

文章编号: 0253-2239(2010)01-0287-07

倾斜沉积“雕塑”薄膜结构参数优化分析

齐红基^{1,2} 王晴云¹ 肖秀娣¹ 易 葵¹ 贺洪波¹ 范正修¹

(¹中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; ²上海大恒光学精密机械有限公司, 上海 201800)

摘要 基于双轴双折射薄膜模型, 利用在不同入射角度下薄膜对两种偏振态光波透射光谱, 同时获得“雕塑”薄膜主轴折射率 N_1, N_2, N_3 和薄膜厚度 d 及柱状角 β 等参数。基于倾斜沉积技术, 利用电子束反应蒸发方法制备了氧化钽“雕塑”薄膜。借助于模拟退火算法, 对入射角度为 $0, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 和 60° 时两种偏振态光波的透射光谱进行拟合, 确定了氧化钽“雕塑”薄膜的结构参数, 并与场发射扫描电镜测量的薄膜结构进行了比较。结果表明, 利用透射光谱曲线可以较为准确地获得“雕塑”薄膜的结构参数。

关键词 薄膜; 结构参数提取; 倾斜沉积技术; 模拟退火算法; “雕塑”薄膜

中图分类号 O484 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103001.0287

Determination of Structural Parameters for Obliquely Deposited Sculptured Thin Film

Qi Hongji^{1,2} Wang Qingyun¹ Xiao Xiudi¹ Yi Kui¹ He Hongbo¹ Fan Zhengxiu¹

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)
(² Shanghai Daheng Optics and Fine Mechanics Co., Ltd, Shanghai 201800, China)

Abstract Based on the biaxial birefringent model, the structural parameters of thin film, including the principal refractive indices N_1, N_2, N_3 , the thickness d and the column angle β were determined by fitting the measured transmittance spectra for two polarizations at the normal and oblique incidence. With the glancing angle deposited technique, the sculptured tantalum oxide thin films were deposited by reactive electron beam evaporation. The structural parameters were extracted by fitting the measured spectral transmittance curves at the incident angle of $0, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ and 60° with the simulated annealing algorithm. Besides, the tilted nano-column structure, the thickness and the column angle were obtained with the cross section of thin film, examined with scanning electron microscope. The results show that the structure parameters of sculptured thin film can be extracted from the transmittance spectra.

Key words thin film; exeration of structural parameters; glancing-angle deposited technique; simulated annealing algorithm; sculptured thin film

1 引 言

“雕塑”薄膜(Sculptured thin films, STF)是指通过人工方法控制薄膜生长行为, 得到亚波长尺度上具有各向异性微结构的新型薄膜材料。1996 年和 1999 年 Robbie 研究小组^[1,2]在 Nature 杂志上发表的关于金属及金属氧化物的“雕塑”薄膜论文使得“雕塑”薄膜的设计和制备技术研究受到广泛关注。随着制备技术的发展, “雕塑”薄膜已经从简单的倾斜柱状

结构、螺旋结构^[1,3]向更为复杂的结构, 如超螺旋结构发展^[4], 在微机械、传感器及新型光学元件制备方面也呈现出巨大的应用潜力。利用“雕塑”薄膜已经成功制备的新型光学元件包括减反射薄膜^[5]、相位元件^[6,7]、偏振元件^[8,9]等。基于“雕塑”薄膜材料进行器件设计制备前需要对薄膜性能有准确的把握, 对于具有宽光谱性能要求的器件, 还需要掌握薄膜在该波段范围光学常数的色散关系。在线偏振光正入射条件

收稿日期: 2009-02-24; 收到修改稿日期: 2009-03-24

基金项目: 国家自然科学基金(60778026)和上海科技启明星基金(07QB14006)资助课题。

作者简介: 齐红基(1979—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事光学薄膜方面的研究。E-mail: qhj@siom.ac.cn

下,波导法可以获得各向异性薄膜的光学常数^[10~12],但需要满足在薄膜内激发几个导模的厚度条件。另外,波导方法对光波耦合也提出很高要求。用表面等离子体共振方法^[13,14]测量介质材料的光学常数时,则需要沉积一层金属薄膜来满足表面等离子体共振条件。相对于波导法及表面等离子体共振方法,椭圆偏振测量方法可以较为方便获得一定波段范围内薄膜光学常数^[15~17],但即使针对各向同性薄膜,其模型也较为复杂,且建立的模型对于椭圆偏振测量结果影响很大。利用薄膜的透射-反射光谱可以简单方便地确定薄膜在一定波段内的光学常数,常用于各向同性薄膜光学常数分析^[18~20]。由于各向异性薄膜主轴折射率之间差异较小及内部电磁场传输较为复杂,几乎没有利用薄膜的透射-反射光谱确定各向异性“雕塑”薄膜结构参数的报道^[21,22]。

基于双轴双折射薄膜模型,利用在不同入射角度下薄膜对两种偏振态光波的透射光谱,同时获得“雕塑”薄膜主轴折射率 N_1, N_2, N_3 , 薄膜厚度 d 及柱状角 β 等参数。采用电子束反应蒸发方式实现了各向异性氧化钽薄膜制备,并用分光光度计获得薄膜在 400~800 nm 范围内不同入射角度下 p 和 s 偏振光波透射光谱;利用模拟退火优化算法对薄膜 s 偏振光波透射光谱进行拟合,得到了双折射薄膜主轴折射率 N_3 和薄膜厚度 d ;另外对薄膜 p 偏振光波透射光谱进行拟合,给出了双折射薄膜主轴折射率 N_1, N_2 及柱状角 β 。为了验证拟合结构参数,利用场发射扫描电镜测量薄膜的横截面形貌,清晰看到薄膜存在柱状结构,且得到的薄膜厚度、柱状角与拟合结果吻合很好,说明利用透射光谱可以确定各向异性薄膜光学常数色散及厚度、柱状角等结构参数。

2 “雕塑”双折射薄膜模型及其结构参数优化

在拟合薄膜的结构参数前,需要建立薄膜介电张量的物理模型。1983年 F. Horowitz^[23]指出,利用倾斜沉积技术(Glancing angle deposited technique, GLAD)制备的柱状结构薄膜通常具有双轴双折射特性,且一个折射率主轴(轴1)沿着倾斜柱子方向,另一个折射率主轴(轴2)位于沉积平面内,且与倾斜柱子方向垂直,第三个折射率主轴(轴3)垂直于沉积平面。倾斜柱状结构与薄膜法线的夹角,即柱状角为 β ,如图1所示。三个折射率主轴对应的复折射率分别用 N_1, N_2 和 N_3 表示(其中

$N = n + ik$)。随后,该模型广泛应用于“雕塑”结构薄膜的微结构描述中。为了计算薄膜内部的电磁场传输特性,依据薄膜界面和法线建立坐标系(x, y, z)。入射介质和出射介质均采用各向同性的介质材料,入射光束与薄膜界面的夹角为 θ_0 。依据图1建立的双轴双折射薄膜模型中,在入射介质、入射角及基片确定后,光束在薄膜内部的传输行为完全决定于三个主轴方向的折射率、柱状角和厚度 d 等参数。因此,根据不同入射条件下薄膜的透射光谱曲线,可以反演出薄膜的结构参数 N_1, N_2, N_3, β 和 d 。通常情况下,双轴双折射晶体材料内部电磁场传输的计算较为复杂。对于双轴双折射薄膜而言,还需要考虑薄膜上下界面多光束的干涉效应,因此双折射薄膜内部电磁场的计算过程更为复杂。为不失一般性,当双折射薄膜的两个折射率主轴方向位于薄膜的入射面内时,两种偏振态光波在双折射薄膜内部能量不发生相互转化^[21],入射的 s 分量光波,其传输行为由薄膜的主轴折射率 N_3 及薄膜厚度 d 决定,出射光波中完全为 s 偏振态。对于 p 偏振入射光,在薄膜内部的电磁场传输过程受到主轴折射率 N_1, N_2 , 薄膜厚度 d 及柱状角 β 的影响,其计算方法与单轴双折射薄膜内部异常光波传输的计算方法类似^[24]。从上面分析中可以看出,由 s 偏振光波的透射光谱曲线可以反演得到主轴折射率 N_3 和 d ,在此基础上,利用 p 偏振光波的透射光谱曲线可以进一步获得“雕塑”薄膜的主轴折射率 N_1, N_2 及柱状角 β 等结构参数。

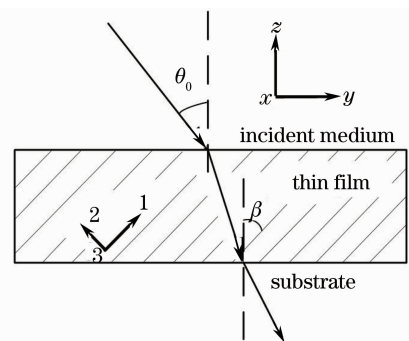


图1 双轴双折射薄膜结构模型

Fig. 1 Schematic structure model of a biaxial birefringent thin film

与获得薄膜在某一波长处的光学常数不同,得到薄膜在某一波段范围内光学常数的色散关系需要使用多波长拟合方法,即利用一定波段范围内的透射或/和反射光谱曲线来拟合薄膜的光学常数。由于使用了多个波长测量数据,多波长拟合方法显著减少了拟合过程中存在多解的可能性,但多波长拟

合需要基于一定的光学常数色散模型,如洛仑兹(Lorentzian)模型、德鲁德(Drude)模型、塞耳迈耶(Sellmier)或柯西(Cauchy)模型。对于介质材料而言,在远离薄膜材料的吸收边时,利用 Cauchy 模型可以很好描述薄膜的光学常数色散情况^[25]。使用 Cauchy 模型来描述薄膜主轴复折射率的色散关系,其折射率色散和消光系数的色散关系分别用 $n(\lambda) = A_n + B_n/\lambda^2 + C_n/\lambda^4$ 和 $k(\lambda) = A_k + B_k/\lambda^2 + C_k/\lambda^4$ 表示。薄膜结构参数的获取过程实质上为优化光学常数色散关系中的系数 $A_n, B_n, C_n, A_k, B_k, C_k, d$ 和 β 。通过比较测量结果与计算结果的差异,调整相关参数,使计算结果尽可能与测量结果吻合。薄膜结构参数的优化问题实质上是在多维空间内寻找一组最合理的解,由于薄膜光学计算具有典型的非线性特点,优化方法必须具有全空间范围内寻找最优值的能力,因此里采用模拟退火算法来拟合测量光谱曲线。

在全局空间内寻找最优参数,其运算量与参数个数呈现幂次方增长。为了加快优化过程,采取两种措施:1)尽可能给出合理的初始参数值;2)结合薄膜自身特点,合理设定优化参数的上下限,减少参数寻优的空间。采用常用于各向同性薄膜结构参数拟合的包络法,即根据光谱曲线极值位置及对应的透射率,做出相应包络曲线;并依据包络曲线结果,给出极值波长位置的折射率及消光系数。初始值设定完毕后,结合薄膜特点及利用包络法提取光学常数时计算光谱曲线与实际光谱曲线的偏离程度,设定包含最优解的合理参数空间。

3 “雕塑”薄膜制备及结构参数提取

利用倾斜沉积技术在 BK7 玻璃基片和单晶硅基片上制备氧化钽薄膜,分别用于光谱测量及薄膜截面的形貌分析。镀膜材料为高纯度的氧化钽碎料,采用电子束反应蒸发方式实现材料蒸镀。镀膜过程中基片的法线方向与入射材料的束流方向夹角 $\alpha = 40^\circ$ 。利用扩散泵获得镀膜需要的高真空,本底气压 3.0×10^{-3} Pa。为了抑制镀膜过程中氧化钽膜料失氧,需要充入高纯度的工作气体,在镀膜过程中气压保持在 2.7×10^{-2} Pa。薄膜的厚度采用光学极值控制方法,为了使镀膜材料充分氧化,获得化学计量比的氧化钽薄膜,平均沉积速率限制在 0.9 nm/s。

镀膜完成后,利用分光光度计(Perkin-Elmer UV/VIS/NIR Lambda 900)测量薄膜在 $400 \sim 800$ nm 范围内对于两种偏振态光波的透射率。为了消除光线通过玻璃基片后光束偏移对测量结果的影响,采用积分球作为探测器件。图 2(a)给出了薄膜在正入射情况下两种偏振光波的透射光谱,与各向同性薄膜在正入射条件下透射特性与偏振态无关情况不同,制备的 Ta_2O_5 薄膜存在明显的偏振分离情况,这说明制备的薄膜具有各向异性的特征。图 2(b)和(c)分别给出了斜入射情况下,薄膜对 s 和 p 两种偏振态光波的透射光谱。与各向同性薄膜类似,由于薄膜前后界面电磁场的干涉效应,透射光谱中存在干涉峰,且随着入射角度增加,整个光谱曲线向短波漂移。

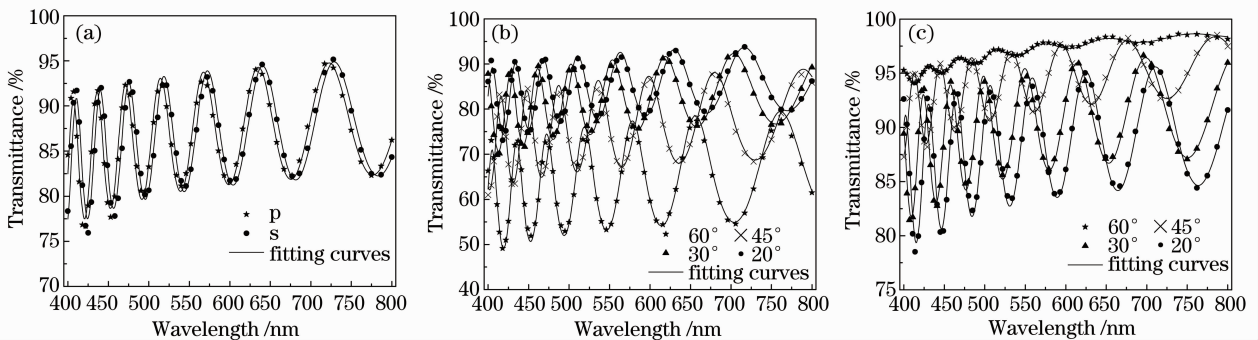


图 2 利用分光光度计测量得到的“雕塑”薄膜的透射光谱。(a) 正入射;(b)斜入射,s 偏振分量;(c)斜入射,p 偏振分量
Fig. 2 Transmittance spectra of thin film by spectrophotometer. (a) at normal incidence for two polarizations; (b) at oblique incidence for s polarization; (c) at oblique incidence for p polarization

对于理想的单层薄膜,当薄膜材料的折射率高于基片材料的折射率且薄膜与基片均不存在吸收时,单层膜的透射率曲线的上包络即为空白基片的透射率曲线。因此,需要确定基片的光学常数。对于 $400 \sim 800$ nm, BK7 基片几乎不存在吸收,基片的

光学常数色散关系可以使用 Cauchy 模型来描述。依据正入射条件下基片的透射光谱,可以得到基片光学常数的色散关系,如图 3 所示。可以看出,在 $400 \sim 800$ nm 波段,基片的折射率由 1.525 逐渐减少至 1.500 。

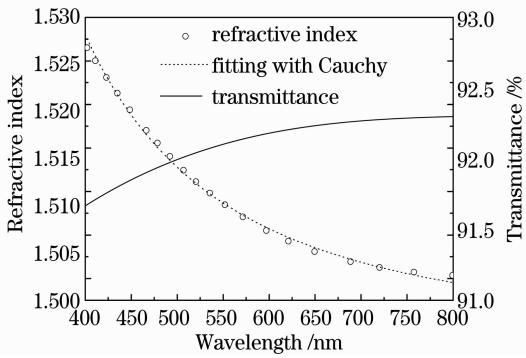


图 3 BK7 基片正入射条件下透射光谱曲线及光学常数色散关系

Fig. 3 Spectral transmittance curve measured at normal incidence and extracted refractive index of BK7 substrate

由上面分析可以看出,在图 1 所示的双轴双折射模型中, s 偏振态光波在薄膜内的传输行为与各向同性薄膜内传输完全相同,因此依据正入射条件下 s 分量的透射光谱可以很好的给出优化过程的初始值。使用 Akima 算法^[26]对光谱曲线极值点进行插值,得到正入射情况下 s 偏振分量光谱曲线的包络,如图 4(a)中的虚线所示。尽管使用的插值算法保证了透射曲线极值点位置包络曲线的连续可导,

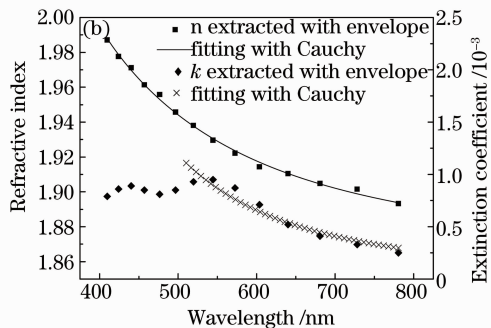
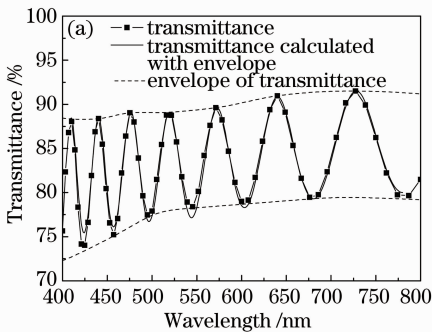


图 4 正入射情况下 s 偏振光波的透射光谱的包络曲线(a)及其计算出的光学常数色散情况(b)

Fig. 4 Envelope of transmittance spectrum measured at normal incidence for s polarized wave (a) and extracted optical constants with envelope method (b)

将包络法给出的薄膜光学常数色散方程及薄膜厚度作为优化过程的初始值,使用模拟退火算法优化不同入射角度下薄膜对 s 偏振光波的透射光谱,获得薄膜的主轴折射率 N_3 及厚度 $d=1340\pm 4$ nm。然后固定薄膜厚度 $d=1340$ nm,对于不同入射角度下得到的光学常数进行重新优化,得到薄膜光学常数的色散情况如图 5 所示。折射率及消光系数均满足正常色散关系,即随波长的增加而减少。利用获得的光学常数,计算不同角度下薄膜对应的 s 偏振光波的透射光谱曲线在图 2 中以细实线给出,可以看出,计算结果与测量结果吻合得较好。

在获得薄膜的厚度后,可以利用薄膜对于 p 偏

但由于薄膜结构的不完整性,得到的包络曲线并不是理想薄膜对应的单调变化的曲线,利用包络法获得的光学常数需要使用优化算法做进一步的分析。图 4(b)给出了利用图 4(a)的包络曲线计算出来的薄膜光学常数色散情况,同时包络法给出薄膜的厚度为 1340 nm。在图 4(b)中,折射率呈现出正常色散,与实际情况相吻合,但消光系数在短波区域出现了振荡。对于氧化铝介质材料而言,400 nm 的波长位置远离消光系数的反常色散区域。为了进一步解释消光系数在短波出现的振荡,利用获得的光学常数及薄膜的厚度值,计算在正入射下薄膜的透射率曲线,并在图 4(a)中使用细实线表示。可以看到计算的透射光谱曲线与测量曲线在长波区域的极值位置及透射率均吻合得较好,但对于短波区域仅极值位置吻合较好,极值位置的透射率差别较大。对于弱吸收薄膜,极值位置主要由薄膜的折射率决定,而极值位置处的透射率则受吸收系数的影响较大。同样,利用 Cauchy 公式拟合了薄膜的光学常数色散曲线,拟合结果在图 4(b)中给出。由于短波区域计算得到的透射率与测量结果偏离较大,仅对 550 nm 以上的消光系数数据进行拟合。

振光波的透射光谱曲线拟合另外两个折射率主軸的对应光学常数 N_1 和 N_2 。与 s 偏振分量不同,薄膜对 p 偏振光波的透射光谱曲线与“雕塑”薄膜的柱状角 β 有关。通常认为薄膜的柱状角 β 与沉积角 α 之间满足 $\tan\beta=0.5\tan\alpha$ ^[27],依据沉积角 $\alpha=40^\circ$ 得到柱状角 β 约为 22.8° 。I. J. Hodgkinson 等^[17]研究了 Ta_2O_5 “雕塑”薄膜沉积角与柱状角的关系,发现 $\tan\beta=0.322\tan\alpha$ 。依据 I. J. Hodgkinson 的结果,可以得到 β 约为 15° 。综合以上研究工作,给出薄膜的柱状角初始值 $\beta=20^\circ$,变化空间为 $10^\circ\sim 30^\circ$ 。基于已有的研究结果,沿着薄膜柱状结构方向的主轴折射率 N_1 与 N_3 接近,大于垂直于柱状结构方向的

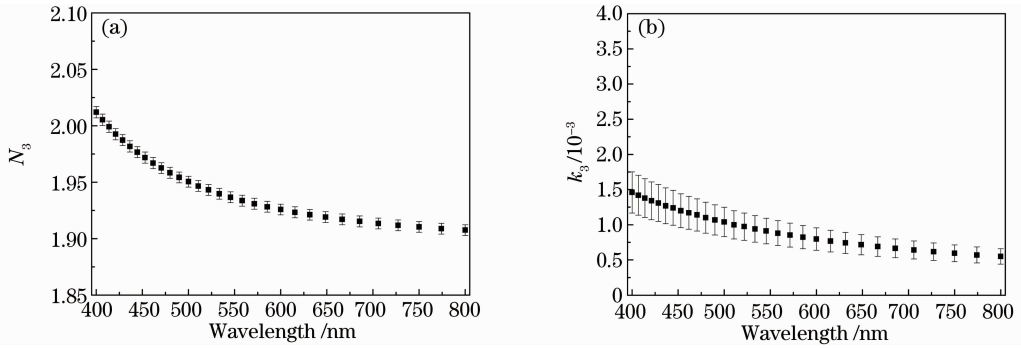


图 5 利用薄膜对 s 偏振光波的透射光谱曲线得到的薄膜主轴折射率 N_3 的色散关系

Fig. 5 Extracted optical constants N_3 of thin film with transmittance spectra for s polarization

主轴折射率 N_2 。参照 N_3 的结果, 可以给出 N_1 和 N_2 的初始值及其参数的优化空间。另外, 在优化时消光系数取值及其参数优化区间可以参照 k_3 。从 s 分量的拟合结果可以看出, 薄膜的折射率较消光系数大三个数量级, 因此在计算双折射薄膜内部电磁场传输过程

时忽略消光系数, 仅在薄膜传输矩阵的位相因子中加入消光系数, 用来模拟光波通过薄膜后的吸收散射损耗。利用不同入射角度下薄膜对于 p 偏振光波透射光谱曲线优化得到的光学常数的色散情况如图 6 所示, 拟合同时给出了柱状角 $\beta = 18.9 \pm 0.8^\circ$ 。

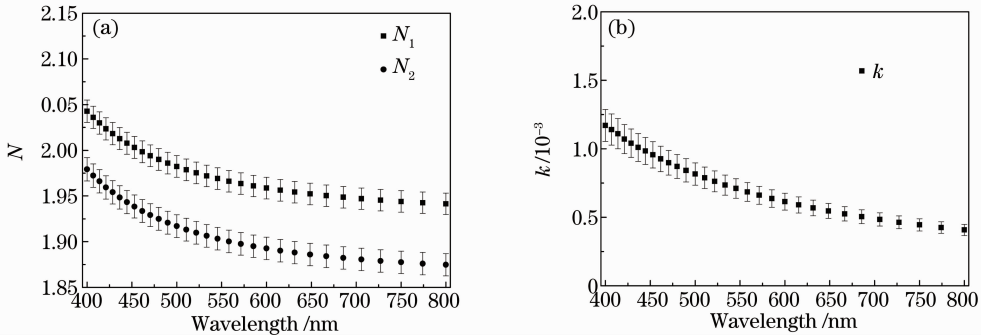


图 6 利用 p 偏振透射率曲线拟合得到的主轴折射率 N_1 和 N_2 色散关系

Fig. 6 Dispersion of optical constants N_1 and N_2 determined with transmittance spectra for p polarization

折射率及消光系数同样满足正常色散关系, 即随波长的增加而减少。拟合得到的消光系数色散情况及误差范围与 k_3 类似, 这说明无论是 p 偏振光或者 s 偏振光, 薄膜的吸收与散射损耗具有类似的变化特征。同时, 可以看出在短波区域消光系数的误差范围越大, 也就是说, 波长越短消光系数的准确拟合越困难。在这里采用吸收系数来表征薄膜在短波区域透射损耗情况, 实际上, 短波区域的透射损耗除了材料的吸收损耗外, “雕塑”薄膜内部材料折射率的不均匀性引起的散射损耗也扮演重要角色。众所周知, 散射损耗与吸收损耗对波长的依赖关系不同, 且随着波长变短散射损耗增大。因此, 利用吸收损耗代替散射损耗必将引入拟合误差, 且拟合误差随着波长的变短而变大。另外, 与 N_3 相比, 从不同入射角度 p 偏振光波透射光谱拟合得到的主轴方向折射率 N_1 和 N_2 具有较大的离散, 可能的原因是拟合时 N_1 和 N_2 两个参数之间有一定的依赖关系, 仅仅利用一个角度下测量的透射率曲线确定两个参数会

产生较大的误差。通过对多个入射角度下薄膜透射光谱的拟合, 可以较为准确确定各向异性薄膜主轴方向的折射率。表 1 给出了拟合得到的柱状角及相应的评价函数值, 其中柱状角 $\beta = 18.9 \pm 0.8^\circ$ 。利用获得的光学常数及柱状角均值, 计算了不同角度下薄膜对应的 p 分量透射率曲线, 在图 2 中以细实线给出。可以看出, 计算结果与测量结果吻合得较好。

表 1 基于各向异性模型, 拟合薄膜对于 p 偏振光波的透射光谱曲线得到的柱状角及评价函数值

Table 1 Extracted column angles and cost of merit function with transmittance spectra measured at different incident angles based on anisotropic model for p polarization

Incident angle / ($^\circ$)	0	20	30	45	60
Column angle / ($^\circ$)	19.6	18.7	19.4	18.2	18.8
Merit function	128	70.7	40.8	12.9	0.518

为了验证拟合得到薄膜结构参数是否合理, 利用 Hitachi S-4700 型场发射电子显微镜测量了沉积在单晶硅基片上的 Ta_2O_5 “雕塑”薄膜的横截面形

貌,如图 7 所示。薄膜柱状结构导致了“雕塑”薄膜具有各向异性的介电常数,即光学的各向异性。从图中可以得到柱子的倾斜方向与薄膜法线的夹角 $\beta=18.2^\circ$,与拟合结果一致。另外,利用显微镜照片的标尺,可以近似得到薄膜的厚度 $d=1320\text{ nm}$,也与拟合厚度 $d=1340\text{ nm}$ 吻合得较好。

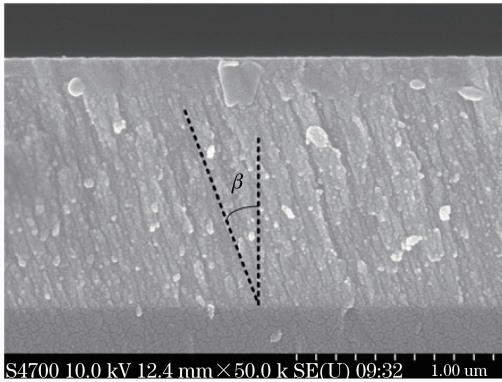


图 7 Ta₂O₅“雕塑”薄膜横截面的 SEM 图像

Fig. 7 SEM image of Ta₂O₅ thin film cross section

4 结 论

给出一种利用薄膜透射光谱测量结果确定双轴双折射薄膜结构参数的方法。基于双轴双折射薄膜结构模型,利用模拟退火优化算法对测量得到的不同入射角度下两种偏振态光波的透射光谱进行拟合,得到了双折射薄膜主轴折射率 N_1, N_2, N_3 , 薄膜厚度 d 及柱状角 β 。在优化过程中,采用包络法获得相关优化参数的初始值,提高了优化效率。利用倾斜沉积技术制备了氧化钽“雕塑”薄膜,并测量了薄膜在 $400\sim 800\text{ nm}$ 范围内正入射条件下对两种偏振态光波的透射光谱。结果表明,薄膜存在透射光谱曲线偏振分离情况,说明薄膜呈现明显的各向异性特征。另外,利用光谱仪测量薄膜在不同入射角度下两种偏振态光波的透射光谱,确定了氧化钽“雕塑”薄膜的主轴光学常数、薄膜厚度及柱状角。为了进一步验证本文针对已经制备的“雕塑”薄膜建立各向异性模型,利用场发射扫描电镜测量了薄膜的横截面形貌。从扫描电镜的图片上可以清晰看到薄膜存在柱状结构,且得到的薄膜厚度与柱状角与拟合结构吻合很好,说明利用透射光谱可以较为准确的确定各向异性薄膜在一定波段内的光学常数、厚度和柱状角等结构参数。

参 考 文 献

1 K. Robbie, M. J. Brett, A. Lakhtakia. Chiral sculptured thin films[J]. *Nature*, 1996, **384**: 616~616

2 K. Robbie, D. J. Broer, M. J. Brett. Chiral nematic order in liquid crystals imposed by an engineered inorganic nanostructure [J]. *Nature*, 1999, **399**: 764~766

3 R. Messier, T. Gehrke, C. Frankel *et al.*. Engineered sculptured nematic thin films [J]. *J. Vac. Sci. Technol. A*, 1997, **15**: 2148~2152

4 R. Messier, V. C. Venugopal, P. D. Sunal. Origin and evolution of sculptured thin films[J]. *J. Vac. Sci. Technol. A*, 2000, **18**(4): 1538~1545

5 I. Hodgkinson, Q. H. Wu. Anisotropic antireflection coatings: design and fabrication [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23** (19): 1553~1555

6 J. C. Yoo, H. P. Shleh. Fabrication and analyses of negative-birefringent thin film compensator with characteristic matrix[J]. *J. Optics*, 1996, **27**(5): 211~215

7 I. Hodgkinson, Q. H. Wu. Thin-film angle-tuned retarders: theory and fabrication [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2001, **18**: 975~979

8 I. Hodgkinson, Q. H. Wu. Birefringent thin film polarizers for use at normal incidence and with planar technologies[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **74**: 1794~1796

9 I. Hodgkinson, Q. H. Wu, M. Arnold *et al.*. Biaxial thin-film coated-plate polarizing beam splitters [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**: 1563~1568

10 E. Pelletier, F. Flory, Y. Hu. Optical characterization of thin films by guided waves[J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**: 2918~2924

11 H. Jänchen, D. Endelega, N. Kaiser *et al.*. Determination of the refractive indices of highly biaxial anisotropic coatings using guided modes[J]. *Pure Appl. Opt.*, 1996, **5**: 405~415

12 H. M. Wang. Analysis of anisotropic thin film parameters from prism coupler measurements [J]. *J. Mod. Opt.*, 1995, **42**: 2173~2181

13 Y. J. Jen, C. H. Hsieh, T. S. Lo. Optical constant determination of an anisotropic thin film via surface plasmon resonance: analyzed by sensitivity calculation [J]. *Opt. Commun.*, 2005, **224**: 269~277

14 Y. J. Jen, C. Y. Peng, H. H. Chang. Optical constant determination of an anisotropic thin film via polarization conversion[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**: 4445~4451

15 M. Schubert, W. Dollase. Generalized ellipsometry for biaxial absorbing materials: determination of crystal orientation and optical constants of Sb₂S₃ [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**: 2073~2075

16 I. J. Hodgkinson, J. C. Hazel, Q. H. Wu. In situ measurement of principal refractive indices of thin films by two-angle ellipsometry [J]. *Thin Solid Films*, 1998, **313-314**: 368~372

17 I. J. Hodgkinson, Q. H. Wu, J. C. Hazel. Empirical equations for the principal refractive indices and column angle of obliquely deposited films of tantalum oxide, titanium oxide, and zirconium oxide[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**: 2653~2659

18 Zhu Yong, Gu Peifu, Shen Weidong *et al.*. Study of silicon oxynitride film deposited by RF magnetron sputtering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(4): 567~571

朱 勇, 顾培夫, 沈伟东 等. 射频磁控反应溅射氮氧化硅薄膜的研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(4): 567~571

19 Fan Ping, Shao Jianda, Yi Kui *et al.*. Optical constants of ion beam sputtering deposited copper films of different thickness[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6): 943~947

范 平, 邵建达, 易 葵 等. 离子束溅射沉积不同厚度铜膜的光学常数研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(6): 943~947

20 Wang Yanzhi, Zhang Weili, Fan Zhengxiu *et al.*. Analysis for accurately fitting the refractive index of SiO₂ thin film[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 760~763

王胭脂, 张伟丽, 范正修 等. SiO₂ 薄膜折射率的准确拟合分析[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 760~763

- 21 I. J. Hodgkinson, F. Horowitz, H. A. Macleod *et al.*. Measurement of the principal refractive indices of thin films deposited at oblique incidence[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1985, **2**: 1693~1697
- 22 H. J. Qi, X. D. Xiao, H. B. He *et al.*. Optical properties and microstructure of Ta₂O₅ biaxial film[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**: 127~133
- 23 F. Horowitz. Structure-induced optical anisotropy in thin film [D]. University of Arizona USA, 1983
- 24 H. J. Qi, D. P. Zhang, J. D. Shao *et al.*. Matrix analysis of an anisotropic optical thin film [J]. *Europhys. Lett.*, 2005, **70**: 257~263
- 25 D. Poelman, P. F. Smet. Methods for the determination of the optical constants of thin films from single transmission measurement: a critical review[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2003, **36**: 1850~1857
- 26 H. A. Akima. A new method of interpolation and smooth curve fitting based on local procedures[J]. *J. Assoc. Comput. Mach.*, 1970, **17**: 589~602
- 27 A. G. Dirks, H. J. Leamy. Columnar microstructure in vapor-deposited thin films[J]. *Thin Solid Films*, 1977, **47**: 219~233