



## 非平行光束对窄带滤光片光谱性能的影响

何文彦 孔明东 任戈 魏铭

### Influence of nonparallel beams on the spectral properties of the narrow-band filter

He Wenyan, Kong Mingdong, Ren Ge, Wei Ming

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20210757>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 焊丝熔化填充方式对激光焊接熔池影响的数值模拟

Numerical simulation of effect of filler wire melting and filling mode on molten pool in laser welding

红外与激光工程. 2018, 47(3): 306005 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0306005>

#### 气动光学效应对激光扩束系统的影响

Influence of aero-optic effect on laser beam expanding system

红外与激光工程. 2019, 48(S1): 1 <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.S106001>

#### 高超声速拦截弹绕流红外辐射特性数值模拟

Numerical simulation of infrared radiation characteristics of flow over hypersonic interceptors

红外与激光工程. 2017, 46(12): 1204001 <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.1204001>

#### 航天光学遥感相机多谱带滤光片设计与考核方法

Multi-band filter design and assessment for space optical-remote-sensing camera

红外与激光工程. 2018, 47(3): 320002 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0320002>

#### 旋转相位屏的动态大气湍流数值模拟和验证方法

Numerical simulation and validation method of atmospheric turbulence of phase screen in rotation

红外与激光工程. 2017, 46(12): 1211003 <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.1211003>

#### 基于包-全法的红外滤光片光学参数测量方法

Optical parameters measurement of infrared filter based on envelope-full spectral fitting inversion method

红外与激光工程. 2019, 48(9): 913004 <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0913004>

## 非平行光束对窄带滤光片光谱性能的影响

何文彦<sup>1,2,3</sup>, 孔明东<sup>1,2,3</sup>, 任 戈<sup>1,2,3\*</sup>, 魏 铭<sup>1,2,3</sup>

1. 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;
2. 中国科学院光束控制重点实验室, 四川 成都 610209;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 因为发散角和线宽效应的存在, 非平行光束入射窄带滤光片时, 滤光片的透射特性会发生变化。特别是在斜入射时, 窄带滤光膜透射通带波形更易从矩形向三角形退化, 并且伴随峰值透过率降低等负面现象。虽然已知的卷积模型可以对非平行光束入射窄带滤光片的情况进行数值模拟, 但是由于制备和测量误差的阻碍, 其正确性和数值模拟的准确性没有严格的实验进行验证。通过膜系优化和测量误差修正降低相应误差及其影响, 并通过等离子体辅助反应磁控溅射 (PARMS) 的方法制备了工作角度为  $17^\circ$  的 1 064 nm 高性能窄带滤光片。滤光片的透射光谱分别由两款分光光度计 Cary 7000 和 Lambda 1050 测量得到。在不同条件下测得的光谱与数值模拟结果吻合得很好, 充分验证了卷积模型的有效性和数值模拟的准确性。

**关键词:** 窄带滤光片; 数值模拟; 发散角效应; 线宽效应

**中图分类号:** O484 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210757

## Influence of nonparallel beams on the spectral properties of the narrow-band filter

He Wenyan<sup>1,2,3</sup>, Kong Mingdong<sup>1,2,3</sup>, Ren Ge<sup>1,2,3\*</sup>, Wei Ming<sup>1,2,3</sup>

1. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;
2. Key Laboratory of Optical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Because of the divergence angle and linewidth effects, the filter's transmission characteristics will change when a nonparallel beam irradiates the narrow-band filter. Especially at oblique incidence, the passband waveform of the narrow-band filter film is more likely to degenerate from rectangular to triangular, and negative phenomena such as the transmittance peak decrease appear. Although the known convolution model can simulate this variation numerically, there is no strict experimental verification for the model's correctness and the accuracy of numerical analysis due to obstacles of preparation and measurement errors. For this verification, the corresponding errors are overcome through film optimization and measurement error correction. A high-performance 1 064 nm narrow-band filter at an incident angle of  $17^\circ$  was fabricated by plasma-assisted reactive magnetron sputtering (PARMS). The transmission characteristics were measured by two spectrophotometers, Cary 7000 and Lambda 1050, separately. The spectra are coincident with the numerical simulation under different conditions. Therefore, the validity of the convolution model and the high accuracy of the numerical simulation are adequately justified.

收稿日期: 2021-10-14; 修订日期: 2021-11-15

作者简介: 何文彦, 男, 副研究员, 硕士, 主要从事高性能光学薄膜的制备与检测仿真方面的研究。

通讯作者: 任戈, 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事光场调控和大型光电仪器方面的研究。

**Key words:** narrow-band filter; numerical simulation; divergence-angle effect; linewidth effect

## 0 引言

光学薄膜是现代光学系统中不可或缺的部分,其中窄带滤光片的品质直接决定了一些高性能光学系统的能力。在滤光片设计中,入射光束常被认为是理想的单色平行光束。然而,在实际的光学系统中,入射光通常具有一定的发散角与线宽。例如,常作为光源的高功率半导体激光器,出射激光的发散角就从几分到十几度不等<sup>[1-5]</sup>;在光通讯领域,通信光束的发散角也因与通信的能力有关受到特别关注<sup>[6-9]</sup>;在光谱测试中,分光光度计的测试光束也有一定的发散角和线宽<sup>[10]</sup>,测试结果会受到发散角和线宽的影响。正是由于发散角和线宽的原因,窄带滤光片可能会出现性能下降甚至失效的情况<sup>[11-14]</sup>,尤其是在倾斜入射时。虽然这种情况已有理论模型进行数值分析<sup>[11-13]</sup>,但由于薄膜制备精度和测量误差的限制,该模型的正确性和数值分析的准确性很难得到严格的验证和评估。

在克服影响验证和评估的误差限制后,文中采用等离子体辅助反应磁控溅射(PARMS)方式制备了入射角为 17°的 1064 nm 窄带通滤光片。该滤光片的透射光谱由两款来自不同主流厂商的分光光度计测得。不同测试条件下,测量结果与相应的数值模拟结果非常吻合。通过比较这些结果,验证了模型的正确性和数值模拟的准确性。文中的结果有益于指导该类滤光薄膜、分光薄膜在分光光度计上的表征及其在实际光学系统中的应用。

## 1 卷积模型

假设入射光束具有发散半角 $\theta$ ,光束正入射和斜入射滤光片的情况如图 1 所示。正入射下的最大入射角是光束发散半角;在斜入射的情况下,最大入射角与入射角有关。

为了方便起见,用 $\theta_{max}$ 表示入射光束的最大发散半角;用函数 $C(\theta)$ 表示光束能量在发散角 $2\theta_{max}$ 中的分布。当发散光束以入射角 $\theta_0$ 入射在薄膜样品表面时,光谱特性可以近似为:

$$F_1(\lambda) = \frac{1}{2\theta_{max}} \int_{\theta_0-\theta_{max}}^{\theta_0+\theta_{max}} C(\theta) f(\lambda, \theta) d\theta \quad (1)$$

其中,薄膜样品光谱函数 $f(\lambda, \theta)$ 可以从薄膜的特征矩阵中推导出来,在分光光度计中光束能量分布通常被认为是均匀的,即函数 $C(\theta) \approx 1$ 。

在大多数情况下,光束很难严格保持单色性,总是具有一定的线宽。假设 $\Delta\lambda$ 代表光束的半线宽,函数 $D(\lambda)$ 表示为入射光在全线宽 $2\Delta\lambda$ 中的能量分布。薄膜的光谱特性可以近似表达式为:

$$F(\lambda) = \frac{1}{2\Delta\lambda} \frac{1}{2\theta_{max}} \int_{\lambda-\Delta\lambda}^{\lambda+\Delta\lambda} D(\lambda) \int_{\theta_0-\theta_{max}}^{\theta_0+\theta_{max}} C(\theta) f(\lambda, \theta) d\theta d\lambda \quad (2)$$

其中,在分光光度计中线宽的能量分布一般也认为是均匀的,即函数 $D(\lambda) \approx 1$ 。

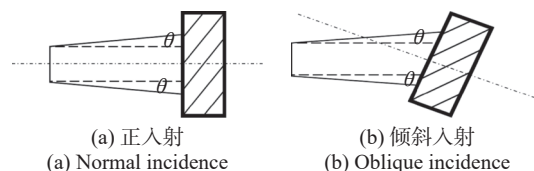
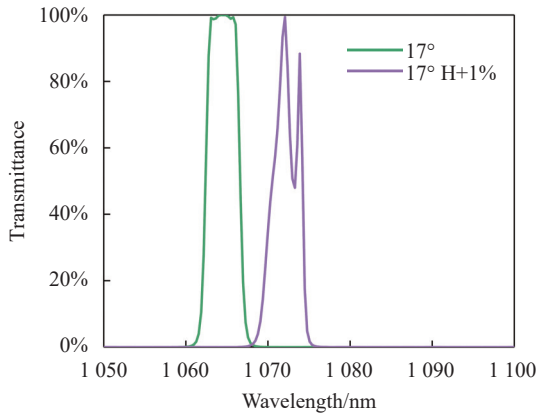


图 1 发散角光束入射滤光片的示意图

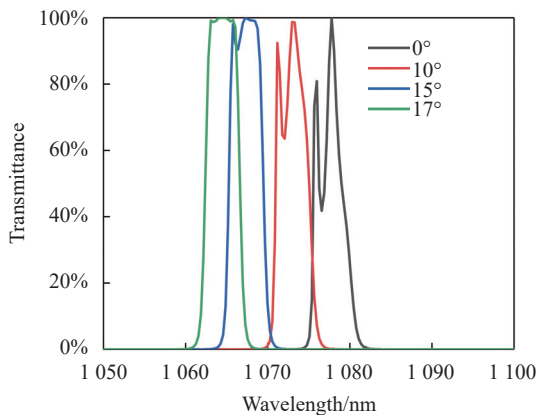
Fig.1 Schematic diagram of a divergent beam incident on the filter

## 2 样品制备过程

标准多腔结构,如 Sub / (HL)<sup>5</sup> 2 H (LH)<sup>5</sup> 5 L 6 H (LH)<sup>5</sup> L 6 H (LH)<sup>5</sup> L 2 H (LH)<sup>5</sup> L / Air 的膜系结构, H 和 L 分别为 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 SiO<sub>2</sub>, 其透射通带波形很容易受到制备和入射角度误差干扰。失配误差作为一种典型的制备误差,在光学薄膜的实际制备中常被遇到。假定每层高折射材料沉积的厚度比低折射材料多 1%, 通过膜系设计软件 OptiLayer 的模拟计算,窄带滤光片透射通带波形会出现如图 2(a) 所示的崩塌。对于文中工作角度为 17°的窄带滤光片,理论透射曲线随着入射角的减小出现红移,同时波形明显坍塌,如图 2(b) 所示。由公式(2)可知,窄带滤光片透射通带的中心波长漂移与入射角及发散角存在紧密的联系,然而这种波形坍塌造成透射通带中心波长难以精确确认,严重阻碍了模型的验证。同时,这种波形的坍塌也使制备误差和测量误差相互纠缠,难以区分并加以抑制,造成无法评估数值模拟准确性的后果。



(a) 材料失配的影响  
(a) Influence of material mismatch



(b) 入射角度的影响  
(b) Influence of incident angles

图 2 部分误差对标准多腔膜系结构的透射光谱影响

Fig.2 Influences of some errors on transmission spectra of standard multi-cavity structure

为了验证模型并评估其数值模拟的准确性,需要抑制波形坍塌:一方面,可以通过优化薄膜结构和采用高精度的薄膜沉积系统,减少薄膜制备误差和降低入射角度误差的影响;另一方面,校准测量设备,降低测量误差。

### 2.1 膜系设计优化

基于前文所述,首先对膜系结构进行优化,通过对反射膜堆层数、腔层厚度及最外两层膜厚的调整,优化后的薄膜结构如图 3 所示。理论透射光谱如图 4 所示,其峰值透光率大于 99%,透射通带宽大于 3 nm,半高宽(Full Width of Half Maximum, FWHM)小于 6 nm。此时,高折射率材料多 1% 的失配误差仅导致透射光谱红移,不会破坏波形,如图 4(a) 所示。另外,入射角度从 0°变化至 17°的情况下,也仅会导致透射光谱漂移,没有出现波形坍塌,如图 4(b) 所示。材料失配误

差与入射角度误差对优化后的窄带滤光片透射通带波形的影响明显降低,方便确认透射通带中心波长位

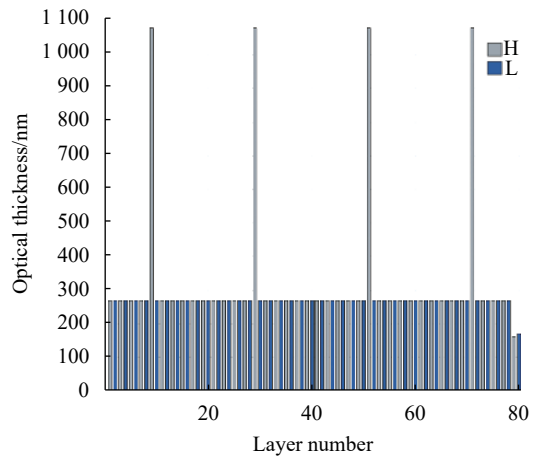
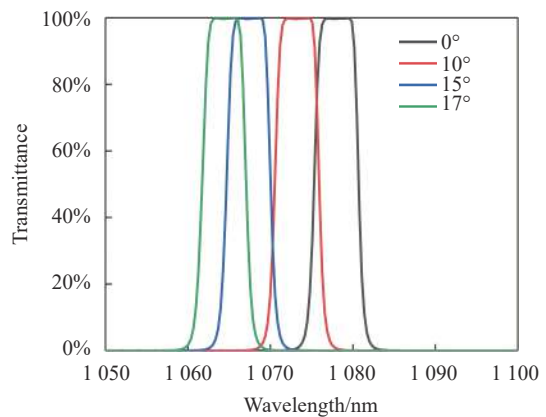
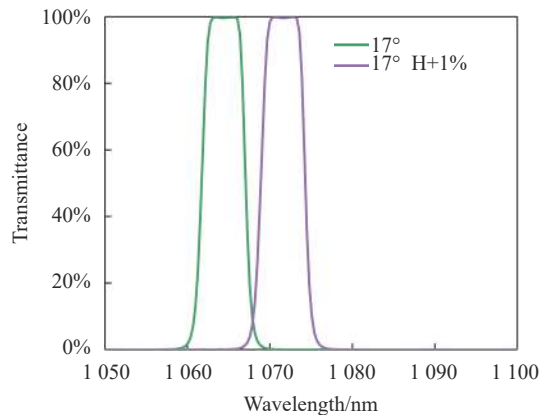


图 3 优化后的窄带滤光片多腔结构

Fig.3 Optimized multi-cavity structure of narrow bandpass filter



(a) 材料失配的影响  
(a) Influence of material mismatch



(b) 入射角度的影响  
(b) Influence of incident angles

图 4 部分误差对优化后多腔薄系结构的透射光谱影响

Fig.4 Influences of some errors on transmission spectra of optimized multi-cavity structure

置及相关信息,且中心波长的漂移对入射角度变化保持较高敏感性。因此,优化后的膜系可以有效抑制模型验证中的制备误差和入射角度误差的影响并满足所需灵敏度。

### 2.2 薄膜样品的制备

文中的 1064 nm 窄带滤光样片由布勒莱宝光学设备有限公司生产的 Helios 400 磁控溅射镀膜机制备。该套镀膜系统具备一个射频源和两个中频磁控溅射源。射频源的作用是通过氩离子 (Ar<sup>+</sup>) 和氧离子 (O<sup>+</sup>) 轰击刚沉积的薄膜,以进一步氧化膜材和平滑表面。通过等离子体辅助反应磁控溅射技术 (PARMS)<sup>[15-17]</sup> 制备由 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 SiO<sub>2</sub> 作为高、低折射率材料的窄带滤光膜。Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 SiO<sub>2</sub> 分别由纯度为 99.9% 的金属钽和纯度为 99.999% 的多晶硅溅射而成。在薄膜制备过程中,分子泵组保持工艺腔室中的压力约为 8.5×10<sup>-2</sup> Pa。所用基板为 Φ25 mm×2 mm 的熔融石英玻璃,基板加热温度为 120 ℃。制备过程中采用直接光学监测装置实时控制薄膜沉积的厚度,高、低折射率两种薄膜材料的沉积速率分别为 0.45 nm/s 和 0.15 nm/s。

## 3 结果与讨论

### 3.1 数值模拟与测试结果

对于分光光度计而言,光束能量在发散角和线宽内的强度分布近似均匀。故公式 (2) 中的函数  $C(\theta)$  与  $D(\lambda)$  可以在数值模拟中简化为 1。数值模拟参数中的发散角和线宽,取分光光度计的实际参数。文中使用安捷伦 (Agilent) 公司的 Cary 7000 和珀金埃尔默 (Perkin Elmer) 公司的 Lambda 1050 测量透射光谱。这两款分光光度计具有不同的发散角,有助于说明模型验证的普适性。

另外,需要校正的测量误差可分为两类:波长误差和入射角误差。众所周知,在不同的入射角下,波长误差导致相同的偏差量;而角度误差导致的光谱偏差会随着入射角度的增加而变得更加显著。通常,分光光度计的波长误差为 1~2 nm,这种误差可以在测量前通过波长校准来消除。图 5 为波长校准后,正入射时窄带滤光片样品测得的透射光谱与理论模拟透射光谱之间的比较,点状符号为测量结果,线状符号为

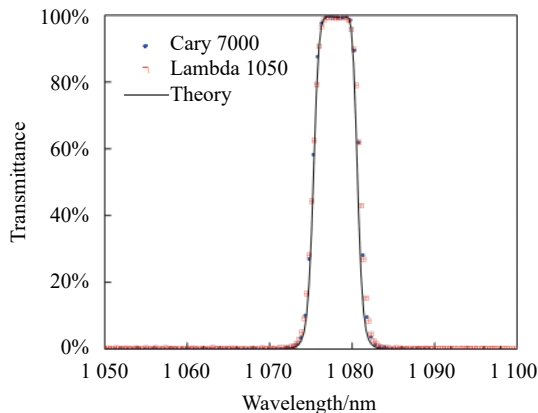


图 5 正入射情况下实测的窄带滤光片样品透射光谱和模拟结果  
Fig.5 Measured transmission spectra and simulated result of narrow-band filter specimen under normal incidence

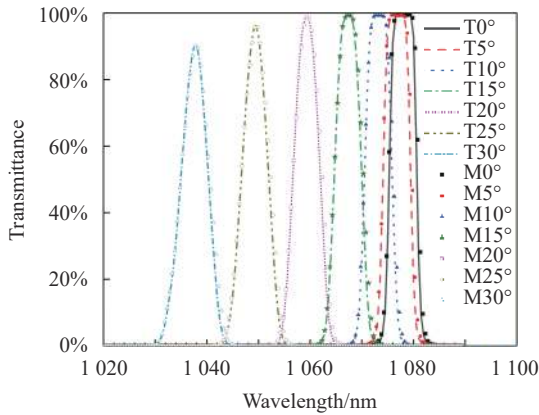
理论模拟结果。实测样品薄膜的透射通带大于 2.7 nm, 峰值透光率大于 99%, 半高宽小于 6 nm。实测曲线与模拟曲线吻合得较好,表明对制备误差影响的控制达到了预期效果。

角度误差是另一种常见的测量误差。光学薄膜的光谱随入射角度变化而异,当入射角度数设置为相同时,由于角度误差的存在,不同偏转方向的真实入射角会有差异,这将导致不同偏转方向下相同角度示数的实测光谱出现不一致的结果。通过找出角度误差并对其进行补偿,可以将角度误差的负面影响降至最低。文中的光谱测量中, Cary 7000 的角度误差非常小,可以忽略;但 Lambda 1050 由于购置早、使用久,出现的角度误差约为 1°。因此,仅需对 Lambda 1050 测量的结果需要角度补偿修正。

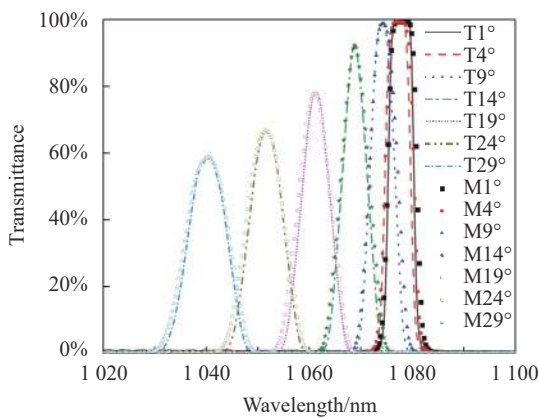
### 3.2 发散角的影响

图 6 为两款分光光度计实测透射光谱与模型数值模拟结果的比较。其中, Cary 7000 配备了一个发散半角为 1° 的可拆卸光阑,测试时选用线宽为 0.5 nm, 实测得到的透射光谱如图 6(a) 中点状符号所示,线状符号表示为不同入射角情况下的模拟结果,两者能很好地重合。据现场实测, Lambda 1050 分光光度计的光束发散半角约为 2.15°, 测试时同样选取 0.5 nm 线宽,测试结果(点状符号)与数值模拟结果(线状符号)如图 6(b) 中所示。图 6(b) 中结果表明,实际测得的透射光谱也非常符合数值模拟结果。

窄带滤光片的透射通带位置随着入射角的增加



(a) Cary 7000 的测试和模拟结果  
(a) Test and simulation results of Cary 7000



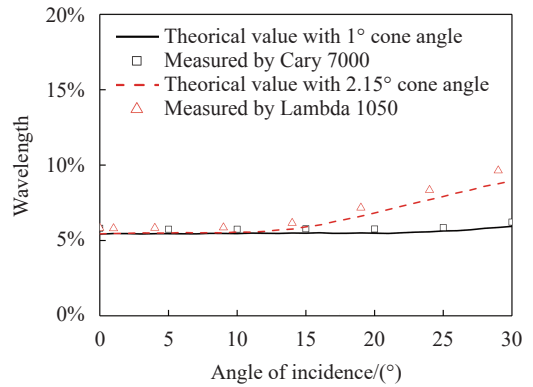
(b) Lambda 1050 的测试和模拟结果  
(b) Test and simulation results of Lambda 1050

图 6 两款分光光度计实测透射光谱与模型模拟结果的比较

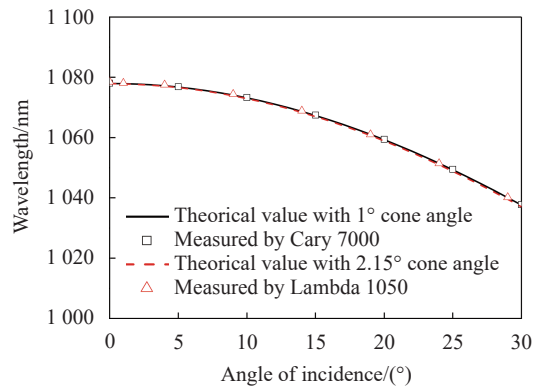
Fig.6 Comparison of transmittance spectra between measured by two types of spectrophotometers and simulated by the model

而出现蓝移,如图 6 所示。同时,该滤光片的透射通带形状从矩形逐渐退化为三角形,峰值透射率也迅速下降。通过比较图 6(a)和图 6(b)可以发现,较大的发散角对通带形状的影响更加突出,导致波形退化更加严重,峰值透射率下降更为迅速。

透射通带中心波长的位置和半高宽 (FWHM) 是评估窄带滤光片的重要指标。当线宽为 0.5 nm 时,中心波长位置受入射角影响很大,两者关系如图 7(a)所示。图 7(a)中结果表明,不同发散角对波长位置的偏移量并无明显差异,实际测量值(点状符号)与数值模拟曲线(线状符号)一致。然而,半高宽受不同发散角的影响较为显著,两者关系如图 7(b)所示。当发散半角为 1°、入射角度从 0°~30°时,半高宽略微扩展,约为 0.5 nm。但当发散半角为 2.15°时,半高宽增加 3.5 nm 以上。Cary 7000 和 Lambda 1050 分光光度计



(a) 中心波长的比较  
(a) Comparison of central wavelength



(b) 半高宽的比较  
(b) Comparison of FWHM

图 7 两款分光光度计实测得到的中心波长和半高宽与数值模拟结果之间的比较

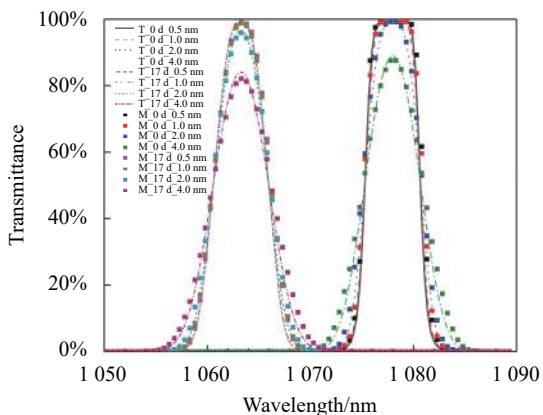
Fig.7 Comparison of central wavelength and FWHM between measured by two types of spectrophotometers and simulated by the model

的实际测量数据与数值模拟结果呈现相同的趋势,差异较小。

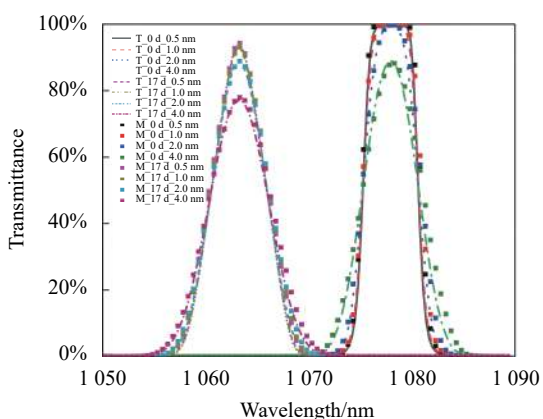
### 3.3 线宽的影响

图 6 与图 7 中的结果验证了卷积模型中发散角对透射光谱的影响。采用两款具有不同发散角、不同生产厂家的分光光度计作为测量设备,也说明模型验证的普适性。其中,由于较新的 Cary 7000 采用了步进电机驱动测试平台,测得的透射光谱具有更高的可靠性。因此,采用 Cary 7000 作为验证线宽影响的实测设备。

Cary 7000 分光光度计配有可拆卸光阑来调节测试光束的发散角。通过改变 Cary 7000 中光阑的孔径,可将发散半角调制为 1°和 2°。当入射光束线宽从 0.5 nm 增加到 4.0 nm 时,透射通带波形在入射角为 0°和 17°时会从矩形退化为三角形,如图 8 所示。



(a) 发散半角为 1° 时  
(a) Divergence half-angle of 1°



(b) 发散半角为 2° 时  
(b) Divergence half-angle of 2°

图 8 在入射角度为 0° 和 17° 时, 不同发散半角情况下, 线宽对透射光谱影响的实测与模拟结果对比 (Cary 7000 测得)

Fig.8 Comparison between measured and simulated results with different divergence half-angles and linewidths under 0° and 17° incidence (measured by Cary 7000)

实际测量得到的光谱 (点状符号) 与数值模拟结果 (现状符号) 一致。从图 8(a) 和图 8(b) 中不难发现, 线宽效应对透射光谱的影响在入射角为 17° 时更为明显: 透射通带形状更快地退化为三角形、透射峰降低更快等。在入射角为 17° 情况下, 较大发散角导致峰值透射率降低更加显著, 半高宽扩展现象也相对更加明显。数值模拟结果与分光光度计实测结果吻合得很好, 也证明了卷积模型描述线宽效应的正确性和数值模拟的准确性。

#### 4 结论

文中首先优化多腔薄膜结构, 有效抑制窄带滤光片透射通带波形坍塌并保留透射通带中心波长漂移

与入射角度之间的高灵敏度。而后通过等离子体辅助反应磁控溅射制备了工作角度为 17° 的 1064 nm 窄带通滤光片样品。该滤光片在正入射情况下, 实测透射通带大于 2.7 nm, 峰值透光率大于 99%, 半高宽小于 6 nm。然后通过对比分光光度计的实际测量和基于模型的数值模拟结果, 分析了不同入射角、发散角和线宽条件下的透射光谱特性。实测结果和数值模拟表明: 非平行光束入射窄带滤光片时, 随着入射角度的增加, 通带中心波长位置蓝移、透射通带形状退化、峰值透射率下降、半高宽扩展等现象逐渐显著。上述退化现象在较大的入射角度和发散角以及线宽的情况下更为明显。

在文中所述的测试条件下, 实际测得的透射光谱与模型的数值模拟结果吻合得很好, 而且采用 Cary 7000 和 Lambda 1050 两款分光光度计的实际测量也说明了模型验证的普适性。模型的有效性得到严格验证的同时, 也证实了数值模拟的高可信度。该结果为今后窄带滤光片等具有高陡直光谱的光学器件的进一步研究、讨论及应用提供了有力的分析手段。

#### 参考文献:

- [1] Zhou Songqing, Huang Ke, Shen Yanlong, et al. Design and experimental investigation of unstable resonator for discharge initiated repetitive-pulsed HF laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(10): 1005002. (in Chinese)
- [2] Wang Shuai, Sun Huayan, Zhao Yanzhong, et al. Method of improving 3D imaging resolution of APD array based on optical phased array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(4): 0406003. (in Chinese)
- [3] Zhang Jiye, Zhang Jianwei, Zeng Yugang, et al. Design of gain region of high-power vertical external cavity surface emitting semiconductor laser and its fabrication [J]. *Acta Phys Sin*, 2020, 69(5): 054204. (in Chinese)
- [4] Yang Tianrui, Xu Huan, Mei Yang, et al. Development of GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(7): 0701012. (in Chinese)
- [5] Liu Y X, Yang G W, Wang Z F, et al. High-power operation and lateral divergence angle reduction of broad-area laser diodes at 976 nm [J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 141: 107145.
- [6] Siegel T, Chen S P. Investigations of free space optical communications under real-world atmospheric conditions [J]. *Wireless Personal Communications*, 2021, 116: 475-490.

- [7] Kumar S, Arora P. Design of multi-beam free space optical communication system for mitigation of atmospheric and geometric nonlinearities [J]. *Journal of Optics*, 2021, 50: 664-670.
- [8] Zhao Taifei, Ma Zhuang, Li Xingshan, et al. Research on line-of-sight channel model for short-range LED optical communication [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(1): 0106001. (in Chinese)
- [9] Duan Shuaijun, Fan Guihua, Zhang Laixian, et al. Laser-echo-power distribution model of large-field cat-eye lens and characteristics analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(10): 1006001. (in Chinese)
- [10] Rancourt J D. Optical Thin Films [M]. Bellingham: SPIE, 1996.
- [11] Macleod H A. Thin-Film Optical Filters [M]. 4th ed. Boca Raton: CRC Press, 2010.
- [12] Yun Kan, Huang Dexiu, Yin Juanjuan, et al. Reflected-intensity distribution of a thin-film filter with oblique incidence of a Gaussian beam under non-parallel case [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(8): 0807003. (in Chinese)
- [13] Liu Huasong, Wang Lishuan, Liu Dandan, et al. Numerical analysis of cone angle effect of optical thin films characteristics [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 0131003. (in Chinese)
- [14] Han K. The influence of beam-cone-angle on the high energy laser induced damage of optical thin film [J]. *Journal of Optics*, 2018, 47: 278-282.
- [15] Jakobs S, Lappschies M, Schallenberg U, et al. Characterization of metal-oxide thin films deposited by plasma-assisted reactive magnetron sputtering [J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(S1): 73-77.
- [16] Schallenberg U, Beatrix P, Lappschies M, et al. Design and manufacturing of high-performance notch filters [C]//Proceedings of SPIE, 2010, 7739: 77391X.
- [17] Xu C, Zhao Y L, Qiang Y H, et al. Comparison of laser-induced damage in Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> single-layer films and high reflectors [J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, 9(1): 013102.