

基于长程气体吸收池的单频纳秒脉冲激光 光谱纯度测量

陈晓^{1,2}, 李世光^{1*}, 朱小磊^{1**}, 马秀华¹, 刘继桥¹, 陈卫标¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 基于长程气体吸收池技术, 搭建了针对波长为 1572 nm 的单频激光的光谱纯度测量装置, 理论分析了测量精度的影响因素, 并推导出误差计算公式。结果表明, 该装置可精确测量光谱纯度为 90%~99.999% 的激光输出。使用该装置对 1572 nm 种子注入光参量振荡器输出的单频纳秒脉冲进行测量, 测得其光谱纯度为 $(99.996 \pm 0.0005)\%$, 达到工业应用的要求。

关键词 测量; 脉冲激光; 光谱纯度; 吸收池; 误差分析

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0204006

Spectral Purity Measurement of Single-Frequency Nanosecond Laser Pulse Based on Long Path Absorption Cell

Chen Xiao^{1,2}, Li Shiguang^{1*}, Zhu Xiaolei^{1**}, Ma Xiuhua¹, Liu Jiqiao¹, Chen Weibiao¹

¹Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

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

Abstract A spectral purity measuring system based on long path absorption cell is built to measure the spectral purity of 1572 nm laser. The error calculation formula of this system is deduced and the factors influencing the measurement accuracy is theoretically analyzed. The results show that the accurately measured spectral purity range is 90%~99.999%. Based on this system, the spectral purity of a self-developed 1572 nm injection-seeded optical parameter oscillator is measured to be $(99.996 \pm 0.0005)\%$, which fulfills the industrial application requirements.

Key words measurement; pulsed laser; spectral purity; absorption cell; error analysis

OCIS codes 140.3538; 300.6360; 120.6200

1 引言

单频纳秒脉冲激光发射源是激光雷达的核心部件^[1-2], 其输出脉冲能量、光谱纯度、频率稳定性等参数直接影响激光雷达的性能^[3-4]。应用于大气 CO₂ 浓度探测的星载积分路径差分吸收 (IPDA) 激光雷达系统^[5], 其激光发射源的光谱纯度会直接影响雷达对激光传输路径上目标气体对激光脉冲能量的吸收情况的判断, 从而影响激光雷达的探测精度。当选择 1572 nm 波长作为 CO₂ IPDA 激光雷达的工作波段时, 通常要求激光光源输出的单频纳秒脉冲

的光谱纯度达到 99.90% 以上^[4,6]。因此, 高精度的光谱纯度测量装置对 IPDA 激光雷达系统的研制具有重要意义。

激光光谱纯度表征单频激光器的输出脉冲中指定光谱窄带部分的能量占总能量的比例^[7]。从理论上分析, 选取合适的光学滤波器 (如气体吸收池), 将指定光谱窄带部分和光谱不纯部分分开, 通过测量二者的能量占比就可以计算出光谱纯度。1994 年, Ponsardin 等^[8] 搭建了基于氧气吸收池的光谱纯度测量系统, 用该系统对一台 760 nm 激光器进行测量, 发现该激光器的光谱纯度优于 99.99%。2010

收稿日期: 2018-09-25; 修回日期: 2018-10-23; 录用日期: 2018-11-01

* E-mail: sgli@siom.ac.cn; ** E-mail: xlzhu@siom.ac.cn

年, Mahnke 等^[9]利用水分子吸收池测量了 935 nm 波长的光参量振荡器(OPO)的光谱纯度,指出其光谱不纯部分的能量占比小于 10^{-5} ,并发现纵模间拍频强度可以在一定程度上反映种子注入 OPO 的光谱纯度。2011 年, Fix 等^[10]用 CO_2 吸收池测量了 1572 nm 种子注入 OPO 输出的光谱纯度,结果表明种子光功率高于 $150 \mu\text{W}$ 时, OPO 输出光谱纯度高于 99.98%。2015 年, 姜佳欣等^[11]给出了光谱纯度测量系统中吸收池参数的选择依据,并从理论上分析了待测光频率稳定性对光谱纯度测量结果的影响。尽管基于长程气体吸收池的窄带滤波方法在光谱纯度测量方面已有广泛应用,但目前鲜有关于光谱纯度测量系统可靠性及测量误差分析的报道。

本文针对精确测量自行研制的 1572 nm 波段激光雷达发射源光谱纯度的需求,设计并搭建了一套基于长程气体吸收池的光谱纯度测量装置。从光谱纯度测量的原理出发,导出测量误差计算方法,并深入分析了能量探测过程、衰减片定标、光路扰动等因素对测量结果的影响。

2 光谱纯度测量原理

窄线宽激光器输出中,指定光谱窄带部分和光谱不纯部分的差异是实现光谱纯度测量的基础。单频输出激光器一般通过干涉选模、纵模选择加强、种子注入等方法来获得单纵模输出^[2],其输出能量集中在一个纵模上,因而具有很窄的线宽,即所谓的光谱窄带部分。这部分能量占激光器总输出能量的比值就是单频激光器的光谱纯度,它反映的是激光器的单纵模运行状态。实际的单频激光器输出频率中总会包含主振荡模式以外的频率成分,包括放大自发辐射(ASE)和其他未被完全抑制的纵模,它们分布在很宽的光谱范围内,导致光谱中存在不纯部分。根据指定的光谱窄带部分和光谱不纯部分的频谱差异,选取合适的光学滤波器滤掉指定的光谱窄带部分的能量,只让光谱不纯部分能量透过,就能找出二者的能量占比,从而计算出光谱纯度。

待测的单频 1572 nm 激光发射源是通过种子注入 OPO 技术来实现的^[12]。该种子注入 OPO 输出激光波长位于 CO_2 的一条吸收线中心处(1572.019 nm),单脉冲能量为 1.5 mJ,脉宽约为 28 ns,拍频法测得的线宽约为 40 MHz,因此激光脉冲能量主要集中在约 100 MHz 的窄带范围内。无种子注入时, OPO 输出谱宽约为 20 GHz,纵模间隔为 1.2 GHz。测量时为了将 OPO 输出脉冲的光谱

窄带部分和光谱不纯部分分开,要求光学滤波器的带宽达到 100 MHz 量级,而长程 CO_2 气体吸收池具备这个能力。本实验设计了光程长度为 210 m 的吸收池,利用 HITRAN 数据库提供的 CO_2 吸收截面参数,可以计算出室温下 3 kPa 压强时池内 CO_2 透过率的特征曲线(图 1)。曲线的半峰全宽为 630 MHz,远大于光谱窄带部分的宽度,小于 OPO 纵模间隔,且远小于整个光谱不纯部分的宽度。

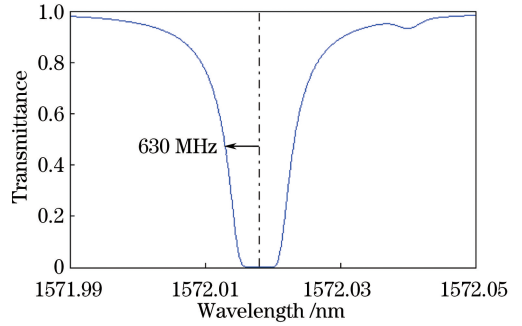


图 1 光程长度为 210 m 的吸收池充 3 kPa CO_2 时的透过率曲线

Fig. 1 Transmittance of 210 m absorption cell filled with 3 kPa of CO_2

首先,理论上可以计算出该吸收池对光谱窄带部分的透过率 T_{purity} 和对光谱不纯部分的透过率 T_{impurity} ,分别为 $T_{\text{purity}} \approx 10^{-6}$, $T_{\text{impurity}} > 0.9$,两者相差 6 个数量级,因此该吸收池可以很好地鉴别两种光谱的成分。实际测量时通常只能获得光脉冲经过吸收池的总透射率 T_{CO_2} ,其与光谱纯度值 S_p 和 T_{purity} 、 T_{impurity} 具有如下关系:

$$S_p = 1 - \eta \cdot T_{\text{CO}_2} = 1 - \left(\frac{1 - T_{\text{purity}}/T_{\text{CO}_2}}{T_{\text{impurity}} - T_{\text{purity}}} \right) \cdot T_{\text{CO}_2} \quad (1)$$

当 $T_{\text{purity}} \ll T_{\text{CO}_2} < T_{\text{impurity}}$, 且 $T_{\text{impurity}} \rightarrow 1$ 时, $\eta \approx 1$, $S_p \approx 1 - T_{\text{CO}_2}$ 。测量激光经过吸收池的透射率 T_{CO_2} ,就可以求出待测光的光谱纯度。

3 光谱纯度测量装置及误差分析

3.1 实验装置

根据上述原理,搭建了图 2 所示的光谱纯度测量装置,包含单模传输光纤、部分反射镜(M)、长程气体吸收池、中性衰减片(A1、A2)、光电探测器(PD1、PD2)、数据采集卡等。

待测激光脉冲从自由空间耦合到单模保偏光纤中,经准直后再出射。出射光被分束镜 M 分成两束,透射部分作为参考光被探测器 PD2 接收,用作

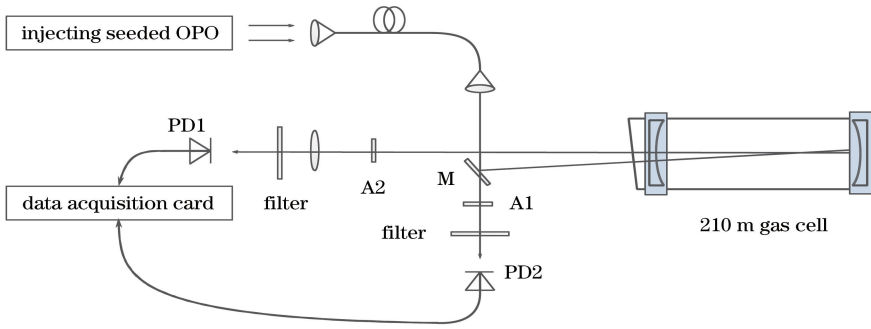


图 2 光谱纯度测量系统

Fig. 2 Spectral purity measurement system

脉冲能量监测;反射部分作为信号光入射到吸收池中,在吸收池内多次反射,累计达到 210 m 光程后由窗口出射,被探测器 PD1 接收。PD1 和 PD2 为相同型号的铟镓砷光电探测器 (PDA10CF-EC, Thorlabs 公司,美国,带宽为 150 MHz),其输出电压信号直接被高速采集卡 (PCI-5154, National Instruments 公司,美国,采样深度为 8 位,单通道最大采样率为 2 GS/s) 记录。与参考光相比,信号光在吸收池中多传输了 210 m,产生约 700 ns 的延时,如图 3 所示。光电探测器输出的电压信号代表了探测面接收的光功率,分别对图 3 的两个信号进行积分,得到参考光和信号光的能量值。

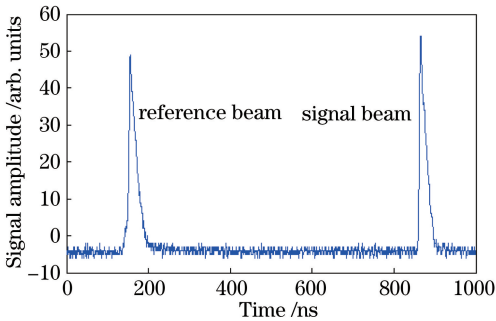


图 3 采集卡记录的参考光和信号光脉冲

Fig. 3 Reference and signal pulses recorded by data acquisition card

3.2 测量过程及误差计算

1) 在吸收池内充入 3 kPa 高纯度 CO₂, 信号光路不加衰减片, 调节参考光路的中性衰减片 A1, 使得探测器接收到的参考光和信号光幅度相近 (图 3)。吸收池内充满 3 kPa 压强的 CO₂ 气体时, CO₂ 气体将吸收部分入射光, 相应的透过率记为 T_{CO₂}。

2) 将吸收池抽真空 (池内压强小于 10 Pa), 此时信号光幅度将显著增强。在信号光路加衰减片 A2, 再次使得探测器接收到的参考光和信号光幅度

相近。A2 的透过率记为 T_{A2}, 结合测量过程的第 1) 步, 可知 T_{A2} ~ T_{CO₂}。以波形的积分作为能量, 求出探测器接收到的参考光能量 E_{ref} 和信号光能量 E_{sig} 之间的关系, 如图 4 (6000 组数据) 所示。用最小二乘法对二者的线性关系进行拟合, 可得到 E_{sig} = a · E_{ref} + b, 根据该线性关系可以由测得的参考光能量值求出未被 CO₂ 吸收的信号光能量。

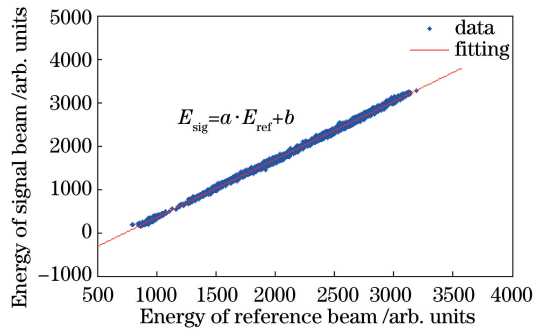


图 4 参考光和信号光的能量相关性

Fig. 4 Energy relationship between reference and signal beams

图 4 中离散数据点相对拟合曲线的偏离程度反映了能量测量的误差。由于信号光路和参考光路使用同一采集卡及相同型号的探测器, 且两个脉冲幅度相近, 可以认为二者的能量测量误差呈相同分布, 用 σ_{ref}、σ_{sig} 分别表示其误差的方均根, 则有 σ_{ref} = σ_{sig}。根据参考光能量来计算信号光能量时的误差记为 σ_{relate}, 它和 σ_{sig} 以及拟合直线 E_{sig} = a · E_{ref} + b 的关系为

$$\sigma_{relate} = \sqrt{1 + a^2} \sigma_{sig} = \text{std}\{E_{sig} - E_{ref} \cdot a - b\}, \quad (2)$$

式中: std{·} 为标准差计算函数。令 δ = E_{sig} - a · E_{ref} - b, 则 δ 的频数分布如图 5 所示, 根据该分布可以求出 σ_{relate}, 进而求出 σ_{sig}。δ 的分布呈现出明显的高斯分布特征, 表明能量测量误差为随机误差。

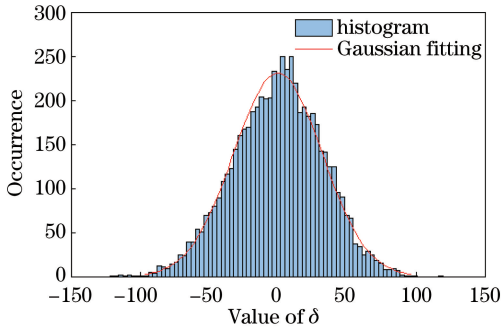


图 5 δ 的频数分布

Fig. 5 Frequency number distribution of δ

3)再次在吸收池内充入 3 kPa 压强的高纯度 CO_2 , 去掉信号光路的衰减片 A2, 实时记录此时的参考光能量 E'_{ref} 和信号光能量 E'_{sig} 。由 $E_{\text{sig}} = a \cdot E_{\text{ref}} + b$ 和(1)式, 可以得到吸收池透过率 T_{CO_2} 和待测光光谱纯度 S_p 的关系:

$$T_{\text{CO}_2} = \frac{E'_{\text{sig}} \cdot T_{\text{A2}}}{E'_{\text{ref}} \cdot a + b}, \quad (3)$$

$$S_p = 1 - \eta \cdot T_{\text{CO}_2} = 1 - \eta \cdot \frac{E'_{\text{sig}} \cdot T_{\text{A2}}}{E'_{\text{ref}} \cdot a + b}. \quad (4)$$

在(3)式和(4)式中, 只有 E'_{ref} 和 E'_{sig} 会引入随机误差。根据随机误差合成公式^[13]:

$$\sigma_{S_p}^2 = \left(\frac{\partial S_p}{\partial E'_{\text{sig}}} \right)^2 \cdot \sigma_{E'_{\text{sig}}}^2 + \left(\frac{\partial S_p}{\partial E'_{\text{ref}}} \right)^2 \cdot \sigma_{E'_{\text{ref}}}^2, \quad (5)$$

可以求出 S_p 的方均根误差:

$$\sigma_{S_p} = \frac{\eta \cdot \sigma_{\text{sig}} \cdot T_{\text{A2}}}{(aE'_{\text{ref}} + b)^2} \sqrt{(aE'_{\text{ref}} + b)^2 + a^2 E_{\text{sig}}'^2}. \quad (6)$$

由(6)式可知, σ_{S_p} 和 E'_{ref} 、 E'_{sig} 有关, 每个脉冲都对应一个 σ_{S_p} 。这是因为光谱纯度值是光谱窄带部分和总能量的比值, 虽然能量测量值的方均根误差 σ_{sig} 相对固定, 但能量测量的相对误差值 $\sigma_{\text{sig}}/E'_{\text{sig}}$ 和 $\sigma_{\text{ref}}/E'_{\text{ref}}$ 是变化的。根据随机误差的 3σ 准则^[13], 光谱纯度测量结果可以记为 $S_p \pm 3\sigma_{S_p}$ 。 σ_{S_p} 可以用于判断当前的光谱纯度测量值 S_p 是否有效, 当 $3\sigma_{S_p} < 1 - S_p$ 时, 可以认为测量结果可靠。

3.3 影响光谱纯度测量误差的因素

从(4)式和(6)式可以看出, 影响光谱纯度测量结果准确性的参数主要有 σ_{sig} 、 T_{A2} 、 η 、 a 和 b 。 σ_{sig} 为脉冲能量测量误差, 呈高斯分布, 主要受探测器噪声、采集卡噪声、采样深度和采样率等因素的影响。本实验所用的采集卡(PCI-5154)的采样深度为 8 位, 采集卡噪声幅度相对所选量程的比值基本固定, 因此使用较大量程时, 探测器的噪声可以忽略不计。 T_{A2} 为信号光路所加衰减片的透

过率, 其数值可通过定标测量得到, T_{A2} 测量值和真实值的偏差和衰减片透过率的不均匀性会导致 S_p 测量值出现微小偏差, 但对随机误差 σ_{S_p} 没有影响。 a 和 b 可通过大量数据点拟合得到, 对 a 和 b 的值进行多次测量并将各组测量值分别代入(4)式计算光谱纯度时, 发现它们对光谱纯度测量结果的影响远小于 σ_{S_p} , 因此数据拟合过程引入的 a 、 b 数值的误差可以忽略不计。但问题在于测量过程中, 光路上的扰动可能引起光束指向性变化, 使探测器上接收到的能量大小发生变化, 从而改变 a 和 b 的值, 导致参考光能量和信号光能量呈现额外的线性关系(图 6), 这将导致参考光路的能量监测过程失效。选取合适的光路参数, 可以提高光路的抗干扰能力, 减小对 a 、 b 值的影响, 从而提高能量监测的可靠性。

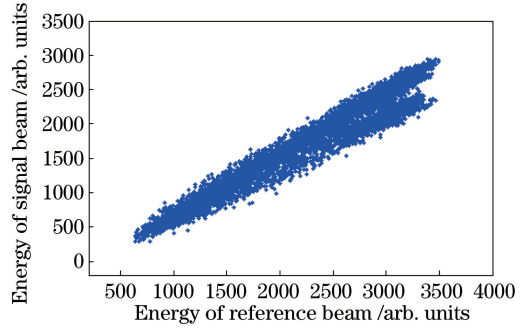


图 6 a 、 b 发生变化时参考光和信号光能量的相关性

Fig. 6 Energy relationship between reference and signal beams when a and b change

η 由 T_{purity} 、 T_{impurity} 、 T_{CO_2} 决定。当 $T_{\text{purity}} \ll T_{\text{CO}_2} < T_{\text{impurity}}$, 且 $T_{\text{impurity}} \rightarrow 1$ 时, $\eta \approx 1$, $S_p \approx 1 - T_{\text{CO}_2}$ 。对于本实验所用的 CO_2 吸收池, T_{purity} 约为 10^{-6} , T_{impurity} 大于 0.9。当 $10^{-5} < 1 - S_p < 10^{-1}$ 时, $\eta \approx 1$ 和 $S_p \approx 1 - T_{\text{CO}_2}$ 都成立, 可以忽略 η 的影响。但当待测光的光谱纯度值非常高($\sim 10^{-6}$)时, T_{CO_2} 会达到与 T_{purity} 可比拟的程度, $\eta \approx 1$ 和 $S_p \approx 1 - T_{\text{CO}_2}$ 不再成立, 只能通过 $S_p = 1 - \eta \cdot T_{\text{CO}_2}$ 来计算光谱纯度。而 η 是通过理论计算得到, 其准确性依赖于激光谱分布模型的选取, 此时难以保证光谱纯度测量结果的可靠性。因此, 所提测量系统的光谱纯度的准确测量范围为 90%~99.999%。

4 实际测量应用

本实验对波长为 1572 nm 的单频种子注入 OPO 输出的窄线宽纳秒脉冲光谱纯度进行测量, 测量结果如图 7(10000 个脉冲)所示。种子注入 OPO

输出信号光谱纯度 S_p 的均值为 99.996%, σ_{S_p} 的均值为 0.00016%, 光谱纯度的典型测量值可以记为 $(99.996 \pm 0.0005)\%$ 。对于每个测量值, 均有 $10^{-5} < 1 - S_p < 10^{-1}$ 和 $3\sigma_{S_p} < 1 - S_p$, 说明本实验的

测量结果都是有效的, 即该系统可以实现单个脉冲光谱纯度的精确测量。该测量结果同时证明了所研制的 1572 nm 种子注入 OPO 光源能够满足星载 CO₂ 激光雷达对发射源光谱纯度的要求。

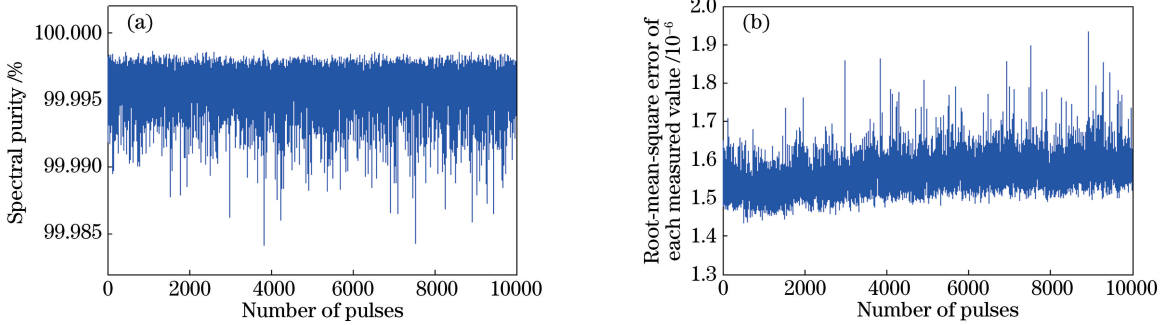


图 7 1572 nm 种子注入 OPO 输出脉冲的光谱纯度。(a) S_p ; (b) σ_{S_p}

Fig. 7 Spectral purity of output pulse of 1572 nm injection-seeded OPO. (a) S_p ; (b) σ_{S_p}

5 结 论

针对高精度测量光谱纯度的应用需求, 搭建了一套基于长程气体吸收池的光谱纯度测量装置, 推导出光谱纯度测量值 S_p 和误差分布方均根 σ_{S_p} 的表达式, 讨论了影响测量精度的因素, 并给出该装置的应用范围。对于所设计的 CO₂ 吸收池, 该装置可准确测量光谱纯度为 90%~99.999% 的激光发射源的光谱纯度, 并且能够实现单个脉冲光谱纯度的精确测量。

应用该系统对 1572 nm 种子注入 OPO 输出的单频纳秒脉冲光谱纯度进行了测量。测量结果显示, 其光谱纯度为 $(99.996 \pm 0.0005)\%$, 表明所研制的种子注入 OPO 激光光源具有很高的光谱纯度。此外, 通过改变吸收池内气体的种类, 该装置还具备测量其他波段激光发射源的光谱纯度的能力。

参 考 文 献

[1] Hu S X, Chen Y F, Liu Q W, *et al.* Differential absorption lidar system for background atmospheric SO₂ and NO₂ measurements[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(9): 0911009.
胡顺星, 陈亚峰, 刘秋武, 等. 差分吸收激光雷达系统探测背景大气 SO₂ 和 NO₂ [J]. 中国激光, 2018, 45(9): 0911009.

[2] Li F. Research on single frequency Q-switched double-pulse DPSSL [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2013.
李峰. 单频调 Q 双脉冲全固态激光器技术研究[D].

上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2013.

[3] Du J, Sun Y G, Chen D J, *et al.* Research of a compact iodine-stabilized diode laser at 1064 nm[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(7): 0701006.
杜鹃, 孙延光, 陈迪俊, 等. 小型化碘稳频 1064 nm 半导体激光器研究 [J]. 中国激光, 2018, 45(7): 0701006.

[4] 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]. Applied Physics B, 2008, 90(3/4): 593-608.

[5] Du J, Liu J Q, Bi D C, *et al.* Validation of double-pulse 1572 nm integrated path differential absorption lidar measurement of carbon dioxide[J]. EPJ Web of Conferences, 2018, 176: 01031.

[6] Caron J, Durand Y, Bezy J L, *et al.* Performance modeling for A-SCOPE: a space-borne lidar measuring atmospheric CO₂ [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7479: 74790E.

[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] Ponsardin P, Higdon N S, Grossmann B E, *et al.* Spectral control of an alexandrite laser for an airborne water-vapor differential absorption lidar system [J]. Applied Optics, 1994, 33(27): 6439-6450.

[9] Mahnke P, Wirth M. Real-time quantitative measurement of the mode beating of an injection-seeded optical parametric oscillator [J]. Applied Physics B, 2010, 99(1/2): 141-148.

[10] Fix A, Büdenbender C, Wirth M, *et al.* Optical

- parametric oscillators and amplifiers for airborne and spaceborne active remote sensing of CO₂ and CH₄ [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8182: 818206.
- [11] Jiang J X, Li S G, Ma X H, *et al.* Investigation on spectral purity of injection seeding single frequency pulsed optical parametric oscillator [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(7): 0702011.
姜佳欣, 李世光, 马秀华, 等. 种子注入单频脉冲光参量振荡器的光谱纯度研究 [J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0702011.
- [12] Li S G, Li H H, Ma X H, *et al.* High-efficiency nanosecond optical parametric oscillator with the stable ring configuration [J]. Laser Physics, 2012, 22(10): 1610-1614.
- [13] Qian Z, Wang Z Y, Liu G L. The testing error analysis and data processing [M]. Beijing: Beihang University Press, 2008: 17-42.
钱政, 王中宇, 刘桂礼. 测试误差分析与数据处理 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008: 17-42.