

基于包-全法的红外滤光片光学参数测量方法

李凯朋,王济洲,王多书,王云飞,董茂进

(兰州空间技术物理研究所 无锡泓瑞航天科技有限公司,江苏 无锡 230000)

摘要: 为了研究准确性更高的复杂多层膜光学参数测量方法,测量实际镀制红外带通滤光片的光学参数,对红外滤光片研制过程的设计优化与工艺的改进具有重要的指导作用。首先,在研究传统薄膜光学参数光谱测量方法的基础上,提出了包-全法,并研究了该方法的基本思想、物理模型以及优化算法;其次,设计制备了 2 000~8 000 nm 谱段内膜料单层膜和高透射率、宽截止中波带通红外滤光片,通过对比测量单层膜光学参数反演计算光谱与实测光谱的差异,验证了包-全法测量膜料单层膜光学参数的准确度及有效性,依据测量结果确定了膜料色散关系,甄别了膜层工艺的优劣;最后,采用包-全法与全光谱拟合反演法对红外滤光片的光学参数作了对比测量验证。结果证明:该方法能够准确测量红外滤光片的光学参数,测量结果可用于指导修正设计与工艺之间的匹配性,进而研制了性能更好的红外滤光片。

关键词: 红外滤光片; 光学参数; 包-全法; 全光谱拟合反演法

中图分类号: O484 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0913004

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

Li Kaipeng, Wang Jizhou, Wang Duoshu, Wang Yunfei, Dong Maojin

(Wuxi Hongrui Science and Technology Company Limited, Lanzhou Institute of Space Technology and Physics, Wuxi 230000, China)

Abstract: The high performance measuring methods to measure the optical parameters of infrared band-pass filter with complex multilayer were significantly important to improve the design and technology of the infrared filter development. Firstly, the traditional spectral measurement methods were fully analyzed, and an envelope-full spectral fitting inversion method was proposed. The basic idea, physical model and optimization algorithm of the new method were discussed in detail. Secondly, a technique for fabricating a single-layer film and infrared filter with high transmittance and wide cut-off medium-band bandpass in the 2 000–8 000 nm spectral range was designed, and the experiments to compare the difference between the actual spectrum and the spectrum calculated with the optical parameters measured by the new method were performed. The results show that the new method not only has very high precision performance, but also can identify the quality of the film process and can determine the dispersion of the film by the

收稿日期:2019-04-05; 修订日期:2019-05-15

基金项目:无锡市科技发展基金(CGE02G1622)

作者简介:李凯朋(1988-),工程师,硕士,主要从事光学薄膜技术等方面的研究。Email:kaipeng132@163.com

measurement results. The another set of experiments on the measurement of optical parameters of infrared filter illustrates that, compared with traditional full spectrum fitting inversion method, the new method not only has high-precision measurement results, but also can quickly and accurately locate the divergence between the actual plating thickness and the design thickness with the measured optical parameters, then a better high-performance infrared filter was developed.

Key words: infrared filter; optical parameters; envelope-full spectral fitting inversion method; full spectral fitting inversion method

0 引言

高精度红外滤光片是空间光谱成像仪、红外探测器等精密光学仪器光谱选择的重要手段之一。光谱特性(如:透射率或反射率)是衡量滤光片性能优劣的重要指标。红外滤光片研制过程,如果能快速准确测量镀制膜层的光学参数,对于研究膜层材料光学特性、改善滤光片光谱性能都有重要作用。

目前,常用薄膜光学参数光谱测量方法包括:包络线法、椭圆偏振法、全光谱拟合反演法等。其中,包络线法仅用于测量单层膜的光学参数,测量效率高,准确性低^[1-3]。椭圆偏振法多用于层数较少的膜系结构,测量准确性较高,但该方法物理模型复杂,计算效率低^[4],测量稳定性差^[5]。全光谱拟合反演法测量范围广、准确性和效率较高,但该方法对物理模型和优化算法的要求很高,尤其测量膜层数较多或膜层材料吸收较大膜系时,测量的准确性和效率都会急剧下降^[6-7]。上述研究表明,针对膜层数目较多的红外滤光片薄膜样品光学参数测量,尚无准确有效的测量方法。因此,文中在研究传统薄膜光学参数测量方法基础上,结合实际镀膜经验,研究了包-全法,用于测量膜层数较多红外滤光片的光学参数。

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{j=1}^K \begin{pmatrix} c_{1j} + ic_{2j} & [i(s_{1j}n_j - s_{2j}k_j) - (s_{1j}k_j + s_{2j}n_j)] / (n_j^2 + k_j^2) \\ (s_{1j}k_j - s_{2j}n_j) + i(s_{1j}n_j + s_{2j}k_j) & c_{1j} + ic_{2j} \end{pmatrix} \right\} \begin{pmatrix} 1 \\ \eta_s \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: $c_{1j} = \cos \delta_{1j} \text{ch} \delta_{2j}$; $c_{2j} = \sin \delta_{1j} \text{sh} \delta_{2j}$; $s_{1j} = \sin \delta_{1j} \text{ch} \delta_{2j}$; $s_{2j} = -\cos \delta_{1j} \text{sh} \delta_{2j}$, 其中, $\delta_{1j} = 2\pi n_j d_j / \lambda$, $\delta_{2j} = -2\pi k_j d_j / \lambda$ 。膜系的透射率为:

$$T = 4n_0 n_s / (n_0 B + C)(n_0 B + C)^* \quad (2)$$

由公式(2)可见,透射率 T 是薄膜系统各膜层光学参数 n 、 k 、 d 的多元函数。

1 包-全法基本思想和物理模型

1.1 包-全法基本思想

包-全法是在包络线法和全光谱拟合反演法的基础上,利用包络线法计算效率高、全光谱拟合反演法计算准确性高的优点,取长补短,结合实际镀膜经验提出的用于测量红外滤光片光学参数的测量方法^[8]。该方法测量:(1) 确定镀膜工艺,设计制备红外滤光片以及各膜层材料的单层膜样品,并测量样品透射率光谱;(2) 通过单层膜样品透射率光谱构建包络线法测量的极大值和极小值包络,优化求解膜层折射率和消光系数近似值,并将此计算结果作为全光谱拟合反演法优化求解时折射率和消光系数的初始值;(3) 采用全光谱拟合反演法优化求解各膜层材料折射率和消光系数的精确值;(4) 依据测量的红外滤光片样品透射率以及步骤(3)测量的各膜层材料的折射率和消光系数,再次采用全光谱拟合反演法优化求解红外滤光片各膜层的物理厚度,最终获得红外滤光片在测量谱段内的所有光学参数。

1.2 包-全法的物理模型

1.2.1 光学薄膜基础理论

由光学薄膜矩阵传输理论,推导光波垂直入射条件下 K 层膜系的特征矩阵为:

1.2.2 包-全法的优化模型

以透射光谱为测量对象,依据膜系透射率实际测量值 $t(\lambda)$ 和理论计算值 $T(\lambda)$ 的差值构建评价函数形式如下:

$$\text{Merit} = \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} \omega(\lambda) [T(\lambda) - t(\lambda)] d\lambda \quad (3)$$

式中： λ_{lb} 、 λ_{ub} 分别为测量波长范围的上下界； $\omega(\lambda)$ 为波长 λ 处的权重因子。

以评价函数取最小值为目标函数，设置约束条

$$\min \text{Merit}(i) = \left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^M \left(\frac{T(d_{1j}, d_{2j}, \dots, d_{mj}, \dots, d_{kj}, \lambda_j) - t(\lambda_j)}{\delta_{\lambda_j}} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (4)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} n_{lbmi} \leq n_{mi} \leq n_{ubmi} \\ k_{lbmi} \leq k_{mi} \leq k_{ubmi} \\ d_{lbmi} \leq d_{mi} \leq d_{ubmi} \end{cases} \quad (5)$$

公式(4)为目标函数，公式(5)为约束条件。其中 M 表示小区间内透射率的取点数目； k 表示膜层的总数；下标 lb 、 ub 、 m 、 i 依次表示下限、上限、膜层序号、小区间序号。依据包络线法测量的光学参数设计约束条件，采用遗传算法与非线性最小二乘法相结合的综合优化算法进行数值求解。第 i 个小区间光学参数的求解过程，Merit 不断逼近最小值，光学参数的优化结果也不断逼近实际膜层光学参数，最终取目标函数最小时，求解的光学参数作为实际膜层的光学参数。然后依次求解剩余 $N-1$ 个区间各膜层的光学参数，可得到膜系在整个测量波段的光学参数。

2 实际样品测量验证及结果分析

2.1 红外滤光片的设计与制备

文中设计并制备了一种高透射率、宽截止中波红外滤光片开展测量验证。该滤光片光谱要求：3 500~3 900 nm 平均透射率大于 90%，通带波纹深度小于 0.5 Tp，截止要求小于 3 420 nm，3 920~5 800 nm 平均透射率小于 0.5%，陡度小于 2%。

2.1.1 膜系设计

该滤光片设计采用长波通+短波通构建通带，并结合基底完成通带外截止。膜料组合选用 Ge/ZnS(基底为 Si)。设计结构为 $0.6(0.5HL0.5H)^8 0.8(0.5HL0.5H)^8 (0.5HL0.5H)^{13}$ 基底 $(0.5HL0.5H)^{13}$ ，其中 H 表示 Ge 膜层厚度为一个基本厚度，L 表示 ZnS 膜层厚度为一个基本厚度，基本厚度为光学厚度中心波长的四分之一。

2.1.2 工艺制备

滤光片制备设备使用 DENTON INTEGRITY-39 全自动光学镀膜机，监控方式为晶振监控，镀膜过程，控制镀膜本底真空抽至 $\leq 3 \times 10^{-5}$ torr，基片加热温度 150 °C，保温时间 60 min，镀膜前需用离子束轰击清洗基底，膜层交替沉积过程，ZnS 采用电阻蒸

件，形成光学参数求解的数值计算物理模型。将测量波长范围 $\lambda_{\min}:\lambda_{\max}$ 分割为 N 个区间，第 i 个区间上数值优化的物理模型如下：

发，沉积速率为 1 nm/s，Ge 采用电子束蒸发，沉积速率为 0.4 nm/s。制备的滤光片光谱如图 1 所示， $T = 4n_0n_s / (n_0B + C)(n_0B + C)^*$ 。

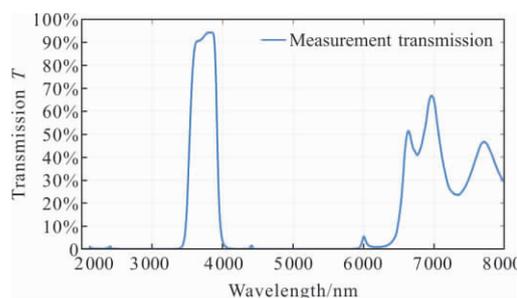


图 1 中波红外滤光片透射率光谱曲线

Fig.1 Transmission spectrum curve of medium wave infrared filter

2.2 红外滤光片各膜层材料光学参数测量及结果分析

2.2.1 膜层材料单层膜的设计与制备

依据 2.1.1 滤光片研制的膜料镀制工艺，在 Ge 基底上沉积设计厚度为 1 500 nm 的 ZnS 膜层，制备 ZnS 单层膜样品；在 ZnSe 基底上沉积设计厚度为 1 200 nm 的 Ge，制备 Ge 单层膜样品。采用 PerkinElmer 红外光谱仪测量 ZnS、Ge 单层膜的透射率光谱曲线。

2.2.2 膜层材料单层膜光学参数测量

依据测量 ZnS、Ge 单层膜 2 000~8 000 nm 波段范围的透射率，采用包-全法，测量该波段 ZnS 和 Ge 膜料的光学参数，并将测量的折射率及消光系数作曲线拟合，折射率拟合采用 Cauchy 色散关系 $n(\lambda) = A_0 + A_1/\lambda^2 + A_2/\lambda^4$ ，消光系数拟合采用 Exponential 负指数函数拟合表达式 $k(\lambda) = B_1 \exp(B_2/\lambda)$ 。拟合参数结果如表 1 所示，拟合曲线如图 2、3 所示。

表 1 两种材料折射率和消光系数的拟合常数

Tab.1 Fitting constants of two materials' refractive index and extinction coefficient

Fitting constants	A_0	A_1	A_2	B_1	B_2
Fitting results					
ZnS	2.285 6	0	0.745 75	0.000 112 8	7.935 3
Ge	4.192 4	0.451 05	0.439 69	0.000 217 9	8.013 7

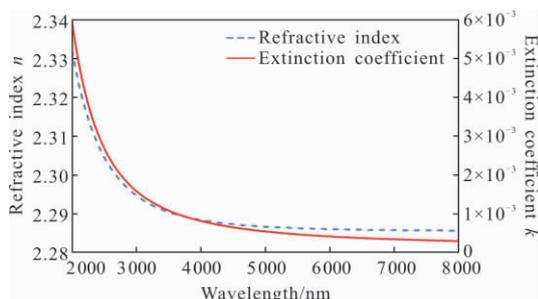


图 2 ZnS 膜折射率和消光系数随波长的变化曲线

Fig.2 Refractive index and extinction coefficient of the ZnS film vs wavelength

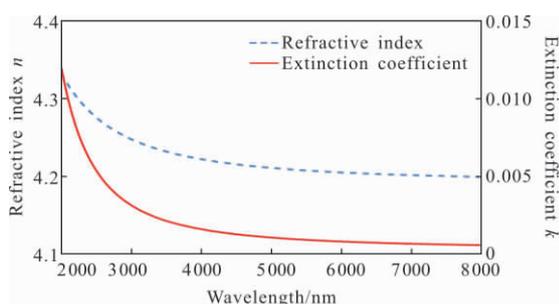


图 3 Ge 膜折射率和消光系数随波长的变化曲线

Fig.3 Refractive index and extinction coefficient of the Ge film vs wavelength

测量膜料单层膜厚度:ZnS 为 1 495.3 nm,与设计厚度相对误差为 0.31%;Ge 为 1 198.5 nm,与设计厚度相对误差为 0.14%。

2.2.3 膜层材料单层膜光学参数反演光谱与实测光谱对比

依据包-全法测量的膜层材料单层膜光学参数反演计算 ZnS、Ge 单层的透射率光谱,并与实测光谱进行对比,如图 4、5 所示。

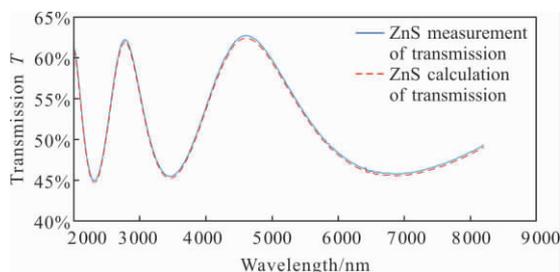


图 4 测量的 ZnS 单层光学参数反演计算透射率光谱与实测透射率光谱对比图

Fig.4 Comparison of the measured transmittance spectrum and calculated transmittance spectrum by ZnS single-layer optical parameters

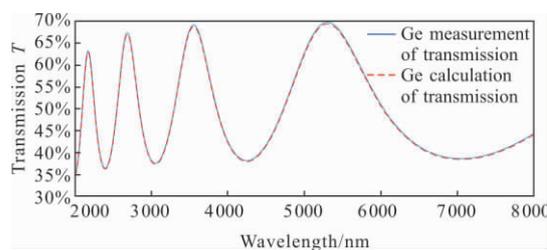


图 5 测量的 Ge 单层光学参数反演计算透射率光谱与实测透射率光谱对比图

Fig.5 Comparison of the measured transmittance spectrum and calculated transmittance spectrum by Ge single-layer optical parameters

由图 4、5 可见,ZnS、Ge 单层反演计算光谱与实测光谱基本重合,因此采用包全法测量的膜料单层膜光学参数准确性很高。

2.2.4 测量结果分析

(1) 由图 2、3 可见,2 000~8 000 nm 谱段,测量的 ZnS 与 Ge 两种膜料折射率及消光系数都随着波长的增大而减小,折射率变化率都小于 10^{-5} ,消光系数都小于 10^{-3} ,结果表明:测量谱段两种材料均为正常色散,膜层折射率稳定,吸收很小,该镀膜工艺参数获得的膜料膜层光谱特性优良,利于高透射率、宽截止红外滤光片产品的研制;

(2) 由图 4、5 以及测量膜料单层膜厚度结果可见,测量的膜料单层膜光学参数准确度很高。其中,两种膜料测量厚度与设计值相对误差均小于 0.4%,表明该工艺条件下膜层镀制的实际厚度与设计值接近。另外,厚度测量结果中,与 Ge 相比,ZnS 测量厚度的相对误差较大。分析原因:ZnS 镀膜蒸发过程,蒸发舟的导电性、膜料状态等会有微小变化,导致膜料蒸发过程沉积速率存在波动,影响了实际镀膜厚度;而 Ge 镀膜蒸发过程,电子枪蒸发沉积状态相对稳定,实际镀膜监控厚度准确。

2.3 红外滤光片光学参数测量及结果分析

2.3.1 红外滤光片光学参数测量

依据图 1 红外滤光片在 2 000~8 000 nm 谱段范围的实测透射率,采用全光谱拟合反演法和包-全法测量实际滤光片各膜层的厚度,并与设计值进行比较。测量结果如表 2、3 所示。

根据表 2、3 测量的实际膜层厚度,以及表 1、图 2、3 所测量的镀膜材料折射率和消光系数,再次

反演计算该滤光片的透射率，并与实际测量的透射率进行对比，如图 6 所示。

表 2 中波红外滤光片短波通膜层厚度测量结果

Tab.2 Thickness measurement results of short wave pass film in medium wave infrared filter

Layers	Material	Design thickness /nm	Full spectral fitting inversion thickness /nm	Relative error	Envelope-full spectral fitting inversion thickness /nm	Relative error
1	ZnS	659.95	662.28	0.35%	660.89	0.14%
2	Ge	303.13	305.32	0.72%	304.21	0.36%
3	ZnS	527.66	522.68	0.94%	525.12	0.48%
4	Ge	303.48	300.75	0.90%	302.06	0.47%
5	ZnS	506.07	501.31	0.94%	503.64	0.48%
6	Ge	286.56	283.99	0.90%	285.23	0.47%
7	ZnS	512.54	507.71	0.94%	510.08	0.48%
8	Ge	287.33	284.76	0.90%	285.99	0.47%
9	ZnS	508.75	503.96	0.94%	506.31	0.48%
10	Ge	281.94	279.42	0.89%	280.63	0.46%
11	ZnS	517.68	512.80	0.94%	515.19	0.48%
12	Ge	279.39	276.90	0.89%	278.09	0.46%
13	ZnS	503.47	498.74	0.94%	501.05	0.48%
14	Ge	290.13	287.53	0.90%	288.78	0.47%
15	ZnS	512.09	507.27	0.94%	509.63	0.48%
16	Ge	273.15	270.72	0.89%	271.88	0.46%
17	ZnS	515.96	511.10	0.94%	513.48	0.48%
18	Ge	286.72	284.15	0.90%	285.39	0.47%
19	ZnS	513.91	509.07	0.94%	511.44	0.48%
20	Ge	282.55	280.02	0.89%	281.24	0.46%
21	ZnS	504.11	499.37	0.94%	501.69	0.48%
22	Ge	288.64	286.05	0.90%	287.30	0.47%
23	ZnS	530.84	525.83	0.94%	528.29	0.48%
24	Ge	291.81	289.19	0.90%	290.45	0.47%
25	ZnS	511.39	502.37	1.76%	507.89	0.68%
26	Ge	275.21	272.01	1.16%	273.63	0.57%
27	ZnS	285.41	275.36	3.52%	280.22	1.82%

表 3 中波红外滤光片长波通膜层厚度测量结果

Tab.3 Thickness measurement results of long wave pass film in medium wave infrared filter

Layers	Material	Design thickness /nm	Full spectral fitting inversion thickness /nm	Relative error	Envelope-full spectral fitting inversion thickness /nm	Relative error
1	Ge	109.18	110.47	1.18%	109.53	0.32%
2	ZnS	277.38	280.36	1.07%	278.57	0.43%
3	Ge	141.88	143.50	1.14%	142.39	0.36%
4	ZnS	277.95	280.93	1.07%	279.14	0.43%
5	Ge	161.97	163.79	1.12%	162.58	0.38%
6	ZnS	325.57	329.03	1.06%	327.00	0.44%
7	Ge	163.87	165.71	1.12%	164.49	0.38%
8	ZnS	340.27	343.87	1.06%	341.77	0.44%
9	Ge	154.67	156.41	1.13%	155.24	0.37%
10	ZnS	296.89	300.06	1.07%	298.18	0.43%
11	Ge	160.94	162.75	1.12%	161.55	0.38%
12	ZnS	332.66	336.18	1.06%	334.12	0.44%
13	Ge	174.16	176.11	1.11%	174.84	0.39%
14	ZnS	318.39	321.78	1.06%	319.78	0.44%
15	Ge	163.19	165.03	1.12%	163.81	0.38%
16	ZnS	304.74	307.98	1.07%	306.06	0.43%
17	Ge	164.81	166.65	1.12%	165.43	0.38%
18	ZnS	314.99	318.34	1.06%	316.36	0.44%
19	Ge	161.34	163.15	1.12%	161.94	0.38%
20	ZnS	343.06	346.69	1.06%	344.58	0.44%
21	Ge	166.50	168.36	1.12%	167.13	0.38%
22	ZnS	323.01	326.44	1.06%	324.42	0.44%
23	Ge	153.33	155.06	1.13%	153.90	0.37%
24	ZnS	300.05	303.15	1.02%	301.35	0.43%
25	Ge	171.20	173.01	1.05%	171.86	0.38%
26	ZnS	311.77	314.98	1.02%	313.12	0.44%
27	Ge	151.21	152.82	1.05%	151.76	0.37%
28	ZnS	248.92	251.51	1.03%	249.96	0.42%
29	Ge	102.56	103.69	1.09%	102.88	0.30%
30	ZnS	181.71	183.62	1.04%	182.41	0.39%
31	Ge	118.79	120.08	1.07%	119.19	0.33%
32	ZnS	252.96	255.59	1.03%	254.03	0.42%
33	Ge	118.72	120.01	1.07%	119.12	0.33%
34	ZnS	219.68	221.97	1.03%	220.57	0.41%
35	Ge	87.46	88.43	1.10%	87.69	0.27%
36	ZnS	204.54	206.68	1.04%	205.36	0.40%
37	Ge	118.76	120.05	1.07%	119.16	0.33%
38	ZnS	258.48	261.17	1.03%	259.57	0.42%
39	Ge	91.15	92.16	1.10%	91.41	0.28%
40	ZnS	210.35	212.55	1.04%	211.20	0.40%
41	Ge	82.01	82.93	1.11%	82.22	0.26%
42	ZnS	232.64	235.06	1.03%	232.03	0.26%
43	Ge	290.67	285.67	1.75%	287.12	1.24%
44	ZnS	252.87	249.35	1.41%	250.83	0.81%
45	Ge	51.54	48.00	7.38%	49.80	3.50%

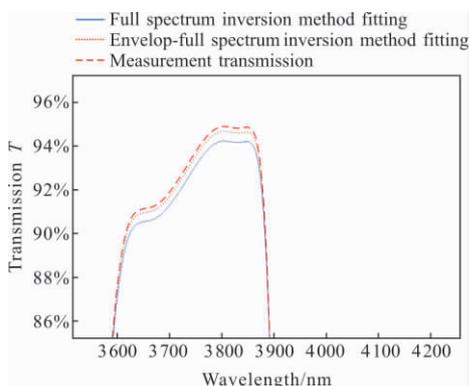


图 6 中波红外滤光片测量光谱与反演计算光谱对比图

Fig.6 Comparison of spectral spectra and inversion calculated spectra of medium wave infrared filter

2.3.2 红外滤光片研制的设计及工艺改进

红外滤光片研制过程,一般滤光片设计中,靠近基底与空气的几层都是厚度相对敏感的匹配层,微小的厚度误差都会影响通带透射率。由依据表 2、3 包-全法测量的滤光片各膜层厚度与设计值的偏差可见,靠近基底与空气的膜层与设计厚度相对误差较大。因此依据包-全法测量的滤光片各膜层实际厚度修正误差较大的敏感层,再次进行膜系镀制,并将研制出的红外滤光片透射率光谱与图 1 光谱比较,如图 7 所示。

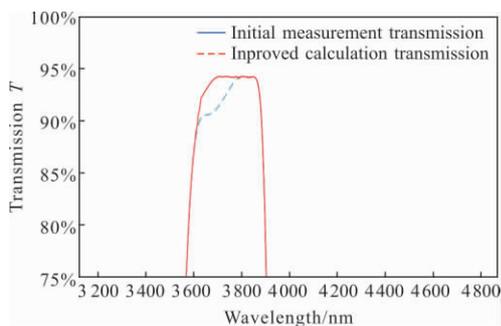


图 7 改进后红外滤光片实测透射率光谱与改进前对比图

Fig.7 Comparison of improved infrared filter measured transmittance spectrum and front measured transmittance spectrum

由图 7 可见,修正后的滤光片透射率明显提升,通带内的波纹深度也明显减少。

2.3.3 测量结果及分析

(1) 由表 2、3 以及图 4 的测量结果可见,与全光谱拟合反演法相比,包-全法测量的膜层厚度与设计值相对误差更小,反演计算的透射率光谱曲线与实

际测量透射率曲线更为接近,因此,与全光谱拟合反演法相比,包-全法测量滤光片光学参数的准确性更高;

(2) 由图 7 可见,依据包-全法测量滤光片光学参数,可以快速准确定位实际镀制膜层厚度与设计厚度之间的偏差,通过快速准确工艺修正,进而获得与设计结果更为匹配的镀膜实际厚度,快速准确的研制出性能更好的红外滤光片。

3 结论

文中研究了包-全法的基本思想、物理模型、评价函数等,并以设计制备的 2 000~8 000 nm 谱段内高透射率、宽截止中波红外滤光片为测量对象,对包-全法测量红外滤光片光学参数的有效性和准确性进行测量验证,并与全光谱拟合反演法进行比较。结果表明:与全光谱拟合反演法相比,包-全法测量的准确性更高,因此,该方法是一种能够准确测量红外滤光片光学参数的有效方法。除此之外,利用该方法测量的红外滤光片光学参数不仅能够确定膜料的色散特性,甄别膜料镀膜工艺的好坏,而且可以快速准确定位实际镀制膜层厚度与设计厚度之间的偏差,通过快速准确工艺修正,进而获得与设计结果更为匹配的镀膜实际厚度,快速准确的研制出性能更好的红外滤光片。该方法的引入,可以有效简化滤光片研制工艺流程,缩短研制周期,提升研制水平,降低研制成本。

参考文献:

- [1] Ji Yiqin, Liu Huasong, Zhang Yanmin. Test and analysis of optical film constants [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(5): 513-518. (in Chinese)
- [2] Chen Yanping, Yu Feihong. Test methods for film thickness and optical constants [J]. *Optical Instruments*, 2006, 28(6): 84-88. (in Chinese)
- [3] Xie Yi, Chen Qian, Liu Yong. Determination of the optical constants and thickness of thin film by improved flexible tolerance method[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(4): 521-525. (in Chinese)
- [4] Manificier J C, Gasiot J, Fillard J P. A simple method for the determination of the optical constants n, k, and the thickness of a weakly absorbing thin film [J]. *Phys E: Sci*

- Instrum*, 1976, 9: 1002-4.
- [5] Xiao Binggang, Hu Jun. Theoretical improvement and experimental design of prism coupler[J]. *Journal of Zhejiang University*, 2007, 41(12): 2040-2044.
- [6] Ulrich R, Torge R. Measurement of thin film parameters with a prism coupler [J]. *Applied Optics*, 1973, 12 (12): 2901-2980.
- [7] Bhattacharyya D, Sahoo N K, Thakur S, et al. Spectroscopic ellipsometry of TiO₂ layers prepared by ion-assisted electron-beam evaporation [J]. *Thin Solid Films*, 2000, 360 (1/2): 96-102.
- [8] Li Kaipeng, Wang Duoshu, Li Chen, et al. Study on optical thin film parameters measurement method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 1048-1052. (in Chinese)