

808 nm 大功率半导体激光器寿命实验

路国光 雷志锋 黄 云 恩云飞

(工业和信息化部电子第五研究所电子元器件可靠性物理及其应用技术重点实验室, 广东 广州 510610)

摘要 为获得 808 nm 单巴条(bar)大功率半导体激光器寿命指标,研制了 10 工位大功率半导体激光器寿命实验在线监测系统,完成了 3 组寿命评价实验,这 3 组实验条件分别为温度 25 °C、电流 100 A,温度 50 °C、电流 100 A,温度 50 °C、电流 115 A。采用线性回归分析、最小二乘法原理及拟合优度检验等统计学相关知识,获得了单 bar 大功率半导体激光器的功率退化模型,据此确定大功率半导体激光器的外推寿命为 2.86×10^9 次脉冲次数。同传统加速寿命评价实验方法相比,基于参数退化模型的寿命外推方法具有寿命评价时间短、准确性高的优点。

关键词 激光器;半导体激光器;寿命;失效机理;可靠性

中图分类号 TN248.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.s114003

Lifetime Test of 808 nm High Power Laser Diodes

Lu Guoguang Lei Zhifeng Huang Yun En Yunfei

(*Science and Technology on Reliability Physics and Application of Electronic Component Laboratory, Fifth Research Institute of MIIT, Guangzhou, Guangdong 510610, China*)

Abstract In order to obtain the lifetime index of the single-bar 808 nm high power semiconductor laser, an on-line monitoring system under ten workspaces is set up. Subsequent lifetime tests are completed. The conditions of these tests are 25 °C, 100 A, 50 °C, 100 A and 50 °C, 115 A, respectively. According to the linear regression analysis, the method of least squares, goodness-of-fit test and other statistical knowledge, the power degradation model is obtained. Based on this degradation model the extrapolated lifetime of cm-bars at 25 °C is 2.86×10^9 shots. This lifetime extrapolative method based on the parameter degradation model has some advantages such as short experiment time and high veracity than other traditional accelerated aging test methods.

Key words lasers; laser diodes; lifetime; failure mechanism; reliability

OCIS codes 140.2010; 140.3330; 140.6810

1 引 言

大功率半导体激光器在微加工、信息处理和国防尖端技术领域有着广泛的用途,除了通常的抽运 Nd:YAG, Nd:YVO₄ 等固体激光器,以获得高效、紧凑、可靠的固体激光器,满足激光测距、制导及微加工的需求外,还可直接用于激光雷达成像、电子焊接、生物组织辐照等方面^[1~4]。在上述应用中,大功率半导体激光器的可靠性是一个关键指标,其重要程度甚至超过了对激光器功率的提升。

对大功率半导体激光器寿命的评价一直以来就是一个难题^[5~7],传统的、通讯用的小功率半导体激

光器的寿命评价标准对大功率半导体激光器并不适用,国外采用的通过进行激光器实际工作条件下的寿命实验获得寿命指标的方法在实验时间和成本上都难以承受,而国内通过外推的方法获得激光器寿命指标的方法尚不成熟,还存在许多值得商榷的问题,使得大功率半导体激光器在使用前寿命和可靠性难以得到保障,影响了其应用进程。

本文基于失效物理,结合实际 3 组寿命实验,通过对寿命实验数据的综合统计分析,确定了大功率半导体激光器缓慢退化的功率退化模型,利用模型获得了大功率半导体激光器的外推寿命,并进行了

收稿日期: 2012-12-31; 收到修改稿日期: 2013-01-09

基金项目: 国家重大科学仪器专项项目(2011YQ040077)和国家预先研究项目(51302010309A)资助课题。

作者简介: 路国光(1979—),男,博士,高级工程师,主要从事光电子器件可靠性评价方面的研究。

E-mail: luguog@yaho.com.cn

验证。同其他方法相比,本文采用的方法具有寿命评价时间短、准确性高的优点。

2 实 验

2.1 寿命实验系统

从现有文献的研究情况来看,电流和温度是影响大功率半导体激光器寿命的主要因素。基于此,研制了具备电流和温度加速能力的大功率半导体激光器寿命实验在线监测系统,如图 1 所示,图中 PD 为光电探测器。该套实验系统由一台激光驱动源同

时对 10 只串联单巴条(bar)器件进行驱动,并配备专门研制的 TVS 保护阵列和继电器保护阵列,有效避免和降低了电路瞬态扰动和实验过程中失效器件对寿命实验的影响。实验器件温度控制采用水冷的方式,研制了精密的 10 通道分水器,通过调节水流量和水流速度等参数,实现了 1 台高功率水冷机同时对 10 只单 bar 器件的稳定温度控制,温度控制精度 $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。实验器件功率由步进电机带动的探测器自动监测,并保存在计算机中。

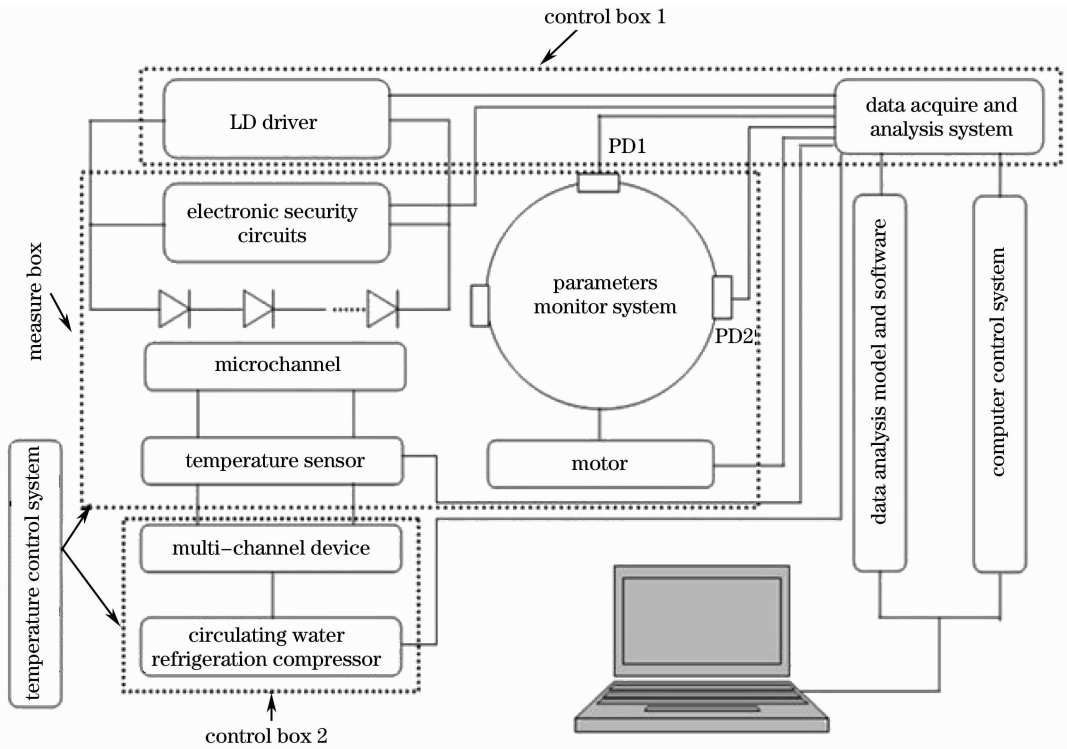


图 1 大功率半导体激光器寿命实验系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of high power laser diodes lifetime test equipment

2.2 寿命实验样品及主要失效模式

寿命实验样品为准连续 808 nm 器件,在 100 A 工作电流、200 μs 脉冲宽度、2% 占空比条件下,器件输出的峰值功率可达 100 W。

对于大功率半导体激光器,常见的失效模式有 3 种:1)由有源区缺陷或腔面灾变损伤所致的突然失效;2)由焊接缺陷如焊接残余应力等因素引起的快速退化^[8];3)因腔面污染、腐蚀等因素导致的缓慢退化。

2.3 寿命实验

寿命实验采用恒定应力加速寿命方法,3 组寿命实验条件分别为温度 25 $^{\circ}\text{C}$ 、电流 100 A;温度 50 $^{\circ}\text{C}$ 、电流 100 A;温度 50 $^{\circ}\text{C}$ 、电流 115 A。实验器

件均工作在准连续工作模式下,脉冲宽度 200 μs 、占空比 2%。寿命实验前,分别对 3 组器件进行电流-电压(I - V)特性曲线测试和腔面检查,所有器件均未发现明显异常失效现象。

寿命实验过程中,每一种应力条件下均有器件发生了突然失效,而缓慢退化的器件,功率随时间近似呈指数退化关系,图 2 为 25 $^{\circ}\text{C}$ 、电流 100 A 以及 50 $^{\circ}\text{C}$ 、电流 100 A 条件下缓慢退化器件平均功率随时间的退化曲线。

2.4 寿命实验结果分析

通常定义激光器功率下降 20% 的时间作为激光器的有效使用寿命^[9]。对于长寿命激光器器件,很难在短期内使器件功率下降 20%,本实验前 2 组

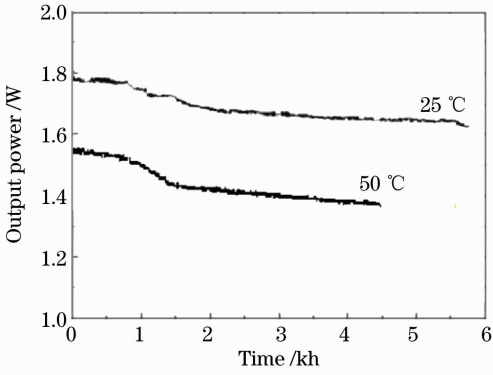


图2 激光器平均功率随时间呈指数退化趋势
Fig.2 Exponential degradation trend of average output power over time

寿命实验器件功率均未达到该失效判据,因此,有必要利用统计学相关知识,对实际得到的实验数据进行分析,外推器件的寿命。

2.4.1 数据拟合

实验器件输出功率随时间呈指数退化,则根据YamaKoshi方程,激光器输出功率与时间近似遵从

$$P_t = P_0 \exp(-\beta t), \quad (1)$$

式中 P_t 为器件失效时的功率, P_0 为初始功率, β 为退化率,可以表示为

$$\beta = I_F \beta_0 \exp\left(-\frac{E_a}{K_b T}\right), \quad (2)$$

式中 I_F 为工作电流, β_0 为常数, E_a 为激活能, K_b 为玻尔兹曼常数。对(1)式进行对数坐标变换有

$$\ln(P_t) = \ln(P_0) - \beta t, \quad (3)$$

从方程(3)可知 $\ln(P_t)$ 与 t 呈线性关系。令 $\varphi(t) = \ln(P_t)$, $a_0 = \ln(P_0)$, $a_1 = -\beta$, 则(3)式可表示为

$$\varphi(t) = a_0 + a_1 t. \quad (4)$$

假设(4)式的一元线性回归方程为

$$\hat{\varphi}(t) = \hat{a}_0 + \hat{a}_1 t, \quad (5)$$

根据最小二乘法原理,通过使观测值与估计值误差

平方和最小求得回归系数 \hat{a}_0 、 \hat{a}_1 , 即

$$\sum_1^a (\varphi_i - \hat{\varphi}_i) = \sum_1^a [\varphi_i(t) - \hat{a}_0 - \hat{a}_1 t], \quad (6)$$

则有

$$\begin{cases} \frac{d\varphi(t)}{da_0} \Big|_{a_0=\hat{a}_0} = -2 \sum_1^n (\varphi_i - \hat{a}_0 - \hat{a}_1 t_i)^2 \\ \frac{d\varphi(t)}{da_1} \Big|_{a_1=\hat{a}_1} = -2 \sum_1^n t_i (\varphi_i - \hat{a}_0 - \hat{a}_1 t_i)^2 \end{cases}. \quad (7)$$

将实际得到的实验数据代入(7)式,即可确定每只器件的退化方程。

2.4.2 拟合优度检验

通过最小二乘法拟合获得了器件的退化方程,拟合方程的可信性直接影响到后续的外推寿命。本实验通过考核样本判定系数 R^2 的大小来判定拟合方程的优劣。通常 $R^2 > 0.8$ 认为拟合优度较高。

$$\begin{cases} S_e = \sum_{i=1}^n \omega_i (\varphi_i - \hat{\varphi}_i)^2, \\ S_R = \sum_{i=1}^n \omega_i (\hat{\varphi}_i - \bar{\varphi})^2, \\ S_T = \sum_{i=1}^n \omega_i (\varphi_i - \bar{\varphi})^2, \\ R^2 = \frac{S_R}{S_T} = 1 - \frac{S_e}{S_T}, \\ A - R^2 = 1 - \frac{S_e(n-1)}{S_T(v-1)}, \\ R_{MSE} = \sqrt{\frac{S_e}{v}}, \end{cases} \quad (8)$$

式中 ω 为权重, n 为样本数, i 为样本编号, φ 为实际监测值, $\hat{\varphi}$ 为回归值, $\bar{\varphi}$ 为平均值, v 为样本自由度, S_e 为误差平方和, S_R 为残差平方和, S_T 为总体平方和, A 为修正样本判定系数, R_{MSE} 为误差的均方根。

利用上述理论,即可外推确定本文3组寿命实验中每只器件到达失效判据的时间,具体如表1所示。

表1 寿命实验器件外推寿命

Table 1 Estimated lifetimes for all lifetime test devices

		25 °C, 100 A							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Lifetime		8088	6973	7695	8962	7539	7152	8944	8478
		50 °C, 100 A							
		G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
Lifetime		3698	4556	4175	3898	3985	4463	4047	5071
		50 °C, 115 A							
		H1	H2	H3	H4	H5			
Lifetime		3564	3698	3741	3796	3924			

2.4.3 寿命指标统计外推

利用上述外推结果,结合商用 ALAT 7 软件,确定单 bar 大功率半导体激光器寿命分布近似遵从正态分布,恒温 25 °C 时激光器外推中值寿命为 2.86×10^9 次脉冲次数。利用 Arrhenius 方程确定激光器激活能为 0.21 eV,加速因子为 1.88。图 3 和图 4 为 ALAT 7 软件分析结果。

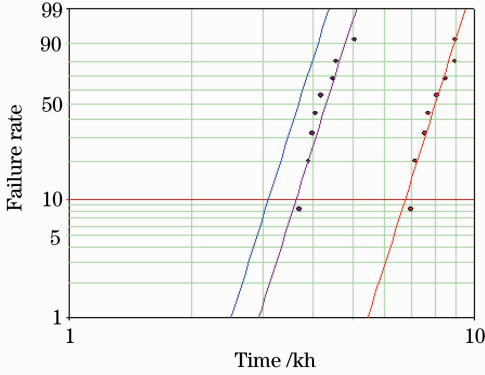


图 3 不可靠度与时间关系图

Fig. 3 Failure rate versus time

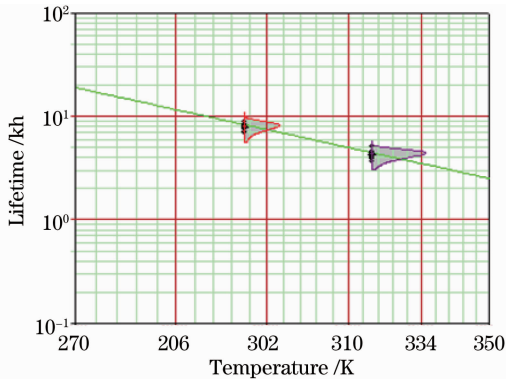


图 4 应力与寿命关系

Fig. 4 Lifetime versus temperature stress

50 °C, 115 A 条件下寿命实验进行到 1.44×10^9 次脉冲次数时达到失效判据,采取上述建立的寿命数据分析方法,获得器件的中值寿命为 1.35×10^9 次脉冲次数,分析结果与实验结果误差为 6.5%,证明本文所述数据处理方法能够较准确地外推获得激光器的寿命指标。

3 结 论

可靠性是功率半导体激光器工程应用的重要考核指标,通过开展 3 组单 bar 大功率半导体激光器的寿命评价实验,综合利用统计学相关知识,获得了单 bar 大功率半导体激光器的功率退化模型,借助模型确定大功率半导体激光器的外推寿命为 2.86×10^9 次脉冲次数。研究形成的方法为快速进行大功率半导体激光器寿命评价提供了支撑。

参 考 文 献

- 1 L. Rogers, S. Macomb. Diode laser target manufacturing[J]. *Laser solutions for Manufacturing*, 1999, **14**(6): 25~28
- 2 Friedrich Bachmann. High power diode laser technology and applications [C]. *SPIE*, 2000, **3888**: 394~403
- 3 Bo Baoxue, Gao Xin, Gao Dingsan *et al.*. 808 nm wavelength high power semiconductor laser arrays[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **28**(6): 494~496
薄报学,高欣,高鼎三等. 808 nm 波长高功率阵列半导体激光器[J]. *中国激光*, 2001, **28**(6): 494~496
- 4 Cao Yinhua, Liu Youqiang, Wang Zhiyong *et al.*. Kilowatt diode laser with beam quality better than all-solid-state laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2282~2285
曹银花,刘友强,王智勇等. 光束质量超过全固态激光器的千瓦直接半导体激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2282~2285
- 5 Gao Songxin, Wei Bin, Lü Wenqiang. Lifetime testing of high power diode laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(6): 689~692
高松信,魏彬,吕文强. 高功率二极管激光器寿命测试[J]. *强激光与粒子束*, 2004, **16**(6): 689~692
- 6 Rong Baohui, Wang Xiaoyan, An Zhenfeng. Accelerated aging test method of high power diode laser [J]. *Package, Measurement and Equipment*, 2008, **33**(4): 360~362
荣宝辉,王晓燕,安振峰. 大功率半导体激光器加速寿命测试方法[J]. *封装、测试与设备*, 2008, **33**(4): 360~362
- 7 Friedhelm Dorsch, Franz X. Daiminger. Aging tests of high power diode lasers as a basis for an international lifetime standard [C]. *SPIE*, 1996, **2870**: 381~389
- 8 Xu Huiwu, Ren Yongxue, An Zhenfeng *et al.*. Packaging of 808 nm 1500 W continuous wave operation perpendicularity laser diode stack [J]. *Chinese J. 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
- 9 Franz X. Daiminger, Friedhelm Dorsch, Stefan Heinemann. Aging properties of AlGaAs/GaAs high power diode lasers [C]. *SPIE*, 1998, **3244**: 587~595

栏目编辑: 宋梅梅