

文章编号: 0258-7025(2010)12-3013-06

高斯光束的传输特性对法布里-珀罗标准具 分光的激光雷达影响

王玉峰¹ 华灯鑫¹ 毛建东^{1,2}

(¹ 西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048)
² 北方民族大学电气信息工程学院, 宁夏 银川 750021)

摘要 高斯光束的传播特性直接影响激光雷达大气回波信号的发散角,进而影响法布里-珀罗标准具(FPE)的光学特性。从高斯光束的 FPE 三维干涉环分析,得到发散角小的高斯光束有利于获得能量较高的 FPE 零级或一级干涉环。探讨了高斯光束品质因子 M^2 和准直倍率对不同高度的激光大气回波信号的影响。数值计算结果表明, FPE 对大气回波信号的透射率与高度的变化有关,在近场变化明显,在远场相对稳定;且对特定高度大气回波信号的 FPE 透射率随着光束品质因子 M^2 的增大而降低,随着准直倍率的放大而增强。所以应设计和选择具有较高准直倍率的准直发射系统和具有较低光束品质因子 M^2 的激光光束,来提高 FPE 的透射率,同时对以 FPE 分光的激光雷达的近场回波信号进行 FPE 透射率校正,以改善激光雷达系统的测量误差。

关键词 激光雷达;法布里-珀罗标准具;光束品质因子;准直倍率

中图分类号 TN958.98 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103712.3013

Effect of Propagation Properties of Gaussian Beam on Fabry-Perot Etalon in Lidar

Wang Yufeng¹ Hua Dengxin¹ Mao Jiandong^{1,2}

(¹ School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology,
Xi'an, Shaanxi 710048, China
² School of Electrical and Information Engineering, North University for Nationalities,
Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract The beam divergence angle of lidar returned signals which is directly influenced by propagation properties of Gaussian beam affects the properties of Fabry-Perot etalon (FPE). In this paper, the three-dimensional interference rings of Gaussian beam are investigated and manifested to some trend. Gaussian beam with small divergence may be propitious to obtain higher energy of FPE zero-order or first-order interference ring. For a lidar system, the effects of beam quality factor M^2 and expander coefficient on returned signals are discussed. The numerical results indicate that FPE transmission is changed clearly with the height in the near field and leveled off in the far field, and at a given height, it decreases with the enhance of the value of M^2 and increases with the expander. It is supposed that laser with lower beam quality factor M^2 and the transmitter with higher expander coefficient are chosen and developed to improve FPE transmission and in the near field decrease the measurement error in lidar using an FPE as spectroscopy, which is expected to supply numerical foundation for the lidar system.

Key words lidar; Fabry-Perot etalon; beam quality factor; expander coefficient

收稿日期:2010-01-25;收到修改稿日期:2010-04-16

基金项目:国家 973 计划(2009CB426302)和国家自然科学基金(60878050)资助课题。

作者简介:王玉峰(1979—),女,讲师,博士研究生,主要从事激光雷达遥感探测技术方面的研究。

E-mail:wangyufeng@xaut.edu.cn

导师简介:华灯鑫(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事激光雷达大气遥感探测技术和光电检测技术等方面的研究。

E-mail:dengxinhua@xaut.edu.cn(通信联系人)

1 引 言

激光雷达作为一种主动遥感探测工具已有几十年的历史,已被广泛用于激光大气传输、全球气候预测、气溶胶辐射效应及大气环境等研究领域。其在大气遥测的高度、空间分辨率、时间上的连续监测和测量精度等方面都具有独到的优势,是其他探测手段无法比拟的^[1~4]。而自 19 世纪后期法国物理学家法布里和珀罗发明了法布里-珀罗标准具(FPE)以来,其作为一种精密光学仪器在计量学和光谱学以及其他领域得到了广泛的应用^[5]。随着激光器的出现及光电探测技术的发展,人们对 FPE 的光学特性及其应用进行了更深入的研究。尤其在激光雷达方面,随着边缘检测技术及图像检测技术的发展,FPE 已成为测风、测温及气溶胶精细探测的重要手段之一^[6,7]。在以前发表的研究工作中,主要集中在探讨 FPE 透射率与光束的入射角、发散角和入射光斑形状等因素之间有依存关系,分析入射光束的入射角、发散角、入射光斑、表面平行和两平行板非严格平行对透射率曲线的影响,并对 FPE 的光学性能和长期稳定性进行了实验检测,得到入射光束的发散角对系统测量误差分析以及其对测风激光雷达系统风速测量精度的影响^[8~10]。

本文从 FPE 三维干涉环的强度分布分析出发,进而讨论了以 FPE 分光的激光雷达系统的一般特性。重点分析非理想高斯光束的传播特性及其对激光雷达大气回波信号(空间光束)发散角的影响,探讨其对 FPE 光学特性产生的不确定性,具体讨论了高斯光束品质因子 M^2 和准直倍率对不同高度的激光大气回波信号发散角的影响,从而决定了 FPE 的

透射特性,为以 FPE 分光的激光雷达系统提供大气回波信号校正或修正的数值依据。

2 FPE 干涉环的特性

FPE 是由两个平行的玻璃平板组成的。当光以平行光入射时,光在腔内进行多次反射和折射后,透射光的理想透射率可表示为

$$t(\nu, \theta) = \left(1 - \frac{L}{1-R}\right)^2 \times \frac{1}{1 + \frac{4F^2}{\pi^2} \sin^2 \left(\frac{2\pi \cdot \nu \cdot d \cdot n}{c} \cos \theta \right)}, \quad (1)$$

式中 n 为 FPE 两平板间介质的折射率, R 为平板内表面的反射率, d 为 FPE 的腔长, c 为光速, ν 为入射光频率, θ 为入射光与 FPE 反射面法线的夹角, L 为光束在通过 FPE 的光损耗, F 为有效精细度。

对于实际的激光雷达系统,入射到 FPE 的光束并非平行光,都存在一定的发散角。当考虑入射光光斑边缘对应的发散角为 θ_{\max} , 并且假设光强在整个入射光斑内均匀分布,此时 FPE 透射率可表示为

$$T(\nu) = \frac{\int_0^{\theta_{\max}/2} h(\theta) \cdot 2\pi \cdot r(\theta) \cdot t(\nu, \theta) f d\theta}{\int_0^{\theta_{\max}/2} h(\theta) \cdot 2\pi \cdot r(\theta) f d\theta}, \quad (2)$$

式中 $h(\theta)$ 表示光束的能量分布函数, $r = f \cdot \tan \theta$ 对应极坐标下的极半径, f 为透镜的焦距, $d\theta$ 代表角度的微分。

在平面坐标下可近似表示为

$$T(x, y) = \left(1 - \frac{L}{1-R}\right)^2 \frac{1}{1 + \frac{4F^2}{\pi^2} \sin^2 \left\{ \frac{2\pi \cdot \nu \cdot d \cdot n}{c} \cos[\arctan(\sqrt{x^2 + y^2}/f)] \right\}}, \quad (3)$$

式中 $\sqrt{x^2 + y^2} = f \cdot \tan \theta_{\max}$ 。

以高斯型入射光束为例,来分析光束发散角对 FPE 干涉环分布的影响。具体的计算参数为: $d = 15 \text{ mm}$, $R = 0.9$, $F = 35$, $T_p = 0.66$, $\lambda = 355 \text{ nm}$, $F_{\text{SR}} = 10 \text{ GHz}$ 。当高斯光束的发散角分别为 2, 5, 10 mrad 时,得到 FPE 干涉环分布如图 1(a)~(c) 所示。由图 1 可见,发散角大小直接影响着 FPE 的干涉条纹特性。当发散角为 2 mrad 时,产生的干涉环很密集地集中在透射率峰值附近;当发散角为 5 mrad 时,干涉环增多;随着发散角继续增大,干涉

环明显增多,而且边缘干涉环的能量大大降低。因此,对于以 FPE 作为分光元件的能量探测型激光雷达系统(如多普勒测风和瑞利测温雷达)而言,应尽量减少高斯光束的发散角,可以获得具有较高能量的 FPE 零级或一级干涉环,从而提高系统的信噪比。

3 FPE 对激光雷达的影响

典型的同轴激光雷达系统结构如图 2 所示,其中 M1~M5 为反射镜, L1~L3 为凸透镜, BS 为分

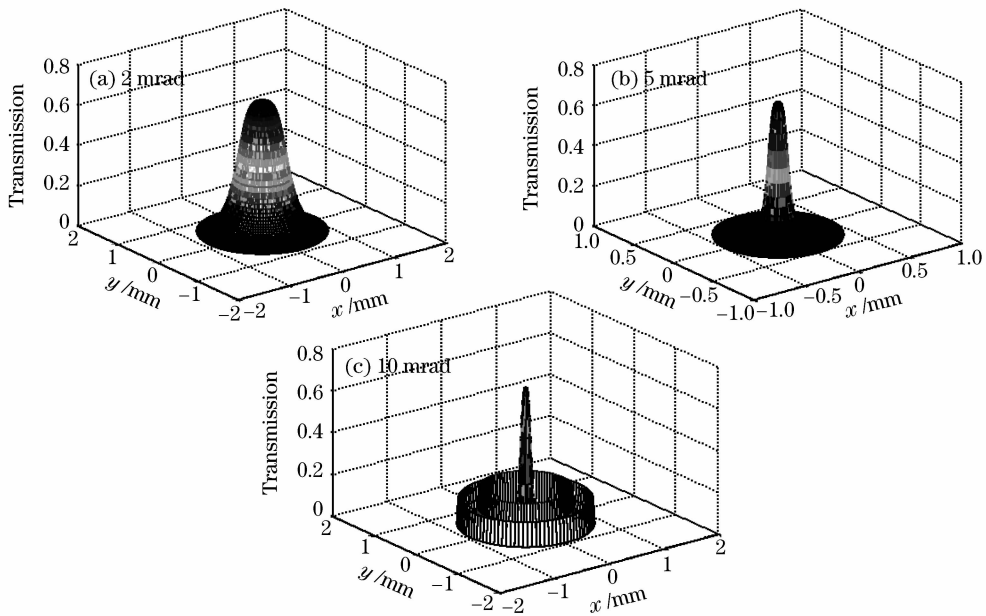


图 1 高斯光束的干涉环变化与发散角的关系

Fig. 1 Dependence of interference rings distribution on different beam divergences of Gaussian beams

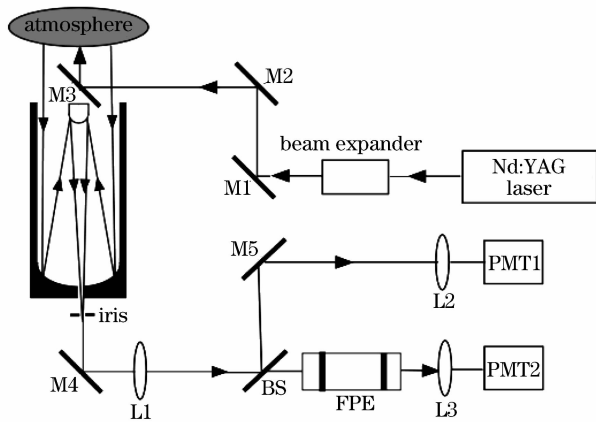


图 2 同轴激光雷达系统结构图

Fig. 2 Schematic diagram of coaxial lidar system with FPE

束镜, PMT1 与 PMT2 为光电探测器。系统采用脉冲激光器的三倍频输出作为光源, 光源波长为 355 nm, 其光束口径为 9 mm, 发散角为 0.5 mrad, 在空间以理想的高斯光束形式传播。再经过 5 倍准直系统的扩束后射入大气。大气的回波信号由口径为 250 mm, 合成焦距为 1200 mm 的卡塞格林式望远镜接收, 再经口径为 1 mm 的光阑和透镜耦合至 FPE, 并由光电倍增管探测大气回波信号。

经过准直系统压缩激光束的发散角, 改善高斯光束的能量密度及光束的指向性, 扩大激光雷达探测范围。激光光束品质因子 M^2 是评价激光束空域质量的重要参数, 它从光束的束宽和远场发散角两个方面进行评价。在实际的激光雷达系统中, 考虑

到大功率激光器的光束品质因子 M^2 对激光束在空间传播的影响, 激光束并不是理想的高斯光束^[11]。在不考虑大气湍流的影响下, 非理想的高斯激光束在任意高度上的光斑半径为

$$W(z) = W_0 + z \cdot \frac{\theta_{\text{beam}}}{2} = M\omega_0 + z \cdot \frac{M\theta}{2}, \quad (4)$$

式中 W_0 和 ω_0 分别表示多模式和单模式 TEM₀₀ 激光束的腰斑半径; θ_{beam} 和 θ 分别表示多模式和单模式 TEM₀₀ 激光束的发散角, z 为激光传输的高度。经过焦距为 f 的望远镜接收到的大气回波信号的光斑大小可近似表示为^[12]

$$W'(z) = W(z) \cdot \frac{f}{z - f}. \quad (5)$$

根据光阑衍射效应, 可以获得经光阑后的高斯光束光斑的束腰半径 ω'_0 ^[13] 和远场发散角 θ , 非理想高斯光束的远场发散角与束腰半径的关系可表示为

$$\theta = \frac{\lambda \cdot M^2}{\pi \omega'_0}. \quad (6)$$

4 数值分析

首先考虑现有实验系统的高斯光束, 其光束品质因子 M^2 为 2.5, 数值模拟获得了不同高度的大气回波信号经过 FPE 的频谱曲线, 如图 3 所示, 图中实线、虚线、点线和短虚线分别对应 100, 1000, 3000 和 5000 m 的高度。由图 3 可见, 不同高度的大气回波信号经过 FPE 后, 谱中心、透射率峰值和谱宽都发生了变化。随着高度的升高, 不仅透射率的频谱

展宽,而且透射率也明显下降。这主要是因为不同高度的回波信号的发散角不同。不同高度的大气回波信号的远场发散角随着高度的升高而增大,在5000 m高度和1000 m高度的回波信号之间的发散角差值可达到约0.285 mrad,结果如图4所示,光束的发散角越大,FPE的透射率越低。同时可以看到,在近场,FPE的透射率下降明显,而到了远场,透射率的变化趋于平缓。所以,在具有FPE分光的测风和测温雷达系统中,近场回波信号引起FPE透射率的不稳定性大于远场回波信号。因此,在探测近场目标时,如考虑对FPE产生不稳定性进行信号校正,可以改善系统的近场测量误差。

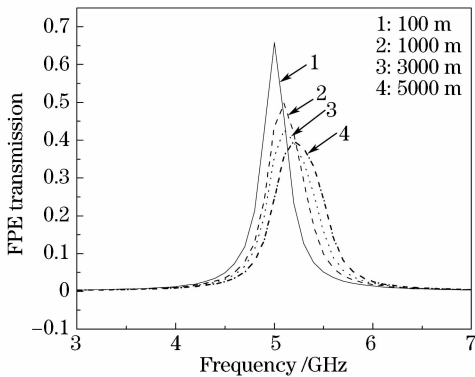


图3 不同高度大气回波信号经过标谱曲线
Fig. 3 FPE spectra for varied returned signals at different heights

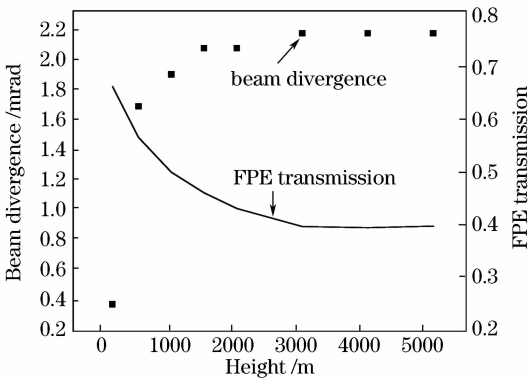


图4 不同高度回波信号的发散角和FPE透射率
Fig. 4 Divergence angle and FPE transmission of returned signals versus height

为了讨论光束品质因子 M^2 对激光雷达探测性能的影响,选取光束品质因子 M^2 分别为1,2,3的高斯光束模型,获得了在高度为3000 m激光雷达大气回波信号的FPE频谱曲线,如图5所示,实线、虚线和点线分别对应 $M^2 = 1, 2, 3$ 。从图中可以看出,FPE的频谱透射率、谱中心和谱宽也受到光束品质因子 M^2 的影响。光束品质因子 M^2 越大,FPE透

射率越低,频谱展宽越宽,这也说明了,在激光雷达探测中,应选择空间质量好的激光束,即光束品质因子 M^2 小,以提高回波信号的信噪比。

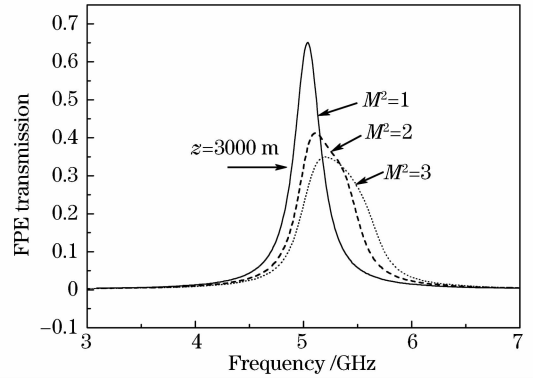


图5 不同光束品质因子 M^2 影响下的FPE频谱图
Fig. 5 FPE spectra of returned signals with different beam quality factor M^2

另外讨论了激光的扩束准直系统对激光雷达系统的影响。图6为不同准直倍率下的激光雷达系统的输出频谱图。可见,经10倍准直系统扩束后的激光雷达系统的FPE透射率较相同条件下5倍准直系统的要高。对于5000 m高度的回波信号,其透射率峰值可达到0.62,远高于5倍准直的激光雷达系统的透射率0.40。在不同高度的回波信号,均可以看到同样的现象。所以,为了获得理想的FPE透射率,应选择和设计高倍率的激光准直系统,使得激光的能量集中。

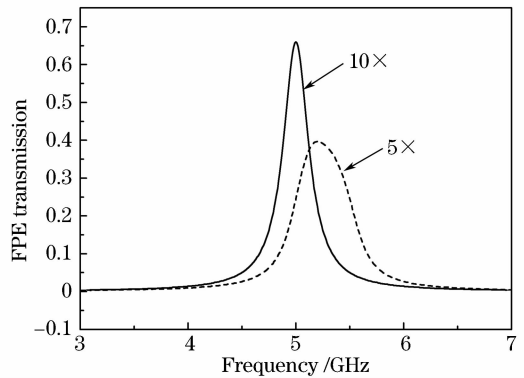


图6 不同准直倍率下的FPE频谱图
Fig. 6 FPE spectra of returned signals with different multiplying powers

考虑大气回波信号的发散角对FPE的透射率分布和测量灵敏度的影响,一般测风激光雷达系统的测量误差为^[9]

$$\epsilon = \frac{1}{\varphi R_{SN}}, \tag{7}$$

式中 φ 为测量(如测风速)灵敏度(无纲量), R_{SN} 为

系统信噪比。由于主要考虑激光雷达大气回波信号的光束特性对 FPE 的影响,所以假定 $\varphi = 1$, 系统的测量误差仅与 R_{SN} 有关。激光雷达接收信号的信噪比 R_{SN} 为

$$R_{SN} = \frac{\sqrt{NT(\nu)n(z)}}{\sqrt{T(\nu)n(z) + n_B + n_D}}, \quad (8)$$

式中 N 为探测累积脉冲数, $n(z)$ 为接收光子数, n_D 为暗电流光子数, n_B 为背景光子数。假设接收信号在散粒噪声极限下, 可知接收系统的信噪比正比于 FPE 标准具透射率的开平方。根据 FPE 标准具的参数及探测器累积脉冲数 10000 下, 分析透射率变化产生的信噪比的相对误差。图 7 为不同 M^2 品质因子的激光束对 FPE 透射率的信噪比误差。不同曲线分别对应不同光束品质因子 M^2 的激光束。从图 7 中可以看到, 品质因子 M^2 越大的激光束经大气传输之后, FPE 透射率的信噪比误差越大。对于远场探测, 非理想的高斯光束 FPE 透射率信噪比误差将由 1.3% 增大到 1.6%。

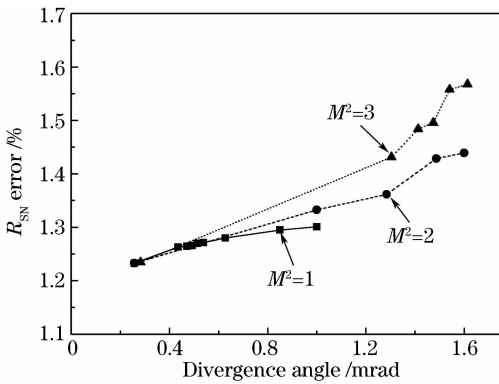


图 7 FPE 透射率相对误差随光束发散角的变化

Fig. 7 FPE transmission R_{SN} error versus the divergence angle

5 结 论

讨论了高斯光束的 FPE 三维干涉环分布的变化趋势, 从实际的 FPE 分光的激光雷达系统出发, 探讨了不同高度激光大气回波信号的远场发散角的不同所引起的 FPE 光学特性的变化; 并基于光束品质因子 M^2 和准直倍率对高斯光束传播特性的影响, 讨论了光束品质因子 M^2 和准直倍率对大气回波信号的影响。数值计算结果表明, FPE 对大气回波信号的透射率与高度的变化有关, 在近场变化明显, 在远场相对稳定; 且对特定高度大气回波信号的 FPE 透射率随着光束品质因子 M^2 的增大而降低, 随着准直倍率的放大而增强。并对 FPE 透射率信

噪比相对误差进行分析, 结果表明非理想的高斯光束经大气传播后, 远场大气回波信号的 FPE 透射率信噪比误差将由 1.3% 增大到 1.6%。所以应设计和选择具有较高准直倍率的准直发射系统和具有较低光束品质因子 M^2 的激光光束, 来提高 FPE 的透射率, 并通过近场探测目标的回波信号进行校正, 减少以 FPE 分光的激光雷达系统的测量误差。

参 考 文 献

- Dengxin Hua, Jun Liu, Kiyotaka Uchida *et al.*. Daytime temperature profiling of planetary boundary layer with ultraviolet rotation Raman lidar [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2007, **46**(9A):5849~5852
- Bo Guangyu, Liu Bo, Zhong Zhiqing *et al.*. Rayleigh-Raman-Mie lidar for atmospheric temperature and aerosol profiles measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1):19~25
伯广宇, 刘 博, 钟志庆 等. 探测大气温度和气溶胶的瑞利-拉曼-米氏散射激光雷达[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1):19~25
- Wang Min, Hu Shunxing, Su Jia *et al.*. Measurements of refractive profiles using a pure rotational Raman lidar in the lower atmosphere [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12):1986~1991
王 敏, 胡顺星, 苏 嘉 等. 纯转动拉曼激光雷达反演低层大气折射率廓线[J]. *中国激光*, 2008, **35**(12):1986~1991
- Dong Yunsheng, Liu Wenqing, Liu Jianguo *et al.*. Application study of lidar in urban traffic pollution [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2):315~320
董云升, 刘文清, 刘建国 等. 激光雷达在城市交通污染中应用研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2):315~320
- Liang Jing, Long Xingwu, Zhang Bin *et al.*. Spectral selection in He-Ne laser by internal F-P etalon [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11):3108~3113
梁 晶, 龙兴武, 张 斌 等. 一种内置法布里-珀罗标准具选择 He-Ne 激光器内谱线的方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(11):3108~3113
- Dengxin Hua, Masaru Uchida, Takao Kobayashi. Ultraviolet Rayleigh-Mie lidar with Mie-scattering correcting by Fabry-Perot etalons for temperature profiling of the troposphere [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(7):1305~1314
- Haiyun Xia, Dongsong Sun, Yuanhong Yang *et al.*. Fabry-Perot interferometer based Mie Doppler lidar for low tropospheric wind observation [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(29):7120~7131
- Chi Ruli, Liu Dong, Zhong Zhiqing *et al.*. Application and analysis of the dual Fabry-Perot etalon in a direct detection wind lidar [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(2):202~206
迟如利, 刘 东, 钟志庆 等. 双 Fabry-Perot 标准具在直接测风激光雷达系统中的应用与分析[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(2):202~206
- Ding Hongxing, Sun Dongsong, Yang Zhao *et al.*. Accuracy affected by the beam divergence in a Fabry-Perot etalon based wind lidar [J]. *Laser & Infrared*, 2004, **34**(1):18~20
丁红星, 孙东松, 杨 昭 等. 测风激光雷达光束发散角对测量精度的影响[J]. *激光与红外*, 2004, **34**(1):18~20
- Xia Haiyun, Sun Dongsong, Dong Jingjing *et al.*. Illumination effects on the dual Fabry-Perot etalon based Doppler wind lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(3):377~381
夏海云, 孙东松, 董晶晶 等. 入射光斑对双 F-P 标准具测风激光雷达的影响[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(3):377~381
- Gao Fei, Hua Dengxin, Wu Min *et al.*. Effect of M^2 factor of laser beam for a non-coaxial lidar system [J]. *Acta Optica*

Simica, 2008, **28**(9):1649~1654

高飞,华烽鑫,吴敏等. 光束品质因子 M^2 对非同轴激光雷达探测性能的影响[J]. 光学学报, 2008, **28**(9):1649~1654

12 James R. Jenness, Jr., Daniel B. Lysak, Jr., C. Russell Philbrick. Design of a lidar receiver with fiber-optic output [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(18):4278~4284

13 Liu Yajing, Ji Xiaoling. Application of the matrix representation

method to the propagation of Bessel Gauss beams through a multi-apertured complex optical system [J]. *Journal of Sichuan Normal University*, 2008, **31**(1):106~109

刘雅静,季小玲. 矩阵表示法在贝塞尔-高斯光束通过多光阑复杂光学系统传输中的应用[J]. 四川师范大学学报, 2008, **31**(1): 106~109

35.6 W 高功率高效率全光纤超连续谱光源

目前,高功率超连续谱(SC)光源通常都采用连续波光纤激光器抽运光子晶体光纤得到,但连续光抽运较难得到设想的谱宽和平坦度,且所需光子晶体光纤长度较长。相对而言,超短脉冲激光(飞秒或皮秒)具有高的峰值功率,容易实现光谱控制,只需较短的光纤即可得到比较理想的谱宽和平坦度。然而,非线性效应和激光破坏限制了超短脉冲光纤激光器的平均输出功率,进而限制了由其抽运产生的超连续谱输出功率的提高。

国防科学技术大学利用独特的重复频率倍增技术降低激光器中的非线性效应,于2009年研制成功全光纤结构的皮秒脉冲激光器,输出功率近百瓦。在此基础上,结合其在光子晶体光纤方面开展的一系列研究工作,于近期研制成功输出功率达35.6 W的全光纤超连续谱光源。该光源最大特点是采用脉冲抽运的全光纤结构,转换效率高,具有很好的稳定性和可靠性。据作者所知,目前国际上见于报道的脉冲抽运全光纤超连续谱光源最高输出功率仅为10 W左右,采用连续光抽运的全光纤超连续谱光源最高功率也不到30 W。

该超连续谱光源的抽运源是一全光纤结构的皮秒脉冲激光器,输出波长1064 nm、脉宽小于20 ps、输出尾纤芯径为15 μm 。采用芯径7 μm 的光子晶体光纤作为非线性介质。由于皮秒激光器输出尾纤模面积与光子晶体光纤模面积相差很大,采用光子晶体光纤常用的低电流多次放电熔接方式进行直接熔接得到的熔接点损耗较大。这种熔接方式将超连续谱的输出功率限制在12 W左右。为了突破该功率限制,采用了特别的光子晶体光纤后处理技术,将光子晶体光纤输入端的模面积扩展到与皮秒激光器输出尾纤模面积相仿,再利用多次放电的方式进行熔接,得到了低损耗的熔接点,保证了其在高功率下的正常运转。图1为该超连续谱光源的功率特性曲

线图,在57.7 W抽运功率下,得到35.6 W输出功率,光-光转换效率为62%。图1中的插图为输出光谱图,光谱覆盖了650~1700 nm(1700 nm以上受到光谱仪的限制未能观察到)。图2为实验进行过程中的照片。

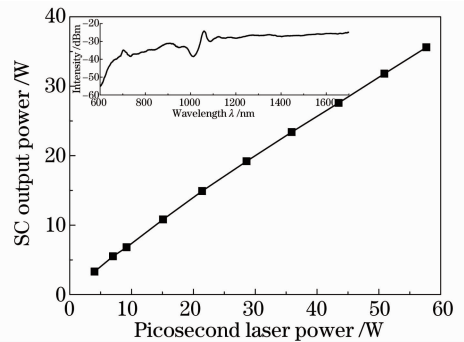


图1 超连续谱输出功率随抽运功率的变化
Fig. 1 Supercontinuum output power versus picosecond laser pump power

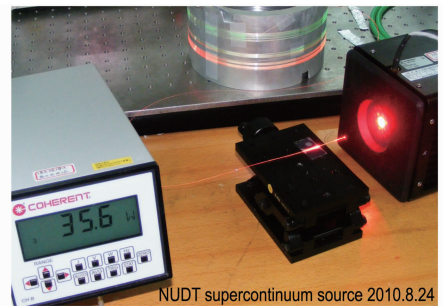


图2 超连续谱光源实验照片
Fig. 2 Experimental photograph of the supercontinuum source

陈胜平 王建华 湛鸿伟 陈子伦 侯静
许晓军 陈金宝 刘泽金

(国防科学技术大学光电科学与工程学院,
湖南长沙410073)