

氧化型垂直腔面发射激光器的静电放电失效特性

张玉岐 阚强 赵佳

Electrostatic discharge failure characteristics of oxide vertical cavity surface emitting lasers

ZHANG Yu-qi, KAN Qiang, ZHAO Jia

引用本文:

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. doi: 10.37188/CO.2021-0226

ZHANG Yu-qi, KAN Qiang, ZHAO Jia. Electrostatic discharge failure characteristics of oxide vertical cavity surface emitting lasers[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(4): 722-730. doi: 10.37188/CO.2021-0226

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0226>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

采用BCB平整技术的高速850 nm垂直面发射激光器

High-speed 850 nm vertical-cavity surface-emitting lasers with BCB planarization technique

中国光学. 2018, 11(2): 190 <https://doi.org/10.3788/CO.20181102.0190>

水平腔面发射半导体激光器研究进展

Research progress of horizontal cavity surface emitting semiconductor lasers

中国光学. 2017, 10(2): 194 <https://doi.org/10.3788/CO.20171002.0194>

陶瓷表面放电光泵浦源放电特性研究

Discharge characteristics of optical pumping source by ceramic surface discharge

中国光学. 2019, 12(6): 1321 <https://doi.org/10.3788/CO.20191206.1321>

硅光子芯片外腔窄线宽半导体激光器

Narrow linewidth external cavity semiconductor laser based on silicon photonic chip

中国光学. 2019, 12(2): 229 <https://doi.org/10.3788/CO.20191202.0229>

高光束质量高斯非稳腔固体激光器研究

Research on the high beam quality of Gaussian unstable resonators in solid state lasers

中国光学. 2019, 12(3): 559 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0559>

固体激光器与光纤激光器对光子晶体光纤棒耦合的分析与对比

Analysis and comparison of solid-state lasers and fiber lasers on the coupling of rod-type photonic crystal fiber

中国光学. 2018, 11(6): 958 <https://doi.org/10.3788/CO.20181106.0958>

氧化型垂直腔面发射激光器的静电放电失效特性

张玉岐^{1,2}, 阚强³, 赵佳^{1,4*}

- (1. 山东大学激光与红外系统集成技术教育部重点实验室, 山东青岛 266237;
2. 厦门市三安集成电路有限公司, 福建厦门 361000;
3. 中国科学院半导体研究所, 北京 100083;
4. 山东大学信息科学与工程学院, 山东青岛 266237)

摘要:氧化型垂直腔面发射激光器(VCSEL)在数据通信等领域具有广泛的应用,然而氧化型 VCSEL 是一种静电敏感型器件,静电放电(ESD)是导致其失效的主要原因之一,并且器件失效后很难判断问题的原因。本文对氧化型 VCSEL 进行了包括人体模式(HBM)、机器模式(MM)和元件充电模式(CDM)3种不同的ESD模式和过度电应力(EOS)冲击,以分析其具体失效原因。其中,在HBM模式中研究了不同极性的电压冲击对应的失效特征,然后分别采用反向I-V、正向L-I-V测试、发光显微镜(EMMI)和透射电子显微镜(TEM)等手段进行表征。结果表明,不同ESD模式表现出截然不同的损伤电压阈值,氧化型VCSEL容易遭受HBM和MM损伤,而对CDM模式不敏感。研究发现和ESD失效关联的特性及缺陷特征包括反向漏电增加、出光功率衰减、EMMI亮点等,而TEM作为最为直接有效的分析手段,不同ESD模式表现出不同的缺陷大小和位置等性质。这些研究结果有助于区分ESD故障和其它故障机制,并且能够精确地判断出引起失效的具体ESD模式,具有重要的意义。

关键词:垂直腔面发射激光器;静电放电(ESD);失效分析

中图分类号:TN365 文献标志码:A doi: 10.37188/CO.2021-0226

Electrostatic discharge failure characteristics of oxide vertical cavity surface emitting lasers

ZHANG Yu-qi^{1,2}, KAN Qiang³, ZHAO Jia^{1,4*}

- (1. *Key Laboratory of Laser & Infrared System, Ministry of Education, Shandong University, Qingdao 266237, China;*
2. *Xiamen San 'An Integrated Circuit Co., LTD, Xiamen 361000, China;*
3. *Institute of Semiconductors, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;*
4. *School of Information Science and Engineering, Shandong University, Qingdao 266237, China)*
* *Corresponding author, E-mail: zhaojia@sdu.edu.cn*

Abstract: Oxide Vertical Cavity Surface-Emitting Lasers (VCSELs) are widely used in data communication.

收稿日期:2021-12-20; 修订日期:2022-01-24

基金项目:国家重点研发计划纳米专项课题(No. 2018YFA0209001); 国家重点研发计划课题(No. 2018YFA0209002, No. 2018YFB2200700)

Supported by Nano Special Project of National Key Research and Development Program (No. 2018YFA0209001); National Key Research and Development Project (No. 2018YFA0209002, No. 2018YFB2200700)

However, VCSELs are sensitive to ElectroStatic Discharge (ESD), which is one of the main reasons for their failure. It is difficult to identify the root cause of this problem. Therefore, 3 different ESD models including Human Body Model (HBM), Machine Model (MM) and Charge Device Model (CDM) and Electrical Over-Stress (EOS) shocks were applied to carry out the failure analysis of oxide VCSELs. Among them, voltage shocks of different polarities were used for HBM while reverse I-V, forward L-I-V scan, emission microscopy (EMMI) and Transmission Electron Microscopy (TEM) were used for characterization. The results show that different ESD models show significantly different damage voltage thresholds, and the oxide VCSEL is susceptible to damage in the HBM and MM models but insensitive in the CDM model. Defect characteristics associated with ESD failure were found including increased reverse leakage, degradation of optical output power, and bright spots in the EMMI. TEM was the most direct and effective method where different ESD events showed different defect sizes and locations. These research results are of great significance to confirm whether the failure mode is caused by ESD and to judge the specific ESD models in detail.

Key words: vertical cavity surface emitting lasers; electrostatic discharge; failure analysis

1 引言

垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 具有成本低、效率高、阈值低、功耗低、光束质量高和易于集成等优点, 在数据通信、消费电子、激光传感等领域具有广泛的应用^[1-3]。然而, VCSEL 是一种静电敏感型器件, 它的一个主要的失效原因是由静电放电 (ESD) 引起的。尤其对于氧化型 VCSEL 来说, 影响更为严重, 这是由于其有源区面积和氧化孔径较小, 以及氧化层易产生缺陷和应力等^[4]。ESD 事件可能发生在 VCSEL 生产流程的任何环节: 晶圆 (wafer) 制造和加工、器件测试、封装、安装和客户操作等^[5-6], ESD 会对器件造成突发的失效或者潜在的损伤, 而潜在的损伤占 90% 左右, 即器件受到 ESD 的损伤后不会立即失效, 可能会继续工作, 并且无法及时通过检测排查出, 但是长期使用过程中会显著缩短器件的工作寿命, 而一旦失效, 需要花费大量的人工和费用来确认根本原因并且很难定位, 从而导致一些未知原因的可靠性问题^[7-8]。

对 VCSEL 的失效分析手段有很多, 主要包括正向光功率-电流-电压 (L-I-V) 测试, 反向电流-电压 (I-V) 测试, 电致发光 (EL), 微光显微镜 (EMMI), 电子束感生电流 (EBIC), 光感生电流 (OBIC), 扫描电子显微镜 (SEM) 和透射电子显微镜 (TEM) 等^[8-10], 不同方法有不同的使用场景和优缺点, 而对于 ESD 引起的失效, 反向 I-V 和 TEM 是相对

有效的手段^[11-13]。ESD 引起的损伤会导致反向漏电增大和出现“soft knee”的明显特征, 但是反向 I-V 不能证明 ESD 就是失效的真正原因^[14]。确定失效的根本原因最直接有效的手段就是 TEM, 包括平面 TEM (PV-TEM) 和横截面 TEM (XS-TEM) 两种方式, 通过 TEM 可以观察到损伤的特征、大小和位置等信息^[15]。但是 TEM 分析的缺点是非常昂贵和费时^[16]。目前, 国外 VCSEL 公司和研究机构有对某部分 ESD 模式或者针对某些光电特性和 TEM 失效特征等方面的研究^[6,9-12,15], 但缺少关于不同 ESD 模式及不同 ESD 电压极性对 L-I-V 性能测试的系统完整的分析, 以及 EMMI 测试和 TEM (包括 PV-TEM 和 XS-TEM) 失效特征的研究, 而国内更是鲜有该方面的研究报道。例如, Agilent 公司只对人体模式 (HBM) 和机器模式 (MM) 两种模式对应的光电特性进行了研究, 且缺少完整的对缺陷进行有效表征的 PV-TEM 和 XS-TEM 图像结果^[6,11]; 国立阳明交通大学 HSU 等人主要采用 OBIC 方法对 HBM 和 MM 两种模式的失效特性进行研究, 缺少其他分析手段的联系^[9]; 卡利亚里大学 Vanzi 等人对 850 nm VCSEL 进行了正向和反向 HBM、MM、元件充电模式 (CDM) 和过度电应力 (EOS) 4 种模式的测试, 发现各种损伤不易与测量的电光退化相关联, 需要通过电子显微镜和设备建模来详细解释观察到的物理机制, 但只给出了反向 HBM 和正向电流冲击的 TEM 结果^[10]。Mathes 等人对不同 ESD 模式下的反向 I-V、EL 和 TEM 特性进行了报道, 但是

缺少 VCSEL 性能测试中常见的 L-I-V 测试的失效特性关联分析^[12,15]。

本文以 25 Gb/s 高速率氧化型 VCSEL 为研究对象,人为施加不同模式的 ESD 和过度电应力 (EOS) 冲击。ESD 冲击包括 3 种典型的模式: HBM、MM 和 CDM。EOS 为长时间大电流的冲击。其中以 HBM 为例,研究了正向、反向和正向 3 种不同极性电压冲击的特性,然后分别采用正向 L-I-V 测试、反向 I-V 测试、EMMI 和 TEM 等常规且有效的分析手段进行表征,进一步建立不同 ESD 模式和 VCSEL 的光电特性及缺陷性质等失效特征的内在联系以及机理解释,给 VCSEL 从业人员提供一个失效分析案例库,从而可以更加快速有效地确认失效是否为 ESD 相关的故障模式,并能有针对性地进行原因排查和改善提升,具有重要的学术意义和产业应用价值。

2 实验

2.1 实验样品

本文选用的氧化型 VCSEL 为商业化应用的 25 Gb/s 高速通信芯片,正负电极为同面电极结构,采用 InGaAs/GaAs 作为有源区材料,激光波长为 850 nm,氧化层位于 P-DBR 侧,厚度为

20 nm,采用台面湿法氧化工艺完成,氧化后的孔径直径中心值为 8 μm ,将其封装到金属管座 (TO) 上进行后续的测试。试验采用的样品均来自于同一片晶圆,选取的样本量遵循光通信行业的光电器件通用可靠性保证标准 Telcordia GR-468 Issue2,每组实验样本量为 6 颗。

2.2 实验设置

采用 MK.1TE 型号 ESD 设备对 VCSEL 进行 HBM 和 MM 的冲击,采用 ORION3 型号设备进行 CDM 试验,冲击标准遵照 MIL-STD-883D 标准。具体的电路模型及产生的脉冲电流随着时间变化的波形如图 1 所示。HBM 是模拟人体和器件接触时产生的电荷转移过程,电路模型如图 1(a) 所示,电路包括 1 个 100 pF 的电容器和 1500 Ω 的电阻,模拟了人体典型的存储电荷和电阻,它是 VCSEL 最为常见的一种失效模式。MM 模拟机器和器件接触时的电荷放电情况,静电能量来自一个机器,电路中没有电阻,电容大小为 200 pF,它的电路模型如图 1(b) 所示。CDM 模拟器件本身由于某种原因带有静电,在接触其他物体时产生电荷转移,电路模型图如图 1(c) 所示。3 种 ESD 模式的电流随时间变化曲线如图 1(d) 所示,可见, HBM 与其他模型相比静电放电脉冲速度慢、强度低;而 MM 放电电流比

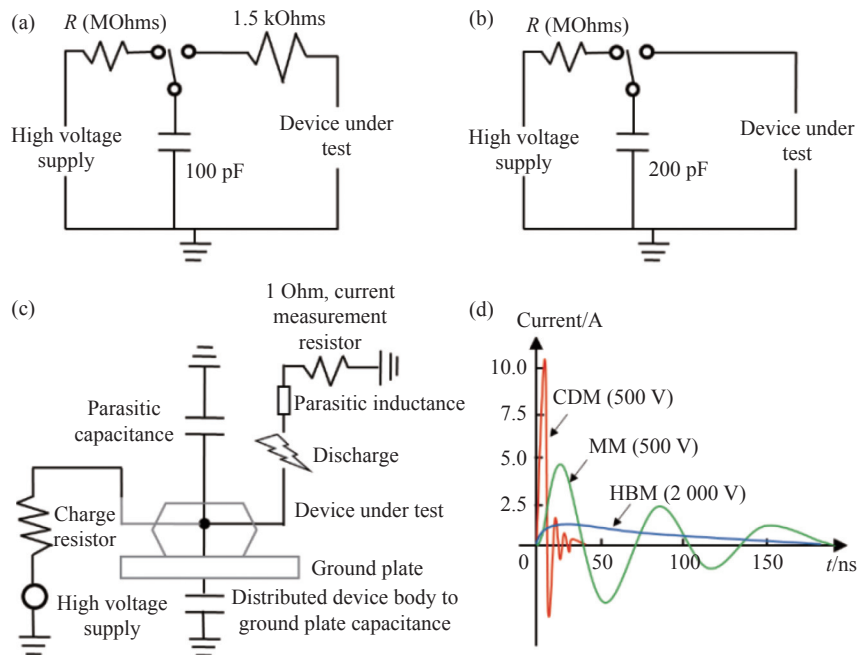


图 1 典型的 ESD 测试电路模型。(a)HBM; (b)MM; (c)CDM 及相应的(d)电流波形

Fig. 1 Typical test circuit models of an ESD. (a) HBM; (b) MM; (c) CDM and (d) corresponding current waveforms

HBM大, 放电时间短, 产生一个中等长度、中等振幅的脉冲; CDM是一个振幅非常短且高的脉冲, CDM放电周期约为1 ns, 而HBM放电周期为微妙级别。

对于HBM和MM的测试步进采用10 V(正向HBM为100 V步进), CDM的步进采用200 V。每个步进电压下对器件连续打击3次, 打击间隔为1 s; 对于EOS测试, 对VCSEL进行45 mA直流下0~960 s不同时间的冲击。每次冲击后进行L-I-V测试, 与冲击前的原始数据进行比较, 如果出现阈值或者定电流下出光功率变化量超过10%, 则认为器件失效, 终止ESD测试。芯片失效后, 对每种ESD模式损伤的芯片分别进行EMMI定位和TEM观察。

3 结果与讨论

3.1 HBM模式损伤的特征

(1) 正向HBM

正向HBM冲击前后的L-I-V曲线对比图如图2(a)(彩图见期刊电子版)所示。当正向电压为600 V时, 功率衰减8.8%, 随着步进电压的增加, 当正向电压为700 V时, 功率下降17.1%, 阈值增大3%左右, 但是在这个过程中电压基本没有发生变化, 在高电流时(>10 mA)电压会有些许下降。图2(a)中插图图为正向HBM 700 V下的EMMI图像, 其没有明显的漏电点, 反向I-V测试在-10 V下漏电约为0.3 nA, 与冲击前-10 V下的漏电0.2 nA基本没有发生变化, 这表明PN结没有受到损伤。图2(b)(彩图见期刊电子版)和图2(c)(彩图见期刊电子版)为经过正向HBM 700 V冲击后失效样品的PV-TEM和XS-TEM照片, 其中XS-TEM为图2(b)中的白色虚框位置, 图2(c)中的插图图为未经过ESD冲击的样品XS-TEM对比图片。可以看出, 受到ESD损伤后在氧化层边缘出现位错, 而氧化尖端由于具有较大的应力而成为位错的源头^[17], 造成出光功率衰减, 高电流下的电压下降是由于氧化孔边缘受损对高电流的局限作用减弱。但位错并未传播到有源区内, 不会对有源区活性层造成足够的损伤, 因此在反向I-V测试和EMMI测试没有表现出明显的退化, 尽管后续操作可能会扩展活性层中的位错(即通过阵列的生长)并导致早期失效。

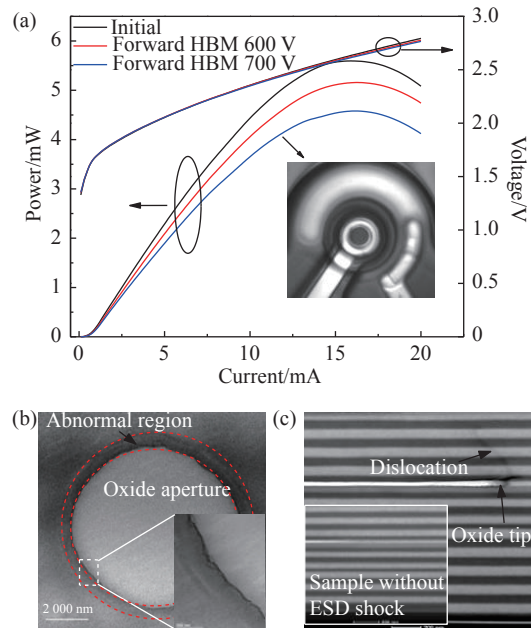


图2 (a)正向HBM模式冲击前后L-I-V曲线对比(插图 为700 V冲击电压下对应的EMMI图像); (b)正向 HBM 700 V冲击后失效样品的PV-TEM(插图为白色虚框部分的放大图)和(c)XS-TEM(插图为未经 ESD冲击样品的氧化层尖端附近的XS-TEM)

Fig. 2 (a) Comparison of L-I-V curve before and after forward HBM shock. Inset is an EMMI image under 700 V impulse voltage. (b) PV-TEM, the insert is an enlarged view of the white dotted part and (c) XS-TEM after forward HBM shock under 700 V impulse voltage, the insert is XS-TEM near the oxide tip of sample without an ESD shock

(2) 反向HBM模式

图3(a)(彩图见期刊电子版)为反向HBM冲击前后的L-I-V曲线, 可见, 当冲击电压为170 V时, L-I-V曲线与初始测试曲线基本重合, 而当冲击电压为180 V时, VCSEL功率曲线快速衰退, 但是正向I-V曲线没有发生明显的变化。插图中的EMMI结果显示光窗边缘有明显的漏电点, 反向I-V测试时漏电明显增大, -10 V下漏电约为50 μ A, 这些结果表明器件的二极管性能有所退化。图3(b)和3(c)是反向HBM 180V损伤电压下的PV-TEM和XS-TEM照片, 结果发现与正向HBM事件相比, 反向HBM事件的损伤阈值不但大大降低, 而且出光功率快速衰退, 缺陷密度也显著增高。由PV-TEM的结果可以看出, 在对应EMMI亮点位置出现了明显的击穿缺陷特征, 其出现在靠近氧化层的光窗内部, 由XS-TEM结果可以看到击穿位错从氧化层向上下DBR传

播,并且在 DBR 中高镓元素层发生较为明显的缺陷,而一旦传播到有源区内,就会形成大量的位错网络,有源区量子阱已经融合在一起,并易于向发光区域扩展,这和有源区的大量辐射复合效应增强了位错的运动有关^[18],进而导致芯片的快速失效。

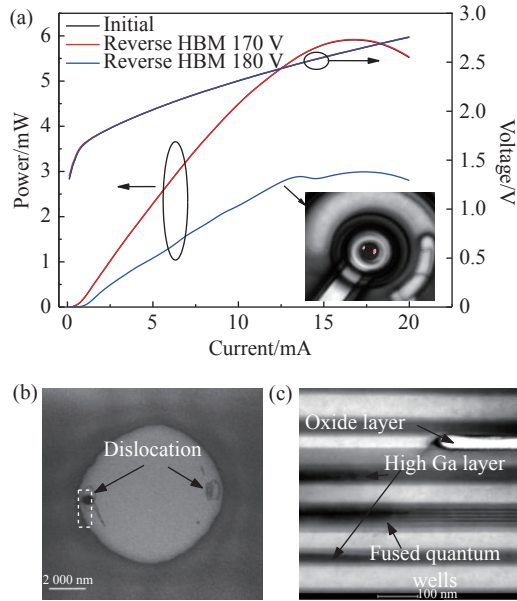


图 3 (a)反向 HBM 模式冲击前后 L-I-V 曲线对比,插图为 180 V 冲击电压对应的 EMMI 图像;反向 HBM 180 V 冲击电压下的(b)PV-TEM 和(c)XS-TEM 结果
Fig. 3 (a) Comparison of L-I-V curve before and after reverse HBM shock. The insert is an EMMI image under 180 V impulse voltage. (b) PV-TEM and (c) XS-TEM after reverse HBM shock under 180 V impulse voltage

(3) 正/反向 HBM

正向和反向 HBM 冲击前后的 L-I-V 曲线如图 4(a)(彩图见期刊电子版)所示,与只有反向极性的 HBM 模式冲击失效特征相似,当冲击电压为 150 V 时, L-I-V 曲线没有任何变化,而当冲击电压为 160 V 时, VCSEL 的阈值增加,功率突然降低,电压在低电流下变化较小(<10 mA),在高电流时(>10 mA)电压会有小幅度增加。EMMI 测试发现光窗边缘有明显的漏电点, -10 V 下漏电约为 0.2 μA 。图 4(b)和 4(c)为经过 ± 160 V 冲击后的 PV-TEM 和 XS-TEM 照片,从 PV-TEM 图像可以看出击穿位置和 EMMI 漏电点相吻合,同反向 HBM 损伤特征一致,位错缺陷出现在靠近氧化层的光窗内部,并且大小为微米量级,而由 XS-TEM 可以看到氧化层和其下方的有源区发生击穿现象,有源区发生部分融合,而且 DBR

层中含高镓成分的也出现明显的损伤现象,推测部分原因是含镓层有较低的熔化温度和较低的带隙宽度而产生更大的光能量吸收^[15]。器件内的缺陷捕获了载流子,造成正向电压增加现象。

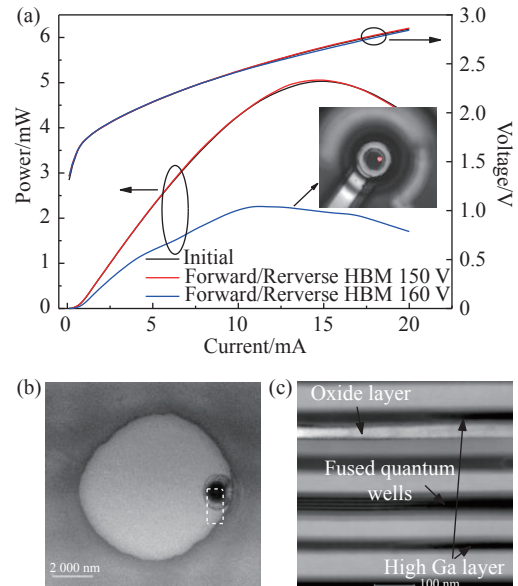


图 4 (a)正/反向 HBM 模式冲击前后 L-I-V 曲线对比,插图为 160 V 冲击电压对应的 EMMI 图像;正反向 HBM 160 V 冲击电压下(b)PV-TEM 和(c)XS-TEM 结果
Fig. 4 (a) Comparison of L-I-V curve before and after forward/reverse HBM shock. The insert is an EMMI image under 160 V impulse voltage. (b) PV-TEM and (c) XS-TEM after forward/reverse HBM shock under an 160 V impulse voltage

3.2 MM 损伤的特征

图 5(a)(彩图见期刊电子版)给出了经过 MM 冲击前后的 L-I-V 曲线,当电压为 50 V 时,阈值显著增加(由原始的 0.4 mA 增加到 1.2 mA)、出光功率显著降低(6 mA 下的功率由 2.81 mW 降低到 1.19 mW)并在高电流下出现抖动,正向电压变大。EMMI 在氧化光窗边缘出现多个亮点,反向电压 -10 V 下漏电结果约为 50 μA ,这些结果表明芯片的 PN 节发生了永久性损伤。TEM 结果如图 5(b)和 5(c)所示,从 PV-TEM 结果可以看出,与反向 HBM 模式的损伤点不同,缺陷出现在氧化孔边缘两侧的位置,直径在数百纳米量级。另外,氧化孔径周围出现一些暗点缺陷,发生了部分氧化层介质击穿现象。从 XS-TEM 结果可以发现,氧化层尖端出现了大量缺陷,并向下传播到 DBR 和量子阱区域,这与明显的漏电电流增加

结果一致,同时缺陷捕获了载流子,等效电阻增加、正向电压增加。上述结果进一步表明,位错缺陷主要也发生在附近的其他含高镓层中。

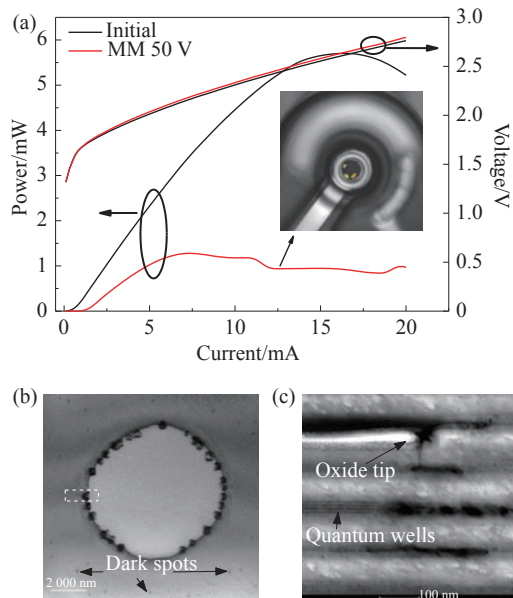


图5 (a)MM模式冲击前后L-I-V曲线对比,插图为损伤电压对应的EMMI图像以及相应的(b)PV-TEM和(c)XS-TEM

Fig. 5 (a) Comparison of L-I-V curve before and after MM shock. The insert is an EMMI image under a damaging impulse voltage. (b) PV-TEM and (c) XS-TEM after MM shock

3.3 CDM 损伤的特征

在ESD事件中,CDM脉冲的强度最高,持续时间最短。由于脉冲速度快,通常VCSEL的绝缘部分(如氧化层)将变得导电,氧化物VCSEL CDM事件很容易导致介电击穿^[9]。如图6(a)(彩图见期刊电子版)所示,经过2000 V CDM冲击后的样品L-I-V特性变化较小,只是高电流下功率出现轻微的衰减,正向电压小幅度降低。同时EMMI测试没有发现亮点,反向I-V测试在-10 V下电流约为1 nA,这表明器件内部PN结可能没有出现损伤。对CDM 2000 V冲击后的VCSEL进行TEM观察,如图6(b)(彩图见期刊电子版)和6(c)所示,与上述HBM和MM的失效特征不同,氧化孔光窗区域、氧化孔边缘和量子阱区域都没有出现明显缺陷,即器件正常的出光和电流通道无缺陷,因此出光功率、阈值和反向漏电基本没有发生变化,但是在氧化层周围出现很多暗点缺陷,呈现环状分布,这可能与芯片的上电极有关。对其中的暗点缺陷进行剖面分析,如

图6(c)所示,可以看到氧化层上下出现介质击穿破坏,可能由于局部融化和凝结导致的。而氧化层的介质击穿,导致氧化绝缘层对电流的限制作用减弱,即表现为正向电压下降。

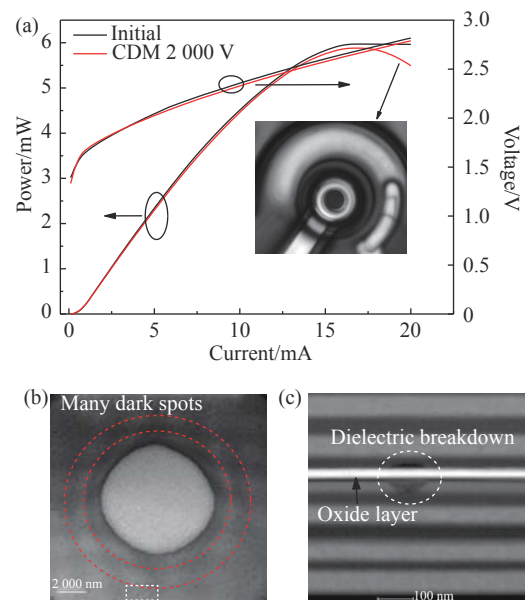


图6 (a)CDM模式冲击前后L-I-V曲线对比,插图为损伤电压对应的EMMI图像以及相应的(b)PV-TEM和(c)XS-TEM结果

Fig. 6 (a) Comparison of L-I-V curve before and after CDM shock. The insert is an EMMI image under a 2000 V impulse voltage; (b) PV-TEM and (c) XS-TEM after CDM shock

3.4 EOS 模式损伤的特征

EOS是大电流长时间的过程,通常是由于设备或者电源过流引起,会对器件产生永久性的损伤,较强的EOS导致的失效可以通过光学显微镜发现,而相对较弱的EOS事件需要类似ESD事件的分析手段。下图7(a)(彩图见期刊电子版)为加电45 mA,不同时间下的L-I-V曲线,可见,加电300 s后阈值和功率明显减弱,继续增加供电时间,器件特性持续恶化,表现为阈值增加、功率下降和正向电压下降,960 s后对器件进行反向漏电测试,-10 V下漏电约为11 μ A,但是EMMI图像没有发现集中的漏电点。图7(b)和7(c)为45 mA加电960 s后的TEM图像,从PV-TEM图像可以看到,在氧化层边缘出现一些暗点缺陷,与正向HBM冲击后的特征相似,也是由于焦耳热导致的过量热应力有关。图中没有集中的位错缠结出现,这与EMMI图像表现为无明显的集中漏电亮点现象一致,但是很多分散的缺陷会引起漏

电通道的增加。图 7(c) 中 XS-TEM 在量子阱区域没有发生融合现象, 而经过大电流长时间的应力驱动, 在氧化层附近出现很多 Burn-out 缺陷, 这和 Ga、As 原子迁移形成的点缺陷有关, 而且应力释放导致半导体和氧化介质层的晶格失配更加显著, 从而导致了分层。

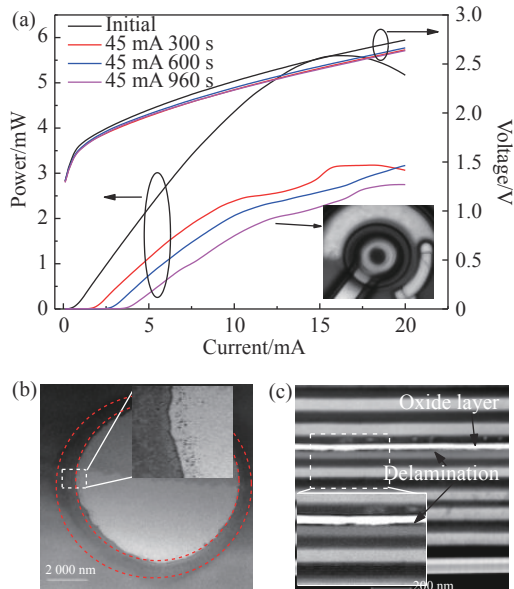


图 7 (a)EOS 模式冲击前后 L-I-V 曲线对比, 插图为 45 mA 960 s 对应的 EMMI 图像以及相应的 (b)PV-TEM 和 (c)XS-TEM, 插图为局部放大图

Fig. 7 (a) Comparison of L-I-V curve before and after EOS shock. The inset is an EMMI image under a 45 mA 960 s surge; (b) PV-TEM and (c) XS-TEM after EOS shock under a 45 mA 960 s surge. The insets are partial enlarged views.

3.5 结果汇总比较及分析

结合上述实验结果, 将不同 ESD 模式的损伤阈值和失效特性、TEM 失效特征及其机理汇总在表 1 中。可以看出, VCSEL 在不同 ESD 模式和不同极性电压冲击下对应的器件损伤阈值、光电特性和 TEM 结果明显不同。其中光电特性是器件的一种外在表现, 由内在的缺陷性质决定, 在上述各个小节中已经分别进行了阐述和分析, 所以此部分对不同 ESD 模式对应的损伤阈值和 TEM 结果进行横向对比分析。

(1) 损伤阈值

ESD 损伤水平取决于 VCSEL 的几个设计方面, 包括发射直径、热阻抗和电阻抗、有源区类型、反向击穿电压、氧化层的厚度和位置等。从 3 种模式来看, VCSEL 的 CDM 损伤阈值最高, 在 CDM 脉冲达到设备极限值 2000 V 时仍未失效, 这可能归因于功率耗散^[16,19]。虽然 VCSEL 对 CDM 造成的短脉宽损伤不是特别敏感, 但在较低电压水平下, 较长的脉冲(MM 和 HBM)会导致故障, MM 具有最低的破坏阈值, HBM 次之。这表明 VCSEL 容易遭受这两种类型的 ESD 损伤, 这和 VCSEL 的氧化层性质有关, 详见下述 TEM 失效特征分析。

从不同极性的电压冲击结果来看, 以 HBM 为例, 不同极性电压冲击也有不同的结果, 其中正向 HBM 损伤阈值最大, 而且和反向 HBM 相差很多, 反向极性的 ESD 冲击具有较大的破坏性, 正

表 1 氧化型 VCSEL 中不同 ESD 模式的失效特征汇总

Tab. 1 Summary of failure characteristics corresponding to different ESD models in oxide VCSELs

ESD模式	损伤阈值	光电特性	EMMI和TEM失效特征	可能的失效机理
正向HBM	700 V	出光功率逐渐下降, 阈值小幅度增加, 反向漏电不变, 高电流下电压微降	EMMI无亮点; 器件内部无集中的击穿位错, 在氧化孔边缘出现位错, 有源区未出现明显的损伤	焦耳热产生的过量热应力导致在应力集中的氧化尖端出现位错; 氧化层对该ESD模式的脉冲表现为电阻特性
反向HBM	-180 V	出光功率快速下降, 阈值增加, 反向漏电变大, 正向I-V特性无明显变化	EMMI有亮点, 和TEM集中的击穿位错位置吻合; 比正向HBM模式的位错密度高, 击穿位错出现在靠近氧化孔边缘的出光孔内, 有源区出现局部融合现象, DBR中含高镓层的缺陷较为严重	隧道击穿效应; 氧化层对该ESD模式的脉冲表现为电阻特性
正/反向HBM	±160 V	出光功率快速下降, 阈值增加, 反向漏电变大, 高电流下电压微增	EMMI有亮点, 和TEM集中的击穿位错位置吻合; 与反向HBM失效特征相似, 位错大小为微米量级, 氧化孔边缘和有源区出现永久性损伤	隧道击穿和热的累积效应; 氧化层对该ESD模式的脉冲表现为电阻特性
MM	50 V	出光功率快速下降, 阈值增加, 反向漏电变大, 正向电压增加	EMMI有亮点, 和TEM集中的击穿位错位置吻合; 氧化孔边缘的两侧出现大量位错, 直径大小为数百纳米量级。位错从氧化层以上延伸到有源区, 高镓含量层位错密度较高。有时会出现轻微的氧化层介质击穿现象	隧道击穿效应; 氧化层相对于该ESD模式的脉冲表现为部分电容特性部分电阻特性
CDM	2000 V	L-I-V特性基本不变, 高电流时出光功率微降, 阈值不变, 反向漏电微增, 正向电压下降	EMMI无亮点; 器件内部无集中的击穿位错, 整个氧化层出现介质击穿, 分布在氧化孔的周围, 并呈现出环状图案。在氧化孔边缘和有源区未观察到明显的缺陷	介质击穿; 氧化层相对于该ESD模式的脉冲等效为电容特性
EOS	/	出光功率逐渐下降, 阈值增加, 反向漏电增大, 正向电压下降	EMMI无亮点; 器件内部无集中的击穿位错, 高电流密度的应力驱动下, 氧化孔边缘出现暗点缺陷和分层现象	焦耳热产生的过量热应力

反向同时冲击具有最低的阈值。这是由于对于正向ESD,焦耳热(欧姆热)是导致退化的主要因素。而在反向偏压下,来自电流/电压的加热较低,反向电流大约比正向电流小4个数量级。因此,通过隧道机制的雪崩击穿可能是反向ESD失效的原因^[20-22],导致VCSEL具有更低反向偏压损坏阈值和更明显的失效缺陷^[15,23]。正反向ESD冲击具有最低阈值的原因可能和热耗散的积累效应有关^[20-22]。

(2) TEM失效特征

从表1可以看出,不同ESD模式冲击后都会有个共同特征,就是氧化层都会伴随有位错等缺陷的产生,尤其是氧化尖端出现损伤,而非只有量子阱区域内有缺陷,这也是能够区分ESD故障和其它故障机制的特有性质。另外,通过横向对比可以看出,氧化型VCSEL在不同ESD模式下会表现出不同的TEM失效特征,这也为精确判断具体是何种ESD失效模式提供一种重要的方法。

不同失效特征的产生机理和ESD冲击波形及器件结构有关。VCSEL的氧化层绝缘层区域可等效为一个阻抗,对于不同的ESD模式脉冲波形,会表现出阻抗的电容性或者电阻性行为,损伤发生的位置和类型等性质强烈依赖于ESD的脉冲速度^[19,24]。从图1的3种ESD模式的电流波形可以知道:HBM为持续时间长的小直流,氧化层相当于电阻特性,电流无法通过氧化层区域,因此会在氧化孔径边缘或者内部形成损伤;MM等效为低频交流,氧化层等效为部分电阻部分电容特性,所以冲击可以部分穿过氧化层,在氧化孔的边

缘和附近的氧化层两侧形成损伤;CDM等效为高频交流,氧化层等效为阻抗的电容性行为,脉冲绝大部分穿过氧化层并在那里形成损伤,在氧化层产生介质击穿,损伤阈值随氧化层厚度的增大而增大;EOS为长时间大电流,产生的过大热应力是缺陷产生的主要原因,会直接穿过并损伤氧化孔径区域,同时可能伴随氧化孔径表面融化、孔洞。

4 结 论

为了建立不同ESD模式和失效特征的联系,本文对25 Gb/s氧化型VCSEL进行了不同ESD模式和EOS冲击,通过正向L-I-V测试、反向I-V测试、EMMI和TEM观察等手段进行表征,对产生的失效特性及其机理进行了研究分析。发现了和ESD故障相关联的特征及内在机制,包括反向偏压下漏电流增加,出光功率退化、阈值增加,正向电压变化等,在有大量击穿位错的现象出现时,反向EMMI测试会出现亮点,其中TEM作为判断ESD失效类型最为有效的分析方式,结果显示在氧化层附近和有源区出现大量位错,并且不同ESD模式和不同脉冲极性作用下VCSEL表现出截然不同的损伤阈值、器件特性和缺陷特点,这些结果可以用来区分ESD故障和其他故障机制,能够为VCSEL研发、制造和使用人员提供一个失效案例库,当器件出现失效后,可以准确地识别出是否为ESD事件,以及具体是何种ESD模式,因此可以快速有效地挖掘到问题的成因并进行相应的改善,具有重要的参考和指导意义。

参考文献:

- [1] 张继业,李雪,张建伟,等.垂直腔面发射激光器研究进展[J].*发光学报*,2020,41(12):1443-1459.
ZHANG J Y, LI X, ZHANG J W, *et al.*. Research progress of vertical-cavity surface-emitting laser[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(12): 1443-1459. (in Chinese)
- [2] 杨卓凯,田思聪,LARISCH G,等.基于PAM4调制的高速垂直腔面发射激光器研究进展[J].*发光学报*,2020,41(4):399-413.
YANG ZH K, TIAN S C, LARISCH G, *et al.*. High-speed vertical-cavity surface-emitting lasers based on PAM4 modulation[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(4): 399-413. (in Chinese)
- [3] 何晓颖,董建,胡帅,等.采用BCB平整技术的高速850nm垂直面发射激光器[J].*中国光学*,2018,11(2):190-197.
HE X Y, DONG J, HU SH, *et al.*. High-speed 850 nm vertical-cavity surface-emitting lasers with BCB planarization technique[J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(2): 190-197. (in Chinese)
- [4] 张玉岐,左致远,阙强,等.氧化型垂直腔面发射激光器的常见失效模式和机理分析[J].*中国光学*,2022,15(2):187-209.
ZHANG Y Q, ZUO ZH 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. (in Chinese)
- [5] HELMS C J, AEBY I, LUO W L, *et al.*. Reliability of oxide VCSELs at Emcore[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5364:

- 183-189.
- [6] KRUEGER J J, SABHARWAL R, MCHUGO S A, *et al.*. Studies of ESD-related failure patterns of Agilent oxide VCSELs[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 4994: 162-172.
- [7] 张建华, 陈章福, 徐小雪, 等. 人体静电放电对有机发光二极管的影响[J]. *发光学报*, 2018, 39(2): 169-174.
ZHANG J H, CHEN ZH F, XU X X, *et al.*. Analysis of organic light emitting diode under electrostatic discharge stresses[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2018, 39(2): 169-174. (in Chinese)
- [8] UEDA O. *Reliability and degradation of III-V optical devices focusing on gradual degradation*[M]//UEDA O, PEARTON S J. Materials and Reliability Handbook for Semiconductor Optical and Electron Devices. New York, NY: Springer, 2013: 87-122.
- [9] HSU C L, DAS S, WU Y S, *et al.*. Spectrally resolved optical beam-induced current imaging of ESD induced defects on VCSELs[J]. *OSA Continuum*, 2021, 4(2): 711-719.
- [10] VANZI M, MURA G, MARCELLO G, *et al.*. ESD tests on 850 nm GaAs-based VCSELs[J]. *Microelectronics Reliability*, 2016, 64: 617-622.
- [11] MCHUGO S A, KRISHNAN A, KRUEGER J J, *et al.*. Characterization of failure mechanisms for oxide VCSELs[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 4994: 55-66.
- [12] MATHES D, GUENTER J, TATUM J, *et al.*. AOC moving forward: the impact of materials behavior[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6132: 613203.
- [13] GUENTER J K, TATUM J A, HAWTHORNE III R A, *et al.*. VCSELs at Honeywell: the story continues[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5364: 34-46.
- [14] WEIDBERG A R. VCSEL reliability in ATLAS and development of robust arrays[J]. *Journal of Instrumentation*, 2012, 7: C01098.
- [15] MATHES D T, GUENTER J, HAWKINS B, *et al.*. An atlas of ESD failure signatures in vertical cavity surface emitting lasers[C]. *Proceedings of ISTFA*, ISTFA, 2005: 330-336.
- [16] UEDA O, HERRICK R W. Failure analysis of semiconductor optical devices[M]//UEDA O, PEARTON S J. Materials and Reliability Handbook for Semiconductor Optical and Electron Devices. New York: Springer, 2013: 19-53.
- [17] MOKHTARI M, PAGNOD-ROSSIAUX P, LEVALLOIS C, *et al.*. Mechanical strain mapping of GaAs based VCSELs[J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 118(9): 091102.
- [18] MUKHERJEE K. *Materials science of defects in GaAs-based semiconductor lasers*[M]//HERRICK R W, UEDA O. Reliability of Semiconductor Lasers and Optoelectronic Devices. Amsterdam: Elsevier, 2021: 113-176.
- [19] GUENTER J K, TATUM J A, HAWTHORNE III R A, *et al.*. A plot twist: the continuing story of VCSELs at AOC[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5737: 20-34.
- [20] HUANG J J SH, JAN Y H, CHANG H S, *et al.*. ESD polarity effect study of monolithic, integrated DFB-EAM EML for 100/400G optical networks[C]. *Proceedings of 2017 Conference on Lasers and Electro-optics Pacific Rim*, IEEE, 2017: 1-4.
- [21] HUANG J S. *Reliability of optoelectronics*[M]//SWINGLER J. Reliability Characterisation of Electrical and Electronic Systems. Cambridge: Woodhead Publishing, 2015: 83-114.
- [22] HUANG J SH, OLSON T, ISIP E. Human-body-model electrostatic-discharge and electrical-overstress studies of buried-heterostructure semiconductor lasers[J]. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 2007, 7(3): 453-461.
- [23] TWU Y, CHENG L S, CHU S N G, *et al.*. Semiconductor laser damage due to human-body-model electrostatic discharge[J]. *Journal of Applied Physics*, 1993, 74(3): 1510-1520.
- [24] MEIER H, SANTSCHI R, ODERMATT S, *et al.*. A TCAD approach to robust ESD design in oxide-confined VCSELs[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6484: 648405.

作者简介:



张玉岐(1991—),男,辽宁辽阳人,博士研究生,工程师,2015年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,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。E-mail: zyxzyq@163.com



赵佳(1984—),男,山东济南人,博士,教授,博士生导师,2011年于山东大学获得博士学位,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。E-mail: zhaojia@sdu.edu.cn