

高功率高可靠性 9XX nm 激光二极管

袁庆贺^{1,2*}, 井红旗¹, 仲莉¹, 刘素平¹, 马晓宇^{1,2}

¹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;

²中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049

摘要 为了提高半导体激光二极管的输出功率和可靠性,通过在有源区两侧势垒层和波导层之间引入高禁带宽度的 GaAsP,抑制有源区载流子的泄漏,极大地改善了器件的性能。研究表明:在 10~40 °C 温度范围内器件特征温度从原来的 150 K 提高至 197.37 K(-75.76 °C),峰值波长随温度的漂移系数为 0.207 nm/°C;条宽 200 μm、腔长 2000 μm 的 9XX nm 激光二极管可靠性工作的最大输出功率高达 14.4 W;器件在注入电流为 7 A 时取得 71.8% 的最大电光转换效率,斜率效率为 1.21 W/A。器件在恒定电流下的加速老化测试显示激光二极管可靠性工作寿命达 2000 h 以上。

关键词 激光光学; 激光二极管; 载流子泄漏; 特征温度; 波长漂移; 寿命

中图分类号 TN248.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0401006

High-Power and High-Reliability 9XX-nm Laser Diode

Yuan Qinghe^{1,2*}, Jing Hongqi¹, Zhong Li¹, Liu Suping¹, Ma Xiaoyu^{1,2}

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

²College of Materials Science and Opto-Electronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In this work, we introduce a high-band-gap GaAsP between the barrier layer and the waveguide layer on both sides of the active region to improve the output power and reliability of a semiconductor laser diode. The leakage of carriers in the active region is suppressed, and the device's performance is greatly improved. Results show that the characteristic temperature of the device increases from 150 to 197.37 K (-75.76 °C) in the temperature range of 10~40 °C, and the temperature-dependent drift coefficient of peak wavelength is 0.207 nm/°C. The maximum output power of a 9XX-nm laser diode with a strip width of 200 μm and cavity length of 2000 μm is as high as 14.4 W. The device achieves a maximum electro-optical conversion efficiency of 71.8% for an injection current of 7 A; the slope efficiency is 1.21 W/A. An accelerated aging test of the device at constant current shows that the laser diode has a reliable operating life of over 20000 h.

Key words laser optics; laser diode; carrier leakage; characteristic temperature; wavelength drift; lifetime

OCIS codes 140.2020; 140.3070; 140.3290; 140.3295

1 引 言

近年来,随着外延生长工艺和芯片制作工艺的不断进步,9XX nm 激光二极管的输出功率和电光转换效率等均有显著的提高。但在一些特殊的应用场合,如光纤激光器泵浦、非线性频率转换以及激光材料处理等^[1-5],不仅要求激光二极管具有高的输出功率和转换效率,器件的可靠性也尤为重要。

半导体器件都是对温度敏感的,半导体激光二极管也不例外。温度升高会引起半导体激光二极管的阈值电流升高,发光效率下降,寿命缩短,波长漂移,从而造成模式不稳定,内部缺陷增加,这严重影响了器件的应用。在半导体激光二极管中,常用特征温度 T_0 表示器件对温度的敏感程度,在不同的温度范围内 T_0 有不同的值,提高 T_0 的值有利于提高器件工作的可靠性。关于 T_0 产生的根源和克服

收稿日期: 2019-10-31; 修回日期: 2019-12-05; 录用日期: 2019-12-13

基金项目: 国家自然科学基金(41414010302)

* E-mail: yuanqinghe@semi.ac.cn

途径已经进行了大量的研究,但仍未得到根本的解决。通常情况下,造成 T_0 值低的主要因素有^[6-7]: 1)由无辐射俄歇复合引起的载流子损失;2)注入到有源区的载流子从有源区越过异质结势垒泄漏到限制层中,简称载流子泄露^[8];3)价带间光吸收引起的光损耗;4)界面和缺陷引起的无辐射复合。

当半导体激光二极管高功率输出时,主要是有源区载流子的泄漏导致发光效率变差、激光器阈值电流增加、特征温度减小。为了抑制高功率输出时有源区载流子的泄漏,本文在有源区两侧势垒层和波导层之间各引入一层高禁带宽度的 GaAsP,用于提高器件的特征温度,改善器件的可靠性。

2 外延生长与器件制备

采用德国 AIXTRON 公司生产的金属有机物化学气相沉积(MOCVD)设备进行芯片的外延生长,激光二极管外延结构参数如表 1 所示。外延生长在衬底 N-GaAs 的(100)方向上进行,首先沉积 0.35 μm 厚的 N-GaAs 缓冲层和 0.18 μm 厚的 N-Al_{0.15~0.3}Ga_{0.85~0.7}As 过渡层,均采用 Si 掺杂,且掺杂粒子数浓度均约为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,主要是为了解决衬底与外延层之间晶格失配的问题。下限制层为 2.55 μm 厚的 N-Al_{0.3}Ga_{0.7}As,采用 Si 掺杂,掺杂粒子数浓度约为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,上限制层为 1.3 μm 厚的 P-Al_{0.3}Ga_{0.7}As,采用 Be 掺杂,掺杂粒子数浓度约

为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,上、下限制层起到限制载流子和光子的作用;上、下波导层均为未掺杂的 0.3 μm 厚的 Al_{0.255}Ga_{0.745}As;上、下势垒层均为 0.04 μm 厚的 Al_{0.154~0.255}Ga_{0.846~0.745}As;在上、下波导层与势垒层之间引入 0.02 μm 厚的高禁带宽度的 GaAsP,用于抑制器件高功率输出时有源区载流子的泄漏;有源层为 0.008 μm 的 AlGaInAs,其属于宽带隙材料,它的俄歇复合率和自旋-轨道裂矩带向重空穴带的跃迁概率都小于窄带隙材料,有利于提高 T_0 值;在上限制层上生长 0.25 μm 厚的 P-GaAs 作为欧姆接触层,采用 Be 掺杂,掺杂粒子数浓度约为 $0.1 \times 10^{19} \sim 2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 。激光器的预设波长为 975 nm。外延生长结束后,用光刻、腐蚀等工艺在外延片上形成脊形波导(宽度为 200 μm);再利用等离子体增强型化学气相沉积(PECVD)生长厚度约为 150 nm 的 SiO₂ 介质膜(作为电绝缘隔离层);在脊形波导上腐蚀出 P 型电极窗口后再进行热蒸发 Ti/Pt/Au,形成 P 型欧姆接触电极;将外延片的衬底减薄至 120 μm 后蒸发 Au/Ge/Ni,形成 N 型欧姆接触电极。合金温度为 420 $^{\circ}\text{C}$,合金气氛为氮气和氢气,经解理形成不同长度的激光器芯片。接下来对激光器腔面进行镀膜,前腔面镀增透膜(SiO₂/TiO₂,反射率 $R < 2\%$),后腔面镀高反膜(Si/Al₂O₃,反射率 $R > 98\%$)。最后经烧焊、引线键合等工艺,将激光器管芯封装到 AlN 次热沉上,并对其相关特性进行测试。

表 1 激光二极管外延结构参数

Table 1 Parameters of laser diode epitaxial structure

Layer order	Name	Material	Thickness / μm	Doped / cm^{-3}
12	Ohmic contact	P-GaAs	0.25	Be, $0.1 \times 10^{19} \sim 2.0 \times 10^{19}$
11	Upper confinement	P-Al _{0.3} Ga _{0.7} As	1.3	Be, $\sim 1.0 \times 10^{18}$
10	Upper waveguide	Al _{0.255} Ga _{0.745} As	0.3	Not doped
9	High gap layer	GaAsP	0.02	Not doped
8	Barrier	Al _{0.154~0.255} Ga _{0.846~0.745} As	0.04	Not doped
7	Active region	AlGaInAs	0.008	Not doped
6	Barrier	Al _{0.154~0.255} Ga _{0.846~0.745} As	0.04	Not doped
5	High gap layer	GaAsP	0.02	Not doped
4	Lower waveguide	Al _{0.255} Ga _{0.745} As	0.3	Not doped
3	Lower confinement	N-Al _{0.3} Ga _{0.7} As	2.55	Si, $\sim 1.0 \times 10^{18}$
2	Transition layer	N-Al _{0.15~0.3} Ga _{0.85~0.7} As	0.18	Si, $\sim 1.0 \times 10^{18}$
1	Buffer layer	N-GaAs	0.35	Si, $\sim 1.0 \times 10^{18}$
0	Substrate	N-GaAs	350	—

3 器件测试与结果分析

为了提高器件的性能,改善激光二极管的可靠性,在有源区两侧势垒层和波导层之间各引入一层

高禁带宽度的 GaAsP,用于抑制器件高功率输出时有源区载流子的泄漏。三元 III-V 族半导体化合物 Al_xGa_{1-x}As 的带隙宽度 W 同组分之间的关系为^[9]

$$W = 1.424 + 1.247 \times x \quad (0 < x < 0.45), \quad (1)$$

式中:1.42、1.247 的单位为 eV。

势垒层 $\text{Al}_{0.154\sim 0.255}\text{Ga}_{0.846\sim 0.745}\text{As}$ 的禁带宽度为 1.616~1.742 eV,而 GaAsP 的禁带宽度为 1.9 eV,因此有源区中的载流子越过 GaAsP 需要更高的能量,从而可以有效地抑制器件在高功率输出时载流子越过势垒进入限制层产生无辐射复合,提高了器件性能。

3.1 光电特性

半导体激光二极管封装完成后,首先对其光电特性进行测试。将封装到 AlN 次热沉上的条宽 200 μm 、腔长 2000 μm 的器件放到半导体激光器综合测试仪上进行测试,控制测试温度为 25 $^{\circ}\text{C}$ 。 P - I - V 特性曲线如图 1 所示。从图 1 中可以看出,其 V - I 曲线呈典型的二极管伏-安特性。受激发射的阈值电流为 0.8 A,小于阈值时半导体激光二极管为发光二极管模式,大于阈值时为激光模式;当注入电流小于 14 A 时,半导体激光二极管中没有出现热饱和现象;注入电流大于 14 A 时,半导体激光二极管中发生了轻微的热饱和;注入电流到达 16 A 时,也并未发生器件失效。而对于传统的未在有源区两侧引入高禁带宽度 GaAsP 的激光器,注入电流大于 10 A 时已经可以观察到明显的热饱和现象,注入电流大于 14 A 时器件发生失效。从图 1 的 P - I 特性测试结果分析可知,在有源区两侧势垒层和波导层之间引入的高禁带宽度 GaAsP 有效地抑制了有源区载流子的泄漏,热饱和与热失效功率均得到了显著的提高,因此激光二极管可以得到更高的输出功率。在 25 $^{\circ}\text{C}$ 下:半导体激光二极管可靠性工作的最大输出功率在注入电流为 14 A 时取得,为 14.4 W;器件最大电-光转换效率在注入电流为 7 A 时取得,为 71.8%,斜率效率为 1.21 W/A。在 25 $^{\circ}\text{C}$ 条件下,半导体激光二极管在最大输出功率下可靠性工作时的光谱如图 2 所示,峰值波长为 973.2 nm。

3.2 温度特性

温度特性主要是指阈值电流 I_{th} 与温度 T 的关系^[10],即

$$I_{\text{th}}(T) = I_{\text{th}}(T_1) \times \exp[(T - T_1)/T_0], \quad (2)$$

式中: $I_{\text{th}}(T)$ 和 $I_{\text{th}}(T_1)$ 为不同温度 T 和 T_1 对应的阈值电流。通过测出不同温度 T 和 T_1 对应的阈值电流 $I_{\text{th}}(T)$ 和 $I_{\text{th}}(T_1)$,然后将它们带入(2)式,计算出特征温度 T_0 ,由 T_0 值的大小来衡量器件的温度稳定性。显然, T_0 值越大, I_{th} 随温度变化越小,器件温度稳定性越好。随着温度的升高,半导体激光二极管的阈值电流增大,输出功率减小,微分功率

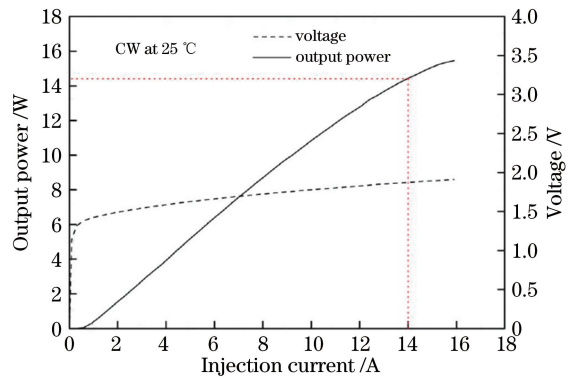


图 1 半导体激光二极管 P - I - V 特性曲线

Fig. 1 Semiconductor laser diode P - I - V characteristic curves

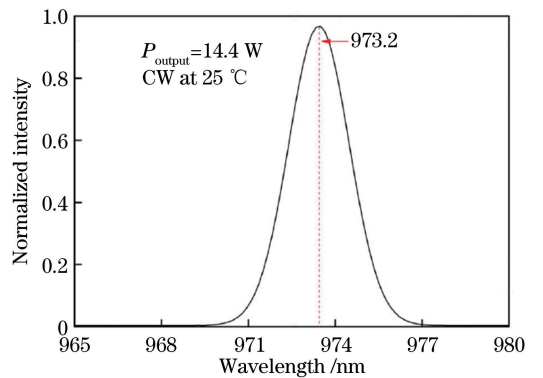


图 2 最大输出功率时的光谱

Fig. 2 Spectrum at maximum output power

效率也减小,导致器件出现热饱和现象。温度对阈值电流的影响主要来自三个方面:增益系数、内量子效率和内部损耗。在不同的温度范围内, T_0 具有不同的值。

为了得出 T_0 的值,将条宽 200 μm 、腔长 2000 μm 的激光器管芯封装在 AlN 次热沉上,然后将器件放到测试平台上进行变温测试,得到不同温度下的阈值电流。测试平台的温度由水冷机进行控制,温度偏差为 ± 1 $^{\circ}\text{C}$ 。图 3 所示为半导体激光二极管连续工作(CW)时阈值电流同温度的关系曲线。从图 3 中可以看出,半导体激光二极管的阈值电流随温度的增加而增加。当温度从 10 $^{\circ}\text{C}$ 上升至 20 $^{\circ}\text{C}$ 时,阈值电流上升了 0.02 A;当温度从 20 $^{\circ}\text{C}$ 上升至 30 $^{\circ}\text{C}$ 时,阈值电流上升了 0.05 A;而当温度从 30 $^{\circ}\text{C}$ 上升至 40 $^{\circ}\text{C}$ 时,阈值电流上升了 0.06 A。说明随着温度的逐步升高,阈值电流上升得越快。这是因为在高温段范围内注入到有源区的少数载流子泄漏到与注入一侧相反的区域,成为无效电流,从而使器件的发光效率下降,阈值电流增加。在高功率输出时,随着器件温度升高,这种现象更加明显。实

验中,通过在器件有源区两侧势垒层和波导层之间各引入一层高禁带宽度的 GaAsP,加强对注入载流子的限制作用,极大地降低了半导体激光二极管在高功率输出时电流的泄漏,在 10~40 °C 温度范围内器件的特征温度高达 -75.76 °C (197.37 K),远高于普通量子阱激光器的 150 K^[11-12]。

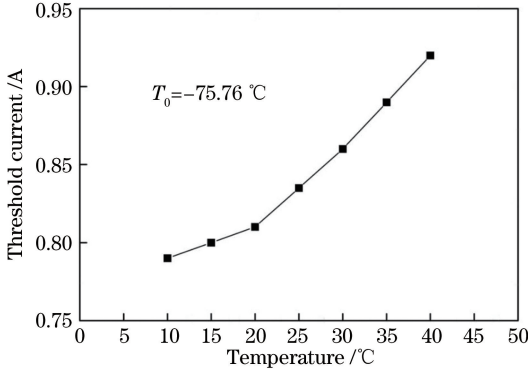


图 3 半导体激光二极管的阈值电流同温度的关系
Fig. 3 Relationship between threshold current and temperature of semiconductor laser diode

温度升高不仅会导致半导体激光二极管的阈值电流上升,输出功率降低,还会引起峰值波长的变化。对于一些特殊的应用,如泵浦光纤激光器等,由于增益材料增益谱的限制,激光器峰值波长变化越小越好。图 4 所示为激光器峰值波长随温度的变化曲线。从图 4 中可以看出,在器件连续输出功率为 15 W 的条件下,测试温度从 10 °C 上升至 40 °C 时,激光器峰值波长从 969.6 nm 红移到 975.8 nm,峰值波长随温度的变化率为 0.207 nm/°C。同时,从图 4 中可以看出,随着温度的升高,激光二极管线宽变窄,分析是因为半导体激光二极管在工作时会产生大量的热,这些热量没能够及时散发出去,导致器件有源区温度升高,出现热透镜现象,对激光束产生了会聚效应。

3.3 退化与寿命特性

任何半导体器件都会退化甚至损坏,半导体激光器也是如此,因此激光器的退化机制和延长寿命一直是激光二极管的重要研究课题。随着对退化机制认识的不断深入和外延生长等制作工艺的进步,如今激光器的寿命已经得到了极大的改善。半导体激光器的退化坑可分为灾变性损坏、快退化和慢退化三种^[13]。为了解决上述问题,可采用加大出光面积、选择适当的工作电流、避免过高的输出功率、端面蒸镀增透介质膜、减少端面处光吸收、加强热沉散热,以及降低器件发热等措施。

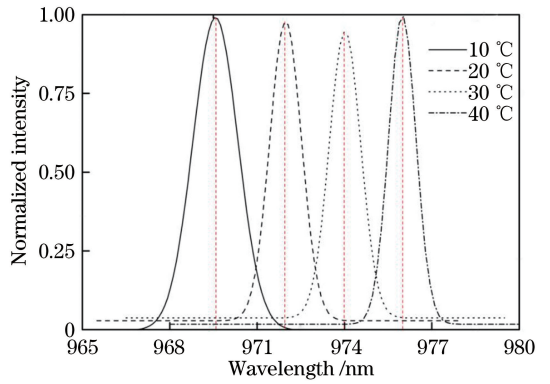


图 4 半导体激光二极管峰值波长随温度的变化
Fig. 4 Semiconductor laser diode peak wavelength versus temperature

有两种定义工作寿命的方法^[14]: 1) 当激光器在额定工作电流下连续工作时,输出功率下降到原始值的 80% 所需的时间; 2) 当激光器在额定功率下连续工作时,工作电流上升到原始值的 120% 所需的时间。前者采用恒流控制,后者采用恒功率控制。本文采用第一种方法对器件进行加速老化测试,额定工作电流 $I_f = 14$ A, 老化温度 $T = 20$ °C, 其结果如图 5 所示。实验中,共使用 10 支半导体激光二极管单管进行加速老化测试,仅有一支单管在老化初期(约 100 h)观察到快退化现象,其余 9 支单管完成了整个老化测试(共计 960 h),并未观察到灾变性损坏,器件工作寿命达 20000 h 以上。导致半导体激光器退化和失效的因素很多,一些因素是可以避免的,但也有一些是不可避免的,如腔面退化。为了保证半导体激光器的长寿命,必须根据振动、冲击、湿度、静电、高温和低温等一系列标准进行测试。在所有的可靠性实验中,最重要、最耗时的是寿命实验。市场上大规模生产的半导体激光器必须通过所有的可靠性鉴定实验才能实现应用。

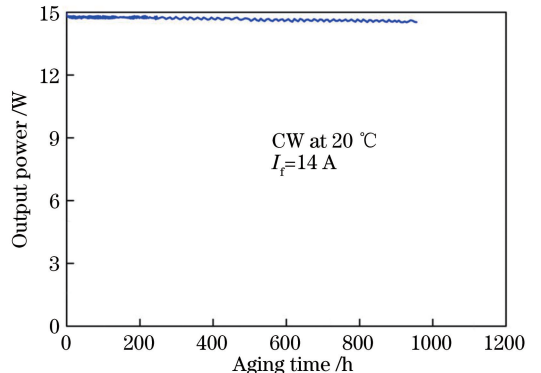


图 5 9XX nm 激光二极管老化特性曲线
Fig. 5 9XX nm laser diode aging characteristic curve

4 结 论

本文从 9XX nm 半导体激光二极管的外延结构出发,通过在有源区两侧势垒层和波导层之间各引入一层高禁带宽度的 GaAsP,抑制了器件高功率输出时有源区载流子的泄漏,提高了激光器输出功率,改善了器件稳定性。重点分析了器件的光电特性、温度特性,及退化与寿命特性。结果显示:通过调整外延结构,器件热饱和功率得到了显著的提升;在 10~40 °C 温度范围内器件特征温度从原来的 150 K 提高至 197.37 K(-75.76 °C);条宽 200 μm 、腔长 2000 μm 的激光二极管可靠性工作的最大输出功率高达 14.4 W,工作寿命长达 20000 h 以上。

参 考 文 献

- [1] Crump P, Frevert C, Bugge F, et al. Progress in high-energy-class diode laser pump sources [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9348: 93480U.
- [2] Kageyama N, Torii K, Morita T, et al. Efficient and reliable high-power laser diode bars with low-smile implementation [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2012, 48(8): 991-994.
- [3] Zucker E, Zou D, Zavala L, et al. Advancements in laser diode chip and packaging technologies for application in kW-class fiber laser pumping [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 8965: 896507.
- [4] Chen X J, Zhao G R, Dong D D, et al. Microstructure and mechanical properties of Inconel625 superalloy fabricated by selective laser melting [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(12): 1202002.
陈秀娟, 赵国瑞, 董东东, 等. 选区激光熔化制造 Inconel625 高温合金的组织 and 力学性能 [J]. 中国激光, 2019, 46(12): 1202002.
- [5] Du W Z, Huang T, Cao Z, et al. Galvanometer scanning laser-micro-welding of AISI304 stainless-steel foil [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(11): 1102006.
杜伟哲, 黄婷, 曹政, 等. AISI304 不锈钢箔振镜扫描激光微焊接工艺 [J]. 中国激光, 2019, 46(11): 1102006.
- [6] Liu C L. The research of high characteristic temperature AlInGaAs/AlGaAs strained quantum well lasers [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2004: 5-21.
刘春玲. 高特征温度 AlInGaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器的研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2004: 5-21.
- [7] Naito H, Nagakura T, Torii K, et al. Long-term reliability of 915-nm broad-area laser diodes under 20-W CW operation [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(15): 1660-1662.
- [8] Wu C M, Yang E S. Physical mechanisms of carrier leakage in DH injection lasers [J]. Journal of Applied Physics, 1978, 49(6): 3114-3117.
- [9] Yu J Z. Semiconductor photonics [M]. Beijing: Science Press, 2015: 136-166.
余金中. 半导体光子学 [M]. 北京: 科学出版社, 2015: 136-166.
- [10] Akahane K, Yamamoto N, Kawanishi T. High characteristic temperature of highly stacked quantum-dot laser for 1.55- μm band [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(2): 103-105.
- [11] Wang D. The design of high characteristic temperature and high power strained quantum well semiconductor lasers [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2004: 5-21.
王丹. 高特征温度大功率应变量子阱半导体激光器设计研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2004: 5-21.
- [12] Zubov F I, Semenova E S, Kulkova I V, et al. On the high characteristic temperature of an InAs/GaAs/InGaAsP QD laser with an emission wavelength of $\sim 1.5 \mu\text{m}$ on an InP substrate [J]. Semiconductors, 2017, 51(10): 1332-1336.
- [13] Fukuda M, Kadota Y, Uehara S. Semiconductor lasers for optical subscriber systems [J]. Review of the Electrical Communication Laboratories, 1986, 34(1): 119-124.
- [14] Liu X S, Zhao W, Xiong L L, et al. Packaging of high power semiconductor lasers [M]. New York: Springer, 2015.