

## 激光与光电子学进展

## 用于远程气体探测的双波长中红外激光器(特邀)

吕新杰<sup>1,2,4\*</sup>, 杨彬<sup>5</sup>, 姚红权<sup>1,3</sup>, 汪小涵<sup>3</sup>, 吴悔<sup>3</sup>, 卜令兵<sup>5</sup>, 祝世宁<sup>1,2,3,4\*\*</sup><sup>1</sup>南京大学固体微结构物理国家重点实验室, 江苏 南京 210093;<sup>2</sup>南京大学现代工程与应用科学学院, 江苏 南京 210023;<sup>3</sup>南京大学物理学院, 江苏 南京 210093;<sup>4</sup>南京大学人工微结构科学与技术协同创新中心, 江苏 南京 210093;<sup>5</sup>南京信息工程大学大气物理学院, 江苏 南京 210044

**摘要** 为了实现远程气体探测, 基于由超晶格材料构成的光参量振荡器, 研制了一台双波长输出的中红外激光器。该光参量振荡器通过种子注入的方式, 实现了纳秒级窄线宽的中红外脉冲激光输出, 重复频率为 500 Hz, 单脉冲能量超过 1 mJ, 并能够对准 2.6~4.0  $\mu\text{m}$  波长范围内的 NO、NO<sub>2</sub> 和 SO<sub>2</sub> 的吸收峰。通过气体动态排放实验, 在远程气体探测实验中对该激光器进行了验证。

**关键词** 光参量; 窄线宽; 光谱; 中红外激光器

中图分类号 TN216

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232609

## Dual-Wavelength Mid-Infrared Laser for Long-Range Gas Detection (Invited)

Lü Xinjie<sup>1,2,4\*</sup>, Yang Bin<sup>5</sup>, Yao Hongquan<sup>1,3</sup>, Wang Xiaohan<sup>3</sup>, Wu Hui<sup>3</sup>, Bu Lingbing<sup>5</sup>,  
Zhu Shining<sup>1,2,3,4\*\*</sup><sup>1</sup>National Laboratory of Solid State Microstructures, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China;<sup>2</sup>College of Engineering and Applied Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, Jiangsu, China;<sup>3</sup>School of Physics, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China;<sup>4</sup>Collaborative Innovation Center of Advanced Microstructures, Nanjing University,  
Nanjing 210093, Jiangsu, China;<sup>5</sup>School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology,  
Nanjing 210044, Jiangsu, China

**Abstract** In order to achieve the purpose of long-range gas detection, a mid-infrared laser with dual wavelength output is developed; this system is based on an optical parametric oscillator composed of superlattice materials. The optical parametric oscillator realizes a mid-infrared pulsed laser output of nanosecond order with a 500 Hz repetition rate and a single pulse energy that exceeds 1 mJ through seed injection, and effectively aligns the NO, NO<sub>2</sub>, and SO<sub>2</sub> absorption peaks in the 2.6–4.0  $\mu\text{m}$  range. The laser performance is validated in a remote gas detection experiment based on a gas dynamic emission experiment.

**Key words** optical parametrics; narrow linewidth; spectrum; mid-infrared laser

## 1 引言

气体吸收光谱技术是近些年发展起来的新型气体探测技术, 具有灵敏度高、响应时间快、可远程探测等特点。目前在大气痕量气体和污染气体监测中最常用的光谱技术包括紫外/可见波段的差分光学吸收光谱

(DOAS)、差分吸收激光雷达(DIAL)、红外波段的傅里叶变换光谱(FTIR)、可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)等。但是, DIAL和TDLAS技术多采用紫外、近红外波段的固定波长激光, 而气体在此波段的光谱吸收能力较弱。许多有毒有害气体在中红外波段(2~5  $\mu\text{m}$ )具有强烈的吸收峰(吸收谱线强度比可见

收稿日期: 2023-12-01; 修回日期: 2023-12-08; 录用日期: 2023-12-11; 网络首发日期: 2023-12-12

基金项目: 国家重点研发计划(SQ2022YFF0700421)、国家自然科学基金(12192251)、博士后创新人才计划(BX201700117)

通信作者: \*lvxinjie@nju.edu.cn; \*\*zhushn@nju.edu.cn

光/近红外波段高出数个数量级),因此可以获得更高的灵敏度以及更远的探测距离。例如一氧化氮(NO)、二氧化氮(NO<sub>2</sub>)、二氧化硫(SO<sub>2</sub>)气体分别在 2.7、3.4、4.0 μm 波长附近有较强吸收峰,同时 2~5 μm 波段也是大气透过率窗口,允许数百米甚至千米以上的远程探测。

自然界中红外波段发射功率很低,被动探测技术容易受环境限制且灵敏度不高;虽然主动发射中红外激光是一种可行的办法,但由于中红外波段的激光能级带隙很小,很难找到合适的激光晶体,因此该波段的激光光源非常紧缺。非线性技术包括光参量放大(OPA)、光参量振荡(OPO)等,这些技术能够产生波长可调谐的中红外激光,已经应用于光声光谱分析<sup>[1]</sup>、光腔衰荡气体分析<sup>[2]</sup>、气体激光雷达<sup>[3]</sup>等领域中,例如 Veerabuthiran 等<sup>[4]</sup>和 Yakovlev 等<sup>[3]</sup>用砷酸钛氧钾(KTA)晶体构成 OPO,实现了 3.4 μm 的差分吸收雷达,进行了甲烷气体的远程激光探测;Cadiou 等<sup>[5]</sup>采用周期极化铌酸锂(PPLN)和多块磷酸氧钛钾(KTP)晶体,构成两级 OPA 系统,在 2 μm 波长附近开展了探测距离超过 1 km 的远程二氧化碳(CO<sub>2</sub>)气体探测。为了实现更长波长的输出,Kinder 等<sup>[6]</sup>采用了基于 PPLN 的多级 OPA 系统,实现了在 3.3 μm 和 3.8 μm 波长处的脉冲激光输出,脉冲能量超过 1 mJ,并采用种子注入的方法实现了极窄线宽;Lü 等<sup>[7]</sup>采用标准具压窄 PPLN-OPO 的线宽,在 3.74 μm 波长处实现了 2.12 W 的输出;Erushin 等<sup>[8]</sup>用种子注入的扇形 PPLN-OPO,开展了对甲烷气体的中红外光声探测。

本文采用重复频率为 500 Hz 的纳秒级单频 1064 nm 激光器作为泵浦源,采用 PPLN 晶体构成双波长的 OPO,输出波长在 2.6~4.0 μm 之间可调谐,单脉冲能量达到 1.42 mJ。在本次气体探测实验中,该 OPO 分别输出重复频率为 250 Hz 的 ON 和 OFF 两路同轴中红外光,其中 ON 一路采用种子注入方法实现窄线宽,对准气体吸收峰,实现对 NO、NO<sub>2</sub> 和 SO<sub>2</sub> 的远程气体探测。

## 2 系统设计

### 2.1 波长设计

大气环境中的氮氧化物和硫氧化物是形成酸雨的主要原因,其主要来源是工业生产、火力发电、垃圾焚烧、机动车排放等,本系统激光器的输出波长是根据 NO、NO<sub>2</sub> 和 SO<sub>2</sub> 这三种气体在中红外波段的吸收波长设计出来的。图 1 是 NO、NO<sub>2</sub> 和 SO<sub>2</sub> 气体的吸收光谱线强度,数据来源于 Hitran 数据库<sup>[9]</sup>。根据谱线强度,设计如表 1 所示的 ON 和 OFF 两路同轴中红外光的波长<sup>[10]</sup>,其中 ON 波长精确对准光谱中较强的一根吸收峰,而 OFF 波长处于吸收峰外,并且距离 ON 比较近。根据这个设计,可通过 PPLN 晶体的 Sellmeier 方程<sup>[11]</sup>,以及超晶格材料的准相位匹配(QPM)原理,

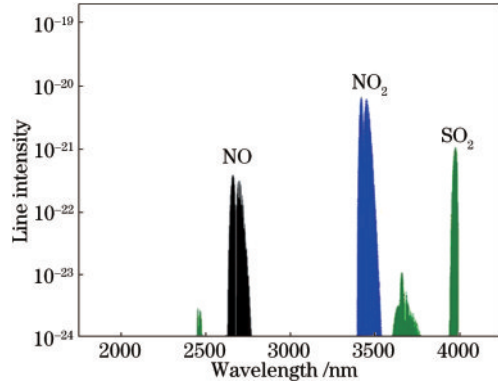


图 1 NO、NO<sub>2</sub> 和 SO<sub>2</sub> 在 2.6~4.0 μm 波段的吸收谱线

Fig. 1 Absorption lines of NO, NO<sub>2</sub>, and SO<sub>2</sub> in the 2.6~4.0 μm range

表 1 ON-OFF 波长及对应的 PPLN 周期

Table 1 ON-OFF wavelength and corresponding PPLN period

	ON /nm	OFF /nm	Period /μm
NO	2654.76	2600	31.5
NO <sub>2</sub>	3424.40	3390	30.5
SO <sub>2</sub>	3996.51	3925	29.0

求解出对应的极化周期。

本文的 OPO 由多通道 PPLN 晶体构成,其极化周期从 28 μm 到 31.5 μm,通过光谱仪对近红外波长进行测量,根据能量守恒关系计算出对应的中红外波长,测量结果如图 2 所示。通过移动晶体更换周期,以及调整晶体温度微调波长,可实现 ON-OPO 的波长对准以及 OFF-OPO 的波长与吸收峰偏移。

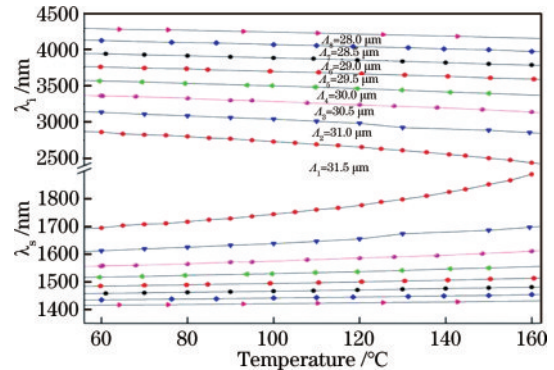


图 2 PPLN-OPO 的波长调谐

Fig. 2 Wavelength tuning of PPLN-OPO

### 2.2 系统设计

所提激光器主要由两部分构成:单频的纳秒脉冲泵浦源和双路 OPO,系统结构如图 3 所示。其中泵浦源由振荡器和放大器两部分构成。振荡器通过电光调 Q 方法产生重复频率为 500 Hz、脉冲长度为 18 ns 的 1064.4 nm 近红外激光。为保持脉冲的单频特性,采用非平面环形谐振腔(NPRO)<sup>[12]</sup>作为种子光注入。振荡器的输出经过双端泵浦的放大器放大后,经分频器分为能量相等、偏振正交的两路光,重复频率均为

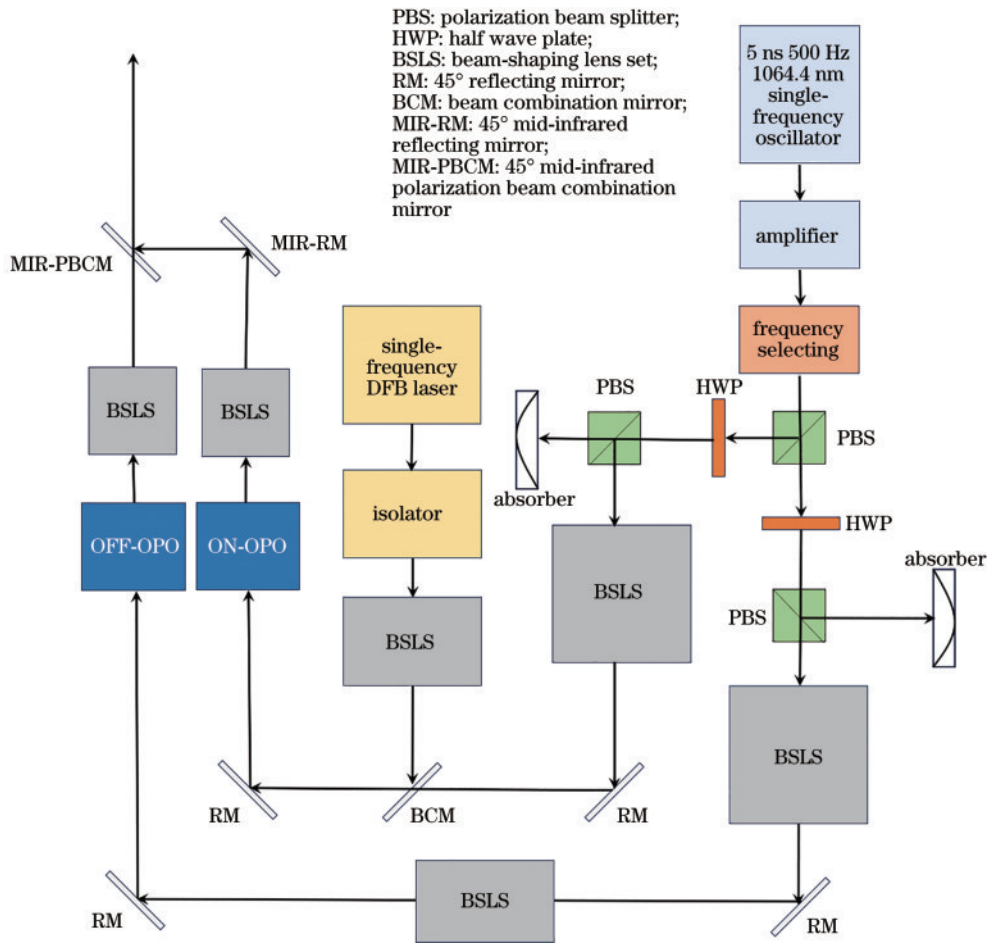


图 3 系统原理图

Fig. 3 System schematic diagram

250 Hz。分频后的两路泵浦光经过整形后,分别进入 ON 和 OFF 两个 OPO 中,其中 ON 路通过种子注入方式压窄线宽,并精确对准吸收峰。两个 OPO 的 PPLN 晶体呈正交放置,出射的中红外激光偏振态正交,然后经过 45° 放置的偏振合束镜合为一路。上述泵浦源在经过工程化设计后,置于整机的下部,如图 4 所示,泵浦光通过向上反射的转折镜导入上层的 OPO 中。

泵浦光在满功率运转下,6 h 内输出功率最小值

为 7.69 W,最大值为 7.86 W,平均值为 7.766 W,标准差为 28.26 mW,计算得出功率不稳定性约为 0.36%,单脉冲能量达到 15.5 mJ,达到设计要求。为确保单频特性,采用高速探头和示波器对单脉冲进行了采样,如图 5 所示。单脉冲长度约为 18 ns,脉冲干净平滑,显示出近傅里叶变换极限的单频特性。根据傅里叶变换极限公式  $\Delta t \times \Delta \nu \geq 0.441$ ,可计算出线宽约为 24.5 MHz。

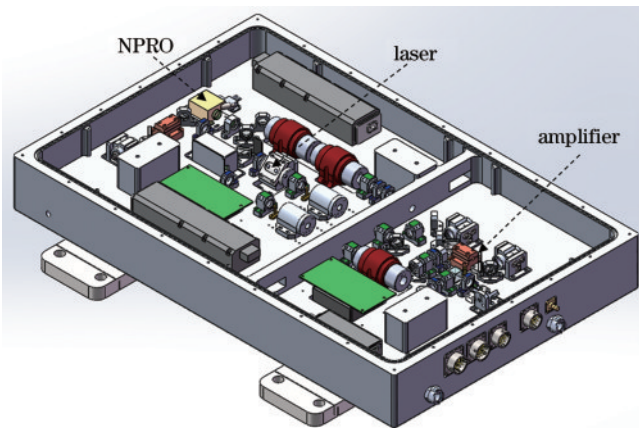


图 4 泵浦激光器的工程化设计  
 Fig. 4 Engineering of pump lasers

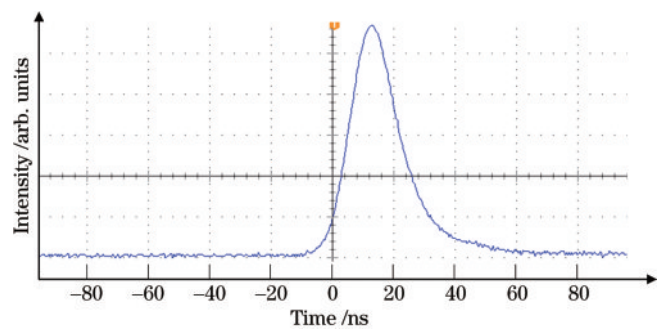


图 5 泵浦光的单脉冲波形  
 Fig. 5 Single-pulse waveform of pump laser

双波长 OPO 处于激光器的上层,如图 6 所示。该层主要由 ON-OPO、OFF-OPO 和种子注入三部分组

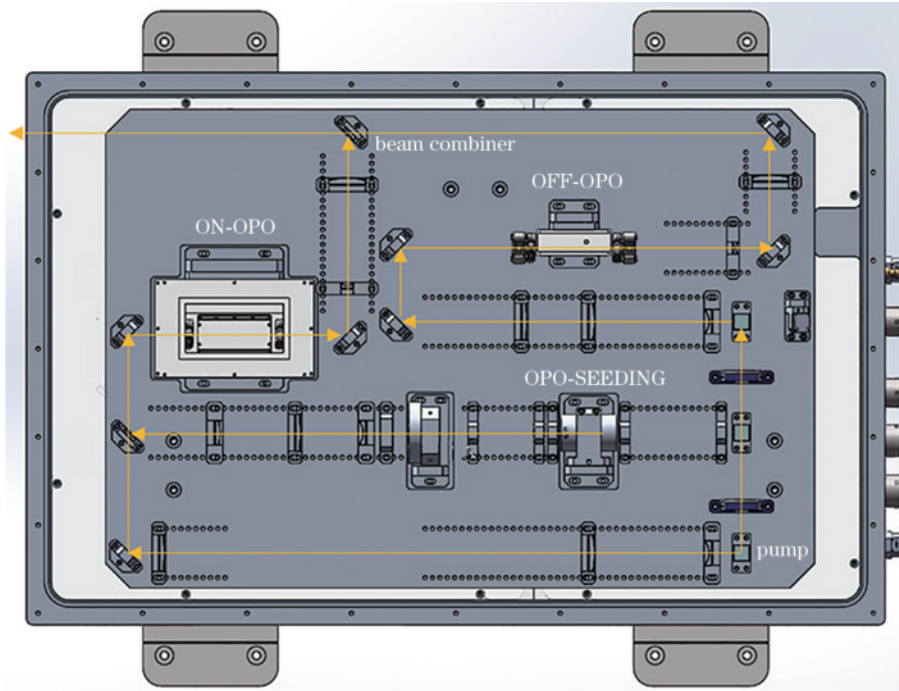


图 6 双波长 OPO 的光路和工程化设计

Fig. 6 Optical path and engineering design of dual-wavelength OPO

成,还有泵浦(Pump)、光束组合器(Beam combiner)等结构。OPO采用直线型腔形式,前后腔镜采用平平镜,基质材料为氟化钙。前腔镜镀膜为:HT@1064 nm,HR@1400~2000 nm。后腔镜镀膜为:HT@1064 nm,~75%R@1400~2000 nm,HT@2600~4000 nm,其中HT代表高透膜,HR代表高反膜。非线性晶体采用MgO:PPLN,晶体厚度为1 mm,长度为40 mm,两端抛光镀增透膜。通过加热片及温度传感器对晶体进行精密控温,控温精度为0.1℃。PPLN晶体采用多通道设计,通过电动位移台改变通道位置,来获得不同波长的中红外激光。为了在获得较高脉冲能量的同时避免晶体损伤,采用光束整形将泵浦光整形成为0.4 mm×2.1 mm的椭圆形光斑。两路OPO的PPLN晶体分别以水平和竖直方式放置,线偏振光通过偏振合束镜合为一束后出射。两路中红外激光脉冲长度比泵浦光略短,重复频率为250 Hz间隔相加,总重复频率为500 Hz,通过如图6所示的整形镜扩束为大小相同的准直光束,然后共线输出,再耦合进入望远镜发射系统中。

将该激光器放置于隔振的光学平台上,并连同电源等设备集成于方舱中,构成中红外差分吸收激光系统,对目标气体进行远程探测。

### 3 ON-OPO 的谱线控制

OFF-OPO工作于气体吸收谱线之外,不需要对其中心波长和线宽进行特别控制。其波长按照表1进行设计,通过调整多通道PPLN的温度获得,并通过光谱仪测量其中心波长是否达到设计要求。由于OFF-OPO与ON-OPO的构造相似,泵浦能量相同,因此单

脉冲能量、转换效率等参数也与ON-OPO相似,下文给出了ON-OPO的参数测试结果,对OFF-OPO的参数不再赘述。由于ON-OPO的中心波长需要准确对准吸收谱线,并且光谱宽度需要尽量窄以便能够最大效率地吸收谱线,因此ON-OPO的光谱控制技术是本系统的核心技术之一。本文尝试了光栅、KTA、片状光参量振荡器(SOPO)种子注入、分布反馈半导体激光器(DFB)种子注入、连续OPO种子注入等多种方案,其中采用Littrow光栅和Littman光栅的两种方案,都存在光栅容易损坏、效率较低、光谱压窄效果不明显等问题;采用双折射相位匹配的KTA晶体替换PPLN晶体,虽然KTA晶体属于非临界相位匹配,输出线宽较窄,但是实验测试单块KTA的波长随温度及角度变化不明显,因此无法实现大范围的波长调谐;采用种子注入方式取得了较为明显的效果,因此分别采用了三种种子注入方式进行了测试,最终选择采用DFB和连续OPO种子注入的方式。

#### 3.1 ON-OPO 和 OFF-OPO 的结构设计

ON-OPO选择采用近红外种子注入的方式压窄线宽。种子注入的OPO需要精确控制腔长,使得注入的波长处于谐振腔的共振峰,从而获得更高的注入效率。一般采用压电陶瓷控制OPO腔长,使腔长锁定于透射信号。此种方式需要复杂的电控系统及光电探测装置。为了简化装置,本文采用了被动式的温度稳定方式。

如图7所示,ON-OPO的两个腔镜安装于热膨胀系数很小的殷钢臂上,通过半导体制冷器(TEC)进行控温,并且密封在具有温度控制的壳体内。根据OPO

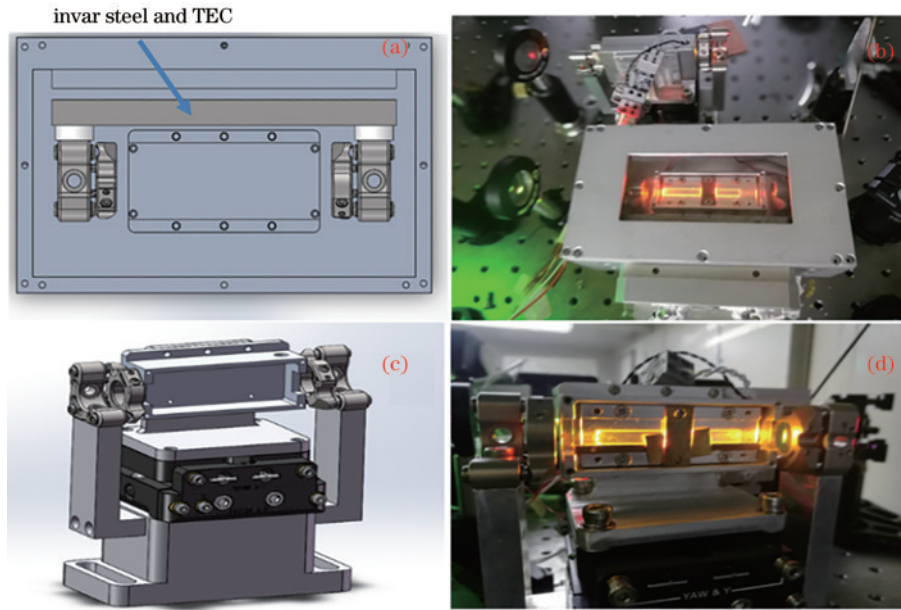


图 7 OPO 结构设计。(a)ON-OPO 设计图;(b)ON-OPO 实物图;(c)OFF-OPO 设计图;(d)OFF-OPO 实物图  
Fig. 7 OPO structure design. (a) ON-OPO design drawing; (b) ON-OPO physical drawing; (c) OFF-OPO design drawing; (d) OFF-OPO physical drawing

的腔镜透过率和腔长可以得到,共振信号光的半峰全宽(FWHM)约为 0.6 pm,在种子光波长对准透过峰的情况下,腔长需要保持在约 $\pm 10$  nm 的范围内,才能保证稳定的注入效率。如果采用普通的金属,例如航空铝,其热膨胀系数为 $2.321 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ,需要使其温度保持在 $\pm 4$  mK 的范围内,具有很高的难度;而所采用的殷钢的热膨胀系数为 $1.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ,只需使其温度保持在 $\pm 60$  mK 的范围内,通过 TEC 进行温控可以轻松达到所要求的精度,并且温度调制约 4.2 K 即可获得一个自由光谱区的波长调谐。采用上述装置进行了 1.5  $\mu\text{m}$  波长激光的注入实验,通过调整殷钢温度实现注入光的共振增强。在长时间的测试过程中,本装置可保持稳定。

### 3.2 SOPO 种子注入

SOPO 是一种厚度仅有百微米的薄片型 OPO<sup>[13]</sup>。SOPO 采用了腔相位匹配<sup>[14]</sup>,由于其厚度很小,根据法布里-珀罗(F-P)效应,其纵模间隔很大,因此能够输出单纵模的种子光。采用掺镁铈酸锂作为基质材料制作的 SOPO,厚度为 200  $\mu\text{m}$ ,在波长为 532 nm 的泵浦下,信号光和闲频光分别为 809.5 nm 和 1551.8 nm 波长的单频输出;其中将 1551.8 nm 波长的近红外光作为种子光注入到 OPO 中。具体的装置如图 6 所示,532 nm 的单频脉冲激光由泵浦光通过倍频获得,通过调整 SOPO 的温度,可以获得 1551.8 nm 和 3318 nm 的单频脉冲激光。具体的实验结果见文献[13]。但调整 SOPO 的波长较为困难,很难对准气体吸收峰,并且存在一定的稳定性问题,因此最终方案并未采用 SOPO 作为种子注入。

### 3.3 DFB 种子注入

DFB 激光器具有波长调谐方便、体积小、可靠性高等特点,适合作为 OPO 种子注入。与上述 SOPO 注入方案类似,将 SOPO 部分替换成为 DFB 即可实现本方案。选择 Santec 公司的 WSL-100 型号可调谐半导体激光器作为种子光源,其波长可调谐范围为 1527.60 nm 到 1565.50 nm,最高输出功率为 35 mW,标称线宽 $< 100$  kHz。通过 YOKOGAWA 扫描式光谱仪对 DFB 光谱进行了测量,测得的线宽为 0.0273 nm,远大于标称线宽,这是因为光谱仪的最小分辨率无法达到测量极限。DFB 激光器与隔离器连接,输入光经光纤引导至激光器内,然后经过准直镜输出,再经三个柱面镜将种子光整形至与 ON 路 1064.4 nm 泵浦光光斑形态一致。DFB 种子光注入 OPO 后,通过对近红外光谱的测量(如图 8 所示)以及中红外光透过吸收池的实验效果,最终确定腔镜反射率为 75%,输出的信号光 FWHM 为 0.0405 nm,相比注入 DFB 的种子光的测量线宽,光谱略有展宽,能够满足吸收光谱测量要求。未注入的 OFF-OPO 的光谱较宽,如图 8(a)所示,在信号光波段超过 1 nm,经过计算可知在中红外波段超过 3 nm。

图 9 是上述种子注入 OPO 的输出特性曲线,在输入泵浦光能量为 10.2 mJ 时,输出的 3424.4 nm 中红外激光脉冲能量为 1.16 mJ,转换效率为 11.3%。在输入泵浦光能量为 6.7 mJ 时具有最高的转换效率,随着泵浦光能量的提高,OPO 出现了增益饱和现象,转换效率有所降低。

### 3.4 连续波 OPO 种子注入

为了测量 NO 气体,需要采用波长为 2657.4 nm

表 2 OPO 不同腔镜反射率的光谱和吸收效果

Table 2 Spectra and absorption effects of different OPO mirrors' reflectance

Reflectance	Spectral quality	Experimental effect of gas absorption cell
50%	Spectrum is broad, and there are multiple peaks, and intensity of each peak is not different, and effect is poor	Transmittance is large, and absorption is poor
85%	Spectral width is narrow, and there are multiple peaks, and intensity of each peak varies greatly, and a main peak with large intensity appears	Transmittance becomes smaller, and there is still a gap with theoretical simulation
75%	Spectral width is narrow, with only one main peak with greater intensity	It is basically consistent with theoretical simulation data

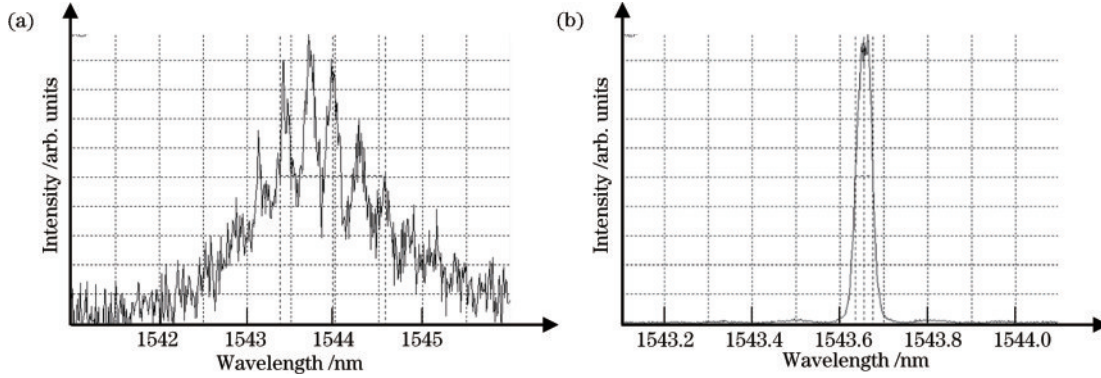


图 8 OPO 的信号光频谱图。(a)自由运转 OPO 的信号光频谱图;(b)种子注入后的 OPO 的信号光频谱图

Fig. 8 Signal optical spectra of OPO. (a) Signal optical spectrum diagram of free-running OPO; (b) signal optical spectrum of OPO after seed injection

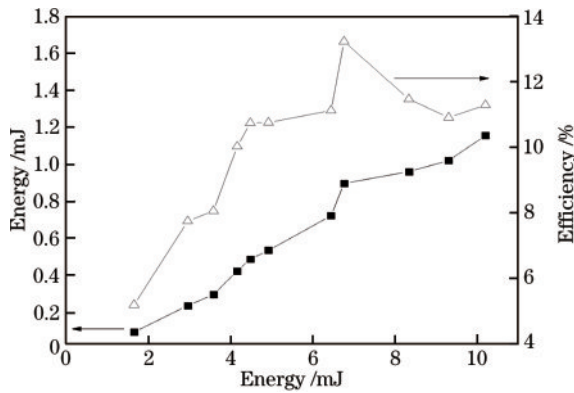


图 9 ON-OPO 的能量曲线

Fig. 9 Energy curves of ON-OPO

的中红外激光,对应的信号光波长为 1774.5 nm。这个波长的 DFB 只能通过定制获得,价格高昂,因此采用连续波 OPO 替代 DFB 作为种子注入光。该连续 OPO 由 50 W 单频连续光纤激光器泵浦,采用周期为 31.9 μm 的 MgO:PPLN 作为参量增益介质,采用四镜环形腔作为谐振腔。在晶体温度为 98 °C 时,OPO 输出的信号光波长为 1774.4 nm,功率为 300 mW,通过光纤导引至种子光位置。关于此连续 OPO 的具体构成可参考文献[15]及文献[16]。

#### 4 气体远程探测结果

首先对本地的气体吸收信号进行测试和标定。

以 SO<sub>2</sub> 气体探测为例,在中红外激光未进入望远镜前放置气体池,通过控制气体池的气体质量浓度、压力和温度,根据 ON-OFF 的信号差值对气体质量浓度进行反演,图 10 是在不同气压下 SO<sub>2</sub> 气体的反演探测质量浓度与实际质量浓度的关系。反演标定后的 NO<sub>2</sub> 的探测灵敏度为 0.047 mg/m<sup>3</sup>,SO<sub>2</sub> 的探测灵敏度为 0.257 mg/m<sup>3</sup>,NO 的探测灵敏度为 0.940 mg/m<sup>3</sup>。在此基础上,还开展了开放气体的远程探测实验。在距离方舱 200 m 处的固定建筑物上方放置一个直径为 400 mm 且可伸缩两端开口以及侧壁密封的排气管道,管道全长为 2 m,侧壁上留有一个圆形通气孔并接上 SO<sub>2</sub> 标准气瓶,模拟污染气体排放,以树木或硬纸

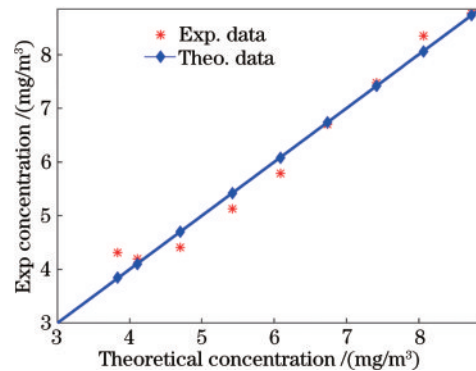


图 10 实际质量浓度和探测质量浓度的对比<sup>[17]</sup>

Fig. 10 Comparison between actual mass concentration and detected mass concentration<sup>[17]</sup>

板作为硬靶反射目标进行实验,其中硬纸板直接放于管道后端面紧贴管道后壁。实验时启动激光器,先用采集卡采集系统的背景信号,然后打开气瓶阀门,向管道内部释放气体,整个过程中通过调节气瓶阀门开关改变气体排量,采集整个释放过程的信号强度变化,反演路径上  $\text{SO}_2$  气体的平均质量浓度。图 11 是动态排放的探测结果。经过多次实验,本系统的探测距离达到 1 km,最远探测距离可达 2.2 km。具体的实验过程和结果可参考文献[17]。上述实验结果说明中红外双波长激光器能够对目标进行设计,并展示其在远程气体探测应用中的能力。

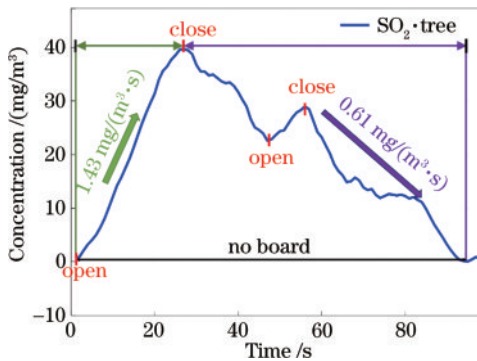


图 11 动态排放的测量结果<sup>[17]</sup>

Fig. 11 Measurement results of dynamic emissions<sup>[17]</sup>

后续还进行了  $\text{NO}$  及  $\text{NO}_2$  的远程气体探测实验,证明了 OPO 的波长可调谐以及单频性能可以较好地应用于远程气体探测当中,具体的结果见文献[17]。

## 5 总结和展望

中红外波段的激光远程气体探测技术因其具有灵敏度高、探测距离远、探测气体种类丰富等优点,在大气探测、环境保护和安全防护等方面具有独特的优势。由于目前商用的中红外激光器主要集中于量子级联(QCL)等半导体激光器,发射功率较低、光谱较宽,一般仅用于近距离的 TDLAS 技术中,而少有适用于远程气体探测的双波长差分中红外激光器的相关报道。主要从设计原理、系统构成、实验结果等方面介绍了用于远程气体探测的双波长中红外激光器,特别是纳秒级窄线宽中红外 OPO 的种子注入技术,并通过气体远程探测实验验证了该激光器的性能,获得了比较理想的探测结果。

本文提到的双波长中红外激光器具有超晶格周期的设计及多通道结构,能够在  $2.6\sim 4.0\ \mu\text{m}$  之间进行调谐,具有测量多种气体的能力;对于种子注入压窄线宽技术,进行了三种注入方式的实验,结果表明采用近红外 DFB 是最为紧凑方便的方式,但受限于 DFB 的输出波长,宽调谐的连续波 OPO 具有更为强大的能力,但是针对工程化应用,需要进一步提升 OPO 的紧凑性、稳定性以及成本;此外,中红外波段激光的背向

散射很弱,需要昂贵的低温制冷探测器才有可能测量到,这也为研制激光气体雷达增加了难度。

## 参 考 文 献

- [1] Lamard L, Balslev-Harder D, Peremans A, et al. Versatile photoacoustic spectrometer based on a mid-infrared pulsed optical parametric oscillator[J]. Applied Optics, 2019, 58(2): 250-256.
- [2] Persijn S, Harren F, van der Veen A. Quantitative gas measurements using a versatile OPO-based cavity ringdown spectrometer and the comparison with spectroscopic databases[J]. Applied Physics B, 2010, 100(2): 383-390.
- [3] Yakovlev S V, Romanovskii O A, Sadovnikov S A, et al. Mobile mid-infrared differential absorption lidar for methane monitoring in the atmosphere: Calibration and first in situ tests[J]. Results in Optics, 2022, 8: 100233.
- [4] Veerabuthiran S, Razdan A K, Jindal M K, et al. Development of  $3.0\text{-}3.45\ \mu\text{m}$  OPO laser based range resolved and hard-target differential absorption lidar for sensing of atmospheric methane[J]. Optics & Laser Technology, 2015, 73: 1-5.
- [5] Cadiou E, Mammez D, Dherbecourt J B, et al. Atmospheric boundary layer  $\text{CO}_2$  remote sensing with a direct detection LIDAR instrument based on a widely tunable optical parametric source[J]. Optics Letters, 2017, 42(20): 4044-4047.
- [6] Kinder J F, Moneke B, Ernst O, et al. Optical parametric oscillator and amplifier providing tunable, narrowband nanosecond laser pulses in the mid-infrared with mJ pulse energy[J]. Applied Physics B, 2022, 128(10): 188.
- [7] Lü G R, Guo L, Xu H P, et al. Watt-level widely tunable narrow-linewidth pulsed mid-infrared  $\text{MgO}:\text{PPLN}$  optical parametric oscillator with a F-P etalon[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 160: 109064.
- [8] Erushin E, Nyushkov B, Ivanenko A, et al. Tunable injection-seeded fan-out-PPLN optical parametric oscillator for high-sensitivity gas detection[J]. Laser Physics Letters, 2021, 18(11): 116201.
- [9] HITRAN online[EB/OL]. [2023-05-06]. <https://hitran.org/>.
- [10] 徐玲, 卜令兵, 蔡镐泽, 等. 中红外差分吸收激光雷达  $\text{NO}_2$  测量波长选择及探测能力模拟[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(10): 1030002.  
Xu L, Bu L B, Cai H Z, et al. Wavelength selection and detection capability simulation of the mid-infrared DIAL for  $\text{NO}_2$  detection[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(10): 1030002.
- [11] Paul O, Quosig A, Bauer T, et al. Temperature-dependent Sellmeier equation in the MIR for the extraordinary refractive index of 5%  $\text{MgO}$  doped congruent  $\text{LiNbO}_3$ [J]. Applied Physics B, 2007, 86(1): 111-115.
- [12] Kane T J, Byer R L. Monolithic, unidirectional single-mode Nd: YAG ring laser[J]. Optics Letters, 1985, 10(2): 65-67.
- [13] Wang X H, Jia K P, Yao H Q, et al. High-energy single-

- longitudinal-mode mid-infrared optical parametric amplifier seeded with sheet optical parametric oscillator [J]. *AIP Advances*, 2021, 11(6): 065104.
- [14] Xie Z D, Lü X J, Liu Y H, et al. Cavity phase matching via an optical parametric oscillator consisting of a dielectric nonlinear crystal sheet[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106(8): 083901.
- [15] Hu L M, He Y Z, Lü X J, et al. A passively wavelength-stabilized mid-infrared optical parametric oscillator[J]. *Photonics*, 2022, 10(1): 5.
- [16] Liu Y C, Xie X K, Ning J, et al. A high-power continuous-wave mid-infrared optical parametric oscillator module[J]. *Applied Sciences*, 2017, 8(1): 1.
- [17] Gong Y, Bu L B, Yang B, et al. High repetition rate mid-infrared differential absorption lidar for atmospheric pollution detection[J]. *Sensors*, 2020, 20(8): 2211.