

反射相移对小腔长可调谐 Fabry-Perot 滤波器滤波特性的影响

丛蕊*, 周晟, 陈刚, 蔡清元, 蒋林, 刘定权

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要: 为具备尽量宽的波长调谐范围, 可调谐 Fabry-Perot 滤波器(TFPF)作为分光器件应用于高光谱遥感时其腔长必须很小。不同于传统 Fabry-Perot 干涉仪, 当 TFPF 的腔长与谐振波长相当时, 其反射镜上的反射相移不可忽略。本文基于传输矩阵方法, 在宽光谱范围内对介质反射镜的反射相移和 TFPF 的滤波特性进行了数值计算。结果显示, 考虑反射相移后 TFPF 表现出更高的光谱分辨率, 并且波长调谐范围被压缩。研究成果对面向高光谱遥感应用的 TFPF 的结构设计和波长校准具有指导意义。

关键词: 波长调谐范围; 可调谐 Fabry-Perot 滤波器; 高光谱遥感; 反射相移; 光谱分辨率

中图分类号: O433 **文献标识码:** A

The effects of reflection phase shift on filtering performance of a tunable Fabry-Perot filter with a small cavity length

CONG Rui*, ZHOU Sheng, CHEN Gang, CAI Qing-Yuan, JIANG Lin, LIU Ding-Quan
(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: In order to obtain the widest wavelength tuning range, the cavity length of the tunable Fabry-Perot filter (TFPF) must be very small when used as a spectroscopic device in hyperspectral remote sensing. Differently from conventional Fabry-Perot interferometer, phase change occurring on reflection at each mirror can not be neglected when the cavity length is comparable with the resonant wavelength. In this paper, numerical calculations were carried out for the reflection phase shift on dielectric mirrors and filtering performance of TFPF in wide spectral range based on the Transfer-Matrix Method. Results show that TFPF exhibits higher spectral resolution and compressed wavelength tuning range after considering reflection phase shift. These research achievements can provide guidance for structure design and wavelength calibration of TFPF for hyperspectral remote sensing applications.

Key words: wavelength tuning range, tunable Fabry-Perot filter, hyperspectral remote sensing, reflection phase shift, spectral resolution

PACS: 42.79.Ci

引言

高光谱遥感技术能够在获取待测目标二维几何信息的同时, 以高光谱分辨率获取目标的光谱信息, 可广泛用于矿产勘探、水资源和大气环境监测以及精细化农业林业生产等领域^[1]。

国内应用于航空航天遥感的高光谱成像仪普

遍采用棱镜或光栅分光^[2-3], 分光系统占据空间较大, 整机比较笨重。近年来随着轻小型无人机遥感及微纳卫星技术的飞速发展, 开发新一代低成本、实时性强的智能灵巧型高光谱成像仪已经成为未来高光谱遥感技术发展的必然趋势^[4-5]。现阶段国内轻小型高光谱成像仪采用的分光器件主要是声

收稿日期: 2020-04-21, 修回日期: 2020-12-20

Received date: 2020-04-21, Revised date: 2020-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(61705248, 61805267); 上海市自然科学基金(17ZR1434900); 上海技术物理研究所创新项目(CX-76, CX-218)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (61705248, 61805267); the Natural Science Foundation of Shanghai (17ZR1434900); the Innovation Program of Shanghai Institute of Technical Physics (CX-76, CX-218).

作者简介 (Biography): 丛蕊(1985—), 女, 黑龙江齐齐哈尔人, 副研究员, 博士学位, 主要研究领域为轻小型可扫描高光谱/超光谱分光元件研究. E-mail: congrui@ucas.ac.cn

*通讯作者 (Corresponding author): E-mail: congrui@ucas.ac.cn

光可调谐滤波器(AOTF)^[6-8]和液晶可调谐滤波器(LCTF)^[9-10]。然而,受声光晶体尺寸与可接收最大光束立体角的限制,AOTF成像光谱仪无法同时兼顾大孔径与大视场^[11];LCTF的波长切换速度受限于液晶分子在外电场下偏转的弛豫时间,波长切换时间一般在几十或百ms的量级^[12],难以满足高光谱遥感应用中更快的通带切换速度要求。

目前国外还有一种 Fabry-Perot 干涉型分光技术,以芬兰 VTT 技术研究中心为代表,VTT 采用这种分光方式的凝视型高光谱相机已经在无人机遥感^[13]和微纳卫星^[14]上获得应用。

Fabry-Perot 干涉型分光元件构型简单,主要由平行放置的两块内表面镀有高反膜的透明平板组成,平板间隙利用微小的压电陶瓷芯片调节。这种具备光谱扫描功能的可调谐 Fabry-Perot 滤波器(Tunable Fabry-Perot Filters, TFPF),采用时间调制方式进行光谱分色,通过调控镜面间隙改变通带波长,实现可调滤波。TFPF 使用时可以直接放置在平行光路里或者探测器前面,能够即插即用,具备透光孔径大,光通量高,通带切换速度快,成本低廉等优势。TFPF 分光可极大地简化成像光谱设备的分光系统,显著降低高光谱成像仪的体积、重量和功耗,加速高光谱遥感仪器的小型化和轻量化。

然而,与平板间距至少在毫米量级的传统 Fabry-Perot 干涉仪不同的是,为具备尽量宽的波长调谐范围,基于高光谱遥感应用的 TFPF 要工作在低干涉级数状态^[15],其腔长很小,跟谐振波长相当,光波在反射镜上的反射相移不可忽略。此时,在较宽波长范围内,腔长与透射峰峰值波长之间不再是经典的线性关系。这种非线性偏离给 TFPF 通带峰位的精确调控和波长校准带来了很大困难。

不同于文献[16-18]中计算反射相移时仅考虑反射膜系参考波长附近的情况,本文讨论反射相移时所涉及的波长范围较宽,而不仅局限于参考波长附近。因此,介质反射镜的反射相移与波长之间的关系既是非线性的,也无法用简单的解析式表达。

针对上述问题,利用光学薄膜的矩阵传输理论,对正入射情况下介质反射镜的反射相移和 TFPF 的滤波特性进行了数值计算,并分析了反射相移对 TFPF 的通带峰位、峰值透过率、光谱分辨率以及波长调谐范围的影响。研究成果对 TFPF 的光机结构设计、腔长调控和波长校准均具有指导意义。

1 TFPF 的光谱调控原理

当组建 Fabry-Perot 腔的两反射镜相同,腔内介质是空气,且光线正入射时,TFPF 的透射率可表示为^[19]

$$\tau(\lambda, d) = \frac{T^2(\lambda)}{[1 - R(\lambda)]^2 + 4R(\lambda) \sin^2 \left[\frac{2\pi d}{\lambda} - \phi(\lambda) \right]}, \quad (1)$$

式(1)中, $R(\lambda)$ 和 $T(\lambda)$ 是 Fabry-Perot 腔内每个反射镜的强度反射率和透射率; d 是平板间隙(腔长); $\phi(\lambda)$ 是腔内反射镜振幅反射系数的辐角,是反射光波相对于入射光波的相位变化,称为反射相移; λ 为入射光波的波长。由于介质膜的机械强度和耐擦伤特性都优于金属膜,因此,本文仅讨论平板反射镜的高反射率膜层是多层介质膜的情况。此时,有

$$R(\lambda) = \left(\frac{B - C}{B + C} \right) \left(\frac{B - C}{B + C} \right)^*, \quad (2)$$

$$T(\lambda) = \frac{\operatorname{Re}(N_s)(1 - R)}{\operatorname{Re}(BC^*)}, \quad (3)$$

$$\phi(\lambda) = \arctan \left[\frac{\operatorname{Im}[BC^* - B^*C]}{BB^* - CC^*} \right], \quad (4)$$

式(3)中, N_s 为衬底的光学导纳,参数 B 、 C 由介质膜系特征矩阵计算而来

$$\begin{pmatrix} B \\ C \end{pmatrix} = \prod_{j=1}^K \begin{bmatrix} \cos \delta_j(\lambda) & i \sin \delta_j(\lambda) / N_j(\lambda) \\ i N_j(\lambda) \sin \delta_j(\lambda) & \cos \delta_j(\lambda) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ N_s(\lambda) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

矩阵

$$\begin{bmatrix} \cos \delta_j(\lambda) & i \sin \delta_j(\lambda) / N_j(\lambda) \\ i N_j(\lambda) \sin \delta_j(\lambda) & \cos \delta_j(\lambda) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

为第 j 层膜的特征矩阵;

矩阵

$$\begin{bmatrix} 1 \\ N_s(\lambda) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

为衬底的特征矩阵;

$\delta_j(\lambda)$ 为第 j 层介质膜的相位厚度

$$\delta_j(\lambda) = \frac{2\pi}{\lambda} N_j(\lambda) d_j, \quad (8)$$

式中, $N_j(\lambda) = n_j(\lambda) - ik_j(\lambda)$ 为第 j 层介质膜的光学导纳,其中 $n_j(\lambda)$ 和 $k_j(\lambda)$ 分别为第 j 层介质膜的折射率和消光系数, d_j 为第 j 层介质膜的物理厚度。

由式(1)易见, Fabry-Perot 腔达到谐振状态时

满足的相位条件为

$$\frac{2\pi d}{\lambda} - \phi(\lambda) = m\pi \quad (m = 0, 1, 2, 3, \dots), \quad (9)$$

式(9)中 m 称为干涉级数。因此,TFPF的通带峰位可以表示为

$$\lambda = 2d \left[m + \frac{\phi(\lambda)}{\pi} \right] \quad (10)$$

对于传统的 Fabry-Perot 干涉仪,由于腔长在毫米量级以上,干涉级数不小于 10^2 量级,反射相移可以忽略不计,因此式(9)可以简化为

$$d = m\lambda/2 \quad (11)$$

显然,通过调控 Fabry-Perot 腔的腔长可以改变 TFPF 的通带峰位,实现 TFPF 时间调制型可调滤波,此即为本文讨论的 TFPF 的光谱调控原理。

2 TFPF 反射镜的膜系结构设计和反射特性计算

本文研究的 TFPF 的工作光谱范围预期在 1.7~2.4 μm 的短波红外波段,两个平板反射镜均采用石英基板作为衬底,考虑到与衬底晶格常数的匹配性和薄膜的机械强度,同时为了获取尽量宽的高反带,采用 Si 和 SiO_2 分别作为高、低折射率材料来制备 TFPF 的反射膜。

TFPF 两平板反射镜的高反射率膜层的膜系相同,均为

$$\text{S/HLHLH}$$

其中,S为石英衬底,H和L分别代表光学厚度为四分之一参考波长的 Si 和 SiO_2 薄膜,参考波长 λ_0 为 2 050 nm。石英衬底折射率为 1.445, Si 和 SiO_2 薄膜在 λ_0 处的折射率分别为 3.702 83 和 1.455 61。两种薄膜材料的折射率和消光系数色散曲线如图 1 所示,数据来源为利用 VEECO 离子束溅射镀膜机制备的相应单层膜来反演的薄膜折射率和消光系数数据。

图 2(a)和(b)所示为基于图 1 所示的薄膜折射率和消光系数数据,并利用式(2)、(4)和(5)计算得到的介质反射镜的反射光谱和反射相移色散曲线。此处需要说明的是,由于要获取 TFPF 精确的透射峰位和半峰宽数据,所以本文在进行所有光谱特性计算时,波长步长均设置为 0.01 nm,后续不再赘述。

图 2 显示,在 1.7~2.4 μm 的波长范围内,介质反射镜的反射率为 96.75%~98.71%,反射相移为 2.802 47~3.363 73rad。在参考波长 $\lambda_0=2 050$ nm

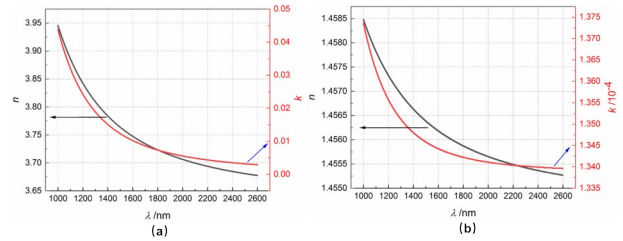


图 1 薄膜材料的折射率和消光系数色散曲线 (a) Si 的 $n(\lambda)$ 和 $k(\lambda)$, (b) SiO_2 的 $n(\lambda)$ 和 $k(\lambda)$

Fig. 1 Dispersion curves of refractive index and extinction coefficient of thin film materials (a) $n(\lambda)$ and $k(\lambda)$ of Si; (b) $n(\lambda)$ and $k(\lambda)$ of SiO_2

处,介质镜的反射率为 98.7%,反射相移 ϕ 为 π 。由于反射膜系中单层膜的相位厚度 $\delta_j(\lambda) = \frac{\pi}{2} \frac{\lambda_0}{\lambda}$ 对不同波长的入射光波来说是不同的,因此当入射光波长 λ 相对于膜系的参考波长 λ_0 发生偏离时,反射膜系中每个单层膜的相位厚度都将偏离 $\pi/2$,加之薄膜的光学导纳存在图 1 所示的色散,不同波长处薄膜的折射率和消光系数不同,因此介质膜系在波长 λ 处的反射率 $R(\lambda)$ 偏离 $R(\lambda_0)$,反射相移 $\phi(\lambda)$ 偏离 $\phi(\lambda_0)$ 。而入射光波长 λ 相对于膜系的参考波长 λ_0 偏离的方向和程度,以及 λ 处光学导纳的具体数值和色散率共同决定了 $R(\lambda)$ 和 $\phi(\lambda)$ 的大小和波长 λ 附近反射谱和反射相移色散曲线的形状。

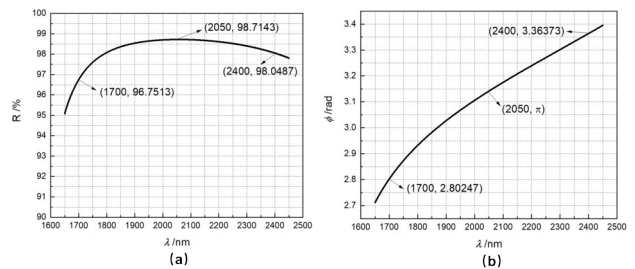


图 2 TFPF 介质反射镜的反射特性 (a) 反射谱, (b) 反射相移色散曲线

Fig. 2 Reflection characteristics of dielectric mirrors for TFPF (a) The reflectance spectrum, (b) The reflection phase shift dispersion curve

3 TFPF 的滤波特性计算和反射相移对滤波特性的影响

为了使 TFPF 在 1.7~2.4 μm 的波长范围内具备单一透射峰的扫描能力,根据 $m < \lambda_{\min} / (\lambda_{\max} - \lambda_{\min})$ 给出的判据^[15],不考虑反射相移时,干涉级数 m 应

取 1 或 2, 对应的腔长变化范围是 $0.85\sim 1.2\ \mu\text{m}$ 或 $1.7\sim 2.4\ \mu\text{m}$ 。此时, 腔长与谐振波长可比拟, 空气间隙可以等效为折射率为 1 的薄膜, 整个 TFPF 的膜系结构可以表示为

$$S/HLHLHxC_pHLHLH/S$$

其中, C 表示空气介质, p 表示 C 的厚度为物理厚度, x 是物理厚度的具体数值。其它条件不变时, 改变 x 的数值即改变了腔长 d , 从而调整了 TFPF 的通带位置。

由于反射相移在 $1.7\sim 2.4\ \mu\text{m}$ 波长范围内的取值在 $[\pi-0.339\ 12, \pi+0.222\ 142]$ 的区间内变化, 因此对于同样的腔长位置, 考虑反射相移后, Fabry-Perot 腔将在新的波长位置建立谐振条件, 相应的干涉级数也将降低一个级次。也就是说, 对于同一 d 值, 式(10)和式(11)中透射峰的位置 λ_p 和干涉级次 m 都不同。

图 3 所示为考虑反射相移前后 TFPF 在不同腔长下的透射谱, 为了透射峰间隔清晰, 便于标注透射峰对应的腔长值, 在两个腔长区间分别选取了等间隔的 15 个腔长位置进行了透射谱计算。计算显示, 当腔长在 $0.85\sim 1.2\ \mu\text{m}$ 或 $1.7\sim 2.4\ \mu\text{m}$ 范围内变化时, 不管是否考虑反射相移, TFPF 在 $1.7\sim 2.4\ \mu\text{m}$ 的波长范围内都具备单通道扫描能力。为了研究反射相移对 TFPF 光谱扫描特性的影响, 我们考察了 TFPF 的透射峰位、峰值透过率和半峰宽在考虑反射相移前后的变化。

图 4 展示了 TFPF 在考虑反射相移前后透射峰位与腔长的对应关系。如图 4(a) 和 (b) 所示, 如果不计反射相移, 腔长在 $0.85\sim 1.2\ \mu\text{m}$ 或 $1.7\sim 2.4\ \mu\text{m}$ 范围内变化时, TFPF 的波长调谐范围(单一透射峰的峰位调谐范围)均是 $1.7\sim 2.4\ \mu\text{m}$, 通带峰位与腔长之间的关系满足式(11)所示的经典的线性关系; 考虑反射相移后, 由于反射相移在 $1.7\sim 2.4\ \mu\text{m}$ 的波长范围内不是一个常数, 而是与波长相关的, 取值在 $[\pi-0.339\ 12, \pi+0.222\ 142]$ 的区间内变化, 因此通带峰位与腔长之间将满足式(10)所示关系, 尽管此时 λ_p 与 d 之间直观看起来仍像是一条直线, 但是二者之间却是非线性关联的, 并且透射峰的干涉级数降低了 1 个级次。

由图 2 易见, 在参考波长 λ_0 处, $\phi(\lambda)/\pi = 1$; $\lambda < \lambda_0$ 时, $\phi(\lambda)/\pi < 1$; $\lambda > \lambda_0$ 时, $\phi(\lambda)/\pi > 1$ 。因此, 式(10)和式(11)在参考波长处等效, λ_0 处的透射峰在考虑反射相移前后保持不动; 而 λ_0 两侧的透射峰均

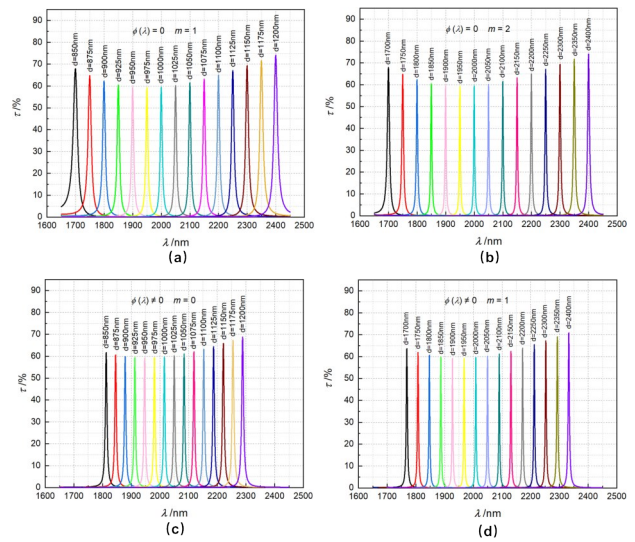


图 3 考虑反射相移前后 TFPF 在不同腔长下的透射谱 (a) $d: 850\sim 1\ 200\ \text{nm}$, $\Delta d=25\ \text{nm}$, $\phi(\lambda)=0$, $m=1$, (b) $d: 1\ 700\sim 2\ 400\ \text{nm}$, $\Delta d=50\ \text{nm}$, $\phi(\lambda)=0$, $m=2$, (c) $d: 850\sim 1\ 200\ \text{nm}$, $\Delta d=25\ \text{nm}$, $\phi(\lambda)\neq 0$, $m=0$; (d) $d: 1\ 700\sim 2\ 400\ \text{nm}$, $\Delta d=50\ \text{nm}$, $\phi(\lambda)\neq 0$, $m=1$

Fig. 3 Transmission spectrum of TFPF with different cavity length before and after reflection phase shift considered (a) $d: 850\sim 1\ 200\ \text{nm}$, $\Delta d=25\ \text{nm}$, $\phi(\lambda)=0$, $m=1$, (b) $d: 1\ 700\sim 2\ 400\ \text{nm}$, $\Delta d=50\ \text{nm}$, $\phi(\lambda)=0$, $m=2$, (c) $d: 850\sim 1\ 200\ \text{nm}$, $\Delta d=25\ \text{nm}$, $\phi(\lambda)\neq 0$, $m=0$, (d) $d: 1\ 700\sim 2\ 400\ \text{nm}$, $\Delta d=50\ \text{nm}$, $\phi(\lambda)\neq 0$, $m=1$

向 λ_0 这个中心移动; 原来透射峰峰位距离参考波长越远, 腔长越靠近区间端点, 峰位移动量越大。而透射峰峰位向参考波长的靠拢, 导致 TFPF 的波长调谐范围缩短, 并且腔长变化区间所属的干涉级数越小, 这种缩短效应越显著。

表 1 给出了腔长为所在区间的端点时, 考虑反射相移前后 TFPF 的通带峰位移动量。数据显示, 在考虑反射相移后, 对应 $0.85\sim 1.2\ \mu\text{m}$ 的腔长变化范围, TFPF 的波长调谐范围缩短了 $224.4\ \text{nm}$; 对应 $1.7\sim 2.4\ \mu\text{m}$ 的腔长变化范围内, TFPF 的波长调谐范围缩短了 $135.9\ \text{nm}$ 。

图 5 展示了反射相移对 TFPF 峰值透过率的影响。如图所示, 虽然在相同的腔长位置, 反射相移的存在会导致 TFPF 的峰值透过率的降低(参考波长处的透射峰除外), 但是降低了峰值透过率的透射峰已不在原来的通带位置; 而在相同的通带中心波长处, 反射相移的存在并没有引起 TFPF 的峰值透过率的明显变化, 并且考虑反射相移前后峰值透

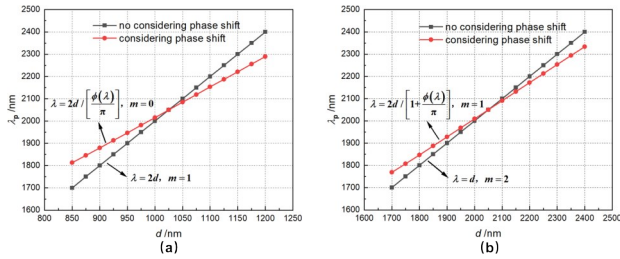


图4 TFPF的通带峰位与腔长之间的关系(a) d : 850~1 200 nm, $\Delta d=25$ nm, (b) d : 1 700~2 400 nm, $\Delta d=50$ nm

Fig. 4 The relationship between peak position of passband and cavity length for TFPF (a) d : 850~1 200 nm, $\Delta d=25$ nm; (b) d : 1 700~2 400 nm, $\Delta d=50$ nm

表1 反射相移导致的TFPF通带峰位变化

Table 1 Changes of peak position for TFPF resulting from $\phi(\lambda)$

$m(\phi(\lambda)=0)$	d	λ_p/nm ($\phi(\lambda)=0$)	λ_p/nm ($\phi(\lambda)\neq 0$)	$\Delta\lambda_p/nm$
1	850	1 700	1 812. 89	112. 89
1	1 200	2 400	2 288. 5	-111. 5
2	1 700	1 700	1 768. 88	68. 88
2	2 400	2 400	2 332. 97	-67. 03

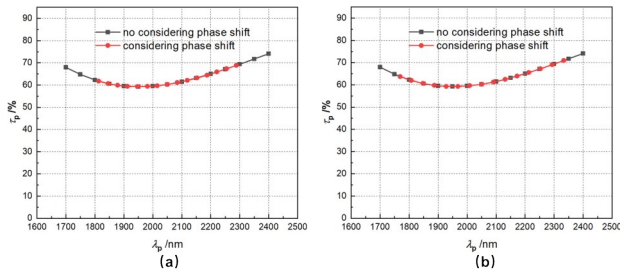


图5 在考虑反射相移前后TFPF峰值透过率的对比(a) d : 850~1 200 nm, $\Delta d=25$ nm, (b) d : 1 700~2 400 nm, $\Delta d=50$ nm

Fig. 5 Comparison of peak transmission for TFPF before and after reflection phase shift considered (a) d : 850~1 200 nm, $\Delta d=25$ nm, (b) d : 17 00~2 400 nm, $\Delta d=50$ nm

过率随通带中心波长变化的曲线几乎是重合的。这是因为Fabry-Perot腔满足式(9)所示的相位谐振条件时,式(1)中正弦的平方项为零,TFPF的峰值透过率仅由腔内反射镜面的强度反射率 $R(\lambda)$ 和强度透射率 $T(\lambda)$ 决定。而对于确定介质反射镜来说,正入射情况下 $R(\lambda)$ 和 $T(\lambda)$ 只与波长相关。因此,只要通带位置是相同的,那么不管是否考虑反射相移,TFPF的峰值透过率都相等。

图6展示了考虑反射相移前后TFPF的透射峰半峰宽随通带峰位变化的曲线。计算结果显示,考

虑反射相移后,虽然TFPF的波长调谐范围缩短了,但是滤波器的半峰宽却明显减小。当腔长在0.85~1.2 μm 范围内变化时,TFPF的半峰宽由8.36~18.03 nm降至5.76~7.71 nm;当腔长在1.7~2.4 μm 范围内变化时,TFPF的半峰宽由4.18~8.95 nm降至3.41~5.06 nm。

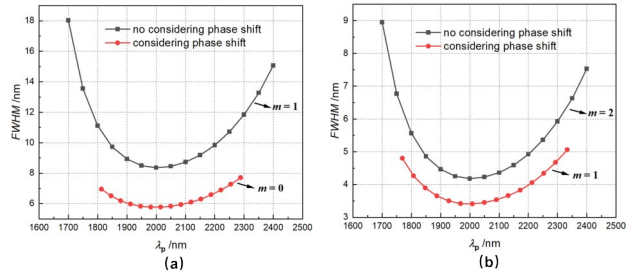


图6 TFPF的半峰宽随峰值波长变化的曲线(a) d : 850~1 200 nm, $\Delta d=25$ nm, (b) d : 1 700~2 400 nm, $\Delta d=50$ nm

Fig. 6 Curves of FWHM versus peak position for TFPF (a) d : 850~1 200 nm, $\Delta d=25$ nm, (b) d : 1 700~2 400 nm, $\Delta d=50$ nm

以图6中计入反射相移的曲线中半峰宽的最小值点和曲线两个端点所在的波长位置作为特征参考点,对比考虑反射相移前后TFPF在相同的通带位置处通带半峰宽变化情况,半峰宽的具体数值如表2所示。数据显示,在相同的波长处,考虑反射相移的TFPF的半峰宽更小,表现出更高的光谱分辨率。而且,不计反射相移时的干涉级数越低,计入反射相移后滤波器的半峰宽下降的越多。当不计反射相移时的干涉级数为1时,考虑反射相移后滤波器的半峰宽下降幅度不小于31%;当不计反射相移时的干涉级数为2时,考虑反射相移后滤波器的半峰宽下降幅度不小于18%。

此处需要说明的是,实际使用时镜面的表面质量和镜面间的平行度也影响TFPF的光谱分辨,而

表2 反射相移导致的TFPF半峰宽度变化

Table 2 Changes of FWHM for TFPF resulting from $\phi(\lambda)$

$m(\phi(\lambda)=0)$	λ_p/nm	FWHM ($\phi(\lambda)=0$)	FWHM ($\phi(\lambda)\neq 0$)	下降百分 比/%
1	1 812. 89	10. 77	6. 94	35. 56
1	2 015. 56	8. 39	5. 76	31. 34
1	2 288. 5	11. 58	7. 71	33. 42
2	1 768. 88	6. 34	4. 80	24. 29
2	2 009. 22	4. 18	3. 41	18. 42
2	2 332. 97	6. 42	5. 06	21. 18

本文讨论光谱分辨率时是假设介质反射镜为理想平滑,且两个镜面之间倾角为零的理想情况。

4 结语

研究了低干涉级数和小腔长下介质反射镜的反射相移在宽光谱范围内对 TFPF 的通带峰位、光谱分辨率以及波长调谐范围的影响。相对于忽略反射相移的经典情况,考虑反射相移后,基于介质反射镜构建的 TFPF 的波长调谐范围被压缩,但是却表现出更高的光谱分辨率。而且,不计反射相移时的干涉级数低,反射相移对 TFPF 滤波特性的影响越显著。计算显示,相比于 $0.85\sim 1.2\ \mu\text{m}$ 的腔长范围,当腔长在 $1.7\sim 2.4\ \mu\text{m}$ 范围内变化时,TFPF 具备更宽的波长调谐范围和更高的光谱分辨。因此,实际应用时 TFPF 的腔长变化范围选在 $1.7\sim 2.4\ \mu\text{m}$ 更为适宜,更能满足高光谱遥感应用需求。

References

- [1] WANG Li-Guo, ZHAO Chun-Hui. Hyperspectral Image Processing [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016: 283-308
- [2] WANG Xin, YANG Bo, DING Xue-Zhuan, et al. The Optical Design of Shortwave Infrared Imaging Spectrometer in Space [J]. *Infrared Technology* (王欣, 杨波, 丁学专, 等. 空间遥感短波红外成像光谱仪的光学系统设计. *红外技术*), 2009, **31**(12): 687-690
- [3] XUE Qing-Sheng, LIN Guan-Yu, SONG Ke-Fei. Optical Design of Spaceborne Shortwave Infrared Imaging Spectrometer with Wide Field of View [J]. *Acta Photonica Sinica* (薛庆生, 林冠宇, 宋克非. 星载大视场短波红外成像光谱仪光学设计. *光子学报*), 2011, **40**(5): 673-678
- [4] Saari H, Pellikka I, Pesonen L, et al. Unmanned Aerial Vehicle (UAV) operated spectral camera system for forest and agriculture applications [C]. SPIE, 2011, 8174: 81740H-1/15
- [5] Praks J, Kestilä A, Hallikainen M, et al. Aalto-1-An experimental nanosatellite for hyperspectral remote sensing [C]. 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2011: 4367-4370.
- [6] WANG Jian-Yu, HE Zhi-Ping, and SHU Rong. Design and applications of spaceborne imaging spectrometer based on acousto-optic tunable filter (AOTF) [C]. SPIE, 2010, 7857: 78570N-1/6
- [7] HE Zhi-Ping, SHU Rong, WANG Jian-Yu. Imaging Spectrometer based on AOTF and its prospects in deep-space exploration application [C]. SPIE, 2011, **8196**: 819625-1/7
- [8] LIU Ji-Fan, MA Yan-Hua, ZHANG Lei, et al. An AOTF hyperspectral imager: The multi-scale remote sensing of Tibetan Plateau [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (刘济帆, 马艳华, 张雷, 等. AOTF 成像光谱仪及其在青藏高原多尺度遥感中的试验应用. *红外与毫米波学报*), 2013, **32**(1): 86-90.
- [9] ZHANG Dong-Ying, HONG Jin, TANG Wei-Ping, et al. Design of Hyperspectral Imaging System Based on LCTF [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (张冬英, 洪津, 汤伟平, 等. 基于 LCTF 调谐的高光谱成像系统设计. *光谱学与光谱分析*), 2008, **28**(10): 2455-2458.
- [10] WANG Wei, SHEN Zhi-Xue. Optical System Design of LCTF-Based Airborne High Spectral Resolution Camera [J]. *Acta Photonica Sinica* (汪伟, 沈志学. LCTF 机载高光谱相机光学系统设计. *光子学报*), 2015, **44**(7): 139-143
- [11] CHANG Ling-Ying, ZHAO Bao-Chang, QIU Yue-Hong, et al. Optimal scheme of AOTF imaging spectrometer optical system [J]. *Journal of Applied Optics* (常凌颖, 赵葆常, 邱跃洪, 等. AOTF 成像光谱仪光学系统的最优方案选择. *应用光学*), 2012, **33**(1): 5-8
- [12] Aharon O, Abdulhalim I. Liquid crystal Lyot tunable filter with extended free spectral range [J]. *Optics Express*, 2009, **17**(14): 11426-11433
- [13] Saari H, Aallos V V, Holmlund C, et al. Novel hyperspectral imager for lightweight UAVs [C]. SPIE, 2010, **7668**: 766805-1/9
- [14] Leppinen H, Kestilä A, Tikka T, et al. The Aalto-1 nanosatellite navigation subsystem: Development results and planned operations [C]. 2016 European Navigation Conference (ENC), Helsinki, 2016: 1-8.
- [15] CONG Rui, WANG Yi-Kun, CHEN Gang, et al. Suppressing Multi-order Transmission Peaks of Tunable Fabry-Perot Filter [J]. *Acta Optica Sinica* (丛蕊, 王义坤, 陈刚, 等. Fabry-Perot 可调谐滤波器多级透射峰的抑制方法. *光学学报*), 2019, **39**(3): 0323003-1/8.
- [16] Xiang M, Cai M Y, Wu Y M, et al. Experimental study of the free spectral range (FSR) in FPI with a small plate gap [J]. *Optics Express*, 2003, **11**(23): 3147-3152
- [17] SHEN Wei-Dong, LIU Xu, HUANG Bi-Qin, et al. The effects of reflection phase shift on the optical properties of a micro-opto-electro-mechanical system Fabry-Perot tunable filter [J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2004, **6**: 853-858
- [18] YIN Xue-Hui, LI Cheng-Fang, WU Xiao-Ping, et al. Analysis of Reflection Phase Shift's Effect on MEMS Based Filter's Full Width of Maximum Height [J]. *Acta Photonica Sinica* (殷学会, 李承芳, 吴晓平, 等. 反射相移对 MEMS 滤波器半峰全宽影响分析. *光子学报*) 2006, **35**(3): 352-356
- [19] TANG Jin-Fa, Gu Pei-Fu, LIU Xu, et al. Modern optical thin film technology [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press (唐晋发, 顾培夫, 刘旭, 等. 现代光学薄膜技术). 杭州: 浙江大学出版社, 2006: 17, 26-29, 141.