

硅纳米晶的制备和电荷储存特性*

焦 正 李 珍 吴明红 吕森林 王德庆

(上海大学射线应用研究所, 上海 201800)

摘要: 在 Si/SiO₂/Si 衬底上通过真空热处理生长了硅纳米晶, 利用原子力显微镜对硅纳米晶注入电荷, 在静电力模式下研究了硅纳米晶的充放电特性. 实验结果表明, 硅纳米颗粒充电后电荷可以保存 10h 以上, 同时可以在几秒钟内快速放电. 电荷储存于纳米颗粒内部和表面, 不会向外扩散.

关键词: 纳米晶; 纳米器件; 电荷注入

PACC: 0779; 0710C

中图分类号: O447

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)05-0927-04

1 引言

硅纳米晶可以应用于多种基于半导体量子点的量子器件, 例如单电子存储器^[1-3], 量子点晶体管^[4-7]以及光电器件^[8-10]等, 近年来有很多研究者从事硅纳米晶制备及其特性的研究工作. 硅纳米晶的生长方法包括化学气相淀积 (CVD)^[11-15]和低能离子束溅射^[16,17]等, 可以得到直径为几纳米到几十纳米的纳米晶. 本文在 SOI 衬底上通过真空热处理生长硅纳米晶, 利用原子力显微镜 (AFM) 对硅纳米晶注入电荷, 在静电力模式下研究了硅纳米晶的电荷储存特性.

2 实验

本文采用的样品为 SOI 衬底, 尺寸为 10mm × 10mm. 其结构为最下层 700μm 厚度的单晶硅层, 中间为 400nm 厚度的二氧化硅层, 最上层为厚度 20nm 的单晶硅层. 单晶硅为 (100) 取向, p 型, 电阻率为 10⁻² Ω·cm.

真空热处理在真空室中进行, 真空度为 1.33 × 10⁻⁶ Pa. 样品硅片置于钽舟中, 在钽舟上通电对硅

片进行加热, 利用红外温度计测量其温度. 加热温度控制在 800 °C, 加热时间 60min. 硅纳米晶的表面形貌利用原子力显微镜进行观测.

利用原子力显微镜在静电力 (EFM) 模式下对硅纳米晶注入电荷并观测电荷的充放电特性. EFM 模式下, 原子力显微镜的探针保持在距离样品表面数十纳米的高度以 tapping mode 扫描, 由于样品表面与探针之间的电荷作用力 (吸引力或排斥力) 使探针的振动频率发生迁移. 通过记录频率迁移数据研究样品的电学特性.

本试验采用的是 Veeco 公司的 Nanoscope 型原子力显微镜, 探针为 Nanosensors 公司的 EFM-50 型硅探针表面 PtIr5 涂层, 谐振频率 60 ~ 100k Hz.

3 结果与讨论

图 1 是经过真空热处理得到的硅纳米晶的 AFM 图像. 纳米颗粒比较均匀, 有一定的尺寸分布, 90nm 和 120nm 颗粒为最大分布. 该样品直接用于后续的电荷储存特性研究.

图 2 是硅纳米颗粒注入电荷后的 EFM 图像. 图 2(a) 为硅纳米颗粒的形貌, 图 2(b) 为频率迁移.

* 上海市应用材料研究发展基金 (批准号: 0318) 和上海市启明星基金 (批准号: 03QB14017) 资助项目

焦 正 男, 副教授, 研究方向为纳米材料和纳米器件.

李 珍 女, 博士研究生, 研究方向为辐射化学和纳米材料.

吴明红 女, 教授, 研究方向为辐射技术在环境中的应用.

2004-07-01 收到, 2004-10-29 定稿

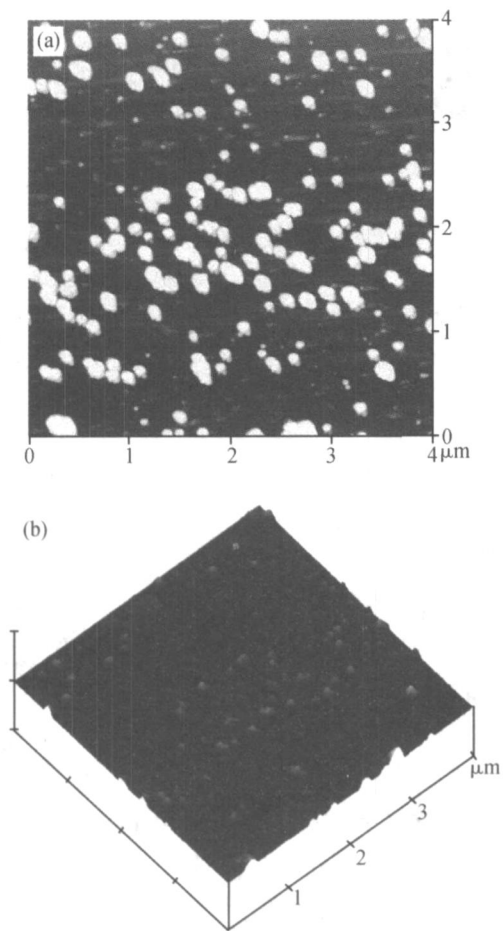


图 1 硅纳米晶的表面形貌 (a) AFM 图像;(b) 3D 图像
 Fig.1 Topography of silicon nanoparticles (a) AFM image;(b) Three dimensional image

电荷注入电压为 5V,即硅片接地,原子力探针加 5V 电压.时间为 1min.图 2(a)的测试电压为 -5V,图 2(b)的测试电压为 5V.在图 2(a)的条件下,硅量子点内的电荷对探针为吸引力,使探针的谐振频率增加,频率迁移为正,在图像中显现为较高的亮度.图 2(b)则相反,图像中显现为暗区.通过分析频率迁移可以研究电荷在硅纳米颗粒内的分布特性.

图 3 为硅纳米颗粒的充电曲线,注入电荷时将 AFM 探针接触硅纳米颗粒表面,在探针上施加电压并保持一段时间.图 3 中充电电压为 6V,充电过程在 10min 以内达到饱和.当移开 AFM 探针后,硅纳米颗粒内的电荷会保持一段时间,在我们的实验中可以保持 10h 以上.这一性质对于将硅纳米颗粒应用于量子点存储器很有利.

图 4 为充电时间和电荷分布半径的关系.结果表明电荷注入硅纳米颗粒后集中在硅纳米颗粒内部,并不向硅表面扩散.硅纳米颗粒的尺寸大约是

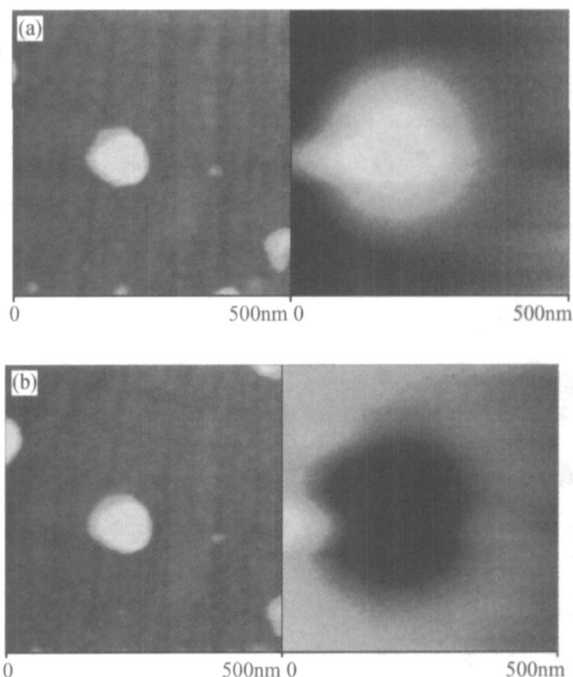


图 2 电荷注入后的硅纳米颗粒 EFM 图像 (a) $V_{inj} = 5V$ $V_{EFM} = -5V$;(b) $V_{inj} = 5V$ $V_{EFM} = 5V$
 Fig.2 EFM images of charged silicon nano dot (a) $V_{inj} = 5V$ $V_{EFM} = -5V$;(b) $V_{inj} = 5V$ $V_{EFM} = 5V$

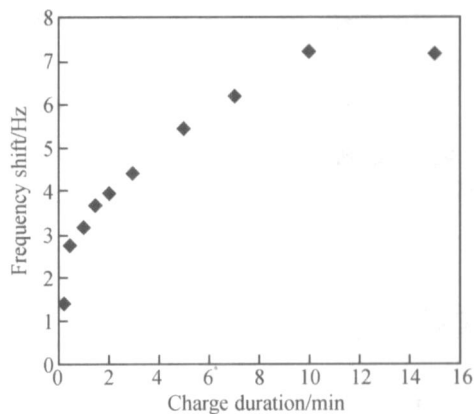


图 3 硅纳米颗粒的充电曲线
 Fig.3 Charge evolution of silicon nanoparticles

120nm.图 4 中在开始向纳米颗粒中注入电荷时电荷分布半径呈上升趋势,而当充电 5,6min 后电荷分布半径达到 200nm 左右的极值,然后电荷基本集中于这一区域内及纳米颗粒的内部和表面,不再向外扩散.从时间上也与图 3 中充电达到饱和状态的时间基本吻合.

图 5 为硅纳米颗粒的放电曲线,放电方式为将 AFM 探针接触硅纳米颗粒表面,但不施加电压,电荷通过探针释放.试验发现放电过程较快,在几秒之

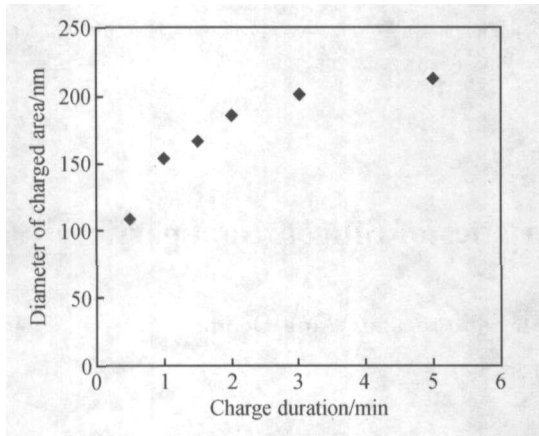


图 4 硅纳米颗粒中电荷分布半径和充电时间的关系

Fig. 4 Relations between charge duration and the charged area

内可以释放大部分的电荷. 这一点也有利于存储器的读写. 但是硅纳米颗粒中电荷不能完全释放, 仍然会保留一定量的电荷. 这些电荷在数十小时后才能完全释放.

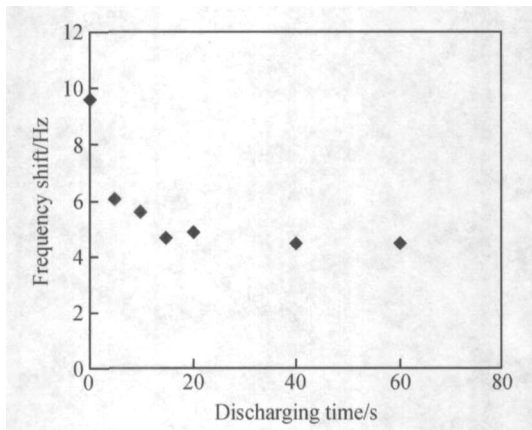


图 5 硅纳米颗粒放电过程

Fig. 5 Discharge evolution silicon nanoparticles

4 结论

本文在 Si/ SiO₂/ Si 衬底上通过真空热处理生长了硅纳米晶, 得到的纳米颗粒尺寸均匀, 粒径的最大分布在 90nm 和 120nm. 利用 AFM 在 EFM 模式下观测得到样品上纳米颗粒的电荷储存特性. 试验结果表明, 硅纳米颗粒充电后电荷可以保存 10h 以上, 同时可以在几秒内快速放电. 电荷储存于纳米颗粒内部和表面, 不会向外扩散.

参考文献

- [1] Yano K, Ishii T, Kobayashi T, et al. Room-temperature single-electron memory. *IEEE Trans Electron Devices*, 1994, 41: 1628
- [2] Molas G, de Salvo B, Mariolle D, et al. Single electron charging and discharging phenomena at room temperature in a silicon nanocrystal memory. *Solid-State Electron*, 2003, 47: 1645
- [3] Takahashi Y, Ono Y, Fujiwara A, et al. Development of silicon single-electron devices. *Physica E*, 2003, 19: 95
- [4] Emiroglu E G, Hasko D G, Williams A. Single-electron polarization of an isolated double quantum dot in silicon. *Microelectronic Engineering*, 2004, 73/ 74: 701
- [5] Ota T, Hatano T, Ono K, et al. Single electron spectroscopy in a single pair of weakly coupled self-assembled InAs quantum dots. *Physica E*, 2004, 22: 510
- [6] Nagase M, Horiguchi S, Shiraishi K, et al. Single-electron devices formed by thermal oxidation. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2003, 559: 19
- [7] Leburton J P, Nagaraja S, Matagne P, et al. Spintronics and exchange engineering in coupled quantum dots. *Microelectronics Journal*, 2003, 34: 485
- [8] Heitmann J, Schmidt M, Zacharias M, et al. Fabrication and photoluminescence properties of erbium doped size-controlled silicon nanocrystals. *Materials Science and Engineering B*, 2003, 105: 214
- [9] Larsson M, Elfving A, Holtz P O, et al. Photoluminescence study of Si/ Ge quantum dots. *Surf Sci*, 2003, 532/ 535: 832
- [10] Nishio K, Koga J, Yamaguchi T, et al. Light emission properties of amorphous silicon quantum dots. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2002, 312/ 314: 323
- [11] Mazen F, Baron T, Papon A M, et al. A two steps CVD process for the growth of silicon nano-crystals. *Appl Surf Sci*, 2003, 214: 359
- [12] Baron T, Martin F, Mur P, et al. Silicon quantum dot nucleation on Si₃N₄, SiO₂ and SiO_xN_y substrates for nanoelectronic devices. *J Cryst Growth*, 2003, 209: 1004
- [13] Myazaki S, Hamamoto Y, Yoshida E, et al. Control of self-assembling formation of nanometer silicon dots by low pressure chemical vapor deposition. *Thin Solid Films*, 2000, 369: 55
- [14] Mazen F, Baron T, Buffet N, et al. Influence of the chemical properties of the substrate on silicon quantum dot nucleation. *J Electrochem Soc*, 2003, 150: G203
- [15] Baron T, Gentile P, Magnea N, et al. Single-electron charging effect in individual Si nanocrystals. *Appl Phys Lett*, 2001, 79: 1175
- [16] Kim T W, Kang S O, Choo D C, et al. Room-temperature observation of the Coulomb blockade effects in Al two-terminal diodes fabricated using a focused ion-beam nanoparticle

process. Appl Phys Lett ,2000 ,76 :1036
[17] Dubcek P ,Desnica U V ,Desnica-Frankovic I D ,et al. GISAXS
study of shape and size of CDS nanocrystals formed in mono-

crystalline silicon by ion implantation. Nucl Instrum Methods
Phys Res B ,2003 ,200 :138

Preparation and Charge Storage Characteristics of Silicon Nanoparticles *

Jiao Zheng , Li Zhen , Wu Minghong , L üSenlin , and Wang Deqing

(*Shanghai Applied Radiation Institute, Shanghai University, Shanghai 201800, China*)

Abstract : Silicon nanoparticles are prepared by heat treatment of Si/SiO₂/Si in vacuum. AFM is used to inject charges into silicon nanoparticles and the charge storage characteristics are studied. Results show charges can be kept in the surface and inside of silicon nanoparticles more than 10h ,and discharge in several seconds.

Key words : nanoparticle ; nano device ; charge injection

PACC : 0779 ; 0710C

Article ID : 0253-4177 (2005)05-0927-04

* Project supported by Applied Material Research and Development Foundation of Shanghai (No. 0318) , Rising Star Foundation of Shanghai (No. 03QB14017)

Jiao Zheng male ,associate professor. he is engaged in the research on the nano materials and nano devices.

Li Zhen female ,PhD candidate. She is engaged in the research on radiation chemistry and nano materials.

Wu Minghong female ,professor. She is engaged in the research on radiation techniques in environment conservation.

Received 1 July 2004 ,revised manuscript received 29 October 2004

© 2005 Chinese Institute of Electronics