

高功率半导体激光器互连界面可靠性研究

彭 勃^{1,2}, 张 普¹, 陈天奇^{1,2}, 赵峯岑², 吴的海^{1,2}, 刘 晖¹

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 随着高功率半导体激光器(HPLD)在极端环境中的应用越来越广泛,互连界面的可靠性已成为制约其性能和寿命的关键瓶颈之一。文中利用有限元方法(FEM)对传导冷却(CS)高功率半导体激光器巴条互连界面在-55~125℃热冲击条件下的失效行为和寿命进行了模拟与分析。基于粘塑性 Anand 本构模型和 Darveaux 能量积累理论,对比了热冲击后界面层边缘及中心位置钎互连界面的可靠性,发现互连界面边缘的应力最大,达到 0.042 5 GPa;相应的边缘位置的寿命最短,只有 3 006 个周期,即边缘位置为互连界面的“最危险单元”。预测了采用钎、金锡合金和纳米银焊膏封装的半导体激光器巴条的寿命,计算出钎、金锡合金和纳米银焊膏三种不同键合材料在边缘位置的寿命分别为 3 006、4 808 和 4 911 次循环,表明纳米银焊膏和金锡合金在热冲击条件下具有更长的寿命,更适合于用于极端环境的高功率半导体激光器封装。

关键词: 可靠性; 高功率半导体激光器; 互连界面; 寿命; 有限元

中图分类号: TN248.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1105002

Reliability of bonding interface in high power diode lasers

Peng Bo^{1,2}, Zhang Pu¹, Chen Tianqi^{1,2}, Zhao Yincen², Wu Dihai^{1,2}, Liu Hui¹

(1. State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: With the rapidly increasing applications of high power laser diode (HPLD) in extreme environments, the reliability of bonding interface has become one of the critical bottlenecks affecting the HPLD's performance and lifetime. In this work, failure behavior and lifetime of a single-bar CS-packaged HPLD under -55~125℃ thermal-shock were analyzed by finite element method (FEM). Based on Anand constitutive model and Darveaux energy accumulation theory, the reliability of indium bonding layer on the edge and at the central position after the thermal-shock was compared. It shows that the bonding interface on the edge has the highest stress (0.042 5 GPa) and lowest lifetime (3 006 cycles), in other words, the edge is the "riskiest element" of the bonding interface. In addition, the lifetimes of three kinds of bonding layers on the edge, including indium, 80Au20Sn and nanosilver paste, were simulated to be 3 006, 4 804 and 4 911 cycles, respectively. The results show nanosilver paste and 80Au20Sn have longer lifetimes and better reliability, which are better bonding materials in the packaging of high power laser diodes used in extreme environments.

Key words: reliability; high power laser diode; bonding interface; lifetime; finite element

收稿日期: 2018-06-05; 修订日期: 2018-07-03

基金项目: 国家自然科学基金(61334010, 61404172)

作者简介: 彭勃(1991-), 男, 硕士生, 主要从事高功率半导体激光器可靠性方面的研究。Email: pengbo2015@opt.cn

导师简介: 张普(1979-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事高功率半导体激光器封装技术及可靠性方面的研究。Email: zhangpu@opt.ac.cn

0 引言

高功率半导体激光器具有体积小、重量轻、输出功率高、效率高、可靠性高、波长覆盖范围大、成本低等诸多优点,在固体激光器和光纤激光器泵浦、医疗美容、投影显示、材料加工以及红外照明等领域得到了广泛的应用^[1]。在国防工业、航空航天以及特殊加工等领域,高功率半导体激光器通常要在高温、低温、高低温循环等条件下存储或工作,对高功率半导体激光器在极端温度环境下的可靠性和寿命等参数提出了更高要求^[2]。

在半导体激光器封装结构中,连接芯片和底部热沉的互连界面对器件的可靠性起到关键作用^[3]。由于芯片、互连材料和热沉材料的热膨胀系数(Coefficient of thermal expansion, CTE)不匹配,互连界面材料会受到热-机械应力作用,在材料内部产生蠕变和塑性变形,进一步产生空洞、裂纹,最终影响到输出激光的光束质量、稳定性以及激光器工作寿命^[4]。

目前,针对高功率半导体激光器互连界面可靠性的系统研究很少,而为了实现用于极端环境的高可靠性、高功率半导体激光器,必须深入理解界面材料对半导体激光器失效的影响,建立高功率半导体激光器互连界面材料寿命预测模型。

文中基于粘塑性 Anand 模型和 Darveaux 能量积累理论模型建立了传导冷却高功率半导体激光器(CS-HPLD)巴条封装结构模型,模拟了器件在热冲击循环条件下的热机械行为,系统分析了互连界面结构在热冲击载荷条件下的失效机理,预测了不同位置 and 不同材料的互连界面在高低温冲击条件下的寿命,为获得可靠性更高的互连界面材料提供了理论依据。

1 热冲击下传导冷却高功率半导体激光器巴条的互连界面失效模拟分析

1.1 模型建立与模拟过程

文中采用常用的 808 nm 传导冷却 CS 封装结构半导体激光器,包括热沉、互连界面、半导体激光器芯片、绝缘层等,其中半导体激光器芯片包括 19 个发光点,填充因子为 30%,腔长为 2 mm,芯片采用 p 面向下的倒装结构。图 1(a)、(b)分别为该激光器巴条

封装结构的主视图和左视图,图 1(c)为 808 nm 19 个发光点的传导冷却高功率半导体激光器巴条实物图(来自于西安炬光科技股份有限公司)。在封装中,广义上的互连界面包括了所有片层之间的键合结构。由于直接影响到激光器可靠性的互连界面主要集中于芯片下方,即图 2 中被标注为红色的部分。为了简化称谓,在后文中如果没有特别注明,互连界面一词均指连接芯片与底部热沉的互连界面。

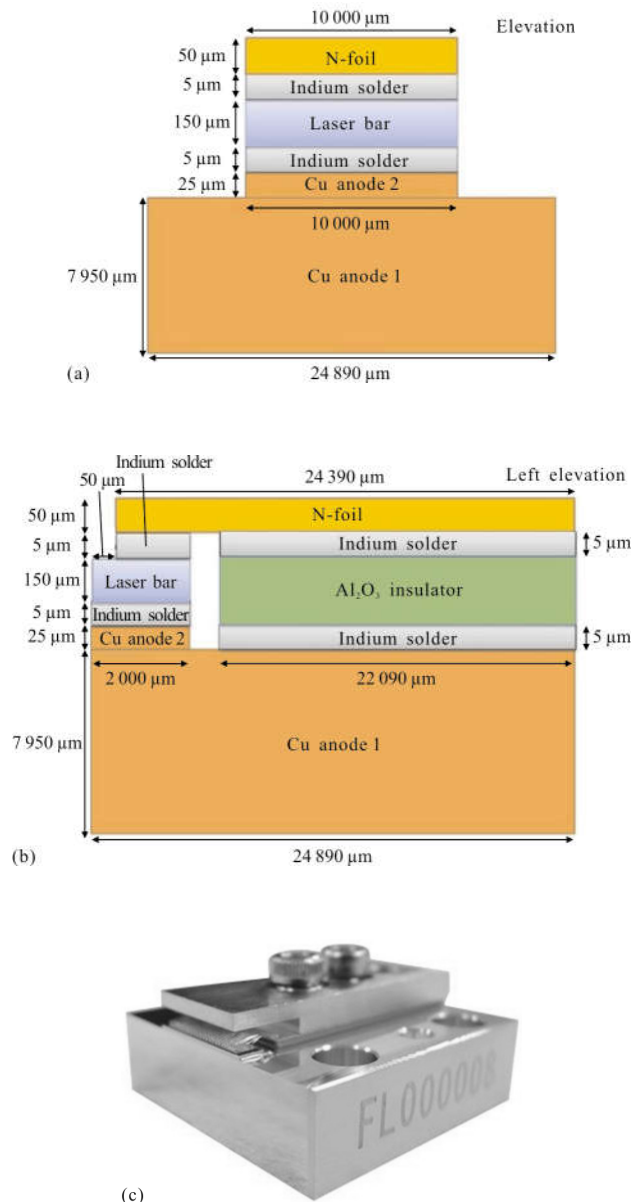


图 1 传导冷却半导体激光器正视图(a)、左视图(b)和实物图(c)
Fig.1 Elevation (a), left elevation(b) and the picture (c) of a conduction-cooled semiconductor laser

文中选用三种不同的互连材料进行了可靠性的

对比分析,分别是:铟(In)、金锡合金(80Au20Sn)以及新型互连材料纳米银焊膏(nanosilver paste)。表 1 列举出了模拟中所需的相关材料属性^[6-8]。

表 1 模拟所需的相关材料属性

Tab.1 Material properties during simulation

Material	CTEP/ ppm·K ⁻¹ (1 ppm= 10 ⁻⁶)	Young's modulus /GPa	Poisson's ratio	Ultimate tensile strength /MPa	Thermal conductivity /W·(m·K) ⁻¹
Nanosilver paste	0.1	10	0.37	55.1	240
80Au20Sn	16	68	0.40	275	57
In	32.2	13	0.45	4.5	66
GaAs	6.4	85.5	0.31	-	54
Al ₂ O ₃	6.26	360	0.31	483	25
Cu	16.6	125	0.34	220	400

文中对互连界面的计算基于统一型粘塑性 Anand 模型。粘塑性 Anand 本构方程具有两个基本特征:(1) 模型不定义明确的屈服面,因此不需要具体的屈服条件。应变过程不需要加载/卸载准则,所有非零应力条件下均产生塑性形变。(2) 采用变形阻抗(用 S 表示,具有应力量纲)作为单一内部变量,用来描述材料内部各向同性强化对宏观塑性流动的平均阻抗^[5]。

统一型粘塑性 Anand 模型^[6]利用流动方程和演化方程统一了焊点的蠕变和率无关塑性行为,适用于各向同性粘塑性较大,且弹性变形较小的情况,被广泛用于描述互连界面的非线性塑性形变。由于高功率半导体激光器互连界面材料在热冲击下的变形主要与温度和时间两个变量相关,具有明显的粘塑性特征,适合采用粘塑性 Anand 模型进行描述^[7]。

在 ANSYS 模拟中,互连界面的单元类型选用粘塑性单元 Solid90,模型的其他部分选用 Solid45 单元。选用 Solid90 的优点是在计算热应力时不需要重新定义单元类型,直接通过 ETCHG,TTS 指令就能够自动完成换算,降低了模拟程序的复杂程度。

表 2 总结了从文献中获取的纳米银焊膏、铟以及金锡合金的 Anand 模型参数^[6-8]。

表 2 三种互连界面材料的 Anand 参数

Tab.2 Anand parameters of three solder materials

	Nanosilver paste	80Au20Sn	In
$Q/J \cdot \text{mol}^{-1}$	47 442	63 009	78 124
ξ	11	11	49.97
m	0.657	0.573	0.300
$A/1 \cdot \text{s}^{-1}$	9.81	93.07	2.33E8
h_0/MPa	15 800	306 280	500
a	1	1.402	1
S_0/MPa	2.768	69.99	28.3
S'/MPa	67.39	466.13	28.3
n	0.003 26	0.046	0.005

图 2(a)是激光器巴条 3D 完整模型图。定义以互连界面底部外侧边缘线的中点为原点,以沿左侧发光点方向为 X+;以指向芯片方向为 Y+;以腔长方向为 Z+。为简化运算量,选取关于 Y 轴对称的左半边模型(图中 A1 部分)进行网格划分和有限元分析。

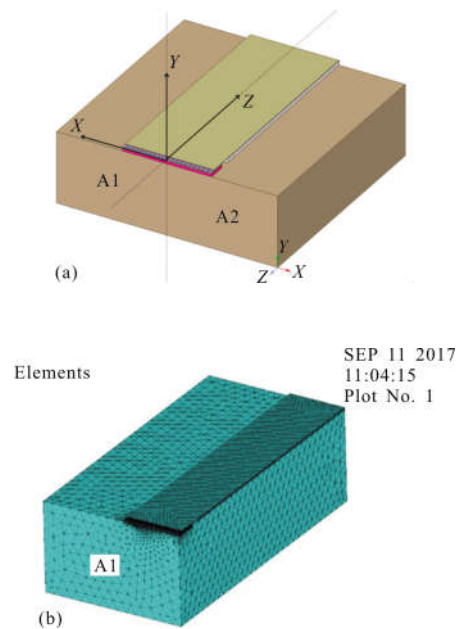


图 2 HPLD 巴条完整模型(a)和半模型网格划分(b)示意图

Fig.2 Full model of the HPLD bar (a) and mesh of the half-model (b)

图 2(b)为半模型网格划分示意图。对于实体模型,不同的网格划分方式会直接影响到计算的速度

和精确度,目前被广泛采用的是混合网格划分方法。文中也采用了该类方法,对于重点研究的芯片层及其下方互连界面,采用精细单元的映射网格绘制(网格尺寸 0.1 mm)。对于模型的其他部分,则采用了能够根据模型结构自适应网格大小的 smartsize 自由网格(网格尺寸 0.8/1.6 mm),从而在不降低计算结果精确度的前提下,优化网格设计,提高运算效率。

温度加载采用升降温幅度较大的热冲击过程模拟高功率半导体激光器互连界面在极端环境中的加速老化行为。温度载荷施加对象为激光器整体,热冲击过程中器件不工作。加载温度随时间变化的关系如图 3 所示。热冲击温度范围为 228~398 K (-55~125 ℃),每个周期内包含保温-升温-保温-降温四个载荷步,升降温速率为 36 K/s。根据文献结果^[9],互连界面的应力应变在热冲击过程中也呈现周期性变化,且一般到第四个循环周期时已趋于稳性变化,因此文中在模拟分析中采用四个周期作为循环次数。

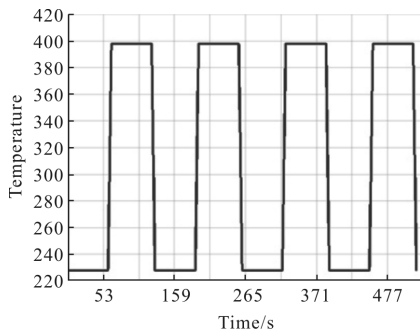


图 3 高功率半导体激光器温度载荷随时间变化曲线

Fig.3 Relationship between the HPLD's temperature loading and time

1.2 互连界面局域失效机理研究

由于激光器巴条各片层材料热膨胀系数不一致,在热冲击下互连界面受剪切及拉伸应力作用产生形变,这将导致裂纹的产生和生长,最后造成互连界面疲劳失效。根据断裂力学理论,材料的区域应力应变越大,裂纹萌生越早、生长速度越快。文中将互连界面上裂纹出现最早,生长速度最快的单元称为“最危险单元”。通过分析 ANSYS 后处理系统中的应力应变及应变能密度分布云图,获得变量在互连界面上的分布情况,能够确定“最危险单元”的位置。

图为纳米银焊膏、铜和金锡合金三种材料构成的互连界面在热冲击结束后的整体 3D 应力(图 4(a1)、(b1)、(c1))及应变分布云图(图 4(a2)、(b2)、(c2))。

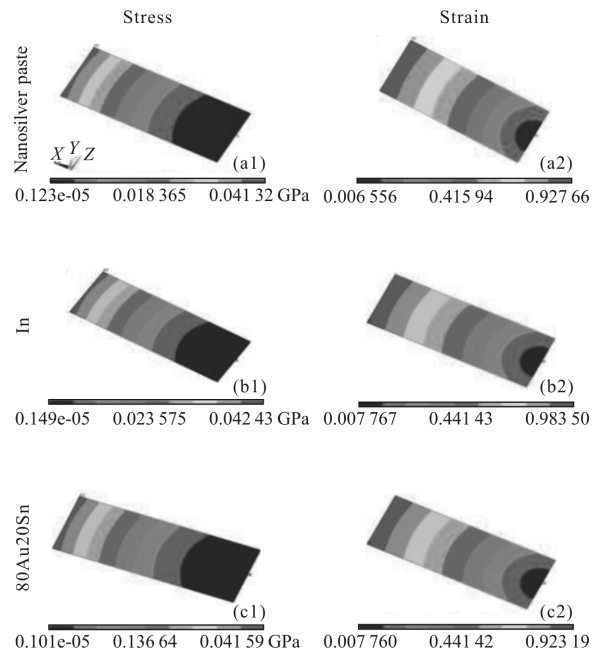


图 4 热冲击结束后不同互连界面材料的应力和应变分布云图

Fig.4 Distributions of stress and strain in solder material after heat shock

对于三种材料,互连界面上应力和应变的“最危险单元”都位于边缘发光点沿腔长方向顶端,即图中互连界面左上方端点处。对于同一种材料构成的互连界面(以铜为例),Z 方向上应力(应变)值差距较小,相差不超过 0.03%;X 方向上应力(应变)值差距较大,相差了 28 700 倍。这是由于靠近对称轴的应力大小相近、方向相反,相互作用抵消;远离对称轴的界面边缘应力方向趋于统一,抵消程度相对较弱,应力(应变)沿 X 轴正方向呈递增趋势。根据云图分布可以推断,裂纹将优先从互连界面边缘沿腔长方向进行生长,并逐渐向片层中央扩展。

通过分析“最危险单元”应力、应变随时间的变化关系,能够归纳裂纹扩展规律,从而推断互连界面的失效机理。

由图 5(a)中三种材料互连界面的“最危险单元”应力随时间变化折线图对比可知,升温过程中应力迅速降低,降温过程中应力迅速升高,保温过程应力水平先降低后升高,整体略有降低。

对比三种材料构成的互连界面单元可以发现,铜、金锡合金和纳米银焊膏的最大应力分别为 0.042 5、0.041 5、0.041 3 GPa。表明金锡合金和纳米银焊膏的

应力值相对钢较小。这是因为铜热沉与金锡合金的热膨胀系数十分接近,同时纳米银焊膏热膨胀系数极小,延展性非常好,降低了互连界面的应力。从图中也能发现,不同材料的应力值随着循环数的增加逐渐趋于统一。图 5(b)是三种互连界面的“最危险单元”的应变随时间变化折线图。由图 5 可知单元应变整体上与温度循环过程相匹配:升温过程中应力积累明显,降温过程应变迅速减小,保温过程应变累积不明显。

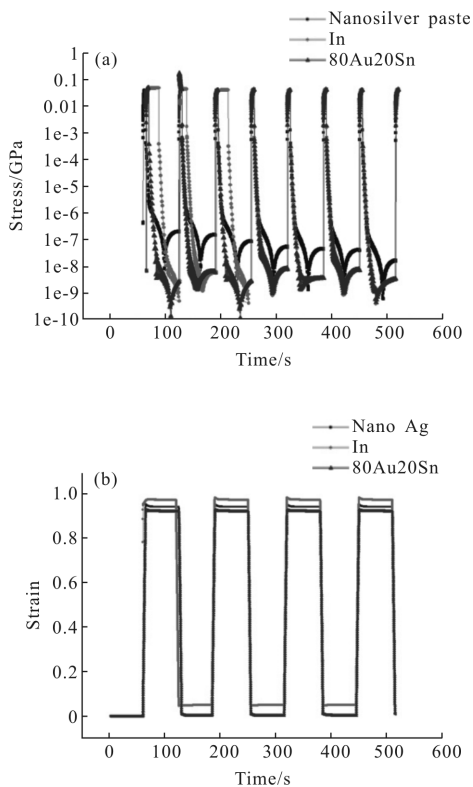


图 5 三种互连界面“最危险单元”应力(a)、应变(b)随时间演化行为

Fig.5 Stress-time (a) and strain-time (b) variation of three different bonding layers' "riskiest element"

对比不同材料的三条曲线,钢的应变最大,金锡合金应变最小,纳米银焊膏略高于金锡合金。这是由于钢是一种软焊料,拥有相对最低的抗拉强度和相对最高的热膨胀系数,容易发生形变。而金锡合金和纳米银焊膏都属于硬焊料,抗拉强度高,抗形变能力强。

综上所述,可以推断互连界面在热冲击条件下的失效模型:由于键和界面材料与芯片和次热沉材

料的 CTE 不匹配,在热冲击的高低温循环过程中产生与温度变化密切相关的、不均匀分布的应力和应变。经过若干个循环,在应变值最大的区域,即“最危险单元”附近出现裂纹。裂纹优先沿互连界面边缘腔长方向生长,直至达到特定失效长度,造成互连界面老化失效。

2 互连界面寿命预测与对比

2000 年 Darveaux 提出了以能量为核心,断裂力学为基础的 Darveaux 寿命预测理论^[10],通过计算裂纹的出现时间以及裂纹生长速度,预测互连界面的寿命。主要计算公式如下:

$$N_0 = K_1 (\Delta W_{ave})^{K_2} \quad (1)$$

$$N_1 = \frac{a}{d_0/d_n} = \frac{a}{K_3 (\Delta W_{ave})^{K_4}} \quad (2)$$

$$N_f = N_0 + N_1 \quad (3)$$

$$\Delta W_{ave} = \frac{\sum_{i=1}^N v_i \Delta W_{ave}}{\sum_{i=1}^N v_i} \quad (4)$$

式中: N_0 为裂纹开始产生所需的循环数; N_1 为裂纹扩展到失效长度所需的循环数; a 为根据失效判据设定的裂纹失效长度; ΔW_{ave} 为每个循环过程中互连界面累积平均粘塑性应变能密度。 N_f 为典型的互连界面疲劳寿命,即达到 63.2%失效时的循环数。由于在模拟中激光器本身不工作,失效判据可以简化为裂纹失效长度达到总长度的 63.2%所需的循环数^[10],此时可认为连接界面内部裂纹会导致其上方的激光器发光区的光功率衰减并发生失效。

根据 1.2 节中的模拟结果,裂纹优先沿腔长方向生长,且键和界面厚度远小于其长和宽,所以 a 可以近似设定为互连界面腔长方向长度的 63.2%,即 1.264 mm。

$K_1 \sim K_4$ 是与裂纹增长相关的常数,随连接焊点和基板金属材料厚度变化,表 3 列出了 Darveaux 通过实验测试得出的部分参数选取标准及对应常数值^[10]。

文中采用切条有限元结构、NL-FEA 仿真方法、Anand 统一本构模型、BF 温度加载、细时间载荷步,连接焊点合集版的材料厚度为 25 μm 。对照表 3 可以确定文中模拟所用 $K_1 \sim K_4$ 常数值为 $K_1 = 22\,400 (\text{cycles}/\text{Pa}^{K_2})$, $K_2 = -1.52$, $K_3 = 3.03 \times 10^{-3} (\text{m} \cdot \text{Pa}^{K_4} \cdot \text{cycles}^{-1})$, $K_4 = 0.98$ 。

表 3 裂纹增长相关常数
Tab.3 Crack growth correlation constants

Finite element model config	Simulation method	Constitutive model	ANSYS version	Temperature change command	Time step scheme	Layers' thickness average (10 ⁻⁵ m)	$K_1/(10^7 \text{ cycles/Pa}^{K_2})$	K_2	$K_3(10^{-4} \text{ m} \cdot \text{Pa}^{K_4} \cdot \text{cycle}^{-1})$	K_4
Slice	NL FEA	Anand	5.2	TUNIF	Coarse	0.6	26 800	-1.44	1.92	1.15
						1.0	21 800	-1.45	2.41	1.15
						1.3	18 100	-1.46	2.77	1.15
Slice	NL FEA	Anand	5.6	TUNIF	Coarse	1.0	19 500	-1.51	6.19	0.98
Slice	NL FEA	Anand	5.6	BF	Coarse	1.0	20 300	-1.52	6.03	0.99
Slice	NL FEA	Anand	5.6	BF	Fine	1.0	22 400	-1.52	5.86	0.98
QTR	NL FEA	Anand	5.6	BF	Fine	0.5	71 000	-1.62	2.76	1.05
						1.0	56 300	-1.62	3.34	1.04
						1.5	48 300	-1.64	3.80	1.04
QTR	L+NL	Anand	5.6	BF	Fine	0.5	58 800	-1.49	1.29	1.16
						1.0	67 500	-1.54	1.20	1.19
						1.5	71 900	-1.58	1.16	1.21
QTR	L+NL	Darveaux	5.6	BF	Fine	0.5	69 900	-1.55	1.19	1.19
						1.0	84 200	-1.61	1.08	1.2
						1.5	91 000	-1.65	1.04	1.25

2.1 不同发光点位置下互连界面寿命预测

不同发光点位置对应的互连界面应力、应变分布不均匀,导致相应区域的寿命差距较大。其中失效时间最早、寿命最低的区域能够直接影响该处发光点的稳定性和可靠性,因而被用来表征传导冷却半导体激光器互连界面的寿命。通过计算互连界面在不同发光点位置下的寿命值,对比分析可以得到最早失效的发光点位置。本节选用铜作为互连界面材料进行模拟。

图 6(a)为单巴条传导冷却半导体激光器半模型的发光点结构示意图,坐标系设定与前文一致。由图 6(a)可知 X 轴最大值处为边缘发光点,原点处为中心发光点。图 6(b)为热冲击结束后,铜互连界面整体应变能分布云图。为了充分体现不同发光点位置键和界面寿命的差异,文中选取了中心发光点(MIN)、边缘发光点(MAX)以及位于两者中间的发光点(MID)作为对比参照。

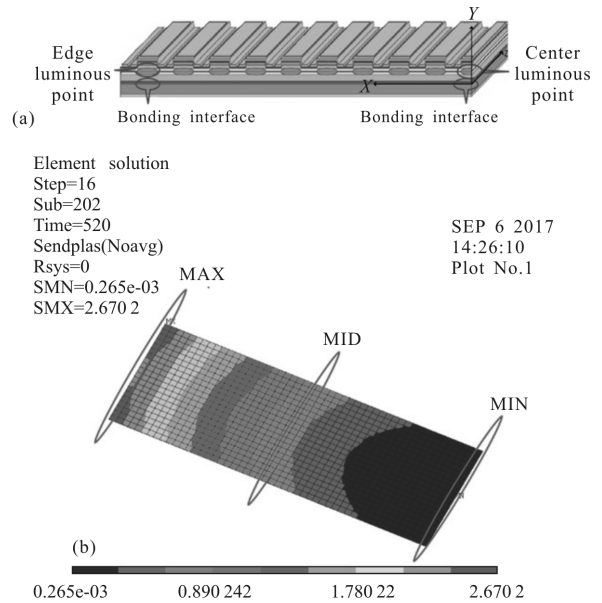


图 6 铜互连界面位置(a)及应变能密度 ΔW_{ave} 分布图(b)
Fig.6 Position (a) and distribution of ΔW_{ave} (b) in the indium bonding layer

通过从后处理模块提取三个位置下互连界面的 ΔW_{ave} , 代入公式(1)~(4)中可以计算出各自的寿命。所得结果整理后如表 4 所示。

表 4 钢材料互连界面不同发光点位置下的寿命
Tab.4 Indium bonding layer's lifetime under different emitters

Position	$\Delta W_{ave}/\text{GPa}$	a/mm	N_0/cycle	N_1/cycle	N_2/cycle
MAX	0.217 22	1.264	118	2 888	3 006
MID	0.029 28	1.264	2 486	20 582	23 068
MIN	0.004 55	1.264	42 133	128 998	171 131

对比表 4 结果, 中心发光点位置(MIN)处的互连界面寿命高达 171 131 次, 位于片层中间的互连界面寿命也有 23 068 次, 远高于边缘发光点位置(MAX)的 3 006 次。由此可以确定边缘发光点位置的互连界面具有最低可靠性, 可以用来表征传导冷却半导体激光器互连界面寿命。

2.2 不同材料的互连界面寿命预测对比

在封装结构中和发光点位置完全相同的条件下, 通过改变互连界面使用材料的种类, 能够计算得到不同材料的互连界面可靠性寿命。再将结果进行横向对比, 就能筛选出可靠性最佳、寿命最长的互连界面材料。

选取边缘发光点位置(MAX)的互连界面区域, 分别提取三种材料互连界面的 ΔW_{ave} , 代入公式(1)~(4)计算得到各自的可靠性寿命如表 5 所示。

表 5 三种互连界面材料边缘发光点位置的寿命
Tab.5 Lifetimes of edge luminous point of three bonding interface material

Material	$\Delta W_{ave}/\text{GPa}$	a/mm	N_0/cycle	N_1/cycle	N_2/cycle
Indium	0.217 22	1.264	118	2 888	3 006
80Au20Sn	0.133 23	1.264	241	4 567	4 808
Nanosilver	0.136 61	1.264	249	4 662	4 911

由表 5 结果可以看出, 在三种材料中, 由传统软焊料材料钢构成的互连界面拥有最大的应变能密度积累和最短的寿命。而传统硬焊料金锡合金则具有较低的应变能密度积累和较长的寿命。

作为近年来出现的新型互连界面材料, 纳米银

焊膏展现出较优良的特质, 其预测寿命值高达 4 911 个循环, 与金锡合金寿命值十分接近, 是一种具有广泛应用前景的高功率半导体激光器封装键合材料。

3 结 论

文中系统研究了单巴条传导冷却半导体激光器在 228~398 K 循环热冲击载荷下的失效行为, 对比分析了钢、金锡合金、纳米银焊膏三种材料组成的互连界面上应力和应变的分布情况。确定了裂纹出现最早, 生长速度最快的“最危险单元”所在位置, 在此基础上分析预测了芯片与热沉之间的互连界面结构在热冲击载荷条件下的失效机理。模拟结果表明“最危险单元”位于边缘发光点沿腔长方向顶端。分析了同一材料互连界面在不同发光点位置下的寿命, 发现边缘发光点位置的互连界面具有最低的可靠性。此外还对比了三种不同材料互连界面在相同发光点位置下的寿命, 结果表明在热冲击条件下纳米银焊膏和金锡合金具有相对较高的可靠性, 在高功率半导体激光器封装中将具有广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] Wang Yinshun, Ren Yongxue, An Zhenfeng. Study of high brightness fiber coupled diode lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(S2): S206004. (in Chinese)
- [2] Wu D, Zhang P, Nie Z, et al. Optimization of microchannel cooler of high power diode laser array package [C]//SPIE, 2017, 100851: 100850I.
- [3] He Guorong, Zheng Wanhua, Qu Hongwei. Influence of fusion interface on optical and thermal characteristics of vertical cavity lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(6): 793-801. (in Chinese)
- [4] Zhang P, Liu X, Zhu Q, et al. Thermal characteristics of compact conduction-cooled high power diode laser array packages" [C]//SPIE, 2017, 10085: 100850A.
- [5] Chang Ruiwu. Influence of cryogenic temperature and microstructure on fatigue failure of indium solder joint [D]. Maryland: Maryland University, 2008.
- [6] Kong Da, Zhang Liang, Yang Fan. Fatigue lifetime prediction of SnAgCu-X solder based on Anand model [J]. *Transactions of The China Welding Institution*, 2017, 38 (4): 17-21, 129. (in Chinese)
- [7] Zhang Guoshang. Research on the mechanical properties of

- 80Au/20Sn solder alloy [D]. Tianjin: Tianjin University, 2010. (in Chinese)
- [8] Zhang Pengzhe. Research on process and mechanism of bonding using small nanosilver paste at low temperature and pressure [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [9] Paydar N H, Tong Y, Akay H U. A finite element study of factors affecting fatigue life of solder joints [J]. *ASME Journal of Electronic Packaging*, 1994, 116(2): 265–273.
- [10] Darveaux R. Effect of simulation methodology on solder joint crack growth correlation and fatigue life prediction [J]. *Journal of Electronic Packaging*, 2002, 124(3): 147–154.