

文章编号 1004-924X(2025)14-2166-12

镜片面形误差与法珀标准具性能指标的关系

于 涵, 江 毅*

(北京理工大学 光电学院, 北京 100081)

摘要:为了对法布里-珀罗标准具镜片加工过程中的面形误差进行确定性控制,本文深入研究镜片面形误差与法珀标准具性能的关系。通过建立面形误差对标准具透射谱影响的理论模型,量化分析面形误差对标准具主要性能指标的影响,进而优化工艺与面形控制参数。研究发现,面形误差的均值与标准具透射谱峰中心波长呈现良好线性关系,理论推导出中心波长偏移的灵敏度系数为 1.65 pm/nm。面形误差的峰谷值影响标准具透射谱线带宽展宽与峰值透过率衰减程度,在峰谷值小于 $\lambda/40$ (15.8 nm) 时,带宽与峰值透过率渐近收敛。为验证理论模型,搭建微米级精度的标准具透射谱测试实验系统,通过通光孔径测试的定性验证与面形误差测试的定量分析,明确中心片面形均匀性对标准具性能的影响高于边缘片,制定满足性能指标的面形误差控制阈值,并据此开展标准具研制实验。实验结果表明,在中心片峰谷值控制在 10 nm 内时,直径 30 mm 的标准具峰值透射率达到了 98.63%,且在中心波长 532.199 nm 处实现带宽为 32.8 pm 的窄带滤波,逼近理论设计极限。本文这一结论对高透过率、窄带宽、中心波长微米级稳定的高精密标准具的生产加工具有重要应用价值。

关键词:面形误差;标准具;峰谷值;法布里-珀罗

中图分类号:TH74 **文献标识码:**A

doi:10.37188/OPE.20253314.2166

CSTR:32169.14.OPE.20253314.2166

Relationship between mirror surface figure errors and performance metrics of Fabry-Pérot etalons

YU Han, JIANG Yi*

(School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

* Corresponding author, E-mail: bitjy@bit.edu.cn

Abstract: To achieve deterministic control of surface figure errors in the fabrication of Fabry-Pérot etalon mirrors, this study thoroughly investigated the relationship between mirror surface figure errors and the performance of etalons. A theoretical model was established to analyze the impact of surface figure errors on the transmission spectrum of the etalon, quantitatively revealing the effects of different surface profiles on key performance parameters, thereby optimizing manufacturing processes and surface control parameters. The research showed that the mean value of surface figure errors had a strong linear correlation with the central wavelength shift, with a sensitivity coefficient of 1.65 pm/nm that was theoretically derived. The peak-to-valley value of surface figure errors affected the spectral linewidth broadening and peak transmittance attenuation. Within the region where the peak-to-valley value was less than $\lambda/40$ (15.8 nm),

收稿日期:2025-03-18;修订日期:2025-05-07.

基金项目:国家自然科学基金-航天科技集团企业联合重点项目(No. U20B2057)

both linewidth and peak transmittance gradually converged. To validate the theoretical model, a transmission spectrum test system with picometer-level accuracy was constructed. Through qualitative validation via clear aperture testing and quantitative analysis of surface figure errors, it was determined that the surface uniformity of the central plate exerted a greater influence on etalon performance than that of the edge plates. A critical surface figure error control threshold satisfying the performance specifications was established, guiding etalon fabrication experiments. Results demonstrate that for a 30 mm-diameter etalon with the peak-to-valley value controlled within 10 nm, the peak transmittance reaches 98.63%, achieving narrowband filtering with a bandwidth of 32.8 pm at the central wavelength of 532.199 nm, which approaches the theoretical design limit. These conclusions hold significant application value for manufacturing high-precision etalons with high transmittance, narrow bandwidth, and picometer-level central wavelength stability.

Key words: surface figure error; etalon; peak-to-valley value; Fabry-Pérot

1 引 言

法布里-珀罗(Fabry-Pérot, F-P)标准具作为一种高精度的光学干涉仪,具有高光谱分辨率、高波长选择性和灵活可调性,广泛应用于天文光谱学^[1-3]、激光与量子技术^[4-5]、光通信^[6-7]和精密测量^[8-9]等领域,在其中发挥谱线分析、选模稳频、滤波等关键作用。F-P标准具从结构上主要可以分为固体标准具、空气隙标准具、可调谐压电控制标准具等^[10]。固体法珀标准具具有良好的耐用性、机械与热稳定性好、易于调谐等优势,为光学精密滤波提供了有效思路。

固体F-P标准具性能主要由三个参数来表征:中心波长(λ_0)、带宽($\Delta\lambda_{\text{FWHM}}$)、峰值透过率(T_p)。基于多光束干涉理论,理想的固体法珀标准具的透射谱为一组中心波长固定、窄带宽、高峰值透过率的明锐干涉条纹。标准具稳定的中心波长使激光器高精度波长校准与频率稳定^[4,11]成为可能,其高精细谱线为精密测量^[12]等领域提供有效手段。但在实际生产过程中,由于研磨抛光设备的运动误差、磨料分布不均或压力波动等因素^[13],镜片的实际表面会与理想形状之间存在偏差,该偏差被定义为面形误差。由于面形误差的存在,标准具在不同空间点处的光学腔长呈现非一致性,使得不同空间点处透射谱的中心波长存在微小差异。在通光孔径内,标准具的实际透射光谱可视作所有空间点透射谱的叠加。标准具的光学腔长精度决定标准具平均腔长下的等效光程,即影响中心波长的偏移,标准具的光学腔长均匀性表征不同空间点上标准具腔长的偏

离程度,即影响带宽展宽和峰值透过率衰减。

近年来,针对标准具面形误差这一课题,众多学者已经展开了深入研究。早在1984年, Sloggett^[14]给出了被缺陷加宽的F-P干涉仪条纹的带宽和精细度的简单表达式。1996年, Palik^[15]等通过实验研究了表面缺陷对F-P干涉仪精细度和对比度的影响。2008年, Reardon^[16]等描述了F-P干涉仪特性表征技术,特别是板间距大尺度误差以及随机分布小尺度误差的空间分布测量方法。2018年, Deng^[17]等对高精度F-P滤波片进行设计与分析,将表面缺陷等效高斯分布,对表面缺陷产生的光谱特性影响采用卷积公式进行表述。2019年, Bailén^[18]等梳理了缺陷描述方法,并进一步扩展结果,给出典型非均匀缺陷的精细度的显式公式。2022年, L'opez^[19]等在对OSIRIS仪器上标准具校准系统进行设计时指出制造缺陷会降低标准具精细度,且对缺陷的控制受到制造能力的限制。2023年, Bailén^[20]等总结了F-P标准具表面缺陷的类型以及各自形成原因,指出缺陷分为大规模缺陷和小规模缺陷(孔径缺陷),且缺陷会引起光谱分辨率退化。以上研究通过理论推导、实验探究和缺陷测量等方法,揭示了面形误差对标准具谱线性能的劣化效应。在此基础上,针对高精密F-P标准具研制中面形误差影响性能的技术挑战,本文旨在突破传统经验主导模式的局限性,为标准具研制方案提供明确的面形误差控制依据,实现标准具性能的精准提升。

为深入研究面形误差与法珀标准具性能指标的关系,本文建立了多参量可调的F-P标准具

透射谱理论模型,采用具有普适性的高斯函数模拟镜片面形误差分布,定量评估面形误差对透射谱中心波长偏移、带宽展宽及峰值透过率衰减的影响机制。进一步,设计并搭建了一套通光孔径可调的标准具透射谱测试系统。通过测试同一标准具样品在不同通光孔径下的透射光谱,来定性验证面形误差对透射谱的影响规律;通过测试不同面形的边缘片与中心片胶合而成的标准具样品透射光谱,来定量探究满足设计指标的面形误差控制阈值,验证并细化理论模型的分析结果。结果表明,测试结果与理论仿真结果呈现良好的一致性,由此得出镜片厚度精度与厚度均匀性对标准具中心波长、带宽及峰值透过率等性能指标的直接影响及具体关联。本文围绕面形误差影响开展系统性研究,提出的标准具理论模型和测试系统,为高精密标准具生产过程中的面形控制与性能测试提供了坚实的理论与实验依据。

2 理论分析

法珀标准具由两个镀有高反射膜的平行平面玻璃板组成,其原理为多光束干涉,透射谱为一组波长固定的谐振峰,可实现对入射光的窄带滤波,其滤波功能如图 1 所示。

本文的固体法珀标准具设计为三层结构:中间层玻璃厚度仅为 0.323 mm,直径达 30 mm,为避免变形及损坏,两侧各增加厚度为 4 mm 的保护层玻璃来增强结构稳定性。保护层玻璃内侧

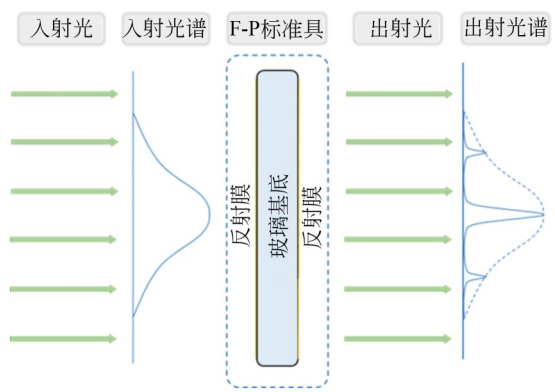


图 1 标准具窄带滤波示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a narrowband filter using an etalon

S1 镀高反射膜,外侧 S2 镀增透膜,三层玻璃采用深化光胶技术进行胶合,其设计图与实物图如图 2 所示,标准具结构设计参数见表 1。

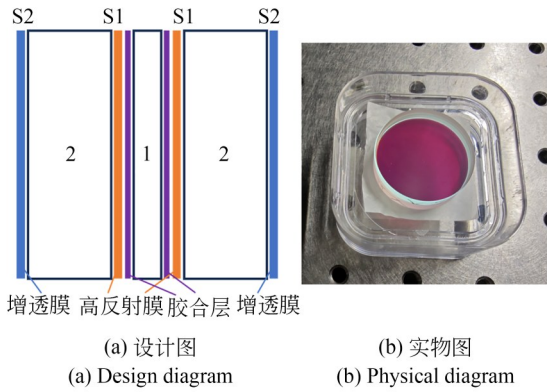


图 2 标准具结构

Fig. 2 Structure of an etalon

表 1 标准具结构设计参数表

Tab. 1 Design parameters of the F-P etalon structure

序号	直径/mm	材料	厚度/mm	镀膜	数量	胶合
1	30	Corning	0.323	无	1	深化
2	30	7980 玻璃	4	S1:高反射膜 S2:增透膜	2	光胶

理想情况下,镀膜反射率 R 决定标准具精细度 F ,精细度反映干涉条纹的细锐程度,通常表示为:

$$F = \frac{\pi \sqrt{R}}{1 - R}. \quad (1)$$

当相邻两束光的光程差等于入射光波长的整数倍时,干涉条纹有极大值,透射光强与入射

光强比值的最大值称为标准具峰值透过率 T_p , $T_p = [1 - \rho / (1 - R)]^2$,峰值透过率与镀膜反射率 R 和吸收损耗 ρ 有关。当透过率为峰值一半时对应的透射谱两点波长差称为标准具带宽 $(\Delta\lambda_{FWHM})$ 。两点波长的均值称为标准具中心波长 (λ_0) 。透射谱两峰值的波长差称为自由光谱范围 (FSR) ,可以表示成:

$$FSR = \frac{\lambda_0^2}{2nh}, \quad (2)$$

其中: n 为折射率, h 为中心层厚度, nh 为标准具光学腔长。带宽 $\Delta\lambda_{FWHM}$ 、精细度 F 与自由光谱范围 FSR 有如式(3)的关系:

$$F = \frac{FSR}{\Delta\lambda_{FWHM}}. \quad (3)$$

光学元件的面形误差,是指被测光学表面与理论表面在法线方向上的形状偏离误差,常用峰谷值(PV)、均值(Δh)和均方根(RMS)来表征。PV是被测光学表面与理想表面进行差异比较后,差值最高点与最低点之间的垂直距离,反映表面的最大偏差,也称厚度均匀性。 Δh 是差值平均值,反映表面整体的厚度偏离程度,也称厚度精度。RMS是差值均方根,通过统计学方法反映差异的离散程度,通常PV值是RMS值的3到5倍。镜片性能失效往往由极端缺陷引起,因此在批量化镜片制造过程中,鉴于镜片厚度测量点数的有限性,采用PV值来表征厚度均匀性可以有效弥补RMS对极端缺陷不敏感的不足,便于实时检测识别与高效调整。

实际生产中,由于工艺限制,标准具镜片表面无法做到绝对平整。假设镜片厚度 $h(x,y)$ 存在高斯分布^[21]的面形误差 $H(x,y)$,则 $h(x,y) = h_0 + H(x,y)$,且:

$$P(H) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \Delta h_D} e^{-\frac{1}{2} \frac{(H - \Delta h)^2}{\Delta h_D^2}}, \quad (4)$$

其中: h_0 为理想表面标准厚度, Δh_D 为镜片缺陷因子,其物理意义与均方根相近。面形误差的存在直接导致对应各个空间点的光学腔长存在差异。根据式(2),不同光学腔长产生不同中心波长的透射谱线,当各个空间点的透射谱相互叠加,标准具的平均腔长受 Δh 影响发生偏移,致使标准具总体谱线中心波长偏离设定值,即:

$$\Delta\lambda_0 = \frac{2n \cos \theta}{m} \cdot \Delta h. \quad (5)$$

因此,若实现中心波长皮米级稳定,需对镜片厚度精度进行纳米级控制。同时,面形误差的存在会引入相位扰动,其方差为:

$$\sigma_\phi^2 = \left(\frac{4\pi n \Delta h_D \cos \theta}{\lambda} \right)^2. \quad (6)$$

相位噪声导致有效精细度 F_{eff} 下降:

$$F_{\text{eff}} = F \cdot e^{-\sigma_\phi^2/2}. \quad (7)$$

据此,各谱线叠加会导致有效精细度下降与光谱展宽,展宽程度受 Δh_D 影响,可由PV值简单表征。谱线展宽会使得峰值透过率降低带宽增加,降低了标准具的滤波分辨能力^[18]。因此,窄线宽高峰值透过率的实现需对镜片厚度均匀性进行严格控制。

3 仿真分析

为探究面形误差对F-P标准具的主要性能指标的影响,基于LabVIEW平台建立仿真模型。设计标准具的中心波长 λ_0 为 $(532.2 \pm 0.01) \text{ nm}$ @ 30°C ,带宽 $\Delta\lambda_{FWHM}$ 为 $30 \sim 35 \text{ pm}$,峰值透过率 $T_p \geq 85\%$,自由光谱范围 FSR 为 300 pm 。根据原理公式,对仿真设置如下:Corning7980玻璃材料折射率 n 为 $1.4607 @ 532 \text{ nm}$,玻璃片标准厚度 h 设置为 0.3232 mm ,精细度 F 为 9.23 ,镀膜反射率 R 为 71.2% 。

仿真思路框图如图3所示,假定面形误差分布为高斯分布^[21],设定PV和 Δh ,将高斯白噪声

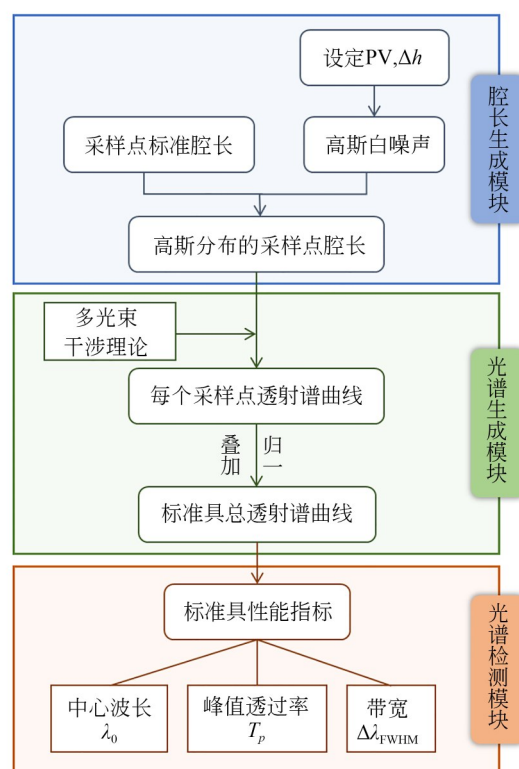


图3 F-P标准具透射谱仿真系统框图

Fig. 3 Block diagram of the simulation system for the transmission spectrum of an F-P etalon

加在采样点标准腔长上,得到 10 000 个具有高斯分布的采样点腔长。基于多光束干涉理论,计算每个采样点在 531~534 nm 的透射谱曲线,将所

有曲线叠加后归一化,最终得到标准具总透射谱曲线。对结果曲线进行光谱检测,计算标准具中心波长、峰值透过率、带宽等性能指标。

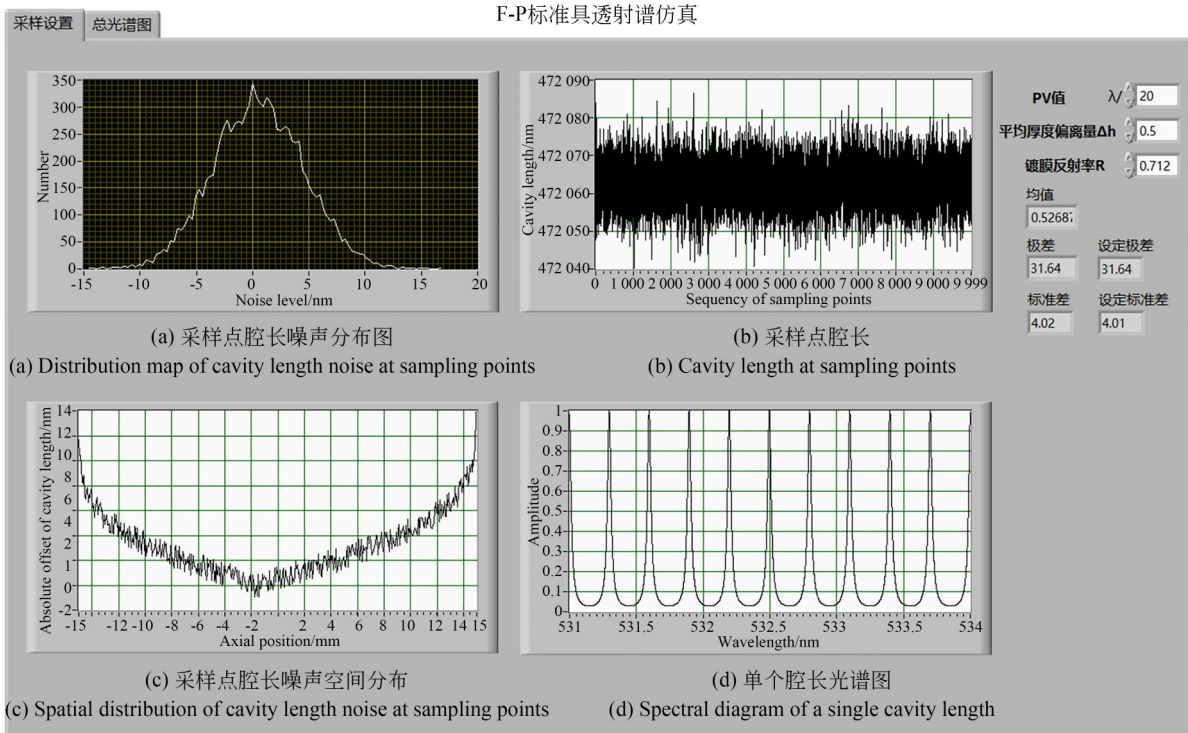


Fig. 4 Sampling settings panel for F-P etalon transmission spectrum simulation system

仿真系统前面板如图 4 和图 5 所示,在图 4 采样设置面板中可以设置峰谷值 PV、平均厚度偏离量 Δh 和镀膜反射率 R 。由于实际镜片面形误差分布各不相同,采用正态分布表征面形误差分布来评估其对标准具性能的影响更具有普遍意义。因此将图 4(a)的高斯白噪声添加到标准腔

长中,得到伪随机分布的含噪采样点腔长,如图 4(b)所示。采样点腔长与标准腔长之间的差值为腔长偏离量,图 4(c)近似表示采样点腔长的绝对偏离量在镜片轴向上的空间分布,PV 值表征偏离量的最大差异程度, Δh 反映腔长分布对称点的空间偏离程度,当 Δh 为 0 时,腔长的空间分布近似以镜片中心对称。计算每个腔长对应的透射光谱如图 4(d)所示。图 5 总光谱面板中展示了标准具透射谱结果图和性能指标检测结果。

对于采样点数的选择,设置采样点数收敛性仿真测试来验证仿真结果的可靠性。设置采样点范围为 1 000~10 000,以 1 000 为梯度进行仿真测试。设置 $PV = \lambda/20$ (氦氖激光 $\lambda = 632.8$ nm), $\Delta h = 0.5$ nm, $R = 71.2\%$,测试所得结果绘制如图 6 所示。

图 6 结果显示,当采样点数超过 7 000 时,系统呈现显著收敛特性:中心波长绝对误差收敛至

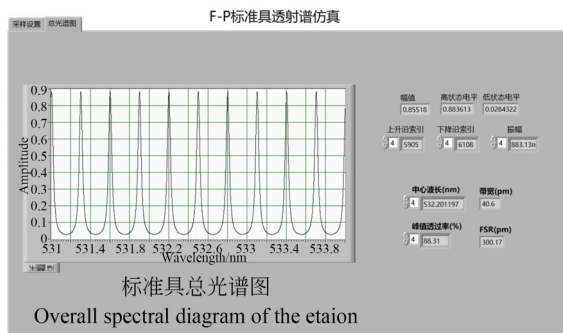
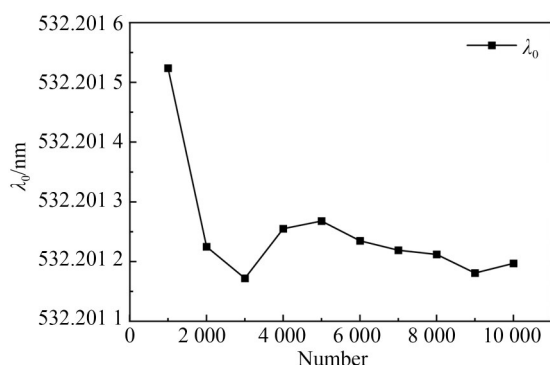
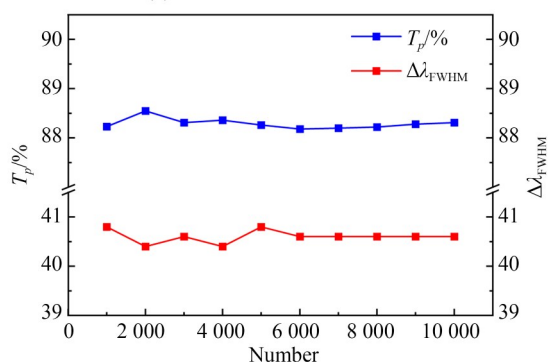


Fig. 5 Total spectrum panel for F-P etalon transmission spectrum simulation system



(a) 中心波长
(a) Central wavelength



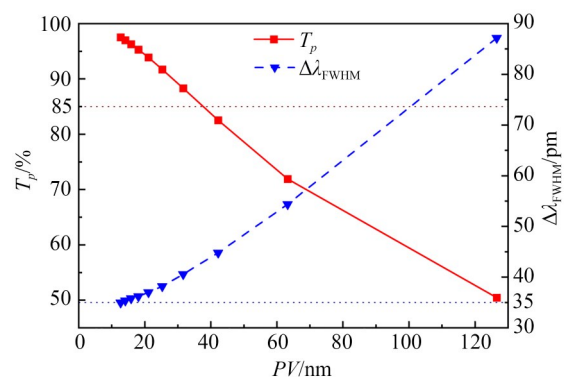
(b) 峰值透过率与带宽
(b) Peak transmittance and bandwidth

图 6 采样点数收敛性仿真结果图

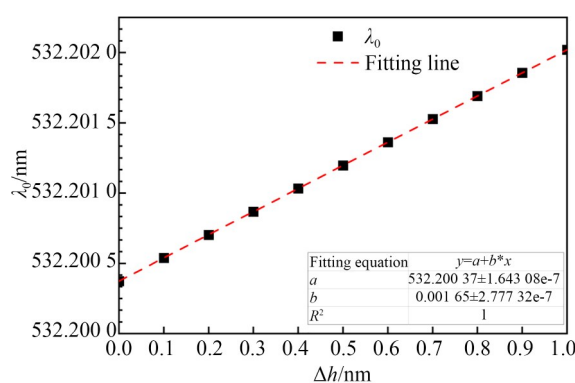
Fig. 6 Result graph of the convergence simulation of the number of sampling points

0.04 pm 以内,峰值透过率绝对误差稳定在 0.11% 以内,且带宽已基本稳定。基于此,模型选取 10 000 个采样点可以保证仿真结果的准确性与可靠性。对于 $\Phi 30$ mm 镜片,10 000 个采样点可等效为在双轴正交等间距网格上对应空间采样间距 0.3 mm。由于镜片研磨抛光工艺形成的光学腔长变化表现为连续平滑梯度特征,上述采样密度已充分满足镜片腔长分布重构精度要求。

PV 表征厚度均匀性,目前国内对直径 30 mm 平行平板的加工精度一般可达到 $\lambda/20$ 到 $\lambda/50$,设置 PV 值范围为 $\lambda/5$ 到 $\lambda/50$,标准具峰值透过率及带宽仿真结果如图 7(a)所示。 Δh 表征厚度精度,设置 Δh 从 0 到 1.0 nm 以 0.1 nm 为梯度递增,标准具中心波长仿真结果如图 7(b)所示。



(a) 峰值透过率与带宽仿真结果图
(a) Simulation result graph of peak transmittance and bandwidth of the etalon at different PV conditions



(b) 不同 Δh 标准具中心波长仿真结果图
(b) Simulation result graph of the central wavelength of the etalon at different Δh values

图 7 $R=71.2\%$ 仿真结果图

Fig. 7 Simulation result graph for $R=71.2\%$

从镜片厚度均匀性来看,当 PV 越小,意味着镜片的厚度越均匀,这有助于提升峰值透过率和压缩带宽,从而使得谱线越精细。在镀膜反射率 R 为 71.2% 的条件下,当面形优于 $\lambda/20$ 后峰值透过率达到 85% 以上,当面形优于 $\lambda/40$ 后带宽与峰值透过率逐渐收敛。从镜片厚度精度来看,标准具中心波长与厚度精度有良好线性关系,且中心波长偏移的灵敏度系数为 1.65 pm/nm。基于此定量关系可计算出,若保证中心波长 ± 10 pm 范围内的稳定性,镜片厚度精度需严格控制在 ± 6 nm 以内。

为满足带宽 30~35 pm 的设计要求,调整镀膜反射率改变精细度来补偿面形误差带来的带宽展宽,图 8 是镀膜反射率 R 分别为 71.2%, 75% 与 77% 时不同 PV 值下标准具峰值透过率

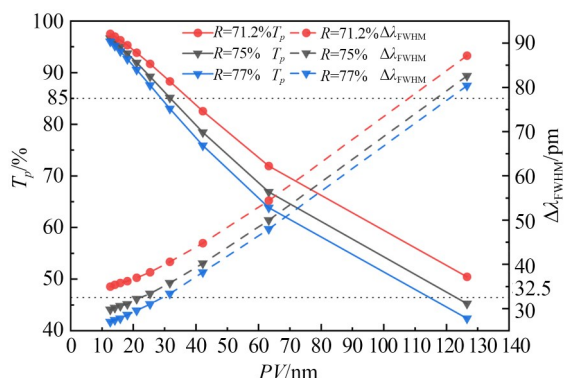


图8 改变镀膜反射率 R 标准具在不同PV下仿真结果对比图

Fig. 8 Comparison diagram of simulation results of the etalon with different PV values by changing the coating reflectivity R

与带宽的仿真结果。结果表明,通过调整镀膜反射率的方法来补偿带宽会导致峰值透过率略微降低,在 R 为75%, PV 为 $\lambda/30$ 时带宽接近32.5 pm且对峰值透过率的影响在2%以内。结合上述仿真分析,得出结论:中心波长偏移量与厚度精度回归系数为1.65 pm/nm;选取镀膜反射率75%和77%的情况下,厚度均匀性初步判断需要控制在 $\lambda/30$ (21 nm)以内。

4 测量实验与结果

为实现对仿真结果的定性验证并进一步明确满足标准具性能指标的面形误差技术要求,对标准具样品进行透射谱测试实验。测试实验系统装置如图9所示,光源选用单频扫描光纤激光器(WSL, VENUS, Connet),通过温度控制波长扫描,扫描范围为 (532.2 ± 0.5) nm,扫描速率1 pm/s。数据控制读取由笔记本电脑完成,上位机LabVIEW平台驱动激光器以指定模式开始波长扫描,其输出波长由多波长计(MWM, WS6-600, HighFinesse GmbH)实时精确测量。波长扫描光经毛玻璃散射后直接耦合进芯径为300 μ m的多模光纤,光纤出射光通过聚焦透镜扩束成平行光,平行光均匀照射待测标准具。标准具入射光与标准具透射光由功率计探头(S120C, Thorlabs)接收,由光功率计表头(PM100D, Thorlabs)处理,测得标准具前后光功率比值为损耗 K 。将安装标准具后损耗 K_2 与未安装标准具系统损耗 K_1 相除,得到标准具损耗 η ,即 $\eta = K_2 / K_1$ 。LabVIEW平台读取多波长计和功率计示数,经计算处理得到标准具透射谱曲线(η - λ 曲线)。

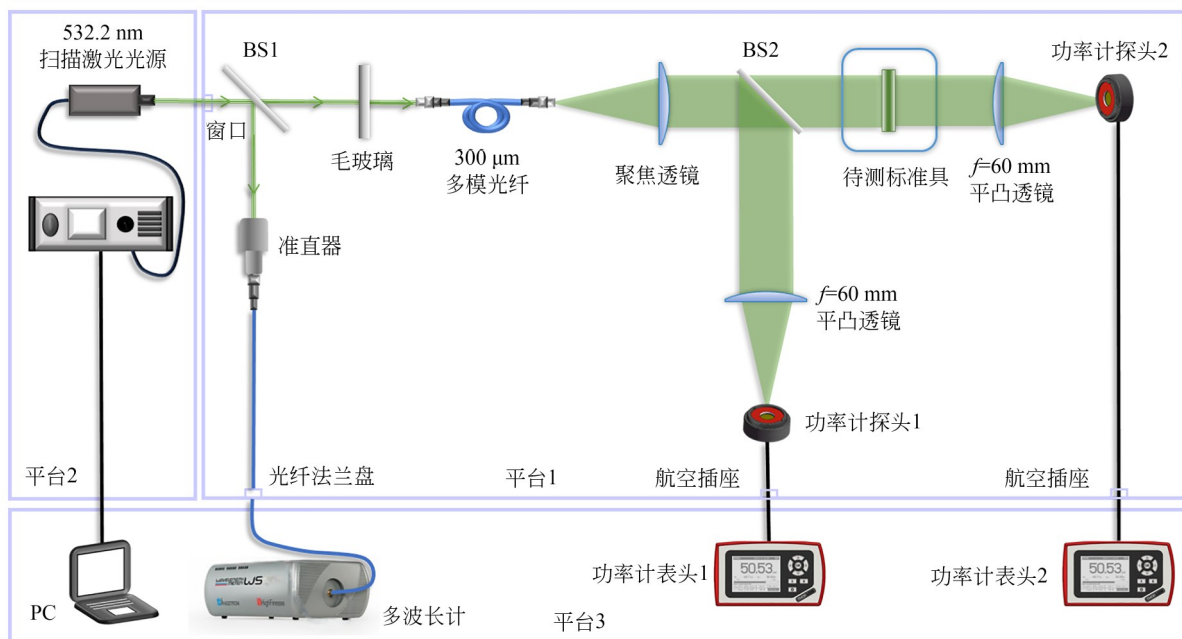


图9 F-P标准具透射谱测试系统图

Fig. 9 Diagram of the F-P etalon transmission spectrum test system

4.1 通光孔径测试

对于同一个标准具样品,考虑边缘效应^[22],镜片厚度偏离量在径向分布上一般呈现梯度特性,越靠近边缘区域越容易出现厚度偏离。当入射光斑直径增大时,通光孔径内覆盖厚度偏离较大的空间点的概率越大。因此,通光孔径越大的标准具,其高性能研制难度越大。一般情况下,光斑直径与PV呈正相关,即光斑直径越大,厚度均匀性越难保证。此外,由于镜片厚度的非中心对称特性, Δh 会随光斑直径的变化而有一定程度的偏移。对镜片厚度精度与均匀性的改变体现为基于普适性厚度分布假设下不同直径均匀光斑内包含的镜片厚度差异。故可以通过改变通光孔径的测试实验来定性验证上述理论模型的可靠性。

实验更换焦距 f 分别为 30,40,50,61.5 mm 的平凸透镜作为形成平行光路的标准具前端聚焦透镜,实现直径 D 分别为 11.1,16,21.5,27.2 mm 的均匀光斑垂直入射标准具样品表面。本实验为定性验证测试,温度对研究结论无显著影响,因此测试在室温(22℃)下进行,波长扫描范围选取 532.2~532.45 nm,测试得到不同光斑直径下标准具透射谱图如图 10 所示。进一步计算标准具性能参数如表 2 所示,将数据绘制成图如图 11 所示。

测试结果表明,光斑直径的减小使得峰值透射率提升以及带宽减小。这说明光斑越小,厚度越均匀,透射谱峰的分辨率越高,滤波效果越好。

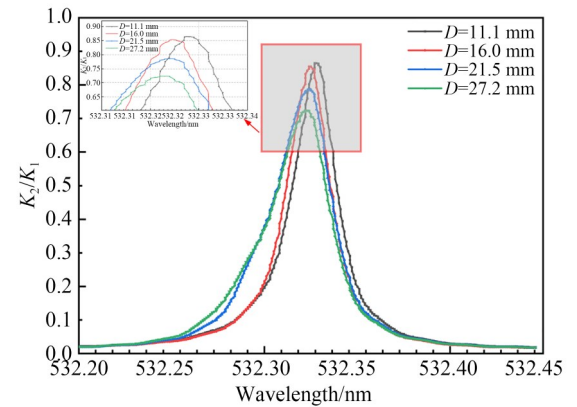


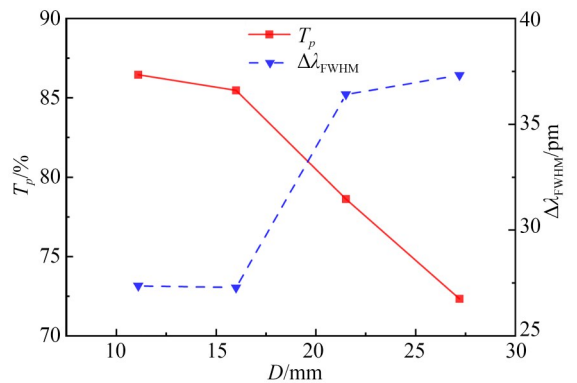
图 10 标准具通光孔径测试透射谱图

Fig. 10 Transmission spectrum of etalon under different spot diameters

表 2 不同光斑直径下标准具性能参数表

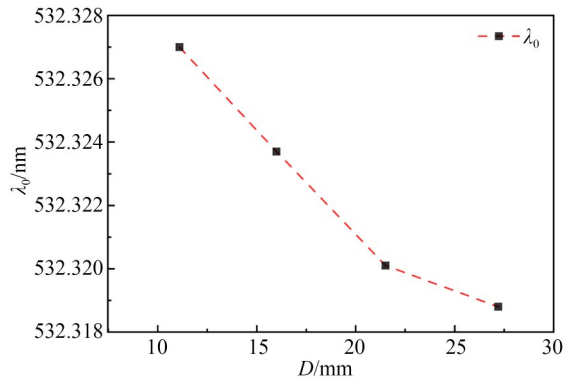
Tab. 2 Performance parameter data of etalon under different spot diameters

D /mm	11.1	16	21.5	27.2
f /mm	30	40	50	61.5
λ_0 /nm	532.327	532.324	532.320	532.319
T_p /%	86.46	85.48	78.62	72.34
$\Delta\lambda_{FWHM}$ /pm	27.38	27.28	36.42	37.32



(a) 峰值透射率与带宽

(a) Peak transmittance and bandwidth



(b) 中心波长

(b) Central wavelength

图 11 不同光斑直径下标准具性能参数测试结果图

Fig. 11 Test result graph of etalon performance parameters under different spot diameters.

此外,中心波长随光斑直径减小而向长波长方向移动,且在 11.1~21.5 mm 的光斑直径范围内二者呈现良好的线性相关性,光斑直径大于 21.5 mm 时的曲线非线性主要源于镜片边缘区域厚度偏离的随机性导致的镜片厚度精度的非线性。测试所得实验结果与仿真结果基本相符,验证了理论模型的准确性。

4.2 面形误差测试

标准具性能受中心层玻璃厚度误差、边缘层玻璃镀膜厚度误差和深化光胶厚度误差等多因素的综合影响。为进一步明确中心片和边缘片面形误差的技术要求,设置面形误差测试来精确量化二者面形误差与标准具性能的关系。此外,为消除上述定性验证实验中平凸透镜准直光束所引入的光束发散角与波像差对实验结果的干扰,在确保 27 mm 的通光孔径的前提下,设计非球面透镜搭建后续实验平行光路系统。非球面透镜凭借其独特的曲面设计,有效校正像差,显著抑制光束发散,实现光束质量的优化提升。

测试选择三组镀膜反射率 77% 的边缘片组和两片中心片样品,两片中心片面形不同,边缘片组间面形有所差异,组内面形近似相同,选用样品参数如表 3 和表 4 所示。边缘片面形由 Zygo 干涉仪检测,中心片厚度由实验室自制的波长扫描白光干涉测量仪测量^[23]。

表 3 边缘片样品面形参数表

Tab. 3 Table of surface figure parameters for edge piece samples

No.	1/2	3/7	31/35
PV	0.123λ/0.126λ	0.086λ/0.080λ	0.063λ/0.064λ

表 4 中心片样品面形参数表

Tab. 4 Table of surface figure parameters for central pieces

No.	A	B
nh/μm	463.037	463.103
PV/nm	18	23

将中心片 A,B 分别与三组边缘片胶合,在室温条件下测试不同组合下标准具透射谱图如图 12 所示,计算标准具性能参数如表 5 所示。

根据测试结果分析,可得到以下结论:

其一,中心片与边缘片面形均匀性都会对标

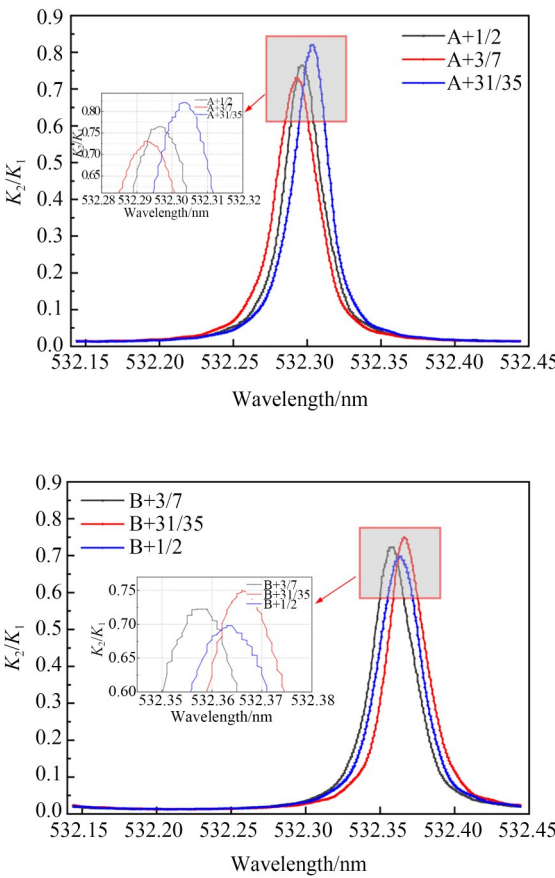


图 12 面形误差测试标准具透射谱图

Fig. 12 Transmission spectrum of the etalon tested for surface figure error

准具性能产生影响。当中心片 A 与边缘片组 31/35 胶合时,标准具各项性能指标接近设计指标,且中心片面形均匀性对标准具性能的影响高于边缘片。基于此,确定面形误差均匀性技术要求为优先满足中心片 $PV \leq 20 \text{ nm}$,同时控制边缘片 $PV \leq 0.07\lambda (44 \text{ nm})$ 有助于减轻中心片面形均匀性的控制压力。

其二,对比同一组边缘片与不同中心片胶合成的标准具,计算三组标准具中心波长偏移量与厚度精度系数分别为 1.444, 1.440, 1.426 pm/

表 5 面形误差测试标准具性能参数表

Tab. 5 Performance of the etalon for surface figure error testing

	A+1/2	A+3/7	A+31/35	B+3/7	B+31/35	B+1/2
λ_0/nm	532.297	532.293	532.303	532.359	532.368	532.363
$T_p/\%$	76.45	73.02	82.05	72.28	75.01	69.83
$\Delta\lambda_{\text{FWHM}}/\text{pm}$	29.26	32.56	27.46	32.34	30.14	33.48

nm,取平均得 1.437 pm/nm。对比理论仿真结果 1.65 pm/nm,为实现中心波长稳定性 20 pm 以内的指标,二者推算所得厚度精度控制范围存在 1.8 nm 偏差。经分析,误差主要来源两方面:一是厚度测量采样点数量有限,不足以有效表征镜片厚度精度;二是测试过程中未使用温控装置保持标准具测试温度恒定,影响中心波长测量结果的准确性。该偏差处于合理误差区间内,结果可用作通过调整镜片厚度来微调标准具中心波长的依据。

4.3 系统可靠性测试

为验证标准具透射系统的可靠性,同一光路条件下连续三次测试未放置标准具时的系统损耗 K_1 ,结果如图 13 所示。实验测试波长范围为 532.15~532.45 nm,采样点数为 597,测试温度稳定在 23℃。通过实验数据可知,在三组数据均值分别为 5.497 63,5.499 84,5.505 39,标准差分别为 0.030 68,0.027 32,0.027 24,相对标准偏差 RSD 为 0.557 638%,0.496 348%,0.494 395%。由此说明系统具有较高稳定性,多次测试具有较高重复性,测试系统可靠。

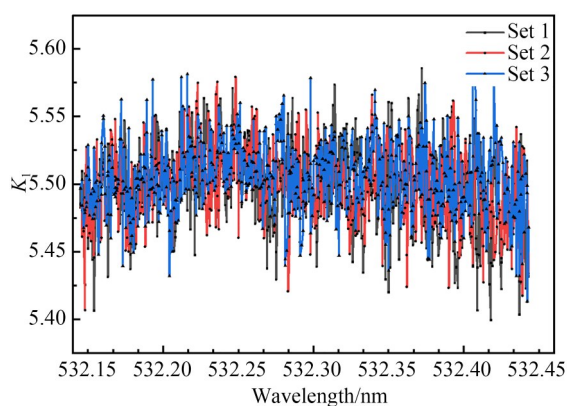


图 13 测试系统损耗重复性测试

Fig. 13 Repeatability test of system loss in the testing system

参考文献:

- [1] HU X C, YANG J S, RAO X J, *et al.* Fabry-Pérot interferometer based imaging spectrometer for Fe I line observation and line-of-sight velocity measurement[J]. *Solar Physics*, 2024, 299(8): 112.
- [2] CHENG Y S, DADI K, MITCHELL T, *et al.*

5 结 论

本文针对标准具生产过程中普遍存在的面形误差问题,采用理论仿真和实验验证相结合的方法,深入研究面形误差与法珀标准具性能指标的具体关系。在理论仿真中,对面形误差的空间分布做出合理假设,并通过改变高斯分布面形误差的均值与峰谷值,得到透射谱中心波长与厚度精度 Δh 的线性回归系数为 1.65 pm/nm,以及透射谱峰值透过率和带宽在峰谷值 PV 值小于 $\lambda/40$ (15.8 nm) 的区域呈现逐渐收敛的规律。对比设计目标,初步确定面形误差的有效控制标准,并对镀膜反射率进一步优化。在实验验证中,设计并搭建皮米级高精度标准具透射谱测试系统,通过重复性测试,证明测试系统稳定可靠。测试结果与仿真结果基本一致,通光孔径测试验证了镜片厚度精度主导中心波长偏移、镜片厚度均匀性影响峰值透过率与带宽这一结论。面形误差测试明确了满足设计指标的面形误差标准为优先满足中心片 $PV \leq 20$ nm,同时控制边缘片 $PV \leq 0.07\lambda$ (44 nm),并且验证了回归系数 1.65 pm/nm 用于中心波长调整的可行性。将结论用于生产,对于直径 30 mm 的标准具,中心片 PV 值控制在 10 nm 内时,峰值透过率高达 98.63%,且在中心波长 532.199 nm 处,实现了带宽仅 32.8 pm 的窄带滤波效果,逼近理论设计极限。本文基于 F-P 标准具面形误差的讨论与研究,为高精度标准具生产加工提供了有益参考,具有广泛的实用价值与参考意义。

作者贡献声明:

于涵:建立理论仿真、测试实验设计实现、数据整理和可视化分析、论文构思和撰写;

江毅:方案设计、实验指导、论文审核。

- ANDES, The High Resolution Spectrograph for The ELT: a 30 GHz UB-band Astrocomb from 390-470 nm[C]. *Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation VI*. June 16-22, 2024. Yokohama, Japan. *SPIE*, 2024.
- [3] KREIDER M K, FREDRICK C, DIDDAMS S

- A, *et al.* Quantification of broadband chromatic drifts in Fabry-Pérot resonators for exoplanet science [J]. *Nature Astronomy*, 2025, 9: 589-597.
- [4] ZHANG X Y, XIE F, CHEN M Y, *et al.* A highly stable frequency single-mode optical fiber laser based on a Fabry-Perot etalon [J]. *Optical Fiber Technology*, 2022, 73: 103047.
- [5] PERICHERLA S V, TRASK L, SHIRPURKAR C, *et al.* Stabilization of an InP mode-locked laser PIC through simultaneous optical filtering and self-injection locking using a Fabry-Perot etalon [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2024, 42(10): 3573-3579.
- [6] FRENKEL A, LIN C. Angle-tuned etalon filters for optical channel selection in high density wavelength division multiplexed systems [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1989, 7(4): 615-624.
- [7] LIN S C, LEE S L, YANG C L. Spectral filtering of multiple directly modulated channels for WDM access networks by using an FP etalon [J]. *Journal of Optical Networking*, 2009, 8(3): 306.
- [8] REN G Y, QU X H, DING S. A real-time measurement method of air refractive index based on special material etalon [J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(11): 2325.
- [9] ZHOU S N, SHEN X Y, WU C G, *et al.* The Error Analysis and Experimental Research of Micro-Angle Measurement System based on F-P Etalon [C]. *Tenth International Symposium on Precision Mechanical Measurements*. October 15-17, 2021. Qingdao, China. SPIE, 2021: 181-191.
- [10] ZAUN N H, WEIMER C, SIDORIN Y, *et al.* Solid-etalon for The CALIPSO Lidar Receiver [C]. *Earth Observing Systems IX*. Denver, CO. SPIE, 2004.
- [11] JIN Y S, JIN L, DONG Y, *et al.* Switchable multi-wavelength Pr: YLF laser based on F-P etalon [J]. *Applied Physics B*, 2024, 130(7): 114.
- [12] SHEN X Y, ZHOU S N, LI D S. Microdisplacement measurement based on F-P etalon: processing method and experiments [J]. *Sensors*, 2021, 21(11): 3749.
- [13] 廖德锋, 张明壮, 谢瑞清, 等. 全口径环形抛光的光学元件面形误差影响因素及其控制 [J]. *光学精密工程*, 2024, 32(3): 333-343.
- LIAO D F, ZHANG M Z, XIE R Q, *et al.* Factors influencing surface figure of optical elements in full-aperture continuous polishing and their control [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(3): 333-343. (in Chinese)
- [14] SLOGGETT G J. Fringe broadening in Fabry-Pérot interferometers [J]. *Applied Optics*, 1984, 23(14): 2427-2432.
- [15] PALIK E D, BOUKARI H, GAMMON R W. Experimental study of the effect of surface defects on the finesse and contrast of a Fabry-Perot interferometer [J]. *Applied Optics*, 1996, 35(1): 38-50.
- [16] REARDON K P, CAVALLINI F. Characterization of Fabry-Perot interferometers and multi-etalon transmission profiles. The IBIS instrumental profile [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2008, 481(3): 897-912.
- [17] DENG Q, LI L, CHU Y F, *et al.* Design and analysis of Fabry-Perot interferometer filter for high spectral resolution Lidar [C]. *Fourth Seminar on Novel Optoelectronic Detection Technology and Application*. October 24-26, 2017. Nanjing, China. SPIE, 2018.
- [18] BAILÉN F J, OROZCO SUÁREZ D, DEL TORO INIESTA J C. On fabry-Pérot etalon-based instruments. I. the isotropic case [J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2019, 241(1): 9.
- [19] LOPEZ R A, VON RAESFELD C, FITZGERALD M P, *et al.* Concept for Calibration of OSIRIS with A Fabry-Pérot Etalon [C]. *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IX*. July 17-23, 2022. Montréal, Canada. SPIE, 2022.
- [20] BAILÉN F J, OROZCO SUÁREZ D, DEL TORO INIESTA J C. Fabry-Pérot etalons in solar astronomy. A review [J]. *Astrophysics and Space Science*, 2023, 368(7): 55.
- [21] SIDORIN Y, LUNT D, KRAINAK M A, *et al.* Tunable solid-etalon filter for use in lidar receivers [C]. *Earth Observing Systems IX*. Denver, CO. SPIE, 2004.
- [22] XIE M L, PAN Y P, AN Z J, *et al.* Review on surface polishing methods of optical parts [J]. *Advances in Materials Science and Engineering*,

2022, 2022(1): 8723269.

- [23] 江毅. 光纤白光干涉测量术新进展[J]. 中国激光, 2010, 37(6): 1413-1420.

JIANG Y. Progress in fiber optic white-light interferometry[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(6): 1413-1420. (in Chinese)

作者简介:



于 涵(1999—),女,山东烟台人,硕士研究生,2022年于中国海洋大学获得学士学位,主要从事光学精密检测与光纤传感等方面的研究。E-mail: 3120220605@bit.edu.cn

通讯作者:



江 毅(1967—),男,四川宜宾人,博士,教授,博士生导师,1987年、1993年、1996年于重庆大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事光纤传感技术,光纤测量仪器,高温光纤传感等方面的研究。E-mail: bitjy@bit.edu.cn