

# 用于线、面阵探测器上的多通道集成窄带滤光片的研制

金南善

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

**摘要** 利用自行设计的挡板机构, 采用真空镀膜技术, 在有效范围为  $25.4 \times 2.5\text{mm}$  和  $6 \times 6\text{mm}$  的条状基片上, 分别制作了用于线阵探测器上的和用于面阵探测器上的多通道集成窄带滤光片, 并详细研究了该滤光片的形成原理、膜系的设计分析、制备工艺以及应用等, 给出了实验所得的结果。最后较系统地介绍了制备特定膜系的真空镀膜平面挡板的设计方法, 并给出了适用于各类光学薄膜制备的平面挡板设计结果。

## 1 前言

多通道集成窄带滤光片是继棱镜和光栅以及现在各种各样的分光元件之后发展起来的新一代分光元件, 研究该滤光片的目的是为了探索新的光谱分光方法, 研制微型化的分光元件与 CCD 和硅光二极管阵列元件相配合, 可组成多通道光谱成像系统。该滤光片与固态成像器件构成的光谱探测系统比采用光栅或棱镜作分光元件的光谱探测系统, 可具有更简单的光学系统, 制成微型化和集成化系统, 重量大为减轻。这可以作成紧凑型便式的光谱光度计、色度计、高速光谱测控仪, 这在遥感技术、色度学、激光对抗、荧光分析等领域里有着广泛的应用前景。

多通道集成窄带滤光片是它的每一不同的空间位置对应于不同透光通道波段的窄带滤光片, 其典型特性可由下图 1 所示。目前国内这种微小尺寸能与 CCD 和光电二极管阵列探测器相配合的多通道滤光片还未见报导。

国外最近已有这方面的工作报导, 始见于 Laser Focus World 杂 1991 年 9 月期, 所报导的工作与我们所作的工作内容基本类似。但主要是与光电二极管阵列配合方面的工作, 尚无这一滤光片制备技术的公开报导。

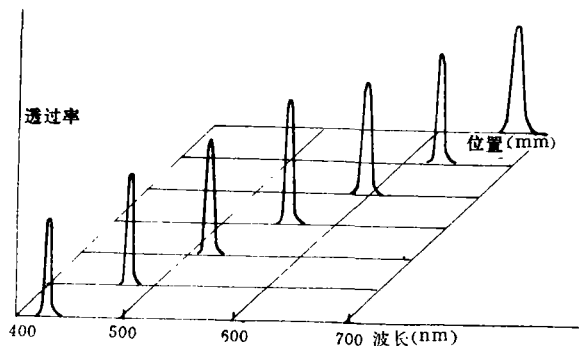


图 1 多通道集成窄带滤光片典型特性

## 2 原 理

多通道集成窄带滤光片是利用光学多层膜的干涉原理来设计的,该滤光片的基本要求是在条状基片上控制长度方向每点对应的膜层厚度来实现每一通道滤光片的透过峰值波长,并使峰值波长与基片上的位置成线性变化,这种膜层度随长度方向的有规律的分布是通过设计特殊形状的蒸气挡板机构来实现的,即基底下安装了这种遮蔽挡板,如图 2 所示。从图中可以看到,挡板在径向方向上所挡住的蒸气流面积是不同的,这样就在基底上镀了一层厚度在径向逐渐变化的膜层。这种挡板机构具有可实现的加工精度,并保证了滤光片制备的稳定性,保证了膜层厚度在基片的各位置按所设计的规律分布。

## 3 设 计

为了与 CCD 或硅光二极管阵列相配合,在有效范围为  $25.4 \times 2.5\text{mm}$  和  $6 \times 6\text{mm}$  的基片上,分别镀制了用于线、面阵探测器上的多通道集成窄带滤光片,它们的通道波段范围分别是  $(400-700)\text{nm}$  和  $(500-600)\text{nm}$ ,截止波长范围是  $(350-1100)\text{nm}$ 。

我们采用了六部分多层膜系实现这一要求:

一个窄带滤光片主膜系(用于线阵探测器上的这种滤光片的主膜系采用了单半波膜系,用于面阵探测器上的这种滤光片的主膜系采用了双半波膜系。)

二个前截止膜系

三个后截止膜系

膜系的中心波长是按滤光片的位置和截止要求而变化的。为了在工艺上较容易实现,我们分别在三基片上制作了上述六组膜系,这样膜层都胶合在里面,外面有玻璃保护,不易损伤。

所设计的各个膜系分别如下:

第一组膜系为:

$$G|(L_1/2H_1L_1/2)^7(H_2/2L_2H_2/2)^7|air$$

第二组膜系为:

$$G|(L_3/2H_3L_3/2)^7(H_4/2L_4H_4/2)^7|air$$

第三组膜系为(用于线阵探测器上的):

$$air|(L_5/2H_5L_5/2)^7|G|(H_0L_0)^32H_0(L_0H_0)^3|air$$

第三组膜系为(用于面阵探测器上的):

$$air|(L_5/2H_5L_5/2)^7|G|(H_0L_0)^2H_02L_0H_0(L_0H_0)^2L_0(H_0L_0)^2H_02L_0H_0(L_0H_0)^2|air$$

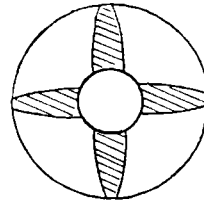


图 2 挡板的示意图

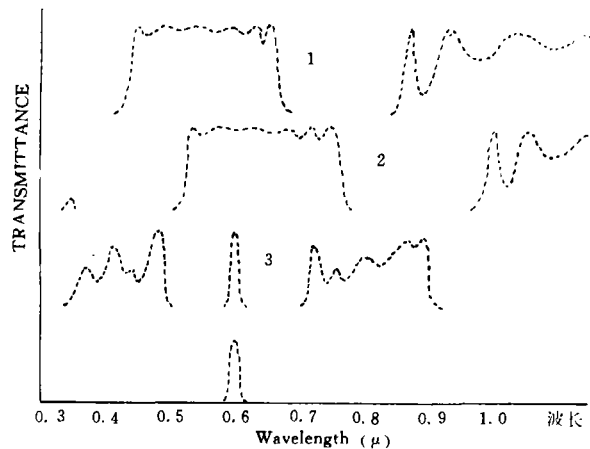


图 3 三组滤光片的迭加获得单峰窄带滤光片

上式中  $H_0, H_1, H_2, H_3, H_4, H_5$  和  $L_0, L_1, L_2, L_3, L_4, L_5$  分别表示不同中心波长的高、低折射率材料的膜厚。  $n_H=2.35; n_L=1.35$ 。为了减轻膜层损耗,提高膜系的透过率,我们全部采用了介质膜层。上述三组膜系的迭加即可得到集成窄带滤光片的整体。如图 3 所示。

### 4 制备结果

采用北京仪器厂生产的 DMD—450 型镀膜机,用电子束蒸发高折射率材料 ZnS 和低折射率材料冰晶石,膜层厚度采用光学直接监控法,监控片随片转动。根据电子束的蒸气空间分布设计精密修正的挡板机构,实现膜层在基片长度方向上的厚度有规律变化。基片用厚度为 1mm 的 K9 玻璃,三组膜层分别镀在三基片上如图 4 所示:

采用光学环氧树脂胶胶合,该滤光片的带宽为 10nm—20nm,截止波长范围为 300nm—1100nm。所制备的滤光片的特性如图(5、6、7、8)所示。

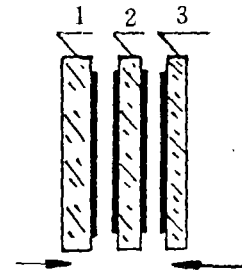


图 4 胶合方式示意图

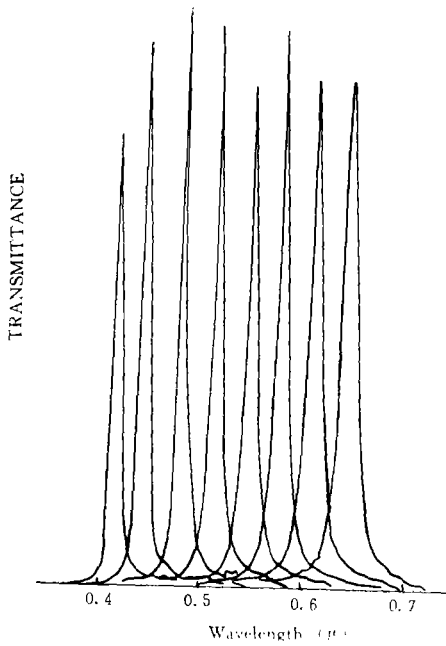


图 5 用日本产的“UV—365 分光光度计”测量的 1 英寸集成窄带滤光片光谱分光曲线(用于线阵探测器上的多通道集成窄带滤光片)

注:滤光片透光缝宽 0.1mm

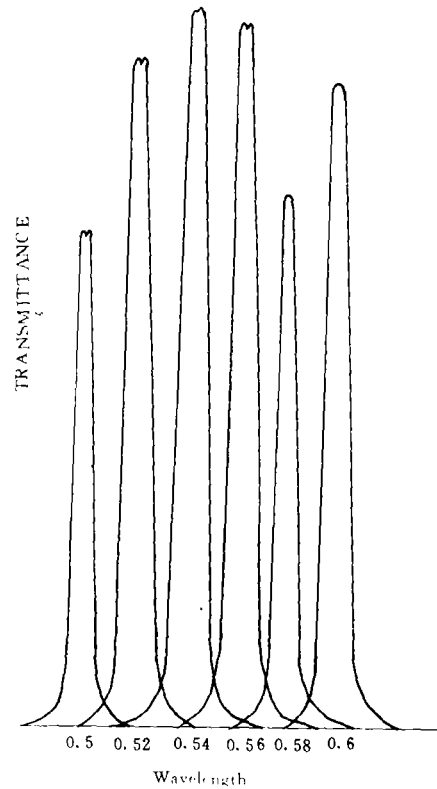


图 6 用日本生产的“UV—365 分光光度计”测量的 6×6mm 集成窄带滤光片光谱分光曲线。(用于面阵探测器上的多通道集成窄带滤光片)

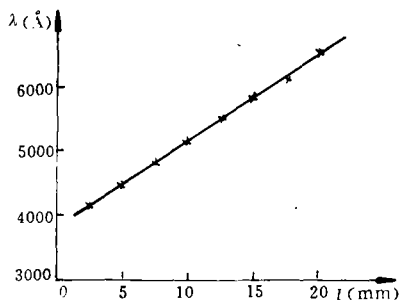


图 7 用于线阵探测器上的多通道集成窄带滤光片上的峰值位置与所对应的波长之间关系图。注：×——表示实测点；——直线表示理论曲线。

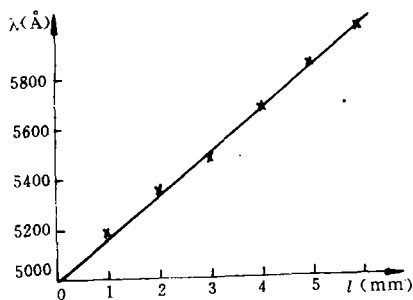


图 8 用于面阵探测器上的多通道集成窄带滤光片的峰值位置与所对应的波长之间关系图。注：×——表示实测点；——直线表示理论曲线。

## 5 应 用

### 5.1 多通道光谱分析仪

采用多通道集成窄带滤光片作为分光元件，硅光二极管阵列作为探测器，以微型计算机作为采集和处理数据核心。

#### (1) 系统和基本结构

图 9 是系统原理图，光源被聚集在光学系统的输入狭缝上，经多通道集成窄带滤光片后，按不同的波长形成一系列强弱不等的谱线，同时输入到硅光二极管阵列探测器，其输出如进入示波器，就能显示波形，如进入 IBM PC 微机，进行数据采集，并把数据贮存在计算机内存里，再经过运算处理后，在 CRT 上显示谱图，由绘图仪绘制谱图，并将谱图数据打印输出。

#### (2) 探测器

我们采用的探测器是 1024 元硅光二极管阵列，它有 1024 元组成，光谱灵感区在 2000 Å 到 1μ，感光响应度是  $2.8 \times 10$  库仑/焦耳/厘米，动态范围是 15000:1。视频信号扫描周期从 64μs 到 0.3s 可调一般可根据所测信号的持续时间和强弱适当调整。

#### (3) 主要功能

①可在 1024 个通道中同时采集、综合信号，信噪比可改善了  $\sqrt{1024} = 32$  倍，测量时间减少 1024 倍。

②具有光谱的单次采集（一次只采集一根谱线），连续采集（一次采集多根谱线）功能。

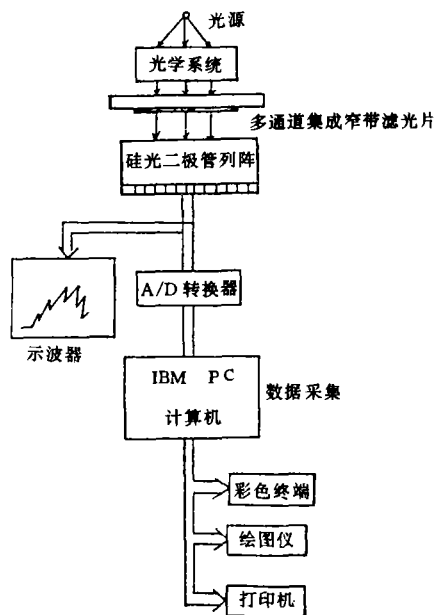


图 9 多通道光谱分析仪的系统原理图

③可选择所采集的谱线,并在屏幕上对谱线进行高分辨率或中分辨率显示。

④可将连续采集的谱线贮存同时,在屏幕上进行本维显示,用于对时变光信号进行动态测试,研究光谱的变化趋势。

⑤可将谱线存盘形成文件,并可以从磁盘中回放曲线,同时在屏幕上显示。

⑥光谱曲线可通过绘图仪绘出,光谱数据可由打印机输出。

(4)实验曲线

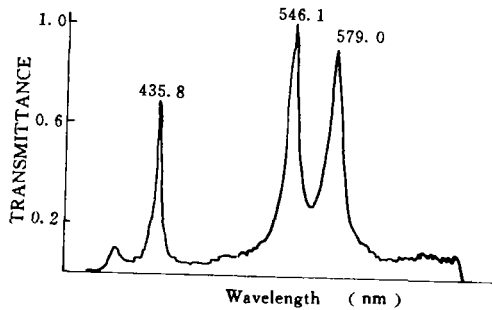


图 10 水银灯发光光谱分布相对响应曲线(滤光片 1)

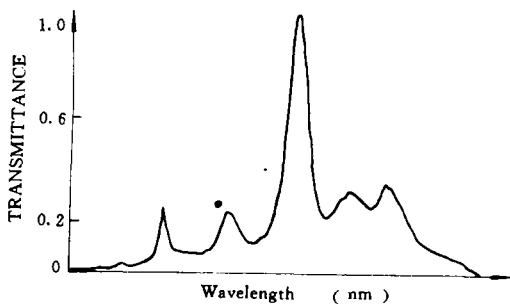


图 11 高效节能灯发光光谱分布相对响应曲线(滤光片 1)

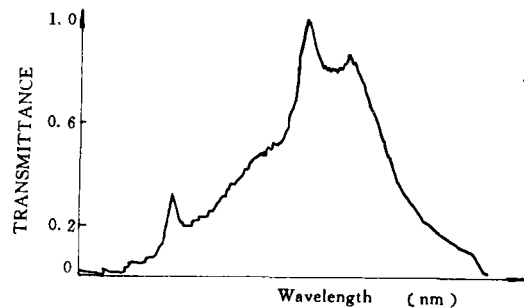


图 12 普通 8W 荧光灯发光光谱分布相对响应曲线(滤光片 1)

5.2 可见光分光光度计

可见光分光光度计是利用不同的物质对光的不同选择吸收现象来测定物质的成分,在分析混合物的成分时不必对被测物质加以分离,而用不同的波长测量吸收光度,便能计算出各种成分的含量。

(1)系统原理图

多通道测量方法采用硅光二极管阵列器作为接收器,它置于多色仪的象面上,测量被色散的所有波长的辐射,这样它不仅具备单通道光电测量的高速、灵敏、动态范围大、线性好等优点,而且具备了摄谱仪同时探测的特点,使用范围更为扩大。图 13 为系统原理框图。

当光束射入参考池或样品池时,全光谱同时测量。这样比较光束进过样品时的谱线和进过参考品时的谱线,就能确定被物质吸收的波长,即确定物质所含的成分。

(2)实验测得的曲线

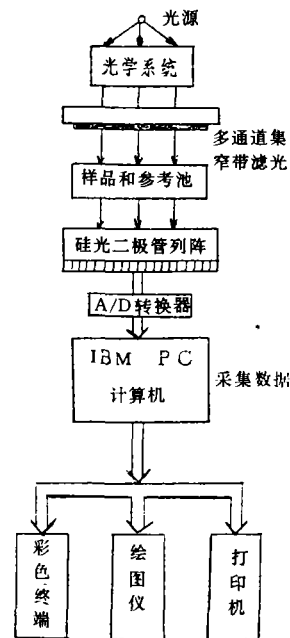


图 13 多通道可见光分光光度计的系统原理框图

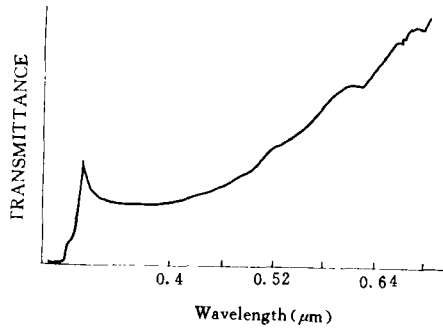


图 14 白丝灯发光光谱分布相对响应曲线

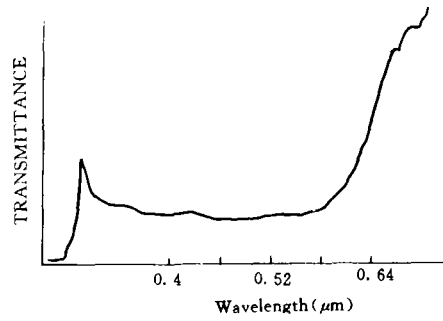


图 15 在白丝灯前放置 HB<sub>g</sub> 颜色玻璃时的光谱分布响应曲线

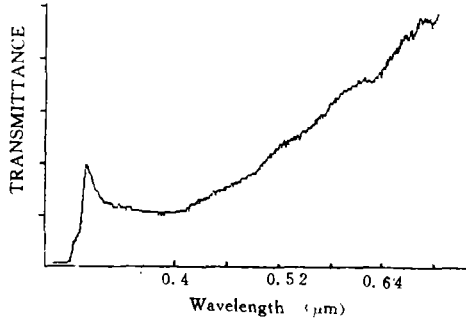


图 16 在白丝灯前放置 J105 颜色玻璃时的光谱分布响应曲线

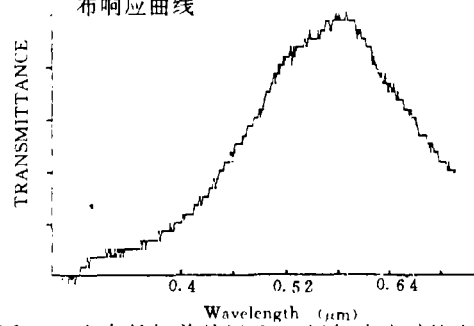


图 17 在白丝灯前放置 QB<sub>21</sub> 颜色玻璃时的光谱分布响应曲线

## 6 制备特定膜系的真空镀膜平面挡板的设计

基板上任何一点的薄膜厚度, 决定于蒸发源的发射特性以及几何配置。通过实际蒸发源, 特别是电子束电子蒸发的蒸气特性研究表明, 用  $\cos^n$  分布来描述膜厚分布是非常合理的, 如图 18。其膜厚分布为:

$$T_s = M[(1-c)\cos^n \varphi + c] \cos(\pi \mu R) \quad (1)$$

其中:  $\mu$  为密度;  $M$  为蒸发材料的总重量;  $n$  为蒸发特性;  $c$  为蒸发源与  $\varphi$  无关的各向同性分量。从这基本公式出发导出了设计平面挡板的基本公式, 公式中的  $\theta'(P) = 2\pi - \theta(P)$ ,  $\theta(P)$  为被挡板遮蔽的角,  $P$  为镀点的半径,  $H, t, \dots$  在数学手册可查到。

平面夹具如图 19、21 时的膜厚分布为:

$$E(P) = \frac{K1}{\pi} \int_{\theta'(P)}^{\pi} \frac{[(1-C)H^n + (E - F \cos \psi)^{n/2} C]}{(E - F \cos \psi)^{(n-3)/2}} d\psi$$

$$= \frac{K1 \theta'(P)}{4\pi} \sum_{i=1}^m \frac{H_i [(1-C)H^n + (E - F \cos(\theta'(P)(1+t_i)/4))^{n/2} C]}{(E - F \cos(\theta(P)(1+t)/4))^{(n-3)/2}}$$

$$\text{其中: } K1 = \frac{(H^2 + L^2)^{(n-3)/2}}{[(1-C)H^2 + (H^2 + L^2)^{n/2} C]}$$

$$E = H^2 + L^2 + P^2$$

$$F = 2LP$$

球面夹具如图 20 的膜厚分布为：

$$E(\rho) = \frac{K}{\pi} \int_{\varphi(\rho)} [K_2 + C(A - B\cos\psi)^{n/2}] [K_1 - B\cos\psi] d\psi$$

$$= \frac{K_1\theta'(P)}{4\pi} \sum_{i=1}^m \frac{H_i [(K + C(A - B\cos(\theta'(P)(1+t_i)/4))^{n/2}) [K_1 - B\cos(\theta'(P)(1+t_i)/4)]]}{(A - B\cos(\theta'(P)(1+t_i)/4))^{(n+3)/2}}$$

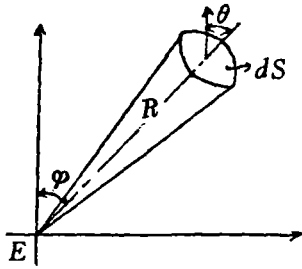


图 18 膜厚分布图

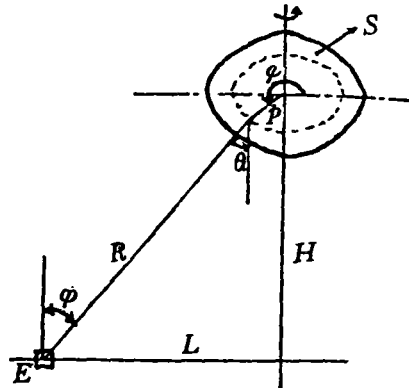


图 19 旋转平面夹具

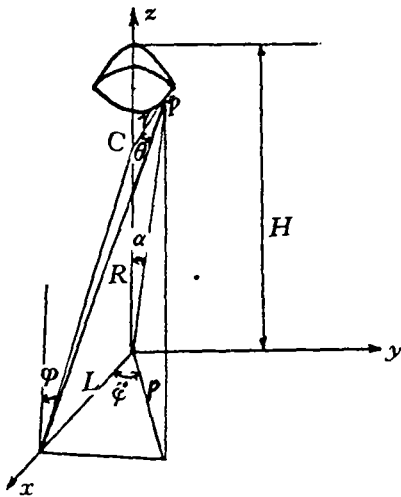


图 20 旋转球面夹具

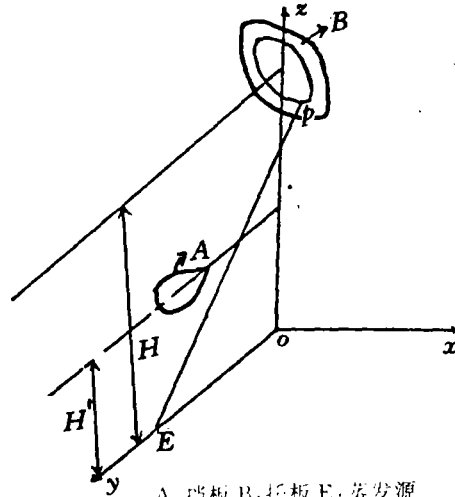


图 21 平面挡板与夹具之间的关系图  
A: 挡板 B: 托板 E: 蒸发源

从上述公式出发,分别设计了获得大面积平面均匀镀层的;获得多通道集成窄带滤光片的;获得光学冷加工非球面的平面挡板设计程序,并制作了用于获得多通道集成窄带滤光片的静止平面挡板,下例是各种挡板曲线。

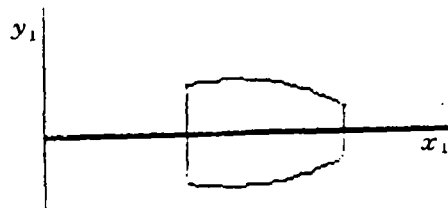


图 22 平面夹具时获得多通道集成窄带滤光片的挡板曲线

注:  $n=2$  把挡住的部分分成四等份。

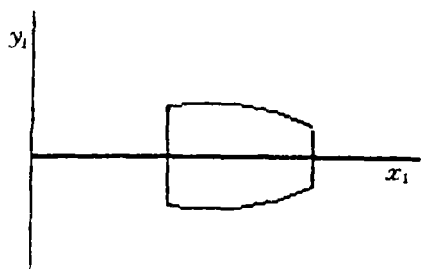


图 23 球面夹具时获得多通道集成窄带滤光片的挡板曲线  
注:  $n=2$ , 把挡住的部分分成四等份。

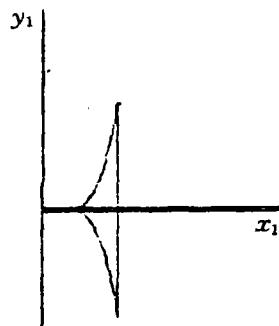


图 24 平面夹具时获得大面积平面均匀镀层的挡板曲线  
注:  $n=2$ , 把挡住的部分分成四等份。

## 7 讨 论

我们的工作表明这种集成窄带滤光片与 CCD 或二极管阵列组成的光谱探测元件是一种十分有前途的器件。目前国外(美国 OCLI 公司)这一领域的工作已有很快的发展,我们虽然已经起步,但是由于工艺基础落后,元件的性能还比不上国外最先进的结果。但就目前国内的技术上讲,要制成实用型的器件完全可以的。进一步采取以下几条工艺措施可以保证这一滤光片的性能达到国际水平和实用水平:

(1) 镀膜环境的净化可以减轻针孔的产生,并提高截止深度达到  $10^{-4}$ 。

(2) 采用较大抽速的电子枪镀膜机加上离子辅助或离子溅射镀膜,可以把所有的膜系镀在一块基片上同时保证有足够的机械强度。

(3) 采用全波段膜层厚度控制方法(即全光谱实时监控技术)提高膜厚的控制精度。

以上的技术条件在国内可以全部建立,可以预见这种滤光片的实用化不久即可来临。

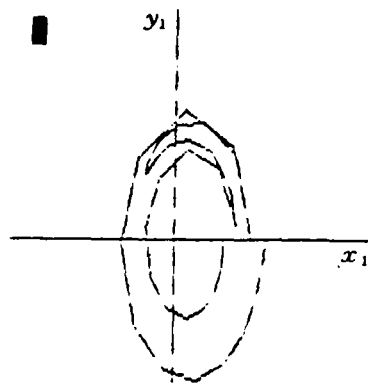


图 25 平面夹具时获得凸非球面的挡板曲线  
注:  $n=2$

**The Study and Manufacture of Variable  
Filters Used in Linear Detectors and  
Area Arrays Detectors**

**Jin Nanshan**

*(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)*

**Abstract**

By using self-designing static plane baffles and vacuum coating technique, we make two multi-channel variable filters used in the linear detector and area arrays detector, it is coated on the base slat with effective areas of  $25.4 \times 2.5\text{mm}$  and  $6 \times 6\text{mm}$  respectively; and we also describe the principle of forming these filters, the design and analysis of the film series, their constructing technique and utilization in detail.

The results of the experiment and the designing methods of plane baffles are given out; and we also present the designing results of static plane baffle that can be used in all kinds of optical film manufacturing.