

## 基于 Ga-Diamond 液态金属常温封装的高功率 LD 巴条热应力抑制研究

孟庆楷<sup>1,2</sup>, 张佳晨<sup>1</sup>, 吴顺华<sup>1,2</sup>, 章珺越<sup>1,2</sup>, 刘嘉辰<sup>1,2</sup>, 黄维洲<sup>1,2</sup>,  
凌 磊<sup>1,2</sup>, 陈 琅<sup>1</sup>, 王贞福<sup>1</sup>, 李 特<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所 超快光科学与技术全国重点实验室, 西安 710119;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 在高功率半导体激光器巴条封装中, 由芯片与热沉之间热膨胀系数失配引起的残余热应力是制约器件性能与可靠性的关键问题。该应力可导致芯片翘曲并引发 SMILE 效应, 从而劣化激光器的光学一致性。针对上述问题, 本文提出了一种基于 Ga-Diamond 液态金属复合连接层的常温封装方案, 通过避免回流过程中的温度梯度及界面刚性约束, 从机理上实现热应力的有效抑制。仿真结果表明, 采用该封装方案后, 芯片最大应力可降低至约 0.9 MPa, 形变量接近于零。实验结果进一步验证, SMILE 值由 1.40  $\mu\text{m}$  显著降低至 0.17  $\mu\text{m}$ 。在 50 A 驱动电流下, 器件光输出功率由 58.5 W 提升至 63.5 W, 电光转换效率由 58.5% 提高至 64.8%。研究表明, Ga-Diamond 液态金属连接层所提供的柔性界面与常温封装工艺可实现热失配应变的有效释放, 为低应力、高亮度半导体激光器巴条的实现提供了一种具有应用潜力的技术路径。

**关键词:** 半导体激光器; 激光巴条; 封装; 热应力; SMILE 效应

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20260118

CSTR: 32170.14.CJL.20260118

## Research on Thermal Stress Suppression of High-Power Semiconductor Laser Bars Based with Ga-Diamond Room-Temperature Packaging

MENG Qingkai<sup>1,2</sup>, ZHANG Jiachen<sup>1</sup>, WU Shunhua<sup>1,2</sup>, ZHANG Junyue<sup>1,2</sup>, LIU Jiachen<sup>1,2</sup>,  
HUANG Weizhou<sup>1,2</sup>, LING Lei<sup>1,2</sup>, CHEN Lang<sup>1</sup>, WANG Zhenfu<sup>1</sup>, LI Te<sup>1\*</sup>

(1. State Key Laboratory of Ultrafast Optical Science and Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Xi'an, China, 710119;

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

\* Corresponding Author, E-mail: Lite@opt.ac.cn

**Abstract:** Residual thermal stress induced by the coefficient of thermal expansion (CTE) mismatch between the chip and heat sink is a critical factor limiting the performance and reliability of high-power semiconductor laser diode (LD) bars. Such stress leads to chip warpage and the SMILE effect, thereby degrading beam quality and optical uniformity. To address this issue, a room-temperature packaging scheme based on a Ga-Diamond liquid metal composite interlayer is proposed, which eliminates thermal stress at its origin by avoiding temperature gradients and rigid interfacial constraints associated with conventional reflow processes. The simulation results demonstrate that the proposed

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修订日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 国家自然科学基金(61504167); 陕西省自然基金(2023-JC-YB-556, 2022JQ-531, 2019ZY-CXPT-03-05, 2018JM6010, 2015JQ6263); 陕西省科技厅人才项目(2017KJXX-72)

National Natural Science Foundation of China (61504167); Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China (2023-JC-YB-556, 2022JQ-531, 2019ZY-CXPT-03-05, 2018JM6010, 2015JQ6263); Talent Project of Science and Technology Department of Shaanxi Province (2017KJXX-72)

approach reduces the maximum chip stress to approximately 0.9 MPa, with negligible deformation. Experimentally, the SMILE value is significantly reduced from 1.40  $\mu\text{m}$  to 0.17  $\mu\text{m}$ . Under a driving current of 50 A, the output power increases from 58.5 W to 63.5 W, while the electro-optical conversion efficiency improves from 58.5% to 64.8%. These results indicate that the Ga-Diamond liquid metal interlayer, together with the room-temperature packaging process, enables effective release of thermally induced mismatch strain, offering a promising pathway toward low-stress, high-brightness LD bar packaging.

**Keywords:** Semiconductor laser; Laser bar; Packaging; Thermal stress; SMILE effect

## 1 引 言

高功率半导体激光(Laser Diode, LD)巴条因其体积小、电光转换效率高、波长覆盖广等特点,在工业制造、医疗和国防中得到了广泛应用<sup>[1-3]</sup>。然而,在巴条高功率运行时,封装结构会显著影响器件的散热性能、机械稳定性以及出光点的空间光学一致性。LD巴条封装中最核心的瓶颈之一,是芯片(GaAs)与热沉(Cu)之间的热膨胀系数(Coefficient of Thermal Expansion, CTE)失配所引发的残余热应力问题。这种残余热应力会导致激光器芯片发生形变、发光单元出现空间错位,并引起 SMILE 效应(Smile-Mode-Induced Line-shape Error),即近场光斑的非线性效应,会劣化器件光束质量、降低耦合效率,最终限制巴条各发光点及巴条间的光学一致性<sup>[4-5]</sup>。

为抑制热应力、降低 SMILE 效应,近年来国内外学者围绕多种技术方案开展了系统的研究,主要包括优化回流工艺、施加预应力、采用过渡热沉结构等。2012年, KAGEYAMA N 等人<sup>[6]</sup>开发了可调控热膨胀系数焊料的装配技术,将 SMILE 值抑制在 0.7  $\mu\text{m}$ 。2013年, XU Huiwu 等人<sup>[7]</sup>通过优化回流曲线的冷却阶段,将 SMILE 值控制在 1  $\mu\text{m}$  以内。2017年,陈华<sup>[8]</sup>等提出预应力封装技术,模拟在封装前对热沉两端施加 190 N 的拉力,使其产生预应变,补偿冷却收缩,仿真结果表明, SMILE 值降低为 0.35  $\mu\text{m}$ 。2020年, Nozaki S<sup>[9]</sup>等引入周期性沟槽,从芯片端释放应变,将 9 mm 宽 InGaN 巴条的 SMILE 值降至 0.4  $\mu\text{m}$ 。尽管以往研究已取得诸多进展,但传统封装方案依赖高温回流条件下形成的冶金键合,这种键合引起的固有残余热应力始终难以消除,并且热应力与 SMILE 效应难以同时得到有效改善。

为突破传统封装方案的技术局限,本文从热应力产生机理出发,提出一种基于 Ga-Diamond 液

态金属(LM)复合连接层的高功率 LD 巴条常温封装技术,旨在从源头抑制封装过程中引入的残余热应力。围绕该方案,采用有限元仿真与实验表征相结合的方法,对其热力学性能进行系统分析。

所采用的 Ga-Diamond 复合材料<sup>[10-11]</sup>中镓基材料体积分数为 57% (57 vol%), 碳基材料体积分数为 43% (43 vol%), 兼具优异的导热导电性能与适当的流变特性,其导热系数可达  $137 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , 显著高于传统焊料,同时具有约 45 mPa·s 的动力粘度,能够满足器件封装的工艺需求。与传统焊料封装相比, Ga-Diamond 连接界面在实现高效散热的同时具备一定柔顺性,可有效缓解界面失配问题,从而抑制残余应力的产生。

此外,该方案采用常温封装工艺,避免了传统焊接过程中不可避免的温度梯度与热循环效应,可从根本上降低热应力的形成。本研究的改善机制并非追求 CTE 匹配或与形变进行对抗,而在于“采用常温工艺消除热应力的温度梯度”以及“利用液态材料柔性界面来释放应变失配”这两个核心机理。为验证该技术的有效性,本文进一步将 Ga-Diamond 封装器件与传统钢焊料及金锡焊料封装器件进行对比,通过仿真与实验结果的综合分析,评估其在热管理与应力控制方面的性能优势。

## 2 设计与仿真

当异质材料体系处于温度变化环境中时,由于各组成材料 CTE 存在差异,将产生不一致的热应变;在界面刚性键合条件下,该不匹配热应变受到约束,进而转化为热应力。在高功率 LD 巴条封装过程中,该热应力主要来源于回流焊阶段芯片与热沉材料之间的 CTE 失配。

上述热应力可导致有源区晶格结构畸变,并引起器件整体翘曲与弯曲变形,从而改变光学谐振腔的几何结构及折射率分布,最终劣化输出光束一致性与器件性能稳定性。因此,准确描述封

装过程中热-力耦合行为,并定量评估不同封装结构下的应力分布特征,对于优化器件结构设计及提升性能具有关键意义。

基于上述物理机制,本文建立了考虑材料非线性与界面约束效应的热-力耦合模型,并采用有限元方法对不同封装方案(包括 Ga-Diamond 液态金属连接与传统焊料连接)下的温度场与应力场分布进行系统仿真分析,以揭示其在热应力调控方面的差异与优势。

## 2.1 封装设计

为抑制上述热应力问题,本文提出一种基于 Ga-Diamond 液态金属复合材料的常温封装方案,以替代传统的固态焊料封装。该液态连接层无需回流工艺即可实现界面保形接触,从而避免了热应力产生的两个关键条件——显著温度梯度及界面刚性约束,有效降低封装过程中的应力累积。

Ga-Diamond 复合材料由镓基液态金属与高体积分数金刚石颗粒构成,其中金刚石作为增强相不仅提升材料整体热导率,同时显著调控其流变行为。相较于纯镓所呈现的低粘度牛顿流体特性(易引发界面渗漏及机械稳定性不足),该复合材料表现出典型的剪切稀化非牛顿行为<sup>[12]</sup>,并可近似描述为宾汉塑性体<sup>[13-14]</sup>。在微观尺度下,金刚石颗粒在液态镓基体中形成空间支撑网络,使材料具备有限屈服应力。在静态或低频扰动条件下,材料保持较高表观粘度(准固态 quasi-solid state 特征),可有效抑制因重力或外界扰动引起的流动与渗漏;而在封装施加压力过程中,材料粘度随剪切速率升高而显著降低,从而具备良好的流动性以实现界面自适应填充;在外载荷释放后,其结构网络迅速恢复,使器件稳定固定于目标位置。

上述流变特性保证了材料在封装过程与服役条件下的结构稳定性,从而克服了纯液态金属体系易迁移的局限。

在传统金锡或钢焊料封装中,界面金属间化合物(IMC)层的形成导致刚性边界约束;固态焊料较高的剪切模量使得热失配引起的剪切应变难以释放,从而导致应力快速积累,这是诱发 SMILE 效应的主要原因之一。相比之下,Ga-Diamond 液态金属界面可视作具有粘滑特征的柔性边界:液态镓基体在芯片与热沉界面处允许一定程度的相对滑移,从而显著降低界面有效剪切刚度,使失配应变能够通过界面重排与局部流动得到释放,对应的剪切应力水平显著降低。此外,分散于液态金属中的金刚石颗粒在提供力学支撑的同时,可稳定键合层厚度(bond layer thickness, BLT),并构建高效的导热通道;其周围液态基体则通过流动适配界面微尺度形变,实现“柔性支撑-流体缓冲”的协同机制。该机制能够有效释放芯片与热沉之间的热收缩失配,从而从根本上抑制封装诱导的热应力与结构形变。

为针对不同封装方案的应力与形变进行定量研究,本文将建立仿真模型并进行有限元分析。

## 2.2 仿真模型的建立与分析

本文通过有限元分析软件,构建了三种不同工艺的倒装芯片封装结构,如图 1 所示。

结构 1 为金锡焊料封装器件,在热沉与芯片间引入与芯片热膨胀系数匹配的 CuW 过渡热沉来改善热应力问题。其结构从上到下依次为:Cu(负极片)、AuSn(金锡焊料)、GaAs(芯片)、AuSn(金锡焊料)、CuW(过渡热沉)、AuSn(金锡焊料)、Cu(热沉),如图 1(a)所示。

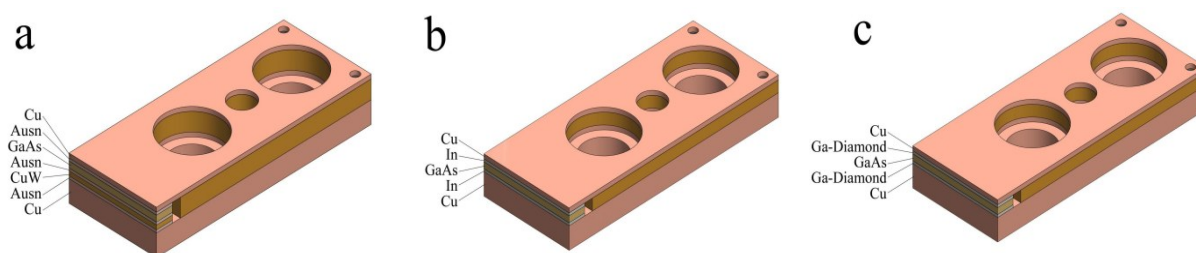


图 1 (a)金锡封装器件;(b)钢封装器件;(c)Ga-Diamond 封装器件的结构

Fig. 1 Structure of (a) AuSn packaged devices; (b) In packaged devices; (c) Ga-Diamond packaged devices

结构 2 为钢焊料封装器件,钢作为软焊料,芯片可直接与热沉进行焊接。其结构从上到下依次为:Cu(负极片)、In(钢焊料)、GaAs(芯片)、In(钢

焊料)、Cu(热沉),如图 1(b)所示。

结构 3 为本文设计的 Ga-Diamond 液态金属封装器件,结构从上到下依次为:Cu(负极片)、Ga-

Diamond 连接层、GaAs (芯片)、Ga-Diamond 连接层、Cu(热沉),如图 1(c)所示。

热沉(AuSn封装引入过渡热沉)、焊料层、芯片

与负极片是热应力与 SMILE 效应产生的核心来源区域。为简化计算,模型中忽略绝缘片的影响。各材料性能参数如表 1 所示<sup>[5]</sup>,各组件参数如表 2 所示。

表 1 材料性能参数

Tab. 1 Material Performance Parameters

| Material   | Thermal Conductivity( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) | Coefficient of Thermal Expansion ( $10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$ ) | Young's Modulus (GPa) | Poisson's Ratio |
|------------|--|--|-----------------------|-----------------|
| Cu         | 398  | 17   | 110                   | 0.36            |
| CuW        | 170  | 6.5  | 315                   | 0.30            |
| In         | 81.6   | 3.3  | 11                    | 0.42            |
| AuSn       | 57   | 16   | 59                    | 0.35            |
| GaAs       | 55   | 5.8  | 85                    | 0.31            |
| Ga-Diamond | 137  | 19.7   | /                     | 0.45            |
| PI         | 0.5  | 25   | 31                    | 0.34            |

表 2 组件参数

Tab. 2 Parameters of Components

|                                   |                         |
|-----------------------------------|-------------------------|
| Heat sink dimension               | 27 mm × 11 mm × 1.5 mm  |
| Laser bar chip dimension          | 1 mm × 10 mm × 0.125 mm |
| Negative electrode foil thickness | 0.05 mm                 |
| Transition heat sink thickness    | 0.3 mm                  |
| Number of emitters                | 19                      |
| Fill factor                       | 30%                     |
| Emission window width             | 0.15 mm                 |
| Wavelength                        | 808 nm                  |

芯片残余热应力主要产生于封装回流的冷却阶段,即焊料由熔融态凝固并进一步降温至室温的过程中。在该过程中,由于材料热膨胀失配及界面约束作用,器件内部逐步积累不可恢复的热应力与结构形变。基于上述物理过程,本文采用有限元仿真方法构建热-力耦合多物理场模型,对封装器件在冷却过程中的温度场、应力场及形变行为进行协同分析。模型中根据材料物理属性将计算区域划分为固体域与流体域,并分别建立对应的控制方程以及边界条件,通过界面连续性条件实现温度、位移及应力等物理量的耦合传递。为定量分析热应力与封装结构及连接材料类型之间的关系,在模型建立过程中做如下合理简化假设:各材料物性参数取为与温度无关的常数;焊料层内部不存在空洞或缺陷;各界面均实现理想键合。上述假设在保证计算可行性的同时,有助于突出不同封装方案在热应力调控方面的本征差异。

针对芯片、焊料、热沉等固态结构,采用线弹性小变形固体力学模型<sup>[6]</sup>,核心为弹性力学基本方程。其中,结构内部力的平衡关系为:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{f}_v = 0 \quad (1)$$

位移与应变的对应关系为:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2} [\nabla \boldsymbol{u} + (\nabla \boldsymbol{u})^T] \quad (2)$$

另根据广义胡克定律,线弹性材料应力-应变关系为:

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{C} : \boldsymbol{\varepsilon} \quad (3)$$

式中, $\boldsymbol{\sigma}$ 为应力张量, $\boldsymbol{f}_v$ 为体积力矢量, $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为应变张量, $\boldsymbol{u}$ 为位移矢量, $\boldsymbol{C}$ 为材料弹性刚度张量,由材料的弹性模量 $E$ 和泊松比 $\nu$ 确定。

针对 Ga-Diamond 液态金属,流体域采用层流模型<sup>[7]</sup>,核心控制方程为连续性方程和动量守恒方程(Navier-Stokes 稳态形式):

$$\nabla \cdot (\rho \boldsymbol{u}) = 0 \quad (4)$$

$$\rho(\boldsymbol{u} \cdot \nabla) \boldsymbol{u} = -\nabla p + \nabla \cdot [\eta(\nabla \boldsymbol{u} + (\nabla \boldsymbol{u})^T)] + \rho \boldsymbol{g} \quad (5)$$

式中, $\rho$ 为流体密度, $\boldsymbol{u}$ 为流体流速矢量, $p$ 为压力, $\eta$ 为流体动力粘度, $\boldsymbol{g}$ 为重力加速度, $C_p$ 为定压比热容。

模型通过流固耦合(fluid-structure interaction, FSI)方法实现固-液界面的力学平衡与运动连续性,从而完成多物理场的耦合求解。网格划分如图 2 所示。鉴于本研究中应力与结构形变主

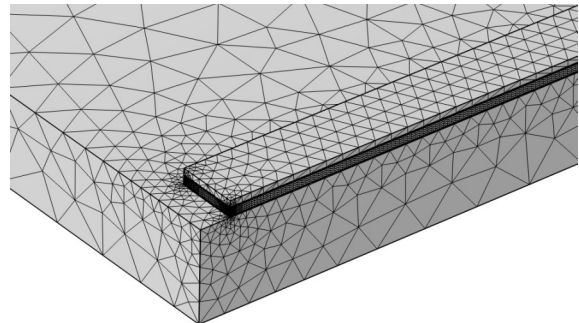


图 2 半导体激光器仿真模型的网格划分

Fig. 2 Mesh division of Semiconductor Laser Simulation Models

要集中于芯片、焊料层以及焊料-热沉界面区域,而上述区域通常具有显著的几何尺度梯度与应力集中效应,为提高数值计算精度,整体采用自由四面体网格进行离散,并在芯片、焊料层以及焊料-热沉界面等关键区域实施局部加密处理,以增强对界面应力分布与微尺度形变特征的解析能力。

依据钢焊料和金锡焊料的熔点,设置了仿真的温度区间。而对于 Ga-Diamond 常温封装工艺,实际封装过程不存在温度梯度,因此不施加封装热载荷。仿真的具体对象为芯片上均匀分布的 19 个发光点,仿真过程聚焦于各发光点的 Von Mises 应力与形变量,以此表征芯片整体的应力分

布特征和 SMILE 效应。

图 3 展示了芯片所受应力分布与形变的仿真结果,其中,图 3(a)、(b)、(c)分别对应金锡、钢和 Ga-Diamond 封装器件的芯片。为更直观呈现芯片的形变,形变量仿真结果采用了 30 倍比例因子放大。通过图 3(a)、(b)的应力分布结果可以看出,应力分布在整体芯片范围内呈现高度的不均匀性,AuSn 封装芯片形变量最大,In 封装所受应力最大。与 In 和 AuSn 情况不同,图 3(c)展示了采用 Ga-Diamond 作为封装材料时对应的应力和形变分布,芯片 Von Mises 应力分布均匀且应力水平较低,30 倍比例因子芯片下几乎无形变。

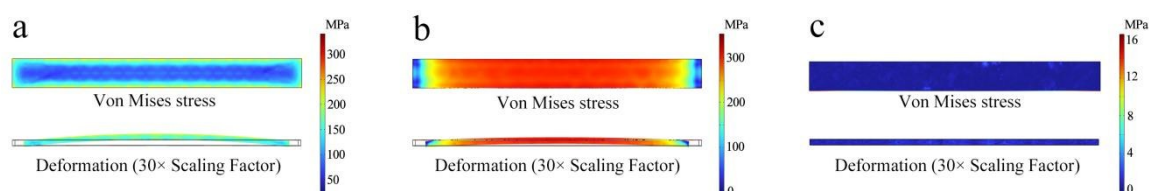


图 3 芯片 Von Mises 应力分布与形变(a)金锡封装器件;(b)钢封装器件;(c)Ga-Diamond 封装器件

Fig. 3 Von Mises stress distribution and deformation of the chip (a) AuSn packaged device; (b) In packaged device; (c) Ga-Diamond packaged device

图 4 给出了三种封装方式在不同出光位置处的 Von Mises 应力分布与形变仿真结果。其中,金锡焊料封装的芯片最大应力达 129.9 MPa,最大差值约为 49.8 MPa,对应的最大垂直形变量为 4.39  $\mu\text{m}$ 。钢焊料封装的芯片最大应力为 253.1 MPa,最大差值约为 99.2 MPa,但其最大垂直形变量相对较小,仅为 1.63  $\mu\text{m}$ 。上述差异主要源于材料力学性能及封装结构的不同。金锡封装中引入了 CuW 过渡热沉,以缓解热沉与芯片之间的热

膨胀系数失配,从而在一定程度上降低了整体应力水平。然而,CuW 材料较高的杨氏模量增强了结构刚性,使热失配引起的应变更易转化为宏观弯曲变形;同时金锡焊料较高的回流温度,进一步放大了热循环过程中的应力驱动力,因此表现出较大的形变量。相比之下,钢焊料由于其较低的剪切模量和良好的塑性变形能力,可在一定程度上释放热失配应变,从而抑制器件翘曲,但其内部仍会积累较高的热应力水平<sup>[18-19]</sup>。

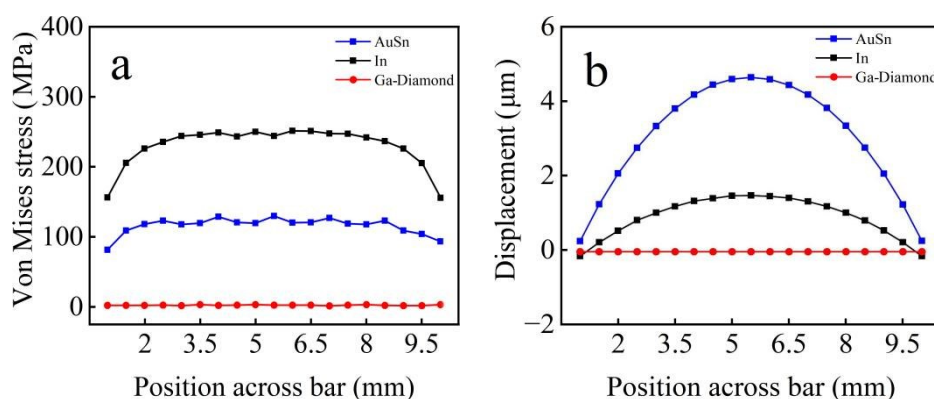


图 4 (a)芯片出光点所受 Von Mises 应力;(b)芯片出光点产生的形变

Fig. 4 (a) Von Mises stress at the emission points of the chip; (b) Displacement at the emission points of the Chip

相比传统固态焊料封装, Ga-Diamond 液态金属封装表现出显著不同的响应特征。仿真结果表明, 其芯片最大应力仅为 0.9 MPa, 形变量可忽略(约 0  $\mu\text{m}$ )。该显著改善主要归因于 Ga-Diamond 常温封装的两个核心机制: 1) 常温工艺消除了传统封装回流的温度梯度; 2) 液态金属连接层的柔性界面在封装过程中不形成刚性冶金键合, 界面允许一定程度的相对滑移, 从而使应变能够通过界面重排与局部流动得到有效释放, 显著抑制应力的累积及由此引发的芯片翘曲变形。此外, Ga-Diamond 复合材料中分散的金刚石颗粒在提升材料导热率的同时, 提供必要的力学支撑以维持界面结构稳定, 并有助于均匀化界面应力分布, 降低局部应力集中风险。综合来看, 液态金属复合界面在降低热应力与抑制结构形变方面具有显著优势, 为高功率 LD 巴条的低应力、高可靠性封装提供了一种有效的技术路径。

### 3 实验测试

基于前述仿真结果, 不同封装方案在芯片形

变响应方面存在显著差异, 其中金锡焊料封装表现出较大的形变量(最高达 4.39  $\mu\text{m}$ )。考虑到实验中通常采用 SMILE 效应对芯片弯曲形变进行表征, 为保证仿真与实验评价指标的一致性, 并突出不同封装界面对形变调控能力的差异, 本文选取仿真中形变较小且具有代表性的钢焊料封装器件作为对照组。

在此基础上, 针对 Ga-Diamond 液态金属封装器件与传统钢焊料封装器件开展对比实验研究。分别完成两类器件的封装制备, 并对其光电性能与结构稳定性进行系统表征, 包括 L-I-V 特性、发射光谱以及 SMILE 效应测试。

#### 3.1 器件制备

对于钢焊料封装器件, 采用回流炉在氮气( $\text{N}_2$ )保护环境下完成封装制备。相比之下, 针对 Ga-Diamond 液态金属封装器件, 本文设计并实现了相应的常温封装工艺流程: 首先, 将 Ga-Diamond 液态金属复合材料均匀覆于芯片 P 面与 N 面; 随后, 将芯片贴装至覆有聚酰亚胺绝缘层的热沉表面, 并完成负极电极结构的组装, 所得器件结构如图 5 所示。

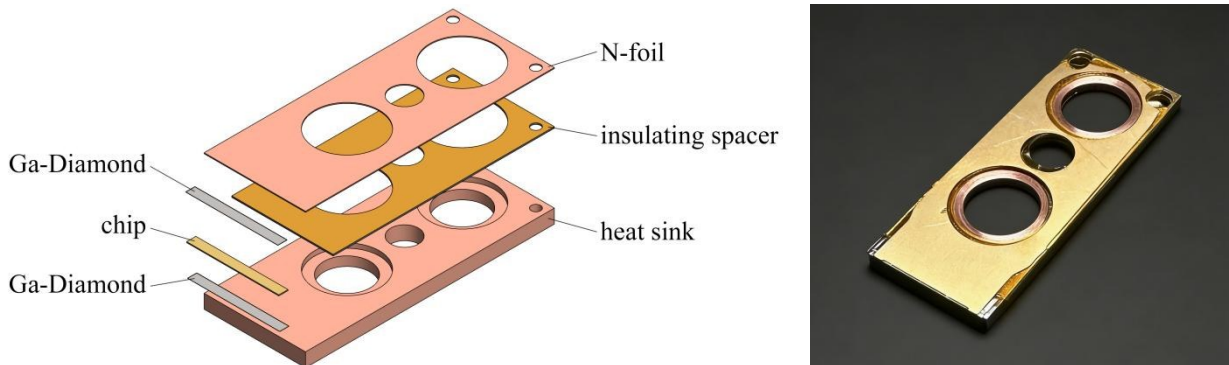


图 5 Ga-Diamond 封装结构 3D 爆炸图与实物图

Fig. 5 Exploded view of the Ga-Diamond liquid metal packaged devices 3D structure.

为保证不同封装方案之间的可比性, 钢焊料封装与 Ga-Diamond 液态金属封装过程均采用专用工装夹具进行精密对位与装配, 并通过施加 20 g 的垂直恒定载荷作为装配压力, 以确保两类样品在受力条件上的一致性, 从而排除外部工艺因素对实验结果的影响。

#### 3.2 实验表征

实验采用微通道(micro-channel cooler, MCC)水冷方式进行散热, 水冷系统温度通过 PID 系统稳定控制在 25 $^{\circ}\text{C}$ , 同时实验室环境温度维持在 25 $^{\circ}\text{C}$ 。两种封装结构的 L-I-V 特性如图 6 所示, 在 50 A 驱动电流下, 钢焊料封装器件的光输出功率

为 58.5 W, 对应电光转换效率为 58.5%。相比之下, Ga-Diamond 封装器件的光输出功率达 63.5 W, 电光转换效率达到 64.8%, 表现出更优的光电性能。上述性能提升主要归因于 Ga-Diamond 复合连接层在热管理与应力调控方面的协同优势。一方面, 相较于钢焊料, Ga-Diamond 复合材料具有更高的有效热导率, 有助于增强器件的散热能力, 从而降低有源区结温; 另一方面, 其柔性界面特性可有效缓解封装引入的热应力, 抑制由应力诱导的材料性能退化。

为进一步定量评估器件热特性, 本文采用波长漂移法对有源区的工作温度进行了计算<sup>[20]</sup>。在

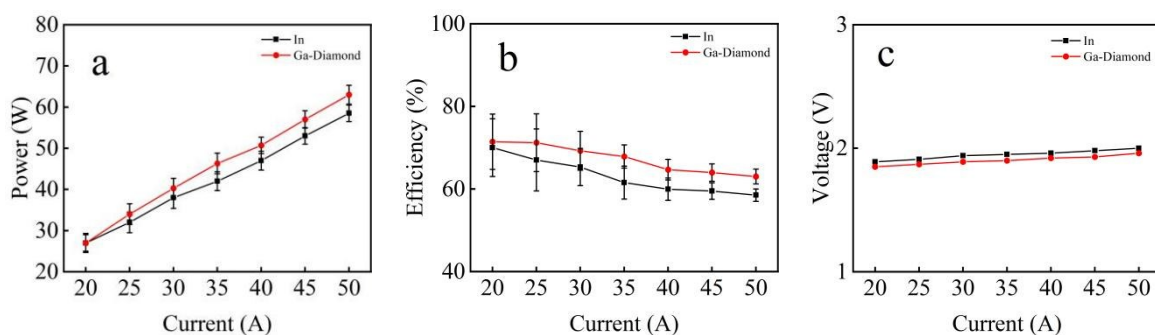


图6 钢焊料封装器件和 Ga-Diamond 封装器件的(a)电流与功率特性; (b)电流与电光转换效率特性; (c)电流与电压值特性

Fig. 6 Characteristics of (a) current and power; (b) current and electro-optical conversion efficiency; (c) current and voltage values for In solder packaged devices and Ga-Diamond packaged devices

相同测试条件(冷却温度 25℃)下, 50 A 工作电流时, 钢焊料封装器件的光谱中心波长相对冷腔波长红移了 2.74 nm, 而 Ga-Diamond 封装器件的波长红移量为 2.15 nm。基于 0.27 nm/℃ 的波长温度漂移系数, 计算得到钢焊料封装器件的有源区工作温度为 35.15℃, 而 Ga-Diamond 封装器件为 32.96℃, 降低约 2.19℃。此外, 较低的热应力水平有助于减弱能带结构畸变、晶格失配及非辐射复合过程, 从而进一步提升载流子复合效率与光子产生效率, 最终体现为器件输出功率与电光转换效率的同步提升<sup>[21-23]</sup>。

如图 7 所示, 在 50 A 驱动电流下, 钢焊料封装器件的光谱半高全宽(full width at half maximum, FWHM)为 3.29 nm, 而 Ga-Diamond 封装器件的光

谱半高全宽收窄至 1.83 nm, 表明其光谱一致性显著提升。该差异主要源于封装诱导热应力对芯片能带结构的调制作用。热应力会引起有源区晶格畸变及禁带宽度变化, 从而导致发射波长发生偏移。对于巴条器件而言, 各出光单元所承受的热应力存在空间分布差异, 使得不同发光单元的发射波长产生离散; 在多单元光场叠加后, 宏观表现为整体光谱线宽的展宽。相比之下, Ga-Diamond 液态金属封装由于其界面应力释放能力, 使芯片内应力分布更加均匀, 从而有效降低各出光单元之间的波长离散程度, 最终表现为光谱线宽的显著收窄<sup>[24]</sup>。该结果从光谱特性角度进一步验证了该封装方案在抑制残余热应力方面的有效性。

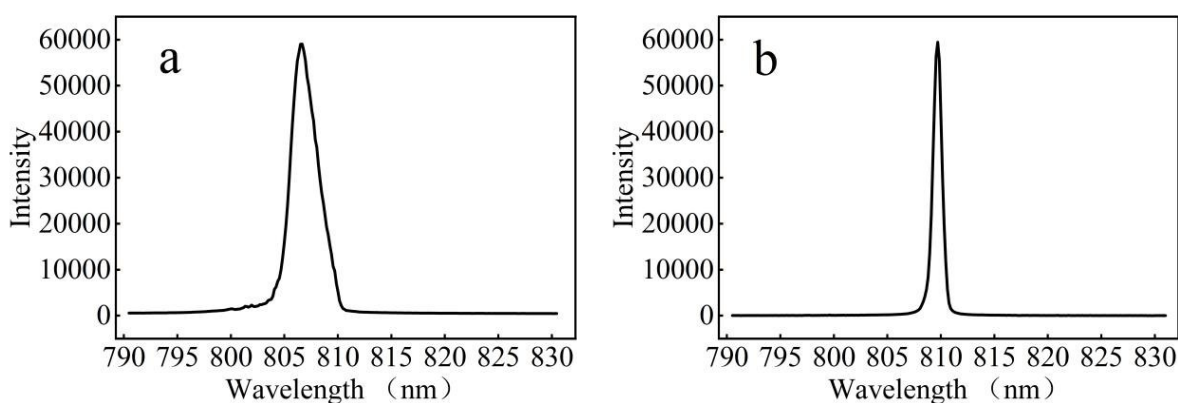


图7 (a)钢焊料封装器件的光谱; (b)Ga-Diamond 封装器件的光谱

Fig. 7 (a) Spectrum of In solder packaged devices; (b) Spectrum of Ga-Diamond packaged devices

本文采用光学成像法测试实验样品的 SMILE 效应, 测试系统如图 8 所示。

根据测试结果对 SMILE 值进行计算, 计算公式<sup>[19]</sup>如下:

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

式中, A 为快轴方向光斑尺寸, B 为快轴方向最高与最低出光点之间的垂直距离。

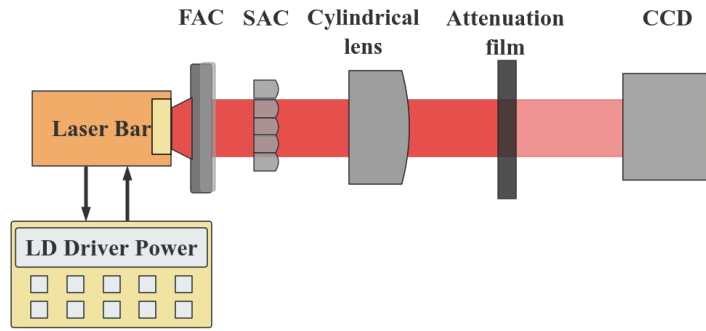


图8 SMILE测试系统结构图

Fig. 8 Structure Diagram of the SMILE Testing System

根据公式(6)对测试结果进行定量计算, 钢焊料封装器件的 SMILE 值为  $1.40 \mu\text{m}$ , 如图 9(a) 所示; 而 Ga-Diamond 封装器件的 SMILE 值显著降低至  $0.17 \mu\text{m}$ , 如图 9(b) 所示, 与仿真结果表现出良好的一致性。实验结果与仿真结果之间的微小偏差, 主要来源于光学测量系统误差、CCD

探测精度限制以及芯片初始形变等因素的综合影响。在考虑上述不确定性的情况下, Ga-Diamond 封装仍实现了近一个数量级的 SMILE 抑制效果, 表明该常温封装方案能够有效降低封装诱导的热应力, 并显著减弱由此引发的芯片弯曲形变。

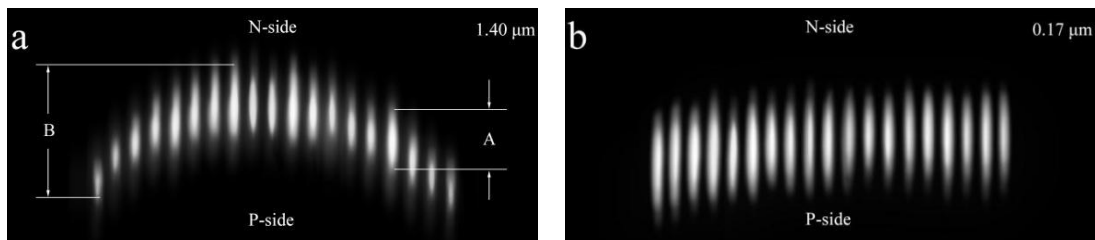


图9 (a) 钢焊料封装器件的 SMILE 效应; (b) Ga-Diamond 封装器件的 SMILE 效应

Fig. 9 (a) SMILE effect of In solder packaged devices; (b) SMILE effect of Ga-Diamond packaged devices

## 4 结论

本文围绕封装热应力的产生机理, 提出了一种基于 Ga-Diamond 液态金属复合连接层的高功率半导体激光器巴条常温封装方案。通过热-力耦合仿真与实验对比研究, 系统验证了该方案在抑制封装诱导热应力与芯片形变方面的有效性。其核心优势在于避免了传统回流焊接过程中不可避免的温度梯度及界面刚性约束, 从而实现了应变的有效释放。仿真结果表明, 采用 Ga-Diamond 封装后, 芯片最大 Von Mises 应力由  $253.1 \text{ MPa}$  显著降低至  $0.9 \text{ MPa}$ , 形变量从  $1.63 \mu\text{m}$  降低至接近于零。实

验结果与仿真分析保持良好一致性, SMILE 值从  $1.40 \mu\text{m}$  降低至  $0.17 \mu\text{m}$ , 验证了其在抑制芯片弯曲形变方面的显著效果。在器件性能方面, 在  $50 \text{ A}$  驱动电流下, Ga-Diamond 封装器件的光输出功率从  $58.5 \text{ W}$  提升至  $63.5 \text{ W}$ , 电光转换效率由  $58.5\%$  提高至  $64.8\%$ , 表明其在热管理与结构稳定性提升的同时, 实现了光电性能的协同优化。此外, 该封装方案在常温条件下完成, 无需焊料高温回流, 有助于简化制备流程并降低热载荷引入的不利影响。综合来看, 本文所提出的 Ga-Diamond 液态金属封装方案为实现高功率、高可靠性 LD 器件及模块提供了一种具有应用潜力的技术路径。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] ROSS P E. Economics drives a ray-gun resurgence: Lasers, cheaper by the shot, should work well against drones and cruise missiles[J]. *IEEE Spectr.*, 2023, 60(1):40-41.
- [ 2 ] ZHENG J X, GUO M R, LUAN M L, et al. Femtosecond laser fabrication of SiC microlens arrays as integrated light ho-

- mogenizer and splitter[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2023, 35(13):705-708.
- [ 3 ] YUN Q J, SONG B F, and PEI Y. Modeling the impact of high energy laser weapon on the mission effectiveness of unmanned combat aerial vehicles[J]. *IEEE Access*, 2020, 8:32246-32257.
- [ 4 ] WANG J W, YUAN Z B, KANG L J, *et al.* Study of the mechanism of “smile” in high power diode laser arrays and strategies in improving near-field linearity[C]. *2009 59th Electro. Compon. Technol. Conf., San Diego California*, 2009: 837-842.
- [ 5 ] KLEIN S, HENGESBACH S, WESTPHALEN T, *et al.* Suppression of cross coupling in an external resonator for a diode laser bar with 19 single emitters[J]. *Opt. Lett.*, 2015, 40(1):641-644.
- [ 6 ] KAGEYAMA N, TORII K, MORITA T, *et al.* Efficient and reliable high-power laser diode bars with low-smile implementation[J]. *IEEE J. of Quantum Electron.*, 2012, 48(8):991-994.
- [ 7 ] XU H W, YONG Z, FANG Y S, *et al.* Influence of storage causing packaging stress changes on smile effect for diode laser arrays[C]. *Proceedings of SPIE, Beijing*, 2013:8904.
- [ 8 ] 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.
- CHEN H, LI J, ZHOU X L, *et al.* Measures to reduce Smile effect of semiconductor laser diode arrays caused by packaging thermal stress[J]. *Chin. J. Lumin.*, 2017, 38(5):656-662. (in Chinese)
- [ 9 ] NOZAKI S, KAWAGUCHI M, KANO T, *et al.* A high power InGaN laser array with built-in SMILE suppression structure [C]. *Proceedings of SPIE, San Francisco California 2020*, 11262:112620S.
- [ 10 ] ZENG C Z, SHEN X, SHEN K, *et al.* Boosted the thermal conductivity of liquid metal via bridging Diamond particles with graphite[J]. *J. Colloid Interface Sci.*, 2025, 680:643-656.
- [ 11 ] KI S, SHIM J, OH S, *et al.* Gallium-based liquid metal alloy incorporating oxide-free copper nanoparticle clusters for high-performance thermal interface materials[J]. *Int. J. of Heat Mass Transf.*, 2021, 170:121012.
- [ 12 ] ZHANG J C, MENG Q K, WU S H, *et al.* Thermomechanical performance of high-power laser diode arrays using a liquid metal-diamond particle hybrid composite bonding layer[J]. *Opt. Express*, 2025, 33(23):49304-49312.
- [ 13 ] SHIN D Y, Chung H W, Song H J, *et al.* Thermomechanical-stress-free interconnection of solar cells using a liquid metal [J]. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 2018, 180:10-18.
- [ 14 ] WANG W D, WEI S, DU X Y, *et al.* Fabrication of liquid metal/diamond hybrid thermal interface materials with high thermal conductivity and low flowability[J]. *Mater. Sci. Mater. Electron.* 2023, 34:1395.
- [ 15 ] 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.
- DU Y G, ZHANG W J. The physical properties of the commonly-used electrical contact materials[J]. *Electr. Eng. Mater.*, 2002, 1(1):35-39. (in Chinese)
- [ 16 ] SHIELD R T. A Consistent Theory for Elastic Deformations With Small Strains [J]. *J. Appl. Mech.*, 1984, 51(4): 717-723.
- [ 17 ] LAKEHAL D, NARAYANAN C. Numerical analysis of the continuum formulation for the initial evolution of mixing layers with particles[J]. *Int. J. Multiph. Flow*, 2003, 29(6):927-941.
- [ 18 ] YE W B, WU Y C, WANG J, *et al.* Simulation study on thermal characteristics and thermal stress of semiconductor laser package[C]. *in 2020 21st ICEPT, Guangzhou 2020*:9202894.
- [ 19 ] 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): 614001.
- CHEN T Q, ZHANG P, PENG B, *et al.* Effect of Packaging on Thermal Stress and Smile of High Power Semiconductor Laser Arrays[J]. *Acta. Photon. Sinica.*, 2018, 47(6):614001. (in Chinese)
- [ 20 ] BUTT N J, ROBERTS R A, PATNAIK S S. Laser diode optical output dependence on junction temperature for high-power laser systems[J]. *Opt. Laser Technol.*, 2020, 125:106019.
- [ 21 ] KAUL T, ERBERT G, KLEHR A, *et al.* Impact of carrier nonpinning effect on thermal power saturation in GaAs-based high power diode lasers[J]. *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, 2019, 25(6):1-10.
- [ 22 ] DOMMERMUTH B, WITTEE U, BALCK A, *et al.* Emitter-resolved characterization of high-power diode laser bars at operating point and below threshold[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2025, 37(18):1045-1048.
- [ 23 ] YUN Z D, YAN L, TING T Z, *et al.* High-power, multi-junction, 905 nm vertical-cavity surface-emitting laser with an

AlGaAsSb electron-blocking layer[J]. *Opt. Lett.*, 2023,48(8):2142-2145.

- [24] 李波,王贞福,仇伯仑,等. 高功率准连续半导体激光阵列中应变对独立发光点性能的影响[J]. *光子学报*, 2020, 49(9):914001.

LI B, WANG Z F, QIU B C, *et al.* Influence of Strain on Performance of Independent Emitters in High Power Quasi-continuous Semiconductor Laser Array[J]. *Acta. Photon. Sinica.*, 2020,49(9):914001. (in Chinese)



孟庆楷(2001-),男,山东济南人,硕士研究生,2023年于西安电子科技大学获得学士学位,主要从事高功率半导体激光器及封装设计的研究。

E-mail: mengqingkai23@mails.ucas.ac.cn



李特(1981-),男,吉林长春人,博士,研究员,2008年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事新型半导体激光芯片及其器件等方面的研究。

E-mail: Lite@opt.ac.cn