

文章编号: 1001-3806(2012)03-0318-04

## 基于 ZEMAX 的半导体激光准直仿真设计

陈国 赵长明\* 纪荣祎 李鲲 罗雄 白羽  
(北京理工大学 光电学院 北京 100081)

摘要: 为了压缩 905nm 的半导体激光, 以用于远程测距, 采用几何光路原理, 设计了由两个相互垂直的椭圆柱面透镜组成的准直系统, 并在 ZEMAX 软件的非序列模式下实现仿真。半导体激光器快慢轴的初始发散角为 30°和 15°, 经过柱面透镜后, 半导体激光器两个方向上的发散角都大大压缩; 经准直后, 激光束的快慢轴发散角分别为 4.4mrad 和 3.6mrad, 基本满足了远程测距的要求。结果表明, 椭圆面柱透镜对半导体激光有很好的准直作用。

关键词: 激光光学; 发散角; 几何光学; ZEMAX

中图分类号: O435; TN248.4 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.03.008

### Simulation design of semiconductor laser collimation based on ZEMAX

CHEN Guo, ZHAO Chang-ming, JI Rong-yi, LI Kun, LUO Xiong, BAI Yu  
(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In order to compress 905nm semiconductor laser for remote distance measurement, based on geometrical optical theory, an alignment system composed of two vertical elliptical cylindrical lens was designed, then simulation was carried out in the non-sequential mode of ZEMAX software. Initial divergent angles of a semiconductor laser at fast axis and slow axis are 30° and 15° respectively. After passing through the cylindrical lens, these divergent angles became greatly compressed in both directions. After collimation, the divergent angles became 4.4mrad and 3.6mrad at fast axis and slow axis respectively, meeting the requirement of a remote distance detection lidar. The results show that the elliptical cylindrical lenses have good effect on semiconductor laser collimation.

**Key words:** laser optics; divergence; geometrical optics; ZEMAX

### 引言

半导体激光器(laser diode, LD)以其体积小、效率高、易于集成、可高速直接调制等优点<sup>[1-2]</sup>, 被广泛用于激光雷达、激光测量、激光照明、激光制导、激光打印以及高密度信息记录与读取等领域<sup>[3-4]</sup>。但是半导体激光器发射的激光光束具有在垂直和平行于结平面两个方向发散角不同、光斑形状不规则(如一般是椭圆型或长条形)、存在固有像散等缺点, 这使得半导体激光 3 维扫描成像雷达的测程、测距精度大大受影响, 为了适用于远距离空间激光测距, 必须对半导体激光发散光束进行准直<sup>[5-8]</sup>。作者主要采用椭圆面柱透镜<sup>[9-10]</sup>对 905nm 的半导体激光做准直整形处理, 使得激光的发散角尽可能的小, 接收物体表面的激光光斑尽可能的小,

而且规则, 从而达到提高测程和测距精度的目的。

### 1 理论分析及计算

采用 OSARM 公司的型号为 SPL LL90\_3 的半导体激光器。查看使用说明书得到: SPL LL90\_3 型号的半导体激光器在弧矢(平行于结平面)方向上的发散角  $\theta_{//} = 15^\circ$ , 在子午(垂直于结平面)方向上的发散角  $\theta_{\perp} = 30^\circ$ , 整个激光器的峰值功率为 70W。

半导体激光器有源区只有约 0.1 $\mu\text{m}$  ~ 0.2 $\mu\text{m}$  的厚度, 可以近似看作沿慢轴方向的线光源。根据半导体激光束两个方向上的发散角不同的特点, 采用两个互相垂直的柱透镜组分别对两个方向的光束进行准直, 选用的两个柱面镜面型为椭圆面。

如图 1 所示, 半导体激光器发出的子午光线先经过母线平行于激光束慢轴方向的柱透镜后变成准平行光束(平行光束不可能实现)。由于第 2 个柱透镜  $M_2$  对于子午光线的发散角无影响, 可看作平板玻璃。图 2 显示弧矢光线经过第 1 个透镜  $M_1$  时, 光束会发生偏移, 但不会影响光束的发散角, 在经过第 2 个柱透镜时, 弧矢光也同样得到准直, 输出准平行光。

基金项目: 国防科技工业技术基础科研资助项目 (J172009C001)

作者简介: 陈国(1988-), 男, 硕士研究生, 主要从事 3 维扫描激光探测系统的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: zhaochm1@263.net

收稿日期: 2011-09-23; 收到修改稿日期: 2011-10-14

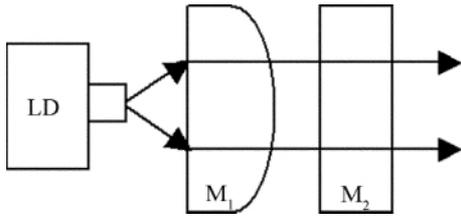


Fig. 1 Laser path in radial direction

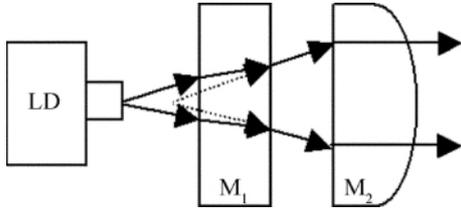


Fig. 2 Laser path in sagittal direction

设两个柱透镜的厚度分别为  $d$  和  $d'$  柱透镜的折射率为  $n$  激光器到第 1 个柱透镜的平面侧的距离为  $L$  激光束的发散半角分别为  $\theta_{1/2//}$  和  $\theta_{1/2\perp}$ 。下面将激光器看作一个点光源,运用几何光路原理分别对子午光线和弧矢光线进行准直计算。

### 1.1 子午方向

建立如图 3 所示的直角坐标系,光束从点  $R$  发射出来,半发散角为  $\alpha$  经过第 1 个柱透镜平面侧在点  $M$  处发生折射,折射角为  $\varphi$  再经过椭圆弧面时发生第 2 次折射,折射角为  $\Phi$  二次折射点  $N$  处法线与  $x$  轴的夹角为  $\theta$  最后得到的准平行光束的半发散角为  $\theta_{1/2//}$ 。

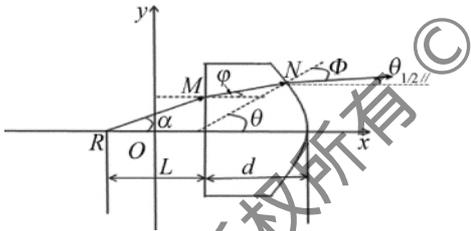


Fig. 3 Collimation calculation of radial beam

图 3 中,设椭圆弧线的方程为:  $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$ ,  $O$  点为椭圆中心,激光由点  $R$  发射,由折射定律有:

$$\sin\alpha = n\sin\varphi \quad (1)$$

$$n\sin(\theta - \varphi) = \sin\Phi \quad (2)$$

直线  $MN$  的方程为:

$$y = x\tan\varphi + L\tan\alpha - (a - d)\tan\varphi \quad (3)$$

又因为点  $N$  在椭圆曲面上,坐标满足椭圆方程  $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$

1 则直线  $MN$  方程和椭圆方程联立,可求得  $N$  点坐标:

$$x_N = \frac{1}{b^2 + u^2}(-auw + ab\sqrt{b^2 + u^2 - w^2}) \quad (4)$$

$$y_N = x_N\tan\varphi + w \quad (5)$$

上面两式为简化结果,其中  $u = a\tan\varphi$   $w = L\tan\alpha - (a - d)\tan\varphi$ 。

此外,  $N$  点处法线的斜率  $k = \tan\theta$ ,  $N$  点处椭圆弧线的切线斜率为  $k' = \frac{dy}{dx}\Big|_N$ , 且  $kk' = -1$ , 因此得:

$$\tan\theta = \frac{a^2 \sqrt{1 - \frac{x_N^2}{a^2}}}{bx_N} \quad (6)$$

由 (2) 式得:  $\Phi = \arcsin[n\sin(\theta - \varphi)] \quad (7)$

由 (1) 式可得到:  $\varphi = \arcsin\left(\frac{\sin\alpha}{n}\right) \quad (8)$

最后得垂直方向的发散半角为:

$$\theta_{1/2\perp} = \theta - \Phi \quad (9)$$

### 1.2 弧矢方向

弧矢方向的分析计算和垂直方向上的基本一样。如图 4 所示,平行方向的光经过第 1 个柱透镜  $M_1$  时,光线发生偏折,发散角并没有改变,折射光的反向延长线交于点  $R'$ , 平行方向的光可以看作是由点  $R'$  发出的,所以柱透镜  $M_2$  距发射点的距离可以表示为:

$$L' = A_s + \Delta + d + L + e \quad (10)$$

式中  $A_s$  为半导体激光器的固有像散,大概有几微米,  $\Delta$  为平行方向光通过第 1 个柱透镜时的向前偏移量,  $d$  为第 1 个透镜厚度,  $L$  为第 1 个透镜距光源距离,  $e$  为两透镜之间的距离。值得注意的是  $A_s$  与  $\Delta$  的符号是相反的,通过调节可基本消除像散。将  $L$  和  $d$  代入子午光线的方程可以求得弧矢发散角。

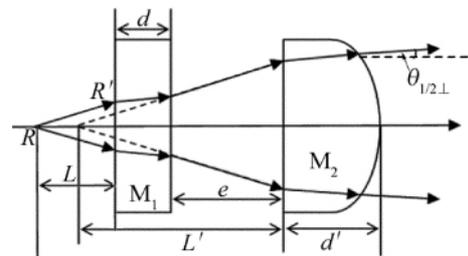


Fig. 4 Collimation calculation of sagittal beam

## 2 仿真设计

上节中列出了求解发散角的公式,可以通过上面的公式对系统进行数值上的模拟仿真。首先,将上面公式组合,得到最终发散角的公式是以距离  $L$ 、透镜厚度  $d$ 、透镜折射率  $n$ 、透镜椭圆弧面方程中的  $a$  和  $b$  为参变量的方程。

### 2.1 MATLAB 计算

为了减少设计的复杂性,尽量先确定部分可选参量,因此,为了便于加工,选用常见的 K9 玻璃作为透镜材料, K9 玻璃的折射率  $n = 1.5163$ 。将程序写入 MATLAB 中,经过多次试探得到椭圆柱透镜的初始结构:在垂直方向,取  $L = 1.5\text{mm}$   $a = 12\text{mm}$   $b = 5\text{mm}$   $n = 1.5163$   $d = 4\text{mm}$ , 此时垂直方向边缘光线的半发散角

被压缩为 0.0029rad; 在平行方向, 取  $L' = 6.5\text{mm}$ ,  $a = 32.5\text{mm}$ ,  $b = 12.5\text{mm}$ ,  $n = 1.5163$ ,  $d' = 4\text{mm}$ , 此时平行方向边缘光线的半发散角被压缩为 0.0020rad。接下来这些参量将作为 ZEMAX 仿真中的初始数据。

由于 ZEMAX 中标准面型公式为:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} \quad (11)$$

式中  $c$  为曲率, 是曲率半径  $R$  的倒数,  $r$  为曲面近轴部分的曲率半径,  $k$  是二次曲面常量, 决定着这个面的类型, 当  $-1 < k < 0$  时, 曲面为横椭圆。

$R$  和  $k$  的计算方式如下:

$$R = \frac{1}{c} = \pm \frac{b^2}{a} \quad (12)$$

$$k = - \left[ \frac{a^2 - b^2}{a^2} \right] \quad (13)$$

式中  $a$  为椭圆半长轴,  $b$  为椭圆半短轴, 将两个透镜的初始数据代入(12)式、(13)式, 得到第1个透镜和第2个透镜的曲率半径及二次系数分别为:  $R_1 = -2.083\text{mm}$ ,  $k_1 = -0.826$ ;  $R_2 = -4.808\text{mm}$ ,  $k_2 = -0.852$ 。

## 2.2 ZEMAX 仿真

ZEMAX 是一种广泛使用的光学设计软件, 由美国华盛顿州贝尔维尤市的名为 ZEMAX 的软件开发公司研制发售。它可以用来设计和分析光学系统。在 ZEMAX 非序列模式下模拟的 905nm 激光器见图 5, 发散角为  $\theta_{//} = 15^\circ$  和  $\theta_{\perp} = 30^\circ$ , 激光总功率为 70W。

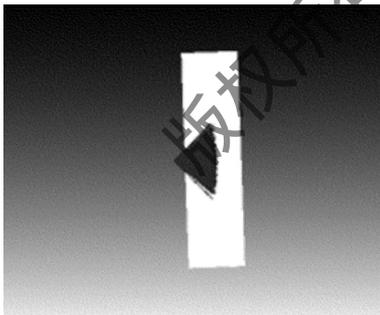


Fig. 5 905nm LD source

由图 6 可以看出, 在激光器后添加第 1 个柱面镜

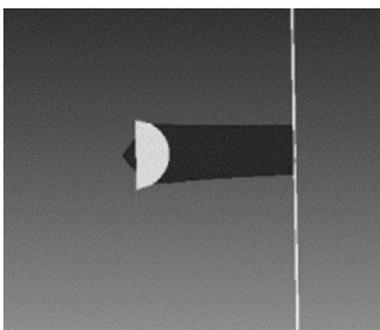


Fig. 6 LD source and the first cylindrical lens

后, 子午光线得到很好的准直, 证明了初始结构的正确性。如图 7 所示, 添加第 2 个柱透镜后, 两个方向的光线都得到很好的准直。

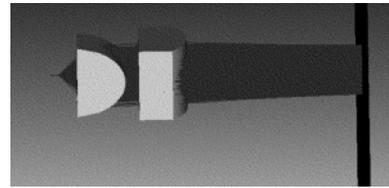


Fig. 7 Whole laser path diagram in ZEMAX

在以上初始结构的基础上, 对镜头数据进行了优化, 最终镜头数据如表 1 所示。

Table 1 The optimized system parameters

object	z position/mm	material	y half-width/mm	x half-width/mm	thickness/mm	R/mm	k
biconic	1.057	K9	3.000	2.000	3.992	-2.112	-0.507
biconic	6.590	K9	3.000	3.000	3.995	-4.031	0.462

表 1 中, biconic 代表柱透镜,  $z$  坐标表示距离光源的距离(因为设定的时候, 把光源放在坐标原点处), 透镜材料为 K9 玻璃,  $x$  和  $y$  半宽分别表示透镜在两方向的透镜宽度,  $R$  和  $k$  参量决定了面型为椭圆。由于两透镜的第 1 面都为平面, 所以第 1 面的参量省略。

在表 1 中的参量设定下对光斑进行分析。图 8 是接收面积为  $100\text{mm} \times 100\text{mm}$  的接收器在距离光源 20mm 和 100mm 处采集的光斑图。图 8a 和图 8c 为未经过准直系统时接收到的光斑, 图 8b、图 8d 为激光经过准直系统后接收到的光斑, 通过比较可明显看出光束的发散角得到大大的压缩。在距离为 50mm, 100mm, 1m 和 10m 处, 准直后的激光束光斑图如图 9 所示。

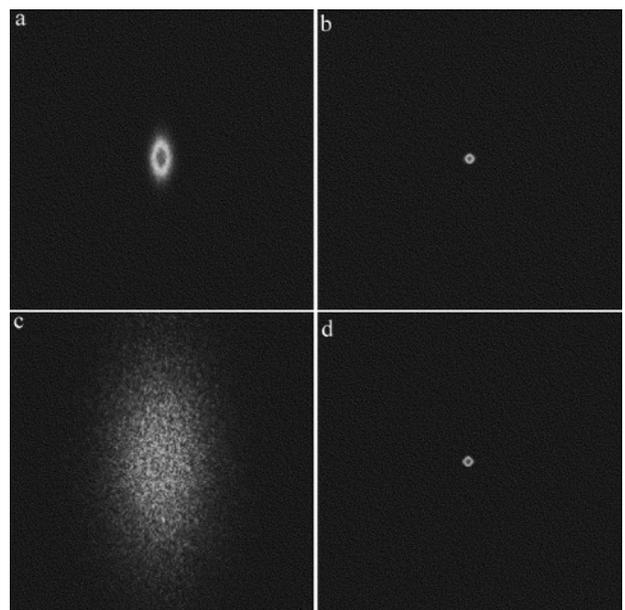


Fig. 8 Comparison of spot diagrams

a—spot of uncollimated beam at 20mm b—spot of collimated beam at 20mm c—spot of uncollimated beam at 100mm d—spot of collimated beam at 100mm

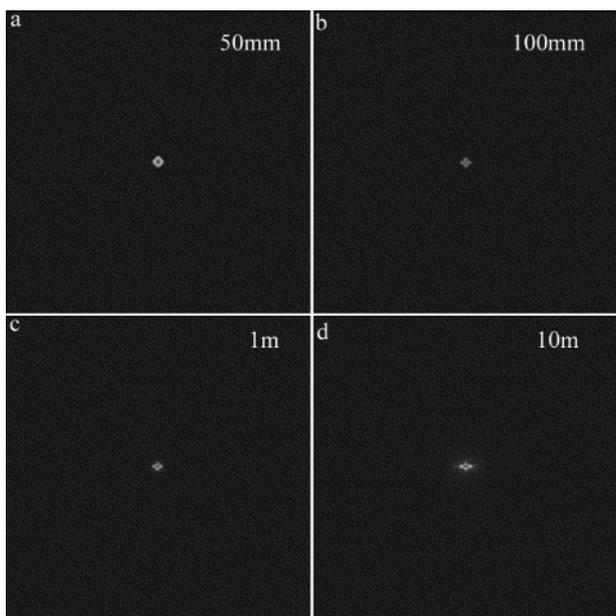


Fig. 9 Contrast of collimated beam spot (100mm x 100mm)

由图 9 可以看出,光束在由 50mm 处到 10m 处的传播过程中,光斑大小没有发生很大变化,椭圆柱透镜对光束的准直起到了很好的效果。

可以通过接收面上激光光斑的光场分布图对光斑大小进行分析。光场分布图中光场曲线与横轴的交点为激光束光斑的最边缘,交点处的横坐标即为相应光斑的半径大小。因此,可以通过采集 x 方向、y 方向上的光场分布图,获得光斑的半径大小。

在探测面上分别采集了 5m 和 10m 处 x 方向上的光场强度分布图,如图 10 和图 11 所示。光场分布图的横轴表示坐标信息(单位: mm),纵轴表示在相应的横坐标处的激光非相干辉度(单位: W/cm<sup>2</sup>)。

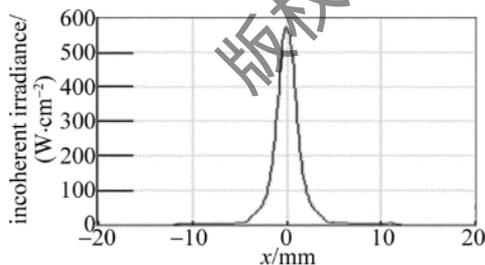


Fig. 10 Light field distribution at 5m in x direction

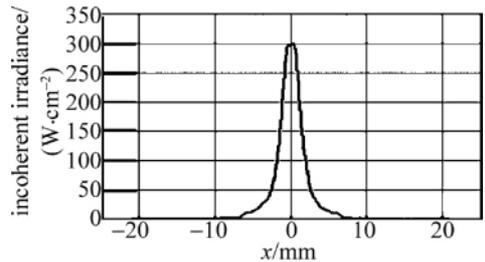


Fig. 11 Light field distribution at 10m in x direction

由图 10 和图 11 可知 5m 和 10m 处激光束的光斑

半径分别为  $R_{x_1} = 12\text{mm}$ ,  $R_{x_2} = 21\text{mm}$ 。所以根据公式可求得 x 方向半发散角为  $\theta_{1/2//} = (R_{x_2} - R_{x_1}) / (z_2 - z_1) = 1.8\text{mrad}$ 。

在探测面上分别采集了 5m 和 10m 处 y 方向上的光场强度分布图,如图 12 和图 13 所示。

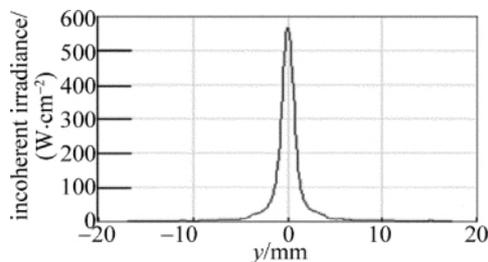


Fig. 12 Light field distribution at 5m in y direction

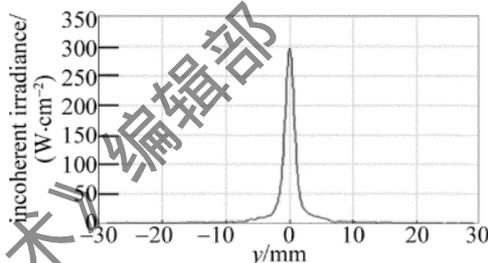


Fig. 13 Light field distribution at 10m in y direction

由图 12 和图 13 可知 5m 和 10m 处激光束的光斑半径分别为  $R_{y_1} = 17\text{mm}$ ,  $R_{y_2} = 28\text{mm}$ 。所以根据公式可求得 y 方向半发散角为  $\theta_{1/2\perp} = (R_{y_2} - R_{y_1}) / (z_2 - z_1) = 2.2\text{mrad}$ 。

子午方向和弧矢方向的光束基本集中在半径为 10mm 的光斑范围内,两个方向的光束分布与标准高斯曲线分布基本吻合,且在 10m 处,接收面上激光总功率为 54W 左右。

### 3 结 论

用两个相互垂直的椭圆面柱透镜对波长为 905nm 的半导体激光器进行准直模拟设计。根据几何光路原理推导了计算公式,并在 MATLAB 中反复计算,得到了准直系统的初始参量。然后在 ZEMAX 设计软件中,将初始参量进一步优化,得到更好的结构。通过优化,得到的激光束在弧矢和子午方向上的发散角分别为 3.6mrad 和 4.4mrad,10m 处接收到的激光总功率为 54W,激光能量大多集中在半径为 10mm 的光斑范围内,基本可以满足 3 维扫描雷达的要求。同时证明了椭圆柱透镜对激光准直有很好的作用。

#### 参 考 文 献

[1] CHEN B L, ZHANG H, SUN Q Y. Collimating optical systems of the pulse semiconductor laser [J]. Laser Technology, 2003, 27(3): 243-244 (in Chinese).

(下转第 325 页)

### 3 结 论

利用 PLD 系统制备了纳米硅薄膜,利用喇曼光谱、XRD 分析计算了在不同脉冲激光能量下所制备纳米硅薄膜中晶粒的尺寸。发现薄膜中晶粒的平均尺寸和薄膜晶化率随着激光能量的增加先增大后减小,在激光能量为 300mJ/pulse 时,晶粒最大,并发现此时 Si(111) 和 Si(311) 晶相择优生长;在激光能量为 270mJ/pulse 时, Si(220) 晶相择优生长。

#### 参 考 文 献

- [1] HE Y L, SHI Y. Improving characters of silicon devices using by nc-Si:H films [J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2003, 24( s1) : 192-197( in Chinese) .
- [2] ZHAO Z X, LI M, ZHAN Y, *et al.* Band gap model and the *I-V* characteristic of the nc-Si:H thin films deposited by RF-sputtering [J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2009, 15( 3) : 299-302( in Chinese) .
- [3] WEI W S, WANG T M, ZHANG C X, *et al.* Preferred growth of nanocrystalline silicon in boron-doped hydrogenated nanocrystalline silicon films [J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2003, 9( 1) : 25-30( in Chinese) .
- [4] ZHANG Q F, ZHU M F, LIU F Z, *et al.* Study of n-type nc-Si:H films and hetero function solar cells by HWCVD [J]. Acta Energeiae Solaris Sinica, 2006, 27( 7) : 691-694( in Chinese) .
- [5] AO Y H, HU S L, LONG H, *et al.* Study on pulsed laser deposition technology [J]. Laser Technology, 2003, 27( 5) : 453-459( in Chinese) .
- [6] CHEN C Z, BAO Q H, YAO S S, *et al.* Pulsed laser deposition and its application [J]. Laser Technology, 2003, 27( 5) : 443-446( in Chinese) .
- [7] TAKEHITO Y, SHIGERU T, YUKA Y, *et al.* Nanometer-sized silicon crystallites prepared by excimer laser ablation in constant pressure inert gas [J]. Applied Physics Letter, 1996, 68( 13) : 1772-1774.
- [8] FU G S, WANG Y L, CHU L Z, *et al.* The size distribution of Si nanoparticles prepared by pulsed laser ablation in pure He, Ar or Ne gas [J]. Europhysics Letter, 2005, 69( 5) : 758-762.
- [9] WANG Y L, CHU L Z, DENG Z C, *et al.* Size-uniform and controllable Si nanoparticles obtained by regulating target-to-substrate distance [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36( 4) : 989-992( in Chinese) .
- [10] ZHANG X D, ZHAO Y, ZHU F, *et al.* Study of vertical non-uniformity of microcrystalline silicon thin film using Raman spectra and AFM [J]. Journal of Synthetic Crystals, 2004, 33( 6) : 960-964( in Chinese) .
- [11] ZHANG L W, ZHAO J T, YANG G, *et al.* Raman analysis of microstructure of silicon thin films deposited at low temperatures [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2007, 28( 1) : 58-59( in Chinese) .
- [12] QIU S H, CHEN C Z, LIU C Q, *et al.* Raman analysis of crystalline properties of nano-crystalline silicon thin films prepared at low temperature by PECVD technique [J]. Materials Research and Application, 2008, 2( 4) : 428-431( in Chinese) .
- [13] BRODSKY M H, CARDONA M, CUOMO J J. Infrared and Raman spectra of the silicon-hydrogen bonds in amorphous silicon prepared by glow discharge and sputtering [J]. Physics Review, 1977, B16( 8) : 3556-3571.
- [14] ZHU L Y, HUANG X F, WANG L, *et al.* Fabrication of nc-Si array made by pulsed laser assisted constrained interference crystallization [J]. Micronanoelectronic Technology, 2002, 39( 7) : 17-20( in Chinese) .
- [15] YUAN Z J, LOU Q H, ZHOU J, *et al.* Flat-top green laser crystallization of amorphous silicon thin film [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36( 1) : 205-209( in Chinese) .
- [16] OSSADNIK C, VEPREK S, REGORA I G. Applicability of Raman scattering for the characterization of microcrystalline silicon [J]. Thin Solid Films, 1999, 337( 1/2) : 148-151.
- [17] LI Q S, ZHANG Z C, SONG L, *et al.* Preparation and properties of nanometer-sized antimony-doped SnO<sub>2</sub> powders [J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2002, 28( 2) : 184-224( in Chinese) .
- [18] ZHOU Y H, CHEN X J, QIAO Y, *et al.* Experiment investigation of femtosecond pulse laser deposition [J]. Journal of Jiangnan University( Natural Science Edition), 2007, 35( 4) : 33-36( in Chinese) .
- [19] WANG Y L, ZHANG H S, CHU L Z, *et al.* Influence of ambient gas on average size of Si nanoparticles deposited by pulsed laser ablation [J]. Journal of Materials Engineering, 2008, 10( 61) : 247-250( in Chinese) .
- [20] PAN Y Y, CUI R Zh, CHEN G, *et al.* Beam-shaping technique for laser diode bars with prism group [J]. Laser Technology, 2006, 30( 4) : 371-372( in Chinese) .
- [21] GE L, QIU K, TANG M G. Study of optical antenna for laser space communication [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 1998, 27( 4) : 367-370( in Chinese) .
- [22] YANG Ch P, WU J, HE Y. Application of laser lidar in space rendezvous and docking [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 1999, 28( 4) : 447-451( in Chinese) .
- [23] BONORA S. Compact beam-shaping system for high-power semiconductor laser bars [J]. Journal of Optics, 2007, A9( 4) : 380-386.
- [24] ZHAO W Q, TAN J B, MA H W, *et al.* Laser collimation method based on the drift feedback control [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24( 3) : 373-377( in Chinese) .
- [25] MA H, ZENG X D, AN Y Y. Double half-cylindrical lens collimate the beam of laser diode [J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33( 7) : 937-940( in Chinese) .
- [26] LIANG P. Study on collimation property of off-axis parabolic mirror [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26( 6) : 909-913( in Chinese) .
- [27] HUNZIKER W, BOLZ E, MELCHIOR H. Cylindrically lensed polarization maintaining fibers [J]. Electronics Letters, 1992, 28( 17) : 1654-1656.
- [28] FU Y Q, NGOI K A B. A novel one step integration of edge-emitting laser diode with micro-elliptical lens using focused ion beam direct deposition [J]. Transactions on Semiconductor Manufacturing, 2002, 15( 1) : 155-159.

( 上接第 321 页)