

基于宽谱大气 CO₂ 浓度探测的红外激光波长选择

林 宏 周传麟 赵 娜 黄攀立

湖北工程学院物理与电子信息工程学院,湖北 孝感 432000

摘要 通过分析大气中 CO₂ 的超精细吸收光谱来选择适合宽谱大气 CO₂ 浓度探测的红外激光波长,为研制宽谱红外激光雷达提供了依据。宽谱红外激光雷达的光谱范围远大于普通差分吸收激光雷达的光谱范围,不需要较高的锁频技术,能够避免差分吸收激光雷达由于在 on 波长处偏移引起的测量误差。对比大气中水汽的吸收光谱、超辐射发光二极管(SLED)的发光光谱,以及铟镓砷(InGaAs)红外探测器的响应光谱,可以在理论上确定满足大气 CO₂ 浓度探测的宽谱红外激光中心波长约为 1572 nm,波长范围约为 1568~1575 nm。通过设计实验装置,得到中心波长为 1571 nm,波长范围为 1564~1578 nm,输出功率约为 0.01 mW 的宽谱红外激光。该波段宽谱红外激光避开了大气中水汽吸收的影响,而且模块简单、容易实现,对实现利用宽谱红外激光雷达探测大气 CO₂ 浓度分布有一定的帮助。

关键词 激光器;宽谱光源;波长选择;CO₂;光谱分析

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.120102

Wavelength Choice for Infrared Laser Based on Atmospheric CO₂ Concentration Wide Spectrum Measurement

Lin Hong Zhou Chuanlin Zhao Na Huang Panli

*Department of Physics and Electronic-Information Engineering, Hubei Engineering University,
Xiaogan, Hubei 432000, China*

Abstract By analyzing the ultra fine atmospheric CO₂ absorption spectrum, the infrared laser wavelength can be choiced for detecting the atmosphere CO₂ concentration. It can provide the basis for a wide spectrum infrared lidar. The spectrum of wide spectrum infrared laser is much wider than the differential absorption lidar, and it has no use for high frequency locking technology. Also, this technology can avoid differential absorption lidar measurement error by the on wavelength shift. By analyzing the water vapour absorption spectrum, super luminescent diode (SLED)'s luminescent spectrum and InGaAs infrared detector's response spectrum, the wide spectrum laser center wavelength is 1572 nm and the spectral range is 1568~1575 nm in theory. By the experimental laser source, the results show that the center wavelength is 1571 nm, the spectral range is 1564~1578 nm, the output power is 0.01 mW. This laser can avoid the influence by the water vapour absorption, and it is simple, low cost and easy to build. It can help for the development of the atmosphere CO₂ concentration detecting by the wide spectrum infrared lidar.

Key words lasers; wide spectrum laser source; wavelength choice; CO₂; spectral analysis

OCIS codes 140.3480; 010.1290; 280.3640

1 引言

近几十年来,人类活动导致了大气中温室气体和污染气体浓度的急剧增加,而温室气体,特别是 CO₂ 的大量增加,会对全球气候产生重要影响。因此,如何精确测量大气中 CO₂ 浓度的变化成为目前各主要国家科学研究的重点。我国现在正处于经济快速发展时期,大气中 CO₂ 的排放量逐年增加,面对国际社会,特别是发达国家制定的碳排放标准,面临着巨大的压力。为应对这种新的国际国内形势,制定合理可行的碳排放标准,谋求更加有利的发展空间,我国把“监测气候变化的过程和要素”等气候变化监测预警作为应对气候

收稿日期: 2015-05-29; 收到修改稿日期: 2015-06-26; 网络出版日期: 2015-11-28

基金项目: 国家自然科学基金(41201362)、湖北省自然科学基金(2014CFB572)、湖北省教育厅科技项目(Q20132704, XD2014267)、湖北工程学院科技项目(z2013027)

作者简介: 林 宏(1980—),男,博士,副教授,主要从事光学与激光遥感、大气环境监测、激光技术等方面的研究。

E-mail: linwind2000@163.com

变化专项行动的重点任务之一,已在“十二五”期间开展有关碳收支和碳循环的研究,其中大气 CO₂空间分布的精确探测是其重要研究内容。

目前,激光雷达作为一种主动探测技术,具有较高的发射功率、测量精度和距离分辨能力,受大气散射影响小,在大气 CO₂浓度主动探测领域受到世界各国的高度重视。目前国内外已有多家科研机构开展了大气 CO₂探测激光雷达的研究工作:美国国家航空航天局利用星载差分吸收激光雷达进行地面附近的 CO₂测量,选用的激光波长为 2 μm^[1-2];欧洲航天局采用机载 1.6 μm 窄带激光雷达探测地面附近 CO₂光学厚度^[3-4];日本的研究机构利用光参量振荡(OPO)激光器进行差分实验测量大气 CO₂浓度,其激光波长为 1.6 μm^[5];武汉大学的科研机构通过研制地基差分吸收激光雷达来探测大气 CO₂浓度,选用 1572 nm 附近的双波长进行探测^[6-8]。以上研究结果表明,现阶段差分吸收激光雷达在探测大气 CO₂浓度方面具有信号强、灵敏度高、作用距离远、距离分辨强等优点。但是,差分吸收激光雷达系统多采用窄带激光光源,其激光线宽很窄,要求具有比较高的锁频技术,从而将 on 波长牢牢锁定,防止出现波长偏移,实现较为困难^[9-10]。针对上述情况,美国的相关科研机构提出了一种利用宽谱红外激光来探测大气 CO₂浓度的方法^[11-12]。该方法采用远大于普通差分吸收激光雷达光源光谱范围的探测光源,能够实现宽谱多波段的探测要求,而且不需要较高的锁频技术,从而避免了普通差分吸收激光雷达在 on 波长处由于偏移引起的测量误差。

但是该宽谱激光光源的中心波长选择在 2 μm 附近,实现方法较为复杂,造价昂贵,而且与之相匹配的红外探测器较少,不能满足实际大气 CO₂浓度探测的需要。作者立足于改进现有的宽谱红外激光光源,结合大气中 CO₂和水汽的超精细吸收光谱、辐射发光二极管(SLED)的发光光谱,以及红外探测器的响应光谱,确定满足大气 CO₂浓度探测的宽谱红外激光的中心波长和波长范围。同时,利用 SLED 模块作为种子光源,辅以铟镓共掺双包层光纤和稀疏波分复用器(CWDM),设计出一种宽谱红外激光光源实验装置,产生满足大气 CO₂浓度探测要求的宽谱红外激光。该光源较之于 2 μm 的宽谱红外激光光源实现起来更为简单,在实际大气 CO₂浓度探测领域具有一定的应用前景。

2 宽谱红外激光探测大气 CO₂原理

宽谱红外激光雷达探测大气 CO₂浓度的原理和双波长差分吸收激光雷达有一些类似,也是一种基于吸收原理的激光雷达,主要利用被探测大气物质对激光束能量的吸收作用,通过接收激光雷达回波信号来反演出被探测大气物质的密度信息。但是,其与差分吸收激光雷达有两点主要区别:一是在发射端,避免需要较高的锁频技术,需要采用宽谱红外激光光源;二是在接收端,主要需要利用 Fabry-Perot 标准具的梳状边缘能调整到与大气 CO₂吸收峰相匹配的原理,有效的滤除干扰光信号,提取有用光信号,通过透过 Fabry-Perot 标准具的光信号与参考光信号能量的比值来精确反演出大气中 CO₂的浓度。

在研制宽谱红外激光雷达的过程中,最重要的一步是确定激光的中心波长,以及激光的输出光谱范围,并由此设计出满足大气 CO₂浓度探测要求的宽谱红外激光光源。目前,最常见的宽谱红外激光光源是用于光纤通信的中心波长为 1550 nm 的 SLED 光源。研究小组已购买的 Zewda 公司 CS5037A 系列 SLED 模块,其光谱特性如图 1 所示。

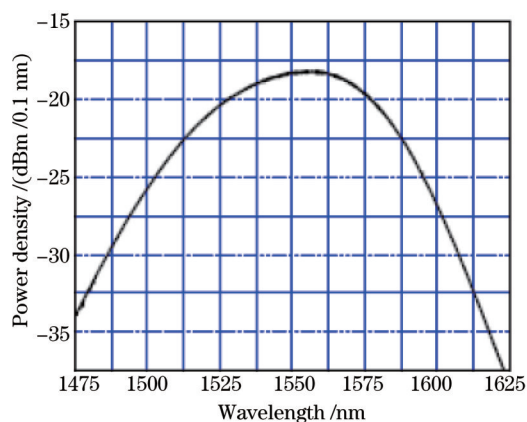


图1 SLED模块的光谱特性

Fig.1 SLED's spectral characteristic

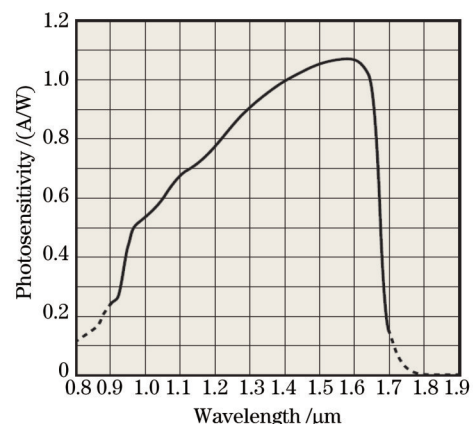


图2 铟镓砷 PIN 光电二极管的光谱响应曲线

Fig.2 InGaAs PIN photodiode's spectral response curve

通过图1可以发现,该SLED模块的中心波长为1550 nm,典型光谱带宽约为50 nm,其光谱范围约为1525~1575 nm。为了满足实际的大气CO₂浓度探测,宽谱红外激光的中心波长一定要对准大气CO₂较强的吸收峰,因此在实际操作中,可以通过增加或减少光纤长度,使得SLED光源输出波长逼近目标波长。

另外,在研制宽谱红外激光雷达的过程中,选择合适的红外探测器也是关键的一步,其光谱响应曲线直接决定了宽谱红外激光的中心波长,以及输出光谱范围的选择。研究小组已购买的滨松公司的G12180系列铟镓砷PIN光电二极管的光谱响应特性曲线如图2所示。

通过图2可以发现,该铟镓砷PIN光电二极管在1550~1600 nm波长范围内的响应是很大的,为满足实际的大气CO₂浓度宽谱红外激光探测的需要,红外激光的波长尽量在该光谱响应范围内选择。

3 大气中CO₂和水汽的吸收光谱分析

利用本课题组已有的HITRAN 2008版本数据库和HITEMP2010版本数据库,可以得出1565~1595 nm光谱范围内的大气CO₂的超精细吸收谱线数据如图3所示。

通过图3可以发现,该光谱范围内存在两个明显的吸收带,其中“右带”为1568~1574 nm(6353~6377 cm⁻¹),最大的吸收峰处于1572.3351 nm(6359.97 cm⁻¹)位置;“左带”为1576~1585 nm(6308~6345 cm⁻¹),最大的吸收峰处于1578.6653 nm(6334.46 cm⁻¹)位置。

同样,可以得出1565~1595 nm光谱范围内的大气中水汽的超精细吸收谱线数据如图4所示。

通过图4发现,大气中水汽的吸收光谱在对应大气中CO₂的吸收带(1568~1585 nm)范围内存在三个明显的吸收峰,其中第一个吸收峰为1582.97 nm(6317.22 cm⁻¹),恰好在大气中CO₂吸收带的“左带”中;第二个吸收峰为1578.72 nm(6334.25 cm⁻¹),恰好也在大气中CO₂吸收带的“左带”中;第三个吸收峰为1567.91 nm(6377.91 cm⁻¹),在大气中CO₂吸收带的“右带”的外侧。因此,可以发现大气中水汽的吸收对1568~1574 nm范围(“右带”)的CO₂吸收影响较小,宽谱红外激光源的波长范围可以选择在这个范围内。

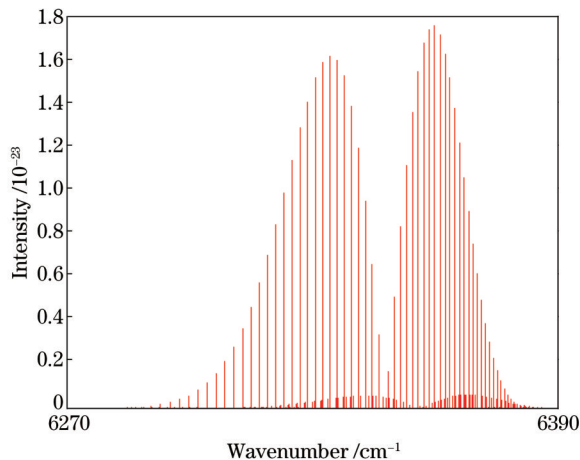


图3 1565~1595 nm 光谱范围内大气CO₂吸收谱线数据

Fig.3 Atmospheric CO₂ absorption spectrum data at 1565~1595 nm

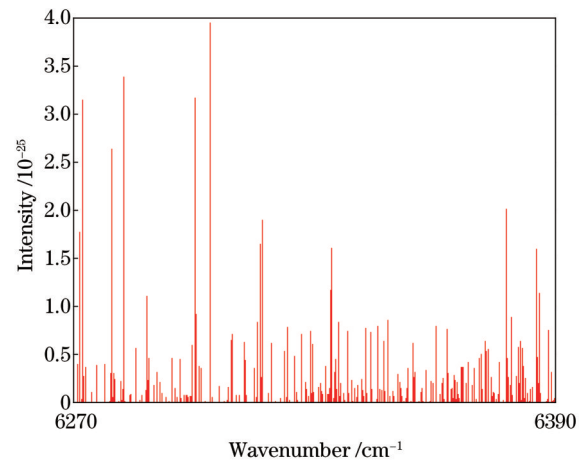


图4 1565~1595 nm 光谱范围内水汽吸收谱线数据

Fig.4 Water vapour absorption spectrum data at 1565~1595 nm

4 测试与分析

目前,光纤通信中常用的SLED光源其中心波长一般在1550 nm附近,需要将其中心波长搬移到1572 nm(“右带”)附近,或者搬移到1578 nm(“左带”)附近。根据SLED的工作原理可知,对于给定的抽运波长,随着采用光纤长度的增加,激光的输出波长往长波方向移动。在实际操作中,通过增加光纤长度,可使得SLED光源输出波长逼近目标波长。通常采用的方法是使用很长的掺铒光纤作为增益介质,但是单纯延长掺铒光纤的长度会带来一些不利影响,比如:光纤过长会增加光纤的吸收损耗和后向放大自发辐射的积累、降低光纤放大器的抽运转换效率、增加噪声指数等^[13-15]。因此,将SLED光源其中心波长由1550 nm搬移到1572 nm附近较为简单。而铟镓砷PIN光电二极管在1550~1600 nm波长范围内的响应都很大的,对于选择

大气 CO₂ 这两个吸收带的哪一个作为宽谱红外激光源的波长范围没有太大影响。

因此,结合大气中 CO₂ 和水汽的超精细吸收光谱、SLED 的发光光谱,以及铟镓砷 PIN 光电二极管的响应光谱,可以从理论上确定满足宽谱大气 CO₂ 浓度探测的红外激光的中心波长约为 1572 nm,波长范围约为 1568~1575 nm,该光谱范围内的大气 CO₂ 的超精细吸收谱线数据和理论上的宽谱红外激光源光谱范围如图 5 所示。

利用 SLED 模块作为激光光源,辅以铟镓共掺双包层光纤调节输出中心波长的位置,设计出一种宽谱红外激光源实验装置如图 6 所示。

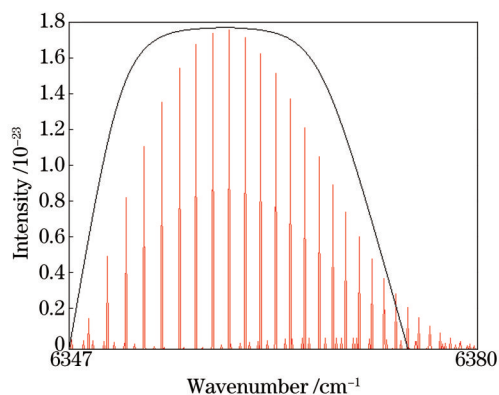


图 5 理论上的宽谱红外激光源光谱范围

Fig.5 Wide spectrum infrared laser's spectrum in theory

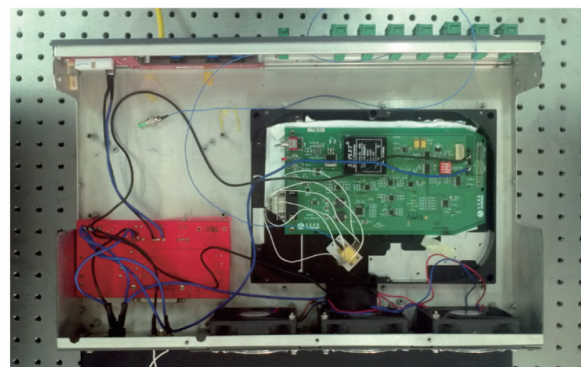


图 6 宽谱红外激光源实验装置图

Fig.6 Experimental apparatus of wide spectrum infrared laser source

利用日本横河 AQ6370C 光谱分析仪对该实验装置产生的红外激光光谱特性进行分析,得到其光谱特性如图 7 所示。

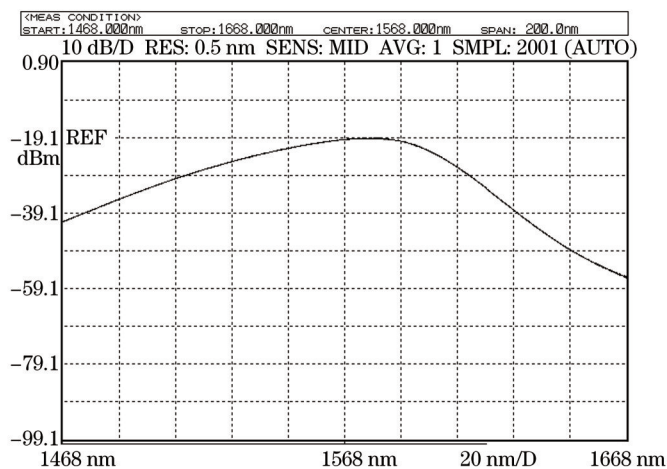


图 7 SLED 光源的光谱特性

Fig.7 Spectral characteristics of SLED source

通过图 7,发现其输出激光中心波长位于 1574 nm 附近,光谱有效范围为 1548~1608 nm,输出功率约为 0.98 mW,但是其光谱边缘不够陡峭,波长范围比较大,因此需要对其边缘进行压缩。

为了对上述宽谱红外激光信号边缘进行有效压缩,研究小组利用稀疏 CWDM 设计了一个光纤滤波器,其实验装置如图 8 所示。

利用日本横河 AQ6370C 光谱分析仪对经过 CWDM 光纤滤波器的输出激光光谱特性进行分析,得到其光谱特性如图 9 所示。

通过图 9,发现其输出红外激光的中心波长位于 1571 nm 附近,光谱有效范围为 1564~1578 nm,其光谱边缘相对陡峭,波长范围比较合适,但是其输出功率相对较小,只有 0.01 mW 左右,因此该宽谱红外激光源如果应用到实际的大气 CO₂ 浓度探测中,还需要利用一个工作在 L 波段的掺铒光纤放大器对其输出功率进行有效放大,要求能够准直透镜输出红外激光,光束发散角小于 1 mrad,出射光斑 8 mm 左右,最终放大输出功率达到 2 W 左右。

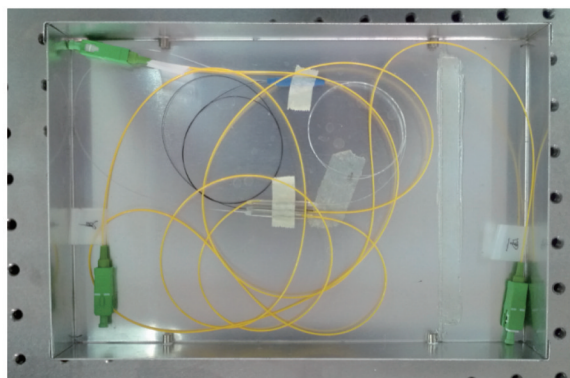


图8 光纤滤波器实验装置图

Fig.8 Experimental apparatus of optical fiber filter

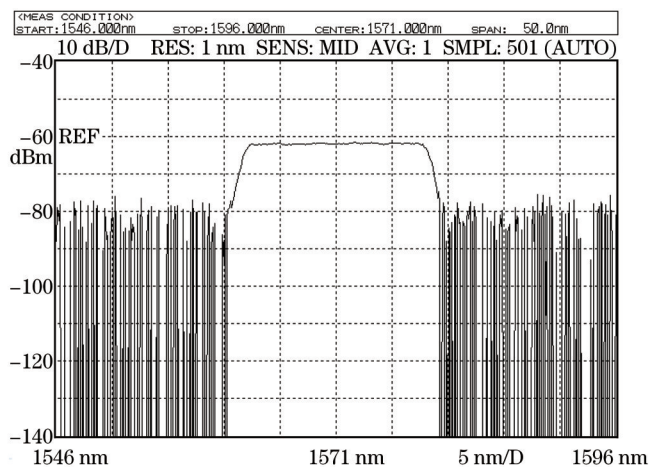


图9 滤波后的输出激光光谱特性

Fig.9 Spectral characteristics of laser source by filtering

5 结 论

针对利用宽谱红外激光雷达来探测大气 CO₂ 浓度的方法,分析并选择了满足实际大气 CO₂ 浓度探测需求的宽谱红外激光的中心波长以及光谱范围,设计了一种实验装置来获得满足该要求的宽谱红外激光。该宽谱红外激光源实验装置能够产生中心波长为 1571 nm 左右,光谱有效范围为 1564~1578 nm,输出功率为 0.01 mW 的宽谱红外激光,在实际大气 CO₂ 浓度探测中具有一定的应用前景。

参 考 文 献

- 1 G J Koch, J Y Beyon, F Gibert, *et al.*. Side-line tunable laser transmitter for differential absorption lidar measurements of CO₂: Design and application to atmospheric measurements[J]. *Appl Opt*, 2008, 47(7): 944-956.
- 2 G J Koch, B W Barnes, M Petros, *et al.*. Coherent differential absorption lidar measurements of CO₂[J]. *Appl Opt*, 2004, 43(26): 5092-5099.
- 3 S Kameyama, M Imaki, Y Hirano, *et al.*. Development of 1.6 m continuous-wave modulation hard-target differential absorption lidar system for CO₂ sensing[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(10): 1513-1515.
- 4 Aamediek, A Fix, G Ehret, *et al.*. Airborne lidar reflectance measurements at 1.57 μm in support of the A-SCOPE mission for atmospheric CO₂[J]. *Atmos Meas Tech*, 2009, 2(2): 1487-1536.
- 5 J Mao, S R Kawa. Sensitivity studies for space-based measurement of atmospheric total column carbon dioxide by reflected sunlight[J]. *Appl Opt*, 2004, 43(4): 914-927.
- 6 Ma Xin, Lin Hong, Ma Yingying, *et al.*. Atmospheric pressure broadening correction algorithm of differential absorption atmospheric CO₂ lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1101003.
- 7 Li Jun, Gong Wei, Mao Feiyue, *et al.*. Dual field of view lidar for observing atmospheric aerosols over Wuhan[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1101003.

- Sinica, 2013, 33(12): 1201001.
- 李俊, 龚威, 毛飞跃, 等. 探测武汉上空大气气溶胶的双视场激光雷达[J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1201001.
- 8 Ge Han, Wei Gong, Hong Lin, *et al.*. On-line wavelength calibration of pulsed laser for CO₂ DIAL sensing[J]. Applied Physics B, 2014, 117(4): 1041-1053.
- 9 Cao Nianwen, Yan Peng. Aerosol classifications method by lidar measurements[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1101003.
- 曹念文, 颜鹏. 基于激光雷达探测的气溶胶分类方法研究[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1101003.
- 10 Wang Ran, Gao Chunqing. Progress of 1.6 μm region single-frequency lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(8): 080006.
- 王然, 高春清. 1.6 μm 波段单频激光器技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(8): 080006.
- 11 E M Georgieva, W S Heaps, Emily L Wilson. Differential radiometers using Fabry-Perot interferometric technique for remote sensing of greenhouse gases[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(10): 3115-3122.
- 12 W S Heaps. Broadband lidar technique for precision CO₂ measurement[C]. SPIE, 2008, 7111(711102): 1-9.
- 13 Guo Liang, Chen Hongwei, Wang Zefeng, *et al.*. Experimental study on the generation of cladding light in passive double-clad fiber[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(2): 020602.
- 郭良, 湛鸿伟, 王泽锋, 等. 被动双包层光纤中包层光产生实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(2): 020602.
- 14 Cheng Jie, Fu Yanfeng, Gong Wei. 1572 nm high power tunable laser source for atmospheric CO₂ measurement[J]. Laser Technology, 2012, 36(4): 463-466.
- 程杰, 傅焰峰, 龚威. 用于CO₂探测的高功率1572 nm可调谐光源[J]. 激光技术, 2012, 36(4): 463-466.
- 15 Qin Fengjie, Tan Zhongwei, Ning Tigang. Research of the influence of bandwidth of light source on the optical correlator based on fiber dispersion[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(10): 1006004.
- 秦风杰, 谭中伟, 宁提纲. 光源带宽对基于光纤色散的光学相关器影响的研究[J]. 光学学报, 2013, 33(10): 1006004.

栏目编辑: 史敏