

文章编号 2095-1531(2016)03-0349-07

采用 APD 阵列的共口径激光成像光学系统设计

于 潇*, 姚 园, 徐正平

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所
航空光学成像与测量中国科学院重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要:针对机载平台激光 3D 成像系统的轻小型需求,设计了采用 APD 阵列的共口径激光收发光学系统。在分析激光成像系统照明方式及其光学系统结构的基础上,给出了激光 3D 成像光学系统结构框图:激光经衍射元件实现分束照明,采用双工反射镜实现收发光路的耦合。该光学系统用于 2 km 以内的目标三维成像,根据激光测距方程,确定了接收光学系统的参数以获得满足信噪比的回波能量。为避免造成像素之间串扰,设计了 5 倍扩束比的发射光学系统。最后,采用偏振片与 1/4 波片相结合的方式消除杂光,降低了发射光路对接收光路的影响。设计结果表明:接收光学系统弥散斑直径小于 120 μm ,畸变小于 0.2%。该光学系统体积小、重量轻,成像质量良好,可为同类激光成像光学系统提供借鉴参考。

关键词:光学设计;激光 3D 成像;发射/接收共光路;消杂光

中图分类号:TP721.2; TP703 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20160903.0349

Laser imaging optical system design with a shared aperture employing APD array

YU Xiao*, YAO Yuan, XU Zheng-ping

(Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: yuxiaojlllove@126.com

Abstract: To meet the requirements of light and small laser 3D imaging system on airborne platforms, a co-aperture laser transceiver optical system is designed employing APD array. On the basis of a brief analysis of the imaging system illumination pattern and optical system structure, the laser 3D imaging system block diagram is given as following: the laser beam can pass through a diffraction element to achieve beam splitting and the mirror with a hole in the middle is used to achieve coupled launching/transmitting optical path. The optical system is used for three-dimensional imaging within a distance of 2 km, and the receiving optical system parameters are determined according to the laser operating range equation to obtain enough echo energy to satisfy

收稿日期:2016-01-26;修订日期:2016-02-23

基金项目:中国科学院国防科技创新基金项目(No. CXJJ-14-S123);吉林省科技发展计划资助项目(20150204022GX)

Supported by Innovation Fund Project of National Defense Science and Technology, Chinese Academy of Sciences (No. CXJJ-14-S123), Jilin Provincial S&T Development Program Project of China (No. 20150204022GX)

the noise ratio. In order to avoid crosstalk between pixels, beam expander of five times is designed. Finally, the stray light is diminished to reduce the impact of the emitted light path on receiving light path by combining the polaroid and quarter-wave plate. The results indicate that the receiving optics has a diffuse spot diameter less than $120\ \mu\text{m}$ and distortion less than 0.2% . The whole optical system could be an example for the similar design with small size, light weight and fine imaging quality.

Key words: optical design; laser 3D imaging; launching/receiving common aperture; stray light elimination

1 引言

激光 3D 成像系统是指通过扫描或凝视有限视场来获得远处目标的反射率、光谱、偏振、多普勒频移以及三维数据等信息的系统^[1-6]。在二维图像的基础上,该系统可以提供距离信息,从而提高从背景中提取目标的能力^[7]。因此,激光 3D 成像系统在军事领域,如目标识别、定位、追踪,武器制导、障碍回避等方面有着广泛的应用^[8]。

目前,国外对激光 3D 成像系统已开展了大量研究^[9]。照明方式包括分束照明和泛光照明。与泛光照明系统相比,采用分束照明的系统可以提高单位时间内像元接收到的能量并且能有效避免串扰,放宽了像质要求,降低了系统尺寸、重量、成本等。其次,根据发射和接收过程是否共用一套望远系统,而光学系统又分为收发分置和收发

合置两种结构形式。收发分置结构可以避免发射光路对接收光路的干扰,而收发合置结构则可以大大降低光学系统的重量和尺寸,同时提高收发对准精度,避免探测盲区。John 等人采用收发合置的光学系统,整个激光 3D 成像系统的体积为 $0.07\ \text{m}^3$,重量为 $33\ \text{kg}$ ^[10]。因此,针对机载平台的应用,采用 APD 阵列的共口径激光 3D 成像系统具有很大优势。国内在激光成像与共口径光学系统方面的研究取得了一系列成果^[11-16],但是没有将二者有效地结合起来进行研究,因此,采用 APD 阵列共口径激光 3D 成像系统光学系统的研究具有一定的实际应用价值。

2 共口径激光 3D 成像光学系统

共口径激光 3D 成像光学系统原理如图 1 所示。

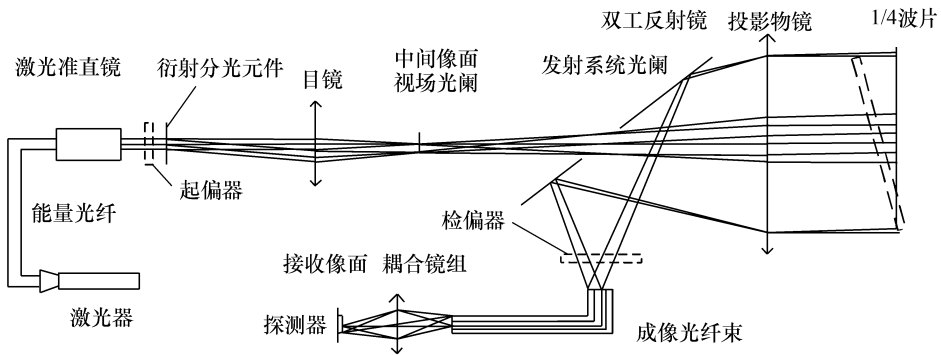


图 1 激光发射/接收系统结构示意图

Fig. 1 Block diagram of laser launching/receiving imaging system

鉴于分束照明方式在小型化激光系统的优势,系统采用 Damman 光栅作为二维衍射元件,对激光进行分束。激光器输出的单束脉冲激光通过能量光纤传输并经过准直镜准直,入射到光栅上,衍射成多束以不同角度传播的平行光,经过目镜

会聚,在中间像面上形成按阵列分布的亮斑。为使出射光斑的二维分布与成像光纤匹配,在中间像面设置视场光阑,滤除由衍射元件产生的不必要的光线。由于空间尺寸的限制,采用中间开孔的双工反射镜来代替棱镜进行分光,实现发射光

路与接收光路的耦合。将发射系统的出瞳设置在双工反射镜的开孔处,能够提高能量利用率并且降低激光散斑对成像的影响。投影物镜将中间像面的亮斑投影出去,照到目标的各个单元面积内,由目标反射的光线再通过投影物镜及双工反射镜聚焦到接收像面,经成像光纤及耦合镜组导入到探测器敏感元区,从而记录下各个测量单元面积内激光束往返的时间,反演出高程,获得三维图像。由于双工反射镜的开孔很小,并且目标的回波能量较弱,对激光器的影响可以忽略不计。

3 接收光学系统设计

投影物镜是整个收发系统的关键组件,既作为接收系统,又是发射光学系统的一部分,决定了整个激光 3D 成像系统的性能,因此,首先对接收光学系统进行设计。

3.1 接收光学系统的设计约束

作用距离是激光 3D 成像系统的一项重要指标,光学系统的口径主要受作用距离、激光器发射功率、探测器性能、光学系统效率等因素的影响。根据激光测距方程可以确定光学系统的口径,由于激光光束被分成 8×8 束,激光测距方程^[10]将被修改成如下形式:

$$P_r = \frac{P_l \pi \rho D^2}{(4r)^2 \times 8 \times 8} \times \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3 \times \eta_4, \quad (1)$$

式中, P_r 为探测器接收光功率, P_l 为激光器发射功率, ρ 为目标反射率, η_1 为光学系统透过率, η_2 为分束元件衍射效率, η_3 为往返大气透过率, η_4 为成像光纤效率, D 为光学系统口径, r 为激光成像系统作用距离。

从式(1)中可以看出,接收光功率与光学口径的平方成正比,因此在允许的条件下口径越大越好。然而受到系统体积尺寸的限制,初步选择 50 mm 光学口径,进一步通过对系统信噪比的计算来验证口径尺寸是否合理。

激光 3D 成像光学系统的参数包括工作波段、焦距、相对口径和视场等。焦距取决于系统的空间分辨率,视场由 APD 探测器的大小和焦距决

定。除此之外,在设计光学系统时,要考虑像质对 3D 成像效果的影响。为了使激光 3D 成像图像与实际景物之间不失真,就要避免接收光斑同时点亮两个敏感源,造成敏感元之间的串扰,根据成像光纤纤芯直径和中心距离,可以约束弥散圆的尺寸以及最大视场处的畸变值。

根据以上分析,光学系统的约束如表 1 所示。

表 1 光学设计约束

Tab. 1 Optical design constrain

| 参数 | 参数值 |
|----------------------|------------------|
| 工作波段/mm | 1.064 |
| 焦距/mm | 320 |
| F 数 | 6.4 |
| 视场角/(°) | 0.648 2 |
| 像元数 | 8×8 |
| 像元尺寸/ μm | 320×320 |
| 畸变/% | < 1.76 |
| 弥散圆直径/ μm | < 120 |

3.2 接收光学系统设计结果

根据系统设计约束,接收光学系统的结构如图 2 所示。为增大系统透过率,尽量减少透镜的数量,而若要满足成像质量,每片透镜的光焦度不宜过大,因此折中选取 6 片透镜组合,第 1 片、第 6 片为正透镜,其余为负透镜。为降低加工检测难度,镜面均采用球面。系统采用 3 种玻璃材料,分别是 HLAk2、HZF62 和 HZK3。

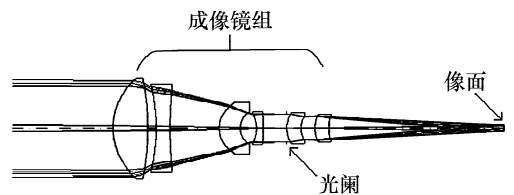


图 2 接收光学系统结构图

Fig. 2 Structure diagram of receiving optical system

对该光学系统进行像质分析,结果如图 3、图 4 所示。图 3 显示出系统的最大畸变值 $\eta < 0.2\%$,由图 4 可以看出全视场内激光回波的 95% 能量集中在 $\Phi 120 \mu\text{m}$ 弥散圆内,满足探测器成像需求。

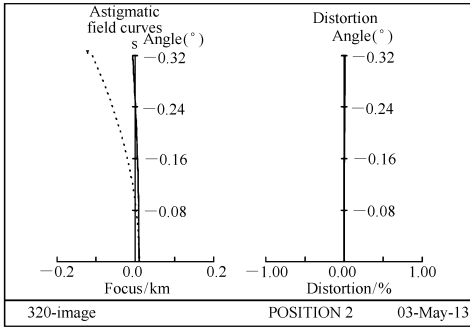


图3 接收光学系统场曲和畸变曲线

Fig. 3 Field curves and distortion graph of receiving optical system

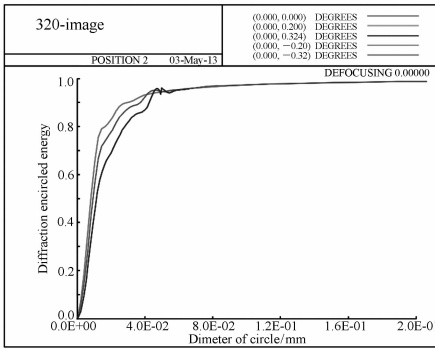


图4 能量集中度曲线

Fig. 4 Diffraction encircled energy graph of receiving optical system

为满足光学系统透过率的要求,每片透镜表面镀增透膜,透过率为0.98,接收光学系统的透过率为0.88。

4 发射光学系统设计

激光发射光学系统的目的是对光束进行扩束准直,以提高能量集中度,满足测量要求,其设计结果如图5所示。发射光学系统由目镜和物镜组成,8×8束激光先经过目镜会聚在中间像面上,再由投影物镜投射到目标上。由于激光3D成像系统采用的是分束照明方式,为提高系统的能量利用率,避免激光照亮目标时产生混叠,经发射系统出射的光斑阵列应与探测器具有相同的占空比,因此约束激光束散角与衍射分束角之间的比值小于0.64。根据系统的空间分辨率要求,可以

确定激光束之间的角间距为1 mrad,即激光束散角应小于0.64 mrad。扩束比同时受视场的限制,目镜的视场为40 mrad,物镜的视场为8 mrad,确定发射系统的扩束比为5。激光经能量光纤传输后的束散角为1 mrad,扩束后束散角为0.2 mrad,满足上述要求。望远系统的扩束比可由式(2)表达:

$$M = \frac{f_{\text{物}}}{f_{\text{目}}}, \quad (2)$$

式中, $f_{\text{物}}$ 为物镜焦距, $f_{\text{目}}$ 为目镜焦距。已知物镜焦距为320 mm,得到目镜的焦距为64 mm。目镜的口径小,像差相对容易校正,采用两片正透镜组合。扩束后的激光光束口径为12 mm×12 mm。采用反射镜将光路进行折叠,整个光学系统的尺寸被压缩至 $\Phi 125 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 的圆柱形空间内。发射光学系统包括8片透镜,1片窗口镜,5片反射镜,反射镜的反射率为0.93,因此发射系统的透过率为0.59,激光在往返光路的光学系统总透过率为0.52。

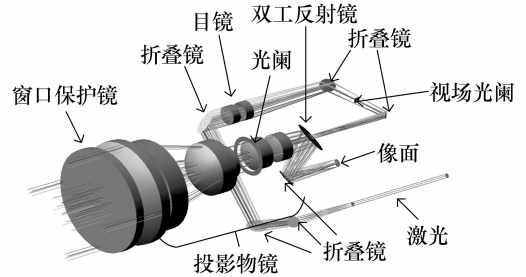


图5 发射光学系统结构示意图

Fig. 5 Principle diagram of transmitting optical system

本系统选用的脉冲激光器频率为10 Hz,峰值功率为100 kW,地面目标的反射率取平均值为0.35,光学系统透过率为0.5,Damman光栅的衍射效率取经验值为0.7,成像光纤的传输效率为0.8。在作用距离为2 km时,大气往返总透过率为0.35。系统的噪声主要包括探测器固有噪声及背景噪声,探测器选择8×8 APD阵列,响应度 R 为5 A/W,暗电流噪声 σ_{dark} 为0.3 nA。在日光照射条件下,1064 nm处目标表面反射的辐亮度为 $7.039321 \times 10^{-7} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$,等效的背景电流 $i_{\text{background}} = 0.03 \text{ nA}$ 。该系统的信噪比由(3)式表达:

$$\text{SNR} = \frac{I_s}{I_N} = \frac{P_r R}{(\sigma_{\text{dark}} + i_{\text{background}})} \quad (3)$$

根据该公式及以上数据条件计算得到系统的信噪比为 116,基本能够满足激光 3D 成像需求。但是以上计算值是在考虑的理想情况下得到的,在实际情况中,不同的处理电路会带来不同量级的电路噪声,信噪比还需要通过实验来验证。

5 消杂光设计

在收发合置的光学系统中,发射光路会对接收光路产生干扰。接收光路中的噪声主要来自投影物镜表面对激光的反射。因此为提高信噪比,减少 3D 成像系统的测量盲区,需在系统中加入消除杂光的措施。针对不同的照射目标,消除杂光的方法略有不同。如果目标表面光滑,则反射激光的偏振度基本不变,如果目标表面粗糙,则目标会对激光产生退偏作用。根据上述偏振效应,采用偏振片与 1/4 波片相结合,设计了相应的消杂光光路,如图 1 中虚线部分所示。激光在经光栅衍射之前先经过偏振片起偏,通过投影物镜后的 1/4 波片后变为圆偏振光,经光滑目标反射后再次通过 1/4 波片变为线偏振光,且方向转过 90°,通过检偏器后入射到像面。而由投影物镜的内反射光偏振方向不变,且与检偏器方向垂直,即达到消杂光的目的。如果目标表面粗糙,则由目标的反射光为自然光,则去掉 1/4 波片即可。除了采用偏振原理消除镜面反射杂光,还要消除来自空间的其他杂散光。激光 3D 成像光学系统实物图如图 6 所示,用金属罩罩在镜头外部,避免激光在空间的散射给成像带来影响。在实验过程中,通过观察发射光学系统和接收光学系统的光斑图来调整二者的相对位置,进而实现发射与接收的配准,如图 7 所示。对于表面光滑的目标成像,C10508 采集到的目标回波信号,实验结果如图 8 所示,3 条曲线分别代表无偏振片、偏振片垂直放置、偏振片倾斜放置时,探测器采集到的回波信号。左侧波形代表杂光信号,右侧波形代表目标回波信号。从实验结果可以看出,采用偏振原理可以在一定程度上降低杂光的影响,但是 1/4 波片需要与光轴成一定角度放置,否则表面反射

会给接收光路带来更大的影响。

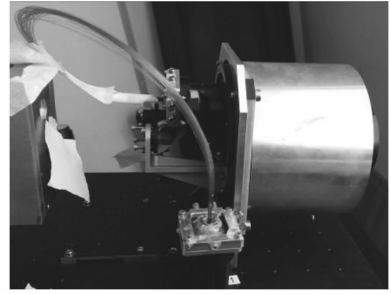
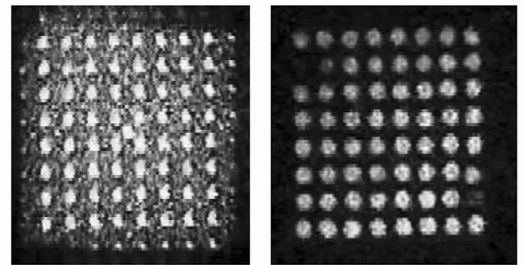


图 6 激光 3D 成像光学系统实物图

Fig. 6 Optical system of laser 3D imaging



(a) 激光照射 Damman 光栅后光斑分布图
(b) 激光照射成像光纤后光斑分布图
(a) Spot distribution of laser irradiated Damman grating
(b) Laser spot distribution of laser fiber after laser irradiation

图 7 激光照射 Damman 光栅后和激光照射成像光纤后光斑分布图

Fig. 7 Spot distribution of laser irradiated Damman grating and laser spot distribution of laser fiber after laser irradiation

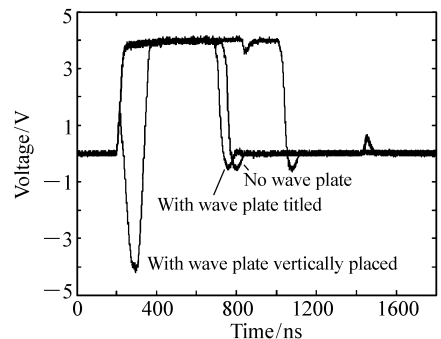


图 8 镜头前无波片、波片垂直放置、波片倾斜放置时,C10508 采集到的目标回波信号

Fig. 8 Echoing signal in condition of no wave plate, with wave plate vertically placed and wave plate tilted

6 结 论

本文根据航空机载激光 3D 成像系统小型化的应用需求,开展了对采用 APD 阵列的共口径激光成像光学系统的研究。首先介绍了光学系统的工作原理,提出了激光成像系统的照明方式以及收发光路的耦合方法。在分析系统作用距离以及

空间分辨率的基础上,分别设计了接收和发射光学系统。最后,给出了在接收光学系统测量时降低杂光的方法。设计结果表明:接收光学系统弥散斑直径小于 $120\ \mu\text{m}$,畸变小于 0.2% 。共口径激光收发光学系统的外形尺寸是 $\Phi 125\ \text{mm} \times 200\ \text{mm}$,基本满足了小型化激光成像系统的测量要求。

参考文献:

- [1] MOLEBNY V, KAMERMAN G, STEINVALL O. Laser radar: from early history to new trends[J]. *SPIE*, 2010, 7835: 783502-1-783502-30.
- [2] 何伟基, 司马博羽, 苗壮, 等. 光子计数三维成像激光雷达反转误差的校正[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(10): 2488-2494.
HE W J, SIMA B Y, MIAO ZH, *et al.*. Correction of reversal errors in photon counting 3D imaging radar[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(10): 2488-2494. (in Chinese)
- [3] 胡峰, 胡春生, 王省书, 等. 成像激光雷达与摄像机外部位置关系的标定[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(4): 938-943.
HU F, HU CH SH, WANG X SH, *et al.*. Calibration of external relation between imaging laser radar and camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4): 938-943. (in Chinese)
- [4] 徐正平, 沈宏海, 许永森, 等. 激光成像系统高精度目标距离和强度信息提取[J]. *红外与激光工程*, 2014(8): 2668-2672.
Xu Z P, Shen H H, Xu Y S, *et al.*. Target-distance and intensity information detecting with high precision in laser imaging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014(8): 2668-2672. (in Chinese)
- [5] 陈骁, 石志广, 杨卫平, 等. 利用三维点云的圆锥状弹头目标参数估计[J]. *红外与激光工程*, 2014(10): 3480-3485.
CHEN X, SHI ZH G, YANG W P, *et al.*. Parameter estimation of conical warhead target based on 3D point cloud[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014(10): 3480-3485. (in Chinese)
- [6] 张秋晨, 施蕊, 李卓. 激光成像目标模拟器建模方法[J]. *红外与激光工程*, 2015(1): 112-117.
ZHANG Q CH, SHI R, L ZH. Modeling method of laser imaging target simulator[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015(1): 112-117. (in Chinese)
- [7] STETTNER R, BAILEY H, RICHMOND R. Eye-safe laser radar 3-D imaging[J]. *RTO-MP-SCI-145*, 2004, 23: 1-16.
- [8] 严洁, 阮友田, 薛珮瑶. 主被动光学图像融合技术研究[J]. *中国光学*, 2015(3): 378-385.
YAN J, RUAN Y T, XUE P Y. Active and passive optical image fusion technology[J]. *Chinese Optics*, 2015(3): 378-385. (in Chinese)
- [9] MCMANAMON P F. A history of laser radar in the united states[J]. *SPIE*, 2010, 7684: 76840T-1-76840T-11.
- [10] SCAMAN M E, ECONOMIKOS L. Computer vision for automatic inspection of complex metal patterns on multichip modules(MCM-D)[J]. *IEEE*, 1995, 18(4): 675-684.
- [11] 金光, 李艳杰, 钟兴, 等. 空间成像与激光通信共口径光学系统设计[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(8): 2067-2074.
JIN G, LI Y J, ZHONG X, *et al.*. Design of co-aperture optical system for space imaging and laser communication[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8): 2067-2074. (in Chinese)
- [12] 王锐. 激光距离选通成像门宽对图像信噪比影响[J]. *中国光学*, 2015(6): 951-956.
WANG R. Effect of gate width of laser range gating imaging on image SNR[J]. *Chinese Optics*, 2015(6): 951-956. (in Chinese)
- [13] 李艳杰, 金光, 张元, 等. 成像与激光发射系统的共口径设计与实验[J]. *中国光学*, 2015(2): 220-226.
LI Y J, JIN G, ZHANG Y, *et al.*. Co-aperture optical system for imaging and laser transmitting[J]. *Chinese Optics*, 2015(2): 220-226. (in Chinese).
- [14] 张学明. 激光接收与彩色电视共窗口设计[J]. *中国光学*, 2014(6): 942-948.

ZHANG X M. Optical design of laser receiving and color TV confocal-window[J]. *Chinese Optics*,2014(6):942-948. (in Chinese)

[15] YAN F,WANG X. Using real-time embedded system with multiple DSPs in corona detection[J]. *SPIE*,2006,6027:928-933.

[16] 陆洪武. 太赫兹波束准直光学系统设计[J]. *光学与光电技术*,2015,13(6):77-81.

CHEN H W. Design of terahertz beam collimation optical system[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*,2015(6):77-81. (in Chinese)

作者简介:



于 潇(1990—),女,黑龙江哈尔滨人,硕士,研究实习员,2014 年于哈尔滨工业大学获硕士学位,主要从事航空光学成像链路与光学系统设计方面的研究。E-mail:yuxiaojlllove@126.com

向您推荐《液晶与显示》期刊

- 中文核心期刊
- 中国液晶学科和显示技术领域的综合性专业学术期刊
- 中国物理学会液晶分会会刊、中国光学光电子行业协会液晶分会会刊
- 英国《科学文摘》(INSPEC)、美国《化学文摘》(CA)、俄罗斯《文摘杂志》(AJ)、美国《剑桥科学文摘》(CSA)、“中国科技论文统计源期刊”等 20 余种国内外著名检索刊物和文献数据库来源期刊

《液晶与显示》以材料物理和化学、器件制备技术及器件物理、器件驱动与控制、成像技术与图像处理等栏目集中报道国内外液晶学科和显示技术领域最新理论研究、科研成果和创新技术,及时反映国内外本学科领域及产业信息动态,是宣传、展示我国该学科领域和产业科技创新实力与硕果,进行国际交流的平台。其内容丰富,涵盖面广,信息量大,可读性强,是我国专业学术期刊发行量最大的刊物之一。

《液晶与显示》征集有关液晶聚合物、胶体等软物质材料和各类显示材料及制备方法、液晶物理、液晶非线性光学、生物液晶;液晶显示、等离子体显示、发光二极管显示、电致发光显示、场发射显示、3D 显示、微显示、真空荧光显示、电致变色显示及其他新型显示等各类显示器件物理和制作技术;各类显示新型模式和驱动技术、显示技术应用;显示材料和器件的测试方法与技术;各类显示器件的应用;与显示相关的成像技术与图像处理等研究论文。

《液晶与显示》热忱欢迎广大作者、读者广为利用,踊跃投稿和订阅。

地址:长春市东南湖大路 3888 号

《液晶与显示》编辑部

邮编:130033

电话:(0431)6176059

E-mail:yjyxs@126.com

国内统一刊号:CN 22-1259/04

国际标准刊号:ISSN 1007-2780

国内邮发代号:12-203

国内定价:50 元/期

网 址:www.yjyxs.com