

基于半导体激光器的 780 nm 高光谱分辨率 激光雷达系统设计

宋跃辉, 周煜东, 汪丽, 王玉峰, 狄慧鸽, 高飞, 刘鹏博, 华灯鑫*

西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048

摘要 设计了一种基于半导体激光器的 780 nm 高光谱分辨率激光雷达。发射系统以分布反馈式半导体激光器为种子源, 利用脉冲电流驱动的锥形半导体光放大器实现窄线宽微脉冲激光输出。分光系统由干涉滤光片、法布里-珀罗标准具和铷原子吸收池构成。干涉滤光片带宽为 0.5 nm, 法布里-珀罗标准具的半峰全宽为 2.8 GHz, 二者串联可有效剔除太阳背景光。温度为 338 K 的铷原子吸收池对米氏散射信号的抑制比达 33 dB, 可有效提取瑞利散射信号。基于美国标准大气模型对系统进行了数值仿真, 验证了系统的探测能力。研究结果对气溶胶光学参量的探测研究具有重要意义。

关键词 激光器; 半导体激光器; 气溶胶; 高光谱分辨率激光雷达; 铷原子吸收池

中图分类号 TN958.98

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1001006

Design of 780-nm High Spectral Resolution Lidar Based on Laser Diode

Song Yuehui, Zhou Yudong, Wang Li, Wang Yufeng, Di Huige, Gao Fei,
Liu Pengbo, Hua Dengxin*

School of Mechanical and Instrumental Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China

Abstract A 780-nm high spectral resolution lidar was designed herein based on a laser diode. A distributed feedback semiconductor laser was used as the seed of the light source system. A tapered semiconductor optical amplifier driven by pulse current was used to output the narrow line width pulse laser. The optical splitting system mainly comprised a narrow-band interference filter, a Fabry-Perot etalon, and a ^{87}Rb absorption cell. The bandwidth of the narrow-band interference filter was 0.5 nm. The full width at half maximum of the Fabry-Perot etalon was 2.8 GHz. Solar background light was filtered by their combination. The Mie scattering signal was absorbed by the ^{87}Rb cell at the temperature of 338 K, which had an inhibition rate of up to 33 dB. The Rayleigh scattering signal was then effectively extracted. Based on the American standard atmospheric model, the detection capability of the high spectral resolution lidar was verified via numerical simulations. This research was highly significant to the detection of aerosol optical parameters.

Key words lasers; semiconductor lasers; aerosol; high spectral resolution lidar; Rb absorption cell

OCIS codes 140.2020; 010.1110; 280.3640; 120.2230; 300.1030

1 引 言

大气气溶胶是指由大气介质和悬浮于其中的固体或液体颗粒物所组成的多相体系, 对气候、环境和人类健康有着重要影响^[1-2]。大气气溶胶与气候变化、人类生产生活关系密切, 已成为环境科学领域的研究热点。

激光雷达是一种主动光学遥感设备, 具有实时性好、空间分辨率高、探测范围广等特点, 是研究气溶胶微物理特性的有力工具^[3-4]。目前, 探测气溶胶光学参量的激光雷达主要有米氏散射激光雷达、拉曼激光雷达和高光谱分辨率激光雷达(HSRL)^[5-8]。HSRL 利用高光谱分光器件将米氏散射信号和瑞利散射信号分开, 从而实现气溶胶消光系数和后向散

收稿日期: 2019-05-17; 修回日期: 2019-05-30; 录用日期: 2019-06-21

基金项目: 国家自然科学基金(41627807, U1733202, 61775179, 61405158)、陕西省自然科学基金(2018JM6091)

* E-mail: dengxinhua@xaut.edu.cn

射系数的独立探测,是气溶胶探测研究的重要手段。

气溶胶米氏散射的光谱半峰全宽(FWHM)与人射激光基本相同。受大气分子热运动的影响,大气分子瑞利散射的半峰全宽大多在吉赫兹量级^[6]。HSRL技术的关键在于瑞利散射信号的有效提取。已有HSRL中多采用种子注入式Nd:YAG激光器。其中,532 nm HSRL的应用最为广泛,355 nm和1064 nm HSRL的研究也取得了一定的成果。2001年,美国航空航天局(NASA)和科罗拉多州立大学的研究人员^[9]利用532 nm种子注入式Nd:YAG激光器和碘分子滤波器设计了HSRL系统,实现了对流层和平流层温度和气溶胶消系数的高空间分辨率探测。2005年,Hua等^[10]基于355 nm种子注入式Nd:YAG激光器和法布里-珀罗标准具(FPE)设计了HSRL系统,实现了全天时大气温度的绝对探测,误差在1 K以内。2008—2010年,中国海洋大学基于碘分子滤波器设计了HSRL系统,实现了气溶胶光学参量和大气视线风速的测量^[11-12]。2015年,浙江大学的Cheng等^[13]证实了视场展宽型迈克耳孙干涉仪在HSRL系统中应用的可行性,并于2017年搭建了原理性实验系统^[14]。2016年,赵明等^[15]基于种子注入激光器和碘分子滤波器设计了HSRL系统,探测了分子散射和气溶胶散射回波信号,实现了大气光学参数的高精度定量探测。西安理工大学在HSRL系统领域也取得了一定的研究成果^[16-19]。

随着激光原子冷却和铷原子钟等研究的不断深

入,780 nm激光器和配套元器件逐渐成熟^[20-21]。特别值得一提的是,铷原子同位素⁸⁷Rb的D₂吸收谱线中心波长就在780 nm附近,这为780 nm HSRL光源和分光系统设计提供了有力的技术保障^[22]。2017年美国国家大气研究中心的Hayman等^[23]设计了780 nm HSRL系统并进行了实验研究,目前相关研究在国内尚未见报道。780 nm HSRL是现有HSRL系统波长的重要补充,对气溶胶波长指数、粒谱分布精细反演等的研究具有重要的价值。同时,780 nm波长具有较好的透过性,且该波长的太阳背景光较弱,因此780 nm HSRL在探测性能上具有一定优势。

鉴于此,本文基于半导体激光器设计了780 nm HSRL系统。其中,发射系统以分布反馈式(DFB)半导体激光器为种子源,利用脉冲电流驱动的锥形半导体光放大器实现了窄线宽微脉冲激光输出。分光系统由干涉滤光片(IF)、FPE和铷原子吸收池构成。后续数据采集处理由光子计数器和计算机完成。数值仿真验证了系统设计的可行性。

2 780 nm HSRL 整体结构

780 nm HSRL系统结构如图1所示。该系统以DFB激光器为种子源,种子激光注入到脉冲电流驱动的锥形半导体放大器(TSOA),从而实现窄线宽激光脉冲输出。回波信号由卡塞格林望远镜接收后进入分光系统中。分光系统可实现瑞利散射信号的有效提取。采集系统采用光子计数器对回波信号能量进行探测。

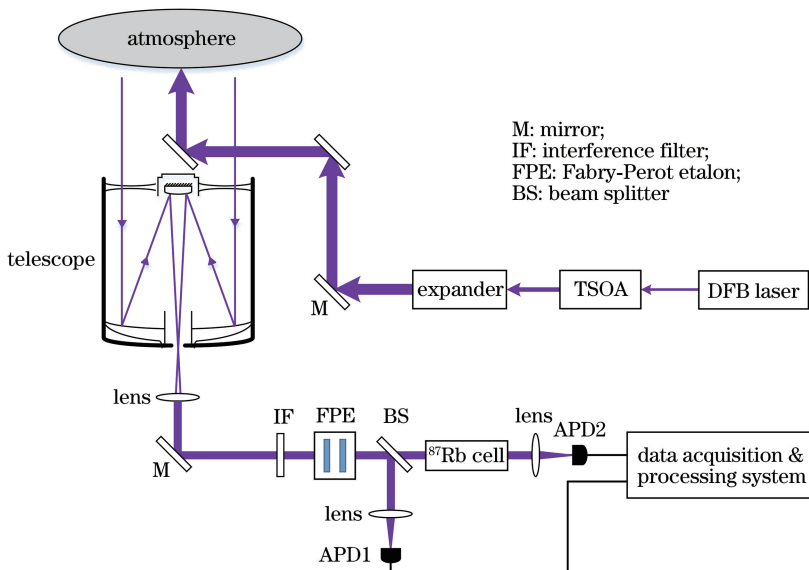


图1 780 nm HSRL系统结构

Fig. 1 Schematic of 780 nm HSRL system

3 发射系统

780 nm HSRL 的发射系统如图 2 所示。发射系统的主要元件参数如表 1 所示。

DFB 激光器的输出光谱中心波长处的半峰全宽为 0.6 MHz, 边模抑制比(SMSR)为 50 dB。DFB 激光器的输出激光经光隔离器后进入 TSOA 进行

放大, 其中 TSOA 采用脉冲电流进行驱动。该型 TSOA 在 780 nm 波长具有最大的功率放大倍数。

由于 TSOA 独特的锥形结构, 其输出光斑呈椭圆形, 且发散角较大。为满足激光雷达发射系统的设计要求, 必须对 TSOA 的输出光束进行整形, 以限制其发散角。光路设计中, 选用非球面镜为慢轴准直透镜, 柱面镜为快轴准直透镜。

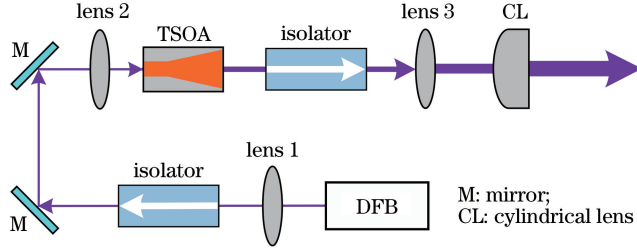


图 2 780 nm HSRL 激光发射系统

Fig. 2 Laser transmitter of 780 nm HSRL

表 1 激光发射系统主要元件参数

Table 1 Parameters of main elements of laser transmitter

Device	Parameter	Value
DFB laser	Target wavelength /nm	780.24
	Linewidth (FWHM) /MHz	0.6
	Mode-hop free tuning range /pm	25
	Side mode suppresion ratio (SMSR) /dB	50
	Forward current /mA	180
	Output power /mW	80
TSOA	Gain spectral width /nm	770-790
	Amplification /dB	22
	Forward current /A	4.5
	Input power /mW	10-50
	Output power /W	3

4 分光系统

4.1 散射光谱

激光和大气分子、气溶胶粒子相互作用产生后向弹性散射回波信号。气溶胶米氏散射的多普勒展宽线型函数为^[24]

$$f_{\text{aer}}(\nu) = \sqrt{\frac{4\ln 2}{\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{4\ln 2 \cdot \nu^2}{\pi\sigma^2}\right), \quad (1)$$

式中: ν 为频率偏移量; σ 为发射激光的频谱宽度。

大气分子的瑞利散射多普勒展宽线型函数为

$$f_{\text{mol}}(\nu) = \sqrt{\frac{4\ln 2}{\pi(\sigma^2 + \Delta\nu_{\text{FWHM}}^2)}} \exp\left(-\frac{4\ln 2 \cdot \nu^2}{\sigma^2 + \Delta\nu_{\text{FWHM}}^2}\right), \quad (2)$$

其中, 瑞利散射多普勒展宽的半峰全宽 $\Delta\nu_{\text{FWHM}}$ 可近似表示为

$$\Delta\nu_{\text{FWHM}} = \sqrt{\frac{32kT\ln 2}{\lambda_0^2 M}}, \quad (3)$$

式中: T 为大气温度; k 为玻尔兹曼常量; λ_0 为激光发射波长; M 为平均分子质量。

当 T 为 288.1 K(海平面)时, 780 nm 波长的散射谱线如图 3(a) 所示。其中, 中心波长处展宽极小、强度较大的部分主要来自米氏散射; 两侧展宽较大、强度较小的部分主要来自瑞利散射。

由美国标准大气模型可知, 在 10 km 范围内, 大气温度随高度的增加而减小。图 3(b) 所示为温度分别为 288.1 K(海平面)、255.7 K(海拔 5 km) 和 223.2 K(海拔 10 km) 时的瑞利散射和米氏散射谱线, 三条谱线的形状非常接近。可见, 在 780 nm 波长 10 km 高度范围内, 大气温度对散射谱线的影响可忽略。

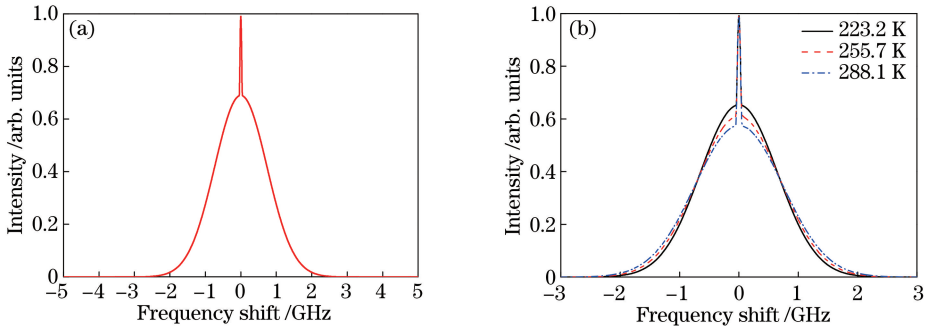


图 3 散射谱线。(a) 780 nm 波长的散射谱线(288.1 K);(b)不同温度条件下的散射谱线

Fig. 3 Scattering spectra. (a) Scattering spectrum at 780 nm (288.1 K); (b) scattering spectrum at different temperatures

4.2 分光系统结构

780 nm HSRL 分光系统的结构如图 4 所示。望远镜接收到的光信号依次通过准直透镜、IF 和 FPE 以剔除太阳背景光。其中,IF 的带宽为 0.5 nm、透过率为 99%。BS 为分束镜,透射率为 80%,反射率为 20%。BS 的反射光直接进入 APD1(米氏散射通道),BS 透射光中的米氏散射回波信号被铷原子吸收池吸收后由 APD2 接收(瑞利散射通道)。

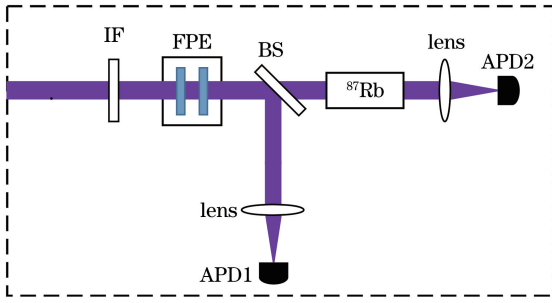


图 4 780 nm HSRL 的分光系统结构

Fig. 4 Schematic of optical splitting system of 780 nm HSRL

4.2.1 FPE

为保证瑞利散射谱线能完全包含在 FPE 的一个透射峰内,同时尽可能减少干涉滤光片带宽范围内 FPE 透射峰的数量,对 FPE 进行了优化设计^[25]。FPE 的主要参数如表 2 所示。

表 2 FPE 的主要参数

Table 2 Parameters of FPE

Parameter	Value
Free spectral range /GHz	98.62
Fineness	56.81
FWHM /GHz	2.8
Intracavity loss coefficient	0.001
Surface albedo	0.9462
Refractive index of plane-parallel plate	1.520
Cavity length /mm	1

FPE 透射场的透过率可表示为

$$T = \frac{T_{\max}}{1 + F \sin^2(\delta/2)}, \quad (4)$$

式中: T_{\max} 为峰值透过率; F 为精细度系数; δ 为相邻两束光的光程差引起的相位差。

$$F = \frac{4\rho}{(1-\rho)^2}, \quad (5)$$

$$T_{\max} = \left(1 - \frac{a}{1-\rho}\right)^2, \quad (6)$$

$$\delta = \frac{4\pi}{\lambda}nh \cos \theta, \quad (7)$$

式中: a 为腔内损耗系数; ρ 为表面反射率; n 为平行平板的折射率; h 为平板间距(腔长); θ 为入射光束与法线的夹角。

FPE 的有效透过率可以表示为理想透过率与大气散射光谱线型在频域上的卷积。当大气温度为 288.1 K 时,FPE 对米氏散射和瑞利散射信号的有效透过率分别为

$$f_a(\Delta\nu) = \int_{-\nu}^{\nu} f_{\text{aer}}(\nu)T(\nu + \Delta\nu)d\nu, \quad (8)$$

$$f_m(\Delta\nu) = \int_{-\nu}^{\nu} f_{\text{mol}}(\nu, 288.1)T(\nu + \Delta\nu)d\nu, \quad (9)$$

式中: $\Delta\nu$ 是 FPE 中心频率相对谱线中心频率的偏移量; T 是 FPE 的理想透过率函数; $f_{\text{aer}}(\nu)$ 和 $f_{\text{mol}}(\nu)$ 分别为(1)式和(3)式所示的米氏散射和瑞利散射线型函数。

由图 3(a)可知,瑞利散射光谱的半峰全宽为 1.736 GHz。其有效透过谱线如图 5 所示。显然,FPE 可在保留瑞利散射的同时,剔除太阳背景光。

4.2.2 铷原子吸收池

为有效滤除瑞利通道内的米氏散射信号,设计了铷原子吸收池,主要参数如表 3 所示^[20,26]。

^{87}Rb 原子 D_2 线的超精细结构如图 6 所示,其中 F 为 ^{87}Rb 原子光谱的超精细能级。由于 ^{87}Rb 原子

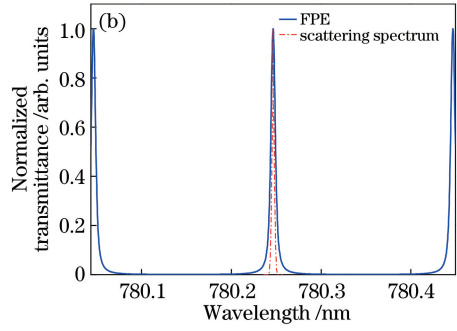
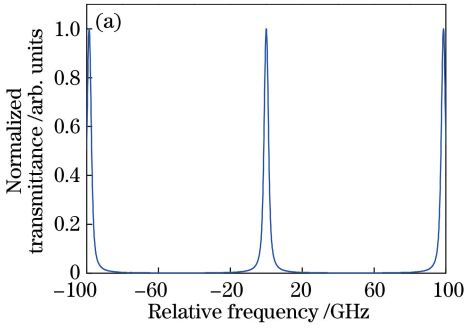


图 5 FPE 的有效透过谱线。(a)频率;(b)波长

Fig. 5 Effective transmittance spectra of FPE. (a) Frequency; (b) wavelength

表 3 铷原子吸收池主要参数

Table 3 Parameters of the Rb absorption cell

Parameter	Content
Mass of Rb atom / (10^{-25} kg)	1.41928
Number density of Rb atoms / ($10^9 \cdot \text{m}^{-3}$)	1.489
Spontaneous emission rate / MHz	38.12
Center frequency / THz	384.23048446
Speed of light / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	299792458
Length of the cell / mm	71.80
Transmittance / %	90
Temperature / K	338

为多普勒展宽; k 为玻尔兹曼常数, T_D 为热力学温度; m 为铷原子质量; c 为光速。根据多普勒展宽线型可计算出 ^{87}Rb 原子 D_2 线的吸收截面 σ_D 。

$$\sigma_D(\nu, \nu_D) = \frac{A_{21}\nu^2}{8\pi\nu_D^2} g(\nu, \nu_D), \quad (12)$$

式中: A_{21} 为自发辐射率。

由朗伯-比尔定律可知,铷原子吸收池的透过率可表示为

$$\frac{I(\nu)}{I_0(\nu)} = \exp(-\sigma_D N l), \quad (13)$$

式中: $I(\nu)$ 为透过吸收池的光强; $I_0(\nu)$ 为入射光强; l 为吸收池腔长; N 为铷原子数密度。

铷原子吸收峰的中心波长由铷原子的固有特性决定,不受温度影响。而吸收能力和吸收峰谱宽与温度密切相关,不同温度时铷原子 D_2F_2 线的透过率曲线如图7所示。

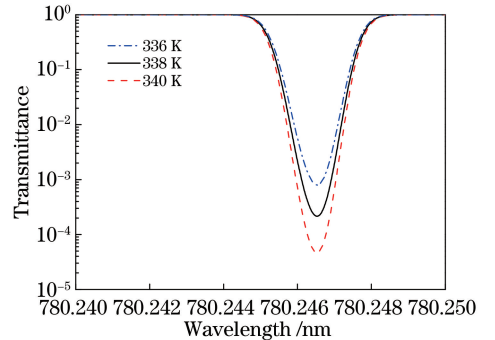


图 7 不同温度时铷原子 D_2F_2 线的透过率曲线

Fig. 7 Transmittance of the ^{87}Rb D_2F_2 line at different temperatures

由图7可知,当温度升高时,铷原子吸收池的吸收能力增强,对米氏散射信号有更好的抑制作用。然而,温度升高时吸收峰谱宽也有所增加,这将导致铷原子吸收池吸收过多的瑞利信号,从而降低系统的探测能力。综合考虑吸收能力和吸收峰谱宽,铷原子吸收池的工作温度设定为338 K^[23]。精准控制

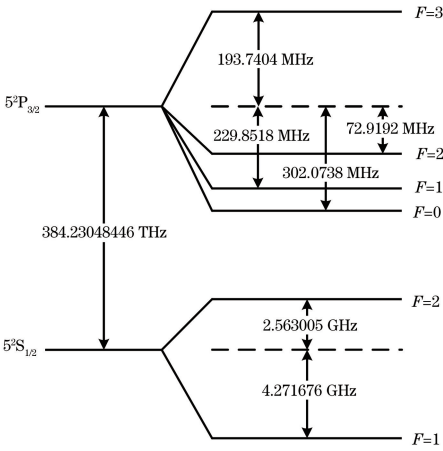


图 6 ^{87}Rb 原子 D_2 线超精细结构

Fig. 6 Hyperfine structure of the ^{87}Rb D_2 line

D_2 线在基态 $5^2S_{1/2}$ 有两个超精细能级($F=1, F=2$),因此其原子吸收光谱存在两个主要的多普勒展宽 F_1 和 F_2 。纯铷蒸气吸收谱线的多普勒展宽线型函数可表示为

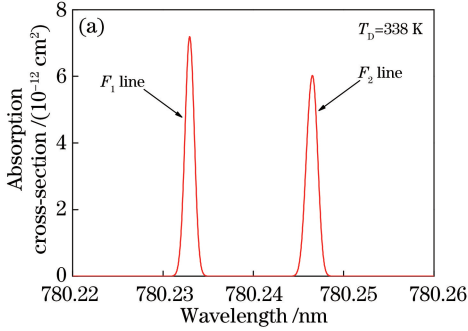
$$g(\nu, \nu_D) = \frac{2}{\Delta\nu_{\text{FWHM}}} \left(\frac{\ln 2}{\pi} \right)^{1/2} \exp \left[-\frac{4 \ln 2 (\nu - \nu_D)^2}{\Delta\nu_{\text{FWHM}}^2} \right], \quad (10)$$

$$\Delta\nu_D = 2\nu_D \left(\frac{2kT_D}{mc^2} \ln 2 \right)^{1/2}, \quad (11)$$

式中: ν 为扫描频率; ν_D 为吸收光谱的中心频率; $\Delta\nu_D$

铷原子吸收池的工作温度是技术关键。实验中拟选用 Thorlabs 公司生产的铷原子吸收池、加热器和温控系统等整套设备,其温度控制范围为 293 ~ 473 K,控制精度为 ± 0.1 K。

图 8(a)所示为 ^{87}Rb 原子在温度为 338 K 时的



D_2 线吸收截面曲线。由图 8(a)可知, ^{87}Rb 原子 D_2F_2 线处的吸收峰频谱位置与 780 nm HSRL 系统的米氏散射信号频谱位置重合,可实现对米氏散射信号的抑制。 ^{87}Rb 原子在 338 K 的 D_2F_2 线透过率曲线如图 8(b)所示。

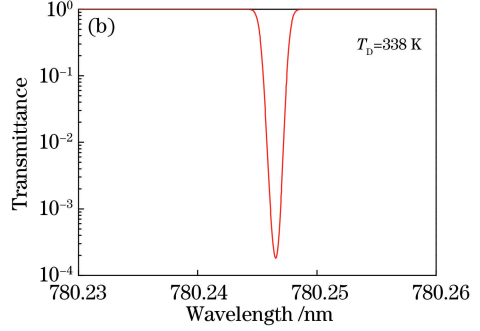


图 8 ^{87}Rb 原子 D_2 线吸收特性。(a)吸收截面;(b) D_2F_2 线透过率

Fig. 8 Absorption characteristics of ^{87}Rb D_2 line. (a) Absorption cross section; (b) transmittance of D_2F_2 line

分光系统的相关光谱如图 9 所示。由图 9 可知, ^{87}Rb 吸收池对米氏散射信号的抑制比可达 33 dB,可满足 HSRL 系统的需要。显然,在

780 nm HSRL 中,由 IF、FPE 和铷原子吸收池所组成的多级分光系统可实现瑞利散射信号的有效提取。

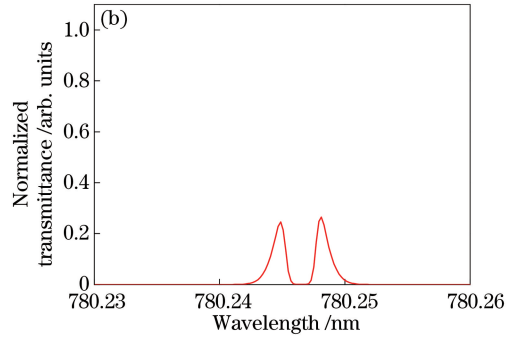
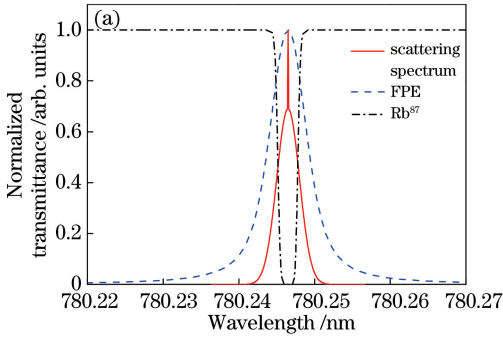


图 9 分光系统。(a)光谱图;(b)透过光谱

Fig. 9 Optical splitting system. (a) Spectrum; (b) transmittance spectrum

5 HSRL 系统性能仿真

基于美国标准大气模型对系统探测性能进行了数值仿真^[27]。表 4 为 HSRL 系统的仿真参数。

接收系统采用直径为 400 mm 的卡塞格林望远镜,其副镜直径约为 120 mm。为抑制太阳背景光影响,望远镜接收视场角取为 0.5 mrad^[28],此时系统探测盲区约为 300 m。太阳背景光数据详见参考文献^[29]。米氏散射通道的光学透过率为 0.7,瑞利散射通道的光学透过率为 0.1。

5.1 夜间探测

夜间探测时,探测时间取为 30 s,出射激光的重复频率为 1 kHz,即脉冲数目为 30000。此时系统的信噪比 R_{SNR} 如图 10 所示。当设定信噪比阈值为 10 时,米氏散射通道和瑞利散射通道在夜间的有效探

测高度分别为 6.5 km 和 5 km。

表 4 780 nm HSRL 系统仿真参数

Table 4 Simulation parameters of 780 nm HSRL

Parameter	Value
Central wavelength / nm	780.2465
Pulse width / ns	250
Peak power / W	4
Single pulse energy / μJ	1
Field of view / mrad	0.5
Diameter of telescope / mm	400
Photon detection efficiency	0.5
Darkcount / s^{-1}	1000
Background radiation of solar / $(\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1})$	5×10^{-3}
Bin width / μs	0.2

参 考 文 献

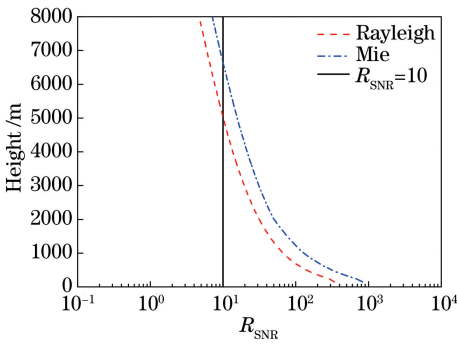


图 10 夜间探测时 780 nm HSRL 系统的信噪比

Fig. 10 SNR of 780 nm HSRL at night

5.2 白天探测

受太阳背景光影响,系统在白天的探测能力显著降低。为提高系统在白天的探测能力,采用过载驱动方式,将发射系统的输出峰值功率提高到 8 W,即单脉冲能量为 $2 \mu\text{J}^{[30]}$;同时延长探测时间,提高激光脉冲的重复频率。白天探测时,探测时间设为 120 s,激光重复频率设为 4 kHz。在此条件下,系统的探测能力如图 11 所示。当信噪比阈值设定为 10 时,该系统米氏散射通道和瑞利散射通道的有效探测高度均可达 3.5 km。

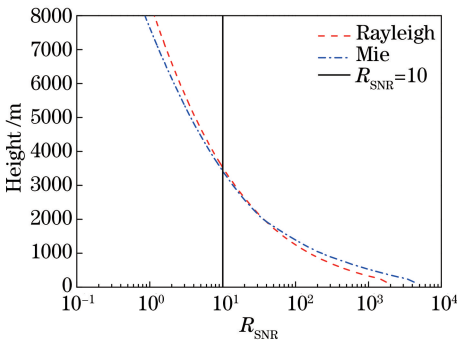


图 11 白天探测时 780 nm HSRL 系统的信噪比

Fig. 11 SNR of 780 nm HSRL in the daytime

6 结 论

为探测气溶胶光学参量,根据气溶胶光散射特性的深层规律,设计了 780 nm HSRL 系统。该系统以 DFB 激光器作为种子激光器,通过脉冲电流驱动的锥形半导体光放大器实现 780 nm 窄线宽微脉冲激光输出。分光系统利用 IF、FPE 和铷原子吸收池实现了瑞利散射信号的精细提取。研究表明,当信噪比阈值设定为 10 时,该系统在白天的有效探测高度可达 3.5 km。该系统是现有 HSRL 的重要补充,对气溶胶光学特性的探测研究具有重要意义。

[1] Mao J T, Zhang J H, Wang M H. Summary comment on research of atmospheric aerosol in China [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2002, 60(5): 625-634.
毛节泰, 张军华, 王美华. 中国大气气溶胶研究综述 [J]. 气象学报, 2002, 60(5): 625-634.

[2] Sheng P X, Mao J T, Li J G. Atmospheric physics [M]. Beijing: Peking University Press, 2013: 25-28.
盛裴轩, 毛节泰, 李建国. 大气物理学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2013: 25-28.

[3] Zhao Y M, Li Y H, Shang Y N, et al. Application and development direction of lidar [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2014, 35(5): 4-22.
赵一鸣, 李艳华, 高雅楠, 等. 激光雷达的应用及发展趋势 [J]. 遥测遥控, 2014, 35(5): 4-22.

[4] Hua D X, Song X Q. Advances in lidar remote sensing techniques [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(s3): 21-27.
华灯鑫, 宋小全. 先进激光雷达探测技术研究进展 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(s3): 21-27.

[5] Liu D, Yang Y Y, Zhou Y D, et al. High spectral resolution lidar for atmosphere remote sensing: a review [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(9): 2535-2546.
刘东, 杨雨英, 周雨迪, 等. 大气遥感高光谱分辨率激光雷达研究进展 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(9): 2535-2546.

[6] Shipley S T, Tracy D H, Eloranta E W, et al. High spectral resolution lidar to measure optical scattering properties of atmospheric aerosols 1: theory and instrumentation [J]. Applied Optics, 1983, 22(23): 3716-3724.

[7] Xia J R, Zhang L. Advances in detecting aerosols with Mie lidar [J]. Arid Meteorology, 2006, 24(4): 68-72, 81.
夏俊荣, 张镭. Mie 散射激光雷达探测大气气溶胶的进展 [J]. 干旱气象, 2006, 24(4): 68-72, 81.

[8] Wu D C, Liu B, Qi F D, et al. Tropospheric aerosols optical properties measured by a Raman-Mie lidar [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2011, 6(1): 18-26.
吴德成, 刘博, 戚福弟, 等. Raman-Mie 激光雷达测量对流层大气气溶胶光学特性 [J]. 大气与环境光学学报, 2011, 6(1): 18-26.

[9] Hair J W, Caldwell L M, Krueger D A, et al. High-spectral-resolution lidar with iodine-vapor filters: measurement of atmospheric-state and aerosol

- profiles[J]. *Applied Optics*, 2001, 40(30): 5280-5294.
- [10] Hua D X, Uchida M, Kobayashi T. Ultraviolet Rayleigh-Mie lidar with Mie-scattering correction by Fabry-Perot etalons for temperature profiling of the troposphere[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(7): 1305-1314.
- [11] Song X Q, Guo J J, Yan Z A, *et al.* Study of atmospheric aerosol optical parameters detected by high spectral resolution lidar[J]. *Progress in Natural Science*, 2008, 18(9): 1009-1015.
宋小全, 郭金家, 闫召爱, 等. 大气气溶胶光学参数的高光谱分辨率激光雷达探测研究[J]. *自然科学进展*, 2008, 18(9): 1009-1015.
- [12] Liu J T, Chen W B, Song X Q. Theory of iodine filter based on high spectral resolution lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(6): 1548-1553.
刘金涛, 陈卫标, 宋小全. 基于碘分子滤波器的高光谱分辨率激光雷达原理[J]. *光学学报*, 2010, 30(6): 1548-1553.
- [13] Cheng Z T, Liu D, Luo J, *et al.* Field-widened Michelson interferometer for spectral discrimination in high-spectral-resolution lidar: theoretical framework [J]. *Optics Express*, 2015, 23(9): 12117-12134.
- [14] Cheng Z T, Liu D, Liu C, *et al.* Multi-longitudinal-mode high-spectral-resolution lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(4): 0401001.
成中涛, 刘东, 刘崇, 等. 多纵模高光谱分辨率激光雷达研究[J]. *光学学报*, 2017, 37(4): 0401001.
- [15] Zhao M, Xie C B, Zhong Z Q, *et al.* High spectral resolution lidar for measuring atmospheric transmission[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(s1): s130002.
赵明, 谢晨波, 钟志庆, 等. 高光谱分辨率激光雷达探测大气透过率[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(s1): s130002.
- [16] Di H G, Hua H B, Zhang J Q, *et al.* Design and analysis of high-spectral resolution lidar discriminator [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(18): 184202.
狄慧鸽, 华杭波, 张佳琪, 等. 高光谱分辨率激光雷达鉴频器的设计与分析[J]. *物理学报*, 2017, 66(18): 184202.
- [17] Shao J F, Hua D X, Wang L, *et al.* Full-time lidar system for ultraviolet high spectral Rayleigh temperature measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(6): 0601003.
邵江锋, 华灯鑫, 汪丽, 等. 全天时紫外高光谱瑞利测温激光雷达系统[J]. *光学学报*, 2017, 37(6): 0601003.
- [18] Gao F, Nan H S, Huang B, *et al.* Technical realization and system simulation of ultraviolet multi-mode high-spectral-resolution lidar for measuring atmospheric aerosols[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(3): 030701.
高飞, 南恒帅, 黄波, 等. 紫外域多纵模高光谱分辨率激光雷达探测气溶胶的技术实现和系统仿真[J]. *物理学报*, 2018, 67(3): 030701.
- [19] Di H G, Zhang Z F, Hua H B, *et al.* Optimization design of spectral discriminator for high-spectral-resolution lidar based on error analysis [J]. *Optics Express*, 2017, 25(5): 5068-5080.
- [20] Que Y Q. Study on detection of rubidium vapor density based on DBR diode laser [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013.
阙义钦. 基于DBR激光器的Rb蒸气粒子数密度检测方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
- [21] Nehrir A R, Repasky K S, Carlsten J L. Micropulse water vapor differential absorption lidar: transmitter design and performance[J]. *Optics Express*, 2012, 20(22): 25137-25151.
- [22] Pitz G A, Perram G P. Pressure broadening of the D1 and D2 lines in diode pumped alkali lasers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7005: 700526.
- [23] Hayman M, Spuler S. Demonstration of a diode-laser-based high spectral resolution lidar (HSRL) for quantitative profiling of clouds and aerosols [J]. *Optics Express*, 2017, 25(24): A1096-A1110.
- [24] Jiao M X, Feng Q B, Wang M. Sensing and measuring with lasers [M]. Beijing: Science Press, 2014: 315-322.
焦明星, 冯其波, 王鸣. 激光传感与测量[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 315-322.
- [25] Yu F. Study of design method of F-P etalons [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005.
余锋. F-P标准具设计方法的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [26] Yang J, Pan B L, Wang Y J, *et al.* Spectral analysis and pressure broadening mechanism of laser diode-pumped rubidium vapor laser D1 and D2 lines [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(s1): s115001.
杨静, 潘佰良, 王亚娟, 等. 铷原子D1、D2线的光谱分析与展宽机制[J]. *中国激光*, 2011, 38(s1): s115001.
- [27] Song Y H, Hua D X, Li S C, *et al.* Design of dual wavelength micro pulse polarization lidar system [J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8916: 89162V.
- [28] Zhong Z Q, Zhou J. Simulated signal calculation for micro pulse lidar [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2003, 20(5): 618-622.
钟志庆, 周军. 微脉冲激光雷达探测信号的数值模拟

- 计算[J]. 量子电子学报, 2003, 20(5): 618-622.
- [29] Measures R M, Alder J F. Laser remote chemical analyses (Chemical analysis series, vol. 94) [J]. Analytica Chimica Acta, 1989, 222(1): 394-396.
- [30] Takase K, Stockton J K, Kasevich M A. High-power pulsed-current-mode operation of an overdriven tapered amplifier[J]. Optics Letters, 2007, 32(17): 2617-2619.