

文章编号:1001-5078(2024)09-01402-08

· 激光应用技术 ·

## 基于蓝光半导体激光器的水下光学天线

张可<sup>1</sup>, 郝坤坤<sup>3</sup>, 于超<sup>2</sup>, 韩腾飞<sup>2</sup>, 宋贺伦<sup>2</sup>, 茹占强<sup>2</sup>, 向阳<sup>1</sup>

(1. 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130000; 2. 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所, 江苏 苏州 215123;

3. 南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016)

**摘要:**边缘发射半导体激光器在快慢轴方向发散角存在巨大差异,且具有固有像散,严重影响水下通信的传输距离,为此,本文基于高斯光束特性和准直扩束原理设计了一套由快慢轴准直器和伽利略扩束镜组成的水下激光光学天线系统,并对其进行了能量损失和发散角的仿真测试。根据测试结果表明,半导体激光器快慢轴方向的分发角分别从 $49^\circ$ 和 $9^\circ$ 压缩到了 $0.315\text{ mrad}$ 和 $0.180\text{ mrad}$ ,该天线系统可以实现水下传播 $100\text{ m}$ 距离。降低了实际中快慢轴准直镜的校准和固定困难,快慢轴的 $Z$ 轴公差在 $20\ \mu\text{m}$ 内,探测器功率衰减 $<3.9\%$ 。此设计结构紧凑,便于加工装调,实际应用价值较高,有助于解决水下远距离传播时光能损耗严重和耦合效率偏低的问题。

**关键词:**准直扩束;光学设计;激光;高斯光束;快慢轴

**中图分类号:** O439; TN249 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.09.010

## Underwater optical antenna based on blue semiconductor laser

ZHANG Ke<sup>1</sup>, HAO Kun-kun<sup>3</sup>, YU Chao<sup>2</sup>, HAN Teng-fei<sup>2</sup>, SONG He-lun<sup>2</sup>, RU Zhan-qiang<sup>2</sup>, XIANG Yang<sup>1</sup>

(1. School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130000, China;

2. Suzhou Institute of Nanotechnology and Nanobionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215123, China;

3. School of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Edge-emitting semiconductor lasers have significant differences in the direction of fast and slow axes, and have inherent astigmatism, which seriously affects the transmission distance of underwater communication. Therefore, a set of underwater laser optical antenna system consisting of fast and slow-axis collimators and Galilean beam expander mirrors is designed based on the Gaussian beam characteristics and collimated beam expanding principle in this paper, and the simulation tests of energy loss and divergence angle are also carried out. According to the test results, the divergence angle in the direction of the fast and slow axes of the semiconductor laser is compressed from  $49^\circ$  and  $9^\circ$  to  $0.315\text{ mrad}$  and  $0.180\text{ mrad}$ , respectively. And the antenna system can achieve underwater propagation over a distance of  $100\text{ m}$ . The difficulty of calibration and fixation of the fast and slow axis collimating mirror in practice is reduced, with a  $Z$ -axis tolerance of within  $20\ \mu\text{m}$  for the fast and slow axes, and a detector power attenuation of less than  $3.9\%$ . This design is compact, easy to process and assemble, with high practical application value, which helps to solve the problems of severe energy loss and low coupling efficiency in underwater long-distance propagation.

**Keywords:** beam collimation and expansion; optical design; laser; Gaussian beam; fast slow axis

**基金项目:** 苏州市碳达峰碳中和科技支撑重点专项项目 (No. ST202219); 江苏省产业前瞻与关键核心技术攻关项目 (No. BE2022021; No. BE2022057); 纳米真空互联试验站 (No. 2018-000052-73-01-000356); 江苏省“六大人才高峰”高层次人才项目 (No. XYDXX-211) 资助。

**作者简介:** 张可 (1990 -), 男, 硕士研究生, 主要从事光学设计的和成像设计方面的研究。E-mail: zhangke\_zeiss@163.com

**通讯作者:** 向阳 (1968 -), 男, 硕士, 教授, 主要从事光学镜头设计以及光学检测设备的研究。E-mail: xyciom@163.com

**收稿日期:** 2024-01-04

## 1 引言

由于激光具有能量高、相干性好和单色性好等特点,被广泛应用在激光通信、激光测距、激光切割、激光干涉以及空间光学等领域。但半导体激光存在不对称的较大发散角,固有像散等问题,容易造成光能量损失严重,耦合效率大大降低。因此,要对激光器的发散光束进行准直和整形。远距离水下激光通信对激光束的准直度和圆化率指标提出了较高的要求。目前国内外的准直整形方法有:1)台阶化面型的衍射方案<sup>[1]</sup>,对高斯光束实现了2.8倍的扩束,但这种近似非球面的元件,计算复杂,制造工艺复杂,加工精度难以达到。2)利用双焦距微透镜准直的方案<sup>[2]</sup>,准直后光束在快轴发散角为 $11.2^\circ$ ,慢轴发散角为 $4.6^\circ$ ,快慢轴发散角相差较大且不接近。3)利用非球面和柱面镜组合的方案<sup>[3]</sup>,系统共由四片透镜组成,总长过长,且准直整形的发散角较大,测试的传播距离仅为1 m。因此设计一款发散角小,且快慢轴发散角相近,筒长较短,易于加工装调,传播距离远的激光整形准直系统具有重要意义。

## 2 设计原理及参数拟定

### 2.1 设计原理

边发射半导体激光器由于截面不对称,导致快轴方向(垂直于有源区)与慢轴方向(平行于有源区)的发散角不一致,在快轴方向发散角将近 $50^\circ$ 而慢轴方向也有 $10^\circ$ 左右。对于半导体激光器,快慢轴方向均是高斯分布<sup>[2]</sup>,由于存在像散,快慢轴方向的束腰位置也不一致。如图1所示。

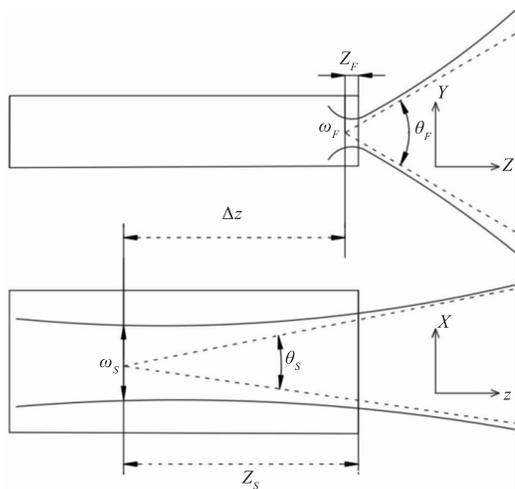


图1 半导体激光器光束特性

Fig.1 The characteristics of laser diode beam

实现半导体激光束的准直,需组合两个法线相互垂直的柱透镜,分别对快轴和慢轴方向的光束进行整形。利用柱透镜实现的准直存在剩余发散角,而实验中快慢轴准直镜相对位置的校准和固定需要十分精确,容差度很小,使得剩余发散角更大<sup>[4]</sup>。由于经过快、慢轴准直镜整形的发散角与半导体激光器的发散角相比要小很多,圆化率也较高。此时对快慢轴发散角已经比较接近的激光束扩束准直,进一步降低发散角,使其可以传播更远的距离,以保证能量的最大传输<sup>[5]</sup>。在满足相同要求的情况下,调整扩束镜的倍数,也可以减小加工和调整的困难。若直接将半导体激光束扩束准直,则会降低光束均匀度,导致能量的巨大损耗,严重影响水下激光通信的探测结果。

### 2.2 参数拟定

光学天线本质上是望远系统,且收发共用,相当于是个扩束/缩束系统,发射时扩大光束口径以降低发散角,接收时缩小光束口径聚焦在探测面上。其与分束元件之间通过精扫描反射镜进行光信号的对接。本文设计一种基于半导体激光器的光学天线,将快慢轴整形准直与扩束镜扩束准直相结合,实现水下远距离高速数据通信。图2是水下光学天线系统的总体图,半导体激光束经过快慢轴整形准直后通过光隔离器和分光器,再经扩束准直在水下100 m信道中传播,后经接收天线,光束进入分光器,反射光到达CCD以实现通信激光的光束进行稳定有效的捕获、瞄准和跟踪,透射光聚焦在雪崩光电二极管的光敏面上实现信号传输。

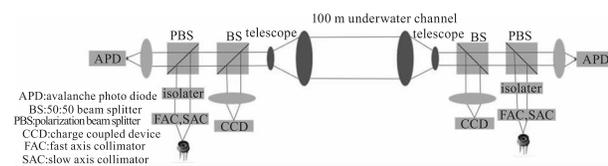


图2 对称式水下光学天线系统

Fig.2 Symmetrical underwater optical antenna system

由于在海水中波长为 $450 \sim 550 \text{ nm}$ 的蓝绿光传输损耗最低,故本文选择欧司朗公司生产的PL450B型半导体激光器,主波长为 $447 \text{ nm}$ ,激光输出功率为 $5 \text{ W}$ ,垂直光束发散角为 $49^\circ$ ,平行光束发散角为 $9^\circ$ ,探测器选择索雷博公司生产的APD130A2雪崩光电二极管,感光范围为 $200 \sim 1000 \text{ nm}$ ,光敏面直

径为1 mm。水下光学天线需要放置在云台上,由于云台支撑板尺寸为185 mm × 160 mm,竖直旋转角度范围为-45°到75°,防止旋转到最值与操作平台触碰,光学天线的整体尺寸不能超过350 mm × 250 mm × 150 mm,有利于实现云台的捕瞄跟系统实现。

### 3 仿真与设计

#### 3.1 快慢轴整形

半导体激光束的初步整形准直,利用两个法线相互垂直的柱透镜,分别整形快轴和慢轴方向的光束。首先在序列模式下,使用渐晕系数确定入瞳的尺寸和位置,参数VCX、VCY、VDX、VDY、VAN分别代表缩放、偏移、角度关系。已知激光束垂直发散角为49°,平行发散角为9°,设置渐晕参数 $VCX = 1 - \tan(4.5^\circ)/(24.5^\circ)$ ,计算为0.8273。入瞳的大小设置为 $\sin(\theta/2)$ , $\theta$ 为激光器需要准直方向的发散角。使用两个Toroidal面来模拟柱状透镜,可以使平行光束在子午光线(沿Y轴方向)聚焦成一条直线,而弧矢光线(沿X轴方向)保持不变。

Toroidal面方程为:

$$z = \frac{cy^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2y^2}} + a_1y^2 + a_2y^4 + a_3y^6 + a_4y^8 + a_5y^{10} + a_6y^{12} + a_7y^{14} \quad (1)$$

建立一个在X方向上为平面的柱面透镜,y为坐标变量,c为曲率半径的倒数,a为变量的各阶系数,k为方程的圆锥系数;建立一个在Y方向上为平面的柱面透镜,方程相同,通过倾斜90°得到。

表1为柱透镜的初始结构参数,最终查看点列图,散斑大小接近衍射极限。

表1 柱透镜的初始结构参数

Tab. 1 Initial structural parameters of cylindrical lens

Surface	Radius/mm	Thickness/mm	material
Object	Infinity	3	/
Toroidal	Infinity	5	BK7
Toroidal	-5	10	/
Image	Infinity	/	/

用此方法设计好校正快慢轴的柱透镜,转换到非序列模式,需要添加光源和探测面。将两个柱透镜法线相互垂直,快轴准直器的倾斜Z参数设置为

0°,慢轴准直器的倾斜Z参数设置为90°。添加探测器,观察出射的光斑。图3为半导体激光束经过快慢轴准直器在两个垂直方向的准直。

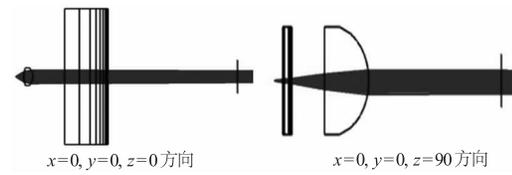


图3 半导体激光器的快慢轴整形准直

Fig. 3 Fast and slow axis shaping and collimation of semiconductor lasers

将探测器置于快慢轴准直器后50 mm处,如图4。由图可知,用快慢轴准直镜可以初步实现发散角压缩,提高圆化率。在距离光源1 m和2 m处,查看探测器,可以分别得到x方向上的光斑半径 $R_{x1} = 4.54$  mm,  $R_{x2} = 5.80$  mm, y方向上的光斑半径 $R_{y1} = 5.61$  mm,  $R_{y2} = 6.85$  mm,计算得,慢轴半发散角为 $\arctan((R_{x2} - R_{x1})/(z_2 - z_1)) = 1.26$  mrad,快轴半发散角为 $\arctan((R_{y2} - R_{y1})/(z_2 - z_1)) = 1.24$  mrad。由于项目需求,发射天线的发散角需小于0.25 mrad,故还需要扩束镜进一步压缩发散角。

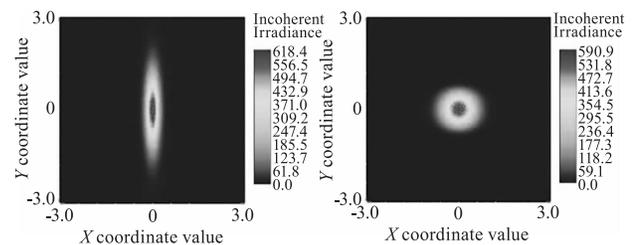


图4 激光整形准直前后探测器对比图

Fig. 4 Comparison of detectors before and after laser shaping and collimation

#### 3.2 扩束系统的设计

由半导体激光的高斯特性可知,其发散角与束腰呈反比例关系:

$$\theta = \frac{2\lambda}{\pi\omega_0} \quad (2)$$

式中, $\lambda$ 为入射波长; $\omega_0$ 为高斯光束的束腰半径; $\theta$ 为发散角。

激光束通过扩束系统后,输出光束束腰直径大于输入光束束腰直径,输出发散角小于输入发散角。可以用输入光束与输出光束发散角或光束束腰直径来表示放大倍率M:

$$M = \frac{\omega_1}{\omega_0}, M = \frac{\theta_i}{\theta_o} \quad (3)$$

式中,  $\theta_i$  为入射光发散角;  $\theta_0$  为出射光发散角;  $\omega_0$  为入射光斑直径;  $\omega_1$  为出射光光斑直径。

扩束系统主要分为反射式和透射式。透射式系统容易校正像差,光能损失较小,结构简单,加工和装配容易;反射系统没有色差,吸收损耗少,高倍数时筒长较短,但是离轴抛物面加工困难、装调复杂,故采用透射式扩束系统。半导体激光束经过快慢轴准直后,通过光隔离器和分光器,到达扩束镜。预留 50 mm 距离给光隔离器和分光器,图 5 为快慢轴准直器后 50 mm 处探测器上的图像,光斑直径小于 3 mm,取扩束镜的入瞳直径为 3 mm。

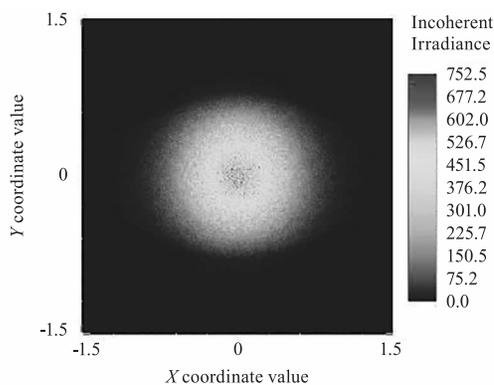


图 5 快慢轴后 50 mm 处探测器图像

Fig. 5 Detector image at 50 mm behind the fast and slow axes

在 ZEMAX 中输入初始结构,如表 2,此时系统筒长为 90 mm,扩束倍数为 5,根据放大率公式,扩束后快慢轴方向光束发散角分别为 0.496 mrad, 0.504 mrad,不满足准直度要求。故需对初始结构进行缩放,将物面到像面的距离缩放为 160 mm,修改孔径大小和视场,切趾类型改为高斯分布,切趾因子为 1。添加 ZEMAX 中的优化向导,成像质量选择波前优化,光瞳采样选择高斯求积,利用操作数 TTHI 提取系统长度,操作数 OPLT 控制系统长度不超过 160 mm,操作数 REAY 控制输出光斑半径,保证放大倍率,利用操作数 EFLY 提取焦距,DIVI 做除法控制放大倍数。为了节约透镜成本和提高激光能量效率,设置透镜均为平凹或平凸结构。查看系统的点列图与波前图,使波峰到波谷远小于  $\lambda/4$ 。

扩束系统的初始结构为两组透镜,成像系统优化后,使用两片双胶合透镜结构替代原先一组透镜提升成像质量,由于激光束的高能量会对胶合表面造成损伤,故将双胶合镜片设计成双分离式组,利用玻璃替

换和空气间隔来增加变量校正像差。再次优化参数,形成三片式球面光学结构,如图 6。综合考虑系统结构尺寸,放大倍数和点列图以及光线的分布情况等因素,反复调整试算,扩束镜的倍数最终选定为 18。

表 2 扩束系统的初始结构参数

Tab.2 Initial structural parameters of beam expansion system

Surface	Radius/mm	Thickness/mm	material	Semi-Dia/mm
object	Infinity	Infinity	/	0
stop	Infinity	12.7	/	0.508
standard	-8.745	0.762	SF8	2.540
standard	Infinity	48.641	/	2.540
standard	Infinity	3.353	SF8	8.890
standard	-43.716	25.4	/	8.890
image	Infinity	/	/	7.531

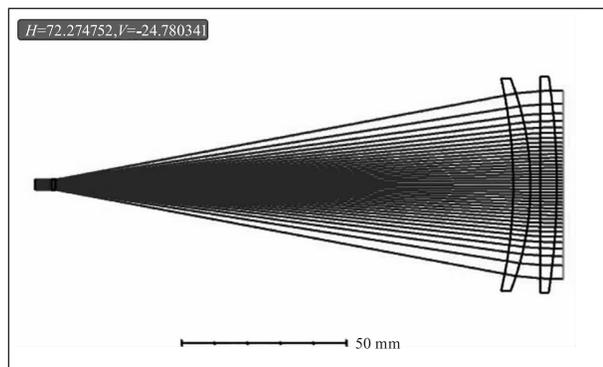


图 6 三片式扩束系统

Fig. 6 Three piece beam expansion system

如图 7 可知,扩束系统点列图 RMS 角半径为 0.006 mrad, GEO 半径为 0.012 mrad,波前图 RMS 为 0.0106 波长,波峰到波谷为 0.0584 波长,由光迹图可知,光斑出射直径为 53.933 mm,100 m 处光斑大小为 56 mm,光束发散小,其成像是完善的,满足系统要求。

运用 zemax 进行公差分析,给出光学元件的折射率,阿贝误差,不规则度,光圈,厚度,偏心,倾斜的允许误差,如表 3 所示。运用蒙特卡罗方法随机分析 50 个镜头,选用 RMS (Root-Mean-Square) 角半径作为结构评价标准,90 % 镜头的 RMSY 向角半径小于  $7.58 \times 10^{-5}$ ,80 % 镜头的 Y 向 RMS 角半径小于  $6.46 \times 10^{-5}$ ,结果表明,扩束准直镜头的准直度满足系统的要求。

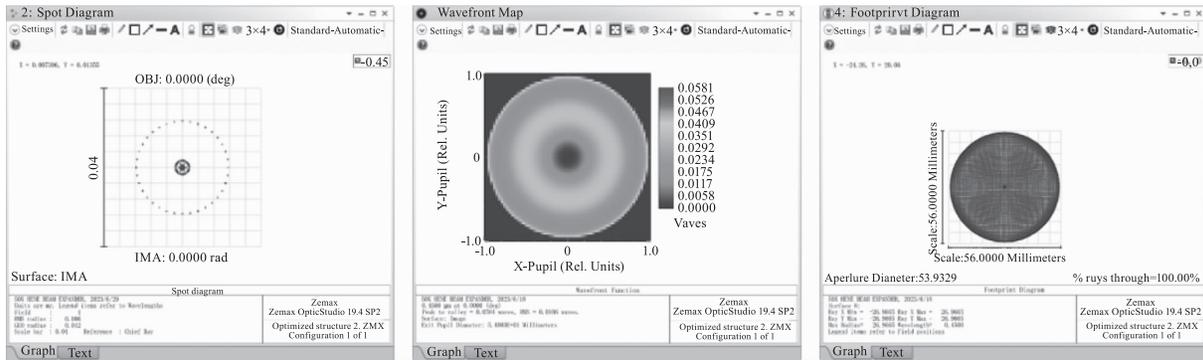


图 7 点列图,波前图和像平面 100 m 处的光迹图

Fig. 7 Spot diagram, wavefront map and light trace map at 100 m of the image plane

表 3 扩束镜的公差设置

Tab. 3 Tolerance setting of beam expander

Tolerance type	Value
F-number	2
Thickness/mm	0.02
Element decenter/mm	0.02
Element tilt/(')	1
Surface decenter/mm	0.02
Surface tilt/(')	1
Refractive index	0.001
Degree of irregularity	0.5

3.3 整体仿真

在序列模式中,将设计好的伽利略扩束镜参数复制到快慢轴准直镜后,并转化为非序列,添加半导体激光器参数,增加不同距离的探测面,进而对整体整形扩束系统进行光线追迹,整体光学系统如图 8 所示。

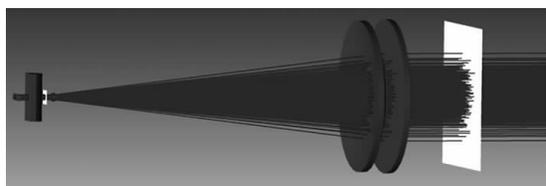


图 8 光学扩束整形系统

Fig. 8 Optical beam expansion and shaping system

将探测器设置为扩束系统后 100 m 距离,打开探测器查看器,文本界面可以得到 y 方向上的光斑直径为 16.50 mm, x 方向上的光斑直径为 17.90 mm。由于 100 米距离是远场分布,使用光斑直径除以距离,求得快轴发散角为 0.165 mrad,慢轴发散角为 0.179 mrad。如图 9

所示,接收面上的总光功率为 4.636 W,光能利用率达到 92.72%。

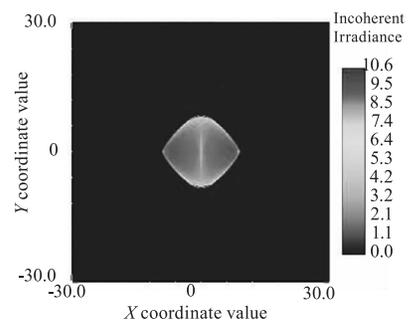


图 9 100 米探测面图像

Fig. 9 100 meter detection surface image

在 100 m 距离处配置翻转后的整形扩束系统,形成对称式光学天线,同时,通过聚焦透镜将光能聚焦在 APD 探测器上,仿真得其接收功率为 4.345 W。轴向调整快慢轴距离,得快慢轴轴向误差与功率衰减的关系,如表 4 所示。结果表明,在 ±20 μm 误差范围内,APD 探测器接收功率衰减 < 3.9%。

表 4 快慢轴轴向误差与功率的关系

Tab. 4 Relationship between fast and slow axis axial error and power

Fast axis/mm	-0.02	-0.01	0	+0.01	+0.02
Power/W	4.176	4.339	4.345	4.336	4.228
Slow axis/mm	-0.02	-0.01	0	+0.01	+0.02
Power/W	4.344	4.345	4.345	4.345	4.345

4 实验分析

4.1 光学天线发散角

图 10 为实际装调后的光学天线测试装置,主体包括欧司朗半导体激光器 450 LB、加工的柱透镜、10 倍伽利略式扩束镜、笼式系统,分辨率为

1600(H) × 1200(V), 像素尺寸为 4.5 μm × 4.5 μm 的 CMOS 传感器。由于实验条件的限制, 故采用干净透明水缸模拟水下实验<sup>[6]</sup>, 尺寸为 2 m(长) × 0.2 m(宽) × 0.1 m(高), 水质清澈, 满足水下通信的需求。



图 10 光学天线水下测试装置

Fig. 10 Optical antenna underwater testing device

欧司朗半导体激光器 450 LB 的额定功率为 5 W, CMOS 相机直接拍摄容易造成曝光, 尝试不断增添衰减片以及在水下信道中增加毛玻璃, 直至使其消除 CMOS 探测器的过饱和状态。激光传播 1 m, 1.5 m, 2 m 位置, CMOS 相机位于水下获取原始图像。经过快慢轴整形的激光光斑圆化率较高,

但由于快慢轴方向剩余发散角不同, 传播不同距离形成的光斑也会不同<sup>[7-8]</sup>, 加之用于实验的半导体激光器欧司朗 450 LB 的工作波长, 工作电流, 垂直和水平发散角与参考值会略有差别, 故仿真和实际测量的图形形状会有所区别。为实测出快慢轴方向的发散角, 将图像高斯滤波去掉噪声, 图像居中和灰度化, 如图 11 所示。

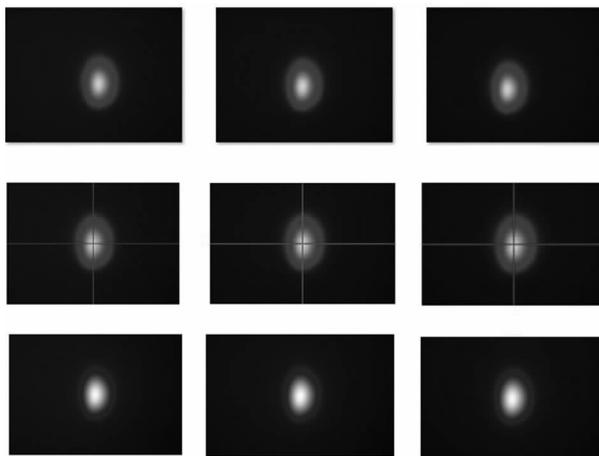
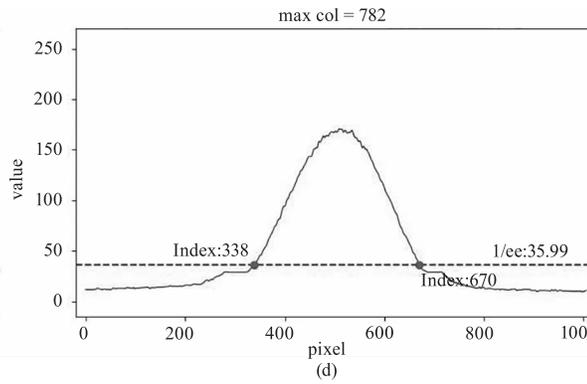
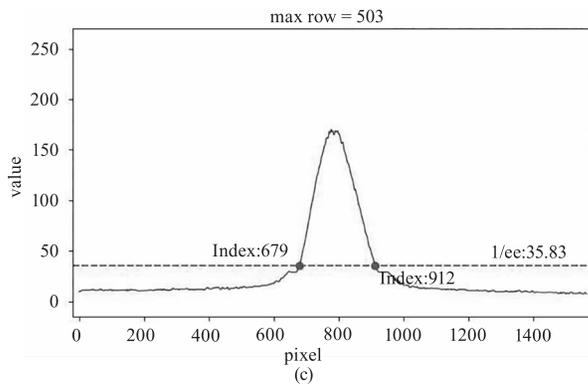
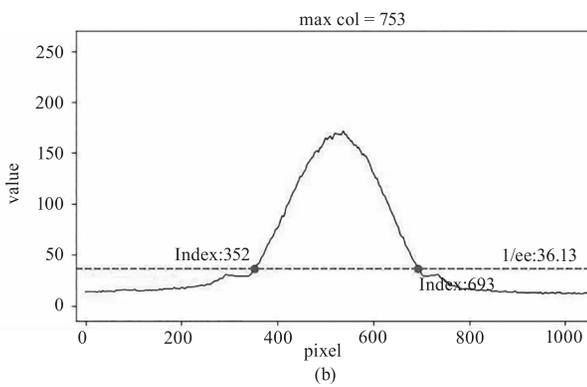
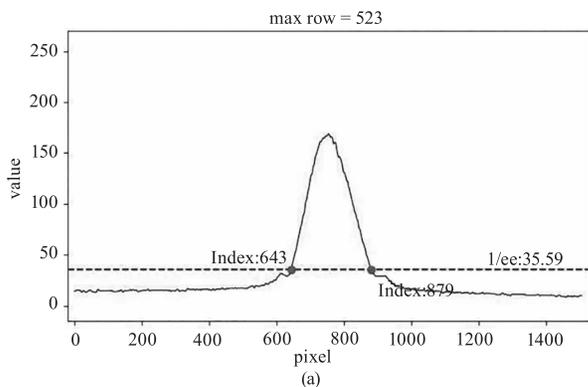


图 11 LD 椭圆形光斑图

Fig. 11 LD elliptical spot pattern

由图 12 所示, 通过 LD 椭圆形光斑图的灰度值, 可以得到激光束的能量分布。分别在快慢轴方向, 取能量最大值的  $1/e^2$  处的宽度为该方向的光斑直径。



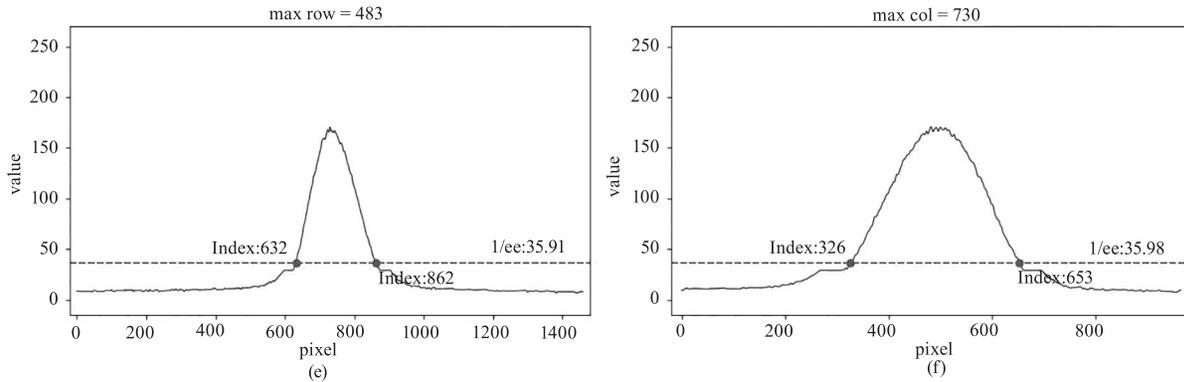


图 12 光斑在不同距离快慢轴方向的能量分布

Fig. 12 The energy distribution of light spots in the direction of the fast and slow axes at different distances

激光束的发散角由如下公式计算得出<sup>[9]</sup>：

$$\theta = \arctan \frac{D_2 - D_1}{L} \quad (4)$$

其中,  $D_2$  和  $D_1$  为不同距离的光斑直径;  $L$  为之间的距离。通过拍摄多组图像光斑, 对其直径进行测量和求取平均值, 利用式(4) 计算可得快慢轴发散角为 0.315 mrad 和 0.180 mrad。

半导体激光束在垂直的两个方向存在不对称的较大发散角, 对比整形准直之后的光斑, 快轴发散角从  $49^\circ$  降为 0.315 mrad, 慢轴发散角  $9^\circ$  降为 0.180 mrad; 快慢轴方向的圆化率有所提高, 两个垂直方向的发散角均降到 1 mrad 以下<sup>[10]</sup>。实验测得的发散角与仿真的发散角比较吻合。相比于双焦距微透镜对半导体激光束准直<sup>[2]</sup> 的实验结果发散角提升了一个量级。

方案通过两个柱透镜和扩束镜的组合, 使系统总长小于 200 mm, 实测准直整形后的发散角小于 1 mrad。相比于四片透镜组成, 使用非球面和柱面镜的方案<sup>[3]</sup>, 有效节省了空间长度。

#### 4.2 光学天线的能量链路计算

在光通信系统中, 要考虑所有增益和损耗, 由于水下光通信信道的复杂多样性, 仅考虑点对点无阻碍的水下连接, 发射端与接收端的链路总损耗为水下信道损耗, 几何损耗, 系统自身损耗。

根据文献[5], 信道损耗是指海水中由于吸收和散射造成的总损耗。可表示为:

$$\Gamma_c = \exp - cZ \quad (4)$$

式中,  $c$  为损耗系数; 在清澈海水中损耗系数为  $c(\lambda) = 0.151$ , 传输 100 m, 计算海水信道损耗为

65.58 dBm。

由于接收孔径的大小限制, 使得发射出的激光束无法全部进入探测器, 其导致的光能量损失, 为光学天线的几何损耗。

光学天线几何损耗的计算公式为:

$$\Gamma_{\text{geo}} = 10 \lg \left( \frac{D}{2 \times Z \times \tan(\frac{\theta}{2}) + D} \right)^2, \text{ 已知光斑}$$

出射直径为 54 mm, 实测发散角最大为 0.315 mrad, 水上传输 100 m, 计算可得几何损耗为 3.98 dBm。表 5 3.3 整体损耗情况。

半导体激光器功率为 5 W 即 37 dBm。分光镜等系统损耗为 6 dBm。计算得, 总损耗为 -75.56 dBm, 水下 100 m 距离最终到达探测器上的总功率为 -38.56 dBm, 大于雪崩光电二极管接收阈值 -46 dBm, 满足探测要求。反向计算, 取 APD 探测器的接收阈值为已知, 则最远传输 110 m。

表 5 整体损耗(单位: dBm)

Tab. 5 Overall loss( Unit: dBm)

Transmitting	Antenna and geometry	Channel	Beam splitter	Final
37	-3.98	-65.58	-6	-38.56

## 5 结 论

针对半导体激光束存在不对称的较大发散角, 固有像散等问题, 提出了快慢轴准直器和扩束镜相结合的方法, 设计了一款水下光学天线, 可以很好实现对激光光束的整形准直, 降低了加工和调整的困难<sup>[11-17]</sup>。实验结果表明, 该天线系统可以满足水下传播 100 m 距离, 发散角小, 且快慢轴发散角相近, 结构简单, 易于加工装调。

## 参考文献:

- [1] Gong Hailong, Liu Zhihui, Li Guojun, et al. Fidelity study of diffractive laser beam expander[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(9): 38-43. (in Chinese)  
龚海龙, 刘志辉, 李国俊, 等. 衍射型激光扩束器的保真度研究[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 38-43.
- [2] Liao Mingxing, Wang Xiang, Jian Weiming, et al. Beam collimation of laser diode based on double-focus micro-lens[J]. Laser & Infrared, 2016, 46(3): 294-299. (in Chinese)  
廖明星, 王翔, 简伟明. 基于双焦距微透镜的半导体激光束准直的研究[J]. 激光与红外, 2016, 46(3): 294-299.
- [3] Yu Taoran, Wang Chao, Zhang Yu, et al. Design and simulation of two-dimensional beam shaping system[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(11): 1360-1363. (in Chinese)  
于陶然, 王超, 张宇碟, 等. 二维光束整形系统设计与仿真[J]. 激光与红外, 2015, 45(11): 1360-1363.
- [4] Peng Hangyu. Study on high power diode laser with beam shaping and beam combining[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, 2011. (in Chinese)  
彭航宇. 大功率半导体激光光束整形及合束研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院, 长春光学精密机械与物理研究所, 2011.
- [5] Wang Peifang, Xiang Yang, Gao Jian, et al. Design of collimating and beam expanding laser system[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(9): 282-287. (in Chinese)  
王培芳, 向阳, 高健, 等. 激光变倍准直扩束系统设计[J]. 光学学报, 2015, 35(9): 282-287.
- [6] Wang T. Research on modulation technology of PL450B laser for underwater laser communication[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)  
王潼. 水下激光通信 PL450B 激光器调制技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2019.
- [7] Zhang Fan, Wang Chuncan, Geng Rui, et al. Novel collimator for simultaneous collimation of fast and slow axis of laser diodes array[J]. Chinese Journal of Lasers, 2007(8): 1059-1063. (in Chinese)  
张帆, 王春灿, 耿蕊, 等. 一种用于激光二极管阵列快慢轴同时准直的新型准直器[J]. 中国激光, 2007(8): 1059-1063.
- [8] Gu Shanshan, Guo Yu, Ju Yuan, et al. Design of optical quality detection system for four-quadrant detector lens[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(2): 202-209. (in Chinese)  
顾姗姗, 郭玉, 句源, 等. 四象限探测器镜头光学质量的检测系统设计[J]. 光学学报, 2022, 42(2): 202-209.
- [9] Du Binbin, Gao Wenhong, Li Jianglan, et al. Design of aspherical lens for laser diode collimation based on ZEMAX[J]. Laser & Infrared, 2013, 43(12): 1384-1388. (in Chinese)  
杜彬彬, 高文宏, 李江澜, 等. 基于 ZEMAX 的半导体激光器非球面准直透镜设计[J]. 激光与红外, 2013, 43(12): 1384-1388.
- [10] Lv Chenyang, Zhan Renjun, Cui Ying, et al. Collimating lens design and aspheric optimization method of laser cauterization gun[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(3): 211-218. (in Chinese)  
吕晨阳, 战仁军, 崔莹. 激光热灼枪准直镜头设计与非球面优化方法[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(3): 211-218.
- [11] Modinger J. Lasers, death rays, and the long, strange quest for the ultimate weapon[J]. Military Review, 2019, 99(4): 133.
- [12] Affan S, Mohsin M, Zubair A. Survey and technological analysis of laser and its defense applications[J]. Defence Technology, 2021, 17(2): 538-592.
- [13] Zohuri B. Laser beam energy as weapon[M]//Zohuri B. Directed-Energy Beam Weapons. Cham: Springer, 2019: 239-268.
- [14] Hu Haijian. Research on laser light weapons and their application in modern anti-terrorism operations[D]. Changsha: National University of Defense Science and Technology, 2006.
- [15] Hecht J. Half a century of laser weapons[J]. Optics and Photonics News, 2009, 20(2): 14-21.
- [16] Chen Xiaodong, Wang Hongguang. Anti-terrorist technical equipment[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [17] Jabczyński J, Gontar P. Impact of atmospheric turbulence on coherent beam combining for laser weapon systems[J]. Defence Technology, 2020(6): 021.