

介质/金属/介质透明导电多层膜的椭圆偏振光谱研究

孙 瑶^{1,2,3} 汪 洪^{1,2,3}

¹ 中国建筑材料科学研究院国家玻璃深加工工程技术中心, 北京 100024

² 中国建筑材料科学研究院绿色建筑材料国家重点实验室, 北京 100024

³ 中国建筑材料科学研究院太阳能与建筑节能玻璃材料加工技术北京市重点实验室, 北京 100024

摘要 拥有介质/金属/介质结构的透明导电多层膜的光学与电学性能优于单层透明导电氧化物膜或金属膜, 且能够在低温下制备。采用磁控溅射室温制备 ZnO/Ag/SiN 透明导电多层膜, 并进行变角度椭圆偏振光谱测量。对单层膜建立物理模型并进行拟合, 获得每层膜的折射率与消光系数。由单层膜模型组建多层膜模型, 使多层膜的椭圆偏振光谱拟合值与实测值相吻合。拟合结果表明, 不同 O₂ 和 Ar 流量比条件下制备衬底层 ZnO 时, 功能层 Ag 的 Drude 模型中载流子浓度几乎不变, 而迁移率不同。当 O₂ 和 Ar 流量比使 ZnO 处于氧化态时, Ag 层的迁移率最高, 由 X 射线衍射分析发现, 此时 Ag 层具有最强的结晶强度与择优取向。

关键词 薄膜; 多层膜; 椭圆偏振; 光学常数; Ag; ZnO

中图分类号 O484.5; O433.4 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.103101

Spectral Ellipsometry of Dielectric/Metal/Dielectric Transparent Conductive Multi-Layer Films

Sun Yao^{1,2,3} Wang Hong^{1,2,3}

¹ National Research Center for Glass Processing, China Building Materials Academy, Beijing 100024, China

² State Key Laboratory for Green Building Materials, China Building Materials Academy, Beijing 100024, China

³ Beijing Key Laboratory of Solar Energy and Building Energy-Saving Glass Materials Processing Technology, China Building Materials Academy, Beijing 100024, China

Abstract The optical and electrical properties of transparent conductive multi-layer films with dielectric/metal/dielectric structures are superior to those of single-layer transparent conductive oxide films or metal films, and the multi-layer films can be prepared at low temperature. The transparent conductive multi-layer ZnO/Ag/SiN film is prepared by magnetron sputtering at room temperature, and then the film is measured by variable-angle spectral ellipsometry. The refractive index and the extinction coefficient of every single layer are obtained by building physical models and fitting. The multi-layer model is established based on the single-layer models, and the measured and fitted ellipsometric spectra of multi-layers fit well. The results show that the carrier concentration in the Drude model of the functional Ag layer barely changes while mobility of the Ag layer varies under different flow rate ratios of O₂ to Ar in reactive ZnO deposition. The mobility of the Ag layer becomes upmost when the flow rate ratio of O₂ to Ar makes ZnO corresponding to the oxidation state. At this point, it is revealed by X-ray diffraction that the Ag layer has the best crystallization and preferred orientation.

Key words thin films; multi-layer film; ellipsometry; optical constant; Ag; ZnO

OCIS codes 310.7005; 120.2130; 300.6470

1 引言

具有“三明治”结构的 D/M/D(介质/金属/介质)透明导电多层膜, 由于其金属功能层 Ag 膜中的自由电

收稿日期: 2016-06-08; 收到修改稿日期: 2016-06-14; 网络出版日期: 2016-09-25

基金项目: 国家自然科学基金(51272245)、国家科技支撑计划(2015BAA02B01)

作者简介: 孙 瑶(1982—), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事玻璃镀膜工艺与薄膜物性等方面的研究。

E-mail: sunyao119@163.com

子具有导电性,且自由电子与电磁辐射存在相互作用,因此电阻低,对可见光透明,具有对红外光谱强烈反射的光谱选择性,能起到隔断辐射的作用,可用于红外辐射反射镜、低辐射镀膜玻璃、抗静电涂层、电加温功能玻璃等领域^[1]。

D/M/D 结构采用 Ag 作为金属功能层,因为 Ag 的电阻率在金属材料中最低,仅为 $1.6 \mu\Omega \cdot \text{cm}$,优于透明导电氧化物膜(TCO),且反射光、透射光的颜色较为中性^[2]。但 Ag 膜较软,因此将其夹在介质/金属/介质结构的中间。介质层通常采用 SiN、ZnO、TiN、TiO₂、SnO₂ 等材料,对 Ag 膜有机械保护与光学增透的作用^[3]。

本文采用磁控溅射室温制备 ZnO/Ag/SiN 多层膜,与单层膜相比,研究多层膜光电性能需考虑两方面因素:1) 由于光学干涉效应,膜系的组合光学导纳取决于单层膜的光学常数,即每层膜的光学常数将影响总的光谱曲线;2) 多层膜的膜层之间存在相互作用,尤其是衬底层会影响在其上生长的功能层结构,进而影响功能层的电学性能。研究 D/M/D 结构的透明导电膜中每层膜的光学常数以及膜层间的相互作用很有必要。

椭圆偏振光谱法(以下简称椭偏法)为高精度、非接触式的光学检测方法。通过探测线偏振光照射到样品表面后反射的椭圆偏振光的 p 分量与 s 分量的振幅比 Ψ 和相位差 Δ 信息,依据材料自身特性建立合适的物理模型,通过反演得到材料的物理厚度、折射率、消光系数与复介电常数。在建模拟合过程中对物理模型各参数进行数值优化运算,使其收敛到最优解,依据物理模型各参数的含义推断被测材料的物理属性。在多层膜拟合过程中,通过对比下层膜变化时上层膜物理参量的变化,推断膜层间的相互作用。

研究发现,磁控溅射生成的膜层质量对反应气氛最为敏感,当 O₂ 和 Ar 的流量比使制备的 ZnO 衬底层处于氧化态时,其上生长的 Ag 层热稳定性最佳^[4]。本文从 ZnO/Ag/SiN 多层膜的光电性能考虑,基于椭偏法,拟合 ZnO、Ag、SiN 每层膜的膜厚与光学常数。由单层膜模型组建多层膜模型,保持初始参数不变,拟合多层膜的椭偏光谱,研究组建膜系后不同 O₂ 和 Ar 流量比时 Ag 层模型参数的变化,从而分析衬底层 ZnO 对功能层 Ag 载流子浓度与迁移率的影响,获得最优 O₂ 和 Ar 流量比。

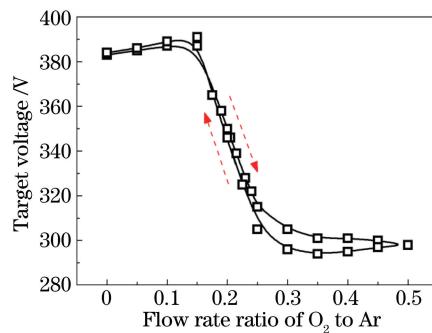
2 实验方法

采用北京创世威纳生产的 MSP-3200 型单腔室共聚焦式磁控溅射仪制备 ZnO/Ag/SiN 多层膜,腔体尺寸为 $\Phi 450 \text{ mm} \times 350 \text{ mm}$,装配英国 Genco 公司的阴极。基片采用厚度为 2 mm 的低铁超白玻璃,沉积前依次采用异丙醇溶液、乙醇溶液与去离子水超声波清洗 10 min,再用氮气吹干,并传送至镀膜腔室,进行线性离子源清洗,清洗工艺及清洗效果如文献[5]所述。

镀膜的背底真空度为 $1.2 \times 10^{-4} \text{ Pa}$,靶基距为 100 mm,靶材尺寸为 $\Phi 75 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$,基片台转速为 10 r/min。功能层 Ag 采用直流磁控溅射,Ag 靶纯度为 99.99%,功率为 22 W,气压为 0.51 Pa,氩气流量为 0.33 mL/s,沉积时间为 100 s,膜厚为 20 nm。上介质层 SiN 的沉积采用射频反应溅射,Si 靶纯度为 99.9999%,功率为 350 W,气压为 0.23 Pa,Ar 流量为 0.10 mL/s,N₂ 流量为 0.10 mL/s,沉积时间为 560 s,膜厚约为 40 nm。下介质层 ZnO 的沉积采用直流反应溅射,Zn 靶纯度为 99.9%,功率为 50 W,固定 Ar 气流量为 0.33 mL/s,O₂ 流量由 0 增大至 0.17 mL/s,即 O₂ 和 Ar 的流量比范围为 0~0.50,对应的气压由 0.54 Pa 增大至 0.71 Pa,膜厚为 22~65 nm。膜厚由美国 Veeco 公司的 Dektak 150 型表面轮廓仪测得。

图 1 所示为反应溅射 ZnO 的靶电压随 O₂ 和 Ar 流量比的变化曲线。反应磁控溅射同时包括溅射(物理过程)和反应(化学过程),是一个动态平衡的过程。在靶面,Ar 离子引起的溅射和活性气体引起的反应同时进行。当反应气体(O₂)含量较少时,靶表面的反应层生长速度小于溅射速度,仅发生溅射,薄膜处于金属态。当反应气体含量较高时,靶表面的反应层生长速度大于溅射速度,形成反应层 ZnO,薄膜处于氧化态。当反应气体含量处于由低到高或由高到低的临界状态时,出现靶电压从低到高的突变,溅射的薄膜处于过渡态^[6]。靶电压的变化滞后于 O₂ 和 Ar 流量比的往复变化,形成迟滞回线。

当 O₂ 和 Ar 流量比由 0 增大至 0.15 时,靶电压保持在 380 V 左右,反应溅射处于金属态;当流量比继续增大至 0.30 时,靶电压急剧下降至约 300 V,反应溅射处于过渡态;当流量比由 0.30 继续增大至 0.50 时,靶电压维持在 300 V 左右不变,反应溅射处于氧化态,此时反应溅射中的 O₂ 含量达到饱和。O₂ 和 Ar 流量比变化时,ZnO 由金属态变为氧化态,其上生长的 Ag 膜结构必定受其影响,因此有必要研究不同的 O₂ 和 Ar

图 1 反应溅射 ZnO 的靶面电压随 O₂ 和 Ar 流量比的变化Fig. 1 Variation in target voltage with flow rate ratio of O₂ to Ar in ZnO reactive sputtering

流量比条件下 ZnO 对 Ag 膜的影响，并获得最佳工艺。

多层膜结构由 X 射线衍射(XRD)表征，采用德国 Bruker 公司生产的 D8 型 X 射线衍射仪，测试条件为 $\theta \sim 2\theta$ 扫描模式，电压为 40 kV，电流强度为 250 mA，扫描速度为 $8(^{\circ})/\text{min}$ 。椭偏测试分析采用美国 J. A. Woollam 公司的 V 型自动变角光谱型椭偏仪，波长范围为 300~2500 nm，步长为 5 nm，测试角度为布儒斯特角附近的 55° 与 65° 。

3 结果与讨论

3.1 椭偏单层膜的建模和拟合

根据菲涅耳公式，平行于入射面的 p 分量与垂直于入射面的 s 分量的振幅反射系数 r_p, r_s 分别为^[7]

$$r_p = \frac{n_1 \cos \theta_0 - n_0 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_0 + n_0 \cos \theta_1}, \quad (1)$$

$$r_s = \frac{n_0 \cos \theta_0 - n_1 \cos \theta_1}{n_0 \cos \theta_0 + n_1 \cos \theta_1}, \quad (2)$$

式中 n_0, n_1 分别为空气和介质的光学常数， θ_0, θ_1 分别为入射角与折射角。由(1)、(2)式定义 $r_p/r_s = \tan \Psi \exp(i\Delta)$ ， Ψ 和 Δ 分别为 p 分量与 s 分量的振幅比和相位差，即椭偏仪获得的实测数据。椭偏法就是通过建立物理模型拟合 Ψ 与 Δ ，与实测值相对比，以模型计算结果与测试结果之间的均方差(MSE)最小为收敛条件，根据物理模型的关系式反演得到光学常数等参数。

多层膜的物理建模需要对每一膜层单独建模，因此有必要先对 ZnO、Ag、SiN 单层进行椭偏测试并拟合。

3.1.1 衬底层 ZnO 的椭偏测试和拟合

图 2(a)、(b) 分别为玻璃基体上 ZnO 单层膜的 Ψ 与 Δ 的实测值与拟合值，以 O₂ 和 Ar 流量比为 0.24 为例，其他沉积参数参见实验方法。ZnO 属于宽禁带半导体，采用 Herzinger 等提出的半导体振子模型进行拟合^[8]，其复介电常数为

$$\epsilon(w) = 1 + i \int_0^\infty w(E) B(hw, E) dE, \quad (3)$$

式中 $w(E)$ 代表与物质有关的多项式， $B(hw, E)$ 代表宽化因子， E 为能量， w 为频率， h 为普朗克常量， hw 代表光子能量。(3)式使介电常数的实部与虚部之间符合 Kramers-Kronig 关系。

镀膜所用的玻璃基体为 2 mm 厚的超白玻璃，厚度较小，透明基材的背面反射信号同样进入探测器中对测试结果造成干扰，因此需要对玻璃基体进行背面反射修正^[9]。由图 2 可以看出，模型拟合的结果与测试结果完全吻合，MSE 仅为 3.31。拟合获得的振子中心峰位为 3.3937 eV，即 ZnO 薄膜的光学带隙，与文献[10]的 3.37 eV 相符。获得的折射率与消光系数随波长的变化曲线如图 3(a) 所示。消光系数在波长小于 500 nm 时存在吸收现象，波长大于 500 nm 后完全透过，对应折射率先增大后降低，波长大于 500 nm 后为正常色散关系。Cho 等^[11]采用 Cauchy 模型拟合 ZnO 薄膜，Cauchy 模型适用于被拟合光谱范围内完全透过或弱吸收的介质材料，而 ZnO 薄膜在短波长处存在吸收，因此采用 Cauchy 模型将损失短波长处的吸收信息。多层膜拟合时由于变量较多，单层膜的拟合误差将累加至多层膜的拟合结果中，因此保证单层膜的拟合精度

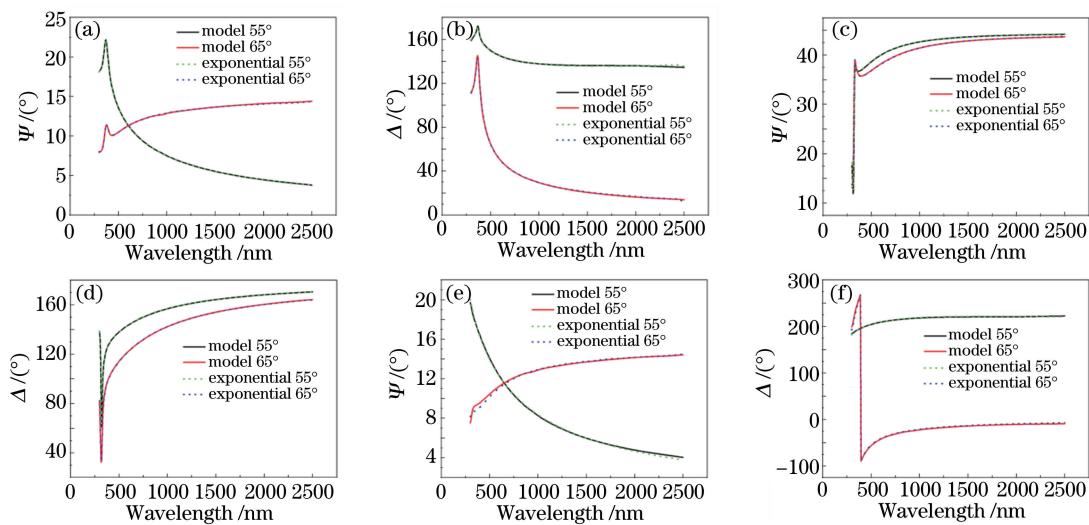


图 2 玻璃基体上单层膜的椭偏光谱。(a)(b) ZnO 层; (c)(d) Ag 层; (e)(f) SiN 层

Fig. 2 Ellipsometric spectra of single layers on glass substrate. (a)(b) ZnO layer; (c)(d) Ag layer; (e)(f) SiN layer

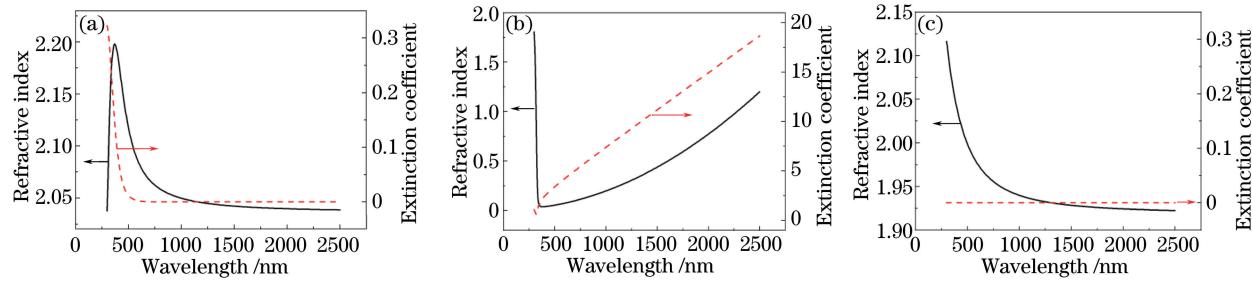


图 3 色散曲线。(a) ZnO 层; (b) Ag 层; (c) SiN 层

Fig. 3 Dispersion curves. (a) ZnO layer; (b) Ag layer; (c) SiN layer

是拟合多层膜的前提。

3.1.2 Ag 单层膜的椭偏测试和拟合

图 2(c)、(d) 分别为玻璃基体上 Ag 单层膜的 Ψ 与 Δ 的实测值与拟合值。玻璃基体仍然采用背面反射修正, Ag 膜拟合采用能够描述自由载流子效应的经典 Drude 模型^[12],

$$\epsilon(w) = \frac{-h^2 e \mu N}{\epsilon_0 (\tau E^2 + i h E)}, \quad (4)$$

式中 ϵ_0 为真空介电常数, τ 为平均弛豫时间, e 为电子电量, N 为载流子浓度, μ 为迁移率, $E = h\nu$ 代表光子能量。由图 2 可以看出, Ψ 与 Δ 的拟合值均与实测值相吻合, MSE 为 2.86, 拟合膜厚为 20.1 nm, 与实际膜厚 20 nm 相近。拟合的折射率与消光系数如图 3(b) 所示, 区别于 ZnO 介质层, Ag 膜的折射率先降低后增大, 消光系数随波长增大而增大。550 nm 处的折射率与消光系数分别为 0.06328 和 3.8255, 与文献[13]相符。

3.1.3 SiN 单层膜的椭偏测试和拟合

图 2(e)、(f) 分别为玻璃基体上 SiN 单层膜的 Ψ 与 Δ 的实测值与拟合值。玻璃基体仍然采用背面反射修正, 由于 SiN 层是弱吸收的均匀电介质薄膜, 采用 Cauchy 模型进行拟合^[14], 其折射率 n 、消光系数 k 与波长的关系为

$$n(\lambda) = A + B/\lambda^2 + C/\lambda^4, \quad (5)$$

$$k(\lambda) = \alpha \exp\left\{\beta \left[12400 \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\gamma}\right)\right]\right\}, \quad (6)$$

式中 A, B, C 为与物质有关的常数, 由拟合得出; α 为消光系数幅值, β 为指数因子, γ 为带宽。可以看出 Ψ 与 Δ 的拟合值均与实测值相吻合, MSE 为 4.40, 拟合膜厚为 39.2 nm, 与实际镀膜厚度 40 nm 接近。折射率 n 随波长增大而降低, k 始终为 0, 符合正常色散关系, 550 nm 处的折射率为 1.98, 消光系数为 0, 与文献[15]相符。

3.2 楔偏多层膜的建模和拟合

获得单层膜的拟合模型后,可以将单层膜逐层累加,对多层膜进行拟合。图 4 所示为 ZnO/Ag/SiN 多层膜的楔偏拟合模型,图 4(a)为膜层结构及拟合膜厚,图 4(b)为模型名称及说明。以 O_2 和 Ar 流量比为 0.24 的多层膜为例,由下至上分别为:2 mm 的玻璃基体,采用背面反射修正;厚度为 50.0 nm 的 ZnO 层,符合 Herzinger 等^[8]提出的 H-J 半导体模型;厚度为 20.7 nm 的 Ag 层,符合 Drude 模型;厚度为 37.0 nm 的 SiN 层,符合 Cauchy 模型;最表面的粗糙度层(Srough),该层本质上是根据有效介质理论设定为 50% 孔隙率的表面疏松层,其光学常数为内部介质层光学常数的一半^[12],拟合厚度为 7.5 nm。

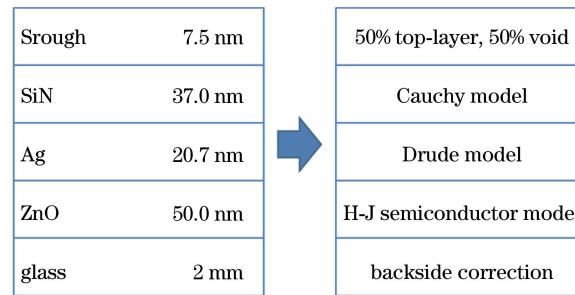


图 4 ZnO/Ag/SiN 多层膜的楔偏拟合模型

Fig. 4 Ellipsometrical fitting model of multi-layer ZnO/Ag/SiN film

楔偏拟合时待求解的未知参数个数小于等于约束方程的个数时才能获得精确解。多层膜的拟合中未知参数过多,需要固定一些已知参数,并设置拟合权重,避免参数间的协同变化导致反演迭代得出局域最优解而非全局最优解。实验中,由于 SiN 层拟合参数简单,且为非晶态结构,不随其他膜层的变化而发生变化,因此多层膜拟合中固定 SiN 层的参数,使其不再参与拟合。Ag 层受 ZnO 影响显著,因此增大 Drude 模型的拟合权重,获得的多层膜的拟合结果如图 5 所示。图 5 为 Ag/SiN 双层膜、 O_2 和 Ar 流量比分别为 0.24 与 0.30 时 ZnO/Ag/SiN 多层膜的 Ψ 与 Δ ,其中 Ag/SiN 双层膜拟合时去掉图 4 所示的 ZnO 半导体模型。是否有衬底层 ZnO 以及 ZnO 处于不同 O_2 和 Ar 流量比时,多层膜的 Ψ 曲线相差不大,而 Δ 曲线的形状存在显著差别。 Ψ 与 Δ 的拟合值与实测值十分吻合,且 MSE 都很小,说明上述模型对多层膜的拟合结果可信。

图 6 所示为多层膜楔偏拟合获得的 Ag 层 Drude 模型中载流子浓度与迁移率随 ZnO 层 O_2 和 Ar 流量

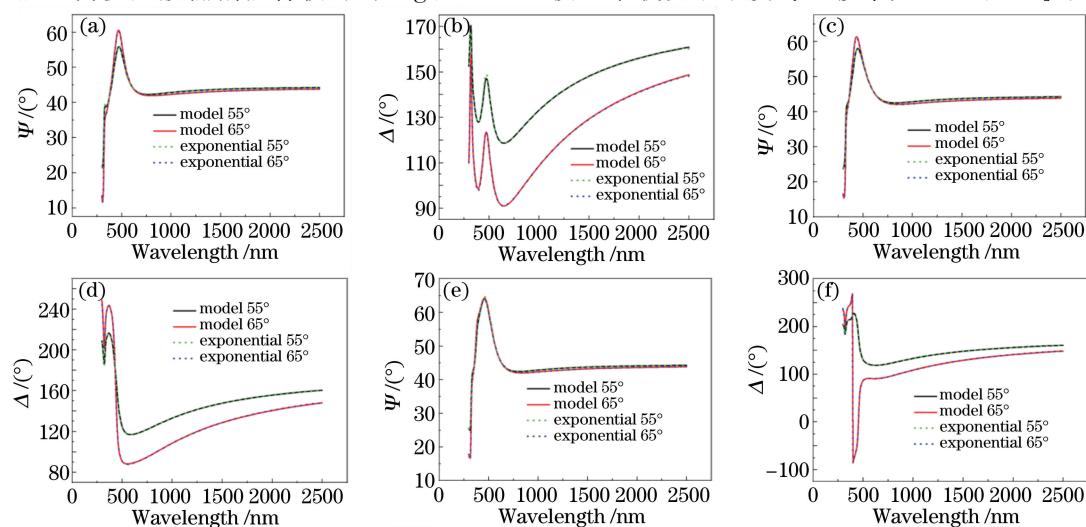


图 5 玻璃基体上多层膜的楔偏光谱。(a)(b) Ag/SiN 双层膜;(c)(d) ZnO/Ag/SiN 三层膜, O_2 和 Ar 流量比为 0.24;(e)(f) ZnO/Ag/SiN 三层膜, O_2 和 Ar 流量比为 0.30

Fig. 5 Ellipsometric spectra of multi-layer films on glass substrate. (a)(b) Bi-layer Ag/SiN film; (c)(d) three-layer ZnO/Ag/SiN film when flow rate ratio of O_2 to Ar is 0.24; (e)(f) three-layer ZnO/Ag/SiN film when flow rate ratio of O_2 to Ar is 0.30

比的变化。随着 O_2 和 Ar 的流量比增大,载流子浓度基本不变。当流量比为 0.21~0.30 时,根据图 1 所示的迟滞回线,即 ZnO 层处于过渡态时,相比于无 ZnO 衬底层,其迁移率急剧增大,当流量比为 0.3~0.50,即 ZnO 层处于氧化态时,迁移率处于上升后的平台期。

根据电阻率公式^[16]

$$\rho = \frac{1}{eN\mu}, \quad (7)$$

式中 ρ 为电阻率,由拟合获得的载流子浓度与迁移率计算的 Ag 层电阻率数值为 $4.97 \times 10^{-6} \sim 6.71 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$,与实测的 Ag 层电阻率数值相符。这说明衬底层 ZnO 的存在有利于 Ag 层的导电,且氧化态的 ZnO 最佳。

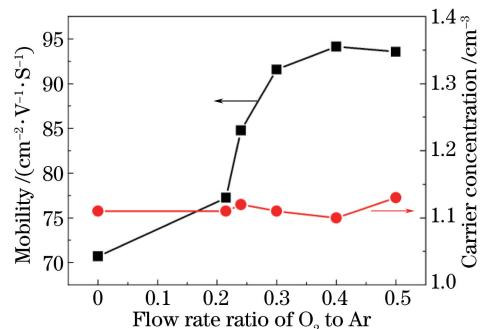


图 6 Ag 层的载流子浓度与迁移率随 ZnO 层 O_2 和 Ar 流量比的变化

Fig. 6 Variation in mobility and carrier concentration of Ag film with flow rate ratio of O_2 to Ar in ZnO layer

3.3 结构分析

采用 XRD 探测不同 O_2 和 Ar 流量比条件下制备的 ZnO/Ag/SiN 多层膜的结构。如图 7(a)所示,曲线上方标示的数字为 O_2 和 Ar 的流量比,流量比为 0 表示无 ZnO 衬底层的 Ag/SiN 双层膜,流量比为 0.21~0.30 对应 ZnO 的过渡态,流量比为 0.30~0.50 对应 ZnO 的氧化态。

如图 7 所示,2θ 角在 $20^\circ \sim 30^\circ$ 之间的非晶峰为玻璃基体与下介质层 SiN^[17],此外还探测到 ZnO(002)衍射峰与 Ag(111)、(200)衍射峰。Ag(200)衍射峰只在 Ag/SiN 双层膜与过渡态 ZnO/Ag/SiN 多层膜中被探测到,而在氧化态的 ZnO/Ag/SiN 多层膜中没有出现,说明氧化态的 ZnO 有利于 Ag 膜的择优取向。

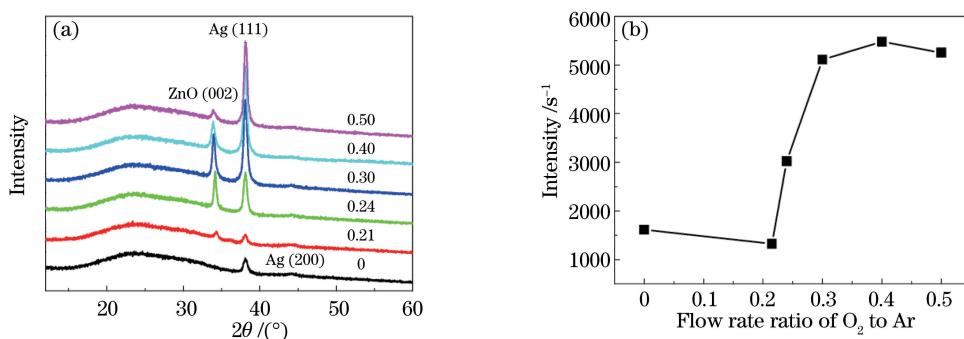


图 7 (a) 不同 O_2 和 Ar 流量比时 ZnO/Ag/SiN 多层膜的 XRD 图;(b) Ag (111) 峰强随反应溅射 ZnO 时 O_2 和 Ar 流量比的变化

Fig. 7 (a) X-ray diffraction patterns of multi-layer films under different flow rate ratios of O_2 to Ar; (b) dependence of diffraction intensity of Ag (111) peak on flow rate ratio of O_2 to Ar in ZnO sputtering

由于未固定 ZnO 层的膜厚,因此 ZnO(002)的衍射峰强度与膜厚相关。但是 Ag 层膜厚始终为 20 nm,所以 Ag 膜主峰(111)的衍射强度随 O_2 和 Ar 流量比呈现规律性变化,如图 7(b)所示。当对应 ZnO 的金属态时,Ag(111)的衍射强度与无 ZnO 衬底层的 Ag/SiN 双层膜相比变化不大,当 O_2 和 Ar 流量比增大至 ZnO 的过渡态时,Ag(111)的衍射强度急剧上升,直至流量比使 ZnO 为氧化态时,衍射强度上升到平台期几乎不变。这说明 ZnO 衬底层的存在能够促进 Ag 膜晶化程度的提高,尤其是氧化态的 ZnO 衬底层使得 Ag

膜的晶化峰强度达到最高。

对比图 6 所示 Ag 层的迁移率可以看出, 迁移率随 O₂ 和 Ar 流量比的变化与 Ag(111)衍射峰强度随 O₂ 和 Ar 流量比的变化曲线形状非常相似。推测是由于 ZnO 衬底层使其上生长的 Ag 层结晶更加完好, 因此 Ag 层中的晶界缺陷密度降低, 晶界散射程度减小, 平均自由程增大, 从而使迁移率提高。尤其是当 O₂ 和 Ar 的流量比为 0.3~0.50, 即 ZnO 层处于氧化态时, Ag 层的结晶强度最佳, 迁移率最大, 为最佳沉积条件。

4 结 论

制备了 D/M/D 结构的透明导电 ZnO/Ag/SiN 多层膜, 并对其进行椭偏拟合。ZnO 层采用 Herzinger 等提出的 H-J 半导体模型^[8], Ag 层采用 Drude 模型, SiN 层采用 Cauchy 模型, 获得了较好的拟合效果, 均方差小, 且拟合结果符合已知的材料特性。多层膜的拟合结果及 XRD 测试表明, 反应溅射制备 ZnO 时, 最佳的 O₂ 和 Ar 流量比为 0.30~0.50, 此时 O₂ 含量达到饱和, 对应氧化态的 ZnO, 能够使 Ag 层具有最佳的结晶强度与择优取向, 迁移率最大。该研究为多层膜的椭偏拟合提供了参考, 并提出可利用物理模型的拟合结果推断薄膜的某些物理性质, 进而分析多层膜之间的相互关系。椭偏法为分析光学多层膜材料提供了一种较好的方法。

参 考 文 献

- 1 Liu Jing, Liu Dan, Gu Zhen'an. Research progress of D/M/D transparent conductive multilayer films [J]. Materials Review, 2005, 8(19): 9-12.
刘 静, 刘 丹, 顾真安. 介质/金属/介质多层透明导电薄膜研究进展 [J]. 材料导报, 2005, 8(19): 9-12.
- 2 Sun Yao, Wang Yongbin, Wang Hong. Agglomeration morphology and element segregation of Ag film in low-emissivity stacks [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34(s): 96-100.
孙 瑶, 王永斌, 汪 洪. 低辐射银膜的团聚形貌与成分偏聚 [J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(s): 96-100.
- 3 Huang Jiamu, Jiang Pan, Dong Siqin. Study on optical property of TiN_x/Ag/TiN_x multilayer films [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(6): 1846-1850.
黄佳木, 蒋 攀, 董思勤. TiN_x/Ag/TiN_x 复合膜的光学性能 [J]. 光学学报, 2010, 30(6): 1846-1850.
- 4 Sun Y, Wang H. Influence of deposition mode in reactively sputtered ZnO underlayer on thermal stability of thin silver films [J]. Materials Science Forum, 2016, 852: 1018-1024.
- 5 Sun Yao, Wang Hong. Surface modification of glass substrate by linear ion source [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2015, 43(11): 1561-1566.
孙 瑶, 汪 洪. 线性离子源对玻璃基片的表面改性 [J]. 硅酸盐学报, 2015, 43(11): 1561-1566.
- 6 Danisman K, Danisman S, Savas S, et al. Modelling of the hysteresis effect of target voltage in reactive magnetron sputtering process by using neural networks [J]. Surface and Coatings Technology, 2009, 204(5): 610-614.
- 7 Zhao Haibin, Xia Guoqiang, Chen Yueli, et al. Analysis of measuring condition for principle angle in spectroscopic ellipsometry [J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(6): 734-736.
赵海斌, 夏国强, 陈岳立, 等. 椭圆偏振光谱中的主角测量条件分析 [J]. 光学学报, 2001, 21(6): 734-736.
- 8 Herzinger C M, Johs B D. Dielectric function parametric model and method of use: US5796983A[P]. 1998-08-18.
- 9 Synowicki R A. Suppression of backside reflections from transparent substrates [J]. Physica Status Solidi (c), 2008, 5 (5): 1085-1088.
- 10 Hong R J, Qi H J, Huang J B, et al. Influence of oxygen partial pressure on the structure and photoluminescence of direct current reactive magnetron sputtering ZnO thin films [J]. Thin Solid Films, 2005, 473(1): 58-62.
- 11 Cho E N, Park S, Yun I. Spectroscopic ellipsometry modeling of ZnO thin films with various O₂ partial pressures [J]. Current Applied Physics, 2012, 12(6): 1606-1610.
- 12 Hu Hui, Zhang Liping, Meng Fanying, et al. Application of spectroscopic ellipsometry for the study of electrical and optical properties of indium tin oxide thin films [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 1031003.
胡 慧, 张丽平, 孟凡英, 等. 分光椭偏技术在铜锡氧薄膜光电特性研究中的应用 [J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1031003.

- 13 Tang Jinfa, Gu Peifu, Liu Xu, *et al.*. Modern optical thin film technology[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2013: 17.
唐晋发, 顾培夫, 刘旭, 等. 现代光学薄膜技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2013: 17.
- 14 Zhu Xiaolong, Xiao Jun, Ma Zi. Wide spectrum optical properties for HFO₂ films[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(3): 033101.
朱晓龙, 肖峻, 马孜. 氧化铪薄膜的宽光谱光学特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(3): 033101.
- 15 Zhao Qingnan, Dong Yuhong, Liu Ying, *et al.*. Surface composition and refractive index of the as-deposited and rapidly annealed silicon nitride thin films[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2010, 32(22): 156-159.
赵青南, 董玉红, 刘莹, 等. 氮化硅薄膜热处理前后表面组成和折射率[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(22): 156-159.
- 16 Tian Shi. Physical properties of materials[M]. Beijing: Beihang University Press, 2001: 58.
田莳. 材料物理性能[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001: 58.
- 17 Sun Yao, Wang Hong. Influence of sputter parameters on optical constants of SiN_x dielectric film in D/M/D structures [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2015, 35(4): 28-33.
孙瑶, 汪洪. 溅射工艺对D/M/D结构中SiN_x介电膜光学常数的影响[J]. 航空材料学报, 2015, 35(4): 28-33.