

用于半导体激光器的高效率复合波导结构

陈琦鹤, 范 杰, 马晓辉, 王海珠, 石琳琳

(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: 提出了一种高电光转换效率的新型复合波导半导体激光器结构 (Composite Waveguide LD, CWG LD)。该器件结构高的电光转换效率得益于其所采用的 Al 组分阶梯分布 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 波导层。通过优化设计波导层电阻率分布及能带分布, CWG LD 结构在保证输出光功率的同时, 可以有效地降低器件串联电阻并提高电光转换效率。结合理论分析及计算机数值仿真软件, 分析了复合波导提升器件电光转换效率的机理。经优化, 在激光器条宽为 $6\ \mu\text{m}$ 、腔长为 $1\ 000\ \mu\text{m}$ 的情况下, 波导层阶梯数为 1 时 CWG LD 结构可以获得最大的电光转换效率。研究表明: 在注入电流为 900 mA 时, CWG LD 结构的串联电阻由常规波导器件结构的 $3.51\ \Omega$ 降低为 $2.67\ \Omega$, 电光转换效率由 54.7% 提升至 69.5%。

关键词: 半导体激光器; 串联电阻; 电光转换效率; 复合波导

中图分类号: TN248.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1106006

High efficiency composite waveguide structure for semiconductor laser

Chen Qihe, Fan Jie, Ma Xiaohui, Wang Haizhu, Shi Linlin

(State Key Laboratory of High Power Semiconductor Lasers,
Changchun University of Sciences and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: A novel structure of high electro-optic conversion efficiency semiconductor laser with composite waveguide was presented. Because of the $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ waveguide layer with Al component step distribution, the electro-optic conversion efficiency of the device was high. Due to the optimal design of distribution of resistivity and band, the series resistance of the semiconductor laser was reduced while resulting in the improvement of electro-optic conversion efficiency without reducing the optical power. Based on the theoretical analysis and software simulation, the mechanism of the electro-optic conversion efficiency of the composite waveguide was analyzed. In the condition that the laser width was $6\ \mu\text{m}$ and the cavity length was about $1\ 000\ \mu\text{m}$, the material composition distribution was optimized, and a step of the composite waveguide laser could achieve maximum electro-optical conversion efficiency. The results show that the series resistance of the semiconductor laser with composite waveguide is reduced from $3.51\ \Omega$ of the conventional laser structure with conventional waveguide to $2.67\ \Omega$, and the electro-optic conversion efficiency is increased from 54.7% to 69.5% at 900 mA.

Key words: semiconductor laser; series resistance; electro-optic conversion efficiency; composite waveguide

收稿日期: 2017-03-10; 修订日期: 2017-06-20

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(21707010); 长春理工大学青年科学基金(XQNJJ-2015-10); 长春理工大学科技创新基金(XJLJG-2016-07)

作者简介: 陈琦鹤(1993-), 男, 硕士生, 主要从事光电子器件及应用方面的研究。Email: 1203144523@qq.com

通讯作者: 范杰(1982-), 男, 助理研究员, 硕士生导师, 博士, 主要从事光电子器件及应用方面的研究。Email: fanjie@cust.edu.cn

0 引言

半导体激光器作为光电子领域的核心器件之一,具有电光转换效率高、稳定性好、尺寸小、重量轻、寿命长和易于集成等优点^[1-5],在激光通讯、激光显示及泵浦源等领域得到了广泛的应用^[6-9]。近年来,随着相关半导体制备工艺技术的改进和完善,半导体激光器各项性能指标得到了大幅提升,应用领域范围也得到进一步拓宽。其中,具有高电光转换效率的半导体激光器件尤为引人关注。这种半导体激光器件可以降低器件功耗并减小发热量,有利于降低器件的电驱动系统及散热系统成本,实现整体设备的小型化和便携化。因此,在倡导低碳环保的发展趋势下,高电光转换效率的半导体激光器是目前研究的热点之一。2000年,C. Mermeistein 等采用脊型波导结构,实现了 2 μm InGaAsSb/AlGaAsSb 半导体激光器内部损耗的降低,提高了器件输出功率。2015年 Yamagata 等^[7]报道了 915 nm 新型的ADCH (Asymmetric Decoupled Confinement Heterostructure)结构,通过优化光限制因子降低了腔内损耗,实现了激光器电光转换效率的提升。围绕半导体激光器电光转换效率特性,文中提出了一种新型半导体激光器结构,通过理论分析及对波导结构的优化设计,实现了器件电光转换效率的提升。

基于 In_xGa_{1-x}As/GaAs 基 980 nm 量子阱半导体激光器,文中提出一种具有复合波导的新型半导体激光器(CWG LD)结构。该器件结构通过改变波导层 Al_xGa_{1-x}As 材料中 Al 组分掺杂情况,优化了波导层内电阻率分布及能带分布,有效地提高了载流子的注入效率并降低了器件的输入功率。与此同时,CWG LD 结构波导中阶梯分布的折射率可以保证器件内光场分布和输出光功率,最终实现了器件电光转换效率的提升。

1 结构设计

半导体激光器的电光转换效率 η 定义为输出功率 P_{out} 与输入功率 P_{in} 之比,其公式如下:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{IV_s + I^2R} \quad (1)$$

式中: V_s 为激光器有源区正向压降; R 为串联电阻(包括半导体材料的体电阻和电极接触电阻); I 为注入电流。公式(1)表明,可以通过激光器外延材料及器件结构的优化设计降低串联电阻 R , 进而实现器件电光转换效率的提升。

国际上多项研究表明^[10],Al_xGa_{1-x}As 材料的 Al 组分会影响其电阻率和折射率。在半导体激光器的结构设计中,波导层 Al_xGa_{1-x}As 材料的 Al 组分情况将对器件的输出特性造成直接影响。Al_xGa_{1-x}As 材料中,Al 组分的含量与折射率成反比,Al 组分越高,材料的折射率越小。然而,当 Al 组分较高时,材料中的 Al 容易被氧化形成高密度的氧化铝,并在材料中产生深能级缺陷。同时,Al 和 Ga 的原子半径相近,会促使缺陷在材料中延伸扩展,从而形成暗线缺陷和暗点缺陷,导致材料质量的降低和器件可靠性的下降。基于上述研究结果,文中设计了 Al 组分阶梯变化的 Al_xGa_{1-x}As 波导结构,借助计算机数值仿真软件模拟分析了该波导结构影响激光器电光转换效率的机理。模拟中采用的器件外延结构如表 1 所示。

表 1 CWG LD 器件外延结构

Tab.1 Extensional structure of the CWG LD

Layer	Material	Doping/ cm ⁻³	Thickness/ μm	Component/ x
p-cladding layer	Al _x Ga _{1-x} As	1×10 ¹⁸ , P	1	0.7
p-waveguide layer	Al _x Ga _{1-x} As		0.25	0.6-0.1
Barrier layer	GaAs		0.05	
Quantum well	In _x Ga _{1-x} As		0.005	0.236
Barrier	GaAs		0.05	
n-waveguide layer	Al _x Ga _{1-x} As		0.25	0.1-0.6
n-cladding layer	Al _x Ga _{1-x} As	5×10 ¹⁷ , N	1.2	0.7

利用 LASTIP 软件,在固定波导层厚度 0.25 μm 的条件下,令 Al 组分按等厚度进行阶梯分布,因此波导层内折射率将形成如图 1 所示的阶梯分布。图 1 给出了 CWG LD 结构波导内折射率分布示意图,其中波导层内 Al 组分分布的阶梯数 n 为 1,图中同时标出了上波导层(Upper Waveguide Layer, UWL)和下波导层(Lower Waveguide Layer, LWL)的位置。

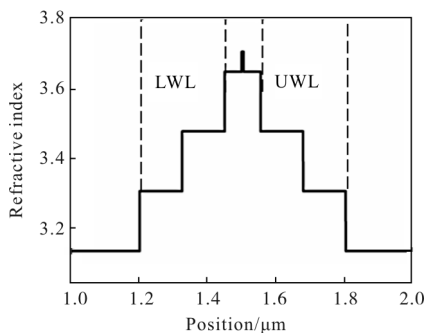


图 1 CWG LD 结构波导内折射率分布示意图($n=1$)

Fig.1 Diagram of refractive index distribution

CWG LD of structure($n=1$)

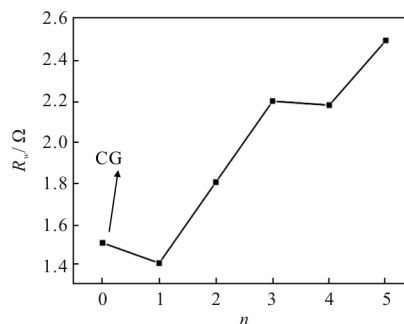


图 2 复合波导层电阻 R_w 与阶梯数 n 之间的关系

Fig.2 Relationship between the resistance R_w and the number n of steps in composite waveguide structure

2 仿真模拟与数据分析

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料中 Al 组分 x 会影响材料的电阻率和能带分布情况, 当 $x > 0.35$ 时 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料从直接带隙变为间接带隙, 材料的电阻率随着 Al 组分的增加急剧增大。V Bareikis 和 R Katilius 等人早在 1999 年就针对 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料 Al 组分与电阻率开展了实验研究^[1]。M. Levinstein 等人对 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料的相关实验数据进行了整理, 并于《半导体参数手册》^[2]中给出了 Al 组分与电阻率的实验数据, 使用 MATLAB 对相关数据进行拟合获得如下方程:

$$\rho = (6.45x^3 + 6.44x^2 - 3.37x + 0.266) \times 10^{11} \quad (2)$$

式中: ρ 为电阻率, 单位为 $\Omega \cdot \text{m}$ 。

阶梯波导层电阻为 R_w 可写为:

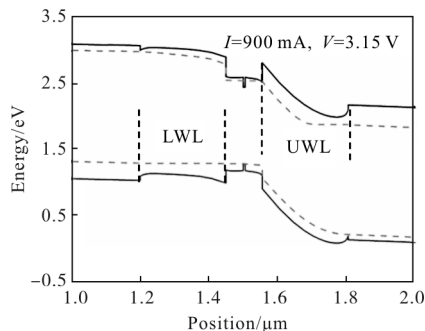
$$R_w = \sum_{i=1}^n R_i = \sum_{i=1}^n \rho_i \cdot \frac{L_i}{S} \quad (3)$$

式中: R_i 和 L_i 分别为波导层内第 i 个阶梯层的电阻和厚度; S 是电流流过的横截面积。在文中研究的结构中, 器件腔长取 $1\ 000\ \mu\text{m}$, 条宽取 $6\ \mu\text{m}$, 计算得 S 为 $6\ 000\ \mu\text{m}^2$ 。

借助 MATLAB 对公式(3)进行计算, 图 2 给出了复合波导层电阻 R_w 与阶梯数 n 之间的关系。当 $n=0$ 时, 复合波导简化为常规波导(Conventional Waveguide, CG)结构。图中数据表明, $n=1$ 的复合波导层电阻 R_w 由常规波导的 $1.52\ \Omega$ 降低至 $1.39\ \Omega$, 此后随着阶梯数 n 的增加 R_w 逐渐增大, 在 $n=5$ 时达到 $2.53\ \Omega$ 。

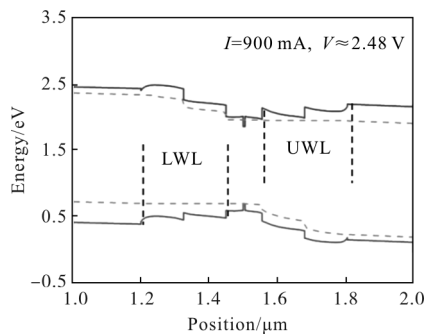
半导体激光器的外延结构中存在多个异质结, 由此形成的能带分布直接影响着注入到有源区的载

流子。借助 LASTIP 软件分别对常规波导器件(CG LD) 结构和 CWG LD 结构的能带分布进行了仿真模拟研究。图 3 给出了工作电流为 $900\ \text{mA}$ 条件下的 CG LD 结构和 CWG LD 结构($n=1$)能带图。在 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料中, 材料禁带宽度随着 Al 组分的变化而改变。因此, 与图 3(a)中所示的 CG LD 结构相比, CWG LD 结构波导层内的能带形成了阶梯分



(a) CG LD 结构能带分布

(a) Distribution of energy band of CG LD



(b) CWG LD 结构能带分布($n=1$)

(b) Distribution of energy band of CWG LD($n=1$)

图 3 $900\ \text{mA}$ 工作电流条件下两种器件结构能带分布

Fig.3 Diagram of energy band of two devices at $900\ \text{mA}$ working current

布,且 Al 组分阶梯越大,其相应位置形成的能带梯度也将越大,如图 3(b)所示。在 CWG LD 结构中,上波导层价带的阶梯分布及下波导层导带的阶梯分布分别有利于空穴和电子向有源区的注入。

研究结果同时表明,在 900 mA 工作电流条件下,CWG LD 结构的正向压降为 2.48 V,明显低于 CG LD 结构的 3.15 V。即在相同工作电流的情况下,CWG LD 结构具有更低的输入功率。

CWG LD 结构波导层 Al 组分分布在影响其电阻率和能带分布的同时,还改变了折射率分布。多项研究均表明,Al_xGa_{1-x}As 材料的折射率与 Al 组分含量有直接关系,Al 组分越大材料的折射率越小。LASTIP 软件中 Al_xGa_{1-x}As 材料折射率 n_{AlGaAs} 与 Al 组分 x 关系如下:

$$n_{AlGaAs}=3.65-0.73x \quad (4)$$

从公式(4)可以看出,材料中 Al 组分和波导层折射率呈现线性反比关系。CG LD 结构的波导层采用 Al_{0.4}Ga_{0.6}As 材料,通过计算可知其折射率为 3.36。而在 CWG LD 结构中,由于波导层材料 Al 组分分布的变化,其折射率将在 3.14~3.58 范围内呈阶梯分布。图 4 分析了 900 mA 工作电流下器件波

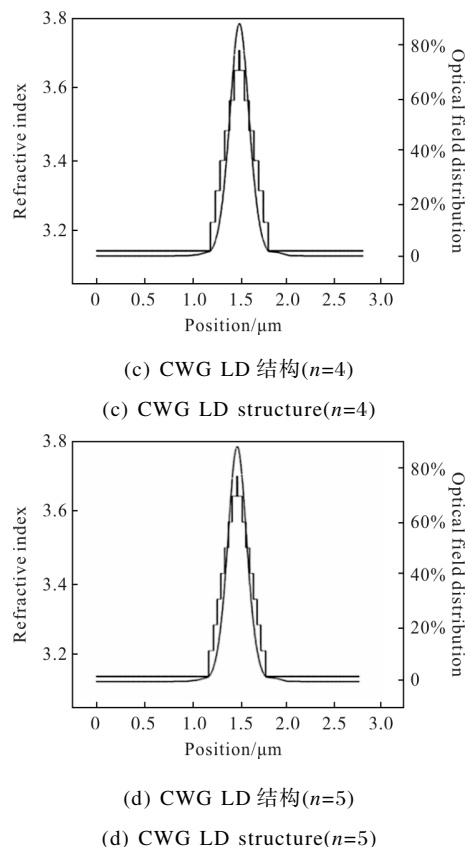
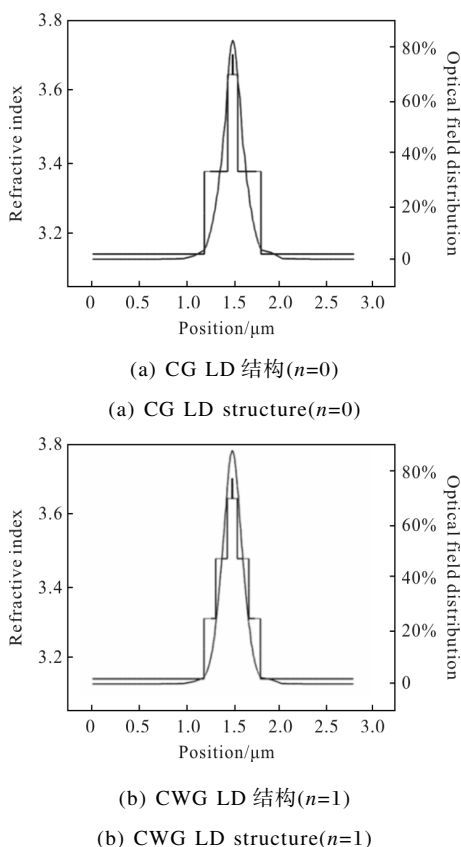


图 4 波导层阶梯数 n 对折射率及光场分布的影响($I=900$ mA)
Fig.4 Effect of the step number n of waveguide on refractive index and optical field distribution at 900 mA

导层阶梯数 n 对折射率与光场分布的影响。如图 4(a) 所示,当 $n=0$ 时即为 CG LD 结构。图 4(b)~(c) 分别为 $n=1, 4$ 和 5 时 CWG LD 结构的折射率和光场分布。通过对比可以看出,波导层折射率分布随着 Al 组分分布的改变呈阶梯分布。同时,虽然 CWG LD 结构改变了波导层折射率分布,但其中的光场分布并没有明显改变,即复合波导结构可以保证其对光场的限制作用。

半导体激光器的输出功率特性是决定其性能好坏的重要参数,半导体激光器的最大输出功率公式^[13]如下:

$$P_{max} = \frac{d}{\Gamma} W \frac{1-R}{1+R} P_{COMD} \quad (5)$$

式中: d 为量子阱厚度; Γ 为光限制因子; W 为条宽; R 为前腔反射率; P_{COMD} 为腔面损伤阈值功率。在 CWG LD 结构中,参数 d, W, R 和 P_{COMD} 均为固定值,此时其最大输出功率直接受光限制因子 Γ 的影响,且呈反比关系。光限制因子 Γ 计算公式^[15]如下:

$$\Gamma = \frac{\int_{\text{active}} U^2(x) dx}{\int_{\text{all}} U^2(x) dx} \quad (6)$$

通过仿真计算,获得了 CWG LD 结构光限制因子随阶梯数 n 的变化关系,如图 5 所示。

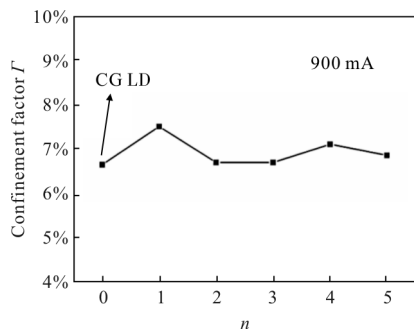


图 5 CWG LD 结构光限制因子 Γ 与阶梯数 n 的关系

Fig.5 Relationship between the confinement factors Γ and the number of steps n in stepped waveguide structure

图 5 表明,CG LD 结构的光限制因子为 6.6%, $n=1$ 时 CWG LD 结构的光限制因子可以提高至 7.5%。此后,随着阶梯数 n 的增加光限制因子略有波动,但变化并不大。根据公式(5)可知,CWG LD 结构可以保证器件的最大输出功率。

在工作电流为 900 mA 的条件下,图 6 给出了波导层阶梯数 n 与器件电光转换效率 η 及串联电阻 R 的关系。图中数据表明,CG LD 结构具有高达 3.51 Ω 的串联电阻以及低至 54.7% 的电光转换效率。而由于引入了阶梯波导结构,CWG LD 结构可以有效地降低器件串联电阻,当 $n=1$ 时其串联电阻降低至 2.67 Ω 。随着 CWG LD 结构阶梯数 n 的进一步增加串联电阻有小幅提高,但均明显低于 CG

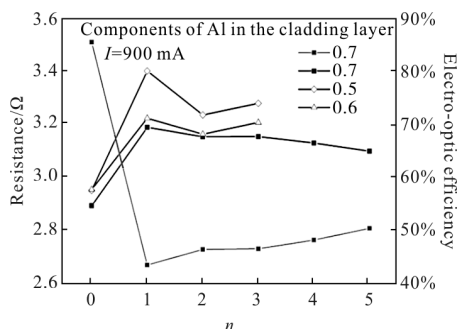


图 6 不同结构在工作电流为 900 mA 条件下,阶梯数 n 与器件串联电阻 R 及电光转换效率 η 的关系

Fig.6 Relationship between the number of steps n and the series resistance R and the efficiency η of electro-optic conversion of different structures at 900 mA working current

LD 结构。在工作电流固定的条件下,串联电阻的降低令器件具有更低的电压及电输入功率,从而有效地提高了器件的电光转换效率。在 $n=1$ 时,CWG LD 结构可以获得高达 69.5% 的电光转换效率。考虑到限制层材料对器件的影响,图 6 同时给出了限制层材料分别为 $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$ 和 $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ 的 CWG LD 电光转换效率随波导层阶梯数的变化情况。由于限制层 Al 组分较低,为满足对光场的限制作用(波导层中 Al 组分必须小于限制层,同时要大于量子阱垒层),图中仅给出阶梯数小于 3 的 CWG LD 的(即常规波导,1 阶梯复合波导,2 阶梯复合波导和 3 阶梯复合波导)情况。通过对比可以发现:随着限制层 Al 组分的降低,CWG LD 的电光转换效率变化趋势一致,电光转换效率有小幅提升。在 $n=1$ 的情况下,限制层为 $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$ CWG LD 的电光转换效率达到 71.2%,要比常规波导结构高 13.4%;限制层为 $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ 的 CWG LD 的电光转换效率则进一步提升至 80.1%。随着阶梯数的增加,具有不同限制层 Al 组分的 CWG LD 电光转换效率均呈小幅度下降趋势,但都高于 CG LD。因此,排除限制层的影响因素,复合波导结构是提高器件效率的关键。复合波导结构的引入可以在保证光场分布的同时,有效地降低器件的串联电阻并提高电光转换效率。研究表明,CWG LD 结构在提升器件电光转换效率方面具有显著的效果及应用潜力。

3 结 论

首先设计了一种具有复合波导的新型 CWG LD 器件结构,通过对阶梯波导结构能带的理论分析,优化了阶梯数结构的串联电阻,然后利用 LASTIP 软件对所提 CWG LD 结构进行了计算模拟及数据对比。研究表明,CWG LD 结构在保证输出光功率的同时,可以有效地降低器件的串联电阻并提升电光转换效率。

根据仿真计算的结果,在工作电流为 900 mA 的条件下,阶梯数为 1 时,CWG LD 结构的电光转换效率达到最大值,串联电阻由 CG LD 结构的 3.51 Ω 降低为 2.67 Ω ,电光转换效率由 54.7% 提升至 69.5%。说明设计的阶梯波导结构的新型 CWG LD 器件结构可以有效地提高半导体激光器

的电光转换效率,减小串联电阻。

根据此实验模拟结果,通过进一步的优化复合波导设计,可用于非对称半导体激光器结构,有望获得更高的电光转换效率。

参考文献:

- [1] Yamagata Y, Yamada Y, Yamaguchi M. 915 nm high-power broad area laser diodes with ultra-small optical confinement based on Asymmetric Decoupled Confinement Heterostructure (ADCH) [C]//SPIE Laser. International Society for Optics and Photonics, 2015, 9348: 93480F-93480F-10.
- [2] Ma Xiaoyu, Wang Jun, Liu Suping. The domestic high power semiconductor laser research and application status of [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 189-194. (in Chinese)
马骁宇, 王俊, 刘素平. 国内大功率半导体激光器研究及应用现状[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(2): 189-194.
- [3] Han Shunli, Wu Xin, Lin Qiang. Semiconductor laser frequency stabilization technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(5): 1189-1193. (in Chinese)
韩顺利, 仵欣, 林强. 半导体激光器稳频技术 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(5): 1189-1193.
- [4] Li Yan, Zhang Yixuan, Na Quanxin, et al. Calculation and experiment of temperature field distribution of Tm:YLF laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(5): 0506001. (in Chinese)
李岩, 张艺轩, 纳全鑫, 等. Tm:YLF 激光器温度场分布计算与实验[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(5): 0506001.
- [5] Wang Lijun, Peng Hangyu, Zhang Jun. Progress of high power diode laser beam combining [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8 (4): 517-534. (in Chinese)
王立军, 彭航宇, 张俊. 大功率半导体激光合束进展[J]. *中国光学*, 2015, 8(4): 517-534.
- [6] Chen He, Chen Shengping, Hou Jing, et al. Characteristic analysis and power amplification research of 1.06 μm injection locked gain switched semiconductor laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44 (10): 2900-2905. (in Chinese)
陈河, 陈胜平, 侯静, 等. 1.06 μm 注入锁定增益开关半导体激光器特性分析与功率放大研究 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(10): 2900-2905.
- [7] Tian Kun, Zou Yonggang, Ma Xiaohui, et al. Surface emitting distributed feedback semiconductor laser [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(1): 51-64. (in Chinese)
田锬, 邹永刚, 马晓辉, 等. 面发射分布反馈半导体激光器 [J]. *中国光学*, 2016, 9(1): 51-64.
- [8] Zhao Yuan'an, Hu Guohang, Liu Xiaofeng, et al. Laser pretreatment technology and its applications. Proceedings of [C]// Symposium on Laser Materials and Components and Symposium on Laser Damage, 2016. (in Chinese)
赵元安, 胡国行, 刘晓凤, 等. 激光预处理技术及其应用 [C]//强激光材料与元器件学术研讨会暨激光破坏学术研讨会论文集, 2016.
- [9] Mermelstein C, Simanowski S, Mayer M, et al. Room-temperature cw operation of GaInAsSb/AlGaAsSb quantum well diode lasers emitting beyond 2 μm [C]//IEEE Conference on Electro-optics, 2002(39): 65.
- [10] Hayakawa T. High reliability in 0.8 μm high-power InGaAsP/InGaP/AlGaAs laser diodes with a broad waveguide [C]//Optoelectronics' 99 -Integrated Optoelectronic Devices. International Society for Optics and Photonics, 1999: 29-37.
- [11] Barekic V, Katilius R. Noise in physical systems and 1/F fluctuations-proceedings of the 13th international conference [J]. *Journal of Surgical Research*, 1974, 16(5): 473-810.
- [12] Levinshtein M, Rumyantsev S, Shur M. Handbook Series on Semiconductor Parameters [M]. US: World Scientific Publishing, 1996: 196-197.
- [13] Li Te, Hao Erjuan, Li Zaijin, et al. Optimization of waveguide structure for high power 1 060 nm diode laser [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Wave*, 2012, 31 (3): 226-230. (in Chinese)
李特, 郝二娟, 李再金, 等. 高功率 1 060 nm 半导体激光器波导结构优化 [J]. *红外与毫米波学报*, 2012, 31(3): 226-230.
- [14] Zhang Jian. Research on design, growth and preparation of GaAs based near infrared semiconductor laser [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)
张建. GaAs 基近红外半导体激光器的设计、生长和制备研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [15] Ye Lei, Zhang Dianyao, Li Xiaodong, et al. Optimization analysis of active layer of 980 nm multi quantum well laser [J]. *Innovation and Application of Science and Technology*, 2016(6): 24-25. (in Chinese)
叶磊, 张殿尧, 李晓东, 等. 980 nm 多量子阱激光器有源层的优化分析[J]. *科技创新与应用*, 2016(6): 24-25.