

# 大功率半导体激光器腔面膜的场强分布优化

张金胜<sup>1,2</sup> 宁永强<sup>1</sup> 张金龙<sup>1</sup> 张 建<sup>1,2</sup> 张建伟<sup>1,2</sup> 王立军<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所发光学及应用国家重点实验室, 吉林 长春 130033)  
<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要** 为了提高半导体激光器腔面膜的激光损伤阈值, 进而提高激光器输出功率, 对激光器的灾变性光学镜面损伤产生的原因进行了探讨。根据损伤原理, 将高反膜中场强最大处移出界面, 采用光学传输矩阵, 对厚度连续变化的界面场强和反射率进行了计算, 得到优化高反膜系, 优化膜系减小了界面处的光场对薄膜的损伤。采用改进后束流密度更大的 LaB<sub>6</sub> 作为阴极原位等离子源, 对离子源清洗的参数进行了优化。薄膜制备前期使用离子清洗的方法在真空环境下对腔面进行去氧化, 在制备过程中使用电子束蒸发离子源辅助沉积, 并测试了薄膜在高温高湿环境下的稳定性。使用该优化的膜系和清洗方法制备的半导体激光器, 在准连续输出时, 功率由 4.6 W 提升到了 7.02 W, 工作电流由 5 A 提升到了 8 A。

**关键词** 激光器; 腔面膜; 激光损伤; 电场分布

**中图分类号** TN248.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0107001

## Optimization of Electric Field Intensity Distribution on High Power Semiconductor Laser Facet Film

Zhang Jinsheng<sup>1,2</sup> Ning Yongqiang<sup>1</sup> Zhang Jinlong<sup>1</sup> Zhang Jian<sup>1,2</sup>  
Zhang Jianwei<sup>1,2</sup> Wang Lijun<sup>1</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Luminescence and Application, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China  
<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** In order to improve the damage threshold of semiconductor laser facet film and increase the laser output power, the causes of the catastrophic optical mirror damage in the laser are discussed. The highest field intensity in the high-reflective (HR) film is moved out of the interface in view of the damage principle. The reflectance and electric field distribution are simulated with film thickness changing continuously by using optical transmission matrix to get the optimized high reflective film, and the film damage is reduced at the interface by the optimized film. LaB<sub>6</sub> with improved higher plasma density is adopted as in situ plasma source, and the cleaning parameter of ion source is optimized. In the earlier period of preparing film, facet deoxidation is made with ion pre-cleaning in vacuum environment, and the film is fabricated with ion-assisted electron beam evaporation, and the stability of the film is tested under high temperature and high humidity environment. The laser output power is raised from 4.5 W to 7.02 W, operating current is raised from 5 A to 8 A in the case of the quasi-continuous operation with the optimized film and cleaning method.

**Key words** lasers; facet coatings; laser induced damage; electric field distribution

**OCIS codes** 000.3860; 140.5960; 240.0310

收稿日期: 2013-04-12; 收到修改稿日期: 2013-06-28

基金项目: 国家自然科学基金(51172225, 11074247, 51204056, 61106047)、国家自然科学基金重点项目(90923037)

作者简介: 张金胜(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事镀膜及半导体电子器件等方面的研究。

E-mail: zhangjs.ciomp@gmail.com

导师简介: 宁永强(1964—), 男, 博士, 研究员, 主要从事垂直腔面发射半导体激光器方面的研究。

E-mail: ningyq@ciomp.ac.cn(通信联系人)

# 1 引 言

大功率半导体激光器具有转换效率高、体积小、可靠性高、可直接调制以及集成能力强等优点,广泛应用于工业、激光医疗和军事等方面<sup>[1-4]</sup>。808 nm 是半导体激光器的一个波长,主要作为 1064 nm 抽运源,可应用在激光切割、激光焊接和激光打标等方面。激光腔面薄膜是半导体激光器非常重要的组成部分,其性能优劣直接影响激光器的光功率输出特性和器件的稳定性。

由于大功率半导体激光器极小的出光面积和极大的功率密度等特点,对腔面薄膜的寿命和稳定性提出了更高的要求。为了提高薄膜的灾变性光学损伤(COMD)阈值,国内外许多研究组开展了许多研究,目前主要方法有:真空解理、腔面钝化、腔面镀制保护膜以及腔面激光预处理等<sup>[5-6]</sup>,这些方法能够在一定程度上提高损伤阈值,但工艺复杂,所需设备昂贵,增加生产成本。由于半导体激光器固有的层状结构,使用化学腐蚀的方法做腔面钝化,容易在出光面形成不同程度的凹陷,而在此基础上进行腔面膜的制备,容易导致中心波长发生偏移,薄膜脱落,激光损伤阈值降低。

本文根据电磁场理论,对激光器后腔面反射膜系进行了场强计算,在反射率不变的前提下,优化得到适合高功率激光器的高损伤阈值反射膜系。在实验中,从半导体激光器腔面薄膜的损伤机理出发,优化离子源能量,使用等离子对表面的氧化层进行清洗,去除氧化物和杂质,提高表面平整度和减小损伤,使激光器形成表面平整的法布里-珀罗(F-P)谐振腔。在电子束蒸发工艺中使用离子源辅助沉积,制备样品在湿热环境下测试,反射率中心波长未发生偏移。将薄膜应用于半导体激光器,通过测试发现功率提升明显。

## 2 腔面膜的计算与分析

### 2.1 灾变光学损伤的原理

由于半导体激光器腔面解离后暴露在空气中,腔面较易氧化形成表面态,空气中氧气与 GaAs 发生氧化反应,形成氧化物。激光在腔面由于表面态的存在会被吸收,导致腔面有电子-空穴对产生<sup>[7-8]</sup>。电子-空穴对会产生两种影响,一种是非辐射复合,在腔面处产生热量;另一种是破坏腔面的化学键,生成高密度氧化物而形成深能级,进一步减小能带值。非辐射复合产生的热量和深能级的影响共

同作用使带隙减少,变小的带隙会增加光的吸收,如此往复循环,直到吸收的能量足够大,最后在腔面形成热损伤,也就是光学灾变损伤。

在腔面镀膜后,空气中的水蒸气和氧气与 GaAs 隔离,阻止了空气对于腔面的污染,但会与薄膜材料的交界面发生反应,腔面薄膜的界面态和粗糙度也会造成吸收增加。高功率工作状态下会对腔面膜造成损伤,在长脉冲作用下,主要表现为热破坏,而薄膜内的温度与材料的吸收系数及界面处的场强相关。为了增大损伤阈值,优化电场分布和改进镀膜工艺非常必要<sup>[9-10]</sup>。

### 2.2 腔面场强的计算与优化

激光器后腔面镀制高反膜,不但可以减缓腔面的氧化,还可以使激光器单一方向出光,提高工作效率。采用高、低折射率交替,每层厚度为  $\lambda_0/4$  的光学厚度介质多层膜能够得到高的反射率。利用光学传输矩阵方法<sup>[11]</sup>,可以推导出关于膜系的反射率及电场信息,膜系的特征矩阵如下:

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \prod_{j=1}^k \begin{bmatrix} \cos \delta_j & i \sin \delta_j / \eta_j \\ i \eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{k+1} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中  $C$  和  $B$  为运算结果的矩阵元,二者相除可以得到膜系的导纳,  $\eta_j$  和  $\delta_j$  为第  $j$  层膜的光学导纳和相位差,  $\eta_{k+1}$  为出射媒质的光学导纳,正入射时有

$$\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} \left( n_j + i \frac{\alpha_j \lambda}{4\pi} \right) d_j, \quad (2)$$

式中  $n_j$ ,  $\alpha_j$  和  $d_j$  分别表示第  $j$  层膜的折射率、吸收系数和物理厚度,  $\lambda$  为光波长。那么,膜系的反射率可以由下式得到:

$$R = \left( \frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right)^* \left( \frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right), \quad (3)$$

式中  $\eta_0$  为入射媒质的光学导纳。各层膜内的电场分布如下式:

$$\begin{bmatrix} E_{k-1} \\ H_{k-1} \end{bmatrix} = \prod_{j=1}^k \begin{bmatrix} \cos \delta_j & \frac{i}{\eta_j} \sin \delta_j \\ i \eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_s \end{bmatrix} E_s = \begin{bmatrix} B_j \\ C_j \end{bmatrix} E_s. \quad (4)$$

高功率半导体激光器的腔面薄膜内部的场强分布对激光损伤阈值有着显著的影响。文献<sup>[12]</sup>对传统的高反膜已进行了改进,使用抗激光损伤阈值更高的  $\text{SiO}_2$  作为内层材料,形成的膜系  $\text{Sub} | (\text{LH}) \cdot 9 | \text{Air}$ , 电场强度大大降低,降低到传统膜系的  $1/3$  左右,其中  $H$  表示  $\lambda/4$  光学厚度的高折射率材料  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ,  $L$  表示  $\lambda/4$  光学厚度的低折射率材料  $\text{SiO}_2$ 。但其相对场

强仍然保持在 170, 需要继续优化提高损伤阈值。针对光学损伤机理, 需要在薄膜界面处的吸收进行控制, 薄膜的吸收与光场强度、薄膜材料的本身属性以及制备工艺有关。选取常用的高折射率材料  $\text{TiO}_2$  和低折射率材料  $\text{SiO}_2$ , 针对实验中使用的半导体激光器, 对初始的高反膜系为  $A: \text{Sub} | (\text{LH}) \cdot 9 \text{ L} | \text{Air}$  的薄膜进行电场分布计算, 其中  $n_{\text{sub}} = 3.6, n_{\text{H}} = 2.2, n_{\text{L}} = 1.48, n_{\text{air}} = 1$ , 其计算结果如图 1 所示。

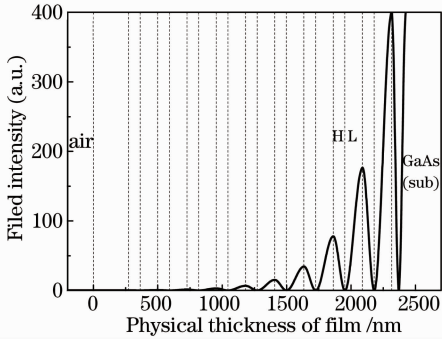


图 1 规整高反膜系的电场分布

Fig. 1 Electric field distribution of the high reflective film

基底与膜系第一层  $\text{SiO}_2$  界面上电场相对强度为 400, 其膜系电场最大值在第二层  $\text{TiO}_2$  与第三层  $\text{SiO}_2$  的界面上, 其相对强度达到 176。薄膜的吸收能力与场强及吸收系数成正比, 由于处于界面和高折射率  $\text{TiO}_2$  膜层内的高场强的存在, 其损伤阈受到限制。为了进一步优化其电场强度的分布, 采用非规整膜系, 增加第一层和第二层  $\text{SiO}_2$  的厚度, 将电场强度最大值移至低折射率  $\text{SiO}_2$  膜层内部来实现高损伤。

对于两种高低折射率变化的反射膜, 其基本周期的光学厚度为  $\lambda_0/2$ , 相邻周期的相位差为  $2\pi$ , 即可实现对  $\lambda_0$  的高反,  $\lambda_0$  表示膜系中心波长。通过计算机对其进行模拟计算, 靠近内层的膜层仍使用 L, 在保证基本光学周期为  $\lambda_0/2$  不变的条件下, 通过次内两层 H 的厚度的连续变化, 可计算出不同变化下界面处的相对场强, 从而对膜层厚度进行非规整优化。通过评价函数  $F = (E - N)^2$  找到最优解<sup>[13]</sup>, 其中  $E$  为界面处的相对电场强度,  $N$  为设定值。其优化膜系结构为  $\text{Sub} | \text{L} 0.36 \text{H} 1.64 \text{L} 0.43 \text{H} 1.57 \text{L} (\text{HL}) \cdot 6 \text{H} 2 \text{L} | \text{Air}$ , 通过 Optilayer 软件对膜系的电场进行计算, 计算结果如图 2 所示。

从图 2 中可得, 非规整膜系最大场强在第一层的界面处的相对场强为 102.56, 较规整膜系降低了 42%, 第二层也从 77 降低到了 69, 虽然  $\text{SiO}_2$  膜层内的最大电场有所增加, 但由于  $\text{SiO}_2$  的吸收系数比  $\text{TiO}_2$  的吸收系数通常小 1~2 个数量级<sup>[11]</sup>, 所以对

吸收的影响不大。

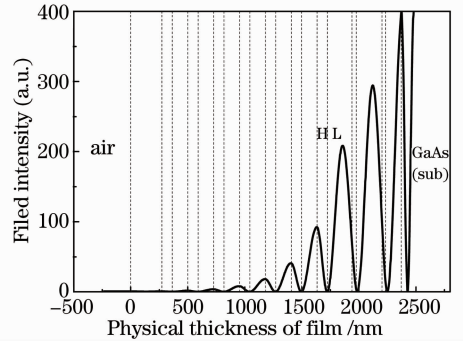


图 2 优化后非规整膜系的电场分布

Fig. 2 Electric field distribution of optimized non-quarter film

通过软件对优化前后的反射率曲线进行模拟, 结果如图 3 所示。从图 3 中可得, 非规整优化后的反射膜有效宽度减小, 但增益谱宽为十几纳米的半导体激光器并不受影响, 其在  $808 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$  范围的反射率均超过 99.8%, 非规整膜系优化前后的反射保持一致。

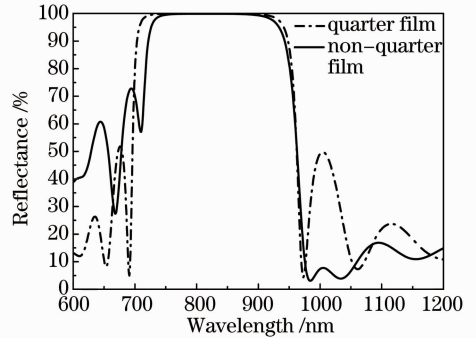


图 3 优化前后的反射率曲线

Fig. 3 Reflectance curves before and after optimization

由于激光器封装后的不对称性, 前腔面相对于后腔面具有更高的能量输出。前腔面减反膜的作用就是要引导激光穿透薄膜。引起腔面-薄膜界面高吸收的因素, 包括腔面的光洁度、腔面杂质缺陷的多

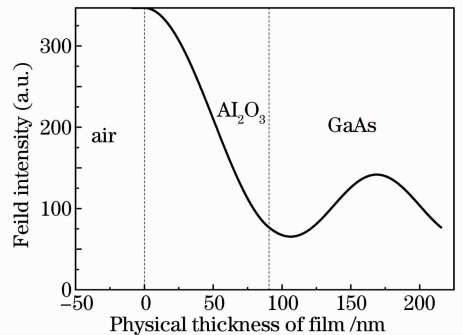


图 4 腔面减反膜的电场分布

Fig. 4 Electric field distribution of facet anti-reflective film

少、镀膜材料的吸收以及薄膜的制备工艺等。为了尽量减小薄膜吸收激光产生的热量,以及满足激光器谐振的增透效果,通常只需要一层损伤阈值高的减反膜,实验中使用材料是损伤阈值高、本征吸收小、稳定性高的单层  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,经过优化的反射率使其膜层厚度已固定,只能通过优化镀膜工艺来提高性能。从图 4 中可以看出,出光面的相对场强为 350,在  $\text{Al}_2\text{O}_3$  与衬底之间的场强仅为 76.8,可以通过增加其表面的清洁度和使用离子辅助沉积镀膜提高膜层的质量<sup>[14]</sup>来减小薄膜的表面和内部的吸收。

### 3 实验制备与结果分析

采用常用的  $\text{TiO}_2$  和  $\text{SiO}_2$  分别作为高折射率材料和低折射率材料,衬底为 GaAs。使用装配有新的等离子源(APS)的莱宝光学电子束镀膜机,APS 在旋转工件盘的下方。当温度达到 200 °C 时,等离子源开始工作,蒸镀前等离子对激光器腔面进行清洗,清除腔面异物和在空气中氧化物;蒸镀过程中,适当调整等离子能量,通过等离子对膜料粒子的碰撞,增大其沉积能量,使薄膜更加平滑、致密和牢固,而且不使等离子对腔面产生破坏。

图 5 为使用分光光度计测量的厚度同为 100 nm 两种薄膜的吸收曲线,从图中可以得到  $\text{TiO}_2$  薄膜在 808 nm 处的吸收是  $\text{SiO}_2$  薄膜的 12.9 倍。这为由于材料吸收不同而进行膜系优化提供了充分的依据。

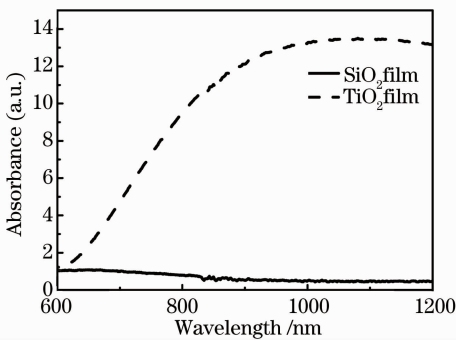


图 5 薄膜的吸收曲线

Fig. 5 Absorbance curves of thin films

为获得在 GaAs 基底上的离子清洗能量的优化,对离子清洗偏压和清洗时间进行了分组实验,其附着程度通过 3M No. 610 测试胶带粘在薄膜表面,然后垂直剥离胶带,反复进行 10 次,拉扯测试得到:刻蚀偏压 100 V,时间 15 min,其附着力不牢;刻蚀偏压 120 V,时间 2 min,其附着度也不牢;刻蚀 120 V,时间 15 min,其附着度较好;刻蚀偏压 140 V

时,时间为 10 min,附着度较好。考虑到对于腔面的损伤,最终选择刻蚀 15 min,120 V 离子源偏压。

薄膜的制备条件参数如表 1 所示,其中 sccm 为标准状态下 1 mL/min。制备完成后将样片放入 100 °C 去离子水中 3 h,薄膜未发生脱落,开裂现象。通过 Lambda 1050 分光光度计对高反射膜进行测量,实验和模拟的反射率曲线如图 6 所示,通过比较分析,得到制备的薄膜在中心波长处的反射率达到 99%,与设计的基本保持一致。

表 1 生长条件参数

Table 1 Parameters of growth condition

	Bias /V	Ar <sub>2</sub> /sccm	O <sub>2</sub> /sccm	Pressure /Pa	Rate / (nm/s)
Etch	120	12	0	$2.10 \times 10^{-2}$	—
H	120	8	10	$4.20 \times 10^{-2}$	0.35
L	120	13	0	$3.50 \times 10^{-2}$	0.8

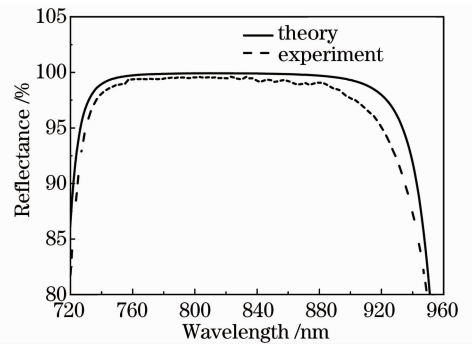


图 6 优化后的理论和实验反射曲线

Fig. 6 Theoretical and experimental refractive curves after optimization

实验采用条宽为 150  $\mu\text{m}$ ,腔长为 2 mm 的半导体激光器,分别使用规整膜系和非规整膜系作为高反膜,单层  $\text{Al}_2\text{O}_3$  作为减反膜进行制备。在室温环境,脉宽为 50  $\mu\text{s}$ ,频率为 100 Hz 的准连续波输出下测得器件的光功率输出曲线如图 7 所示。从图 7 中

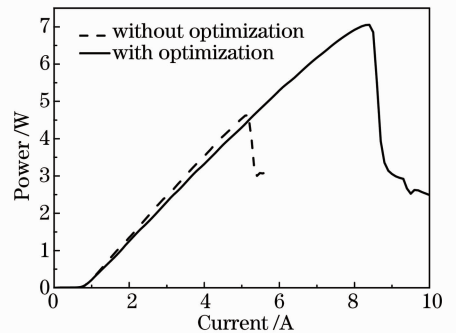


图 7 腔面膜优化前后功率曲线

Fig. 7 Output power curves of facet film before and after optimization

可以看出,两种高反膜在阈值以及斜率效率上保持一致,阈值均为 0.8 A,斜率效率为 0.97 W/A。使用未优化电场得到规整膜系做高反膜的器件,最大功率为 4.6 W,在 5 A 的时候已经失效;而使用优化后的非规整膜系做高反膜的器件,在 8 A 时失效,失效功率为 7.02 W,功率提升了 2.42 W,说明使用非规整膜系能够显著地提升半导体激光器的性能。

## 4 结 论

对腔面膜电场分布进行了计算,通过计算机辅助进行优化,改进后的腔面高反膜系结构为 Sub|L 0.36H 1.64L 0.43H 1.57L(HL)\*5 H 2L|Air,此膜系结构在界面处的相对场强最大值由 170 减小到了 102,减小了 42%,通过对前腔面的离子刻蚀工艺的偏压和时间进行优化,使用电子束蒸发,离子辅助沉积的方法将优化的膜系制备于半导体腔面;使用压测方法,在室温脉宽为 50  $\mu$ s,频率为 100 Hz 的连续输出情况下,使用优化前膜系做高反膜的器件,最大功率由 4.6 W 提升到 7.02 W,失效电流由 5 A 提升到 8 A。对腔面膜进行电场分布优化是提高大功率半导体激光器腔面损伤阈值及功率的一种有效方法。

## 参 考 文 献

- 1 Y Qu, Y Shu, C Y Liu, *et al.*. High-power InAlGaAs/GaAs and AlGaAs/GaAs semiconductor laser arrays emitting at 808 nm[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(2): 389-391.
- 2 C S Cao, L Fan, I Ai, *et al.*. Recent development of high-power-efficiency 50-W CW TE/TM polarized 808 nm diode laser bar at Lasertel[C]. SPIE, 2010, 7583: 75830L.
- 3 H Konig, G Groninger, P Brick, *et al.*. Brilliant high power laser bars for industrial applications[C]. SPIE, 2008, 6876: 687616.
- 4 D F Welch. A brief history of high-power semiconductor lasers

- [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2000, 6(6): 1470-1477.
- 5 D Yanson, M Levi, M Shamay, *et al.*. Facet engineering of high power single emitters[C]. SPIE, 2011, 7918: 79180Z.
- 6 P Ressel, G Erbert, U Zeimer, *et al.*. Novel passivation process for the mirror facets of Al-free active-region high-power semiconductor diode lasers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(5): 962-964.
- 7 C Silfvenius, P Blixt, C Lindstrom, *et al.*. High COMD, nitridized InAlGaAs laser facets for high reliability 50 W bar operation at 805 nm[C]. SPIE, 2004, 5336: 132-143.
- 8 G Erbert, A Brwloff, J Sebastian, *et al.*. High Power Diode Lasers [M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2000, 173-223.
- 9 Fan Zhengxiu, Tang Xuefei. Temperature field design of optical coating[J]. Acta Optica Sinica, 1995, 15(4): 463-467.
- 范正修, 汤雪飞. 光学薄膜的温度场设计[J]. 光学学报, 1995, 15(4): 463-467.
- 10 H G Qi, M P Zhu, M Fang, *et al.*. Development of high-power laser coatings[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2013, 1(1): 36-43.
- 11 Tang Jinfa, Gu Peifu, Liu Xu, *et al.*. Modern Optical Thin Film Technology[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006. 338-343.
- 唐晋发, 顾培夫, 刘旭, 等. 现代光学薄膜技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006. 338-343.
- 12 Tao Getao, Lu Guoguang, Yao Shun, *et al.*. Optimized design of cavity facet coatings of 808 nm high power semiconductor laser [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2007, 28(6): 778-784.
- 套格套, 路国光, 尧舜, 等. 808 nm 大功率半导体激光器腔面膜优化设计[J]. 半导体光电, 2007, 28(6): 778-784.
- 13 Kong Mingdong, Li Ruijie, Zhou Jiulin, *et al.*. A new method to design high reflectivity film[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2000, 11(1): 62-64.
- 孔明东, 李瑞洁, 周九林, 等. 高反射率光学薄膜的一种新设计方法[J]. 光电子激光, 2000, 11(1): 62-64.
- 14 Wang Congjuan, Jin Yunxia, Wang Yingjian, *et al.*. High laser-induced damage threshold antireflection coatings of 1053 nm deposited by ion assisted deposition[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(5): 683-686.
- 王聪娟, 晋云霞, 王英剑, 等. 离子束辅助技术获得高激光损伤阈值的增透膜[J]. 中国激光, 2006, 33(5): 683-686.

栏目编辑: 韩峰