

优化 p 型波导层厚度提高半导体激光器电光转换效率

崇 锋 王 俊 熊 聪 王 冠 赵 懿 昊 马 骁 宇

(中国科学院半导体所 光电子器件国家工程中心, 北京 100083)

摘要 理论分析了 p 型波导层厚度对半导体激光器阈值电流、内损耗以及串联电阻的影响, 优化得到该参数对器件电光转换效率的影响。由此设计了波导结构, 并制作了波长为 980nm 非对称高效率半导体激光器。器件的光电特性测试为: 腔长为 1500 μm , 20% 占空比的巴条的阈值电流以及串联电阻分别为 7.3 A 和 4.8 m Ω , 内损耗低至 0.78 cm^{-1} 。微通道封装 1 cm 激光二极管阵列连续工作条件下最大电光转换效率为 63.2%, 相应的斜率效率和输出光功率分别为 1.17 W/A 和 36.2 W, 最大输出功率可达 139.6 W。实验结果表明: 通过优化 p 型波导层厚度, 有效地提高器件电光转换效率。

关键词 激光器; 半导体激光器; 电光转换效率; 非对称宽波导; 高功率

中图分类号 TN248.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092912.3419

Optimum the Thickness of p-Waveguide Layer for High Conversion Efficiency Diode Lasers

Chong Feng Wang Jun Xiong Cong Wang Guan Zhao Yihao Ma Xiaoyu

(National Engineering Research Center for Optoelectronic Device, Institute of Semiconductors,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract The p-waveguide thickness which maximizes the power conversion efficiency (PCE) is optimized for quantum well diode lasers. The optimization are based on the simple models of the semiconductor laser's electrical and optical behaviors, including series resistance, threshold current and internal loss. The structure is designed and the device is fabricated experimentally. For a 1500 μm cavity length and 20% fill factor devices, the threshold current and series resistance are 7.3 A and 4.8 m Ω respectively, and a low internal loss around 0.78 cm^{-1} is achieved. Under continuous wave operation condition, the maximal electro-optical conversion efficiency of the standard 1 cm laser bar with micro-channel cooler is 63.2%. The corresponding slope efficiency and output power are 1.17 W/A and 36.2 W. The maximal output power is 139.6 W when the current is 161 A. The results prove that the way through optimizing the p-waveguide thickness is an efficient approach to improve.

Key words laser; semiconductor diode lasers; electro-optical conversion efficiency; asymmetric broad waveguide; high power

1 引 言

980 nm 半导体激光器广泛应用于材料加工、激光医疗以及抽运固体激光器等领域^[1~3]。在这些应用中, 不仅要求激光器有高的光功率, 而且要求有高的电光转换效率。高的电光转换效率一方面可以极大降低器件的散热成本, 实现器件的小型化和便携

化^[4]; 另一方面可以极大提高半导体激光器的输出功率^[5]。

理论研究表明: 低阈值、低内损耗以及低的串联电阻可以明显提高半导体激光器的电光转换效率^[6]。为了提高半导体激光器的电光转换效率, 许多研究机构采用对称宽波导结构来降低内损, 提高

收稿日期: 2009-02-16; 收到修改稿日期: 2009-03-16

基金项目: 中国科学院知识创新工程青年人才领域前沿项目(ISCAS2008T12)资助课题。

作者简介: 崇 锋(1980—), 男, 博士研究生, 主要从事高电光转换效率半导体激光器方面的研究。

E-mail: chongfeng@semi.ac.cn

导师简介: 马骁宇(1963—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事半导体电子器件方面的研究。E-mail: maxy@semi.ac.cn

器件的电光转换效率,并取得了一定的成果^[7~10]。然而太厚的波导层,特别是 p 型波导层,会极大增加激光器的串联电阻和阈值电流^[11],反而降低器件的电光转换效率。而且在大电流条件下,太厚的 p 型波导层厚度会使得激光器的内量子效率迅速下降以及内损耗迅速增大,使得激光器的电光转换效率迅速下降,影响器件性能^[12]。

基于半导体激光器 p 型波导层的电阻以及高掺杂 p 型限制层的自由载流子损耗是引起器件高串联电阻、高损耗的主要因素^[13]。本文通过优化 p 型波导层厚度,系统优化半导体激光器的内损耗、串联电阻以及阈值电流,从而有效地提高了半导体激光器电光转换效率。

2 理论分析

半导体激光器峰值电光转换效率 $\eta_{c,max}$ 可以表示为^[14]

$$\eta_{c,max} = \eta_d \frac{h\nu}{eV_0} \left[\frac{x}{(1 + \sqrt{1+x})^2} \right], \quad (1)$$

式中 $x = V_0 / (I_{th} R_s)$, $h\nu$ 为激光器激射光子能量, V_0 为开启电压, I_{th} 为阈值电流, R_s 为串联电阻, η_d 为外微分量子效率。 η_d 可表示为

$$\eta_d = \eta \frac{\alpha_m}{\alpha_m + \alpha_i}, \quad (2)$$

式中 α_i 为激光器的内损耗, α_m 为腔面损耗。

$$\alpha_m = \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right), \quad (3)$$

L 是激光器的腔长, R_1 和 R_2 分别为前后腔面的反射率。

从(1)式~(3)式可以看到,低内损耗、低串联电阻和低阈值电流可以极大提高半导体激光器的电光转换效率。由于 p 型波导层厚度与半导体激光器的内损耗、阈值电流以及串联电阻都密切相关,本文优化了如图 1 所示的非对称的波导结构的 p 型波导层

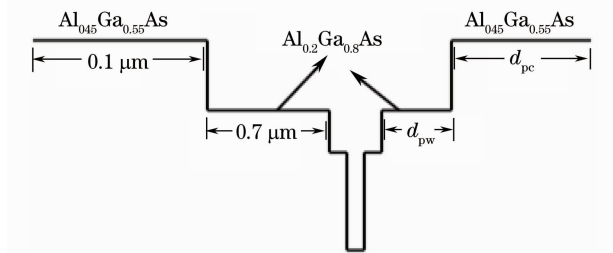


图 1 980 nm 非对称波导结构示意图

Fig. 1 Schematic conduction band diagram of the 980 nm asymmetric waveguide structure

厚度 d_{pw} 以及 p 型限制层厚度 d_{pc} 。在优化中,采用类似结构半导体激光器的典型参数^[10,15~17]: $\eta_i = 0.92$, $J_{tr} = 105 \text{ A/cm}^2$, $g_{th} = 1323 \text{ cm}^{-1}$, $V_0 = 1.36 \text{ V}$, $R_1 = 0.95$, $R_2 = 0.05$ 。下面将依次详细讨论这些参数与 p 型波导层厚度的函数关系,从而得到 p 型波导层厚度对器件电光转换效率的影响。

从(1)式和(2)式可以看到,降低半导体激光器的内损耗可以提高激光器的外微分量子效率,从而极大提高器件的电光转换效率。半导体激光器的内损耗主要由限制层和量子阱的自由载流子损耗造成,为了降低半导体激光器的内损耗,需要尽量避免光场与高掺杂限制层重叠^[18]。基于 p 型空穴光吸收系数远大于 n 型电子光吸收系数^[13],通过优化 p 型波导层厚度可以很好地降低半导体激光器的内损耗。为此计算了半导体激光器的内损耗与 p 型波导层厚度的函数关系,计算结果如图 2 所示。图 2 中曲线 1 是该激光器总的内损耗,曲线 2 是限制层掺杂载流子引起的损耗,曲线 3 是量子阱中注入的自由载流子引起的损耗。由图 2 曲线 1 可以看到:随着 p 型波导层的厚度的增加,半导体激光器的内损耗先迅速变小,然后减小变缓。

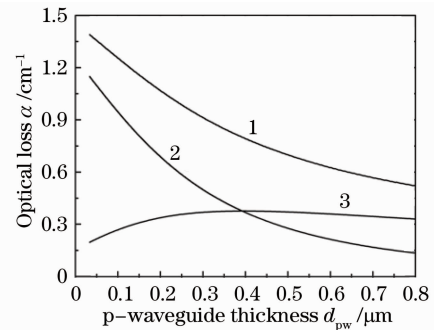


图 2 半导体激光器的内损耗与 p 型波导层厚度的函数关系

Fig. 2 Relationship of internal loss and p-waveguide thickness

阈值电流是影响半导体激光器电光转换效率的一个重要因素,它表述为

$$I_{th} = \frac{1}{\eta_i} J_{tr} \exp \left[\frac{1}{g_{th} \Gamma} (\alpha_i + \alpha_m) \right] WL, \quad (4)$$

式中 η_i 为内量子效率, J_{tr} 为透明电流密度, g_{th} 为材料的阈值增益, Γ 为有源区的光限制因子, W 为发光区的条宽。其中内损耗 α_i 和有源区光限制因子 Γ 都与 p 型波导层厚度密切相关。计算了腔长 $1500 \mu\text{m}$, 条宽 $150 \mu\text{m}$ 半导体激光器的阈值电流随 p 型波导层厚度增加的变化,计算结果如图 3 所示。阈值电流随 p 型波导层厚度的增加先迅速变小,然

后缓慢增加。

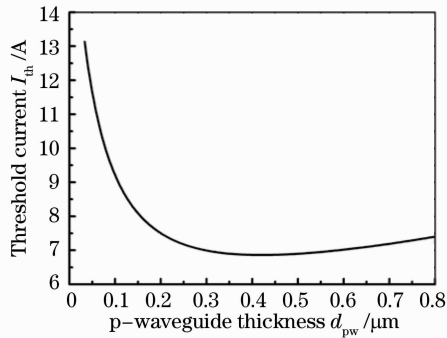


图 3 半导体激光器阈值电流与 p 型波导层厚度的函数关系

Fig. 3 Relationship of threshold current and p-waveguide thickness

串联电阻是影响半导体激光器电光转换效率的另一个重要因素, 它可表示为各层电阻的叠加

$$R_s = \sum_j \frac{\rho_j d_j}{WL}, \quad (5)$$

式中第 j 层的电阻率 ρ_j 为

$$\rho_j = 1/\sigma_j = 1/(n_j q \mu_j), \quad (6)$$

d_j 为第 j 层的厚度, σ_j 为电导率, q 为电子电量, n_j 和 μ_j 分别为该层的电子(空穴)自由载流子浓度和该层的迁移率。由(5)式和(6)式可以看到: 串联电阻与掺杂浓度成反比。半导体激光器的电阻主要由非故意掺杂波导层的电阻决定。又由于空穴迁移率远小于电子迁移率(一般小一个数量级), p 型波导层的电阻是造成半导体激光器高串联电阻的主要因素。为此优化了半导体激光器串联电阻与 p 型波导层厚度变化的函数关系。图 4 给出了计算结果: 随着 p 型波导层厚度的增加, 激光器的串联电阻基本成线性增加。

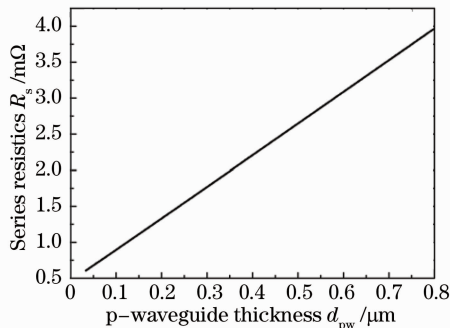


图 4 串联电阻与 p 型波导层厚度的函数关系

Fig. 4 Relationship of series resistance and p-waveguide thickness

上述分析可以得到: 当 p 型波导层太薄时, 半导体激光器的内损耗和阈值电流都很大, 这将导致

器件的电光转换效率很小。随着 p 型波导层厚度的增加, 半导体激光器的内损耗和阈值电流迅速减小, 器件的电光转换效率也随之增加。然而当半导体激光器 p 型波导层厚度进一步增加时, 尽管激光器的内损耗仍在减小, 但由于此时量子阱的自由载流子损耗的比重变得很大(量子阱的内损耗基本不变, 如图 2 中曲线 3 所示), 总的内损耗减小缓慢; 激光器串联电阻则一直成线性迅速增加, 而且器件的阈值电流也随着厚度的增加而增加。因此必然存在一个优化的 p 型波导层厚度, 它使得半导体激光器的电光转换效率达到最大。根据上述分析, 计算得到半导体激光器电光转换效率与 p 型波导层厚度的函数关系。计算结果如图 5 所示: 随着 p 型波导层厚度的增加, 峰值电光转换效率先增加, 然后迅速变小, 当 p 型波导层厚度大约为 $0.15 \mu\text{m}$ 时, 电光转换效率达到最大值。可见, 并不是波导层越厚, 内损耗越小, 电光转换效率越大; 也不是波导层越薄, 串联电阻越小, 电光转换效率越高。

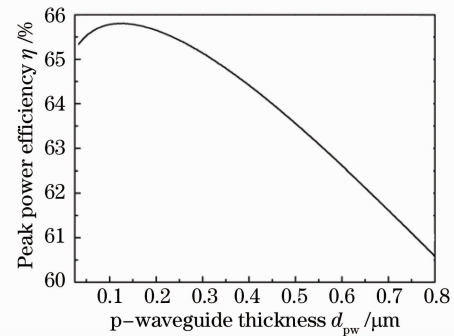


图 5 电光转换效率与 p 型波导层厚度的函数关系

Fig. 5 Relationship of electro-optical conversion efficiency and p-waveguide thickness

由图 5 可以看到: 当 p 型波导层厚度大于 $0.15 \mu\text{m}$ 时, 半导体激光器电光转换效率迅速变小。但是, 为了保证激光器基模条件下工作, 必须使激光器的高阶模的阈值电流远大于基模的阈值电流。结合器件结构, 计算了半导体激光器一阶模与基模阈值电流的比值随 p 型波导层厚度的函数关系, 计算结果如图 6 所示。当 p 型波导层较薄时, 一阶模的阈值电流与基模的阈值电流相差很小, 这时, 模式竞争很激烈, 很难保证单模工作; 随着 p 型波导层厚度的增加, 它们的比值迅速增加, 当 p 型波导层厚度大于 $0.48 \mu\text{m}$ 时, 一阶模的阈值电流远大于基模阈值电流(50 倍以上) 此时一阶模很难激励, 实现了单模输出。通过上述优化, 选取 p 型波导层的厚度为 $0.48 \mu\text{m}$, 对应的优化 p 型限制层厚度为 $0.8 \mu\text{m}$ 。

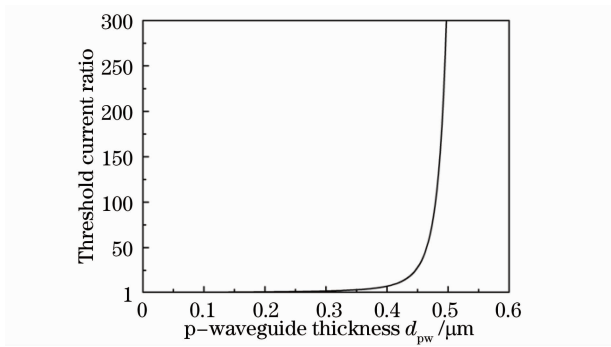


图 6 一阶模阈值电流和基模阈值电流的比值与 p 型波导层厚度的函数关系

Fig. 6 Dependence of the threshold current ratio between the first order mode and the fundamental mode on the p-waveguide thickness

3 器件制备

采用 LP-MOCVD 外延系统进行材料生长,生长时的载气为经过钯管纯化的 H_2 , III 族源为 TMGa, TMIn 和 TMAI, V 族源为 100% 的 PH_3 和 AsH_3 , n 型掺杂剂为 2% 的 SiH_4 , p 型掺杂剂为 DMZn。在 n-GaAs($Si:0.8\sim 4\times 10^{18} cm^{-3}$)衬底上依次生长如下各外延层: $0.2\ \mu m$ 厚的 n-GaAs 缓冲层, $1.0\ \mu m$ 厚的 AlGaAs 下包层(掺 $Si:1\times 10^{18} cm^{-3}$), $0.7\ \mu m$ 厚非掺杂 AlGaAs 下波导层, $10\ nm$ GaAs 量子垒, $10\ nm$ InGaAs 量子阱, $10\ nm$ GaAs 量子垒, $0.48\ \mu m$ 厚的非掺杂 AlGaAs 上波导层, $0.8\ \mu m$ 厚的 AlGaAs 上包层(掺 $Zn:2\times 10^{18} cm^{-3}$), $0.25\ \mu m$ 厚的 GaAs 欧姆接触层(掺 $Zn:0.5\sim 1.5\times 10^{20} cm^{-3}$)。

在外延片 p 面沉积一层 SiO_2 , 光刻制作成 $150\ \mu m$ 宽的条形电极接触; 通过溅射方法制作 p 面 TiPtAu 电极; 经减薄抛光后, 真空蒸镀 n 面 AuGeNi。将大片解理成不同腔长的巴条, 一部分解理成的管芯, 用激光器综合测试仪在脉冲条件 ($50\ \mu s, 200\ Hz$) 下进行光电特性测试; 对另一部分激光巴条进行端面镀膜 ($AR/HR = 5\%/95\%$), 然后 p 面向下封装在微通道铜热沉上。

4 激光器特性测试结果和分析讨论

在室温脉冲条件 ($50\ \mu s, 200\ Hz$) 下, 测试了不同腔长管芯的光电特性。根据测试数据, 将微量子效率倒数与腔长进行了线性拟合, 得到其内损耗和内量子效率分别为 $\alpha_i = 0.78\ cm^{-1}$ 和 $\eta_i = 92.5\%$, 如图 7 所示。内损耗实验结果与理论分析结果 $0.73\ cm^{-1}$ 非常相符, 低内损耗以及高内量子效率保证激光器

实现高的斜率效率以及高的电光转换效率。

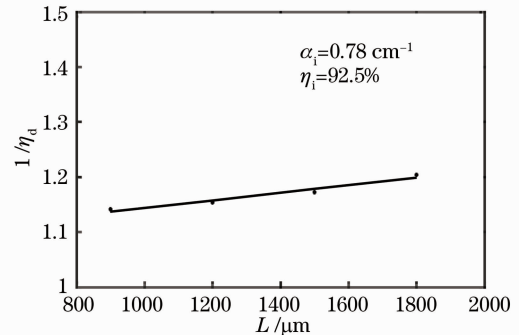


图 7 外微量子效率倒数与腔长的关系曲线

Fig. 7 Dependence of reverse differential quantum efficiency on the cavity length

将微通道结构封装的 $1\ cm$ 激光巴条(腔长为 $1500\ \mu m$, 器件占空比为 20%), 器件在连续工作电流条件下进行光电特性测试。输出光功率、电光效率和电压随着注入电流的关系如图 8 所示。巴条的阈值电流为 $7.3\ A$, 这与理论计算的结果 $7.62\ A$ 非常相符; 器件的串联电阻为 $4.8\ m\Omega$, 稍大于理论计算结果 $3\ m\Omega$, 这主要是在实际测试过程中还存在接触电阻、导线电阻等原因引起的。当注入电流为 $39.0\ A$ 时, 半导体激光器的电光转换效率达到最大值 63.2% , 此时器件的输出光功率为 $36.2\ W$, 对应的斜率效率和电压分别为 $1.17\ W/A$ 和 $1.49\ V$ 。中心波长为 $970.2\ nm$, 光谱宽度为 $5.6\ nm$ 。当注入电流为 $161.0\ A$ 时, 连续输出功率达到 $139.6\ W$, 此时对应的斜率效率和电压分别为 $0.91\ W/A$ 和 $1.79\ V$, 对应的电光转换效率为 48.4% 。

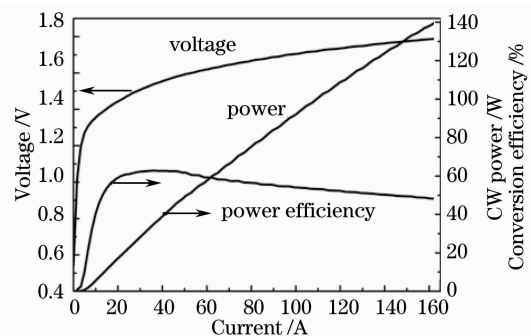


图 8 腔长 $1500\ \mu m$ 激光二极管单巴条的光电特性
Fig. 8 Electro-optical performance of $1500\ \mu m$ cavity length laser diode bar

与传统的对称宽波导结构器件相比^[10], 通过优化设计 p 型波导层以及限制层厚度, 得到的非对称宽波导结构器件性能有所提高。虽然优化后器件的内损耗略有增加(从 $0.58\ cm^{-1}$ 增加到 $0.78\ cm^{-1}$), 但串联电阻得到了明显下降, 从而极大地降低了器

件的工作电压,当注入电流 50 A 时,对称宽波导结构的工作电压为 1.72 V,而非对称波导结构的工作电压仅为 1.59 V,因此其电光转换效率得到了提高(从 60.0% 提高到 63.2%);同时减小了散热路径,降低了热阻,明显提高了半导体激光器输出光功率。

5 结 论

通过对 980 nm 非对称宽波导半导体激光器峰电光转换效率的理论分析,计算优化了 p 型波导层以及限制层的厚度,并用 LP-MOCVD 方法生长了设计的器件材料。将半导体激光器的内损耗降低为 0.78 cm^{-1} ,器件的阈值电流为 7.3 A 以及串联电阻为 4.8 m Ω 。当注入电流为 39 A 时,半导体激光器的电光转换效率达到最大 63.2%,此时器件的输出光功率为 36.2 W,对应的斜率效率和电压分别为 1.17 W/A 和 1.49 V。

参 考 文 献

- 1 B. Pederson, B. A. Thompson, S. Zemon *et al.*. Power requirements for erbium-doped fiber amplifiers pumped in the 800, 980, 1480 nm bands[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**(1): 46~49
- 2 S. Nikolov, L. Wetenkamp. Single frequency diode-pumped erbium lasers at 1.55 and 1.64 μm [J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(9): 731~733
- 3 J. B. Roman, P. Camy, M. Hempstead *et al.*. Ion exchange Er/Yb waveguide laser at 1.5 μm pumped by laser diode[J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(16): 1345~1346
- 4 Mei Suisheng. Progress of super high efficiency diode source research[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(11): 2~8
梅遂生. 超高效率二极管抽运光源研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(11): 2~8
- 5 S. Q. Slipchenko, A. V. Lyutetski, N. A. Pikhtin. Low-threshold-current 1.2~1.5 μm laser diodes based on AlInGaAs/InP[J]. *Technol. Phys. Lett.*, 2003, **29**(2): 115~120
- 6 G. Erbert, F. Bugge, A. Knigge *et al.*. Highly reliable 75 W InGaAs/AlGaAs laser bars with over 70% conversion efficiency [C]. *SPIE*, 2006, **6133**: 61330B
- 7 M. Kanskar, T. Earles, T. J. Goodnough *et al.*. High power conversion Al-free diode laser for pumping high power solid state laser[C]. *SPIE*, 2005, **5738**: 47~56
- 8 D. Botez, L. J. Mawsl, A. Bhattacharya *et al.*. 66% CW wallplug efficiency from Al-free 0.98 μm emitting diode laser[J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(21): 2012~2013
- 9 E. G. Golikova, I. V. Kureshov, V. M. Lantratov. Separately bounded InGaAsP high-power laser heterostructures obtained by VPE of organ metallic compounds[J]. *Technol. Phys. Lett.*, 2000, **26**(3): 913~916
- 10 Wang Jun, Bai Yiming, Chong Feng *et al.*. High power laser diode array with 60% electro-optical efficiency[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(9): 1323~1327
王 俊,白一鸣,崇 锋等. 60%电光效率高功率激光二极管阵列[J]. *中国激光*, 2008, **35**(9): 1323~1327
- 11 I. B. Petrescu-Prahova, T. Moritz, J. Riordan. High brightness 810 nm long cavity diode lasers with high d/ Γ ratio in asymmetric low confinement epitaxial structure[C]. *Proc. 2001 IEEE/LEOS Annual Meeting*, 2001, **1**: 135~136
- 12 B. S. Ryvkin, E. A. Avrutin. Free-carrier absorption and active layer heating in large optical cavity high-power diode lasers[J]. *J. Appl. Phys.*, 2006, **100**(10): 2310~2318
- 13 M. Peters, V. Rossin, Bruno. High-efficiency high-reliability laser diodes at JDS Uniphase[C]. *SPIE*, 2005, **5711**: 142~151
- 14 D. P. Bour, Rosen. A optimum cavity length for high conversion efficiency quantum well diode lasers[J]. *J. Appl. Phys.* 1989, **66**(7): 2813~2819
- 15 E. D. Palik. Handbook of Optical Constants of Solids[M]. Orlando: Academic Press 1985. 385~400
- 16 Zhong Li, Wang Jun, Feng Xiaoming *et al.*. 808 nm High-power Al-free active region with asymmetric-waveguide structure lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(8): 1037~1041
仲 莉,王 俊,冯小明等. [J]. *中国激光*, 2007, **34**(8): 1037~1041
- 17 N. C. Casey, M. B. Panish. Heterostructure Lasers[M]. New York: Academic Press,1978. 202~248
- 18 N. A. Pikhtin, S. O. Slipchenko, Z. N. Sokolova *et al.*. Internal optical loss in semiconductor lasers[J] *Semcond.*, 2004, **38**(3): 374~380