

25 Gb/s 粗波分复用分布式反馈激光器的可靠性研究

张玉岐^{1,2}, 刘万居², 赵佳^{1*}

(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)

摘要:高速波分复用分布式反馈(DFB)激光器是数据通信的核心器件,其可靠性影响了整个通信系统的可靠性。对自主研发的 25 Gb/s 4 波长粗波分复用(CWDM4) DFB 激光器进行了 2 种老化筛选(Burn-in)实验和失效分析,并采用三温法推算了激光器的工作寿命。实验结果表明:对激光器采用光加速(25 °C、100 mA)和温度加速(100 °C、75 mA)相结合的 Burn-in 方法能够有效激发薄弱激光器的早期失效特征;采用三温法推算激光器在 60 °C、45 mA 环境下长期工作的实际寿命至少为 17 年。

关键词:分布式反馈激光器;可靠性;老化筛选;激活能;寿命

中图分类号: TN365 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2022)06-0001-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.06.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on reliability of 25 Gb/s coarse wavelength division multiplexing distributed feedback laser

ZHANG Yuqi^{1,2}, LIU Wanju², ZHAO Jia^{1*}

(1. Key Laboratory of Laser&Infrared System, Ministry of education, Shandong University, Qingdao Shandong 266237, China;

2. Xiamen San'An Integrated Circuit Co., Ltd., Xiamen Fujian 361000, China)

Abstract: High speed wavelength division multiplexing distributed feedback (DFB) laser is the core device of data communication, and its reliability affects the reliability of the whole communication system. Two burn-in experiments and failure analysis are carried out on the self-developed 25 Gb/s 4-wavelength coarse wavelength division multiplexing (CWDM4) DFB laser, and the working life of the laser is calculated by the three-temperature method. The experimental results show that the burn-in method combining light acceleration (25 °C, 100 mA) and temperature acceleration (100 °C, 75 mA) can effectively stimulate the early failure characteristics of weak lasers, the three-temperature method is used to estimate the actual lifetime of the laser at 60 °C and 45 mA for a long time to be at least 17 years.

Key words: distributed feedback laser, reliability, burn-in, activation energy, lifetime

0 引言

25 Gb/s 粗波分复用(CWDM)分布式反馈(DFB)激光器具有阈值低、单色性好、增益谱宽及功耗与成本低等优势,并且能通过单通道物理层技术实现 100 Gb/s

收稿日期:2022-01-28。

基金项目:国家重点研发计划纳米专项课题项目(2018YFA0209001)资助;国家重点研发计划课题项目(2018YFA0209002、2018YFB2200700)资助。

作者简介:张玉岐(1991—),男,辽宁辽阳人,工程师,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,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。



的数据传输,满足光通信、激光传感等领域日益增长的传输需求,在医疗、军事等领域的发展前景广阔^[1-4]。但因偏远地区设备维修困难、维护成本高,人们对激光器的可靠性要求越来越严苛^[3-4]。高速半导体激光器一般采用短腔设计,导致高电流密度引起的加速退化速率高^[5];高速 DFB 激光器有源结构部分通常采用高温特性较好的 InGaAlAs 量子阱材料,但是含 Al 材料容易被氧化,影响器件的可靠性^[6-7]。因此,半导体激光器在正式投入实际应用前需要进行可靠性测试和寿命预测,使其能够长时间稳定可靠地运行。本文采用老化筛选(Burn-in)方法对自主研发的 25 Gb/s 4 波长粗波分复用(CWDM4) DFB 激光器进行可靠性研究。

1 激光器结构与 Burn-in 实验设置

25 Gb/s CWDM4 DFB 激光器是采用多量子阱设计的, 其有源区材料为 InGaAlAs 材料, 采用脊波导 (RWG) 结构, 上脊宽为 $2\ \mu\text{m}$, 腔长为 $150\ \mu\text{m}$, 器件宽度为 $250\ \mu\text{m}$, 厚度约为 $85\ \mu\text{m}$, 激光器的结构示意图和实际外观图如图 1 所示。激光器的 4 个中心波长分别为 $1271\ \text{nm}$ 、 $1291\ \text{nm}$ 、 $1311\ \text{nm}$ 和 $1331\ \text{nm}$, 对应的波长通道采用相同的外延设计, 通过调节光栅的周期实现对波长的调节。

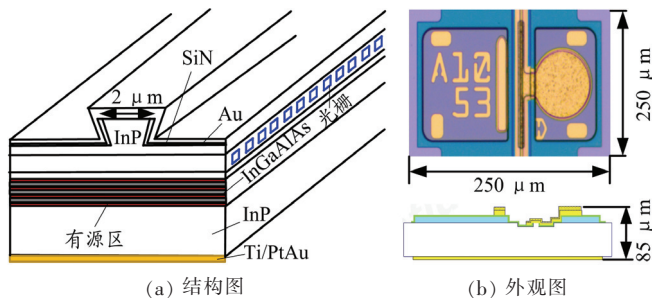


图 1 25 Gb/s CWDM4 DFB 激光器的结构示意图和外观图

激光器老化测试系统型号为 Newport LRS-9434, 老化模式采用恒电流模式。根据 Telcordia GR-468 CORE 标准要求, 本文在进行 Burn-in 实验前后测量了激光器的电学和光学参数。每隔一定时间将激光器取出, 在常温 ($25\ ^\circ\text{C}$) 下进行光功率-电流-电压 (P-I-V) 测试, 对比每个时间节点的阈值电流 (I_{th}) 变化量, 当阈值变化率超过 10% 时判定激光器失效。

2 Burn-in 方法与讨论

几乎所有的激光器和发光二极管 (LED) 都会经历一个加速老化的过程来稳定设备 (释放应力, 稳定光电参数), 这个过程被称为 “Burn-in”。Burn-in 试图迫使那些有早期失效特征的器件迅速失效^[8]。

2.1 传统的高温高电流 Burn-in 方法

传统最常用的激光器老化方法是温度电流加速法, 即在老化激光器时的温度和工作电流应尽可能高, 以减少老化时间, 但又不能高到触发器件正常工作条件下不存在的退化模式^[9]。本文采用这种传统的高温高电流 Burn-in 方法进行了实验, 具体过程如下: 首先, 本文根据产品特点和经验设定 Burn-in 条件 (温度为 $100\ ^\circ\text{C}$ 、电流为 $75\ \text{mA}$, 老化 $48\ \text{h}$); 然后, 选取 64 个 25 Gb/s CWDM4 DFB 激光器进行高温高电流的 Burn-in, 剔除早期失效的样品; 最后, 将温度、电流分别设定为 $85\ ^\circ\text{C}$ 、 $70\ \text{mA}$ 时进行高温寿命 (HTOL) 实验, 得到所有样品的长期老化趋势图如图 2 所示。可以看出, 有 2 个激

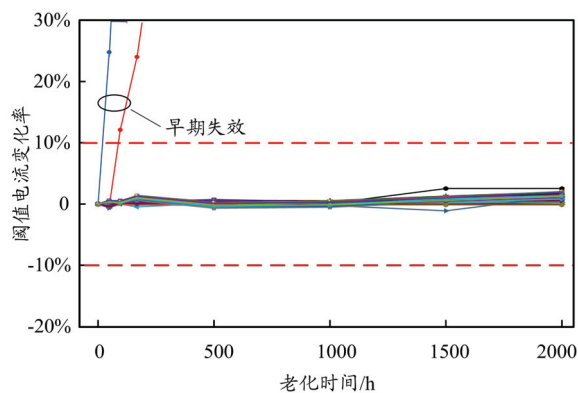


图 2 高温高电流 Burn-in 条件的长期老化趋势图

光器在老化时间分别为 $48\ \text{h}$ 和 $168\ \text{h}$ 时开始出现不同程度的劣化失效, 而其余激光器可以稳定地通过 $2000\ \text{h}$ 老化测试。

本文对失效激光器进行分析。首先, 检查外观, 查看激光器端面和脊波导等区域有无缺陷或异常点, 如图 3(a) 所示; 其次, 将激光器进行背部研磨去掉背金, 采用微光显微镜 (EMMI) 测试、判断缺陷的位置, 如图 3(b) 所示, EMMI 图像的亮点区域为激光器的缺陷位置 (红色虚框), 缺陷出现在激光器的反射端面 (HR); 然后, 采用透射电子显微镜 (PV-TEM) 对 EMMI 定位到的缺陷位置 (红色虚框) 进行平面视图观察, 缺陷位置平面视图如图 3(c) 所示, 可以看出缺陷的整体形貌和源头, 从端面发展出大量的位错缠结并向内传播; 最后, 为了判断缺陷分布的结构性质, 采用透射电子显微镜 (XS-TEM) 进行横截面观察, 如图 3(d) 所示, 位错缺陷分布在多量子阱区域, 因而导致了激光器的性能劣化。

综上所述, 根据失效激光器的失效时间和失效特

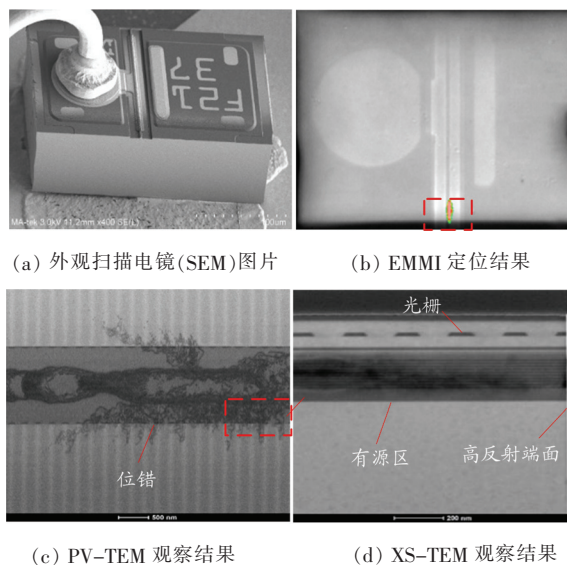


图 3 早期失效样品的失效特征

征可以判断为早期失效。但是,采用传统的高温高电流 Burn-in 方法对 64 个激光器老化 48 h 后,并未使早期具有失效特征的器件迅速失效,仍有 2 个薄弱激光器在 HTOL 实验阶段被发现,这表明传统的高温高电流 Burn-in 方法不能有效地筛选出薄弱的激光器。

2.2 改进的 Burn-in 方法

由于传统的高温高电流 Burn-in 方法比较适合筛选 InGaAsP 材料制成的 DFB 激光器,不适合筛选 InGaAlAs 等有源区材料的 DFB 激光器。因此,需要在传统 Burn-in 环节增加光加速筛选的环节^[10]。光加速的使用环境为低温高电流,此种情况可以使激光器出光功率最大化。

25 Gb/s CWDM4 DFB 激光器在不同温度和电流条件下的功率-电流(P-I)曲线如图 4 所示。可以看出,相同的驱动电流下,温度越高出光功率越低。同时,根据激光器的工作原理可知,在相同的温度下,达到饱和和电流前,出光功率随着电流的增加而增加;超过饱和电流后,因激光器的结温提高而降低了光/电转换效率,导致出光功率随着电流的增加反而下降甚至无出光。因此,本文采用常温为 25 ℃、电流为 100 mA 作为光加速 Burn-in 条件,此时激光器的出功率约为 23 mW,比正常工作时的出光功率(6 mW@60 ℃、45 mA)要高,具有光加速的效果,尤其对激光器的端面缺陷可以快速激发,从而达到筛选薄弱激光器的目的。

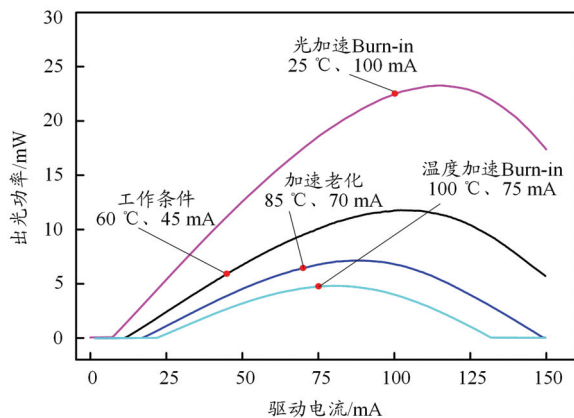


图 4 不同条件下 25 Gb/s CWDM4 DFB 激光器的 P-I 曲线

本文对 25 Gb/s CWDM4 DFB 激光器采用光加速(25 ℃、100 mA)和温度加速(100 ℃、75 mA)Burn-in 条件相结合的方法进行可靠性验证,选取 64 个激光器进行 24 h Burn-in 测试,筛选出 1 个不良品,然后对剩余的 63 个激光器再进行长时间加速 Burn-in 实验。图 5 为 63 个激光器阈值长期老化趋势图。可以看出,63 个激光器可以通过 5000 h 的寿命测试,并且数据

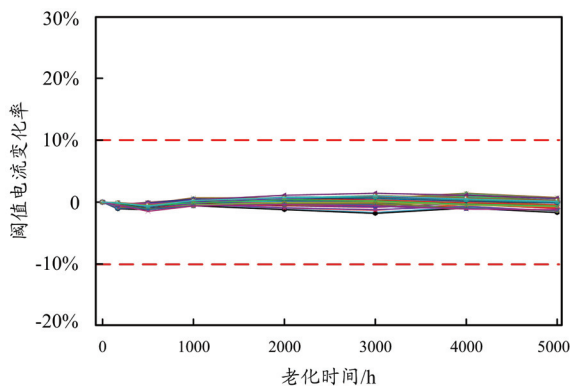


图 5 通过光加速+温度加速 Burn-in 条件筛选后的 25 Gb/s CWDM4 DFB 激光器长期老化趋势图

相对稳定,证明采用光加速和温度加速相结合的 Burn-in 方法可以有效地筛选出薄弱品,保证了激光器后续长期使用的可靠性。

3 采用三温法推算工作寿命

为了对自主研发的 25 Gb/s CWDM4 DFB 激光器实际应用时的工作寿命进行预测,本文采用三温法(3 组不同温度的加速应力老化实验)来提取激活能,通过 Arrhenius 公式^[11-12]计算激光器的寿命,Arrhenius 公式如下:

$$L_{MFT} = A e^{\frac{E_a}{kT}} \quad (1)$$

其中, L_{MFT} 为中线寿命, A 为比例因子, E_a 为激活能, k 为玻尔兹曼常数, T 为激光器的结温。

根据激光器的波长对结温变化的敏感性,本文采用波长漂移法^[15]测得芯片在不同老化条件(电流和温度)下的结温,改变环境温度和加载电流得到芯片的结温关系如图 6 所示。可以看出,相同的环境温度下,激光器的结温和加载电流呈线性比例增加,平均斜率为 0.3 ℃/mA;而在相同的加载电流条件下,环境温度每改变 1 ℃,激光器的结温的变化率约为 0.93 ℃。

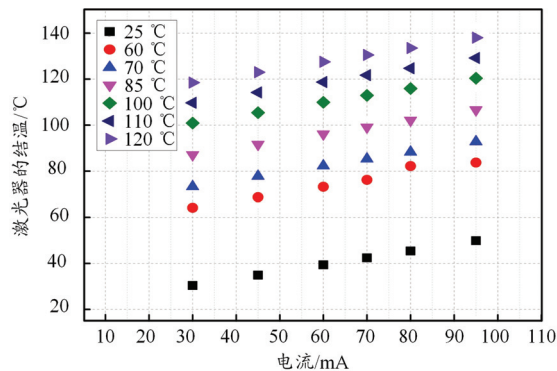


图 6 激光器的结温和加载电流、环境温度的关系

为了在有效时间内得到激光器的失效数据, 本文设置的 3 组加速老化实验条件如下: 电流为 95 mA, 环境温度分别为 100 °C、110 °C 和 120 °C, 每组样本量为 32 个。与老化前的初始值相比, 当激光器的阈值电流变化超过 10% 时认为其失效, 激光器在损耗失效时符合对数正态分布的关系^[13-14], 统计激光器的累计损耗失效率的对数正态分布图如图 7 所示。

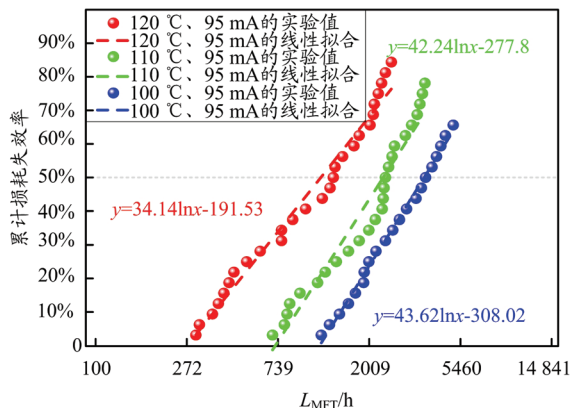


图 7 累计损耗失效率的对数正态图

本文利用上述 3 组试验的实际累计损耗失效率, 按照对数正态分布进行拟合, 得到累计损耗失效率 50% 时对应的 L_{MFT} 如表 1 所示 (T 表示环境温度)。

表 1 三温法估计 L_{MFT}

实验条件	L_{MFT}/h		
	$T=100\text{ °C}$	$T=110\text{ °C}$	$T=120\text{ °C}$
50% 累积损耗失效率	3669	2346	1182

对式(1)取对数, 得到方程如下:

$$\ln L_{MFT} = \ln A + E_a \frac{1}{kt} \quad (2)$$

根据式 (2) 对表 1 中不同温度下的 L_{MFT} 进行计算, 得到如图 8 所示的拟合直线, 斜率约等于 0.9, 即 $E_a \approx 0.9\text{ eV}$ 。

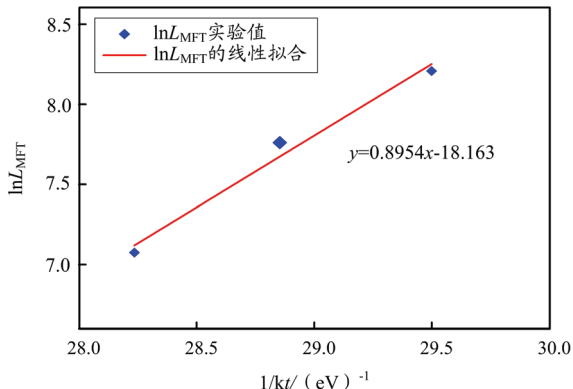


图 8 寿命数据的三点线性拟合

除了上述温度对激光器的寿命影响外, 还需要考虑加速老化时电流的影响。当考虑电流的加速因子时, 需要在 Arrhenius 公式中加入电流的加速效果。电流对激光器寿命的影响关系符合幂指数^[16-18], 如式(3)所示。

$$L_{MFT} = A \left(\frac{I}{I_0} \right)^{-n} e^{\frac{E_a}{kt}} \quad (3)$$

其中, I 为施加在激光器上的电流, I_0 为参考电流, n 为幂指数 (通常取值为 1~3, 本文取 $n=2$)。

25 Gb/s CWDM4 DFB 激光器主要应用在数据中心的机房中, 典型工作温度和电流值分别是 60 °C 和 45 mA。当加速老化时的温度、电流值分别为 85 °C、70 mA 时, 根据式(3)计算加速因子 A_f 为

$$A_f = \left(\frac{I_{acc}}{I_{op}} \right)^n e^{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_{acc}} - \frac{1}{T_{op}} \right)} = \left(\frac{70}{45} \right)^2 e^{\frac{0.9}{8.617 \times 10^{-5}} \left(\frac{1}{341.7} - \frac{1}{372.3} \right)} = 29.8 \quad (4)$$

其中, I_{acc} 和 T_{acc} 为加速老化条件下 (85 °C、70 mA) 的电流和结温, I_{op} 和 T_{op} 为工作条件下 (60 °C、45 mA) 的电流和结温。

按上述加速老化条件进行了 5000 h 测试, 激光器未失效, 则至少可以等效其正常工作时的寿命为: $L_{MFTop} = A_f \times 5000 / 8760 = 149\,000 / 8760 \approx 17$ 年。由此可知, 本文自主研发的激光器可以满足实际应用大于 17 年的寿命要求。若要更加准确地评估使用寿命及其失效率, 还需要增加样本量并继续延长老化时间, 直到有器件出现失效。

4 结束语

本文对 25 Gb/s CWDM4 DFB 激光器进行了可靠性研究, 在传统的高温高电流 Burn-in 方法基础上增加了光加速 Burn-in 项目, 可以有效地筛选出薄弱的激光器, 尤其适合有腔面缺陷的不良芯片的筛选。经长期高温寿命实验和对数正态分布拟合, 求得激光器的中值寿命, 并利用 Arrhenius 公式求取激光器的激活能为 0.9 eV, 推算芯片在 60 °C、45 mA 的实际应用条件下的等效寿命至少为 17 年。本文的研究结果为激光器设计、生产制造工艺等方面提供改进依据, 具有重要的理论意义和工程实用价值。

参考文献:

- [1] SAARELA A, MELANEN P, VILOKKINEN V, et al. High-temperature AlGaInAs-based 25G DML-DFB lasers operating in O-band for data center use[EB/OL]. [2022-01-28]. <https://doi.org/10.1117/12.2578257>.

- [2] TURGUNOV B, JURAEV N, TOSHPULATOV S, et al. Researching of the degradation process of laser diodes used in optical transport networks [C]//IEEE. Proceedings of 2021 International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT). New York: IEEE, 2021: 1–4.
- [3] HUANG J S. Design-in reliability for modern wavelength-division multiplex (WDM) distributed feedback (DFB) InP lasers[J]. Applied Physics Research, 2012, 4(2): 15–28.
- [4] HUANG J S. Burn-in aging behavior and analytical modeling of wavelength-division multiplexing semiconductor lasers: is the swift burn-in feasible for long-term reliability assurance? [EB/OL]. [2022-01-28]. <https://downloads.hindawi.com/journals/aoe/2013/568945.pdf>.
- [5] HUANG J S, HUANG S C, WU N Y, et al. High-reliability, high-performance 25 Gb/s directly modulated uncooled lasers for 5G wireless communications[J]. Applied Science and Innovative Research, 2021, 5(1): 56–64.
- [6] 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): 11–29.
- [7] VILOKKINEN V, SAVOLAINEN P, SIPILA P. Reliability analysis of AlGaInAs lasers at 1.3 μm [J]. Electronics Letters, 2004, 40 (23): 1489–1490.
- [8] HERRICK R W, GUO Q. Introduction to optoelectronic devices [EB/OL]. [2022-01-28]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128192542000102>.
- [9] JOHNSON L A. Laser diode burn-in and reliability testing [J]. IEEE Communications Magazine, 2006, 44(2): 4–7.
- [10] HERRICK R W, ROXLO C B, SJOLUND O T H, et al. Methods for testing lasers using optical burn-in: 8067949[P]. 2011–11–29.
- [11] FUKUDA M. Reliability and degradation of semiconductor lasers and LEDs[M]. Boston: Artech House, 1991.
- [12] 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 SPIE - The International Society for Optical Engineering. Strasbourg: SPIE, 2004: 1–8.
- [13] UEDA O, PEARTON S J. Materials and reliability handbook for semiconductor optical and electron devices[M]. New York: Springer, 2013.
- [14] OHRING M, KASPRZAK L. Reliability and failure of electronic materials and devices[M]. New York: Academic Press, 2014.
- [15] JOHNSON L A, TEH A. Measuring high power laser diode junction temperature and package thermal impedance[EB/OL]. [2022-01-28]. https://www.newport.com.cn/medias/sys_master/images/h66/h78/879705.0142750/AN30-Measuring-High-Power-Laser-Diode-Junction-Temperature-and-Package-Thermal-Impedance.pdf.
- [16] DESHAYES Y, BECHOU L, VERDIER F, et al. Long-term reliability prediction of 935 nm LEDs using failure laws and low acceleration factor ageing tests[J]. Quality and Reliability Engineering International, 2005, 21: 571–594.
- [17] HUANG J S. Reliability of optoelectronics [EB/OL]. [2022-01-28]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978178242221100006X?via%3Dihub>.
- [18] HERRICK R W. Reliability engineering in optoelectronic devices and fiber optic transceivers[EB/OL]. [2022-01-28]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128192542000035>.