

## 基于Zemax的在线光纤标准具模拟和设计

程义 王福娟 王自鑫 蔡志岗

### Simulation and design of in-line fiber optic etalon with Zemax

CHENG Yi, WANG Fujuan, WANG Zixin, CAI Zhigang

引用本文:

程义,王福娟,王自鑫,等. 基于Zemax的在线光纤标准具模拟和设计[J]. 应用光学, 2024, 45(6): 1331–1336. DOI: 10.5768/JAO202445.0608003  
CHENG Yi, WANG Fujuan, WANG Zixin, et al. Simulation and design of in-line fiber optic etalon with Zemax[J]. *Journal of Applied Optics*, 2024, 45(6): 1331–1336. DOI: 10.5768/JAO202445.0608003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0608003>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 面阵像元细分用于法布里珀罗标准具间隔测量

Virtual plane pixel subdivision for measuring interval of F-P etalon

应用光学. 2019, 40(1): 99–104 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0103004>

#### 基于拉锥光纤布拉格光栅的法布里-珀罗应变传感器的仿真研究

Simulation of Fabry-Perot strain sensor based on tapered fiber Bragg grating

应用光学. 2020, 41(5): 1129–1136 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0508002>

#### 变间隙法布里-珀罗干涉仪光程差线性分析

Linear analysis of optical path difference of variable-gap Fabry-Perot interferometer

应用光学. 2021, 42(3): 494–498 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0302007>

#### 光纤式微液滴光学检测与计数单元仿真分析

Simulation and analysis of micro-droplet optical detection and counting unit with optical fiber

应用光学. 2019, 40(1): 172–178 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0108004>

#### 光学元件缺陷在线检测光学系统设计

Optical system design for on-line defects detection of optical components

应用光学. 2019, 40(5): 779–785 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0501010>

#### 小型化光纤光栅解调系统设计及寻峰算法的模拟评测

Design of miniaturized fiber grating demodulation system and simulation evaluation of peak-detection algorithm

应用光学. 2020, 41(3): 618–625 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0308001>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 06-1331-06

# 基于 Zemax 的在线光纤标准具模拟和设计

程 义<sup>1</sup>, 王福娟<sup>2</sup>, 王自鑫<sup>3</sup>, 蔡志岗<sup>2</sup>

(1. 珠海光库股份有限公司, 广东 珠海 519080; 2. 中山大学 物理学院, 广东 广州 510275;  
3. 中山大学 电子与信息工程学院, 广东 广州 510275)

**摘要:** 从原理上分析了单层膜和法布里-珀罗谐振腔 (Fabry-Parot cavity, FP 腔), 并使用 Zemax 软件的膜层设计工具对分光比膜和 FP 腔进行了建模, 分析了不同折射率材料单层膜的反射率和透射率随波长的变化关系。对 FP 腔的模型进行简化分析, 用 3 mm 间距的空气隙 FP 腔进行了反射率和透射率初步验证。设计了一款通讯常用的 50 GHz 的光学标准具, 并介绍了一种基于自聚焦透镜准直器的在线光学标准具生产方案。通过设计, 控制自聚焦透镜平面分光比膜的透射率和反射率, 调整 2 个自聚焦透镜准直器之间的距离, 达到控制 FP 腔的峰值、谷值透射率和自由光谱范围 (free spectral range, FSR) 等参数的目标。通过 Zemax 建模, 发现模拟和样品的参数值基本一致。分析了样品间差异、光谱峰值透射率的差异和光谱相位差异。使用 Zemax 分析 FP 标准具方便直观, 为 FP 的设计与分析提供了一种新方法。

**关键词:** 法布里-珀罗标准具; Zemax; 光学仿真

中图分类号: TN209

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202445.0608003](https://doi.org/10.5768/JAO202445.0608003)

## Simulation and design of in-line fiber optic etalon with Zemax

CHENG Yi<sup>1</sup>, WANG Fujuan<sup>2</sup>, WANG Zixin<sup>3</sup>, CAI Zhigang<sup>2</sup>

(1. Advanced Fiber Resources (Zhuhai) Co., Ltd., Zhuhai 519080, China; 2. School of Physics, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 3. School of Electronics and Information Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** The single-layer coating and Fabry-Parot resonant cavity (FP cavity) were analyzed in principle, and the tap coating and FP cavity were modeled using the coatings tool of Zemax software. The reflectance and transmittance of single-layer coating with different refractive index materials were analyzed with respect to wavelength. The model of FP cavity was simplified and analyzed, and the reflectance and transmittance were preliminarily verified with an air-gap FP cavity with 3 mm gap. A fiber optical etalon of 50 GHz commonly used in communication was designed, and a production scheme of in-line optical etalon based on Glens collimator was introduced. Through the design, the transmittance and reflectance of the spectral ratio film of the Glens plane were controlled, and the distance between two Glens collimators was adjusted to achieve the control of the peak value, valley value transmittance and free spectral range (FSR) parameters of the FP cavity. Through the simulation, the parameters of the simulation and samples were obtained to be basically the same. The inter-sample differences, differences in spectral peak transmittance and spectral phase differences were also analyzed. Analysis of FP etalon by Zemax is convenient and intuitive, which provides a new method for FP design and analysis.

**Key words:** Fabry-Parot etalon; Zemax; optical simulation

---

收稿日期: 2023-10-20; 修回日期: 2023-12-24

基金项目: 国家重点研发计划 (2021YFF0701001); 广东省重点领域研发计划 (2020B0404030003)

作者简介: 程义 (1986—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事通讯、传感和激光雷达技术研究。E-mail: [chengyi900@163.com](mailto:chengyi900@163.com)

通信作者: 王福娟 (1979—), 女, 博士, 高级实验师, 主要从事激光光谱和光学传感测量技术研究。

E-mail: [wangfj@mail.sysu.edu.cn](mailto:wangfj@mail.sysu.edu.cn)

## 引言

法布里-珀罗谐振腔(Fabry-Parot cavity, FP 腔)是由 2 个镀有一定反射率的平行平板形成的干涉腔, 当一束光入射到此腔内时, 会产生多光束干涉。FP 腔可以应用于高分辨光谱学, 例如测试光学材料的温度特性<sup>[1]</sup>, 以及波长标定<sup>[2]</sup>, 风场测试<sup>[3]</sup>, 悬臂测试<sup>[4]</sup>等; 也可做高分辨光学滤波器, 应用于通讯领域, 例如可调谐滤波器<sup>[5-6]</sup>、通信波段吸收器<sup>[7-8]</sup>等; 还可以应用在激光器中, 提高调制效率<sup>[9]</sup>。

Zemax 是一款光学设计仿真软件, 可以用于镜头、准直器等的光学设计<sup>[10-11]</sup>, 有序列模式和非序列模式。序列模式下, 光线将会按照顺序依次通过各个界面; 非序列模式下, 则允许光线多次通过某个界面, 没有严格顺序。对于 FP 腔, 可以在非序列模式下建立实物模型<sup>[12]</sup>, 利用 Zemax 可计算光线在 2 个界面的多次反射, 得到干涉。然而在非序列模式下, 为了得到不同波长的透过率或者反射率, 需要手动输入具体波长, 使用 Ray Trace 和 Detector Viewer 等分析工具, 得到当前波长的透射率和反射率, 然后再修改波长, 得到另一波长的透射率和反射率。其过程非常繁琐且无法直观表现, 模拟空气隙的 FP 腔难度比较大。

为了将 FP 腔的模拟和分析变得更加简洁, 本文尝试在 Zemax 的序列模式下进行建模和分析。

## 1 理论分析

### 1.1 单层膜

当一束光入射到一块镀有薄膜的平行平板上时, 其反射率<sup>[13]</sup>为

$$R = \frac{(n_0 - Y)^2}{(n_0 + Y)^2} \quad (1)$$

式中:  $n_0$  为入射介质的折射率;  $Y$  为等效介质的等效光学导纳, 其表达式为

$$Y = \frac{n_1^2}{n_2} \quad (2)$$

式中:  $n_1$  为镀膜材料的折射率;  $n_2$  为基底材料的折射率。

对于特定的膜层, 例如肥皂膜, 其入射介质和基底材料都为空气, 即  $n_0=n_2=1$ 。将式(2)代入式(1), 并进行简化, 可得其反射率  $R$  为

$$R = \frac{(1 - n_1^2)^2}{(1 + n_1^2)^2} \quad (3)$$

### 1.2 FP 腔

当一束光正入射到一个前后表面反射率相同的平行平板 FP 腔, 光会在平行平板进行多次反射。反射的光由于存在恒定的相位差, 将会产生多光束干涉<sup>[14]</sup>。FP 腔有 2 个重要参数: 精细度  $F$  和自由光谱范围  $f_{\text{FSR}}$ 。

$$F = \frac{\pi \sqrt{R}}{1-R} \quad (4)$$

式中  $R$  为平行平板前后表面的反射率。

$$f_{\text{FSR}} = \frac{c}{2nh} \quad (5)$$

式中:  $c$  为真空中的光速;  $n$  为平行平板间介质折射率;  $h$  为平行平板的间距。

对于空气隙的 FP 腔,  $n=1$ , 则  $f_{\text{FSR}}$  可以简化为

$$f_{\text{FSR}} = \frac{c}{2h} \quad (6)$$

## 2 建模

### 2.1 系统设置

对于 Zemax 系统, 假设入瞳直径为 10 mm, 波长设置为 1 540 nm 和 1 560 nm, 其他选项按照默认参数进行初始设置。

### 2.2 设计膜系

根据 FP 腔的原理, 需要设计出不同反射率的膜系, 为了简化模拟过程, 且不失真实性, 故利用单层膜的理论设计所需要的膜系。

假设一个理想的材料, 厚度为 1/4 波长, 即材料的厚度会随着波长发生改变, 始终保证材料的厚度满足 1/4 波长, 并且不存在色散。按照 1.1 节的理论分析, 通过改变镀膜材料的折射率, 可得到比较稳定的反射率, 如表 1 所示。

表 1 不同折射率的反射率

Table 1 Reflectance of different refractive indexes

$n_1$	$R/\%$
1.000	0.0
1.387	10.0
1.618	20.0
1.850	30.0
2.107	40.0
2.414	50.0
2.806	60.0
3.353	70.0
4.236	80.0
6.162	90.0

为了实现 50.0% 的反射率, 可以假设一个理想材料 A, 在  $1.54 \mu\text{m} \sim 1.56 \mu\text{m}$  波段, 其折射率恒定为  $n_1=2.414$ , 且材质不存在吸收, 其折射率虚部为 0。用上述材料 A 定义一个简单的膜系 TF, 用于模拟 FP 腔 2 个表面的反射情况。如之前 1.1 节所述理论, 使用单层膜进行建模。为了简化, 用波长作为单位, 定义膜层厚度为  $1/4$  波长。

至此, 得到了 1.1 节所述的 TF 膜, 为肥皂膜结构, 如图 1 所示。

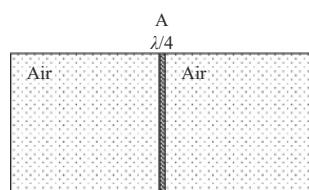


图 1 TF 膜

Fig. 1 TF coating

通过分析膜系在  $1.54 \mu\text{m} \sim 1.56 \mu\text{m}$  范围内的透射率和反射率, 其结果均为 50%, 如图 2、图 3 所示。

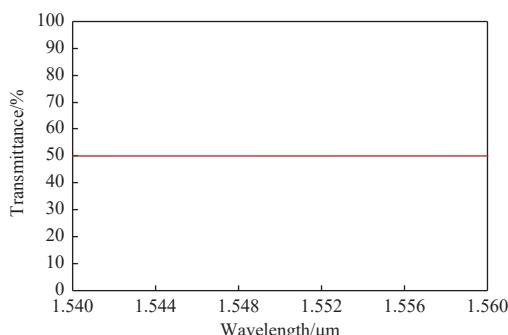


图 2 膜层 TF 的透射率随波长的变化

Fig. 2 Transmittance of coating TF versus wavelength

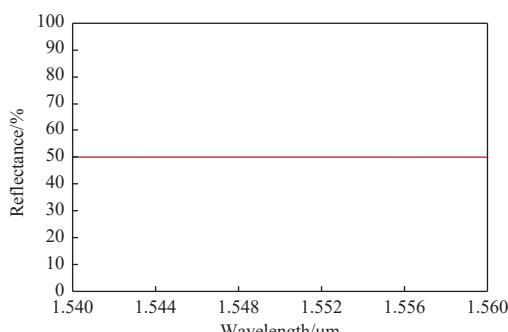


图 3 膜层 TF 的反射率随波长的变化

Fig. 3 Reflectance of coating TF versus wavelength

### 2.3 设计 FP 腔

由于 Zemax 在序列模式下只会考虑按照顺序进行传播, 故在透镜编辑窗口设计的界面, 不能同

时进行透射和反射, 所以设置多个界面不能形成干涉腔。然而, 关注到 Zemax 中的膜系设计工具, 由于膜系本身就是基于薄膜干涉理论而建立的, 所以, 可以尝试用膜层设计工具对 FP 腔进行模拟。

考虑到一个实际案例, 应用于通讯行业的光学梳状滤波器, FP 腔的 FSR 由信道的间隔决定, 通常有 200 GHz、100 GHz、50 GHz 和 25 GHz 等。由式(5)可以得出, 对于 50 GHz 的产品, 需要设置空气隙的间距约为 3 mm, 即  $3000 \mu\text{m}$ 。

前后表面反射率为 50%, 中间为  $3000 \mu\text{m}$  空气隙的 FP 腔, 其膜系设计参数如表 2 所示。

表 2 膜层 FP 的参数

Table 2 Parameters of coating FP

Material	Thickness	Is_absolute	Loop_index
A	$0.25\lambda$	0	0
Air	$3000 \mu\text{m}$	1	0
A	$0.25\lambda$	0	0

其中 A 为 2.2 节中假设的理想材料, 折射率  $n=2.414$ , 厚度为  $1/4$  个波长。中间为空气隙(Air), 厚度为绝对厚度, 值为  $3000 \mu\text{m}$ 。

为了使前后表面的反射都为 50%, 模型中必须满足入射和出射的介质为空气, 如图 4 所示。

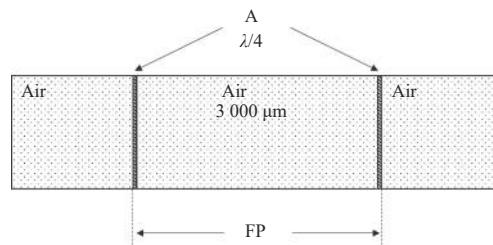


图 4 空气隙 FP 腔

Fig. 4 Air-gap FP cavity

透过率与波长的关系如图 5 所示。

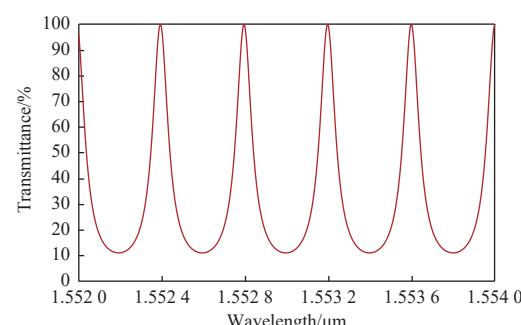


图 5 膜系 FP 腔的透射率随波长的变化

Fig. 5 Transmittance of coating FP versus wavelength

同样,可以得到反射率与波长的关系,如图 6 所示。

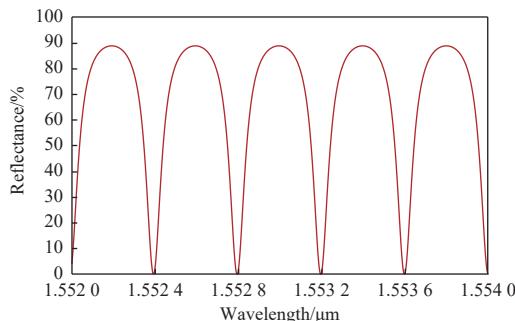


图 6 膜系 FP 的反射率随波长的变化

Fig. 6 Reflectance of coating FP versus wavelength

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 器件生产

对自聚焦透镜的平面镀 50 : 50 的分光比膜,并将其制成准直器,按照 3 mm 的距离胶接在一起,形成 2.3 节中所述的空气隙 FP 腔<sup>[15]</sup>器件,即光学梳状滤波器。实物如图 7 所示。



图 7 光学梳状滤波器实物

Fig. 7 Optical comb filter

#### 3.2 器件测试

测试光路如图 8 所示,使用 ASE 宽带光源,波长范围为 1 520 nm~1 580 nm,功率为 1 mW。光谱

分析仪分辨率设置为 0.01 nm,灵敏度为 -90 dBm。样品测试条件为 23℃,相对湿度为 60%。

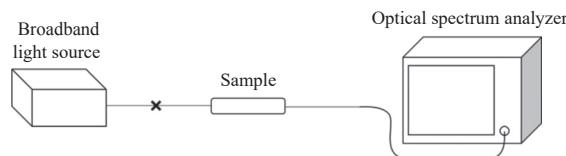


图 8 光路图

Fig. 8 Optical path diagram

图 9 为软件模拟结果和测量得到的样品透过率光谱曲线。

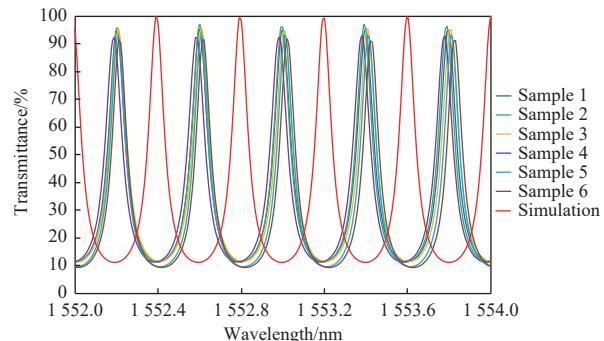


图 9 模拟和样品的透过率随波长的变化

Fig. 9 Transmittance of simulation and samples versus wavelength

从图 9 可以看出,样品谱线的重合度还是比较好的,但是由于生产过程中要求严格保证空气隙 3 mm 的距离比较困难,受限于工艺水平,可以看到样品在偏长波时,出现了分离的情况。

#### 3.3 数据分析

对数据进行分析,得到样品和模拟的基本参数如表 3 所示。

表 3 样品和模拟参数

Table 3 Parameters of samples and simulation

Parameters	Sample1	Sample2	Sample3	Sample4	Sample5	Sample6	Simulation
$f_{\text{FSR}}/\text{GHz}$	49.5	49.2	49.6	49.5	49.9	50.0	50.0
Peak loss/%	95.4	97.0	96.0	93.2	93.3	92.1	100.0
Bottom loss/%	11.3	11.3	11.4	11.2	9.5	9.2	11.1

Zemax 模拟结果与实际产品在 FSR 上基本一致,说明产品基本做到了空气隙距离在 3 mm,且峰值损耗和谷值损耗基本一致,说明样品的膜层反射率在所测试的波长范围内均为 50%。

注意到峰值损耗与模拟的结果存在一定的差异,这是因为一对准直器存在固有的损耗。其中

包括透镜材料的吸收、散射,透镜本身的像差,无法完成完美成像导致的耦合损耗增大,以及在实际加工过程中,由于胶水的固化收缩,对准直器对产生了不对称的拉力,导致 2 个准直器存在角度、轴向上的失配损耗,从而使样品间存在差异。谷值损耗主要受到构成 FP 腔 2 个界面膜层的反射率

影响, Sample1~Sample6 存在 2 个批次的透镜(其镀膜的反射率存在一定差异), 故其谷值会有差异。

图 9 所示模拟曲线与实际样品的谱线存在一定的相位差, 这是因为 Zemax 模拟忽略了自聚焦透镜准直器的点精度, 即对入射光角度为 0 度进行的模拟。为了方便, 选取特定波长 1552 nm 的 FP 腔透过率随角度的变化情况作为研究对象。如图 10 所示, 模拟了在 1552 nm 时, FP 腔透过率随入射角度的变化关系。

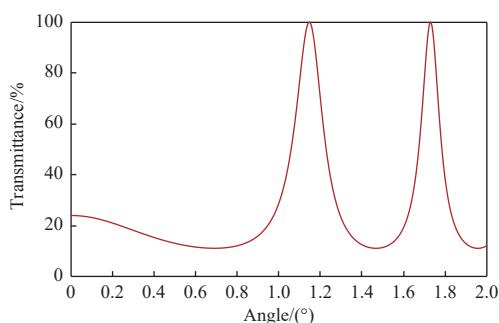


图 10 透射率随入射角的变化

Fig. 10 Variation of transmittance with incident angle

可以观察到在  $0^\circ \sim 2^\circ$ , 透过率变化了 2 个多周期。而通讯行业所用准直器的点精度在  $1.2^\circ$  以内, 当调整入射到 FP 腔的角度为  $0.68^\circ$  时, 模拟与实际样品的谱线完美重合, 如图 11 所示。

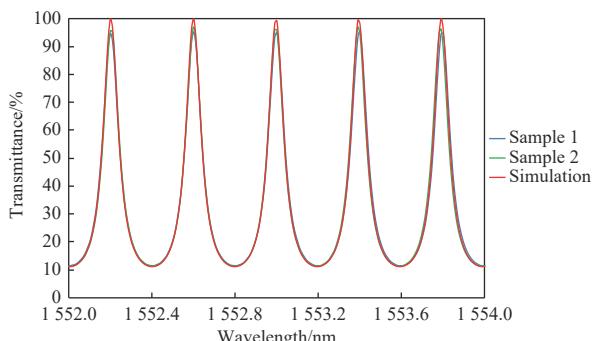


图 11 模拟和样品的透过率随波长的变化

Fig. 11 Variation of transmittance of simulation and samples with wavelength

同样对于其他样品, 通过对模型空气隙和入射角的调整, 即可实现模拟和样品谱线的重合。

## 4 结论

本文阐述了单层膜和 FP 腔的原理, 并基于 Zemax 的序列模式下, 利用膜层设计工具对 FP 腔

进行了设计, 避开了序列模式下光线只能按照顺序进行传输的问题。为了验证模拟的合理性, 生产了样品, 得到样品的透射光谱曲线与模拟透射光谱曲线的自由光谱范围和峰谷值基本一致。不同样品之间存在差异是由于工艺精度问题导致, 操作过程中无法保证 3 mm 空气隙严格相等。而样品峰值透过率存在轻微差异是由于器件固有的损耗和工艺带来的损耗导致的。通过分析 FP 腔特定波长透过率与入射角度的关系, 发现当 FP 腔的入射角为  $0.68^\circ$  时, 模拟与样品的光谱重合。该模拟方法对 FP 腔进行快速设计和分析具有一定的指导意义。

## 参考文献:

- [1] 余佳音, 樊静, 蓝旭辉, 等. 反射相移在 Fabry-Perot 标准具间距测量中的影响 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(9): 091201.  
YU Jiayin, FAN Jing, LAN Xuhui, et al. Influence of reflection-induced retardance on the measurement of Fabry-Perot etalon interval [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(9): 091201.
- [2] 刘加庆, 刘磊, 刘雷, 等. 布里渊光谱仪的高精度波长标定方法研究 [J]. 光学学报, 2020, 40(20): 2030001.  
LIU Jiaqing, LIU Lei, LIU Lei, et al. Wavelength calibration of ultra-high resolution brillouin spectrometer [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(20): 2030001.
- [3] 李路, 庄鹏, 谢晨波, 等. 多普勒测风激光雷达的 FP 标准具透过率曲线校准及风场观测 [J]. 光子学报, 2020, 49(11): 1149016.  
LI Lu, ZHUANG Peng, XIE Chenbo, et al. Calibration of FP etalon transmittance curve and wind field observation based on Doppler wind measurement lidar [J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(11): 1149016.
- [4] 徐琼, 丁丽萍, 付号, 等. FP 腔中驱动微悬臂的双稳效应的研究 [J]. 光学与光电技术, 2012, 10(6): 49-52.  
XU Qiong, DING Liping, FU Hao, et al. Bistability of optical actuated micro-cantilever in a Fabry-Perot [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2012, 10(6): 49-52.
- [5] 刘晓明, 张敏明, 刘德明. 基于法布里-珀罗滤波片的宽光谱可调谐滤波器 [J]. 光学与光电技术, 2006, 4(1): 55-57.  
LIU Xiaoming, ZHANG Minming, LIU Deming. Widely tunable Fabry-Perot etalon filter [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2006, 4(1): 55-57.

- [ 6 ] 杨四刚, 潘晴, 胡必春, 等. 基于固体腔 F-P 标准具的可调谐自适应光滤波器 [J]. 半导体光电, 2003, 24(2): 107-109.  
YANG Sigang, PAN Qing, HU Bichun, et al. An adaptive tunable optical filter based on solid cavity F-P etalon [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2003, 24(2): 107-109.
- [ 7 ] 金文最, 赵洪霞, 安雪瑶, 等. 通信波段宽带吸收器设计研究 [J]. 光电子·激光, 2020, 31(8): 800-805.  
JIN Wenzui, ZHAO Hongxia, AN Xueyao, et al. Research on the optimal design of a communication band broad-band absorber [J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2020, 31(8): 800-805.
- [ 8 ] 江孝伟, 武华. 双通道窄带宽超材料吸收器 [J]. 光学学报, 2021, 41(14): 1416002.  
JIANG Xiaowei, WU Hua. Dual-channel narrow bandwidth metamaterial absorber [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(14): 1416002.
- [ 9 ] 胡文杰, 梅文婷, 黄峻峰, 等. 光栅外腔提高 VCSEL 微波调制效率实验研究 [J]. 光电子·激光, 2021, 32(11): 1135-1139.  
HU Wenjie, MEI Wenting, HUANG Junfeng, et al. Experimental study on enhancement of microwave modulation efficiency in VCSEL laser using a grating external cavity [J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2021, 32(11): 1135-1139.
- [ 10 ] 闫亚东, 何俊华, 仓玉萍, 等. 用 ZEMAX 模拟五棱镜误差对平行度检测的影响 [J]. 应用光学, 2007, 28(5): 649-653.  
YAN Yadong, HE Junhua, CANG Yuping. Effect of penta prism error on parallelism detection with ZEMAX [J]. Journal of Applied Optics, 2007, 28(5): 649-653.
- [ 11 ] 程义. 基于 Zemax 的 C-lens 光纤准直器点精度分析 [J]. 机电工程技术, 2022, 51(6): 143-146.  
CHENG Yi. Analysis of point error for C-lens fiber collimator with Zemax [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2022, 51(6): 143-146.
- [ 12 ] 胡永宏. 用于成像的 FP 标准具研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2010.  
HU Yonghong. Reserch on FP etalon for imaging [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2010.
- [ 13 ] 唐晋发, 顾培夫, 刘旭, 等. 现代光学薄膜技术 [M]. 1 版. 杭州: 浙江大学出版社, 2006: 61-64.  
TANG Jinfa, GU Peifu, LIU Xu, et al. Modern optical thin film technology [M]. 1st ed. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006: 61-64.
- [ 14 ] 马科斯·玻恩, 埃米尔·沃尔夫. 光学原理: 光的传输、干涉和衍射的电磁理论 [M]. 杨葭荪, 译. 7 版. 北京: 电子工业出版社, 2009: 299-340.  
BORN M, WOLF E. Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light [M]. YANG J S, Transl. 7th ed. Beijing: Electronic Industry Press, 2009: 299-340.
- [ 15 ] 程义. 一种基于 FP 标准具的光滤波器: CN212009020U [P]. 2020-11-24.  
CHENG Yi. An optical filter based on FP etalon: CN212009020U [P]. 2020-11-24.