

激光钠导引星技术研究进展

许祖彦¹, 薄 勇¹, 彭钦军¹, 张雨东², 魏 凯², 薛随建³, 冯 麓³

- (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. 中国科学院光电技术研究所 自适应光学实验室, 四川 成都 610209;
3. 中国科学院国家天文台, 北京 100012)

摘 要: 望远镜是人类探索宇宙奥秘最重要的科学工具之一。大型地基光学望远镜对天观测时, 大气扰动使星光波前畸变导致其实际分辨率大幅下降, 是长期困扰高精度天文观测的重大科技问题。因此世界各大望远镜均在竞相发展自适应光学技术, 以校正大气造成的波前畸变, 使望远镜达到近衍射极限分辨率, 这标志着地基光学望远镜正在进入自适应光学望远镜时代。激光钠导引星是用激光激发海拔约 90 km 电离层中的钠原子产生的人造亮星, 作为自适应光学校正的信标源, 是自适应光学望远镜的核心技术之一。文中介绍了激光钠导引星技术的原理、方法与国内外发展状况, 尤其是该实验室采用的固体激光和频技术, 实现了钠 D2 线光谱匹配和钠层激发匹配的微秒脉冲钠导引星激光, 并在国内外大望远镜上使用获得成功。

关键词: 钠导引星; 钠信标; 钠导引星激光; 自适应光学

中图分类号: O437 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0101001

Progress on sodium laser guide star

Xu Zuyan¹, Bo Yong¹, Peng Qinjun¹, Zhang Yudong², Wei Kai², Xue Suijian³, Feng Lu³

- (1. Research Center for Laser Physics and Technique, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. The Key Laboratory on Adaptive Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China; 3. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: Astronomical telescope is always one of the vital tools that help human kind to unveil hidden natural laws in the universe. However, spatial resolution of the large ground-based telescope was severely limited because the turbulence of atmosphere degenerates the perfect wavefront from stars into an aberrated one, which was the key science and technology difficult problem to achieve high resolution astronomical observation. So adaptive optics (AO) was being pursuit by many teams internationally to correct the wavefront aberration and make large ground-based telescope resolving power to near diffraction limitation. It indicates that the ground-based optical telescope was currently turning into the AO telescope age. Sodium laser guide star (LGS) generated by laser exciting sodium atoms in the mesospheric layer at an altitude of about 90 km, as a beacon of AO correction, was the cutting-edge technology for the AO telescope. The theory, methods and development status of the sodium LGS were described in this paper. Especially in our

收稿日期: 2015-05-05; 修订日期: 2015-06-15

基金项目: 国家自然科学基金委青年人才基金(11303056)

作者简介: 许祖彦(1940-), 男, 中国工程院院士, 主要从事可调谐激光、全固态激光及非线性光学方面的研究。

Email: zyxu@mail.ipc.ac.cn

lab, micro-second sodium LGS laser system suitable for efficient excitation of the sodium layer was developed with spectral format matched to the mesospheric D2 line. The sodium LGS laser system was successful to apply in some domestic and overseas large telescopes.

Key words: sodium laser guide star; sodium beacon; sodium guide star laser; AO

0 引言

自 400 多年前望远镜的诞生到现在, 已经成为人类探索宇宙奥秘最重要的科学工具之一。天文观测要求望远镜不断提高分辨率与灵敏度, 由此望远镜口径越建越大, 然而当地基光学望远镜的口径达到大气相干长度(一般小于 0.4 m)时, 再增大口径, 其实际分辨率就难于提高了。例如 1948 年口径 5 m 的 Hale 望远镜建成后, 因大气影响, 其实际分辨率仅能达到 0.5", 远低于其衍射极限(0.025")。为此, 1953 年美国天文学家 H. W. Babcock 提出采用自适应光学技术校正大气导致的波前畸变^[1], 使望远镜的实际分辨率达到其衍射极限。随着激光技术的发展, 从 20 世纪 80 年代以来, 世界地基天文望远镜开始走向一个全新的时代——自适应光学望远镜时代。

望远镜自适应光学校正需以观测目标附近的亮星作为导引星, 来获取大气造成的波前畸变信息。如图 1 所示, 以导引星发出的光波为标准波前(称为信标), 被大气畸变后由望远镜接收, 用波前探测器探测, 再实时反馈控制变形镜, 补偿该波前的畸变, 从而实现对该导引星附近被观测目标的高分辨成像。

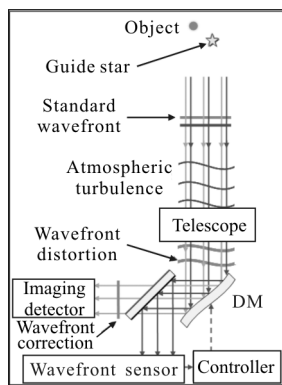


图 1 望远镜自适应光学校正原理图

Fig.1 Schematic of AO correction for telescope

自适应光学望远镜早期是以天空中的自然亮星如天狼星作为导引星^[2]。但是能够达到自适应校正所

需亮度的亮星很少, 并且以一颗导引星仅能对其附近即大气等晕角内(约数角秒)的目标像实现好的校正, 由此估算, 使用自然导引星, 只能对全天区大约 1% 范围实现好的校正。因此, 20 世纪 80 年代, 美国提出了激光导引星技术^[3], 即利用高功率激光在大气层上方产生高亮度的人造导引星, 从而实现对全天区目标的校正。首先研制出激光瑞利导引星^[4], 其利用海拔 10~20 km 大气分子对可见光如 532 nm 波长绿激光的瑞利散射形成的, 但因其高度较低, 存在锥体效应, 只能用于校正低层大气。后来研制出激光钠导引星^[5], 海拔 80~105 km 大气电离层中有许多金属原子, 其中钠原子丰度高、且能发出很强的钠 D2 荧光谱线, 采用相应波长的黄激光(称为钠导引星激光)共振激发这些钠原子, 产生强烈的背向荧光辐射, 称为激光钠导引星(又称为钠信标)。钠导引星生成高度高(已接近大气顶层)、亮度高, 对全程大气造成的波前畸变都能很好校正, 使望远镜实现近衍射极限的高分辨率。所以, 激光钠导引星系统成为自适应光学望远镜的核心装备之一, 国际上 m 级以上口径的天文望远镜均在竞相研发, 以抢占世界天文观测技术的前沿, 包括美国星火观测台 1.5 m 口径望远镜^[6]、美国 3.5 m 口径的 Lick 望远镜^[7]、美国 5 m 口径的 Hale 望远镜^[8]、欧洲 8.2 m 的 VLT 望远镜^[9]、日本 8 m 口径的 Subaru 望远镜^[10]、目前世界最大的光学望远镜——美国 10 m 口径的 Keck 望远镜^[11]、在建的世界最大的光学望远镜之一——30 m 口径的 TMT 望远镜^[12]等。

1 激光钠导引星技术

1.1 钠导引星激光的技术要求

钠导引星激光技术是钠导引星自适应光学系统研制的主要难点之一。望远镜自适应光学系统要求激光产生的钠导引星亮度高、信噪比高, 从而实现大气造成的波前畸变的高精度探测。其中, 亮度高是指在波前探测器的采样周期内(数百赫兹、数毫秒), 钠导引星保持高亮度。

大气电离层中的钠原子丰度是随时间变化的,如图 2 所示^[13]。一般来说,钠原子柱积分密度约为 $2-10 \times 10^{13} \text{ m}^{-2}$, 相应的激光激发钠层的饱和功率密度约 $200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。钠导引星激光光束质量应达到近衍射极限,使激光发射到海拔约 90 km 的钠层时光斑足够小,一般小于 m 级,则钠导引星激光功率达到数十到百瓦级时,就已接近钠层饱和功率密度,再提高功率,钠导引星亮度已难于提高,还会增加瑞利散射背景噪声。因此,如何高效激发钠原子成为关键,这需深入分析电离层钠原子光谱特性,并对激光的相应特性提出特殊要求。

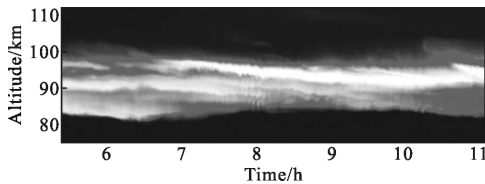


图 2 加拿大 UBC 天文台址电离层钠原子分布测量结果

Fig.2 Sodium atoms distribution measurement results in mesospheric layer at UBC site of Canada

图 3 所示为大气电离层钠 D2 线荧光光谱图^[14],图 4 所示为钠原子 D2 线能级跃迁示意图^[15],可见钠 D2 线包括 D2a 与 D2b 两条超精细谱线,其中 D2a 线谱宽约 1.2 GHz,是由 $3P_{3/2}(F=1, 2, 3)$ 能级向 $3S_{1/2}(F=2)$ 能级跃迁产生的,共包括 12 条可能的跃迁谱线,其中最强的两条谱线分别对应 $3P_{3/2}(F=\pm 3)$ 能级向 $3S_{1/2}(F=\pm 2)$ 能级跃迁;而 D2b 线是 $3P_{3/2}(F=0, 1, 2)$ 能级向 $3S_{1/2}(F=1)$ 能级跃迁产生的。为实现高效激发,激光波长应精确对准钠原子 D2a 线 (589.159 nm) 进行激发,波长稳定精度至少达到 10^{-6} ; 并且激光应为圆偏振光,使 $3S_{1/2}(F=2)$ 能级上的钠原子不断被激发到 $3P_{3/2}(F=3)$ 能级上,发射出最强的荧光。同时,激光谱线应窄于大气电离层中钠原子 D2a 线谱宽(约 1.2 GHz)。事实上,由于部分钠原子处于 $3S_{1/2}(F=1)$ 能级,并且被激发到 $3P_{3/2}(F=0, 1, 2)$ 能级上的钠原子有一定比例跃迁到 $3S_{1/2}(F=1)$ 能级,从而难于再被对准 D2a 线的激光激发到 $3P_{3/2}$ 能级,因此钠导引星激光谱型最好能够与钠原子 D2 线的超精密双峰谱线匹配,使处于 $3S_{1/2}(F=1)$ 能级上的钠原子也被不断激发到 $3P_{3/2}(F=3)$ 能级上,发射出最强的共振荧光。模拟计算结果如图 5 所示,从图中可见,双峰谱型激光比单峰谱型激光激发,可使钠导引星亮度提高 1 倍以上^[16]。

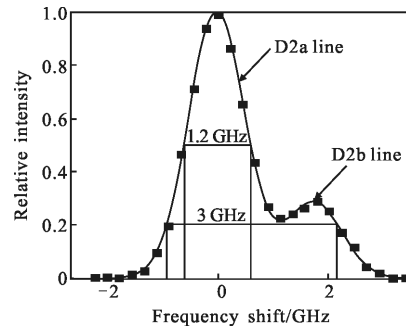


图 3 大气电离层钠 D2 线荧光光谱图

Fig.3 Sodium D2 line fluorescence spectrum in mesospheric layer

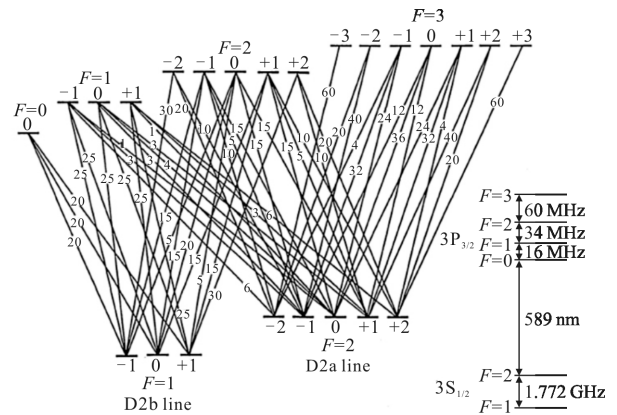


图 4 钠原子 D2 线能级跃迁示意图

Fig.4 Energy level transitions of sodium D2 line

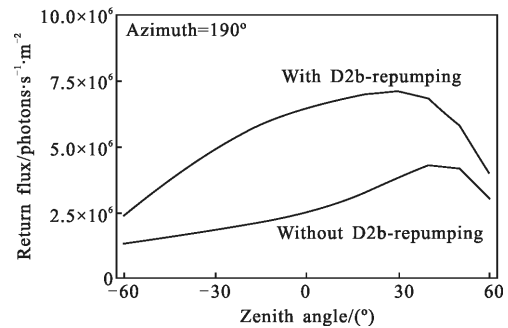


图 5 双峰谱型与单峰谱型激光产生的钠导引星光子回波模拟结果

Fig.5 Photon return simulation results generated by laser with and without D2b-repumping

此外,钠导引星激光系统应用于高海拔的天文台台址,需每晚约 12 h、每年约 300 晚的长期运行,对激光器的稳定性、可靠性与环境适应性等工程化要求很高。并且,由于上述各个性能指标要求相互影响制约,同时实现的技术难度很大,因此钠导引星激光成为目前激光技术研究的国际热点和难点之一。

1.2 钠导引星激光的主要技术路线

(1) 染料激光技术路线：采用 532 nm 绿激光泵浦若丹明 6G 染料可调谐激光，可直接产生 589 nm 钠导引星激光，首先在望远镜上获得应用^[17]；但是其激光介质为液体，使用维护不便，目前已很少采用。

(2) 固体激光变频技术路线：固体激光具有功率高、体积小、结构紧凑、稳定性好、可靠性高、寿命长、使用方便等优势，是目前的主要方案。但常用的高功率固体介质如 Nd:YAG、Yb:YAG 等，不能直接产生 589 nm 激光，需通过非线性变频产生，包括固体激光和频、固体激光先拉曼频移再倍频、固体激光先倍频再拉曼频移、以及固体激光先倍频再光参量变频等技术方案。其中，Nd:YAG 1 064 nm 与 1 319 nm 激光和频方案是最佳技术路线，首先获得了突破与应用。

(3) 光纤激光变频技术路线：光纤技术本质上是一类特殊的固体激光，同样具有固体激光变频技术的优势。但如采用常规的 Yb 石英光纤产生 1 178 nm 激光再倍频获得 589 nm 激光方案，因增益低，高功率输出困难。因此，主要发展了 Yb 光纤激光先拉曼频移再倍频、Yb 光子晶体光纤增强 1 178 nm 激光再倍频、以及光纤激光 1.5 μm 与 0.94 μm 和频等技术方案。其中，Yb 光纤激光先拉曼频移再倍频方案获得了突破与应用。

1.3 钠导引星激光的主要运转体制

固体(包括光纤)钠导引星激光的运转体制主要包括连续波激光、连续波锁模皮秒脉冲激光、微秒脉冲激光、微秒脉冲锁模皮秒脉冲激光、纳秒脉冲激光等多种。

连续波钠导引星固体激光可采用种子注入锁定技术实现窄线宽运转，但峰值功率低，和频或倍频产生 589 nm 激光的转换效率低，必须采用复杂精密的注入锁定倍频腔或和频腔技术。因此又发展了连续锁模激光技术，通过锁模获得数十到上百 MHz、数十到数百皮秒脉冲输出，可提高单通倍频或和频效率。但连续波或连续波锁模皮秒脉冲激光作为钠导引星激光，如图 6 所示^[18]，不仅在海拔约 90 km 的电离层产生高亮度的钠导引星，而且在低层大气会产生很强的瑞利散射光，从而造成严重的大气瑞利散射噪声干扰问题，如图 7 所示^[19]。虽然连续波激光可采用旁轴发射钠导引星激光方法，但由于钠层厚度达 10~20 km，旁轴探测钠导引星会产生光斑拉长效应^[20]，将影响自适应光学校正效果。

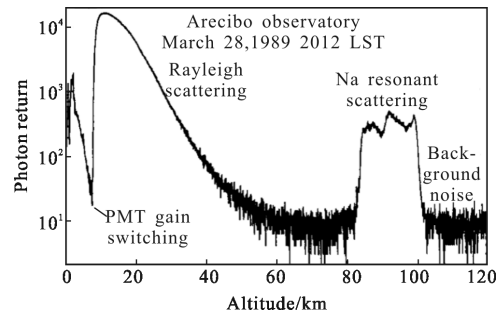


图 6 激光激发钠层回波光子数测量结果

Fig.6 Photon return measurement results generated by laser exciting sodium layer

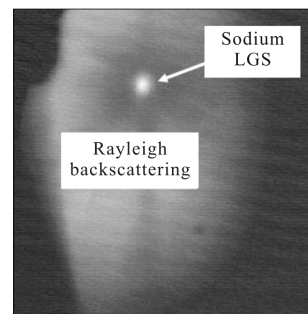


图 7 望远镜探测到钠导引星信号及其瑞利散射干扰噪声

Fig.7 Sodium photon return and Rayleigh backscattering image detected by telescope

为更好的消除瑞利散射噪声干扰问题，美国芝加哥大学 Edward 等人提出发展微秒脉冲钠导引星固体激光^[8]，基于时间选通原理可消除瑞利散射噪声、大大提高钠导引星波前探测的信噪比。根据图 6 所示钠导引星激光激发大气的光子回波信号特征，可设计时间选通方案来去除瑞利散射噪声干扰，即在激光脉冲前沿激发到 80 km 钠层下边缘时至脉冲后沿离开钠层上边缘时这段时间内测量回波信号，由此可去除低层大气的瑞利散射噪声，实现高信噪比。由于大气钠层柱密度有限，当脉冲激光峰功率高于钠层饱和吸收功率值时，再提高激光功率也无法获得更多的回波光子。因此，脉冲宽度应设计使激光脉冲前沿激发 80 km 钠层下边缘获得的光子回波返回到 50 km 处时，激光脉冲的后沿也同时传输到此，则可将钠导引星回波信号与大气 50 km 以下瑞利散射回波噪声信号从时间上分隔开，由此可得激光脉冲宽度应为 100~200 μs。激光重复频率应设计一方面使激光脉冲后沿从地面发射时刻至激光脉冲后沿激发 105 km 钠层上边缘的回波光子返回地面为一个运行周期，并考虑 45°角发射，则计算可得一个周期约为 1 ms，即激光重复频率上限约为 1 kHz。因此，kHz

的百微秒脉冲钠导引星激光同时具有高信噪比、高亮度的优点,被学界称为先进的钠导引星激光^[21]。

微秒脉冲钠导引星固体激光技术难度高,除波长、光谱、功率、光束质量、偏振等有严格要求外,还对脉冲波形、重复频率等有特殊要求。由于微秒脉冲激光峰值功率比连续波激光高约 10 倍,采用单通非线性光学晶体倍频或和频方法,就可实现高功率输出。为进一步提高倍频或和频效率,可采用微秒脉冲锁模皮秒脉冲激光技术,在百微秒的长脉冲中调制出数百皮秒的短脉冲,这又被称为宏微脉冲钠导引星激光。但因皮秒脉冲脉宽太窄,谱宽较宽,一般高于 1 GHz,同时激光占空比更低,因此产生的钠导引星光子回波较低。

采用声光或电光调 Q 技术,可实现纳秒脉冲钠导引星固体激光输出,由于峰值功率高,和频或倍频产生 589 nm 激光的频率变换效率较高,但纳秒脉冲激光重频一般低于 100 kHz,占空比一般低于 1%,即使峰功率高、达到了钠层的饱和激发功率密度,产生的钠导引星在数毫秒周期内(波前探测器的采样周期)的回波光子低于连续波或微秒脉冲激光,在望远镜上开展了实验研究,但尚未实现应用。

2 激光钠导引星技术发展状况

激光钠导引星技术是 20 世纪 70 年代美国在研制望远镜自适应光学系统时首先提出并秘密开展研究的。1982 年美国普林斯顿大学的 Happer 首先提出激光钠导引星技术^[21]。1984 年美国麻省理工学院林肯实验室的 Humphreys 等首先进行了实验验证^[21]。1985 年法国的 Roy 和 Labeyrie 根据高分辨自适应光学天文望远镜的需要,也独立地提出这一技术并公开发表了参考文献[22]。随之德国、法国、日本、英国、俄国、中国等都加强了激光钠导引星技术研究,促使其获得快速发展。

2.1 国外发展状况

连续波固体钠导引星激光 2003 年在美国空军实验室首先获得了突破^[23],采用 Nd:YAG 1064 nm 与 1319 nm 激光和频技术,获得了连续波钠导引星激光输出 22.5 W,单峰激光,线宽 10 MHz,光束质量 $M^2 < 1.1$,激光波长对准钠原子 D2a 线,产生了钠导引星^[24],当发射激光功率 11.5W 时,在 Starfire 3.5 m 口径望远镜上,获得光子回波为 1015 photons/cm²/sec,

相当于 7.1 星等,其效率为 88 photons/cm²/sec/W。2005 年又进一步实现了 50 W 输出^[25],产生了钠导引星光子回波为 3870 photons/cm²/sec,相当于 5.7 星等。该激光器方案如图 8 所示,1064 nm 与 1319 nm 激光分别采用种子注入锁定环形腔方案,和频激光采用 1064 nm 与 1319 nm 激光双共振环形腔和频方案,由于系统有 3 个注入锁定环形腔,每个环形腔的腔长要求控制精度至少优于注入激光波长的 1/4,整体系统技术复杂、保持长期稳定的难度大。

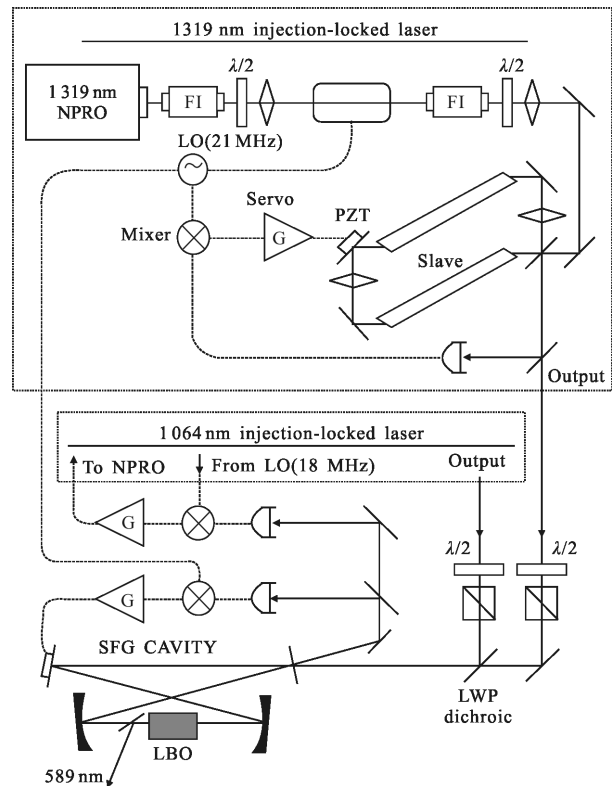


图 8 美国空军实验室的连续波钠导引星激光器设计框图
Fig.8 Schematic of cw sodium LGS laser of US air force lab

2011 年美国 Lockheed Martin 公司也采用 Nd:YAG 激光和频技术,获得了钠导引星激光输出平均功率达 58W^[26],方案设计如图 9 所示。为了提高和频效率,该激光器为连续波锁模皮秒脉冲运转,重复频率为 77 MHz,脉冲宽度约 400 ps,相应的激光线宽达 2.1 GHz,且占空比仅 3%,因此产生的钠导引星光子回波较低。在美国 Gemini 望远镜上产生的钠导引星,光子回波效率仅为 34 photons/cm²/sec/W。同时该激光器系统复杂、保持长期稳定输出难度大,因此 2015 年 Gemini 望远镜计划对该激光器系统进行升级改造。

此外,日本理化技术研究所与东京大学合作同样采用 Nd:YAG 激光和频技术,连续波锁模皮秒脉

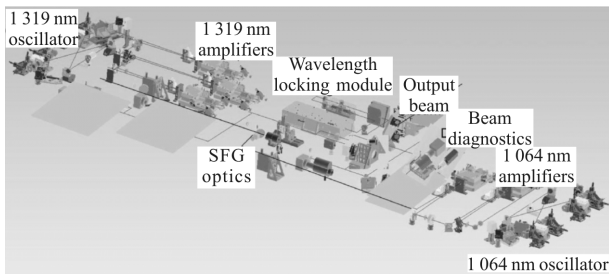


图 9 美国 Lockheed Martin 公司的连续锁模钠导引星激光器设计框图

Fig.9 Schematic of cw mode-lock sodium LGS laser of Lockheed Martin corporation in US

冲运转,实现了 10 W 级钠导引星激光输出^[27],在 Subaru 望远镜上产生了 13.9 等星钠导引星。

连续波钠导引星激光的另一种获得重要突破的方案是光纤拉曼激光倍频技术,由欧洲南方天文台与德国 Toptica 公司合作于 2009 年获得了重要进展^[28],激光器设计方案如图 10 所示,以 1 178 nm 半导体激光作为种子源,经 1 120 nm Yb 光纤激光泵浦的光纤拉曼放大器放大,再注入到环形共振腔中倍频,实现了连续波钠导引星激光输出 25 W,激光线宽小于 2.3 MHz。由于单纤拉曼放大功率有限,为进一步提高功率,采用三束拉曼激光相干合成技术,2010 年实现了 50.9 W 输出^[29]。该激光器应用于欧南台 VLT 望远镜,激光功率 12 W 时产生钠导引星,光子回波约为 660 photons/cm²/sec,相当于亮度约 8 等星。钠导引星激光采用光纤激光技术路线的还有两个典型方案:(一) 2010 年日本电气通讯大学采用 Yb 光子晶体光纤激光倍频技术,实现了 14.5 W 589 nm 激光输出^[30],光束质量 $M^2=1.1$,但激光线宽较宽,约 44 GHz。(二)

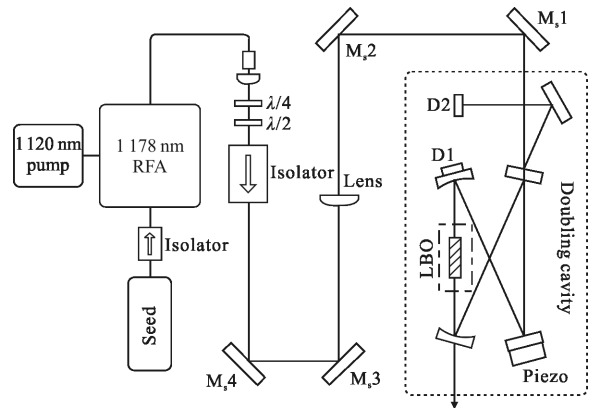


图 10 德国 Toptica 公司的光纤钠导引星激光器设计框图

Fig.10 Schematic of fiber sodium LGS laser of Toptica corporation in Germany

2005 年美国 LLNL 实验室采用 1583 nm Er/Yb 光纤激光与 938 nm Nd 光纤激光和频技术,实现了 3.5 W 589 nm 激光输出^[31]。此外,俄国^[32]、英国^[33]等也在采用光纤激光技术发展钠导引星激光。

微秒脉冲钠导引星激光国外首先获得的重要进展是美国麻省理工学院林肯实验室采用灯泵锁模脉冲固体激光和频技术,实现了微秒脉冲锁模皮秒脉冲钠导引星激光输出^[34],脉冲能量 24 mJ,重复频率 840 Hz,激光线宽约 1.4 GHz。在此基础上,1994 年美国麻省理工学院与芝加哥大学进一步采用半导体激光泵浦锁模脉冲固体激光和频技术,实现了微秒脉冲锁模皮秒脉冲钠导引星激光输出^[35],平均功率为 9.5 W,宏脉冲重复频率 400 Hz,宏脉冲宽度 150 μs,激光线宽约 0.9 GHz。2004 年美国芝加哥大学采用该方案,如图 11 所示,为 Palomar 望远镜研制了一台

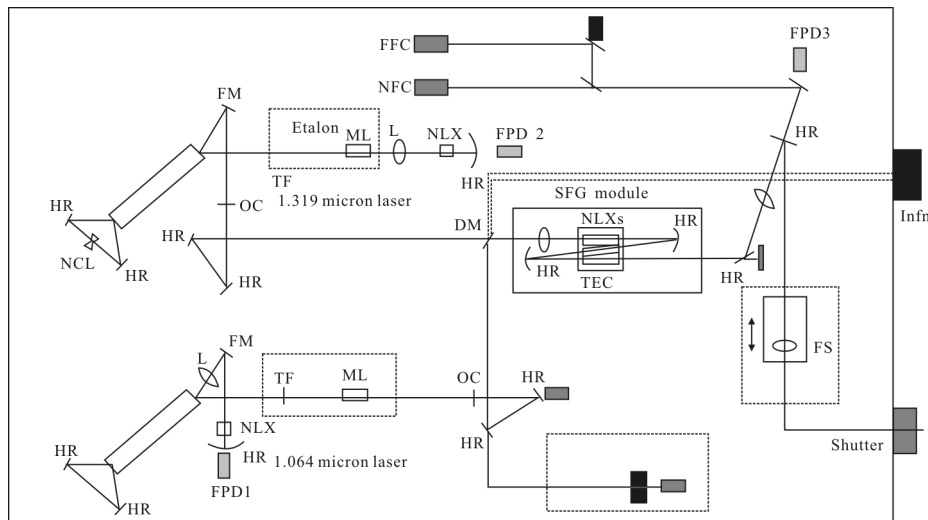


图 11 美国芝加哥大学的钠导引星激光器设计框图

Fig.11 Schematic of sodium LGS laser of University of Chicago in US

微秒脉冲锁模皮秒脉冲钠导引星激光器^[36-37],平均功率为 10 W 级,宏脉冲重复频率 500 Hz,宏脉冲宽度 200 μs ,微脉冲重复频率 100 MHz,微脉冲宽度 2 ns,应用于 Palomar 望远镜,产生了钠导引星光子回波约为 560 photons/cm²/sec,相当于亮度约 8.8 等星,经一段时间试用后,该激光器于 2012 年搬回实验室计划升级到 20 W。

2.2 国内发展状况

国内,中国科学院理化技术研究所从 2003 年开始微秒脉冲钠导引星激光技术研究,2010 年采用固体 Nd:YAG 1 064 nm 与 1 319 nm 激光腔外和频技术^[38],突破了 33 W 输出^[39],激光线宽 0.4 GHz,光束质量 $M^2=1.3$,重复频率 500 Hz,脉冲宽度 120 μs 。2011 年 4 月中科院理化所与光电所合作,在云南丽江站实现了高亮度的钠导引星,达 8.7 等星^[40]。2012 年,进一步实现了 50 W 级微秒脉冲钠导引星激光输出,特别是该激光首次实现了双峰谱型结构,匹配激发钠 D2 线,激发效率比单峰激光提高了 80%,由此产生了高亮度的钠导引星,当激光功率 25 W 时,在丽江 1.8 m 望远镜上获得光子回波 1 660 photons/cm²/sec,相当于 6.5 星等^[41]。2013 年,TMT[注]、中科院国家天文台、理化所、光电所、加拿大 UBC 合作,该激光器在 UBC 天文台应用,当激光功率 20 W 时,获得光子回波约 900 photons/cm²/sec,并首次测得了钠导引星激光与钠层原子的耦合效率为 260~300 photons·m²/s/W/ion^[42],超过了 TMT 所要求的 130 photons·m²/s/W/ion,被 TMT 称为重大进展。2014 年,中国科学院理化技术研究所又进一步实现了双峰谱型微秒脉冲钠导引星激光平均功率 102 W。同时,中科院理化所与光电所合作,在云南丽江 1.8 m 望远镜上实现了对恒星的钠导引星自适应光学实时闭环校正,获得了高分辨成像(注:TMT 为目前在建的国际最大望远镜之一,口径达 30 m)。

中国工程物理研究院采用 Nd:YAG 1 064 nm 与 1 319 nm 激光腔外和频技术方案,2012 年实现了单峰微秒脉冲钠导引星激光输出平均功率 19 W^[43-44],激光线宽 0.6 GHz,光束质量 $M^2=1.5$,脉冲宽度 140 μs ,重复频率为 50 Hz,由此产生的钠导引星光子回波为 80~745 photons/cm²/sec,相当于 10~7.5 等星^[45]。目前网上报道进一步实现了 81 W 输出,但未见光束质量、

光谱、重频等性能指标情况。

中国科学院长春光学精密机械研究所采用 Nd:YAG 1 064 nm 与 1 319 nm 激光腔内和频技术方案,2014 年实现了单峰纳秒脉冲钠导引星激光平均功率 8 W^[46],激光线宽 3.5 GHz,脉冲宽度 152 ns,重复频率 5 kHz,由此产生了钠导引星光子回波为 46 photons/cm²/sec,相当于约 10 等星。

此外,中国科学院上海光学精密机械研究所采用光纤拉曼激光倍频技术方案获得重要进展^[47],2014 年实现单频连续波钠导引星激光输出达 52.7 W。南京大学 2013 年采用光纤激光拉曼倍频方案实现了 4 W 连续波 589 nm 窄线宽激光输出^[48]。山西大学 2013 年采用光纤激光和频方案实现了 5 mW 连续波 589 nm 窄线宽激光输出^[49]。山东大学 2013 年采用固体激光拉曼频移再倍频方案获得纳秒脉冲 589 nm 激光输出 4.3 W^[50]。长春理工大学 2012 年采用固体激光腔内和频方案获得纳秒脉冲 589 nm 激光输出 11.5 W^[51]。中国科学院福建物质结构研究所和温州大学合作 2011 年采用固体激光自拉曼频移再倍频方案获得纳秒脉冲 589 nm 激光输出 570 mW^[52]。西北大学 2009 年采用固体激光腔内和频方案获得纳秒脉冲 589 nm 激光输出 3.8 W^[53]。中国电子科技集团公司第十一研究所 2008 年采用固体激光腔内和频方案获得纳秒脉冲 589 nm 激光输出 10.5 W^[54]。

3 本实验室激光钠导引星技术最新进展

3.1 100 W 级钠导引星激光研究

微秒脉冲钠导引星激光技术方案采用 Nd:YAG 1 064 nm 与 1 319 nm 激光腔外和频技术,如图 12 所示,系统包括 1 064 nm 激光器、1 319 nm 激光器、腔外和频器、激光电源、水冷机与控制器等 6 个部分。该技术方案与美国空军实验室的连续波钠信标激光器虽然都是 Nd:YAG 激光和频路线,但具体方案不同。美国空军实验室的 1 064 nm 与 1 319 nm 激光器为种子激光注入锁定环形腔放大方案,和频采用注入锁定和频腔方案,要求环形腔腔长精密控制在 1/4 波长以下,控制技术复杂、长期稳定困难。而该方案 1 064 nm 与 1 319 nm 激光器为种子激光直接行波放大方案,和频采用单通和频方案,系统相对简单,稳定性与可靠性高。

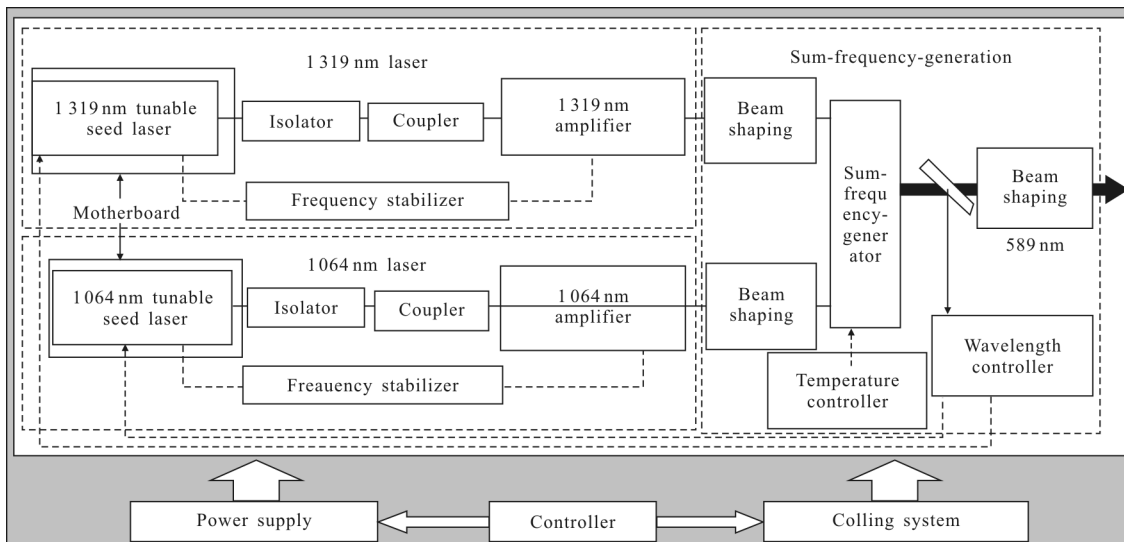


图 12 钠导引星激光器方案示意图

Fig.12 Schematic of sodium LGS laser

为了实现高功率、窄线宽、可调谐的 1064 nm 与 1319 nm 种子激光输出，种子激光源采用环形行波腔结构，可消除增益介质空间烧孔效应，有效抑制多纵模振荡。通过腔内插入高色散低损耗的标准具来精密调谐波长，并压窄线宽，使种子激光波长稳定精度低于 0.2 GHz、线宽窄于 0.3 GHz。为了获得高功率输出，1064 nm 与 1319 nm 种子激光分别进行功率放大。其中，1064 nm 激光采用棒状激光模块进行高功率、高光束质量放大。1319 nm 激光由于相应的 Nd:YAG 谱线强度低、量子亏损高，因此采用双 Z 型板条激光模块进行放大，与常用的单 Z 型板条模块不同，激光可在板条的厚度与宽度两方向上沿 Z 型光路传输放大，同时补偿两方向的热畸变，并提高放大增益，能够实现 1319 nm 激光的高功率、高光束质量放大。1064 nm 与 1319 nm 激光采用 LBO 晶体和频，LBO 晶体抗损伤阈值高，无走离效应，可保持和频激光的光束质量。采用 3 波耦合方程模拟了 1064 nm 与 1319 nm 激光的和频过程，获得了最佳和频参数，包括激光的束腰尺寸与位置、非线性晶体的长度、两束激光的功率配比等，从而实现了高功率与高光束质量的和频 589 nm 激光输出。

钠导引星激光输出平均功率为 102 W，如图 13 所示。光束质量 $Mx^2=1.45, My^2=1.35$ ，相当于 $M^2=1.4$ ，如图 14 所示。激光波长稳定精度为 0.2 GHz，如图 15 所示。为提高激光激发电离层钠原子的效率，采用种子激光调制产生双峰谱型与 589 nm 激光直接电光调制相结合的方法，精确调控双峰激光的功率比，实现了双峰谱型微秒脉冲钠导引星激光输出。

激光光谱采用扫描干涉仪测量，如图 16 所示，激光为双峰谱型，单峰线宽约 0.3 GHz。还采用了电控与非线性光学复合反馈调控方法，有效抑制了微秒脉冲激光弛豫振荡效应导致的尖峰脉冲，防止尖峰脉冲超过钠层饱和功率密度，激光脉冲宽度为 115 μ s，重复频率为 1 kHz，如图 17 所示。

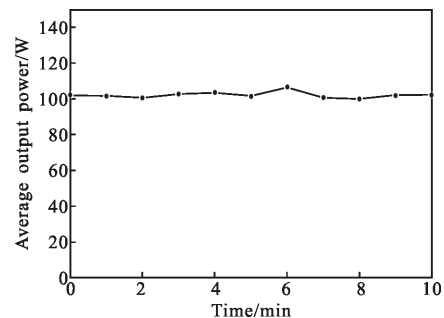


图 13 钠导引星激光输出平均功率测量结果

Fig.13 Measurement of average output power for sodium LGS laser

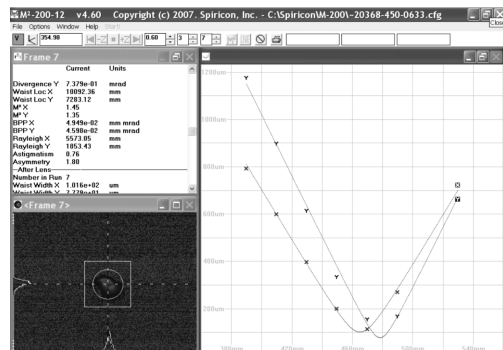


图 14 钠导引星激光光束质量测量结果

Fig.14 Measurement of beam quality for sodium LGS laser

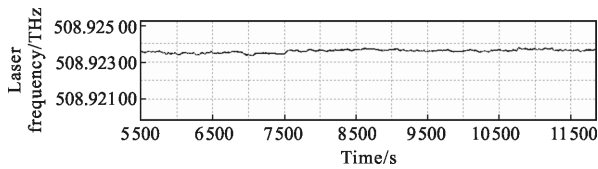


图 15 钠导引星激光波长测量结果

Fig.15 Measurement of sodium LGS laser wavelength

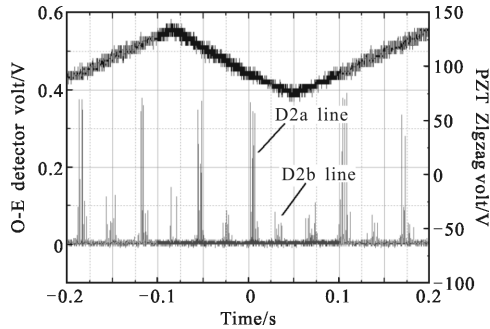


图 16 钠导引星激光光谱测量结果

Fig.16 Measurement of sodium LGS laser spectrum

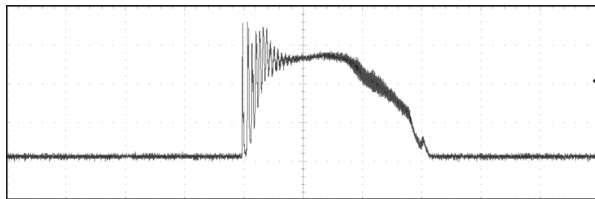


图 17 钠导引星激光脉冲测量结果

Fig.17 Measurement of sodium LGS laser pulse

3.2 兴隆站激光钠导引星研究

2014 年,该实验室研制出了双峰谱型微秒脉冲钠导引星激光器样机,并与光电所研制的发射望远镜集成,在国家天文台兴隆站开展了激光产生钠导引星研究。激光器输出激光经扩束准直耦合到发射望远镜,发射口径 280 mm,通过调焦使激光束聚焦在海拔约 90 km 处的钠层,产生了高亮度的钠导引星,如图 18 所示,钠导引星光斑尺寸约为 5.7",考虑激光光束质量($M^2=1.4$)与大气视宁度(约 4"),表明调焦良好。

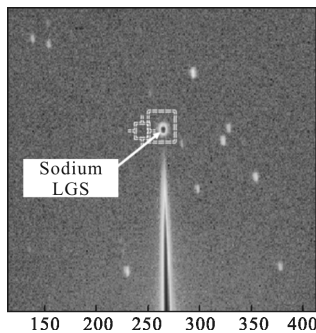


图 18 接收望远镜对钠导引星成像

Fig.18 Image of sodium LGS by telescope

测量了钠导引星光子回波随激光功率的变化,结果如图 19 所示,当双峰谱型钠导引星激光输出重复频率 600 Hz、脉冲宽度约 120 μ s、平均功率 32 W 时,获得了高亮度的钠导引星,光子回波达 1 820 photons/cm²/sec。

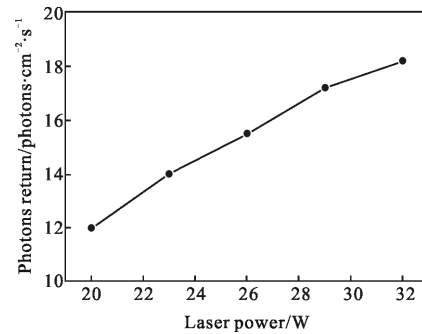


图 19 钠导引星光子回波随激光功率的变化

Fig.19 Measurement of photon return as a function of sodium

LGS laser output power

3.3 丽江站激光钠导引星研究

2014 年,该实验室与光电所合作,将钠导引星激光器与发射望远镜集成在云南丽江 1.8 m 望远镜上。激光发射到海拔约 90 km 处的钠层,产生高亮度的钠导引星,光子回波由 1.8 m 望远镜接收与探测,基于当地优良的大气视宁度(1.4"),将钠导引星光斑调焦到约 2"。图 20 所示为激光功率相同时,圆偏振与线偏振激光产生的钠导引星光子回波测量结果,从图中可以看出,圆偏振激光产生的钠导引星光子回波比线偏振高约 50%。图 21 所示为双峰谱型与单峰谱型激光产生的钠导引星光子回波测量结果,从图中可以看出,双峰谱型激光产生的钠导引星光子回波比单峰谱型高约 80%。由此产生了高亮度、小光斑的钠导引星,由 1.8 m 望远镜探测并实现了对恒星的实时闭环自适应校正,获得 J 波段成像分辨率提高了约 5 倍,达 1.7 倍衍射极限。

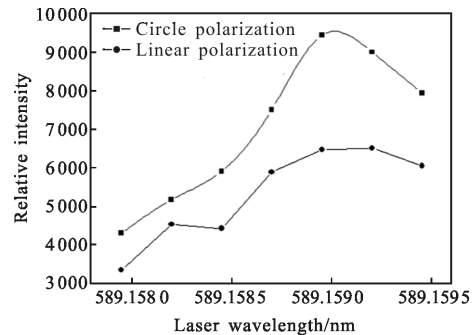


图 20 不同偏振态时钠导引星光子回波随波长变化

Fig.20 Measurement of photon return at circle and linear

polarization for sodium LGS laser

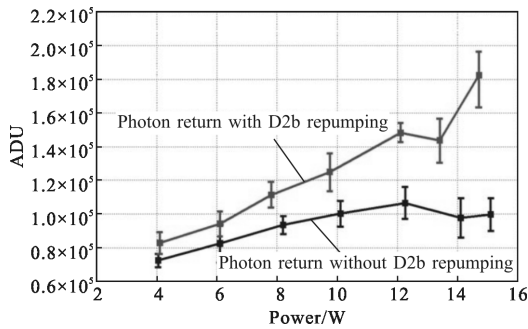


图 21 双峰谱型与单峰谱型激光产生的钠导引星光子回波强度
Fig.21 Measurement of photon return with & without D2b-repumping for sodium LGS laser

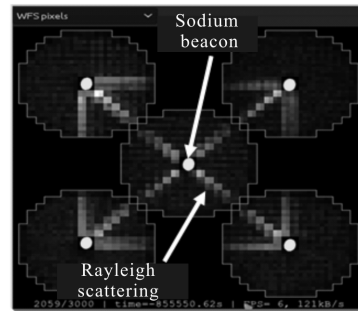


图 23 Fratricide 现象

Fig.23 Fratricide phenomena

4 激光钠导引星技术发展方向

4.1 钠导引星星群自适应光学技术

自适应光学望远镜采用单导引星校正大气畸变,还存在两大问题:一是校正视场小,原因是大气等晕角限制,导致采用单颗导引星仅能校正大气等晕角(约数角秒)内的视场;其二是校正不均匀,钠导引星高度约为 90 km,仍然有限,单颗使用时存在锥体效应,将导致校正的空间不均匀,即中心区域校正精度高,边缘区域校正精度低,如图 22 所示。采用多颗钠导引星构成的星群技术,可成倍的突破等晕角限制,扩大校正视场,并且由于交叉补偿方法,可显著克服锥体效应导致的校正的空间不均匀。2012年,美国 Gemini 望远镜^[27]采用连续波钠导引星激光产生了 5 颗钠导引星组成星群,并进行了自适应光学校正实验,验证了星群技术的优势。但在 Gemini 的实验中又发现,如图 23 所示,由于存在多束激光,多颗钠导引星与多束瑞利散射光柱之间出现相互串扰

问题——称为“fratricide”问题。采用微秒脉冲钠导引星激光,通过时间选通可消除瑞利散射干扰噪声,解决 fratricide 问题,提高波前探测信噪比 3~4 倍。因此,TMT 等大型望远镜,正在利用微秒脉冲钠导引星的时间选通优势,发展无串扰现象的星群技术,实现全天区、大视场、高分辨、高灵敏成像。

4.2 多色激光钠导引星技术

由于采用单色钠导引星无法校正大气造成的倾斜像差,目前还需辅以自然导引星校正倾斜像差,而以钠导引星校正高阶像差。若发展多色激光钠导引星技术,如 330 nm 钠导引星激光^[55],可产生两种或两种以上波长的钠导引星回波,由此可计算出波前倾斜像差,从而彻底摆脱自然导引星的限制,实现更准确、更方便的自适应光学校正。

4.3 数微秒脉冲激光钠导引星技术

大气导致星光波前畸变是立体效应,不同的高度有不同的畸变,而目前的钠导引星校正的是大气的畸变积分效应。采用数微秒脉冲激光钠导引星群^[58],通过时间选通技术,可实现对大气的层析探测,建立大气畸变的 3D 模型,再结合多变形镜可实现 3D 校正,极大地提高校正精度。

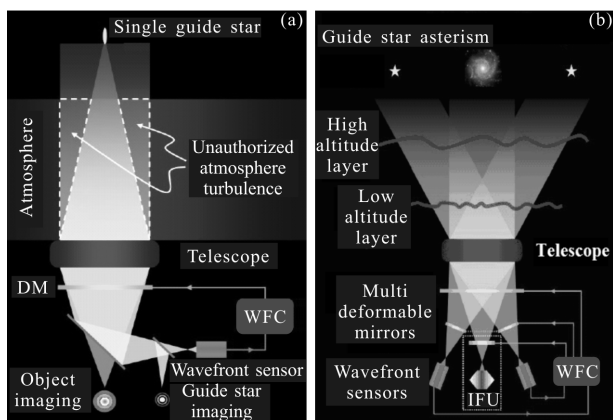


图 22 单导引星与星群自适应光学校正示意图

Fig.22 Single guide star and guide star asterism AO correction

5 结论

为克服大气扰动影响,大型地基光学望远镜正在进入自适应光学望远镜时代,激光钠导引星是其中的核心技术之一。基于固体激光及其频率变换技术,国际上主要在发展连续波与微秒脉冲两种体制的钠导引星激光,其中,微秒脉冲钠导引星兼有高信噪比与高亮度的优点,被天文学界称为先进的钠导引星。本实验室提出了固体激光振荡放大再腔外和频的技术方案,实现了钠 D2 线光谱匹配和钠层激发

匹配的高功率微秒脉冲钠导引星激光,并在国内外大望远镜上应用,产生了高亮度的钠导引星,获得了高分辨自适应光学成像。

参考文献:

- [1] Babcock H W. The possibility of compensating astronomical seeing [C]//Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1953, 65: 229-236.
- [2] Hardy J W. Proc. Inst. Elect. Electron. Engrs [C]//Control designs for an adaptive optics system, 1978, 66: 651-697.
- [3] Happer W, MacDonald G J, Max C E, et al. Atmospheric-turbulence compensating by resonant optical backscattering from the sodium layer in the upper atmosphere [J]. *J Opt Soc Am A*, 1994, 11: 263-276.
- [4] Belenkii M S, Karis S J, Brown J M. Experimental validation of a technique to measure tilt from a laser guide star [J]. *Optics Letters*, 1999, 24: 637-639.
- [5] Thompson L A, Gardner C S. Experiments on laser guide stars at Mauna Kea Observatory for adaptive imaging in astronomy [J]. *Nature (London)*, 1987, 328: 229-231.
- [6] Jelonek M P, Fugate R Q, Lange W J, et al. Characterization of artificial guide stars generated in the mesospheric sodium layer with a sum-frequency laser [J]. *J Opt Soc Am A*, 1994, 11 (2): 806-812.
- [7] 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 (12): 1649-1652.
- [8] Viswa Velur, Edward J K, Richard G D, et al. Implementation of the Chicago sum frequency laser at Palomar laser guide star test [C]//SPIE, *Advancements in Adaptive Optics*, 2004, 5490: 1033-1040.
- [9] Kuntschner, Harald. Operational concept of the VLT's adaptive optics facility and its instruments [C]//SPIE, 2012, 8448: 07-11.
- [10] Yutaka Hayano, Yoshihiko Saito, Meguru Ito, et al. The laser guide star facility for subaru telescope [C]//SPIE, 2006, 6272: 627247-1-627247-7.
- [11] Allen K Hankla, Jarett Bartholomew, Ken Groff, et al. 20 W and 50 W solid-state sodium beacon guidestar laser systems for the Keck I and gemini south telescopes [C]//SPIE, 2006, 6272: 62721G-1-62721G-9.
- [12] Joyce R, Boyer C, Daggert L, et al. The laser guide star facility for the thirty meter telescope [C]//Advances in Adaptive Optics II, SPIE Proc, 2006, 6272: 1H1-1H6.
- [13] Pfrommer Thomas, Hickson Paul, She Chiaoyao. A large-aperture sodium fluorescence lidar with very high resolution for mesopause dynamics and adaptive optics studies [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36: 1-5.
- [14] Jian GeL, Jacobsena B P, Angel' J R P, et al. Simultaneous measurements of sodium column density and laser guide star brightness [C]//SPIE, 1998, 3353: 242-253.
- [15] Ungar P J, Weiss D S, Riis E, et al. Optical molasses and multilevel atoms: Theory [J]. *J Opt Soc Am B*, 1989, 6(11): 2058-2071.
- [16] Rochester Simon M, Otarola Angel, Boyer Corinne. Modeling of pulsed-laser guide stars for the Thirty Meter Telescope project [J]. *Journal of the Optical Society of America B-Optical Physics*, 2012, 29(8): 2176-2188.
- [17] Avicola K, Brase J M, Morris J R, et al. Sodium-layer laser-guide-star experimental results [J]. *J Opt Soc Am A*, 1994, 11: 825-831.
- [18] Chester S Cardner, Byron M Welsh, Laird A Thompson. Design and performance analysis of adaptive optical telescopes using laser guide stars [C]//Proceedings of the IEEE, 1990, 78(11): 1721-1743.
- [19] Brent Ellerbroek, Corinne Boyer, Larry Daggert, et al. The TMT Laser Guide Star facility conceptual design report [Z]. TMT LGSF Team, TMT International Observatory, LLC, TMT.AOS.CDD.06.035.REL03, 2006, 25-25.
- [20] Peter L W, David L M, Antonin H B, et al. The W. M. keck observatory laser guide star adaptive optics system: overview[C]//Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2006, 118: 000-000.
- [21] Humphreys R A, Primmerman C A, Bradley L C, et al. Atmospheric-turbulence measurements using asynthetic beacon in the mesospheric sodium layer [J]. *Opt Lett*, 1991, 16: 1367-1369.
- [22] Foy R, Labeyrie A. Feasibility of adaptive telescope with laser probe [J]. *Astron Astrophys*, 1985, 152: 129-131.
- [23] Joshua C Bienfang, Craig A Denman, Brent W Grime, et al. 20 W of continuous-wave sodium D2 resonance radiation from sum-frequency generation with injection-locked lasers [J]. *Opt Lett*, 2003, 28(22): 2219-2221.
- [24] Craig A D, Paul D H, Gerald T M, et al. 20 W CW 589 nm sodium beacon excitation source for adaptive optical telescope applications [J]. *Optical Materials*, 2004, 26: 507-513.
- [25] Craig A Denmana, Paul D Hillmana, Gerald T Moorea, et al. Realization of a 50-Watt facility-class sodium guidestar

- pump laser [C]//SPIE, 2005, 5707: 46–49.
- [26] Céline d'Orgeville, Sarah Diggs, Vincent Fesquet, et al. Gemini south multi-conjugate adaptive optics (GeMS) laser guide star facility on-sky performance results [C]//SPIE, 2012, 8447: 84471Q–1–84471Q–21.
- [27] Hideki Takami, Stephen Colleya, Matt Dinkinsa, et al. Status of subaru laser guide star AO system[C]//SPIE, 2006, 6272: 62720C1–C10.
- [28] Yan Feng, Luke R Taylor, Domenico Bonaccini Calia. 25 W Raman -fiber -amplifier -based 589 nm laser for laser guide star[J]. *Optics Express*, 2009, 17(21): 19021–19026.
- [29] Luke R Taylor, Yan Feng, Domenico Bonaccini Calia. 50 W 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.
- [30] Christina B Olausson, Akira Shirakawa, Hiroki Maurayama, et al. Power-scalable long-wavelength Yb -doped photonic bandgap fiber sources [C]//SPIE, 2010, 7580: 758013–1–758013–12.
- [31] Pennington D M, Dawson J W, Beach R J, et al. Compact fiber laser for 589 nm laser guide star generation [C]//CLEO Europe, 2005: 532–532.
- [32] Surin A A, Larin S V. 14 W SHG in MgO:sPPLT at 589 nm from high power CW linearly polarized RFL [C]//Laser Optics, International Conference, 2014: 1–1.
- [33] Dupriez P, Farrell C, Ibsen M, et al. 1 W average power at 589 nm from a frequency doubled pulsed Raman fiber MOPA system[C]//SPIE, 2006, 6102: 61021G–1–61021G–6.
- [34] Jeys T H. Development of a mesospheric sodium laser beacons for adaptive optics [J]. *The Lincoln Laboratory Journal*, 1991, 4: 133–133.
- [35] Kibblewhite E J, Shi F. Design and field tests of an 8 W sum-frequency laser for adaptive optics [C]//SPIE, 1998, 3353: 300–319.
- [36] Viswa Velur, Edward J Kibblewhite, Richard G Dekany, et al. Implementation of the Chicago sum frequency laser at Palomar laser guide star test[C]//SPIE, 2004, 5490: 1033–1040.
- [37] Jennifer E Roberts, Antonin H Bouchez, John Angione, et al. Facilitizing the palomar AO Laser Guide Star system [C]//SPIE, 2008, 7015: 70152S–1–10.
- [38] Xie S, Bo Yong, Xu J, et al. A 7.5 W quasi-continuous-wave sodium D2 laser generated from single-pass sum-frequency generation in LBO crystal[J]. *Appl Phys B*, 2011, 102: 781–787.
- [39] Xu Zuyan, Xie Shiyong, Bo Yong, et al. Investigation of 30 W-class second-generation sodium beacon laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 094208–1–094208–4. (in Chinese) 许祖彦, 谢仕永, 薄勇, 等. 30 W 级第二代钠信标激光器研究[J]. 光学学报, 2011, 31(9): 094208–1–094208–4.
- [40] Kai Wei, Yong Bo, Xianghui Xue, et al. Photon returns test of the pulsed sodium guide star laser on the 1.8 meter telescope[C]//SPIE, 2013, 8447: 84471R–1–84471R–7.
- [41] Angel Otarola. On-sky tests of the TIPC prototype laser results from tests held at the Lijiang observatory [Z]. TIPC Technical Review, TMT. AOS. PRE. 13.028. DRF01, 2013.
- [42] Otarola Angel, Hickson Paul, Bo Yong, et al. On-sky tests of a high-power pulsed-laser system for sodium laser guide star adaptive optics [J]. *Journal of Astronomical Instrumentation*, 2015: 22.
- [43] Lu Yanhua, Xie Gang, Pang Yu, et al. 340 mJ all solid state sodium beacon laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(7): 0708004–7. (in Chinese) 鲁燕华, 谢刚, 庞毓, 等. 340 mJ 全固态钠信标激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 0708004–7.
- [44] Yan Hualu, Xie Gang, Zhang Lei, et al. High energy all solid state sodium beacon laser with line width of 0.6 GHz [J]. *Appl Phys B*, 2015, 118: 253–259.
- [45] Wang Feng, Chen Tianjiang, Luo Zhongxiang, et al. Experimental study on backscattering characteristics of sodium beacon based on a long pulse laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(1): 014208–1–014208–6. (in Chinese) 王锋, 陈天江, 雒仲祥, 等. 基于长脉冲光源的钠信标回光特性实验研究 [J]. 物理学报, 2014, 63(1): 014208–1–014208–6.
- [46] Liu Jie, Wang Jianli, Lv Tianyu, et al. All-solid-state 589 nm laser and the brightness of excited sodium guide star[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(12): 3199–3204. (in Chinese) 刘杰, 王建立, 吕天宇, 等. 全固态 589nm 激光器及其钠导星激发亮度[J]. 光学精密工程, 2014, 22(12): 3199–3204.
- [47] Lei Zhang, Huawei Jiang, Shuzhen Cui, et al. Over 50 W 589 nm single frequency laser by frequency doubling of single Raman fiber amplifier [C]//CLEO, 2014: 1–2.
- [48] Yuan Y, Zhang L, Liu Y, et al. Sodium guide star laser generation by single-pass frequency doubling in a periodically poled near-stoichiometric LiTaO₃ crystal [J]. *China-Technological Sciences*, 2013, 56(1): 125–128.
- [49] Tan Wei, Fu Xiaofang, Li Zhixin, et al. The wavelength tunable 589 nm laser output based on singly resonant sum-frequency generation and the measurement of saturate fluorescence spectrum of sodium atom [J]. *Acta Physica*

- Sinica*, 2013, 62(9): 094211-1-094211-6. (in Chinese)
- 谭巍, 付小芳, 李志新, 等. 基于单波长外腔共振和频技术产生波长可调谐 589 nm 激光及钠原子饱和荧光谱的测量 [J]. 物理学报, 2013, 62(9): 094211-1-094211-6.
- [50] Gao Z L, Liu S D, Liu J J, et al. Self-frequency-doubled BaTeMo₂O₉ Raman laser emitting at 589 nm [J]. *Optics Express*, 2013, 21(6): 7821-7827.
- [51] Wang Yuning. Advances in all-solid-state yellow lasers at 589 nm [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- 王禹凝. 高功率全固态 589nm 黄光激光器的研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
- [52] Zhu Haiyong, Zhang Ge, Zhang Yaoju, et al. LD end-pumped c-cut Nd:YVO₄ laser at 589 nm generated by self-Raman conversion and frequency doubling [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(9): 373-377. (in Chinese)
- 朱海永, 张戈, 张耀举, 等. LD 端面抽运 c 切 Nd:YVO₄ 自拉曼倍频 589 nm 黄光激光研究 [J]. 物理学报, 2011, 60(9): 373-377.
- [53] Li Lisha, Hou Yao, Chen Xiuyan, et al. Diode-side-pumped 589nm yellow laser with double acousto-optic Q-switches [J]. *Laser Technology*, 2009, 33(3): 273-275. (in Chinese)
- 李莉莎, 侯瑶, 陈秀艳, 等. 二极管侧面抽运双声光调 Q 589 nm 黄光激光器 [J]. 激光技术, 2009, 33(3): 273-275.
- [54] Liang Xingbo, Yuan ligang, Jiang Dongsheng, et al. 10.5 W quasi continuous wave yellow laser at 589 nm [J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(9): 876-878. (in Chinese)
- 梁兴波, 苑利钢, 姜东升, 等. 10.5 W 准连续波 589 nm 黄光激光器 [J]. 激光与红外, 2008, 38(9): 876-878.
- [55] Pique Jean-Paul, Ioana C Moldovan, Vincent Fesquet, et al. Polychromatic Laser Guide Star using a single laser at 330 nm [C]//SPIE, 2006, 6272: 62723D-1-62723D-10.
- [56] Brent Ellerbroek, Corinne Boyer, Larry Daggert, et al. The TMT Laser Guide Star facility conceptual design report [Z]. TMT LGSF Team, TMT International Observatory, LLC, TMT.AOS.CDD.06.035.REL03, 2006: 26-26.