

# 碳化硅封装高功率半导体激光器散热性能研究

倪羽茜<sup>1,2</sup>, 井红旗<sup>1\*</sup>, 孔金霞<sup>1</sup>, 王翠鸾<sup>1</sup>, 刘素平<sup>1</sup>, 马骁宇<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院半导体研究所光电子器件国家工程中心, 北京 100083;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 为研究基于碳化硅(SiC)陶瓷封装的高功率半导体激光器的散热性能,将其与常用的氮化铝(AlN)陶瓷进行对比,使用基于结构函数法的热阻仪分别测量 SiC 和 AlN 封装 F-mount 器件的热阻值,得到 SiC 器件的总热阻约为  $3.0\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$ , AlN 的约为  $3.4\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$ , SiC 器件的实测热阻值比 AlN 器件低 14.7%,实验结果表明 SiC 过渡热沉具有较好的散热性能。实验进一步测试了两种过渡热沉封装器件的输出性能,在 16 A 连续电流注入时,915 nm 波段的 SiC 器件单管输出功率为 15.9 W, AlN 为 15 W,测试结果显示 SiC 封装的器件具有更高的功率输出水平。

**关键词** 激光器; 半导体激光器; 碳化硅; 热阻; 结构函数法; 氮化铝

中图分类号 TN248.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0101002

## Thermal Performance of High-Power Laser Diodes Packaged by SiC Ceramic Submount

Ni Yuxi<sup>1,2</sup>, Jing Hongqi<sup>1</sup>, Kong Jinxia<sup>1</sup>, Wang Cuiluan<sup>1</sup>, Liu Suping<sup>1</sup>, Ma Xiaoyu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Engineering Research Center for Optoelectronic Devices, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The heat dissipating performance of high-power laser diodes packaged by silicon carbide (SiC) ceramic submounts is investigated, comparing with the commonly-used aluminum nitride (AlN) ceramic submounts. The thermal resistance of SiC and AlN submounts packaged F-mount devices are measured by the thermal resistance instrument based on the structure function method. The thermal resistance of SiC devices is about  $3.0\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$ , and the AlN ones is about  $3.4\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$ . The measured thermal resistance of SiC devices is about 14.7% less than that of the AlN. The experimental data shows better heat-dissipating performance of SiC submounts. In addition, the output characteristics of devices packaged by two kinds of submounts are further tested. The output power of 915 nm single emitter of SiC device achieves 15.9 W at the continuous injection of 16 A, while for AlN device, the value is only 15 W. Test results demonstrate that the SiC packaged laser diode achieves higher power output.

**Key words** lasers; semiconductor lasers; silicon carbide; thermal resistance; structure function method; aluminum nitride

**OCIS codes** 140.5960; 250.5960; 230.5590

## 1 引言

经过几十年的发展,半导体激光器已从抽运等传统应用领域拓展到材料加工、激光显示、激光导航

等领域,在应用需求的驱动下,激光器的输出功率也不断提高<sup>[1-2]</sup>。现阶段,国际上波长为 900 ~ 1000 nm,发光孔径约为 100  $\mu\text{m}$  的商用单管器件的功率标称值为 15 ~ 20 W,文献报道水平达 20 ~

收稿日期: 2017-06-21; 收到修改稿日期: 2017-07-13

作者简介: 倪羽茜(1991—),女,博士研究生,主要从事大功率半导体激光器封装方面的研究。

E-mail: niyuxi@semi.ac.cn

导师简介: 马骁宇(1963—),男,硕士,研究员,博士生导师,主要从事大功率半导体激光器及其组件方面的研究。

E-mail: maxy@semi.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: jinghq@semi.ac.cn

25 W<sup>[3-4]</sup>,其功率水平相对而言已达瓶颈。为继续提高功率和效率,文献[5]采用液氮冷却方法在-50℃下实现单 bar 准连续峰值功率 1.7 kW 的输出,但这种冷却方式限制性大,无法推广应用,但却说明了如果能有效解决散热问题,器件的输出功率则将大幅提高,因此有效的封装热设计对半导体激光器至关重要<sup>[6]</sup>。

目前高功率半导体激光器均采用硬焊料封装的传导冷却方式,即首先用硬焊料将激光器芯片封装到过渡热沉上,形成 COS(chip on submount)结构,然后将 COS 封装到热传导系数更高的铜热沉上,完成二级封装,其中过渡热沉位于芯片和铜热沉之间,承担着散热过渡和应力过渡的双重作用。理想的过渡热沉材料应具有较高热导率,同时能与激光器芯片膨胀匹配<sup>[7]</sup>。目前较为通用的材料是陶瓷,如氮化铝(AIN)、氧化铍等,碳化硅(SiC)虽已应用于 LED、金属半导体场效应管(MESFET)等器件中,但在高功率半导体激光器中的应用并不广泛,对其封装性能的研究也不深入<sup>[8]</sup>,因此本文基于 F-mount 封装,通过与市面上常见的 AIN 陶瓷对比,利用结构函数法研究 SiC 封装的半导体激光器的散热性能。

## 2 器件结构

半导体激光器 F-mount 封装结构如图 1 所示,从上到下依次为激光芯片、过渡热沉和铜热沉。实验中所使用的激光器芯片取自同一外延片,具体的芯片外延结构可参考文献[7]。包括光刻、溅射、镀膜、解理等在内的芯片处理工艺均相同,取相邻位置的 4 支管芯,使用金锡焊料烧结技术将芯片依次封装到 SiC、AIN 过渡热沉上,形成 COS 结构,然后使用钢焊料将 COS 焊接到铜热沉上,完成 F-mount 结构封装。测试中将 F-mount 器件用螺钉固定在

通水底座上,由水温 23℃ 的水冷机制冷,因此 F-mount 虽与通水底座表面紧密接触,但中间仍有一层空气隙,因此实际器件底面温度略高于 23℃。

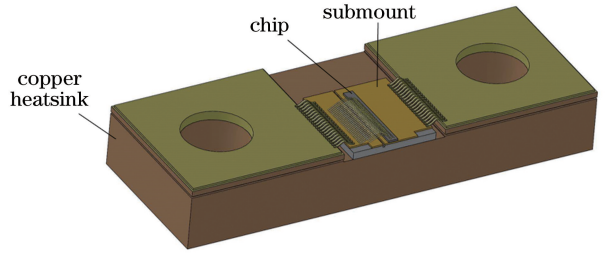


图 1 半导体激光器 F-mount 封装结构示意图

Fig. 1 Schematic of the F-mount package of laser diodes  
由于 SiC 和 AIN 两种材料的线膨胀系数及杨氏模量等力学参数与 GaAs 芯片差别较大,直接用作过渡热沉会引入较大应力,因此需要在陶瓷材料两侧覆铜形成一种三明治叠层结构,其等效热膨胀系数  $\bar{\alpha}$  的近似计算<sup>[9]</sup>如下:

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha_1 d_1 E_1 (1 - \nu_2) + \alpha_2 d_2 E_2 (1 - \nu_1)}{d_1 E_1 (1 - \nu_2) + d_2 E_2 (1 - \nu_1)}, \quad (1)$$

式中  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$ 、 $E_1$  和  $E_2$ 、 $\nu_1$  和  $\nu_2$  分别代表构成三明治叠层的两种材料的线膨胀系数、杨氏模量、泊松比,  $d_1$  和  $d_2$  为两种材料的总厚度,通过改变两种材料的厚度比,可以调节过渡热沉烧结面上的  $\bar{\alpha}$ ,在保持总厚度不变的情况下,增大铜层占比会使  $\bar{\alpha}$  增大,增大陶瓷材料厚度占比会使  $\bar{\alpha}$  减小。

在膨胀匹配的条件下,固定  $\bar{\alpha}$  为芯片 GaAs 的线膨胀系数,即可计算出过渡热沉中陶瓷材料和覆铜层的总厚度比。实验中所使用的过渡热沉尺寸为 5.75 mm×4.5 mm,总厚度为 0.5 mm,经过优化设计的两种 COS 厚度及相应的材料参数如表 1 所示。由于三明治型过渡热沉为对称的铜/陶瓷/铜结构,陶瓷两侧所覆铜层为相同厚度,所以表格中铜层的厚度指单侧厚度。

表 1 COS 封装结构的材料参数和结构参数

Table 1 Detailed parameters of the material and structure of COS package

| Layer  | CTE / (10 <sup>-6</sup> · K <sup>-1</sup> ) | Elastic modulus / GPa | Poisson ratio | Thermal conductivity / (W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> ) | Specific heat / (kJ · kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> ) | Thickness in experiment / μm |
|--------|---|-----------------------|---------------|---|--|------------------------------|
| GaAs   | 6.03  | 85.3                  | 0.312         | 45  | 5.32   | 110                          |
| Cu-SiC | 17.00                                       | 130.0                 | 0.350         | 398   | 0.38   | 68                           |
| SiC    | 3.90  | 221.0                 | 0.210         | 490   | 0.69   | 346                          |
| Cu-AIN | 17.00                                       | 130.0                 | 0.350         | 398   | 0.38   | 79                           |
| AIN    | 4.10  | 270.0                 | 0.260         | 200   | 0.69   | 324                          |

## 3 结构函数法分析器件热性能的原理

结构函数法测量热阻是指利用半导体结电压和

温度之间的线性关系,在半导体激光器升温(降温)的过程中,通过快速测量器件的结电压得到瞬态温度曲线,利用热学 RC 网络分析理论,将瞬态温度响

应曲线解析成热学 RC 网络,并通过数学处理将其转化为微分结构函数曲线,从而可以直观的对器件封装的各层结构热阻进行分析<sup>[10]</sup>。

1988 年, Székely 等<sup>[11]</sup>提出采用结构函数法分析半导体器件的热学特性。半导体器件一般是由不同材料封装成的多层结构,在器件热传导路径中,不同材料之间的热阻和热容不同,它们的温度响应也不相同,因此可将半导体器件及其封装结构视作一维热学网络,在  $t=0$  时刻对器件有源区施加(取消)热功率,随后通过测量器件结电压的变化,得到升温(降温)过程中温度随时间的变化曲线,称为瞬态热响应曲线。瞬态热响应曲线可以等效成具有  $n$  个单元的 Foster RC 网络模型的响应,此响应可表达为  $n$  个具有不同时间常数的指数项的线性组合的形式:

$$a(t) = \sum_{i=1}^n R_i [1 - \exp(-t/\tau_i)], \quad (2)$$

式中  $a(t)$  为热响应曲线,  $\tau_i = R_i \times C_i$  为第  $i$  个 RC 单元的时间常数,  $R_i$  为指数项的幅度系数,即时间常数谱。真实的热学系统具有连续的时间常数分布形式,表达为积分形式:

$$a(t) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\zeta) \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{t}{\exp(\zeta)}\right] \right\} d\zeta. \quad (3)$$

引入指数时间变量  $z = \ln t$ , 将  $a(t)$  表达为

$$a(t) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\zeta) \{1 - \exp[-\exp(z - \zeta)]\} d\zeta. \quad (4)$$

对于未知的时间常数谱  $R(\zeta)$ , (4) 式是一个反卷积式的微分方程,对其两侧分别对  $z$  取微分得:

$$\frac{d}{dz} a(z) = R(z) \otimes W(z), \quad (5)$$

式中  $W(z) = \exp[z - \exp(z)]$ ,  $\otimes$  代表卷积操作。因此测量得到热响应曲线  $a(t)$  后,转变为指数时间变量形式,对其取微分,然后根据 (5) 式进行反卷积操作,就可以得到一维热学结构的时间常数谱  $R(z)$ , 即可提取 Foster 网络  $n$  个单元的热阻  $R_i$  和热容  $C_i$ 。实际上 Foster 网络中点到点的热容没有实际的物理意义,因此需将 Foster 网络转变为使用点对点热容模型的 Cauer 网络,所得到的 Cauer 网络  $n$  个 RC 单元就可以用来近似描述器件的传热结构。根据文献<sup>[11]</sup>的分析,结温的热响应曲线  $a(t)$  决定于器件的结构函数,而结构函数定义为单位长度热容  $c$  与单位长度热阻  $r$  之比,即:

$$k(x) = \frac{c(x)}{r(x)}, \quad (6)$$

式中  $x$  是一维导热路径的线度,沿热传导路径依次对 Cauer 网络中各 RC 单元的热阻和热容求和得到  $R_{\Sigma}(x)$  和  $C_{\Sigma}(x)$ , 两者相比就可以得到结构函数在导热路径  $x$  上的分布。实际上热阻测试仪器中常用的是微分结构函数<sup>[12]</sup>, 即  $C_{\Sigma}(x)$  对  $R_{\Sigma}(x)$  微分所得到的函数值  $K[R_{\Sigma}(x)]$ , 即:

$$K[R_{\Sigma}(x)] = \frac{dC_{\Sigma}(x)}{dR_{\Sigma}(x)}. \quad (7)$$

考虑截面积为  $A$ , 厚度为  $dx$  的薄片材料,其热容可表示为  $dC_{\Sigma} = c_v A dx$ , 热阻可表示为  $dR_{\Sigma} = dx / eA$ , 式中  $c_v$  为体积热容,  $e$  为材料热导率,因此 (7) 式的微分结构函数可表达为

$$K[R_{\Sigma}(x)] = \frac{dC_{\Sigma}(x)}{dR_{\Sigma}(x)} = \frac{c_v A dx}{dx / eA} = c_v e A^2. \quad (8)$$

对于热流路径上的某一结构,  $c_v$  和  $e$  都是常数,而热流截面积  $A$  则会由于热扩散效应逐渐增加,在微分结构函数曲线上存在局部的波峰或波谷,这是由于  $c_v$  和  $e$  突然变化造成的,代表热流到达了一个新的材料,因此根据微分结构函数曲线便可识别并分析器件内部各层结构及其导热特性。

## 4 器件测试和分析

### 4.1 热阻测试

进行热阻测量之前首先要校正温度系数,即电压变化与温度变化的比值。在 23, 40, 60, 78 °C 的水温下分别测量激光器的结电压变化量,结电压随温度升高而线性下降,测量结果如图 2(a) 所示,横坐标为温度值,纵坐标为结电压变化量的绝对值,经拟合得到的 4 个器件的线性温度系数分布在  $-1.36 \sim -1.32 \text{ mV} \cdot \text{°C}^{-1}$  之间。测试时使用 12 A 连续电流加热器件 40 s,使器件内部达到热平衡状态,然后关闭加热电流,在 5 mA 小电流下快速测量其结电压,得到图 2(b) 中的瞬态冷却曲线,横轴为冷却时间,纵轴为结温与参考温度(23 °C)之间的差值。数据经处理后得到图 2(c) 中的微分结构函数曲线,图中横坐标表示有源区到热流传导路径上某一点  $x$  之间的热阻值  $R_{\Sigma}(x)$ , 纵坐标为微分结构函数值  $K$ 。

图 2(c) 中横轴热阻值为 0 处代表芯片有源区,越靠近原点的位置代表着传热路径上越接近芯片有源区的结构,在热流传导路径中,热容和热阻层层累积,其值不断增加,有的材料热容相对于热阻增加得更快,在曲线中即为  $K$  值较大的区域,如过渡热沉和 F-mount 热沉;有的区域  $K$  值较小,代表热流经过时总热阻比总热容增加得更快,如焊料层;曲线波

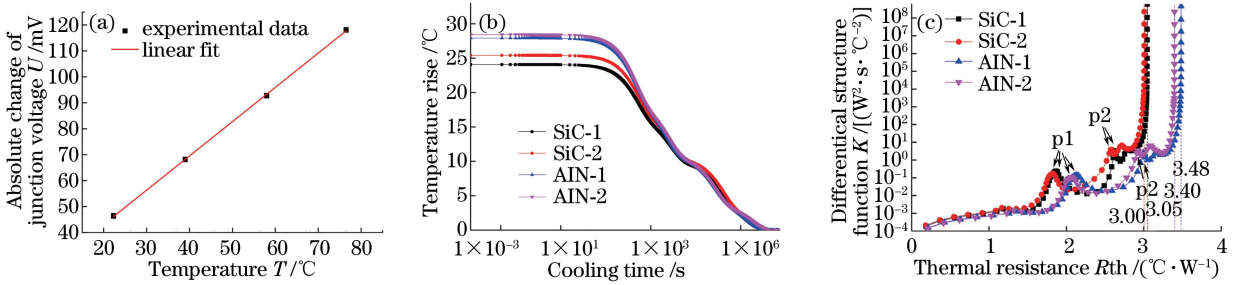


图 2 (a)温度系数测量值与线性拟合曲线;(b)瞬态冷却曲线;(c)半导体激光器的结构函数曲线

Fig. 2 (a) Experimental data of temperature coefficient and linearly fitted curve; (b) transient cooling curves; (c) structure function curves of laser diodes

峰与波谷的拐点为相邻材料的分界处,而波峰或波谷对应的极值点可以近似看作是材料中间位置,因为此时热流横截面积  $A$  变化很小,所以图中第一个波峰 p1 所对应的横轴坐标代表芯片有源区经过金锡焊料层到过渡热沉的热阻值,图 2(c) 中 SiC 器件的 p1 峰所对应的热阻值为 1.83、1.86  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$ , AlN 器件的 p1 峰热阻值为 2.08、2.14  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$ ,两者平均值相差 0.27  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$ ;随后热流经过钢焊料的波谷到达 F-mount 铜热沉,对应图中第二个波峰 p2, p1 和 p2 之间的距离为过渡热沉到 F-mount 铜热沉的热阻值,主要构成是钢焊料的热阻, SiC 器件为 0.75、0.77  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$ , AlN 器件为 0.84、0.86  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$ ,相同过渡热沉的 p1 和 p2 之间热阻差别很小,说明烧结工艺较稳定,焊接界面不存在会使热阻急剧增加的空洞,造成热阻差别的主要原因在于过渡热沉不同。由于 F-mount 和通水底座之间是硬接触,中间有一层空气隙,所以 p2 峰后还有一些波动起伏,应源于界面不完美接触导致的噪声。在曲线末端,其值趋向

于一条垂直的渐近线,此时代表热流传导到了空气层,由于空气的体积无穷大,因此热容也就无穷大。从原点到这条渐近线之间的横坐标值就是器件有源区到空气环境的总热阻,对比两种过渡热沉的微分结构函数曲线可以看出,两个 SiC 过渡热沉封装器件的总热阻分别为 3.00、3.05  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$ ,而两个 AlN 器件则分别为 3.40、3.48  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$ , SiC 器件总热阻比 AlN 低了约 14.7%。另外器件在 p1 峰处, SiC 过渡热沉的微分结构函数值  $K$  也略高于 AlN,  $K$  值越大说明相邻界面的  $c_v$  和  $e$  变化越大,从焊料层到过渡热沉, SiC 的 p1 峰明显高于 AlN,而两者比热近似相等,因此其值差别主要由材料热导率的突变造成,此处也可以看出 SiC 的材料热导率高于 AlN。

#### 4.2 功率-电流特性

为比较 4 支 F-mount 器件的性能,在半导体激光测试平台上测试了激光器的典型输出特性,表 2 为激光器在电流为 16 A 时的输出功率、电光转换效率和波长。

表 2 SiC 和 AlN 封装的半导体激光器在 16 A 电流注入时的输出特性

Table 2 Output characteristics of laser diodes packaged by SiC and AlN respectively at 16 A current injection

| Number of laser diodes | Submount material | Power /W | Electro-optical conversion efficiency /% | Wavelength /nm |
|------------------------|-------------------|----------|--|----------------|
| SiC-1                  | SiC               | 15.9     | 56.8                                     | 913.3          |
| SiC-2                  | SiC               | 15.5     | 55.1                                     | 913.5          |
| AlN-1                  | AlN               | 15.0     | 53.2                                     | 912.8          |
| AlN-2                  | AlN               | 15.1     | 53.9                                     | 912.5          |

为了更加直观地比较器件的特性,如图 3 所示,对比其中两支激光器的电流-功率曲线。在注入电流超过 10 A 后, SiC 封装器件的电光转换效率开始超过 AlN;当注入电流达到 16 A 时, SiC 器件的输出功率为 15.9 W,电光转换效率为 56.8%,而 AlN 器件的输出功率为 15 W,电光转换效率为 53.2%;另外在电流为 14 A 时 AlN 器件已出现了热饱和现象,而 SiC 器件仍保持较好的线性度。值得注意的

是,在较小电流时 AlN 器件的电光转换效率高于 SiC,其原因可能为,实际制作的过渡热沉与设计出现了一定误差, AlN 过渡热沉在 GaAs 芯片有源区内引入了较大的压应力,因此在相同电流注入时有较高的微分增益。而在高电流注入时产生大量热量,器件的封装应力不能消除有源区温度升高的影响,因此 SiC 散热性能的优势得以体现,表现为封装器件具有更高的电光转换效率。



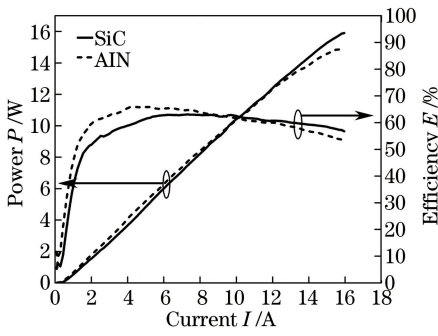


图 3 典型激光器连续工作方式的电光特性

Fig. 3 Electrical-optical characteristics of typical laser diodes

## 5 结 论

主要研究了 SiC 过渡热沉封装高功率半导体激光器的热阻,利用结构函数法测量并分析了两种过渡热沉封装 F-mount 器件的热阻,两支 SiC 器件的封装热阻为  $3.00、3.05 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$ ,而两个 AlN 器件的则为  $3.40、3.48 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$ ,SiC 器件的热阻值比 AlN 器件低 14.7% 左右。为进一步验证 SiC 过渡热沉封装半导体激光器的性能,还测试了两种过渡热沉封装器件的光电参数,发现 AlN 器件在注入电流超过 14 A 后就出现了热饱和现象,在 16 A 时输出功率为 15.0 W;而 SiC 器件在 16 A 时输出功率为 15.9 W,电光转换效率为 56.8%,且仍保持一定的线性度。通过观察电流-功率曲线可以发现, SiC 相比于 AlN 封装在小电流时的优势并不明显,而在大电流注入激光器内部大量产热时其散热优势才得以体现。此外,研究表明,结温严重影响激光器的寿命<sup>[13]</sup>,而结温与过渡热沉的散热效果有直接关系,因此 SiC 过渡热沉对高功率半导体激光器寿命和可靠性的影响仍需进一步的实验研究。

## 参 考 文 献

[1] Zhang Q, Zhao Y H, Dong Z, *et al.* 980 nm High-power fundamental mode distributed-feedback laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43 (2): 0202004.  
张奇, 赵懿昊, 董振, 等. 980 nm 大功率基横模分布反馈激光器[J]. 中国激光, 2016, 43(2): 0202004.

[2] Liu M H, Cui B F, He X, *et al.* Study of high power semiconductor laser with low threshold current [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43 (5): 0502001.  
刘梦涵, 崔碧峰, 何新, 等. 大功率低阈值半导体激

光器研究[J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0502001.

[3] Kaifuchi Y, Yamagata Y, Nogawa R, *et al.* Ultimate high power operation of 9xx-nm single emitter broad stripe laser diodes [C]. SPIE, 2017, 10086: 100860D.

[4] Crump P, Blume G, Paschke K, *et al.* 20 W continuous wave reliable operation of 980 nm broad-area single emitter diode lasers with an aperture of  $96 \mu\text{m}$  [C]. SPIE, 2009, 7198: 719814.

[5] Crump P, Frevert C, Wenzel H, *et al.* Cryolaser: innovative cryogenic diode laser bars optimized for emerging ultra-high power laser applications [C]. Proceedings of 2013 Conference on Lasers and Electro-Optics, 2013.

[6] Zhang Z K, Liu Y, Liu J G, *et al.* Packaging investigation of optoelectronic devices[J]. Journal of Semiconductors, 2015, 36(10): 101001.

[7] Ni Y X, Ma X Y, Jing H Q, *et al.* Finite element analysis of expansion-matched submounts for high-power laser diodes packaging [J]. Journal of Semiconductors, 2016, 37(6): 064005.

[8] Bezotosnyi V V, Krokhin O N, Oleshchenko V A, *et al.* Thermal modelling of high-power laser diodes mounted using various types of submounts [J]. Quantum Electronics, 2014, 44(10): 899-902.

[9] Lorenzen D, Hennig P. Highly thermally conductive substrates with adjustable CTE for diode laser bar packaging[C]. SPIE, 2003, 4945: 174-185.

[10] Feng S W, Xie X S, Lü C Z, *et al.* Measurement and analysis for thermal characteristics of GaAs MESFET by electrical method[J]. Semiconductor Technology, 1999, 24(1): 32-35.  
冯士维, 谢雪松, 吕长志, 等. GaAs MESFET 热特性电学法测量与分析[J]. 半导体技术, 1999, 24(1): 32-35.

[11] Székely V, Vanbien T. Fine structure of heat flow path in semiconductor devices: a measurement and identification method [J]. Solid-State Electronics, 1988, 31(9): 1363-1368.

[12] Zhang G C, Feng S W, Zhou Z, *et al.* Evaluation of thermal resistance constitution for packaged AlGaN/GaN high electron mobility transistors by structure function method [J]. Chinese Physics B, 2011, 20(2): 027202.

[13] Qiao Y B, Feng S W, Ma X Y, *et al.* Thermal characteristic of GaAs-based laser diodes[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(11): 2134-2137.  
乔彦彬, 冯士维, 马骁宇, 等. GaAs 基半导体激光器热特性[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(11): 2134-2137.