

对纳米硅薄膜高电导机制的探讨^{*}

何宇亮^{a,b,c} 韦亚一^b 余明斌^{c,d} 郑国珍^b 刘明^{c,d} 张蔷^e

(a) 南京大学固体微结构物理实验室, 210093;

b 上海技术物理所红外物理国家实验室, 200083;

c 北京航空航天大学非晶态物理与光信息研究室, 100083;

d 西安理工大学物理系, 710048;

e 北京联合大学电子自动化工程学院, 100101)

19960304 收稿, 19961110 收改稿

摘要 使用超高真空 PECVD 薄膜沉积系统制备的纳米硅薄膜(nc-Si:H)具有高电导特性。为了探讨其导电机制,先使用 K. Yoshida 早期提出的两相无序结构有效电导模型分别对晶粒电导和界面电导进行了理论计算。指出,nc-Si:H 膜中高电导主要来自于细微晶粒的传导,界面可视之为非导体。另一方面,实验证实 nc-Si:H 膜的电导率随平均晶粒尺寸减小而增大,具有明显的小尺寸效应。

文中首次提出,nc-Si:H 膜的微晶粒具有异质结量子点(HQD)特性,并按此模型对 nc-Si:H 膜的电导率实验曲线进行了讨论。理论与实验结果符合得很好。又得出,硅薄膜结构在其晶态体积百分比 $X_c=0.30$ 和 0.70 处呈现出两个明显的相变点。

关键词: 纳米硅 导电机制 量子点 小尺寸效应

中图分类号: TN304.055

An Exploratory Study of the Conduction Mechanism of Hydrogenated Nano-crystalline Silicon Films

He Yuliang^{a,b,c} Wei Yayi^b Yu Minbin^{c,d} Zheng Guozhen^b

Liu Ming^{c,d} Zhang Qiang^e

(a) *The National Lab. of Solid State Phys. of Nanjing Univ.*, 210093, CHN;

b *The National Lab. for Infrared Phys., Shanghai Inst. of Tech. Phys., C A S, Shanghai*, 200083, CHN;

c *The Amorphous Phys. Res. Lab., Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing*, 100083, CHN;

d *Dept. of Phys., Xi'an Univ. of Tech.*, 710048, CHN;

e *Beijing Union Univ., Electron Automation Eng. College*, 100101, CHN)

* 本课题为国家自然科学基金资助项目

Abstract: Hydrogenated nano-crystalline silicon (nc-Si:H) films are prepared by using ultra-high vacuum plasma enhanced chemical vapor deposition system. The experimental results show that conductivity of the nc-Si:H films increases with decrease of the mean grain-size of the films. There exists evident small size effect on the conduction process. Based on the experimental data, the effective-medium theory is used to calculate the partial conductivities σ_c of crystallites and σ_i of interface. From the calculation, it is found that there exist two structure phase change points in the materials. The results suggest that the high conductivity of nc-Si:H films results mainly from the crystallites and the interface region may serve as insulator layers. Thus, it is considered that the crystallites in the nc-Si:H films act as quantum dots. A heteroquantum dots tunneling model is presented in this paper to discuss the transport process of the nc-Si:H films. The calculated results agree very well with the experimental conductivity data of the nc-Si:H films.

Key Words: Nano-crystalline Silicon Conductivity Mechanism Quantum Dot Small Size Effect

1 引言

使用 PECVD 法制备的纳米硅薄膜(nc-Si:H)是一种新型人工功能材料。它是由大量的具有纳米量级的细微晶粒构成,其晶态所占体积百分比 $X_c \approx 50\%$,各相邻晶粒之间构成晶间界面。纳米硅薄膜中含有高浓度的界面($\sim 10^{19}/\text{cm}^2$),界面厚度 $l \leq 1 \text{ nm}$ 。这些大量的界面决定性地影响着 nc-Si:H 膜的结构和物性,是值得进行深入探讨的。近几年,笔者对 nc-Si:H 膜的制备工艺^[1]、微观结构^[2]、光吸收特性^[3]进行了较为深入的研究。最近,又分别研制出具有可见光致发光(PL)^[4]及电致发光(EL)的样品^[5],把 nc-Si:H 膜往实用方向发展迈出了可喜的一步。然而,这一系列新颖的物性都与它的传输机制相联系。纳米硅薄膜的高电导特性,其室温电导率 σ 高达 $10^{-3} - 10^{-1} \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$,远高于 C-Si 的本征电导($10^{-5} - 10^{-4} \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$),一直是一个有待解决的重要问题^[6]。本研究首先使用 K. Yoshida 于 1986 年提出的两相无序结构有效电导模型^[7]对纳米硅膜的晶粒及晶界电导分别进行了理论计算,再同 nc-Si:H 膜电导变化的实验结果进行对比。指出纳米硅薄膜的高电导性主要来自于晶粒传导,大量界面可近似视为非导体。电导率的实验曲线给出,电导率的大小与晶态体积百分比 X_c 值密切相关,nc-Si:H 膜中平均晶粒尺寸越小越呈现出高电导特性,具有明显的小尺寸效应。使用 Raman 光散射技术,HREM 及 STM 等手段对纳米硅薄膜显微结构进行了微观分析。使用 PECVD 法制备的 nc-Si:H 薄膜平均晶粒尺寸为 3—6 nm,晶粒所占体积百分比为 $X_c = (53 \pm 5)\%$,与国际上对纳米固体材料的共同认识相符。显微结构照片明显地显示出细微晶粒的杂乱分布以及晶粒之间的界面结构,如图 1 所示。图 2 为在室温及空气环境中使用中科院化学所生产的扫描隧道显微镜(STM)拍摄到的一张典型的 nc-Si:H 膜原子分布图象,可清晰地看到晶粒及界面区硅原子的分布情况。



图 1 一块典型 nc-Si:H 薄膜的 HREM 照片

Fig. 1 A typical HREM picture of nc-Si:H film

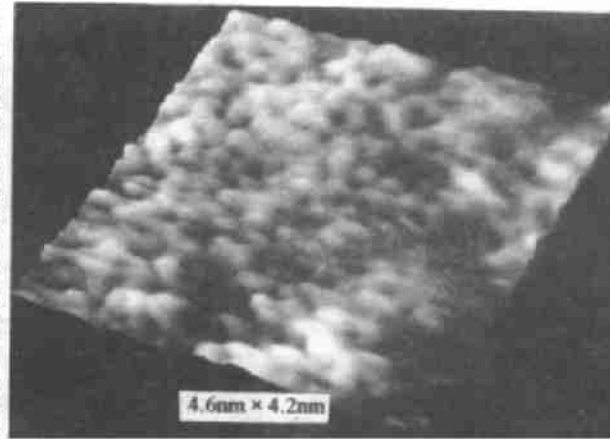


图 2 一块 nc-Si:H 膜 STM 原子分布 (4.6 nm × 4.2 nm)

Fig. 2 An atomic distribution picture of nc-Si:H film by STM

2 两相结构的理论模型

由於 nc-Si:H 薄膜是由晶粒和晶界两大部分组成,认为其电导也必然是由晶粒电导 σ_c 和界面电导 σ_i 组成。既然 nc-Si:H 膜中大量的晶粒及界面是随机分布的,根据 K. Yoshida 的两相随机分布有效电导理论^[7],按纳米硅薄膜的实际情况,取结构参数 $\Phi=0, F_c=F_D=0$, 并设 $f_c=X_c, f_s=1-X_c=X_i, \gamma_A=\gamma_c, \gamma_b=\gamma_i$ 以及 $F_A=F_c, F_B=F_i$ 。则将 Yoshida 论文中的(19)、(28)及(30)式改写为:

$$F_c = \frac{\gamma_i - 1 + X_c}{\gamma_c + \gamma_i - 1}, \quad F_i = \frac{\gamma_c - X_c}{\gamma_c + \gamma_i - 1} \quad (1)$$

$$\gamma_c = X_c + (3 - \alpha_1 - 2\alpha_2) \left[\frac{X_c - \alpha_1}{\alpha_2 - \alpha_1} \right]^2 + (\alpha_1 + \alpha_2 - 2) \left[\frac{X_c - \alpha_1}{\alpha_2 - \alpha_1} \right]^3 \quad (2)$$

$$\gamma_i = 1 - X_c + (2\alpha_1 + 2\alpha_2) \left[\frac{X_c - \alpha_2}{\alpha_2 - \alpha_1} \right]^2 + (\alpha_1 + \alpha_2) \left[\frac{X_c - \alpha_2}{\alpha_2 - \alpha_1} \right]^3$$

$$F_c \frac{\sigma_c + 2\sigma_i + \gamma_c(\sigma_i - \sigma_c)}{(2\sigma + \sigma_i)(\sigma_c + 2\sigma_i) + 2\gamma_c(\sigma_i - \sigma)(\sigma_c - \sigma)} + F_i \frac{\sigma_i + 2\sigma_c + \gamma_i(\sigma_c - \sigma_i)}{(2\sigma + \sigma_c)(\sigma_i + 2\sigma_c) + 2\gamma_i(\sigma_c - \sigma)(\sigma_i - \sigma_c)} = \frac{1}{3\sigma} \quad (3)$$

上式中 F_c, F_i, γ_c 及 γ_i 分别为晶粒(C相)及界面(i相)的结构参数。 α_1 及 α_2 为因子,在计算中可加以选定。 X_c 及 σ 为 nc-Si:H 样品晶态体积百分比及电导率的实验值。

在上述基础上,补充假设 nc-Si:H 膜的总电导率 σ 为其晶粒部分传导 σ_c 及界面部分传

导 σ_i 联合组成,有:

$$\sigma = \sigma_c + \sigma_i \quad (4)$$

将(4)式代入(3)式分别得到:

$$F_c \frac{(2 + \gamma_c)\sigma - (1 + 2\gamma_c)\sigma_c}{(3\sigma - \sigma_c)(2\sigma - \sigma_c) + 2\gamma_c\sigma_c(2\sigma - \sigma_c)} + F_i \frac{(1 - \gamma_i)\sigma + (1 + 2\gamma_i)\sigma_c}{(2\sigma + \sigma_c)(\sigma + \sigma_c) - 2\gamma_i(\sigma - \sigma_c)(\sigma - 2\sigma_c)} = \frac{1}{3\sigma} \quad (5)$$

$$F_c \frac{(1 - \gamma_c)\sigma + (1 + 2\gamma_c)\sigma_i}{(2\sigma + \sigma_i)(\sigma + \sigma_i) - 2\gamma_c(\sigma - \sigma_i)(\sigma - 2\sigma_i)} + F_i \frac{(2 + \gamma_i)\sigma - (1 + 2\gamma_i)\sigma_i}{(3\sigma - \sigma_i)(2\sigma - \sigma_i) + 2\gamma_i\sigma_i(2\sigma - \sigma_i)} = \frac{1}{3\sigma} \quad (6)$$

把由(1)、(2)式计算出的有关参数代入(5)和(6)式即可分别计算出纳米硅薄膜的晶粒电导 σ_c 及界面电导 σ_i 值。当取 $\alpha_1=0.30$ 及 $\alpha_2=0.70$ 时,对具有不同 X_c 值的纳米硅计算出的有关参数及 σ_c 值列入表 1。

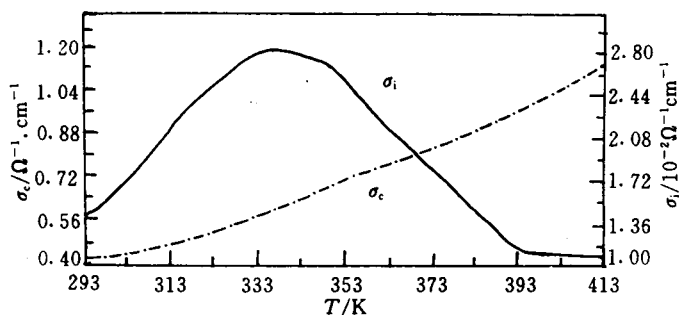
表 1 对硅薄膜各有关参数计算结果

Tab. 1 The calculated results of related parameters of a series of silicon films

X_c (exp. value)	$\sigma/\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ (exp. value)	γ_c	γ_i	F_c	F_i	$\sigma_c/\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ (cal. value)	σ_c/σ
0.45	1.75×10^{-2}	0.610	0.868	0.665	0.335	2.4×10^{-2}	1.37
0.47	3.70×10^{-2}	0.662	0.807	0.591	0.409	4.65×10^{-2}	1.26
0.50	5.10×10^{-2}	0.700	0.700	0.500	0.500	5.15×10^{-2}	1.01
0.55	5.30×10^{-2}	0.814	0.580	0.330	0.670	5.17×10^{-2}	0.98
0.58	3.87×10^{-1}	0.874	0.510	0.234	0.766	4.05×10^{-1}	1.03
0.66	1.50×10^0	0.984	0.352	0.036	0.964	1.41×10^0	0.94

表 1 示出,对 $X_c=(53 \pm 5)\%$ 的纳米硅样品所计算的各个 σ_c 值在实验误差范围内与样品的总电导率 σ (实验值)一致,这直接说明,nc-Si:H 膜的电导基本上是由晶粒电导 σ_c 构成的。对 $X_c=0.45$ 及 0.47 两块样品,已偏离纳米硅范畴,从而使其理论计算值的偏差大一些。除 $X_c=0.66$ 的样品($\sigma_c/\sigma=0.94$)显示出一些界面传导的特性外,其它 X_c 值的纳米硅薄膜中界面传导的成分是可以忽略的。

另外,还针对一块 $X_c=58\%$, $d=3.7$ nm 的 nc-Si:H 膜使用上述方法分别计算了其 σ_c 及 σ_i 分量随温度的变化规律。所得结果分别列入表 2 及图 3 中。计算结果给出,在所计算的温度范围内(293—413 K), σ_i/σ 的比值仅占 1%—4.4%,即在整个电导率中界面电导 σ_i 所占比重是微弱可忽略的。另一方面,由图 3 示出的 σ_c 、 σ_i 温度曲线显示出它们随温度的变化规律完全不同, σ_c-T 的变化是单调增大的,类似于总电导率 σ 的温度相依性,而 σ_i-T 的变化在 $T \approx 333$ K 处呈现出一峰值,向两端 σ_i 随温度升高或降低皆是下降的。即便峰值处的 σ_i 值在总电导的比例中也仅占不到 5%。所以可认为在 nc-Si:H 膜中,晶粒部分传导 σ_c 与界面部分传导 σ_i 是两个相互独立的传导机制,同时也证实了(4)式的正确性。

图3 σ_c, σ_i 的温度曲线Fig. 3 The temperature dependent curves of σ_c and σ_i 表2 对一块 $X_c=0.58$ 样品的计算结果Tab. 2 The calculated results of a $X_c=0.58$ nc-Si : H film

T/K	$\sigma_c/\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$	$\sigma_i/\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$	$\sigma_i:\sigma/\%$
413	1.101	1.13×10^{-2}	1.0
393	0.980	1.15×10^{-2}	1.2
363	0.776	2.16×10^{-2}	2.7
353	0.759	2.57×10^{-2}	3.3
333	0.587	2.81×10^{-2}	4.4
313	0.479	2.16×10^{-2}	4.3
303	0.443	1.64×10^{-2}	3.6
293	0.405	1.40×10^{-2}	3.3

3 nc-Si : H 膜电导率的实验结果

表3列出一组 nc-Si : H 膜的电导率实验数值及相应的结构参数,这一组样品的 $\log \rho-1/T$ 实验曲线绘入图4。图4示出,这一组 nc-Si : H 样品中的电阻率 Arrhenius 曲线随 X_c 值的增大而下降。在早期的论文中已找出其电导率随 X_c 值变化的经验规律^[6]。值得注意的是,图4中还示出对一组 X_c 值大体相同的样品(编号3、4、5),其 Arrhenius 曲线随平均晶粒尺寸的减小而降低,这是从实验上首次观测到在 nc-Si : H 膜的电导机制中小尺寸效应的存在。

结合前节对晶粒电导的计算,可以认识到在 nc-Si : H 薄膜网络中的微晶粒(几个 nm 大小)是被非导电的界面隔开的,因而可把这些微晶粒视之为量子点,并在其导电机制中显示出量子点的小尺寸作用,这是本论文的一个主要结论。

表3 一组 nc-Si:H 膜的实验值

Tab. 3 The experimental values of related parameters of a series of nc-Si:H films

sample number	X_c	particle diameter d/nm	films/ μm	$\sigma_n/\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$
1	0.46	4.0	2.3	6.4×10^{-3}
2	0.47	3.8	1.6	3.7×10^{-2}
3	0.55	5.2	1.1	4.7×10^{-2}
4	0.55	4.1	2.1	5.7×10^{-2}
5	0.55	3.5	1.8	1.8×10^{-1}

4 讨论

4.1 结构因子 α_1 及 α_2 的物理意义

在前节的理论计算中用到了结构因子 α_1 及 α_2 , 它们唯一地由薄膜结构确定。 α_1 及 α_2 一旦选定后, 其它描述结构的辅助参数 F_c, F_i 及 γ_c, γ_i 可从公式(1)、(2)中计算出来。大量的计算结果指出, 只有当选定 $\alpha_1=0.30$ 及 $\alpha_2=0.70$ 时计算结果与实验值吻合。

表1的数据指出, 当 X_c 值 < 0.3 时有 $\gamma_i \rightarrow 1$, 而当 X_c 值 > 0.7 时 $\gamma_c \rightarrow 1$ 的趋势。其物理意义是: $X_c < 0.3$, 整个材料的性质将取决于单一的非晶相(i相); 而当 $X_c > 0.7$, 整个材料又将是单一晶态组元构成(C相), 只有在 $0.3 < X_c < 0.7$ 范围内才呈现出晶态与非晶态的混合相(二相结构), 包括微晶硅($\mu\text{c-Si:H}$)及纳米硅(nc-Si:H)两大范畴。因此, 结构因子 $\alpha_1=0.3$ 及 $\alpha_2=0.7$ 预示着在硅薄膜材料的结构中存在着两个相变点。

图5为一系列硅薄膜样品的室温电导率 σ_n (实验值) 随晶态体积百分比 X_c 值的变化曲线。图中曲线示出, $X_c=0.35$ 为电导率曲线明显上升的一个起点。显然, 电导率的上升是由于在硅薄膜网络中明显的出现了一定的晶态成份(小晶粒)所致。另一方面, 当 $X_c \rightarrow 0.7$ 时电导率 σ_n 陡升, 有趋向于无穷大的趋势, 这是另一个相变点。越过这一个相变点, 硅薄膜将转化成晶粒的多晶硅以至单晶硅(单一的C相)。图6为对一块 $X_c=0.66$ (已很接近0.7值) 硅膜样品的 Raman 光散射谱。令人感兴趣的是, 在该谱图中已不具有表征非晶硅成份的谱峰。另一方面, 表征微晶粒的谱峰呈现出两个, 509 cm^{-1} (表征平均晶粒大小—3 nm) 及 521 cm^{-1} (接近于 C-Si 的晶态峰)。说明, 在该样品中细微晶粒已呈现出向特大晶粒的转变, 证实了 $X_c=0.7$ 这一相变点的存在。关于 $X_c=0.3$ 的相变点, 在早期工作中亦已证实^[8]。图5电导率曲线的右端虚线是一假想模拟曲线。已知对 C-Si ($X_c=100\%$) 其室温电导率 $\sigma_n=10^{-5}-10^{-4}\ \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$

4.2 nc-Si:H 薄膜的传导机制

按照前面的理论分析和实验结果, 对 nc-Si:H 膜的传导机制提出下面的设想。首先, 认为纳米硅中的晶粒是镶嵌在非晶硅无序网络结构(界面)中的, 可定性的把它视为一种 C-Si/a-Si

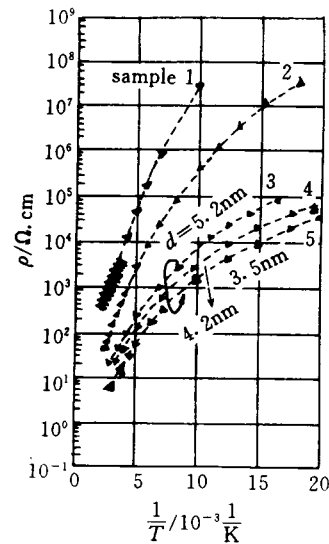


图4 一组纳米硅薄膜的 Arrhenius 曲线

Fig. 4 A series Arrhenius curves of nc-Si:H films

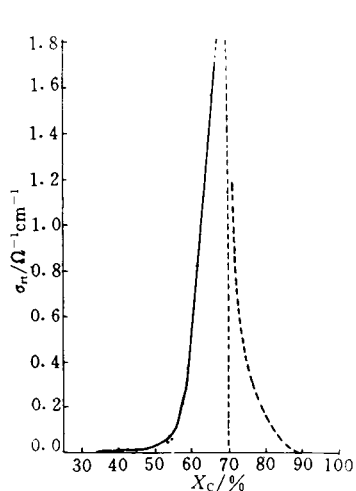


图 5 室温电导 σ_r 随 X_c 的变化

Fig. 5 The room temperature conductivity σ_r varied with X_c

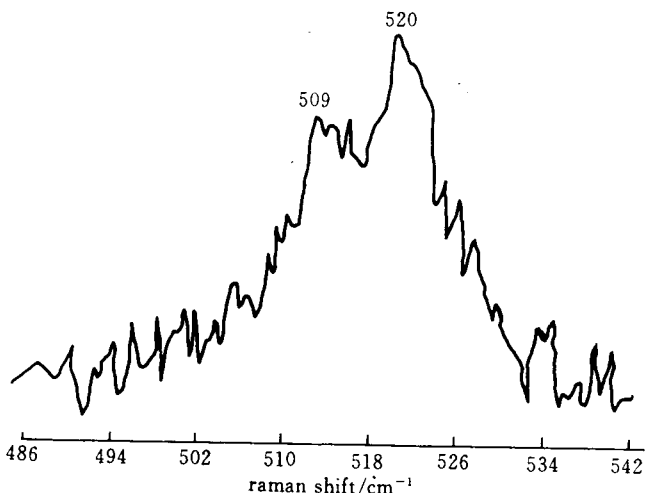


图 6 一块 $X_c=0.66$ 样品的 Raman 谱

Fig. 6 A Raman spectrum of nc-Si:H film with $X_c=0.66$

异质结构(见图 7)。其次,在 nc-Si:H 颗粒的网络中电子是以热辅助隧穿方式越过晶间势垒的。这两方面的物理问题,近几年在文献中皆有报导^[9,10],它也是本文用来讨论纳米硅传导问题的基础。并将其简易能带图绘于图 8。由于纳米硅膜中量子点(微晶粒)的小尺寸效应,图 8 中 C-Si(晶粒)和 a-Si(界面)部份的能隙宽度 E_g 值将不同於体单晶硅的能隙宽度(1.10 eV),及 a-Si:H 膜的能隙宽度(1.70 eV)。在此取实验测得的光能隙宽度 E_g^{opt} 为其能隙宽度^[6],并在图 8 中标出。

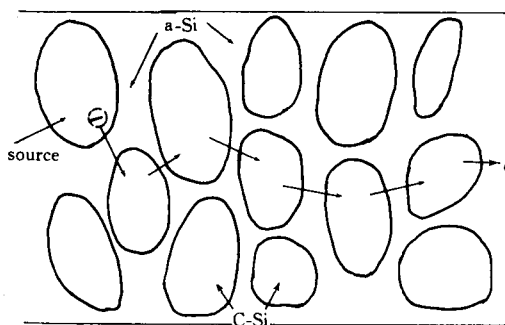


图 7 纳米硅薄膜中量子点(微晶粒)分布

Fig. 7 A schematic diagram of quantum dots (micro-grains) distribution in the network of nc-Si:H

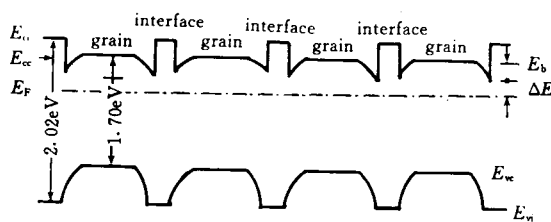


图 8 纳米硅膜能带简图

Fig. 8 A schematic energy band diagram of nc-Si:H

为了与通常的量子点结构(QD)相区别,下面把纳米硅薄膜中的量子点阵列(无序的)称为

异质结量子点(HQD)^[11]。在HQD模型中纳米晶粒之间的隧穿由于还需要一个热激发过程,可以叫做热辅助隧穿过程。有关这一问题另有论文详述^[12]。

5 结 论

使用PECVD薄膜淀积技术制备的nc-Si:H膜是由晶态体积百分比 $X_c \approx 53\%$ 的3—6 nm 细微晶粒及大量的晶间界面构成。使用两相随机分布有效电导理论计算出nc-Si:H膜的高电导特性主要来自於晶粒传导,大量的界面区域可视为非导体,从而使nc-Si:H膜中的细微晶粒形成无规分布的量子点阵列(见图7)。对nc-Si:H膜电导率实验曲线的研究指出,它随 X_c 值增大呈指数式上升规律,且随晶粒尺寸减小而增大。从而从理论及实验上确认,nc-Si:H薄膜具有量子点传输特征。有关这方面研究仍在进行中^[12]。

由两相随机分布有效电导理论对纳米硅薄膜结构的分析指出,在硅薄膜的结构中存在两个相变点。当晶态体积百分比(C相) $X_c < 30\%$ 时属于单相的无序结构范畴,而当 $X_c > 70\%$ 又是属于单一的晶态范畴(多晶及单晶体),只有在 $0.30 \leq X_c \leq 0.70$ 范围才是晶态(微晶粒)及非晶态(无序、界面)共同存在的区域,在这一区域内包括微晶硅($0.30 \leq X_c \leq 0.45$)及纳米硅($0.47 \leq X_c \leq 0.58$)两大类。当 $X_c = 0.70$ 时,由Raman光散射谱显示出薄膜结构由细微晶粒向特大晶粒转变的特征,这一结果最近又被程开甲和程漱玉的工作证实^[13]。

为了从实验上更进一步证实纳米硅薄膜中细微晶粒的量子点功能,业已试制成一种简单的隧道二极管结构。它是在n型C-Si衬底上热氧化生长一层20 nm厚的SiO₂层,在SiO₂层上光刻成一系列具有30—40 μm 宽度的方孔阵列,然后在小方孔内按生长nc-Si:H膜的工艺条件沉积一层约20 nm厚的nc-Si:H膜,将小方孔外面的nc-Si:H膜腐蚀掉,再蒸上铝电极即成^[14]。

图9及10示出,在液氮温区(77 K),纳米硅薄膜隧道二极管的 $I-V$ 及 $C-V$ 特性曲线中已

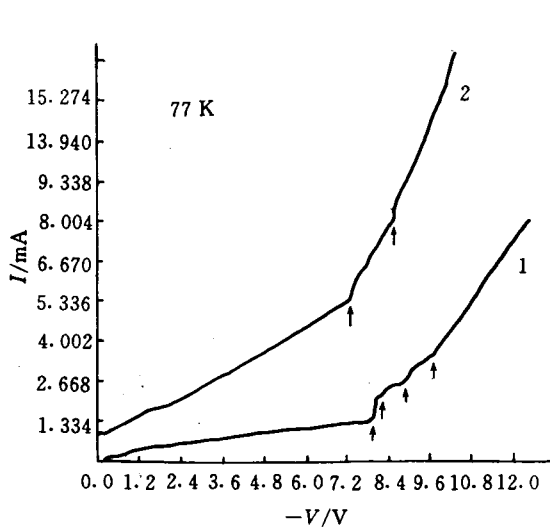


图9 77 K下纳米硅隧道二极管的 $I-V$ 曲线
Fig. 9 The $I-V$ curve of a nc-Si:H tunneling diode at 77 K

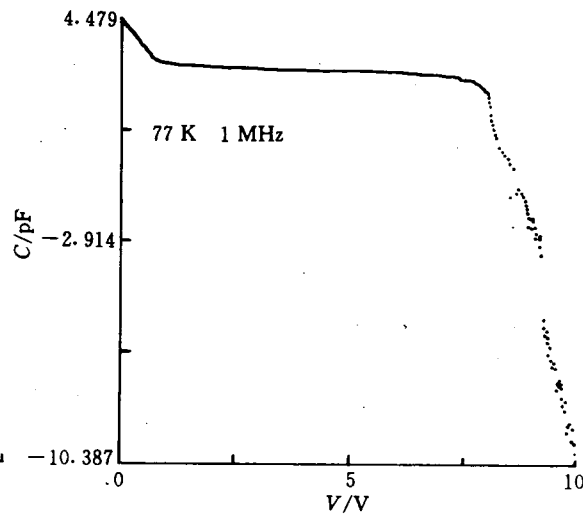


图10 77 K下纳米硅隧道二极管的 $C-V$ 曲线
Fig. 10 The $C-V$ curve of a nc-Si:H tunneling diode at 77 K

明显地呈现出量子振荡现象,出现了所谓量子台阶,这是对本文结论的又一实验证实。

感谢上海复旦大学物理系劳浦东教授所提供的令人信服的 Raman 光散射谱。还值得一提的是美国 Colorado 大学 J. I. Pankove 教授早在 1992 年就曾向作者暗示,纳米硅中有可能具有量子点输运的特征,无异,这对本研究是有启发性的。另外,还要感谢北京电真空物理国家实验室杨海澄和高聚宁提供的 STM 照片(图 2)。

参 考 文 献

- 1 何宇亮,刘湘娜,王志超等. 中国科学, 1992(9): 995
- 2 He Yuliang, Chu Yiming, Lin Hongyi, et al. *Chinese Phys Lett*, 1993; 10(9): 539
- 3 Liu Xiangna, He Yuliang, Wang F, et al. *Chinese Phys Lett*, 1993; 10(12): 752; *物理学报*, 1993; 42(12): 1 979
- 4 Liu Xiangna, Wu Xiaowei, Bo Ximao, et al. *Appl Phys Lett*, 1994; 64(2): 220
- 5 何宇亮,余明斌,万明芳等. *自然科学进展*, 1995; 5(3): 359
- 6 He Yuliang, Yin Chengzhong, Cheng Guangzu, et al. *J Appl Phys*, 1994; 75(2): 797
- 7 Yoshida Katsukumi. *Phil Mag*, 1986; B53(1): 55
- 8 何宇亮,周衡南,刘湘娜. *物理学报*, 1990; 39(11): 1 796
- 9 Ye Q, Tsu R, Nicollan. *Phys Rev*, 1991; B44: 1 806
- 10 Evangrlisti F. *J Non-cryst Solids*, 1985; 78 & 79: 969
- 11 Hu G Y, O'Connell F, He Y L, et al. *J Appl Phys*, 1995; 78(6): 3 945
- 12 何宇亮,胡根友. *物理学报*, 1997(8)待发表
- 13 程开甲,程漱玉. *自然科学进展*, 1996; 6(6): 693
- 14 何宇亮,余明斌. *自然科学进展*, 1996; 6(6): 700



何宇亮(He Yuliang) 现年 62 岁,南京大学物理系教授,北京航空航天大学非晶态物理与光信息研究室客座教授,系中国物理学会非晶态物理专业委员会委员,中国电子学会高级会员,自 90 年代以来从事纳米硅半导体研究,已发表学术论文百余篇。著有“非晶态半导体物理学”一册(1989 年高教出版社出版),获国家专利一项(专利号为 ZL92 1 14905.0)。



余明斌(Yu Minbin) 男,1959 年 12 月生,1982 年毕业于陕西机械学院,获学士学位,1989、1995 年毕业于西安交通大学,获硕士、博士学位。现为西安理工大学副教授,主要从事半导体材料和器件研究。



郑国珍(Zheng Guozhen) 女,研究员,在上海技术物理研究所红外物理国家实验室从事半导体材料、器件及各种功能材料的输运研究。