

用于自适应光学的钠导星激光器研究进展

谢仕永, 黄康胜, 孙勇, 王久旺, 王彩丽, 薄铁柱, 蔡华, 徐滔, 廉姣, 宋普光

中国建筑材料科学研究总院有限公司, 北京 100024

摘要 自适应光学技术在大型地基光学天文望远镜发展中扮演越来越重要的角色, 589 nm 钠导星激光器是此技术的关键。按产生方式的不同, 综述了染料钠导星激光器、全固态钠导星激光器和光纤钠导星激光器, 重点从激光产生难度与导星回波效率等方面对不同运转模式的全固态钠导星激光器进行了比较与分析。与连续波运转的钠导星光源相比, 以微秒脉冲方式运转的钠导星光源可以采用时间选通机制提高钠导星成像精度, 为自适应光学的校正提供了优良的信标。

关键词 钠导星激光器; 自适应光学; 和频; 光纤拉曼放大器

光学天文望远镜被认为是对人类历史影响最大的科学仪器之一, 从牛顿万有引力、爱因斯坦广义相对论到大爆炸宇宙学的建立与验证都起到了巨大的作用, 孕育出多个诺贝尔奖成果。理论上, 望远镜的分辨率 $R=(1.22g\lambda)/D$ (λ 为波长, D 为望远镜的口径), 望远镜的灵敏度 $SN\propto R^2\cdot D^2$, 即口径越大, 分辨率越高, 灵敏度越高。然而 400 年前的牛顿, 却无奈地发现无论望远镜口径如何增大, 在观测天体时, 天体的像的大小并不像理论推导的那样与望远镜口径成反比, 而是远低于理论值。于是在他的《光学》一书中叹息到: “之所以这样是由于大气不够宁静, 唯一的解决方式是将望远镜建到高高的山巅。”如果再进一步, 当望远镜运行在太空中, 那么大气对望远镜成像的影响将不再是个问题。

1 钠导星发展历史

哈勃空间望远镜是第一个发射升空的空间大型望

远镜, 望远镜口径为 2.5 m。由于它位于地球大气层之上, 获得了地基望远镜所没有的优点: 影像不受大气湍流扰动、视宁度优良、无大气散射造成的背景光, 能观测到被臭氧层吸收的紫外线等。1990 年发射后, 哈勃空间望远镜已经成为天文学史上最重要的仪器。尽管哈勃望远镜有着诸多优点, 但昂贵的成本无疑限制了其发展。从 1978 年至 2000 年, 哈勃望远镜的成本不断增加, 并且其维护难度也是不言而喻的。到目前为止, 哈勃望远镜共进行了 5 次维护, 每一次都需要宇航员从空间站出仓维护, 成本及危险性很高。尽管如此, 美国国家航空航天局仍然在筹划第二代空间望远镜——詹姆斯·韦伯望远镜, 并计划于 2019 年春^[1]发射至 1.5×10^6 km 处的第二拉格朗日点, 现已耗资 80 亿美元, 届时将无法派人维护, 工程难度极高。

相对空间望远镜, 地基望远镜更易维护, 并具有更大的资金优势。2003 年, 美国和加拿大发起的巨型地基巨型光学-红外天文观测设备——30 m 望远镜(Thir-

收稿日期: 2017-07-11; 修回日期: 2018-01-11

基金项目: 中国建筑材料科学研究总院前沿探索基金项目(YX-91)

作者简介: 谢仕永, 高级工程师, 研究方向为全固态激光及其变频技术, 电子信箱: shiyong515@163.com; 王彩丽(通信作者), 高级工程师, 研究方向为激光技术及其应用, 电子信箱: clw3662@163.com

引用格式: 谢仕永, 黄康胜, 孙勇, 等. 用于自适应光学的钠导星激光器研究进展[J]. 科技导报, 2018, 36(5): 60-69; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.05.007

ty Meter Telescope, TMT)^[2], 预算 10 亿美元, 计划 2024 年投入使用。TMT 相对哈勃望远镜, 空间分辨率提高了 1 个数量级, 探测深度最高可提高 4 个数量级。2009 年, 中国作为 TMT 项目的观察员参与其中, 需要中国投资 8~12 亿人民币^[3]。

地基光学天文望远镜发展方向是实现全天区、大视场、高分辨、高灵敏成像。然而经过大气观察宇宙, 大气对光波产生的波前畸变导致望远镜成像分辨率和探测灵敏度大幅降低, 一直是限制地基光学天文望远镜发展的关键瓶颈。提高大气波前畸变探测精度, 发展先进探测手段和相应的校正技术, 是当今天文观测的重大科学技术问题。自适应光学技术^[4]应运而生, 主要通过合适的信标光来控制变形镜, 校正大气引起的相位误差, 从而获得清晰的近衍射极限的图像, 图 1 是 10 m 口径的美国 Keck 天文望远镜使用自适应光学校正前后银河系中心图像的对比, 分辨率提高了约 25 倍。

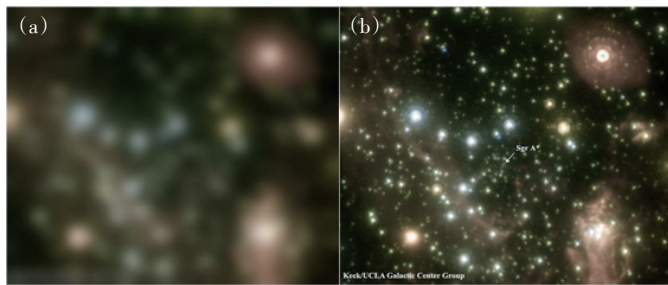


图 1 自适应光学校正大气干扰前(a)、后(b)Keck 望远镜对银河系中心成像

Fig. 1 Imaging of Keck telescope on the galactic center before and after adaptive optics correction of atmospheric disturbance

然而, 自适应光学校正须用天空中的亮星作为信标源, 获取大气扰动导致的波前畸变信息。早期是以天空中的自然亮星(如天狼星)作为信标, 但是能够达到自适应光学校正要求亮度的亮星很少, 并且一颗亮星获得好的校正范围不大于大气等晕角(一般为几角秒), 因此使用自然信标进行自适应光学校正, 只能覆盖大约 1% 天区范围。于是天文学界开始考虑用人造亮星——激光信标, 即由地面发射激光, 利用大气对激光的背向散射光作为信标, 能够在 100% 天区任何位置打出亮星, 图 2 为装备激光信标自适应光学系统的望远镜示意图。先后研发的激光信标主要有瑞利信标^[5]和钠信标^[6-7]两类。其中, 瑞利信标是利用海拔 10~20 km 大气对激光如 532 nm 波长绿激光的背向瑞利散射形

成的, 但因其高度较低, 仅能校正低层大气的波前畸变。为此, 20 世纪 70 年代后期, 由美国军方支持的 Happer 等提出并建议利用大气中间层中的丰富钠原子进行共振散射作为信标, 麻省理工学院的 Lincoln 实验室于 1984 年在夏威夷 Maui 岛上进行了首例钠导星试验。强烈的军事应用背景使其一直处于保密状态下, 直到 1991 年美国军方将部分技术解密公开。与此相对独立的, 天文界在激光钠导星技术方面的研究始见于 Thompson 和 Gardner 等对激光人造信标自适应光学系统的性能做了综合性的评估以及提出了设计激光人造信标自适应光学系统的原则, 并生成了一个钠导星, 验证了激光导引星的可行性^[8]。

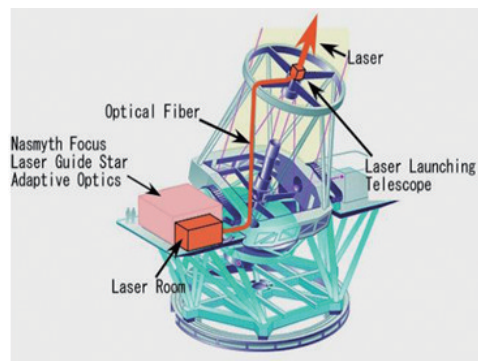


图 2 装备激光信标自适应光学系统的望远镜示意

Fig. 2 The telescope equipped with an adaptive optical system containing laser beacon

钠信标是利用海拔 90~105 km 大气电离层中的钠原子对 589 nm 波长黄激光的共振荧光背向散射形成的。由于钠信标生成高度高(已接近大气顶层), 可校正更大高度范围大气的波前畸变, 已成为当前信标研究的前沿方向。因此, 激光钠信标系统成为大型地基光学望远镜竞相研发的核心仪器设备之一, 产生钠信标的钠导星激光器的研制也成为当今天文观测技术发展的前沿课题。图 3 为 589 nm 激光产生钠导星的成像图片。麻省理工学院用配备闪光灯泵浦的和频钠黄光激光器, 于 1992 年对电离层钠层的特性进行了研究, 成果显著^[9]。目前, 较著名的配备有激光导引星的自适应光学望远镜有 Keck II 和欧洲南方天文台(ESO)VLT 等, 图 4 是 ESO VLT 成功启用强激光束钠导星观测的图片。

由于钠导星激光要求能够与大气电离层的钠原子共振, 并达到很高的回波强度, 因此对其输出功率、光束质量、波长、线宽等重要参数都有严格要求, 技术难度高, 是目前国际上激光技术研究的难点和热点^[10]。另

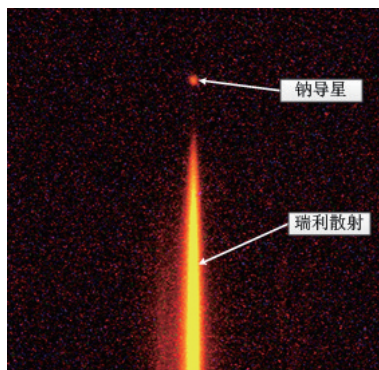


图3 589 nm激光产生钠导星的成像

Fig. 3 Sodium guide star image generated by 589 nm laser



图4 ESO VLT成功启用强激光束钠导星观测

Fig. 4 ESO VLT successfully enabled the observation of strong laser beam sodium guide star

外,对于常规的天文观测应用,应该有较高的可靠性、耐用性及集成化。我们将能够符合这些要求的589 nm激光器称之为钠导星激光器。目前,用于产生钠导星的激光器主要有染料激光器、全固态激光器及光纤激光器,随着激光技术的不断发展,各类钠导星激光器的性能都在不断提高。

2 染料钠导星激光器

染料激光器由于可以直接受激辐射产生589 nm激光,在钠导星激光器早期研究中受到科学家们的青睐。1993年,美国劳伦斯-利弗莫尔国家实验室(LLNL)研制出平均功率达1.1 kW的染料钠信标激光器^[11],重复频率为26 kHz,脉宽约32 ns,中心波长漂移小于 ± 50 MHz,线宽约2.7 GHz。该激光器在钠层的峰值功率密度远超过了钠原子的饱和光强,实际应用中并不需要如此高的平均功率。LLNL基于上述激光器原理为Keck天文台和Lick天文台完成了20 W级和100 W级紧凑型染料信标激光器的研制^[12]。1996年,德

国的马克斯·普朗克研究所为Calar Alto天文台成功开发出ALFA染料激光器^[13]。它采用30 W的514 nm Ar离子激光器作为抽运源,染料介质为若丹明6G,最高获得了4.5 W的近衍射极限连续单频钠信标激光。同时为了实现输出激光谱线与钠D_{2a}的精确对准,还采用主动稳频及谱线闭环控制措施。

虽然染料激光器技术较成熟,但也存在着明显的缺点。首先是染料激光器体积较大,实现集成化较困难。如LLNL研制的染料钠导星激光器,激光头占地面积约15 m²。其次,染料激光的光谱覆盖较小,若想从染料激光器中获得在整个Na原子的多普勒吸收线型上以10 MHz的间隔产生Na的共振辐射,则染料激光的腔长至少需要15 m^[14]。此外,染料激光器还存在安全性差、易退化变质、循环冷却复杂、长期工作不稳定等固有缺陷,因此,近年来其在钠导星激光器领域的应用逐渐被全固态激光器和光纤激光器取代。

3 全固态钠导星激光器

全固态激光器是目前国际上激光技术研究的热点。通过对激光二极管泵浦的掺Nd离子激光器进行倍频,已获得了大功率的红、绿、蓝三基色输出,但是在黄光波段由于缺少相应的基频光,还不能通过倍频的方式直接获得。然而一个非常有趣的巧合是,使用2个分别运转在1064 nm和1319 nm的掺Nd离子YAG激光器,通过非线性频率转换(和频过程)^[15-18],便可得到与钠原子D₂线共振的589 nm黄光输出。全固态激光器凭借其诸多的优点已成为目前获得钠导星激光最主要的技术手段之一。

3.1 全固态短脉冲钠导星激光器

1989年,Jeys等首先使用1064 nm和1319 nm的2个重复率为1 kHz的调Q Nd:YAG脉冲激光,通过LiNbO₃腔外和频产生了395 mW,谱宽2 GHz,脉宽100 ns的589 nm激光^[14],光路如图5所示,进行了产生钠导星的实验,并且观察到了电离层钠原子的共振荧光。

2007年,日本Saitoa等对短脉冲钠导星激光器进行了研究^[19-20],采用如图6的光路结构,基频光采用了主动锁模的驻波腔结构,通过在腔内插入标准具窄激光线宽和谐调激光波长,分别获得16.5 W的1064 nm输出和5 W的1319 nm输出,经过PPMgd:SLT腔外和频获得4.6 W的钠导星短脉冲激光输出。

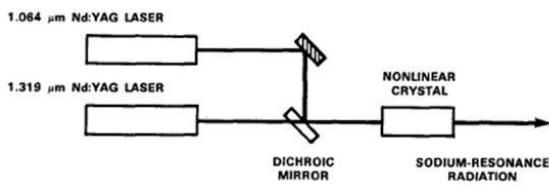


图5 和频 589 nm 全固态激光器

Fig. 5 589 nm all solid state laser

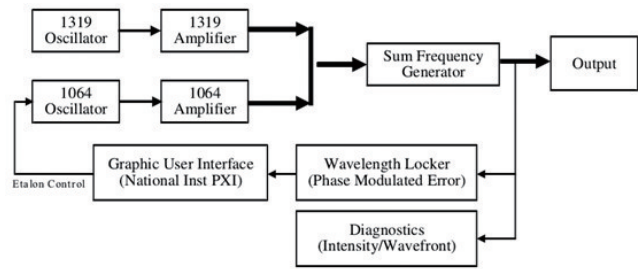


图7 LMCT 连续锁模短脉冲钠导星激光器示意

Fig. 7 Continuous mode-locked short pulse sodium guide star laser developed by LMCT

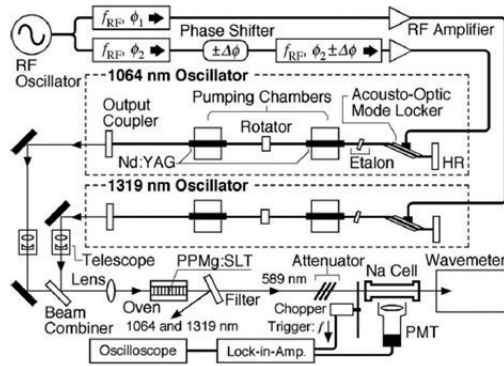


图6 日本科学家研制的钠导星激光方案示意

Fig. 6 Schematic diagram of the sodium guide star laser developed by Japanese scientists

光重频为 5 kHz, 脉冲宽度为 152 ns, 波长可准确地控制在 589.159 nm (钠原子 D_{2a} 谱线), 线宽稳定在 3.5 GHz 以内。该激光器工程样机自 2013 年 6 月起投入外场试验测试, 观测到的钠导星亮度达 10.0 等。近期, 他们在宏微脉冲锁模的运转体制下, 产生了功率 >5.5 W、线宽 ≤ 0.4 GHz、光束质量 $M^2 < 1.4$ 的 589 nm 激光输出^[26], 性能指标有了明显改善。

采用短脉冲方式运转的钠导星激光器, 由于高的脉冲峰值功率有利于提高非线性和频效率从而得到最早研发。然而高峰值功率的钠导星激光也会引起电离层钠原子的吸收出现饱和, 同时高增益也使得激光线宽难以压窄, 以上两方面都会降低钠原子的回波效率, 造成激光功率无法得到有效利用, 为此, 科学家对连续波运转的钠导星激光器进行了研制。

3.2 全固态连续波钠导星激光器

1997 年, Moosmuller 等报道了连续波运转的钠导星激光器^[27], 实验光路如图 8 所示, 实验中所用的 1064 nm 和 1319 nm Nd:YAG 激光是基于二极管泵浦的单块非平面环形腔激光器, 其线宽仅为 5 kHz, 通过 LiNbO_3 晶体的 I 类非临界相位匹配进行腔外和频, 获得了 3.4 mW 线宽 10 kHz 的 589 nm 黄激光输出。

洛克希德-马丁相干技术公司(LMCT)近年在商用钠导星激光器开发领域发展迅猛, 先后为 Gemini North 天文台、Keck 天文台和 Gemini South 天文台研制出高功率连续锁模体制的短脉冲钠导星激光器^[21-24]。图 7 为 LMCT 连续锁模激光器光路示意, 1064 nm 与 1319 nm 基频激光均采用功率定标放大方式产生, 振荡级为折叠腔连续锁模激光器, 放大器为相干技术公司专利产品——自成像波导放大器, 和频晶体采用 LBO 晶体, 并以单通方式输出 589 nm 钠导星激光。同时, 以波长计实时监测输出中心波长, 并反馈实现输出激光波长的闭环控制。LMCT 最早完成研制的是应用于 Gemini North 天文台的钠信标激光器, 在 2004 年完成产品交付^[21], 输出平均功率约 12 W。紧接着, LMCT 又接到来自 Keck 天文台和 Gemini South 天文台的 2 笔订单, 技术指标要求更高, 平均功率分别要求达到 20 W、50 W^[22]。2010 年 LMCT 完成了这 2 台激光器的研制^[23-24]。

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所也对短脉冲的全固态钠导星激光器进行了研究^[25]。激光器采用 LD 侧面泵浦复合折叠腔结构, 将 1064 nm 和 1319 nm 两路红外基频光在和频区内和频后得到 589 nm 的输出光。经过设计与优化后, 589 nm 输出功率大于 8 W, 激

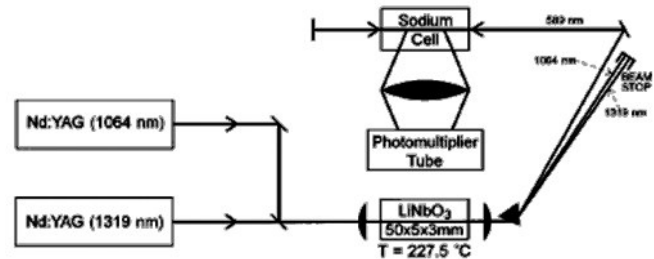


图8 连续波运转的全固态钠导星激光器示意

Fig. 8 Schematic diagram of the continuous-wave all solid sodium guide star laser

1998年, Vance等将连续波单频钠导星激光的输出功率提高了2个数量级^[28], 实验方案如图9所示, 实验中所使用的Nd:YAG激光器同样采用了二极管泵浦的单块非平面环形腔激光器, 外腔和频是在一块LiNbO₃晶体组成的谐振腔中通过双共振和频过程完成的, 通过优化和频晶体温度和腔体, 获得大于400 mW的单频589 nm激光输出, 相应光光转换效率超过40%。

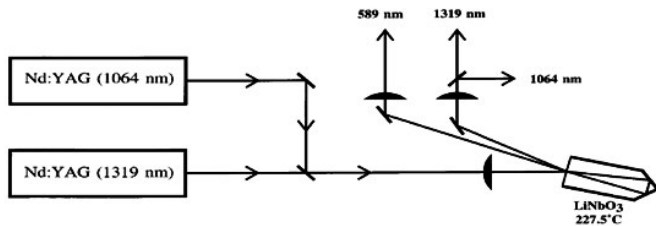


图9 双共振和频的激光器实验方案示意

Fig. 9 The experimental scheme of double-resonance sum-frequency laser

2003年, 美国空军实验室的Bienfang等通过种子源注入环形腔锁定放大及PDH(Pound-Drever-Hall)稳频技术, 获得了20 W的连续波589 nm激光输出^[29], 并调谐扫过了钠的D₂线, 其实验装置如图10所示, 分别将1064 nm与1319 nm种子光注入至一个外部环形谐振腔实现注入锁定, 每个环形谐振腔采用一套电学反馈控制系统。再将放大后的1064 nm与1319 nm激光同时注入至1个和频腔, 使2束基频激光在和频腔内产生共振增强, 提高和频转换效率。整个系统输出的黄光波长由1319 nm种子源决定, 通过调谐1319 nm种子源

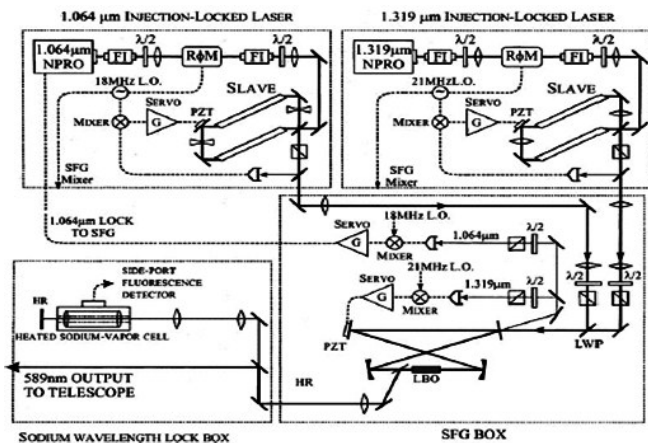


图10 美国空军实验室的20 W连续波钠导星激光器实验装置示意

Fig. 10 20 W continuous-wave sodium guide star laser developed by US Air Force Laboratory

的波长, 即可获得与钠原子D₂线共振的黄光输出。通过此系统获得了20 W的连续波589 nm输出, 转换效率超过55%。

2005年, 在上述实验基础上, 将其系统进一步改进, 1064 nm与1319 nm激光环形放大器分别由原来的2个泵浦模块增加到4个和6个, 获得了100 W的1064 nm输出和60 W的1319 nm输出, 最终通过共振增强腔和频获得50 W的589 nm钠黄光输出^[30]。图11、图12分别是将激光器装备于3.5 m口径的天文望远镜进行钠导星实验的照片以及所产生的激光钠导星图样, 观测到了4.8等亮度的钠导星。

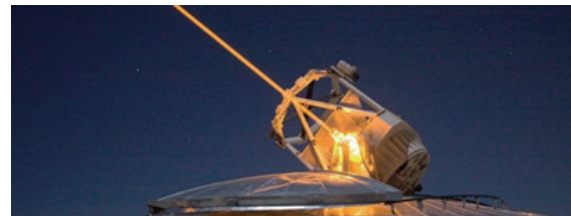


图11 50 W级连续波钠导星激光装备于3.5 m口径天文望远镜

Fig. 11 50 W continuous wave sodium guide star laser is equipped in the 3.5 m telescope

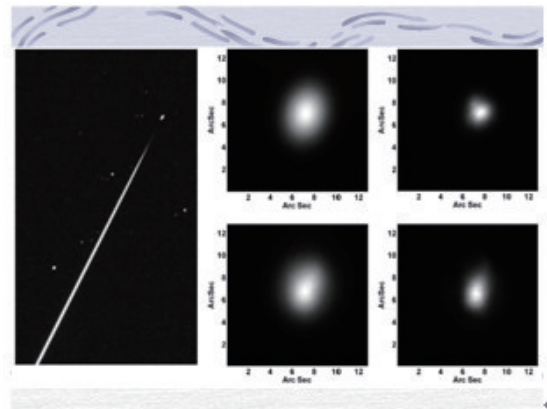


图12 产生的激光钠导星图像

Fig. 12 Image of laser sodium guide star

可见, 连续波运转的全固态钠导星激光器为了提高基频1064 nm与1319 nm激光的功率需要注入锁定法对种子光进行放大, 同时为获得高功率589 nm黄光输出需要采用共振增强腔提高和频效率, 以上两方面对精密控制提出了极高要求, 极大地提高了激光器的工程化集成难度, 因此限制了其在外场试验中的应用。

3.3 全固态微秒脉冲钠导星激光器

1998年, Kibblewhite等^[31]设计并完成了宏微脉冲运

转钠信标激光器装置的研制。宏脉冲通过设置二极管驱动电源得到,微脉冲通过锁模技术实现,主要用于共孔径发射接收系统。2004年,芝加哥大学和加州理工学院合作,向Palomar天文台交付了1台名为CSFL的钠导星激光器样机^[32-33],图13为CSFL的光路示意图。1064 nm和1319 nm激光器腔型采用折叠腔结构,用主动声光锁模器进行脉冲锁模。在谐振腔内插入滤波片和标准具来调谐输出中心波长及压窄线宽,还插入一块非线性晶体抑制弛豫振荡尖峰。激光器运转时宏脉冲重复频率为500 Hz,微脉冲重复频率为100 MHz。当注入光14 W的1064 nm激光和8 W的1319 nm激光时,最高和频输出7.5 W,线宽约为0.9 GHz。

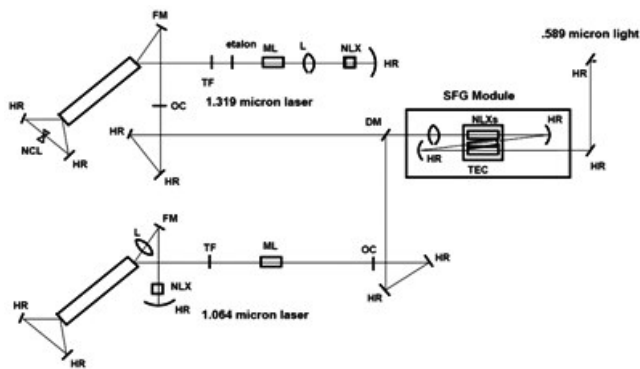


图13 宏微脉冲体制CSFL光路示意

Fig. 13 Schematic diagram of macro and micro-pulse CSFL

中国科学院理化技术研究所(TIPC)许祖彦研究组在全固态微秒脉冲钠导星激光器研究方面取得重要突破,技术方案如图14所示^[34],为获得窄线宽激光输出,1064 nm与1319 nm种子源均采用环形腔结构,通过腔内插入标准具进一步压窄激光线宽。基频输出的1064 nm与1319 nm激光分别经过两级和四级放大后达到90.3 W与59.8 W,利用LBO晶体对两路输出激光进行和频获得了输出功率33 W,光束质量 $M^2=1.25$,线宽0.4 GHz,波长漂移 ± 0.5 GHz的波长精密可调589 nm钠导星激光器,整个系统工作在准连续微秒脉冲状态,重复频率为500 Hz,脉冲宽度为120 μ s。进一步优化基频光的放大系统后,589 nm激光输出功率提高至53 W。

该激光器的工程化样机进行了一系列外场试验^[7,35],在云南1.8 m口径望远镜上成功观测到了激光钠导星,视星等最高达到6.6,并实现了对恒星的自适应光学闭环校正,为国内此领域的重要突破。此外,还参与国际重大合作项目TMT,在加拿大UBC天文台成功进

行了联机外场试验,获得钠层回波效率 $260 \text{ photons} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{atom}^{-1} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^2$,超过了TMT要求的 $130 \text{ photons} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{atom}^{-1} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^2$ 的技术指标。TMT项目组认为此次中国科学院理化技术研究所钠信标激光器的外场试验是“一项巨大的进展(great achievement)”。图15为中国科学院理化技术研究所钠导星激光器在1.8 m望远镜上的外场试验实物照片。该研究组在2016年对激光器进行了升级^[36],研制成功具有 D_{2b} 再泵功能的微秒脉冲全固态钠导星激光器,其平均输出功率为63 W。

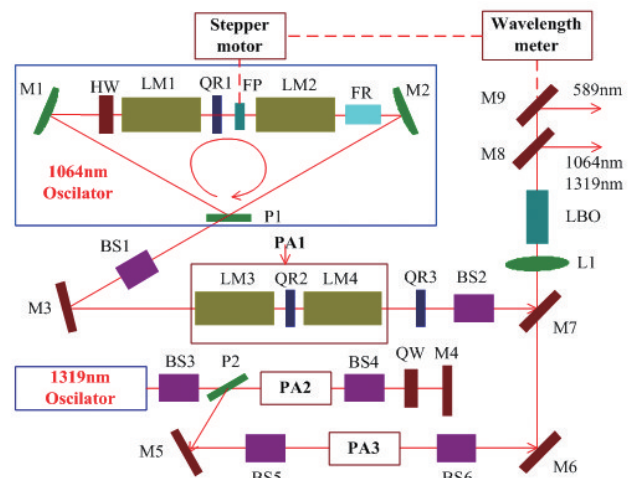


图14 TIPC全固态微秒脉冲钠导星激光器技术方案

Fig. 14 Technical scheme of TIPC all solid state microsecond-pulse sodium guide star laser



图15 TIPC钠导星激光器外场试验照片

Fig. 15 Photo of the field test of TIPC sodium guide star laser

中国工程物理研究院(CAEP)在全固态微秒脉冲钠导星激光器研究方面也有重要进展^[37],其技术方案如图16所示,基频1319 nm激光经三级Nd:YAG放大后功

率扩展为 100 W, 而基频 1064 nm 激光先经过光纤放大后再由两级 Nd:YAG 放大至 150 W, 和频晶体采用 LBO, 最终获得重复频率 250 Hz、脉冲宽度 150 μs 、输出功率 81 W 的 589 nm 钠导星激光, 相应光束质量 $M^2 < 1.3$, 线宽 0.3 GHz。图 17 为 CAEP 微秒脉冲钠导星激光器照片。

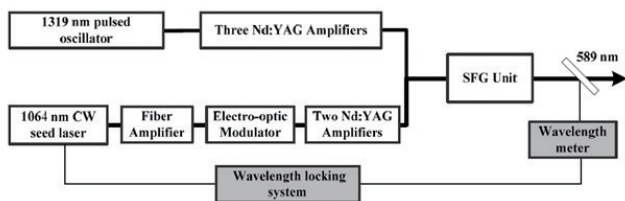


图 16 CAEP全固态微秒脉冲钠导星激光器方案示意

Fig. 16 Scheme of CAEP all solid state microsecond-pulse sodium guide star laser

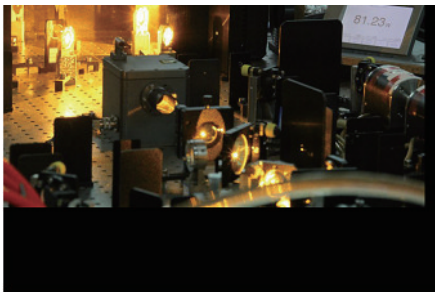


图 17 CAEP钠导星激光器照片

Fig. 17 Photo of CAEP sodium guide star laser

与连续波方式运转的钠导星光源相比, 以准连续微秒脉冲方式运转的钠导星光源, 可以提供门脉冲时间选通机制, 消除大气瑞利散射的干扰, 提高钠信标信号的信噪比, 从而使自适应光学系统获得更好的校正效果。另外, 准连续运转条件下的激光具有较高的峰值功率, 因此一般通过单通的外腔和频就可以获得较高的和频效率, 因此激光系统相对不那么复杂, 在工程化中较易实现稳定与可靠, 从而满足天文观测中严酷的环境要求。与以短脉冲方式运转的钠导星光源相比, 微秒脉冲钠导星激光器的功率密度不容易导致电离层钠原子的吸收饱和, 所以可以有效利用高功率激光产生高亮度钠导星, 为自适应光学的校正提高优良的信标。

4 光纤钠导星激光器

光纤激光器具有光束质量高、易维护、安全性高等

优点, 近年来得到极大发展。在钠导星激光器方面, 光纤激光器也呈现快速发展趋势, 其中光纤拉曼法是目前的主流技术, 其基本原理是: 通过光纤激光器的拉曼频移技术将普通的 1 μm 波段的光纤激光器高效地拉曼频移(1次或多次)至 1178 nm, 然后采用非线性晶体直接倍频便可得到 589 nm 激光输出。2006年, ESO 的 Taylor 等开始研究如何通过拉曼光纤激光器获得窄线宽、高功率的钠导星激光^[38-41]。2009年, 他们与德国 Toptica 公司、加拿大 MPB 公司合作, 通过单个拉曼光纤放大器倍频获得最大功率为 28 W 的连续波单频钠导星激光, 光束质量近衍射极限, 线宽小于 2 MHz, 倍频效率 80%, 其原理如图 18 所示, 与早期研究相比做了 2 个重要的改进: 一是拉曼光纤放大器运转于连续单频状态, 并采用专利技术解决了同时发生的受激布里渊散射(SBS)抑制难题; 二是采用谐振倍频腔取代单通倍频, 大幅提高了倍频转换效率。

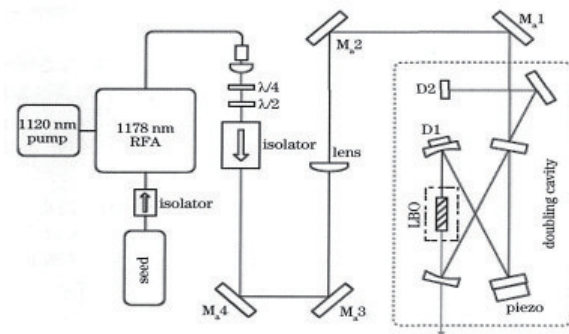


图 18 基于拉曼光纤放大器倍频的钠导星激光器

Fig. 18 Sodium guide star laser based on frequency doubling of Raman fiber amplifier

ESO 研究人员通过单个拉曼光纤放大器倍频获得的 589 nm 激光最高输出约 28 W, 目前未见更高功率的报道, 原因可能是受限于高功率情况下 SBS 的抑制难题。为此, 2010 年他们用 3 个 1178 nm 拉曼光纤放大器进行相干合成, 获得大于 60 W 的总合成功率, 倍频后实现了大于 50 W 的连续单频 589 nm 钠导星激光输出, 相应的倍频效率为 84%^[42](图 19)。

中国科学院上海光学精密机械研究所冯衍研究组对钠导星保偏光纤拉曼激光器进行了研究^[43], 采用窄线宽半导体激光器作为种子激光器, 设计两级保偏拉曼光纤放大器进行功率放大, 获得的高功率 1178 nm 激光再通过一个谐振倍频腔产生 589 nm 激光, 波长锁定于钠原子 D_{2a} 吸收线。研究过程中, 发展了高功率拉曼光

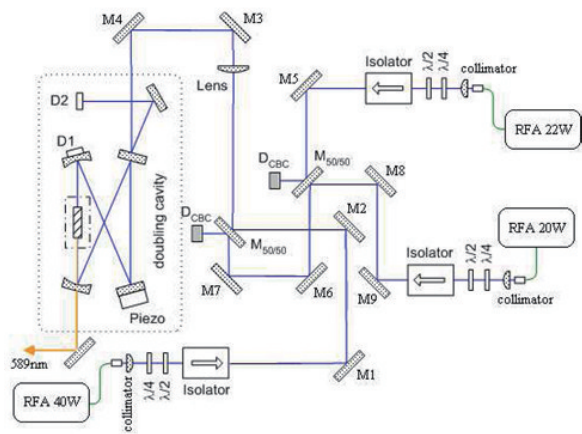


图 19 基于拉曼光纤放大器相干合成的 50 W 钠导星激光器
Fig. 19 50 W sodium guide star laser based on coherent combination of Raman fiber amplifiers

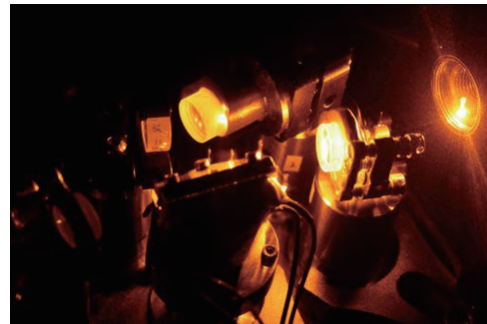


图 21 谐振倍频产生 589 nm 黄光照片
Fig. 21 Photo of 589 nm yellow light generated by resonant frequency doubling

纤激光器、高功率窄线宽光纤放大器、高效率谐振腔倍频等核心关键技术。同一激光装置可以连续波或多种脉冲运转(图 20)。连续波运转时,589 nm 输出功率 > 50 W(最大 57 W);矩形长脉冲运转时,峰值功率 > 80 W,重复率(500 Hz~10 kHz)和脉宽(1 ms~30 μs)连续可调,光束质量近衍射极限,线宽 < 5 MHz,图 21 为谐振倍频产生 589 nm 黄光照片。该课题组最近开展了纳秒脉冲光纤钠导星激光器研究^[44],取得了较大进展,平均功率达到 17 W,但尚不能满足 TMT 等大型天文望远镜的要求(> 20 W)。而由于非线性效应的严重限制,进一步提高脉冲光纤激光器平均输出功率极为困难。

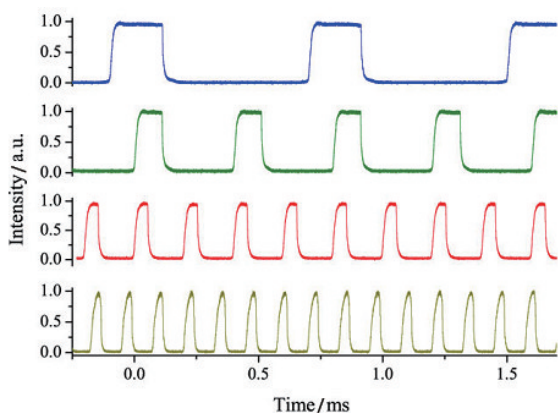


图 20 拉曼光纤钠导星激光器多种脉冲运转模式
Fig. 20 Raman fiber sodium guide star laser operating at multiple pulse modes

5 结论

自适应光学技术在大型地基光学天文望远镜的发展中扮演越来越重要的角色,而 589 nm 钠导星激光器是此技术的关键。由于钠导星激光要求能够与电离层的钠原子共振,并达到很高的回波强度,因此对激光器参数有严格要求,技术难度高,是目前国际上激光技术研究的难点和热点。按产生方式的不同,钠导星激光器可以分为染料激光器、全固态激光器和光纤激光器,本文对 3 种激光器的研究进展分别做了介绍,重点从激光产生难度与导星回波效率等方面对不同运转模式的全固态钠导星激光器进行了比较与分析。以微秒脉冲方式运转的钠导星光源,与以连续波方式运转的钠导星光源相比,可以提供时间选通机制,提高钠导星成像精度,另外较高的峰值功率使得单通和频就可以获得较高的和频效率,因此激光系统相对不那么复杂;与以短脉冲方式运转的钠导星光源相比,其激光功率密度不容易导致电离层钠原子的吸收饱和,因此可以有效利用高功率激光产生高亮度钠导星,为自适应光学的校正提供优良的信标。

参考文献 (References)

[1] NASA's James Webb Space Telescope to be Launched Spring 2019[EB/OL]. [2017-09-29]. <https://www.nasa.gov/feature/nasa-s-james-webb-space-telescope-to-be-launched-spring-2019>.
 [2] Joyce R, Boyer C, Daggert L, et al. The laser guide star facility for the thirty meter telescope[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6272: 1H1.
 [3] China TMT. 中国参与国际巨型光学三十米望远镜(CTMT)情

- 况简介[EB/OL]. [2017-09-29]. <http://ctmt.bao.ac.cn>.
China TMT. Introduction of China's participation in the international giant optical CTMT[EB/OL]. [2017-09-29]. <http://ctmt.bao.ac.cn>
- [4] 周仁忠. 自适应光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.
Zhou Renzhong. Adaptive optics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1996.
- [5] Fugate R Q, Fried D L, Ameer G A, et al. Measurement of atmospheric wavefront distortion using scattered light from a laser guide-star[J]. *Nature*, 1991(6340), 353: 144-146.
- [6] Kupke R, Gavel D T, Rockosi C M, et al. Shane AO: An enhanced adaptive optics and infrared imaging system for the Lick Observatory 3-meter Telescope[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8447: 125.
- [7] Otarola A, Hickson P, Gagne R, et al. On-sky tests of a high-power pulsed laser for sodium laser guide star adaptive optics[J]. *Journal of Astronomical Instrumentation*, 2016, 5(1): 1650001.
- [8] Thompson L A, Gardner C S. Experiments on laser guide stars at Mauna Kea Observatory for adaptive imaging in astronomy[J]. *Nature*, 1987, 328(6127): 229-231.
- [9] Jelonek M P, Fugate R Q, Cleis R A, et al. Characterization of artificial guide stars generated in the mesospheric sodium layer with a sum-frequency laser[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1994, 11(2): 806.
- [10] Xie S Y, Bo Y, Xu J L, et al. A 7.5 W quasi-continuous-wave sodium D₂ laser generated from single-pass sum-frequency generation in LBO crystal[J]. *Applied Physics B*, 2011, 102(4): 781-787.
- [11] Kenneth A, James B, James M. Sodium laser guide star system at Lawrence Livermore National Laboratory: System description and experimental results[J]. *Proceedings of SPIE*, 1994, 2201: 326-341.
- [12] Max C E, Gavel D T, Olivier S S, et al. Issues in the design and optimization of adaptive optics and laser guide stars for the Keck telescopes[J]. *Proceedings of SPIE*, 1994, 2201: 189-200.
- [13] Quirrenbach A, Hackenberg W K P, Holstenberg H C, et al. Sodium laser guide star system of ALFA[J]. *Proceedings of SPIE*, 1997, 3126: 35-43.
- [14] Jeys T H, Brailove A A, Mooradian Aram. Sum frequency generation of sodium resonance radiation[J]. *Applied Optics*, 1989, 28(13): 2588-2591.
- [15] Lu Y F, Bo Y, Xie S Y, et al. An 8.1 W diode pumped solid-state quasi-continuous-wave yellow laser at 589 nm by intracavity sum-frequency mixing generation[J]. *Optics Communications*, 2008, 281(22): 5596-5600.
- [16] Lu Y F, Xie S Y, Bo Y, et al. Generation of tunable and narrow linewidth continuous-wave yellow laser by sum-frequency mixing of diode-pumped solid-state Nd: YAG ring lasers[J]. *Optics Communications*, 2009, 282(17): 3573-3576.
- [17] Fugate R Q, Denman C A, Hillman P D, et al. Progress toward a 50-watt facility-class sodium guidestar pump laser[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5490: 1010-1020.
- [18] 鲁远甫. 高功率高光束质量全固态黄光激光技术研究[D]. 北京: 中国科学院物理研究所, 2009.
Lu Yuanfu. Research on the technology of all solid state yellow laser with high power and high beam quality[D]. Beijing: Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, 2009.
- [19] Hayano Y, Saito Y, Ito M, et al. The laser guide star facility for Subaru Telescope[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6272: 627247.
- [20] Saito Y, Hayano Y, Saito N, et al. 589 nm sum-frequency generation laser for the LGS/AO of Subaru Telescope[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6272: 627246.
- [21] Tracy A J, Hankla A K, Lopez C A, et al. High-power solid-state sodium beacon laser guide star for the Gemini North Observatory[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6100: 61001H.
- [22] 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[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 61: 62721G.
- [23] Lee I, Jalali M, Vanasse N, et al. 20 W and 50 W guidestar laser system update for the Keck I and Gemini South telescopes[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7015: 70150N.
- [24] Sawruk N, Lee I, Jalali M, et al. System overview of 30 W and 55 W sodium guide star laser systems[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7736: 77361Y.
- [25] 刘杰, 王建立, 吕天宇, 等. 全固态 589 nm 激光器及其钠导星激发亮度[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(12): 3199-3204.
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.
- [26] 刘杰, 王建立, 王禹凝, 等. 自适应光学技术在钠激光导星发射光路中的应用初步实验研究[C]//长沙: 第三届大气光学及自适应光学技术发展研讨会会议论文, 2017.
Liu Jie, Wang Jianli, Wang Yuning, et al. Fundamental experimental research on application of adaptive optics in sodium laser guide star launch telescope[C]//Changsha: The Third Symposium on the Technical Development of Atmospheric Optics and Adaptive Optics, 2017.
- [27] Moosmuller H, Vance J D. Sum-frequency generation of continuous-wave sodium D₂ resonance radiation[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(15): 1135.
- [28] Vance J D, She C Y, Moosmüller H. Continuous-wave, all-

- solid-state, single-frequency 400 mW source at 589 nm based on doubly resonant sum-frequency mixing in a monolithic lithium niobate resonator[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(21): 4891-4896.
- [29] Bienfang J C, Denman C A, Grime B W, et al. 20 W of continuous-wave sodium D₂ resonance radiation from sum-frequency generation with injection-locked lasers[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(22): 2219-2221.
- [30] Denman C A, Hillman P D, et al. Realization of a 50-watt facility-class sodium guidestar pump laser[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5707: 46.
- [31] Kibblewhite E J, Shi F. Design and field tests of an 8-W sum-frequency laser for adaptive optics [J]. *Proceedings of SPIE*, 1998, 3353: 300-309.
- [32] Velur V, Kibblewhite E J, Dekany R G, et al. Implementation of the Chicago sum frequency laser at Palomar laser guide star test bed[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5490: 1033-1040.
- [33] Dekany R, Bouchez A, Britton M, et al. PALM-3000: Visible light AO on the 5.1-meter Telescope[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6272: 62720G.
- [34] Wang P Y, Xie S Y, Bo Y, et al. 33W quasi-continuous-wave narrow-band sodium D_{2a} laser by sum-frequency generation in LBO[J]. *Chinese Physics B*, 2014, 23(9): 094208.
- [35] Wei K, Bo Y, Xue X H, et al. Photon returns test of the pulsed sodium guide star laser on the 1.8 meter telescope[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8447: 84471R.
- [36] Bian Q, Bo Y, Zuo J W, et al. High-power QCW microsecond-pulse solid-state sodium beacon laser with spiking suppression and D_{2b} re-pumping[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(8): 1732-1735.
- [37] Lu Y H, Fan G B, Ren H J, et al. High-average-power narrow-line-width sum frequency generation 589 nm laser[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9650: 965008.
- [38] Taylor L R, Feng Y, Bonaccini C D. High power narrowband 589 nm frequency doubled fiber laser source [J]. *Optics Express*, 2009, 17(17): 14687-14693.
- [39] Feng Y, Taylor L R, Bonaccini C D. 25 W Raman-fiber-amplifier-based 589 nm laser for laser guide star[J]. *Optics Express*, 2009, 17(21): 19021-19026.
- [40] Feng Y, Taylor L R, Bonaccini C D. 39 W narrow linewidth Raman fiber amplifier with frequency doubling to 26.5 W at 589 nm [J]. San Jose: *Frontiers in Optics 2009, PDAA4*.
- [41] Bonaccini C D, Feng Y, Hackenberg W, et al. Laser development for sodium laser guide stars at ESO[J]. *The Messenger*, 2010, 139: 12-19.
- [42] Taylor L R, Feng Yan, Bonaccini C D. 50W CW visible laser source at 589 nm obtained via frequency doubling of three coherently combined narrow-band Raman fiber amplifiers[J]. *Optics Express*, 2010, 18(8): 8540-8555.
- [43] Zhang L, Jiang H W, Cui S Z, et al. Versatile Raman fiber laser for sodium laser guide star[J]. *Laser and Photonics Review*, 2014, 8(6): 889-895.
- [44] Yang X Z, Zhang L, Cui S Z, et al. Sodium guide star laser pulsed at Larmor frequency[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(21): 4351-4354.

Research progress of sodium guide star laser for adaptive optics

XIE Shiyong, HUANG Kangsheng, SUN Yong, WANG Jiuwang, WANG Caili, BO Tiezhu, CAI Hua, XU Tao, LIAN Jiao, SONG Puguang

China Building Materials Academy, Beijing 100024, China

Abstract Adaptive optics technology plays an increasingly important role in the development of large ground-based optical astronomical telescopes, whereas the 589 nm sodium guiding star laser (SGSL) is the key to this technology. According to different generation ways, this paper reviews dye SGSL, all solid state SGSL and optical fiber SGSL, with emphases on analysis and comparison of all solid state SGSLs operating in different modes in terms of laser generation and photon-return efficiency of laser guide star. Compared with continuous wave SGSL, SGSL operating in microsecond pulse mode can use time gating mechanism to improve the imaging accuracy of sodium guide star, which provides an excellent beacon for adaptive optics correction.

Keywords sodium guide star laser; adaptive optics; sum frequency; fiber Raman amplification ●



(责任编辑 傅雪)