

分光椭偏技术在铟锡氧薄膜光电特性研究中的应用

胡 慧^{1,2} 张丽平^{1*} 孟凡英¹ 刘正新¹

(¹ 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050)
² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 通过分光椭偏测量技术,并采用 Drude 和 Tauc-Lorentz 复合模型,研究了铟锡氧(ITO)薄膜在不同基底温度和退火过程中光学介电函数的变化。通过与霍尔效应以及光学带隙测试的数据对比,发现 ITO 薄膜的载流子浓度和光学带隙变化分别对材料红外和紫外波段光学介电函数有影响。通过分别研究材料在低能端和高能端的介电函数,得到光学介电函数与薄膜的载流子浓度和光学带隙的关系。该研究确定了利用非接触分光椭偏技术对 ITO 薄膜的电学和光学特性进行定量分析的近似方法。

关键词 薄膜;ITO 薄膜;分光椭偏测量;光电性质;介电函数

中图分类号 O472+.3 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.1031003

Application of Spectroscopic Ellipsometry for the Study of Electrical and Optical Properties of Indium Tin Oxide Thin Films

Hu Hui^{1,2} Zhang Liping¹ Meng Fanying¹ Liu Zhengxin¹

(¹ Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The dielectric function transformation of ITO thin films caused by different substrates and post annealing temperatures is studied by spectroscopic ellipsometry measurement using Drude and Tauc-Lorentz combined modes. By comparing with the Hall effect measurement results and optical bandgap values calculated from transmittance and reflectance spectra, it is found that the influences on the dielectric functions from the carrier concentration and optical bandgap values occur at infrared and ultraviolet wavelength regions, respectively. The relationship between the dielectric functions and carrier concentration and optical bandgap is deduced by studying the dielectric functions at low and high energy regions. This study provides a new technological way to analysis the electrical and optical properties of ITO thin films by non-contact spectroscopic ellipsometry measurements.

Key words thin films; ITO thin films; spectroscopic ellipsometry technology; opto-electronic property; dielectric function

OCIS codes 310.3840; 300.6550; 260.2130; 160.6000

1 引 言

铟锡氧(ITO)薄膜具有高电导率、高光学透射

率和表面平滑等优点,作为透明导电薄膜电极被广泛应用于太阳能电池、平板显示器和有机发光器件

收稿日期: 2014-04-04; 收到修改稿日期: 2014-06-13

基金项目: 国家自然科学基金(61204005)、国家 863 计划(2011AA050501)、中国科学院知识创新重要方向性项目(KGCX2-YW-399+11)

作者简介: 胡 慧(1988—),女,硕士研究生,主要从事分光椭偏技术在光伏材料中的应用方面的研究。

E-mail: huhui@mail.sim.ac.cn

导师简介: 刘正新(1976—),男,博士,研究员,主要从事新型光伏材料及高效率太阳能电池方面的研究。

E-mail: z. x. liu@mail.sim.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: zlp_wan@mail.sim.ac.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

等领域^[1-4]。ITO 薄膜的微结构和光电特性主要受生长方法、生长过程中的氧浓度、衬底温度以及各种后处理条件的影响,通常利用 X 射线衍射、霍尔(Hall)效应测试、透射和反射(T&R)光谱等来评价 ITO 薄膜的结晶性、电学和光学性能^[5-10]。而分光椭圆偏(SE)技术的发展^[11-14]让研究人员对 ITO 薄膜生长机制和微结构演变有了更深的理解^[15-21]。SE 技术通过椭圆偏振光与物质相互作用前后偏振状态的改变来测定薄型或多层薄膜样品的厚度和光学常数,具有非破坏性、高分辨率的优点。通常用来拟合 ITO 薄膜光学参数的有 Cauchy, Lorentz oscillator 或 Drude 模型^[17-20],通过进一步增加梯度分层,可以精确模拟薄膜生长方向结构和晶相演变引起的光学参数变化^[15,17,22]。Akagawa 等^[23]利用 SE 技术分析了具有绒面结构的掺氟氧化锡与非晶硅叠层的结构特征,不仅精确拟合了绒面掺氟氧化锡的载流子浓度、迁移率和表面粗糙度,而且还得到了非晶硅薄膜的厚度和微结构信息。另外,通过 SE 设备原位观察样品的成膜过程,可以得到样品生长方向的结构演变情况^[24-26]。

利用分光 SE 技术测量 ITO 薄膜的光学参数,研究了薄膜沉积后的退火处理过程对 ITO 薄膜结构的影响;结合其他光、电学特性测试结果,分析了光学常数与之对应的关系,并给出了利用 SE 表征 ITO 薄膜性质的有效参数。

2 实 验

2.1 实验条件

本研究利用反应等离子沉积(RPD)方法在玻璃衬底上生长 ITO 薄膜,有关 RPD 的原理以及在薄膜沉积中的优点已有介绍^[27]。采用钢锡合金作为靶材(纯度为 99.99%),靶材中氧化锡的掺杂摩尔分数为 5%。RPD 腔室的本底真空低于 1.0×10^{-3} Pa。成膜时通过质量流量控制计分别导入高纯度气体氧气(O₂)和氩气(Ar)(纯度分别为 99.995%和 99.9999%),通过优化确定气体流量比在 O₂/Ar = 12%~15%之间,腔室的气压为 3.95×10^{-1} Pa。基底温度(T_{sub})分别为室温(RT)、130 °C 和 150 °C。样品从真空取出后在空气氛围下的热处理炉中进行后处理,退火温度(T_{ann})在 200 °C~500 °C 之间,时间为 30 min。

采用可变角度 SE 设备(J A Woollam, M-2000XI)测量 ITO 薄膜的厚度和光学参数,测量的波长范围为 246~1690 nm (0.73~5.04 eV);利用

紫外-可见-近红外分光光度计(Perkin-Elmer, Lambda 950)测试样品的光学透射率和反射率,并计算光学带隙^[28];利用霍尔效应(ECOPIA, HMS-5300)测量 ITO 薄膜的载流子浓度,并与 SE 的分析结果进行比较。霍尔效应测量中的磁场强度为 0.55 T,温度为室温。

2.2 SE 测试及分析

可变角度分光 SE 测量原理是通过测量在不同入射角度条件下反射与入射偏振光振幅($\tan \Psi$)和相位(Δ)的相对变化来表征薄膜的微观结构和光学参数。复反射率可以表示为

$$\rho = \tan \Psi \exp(i\Delta) \equiv r_p / r_s, \quad (1)$$

式中 r_p 和 r_s 分别为 p-偏振光和 s-偏振光的复振幅反射系数^[29]。

对生长在玻璃衬底上的 ITO 薄膜通常采用的分析模型为:具有粗糙度的表面层/带梯度的体层/玻璃衬底。体层的分析模型通常采用 Drude 和 Tauc-Lorentz (TL) 混合分析模型^[30],表面层一般采用 50%空气与 50% ITO 体层混合分析。

在分析模型中,ITO 薄膜介电函数 $\epsilon(E) = \epsilon_1(E) + i\epsilon_2(E)$ 也可以表示为 $\epsilon(E) = \epsilon_D(E) + \epsilon_{TL}(E)$,其中 $\epsilon_D(E)$ 和 $\epsilon_{TL}(E)$ 分别表示 Drude 和 TL 模型的光学函数。在 Drude 理论中,材料等离子体能量 E_p 的表达式^[21]为

$$E_p = \hbar\omega_p = \left(\frac{\hbar^2 e^2 N_{\text{opt}}}{m_e^* \epsilon_\infty \epsilon_0} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

式中 ω_p 为材料等离子体角频率, m_e^* 为电子的有效质量, ϵ_∞ 为高频介电常数, \hbar 为约化普朗克常数, e 为电子电荷, N_{opt} 为光学载流子浓度, ϵ_0 为真空介电常数。当 ITO 薄膜的载流子在 $1 \times 10^{20} \sim 1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 浓度范围时, $\epsilon_\infty m_e^* = 1.4m_e$ 成立^[2],其中, m_e 为电子质量。

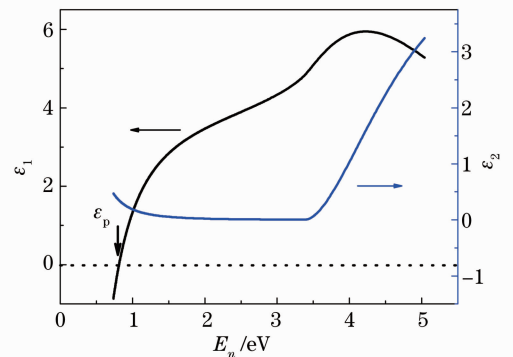


图 1 典型的 ITO 薄膜介电函数 ϵ_1 和 ϵ_2 随 E_n 的变化
Fig. 1 Typical dielectric functions ϵ_1 and ϵ_2 of ITO thin films versus E_n

图 1 给出了一个典型的 ITO 薄膜介电函数随光子能量 E_n 的变化关系。 ϵ_1 与薄膜材料的电学性能载流子浓度和迁移率密切相关^[21]。当 $\epsilon_1 = 0$ 时对应 ω_p ^[31]，且 E_n 位于低能端 ($E_n \sim 1$ eV)。因此，根据(2)式，低能区域的 ϵ_1 可间接反映 ITO 薄膜中实际载流子浓度 N 的变化。

在低能(近红外)区域， ϵ_2 代表 ITO 薄膜中自由载流子吸收增强^[2]，所以这一区域的 ϵ_2 值由自由载流子浓度和电子迁移率决定^[30]。在 高能(紫外)区域，ITO 薄膜对光的吸收主要为带隙吸收^[32]，这一区域的 ϵ_2 值与光学带隙 E_{opt} 相关。

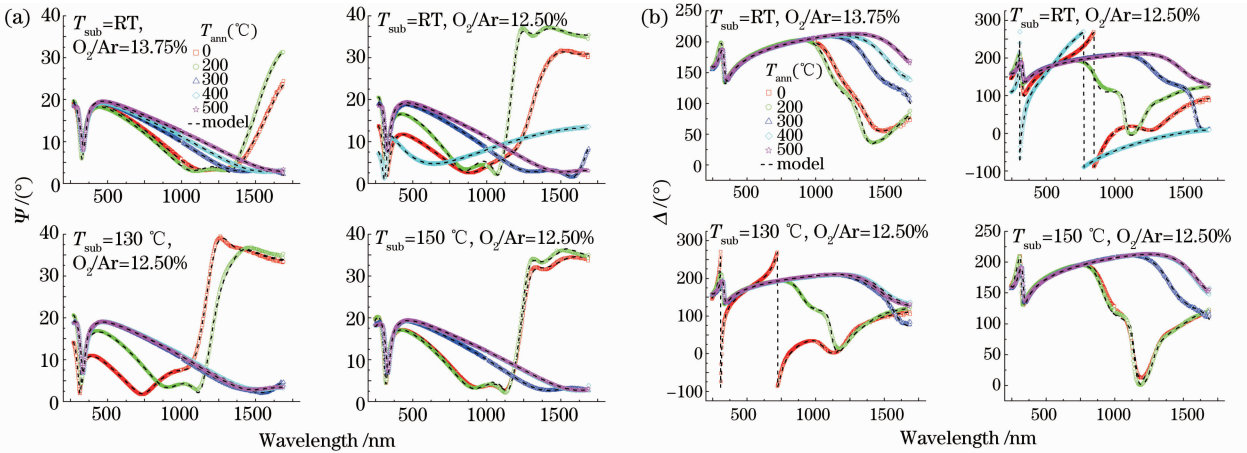


图 2 不同生长和退火条件下 ITO 薄膜的 SE 测量数据和拟合结果。(a) Ψ 随波长的变化；(b) Δ 随波长的变化

Fig. 2 Ellipsometric data and fits of ITO thin films under different deposition conditions and annealing temperatures. (a) Ψ as a function of wavelength; (b) Δ as a function of wavelength

图 3 给出不同基底温度和 O_2/Ar 流量比条件下制作 ITO 薄膜的 ϵ_1 ($E_n = 1$ eV) 和 Hall 效应测试所得载流子浓度 N 随后退火温度的变化趋势。由图 3(a)可知，经 200 °C 退火，所有样品的 ϵ_1 值变化均不明显；300 °C 退火后， ϵ_1 值均有不同程度的增加；随着退火温度继续增大，所有样品 ϵ_1 值未呈现太大的变化。对比图 3(b)可知，200 °C 退火同样对样品 N 的影响较小；而 300 °C 退火后，所有样品的 N 均有不同程度的下降，且与 ϵ_1 值的变化趋势相反；随退火温度继续增大，所有样品 N 趋于稳定。

为了进一步证明 N 与 ϵ_1 ($E_n = 1$ eV) 的相关性，图 4 给出 N 与 ϵ_1 ($E_n = 1$ eV) 的对应关系。由图可知，不同条件下 ITO 薄膜的 N 与 ϵ_1 ($E_n = 1$ eV) 成负相关，且通过拟和得到线性关系为

$$N = a + b \cdot \epsilon_1, \quad a = (9.22 \pm 0.37) \times 10^{20},$$

$$b = -2.31 \pm 0.17, \quad (3)$$

根据(3)式，利用介电函数实部 ϵ_1 ($E_n = 1$ eV) 可实现对 ITO 薄膜载流子浓度 N 的定量分析。

如 2.2 节中所述，在 4 eV 近紫外区域， ϵ_2 值与

3 结果与讨论

图 2 为 SE 技术测量不同生长和退火条件下 ITO 薄膜的 SE 测量参数 Ψ 和 Δ 随波长的变化，空心标记代表实验样品实际测量值，虚线代表利用 TL 和 Drude 复合模型拟合的结果。从图中可看出，利用 TL 和 Drude 复合模型拟合得到的 Ψ 和 Δ 分别与实际测量值随波长的变化相吻合，证明了该复合模型在拟合 ITO 薄膜光学参数方面的有效性。

E_{opt} 相关。通过测量 ITO 薄膜的光学透射率和反射率(T&R 光谱)，计算可得光学带宽 E_{opt} 。图 5 为 ITO 薄膜的 ϵ_2 ($E_n = 4$ eV) 和 E_{opt} 随后退火温度的变化。由图 5(a)和(b)可知，经 200 °C 退火后，RT 生长的样品 ϵ_2 值明显下降而 E_{opt} 则明显升高，而 130 °C 和 150 °C 生长的样品 ϵ_2 与 E_{opt} 值均无明显变化，说明 200 °C 后退火对稍高温生长样品结构影响较小。300 °C 退火后，所有样品的 ϵ_2 值迅速增大而 E_{opt} 值均下降。之后，随着退火温度进一步升高， E_{opt} 值和 ϵ_2 同样都趋于稳定。

简言之，200 °C 退火可以有效改善 RT 生长 ITO 薄膜的 E_{opt} ；进一步增加退火温度会使 ITO 的结构迅速劣化， E_{opt} 值减小； ϵ_2 ($E_n = 4$ eV) 值与 E_{opt} 的变化相反。

为了进一步证明 E_{opt} 与 ϵ_2 ($E_n = 4$ eV) 的相关性，通过分析 E_{opt} 与光学参数之间的解析关系，图 6 给出 E_{opt} 随 $(\epsilon_2/n)^{1/2}$ ($E_n = 4$ eV) 的变化关系，其中 n 为薄膜在 $E_n = 4$ eV 时的折射率，同样通过 SE 数据分析而得^[15]。由图可知，不同条件下 ITO 薄膜的

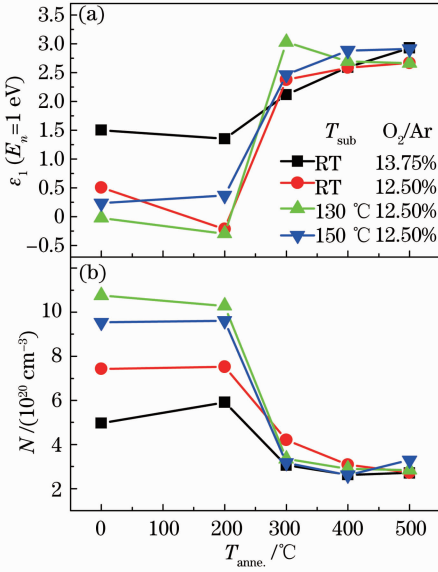


图 3 不同基底温度和 O₂/Ar 流量比条件下制作 ITO 薄膜的 ε₁ (E_n = 1 eV) 与载流子浓度随后退火温度的变化

Fig. 3 Dependence of dielectric function ε₁ (E_n = 1 eV) and carrier concentration of ITO thin films on the post annealing temperature. The ITO thin films are deposited at different substrate temperatures and O₂/Ar flow rate ratios

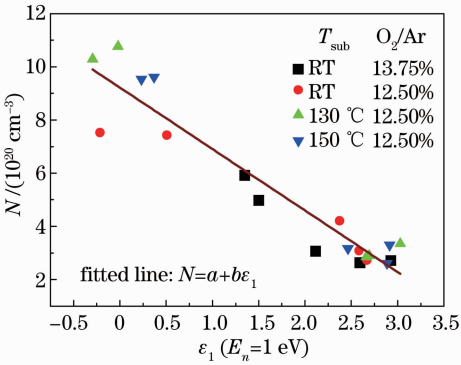


图 4 ITO 薄膜的载流子浓度 N 与 $E_n = 1$ eV 时 ϵ_1 的关系

Fig. 4 Correlation between the carrier concentration N and ϵ_1 value at $E_n = 1$ eV of ITO thin films

E_{opt} 与 $(\epsilon_2/n)^{1/2}$ ($E_n = 4$ eV) 成负相关, 且通过拟和得到线性关系为

$$E_{opt} = a + b \cdot (\epsilon_2/n)^{1/2}, \quad a = 3.96 \pm 0.03, \quad b = -0.14 \pm 0.05. \quad (4)$$

根据(4)式, 利用 4 eV 对应的介电函数虚部 ϵ_2 和折射率 n 可实现对 ITO 薄膜 E_{opt} 的定量分析。

另外, 从图 6 还可看出, 在 RT 生长且未经退火样品的 E_{opt} 与所拟合的直线偏离较大。可能的原因

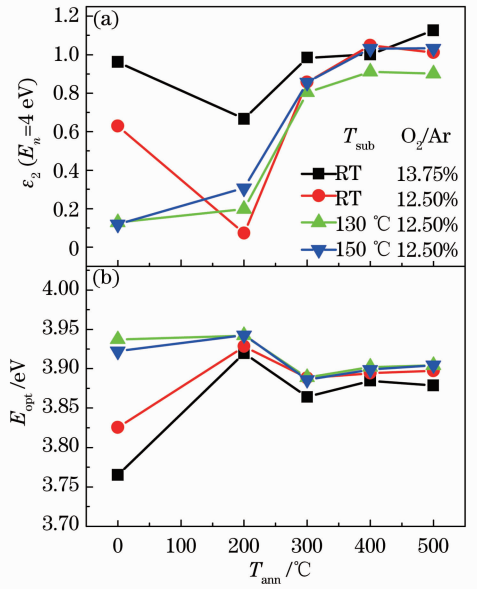


图 5 不同基底温度和 O₂/Ar 流量比条件下制作 ITO 薄膜的 ε₂ (E_n = 4 eV) 与 E_{opt} 随后退火温度的变化

Fig. 5 Dependence of dielectric function ε₂ (E_n = 4 eV) and E_{opt} of ITO thin films on the post annealing temperature. The ITO thin films are deposited at different substrate temperatures and O₂/Ar flow rate ratios

是 RT 生长的 ITO 薄膜结构中存在较多锡的氧化物且结晶性较差, 晶化类型和晶界处高的缺陷态都

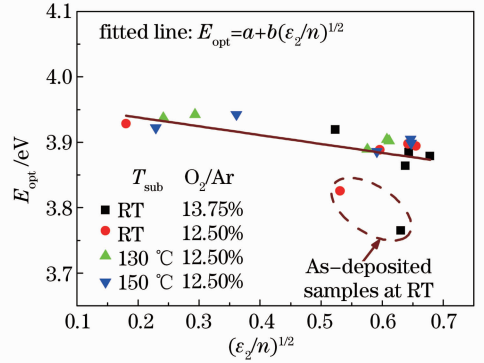


图 6 ITO 薄膜的光学带隙 E_{opt} 随 $(\epsilon_2/n)^{1/2}$ 的变化

Fig. 6 Dependence of optical bandgap E_{opt} of ITO thin films on $(\epsilon_2/n)^{1/2}$

会导致 E_{opt} 的减小, 所以 RT 生长且未经退火样品的 E_{opt} 与所分析的线性关系偏离较大。

图 7 为 ITO 薄膜的霍尔迁移率和电阻率随后退火温度的变化。同一样品的霍尔迁移率随退火温度的增加而增大, 退火温度大于 200 °C 后, 增大的趋势变缓。RT 生长样品的霍尔迁移率较低, 正如对图 6 分析所提到的, 主要原因是 RT 生长样品的结

晶性较差, 200 ℃ 的退火就可以使迁移率增加 2~4 倍。随着退火温度的增加, O₂/Ar 流量比为 12.5% 的三种样品的电阻率几乎呈线性增加, 而 O₂/Ar 流量比为 13.75% 的样品的电阻率几乎没有劣化, 这说明高 O₂/Ar 流量比可以抑制电阻率劣化的速率。结合 N 和 E_{opt} 分析可知, 200 ℃ 是较合适的退火温度, 对所有条件生长的 ITO 薄膜特性都有不同程度的改善。

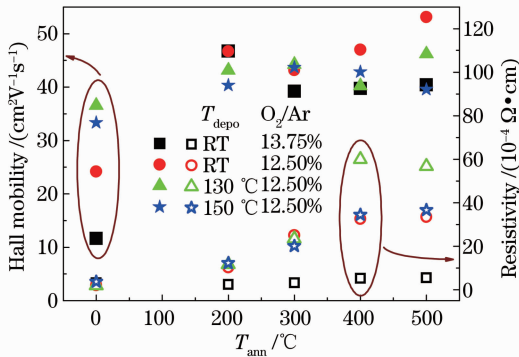


图 7 ITO 薄膜的霍尔迁移率和电阻率随后退火温度的变化

Fig. 7 Dependence of hall mobility and resistivity of ITO thin films on the post annealing temperature

综上所述, 130 ℃ 和 150 ℃ 生长的样品, 只有在 200 ℃~300 ℃ 退火时 E_{opt} 会减小, 当退火温度小于 200 ℃ 或大于 300 ℃ 后 E_{opt} 较稳定, N (和 ϵ_1 成反比) 随退火温度的变化具有同样的趋势。对于简并半导体, Burstein-Moss (BM) 效应可以引起带隙展宽^[33], 且带隙展宽与载流子浓度符合 $\Delta E_g \sim N^{2/3}$ 关系。经验证, 样品的 E_{opt} 变化与载流子浓度 N 的关系近似符合 BM 效应。

相对 130 ℃ 和 150 ℃ 生长的样品, RT 生长样品的 E_{opt} 经 200 ℃ 退火后变化较大。一方面, 由 BM 效应 N 增大引起。对于 RT 生长的 ITO 薄膜, 在晶界处有锡的分离相存在, 适当的退火处理使这一部分锡电离之后贡献为自由载流子, 因此 N 增大^[34]。另一方面, 后退火可以改善 RT 生长样品的结晶性^[35]。200 ℃ 退火对 RT 生长样品的结构有较明显改善, 所以带隙展宽增大。当退火温度大于 200 ℃, 融入薄膜中的氧与锡形成电活性较差的氧化锡以致晶粒尺寸进一步增大^[7], 而氧空位与活性锡原子的减少对 E_{opt} 的影响远远大于薄膜结晶性的改善, 所以退火温度在 200 ℃~300 ℃ 之间, E_{opt} 随 N 减小 (ϵ_1 增大) 而减小。当退火温度大于 300 ℃, N 和 E_{opt} 的变化均不明显, 说明氧空位与活性锡原子数量的减小与薄膜结晶性的改善相平衡。

4 结 论

通过分光椭圆技术研究了退火处理前后 ITO 薄膜的光学介电函数。通过分析低能端 1 eV 时的 ϵ_1 和测试所得的载流子浓度, 得到 $\epsilon_1(E_n=1 \text{ eV})$ 随载流子浓度变化的关系式, 利用该经验公式和测试样品的 $\epsilon_1(E_n=1 \text{ eV})$ 值, 可以计算推得 ITO 薄膜的载流子浓度。通过分析高能段 4 eV 时的 ϵ_2 和测试计算光学带隙, 可知 $\epsilon_2(E_n=4 \text{ eV})$ 与光学带宽之间的变化关系, 结合光学折射率或 BM 效应利用载流子浓度都可以近似计算推得 E_{opt} 。因此, 通过光学介电函数可以在一定程度上实现对 ITO 薄膜光电特性的定量分析。这种非接触、非破坏性测量技术对于研究 ITO 薄膜在太阳能电池、平板显示器和有机发光器件的应用具有一定的科学价值。

参 考 文 献

- 1 Yang Huiyin, Chen Xue, Qian Ziqing. Design and preparation of ITO film filter used in thermal photovoltaic system [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 1231003.
- 2 杨惠尹, 陈 雪, 钱子勤. 热光伏系统中 ITO 薄膜滤波器设计与制备[J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1231003.
- 3 I Hamberg, C G Granqvist. Evaporated Sn-doped In₂O₃ films: basic optical properties and applications to energy-efficient windows [J]. J Appl Phys, 1986, 60(11): R123-R159.
- 4 T Koida, M Kondo, K Tsutsumi, *et al.*. Hydrogen-doped In₂O₃ transparent conducting oxide films prepared by solid-phase crystallization method [J]. J Appl Phys, 2010, 107(3): 033514.
- 5 R B H Tahar, T Ban, Y Ohya, *et al.*. Tin doped indium oxide thin films: electrical properties [J]. J Appl Phys, 1998, 83(5): 2631-2645.
- 6 W F Wu, B S Chiou, S T Hsieh. Effect of sputtering power on the structural and optical properties of RF magnetron sputtered ITO films [J]. Semiconductor Science and Technology, 1994, 9(6): 1242-1249.
- 7 N Manavizadeh, F A Boroumand, E A Soleimani, *et al.*. Influence of substrates on the structural and morphological properties of RF sputtered ITO thin films for photovoltaic application [J]. Thin Solid Films, 2009, 517(7): 2324-2327.
- 8 G H Guai, Q L Song, Z S Lu, *et al.*. Effects of multiple heat treatment cycles on structure, optical and electrical properties of indium-tin-oxide thin films [J]. Surface and Coatings Technology, 2011, 205(8-9): 2852-2856.
- 9 J N Hilfiker, C L Bungay, R A Synowicki, *et al.*. Progress in spectroscopic ellipsometry: applications from vacuum ultraviolet to infrared [J]. J Vac Sci Technol A, 2003, 21(4): 1103-1108.
- 10 G E Jellison, Jr.. Spectroscopic ellipsometry data analysis: measured versus calculated quantities [J]. Thin Solid Films, 1998, 313-314(1-2): 33-39.
- 11 L M Tang, L L Wang, D Wang, *et al.*. Donor-donor binding in In₂O₃: engineering shallow donor levels [J]. J Appl Phys, 2010, 107(8): 083704.
- 12 S A Alterovitz, J A Woollam, P G Snyder. Variable angle spectroscopic ellipsometry [J]. Solid State Technology, 1988, 31(3): 99-102.
- 13 J A Woollam, P G Snyder. Fundamentals and applications of variable angle spectroscopic ellipsometry [J]. Materials Science and Engineering, B, 1990, 5(2): 279-283.

- 13 Wu Suyong, Long Xingwu, Yang Kaiyong. Technique to minimize the characterization deviations of optical parameters of thin films caused by ellipsometric measurement systematic errors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(6): 0631001.
吴素勇, 龙兴武, 杨开勇. 一种最小化薄膜光学参数表征偏差的椭圆测量系统误差处理技术 [J]. *光学学报*, 2012, 32(6): 0631001.
- 14 He Jian, Li Wei, Xu Rui, *et al.*. Spectroscopic ellipsometry characterization of hydrogenated amorphous silicon thin film [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(10): 1031001.
何 剑, 李 伟, 徐 睿, 等. 氢化非晶硅薄膜的光谱椭圆研究 [J]. *光学学报*, 2013, 33(10): 1031001.
- 15 R A Synowicki. Spectroscopic ellipsometry characterization of indium tin oxide film microstructure and optical constants [J]. *Thin Solid Films*, 1998, 313-314(1-2): 394-397.
- 16 J A Woollam, W A Mcgahan, B Johs. Spectroscopic ellipsometry studies of indium tin oxide and other flat panel display multilayer materials [J]. *Thin Solid Films*, 1994, 241(1-2): 44-46.
- 17 H E Rhaleb, E Benamar, M Rami, *et al.*. Spectroscopic ellipsometry studies of index profile of indium tin oxide films prepared by spray pyrolysis [J]. *Applied Surface Science*, 2002, 201(1-4): 138-145.
- 18 M Losurdo, D Barreca, P Capezzuto, *et al.*. Interrelation between nanostructure and optical properties of oxide thin films by spectroscopic ellipsometry [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2002, 151-152(1): 2-8.
- 19 M Losurdo, M Giangregorio, P Capezzuto, *et al.*. Parametrization of optical properties of indium-tin-oxide thin films by spectroscopic ellipsometry: substrate interfacial reactivity [J]. *J Vac Sci Technol A*, 2002, 20(1): 37-42.
- 20 L J Meng, E Crossan, A Voronov, *et al.*. Indium-tin-oxide thin film prepared by microwave-enhanced d. c. reactive magnetron sputtering for telecommunication wavelengths [J]. *Thin Solid Films*, 2002, 422(1-2): 80-86.
- 21 H Fujiwara, M Kondo. Effects of carrier concentration on the dielectric function of ZnO; Ga and In₂O₃; Sn studied by spectroscopic ellipsometry: analysis of free-carrier and band-edge absorption [J]. *Phys Rev B*, 2005, 71(7): 075109.
- 22 Y S Jung. Spectroscopic ellipsometry studies on the optical constants of indium tin oxide films deposited under various sputtering conditions [J]. *Thin Solid Films*, 2004, 467(1-2): 36-42.
- 23 M Akagawa, S Kageyama, H Fujiwara. Ellipsometry analysis of a-Si:H/SnO₂:F textured structures [C]. *PVSC, IEEE*, 2011. 000172-000175.
- 24 H Fujiwara, M Kondo, A Matsuda. Real-time spectroscopic ellipsometry studies of the nucleation and grain growth processes in microcrystalline silicon thin films [J]. *Phys Rev B*, 2001, 63(11): 115306.
- 25 H Fujiwara, M Kondo. Real-time monitoring and process control in amorphous/crystalline silicon heterojunction solar cells by spectroscopic ellipsometry and infrared spectroscopy [J]. *Appl Phys Lett*, 2005, 86(3): 032112.
- 26 H Fujiwara, M Kondo, A Matsuda. Depth profiling of silicon-hydrogen bonding modes in amorphous and microcrystalline Si:H thin films by real-time infrared spectroscopy and spectroscopic ellipsometry [J]. *J Appl Phys*, 2002, 91(7): 4181-4190.
- 27 T Kakeno, K Sakai, H Komaki, *et al.*. Dependence of oxygen flow rate on piezoelectric photothermal spectra of ZnO thin films grown by a reactive plasma deposition [J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2005, 118(1-3): 70-73.
- 28 C Guillén, J Herrero. Structure, optical, and electrical properties of indium tin oxide thin films prepared by sputtering at room temperature and annealing in air or nitrogen [J]. *J Appl Phys*, 2007, 101(7): 073514.
- 29 J Li, J Chen, M N Sestak, *et al.*. Optics of CdS/CdTe thin-film photovoltaics [J]. *IEEE J Photov.*, 2011, 1(2): 187-192.
- 30 P I Rovira, R W Collins. Analysis of specular and textured SnO₂:F films by high speed four-parameter stokes vector spectroscopy [J]. *J Appl Phys*, 1999, 85(4): 2015-2025.
- 31 H Fujiwara. *Spectroscopic Ellipsometry: Principles and Applications* [M]. Tokyo: Maruzen Co. Ltd., 2003, 174-176.
- 32 G E J Jr, F A Modine. Parametrization of optical functions of amorphous materials in the interband region [J]. *Appl Phys Lett*, 1996, 69(3): 371-373.
- 33 S M Park, T Ikegami, K Ebihara, *et al.*. Structure and properties of transparent conductive doped ZnO films by pulsed laser deposition [J]. *Applied Surface Science*, 2006, 253(3): 1522-1527.
- 34 H Morikawa, H Kurata, M Fujita. On the grain boundary segregation of Sn in indium-tin-oxide thin films [J]. *J Electron Microsc.*, 2000, 49(1): 67-72.
- 35 L Kerkache, A Layadi, E Dogheche, *et al.*. Physical properties of RF sputtered ITO thin films and annealing effect [J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2006, 39(1): 184-189.

栏目编辑: 张浩佳