

研究简报

反应溅射生长的 $a\text{-Si:H}/a\text{-Ge:H}$ 超晶格
光学性质研究

王印月 许怀哲 张仿清 陈光华

(兰州大学物理系, 兰州, 730001)

1990年11月13日收到, 1991年6月28日修改定稿

本文报道了反应溅射法制备的 $a\text{-Si:H}/a\text{-Ge:H}$ 超晶格结构特性。小角度 X 射线衍射测量和透射电子显微镜观察表明: 超晶格层厚均匀、层间平行、界面处组分突变、周期性良好; 喇曼散射、光吸收和红外透射表明: 在超晶格中并不存在由于超晶格结构引起的界面结构无序, 界面无 H 富集现象。

一、引言

自 Tiedje 和 Abeles^[1] 首次制成非晶态半导体超晶格以来, 非晶态半导体超晶格以它特殊的性质越来越受到人们的注意, 它不仅对固体物理的理论研究有重要意义, 而且具有相当大的应用前景。在非晶超晶格结构中关键的问题就是能否生长出没有额外缺陷的界面, 为了解决这个问题, 测量异质生长引起的结构变化是非常重要的。

我们用反应溅射法制备了 $a\text{-Si:H}/a\text{-Ge:H}$ 超晶格薄膜, 在这种方法中, 两种靶材在同一反应气氛中溅射, 避免了交叉“污染”, 保证了界面处组分突变。由于溅射法的生长机理不同于辉光放电法, 避免了国内 GeH_4 气体难以购买、进口气体又价格昂贵的矛盾。本文通过 X 射线小角度衍射 (XRD)、透射电镜 (TEM)、喇曼散射 (Raman)、光吸收及红外 (IR) 透射测量手段, 分析了超晶格的结构特性, 并对实验结果作了初步讨论。

二、样品制备及测量

实验所用的 $a\text{-Si:H}/a\text{-Ge:H}$ 超晶格样品是在 JS-450 型溅射系统中用射频反应溅射法制备的, 溅射靶分别是高纯多晶 Ge 和 Si 片^[2]。除 TEM 的样品外, 超晶格中 $a\text{-Si:H}$ 与 $a\text{-Ge:H}$ 子层厚度比固定为 $d_{\text{Si}}/d_{\text{Ge}} = 1.2$, 膜的总厚度控制在 $\sim 0.7 \mu\text{m}$ 保持不变, 这样当层数改变时膜的平均组分保持不变。

衬底材料按照测量目的不同, 分别为环氧树脂小条、玻璃和双面抛光高阻硅片 ($>10^4 \Omega \cdot \text{cm}$)。

样品的测量是在兰州大学测试中心和中科院兰州化物所进行的。

三、结果与讨论

1. 小角度 X 射线衍射谱:

小角度 X 射线衍射技术能够给出非晶超晶格结构特性方面的许多信息,它是检验非晶超晶格结构的有力手段。图 1 是 a-Si:H/a-Ge:H 超晶格的 XRD,由图看出,在 2θ 为 $0.8-6^\circ$ 范围内直到第五级衍射峰都已清楚地显示出来,高级次衍射峰的出现和每一个峰窄的半高宽度表明超晶格界面非常平整和十分陡峭;由衍射峰的角位置求得的

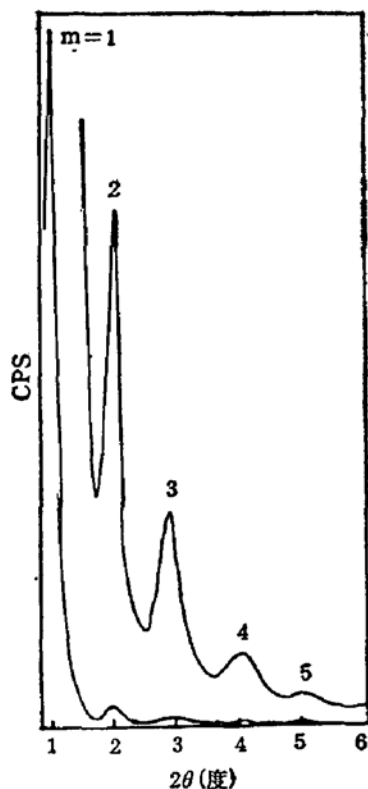


图 1 a-Si:H/a-Ge:H 超晶格的小角度 X 射线衍射谱

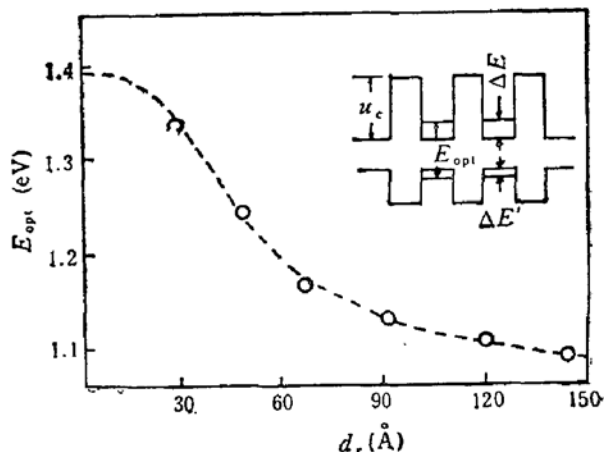


图 2 a-Si:H/a-Ge:H 超晶格 $E_{opt} \sim d_r$ 关系
○ 实验点 --- 理论拟合结果

超晶格的周期厚度 $d_r = 86.5 \text{ \AA}$; 利用 X 射线运动学理论得到超晶格的子层厚度比

$$d_{Si}/d_r = 0.56,$$

这与设计值很接近; 同时求得的界面浮动区为 $2-3 \text{ \AA}$ 与 TEM 直接观察的结果符合较好。以上结果充分说明我们用反应溅射法制备的 a-Si:H/a-Ge:H 超晶格层状周期性良好, 界面平整性好, 各子层变化陡峭。

2. 光学带隙和折射率

图 2 是由光透射谱得到的超晶格光学带隙 E_{opt} 和周期厚度 d_r 的依赖关系。在 $20-120 \text{ \AA}$ 范围内改变 d_r , 随着超晶格阱层厚度的减小, E_{opt} 逐渐增大, 出现“兰移”, $d_r = 30 \text{ \AA}$ 时 E_{opt} 移动 $\sim 0.25 \text{ eV}$, 光学带隙的“兰移”是超晶格的一个主要特征, 是由量子尺寸效应引起的。 E_{opt} 随 d_r 的变化关系可用图 2 中插图所示的一维周期性方势阱模型得到较好的说明, 我们计算出的 E_{opt} 与 d_r 的关系如图中虚线所示, 可以看出与实验结果符合很好。 计算中所用的电子有效质量与 Yang *et al.* 从原位光反射测量^[3] 及 Wronski *et al.* 从电导测量^[4] 得到的结果相符合。

从我们得到的折射率 n_s 和 Tauc 曲线斜率 B_s 随 d_s 的关系表明 n_s 、 B_s 基本上不随 d_s 改变, 这个结果与 Tiedje *et al.* 由光电导测量的结果^[5]符合很好, 这表明: a-Si:H/a-Ge:H 超晶格由于 Ge、Si 两种材料的电负性相近、结构相同, 不存在由多层结构诱导的界面结构无序。

3. 红外谱

图 3 是单层 a-Si:H、a-Ge:H 薄膜和超晶格的红外透射谱, 由图看出超晶格结构的谱线具有两层谱线中所有的原子振动吸收谱, 随着 d_s 的改变, Si-H 和 Ge-H 键的伸展和弯曲振动膜特征峰的峰位没有发生移动; 同时超晶格的红外谱是各单层红外谱的迭加, 超晶格的拉伸振动特征峰可以分解为三个成分 2000、2100 和 1885 cm^{-1} , 分别对应于 Si-H、Si-H₂ 和 Ge-H 键的拉伸振动膜, 进行计算可以得到三个成分的 H 含量分别为 ~ 6 、 ~ 4 、 $\sim 3.2 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$, 这个值接近于体样品的值, 这一事实与 Abeles *et al.* 对 GD-a-Si:H/a-Ge:H 超晶格的研究结果相符合^[6], 即随界面数的增加, H 的分布没有发生变化, 界面不存在 H 富集。

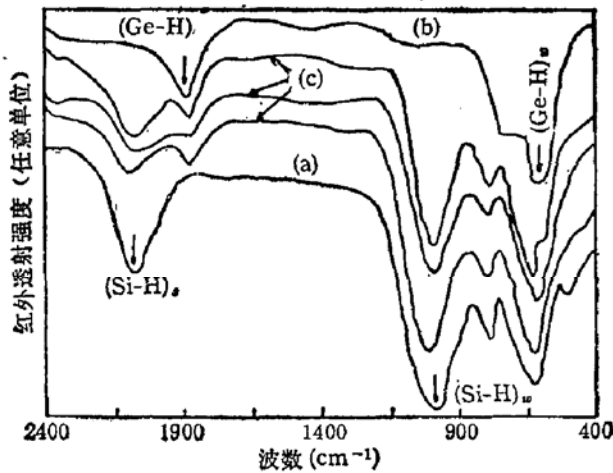


图 3 红外透射谱

a) a-Si:H b) a-Ge:H c) a-Si:H/a-Ge:H
超晶格(从上至下 d_s 减小)

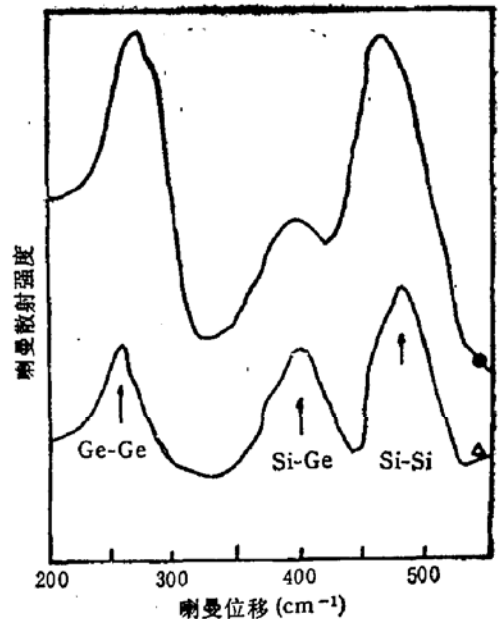


图 4 a-Si:H/a-Ge:H 超晶格的喇

曼谱
○ $d_s = 40 \text{ Å}$ △ 20 Å

4. 喇曼散射谱

图 4 是超晶格的 Raman 谱. 我们用 Gaussian 曲线对扣除 a-SiGe:H 合金层的贡献后, 剩余超晶格 Raman 谱的 a-Ge:H 光学模峰和 a-Si:H 光学模峰的高能边进行拟合, 得到类 Ge 峰和类 Si 峰的半高宽分别为 20 ± 2 和 $30 \pm 4 \text{ cm}^{-1}$, 这与高纯体膜 a-Ge:H 和 a-Si:H 的值相同. 这表明超晶格在界面层及两边的子层材料中平均键角畸变小于 10° , a-Si:H/a-Ge:H 界面具有比较低的额外畸变。

四、结 论

反应溅射制备的 a-Si:H/a-Ge:H 超晶格,层厚均匀、层间平行、界面组分突变、周期结构良好;当周期厚度 $d_p < 100 \text{ \AA}$ 时出现量子尺寸效应;超晶格界面处不存在结构无序,界面无 H 富集现象存在。

参 考 文 献

- [1] B. Abeles and T. Tiedje, *Phys. Rev. Lett.*, **51**, 2003 (1983).
- [2] 王印月等,兰州大学学报, **26** (2), 129 (1990).
- [3] L. Yang and B. Abeles, *J. Non-cryst. Solids*, **97/98**, 1155 (1987).
- [4] C. R. Wronski *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **49**, 569 (1986).
- [5] T. Tiedje and C. B. Roxlo, *Proc. of Workshop on Amorphous Semiconductors*, 225, Beijing edited by Fritzsche Han. Tsai. World Scientific (1985).
- [6] P. D. Persans, B. Abeles *et al.*, In *Proceedings of the 17 th International Conference on the Physics of Semiconductors*, 499, edited by J. Chadi and W. A. Harrison Springer-Verlag New York, (1985).

Study on Optical Properties of Reactive-Sputtering a-Si:H/a-Ge:H Superlattices

Wang Yinyue, Xu Huaizhe, Zhang Fangqing and Chen Guanghua

(Department of Physics, Lanzhou University, Lanzhou, 730001)

Abstract

a-Si:H/a-Ge:H superlattices have been fabricated by reactive-sputtering method and their structural properties were studied. Transmission electron micrography (TEM) and small angle X-ray diffraction measurements demonstrated that the superlattice layers are parallel and uniform with atomically sharp interfaces and good periodicity. From Raman, IR and optical absorption spectrum measurements, we found no indication of excess structural disorder associated with the indication and no evidence for excess H at the a-Si:H/a-Ge:H interface.