

文章编号: 1000-7032(2017)02-0165-05

# 大功率半导体激光器可靠性研究和失效分析

王文知, 井红旗\*, 祁琼, 王翠鸾, 倪羽茜, 刘素平, 马晓宇

(中国科学院半导体研究所 光电子器件国家工程研究中心, 北京 100083)

**摘要:** 对自主研发的 975 nm 波长的 COS 封装的大功率半导体单管激光器进行了 10, 12, 14 A 的电流步进加速应力试验, 应用逆幂律模型和指数分布的理论对试验结果进行了分析, 计算出在 8 A 的电流下, 器件的平均寿命为 28 999 h。研究了器件的失效形式和老化前后的温升、偏振度的变化, 结果表明: 失效形式主要有体内退化、腔面退化、与焊接有关的退化; 老化后的器件的结温上升增多, 偏振度下降 10% 左右。

**关键词:** 可靠性; 步进加速应力; 指数分布

中图分类号: TN248.4; TN306

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fgxb20173802.0165

## Reliability Test and Failure Analysis of High Power Semicouductor Laser

WANG Wen-zhi, JING Hong-qi\*, QI Qiong, WANG Cui-luan, NI Yu-xi, LIU Su-ping, MA Xiao-yu

(National Engineering Research Center for Optoelectronic Devices,

Institute of Semiconductor, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

\* Corresponding Author, E-mail: jinghq@semi.ac.cn

**Abstract:** The current step accelerated stress tests were carried out at 10, 12, 14 A for 975 nm high power semiconductor laser which is packaged with the way of COS. The test results were analyzed by using the inverse power law model and the exponential distribution theory. The average life of the device is 28 999 h under the current of 8 A. The high power semiconductor laser's failure and the change of temperature rise and the degree of polarization before and after aging were also studied. The results show that the main failure is internal degradation, deterioration of the cavity surface, and welding related degradation. The junction temperature of device after aging is higher, and the degree of polarization decreases about 10%.

**Key words:** reliability; step accelerated stress; exponential distribution

## 1 引 言

随着大功率半导体激光器的材料、工艺与各类相关技术的发展与进步, 大功率半导体激光器已经发展到一个相对来说较为成熟的阶段, 成为光电子技术的核心器件之一。目前, 大功率半导体激光器广泛应用于光盘存储、光纤通信、光纤传

感、激光显示、固体激光器泵浦等领域<sup>[1]</sup>, 对于大功率半导体激光器的可靠性要求也在逐步提高。器件可靠性是器件在应用过程中的决定性因素之一, 可靠性和寿命研究是目前研究的一个热点与难点。大功率半导体激光器的寿命都比较长, 在正常条件下研究其可靠性难以实现, 所以需要采用加速老化的方式进行研究。

收稿日期: 2016-07-18; 修订日期: 2016-10-08

基金项目: 国家自然科学基金(61306057)资助项目

Supported by National Natural Science Foundation of China(61306057)

目前的加速模型有恒定应力、步进应力和序进应力 3 种方式<sup>[2]</sup>。加速应力主要有温度应力<sup>[3-6]</sup>、电流应力<sup>[7]</sup>等,由于半导体激光器对于温度尤其敏感,为了避免产生新的失效机理,所以对于大功率半导体激光器的寿命考核,一般采用的是用电流应力老化,即在超过正常工作的电流下观察器件的输出功率变化或者阈值电流的变化。通常在老化过程中当输出功率下降到原来的 80%,或者阈值电流上升到原来的 120% 即为失效。本文采用增加电流应力的方式进行老化实验,通过外推公式计算出正常工作条件下的器件的使用寿命。

## 2 理论依据

对于加速应力为电流的老化实验使用的加速模型主要为逆幂律模型<sup>[8-9]</sup>。基于逆幂律模型可以得到器件的寿命特征与应力的关系如下:

$$\xi = AS^{-c}, \quad (1)$$

式中:  $\xi$  是某寿命特征,如中位寿命、平均寿命、特征寿命等;  $A$  是一个正常数;  $c$  是一个与激活能有关的正常数;  $S$  是应力。上述关系称为逆幂律模型,它表示产品的某寿命特征是应力  $S$  的负次幂函数。

对上式取对数可得:

$$\ln\theta = a + b\ln S, \quad (2)$$

式中:  $a = \ln A$ ,  $b = -c$ 。  $a$  和  $b$  是两个待定参数,只要确定了  $a$ 、 $b$  的取值即可外推出其寿命值。

大多数电子元器件的失效曲线符合浴盆曲线,主要有 3 部分:早期失效、随机失效、损耗失效。在浴盆曲线的随机失效部分,其寿命的分布符合指数分布<sup>[10]</sup>。根据指数分布的特点即可以求得  $a$ 、 $b$  的值。

设有  $n$  个产品在一组加速应力  $\{S_1, \dots, S_k\}$  下顺序进行步进试验,其应力转换时间分别为  $t_1, t_2, \dots, t_k$ ,在  $S_i$  下持续时间  $t_i$  内共有  $r_i$  个失效。

由于定时转换步加试验数据的处理较为困难,所以将其转化为定时截尾恒加试验数据。该方法的要点如下:

(1) 极大似然法对平均寿命的估计

$$\hat{\theta}_1 = \frac{T_2^*}{r_1}, T_1^* = t_{11} + \dots + t_{1r_1} + (n - r_1)t_{1r_1}, \quad (3)$$

$$\hat{\theta}_i = \frac{T_i^*}{r_{i-1}},$$

$$T_i^* = t'_{i1} + \dots + t'_{ir_{i-2}} + (n - R_i)t'_{ir_{i-1}}, \quad i = 2, \dots, k, \quad (4)$$

式中  $R_i$  为总的失效个数。

(2)  $\ln\theta_i$  的无偏估计及其方差

令

$$\delta_i = \ln T_i^* - \psi(r_i - 1), \quad (5)$$

则有

$$E(\delta_i) = \ln\theta_i = a + b\ln S_i, \quad (6)$$

$$\text{Var}(\delta_i) = \xi(2, r_i - 1), \quad (7)$$

$$\text{Var}(\delta_i) = \xi(2, r_i - 2), \quad i = 2, \dots, k. \quad (8)$$

(3) 加速模型的估计

$$\hat{a} = \frac{GH - IM}{EG - I^2}, \quad \hat{b} = \frac{EM - IH}{EG - I^2}, \quad (9)$$

且  $\hat{a}$  与  $\hat{b}$  的方差与协方差分别为

$$\text{Var}(\hat{a}) = \frac{G}{EG - I^2}, \quad \text{Var}(\hat{b}) = \frac{E}{EG - I^2},$$

$$\text{Cov}(\hat{a}, \hat{b}) = \frac{-I}{EG - I^2}, \quad (10)$$

记  $\xi_1 = \xi(2, r_1 - 1)$ ,  $\xi_i = \xi(2, r_i - 2)$ ,  $i = 2, \dots, k$ , 则上述  $E$ 、 $I$ 、 $G$ 、 $H$ 、 $M$  分别为:

$$E = \sum_{i=1}^k \xi_i^{-1}, \quad (11)$$

$$I = \sum_{i=1}^k \xi_i^{-1} \ln S_i, \quad (12)$$

$$G = \sum_{i=1}^k \xi_i^{-1} \ln S_i^2, \quad (13)$$

$$H = \sum_{i=1}^k \xi_i^{-1} \delta_i, \quad (14)$$

$$M = \sum_{i=1}^k \xi_i^{-1} \ln S_i \delta_i, \quad (15)$$

由此可获得加速模型:

$$\ln\hat{\theta} = \hat{a} + \hat{b}\ln S, \quad (16)$$

若取  $S = S_0$  即可获得正常工作条件下的平均寿命。

## 3 实验方案及数据分析

本文采用的是自主设计研发的 GaAs 基 975 nm 半导体激光器,其封装形式如图 1 所示,不同的热沉对器件的散热和寿命也有影响<sup>[11-12]</sup>。选取 15 只器件进行初步的筛选,剔除掉早期失效的器件。筛选过后,选取 10 只器件进行加速老化试验。采用的电流加速应力  $S$  分别为 10, 12, 14 A, 老化时间分别为 1 000, 500, 500 h。在实验过程中,一直有水冷机对器件进行冷却,保证器件管壳

在不同的电流应力下保持在同一个温度。在器件正常工作的情况下, 结温会随着电流的增大而增加, 但是增加很小<sup>[6]</sup>, 所以在不同的电流应力下, 基本可以认为器件的失效机理是一致的。寿命考核的参数为功率值( $P$ ), 当功率下降到初始值的 20% 即为失效。电流步进加速老化过程中的功率变化如图 2 所示。

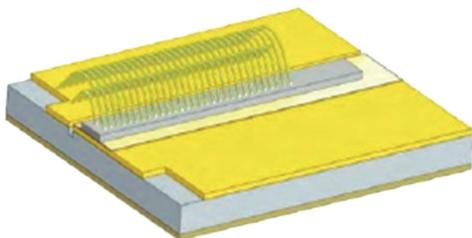


图 1 器件封装结构

Fig. 1 Packaging structure of the device

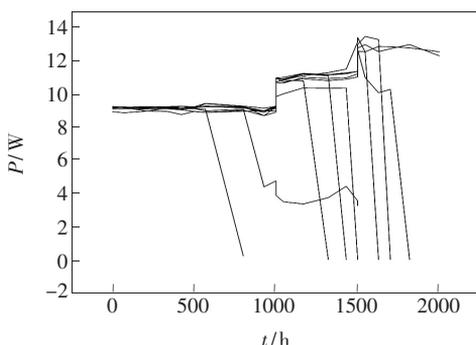


图 2 器件老化曲线

Fig. 2 Accelerated aging curves of the devices

对以上数据进行处理, 可得表 1。

表 1 步加试验有关数据

Tab. 1 Data of the step stress test

电流水平 $S_i/A$	10	12	14
持续时间 $t_i/h$	1 000	500	500
	568	168	45
失效时间 $t_{ij}/h$	800	320	128
		430	200
失效个数 $r_i$	2	3	3
$\psi_i$	0.422 784	0.422 784	0.422 784
$\xi_i$	0.644 934	0.644 934	0.644 934
寿命数据 $t_{ij}^*$	568	152	83
	800	262	155
总试验时间	7 768	1 724	548
$T_i^*/h$	3 884	862	274
$\delta_i$	8.534 984	7.029 618	5.883 491

根据表 1 中的有关数据, 首先计算  $E, I, G, H, M$  等的数值:  $E = 4.651\ 339, I = 11.515\ 208, G = 28.594\ 062, H = 33.256\ 260, M = 81.632\ 138$ , 由此可以算出  $a$  与  $b$  的估计值:

$$\hat{a} = 26.684\ 924 \quad \hat{b} = -7.891\ 518,$$

利用加速模型可以算出该器件在正常使用电流水平 12 A 下的平均寿命的估计值:

$$\ln \hat{\theta} = 26.684924 - 7.891518 \ln 8 = 10.274974,$$

$$\hat{\theta} = 28\ 999\ h.$$

## 4 失效分析及老化前后性能变化

半导体激光器退化主要有体内退化、腔面退化和与焊接有关的退化等几种形式。

### 4.1 体内退化

体内退化主要是材料内部的杂质与缺陷增多, 从而使载流子的非辐射复合速率增加, 造成器件缓慢退化。我们分别对老化前后的 5 只器件进行测量。老化后的器件性能退化, 器件的结温有所上升, 具体情况如图 3 所示。图中前 3 只器件的转换效率均在 55% 左右, 温升在 40 °C 左右; 第 4 只和第 5 只器件转换效率较低, 温升达到了

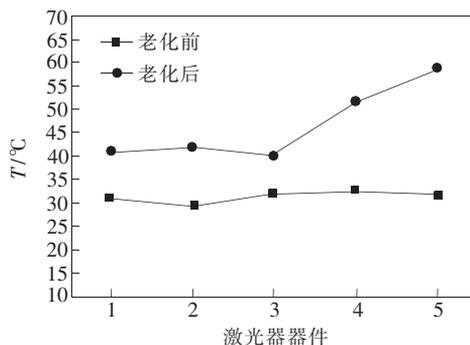


图 3 器件在老化前后的温升变化

Fig. 3 Temperature rise before and after aging

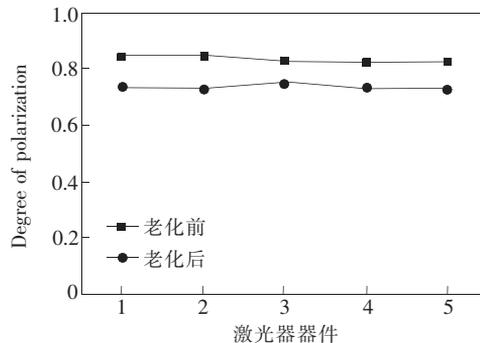


图 4 器件在老化前后的偏振度变化

Fig. 4 Degree of polarization before and after aging

50 ℃ 和 58 ℃。结果表明,转换效率较低的器件非辐射复合增多,光功率降低,温升较大。降低有源区的温度的措施主要有:提高芯片生长工艺;采用导热性能和热匹配比较好的焊料;采用散热性能好的封装管壳等<sup>[13]</sup>。

本文还测量了老化前后的器件的偏振度的变化,具体情况如图 4 所示。从图中可以看出,偏振

度在老化之后下降了 10% 左右,说明激光器的光束质量在老化之后有所下降。

#### 4.2 腔面退化

局部过热、氧化、腐蚀等因素会造成腔面损伤,使腔面的表面态增加,表面复合速度增加,温度极速上升,甚至发生腔面光学损伤(COD),如图 5 所示。可以采用量子阱混杂和非吸收窗口等

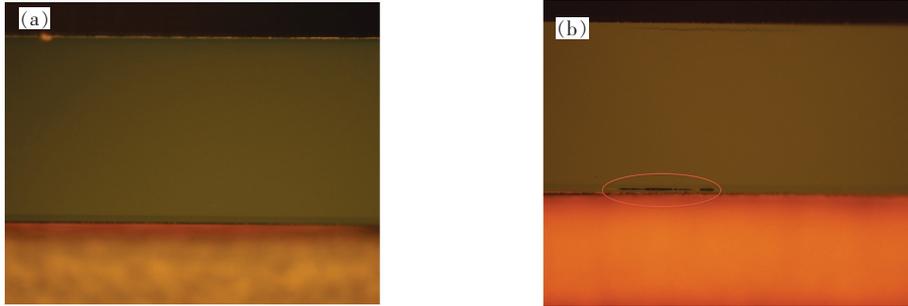


图 5 光学灾变损伤照片。(a)无光学灾变损伤发生;(b)标注位置处发生了光学灾变损伤。

Fig.5 Catastrophic optical damage (COD). (a)Without the occurrence of COD. (b)Occurrence of COD at the position marked out.

方式降低 COD。

#### 4.3 与焊接有关的退化

焊接不良主要有焊料溢出、管芯与载体粘结

不好等情况。焊接不良不仅会增加热耗散功率还会降低激光器的效率,引起局部过热、引线脱落等问题。几种焊接不良的情况如图 6 所示。

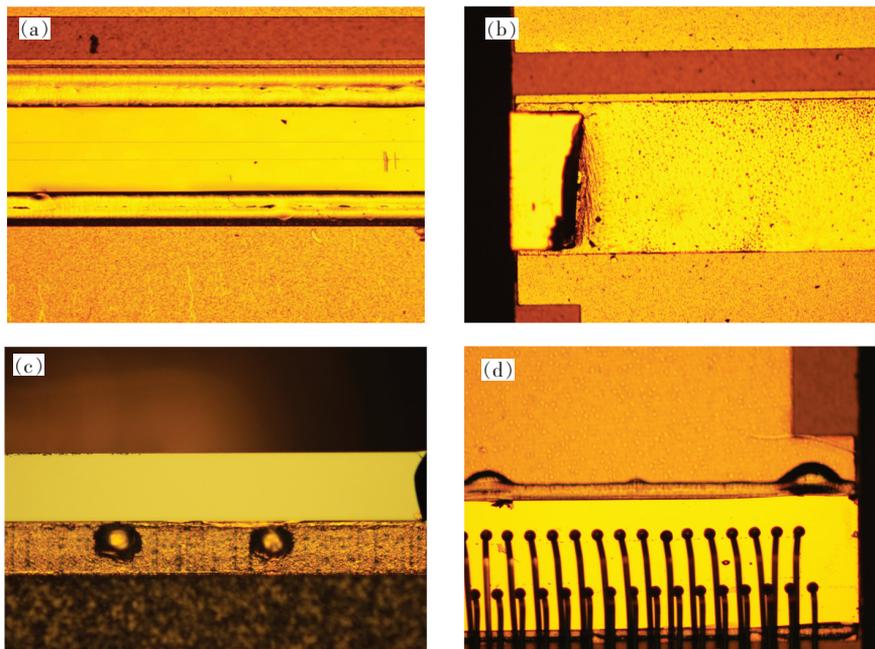


图 6 各种焊接不良情况的照片。(a)焊接良好;(b)焊料与管芯脱离;(c)焊料从腔面溢出;(d)焊料从两边溢出。

Fig.6 Photos of poor welding. (a) Good welding. (b) Solder away from the LD. (c) Solder overflow from the cavity surface. (d) Sold overflow from both sides.

## 5 结 论

本文采用步进电流应力的方式对大功率半导

体单管激光器进行了加速寿命试验,根据运动逆幂律模型和指数分布的理论外推出其在正常工作下寿命为 28 999 h。该结果是统计值,样品数越

多则结果越准确。由于试验条件的限制, 本文选取了 10 只, 结果会有所偏差, 但是在实际使用中仍有一定意义。本文还对器件的失效形式和老化

前后的性能进行了研究, 发现其老化后有温升增多、偏振度下降等现象。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] 王立军, 宁永强, 秦莉, 等. 大功率半导体激光器研究进展 [J]. 发光学报, 2015, 36(1):1-19.  
WANG L J, NING Y Q, QIN L, *et al.*. Development of high power diode laser [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2015, 36(1):1-19. (in Chinese)
- [ 2 ] 刘婧, 吕长志, 李志国, 等. 电子元器件加速寿命试验方法的比较 [J]. 半导体技术, 2006, 31(9):680-683.  
LIU J, LV C Z, LI Z G, *et al.*. Comparison of accelerated life tests of electronic component [J]. *Semicond. Technol.*, 2006, 31(9):680-683. (in Chinese)
- [ 3 ] 荣宝辉, 王晓燕, 安振峰, 等. 大功率半导体激光器加速寿命测试方法 [J]. 半导体技术, 2008, 33(4):360-362.  
RONG B H, WANG X Y, AN Z F, *et al.*. Accelerated life-time test of high-power laser diode [J]. *Semicond. Technol.*, 2008, 33(4):360-362. (in Chinese)
- [ 4 ] ISHIKAWA H, FUJIWARA T, FUJIWARA K, *et al.*. Accelerated aging test of  $Ga_{1-x}Al_xAs$  DH lasers [J]. *J. Appl. Phys.*, 1979, 50(4):2518-2522.
- [ 5 ] ENDO K, MATSUMOTO S, KAWANO H, *et al.*. Rapid degradation of InGaAsP/InP double heterostructure lasers due to <110> dark line defect formation [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1982, 40(11):921-923.
- [ 6 ] BAO L, WANG J, DEVITO M, *et al.*. Reliability of high performance 9xx-nm single emitter laser diodes [J]. *SPIE*, 2010, 7583:1-10.
- [ 7 ] 王德宏, 李雅静, 安振峰. 大功率半导体激光器步进加速老化研究 [J]. 微纳电子技术, 2008, 45(9):508-511.  
WANG D H, LI Y J, AN Z F. Reliability of high power semiconductor laser diodes [J]. *Micronanoelectron. Technol.*, 2008, 45(9):508-511. (in Chinese)
- [ 8 ] 茆诗松, 王玲玲. 加速寿命试验 [M]. 北京: 科学出版社, 1997:19-137.  
MAO S S, WANG L L. *Accelerated Life-time Test* [M]. Beijing: Science Press, 1997:19-137. (in Chinese)
- [ 9 ] 茆诗松. 加速寿命试验的加速模型 [J]. 质量与可靠性, 2003(2):15-17.  
MAO S S. The accelerated model of accelerated life-time test [J]. *Qual. Reliab.*, 2003(2):15-17. (in Chinese)
- [ 10 ] FUSEK M, MICHÁLEK J. Statistical analysis of analysis of type I multiply left-censored samples from exponential distribution [J]. *J. Stat. Comput. Simul.*, 2015, 85(11):2148-2163.
- [ 11 ] 倪羽茜, 井红旗, 孔金霞, 等. 高功率半导体激光器陶瓷封装散热性能研究 [J]. 发光学报, 2016, 37(5):561-566.  
NI Y X, JING H Q, KONG J X, *et al.*. Thermal performance of high-power semiconductor laser packaged by ceramic submount [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2016, 37(5):561-566. (in Chinese)
- [ 12 ] NI Y X, MA X Y, JING H Q, *et al.*. Finite element analysis of expansion-matched submounts for high-power laser diodes packaging [J]. *J. Semicond.*, 2016, 37(6):064005.
- [ 13 ] JING H Q, ZHONG L, NI Y X, *et al.*. Design and simulation of a novel high-efficiency cooling heat-sink structure using fluid-thermodynamics [J]. *J. Semicond.*, 2015, 36(10):102006-1-6.



王文知(1992 -), 女, 河北沧州人, 硕士研究生, 2014 年于河北工业大学获得学士学位, 主要从事大功率半导体激光器的研究。

E-mail: wwzhi1991@163.com



井红旗(1980 -), 女, 河北保定人, 博士, 助理研究员, 2014 年于中国科学院半导体研究所获得博士学位, 主要从事大功率半导体激光器及其封装方面的研究。

E-mail: jinghq@semi.ac.cn