维普资讯 http://www.cqvip.com

线性渐变滤光片镀制挡板设计

秦洁玉，罗崇泰，马勉军
（兰州物理研究所，表面工程技术国家级重点实验室， 甘肃 兰州 730000）

摘 要：提出了一种膜厚修正挡板的设计方法，分析给出了使用挡板情况下基片膜厚和监控片膜厚的关系，对线性渐变滤光片镀制挡板进行了设计，给出了设计结果。用设计的挡板成功镀制了线性渐变滤光片，并给出了镀制结果。

关键词：薄膜厚度；修正挡板；设计
中图分类号：O484.22+1 **文献标识码**：A **文章编号**：1006-7086(2007)01-0057-06

MASK DESIGN FOR LINEAR VARIABLE FILTERS

QIN Jie-yu, LUO Chong-tai, MA Mian-jun
(National Key Lab. Of Surface Engineering, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract: A method of mask for adjusting the thin film thickness design was described. Relation between the film thickness on the substrates and that on the chips was analyzed when a mask is used. The mask for linear variable filters was designed. Some linear variable filters were successfully fabricated and the results were given.

Key words: film thickness; modifying mask; design

1 引 言

线性渐变滤光片与传统的棱镜等分光元件相比具有体积小、通道密度大、通道中心波长理论上可以任意设计等优点。研究线性渐变滤光片的镀制方法很有意义。在这方面曾有人设计修正挡板来实现膜厚的渐变或提高薄膜厚度的均匀性[1-4]。作者提出了一种通用的膜厚修正挡板设计方法，可以设计出镀制线性渐变滤光片和大面积均匀膜的挡板。采用这种方法设计的挡板在1 cm×3 cm的Si基片和K9玻璃基片上镀制了线性渐变滤光片；给出了镀制结果。

2 膜厚修正挡板设计

2.1 设计方法

在旋转平面夹具情况下镀膜时，夹具的不同位置镀出的薄膜厚度 t 并不相同，而是距转动中心 O 的距离 ρ 的 $t(\rho)$ 函数 。这样，要镀出线性渐变滤光片或是均匀膜都需要设计特定形状的挡板来改变挡板后的膜料蒸气分布，从而达到修正夹具上膜厚分布函数，使之满足要求。

挡板形状如图1所示。中间圆孔用来透过监控光和膜料蒸气，外围孔洞（n 个）部分在蒸气中于夹具上的投影部分为镀膜区域。挡板置于夹具下方，如图2所示。

由图可知，θ 随 ρ' 的变化而变化，所以 $n\theta$ 占 2π 的比例也随 ρ' 而变化。通过调整 θ 和 ρ' 的函数关系，就能达到调整工件盘上沿径向的膜厚分布函数的目的。

收稿日期：2005-11-29.
作者简介：秦洁玉（1978-），男，山东省日照市人，硕士研究生，从事光学薄膜研究。

维普资讯 http://www.cqvip.com

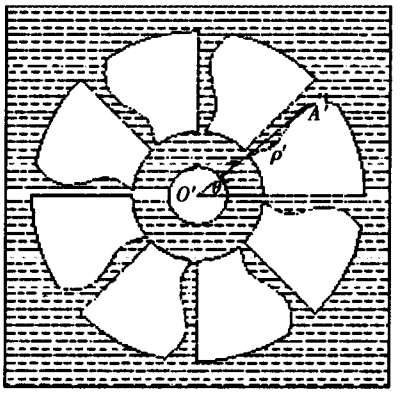


图1 挡板形状(n=8)

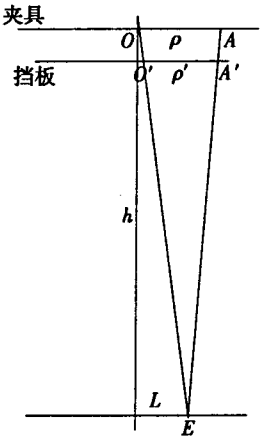


图2 各点对应关系

ρ'是考察点A'距中心O'的距离;θ是考察点对应的角度;$n\theta$是此处能透蒸气部分对应的角度;2π是不放挡板时此处能透过蒸气的角度。

在夹具上取距旋转中心距离为$\rho=a$的一点为基准点,它在挡板上的对应点为$\rho'=a'$的点。因为在夹具匀速旋转的情况下,被镀表面各点获得的薄膜厚度与在蒸发过程中其被暴露在蒸气流中的角度成正比[5],所以用挡板时夹具上的膜厚分布函数$t'(\rho)$和不用挡板时夹具上的膜厚分布函数$t(\rho)$的比例关系

$$t'(\rho)=\frac{n\theta(\rho')}{2\pi}\cdot t(\rho)$$

其中$\theta(\rho')$为所用挡板的孔洞曲边函数。结合图2中的几何关系可得$\theta(\rho')$与$t'(\rho)$的关系

$$\theta(\rho')=\frac{t'(\rho)}{t'(a)}\cdot\frac{t(a)}{t'(h\rho'/h')}\cdot\theta(a') \tag{1}$$

式中 h'为挡板高度;h为夹具高度;$t'(a)$为$\rho=a$处$t'(\rho)$的函数值;$t(a)$和$t'(h\rho'/h')$分别为不用挡板时$\rho=a$和$\rho=(h\rho'/h')$处$t(\rho)$的函数值;$\theta(a')$为$\rho'=a'$处$\theta(\rho')$的给定函数值。

由上面的关系式可以针对特定的膜厚变化要求,即函数$t'(\rho)$以及镀膜设备的参数来计算挡板曲边函数$\theta(\rho')$。

如要镀制膜厚沿半径方向线性变化的线性渐变滤光片,可取$t'(\rho)=b(\rho+c)$,则

$$\frac{t'(\rho)}{t'(a)}=\frac{\rho+c}{a+c}$$

$$\theta(\rho')=\frac{\rho+c}{a+c}\cdot\frac{t(a)}{t'(h\rho'/h')}\cdot\theta(a')$$

式中 c为常数,由滤光片的膜厚变化要求和基片的安装位置确定。

如要镀均匀膜,可取$t'(\rho)=c$,则

$$\frac{t'(\rho)}{t'(a)}=1$$

$$\theta(\rho')=\frac{t(a)}{t(h\rho'/h')}\cdot\theta(a')$$

同理,可以计算出镀制膜厚沿半径方向以任意方式变化的薄膜所需要的挡板曲线。

设计挡板时,必须设定一个$\theta(a')$的值才能得到具体的函数$\theta(\rho')$,又因为必须保证$n\theta$小于2π才能实现挡板设计,故$\theta(a')$的值必须设定在一定的范围之内才能实现挡板设计。由此可知$\theta(a')$的取值必须满足下式

$$\theta(a')<\frac{2\pi}{n}\cdot\frac{t'(a)}{t'(\rho)}\cdot\frac{t(\rho)}{t(a)} \tag{2}$$

理论上可以设定$\theta(a')$的值为满足式(2)的任意值,但若$\theta(a')$设的太小就会因挡板截流蒸气太多而大大

维普资讯 http://www.cqvip.com

影响镀膜效率,同时还会浪费膜料。所以,应该设定 $\theta(a')$ 为小于但又比较接近 $\frac{2\pi}{n}\cdot\frac{t'(a)}{t'(\rho)}\cdot\frac{t(\rho)}{t(a)}$ 的最小值的一个值。

另外,在安装挡板时应该尽量使工件盘的转动中心(即中心点 O)、挡板的中心点 O'、蒸发源 E 在同一条直线上。在挡板设计时应该将挡板与工件盘之间的安装距离设计的尽量小,这样会有以下好处:

(1)可以减小挡板安装位置的偏差给膜厚分布带来的影响;(2)可以减小膜料蒸气在挡板后的绕射作用给膜厚分布带来的影响;(3)可以近似认为 $\rho=\frac{h\rho'}{h'}=\rho'$ 而不影响设计精度;(4)可以在一定程度上解决固定挡板不能同时兼顾 2 个蒸发源的问题。

2.2 监 控

对于光学薄膜厚度监控多采用光学控制法[6,7]。使用挡板镀膜时因挡板截流了部分射向工作区域的膜料蒸气,而射向监控片的蒸气不被截流,所以监控片上的膜厚与工作区域镀得的膜厚不同,而是存在一定的函数关系。它们的函数关系如下

$$t'(\rho)=\frac{n\theta(\rho')}{2\pi}\cdot\frac{t(\rho)}{t(0)}\cdot t'(0) \tag{3}$$

式中 $\frac{n\theta(\rho')}{2\pi}$ 为已知;$t(0)$ 为 $\rho=0$ 处 $t(\rho)$ 的函数值。由监控到的 $t'(0)$ 就能知道整个工作区域的膜厚分布函数 $t'(\rho)$。

实际上只要对工作区域的一点(基准点 B)的膜厚进行监控就足够了。这样,可以令上式中的 $\rho=a$,得到 $t'(a)$ 与 $t'(0)$ 的关系式

$$t'(a)=\frac{n\theta(\rho')}{2\pi}\cdot\frac{t(a)}{t(0)}\cdot t'(0)$$

式中的 $\frac{n\theta(\rho')}{2\pi}$ 已知,$\frac{t(a)}{t(0)}$ 为常数。

3 线性渐变滤光片镀制挡板设计

工件盘在面源斜上方时[5]

$$t(\rho)=\frac{(h^2+L^2)^2(h^2+L^2+\rho^2)}{[(h^2+L^2+\rho^2)^2-4L^2\rho^2]^{\frac{3}{2}}}\cdot t(0) \tag{4}$$

从而

$$\frac{t(a)}{t(\rho)}=\frac{h^2+L^2+a^2}{h^2+L^2+\rho^2}\cdot\left[\frac{(h^2+L^2+\rho^2)^2-4L^2\rho^2}{(h^2+L^2+a^2)^2-4L^2a^2}\right]^{\frac{3}{2}} \tag{5}$$

基片(1 cm×3 cm)装在距旋转中心 5~8 cm,两端中心波长比为 2:5 时,$c=-3$ cm,所以

$$\frac{t'(\rho)}{t'(a)}=\frac{\rho-3}{a-3} \tag{6}$$

测得 $h=32$ cm,$L=14$ cm。取 $a=8$ cm,$h'\approx h$,则 $\rho'\approx\rho$,$a'\approx a$,并将式(5)、式(6)一起代入式(1),有

$$\theta(\rho')=\frac{256.8(\rho'-3)}{1\ 220+\rho'^2}\left(\frac{1.488\ 4\times10^6+1\ 656\rho'^2+\rho'^4}{1.598\ 48\times10^6}\right)^{\frac{3}{2}}\cdot\theta(a') \tag{7}$$

取 3.0 cm$<\rho'<$9.5 cm,$n=4$,则由式(2)知 $\theta(a')<1.18$。取 $\theta(a')=1$,并将其代入式(7)得挡板的曲边函数为

$$\theta(\rho')=\frac{256.8(\rho'-3)}{1\ 220+\rho'^2}\left(\frac{1.488\ 4\times10^6+1\ 656\rho'^2+\rho'^4}{1.598\ 48\times10^6}\right)^{\frac{3}{2}} \tag{8}$$

挡板的另外 3 条曲边函数分别为:$\theta(\rho')-\frac{\pi}{2}$,$\theta(\rho')+\pi$,$\theta(\rho')+\frac{3\pi}{2}$,由此函数作出的挡板形状如图 3 所示。

维普资讯 http://www.cqvip.com

图中中心圆孔半径3 cm,外围孔洞距中心距离4.0 cm< ρ <9.5 cm,外围正方形的边长为28 cm。这些尺寸在设计中可以根据实际情况取成别的合适数值。

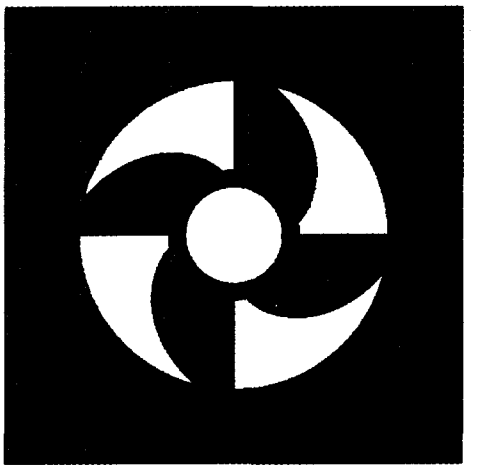


图3 渐变膜挡板(n=4)

将使用此挡板前后夹具上的膜厚变化情况加以对比。使用挡板前夹具上的膜厚变化情况符合式(4);使用挡板时

$$t'(\rho)=\frac{4\theta(\rho)}{2\pi}\cdot t(\rho) \tag{9}$$

挡板紧贴夹具安装时,将 h=32 cm,L=14 cm,$h'\approx h$, $\rho'\approx\rho$ 代入式(4)和式(9)得

$$t(\rho)=\frac{1.488\ 4\times10^{6}(1\ 220+\rho^{2})}{(1.488\ 4\times10^{6}+1\ 656\rho^{2}+\rho^{4})^{\frac{3}{2}}}\cdot t(0)$$

$$0\ \text{cm}<\rho<9.5\ \text{cm} \tag{10}$$

$$t'(\rho)=\frac{764\ 442\ 240(\rho-3)}{\pi(1.598\ 48\times10^{6})^{\frac{3}{2}}}\cdot t(0)\qquad 4.0\ \text{cm}<\rho<9.5\ \text{cm} \tag{11}$$

此时,0 cm< ρ <3 cm 范围内蒸气不被截流,$t'(\rho)=t(\rho)$; 3 cm< ρ <4 cm 范围内蒸气全部会被截流,$t'(\rho)=0$; 4.0 cm< ρ <9.5 cm 范围内蒸气被部分截流,夹具上膜厚变化情况符合式(11)。

挡板离开夹具一段距离安装(其中心位于基片旋转中心与蒸发源的连线上)时,$h'\neq h$, $\rho'=\frac{h\rho'}{h'}$。取 h'= 28 cm,则 $\rho'=\frac{7\rho}{8}$,将其代入式(8)得挡板距夹具4 cm时挡板在夹具上投影的方程为

$$\theta(\rho)=\frac{256.8(\frac{7\rho}{8}-3)}{1\ 220+\frac{49\rho^{2}}{64}}\left[\frac{1.488\ 4\times10^{6}+1\ 267.875\rho^{2}+(\frac{7\rho}{8})^{4}}{1.598\ 48\times10^{6}}\right]^{\frac{3}{2}} \tag{12}$$

取 h'==24 cm,则 $\rho'=\frac{3\rho}{4}$,将其代入式(8)得挡板距夹具8 cm时挡板在夹具上投影的方程为

$$\theta(\rho)=\frac{256.8(\frac{3\rho}{4}-3)}{1\ 220+\frac{9\rho^{2}}{16}}\left[\frac{1.488\ 4\times10^{6}+931.5\rho^{2}+(\frac{3\rho}{4})^{4}}{1.598\ 48\times10^{6}}\right]^{\frac{3}{2}} \tag{13}$$

将式(10)、式(12)代入式(9)得挡板距夹具4 cm时夹具上镀膜区域内的膜厚分布

$$t'(\rho)=\frac{513.6\times1.488\ 4\times10^{6}(1\ 220+\rho^{2})(\frac{7\rho}{8}-3)}{\pi(1\ 220+\frac{49}{64}\rho^{2})}\left[\frac{1.488\ 4\times10^{6}+1\ 267.875\rho^{2}+(\frac{7\rho}{8})^{4}}{1.598\ 48\times10^{6}(1.488\ 4\times10^{6}+1\ 656\rho^{2}+\rho^{4}}\right]^{\frac{3}{2}}\cdot t(0) \tag{14}$$

因 ρ'为3.0 cm、4.0 cm、9.5 cm的点,在夹具上对应于 ρ 为3.43 cm、4.57 cm、10.86 cm的点,故在0 cm< ρ <3.43 cm 范围内蒸气不被截流,$t'(\rho)=t(\rho)$;3.43 cm< ρ <4.57 cm 范围内蒸气全部被截流,$t'(\rho)=0$; 4.57 cm< ρ <10.86 cm 范围内蒸气被部分截流,夹具上膜厚变化情况符合式(14)。

将式(10)、式(13)代入式(9)得挡板距夹具10 cm时夹具上镀膜区域内的膜厚分布

$$t'(\rho)=\frac{513.6\times1.488\ 4\times10^{6}(1\ 220+\rho^{2})(\frac{3\rho}{4}-3)}{\pi(1\ 220+\frac{9}{16}\rho^{2})}\left[\frac{1.488\ 4\times10^{6}+931.5\rho^{2}+(\frac{3\rho}{4})^{4}}{1.598\ 48\times10^{6}(1.488\ 4\times10^{6}+1\ 656\rho^{2}+\rho^{4}}\right]^{\frac{3}{2}}\cdot t(0) \tag{15}$$

维普资讯 http://www.cqvip.com

因 ρ' 为 3.0 cm、4.0 cm、9.5 cm 的点在夹具上对应于 ρ 为 4.00 cm、5.33 cm、12.67 cm 的点，故在 0 cm< ρ <4 cm 范围内蒸气不被截流，$t'(\rho)=t(\rho)$；4.00 cm< ρ <5.33 cm 范围内蒸气全部截流，$t'(\rho)=0$；5.33 cm< ρ <12.67 cm 范围内蒸气被部分截流，夹具上膜厚变化情况符合式(15)。

由此作出使用此挡板前后夹具上的膜厚变化情况对比，如图 4 所示。图中上方实线表示使用挡板前的膜厚变化情况；点线表示挡板按设计安装(紧贴夹具)时的膜厚变化情况；虚线表示挡板安装在距夹具 5 cm (中心在夹具旋转中心与蒸发源连线上)时的膜厚变化情况；点划线表示挡板安装在距夹具 10 cm (中心在夹具旋转中心与蒸发源连线上)时的膜厚变化情况。由图可知，使用挡板并按设计安装时夹具上在工作区域(4.0 cm< ρ <9.5 cm)内的膜厚呈线性变化，符合设计要求；使用挡板但不按设计安装时，夹具上的工作区域随挡板与夹具之间距离的增大而增大并向远离夹具旋转中心方向移动，膜厚的线性也随之慢慢变差。

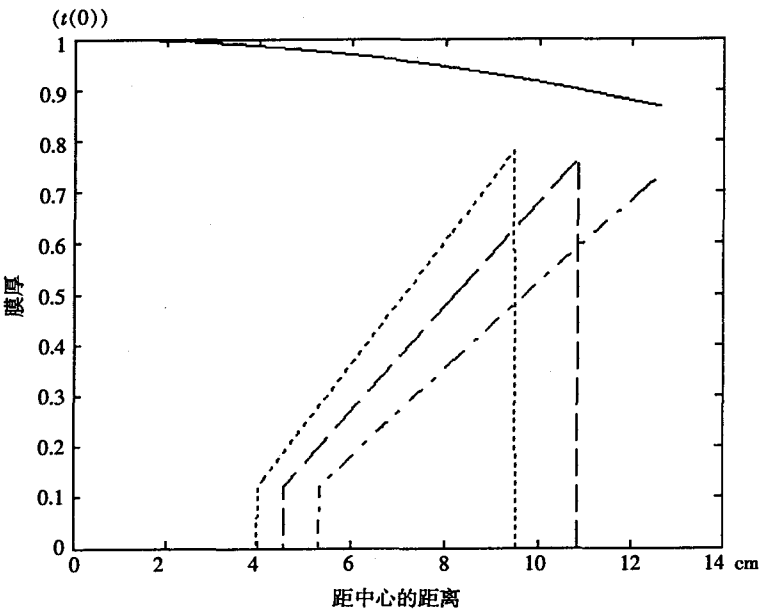


图 4 膜厚的变化对比

用此挡板镀出的线性渐变膜的上表面相对基片表面的斜率 $b=\frac{t(a)}{a+c}$，它随镀膜的厚度变化而变化。

4 挡板的制作

挡板选用 1 mm 厚的不锈钢板用线切割技术加工而成。由于挡板选材厚度太薄，在镀制初期出现了挡板受热变形凸起，压迫夹具以致无法正常镀膜的问题，后采取四角钻孔固定并拉大挡板与基片的距离的方法，使这一问题得到一定程度的解决。建议以后的工作者选用较厚(3~5 mm)的板材加工挡板，并对边缘进行倒角，以尽量消除挡板厚度对膜料蒸气分布的影响。如对膜厚分布要求很高，可在镀制过程中根据实测情况对挡板进行适量的修正。

5 线性渐变滤光片的镀制

为验证这种膜厚修正方法的可行性，作者设计了 HLHL2HLE 和 $(HL)^2 2H(LH)^2 L(HL)^2 2H(LH)^2$ 2 种简单带通膜系镀制线性渐变滤光片。基片选用 1 cm×3 cm 的 Si 基片和 K9 玻璃基片。膜料选用 ZnS 和 Na_3AlF_6。蒸发源选用钽舟。真空室内温度在镀膜前先升至 170~175 ℃再降至 150~165 ℃保温 1 h。镀膜前用离子源对基片轰击约 15 min 来对基片进行清洗。ZnS 和 Na_3AlF_6 的蒸发电流分别选在 197~250 A 和 150~170 A。ZnS 和 Na_3AlF_6 的沉积速率分别约为 4 nm/s 和 5 nm/s。镀膜时夹具转速约 9.5 r/min(如果不受电机功率的限制可适当加快夹具的旋转速度)，真空度优于 3.3×10^{-3} Pa。

6 镀制结果

作者分别用 2 种膜系镀制了 0.4~1.0 μm、1.2~3.0 μm、2~5 μm、2.8~7.0 μm 等波段的线性渐变滤光片。前 2 个波段 2 种膜系都镀制成功；后 2 个波段对 7 层简单膜系镀制成功，19 层膜系镀出后降到室温过程中膜层因应力过大而崩裂脱落。

2~5 μm 波段 7 层渐变滤光片的实测光谱如图 5 所示。图中各通带分别为距基片一端距离约为 5 mm、10 mm、15 mm、20 mm 和 25 mm 5 个点测得的通带(通带两侧的次峰已去除)。此 5 点的通带中心波长分别为 2 739.7 nm、3 260.0 nm、3 808.2 nm、4 338.0 nm 和 4 840.2 nm.，其差值分别为 520.3 nm、548.2 nm、

维普资讯 http://www.cqvip.com

529.8 nm和502.2 nm,与理论计算的100 nm/mm的渐变速率基本一致。据理论计算,此5点的中心波长应分别为2 592.5nm、3 111.0 nm、3 629.5nm、4 148.0 nm和4 666.5 nm,与实测值比较可知基片各点膜厚都比理论值偏厚3.7%~5.7%。

1.2~3.0 μm波段19层渐变滤光片的实测光谱如图6所示。图中各通带分别为距基片一端距离约为15 mm、10 mm和5 mm 3个点测得的通带。此3点的通带中心波长为2 205 nm、2 520 nm和2 819 nm,其差值分别为315 nm和299 nm,与理论计算的60 nm/mm的渐变速率一致。据理论计算,此3点的中心波长应分别为2 177.7 nm、2 488.8 nm和2 780.0 nm,与实测值比较可知基片各点膜厚都比理论值偏厚了约1.25%~1.40%。

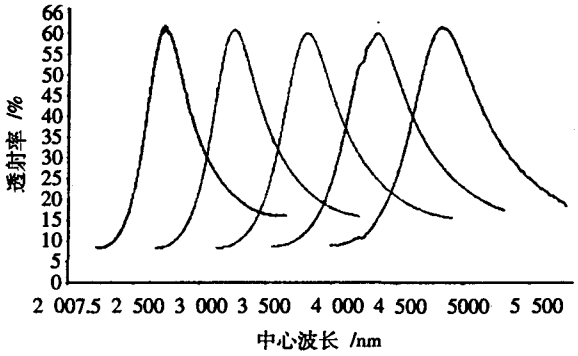


图5 2~5 μm波段光谱图

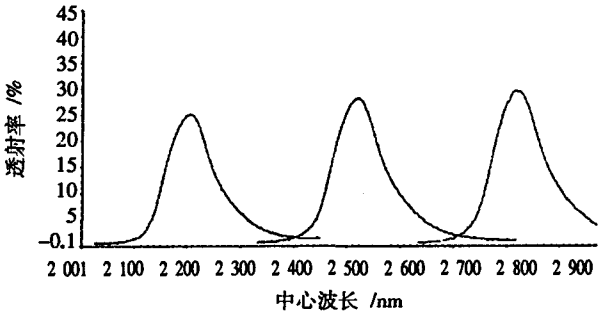


图6 1.2~3.0μm波段光谱图

0.4~1.0 μm波段19层渐变滤光片的实测光谱如图7所示。图中各通带分别为距基片一端距离5 mm、15 mm和25 mm 3个点测得的通带。此3点的通带中心波长分别为534.7 nm、765.0 nm和1 000.0 nm,其差值分别为230.3 nm和235.0 nm,与理论计算的20 nm/mm的渐变速率基本一致。据理论计算,此3点的中心波长应分别为518.50 nm、777.75 nm和933.30 nm,与实测值比较可知基片各点膜厚比理论值偏厚-1.64%~7.14%。

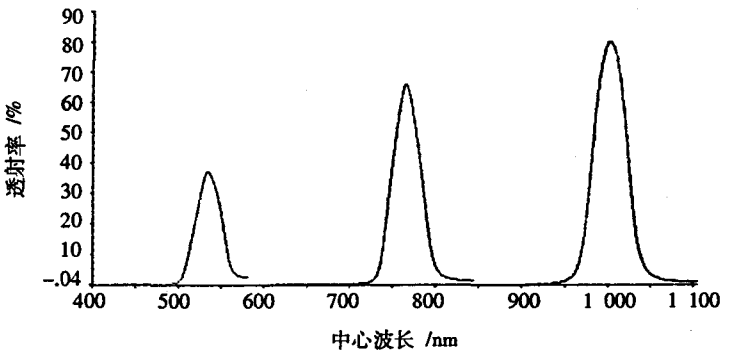


图7 0.4~1.0 μm波段光谱图

7 结 论

作者用设计的挡板镀制了多个波段的线性渐变滤光片。结果显示:滤光片的薄膜厚度(或中心波长)沿基片长度方向有很好的线性;滤光片的薄膜厚度与理论设计值符合较好,它的偏差仅为-1.64%~7.14%。而滤光片的薄膜厚度与理论设计值的偏差还可以通过提高膜厚的控制精度的办法来减小。这就说明用这种方法可以很好地修正基片架上的膜厚分布,镀制出符合设计要求的线性渐变滤光片。

参考文献:

[1] 金南善. 用于线、面阵探测器上的多通道集成窄带滤光片的研制[J]. 光学精密工程,1993,1(5):27~35.
[2] 林坚,林永钟,廖群峰. 光学薄膜厚度修正挡板的设计[J]. 光子学报,1999,28(9):141~145.
[3] 李新昌. 渐变滤光铬膜的遮板设计与真空镀制[J]. 电子工业专用设备,1999,28(4):16~19;59.
[4] 卜忍安,王文江,张劲涛. 多功能镀膜机的研制[J]. 真空电子技术,1999,6:33~37.
[5] 屠磊金. 光学系统计算[M] . 北京:国防工业出版社,1965.
[6] 唐晋发,顾培夫. 薄膜光学与技术[M] .北京:机械工业出版社,1987.
[7] 熊玉卿. 超窄带滤光片制作技术[J] .真空与低温,2005,11(3): 125~130.