

无吸收模式滤波结构高亮度大功率 宽条形半导体激光器

乔忠良 薄报学 高欣 张斯钰 王玉霞 芦鹏 李辉 王勇 李特
李再金 曲轶 刘国军

(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 提升宽条形半导体激光器水平方向激光输出的光束质量,改善宽条形半导体激光器的工作特性,一直是大功率、高亮度宽条形半导体激光器器件工艺研究的难点。基于激光光在无源波导内的衍射原理制备宽条形半导体激光器的模式滤波结构,利用 Al_xN_y 绝缘介质薄膜应力使基底半导体材料带隙变化的原理制备无吸收无源波导。将两者结合,设计制备了带有无吸收模式滤波器结构的宽条形半导体激光器,使器件平均最大输出功率提高 49%,垂直发散角达 20.6° ,水平发散角达 3.3° ,3500 h 老化实验,其千小时退化率小于 0.085%。

关键词 激光器;高亮度半导体激光器;模式滤波;无吸收无源波导;AlN;应力

中图分类号 TN248.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0402003

High Brightness High Power Broad Area Semiconductor Lasers with No-Absorption Mode Filter

Qiao Zhongliang Bo Baoxue Gao Xin Zhang Siyu Wang Yuxia Lu Peng
Li Hui Wang Yong Li Te Li Zaijin Qu Yi Liu Guojun

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

Abstract It is the most difficult point of high brightness high power semiconductor lasers to improve horizontal directional beam quality and performance characteristic of broad area laser diodes (LDs). According to diffraction losses characteristic of those different modes, lasing light propagates in the passive waveguide of broad area semiconductor laser. And Al_xN_y dielectric film stress is used to prepare no-absorption passive waveguide by changing base band gap of semiconductor materials. Combining both the principle and the technology, broad area semiconductor lasers with no-absorption mode filter (passive waveguide) have been designed whose average peak power output increases by 49% for new structural device, vertical divergence angle is up to 20.6° , and horizontal divergence angle is up to 3.3° . It is less than 0.085% of aging speed per thousand of the LDs after testing of 3500 h aging.

Key words lasers; high brightness semiconductor lasers; mode filter; no-absorption passive waveguide; AlN; stress

OCIS codes 140.5960; 140.3570; 310.6860; 350.2450

1 引 言

为了抑制多光丝现象和改善高功率半导体激光器的光束质量,研究者们采用了多种方法进行改

进,其中包括:锥形激光器法^[1~3],极大地改进了器件的光束输出质量;图形电极接触法^[4],增加中央区载流子密度抑制自聚焦现象;非稳腔结构^[5~7],通过

收稿日期:2010-11-11;收到修改稿日期:2010-12-15

基金项目:国家 973 计划(6135602)、武器装备基金(9140C3102071002)和吉林省科技厅项目资助课题。

作者简介:乔忠良(1980—),男,博士研究生,助理研究员,主要从事大功率半导体激光器器件制备方面的研究。

E-mail:qzhl2007@hotmail.com

导师简介:薄报学(1964—),男,博士,研究员,主要从事大功率半导体激光器制备与应用方面的研究。

E-mail:bobaoxue@yahoo.com.cn

改善腔体结构实现对基横模的选择作用。这些实验结果对器件的光束质量都有相当大的改善,但还处于实验室阶段,对于实际生产来说,生产工艺都比较复杂和困难^[8],很难在实际中得到应用。

为了实现高亮度、大功率光输出,激光器通常采用宽面结构。对比增益导引型器件,发光孔径相对较宽,为 50~200 μm。宽条形结构半导体激光器降低了增益饱和及热效应对输出功率的限制。此外,简单的制备工艺过程较适合器件量产。

尽管如此,此类激光器主要缺点是宽条结构易导致高阶模光传输。高阶模或多光丝是由载流子与光场模式间的相互强作用导致的非线性效应,该效应使折射率改变,促使传播光束自聚焦现象的发生,进而导致高阶模式激光的出现。高阶模的出现直接导致多光丝现象的发生,输出光场变成了大量由光丝组成的光斑,使远场变宽,并显现光场多瓣现象。这些问题极大地限制了此类器件的使用。

为此,本文利用高阶模或自聚焦光束(光丝)经无源波导光束发散的特性,提出在宽条形半导体激光器内部集成无源波导模式滤波结构的方法改进高功率半导体激光器的光束质量。通过实现对高阶模激光传播及自聚焦现象的抑制,达到抑制多瓣光丝现象的目的。利用激光光在无源波导内衍射的工作原理,将其应用在中心波长 808 nm 的大功率宽条形半导体激光器设计当中,以期实现大功率、低发散角器件的高亮度输出特性。

2 模式滤波高亮度、大功率激光器结构设计

半导体激光器自聚焦产生的光丝或多模光束在非电流注入区内发散,如图 1 所示。1 为光丝,2 为注入区,3 为非注入区。在非注入区一定宽度范围内,多光丝光场在非注入区内或之外相互交叠,使得光场重新分布,抑制了宽条形半导体激光器的自聚焦效应。在图 1 中,锥形深色区域是自聚焦光束在非注入区的传播路径, h 为自聚焦光束(光丝)的宽度, d 为非注入区宽度, y 为光丝经非注入区发散后的横向长度。 x 为器件横向座标, z 为激光器光传播方向。在图中左侧给出了光丝的光场分布示意图,右侧给出了器件光场经非注入区交叠后的光场分布示意图。

同样,从半导体激光器的光束输出特性可知,在腔面输出端,高阶模发散角大,基横模发散角最小,

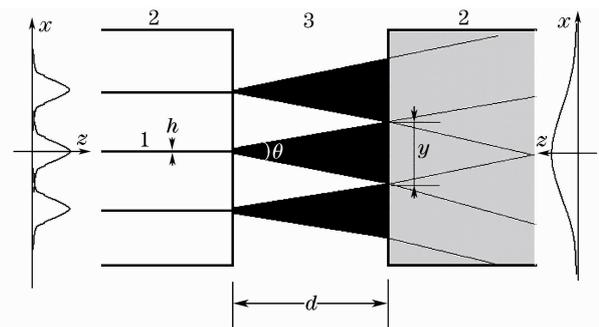


图 1 自聚焦光束交叠示意图

Fig. 1 Schematic of self-focused beam overlap

在介质中也存在着这样的激光传播规律。高阶模发散角大,损耗也大。其中损耗一方面是无源平板波导内部吸收损耗,另一方面是高阶模发散角较大造成的衍射损耗,损耗大小取决于无源波导宽度和长度的大小。无源波导区的有效发射尺寸决定了其中激光的衍射角,与基横模相比,越高阶模式的激光会呈现出越小的光发射孔径和越大的光场展宽。

设计了一个带有无源平板波导模式滤波器结构的宽条形 808 nm 半导体激光器结构,如图 2 所示。1 为滤波区,是无源平板波导结构、非注入区,2 为电注入区。

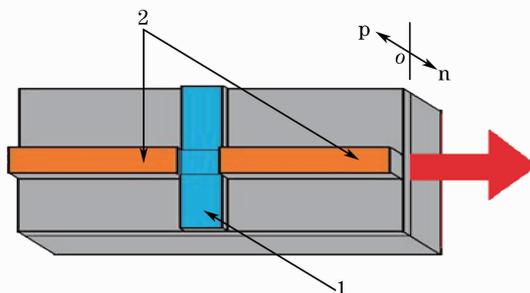


图 2 带有模式滤波结构的宽条形半导体激光器示意图

Fig. 2 Diagram of broad area semiconductor laser with mode filter

808 nm 外延片通过分子束外延生长得到。器件经过传统工艺方法制备,采用 $H_3PO_4 : H_2O_2 : H_2O$ 溶液对 808 nm AlGaAs/GaAs 外延片无源波导区进行腐蚀,腐蚀深度为 0.75 μm。图 3 是对该外延片腐蚀后的截面扫描电镜图,图 4,5 为经过解理后,3 只带有对称和非对称结构模式滤波激光器管芯 p 面形貌。

实验中器件尺寸为 1000 μm(长) × 500 μm(宽) × 100 μm(厚),注入区条宽为 100 μm。模式滤波器的非注入区无源平板波导宽度为 100 μm,新型器件与传统结构 1000 μm 腔长器件进行了比较。



图 3 808 nm AlGaAs/GaAs 外延片腐蚀后截面扫描电镜图

Fig. 3 Cross-section scanning electron micrograph of 808 nm AlGaAs/GaAs etched wafer

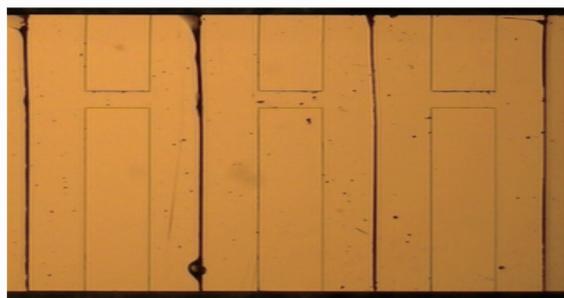


图 5 解理后的非对称管芯 p 面形貌

Fig. 5 P-side asymmetric structure top view appearance of 3 chips



图 4 解理后的对称管芯 p 面形貌

Fig. 4 P-side symmetric structure top view appearance of 3 chips

3 模式滤波结构激光器特性测试与分析

测试结果分析如图 6, 7 所示, 其中半峰全宽 (FWHM) 由 θ_{FWHM} 表示。

图 6 为模式滤波器放置位置不同时与传统器件水平远场的比较。从实验所测得器件水平远场图可知, 对比传统器件 $\theta_{FWHM} \approx 8.4^\circ$, 带有模式滤波器结构的器件远场发散角 $\theta_{FWHM} \approx 3.3^\circ$, 有了极大改善。同时可以看出, 器件的远场发散角与模式滤波器结构的无源平板波导位置有一定关系, 靠近器件中部, 输出发散角最小, 靠近腔面端, 输出发散角变大。这是因为器件大功率工作时, 靠近端面处的各光丝经过无源波导区光束变得发散, 发散之后各光丝相互交叠, 在端面处光场重新分布, 若无源波导区靠近后腔面, 则重新分布的光场经过较长的有源波导区时会再次发生自聚焦现象, 导致光丝出现; 若无源波导区靠近前腔面, 则各光丝经无源波导后没有经过充分混叠, 仍会导致多光丝现象, 光束质量改进会下降。实验中发现, 带有模式滤波器结构器件垂直远场特性未发生明显变化, 如图 7 所示。

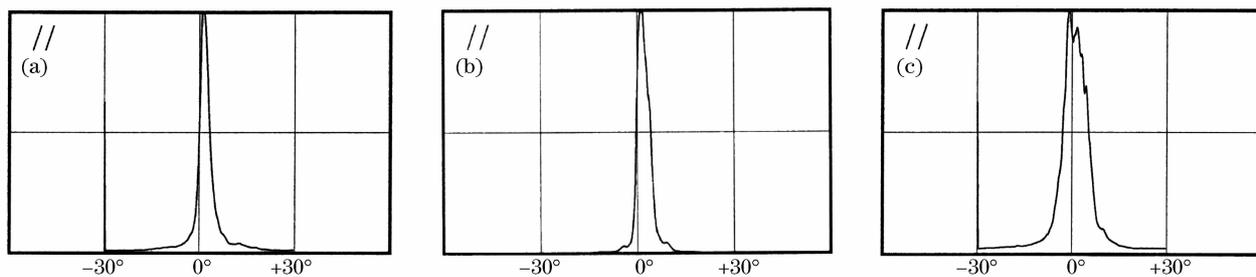


图 6 不同结构的宽条形半导体激光器远场(室温, 连续波, 2.4 W)

(a) 正中间位置带有模式滤波器, (b) 靠近端面处带有模式滤波器, (c) 无模式滤波器

Fig. 6 Far field of different structure broad area semiconductor lasers [room temperature, continuous wave (CW), 2.4 W]

(a) with mode filter in the center, (b) with mode filter near cavity surface, (c) without mode filter

图 8 为器件中部位置带有模式滤波器结构的宽条形半导体激光器(曲线 2)与传统器件(曲线 1)的 $L-I$ 及 $V-I$ 特性曲线, 曲线 1 采用普通条形 SiO_2 介质膜的激光器, 曲线 2 为带有 SiO_2 介质膜的无源平板波导激光器。由图可以得到新结构器件的斜率效率为 0.88 W/A , 最大输出光功率为 2.93 W ; 传统器

件的斜率效率为 1.01 W/A , 最大输出光功率为 2.5 W 。之所以存在这样的结果是由于作为模式滤波器的无源平板波导存在一定的光吸收, 降低了转换效率, 使得新结构器件光束质量变好, 腔面光学灾难 (COD) 阈值提高, 而传统器件因为多光丝效应导致腔面局部被自聚焦的光丝破坏, 致使 COD 发生。

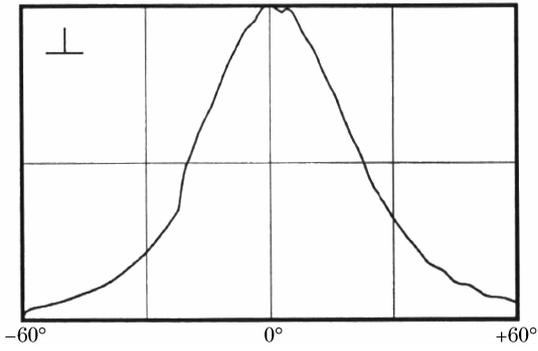


图7 中间带有模式滤波器的宽条形半导体激光器垂直远场(室温,CW, 2.4 W, $\theta_{FWHM} \approx 42.6^\circ$)

Fig.7 Perpendicular far field of symmetric structure broad area semiconductor laser with mode filter (room temperature, CW, 2.4 W, $\theta_{FWHM} \approx 42.6^\circ$)

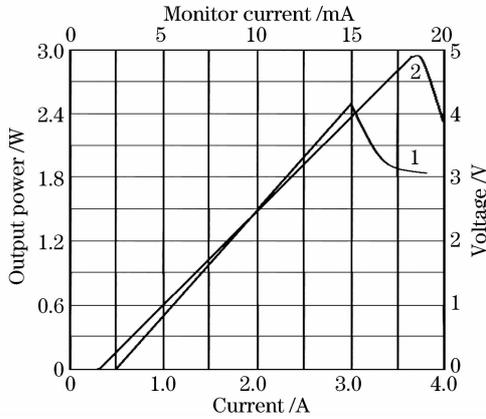


图8 激光器输出功率曲线比较(室温,CW)

Fig.8 Comparison of light output properties on different kinds of LDs (room temperature, CW)

4 器件优化

由于模式滤波器中无源波导的吸收降低了器件的转换效率和输出功率,因此需要对模式滤波器中的无源平板波导进行优化,降低光损耗。目前改进方法主要有两种,1) 从外延层设计上改进;2) 透明窗口法。两种方法的目的是降低模式滤波器无源平板波导层的吸收。

4.1 外延层改进法

为使激光经无源波导损耗降至最低,需要优化量子阱的数量 N ,组分,阱宽 d 。阈值增益方程为

$$G(d, n)\Gamma(N)N = \alpha_b + \alpha_c + \alpha_p \frac{L_p}{L_a} - \frac{\ln(R_1 R_2)}{2L_p}, \quad (1)$$

由载流子密度得到阈值电流

$$I_{th} = \eta(An + Bn^2 + Cn^3)L_a W d, \quad (2)$$

两式中 L_p 为无源区长度, W 为注入区宽度, n 为载

流子密度, R_1, R_2 分别为半导体激光器前后腔面处的腔面反射率, L_a 为电注入区长度, α_b 为背景损耗, α_p 为无源区损耗, α_c 为包层中的自由载流子损耗, A, B, C 为系数。在量子阱层内的自由载流子损耗表示为

$$\alpha_q = \Gamma(N)C_V N n, \quad (3)$$

式中 C_V 为价带内吸收系数, $\Gamma(N)$ 为相应量子阱的限制因子。(3)式决定了量子阱设计的阈值处载流子密度,从而决定了相应损耗和阈值电流。经过优化后可得到低损耗、高功率输出和低阈值电流。此外,通过优化 p 型掺杂分布,可使自由载流子吸收最小化,从而得到器件良好的电学、光学特性,优化了外延结构。

但器件的结构优化和外延工艺优化比较复杂,实现有一定难度。

4.2 透明窗口法

根据薄膜材料与基底材料的热膨胀系数不同,成膜时薄膜、基底产生的热应变而导致热应力(σ_{th})的产生,热应力公式为

$$\sigma_{th} = \left(\frac{E_f}{1 - \nu_f} \right) (\alpha_f - \alpha_s) (T_1 - T_0), \quad (4)$$

式中 $E_f/(1 - \nu_f)$ 为薄膜的双轴模量,一般而言,其为正值; α_s, α_f 分别为基底材料和薄膜材料的热膨胀系数, T_1, T_0 分别为沉积时温度和测量时基片温度。由(4)式可知,当 σ_{th} 为负时,表现为压应力;当 σ_{th} 为正时,表现为张应力。因为 AlN 的热膨胀系数比 AlGaAs / GaAs 材料的热膨胀系数小,若在 AlGaAs 材料上高温生长一定厚度的 AlN 膜,AlN 膜对其下面的 AlGaAs 材料表现为压应力。半导体材料受到压应力时,其带隙会增大。光子经过此应变区域时,吸收大幅降低,形成低吸收或无吸收区域,这就是无吸收窗口的原理^[9]。利用无吸收窗口制备无吸收无源平板波导结构,将该结构应用于宽条形半导体激光器的模式滤波器结构中,可大幅降低无源波导的吸收,提高器件斜率效率。

用溅射 AlN 制作了模式滤波器的无吸收无源平板波导 AlGaAs / GaAs 激光器,激光器结构如图 9 所示。1 为无吸收区,2 为单个周期的增益区和模式滤波区,3 为电流注入区。其主要工艺包括:1) 利用光刻技术,在激光器的模式滤波无源波导区光刻出模式滤波无吸收无源平板波导区;2) 无源波导区中的条形区域进行间隔式腐蚀,腐蚀深度为 $0.75 \sim 1.1 \mu\text{m}$,间隔距离为 $8 \sim 10 \mu\text{m}$,然后在 50°C 温度下生长氮化铝层^[10],其厚度为 $0.5 \mu\text{m}$;3) 对注

入区中的条形以外的区域进行微腐蚀,除去欧姆接触层,然后在250 °C温度条件下,溅射厚度约0.3 μm的氮化铝膜代替传统的二氧化硅膜作为绝缘层。器件的其他工艺与常规器件相同。

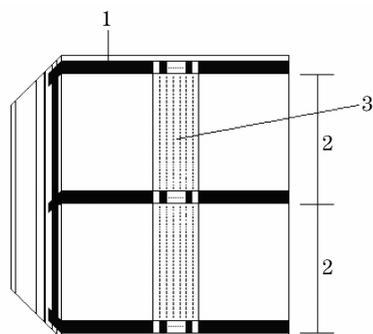


图9 优化后带有无吸收模式滤波结构的宽条形半导体激光器

Fig. 9 Broad area semiconductor laser with optimized no-absorption mode filter

图10为AlGaAs/GaAs材料带有无吸收模式滤波器宽条形半导体激光器与普通条形激光器(腔长均为1 mm,注入区条宽100 μm,采用SiO₂作为介质膜,没有模式滤波结构)激光阈值温度特性的比较结果。

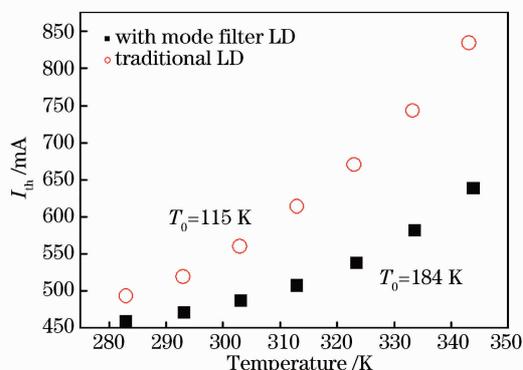


图10 激光器 I_{th}-T 曲线

Fig. 10 I_{th}-T curve of laser

$$I_{th}(T) = I_{th}(T_1) \exp[(T - T_1)/T_0], \quad (5)$$

由(5)式计算可得,新型器件的特征温度为184 K,传统器件的特征温度为115 K。新型器件的温度特性有了明显改善。

图11为带有3个无吸收模式滤波结构无源平板波导的宽条形半导体激光器垂直远场。具有无吸收模式滤波结构的激光器阈值电流比普通激光器增加得缓慢。这是由于带无吸收模式滤波器的激光器腔内吸收减少,产生的热量也相应减少,而且AlN作为高效导热介质膜热导率比SiO₂高很多。因此,带有无吸收模式滤波器激光器的温度稳定性明显好

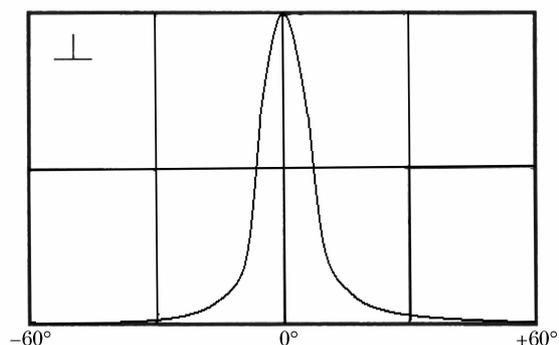


图11 带有3个无吸收模式滤波结构无源平板波导的宽条形半导体激光器垂直远场(室温,CW, 2.4 W, θ_{FWHM} ≈ 20.6°)

Fig. 11 Perpendicular far field of broad area semiconductor laser with three passive waveguide mode filters (room temperature, CW, 2.4 W, θ_{FWHM} ≈ 20.6°)

于普通激光器。

图12给出了优化后新型结构器件与使用高导热率AlN绝缘介质膜的常规器件输出特性比较。曲线1为带有AlN介质膜的无源平板波导激光器,曲线2为普通条形AlN介质膜的激光器。使用AlN高效导热膜优化后器件的斜率效率为1.15 W/A,传统结构器件使用氮化铝薄膜后的斜率效率为1.0 W/A;新型器件的垂直远场分布也发生了巨大改变,由原来的42.6°下降到20.6°,并且远场变得更加平滑,而水平近场较优化前变化不明显;新型器件最大COD超过4 W。从图中可以看出传统器件斜率效率明显小于优化后新型器件的斜率效率,并且优化后器件的阈值电流也明显优于传统器件。新型器件大幅降低了光子传播损耗,优化后的

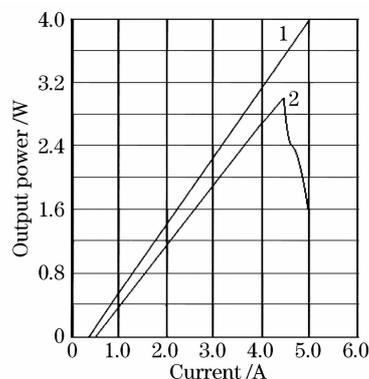


图12 优化后与未优化的新型器件 P-I 特性曲线对比(室温,CW)

Fig. 12 Comparison of light output properties on different kinds of optimized LDs with AlN film (room temperature, CW)

新型器件经过3500 h老化实验,其千小时退化率小于0.085%,这说明无吸收模式滤波无源波导结构对改善器件的输出特性有明显作用。

5 结 论

提出了带有无吸收无源平板波导模式滤波宽条形半导体激光器结构,具有工艺简单、适合不同条宽激光器等特点。实验研究了带有无源平板波导模式滤波结构的高亮度大功率宽条形半导体激光器。结果表明,采用无源平板波导模式滤波结构的宽条形半导体激光器,经优化模式滤波区无源波导后的工艺设计,得到无吸收无源平板波导模式滤波结构的宽条形半导体激光器的输出功率2.4 W,远场发散角 3.3° ,垂直发散角 20.6° ,器件亮度得到大幅提升。

致谢 作者感谢李梅教授在材料测试方面给予的帮助,感谢马建立博士、魏星博士在论文资料查找方面给予的帮助。

参 考 文 献

- 1 S. Kallenbach, M. T. Kelemen, R. Aidam *et al.*. High-power high-brightness ridge-waveguide tapered diode lasers at 14xx nm [C]. *SPIE*, 2005, **5738**:406~415
- 2 Márc T. Kelemen, Franz Rinner, Joseph Rogg *et al.*. High-power high-brightness ridge waveguide tapered diode lasers at 940 nm [C]. *SPIE*, 2002, **4648**:75~81
- 3 Li Hui, Liu Guojun, Qu Yi *et al.*. High performance high beam quality 808 nm tapered semiconductor lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s2):11~13
李 辉,刘国军,曲 轶等.高性能高光束质量808 nm锥形半导体激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(s2):11~13
- 4 P. Salet, F. G'erald, T. Fillion *et al.*. 1.1 W continuous-wave 1480-nm semiconductor lasers with distributed electrodes for mode shaping [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(12):1706~1708
- 5 Chih Hung Tsaia, Yi Shin Su, Ching Fuh Lina. Tunable and high-power semiconductor laser with good beam quality in optical-communication band [C]. *SPIE*, 2005, **5723**:227~235
- 6 Eckard Deichsel. High-brightness unstable-resonator semiconductor laser diodes [R]. Ulm: Optoelectronics Department, University of Ulm, 2003
- 7 Wang Qiming. Breakthroughs and developments of semiconductor laser in China [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9):2190~2197
王启明. 中国半导体激光器的历次突破与发展[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9):2190~2197
- 8 Zhang Yanxin, Wang Jingwei, Wu Di *et al.*. A new package structure for high power single emitter semiconductor laser and performance analysis [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5):1186~1191
张彦鑫,王警卫,吴 迪等.一种新型大功率单发射腔半导体激光器及其特性[J]. *中国激光*, 2010, **37**(5):1186~1191
- 9 Qiao Zhongliang, Bo Baoxue, Me Yanping *et al.*. High power semiconductor lasers of new window on insulation film of Al_xN_y [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9):2277~2281
乔忠良,薄报学,么艳平等.基于 Al_xN_y 绝缘介质膜的新型窗口大功率半导体激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9):2277~2281
- 10 G. F. Iriarte, F. Engelmark, M. Ottosson *et al.*. Influence of deposition arameters on the stress of magnetron sputter-deposited AlN thin films on Si (100) substrates [J]. *J. Mater. Res.*, 2003, **18**(2):423~432