

# 表面粗糙氢化非晶硅薄膜光学常量的确定

丁文革 卢云霞 马登浩 苑 静 侯玉斌 于 威 傅广生

(河北大学物理科学与技术学院河北省光电信息材料重点实验室, 河北 保定 071002)

**摘要** 由于光学薄膜的透射光谱和反射光谱受表面粗糙程度的影响很大,因此在确定表面粗糙薄膜的厚度及光学常量时,如果不考虑这种影响必然会引起较大的误差。利用标量波散射理论,引入表面均方根粗糙系数,对粗糙薄膜表面的光散射进行了细致分析,得出了光散射影响下薄膜系统透射系数的表达式。在此基础上计算的薄膜厚度以及透射光谱与制备的氢化非晶硅薄膜的相应测量结果基本一致,由此确定的光学常量也更接近实际量值。该方法的运算过程不基于最小值优化算法,无需复杂软件辅助,是准确确定表面粗糙薄膜的厚度以及光学常量的一种有效方法。

**关键词** 薄膜;氢化非晶硅薄膜;表面粗糙系数;透射光谱;光学常量

**中图分类号** O484.4<sup>+</sup>1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0331001

## Determination of Optical Constants of Rough Hydrogenated Amorphous Silicon Thin Films

Ding Wen'ge Lu Yunxia Ma Denghao Yuan Jing Hou Yubin Yu Wei Fu Guangsheng

(Key Laboratory of Photo-Electricity Information Materials of Hebei Province, College of Physics Science and Technology, Hebei University, Baoding, Hebei 071002, China)

**Abstract** The transmission and reflection spectra of the rough thin films are directly affected by the surface roughness. If this effect is not taken into account, there will be evident error for the calculation of thickness and optical constants of rough thin films. Using the scalar wave scattering theory, the light scattering caused by rough film surface is analyzed in detail by introducing the surface root mean square roughness, and the transmittance expression of the thin film system is obtained. On this basis, the calculated film thickness and transmission spectrum are in agreement with the measurement results of the prepared hydrogenated amorphous silicon (a-Si:H) thin film. The determined optical constants are closer to the actual ones. Because the calculation process is not based on the minimum value optimization algorithm and does not need the aid of complicated software, it is an effective and exact method to determine the thickness and optical constants of rough thin films.

**Key words** thin films; hydrogenated amorphous silicon film; surface roughness coefficient; transmission spectrum; optical constant

**OCIS codes** 310.6860; 240.5770; 160.4760; 290.5880

## 1 引 言

氢化非晶硅(a-Si:H)薄膜具有高光敏性、电阻温度系数较大、禁带宽度可控、大面积低温成膜以及与硅(Si)半导体集成工艺兼容等特点,在太阳能电池、薄膜晶体管和红外成像等领域具有广泛的应用前景<sup>[1~5]</sup>。由于 a-Si:H 薄膜的微观结构和特性随工艺的不同而变化很大,因此准确确定薄膜的厚度

和光学常量等参数对于设计和研制高质量的薄膜器件至关重要。目前,有多种方法用于确定薄膜厚度和光学常量,如椭圆偏振光谱法<sup>[6]</sup>、分光光度法<sup>[7]</sup>和透射光谱法<sup>[8]</sup>等,其中透射光谱法因具有操作方便、测试简单和精度高等优点而备受青睐。利用薄膜的透射和反射光谱,可以获得薄膜的厚度、色散关系和光吸收系数等参量。虽然已有很多这方面的研究,

**收稿日期**: 2012-09-10; **收到修改稿日期**: 2012-10-25

**基金项目**: 国家自然科学基金(60940020)、河北省自然科学基金(E2012201059)和河北省重点基础研究项目(12963930D)资助课题。

**作者简介**: 丁文革(1966—),女,博士,教授,主要从事光与物质相互作用方面的研究。E-mail: dwg@hbu.edu.cn

但是大多是在假定薄膜表面为理想光滑平面的前提下进行的<sup>[9~11]</sup>。实际上,利用各种技术沉积的薄膜,其表面都具有一定的粗糙程度。粗糙表面的光散射将严重影响光的透射系数和反射系数,从而基于透射和反射光谱计算的 a-Si:H 薄膜的厚度和光学常量等参数与其实际值存在着较大偏差。目前也有少数研究考虑了粗糙表面的影响,如 Caricato 等<sup>[12]</sup>假设薄膜厚度为平均厚度加/减厚度的最大偏差,但是这种假设使得运算过程变得较为复杂,需要特定的辅助软件。再如 Swanepoel<sup>[13]</sup>假定薄膜表面的厚度按照三角函数或矩形函数或正弦函数的形式变化,这显然与实际薄膜表面粗糙分布的随机变化存在一定的偏差。

本文利用标量波散射理论,引入表面均方根粗糙系数对粗糙薄膜表面引起的光散射进行了细致分析,给出了光散射影响下薄膜系统透射系数的表达式。在此基础上确定薄膜的厚度、折射率等参量。该方法的计算过程不基于最小值优化算法,无需复杂软件辅助,计算便捷。

## 2 理论框架

### 2.1 薄膜系统的透射系数

设任一介质  $I$  的复折射率为  $\bar{n}_I = n_I + i\kappa_I$ , 其中  $n_I$  和  $\kappa_I$  分别为介质  $I$  的折射率和消光系数。根据菲涅耳公式,当光束从介质  $I$  正入射介质  $J$  时的菲涅耳振幅反射系数  $r_{IJ}$  和振幅透射系数  $t_{IJ}$  ( $I, J = 1, 2, 3, \dots$ ) 分别为

$$r_{IJ} = \frac{(n_I + i\kappa_I) - (n_J + i\kappa_J)}{(n_I + i\kappa_I) + (n_J + i\kappa_J)}, \quad t_{IJ} = \frac{2n_I}{n_I + n_J}. \quad (1)$$

相应的光强反射系数和透射系数为

$$R_{IJ} = |r_{IJ}|^2, \quad T_{IJ} = \frac{n_J}{n_I} |t_{IJ}|^2. \quad (2)$$

根据标量波散射理论,当光束从介质  $I$  正入射表面粗糙的薄膜介质  $J$  时,与光滑的界面相比,光束在粗糙界面上外反射、内反射和穿过界面透射时,菲涅耳系数在幅度上减小一个因子。当介质表面方均根粗糙系数  $\sigma \ll \lambda$  ( $\lambda$  是入射光的波长) 时,相应的散射因子  $S_e, S_i, S_t$  可表示为<sup>[14]</sup>

$$S_e = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{4\pi n_I \sigma}{\lambda}\right)^2\right], \quad (3)$$

$$S_i = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{4\pi n_J \sigma}{\lambda}\right)^2\right], \quad (4)$$

$$S_t = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{2\pi(n_J - n_I)\sigma}{\lambda}\right)^2\right]. \quad (5)$$

显然,当  $\sigma = 0$  时,散射因子  $S_e = S_i = S_t = 1$ , 即界面光滑时无散射;当  $(2\pi\sigma/\lambda)^2 \gg 1$  时,散射因子趋于 0, 即界面严重粗糙时,光几乎全部被散射。

设沉积在石英衬底上的 a-Si:H 薄膜的均方根粗糙系数为  $\sigma$ , 厚度为  $d$ , 复折射率  $\bar{n} = n + i\kappa$ , 吸收系数为  $\alpha, \alpha = 4\pi\kappa/\lambda$ 。石英衬底的折射率为  $s$ , 其厚度  $d_s \gg d$ 。如图 1 所示,一束波长为  $\lambda$ 、复振幅为 1 的单色光从空气正入射到薄膜上,经薄膜上下表面的多次反射和折射,进入衬底层的光束为振幅递减的无穷系列。设薄膜的光强透射系数为  $T_{13}$ , 薄膜下表面的光强反射系数为  $R_{31}$ , 衬底下表面的光强透射系数和反射系数分别为  $T_{34}$  和  $R_{34}$ , 忽略衬底的吸收, 则衬底下表面透射光的强度依次为  $T_{13}T_{34}$ 、 $T_{13}T_{34}(R_{31}R_{34})$ 、 $T_{13}T_{34}(R_{31}R_{34})^2, \dots$ 。由于石英衬底的厚度比沉积的薄膜厚度大几个量级,忽略光在衬底层的干涉效应,即光束从薄膜上表面正入射时,薄膜系统的光强透射系数为

$$T_\sigma = \frac{T_{13}T_{34}}{1 - R_{31}R_{34}}. \quad (6)$$

由(2)式可知,

$$T_{34} = \frac{1}{s} |t_{34}|^2 = \frac{1}{s} |t_{31}|^2, \quad R_{34} = |r_{34}|^2 = |r_{31}|^2. \quad (7)$$

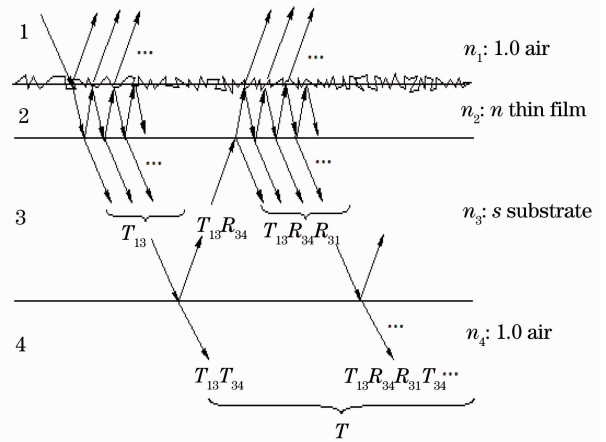


图 1 空气中薄膜系统的多光束反射和折射  
Fig. 1 Multi-beam reflection and refraction of film system in air

下面考虑薄膜的光强透射系数  $T_{13}$  和薄膜下表面的光强反射系数  $R_{31}$ 。如图 2 所示,从薄膜下表面透射的光是一个无穷系列,这些光束是相干的,且任意相邻的两光束之间的相位差为  $\delta = 4\pi nd/\lambda$ 。考虑到薄膜上表面的散射,透射光束的复振幅依次为  $S_t t_{12} t_{23} \exp(-\alpha'd)$ ,  $S_t t_{12} t_{23} \exp(-\alpha'd) r_{21} r_{23} \exp(-2\alpha'd) \exp(i\delta) S_t$ ,

$S_i t_{12} t_{23} \exp(-\alpha' d) [r_{21} r_{23} \exp(-2\alpha' d) \exp(i\delta) S_i]^2, \dots$ , 其中  $\alpha'$  为薄膜的振幅吸收系数 ( $\alpha' = \alpha/2$ )。则薄膜的振幅透射系数为

$$t_{13} = \frac{S_i t_{12} t_{23} \exp(-\alpha' d)}{1 - r_{21} r_{23} \exp(-2\alpha' d) \exp(i\delta) S_i} \quad (8)$$

薄膜的光强透射系数为

$$T_{13} = \frac{t_{12}^2 t_{23}^2 S_i^2 \exp(-\alpha d) s}{1 - 2r_{21} r_{23} S_i \exp(-\alpha d) \cos \delta + r_{21}^2 r_{23}^2 S_i^2 \exp(-2\alpha d)} \quad (9)$$

若光束从衬底一侧正入射薄膜下表面,如图3所示,考虑到薄膜上表面的散射,从薄膜下表面透射的无穷系列光束的复振幅依次为

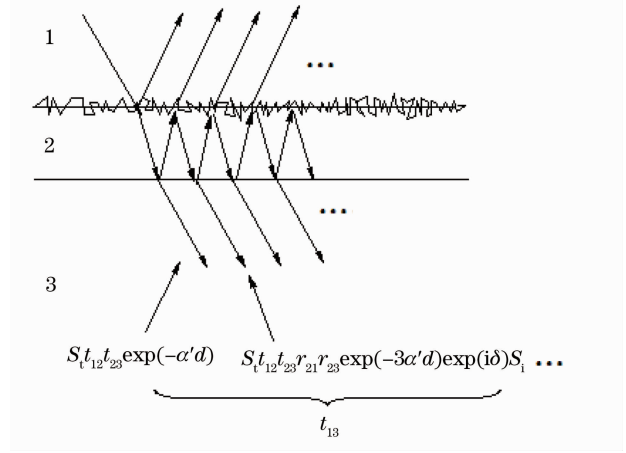


图2 薄膜透射光的干涉

Fig. 2 Interference of transmitted light of thin film

$$r_{32}, \quad t_{32} r_{21} S_i t_{23} \exp(-2\alpha' d) \exp(i\delta), \quad t_{32} r_{21} S_i t_{23} \exp(-2\alpha' d) \exp(i\delta) [r_{23} r_{21} S_i \exp(-2\alpha' d) \exp(i\delta)],$$

$$t_{32} r_{21} S_i t_{23} \exp(-2\alpha' d) \exp(i\delta) [r_{23} r_{21} S_i \exp(-2\alpha' d) \exp(i\delta)]^2, \dots,$$

则薄膜下表面的振幅反射系数为

$$r_{31} = \frac{r_{32} + r_{21} S_i \exp(-\alpha d) \exp(i\delta)}{1 - r_{23} r_{21} S_i \exp(-\alpha d) \exp(i\delta)} \quad (10)$$

即薄膜下表面的光强反射系数为

$$R_{31} = \frac{r_{32}^2 + 2r_{32} r_{21} S_i \exp(-\alpha d) \cos \delta + r_{21}^2 S_i^2 \exp(-2\alpha d)}{1 - 2r_{21} r_{32} S_i \exp(-\alpha d) \cos \delta + r_{21}^2 r_{32}^2 S_i^2 \exp(-2\alpha d)} \quad (11)$$

将(7)、(9)、(11)式代入(6)式,得到光束从薄膜上表面正入射时,薄膜系统的光强透射系数为

$$T_\sigma = \frac{(S_i t_{12} t_{23} t_{31})^2 \exp(-\alpha d)}{1 - (r_{31} r_{32})^2 - 2r_{21} (r_{23} + r_{32} r_{31}^2) S_i \exp(-\alpha d) \cos \delta + S_i^2 r_{21}^2 (r_{23}^2 - r_{31}^2) \exp(-2\alpha d)} \quad (12)$$

在薄膜的弱吸收区域,消光系数远小于折射率,此时薄膜复折射率中的消光系数可忽略。在此条件下,将(1)式给出的菲涅耳系数代入(12)式,有

$$T_\sigma = \frac{Ax}{B - Cx \cos \delta + Dx^2} \quad (13)$$

式中  $A = 16n^2 s S_i^2$ ,  $B = (n+1)^3 (n+s^2)$ ,  $C = 2(n^2-1)(n^2-s^2) S_i$ ,  $D = (n-1)^3 (n-s^2) S_i^2$ ,  $\delta = 4\pi n d / \lambda$ ,  $x = \exp(-\alpha d)$ 。

## 2.2 薄膜的折射率

由(13)式得透射极大值和极小值为

$$T_M = \frac{Ax}{B - Cx + Dx^2} \quad (14)$$

$$T_m = \frac{Ax}{B + Cx + Dx^2} \quad (15)$$

联立(14)式和(15)式,得

$$\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T_M} = \frac{2C}{A} \quad (16)$$

将 A、C 表达式代入(16)式,并令  $a = S_i / S_i^2$ , 解出薄膜折射率为

$$n = [N \pm (N^2 - s^2)^{1/2}]^{1/2} \quad (17)$$

式中

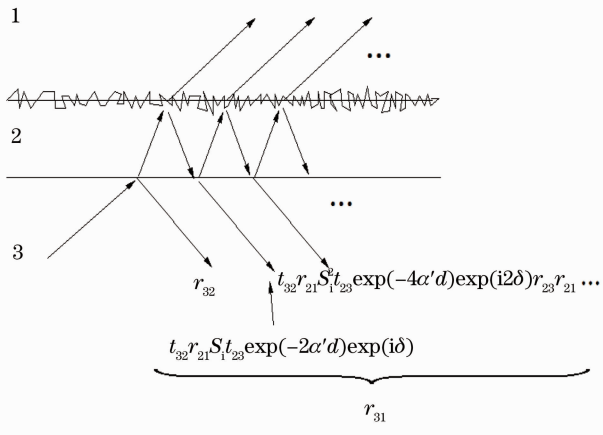


图3 薄膜下表面反射光的干涉

Fig. 3 Interference of reflected light of thin film lower surface

$$N = 2s \frac{T_M - T_m}{T_M T_m a} + \frac{s^2 + 1}{2}. \quad (18)$$

(17)式中当  $n > s$  时,取正号(+);当  $n < s$  时,取负号(-)<sup>[11]</sup>。这里制备的 a-Si:H 薄膜是以石英作为衬底,所以在计算薄膜折射率时取十号。

### 3 a-Si:H 薄膜的制备及测试

以 SiH<sub>4</sub> 和 H<sub>2</sub> 作为前驱气体,利用等离子体增强化学气相沉积法制备了以石英作为衬底的 a-Si:H 薄膜。衬底温度为 250 ℃,沉积气压为 90 Pa, SiH<sub>4</sub> 和 H<sub>2</sub> 流量分别为 12 sccm 和 88 sccm(1 sccm 即在 0 ℃, 1 个标准大气压的标准状态下 1 mL/min)。

采用 Veeco Dektak150 型台阶仪对薄膜样品厚度进行测量。其厚度  $d = 558$  nm。采用 Hitachi U-4100型光谱仪测量所制备薄膜在 500~1100 nm 范围的透射光谱和反射光谱。图 4 给出了光正入射薄膜系统的示意图,薄膜置于空气中,空气折射率  $n_0 = 1.0$ 。薄膜复折射率  $\tilde{n} = n + i\kappa$ ,其中  $n$  为折射率, $\kappa$  为消光系数。正入射时薄膜透射光谱和准正入射时薄膜反射光谱的测量结果示于图 5,由图可见波长小于 500 nm 范围为强吸收区域,波长大于 630 nm 的透射和反射光谱曲线上具有周期性变化的干涉峰,这是入射光在薄膜层的多光束干涉造成的。图 5 中明显的干涉峰和较大的调制深度表明,实验中制备的 a-Si:H 薄膜厚度比较均匀。

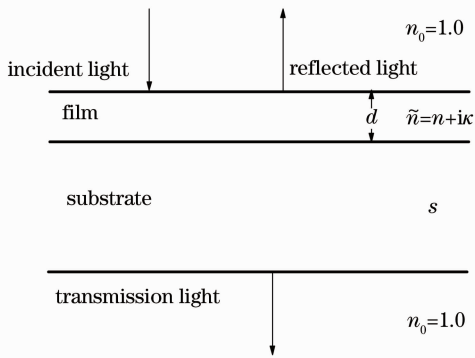


图 4 薄膜系统的反射与透射

Fig. 4 Reflection and transmission of thin film system

由于薄膜干涉效应,直接由透射光谱计算得到的吸收光谱在带隙吸收区和指数吸收区表现出很强的干涉峰,从而对薄膜光学常量的准确计算造成干扰。而  $T/(1-R)$  曲线呈单调增加趋势,因此利用该单调性计算薄膜的吸收系数  $\alpha$ ,有

$$\alpha = -\frac{1}{d} \ln\left(\frac{T}{1-R}\right). \quad (19)$$

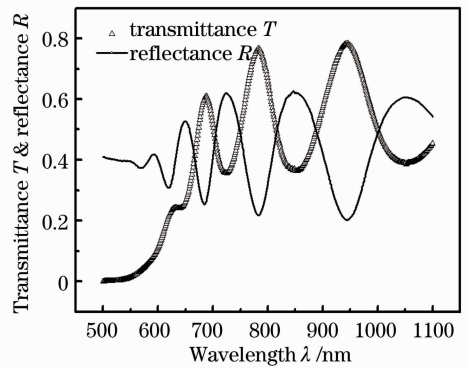


图 5 a-Si:H 薄膜的透射光谱和反射光谱  
Fig. 5 Transmission and reflection spectra of a-Si:H film

### 4 薄膜光学常量的理论确定

假制备的 a-Si:H 薄膜表面是光滑的,即薄膜表面均方根粗糙系数  $\sigma = 0$ 。采用多项式拟合方法,给出薄膜透射光谱中干涉极大点和极小点的包络线  $T_M(\lambda)$  和  $T_m(\lambda)$ ,如图 6 所示, $T_M(\lambda)$  为上包络线, $T_m(\lambda)$  为下包络线<sup>[11]</sup>。然后将得到的  $T_M(\lambda)$  和  $T_m(\lambda)$  代入(17)式和(18)式,给出薄膜的折射率  $n_1(\lambda)$ 。设透射光谱干涉峰中两相邻极大值(或两相邻极小值)所对应的波长分别为  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ ,则利用干涉极值条件可得薄膜厚度

$$d_1(\lambda) = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2[\lambda_1 n_1(\lambda_2) - \lambda_2 n_1(\lambda_1)]}, \quad (20)$$

并可以得出平均薄膜厚度  $\bar{d}_1$ 。由上式确定的薄膜厚度易受拟合的  $T_M(\lambda)$  和  $T_m(\lambda)$  误差的影响,为进一步精确给出薄膜厚度,将计算出的  $n_1(\lambda)$  和  $\bar{d}_1$  代入干涉极值公式

$$2n_1 \bar{d}_1 = m_0 \lambda, \quad (21)$$

得出干涉级数  $m_0$ 。考虑到波峰和波谷干涉级数应为整数和半整数,并且相邻波峰或波谷的干涉级数

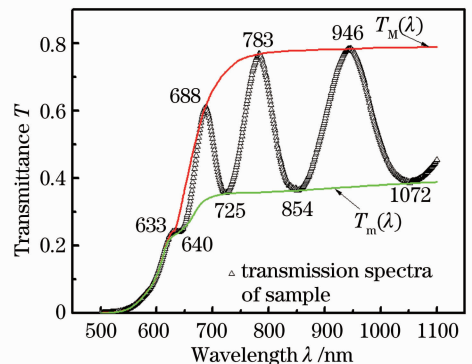


图 6 a-Si:H 薄膜透射光谱的拟合

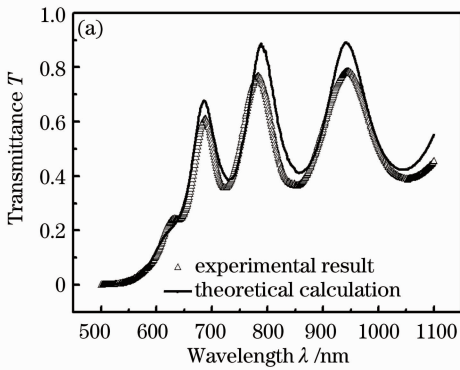
Fig. 6 Fitting of transmission spectra of the a-Si:H film

应相差 1, 对  $m_0$  进行调整, 以减小薄膜厚度和折射率的计算误差<sup>[15]</sup>。调整后得到的薄膜平均厚度  $\bar{d} = 704 \text{ nm}$ , 折射率  $n(\lambda)$  由图 7 中“○”符号表示。利用柯西公式

$$n(\lambda) = a + b/\lambda^2, \quad (22)$$

对计算所得折射率进行拟合, 得出的 a-Si:H 薄膜的色散曲线如图 7 中曲线 I 所示, 拟合参数  $a = 3.30, b = 3.83 \times 10^4$ 。

为验证上面所计算的光学常量及厚度的准确性, 将其代入(13)式, 计算出薄膜透射系数  $T(\lambda)$ , 并与实验测量得到的薄膜透射光谱进行对比, 如图 8 所示, 其中透射光谱实验数据用“△”符号表示, 利用模型拟合的透射光谱用实线表示。由图 8(a)可见, 若假设 a-Si:H 薄膜表面是光滑时, 薄膜透射光谱与



理论计算结果存在较大的偏差, 而且由计算得到的 a-Si:H 薄膜厚度与台阶仪测得的厚度也存在很大的偏差。

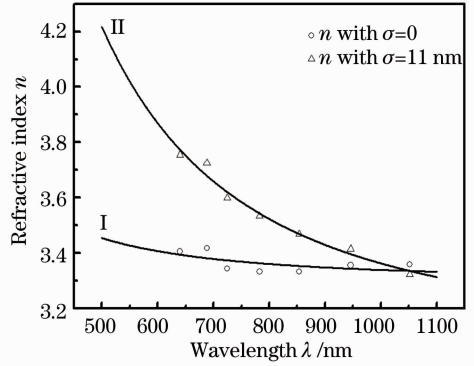


图 7 a-Si:H 薄膜的色散曲线

Fig. 7 Dispersion curves of the a-Si:H film

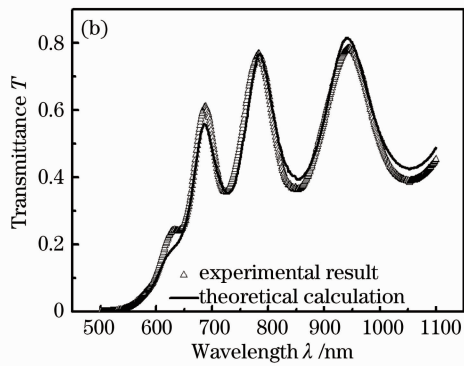


图 8 a-Si:H 薄膜的理论计算透射光谱与实验测量结果的比较。(a)  $\sigma = 0$ ; (b)  $\sigma = 11 \text{ nm}$

Fig. 8 Comparison between experimental and calculated transmission spectra of a-Si:H film. (a)  $\sigma = 0$ ; (b)  $\sigma = 11 \text{ nm}$

考虑到各种薄膜沉积技术制备的 a-Si:H 薄膜, 其表面都具有一定的粗糙程度, 即薄膜表面方均根粗糙系数  $\sigma \neq 0$ 。采用与粗糙系数  $\sigma = 0$  时相同的计算步骤, 选取不同的  $\sigma$ , 重新确定 a-Si:H 薄膜的折射率和厚度。

为了评价理论计算的透射系数与薄膜透射光谱的符合程度, 引入偏差  $\sigma_0$ :

$$\sigma_0 = \frac{\sum [T_\sigma(\lambda) - T_s(\lambda)]^2}{N}, \quad (23)$$

式中  $T_\sigma(\lambda)$  为理论计算出的薄膜透射系数,  $T_s(\lambda)$  为实验测量的透射光谱,  $N$  为所取数据点的个数。选取不同的粗糙系数, 计算得出的薄膜厚度  $d$  和偏差  $\sigma_0$  列于表 1, 偏差随粗糙系数的变化曲线如图 9 所示。显然所制备 a-Si:H 薄膜的表面均方根粗糙系数取 11 nm 时, 偏差最小。这时理论计算的透射系数与薄膜透射光谱符合得最好, 如图 8(b) 所示。在  $\sigma$  取 11 nm 时, 得出的折射率  $n(\lambda)$  由图 7 中的“△”符号表示。对其进行拟合, 得到的 a-Si:H 薄膜的色散曲线

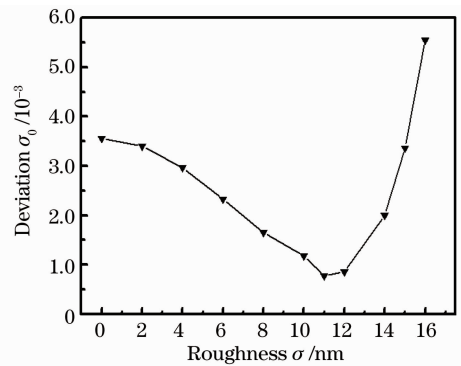


图 9 偏差随粗糙系数的变化

Fig. 9 Dependence of deviation on roughness coefficient

如图 7 中曲线 II 所示, 拟合参数  $a = 3.07, b = 2.85 \times 10^5$ 。同时计算出的薄膜厚度为 554 nm, 该厚度与台阶仪测量值 558 nm 基本一致。上述结果表明, 薄膜粗糙表面的光散射严重影响薄膜的透射和反射, 因此基于透射光谱和反射光谱计算 a-Si:H 薄膜的厚度和光学常量等参数时, 必须考虑薄膜表面粗糙程度的影响。



表 1 不同粗糙系数时计算得到的薄膜厚度和偏差

Table 1 Calculated film thicknesses and deviations for different roughness coefficients

$\sigma$ /nm	0	2	4	6	8	10	11	12	14	15	16
$d$ /nm	705	704	700	695	686	675	554	548	531	521	510
$\sigma_0/10^{-3}$	3.6	3.4	3.0	2.3	1.7	1.2	0.8	0.9	2.0	3.4	5.6

另外,在理论计算得到的薄膜厚度与台阶仪测量值基本一致的情况下,理论透射光谱与实验测量曲线之间仍存在一些偏差[见图 8(b)]。究其原因,可能是所制备 a-Si:H 薄膜的非均匀性引起的薄膜折射率变化造成的。所用模型尚未考虑薄膜内部的非均匀性及其造成的光散射的影响,有待进一步改进。

## 5 结 论

利用标量波散射理论,引入表面均方根粗糙系数对粗糙薄膜表面引起的光散射进行了细致分析,得出了光散射影响下薄膜系统透射系数的表达式。在此基础上计算出的薄膜厚度以及透射光谱与实验测量结果基本一致,由此确定的光学常量也更接近实际量值。由于该方法的计算过程不基于最小值优化算法,无需复杂软件辅助,计算简单、速度快,是准确确定表面粗糙薄膜的厚度以及光学常量的一种有效方法。

## 参 考 文 献

- 1 Cai Hongkun, Tao Ke, Wang Linshen *et al.*. Interface treatment of amorphous silicon thin film solar cells on flexible substrate[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(11): 7921~7925
- 蔡宏琨,陶科,王林申等. 柔性衬底非晶硅薄膜太阳能电池界面处理的研究[J]. *物理学报*, 2009, **58**(11): 7921~7925
- 2 R. Alieva, R. G. Ikramovb, O. T. Ismanovab *et al.*. A semiempirical equation for temperature dependences of photoelectric parameters of a-Si:H solar cells[J]. *Appl. Solar Energy*, 2011, **47**(1): 52~55
- 3 Li Shibin, Wu Zhiming, Yuan Kai *et al.*. Study on thermal conductivity of hydrogenated amorphous silicon films[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(5): 3126~3131
- 李世彬,吴志明,袁凯等. 氢化非晶硅薄膜的热导率研究[J]. *物理学报*, 2008, **57**(5): 3126~3131
- 4 I. A. Kurova, N. N. Dvmont. Specific features of recombination in layered a-Si:H films [J]. *Semiconductors*, 2012, **46**(3): 315~318
- 5 J. L. Tissot. 160×120 uncooled amorphous silicon TEC-less

detector with 25  $\mu\text{m}$  pixel-pitch[J]. *J. Applied Optics*, 2007, **28**(1): 1~6

J. L. Tissot. 像元间距为 25  $\mu\text{m}$ 、160×120 元无热电制冷器的非致冷非晶硅探测器[J]. *应用光学*, 2007, **28**(1): 1~6

- 6 Zhou Yi, Wang Aiyang. Determination of optical constants and thickness of diamond like carbon films by a multiple sample method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2467~2472
- 周毅,汪爱英. 多样品法确定类金刚石薄膜的光学常数与厚度[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2467~2472
- 7 Guo Chun, Lin Dawei, Zhang Yundong *et al.*. Determination of optical constants of LaF<sub>3</sub> films from spectrophotometric measurements[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0731001
- 郭春,林大伟,张云洞等. 光度法确定 LaF<sub>3</sub> 薄膜光学常数[J]. *光学学报*, 2011, **31**(7): 0731001
- 8 Liang Liping, Hao Jianying, Qin Mei *et al.*. Determination of the optical constants of sol-gel derived ZrO<sub>2</sub> films simply from the transmission spectra[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(12): 7906~7911
- 梁丽萍,郝建英,秦梅等. 基于透射光谱确定溶胶凝胶 ZrO<sub>2</sub> 薄膜的光学常数[J]. *物理学报*, 2008, **57**(12): 7906~7911
- 9 M. Kar, B. S. Verma. Improvements in the determination of extinction coefficients of a thin film using an envelope method[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2005, **7**(10): 599~603
- 10 E. R. Shaaban. Calculation of the optical constants of amorphous semiconducting As<sub>40</sub>S<sub>60</sub>, As<sub>40</sub>S<sub>35</sub>Se<sub>25</sub> and As<sub>40</sub>Se<sub>60</sub> thin film from transmittance and reflectance measurements[J]. *J. Appl. Sci.*, 2006, **6**(2): 340~346
- 11 M. Kar. Error minimization in the envelope method for the determination of optical constants of a thin film [J]. *Surf. Interface Anal.*, 2010, **42**(3): 145~150
- 12 A. P. Caricato, A. Fazzi, G. Leggieri. A computer program for determination of thin films thickness and optical constants[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2005, **248**(1-4): 440~445
- 13 R. Swanepoel. Determination of surface roughness and optical constants of inhomogeneous amorphous silicon films [J]. *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, 1984, **17**(10): 896~903
- 14 Z. Yin, H. S. Tan, F. W. Smith. Determination of the optical constants of diamond films with a rough growth surface [J]. *Diam. Relat. Mater.*, 1996, **5**(12): 1490~1496
- 15 Ding Wenge, Yuan Jin, Li Wenbo *et al.*. Thickness and optical constants calculation of hydrogenated amorphous silicon film based on transmission and reflectance spectra[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(7): 1096~1100
- 丁文革,苑静,李文博等. 基于反射和透射光谱的氢化非晶硅薄膜厚度及光学常数计算 [J]. *光子学报*, 2011, **40**(7): 1096~1100

栏目编辑: 韩峰