

doi: 10.3788/gzxb20144312.1216001

# 粮食筛选系统中双通道带通滤光膜的研制

付秀华<sup>1</sup>, 何松霖<sup>1</sup>, 贾星明<sup>2</sup>, 刘冬梅<sup>1</sup>, 张静<sup>1</sup>, 刘爽<sup>1</sup>

(1 长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

(2 安徽中科光电色选机械有限公司, 合肥 231202)

**摘 要:** 利用杂质和劣质粮食与优质粮食的近红外吸收光谱不同的特性, 根据光谱中反映测试成分的特征波段的差异对粮食进行光学分选. 在光谱进入传感器之前经过滤光片对多个测试波段进行过滤, 降低噪音的影响. 本文针对光学筛选系统中核心部件双通道带通滤光片进行研制, 从膜系设计理论出发, 采用了 Smith 法结合膜系设计软件设计了以周期膜系和非周期膜系相结合的双通道带通滤光膜系, 利用电子束蒸发和离子辅助沉积的方法进行制备并通过数学建模分析, 减小了实验误差对光谱的影响. 在 1 200 nm 和 1 450 nm 波段得到平均透射率大于 97%, 1 000~1 130 nm 和 1 570~2 000 nm 波段平均透射率小于 1% 的滤光膜, 通过系统测试, 满足使用要求.

**关键词:** 光学薄膜; 双通道带通滤光膜; Smith 法; 粮食筛选; 膜系设计; 真空镀膜; 膜厚监控

中图分类号: O484.5

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)12-1216001-6

## Study and Fabrication of the Dual Band-pass in Grain Screening System

FU Xiu-hua<sup>1</sup>, HE Song-lin<sup>1</sup>, JIA Xing-ming<sup>2</sup>, LIU Dong-mei<sup>1</sup>, ZHANG Jing<sup>1</sup>, LIU Shuang<sup>1</sup>

(1 School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

(2 Anhui Zhongke Photoelectric Color Sorting Machinery Co., Ltd., Hefei 231202, China)

**Abstract:** Optical sorting of grain, is using different characteristics of near infrared absorption spectra of impurity inferior food and high quality food, and based on the difference of feature band which reflects the test components in the spectrum to do the sieving grain. Before the light beam into the sensor, it needs to pass through the optical filter, filtering the multiple test band and reducing the noise effect. A dual band-pass optical filter was developed which is the core parts in the system, it is based on the film system design theory, adopt Smith method and the film system design software basing on the combination of period and non period multilayer coatings to design the dual band-pass filter coating,. Utilize electron beam evaporation and ion assisted deposition method to prepare and mathematical modeling to analyze, which has reduced the influence of experimental error to the spectrum and prepared the filter coating. The average transmittance of which is more than 97% in 1 200 nm and 1 450 nm band and less than 1% in 1 000~1 130 nm and 1 130~2 000 nm band. The film meets the use requirements through the test system and evaluation.

**Key words:** Optical films; Dual band-pass; Smith method; Mathematical modeling; Grain screening system; Film system design; Vacuum coating; Thickness monitor

**OCIS Codes:** 310.6860; 310.6188; 310.6805; 240.0310; 310.1210

## 0 引言

近红外光谱分析技术(Near Infrared, NIR)在品质

分析方面具有快速、灵敏度高、可在线检测等优点, 得到广泛应用. 2011 年暨南大学光电信息与传感技术广东普通高校重点实验室的黄富荣等进行了近红外光谱

基金项目: 红外技术预研项目(No. 5131xxxx103)资助

第一作者: 付秀华(1963-), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为薄膜技术. Email: goptics@126.com

通讯作者: 何松霖(1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为薄膜技术. Email: xiaoguaihe1989@126.com

收稿日期: 2014-04-02; 录用日期: 2014-06-04

<http://www.photon.ac.cn>

测量全血胆固醇和甘油三酯的可行性的研究<sup>[1]</sup>. 2011年南昌航空大学信息工程学院的赵珂等利用近红外光谱技术对脐橙进行无损检测<sup>[2]</sup>. 2006年中国林业科学研究院木材工业研究所的江泽慧等对木材中的水分近红外光谱进行了分析<sup>[3]</sup>. 2012年上海海洋大学食品学院的王小燕等运用近红外光谱技术对水分和蛋白质进行检测<sup>[4]</sup>. 2012年 Sineenart Suktanarak 等人利用近红外光谱技术对食品中水分含量进行了检测<sup>[5]</sup>. 通过对上述国内外检测方法的研究,将近红外光谱分析技术利用在粮食筛选中,不仅可以对粮食的外貌残缺进行检测,更可在不破坏粮食的前提下,对粮食内部质量进行判断.

基于近红外光谱分析技术的粮食筛选系统主要由光源、分光系统、测样装置、信号处理系统以及分选装置构成. 本文主要对分光系统中的滤光片进行研制,采用双波段对比检测法,对粮食中油脂和水分的强吸收波段,即  $1\ 200 \pm 20\ \text{nm}$  和  $1\ 450 \pm 30\ \text{nm}$  波段进行检测<sup>[6]</sup>,利用膜系理论,设计了周期膜系与非周期膜系相结合的双波段带通滤光膜,减少了实验中由于累积误差造成的影响,并通过对折射率的调整和控制,制备得到符合使用要求的滤光片,有效降低了误报率.

## 1 膜料选择及膜系设计

### 1.1 膜料选择

根据粮食筛选系统的技术要求,设计的双通道带通滤光膜的具体技术参数如表 1.

表 1 双通道带通滤光膜的技术参数  
Table 1 Technical parameter requirements for the Dual band-pass filter

Technical parameter	Requirements
Transmissive region/nm	$1\ 200 \pm 20, 1\ 450 \pm 30$
Average transmittance	$\geq 97\%$
Cut-off region/nm	$1\ 000 \sim 1\ 130, 1\ 570 \sim 2\ 000$
Transmittance of the Cut-off region	$< 1\%$

该滤光膜所涉及的波段位于近红外,根据设计需要至少要选择高低两种折射率的材料进行设计,可用的高折射率材料有  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ 、 $\text{ZrO}_2$ 、 $\text{HfO}_2$ 、 $\text{Ti}_3\text{O}_5$ ,低折射率材料有  $\text{SiO}_2$  和  $\text{MgF}_2$ <sup>[7-8]</sup>. 其中  $\text{Ti}_3\text{O}_5$  透明区为  $0.3 \sim 10\ \mu\text{m}$ ,在此波段折射率高、光学常量相对稳定、吸收损耗小、抗腐蚀性能强.  $\text{SiO}_2$  薄膜在  $0.2 \sim 4\ \mu\text{m}$  波段无吸收,膜层牢固,具有良好的光学和化学稳定性,且  $\text{Ti}_3\text{O}_5$  和  $\text{SiO}_2$  匹配良好. 故选用  $\text{Ti}_3\text{O}_5$  和  $\text{SiO}_2$  为高低折射率材料<sup>[9]</sup>.

### 1.2 膜系设计

从具体的技术参数分析,可以通过两种方案实现,第一种是在宽带通膜系的基础上在另一面镀制负滤光片膜系<sup>[10]</sup>;第二种是通过基片两面分别设计两种不同

的膜系,其中一种是由多个谐振腔组成的双通道带通膜系,另一种是截止膜系.

对于方案一,利用膜系设计软件 OptiLayer,以带通膜系 (SUB|(HL)"2H(LH)"L(HL)"2H(LH)"|AIR) 为基础膜系<sup>[11]</sup>,采用 Needle Optimization 和 Gradual Evolution 两种优化方式相结合的方法,优化后的膜系如下:

宽带通膜系为

SUB| 1. 1L1. 6H1. 1LH1. 6L1. 3H0. 7L0. 7H2L 0. 7H0. 9LH1. 7L0. 9HL1. 1H1. 4L1. 2H1. 1LH 1. 1L1. 6H0. 9L0. 9H0. 7L0. 4H0. 7L0. 8H0. 6L0. 6H 0. 8L0. 9H0. 8L0. 2H0. 8L0. 9H0. 9L2. 2H0. 6L2. 3H 0. 9L0. 5H2. 1L0. 9H0. 9L1. 8H|AIR,共 46 层,物理厚度约为  $10.4\ \mu\text{m}$ .

负滤光片膜系为

SUB| 0. 9H0. 9L0. 6H0. 3L0. 7H0. 8L0. 7H 0. 2L0. 7H0. 9L0. 9H0. 9L0. 9H0. 8L0. 8H0. 7L0. 6H 0. 7L0. 7H0. 5L0. 4H0. 7L0. 7H0. 8L0. 9H0. 9L0. 9H 0. 8L0. 8H0. 8L0. 7H0. 7L0. 6H0. 6L0. 5H0. 6L0. 7H 0. 8L0. 8H0. 8L0. 8H0. 8L0. 8H0. 8L0. 8H0. 8L0. 6H 0. 4L0. 6H0. 7L0. 7H0. 6L0. 7H0. 8L0. 8H0. 9L0. 8H 0. 6L0. 2H0. 9L0. 8H0. 8L0. 3H0. 7L0. 8H|AIR,共 67 层,物理厚度约为  $13.4\ \mu\text{m}$ . 由双面叠加的理论光谱曲线如图 1.

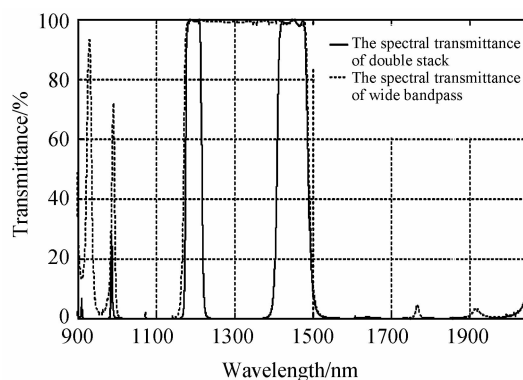


图 1 方案一理论透射率曲线

Fig. 1 The spectral transmittance of design 1

第一种方案可以满足通带宽度和截止带宽度要求,但在设计过程中为了得到较好的通带矩形度同时展宽带通膜系的通带宽度<sup>[10]</sup>,需要插入大量的非周期膜层,在实际制备时会因为晶控误差的累积而难以得到理想的光谱曲线. 针对此问题,第二种方案从理论出发,通过分析和改变带通膜系结构,使膜系以周期膜系为主,以非周期膜系为辅,减少非周期膜层厚度,使用晶控和光控相结合的方法,达到提高膜厚控制准确度的目的.

第二种方案主要是根据 Smith 法进行设计,该方法是把选择层两边的膜堆等分别等效为两个有效界

面.根据有效界面之间多光束干涉的结果可以导出整个系统的透射率分布公式<sup>[10]</sup>为

$$T = \frac{T_1 T_2}{[1 - (R_1 R_2)^{1/2}]^2 \left[ 1 + \frac{4(R_1 R_2)^{1/2}}{(1 - R_1 R_2)^{1/2}} \sin^2 \left( \frac{\varphi_1 + \varphi_2 - 2\delta}{2} \right) \right]} \quad (1)$$

式中  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $R_1$ 、 $R_2$  分别为选择层左右两个反射堆的透射率和反射率.

当中间一层为选择层时,可以利用特征导纳矩阵对膜堆的反射振幅和相位进行计算,多层膜的特征矩阵的表达式为

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{j=1}^k \begin{bmatrix} \cos \delta_j & i \sin \delta_j / n_j \\ i n_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中  $\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} N_j d_j \cos \theta_j$ ,  $\eta_j = n_j - iK_j$ ,  $\eta_0$  是该层膜的导纳,  $K_j$  为消光系数.

整个反射膜层的等效导纳为:  $Y = C/B$ . 反射膜堆的反射率为

$$R = \left( \frac{\eta_0 - Y}{\eta_0 + Y} \right) \left( \frac{\eta_0 - Y}{\eta_0 + Y} \right) = \left( \frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right) \left( \frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right) \quad (3)$$

根据式(1)可以看出  $R_1 = R_2$  时,那么在任意波长都能得到高透射率,其相位条件为

$$\frac{\varphi_1 + \varphi_2 - 2\delta}{2} = m\pi \quad (4)$$

由分析可知,必须设计适当的膜系才能保证光谱透射曲线通带形状好、矩形度高.带通膜系的基础膜系为  $\text{SUB} | A_1(S_1, \omega_1, t_1) L A_2(S_2, \omega_2, t_2) L A_3(S_3, \omega_3, t_3) L A_4(S_4, \omega_4, t_4) | \text{AIR}$ .

式中  $A_i(S_i, \omega_i, t_i)$  为一个单腔,  $S$  表示反射层 HL 或 LH 的数目,  $\omega$  表示间隔层干涉级次,  $t$  表示间隔层特征,  $t=1$  表示间隔层为高折射率材料,  $t=0$  表示间隔层为低折射率材料.带通膜系间隔层通常由  $2\omega L$  或者  $2\omega H$  组成,但是当间隔层为  $(2\omega+1)L$  或者  $(2\omega+1)H$  时,会在中心波长和临近波段出现两个透射峰,再经过合理对称搭配高低折射率材料,调整等效折射率,便可在  $1\,200 \pm 20 \text{ nm}$  和  $1\,450 \pm 30 \text{ nm}$  处出现两个透射带.

双通道带通滤光膜的基本光谱由串接的单腔个数  $q$ ,各单腔反射层中高低折射率材料的搭配数目  $S$ 、系数  $n$ ,以及间隔层系数  $(2\omega+1)$  等参量决定.利用 optilayer 膜系设计软件对不同参量的膜系光谱进行模拟,模拟发现膜系结构为  $\text{SUB} | A\,2L\,A\,2L\,A | \text{AIR}$  时,其中  $2L$  为耦合层,  $A$  为一个单腔膜系,表达式为

$$A: [2nH2(n+1)L]^S (2\omega+1)H [2(n+1)L2nH]^S.$$

在  $1\,200 \pm 20 \text{ nm}$  和  $1\,450 \pm 30 \text{ nm}$  会出现通带,且通带间存在不同程度的截止带,由  $\omega$ 、 $n$ 、 $S$  共同决定,有如下规律:

1) 系数  $\omega$  影响通带间距,  $\omega$  增大,通带间距增大,

截止区域截止度好,但随着  $\omega$  的增大,中心波长处通带波纹幅度增大;

2) 系数  $n$  会影响通带带宽,  $n$  增大,通带变宽,但是通带间截止区域的截止程度会变差;

3) 增加反射层中  $[2nH2(n+1)L]$  和  $[2(n+1)L2nH]$  的个数,可以增加通带个数,同时每个通带的带宽会变得更窄;

4) 综上所述,经过多次模拟得到  $n=1$ ,  $S=2$ ,  $\omega=2$ ,双通道带通膜系如下:

$\text{SUB} | [2H4L]^2 5H [4L2H]^2 2L [2H4L]^2 5H [4L2H]^2 2L [2H4L]^2 5H [4L2H]^2 | \text{AIR}$ .如图 2 所示,对于  $1\,450 \text{ nm}$  处通带波纹很大,根据通带波纹压缩理论<sup>[11-12]</sup>,可在周期膜系两端增加匹配层压缩通带波纹,添加匹配层后的膜系表达式为

$\text{SUB} | 6.1H4.3L4.3H0.3L \cdots 3.8H1.2L1.9H2L2.3H1.7L1.7H1.7L2.2H1.6L1.4H | \text{AIR}$  (省略号中为规整膜系),共 43 层,总厚度  $9\,516 \text{ nm}$ ,理论曲线如图 3.  $1\,200 \pm 20 \text{ nm}$  和  $1\,450 \pm 30 \text{ nm}$  平均透射率均大于 97% (未考虑背面反射),通带的位置和透射率均满足技术要求.

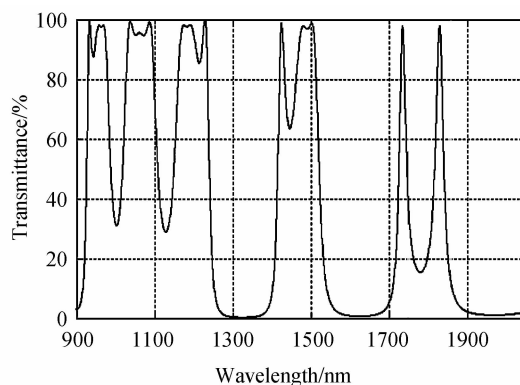


图 2 双带通膜系理论透射率曲线

Fig. 2 Spectral transmittance of the Dual band-pass filter

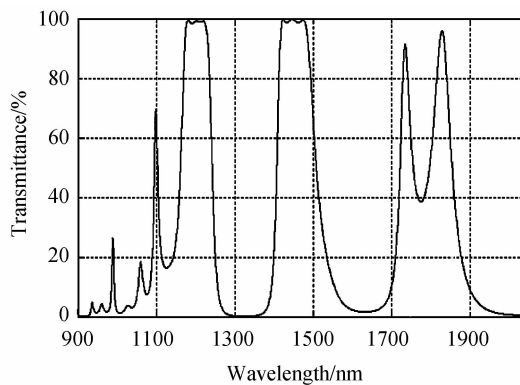


图 3 添加非周期膜层的双带通膜系理论透射率曲线

Fig. 3 Spectral transmittance of the Dual band-pass filter adding the aperiodic multilayer

从理论设计曲线可以看出,  $1\,000 \sim 1\,130 \text{ nm}$ 、 $1\,570 \sim 2\,000 \text{ nm}$  存在透射峰,需要在另一面采用截止

膜系进行抑制,利用膜系设计软件经过优化后得到的膜系为

SUB|5.2H2.5L4.H3.2L3.8H2.9L4.9H2.4L2.2H5.3L2.5H2.4L5.6H2.2L2.4H5.7L1.9H2.1L6.1H2.1L2.3H1.3LH|AIR,两种膜系叠加后光谱曲线如图4.在1000~1130 nm和1570~2000 nm波段透射率  $T < 1\%$ ,满足设计要求.

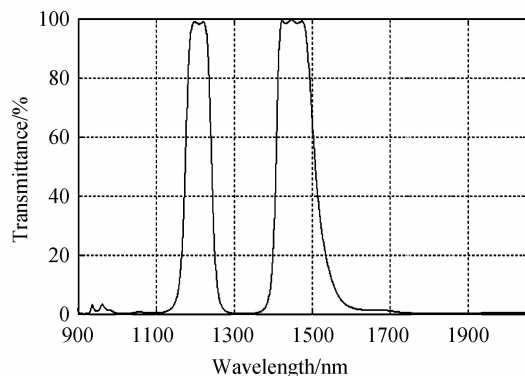


图4 添加后表面的双带通膜系理论透射率曲线

Fig.4 Spectral transmittance of the Dual band-pass filter after adding back surface coatings

对比两种方案,结合实验设备,考虑膜厚控制误差,选用第二种方案的设计结果进行工艺制备.

## 2 薄膜制备

选用惠州奥普康900型真空镀膜机上完成实验.该设备配有双e型电子枪、环形坩埚和八孔位坩埚、考夫曼离子源<sup>[13]</sup>、GM-X07型宽光谱光学薄膜控制仪和IC/5型晶控仪,可以满足利用光学极值法监控薄膜周期膜层厚度,石英晶体控制法监控薄膜非周期膜层厚度的需要<sup>[14]</sup>.

## 3 测试结果及误差分析

### 3.1 测试结果

采用UV3150型分光光度计测量双通道带通滤光膜的透射率光谱,如图5所示,在1200±20 nm处通

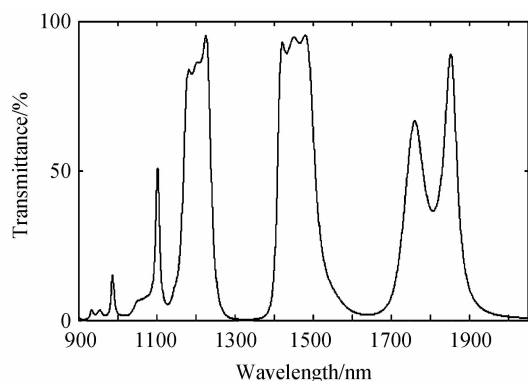


图5 双通道带通滤光膜实测光谱曲线

Fig.5 Measured transmittance curve of the Dual band-pass filter

带变形,1450±30 nm区域存在较大通带波纹,整体透射率较低.

### 3.2 误差分析与解决办法

将测试结果导入逆向工程软件OptiRE中进行模拟,得到各层的实际厚度与理论厚度差值分布如图6.

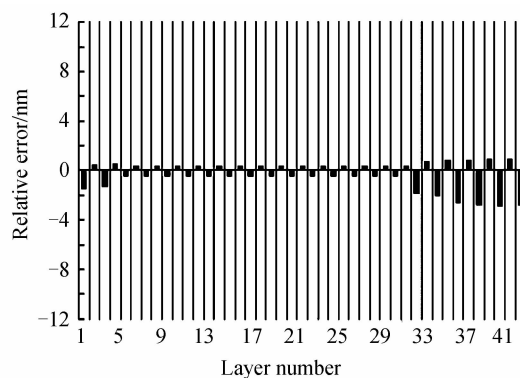


图6 膜层实际厚度与理论厚度差值分布图

Fig.6 The distribution of difference between the actual thickness and theoretical thickness

由图6可知前4层与后11层为晶控控制,其中 $Ti_3O_5$ 的厚度变化较大,这是由于初始与后期镀膜系的工艺环境并不相同,导致 $Ti_3O_5$ 折射率发生改变,根据 $nd = \lambda/4$ 可知,折射率的改变会直接造成非周期膜层的光学厚度误差<sup>[8]</sup>,所以在保证工艺条件一致的基础上,需要对材料的折射率进行准确计算.

利用OptiRE软件对膜系进行 $Ti_3O_5$ 折射率拟合,得到新的 $Ti_3O_5$ 折射率,与原折射率差异如图7.

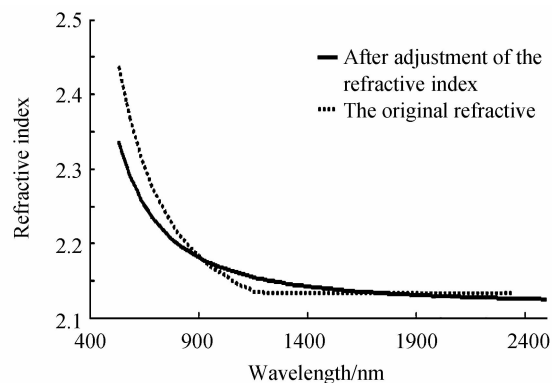


图7 修正前后 $Ti_3O_5$ 折射率对比

Fig.7 The refractive index of  $Ti_3O_5$  corrected compared with before

将修正后的 $Ti_3O_5$ 折射率导入理论设计曲线,根据设计要求和图7所示的厚度误差对膜系中非周期膜层厚度进行调整.

利用优化后的工艺参量进行重新镀膜,测试光谱曲线如图8,1200 nm和1450 nm处通带半宽度分别为39 nm和58 nm.

在另一面镀膜截止膜在波段1000~1130 nm和1570~2000 nm进行截止,双面镀膜后测得的光谱曲

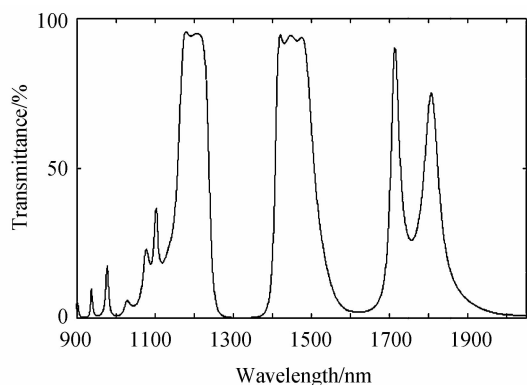


图8 调整工艺后的双带通透射率实测曲线

Fig. 8 Spectral transmittance of the Dual band-pass filter after adjustment process

线如图9,截止区域平均透射率均小于1%,光谱曲线满足使用要求.

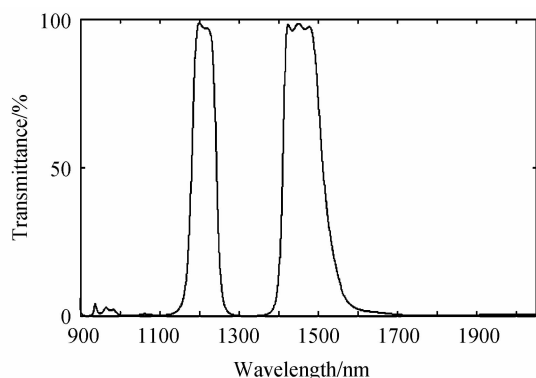


图9 双面镀制后的透射率实测曲线

Fig. 9 Spectral transmittance of the double-sided coatings

将测试片放在沸水中煮2 h后在用显微镜观察表面,未发现龟裂.用金属硬物刮划薄膜,用胶带粘拉,均未发现脱膜现象.

### 3.3 系统测试

粮食筛选系统中分光系统的结构示意图如图10.

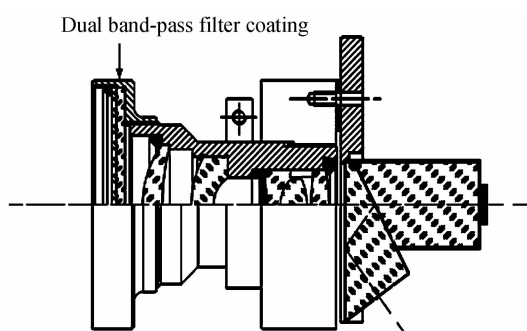


图10 粮食筛选系统结构示意图

Fig. 10 Schematic diagram of grain screening system

利用筛选系统对含有杂质和劣质的玉米粒进行筛选,经过测样系统后,优质玉米粒与杂质或劣质玉米粒的吸收分布如图11.

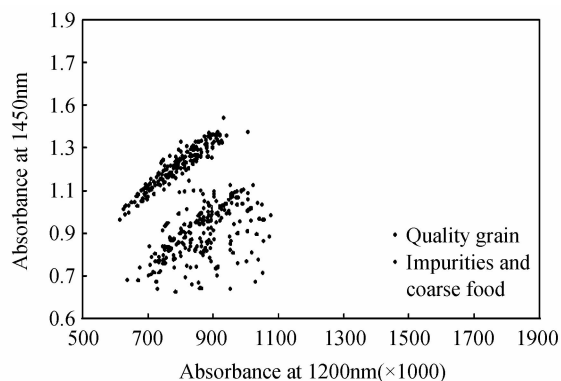


图11 优质玉米与杂质或劣质玉米光谱分布

Fig. 11 Spectral distribution of the quality grain and impurities or coarse grain

由图11可以看出,杂质和劣质玉米与优质玉米在光谱分布上差异明显,通过信号处理系统将光信号转变为电信号<sup>[15]</sup>,再经由分选装置将其分开.经过筛选后的玉米中杂质含量小于0.4%,满足使用要求,筛选结果如图12,左图为经过筛选后的优质玉米,颗粒饱满,色泽优秀;右图为经过筛选装置后筛选出的劣质玉米,其颗粒残缺.

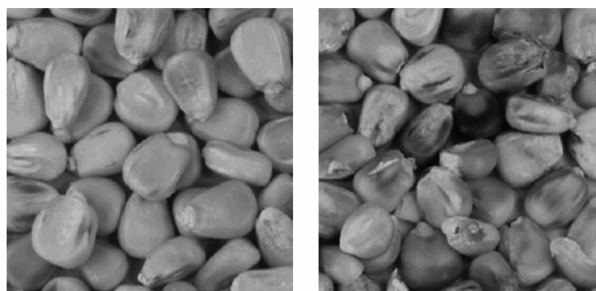


图12 经过筛选后的玉米粒

Fig. 12 After screening of maize grain

## 4 结论

本文针对粮食筛选系统中对滤光膜的要求,以Smith膜系设计方法为依据,采用两种方案对膜系进行设计,并对方案二中双通道带通滤光膜系的结构进行分析和归纳,找出了设计多带通滤光膜的设计方法和规律.结合设备实际情况,采用第二种膜系设计方案进行制备,利用逆向工程软件OptiRE对测试结果的误差进行模拟分析,解决了在镀制过程中由于工艺环境的改变,导致非周期膜层厚度的误差问题,所制备的滤光膜满足使用要求.但对于要求矩形度更高,截止区域更宽的双通道带通滤光膜,还要从设计和工艺上进行研究,是今后努力的方向.

### 参考文献

[1] HUANG Fu-rong, LUO Yun-han, ZHENG Shi-fu, et al. Near-infrared spectroscopic analysis and model optimization on cholesterol and triglyceride in whole blood[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(10): 1030001.

- 黄富荣, 罗云瀚, 郑仕富, 等. 全血胆固醇、甘油三酯近红外光谱分析与模型优化[J]. 光学学报, 2011, **31**(10): 1030001.
- [2] ZHAO Ke, XIONG Yan, ZHAO Min. Rapid non-destructive testing of navel orange based on near infrared spectroscopy [J]. *Laser and Infrared*, 2011, **41**(6): 649-652.  
赵珂, 熊艳, 赵敏. 基于近红外光谱技术的脐橙快速无损检测[J]. 激光与红外, 2011, **41**(6): 649-652.
- [3] JIANG Ze-hui, HUANG An-min. Water in wood and its near infrared spectroscopic analysis[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2006, **26**(8): 1464-1468.  
江泽慧, 黄安民. 木材中的水分及其近红外光谱分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2006, **26**(8): 1464-1468.
- [4] WANG Xiao-yan, WANG Xi-chang, LIU Yuan, *et al.* Application of near infrared spectroscopy technique based on machine in the measurement of moisture and protein contents in surimi[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, **32**(9): 2418-2421.  
王小燕, 王锡昌, 刘源, 等. 基于 SVM 算法的近红外光谱技术在鱼糜水分和蛋白质检测中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, **32**(9): 2418-2421.
- [5] SUKTANARAK S, TEERACHAICHAYUT S. Detection for moisture content of sweet tamarind flesh by transmittance short wavelength near infrared spectroscopy[J]. *International Proceedings of Chemical, Biological & Environmental Engineering*, 2012, **39**: 71-74.
- [6] ZHANG Jia-hua, XU Yun, YAO Feng-mei, *et al.* Advances in estimation methods of vegetation water content based on optical remote sensing techniques[J]. *Science China Press*, 2010, **40**(10): 1121-1129.  
张佳华, 许云, 姚凤梅, 等. 植被含水量光学遥感估算方法研究进展[J]. 中国科学, 2010, **40**(10): 1121-1129.
- [7] 钟迪生. 真空镀膜-光学材料的选择与应用[M]. 沈阳: 辽宁大学出版社, 2001, 235~241, 252-264.
- [8] FU Xiu-hua, SUN Ying-jie, LIU Dong-mei, *et al.* Study and fabrication of visible and infrared broadband antireflection coating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(3): 0331002.  
付秀华, 孙英杰, 刘冬梅, 等. 可见与近红外宽带减反膜的研制. 光学学报, 2013, **33**(3): 0331002.
- [9] PAN Yong-qiang, ZHU Chang, MI Qian, *et al.* The optical properties of TiO<sub>2</sub> thin film prepared by electron beam evaporation[J]. *Applied Optics*, 2004, **25**(5): 53-55.  
潘永强, 朱昌, 弥谦, 等. 电子束蒸发 TiO<sub>2</sub> 薄膜的光学特性[J]. 应用光学, 2004, **25**(5): 53-55.
- [10] 唐晋发, 顾培夫, 刘旭, 等. 现代光学薄膜技术[M]. 浙江: 浙江大学出版社, 2006: 161-166.
- [11] CHEN Chao-ping, SHI Jian-tao, GUO Rui, *et al.* Design and preparation of mid-infrared band-pass filter[J]. *Journal of Applied Optic*, 2012, **33**(3): 595-598.  
陈建平, 师建涛, 郭芮, 等. 中红外带通滤光片的设计与制备[J]. 应用光学, 2012, **33**(3): 595-598.
- [12] MU Xin, FU Xiu-hua, ZHAO Yan, *et al.* Design and manufacture interference filter applied in criminal investigation and test optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(2): 259-262.  
牟鑫, 付秀华, 赵燕, 等. 刑侦检测光学系统中干涉滤光片的设计与制备[J]. 光子学报, 2011, **40**(2): 259-262.
- [13] LI Shou-zhong, YANG Yi-min, HUANG Liang-pu, *et al.* Research for working stability of Kaufman ion sources[J]. *Optical Instruments*, 1999, **21**(4): 44-46.  
李守中, 杨益民, 黄良甫, 等. 考夫曼型离子源工作稳定性研究[J]. 光学仪器, 1999, **21**(4): 44-46.
- [14] ZHAN Mei-qiong, ZHANG Dong-ping, YANG Jian, *et al.* Thickness monitoring by quartz crystal oscillation for optical coatings[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(5): 585-588.  
占美琼, 张东平, 杨健, 等. 石英晶体振荡法监控膜厚研究[J]. 光子学报, 2004, **33**(5): 585-588.
- [15] HAFF R P, PEARSON T. Spectral band selection for optical sorting of pistachio nut defects [J]. *Transactions of the ASABE*, 2006, **49**(4): 1105-1113.