

文章编号:1001-9014(2004)05-0384-05

探测低空大气 CO₂ 浓度分布的近红外微脉冲激光雷达

洪光烈, 张寅超, 胡顺星

(中国科学院安徽光学精密机械研究所 863 计划大气光学国家重点实验室,安徽 合肥 230031)

摘要:提出了用来探测大气 CO₂ 分布、基于光纤 1.6 μ m 波长的微脉冲激光雷达,对其性能进行了数值模拟.微脉冲激光雷达的发射机以半导体激光器加光纤放大器为核心,饱和输出功率 37dBm;接收机采用了近红外光电倍增管和光子计数器,量子效率 1%;一种偏正无关性纤维光学环形器作为发射/接收转换器,分波/合波器、隔离器、滤波器、耦合器都采用光纤器件,使系统更牢固.该系统的特点是发射脉冲能量低 20 μ J、重复频率高 20KHz、小型化.(18 \times 10⁶ 个脉冲累加)它对近地面 4.7Km 高度内的探测信噪比在 10:1 以上.光电倍增管的暗计数 2 \times 10⁵/s 限制了系统探测距离的增加.吸收倍增分离的 InGaAs/Si 雪崩光电二极管将会改善雷达的性能.

关键词:大气光学;微脉冲激光雷达;差分吸收;发射系统;接收系统

中图分类号:TN958.98 **文献标识码:**A

NEAR INFRARED MICRO PULSE LIDAR OF PROFILING ATMOSPHERIC CO₂

HONG Guang-Lie, ZHANG Yin-Chao, HU Shun-Xin

(Atmospheric Optics Laboratory, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei 230031, China)

Abstract:1.6 μ m-wave length, fiber-based micro pulse lidar of profiling atmospheric CO₂ was designed. The performance of this lidar was simulated. The transmitter of micro pulse lidar is based on semiconductor laser plus erbium-doped fiber amplifier with a saturated output power of 37dBm. The receiver employs photon counter and near infrared photomultiplier tube with quantum efficiency of 1%. A polarization-independent fiber-optic circulator is used as the transmit-receive switch. The system utilizes fiber devices for almost all components, e. g. wavelength-division-multiplexers/demultiplexers, isolator, filter, coupler, which make the system robust. Characteristic of this lidar is micro pulse energy 20 μ J, high repetition rate of 20kHz and miniaturization. Signal simulations indicate that signal-to-noise ratio below 4.7km is more than 10:1 (18 \times 10⁶ pulse). Anode dark count of 2 \times 10⁵/s limits the system performance. New InGaAs/Si APD with separate absorption and multiplication region will improve the lidar performance.

Key words:atmospheric optics;micro pulses lidar;differential absorption;transmitter;receiver

引言

激光雷达是一种较好的大气探测方法,它具有快速实施、测量范围大的优点.各国致力研制的探测雷达,都是基于固体激光器^[1]、染料激光器和几何光学元件以及利用其喇曼散射^[2]、参量放大等效应.这些大光学雷达系统可提供高的分辨率、精度和远的探测距离,但也存在一些不足,系统复杂,价格昂贵;几何光学元件体积大,不宜统调.目前光纤通讯产业发展,相关元器件比较成熟、价格便宜,为雷

达向小型化发展提供了基础条件.我们提出的一种探测大气 CO₂ 系统:使用外腔调谐窄频带半导体激光器和分布反馈激光器作主振荡器,而以光纤放大器实现终端脉冲功率放大,工作在 CO₂ 吸收线 1572nm^[3]附近,光检测采用近红外光电倍增管和光子计数器.这种结构,其脉冲能量不能做大,但重复频率可做得高,适合做成微脉冲雷达.

1 工作原理

激光脉冲在大气层中行进一方面被大气散射,

收稿日期:2003-11-03,修回日期:2004-04-28

Received date: 2003-11-03, revised date: 2004-04-28

基金项目:863-13 主题课题车载激光测污雷达关键技术资助项目(2002 AA 135030)

作者简介:洪光烈(1966-),男,安徽庐江人,副研究员,博士生,目前主要从事激光雷达系统研究.

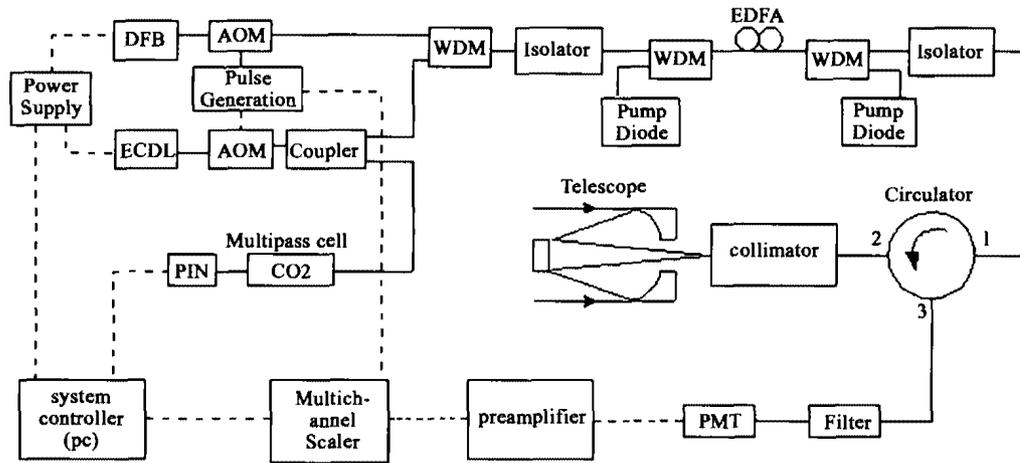


图1 系统结构原理图

Fig. Schematic diagram of system.

另一方面还被大气物质吸收,而本系统所探测的信号正是表现为 CO₂ 气体对激光脉冲能量的吸收.在此吸收探测系统中,既利用大气散射而形成的回波,又利用气体吸收而获得 CO₂ 的信息.其吸收信号的强弱反映了 CO₂ 浓度的大小.为了尽量排除其他各种因素的影响,以获得准确 CO₂ 的吸收信息,在该系统中采用两束波长相近的发射激光束.其中一波长选在 CO₂ 吸收峰的中心,记为 λ_{on} ;另一波长选在吸收峰的外边,使其受到的吸收较小,记为 λ_{off} . 探测的回波方程^[1]为:

$$N_{e,on}(R) = N_{p,on} \eta \beta(\lambda_{on}, R) \Delta R (A/R^2) \cdot \exp[-2 \int_0^R [N_w(z) \sigma_w(\lambda_{on}) + \alpha(\lambda_{on}, z) dz]] \quad (1)$$

$$N_{e,off}(R) = N_{p,off} \eta \beta(\lambda_{off}, R) \Delta R (A/R^2) \cdot \exp[-2 \int_0^R [N_w(z) \sigma_w(\lambda_{off}) + \alpha(\lambda_{off}, z) dz]] \quad (2)$$

ΔR 是在高度取样距离, N_w 是 CO₂ 分子的密度 (cm^{-3}), $N_e(R)$ 是接收机接受到的来自 $R \sim R + \Delta R$ 高度大气段的回波在探测器产生的光电子数, N_p 为被发射的单个激光脉冲包含的光子数, η 是系统的接收效率常数, R 为探测距离, A 为接受望远镜的受光面积, $\beta(\lambda, R)$ 为大气中探测光的后向散射系数 ($\text{km}^{-1}/\text{sr}^{-1}$), 探测光在来回行程中的消光系数,包括大气光散射衰减和光吸收衰减,表示为 $N_w(z) \sigma_w(\lambda, z) + \alpha(\lambda, z)$, $\sigma_w(\lambda)$ 是 CO₂ 的吸收截面 (cm^2), $\alpha(\lambda, z)$ 是除了 CO₂ 吸收之外的消光系数. 因为 λ_{on} 与 λ_{off} 相近, 近似认为:

$\beta(\lambda_{on}, R) = \beta(\lambda_{off}, R)$, $\alpha(\lambda_{on}, z) = \alpha(\lambda_{off}, z)$, 将上面式(1)和式(2)相除(即排除大气变化的主要因素), 两边取对数、微分运算, 可得到下式:

$$N_w(R) = \frac{1}{2[\sigma_w(\lambda_{on}) - \sigma_w(\lambda_{off})]} \frac{d}{dR} \left[\ln \frac{N_{e,off}(R)}{N_{e,on}(R)} \right] \quad (3)$$

这叫差(微)分吸收原理, 根据这一原理, 探测近距离大气 CO₂ 含量的微脉冲雷达主要由激光发射系统和回波光的接收、信号采集系统以及 PC 机控制部分组成. 由于微脉冲雷达发射的单脉冲能量不到大脉冲激光雷达的 1000 分之一, 为了达到与大脉冲雷达相当的信噪比, 其工作频率必须提高到大脉冲雷达的 1000 倍, 即增加采样的次数、累加平均, 提高信噪比. 因回波信号很弱, 信号的采集用光子计数器, 而不是量化采样和 A/D 转换结构框图如图 1.

2 发射系统

发射系统的功能在于发射出双波长窄线宽激光探测脉冲. 它主要由以下部分组成: DFB 半导体激光器 (InGaAsP-InP 激光二极管), 声光调制器 AOM1、AOM2, ECDL 外腔调谐半导体激光器 (其核心是 In/P 激光二极管), 脉冲信号发生器, 波分复用器 WDM, 光纤隔离器 Isolator, 掺铒光纤放大器 EDFA, 发射望远镜.

为了比较精确地使用差分方程(3)进行分析, 一般假定探测激光的光谱线宽相对于被探测气体吸收光谱的线宽是一个 DELTA 函数. 因为 CO₂ 气体红外吸收谱线很细, 比紫外吸收谱窄得多, 为使吸

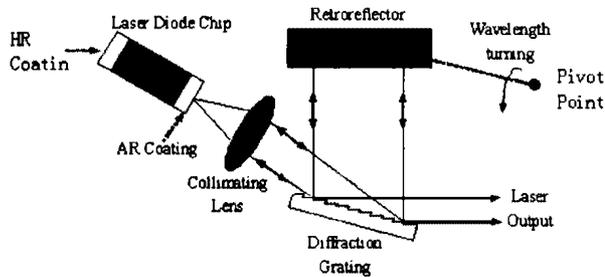


图2 外腔调谐二极管激光器
Fig.2 External cavity diode laser

收截面误差小于 0.1%，发射光谱线宽应小于 30MHz，因此选择窄线宽激光器，还必须对其采取稳频措施。

外腔调谐半导体激光器 (ECDL) 是 λ_{on} 主振荡器，其波长、线宽、功率分别为 1571.276^[5] nm、200KHz、10mw。它主要由一只二极管激光器管芯、准直透镜、衍射光栅、反光镜组成 (如图 2)，二极管激光器的一个端面镀全反射膜，另一端面镀半反射膜，全反射膜和反光镜形成谐振腔，光栅既是光选频元件又是光反馈元件，起到压缩线宽的作用。为了确保 ECDL 输出 λ_{on} 光的稳定性，由耦合器 (耦合器的分光比是 90/10) 取样出部分 (10%) 光经过充有 2 兆 CO₂ 气体的标准吸收池，其反馈信号可调整的 ECDL 激光器波长，使之稳定在 CO₂ 吸收谱峰上。

分布反馈半导体激光器 (DFB) 是 λ_{off} 的主振荡器，其波长、线宽、功率分别为 1571.429nm^[2]、2MHz、10mw。这是一种集成化光电器件，内部有标准具和光电二极管的自反馈稳频结构，带热敏电阻的热电冷却器。其光谱宽度比外腔调谐 ECDL 宽，但价格却明显便宜。

虽然大功率的半导体激光器也能输出 1W 以上的平均功率，但由于半导体激光器的电子能级寿命短而不能形成高密度粒子反转，所以工作在脉冲状态下其单脉冲能量偏小，大大的限制了探测距离。光纤激光器目前的产品，若不引入种子，其光谱线宽较宽。因此目前该系统采用半导体激光器 + 掺铒光纤放大器 (铒离子能级寿命较长) 作为发射主机的核心，而不直接使用大功率半导体激光器^[3] 或光纤激光器。

该系统的 DFB 激光器和 ECDL 激光器输出的都是连续波激光，脉冲信号发生器对声光调制器施加脉冲信号，激光经过后就变成脉冲激光，两个声光调制频率都是 10KHz，它们的脉冲是交替出现的。两

个序列的脉冲经过合波器后变成 20KHz 的单序列脉冲，脉冲的时间宽度 50ns，然后经过掺铒光纤放大器模块进行功率放大。为减小反射光重新回到主振荡半导体激光器或光纤放大器带来的光谱线纯度下降，EDFA 的两端使用光纤隔离器，隔离度 30dB。

光纤放大器工作在饱和输出状态。平均饱和输出功率为 37dbm (4000mW)，为提高功率输出，EDFA 采用正\反双向泵浦；考虑到在大功率密度下光纤芯的损坏 (损伤阈值 10GW/cm²)、喇曼散射 (SRS) 和布里渊散射 (SBS) 导致光谱展宽、放大的自发辐射 (ASE) 带来的损耗，激光单脉冲能量 20uJ，不宜使用更高能量；如果将纤芯直径增至 20um，光脉冲能量可提高到 50uJ。

望远镜是施米特-卡塞格林 (Smith-Cassagrin) 反射式望远镜，其口径是 25cm，内壁镀有全反射薄膜。光纤的输出末端是光纤准直器，出射光发散角小于 0.25rad，望远镜内表面是抛物面，光纤终端出射的激光经望远镜内壁反射后变成平行光束，其发散角不大于 100urad，发散角小，光束能量集中。

3 接收系统

接收系统接受激光束在大气中行进被大气射回来的回波信号进行探测。它包括以下几部分：望远镜 Telescope，准直器 Fibre collimator，纤维光学环形器 Fiberoptic-circulator，光纤滤波器 Filter，光电倍增管 PMT (InP/InGaAs 光电阴极)，前置放大器 Preamplifier，多通道脉冲计数器 Multichannelscaler。

接收望远镜与发射望远镜同轴公用，其口径是 25cm，可以做到发射和回波激光束尽可能的重合，以减小分置收发望远镜产生的盲区；望远镜收集的回波光由准直器耦合进入光纤；在该系统中，发射\接收的转换是偏正不敏感的纤维光学环形器，其接入损耗 1 端口→2 端口以及 2 端口→3 端口小于 0.8dB，反向传输损耗 (≥50dB) 很大，即这个环形器可容许光从 1 传输到 2，或 2 传输到 3，保证了回波信号只会进入接受系统，不会返回到发射系统，而发射光只会由望远镜发出去，不会直接进入接收系统。如图 3 所示。

回波光被光纤滤波器滤波，光纤滤波器的带宽 (6dB) 1.5nm，介入损耗 2.0dB，可滤除大气的杂散光，减小背景噪声。再由光电倍增管探测，并被多通道脉冲计数器进行光子计数 (计数速率 250MHz)。λ_{on} 和 λ_{off} 回波的光子计数交替进行。

近红外光电倍增管 PMT 采用温度 -80℃ 制冷，

大大降低了探测器的热噪声. 其量子效率 1%, 暗电流的计数 $2 \times 10^5/s$ 受光面 $\phi 19mm$, 增益 1×10^6 . 光电倍增管的输出电信号仍较小, 需先经过低噪声前置放大器放大后再由光子计数器计数. 1.5 μm 波段的 InGaAs 雪崩二极管 (APD) 很有潜力, 体积小, 量子效率高 75%, 暗电流 6nA, 但增益低 10, 不能工作在 Geiger 计数模式下. 一种新出现的吸收倍增分离的雪崩二极管性能优良, 它的光电转换层是 InGaAs 材料, 雪崩倍增层是 Si 材料, 结合了 InGaAs 光吸收特性和 Si 的雪崩放大特性, 这种雪崩二极管的光谱响应与 InGaAs-APD 相近, 具有与 InGaAs-APD 相当的高量子效率, 同时具有与 Si-APD 相当的高增益和低噪声, 若将它用于光子的 Geiger 计数, 可提高接收机的灵敏度, 减小其体积, 只是价格十分昂贵.

时间延时和脉冲发生器产生一定时间宽度 τ 的矩形波去触发光子计数器并确定计数的时间, 差分计算的方程式(3)中的 ΔR (空间取样距离) $= \tau C/2$, C 是光速; 可见矩形波宽度 τ 决定了雷达的空间距离分辨率. 每发射一个光脉冲, 就有一个触发脉冲送到光子计数器, 启动一个采样周期; 激光脉冲一旦发射, 回波信号立即按从低到高的循序被接受; 在每一个采样周期中, 门宽 (τ)、采样点数 (N)、被探测的最大高度 (H) 之间有关系 $H = CN\tau/2$; 最后把多个 (18×10^6) 采样周期中的光电子计数累加起来. 为了避免持续脉冲回波信号间的干扰, 发射的脉冲不宜过密, 所以重复频率不宜太高 (我们取 20KHz).

光信号的强弱, 由计数脉冲在时间上分布的密集程度来表示, 即在确定的时间门宽 τ 内, 被计数到的光子脉冲越多表示其光信号越强. 在光电倍增管的输出端, 信号和噪声虽然均反映在时间座标上的快速电脉冲. 但两者的幅度不同, 通常光脉冲的幅度大于噪声脉冲. 因此, 光子计数器内设置有一阈值幅度鉴别器, 只让那些幅度高于阈值的脉冲才被计数, 以提高信噪比.

为了减小接收系统中各个光接头处的光损失, 各个光器件端面镀上 (对于 1.55 μm 附近) 减反射薄膜.

4 系统的模拟计算

根据雷达回波方程、大气散射模型 (前人大量工作的结果) 和系统参数, 进行 λ_{on} 、 λ_{off} 光的后向散射信号和探测信噪比的模拟计算, 对于最终确定激光雷达的技术参数和总体结构, 了解其探测的性能十分有益的. 由上文式(1)和式(2)可以计算到, λ_{on}

和 λ_{off} 光的后向散射被接受的光电子数.

光子计数方法中, 信噪比定义^[3]:

$$S = \frac{N_s}{\sqrt{N_s + (N_B + N_D)}} \quad (4)$$

式(4)中, N_s : 回波信号的计数; N_B : 背景辐射引起的计数; N_D : 光电倍增管的暗电流脉冲计数, 如果激光雷达应用于夜间探测, 背景辐射所应起的计数可以忽略不计. $N_s = M \cdot N_e$; 同时 $N_D = M \cdot D_{cp} \cdot \frac{2\Delta R}{C}$; M

是累计的激光探测脉冲数, D_{cp} 光电倍增管每秒的暗计数, c 光速, 上面式(4)也表示为 $S =$

$$\frac{N_e \cdot \sqrt{M}}{\sqrt{N_e + D_{cp} \cdot \frac{2\Delta R}{C}}} \quad (5)$$

对于微脉冲雷达来说, N_e 值较小, 所以提高重复频率, 增加 M 值可提高信噪比.

数值模拟计算采用前人得到的 532nm 波长大气分子消光模式和气溶胶粒子消光模式分别由下面四式^[7]表示 (式中的 z 单位是 km):

大气分子的后向散射系数 (km^{-1}/sr):

$$\beta_m(z) = 1.54 \times 10^{-3} \exp(-z/7). \quad (6)$$

大气分子消光系数 (km^{-1}):

$$\alpha_m(z) = \beta_m(z) \times 8\pi/3, \quad (7)$$

气溶胶的后向散射系数 (km^{-1}/sr):

$$\beta_a(z) = 2.47 \times 10^{-3} \exp(-z/2) + 5.13 \times 10^{-6} \exp(-(z-20)^2/36), \quad (8)$$

气溶胶的消光系数 (km^{-1}):

$$\alpha_a(z) = \beta_a(z) \times 50 \quad (9)$$

大气分子后向散射系数、气溶胶后向散射系数与光

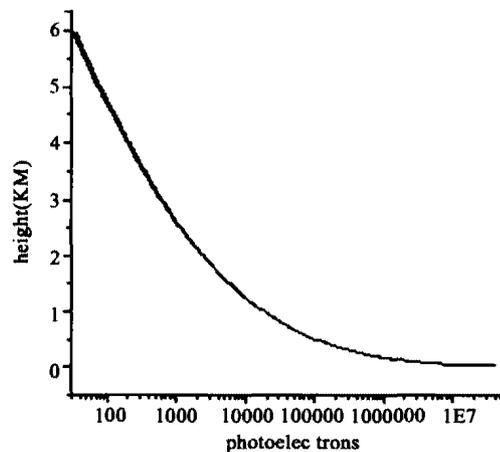


图3 计算得的接收未经压缩信号 (15×10^4 脉冲累加)
Fig.3 The calculated received signal in photoelectrons detected 15s (15×10^4 pulse) based on the atmosphere and the system parameters

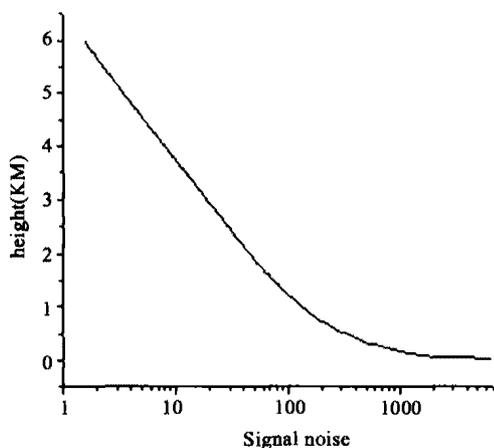


图4 计算得到的信噪比

Fig. 4 The calculated (λ on) signal-to-noise ratio for the system parameters given and the model atmosphere. The calculation assumes 18×10^6 pulses and 30m vertical sampling. night assume no background signal noise

波长之间存在以下关系^[1]:

$$\frac{\beta_a(\lambda_1)}{\beta_a(\lambda_2)} = \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)^{-1} \text{ (大约)}$$

$$\frac{\beta_m(\lambda_1)}{\beta_m(\lambda_2)} = \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)^{-4}$$

因此: $\beta_a(z)_{1572} = 0.34 \times \beta_a(z)_{532}$

$$\beta_m(z)_{1572} = 0.0131 \times \beta_m(z)_{532}$$

这两个式子可将 532nm 波长的大气模式转换成 1572nm 波长下的大气模式. 同时, 为了模拟回波信号, 假定 6 公里以下 CO_2 气体浓度随高度分布 $N_w(z) = N_0 \exp(-z/7)$, 暂定 N_0 为 $1.048 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, 估计 λ_{on} 的吸收截面为 $6.36 \times 10^{-23} \text{ cm}^2$ ^[2]; λ_{off} 的吸收截面为 $4.56 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$ ^[2]. 将式(8) $\times 0.34$ + 式(6) $\times 0.0131$; 将式(7) + (9) 得到下面两式, 即可代入式(1)和式(2)进行计算.

$$\beta(R) = 0.8398 \times 10^{-3} \exp(-R/2) + 1.74 \times 10^{-6} \exp(-(R-20)^2/36) + 2 \times 10^{-5} \exp(-R/7)$$

$$\alpha(z) = 4.2 \times 10^{-2} \exp(-z/2) + 8.7 \times 10^{-5} \exp(-(z-20)^2/36) + 1.67 \times 10^{-4} \exp(-z/7)$$

系统参数如下:

脉冲能量 $20\mu\text{J}$, $N_{p,on}, N_{p,off} = 20\mu\text{J}/h\nu = 1.6 \times 10^{12}$; 探测器的量子效率 1%, 接收系统的光利用率 20%, $\eta = 0.2\%$; 距离分辨率 $\Delta R = 200\text{ns}/2 \times (3 \times 10^8 \text{ m/s}) = 30\text{m} = 0.03\text{km}$; 接收面积 $A = (250\text{mm}/2)^2 \times 3.1416 = 4.9 \times 10^{-2} \text{ m}^2$; 光滤波器带宽 1.5nm; 接收视场 100urad.

以 15 秒钟时间 15 万个采样周期(激光脉冲重复频率 10KHz)接收的光电子数累加作为 1 组回波信号. 计算的结果如图 3. 以 30 分钟连续采样模拟系统的接收回波的信噪比, 图 4 所示. 数值计算表明, 高度在 4.7 公里时, 其信噪比是大约 10:1, 说明这个高度以下的系统探测是可行的. 模拟计算出高度在 6 公里以内信号的动态范围在 6 个数量级, 经过信号的压缩, 相当于乘以几何因子, 把近距离的 1 公里内强回波信号压下来.

6 结语

微脉冲雷达是基于半导体激光器、光纤放大器、近红外光电倍增管和光子计数器, 其多数光学器件都是光纤器件, 使得系统可做得小型化、牢固、便于统调. 该系统脉冲能量小, 为了能获得较好的测探灵敏度, 发射机工作应在高重复频率下. 数值模拟的结果表明, 其设计是可行的. 光电倍增管的暗计数大, 限制了系统的探测距离.

REFERENCES

- [1] Sun Jin-Qun. *Laser atmosphere detect* [M]. Beijing: Science Press, 1986. (孙景群. 激光大气探测. 北京: 科学出版社), 1986: 103.
- [2] Paolo Francesco Ambrico, Aldo Amodeo, Paolo Di Girolamo, et al. Sensitivity analysis of differential absorption lidar measurements in the mid-infrared region [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(36): 6847-6864.
- [3] James, Spinhirne D. Micro pulse lidar [J]. *IEEE Transactions on Geoscience Andremote Sensing*, 1993, 31(1): 48-55.
- [4] Sasano Y, Kobayashi T. *Feasibility study on space lidars for measuring global atmospheric environment, No. 4 Final Report, F-82-95* [R]. Japanese: NIES 1995.