

基于遗传算法透明介质膜层折射率及厚度在线分析

余 刚^{1,2}, 汪 洪^{1,2}

(1. 中国建筑材料科学研究总院, 北京 100024; 2. 绿色建筑材料国家重点实验室, 北京 100024)

摘 要: 针对离线 Low-E 膜系产品设计与调试过程中对获悉透明介质膜层折射率及厚度的需求, 提出依据在线测试膜层膜面反射光谱数据, 建立 Cauchy 光学模型, 利用遗传算法进行分析的方法。在线光谱测量装置安装于镀膜设备产品出口端, 可以在镀膜玻璃宽度方向测量 24 个位置、380~780 nm 波长范围的光谱, 每测量点所需时间小于 260 ms。根据 Cauchy 光学模型及离线 Low-E 膜系中透明介质膜层的特点, 结合遗传算法原理建立分析流程, 讨论了遗传算法主要参数对结果的影响。得到的最佳遗传条件为: 种群大小为 35 个个体、遗传迭代 40 次、精英数量为 8 个, 交叉比例 0.2; 根据实际生产的膜层膜面反射光谱特征, 设立合理的初始值, 可以使计算分析结果更正确。

关键词: 遗传算法; Cauchy 模型; 介质膜层; 低辐射膜系; 折射率

中图分类号: TU201.5 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2016)01-0148-07

网络出版时间: 2015-12-23 05:19:59

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2310.TQ.20151223.1719.023.html>

On-line Analysis on Refractive Index and Thickness of Dielectric Layer Based on Genetic Algorithm

YU Gang^{1,2}, WANG Hong^{1,2}

(1. China Building Materials Academy, Beijing 100024, China;

2. State Key Laboratory of Green Building Materials, Beijing 100024, China)

Abstract: For the requirement of off-line Low-E coating design and process of refractive index and thickness of transparent dielectric layer control, the method and the process of using genetic algorithm were proposed according to the on-line reflection spectra of the film surface and the Cauchy optical model. The on-line spectral measurement device was installed on the export side of the coating equipment, the width of the coated glass was measured at 24 points, and the wavelength range of each point was 380~780 nm, the time required for each measuring point was less than 260 ms. The characteristics of the Cauchy optical model and the dielectric film in the Low-E film system were discussed based on the principle of genetic algorithm to establish the analysis process of film refractive index and thickness, and the influence of the main parameters of genetic algorithms was discussed. The optimum genetic optimum condition is population size of 35 individuals, 40 iterations, the elite count of 8, and crossover fraction of 0.2. The reasonable initial value was established according to the reflectance spectrum characteristics of film surface for the more appropriate analysis of the results.

Keywords: genetic algorithm; Cauchy model; dielectric layer; low emissivity film; optical thickness

随着建筑节能法规的实施及公众节能意识的增强, 离线低辐射(low emissivity, Low-E)镀膜玻璃的用量在逐年增加, 由于其膜系结构复杂, 各膜层的光学常数及厚度都将影响到产品的最终品质, 因此

在产品的设计开发时首先利用膜系设计软件建立模型, 对性能及工艺调试方案进行评估, 可以缩短开发试验周期。膜系模型中需要各膜层的光学常数作为基础数据以体现材料性质, 同时也需要各膜层沉

收稿日期: 2014-05-18。 修订日期: 2015-08-30。

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2013BAE12B01); 国家自然科学基金项目(51272245)。

第一作者: 余 刚(1982—), 男, 高级工程师。

Received date: 2014-05-18. Revised date: 2015-08-30.

First author: YU Gang(1982—), male, Senior Engineer.

E-mail: yugang0018@163.com

积速率以建立设计结果与工艺条件的对应关系^[1-2]。离线 Low-E 膜系中的透明介质膜层常采用金属靶材反应磁控溅射方式生产，其溅射状态随反应气体增加由金属模式向反应模式转变，直接表现为沉积速率下降，同时光学常数也会体现反应进行的程度^[3]。因此针对离线 Low-E 镀膜玻璃连续规模生产方式，在线快速分析测试膜层光学常数及厚度具有重要意义。

采用光学方法测试薄膜光学常数及厚度具有准确、非接触无损等优点，目前两种典型的光学方法是光谱拟合法和椭圆偏振法^[4]。由于椭圆偏振法在仪器及使用上专业性较强，不利于工厂实际生产控制^[5-6]。光谱拟合法是利用光谱仪测量样品在一定波长范围内的透射或反射光谱，利用光谱数据、干涉现象或光谱包络线分析计算，在运算中应用到干涉极值法、单纯型法、遗传算法等，各光学分析方法对膜层的吸收性能及厚度范围有一定的适应要求^[7-13]。在离线 Low-E 镀膜玻璃生产管理中为满足产品质量管控需求，镀膜设备均配备有在线光学性能测试系统，用于监控产品玻面、膜面反射和透过光谱及颜色。若能利用在线光学系统测得的光谱数据，针对离线 Low-E 膜系膜层特点及特定工艺条件分析膜层光学常数及厚度，将能充分利用现有仪器，及时获得产品设计开发及生产控制所需的相关数据。因此本工作将针对离线 Low-E 膜系中透明介质膜层特点，介绍基于遗传算法依据膜层膜面反射光谱在线分析透明介质膜层的折射率及厚度的方法及应用。

1 光学模型建立

1.1 透明介质膜层折射率 Cauchy 模型

在离线 Low-E 膜系生产中，透明介质膜层一般采用金属靶材反应溅射方式生产，常用到的氮化硅(SiN_x)、氧化锡(SnO_x)、氧化钛(TiO_x)等透明介质膜层，根据反应溅射工艺原理，在合理的气氛条件下该类膜层光学常数中消光系数 $k=0$ ，折射率 n 随波长的色散关系可以用 Cauchy 模型表示^[14]，如式(1)。

$$n(\lambda) = A_n + \frac{B_n}{\lambda^2} + \frac{C_n}{\lambda^4} \quad (1)$$

其中： λ 为波长，对于可见光范围取值 380~780 nm； A_n 体现了折射率的最小值； B_n 、 C_n 表示折射率随波长的变化情况，其值越大，折射率在短波方向增加的越明显(如图 1)。

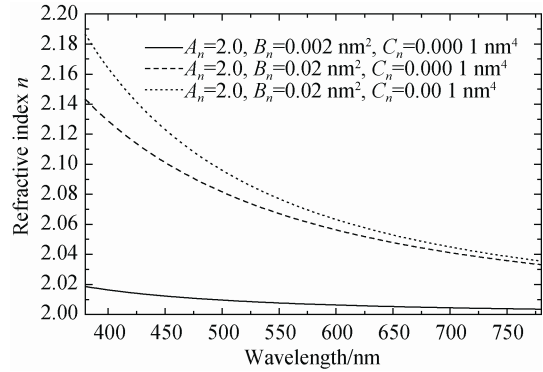


图 1 Cauchy 模型中系数对膜层折射率的影响

Fig. 1 Influence of Cauchy model coefficient on the film refractive index

1.2 介质膜层光学模型及特征

镀膜玻璃光谱的理论结果可采用导纳矩阵方法进行分析计算^[14]，将膜层及基片玻璃的光学常数、厚度构成对应的特征矩阵，由此构成镀膜玻璃光学模型，并计算得到膜层与基片的组合导纳，由组合导纳计算镀膜玻璃透射、反射光谱。由于离线 Low-E 镀膜玻璃使用的建筑浮法玻璃均有微弱的吸收，对透过及玻面反射光谱有一定影响，而膜面反射光谱的反射率(R)能够更好体现膜层的光学性能^[3]，因此，利用膜面反射率数据作为分析依据，能够避免因玻璃批次不同造成的分析偏差。

图 2 为 Cauchy 模型得到不同折射率、相同厚度薄膜的反射光谱。从图 2 可以看出，折射率越高其反射率越高， A_n 、 B_n 、 C_n 对反射率大小的影响作用依次减小。由于离线 Low-E 膜系光学性能需求，以及工艺及设备限制，介质层单层厚度一般不超过 80 nm。图 3 为不同厚度氮化硅 SiN_x 膜层膜面反射光谱，根据薄膜光学干涉原理，在同一干涉周期下随着厚度增加，干涉产生的反射率最大位置向长波方向移动。

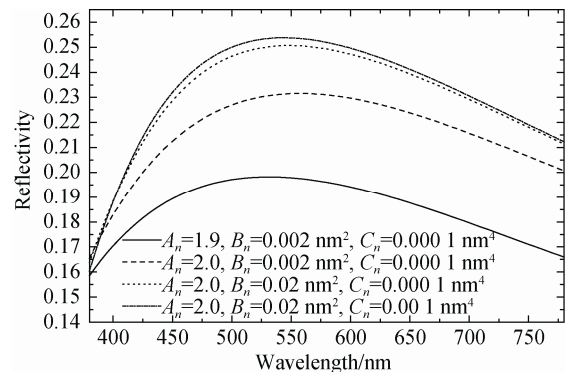


图 2 Cauchy 模型不同折射率相同厚度薄膜膜面反射光谱
Fig. 2 Reflectance spectra of film surface with the same thickness and different refractive index obtained from the Cauchy model

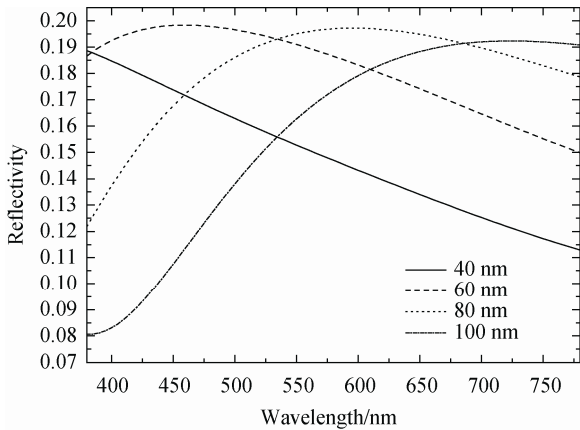


图3 不同厚度 SiN_x 介质膜层膜面反射光谱

Fig. 3 Reflectance spectra of film surface of SiN_x films with different thickness

1.3 遗传算法与膜层光学模型的结合

透明介质膜层实际膜面反射光谱是通过在线光谱测量系统获得。所用的在线光谱测量装置安装于镀膜设备产品出口端，可以在镀膜玻璃宽度方向测量 24 个位置、380~780 nm 波长范围光谱，采用线阵电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)测量光谱方法^[15]，每测量点所需时间小于 260 ms。膜层理论光谱数据可以通过导纳矩阵法计算得到，其特征矩阵由折射率及厚度决定，从而可以建立以膜层折射率及厚度为未知数的膜层特征矩阵方程，并由实测光谱求解膜层折射率及厚度。该方程涉及到三角函数、复数等相关复杂运算，但可以将其转化为寻找最优数值解的求解过程^[11–14]。

遗传算法(genetic algorithm, GA)由美国密歇根大学 Holland 教授于 1969 年提出并使其发展起来，其基本原理是效仿生物界中的“物竞天择、适者生存”的演化法则。遗传算法是把问题参数编码为染色体，再利用遗传迭代的方式进行选择、交叉以及变异等运算来进化种群中的染色体的信息，最终生成符合目标的染色体。遗传算法是一种在最优组合搜索应用中十分常见的高效搜索算法，能够进行高效的全局最优搜索。遗传算法的编码定义与本文讨论的求解膜层折射率及厚度问题存在以下的对应关系^[16–18]。

基因：待求解的问题参数，为膜层折射率及厚度，由于以 Cauchy 模型表示膜层折射率，所以 Cauchy 模型参数 A_n 、 B_n 、 C_n 及膜层厚度为基因。

个体：基因的 1 个组合，或称为染色体、基因

型个体，对应于厚度、 A_n 、 B_n 、 C_n 的 1 个组合。

种群：多个个体的组合，种群的大小即为个体的数量。

评价函数：用于评价个体计算所得的膜面反射光谱曲线与实际测得膜面反射光谱曲线的接近程度。以个体计算获得的反射率(R_j)与实际测得的对应各波长的反射率(R_C)之间的均方差(mean square error, MSE)表示，如式(2)。

$$MSE_{(R_j, R_C)} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [R_j(\lambda_i) - R_C(\lambda_i)]^2} \quad (2)$$

式中： λ_i 为计算波长； n 为波长点个数。在 380~780 nm 范围、步长为 5 nm，共 81 个计算波长点。

适应度值：由个体计算获得的 R_j 与实际测得 R_C 之间的均方差值表示。

终止条件：遗传算法是一种迭代循环过程，若循环过程满足遗传终止条件，即得到最优解，否则继续进行遗传过程。根据实际精度和运算量需求，设定满足 MSE 小于 10^{-3} 或 40 次迭代任意 1 个条件就终止遗传过程。

通过以上的定义即可将求解膜层折射率和厚度转化为利用遗传算法寻找最优个体(膜层厚度、 A_n 、 B_n 、 C_n)的过程，该个体对应的膜面反射率与实际测得膜面反射率之间的均方差(MSE)最小。

2 在线分析流程和算法参数设置

2.1 分析流程

根据以上定义将遗传算法应用于离线 Low-E 膜系透明介质膜层折射率及厚度的分析求解，具体流程如图 4 所示。图 5 为在线测试得到的样品反射光谱的 R_C ，该样品为 SiN_x 薄膜，溅射气氛为氮气、氩气，其流量均为 800 mL/min，溅射功率为 90 kW，基片前进速率为 1.2 m/min；初始种群的生成和遗传过程由遗传算法标准过程完成^[16–17]。计算光谱的 R_j 由光学模型对应的特征矩阵计算得到^[14]，初始种群或新种群中的个体(厚度及 Cauchy 模型的 A_n 、 B_n 、 C_n)构成膜层特征矩阵的输入参数。根据评价函数计算测量光谱结果得到的 R_C 与计算反射光谱的 R_j 之间的均方差 MSE，即适应度值，并判断是否满足终止条件。若满足终止条件即获得膜层厚度、 A_n 、 B_n 、 C_n 最佳值，否则按照遗传过程参数重新进行遗传迭代过程。

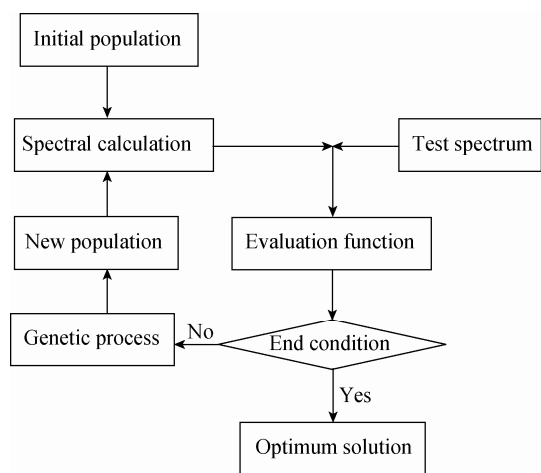


图 4 遗传算法求解膜层光学厚度流程

Fig. 4 Process of genetic algorithm for solving the film optical thickness

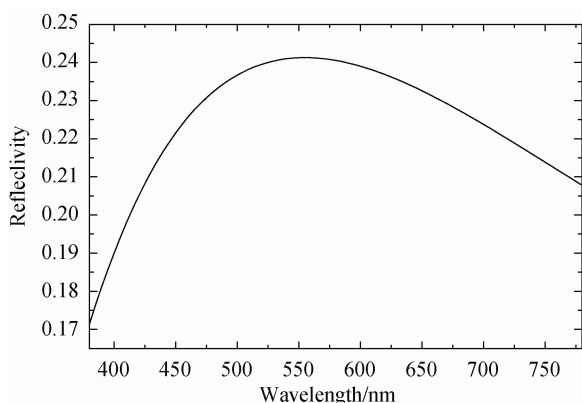


图 5 SiN_x 薄膜在线测试反射光谱

Fig. 5 Reflectance spectrum of SiN_x film by online test

2.2 遗传算法参数设置

遗传算法的参数主要为遗传过程的控制参数和初始值，遗传过程通过种群大小、迭代次数、精英数量、交叉比例参数设定，这些参数直接影响运算量及收敛速度；初始值是遗传过程的起点，对收敛的方向起到重要的影响^[16-17]。以下将根据图 4 所示流程及图 5 所示 SiN_x 薄膜在线测试光谱，说明各参数设置对结果 MSE 的影响。

2.2.1 种群大小和迭代次数 遗传算法是一种迭代算法，每次遗传过程产生新一代种群，种群大小是每次遗传迭代时需要计算的个体的数量，因此种群大小和遗传迭代次数决定了总运算量。图 6 为 100 次遗传迭代后最优个体的 MSE 值变化情况，运算是在相同条件下进行(初始值膜厚为 65 nm、 $A_n=1.9$ 、 $B_n=0.002 \text{ nm}^2$ 、 $C_n=0.0001 \text{ nm}^4$ 、遗传过程的控制参数精英数量 4 个、交叉比例 0.2)。从图 6 可以看出，随种群中个体数量的增加，MSE 在迅速降

低，由于遗传过程有随机变异个体，因此当种群大小达到 25 个以上时 MSE 值虽有一定波动但趋于稳定。图 7 为不同种群大小条件下遗传迭代收敛过程。可以看出，种群越小收敛越快，但最终结果越差。这与遗传算法的原理相关，增加种群中个体的数量可提高进化的可能性，有利于获得全局最优解。由图 6、图 7 分析选择 40 次遗传迭代，30~40 个个体的种群计算效率最佳。

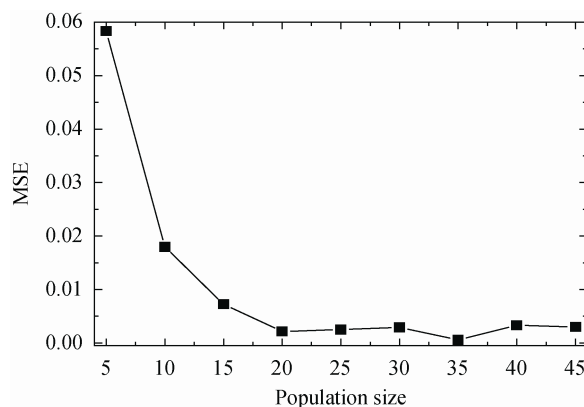


图 6 种群大小对 MSE 的影响

Fig. 6 Influence of population size on mean square error(MSE)

Initial value: thickness 65 nm, $A_n=1.9$, $B_n=0.002 \text{ nm}^2$, $C_n=0.0001 \text{ nm}^4$. Genetic operators: elite count 4, crossover fraction 0.2, the same below.

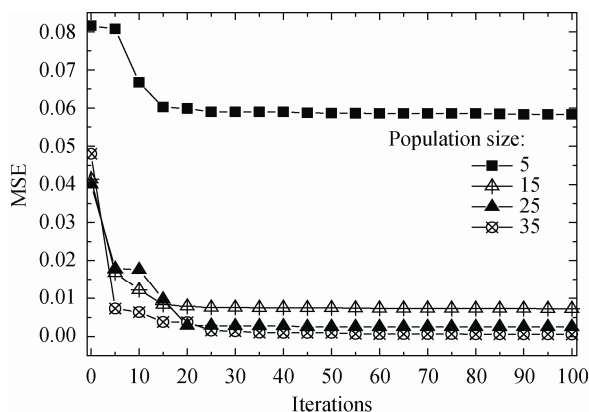


图 7 种群大小对收敛过程的影响

Fig. 7 Influence of population size on convergence process

2.2.2 精英数量 在每次迭代中，运算种群中每个个体的适应度结果，并进行排序；MSE 值越小排名靠前的个体为精英，直接保留进入子代。这种方式提高了收敛的可能性，精英数量小会导致收敛需要的时间长，而数量大会导致过早收敛。图 8 为初始值膜厚 65 nm、 $A_n=1.9$ 、 $B_n=0.002 \text{ nm}^2$ 、 $C_n=0.0001 \text{ nm}^4$ 、种群个体 35 个、遗传迭代 40 次、交叉比例 0.2 条件下，不同精英数量下结果的 MSE 值。可以

看出, 当在精英数量超过 20 时, MSE 值显著增加。这是由于在相同的种群大小下, 直接遗传的精英数量增加使遗传过程中变异的可能性减小, 导致种群无法进化而陷入局部最优解, 因此一般精英数量不超过种群个体个数的一半。

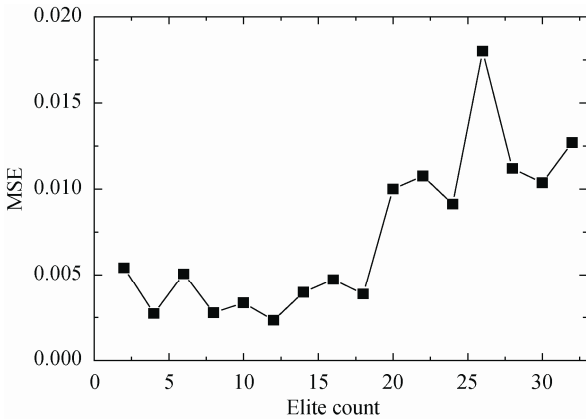


图 8 精英数量对结果的影响
Fig. 8 Influence of elite count on MSE

Initial value: thickness 65 nm, $A_n=1.9$, $B_n=0.002 \text{ nm}^2$, $C_n=0.000 1 \text{ nm}^4$. Genetic operators: population size 35, iterations 40, crossover fraction 0.2.

2.2.3 交叉比例 子代种群是从父代中直接遗传下来的精英、父代中个体间交叉及变异形成的个体的总和, 交叉比例是种群中除精英数外, 由交叉方法产生的个体的比例。图 9 为在以上相同条件下不同交叉比例及精英数量对结果的影响。从图 9 可以看出, 当精英数量增加、交叉比例变大时结果将严重恶化, 因此说明需要保证种群中有适当的变异个体的数量, 交叉比例应小于 0.5, 以促进种群的进化, 避免陷入局部最优解的情况。

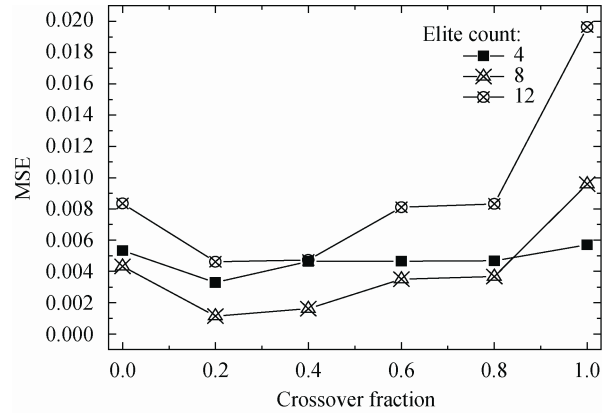


图 9 交叉比例对结果影响
Fig. 9 Influence of crossover fraction on MSE

Initial value: thickness 65 nm, $A_n=1.9$, $B_n=0.002 \text{ nm}^2$, $C_n=0.000 1 \text{ nm}^4$. Genetic operators: population size 35, iterations 40.

2.2.4 初始值 通过以上讨论确定种群大小为 35 个个体、遗传迭代 40 次、精英数量为 8 个, 交叉比例 0.2 为最佳的遗传条件, 在此条件下设置不同的初始值。针对图 5 所示 SiN_x 样品膜面反射率 R_C , 按图 4 所示流程分析获得的该膜层厚度及 Cauchy 模型参数(A_n 、 B_n 、 C_n)最佳值, 如表 1 所示, 其中 $\text{MSE}(R_i, R_C)$ 为不同初始值条件下获得最佳值时对应的 MSE 值。将图 5 所示 SiN_x 样品利用 Woolam V-VASE 型椭偏仪进行测试分析, 获得膜层厚度 69.38 nm, Cauchy 模型参数 $A_n=2.016$ 、 $B_n=0.004 652 \text{ nm}^2$ 、 $C_n=0.000 152 3 \text{ nm}^4$, 椭偏分析方法是依据测试椭圆偏振光经膜层表面反射后偏振状态变化数据, 建立 Cauchy 模型, 分析膜层厚度及 Cauchy 模型参数(A_n 、 B_n 、 C_n)最佳值^[6]。由于测量数据同时包括反射偏振光强度及相位信息, 测量精度高, 参考数据多, 因此椭偏测试方法结果相对可靠。

表 1 初始值对分析结果的影响
Table 1 Influence of initial value on MSE

Initial value				Genetic algorithm analysis results				MSE
Thickness /nm	A_n	B_n/nm^2	C_n/nm^4	Thickness /nm	A_n	B_n/nm^2	C_n/nm^4	(R_i, R_C)
65	1.9	0.002	0.000 1	68.97	2.025	0.001 978	0.000 115 25	0.000 274 5
60	1.9	0.002	0.000 1	73.31	1.974	0.003 294	0.005 612 89	0.005 147 6
60	1.8	0.002	0.000 1	73.42	1.955	0.010 040	0.005 395 40	0.005 416 5

从表 1 可以看出, 设置的初始值与椭偏测量分析结果越接近, 说明初始值设置越合理, 同时获得最佳值时的 MSE 值越小, 结果准确性越高。最佳结果为薄膜厚度 68.97 nm、Cauchy 模型参数 $A_n=2.025$ 、 $B_n=0.001 978 \text{ nm}^2$ 、 $C_n=0.000 115 25 \text{ nm}^4$ 。因此为提高分析运算准确性, 可以根据测试光谱反射率最大值及对应的波长, 结合图 1 和图 2 所示规律进行合

理设置。如图 5 所示 SiN_x 样品膜面反射光谱反射率最大值为 0.241, 对应的波长为 555 nm; 图 1 中 Cauchy 模型参数 $A_n=2.0$ 、 $B_n=0.002 \text{ nm}^2$ 、 $C_n=0.000 1 \text{ nm}^4$ 对应的的光谱反射率最大值为 0.232; 因此表 1 中设置 Cauchy 模型主要参数 A_n 为 1.9 时更为合理。图 2 中膜层厚度为 60、80 nm 所对应的反射率最大值时的波长分别位于 450、595 nm 处, 因此表 1 中设置初

始厚度为 65 nm 更为合理。

3 在线分析方法在产品开发及生产中的应用

3.1 膜系设计与工艺实现

在利用膜系设计软件进行产品开发时, 需要膜层的折射率数据作为输入参数, 然后通过膜层厚度的调整达到性能设计目标, 再通过镀膜溅射功率、气氛等工艺条件实现设计需求的各膜层厚度。因此获得膜层折射率数据及厚度与工艺条件的联系是进行膜系产品开发的基础。在离线 Low-E 镀膜玻璃生产中, 玻璃基片是依次经过被溅射靶材沉积相应的膜层, 膜层的沉积速率称为动态沉积速率(dynamic deposition rate, DDR) v_{DDR} , v_{DDR} 与薄膜厚度、溅射功率和基片前进速率的关系如式(3), v_{DDR} 结果体现了基片若以 1 m/min 速率经过被溅射靶材时, 每千瓦溅射功率能沉积的薄膜厚度。

$$v_{\text{DDR}} = \frac{D}{P} v \quad (3)$$

式中: D 为薄膜厚度, nm; P 为溅射功率, kW; v 为基片走速, m/min。

从式(3)可以看出, 动态沉积速率 v_{DDR} 建立了膜层厚度与相应工艺条件的联系。如图 5 所示 SiN_x 薄膜样品, 经图 4 所示流程分析获得的最佳结果为膜层厚度 68.97 nm, Cauchy 模型参数 $A_n=2.025$ 、 $B_n=0.001\ 978\ \text{nm}^2$ 、 $C_n=0.000\ 115\ 25\ \text{nm}^4$ 。根据其溅射功率 90 kW, 基片前进速率 1.2 m/min 的工艺条件, 由式(3)得到该 SiN_x 膜层的动态沉积速率 $v_{\text{DDR}}=0.92\ \text{nm}\cdot\text{m}/(\text{kW}\cdot\text{min})$ 。在实际应用中, 以该 SiN_x 薄膜为例, 在进行膜系设计时, 将最佳 Cauchy 模型参数代入式(1)即可得到当前制备的 SiN_x 薄膜折射率数据作为膜系设计的基础。而在针对具体设计结果的工艺实现时, 若设计需求该 SiN_x 膜层厚度 25.5 nm, 并考虑实际生产效率需求基片前进速率 2.5 m/min, 在已知分析该 SiN_x 薄膜层动态沉积速率 $v_{\text{DDR}}=0.92\ \text{nm}\cdot\text{m}/(\text{kW}\cdot\text{min})$ 的条件下, 根据关系式(3)可知, 设计膜系生产时, 制备该 SiN_x 膜层所需功率为 69.3 kW。

在产品生产中随时间推移, 工艺参数会发生波动及漂移, 因此通过以上在线测试及分析方法, 能够及时获得透明介质膜层折射率及膜层沉积速率数据, 为膜系设计提供基础数据, 并可根据设计结果确定相应工艺条件。

3.2 工艺合理性分析

根据反应溅射工艺原理, 溅射过程中气氛状态直接影响到膜层的沉积速率及反应程度, 而折射率数据体现反应产物的光学性能。在离线 Low-E 膜系生产中以制备 SiN_x 薄膜为例, 该膜层以硅铝合金为靶材, 溅射时的反应气体为氮气、工作气体为氩气, 在一定的工艺条件下减少反应气体氮气或增加氩气, 会使沉积速率提高^[3]; 但当反应气体不足时, 将导致膜层中含有不完全反应的金属成分而使膜层吸收增加、折射率增大。因此, 在线分析膜层的沉积速率及折射率, 能够及时对工艺条件的合理性及变化作出分析。如图 5 所示的 SiN_x 薄膜样品经在线分析获得 Cauchy 模型最佳参数 $A_n=2.025$ 、 $B_n=0.001\ 978\ \text{nm}^2$ 、 $C_n=0.000\ 115\ 25\ \text{nm}^4$, 将该参数代入式(1)得到波长 $\lambda=550\ \text{nm}$ 时膜层的折射率 $n=2.03$; 而 SiN_x 膜层材料在波长 $\lambda=550\ \text{nm}$ 处的折射率合理范围为 1.9~2.1^[1,3], 说明当前工艺条件较合理。若生产中需要提高生产效率时, 可以通过减少反应气体氮气流以提高膜层沉积速率, 此时可利用在线测试分析监控折射率及动态沉积速率变化情况, 在提高膜层沉积速率的同时应保证膜层在波长 $\lambda=550\ \text{nm}$ 处的折射率不超过 2.1。

4 结论

利用在线测量膜面反射光谱, 建立 Cauchy 光学模型, 采用遗传算法分析离线 Low-E 膜系中透明介质膜层的折射率及厚度能够为膜系设计提供基础数据, 并建立设计结果与工艺条件的联系, 及时分析工艺条件的合理性, 满足实际生产对膜层性能准确、快速的分析需求。在遗传算法中, 遗传过程参数存在合理范围为: 设定种群大小为 35 个个体、遗传迭代 40 次、精英数量为 8 个, 交叉比例 0.2, 这是最高效的遗传条件。根据实际膜层膜面反射光谱特征估算膜层厚度及 Cauchy 模型系数, 设立合理的初始值, 将使结果更准确。

参考文献:

- [1] BRÄUER G. Large area glass coating[J]. Surf Coat Technol, 1999, 112: 358-365.
- [2] SCHAEFER C, BRÄUER G, SZCZYRBOWSKI J. Low emissivity coatings on architectural glass [J]. Surf Coat Technol, 1997, 93: 37-45.
- [3] Hans Joachim Glaser. 大面积玻璃镀膜[M]. 董强译. 上海: 上海交通大学出版社, 2006: 131-136.
Hans Joachim Glaser. Large Area Glass Coating[M]. DONG Qiang transt. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2006: 131-136.

- [4] 陈燕平, 余飞鸿. 薄膜厚度和光学常数的主要测试方法[J]. 光学仪器, 2006, 28(6): 84–88.
CHEN Yanping, YU Feihong. Opt Instrum (in Chinese), 2006, 28(6): 84–88.
- [5] 陈篮, 莫党. 薄膜材料光学特性研究的椭偏光谱数据处理[J]. 压电与声光, 1999, 21(4): 267–271.
CHEN Lan, MO Dang. Piezoelectr Acoustoopt (in Chinese), 1999, 21(4): 267–271.
- [6] 徐均琪, 冯小利. 多层薄膜光学常数的椭偏法研究[J]. 光电工程, 2009, 36(2): 29–33.
XU Junqi, FENG Xiaoli. Opto-Electron Eng (in Chinese). 2009, 36(2): 29–33.
- [7] 王晨达, 韩崇昭. 光谱法测量薄膜厚度算法的改进[J]. 仪表技术与传感器, 2003, 6: 51–54.
WANG Chengda, HAN Chongzhao. Instrum Technol Sens (in Chinese), 2003, 6: 51–54.
- [8] 沈伟东, 刘旭, 叶辉. 确定薄膜厚度和光学常数的一种新方法[J]. 光学学报, 2004, 24(7): 885–889.
SHEN Weidong, LIU Xu, YE Hui. Acta Opt Sin (in Chinese), 2004, 24(7): 885–889.
- [9] 门智新, 何翔, 孙泰姿. 一种简单的光学薄膜厚度测量方法[J]. 真空, 2011, 48(5): 32–34.
MEN Zhixin, HE Xiang, SUN Fenglou. Vacuum (in Chinese), 2011, 48(5): 32–34.
- [10] LAAZIZ Y, BENNOUNA A, ELAZHARI M Y. A method for monitoring the thickness of semiconductor and dielectric thin films: application to the determination of large-area thickness profiles[J]. Thin Solid Films, 1997, 303: 255–263.
- [11] JIANG Daoping, JIA Hongzhi, LU Huancai. Calculation for the optical parameters of the Sn-doped SiO₂ thin films by fitting the entire transmitted spectrum[J]. Optik-Int J Light Electron Opt, 2013, 124: 102–106.
- [12] PATEL S J, KHERAJ V. Optimization of the genetic operators and algorithm parameters for the design of a multilayer anti-reflection coating using the genetic algorithm [J]. Opt Laser Technol, 2015, 70: 94–99.
- [13] GÜNGÖR T, SAKA B. Calculation of the optical constants of a thin layer upon a transparent substrate from the reflection spectrum using a genetic algorithm [J]. Thin Solid Films, 2004, 467: 319–25.
- [14] 唐晋发, 顾培夫, 刘旭. 现代光学薄膜技术[M]. 第1版. 杭州: 浙江大学出版社, 2006, 20–30, 403–470.
- [15] 唐奕, 陈海清, 张子业. 线阵 CCD 多通道光谱仪及其应用[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2002, 30(10): 96–98.
TANG Yi, CHEN Haiqing, ZHANG Ziye. J Huazhong Univ Sci Technol: Nat Sci Ed (in Chinese), 2002, 30(10): 96–98.
- [16] 邢文训, 谢金星. 现代优化计算方法[M]. 第二版. 北京: 清华大学出版社, 2007, 113–119, 542–547.
- [17] HAUPT Randy L, HAUPT Sue Ellen. Practical Genetic Algorithms [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2004: 22–47.
- [18] 赵利, 薛亦渝, 王学华. 膜系自动设计中的几种新型评价函数[J]. 武汉理工大学学报: 信息与管理工程版, 2002, 24(5): 125–127.
ZHAO Li, XUE Yiyu, WANG Xuehua. J Wuhan Univ Technol: Inf Manage Eng (in Chinese), 2002, 24(5): 125–27.