

薄膜与“厚膜”的颜色

张铮扬

(中国纺织大学基础部, 上海, 200051)

摘要: 无色透明材料形成的单层薄膜, 其颜色由干涉色决定。以白光照射其表面, 随薄膜厚度的增加, 将出现一系列色彩, 这是由薄膜干涉所致。我们可以根据薄膜颜色, 估计薄膜厚度。显然, 当厚度增大到后界面的影响可以忽略不计的程度(相当于只有一个界面的半无限大情形, 本文简称“厚膜”), 则“厚膜”颜色恢复为无色透明。

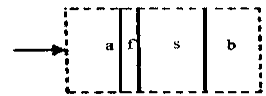
半透明材料在基底上形成的薄膜系统, 以白光照射所呈现的颜色, 由于基底及吸收的影响, 则不能简单地以薄膜干涉来分析。对于半透明薄膜系统, 首先测量它的光强反射率谱和透射率谱, 运用传递矩阵^[1]方法计算出薄膜的介质光学常数, 再以光学常数计算单层薄膜与“厚膜”的光强透射率谱与反射率谱及它们的色坐标。以菲涅耳公式计算出的反射率谱为半无限大介质反射率谱, 这时的色坐标可视为“厚膜”的色坐标。

关键词: 传递矩阵, 薄膜系统, 半无限大介质, 色坐标

对于图(1)所示的系统: 媒质 a/膜 f/基底 s/媒质 b (在我们的实验条件下, 媒质 a 和 b 均近似为真空), 箭头表示光线由 a 到 b 正入射进入系统。考虑到基底 s 很厚, 其前后表面的光彼此不相干, 以传递矩阵方法得到系统的光强反射率和透射率为^[2]

$$R_{ab} = |r_{as}|^2 + \frac{|t_{as}t_{sa}p_{sb}|^2 \exp(-4\omega\tau^{-1}k_s d_s)}{1 - |r_{as}p_{sb}|^2 \exp(-4\omega\tau^{-1}k_s d_s)} \quad (1)$$

$$T_{ab} = \frac{|t_{as}t_{sb}|^2 \exp(-2\omega\tau^{-1}k_s d_s)}{1 - |r_{as}p_{sb}|^2 \exp(-4\omega\tau^{-1}k_s d_s)} \quad (2)$$



图(1) 光学系统:

媒质 a/膜 f/基底 s/媒质 b

式中 r_{as} 和 a_s 分别为光通过媒质 a/膜 f/基底 s/媒质 b 时的复振幅反射

系数和透射系数, 令 $\Phi = \exp(i\frac{\omega}{c}N_f d_f)$, 则 $r_{as} = \frac{p_{af} + \Phi^2 p_{fs}}{1 + p_{af} \Phi^2 p_{fs}}$; $t_{as} =$

$\frac{\tau_{af} \Phi \tau_{fs}}{1 + p_{af} \Phi^2 p_{fs}}$, p 和 τ 分别为菲涅耳复振幅反射系数和透射系数, d_s 为基底厚度, d_f 为薄膜厚度。

薄膜介质的复数折射率

$$N_f = n_f + ik_f \quad (3)$$

由(1)式(2)式和(3)式及系统光强反射率和透射率的测量值可得到薄膜介质的折射率 n_f 和消光系数 k_f 。

半无限大介质的光强反射率 R , 由菲涅耳复振幅反射系数 p 给出

$$R = pp^* = \frac{(n_f - 1)^2 + k_f^2}{(n_f + 1)^2 + k_f^2} \quad (4)$$

单层薄膜的光强透射率 T , 由单层薄膜复振幅透射系数 t 给出

$$T = tt^* = \frac{(1 - R)^2 \Psi}{1 + 2R \Psi \cos 2(\theta + \alpha) + R^2 \Psi^2} \quad (5)$$

其中 $\Psi = \exp(-2\alpha \sin^2 \theta d_f)$, $\alpha = \omega^2 n_f d_f$, θ 为 p 的辐角。以各光波长的折射率 n_f 和消光系数 k_f 代入 (4) 式 (5) 式, 可得到“厚膜”光强反射率谱及单层薄膜光强透射率谱。

实验中的半透明薄膜样品为等离子体噻吩聚合膜 (基底为玻璃片)。等离子聚合在频率为 13.56MHz 的电容耦合管式反应器中进行。系统光强反射率谱和透射率谱的测量在 PERKIN-ELMER LAMBDA 9 UV/VIS/TK 谱仪上进行, 得到的测量谱由 (1) 式 (2) 式和 (3) 式计算出样品的折射率及消光系数, 如图 (2)、图 (3) 所示, 再由 (4) 式 (5) 式得到单层等离子体噻吩聚合薄膜 (薄膜厚度取 $5\mu\text{m}$) 光强透射率谱 $T(\lambda)$ 及“厚膜”光强反射率谱 $R(\lambda)$, 如图 (4)、图 (5) 所示。

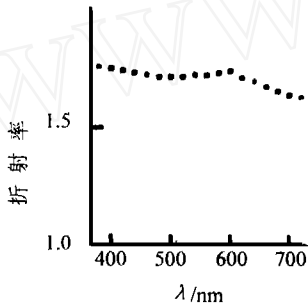


图 (2) 等离子体噻吩聚合膜折射率 n_f
($d_f = 480\text{nm}$, $d_s = 1\text{mm}$)

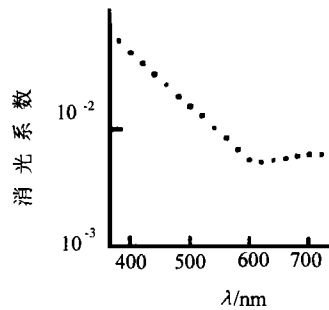


图 (3) 等离子体噻吩聚合膜消光系数 k_f

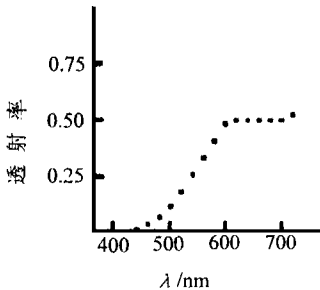


图 (4) 单层等离子体噻吩聚合膜光强透射率谱 (薄膜厚度取 $5\mu\text{m}$)

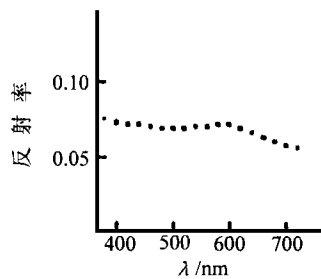


图 (5) 等离子体噻吩聚合膜“厚膜”光强反射率谱

单层薄膜的颜色。

图 (4) 所示的单层等离子体噻吩聚合薄膜光强透射率谱 $T(\lambda)$ 的色坐标为

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} = 0.49, \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z} = 0.45$$

其中 $X = \int_{380}^{720} k(\lambda) T(\lambda) x d\lambda$; $Y = \int_{380}^{720} k(\lambda) T(\lambda) y d\lambda$; $Z = \int_{380}^{720} k(\lambda) T(\lambda) z d\lambda$ 式中 \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} 为光谱三刺激值, $S(\lambda)$ 为 D_{65} 相对光谱功率分布。色坐标 $x = 0.49$; $y = 0.45$, 表示的颜色为橙黄色。

“厚膜”的颜色。

图 (5) 所示的等离子体噻吩聚合膜“厚膜”光强反射率谱 $R(\lambda)$ 的色坐标为: $x = 0.31$, $y = 0.33$, 在白色区域, 由于亮度较低 ($Y = 7.1$), 所以呈现灰色。介质对光的吸收规律由郎伯定律 $I = I_0 \exp(-\alpha x)$ 决定, 其中 $\alpha = 4\pi n_f k_f / \lambda$ 。若单层等离子体噻吩聚合膜的厚度为 $50\mu\text{m}$, 前界面入射光强为 I_0 , 经吸收到达后界面的光强为 I , 由郎伯定律得 I/I_0 的值为 10^{-6} 数量级, 因



此后界面的影响可以忽略不计。这样, 等离子体噻吩聚合膜厚度为 $50\mu\text{m}$ 时, 我们就可以把它视为“厚膜”。

总之, 等离子体噻吩聚合膜为半透明材料, 对光线存在一定程度的吸收。它的颜色与光的透射程度有关。薄膜厚度较小时(例如 $5\mu\text{m}$), 则透射较强, 我们观察到的为透射颜色, 呈橙黄色。薄膜厚度增大为“厚膜”时(例如 $50\mu\text{m}$), 透射极弱, 我们观察到的为反射颜色, 呈灰色。显然, 这种颜色的变化不能简单地以薄膜干涉来解释。

等离子体噻吩聚合膜材料的光学能隙 E_g 为 2.2eV [2]。这意味着大于 2.2V 的光能(波长小于 560nm) 将被吸收, 估计等离子体噻吩聚合薄膜的透射颜色呈橙黄色, 与上述结果一致。

用辉光放电方法对有机化合物单体进行等离子聚合的过程较为简单, 因此利用玻璃基底上等离子体噻吩聚合膜的橙黄色透射特性进行滤色获得橙黄色光照有一定的应用前景, 以其它有机化合物的单体进行等离子聚合得到半透明薄膜进行滤色, 可望获得不同颜色的光照。

参 考 文 献

- [1] B. Harbecke, Appl Phys, B39 (1986), 165
- [2] 童志深, 吴美珍, 张铮扬, 《物理学报》, 第45卷, 第3期, 1996年3月.

Color in Film and in Thick Film

Zheng Yangzhang

(Department of Basic Sciences, China Textile University, Shanghai, 200051)

Abstract

A translucent film was prepared by plasma polymerization from thiophene. The optical properties of the film have been explored. Color of the plasma-polymerized thiophene film will be tuned if the film thickness increasing.

Key words: Transfer matrices; System of film; Semi-infinite medium; Chromaticity coordinate