

大功率半导体激光器波导热透镜效应及 对慢轴光束发散角的影响

宋健, 高欣, 闫宏宇, 张晓磊, 张哲铭, 徐雨萌, 顾华欣, 刘力宁, 薄报学*

长春理工大学高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022

摘要 模拟分析了大功率半导体激光器的稳态温度场,通过温度场计算半导体激光器的热透镜焦距及其对慢轴发散角的变化量,并获得半导体激光器的热功率及其关系。分析表明,相同条件下热功率与热透镜焦距近似为反比关系,与慢轴光束发散角近似为线性关系。当热功率达到 10 W 时,热透镜焦距为 568 μm ,慢轴发散角增加约 10° 。实验测量了不同工作电流条件下激光器的慢轴发散角,结果显示模拟值与实验值基本一致。

关键词 激光器; 半导体激光器; 热透镜; 热分析; 慢轴发散角

中图分类号 TN248.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1005004

Thermal Lens Effect of High Power Semiconductor Laser Waveguide and Its Influence on Beam Divergence Angle of Slow Axis

Song Jian, Gao Xin, Yan Hongyu, Zhang Xiaolei, Zhang Zheming,

Xu Yumeng, Gu Huaxin, Liu Lining, Bo Baoxue*

State Key Laboratory of High Power Semiconductor Laser, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China

Abstract The steady-state temperature distribution of high-power semiconductor lasers is simulated, the thermal lens focal length and the variation of the slow axis divergence angle are calculated with the temperature distribution under different thermal power conditions. Results show that, under the same conditions the thermal power and the thermal lens focal length are approximately inversely proportional, and the slow axis divergence angle is approximately linear with thermal power. When the thermal power reaches 10 W, the thermal lens focal length is 568 μm , and the slow axis divergence angle increases about 10° . The slow axis divergence angle of the laser under different working current conditions is measured and the results show that the simulated values are consistent with the experimental values.

Key words lasers; semiconductor laser; thermal lens; thermal analysis; slow axis divergence angle

OCIS codes 140.5960; 350.6830

1 引言

高功率半导体激光器因其体积小、质量轻、电光转换效率高、功率密度高、性能稳定,以及寿命长等优点,已经成为光电行业中最具有发展前景的激光器产品之一,在工业、医疗、军事,以及直接的材料处理等领域被广泛应用^[1-4]。高功率半导体激光器通

常采用宽条形结构,由于光学灾变损伤(COMD)等因素的影响,其最大输出功率受到限制^[5-6]。随着器件制备工艺水平的提高,激光器的输出功率和光束质量获得大幅提升,应用领域也进一步扩大^[7]。但是受到激光器电光效率的限制,输出功率的增大会使器件的温度分布出现明显不均匀性,从而引发慢轴方向波导的热透镜效应,导致高阶模增加、激光自

收稿日期: 2018-03-16; 修回日期: 2018-04-17; 录用日期: 2018-05-21

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0405100)、国家自然科学基金(61774024)、吉林省科技发展计划(20150203007GX,20160203017GX,20170101047JC,20170203014GX)

* E-mail: bbx@cust.edu.cn

聚焦、发散角增大等不利影响^[8]。热透镜效应在固体激光器中已有较多研究,会对激光输出特性产生不利影响,针对此问题,众多学者进行了分析并提出了优化方案,但对宽条形大功率半导体激光器热透镜效应的研究仍然不足。Bendow 等^[9-10]对受热固体激光晶体的热透镜效应进行研究发现,热透镜效应与受热功率、材料的几何形状及晶体相关的热特性参数有关。Rieprich 等^[11]通过测量半导体激光器光斑的光参数积(BPP)来定量计算热透镜效应对光束发散角的影响。半导体激光器相对固体激光器具有更小的波导尺寸及结构非对称性,难以通过简单的模型进行简化分析并获得解析解。本文通过热分析,得到激光器有源区平行结平面方向的温度分布,并根据此分布拟合了热透镜效应相关的热焦距及光束发散角变化,得出了大功率半导体激光器热透镜效应对波导特性的影响规律。

2 半导体激光器慢轴光束发散角的影响机理

2.1 半导体激光器的热源及热分析

半导体激光器虽然相比其他类型激光器转化效率较高,但是对于大多数半导体激光器器件,转换效率约为 50%,即近一半的输入功率转化为其他形式能量,主要表现为热能。半导体激光器的废热主要有以下来源^[12]。

1) 有源区电子和空穴的非辐射复合,即辐射吸收和自发辐射的热流密度 Q_1 :

$$Q_1 = \frac{V_j(1 - \eta_{sp}f_{sp})}{d_a} [j_{th} + (j - j_{th})(1 - \eta_i)]. \quad (1)$$

2) 除有源区外,各层通过电流时引起焦耳热的热流密度 Q_2 :

$$Q_2 = j^2 \rho_j. \quad (2)$$

在(1)式和(2)式中: d_a 为有源区厚度; V_j 为PN结上的电压降; j 为注入电流密度; j_{th} 为阈值电流密度; η_{sp} 为自发辐射内量子效率; η_i 为受激辐射内量子效率; f_{sp} 为自发辐射光子从有源区的逃逸因子; ρ_j 为各层的电阻率。以上产生的热量主要经过热沉传导,使半导体激光器工作时温度不会过高。稳定工作时,热量传导遵循以下稳态热传导方程:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = -\frac{Q}{K}, \quad (3)$$

式中 T 为温度, Q 为热功率密度, K 为材料的导热系数。采用的激光器封装结构如图 1 所示。

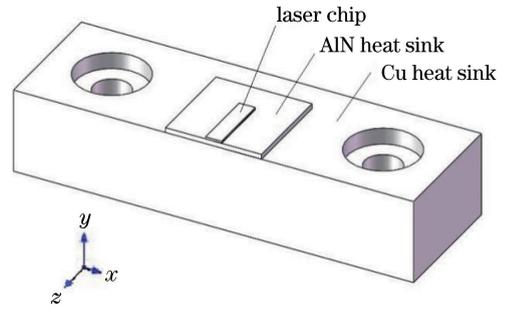


图 1 大功率半导体激光器封装结构

Fig. 1 Packaging structure for high power diode lasers

针对该模型建立坐标系, x 轴为平行结平面方向(即慢轴方向), y 轴为垂直结平面方向(即快轴方向), z 轴为谐振腔方向(即激光出射方向), 并建立以下假设。

1) 所有分析都是基于阈值电流以上的情形。激光器工作时, 热量主要来自于有源区载流子辐射复合、吸收及非辐射复合, 并根据实验器件合理地模拟体电阻的焦耳热, 其他区域产生的热量忽略不计。

2) 忽略激光器、热沉与空气接触的热对流和热传导。

2.2 慢轴光束发散角的影响因素

半导体激光器慢轴光束发散角主要与慢轴方向的材料折射率分布和载流子浓度分布有关, 而载流子浓度又直接影响波导的折射率变化。对于一般的条形激光器, 慢轴方向的折射率分布可以近似为缓变波导。温度、载流子浓度对材料折射率的变化关系为

$$\Delta n = \frac{\partial n}{\partial T} \Delta T - a_{fc} \cdot \Delta N_{fc}, \quad (4)$$

式中 Δn 为折射率变化量, ΔT 为温度变化量, $\partial n / \partial T$ 为温度折射率系数, a_{fc} 为载流子折射率系数, ΔN_{fc} 为载流子浓度变化量。在 GaAs 中 $\partial n / \partial T$ 一般取 $3.7 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, a_{fc} 一般取 $1.2 \times 10^{-20} \text{ cm}^3$ 。激光器高功率工作的结温通常大于 $25 \text{ }^\circ\text{C}$, 温度导致的折射率增加量约为 0.01, 激光器的阈值载流子密度约在 10^{18} cm^{-3} 量级, 由此载流子注入引起的折射率变化量约为 0.001; 因此, 激光器高功率工作时的热透镜效应对侧向波导具有相对更大的影响。

2.3 梯度折射率和热透镜效应

半导体激光器热透镜效应的主要原因是非均匀温度场导致的折射率分布不均匀^[13]。根据梯度折射率(GRIN)光学的相关理论^[14]可知, 折射率呈钟形分布(中心高、两侧低)时, 对光束的传输可以等效为自聚焦透镜, 该自聚焦透镜对激光器波导的影响

可以等效为一凸透镜,其焦距也就是等效凸透镜的焦距。通过计算可以得到孔径角,此孔径角可近似为热透镜效应导致的发散角变化量。这种近似的几

何分析方法已在固体激光器的分析中得到应用^[15-19]。自聚焦透镜和凸透镜对光束的传输特性如图 2 所示。

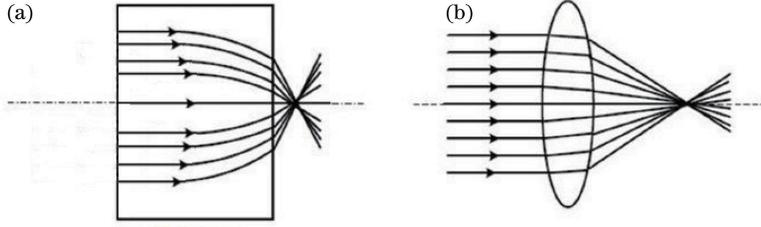


图 2 (a)自聚焦透镜和(b)普通透镜的光束传输

Fig. 2 Schematic of (a) GRIN lens and (b) ordinary lens

当折射率分布为二次函数分布时,可以表示为^[14]

$$n_{(x)}^2 = n_0^2(1 - \alpha^2 x^2), \quad (5)$$

式中 $n_{(x)}$ 为折射率分布, n_0 为初始折射率,对于 GaAs 基波导材料一般为 $3.59^{[20]}$ 。 α^2 决定折射率分布的不均匀程度。当 $\alpha^2 > 0$ 时,该自聚焦透镜具有正透镜效应,对传输光产生会聚作用,其焦距可以表示为

$$f = \frac{1}{n_0 \alpha \sin(\alpha l)}, \quad (6)$$

式中 l 为自聚焦透镜的厚度。宽条形半导体激光器侧向波导的热透镜效应可以近似通过等效透镜对低发散角高斯光束发散角的影响来定量评估热透镜效应导致的发散角变化。根据几何光学,慢轴发散角

的增加可表示为

$$\theta = \frac{180}{\pi} \arctan\left(\frac{w}{2f}\right), \quad (7)$$

式中 θ 为发散角变化量, w 为有源区侧向宽度。这样就建立了不同工作条件下的激光器结温与热透镜焦距、慢轴发散角增加量的近似关系。

3 热透镜效应模拟及结果分析

3.1 热透镜效应的模拟分析

通过 Ansys 模拟了典型宽条形激光器在不同热功率条件下的温度分布,并计算获得对应温度分布的热透镜焦距和慢轴发散角的变化量。热特性分析所需的各材料参数如表 1 所示。

表 1 激光器各材料参数

Table 1 Material parameters of lasers

Various parts of the LD	Size / (mm × mm × mm)	Material	Thermal conductivity / (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)
Cu heat sink	25 × 8.1 × 5.1	Cu	398
AlN heat sink	6 × 6 × 0.3	AlN	180
Laser chip	4 × 1 × 0.12	GaAs	55
AuSn/Au	4 × 1 × 0.003	AuSn	57

当激光器热功率达到 10 W 时,半导体激光器芯片前腔面温度分布如图 3 所示。

由图 3 可知,激光器温度最高点位于有源区内,

芯片前腔面的温度分布沿慢轴方向近似对称分布,温度从有源区中心向两侧逐渐降低。由平行结平面方向的温度分布数据,作出拟合曲线如图 4 所示。

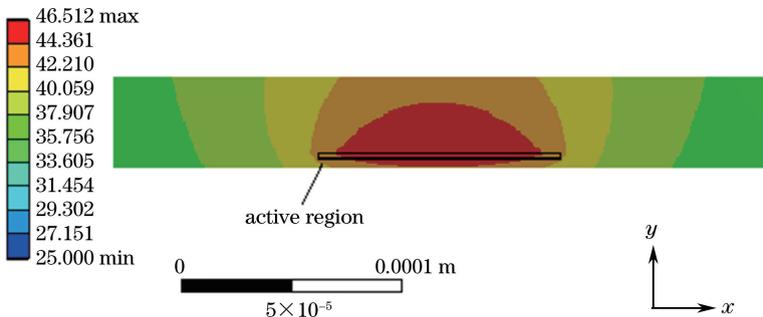


图 3 激光器热功率 10 W 时芯片前腔面温度分布

Fig. 3 Temperature distribution of chip front cavity surface at laser thermal power of 10 W

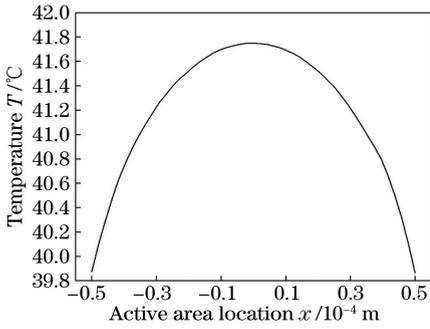


图 4 激光器条形区沿慢轴方向的结温分布

Fig. 4 Junction temperature distribution along slow axis direction in laser bar area

由图 4 的拟合曲线可知,有源区内沿慢轴方向的温度分布可以拟合成二次函数曲线,从而可方便

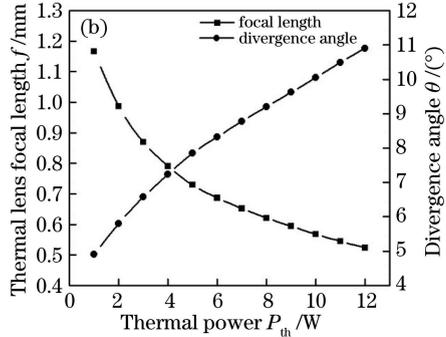
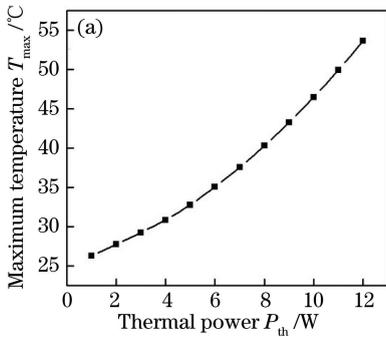


图 5 激光器热功率与(a)中心结温度和(b)热透镜焦距及发散角的变化关系

Fig. 5 Relationship between laser thermal power and (a) central junction temperature and (b) thermal lens focal length and divergence angle

3.2 实验结果及比较

为了与模拟结果进行比较,实验采用上述封装的 975 nm 波长宽条形半导体激光器,激光器注入区条宽为 100 μm ,腔长为 4000 μm ,测量其在连续电流条件下工作时的远场特性。通过调整电流的大小,得到工作电流在 1~12 A 时半导体激光器的光谱和光功率-工作电流-工作电压(P - I - V)测试结果。同时,通过中心波长随激光器结温的变化数值拟合出封装激光器的波长温漂系数(约为 0.3 nm/ $^{\circ}\text{C}$),进而计算出该封装激光器的结温升。测得的激光器工作电流 I 与中心波长 λ 、工作电压 U 和光功率 P_{opt} 的关系曲线及 10 A 工作时的远场光斑三维强度分布如图 6 所示。

由图 6(a)、(c)可知,激光器中心波长、光功率均随工作电流的增加而增大,可以近似拟合为线性关系。由图 6(d)可知,远场激光光斑近似为椭圆形状,而且相对强度在快慢轴方向均可以近似为高斯分布。实验得到的慢轴发散角($1/e^2$ 高度位置)与模拟热透镜效应获得的发散角增加量的对比曲线如图

地获得热透镜焦距和热致光束发散角的变化。通过改变激光器热功率的大小,得到激光器热功率与器件最高结温的对应关系。通过(4)~(7)式得到热透镜焦距、热致光束发散角变化与激光器热功率的依赖关系,如图 5 所示。

由图 5 可知,激光器最高结温随热功率的升高而增大,计算得到的热透镜焦距随热功率的升高而减小,从而使得慢轴发散角随热功率的升高而增大。当激光器热功率为 10 W 时,器件发光区中心的结温达到 46.5 $^{\circ}\text{C}$,其边缘与中心的温差达到 1.9 $^{\circ}\text{C}$,热透镜焦距约 568 μm ,慢轴发散角增加约 10 $^{\circ}$ 。由此可见,器件高功率工作时,半导体激光器的热透镜效应对侧向波导的影响很大,使慢轴发散角明显增加。

7 所示。

由图 7 可知,实测慢轴发散角随工作电流的增加而增大,可以近似为线性关系。在工作电流为 7 A 时曲线出现局部下降,而且在实测光束发散角与模拟热透镜效应导致发散角变化的对比中发现,工作电流低于 7 A 时的实测值大于模拟值,而工作电流大于 7 A 时的模拟值大于实测值。

4 结果讨论

4.1 热透镜效应分析

从模拟结果可以看出,激光器工作时的中心结温随热功率的增加而增加,热透镜焦距随之减小,近似呈反比关系,慢轴发散角随之增大,可以近似为线性关系。在激光器芯片封装散热能力不变的前提下,热功率越大,平行结平面方向的温度分布就越陡峭,从而导致侧向折射率分布起伏明显。由于半导体激光器尺寸较小,发光区的热功率密度很高(达到 10^{13} W/ m^3 量级),所以与固体激光器相比,热透镜焦距也相对更短。

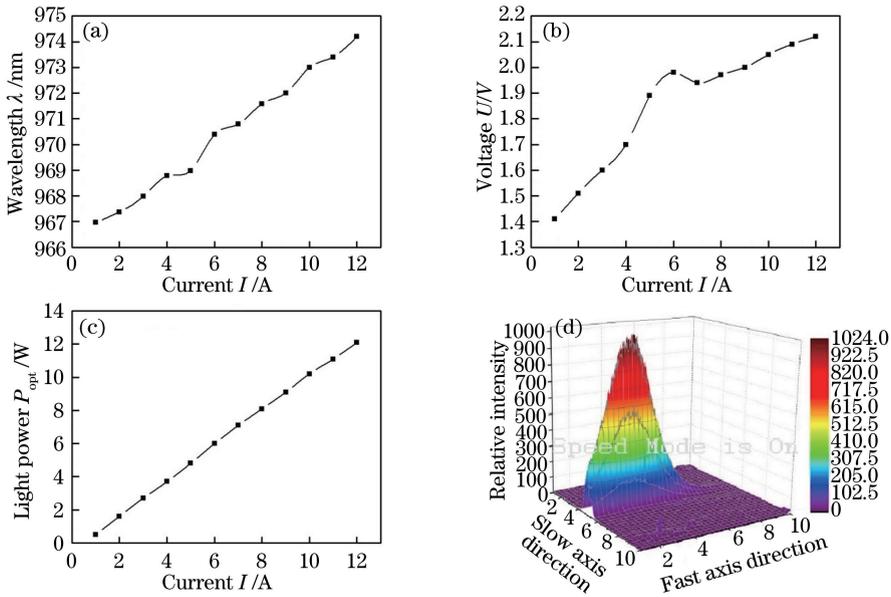


图 6 工作电流与(a)中心波长,(b)工作电压和(c)光功率的关系曲线;
(d)工作电流为 10 A 时光斑三维强度分布

Fig. 6 Relationship between working current and (a) central wavelength, (b) working voltage, and (c) light power in experiment; (d) three-dimensional intensity distribution of light spot at 10 A working current

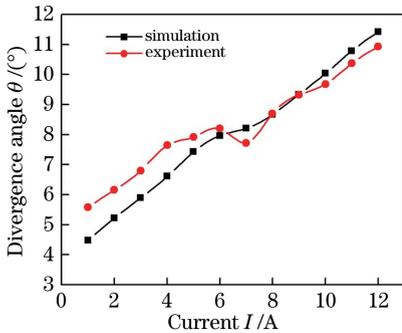


图 7 实测与模拟激光器慢轴发散角随工作电流的变化
Fig. 7 Measured and simulated slow axis divergence angle varies with working current

4.2 实验/模拟结果对比

根据器件的 P - I - V 曲线、光谱测试结果,可以计算得到激光器的串联电阻等参数。由图 6(a)可知,工作电流从 1 A 上升至 12 A 的过程中,激光波长从 967 nm 红移至 974.2 nm,当激光器的波长温漂系数为 0.3 nm/°C 时,计算得到有源区的温升从 1.9 °C 提升至 26 °C,这与模拟温升从 1.3 °C 提升至 25.6 °C 的结果基本吻合。对图 6(b)的曲线进行拟合,得到激光器的串联电阻约为 63 m Ω ,其中在 5~7 A 的电压处出现局部扭折(由测试时压触电极与芯片的接触引起)。由图 6(c)可知,工作电流与激光光功率近似为线性关系,得到器件的阈值电流 $I_{th} \approx 0.46$ A。工作电流为 5~8 A 时测试得到的远场光斑如图 8 所示,图片尺寸为 114.1 mm \times 32.9 mm。

由图 8 可知,激光器的远场光斑由多个光丝叠加组成,随着注入电流增大,各光丝的位置和强度也在不断变化,一定程度上反映了不同工作电流下热透镜效应、载流子分布对宽条形激光器侧向波导特性的影响。在工作电流较小(小于 7 A)时,热透镜效应不明显,结温上升引起的折射率变化可能不足以抵消载流子分布对横向波导变化的影响,增益导引机制占据主导作用。有源区中心注入载流子浓度大于注入条两边,使得中心折射率小于两边,产生了反波导效应,光束不完全限制于有源区,会辐射相邻的区域。因此模拟热透镜效应引起的慢轴发散角增加量小于实验测量值(包含了较大比例的载流子注

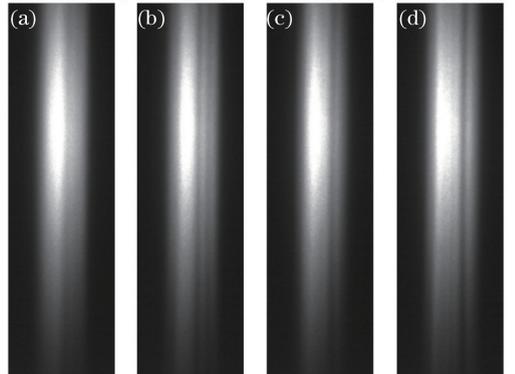


图 8 工作电流分别为(a) 5 A,(b) 6 A,(c) 7 A,
(d) 8 A 时,测试得到的远场光斑

Fig. 8 Far-field patterns measured at working currents of (a) 5 A, (b) 6 A, (c) 7 A, (d) 8 A

入波导效应)。在工作电流较大(大于 7 A)时,由于激光器波导区结温上升明显,不同的波导导引机制开始竞争,同时由图 8 可以看到,部分远场光斑出现跳动,甚至出现随光功率增加发散角反而减小的情况。随着工作电流的进一步增大,芯片内部热量引起的热透镜效应使得有源区中心折射率明显高于两侧,自聚焦效应开始体现,导引机制由增益导引为主完全转变为折射率导引为主。由(4)式可知,芯片内部温度引起的折射率增加会部分被载流子引起的折射率降低所抵消,因而模拟得到的热透镜效应引起的发散角变化量略大于实验测量值。

5 结 论

分析了宽条形大功率半导体激光器的热透镜效应及其对慢轴发散角的影响,定量获得了不同热功率条件下的热透镜焦距和慢轴发散角的变化。通过实验测量了封装激光器的结温和慢轴发散角随工作电流的变化,并对比了其于模拟结果的差异。分析表明,热透镜效应随热功率的升高而变得明显,即随着热功率升高,热透镜焦距变小,慢轴光束发散角变大。因此,实际设计大功率半导体激光器时,在保证激光器电光效率的前提下,可适当通过增加管芯长度和有源区宽度,以及良好的散热封装结构来降低热透镜效应带来的不利影响。

参 考 文 献

- [1] Ou F, Li X Y, Liu B Y, *et al.* Enhanced radiation-loss-based radial-waveguide-coupled electrically pumped microresonator lasers with single-directional output[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(10): 1722-1724.
- [2] Fang J X, Dong S Y, Xu B S, *et al.* Study of stresses of laser metal deposition using FEM considering phase transformation effects[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(5): 0503009.
方金祥,董世运,徐滨士,等.考虑固态相变的激光熔覆成形应力场有限元分析[J].*中国激光*, 2015, 42(5): 0503009.
- [3] Hai Y N, Zou Y G, Tian K, *et al.* Research progress of horizontal cavity surface emitting semiconductor lasers[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(2): 194-206.
海一娜,邹永刚,田锬,等.水平腔面发射半导体激光器研究进展[J].*中国光学*, 2017, 10(2): 194-206.
- [4] Asif K M, Shatalov M, Maruska H P, *et al.* III-nitride UV devices[J]. *Japanese Journal of Applied*

- Physics*, 2005, 44(10): 7191-7206.
- [5] Cheng D M, Song X S, Liu Y, *et al.* Catastrophic optical damage in laser diode [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2002, 23(2): 87-89.
程东明,宋晓舒,刘云,等.半导体激光器中的光学灾变[J].*半导体光电*, 2002, 23(2): 87-89.
- [6] Li P X, Yin F J, Zhang C S, *et al.* 808 nm single emitter high power laser with 13.6 W[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(1): 0101013.
李沛旭,殷方军,张成山,等.808 nm连续输出13.6 W单芯片大功率激光器[J].*中国激光*, 2018, 45(1): 0101013.
- [7] Wang L J, Ning Y Q, Qin L, *et al.* Development of high power diode laser [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, 36(1): 1-19.
王立军,宁永强,秦莉,等.大功率半导体激光器研究进展[J].*发光学报*, 2015, 36(1): 1-19.
- [8] Li D Y, Huang Y Z, Zhu J J, *et al.* Thermal lensing effect in ridge structure InGaN multiple quantum well laser diodes[J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 100(4): 046101.
- [9] Bendow B, Gianino P D. Optics of thermal lensing in solids[J]. *Applied Optics*, 1973, 12(4): 710-718.
- [10] Klein C A. Optical distortion coefficients of high-power laser windows[J]. *Optical Engineering*, 1990, 29(4): 343-350.
- [11] Rieprich J, Winterfeldt M, Tomm J, *et al.* Assessment of factors regulating the thermal lens profile and lateral brightness in high power diode lasers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10085: 1008502.
- [12] Wang W, Gao X, Zhou Z P, *et al.* Steady-state thermal analysis of hundred-watt semiconductor laser with multichip-packaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1438-1443.
王文,高欣,周泽鹏,等.百瓦级多芯片半导体激光器稳态热分析[J].*红外与激光工程*, 2014, 43(5): 1438-1443.
- [13] Guo C Z. Theory of semiconductor lasing mode[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 1989: 69-71.
郭长志.半导体激光模式理论[M].北京:人民邮电出版社, 1989: 69-71.
- [14] Qiao Y T. GRIN optics[M]. Beijing: Science Press, 1991: 98-100.
乔亚天.梯度折射率光学[M].北京:科学出版社, 1991: 98-100.
- [15] Koechner W. Solid-state laser engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002: 363-364.
克希耐尔.固体激光工程[M].北京:科学出版社, 2002: 363-364.
- [16] Li X, Xu X J, Xi F J, *et al.* Measuring thermal focal

- length with a curvature sensor[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(9): 1465-1468.
- 李霄, 许晓军, 刁锋杰, 等. 采用曲率传感器测量热透镜焦距[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(9): 1465-1468.
- [17] Wang S, Liu C, Chen J, *et al.* Influence of resonator structure of solid-state laser on thermal focal length measurement[J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(10): 1431-1435.
- 汪莎, 刘崇, 陈军, 等. 固体激光器腔型结构对热透镜焦距测量的影响[J]. 中国激光, 2007, 34(10): 1431-1435.
- [18] Wen J J. Theoretical analysis on the thermal effects of laser medium[D]. Shanghai: Donghua University, 2008: 31-35.
- 温姣娟. 激光介质热效应的理论分析[D]. 上海: 东华大学, 2008: 31-35.
- [19] Qu P F, Wang S Y, Guo Z, *et al.* Adaptive adjusting technique of thermal effect to laser beam quality [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37 (5): 0514001.
- 屈鹏飞, 王石语, 过振, 等. 热效应对激光器光束质量的自适应调整技术[J]. 光学学报, 2017, 37(5): 0514001.
- [20] Jiang J P. Semiconductor laser [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000: 74.
- 江剑平. 半导体激光器[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000: 74.