

水汽差分吸收激光雷达发射机 935 nm 高功率光参量振荡器

洪光烈¹, 梁新栋², 肖春雷¹, 孔伟¹, 舒嵘¹

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 中国科学院空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 水汽分子的 3ν 强振动吸收带位于 935 nm 附近, 差分吸收激光雷达在这个波段具有高探测灵敏度。不幸这一波段位于 Ti:Sapphire 激光器增益带宽的边缘和 Cr:Alexandrite 激光器增益带宽之外, 染料激光器有较高的自发荧光成分而使其光谱纯度不高, 光参量频率转换器可以用作该波段水汽差分吸收激光雷达的发射机。动态稳定的环形谐振腔中有一对走离补偿的、 70.7° 切角的 KTP 非线性晶体。它由种子注入单纵模 Nd:YAG 激光器的二倍频 532 nm 光脉冲泵浦, 脉冲重复频率 10 Hz。通过 935 nm 分布反馈半导体激光器种子注入和“ramp-hold-fire”方法, 主动锁定光参量振荡器谐振腔的腔长。发射机平均输出功率达到 4.5 W, 脉冲长度 6 ns, 光(532 nm)-光(935 nm)转换效率大于 17%, 光频的短程和长程频率稳定性 30 MHz(RMS)。光束质量 M^2 大约 7.8, 光谱纯度可以达到 99.9%。它将是空间探测大气水汽廓线遥感器的候选光源之一。

关键词: 差分吸收激光雷达; 发射机; 光参量频率转换器; KTP 晶体; 腔长稳定

中图分类号: O437.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1230007

High-power optical parametric oscillator at 935 nm for water-vapor differential absorption lidar transmitter

Hong Guanglie¹, Liang Xindong², Xiao Chunlei¹, Kong Wei¹, Shu Rong¹

(1. Key Laboratory of Space Active Opto-Electronics Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: 3ν vibrational absorption band of water vapor lies in the 935 nm spectral region. Differential absorption lidar has much higher measurement sensitivity in this region. Unfortunately, this spectral region is already at the edge of the gain bandwidth of Ti:Sapphire lasers and outside gain bandwidth of Cr:Alexandrite laser. Spontaneous fluorescence radiation of tunable dye laser is higher, which makes their spectral purity declinable. So optical parametric frequency convertor can be used as the transmitter for water-vapor differential absorption lidar(DIAL). The dynamically-stable ring resonator contains dual 70.7° cut, walk-off-compensated KTP nonlinear crystals, which is pumped with an injection seeded, frequency-doubled 532 nm Nd:YAG laser with repetition frequency of 10 Hz pulse. The resonator length of OPO

收稿日期: 2018-07-05; 修订日期: 2018-08-03

基金项目: 国家自然科学基金(61775227)

作者简介: 洪光烈(1966-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士生, 主要从事激光雷达与遥感器方面的研究。Email: glhong@mail.sitp.ac.cn

导师简介: 舒嵘(1971-), 男, 研究员, 博士, 主要从事航空与空间遥感器方面的研究。Email: shurong@mail.sitp.ac.cn

was actively locked by injecting the distributed feedback semiconductor lasers of 935 nm and using "ramp-hold-fire" technique. The average output power of the transmitter was 4.5 W, the pulse length was 6 ns, the conversion efficiency of light (532 nm) to light (935 nm) was more than 17%, and the short-range and long-range frequency stability of light frequency was 30 MHz(RMS). The beam quality M^2 was about 7.8, and the spectral purity can reach 99.9%. It will be one of the candidate light sources for remote sensing of atmospheric water vapor profiles.

Key words: differential absorption lidar; transmitter; optical parametric frequency convertor; KTP crystal; length-stabilized resonator

0 引言

差分吸收激光雷达大气水汽的廓线测量,需要高峰值功率和高平均功率、ns 时间尺度的、波长与大气水汽的吸收光谱特征相对应的相干光源,而通常这些波长与容易获得的激光器的发光谱线不一致。水汽 3ν 振动谱 935 nm 波段脉冲相干光源应用于机载水汽差分吸收激光雷达,在对流层顶亦是敏感的,特别是在非常干燥的平流层底,也推荐工作在 935 nm 波段。在这个波段,水汽吸收线的强度高于 4ν 振动带 720 nm 或 830 nm 波段。以前机载工作的 4ν 振动带差分吸收激光雷达 (Differential Absorption Lidar, DIAL) 系统 (NASA, CNRS, DLR) 使用可调谐染料激光器^[1], 翠宝石 (alexandrite) 或钛宝石 (Ti:sapphire) 激光器^[2-3]; 不幸 935 nm 这一波段位于钛宝石激光器增益带宽的边缘以及翠宝石的可调谐范围之外,染料 (dye) 激光器的残存荧光成分较高而使得光谱不纯,所以光参量振荡器 (Optical Parametric Oscillator, OPO) 成为可能的选项^[4]。

OPO 的潜力在 1965 年第一次被发现之后很快被广泛认识,几年之后即用于激光雷达,然而从科学研究的课题到实用的器件(如激光雷达)依然经历了一个漫长的过程,早期 OPO 因为其不可靠性以及空间性能(横模)和光谱性能(纵模)不够好而臭名昭著;在最近的二十年当中,新颖的、低吸收、高光学损伤阈值非线性晶体、高功率的泵浦固态激光器以及光学薄膜等方面取得了重要的进展,从而把 OPO 变成有吸引力的可调谐相干光源。

国际上知名的激光器制造商,如美国的 Continuum 公司和 Spectra Physics 公司、德国 Innolas 公司以及立陶宛 EKSPLA 公司,可以提供成熟的商

业化 OPO 产品,这些产品都可以用 ns 级 Nd:YAG 脉冲激光器来泵浦,而且这些商品化 OPO 输出的光谱调谐范围都比较宽,不过,它们都不是单纵模、窄线宽和光频稳定的,所以还不能直接担当像水汽这种成分的差分吸收激光雷达的光源。

935 nm 差分吸收激光雷达已经成功地应用于大气边界层水汽通量的研究,这一水汽差分吸收激光雷达在 1999~2006 年间,定期在欧洲、北非、美国和澳大利亚的各个科学任务之间飞行^[5-6]。DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) 水汽差分吸收激光雷达的成功运行,推动了欧洲空间局 ESA 立项发展空间水汽差分吸收激光雷达,从地球表面到平流层底高垂直分辨率和高精度测量水汽^[7]。在新的背景下,最先进的,机载多波长水汽差分吸收激光雷达 WALES (Water Vapour Lidar Experiment in Space) 建立起来,作为空间 WALES 任务的机载模拟器^[8]。空间 WALES 的平均功率将比它的前辈系统高 7.5 倍,同时用更大的接收望远镜 (1.7 倍面积增加),在探测器性能方面也有很大的提高。针对水汽探测能力,WALES 特别增加了泵浦激光器 1 064 nm 基波和 532 nm 二次谐波的偏振正交探测通道,以及高光谱分辨率通道,用高光谱分辨率激光雷达 (High Spectral Resolution Lidar, HSRL) 去反演气溶胶的消光系数^[9]。

发展 935 nm 光参量变频器的目的在于,通过不断完善该差分吸收激光雷达系统,首先使之在地基情况下能试验运行,昼夜探测自地面到 3 km 高度的大气水汽垂直廓线,服务于中小尺度分辨率大气边界层研究,继而安装在飞机上,垂直向下探测,期望能够探测 12~5 km 高度之间的大气水汽垂直廓线,为全球气候变化的研究(对流层顶-平流层底水汽交换)提供基础数据;条件成熟之后,更进一步地将差

分吸收激光雷达最终安装在太阳同步轨道卫星上,随着卫星的绕飞,获得不同地区的垂直大气水汽柱浓度的分布情况,服务于数值天气预报^[10]。

1 差分吸收水汽激光雷达 935 nm OPO 发射机

典型 ns 级 OPO 结构在最佳相位匹配时从噪声水平开始有效地转换泵浦辐射为信号光辐射和空闲光辐射的增益大约为 2,但这是远远不够的。因此在晶体附近建立光学谐振腔提供光反馈是必要的。一旦泵浦能量增加到某个阈值时,增益可以补偿谐振腔的损耗,系统开始振荡。OPO 的典型增益带宽在 0.3 nm 量级,信号光带宽和空闲光带宽具有相同的量级。0.3 nm 的增益带宽对于差分吸收激光雷达的应用来说通常是太宽了,它需要带宽近乎于时间宽度的傅里叶变换限。通过引入频率选择元件进入谐振腔以减小 OPO 的带宽把 OPO 的带宽降低几个数量级,这项技术证明是非常有效的,在航空应用中种子注入是可靠的技术。这一技术要求从外部将低功率窄线宽种子光辐射注入到 OPO 腔;成功的注入种子,还要求泵浦激光也必须工作在单纵模状态下。光参量振荡器信号光辐射的其他纵模从噪声开始成长,而与种子光频率对应的纵模从毫瓦开始成长,种子的注入抑制了其他纵模的振荡,因此光参量振荡器可以实现单纵模输出。

水汽差分吸收激光雷达系统发展了基于种子注入 KTP(potassium titanyl phosphate)光参量振荡器发射机,由单纵模 Nd:YAG 激光器的二倍频泵浦,脉冲重复频率 10 Hz,最优化工作参数在 930~940 nm 区域,平均输出功率 4.5 W。至于 OPO,532 nm 最大泵浦能量 290 mJ,搭建了四个平面镜的环形谐振腔,两个 KTP 晶体切割成 II-型相位匹配,仅为信号波的单谐振。

采用分布反馈式(DFB)半导体激光器(LD-0935-0030-DFB-1/TOPTICA)作为种子注入到 OPO 中,DFB(distributed feedback)激光器的波长可由二极管的注入电流和温度控制^[10],大约为 0.068 nm/K 和 0.01 nm/mA。激光雷达地基系统的 DFB 半导体激光器曾经采用电流-温度控制器被动稳频,采用被动稳频在实验室环境温度(20 ℃)下,DFB 激光器的频

率漂移在 24 h 内为 ±200 MHz,短时间的跳频也有 ±40 MHz;说明主动稳频是迫不得已。直流电流源的输出电流可受外部输入电压调节,电流-温度控制器 DCC110/DTC110 前面板留有一个模拟电压输入 BNC 头,外部电压可由此 BNC 输入电流-温度控制器,调节注入到 DFB 激光器的电流。外部调节电压变化 1 V,对应的注入电流变化 100 mA。利用电流-温度控制器的此功能设计了基于闭环控制的种子激光器波长稳定方法,图 1 为半导体激光器种子波长控制的示意图。图 2 为种子激光(935.52 nm)稳频结果,图中红色曲线为温度变化曲线。

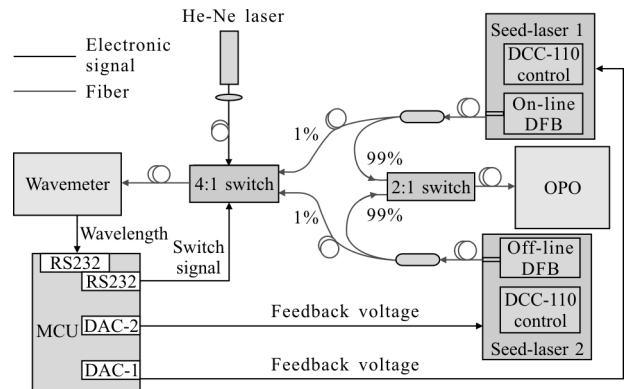


图 1 种子激光器主动稳频系统原理框图

Fig.1 Schematic diagram of active frequency stabilization system for seed-laser

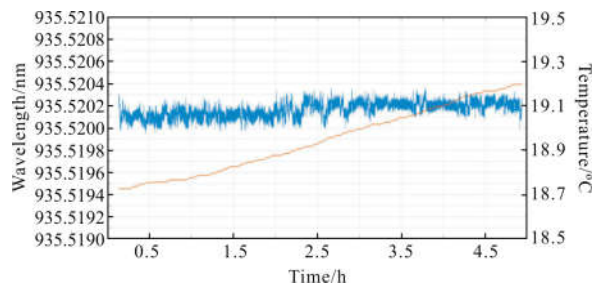


图 2 种子激光(935.52 nm)稳频结果

Fig.2 Seed-laser frequency stabilization result (935.52 nm)

以波长稳定度很高的 He-Ne 激光器的波长 632.991 2 nm 为标准波长,以它作为波长计的波长检测的标定基准。用光纤耦合器将探测波长 on-line、参考波长 off-line 半导体连续激光分成两束,其中 99% 的功率作为种子光注入到 OPO 谐振腔中,剩余 1% 的功率输入到一个四选一纤维光开关 (FSW×4-SMA),同时也将 He-Ne 激光器的光束通过一个单

模光纤也输入到四选一光开关。四选一光开关的输出端通过单模光纤接到高精度波长计 (WS/6-200, High Finesse/Ångstrom), 单片机 MCU(micro controller unit)通过 RS232 串口发送光开关切换指令, 光开关以 10 Hz 的频率在三个通道中来回切换, 此时三个波长将依次被波长计测量, 被测波长的数据通过 RS232 串口传输到单片机, 单片机 MCU 将波长测量的数据整理分类且分别运算激光器 1 波长真值与水汽的特征光谱吸收线 λ_{on} 之间、激光器 2 波长的真值与发射机既定的参考波长 λ_{off} 之间的波长差, 该差值作为 PID(比例-积分-微分)伺服控制系统的误差信号。调整 PID(比例-积分-微分)的参数, 单片机 MCU 通过 DAC(数模转换器)生成一个 P 倍数反馈电压值, 加给 DCC110 直流电流源, I 参数和 D 参数数值用来更稳定、更平滑反馈半导体激光器的电流, 进而控制半导体激光器的波长。种子激光稳定系统的性能取决于波长计的精度和 He-Ne 基准激光器波长的稳定性。下一步将精度更高的 WS/7-波长计代替 WS/6-200 波长计。

1.1 泵浦激光器

以 Continuum SI-2000 光纤激光器作为种子源 (图 3 左侧虚线框内的 1 064 nm seed source 模块), 将其输出的 1 064 nm 窄线宽连续波激光注入到脉冲的 Continuum Surelite™ EX 激光器中, 以获得单纵模、高能量的、稳定的 1 064 nm 激光脉冲, 再经由一个二倍频器转换为 532 nm 激光脉冲, 能量转换效率可达 50%^[10]。泵浦激光器的原理框图如图 3 左侧虚线框部分所示。

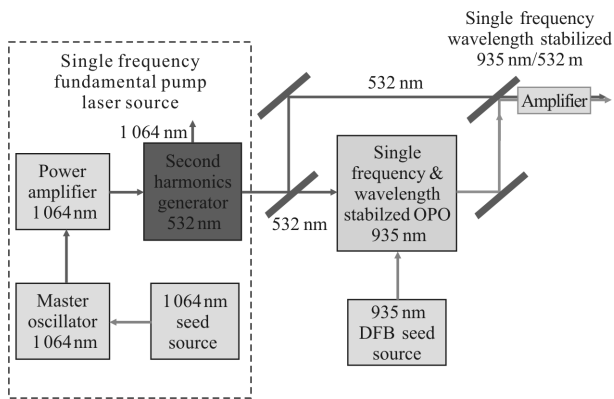


图 3 差分吸收水汽激光雷达发射机框图

Fig.3 Block diagram of differential absorption water vapor lidar transmitter

1.2 光参量振荡器与光参量放大器

光参量振荡器采用四个平面镜组成的环形行波腔, 通过光参量振荡器将 532 nm 的泵浦光下变频为 935 nm(信号光)和 1.234 μm (空闲光), 其中 935 nm 的信号光用作大气水汽的差分吸收激光雷达的探测光 (on-line, 935.55 nm, 见图 4) 和参考光(off-line, 935.375 nm, 见图 4), 而空闲光被舍弃。光参量振荡器输出的信号光再经过后续的光参量放大过程进一步提高其脉冲能量, 以满足探测距离的要求。注入振荡腔的种子激光采用两个连续波小功率分布反馈式半导体激光, 波长调谐范围 935~936 nm, 最大输出连续波功率>30 mW(光纤耦合输出 15 mW), 线宽 <4 MHz。通过 1×2 微机械开关切换两种 935 nm 种子光注入, 让波长为 λ_{on} 和 λ_{off} 的种子激光轮流注入光参量振荡器的谐振腔, 发射机也因而轮流发射两种光脉冲^[10]。一对光楔, 将半导体激光束椭圆光斑变成圆形光斑。激光雷达发射机(含 OPO 光参量振荡器, DFB 分布反馈半导体激光器)的原理, 如图 3 所示。

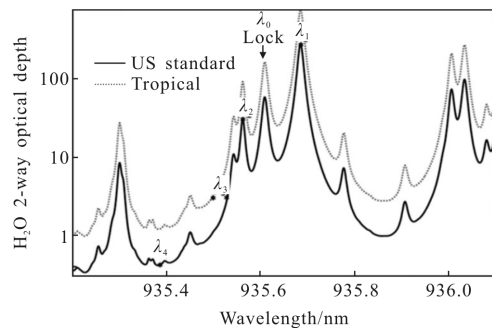


图 4 水汽的光谱分布片段(双程光学厚度)

Fig.4 Water vapor spectrum segment (2-way optical depth)

在 OPO 环形腔中, 如图 5 所示, 腔镜 M1 是 532 nm 泵浦光的入口, 对 532 nm 高透过 $T>95\%$, 对信号光 935 nm 高反射 $R>98\%$; 腔镜 M2 是种子光注入端和信号光输出口, 谐振时, 种子光和信号光波长相同, 要求对 532 nm 高反射 $R>98\%$, 对信号光 935 nm 有中等透过率 $T\approx 60\%$; 腔镜 M3 是一个全反镜, 对 532 nm 高反射 $R>98\%$, 对 935 nm 也是高反射, $R>98\%$; 腔镜 M4 是 532 nm 泵浦光的出口, 因此对 532 nm 高透过 $T>95\%$, 对信号光 935 nm 高反射 $R>98\%$, 即 M1 和 M4 腔镜光学性能相似。四个腔镜对空闲光 1 234 nm 都具有较高的透过率。泵浦束径 4.5 mm, 种子光束径略大于泵浦光束径, 种子光的偏振方向与信号光

偏振方向一致, 与 532 nm 泵浦激光偏振方向垂直。谐振腔的腔镜对 *s* 偏振光、*p* 偏振光、非偏振(*u*)光的透过光谱特性, 如图 5 所示。

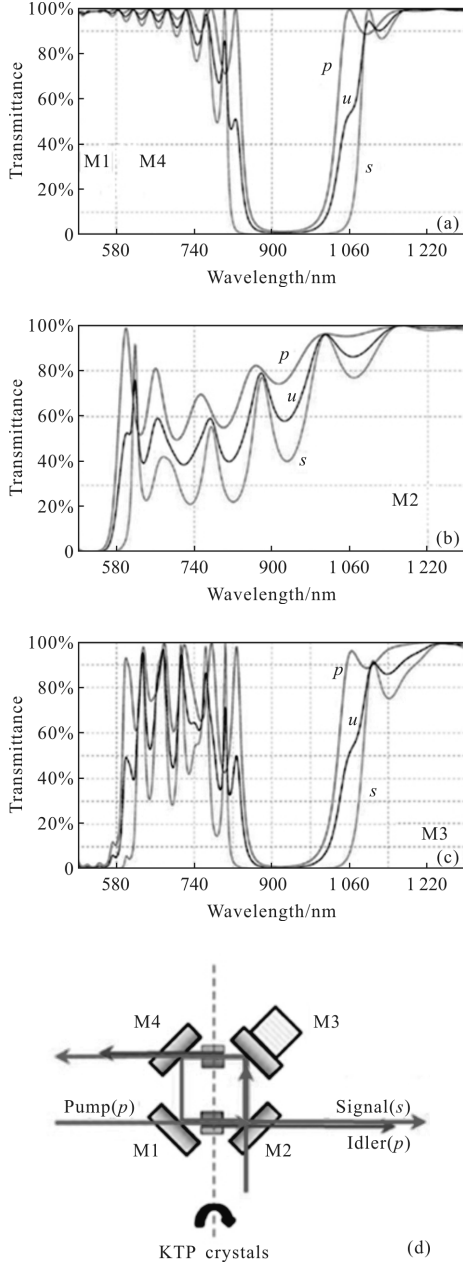


图 5 腔镜的透射光谱特性和谐振腔的结构

Fig.5 Optical transmission spectra and configuration of resonance cavity

KTP 晶体两个端面镀膜, 对 532 nm 的泵浦光和 935 nm 信号光以及空闲光 1 234 nm 都是高透的 ($T > 95\%$ @532 nm and @935 nm @1 234 nm); 晶体的端面直径不小于 10 mm, 为了满足相位匹配条件, 切割晶向角度 ($\phi=0^\circ, \theta=70.7^\circ$)。一对完全相同的 KTP 晶体

安置在振荡腔内形成走离角补偿结构。泵浦光 532 nm 是 *o* 光(*p* 偏振), 信号光是 *e* 光(*s* 偏振), $532(o) \rightarrow 1\ 234(o)+935(e)$, 这样只有信号光被正反馈从而在谐振腔内振荡, 即为单谐振光参量振荡器, 腔镜的表面光洁度和平整度要达到一定标准。从 532 nm 转换为 935 nm 的总体转换效率大约 17%, 最终获得的 935 nm 信号光单脉冲能量在 45 mJ 左右, 1 234 nm 空闲光被腔镜泄露掉, 不满足正反馈条件, 从而避免光参量差频的逆过程的出现。

1.3 OPO 腔长锁定

在泵浦脉冲启动过程中注入一频率 ω_1 的弱信号, 虽然它不足以真正地锁定光参量振荡器的自由振荡模式, 但它在再生放大器中往返传输并不断增强的过程中发生快速相移, 其角频率迅速变为最临近的激光器模式的角频率 ω 。于是, 角频率为 ω 的邻模在注入信号的基础上增长, 而其他的激光模式却在弱得多的自发辐射噪声的基础上增长, 因此角频率 ω 的模式占绝对优势。

为实现 OPO 振荡器谐振腔腔长与种子激光器波长的匹配, 满足稳频的需要, 使用压电陶瓷(晶体)控制其中一片腔镜(如图 5 中 M3)的位置以便精确调节 OPO 谐振腔的腔长, 实现谐振频率($\omega=\omega_1$)的调谐。受到脉冲固体激光器谐振腔“ramp-hold-fire”锁定方法^[1]的启发, 将这一脉冲激光谐振腔锁定技术移植到光参量振荡器的谐振腔的注入锁定。种子光通过单模保偏光纤耦合进入谐振腔, DFB 二极管种子激光器受到法拉第隔离器保护 (-35 dB 逆向衰减), 阻止不希望的、来自顺时针方向的激光。当然, 成功的种子注入情况, 顺时针方向激光被完全截止, 典型的种子注入功率为 5 mW 以上。

由光电二极管检测的信号是种子光通过谐振腔过程中被 M2 反射的部分光束与在腔内已经做了环行之后被 M2 透射的光束之间干涉的结果。一个数字化斜坡(ramp)电压被放大并驱动压电器件, 干涉信号由光电二极管检测并且电子乘方两次, 锐化其谐振时的最大峰值, 谐振信号的峰值由差动检测, 当种子光与环行腔谐振时(整腔长的光程是种子光波长的整数倍, $\omega=\omega_1$)的信号被检测, 电子模块就会产生一个自锁信号, 中止施加于压电上的电压扫描, 从检测到峰值到自锁信号停止计数的时间大约 100 ns,

在相关的时域里,这个时间间隔是非常短的。

一旦斜坡(ramp)停止,电子学也产生一个主动的反馈信号去稳定腔和控制颤动(由于斜坡突然停止之后,压电出现的颤动),这个过程由采样保持电路复合 PID(比例-积分-微分)控制电路来实现。在 ramp 停止之后,压电电压进入保持不变(hold)阶段,在 hold 阶段内,发射(fire)泵浦激光脉冲,于是光参量振荡器产生一个信号光脉冲。接着,又重复进入下一个 ramp-hold-fire 过程,使得 OPO 谐振腔能高效地产生与种子光波长相等的单频激光脉冲^[10]。谐振腔长控制示意图如图 6 所示。“ramp-hold-fire”锁定方法的工作时序如图 7 所示。

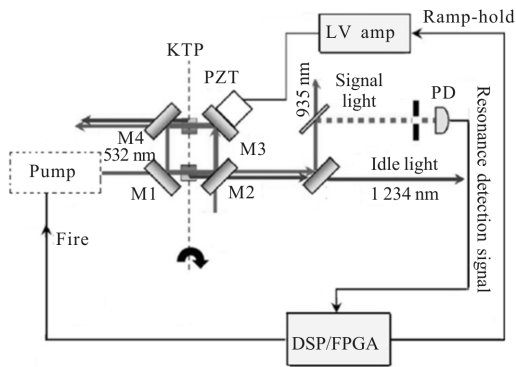


图 6 谐振腔腔长控制示意图
Fig.6 Length control of resonant cavity

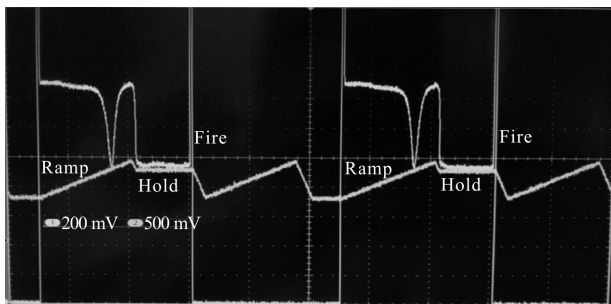


图 7 “ramp-hold-fire”锁定方法的工作时序
Fig.7 Working sequence of “ramp-hold-fire” locking method

OPO 在高能量状态下工作时,输出光束的单色性和光束质量会有所退化,因此其泵浦能量不宜过高。为了获得好的光束的同时尽可能提高输出信号激光脉冲的能量,在 OPO 之后级联一级 OPA,充分利用剩余的泵浦光来进一步放大信号光的能量,即分为振荡和放大两步,以满足探测需求。

2 实验结果

935 nm 单纵模光参量振荡器输出脉冲测试的情况如下:

- (1) 无种子光注入时,OPO 起振的 532 nm 泵浦阈值 17.5 mJ。
- (2) 种子注入(不小于 5 mW)后,OPO 起振的泵浦阈值 10.8 mJ。种子注入会降低光参量振荡器的阈值。
- (3) 种子注入(不小于 5 mW)情况下,当 532 nm 泵浦能量 290 mJ,输出的 935 nm 信号光脉冲能量 50 mJ,转换效率 17.1%。
- (4) 无种子光注入情况下,当 532 nm 泵浦能量 290 mJ,输出的 935 nm 信号光脉冲能量 46 mJ,转换效率 15.75%。
- (5) 6000 个脉冲能量求出均方差,获得脉冲能量不稳定性 12.7%
- (6) 激光光束分析仪测得光束水平方向发散角 2.7 mrad,垂直方向发散角 2.0 mrad,光束椭圆。
- (7) 无种子注入时,信号光脉冲宽度 5.8 ns;种子注入时和信号光脉冲宽度 6.1 ns。

种子注入锁定光参量振荡器的谐振腔,有两点不同于种子注入锁定固体激光器的谐振腔。一是同样泵浦能量,种子注入光参量振荡器产生的信号光脉冲的能量,高于无种子注入的情况下产生的信号光脉冲能量,而种子注入固体激光器谐振腔产生激光脉冲能量,低于无种子注入情况下产生的激光脉冲能量^[12-13];二是同样的泵浦能量下,种子注入光参量振荡器产生的信号光脉冲时间宽度,略大于无种子注入光参量振荡器产生的信号光脉冲时间宽度,而种子注入固体激光器谐振腔产生激光脉冲时间宽度,略短于无种子注入情况下产生的脉冲时间宽度^[12-13]。虽然光参量振荡器也如激光器一样产生相干辐射,但它们的机理不同,前者为泵浦光场诱导介质极化的非线性,而不同于激光器的能量储存在介质中反转粒子的上能级,前者没有受激(跃迁)辐射发生。前者要求泵浦光、信号光和空闲光相位匹配,后者要求满足电子在两个能级之间的级差,大于等于受激辐射的光子能量。实际上发生粒子反转的两个能级都具有一定的宽度,谐振腔也具有定增益带宽,没有

注入种子时,激光器输出多纵模激光,而注入种子之后,只有与种子光最接近的模式优先振荡输出,而且是单一纵模输出,由于竞争关系,其他纵模增益因不能超过损耗而不能输出,最终符合这一单纵模的上能级反转粒子数目少于不注入种子情况下多纵模模式下可发生受激(跃迁)辐射的上能级反转粒子数目,受激辐射光放大亦提前结束,所以注入种子情况下受激辐射放大激光器输出脉冲能量,小于无种子注入受激辐射放大激光器输出脉冲能量。而在光参量振荡器中,种子光的注入(且种子光与谐振腔的腔长之间符合谐振关系)使得发生参量振荡的泵浦阈值下降,信号光脉冲的前沿在时间上提前了,泵浦脉冲能量因参量转换而脉冲能量下降,直至低于阈值后,信号光脉冲的后沿才截至。只要种子注入的功率足够大,持续的时间足够长,泵浦脉冲能量没有超过特别大的数值,此情况下产生的信号光脉冲时间长度,略大于无种子注入情况下的信号光脉冲时间长度,满足相位匹配条件的光子也更多,信号光脉冲能量也略大于无种子注入情况下的信号光脉冲能量^[14]。

图 8(a)是模拟泵浦脉冲的轮廓,蓝色虚线代表种子注入的情况,红色实线表示无种子注入的情况,黑色点划线表示泵浦光的时间波形轮廓。从图 8(a)中看到,有种子注入泵浦脉冲在 KTP 光参量振荡器中的消耗大于无种子注入泵浦脉冲在 KTP 光参量振荡器中的消耗;图 8(b)表示的是有种子注入和

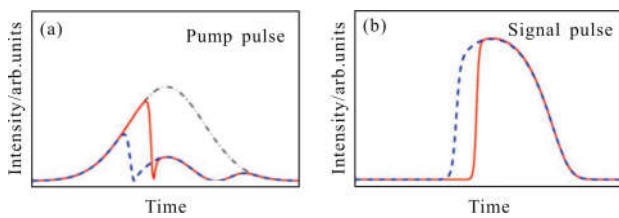


图 8 (a)无种子注入和有种子注入泵浦脉冲在 KTP 光参量振荡器中的消耗;(b)有种子注入和无种子注入光参量振荡器输出信号光脉冲的轮廓

Fig.8 (a) Consumption of the pump pulses in KTP optical parametric oscillators with seed and without seed;
(b) Contours of the of optical pulses of output signal of optical parametric oscillators with seed and without seed

无种子注入两种情况下光参量振荡器输出信号光脉冲的轮廓模拟结果,可以看出,有种子注入时光参量

振荡器的输出建立时间要早于无种子注入时输出的建立时间;图 9 是实验测得的本系统 KTP 非线性晶体的 OPO 输入/输出能量一段曲线,红色是有种子注入时 OPO 的输入/输出能量曲线,蓝色表示无种子注入时 OPO 的输入/输出能量曲线,与图 8(b)模拟结果符合,有种子注入时 OPO 输出建立时间小于无种子注入时,且有种子注入时 OPO 的转化效率高于无种子注入情况。

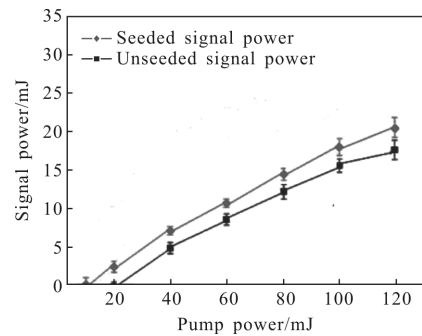


图 9 测得的 KTP 非线性晶体 OPO 的输入/输出能量曲线

Fig.9 Measured KTP nonlinear crystal OPO input/output energy curves

用波长计测量 OPO 输出信号光频率的长程稳定性、短程稳定度,如图 10 所示。中心波长与种子光的波长基本一致,其频率抖动的标准差约为 28.7 MHz。利用该方法得到的稳频精度完全能够满足大气水汽探测差分吸收激光雷达系统的要求^[15]。

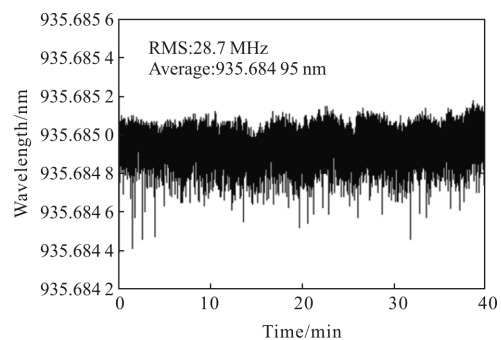


图 10 采用脉冲间隔扫描方法稳频后 OPO 输出的脉冲激光波长稳定性测试结果

Fig.10 Test results of wavelength stability of pulsed laser output OPO after frequency stabilization using pulse interval scanning method

光束测试仪探测光束质量,信号光束 935 nm (@ 脉冲能量 45 mJ)结果 M^2 为 7.8。图 11 为使用激

光光束质量测试对光束质量测试的结果。

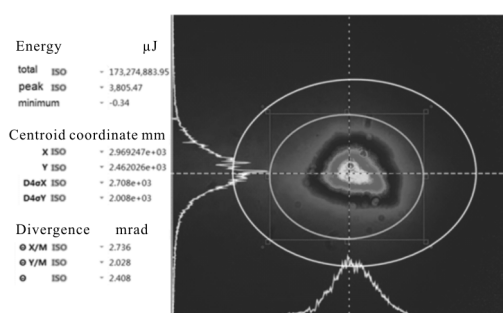


图 11 使用激光光束质量测试仪对光束质量测试的结果

Fig.11 Test results of beam quality by using laser beam quality tester

OPO 的光谱纯度的测量方法:使用一个如图 12 中 Cyclone™ 系列中的 10.6 m 路径长度的多通道水汽气体吸收池,充满 15 KPa 水汽,种子激光波长稳定在主要吸收线 935.45 nm,通过气体池的剩余光透过率不大于 10^{-4} (0.01%),说明光谱纯度满足差分吸收激光雷达的要求。



图 12 Cyclone™ 系列 2.1~10.6 m 可变路径长度的多通道水汽气体吸收池

Fig.12 Cyclone™ series multi-channel vapor absorption tank with variable path length from 2.1-10.6 m

用波长计扫描,当没有种子时,OPO 的带宽在 0.26 nm 量级(90 GHz),比水汽的某个吸收线(1~2 GHz)宽得多。图 13 为光参量振荡器 OPO 的实物照片。

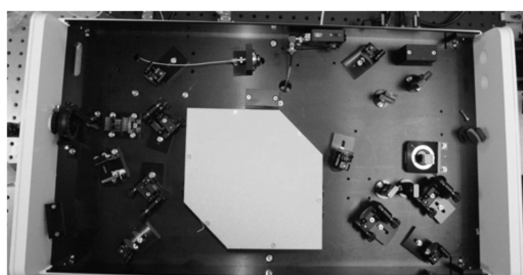


图 13 光参量振荡器实物照片

Fig.13 Photograph of optical parametric oscillator

3 结 论

差分吸收激光雷达的水汽廓线测量,需要高峰值功率和高平均功率,ns 时间尺度的,波长与大气水汽的光谱吸收特征相应的相干光源。通常这些波长与容易获得的、有效激光线谱不一致。光参量振荡器和放大器能够有效地从固定波长 532 nm 的光源调谐转换到所需要激光波长 935 nm,发展成差分吸收激光雷达发射机。在机载或空间条件下,这一相干光源能够提供高的电光效率,小的体积和牢固性。在连续波种子注入条件下,光参量振荡器输出单纵模的信号光,单脉冲能量增加。光-光转换率 17%,脉冲能量 45 mJ,线宽接近傅里叶限,中心光频率稳定性 30 MHz,光束质量 M^2 不大于 7.8,这种技术已经被发展到可以适合于地面应用一个成熟的阶段。

致谢:

诚挚地感谢中国气象局气象探测中心的姚波博士、赵培涛博士的热心帮助!

参考文献:

- [1] Noah S Higdon, Edward V Browell, Patrick Ponsardin, et al. Airborne differential absorption lidar system for measurements of atmospheric water vapor and aerosols [J]. *Applied Optics*, 1994, 33(27): 6422-6438.
- [2] Wulfmeyer V. Ground-based differential absorption lidar for water-vapor and temperature profiling: development and specifications of a high-performance laser transmitter [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(18): 3804-3824.
- [3] Hannes Vogelmann, Thomas Trickl. Wide-range sounding of free-tropospheric water vapor with a differential-absorption lidar (DIAL) at a high-altitude station [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(12): 2116-2132.
- [4] Poberaj G, Fix A, Assio A, et al. Airborne all-solid-state DIAL for water vapour measurements in the tropopause region: system description and assessment of accuracy [J]. *Applied Physics B*, 2002, 75: 165-172.
- [5] Wirth M, Fix A, Mahnke P, et al. The airborne multi-wavelength water vapor differential absorption lidar WALES: system design and performance [J]. *Applied Physics B*, 2009, 96: 201-213.
- [6] Ehret G, Fix A, Weiss V, et al. Diode-laser-seeded optical parametric oscillator for airborne water vapor DIAL

- application in the upper troposphere and lower stratosphere [J]. *Applied Physics B*, 1998, 67: 427–431.
- [7] Paolo Di Girolamo, Andreas Behrendt, Christoph Kiemle, et al. Simulation of satellite water vapour lidar measurements: Performance assessment under real atmospheric conditions[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112: 1552–1568.
- [8] Kiemle C, Wirth M, Fix A, et al. First airborne water vapor lidar measurements in the tropical upper troposphere and mid-latitudes lower stratosphere: accuracy evaluation and inter comparisons with other instruments [J]. *Atmos Chem Phys*, 2008, 8: 5245–5261.
- [9] Ti Chuang, Brooke Walters, Tim Shuman, et al. Single frequency and wavelength stabilized near infrared laser transmitter for water vapor DIAL remote sensing application [C]//SPIE, 2015, 9342: 93420J.
- [10] Hong Guanglie, Li Jiatang, Kong Wei, et al. 935 nm differential absorption lidar system and water vapor profiles in convective boundary layer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(2): 0201003. (in Chinese)
- [11] Zhang Yunshan, Gao Chunqing, Gao Mingwei, et al. Frequency stabilization of a single-frequency Q-switched Tm:YAG laser by using injection seeding technique [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(21): 4232–4236.
- [12] SI-2000 seeder system operation and service manual [Z], 2008.
- [13] Operation and maintenance manual for Surelite™ lasers [Z], 2002.
- [14] Richard T White, He Yabai, Brian J Orr, et al. Control of frequency chirp in nanosecond-pulsed laser spectroscopy. 3. Spectrotemporal dynamics of an injection-seeded optical parametric oscillator [J]. *J Opt Soc Am B*, 2007, 24(10): 2601–2609.
- [15] Ge Ye. Research on 935 nm differential absorption lidar for atmospheric water vapor measurement[D]. Shanghai: Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)