

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0006-4

高功率二极管激光器阵列可靠性研究

高松信^{1,2}, 武德勇¹, 魏 彬¹, 吕文强¹

(¹中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)
(²电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054)

摘要 通过高功率二极管激光器封装实验对二极管激光器单元的封装工艺可靠性进行了物理分析,对组装的大功率阵列二极管激光器以及抽运模块的失效特性进行了分析。根据分析结果,提出了高功率二极管激光器单元以及大功率阵列激光器的可靠性测试方法。任意抽取经过可靠性测试的激光器,在冷却水温 20 ℃条件下进行寿命测试,根据实验结果得出退化率,推算出准连续二极管激光器在水温 20 ℃,电流 150 A,占空比为 15% (500 Hz, 300 μs)时,平均激光工作寿命达到 5×10^9 次脉冲,且寿命测试过程中激光器再没有发生失效。结果表明,经过单元老化筛选后的二极管激光器,其运行可靠性得到进一步保证。

关键词 激光技术; 二极管激光器; 可靠性; 失效; 封装; 抽运

中图分类号 TN242 **文献标识码** A

Reliability of High Power Diode Laser Stack

GAO Song-xin^{1,2}, WU De-yong¹, WEI Bin¹, LÜ Wen-qiang¹

(¹ Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)
(² School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract The reliability of packaging technique about diode laser (DL) unit and the defect characteristics of high power DL stack and pumping module are analyzed. Testing methods for the reliability of high power DL unit and stack is made. Random samples selected from the lasers passing the reliability tests were used for lifetime test. Under the conditions of cooling water temperature of 20 ℃, current of 150 A, and duty cycle of 15% (500 Hz, 300 μs), the experimental results led to an estimated lifetime of 5×10^9 shots. No defect was found during the lifetime test. It was demonstrated that the reliability of diode lasers could be assured after filtrating.

Key words laser technique; diode laser; reliability; defect; packaging; heat sink

1 引 言

二极管激光器由于其体积小、结构紧凑、寿命长、电光效率高等特点,毫瓦量级的小功率器件已在通信领域得到广泛应用^[1]。同时,随着二极管激光芯片制造及封装工艺水平的提高,商品化大功率二极管激光器单条连续输出功率已达 100 W,准连续 150 W,封装的大功率二极管激光阵列也达到数千瓦的功率水平,这使其在材料加工、医学、军事等领域的应用前景更加明朗。特别是近年来,高功率二极管激光器作为固体激光器和光纤激光器的抽运源及其在材料加工领域的直接应用,使其成为激光研

究领域的热点^[2]。随着高功率二极管激光器应用需求的不断扩大,其可靠性和寿命已成为研究的焦点^[1]。本文针对高功率二极管激光阵列封装工艺过程造成的器件失效进行了物理分析,建立了可靠性物理测试方法。同时,对封装的器件进行了寿命测试。

2 二极管激光器可靠性物理分析

高功率二极管激光器阵列可分为一维排列组成的线阵和二维叠阵,一维线阵可组成环形抽运模块,用于抽运棒状晶体、研制二极管抽运固体激光器

基金项目: 中国工程物理研究院重大项目资助课题。

作者简介: 高松信(1975—),男,助理研究员,主要从事高功率激光二极管激光器的研究。E-mail: xingao995@sohu.com

(DPL);二维叠阵一般利用光学耦合手段将光束耦合到光纤输出,可直接用于材料加工、医学等领域,也可作为片状晶体抽运源开展高平均功率二极管抽运固体激光器研究。由于各公司封装结构的差异,影响大功率激光器阵列可靠性的因素也有所不同。针对目前封装的抽运模块,实际使用过程中失效状态统计表明,抽运模块的失效主要集中在单元器件封装工艺缺陷和耐压能力。

2.1 二极管激光器单元封装工艺可靠性

高功率二极管激光器单元是抽运模块组装最基本的元素,也是影响抽运模块可靠性的最关键因素。目前,高功率二极管激光器的封装选用具有良好热导率、电导率及廉价的无氧铜作为热沉材料。但是,由于无氧铜相对较软,并且热膨胀系数与芯片材料GaAs不匹配等因素,增加了二极管激光器单元封装工艺失效比例,降低了工艺可靠性。

2.1.1 热膨胀系数失配引起可靠性下降

对于高热导率的铜,其热膨胀系数为 $16.7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$,将芯片焊接在铜热沉上,由于热膨胀系数的不匹配,在芯片焊接过程中会产生较大的应力^[3,4],如图1,图2所示。图1为芯片焊接后冷却过程中,焊层释放和产生应力的过程;图2为焊接完毕后,器件中存在的应力。

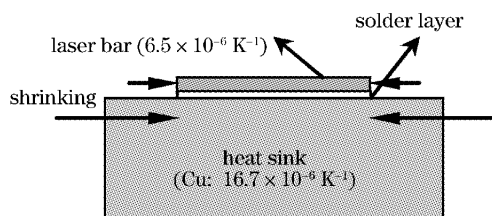


图1 芯片焊接后冷却过程中产生(220 °C~25 °C)

Fig.1 Stress occurs during the cooling down after soldering (220 °C~25 °C)

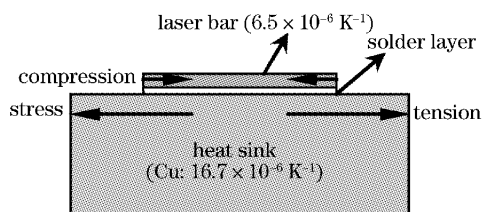


图2 芯片冷却后应力状态

Fig.2 Stress after cooling down

根据实验,由于焊接过程中热应力释放不足,抽运模块频繁开关,焊接层冷热快速变化,热应力不断作用于芯片和焊层,将导致芯片断裂或芯片脱离热

沉的断路现象^[5],如图3所示,严重影响器件的可靠性。因此,通过优化焊接温度,可有效释放焊接应力,从而达到较好的焊接效果。

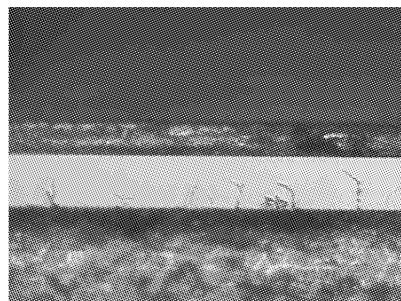


图3 应力引起腔面裂痕

Fig.3 Visible damage on the facet formed by stress

2.1.2 焊料制备的可靠性

用In作焊料,由于其在空气中极易氧化的特点,选用高真空蒸发镀膜的方式进行焊料制备。在蒸发过程中,膜层的厚度、均匀性与基片位置、蒸距等参量有很大关系。膜厚与各参量的关系为

$$\frac{t}{t_0} = \frac{1}{[1 + (x/h)^2]^2}, \quad (1)$$

式中 t_0 为蒸发源对平面投影点处的膜厚; h 为蒸距; x 为平面上任意点距蒸发源在平面上投影点的距离; t 为任意点膜厚。在蒸发过程中,蒸发温度的变化也会严重影响膜质量。由于二极管激光器基底材料GaAs的热导率较低,为了减小热阻,必须使芯片的p面向下焊接在热沉上。这样,发光区与焊料层的距离仅有 $2 \mu\text{m}$,虽然大大减小了热阻,但给焊接制备工艺带来很大难度,焊料太薄或不均匀都会造成底部的焊接空隙,焊料太厚则会导致pn结短路,从而降低器件的可靠性^[6]。另外,由于软焊料In在器件运行中热电位移和晶须的生长,会引起短路和焊层的热疲劳,特别是当二极管激光器单元被装配到抽运模块腔体内,In焊料受到杂散光的照射和腔体内整体温度的升高,将加速热电位移和晶须的生长。根据实验,对于晶须的生长,通过严格控制In膜的尺寸,使焊料面积与芯片焊接面尺寸相等,可有效控制晶须造成的器件失效。

2.2 激光阵列耐压能力

影响抽运模块可靠性的另一个重要因素是器件的耐压能力,包括耐水压能力和耐电压能力,这两种耐压能力对器件的安全运行起到至关重要的作用。根据实验分析,随着功率的不断提高,器件的可靠性在不断的降低。由于大激光阵列由多个二极管激光

单元串联而成,激光阵列功率越高,串联的器件单元数目就越多,这本身就增大了失效几率。另外,器件的端电压也随之增大,器件与冷却器之间的电压差很容易使器件漏电,瞬间的电击穿会造成多个单元器件损坏,如图 4 所示。

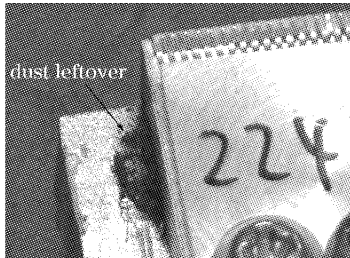


图 4 电击穿引起器件失效

Fig. 4 Diode laser damaged because of electrical breakdown

抽运模块采用多边环形抽运的结构,为了满足大功率阵列散热要求,每一边的条形冷却器采用铜微通道冷却器,每个冷却器安装 9~12 个二极管激光器单元排成一维线阵,并且抽运模块需要承受 $(4\sim 5)\times 10^5$ Pa 的水压。高的水压很容易导致冷却器焊接面和安装密封处漏水,不但污染腔面,而且在激光器运行过程中与铜电极发生电化学反应,如图 5 所示,造成整个抽运模块失效。因此,必须采取有效的可靠性测试手段,降低器件灾难性损伤的概率。

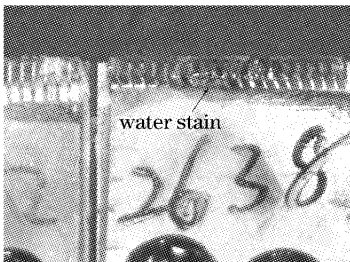


图 5 漏水引起器件失效

Fig. 5 Diode laser damaged because of water leakage

对于二维叠阵的激光器模块,漏水是影响器件可靠性的最主要因素。激光器单元之间的水密封主要靠硅橡胶。单元器件数量越多,所需要的水流越大 [≥ 150 ml/min (1×10^5 Pa)],其整体的水压也就越大,由此将引起水密封可靠性降低。

3 可靠性实验

3.1 单元可靠性测试

统计表明,高功率二极管激光器单元的失效主要是由封装工艺的缺陷造成的,其主要失效模式有

焊料空隙、应力拉裂以及电极失效,而这几种失效主要集中在器件点燃 20 h 内。因此,对封装的每一个器件都进行初步老化测试,参照国外大功率二极管激光器器件测试参量,输出功率定为正常工作时的 1.2 倍,老化时间为 24 h。老化期间,频繁的关断、开启激光器(每 2 h 1 次),增强器件焊层对温度变化引起应力的适应能力,从而使封装的每一个成品器件的可靠性得到保障。器件的失效一般集中在某一批次的封装过程中,因此,必须对老化中失效的器件及时分析并反馈,对工艺参量进行优化,以保证下一批次封装工艺的可靠性。

3.2 阵列器件可靠性测试

高功率阵列二极管激光器由经过初步老化的单元器件组装而成。耐压能力是衡量抽运模块可靠性的重要指标。首先,由于半导体激光器十分脆弱,反向偏压很容易造成器件烧毁。因此,设计了一种具有保护功能的简单耐压实验装置,该系统由耐压测试器、保护二极管和保护电阻组成,可有效测试出条形二极管激光阵列的耐压能力,耐压参量参照北美实验标准。实验结果显示,当单条冷却器与二极管激光器单元之间绝缘电阻大于 $4\text{ M}\Omega$ 时,激光器可靠运行。其次,进行对冷却水的耐压实验,将封装好的激光阵列放在正常工作压力 1.2 倍条件下进行 1~2 h 的通水实验,确定水密封的可靠性。经过耐压实验后,大功率阵列在工作状态下运行 2 h,对其外电路进行检验,从而保证其可靠性。

4 寿命测试

二极管激光器寿命测试是可靠性研究的重要组成部分,器件使用寿命的长短是用户最关心的技术指标之一,也是评价器件好坏的关键参量。因此,二极管激光器的寿命标定是必不可少的环节。对于大功率二极管激光器,在工作电流一定的情况下,器件满负荷运行,当输出的激光功率下降为初始值 80% 的时间,称为工作寿命。根据实验,激光二极管按照线性关系逐步退化,即

$$P(\tau_c) = \alpha P_0, \quad (2)$$

$$\delta = dP/dt, \quad (3)$$

$$\tau_c = \frac{P_0 - P(\tau_c)}{\delta}, \quad (4)$$

式中 $\alpha = 0.8$, P_0 为初始测试的激光输出功率, $P(\tau_c)$ 为输出功率下降为初始值 80% 时的功率, δ 为退化率, τ_c 为激光器工作寿命。寿命实验是将经过初步老化的单元器件随机抽取若干只在正常工作状

态下运行,利用上述关系推算。为了使其均匀散热和提高散热效果,激光器芯片 p 面向下焊接在一块 $25\text{ mm}\times 25\text{ mm}\times 7.5\text{ mm}$ 的铜热沉上,热沉本身带有冷却器,冷却水流量为 $200\text{ mL}/\text{min}$,封装结构的热阻对腔长 $900\text{ }\mu\text{m}$ 为 $0.52\text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$ 。这一封装结构的线阵激光器的峰值功率为 150 W , 占空比 15% (500 Hz , $300\text{ }\mu\text{s}$), 芯片激活区的填充因子为 50% 。寿命测试前,先对器件的功率-电流-电压特性进行了测试。测试过程中,激光器没有偶然失效的情况,但激光器在 2.2×10^9 次脉冲时,输出功率整体下降,如图 6 所示,经分析是由于驱动电源输出误差造成。根据实验结果得出,被测激光器平均退化率为 $6.9\text{ W}/\text{Gshot}$ (Gshot 即 10^9 次脉冲),根据(4)式推算,器件寿命为 $(4\sim 5)\times 10^9$ 次脉冲。

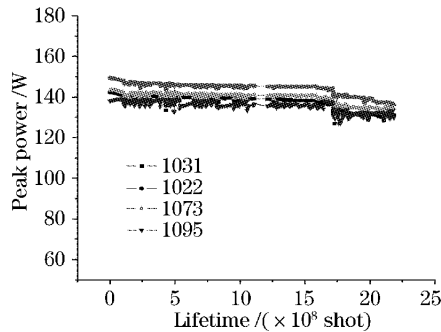


图 6 随机抽取的 4 件样品激光器寿命测试结果
Fig. 6 Lifetime test results of 4 random samples
(500 Hz , $300\text{ }\mu\text{s}$, $20\text{ }^\circ\text{C}$, 150 A)

5 结 论

通过高功率二极管激光器封装实验,统计了高功率二极管激光器失效状态。根据结果,对二极管

激光器单元的封装工艺缺陷进行了物理分析。对组装的大功率面阵二极管激光模块失效特性进行了分析,得出封装工艺中存在的影响器件可靠性的主要因素,分析了影响激光阵列可靠运行的几种可能因素。提出了高功率二极管激光器单元以及大功率阵列激光器的可靠性基本测试方法,并对封装的每一个激光器进行了可靠性测试实验,保证了器件使用可靠性指标。随机抽取若干只经过测试的激光器,在冷却水温 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下进行寿命测试,根据试验结果得出退化率,推算出准连续二极管激光器在水温 $20\text{ }^\circ\text{C}$, 电流 150 A , 占空比为 15% (500 Hz , $300\text{ }\mu\text{s}$) 时,平均激光工作寿命达到 5×10^9 次脉冲。结果表明,经过可靠性老化测试,激光器运行的可靠性得到保证。

参 考 文 献

- 1 Friedrich Dorsch, Franz X. Daiminger. Aging tests of high power diode lasers as a basis for an international lifetime standard [C]. *SPIE*, 1996, **2870**: 381~391
- 2 Friedrich G. Bachmann. Present technology, industrial applications, and future prospects of high-power diode lasers [C]. *SPIE*, 2002, **4762**: 1~15
- 3 Christian Scholz, Konstantin Boucke, Reinhart Poprane. Mechanical stress-reducing heat sinks for high-power diode lasers [C]. *SPIE*, 2004, **5336**: 176~187
- 4 W. Pittroff, G. Erbert, A. Klein *et al.*. Mounting of laser bars on copper heat sinks using Au/Sn solder and CuW submounts [C]. In Proceedings of IEEE 2002 Electronic Components and Technology Conference. 276~281
- 5 Nicolas Wiedmann, Juergen Jandeleit, Dieter Hoffmann *et al.*. Defects and degradation of InGa(Al)As/GaAs high-power diode lasers [C]. *SPIE*, 2000, **3889**: 90~95
- 4 Gao Songxin, Wu Deyong, Wang Jun *et al.*. Multilayer bonding technique for high power diode laser package [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(5): 447~449
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