

激光与光电子学进展

半导体激光器失效机理与检测分析研究进展

孙天宇¹, 夏明俊^{1*}, 乔雷²

¹浙江大学信息与电子工程学院, 浙江 杭州 310027;

²中兴通讯股份有限公司, 广东 深圳 518057

摘要 半导体激光器具有输出波长范围广、结构简单和易于集成等优势, 广泛应用于医疗、传感、光学通讯、军事和航空航天等领域。随着应用需求不断增大, 输出光功率不断提高, 对激光器的可靠性提出了严峻的挑战。在回顾半导体激光器失效机理的基础上, 分析光致发光技术、电致发光技术、阴极发光技术、红外热成像和激光显微镜 5 种有效的失效检测和分析手段, 重点对有源区内部问题、腔面问题、焊接问题和操作环境问题的改善措施进行回顾和建议, 为从事半导体激光器研究和生产的人员提供半导体激光器失效分析的依据。

关键词 激光技术; 半导体激光器; 失效机理; 失效分析; 激光器缺陷检测

中图分类号 TN365

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1900003

Failure Mechanism and Detection Analysis of Semiconductor Laser

Sun Tianyu¹, Xia Mingjun^{1*}, Qiao Lei²

¹College of Information Science & Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China;

²ZTE Corporation, Shenzhen, Guangdong 518057, China

Abstract As semiconductor lasers have excellent characteristics including wide output wavelength range, simple structure, and easy to be integrated, they are widely used in medical, sensing, optical communications, military, and aerospace fields. With the increase of application requirements and output optical power, the reliability of lasers suffers from severe challenges. This paper reviews the failure mechanism of semiconductor lasers and analyzes the five effective failure detection and analysis methods of photoluminescence technology, electroluminescence technology, cathodoluminescence technology, infrared thermal imaging, and emission microscope. Furthermore, this paper summarizes and suggests the improvement measurements of the failure induced by the active area, cavity surface, welding, and operating environment. These will provide effective suggestions for the research and production of semiconductor lasers.

Key words laser technique; semiconductor laser; failure mechanism; failure analysis; laser defect detection

OCIS codes 140.3425; 140.3330; 140.2020; 140.3490

1 引 言

半导体激光器作为一种基础的光电子器件, 在当今光电子技术中被广泛应用。自 20 世纪 60 年代诞生后^[1], 几十年来取得飞速的进展。由于半导体

激光器具备输出波长范围广、结构简单、易于集成等优势, 广泛用于材料加工、光学通讯、医学、激光传感、军事和航天等领域^[2-5]。

半导体激光器的材料多为直接带隙的 III-IV 化合物半导体, 输出波长覆盖范围从深紫外到远红外

收稿日期: 2021-01-14; 修回日期: 2021-02-07; 录用日期: 2021-03-02

基金项目: 中兴通讯研究基金(HC-CN-20200304002)

通信作者: *xiamingjun@zju.edu.cn

波段。例如 GaAs 基激光器的发光波长范围为 610~1060 nm, 是 850 nm 数据通信、激光显示(红色基色)、固态激光器泵浦(Nd:YAG)、掺铒激光器应用的核心光源; InP 基激光器发光波长为 1250~1700 nm, 包含光纤通信零色散窗口 1310 nm 和最低损耗窗口 1550 nm; GaN 基激光器发光波长从深紫外到绿光波段, 主要用于激光显示、蓝光存储和激光打印方面。随着各领域对半导体激光器需求不断增大, 要求输出功率不断提高, 可靠性已成为以半导体激光器为核心器件的开发和应用领域的关键问题, 并逐渐被研究人员和产业界关注^[6-8]。而研究半导体激光器的失效机理, 对失效进行检测并提出改善措施是提高半导体激光器可靠性的必经之路。

本文详细阐述了半导体激光器快速退化、突然失效和突然退化 3 种失效机理, 系统性地分析有源区退化、腔面退化、电极退化和绝缘层失效 4 种失效模式。分析光致发光技术、电致发光技术、阴极发光技术、红外热成像和微光显微镜 5 种有效的失效检测和分析手段。随后回顾并建议近年来针对激光器的腔面问题、有源区内部问题、焊接问题和操作环境问题有效的改善措施, 期望能为从事半导体激光器研究和生产的人员提供提高激光器可靠性的参考。

2 失效机理

半导体激光器的失效机理与半导体激光器结构和工作机理密切相关。图 1 为半导体激光器结构, 以半导体 PN 结为主要工作区, 在正向偏压下, 通过向激光器的 PN 结有源区注入载流子, 引起有源区内的载流子数反转分布, 位于导带的电子与价带的空穴在有源区复合, 辐射出光子。半导体两端的解理面构成光学谐振腔, 提供光学反馈和控制输出光的方向与频率。

研究半导体激光器的失效机理主要是研究半

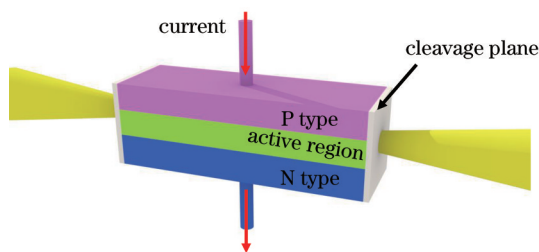


图 1 半导体激光器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of semiconductor laser structure

导体激光器的退化过程。半导体激光器的退化过程按统计学归纳为三种表现形式: 快速退化、突然失效和缓慢退化^[9]。可以用在恒定输出光功率下的激光器驱动电流-时间曲线表示三种表现形式, 示意图如图 2 所示。

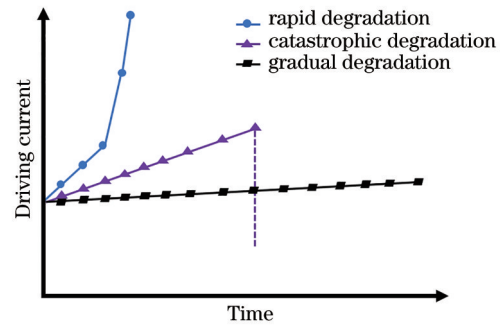


图 2 半导体激光在三种退化形式下的驱动电流-时间曲线
Fig. 2 Driving current-time curves of the semiconductor laser in the three different degradation forms

1) 快速退化: 在恒定驱动电流工作下, 激光器的输出光功率下降得很快, 常表现为在较短时间内(100 h 内)功率降为初始的一半甚至更小。这主要是因为内部非辐射复合区域的形成, 如暗线缺陷(DLD)或暗点缺陷(DSD)。暗线缺陷和暗点缺陷为位错环构成的位错网络。位错网络多由于衬底表面初始位错、材料生长和激光器使用过程中无法释放热应力形成的位错通过复合增强攀爬和滑移形成^[10-11]。

2) 突然失效: 激光器在工作期间突然无输出光强。这也是限制激光器输出最高光功率的主要因素。这种失效情况多数与缺陷密切相关。主要原因有电流电压过载、灾变光学损伤(COD)和电极退化。

3) 缓慢退化: 如果半导体激光器不存在突然失效的问题, 那么恒定驱动电流下的激光器输出光功率也会随使用时间增加缓慢减小, 这种称为缓慢退化。常见的表现为输出光功率缓慢下降和有源区出现均匀暗化或暗点缺陷。这决定了器件的最终寿命。

半导体激光器退化模式有: 有源区退化、腔面退化、电极退化和绝缘层失效^[12]。

1) 有源区的退化有两种情况, 一种是缓慢退化过程中的均匀退化, 另一种是暗线缺陷或暗点缺陷形成引起的快速退化。这些缺陷是位错网络的形成和不断扩大导致的。由于有源区发生退化, 非辐射复合区扩大, 从而引起量子效率和电流阈值降低。暗线缺陷和暗点缺陷可利用透射电子显微镜进行观测, 如图 3 所示^[9]。

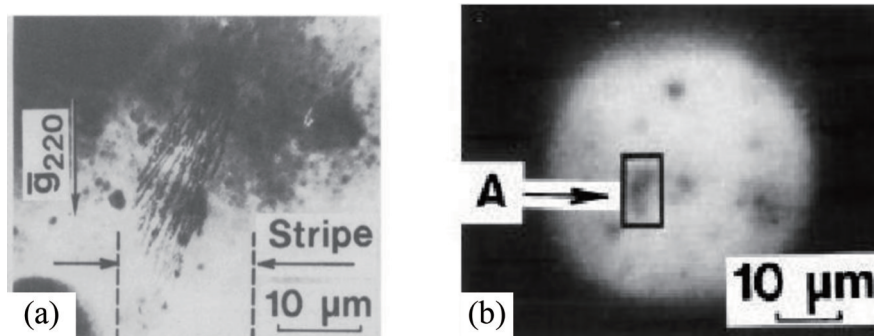


图3 透射电子显微镜观测到的暗线缺陷和暗点缺陷^[9]。(a)暗线缺陷;(b)暗点缺陷

Fig. 3 DLD and DSD observed by transmission electron microscope^[9]. (a) DLD; (b) DSD

2) 腔面退化分为两种情况:腔面灾变光学损伤和化学腐蚀。在激光器大功率工作下,腔面灾变光学损伤过程如图4所示。由于氧化、局部过热和杂质的存在,表面态复合增多,增加对光的吸收。腔面对光吸收后会产生电子-空穴对,随着电子-空穴对的产生,非辐射复合不断增强,从而使温度不断升高。温度的升高会使材料带隙减小,端面的电流密度继续增大,促进光的进一步吸收,从而产生恶性循环,最终导致灾变光学损伤。而腔面的化学腐蚀,特别是光化学腐蚀引起腔面被氧化,导致点缺陷在腔面产生。

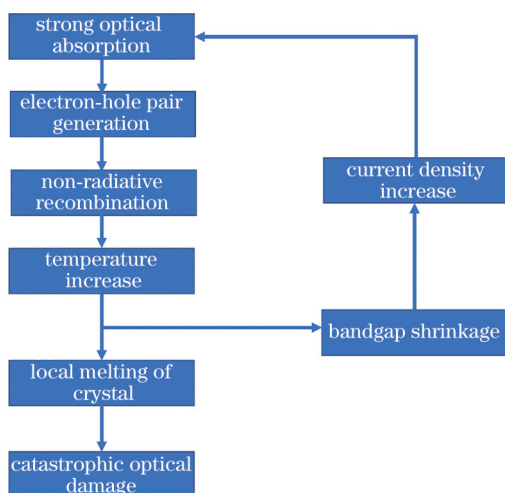


图4 光学损伤的形成过程

Fig. 4 Formation of catastrophic optical damage

3) 电极退化发生在金属与半导体材料的界面,由于扩散作用,焊料材料扩散进半导体内部,从而产生缺陷,引起退化。同时如果芯片材料和焊料的匹配性差,会导致激光器在焊接或工作时产生温度应力,进而引起内部缺陷或芯片裂损。电极的欧姆接触也相当重要。在焊接激光器时,芯片和焊料

间存在的焊接空隙会导致激光器退化。同时焊接中的焊料溢出也易导致PN结短路。

4) 端面绝缘层失效的原因是在芯片端面未镀膜或镀膜质量不好,使焊料沿着端面浸润到芯片的另一极从而引起短路,导致激光器失效。尤其在大电流注入产生的高温环境下,焊料易形成晶须,引起PN结短路^[13]。

3 失效检测和分析手段

光致发光(PL)的原理是将高能光子流打到激光器,激光器无缺陷的部位吸收光子,辐射出新的光子,然后对新激射的光进行接收成像,从而确定缺陷^[14]。德国欧斯朗公司通过光致发光技术对腔面灾变光学损伤的缺陷进行检测^[15]。他们增加激光器的连续波工作驱动电流,使得激光器输出功率突然下降到极低值。通过机械抛光上层的n金属层,然后利用湿法刻蚀技术选择性刻蚀吸收光的n-GaAs,直接刻蚀到n-AlGaInP层。利用488 nm氩激光器(空间分辨率为1 μm)对经过刻蚀后激光器的整个n-AlGaInP层进行扫描,得到了激光器的光致发光图像,如图5(a)所示。可以看到,激光器已经发生严重的腔面灾变光学损伤,暗线缺陷从输出腔面开始分裂出多个分支,其范围超过了谐振器长度的一半。后续,为了检测腔面光学损伤对外延层的影响,他们利用聚焦离子束(FIB)技术观测激光器的切面,据此推断暗线源于量子阱。由于伴随灾变光学损伤的高温 and 熔融,部分缺陷向波导层进行传播。同时,利用深刻蚀,对p-AlGaInP层进行光学成像和FIB分析,结果如图5(b)和图5(c)所示。从实验数据得出缺陷在腔面可来源于腔面的多个点。由材料刻蚀速率的不相同,推断缺陷是由于腔面熔融再结晶,材料变成非晶体导致非辐射复合得来

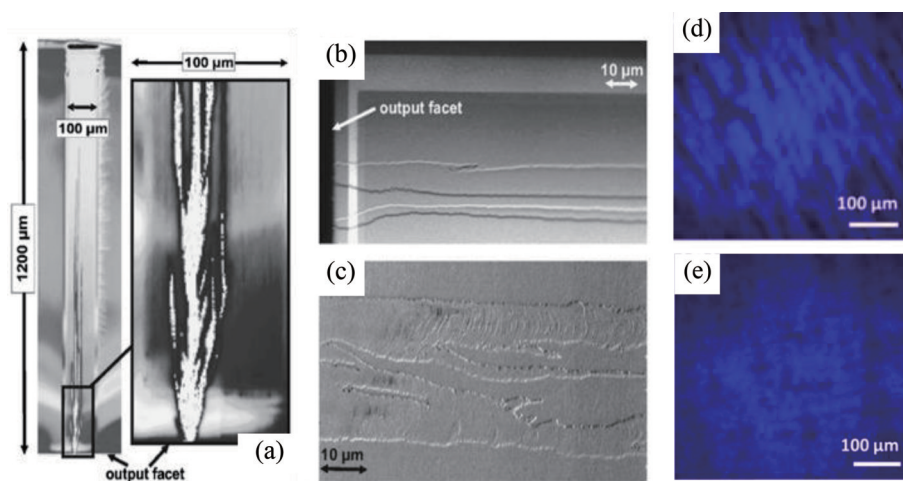


图 5 光致发光技术观测缺陷。(a) n-AlGaInP 层上表面的暗线缺陷；(b) p-AlGaInP 层上表面暗线缺陷；(c) FIB 分析得到的暗线缺陷^[15]；(d) 未优化工艺的 InGaN 基激光器内的缺陷；(e) 优化工艺后的 InGaN 基激光器内的缺陷^[16]

Fig. 5 Defects observed by photoluminescence. (a) Top-view image of DLD on the n-AlGaInP layer; (b) top-view image of DLD on the p-AlGaInP layer; (c) DLDs obtained by FIB analysis^[15]; (d) defect in InGaN-based laser with unoptimized process; (e) defect in InGaN-based laser with optimized process^[16]

的。中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所 Liu 等^[16]将 405 nm 激光器作为激励光源，采用 Nikon A1 激光器扫描共聚焦显微镜对工艺优化前和优化后在 Si 上生长的 InGaN 基激光器的有源区进行扫描，从而得到光致发光图像，如图 5(d) 和图 5(e) 所示。可以观测到缺陷内部缺陷暗点优化后显著减少，同时使激光器的阈值电压从 8.2 V 降至 4.7 V。

电致发光 (EL) 技术是一种激光器在一定的电

场作用下，有源区无缺陷区会正常激光光子，而有缺陷区将无光子产生呈现暗区的技术。中国科学院半导体研究所通过电致发光原理进行了半导体激光器的失效模式分析^[17]。对 90 个退化的 975 nm 的 GaAs 基半导体激光器进行研究，观测到了腔面的灾变光学损伤 (COMD) 和激光器内部的灾变光学损伤 (COBD)，并在近出射端面、近反射端面和有源区内部清晰捕获了暗线缺陷的图像，如图 6 所示。

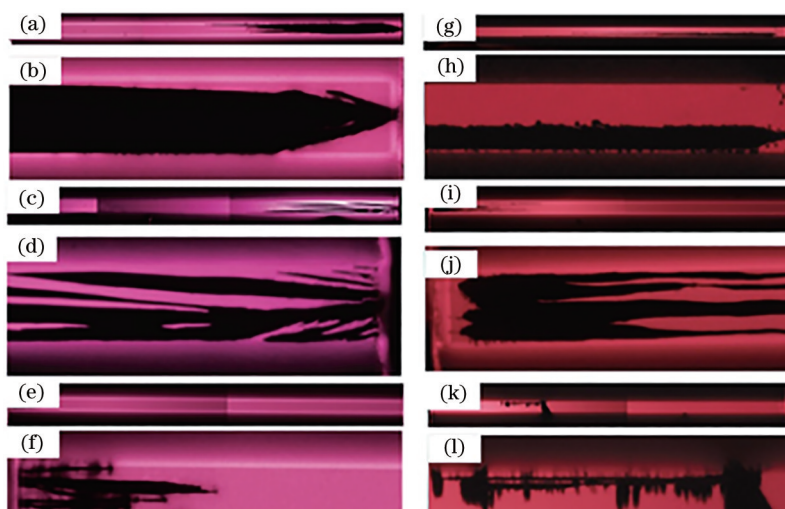


图 6 实验观测到的暗线缺陷^[17]。(a)~(d) 腔面灾变光学损伤，近出射端面暗线；(e)-(f) 腔面灾变光学损伤，近反射端面暗线；(g)-(h) 腔体灾变光学损伤，近出射端面暗线；(i)-(j) 腔体灾变光学损伤，近背面的暗线；(k)-(l) 腔体灾变光学损伤，有源区内部暗线

Fig. 6 DLD observed in the experiment^[17]. (a)~(d) COMD, DLD at the front facet; (e)-(f) COMD, DLD at the rear facet; (g)-(h) COBD, DLD at the front facet; (i)-(j) COBD, DLD at the rear facet; (k)-(l) COBD, DLD in the middle of the active region

阴极发光 (CL) 技术是一种将阴极射线管发射的高能电子束作为激发源, 当电子束作用在材料上, 材料会吸收电子能量, 释放特征光子, 通过收集光子进行成像的技术。该技术可以用来识别材料中的缺陷, 如位错、堆垛层错。2008 年西班牙的巴亚多利德大学利用阴极发光成像, 观测到 808 nm 的 AlGaAs 腔面的 V 型缺陷, 并通过刻蚀暴露有源区, 最终观测到沿 V 型缺陷扩散的暗线缺陷, 结果如图 7(a) 所示, 最终证实局部热应力和封装应力导致

激光器快速退化^[18]。2011 年北京工业大学和中国科学院半导体所合作对 AlGaAs 激光器进行分析, 并利用阴极发光成像技术对研磨和湿法腐蚀后的激光器进行成像, 观测到了在激光器腔面熔融点处的暗线缺陷, 如图 7(b) 所示^[19]。2021 年巴亚多利德大学的 Dadgostar 等^[20]回顾阴极发光技术在激光器退化表征的发展历程, 并展示利用阴极发光技术, InGaAs/AlGaAs 量子阱激光器中由光圈形成暗线缺陷的成像效果, 结果如图 7(c) 所示。

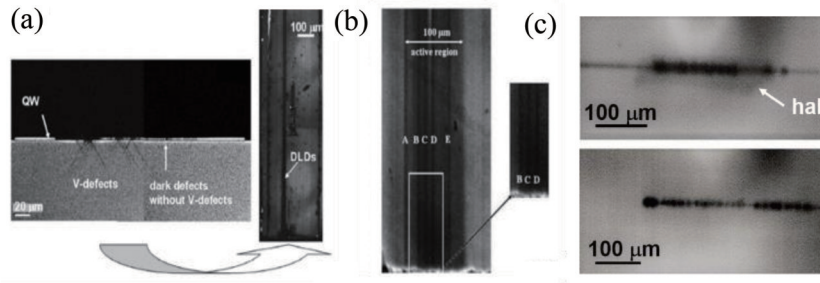


图 7 阴极发光技术对激光器暗线缺陷的观测。(a) 沿 V 型缺陷扩散的暗线缺陷^[18]; (b) 腔面熔融点处的暗线缺陷^[19]; (c) 暗线缺陷形成的光圈^[20]

Fig. 7 DLD observed by cathodoluminescence technology. (a) DLDs diffuse along V-type defects^[18]; (b) DLDs near the melting spots at cavity surface^[19]; (c) halo formed by DLDs^[20]

红外热成像 (IRT) 中, 任何高于绝对零度的物体都向外辐射电磁波, 由于激光器的有源区中有缺陷的部位非辐射复合中心较多, 对其进行电流注入, 非辐射中心将吸收的电能为热能, 使得该区域的温度相对无缺陷的部分更高。红外相机收集不同部位辐射的红外电磁波, 然后处理成热图像,

可清楚辨别缺陷所在位置, 同时能对缺陷的产生过程进行实时观测。德国马克思·波恩研究所的 Martin Hempel 团队利用单脉冲电流驱动激光器, 在激光器打开一个如图 8(a) 所示的窗口。不断向激光器激励单脉冲电流, 通过红外成像设备对窗口暴露的有源区的温度进行记录成像。通过该技术可

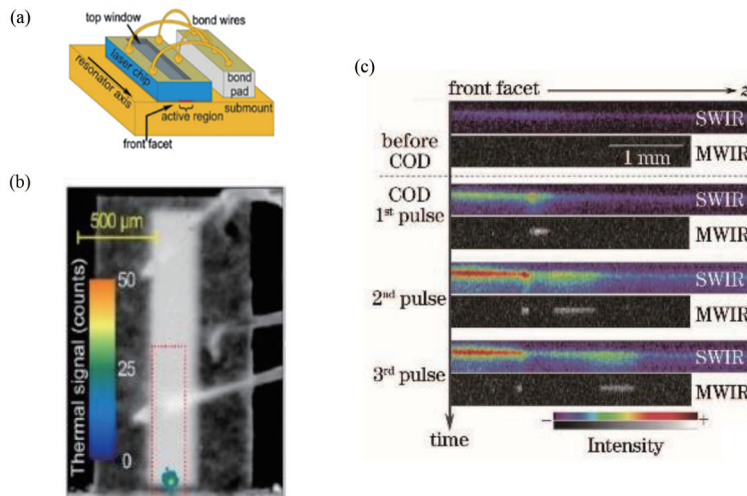


图 8 激光器退化的热成像分析。(a) 热成像分析的样品示意图; (b) 腔面灾变光学损伤热成像图^[21]; (c) 腔面光学损伤短波红外和中波红外热成像图^[22]

Fig. 8 Thermal imaging analysis of laser degradation. (a) Schematic of the sample by thermal imaging analysis; (b) thermal imaging of COMD^[21]; (c) thermal imaging of COMD in the SWIR and MWIR^[22]

以确定激光器发生灾变光学损伤的位置并记录灾变位置的移动过程。图 8(b) 中的局部温度过高点为光学损伤位置^[21]。华东师范大学越方禹等^[22]通过捕捉 3 次注入脉冲电流的短红外和中红外热成像, 分析 GaAs 基 980 nm 激光器的灾变光学损伤动力学过程, 可以检测缺陷位置。

微光显微镜 (EMMI) 原理: 在存在漏电、击穿、热载流子效应的半导体器件中, 失效点可由电致发光发生缺陷发光现象, 通过高分辨率相机进行光电转换, 对发光图像进行处理, 再对发光图像与器件表面的光反射图像进行叠加, 就可实现失效点和缺陷的定位。对于激光器缺陷的定位, 微光显微镜可实现对腔面灾变光学损伤的无损定位。当 PN 结反向偏置时, 反向电压引起的隧穿电子与空穴复合或者雪崩产生的电子-空穴复合都会激射光子。由于

在缺陷处反向漏电流更大, 所以发光更强, 通过观测发光图像即可定位缺陷。北京工业大学的冯士维团队通过对老化后激光器进行反向加压 (偏置电压大于 8 V), 观测到腔面的灾变光学损伤点^[23], 如图 9 所示。图 9(a) 为老化前的激光器在反向偏置电压作用下不同放大倍数的成像情况, 结果显示无任何明显特征。图 9(b) 为老化后激光器的发光情况, 可观测到缺陷点处漏电流的位置^[23]。图 9(c) 为观测到腔面的灾变光学损伤的位置^[24]。该技术可以在不损坏激光器的情况下快速找到端面的缺陷位置, 非常适合对腔面灾变损伤进行定位和初步分析。本课题组利用自主设计的 EMMI 系统, 观测到存在较大漏电流的半导体激光器缺陷发光图像, 如图 9(d) 所示。在 50 倍放大倍率下, 可以观测到端面出现因漏电流产生的缺陷发光。

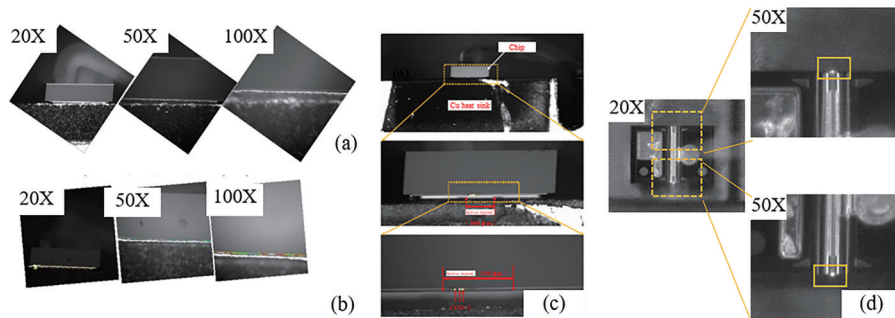


图 9 微光显微镜分析缺陷。(a) 反向 8 V 偏置电压下, 老化前激光器腔面微光显微图像; (b) 反向 8 V 偏置电压下, 老化后激光器腔面微光显微图像^[23]; (c) 反向 10 V 偏置电压下, 老化后激光器腔面灾变光学损伤的微光显微图像^[24]; (d) 反向 9 V 偏置电压下, 存在漏电流的激光器缺陷发光图像

Fig. 9 Defects analysis by EMMI. (a) Micro-image of laser facet before aging under reverse 8-V bias voltage; (b) micro-image of laser facet after aging under reverse 8-V bias voltage^[23]; (c) micro-image of laser COMD after aging under reverse 10-V bias voltage^[24]; (d) micro-image of defect emission of laser with leakage current under reverse 9-V bias voltage

光致发光技术、阴极发光技术、电致发光技术、红外热成像和微光显微镜 5 种技术都可以实现缺陷分析和检测。5 种检测手段的技术原理具有较大差别, 因此在检测技术难度、样品制备方式、检测所需时间、检测费用和检测类型有着较大差异。表 1 列举了 5 种检测技术在操作时间、检测费用、检测类型和成像分辨率 4 个方面的对比。

半导体激光器有边发射激光器 (EEL) 和垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 两种类型。半导体器件检测方式常划分为有损检测和无损检测。5 种检测手段的检测类型 (有损检测或无损检测) 会根据不同类型激光器以及相同类型激光器的不同检测部位相应改变。激光器产生光的部位为有源区, VCSEL 常观测部位为激光器顶部, EEL 常观测激

光器顶部和出光腔面。由于 EEL 的激光器上表面常被大面积的金属电极覆盖, 因此无法观测有源区内部, 只能通过特殊处理后从芯片背向观测有源区, 这些特殊处理目前普遍采取研磨和刻蚀的方法, 因此需要背向观测的检测手段, 但是这些手段都是有损检测。此外 IRT 常采用刻蚀的方法开设透光窗口, 观测 EEL 的顶部, 所以 IRT 为有损检测。

EEL 观测激光器顶部和出射腔面, 无需特殊处理, 只需要提供外部供电设备和相应波段的 CCD 相机即可实现成像, 因此相对操作难度低, 而且技术要求不高, 检测费用相对较低。EL 可实现激光器腔面和有源区内部的缺陷检测。但是对于大多数 EEL, 其有源区多被金属电极覆盖, 无法观测。因此需要复杂的制样和加电观测过程, 因而检测时间

表 1 5 种检测手段的对比
Table 1 Comparison of five detection methods

Method	Labor time /h	Cost /yuan	Detect category	Resolution
PL	4	4000	Non-destructive (VCSEL, Topside)	Medium
			Non-destructive (EEL, Topside)	
			Destructive (EEL, Backside)	
EL	0.2-3	120-2000	Non-destructive (VCSEL, Topside)	Medium
			Non-destructive (EEL, Topside and front facet)	
			Destructive (EEL, Backside)	
CL	5	20000	Non-destructive (VCSEL, Topside)	High
			Non-destructive (EEL, Topside)	
			Destructive (EEL, Backside)	
IRT	0.5	/	Non-destructive (VCSEL, Topside)	Medium
			Non-destructive (EEL, Front facet)	
			Destructive (EEL, Topside)	
EMMI	0.4	1000	Non-destructive (VCSEL, Topside)	Medium
			Non-destructive (EEL, Topside and front facet)	

和费用会增加,同时由于后续要制备电极或探针作为加电装置直接接触待测样品,测试结果易受影响。

PL 常用波长短的光源作为激励光源,对样品进行扫描,得到发光图像,主要对激光器有源区内部缺陷进行检测。激励源不接触待测样品,减小测试过程中外界因素对结果的影响。随着待测器件尺寸的不断缩小,对成像的分辨率要求不断提高。PL 由于采用聚焦后光源,所以光衍射严重限制了 PL 成像的空间分辨率。同时光的穿透深度受到材料吸收系数所限,一般为 100~200 nm,一方面对样品制备提出较高的要求,一方面不适合多层量子阱结构的激光器检测。

CL 主要针对激光器有源区内部,与 PL 不同,激励源采用电子束而不是光源。电子束相对于光源不受光学衍射影响,具有更高的分辨率,而且通过控制电子束的能量可以控制穿透的深度(可达 2~3 μm),适合多层结构的检测^[20]。PL 和 CL 都需要利用激励源对样品进行扫描,因此相对其他技术,需要较长的时间,同时针对 EEL 观测,两种方法多采用研磨和湿法刻蚀的方式制备背向观测样品。相对其他检测手段,CL 设备昂贵,因此检测费用较高。

IRT 主要利用非辐射复合缺陷处热量高的特点,主要采用制冷型 InSb 的 CCD 相机对温度异常点进行成像和检测,目前仅用于检测激光器的腔面的灾变光学损伤点位置和监测灾变损伤的形成过

程。检测有源区情况,需要制作透明窗口,增加工艺步骤,而且由于 COD 的发生过程比相机的时间分辨率要快,所以监测 COD 形成过程是否准确有待进一步探究。目前很少有实验室采用该检测方法。

EMMI 已经是集成电路中常用的缺陷检测手段,主要采用带制冷的 Si 的 CCD 相机采集图像,目前已经开始用于激光器的漏电流缺陷检测。其检测方法主要对器件施加反向偏压,因此检测过程需要小心,防止施加电压过大导致芯片反向击穿。由于属于无损检测,而且检测费用不高,检测时间较短,EMMI 未来有希望成为与半导体激光器的光-电流-电压(L-I-V)测试一样的基础性测试工序。

4 失效改善措施

针对常见的半导体激光器缺陷,研究人员已经采取了不同的改善半导体失效的措施。解决问题的切入点主要有激光器的腔面问题、激光器有源区内部问题、激光器焊接问题和操作环境问题。

1) 真空解理镀膜技术

在真空中对外延片进行解理,然后进行端面钝化和镀膜,有效减少端面氧化和污染。美国的 SVT Associates 公司制作的解理系统可以在超高真空条件下实现晶圆解理^[25]。长春理工大学王鑫等^[26]利用真空解理镀膜机对 850 nm 的 GaAs 基激光器进行真空解理后,蒸镀 Si 钝化膜,并与未在真空

解理的激光器进行对比。实验结果显示,在空气中解理的激光器由于受到空气中氧和碳元素的污染,3 d后功率下降 1/2,而真空解理的激光器未出现明显功率下降的现象。北京工业大学的凌小涵等^[27]通过真空解理技术制作大光腔的 980 nm 半导体激光器,使其输出功率达到 12 W,成品率可达 40%。真空解理镀膜技术虽然能提高腔面性能,但技术复杂,设备相当昂贵,不利于大批量生产。

2) 特殊材料进行端面钝化

端面钝化后形成保护膜,减小界面态的密度,降低非辐射复合速率,提高腔面光学损伤阈值。常用的钝化液有含硫溶液,硫溶液可以抑制氧化反应,减少表面态复合中心数目^[28-29]。其中含硫溶液主要有 $(\text{NH}_4)_2\text{S}_x$ 、 Na_2S 和十八烷基硫醇(ODT)。相应的研究团队有日本 NTT 跨学科研究实验室^[30]、俄罗斯科学院物理技术研究所^[31]、美国宾夕法尼亚州立大学^[32]。同时含氮的钝化液也得到相应的研究,俄罗斯科学院约飞物理技术研究所 Berkovits 等^[33]通过实验,得到含氮的联氨溶液生成的氮化物比硫化物更加稳定。利用钝化液钝化,技术难度小,但是钝化操作易受到空气中氧侵蚀。

3) 端面处形成非吸收窗技术

端面形成非吸收窗,主要是在端面产生高带隙的材料,减少对光的吸收,从而改善可靠性。形成非吸收窗的方式主要有外延技术和量子阱混杂技术^[34]。

利用外延技术形成非吸收窗口主要有二次外延生长和选择区域外延生长两种方式。二次外延通过腐蚀腔面附近材料,再生长高带隙的氧化物形成非吸收窗。美国 Ortel 公司的 Ungar 等^[35-36]利用二次生长的 AlGaAs 作为 980 nm 激光器的非吸收窗口,使输出功率达到 500 mW。在 100 mW, 50 °C 的老化条件下激光器可工作 2700 h。选择区域外延生长则利用外延材料不能在掩模层成核的原理,利用掩模层图形在腔面附近形成非吸收窗口。美国伊利诺大学的 Lammert 等^[37]利用选择区域的金属有机物化学气相沉积,制作 13 μm 非吸收窗,将输出功率提高 40%。二次外延由于工艺步骤复杂而且在非吸收区存在衍射损耗,不利于实际应用。

量子阱混杂技术主要包括 6 种技术手段,分别为高温快速退火、离子注入、激光器诱导、杂质扩散^[38]、无杂质空位扩散和耦合氩等离子增强诱导量子阱混杂。1990 年,日本电气股份有限公司的

Ueno 等^[39]利用 Zn 杂质在 680 nm 的 AlGaInP 可见光激光器二极管端面进行扩散掺杂,端面处的带隙增大,形成非吸收窗口,将连续输出模式下的输出功率提高到 75 mW,相比传统激光器的输出功率,提高 2~3 倍。1993 年,日本三菱电器公司的 Arimoto 等^[40]利用 ZnO 薄膜对 670 nm GaInP 激光器进行 Zn 扩散来制作窗口结构,实现 150 mW 功率的无光学失效输出。在量子阱混杂技术中,无杂质空位扩散工艺相对于有杂质空位扩散工艺扩散简单,而且不引入杂质和低光学损耗,是目前的主流。由于 Ga 在 SiO_2 中具有很高的扩散吸收和溶解度,常作为促进混合介质材料。而 TiO_2 和 Si_3N_4 常作为抑制混合材料。日本古川电工业公司^[41]、日本滨松光子公司^[42]和法国的 Thomson-CSF^[43]相继用无杂质空位扩散制造窗口结构。中国科学院半导体研究所^[44-45]和长春理工大学^[46]在制备半导体激光器的窗口结构方面也有突破进展。虽然量子阱混杂技术能提高腔面性能,但是由于工艺过程中存在快速热退火过程,容易影响器件质量,因此需要优化量子阱混杂工艺,降低高温退火的温度。

4) 端面附近引入非注入区

在端面附近引入非注入区来减少端面的载流子注入,从而减小非辐射复合的发生几率,进而抑制腔面温度的升高。实现腔面非注入区主要有在腔面附近生长电流阻挡层、去除腔面附近重掺杂区和离子注入形成高阻区这三种方式。最早日本日立集团的 Sagawa 等^[47]采用氧化层作为电流阻挡层,将输出功率从 350 mW 提升至 466 mW。中国科学院半导体所的方高瞻等^[48]采用 SiO_2 作为非注入区,将 808 nm GaAs/AlGaAs 激光器阵列的抗灾变损伤能力提高 40%。电子科技集团第十三研究所张世祖等^[49]通过腐蚀端面附近 GaAs 的高掺杂区,形成非注入区,使得 808 nm 激光器输出功率从 3.1 W 提高到 3.7 W。北京工业大学刘斌等^[50]利用腐蚀工艺在腔面形成 25 μm 长的脊型波导非注入窗口,解决传统腔面去除高掺杂层导致发散角度增大的问题,并提高光学损伤损伤阈值 20%。证据科学教育部重点实验室的刘斌和中科院半导体研究所的刘媛媛等^[51]利用氩离子注入的方法形成腔面电流非注入区,非注入区的引入将老化寿命从 1500 h 提高到 3000 h 以上,同时结果显示,引入非注入区会使激光器最大输出光功率提高 8%。生长电流阻挡层工艺相对简单,但是电流会侧向扩散注入腔面,导致非

注入区失效。湿法腐蚀易对限制层产生损伤,从而影响光束质量,应添加必要的腐蚀阻挡层。离子注入与镀膜工艺兼容,适合批量生产,但是在非注入区会引入晶格缺陷,要采取适当的退火工艺来消除产生的缺陷。需要合理优化退火工艺,减少退火过程中的高温引起的激光器内部缺陷。

5) 离子辅助镀膜技术

半导体激光器芯片在空气中解理,会使腔面受空气中的氧和其他杂质污染,利用离子束进行清洗,可去除表面杂质而且使镀膜更牢靠,有效抑制激光器的退化。北京工业大学的何新等^[52]利用氩离子辅助氮钝化,将腔面氧含量从 61% 降至 30%,使得激光器输出功率提高 18.9%。

解决有源区内部问题的改善措施如下。

1) 选取低位错密度的材料作为衬底,防止在激光器制备过程中,衬底中的穿透位错向有源区内部攀移和生长。采用蒸汽压控制直拉法和垂直 Bridgman 法制备单晶 GaAs 和 InP,可获得具有极低位错密度的衬底^[53-54]。同时通过循环退火释放内部应力和引入应变缓冲层,可以有效抑制穿透位错^[55-57]。英国伦敦城市学院 Tang 等^[58]利用 InAlAs/GaAs 和 InGaAs/GaAs 两种超晶格应变层,硅衬底上 InAs/GaAs 量子点激光器的缺陷数量降低 3 个数量级。中国科学院西安光学精密机械研究所 Song 等^[59]通过 AlGaIn/GaN 超晶格缓冲层,实现蓝宝石上生长的 GaN 穿透位错减少 1/3。

2) 外延制备过程的生长温度、掺杂情况以及气体流量比要进行合理优化^[60]。合理设计有源区的结构,通过减小有源区的尺寸可以有效地减少缺陷进入。有源区不进行掺杂或轻掺杂可直接降低本征缺陷的密度,降低位错滑移几率。

3) 在制备和封装等工艺中减少对芯片的应力损伤。

4) 在激光器大功率输出过程中,有源区内部温度非常高,应采用良好的散热装置,减少激光器内部热应力产生的缺陷。传统的散热方式主要有自然对流热沉冷却散热、半导体制冷和大通道水冷散热^[61-63]。随着激光器输出功率的不断提高,传统技术已经无法满足当今需求,可以采用新型的散热方式,如微通道散热^[64]、喷雾冷却^[65]和热管散热^[66]。

解决焊接问题的改善措施如下。

1) 在芯片焊接过程中,保证热沉表面的平整、焊料的均匀性,防治焊层出现间隙和空洞。同时选

用低熔点、不易产生合金反应的焊料,如 Au-Sn 合金和纳米银焊膏^[67]等。

2) 在烧焊过程中,选用焊接应力小、热膨胀系数匹配性好、散热性好和稳定的材料。焊接应该在具有惰性和还原性的气氛中进行,优化烧焊工艺曲线^[68],最终得到均匀、无空洞并可靠的焊接界面。

解决操作环境问题的改善措施如下。

1) 由于静电和电压浪涌会使器件失效^[69],所以采用必要的防静电措施,如在激光器外部设计静电释放的物理电路,使用防静电地毯、防静电工作台和防静电服,控制环境湿度、焊接和测试仪器接地等。

2) 防止在操作和制备激光器过程中引入划痕和机械损伤。

3) 保证激光器封装前所处环境的清洁,防止杂质附着在激光器腔面,引起氧化和缺陷产生。

5 总结与展望

在过去几十年中,半导体激光器在光通信、军事、医疗和航天等领域已经发挥着关键作用。重点介绍了半导体激光器失效机理、失效分析手段和失效改善措施。可以看出激光器可靠性的提高不仅提高激光器寿命,而且使其最大输出光功率和对环境条件的容忍性等都有着极大的增强。从事激光器研究和生产的人员在优化材料外延生长工艺前提下,可利用所述的量子阱混杂、离子辅助镀膜和优化烧焊过程等方式来提高制作的激光器可靠性,同时避免操作环境问题造成器件失效,这将极大地促进半导体激光器性能的改善。随着微电子工艺和材料科学的发展,新型材料生长工艺、新型烧焊焊料、新型镀膜材料和热沉材料势必会进一步提高激光器的可靠性。半导体激光器可靠性的提高将使其扩展到更多应用领域,发挥越来越重要的作用。

参 考 文 献

- [1] Hall R N, Fenner G E, Kingsley J D, et al. Coherent light emission from GaAs junctions[J]. Physical Review Letters, 1962, 9(9): 366.
- [2] Zhu Z C, Ye J. Overview of lasers for material processing[J]. Heat Treatment, 2008, 23(5): 1-6. 朱祖昌, 叶俭. 应用在材料加工上的激光器概述[J]. 热处理, 2008, 23(5): 1-6.
- [3] Zhu N H. Status and prospect of directly modulated

- semiconductor lasers[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2019, 17(1): 1-5.
- 祝宁华. 高速半导体激光器的现状与展望[J]. *光学与光电技术*, 2019, 17(1): 1-5.
- [4] Yuan Q H, Jing H Q, Zhang Q Y, et al. Development and applications of GaAs-based near-infrared high power semiconductor lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(4): 040003.
- 袁庆贺, 井红旗, 张秋月, 等. 砷化镓基近红外大功率半导体激光器的发展及应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(4): 040003.
- [5] Lu D, Yang Q L, Wang H, et al. Review of semiconductor distributed feedback lasers in the optical communication band[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(7): 0701001.
- 陆丹, 杨秋露, 王皓, 等. 通信波段半导体分布反馈激光器[J]. *中国激光*, 2020, 47(7): 0701001.
- [6] Chen L H, Yang G W, Liu Y X. Development of semiconductor lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 0500001.
- 陈良惠, 杨国文, 刘育衍. 半导体激光器研究进展[J]. *中国激光*, 2020, 47(5): 0500001.
- [7] Meng X, Ning Y Q, Zhang J W, et al. Research progress of red semiconductor laser diodes for laser display[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(18): 180001.
- 孟雪, 宁永强, 张建伟, 等. 面向激光显示的红光半导体激光器的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(18): 180001.
- [8] Zhang Y, Xu P. Research progress of GaN-based laser diodes[J]. *Nonferrous Metal Materials and Engineering*, 2020, 41(1): 54-60.
- 张洋, 徐鹏. GaN基激光器的研究进展[J]. *有色金属材料与工程*, 2020, 41(1): 54-60.
- [9] Ueda O. Degradation of III-V opto-electronic devices[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1988, 135(1): 11C.
- [10] Petroff P, Hartman R L. Rapid degradation phenomenon in heterojunction GaAlAs-GaAs lasers[J]. *Journal of Applied Physics*, 1974, 45(9): 3899-3903.
- [11] Maeda K, Sato M, Kubo A, et al. Quantitative measurements of recombination enhanced dislocation glide in gallium arsenide[J]. *Journal of Applied Physics*, 1983, 54(1): 161-168.
- [12] Yang S H, Huang Y. Progress in high power semiconductor lasers lifetime evaluation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, 44(6): 34-37.
- 杨少华, 黄云. 大功率半导体激光器的寿命评价研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, 44(6): 34-37.
- [13] Gao S X, Wei B, Lü W Q, et al. Failure analysis of high power diode laser array[J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2005, 17(S1): 97-100.
- 高松信, 魏彬, 吕文强, 等. 大功率二极管激光器失效特性研究[J]. *强激光与粒子束*, 2005, 17(S1): 97-100.
- [14] Jimenez J, Tomm J W. Photoluminescence (PL) techniques[M]//Spectroscopic analysis of optoelectronic semiconductors. Springer series in optical sciences. Cham: Springer, 2016, 202: 143-211.
- [15] Sanayeh M B, Jaeger A, Schmid W, et al. Investigation of dark line defects induced by catastrophic optical damage in broad-area AlGaInP laser diodes[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(10): 101111.
- [16] Liu J X, Wang J, Sun X J, et al. Performance improvement of InGaN-based laser grown on Si by suppressing point defects[J]. *Optics Express*, 2019, 27(18): 25943-25952.
- [17] Liu Q K, Kong J X, Zhu L N, et al. Failure mode analysis of high-power laser diodes by electroluminescence[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2018, 39(2): 180-187.
- 刘启坤, 孔金霞, 朱凌妮, 等. 电致发光用于大功率半导体激光器失效模式分析[J]. *发光学报*, 2018, 39(2): 180-187.
- [18] Martín-Martín A, Avella M, Iniguez M P, et al. A physical model for the rapid degradation of semiconductor laser diodes[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(17): 171106.
- [19] Qiao Y B, Feng S W, Xiong C, et al. Spatial hole burning degradation of AlGaAs/GaAs laser diodes[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(10): 103506.
- [20] Dadgostar S, Souto J, Jiménez J. CL as a tool for device characterisation: the case of laser diode degradation[J]. *Nano Express*, 2021, 2(1): 014001.
- [21] Hempel M, la Mattina F, Tomm J W, et al. Defect evolution during catastrophic optical damage of diode lasers[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2011, 26(7): 075020.
- [22] Yue F Y, Mao F, Wang H, et al. Infrared defect emission and thermal effect in high power diode lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(11): 110001.
- 越方禹, 毛峰, 王涵, 等. 大功率半导体激光器红外

- 缺陷发射与热效应[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(11): 110001.
- [23] Gong X Q. The study for the accelerated degradation test method and facet coating reliability of high power GaAs-based laser diodes[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016.
龚雪芹. 大功率 GaAs 基半导体激光器加速老化试验方法及腔面膜可靠性的研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2016.
- [24] Zhang S Y. The catastrophic optical damage monitoring and failure mechanism study of high power GaAs-based semiconductor laser diodes[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2018.
张思雨. 大功率 GaAs 基半导体激光器 COD 监控及失效机理研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2018.
- [25] AssociatesSVT, Inc[EB/OL]. [2021-01-10]. <https://www.svta.com/>.
- [26] Wang X, Qu Y, Gao T, et al. Study on vacuum cleavage passivation technology of GaAs semiconductor laser[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2014, 35(6): 1013-1015, 1049.
王鑫, 曲轶, 高婷, 等. GaAs 基半导体激光器真空解理钝化工艺研究[J]. 半导体光电, 2014, 35(6): 1013-1015, 1049.
- [27] Ling X H, Cui B F, Zhang S, et al. Failure analysis of 980 nm large-optical-cavity single light bar high-power LD[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(4): 369-372.
凌小涵, 崔碧峰, 张松, 等. 980 nm 大光腔单发光条大功率 LD 失效分析[J]. 激光与红外, 2015, 45(4): 369-372.
- [28] Beister G, Maeger J, Sebastian J, et al. Stability of sulfur-passivated facets of InGaAs-AlGaAs laser diodes[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1996, 8(9): 1124-1126.
- [29] Berkovits V L, L'Vova T V, Ulin V P. Chemical nitridation of GaAs(100) by hydrazine-sulfide water solutions[J]. Vacuum, 2000, 57(2): 201-207.
- [30] Oshima M, Scimeca T, Watanabe Y, et al. Oxidation of sulfur-treated GaAs surfaces studied by photoluminescence and photoelectron spectroscopy [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1993, 32(15): 518.
- [31] Bessolov V N, Konenkova E V, Lebedev M V. Solvent effect on the properties of sulfur passivated GaAs[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, 1996, 14(4): 2761-2766.
- [32] Nakagawa O S, Ashock S, Sheen C W, et al. GaAs interfaces with octadecyl thiol self-assembled monolayer: structural and electrical properties[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1991, 30(12B): 3759-3762.
- [33] Berkovits V L, Gordeeva A B, L'vova T V, et al. Nitride and sulfide chemisorbed layers as the surface passivants for A3B5 semiconductors[M]//Kervalishvili P J, Yannakopoulos P H. Nuclear radiation nanosensors and nanosensory systems. NATO science for peace and security series B: physics and biophysics. Dordrecht: Springer, 2016: 61-79.
- [34] Lin T, Sun H, Zhang H Q, et al. Present status of impurity free vacancy disordering research and application[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(3): 030003.
林涛, 孙航, 张浩卿, 等. 无杂质空位诱导量子阱混杂研究及应用现状[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(3): 030003.
- [35] Ungar J E, Kwong N S K, Oh S W, et al. High power 980 nm nonabsorbing facet lasers[J]. Electronics Letters, 1994, 30(21): 1766-1767.
- [36] Lammert R M, Ungar J E, Oh S W, et al. High-power InGaAs-GaAs-AlGaAs distributed feedback lasers with nonabsorbing mirrors[J]. Electronics Letters, 1998, 34(9): 886-887.
- [37] Lammert R M, Coleman J J, Smith G M, et al. Strained-layer InGaAs-GaAs-AlGaAs buried-heterostructure lasers with nonabsorbing mirrors by selective-area MOCVD[J]. Electronics Letters, 1995, 31(13): 1070-1072.
- [38] Laidig W D, Holonyak N, Jr, Camras M D, et al. Disorder of an AlAs-GaAs superlattice by impurity diffusion[J]. Applied Physics Letters, 1981, 38(10): 776-778.
- [39] Ueno Y, Endo K, Fujii H, et al. Continuous-wave high-power (75 mW) operation of a transverse-mode stabilised window-structure 680 nm AlGaInP visible laser diode[J]. Electronics Letters, 1990, 26(20): 1726-1728.
- [40] Arimoto S, Yasuda M, Shima A, et al. 150 mW fundamental-transverse-mode operation of 670 nm window laser diode[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1993, 29(6): 1874-1879.
- [41] Taniguchi H, Ishii H, Minato R, et al. 25-W 915-nm lasers with window structure fabricated by impurity-free vacancy disordering (IFVD)[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics,

- 2007, 13(5): 1176-1179.
- [42] Morita T, Nagakura T, Torii K, et al. High-efficient and reliable broad-area laser diodes with a window structure[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, 19(4): 1502104.
- [43] Collot P, Arias J, Mira V, et al. Nonabsorbing mirrors for AlGaAs quantum well lasers by impurity-free interdiffusion[J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3628: 260-266.
- [44] Yao N, Zhao Y H, Liu S P, et al. High power 915 nm semiconductor lasers with non-absorbing windows[J]. Semiconductor Technology, 2015, 40(8): 596-600.
姚南, 赵懿昊, 刘素平, 等. 带有非吸收窗口的大功率 915 nm 半导体激光器[J]. 半导体技术, 2015, 40(8): 596-600.
- [45] Wang X, Zhao Y H, Zhu L N, et al. Impurity-free vacancy diffusion induces quantum well intermixing in 915 nm semiconductor laser based on SiO₂ film[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(3): 0314003.
王鑫, 赵懿昊, 朱凌妮, 等. 基于 SiO₂ 薄膜的 915 nm 半导体激光器的无杂质空位诱导量子阱混合研究[J]. 光子学报, 2018, 47(3): 0314003.
- [46] Zhou L, Bo B X, Wang Y H, et al. Study of 940 nm semiconductor lasers with non-absorb window structure fabricated by impurity-free vacancy disordering[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(8): 0802001.
周路, 薄报学, 王云华, 等. 基于无杂质空位混杂法制备带有无吸收窗口的 940 nm GaInP/GaAsP/GaInAs 半导体激光器研究[J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0802001.
- [47] Sagawa M, Hiramoto K, Uomi K, et al. High power COD-free operation of 0.98 μm InGaAs/GaAs/InGaP lasers with non-injection regions near the facets[J]. Electronics Letters, 1994, 30(17): 1410-1411.
- [48] Fang G Z, Xiao J W, Ma X Y, et al. High power GaAs/AlGaAs (λ=808 nm) laser diode arrays with non-injection regions near the facets[J]. High Technology Letters, 2000, 10(12): 9-11.
方高瞻, 肖建伟, 马骁宇, 等. 带有腔面非注入区的大功率 808 nm GaAs/AlGaAs 激光二极管列阵[J]. 高技术通讯, 2000, 10(12): 9-11.
- [49] Zhang S Z, Yang H W, Hua J Z, et al. High power laser diode with non-injection regions near the facet [J]. Micronanoelectronic Technology, 2009, 46(5): 270-273.
张世祖, 杨红伟, 花吉珍, 等. 基于腔面非注入技术的大功率半导体激光器[J]. 微纳电子技术, 2009, 46(5): 270-273.
- [50] Liu B, Zhang J M, Ma X Y, et al. Investigation of 980 nm ridge waveguide lasers with current non-injection regions by He ion implantaion[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2003, 24(3): 234-237.
刘斌, 张敬明, 马骁宇, 等. 氦离子注入形成 980 nm 脊型波导激光器腔面非注入区的研究[J]. 半导体学报, 2003, 24(3): 234-237.
- [51] Liu B, Liu Y Y, Cui B F. Long-term aging and failure analysis for 980 nm laser diodes[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(9): 091404.
刘斌, 刘媛媛, 崔碧峰. 980 nm 半导体激光器长期老化结果及失效分析[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(9): 091404.
- [52] He X, Cui B F, Liu M H, et al. Research on nitrogen passivation for high power semiconductor lasers[J]. Laser & Infrared, 2016, 46(7): 805-808.
何新, 崔碧峰, 刘梦涵, 等. 大功率半导体激光器腔面氮钝化的研究[J]. 激光与红外, 2016, 46(7): 805-808.
- [53] Zhang W C, Han H P, Yang J. The material property and growing method of InP single crystal[J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing, 2018, 47(4): 36-41.
张伟才, 韩焕鹏, 杨静. InP 单晶材料性能及制备方法[J]. 电子工业专用设备, 2018, 47(4): 36-41.
- [54] Zhou C F, Lan T P, Sun Q. GaAs materials: a review of technological development and market demands[J]. Tianjin Science & Technology, 2015, 42(3): 11-15.
周春锋, 兰天平, 孙强. 砷化镓材料技术发展及需求[J]. 天津科技, 2015, 42(3): 11-15.
- [55] Lee J W, Shichijo H, Tsai H L, et al. Defect reduction by thermal annealing of GaAs layers grown by molecular beam epitaxy on Si substrates[J]. Applied Physics Letters, 1987, 50(1): 31-33.
- [56] Yamaguchi M. Dislocation density reduction in heteroepitaxial III-V compound films on Si substrates for optical devices[J]. Journal of Materials Research, 1991, 6(2): 376-384.
- [57] Beneking H, Narozny P, Emeis N, et al. Reduction of dislocations in GaAs and InP epitaxial layers by quasi ternary growth and its effect on device performance[J]. Journal of Electronic Materials, 1986, 15(4): 247-250.
- [58] Tang M C, Chen S M, Wu J, et al. 1.3-μm InAs/

- GaAs quantum-dot lasers monolithically grown on Si substrates using InAlAs/GaAs dislocation filter layers[J]. *Optics Express*, 2014, 22(10): 11528-11535.
- [59] Song J, Choi J, Han J. Improving performance of semipolar (20 $\bar{2}$ 1) light emitting diodes through reduction of threading dislocations by AlGaN/GaN superlattice interlayer[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2020, 536: 125575.
- [60] Ueda O, Pearton S J. *Materials and reliability handbook for semiconductor optical and electron devices*[M]. New York: Springer, 2013: 153-154.
- [61] Liu X S, Zhao W, Xiong L L, et al. *Materials in high power semiconductor laser packaging*[M]// *Packaging of high power semiconductor lasers. Micro- and opto-electronic materials, structures, and systems*. New York: Springer, 2014: 155-183.
- [62] Rasheed F F, Jasim S Y, Jassim M J. Controlling the wavelength of a high power diode laser using thermoelectric cooler[J]. *Iraqi Journal of Physics*, 2012, 10(17): 66-70.
- [63] Zhao H, Li B, Wang W J, et al. Water cooling radiator for solid state power supply in fast-axial-flow CO₂ laser[J]. *Frontiers of Optoelectronics*, 2016, 9(4): 585-591.
- [64] Kozłowska A, Łapka P, Seredyński M, et al. Experimental study and numerical modeling of micro-channel cooler with micro-pipes for high-power diode laser arrays[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 91: 279-287.
- [65] Yang B, Gao S X, Liu J, et al. Spray cooling of high power diode laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(7): 9-12.
杨波, 高松信, 刘军, 等. 高功率二极管激光器喷雾冷却实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(7): 9-12.
- [66] Shu S L, Hou G Y, Wang L J, et al. Heat dissipation in high-power semiconductor lasers with heat pipe cooling system[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2017, 31(6): 2607-2612.
- [67] Peng B, Zhang P, Chen T Q, et al. Reliability of bonding interface in high power diode lasers[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(11): 1105002.
彭勃, 张普, 陈天奇, 等. 高功率半导体激光器互连界面可靠性研究[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(11): 1105002.
- [68] Xu H W, Ren Y X, An Z F, et al. Packaging of 808 nm 1500 W continuous wave operation perpendicularity laser diode stack[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(11): 2769-2773.
徐会武, 任永学, 安振峰, 等. 808 nm 连续 1500 W 阵列激光器封装[J]. *中国激光*, 2010, 37(11): 2769-2773.
- [69] Huang X Z, Cui B F, Guo W L, et al. Study on static electric shoke failure of GaAs based high power laser[J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(6): 698-702.
黄欣竹, 崔碧峰, 郭伟玲, 等. GaAs 基大功率激光器静电失效现象的研究[J]. *激光与红外*, 2017, 47(6): 698-702.