

建筑节能薄膜的设计与制备

顾培夫 刘 旭 黄胜军 唐晋发

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘 要 对介质-金属组合的建筑节能薄膜进行了理论设计, 给出了双层和三层膜的理论参数。用计算机模拟了大面积薄膜的膜厚均匀性分布, 获得了最佳的蒸发源配置, 实验上达到了满足实际使用的均匀性要求, 最后给出了实际样品的光谱特性。

关键词 建筑节能薄膜, 诱导透射率, 膜厚均匀性。

1 引 言

建筑节能薄膜在白天能提供良好的自然照明, 并在最低的能耗费用下, 无论是白天还是夜晚都能提供“热舒适”^[1]。这是因为光学薄膜能有效地控制进入室内的太阳能或控制透过窗玻璃的热辐射能, 从而达到节省用于致冷或采暖的能源费用。

对节能薄膜的研究是令人鼓舞的。据美国麻省理工学院报告, 美国建筑的能耗占总能耗的40%, 单层玻璃每年热损费用为7美元/米², 如果镀上一层辐射率 $E = 0.1$ 的节能膜, 可使热损费用降低至3.2美元/米², 这相当于气隙5cm厚的双层玻璃窗的能耗。若在双层玻璃上镀上一层节能膜, 热损费用可降至2.2美元/米²。

本文讨论节能薄膜的设计原理和制备技术, 给出了简易的设计图表, 讨论了大面积镀膜的膜厚均匀性, 最后给出制备样品的分光特性。由于单层贵金属薄膜的牢固度不理想, 而单层过渡金属薄膜的节能效果不佳, 所以文中考虑二层和三层介质/金属薄膜组合系统。

2 设 计

2.1 诱导透射率原理

只要正确选择基板侧匹配的导纳, 就能使整个膜系的势透射率达到最大。如果同时在入射侧设计适当的减反射膜, 就能开发出金属膜的最大透射率。这就是所谓诱导透射率概念。

应用诱导透射率概念, 可以得到金属/介质薄膜系统的势透射率^[2]

$$\psi = \frac{\epsilon}{C_0 + C_1 X + C_2 Z + C_3 (X^2 + Z^2)} \quad (1)$$

式中, X 和 Z 分别为金属膜负载导纳(记为 Y) 的实部和虚部, 即 $Y = X + iZ$, C_0, C_1, C_2, C_3 是由金属膜特征矩阵

$$M = \begin{bmatrix} a_1 + ib_1 & a_3 + ib_3 \\ -a_2 + ib_2 & a_4 + ib_4 \end{bmatrix}$$

决定的常数。且 $C_0 = a_1a_2 + b_1b_2$, $C_1 = a_2a_3 + a_1a_4 - b_2b_3 + b_1b_4$, $C_2 = b_1a_4 + a_3b_2 - a_1b_4 - b_3a_2$, $C_3 = a_3a_4 + b_3b_4$ 。若给定波长, 则 ψ 在 Y 复平面上的等值线是一簇圆。圆方程为

$$|Y - (X_0 + iZ_0)|^2 = r^2 \tag{2}$$

式中, $X_0 = (1 - \psi C_1)/2C_3\psi$, $Z_0 = -C_2/2C_3$, $r^2 = X_0^2 + Z_0^2 - C_0/C_3$ \tag{3}

设 $X_0 = \alpha_0 + \Delta\alpha_0$, $Z_0 = \beta_0$, 当 $X \rightarrow X_{max}$ 和 $Z \rightarrow Z_{max}$ 时, 则势透射率圆为

$$|Y - (\alpha_0 + \Delta\alpha_0) - i\beta_0|^2 = \Delta\alpha_0(2\alpha_0 + \Delta\alpha_0) \tag{4}$$

所以, 当 $\psi = \psi_{max}$ 时, 势透射率圆退化为一个点, 即 $P_0(\alpha_0, \beta_0)$ 。这时, 对于给定的反射率 R , 透射率 $T = (1 - R) \cdot \psi$ 为极大, 吸收 $A = (1 - R)(1 - \psi)$ 为极小。如果在入射侧设计一减反射膜, 使 $R \rightarrow 0$, 则膜系透射率为最大值。

2.2 设计结果

应用诱导透射率原理, 可以获得匹配层厚度、折射率与膜系光学性质之间的关系。

在金属膜上设计一减反射膜的两层结构示于图 1 和图 2。 d 表示膜层厚度, 可以看出, 由于势透射率 ψ 没有变化, 随着反射率 R 减小, 透射率 T 增大, 但吸收率 A 也增大。吸收率的增大会使镀膜玻璃升温, 在气温骤变时易使玻璃破裂。为了最大限度地减小吸收, 需采用三层结构 $G|D_1 M D_2|A$ 。

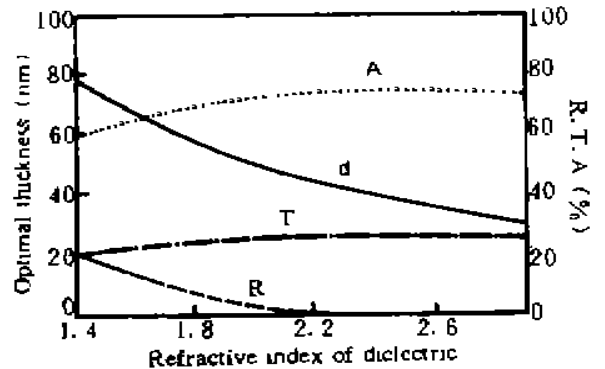
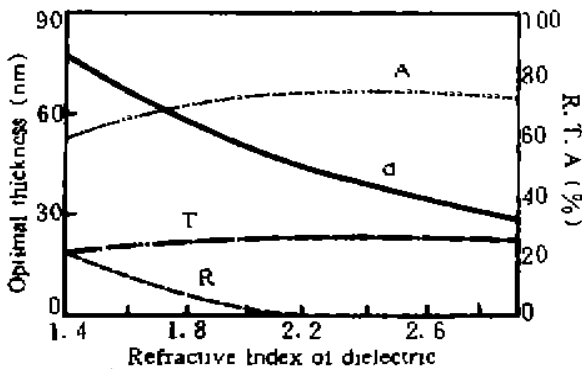


Fig. 1 Relation between properties and thickness and index of match layer for design G/20 nm Ti-dielectric layer/A

Fig. 2 Relation between properties of design and thickness and index of match layer for G/20 nm Ag-dielectric layer/A

图 3 和图 4 给出金属膜分别为 Ti 和 Ag 时三层结构的光学性质及匹配层厚度与折射率的关系。 d_1, d_2 表示膜层厚度。图中设计波长为 500 nm。可以看出, 随着匹配层的折射率增大, 反射率 R 减小, 透射率 T 增大, 吸收率 A 亦减小, 膜厚变薄, 且总是 $d_2 < d_1$ 。

利用上述图示, 可以方便地给出薄膜系统的结构。

3 制 备

制备节能薄膜的关键是大面积镀膜的膜厚分布均匀性和膜层的耐久性。

图 5 给出蒸发源平面与基板平面之间的关系。在 XYZ 坐标中玻璃基板平面表示为 $Z = 0$, 蒸发源平面表示为 $Z = d$, 第 i 个蒸发源的坐标为 (x_i, y_i, d) , 它对玻璃上某一点 $(x, y, 0)$ 的膜厚贡献为

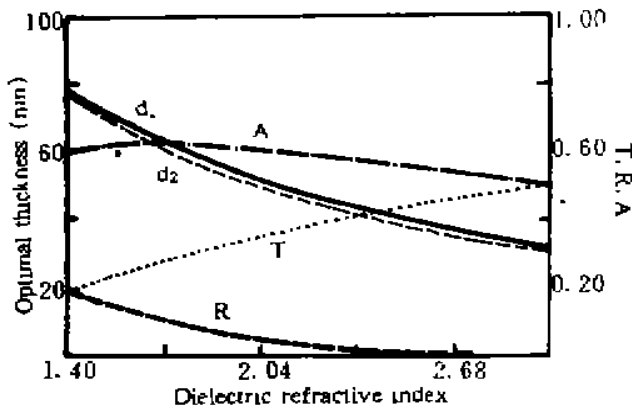


Fig. 3 Relation between properties of design and thickness and index of match layer for G/ D₁- 20 nm Ti-D₂/A

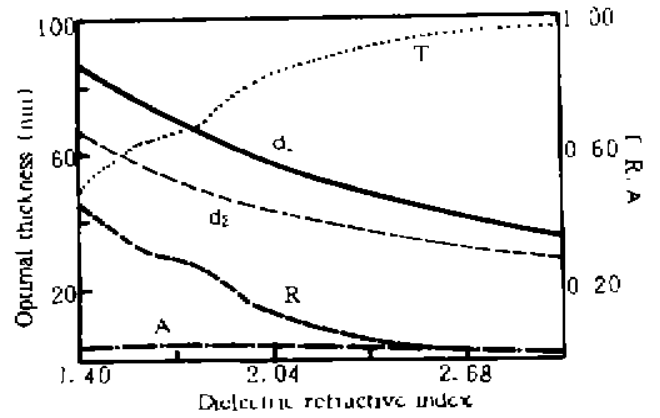


Fig. 4 Relation between properties of design and thickness and index of match layer for G/ D₁- 20 nm Ag-D₂/A

$$t_i(x, y, 0) = \frac{Cm_i}{[(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + d^2]^{3/2}} \quad (5)$$

式中 C 是常数, m_i 是第 i 个蒸发源的镀膜材料质量。设蒸发源平面上有 n 个蒸发源, 故玻璃上某一点 $(x, y, 0)$ 的膜厚为

$$t(x, y, 0) = \sum_{i=1}^n t_i(x, y, 0) \quad (6)$$

用计算机自动调节蒸发源的分布, 可以获得如图 6 所示的均匀的膜厚分布。它是基于点源计

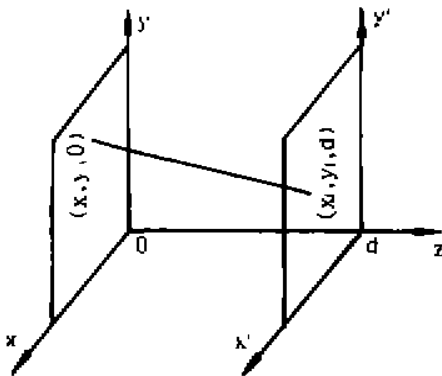


Fig. 5 Relation between evaporation sources and substrate

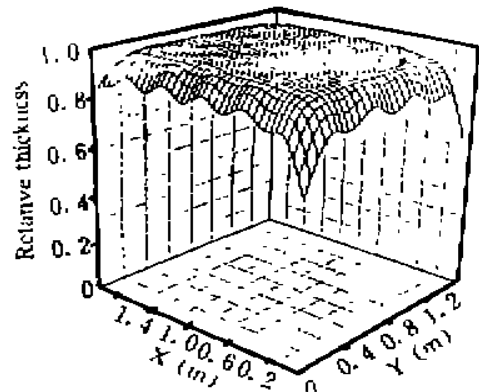


Fig. 6 Layer thickness distribution for point-sources

算得到的。而实际蒸发源接近于“线源”, 假如线源平行于 x 轴。则

$$t(x, y) = \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{a_i^2} \{B_i\} \quad (7)$$

式中,

$$a_i = [d^2 + (y - y_i)^2]^{1/2}$$

$$B_i = \frac{L\{a_i^2 - (x - x_i)^2 + L^2/4\}}{[a_i^2 + (x - x_i)^2] + (L^2/2)[a_i^2 - (x - x_i)^2] + (L^4/16)} + \frac{1}{a_i} \left\{ \arctg \left[\frac{(L/2) + x - x_i}{a_i} \right] + \arctg \left[\frac{(L/2) - x + x_i}{a_i} \right] \right\} \quad (8)$$

式中 L 是线源长度。图 7 是按线源计算得到的结果。

膜层的耐久性不仅取决于工艺, 也取决于薄膜材料。为此, 作者采用 Ti 作为金属膜, 充氧反应得到 TiO_x 作为介质膜。膜层厚度用石英晶体监控。这样便可用一种蒸发料得到两种膜层而获得二层或三层膜结构。

图 8 是二层膜的实验结果。在可见光区获得了较低的反射率和较高的透射率, 而在近红外区透射率降低, 反射率增大, 在面积为 $2 \times 1.5 \text{ m}^2$ 的玻璃上, 膜层均匀性的相对偏差可小

于 20%。通过调节介质层的厚度，还可适当地改变膜层的反射色。这说明实现均匀牢固的大面积节能薄膜是可能的。

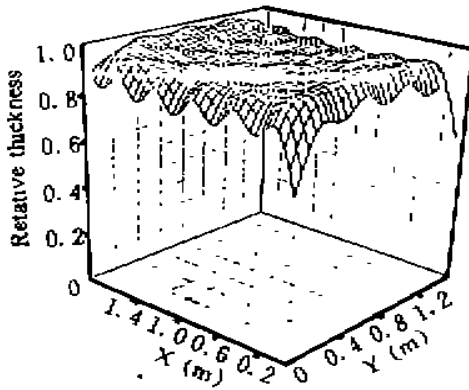


Fig. 7 Layer thickness distribution for line sources

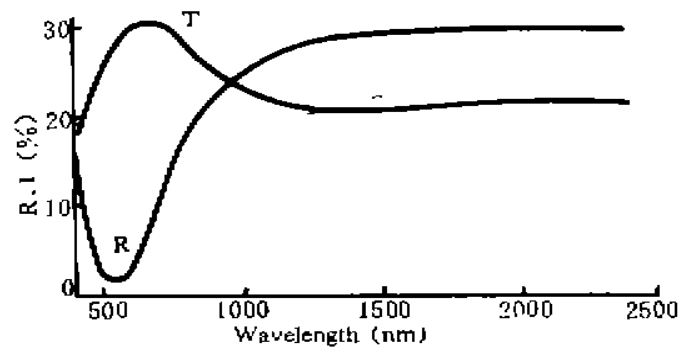


Fig. 8 Experimental results for a double-layer system;
G/42 nm Ti/46 TiO₂/A

参 考 文 献

- [1] C. Granqvist, Spectrally-selective surfaces for heating and cooling applications. *Proc. SPIE*, 1989, TTI,
[2] 唐晋发, 郑 权, 应用薄膜光学, 上海, 上海科学技术出版社, 1984: 270~285

Design and Preparation of Architecture Energy Conserving Coatings

Gu Peifu Liu Xiu Huang Shengjun Tang Jinfa

(State Key Laboratory of Modern Optical Instruments, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

(Received 12 April 1995; revised 7 August 1995)

Abstract The design of architecture energy conserving coatings with the metal double-layers and the tripe-layers is presented. A detailed discussion involves the design parameters as well as the transmittance and the reflectance properties. Uniformity of thicknesses of large area coatings is simulated by a computer and optimized distribution of evaporation sources is given. Experiments show that acceptable uniformity can be reached by using computer simulated distribution of evaporation sources. The measured spectral properties of such coating are presented.

Key words architecture energy conserving coating, induced transmittance, layer thickness uniformity.