

光锥角对窄带滤光片透射率的影响及补偿方法

张军强 王笑夷 张新洁 颜昌翔 张 滨

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要 全介质膜窄带滤光片因具有优良的光学性能、较强的工艺性和空间环境适应性被广泛应用于空间多光谱遥感仪器中,但锥光束入射导致的中心波长漂移问题严重影响此类窄带滤光片的光谱选择性能。为了研究光锥角对窄带滤光片透射率特性的影响,设计了非规整型全介质膜窄带滤光片,分析了高斯光束倾斜入射窄带滤光片导致透射率的变化,建立了非均匀照度下锥光束正入射时窄带滤光片等效透射率的求解模型,定量求解了等效透射率及中心波长漂移量,并对理论模型进行了实验验证。结果表明,锥光束正入射对窄带滤光片透射率的影响主要表现为中心波长的蓝移;在镀膜工艺相对稳定的基础上,理论模型的等效透射率预测精度优于中心波长的 0.15%。所以,可以使用等效透射率求解模型定量计算锥光束正入射导致窄带滤光片透射率的变化,并利用中心波长漂移量修正后的设计数据指导滤光片镀膜,进而实现窄带滤光片的高精度光谱选择,这为解决全介质膜窄带滤光片因锥光束入射导致的中心波长漂移问题提供了新的技术途径。

关键词 几何光学;窄带滤光片;斜入射;光锥角;透射率

中图分类号 O411.2; O484 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0131001

Effects and Corrections of Incidence Light Cone on Transmission Characteristics of Narrowband Filter

Zhang Junqiang Wang Xiaoyi Zhang Xinjie Yan Changxiang Zhang Bin

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract All-dielectric film narrowband filter is widely used in space-borne multispectral remote sensor owing to its excellent optical capability, manufacturability and environmental adaptability. But center wavelength shift, due to entrance light cone angle, affects its spectral selective power seriously. In order to study effects of incident light cone on transmission characteristics of narrowband filter, an informal dielectric film narrowband filter is designed and manufactured. Changes of transmission characteristics with oblique incidence of Gaussian beam of uneven illumination are analyzed. The count model of effective transmission with vertical incidence light cone is established and verified by spectral calibration. Results show that blue shift of central wavelength is the main influence of incidence light cone on transmission characteristics of all-dielectric film narrowband filter. Prediction accuracy of transmittance calculated by effective transmission model is better than 0.15% of central wavelength. Therefore, count model of effective transmission can be used to calculate the actual transmittance of film narrowband filter with oblique incidence of Gaussian beam, and spectral selective ability of narrowband filter will be improved when the reasonable film design data corrected by center wavelength shift is utilized during film coating. This provides a new technical approach to solve the problem of the wavelength shift of film narrowband filter with vertical incidence light cone.

Key words geometric optics; narrowband filter; oblique incidence; light cone; transmittance

OCIS codes 080.1753; 080.2720; 310.5696; 310.6188

1 引 言

空间多光谱探测对滤光片都要求矩形度高,截

止度深,峰值透射率高^[1]。全介质膜窄带滤光片与金属膜、金属-介质膜滤光片相比具有较高的透射

收稿日期: 2013-05-22; 收到修改稿日期: 2013-06-13

基金项目: 国家 863 计划(2011AA12A103)

作者简介: 张军强(1981—),男,博士,助理研究员,主要从事空间光学遥感仪器研制、光机系统整体性能评价等方面的研究。E-mail: zjq1981_81@163.com

率、较深的截止度、较高的矩形度和较强的空间环境适用性,已经被广泛应用于空间多光谱仪器^[2]。介质膜的一个主要特点是,随着入射角的增大,滤光片的中心波长和通带会向短波方向移动,在光通信领域常用该特性实现波长调谐^[3],但在星载多光谱探测特别是大气探测领域波长漂移将影响仪器的光谱测量精度,进而影响辐射测量精度,降低测量数据的可靠性^[4]。

针对光束倾斜入射引起窄带滤光片的波长漂移问题,俞侃等^[5-6]基于遗传算法对斜入射窄带滤光片膜系进行了优化设计,并基于多光束干涉原理,推导了高斯光束斜入射角度调谐窄带滤光片的反射光强以及透射光强的表达式;方靖岳^[7]研究了入射角度对高反膜及干涉滤光片的影响,用数值法模拟了多层介质膜的工作波长向短波方向移动的现象,并用光程差原理对这一现象进行了分析。

当前,国内外学者解决光束倾斜入射引起滤光片波长漂移问题的主要技术途径是通过优化膜系设计,降低滤光片的角度敏感性,但这种方法具有一定的局限性。譬如,Kochergin^[8]采用多孔氧化硅阵列制作了全角度透射滤光片,然而其制备十分复杂,工艺性和可靠性较低;薛晖等^[9-10]设计了一种高折射率的介质膜和金属膜交替组合的低角度效应窄带透射滤光片,在高斯光束斜入射照明时,中心波长移动较传统法布里-珀罗滤光片(FPF)显著减少,而且特性仍能保持良好,但这种膜系滤光片的峰值透射率和矩形度都不够理想,且热稳定性和化学稳定性较差。在实际工程应用中,锥光束入射是光束倾斜入射的表现形式之一,而对锥光束入射导致窄带滤光片透射率特性的影响及定量补偿,目前尚无系统研究的公开报道。

本文介绍了非规整型全介质膜窄带滤光片的优缺点,分析了高斯光束倾斜入射窄带滤光片导致透射率的变化,建立了非均匀照度下锥光束正入射时窄带滤光片等效透射率的求解模型,定量求解了锥光束正入射时滤光片的透射率变化及中心波长漂移量,并通过工程实践对理论模型进行了实验验证。

2 高斯光束倾斜入射对全介质窄带滤光片透射率的影响

多谱段云与气溶胶探测仪(CAPI)是中国科学院长春光学精密机械与物理研究所承担的我国首颗星载多谱段云与气溶胶偏振测量仪,是我国首颗“碳卫星”上有效载荷之一。CAPI设置380、670、870、

1375、1640 nm共5个光谱通道,其中670、1640 nm波段设置0°、60°、120°三个方向的偏振测量;选用像方远心的透射式系统提高偏振测量精度、系统照度均匀性和光谱一致性;采用窄带滤光片实现多光谱分光,光锥角为10°。CAPI的主要任务是获取高精度的云与气溶胶多光谱偏振测量数据,提高二氧化碳气体的反演精度。

为了满足项目总体对光谱选择精度、矩形度、峰值透射率、截止深度、空间环境适应性等指标要求,采用折射率较高的Nb₂O₅作为高折射率材料,与SiO₂匹配进行膜系设计,以全介质窄带滤光片膜系作为基本结构。为尽可能减小入射角度对滤光片中心波长的影响,在窄带滤光片膜系中采用高折射率材料作为间隔层,采用多腔滤光片膜系设计以提高矩形度,并在窄带滤光片膜系外部增加了截止滤光片膜系再进行统一优化,增强了带外截止的宽度、深度以及峰值透射率。

在薄膜制备技术方面,选用光学性能更佳,膜层吸收少,波长漂移小,致密性、均匀性好的等离子体辅助电子束蒸发的镀膜工艺,采用石英晶体振荡方法控制膜层沉积速率,光学膜厚控制方法控制膜层厚度,保证了薄膜的光学性能和空间环境适应性^[11-12]。670 nm波段的窄带滤光片设计结果如图1所示。

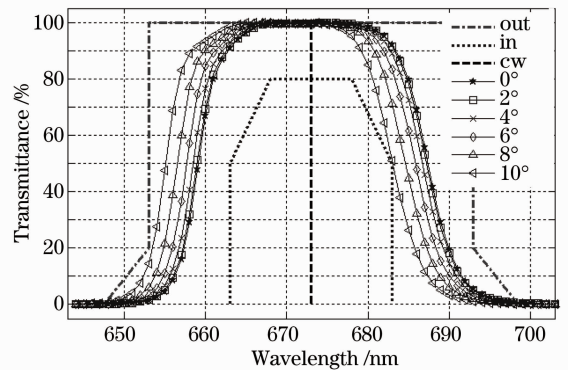


图1 介质膜滤光片透射率曲线

Fig. 1 Transmittance curves of dielectric film filter

对于常规光学薄膜来说,当光线入射角度由0°逐渐变大时,膜系的光谱曲线会向短波方向发生移动,即蓝移;同时光谱还会产生偏振分离,即不同偏振方向的光表现出不同的光谱特性。光谱蓝移和偏振分离的幅度随着入射角的变大而变大。对于窄带滤光片,光谱蓝移使中心波长变短,偏振分离则会使带宽变小、曲线矩形度和峰值透射率变差。优化设计的全介质膜窄带滤光片当入射角为10°时,中心

波长蓝移约为 0.8%，但光谱的偏振分离量很小，对窄带滤光片带宽、矩形度、峰值透射率等光谱性能影响小于 0.1%。

综上所述，在一定倾斜角度范围内，高斯光束倾斜入射对优化设计的全介质薄膜中心波长影响较大，而对带宽、矩形度的影响较小。

3 锥光束正入射时等效透射率的求解模型

普通商业薄膜设计软件无法仿真非均匀照度下的等效透射率^[13]，但在实际工程研制过程中，像面照度的非均匀性客观存在，而滤光片膜系的设计、制备一般都先于光机系统加工、装调进行，在滤光片试制阶段只能通过分光光度计等仪器实现某个视场的透射率测量，无法评估全视场的综合透射率。所以，深入研究锥光束入射对滤光片等效透射率的影响，并定量求解等效透射率显得尤为必要。

对窄带滤光片而言，高斯光束倾斜入射时，滤光片透过中心波长将发生蓝移；光锥正入射时，滤光片透过中心波长发生偏移的同时透射率曲线的形状也将发生变化；而光锥倾斜入射时，滤光片的等效透射率定量求解将变得更加复杂。为了消除光束倾斜入射导致的谱线漂移，远心光路在工程中得到了广泛的应用，但光锥角必然存在^[14-15]，非均匀照度下锥光束正入射是实际工程应用中遇到的常见问题，也是讨论的重点。

图 2 为光锥垂直入射窄带滤光片的示意图，图中 θ 为光锥角； H 为光锥顶点距离滤光片等效距离； r 为光锥角 ζ 对应的滤光片通光半径， R 为光锥角 θ 对应的滤光片通光半径； l 为光锥角 ζ 对应的圆锥母线， L 为光锥角 θ 对应的圆锥母线。

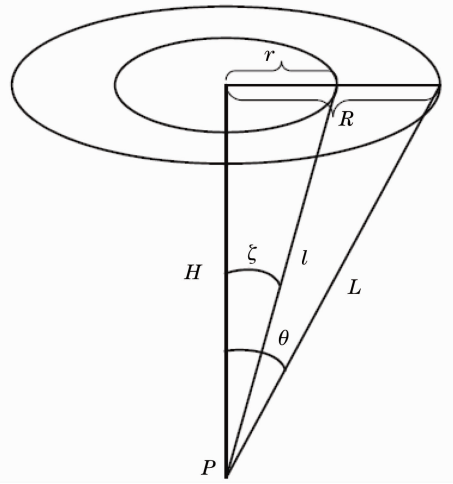


图 2 光锥垂直入射窄带滤光片的示意图
Fig. 2 Light cone vertical incidence on a filter

滤光片在波长 λ 处的等效透射率为

$$T(\lambda) = \frac{\iint E(\zeta, \lambda) \tau(\zeta, \lambda) dA}{E(\lambda) A}, \quad (1)$$

式中 $E(\zeta, \lambda)$ 为滤光片光锥角 ζ 位置波长为 λ 的照度； $\tau(\zeta, \lambda)$ 为滤光片倾斜角 ζ 入射时波长为 λ 的透射率，可以采用商业薄膜设计软件 (TFCalc, Software Spectra Inc 等) 数值计算的结果； A 为光锥在滤光片上投影面积，由光锥角 θ 决定。

(1) 式有效解决了普通商业薄膜设计软件无法仿真非均匀照度下的等效透射率问题。滤光片位于 CAPI 的远心光路中，系统像面照度均匀性优于 98%，滤光片位置单个视场光锥的照度均匀性则优于 99.9%。所以，对于同一视场、相同波长的辐照度 $E(\zeta, \lambda)$ 可以认为是一定值，即

$$E(\zeta, \lambda) = E(\lambda). \quad (2)$$

由 (1)、(2) 式可得

$$T(\lambda, \theta) = \frac{\iint \tau(\zeta, \lambda) dA}{A} = \frac{\int_0^R \tau(\zeta, \lambda) 2\pi r dr}{\pi R^2} = \frac{2\pi \int_0^\theta \tau(\zeta, \lambda) H \tan \zeta \frac{H}{\cos \zeta} d\zeta}{\pi (H \tan \theta)^2} = \frac{2 \int_0^\theta \tau(\zeta, \lambda) \frac{\tan \zeta}{\cos \zeta} d\zeta}{\tan^2 \theta}, \quad (3)$$

由 (3) 式可知，照度均匀光束以一定光锥角垂直入射窄带滤光片时，影响滤光片等效透射率的主要因素是光锥角 θ 和膜系不同入射角度下的透射率 $\tau(\zeta, \lambda)$ ，与入射距离 H 及入射光的光谱辐照度 $E(\lambda)$ 无关。

4 实验验证

为了验证等效透射率求解模型的正确性和计算

精度，在 CAPI 中心波长 670 nm 的窄带滤光片研制中进行了工程应用，具体步骤如下：

1) 以高斯光束正入射为设计基准，将中心波长调整为要求的 670 nm，并得到高斯光束在 0° 、 2° 、 4° 、 6° 、 8° 、 10° 共 6 种入射角度下滤光片的透射率；

2) 利用 Matlab 软件对不同倾斜角 ζ 入射时的滤光片透射率进行二次曲线拟合，求解滤光片透射

率与入射角之间的函数 $\tau(\zeta, \lambda)$;

3) 利用(3)式求解滤光片在锥光束正入射时的等效透射率,利用相关系数法^[16-17]计算滤光片的中心波长漂移量,并利用中心波长漂移量修正后的设计数据指导滤光片镀膜;

4) 利用分光光度计实测滤光片高斯光束正入射时的透射率,并与理论设计值进行对比,验证设计的可行性、镀膜工艺的稳定性和波长控制精度;

5) 将滤光片装在实际的工程样机中进行光谱定标,实测滤光片在锥光束入射时的等效透射率,并与仿真值进行对比,验证等效透射率求解模型的正确性和计算精度。

图3中给出了中心波长修正后0°和10°倾斜入射角时的透射率设计曲线、分光光度计实测滤光片高斯光束正入射(即倾斜角为0°)时的透射率曲线、

等效透射率的理论计算曲线以及工程样机光谱定标实测的探测器响应曲线,不同透射率曲线的中心波长漂移量(CWLD)及相关性如表1、2所示。

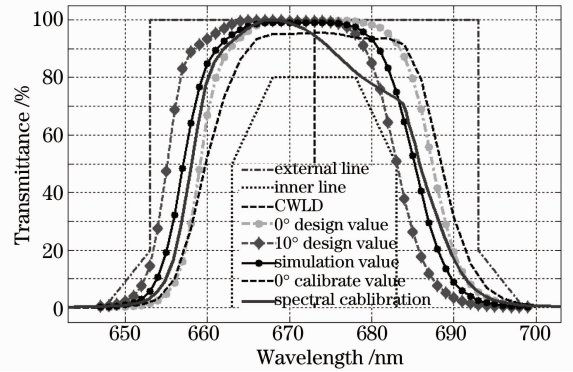


图3 滤光片等效透射率模拟值与实测值对比
Fig. 3 Comparison of simulated equivalent transmittance and spectral calibration

表1 不同透射率曲线的中心波长漂移量

Table 1 Center wavelength drift for different transmittance curves

CWLD /nm	0°	10°	Simulation value	0° calibration	Spectral calibration
0°	0	-4.10	-2.08	0.88	-1.36
10°	4.10	0	1.99	4.98	2.71
Simulation value	2.08	-1.99	0	2.99	0.73
0° calibration	-0.88	-4.98	-2.99	0	-2.19
Spectral calibration	1.36	-2.71	-0.73	2.19	0

表2 不同透射率曲线的相关性

Table 2 Correlation among different transmittance curves

Correlation	0°	10°	Simulation value	0° calibration	Spectral calibration
0°	1	0.9998	0.9998	0.9987	0.9955
10°	0.9998	1	0.9996	0.9985	0.9952
Simulation value	0.9998	0.9996	1	0.9989	0.9958
0° calibration	0.9987	0.9985	0.9989	1	0.9941
Spectral calibration	0.9955	0.9952	0.9958	0.9941	1

由表1、2和图3可知:

1) 优化设计的非规整型全介质膜能够满足高矩形度、高透射率和深截止的需求,镀膜工艺的稳定性和波长控制精度较好,滤光片透射率实测值与理论设计值平均偏差0.88 nm,约为中心波长的0.13%;

2) 等效透射率理论求解模型正确,计算精度较高,10°光锥角正入射时的等效透射率实测值与仿真计算值平均偏差0.73 nm,约为中心波长的0.11%,误差主要来源于镀膜的波长控制误差、光谱定标的波长误差等几方面;

3) 等效透射率实测曲线在670~684 nm之间有明显的下凹(半峰全宽位置无明显变化),这主要

是由工程样机光学镜头的透射率和Si探测器的光谱响应综合作用的结果。

综上所述,锥光束正入射时介质膜滤光片的中心波长将发生蓝移,可以利用理论模型定量预测等效透射率并修正镀膜设计,等效透射率求解精度优于中心波长的0.15%,误差主要来源于透射率测量、镀膜波长控制、等效透射率模型计算等。

5 结 论

锥光束入射导致的全介质膜窄带滤光片中心波长蓝移制约着其在多光谱遥感领域中的应用,而现有技术条件下的低角度效应膜系在透射率、矩形度、截止深度和空间环境适应性等方面又不具有优势,锥

光束入射窄带滤光片的等效透射率定量求解具有一定的理论和实践意义。

重点研究了非均匀照度下锥光束正入射时滤光片等效透射率的求解,提出了通过定量补偿介质膜滤光片中心波长蓝移而提高光谱选择精度的思想,为解决光束正入射引起的滤光片波长漂移问题提供了新的、可行的技术方案。实验证明,膜系设计时无须过分追求膜系的低角度敏感性而牺牲其他光学指标和环境适应性,只需根据膜系的理论设计结果,利用理论模型求解锥光束正入射时的等效透射率,计算滤光片的中心波长漂移量,并利用中心波长漂移量修正后的设计数据指导滤光片镀膜,即可实现窄带滤光片的高精度光谱选择。

参 考 文 献

- 1 Yao Liying, Jin Yonghao, Shao Jianda, *et al.*. Design of narrow and wide band-pass filter [J]. *Optical Instruments*, 2001, 23(5-6): 19-22.
姚李英, 金永浩, 邵建达, 等. 超宽超窄矩形带通滤光片的设计 [J]. *光学仪器*, 2001, 23(5-6): 19-22.
- 2 Wang Duoshu, Xiong Yuqing, Chen Tao, *et al.*. Applications of optical thin film technology in China's aerospace industry [J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2012, 32(8): 710-716.
王多书, 熊玉卿, 陈 焱, 等. 空间光学薄膜技术 [J]. *真空科学与技术学报*, 2012, 32(8): 710-716.
- 3 L Domash, M Wu, N Nemchuk, *et al.*. Tunable and switchable multiple-cavity thin film filters [J]. *Lightwave Technol*, 2004, 22(1): 126-135.
- 4 Zhou Haijin, Liu Wenqing, Si Fuqi, *et al.*. Spectral calibration for space-borne differential optical absorption spectrometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(11): 2881-288.
周海金, 刘文清, 司福祺, 等. 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪光谱定标技术研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(11): 2881-2885.
- 5 Yu Kan, Liao Jianfeng, Zhang Xiaodan, *et al.*. Optimal design of narrowband filter in oblique incidence based on genetic arithmetic [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(2): 181-185.
俞 侃, 廖剑锋, 张晓丹, 等. 基于遗传算法的斜入射窄带滤光片膜系优化设计 [J]. *光子学报*, 2013, 42(2): 181-185.
- 6 Yu Kan, Ji Zijuan, Huang Dexiu, *et al.*. Transmitted-intensity distribution of a narrowband thin-film filter with oblique incidence of Gaussian beam under non-parallel case [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(10): 1013001.
俞 侃, 吉紫娟, 黄德修, 等. 非平行条件下高斯光束斜入射窄带滤光片的透射光强分布 [J]. *光学学报*, 2011, 31(10): 1013001.
- 7 Fang Jingyue. Analysis for reflectivity of high reflective film and transmittance of interference filter with different incident angles [J]. *Physical Experiment of College*, 2013, 26(1): 12-13.
方靖岳. 入射角度对高反膜及干涉滤光片的影响 [J]. *大学物理实验*, 2013, 26(1): 12-13.
- 8 V Kochergin. *Omnidirectional Optical Filters* [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2003.
- 9 Xue Hui, Zheng Zhengrong, Gu Peifu, *et al.*. A novel filter with low angle effect [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(6): 3983-3987.
薛 晖, 郑臻荣, 顾培夫, 等. 一种新型的低角度效应的滤波器 [J]. *物理与工程*, 2009, 58(6): 3983-3987.
- 10 Dong Xiaoyan, Gong Bin, Li Yali. Study on optical film and relevant applications [J]. *Physics and Engineering*, 2012, 22(5): 14-18.
董小燕, 龚 斌, 李雅丽. 光学薄膜及其应用方面的研究 [J]. *物理与工程*, 2012, 22(5): 14-18.
- 11 Chen Hong, Gao Jinsong, Song Qi, *et al.*. Si modified coating on SiC substrate by ion beam assisted deposition [J]. *Opt Precision Eng*, 2008, 16(3): 381-385.
陈 红, 高劲松, 宋 琦, 等. 离子辅助制备碳化硅改性薄膜 [J]. *光学精密工程*, 2008, 16(3): 381-385.
- 12 Wang Tongtong, Gao Jinsong, Wang Xiaoyi, *et al.*. Preparation of $Ge_{1-x}C_x$ thin film by e-gun evaporation assisted with ion source [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(4): 715-718.
王彤彤, 高劲松, 王笑夷, 等. 离子源辅助电子枪蒸发制备 $Ge_{1-x}C_x$ 薄膜 [J]. *光子学报*, 2007, 36(4): 715-718.
- 13 Zhang Jinlong. Research and Fabrication of Metal-Dielectric Thin Film Devices [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009. 40.
张锦龙. 金属介质薄膜结构的研究与制备 [D]. 杭州: 浙江大学, 2009. 40.
- 14 F Auriol, J F Léon, J Y Balois, *et al.*. Multidirectional visible and shortwave infrared polarimeter for atmospheric aerosol and cloud observation; OSIRIS (observing system including polarisation in the solar infrared spectrum) [C]. *SPIE*, 2008, 7149: 7149D.
- 15 E Waluschkaa, C J Bruegge, X Xiong, *et al.*. Pre-launch optical tests of MODIS and MISR [C]. *SPIE*, 2008, 7081: 708108.
- 16 R A Neville, L Sun, K Staenz. Detection of spectral line curvature in imaging spectrometer data [C]. *SPIE*, 2003, 5093: 144-154.
- 17 Zhang Junqiang, Shao Jianbing, Yan Changxiang, *et al.*. Data processing of on-orbit spectral calibration of space-borne high resolution imaging spectrometer [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(2): 175-181.
张军强, 邵建兵, 颜昌翔, 等. 成像光谱仪星上光谱定标的数据处理 [J]. *中国光学*, 2011, 4(2): 175-181.

栏目编辑: 韩 峰