

纳米硅薄膜的最新进展及其在量子功能器件中的应用前景

Progress in the Thin Film of nc-Si:H and Its Application in Quantum Functional Devices

何宇亮

(南京大学物理系及固体微结构物理国家重点实验室、北京航空航天大学理学院材料物理与化学研究中心,教授 北京 100083)

一、引言

正当进入 21 世纪之际,微电子工业面临一场新的技术革命。随着电路集成度的不断提高,必然要涉及到纳米量级的器件结构,这促使人们去思考一些全新的物理问题。早在 80 年代初,科学家们先后提出了具有纳米(nm)量级的量子线和量子点新概念。在这些微空间里电子的性质全部量子化,人们可利用这种量子化的全新特性设计出一系列具有更快逻辑功能的新型半导体量子功能器件。这些将是发展纳米电子学的基础。

硅是重要的半导体材料,过去几十年里它在微电子学的发展中立下了汗马功劳。随着近十多年来纳米科技的发展^[1,2],在硅系半导体材料中又出现了一个新的品种——纳米硅(nc-Si:H)人工功能薄膜。它具有一系列既不同于单晶硅(c-Si)也不同于非晶硅(a-Si:H)和微晶硅(μ c-Si:H)的鲜为人知的物性^[3]。我们对纳米硅薄膜的研究始于 1990 年,在国内是最早的,在国际上也是较为先进的,曾于 1993 年获江苏省科技进步三等奖,1997 年获航空工业总公司科技进步二等奖,现已正式获得国家专利。

二、纳米硅薄膜的量子特征

纳米硅薄膜最令人瞩目的特征是它的一系列低维物性。我们已从大量的实验和理论研究中得出,纳米硅膜中的极细微晶粒(仅几个 nm 大小)具有量子点特性^[4]。由于它是在使用 PECVD 薄膜沉淀过程中通过控制工艺条件自然成核生成的,故称它为自然量子点(NQD)。它要比目前在半导体中使用平面工艺技术在 c-Si 和 c-GAAs 晶片中人为刻

制出的量子点(几十 nm 大小,称之为人工量子点 AQD)小得多。所以,在纳米硅薄膜中的量子点(微晶粒)中呈现出量子化效应的温度范围要比 AQD 高得多。例如,我们使用薄层(~ 20 nm)nc-Si:H 膜研制成的隧道二极管,在其液氮温区(< 100 K)的 $I-V$ 、 $\sigma-V$ 及 $C-V$ 特性曲线中就能观测到共振隧穿及量子振荡现象^[5]。这要比使用 AQD 研制成的量子功能器件所呈现的温度(< 10 K)高得多。这一特性使它显示出应用前景。我们进一步的理论分析证明,如能把纳米硅膜中的微晶粒的大小进一步降低到 $d \leq 3$ nm,这种量子功能作用将会在室温范围呈现出来^[6],也就是说纳米硅膜能成为研制在室温范围工作的量子功能器件的好材料,这将使它在纳米电子学发展中发挥重要作用。目前我们已采用在 nc-Si:H 膜中适量掺杂(目前是磷)的办法达到了此目的。

纳米硅薄膜中微晶粒的量子点特征是我们近几年来一个重要的发现。这一发现推进了我们对纳米硅膜高电导输运机制的理论研究,并认识到:它是一种异质结量子隧穿模型(HQD)^[7],它的电输运已不再是通常半导体材料热激发式传导了,这是它具有一系列低维物性的理论依据,人们可以充分利用这一特性研制各种能在接近室温范围工作的量子功能器件。

正是由于在纳米硅薄膜中电子的传输是以量子隧穿为其基本过程,所以使它的电导率以及一些其它的物性与温度失去了强烈依赖关系。例如,在我们研制成的 nc-Si/c-Si 异质结构中,测得其 $I-V$ 特性在几百度范围内(10 K ~ 500 K)几乎无明显变化^[8],这一特征在现有的半导体器件中是罕见的。可以预计,使用纳米硅薄膜研制成的新型器件,其温度稳定性将会非常好。

三、纳米硅薄膜的可见发光

自 90 年代以来,硅材料可见发光的发现是半导体界一个大事,深受国内外瞩目。然而,对硅材料发光的研究大都偏向于多孔硅以及在绝缘介质中(如 SiO_2 , Si_3N_4) 注入纳米硅颗粒(Ge, Si)来实现^[9,10]。我们发现:使用 PECVD 薄膜沉积技术制备的 nc-Si:H 膜,当其微晶粒 $d \leq 4\text{nm}$ 且晶态体积百分比 $X_c \approx 30\%$ 左右时,能在室温下观测到稳定的光致发光(PL)及电致发光(EL)谱^[11]。发光峰位及光强强烈地依赖于晶粒大小,即与膜的微结构密切相关。我们认为发光来自于微晶粒的量子化作用。

由于纳米硅薄膜是使用 PECVD 工艺制备的,故它更有利于与硅集成工艺相容,形成纳米硅光、电一体化的光电集成电路,这一点的意义是重大的。

四、极好的压力敏感效应

当前大部分压力敏感元件(传感器)是使用 C-Si 和多晶硅(pc-Si)材料制成的。这是由于在外力作用下能引起硅晶格常数的变化而引起电阻的变化(即压阻效应)。前几年,我们测量了 $\mu\text{c-Si:H}$ 及 nc-Si:H 膜的压力灵敏系数 K 值的变化,发现当 $X_c \approx 52\%$ 时 K 有极大值,此时 $K \approx 130$,这个值要比微晶硅和多晶硅高 5~6 倍^[12]。这说明,纳米硅薄膜具有极好的压力敏感效应,它将会成为理想的微传感器材料,在未来的 MEMS 系统中发挥作用。另一方面,利用前述的量子振荡现象,若施加外力(如应力、电磁辐射等)即能造成隧穿电流的极灵敏变化。这就是量子隧道传感器的理论依据,它在国外也仅是提出的一种新思路;而利用我们研制的纳米硅隧道二极管则有可能实现这一新思路。它的灵敏性将是目前所有传感器均无法相比的。

五、相关的理论研究

到目前为止,虽然我们已经对纳米硅的电输运过程、量子隧穿效应以及可见发光等方面进行了一定的理论研究并已获得一些成果^[13],然而存在的问题仍是大量的,有待于去探索。目前已知,在纳米固体材料中,除占体积百分比 $X_c \approx 50\%$ 的由极细微晶粒组成的晶态部分外,尚有另一半是由大量的,其厚度约为 2~4 个原子层的界面组成的。如此大量的界面(其密度高达 10^{19} 个/ cm^2)必然会对纳米材料造成重大的影响。然而,有关界面的详细结构和性质还是不清楚的,值得进行深入的理论研究,主要有如下几点:

1. 纳米硅膜的电磁理论。目前除对其电导机制已有一些认识外,对磁场作用下的物性尚是空白,如,在人工量子阵列中呈现出来的磁量子化效应在纳米硅中是否也具有^[14],纳米硅的磁阻率有多大^[15],等等。

2. 能带结构与异质结特性。对此国外已有少许理论计算,得知纳米细微晶粒的能隙宽度 E_g 与晶粒尺寸密切相关;但对纳米硅的具体理论计算尚缺少。

3. 微晶粒的细微结构及缺陷(位错、层错、位错环等)的形成。即,多大的微晶粒中开始出现缺陷,各种缺陷对其物性造成哪些影响。

4. 可见发光机理的研究,即如何提高发光强度以达到实用的目的。

5. 界面的弛豫特性及其压阻效应的来源。

综上所述,纳米硅薄膜是近十多年发展出来的一种新型人工功能半导体薄膜,是硅系列中的一个新品种。我们通过研究已发现它具有一系列新颖的低维物性,有可能成为研制量子功能器件的有用材料;对它的理论研究将对探讨低维体系的特征具有不可估量的价值。这一切应该引起人们的重视。

参考文献

- [1] H. Gleiter, Prog. in Materials Science, 33 223, 1989
- [2] R. W. Siegel, Scientific American, Dec. 42, 1996
- [3] 何宇亮、刘湘娜等,中国科学 A 辑(9):955, 1992; Yuliang He Chengzhong Yin et al. J. Appl. Phys. 75 (2) 797, 1994
- [4] 何宇亮、韦亚一等,固体电子学研究与进展, 17 (2): 102, 1997; Yuliang He, Yayi Weet al. J. Appl. Phys. 82 (7): 3408, 1997
- [5] 何宇亮、余明斌等,自然科学进展, 6 (6): 700, 1996; 何宇亮、奚中和等,半导体杂志, 23 卷 (1): 1998
- [6] 彭英才、刘明等,半导体学报, 19 (8): 1998
- [7] G. Y. Hu, R. F. O'connel et al. J. Appl. Phys 78 (6): 3945, 1995; 何宇亮、余明斌等,物理学报, 46 (8): 1636, 1997
- [8] 刘明,北京航空航天大学博士论文, 1998
- [9] L. T. Canhan, Appl. Phys. Lett. 57 1046, 1990
- [10] Q. Zhang, S. C. Bayliss et al. Appl. Phys. Lett. 66: 1997, 1995; 何宇亮、余明斌等,自然科学进展, 5 (3): 369, 1995
- [11] 刘湘娜、佟嵩等,物理学报, 46: 1217, 1997
- [12] 何宇亮、林鸿益等,材料研究学报, 10 (1): 33, 1996; Yuliang He Hong Liu et al. Nano-structure Materials 7 769, 1996
- [13] Y. L. He, G. Y. Hu et al. Phys. Rev. B, 1998, 待发表
- [14] 周义昌、李华钟,物理学进展, 13 (3): 423, 1993
- [15] 都有为,物理学进展, 17 (2): 180, 1997

(责任编辑 王宏章)