

空芯光子晶体光纤吸收池的激光稳频技术

黄崇德^{1,2} 陈迪俊^{1*} 蔡海文¹ 叶青¹ 刘晔³ 瞿荣辉¹ 陈卫标¹

¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所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
³ 中国科学院安徽光学精密机械研究所安徽光子器件与材料重点实验室, 安徽 合肥 230031

摘要 针对星载积分路径差分吸收(IPDA)激光雷达的应用需求,研制了一套利用空芯光子晶体光纤(HC-PCF)作为吸收池,以 CO₂ 气体 1.57 μm 处的吸收线作为频率参考,基于频率调制光谱稳频技术的激光稳频系统。结合其工作原理,建立仿真模型,计算了 CO₂ 气压、光谱调制频率以及调制深度对稳频误差信号的影响,给出最优化的设计参数。并且与实验测试数据进行了比对,实验数据与计算结果吻合。报道了系统的稳频效果,给出进一步提升稳频性能的方案意见。

关键词 激光器;频率稳定;空芯光子晶体光纤;空间光学;积分路径差分吸收雷达

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0802006

Laser Frequency Stabilization Technology Based on Hollow-Core Photonics Crystal Fiber Gas Cell

Huang Chongde^{1,2} Chen Dijun¹ Cai Haiwen¹ Ye Qing¹ Liu Ye³
Qu Ronghui¹ Chen Weibiao¹

¹ Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Fine Mechanics and Optics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
³ Anhui Provincial Key Laboratory of Photonics Devices and Materials, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract A laser frequency stabilization system for the space integrated path differential absorption (IPDA) lidar is developed. The gas cell is made of the hollow-core photonics crystal fiber (PCF) filled with the CO₂ and the absorption line around 1.57 μm is used as the laser frequency reference. The frequency modulation spectroscopy technique is used to stabilize the laser frequency. The impact of the pressure of CO₂, the modulation frequency and depth on the error signal's slope is simulated, and the optimal parameters are given. The computed results are coincident with the measured results. At last, the performance of the laser frequency stabilization is shown, and the suggestion for further improvement is given.

Key words lasers; frequency stabilization; hollow-core photonics crystal fiber; space optics; integrated path differential absorption lidar

OCIS codes 140.3425; 060.4005; 350.6090; 280.1910

收稿日期: 2014-02-18; 收到修改稿日期: 2014-03-13

基金项目: 国家自然科学基金(61108028, 61178031)、上海市科委重点基础项目(11JC1413500)、民用航天项目(D030104)、中国科学院无机功能材料与器件重点实验室开放课题(KLIFMD-2012-06)

作者简介: 黄崇德(1986—),男,博士研究生,主要从事激光器稳频技术方面的研究。E-mail: huanged@siom.ac.cn

导师简介: 瞿荣辉(1972—),男,研究员,博士生导师,主要从事光电子器件与信息系统技术等方面的研究。

E-mail: rhqu@siom.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: djchen@siom.ac.cn

1 引 言

随着经济与文化的高速发展,人们越来越重视环境气候问题对社会可持续发展的影响,其中一个主要问题就是温室气体对全球气候的影响。研究发现,如今大气中 CO₂ 气体浓度要远高于过去 420 000 年前^[1],加上近年来全球气候变暖和一些恶劣天气的出现,已经说明大气中 CO₂ 含量与气候变化是存在密切联系的。因此,需要一种手段能够观测全球范围的 CO₂ 浓度分布和变化,以了解和分析 CO₂ 的源头和碳元素的循环演化过程。星载积分路径差分吸收(IPDA)激光雷达技术就是有效的测量手段之一,该技术基于主动激光差分吸收光谱方法,能够不依赖于太阳光反射,不易受云或大气气溶胶的干扰,能实现全天候、高精度的 CO₂ 浓度测量^[2-3]。

为了保证星载 IPDA 激光雷达测量的功能和高精度,要求探测光频率精确锁定在 CO₂ 的 1.57 μm 吸收线上,并且要有较高的频率稳定度,因此需要一个稳频激光器作为其种子光源^[3]。但由于 CO₂ 在 1.57 μm 处的吸收强度较弱,需要有长光程的吸收池来保证足够的信噪比(SNR)。传统的长光程体光学吸收池如 White 池和 Herriott 池,体积大,质量重,要实现高气密性在工艺上也存在较大难度,不适合星载需求^[4-5]。近年来日益成熟的空芯光子晶体光纤(HC-PCF)成为制作小型化微腔结构气体吸收池的很好的选择^[6-7]。空芯光子晶体光纤可以同时

作为气体的容器和导光介质,能很好地满足激光与气体较长的相互作用距离的要求,并且光纤结构可弯曲,质量轻,通过与普通光纤熔接就能实现优异的气密效果,能很好地满足星载要求。

本文主要报道了基于光子晶体光纤(PCF)吸收池的激光稳频系统的理论模型,计算了关键参数对误差信号的影响,给出了优化设计的结果,并结合实验测试数据进行了对比和分析,给出了目前已经实现的稳频结果以及进一步提升稳频性能的方案。

2 系统原理与仿真模型

该套激光稳频系统采用了频率调制光谱技术来实现频率稳定,其系统框图如图 1 所示,分布式反馈(DFB)半导体激光器(LD)输出光经过隔离器(ISO),由光纤耦合器(OC)分为两路,一路作为种子光输出,另一路经电光相位调制器(EOM)调制后注入到充有 CO₂ 气体的 HC-PCF 吸收池,再由光电探测器(PD)转换为探测电信号。直接数字频率合成器(DDS)为 EOM 提供射频调制信号,并在 PD 后端电路与探测电信号进行混频解调,得到的误差信号如图 1 左上角插图所示,利用误差信号中间的线性变化区域来表征激光频率的变化情况,经比例、积分、微分(PID)伺服控制系统调节 DFB 激光器的出光频率,实现闭环反馈。图中黑色粗实线为光纤链路,虚线为电子学链路。

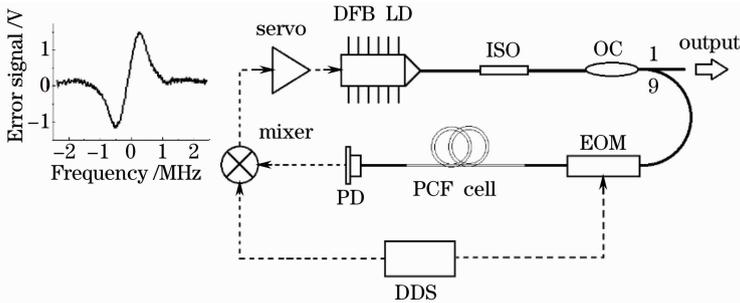


图 1 基于 PCF 吸收池的激光稳频系统原理框图

Fig. 1 Schematic of the frequency stabilization laser system based on PCF gas cell

所采用的稳频方案与利用法布里-珀罗干涉仪作为频率参考的 Pound-Drever-Hall 稳频技术类似,需要先对激光的相位进行调制,经过频率参考源后加载上有用的频率信息,再经电路混频解调产生误差信号来实现闭环反馈^[8-10]。首先,激光注入到 EOM 进行相位调制,可以表示为

$$E_m = |E_0| \exp[i(\omega t + \beta \sin \Omega t)], \quad (1)$$

式中 E_0 为相位调制器的入射光电场强度; ω 为角频率; β 为 EOM 对激光的调制深度; $\Omega = 2\pi f$ 为调制角

频率,其中 f 为调制频率; E_m 为调制后的输出光的电场强度,与 E_0 同是复数表示。(1)式用贝塞尔函数展开后可以表示为

$$E_m = |E_0| \exp(i\omega t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta) \exp(in\Omega t), \quad (2)$$

式中 n 是贝塞尔函数的阶数,代表激光经过相位调制后产生的边频的阶数。调制后的光注入 CO₂ 气体吸收池,由于气体对光强的吸收,光强的损耗满足比尔-朗伯定律,输出光的光强可以表示为

$$P_{\text{out}} = |E_m F(\omega)|^2 = P_m \exp[-\alpha(\omega)L], \quad (3)$$

$$F(\omega) = \exp\left[-\frac{1}{2}\alpha(\omega)L\right] \exp(-i\omega n_{\text{cell}}L), \quad (4)$$

式中 $F(\omega)$ 为 CO_2 气体对激光电场强度的传递函数； n_{cell} 是光在吸收池内传播的折射率； L 是激光在气体中传播的光程； $\alpha(\omega)$ 是气体的吸收系数； P_m 和 P_{out} 分别表示吸收池的入射光强和出射光强。为了能全面考察不同气压条件下，气体对光的吸收，一般采用 Voigt 线型计算吸收系数^[11-12]：

$$\alpha(\omega) = SN \frac{y}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\exp(-\xi^2)}{y^2 + [(\omega - \omega_0/\alpha_D) - s - \xi]^2} d\xi, \quad (5)$$

式中 S 是吸收线强度； N 是数值密度； α_D 是多普勒线宽； y 表示气体分子间碰撞引起的展宽，是展宽量与 α_D 的比值； ω_0 是气体吸收线中心的角频率； s 表示气压导致的吸收线中心的频移，是频移量与 α_D 的比值。结合(2)式和(3)式，可以得到

$$P_{\text{out}}(\omega) = 2 |E_0|^2 \cos \Omega t \sum_{n=0}^{+\infty} \{J_n(\beta) J_{n+1}(\beta) \text{Re}\{F(\omega + n\Omega) F^*[\omega + (n+1)\Omega] - F^*(\omega - n\Omega) F[\omega - (n+1)\Omega]\}\} + 2 |E_0|^2 \sin \Omega t \cdot \sum_{n=0}^{+\infty} \{J_n(\beta) J_{n+1}(\beta) \text{Im}\{F(\omega + n\Omega) F^*[\omega + (n+1)\Omega] - F^*(\omega - n\Omega) F[\omega - (n+1)\Omega]\}\}, \quad (6)$$

式中只具体考虑了对误差信号有用的调制频率的一倍频项，直流项和高倍频项在混频后会被滤波去掉，因而在(6)式中省略了直流项和高倍频项。激光经过 CO_2 吸收池加载上频率信息，被 PD 接收，再经过混频解调表示为

$$S_{\text{err}} = \eta_{\text{sys}} P_{\text{out}}(\omega) \cos(\Omega t + \delta), \quad (7)$$

式中 η_{sys} 表示整个稳频系统的响应效率，包括探测器的光电转换效率、光学链路的损耗、电路的放大和衰减等一系列过程共同作用的结果； δ 表示 DDS 产生的本振信号相对 PD 探测信号的相位延迟量，选择合适的 δ 值可以使输出误差信号的幅值最大。因为误差信号是混频输出的低频信号，电路中会进行低通滤波，所以只需要考虑计算结果的直流项。误差信号中间的线性区域是用于频率鉴别，斜率越大，意味着同样频率变化尺度下，对应的电压变化量更大，

鉴频灵敏度更高。除了 EOM 的调制频率和调制深度， CO_2 的气压也会对误差信号的斜率产生影响。因为误差信号线性区域的幅度和宽度分别与 CO_2 吸收线的强度和线宽成正比，而 CO_2 气压与吸收线的强度成正比，与线宽成反比^[11]，所以需要找到一个合适的气压使得误差信号的斜率最大。

另外，由于 CO_2 在 $1.57 \mu\text{m}$ 处的吸收强度比较弱，通常会比 C_2H_2 在 $1.53 \mu\text{m}$ 处的吸收线小 2~3 个数量级，所以需要比较长的吸收长度来提高系统的信噪比以及误差信号的斜率。当 $\alpha(\omega)L \ll 1$ 时，有

$$F(\omega) \approx \left[1 - \frac{1}{2}\alpha(\omega)L\right] \exp(-i\omega n_{\text{cell}}L), \quad (8)$$

所以，结合(5)式、(6)式和(8)式，可以得到误差信号幅度与吸收长度的近似关系表示如下：

$$S_{\text{err}} \approx |E_0|^2 \eta_{\text{sys}} L \sum_{n=0}^{+\infty} J_n(\beta) J_{n+1}(\beta) \{\alpha(\omega - n\Omega) + \alpha[\omega - (n+1)\Omega] - \alpha(\omega + n\Omega) - \alpha[\omega + (n+1)\Omega]\}, \quad (9)$$

即误差信号与吸收长度是近似呈线性关系的，吸收长度越长， CO_2 吸收光谱的信噪比和误差信号的斜率会越大。在本系统中，选用了 15 m 左右的吸收长度。

根据前文所述的仿真模型，可以得到不同气压下，误差信号斜率随 EOM 调制频率和调制深度的变化规律。因为此时 η_{sys} 取值为 1，误差信号的幅值

是无量纲的，所以斜率的单位为 GHz^{-1} 。表 1 是在不同 CO_2 气压下，选择优化的调制频率和调制深度时误差信号斜率可能达到的极大值的变化情况；以及斜率达到极大值时调制频率和调制深度的优化值。可以看出，当 CO_2 气压在 7 kPa 左右时，误差信号斜率达到最大，即 0.1837GHz^{-1} ，并且随着气压的增大， CO_2 吸收线宽度的增加，调制频率的优

化值也在增加。图 2 是 CO₂ 气压在 7 kPa 条件下，误差信号斜率随调制频率和调制深度变化的三维

图，当斜率最大时，调制频率为 145 MHz，调制深度为 3.5 rad。

表 1 不同 CO₂ 气压下的仿真结果

Table 1 Simulation results with different CO₂ pressures

CO ₂ pressure /kPa	1	4	7	10
Slope of error signal /GHz ⁻¹	0.0696	0.1648	0.1837	0.1773
Optimized modulation frequency /MHz	110	130	145	160
Optimized modulation depth /rad	3.7	3.5	3.5	3.5

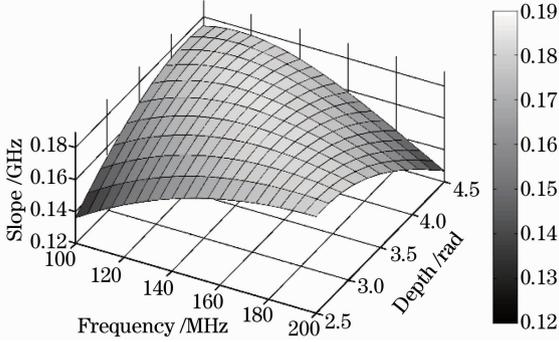


图 2 CO₂ 气压 7 kPa 条件下误差信号斜率随调制频率和调制深度变化情况

Fig. 2 Variation of the error signal's slope with the modulation frequency and depth when the CO₂ pressure is 7 kPa

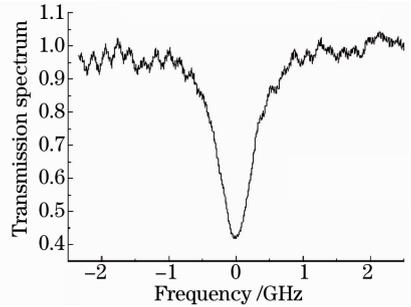


图 3 HC-PCF 吸收池透射谱

Fig. 3 Transmission spectrum of the HC-PCF gas cell
平坦，对 130 MHz 信号的放大倍数最高，约是 140~150 MHz 信号的 1.8 倍，因此调制频率选择在 130 MHz 能使误差信号斜率最大；另外受限于电路驱动能力，调制深度只能达到 2.08 rad。鉴于系统性能的限制，实际最佳工作参数与前文理论计算结果有所不同，将根据实际参数计算仿真结果，并与实验数据相比较。

3 实验结果

在上述仿真计算结果的基础上，设计并完成了一套基于 HC-PCF 吸收池的激光稳频系统，采用了 NKT Photonics 公司的 HC-1550-02 型号的 HC-PCF 作为气体吸收池，在 15 m 长的 HC-PCF 中充入 CO₂ 气体，输入端与普通单模光纤(SMF)熔接，输出端与多模光纤(MMF)熔接，保证吸收池良好的气密性和较低的插入损耗^[13]。制备完成后的 HC-PCF 吸收池的透射谱如图 3 所示，由于吸收池在制备过程中光纤内气压控制精度有限，实际达到的气压约为 6.2 kPa，透射谱的半峰全宽(FWHM)为 595 MHz，偏离吸收线处的插入损耗约为 5.6 dB，图 3 透射谱中 CO₂ 吸收线两边的振荡背景是由于 HC-PCF 中基模与高阶模、表面模相互作用引起的^[14-15]。这一振荡背景易受环境温度和应力的影响，会成为影响稳频性能的主要噪声之一。在该套激光稳频系统上，分别单独改变 EOM 的调制频率、调制深度以及 CO₂ 气压，考察各参数对误差信号斜率的影响，与仿真结果进行了对比，最后对系统的稳频性能进行了测试。

3.1 EOM 调制频率和调制深度的影响

在测试过程中发现，电路的频率响应特性并不

在考察调制频率对误差信号斜率影响的过程中，调制深度为 2.08 rad，HC-PCF 吸收池内 CO₂ 气压为 6.2 kPa，调制频率测试范围为 100~150 MHz。在测试前先测定电路的频率响应系数，如图 4 所示；再把测得的误差信号除以该系数作为实验测试结果，以排除电路频率响应不平坦的影响，如图 5 所示。仿真结果显示，由于调制深度只能达到 2.08 rad，调制频率需要增加到 175 MHz 误差信号斜率才能达到极大值，但由于 EOM 的调制带宽限制，只能比较调制频率在 150 MHz 以下的实验数

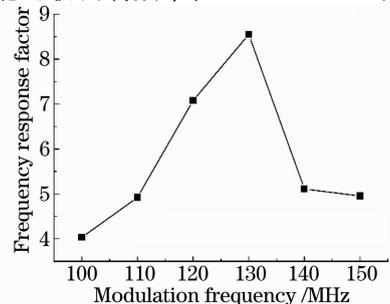


图 4 电路的频率响应系数

Fig. 4 Circuit's frequency response factor

据,误差信号斜率是随调制频率的增加而增大的,与仿真结果吻合。

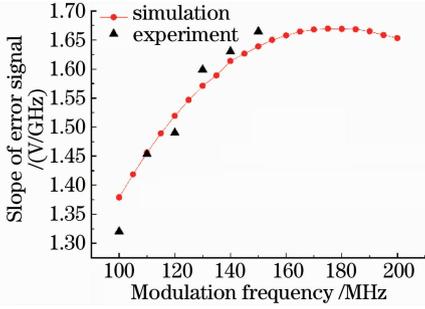


图5 误差信号斜率随调制频率变化曲线的实验数据和仿真结果

Fig. 5 Experiment and simulation results of the error signal's slope versus modulation frequency

随后考察了调制深度对误差信号斜率的影响,由于电路频率响应特性的不平坦,为了让误差信号幅度最大,选择调制频率为 130 MHz,HC-PCF 吸收池内 CO₂ 气压为 6.2 kPa,调制深度测试范围为 0.79~2.08 rad,测试结果与仿真对比如图 6 所示。仿真结果显示,在调制深度达到 2.80 rad 附近误差信号的斜率会达到最大值,但是由于电路驱动能力限制,只能考察调制深度在 2.08 rad 以下的实验数据,误差信号斜率随调制深度的增加而增大,与仿真结果吻合。

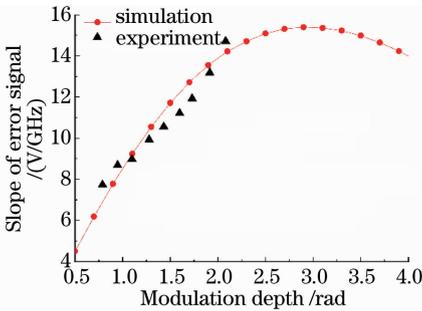


图6 误差信号斜率随调制深度变化曲线的实验数据和仿真结果

Fig. 6 Experiment and simulation results of the error signal's slope versus modulation depth

3.2 CO₂ 气压的影响

为了考察 CO₂ 气压对误差信号斜率的影响,要求气压可以调节控制,HC-PCF 制备完成后无法再改变内部气压,所以这里使用一个总光程为 16 m 的 White 池代替光子晶体光纤吸收池进行测试。首先测试了在不同气压下 CO₂ 的吸收谱线,如图 7 所示,气压越大,线宽越宽,同时吸收强度也越强;同时也可以看出,在吸收线两侧区域,没有与 HC-PCF 吸收池类似的振荡背景。此时 EOM 调制频率为

130 MHz,调制深度为 2.08 rad,CO₂ 气压测试范围为 1~50 kPa,测试结果如图 8 所示,在 7 kPa 附近误差信号斜率达到最大值,气压过高或过低误差信号斜率都会减小,与仿真结果吻合。

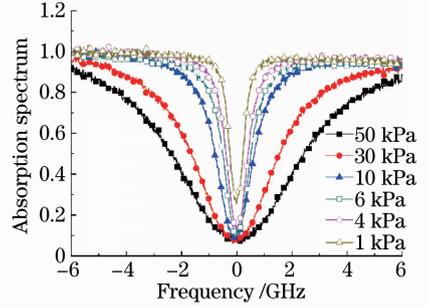


图7 不同 CO₂ 气压下的吸收光谱

Fig. 7 Absorption spectra in different pressures of CO₂

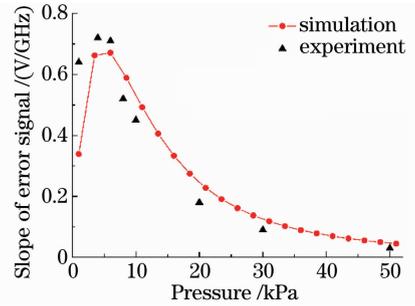


图8 不同 CO₂ 气压下误差信号线性区域斜率变化曲线的实验数据和仿真结果

Fig. 8 Experiment and simulation results of the slope of the error signal's linear area versus CO₂ pressure

3.3 稳频结果

该套激光稳频系统工作参数选择为 130 MHz 调制频率,2.08 rad 调制深度,以 HC-PCF 吸收池作为载体,CO₂ 气压为 6.2 kPa。由于 HC-PCF 的透射光谱的振荡背景易受环境温度的影响,温度改变,振荡背景会发生漂移,进而引起误差信号的变化,造成激光频率稳定点的变化^[3]。为了减少由于 HC-PCF 吸收池背景振荡温度漂移引起的激光频率不稳定,可以对吸收池进行温控或者隔温处理,来保证频率参考本身的可靠性。这里比较了 HC-PCF 吸收池直接放置在空气中以及放置在隔温箱两种状态下激光器的稳频结果。如图 9 所示,当 HC-PCF 吸收池放置在空气中时,测试时间为 4 h,期间温度变化大约为 1.8 °C,频率变化峰峰值为 44.4 MHz;当 HC-PCF 放入隔温箱后,温度变化约为 0.6 °C,激光频率变化的峰峰值为 9.7 MHz。

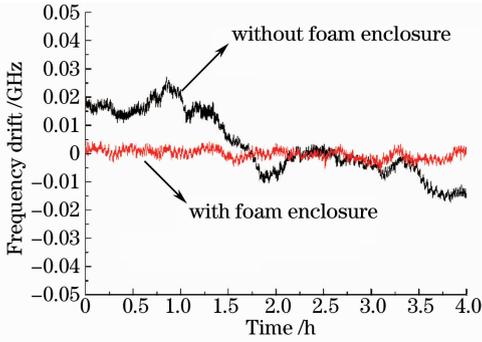


图 9 激光系统的稳频性能

Fig. 9 Frequency stabilization performance of the laser system

4 结 论

报道了一套基于 HC-PCF 吸收池的激光稳频系统,把激光频率稳定在 CO_2 的 $1.57 \mu\text{m}$ 处的吸收线上,建立模型;分析了 EOM 调制频率、调制深度以及 CO_2 气压对误差信号的影响,给出了优化参数;并对稳频系统进行了测试,实验测试数据与仿真结果吻合,最终实现了在 4 h 内 9.7 MHz 峰峰值的频率稳定性。在后续的系统优化工作中,可以通过改善 HC-PCF 的模式特性以减少背景振荡,改进电路的频率响应特性,提高 EOM 的调制频率以及调制深度的方法,来进一步提高激光频率的稳定性。

参 考 文 献

1 J R Petit, J Jouzel, D Raynaud, *et al.*. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica[J]. *Nature*, 1999, 399(6735): 429–436.

2 A Fix, C Budenbender, M Wirth, *et al.*. Optical parametric oscillators and amplifiers for airborne and spaceborne active remote sensing of CO_2 and CH_4 [J]. *SPIE*, 2011, 8182: 818206.

3 K Numata, J R Chen, S T Wu, *et al.*. Frequency stabilization of distributed-feedback laser diodes at 1572 nm for lidar measurements of atmospheric carbon dioxide[J]. *Appl Opt*, 2011, 50(7): 1047–1056.

4 J U White. Long optical paths of large aperture[J]. *J Opt Soc Am*, 1942, 32(5): 285–288.

5 J Altmann, R Baumgart, C Weitkamp. Two-mirror multipass absorption cell[J]. *Appl Opt*, 1981, 20(6): 995–999.

6 P S Light, F Couny, F Benabid. Low optical insertion-loss and vacuum-pressure all-fiber acetylene cell based on hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Opt Lett*, 2006, 31(17): 2538–2540.

7 P T Marty, J Morel, T Feurer. All-fiber multi-purpose gas cells and their applications in spectroscopy[J]. *J Lightwave Technol*, 2010, 28(8): 1236–1240.

8 E D Black. An introduction to Pound-Drever-Hall laser frequency stabilization[J]. *Am J Phys*, 2001, 69(1): 79–87.

9 Z Bian, C Huang, D Chen, *et al.*. Seed laser frequency stabilization for Doppler wind lidar[J]. *Chin Opt Lett*, 2012, 10(9): 019405.

10 M Zhou, L Huang, X Xu. Development of a frequency-stabilized 555.8 nm laser[J]. *Chin Opt Lett*, 2013, 11(12): 121402.

11 J Henningsen, H Simonsen. The ($22^01 - 00^00$) band of CO_2 at 6348 cm^{-1} : linestrengths, broadening parameters, and pressure shifts[J]. *J Mol Spectroscopy*, 2000, 203(1): 16–27.

12 P L Varghese, R K Hanson. Collisional narrowing effects on spectral line shapes measured at high resolution[J]. *Appl Opt*, 1984, 23(14): 2376–2385.

13 Wang Haibin, Liu Ye, Wang Jinzu, *et al.*. Preparation of all-fiber low-pressure CO_2 gas cell based on hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0706007.

王海宾, 刘 晔, 王进祖, 等. 光纤型空芯光子晶体光纤低压 CO_2 气体腔的制备[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0706007.

14 C M Smith, N Venkataraman, M T Gallagher, *et al.*. Low-loss hollow-core silica/air photonic bandgap fibre[J]. *Nature*, 2003, 424(6949): 657–659.

15 J M Fini, J W Nicholson, R S Windeler, *et al.*. Low-loss hollow-core fibers with improved single-modedness[J]. *Opt Express*, 2013, 21(5): 6233–6242.

栏目编辑:王晓琪