

双轴晶衬底上双轴晶单晶 薄膜的椭圆偏测量*

施路平 蒋民华 邵宗书 刘耀岗 王继扬
(山东大学晶体材料研究所, 济南)

提 要

本文给出了两种测量双轴晶衬底上双轴晶单晶膜的折射率和膜厚的方法及测量的公式。我们利用这种方法测量了所研制的KTP光波导薄膜层的折射率和膜厚。

关键词: 椭圆偏振测量; 双轴晶; 光率体。

一、引 言

椭圆偏振测量法, 用偏振光束投射到样品表面, 然后观测反射光束偏振状态的改变, 从而定出样品膜厚和折射率。它广泛用于物理、化学、光学、电子学、机械、金属、医学等领域^[1]。其中应用最广的是半导体薄膜的测量。其主要研究对象是各向同性衬底上的各向同性薄膜。随着集成光学的发展, 各向异性衬底上各向异性薄膜的测量, 已显得十分重要^[2~4]。本文提出了两种利用多角度, 测量双轴晶衬底上双轴晶单晶薄膜的方法。给出了测量所需的计算公式, 并利用此方法测量了我们所研制的KTP光波导的薄膜层。以上的测量法可自然地推广到单轴晶衬底上单轴晶薄膜的测量。

二、理论和测量方法

X 、 Y 、 Z 分别为光率体的三个主轴。衬底为 XY 面, 上面的薄膜同样是 XY 面, 薄膜和衬底光率体的三个主轴方向完全一致, 入射光在 YZ 平面内, 与 Z 轴成夹角 φ_0 , 如图1所示。 φ_0 即为入射角, 光的波长为 λ , N_0 为薄膜之上环境介质的折射率。 N_{2x} 、 N_{2y} 、 N_{2z} 为衬底的主轴折射率。 N_{1x} 、 N_{1y} 、 N_{1z} 为薄膜的主轴折射率, d 为膜厚。

用波矢量 $\mathbf{K}_0 \equiv \{K_{0x}, K_{0y}, K_{0z}\}$, $\mathbf{K}_1 \equiv \{K_{1x}, K_{1y}, K_{1z}\}$ 等写出光束在三种媒质中的振幅, 按膜层界面的常用边界条件求解麦克斯韦方程得:

$$r_{01y} = \frac{N_{1y}N_{1z} \cos \varphi_0 - N_0(N_{1z}^2 - N_0^2 \sin^2 \varphi_0)^{1/2}}{N_{1y}N_{1z} \cos \varphi_0 + N_0(N_{1z}^2 - N_0^2 \sin^2 \varphi_0)^{1/2}}, \quad (1)$$

$$r_{01z} = \frac{N_0 \cos \varphi_0 - (N_{1x}^2 - N_0^2 \sin^2 \varphi_0)^{1/2}}{N_0 \cos \varphi_0 + (N_{1x}^2 - N_0^2 \sin^2 \varphi_0)^{1/2}}, \quad (2)$$

收稿日期: 1988年12月17日; 收到修改稿日期: 1989年5月8日

* 本项工作是国家自然科学基金资助的项目。

$$r_{12p} = \frac{N_{1y}N_{2z}\sin^2\varphi_{1p}(N_{1z}^2 - N_0^2\sin^2\varphi_0)^{1/2} - N_{2y}N_{1z}\sin^2\varphi_{2p}(N_{2z}^2 - N_0^2\sin^2\varphi_0)^{1/2}}{N_{1y}N_{2z}\sin^2\varphi_{1p}(N_{1z}^2 - N_0^2\sin^2\varphi_0)^{1/2} + N_{2y}N_{1z}\sin^2\varphi_{2p}(N_{2z}^2 - N_0^2\sin^2\varphi_0)^{1/2}}, \quad (3)$$

$$r_{12s} = \frac{(N_{1x}^2 - N_0^2\sin^2\varphi_0)^{1/2} - (N_{2x}^2 - N_0^2\sin^2\varphi_0)^{1/2}}{(N_{1x}^2 - N_0^2\sin^2\varphi_0)^{1/2} + (N_{2x}^2 - N_0^2\sin^2\varphi_0)^{1/2}}. \quad (4)$$

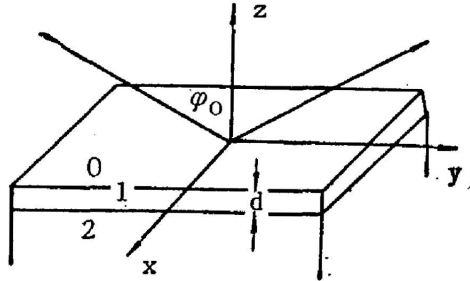


Fig. 1 Three-phase system. Medium 0 is isotropic, whereas medium 1 and 2 satisfy the conditions of biaxial symmetry with the optic axis parallel to the Z axis. YZ plane is the incident plane

其中 01 和 02 分别表示薄膜与环境 and 薄膜与衬底的界面。p 和 s 分别表示平行于和垂直于入射面的偏振分量。式中 ϕ_{1p} 和 ϕ_{2p} 分别是薄膜和衬底中偏振光波的折射角。其值分别为：

$$\phi_{1p} = \text{tg}^{-1} \left[\left(\frac{N_0 N_{1z}}{N_{1y}} \right) (N_{1z}^2 - N_0^2 \sin^2 \varphi_0)^{-1/2} \right], \quad (5)$$

$$\phi_{2p} = \text{tg}^{-1} \left[\left(\frac{N_0 N_{2z}}{N_{2y}} \right) (N_{2z}^2 - N_0^2 \sin^2 \varphi_0)^{-1/2} \right]. \quad (6)$$

p 偏振和 s 偏振的相位差 β_p 和 β_s 分别为：

$$\beta_p = 2\pi(d/\lambda)(N_{1y}/N_{1z})(N_{1z}^2 - N_0^2 \sin^2 \varphi_0)^{1/2}, \quad (7)$$

$$\beta_s = 2\pi(d/\lambda)(N_{1x}^2 - N_0^2 \sin^2 \varphi_0)^{1/2}. \quad (8)$$

系统的总反射系数：

$$R_p = (r_{01p} + r_{12p} \exp[-i2\beta_p]) / (1 + r_{01p}r_{12p} \exp[-i2\beta_p]), \quad (9)$$

定义：

$$R_s = (r_{01s} + r_{12s} \exp[-i2\beta_s]) / (1 + r_{01s}r_{12s} \exp[-i2\beta_s]). \quad (10)$$

$$\text{tg } \psi \exp(i\Delta) = R_p/R_s. \quad (11)$$

从(1)~(11)式可以看出，在一定入射角的情况下，当 $n_{2x}n_{2y}n_{2z}$ 已知时， ψ 、 Δ 是 n_{1x} 、 n_{1y} 、 n_{1z} 、 d 的函数，由于椭圆偏振测量中，对于某一特定的入射角，可测得 ψ 、 Δ ，所以必须选用两个以上的入射角才能由(11)式的实部和虚部等式关系，得到四个以上的方程，从而利用数值计算得出所求的 n_{1x} 、 n_{1y} 、 n_{1z} 、 d 四个未知量。

从以上结果可以很容易地推出单轴晶衬底上单轴晶膜的情况。设单轴晶薄膜与单轴晶衬底的光轴平行，且两光轴的公共方向与薄膜界面垂直，则由(1)~(10)式推出的反射系数表达式， β_s 、 β_p 、 ϕ_{1p} 、 ϕ_{2p} 的表达式，与文献[5]中的结果一致。而对两光轴的公共方向与薄膜界面平行的情况，可取光轴和薄膜法线所确定的平面为入射面，则椭圆偏振测量所需的关系式也很容易由(1)~(10)式推出。

测量方法 1 选不同的两个入射角 φ_m ， $m=1$ 或 2，由每一个入射角测得 ψ_m 、 Δ_m ，而得四个方程，数值计算可得四个分量。

测量方法 2 将入射光分别取在 xz 和 yz 面内，在每一个面内各取一个入射角，由每一个入射角测得相应的 ψ 、 Δ ，从而得四个方程，数据处理方式与方法 1 相同。

三、KTP 衬底上 $K_{1-x}R_x\text{TP}$ ($x=0.5$) 单晶膜的测量

KTP(KTiOPO_4) 晶体是目前最好的激光倍频材料之一，它的有效非线性系数比 KDP

大一个数量级以上, 抗光损伤阈值高, 能实现 I 类、II 类相位匹配, 在 $0.35\sim 4.5\mu\text{m}$ 波段范围内是透明的, 电光系数大^[6], 介质常数小, 晶体化学性质稳定, 不潮解、耐高温, 是制作波导调制器和开关的理想材料。目前, KTP 在集成光学上的应用已引起国外的重视, 1987 年 Bierlein^[7] 采用离子交换法, 首次在 KTP 衬底上制成了光波导。我们采用助溶剂液相外延法在 KTP 衬底上外延 KRbTP ($\text{K}_{1-x}\text{Rb}_x\text{TiOPO}_4$), 制得了高质量的外延单晶膜, 并制成了光波导, 在波导层中实现了 $1.06\sim 0.53\mu\text{m}$ 的激光倍频转换。

采用本文所述的测量方法 1, 对 KRTP 外延层进行了测量。测量采用的是 Rudolph 公司 43603-200E 型椭圆偏度仪。图 2 是实验装置图。

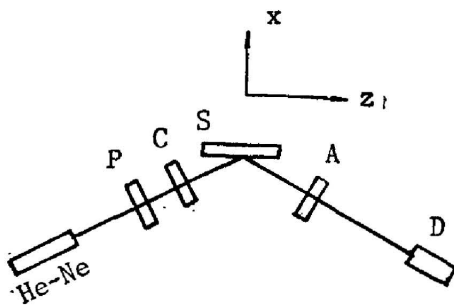


Fig. 2 Schematic diagram of the PCSA ellipsometer

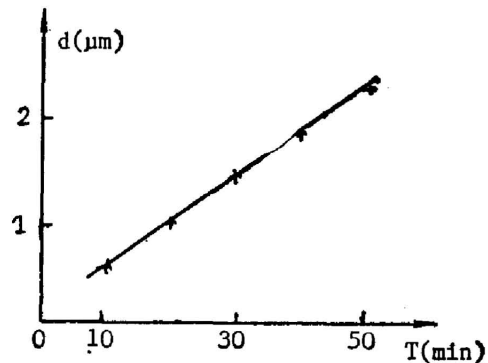


Fig. 3 Relationship between the film thickness and epitaxy time. Equilibrium step-cooling epitaxy mode ((100) face of KTP as substrates and $\Delta T = T_m - T_p = 2^\circ\text{C}$)

KTP 和 KRTP 都是正交晶系, 晶轴就是光率体的主轴。衬底和薄膜都是 (100) 面, 因为 KTP 的 Y 方向不能由 X 光定向, 所以将入射面取为 XZ 面。KRTP 是透明膜, 故只选两个入射角。图 3 是采用平衡步冷外延方式, 以 KTP 的 (100) 面为衬底进行外延时膜厚和外延时间的关系曲线。K_{1-x}R_xTP 薄膜的折射率的测量结果是

$$n_x = 1.7731, n_y = 1.7875, n_z = 1.8758。$$

将测试结果与用有效折射率测得的结果进行比较, 结果十分相近。用有效折射率法测得的 K_{1-x}R_xTP 的折射率数据是

$$n_x = 1.7732, n_y = 1.7876, n_z = 1.8759。$$

四、讨 论

将两种测量方法进行比较可以看出:

由于椭圆偏振测量的灵敏度与入射角有关, 所以测量方法 2 的测量精度高。但需要调整两次光路, 所以实际测量带入的误差比方法 1 大。有时 X、Y 两个主轴中只有一个可以精确定出, 这时用方法 1 更合适。

KTP 的 Y 轴不能用 X 光定出, 所以我们选用方法 1。

值得注意的是用多角度测量, 有时会出现角度相关结果^[8]。即虽然测了四个角度的 ψ_m ,

Δ_m , 但并不一定能解出七个参数。因为它们是相关的, 形式上测了两个角度, 实际上少于两个角度。

本实验中未遇到相关情况。

参 考 文 献

- [1] R. M. A. AZZAM; «*Ellipsometry and polarized light*», (NORTH-HOLLAD PUBLISHING COMPANY, NEW YORK, 1977), 417, 492.
- [2] D. DEN ENGELSEN; *J. Opt. Soc. Am.*, 1971, **61**, No. 11 (Nov) 1460~1466.
- [3] D. J. De Smet; *J. Opt. Soc. Am.*, 1973, **63**, No. 8 (Aug), 958~964.
- [4] D. J. De Smet; *J. Opt. Soc. Am.*, 1974, **64**, No. 5 (May), 631~638.
- [5] R.M.A. AZZAM; «*Ellipsometry and Polarized Light*», (NORTH-HOLLAD PUBLISHING COMPANY, NEW YORK 1977), 354~358.
- [6] J. D. Bierlein; *Appl. Phys. Lett.* 1986, **49**, No. 15 (Oct) 917~919.
- [7] J. D. Bierlein; *Appl. Phys., Lett.* 1987, **55**, No. 18 (May) 1216~1218.
- [8] R. M. A. AZZAM; «*Ellipsometry and Polarized Light*», (NORTH-HOLLAD PUBLISHING COMPANY, NEW YORK 1977), Chapter 4. 5. 3.

Ellipsometric measurement of biaxial single crystal films on biaxial crystal substrats

SHI LUPING, JIANG MINHUA, SHAO ZHONGSHU

LIU YAOGANG AND WANG JIYANG

(Institute of Crystal Materials, Shandong University, Jinan)

(Received 17 December 1988; revised 8 May 1989)

Abstract

This paper presents two kinds of methods for measuring the biaxial single crystal films on the biaxial crystal substrats. We have used such methods to measure the thickness and refractive index of the film layer of KTP waveguide.

Key words: ellipsometric measurement; biaxial crystal; indicatrix.