



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103674892 A

(43) 申请公布日 2014. 03. 26

(21) 申请号 201310590551. 3

(22) 申请日 2013. 11. 21

(71) 申请人 中国科学院上海技术物理研究所

地址 200083 上海市虹口区玉田路 500 号

(72) 发明人 蔡清元 刘定权 罗海瀚 郑玉祥

陈刚 张冬旭 胡二涛

(74) 专利代理机构 上海新天专利代理有限公司

31213

代理人 郭英

(51) Int. Cl.

G01N 21/41 (2006. 01)

G01B 11/06 (2006. 01)

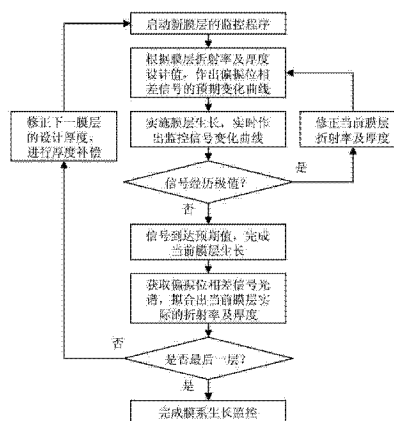
权利要求书1页 说明书4页 附图4页

(54) 发明名称

一种基于全内反射偏振位相差测量来监控薄膜生长的方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于全内反射偏振位相差测量来监控薄膜生长的方法,属于薄膜生长光学监控技术领域。本发明以入射光的偏振位相差变化为测量目标,反映了薄膜生长过程中光学特性的变化,建立光信号与膜层厚度的对应关系,完成薄膜生长的监控。根据膜系设计参数进行理论计算,并作出预期的全内反射偏振位相差随薄膜生长的变化曲线,通过实际光学监控信号值来判断薄膜生长厚度,完成膜层生长后,通过光谱扫描获取偏振位相差在光谱范围内的分布,拟合获得精确的实际膜层折射率和厚度,从而修正膜系设计参数,并进行不同膜层间的厚度补偿。本发明具有膜层折射率及厚度监控灵敏、测量速度快的优点。



1. 一种基于全内反射偏振位相差测量来监控薄膜生长的方法,其特征在于包括以下步骤:

1). 根据膜层设计参数进行薄膜特征矩阵的理论计算,获取入射光以大于全内反射角 θ_c 的入射角度 θ 。在透明基底内部的薄膜生长面发生全内反射后的偏振位相差 Δ 随着膜层生长厚度的变化曲线;

2). 采集监控单色光的总光强,实施薄膜生长,即时采集监控单色光在特定起偏器角度和检偏器角度的光强信号,计算出对应的偏振位相差 Δ ,绘制偏振位相差 Δ 或其等同信号随薄膜生长的实际变化曲线;

3). 如监控过程中出现的偏振位相差 Δ 极值,则计算以获取膜层的实际折射率,修正膜层折射率及厚度;

4). 持续进行薄膜生长,直到偏振位相差信号到达预期值,完成当前膜层生长;

5). 扫描光谱强度,获取光谱范围内的偏振位相差分布,采用薄膜分析软件拟合获取当前膜层的实际折射率及厚度,修正下一膜层的厚度设计,并进行下一膜层的生长,重复步骤 1) 至步骤 4),直到完成所有膜层生长监控。

一种基于全内反射偏振位相差测量来监控薄膜生长的方法

技术领域

[0001] 本发明涉及薄膜生长光学监控技术,具体涉及一种基于全内反射偏振位相差测量来监控薄膜生长的方法。

背景技术

[0002] 光学薄膜生长的光学特性的好坏取决于对生长的膜层折射率及厚度参数的精确掌握和控制。光学监控方法可以同时获取膜层的折射率及厚度生长信息,被认为是光学薄膜生长监控中最有效的方法之一。传统光学监控采用的监控信号是生长薄膜的透射率或反射率,其监控原理在于薄膜的透射率或反射率随着膜层厚度变化而变化,当膜层厚度为规整厚度,则监控信号出现一个极值。但随着光学薄膜技术的发展,很多高端精密的光学薄膜元件的膜系通常为非规整膜系,甚至包含 10 ~ 20nm 的超薄膜层。在超薄膜层生长情况下,传统光学监控信号随厚度变化的量不大,导致膜层厚度控制效率低。对膜层的折射率及厚度测量,特别是较薄膜层的情况,相较于透射率 / 反射率测量,椭偏测量的膜层折射率及厚度的测量精度更高,这主要由于薄膜偏振特性相较于透射率 / 反射率对膜层折射率及厚度更为敏感,其中以偏振位相差最为敏感。然而,传统椭偏测量中,椭偏参数 ψ 和 Δ 均为未知量,一次测量需要旋转起偏器、检偏器等偏振元件,测量时间较长,不利于实时监控应用。因此提高椭偏测量速度,有助于扩展椭偏测量在光学薄膜生长监控的应用,具有实用价值。本发明基于椭偏测量的基本原理,采用全内反射测量方式,可以快速获取偏振位相差信号,将其应用到薄膜生长光学监控中。

发明内容

[0003] 本发明提出了一种基于全内反射偏振位相差测量来监控薄膜生长的方法,这样可以利用偏振位相差对薄膜厚度敏感的特性,提高薄膜生长的监控效率。

[0004] 本发明提出的方法包括了快速测量全内反射偏振位相差的方法,通过偏振位相差反演薄膜生长厚度的方法以及在薄膜生长过程中监控薄膜生长的实施步骤。

[0005] 所述快速测量全内反射偏振位相差的方法是基于琼斯矩阵描述的偏振测量系统,其测量原理图如图 1 所示。坐标系为右手直角坐标系,Z 轴方向为光线传输方向,X 轴为 p 分量正方向,Y 轴为 s 分量正方向。P、A 分别为起偏器和检偏器的偏振角。光源系统 1 发出的准直入射光束 2 经由起偏器 3 起偏,成为线偏振光,垂直进入透明的等腰棱镜基底 4,以入射角 θ_0 在基底薄膜生长面 5 上发生了全内反射,反射的光经由检偏器 6 检偏,进入探测器 7,从而获得偏振方向 A 上的偏振光分量强度。

[0006] 所述全内反射偏振位相差快速测量流程为:首先,设定起偏角度 P 恒为 45° ,分别设定检偏角度 A 为 45° 和 -45° ,进行测量,获得两个光强值,将两个光强值相加,得到入射光的有效总光强 I_0 ;其次,设定检偏角度 A 为 45° 或 -45° ,实时采集光强值 I,此时样品的全内反射偏振位相差 Δ 与光强 I_0 和 I 的关系为:

[0007] $\cos \Delta = 2I/I_0 - 1 (A = 45^\circ)$ 或 $\cos \Delta = 1 - 2I/I_0 (A = -45^\circ)$ (1)

[0008] 经由公式 (1) 可以计算得到全内反射偏振位相差。

[0009] 对于基底未生长薄膜的情况, 全内反射偏振位相差直接反映了基底的折射率信息。其反演公式为:

$$[0010] \quad n_{\text{sub}} = \frac{n_{\text{amb}}}{\sin \theta_0 \sqrt{1 - \tan^2 \theta_0 \frac{1 - \cos \Delta}{1 + \cos \Delta}}}, \quad (2)$$

[0011] 其中, n_{amb} 表示测量环境(空气或真空)的折射率, n_{sub} 表示待测基底的折射率。

[0012] 所述偏振位相差反演薄膜生长厚度的方法, 是基于半直接监控方式的情况, 即相同材料的膜层生长监控采用同一个监控片, 全内反射偏振位相差的变化反映了生长膜层厚度的变化。膜系结构为单层膜结构, 即基底 | 膜层 | 真空, 如图 2 所示。全内反射偏振位相差随薄膜厚度变化的规律遵循以下公式:

$$[0013] \quad \cos \Delta = \frac{4abcd - (a^2 - b^2)(c^2 - d^2)}{(a^2 + b^2)(c^2 + d^2)}. \quad (3)$$

[0014] 其中,

$$[0015] \quad a = n_{\text{sub}} \cos \theta_0 \left(1 + \frac{\sqrt{n_{\text{sub}}^2 \sin^2 \theta_0 - n_{\text{amb}}^2}}{\sqrt{n^2 - n_{\text{sub}}^2 \sin^2 \theta_0}} \tan \delta \right), \quad (4)$$

$$[0016] \quad b = \sqrt{n_{\text{sub}}^2 \sin^2 \theta_0 - n_{\text{amb}}^2} - \sqrt{n^2 - n_{\text{sub}}^2 \sin^2 \theta_0} \tan \delta, \quad (5)$$

$$[0017] \quad c = \frac{n_{\text{sub}}}{\cos \theta_0} \left(1 - \frac{n_{\text{amb}} \sqrt{n^2 - n_{\text{sub}}^2 \sin^2 \theta_0}}{n^2 \sqrt{n_{\text{sub}}^2 \sin^2 \theta_0 - n_{\text{amb}}^2}} \tan \delta \right), \quad (6)$$

$$[0018] \quad d = \frac{n_{\text{amb}}^2}{\sqrt{n_{\text{sub}}^2 \sin^2 \theta_0 - n_{\text{amb}}^2}} + \frac{n^2}{\sqrt{n^2 - n_{\text{sub}}^2 \sin^2 \theta_0}} \tan \delta. \quad (7)$$

[0019] 在这里, n 是膜层的折射率, δ 是膜层的等效位相厚度, $\delta = 2\pi n t \cos \theta / \lambda$, t 为膜层的物理厚度, θ 为膜层中光的折射角, λ 为参考波长。从公式 (4) ~ (7) 可以看出, a 、 b 、 c 、 d 为 $\tan \delta$ 的线性表达式, 如设 $\tan \delta$ 为未知量, 公式 (3) 为一元四次方程式, 通过解方程可以得到最多 4 个可能的解, 去除非实数解, 一般情况下有 2 个解。根据薄膜生长情况, 只有一个解为膜层实际厚度, 可根据信号曲线变化进行判断。

[0020] 对于多层膜直接监控的情况, 即所有膜层生长在同一个块监控基底上, 则各膜层厚度的反演很难有解析解, 需要借助薄膜设计软件, 如 FilmWizard, Essential Macleod 等, 进行拟合分析, 获得各个膜层最佳的拟合折射率及厚度值, 以表征实际膜层生长情况。

[0021] 所述全内反射偏振位相差监控在薄膜生长过程中的监控流程如图 3 所示, 实施步骤如下:

[0022] 1). 根据膜层设计参数进行薄膜特征矩阵的理论计算, 获取入射光以大于全内反射角 θ_c 的入射角度 θ_0 在透明基底内部的薄膜生长面发生全内反射后的偏振位相差 Δ 随着膜层生长厚度的变化曲线;

[0023] 2). 采集监控单色光的总光强, 实施薄膜生长, 即时采集监控单色光在特定起偏器角度和检偏器角度的光强信号, 计算出对应的偏振位相差 Δ , 绘制偏振位相差 Δ 或其等同

信号随薄膜生长的实际变化曲线；

[0024] 3). 如监控过程中出现的偏振位相差 Δ 极值, 则计算以获取膜层的实际折射率, 修正膜层折射率及厚度；

[0025] 4). 持续进行薄膜生长, 直到偏振位相差信号到达预期值, 完成当前膜层生长；

[0026] 5). 扫描光谱强度, 获取光谱范围内的偏振位相差分布, 采用薄膜分析软件拟合获取当前膜层的实际折射率及厚度, 修正下一膜层的厚度设计, 并进行下一膜层的生长, 重复步骤 1) 至步骤 4), 直到完成所有膜层生长监控。

[0027] 本发明的优点在于: 偏振位相差相较于透射率 / 反射率, 对膜层的折射率及厚度更加灵敏, 采用全内反射偏振位相差监控克服了传统光度法监控薄膜生长对于超薄的膜层生长监控不灵敏的缺点, 同时克服了传统椭偏测量需要不断旋转偏振元件进行椭偏测量而导致的测量时间过长的缺点。

附图说明

[0028] 为了使本发明之目的、原理、功能更清晰表示出来, 采用了一些附图进行说明, 并在接下来的具体实施方式中以实例进一步阐明本发明的特点。附图说明如下：

[0029] 图 1 是基于全内反射偏振位相差的快速测量系统的工作原理图, 其中, 1 为出射准直单色光的光源系统, 2 为探测光束, 3 为起偏器, 4 为透明的等腰梯形基底, 5 为薄膜生长面, 6 为检偏器, 7 为光强探测器。

[0030] 图 2 是全内反射偏振位相差监控的监控片膜系结构, 8 为薄膜生长基底, 9 为生长的膜层, 10 为环境介质。

[0031] 图 3 是基于全内反射偏振位相差测量监控薄膜生长的流程图。

[0032] 图 4 是示范实例所采用的用于可见光波段 60° 反射的三层低偏振灵敏度反射镜的膜层结构, 11 为反射镜基底, 12 为反射层银膜 (Ag), 厚度为 150nm, 13 为过渡层三氧化二铝膜 (Al_2O_3), 厚度为 10nm, 14 为保护层二氧化硅膜 (SiO_2), 厚度为 34nm。

[0033] 图 5 是在实例反射镜的过渡层和保护层生长过程中, 监控光以 45° 入射角在 K9 玻璃内薄膜生长面全内反射, 监控到的偏振位相差的预期变化曲线。

[0034] 图 6 是过渡层生长完后, 扫描光谱获得的偏振位相差分布, 15 为无误差情况下的理论偏振位相差光谱分布, 16 为过渡层物理厚度为 15nm 情况下的偏振位相差光谱分布。

[0035] 图 7 是根据过渡层生长的实际厚度, 对保护层重新进行优化设计后, 以 45° 入射角监控的保护层生长导致的偏振位相差的变化曲线。

[0036] 图 8 是低偏振灵敏度的反射镜在 60° 入射角的偏振性能表现, 17 为初始理论设计情况, 18 为过渡层存在 5nm 误差情况进行保护层修正补偿的情况, 19 为过渡层存在 5nm 误差情况不进行保护层修正补偿的情况。

具体实施方式

[0037] 下面结合实例进一步阐述本发明的具体实施方式。

[0038] 所选示范实例为一种低偏振灵敏度反射镜的生长监控, 该反射镜用于保持 60° 反射光的非偏振状态, 具体要求是保证在 400–700nm 波段内 60° 反射的椭偏参数 ψ 在 $45 \pm 0.2^\circ$ 范围内, 其设计结构如图 4 所示, 包含反射层, 过渡层和保护层。反射层为银膜

(Ag), 厚度为 150nm, 过渡层为三氧化二铝膜(Al_2O_3), 折射率为 1.68, 厚度为 10nm, 保护层为二氧化硅膜(SiO_2), 折射率为 1.46, 厚度为 34nm。对于该膜系结构的生长监控, 反射层银膜可以采用晶振来监控厚度, 不影响最后的偏振特性。而对于过渡层和保护层的生长监控, 传统晶振法和光度法监控的精度都不够, 会导致膜系的偏振特性变差, 不符合要求。

[0039] 采用本发明提出的监控法, 可以满足过渡层和保护层的监控要求, 具体实施如下:

[0040] 1) 监控片采用 45° 入射角的 K9 棱镜, 在棱镜下底面生长三氧化二铝膜和二氧化硅膜, 根据设计的折射率及厚度参数, 选择 550nm 为监控波长, 其全内反射偏振位相差随着薄膜生长厚度的预期变化曲线如图 5 所示。

[0041] 2) 开始生长三氧化二铝膜, 当生长过程中监控的偏振位相差达到 43.12° , 停止生长。假如由于存在监控误差或其他因素导致了三氧化二铝膜生长厚度达到了 15nm, 此时进行 400–700nm 波段光谱扫描, 得到的全内反射偏振位相差分布 16 将与理论分布 15 发生偏离, 如图 6 所示。

[0042] 3) 对实际获得的全内反射偏振位相差光谱分布进行拟合, 获得实际过渡层生长厚度为 15nm, 对保护层二氧化硅膜厚度进行重新优化, 优化厚度为 27nm。此时优化后全内反射偏振位相差监控的曲线变化, 如图 7 所示。

[0043] 4) 开始生长二氧化硅膜, 当生长过程中监控的偏振位相差达到 43.03° , 停止生长, 从而完成了低偏振灵敏度的反射镜的镀制。

[0044] 该反射镜在 60° 反射角的偏振性能表现, 如图 8 所示。其中初始理论设计的情况 17, 满足椭圆偏参数 ψ 在 $45 \pm 0.2^\circ$ 范围内的要求。经过保护膜的厚度修正 18, 也能满足要求。如果不进行保护膜的厚度修正 19, 则不满足要求。

[0045] 以上所述的采用本发明方法进行低偏振灵敏度的反射镜膜系镀制监控的实例, 是为了进一步阐述本发明的设计思路及实施方案, 但本发明不仅限于对此种类薄膜的监控。本发明实施应用同样适用于其他类型的光学薄膜的生长监控。因此, 凡依本发明所述之方法、内容及权利要求范围而进行形式变化的等效方法, 均属于本发明专利涵盖的范围之内。

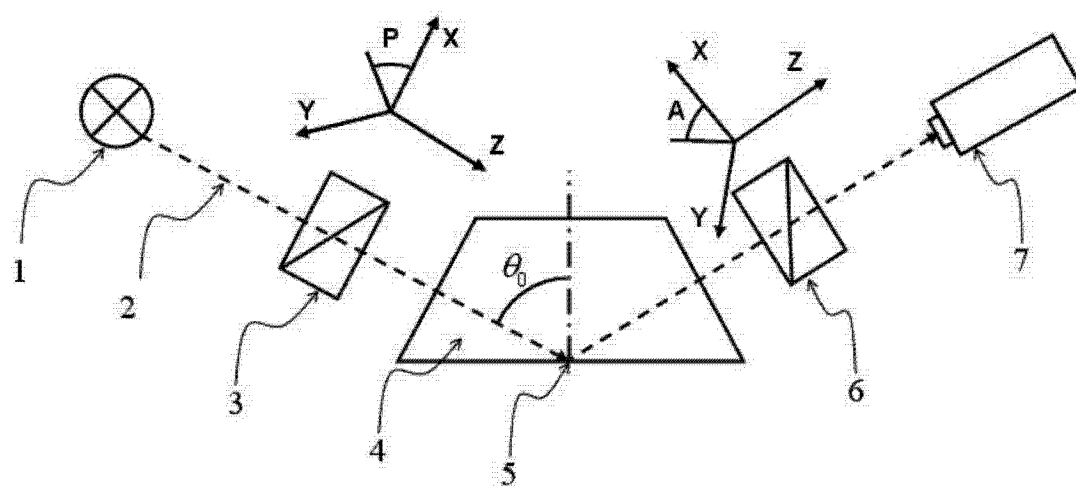


图 1

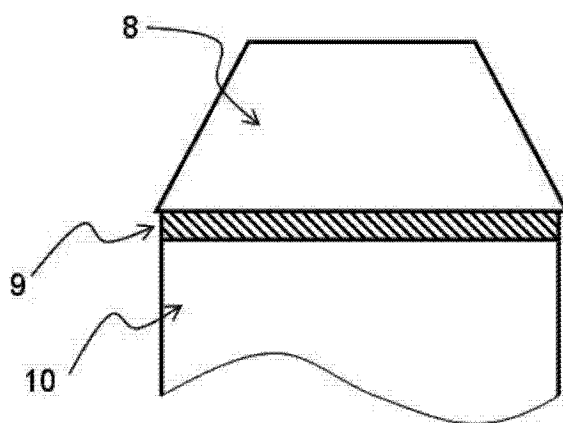


图 2

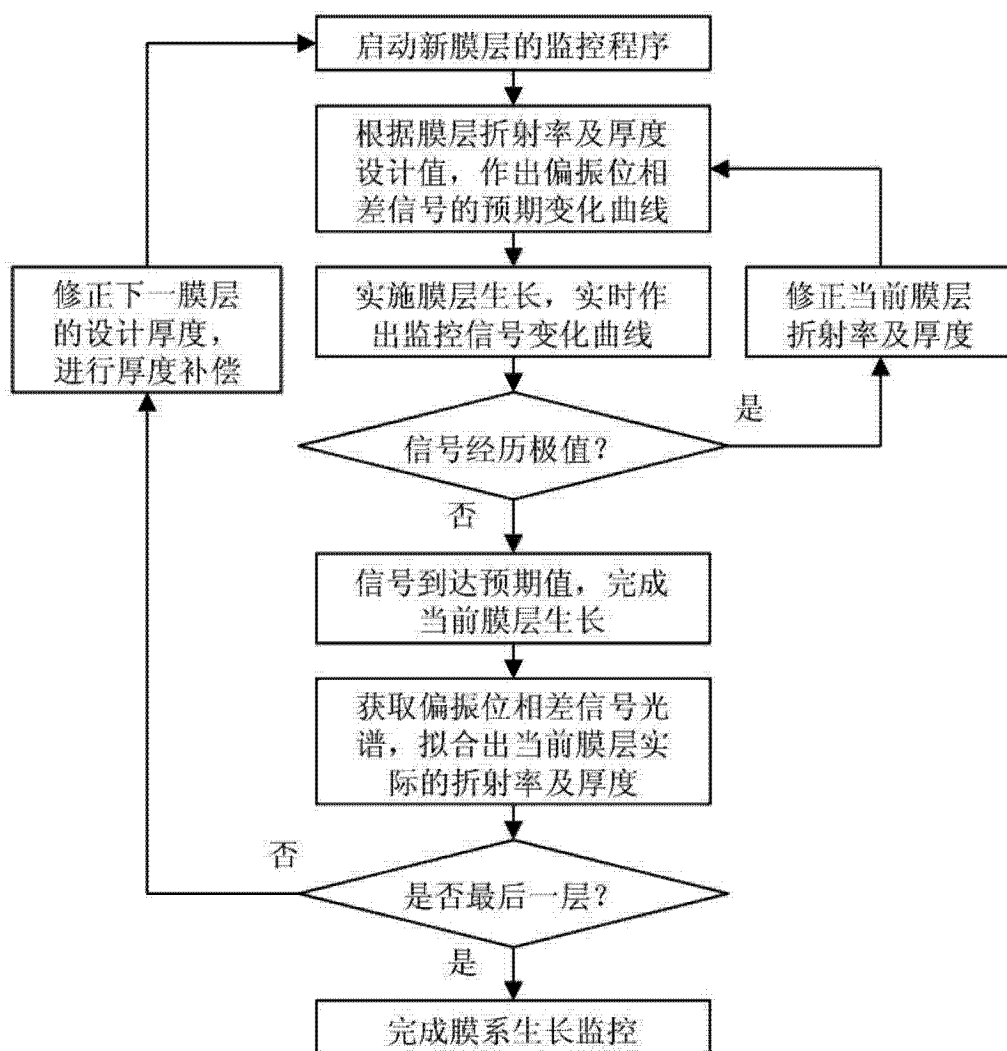


图 3

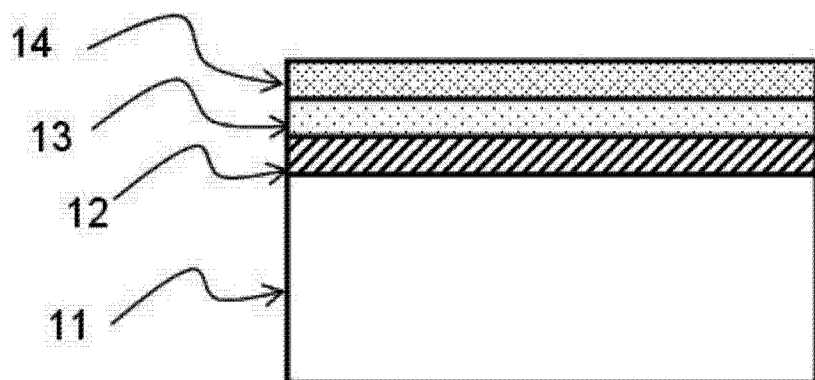


图 4

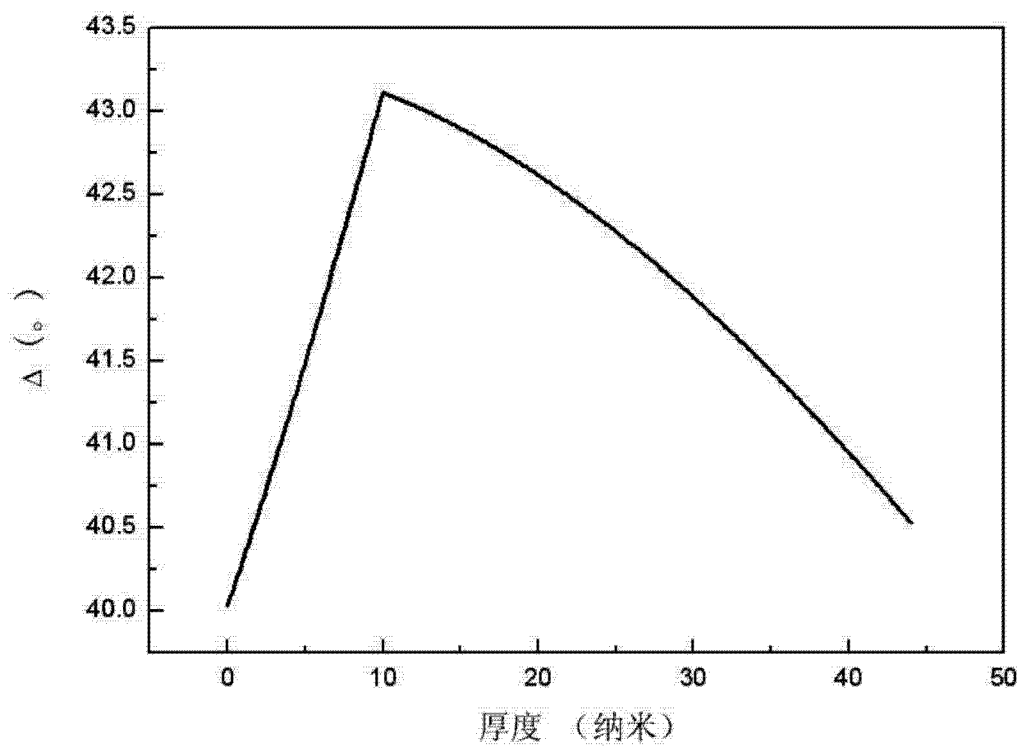


图 5

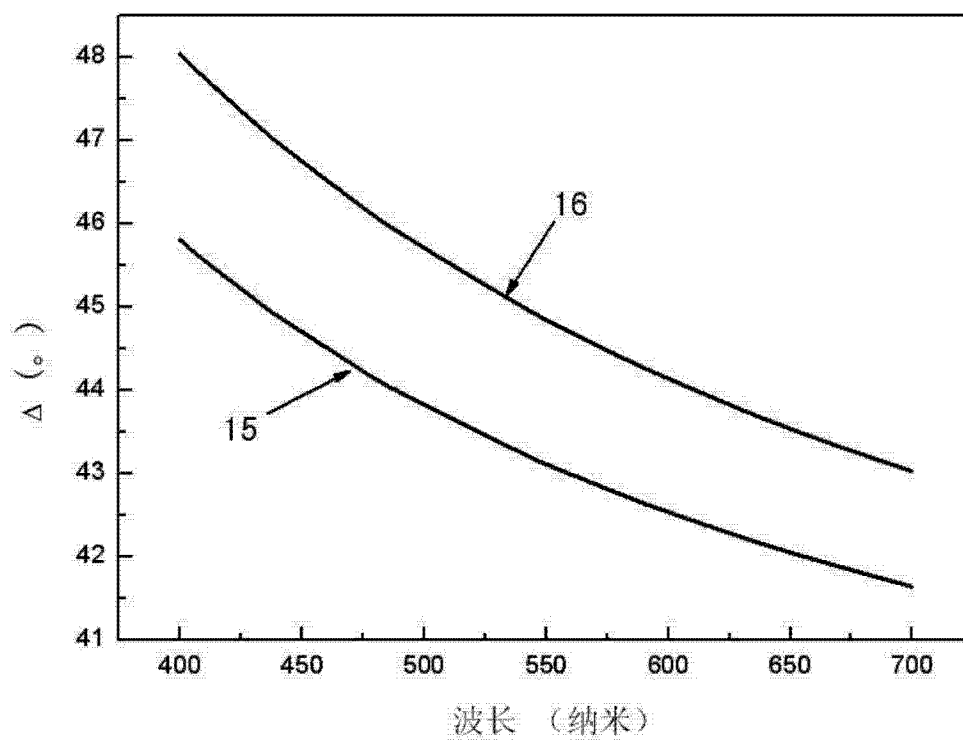


图 6

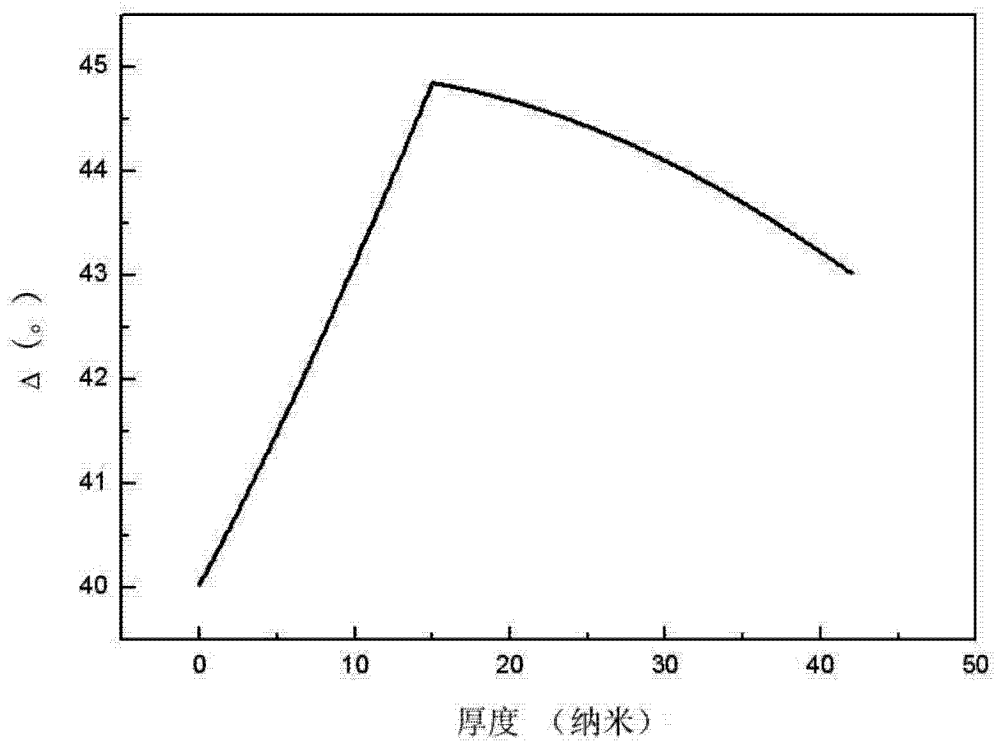


图 7

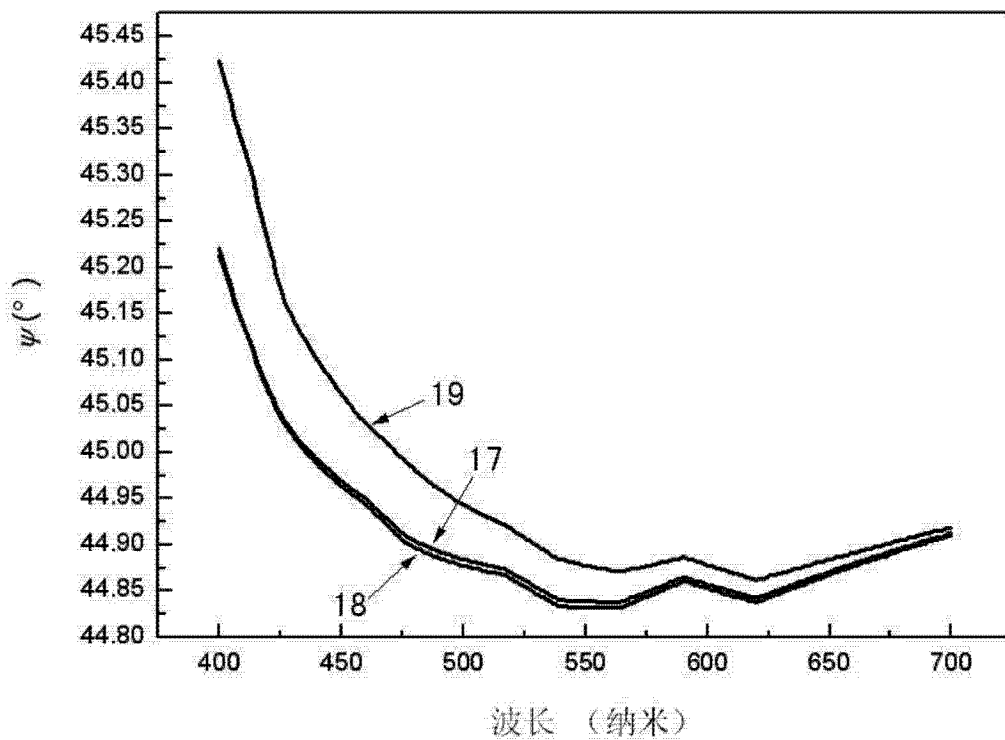


图 8