

大功率半导体激光器的可靠性研究

路国光^{1,2}, 套格套^{1,2}, 尧舜^{1,2}, 单肖楠^{1,2}, 孙艳芳^{1,2}, 刘云¹, 王立军¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 激发态物理重点实验室, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:文中介绍了半导体激光器寿命测试的理论依据, 给出寿命测试的数学模型, 据此对 InGaAsP/GaAs 有源区无铝的 808nm 大功率半导体激光器进行高温恒流加速老化实验, 得到器件在高温下的寿命, 利用外推公式推算出激光器在室温条件下工作的寿命可超过 30000 小时。讨论了实验中出现的灾变退化, 提出了防止灾变退化的几种方法。

关键词:大功率; 半导体激光器; 加速老化; 寿命测试; 灾变退化

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

文章编号: 0253-2743(2005)04-0014-02

Reliability of high-power semiconductor laser diodes

LU Guo-guang^{1,2}, TAO Ge-tao^{1,2}, YAO Sun^{1,2}, SHAN Xiao-nan^{1,2}, SUN Yan-fang^{1,2}, LIU Yun¹, WANG Li-jun¹

1. Lab. of Excited State Processes, Chinese Academy of Science, Changchun Institute of Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033;
2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039

Abstract: The theory of laser diode life testing and mathematic modal of life testing were introduced, accelerated aging tests were carried out under constant current conditions at high-temperatures for 808nm high-power Al-free InGaAsP/GaAs laser. Based on the mean lifetimes of the laser diodes at high-temperatures, the mean lifetimes of lasers at room temperature were estimated to be in excess of 30,000 hours. In addition, we discussed the catastrophic degradation modes and several methods to prevent this degradation mode.

Key words: high-power; semiconductor lasers; accelerated aging; life testing; catastrophic degradation.

1 引言

大功率半导体激光器作为一种新型的激光光源, 具有较高的电光转换效率和良好的工作稳定性及紧凑的体积和简单的驱动要求。它在光存储、光通讯、国防、工业及医疗等方面有很大的发展前景。在大多数的应用中, 器件的可靠性是一个决定性的因素, 因此可靠性和寿命测试的研究已成为当前的热点。本文基于加速寿命的基本概念, 参考普通半导体器件寿命测试方法, 给出了高温条件下加速寿命测试的数学模型。并叙述了半导体激光器寿命测试的实验过程: 即通过采集恒流工作半导体激光器的平均输出功率随时间变化的信息, 绘制激光器的老化曲线, 即恒流条件下的 P-t 曲线, 或通过采集恒功工作条件下的工作电流随时间的变化信息, 即恒功条件下的 I-t 曲线, 然后推断激光器正常条件下的使用寿命。

2 理论依据

2.1 加速寿命的基本概念

确定器件的可靠性和寿命原则上应在特定的工作条件下(电流、功率、温度等)对器件进行考核, 直至器件失效。对于高可靠性的器件进行长时间的寿命测试, 无论从成本上还是时间上来看, 都是不合算的, 甚至是不可能的。因此提出了加速寿命实验来预测器件寿命, 即用较短的时间加速老化预测器件寿命。

加速寿命实验的目的概括起来有: 可在较短时间内用较少的元器件估计高可靠性器件的可靠性水平, 运用外推的方法快速预测器件在正常工作条件下的寿命; 可在较短时间内提供实验结果, 检验工艺; 在较短时间内暴露器件的失效类型及形式, 便于对失效机理进行研究, 找出失效原因, 淘汰早期失效产品; 测定元器件的极限使用条件。

收稿日期: 2005-03-05

作者简介: 路国光, 男, 1979-, 吉林省农安县人, 博士研究生。2002年毕业于长春理工大学(原长春光学精密机械学院)光学物理系, 现为长春光学精密机械与物理研究所博士研究生, 研究方向为半导体光电子器件。

2.2 寿命测试的理论依据

2.2.1 寿命的定义

寿命测试是在老化筛选的基础上进行。半导体激光器的寿命是表征其可靠性的物理量。规定器件恒流工作时, 其功率下降 30% 时对应的时间为其寿命, 或规定器件恒功工作时, 其工作电流升高 30% 时对应的时间为其寿命。

2.2.2 加速寿命测试的数学模型

半导体激光器的老化寿命测试原理是基于 Arrhenius 模型^[1], 利用该模型可以发现由温度应力决定的反应速度的依赖关系, 即

$$\ln L = A + \frac{E_a}{kT} \quad (1)$$

式中 L 为寿命, E_a 为激活能, A 为常数, k 为玻尔兹曼常数: $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$, T 为热力学温度。

设通过实验可以测得某温度 T_1 下器件寿命为 L_1 , 从(1)式仍不能推得其它温度下的寿命, 因为有两个未知数。因此测试温度应有两个, 即还需测得另一个温度 T_2 下器件寿命为 L_2 , 根据(1)式可以求得激活能 E_a 。这样便可求得温度 T_1 对某温度 T_3 下的加速系数 K_3 :

$$K_3 = \frac{L_3}{L_1} = \frac{\exp\left(-\frac{E_a}{kT_3}\right)}{\exp\left(-\frac{E_a}{kT_1}\right)} = \exp\left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_3} - \frac{1}{T_1}\right)\right] \quad (2)$$

则有:

$$L_3 = L_1 \exp\left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_3} - \frac{1}{T_1}\right)\right] \quad (3)$$

可见实验需要测得同一批器件在两个不同温度下的寿命, 然后推得其他温度下的寿命。这就要求被测器件的数量足够多, 才能避免个性影响, 而得到共性, 即得到统计寿命值才可靠。

3 实验及讨论

依据(1)式, 实验中随机抽取六只半导体激光器分别在 70 和 80 条件下将其放进恒温箱内进行恒流加速老化实验, 激光器工作电流控制在 1000mA。记录激光器在高温条件下的寿命, 然后推算其在正常工作条件下的寿命。老化之

前,使用综合参数测试仪对 6 只激光器进行测试。其 P-I 曲线如图 1 所示。

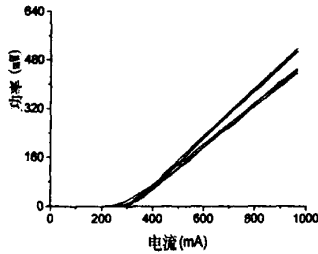


图 1 808nm 激光器输出功率图

实验过程中,每 10 小时用综合参数测试仪对 6 只激光器进行测试,如果发现激光器的功率下降 30% 时,则认为该器件已经失效。图 2 表示 6 只激光器在各自工作条件下的退化曲线。

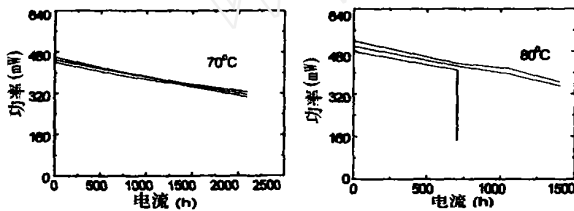


图 2 70 与 80 条件下的寿命曲线图

激光器的寿命以失效的平均寿命 (MTTF) 来表示,亦称 MTTF 为中值寿命。正常工作温度下的中值寿命也是通过测定高温条件下的中值寿命和激活能,然后由式 (1) 计算得到的。实际计算过程中,把多只同类激光器的各自失效时间的统计平均值作为 MTTF。由本实验得到的数据计算激光器的激活能约为 0.5eV,由此根据 (3) 式推算激光器在室温 25 条件下工作时可连续运转 30000 多个小时。

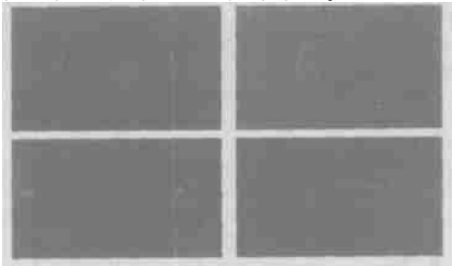


图 3 灾变退化时腔面的照片

在老化过程中发现了与灾变退化相联系的突然失效,灾变退化是和解理面有关的退化,半导体激光器中的灾变退化是影响半导体激光器的最大输出功率和器件寿命的一个主要因素^[2]。而灾变退化是由热量的逸出产生的,它主要发生在半导体激光器的表面。热量的逸出是一个正反馈过程,它是由载流子的非辐射复合产生的热量引起的。在靠近表面处,由于表面复合和体复合,载流子的复合率增强。这是因为表面区有大量的缺陷,这些缺陷是由解理和热应力引起的机械应力产生的,由于缺陷的存在,因此载流子被不断输送到表面,从而在表面有较大的复合电流。在较高的输出能量时,载流子主要是由带隙吸收激光而产生的光激发提供的。由于复合产生的热量导致带隙的局部热收缩,在表面的光吸收和随之引起的复合电流会随着温度的升高而加剧。在某一能量输出值,这种正反馈导致温度很快升高,从而激光器的有源区融化而导致灾变退化的发生。图 3 是半导体激光器发生灾变退化时腔面的照片^[3]。

为了防止灾变退化,必须遏止光吸收和作为复合中心的表面态行为。为此,人们发展了以下几种方法:(1)通过表面

处理去除表面态,成功地进行表面老化。这种方法主要用硫化物 $(\text{NH}_4)_2\text{S}_x$ 。处理激光器表面^[4],它减少了表面态密度,从而降低了表面非辐射复合速率,提高了 COD 阈值。(2)扩大近场模式,减少在表面的光密度。为此往往采用大光腔结构。这种结构减少了近表面有源层的光吸收。但是,近场模式扩大得很大比较困难,在表面仍然存在光吸收。(3)量子阱无序技术,原理:通过量子阱混杂技术,使端面处带隙增大,形成输出光的透明窗口,减少光的吸收。杂质注入诱导无序^[5],同普通激光器相比,COD 阈值提高了 1.65 倍;同 SiO_2 膜做电流阻挡层的激光器相比,COD 阈值提高了 1.13 倍,长期可靠性二者类似。空穴诱导无序技术^[6],在激光器端曲附近淀积 SiO_2 膜,在适合的热退火条件下,引起空穴诱导的量子阱无序,使端面处带隙增大,形成输出光的透明窗口。该实验结果显示:带有窗口结构的激光器在最大输出功率处没有发生 COD,而是受到热饱和的限制,其最大输出功率同普通激光器相比提高了 36%。量子阱无序技术需要多次外延或者高温 (900 °C) 退火,有可能造成器件损伤,且成品率较低。(4)端面附近引入非注入区,^[7]在激光器的两个端面附近分别引进 25 μm 长的电流非注入区,以限制电流注入到端面。非注入区的原理:通过减少端面附近载流子注入,以减少端面处的非辐射复合的发生,同时使端面温度升高得到抑制。非注入区的制作工艺: SiO_2 膜做电流阻挡层,使 COD 阈值提高了 30%;应用离子注入形成高电阻区漏掉作为电流阻挡层,该方法和杂质注入诱导无序技术联合使用,使激光器的可靠性得到了很大提高,达到了实用化的要求。总之,该方法简单实用,可以和其他方法共同使用。(5)在半导体激光器表面加保护膜^[2],如 $\lambda/4$ 波长的 Al_2O_3 ,这种膜层能减少激光器的表面热量。(6)在半导体激光器的前面加一个具有非吸收镜结构的弯曲波导^[8]F. R. Geller 对这种结构作了理论分析。

4 结论

提高光学灾变的方法很多,但是每种方法的可靠性也不相同,实验过程中可根据实际情况选用适当的方法,来改进半导体激光器的各项性能。利用表面钝化技术,实验成功地提高了半导体激光器发生光学灾变时的功率。但不同的钝化材料会产生不同的结果。

参考文献

- [1] China Technology information Institute. The Reliability of Semiconductor Devices [M]. (Chongqing: Technology Literature Publishing Company) 1977, 20.
- [2] A. Moser. Thermodynamics of facet damage in cleaved AlGaAs lasers [J]. Appl. Phys. Lett. July 1991, 59 (5), 29: 522 - 524.
- [3] Iain Macmillan. Creating high - power optical coatings is complex [J]. Laser Focus World, May 2002, 137 - 144.
- [4] G. Beister, J. Mæge, D. Gutsche, G. Erber. Simple method for examining sulphur passivation of facets in InGaAs - AlGaAs (0.98 μm) laser diodes [J]. Appl. Phys. Lett., April 1996, 68 (18), 29: 2467 - 2468.
- [5] J. K. Lee, K. H. Park, D. H. Jang, et al. Improvement of Catastrophic Optical Damage (COD) Level for High - Power 0.98 μm GaInAs - GaInP Laser Diodes Using Impurity Induced Layer Disordering [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1998, 10 (9): 1226 - 1228.
- [6] 徐遵图,徐俊英,杨国文等.量子阱无序的窗口结构 InGaAs/ GaAs/ AlGaAs 量子阱激光器 [J]. 中国激光, 1998, A25 (12): 1078 - 1082.
- [7] 刘斌,张敬明,刘媛媛等.980nm 半导体激光器可靠性的研究现状分析 [J]. 激光杂志, 2002, 23 (5): 2.
- [8] Jun - ichi Hashimoto, Ichiro Yoshida. A highly reliable GaInAs - GaInP 0.98 μm window laser [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, January 1997, 33 (1): 971 - 976.