

氢化硅薄膜介观力学行为及其与 微结构内禀关联特性*

王 权^{1)†} 丁建宁¹⁾ 何宇亮^{1)‡} 薛 伟³⁾ 范 真¹⁾

1) 江苏大学微纳米科学技术研究中心, 镇江 212013)

2) 南京大学物理系, 南京 210093)

3) 温州大学工业工程学院, 温州 323035)

(2006 年 12 月 18 日收到, 2007 年 2 月 8 日收到修改稿)

使用等离子体增强化学气相沉积系统, 在射频和直流负偏压的双重激励下制备了本征和掺杂后的氢化硅薄膜. 利用拉曼谱对薄膜进行了微结构分析, 用纳米压痕系统研究了薄膜的介观力学行为. 研究表明: 制备于玻璃衬底上的氢化硅薄膜, 由于存在非晶态的过渡缓冲层, 弹性模量小于相应的制备于单晶硅衬底的薄膜. 对于掺杂的氢化硅薄膜, 由于磷的掺入使得薄膜晶粒细化、有序度提高, 薄膜的晶态比一般在 40% 以上. 而硼的掺入, 薄膜晶态比减小, 一般低于 40%. 同时发现, 掺磷、本征和掺硼的氢化硅薄膜分别在晶态比为 45%、30% 和 15% 左右处, 弹性模量较小, 对此给出了理论解释.

关键词: 氢化硅薄膜, 拉曼谱, 弹性模量, 晶态比

PACC: 6220, 3220F, 0630M, 7360F

1. 引 言

硅薄膜材料广泛应用于微纳机电系统. 文献 [1] 按照薄膜晶态体积百分比, 将硅薄膜分为非晶硅、微晶硅、纳米硅、多晶硅和单晶硅薄膜. 纳米硅薄膜是由大量硅细微晶粒(尺度为若干纳米)和晶界组织(2—3 个原子厚度)构成. 细微晶粒是有序的晶态结构, 在组成材料中的分布是无规的^[2]. 新颖的结构使得纳米硅薄膜与非晶硅、单晶硅薄膜有着明显区别, 呈现出一系列低维物性, 如量子点共振隧穿^[3]和高电子迁移率^[4]等.

近年来, 采用与半导体工艺相兼容的等离子增强化学气相沉积(PECVD)法制备的氢化硅薄膜, 由于其独特的优越性, 在异质结二极管^[5]、太阳能电池^[6,7]、薄膜晶体管^[8,9]等研究中引起了人们极大的兴趣. 对氢化硅薄膜的光学和电学特性已做了很多工作^[10—12], 但是对氢化硅薄膜介观力学行为的研究却很少. 早期研究^[13]发现纳米硅薄膜的压阻效应, 压力灵敏度系数比单晶硅薄膜高出 6—8 倍, 这为研

发高灵敏度微型超微压压力传感器以及位移传感器等微纳电子器件提供了条件. 因此研究氢化硅薄膜的介观力学行为对薄膜器件实用化很有意义.

本文采用 PECVD 系统, 使用高氢稀释的硅烷和掺杂气体(磷烷和硼烷), 在射频和直流负偏压的双重激励下制备了氢化硅薄膜, 以拉曼谱对薄膜进行了微结构分析, 用纳米压痕系统研究了薄膜的介观力学行为. 对薄膜显微结构与介观性能之间关系(内禀关联特性)提出了定量理解, 从而可以通过工艺的调整进一步对材料的显微结构进行设计(裁剪)^[14], 满足器件开发的需要.

2. 氢化硅薄膜制备

氢化硅薄膜在电容耦合式 PECVD 系统中制备, 所用射频频率为 13.56 MHz, 极板间距为 30 mm, 本底真空度达 1×10^{-4} Pa. 所使用反应气体为高氢稀释的硅烷(95% 的 H_2 和 5% 的 SiH_4) 和高纯氢气(H_2 99.9999%) 掺杂气体为磷烷(PH_3) 或乙硼烷(B_2H_6), 浓度都为 0.5%, 其余 99.5% 为 H_2 . 分别以

* 江苏省“六大人才高峰”(批准号: 06-D-022)、国家重点基础研究发展规划(批准号: 2004CB619305)、浙江省科技发展计划(批准号: 2005C31048)和江苏大学博士生创新基金资助的课题.

† E-mail: wangquan100@126.com

玻璃和单晶硅作为衬底,所有的衬底都进行标准的化学清洗,依次为三氯乙烯(80 °C下,5 min),丙酮(室温下,5 min),煮沸的丙酮(5 min),然后在去离子水中漂洗,并在氮气中风干。在清洗前,单晶硅为避免粗糙表面引起的散射,对其进行双面抛光。为消除抛光引起的损伤,机械抛光后的单晶硅衬底室温下在双氧水稀释后的硫酸中腐蚀 2 min,再在 10% 的氢氟酸中浸泡 10 s,去除氧化层。最后用丙醇漂洗,并在氮气中吹干。

PECVD 系统两平行板之间施加高频电压的同时施加一个直流负偏压(相对于上电极,衬底电压为负),为射频和直流电源双重激励。负偏压的激励,提高了薄膜中微晶粒的成核密度并抑制在沉积过程中微晶粒的长大。由于在高频等离子体中,氧负离子或氧气与其他原子结合成带负电荷的自由基受到负电位的排斥,而难以接近生长薄膜表面,使得生长薄膜具有抗氧渗入的能力,因此薄膜中氧含量明显偏低。

大量 H_2 的稀释,增加了氢等离子体对生成膜表面的腐蚀作用,刻蚀了弱的 Si—Si 键,并起到钝化晶粒表面、分凝及中和硅原子中的悬挂键的作用,促进纳米晶粒的形成。磷、硼的掺杂是通过薄膜生长时在混合气体中分别通入 PH_3 或 B_2H_6 ,它们被射频电源的微波分成等离子体,同时辅以直流负偏压形成的电场作用下沉积到衬底上,沉积时间根据气体掺杂比的不同,取 6—10 h 不等,使得薄膜厚度在 1 μm 左右。

3. 氮化硅薄膜的微观表征

对微结构的测量分析而言,拉曼光谱是有力的工具^[15],尤其在硅纳米相(或非晶相)中,结构序的量变直观地给出了原子结构环境的多重性,拉曼谱为揭示这一多重性提供了更深层次的表现^[16]。拉曼测试设备为法国 Jobin Yvon 公司生产的 LABRAM HR800 型背散射式激光共焦显微拉曼谱仪,激发光源为光谱物理公司生产的 163 型氩离子激光器,激发波长为 514.5 nm,光孔直径为 200 μm ,激光能量密度小于 1 mW/mm²,以免过高的入射激光强度对样品造成温度效应或使薄膜晶化。

在理想完美的固体中,声子的传播形式是不衰减的平面波,即声子的相关长度不受制约,表现为拉曼散射中的动量守恒情况,只有在布里渊区中心($|q|=0$)的声子才能被激,对于单晶硅在室温下第

一阶拉曼峰位于 $\omega_q = 520 \text{ cm}^{-1}$,其半高宽约为 2.25 cm^{-1} ,二阶散射峰在 970 cm^{-1} 附近,如图 1 所示。散射强度用下列高斯分布的相关函数给出:

$$I(\omega) \propto \int \exp[-qL/2] \frac{dq^2}{[\omega - \alpha(q)]^2 + \left(\frac{\Gamma_0}{2}\right)^2}, \quad (1)$$

式中 ω , q 和 L 分别为声子的频率、波矢和相关长度^[16]。

通过改变积分时间,测出了单晶硅的 3 个三阶散射峰以及 1 个四阶散射峰和样品表面氧气和氮气的吸附信息,如图 1 中虚线所示。

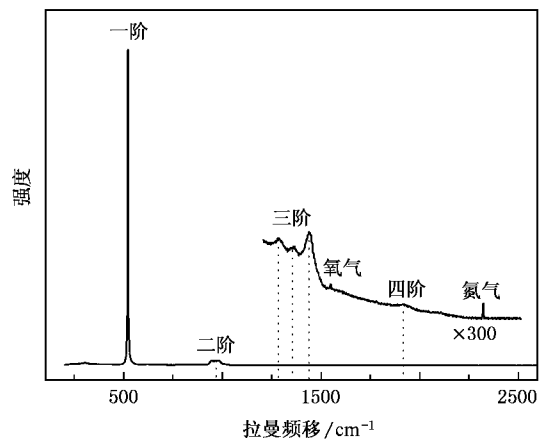


图 1 单晶硅薄膜的拉曼谱

制备于单晶硅衬底和玻璃衬底上的非晶硅薄膜,其原子与最近邻原子的相对位置与单晶硅晶体大致相同。这些原子组成了一些非常微小的晶粒,而晶粒又被结缔组织的无序区域连接起来。同时,这些微晶粒的取向是散乱和无规的,晶格对称性遭到了破坏,平移对称性发生了部分或全部的松弛,在 $|q| \neq 0$ 的其他振动模式都不同程度地得到了激活。由于在非晶态材料中声子不遵从准动量守恒定则,造成峰的形状变宽,具有相应波矢的声子不能在整个材料中传播,已经不再是原有晶态材料中的声子了,称为类光学模和类声学模,即类 TO 模(TO-like mode)峰位位于 $475 \pm 10 \text{ cm}^{-1}$,类 LO 模(LO-like mode)峰位位于 $380 \pm 20 \text{ cm}^{-1}$,类 LA 模(LA-like mode)峰位位于 $300 \pm 10 \text{ cm}^{-1}$,类 TA 模(TA-like mode)峰位位于 $150 \pm 5 \text{ cm}^{-1}$ 。一般类 LO 模难以出现,只有达到一定晶化程度后才能显示类 LO 谱峰,如图 2 所示。

纳米硅薄膜是由晶态组分和非晶界面组分两部

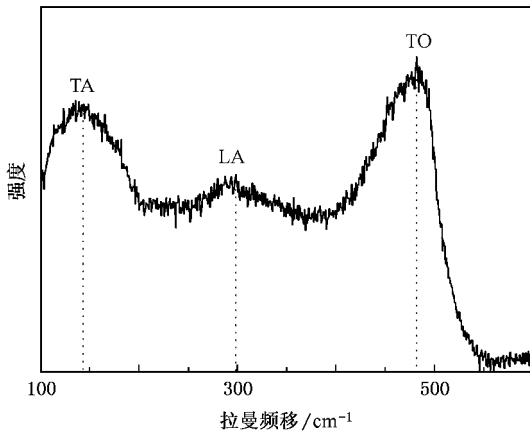


图 2 非晶硅薄膜的拉曼谱

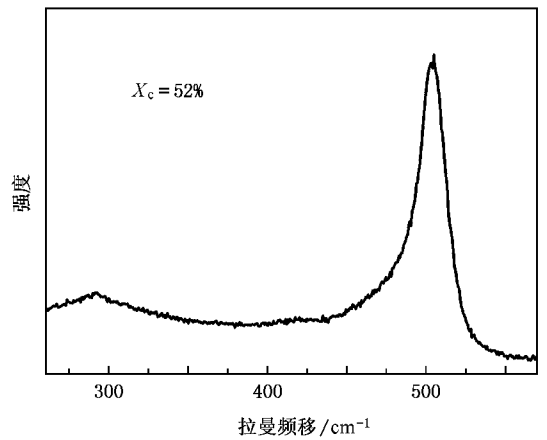


图 3 纳米硅薄膜的拉曼谱

分组成,晶态组分由晶粒中原子组成,非晶界面是由处于各晶粒之间的非晶界面中所有原子组成.拉曼谱中,晶态组分的类 TO 模主峰位于 520 cm⁻¹附近,非晶界面组分的类 TO 模主峰位于 480 cm⁻¹附近同时存在,它们相互叠加而呈现出不对称的形状.利用这两个峰的强度来估算薄膜中晶态组分在薄膜中占有的体积比,即晶态比 X_c,

$$X_c = \frac{I_c}{I_c + \gamma I_a} \quad (2)$$

这里的拟合因子^[17]γ 可表示为

$$\gamma(D) = 0.1 + \exp(-D/25), \quad (3)$$

式中 D 是平均晶粒尺寸^[17],单位为 nm.

$$D = 2\pi\sqrt{\frac{B}{|\Delta\omega_{TO}|}}, \quad (4)$$

式中 B 是常数,对本征薄膜而言, B 取 2.0 cm⁻¹nm²,对于硼和磷掺杂的硅薄膜, B 分别取 2.24 和 2.16 cm⁻¹nm²^[18], Δω_{TO} 直接从拉曼光谱中测出,为类 TO 峰位与体材料单晶硅一阶特征峰位 520 cm⁻¹ 之偏差.

利用(2)–(4)式,可以计算出所制备纳米硅薄膜的晶态比.图 3 所示为 X_c = 52% 的纳米硅薄膜的拉曼谱.

4. 纳米压痕

在微纳系统设计中,弹性模量是重要的力学特征之一.薄膜的弹性模量 E 是表征原子间结合力强弱的物理量,决定着器件的结构响应特性.如在微型压力传感器设计中,对于周边固定的圆形膜片的固有频率^[19]f_n 为

$$f_n = \frac{2.54h}{\pi r^2} \sqrt{\frac{E}{3(1-\nu^2)\rho}}, \quad (5)$$

式中 ν 为泊松比, ρ 为材料密度, r 为膜片有效半径, h 为膜片厚度.同时,准确测定材料的弹性常量,对于研究材料间原子的相互作用和相变都具有工程和理论意义.

用纳米压痕的方法来表征材料的介观力学行为,由于其样品准备简单、操作方便而被广为接受.弹性模量和硬度可以同时用 Oliver-Pharr 方法测出^[20].实验采用 Hysitron 公司生产的 TriboIndenter 纳米压痕系统,压针为 Berkovich 金刚石压针(针尖半径为 150 nm).由于所制备氢化硅薄膜厚度在 1 μm 左右,为避免衬底的影响,调节最大载荷使得最大的压入深度小于 100 nm,每个样品选择 10 个压点,每个相邻点之间距离保持在 3 μm 以上.图 4 为其中一次实验的载荷与压入深度的关系.

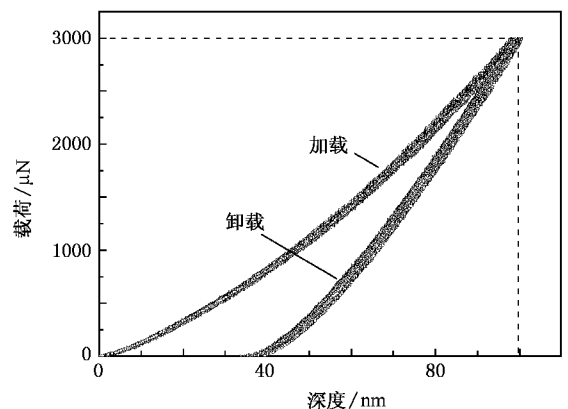


图 4 样品载荷与压入深度的关系

由 Oliver-Pharr 方法可知

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1 - \nu^2}{E} + \frac{1 - \nu_i^2}{E_i}, \quad (6)$$

式中 E 为所测样品的弹性模量, ν 为样品泊松比, E_i 为 Berkovich 金刚石压针的弹性模量, ν_i 为压针的泊松比, 其中 $E_i = 1140 \text{ GPa}$, $\nu_i = 0.07$, 而 E_r 称为综合弹性模量. 由弹性接触理论得

$$E_r = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}} \frac{dP}{dh}, \quad (7)$$

式中 P 为载荷, h 为压入深度, A 为弹性接触区面积. 由此可测出样品的弹性模量.

5. 结果及讨论

用拉曼散射谱估算出所制备氢化硅薄膜的晶态比 X_c , 用纳米压痕的方法计算出薄膜的弹性模量, 结果如图 5 所示.

从图 5 可以看出, 对于具有相同晶态比的氢化硅薄膜, 制备于单晶硅衬底的薄膜弹性模量要高于制备于玻璃衬底上的薄膜. 文献 [21] 用高分辨透射电子显微镜 (HRTEM) 对薄膜进行了研究, 表明在玻璃衬底上生长的氢化硅薄膜有非晶硅无序的缓冲过

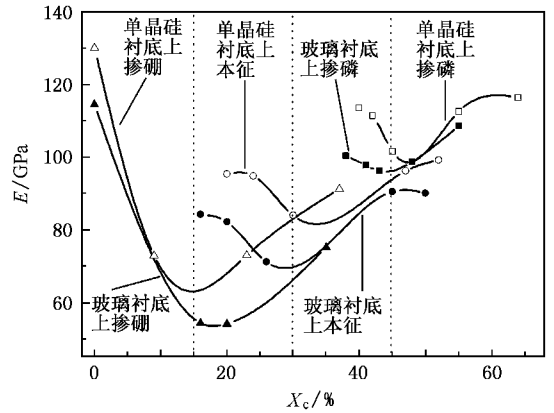


图 5 玻璃和单晶硅衬底上的氢化硅薄膜弹性模量与晶态比的关系

渡层, 而在单晶硅衬底上生长的氢化硅薄膜微观结构和单晶硅衬底的界面非常平整, 不存在非晶硅的缓冲层. 由此可见, 因玻璃衬底上缓冲层的存在, 使得相同晶态比的硅薄膜弹性模量低于单晶硅衬底硅薄膜.

与本征硅薄膜相比, 掺磷的氢化硅薄膜的晶粒更小、排列更整齐, 形成了明显的晶粒带, 如图 (a) 原子力显微镜形貌图所示. 磷原子的掺入使得界面

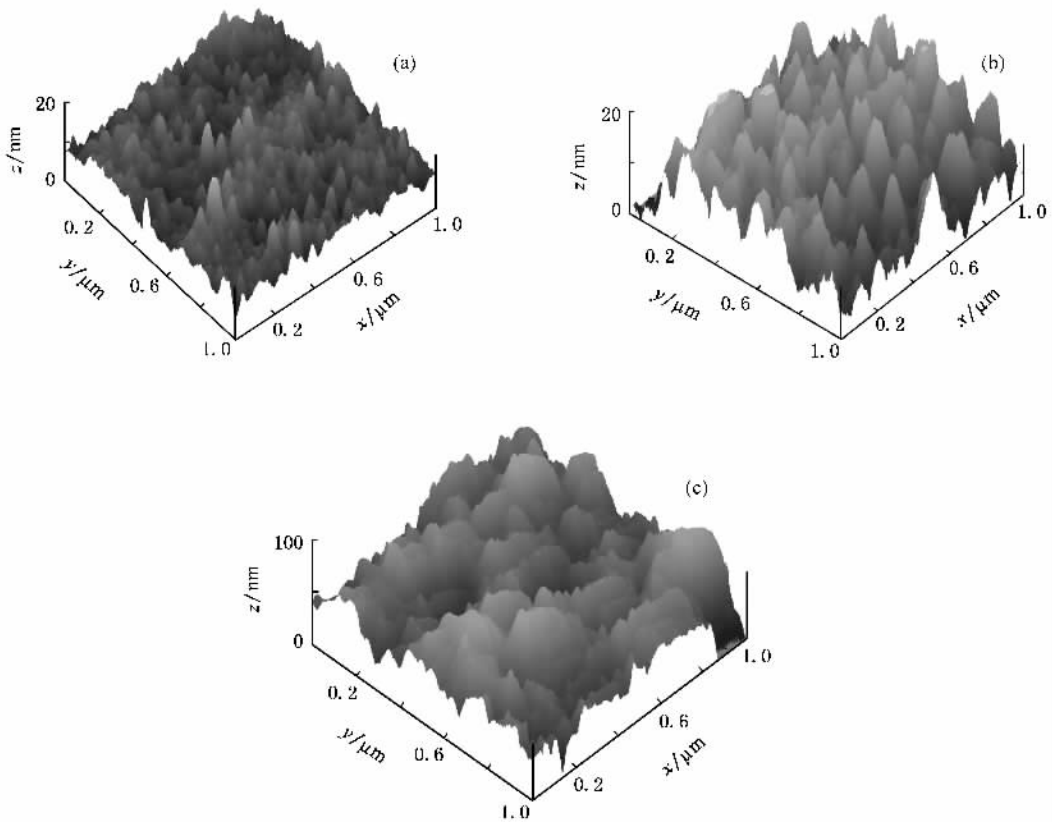


图 6 氢化硅薄膜的原子力显微镜形貌图 (a) 掺磷 (b) 本征 (c) 掺硼

更加有序,从而使其弹性模量高于本征硅薄膜.

掺硼的氢化硅薄膜与掺磷的氢化硅薄膜相比,晶粒大小变化不大.由于在掺硼的氢化硅薄膜中硼原子在晶界无序网络结构中引入局部的低势垒区,形成凝聚中心,淀积的硅原子围绕这些凝聚中心不规则地堆积成原子团,导致无序度增加,如图 6(c) 所示.当掺硼浓度逐渐增加时,使得凝聚成核的硅原子减少,使微晶硅薄膜转变成非晶硅薄膜.纳米压痕的实验表明,硼掺杂的氢化硅薄膜的弹性模量变化也很大,变化范围从 50 到 120 GPa.

我们还注意到,对于掺磷的氢化硅薄膜,在晶态比 X_c 为 45% 左右时弹性模量较小(掺磷的氢化硅薄膜晶态比一般在 40% 以上).本征的氢化硅薄膜,在晶态比 X_c 为 30% 左右时弹性模量较小.对于掺硼的氢化硅薄膜,在晶态比 X_c 为 15% 左右时弹性模量较小(掺硼的氢化硅薄膜晶态比一般低于 40%).

材料的力学性能是由材料内部的微结构决定的.氢化硅薄膜由于大量晶界或界面的存在,材料中相当一部分的原子位于或靠近晶界,被看作由所有晶体一起组成的“晶体组元”和界面区域的原子构成的“界面组元”组成的两组元体系.晶界所起的作用比较清楚,在上述 X_c 值处,晶粒内部存在有缺陷,常规位错运动起主要作用,因此弹性模量减小.随着晶态比的提高,晶粒细小化,晶粒内部位错的活动减弱,形变更集中在晶界附近,弹性模量得到提高.而对于非晶成分高的结构是以随机密排模型为特征的,即比较接近完整晶体,因而具有高的弹性模量.

在早期氢化硅薄膜电学特性的研究中^[22,23],对本征氢化硅薄膜而言,当 $X_c \geq 30%$ 时,电导率明显上升.在 $X_c \approx 30%$ 时,微晶硅薄膜网络中出现了一定的晶态成分(小晶粒),晶面的排列由不规则趋向于规则.图 7 为微晶硅薄膜的拉曼谱.由图 7 可见,类 TO 模半高宽明显地比图 3 中纳米硅薄膜的类 TO 模半高宽要宽得多, $X_c \approx 30%$ 预示氢化硅薄膜微结构中存在一个相变点.

对氢化硅薄膜光学特性的研究中发现^[24], $X_c \approx 30%$ 时对太阳弱光部分的吸收有最大值.这与力学

行为有相似之处.当 $X_c \approx 30%$ 时本征氢化硅薄膜弹性模量最小,而掺磷和掺硼使得氢化硅薄膜的 X_c 偏移到 45% 和 15%,这是材料的相变点.

需要指出的是,在纳米压痕实验中,薄膜的表面粗糙度和薄膜内应力场对弹性模量的测试结果也有影响,对此需要做进一步的研究.

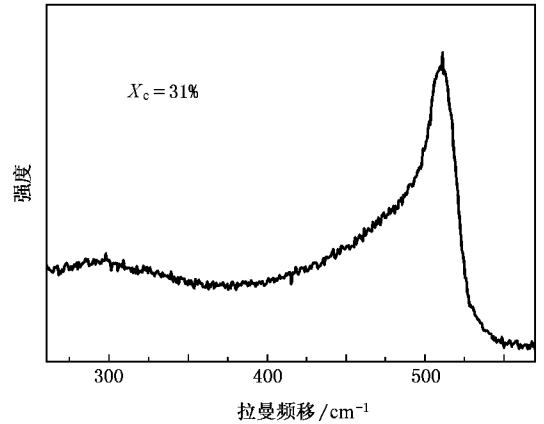


图 7 微晶硅薄膜的拉曼谱

6. 结 论

用拉曼谱对所制备的氢化硅薄膜进行了微观结构分析,用晶态比来表征薄膜晶态组分和非晶界面组分体系,用纳米压痕的方法研究了薄膜的弹性模量.研究发现,在晶态比相同的情况下,由于存在非晶态的过渡缓冲层,制备于玻璃衬底上的氢化硅薄膜的弹性模量小于相应的制备于单晶硅衬底上的氢化硅薄膜的弹性模量.对于磷掺杂的氢化硅薄膜,由于磷的掺入,薄膜中晶粒细化、有序度提高,薄膜晶态比一般在 40% 以上.对于硼掺杂的氢化硅薄膜,由于硼的掺入,薄膜晶态比减小,一般低于 40%.同时发现对掺磷、本征和掺硼的氢化硅薄膜,晶态比分别在 45%、30% 和 15% 左右时弹性模量较小.对此给出了相应的解释,初步探讨了氢化硅薄膜介观力学行为与微结构内禀关联特性.

感谢南京大学固体微结构物理国家重点实验室程光照教授和上海交通大学物理系沈文忠教授的帮助.

- [1] Yu M B , He Y L , Liu H T , Luo J S 1995 *Acta Phys. Sin.* **44** 634 (in Chinese) [余明斌、何宇亮、刘洪涛、罗晋生 1995 物理学报 **44** 634]
- [2] Yu W , Zhang L , Wang B Z , Lu W B , Wang L W , Fu G S 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1936 (in Chinese) [于 威、张 立、王保柱、路万兵、王利伟、傅广生 2006 物理学报 **55** 1936]
- [3] Liu M , Wang Z O , He Y L , Jiang X L 1998 *Acta Phys. Sin.* **47** 699 (in Chinese) [刘 明、王子欧、何宇亮、江兴流 1998 物理学报 **47** 699]
- [4] Chen X Y , Shen W Z , He Y L 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 024305
- [5] Peng Y C , Xu G Y , He Y L , Liu M , Li Y X 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 2466 (in Chinese) [彭英才、徐刚毅、何宇亮、刘 明、李月霞 2000 物理学报 **49** 2466]
- [6] Hu Z H , Liao X B , Diao H W , Xia C F , Zeng X B , Hao H Y , Kong G L 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2945 (in Chinese) [胡志华、廖显伯、刁宏伟、夏朝凤、曾湘波、郝会颖、孔光临 2005 物理学报 **54** 2945]
- [7] Zhang X D , Zhao Y , Gao Y T , Chen F , Zhu F , Wei C C , Sun J , Geng X H , Xiong S Z 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6697 (in Chinese) [张晓丹、赵 颖、高艳涛、陈 飞、朱 锋、魏长春、孙 建、耿新华、熊绍珍 2006 物理学报 **55** 6697]
- [8] Cheng I C , Wagner S 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 440
- [9] Li J , Wu C Y , Zhao S Y , Liu J P , Meng Z G , Xiong S Z , Zhang F 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6612 (in Chinese) [李 娟、吴春亚、赵淑云、刘建平、孟志国、熊绍珍、张 芳 2006 物理学报 **55** 6612]
- [10] Yu Y P , Lin X Y , Lin S H , Huang R 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2038 (in Chinese) [余云鹏、林璇英、林舜辉、黄 锐 2006 物理学报 **55** 2038]
- [11] Huang R , Lin X Y , Yu Y P , Lin K X , Zhu Z S , Wei J H 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2523 (in Chinese) [黄 锐、林璇英、余云鹏、林揆训、祝祖送、魏俊红 2006 物理学报 **55** 2523]
- [12] Gao X Y , Li R , Chen Y S , Lu J X , Liu P , Feng T H , Wang H J , Yang S E 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 98 (in Chinese) [郜小勇、李瑞、陈永生、卢景霄、刘 萍、冯团辉、王红娟、杨仕娥 2006 物理学报 **55** 98]
- [13] He Y L , Liu H , Yu M B , Yu X M 1996 *Nanostructured Mater.* **7** 769
- [14] Bai Y L , Wang H Y , Xia M F , Ke F J 2005 *Appl. Mech. Rev.* **58** 372
- [15] Ding S , Liu Y L , Siu G G 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4416 (in Chinese) [丁 硕、刘玉龙、萧季驹 2005 物理学报 **54** 4416]
- [16] Cheng G X 2001 *Raman Brillouin Scattering* (Beijing : Science Press) p240 (in Chinese) [程光照 2001 拉曼布里渊散射(北京 科学出版社)第 240 页]
- [17] Han D X , Lorentzen J D , Weinberg W J , McNeil L E , Wang Q 2003 *J. Appl. Phys.* **94** 2930
- [18] Cheng G X , Chen K J , Xia H , Zhang W , Zhang X K , Chu H Y 1992 *Chin. J. Light Scattering* **4** 150 (in Chinese) [程光照、陈坤基、夏 桦、张 维、张杏奎、储浩玉 1992 光散射光学 **4** 150]
- [19] Niu D F 1987 *Mechanical Sensitive Devices and Application* (Beijing : Science Press) p62 (in Chinese) [牛德芳 1987 力学量敏感器件及其应用(北京 科学出版社)第 62 页]
- [20] Oliver W C , Pharr G M 1992 *J. Mater. Res.* **7** 1564
- [21] He Y L , Hu G Y , Yu M B , Liu M , Wang J L , Xu G Y 1997 *Phys. Rev. B* **59** 15352
- [22] He Y L , Wei Y Y , Zheng G Z , Yu M B , Liu M 1997 *J. Appl. Phys.* **82** 3408
- [23] He Y L , Yu M B , Hu G Y , Zhang Q 1997 *Acta Phys. Sin.* **46** 1636 (in Chinese) [何宇亮、余明斌、胡根友、张 蕾 1997 物理学报 **46** 1636]
- [24] Liu X N , He Y L , Wang F , Schwarz R 1993 *Acta Phys. Sin.* **42** 1979 (in Chinese) [刘湘娜、何宇亮、Wang F、Schwarz R 1993 物理学报 **42** 1979]

Mesoscopic mechanical characterization of hydrogenated silicon thin film and the intrinsic relationship with the microstructure *

Wang Quan^{1)†} Ding Jian-Ning¹⁾ He Yu-Liang¹⁾²⁾ Xue Wei³⁾ Fan Zhen¹⁾

1) *Center of Micro and Nano Science and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China*

2) *Department of Physics, Nanjing University, Nanjing 210093, China*

3) *School of Industrial Engineering, Wenzhou University, Wenzhou 323035, China*

(Received 18 December 2006; revised manuscript received 8 February 2007)

Abstract

Hydrogenated silicon films were deposited on glass and single crystalline silicon substrate in a capacitively coupled radio-frequency plasma enhanced vapor deposition system aided by direct current bias excitation. Hydrogenated silicon films are used to realize a silicon material that consists of a two-phase mixture of amorphous and ordered silicon. Micro-Raman scattering is employed to investigate the thin film microstructure. The crystalline volume fraction (X_c) is obtained from the Raman spectra. Mesoscopic mechanical characterization of the thin film is done by nanoindentation based on the conventional depth-sensing indentation method. An analytical relation between X_c and elastic modulus is established. It is shown that the elastic modulus of the film on glass substrate is lower than that on silicon with the same X_c . The grain size of phosphorus doped thin film is smaller than that of the intrinsic one and more ordered. The X_c is usually above 40%. The film with diborane doping is on the opposite, the X_c of which is usually below 40%. For P-doped, intrinsic and B-doped films, when the X_c values are 45%, 30% and 15%, respectively, the values of elastic modulus are minimal.

Keywords : hydrogenated silicon film, Raman spectra, elastic modulus, crystalline volume fraction

PACC : 6220, 3220F, 0630M, 7360F

* Project supported by the "Six Top Talents and High Peak" Program of Jiangsu Province, China (Grant No. 06-D-022), the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2004CB619305), the Science and Technology Development Program of Zhejiang Province, China (Grant No. 2005C31048) and the Doctoral Innovation Foundation of Jiangsu University, China.

† E-mail : wangquan100@126.com