

种子注入单频脉冲光参量振荡器的光谱纯度研究

姜佳欣^{1,2} 李世光¹ 马秀华¹ 刘继桥¹ 朱小磊¹ 陈卫标¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所,上海市全固态激光器与应用技术重点实验室,上海 201800

²中国科学院大学,北京 100049

摘要 种子注入单频脉冲光参量振荡器(OPO)是实现差分吸收雷达激光发射源的重要手段,且其输出光谱纯度直接影响探测气体对激光能量的吸收,进而影响该雷达系统的测量精度。就种子注入单频脉冲激光器而言,光谱纯度表征在其输出光谱中,种子波长成分所占的比例可以综合反映脉冲激光的输出线宽和频率稳定性等光谱特性。针对种子注入单频 1.57 μm 脉冲 OPO,理论上分析了光谱纯度的影响因素,设计并搭建了一套基于长程气体吸收池的光谱纯度测量系统。实验结果表明,当种子注入功率为 26 mW, OPO 输出单脉冲能量为 1.1 mJ 时,种子注入单频脉冲 OPO 的光谱纯度达到 99.9%。

关键词 激光器;种子注入;单频;光谱纯度;吸收池

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0702011

Investigation on Spectral Purity of Injection Seeding Single Frequency Pulsed Optical Parametric Oscillator

Jiang Jiaxin^{1,2} Li Shiguang¹ Ma Xiuhua¹ Liu Jiqiao¹ Zhu Xiaolei¹ Chen Weibiao¹

¹Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Lasers and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Injection seeding single frequency pulsed optical parametric oscillator (OPO) is an important technique to realize differential absorption lidar, whose spectral purity effects the energy absorption of laser pulses travelling via atmosphere directly and influences the accuracy of lidar system. Spectral purity demonstrates the ratio of seed mode energy to the whole pulse energy, which presents a comprehensive projection of spectral performances such as linewidth and frequency stability. In connection with 1.57 μm injection seeding OPO, factors influencing spectral purity are analyzed theoretically. A measuring system based on long path absorption cell is designed and built up. Experimental results show that spectral purity of injection seeding OPO can achieve 99.9% when seed injection power is 26 mW and OPO output energy is around 1.1 mJ.

Key words lasers; seed injection; single frequency; spectral purity; absorption cell

OCIS codes 140.3070; 140.3570; 190.4970; 120.6200

1 引 言

采用星载积分路径差分吸收(IPDA)激光雷达对大气 CO₂ 浓度进行测量,是一种高精度主动遥感探测技术^[1-3]。种子注入单频脉冲光参量振荡器(OPO)具有窄线宽、效率高、光束质量好、波长可调谐、光谱性能优良等优点,是 IPDA 雷达激光发射源的理想技术方案^[4]。在 IPDA 激光雷达技术中,影响探测精度的因素有很多,主要包括激光源光谱纯度、探测器噪声、数据反演算法等,其中激光源输出光谱纯度会直接影响激光传

收稿日期:2015-02-05;收到修改稿日期:2015-03-26

基金项目:上海市自然科学基金(12ZR1435100)

作者简介:姜佳欣(1990—),女,硕士研究生,主要从事中红外光参量振荡器方面的研究。E-mail: jiangjx@siom.ac.cn

导师简介:朱小磊(1966—),男,博士生导师,研究员,主要从事固体激光器方面的研究。E-mail: xlzhu@siom.ac.cn

*通信联系人。E-mail: sgli@siom.ac.cn; xlzhu@siom.ac.cn

输过程中大气对激光脉冲能量的吸收,进而影响激光雷达系统的探测精度^[5]。研究表明,IPDA激光雷达光源的光谱纯度达到99.9%以上,才能保证探测结果的可靠性和数据反演的准确性^[6]。

相对于激光器的其他参数如波长、能量、光斑等,光谱纯度目前还没有标准的测量方法,也没有商业化的测量仪器,且国内对光谱纯度的研究还处于理论分析阶段,国外少数研究机构做过初步的实验测量。1989年,Ismail等^[7]理论上对大气和仪器参数给激光雷达探测精度带来的误差进行了分析,并在水蒸气浓度测量的应用基础上讨论了光谱纯度的定义。1998年,Ehret等^[8]用吸收池测量了940 nm波段激光器的光谱纯度,实验表明,种子激光器输出功率只要达到几十微瓦,就能保证输出光谱纯度高于99%。2007年,Mahnke等^[9]研究了谐振腔长、相位失配和抽运强度对种子注入脉冲OPO光谱纯度的影响,分析指出随着抽运强度增加,参与起振的纵模模式数目增加,导致注入种子的接收范围减小,即使满足最佳相位匹配条件,输出光谱纯度也会下降。同时推测,光谱纯度噪声可能是谐振腔长抖动导致的,且随着参量晶体温度变化,光谱纯度降低。2011年,Fix等^[10]用长程CO₂气体吸收池测量了种子注入脉冲OPO的光谱纯度,结果显示种子功率只要高于150 μW,光谱纯度就能达到99.98%,但由于经过光参量放大器(OPA)后抽运光斑质量变差,导致光谱纯度略有下降。

本文针对自行研制的1.57 μm种子注入单频脉冲OPO,理论上分析了抽运能量、注入的种子功率等因素对光谱纯度的影响,设计并搭建了一套基于长程气体吸收池的光谱纯度测量系统,包括气体吸收池、中红外探测器、积分电路、数据采集等模块,通过测量激光脉冲经过吸收池前后的能量比值,得到透射率,从而计算出激光器的光谱纯度。测试了激光器在不同输出能量下的光谱纯度,得到最佳输出能量。实验结果表明,当种子注入功率为26 mW,OPO输出单脉冲能量为1.1 mJ(即抽运能量在2.5倍阈值处)时,OPO系统的光谱纯度达到99.9%。

2 光谱纯度理论

2.1 理论模型

光谱纯度定义为激光脉冲在特定光谱范围内的能量与脉冲辐射总能量的比值^[7]。对于种子注入OPO,注入到OPO谐振腔中的种子模式首先获得增益,消耗抽运激光,抑制其他模式振荡,使得输出脉冲与种子频率相同,线宽接近其傅里叶变换极限。如果种子效率比较低,那么发射的脉冲只有部分能量在所需的光谱区间内,其余能量具有很宽的光谱分布,导致光谱纯度降低。另外,在实际的激光器中,输出频率总会包含种子以外的频率成分,包括放大自发辐射(ASE)和其他纵模,造成光谱不纯^[11]。

光谱纯度与激光器的纵模特性有关,反映主纵模(注入的种子模式)对其他模式的抑制能力。一种测量光谱纯度的方法是通过光学外差探测得到OPO的时域光谱特性^[12]。文献[13]用高速光电探测器拍频得到OPO的纵模分布和边模抑制能力,但无法评估由ASE引起的光谱不纯。

广义上的光谱纯度不仅包括注入种子对边模的抑制效果,还反映了OPO输出激光光谱的线宽、频率稳定性和单纵模运行状态,是对激光雷达频谱性能的综合评价。长程气体吸收法是利用气体吸收线作为高稳定性的窄带滤波器,位于气体吸收峰处的种子模式被吸收,其他模式会透过,测量激光穿过某种气体的透射率(即其他模式的能量),更准确地检测出由多种因素引起的光谱不纯^[14]。

当一束初始光强为 I_0 、频率为 ν 的单色光穿过充满的某种均匀气体后,由于气体的吸收,其强度会衰减。透射光强 I 与入射光强 I_0 的关系满足朗伯-比尔定律^[15]

$$I(\nu) = I_0 \exp\left[-\int \alpha(\nu) dr\right], \quad (1)$$

式中 α 为吸收系数,对于线性吸收, α 与光强无关, r 为吸收路径。

定义种子注入OPO的光谱纯度 S_p 为

$$S_p = \frac{E_{\text{seed}}}{E_{\text{total}}} = 1 - \frac{E_{\text{total}} - E_{\text{seed}}}{E_{\text{total}}} \approx 1 - T_{\text{cell}}, \quad (2)$$

式中 E_{seed} 为种子模式的光能量, E_{total} 为OPO输出脉冲的总能量。

光谱纯度也可以用小信号增益近似表示为^[6]

$$S_p = \frac{T_R c_0^2 E_s G_s}{T_R c_0^2 E_s G_s + E_n G_n}, \quad (3)$$

式中 G_s 和 G_n 分别是种子模式和其他模式的时间积分增益, E_s 和 E_n 分别表示种子模式和噪声模式的能量, $T_R c_0^2$ 为种子模与腔模的耦合系数。激光系统光谱纯度越高, 所需要种子注入功率也越大。虽然这是基于小信号增益而得出的结果, 但对这些参数的估计值, 仍有现实意义。

影响光谱纯度的因素主要有抽运光源的单频性、抽运功率、种子激光器的线宽和稳定性、OPO 谐振腔的稳定性、种子激光与腔内谐振模式的匹配、晶体角度失配量等^[16]。

相位匹配条件由自由运转 OPO 的中心波长和种子波长之差决定。晶体角度会影响 OPO 自由运转的增益范围, 如果自由运转的中心峰与种子波长不一致, 会带来相位失配。种子注入所允许的相位失配范围通过(4)式计算^[9]

$$g(\Delta k) = g_0 \sin^4\left(\frac{\Delta k l}{2}\right) \approx g_0 \left[1 - \frac{(\Delta k l / 2)^2}{6}\right]^4 = 1, \quad (4)$$

式中 Δk 为相位失配量, l 为晶体长度, g_0 为 $\Delta k = 0$ 时的功率增长因子。对于磷酸钛氧钾(KTA)晶体, 抽运功率是阈值的 2.5 倍时, 种子注入接收带宽为 ± 0.76 nm; 抽运功率是阈值的 4.8 倍时, 接收带宽为 ± 0.55 nm; 抽运功率是阈值的 10 倍时, 接收带宽为 ± 0.42 nm。考虑到增益饱和和纵模展宽效应, 实际带宽略大于计算值。与参量过程的其他带宽相似, 种子注入接收带宽与晶体长度互相影响, 晶体越短, 种子注入成功的带宽范围越大、阈值越高、接收角度越大, 但会使光束质量下降。

当激光器受到外界环境的扰动时, 谐振腔的长度会发生微小变化, 造成输出波长抖动, 甚至引起跳模。在雷达应用中, 激光器的频率稳定性尤为重要。模拟了不同频率漂移下, OPO 的光谱纯度变化规律, 如图 1 所示。

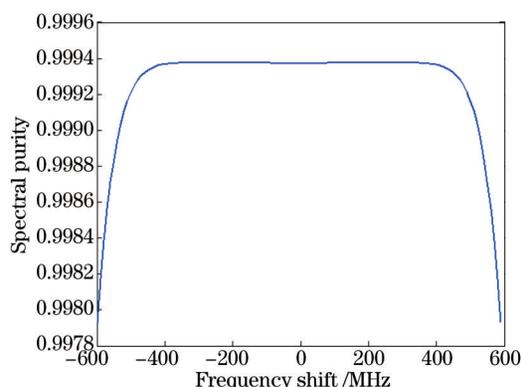


图 1 种子注入脉冲 OPO 输出频率稳定性对光谱纯度的影响

Fig.1 Effect of frequency stability of injection seed pulse OPO on spectral purity

由图 1 可知, 当频率漂移小于 530 MHz 时, 光谱纯度大于 99.9%, 对应的腔长变化应小于 0.267 nm, 这对腔长控制是一个很高的要求, 因此通过扫描腔长进行主动稳频, 保证出光的频率稳定性^[17]。

2.2 吸收池参数

如果激光波长在气体强吸收线的位置, 并且池内气体的光学厚度足够吸收掉特定带宽内的能量, 那么不被 CO_2 吸收的能量输出就是光谱不纯的部分^[7], 此时光谱纯度就等于吸收池的吸收, 通常由吸收池的透射率间接确定。因此需要合理设计吸收池两端反射镜的结构布局, 保证光在吸收池内有足够的光程(达到上百甚至上千米)。

用 Voigt 线型拟合 CO_2 的吸收光谱, 根据 HITRAN 数据库提供的光谱参数, 计算 2~12 kPa 压强下 CO_2 吸收线的半峰全宽(FWHM), 如图 2 所示。

由图 2 知, 压强越小, 吸收线的 FWHM 越小。将吸收池作为窄带滤波器, 考虑到 OPO 输出激光的纵模间隔大约为 1.2 GHz, 因此选择吸收池内的气体压强为 10 kPa, 此时吸收线宽为 750 MHz。

假设激光脉冲是洛伦兹线型, 气体吸收线是 Voigt 线型, 在考虑 ASE 的情况下, 仿真计算出不同光程长度时, 吸收池的透射率随气体压强的变化, 如图 3 所示。

由图 3 可知, 光程越长, 压强越大, 吸收池的透射率越低。当压强足够大(大于 8 kPa)时, 不同光程长度吸收池的透射率都趋近于 6×10^{-4} , 且基本为线性变化, 此时的光学厚度足以吸收掉种子模式的能量, 剩下的能

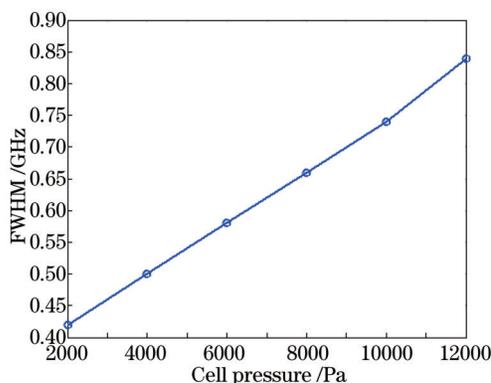


图2 不同压强下 CO₂吸收线的半峰全宽

Fig.2 FWHM of CO₂ absorption line with different pressures

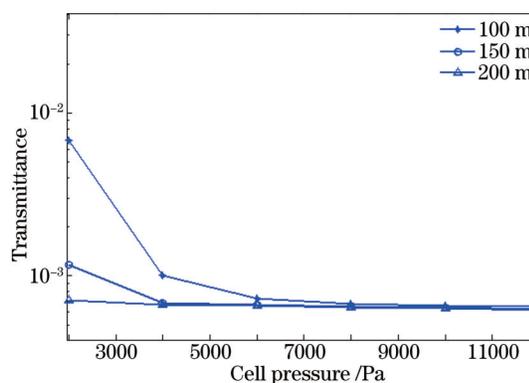


图3 不同光程长度的吸收池的透射率随压强的变化关系

Fig.3 Relationship between transmittance and pressures with different light lengths

量是由 ASE 和其他噪声引起的光谱不纯。为了满足高吸收率和窄带宽的条件,吸收池内气体压强不能太大,相应的吸收长度就要增加,以保证测试精度。理论上透射率越低,测量精度越高,但过低的透射率对后续探测系统是一个挑战。一般差分吸收激光雷达系统对激光光源光谱纯度的要求要不低于 99.9%,因此选定吸收池长度为 210 m、气体压强 10 kPa,此时透射率约为 6.25×10^{-4} ,系统的测试精度可以达到 99.95%。

3 实验装置

以自行研制的种子注入单频脉冲 1.57 μm 波段 OPO 作为 IPDA 激光雷达系统的光源,用于大气 CO₂ 浓度测量。通过改变连续(CW)分布式反馈(DFB)种子激光器的驱动电流和温度调谐输出波长,进而实现对脉冲 OPO 输出波长的调谐。谐振腔的一个腔镜安装在压电陶瓷(PZT)上,给 PZT 施加斜坡电压对 OPO 谐振腔长进行扫描,从而实现对 OPO 输出频率的主动控制。连续 DFB 种子激光器的输出中心波长为 1572 nm,平均功率 30 mW。OPO 的输出脉冲重复频率为 50 Hz,脉宽约为 14 ns,单脉冲能量约为 1 mJ,拍频法测得线宽约为 40 MHz,输出能量不稳定性约为 1.02%。

为了测量所述激光器^[17]的光谱纯度,设计并搭建了一套基于长程气体吸收的光谱纯度测量系统,如图 4 所示。该系统包含延时光纤、分束器、长程气体吸收池、光电探测器(PD)、积分电路、信号发生器、数据采集卡等部分。测量激光脉冲通过吸收池的透射率(出射激光与入射激光能量的比值),得到光谱纯度参数。

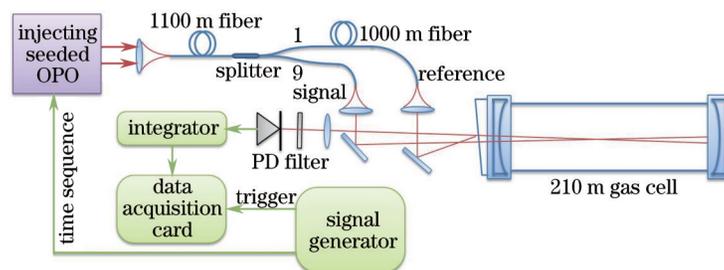


图4 光谱纯度测量系统

Fig.4 Spectral purity measurement system

自由空间传输的激光光束经聚焦透镜耦合到多模光纤(芯径 50 μm,包层直径 125 μm)的纤芯中。相比于单模光纤,多模光纤芯径更大,能耦合进更多能量。分束比为 9:1 的分束器把光脉冲分为两路,“9”端作为信号光,经透镜准直后入射到吸收池,在吸收池内多次反射,经过 210 m 光程后出射。“1”端作为参考光,用来标定系统的分光比,推算信号光的能量。参考光经透镜准直后被吸收池窗口玻璃反射,调整其方位使反射的参考光与从吸收池出射的信号光共轴。带增益的光电二极管将信号光和参考光响应为电脉冲信号,经积分电路积分后被数据采集卡(16位,采样率 100 M/s)采集,信号发生器为采集卡提供触发信号,保持测量系统与激光器同步。

在脉冲出光时刻,1064 nm 抽运光的调 Q 高压板输出高电压使 Q 开关打开,该高压信号会对探测器造成

干扰,出现电噪声(如图5的 t_n 时刻),并且在时间上与光信号重叠。为了区分电噪声和光信号,在光路中加入1100 m多模延时光纤,使光信号延后约 $5.5 \mu\text{s}$,在时间上区分电噪声和光信号。

光电探测器响应的脉冲信号表示光功率,对光脉冲积分得到脉冲能量。待测激光的脉宽约为 14 ns ,若直接使用数据采集卡进行脉冲采集,则对采集卡的采集速度要求很高,但高速采集卡很难保证高精度。若先用电容对PD输出的电信号进行电荷积分,积分后的峰值表示原始脉冲的能量,再通过控制放电电路的参数得到合适的放电时间,由于能量守恒,放电过程与充电过程等价,因此对积分波形进行累加求和得到面积,用来表征原始脉冲的能量,波形的面积之比表示脉冲能量之比。此方法将峰值幅度的单点测量扩展为整个脉冲的面积测量,增加了取样点数,弱化了误差,电路相对简单,噪声小,通过合理的脉冲形状变换,降低了对采集电路的精度和速度要求,适合用于高精度窄脉冲的能量测量。

电荷积分电路的放电时间约 $1 \mu\text{s}$,而210 m吸收池引入的时间差约 700 ns ,探测器响应的参考光和信号光脉冲会在时间上重叠,因此在参考光路中加入1000 m多模光纤,使参考光脉冲延时约 $5 \mu\text{s}$,如图5中的 t_r ,这样就能使信号光脉冲有充足的放电时间,避免重叠。利用控制1064 nm抽运源的时序信号,延时一定时间后作为数据采集卡的触发信号,避免采集电噪声,提高系统效率,方便后续数据处理。实际的脉冲信号如图5所示。其中, $t_s - t_n \approx 6 \mu\text{s}$, $t_r - t_s \approx 4.3 \mu\text{s}$ 。

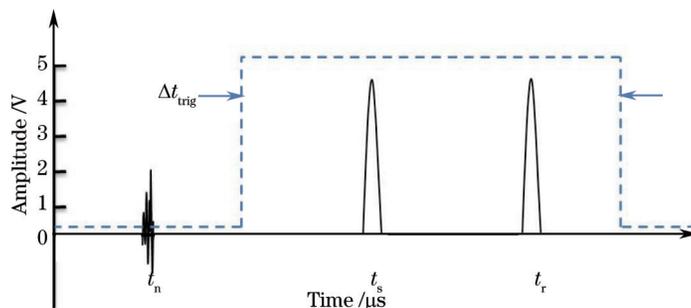


图5 脉冲信号与触发信号

Fig.5 Signal pulses and trigger pulses

1) 将吸收池抽真空后充入3 kPa空气,此时信号光不被吸收,可以用来标定两路光的能量分光比。分别计算信号光脉冲面积的平均值 S_{air} 和参考光脉冲面积的平均值 R_{air} ,得到系统的分光比 $\beta = S_{\text{air}}/R_{\text{air}}$ 。

2) 然后将吸收池抽真空并用纯度为99.999%的 CO_2 气体冲洗吸收池,充入3 kPa的 CO_2 气体,将激光器波长调谐到 CO_2 吸收峰 1572.018 nm 处,分别计算信号光脉冲能量的平均值 S_{CO_2} 和参考光脉冲能量的平均值 R_{CO_2} ,光谱纯度可以由(5)式计算得到。

$$S_p = 1 - \frac{S_{\text{CO}_2}}{\beta \cdot R_{\text{CO}_2}} = 1 - \frac{S_{\text{CO}_2} R_{\text{air}}}{R_{\text{CO}_2} S_{\text{air}}} \quad (5)$$

如果在OPO聚焦进多模光纤前加入积分球,则可以解决OPO脉冲指向稳定性带来的误差,但因积分球对光强衰减过大,导致进入耦合光路的脉冲能量太低,对探测器的弱光探测极限提出了更高的要求。另外,如果耦合进多模光纤的脉冲能量过高,有可能在多模光纤中产生非线性效应,造成光谱展宽。

4 结果与讨论

OPO输出光谱纯度不仅与种子注入功率有关,也与注入种子带宽有关,采用延时拍频法测得,CW种子激光器的输出线宽约600 kHz,如图6所示,种子线宽远小于脉冲OPO输出线宽(40 MHz),在研究光谱纯度时,可以忽略种子激光器线宽的影响。

吸收池内充10 kPa气体,选用能量探测器接收吸收池出射光的能量,计算了激光器的光谱纯度。采集500组脉冲,根据(5)式计算其光谱纯度,结果如图7所示。插图表示能量探测器输出的信号,第一个台阶表示第一个脉冲的能量,两个台阶的差值表示第二个脉冲的能量,在信号脉冲信号到来前,触发信号会将探测器清零,消除电噪声的影响。

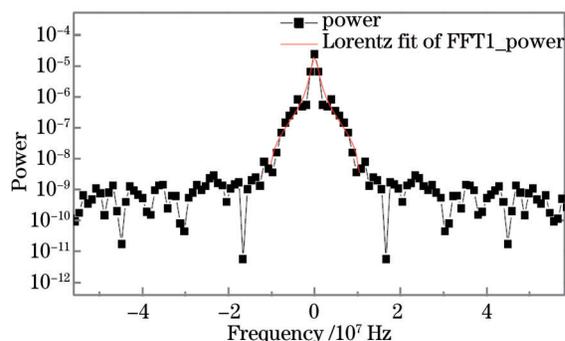


图6 DFB连续种子激光器的输出线宽

Fig.6 Linewidth of CW DFB seed laser

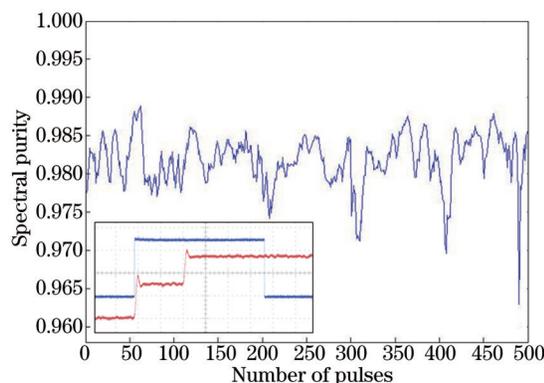


图7 能量探测器测量的光谱纯度

Fig.7 Spectral purity measured with energy detector

由图7可知,用能量探测器直接测量光脉冲的能量时,平均光谱纯度为98%,而且波动较大。其原因是能量探测器内部为峰值保持电路,精度较低,无法满足系统的测试精度,因此更换探测器,采用雪崩光电二极管和积分电路作为能量测量模块,在同样的条件下测量OPO的光谱纯度,结果如图8所示。插图表示积分电路对APD脉冲信号积分后的波形,方波信号为采集卡提供触发信号,避免采集电噪声。

由图8可知,单频脉冲激光器的平均光谱纯度达到99.9%,稳定度有所提升,但是主动稳频时谐振腔的长度抖动会带来噪声,探测器的非线性响应和积分电路的热噪声也会产生干扰。

在抽运能量超过阈值倍数不太多的情况下,OPO输出能量与抽运能量基本成线性关系。为了探究抽运能量对OPO光谱纯度的影响,测试了不同抽运能量下的光谱纯度,结果如图9所示。

由图9可见,当抽运能量为8.3 mJ时,OPO输出单脉冲能量为1.1 mJ,光谱纯度最高,为99.9%。抽运能量低,OPO处于谐振阈值附近,性能不稳定,而抽运能量过高,又会使种子模式之外的其他纵模获得增益起振,展宽了输出线宽,降低光谱纯度。另外,抽运能量越高,光谱纯度对晶体角度和共振调谐越敏感,由于抽运光在晶体内部造成轻微的热效应,使注入模式与谐振腔发生了少量的相位失配,降低光谱纯度。抽运能量增大、OPO输出多模、种子注入失效、发生逆转换、抽运频率展宽,这些都增加光谱纯度的敏感性。较小的角度失配(种子波长与OPO自由运转的增益中心相差0.15 nm)可获得最大的光谱纯度,并且在0.05个自由光谱范围内都能稳定运转(即谐振腔失谐0.1 nm)。

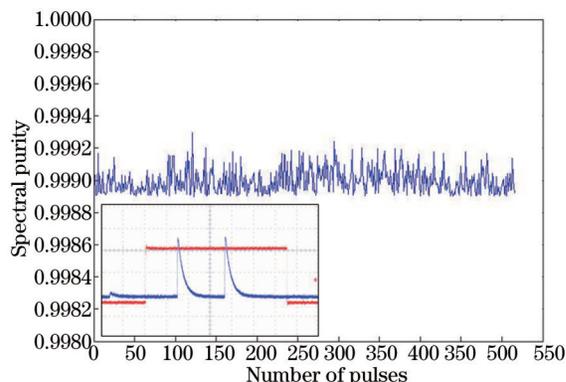


图8 APD测量的光谱纯度

Fig.8 Spectral purity measured with APD

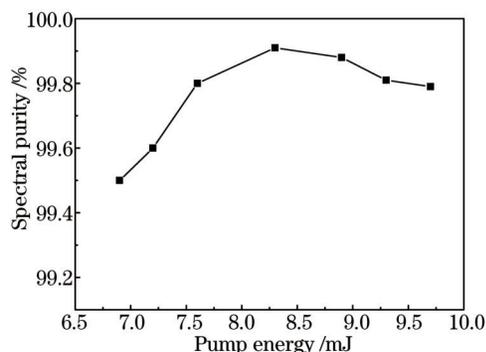


图9 不同抽运能量下的光谱纯度

Fig.9 Spectral purity with different pump energy

5 结 论

研究了1.57 μm 波段单频脉冲OPO输出光谱纯度特性,理论分析了光谱纯度的影响因素,计算了测量光谱纯度所需的 CO_2 吸收池长度和内充气体压强要求,最终搭建光谱纯度测量装置,实现对OPO输出脉冲激光的光谱纯度进行测量。通过对比不同测试条件(种子功率、抽运能量等)和不同器件下的结果,获得了OPO输出最高光谱纯度时的对抽运脉冲能量要求,为相关研究提供参考。实验结果表明,当抽运能量为8.3 mJ(2.5

倍阈值)时,OPO输出单脉冲能量为1.1 mJ,光谱纯度测量值达到99.9%。

参 考 文 献

- 1 Wei Rong. All solid-state laser system with high peak power and high average power used in air-borne lidar[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2001, 38(4): 45-53.
魏 荣. 用于机载光雷达的高峰值功率高平均功率全固态激光系统[J]. *激光与光电子学进展*, 2001, 38(4): 45-53.
- 2 Fan Guangqiang, Zhang Tianshu, Fu Yibin, *et al.*. Temporal and spatial distribution characteristics of ozone based on differential absorption lidar in Beijing[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(10): 1014003.
范广强, 张天舒, 付毅宾, 等. 差分吸收激光雷达监测北京灰霾天臭氧时空分布特征[J]. *中国激光*, 2014, 41(10): 1014003.
- 3 He Tao, Hou Lujian, Lü Bo, *et al.*. Study of accuracy of lidar inversion PM2.5 concentration[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0113001.
何 涛, 侯鲁健, 吕 波, 等. 激光雷达探测反演PM2.5浓度的精度研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0113001.
- 4 Li Peng, Ma Yayun, Nie Dandan, *et al.*. Continuous-wave single frequency 1.5 μm laser generated by a singly resonant optical parametric oscillator[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(8): 0802008.
李 鹏, 马云云, 聂丹丹, 等. 利用单共振光学参量振荡器产生1.5 μm 连续单频激光[J]. *中国激光*, 2014, 41(8): 0802008.
- 5 Ehret G, Kiemle C, Wirth M, *et al.*. Space-borne remote sensing of CO₂, CH₄, and N₂O by integrated path differential absorption lidar: a sensitivity analysis[J]. *Appl Phys B*, 2008, 90(3): 593-608.
- 6 Barnes N P, Barnes J C. Injection seeding I: theory[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1993, 29(10): 2670-2683.
- 7 Ismail S, Browell E V. Airborne and spaceborne lidar measurements of water vapor profiles: a sensitivity analysis[J]. *Applied Optics*, 1989, 28(17): 3603-3615.
- 8 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]. *Appl Phys B*, 1998, 67(4): 427-431.
- 9 Mahnke P, Klingenberg H H, Fix A, *et al.*. Dependency of injection seeding and spectral purity of a single resonant KTP optical parametric oscillator on the phase matching condition[J]. *Appl Phys B*, 2007, 89(1): 1-7.
- 10 Fix A, Budenbender C, Wirth M, *et al.*. Optical parametric oscillator and amplifiers for airborne and spaceborne active remote sensing of CO₂ and CH₄[C]. *SPIE*, 2011, 8182: 818206.
- 11 Bosenberg J. Ground-based differential absorption lidar for water-vapor and temperature profiling: methodology[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(18): 3845-3860.
- 12 White R T, He Y, Orr B J, *et al.*. Transition from single-mode to multimode operation of an injection-seeded pulsed optical parametric oscillator[J]. *Optics Express*, 2004, 12(23): 5655-5660.
- 13 Mahnke P, Wirth M. Real-time quantitative measurement of the mode beating of an injection-seeded optical parametric oscillator [J]. *Appl Phys B*, 2010, 99(1): 141-148.
- 14 Xie Yangyi, Liu Jiqiao, Jiang Jiabin, *et al.*. Wavelengths optimization to decrease error for a space-borne lidar measuring CO₂ concentration[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 88-93.
谢杨易, 刘继桥, 姜佳欣, 等. 使CO₂浓度测量误差减小的星载激光雷达波长优化[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(1): 88-93.
- 15 Wu Chengjiu, Wei Heli, Yuan Yiqian, *et al.*. The high-resolution absorption spectra of atmosphere measured by laser long-path absorption spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(2): 238-242.
邬承就, 魏合理, 袁恽谦, 等. 激光长程吸收光谱法测量高分辨率大气吸收光谱[J]. *光学学报*, 2002, 22(2): 238-242.
- 16 Poberaj G, Fix A, Assion A, *et al.*. Airborne all-solid-state DIAL for water vapour measurements in the tropopause region: system description and assessment of accuracy[J]. *Appl Phys B*, 2002, 75(2-3): 165-172.
- 17 Li Shiguang. Research on Injection Seeded Single Frequency 1.57 μm Pulsed All Solid-state Laser[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, 2013.
李世光. 种子注入单频1.57 μm 脉冲全固态激光器技术研究[D]. 上海: 中科院上海光学精密机械研究所, 2013.

栏目编辑: 宋梅梅