

引用格式: CAO Zhao-wen, XU Zi-wei, ZOU Kuai-sheng. Study on Beam Width Narrowing of Blue Structured Light in Long Distance[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(8):0814002

曹兆文, 许子威, 邹快盛. 蓝光线结构光长距离束宽窄化研究[J]. 光子学报, 2020, 49(8):0814002

# 蓝光线结构光长距离束宽窄化研究

曹兆文<sup>1,2</sup>, 许子威<sup>1,2</sup>, 邹快盛<sup>1,2</sup>

(1 苏州大学 光电科学与工程学院, 江苏 苏州 215006)

(2 江苏省先进光学制造技术重点实验室 & 教育部现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006)

**摘 要:** 针对一种快轴半功率角为  $23^\circ$  的商用蓝色单管半导体激光器, 设计制作了由直径为 1.8 mm 的自聚焦透镜、直径 2.5 mm 的柱透镜以及体布拉格光栅组成的光学系统以产生线结构光. 研究表明, 该方案可以实现在距离系统 5.5 m 处束宽为 0.48 mm、在  $5.5 \pm 0.5$  m 范围内束宽低于 0.60 mm 的线结构光输出, 可为线结构光测量方案的选择提供新的思路.

**关键词:** 自聚焦透镜; 半导体蓝光激光二极管; 光束整形; 体布拉格光栅; 圆柱透镜

中图分类号: O439

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204908.0814002

## Study on Beam Width Narrowing of Blue Structured Light in Long Distance

CAO Zhao-wen<sup>1,2</sup>, XU Zi-wei<sup>1,2</sup>, ZOU Kuai-sheng<sup>1,2</sup>

(1 School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China)

(2 Key Lab of Advanced Optical Manufacturing Technologies of Jinangsu Province & Key Lab of Modern Optical Technologies of Education Ministry of China, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China)

**Abstract:** A gradient-index lens with a diameter of 1.8 mm, a cylindrical lens with a diameter of 2.5 mm and a volume Bragg grating are designed and fabricated as an optical system for a commercial blue single-tube semiconductor laser with a fast axis full width at half maxima of  $23^\circ$ . The experimental results show that this scheme can achieve a beam width of 0.48 mm at a distance of 5.5 m from the system, and the beam width is less than 0.60 mm in  $5.5 \pm 0.5$  m nearly, which can provide a new solution for the selection of the measurement scheme of line structured light.

**Key words:** Gradient-index Lens; Blue semiconductor laser diode; Beam shaping; Volume Bragg Grating; Cylindrical lens

**OCIS Codes:** 140.2020; 140.3300; 230.1950; 110.2760

## 0 引言

在工业测量领域中,非接触式测量定位是一个非常重要的环节,半导体激光器集成的线结构光模组具有价格低、输出稳定、效率高等优势,被广泛用于机器视觉的解决方案中.现阶段在各领域广泛应用的线结构光应用模型为光栅投影模型<sup>[1]</sup>.模型中用多个等距线结构光条纹光带投影至被测物,再用相机拍摄条纹受物品调制的弯曲程度,将弯曲的条纹进行解调得到相位信息,即可获得物品的高度、轮廓等细节信息.系统

基金项目:国家重点研发计划(No.2016YFF0100902),江苏高校优势学科建设工程资助项目

第一作者:曹兆文(1994—),男,硕士研究生,主要研究方向为先进光电材料与器件. Email: rrsrsrsr@163.com

导师:邹快盛(1976—),男,研究员,博士,主要研究方向为先进光电材料与器件. Email: zks@suda.edu.cn

收稿日期:2020-03-20;录用日期:2020-05-11

<http://www.photon.ac.cn>

中线结构光条纹间距大小决定了测量的精度,更小的条纹间距能使系统分辨出更多被测物体的细节.

相比于使用更为普遍的红光或者红外激光器二极管(Laser diode, LD),短波长的蓝光激光器二极管由于损耗低、能量集中、不容易发生衍射等优势在测量、定位等领域有着重要的应用<sup>[2-3]</sup>.激光二极管输出的激光发散角通常比较大,同时快轴与慢轴两个方向的分散角有差异,因此在使用时需要对其出射的光束进行整形<sup>[4]</sup>.对激光器二极管的光束的压缩一般有柱透镜整形、梯形棱镜整形<sup>[4-5]</sup>、自聚焦透镜整形<sup>[6-7]</sup>等方案<sup>[8]</sup>.柱透镜的整形是对光束单方向上的光进行压缩,激光器二极管在两个方向上的光有不同分散角度,因此需要两个甚至多个柱透镜,对装配中心对准的要求极高,非球面透镜具有良好的准直效果,但是由于设计难度比较大,对不同的激光器二极管光束需要有不同的光学设计.2009年,吴芄等<sup>[9]</sup>将波长为800 nm的激光器二极管通过单管自聚焦透镜,再将出射光束整形形成线形光斑,其快、慢轴远场分散角分别为 $0.1^\circ$ 和 $2.5^\circ$ ,在外壳0.2 mm处,其快轴方向的光束宽度被压缩至0.82 mm,有效耦合效率为86%,但是其准直效果图中有相当一部分杂光,因而难以应用在实际结构光测量中.2019年,秦贯宇等<sup>[10]</sup>提出了一种基于普吕克直线的标定法,同时使用高精度的多线光源产生仪器,将1.8 m处被测物品的测量误差降低到0.08 mm以下.在民用市场,德国DEKO Measuring的线结构光测量设备产品LL12-HVG测量宽度为1~1.1 mm,工作距离为 $5\text{ m} \pm 1.5\text{ mm}$ ,美国THORLABS公司的CPS450产品在外壳前50.8 mm测得快轴方向的光束宽度为0.89 mm,市面上很少有在长距离(大于5 m)上低于0.8 mm光束宽度的设备,因此限制了线结构光的应用<sup>[11]</sup>.

为了获得光束质量更好、光束宽度更小的结构光束,针对美国OSRAM公司一款商用450 nm蓝光激光二极管,结合自聚焦透镜、柱透镜与体布拉格光栅(Volume Bragg Grating, VBG)三种光学元件的特点,优化设计并制作三种光学元件,实现一种新的结构光方案.

## 1 理论分析

### 1.1 自聚焦透镜中的光束传输

有一定张角的光从发光点出射,进入自聚焦透镜的传输原理如图1所示,从发光点发出的光以角度为 $\theta$ 的收光角入射到自聚焦透镜的端面,入射点为 $M$ ,那么使光线在自聚焦透镜内稳定传输的条件为: $\text{NA} > \sin\theta$ ,其中NA为自聚焦透镜的数值孔径.

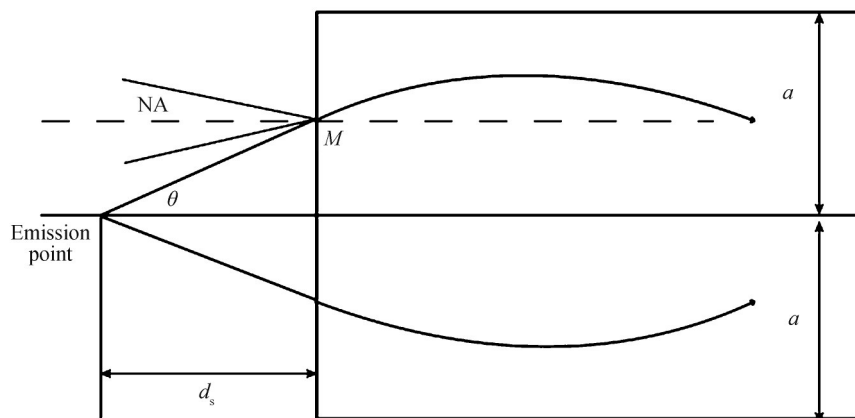


图1 光线进入自聚焦透镜传输原理  
Fig. 1 The light enters the gradient-index lens

为了使光束不从透镜的外壁泄露,在 $M$ 点处有 $\text{NA} > \sin\theta$ ,可以得到自聚焦透镜数值孔径的边界收光条件 $r_p$ ,即

$$r_p = \sqrt{\frac{d_s^2 \text{NA}_m^2 a^2}{d_s^2 \text{NA}_m^2 + a^2}} \quad (1)$$

式中, $a$ 为自聚焦透镜的半径, $\text{NA}_m$ 为自聚焦透镜的中心最大数值孔径, $d_s$ 为半导体激光器二极管发光点到端面的距离.根据光路可逆原理,当平行光照射进自聚焦透镜后出射的截距可以被认为是在截距处入射出射平行光,因此可以计算得到发光点距离端面距离为 $d_s$ 时,自聚焦透镜出射平行光的长度 $z$ 为

$$z = \frac{1}{\sqrt{A}} \arctan \left[ \frac{1}{n(0)\sqrt{A}d_s} \right] + \frac{s\pi}{\sqrt{A}}, s = 0, 1, \dots \quad (2)$$

式中,  $\sqrt{A}$  为自聚焦透镜的聚焦常数,  $n(0)$  为自聚焦透镜的中心折射率.

自聚焦透镜经过离子交换<sup>[12]</sup>后的折射率分布采用马赫-曾德干涉系统测量<sup>[13]</sup>, 自聚焦透镜样品厚度为 0.35 mm, 测量并拟合得到样品折射率分布如图 2 所示, 从自聚焦透镜的中心到边缘的折射率差  $\Delta n$  为 0.071, 此时可以得到透镜的折射率分布拟合式为

$$n^2(r) = n^2(0)(1 - 0.115r^2 + 0.013r^4 + \dots) \quad (3)$$

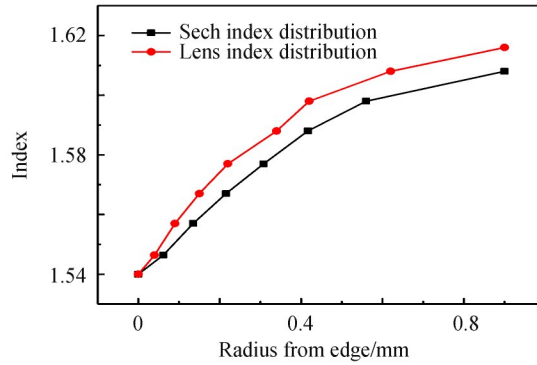
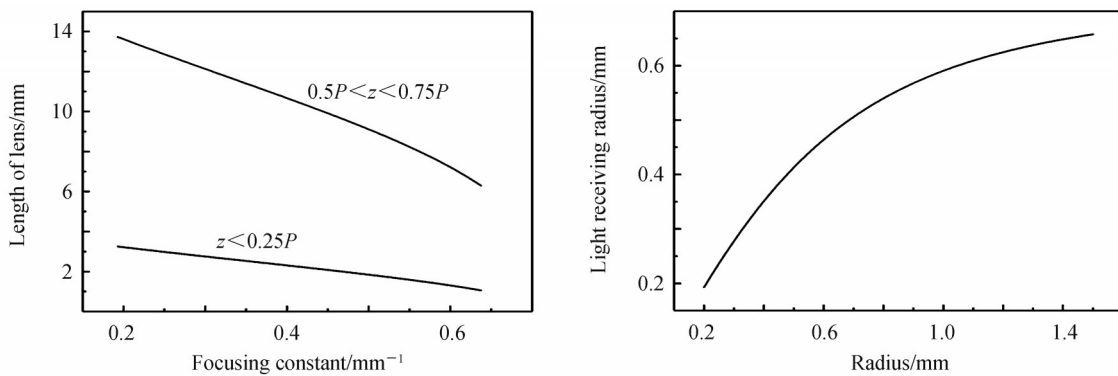


图 2 折射率分布  
Fig. 2 Index distribution

假设半导体激光器二极管发光点到端面的距离  $d_s$  为 1.4 mm, 用于制作自聚焦透镜的预制玻璃棒的折射率为 1.6116, 玻璃棒的直径的范围为 0.5~3 mm, 图 3(a) 表示准直需要的自聚焦透镜的长度  $z$  与聚焦常数之间的关系, 可以看到在自聚焦透镜的 1/4 个周期内, 随着自聚焦透镜的聚焦常数增大, 准直需要透镜的长度在减小.

根据  $\Delta n$  值可以计算透镜最大数值孔径  $NA_m$  为 0.436. 图 3(b) 展示了自聚焦透镜的收光半径与透镜本身半径的关系, 可以发现随着半径的增大, 透镜半径的利用率在变低, 但是有效收光半径也在增加. 一般定义光束半径通常为峰值强度的  $1/e^2$  处对应的半径, 对应  $a \geq 84.7\%r_p$ , 大于 84.7% 的部分需要使用光阑挡掉, 否则会影响出射光的质量.



(a) The length required for collimation in relation to the gradient constant (b) The relation between the receiving radius and the radius of the lens

图 3 自聚焦透镜参数  
Fig 3 Parameters of gradient-index lens

## 1.2 体布拉格光栅的角度选择性

在半导体激光器中内置布拉格光栅可以稳定输出波长, 且输出的波长单色性更好. 体布拉格光栅是一种常用于激光领域的衍射型器件, 具有优异的波长选择性和角度选择性<sup>[14]</sup>, 当具有一定发散角的光束入射体布拉格光栅时, 可将入射光束视为不同传输方向的平面波的集合. 入射光束中不满足布拉格条件(即偏离布

拉格角入射)的成分将无法衍射,而是直接透射经过体布拉格光栅;满足布拉格条件的成分则以高效率衍射经过体布拉格光栅.只需要入射光与光栅栅线平面的夹角满足布拉格条件就可以使用体光栅对线结构光系统进行角度方向的选择.

设计并制作的透射式体布拉格光栅参数为:折射率调制为 220 ppm,基底折射率为 1.516,光栅周期为  $1\ \mu\text{m}$ ,光栅厚度为 3 mm,计算可知此光栅衍射的布拉格角为  $8.51^\circ$ ,体布拉格光栅的角度选择性一般由零值全宽(Full Width at First Zero, FWFZ)(体布拉格光栅衍射效率曲线中第一级衍射左右零值之间的宽度)来表示.根据经典耦合波理论<sup>[14]</sup>可以得到该布拉格光栅的衍射效率随偏离角度的关系如图 4 所示.计算可得此时布拉格光栅的零值全宽为  $0.05^\circ$ .

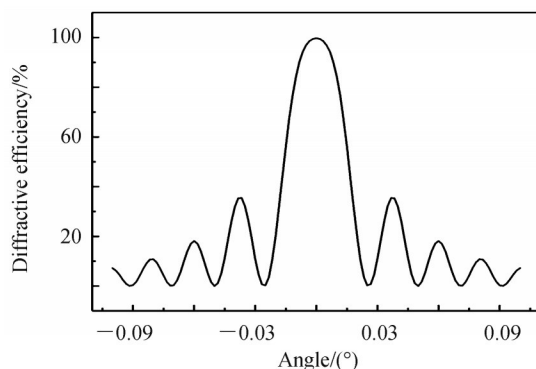


图 4 体布拉格光栅的角度选择性  
Fig. 4 Angle selectivity of the VBG

## 2 线结构光产生方案设计

器件的设计目标为距离出光点 5.5 m 处的光束宽度在 0.6 mm 以下,本文设计的方案如图 5 所示:将光阑小孔贴在自聚焦透镜样品的表面,激光器二极管射出的光通过自聚焦透镜压缩快轴后经过柱透镜扩束,最后通过体布拉格光栅衍射.实验中采用美国 OSRAM 公司型号为 PL-TB450B 的激光器二极管,快轴半功率角度值为  $23^\circ$ ,慢轴半功率角度值为  $18^\circ$ ,半功率角是激光功率衰减到原来一半时的发散角度,是高斯光束理论计算的半发散角的 1.18 倍,因此计算中取快轴半发散角为  $19.5^\circ$ ,慢轴半发散角为  $15.3^\circ$ ,激光器二极管发光点距离自聚焦透镜端面距离  $d_0$  为 0.9 mm,模拟使用自聚焦透镜的聚焦常数为  $0.088\sim 0.546/\text{mm}$ ,中心折射率 1.6117.

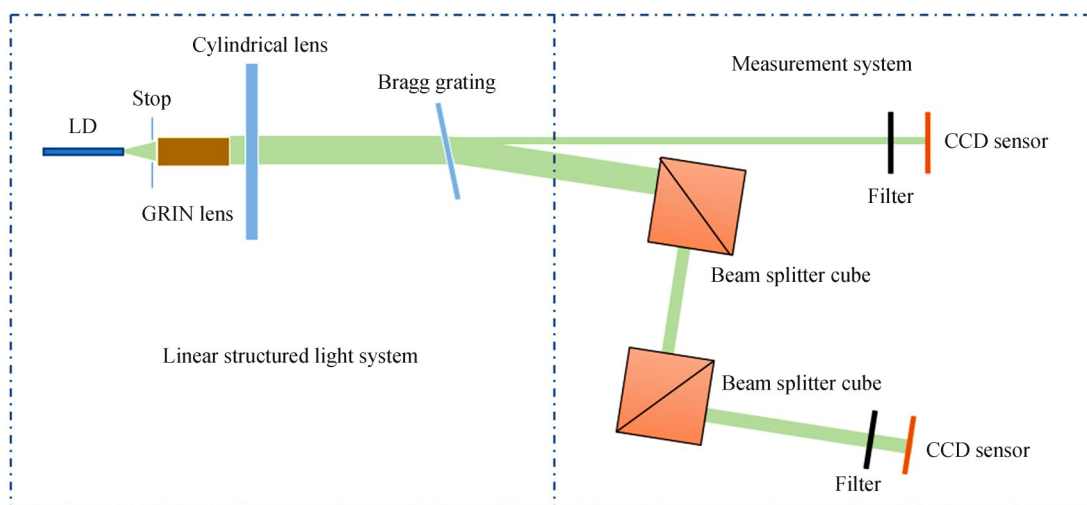


图 5 线结构光束产生方案及实验测量  
Fig. 5 Beam generation scheme and experimental measurement for linear structure light

设计中使用矩阵光学中的ABCD法则进行计算,假设柱透镜与体布拉格光栅为理想光学系统,那么从激光器二极管出射的光可以用自聚焦透镜出射的传输矩阵 $M$ 表示

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & n(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\sqrt{A}z) & \frac{1}{\sqrt{A}}\sin(\sqrt{A}z) \\ -\sqrt{A}\sin(\sqrt{A}z) & \cos(\sqrt{A}z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{n(0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

假设从激光器出射的光快轴方向的复参量为 $q_0$ ,经过自聚焦透镜后的复参量为 $q_1$ ,可以得到两个复参量之间的关系为

$$\begin{cases} q_1 = \frac{A_m q_0 + B_m}{C_m q_0 + D_m} \\ q_0 = j \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda} \\ \frac{1}{q_1} = \frac{1}{R_1} - j \frac{\lambda}{\pi \omega_1^2} \end{cases} \quad (5)$$

式中, $A_m$ 、 $B_m$ 、 $C_m$ 和 $D_m$ 分别为矩阵 $M$ 的四个参数, $\omega$ 为激光光束的光斑半径, $R$ 为曲率半径,在传输距离5.5 m处曲率半径趋向无穷大,因此 $q_1$ 的实数部分趋向0.最终计算得到自聚焦透镜参数对比数据如表1所示,编号1、2和3分别对应0.5 mm、1.8 mm与2.5 mm三种不同直径的自聚焦透镜,综合考虑提升效果和结构尺寸,最终实验中采用2号透镜,对应的聚焦常数为0.330/mm,加工到准直所需要的长度为3.410 mm.

表1 模拟中不同参数自聚焦透镜  
Table 1 Gradient-index lens with different parameters in simulation

Gradient index lens	Diameter/mm	Period/mm	$r_p$ /mm	Length/mm
1	0.50	11.51	0.235	1.785
2	1.80	19.04	0.570	3.410
3	2.50	34.85	0.620	6.672

柱透镜对光束的整形简单原理如图6所示.

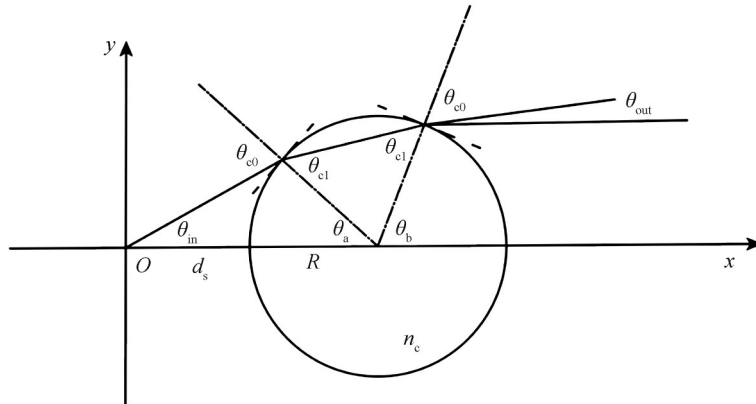


图6 圆柱透镜对光束的整形  
Fig. 6 Beam shaping by cylindrical lens

根据几何关系与折射定律可以得到出射光束角度 $\theta_{out}$ 与入射光束角度 $\theta_{in}$ 的关系为

$$\theta_{out} = \theta_{in} + 2 \arcsin \frac{(d_s + R) \sin \theta_{in}}{R n_c} - 2 \arcsin \frac{(d_s + R) \sin \theta_{in}}{R} \quad (6)$$

式中, $n_c$ 为柱透镜玻璃折射率1.525(K9光学玻璃,450 nm),系统中柱透镜的作用是对光束的慢轴进行扩束,实验室能加工的柱透镜半径范围为0.25~5.00 mm.分析参数可知柱透镜可以设计较大的数值孔径,甚至远大于自聚焦透镜的数值孔径,这样可以更有效地收集光线,取柱透镜的直径为2.5 mm,得到此时柱透镜距离自聚焦透镜后端面的距离最大为15.2 cm,计算得到圆柱透镜出射光的半张角为15.9°.



### 3 实验与测量

#### 3.1 影响光束宽度的因素

系统中使用的透射式体布拉格光栅是基于光热折变玻璃设计的,这种类型的光栅厚度通常为几毫米,改变光栅的周期,光栅的角度选择性在 $0.08^\circ$ 之内变化,最小达到5个数量级,当空间频率超过每毫米几百线时,对应的角度选择性小于 $0.07^\circ$ <sup>[14]</sup>.实验中光栅的FWFZ为 $0.05^\circ$ ,如果光束进入布拉格光栅的角度在光栅的角度选择性以外,那么衍射现象将不会被观察到.

系统中柱透镜存在一定的球差,如果透镜为理想柱透镜,那么得到的光束应该为均匀宽度的一条竖线,而实际上柱透镜的球差会导致光束宽度不均匀,具体表现为中间近轴部分的光束等宽,而两边远轴部分的光束会渐渐变细,使用中应当避免使用两边的光束而选用中间近轴部分均匀的光束.

理想折射率分布(双曲正割分布)的自聚焦透镜可以完美聚焦没有像差,而实际制作自聚焦透镜难以做到这种分布,透镜折射率分布偏离理想程度而引入的球差是最终导致光束宽度达不到理想值的主要原因.

#### 3.2 光束宽度测量

在没有光阑的情况下,当激光二极管的发光点距离自聚焦透镜端面的距离 $d_s$ 分别为1.9 mm、0.9 mm时可以得到激光二极管光束经过自聚焦透镜的出射效果如图7(a)和(b)所示.

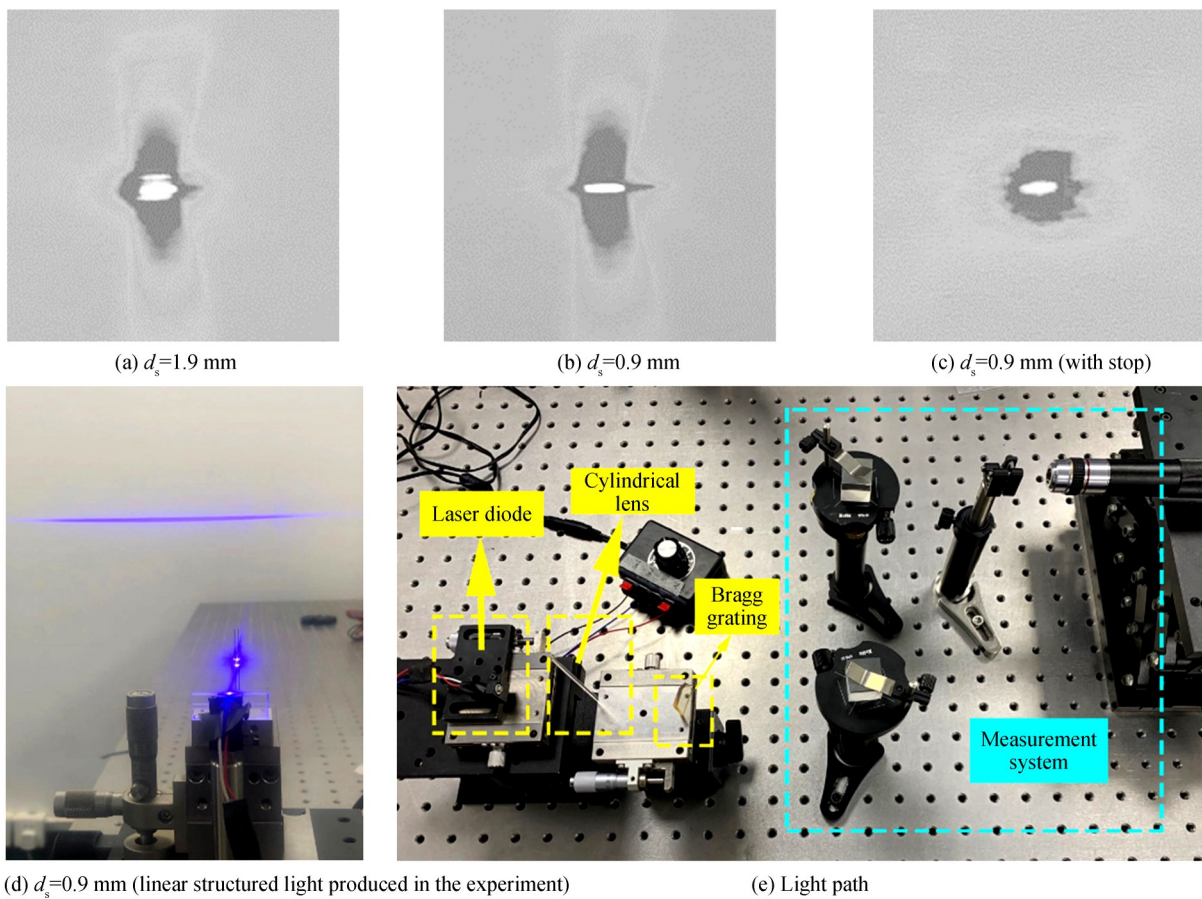


图7 激光二极管光束出射自聚焦透镜效果

Fig. 7 Image of laser diode beam emitted from GRIN lens

随着激光二极管的发光点距离自聚焦透镜端面的距离 $d_s$ 的减少,激光器出射的光束逐渐聚焦,最终在中心汇聚.当汇聚程度越来越高时,激光器中大于收光半径的光束收不进自聚焦透镜内,最终导致出射光束的两侧有像“飞翼”的两束光,图7(c)是在自聚焦透镜的后方加上一个直径为0.6 mm的光阑产生的光束效果,可以观察到光束质量得到了明显改善.

为了得到目标线结构光,还需加入柱透镜对慢轴方向的光束进行扩束,将直径为2.5 mm,长为100 mm

的柱透镜放在三维调节架的前端,调节柱透镜与自聚焦透镜后端的距离,得到快轴准直慢轴扩束后的线激光光束如图7(d)所示,柱透镜的方向应当垂直于激光器二极管的快轴方向,装配时需注意一般激光器二极管的快轴方向有一个小凹槽作为标记。

为了方便测量激光的光束宽度,同时避免光束直接照进相机导致光学元件被损害,实验中将产生的线结构光通过两个分束立方体后再经过一块滤光片,最后将光束用CCD相机接收,如图5所示.将得到的线结构光宽度调整到在5.5 m处达到最低值,图8为此时部分线结构光在相机中拍摄到的图样,在没有体布拉格光栅时,使用光强二阶矩法<sup>[15]</sup>测得线结构光光束宽度为 $0.52\pm 0.05$  mm,图8(a)中可以观察到由于自聚焦透镜本身不均匀性导致的杂散光较多,将体布拉格光栅放置进光路,调整光路角度,测得有布拉格光栅时光束宽度为 $0.48\pm 0.05$  mm,此时杂散光几乎消失,因此体布拉格光栅在系统中将光束宽度降低7.7%,同时消除了绝大部分的杂散光.测量中移动相机使相机距离发光点不同位置测得图9表示的光束宽度变化图,在距离线结构光系统的柱透镜后 $5.5\pm 0.5$  m束宽均小于0.60 mm,布拉格光栅对光束宽度的降低作用在6%~9%之间,同时测得该系统快轴方向的远场发散角为 $0.01^\circ$ .要实现能量更高、光束宽度更窄的长距离线结构光系统,自聚焦透镜的参数是限制系统性能的关键.为了得到更大收光半径的自聚焦透镜则需要交换更粗直径的自聚焦透镜,此时透镜的交换时间变长、交换过程难以控制,透镜的折射率分布曲线与理想曲线相差较大,最终导致系统产生的线结构光更宽;如果使用直径较细的透镜,其收光半径会变小,产生的线结构光的能量也相应会变小。

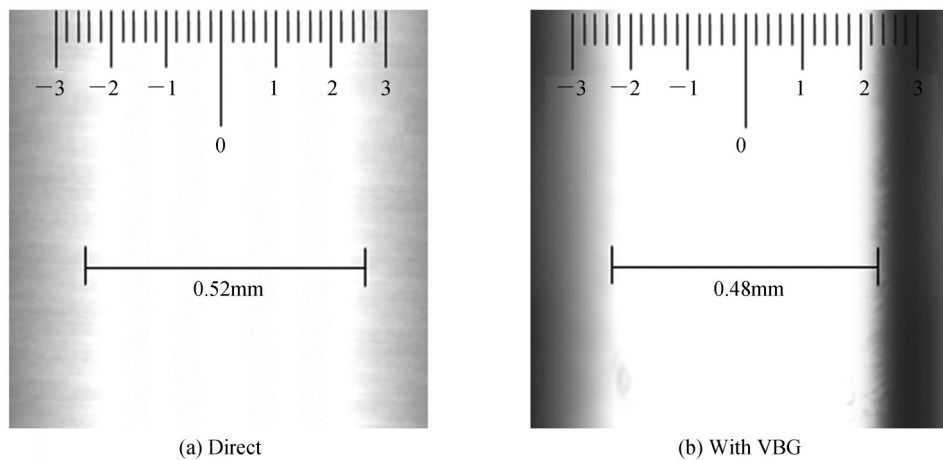


图8 光强二阶矩法测量光束宽度(刻度单位为0.1 mm)

Fig. 8 Measurement of beam width by second intensity moments method (precision of unit is 0.1 mm)

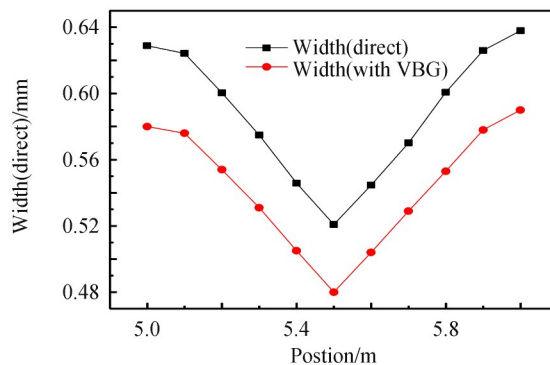


图9 不同位置处系统的光束宽度

Fig 9 Beam width of the system at different positions

## 4 结论

自聚焦透镜由于结构简单、体积较小、端面平整等特点在激光器二极管输出光束的压缩整形中具有很

大的优势,本文结合圆柱透镜的特点和体布拉格光栅对杂散光消除效果显著的优势,设计并构建了一套多光学元件组合的光学系统以产生线结构光.研究表明,体布拉格光栅能将自聚焦透镜和圆柱透镜压缩后的线结构光的光束宽度降低6%~9%,该线结构光产生方案可以实现在5.5 m处束宽为0.48 mm、在5.5±0.5 m范围内束宽低于0.60 mm的线结构光输出,预期可以应用在很多非接触测量中替代红光线结构光方案以提高测量精度.

### 参考文献

- [1] BARONE S, NERI P, PAOLI A, *et al.* 3D acquisition and stereo-camera calibration by active devices: a unique structured light encoding framework[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, **127**: 105989.
- [2] LI Guan-nan, TAN Qiang-chang, KOU Ying, *et al.* A new method for calibrating line structured-light 3D measurement model [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(11): 1334-1339.  
李冠楠,谭庆昌,寇莹等.一字线结构光三维测量模型的新型标定方法[J].光子学报,2013, **42**(11): 1334-1339.
- [3] HAO Tian-yu, YU Huang, DONG Liang-zheng, *et al.* Three-dimensional shape measurement technique for large-scale objects based on line structured light combined with industrial robot[J]. *Optik*, 2020, **202**: 163656.
- [4] YU He, MA Xiao-hui, ZOU Yong-gang, *et al.* Beam shaping design for fiber-coupled laser-diode system based on a building block trapezoid prism[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, **109**: 366-369.
- [5] TARASOV P A, IVANOV B B. Optical system for collimation of radiation from semiconductor lasers [J]. *Journal of Optical Technology*, 2017, **84**(4): 231-232.
- [6] XU Qiang, ZENG Xiao-dong, AN Yu-min, *et al.* Propagation of laser diodes beams through a gradient index lens [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(S): 72-74.  
徐强,曾晓东,安毓英,等.LD光束在自聚焦透镜中的传输特性[J].光子学报,2007, **36**(S): 72-74.
- [7] FORBES A. Common elements for uncommon light: vector beams with GRIN lenses [J]. *Light: Science & Applications*, 2019, **8**: 111.
- [8] WU Zhi-wei. Novel prism generating non-diffracting-like linear structured beam [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(8): 956-961.  
吴志伟.新型棱镜产生近似无衍射线结构光[J].光子学报,2012, **41**(8): 956-961.
- [9] WU Peng, LIU Yuan-yuan, WANG Xiao-wei, *et al.* Study on collimating of semiconductor diode laser [J]. *Semiconductor Technology*, 2009, **34**(5): 423-426.  
吴芑,刘媛媛,王晓薇,等.半导体激光器单管准直实验研究[J].半导体技术,2009, **34**(5): 423-426.
- [10] QIN Guan-yu, WANG Xiang-jun, YIN Lei. Calibration method for multi-line structured light vision sensor based on Plücker line [J]. *Journal of Measurement Science and Instrumentation*, 2020, **11**(2): 103-111.
- [11] LI Yue-hua, ZHOU Jing-bo, LIU Li-jian. Research progress of the line structured light measurement technique [J]. *Journal of Hebei University of Science and Technology*, 2018, **39**(2): 115-124.  
李玥华,周京博,刘利剑.线结构光测量技术研究进展[J].河北科技大学学报,2018, **39**(2): 115-124.
- [12] KOGAN V E, SHAKHPARONOVA T S. Gradient optical elements: methods of obtaining and measuring refractive index distribution profiles [J]. *Glass and Ceramics*, 2017, **74**(5-6): 193-195.
- [13] LIU Jiao, HUANG Zhi-qiang, LIU De-sen, *et al.* Experimental study of the optimal ion exchange time for producing self focusing lenses [J]. *Journal of South west University (Natural Science Edition)*, 2008, **30**(9): 29-32.  
刘姣,黄志强,刘德森,等.自聚焦透镜最佳离子交换时间的实验研究[J].西南大学学报(自然科学版),2008, **30**(9): 29-32.
- [14] WU Qing-qing, ZHANG Xiang, FENG Jian-sheng, *et al.* Study on angular selectivity of transmitting volume Bragg gratings in photo-thermo-refractive glass [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(12): 1205001  
吴青晴,张翔,封建胜,等.基于光热敏折变玻璃的透射型体布拉格光栅角度选择性研究[J].光学学报,2012, **32**(12): 1205001.
- [15] BIENVENU N, HEND S, MELANIE M, *et al.* Beam quality measure for vector beams [J]. *Optics Letters*, 2016, **41**(15): 3407-3410.