

文章编号 1004-924X(2014)12-3199-06

全固态 589 nm 激光器及其钠导星激发亮度

刘 杰^{1, 2*}, 王建立¹, 吕天宇¹, 孙敬伟¹, 董 磊¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:研制了一台 LD 侧面泵浦和腔内和频结构的小型全固态 589 nm 激光器, 报道了利用该激光器激发钠导星亮度的实验研究结果。通过数值模拟分析并设计了谐振腔腔长、晶体位置等, 使其具有体积小、转换效率高等特点。研制了一套时域匹配电源用于补偿两路激光脉冲的时间差。对分束镜双侧进行特殊镀膜, 获得了相应的线偏振光并提高了转换效率和热稳定性。采用插入标准具、特殊镀膜等技术抑制了 1 338 nm 谱线的振荡。最后设计了相应的发射望远镜和接收系统用于钠激光导星的观测。测试结果表明, 该激光器的输出功率大于 8 W, 重复频率为 5 kHz, 线宽小于 3.5 GHz, 对应 808 nm 泵浦功率的转换效率达到 2%。在长春市内天光背景下, 冬季实验激发的导星亮度可达 10.0 等。

关 键 词:全固态激光器; 腔内和频; 激光导星; 自适应光学

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142212.3199

All-solid-state 589 nm laser and the brightness of excited sodium guide star

LIU Jie^{1, 2*}, WANG Jian-li¹, LÜ Tian-yu¹, SUN Jing-wei¹, DONG Lei¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

* *Corresponding author, E-mail: liujie@ciomp.ac.cn*

Abstract: A LD side-pumped 589 nm small-scale all-solid-state laser with an intra-cavity sum-frequency structure was developed and the experiments for exciting the brightness of a sodium guide star by the laser were described. The numerical simulation method was employed to analyze and design the cavity length and the position of a sum-frequency crystal, and it shows a smaller size and higher conversion efficiency. A synchronous power system in time domain was developed to compensate the delay between pulses of the two fundamental lasers. Special films were coated on the sides of the splitter mirror to obtain linear polarized laser as well as to increase the conversion efficiency and the thermal stability. Moreover, etalons and special coating methods were employed to suppress the oscillation of 1 338 nm spectral line. Finally, a dedicated launch telescope and a receive system were used for the generation and observation of sodium guide star. Test results show that the laser offers an output power more than 8 W, a repetition frequency of 5 kHz and the linewidth less than 3.5 GHz, mean-

收稿日期: 2014-05-05; 修订日期: 2014-05-26.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2012AAXX1003X)

while, its conversion efficiency is up to 2% corresponding to the 808 nm pump power. Under the sky background light of Changchun, the brightness of the guide star excited by the laser in winter experiments is about 10 Mv.

Key words: all-solid-state laser; intra-cavity sum-frequency; laser guide star; adaptive optics

1 引言

激光导星技术是现代大型天文望远镜自适应光学系统的重要组成部分,主要用于克服目标暗弱等原因导致的天空覆盖率低的问题。589 nm 激光器作为其核心技术,成为了该领域的研究热点。目前,多台不同结构和性能的激光器已应用于各大型望远镜,为自适应光学系统提供波前畸变信息。美国星火靶场的 50 W 连续激光器是目前已知的激发钠原子发光效率最高的激光器之一^[1], 2005 年 11 月以 30 W 功率完成的实验中获得的钠导星亮度最高可达 5.1 等。由芝加哥大学研制的锁模和频激光器也具有较高的激发效率^[2], 回波光光子数平均达到 $30 \sim 130 \text{ ph}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{W}^{-1})$ ^[3], 实验表明 1.1 W 该形式的激光功率即可激发出亮度为 9.5 等的钠导星。此外, Gemini 的固态激光器^[4]、Subaru 的锁模和频激光器^[5]及 KECKII 的染料激光器等已为大家所熟知并且相关研究成果丰硕,但相对之前的两种激光器,它们的激发效率相对较低。这些激光器的性能指标通常较高,大多采用腔外和频结构,具有系统复杂笨重,成本高昂,维护要求高等特点。

在国内,中科院理化所在该领域的研究起步较早,所研制的 30 W 级第二代准连续微秒脉冲和频激光器已经在云南进行过多次外场观测实验^[6]。中国工程物理研究院应用电子学研究所也获得了基于腔外和频结构的 15.5 W 黄光激光^[7]。本文研制出一台基于腔内和频结构的全固态 589 nm 激光器^[8], 在经过调整与部分优化后其各性能指标在满足激发一定亮度的钠激光导星要求的同时,具有体积小、重量轻、稳定性高、成本低等特点。激光器工程样机于 2013 年 6 月正式投入外场测试,长期实验证明它的可靠性非常好。

2 全固态激光器设计与性能

2.1 激光器结构

激光器采用 LD 侧面泵浦复合折叠腔结构, 将 1 064 nm 和 1 319 nm 两路红外基频光在和频区内和频后得到 589 nm 的输出光, 其结构原理如图 1 所示^[9]。

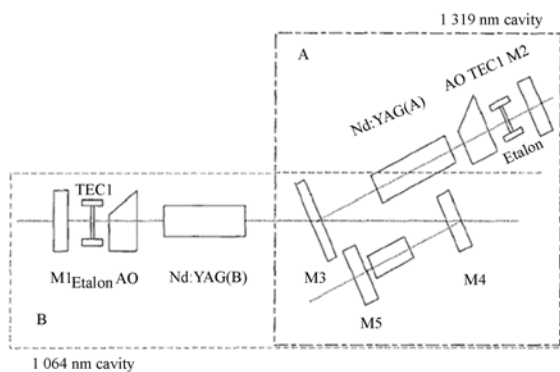


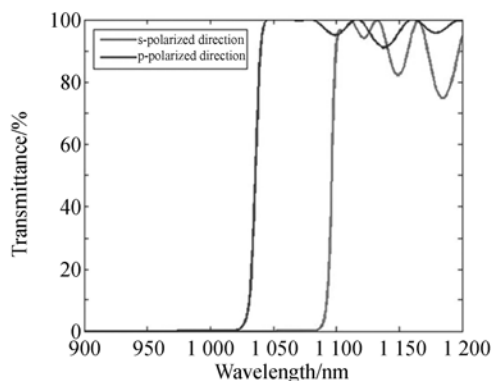
图 1 全固态 589 nm 激光器结构原理图

Fig. 1 Schematic diagram of all-solid-state 589 nm laser

首先设计谐振腔。将激光工作物质受到泵浦后产生的热效应等效为一块透镜, 采用 ABCD 矩阵设计谐振腔, 激光工作物质上的基模体积要尽量大, 而非线性和频晶体位置处光斑在不超过晶体和膜层损伤阈值的前提下半径应尽量小, 同时满足空间模式匹配。1 064 nm 和 1 319 nm 腔长的模拟结果分别约为 390 mm 和 465 mm, 在工作物质上基模的光斑半径分别为 0.47 mm 和 0.55 mm, 而在磷酸钛氧钾 (KTP) 晶体处激光半径近似相等约为 0.24 mm。

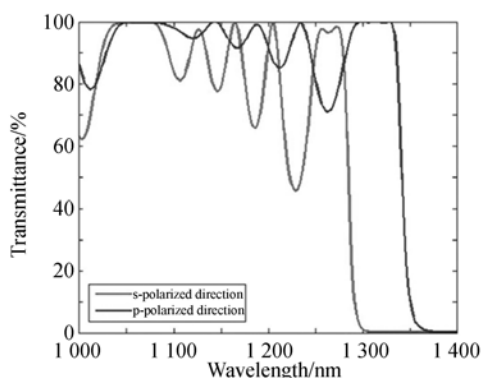
图中 A 区域为 1 319 nm 谐振腔, 其中高反镜 M2, 分束镜 M3, 589 nm 激光输出透镜 M4 和高反镜 M5 构成谐振腔腔镜, 还包括 Nd:YAG 晶体、调 Q 模块 (图中 AO) 以及选频原件标准具 (Etalon)。B 区域为 1 064 nm 谐振腔, 其结构与 1 319 nm 谐振腔类似, 同样包括谐振腔镜组、Nd:YAG 晶体、调 Q 模块和标准具等。其中

M1、M2 为平凹镜,曲率均为 1 000 mm,其它为平面镜。调 Q 模块采用英国 Gooch & Housego 公司的 I-QS27-5S4G-U5-ST1。基频光均由 808 nm 半导体激光二极管泵浦 Nd:YAG 晶体得到,总泵浦功率为 408 W,其中 A 区的泵浦功率为 198 W,B 区的泵浦功率为 210 W,对应的泵浦电流分别为 21.7 A 和 20.5 A。Nd³⁺ 离子的掺杂浓度为 1%,以使增益分布均匀,晶体尺寸为 $\Phi 4$ mm,厚度为 65 mm,两端镀 1 064 nm 或 1 319 nm 的增透膜。M3、M4、M5 以及非线性晶体组成和频区域,将基频光和频为 589 nm 激光并输出腔外,采用 KTP 晶体,晶体大小为 5 mm $\times$ 5 mm $\times$ 10 mm,按 $\theta=78.8^\circ$, $\varphi=0^\circ$ 方向切割,模拟计算得到非线性系数 d_{eff} 为 3.808×10^{-12} m/V。



(a) M3 左侧透过率

(a) Transmission of M3's left side



(b) M3 右侧透过率

(b) Transmission of M3's right side

图 2 M3 镀膜的透过率

Fig. 2 Transmittances of M3 coatings

为获得两路互相垂直的线偏振基频光,图 1 中 M3 的两侧经过了特殊的镀膜处理,左侧以 45°

镀 1 064 nm p 波高透、1 064 nm s 波高反;右侧以 45° 镀 1 064 nm p 波和 s 波高透、1 319 nm p 波高透、1 319 nm s 波高反;镀膜后的透过率如图 2 所示。由此,1 064 nm p 波实现振荡,1 319 nm s 波实现振荡,热效应降低,转化效率和系统热稳定性提高。

2.2 激光器优化

由于 1 064 nm 和 1 319 nm 激光的谱线增益和阈值功率不同,激光建立的时间不同,不同激光电源电路的信号延时也不同,因此两个基频光在脉冲时域上不匹配,从而导致和频效率低,输出功率低,存在基频光倍频产生的绿光和红光输出问题。为解决这一问题,设计了一套时域匹配电源系统用于补偿 1 064 nm 和 1 319 nm 的激光脉冲的时间差,提高和频效率和输出激光功率。

Nd:YAG 在 $1.3 \mu\text{m}$ 处有两条增益较强的谱线,具有几乎相同的受激发射截面,两条谱线的波长分别为 1 319 nm 和 1 338 nm,相差仅 19 nm,竞争效应十分显著,导致同时输出 589 nm 和 592 nm 谱线。为抑制 1 319 nm 谐振腔内的其他谱线,对 M2 进行了特殊的镀膜处理,即对 1 319 nm 和 1 338 nm 高反但后者的反射率较低,对 1 064 nm 增透,同时插入厚度为 0.5 mm 的标准具,标准具的透射线宽和对纵模的选择随着标准具表面反射率的增大变得更加精细,从而控制输出光频率。这里 1 319 nm 和 1 338 nm 处的透过率分别为 98% 以上和 88%,此时 1 338 nm 谱线难于起振,达到了仅保留 1 319 nm 谱线的目的。实验发现,如果不能有效抑制 1 338 nm 谱线的振荡,即使增加泵浦功率,589 nm 的激光输出功率也不会增加,同时伴随闪烁、功率不稳定等现象。

为方便激光器波长的调整,使激光器精确对准或者偏离 589.159 nm,在 1 064 nm 谐振腔内插入 PI 精密位移控制器对标准具角度进行控制,实现了光频率在小范围内的连续调谐,使激光波长具有 ± 10 pm 的调整范围。

2.3 性能指标

经过设计与优化后,激光器在 589 nm 处的输出功率大于 8 W,总的泵浦功率为 808 nm,激光器的光光转换效率可达 2%。激光重频为 5 kHz,脉冲宽度为 152 ns,如图 3 所示,线偏振度大于 95%。

采用 High Finesse 波长计测量激光波长,结

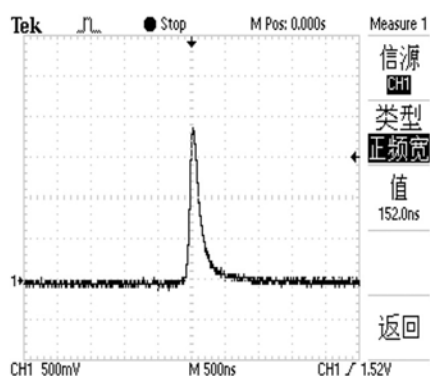


图 3 589 nm 激光脉冲

Fig. 3 Temporal profile of 589 nm laser pulse

果表明波长可准确地控制在 589.159 nm, 线宽稳定在 3.5 GHz (4 pm) 以内, 如图 4 所示。实验过程中获得的最佳线宽可以达到 3 GHz, 即与钠原子的多普勒展宽线宽相一致, 可以充分利用钠原子的有效激发带宽。

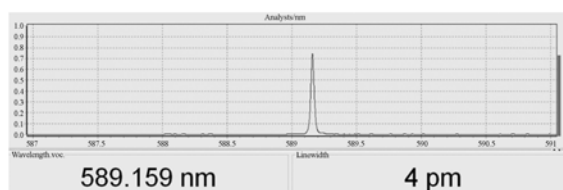


图 4 线宽测量

Fig. 4 Measurement of line width

激光器功率及稳定性 (2 h) 的测试曲线如图 5 所示。

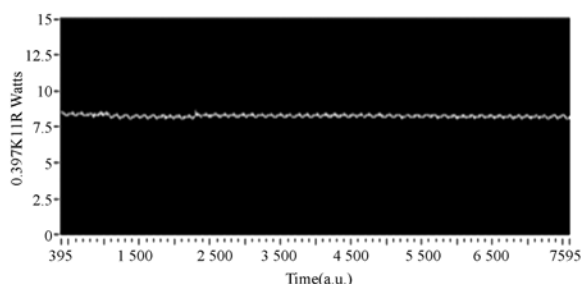


图 5 功率及稳定性测量曲线

Fig. 5 Power and stability measurements

目前测量得到的光束质量 M^2 因子略小于 3, 这主要因为通过增大增益界面和菲涅尔数来获得大功率输出时, 谐振腔内处于多模振荡状态, 腔内和频结构激光反复振荡的功率较大, 所引起的热

效应较明显, 而由此引起的镜面的热变形、热致双折射效应、热透镜像差等都会降低输出光的光束质量, 使它无法达到近衍射极限值, 并且光束质量随泵浦功率的变化而变化。通过半导体致冷 (TEC) 控制器和水冷技术对标准具等重要器件进行温控可在一定程度上降低热效应, 在外部光路中采用自适应光学技术对光束进行校正可进一步提高光束质量。

激光器的性能指标如表 1 所示。激光器工程样机主要包括激光器铝箱、电源箱、水冷箱以及控制计算机。其中光路等关键部分均密封于 525 mm × 405 mm × 155 mm 的铝质箱体并充入惰性气体, 质量在 25 kg 左右。

表 1 全固态激光器的性能指标

Tab. 1 Performances of all-solid-state laser

Property	Value
Power	>8 W
Power stability	<1% (2 h)
Line width	≤3.5 GHz
Repetition frequency	5 kHz
Pulse width	152 ns
Linear polarization	95%
Wavelength stability	±1 pm
Tunable range	±10 pm
Beam quality M^2	<3

工程样机自 2013 年 6 月起投入外场实验测试, 经过半年多的运行, 历经了季节温度变化和工作环境等的考验, 仅因为电子连接器件出现故障进行过一次开箱维修。由于激光器操作十分简单, 夜晚进行观测实验时不需要设计人员在场。

3 钠激光导星观测实验及结果

3.1 实验构成

为了有效地发射 589 nm 激光束, 本文设计了一套由两个扩束光学系统级联的发射望远镜, 并将其固定于 2.4 m × 1.2 m 的光学平台上, 扩束倍率为 7.5。目前出射激光束的直径为 140 mm。在设计初期首先采用 633 nm 干涉仪进行装调。实验中, 将发射望远镜倒置为接收望远镜并配合 589 nm 窄带滤光片观测恒星, 调整使恒星达到最小。最后在激光发射过程中, 与观测系

统成像配合再次微调以达到最佳工作状态。发射望远镜的光路设计如图 6 所示。

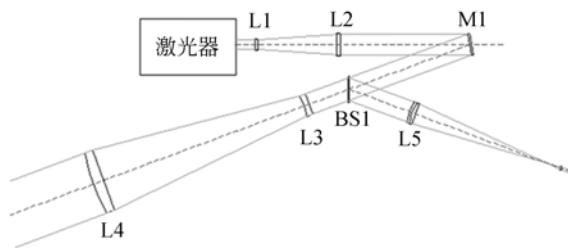


图 6 发射望远镜光路

Fig. 6 Optical path of launch telescope

图中, L1 与 L2 为第一级扩束, 放大倍率为 2.5 倍; L3 与 L4 为第二级扩束, 放大倍率为 3 倍; M1、BS1 与 L5 为预留接口, 为后续采用自适应校正系统优化光束质量准备。其中 M1 口径为 50 mm, 可替换为变形镜, L5 后接波前传感器。

钠导星观测系统与发射望远镜的距离约为 60 m, 主要由 508 mm 口径的天文望远镜、CCD 相机、窄带滤光片等部分组成。其中望远镜焦距为 3 454 mm, 中心遮拦比为 0.39, CCD 相机靶面为 8.2 mm × 8.2 mm, 像素数为 512 pixel × 512 pixel, 因此每像素的视场为 0.96" × 0.96"。窄带滤光片的半高全宽(FWHM)为 10 nm, 589 nm 处的透过率达到 97% 以上。

3.2 实验结果

钠导星观测实验于 2014 年 1 月初在长春市



图 7 1 s 曝光钠导星

Fig. 7 Image of sodium guide star with 1 s exposure

内天光背景条件下进行, 图 7 为 1 s 曝光时间的 CCD 图像。

由于望远镜控制精度的限制, 实验中使用北极星作为标定恒星。在观测钠导星和北极星的过程中, 除了曝光时间及天顶角不同, 其它参数均相同。对导星和北极星的图像分别进行提取与处理后, 根据前期实验采用的方法^[10]计算得到在相机靶面处导星的平均光子返回流为 $4.6 \times 10^5 \text{ photons}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$, 北极星的平均光子返回流为 $7.1 \times 10^8 \text{ photons}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$, 导星的亮度为 10.0 等。根据钠原子能级规律, 在将激光的线偏振态转化为圆偏振后, 由于光学泵浦的作用, 激发效率可进一步提高 1.5 倍左右^[11]。该亮度可满足 KECK、Subaru 等大型天文望远镜的要求, KECK 自适应光学系统使用 12 等星(V 波段)时仍可达到衍射极限性能^[12], 而 Subaru 的 AO188 在 15 等星(R 波段)时校正后的 Strehl 比(K 波段)仍大于 0.2^[13]。

4 结 论

本文设计了一台小型全固态 589 nm 激光器, 并进行了激发钠激光导星亮度的实验研究。该激光器采用了 LD 侧面泵浦腔内和频结构, 利用数值模拟方法设计了腔模等。采用时域电源匹配系统、镀膜以及选频等手段对激光器进行了优化, 优化后激光器的功率输出达到 8 W, 线宽小于 3.5 GHz, 重复频率为 5 kHz, 脉冲宽度为 152 ns, 线偏振度达到 95%。搭建了激光器工程样机, 该样机具有体积小、重量轻、操作简便以及可靠性高等特点, 可方便地安装至大型望远镜上, 且成本更容易接受。实验结果表明, 该激光器在 1 月初可激发亮度为 10 等的钠导星。

未来拟采用重新精细调整内部谐振腔来优化光束质量, 采用无波前自适应光学系统^[14]或者适用于偏振光的高分辨率液晶自适应光学系统^[15]对光束进行整形, 以及重新设计发射望远镜等方法获得更小的钠导星尺寸, 以完全满足大口径望远镜自适应光学系统的要求。

参考文献:

[1] CRAIG A D, PAUL D H, GERALD T M, *et al.*.

Realization of a 50-watt facility-class sodium guide-star pump laser [J]. SPIE, 2005, 5707: 46-49.

[2] JENNIFER E R, ANTONIN H B, JOHN A, *et*

- al.. Facilitizing the palomar AO laser guide star system [J]. *SPIE*, 2008, 7015: 70152S-1.
- [3] DONALD G. Laser technology for astronomical adaptive optics [J]. *SPIE*, 2008, 7015: 70150J-1.
- [4] ALLEN J T, ALLEN K H, CAMILO A L, *et al.*. High-power solid-state sodium guidestar laser for the Gemini North Observatory [J]. *SPIE*, 2006, 6100: 61001H-1.
- [5] YOSHIHIKO S, YUTAKA H, NORIHITO S, *et al.*. 589 nm sum-frequency generation laser for the LGS/AO of Subaru Telescope [J]. *SPIE*, 2006, 6272: 627246-1.
- [6] 许祖彦, 谢士永, 薄勇, 等. 30W 级第二代钠信标激光器研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(9): 0900111-1-3. XU Z Y, XIE SH Y, BO Y, *et al.*. Investigation of 30 W-class second-generation sodium beacon laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900111-1-3. (in Chinese)
- [7] 鲁燕华, 张雷, 刘晟西, 等. 15.5W 全固态腔外和频 589nm 黄光激光器[J]. *中国激光*, 2010, 37(9): 2419-2423. LU Y H, ZHANG L, LIU SH X, *et al.*. 15.5 W all-solid-state extra-cavity sum-frequency generation 589 nm yellow laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(9): 2419-2423. (in Chinese)
- [8] WANG Y N, ZHENG Q, YAO Y, *et al.*. Intracavity sum-frequency diode side-pumped all-solid-state generation yellow laser at 589 nm with an output power of 20.5 W [J]. *Applied Optics*, 2013, 52: 1876-1880.
- [9] 王禹凝. 高功率全固态 589 nm 黄光激光器的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2012. WANG Y N. *Research on High Power All-solid-state 589 nm Yellow Laser* [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- [10] 刘杰, 王建立, 吕天宇, 等. 钠激光导星星等计算方法研究[J]. *中国科学: 物理学力学天文学*, 2013, 43(3): 318-323. LIU J, WANG J L, LÜ T Y, *et al.*. Research on the calculation method of sodium laser guide star magnitude [J]. *Scientia Sinica Physica: Mechanica & Astronomica*, 2013, 43(3): 318-323. (in Chinese)
- [11] JEYS T H, HEINRICHS R M, WALL K F, *et al.*. Observation of optical pumping of mesospheric sodium [J]. *Optics Letters*, 1992, 17(16): 1143-1145.
- [12] ANTONIN H B, DAVID L M, MARCOS A D, *et al.*. Keck laser guide star adaptive optics: science verification results [J]. *SPIE*, 2004, 5490: 321.
- [13] YUTAKA H, HIDEKI T, SHIN O, *et al.*. Commissioning status of Subaru laser guide star adaptive optics system [J]. *SPIE*, 2010, 7736: 77360N-1.
- [14] 刘磊, 郭劲, 赵帅, 等. 随机并行梯度下降算法在激光束整形中的应用[J]. *中国光学*, 2014, 7(2): 260-266. LIU L, GUO J, ZHAO SH, *et al.*. Application of stochastic parallel gradient descent algorithm in laser beam shaping [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(2): 260-266. (in Chinese)
- [15] 曹召良, 李小平, 宣丽, 等. 液晶自适应光学的研究进展[J]. *中国光学*, 2012, 5(1): 12-19. CAO ZH L, LI X P, XUAN L, *et al.*. Recent progress in liquid crystal adaptive optical techniques [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(1): 12-19. (in Chinese)

作者简介:



刘杰(1985—),男,江苏连云港人,博士研究生,助理研究员,2010年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事自适应光学及激光应用技术等方面的研究。E-mail: liujie@ciomp.ac.cn



王建立(1971—),男,山东曲阜人,博士,研究员,博士生导师,2002年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事空间目标探测技术、地基高分辨率成像光电望远镜总体技术的研究。E-mail: wangjianli@ciomp.ac.cn