

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl⁷

G02B 5/30

G02B 27/28 G01J 4/00



[12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 200410015648.2

[43] 公开日 2004年12月22日

[11] 公开号 CN 1556422A

[22] 申请日 2004.1.6

[21] 申请号 200410015648.2

[71] 申请人 同济大学

地址 200092 上海市四平路 1239 号

[72] 发明人 王占山 王洪昌

[74] 专利代理机构 上海东亚专利代理有限公司

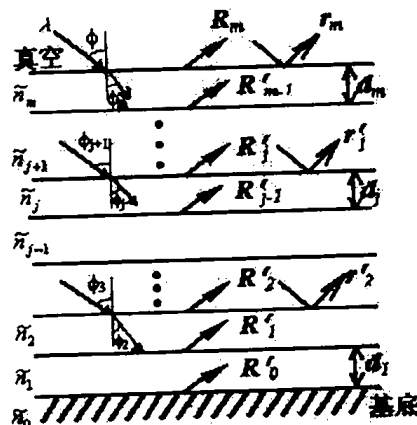
代理人 陈树德

权利要求书 1 页 说明书 6 页 附图 5 页

[54] 发明名称 软 X 射线反射式多层膜宽带起偏器及其制备方法

[57] 摘要

本发明提供了一种采用多层膜结构的软 X 射线波段高偏振度，高光通量的软 X 射线反射式多层膜宽带起偏器及其制备方法，不同于传统的宽带起偏器，它不仅具有较高的光通量和偏振度以及较宽的带宽，而且制作工艺简单，使用调节方便。本专利介绍了起偏器的设计思路和具体的制备方法，以及在此设计思想下所计算出的宽带起偏器的光学性能等。本发明可应用于软 X 射线磁圆二色、磁线二色分析，以及软 X 射线共振磁散射等许多偏振测量领域。



ISSN 1008-4274

1、一种软X射线反射式多层膜宽带起偏器，其特征在于：
由钼、硅两种材料对，算出从13纳米到25纳米波长范围内所需的多层膜每层膜的厚度而形成的多层膜宽带起偏器，对应s分量反射率 R_s 的值均大于10%，而且p分量的反射率 R_p 值均小于1%，偏振度 R_s/R_p 达到10到 10^4 量级，保证在很宽的波长范围内都保证很大的偏振度。

2、根据权利要求1所述的软X射线反射式多层膜宽带起偏器，其特征在于：

所述的多层膜厚度，厚度为0.5纳米~8.5纳米之间，并且该厚度可用薄膜制备设备制备出。

3、根据权利要求1所述的软X射线反射式多层膜宽带起偏器，其特征在于：

本发明的钼、硅两种材料对，也适用于在软X射线波段其他的材料对组合，如钨/碳、钨/硅等。

4、一种软X射线反射式多层膜宽带起偏器的制备方法，其特征在于：

用高真空多功能磁控溅射膜设备对起偏器镀膜，先用酒精乙醚对起偏器基片，超光滑硅片进行清洗，并对表面擦干净，在本真空度低于 5.0×10^{-5} Pa，镀膜时真空保持在250Pa，对钼、硅两种靶材表面充氩气，流量控制在15.5SCCM，镀膜前须起辉预溅半小时以清洗靶材，用步进电机控制起偏器基片的公转和自转，步进电机的信号由电脑操作，在对钼、硅两种材料溅射速率标定后，用0.5纳米~8.5纳米厚度的钼、硅材料，把对应镀制的时间输入电脑，程序运行时，起偏器基片在两种钼、硅间来回旋转停留，使钼、硅交替地镀制在起偏器基片上；并且该方法也适用于软X射线波段其他的波长范围。

软 X 射线反射式多层膜宽带起偏器及其制备方法

技术领域

本发明为一种软 X 射线波段多层膜偏振光学元件，具体为软 X 射线反射式多层膜宽带起偏器，可用于软 X 射线磁圆二色、磁线二色分析，以及软 X 射线共振磁散射等许多偏振测量领域。

背景技术

软 X 射线波段起偏器是一种在准布儒斯特角（由于材料有吸收，没有 P 偏振光反射率等于 0 的布儒斯特角）入射条件下的偏振器，图 1 是波长固定、周期稍有不同的 Mo/Si 多层膜 R_s 、 R_p 和 R_s/R_p 随入射角的变化， $d=10.1\text{nm}$ 多层膜（图 1a）的反射角正好与准布儒斯特角匹配， R_s 和 R_s/R_p 都达到较大值， $d=10.5\text{nm}$ 多层膜（图 1b）的反射角与准布儒斯特角不匹配，因为 R_p 不再被完全压低， R_s 和 R_s/R_p 不同时达到最大（其中 R_s 、 R_p 和 R_s/R_p 分别表示光的 S 偏振分量的反射率，P 分量的反射率和偏振度）。这表明每一个多层膜偏振光学元件只能用在某一特定的波长处达最佳性能。为了避免这个缺点，需设计宽波段偏振元件。传统的软 X 射线波段宽带起偏器一般有以下两种：

1,软 X 射线梯度多层膜宽带起偏器

梯度多层膜主要是利用在基片不同位置镀制不同的周期厚度多层膜，使其对应不同波长的起偏器，在使用梯度多层膜起偏器时，

只需调整入射光入射到不同位置处，都可以达到一定的偏振度，如图 2a 所示，多层膜周期数为 50,正入射角为 40.5 度，在中心波长 16.0nm 处，周期厚度为 11.1nm，对应不同的周期厚度 10.2—11.8nm 时， R_s 与入射光波长的关系曲线，顶层膜厚度比（每个周期中对应上层的膜层厚度与周期厚度之比）为 0.32，粗糙度为 0nm，其优点是能够保证在一个很宽的波长范围内的偏振光 S 分量都很大，但偏振光 P 分量也跟着变大，使得偏振度 R_s/R_p 降低，如图 2b 所示， R_p 与入射光波长的关系曲线，而且梯度多层膜的制备非常复杂，经过标定的梯度多层膜在使用时要精确调整对应不同波长处的位置，过程非常繁琐复杂，要求的精度也非常高。

2, 软 X 射线波段可调角度的双多层膜起偏器

可调角度的双多层膜起偏器，利用多层膜起偏器在不同波段对应不同角度时有较高的偏振度，使用两块相同的起偏器平行放置，同时可以保证出射光束方向不偏转，如图 3a 所示，但是这种类型的起偏器在工作过程中，对应不同波段要同时精确旋转两个起偏器，并保持彼此平行，调整起来不方便，而且最终的光通量相对梯度多层膜也要降低，图 3b、3c 所示为 Mo/Si 多层膜，周期为 50, 周期厚度为 11.00 nm,顶层膜厚度比为 0.320，对应不同角度时多层膜的偏振分量 R_s 和 R_p 的反射率与入射光波长的关系曲线。

发明内容

本发明的目的在于设计一种既具有高的偏振度和光通量，同时在制备和使用中比较方便实用的软 X 射线反射式多层膜宽带起偏器。软 X 射线反射式多层膜宽带起偏器及其制备方法，具有制作工艺简单，调节方便，偏震度高，而且还可以在很宽的波段使用。

软 X 射线多层膜系的反射特性的计算是以 Fresnel 公式为出发

点, 得出整个膜系复振幅反射率公式。软 X 射线反射式多层膜宽带起偏器如图 4 所示, 在复折射率为 $\tilde{n}_0 = n_0 - ik_0$ 的无限厚基片上, 依次镀上厚度为 d_j ($j=1$ 到 $j=m$ 止) 的各向同性均匀薄膜, 材料的复折射率为 $\tilde{n}_j = n_j - ik_j$ 。波长为 λ 的软 X 射线平行光束从真空中以入射角 θ 入射到膜系表面。本专利的入射角 θ 必须在中心波长对应的准布儒斯特角。

第 j 层多层膜系的振幅反射率 R_j 为:

$$R_j = \frac{r_j(1-r_jR_{j-1}) + (R_{j-1}-r_j)\exp(-i\delta_j)}{1-r_jR_{j-1} + r_j(R_{j-1}-r_j)\exp(-i\delta_j)}$$

其中 R_j , R_{j-1} 为第 j 层, 第 $j-1$ 层多层膜系的振幅反射率, r_j 为第 j 层介质相对于真空中介质的 Fresnel 反射系数:

$$r_j = \frac{\cos\theta - \tilde{n}_j \cos\theta_j}{\cos\theta + \tilde{n}_j \cos\theta_j} \quad (\text{s 偏振})$$

$$r_j = \frac{\tilde{n}_j \cos\theta - \cos\theta}{\tilde{n}_j \cos\theta + \cos\theta_j} \quad (\text{p 偏振})$$

从 $j=1$ ($R_0 = r_0$) 开始, 直到 $j=m$ 进行迭代计算, 得到 m 层多层膜系统的振幅反射率 R_m , 以及多层膜系统的光强反射率 $|R_m|^2$ (s 偏振和 p 偏振的反射率分别为 R_s , R_p)。多层膜的偏振度 P 定义为 $P = R_s/R_p$, 然后利用单纯型优化算法进行优化设计, 求出评价函数的极小值, 评价函数定义为

$$F = \left(\sum_{\lambda} (R_0 - R_s + \tau \times (R_p / R_s))^2 \right)^{1/2}$$

其中 R_s 表示 S 偏振分量, R_p 表示 P 偏振分量, R_0 为目标 R_s 的函数, τ 为一个调整系数, 保证光通量和偏振度同时优化到最大值。图 4 为利用非周期多层膜系优化的 R_s 和 R_p 对应波长的函数关系, 在波长从 13 纳米到 25 纳米宽的范围内, 对应 R_s 的值均大于 10%, 而且 R_p 值均

小于1%，偏振度达到10到 10^4 量级，能够保证在很宽的波长范围内都保证很大的偏振度。

附图说明

图1a为现有技术波长为13.9纳米，周期为50，周期厚度为10.1纳米，顶层膜厚度比为0.4，粗糙度为0纳米时，Mo/Si多层膜 R_s 、 R_p 和 R_s/R_p 随入射角的变化曲线；

图1b为现有技术波长为13.9纳米，周期为50，周期厚度为10.5纳米，顶层膜厚度比为0.4，粗糙度为0纳米时，Mo/Si多层膜 R_s 、 R_p 和 R_s/R_p 随入射角的变化曲线；

图2a为现有技术Mo/Si梯度多层膜宽带起偏器示意图，多层膜周期数为50，正入射角为40.5度，在中心波长16.0纳米处，周期厚度为11.1纳米，顶层膜厚度比为0.32，对应不同的周期厚度10.2—11.8纳米，顶层膜厚度比为0.32，粗糙度为0纳米时， R_s 与入射光波长的关系曲线；

图2b为现有技术Mo/Si梯度多层膜，多层膜周期数为50，正入射角为40.5度，在中心波长16.0纳米处，周期厚度为11.1纳米，顶层膜厚度比为0.32，对应不同的周期厚度10.2—11.8纳米，顶层膜厚度比为0.32，粗糙度为0纳米时， R_p 与入射光波长的关系曲线；

图3a为现有技术可调角度的双多层膜起偏器示意图，其中P1、P2为起偏器，D为探测器，在工作过程中根据不同的波长要求，通过调节P1和P2的位置和角度达到宽带偏振；

图3b为现有技术Mo/Si多层膜，周期为50，周期厚度为11.00纳米，Mo膜层的厚度与周期厚度比率为0.320，对应不同角度时多层膜的偏振分量 R_s 的反射率与入射光波长的关系曲线；

图3c为现有技术Mo/Si多层膜，周期为50，周期厚度为11.00 nm，Gamma=0.320，对应不同角度时多层膜的偏振分量Rp的反射率与入射光波长的关系曲线；

图4为本发明的反射式多层膜宽带起偏器结构示意图；

图5a为本发明利用非周期多层膜系设计反射式多层膜宽带起偏器，Rs、Rp随入射光波长的变化曲线以及对应膜层厚度随膜层序列数的关系曲线反射式多层膜宽带起偏器的优化结果，在波长从11nm到19nm宽的范围，对应Rs的值一般大于10%，而且Rp值一般小于1%，偏振度达到10到104量级；

图5b为本发明反射式多层膜宽带起偏器膜层厚度与层数之间的关系曲线反射式多层膜宽带起偏器结构示意图。

具体实施方式

本发明的软 X 射线反射式多层膜宽带起偏器的选材原则从光学本身角度看，主要是寻找两种材料折射率差最大的材料对，同时在给定波段都有最小的吸收，本发明选取的是钼（Mo）、硅（Si）两种材料，利用上述方法编译的程序，计算出对应波段所需多层膜每层膜的厚度，厚度为 0.5 纳米到 8.5 纳米之间，具体的厚度参数如图 5b 所示。本发明也适用于在软 X 射线波段其他的材料对组合，如钨/碳、钨/硅等。

制备软 X 射线反射式多层膜宽带起偏器，使用磁控溅射镀膜法。在实验中使用的是 JGP560C6 型高真空多功能磁控溅射镀膜设备，镀膜开始前，用酒精乙醚对起偏器基片（超光滑硅片）进行清洗，并用脱脂棉将表面擦干净，在本底真空度低于 5.0×10^{-5} Pa，镀膜时真空度保持在 250 Pa，对钼、硅两种靶材表面充氩气，流量控制在 15.5 SCCM，镀膜前须起辉预溅半个小时以清洗靶材，用步进

电机控制起偏器基片的公转和自转，步进电机的信号由电脑操作，当完成对钼、硅两种材料溅射速率标定后，根据理论算得的用 0.5-8.5 纳米厚度的钼、硅膜层（见图 5b），把相应镀制的时间输入电脑，程序运行时，起偏器基片在两种钼、硅间来回旋转停留，使钼、硅交替地镀制在起偏器基片上，程序运行结束后，取出镀制好的起偏器。本发明的制备方法也适用于软 X 射线波段其他的波长范围。本发明可应用于软 X 射线磁圆二色、磁线二色分析、以及软 X 射线共振磁散射等许多偏振测量领域。

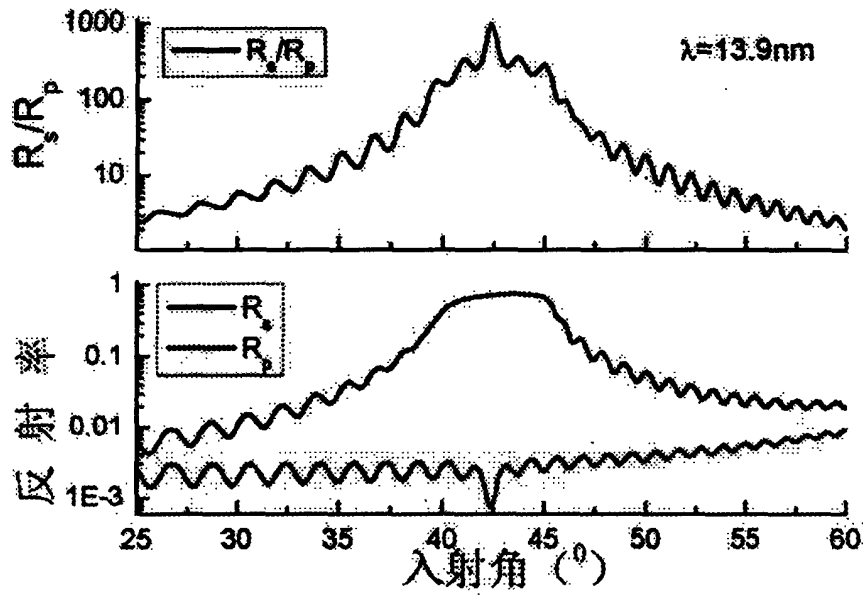


图1a

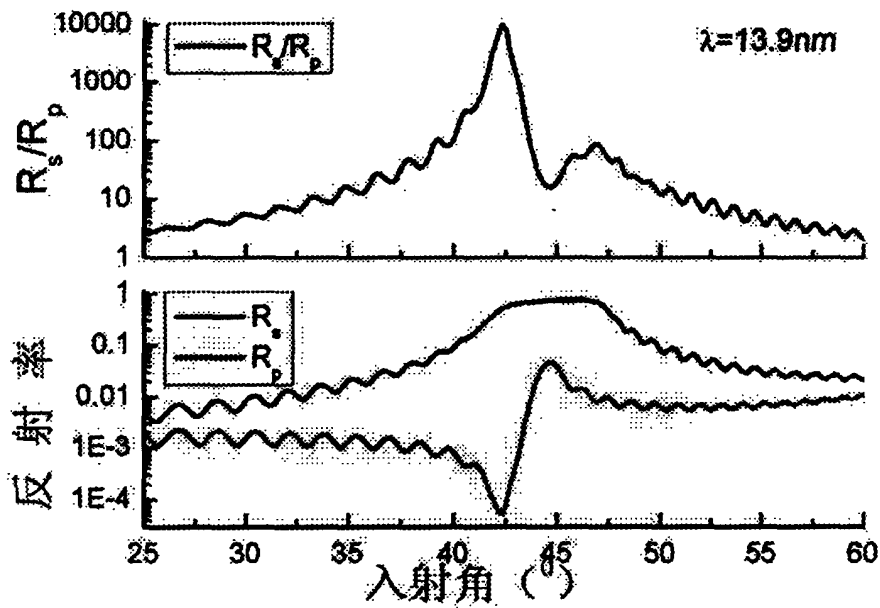


图1b

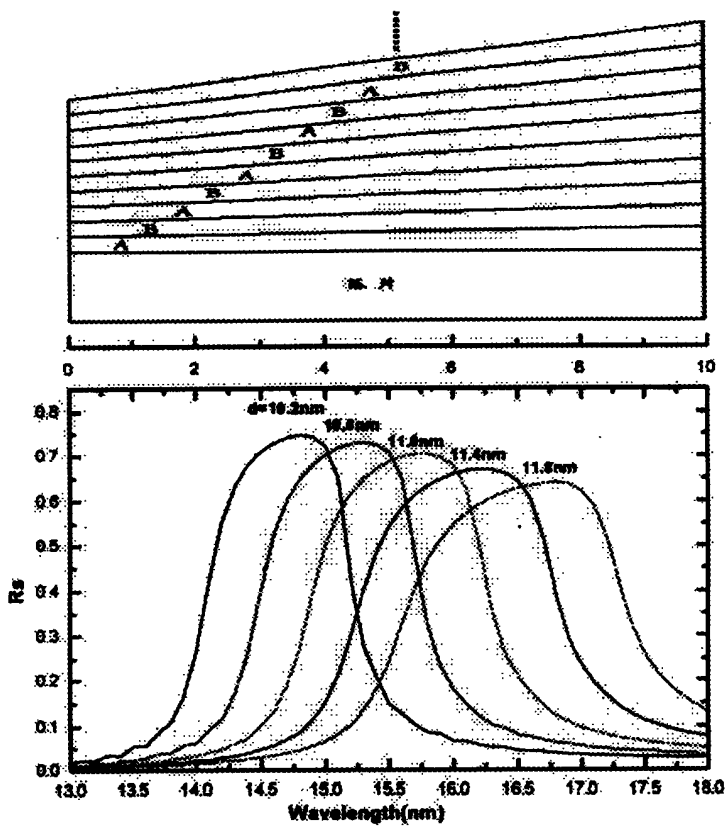


图 2a

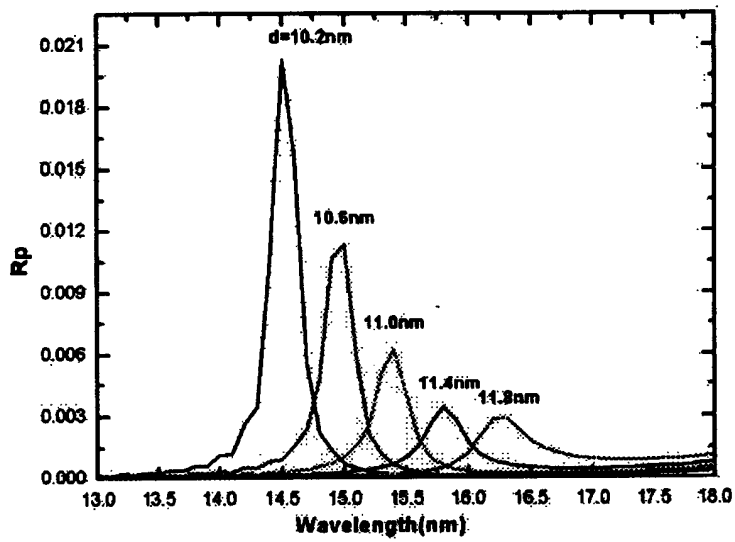


图 2b

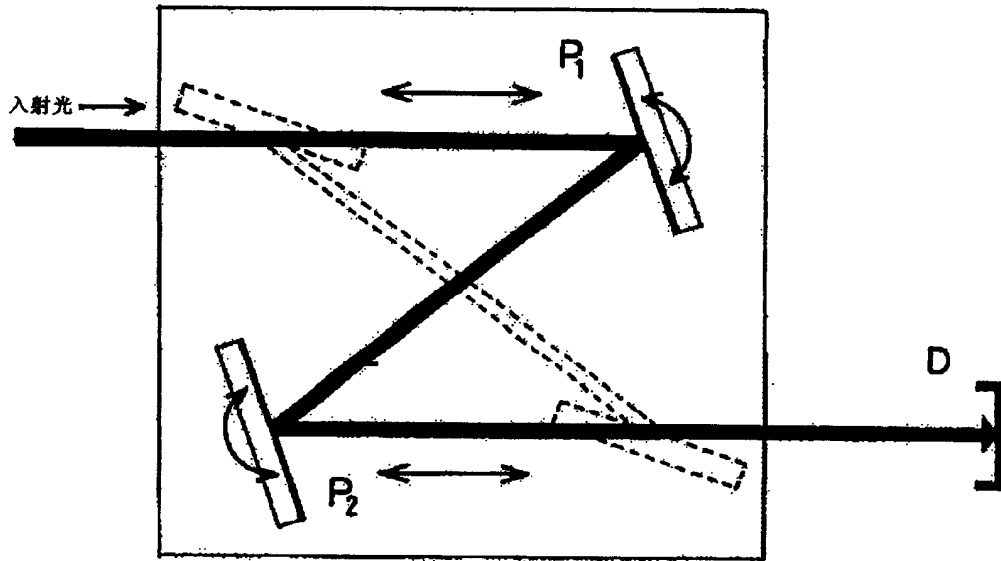


图 3a

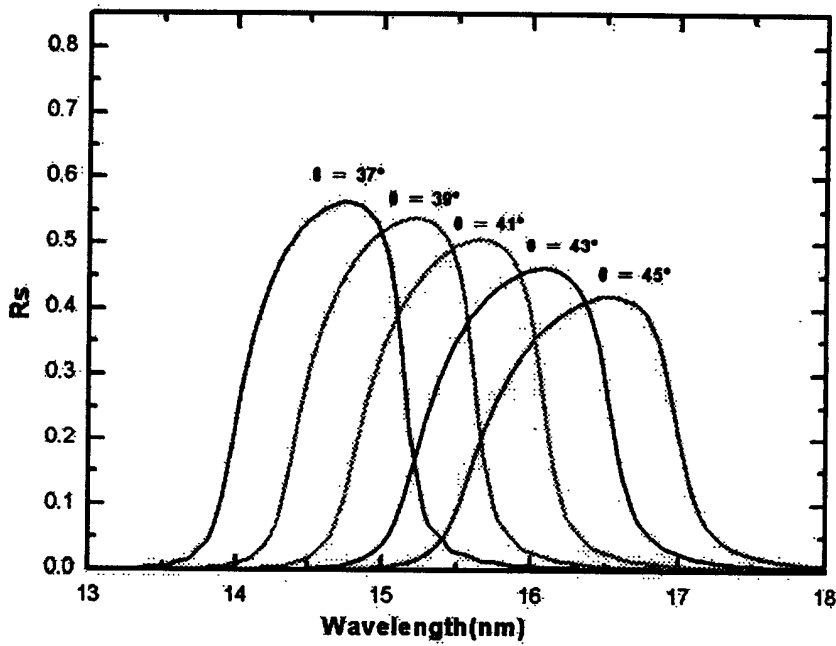


图 3b

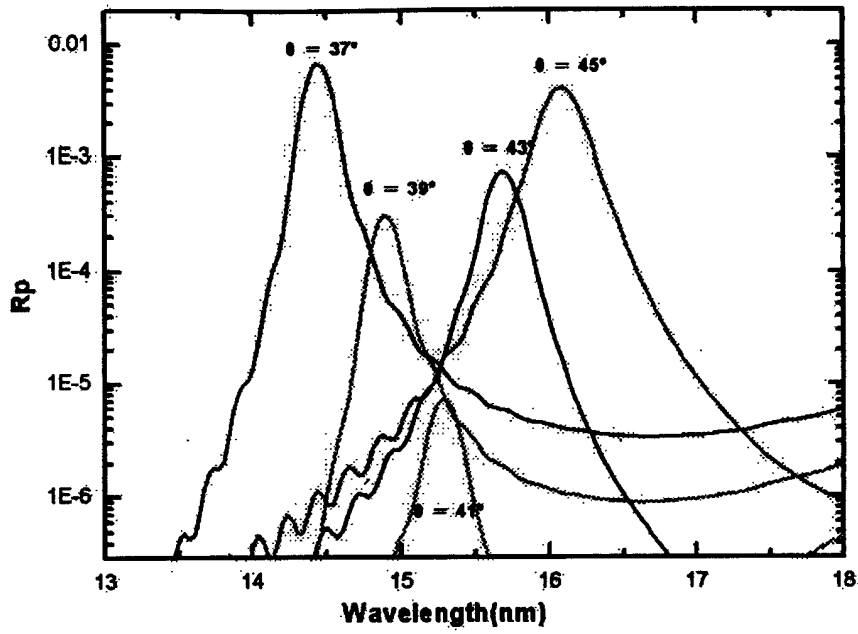


图 3c

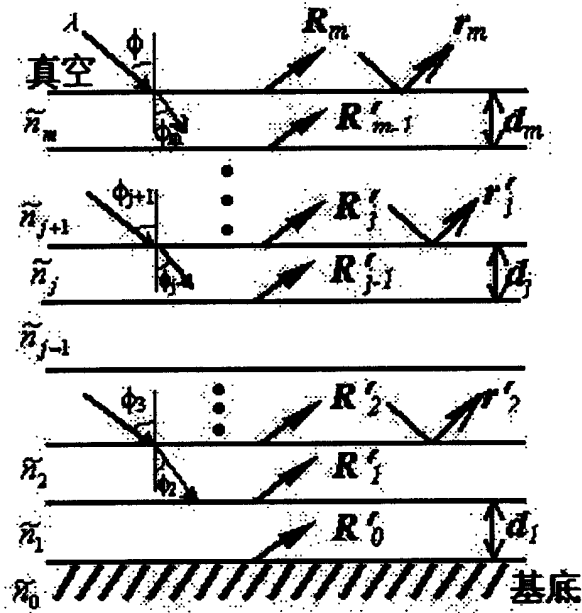


图4

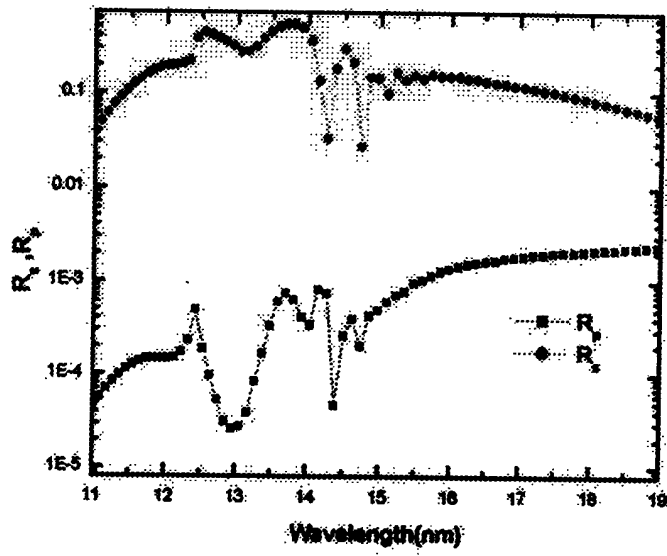


图 5a

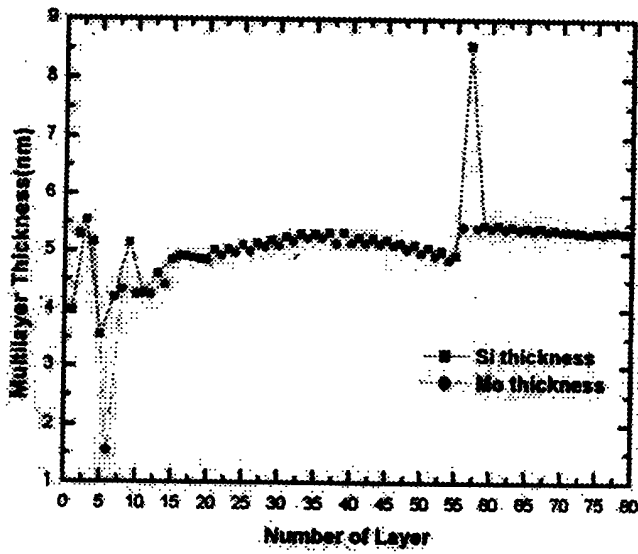


图 5b