温度和吸湿对窄带滤光片性能的影响

崔　云，马勉军，熊玉卿，王多书，黄良甫
（兰州物理研究所，甘肃 兰州　730000）

摘　要：根据窄带滤光片性能对温度和吸湿依赖性的数学模型，进行了初步实验验证，得到了温度和吸湿对窄带滤光片光学性能的影响规律。

关键词：窄带滤光片；聚集密度；光学薄膜；薄膜稳定性
中图分类号：O484.4+1；O436.2　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1006-7086(2004)02-0075-07

INFLUENCE OF TEMPERATURE AND HUMIDITY TO THE PERFORMANCE OF NARROW BAND FILTERS

CUI Yun，MA Mian-jun，XIONG Yu-qing，WANG Duo-shu，HUANG Liang-fu
（**Lanzhou Institute of Physics，Lanzhou 730000，China**）

Abstract：A model has been established to analyze the influence of temperature and humidity to the performance of narrow bandpass filters. The experiment results were coincident with those of calculation. The law of influence has been obtained.

Key words：narrow bandpass filter；packing density；optical thin film；thin film stability

1　引　言

随着窄带滤光片在航空、航天、国防、通讯、环保、分析仪器等各个领域的广泛应用，对其性能也提出了更高的要求。温度和吸湿是影响窄带滤光片性能的 2 个主要因素。

作者主要对由 Ta_2O_5/SiO_2膜系组成的滤光片进行研究，分析其光学性能与聚集密度、温度变化和吸湿等因素之间的关系。根据吸湿及温度引起窄带滤光片各层膜的厚度误差，给出了吸湿前后及温变前后光谱漂移的模型。通过对窄带滤光片的光学稳定性进行分析和初步实验，提出了改善窄带滤光片光学性能的措施。

2　吸湿对窄带滤光片光学性能的影响

全介质窄带滤光片暴露于空气后，很快出现宏观上的吸水现象。先是膜层表面上出现许多吸水斑点，之后逐渐扩大并连成一片，最后形成均匀的吸水层。待膜层吸水达到稳定后，测量滤光片的透射率就会发现，不仅峰值波长移向长波，而且峰值波长的透射率也有所增加。

2.1　引起原因

薄膜中存在一定数量的孔隙，在膜层未吸水前，膜层中的孔隙为空气所填充，其折射率为 1；吸水后，孔隙被水填充，水的折射率为 1.33。由于孔隙内折射率的变化，使得膜层的平均折射率增加，又由于膜层的光学厚度随着折射率增加而增加，因此出现了滤光片峰值波长移向长波的现象。

2.2　分析计算

为了表征薄膜的这种结构特性，所以人们提出了聚集密度（P）概念，它被定义为薄膜中固体部分的体积

收稿日期：2004-02-20.
作者简介：崔云（1978－），女，山西省长治市人，硕士研究生，从事窄带滤光片的研究工作。

与总体积之比，是描述薄膜疏松程度的物理量。

膜层吸水前，P 与膜层平均折射率 n 的关系由下式给出[1]

$$n = Pn_F + (1-P)n_0 \tag{1}$$

式中 n_0 为空气折射率；n_F 为膜料折射率。

如果 f 是总孔隙中被水填充的百分数，则

$$n = Pn_F + (1-f)(1-P)n_0 + f(1-P)n_w \tag{2}$$

式中 n_w 为水的折射率。

在一定温度下，薄膜孔隙吸湿引起的漂移量 $\Delta\lambda$ 可用下式表示

$$\Delta\lambda = (\lambda_0/\pi)\sum_{k=1}^{m} A_k \Delta a_k \tag{3}$$

式中 λ_0 是滤光片峰值波长；m 是层数；$\Delta a_k = (4\pi/\lambda_0)\Delta(n_k d_k)$，是第 k 层膜在 λ_0 波长时的相位厚度误差，而 $\Delta(n_k d_k)$ 是薄膜中由于孔隙吸湿而产生的光学厚度误差。系数 A_k 的大小决定了 Δa_k 对漂移的影响程度，从该式可以看出薄膜滤光片中的每一层膜对 $\Delta\lambda$ 的影响是不同的。A_k 的数值可由下列公式定量给出

$$\begin{cases} A_k = a_k - b_k n_s^2 & k = 1, 2, \cdots, (m-1)/2 \\ A_k = a_{m+1-k} - b_{m+1-k} n_0^2 & k \geqslant (m+3)/2 \\ A_k = 1/(2+2B) & k = (m+1)/2 \end{cases}$$

其中

$$B = n_L/(n_H - n_L)$$

$$a_k = [2\times(1+B)]^{-1}(n_L/n_H)^{(m+1)/2-k}$$

$$b_k = [2\times(1+B)n_L^2]^{-1}(n_L/n_H)^{(m+1)/2+k}$$

式中 n_s 为基底材料折射率；n_L 为低折射率材料的折射率；n_H 为高折射率材料的折射率。

在完全吸湿的情况下，针对 SiO_2 和 Ta_2O_5 的不同聚集密度，利用上述公式计算了 23 层和 37 层窄带滤光片的中心波长漂移量，如表 1 所列。其中 23 层滤光片带宽 60 nm，膜系结构为 HLH LLHLH L HLH LL HLH L HLH LL HLH；37 层滤光片带宽 14 nm，膜系结构为 HLHL HH LHLHLHLHLHLHL HH LHLHLHLHLHLHL HH LHLH(下划线标注的为间隔层，H 和 L 表示 Ta_2O_5 和 SiO_2 层)。表 1 表明：

(1) 光学稳定性与膜系结构有着密切关系。对于不同的膜系结构，相同的聚集密度，即使总膜层不同，

表 1 吸湿效应引起窄带滤光片中心波长漂移的计算值

层数	Ta_2O_5 的聚集密度	SiO_2 的聚集密度	中心波长漂移量 $\Delta\lambda$(nm)
23	0.98	0.98	3.10
		0.96	5.26
		0.94	7.44
	0.96	0.98	4.10
		0.96	6.26
		0.94	8.44
	0.94	0.98	5.12
		0.96	7.28
		0.94	9.46
37	0.98	0.98	2.90
		0.96	4.36
		0.94	5.84
	0.96	0.98	4.38
		0.96	5.84
		0.94	7.32
	0.94	0.98	5.90
		0.96	7.36
		0.94	8.84

但在完全吸湿的情况下，中心波长的漂移量也相近。随着层数的增加，光学厚度误差对漂移的影响相对减小。

(2) 间隔层不同，高折射率材料与低折射率材料引起的中心波长漂移的幅度不同。当间隔层为低折射率材料时，聚集密度每减小 0.2，高折射率材料吸湿引起的中心波长漂移量相应增加约 1.0 nm，而低折射率材料吸湿引起的中心波长漂移量相应增加约 2.2 nm；当间隔层为高折射率材料时，聚集密度每减小 0.2，高折射率材料和低折射率材料吸湿引起的中心波长漂移量都相应增加约 1.5 nm。这种现象产生的原因，一是低折射率材料吸湿后，折射率提高的相对值较高，如当聚集密度为 0.94 时，SiO_2的折射率在吸湿前后的值分别为 1.426 6 和 1.446 4，增加了 1.39%，而 Ta_2O_5的折射率在吸湿前后的值分别为 2.053 0 和 2.072 8，只增加了 0.96%；二是间隔层与其他膜层相比，对中心波长的漂移影响相对较大。

(3) 吸湿程度不同，引起的滤光片的中心波长漂移量也不同。利用式(3)，可以计算出 Ta_2O_5层吸湿、SiO_2层吸湿及两膜层同时吸湿后中心波长的漂移值，根据这些值绘制了在不同聚集密度下中心波长漂移的趋势图(定义邻接空气的膜层为第一层)，如图 1 和图 2 所示。

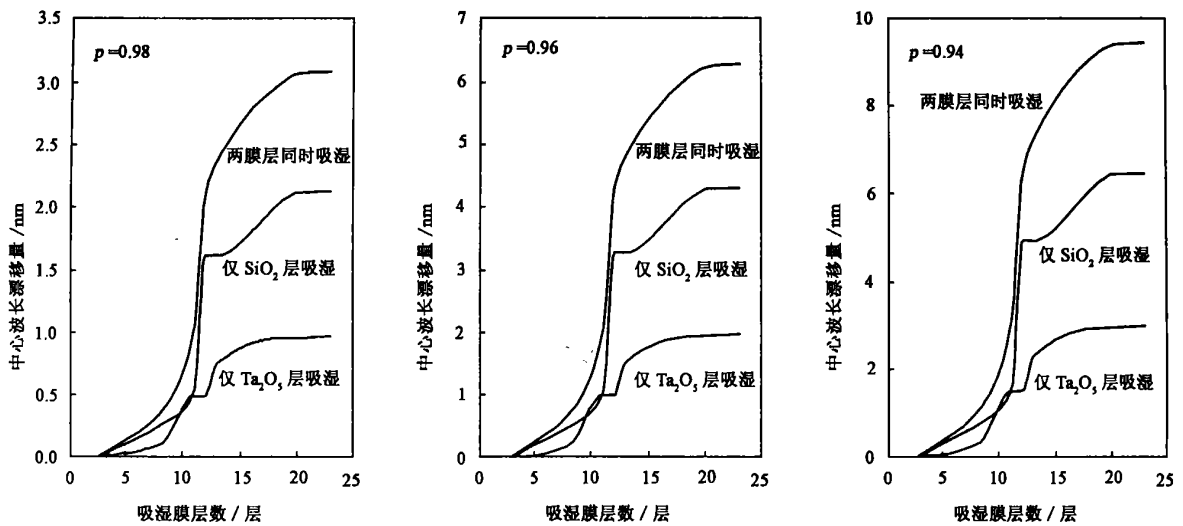

图 1　23 层窄带滤光片不同膜层吸湿后中心波长漂移的趋势图

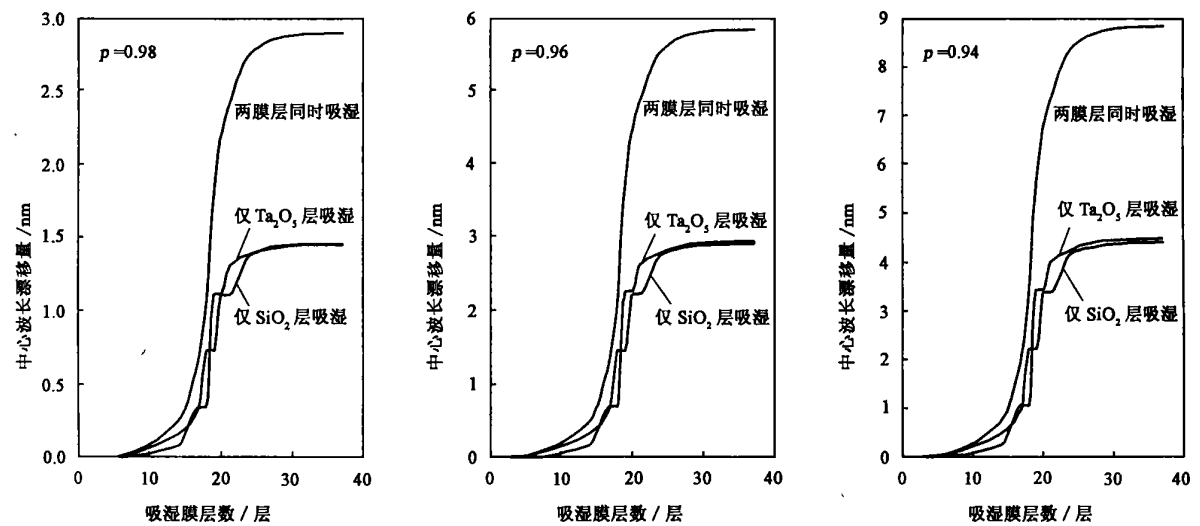

图 2　37 层窄带滤光片不同膜层吸湿后中心波长漂移的趋势图

另外，使用 MACLEOD ESSENTIAL 薄膜设计软件，可以模拟出 23 层膜和 37 层膜不同膜层吸湿后的透射光谱漂移图，如图 3～图 8 所示。

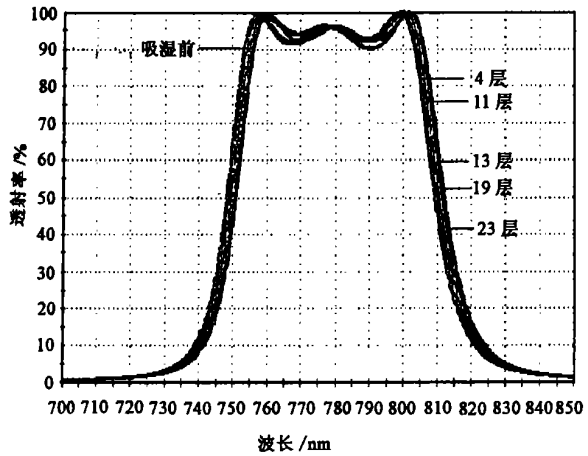

图 3 聚集密度为 0.98 时，23 层滤光片的不同膜层吸湿后的透射光谱漂移图

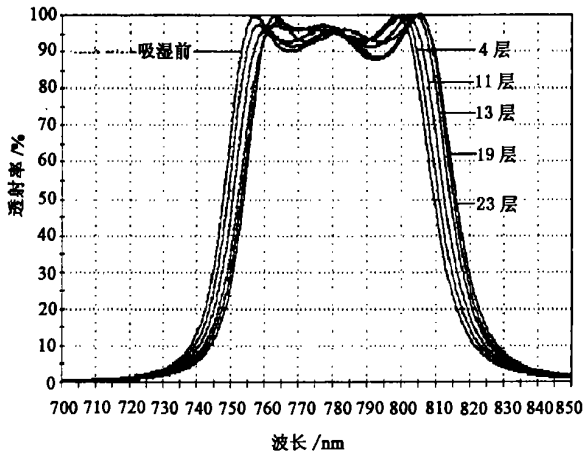

图 4 聚集密度为 0.96 时，23 层滤光片的不同膜层吸湿后的透射光谱漂移图

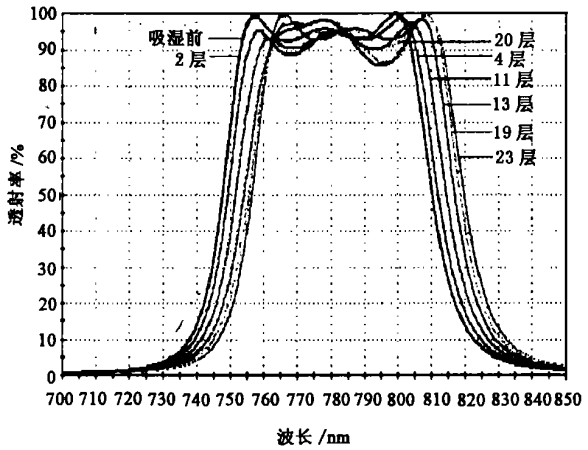

图 5 聚集密度为 0.94 时，23 层滤光片的不同膜层吸湿后的透射光谱漂移图

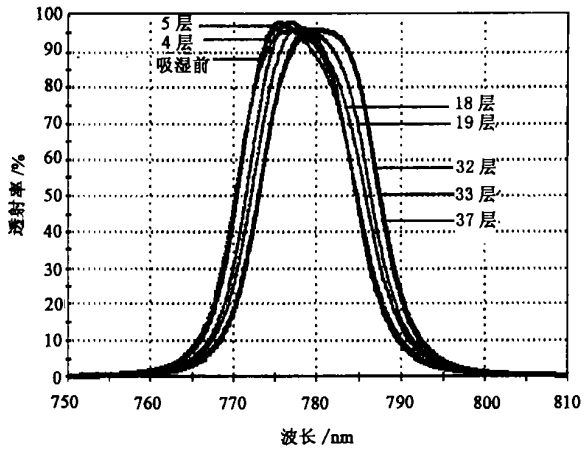

图 6 聚集密度为 0.98 时，37 层滤光片的不同膜层吸湿后的透射光谱漂移图

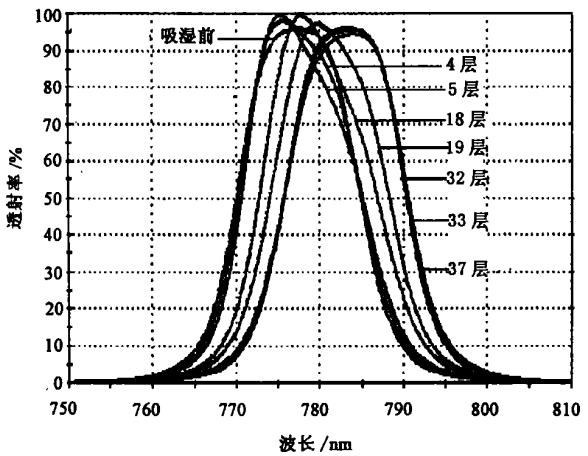

图 7 聚集密度为 0.96 时，37 层滤光片的不同膜层吸湿后的透射光谱漂移图

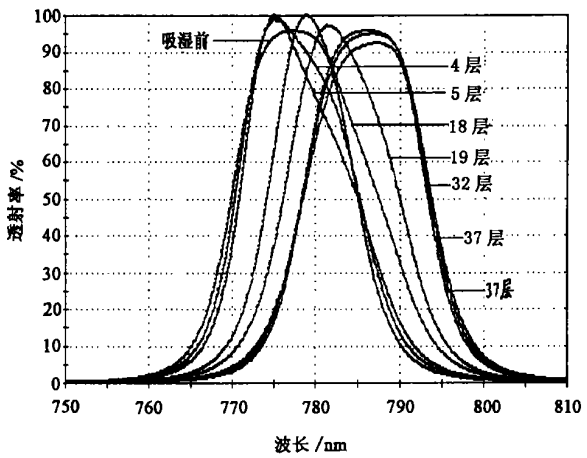

图 8 聚集密度为 0.94 时，37 层滤光片的不同膜层吸湿后的透射光谱漂移图

从趋势图及模拟光谱图可以看出：

(1) 前几层吸湿对中心波长的影响比较小，几乎为 0。膜层越多，每一层膜吸湿对中心波长漂移的影响

越小。如对 23 层膜和 37 层膜的前 3 层,虽然材料和光学厚度都相同,但当 P 等于 0.94,前 3 层膜吸湿后,23 层膜的中心波长漂移量为 0.08 nm,37 层膜的中心波长漂移量为 0。这正是由于随着膜层数的增加,光学厚度误差对漂移的影响相对减小造成的。

(2) 随着吸湿膜层的增加,每一层膜对中心波长的影响也逐步增大,中间层及其邻接层吸湿对中心波长的影响最大,靠近基底的膜层吸湿对中心波长的影响较小。

(3) 吸湿对窄带滤光片的通带和透射率影响不大。

2.3　吸湿后光谱漂移的实验

将滤光片置于相对湿度为(95±1)%、温度为(20±1) ℃的密闭容器中存放 72 h。图 9 和图 10 分别示出了 23 层滤光片和 37 层滤光片吸湿前后的透射光谱图。图中曲线 1 为实验前透射光谱,曲线 2 为实验后透射光谱。

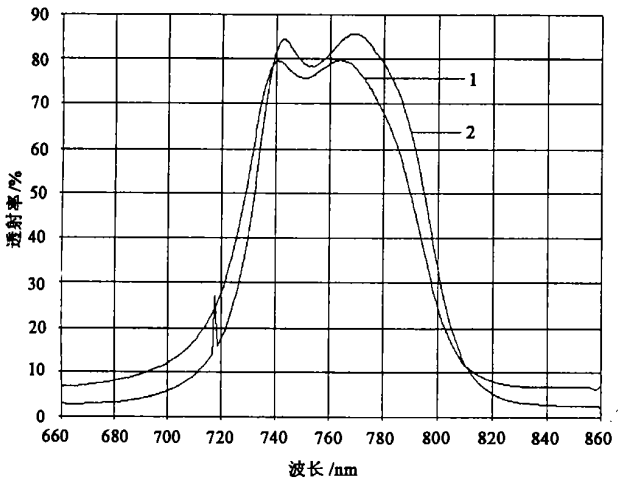

图 9　23 层膜滤光片吸湿前后的透射光谱漂移

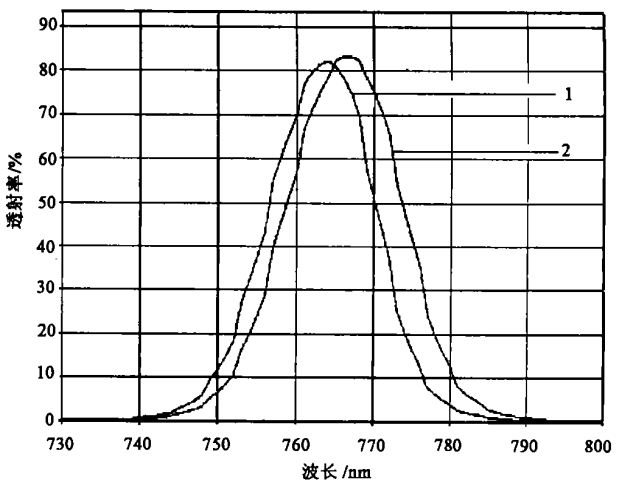

图 10　37 层膜滤光片吸湿前后的透射光谱漂移

由图可清楚地看出滤光片的光谱整体向长波方向漂移,通带透射率略有提高。23 层膜滤光片的中心波长向长波方向漂移了约 2.8 nm,中心波长透射率增加了 2.4%。37 层膜滤光片的中心波长向长波方向漂移了约 2.5 nm,中心波长透射率增加了 1.7%。

3　工作环境温度对窄带滤光片光学性能的影响

3.1　引起原因

窄带滤光片随环境温度变化发生的漂移可以归因于薄膜材料的折射率温度系数及其热膨胀系数。窄带滤光片的光学特性对温度变化比较敏感。对于具有正温度系数的材料,当温度变化很小时,随温度的上升,最主要的影响就是波峰向长波方向移动;当温度变化较大时,通常滤光片的湿气会放出来,有可能引起波峰向短波方向移动 。

3.2　计算分析

窄带滤光片的中心波长漂移量对环境温度的依赖会有物理厚度变化引起的漂移,温度折射率变化引起的漂移和热膨胀不匹配引起的漂移[2]。

当温度改变时,热应力使薄膜材料发生弹性形变,从而导致薄膜的厚度和折射率的变化。为了分析这一过程,可以利用 Haruo Takashashi 在分析红外滤光片的温度稳定性时建立的计算模型[3]。在 T_0温度下,膜层的平均折射率为 $n_1 = N_0 P_0 + 1 - P_0$。其中 P_0为平均聚集密度;N_0为膜系等效折射率。

由于基底热膨胀系数与膜系的热膨胀系数不同,温度变化时,膜系发生弹性形变。假设基底和薄膜的热膨胀系数是各向同性的,x 方向与 y 方向的线性膨胀相同,忽略微小量,x、y 方向的热膨胀可表示为

$$L_x = L_y = L_0[1 + t(1 - s)/E] \tag{4}$$

在 z 方向,即薄膜厚度方向的热膨胀为

$$L_z = L_0(1 - 2st/E) \tag{5}$$

式中 L_0为薄膜内任一区域立方体的一条边的长度；E 为杨氏弹性模量；s 为泊松比；t 为 x、y 方向的热应力。

又因为当温度变化不大时，薄膜和衬底的热膨胀可以认为是线性的，故设 α、β 分别为基底和薄膜的热膨胀系数，则

$$t(1-s)/E=(\alpha-\beta)(T-T_0) \tag{6}$$

温度为 T 时的薄膜体积可以写成

$$V'_T=L_xL_yL_z=L_0^3[1+2(\alpha-\beta)(1-2s)/(1-s)] \tag{7}$$

再考虑膜系本身的热膨胀为 $\Delta V_T=3V_0\beta$，，则基底热应力和膜系热膨胀 2 种效应的累加有

$$V_T=L_0^3[1+2(\alpha-\beta)(1-2s)/(1-s)+3\beta] \tag{8}$$

由此，T 温度下的平均聚集密度 P_T可表示为(不考虑吸湿)

$$P_T=P_0(1+3\beta)/(1+3\beta+A) \tag{9}$$

式中 $A=2(\alpha-\beta)(1-2s)(T-T_0)/(1-s)$。

考虑薄膜的变形和自身热膨胀，可得温度为 T 时的薄膜总物理厚度为

$$d_T=d_0(1-B+\beta) \tag{10}$$

式中 $B=2s(\alpha-\beta)(T-T_0)/(1-s)$；$d_0$ 是温度为 T_0时的薄膜厚度。

引入标准化的折射率温度系数(它由薄膜自身的性质所决定)

$$\delta=(\mathrm{d}N/\mathrm{d}T)/N \tag{11}$$

令膜系等效折射率随温度变化后的值 $N_T=N_0(1+\delta)^{T-T_0}$，可以得到温度为 T 时的平均折射率

$$n_T=N_TP_T+1-P_T \tag{12}$$

温度升高引起的中心波长漂移为

$$\Delta\lambda=\lambda\Delta(nd)/n_1d_0=\lambda(n_Td_T/n_1d_0-1) \tag{13}$$

上述理论可以用来定量地分析温度上升所引起的中心波长漂移，其中主要因素就是材料的折射率温度系数、基底及膜系的热膨胀系数、材料的泊松比和膜层的聚集密度等。

图 11、图 12 展示了温度变化分别为 5 ℃、10 ℃时不同薄膜热膨胀系数下，基底热膨胀系数与中心波长温度漂移之间的关系。其中，$s=0.1$；$P_0=1$；$\delta=0.88\times10^{-5}$/℃；$N_0=1.5114$；$\lambda_0=777.4$ nm；β的值分别

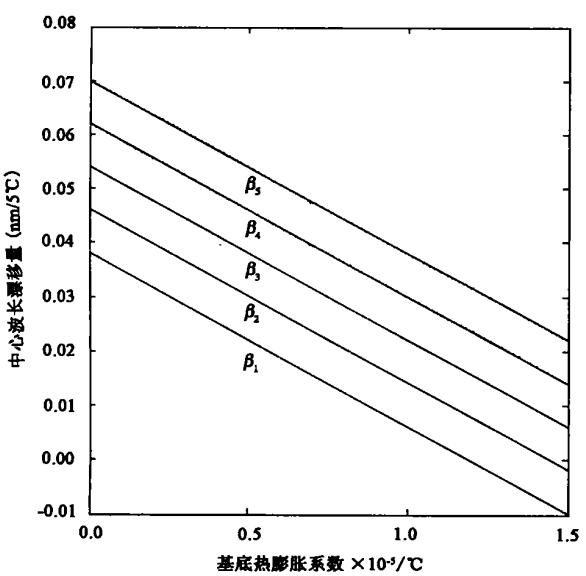

图 11 温度变化 5 ℃时不同薄膜热膨胀系数下，基底热膨胀系数与中心波长温度漂移之间的关系

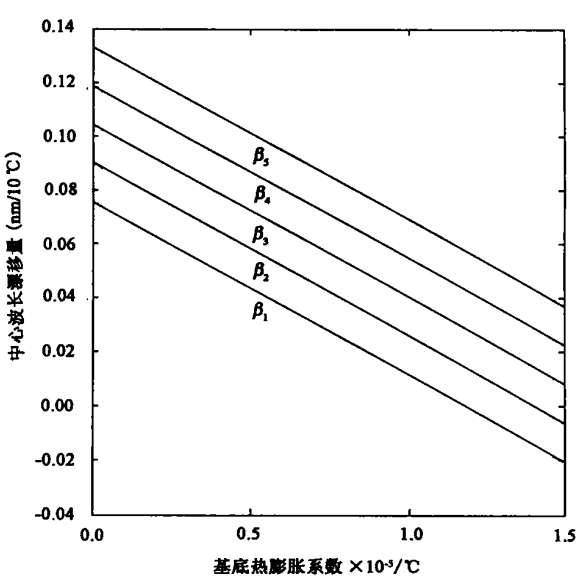

图 12 温度变化 10 ℃时不同薄膜热膨胀系数下，基底热膨胀系数与中心波长温度漂移之间的关系

为 $\beta_1=1\times10^{-6}/℃$、$\beta_2=3\times10^{-6}/℃$、$\beta_3=5\times10^{-6}/℃$、$\beta_4=7\times10^{-6}/℃$、$\beta_5=9\times10^{-6}/℃$。

图 13 和图 14 展示了温度变化分别为 5 ℃、10 ℃时不同基底热膨胀系数下，薄膜的热膨胀系数与中心

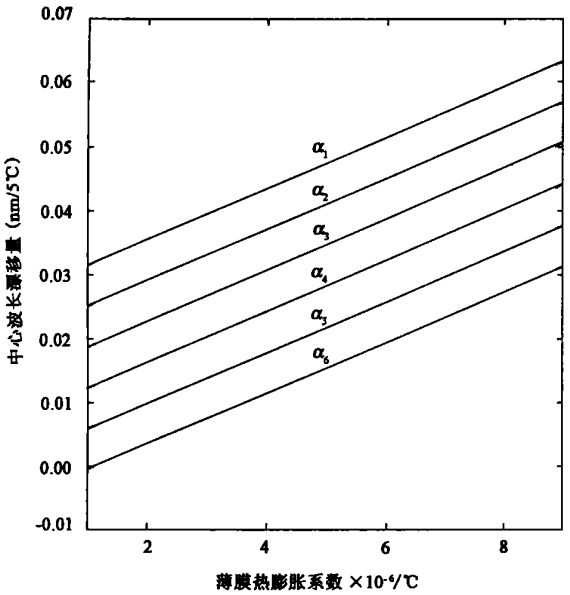

图 13　温度变化为 5 ℃时不同基底热膨胀系数下，薄膜热膨胀系数与中心波长温度漂移之间的关系

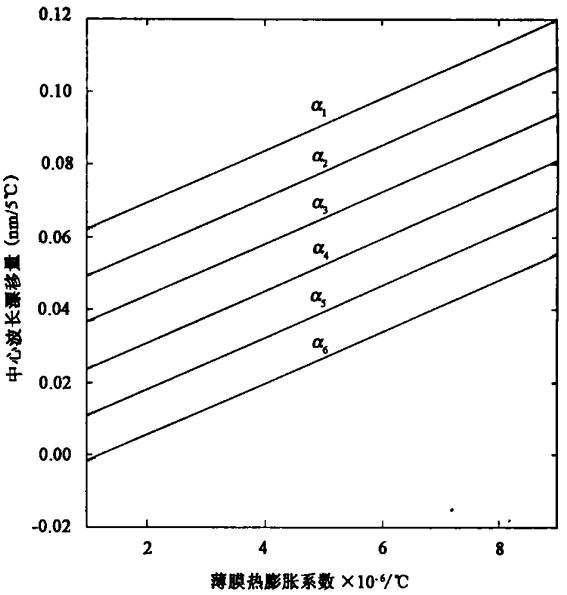

图 14　温度变化为 10 ℃时不同基底热膨胀系数下，薄膜热膨胀系数与中心波长温度漂移之间的关系

波长温度漂移之间的关系。其中：$s=0.1$；$P_0=1$；$\delta=0.88\times10^{-5}/℃$；$N_0=1.5114$；$\lambda_0=777.4$ nm；α 的值分别为 $\alpha_1=2.1\times10^{-6}/℃$、$\alpha_2=4.1\times10^{-6}/℃$、$\alpha_3=6.1\times10^{-6}/℃$、$\alpha_4=8.1\times10^{-6}/℃$、$\alpha_5=10.1\times10^{-6}/℃$、$\alpha_6=12.1\times10^{-6}/℃$。

从这些图中我们可以看到，薄膜的热膨胀系数越大，中心波长的漂移越大。当薄膜沉积在热膨胀系数为 $12.1\times10^{-6}\sim15.0\times10^{-6}/℃$的基底上时，波长漂移近似为零，当然这个值会随着膜层热膨胀系数、折射率温度系数、泊松比等参数变化而变化。这种零漂移的窄带滤光片非常有用，譬如在光纤通讯和卫星探测领域中的应用。沉积在热膨胀系数大于 $15.0\times10^{-6}/℃$的基底上时，滤光片的中心波长温度漂移可能出现负值，中心波长温度漂移与基底的热膨胀系数成反比。

4　结　论

根据温度和吸湿对窄带滤光片光学稳定性影响的模型进行了模拟计算分析，发现湿气对滤光片的影响是很大的。当温度和湿度同时作用时情况比较复杂，薄膜吸湿后随着温度的上升和膜层中水的损失，折射率会减小。而这种折射率减小的影响远大于薄膜材料折射率随温度上升和热膨胀引起的几何厚度增大的影响，从而引起中心波长向短波方向漂移。所以，可以控制薄膜的温、湿度环境来控制滤光片的中心波长。

根据分析，可以提出改善窄带滤光片稳定性的方法。首先，在工艺上要设法提高薄膜的聚集密度。聚集密度通常是(但不总是)基底温度的函数，随基底温度的增加而增加；同时也是气体压力的函数，随压力的增高而降低。因此，适当提高基底温度和真空度就可以提高聚集密度。提高沉积粒子的能量是增加薄膜聚集密度和光学稳定性的有效方法，如采用离子束辅助沉积等方法提高沉积能量。把滤光片与一些盖片相合[4]，也可以使中心波长的漂移固定下来。其次，采用热膨胀系数大的基底，当温度降低时，基底的收缩把应力加到膜上，也会使薄膜聚集密度增大，同时可以减小温度引起的中心波长的漂移。

参考文献：

[1]　MACLEOD H A. 光学薄膜技术(1nd ed)[M]. 北京：国防工业出版社，1956. 333～335.

(下转第 84 页)

缺陷散射和声子-晶界散射占主导地位。增大接触压力可以改善界面层上的缺陷,从而提高热载子的平均自由程和界面热导,于是降低了界面热阻。从实验数据看,在较高的接触压力下,界面热阻的温度的变化率会增大。

AlN 在低温下的热导性好,绝缘电阻率为 10^{12}～10^{14} Ω·cm,介电常数 ε′为 9.1,与 OFHC-Cu 接触界面温差相对较小,接触热阻小,又能与 OFHC-Cu 实现电绝缘,这将有利于在低温下工作的电子器件或超导装置所产生的热量迅速释放,使电子器件或超导装置正常可靠的工作。

4 结 论

本实验研究了低温下界面温度和接触压力对氮化铝和无氧铜接触界面热阻的影响。实验结果表明,当界面温度范围为 90～120 K,接触压力为 0.273～0.985 MPa 时,AlN/OFHC-Cu 界面热阻随接触压力的提高而降低,而当界面温度上升时界面热阻由于热载子热运动的强化而降低,温度较高时,界面热阻随压力变化的速率较大。

实验表明,界面温度和接触压力是影响界面热阻的重要因素。为减小界面热阻,可在材料允许的应力范围内增加压力。AlN/OFHC-Cu 界面热阻的研究,不仅对电子器件或超导装置设计和制造是重要的,而且对它们的稳定工作也同样重要。

参考文献:

[1] BARRETT JACKSON T, ANIL V VIRKAR, KARREN L MORE, *et al*. High-thermal-conductivity aluminum nitride ceramics: the effect of thermodynamic kinetic and microstructual factors[J]. J Am Ceram Soc, 1997,80:1 421～1 435.

[2] 张亚黎,庄汉锐,王惠龄,等. 高导热高电绝缘 AlN 低温特性及热分析[J]. 低温工程,2003,131:8～12.

[3] SALERNO L J, KITTEL P, SPIVAK A L. Thermal conductance of pressed metallic contacts augmented with indium foil or Apiezon grease at liquid helium temperatures[J]. Cryogenics, 1994,34:649～654.

[4] POWEL R L, RODER H M, RONGER W M. Low-temperature thermal conductivity of some commercial coppers[J]. J Applied Physics, 1957,28:1 282～1 286.

(上接第 66 页)

[3] ROSTRUP-NIELSEN J, TRIMM D L. Mechanisms of carbon formation on nickel-containing catalysts[J]. J Catal, 1977, 48(1～3): 155～165.

[4] SUN L F, MAO J M, PAN Z W, *et al*. Growth of straight nanotubes with a cobalt-nickel catalyst by chemical vapor deposition[J]. Appl Phys Lett, 1999, 74(5): 644～646.

[5] 王升高,汪建华,马志斌,等. 微波等离子体化学气相沉积法低温合成直纳米碳管[J]. 无机化学学报,2003,19(3):329～331.

(上接第 81 页)

[2] BAI SHENGYUAN, LIU XU, GU PEIFU, *et al*. Optical stability of thin film filter[J]. ACTA PHOTONICA SINICA, 2001,30(5):576～580.

[3] HARUO TAKASHASHI. Temperature stability of thin-film narrow-bandpass filters produced by ion-assisted deposition[J]. Applied Optics, 1995,34(4):667～670.

[4] MACLEOD H A. Thin Film Optical Filters(2nd ed)[M]. Macmillan, New York, 1986.405.