

# 光学学报

## 光纤空气隙法布里-珀罗标准具透射谱线型研究

汪巧云, 杨静, 高欣宇, 钟宇民, 孟彦龙, 毛邦宁, 裘燕青, 李裔\*

中国计量大学光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018

**摘要** 空气隙法布里-珀罗(F-P)标准具是一种常见的光无源器件,其作为滤波器广泛应用于光通信、光电测量和光传感领域。根据经典干涉理论,F-P标准具的光谱为周期出现的洛伦兹峰。但在对F-P标准具透射谱的校准与拟合过程中,发现其透射峰存在左右不对称以及展宽现象,导致使用经典洛伦兹公式的拟合误差较大。通过分析透射峰不对称度和展宽间的关系,并考虑光纤准直器的发散角以及F-P标准具的装配误差因素,提出了一种基于传统F-P干涉理论并融合发散角与入射偏角的多峰叠加拟合公式。使F-P透射谱的拟合方差提高到0.008、重合精度为0.9998,与基于洛伦兹线型的拟合结果相比提高了近15倍。该研究提供了一种对光纤空气隙F-P标准具透射谱精确拟合的方法,并对其设计以及装配工艺有着重要的指导意义。

**关键词** 测量; 光纤空气隙法布里-珀罗标准具; 多峰拟合; 偏度; 光谱展宽

中图分类号 O433.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0412001

### Research on the Lineshape of Transmission Spectra from Fiber Air Gap Fabry-Perot Etalons

Wang Qiaoyun, Yang Jing, Gao Xinyu, Zhong Yumin, Meng Yanlong,  
Mao Bangning, Qiu Yanqing, Li Yi\*

College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

**Abstract** Air gap Fabry-Perot (F-P) etalon is a common passive optical device, which, as a filter, has been widely used in optical communications, photoelectric measurement, and optical sensing. Based on the classical multi-beam interference theory, the spectrum of an F-P etalon has periodical Lorentz peaks. However, during the calibration and fitting of the transmission spectrum of a fiber air gap F-P etalon, left-right asymmetry and broadening of the transmission peaks are found. These unexpected phenomena lead to a large fitting error if the classical Lorentz formula is employed. In this study, we firstly analyze the relationship between peak asymmetry and broadening, and then investigate the influence of the divergence angle of a fiber collimator and the assembly error of the etalon. Finally, taking the divergence angle and the incident deflection angle into consideration, we propose a multi-peak superposition fitting formula based on the traditional F-P interference theory. With the new formula, a fitting variance of 0.008 and a coincident accuracy of 0.9998 are achieved for the F-P transmission spectra. Compared with the fitting results of Lorentz lineshape, the fitting accuracy is improved by about 15 times. In conclusion, an accurate fitting method for the transmission spectra of fiber air gap F-P etalons is provided, which has important guiding significance for the design and assembly of the F-P etalons.

**Key words** measurement; fiber air gap Fabry-Perot etalon; multi-peak fitting; skewness; spectral broadening

**OCIS codes** 120.2230; 300.6420; 300.3700

收稿日期: 2020-08-04; 修回日期: 2020-09-12; 录用日期: 2020-09-25

基金项目: 浙江省自然科学基金(LY16F050006)、浙江省大学生科技创新活动计划(2020R409042)

\* E-mail: yli@cjlu.edu.cn

## 1 引言

法布里-珀罗(F-P)标准具基于平行平板多光束干涉原理<sup>[1]</sup>,具有结构简单、低温漂、低成本等优异特性,作为滤波器广泛应用于激光稳频、激光雷达、光纤传感等领域<sup>[2-5]</sup>。根据多光束干涉理论,F-P透射谱呈现出周期性的洛伦兹线型的透射峰,其线性区和峰顶经常用于滤波与鉴频<sup>[6-9]</sup>。例如,在多普勒测风激光雷达系统中,探测激光受风场作用发生多普勒频移,通过双 F-P 标准具透射谱线性区组成的边缘滤波器后,可根据探测光透射率的变化测得多普勒频移量,从而获得径向风速的大小和方向<sup>[10-11]</sup>。显然,多普勒频移以及相应风速的测量误差取决于 F-P 透射谱的标定精度。在光纤光栅解调仪中<sup>[12]</sup>,利用光纤 F-P 标准具的高稳定度,可以直接获取光纤光栅的中心波长值<sup>[13]</sup>。另外,半导体扫描激光器受环境影响其波长调谐会呈现一定非线性,在高精度光谱仪<sup>[14]</sup>、光学相干断层成像<sup>[15]</sup>、光电测量<sup>[16]</sup>等应用中,波长的非线性调谐是测量误差的主要来源之一。为解决此问题,Wada 等<sup>[17]</sup>使用 F-P 标准具的透射谱来检测其波长输出的非线性,并在数据的后期处理中进行波长补偿。从以上研究可以看出,F-P 标准具可用于排除由光学测量系统自身或外界因素引起的多种误差,显著提高测量的精度和稳定性,但这都依赖于对其透射谱的精确校准。对于 F-P 标准具透射谱的校准,出于标定效率和成本的考虑,一般只能使用设备对光谱曲线上的若干点进行标定。而在该光谱曲线实际应用中,经常要使用非标定点的曲线数据,因此需要把离散的标定点连续化才能完成对整个光谱的校准。这个将离散数据连续化的过程就是对光谱的精确拟合,拟合精度越高,得到的光谱曲线数据越精确。

本文的研究对象是光纤空气隙 F-P 标准具,其广泛应用于波分复用系统中的信道分离<sup>[2]</sup>和半导体激光器稳频<sup>[18]</sup>。在对其透射光谱的校准过程中,发现其透射峰线型与理论的洛伦兹线型存在较大差异,体现在透射峰的展宽以及左右非对称现象,导致其拟合误差较大。通过分析各种影响因素,本文提出一种基于经典 F-P 理论并融合发散角与入射偏角的多峰叠加拟合方法,用于解决透射谱精确拟合的问题。最终得到了方差为 0.008、重合精度 0.9998 的拟合精度,比基于洛伦兹线型公式的拟合精度高 15 倍。该研究提供了一种高效、精确的 F-P 光谱校准方法,为光纤空气隙 F-P 标准具的研究与应用提供了一定的理论参考。

## 2 光纤空气隙 F-P 标准具透射谱线型分析

图 1 为光纤空气隙 F-P 标准具的测试系统,该系统由扫描激光器(Agilent 81680a)、光纤耦合器(1×2)、波长计(Agilent 86122a)、光纤准直器、半透半反镜、F-P 标准具、光电探测器(PD)以及自主设计的高精度采集电路和个人计算机(PC)构成。PC 作为数据处理和主控设备,首先通过通用接口总线(GPIB)设置扫描激光器出射波长值,其出射光经单模光纤进入光纤耦合器后分为两路,一路进入波长计进行波长测量,测量结果通过 GPIB 返回 PC。另一路经光纤准直器(光束发散角 $<1^\circ$ )和半透半反镜后,一束通过 F-P 标准具后被 PD2 接收,另一束作为参考光被 PD1 所接收,两束光信号在由 PD 转换为电信号后,由自主设计的高精度采集电路进行放大和采集,最后通过串口传输至 PC 进行处理得到 F-P 标准具的透射光谱。测试系统中高精度波长计(Agilent86122a)的测量误差为 $\pm 0.3$  pm,自主研

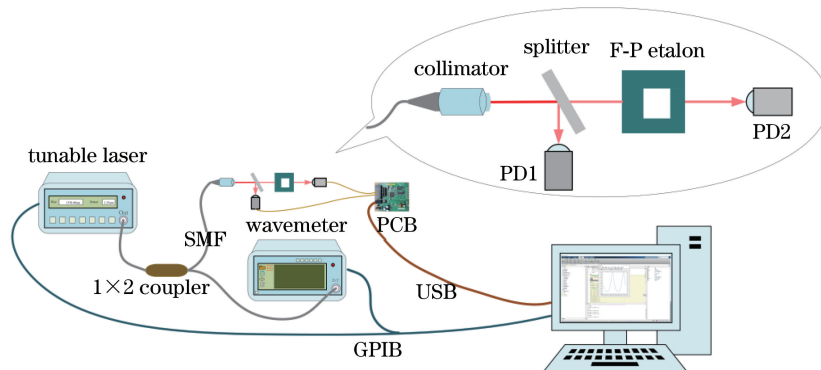


图 1 光纤空气隙 F-P 标准具透射光谱测试系统

Fig. 1 Transmission spectrum test system of fiber air gap F-P etalon

发的高精度放大采集电路测量信噪比为 32.8 dB, 测量误差约为 0.09%, 可以满足本文实验需求。

使用上述测试系统, 设置激光器波长扫描步进为 20 pm, 得到的空气隙 F-P 标准具透射谱 (PD2/PD1) 如图 2 所示。

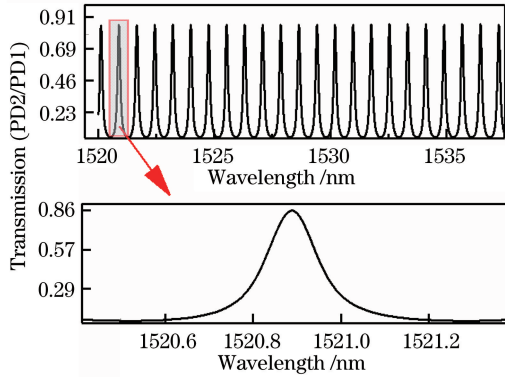


图 2 光纤空气隙 F-P 标准具的透射光谱图

Fig. 2 Transmission spectrum of fiber air gap F-P etalon

根据前文所述, 在光谱校准过程中, 得到标定点数据后, 还需要对其进行高精度的光谱拟合。将有限的离散数据连续化, 从而提高光谱校准效率。基于上述考虑, 首先采用基于经典干涉理论的透射峰公式<sup>[19]</sup>对图 2 所示的透射峰进行拟合,

$$\frac{I_t}{I_i} = \frac{(1 - R_1)(1 - R_2)}{(1 - \sqrt{R_1 R_2})^2 + 4\sqrt{R_1 R_2} \sin^2\left(\frac{2\pi n d \cos \theta}{\lambda}\right)}, \quad (1)$$

式中:  $I_t$ 、 $I_i$  为透射光强与入射光强值;  $R_1$ 、 $R_2$  分别为 F-P 标准具间镀膜的反射率;  $d$  为 F-P 标准具腔长;  $n$  为腔内介质的折射率;  $\theta$  为入射光束与标准具法线间夹角;  $\lambda$  为入射光波长值。得出拟合结果如

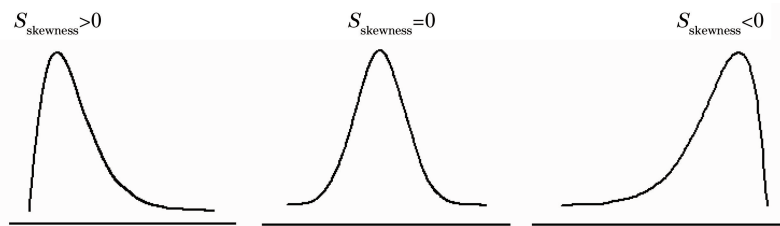


图 4 偏态分布示意图

Fig. 4 Schematic of skew distribution

同时对其他 6 个同一规格的光纤空气隙 F-P 标准具 (自由光谱范围为 100 GHz) 进行了测试, 寻找线型分布的规律, 透射峰的 FWHM 以及偏度值如表 1 所示。可以看出, 各个 F-P 标准具的偏度值、FWHM 均不相等, 且 6 个 F-P 标准具的偏度以及 FWHM 的最大值约为各自最小值的 1.7 倍。图 5 以 FWHM 为

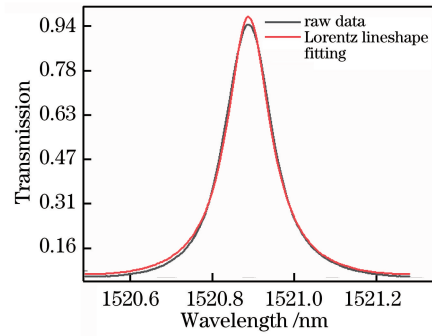


图 3 基于洛伦兹线型的光谱透射峰拟合结果图

Fig. 3 Fitting result of spectral transmission peak based on Lorentz lineshape

图 3 所示, 其拟合方差为 0.12, 拟合优度为 0.98。

从图 3 中可以看到, 洛伦兹线型的拟合曲线与实测光谱在半峰全宽 (FWHM)、峰值大小等方面均存在较大差别。仔细观察光谱, 注意到该透射峰比理想的洛伦兹峰有一定的展宽, 而且左右不对称, 这是导致拟合误差大的主要原因。为了方便分析谱线的不对称性, 引入偏度概念对透射峰的左右不对称程度进行量化。偏度也称为偏态, 专门用于描述统计数据分布偏斜方向和非对称程度度量。

$$S_{\text{skewness}}(X) = E\left[\left(\frac{X - \mu}{\delta}\right)^3\right] = \frac{EX^3 - 3\mu\delta^2 - \mu^3}{\delta^3},$$

$$\mu = EX, \delta^2 = E(X - EX)^2 = EX^2 - E^2X, \quad (2)$$

式中:  $X$  为待测样本;  $\delta$  为样本标准差;  $\mu$  为样本数学期望。

偏态分布的差异性由偏度的正负表征, 如图 4 所示, 当  $S_{\text{skewness}} = 0$  时, 曲线左右对称分布, 当  $S_{\text{skewness}} > 0$  时, 曲线为正偏态分布, 当  $S_{\text{skewness}} < 0$  时, 曲线为负偏态分布。

横坐标, 偏度为纵坐标, 展示了透射峰的 FWHM 与偏度的关系。两变量之间呈现一定的负相关, FWHM 值越大, 光谱透射峰越接近正态。显然, 光纤空气隙 F-P 标准具透射峰的偏度、FWHM 值的差异, 以及拟合误差问题是普遍存在的。因此, 本文将探究导致透射光谱峰的不对称和展宽的因素。

表 1 光纤空气隙 F-P 标准具的 FWHM 和偏度  
Table 1 FWHM and skewness of fiber air gap F-P etalons

Item	1	2	3	4	5	6
FWHM /nm	0.1148	0.1175	0.1312	0.1764	0.1818	0.1915
Skewness	1.8189	1.7059	1.5546	1.2004	1.0780	1.0712

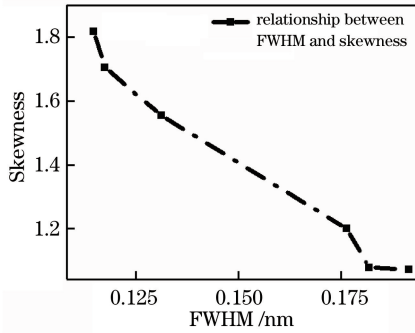


图 5 F-P 标准具透射峰的 FWHM 与偏度的关系  
Fig. 5 Relationship between FWHM and skewness of F-P etalon transmission peaks

### 3 引起 FWHM 和偏度改变的因素

通过查阅文献, Lee 等<sup>[6,20]</sup>在对 F-P 干涉仪的研究中发现, 入射光束发散角的增大会引起透射光谱 FWHM 的展宽。当射入 F-P 标准具的光束具有一定发散角时, 相当于多个不同角度的入射光同时射入 F-P 标准具内, 则最终得到的透射光强就是多个角度下透射光强之和。假设其入射光束的光强振幅随角度呈高斯分布<sup>[21]</sup>,

$$F(\theta) = a_1 \times \exp\left[-\frac{(\theta - \mu_1)^2}{2c}\right], \quad (3)$$

式中:  $a_1$  为光强最大位置的光强值;  $\mu_1$  为光强最大值位置与 F-P 标准具所成的角度值;  $c$  为光强随波长分布数据的方差值, 光强分布越集中, 方差值越小。

综合(1)、(3)式可得, 当激光束发散角为  $2\alpha$ , 入射光波长为  $\lambda$  时, F-P 标准具透射公式为

$$T = \int_{-\alpha}^{\alpha} F(\theta) \times \frac{(1 - R_1)(1 - R_2)}{(1 - \sqrt{R_1 R_2})^2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \sin^2\left(\frac{2\pi n d \cos \theta}{\lambda}\right)} d\theta. \quad (4)$$

根据(4)式计算不同光束发散角对透射峰的 FWHM、偏度的影响, 参数  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $n$ 、 $d$  均为使用公式拟合得出的数值。计算结果如图 6 所示, 随着光束发散角的增加, 透射峰的 FWHM 逐渐增大、偏度逐渐减小, 这一变化趋势与图 5 中 FWHM 和偏度

的负相关关系一致。但本实验中光纤准直器, 其光束发散角在  $1^\circ$  以内, 对应偏度和 FWHM 的最大值与最小值之间只存在 1% 左右的波动值, 与实验值相比仍然相差较大。显然, 除了光束发散角之外还有其他的因素对偏度和 FWHM 展宽造成影响。

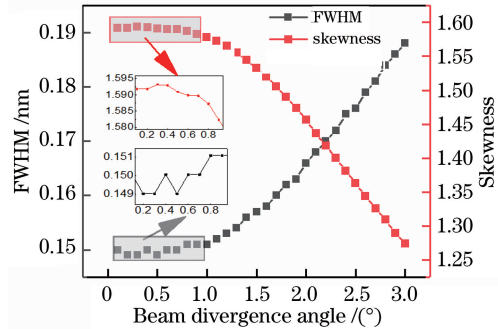


图 6 不同光束发散角下 F-P 标准具透射谱偏度与 FWHM 值变化曲线图

Fig. 6 Skewness and FWHM of F-P etalon transmission spectrum at different beam divergence angles

从器件的实际角度进一步分析, 在理想情况下光纤准直器的出射光应正入射进 F-P 标准具。但在实际的装配过程中, 由于装配误差光纤准直器的轴线与 F-P 标准具的法线可能存在一定偏角, 具体示意图如图 7 所示。

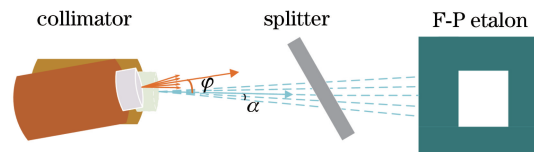


图 7 入射角度偏移示意图

Fig. 7 Schematic of incident angle deviation

图中  $\alpha$  为光束发散角的半角,  $\varphi$  为光束入射偏角。则考虑装配误差后的光纤 F-P 标准具透射公式为

$$T = \int_{-\alpha}^{\alpha} F(\theta) \times \frac{(1 - R_1)(1 - R_2)}{(1 - \sqrt{R_1 R_2})^2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \sin^2\left[\frac{2\pi n d \cos(\theta + \varphi)}{\lambda}\right]} d\theta. \quad (5)$$

利用(5)式计算不同入射偏角对透射峰的 FWHM 和偏度的影响。在光束发散角为  $1^\circ$ , 入射



偏角  $\varphi$  为变量的情况下,绘出入射偏角与偏度、FWHM 的曲线关系如图 8 所示。可以看出,随着入射角度的增加,偏度逐渐减小,FWHM 逐渐增大,FWHM 与偏度和入射偏角之间均呈现明显相关性。在数值变化上,入射偏角由  $0^\circ$  变为  $1.6^\circ$ ,F-P 标准具透射峰的偏度与 FWHM 值幅度改变达到初始值的 70% 左右。显然,在不忽略光束发散角的情况下,入射光束的微小偏移会对透射峰的 FWHM 以及偏度造成更大影响。比较光束发散角的分析结果(图 6)和入射偏角分析结果(图 8)可知,透射峰的偏度和 FWHM 更易受入射光束偏角的影响。随着光束发散角的增大,其透射峰的偏度和 FWHM 值会在某一范围内几乎不受影响,之后才呈现线性变化。在不忽略光束存在发散角的情况下,选取对透射峰的偏度和 FWHM 值几乎不会产生影响的入射偏角进行分析,在光束偏角发生微小改变时,其透射峰的偏度和 FWHM 值呈斜率较大的线性变化。由此可知,光纤空气隙 F-P 透射峰的偏度和 FWHM 更易受其光束入射偏角的影响。

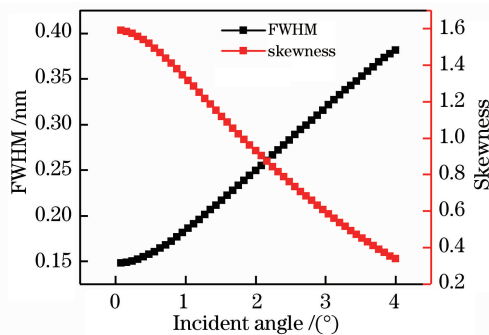


图 8 光束发散角为  $1^\circ$  时,随光束入射角度增加 F-P 标准具透射谱偏度值与 FWHM 值变化曲线

Fig. 8 Change curves of skewness and FWHM of F-P etalon transmission spectrum with the increase of beam incident angle, when beam divergence angle is  $1^\circ$

#### 4 多峰拟合实验结果与讨论

从上述分析可知,光纤空气隙 F-P 标准具透射峰出现的偏度异常和 FWHM 展宽现象,主要是受到入射光束发散角与入射角度的综合作用。根据(5)式,本文提出一种基于传统 F-P 理论并融合发散角与入射偏角的多峰拟合方法。基于最小二乘法,对图 2 透射峰进行拟合,最终得出入射光束发散角以及入射角的参数值分别为  $0.12^\circ$  和  $3^\circ$ ,其拟合结果如图 9 所示。

对比图 9 与图 3 可知,图 9 中拟合曲线与实测数据的重合度在峰值、FWHM 以及左右不对称度

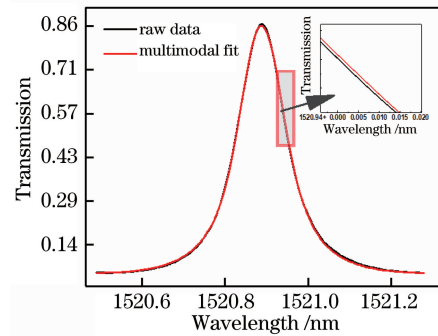


图 9 基于多峰拟合公式的透射谱拟合结果图

Fig. 9 Fitting result of transmission peak based on multi-peak fitting formula

上均得到明显改善,拟合方差为 0.008,拟合优度值为 0.9998,其线性区的波长重合度可达到 1 pm 以内。与基于洛伦兹线型的拟合得出的方差 0.12、拟合优度 0.98 相比,融合发散角与入射偏角的多峰拟合将拟合误差降低 1/15。这表明,融合发散角与入射偏角的多峰拟合方式,可以基本解决洛伦兹线型拟合中出现的 FWHM 以及光谱左右非对称等问题,实现对光纤空气隙 F-P 标准具谱线的高精度拟合,大大提高了其光谱校准效率。与此同时,也验证了入射偏角与谱线偏度以及展宽的相关性,从而可以通过观察光谱偏度和展宽反过来指导光纤空气隙 F-P 标准具的结构设计和装配。

#### 5 结 论

针对光纤空气隙 F-P 标准具透射谱线难以精确拟合,光谱校准存在成本高、效率低的问题。本文对其光谱的透射峰偏度改变以及 FWHM 展宽现象进行深入研究,分析了光束发散角、光束入射偏角对透射峰的影响。光纤空气隙 F-P 标准具透射峰的偏度以及 FWHM 展宽主要来源于光纤准直器的发散角以及装配中准直器与 F-P 标准具的偏角误差,其中偏角误差对光谱形变的影响更大。根据以上分析,本文提出了一种新的基于传统 F-P 理论并融合发散角和入射偏角的多峰拟合方法,给出新的 F-P 标准具透射峰表达式。基于新理论的拟合结果与实际光谱数据间的方差为 0.008,拟合优度为 0.9998。相比于传统洛伦兹线型的拟合,将方差值降低 1/15,拟合优度提高了 0.0198。采用上述多峰拟合的方式,可以基于较少校准点拟合得出整个透射峰数据,从而在保证一定精度的前提下大大提高校准效率。该研究不仅有利于深入理解光纤空气隙 F-P 标准具的光谱,而且为 F-P 标准具的设计以及装配

工艺提供理论依据,对其实际应用有着重要参考价值。

### 参 考 文 献

- [1] Chen B, Li Y. Research on the phase shift characteristic of angle tuning F-P etalon [C]//2017 16th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), August 7-10, 2017, Wuzhen, China. New York: IEEE Press, 2017: 1-3.
- [2] Iodice M, Cocorullo G, Corte F G D, et al. Silicon Fabry-Perot filter for WDM systems channels monitoring [J]. *Optics Communications*, 2000, 183 (5/6):415-418.
- [3] Lo Y L, Tsai M H, Tsao C C. Spectrum analysis in cross-talk of series Fabry-Perot sensors in path-matching differential interferometry [J]. *Optics & Laser Technology*, 1998, 30(6/7):395-401.
- [4] Panda J. Spectrally-resolved Rayleigh scattering to measure velocity, temperature, density, and density fluctuations in high-speed flows [J]. *Experiments in Fluids*, 2020, 61(3): 74.
- [5] Liu Y Y, Liu L, Liu X Q, et al. Sensitivity improvement of Fabry-Perot sensor based on Vernier effect [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39 (4): 0428001.  
刘燕燕, 刘磊, 刘雪强, 等. 基于 Vernier 效应的法布里-珀罗传感器增敏方法 [J]. *光学学报*, 2019, 39 (4): 0428001.
- [6] Lee J S, Shim C S. Characteristics of a spectrum-slicing filter composed of an angle-tuned Fabry-Perot etalon and a Gaussian input beam [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1995, 7(8): 905-907.
- [7] Sadot D, Boimovich E. Tunable optical filters for dense WDM networks [J]. *IEEE Communications Magazine*, 1998, 36(12): 50-55.
- [8] Zhang H L, Betremieux Y, Noto J, et al. Novel tunable liquid crystal Fabry-Perot filters for fiber optical system [J]. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4583: 64-72.
- [9] Wang P, Zhao H, Liu J, et al. Dynamic real-time calibration method for fiber Bragg grating wavelength demodulation system based on tunable Fabry-Perot filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35 (8): 0806006.  
王鹏, 赵洪, 刘杰, 等. 基于可调谐 F-P 滤波器的 FBG 波长解调系统的动态实时校准方法 [J]. *光学学报*, 2015, 35(8): 0806006.
- [10] Jiang L H, Zhang D, Chen X, et al. Parameter estimation method of Fabry-Perot etalon based on modern spectrum estimation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(9): 0906006.  
蒋立辉, 章典, 陈星, 等. 基于谱估计的 Fabry-Perot 标准具透过率曲线参数估计方法 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(9): 0906006.
- [11] Shen F H, Sun D S, Liu C L, et al. Single solid F-P etalon-based dual-frequency Doppler lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(11): 2944-2950.  
沈法华, 孙东松, 刘成林, 等. 基于单固体 F-P 标准具的双频率多普勒激光雷达研究 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(11): 2944-2950.
- [12] Jiang J F, Zang C J, Wang S, et al. Investigation of composite multi-wavelength reference stabilization method for FBG demodulator in unsteady temperature environment [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2018, 29(6): 575-581.  
江俊峰, 臧传军, 王双, 等. 变温环境 FBG 解调仪复合多波长参考稳定方法研究 [J]. *光电子 • 激光*, 2018, 29(6): 575-581.
- [13] Zhang J N, Xiong Y L, Wu M Z, et al. Wavelength demodulating algorithm of FBG dynamic tuned by DFB laser [J]. *Journal of Harbin University of Science and Technology*, 2019, 24(2): 139-143.  
张嘉楠, 熊燕玲, 吴明泽, 等. DFB 激光器扫描的 FBG 波长解调算法 [J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2019, 24(2): 139-143.
- [14] Lanin A A, Voronin A A, Stepanov E A, et al. Frequency-tunable sub-two-cycle 60-MW-peak-power free-space waveforms in the mid-infrared [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(22): 6430-6433.
- [15] Huber R, Wojtkowski M, Fujimoto J G, et al. Three-dimensional and C-mode OCT imaging with a compact, frequency swept laser source at 1300 nm [J]. *Optics Express*, 2005, 13(26): 10523-10538.
- [16] Yadav J, Rani A, Singh V, et al. Prospects and limitations of non-invasive blood glucose monitoring using near-infrared spectroscopy [J]. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2015, 18:214-227.
- [17] Wada A, Tanaka S, Takahashi N. Enhancement of dynamic range of optical fiber sensor using fiber Bragg grating Fabry-Pérot interferometer with pulse-position modulation scheme: compensation of source wavelength-sweep nonlinearity [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(4): 6801108.
- [18] Sun X T, Chen W B. Theoretical study on laser frequency stabilization in reference to Fabry-Perot cavity [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36 (12): 2219-2222.  
孙旭涛, 陈卫标. 基于法珀标准具的激光稳频方法理论研究 [J]. *光子学报*, 2007, 36(12): 2219-2222.

- [19] Wang X H, Zhang W C, Zhao H, et al. Impact of liquid insulation on characteristic parameters of fiber Fabry-Perot partial discharge induced ultrasound sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38 (4): 0406005.  
王学会, 张伟超, 赵洪, 等. 液体绝缘对光纤法布里-珀罗局放超声传感器特性参数影响 [J]. 光学学报, 2018, 38(4): 0406005.
- [20] Shen F H, Xia Y Q, Yu A A, et al. Transmission spectral characteristics of F-P interferometer under multi-factors [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(6): 1800-1805.  
沈法华, 夏益祺, 於爱爱, 等. 多因素影响下法布里-珀罗干涉仪透射频谱特性 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(6): 1800-1805.
- [21] Fan Y, Wu S J, Li D J. Research on fiber optic collimator used in long distance velocity measurement [J]. Process Automation Instrumentation, 2018, 39 (9): 1-4.  
范源, 吴慎将, 李党娟. 用于远距离测速的光纤准直器研究 [J]. 自动化仪表, 2018, 39(9): 1-4.