

文章编号: 1001-4322(2005)S0-0097-04

高功率二极管激光器失效特性研究*

高松信, 魏 彬, 吕文强, 武德勇, 邵冬竹, 左 蔚

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 利用统计分析手段,对高功率二极管激光器封装中各环节引起器件失效的原因进行了分析和归类。根据几种失效模式的分析结果,焊接空隙、结短路、腔面退化是引起高功率 DL 失效的主要模式,针对高功率二极管激光器失效的主要模式,对焊料沉积夹具及焊接工艺参数进行了改进和优化,大大提高了封装工艺水平,使封装的器件成品率由原来的 77% 提高到了 85% 以上。

关键词: 二极管激光器; 失效; 腔面退化; 封装

中图分类号: TN248 **文献标识码:** A

半导体激光器(DL)以其转换效率高、体积小、可靠性高等特点,在光纤通讯、光盘系统以其它信息处理方面的得到了广泛应用。近几年,随着高功率二极管激光芯片制造工艺成熟和封装技术迅速发展,使其在材料加工、医疗、生物、军事等领域的应用前景更加广阔^[1]。目前,高功率二极管激光器已作为固体激光器泵浦源,使固体激光器获得新的生命力,并成为近几年激光技术领域研究的热点。但是,由于高功率二极管激光器芯片制造工艺复杂,价格昂贵,封装工艺中存在的缺陷严重影响着器件的成品率,制约着高功率二极管激光器批量生产。因此,对封装的器件进行失效分析、建立失效模式,从而改进封装工艺,是高功率二极管激光器发展的重要环节。

1 主要失效特性

经过多年的试验研究发现,半导体激光器失效主要分布在三个时间段:早期失效,偶然失效和损耗失效,如图 1 所示^[2]。横轴为器件使用时间,纵轴为各时间的产品故障率。从图中可以看出,半导体器件的主要失效出现在早期和末期。早期失效,又称为“婴儿效应”,在婴儿期抵抗力最差,最容易夭折。引起器件早期失效的主要原因有:芯片制造工艺缺陷(暗线缺陷,面缺陷)焊接失效(封装工艺的焊接空隙,pn 结短路),芯片端面绝缘层失效等。引起损耗失效的主要原因有:芯片制造工艺水平限制,使器件老化、疲劳等因素达到寿命终结。

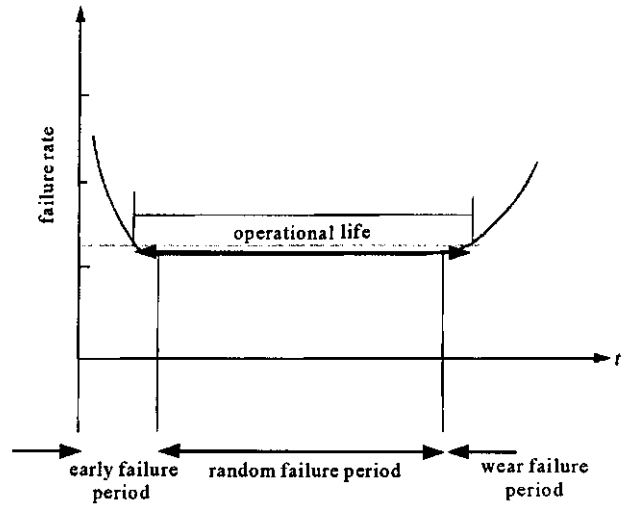


Fig. 1 DL failure rate vs failure time

图 1 DL 失效率与时间关

2 失效模式分析

2.1 电极退化

高功率激光二极管阵列的电极失效主要表现在两个方面:其一,高功率激光二极管工作电流很大,焊料层随电流方向扩散到半导体材料内,形成暗点缺陷,在大电流作用下,造成局部热积累,作为上电极的薄铜片极易被烧毁,造成激光器灾难性的失效,如图 2 所示。其二,激光二极管芯片材料(GaAs)与热沉材料热匹配性差,焊接温度应力引起焊层内部缺陷或开裂,导致器件电极退化,如图 3 所示。导致焊接缺陷的主要因素有:芯片焊接过程中升温、降温时间过快,焊接应力无法及时释放,显微镜下不易发现。激光器运行时,激光器反复开关

* 收稿日期:2004-11-22; 修订日期:2005-02-23

基金项目:中国工程物理研究院基金资助课题

作者简介:高松信(1975—),男,助理研究员,从事高功率二极管激光器研究;绵阳 919-1013 信箱;E-mail: xingao995@sohu.com.

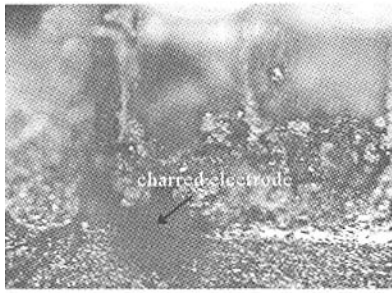


Fig. 2 Electrode damaged by strong current
图 2 电极受大电流损坏

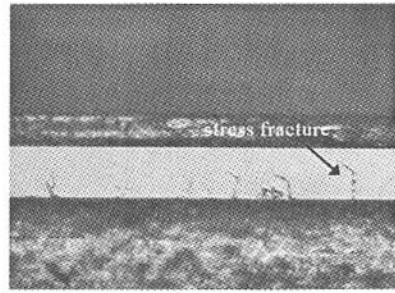


Fig. 3 Visible facet damage by stress
图 3 应力引起腔面裂痕

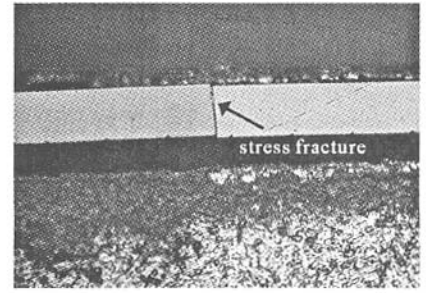


Fig. 4 Split by solder stress
图 4 焊接引力引起焊层裂

造成的温度梯度使焊层暗线缺陷逐渐明显,最终导致焊层开裂,引起激光器失效,如图 4 所示。2.2 欧姆接触退化

欧姆接触主要由焊接面造成高功率激光二极管失效,是封装工艺中最主要的失效模式,可分为两种:一种是焊接空隙,另一种是 pn 结短路。高功率二极管激光器的热载很大,功率为 60W 的线阵激光器,其工作废热可达到 80~90 W。因此,焊接过程中极小的空隙都会造成器件过热而失效,如图 5 所示。根据试验结果,造成焊接空隙的因素主要有:热沉加工的平整度差、焊料制备过程中产生杂质、热沉金属化中形成大颗粒等,引起局部焊料与芯片间浸润不好。另一方面,为了良好散热,芯片必须 p 面向下焊接在热沉上,使出光面与焊层间距离仅为 2 μm 。但是,如果焊料太厚或焊层不均匀,焊接过程中极易从焊层挤出焊料颗粒,造成 pn 结短路而失效,如图 6 所示。因此,焊料制备中焊料均匀性和焊料厚度的控制也是封装工艺中的关键环节之一。

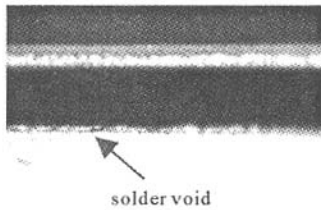


Fig. 5 Solder hole by particle and asymmetric solder
图 5 焊料不均匀引起焊接空隙

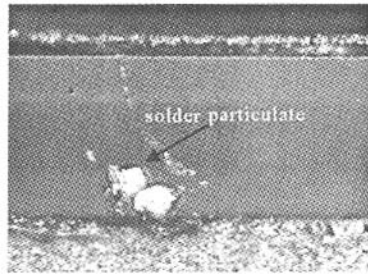


Fig. 6 pn short circuit by thick solder
图 6 厚焊料引起 pn 结短路

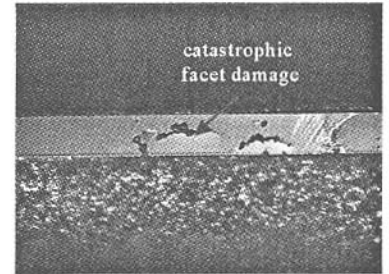


Fig. 7 Catastrophic facet damage due to high power density
图 7 腔面灾难性损伤

2.3 腔面退化

腔面退化是激光二极管区别于其它微电子器件的主要失效模式,在大输出功率下,作为谐振腔的自然解理面承受很高的功率密度(1~10 MW/cm^2)^[4],特别是大功率器件,其前后腔面的输出功率密度可达到数 MW/m^2 ,且有源区材料含有铝或铟元素。铝或铟在高功率密度下融化或再结晶,导致腔面的破坏,这种由于制造工艺缺陷造成的器件失效属于内缺陷,是芯片设计制造工艺不成熟形成的。它主要表现在暗线缺陷(DLD)、腔面灾难性损伤退化(COD)、端面绝缘层失效,而暗线缺陷主要是位错形成强烈的光吸收,使阈值电流不断增加,光转换效率下降,输出光功率逐步下降而失效。腔面灾难性损伤退化是由于芯片前后腔面所镀的透射膜和高反膜的工艺控制缺陷,在高功率密度作用下炭化或化学腐蚀损伤退化,最终引起芯片失效,如图 7 所示。腔面另一种退化形式为可视光学损伤(VOD),其主要出现在激光二极管发光区,由于焊接过程中焊料污染到出光面和出光面由于操作失误受到损伤,形成高的热吸收源。可视光学损伤与灾难性光学损伤区别在于:它在失效前可用光学显微镜或电子显微镜下观察到缺陷状态。但存在可视光学损伤的二极管激光器在老化初期未必迅速失效,随着功率密度增加,缺陷处吸热量迅速增加,最终导致激光器失效,其缺陷状态如图 8 所示。

2.4 端面绝缘层失效

另一种原因是端面绝缘层失效如图 9、图 10 所示。芯片制造过程中,两个端面的绝缘层是人们往往忽略的问题,给封装带来了很大的难度。由于芯片两端未镀介质膜或介质膜镀的不好,使焊料沿着端面浸润到 n 极,引起芯片短路而失效。对于高功率激光二极管,其焊接面与二极管芯片的激活区仅有 2 μm ,随着工作大电

流的注入,作为低熔点的软焊料 In,焊料层很容易形成晶须和热疲劳现象。尤其是在高温环境下,更容易促进焊层晶须的生长,加速焊层热疲劳产生,导致激光二极管早期失效,如图 9 所示。

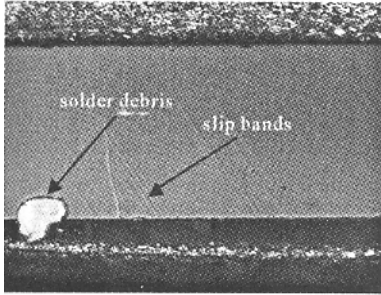


Fig. 8 Slip bands and solder debris of active area of laser

图 8 腔面划痕和焊接杂质

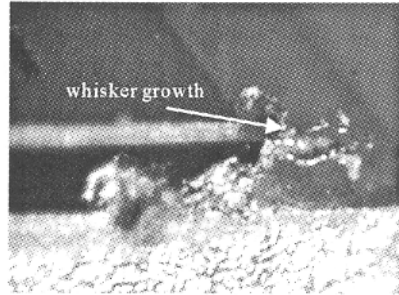


Fig. 9 Whisker growth with heat

图 9 热效应促使晶须生长

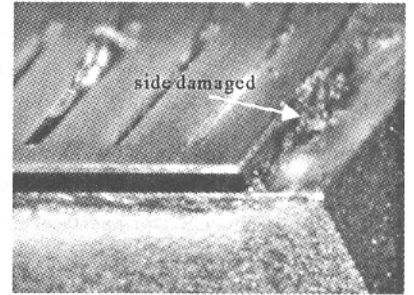


Fig. 10 Insulating destroy of diode

laser side

图 10 端面绝缘层失效

2.5 环境污染

环境污染是激光二极管失效的外界因素,它主要是由于一些偶然因素导致激光二极管灾难性失效,它包括电浪涌、灰尘颗粒、静电、水汽污染腔面等诸多因素。

3 器件失效统计分析

针对高功率二极管激光器主要失效模式,改进封装工艺是至关重要的关键环节。因此,对封装的大量线阵激光器进行了统计,其中失效率为 17.3%。根据实验统计结果,高功率激光二极管失效主要集中在焊接、焊料制备和芯片本身工艺三个方面,而三种失效模式出现的几率随着老化时间的延续表现出不同的趋势。焊接和焊料制备引起的失效主要集中在器件早期失效过程中,而芯片本身制造工艺的缺陷引起的器件失效主要集中在耗损失效期间。从失效统计看出,高功率激光二极管的失效表现在焊接空隙(30%)、结短路(29%)、腔面退化(17%)、电极退化 9%、环境因素(7%)几个方面,因此,解决芯片焊接工艺和焊料制备的膜质量是目前控制高功率二极管激光器封装成品率的关键环节。

根据试验结果和失效统计分析,对引起高功率 DL 失效的主要模式进行了优化。利用非接触式测试方法精确控制焊料厚度和均匀性,根据不同热沉材料,使膜厚控制在 $5\sim 7\ \mu\text{m}$,有效遏制了焊接空隙和 pn 结短路失效,大大提高了封装成品率。同时,不断优化焊接工艺,确定了最佳焊接温度和时间,精确控制升温、降温时间,有效释放焊接应力,提高了高功率 DL 的使用寿命。

4 总结

通过对封装的大量二极管激光器的统计和失效分析,建立失效模式和失效物理模型,针对目前封装工艺中出现的主要失效模式,进一步改进和优化。利用归类的几种失效模式和故障统计手段,分析工艺缺陷,建立高功率二极管激光器故障库,可为高功率二极管激光器封装提供重要理论和试验依据。

参考文献:

- [1] 高松信,武德勇,王骏,等. 高功率二极管激光器封装的多层焊接技术[J]. 强激光与粒子束, 2003, **15**(5): 447—449. (Gao S X, Wu D Y, Wang J, et al. Multilayer bonding technique for high power diode laser package. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(5): 447—449.)
- [2] Fukuda M. Degradation modes of semiconductor laser used in optical fiber transmission system[A]. Proc of SPIE[C], 1992, **1634**: 184—191.
- [3] Pittroff W, Erbert G, Beister G, et al. Mounting of high power laser diodes on boron nitride heat sinks using an optimized Au/Sn metallurgy [J]. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 2001, **24**(4): 434—440.
- [4] Hans-Georg T, Jim H, Bor M, et al. Compact high brightness and high power diode laser source for materials processing[A]. Proc of SPIE [C]. 2000, **3945**: 23—31.

Failure analysis of high power diode laser array

GAO Song-xin, WEI Bin, LÜ Wen-qiang, WU De-yong, SHAO Dong-zhu, ZUO Wei

(Institute of Applied Electronics, CAEP, P. O. Box 919-1013, Mianyang 621900, China)

Abstract: Using statistics analysis method, diode laser failure states were classified and the causes of these diode laser failures were analyzed in every packaging process. The result of the statistics analysis shows that the main causes of these failures are solder void, pn short circuit and facet damage. The packaging techniques were optimized and ameliorated and the production rate is improved from 77% to 85%.

Key words: Diode laser; Failure; Facet damage; Packaging