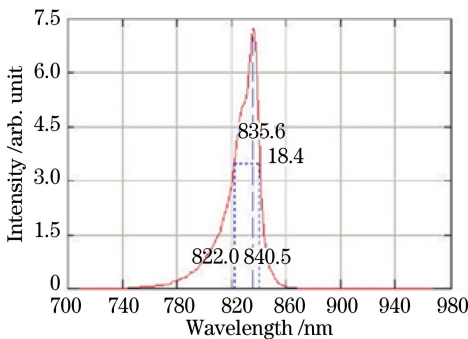


图 6 VCSEL 样品光致荧光曲线

Fig. 6 Fluorescence characteristic curve of VCSEL

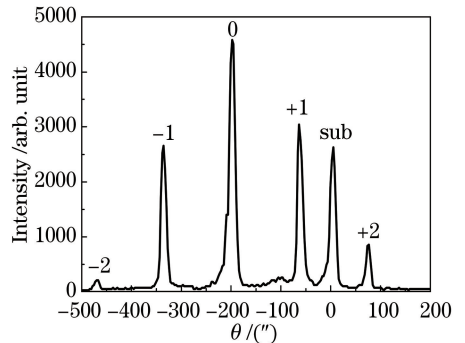


图 7 X 射线双晶衍射图

Fig. 7 Double crystal X-ray diffraction

850 nm VCSEL 单管光谱图如图 8 所示。由图 8 可知, VCSEL 工作时, 光谱峰位置在 850 nm 附近, 符合设计需求。单管 VCSEL 的功率-电流-电压 ( $P-I-V$ ) 曲线如图 9 所示。可知其阈值电流为 0.5 mA, 当电流

达到 28.5 A 时,最大输出光功率接近于 11 mW,斜率效率约为 0.85 W/A。VCSEL 单管远场光斑与发散角如图 10 所示。从图中可知,其半角约为 8.5°,并呈现出非常好的圆形对称高斯光束特点,符合设计要求。

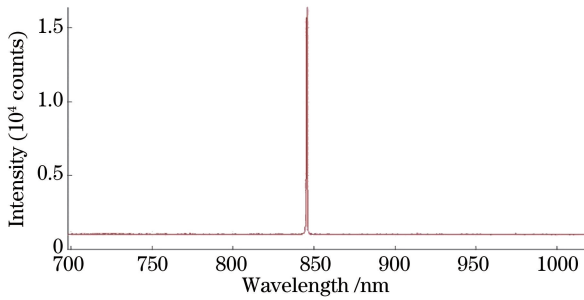


图 8 850 nm VCSEL 单管光谱图

Fig. 8 Spectrum of the 850 nm single VCSEL

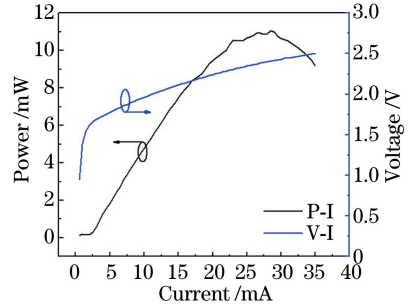


图 9 单管 VCSEL 的 P-I-V 曲线

Fig. 9 P-I-V characteristics curves of single VCSEL

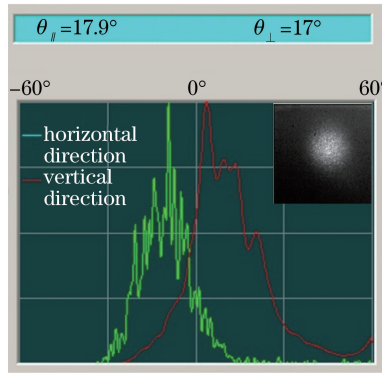


图 10 VCSEL 单管远场光斑与发散角

Fig. 10 Far field spot and divergence angle of single VCSEL

## 4 结 论

基于能带理论和 DBR 的工作原理,对激光波长为 850 nm 的 VCSEL 芯片的整体结构进行了理论设计,确定了 QW 组分、宽度以及 DBR 反射镜的对数。设计的 VCSEL 通过 Crosslight 软件模拟反射谱和 QW 增益谱,得到阱宽为 5 nm、垒宽为 10 nm 的  $\text{In}_{0.075}\text{Ga}_{0.925}\text{As}/\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$  QW,材料增益的峰值波长在 840 nm 附近,其峰值增益达到  $6000\text{ cm}^{-1}$ ,采用 MBE 对优化设计的结构外延生长,测得室温下光谱峰值波长为 835.6 nm,与理论设计结果基本符合。经过后工艺器件制备,测得器件阈值电流为 0.5 mA,当电流达到 28.5 A 时,最大的输出功率达到 11 mW,斜率效率为 0.85 W/A。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang Juan, Liu Liren, Zhou Yu, *et al.* Design of a new type interleaver[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(12): 1424-1428.  
张 娟, 刘立人, 周 煜, 等. 一种新型的光交错复用器的设计[J]. 光学学报, 2003, 23(12): 1424-1428.
- [2] Cui Ming, Han Jun, Deng Jun, *et al.* Epitaxial growth of 980 nm vertical cavity surface emitting laser [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2015, 36(1): 38-41.  
崔 明, 韩 军, 邓 军, 等. 980 nm 垂直腔面发射激光器的外延生长[J]. 半导体光电, 2015, 36(1): 38-41.
- [3] Chang Y C, Wang C S, Coldren L A. High-efficiency, high-speed VCSEL with 35 Gbit/s error-free operation [J]. Electronics Letters, 2007, 43(19): 1022-1023.
- [4] Shi Jingjing, Tian Zhenhua, Qin Li, *et al.* 850 nm high-power vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. Journal of Optoelectronics•Laser, 2010, 21(10): 1445-1448.  
史晶晶, 田振华, 秦 莉, 等. 850 nm 大功率垂直腔面发射激光器[J]. 光电子•激光, 2010, 21(10): 1445-1448.
- [5] Huang Shouwen, Chen Jianjun, Xia Guangqiong, *et al.* Polarization bistability characteristics of 1550 nm vertical-cavity

- surface-emitting laser under optoelectronic feedback[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(7): 071405.  
黄守文, 陈建军, 夏光琼, 等. 光电反馈 1550 nm 垂直腔表面发射激光器偏振双稳特性[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(7): 071405.
- [6] Tian Kun, Zou Yonggang, Jiang Xiaowei, *et al.* Wavelength tuning range of inter cavity subwavelength grating MEMS VCSELs[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(7): 0701009.  
田 锟, 邹永刚, 江孝伟, 等. 内腔亚波长光栅 MEMS VCSELs 的波长调谐范围[J]. *中国激光*, 2016, 43(7): 0701009.
- [7] Li Xiushan, Ning Yongqiang, Cui Jinjiang, *et al.* Polarization properties of rectangle-shape VCSEL with asymmetrical current injection[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(7): 071402.  
李秀山, 宁永强, 崔锦江, 等. 非对称电流注入对矩形台面激光器的偏振分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(7): 071402.
- [8] Zhang Yan, Ning Yongqiang, Zhang Jinsheng, *et al.* Structural design of 808 nm InGaAlAs vertical-cavity surface-emitting laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(9): 0902007.  
张 艳, 宁永强, 张金胜, 等. 808 nm InGaAlAs 垂直腔面发射激光器的结构设计[J]. *中国激光*, 2011, 38(9): 0902007.
- [9] Wang Lijun, Ning Yongqiang, Qin Li, *et al.* Development of high power diode laser [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, 36(1):1-19.  
王立军, 宁永强, 秦 莉, 等. 大功率半导体激光器研究进展[J]. *发光学报*, 2015, 36(1): 1-19.
- [10] Shi J, Chi K, Chang J, *et al.* Single-mode vertical-cavity surface-emitting laser array with high power and narrow far-field divergence angle[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(6): 1502508.
- [11] Shi Jingjing, Qin Li, Ning Yongqiang, *et al.* 850 nm vertical cavity surface-emitting laser arrays [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(1): 17-23.  
史晶晶, 秦 莉, 宁永强, 等. 850 nm 垂直腔面发射激光器阵列[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(1): 17-23.
- [12] 李 特, 宁永强, 郝二娟, 等. 980 nm 底发射 VCSEL 的 DBR 设计与优化[J]. *中国科学: 信息科学*, 2009, 39(8): 918-922.