光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20251012004

半导体激光器工作可靠性评价方法研究

韩宝妮*，李　婧，文　平，刘涵颖，李海岸，董作典
（中国空间技术研究院西安分院，西安 710000）

摘　要： 空间光通信技术是空间通信的前沿发展方向，激光器作为空间光通信系统中的核心元器件，其功能性能和可靠性直接影响空间光通信系统的稳定性。基于半导体激光器的应用失效案例和固有失效模式分析，结合其特点和应用需求，文章提出一种半导体激光器工作可靠性评价方法，以解决现有评价方法对半导体激光器主要失效模式评价覆盖性不足的问题。该方法有效解决了半导体激光器长寿命、高可靠应用中的质量保证关键难题，可推广应用于长寿命、高可靠半导体激光器的质量保证工程实践，以确保应用的可靠性。

关键词： 半导体激光器；失效模式；工作可靠性；评价方法

中图分类号： TN248　**文章编号：** 1001－5868(2025)06－1011－06

Research on Evaluation Methods for the Operational Reliability of Semiconductor LASERS

HAN Baoni, LI Jing, WEN Ping, LIU Hanying, LI Haian, DONG Zuodian
(China Academy of Space Technology(Xi'an), Xi'an 710000, CHN)

Abstract: Space optical communication technology represents the cutting-edge development direction of space communication. Lasers—the key components—directly impact the stability through functional performance and reliability of space optical communication systems. In this study, a method for evaluating the operational reliability of semiconductor lasers is developed based on the analysis of failure cases and inherent failure modes of semiconductor lasers. The proposed evaluation method considers the characteristics and application requirements of semiconductor lasers, addressing the drawbacks due to the insufficient coverage of major failure modes in existing evaluation methods for semiconductor lasers. It effectively resolves the key challenges in ensuring the quality of semiconductor lasers for long-duration and high-reliability applications. Thus, this method and can be widely applied to quality assurance engineering practices to maintain application reliability.

Key words: semiconductor lasers; failure modes; operational reliability; evaluation methods

0　引言

作为空间光通信系统中的核心元器件，半导体激光器的功能性能和可靠性直接影响空间光通信系统的稳定性[1-6]。目前，半导体激光器面向长寿命高可靠任务的研制和工程应用尚处于起步阶段，未经质量保证的器件在应用阶段问题较多。根据近年来激光通信用光电元器件失效案例的统计分析，半导体激光器的质量问题占比大于50%，且激光器失效主要集中在输出光功率下降、无输出光功率等工作可靠性方面。

为保证新型激光器的应用可靠性，需对其开展质量保证工作。其中，如向有效评估器件的工作可靠性，降低其在应用中出现严重性能退化或失效风险，是长寿命、高可靠激光器质量保证的核心问题。

收稿日期：2025－10－12.

* 通信作者：韩宝妮

本文基于半导体激光器典型工作失效案例和失效模式分析，以长寿命高可靠任务用主流半导体激光器为样例，提出一种长寿命高可靠用半导体激光器工作可靠性评价方法。该方法有效解决了半导体激光器质量保证关键难题，为确保其在长寿命高可靠应用中的稳定性提供了科学依据。

1 半导体激光器典型失效案例和主要失效模式分析

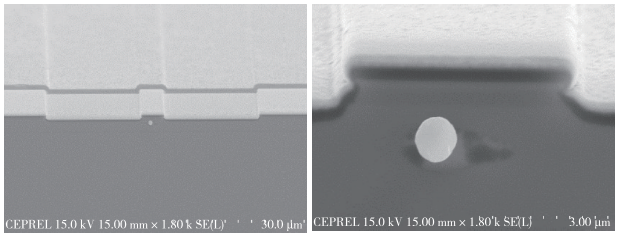
1.1 失效案例和失效模式分析

失效案例1为一款半导体激光器在筛选高温老炼试验中，发现器件的输出光功率严重下降。失效案例2为一款泵浦激光器在单机筛选高温老化时，发现器件存在输出光功率持续下降问题。对这两个失效案例进一步分析可以发现，失效原因与半导体激光器工作可靠性退化的典型失效模式匹配。

半导体激光器可靠性随着工作时间的增加，其工作性能将会劣化，最明显的表现是在保持电流不变的情况下，激光器的发射功率和效率都会下降，严重时还会发生突然失效的灾变性损伤（COD）[7]。国内外学者针对半导体激光器的工作可靠性退化失效模式进行了广泛研究，主要失效模式包括腔面损伤退化、材料内部晶格缺陷，以及应力的影响、欧姆接触退化等[7-14]。

激光器芯片的腔面退化包括迅速退化、逐渐退化和COD。迅速退化通常发生在最初阶段，表现出这种退化模式的器件为不合格产品。在低功率密度条件下，以逐渐退化为主，而在高功率密度条件下，则以COD为主。

在失效案例1中的激光器为大功率激光器，其失效问题源于激光器生产过程中的Bar条解理异常（即划道线与标记线重叠导致金层裂开产生附带应力），造成芯片腔面机械损伤，导致器件在高温老炼阶段发生COD效应，最终造成输出功率下降。失效样品腔面出光口位置的SEM形貌见图1。腔面机械损伤缺陷在显微镜暗场下观察表现为水波纹状见图2。当该缺陷位于量子阱有源区时，会导致腔面吸收增强、温度升高，当腔面热量积聚到一定程度时，温度急剧升高会导致COD发生。在发生COD后，缺陷沿出光腔面开始蔓延和纵向扩展进入腔内，同时电子空穴对继续发生非辐射复合且非辐射复合速率随着缺陷的产生而加剧。这一过程导致短时间内迅速产生大量热量，造成强烈光吸收，进而引起温度升高，导致半导体材料的晶格结构发生大面积损伤，形成具有正反馈循环的位错网络，使半导体激光器阈值电流不断增加，光电转换效率下降，最终造成器件出光功率严重下降。



（a）全貌　　（b）局部放大

图1 失效样品腔面出光口烧毁位置SEM形貌

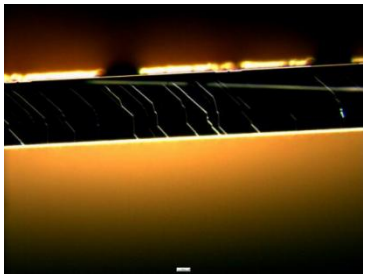


图2 失效样品腔面机械损伤后的水波纹状缺陷

芯片材料内部退化的主要原因是有源区产生缺陷，或是由其他区域迁移进入有源区的位错。退化包括有源区发生的均匀退化或强烈吸收光的暗线缺陷（DLD）和暗点缺陷。这些缺陷的形成一方面与材料衬底、外延生长和工艺过程中的引入有关，另一方面还与非辐射复合中心引起的结构微观变化有关。退化速率对温度具有强烈依赖性，温度越高则退化越快。在失效案例2中的问题源于器件芯片外延材料生长时存在位错，导致暗线和暗点等缺陷，有源区产生许多非辐射复合吸收强烈的区域，局部外延缺陷不断迁移和扩散，导致输出光功率持续降低。

1.2 失效案例和失效模式分析小结

1）激光器固有失效模式包括芯片腔面损伤、芯片材料缺陷、欧姆接触退化等。其中，欧姆接触退化失效模式是半导体器件常见的失效模式，对该失效模式引起器件可靠性退化的评价和质量控制方法已较为明确，本文不作深入探讨。

2）材料内部晶格缺陷、应力的影响以及出光腔面损伤退化为半导体激光器的典型失效模式。基于这两种主要失效模式设计半导体激光器工作可

靠性评价方法，对于长寿命高可靠任务用半导体激光器的质量保证工作至关重要。

2 半导体激光器工作可靠性评价方法

2.1 现有工作可靠性评价方法适应性分析

在长寿命高可靠任务用半导体器件交付使用前，需开展100%筛选试验和抽样考核试验。筛选试验包括工作范围内的电性能测试、轻量级的温度、机械环境应力、密封性检查等试验，主要目的是剔除早期失效的器件。抽样考核试验包括更高量级的温度、机械环境应力试验、寿命试验等，以考核规定批次器件的质量和可靠性。

在半导体器件工作可靠性评价中，最主要的试验项目为筛选电老炼试验和考核中的寿命试验。电老炼和寿命试验中项目和条件的制定应基于器件的主要失效模式和应用工况。GJB 8120-2013《半导体光电模块通用规范》[15]中电老炼和寿命试验要求中仅规定了试验温度为最高工作温度，但工作条件未明确给出。因此，需依据具体器件特性进一步制定。

理论上，在最高工作温度下开展激光器的电老炼和寿命试验可有效评价器件在高温工作下的可靠性，特别是对内部芯片、光学元件、芯片或光学元件与基板或管壳的焊接/粘接、金属化互联等可靠性。然而，评价效果还需结合不同类型的半导体激光器具体分析。

例如，制冷型激光器由于内部包含热电制冷（TEC）装置，高温工作下芯片的工作温度远低于器件工作温度，而激光器芯片材料缺陷退化与温度密切相关，因此，高温老炼和寿命对制冷型激光器芯片材料缺陷老化效果有限。同时，非制冷型激光器高温下输出功率往往低于常温或低温，高温老炼对非制冷型激光器腔面损伤缺陷退化的老化效果有限。

因此，单一的器件级高温老炼或寿命试验对激光器主要失效模式评价存在覆盖性不足的问题。除了试验温度，老炼和寿命试验时的工作电流、时间、试验前后参数变化要求等要素都会影响试验的评价效果，在设计相关试验时需结合不同类型器件合理制定。

2.2 半导体激光器工作可靠性评价方法

为确保老炼和寿命试验对激光器主要失效模式的有效覆盖，结合长寿命高可靠任务用主流的窄线宽激光器和泵浦激光器，提出半导体激光器电老炼和寿命试验中关键要素的确定方法。

2.2.1 试验温度确定

（1）窄线宽激光器

窄线宽激光器通常为制冷型激光器，以获取优良的窄线宽等性能指标。如图3为窄线宽激光器输出光功率随工作温度变化的典型曲线。

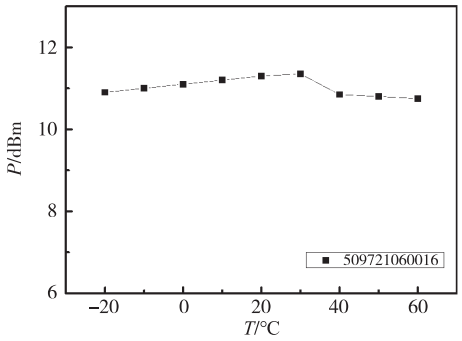


图3 窄线宽激光器输出光功率随工作温度变化曲线

从图3可以看出，器件在工作温度范围内的输出光功率相对稳定，变化小于1 dB。因此，在最高工作温度下进行电老炼和寿命试验可有效筛选和老化腔面损伤缺陷。然而，由于内部TEC制冷器的存在，工作温度范围内器件内部芯片工作温度为TEC控温电路设定的温度，典型值为20℃～30℃，而芯片材料缺陷退化与温度密切相关。因此，在最高温度下的电老炼和寿命试验对激光器芯片材料缺陷的老化效果有限。

为有效老化材料缺陷，需提高电老炼和寿命试验过程中芯片的工作温度。该要求可通过在激光器筛选前先对内部芯片开展芯片级电老炼，同时抽样开展芯片级寿命试验。芯片级电老炼和寿命试验温度应按照芯片自身最高工作温度制定，可有效评价芯片材料缺陷的老化。

（2）泵浦激光器

泵浦激光器包括制冷型泵浦激光器和非制冷型泵浦激光器。对于制冷型泵浦激光器，其电老炼和寿命试验方式及温度确定原则与窄线宽激光器相同。参考窄线宽激光器，非制冷型泵浦激光器的电老炼和寿命试验也包括芯片级和器件级两种方式，芯片级电老炼和寿命试验温度确定原则与窄线宽激光器相同。

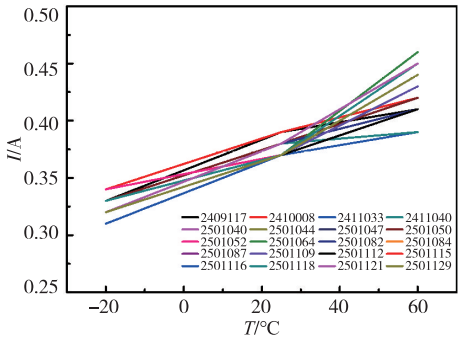
对于非制冷泵浦激光器的器件级老炼和寿命试验，首先应按标准要求在最高工作温度下进行。然而，在该温度下，器件的输出功率相比室温和低温工况往往更低。这是因为，随着温度升高，半导体材料的电阻率增加，工作电压减小，激光器的阈值电流减小；但同时温度升高会使得器件内部耦合等损耗增加，漏电流增加，量子效率降低。在这些综合因素下，高温下非制冷型泵浦激光器的阈值电流往往增大，输出光功率减小。

表1为典型非制冷940 nm泵浦激光器全在工作温度范围下工作电压、阈值电流、输出光功率的测试结果。如图4(a)和(b)分别为器件全工作温度范围下阈值电流和输出光功率的变化曲线。

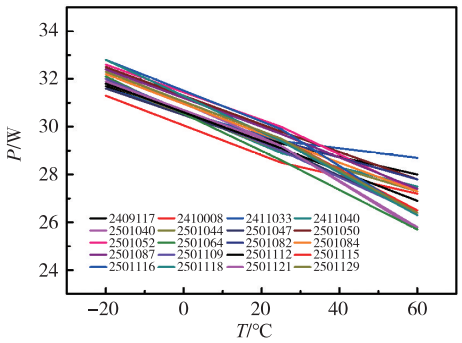
表1 典型非制冷940 nm泵浦激光器全温下工作电压、阈值电流和输出光功率测试结果

器件编号	温度/℃	工作电流/A	工作电压/V	阈值电流/A	输出光功率/W
2409117	−20	10	5.14	0.33	31.70
2409117	25	10	5.03	0.39	29.30
2409117	60	10	4.92	0.41	28.00
2410008	−20	10	5.14	0.34	31.30
2410008	25	10	5.00	0.39	28.50
2410008	60	10	4.92	0.42	27.20
2411033	−20	10	5.14	0.31	31.60
2411033	25	10	5.02	0.37	29.40
2411033	60	10	4.92	0.39	28.70
2411040	−20	10	5.14	0.32	32.00
2411040	25	10	5.01	0.38	28.90
2411040	60	10	4.92	0.39	27.50
2501044	−20	10	5.18	0.33	31.80
2501044	25	10	5.23	0.37	29.00
2501044	60	10	4.87	0.43	27.30

从表1、图4可以看出，随着温度的升高，器件的阈值电流逐渐增大，输出光功率逐渐减小。考虑不同器件的差异，非制冷泵浦激光器最高工作温度下输出光功率相比低温降低10%～20%。考虑到腔面缺陷与功率密度强相关，为更有效老化腔面缺陷并覆盖不同应用工况，在保持最高工作温度不变的情况下，可采用脉冲方式加电代替常规的连续工作电流的方式。通过增加脉冲电流值和改变脉冲占空比，可以在提高芯片出光功率的同时，降低芯片的温升，由此“抵消”一部分高温引起的输出功率降低，最终达到有效老化腔面损伤缺陷的目的。



(a) 阈值电流变化



(b) 全温下的输出功率变化

图4 典型非制冷940 nm泵浦激光器

2.2.2 工作电流确定

鉴于半导体激光器通常采用恒流工作模式，为覆盖应用工况并有效老化，电老炼和寿命试验的工作电流应按照器件手册或规范中给定的最大额定电流进行设置。

对于非制冷型泵浦激光器，器件级试验工作电流为脉冲电流或连续电流的选择，需综合分析器件最高工作温度下的输出功率值、在全温工作范围内的水平和芯片的温升等进行确定。脉冲电流的具体参数应根据器件在规定电流下结温的控制要求，通过摸底测试确定。典型的脉冲条件：脉冲宽度为100 ms，频率为1 kHz，占空比为10%。

2.2.3 试验时间确定

根据电老炼试验目的，合理的电老炼试验时间应大于器件工作寿命曲线中参数快速退化的时间段，以确保试验后器件参数趋于稳定。这个稳定时间受半导体激光器芯片和器件的材料、制造、工艺、温度、加电应力等因素影响，可通过开展加速寿命试验获得。在加速寿命试验结果的基础上，寿命试验时间应根据器件使用寿命、应用工况要求，参考相应标准要求制定。图5展示了典型激光器芯片加速寿命试验典型曲线。

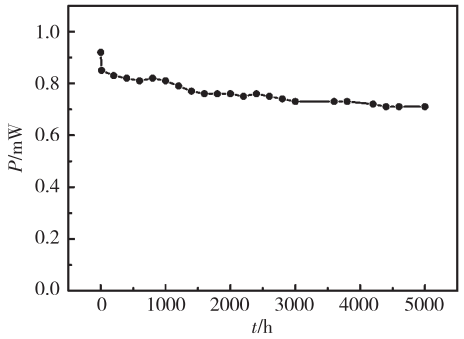


图5　典型激光器加速寿命试验典型曲线

从图5可以看出，芯片输出光功率随时间的变化先快速减小，之后缓慢降低并趋于稳定，器件在12 h内变化最快，200 h内参数已相对稳定，由此可制定芯片级老炼时间。需要注意的是，无论是芯片级还是器件级老炼或寿命试验，试验时间在基于加速寿命试验摸底的基础上，应同时考虑符合相应标准的要求，还应考虑器件在生产过程中已经历的高温老化等试验时间。对于长寿命高可靠任务用半导体激光器，芯片级和器件级电老炼试验时间典型要求为168 h或240 h，寿命试验时间典型值为1 000 h、2 000 h、5 000 h，首次供货的半导体激光器寿命试验时间通常要求至少为2 000 h。

2.2.4　试验前后参数变化要求的确定

合理的试验条件需配合合理的试验前后参数测试要求才能合理的评价器件的工作可靠性。对于长寿命高可靠任务用半导体激光器，在电老炼和寿命试验前后，除了要求器件光电性能指标满足详细规范的规定外，还应对试验前后关键参数的变化量提出控制要求。

输出功率是表征激光器性能最关键的参数之一，正向电压的变化能够反映激光器有源区特性和阈值电流的变化。因此，电老炼和寿命试验应至少关注输出光功率和正向电压这两个参数的变化。具体变化要求需根据器件寿命或加速寿命试验结果，结合使用要求制定。一般来说，电老炼试验前后输出光功率和正向电压变化典型要求为不超过10%。

另外，根据器件工作原理，部分激光器芯片的电性能指标特性与器件级存在差异。例如，对于外腔半导体窄线宽激光器，其内部增益芯片自身未形成谐振器，芯片的输出波长为宽光谱，输出光功率远远小于器件级输出功率。对于部分单模泵浦激光器，芯片级输出光为多模光，锁模的光纤光栅是通过紫外脉冲激光刻写在器件输出光纤线芯内，芯片的输出光功率与器件级输出功率不同。因此，对于这类激光器在芯片级电老炼和寿命试验前后应重点关注芯片输出光功率等关键参数的变化情况，而器件级的参数及指标规范值在芯片级老炼和寿命试验后不作要求。

3　结论

本文基于半导体激光器应用失效案例和固有失效模式分析，结合长寿命高可靠任务用主流半导体激光器特点，提出一种长寿命高可靠任务用半导体激光器工作可靠性评价方法。详细介绍了评价方法关键要素的确定，解决了现有评价方法对半导体激光器主要失效模式评价覆盖性不足的问题。该方法有效解决了半导体激光器在长寿命高可靠任务应用质量保证关键难点问题，可推广应用于质量保证工程实践，为确保应用可靠性提供了有效保障。

参考文献：

[1] 陈良惠，杨国文，刘育衔，等. 半导体激光器研究进展[J]. 中国激光，2020，47(5)：13-31.
Chen Lianghui，Yang Guowen，Liu Yuxian，et al. Research progress of semiconductor lasers [J]. Chinese Journal of Lasers，2020，47(5)：13-31.

[2] 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)：35-48.
Yuan Qinghe，Jing Hongqi，Zhang Qiuyue，et al. Development and applications of GaAs-based near-infrared high power semiconductor lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress，2019，56(4)：35-48.

[3] 周彦平，常国龙，马　晶，等. 半导体激光器辐射损伤对空间光通信误码率的影响[J]. 红外与激光工程，2011，40(3)：497-500.
Zhou Yanping，Chang Guolong，Ma Jing，et al. Influence of laser diodes cumulative radiation damage on bit error rate of space optical communication system [J]. Infrared and Laser Engineering，2011，40(3)：497-500.

[4] 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.
Lu Dan，Yang Qiulu，Wang Hao，et al. Review of semiconductor distributed feedback lasers in the optical communication band [J]. Chinese Journal of Lasers，2020，47(7)：0701001.

[5] 袁庆贺，井红旗，仲　莉，等. 高功率高可靠性9XX nm激光二极管[J]. 中国激光，2020，47(4)：0401006.
Yuan Qinghe，Jing Hongqi，Zhong Li，et al. High-power and

high-reliability 9XXnm laser diode [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(4): 0401006.

[6] 徐争放. 高速BPSK相干光通信系统对激光器线宽要求[J]. 空间电子技术, 2011, 8(1): 6-9, 26.
Xu Zhengfang. The requirement of laser linewidth for high-speed BPSK homodyne communication [J]. Space Electronic Technology, 2011, 8(1): 6-9, 26.

[7] 罗 丹. 半导体激光器腔面镀膜及可靠性的研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2007.

[8] Kondow M, Kitatani T, Nakahara K, et al. Temperature dependence of lasing wavelength in a GaInNAs laser diode [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2000, 12(7): 777-779.

[9] 孙天宇, 夏明俊, 乔 雷. 半导体激光器失效机理与检测分析研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(19): 1-13.
Sun Tianyu, Xia Mingjun, Qiao Lei. Failure mechanism and detection analysis of semiconductor laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(19): 1-13.

[10] Ueda O. Degradation of III - V opto-electronic devices [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1988, 135(1): 11C-22C.

[11] 杨少华, 黄 云. 高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.
Yang Shaohua, Huang Yun. Progress in high power semiconductor lasers lifetime evaluation[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2007, 44(6): 34-37.

[12] Fukuda M, Okayasu M, Temmyo J, et al. Degradation behavior of 0.98-/ spl mu/m strained quantum well InGaAs/AlGaAs lasers under high-power operation[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1994, 30(2): 471-476.

[13] 高松信, 魏 彬, 吕文强, 等. 高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.
Gao Songxin, Wei Bin, Lü Wenqiang, et al. Study on failure characteristics of high power diode laser [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(S1): 97-100.

[14] 吴子博, 宋 悦, 牛 岫, 等. 大功率半导体激光器电极失效机理研究综述[J]. 激光与红外, 2023, 53(5): 643-650.
Wu Zibo, Song Yue, Niu Shen, et al. A review of electrode failure mechanisms of high power semiconductor lasers [J]. Laser & Infrared, 2023, 53(5): 643-650.

[15] 赵 英,姚 鸿,陈 兰,等. GJB 8120-2013半导体光电模块通用规范[S]. 北京:总装备部军标出版发行部,2013.

作者简介:

韩宝妮(1983—),女,高级工程师,主要研究方向为元器件质量保证。