

用于大气 CO₂ 浓度探测的高功率宽谱红外激光源

林 宏 何武光 李卫中 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 基于大气中 CO₂ 的超精细吸收光谱, 利用超辐射发光二极管和掺铒光纤放大器来构建一种用于高精度大气 CO₂ 浓度探测的宽谱红外激光源, 其光谱范围远大于普通差分吸收激光雷达的光谱范围, 能够实现宽谱探测技术的要求, 而且不需要较高的锁频技术, 避免了差分吸收激光雷达技术由于在 on 波长处偏移引起的测量误差。实验结果表明, 最终得到的宽谱红外激光源中心波长约为 1584 nm, 光谱有效范围为 1564~1604 nm, 输出光功率可达到 2 W 以上, 光纤放大器对该范围内光放大的最大增益可达 34 dB 以上。该激光光源具有体积小、功率大、成本低和携带方便的优点, 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; 光纤放大; CO₂; 超辐射发光二极管

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.081401

High Power Wide Spectrum Infrared Laser Source for Atmospheric CO₂ Concentration Measurement

Lin Hong He Wuguang Li Weizhong Huang Panli

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

Abstract A wide spectrum infrared laser source can be designed by using a super luminescent light emitting diode (SLED) and an erbium doped fiber amplifier. This laser source can be used for detecting the atmosphere CO₂ concentration with high precision, and this detecting technology is based on the ultra fine atmospheric CO₂ absorption spectrum. The spectrum of SLED is much wider than that of 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 on wavelength shift. The experimental results show that the laser center wavelength is 1584 nm, spectral range is from 1564 nm to 1604 nm, output power is 2 W, and the max gain of the fiber amplifier is 34 dB at this spectral range. This laser has advantages of small size, high power, low cost and easy to carry, and it can help for the development of atmosphere CO₂ concentration detecting by the wide spectrum infrared lidar technology.

Key words lasers; wide spectrum laser source; fiber amplification; CO₂; super luminescent light emitting diode

OCIS codes 140.3480; 010.1290; 280.3640

1 引 言

气候和环境变化及其影响、预测、控制是当前大气科学研究的重要研究前沿。在气候变化的研究中, 人们对温室气体, 特别是大气中的 CO₂ 予以极大关注。因此, 如何精确测量大气中 CO₂ 浓度变化情况成为目前各主要国家科学研究的重点。我国现在处于经济快速发展时期, CO₂ 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, 面临了很大的压力。我国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, 谋求更加有利于我国发展的空间, 把大气 CO₂ 空间分布的精确探测作为重要研究内容。

激光雷达作为一种主动探测技术, 具有较高的测量精度和距离分辨能力, 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。日本研究机构利用光学参量振荡器

收稿日期: 2015-01-10; 收到修改稿日期: 2015-03-01; 网络出版日期: 2015-07-01

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

(OPO)激光器进行差分实验测量大气 CO₂ 浓度^[1];美国国家航空航天局采用星载差分吸收激光雷达进行地面附近 CO₂ 测量^[2-4];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^[5];武汉大学通过研制地基差分吸收激光雷达来探测大气 CO₂ 浓度^[6-7]。以上成果表明,现阶段差分吸收激光雷达在探测大气 CO₂ 浓度方面具有灵敏度高、作用距离远、范围广等优点。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^[8-9]。针对这种情况,美国科研机构提出了一种利用宽谱激光来探测大气 CO₂ 浓度的方法^[10-11]。该方法采用的探测光源光谱范围远大于普通差分吸收激光雷达光源的光谱范围,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,从而避免了差分吸收激光雷达技术在 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实现方法较为复杂、造价昂贵,而且输出功率较低,不能满足实际大气 CO₂ 浓度探测的需要。本文着眼于改进现有的宽谱激光光源发射系统,利用超辐射发光二极管(SLED)作为种子光源,辅以高功率、工作在 L 波段的掺铒光纤放大器,能够输出中心波长为 1584 nm 附近,光谱范围为 1564~1604 nm,输出功率为 2 W 以上的宽谱红外激光,满足实际大气 CO₂ 浓度探测的需要。该光源体积小、功耗低、成本低,较之于以往的宽谱红外光源系统有着更大的输出功率和探测范围,具有一定的应用前景。

2 宽谱红外激光探测 CO₂ 原理和波长选择

宽谱红外激光雷达探测大气 CO₂ 的原理和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,主要利用信号表示被探测大气物质对激光束能量的吸收。同时为了得到吸收信号,还需将信号通过大气物质散射回来,形成激光雷达回波信号。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,有效地滤除干扰光信号,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。

在利用宽谱红外激光雷达探测大气 CO₂ 浓度的过程中,最主要的是设计和实现一种大功率、光谱范围宽,能满足大气 CO₂ 浓度探测需要的宽谱红外激光光源。综合利用已有的 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 1 所示。通过分析大气中 CO₂ 的超精细吸收光谱,可以确定需要设计和实现的宽谱红外激光光源相关参数。

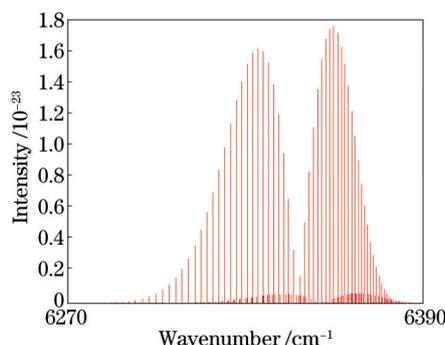


图 1 1565~1595 nm 光谱范围内大气 CO₂ 吸收谱线数据

Fig.1 Atmospheric CO₂ absorption spectrum data at 1565~1595 nm

通过图 1 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 1576~1582 nm(6321~6345 cm⁻¹),最大的吸收峰处于 1578.6653 nm(6334.46 cm⁻¹)位置。由于目前普遍使用的 InGaAs 红外探测器在 1550~1600 nm 之间的响应还比较大,因此这两个吸收带都可以用于实际的大气 CO₂ 浓度的探测。为了尽可能覆盖这两个吸收带,宽谱红外激光光源的波长有效覆盖范围可为 1565~1595 nm,中心波长可以选择 1580 nm 附近。

3 宽谱红外激光光源实现方案

针对上述宽谱红外激光雷达探测大气中 CO₂ 浓度的应用需求,设计了以 SLED 光源为种子光源,通过掺铒光纤放大器来提升输出光功率的激光发射系统方案。该激光发射系统具有结构简单、成本低、光谱范围宽、输出功率高等优点,能够满足实际大气 CO₂ 浓度探测的需要。

3.1 超辐射发光二极管

SLED光源是专为光纤通信、光纤传感和光纤陀螺等特殊应用领域设计的超宽带光源,相对一般的宽带光源具有输出功率高、覆盖光谱范围宽等特点。其主要部分是由SLED模块、负温度系数(NTC)热敏电阻温度传感器和半导体制冷器(TEC)构成,热敏电阻温度传感器主要用来准确反映SLED的工作温度,半导体制冷器主要用来对SLED的工作温度进行准确控制。

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1580 nm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。另外,SLED光源的输出功率和中心波长都会随着温度和注入电流的波动而发生漂移,如果不施加恒温、恒流控制,这种漂移会影响光纤系统的稳定性。因此需要有一个能实现恒温、恒流控制的,具有可靠保护功能的SLED控制系统。具体的SLED光源温度和电流控制结构框图如图2所示。

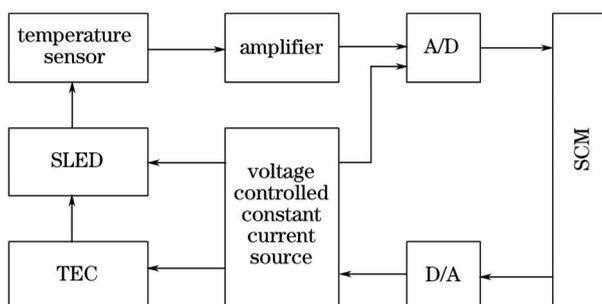


图2 SLED光源温度和电流控制系统

Fig.2 Temperature and current control system of SLED source

该系统中的单片机主要通过数模转换器和压控恒流源来控制 and 调节SLED光源的驱动电流,一般采用STC89C52系列芯片。温度传感器负责采集SLED光源的工作温度并转换成数字信号送入单片机,经过单片机处理后的结果通过数模转换器来控制压控恒流源,调节TEC的制冷电流。单片机软件的核心部分是分段PID控制算法,该程序将实际温度与设置温度之间的差值作为输入变量,利用模糊PID算法进行计算并输出相应的电压值,从而驱动TEC对SLED光源的工作温度进行控制。通过实验发现,该控制系统可以使SLED光源在环境温度为0~40℃范围内稳定工作,温度稳定性可达到0.1℃,而其驱动电流则在0~200 mA范围内连续可调,且恒定驱动电流可在全程范围内稳定性达到0.1 mA。

3.2 掺铒光纤放大器

掺铒光纤放大器是光纤通信系统中最常用的放大设备,但是由于铒离子的受激辐射特性,使得其在1580 nm附近的增益很低。为了将增益转移到1580 nm附近,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

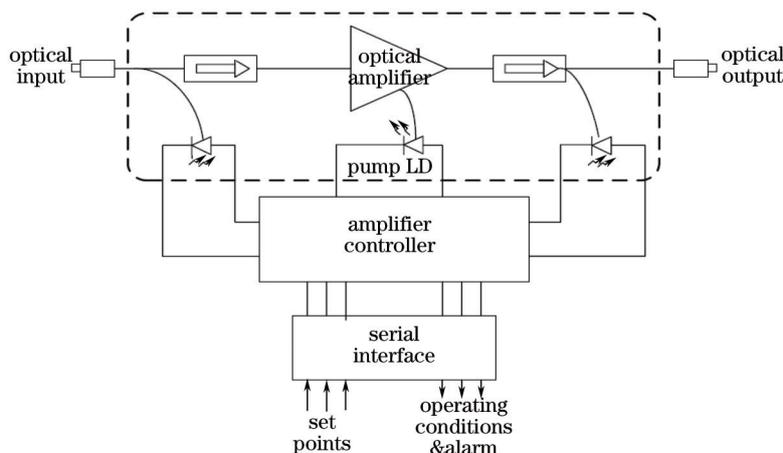


图3 高功率光纤放大器结构框图

Fig.3 High power fiber amplifier structure diagram

向放大自发辐射(ASE)的积累、降低光纤放大器的抽运转换效率、增加噪声指数等^[12-14]。因此,本设计中采用了级联结构来解决这个问题,通过将高掺杂的掺铒光纤并分为两段,分别作为前级和后级,通过匹配这两段掺铒光纤的长度使得铒离子维持在较低的粒子数反转程度,进而达到将增益转移到 1580 nm 附近的目的。同时在两级之间添加隔离器,避免了后级的反向 ASE 反射回前级,使得前级的正向 ASE 可以进入后级作为抽运参与后级的放大,提高了整体抽运的转换效率并优化了光纤放大器的噪声特性。设计的高功率掺铒光纤放大器结构框图如图 3 所示。

该高功率光纤放大器核心器件采用高可靠性的多模抽运激光器和铒镱共掺双包层光纤。根据 Giles 模型进行理论计算,并通过实验对比验证,级联结构前级一般采用 12 m 铒镱共掺双包层光纤,后级可采用 15 m 的铒镱共掺双包层光纤,中间采用光放大器进行连接。前级、后级双包层光纤,以及光放大器都使用 940 nm 的多模抽运激光器抽运。通过调节抽运激光器的驱动电流,可以调整相应的抽运功率,使得光纤放大器输出功率达到最佳效果。该光纤放大器还采用独特的智能化自动功率控制(APC)和自动温度控制(ATC)电路,能够得到高稳定度的输出光功率;采用高稳定和高精度的微处理器(MPU)系统,可以使得系统调节和显示更加方便、可靠、智能。该光纤放大器电光转换效率比常规 EDFA 高 10 倍左右,最大输出总功率可达 2 W 以上,具有更低的相对成本、更紧凑的体积、更低的功耗以及更高的可靠性。

4 测试与结果

研制出的宽谱红外激光源实物图如图 4 所示,其核心器件为一个 SLED 种子源和一个工作在 L 波段的掺铒光纤放大器(EDFA)。



图 4 宽谱红外激光源实物图

Fig.4 Wide spectrum infrared laser source

该系统利用+48 V 的直流稳压电源驱动 SLED 种子源,能够产生大约 0.9 mW 的宽谱红外激光,然后作为种子源输出到掺铒光纤放大器,最终能产生大约 2 W 左右的宽谱红外激光。为了满足实际大气 CO₂ 探测的需要,光纤放大器输出端采用一根 1.5 m 的铠装尾纤,SMA905 接头输入/准直透镜输出,发散角小于 1 mrad,出射光斑 6 mm 左右。

利用日本横河 AQ6370C 光谱分析仪对 SLED 种子源产生的激光光谱特性进行分析,得到其光谱特性如图 5 所示。

通过图 5,发现其输出激光中心波长位于 1580 nm 附近,光谱有效范围为 1548~1608 nm,但是其光谱边缘不够陡峭,波长范围比较大,因此在利用光纤放大器放大其功率时需要对边缘进行压缩。同时,利用光功率计实测 SLED 种子源输出功率约为 0.98 mW。

接着,利用光谱分析仪对经过掺铒光纤放大器产生的输出红外激光光谱特性也进行了分析,得到其光谱特性如图 6 所示。为了减小探测误差,光纤放大器输出端安装的准直透镜尾纤不可拆卸,其出射光斑约为 6 mm,而光谱分析仪(日本横河 AQ6370C)的信号输入端有效感光面积约为 0.8 mm,这样在用光谱分析仪测量过程中就存在 17.5 dB 的衰减。

通过图 6,发现其输出光谱中心波长位于 1584 nm 附近,光谱有效范围为 1564~1604 nm,其光谱边缘相对陡峭,基本满足大气 CO₂ 浓度宽谱红外探测的需要。同时,利用光功率计实测光纤放大器输出功率约为 2.05 W。

对该光纤放大器在 1560~1610 nm 之间的放大增益进行了分析,得到如图 7 所示的放大增益曲线。

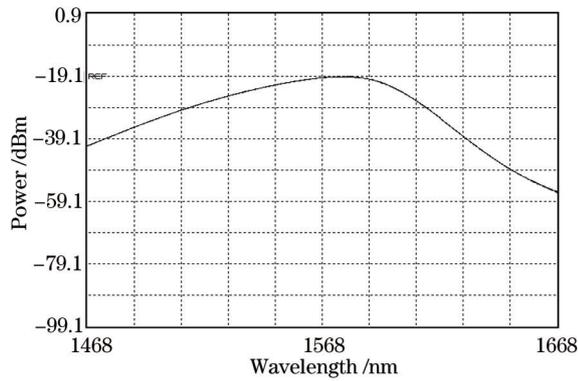


图5 SLED种子源的光谱特性

Fig.5 Spectral characteristics of SLED source

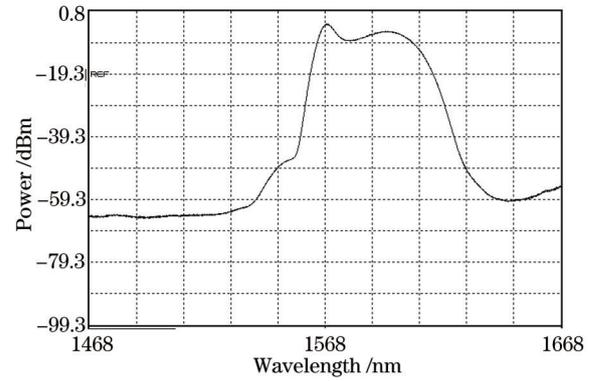


图6 输出宽谱红外激光的光谱特性

Fig.6 Spectral characteristics of wide spectrum infrared laser

由图7可知,设计的光纤放大器在1568.7 nm处的放大增益约为33.65 dB;在1601.4 nm处的放大增益约为34.29 dB;在1564~1604 nm区间内平均有效增益约为33 dB。

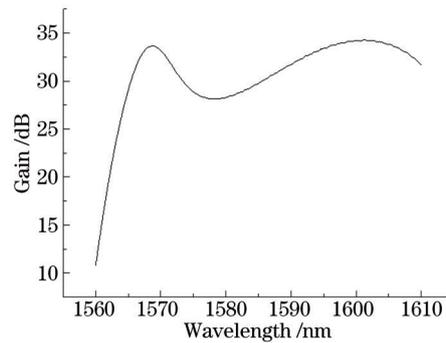


图7 光纤放大器的增益

Fig.7 Gain of optical fiber amplifier

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,提出并研制了一种可应用于实际大气CO₂浓度探测的高功率宽谱红外激光源。该红外激光源能够输出激光的中心波长为1584 nm左右,光谱有效范围为1564~1604 nm,最大输出功率能达到2 W以上,光纤放大器最大增益可达到34 dB左右。同时,该激光源还具有体积小、成本低、携带较为方便等优点,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 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.
- 2 S Kameyama, M Imaki, Y Hirano, *et al.*. Development of 1.6 μm continuous-wave modulation hard-target differential absorption lidar system for CO₂ sensing[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(10): 1513-1515.
- 3 D Sakaizawa, C Nagasawa, T Nagai, *et al.*. Development of a 1.6 μm differential absorption lidar with a quasi-phase-matching optical parametric oscillator and photon-counting detector for the vertical CO₂ profile[J]. *Appl Opt*, 2009, 48(4): 748-757.
- 4 A Amediek, A Fix, M Wirth, *et al.*. Development of an OPO system at 1.57 μm for integrated path DIAL measurement of atmospheric carbon dioxide[J]. *Appl Phys B: Lasers and Optics*, 2008, 92(2): 295-302.
- 5 A Amediek, 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): 755-772.
- 6 Wei Gong, Ge Han, Xin Ma, *et al.*. Multi-points scanning method for wavelength locking in CO₂ differential absorption lidar[J]. *Opt Commun*, 2013, 305: 180-184.
- 7 Li Jun, Gong Wei, Mao Feiyue, *et al.*. Dual field of view lidar for observing atmospheric aerosols over Wuhan[J]. *Acta*

- Optica 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 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.
- 马昕, 林宏, 马盈盈, 等. 差分吸收大气 CO₂ 激光雷达的大气压力增宽修正算法[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1101003.
- 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 E M Georgieva, W S Heaps, E 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.
- 11 W S Heaps. Broadband lidar technique for precision CO₂ measurement[J]. SPIE, 2008, 7111: 711102.
- 12 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.
- 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, 谌鸿伟, 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 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: 宋梅梅