

4 × 15 Gbit/s 850 nm 垂直腔面发射激光器阵列

吕朝晨¹, 王青^{1*}, 尧舜¹, 周广正¹, 于洪岩¹, 李颖¹, 郎陆广¹, 兰天¹,
张文甲³, 梁辰余³, 张杨², 赵凤春², 贾海峰², 王光辉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, 江苏 泰州 225300;

³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, 上海 200030

摘要 采用金属有机物化学气相沉积设备生长 InGaAs/AlGaAs 应变多量子阱有源区和双氧化限制层的外延整体结构, 利用断点监控电感耦合等离子体刻蚀技术、精确湿法氧化控制技术 etc 芯片制造技术, 实现了氧化孔径为 7 μm、相邻单元间隔为 250 μm 的高速调制 4 × 15 Gbit/s 850 nm 垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 阵列。测试得到了 VCSEL 阵列的静态特性和动态特性: 阈值电流为 0.7 mA, 斜效率为 0.8 W/A; 在 6 mA 工作电流下, 工作电压为 2.3 V, 光功率为 4.5 mW。在 15 Gbit/s 调制速率下, 眼图轮廓清晰, 线迹很细, 抖动较小且无明显串扰。对比阵列各单元在 15 Gbit/s 调制速率下眼图的上升时间、下降时间、信噪比、均方根抖动等相关参数, 结果表明其动态性能的一致性良好。利用箱线图分析得出外延片上 VCSEL 器件性能的一致性良好, 能够满足批量生产的要求。

关键词 激光器; 激光光学; 高速调制垂直腔面发射激光器阵列; 金属有机物化学气相沉积; 外延结构; 芯片工艺; 静态和动态特性

中图分类号 TN248.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0514001

4 × 15 Gbit/s 850 nm Vertical Cavity Surface Emitting Laser Array

Lü Zhaochen¹, Wang Qing¹, Yao Shun¹, Zhou Guangzheng¹, Yu Hongyan¹,
Li Ying¹, Lang Luguang¹, Lan Tian¹, Zhang Wenjia³, Liang Chenyu³,
Zhang Yang², Zhao Fengchun², Jia Haifeng², Wang Guanghui², Wang Zhiyong¹

¹Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

²Sino Semiconductor Photonic Integrated Circuit Co., Ltd., Taizhou, Jiangsu 225300, China;

³National Key Laboratory of Regional Fiber Communication Network and New Optical Communication System, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China

Abstract A high-speed modulation of 4 × 15 Gbit/s 850 nm vertical cavity surface emitting lasers (VCSEL) array with oxidation aperture of 7 μm and adjacent unit interval of 250 μm is demonstrated. Its epitaxy structure has a strained multiple quantum well active region of InGaAs/AlGaAs and a double oxide confinement layer grown with the metal organic chemical vapor deposition (MOCVD) apparatus. And in the chip fabrication process, a series of technologies are used, such as the breakpoint monitor inductively coupled plasma etching and the wet oxidation precise control. The static and dynamic characteristics of the VCSEL array are measured. For the single VCSEL cell, the threshold current and slop efficiency are 0.7 mA and 0.8 W/A, respectively. And the optical power reaches 4.5 mW at the working current of 6 mA, meanwhile the voltage is 2.3 V. Modulated by a 15 Gbit/s non-return zero code (NRZ), VCSEL cells perform eye diagrams with clear profiles, fine stitches, tiny jitter and few crosstalk. For the eye diagram relative parameters, such as rise time, fall time, signal-to-noise ratio, root mean square jitter and so on, some comparisons are made among VCSEL cells in the array. The results indicate that the

收稿日期: 2017-10-10; 收到修改稿日期: 2017-12-22

作者简介: 吕朝晨(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事光通信光感测 VCSEL 芯片工艺方面的研究。

E-mail: lvzhaochen@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 尧舜(1979—), 男, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事半导体化合物外延生长方面的研究。

E-mail: yaoshun @ bjut.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: wangqing@ bjut.edu.cn

consistency of the dynamic characteristics is good. In addition, the consistency of device static characteristics among the VCSEL cells in the whole wafer is analyzed through the method of boxplot. All characteristics show a high consistency, which can meet the requirement of mass-production.

Key words lasers; laser optics; high-speed modulation vertical cavity surface emitting laser array; metal organic chemical vapor deposition; epitaxial structure; chip technology; static and dynamic characteristics

OCIS codes 140.7260; 250.7260; 060.4510; 190.5970

1 引 言

随着云计算、虚拟/增强现实技术、智慧城市、人工智能、4K 显示等带宽密集型产业的不断发展,高清显示和快速数据传输的需求也日益增加。早期的模拟视频接口由于传输速率、能耗等诸多限制而逐步被基于高速光纤传输系统的高清数字接口所替代。随着配备高清晰多媒体接口(HDMI)的笔记本式计算机、录像机及数码相机等的数量越来越多,HDMI 的市场需求将空前扩大。最新的 HDMI 2.1 标准已经将传输带宽提升到了 48 Gbit/s。为了满足更大的传输带宽要求,以垂直腔面发射激光器(VCSEL)为发射光源的并行光传输 HDMI 得到了广泛应用。VCSEL 是一种激光垂直于衬底面射出的半导体激光器,与 LED 和法布里-珀罗(F-P)激光器、分布反馈(DFB)激光器相比,其具有体积小、圆形输出光斑、单纵模输出、阈值电流小、价格低廉、易集成为大面积阵列等优点^[1],广泛应用于光通信、光互连、光存储等领域^[2]。目前,国内外高速 VCSEL 的研究多集中在优化外延结构^[3-4]、改善激光器内部响应和优化外部寄生响应等方面^[5-6]。北京工业大学已报道实现了 17 GHz VCSEL 器件的研制^[7]。在国内市场上,光通信行业对高速 VCSEL 阵列的需求旺盛,然而国产调制速率在 14 Gbit/s 以上的高速 850 nm VCSEL 阵列尚未见报道。这主要是因为 VCSEL 的外延层数多,组分和掺杂变化复杂,而国内的材料生长技术尚不成熟,需要依靠国外进口外延片,导致设计开发周期长。

本文介绍了采用金属有机物化学气相沉积(MOCVD)设备生长 InGaAs/AlGaAs 应变多量子阱有源区和双氧化限制层的外延整体结构,利用断点监控电感耦合等离子体刻蚀技术、精确湿法氧化控制技术 etc 芯片制造技术制备了高速调制 4×15 Gbit/s 850 nm VCSEL 阵列。该阵列各发光单元的阈值电流为 0.7 mA,斜效率高达 0.8 W/A,在 6 mA 的工作电流下,工作电压为 2.3 V,光功率为 4.5 mW。在非归零(NRZ)码 15 Gbit/s 的调制速率下,信号在多模光纤中传输 1.5 m 后的眼图轮廓清

晰,抖动较小。同时还讨论了外延片上 VCSEL 器件性能的一致性问题。

2 VCSEL 的外延生长及芯片制造工艺

2.1 VCSEL 的外延结构与外延生长

VCSEL 的外延结构如图 1 所示,由下到上依次为衬底、n 型接触层、n 型分布布拉格反射镜(DBR)层、量子阱层、p 型 DBR 层、p 型接触层。其中 p 型 DBR 层中有两层是高铝组分的 AlGaAs 层。两层氧化限制层都采用了 30 nm 的 $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$,利用双氧化层结构降低了氧化层引入的电容,从而减小了器件的电子寄生参数^[8]。经计算可知,当台面尺寸为 $22 \mu\text{m}$,氧化孔径为 $7 \mu\text{m}$ 时,单氧化层结构引入的电容为 111.39 fF,双氧化层结构引入的电容为 87.29 fF。VCSEL 激光器根据改变 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 中铝的组分来改变材料的折射率。通过两种铝组分的 AlGaAs 以多组周期循环的方式形成 DBR,n 型 DBR 的反射率接近 100%,作为谐振腔的全反镜;上 DBR 的反射率相对较低,作为谐振腔的出射镜。

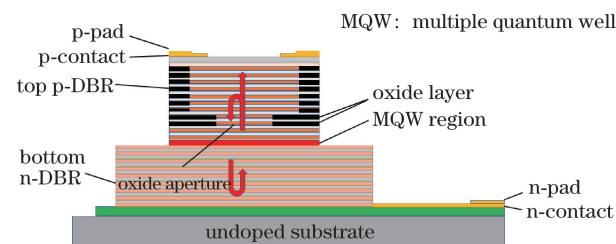


图 1 850 nm VCSEL 结构示意图

Fig. 1 Schematic of 850 nm VCSEL structure

在 VCSEL 外延结构的生长过程中,本课题组使用 Veeco 公司的 TurboDisc K475i As/P MOCVD 系统,以 4 in(10.16 cm)的半绝缘 GaAs(110)作为外延材料的生长衬底,以三甲基镓(TMGa)、三甲基铝(TMAI)、三甲基铟(TMIIn)作为 III 族源,砷烷(AsH_3)作为 V 族源,硅烷(SiH_4)作为 n 型掺杂源,四溴化碳(CBr_4)作为 p 型掺杂源。在生长过程中,为了防止衬底的外延缺陷或杂质向下限制层扩散,确定缓冲层 GaAs 的厚度为 500 nm。DBR 中的 AlGaAs 和有源区的 InGaAs 在外延生长时需要精确控制生长温度、气体流量、时间等参数,使各元素组分

满足设计要求^[9]。在有源区生长过程中,采用 5 对 4 nm InGaAs/6 nm AlGaAs 应变量子阱结构,并单独生长了限制层和量子阱结构来确认量子阱的光致发光光谱特性。图 2(a)所示为 25 °C 下采用 Nanometrics 公司的 RPM blue 光致荧光光谱仪对量子阱进行测试得到的光致发光谱,光源为 532 nm 激光器,量子阱的峰值波长约为 830 nm,长波侧的弱峰是由 GaAs 衬底引起的。VCSEL 在工作过程中产生的热量通过红移到达 850 nm 附近,具有较宽的工作温度范围,图 2(b)所示为外延片的白光反射谱,高反射带宽为 89.7 nm, F-P 腔模明显,波长为 849.7 nm。

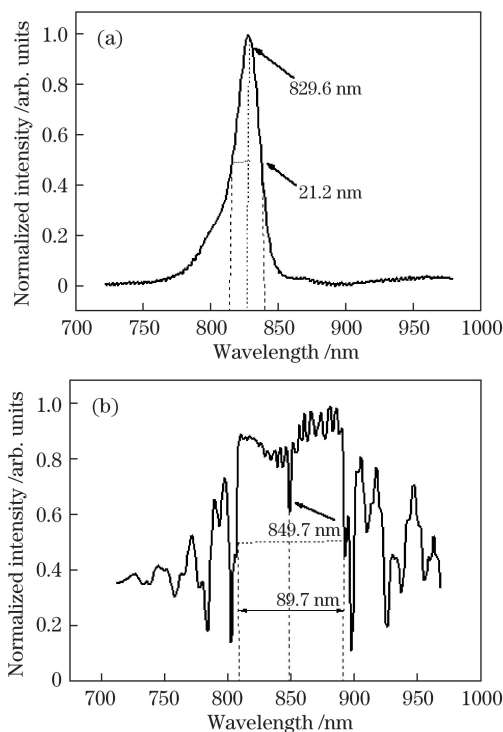


图 2 (a) 25 °C 时有源区的光致发光谱;
(b) VCSEL 的白光反射谱

Fig. 2 (a) PL spectrum of active region at 25 °C ;
(b) white light reflection spectrum of VCSEL

通过精确控制 DBR 中 AlGaAs 层的铝组分实现高低折射率层材料的周期分布,从而得到高反射率的谐振腔反射镜,高铝组分氧化层及周围外延层必须降低铝组分的波动,以实现铝组分的精确控制,这样才能保证湿法氧化制备氧化层时的氧化深度一致,氧化速率稳定。

2.2 VCSEL 芯片的制造工艺

与异面电极结构相比,VCSEL 列阵的同面电极结构芯片的制造工艺更复杂,其工艺过程包括 10 次清洗、9 次光刻、4 次干法刻蚀、4 次金属工艺、1 次湿法氧化工艺。在 VCSEL 台面刻蚀过程中引入拥有

断点监控功能的刻蚀设备——电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)来保证刻蚀的精确程度。在刻蚀第一个台面时,通过监控 Ga 元素的原子光谱强度的变化来实时判断刻蚀深度。此时,采用台阶仪测量外延片上 5 个位置的刻蚀深度,结果如表 1 所示,刻蚀深度范围在 3500~3700 nm 之间,满足工艺要求。由于需要进行多次台面刻蚀,外延片不同位置的台面刻蚀深度会直接影响芯片器件的性能参数,因此,保证外延片的刻蚀均匀性至关重要。在刻蚀工艺方面,为了保证外延片的刻蚀均匀性,通过改变电感耦合等离子体(ICP)刻蚀时外延片背面氦气的压力来调节干法刻蚀过程中外延片不同位置处的刻蚀速率,刻蚀速率随着背氦压力增加而减小;当背氦压力为 66.661 Pa 时,中间的刻蚀速率高于边缘;随着背氦压力增加,中间的刻蚀速率低于边缘;当背氦压力为 199.983 Pa 时,外延片各部分的刻蚀均匀性最好。

表 1 VCSEL 第一台面不同位置处的刻蚀深度
Table 1 Etching depth of different positions of first mesa in VCSEL

Wafer position	Upper	Bottom	Middle	Left	Right
Etching depth /nm	3625.4	3607.7	3577.8	3645.4	3699.8

在金属电极工艺中,N 面电极金属膜和 P 面电极金属膜的制作主要有两种方式:电子束蒸发镀膜和磁控溅射镀膜。N 面金属电极材料为 AuGeNi 合金,P 面金属电极材料为 Ti/Pt/Au 合金。其中,N/P 面金属电极都是在氮气氛围下,进行不同温度和时间的快速退火处理,以形成良好的欧姆接触。

湿法氧化工艺是 VCSEL 芯片制造中最关键的工艺,外延结构中的高铝氧化层经过湿法氧化工艺后变为低折射率、高绝缘性的 Al₂O₃,形成有效的光场和电场限制。电流从正极电极注入,通过氧化孔径注入到有源区,满足受激辐射条件后产生光增益,产生的光子经上下 DBR 反射,并在上下 DBR 形成的谐振腔中形成稳定的驻波,使受激辐射不断增强,激光光从反射率较小的 DBR 出射,稳定地输出光波。因此,氧化孔径的大小和形状会影响 VCSEL 器件的很多性能参数,如 VCSEL 的阈值电流、光功率、串联电阻、-3 dB 带宽等。尤其是 VCSEL 列阵,要求各发光单元的氧化孔径要有非常高的均匀性,才能保证列阵中各发光单元性能的一致。实施湿法氧化时,为保证湿法氧化整片的均匀性,氧化前先加热烘烤氧化腔室 15 min,然后再放入样片进行

湿法氧化,通过控制氮气的流量、腔室内的加热温度、加热水的温度来控制氧化速率,保证氧化速率的稳定,从而达到用时间精准控制氧化孔径大小的目的;同时采用红外光源的 CCD 来实时观察氧化情况,保证氧化工艺的成功率^[10]。统计样本片的氧化孔径时应遵循以下原则:将掩模板分为多个方格单元,如图 3(a)所示;在图 3(b)所示的每个方格单元中,取左上角处的第一颗芯片作为统计样本。按照

此统计原则可以给出如图 3(c)、(d)所示的红外光源 CCD 下氧化孔的分布图,氧化孔径的精度可达 $\pm 1 \mu\text{m}$ (排除外延片边缘不稳定的部分),氧化孔的形状近似为圆形。经过一系列复杂的半导体工艺后,再进行测试、解理,最终得到 1×4 VCSEL 列阵。其实物图如图 4 所示,器件为同面电极结构,各发光单元的间距为 $250 \mu\text{m}$,第一台面尺寸为 $22 \mu\text{m}$,氧化限制孔径为 $7 \mu\text{m}$ (红外光源 CCD 可见)。

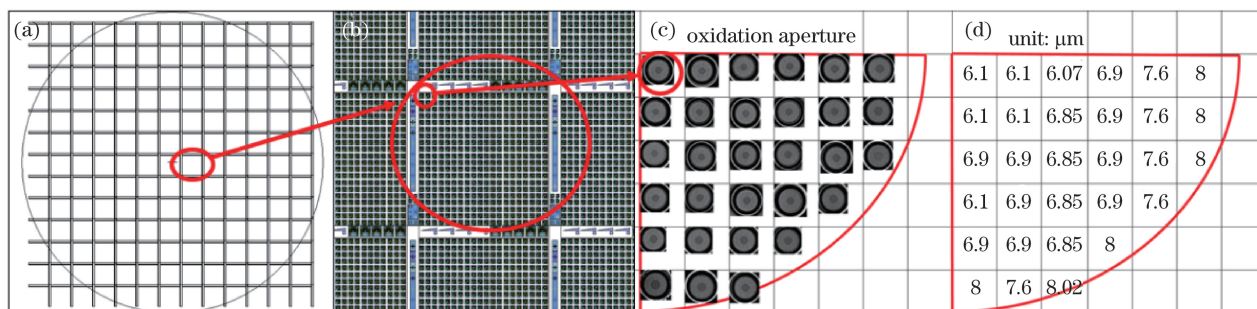


图 3 (a)掩模板上的方格单元;(b)方格单元中芯片的排列方式;(c)红外光源 CCD 下外延片各单元氧化孔的分布;(d)外延片各单元氧化孔的孔径

Fig. 3 (a) Grid cells on the mask; (b) arrangement of chips in the grid cells; (c) oxidation aperture distribution in each cell on the wafer under the infrared light source CCD; (d) size of oxidation aperture on each cell of the wafer

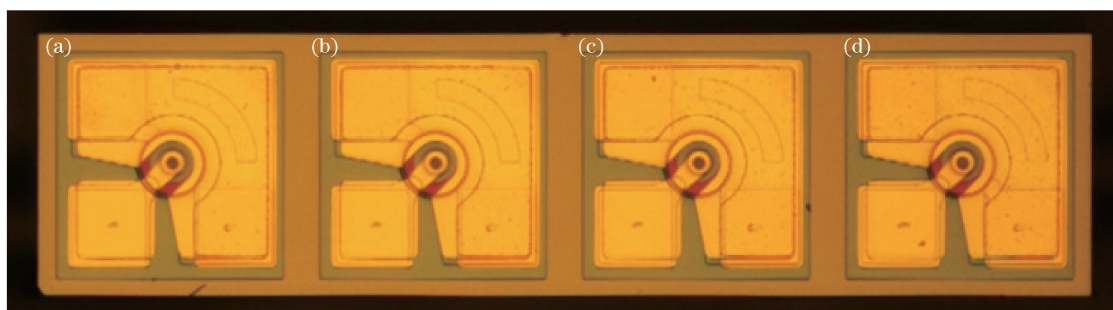


图 4 1×4 VCSEL 列阵实物图

Fig. 4 Images of 1×4 VCSEL array

3 VCSEL 器件的静态性能和动态性能

3.1 VCSEL 的静态特性测试

高速 VCSEL 器件的静态特性和动态特性表征了 VCSEL 器件的整体性能。在静态特性测试方面,采用 VCSEL 静态测试系统,该系统有 2 个铍铜正负极探针,测试时调节探针控制器,使探针接触到 VCSEL 芯片的正负电极,通过调节电流源注入 $0 \sim 15 \text{ mA}$ 的电流,由积分球接收激光并得出测试结果。

分别对 1×4 VCSEL 列阵的 4 个子单元进行了测试,由测试系统得出 $P-I-V$ 特性曲线及 VCSEL 光谱图,如图 5 所示。图中 P1~P4 分别是图 4(a)~(d)中 VCSEL 列阵的 4 个子单元。从图中可以得到阈值电流、光功率、斜效率、工作电压及光谱等静态特

性参数, $P-I-V$ 曲线在 $0 \sim 6 \text{ mA}$ 的工作电流下基本重合,4 个子单元的静态特性参数大体保持一致阈值电流为 0.7 mA ,在 6 mA 工作电流下,光功率为 4.5 mW ,斜效率为 0.8 W/A ,工作电压为 2.3 V 。当电流为 13 mA 时,4 个单元的峰值功率均超过 7.5 mW 。VCSEL 单管的远场光斑与发散角如图 6 所示。从图中可发现远场光斑呈现出优良的圆形对称高斯光束的特点^[11]。根据国际标准 IEEE 802.3ba 中关于 VCSEL 传输的标准可知,其静态性能满足光纤通信光源的基本要求。

采用 IPT7000 点测机对外延片进行在片测试,点测机扫描 VCSEL 芯片(共计 22232 颗),测试驱动电流为 6 mA ,得出所有芯片的相关性能参数。同时采用箱线图对所有 VCSEL 芯片的阈值电流、功

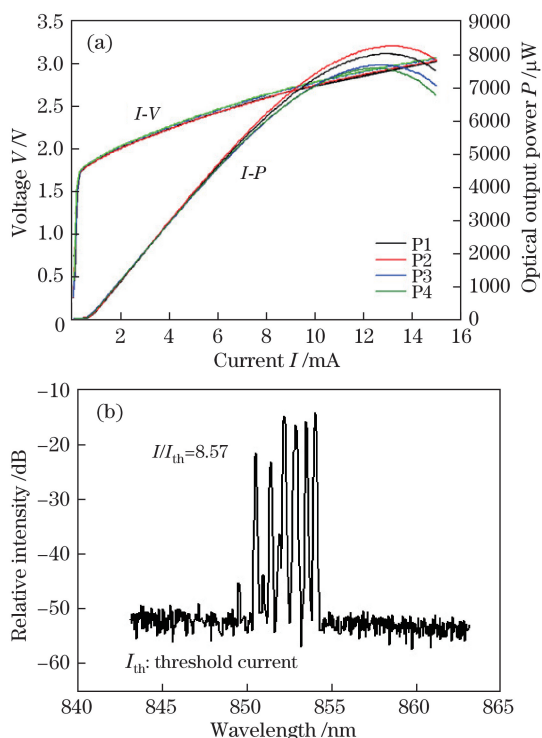


图 5 (a) 1×4 VCSEL 列阵 P - I - V 曲线; (b) VCSEL 的光谱
Fig. 5 (a) P - I - V curves of 1×4 VCSEL array;
(b) spectrum of VCSEL

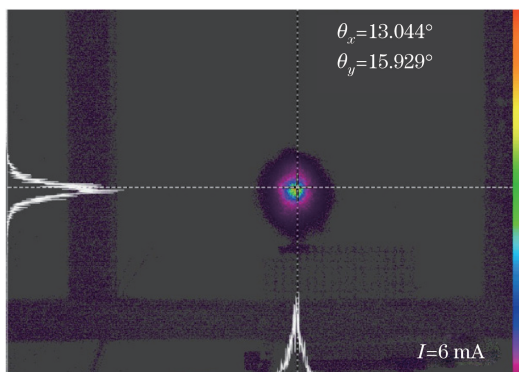


图 6 VCSEL 单管的远场光斑与发散角
Fig. 6 Far field spot and divergence angle of single VCSEL

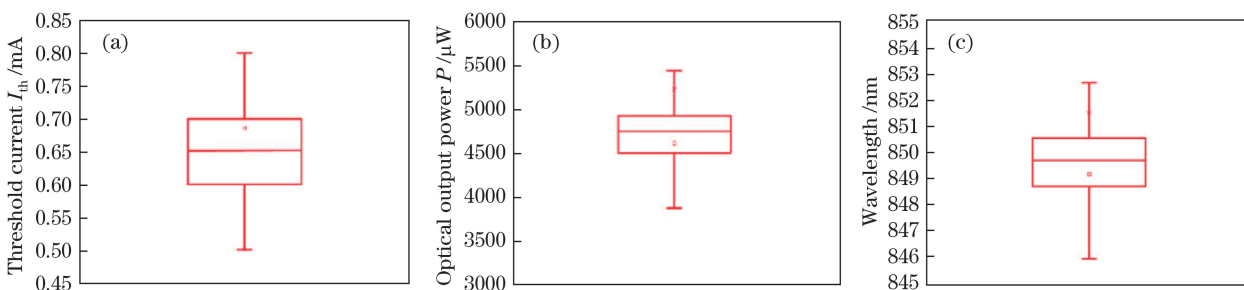


图 7 (a) VCSEL 阈值电流的箱线图; (b) 6 mA 驱动电流下 VCSEL 光功率的箱线图;
(c) 6 mA 驱动电流下 VCSEL 波长的箱线图

Fig. 7 (a) Box diagram of VCSEL threshold current; (b) box diagram of VCSEL optical output power at driving current of 6 mA; (c) box diagram of VCSEL wavelength at driving current of 6 mA

率、中心波长进行统计分析。由图 7(a)可知,该外延片 VCSEL 的阈值电流分布下四分位线为 0.6 mA,上四分位线为 0.7 mA,最大值和最小值分别为 0.8 mA 和 0.5 mA,VCSEL 阈值电流分布在 0.5~0.8 mA 范围内,且有半数集中在 0.6~0.7 mA 之间。由此可见阈值电流分布得相当均匀,而这正是得益于氧化孔径尺寸的良好均匀性。由图 7(b)、(c)可知,在 6 mA 驱动电流下,VCSEL 的光功率集中分布在 4~5 mW 之间,中心波长为 848~852 nm。由箱线图分析结果可知该外延片 VCSEL 器件的静态特性参数分布相对均匀,且能满足对光纤通信光源的基本要求。

3.2 VCSEL 的动态特性测试

数字光纤通信系统中的 VCSEL 通常都在大信号状态下工作,因此对 VCSEL 大信号的测试成为考察器件能否满足通信需要的标准测试。采用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搭建的脉冲大信号高速测试平台进行动态特性测试,如图 8 所示。将安捷伦公司的任意波形发生器 AWG-M8195A 产生的 NRZ 码排列成伪随机比特序列,将美国 GGB 公司的 40A-SG-100DP 高频探针加载到 VCSEL 器件上产生调制激光,经 1.5 m 多模光纤传输后由高速光电探测器 Newfocus1484-A-50 转换回电信号发送到数字采样示波器 86100D 上,并以时钟信号作为示波器的外触发,使其与比特周期同步,此时示波器上就会显示出眼图^[12]。测试过程中,器件 4 个子单元的偏压为 2.5 V,调制信号幅度为 700 mV,耦合入光纤的光功率分别为 -0.5, -0.3, -1, -0.4 dBm。调制速率为 15 Gbit/s 的信号在多模光纤中传输 1.5 m 后的光眼图(“背对背”传输)如图 9 所示。

从图 9 中可以看出,眼图“0”和“1”的电平相对较细,信号过冲、下冲略小,取 10%~90% 的上升、

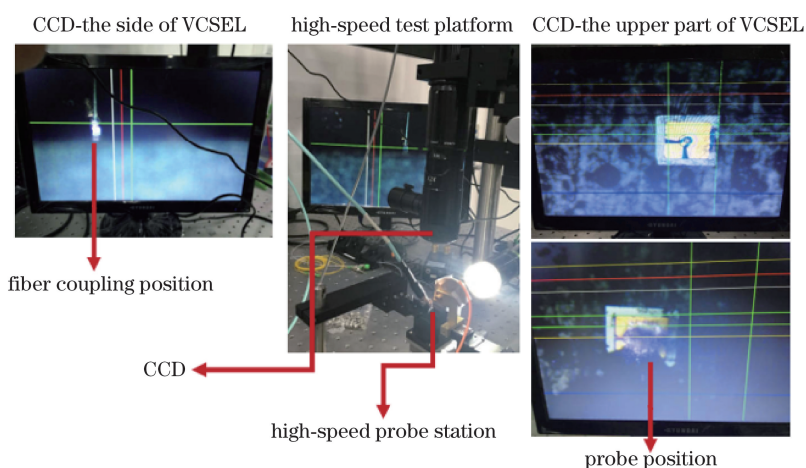


图 8 脉冲大信号高速测试平台

Fig. 8 High-speed test platform with pulse large signal

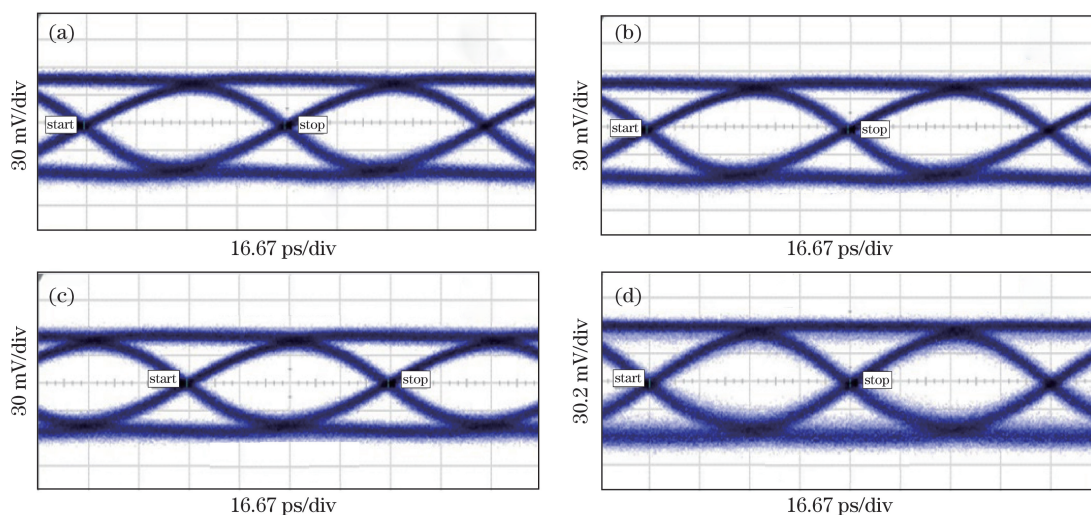


图 9 室温下调制速率为 15 Gbit/s 的信号在多模光纤中传输 1.5 m 后的四通道光眼眼图。

(a) P1 通道; (b) P2 通道; (c) P3 通道; (d) P4 通道

Fig. 9 Four-channel optical eye diagrams after signal with modulation rate of 15 Gbit/s transmission in multimode fiber for 1.5 m. (a) P1 channel; (b) P2 channel; (c) P3 channel; (d) P4 channel

下降时间(约为 65 ps),信号信噪比约为 7,均方根抖动约为 1.8 ps,眼图幅度约为 100 mV,眼高约为 50 mV,眼图轮廓清晰,“眼睛”张开,且无明显串扰,说明 VCSEL 器件在 15 Gbit/s 调制速率下“背对背”传输性能可靠。在高速性能一致性方面,各子单元相关眼图的参数在 15 Gbit/s 调制速率下的一致性优异,能满足 1×4 VCSEL 列阵高频性能一致性的要求。

4 结 论

成功实现了高速 4×15 Gbit/s 850 nm VCSEL 列阵的制备。该列阵各发光单元的阈值电流为 0.7 mA,斜效率高达 0.8 W/A,在 6 mA 工作电流下,工作电压为 2.3 V,光功率为 4.5 mW。在 15 Gbit/s

调制速率下,眼图轮廓清晰,中间无噪点。

目前,器件的带宽还受电极间的寄生电容、光子寿命、外延结构和掺杂导致的串联电阻较大等因素的限制。未来在保证器件工作可靠性和稳定性的基础上,可从器件的内部响应和外部寄生响应两方面着手,持续不断设计新的外延结构,改进芯片的制造工艺。比如:优化应变量子阱的结构;改善 DBR 的结构,对上 DBR 进行浅刻蚀,减小光子寿命,提高调制带宽;采用苯并环丁烯(BCB)等低介电常数填充介质作为钝化层,减小电极间的寄生参数等。

致谢 感谢江苏华芯半导体科技有限公司芯片部的朱凯华、单杰、韩浩、吴在晶、王健军等工程师在芯片制造工艺上的帮助与支持,以及外延部的夏

宇、周天宝等工程师在外延片生长工艺上提供的帮助与支持。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为本实验提供脉冲大信号高速测试平台。

参 考 文 献

- [1] Gustavsson J S, Larsson A, Haglund A, *et al.* High speed 850 nm VCSELs for >40 Gb/s transmission[C]//2013 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference. [S.l.]: IEEE, 2013: OTh4H.4.
- [2] Dyball H. Bandwidth boost for 850 nm VCSELs[J]. Electronics Letters, 2010, 46(13): 875.
- [3] Kuchta D M, Pepeljugoski P, Kwark Y. VCSEL modulation at 20 Gb/s over 200 m of multimode fiber using a 3.3 V SiGe laser driver IC[C]//Advanced Semiconductor Lasers and Applications/Ultraviolet and Blue Lasers and Their Applications/Ultralong Haul DWDM Transmission and Networking/WDM Components. [S.l.]: IEEE, 2001: 7068958.
- [4] Westbergh P, Gustavsson J S, Haglund A, *et al.* High-speed, low-current-density 850 nm VCSELs[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2009, 15(3): 694-703.
- [5] Westbergh P, Gustavsson J S, Kogel B, *et al.* 40 Gbit/s error-free operation of oxide-confined 850 nm VCSEL[J]. Electronics Letters, 2010, 46(14): 1014-1016.
- [6] Westbergh P, Haglund E P, Haglund E, *et al.* High-speed 850 nm VCSELs operating error free up to 57 Gbit/s[J]. Electronics Letters, 2013, 49(16): 1021-1023.
- [7] Dong J, Hu S, Lü B S, *et al.* The development of high speed 850 nm vertical cavity surface emitting laser[C]//Proceedings of the 14th National MOCVD Academic Conference. 2016.
董建, 胡帅, 吕本顺, 等. 高速 850 nm 垂直腔面发射激光器的研制[C]//第十四届全国 MOCVD 学术会议论文集. 2016.
- [8] Ou Y, Gustavsson J S, Westbergh P, *et al.* Impedance characteristics and parasitic speed limitations of high-speed 850-nm VCSELs[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(24): 1840-1842.
- [9] Feng Y, Hao Y Q, Wang X T, *et al.* Optimization and preparation of 850 nm vertical cavity emission laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 0301005.
冯源, 郝永芹, 王宪涛, 等. 850 nm 垂直腔面发射激光器结构优化与制备[J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0301005.
- [10] Choquette K D, Geib K M, Ashby C I H, *et al.* Advances in selective wet oxidation of AlGaAs alloys[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1997, 3(3): 916-926.
- [11] Cui J J, Dong N N, Xu J G, *et al.* Beam quality of high power vertical cavity surface emitting laser single device[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(s1): s102007.
崔锦江, 董宁宁, 徐建根, 等. 垂直腔面发射半导体激光器单管的光束质量研究[J]. 中国激光, 2015, 42(s1): s102007.
- [12] Zhu N H. Microwave design and characterization of optoelectronics devices and packaging[M]. Beijing: Science Press, 2007.
祝宁华. 光电子器件微波封装和测试[M]. 北京: 科学出版社, 2007.