

高速 850 nm 垂直腔面发射激光器的优化设计与外延生长

周广正 尧舜 于洪岩 吕朝晨 王青 周天宝 李颖 兰天 夏宇 郎陆广 程立文 董国亮 康联鸿 王智勇

Optimized design and epitaxy growth of high speed 850 nm vertical-cavity surface-emitting lasers

Zhou Guang-Zheng Yao Shun Yu Hong-Yan Lü Zhao-Chen Wang Qing Zhou Tian-Bao Li Ying Lan Tian Xia Yu Lang Lu-Guang Cheng Li-Wen Dong Guo-Liang Kang Lian-Hong Wang Zhi-Yong

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 67, 104205 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20172550

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172550>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I10>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于两正交互耦 1550 nm 垂直腔面发射激光器获取多路随机数](#)

Multi-channel physical random number generation based on two orthogonally mutually coupled 1550 nm vertical-cavity surface-emitting lasers

物理学报.2018, 67(2): 024204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20171902>

[高斯切趾型光纤布拉格光栅外腔半导体激光器的混沌输出特性](#)

Characteristics of chaotic output from a Gaussian apodized fiber Bragg grating external-cavity semiconductor laser

物理学报.2017, 66(24): 244207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.244207>

[混沌光注入垂直腔面发射激光器混沌输出的时延和带宽特性](#)

Performances of time-delay signature and bandwidth of the chaos generated by a vertical-cavity surface-emitting laser under chaotic optical injection

物理学报.2017, 66(24): 244206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.244206>

[利用混沌激光多位量化实时产生 14 Gb/s 的物理随机数](#)

14-Gb/s physical random numbers generated in real time by using multi-bit quantization of chaotic laser

物理学报.2017, 66(23): 234205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.234205>

[大幅度增加弛豫振荡频率来实现毫米级外腔半导体激光器的外腔机制转换](#)

Conversion of external cavity mechanism of millimeter-level external cavity semiconductor laser by significantly increasing relaxation oscillation frequency

物理学报.2017, 66(23): 234204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.234204>

高速850 nm垂直腔面发射激光器的 优化设计与外延生长

周广正¹⁾ 尧舜^{1)†} 于洪岩¹⁾ 吕朝晨¹⁾ 王青¹⁾ 周天宝²⁾ 李颖¹⁾
三天¹⁾ 夏宇²⁾ 郎陆广¹⁾ 程立文³⁾ 董国亮²⁾ 康联鸿²⁾ 王智勇¹⁾

1) (北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

2) (华芯半导体科技有限公司, 泰州 225599)

3) (扬州大学物理科学与技术学院, 扬州 225002)

(2017年11月29日收到; 2018年3月12日收到修改稿)

利用传输矩阵理论和TFCalc薄膜设计软件分析了分布布拉格反射镜和垂直腔面发射激光器(VCSEL)的反射率谱特性, 对比了从谐振腔入射与从表面入射时反射率谱的差异, 为白光反射谱表征VCSEL外延片提供了依据. 利用Crosslight软件模拟了InGaAs/AlGaAs应变量子阱的增益谱随温度的变化特性及VCSEL器件内部温度分布, 设计了增益-腔模调谐的VCSEL. 采用金属有机物化学气相淀积设备外延生长了顶发射VCSEL, 制作了氧化孔径为7.5 μm 的氧化限制型VCSEL器件, 测试了器件的直流特性、光谱特性和眼图特性; 6 mA, 2.5 V偏置条件下输出光功率达5 mW, 4级脉冲幅度调制传输速率达50 Gbit/s.

关键词: 垂直腔面发射激光器, 分布布拉格反射镜, 量子阱, 金属有机物化学气相淀积

PACS: 42.55.Px, 42.55.Sa, 73.21.Fg

DOI: 10.7498/aps.67.20172550

1 引言

垂直腔面发射激光器(vertical cavity surface emitting laser, VCSEL)具有高调制速率、低阈值电流、圆形光斑易与光纤耦合、高温稳定、易于集成等优势, 广泛应用于短距离数据通信和并行高速光纤通信. 在中短距离通信中激光波长为850 nm等中短波段激光的氧化限制性VCSEL得到广泛应用. VCSEL集合了众多优点, 相应的外延质量比发光二极管(light emitting diode, LED)的要求更高, 层数比激光二极管(laser diode, LD)更多(200层以上), 使得VCSEL的外延生长和表征比较困难.

VCSEL外延结构主要由上下分布布拉格反射镜(distributed Bragg reflector, DBR)、多量子阱(multi-quantum well, MQW)有源区和氧化限制层等组成. DBR的反射率直接影响VCSEL的阈值电

流、输出功率和调制特性, 一般采用传输矩阵法分析DBR反射率谱特性^[1-4], 文献[1]考虑到材料折射率随波长变化及不同吸收系数对DBR反射率谱模拟结果的影响, 本文加入材料的消光系数随波长条件, 模拟了DBR反射率谱; 对于上DBR而言, 文献[2]考虑到光源是在量子阱有源区, 模拟了从谐振腔入射时DBR的反射率谱特性, 而白光反射谱无损检测是白光光源从外延片表面入射. 本文分析了两种情况下反射率谱的差异, 如图1所示, H为高折射率层, L为低折射率层, R_0 为从衬底入射时的反射率, R_0 为从表面入射时的反射率. VCSEL整体结构反射率谱会在高反射带内形成腔模^[5], 一般认为腔模附近需要形成高反射带, 才能使得反射率足够高, 只有腔模波长的光才能激射, 达到单纵模高功率输出条件. 文献[6, 7]讨论了GaAs cap层厚度对镜面损耗和光子寿命的影响, 考虑到从谐振

† 通信作者. E-mail: yaoshun_bjut@126.com

腔和表面入射时 DBR 反射率谱特性差异, 本文分析了在不同 cap 层情况下 DBR 和 VCSEL 整体结构的白光反射率谱特性, 为 DBR 和 VCSEL 外延片的白光反射率的表征提供了依据.

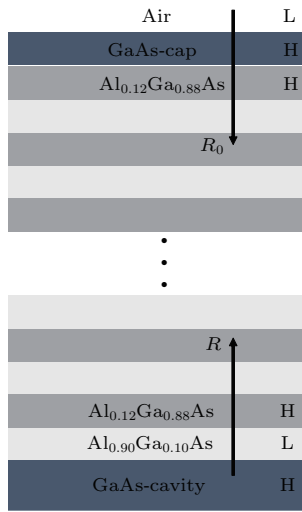


图1 DBR 结构示意图
Fig. 1. Schematic of DBR.

850 nm 波长的 VCSEL 有源区一般为 GaAs/AlGaAs 量子阱或 InGaAs/AlGaAs 量子阱. 与 GaAs/AlGaAs 量子阱相比, InGaAs/AlGaAs 应变量子阱具有更高的光增益^[8]. 由于 VCSEL 器件很小, 有源区产生的热量需经过 N 型 DBR 和衬底导入热沉, 工作时器件内部有源区温度要高于环境温度, 而量子阱增益谱随温度变化较大, 需要设计量子阱增益谱峰值波长和 VCSEL 整体结构法布里-珀罗 (Fabry-Perot, F-P) 腔模波长, 才能使得器件有高输出功率. 采用 Crosslight 软件模拟了 InGaAs/AlGaAs 量子阱增益谱随温度变化的特性以及器件内部温度分布情况, 设计了室温下量子阱增益谱峰值波长为 829 nm, F-P 腔模为 847 nm 的 VCSEL 器件. 并采用金属有机物化学气相沉积 (metal organic chemical vapor deposition, MOCVD) 生长了 MQW 以及 VCSEL 整体结构.

近些年来, 国内外相关学者对如何提高 VCSEL 调制速率及能量效率进行了较深入的研究, Westbergh 等^[7] 采用 InGaAs 量子阱及多氧化层结构, 通过浅表面刻蚀降低了上 DBR 反射率, 进而减小光子寿命, 通过优化光子寿命得到 23 GHz 调制带宽和 40 Gbit/s 无差错数据传输; Kuchta 等^[9] 通过采用带有 2-轴头前馈均衡器的 130 nm 双

极互补金属氧化物半导体 (bipolar complementary metal oxide semiconductor, BiCMOS) 驱动集成电路和 130 nm BiCMOS 接受集成电路, 非归零调制下无差错传输速率达 71 Gbit/s. 香农定律指出信道的最大传输速率除了与信道带宽成正比, 还与信噪比有关. 把 VCSEL 也等效成信道的一部分, 通过减小阈值电流、减小寄生效应等方法可以增大 3 dB 带宽^[6], 提高信噪比的有效方法是增大器件的输出功率^[10], 本文通过反射率谱的精确表征、增益-腔模失配设计和采用半绝缘衬底等方法, 制作出高斜效率、高调制速率的 VCSEL 器件.

2 结构与理论分析

2.1 VCSEL 结构

850 nm VCSEL 结构示意图见图 2, 采用非掺杂衬底是为了减小寄生效应, 提高调制速率; 外延层包括 N 型 GaAs 欧姆接触层, 28 对 Al_{0.12}Ga_{0.88}As/AlAs 加 3 对 Al_{0.12}Ga_{0.88}As/Al_{0.9}Ga_{0.1}As 材料的 N 型 DBR, 掺杂浓度 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 5 周期 InGaAs/AlGaAs 材料的有源区量子阱, 两个 Al_{0.6}Ga_{0.4}As 限制层, 厚度 30 nm 的 Al_{0.98}Ga_{0.02}As 氧化层, 22 对 Al_{0.12}Ga_{0.88}As/Al_{0.9}Ga_{0.1}As 材料的 P 型 DBR, 掺杂浓度 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 为了减小异质结势垒对串联电阻的影响, DBR 中材料界面处采用组分渐变形式生长, 最后生长了 P 型 GaAs 欧姆接触层, 掺杂浓度 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$; 后续芯片工艺形成的两个台面, 氧化孔径和金属电极等.

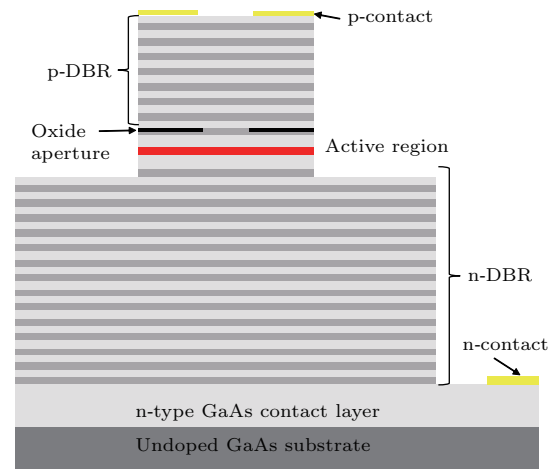


图2 850 nm VCSEL 结构示意图
Fig. 2. Schematic of 850 nm VCSEL.

2.2 DBR 反射率谱模拟与分析

由于谐振腔腔长较短, 谐振腔上下采用 DBR 结构提高反射率, 减小腔镜损耗, 进而达到激射条件. 通过传输矩阵的方法来研究 VCSEL 的光学特性^[10], 如图 3 所示, 公式为

$$\begin{pmatrix} E_m^+ \\ E_m^- \end{pmatrix} = T_m \cdots T_3 T_2 T_1 \begin{pmatrix} E_0^+ \\ E_0^- \end{pmatrix}, \quad (1)$$

其中,

$$T_i = \begin{pmatrix} \frac{1}{t} e^{j\phi} & \frac{r}{t} e^{-j\phi} \\ \frac{r}{t} e^{j\phi} & \frac{1}{t} e^{-j\phi} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

式中 E_m^+ , E_m^- 分别为入射面电场传播正向分量和反向分量; E_0^+ , E_0^- 为出射面电场传播正向分量和反向分量; T_i 为距出射面第 i 层的传输矩阵; r 为反射系数; t 为透射系数; $\phi = 2\pi(n_i - jk_i)d_i$ 为相位变化及材料吸收, n_i 和 k_i 分别为第 i 层材料的折射率和消光系数, d_i 为第 i 层材料厚度. GaAs 材料折射率和消光系数 (载流子浓度 $p = 2.4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) 随波长的变化如图 4 所示^[11,12].

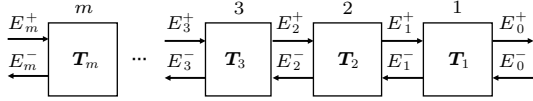


图 3 传输矩阵法表示的级联特性

Fig. 3. Cascaded scattering junctions characterized by transmission matrices.

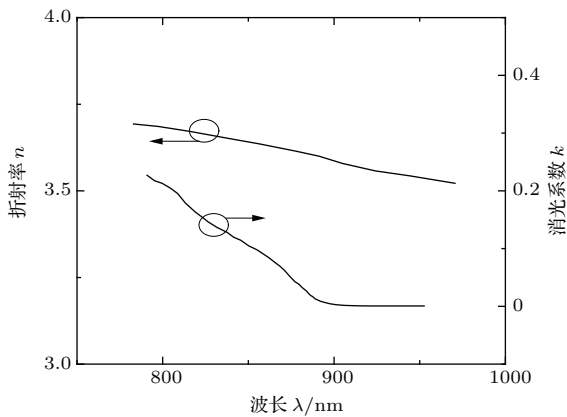


图 4 GaAs 材料折射率和消光系数随波长的变化

Fig. 4. Refractive index and extinction coefficient of GaAs varying with wavelength.

上 DBR 一般包含高掺杂 (p+) GaAs cap 层^[6], 形成相位补偿层, 用于调节光子寿命, 同时高掺

杂可以减小欧姆接触. 本文分析了三种不同 cap 层的 DBR 和 VCSEL: 1) DBR 和 VCSEL 无 cap 层, 分别记作 DBR1 和 VCSEL1; 2) cap 包含光学厚度为 $1/4\lambda$ 的 GaAs 外延层, 分别记作 DBR2 和 VCSEL2; 3) cap 层包含光学厚度为 $1/4\lambda$ 的 GaAs 外延层和厚度为 120 nm 的 SiO_2 层, 分别记作 DBR3 和 VCSEL3. SiO_2 是芯片工艺完成后利用等离子体增强化学气相沉积 (plasma enhanced chemical vapor deposition, PECVD) 方法进行沉积, 起到保护作用. 图 5 (a) 为三种 cap 层 DBR 从表面入射时的反射率谱, 可以明显看出高反射带处的不同, DBR1 高反射带平整, DBR2 中间有凹陷, DBR3 高反射带左侧低右侧高; 图 5 (b) 为入射波长为 850 nm 时 DBR 的驻波场分布, 为了便于对比, 出射端场强按比例设成相同值, 可以看出为了得到相同的输出端光强, 需要的入射端光强有所不同, 其中 DBR1

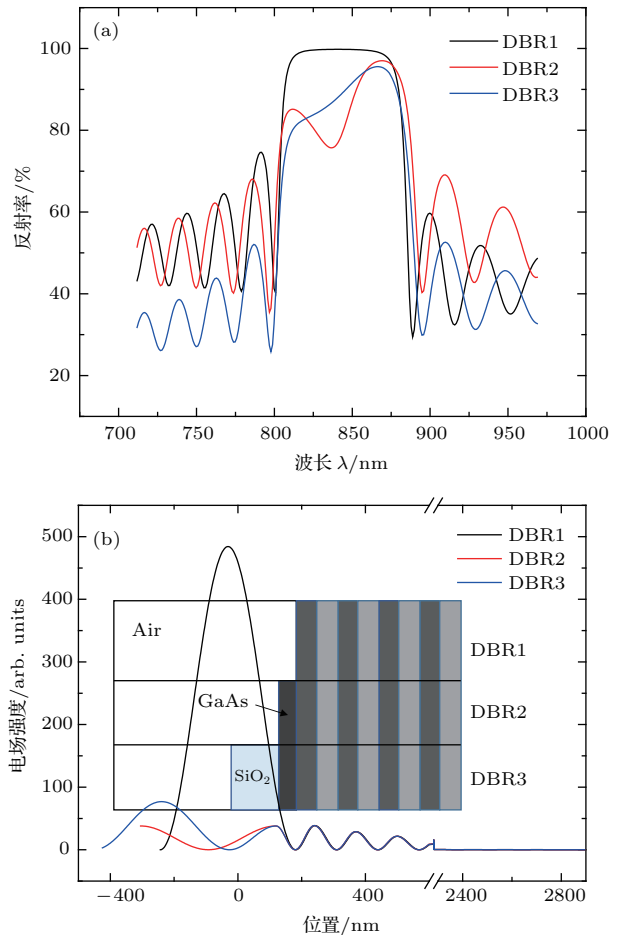


图 5 (a) DBR 从表面入射的反射率谱; (b) 入射波长 850 nm 时 DBR 的驻波场分布

Fig. 5. (a) Reflectance spectrum of DBR as seen from the surface; (b) standing wave pattern in DBR with the incident wavelength of 850 nm.

入射端的强度最大, DBR3次之, DBR2最小, 与图5(a)中850 nm处的反射率相对应. 图6为三种cap层DBR从谐振腔入射时的反射率谱, 高反射带都比较平整, 只是反射率有1%—2%的差异, 850 nm处的反射率依次为99.7%, 97.8%和98.7%.

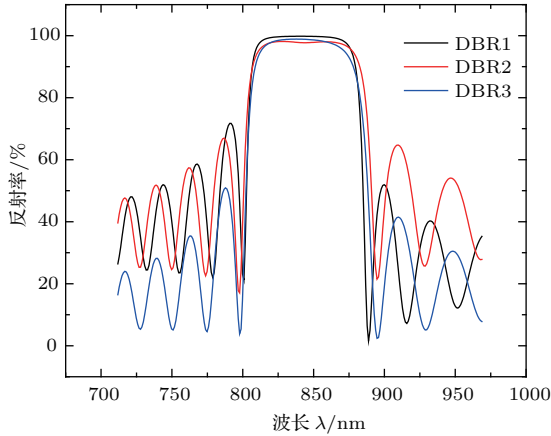


图6 DBR从谐振腔入射的反射率谱
Fig. 6. Reflectance spectrum of DBR as seen from the cavity.

图7为三种cap层VCSEL从表面入射时的反射率谱, 不考虑腔模时的形状与DBR从表面入射时类似, 腔模凹陷深度VCSEL1最浅, VCSEL3次之, VCSEL2最深. 由图5和图6可知, 对于不同cap层结构的DBR和VCSEL, 从表面入射的反射率相差较大, 而从谐振腔入射的反射率相差只有1%—2%. DBR和VCSEL用白光反射谱表征时需要根据反射率谱形状和外延结构, 结合模拟结果推测从谐振腔入射时的反射率. 反之, 也可以通过反射率谱形状和模拟结果推测实际外延结构, 用来评估实际结构与设计结构的偏差.

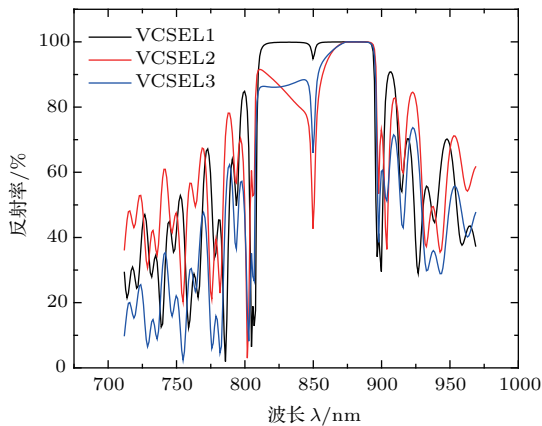


图7 VCSEL从表面入射的反射率谱
Fig. 7. Reflectance spectrum of VCSEL as seen from the surface.

2.3 量子阱增益模拟与波长设计

对于F-P激光器激射波长需要满足光柱波条件, 其他波长的光不能形成光驻波而不能激射, VCSEL激射波长与腔模相对应. 由于VCSEL面积小, 散热性能较差, 有源区温度较高, 量子阱增益谱峰值波长与腔模波长随温度升高红移速率不一致 [13–18], 需要设计量子阱光致发光(PL)峰值波长与F-P腔模波长之间的差值, 使得VCSEL能有较高的功率输出. 利用Pics3D软件模拟了注入载流子浓度为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时增益谱随温度的变化, 如图8所示, 300 K条件下峰值增益达到 5000 cm^{-1} , 增益谱峰值波长随温度的变化率为 0.3 nm/K , 而F-P腔模波长随温度的变化率仅为 0.06 nm/K [14]. 利用Pics3D软件模拟了6 mA电流条件下环境温度300 K时VCSEL的温度特性, 如图9所示,

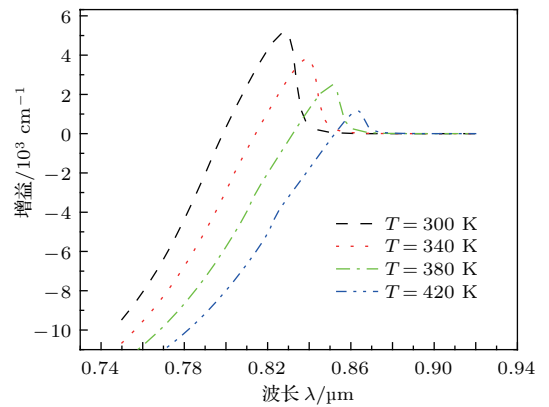


图8 增益谱随温度变化特性
Fig. 8. Gain spectrum varying with temperature.

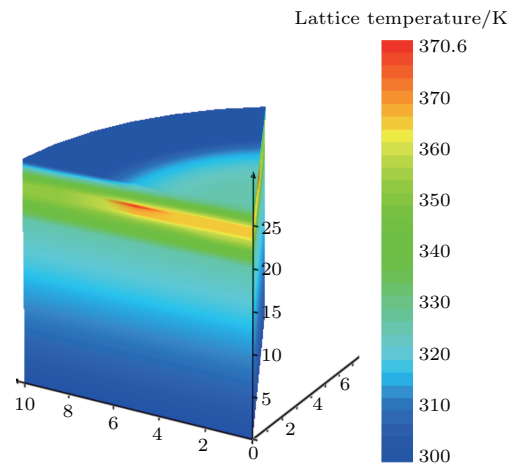


图9 VCSEL内部温度分布模拟结果
Fig. 9. Simulation result of temperature distribution in VCSEL.

量子阱有源区温度达360—370 K, 由于氧化孔径边界处电流较集中, 所以温度最高; 经计算室温下量子阱增益谱峰值波长应该设计在829—832 nm左右, 腔模波长设计在845—847 nm.

3 实验结果与讨论

3.1 VCSEL的外延生长与表征

实验采用Veeco公司的K475i型MOCVD设备进行外延生长, 生长温度为650—700 °C, III族源为三甲基镓(TMGa)、三甲基铝(TMAl)和三甲基铟(TMIn), V族源为砷烷(AsH₃), n型掺杂源为乙硅烷(Si₂H₆), p型掺杂源为四溴化碳(CBr₄). 采用偏(110) 2°的GaAs (100)半绝缘型衬底, 参考图2外延生长了VCSEL; 并且单独生长了DBR和量子阱结构来确认DBR白光反射谱和量子阱PL谱.

利用MOCVD外延生长了cap光学厚度为1/4λ的DBR得到DBR2, 在此基础上沉积120 nm SiO₂得到DBR3, 测完白光反射谱之后刻蚀掉SiO₂和GaAs cap层得到DBR1, 利用Nanometrics RPMblue测得三种结构DBR白光反射谱如图10所示, 测得的白光反射谱是强度值, 图中是归一化结果. 比较图5(a)和图10, 三种结构反射率谱形状的模拟结果与测试结果基本一致, 验证了模拟的正确性. 从谐振腔入射的反射率谱需要根据白光反射谱和外延结构, 结合模拟结果推测得到. 采用RPMblue光致荧光光谱仪对量子阱进行测试, 光源为532 nm激光器, 室温下测得量子阱PL光谱. 通过优化量子阱生长温度和通入的V族元素与III族元素摩尔量之比(V/III), 得到光谱强度和半宽分别随生长温度和V/III的关系, 如图11(a)所示, 综合比较生长温度为660 °C, V/III为40时光谱的峰值强度较强且半宽最小. 图11(b)为优化生长条件后的量子阱PL光谱, 峰值波长为827.5 nm, 外延片波长标准差小于1 nm, 与设计值基本一致; 半高全宽为26.4 nm, 长波长处弱峰波长约870 nm, 与GaAs衬底禁带宽度相对应. VCSEL白光反射谱如图12所示, 可以看出模拟结果与实验结果一致性较好, 同时也说明实际外延结构与设计的结构基本一致, F-P腔模波长847.7 nm, 外延片波长标准差小于2.5 nm, 与设计值基本一致. 由图10和图12可以看出RPMblue测试存在一定的噪声, 若

F-P腔模较浅, 可能会被噪声覆盖, 通过在VCSEL上加入1/4λ的GaAs cap层, 使得腔模加深, 从而很容易判断腔模位置, 避免了测试噪声的影响.

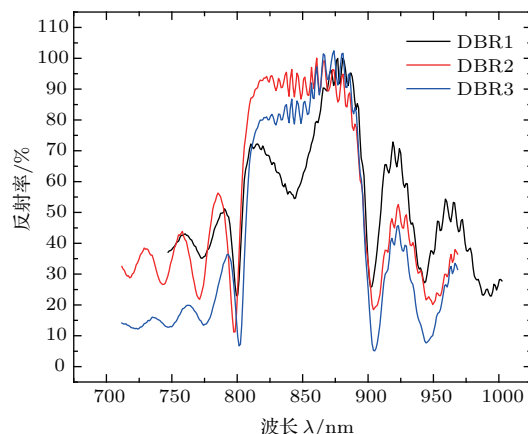


图10 不同结构DBR白光反射谱测试结果
Fig. 10. White light source optical reflection spectrums of DBRs with different structures.

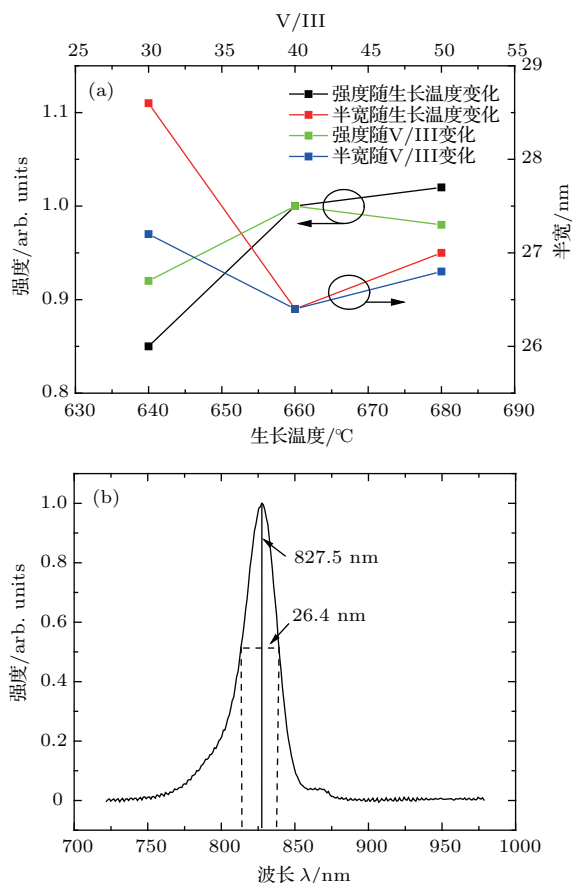


图11 (a) 优化量子阱生长条件实验数据; (b) 优化生长条件后量子阱PL光谱
Fig. 11. (a) The experimental data of optimizing the growth conditions of MQW; (b) photoluminescence spectrum of MQW after optimizing the growth conditions.

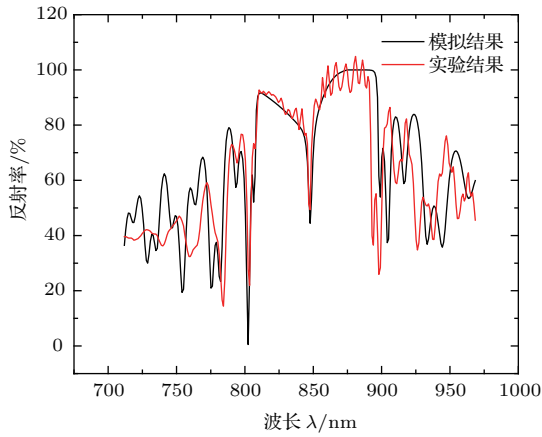


图 12 VCSEL 白光反射谱

Fig. 12. White light source optical spectrum of VCSEL.

3.2 VCSEL 器件的制备与测试

VCSEL 外延生长完成之后, 对外延片进行光刻、刻蚀、湿法氧化、金属溅射等, 制备了氧化孔径为 $7.5 \mu\text{m}$ 的氧化限制性 VCSEL 器件. 测试了外延片的白光反射谱及器件的直流特性、光谱特性和眼图. 氧化层起到了电流限制和光场限制的作用, 图 13(a) 为红外光源电荷耦合器 (CCD) 下氧化孔径图像, 孔径呈圆形, 直径 $7.5 \mu\text{m}$, 图 13(b) 为氧化后 VCSEL 截面的扫描电子显微镜 (scanning electron microscopy, SEM) 图像, 较浅的为 $\text{Al}_{0.90}\text{Ga}_{0.10}\text{As}$ 氧化, 较深的为 $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ 氧化.

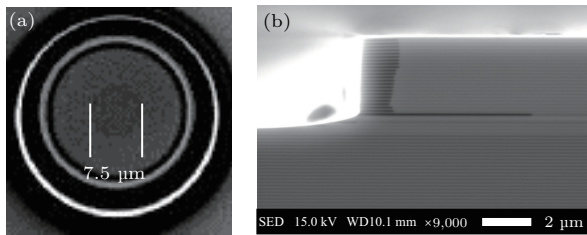


图 13 (a) 红外光源 CCD 下氧化孔径; (b) VCSEL 截面的 SEM 图像

Fig. 13. (a) Oxidation aperture with the infrared light source CCD; (b) SEM images of VCSEL cross section.

器件完成之后沉积了一层 120 nm SiO_2 保护层, VCSEL 单管的光功率-电流-电压 (light power-current-voltage, LIV) 曲线如图 14 所示, 阈值电流为 0.8 mA , 当电流为 13.5 mA 时最大输出功率超过 9 mW , 6 mA 时输出功率达 5 mW , 与文献 [7] 相比提高约 25% , 斜效率为 0.96 W/A . 室温 6 mA 条件下的光谱如图 15 所示, 呈现出 VCSEL 多横模特

性 [6,7], 中心波长 $\lambda_c = 852.3 \text{ nm}$, 比设计值偏长, 可能是外延片波长不均匀性导致, 均方根 (RMS) 谱宽 $\Delta\lambda_{\text{RMS}} = 0.6 \text{ nm}$, 满足高速数据传输标准 [19].

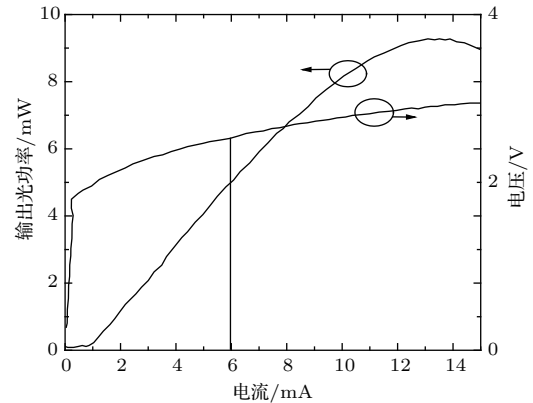


图 14 VCSEL 的 LIV 曲线

Fig. 14. LIV curve of VCSEL.

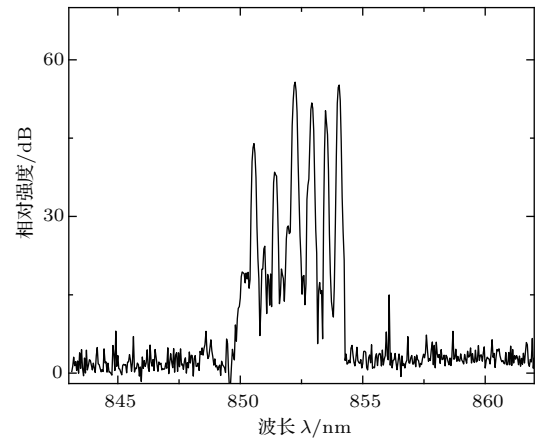


图 15 6.0 mA 测试条件下的光谱图

Fig. 15. Optical spectrum biased at 6.0 mA .

香农定理描述了有限带宽、有随机噪声信道的最大传输速率与信道带宽、信噪比之间的关系:

$$R_{\text{max}} = B \times \log_2(1 + \text{SNR}), \quad (3)$$

R_{max} 为信道的最大传输速率, 与调制方式无关; B 为信道带宽; SNR 为信噪比. 为了便于理论计算, 一般用相对强度噪声 (relative intensity noise, RIN) 来表示输出功率的波动 [10], 相对噪声谱密度峰值的表达式如下:

$$\frac{RIN}{\Delta f} = \frac{16\pi(\Delta\nu)_{\text{ST}}}{\gamma^2}, \quad (4)$$

其中 Δf 为测量仪器的滤波器带宽, $(\Delta\nu)_{\text{ST}}$ 为肖洛-汤斯线宽, γ 为阻尼因子; $(\Delta\nu)_{\text{ST}} \propto 1/P_0$, $\gamma \propto P_0$, 所以 $\frac{RIN}{\Delta f}$ 峰值正比于 $1/P_0^3$, 通过提高输出功率 P_0 , 可以有效减小 RIN , 提高 SNR , 从

而提高 VCSEL 调制速率. 二进制启闭键控 (on-off keying, OOK) 调制速率为 25 Gbit/s 的眼图如图 16(a) 所示, 10%—90% 下降时间为 38.66 ps, 上升时间为 41.54 ps, SNR 为 5.6, 均方根抖动为 1.57 ps, 图 16(b) 给出了 25 GBaud/s 4 级脉冲幅度调制 (4-level-pulse amplitude modulation, PAM-4) 下的眼图, 调制速率达 50 Gbit/s, 眼图较清晰, 表明了 VCSEL 的高速调制性能 [20–25].

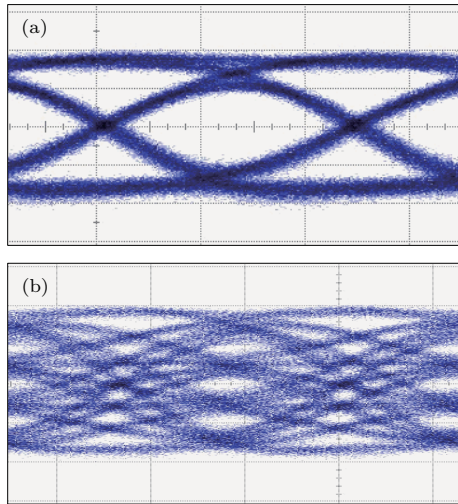


图 16 (a) 25 Gbit/s OOK 调制下的光眼眼图; (b) 50 Gbit/s PAM-4 调制下的光眼眼图 (16.67 ps/div)
Fig. 16. Optical eye diagram of (a) 25 Gbit/s OOK signal and (b) 50 Gbit/s PAM-4 signal (16.67 ps/div).

4 结 论

对比 DBR 从谐振腔入射和从表面入射时反射率谱的差异, 可以看出 cap 层的变化对从表面入射时的反射率谱形状影响较大, 把从表面入射测得的反射率结合外延结构, 推算出从谐振腔入射时的反射率, 为 DBR 和 VCSEL 白光反射谱表征提供依据. 通过模拟量子阱增益谱随温度变化及 6 mA 电流条件下器件内部的温度特性, 设计了室温下量子阱增益谱峰值波长为 829 nm, VCSEL 整体结构 F-P 腔模为 846 nm 的 VCSEL, 采用 MOCVD 分别生长了量子阱和 VCSEL 整体结构, 室温下测得量子阱光致发光峰值波长为 827.5 nm, VCSEL 白光反射谱 F-P 腔模波长 847.7 nm, 与理论设计结果基本一致. 芯片工艺制备了氧化孔径为 7.5 μm 的 VCSEL 器件, 6 mA, 2.5 V 偏置条件下输出功率达 5 mW, 斜效率为 0.96 W/A, PAM-4 调制下传输速率达 50 Gbit/s. 从减小寄生效应提高带宽的角度, 采用多氧化层和低介电常数的苯并环丁烯作

为填充物质等方法, 预计调制速率可以进一步提高.

感谢上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室张文甲老师等提供眼图测试数据.

参考文献

- [1] Saha A K, Islam S 2009 *Opt. Quant. Electron* **41** 873
- [2] Moser P 2015 *Ph. D. Dissertation* (Berlin: Technische Universität Berlin)
- [3] Li T, Ning Y Q, Hao E J, Cui J J, Zhang Y, Liu G Y, Qin L, Liu Y, Wang L J, Cui D F, Xu Z Y 2009 *Sci. China Ser F: Inform. Sci.* **52** 1226
- [4] Wang Y H, Bo B X 2013 *Chin. J. Lumin.* **34** 184
- [5] Blokhin S A, Bobrov M A, Maleev N A, Kuzmenkov A G, Sakharov A V, Blokhin A A, Moser P, Lott J A, Bimberg D, Usinov V M 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 061104
- [6] Moser P, Lott J A, Bimberg D 2013 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **19** 1702212
- [7] Westbergh P, Gustavsson J S, Kögel B, Haglund Å, Larsson A 2011 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **17** 1603
- [8] Feng Y, Hao Y Q, Wang X T, Liu G J, Yan C L, Zhang J B, Li Z J, Li Y 2017 *Chin. Laser J.* **44** 47 (in Chinese) [冯源, 郝永芹, 王宪涛, 刘国军, 晏长岭, 张家斌, 李再金, 李洋 2017 中国激光 **44** 47]
- [9] Kuchta D M, Rylyakov A V, Doany F E, Schow C L, Proesel J E, Baks C W, Westbergh P, Gustavsson J S, Larsson A 2015 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **27** 577
- [10] Coldren L A, Corzine S W, Mašanovi M L 2012 *Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits, Second Edition* (New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.) pp288–298
- [11] Blakemore J S 1982 *J. Appl. Phys.* **53** 123
- [12] Casey H C, Sell D D, Wecht K W 1975 *J. Appl. Phys.* **46** 250
- [13] Zhang Y M, Zhong J C, Zhao Y J, Hao Y Q, Li L, Wang Y X, Su W 2005 *Chin. J. Semicond.* **5** 1024 (in Chinese) [张永明, 钟景昌, 赵英杰, 郝永芹, 李林, 王玉霞, 苏伟 2005 半导体学报 **5** 1024]
- [14] Zhang X, Zhang Y, Zhang J W, Zhong C Y, Huang Y W, Ning Y Q, Gu S H, Wang L J 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 134204 (in Chinese) [张星, 张奕, 张建伟, 钟础宇, 黄佑文, 宁永强, 顾思洪, 王立军 2016 物理学报 **65** 134204]
- [15] Cui M, Han J, Deng J, Li J J, Xing Y H, Chen X, Zhu Q F 2015 *Semicond. Optoelectron.* **36** 38 (in Chinese) [崔明, 韩军, 邓军, 李建军, 邢艳辉, 陈翔, 朱启发 2015 半导体光电 **36** 38]
- [16] Li L, Zhong J C, Zhang Y M, Zhao Y J, Wang Y, Liu W L, Hao Y Q, Su W, Yan C L 2005 *Atca Photon. Sin.* **3** 343 (in Chinese) [李林, 钟景昌, 张永明, 赵英杰, 王勇, 刘文莉, 郝永琴, 苏伟, 晏长岭 2005 光子学报 **3** 343]
- [17] Zhang J W, Ning Y Q, Zhang X, Zeng Y G, Zhang J, Liu Y, Qin L, Wang L J 2013 *Chin. Laser J.* **40** 6 (in Chinese) [张建伟, 宁永强, 张星, 曾玉刚, 张建, 刘云, 秦莉, 王立军 2013 中国激光 **40** 6]

- [18] Chen M, Guo X, Guan B L, Deng J, Dong L M, Shen G D 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5842 (in Chinese) [陈敏, 郭霞, 关宝璐, 邓军, 董立闽, 沈光地 2006 物理学报 **55** 5842]
- [19] IEEE P8023ba 40Gb/s and 100Gb/s Ethernet Task Force, <http://www.ieee802.org/3/ba/public/may08/index.htm>. [2018130]
- [20] Szczerba K, Lengyel T, Karlsson M, Andrekson P A, Larsson A 2016 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **28** 2519
- [21] Wang J Y, Murty M V R, Wang C, Hui D, Harren A L, Chang H H, Feng Z W, Fanning T R, Sridhara A, Taslim S, Cai X L, Chu J, Giovane L 2017 *Proc. SPIE* **10122** 1012202
- [22] Li H, Wolf P, Jia X W, Lott J A, Bimberg D 2017 *Appl. Phys. Lett.* **111** 243508
- [23] Larisch G, Moser P, Lott J A, Bimberg D 2017 *IEEE J. Quantum Electron.* **53** 2400908
- [24] Dalir H, Koyama F 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 091109
- [25] Kao H Y, Chi Y C, Peng C Y, Leong S F, Chang C K, Wu Y C, Shih T T, Huang J J, Kuo H C, Cheng W H, Wu C H, Lin G R 2017 *IEEE J. Quantum Electron.* **53** 8000408

Optimized design and epitaxy growth of high speed 850 nm vertical-cavity surface-emitting lasers

Zhou Guang-Zheng¹⁾ Yao Shun^{1)†} Yu Hong-Yan¹⁾ Lü Zhao-Chen¹⁾ Wang Qing¹⁾
 Zhou Tian-Bao²⁾ Li Ying¹⁾ Lan Tian¹⁾ Xia Yu²⁾ Lang Lu-Guang¹⁾ Cheng Li-Wen³⁾
 Dong Guo-Liang²⁾ Kang Lian-Hong²⁾ Wang Zhi-Yong¹⁾

1) (Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

2) (Sino-semiconductor Photonics Integrated Circuit Co., Ltd., Taizhou 225599, China)

3) (College of Physics science and Technology and Institute of Optoelectronic Technology, Yangzhou University, Yangzhou 225002, China)

(Received 29 November 2017; revised manuscript received 12 March 2018)

Abstract

Using transfer matrix method and TFCalc thin film design software, the reflectance spectrum of distributed Bragg reflector (DBR) and vertical cavity surface emitting laser (VCSEL) are simulated. The reflectance spectra from the cavity and surface are compared with each other, thus providing the basis for white light source (WLS) optical reflectance spectrum of the VCSEL epitaxial wafer. When using WLS to characterize VCSEL wafer, it is necessary to combine the simulation results and the shape of optical reflectance spectrum to speculate the reflectance seen from the cavity. The influences of different cap layers on the reflectance of DBRs are discussed theoretically and experimentally. With a $1/4\lambda$ GaAs cap layer, the reflectance reaches up to 97.8% seen from the cavity. This design can make the wavelength of the VCSEL etalon picked easily because of avoiding the influence of test noise.

The active region has higher heat accumulation due to the small area and poor thermal conductivity. The characteristics of the gain spectrum of InGaAs/AlGaAs strained quantum well (QW) under different temperatures and the temperature distribution in VCSEL are simulated by Crosslight software. The gain-to-cavity wavelength detuning is used to improve the slope efficiency and the temperature stability. The temperature in active region ranges from 360 K to 370 K. The gain peak wavelength and the Fabry-Perot cavity wavelength are designed in the ranges of 829–832 nm and 845–847 nm, respectively. Epitaxial wafer with top-emitting VCSEL structure grown by metal-organic chemical vapor deposition is characterized. The room temperature photoluminescence peak is at 827.5 nm and the etalon cavity wavelength measured by optical reflectance is 847.7 nm, which are consistent with designed values.

The oxide restricted VCSELs with 7.5 μm oxide aperture are fabricated. The image of the infrared light source CCD shows that the oxide aperture is circular. A passivation layer of 120 nm SiO_2 is finally deposited to insulate water vapor. The threshold current is 0.8 mA, and the maximum output power reaches up to 9 mW at 13.5 mA. The optical spectrum at 6.0 mA reveals multiple transverse modes. The center wavelength is 852.3 nm and the root mean square (RMS) spectrum width is 0.6 nm, meeting the high-speed Datacom standards. Shannon theory indicates that the maximum data rate is not only proportional to bandwidth but also related to signal-to-noise ratio (SNR). It is effective to reduce relative intensity noise and enhance the SNR by increasing output power. From the eye diagram of 25 Gbit/s on-off key VCSEL, it is demonstrated that fall time is 38.66 ps, rise time is 41.54 ps, SNR is 5.6, and jitter RMS is 1.57 ps. Clear eye opening is observed from eye diagram of 25GBaud/s PAM-4 VCSEL, which indicates the qualified 50 Gbit/s high speed performance.

Keywords: vertical cavity surface emitting lasers, distributed Bragg reflector, quantum well, metal-organic chemical vapor deposition

PACS: 42.55.Px, 42.55.Sa, 73.21.Fg

DOI: 10.7498/aps.67.20172550

† Corresponding author. E-mail: yaoshun_bjut@126.com