

doi:10.3788/gzxb20184706.0614001

封装对大功率半导体激光器阵列热应力及 Smile 的影响

陈天奇^{1,2}, 张普¹, 彭勃^{1,2}, 张宏友^{1,2}, 吴的海^{1,2}

(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重点实验室, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:提出一种采用双铜-金刚石的“三明治”封装结构,利用有限元分析方法研究了其与传统的 Cu+CuW 硬焊料封装结构激光器的热应力与 Smile.对比模拟结果发现新封装结构热应力降低 43.8%,Smile 值增加 95%.在次热沉热膨胀系数与芯片材料匹配的情况下,使用弹性模量更大的次热沉材料,可对芯片层热应力起到更好的缓冲作用.以硬焊料封装结构为例,分析了负极和次热沉厚度对器件 Smile 的影响.结果表明负极片厚度从 50 μm 增加到 300 μm ,器件工作结温降低 2.26 $^{\circ}\text{C}$,Smile 减小 0.027 μm ,芯片的热应力增加 22.95 MPa.当次热沉与热沉的厚度比小于 29%时,Smile 随次热沉厚度增加而增加;而当次热沉厚度超过临界点后,Smile 随次热沉厚度增加而减小.当次热沉厚度达到临界点(2300 μm)时,硬焊料封装的半导体激光器具有最大的 Smile 值 3.876 μm .制备了 CuW 厚度分别为 300 μm 和 400 μm 的硬焊料封装 976 nm 激光器,并测量了其发光光谱.通过对比峰值波长漂移量,发现 CuW 厚度增加了 100 μm ,波长红移增加了 1.25 nm,根据温度和应力对波长的影响率可知应力减小了 18.05 MPa.测得两组器件的平均 Smile 值分别为 0.904 μm 和 1.292 μm .实验证明增加 CuW 厚度可减小芯片所受应力,增大 Smile 值.

关键词:大功率半导体激光器;封装;有限元分析;热应力;Smile

中图分类号:TN248.4

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)06-0614001-11

Effect of Packaging on Thermal Stress and Smile of High Power Semiconductor Laser Arrays

CHEN Tian-qi^{1,2}, ZHANG Pu¹, PENG Bo^{1,2}, ZHANG Hong-you^{1,2}, WU Di-hai^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710077, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A "sandwich" structure based on copper-diamond is proposed, the thermal stress and Smile of the proposed structure and traditional Cu+CuW hard-solder packaged laser are studied by finite element analysis. Comparison of simulation results shows that the thermal stress of the new package structure is reduced by 43.8% and the Smile value is increased by 95%. When the coefficients of thermal expansion of laser chip and submount are matched, the submount materials with larger elastic modulus can better buffer the thermal stress of the chip. Taking the widely used Cu+CuW hard-solder package structure as an example, the influence of negative electrode and substrate thickness on the Smile of diode laser chip is studied. It shows that when the thickness of the negative electrode increases from 50 μm to 300 μm , the junction temperature of the chip decreases by 2.26 $^{\circ}\text{C}$, the Smile value decreases by 0.027 μm , and the

基金项目:国家自然科学基金(Nos.61334010, 61306096, 61404172, 61504167)资助

第一作者:陈天奇(1992-),女,硕士研究生,主要研究方向为高功率半导体激光器封装.Email:chentianqi2015@opt.cn

导师(通讯作者):张普(1979-),男,副研究员,博士,主要研究方向为高功率半导体激光器封装技术及可靠性.Email:zhangpu@opt.cn

收稿日期:2018-01-15;录用日期:2018-03-26

<http://www.photon.ac.cn>

thermal stress increases by 22.95 MPa. When the thickness ratio of the substrate to the heat sink is less than 29%, the Smile value increases with the increase of the thickness of the heat sink, and when the ratio exceeds the critical point, the Smile value start to decrease. Hard-solder packaged semiconductor lasers have a maximum Smile value of $3.876\mu\text{m}$ at a critical thickness of $2300\mu\text{m}$. Hard-solder packaged 976 nm lasers with CuW thicknesses of $300\mu\text{m}$ and $400\mu\text{m}$ are fabricated. The luminescence spectra are measured. By comparing the peak wavelength shifts, it is found that when the CuW thickness increased by $100\mu\text{m}$, the red shift of wavelength increased by 1.25 nm . According to the effect of temperature and stress on the wavelength, the stress is reduced by 18.05 MPa ; the average Smile values of the devices are also measured, which are $0.904\mu\text{m}$ and $1.292\mu\text{m}$ respectively. Experiments show that the increase in CuW thickness can reduce the stress in the chip, but increase the Smile value.

Key words: High power diode laser; Packaging; Finite element method; Thermal stress; Smile

OCIS Codes: 140.2010; 140.2020; 250.5960

0 引言

大功率半导体激光器在工业加工、显示照明、医学应用、全固态激光泵浦等领域获得了广泛应用^[1-2]。目前半导体激光器的发展趋势是进一步提高功率、效率和可靠性^[3-4]。热应力会使半导体材料带隙宽度发生变化,影响光学性能,同时热应力引发的缺陷限制了器件的寿命。大功率半导体激光器阵列的 Smile,即近场非线性,是指其输出光在快轴方向的非线性分布。封装及工作过程中,由于激光器芯片与衬底热沉等封装材料间的热膨胀系数不匹配引入的热应力是 Smile 产生的主要原因^[5]。Smile 效应给光束准直、整形及光纤耦合带来了极大的挑战,是阻碍大功率半导体激光器更广泛应用的主要因素之一^[6],所以对大功率半导体激光器阵列的热应力和 Smile 进行研究尤为重要。

目前典型的传导冷却大功率半导体激光器阵列包括采用 In 焊料的传导冷却(Conduction-cooled Structure, CS)封装结构和采用 AuSn 焊料的硬焊料传导冷却(Hard-solder Conduction-cooled Structure, HCS)封装结构。CS 封装结构中,In 焊料在高电流下工作时存在易氧化、易发生电迁移、电热迁移和抗热疲劳性能差^[7-8]等缺点。HCS 封装有效提高了器件的寿命和可靠性,结构采用 AuSn 硬焊料将芯片倒装键合在热膨胀系数(Coefficient of Thermal Expansion, CTE)匹配的次热沉上,同时采用硬焊料将 Chip on Substrate (COS)整体结构封装到铜热沉上。但由于硬焊料不易变形,无法起到释放应力的作用,因此 HCS 封装结构芯片中应力普遍较大,且 Smile 值大于 In 封装的 CS 器件^[9]。为了降低大功率半导体激光器的热应力和 Smile,必须深入了解封装对半导体激光器阵列热应力和 Smile 的影响机制。

国外的 TOMM J W^[10]等在 2002 年对 Cu-diamond、纯金刚石、Cu-Mo、CuW 和 Cu 几种材料作为热沉时半导体激光器中的应变和缺陷进行了定量分析和比较,发现使用 Cu-diamond 的器件表现出较小的缺陷密度和应变。FREVERT C^[11]等在 2016 年用厚度远大于传统负极的 CuW 块作为负极,选择 CuW 作为次热沉,通过实验测量证明这种结构能够降低器件串联电阻,提高工作效率。国内西安光机所王淑娜、鲁瑶等系统研究了温度、电流等因素对传导冷却大功率半导体激光器阵列的 Smile 的影响,提出了控制热应力及减小 Smile 的方法^[12-13]。

但是目前关于封装结构和材料对半导体激光器阵列热应力及 Smile 的影响机理尚不明确,本文采用有限元方法分析了采用不同负极、次热沉材料和尺寸进行封装的大功率半导体激光器阵列力学性能,对比了 Cu、铜金刚石、CuW 三种材料封装后器件的热应力和 Smile 值,研究了负极和次热沉厚度对器件的热-机械行为的影响,得到热应力及 Smile 值分别随负极和次热沉厚度的变化规律。

1 模型结构及材料性能参数

设计了 4 种不同负极片和次热沉材料组合的封装结构,如图 1。结构 1 为 Cu 负极+芯片+CuW 次热沉,结构 2 为 Cu 负极+芯片+Cu-diamond 次热沉,结构 3 为 CuW 负极+芯片+CuW 次热沉,结构 4 为 Cu-diamond 负极+芯片+Cu-diamond 次热沉。结构 1 和结构 2 中 Cu 负极厚度为 $50\mu\text{m}$,次热沉厚度为 $300\mu\text{m}$,结构 3 和结构 4 中的 CuW 和 Cu-diamond 负极厚度与次热沉相同,均为 $300\mu\text{m}$ 。

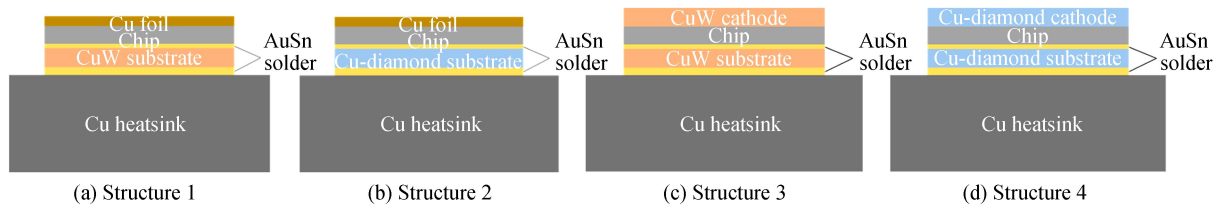


图 1 不同负极片和次热沉材料组合的封装结构
Fig.1 Package structure of different negative and sub-substrate materials

激光器芯片尺寸 $10 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 0.153 \text{ mm}$, 共 19 个发光点, 填充因子为 30%, 腔长 2 mm. 芯片 p 面向下通过 Au(80)Sn(20) 焊料键合在次热沉上, n 极通过负极片与负极块相连, 负极块通过螺栓固定在激光器上, 并整体通过 AuSn 焊料封装在铜热沉上. 芯片层结构如图 2 所示, 从上到下依次为 N 金属化层、GaAs 衬底、包层、有源区、包层和 P 金属化层.

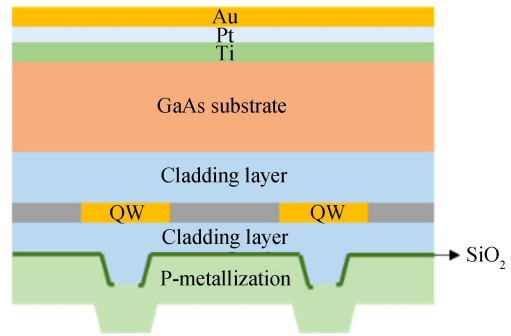


图 2 芯片层结构
Fig.2 Structure of the laser diode chip

考虑到激光器结构对称性, 只建立对称面左侧模型, 然后通过 ANSYS 软件对模型进行网格划分和求解. ANSYS 仿真模型和网格划分如图 3 所示. 由于芯片尺寸远小于 Cu 热沉, 为了提高计算精度, 芯片层采用六面体网格, 网格密度最大, 而 Cu 热沉不是研究重点, 因此采用智能网格划分, 网格密度最小. 整个模型网格数共 86 305 个, 测得芯片层最大应力 159.8 MPa, Smile 值 $0.91 \mu\text{m}$. 分别增加和减少 10% 的网格密度, 测得的应力和 Smile 值分别为 159.68 MPa、 $0.92 \mu\text{m}$ 和 159.59 MPa、 $0.92 \mu\text{m}$, 应力误差分别为 0.07% 和 0.1%, Smile 误差为 0.1%, 对数值计算结果影响可以忽略. 首先对器件回流热应力和节点位移进行了模拟, 将回流后器件内残余应力和器件变形作为初始条件施加到模型上, 然后施加工作温度载荷及位移边界条件进行求解. 器件回流的温度为 280°C , 工作功率为 60 W, 由于电光转换效率为 50%, 芯片工作时产生的热功率为 60 W.

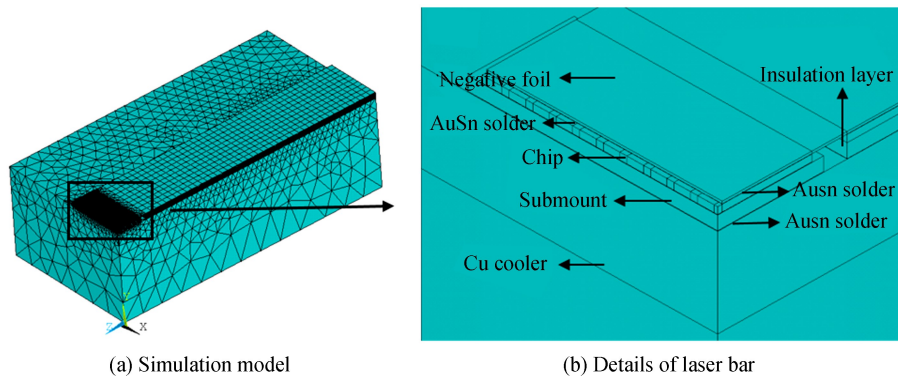


图 3 HCS 封装半导体激光器仿真模型及网格划分
Fig.3 Simulation model and mesh division of HCS packaged laser diode

一般 HCS 封装半导体激光器多用 CuW 作为次热沉材料, CuW 可以通过改变成分配比来调节 CTE 系数使之与芯片匹配, 从而缓解回流和工作过程产生的热应力^[14]. 但 CuW 的热导率较低 ($174 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$), 器件在大功率下工作会产生大量废热, 限制了激光器额定输出功率. Cu-diamond 的热导率远高于纯铜和 CuW, 并且热膨胀系数也可通过改变成分配比调节^[15-16], 此外, Cu-diamond 材料电阻率在 $(0.4 \sim 1) \times 10^{-3} (\Omega \cdot \text{m})$ ^[17] 之间, 与 CuW(80) (电阻率约为 $0.56 \times 10^{-3} (\Omega \cdot \text{m})$) 接近^[18], 因此 Cu-diamond 复合材料可以替代 CuW 作为更好的次热沉材料. 近几年以 Cu-diamond 作为次热沉材料的大功率半导体激光器逐渐成为新的研究方向, 但尚未见将 Cu-diamond 作为负极材料的相关研究. 为了探索全 Cu-diamond 封装结构的可行性, 本文建

立了负极和次热沉材料均为 Cu-diamond 的“三明治”模型,使用 ANSYS 仿真软件模拟激光器工作时的热和热应力,并与双 CuW 封装结构、单 CuW 结构和单 Cu-diamond 结构进行比较.表 1 是相关材料的性能参数^[18].

表 1 材料性能参数
Table 1 Material performance parameters

Materials	Elastic modulus /MPa	TEC/ $(\times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	Poisson's ratio	Thermal conductivity/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
Cu	1.28×10^5	16.5	0.36	398
AlGaAs	8.47×10^5	4.97	0.34	13.7
GaAs	7.5×10^4	6.4	0.3	44
AnSn	5.91×10^4	15.9	0.3	57.3
CuW	3.15×10^5	6.5	0.3	170
Cu-diamond	4.2×10^6	6.4	0.15	623
Au	7.4×10^4	14.4	0.42	315
Pt	1.7×10^5	9.1	0.39	73
Si_3N_4	2.9×10^5	2.9	0.27	18
Al_2O_3	3.6×10^5	5.5	0.21	25

2 仿真结果及分析

2.1 不同封装结构对器件热应力、Smile 效应和结温的影响

对图 1 所示 4 种不同结构激光器的 Von Mises 应力和有源区温度进行了模拟.其中 Von Mises 应力的定义为第一、第二、第三主应力根据第四强度理论计算后得到的等效应力,表达式为^[19]

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2} ((\sigma_r \times \sigma_\theta)^2 + (\sigma_r \times \sigma_z)^2 + (\sigma_z \times \sigma_\theta)^2)} \quad (1)$$

式中, σ_r 、 σ_z 、 σ_θ 分别为 x 、 y 、 z 三轴方向正应力.

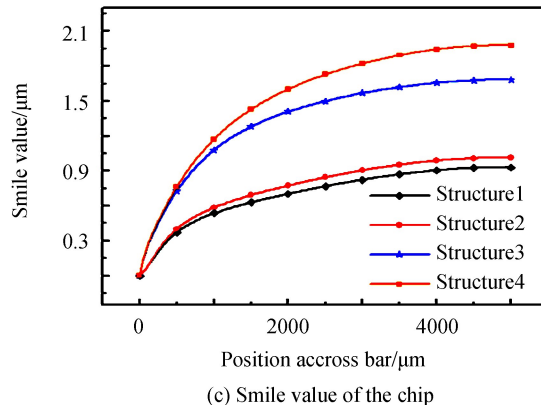
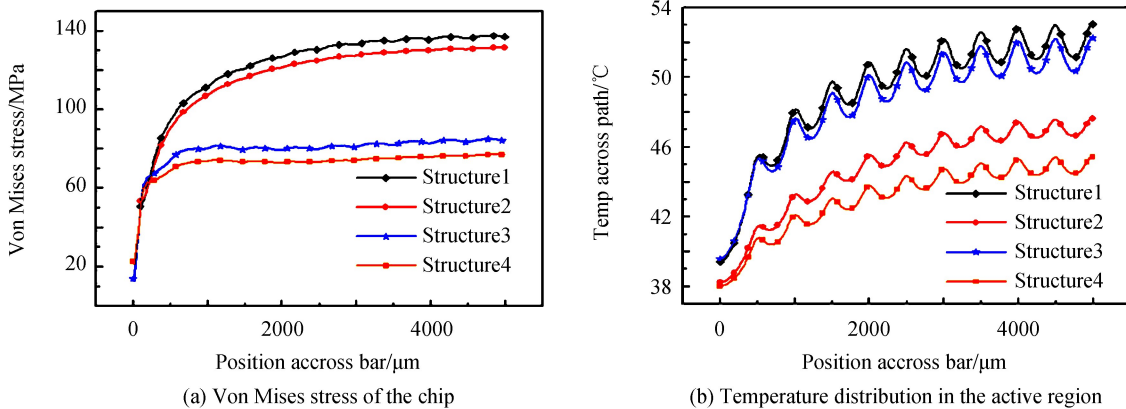


图 4 四种结构激光器的仿真结果

Fig.4 Simulation results of four laser structures

如图 4(a), 结构 2 采用 Cu-diamond 次热沉, 其最大应力相比结构 1(使用 CuW 作为次热沉)减小了 5.51 MPa(以下提到的应力均指最大 Von Mises 应力); 结构 3 和结构 4 两种“三明治”结构之间, 双 Cu-diamond 结构的应力比双 CuW 结构减小了 7.09 MPa。结构 1 和结构 2, 结构 3 和结构 4 之间的应力差与两种材料的物理性能有关。虽然 CuW 和 Cu-diamond 的 CTE 系数均与芯片一致(见表 1), 但 Cu-diamond 的弹性模量 (4.2×10^5 MPa) 大于 CuW (3.15×10^5 MPa), 这意味着 Cu-diamond 更难变形, 即在相同温度差导致的相同热应力作用下, Cu-diamond 产生的应变更小, 与之键合的芯片相应产生的应变也更小, 根据胡克定律, 则芯片应力更小。通过模拟结果可知, 在次热沉的 CTE 系数与芯片材料匹配的前提下, 选择弹性模量更大的材料作为次热沉, 能够对芯片层热应力起到更好的缓冲作用。

结构 3 和结构 4 是分别以 CuW 和 Cu-diamond 进行“三明治”封装的器件, 这种封装形式的特点是芯片上层负极片厚度与芯片下层次热沉厚度相同, 均为 $300 \mu\text{m}$ 。从图 4(a)中明显可以看到, “三明治”结构与传统结构相比可以显著降低芯片受到的应力。双 CuW 结构与单 CuW 结构相比应力降低了 52.931 MPa, 降幅 38.6%, 双铜金刚石结构与单铜金刚石结构相比应力降低了 54.54 MPa, 降幅 41.4%。双铜金刚石结构与传统 Cu+CuW 结构激光器相比应力降低了 60.02 MPa, 降幅 43.8%。

图 4(b)为 4 种封装结构的芯片结温分布曲线。可以看到, 虽然双 CuW 结构有效地降低了芯片受到的应力, 但是对散热能力的提升非常有限, 芯片结温相比单 CuW 结构仅降低了 $0.78 \text{ }^\circ\text{C}$ 。Cu-diamond 材料的高热导率的优点十分明显, 单 Cu-diamond 结构较之传统 HCS 器件芯片结温降低了 $5.4 \text{ }^\circ\text{C}$, 而双 Cu-diamond 结构的结温降低了 $7.6 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

图 4(c)为 4 种结构的 Smile 曲线, 其 Smile 值分别为 $0.93 \mu\text{m}$ 、 $1.014 \mu\text{m}$ 、 $1.683 \mu\text{m}$ 和 $1.978 \mu\text{m}$ 。CuW 和铜金刚石“三明治”封装结构使器件 Smile 相比传统结构分别增加了 81% 和 95%, 与图 4(a)所示热应力变化规律相反。说明两个问题: 1) 芯片 Smile 值并不由芯片层热应力决定, 而是取决于铜热沉应力与变形情况, 见 2.2 节; 2) 对于 CTE 系数匹配的负极材料, 其厚度增加会使激光器 Smile 值明显增加。双铜金刚石结构的激光器具有最大的 Smile 值, 一方面是因为铜金刚石弹性模量大, 不易变形, 使 Cu 热沉上下表面长度差增加, 导致铜热沉弯曲程度增加, 从而使得 Smile 值增加; 另一方面是因为铜金刚石具有和芯片一致的 CTE 系数, 不能遏制芯片下弯趋势, 两个因素共同作用导致这种结构虽然可以大幅降低芯片热应力, 但使得 Smile 现象明显恶化。

综合分析结果可知, Cu-diamond 的 CTE 系数与芯片匹配, 弹性模量大, 同时具有非常高的热导率和与 CuW 相当的电阻率, 作为次热沉材料可以大幅度降低芯片有源区温度, 但对芯片热应力和 Smile 值无明显优化。与传统封装结构相比, 用 CTE 系数匹配的材料进行“三明治”封装可大幅降低芯片受到的热应力, 优化器件工作时的结温, 但会使器件 Smile 现象明显恶化。实际生产中, 如果侧重器件光束准直、整形和光耦合性能, 可采用传统结构器件以使 Smile 值最小, 而如果侧重低热阻、高可靠性和高工作效率, 则宜使用全 Cu-diamond 封装的“三明治”结构减小芯片应力, 降低结温。

2.2 负极片厚度对器件热及力学行为的影响

以典型的 Cu 负极+芯片+CuW 次热沉的 HCS 封装结构为研究对象, 首先模拟了芯片受到的 Von Mises 应力和器件 Smile 及工作结温随负极片厚度的变化规律。

CuW 次热沉厚度为 $300 \mu\text{m}$ 时, 负极片厚度从 $50 \mu\text{m}$ 增加到 $300 \mu\text{m}$, 芯片受到的应力以及有源区温度分布如图 5。

如图 5(a), 由于 CTE 系数与芯片不匹配, 随着铜箔厚度增加, 芯片受到的 Von Mises 应力非线性增加。当铜箔厚度从 $50 \mu\text{m}$ 增加到 $300 \mu\text{m}$, 最大应力增加了 22.95 MPa。与此同时, 芯片层温度随着铜箔厚度增加线性减小, 厚度每增加 $50 \mu\text{m}$, 中间发光点温度降低 $0.45 \text{ }^\circ\text{C}$ 。铜箔厚度从 $50 \mu\text{m}$ 增加到 $300 \mu\text{m}$, 芯片层最高温度降低了 $2.26 \text{ }^\circ\text{C}$ 。增加铜箔厚度不仅增加了散热面积, 而且增加了负极片热容, 工作废热可以先传递到铜箔中, 再经由铜箔传递到空气中, 避免了热量在芯片中堆积。

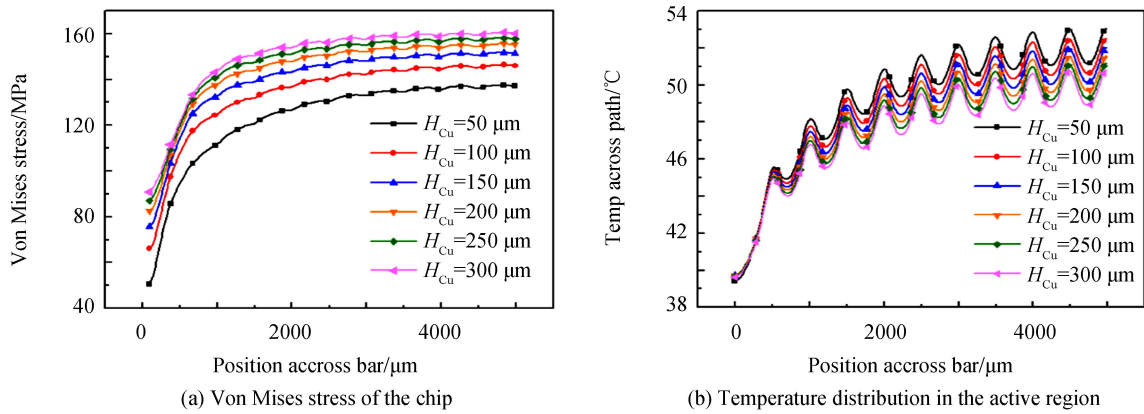


图5 不同厚度负极片激光器的模拟结果

Fig.5 Simulation results of lasers with different negative electrode thickness

值得注意的是,虽然铜箔厚度增加导致了芯片层应力增加,但是芯片 Smile 非线性减小,当铜箔厚度增加到 300 μm 时,Smile 变化也趋于平缓,如图 6(a)所示.器件在回流过程中,由于芯片与次热沉厚度很小,因此变形受铜热沉影响是上凸的,而铜负极下表面与芯片通过焊料连接,上表面自由收缩,铜负极与铜热沉有相反的弯曲趋势,从而对芯片 Smile 效应起阻碍作用,如图 6(b).随着铜负极片厚度增加,材料抗弯刚度随之增加,因此使铜负极片对芯片下弯变形的阻力增大,芯片 Smile 也随之减小.

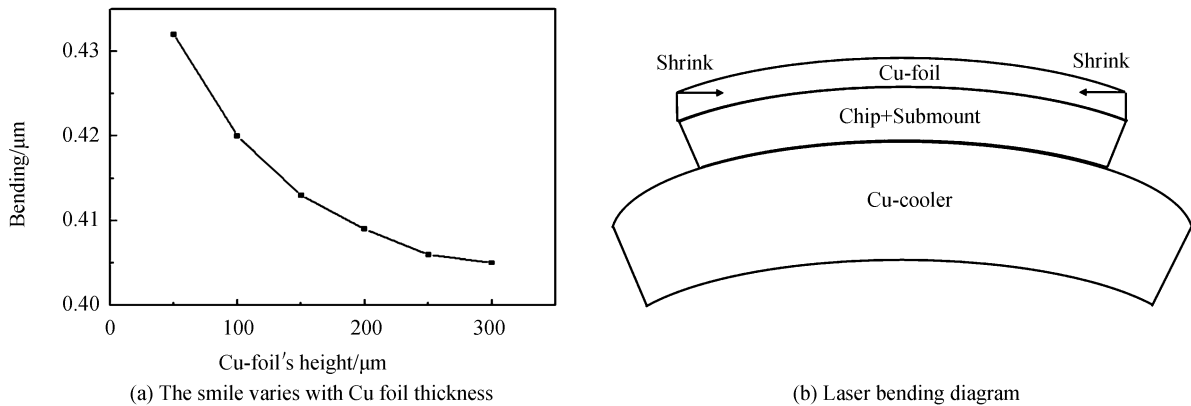


图6 Smile 随铜箔厚度变化曲线及激光器各层弯曲示意图

Fig.6 Smile varies with Cu foil thickness and laser bending diagram

2.3 次热沉厚度对器件热及力学行为的影响

Cu 负极片厚度为 50 μm 时,CuW 次热沉厚度从 100 μm 增加到 500 μm ,芯片受到的应力以及有源区温度分布如图 7 所示.

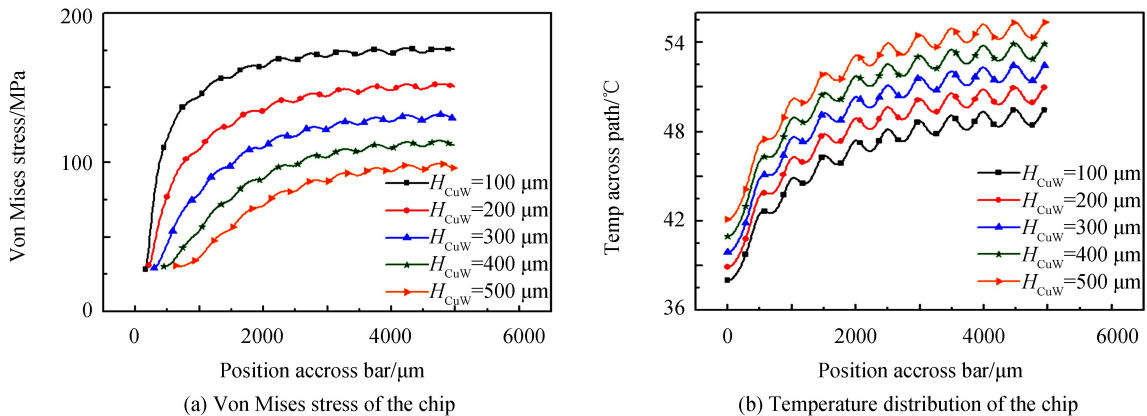


图7 不同厚度次热沉激光器模拟结果

Fig.7 Simulation results of lasers with different sub-substrate thickness

CuW 厚度从 100 μm 增加到 500 μm , Von Mises 应力从 175.85 MPa 减小到 96.172 MPa, 因此随着 CuW 厚度的增加, 芯片受到来自热沉的压应力越小. 但是增加 CuW 厚度的同时会导致器件热阻增加及芯片有源区温度升高, 如图 7(b) 所示, 可以看到随着次热沉厚度增加, 芯片温度也随之升高, 厚度每增加 100 μm , 最高温度上升 1.5 $^{\circ}\text{C}$, CuW 厚度从 100 μm 增加到 500 μm 时, 最高结温从 49.531 $^{\circ}\text{C}$ 增加到了 55.432 $^{\circ}\text{C}$.

图 8 为芯片 Smile 随 CuW 厚度的变化情况. 当 CuW 厚度小于 29% Cu 热沉厚度 (7950 μm) 时 (考虑 Cu 负极片和芯片厚度的影响, 模拟中转折点为 2300 μm), 尽管芯片应力随 CuW 厚度增加而减小, 但芯片的 Smile 却逐渐增加, 而当 CuW 厚度大于 2300 μm 之后 Smile 才开始随着 CuW 厚度增加而减小.

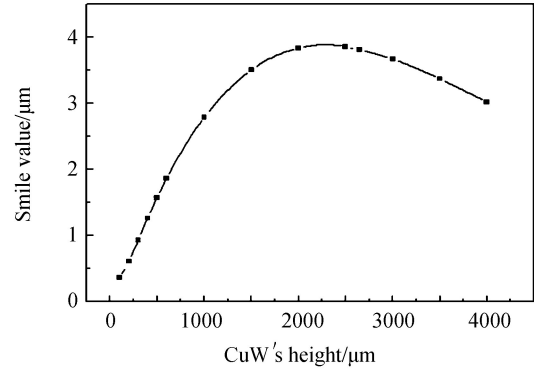


图 8 芯片 Smile 随 CuW 厚度的变化曲线
Fig.8 Effect of CuW thickness on the Smile

在实际 HCS 封装的器件结构中, 芯片及其上下层的 Cu 负极和 CuW 次热沉的总厚度远小于 Cu 热沉的厚度. 此时可以将器件整体近似为薄膜-衬底的结构, Timoshenko 和 Suhir 等的双层金属片模型不适用于描述芯片 Smile 的变化规律. 为了得到更准确的器件 Smile 随 CuW 厚度的变化规律, 推导了 Stoney 薄膜-衬底应力模型公式. 将 COS 整体 (芯片 + CuW) 等效为薄膜, Cu 热沉为衬底, 如图 9(a), 当 COS 和 Cu 没有键合在一起时, 回流过程中由于热膨胀系数不匹配, 因此存在长度差 ΔL .

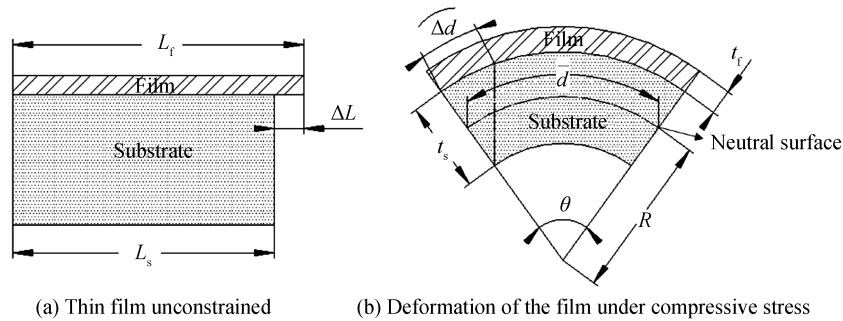


图 9 薄膜-衬底模型结构图
Fig.9 Thin film-substrate model structure

材料在弯曲过程中, 外层受拉伸, 内层受挤压, 在其横截面上必然会有一个既不受拉, 又不受压的过渡层, 应力几乎等于零, 这个过渡层称为材料的中性层. 由于 Cu 衬底的厚度 t_s 远大于薄膜的厚度 t_f , 因此中性面可近似认为是 Cu 热沉的中间层, 且正应力 σ_f 在薄膜内均匀分布. 则薄膜中的应力相对于中性面的力矩可以写成^[20]

$$M_f = W \sigma_f t_f t_s / 2 \quad (2)$$

式中, W 为 CuW 次热沉宽度 (即腔长方向尺寸). 图 9(b) 所示为 COS 通过焊料键合到 Cu 热沉上之后的变形情况. 根据几何变形关系, 可以得到

$$\frac{d}{R} = \frac{\Delta d}{t_s / 2} \quad (3)$$

式中, Δd 为 Cu 热沉上表面和下表面的长度差. 则根据式 (3) 可得曲率表达式为

$$\frac{1}{R} = \frac{\Delta d}{t_s d / 2} \quad (4)$$

一般定义弯曲发光点的最高点与最低点的位置差为 Smile 值^[9], 用符号 δ 表示. 在几何关系中 Smile 值则用挠度表征. 根据挠度和曲率半径的关系有

$$\delta = \frac{L_s^2 \Delta d}{4 t_s d} \quad (5)$$

在 Cu 衬底弯曲变形过程中,中性面上的正应力始终为 0,则中性面的长度 d 是常数, t_s 也为常数.回流过程中 Cu 热沉的下表面不受约束可以自由收缩,但随着 CuW 厚度增加, Cu 热沉上表面受到薄膜的约束力会随之增加,使得 Cu 热沉上表面收缩量减小,即 Δd 的值随之减小.从式(5)可知, Δd 随 CuW 次热沉厚度增加而增加,因此 Smile 值 δ 随之增加.

当 CuW 次热沉的厚度超过临界厚度(本文模型临界厚度为 $2\ 300\ \mu\text{m}$)时,不能再将其视作薄膜-衬底结构,此时 CuW 厚度进一步增加时,由于 CuW 的抗弯刚度与 CuW 厚度的三次方成正比, CuW 抵抗弯曲变形的能力逐渐增加,因此芯片的 Smile 随着 CuW 厚度的增加而减小.

3 实验测试

基于理论模拟结果,采用 Cu+CuW 传统封装结构,同时适当增加铜箔厚度,减小 CuW 次热沉厚度,可以降低器件 Smile 值.分别制备了 5 只 CuW 厚度为 $300\ \mu\text{m}$ 和 $400\ \mu\text{m}$ 的样品,实验样品冷波长 $969\ \text{nm}$,共 19 个发光点,芯片材料取自同一晶元,测试功率 $60\ \text{W}$.图 10 为两组样品在 $60\ \text{W}$ 工作功率连续工作状态下测得的发光光谱.根据模拟结果, CuW 厚度从 $300\ \mu\text{m}$ 增加到 $400\ \mu\text{m}$,中心发光点应力减小了 $18.05\ \text{MPa}$,温度升高了 $1.462\ ^\circ\text{C}$,根据文献中参数^[21],应力造成的波长漂移率为 $0.05\ \text{nm/MPa}$,温度造成的波长漂移率为 $0.27\ \text{nm}/^\circ\text{C}$ ^[22].回流使芯片受到压应力,波长蓝移,温度升高使波长红移,因此当 CuW 厚度从 $300\ \mu\text{m}$ 增加到 $400\ \mu\text{m}$,会造成波长红移增加 $1.3\ \text{nm}$.实验表明,两组样品平均峰值波长分别为 $976.21\ \text{nm}$ 和 $977.46\ \text{nm}$,相对于冷波长 $969\ \text{nm}$ 分别红移了 $7.21\ \text{nm}$ 和 $8.46\ \text{nm}$,红移增加了 $1.25\ \text{nm}$,与模拟计算结果较吻合.

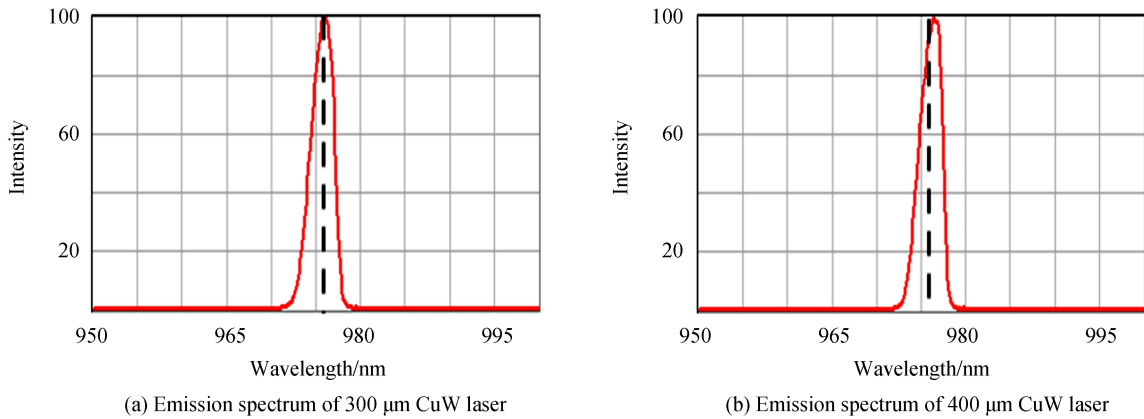


图 10 CuW 厚 $300\ \mu\text{m}$ 和 $400\ \mu\text{m}$ 激光器发光光谱

Fig.10 Emission spectra of $300\ \mu\text{m}$ and $400\ \mu\text{m}$ CuW lasers

采用成像方法测试两组实验样品的 Smile,测试系统如图 11,测试结果如图 12.该测试装置中激光器发射的光束首先通过准直系统进行快慢轴准直,随后通过分光镜将光束分为两部分,一部分通过半透半反镜和衰减镜减小激光强度,然后传输到 CCD 相机,通过计算机相关软件进行数字化并成像,另一部分传输到光束分析仪来控制准直光束的质量.该系统测试精度为 $0.01\ \mu\text{m}$.半导体激光器阵列的 Smile 的计算公式为

$$\text{Smile} = \frac{B}{A} \mu\text{m} = \left(\frac{C}{A} - 1 \right) \mu\text{m} \quad (6)$$

式中, A 为激光器阵列的发光单元在快轴方向的宽度, B 为弯曲的激光器巴条的最高发光点与最低发光点中心间的距离, C 为激光器巴条的最高发光点的上端和最低发光点的下端间的距离.其中, A 和 C 的值可以直接从 CCD 所成的像中测量得到.

根据模拟结果, CuW 厚度 $300\ \mu\text{m}$ 时 Smile 值为 $0.931\ \mu\text{m}$, CuW 厚度为 $400\ \mu\text{m}$ 时, Smile 值为 $1.261\ \mu\text{m}$.两组样品器件测试得到的平均 Smile 值分别为 $0.904\ \mu\text{m}$ 和 $1.292\ \mu\text{m}$,说明模拟结果与实验结果几乎一致.从图 12 可以看到并非所有 Smile 的形状都是均匀的弧形,这与芯片本身弯曲变形有关.

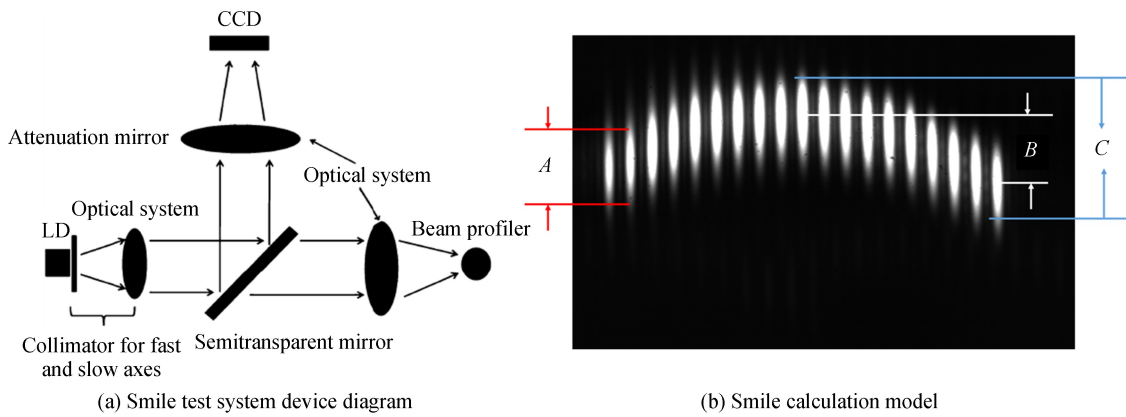


图 11 Smile 测试系统示意图及计算模型
Fig.11 Smile test system diagram and calculation model

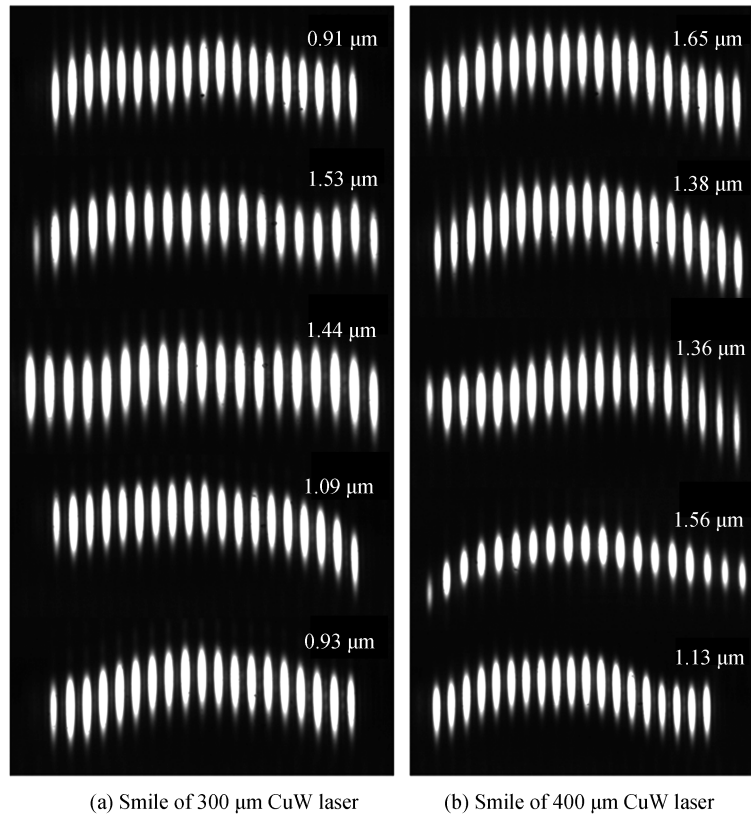


图 12 300 μm 和 400 μm 厚 CuW 激光器 Smile
Fig.12 Smile of 300 μm and 400 μm CuW lasers

4 结论

本文系统研究了不同封装结构和材料对大功率半导体激光器阵列热应力和 Smile 的影响.结果表明 Cu-diamond 由于其高热导率、高弹性模量和与芯片匹配的 CTE 系数,能够更好地缓冲芯片所受热应力,并且使芯片工作温度降低,因此是相对最优的负极和次热沉材料.基于此提出了一种芯片上下层同时以等厚度的 Cu-diamond 作为负极和次热沉的优化封装结构,即“三明治”结构.与传统的 Cu+CuW 的 HCS 封装器件相比,双 Cu-diamond 的“三明治”封装结构使芯片热应力减小了 32.278 MPa,芯片有源区结温降低了 7.6 $^{\circ}\text{C}$.

对比不同厚度负极片的模拟结果,发现负极厚度增加,且可以通过增加热容降低芯片温度.同时,对于 CTE 系数大于芯片的负极材料(例如 Cu),由于回流收缩时弯曲方向与铜热沉相反,因此可以通过反向弯曲趋势减小芯片 Smile 值,负极厚度越大,芯片 Smile 值越小.对比不同厚度次热沉的仿真结果,发现次热沉/热

沉厚度比小于 29% 时, 芯片 Smile 随次热沉厚度增加而增加; 当次热沉厚度/热沉厚度比超过 29% 时, Smile 随次热沉厚度增加而减小, 次热沉厚度越小, 器件热阻越小, 结温越低, Smile 越小, 但芯片受到的热应力更大。

制备了 CuW 厚度分别为 300 μm 和 400 μm 的两组 HCS 传导冷却高功率半导体激光器, 实验结果表明 CuW 厚度增加, 可减小芯片所受热应力, 但会增加器件 Smile 值。

参考文献

- [1] LIU X S, DAVIS R W, HUGHES L C, *et al.* A study on the reliability of indium solder die bonding of high power semiconductor lasers[J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, **100**(1): 013104.
- [2] SONG Yan-rong, HU Jiang-hai, ZHOU Jing-feng, *et al.* Laser diode-pumped Q-Switched Yb: LSO laser with a semiconductor saturable absorber mirror[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, **33**(10): 1297-1300.
宋晏蓉, 胡江海, 周劲峰, 等. 半导体可饱和吸收镜调 Q 的 Yb: LSO 激光器[J]. 中国激光, 2006, **33**(10): 1297-1300.
- [3] GAO Song-xin, WU De-yong, WANG Jun, *et al.* Multiplayer 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.
- [4] CAO Yin-hua, LIU You-qiang, QIN Wen-bin, *et al.* Kilowatt diode laser with beam quality better than All-Solid-State laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, **36**(9): 2282-2285.
曹银花, 刘友强, 秦文斌, 等. 光束质量超过全固态激光器的千瓦直接半导体激光器[J]. 中国激光, 2009, **36**(9): 2282-2285.
- [5] LI Jing, CAO Yin-hua, LIU You-qiang, *et al.* Smile effect measurement of laser diode line arrays based on external cavity[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2017, **38**(10): 1302-1306.
李景, 曹银花, 刘友强, 等. 基于外腔反馈二极管线阵列的 smile 效应测量方法[J]. 发光学报, 2017, **38**(10): 1302-1306.
- [6] CHEN Hua, LI Jing, ZHOU Xing-lin, *et al.* Measures to reduce Smile effect of semiconductor laser diode arrays caused by packaging thermal stress[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2017, **38**(5): 656-662.
陈华, 李静, 周兴林, 等. 封装热应力致半导体激光器“Smile”效应的抑制方法[J]. 发光学报, 2017, **38**(5): 656-662.
- [7] SCHLEUNING D, GRIFFIN M, JAMES P, *et al.* Robust hard-solder packaging of conduction cooled laser diode bars [C]. SPIE, 2007, **6456**: 645604.
- [8] YUAN Zhen-bang, WANG Jing-wei, WU Di. Static and transient thermal behavior of high power semiconductor lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, **36**(8): 1957-1962.
袁振邦, 王警卫, 吴迪, 等. 大功率半导体激光器阵列的稳态和瞬态热行为[J]. 中国激光, 2009, **36**(8): 1957-1962.
- [9] LANG Chao, YAO Shun, CHEN Bing-zhen, *et al.* "Smile" effect on the beam quality for diode laser arrays[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, **39**(5): 502006.
郎超, 尧舜, 陈丙振, 等. 半导体激光器阵列的“Smile”效应对光束质量的影响[J]. 中国激光, 2012, **39**(5): 502006.
- [10] TOMM J W, GERHARDT A, ELSAESSER T, *et al.* Simultaneous quantification of strain and defects in high-power diode laser devices[J]. *Applied Physics Letters*, 2002, **81**(17): 3269-3271.
- [11] FREVERT C, BUGGE F, KNIGGE S, *et al.* 940 nm QCW diode laser bars with 70% efficiency at 1 kW output power at 203 K: analysis of remaining limits and path to higher efficiency and power at 200K and 300K [C]. SPIE, 2016, **9733**: 97330L.
- [12] WANG Shu-na, ZHANG Pu, XIONG Ling-ling, *et al.* Influence of temperature on "Smile" in high power diode laser bars[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(5): 0514001.
王淑娜, 张普, 熊玲玲, 等. 温度对高功率半导体激光器阵列“Smile”的影响[J]. 光子学报, 2016, **45**(5): 0514001.
- [13] LU Yao, NIE Zhi-qiang, CHEN Tian-qi, *et al.* Thermo-mechanical behavior of conduction-cooled high power diode laser arrays[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(9): 0914001.
鲁瑶, 聂志强, 陈天奇, 等. 传导冷却单巴高功率半导体激光器热应力和 Smile 研究[J]. 光子学报, 2017, **46**(9): 0914001.
- [14] WEIB S, KAULFERSCH E, TOPFER M, *et al.* Design, simulation and technological realization of a reliable packaging concept for high power laser bars: proceedings of the Electronic Components & Technology Conference [C]. IEEE, 1998: 0569-5503.
- [15] SCHLEUNING D, SCHOLZ K, GRIFFIN M, *et al.* Material survey for packaging semiconductor diode lasers [C]. SPIE, 2009, **7198**: 71981K.
- [16] DU J, ZHOU H, SCHLEUNING D, *et al.* 8xx nm kW conduction cooled QCW diode arrays with both electrically conductive and insulating submounts [C]. SPIE, 2008, **6876**: 687605.
- [17] TAN Yao-lin. Electroconductive diamond and its applications [J]. *Superhard Material Engineering*, 2007, **19**(3): 32-34.
谈耀麟. 导电金刚石及其应用 [J]. 超硬材料工程, 2007, **19**(3): 32-34.
- [18] DU Yong-guo, ZHANG Wei-jun. The physical properties of the commonly-used electrical contact materials [J].

Electrical Engineering Materials, 2002, **1**(1): 35-39.

堵永国, 张为军. 常用触点材料的物理性能[J]. 电工材料, 2002, **1**(1): 35-39.

- [19] ZHANG Xiu-rui, LI Huai-xue, HUANG Rui. Numerical simulation of thermal stress in hole-wall fabricated by nano-pulse laser drilling[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016, **504**(9): 74-78.
张修瑞, 李怀学, 黄锐. 纳秒脉冲激光制孔孔壁热应力数值模拟研究[J]. 航空制造技术, 2016, **504**(9): 74-78.
- [20] ZHANG Y, ZHAO Y P. Applicability range of Stoney's formula and modified formulas for a film/substrate bilayer[J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, **99**(5): 053513.
- [21] STASKE R, SEBASTIAN J, WENZEL H, *et al.* Influence of mounting stress on polarisation degree of electroluminescence of laser diode bar[C]. IEEE, 2000: CWF99.
- [22] WEN Y, BASARAN C. An analytical model for thermal stress analysis of multi-layered microelectronic packaging[J]. *Mechanics of Materials*, 2004, **36**(4): 369-385.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (Nos.61334010, 61306096, 61404172, 61504167)

引用格式: CHEN Tian-qi, ZHANG Pu, PENG Bo, *et al.* Effect of Packaging on Thermal Stress and Smile of High Power Semiconductor Laser Arrays[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(6): 0614001

陈天奇, 张普, 彭勃, 等. 封装对大功率半导体激光器阵列热应力及 Smile 的影响[J]. 光子学报, 2018, **47**(6): 0614001