

氧化型 VCSELs 的可靠性及失效分析

张玉岐,赵佳*

(山东大学 激光与红外系统教育部重点实验室,山东 青岛 266237)

摘要:为了研究氧化型垂直腔表面发射激光器(VCSELs)的可靠性寿命模型和失效模式,对含有 AlGaAs/GaAs 量子阱的氧化型 VCSELs 进行了不同应力条件的老化实验,使用外推函数求得 VCSELs 的失效寿命,进而求得了不同应力条件下的中值寿命,并结合 VCSELs 的结温获得准确的寿命模型。最后,采用透射电子显微镜(TEM)分析了氧化型 VCSELs 的主要失效特征和原因。测试与试验结果表明:含有 AlGaAs/GaAs 量子阱的氧化型 VCSELs 的寿命模型参数激活能为 0.55 eV,电流加速因子为 2.01;氧化型 VCSELs 失效原因主要与具有内在应力的氧化层相关。

关键词:氧化型垂直腔表面发射激光器;可靠性;寿命;激活能;失效模式;氧化层

中图分类号:TN365 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2024)01-0060-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.01.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Reliability and failure analysis of oxide VCSELs

ZHANG Yuqi, ZHAO Jia*

(Key Laboratory of Laser&Infrared System, Ministry of Education, Shandong University, Qingdao Shandong 266237, China)

Abstract: In order to study the reliability lifetime model and failure mode of oxidized vertical cavity surface-emitting lasers (VCSELs), aging experiments are performed on oxidized VCSELs containing AlGaAs/GaAs quantum wells under different stress conditions. The failure lifetime of VCSELs under different stress conditions is obtained using extrinsic function, and then the median lifetime under different stress conditions is obtained. Combined with the junction temperature of VCSELs, an accurate lifetime model is obtained. Finally, the main failure characteristics and causes of oxidized VCSELs are analyzed by transmission electron microscopy (TEM). The test results show that the lifetime model parameter activation energy of oxidized VCSELs containing AlGaAs/GaAs quantum wells is 0.55 eV and the current acceleration factor is 2.01. The failure reason of oxidized VCSELs is mainly related to the oxide layer with internal stress.

Key words: oxide vertical cavity surface emitter lasers, reliability, life, energy activation, failure mode, oxide layer

0 引言

氧化型垂直腔表面发射激光器(VCSELs)具有高速率、低制造成本和低功耗等优点,在数据通信、激光传感、显示和医疗等领域得到了广泛应用^[1-2]。随着氧化型 VCSELs 大量的投入使用,人们对其可靠性的要求越来越高。然而,在制备氧化型 VCSELs 过程中,由

收稿日期:2023-07-27。

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB2800301)资助。

作者简介:张玉岐(1991—),男,辽宁辽阳人,博士研究生,现就读于山东大学激光与红外系统集成技术教育部重点实验室电子信息专业,主要从事半导体激光器的可靠性和失效分析等方面的研究工作。

*通信作者:赵佳(1984—),男,山东济南人,博士,教授,博士生导师,主要从事光电子器件与系统设计、计算电磁学等方面的研究工作。



于氧化限制层(材料 Al_2O_3)是由 AlAs 或者含有少量 Ga 的 AlGaAs 材料经过水汽氧化形成的,当 AlAs 氧化形成 Al_2O_3 时,其体积会收缩 10%~20%^[3-4],从而导致在氧化层形成较大的应力,这是氧化型 VCSELs 老化缺陷形成的主要源头^[4-5],严重影响器件的可靠性。CHOQUETTE K D 和 HERRICK R W 等人^[3-5]对氧化型 VCSELs 的失效原因进行了研究,TATUM J A 和 GRAHAM L A 等人^[6-7]对氧化型 VCSELs 的可靠性加速寿命、寿命模型参数进行了抽取,而对氧化型 VCSELs 的可靠性及其失效模式进行系统性的研究较少。因此,本文对氧化型 VCSELs 的可靠性和失效模式进行研究,评估其长期可靠性并提取其寿命模型,同时研究常见的失效模式及其原因,为提升氧化型 VCSELs 的可靠性提供实验和理论基础。

1 试验材料

本文试验材料选用商业化的 10 Gb/s 氧化型 VCSELs,结构示意图如图 1 所示。该 VCSELs 具有 Al-GaAs-GaAs 量子阱(QWs),激射波长为 850 nm。VCSELs 采用 N 型 GaAs 衬底,采用金属有机气相沉积(MOCVD)方法进行外延层的生长,氧化层位于 QWs 上方的 P 型分布布喇格反射镜(DBR)中,氧化孔径的中心值为 8 μm ,器件的电极位于出光方向的同一侧。

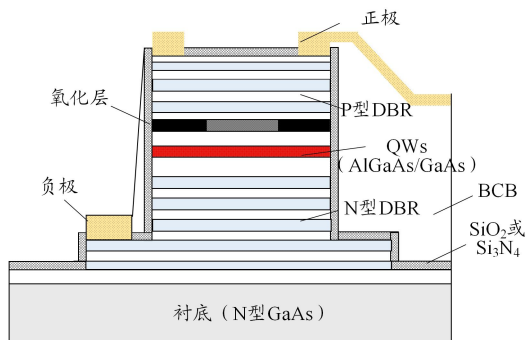


图 1 氧化型 VCSELs 结构示意图

2 可靠性研究

本文将氧化型 VCSELs 封装在非密封的晶体管外壳(TO)中,并在 Chroma 58604 型号的老化设备中施加 4 组阶梯应力的测试条件对氧化型 VCSELs 进行加速老化。通过这种方式,获取了氧化型 VCSELs 的加速老化数据,并筛选出了其中的失效器件。为了推算出器件的失效寿命,本文首先外推了在有限时间内获得的老化数据,并得到了失效标准下的失效时间(寿命);然后,对每组应力条件下得到的所有器件寿命进行了对数正态分布拟合,得到了中值寿命(L_{MT});最后,利用不同应力条件下的中值寿命,推算应力条件(温度和电流)对寿命的影响。此外,为了获得器件准确的温度(结温),本文还改变了偏置电流和环境温度。通过测试 TO 器件在不同条件下的激射波长和出光功率,并利用波长漂移法成功地测得了器件的结温。

2.1 老化试验

在老化试验过程中,每隔一定时间将样品取出,并在常温条件下测试出光功率。当出光功率衰减到老化开始前出光功率的一半时,VCSELs 被判定为失效。

本文在有效的老化时间内根据器件的衰减趋势进行拟合外推,外推函数通常选取幂函数(比较贴合实验数据^[9-10]),其表达式如式(1)所示。

$$y = bx^m \quad (1)$$

其中, x 为老化时间, y 为器件特性(功率、阈值等)的变

化率, b 为经验常数, m 为幂指数(一般取值在 0~1 之间)。

本文采用对数正态分布对根据式(1)计算出的每个器件失效时间进行拟合,得到累积失效概率拟合曲线如图 2 所示。从图中可以得到不同应力条件下的 L_{MT} ,即累积失效率 50%对应的器件失效时间。

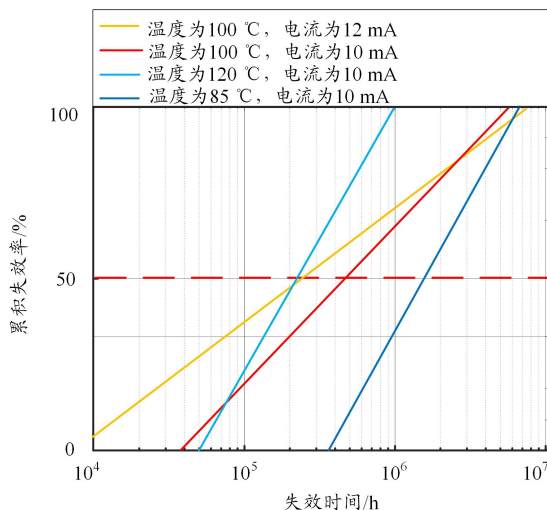


图 2 累积失效概率拟合曲线

2.2 结温测试

为了获得器件的准确温度(结温),本文采用波长漂移法测试 VCSELs 样品在 TO 封装形式下的热阻,得到不同应力条件下的器件结温。测试装置的示意图如图 3 所示。TO 放置在由热电冷却器(TEC)控制的热吸盘上,可以使温度从 30 $^{\circ}\text{C}$ 升高到 120 $^{\circ}\text{C}$ 。通过源表调控加载到 TO 器件上的电流,并回读测试电压,同时通过积分球测试器件的出光功率。光谱测量采用高分辨率光谱仪。

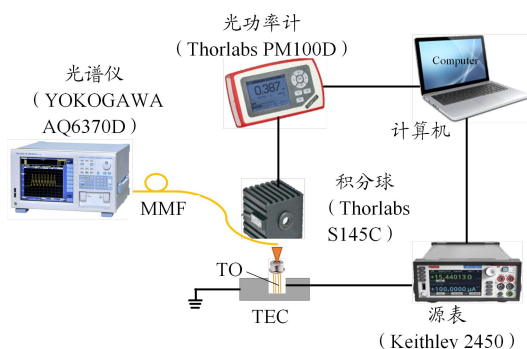


图 3 测试装置示意图

结温测试的方法如下:

①在不同的环境温度和偏置电流条件下测量器件的电压、出光功率,利用式(2)计算不同条件下的损耗功率 P_{diss} 。

张玉岐, 赵佳: 氧化型 VCSELs 的可靠性及失效分析

$$P_{\text{diss}} = IV - P_o \quad (2)$$

其中, I 为偏置电流, V 为测试电压, P_o 为偏置电流下的出光功率。

②在不同环境温度下测得基模峰值波长与损耗功率的关系如图 4 所示。可以看出, 在不同环境温度下, 波长随着损耗功率的增大而线性增大, 两者之间的线性拟合曲线为图 4 中的虚线所示。外推这些拟合曲线至损耗功率为零, 得到对应的波长数值, 此时环境温度即为器件结温。然后, 绘制这些零损耗功率下的波长随结温的变化曲线(如图 5 所示), 并对数据进行线性拟合, 得到器件的波长随结温的漂移量 $\Delta\lambda/\Delta T$ 为 $0.060 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。

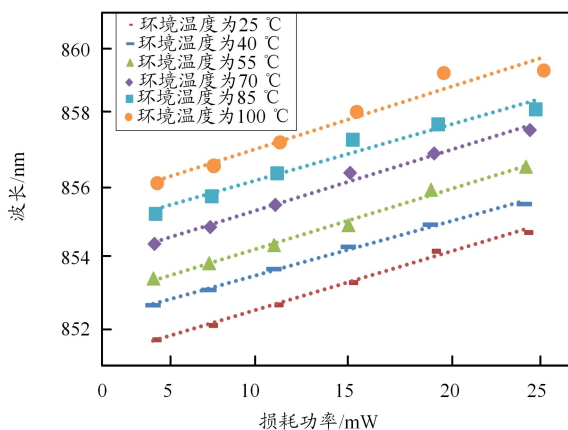


图 4 在不同环境温度下基模峰值波长与损耗功率的关系

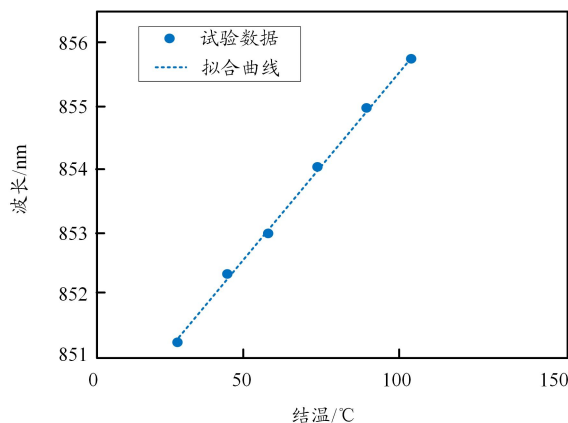


图 5 波长与器件结温的关系

③根据式(3)计算热阻 $R_{\text{th}}^{[11]}$ 。

$$R_{\text{th}} = \frac{\Delta T}{\Delta P_{\text{diss}}} = \frac{\Delta\lambda/\Delta P_{\text{diss}}}{\Delta\lambda/\Delta T} \quad (3)$$

其中, $\Delta\lambda$ 、 ΔP_{diss} 分别为基模峰值波长、损耗功率的变化量。因此, 根据式(3)可以确定不同环境温度 T_a 下的热阻。

④根据式(4)计算结温 T_j 。

$$T_j = T_a + R_{\text{th}} \times P_{\text{diss}} \quad (4)$$

不同环境温度下结温与偏置电流的曲线关系如图 6 所示。可以看出, 结温随偏置电流的增大和环境温度的升高而增大, 因此根据任意环境温度 and 偏置电流可以确定器件的结温。

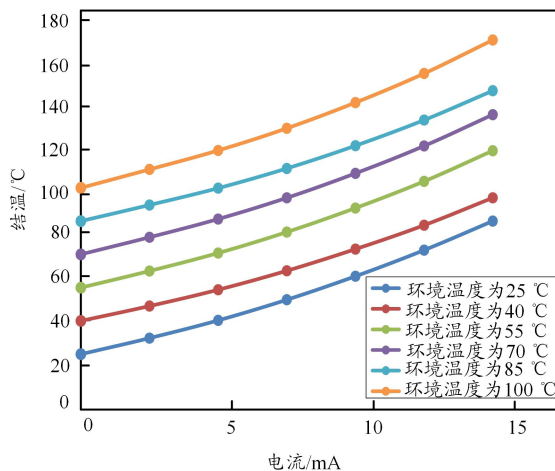


图 6 不同环境温度下器件结温和偏置电流的关系

2.3 寿命模型参数提取

氧化型 VCSELs 的可靠性研究结果如表 1 所示。本文根据表 1 中的数据求取寿命模型的未知参数(激活能 E_a 和电流加速因子 n), 得到氧化型 VCSELs 的寿命模型^[12-13]如式(5)所示。

$$L_{\text{MFT}} = A \left(\frac{I}{I_0} \right)^{-n} e^{\frac{E_a}{kT_j}} \quad (5)$$

其中, A 为比例因子, I_0 为参考电流, k 为玻尔兹曼常数 ($8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$)。同时, 激活能 E_a 通过相同电流下不同温度的数据进行求取, 电流加速因子 n 通过不同的偏置电流数据进行求取。

对式(5)取对数, 得到式(6)如下:

$$\ln(L_{\text{MFT}}) = \ln A + E_a \frac{1}{kT_j} - n \ln(I/I_0) \quad (6)$$

当偏置电流 I 恒定时, 通过获取不同结温 T_j 下的 L_{MFT} , 可以得到 L_{MFT} 与 $1/(kT_j)$ 之间的关系如图 7(a)所示, 拟合曲线的斜率即是激活能 E_a ^[13]。本文实验研究得到的激活能 $E_a = 0.55 \text{ eV}$ 。同理, 可以得到 $\ln(L_{\text{MFT}})$ 与 $\ln(I/I_0)$ 之间的关系如图 7(b)所示, 拟合曲线斜率绝对值即是电流加速因子 n 。在求取 n 的过程中, 本文忽略了结温的影响, 实验研究得到的电流加速因子为 2.09。本文研究结果与文献[6-7]中配置了 GaAs QWs 有源层的激射波长为 850 nm 的 VCSELs 相似。

3 失效分析

为了确定器件的主要失效特征及其原因, 本文使

表 1 氧化型 VCSELs 的可靠性研究结果

测试组	应力条件			样本量	老化时间/h	失效数量	中值寿命/h
	环境温度/℃	偏置电流/mA	结温/K				
1	85	10	403.75	22	4 500	0	1.09E+6
2	100	10	424.76	22	4 500	0	5.35E+5
3	120	10	443.99	22	4 200	0	2.58E+5
4	100	12	439.86	22	3 860	0	2.18E+5

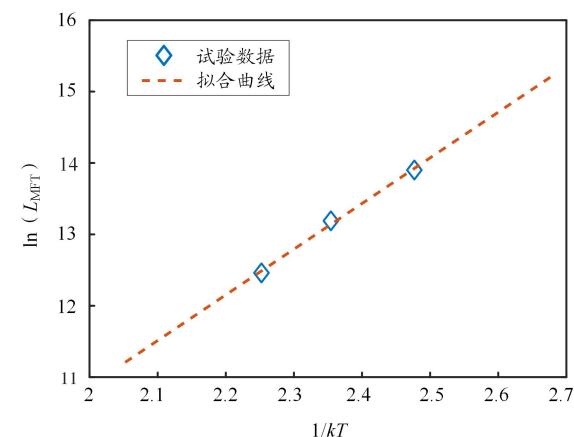
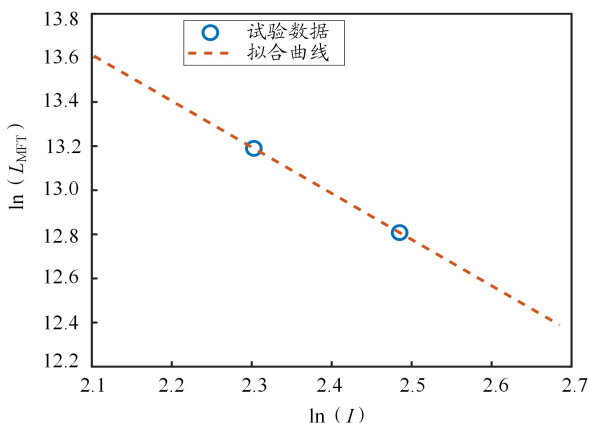
(a) 激活能 E_a 的求取(b) 电流加速因子 n 的求取

图 7 寿命模型参数的提取

用聚焦离子束(FIB)设备制备透射电子显微镜(TEM)观察所需要的样品(包括量子阱、氧化层、P型DBR、N型DBR等结构在内),样品的长宽尺寸为 $20\mu\text{m}\times 20\mu\text{m}$,厚度为 $800\sim 1\,000\text{ nm}$ 。其中,平面视图TEM(PV-TEM)可以一次性观察到整个VCSELs的mesa区域(包括有源区和氧化层),从而能够较为精确地判断缺陷的位置及形貌^[8]。此外,为了确认缺陷在垂直方向的形貌及器件结构中的问题,本文对PV-TEM的样品进行了横截面视图TEM(XS-TEM)观察。

3.1 静电释放(ESD)损伤试验

氧化型VCSELs是一种对静电敏感的器件,其氧

化孔的直径一般为 $6\sim 12\mu\text{m}$,这使得VCSELs容易受到ESD的影响,也是VCSELs失效的主要原因之一^[14]。本文通过人为引入人体放电模式(HBM)冲击,对失效后的器件进行TEM分析,得到的PV-TEM和XS-TEM结果分别如图8所示。从PV-TEM结果中可以看出,在菱形氧化窗口的4个边角出现了明显的击穿缺陷特征。从XS-TEM结果可以看出,击穿位错从氧化层向DBR传播,一旦传播到有源区,就会形成大量的位错网络,导致有源区量子阱融合在一起,从而使器件快速失效。不同失效特征的产生机理与ESD冲击波的波形、器件的结构有关^[15-16]。

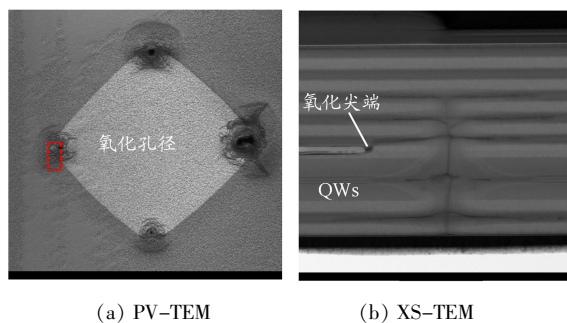


图 8 HBM 冲击下 ESD 损伤后失效样品的 TEM 结果

3.2 电气过应力(EOS)损伤试验

氧化型VCSELs易受EOS的影响而失效。本文采用 60 mA 直流电流(远超过器件正常工作电流)持续 60 s 对VCSELs进行加电,得到的EOS损伤后失效样品的TEM结果如图9所示。可以看出,PV-TEM图像显示缺陷主要出现在氧化孔的边缘,并且在氧化孔径的内部出现一些暗点缺陷;对应的XS-TEM结果表明,氧化层出现了晶格融化的永久热损伤。

3.3 高温工作寿命试验

VCSELs在高温和高电流条件下会加速老化,温度和电流是影响其寿命的2个主要因素,缺陷会在高温高电流环境下产生和扩展。图10为高温高电流(环境温度为 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$,偏置电流为 10 mA)条件下失效样品的TEM结果。可以看出,样品的PV-TEM失效特征为氧化孔径边缘出现了类似于ESD的击穿缺陷^[15],并且

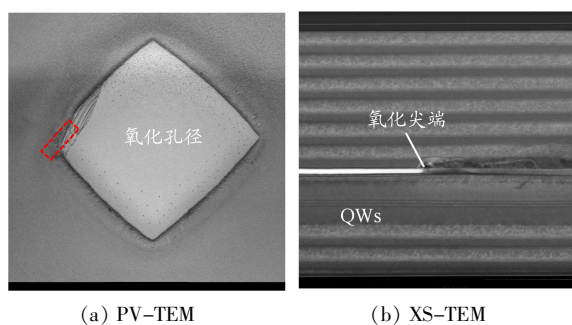


图 9 EOS 损伤后失效样品的 TEM 结果

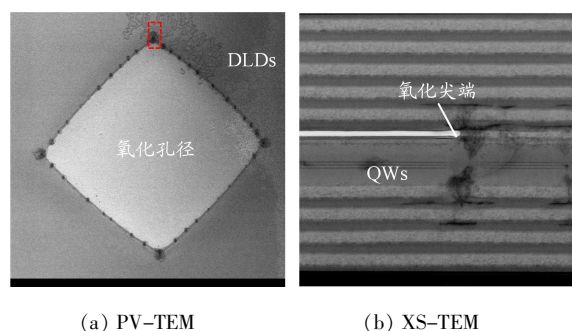


图 10 高温高电流条件下失效样品的 TEM 结果

在图的上部分发展出了黑线缺陷(DLDs)缺陷。对氧化孔径边缘进行 XS-TEM 观察,可以看到从氧化层尖端向四周出现了击穿缺陷,表现出机器模式(MM)ESD 的失效特征^[17],这可能是由于老化前的操作或者 TO 器件和老化夹具插拔过程中引入了 ESD 损伤。

3.4 高温高湿试验

在高温高湿加速老化的条件下(环境温度为 85℃、相对湿度为 85%、偏置电流为 6 mA),氧化型 VCSELs 样品的 TEM 图片在高温高湿试验失效后如图 11 所示。图 11(a)中,氧化孔径的边缘出现了大量的黑线缺陷(DLDs),尤其是在菱形的边角应力集中区域,这些缺陷在温度和电流等应力的驱动下向外扩展,生成了许多位错缺陷。图 11(b)是图 11(a)中红框的 XS-TEM 结果。可以看出,氧化层尖端出现了明显的击穿现象,DBR 区域包括 QWs 在内均出现了晶格缺陷;当 QWs

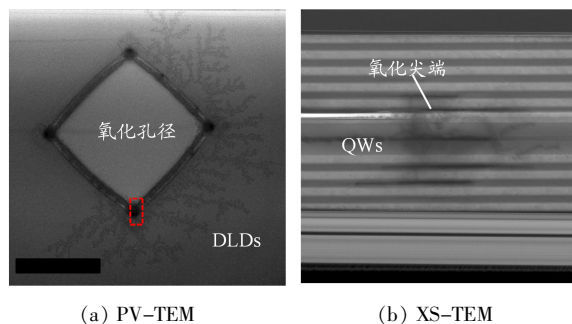


图 11 高温高湿带电条件下失效样品的 TEM 结果

出现缺陷后,这些缺陷在该区域逐渐向外部扩展。产生失效模式的原因可能为器件在试验过程中受到了 ESD 损伤,在高温高湿的条件下位错沿着 QWs 区域向外扩展,最终导致器件的失效。

4 结束语

本文研究了商用 AlGaAs/GaAs QWs 10 Gb/s 氧化型 VCSELs 的可靠性和失效模式。通过使用波长漂移法,在不同老化条件下获得了准确的器件结温数据,并计算得到了寿命模型参数激活能 E_a 为 0.55 eV,电流加速因子 n 为 2.09。采用 TEM 方法对不同类型应力试验下的 VCSELs 失效特征和失效原因进行了分析,试验结果表明,氧化型 VCSELs 的失效主要受到氧化层应力的影响,特别是应力集中的氧化尖端是缺陷出现的主要源头。减少氧化层的应力是设计和器件制作工艺需要重点考虑的方向,例如可以通过调整氧化孔径的大小和形状来减小应力集中,或者改变氧化层材料成分、降低氧化速率、减小氧化层厚度等方式来降低氧化层的应力和减小 AlAs 体积收缩,从而提高 VCSELs 的可靠性^[18]。

参考文献:

- [1] UEDA O. Reliability and degradation of III-V optical devices focusing on gradual degradation[M]. New York: Springer, 2013.
- [2] IGA K. Forty years of vertical-cavity surface-emitting laser: invention and innovation [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2018, 57(8S2): 08PA01-1-08PA01-7.
- [3] TWESTEN R D, FOLLSTAEDT D M, CHOQUETTE K D, et al. Microstructure of laterally oxidized Al_xGa_{1-x}As layers in vertical-cavity lasers[J]. Applied Physics Letters, 1996, 69(1): 19-21.
- [4] CHOQUETTE K D, GEIB K M, CHUI H C, et al. Selective oxidation of buried AlGaAs versus AlAs layers [J]. Applied Physics Letters, 1996, 69(10): 1385-1387.
- [5] HERRICK R W, DAFINCA A, FARTHOUAT P, et al. Corrosion-based failure of oxide-aperture VCSELs[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2013, 49(12): 1045-1052.
- [6] TATUM J A, CLARK A, GUENTER J K, et al. Commercialization of Honeywell's VCSEL technology [C]//SPIE. Proceedings of Symposium on Integrated Optoelectronics. San Jose: SPIE, 2000: 2-13.
- [7] GRAHAM L A, SCHNOES M, MARANOWSKI K D, et al. New developments in 850 and 1300nm VCSELs at JDSU[C]//SPIE. Proceedings of Integrated Optoelectronic Devices 2009. San Jose. SPIE, 2009: 72290B-1 - 72290B-8.
- [8] GUENTER J K, TATUM J A, HAWTHORNE III R A, et al. VCSELs at Honeywell: the story continues[C]//SPIE. Proceedings of Integrated Optoelectronic Devices 2004. San Jose, CA, United States, 2004: 34-46.

- [9] GEBIZLIOGLU O. Generic reliability assurance requirements for optoelectronic devices used in telecommunications equipment: GR-468-CORE [S/OL]. <https://www.doc88.com/p-43247032363871.html>.
- [10] DESHAYES Y, VERDIER F, BECHOU L, et al. Estimation of lifetime distributions on 1550-nm DFB laser diodes using Monte-Carlo statistic computations[C]//SPIE. Proceedings of the International Society for Optical Engineering. Strasbourg: SPIE, 2004: 103–115.
- [11] XUN M, PANG G, ZHAO Z Z, et al. 190 °C high-temperature operation of 905-nm VCSELs with high performance[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2021, 68(6): 2829–2834.
- [12] HERRICK R W. Reliability engineering in optoelectronic devices and fiber optic transceivers[J]. Reliability of Semiconductor Lasers and Optoelectronic Devices. Elsevier, 2021: 47–87.
- [13] 张玉岐, 刘万居, 赵佳. 25 Gb/s 粗波分复用分布式反馈激光器的可靠性研究[J]. 光通信技术, 2022, 46(6): 1–5.
- [14] ZHANG Y Q, ZUO Z Y, KAN Q, et al. Common failure modes and mechanisms in oxide vertical cavity surface emitting lasers [J]. Chinese Optics, 2022, 15(2): 187–209.
- [15] 张玉岐, 阚强, 赵佳. 氧化型垂直腔面发射激光器的静电放电失效特性[J]. 中国光学, 2022, 15(4): 722–730.
- [16] MEIER H, SANTACHI R, ODERMATT S, et al. A TCAD approach to robust ESD design in oxide-confined VCSELs [C]//SPIE. Proceedings of Integrated Optoelectronic Devices 2007. San Jose: SPIE, 2007: 648405-1–648405-10.
- [17] MATHES D T, GUENTER J, HAWKINS B, et al. An atlas of ESD failure signatures in vertical cavity surface emitting lasers [C]//SPIE. Proceedings of ISTFA 2005, San Jose: SPIE, 2005: 336–343.
- [18] PAO J J, WU T C, KYI W, et al. Reliability and manufacturability of 25G VCSELs with oxide apertures formed by in-situ monitoring[C]//SPIE. Proceedings of Conference on Advanced Fabrication Technologies for Micro/Nano Optics and Photonics X. SPIE OPTO. San Francisco: SPIE, 2017: 1011519-1–1011519-7.