



·激光合束技术·

## 产生钠导引星星群的钠信标激光合/分束技术\*

卞 奇<sup>1,2</sup>, 薄 勇<sup>1,2</sup>, 左军卫<sup>1,2</sup>, 彭钦军<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 理化技术研究所 激光物理与技术研究中心, 北京 100190; 2. 齐鲁中科光物理与工程技术研究院, 济南 250000)

**摘 要:** 研究了脉冲光束的偏振和时序非相干合成技术, 通过偏振合束器将两路 50 W 级 500 Hz 的 589 nm 钠信标激光在空间上合为一束光线, 成功突破了 100 W 级  $\mu\text{s}$  脉冲全固态钠信标激光输出; 利用脉冲激光同步延时器控制两路激光脉冲的时序, 使其按先后顺序合成一束脉冲激光, 重复频率提升到 1 kHz。合束后的激光光束质量  $M^2$  约为 1.41, 与单光束的光束质量基本保持一致, 光斑抖动性约为 40  $\mu\text{rad}$ , 可满足激光钠导引星自适应光学系统的应用需求。与传统的相干合成方法相比, 该偏振和时序非相干合成方案具有结构简单、稳定、效率高的优点, 且整个系统无需复杂的相位控制机制, 为脉冲激光功率扩展提供了新途径。基于上述技术基础, 结合自主提出的精密偏振分光专利技术, 在丽江天文台通过一台发射望远镜将四束 25 W/束的  $\mu\text{s}$  脉冲黄激光发射到钠层, 成功产生了四颗钠导引星, 这一结果将有助于推动大型地基光学望远镜中多层共轭自适应光学技术的发展。

**关键词:** 钠信标激光; 非相干光束合成; 偏振调制; 时序控制; 脉冲激光器

中图分类号: O437

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220317

## Beam combining/splitting technology of sodium beacon laser for generating sodium guidestars constellation

Bian Qi<sup>1,2</sup>, Bo Yong<sup>1,2</sup>, Zuo Junwei<sup>1,2</sup>, Peng Qinjun<sup>1,2</sup>

(1. Center for Laser Physics and Technique, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;  
2. Institute of Optical Physics and Engineering Technology, QiluZhongke, Ji'nan 250000, China)

**Abstract:** A polarization and sequence incoherent combining technology of pulsed laser beam is introduced. A 100 W level microsecond-pulse all-solid-state sodium beacon laser is performed, via combining two independent 50 W level 589 nm lasers at 500 Hz to be one beam by a polarized coupler. Through a pulsed laser synchronizing and delay controller, the two pulsed laser beams are added successfully at time sequence, and the corresponding repetition rate is up to 1 kHz. The beam quality factor  $M^2$  of the combined laser is about 1.41, maintaining at almost equal level with one of two laser beams, and the beam pointing stability is measured to be about 40  $\mu\text{rad}$ , which can well meet the requirements at the time of laser guide star testing. Compared with the coherent beam combining, the approach of polarization and sequence incoherent combining has high efficiency, simple combination, and no specific restriction on phase and frequency spectrum, providing a new way for pulsed laser power scaling. Based on a self-proposed precise polarized splitting technology, four beams of (25 W/beam)  $\mu\text{s}$ -pulsed yellow laser are projected up to the sodium layer through one launching telescope at Lijiang Observatory, and successfully generate four sodium guidestars, which could promote the development of multi-conjugate adaptive optics systems on large-aperture ground-based telescopes.

**Key words:** sodium beacon laser, incoherent beam combining, polarized modulation, sequence controlling, pulsed laser

钠信标激光用来激发海拔约 90 km 大气电离层中的钠原子产生高亮度的钠导引星, 以之为信标, 采用自适应光学系统可校正大气扰动, 使地基光学望远镜的观测分辨率可以达到接近衍射极限<sup>[1]</sup>。钠导引星的亮度决定了自

\* 收稿日期: 2022-09-25; 修订日期: 2022-12-01

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62005295); 国家重点研发计划项目 (2016YFB0402103)

联系方式: 卞 奇, bianqi@mail.ipc.ac.cn。

通信作者: 薄 勇, boyong@mail.ipc.ac.cn。

适应光学系统的整体性能,为了能够产生高亮度的钠导引星,钠信标激光需精密匹配钠原子光谱:波长对准钠原子共振谱线 589.159 nm、线宽窄于钠原子谱线宽度 1 GHz、偏振度大于 98%;考虑到钠信标的生成高度较高,在大气传输过程中激光能量损耗和光斑形态恶化,因此要求钠信标激光的发射功率应足够高,且具有较好的光束质量;此外,钠信标激光运转在脉冲方式具有更高的探测信噪比,且激光器应该有较高的可靠性、耐用性及集成化。上述这些性能指标相互制约,同时实现技术难度很大。

另一方面,自适应光学望远镜采用单颗导引星校正大气畸变时,探测视场小且校正不均匀,通过多束钠信标激光同时激发多颗钠导引星构成星群,能在较大视场内实现高分辨率、高灵敏度的目标成像<sup>[2]</sup>。显然,高功率、高亮度钠信标激光器是多导引星自适应光学系统的关键,这极大推动了大能量 589 nm 钠信标激光的快速发展。目前,国内外采用光纤拉曼激光倍频技术与固体激光和频技术研制的钠信标激光都实现了 50 W 级输出<sup>[3-7]</sup>,但受非线性效应、热损伤、热透镜效应等的影响,功率进一步提升受到限制,尤其在脉冲激光器中更为突出。多光束合成技术是突破激光输出功率极限,实现高功率高光束质量激光输出的有效手段,如光谱合成<sup>[8-10]</sup>、相干合成<sup>[11-13]</sup>、偏振合成<sup>[14-16]</sup>以及非相干合成<sup>[17-19]</sup>等。其中,非相干合成对子激光束的相位和频率没有严格的要求,易于实现,系统更加简单且鲁棒性更高。本文介绍了一种偏振和时序非相干合成方案,分别对偏振非相干合成过程、激光脉冲时序控制机制以及自主提出的精密偏振分光技术进行了深入研究,并给出了在钠信标激光领域取得的突破性成果。

## 1 实验装置

用于产生钠导引星星群的钠信标激光合/分束技术方案如图 1 所示,主要包括三部分:偏振光束合成系统、脉冲激光同步延时控制系统以及精密偏振分光系统。

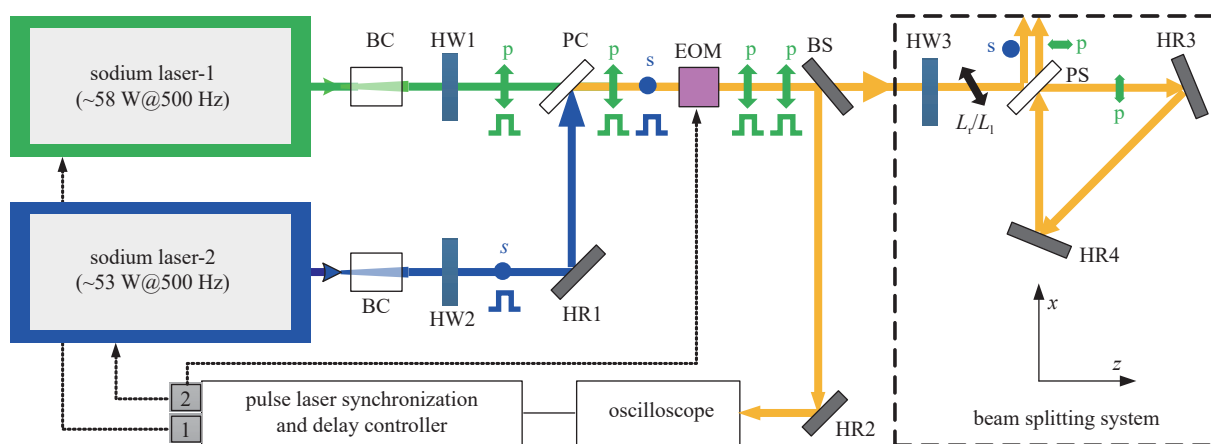


Fig. 1 Schematic of incoherent beam combining and polarization splitting for two pulsed sodium lasers. BC, beam collimator; HW, half-wave plate; HR: high reflective mirror; PC: polarization coupler; EOM: electro-optical modulator; BS: beam splitter; PS: polarization splitter

图 1 两路脉冲钠信标激光非相干合成与偏振分束技术方案示意图

### 1.1 偏振非相干合成技术

首先,采用 Nd:YAG 的 1064 nm 与 1319 nm 两条谱线和频技术方案,研制了具有线性偏振态的两台钠信标激光器,运转在 500 Hz 重复频率和百  $\mu\text{s}$  脉冲宽度,钠激光源 1 和钠激光源 2 输出功率分别为 58 W 和 53 W,功率差异是由半导体激光泵浦功率和激光谐振腔损耗不同引起的,其他参数已经在之前发表的文章中描述<sup>[7]</sup>。钠激光源 1 和钠激光源 2 输出激光束经各自的光束整形器 BC 扩束并准直为光斑大小相等的平行光,再分别通过半波片 HW-1 和 HW-2 将其偏振态调整为水平方向(p 偏振)和竖直方向(s 偏振)。正交偏振的两束激光通过偏振耦合器 PC 在空间上合为一束光线,即实现偏振非相干合成,其中 PC 表面镀有对于 p 偏振光束高透且对于 s 偏振光束高反膜。分光镜 BS 将少量合成钠信标激光束分离出来,注入到连接示波器的光电转换器内,用来探测合成脉冲激光信号。

### 1.2 激光脉冲时序控制

两束激光的时序控制是基于脉冲激光的同步和延迟触发技术实现的,采用高精度同步延时控制器产生两路延时相对可调的电触发脉冲,用产生的电触发脉冲去触发两台脉冲钠信标激光器产生激光脉冲,根据示波器实时监测合成光束脉冲的时间序列,进一步精确优化两路信号之间的延迟。图 2 给出了时序合成过程中脉冲序列变化情况,图 2(a)和(b)显示了 p 偏振钠激光器 1 相当于 s 偏振钠激光器 2 有个适当延时,图 2(c)显示了合成后的脉冲序

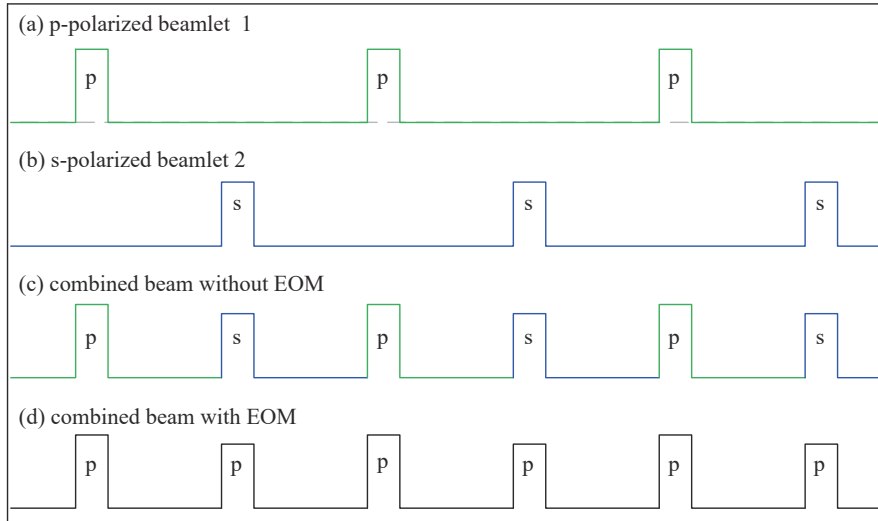


Fig. 2 Schematic of two pulsed laser beams by polarization and sequence combining

图 2 偏振时序控制的脉冲时间序列示意图

列, 可以看到合成激光束的重复频率增加 1 倍, 其功率为两激光束的和, 但相邻的两个脉冲是独立的, 交替的 p 偏振和 s 偏振依次出现。由于地磁场的影响, 具有一致偏振态的钠信标激光将有利于产生较高的光子回波<sup>[20]</sup>。普克尔盒可以用作高重频高电压的电光相位调制器(EOM), 使所有脉冲激光偏振态调节到相同。普克尔盒的触发时间和 s 偏振钠激光器 2 同步, 当其偏置为半波电压时, s 偏振态的激光束的偏振方向在通过普克尔盒后将改变 90°, 但是 p 偏振钠激光器 1 的偏振保持不变, 最终合成的激光束产生了一致的 p 偏振态, 如图 2(d) 所示。该时序控制合成方法可将多束具有相同重频的脉冲激光在时序上按先后顺序合成一束脉冲激光, 可以合成的脉冲激光数目只与激光重频周期和激光脉冲宽度有关。

### 1.3 精密偏振分光技术

光束分光系统是多层共轭自适应光学望远镜的核心组成部分之一。采用多个具有不同反射率的分光镜和反射镜组合可实现激光分束, 但多个光学元件需较大的占地面积, 还会导致较差的光束指向性, 在实际应用中造成探测和分析偏差。创新设计了一种小角度精密偏振分光专利技术, 采用半波片 HW3 调节合成钠信标激光束的偏振方向与水平/竖直方向呈特定角度, 偏振分束器 PS 置于 HW3 的后面, 其中, 偏振态改变后的合成激光束中垂直分量被 PS 反射, 水平分量则透过 PS 后, 经高反镜 HR3 和 HR4 反射后再次透过 PS, 通过旋转 HW3 主轴与 x 轴之间的角度来调节光束间的能量比。当然, 采用  $n$  个半波片和偏振分束器的组合, 可以在有限空间内获得  $2^n$  束激光束的分光。采用压电陶瓷促动器精确改变高反镜 HR1、HR3 和 HR4 的放置角度和位置, 优化激光束光轴间的夹角和距离, 可获得一束、两束和四束钠信标激光发射光束, 以满足不同的应用需求。与配备四个发射望远镜完成四束激光投射的 ESO VLT 系统相比<sup>[21]</sup>, 这种方法提供了更高的可靠性、更好的灵活性、更低的成本和更简单的部署, 为发展大型天文望远镜的多导星自适应光学系统开辟了新道路。

## 2 实验结果

基于上述脉冲光束偏振和时序合成方法, 获得了平均功率 106.8 W 的钠信标激光输出, 合成效率高达 96.2%。图 3 给出了合成钠信标激光功率波动测试结果, 采用功率计(Ophir, FL400A)测得 30 min 内功率标准差约为 2.803 W, 相应功率稳定性在  $\pm 2.6\%$  以内。采用一硅光电转换器(DET10A, Thorlabs)探测合成钠信标激光信号, 并使用示波器(Tektronix DPO4104)显示激光脉冲的波形。设置脉冲激光同步延时控制器的两路触发信号之间相对延时为 1000  $\mu\text{s}$ 。图 4 为观测到的脉冲激光合束后时间轨迹, 表明合成后钠信标激光的重复频率为 1000 Hz, 单脉冲宽度约 120  $\mu\text{s}$ 。由于两台钠信标激光器的输出功率不同, 可以看到相邻的两个激光脉冲之间存在很小的强度起伏。此外, 百  $\mu\text{s}$  脉冲宽度可以更高效地激发钠原子, kHz 的高重复频率也有利于自适应光学系统探测和校正大气的高阶像差。

采用光束质量分析仪(Spiricon M<sup>2</sup>-200)对合成前后激光光束质量进行了测量, 图 5 为两子激光束和合成激光束的二维强度分布, 测得两子激光器的光束质量因子分别为  $M^2=1.38$  和  $M^2=1.40$ , 合成后激光光束质量因子  $M^2=1.41$ , 可以看到合成后的光束质量维持在与单个脉冲激光束相同的水平。通常情况下, 相干合成中  $N$  个子光束合束后的

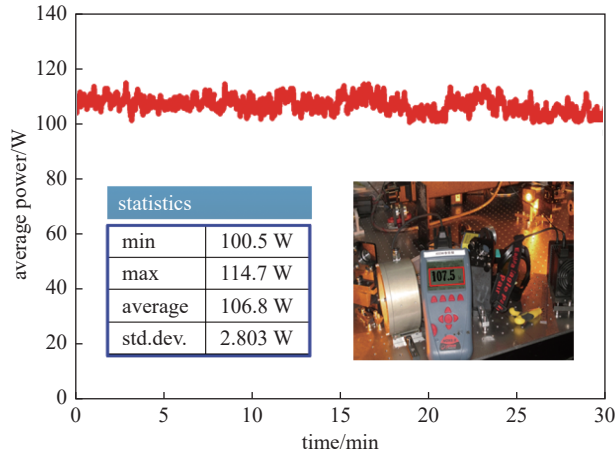


Fig. 3 Power-stability test of the combined sodium laser at the highest output over 30 min

图 3 合成钠信标激光功率 30 min 稳定性测试

光强是单个光束的  $N^2$  倍,但容易产生旁瓣,使中心光强减弱以及光束质量恶化。相比之下偏振和时序非相干合成是多束脉冲激光的线性叠加,没有相干合成那样的旁瓣效应,可有效防止光束质量下降。在自适应光学系统中,钠信标激光器的长期指向稳定性是一个关键技术指标。采用 CCD (BASLER, ACA2000-50gm, NIR)测得 10 min 内合成激光束光斑位置变化如图 6 所示,估算在  $x$  和  $y$  方向上光束倾斜角分别为  $38.6 \mu\text{rad}$  和  $40.5 \mu\text{rad}$ ,表明此合成钠信标激光器的指向

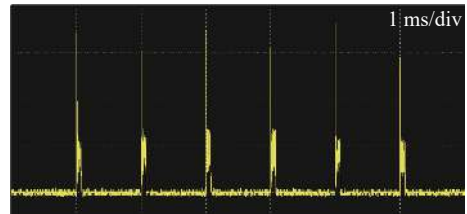


Fig. 4 Pulse train of the combined sodium laser observed by an oscilloscope

图 4 合成钠信标激光脉冲序列图

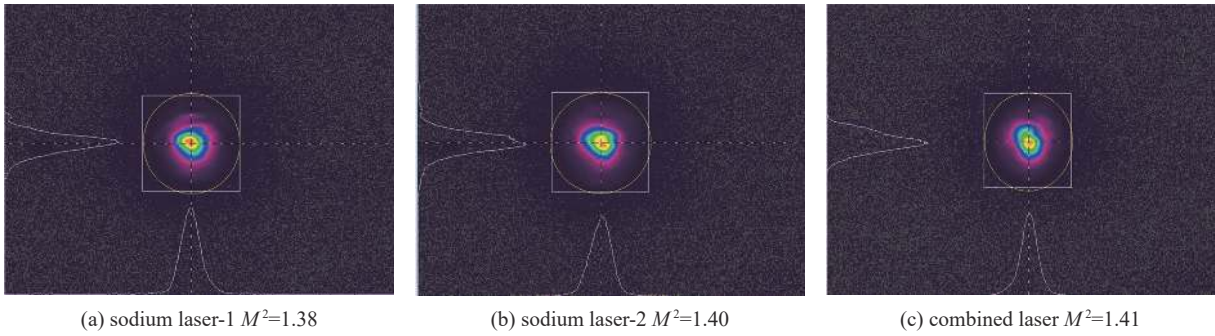


Fig. 5 Two-dimensional spatial intensity profiles of sodium beacon laser beam

图 5 钠信标激光光斑的二维强度分布图

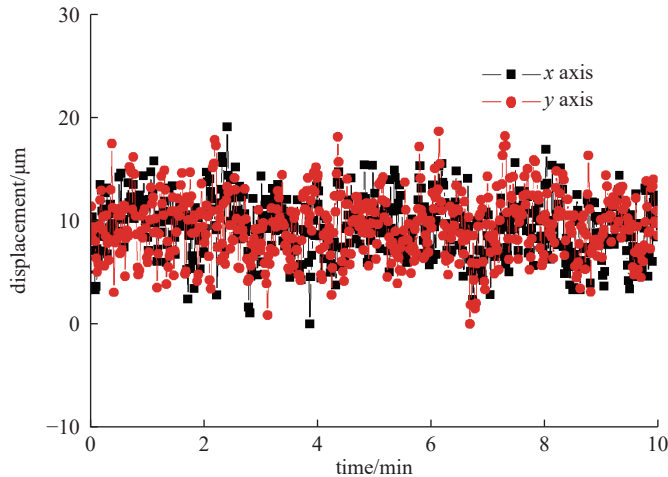


Fig. 6 Pointing measurement of the combined laser beam

图 6 合成钠信标激光束的指向稳定性测试



稳定性能够满足钠导引星测试要求。

上述实验装置已成功安装于云南丽江 1.8 m 天文望远镜上,并开展了激光钠导引星实验研究,图 7 为捕捉到的钠导引星图像。基于 100 W 级合成钠信标激光,产生了国际最高亮度的  $\mu\text{s}$  脉冲激光钠导引星,如图 7(a)所示,亮度约为 V 波段 6 等星。采用小角度偏振分光技术,通过一台发射望远镜先后将 2 束 50 W/束和 4 束 25 W/束的钠信标激光发射到电离层,国内首次产生了 2 颗和 4 颗  $\mu\text{s}$  脉冲激光钠导引星星群<sup>[22]</sup>,如图 7(b)和 (c)所示。通过控制压电陶瓷促动器调节反射镜与  $x$  轴的夹角,可使单颗导星沿水平方向分开,调节与  $y$  轴的夹角,可使单颗导星沿竖直方向分开,在两个方向上不同角度的组合使得星群构型可调控。这为大口径天文望远镜多层共轭校正系统的研制提供技术基础。

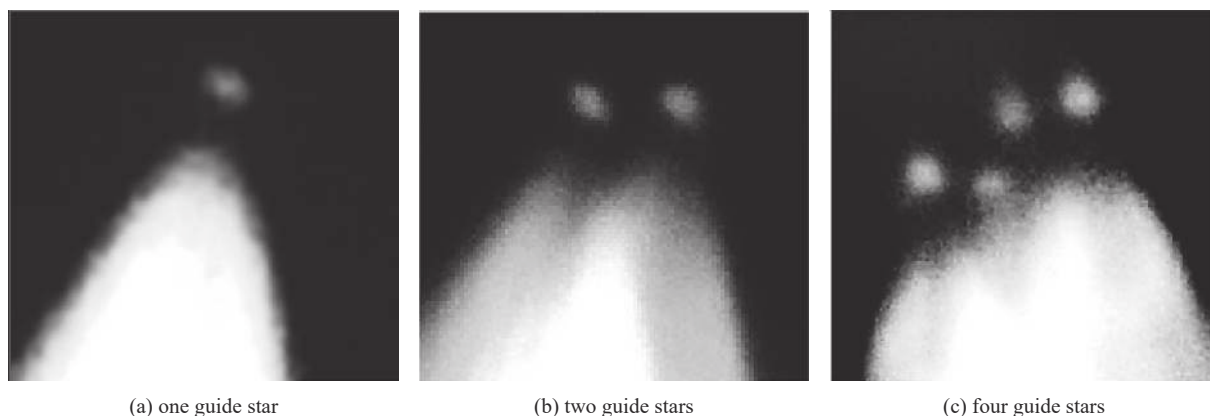


Fig. 7 Images of generating guide stars for sodium beacon laser on-sky tests

图 7 钠信标激光器外场试验产生钠导引星图

### 3 结 论

589 nm 钠信标激光是自适应光学系统理想信标的关键光源技术,钠信标的亮度决定了自适应光学系统的性能。为突破单台钠信标激光器输出功率有限的瓶颈,提出简单高效的脉冲光束偏振时序非相干合成技术,不需考虑相位和频谱特殊限制等复杂性问题,可实现激光运转频率和输出功率增加 1 倍,同时保证较好的光束质量。基于上述技术,研制出平均功率 106.8 W、重复频率 1000 Hz、光束质量  $M^2=1.41$  的高稳定合成钠信标激光源,于云南丽江 1.8 m 天文望远镜上产生了国际最高亮度的  $\mu\text{s}$  脉冲激光钠导引星;提出精密偏振分光专利技术,国内首次实现四颗  $\mu\text{s}$  脉冲钠导引星星群。

#### 参考文献:

- [1] Max C E, Olivier S S, Friedman H W, et al. Image improvement from a sodium-layer laser guide star adaptive optics system[J]. *Science*, 1997, 277(5332): 1649-1652.
- [2] Neichel B, Lu J R, Rigaut F, et al. Astrometric performance of the Gemini multiconjugate adaptive optics system in crowded fields[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2014, 445(1): 500-514.
- [3] Denman C A, Hillman P D, Moore G T, et al. Realization of a 50-watt facility-class sodium guidestar pump laser[C]//Proceedings of SPIE 5707, Solid State Lasers XIV: Technology and Devices. 2005: 46-49.
- [4] Hankla A K, Bartholomew J, Groff K, et al. 20-W and 50-W solid-state sodium beacon guidestar laser systems for the Keck I and Gemini South Telescopes[C]//Proceedings of SPIE 6272, Advances in Adaptive Optics II. 2006: 62721G.
- [5] Taylor L R, Feng Y, Calia D B. 50W CW visible laser source at 589nm obtained via frequency doubling of three coherently combined narrow-band Raman fibre amplifiers[J]. *Optics Express*, 2010, 18(8): 8540-8555.
- [6] Zhang Lei, Jiang Huawei, Cui Shuzhen, et al. Versatile Raman fiber laser for sodium laser guide star[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, 8(6): 889-895.
- [7] Bian Qi, Bo Yong, Zuo Junwei, et al. High-power QCW microsecond-pulse solid-state sodium beacon laser with spiking suppression and  $D_{20}$  re-pumping[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(8): 1732-1735.
- [8] Andrusyak O, Smirnov V, Venus G, et al. Spectral combining and coherent coupling of lasers by volume Bragg gratings[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(2): 344-353.
- [9] 马毅, 颜宏, 田飞, 等. 光纤激光共孔径光谱合成实现 5 kW 高效优质输出[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27: 040101. (Ma Yi, Yan Hong, Tian Fei, et al. Common aperture spectral beam combination of fiber lasers with 5 kW power high-efficiency and high-quality output[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27: 040101)
- [10] Honea E, Afzal R S, Savage-Leuchs M, et al. Advances in fiber laser spectral beam combining for power scaling[C]//Proceedings of SPIE 9730, Components

and Packaging for Laser Systems II. 2016: 97300Y.

- [11] Marmo J, Injeyan H, Komine H, et al. Joint high power solid state laser program advancements at Northrop Grumman[C]//Proceedings of SPIE 7195, Fiber Lasers VI: Technology, Systems, and Applications. 2009: 719507.
- [12] Yu C X, Augst S J, Redmond S M, et al. Coherent combining of a 4 kW, eight-element fiber amplifier array[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(14): 2686-2688.
- [13] 王小林, 周朴, 马阎星, 等. 基于主动相位控制的脉冲激光相干合成技术[J]. *国防科技大学学报*, 2012, 34(1): 33-37. (Wang Xiaolin, Zhou Pu, Ma Yanxing, et al. Investigation of coherent beam combining pulsed fiber lasers with active phase control[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2012, 34(1): 33-37)
- [14] Uberna R, Bratcher A, Tiemann B G. Coherent polarization beam combination[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2010, 46(8): 1191-1196.
- [15] 颜宏, 叶一东, 卢飞, 等. 基于偏振鉴相的相干合成技术[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(s1): 5-8. (Yan Hong, Ye Yidong, Lu Fei, et al. Coherent beam combining based on polarization phase discrimination[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(s1): 5-8)
- [16] 马鹏飞, 王小林, 粟荣涛, 等. 2kW级光纤激光相干偏振合成[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28: 040102. (Ma Pengfei, Wang Xiaolin, Su Rongtao, et al. Coherent polarization beam combining of fiber lasers to 2 kW power-level[J]. *High Power Laser And Particle Beams*, 2016, 28: 040102)
- [17] Wirth C, Schmidt O, Tsybin I, et al. 2 kW incoherent beam combining of four narrow-linewidth photonic crystal fiber amplifiers[J]. *Optics Express*, 2009, 17(3): 1178-1183.
- [18] Sprangle P, Ting A, Penano J, et al. Incoherent combining and atmospheric propagation of high-power fiber lasers for directed-energy applications[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2009, 45(2): 138-148.
- [19] Xu Jian, Gao Hongwei, Xu Yiting, et al. Sequence combining of pulsed lasers using refraction-beam-displacement[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(2): 208-211.
- [20] Fan Tingwei, Zhou Tianhua, Feng Yan. Improving sodium laser guide star brightness by polarization switching[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 19859.
- [21] Calia D B, Hackenberg W, Holzlohner R, et al. The four-laser guide star facility: design considerations and system implementation[J]. *Advanced Optical Technologies*, 2014, 3(3): 345-361.
- [22] Bian Qi, Bo Yong, Zuo Junwei, et al. First implementation of pulsed sodium guidestars constellation for large-aperture multi-conjugate adaptive optics telescopes[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2022, 134: 074502.