

钠导星激光器研究进展

鲁燕华 黄园芳* 张雷 张凯 唐淳 王卫民 马毅

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 介绍了钠导星激光器在自适应光学系统中的应用价值,分析了其指标特点及技术难点。按产生方式的不同,分别从染料激光器、固体激光器、光纤激光器3个方面阐述了钠导星激光器的发展历程及最新进展。染料钠导星激光器是最早获得工程应用的激光器,但由于体积较大、稳定性及可靠性较差等缺点逐渐遭到淘汰。固体钠导星激光器又分为和频(SFG)、受激拉曼散射(SRS)及光参量放大器(OPA)3种类型,其中和频方式应用最为广泛,科学家们已根据需要开发出宏微脉冲体制、连续单频体制及连续锁模体制的激光器,并已研制出平均功率50 W的商用产品。光纤钠导星激光器是近几年迅猛发展起来的一类新型激光器,尤其是基于拉曼光纤放大器倍频的连续单频钠导星激光器,输出功率已突破了50 W。

关键词 激光器;钠导星;染料激光器;固体激光器;光纤激光器;和频

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.071406

Research Progress of Sodium Guide Star Lasers

Lu Yanhua Huang Yuanfang* Zhang Lei Zhang Kai Tang Chun

Wang Weimin Ma Yi

(Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics,
Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract Sodium guide star lasers have a great application in the adaptive optics systems. The characteristic parameters and technique difficulties of the lasers are analyzed. According to the generation methods, the sodium guide star lasers can be divided into three types: dye lasers, solid lasers and fiber lasers. The development history and the state of the art of them are expatiated. Dye lasers applied in engineering firstly have been washed out because of its big scale, low stability and dependability, and so on. Solid lasers include sum-frequency generation (SFG), stimulated Raman scattering (SRS) and optical parameter amplifier (OPA). SFG lasers are used mostly and developed into macro-micro pulse lasers, continuous single frequency lasers and continuous mode-locked lasers by scientists for different requirements. The commercial SFG lasers with 50 W average power have been produced recently. The fiber sodium guide star lasers as a novel type have been developed rapidly in recent years. Especially, the continuous single frequency sodium guide star lasers based on the Raman fiber amplifier and the second harmonious generation have exceeded 50 W average power.

Key words laser; sodium guide star; dye laser; solid laser; fiber laser; sum frequency

OCIS codes 140.0140; 060.0060; 060.4370; 140.3550

1 引言

激光导引星可以用作自适应光学(AO)系统的人造参考导引星(又称为信标)^[1,2],大幅增加天文望远镜上AO系统的天空覆盖率。在地面上发射一束589 nm(对应钠D₂线)激光,照射高度80~100 km处大气层的钠原子,引起钠原子共振,产生后向散射荧光,就可以获得钠导星^[3]。AO系统用这些激光导引星作为参考光源去探测大气湍流效应,为变形镜提供反馈信号,用于补偿由于湍流引起的成像模糊效应。钠激光导引星与10~20 km处的瑞利激光导引星相比,聚焦非等晕(圆锥效应)更小,并且它们可以探测大气全部范围内的湍流效应。

收稿日期: 2011-01-07; **收到修改稿日期**: 2011-03-08; **网络出版日期**: 2011-06-20

作者简介: 鲁燕华(1981—),男,硕士,助理研究员,主要从事激光二极管抽运固体激光器技术方面的研究。

E-mail: happyeleo@yahoo.com.cn

* **通信联系人**。E-mail: hyf135@gmail.com

钠导星最常用的波长是钠原子的 D_2 谱线,因为它具有最大的散射截面。根据钠原子的超精细结构, D_2 线分离为间隔 1.772 GHz 的 D_2a 线(589.159 nm)和 D_2b 线(589.157 nm)。当大气层温度在 190 K 附近时, D_2a 线和 D_2b 线多普勒展宽宽度均约为 1 GHz,整个 D_2 线展宽宽度约 3 GHz,呈现为“双驼峰”式结构^[4],并且 D_2a 线“驼峰”的吸收截面比 D_2b 线“驼峰”高出近 1 倍。因此,钠导星激光器的中心波长对准 D_2a 线(589.159 nm)时效果最佳,且线宽应小于 3 GHz。另一方面,钠原子的吸收是非线性的^[5],会产生饱和效应,峰值功率密度不可太高,因此在时间特性上不适宜采用低占空比、高能量的脉冲激光器。

由于钠原子具有上述物理特性,钠导星激光器要求的研制难度比瑞利导星激光器要高得多,通常要求其平均功率大于 10 W,光束质量近衍射极限,中心波长精确对准 589.159 nm,且线宽小于 3 GHz(约 3.3 pm),工作体制以连续体制或宏微脉冲体制为佳^[6~8]。因而早期的激光人造信标以瑞利导星为主,但由于瑞利导星存在一些固有的缺点,所以随着激光技术的发展,钠导星已逐渐占据主导地位。按产生方式的不同,钠导星激光器可以分为染料激光器、固体激光器和光纤激光器。

2 染料激光器

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 的染料钠导星激光器^[9~11],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,图 1 为其原理示意图。

图 1 中,抽运源采用波长为 510 nm 的铜蒸气激光器,染料激光器采用链路式功率定标放大结构,整个激光器耗能约 200 kW,激光头(不含电源、制冷机)占地面积约 15 m²。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 级紧凑型染料导星激光器的研制^[12,13]。

1996 年,德国的 Max-Planck 研究所为 Calar Alto 天文台成功开发出 ALFA 染料激光器^[14~16]。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 6 G,最高获得了 4.5 W 的近衍射极限连续单频钠导星激光。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。

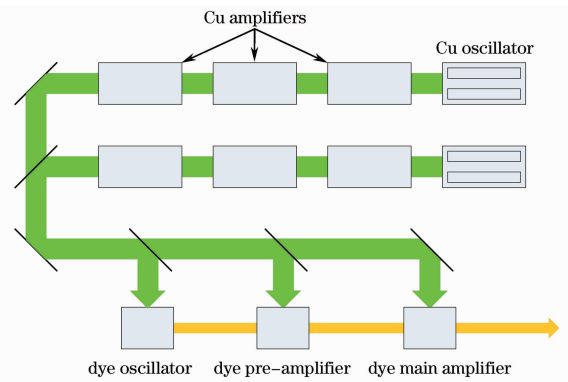


图 1 LLNL 染料钠导星激光器原理示意图
Fig. 1 Schematic of LLNL sodium beacon dye laser

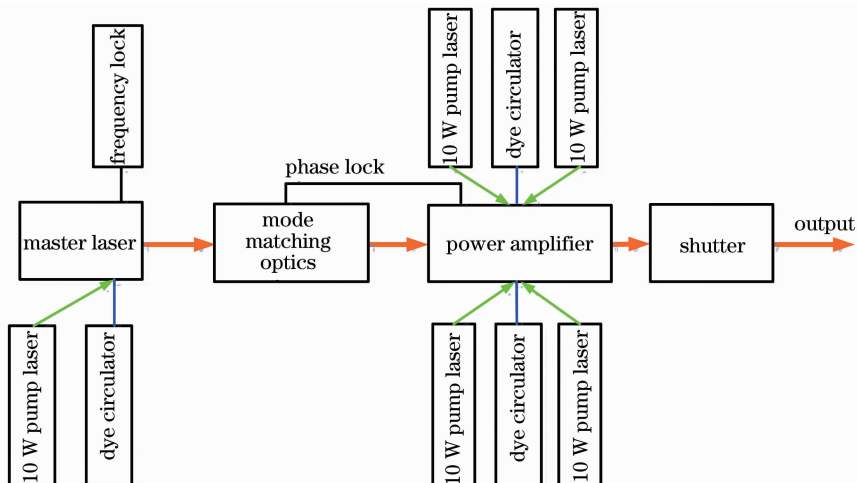


图 2 Parsec 染料激光器光路示意图
Fig. 2 Schematic of Parsec dye laser

2004年,Max-Planck研究所与欧洲南方天文台合作,对ALFA钠导星激光器进行了升级改造^[17~21],用结构紧凑的固体532 nm激光器取代Ar离子激光器,研制成功效率更高、结构更紧凑的Parsec染料钠导星激光器。图2为Parsec染料钠导星激光器原理示意图。该激光器从设计、试验到集成共耗费3年时间,主要由一个主激光器和一个环形谐振腔放大器组成,并采用5个10 W的532 nm商用固体激光器作为抽运源,最高输出20 W的连续单频钠导星激光,光束质量因子 $M^2 < 1.15$,线宽小于10 MHz。由于532 nm更靠近若丹明6G的吸收峰,可以获得更高的转换效率,因此Parsec激光器的光光转换效率高达40%,比ALFA激光器提高了近两倍。图3为集成化的Parsec激光器照片,左边为主振荡器,右边为环形谐振腔从放大器。整个激光器占地面积约为2.2 m²,已经达到了可与固体激光器相比拟的尺寸。



图3 Parsec染料激光器装置照片

Fig. 3 Picture of Parsec dye laser

然而,由于染料激光器安全性差、易退化变质、循环冷却复杂、长期工作不稳定等固有缺陷限制,近年来其在钠导星激光器领域的应用逐渐被固体激光器和光纤激光器取代。

3 固体激光器

目前,在固体激光器增益介质中,尚未找到可以直接发射589 nm或者1178 nm的材料,因此只有将固体激光器与非线性频率变换技术(和频、受激拉曼散射或光参量放大器)相结合才能产生钠导星激光。

3.1 和频激光器

和频钠导星激光器在20世纪90年代初期由麻省理工学院林肯实验室研究人员发明^[22],在美国空军和陆军的联合支持下,他们以闪光灯作为抽运源,分别研制完成0.5 J,10 Hz和24 mJ,840 Hz的两台钠导星激光器。进入20世纪90年代中后期,随着高效紧凑的二极管抽运源技术的快速发展,二极管抽运的固体和频激光器逐渐占据主导地位,目前已广泛应用于世界上最先进的天文台。

和频激光器按产生方式又可分为腔内和频与腔外和频,腔内和频方式可节省激光器体积,而且比较容易实现连续体制工作,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所^[23]、中国科学院理化技术研究所^[24,25]、华北光电技术研究^[26]等单位在该方面也进行了研究。但兼顾功率、光束质量、线宽等指标,腔外和频方式更适用于产生钠导星激光器。2008~2009年,中国工程物理研究院应用电子学研究所^[27,28]与中国科学院理化技术研究所^[29]均报道通过腔外和频方式获得了钠导星激光器。2010年,中国工程物理研究院应用电子学研究所对激光器进行优化改进^[30],获得钠导星激光功率3.09 W,中心波长为589.1591 nm,线宽约1.6 GHz,重复频率800 Hz,装置示意图如图4所示。

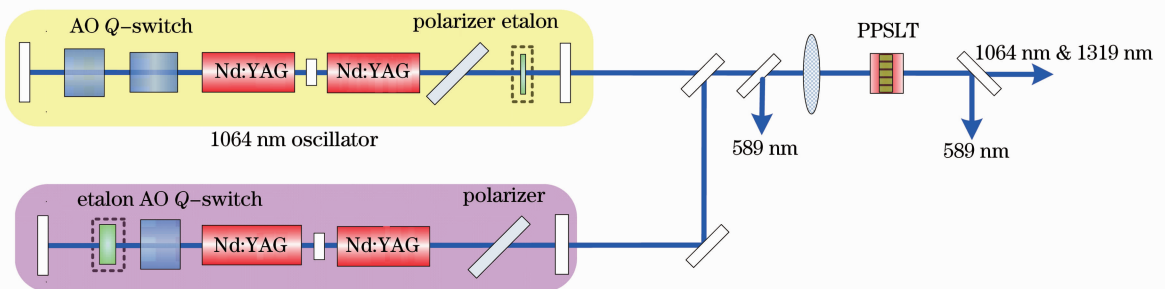


图4 腔外和频钠导星激光器示意图

Fig. 4 Schematic of extra-cavity SFG sodium guide star laser

以下为国际上具有代表意义的3类不同工作体制钠导星激光器。

3.1.1 宏微脉冲体制

1998年,Kibblewhite等^[31]设计并完成了宏微脉冲体制钠导星激光器装置的研制。宏脉冲由二极管驱

动电源设置控制,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天文台交付了一台取名为CSFL的钠导星激光器样机^[32~34]。图5为CSFL的光路示意图。

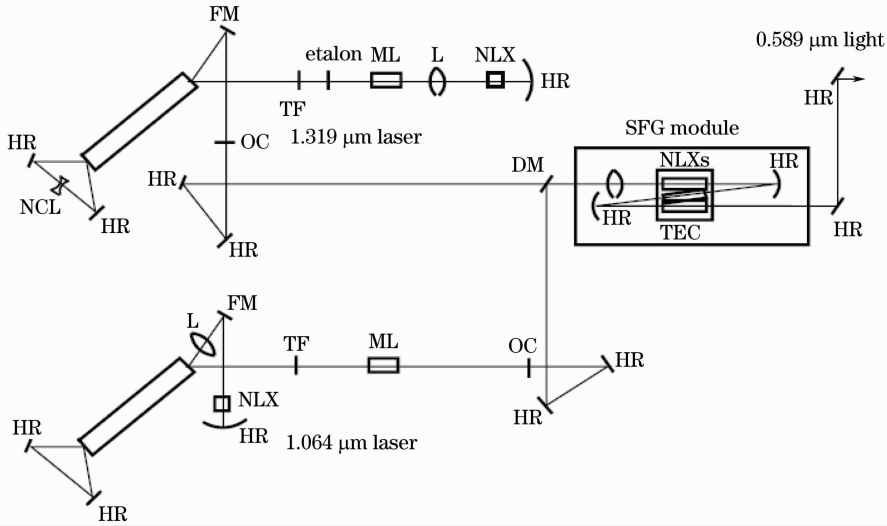


图5 宏微脉冲体制CFSL光路示意图

Fig. 5 Schematic of macro-micro CFSL

图5中,1.064 μm 和 1.319 μm 激光器腔型采用折叠腔结构,并用主动声光锁模器(ML)进行脉冲锁模。在谐振腔内插入滤波片(TF)和标准具的作用是调谐输出中心波长及压窄线宽,同时还插入一块非线性晶体(NLX)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 1.064 μm 和 8 W 的 1.319 μm 时,最高和频输出 7.5 W,线宽约为 0.9 GHz。图6为 589nm 钠导星激光脉宽与线宽测量结果。

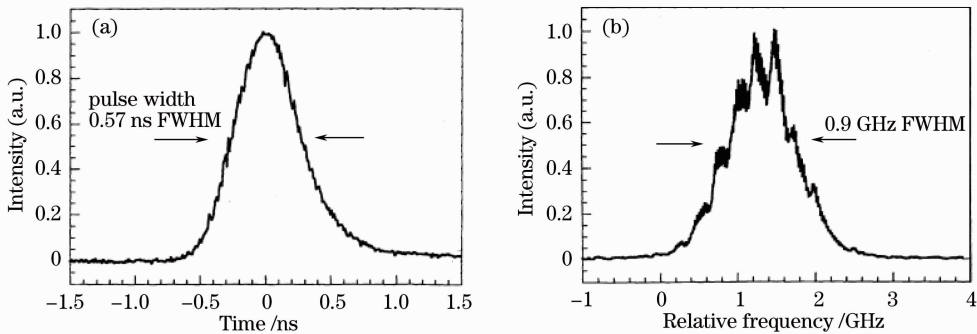


图6 和频 589 nm 钠导星激光脉宽(a)及线宽(b)

Fig. 6 Pulse width (a) and frequency (b) FWHM of 589 nm sum-frequency sodium beacon laser

3.1.2 连续单频体制

美国空军研究实验室(AFRL)早在 20 世纪 80 年代就开始资助麻省理工学院林肯实验室研制钠导星激光器^[22]。2001年,他们开始组建独立的研究团队,并且另辟蹊径,将精密的电学反馈控制技术应用于激光器中,实现了高功率单频激光注入锁定放大及高效率外谐振腔和频。2002年,AFRL成功获得 20 W 连续单频钠导星激光^[35],线宽小于 10 kHz。2004年,他们又将连续单频钠导星激光的功率提升至 50 W^[36~38]。图7为其原理示意图。

如图8中,首先采用 Pound-Drever-Hall(PDH)边带锁频技术^[39]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,功率由 100 mW 级放大至 50 W 以上,每个环形谐振腔采用一套电学反馈控制系统。然后,将放大后的 1064 nm 与 1319 nm 激光同时注入至一个和频腔,使两束基频激光在和频腔内产生共振增强,提高和频转换效率,和频腔内需采用两套电学反馈控制系统。另外,以钠池或者波

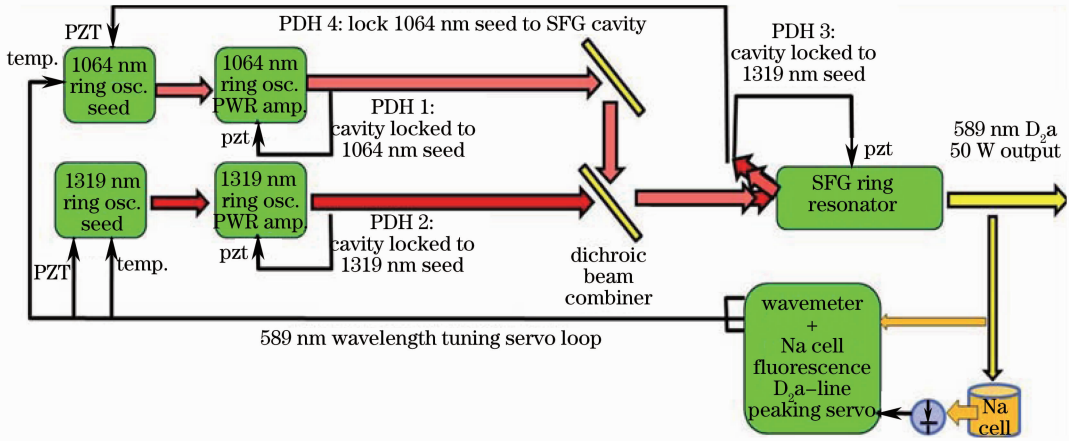


图 7 AFRL 钠导星激光器原理示意图

Fig. 7 Schematic of AFRL sodium beacon laser

长计探测信号为参考,再采用一套电学反馈控制系统将输出激光谱线精确锁定至钠 D_{2a} 线峰值 (589.15902 nm)。整台激光器累计采用了 5 套电学反馈控制系统,将光-机-电结合技术发挥至极点。

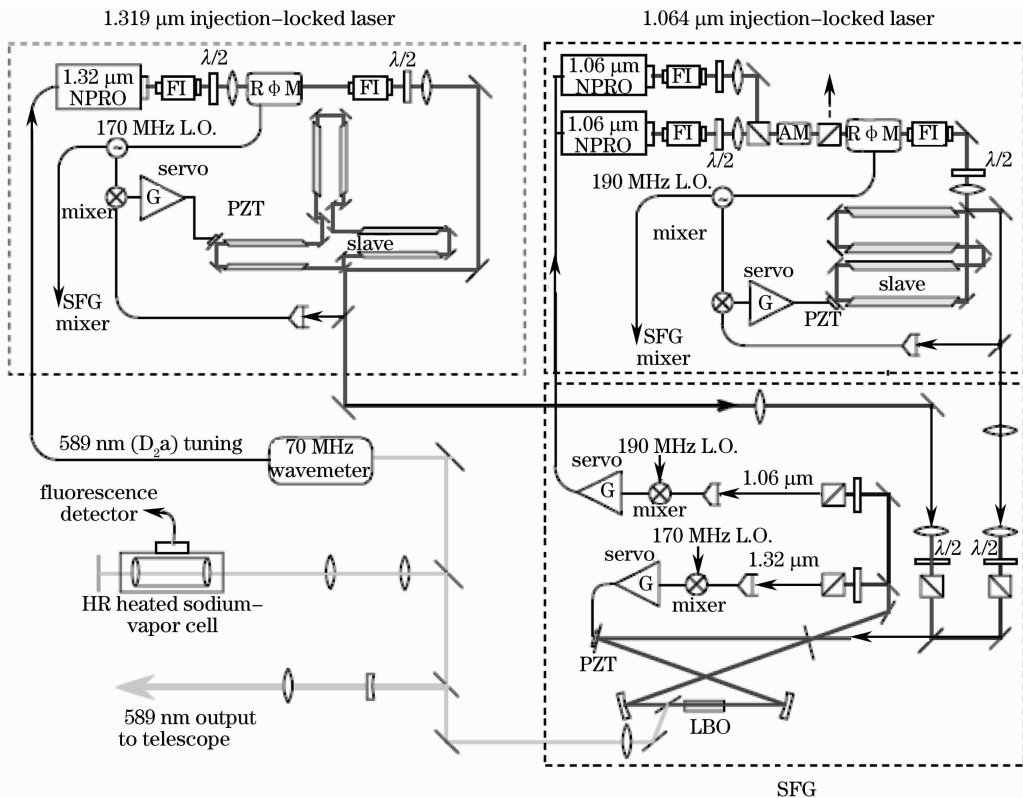


图 8 AFRL 的 50 W 钠导星激光器光路示意图

Fig. 8 Schematic of 50 W sodium beacon laser in AFRL

当注入和频腔的 1064 nm 功率为 56 W, 1319 nm 功率为 44 W 时,和频光功率最高达 59.8 W,和频效率接近 60%。经分光测试、传输整形产生一定损耗,最终由样机输出 51.5 W,光束质量因子 $M^2 < 1.1$,线宽小于 10 kHz。该激光器结构紧凑,激光头部分体积为 $0.6 \text{ m} \times 1.8 \text{ m} \times 0.25 \text{ m}$,目前正应用于“星火光学靶场” 3.5 m 望远镜的 AO 系统。

3.1.3 连续锁模体制

洛克希德·马丁相干技术公司(LMCT)近几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钠导星激光器^[40~43]。图 9

为 LMCT 连续锁模激光器光路示意图。

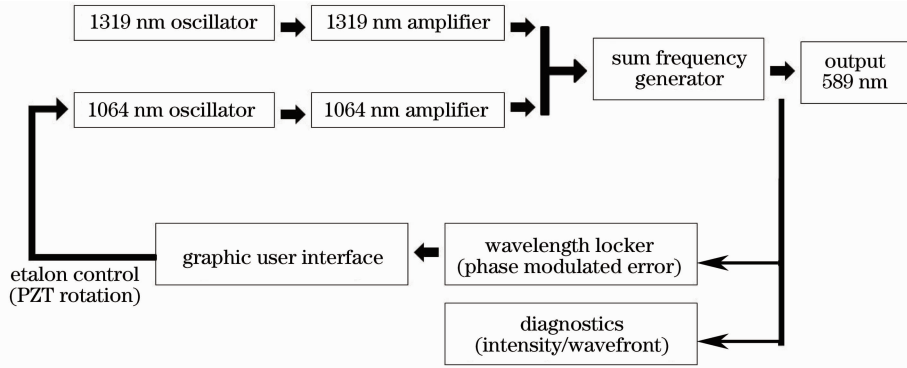


图 9 LMCT 连续锁模激光器光路示意图

Fig. 9 Schematic of LMCT coherent mode-locking laser

如图 9 所示,1064 nm 与 1319 nm 基频激光均采用功率定标放大方式,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,对 1064 nm 与 1319 nm 连续锁模激光高效率放大至大约 100 W。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,并反馈实现输出谱线的闭环控制。

LMCT 最早完成研制的是应用于 Gemini North 天文台的钠导星激光器,在 2004 年完成产品交付^[40],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 天文台的两笔订单,技术指标要求更高,平均功率分别要求达到 20 W、50 W。2010 年 LMCT 完成了这两台激光器的研制^[43],表 1 为其主要技术指标。

表 1 Keck 与 Gemini South 钠导星激光器主要指标

Table 1 Characteristics in Keck and Gemini South sodium beacon laser

589 nm power /W	Keck		Gemini South	
	Normal	Highest	38	58
Beam quality / M^2	<1.2		<1.3	
Power stability	1% (rms)		6% (rms)	
SFG efficiency	30%		29%	
Line width /GHz	1.8		2.1	
Frequency drift /MHz	< ± 19		< ± 150	
Repetition frequency /MHz	77		77	
Pulse width /ns	~0.3		~0.3	

备注:除功率外的所有指标均是在通常状态下测试结果

3.2 拉曼激光器

基于受激拉曼散射(SRS)效应的固体激光器也是获取钠导星激光器的一条技术途径,其实现方法主要分为两类:一是将 Nd 离子激光器输出的 1064 nm 激光拉曼频移至 1178 nm,然后再倍频(SHG)输出 589 nm 激光,如图 10(a)所示;另一种方法是先将 Nd 离子激光器倍频输出 532 nm 激光,然后再拉曼频移至 589 nm,如图 10(b)所示。

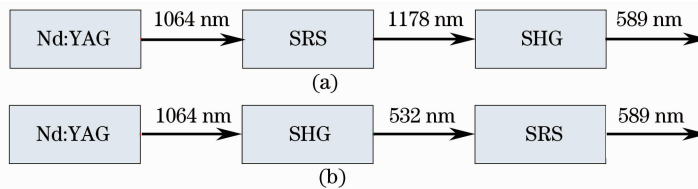


图 10 两种固体拉曼钠导星激光器原理示意图。(a) 先拉曼频移后倍频;(b) 先倍频后拉曼频移

Fig. 10 Block diagram of all-solid-state Raman sodium beacon lasers in two different ways.

(a) SRS+SHG; (b) SHG+SRS

从 20 世纪 70 年代末期开始,科学家们已经通过拉曼固体激光器获得黄光波段的输出^[44],并陆续发明了各种拉曼晶体材料及拉曼激光器,山东大学^[45~47]、深圳大学^[48]、中国科学院福建物质结构研究所等单位也在该领域取得较好的进展。但是由于受激拉曼散射属于三阶非线性效应,其阈值通常要求极高,自由空间的拉曼固体材料有效作用长度通常又较短,因此拉曼固体激光器通常只能运转于短脉冲体制。随着高性能光纤材料及激光器的快速发展,科学家们发现在光纤这种约束的波导空间内可以获得数十米的拉曼作用长度,大大降低拉曼激光器的产生难度,基于光纤材料的拉曼钠导星激光器逐渐占据主导地位。

3.3 光参量放大器

2009 年, Duering 等^[49]报道了一台基于两级光参量放大器(OPA)的固体钠导星激光器,其原理示意图如图 11 所示。在图 11 中,1064 nm 采用 50 W 的 Nd:YVO₄ 被动锁模激光器,重复频率为 1 MHz,经 SHG 转换获得 40 W 的 532 nm 绿光,其中 4 W 的 532 nm 激光与 90 mW 的 970 nm 激光相互作用经第一级 OPA 产生 720 mW 的 1178 nm 种子光。剩余 36 W 的 532 nm 激光再与 1178 nm 种子光相互作用经第二级 OPA 输出大约 7 W 的 1178 nm 激光,最后对 1178 nm 激光进行倍频,获得 5.5 W 的 589 nm 激光输出,线宽约 65 GHz。在 1064 nm 谐振腔内插入标准具,最后将 589 nm 激光线宽窄至 13 GHz,此时对应输出功率 3 W,光束质量因子 $M^2 < 1.2$ 。

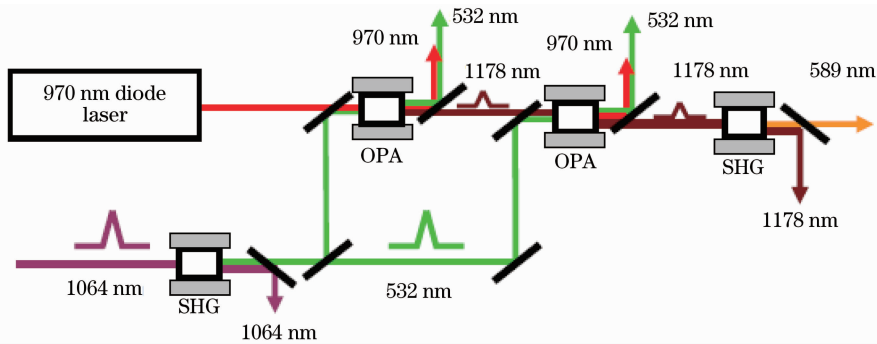


图 11 基于 OPA 的全固体钠导星激光器

Fig. 11 All-solid-state sodium beacon laser based on OPA

尽管该激光器输出线宽较宽,还不能称之为严格意义上的钠导星激光器,但是研究人员宣称,作为系统基本条件之一的 1064 nm 激光器经论证可以放大至 1000 W 以上,为此该方案具备发展 100 W 以上钠导星激光器的潜力。

4 光纤激光器

按介质属性分类,光纤激光器也属于固体激光器范畴,但为了与传统自由空间运转传输的固体激光器进行区别比较,本文单独将其列为一节进行介绍。光纤激光器因为体积小、插头效率高、热管理简单,在钠导星激光器研制领域越来越受到国内外研究人员的关注。由于光纤激光器中尚未发现能直接激射 589 nm 或 1178 nm 增益介质材料,因此同样需结合一种或两种非线性频率变换技术才可获得钠导星激光,以下是两类具有典型特色的光纤钠导星激光器。

4.1 和频激光器

美国的 LLNL 是最早开始钠导星激光器研究的机构之一,20 世纪 90 年代初期就开发了染料钠导星激光器样机。2003 年,他们报道了一种新型的、紧凑小巧的光纤和频钠导星激光器^[50],其装置原理示意图如图 12 所示。

首先用两个连续单频 938 nm 与 1583 nm 激光器作为种子源,然后对其进行相位和幅度调制获得需求的工作体制,再分别通过掺钕光纤放大器(NDFA,两级)与掺铒光纤放大器(EDFA,两级)进行功率定标放大,最后由准相位匹配的周期极化非线性晶体(PPSLT 或 PPKTP)进行和频,产生 589 nm 钠导星激光。经过 4 年的研究^[51~53],2007 年,LLNL 在 PPKTP 晶体上实现了 2.7 W 连续体制 589 nm 激光输出,在 PPSLT 晶体上实现了 3.8 W 准连续体制 589 nm 激光输出,重复频率为 100 kHz,脉宽为 1 μ s。目前,该激

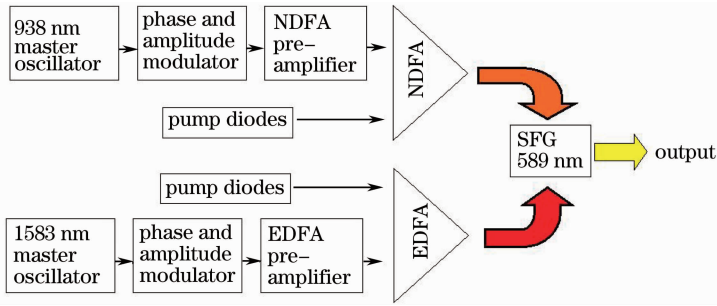


图 12 光纤和频钠导星激光器示意图

Fig. 12 Schematic of fiber sum-frequency sodium beacon laser

光器正应用于 Lick 天文台的 Nickel 望远镜。

LLNL 的研究人员认为,经过对激光器的进一步优化,系统具备获得 5~10 W 的平均功率输出的潜力。然而,该系统的和频效率约 15%,较为低下,倘若要获得更高功率的激光输出,将有必要对和频部分进行大幅度的优化改进。

4.2 拉曼激光器

随着拉曼光纤激光器的出现及快速发展,科学家们发现,通过优化设计可以将普通的 1 μm 波段的光纤激光器高效地拉曼频移(一次或多次)至 1178 nm,然后对 1178 nm 进行直接倍频即可输出 589 nm 激光。2005 至 2006 年,Sharma 等^[54~56]直接向 IPG 等公司订购连续的 1178 nm 拉曼光纤激光器,然后利用准相位匹配的周期极化非线性晶体开展了此方面的研究。但上述激光器功率均较低、线宽也不适合钠导星激光器的要求。

2006 年,德国欧洲南方天文台(ESO)的 Taylor 等^[57~60]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。2009 年,他们与德国 Toptica 公司、加拿大 MPB 公司合作,取得了一系列重大进展^[57~60],通过单个拉曼光纤放大器倍频最高获得平均功率 28 W 的连续单频钠导星激光,光束质量近衍射极限,线宽小于 2 MHz,倍频效率高达 80%,图 13 为其原理示意图。

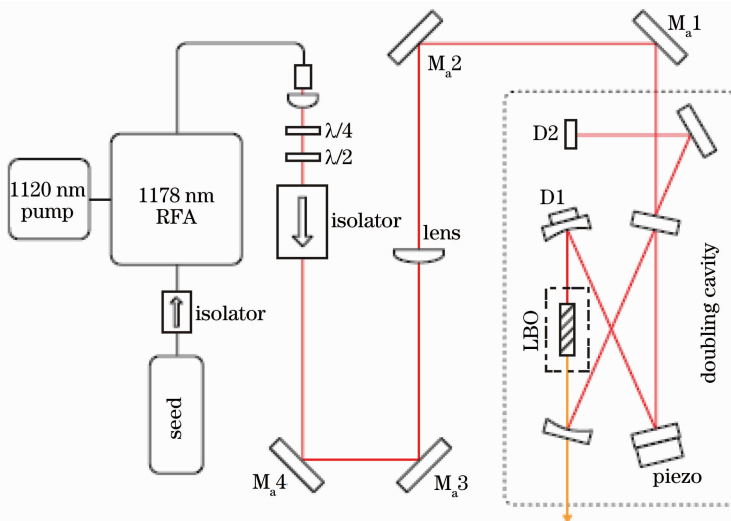


图 13 基于拉曼光纤放大器倍频的钠导星激光器

Fig. 13 Sodium beacon laser based on Raman fiber amplifier and sum frequency

与早期的研究相比,Yan 等^[61]作了两个重要的改进: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。

ESO 的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,再未见更高功率的报道,其可能原因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,图 14 为其示意图^[62]。

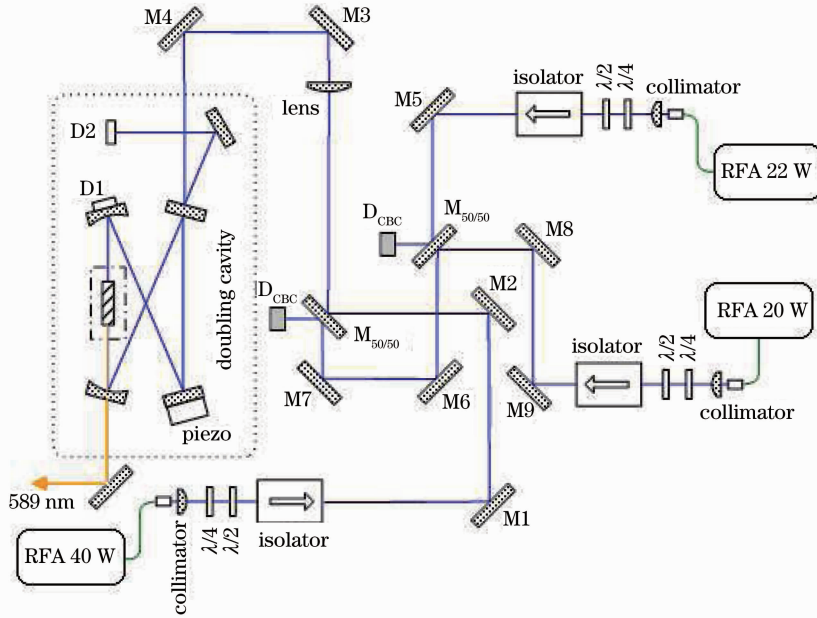


图 14 基于拉曼光纤放大器相干合成的 50 W 钠导星激光器

Fig. 14 50 W sodium beacon laser based on Raman fiber amplifier and interference combination

ESO 的研究成果在世界范围内引起了关注^[63],目前其专利成果已转移至德国 Toptica 公司。2010 年 6 月,该公司成功签下一笔价值 650 万美元的订单。另外,美国 AFRL 在原有固体和频钠导星激光器基础上,也正筹划发展拉曼光纤放大器倍频技术^[64]。

5 结 论

钠导星激光器技术是 AO 系统中一项极具意义的关键技术。从 20 世纪 90 年代初至今约 20 年的时间内,钠导星激光器经历了染料激光器、固体激光器、光纤激光器 3 个阶段,并朝着更高亮度、更高可靠性、更低能耗、更小体积的方向持续发展。目前,基于固体激光器和频以及拉曼光纤放大器倍频的两种产生方式技术最为成熟、发展水平最高,国外商用产品输出功率分别达到了 50 W 与 20 W,并逐渐应用于世界各地的大型天文台。我国的钠导星激光器技术起步于“十一五”初,并经过几年的发展在固体激光器与光纤激光器领域均取得了一系列的技术突破。在“十二五”天文 AO 系统的需求牵引下,未来几年我国在该领域的研究将会迅猛发展,逐渐缩小与国际领先水平之间的差距。

参 考 文 献

- 1 Erez N. Ribak. Laser guide star projection for large telescopes[C]. *SPIE*, 2006, **6272**: 62724E
- 2 Richard Joyce, Corinne Boyer, Larry Daggert *et al.*. The laser guide star facility for the thirty meter telescope[C]. *SPIE*, 2006, **6272**: 62721H
- 3 P. D. Hillman, J. D. Drummord, C. A. Denman *et al.*. Simple model, including recoil, for the brightness of sodium star created from CW single frequency fasors and comparison to measurements[C]. *SPIE*, 2008, **7015**: 7015OL
- 4 R. Holzlöhner, S. M. Rochester, D. Bonaccini *et al.*. Optimization of cw sodium guide star efficiency[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2010, **510**(A20):1~14
- 5 Byron M. Welsh, Chester S. Gardner. Effects of nonlinear resonant absorption on sodium laser guide star[C]. *SPIE*, 1989, **1114**: 203~214
- 6 Peter W. Milonni, John M. Telle, Paul D. Hillman. Photon return from a mesospheric sodium guidestar versus excitation laser characteristics[C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics*, 1998, 452
- 7 John M. Telle, Peter W. Milonni, Paul D. Hillman. Comparison of pump-laser characteristics for producing a mesospheric sodium guidestar for adaptive optical systems on large aperture telescopes[C]. *SPIE*, 1998, **3264**: 37~42

- 8 Edward Kibblewhite. Calculation of returns from sodium beacons for different types of laser [C]. *SPIE*, 2008, **7015**: 70150M
- 9 Herbert Friedman, Kenneth Avicola, Horst Bissinger *et al.*. Laser guide star measurements at Lawrence Livermore National Laboratory[C]. *SPIE*, 1993, **1920**: 52~60
- 10 Herbert W. Friedman. Laser system design for the generation of a sodium-layer laser guide star[C]. *SPIE*, 1993, **1859**: 251~262
- 11 Kenneth Avicola, James Brasc, James Morris *et al.*. Sodium laser guide star system at Lawrence Livermore National Laboratory: system description and experimental results[C]. *SPIE*, 1994, **2201**: 326~341
- 12 C. E. Max, D. T. Gavel, S. S. Olivier *et al.*. Issues in the design and optimization of adaptive optics and guide stars for the Keck Telescopes[C]. *SPIE*, 1994, **2201**: 189~200
- 13 Herbert Friedman, Gaylen Erbert, Thomas Kuklo *et al.*. Sodium beacon laser system for the lick observatory[C]. *SPIE*, 1995, **2534**: 150~160
- 14 Andreas Quirrenbach, Wolfgang Hackenberg, Hans-Christoph Holstenberg *et al.*. The sodium laser guide star system of ALFA[C]. *SPIE*, 1997, **3126**: 35~43
- 15 S. Rabien, R. Davies, W. Hackenberg *et al.*. Beam quality and polarization analysis of the ALFA-Laser at Calar Alto and influence on brightness and size of the laser guide star[C]. *SPIE*, 1999, **3782**: 368~377
- 16 D. J. Butler, R. I. Davies, H. Fewes *et al.*. Calar Alto ALFA and the sodium laser guide star in astronomy[C]. *SPIE*, 1999, **3762**: 184~193
- 17 S. Rabien, R. I. Davies, T. Ott *et al.*. PARSEC, the laser for the VLT[C]. *SPIE*, 2002, **4494**: 325~335
- 18 S. Rabien, R. I. Davies, T. Ott *et al.*. Design of PARSEC, the VLT laser[C]. *SPIE*, 2002, **4839**: 393~401
- 19 Richard Davies, Thomas Ott, Jianlang Li *et al.*. Operational Issues for PARSEC, the VLT Laser[C]. *SPIE*, 2003, **4839**: 402~411
- 20 D. Bonaccini, E. Allaert, C. Araujo *et al.*. The VLT laser guide star facility[C]. *SPIE*, 2003, **4839**: 381~392
- 21 S. Rabien, R. I. Davies, T. Ott *et al.*. Test performance of the PARSEC laser system[C]. *SPIE*, 2004, **5490**: 981~988
- 22 Thomas H. Jeys. Development of a mesospheric sodium laser beacon for atmospheric adaptive optics[J]. *The Lincoln Laboratory Journal*, 1991, **4**(2): 133~150
- 23 Lü Yanfei, Tan Huiming, Qian Longsheng. Laser diode array pumped Nd:YAG dual wavelength laser with intracavity sum-frequency mixing at 589 nm[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4): 438~442
吕彦飞, 檀慧明, 钱龙生. 激光二极管阵列抽运 Nd:YAG 腔内双波长运转 589 nm 和频激光器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(4): 438~442
- 24 Geng Aicong, Bo Yong, Bi Yong *et al.*. A 3 W continuous-wave 589 nm yellow laser based on the intracavity sum frequency generation in a V-shaped cavity[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(10): 5227~5230
耿爱丛, 薄勇, 毕勇等. V型腔腔内和频产生 3 W 连续波 589 nm 黄光激光器[J]. *物理学报*, 2006, **55**(10): 5227~5230
- 25 Bo Yong, Geng Aicong, Lu Yuanfu *et al.*. A 4.8-W $M^2 = 4.6$ continuous-wave intracavity sum-frequency diode-pumped solid-state yellow laser[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2006, **23**(6): 1494~1497
- 26 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
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
- 27 Liu Dong, Lu Yanhua, Ma Yi *et al.*. Diode pumped all-solid-state pulsed 589 nm laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(10): 1625~1628
刘东, 鲁燕华, 马毅等. 二极管抽运全固态 589 nm 脉冲激光器[J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(10): 1625~1628
- 28 Lu Yanhua, Liu Dong, Zhang Lei *et al.*. All-solid-state narrow linewidth sodium guidestar laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1848~1851
鲁燕华, 刘东, 张雷等. 全固态窄线宽钠导星激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1848~1851
- 29 Yuanfu Lu, Shiyong Xie, Yong Bo *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]. *Opt. Comm.*, 2009, **282**(17): 3573~3576
- 30 Lu Yanhua, Zhang Lei, Ma Yi *et al.*. Sodium guidestar laser based on high-efficiency PPSLT quasi-phase-matched sum frequency generation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2306~2310
鲁燕华, 张雷, 马毅等. 高效率 PPSLT 准相位匹配和频钠导星激光器[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2306~2310
- 31 Edward J. Kibblewhite, Fang Shi. Design and field tests of an 8 watt sum-frequency laser for adaptive optics[C]. *SPIE*,

- 1998, **3353**: 300~309
- 32 Viswa Velur, Edward Kibblewhite, Richard Dekany *et al.*. Implementation of the Chicago sum frequency laser at Palomar laser guide star test bed[C]. *SPIE*, 2004, **5490**: 1033~1040
- 33 R. Dekany. Palomar Laser Guide Star Status[C]. UCLA Lake Arrowhead Conference, 2004. 3~11
- 34 Richard Dekany, Viswa Velur, Hal Petrie *et al.*. Laser guide star adaptive optics on the 5.1 meter telescope at Palomar observatory[J]. Amos Technical Conference Proceedings, 2005.
- 35 Craig A. Denman, Paul D. Hillman, Gerald T. Moore *et al.*. 20 W CW 589 nm sodium beacon excitation source for adaptive optical telescope applications[J]. *Optical Materials*, 2004, **26**(4): 507~513
- 36 Craig A. Denman, Paul D. Hillman, Gerald T. Moore *et al.*. 50 W CW single frequency 589 nm FASOR[C]. OSA Trends in Optics and Photonics, Advanced Solid-State Photonics, 2005, **85**: 698~702
- 37 Craig A. Denman, Paul D. Hillman, Gerald T. Moore *et al.*. Realization of a 50 watt facility-class sodium guidestar pump laser[C]. *SPIE*, 2005, **5707**: 46~49
- 38 Craig A. Denman, Paul D. Hillman, Gerald T. Moore *et al.*. The starfire optical range sodium guidestar FASOR[C]. Proceedings of the twenty-first annual solid state and diode technology review, 2008. 784~827
- 39 R. W. P. Drever, J. L. Hall, F. V. Kowalski. Laser phaser and frequency stabilization using an optical resonator[J]. *Appl. Phys. B*, 1983, **31**(2): 97~105
- 40 Allen J. Tracy, Allen K. Hankla, Camilo Lopez *et al.*. High-power solid-state sodium beacon laser guidestar for the Gemini North Observatory[C]. *SPIE*, 2004, **5490**: 998~1009
- 41 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
- 42 Ian Lee, Munib Jalali, Neil Vanasse *et al.*. 20 W and 50 W guidestar laser system update for the Keck I and Gemini South telescopes[C]. *SPIE*, 2008, **7015**: 70150N
- 43 Nicholas Sawruk, Ian Lee, Munib Jalali *et al.*. System overview of 30 W and 55 W sodium guide star laser systems[C]. *SPIE*, 2010, **7736**: 77361Y
- 44 Wang Zhichao, Du Chenlin, Ruan Shuangchen. Research progress of all-solid-state yellow lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(1): 29~36
王志超, 杜晨林, 阮双琛. 全固态黄光激光器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(1): 29~36
- 45 Liu Bo, Zhang Xingyu, Wang Qingpu *et al.*. Diode-pumped intracavity frequency-doubled Nd:YVO₄ self-Raman yellow laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(10): 1777~1779
刘波, 张行愚, 王青圃等. LD抽运 Nd:YVO₄自喇曼倍频黄光激光器[J]. *光子学报*, 2007, **36**(10): 1777~1779
- 46 Wang Zhengping, Hu Dawei, Zhang Huaijin *et al.*. External resonator BaWO₄ crystal Raman laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(4): 683~686
王正平, 胡大伟, 张怀金等. 外腔式 BaWO₄ 拉曼激光器[J]. *红外与激光工程*, 2009, **38**(4): 683~686
- 47 Hu Dawei, Wang Zhengping, Zhang Huaijin *et al.*. External resonator YVO₄ crystal Raman laser[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(5): 975~979
胡大伟, 王正平, 张怀金等. 外腔型 YVO₄ 拉曼激光器[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(5): 975~979
- 48 Du Chenlin, Wang Zhichao, Ruan Shuangchen. LD-pumped Nd:YVO₄ self Raman laser at 1176 nm[J]. *J. Shenzhen University Science and Engineering*, 2008, **25**(4): 418~421
杜晨林, 王志超, 阮双琛. LD泵浦 Nd:YVO₄自拉曼 1176 nm 激光器[J]. *深圳大学学报理工版*, 2008, **25**(4): 418~421
- 49 Malte Duering, Vesselin Kolev, B. L. Davies. Generation of tuneable 589 nm radiation as a Na guide star source using an optical parametric amplifier[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(2): 437~446
- 50 D. M. Pennington, R. Beach, J. Dawson *et al.*. Compact fiber laser approach to generating 589 nm laser guide stars[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, 2003. 730
- 51 D. M. Pennington, J. W. Dawson, A. Drobshoff *et al.*. Compact fiber laser for 589 nm laser guide stars generation[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, 2005
- 52 Jay W. Davson, Alex D. Drobshoff, Raymond J. Beach *et al.*. Multi-watt 589 nm fiber laser source[C]. *SPIE*, 2006, **6102**: 61021F
- 53 D. M. Pennington, J. W. Dawson, R. J. Beach *et al.*. Compact fiber laser for 589 nm laser guide star generation[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, 2005, 532
- 54 Sharma, I. 52 W frequency-doubled fiber based continuous wave orange laser radiation at 590 nm[J]. *Rev. Laser Eng.*, 2005, **33**(2): 130~131

- 55 Georgiev, V. P. Gapontser, A. G. Dronv *et al.*. Watts-level frequency doubling of a narrow line linearly polarized Raman fiber laser to 589 nm[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(18): 6772~6776
- 56 Luke R. Taylor, Yan Feng, D. B. Calia *et al.*. Multi-watt 589 nm Na D₂-line generation via frequency doubling of a Raman fibre amplifier; a source for LGS-assisted AO[J]. *SPIE*, 2006, **6272**: 627249
- 57 Luke Taylor, Yan Feng, D. B. Calia. High power narrowband 589 nm frequency doubled fibre laser source[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(17): 14687~14693
- 58 Yan Feng, Luke R. Taylor, D. B. Calia. 25 W Raman-fiber-amplifier-based 589 nm laser for laser guide star[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(21): 19021~19026
- 59 Y. Feng, L. R. Taylor, D. B. Calia *et al.*. 39 W narrow linewidth Raman fiber amplifier with frequency doubling to 26.5 W at 589 nm[R]. Presented at Frontiers in Optics, San Diego, 2009, PDPA4
- 60 D. B. Calia, Yan Feng, W. Hackenberg *et al.*. Laser development for sodium laser guide stars at ESO[J]. *Telescopes and Instrumentation*, 2010, **139**: 12~19
- 61 Yan Feng, Luke R. Taylor, D. B. Calia. 150 W highly-efficient Raman fiber laser[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(26): 23678~23683
- 62 Luke R. Taylor, Yan Feng, D. B. Calia. 50 W CW visible laser source at 589 nm obtained via frequency doubling of three coherently combined narrow-band Raman fibre amplifiers[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(8): 8540~8555
- 63 Wallace R. Clements, Wilhelm Kaenders. High-power guidestar lasers are ready for next-generaion AO astronomy[J]. *Laser Focus World*. 2010, **46**(6): 27~33
- 64 T. Justin Bronder, Harold Miller, Jonathan Stohs *et al.*. AFRL advanced electric lasers branch: construction and upgrade of a 50-watt facility-class sodium guidestar pump laser[C]. Proceedings of the advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2009: E59