

多孔硅上生长 Ge 量子点的光学特性*

王亚东 黄靖云 叶志镇 赵炳辉

(浙江大学硅材料国家重点实验室, 浙江大学微系统研究与开发中心, 杭州 310027)

摘要: 采用量子尺寸的多孔硅作为衬底, 利用区域优先成核在多孔硅表面上成功地生长了 Ge 量子点。由于量子限制效应锗的 PL 谱发生了明显的蓝移, 计算表明在傅里叶红外光谱中观察到的中红外 ($5\text{--}6\mu\text{m}$) 吸收峰是源于量子点中的亚能带跃迁 (两个重空穴能级之间的跃迁), 这为 Ge 量子点红外光探测器的应用提供了理论基础。

关键词: 量子点; 亚能带吸收; 红外光探测器

PACC: 6855; 8115H; 7865

中图分类号: TN215

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2001)09-1116-03

1 引言

半导体量子点由于其独特的性能成为当今研究的热点^[1-5]。量子点中低的态密度和尖锐化的能级, 导致了量子点结构对其中的载流子产生三维量子限制效应, 从而使其电学性能和光学性能发生变化。量子阱结构在电子器件和光电器件中的成功应用有望拓展到量子点结构, 且由于后者更强的限制效应, 器件的性能将更优异, 比如量子点激光器以及红外探测器^[6-10]。量子点红外探测器与量子阱探测器相比有着明显的优点: 量子阱红外探测器由于选择定则的限制, 对正入射光照不敏感^[11]; 量子点中局域态的存在, 使得带内跃迁能被正入射光照诱发^[12]; 量子点中声子散射的减少^[13], 光激载流子在弛豫到基态前形成光电流, 提高了探测效率; 由于声子瓶颈效应^[14], 量子点激发态中载流子寿命的延长也有利于改善探测器性能。加强量子效应, 有望提高器件的操作温度。利用III-V 族量子点已经成功地制备了红外探测器^[15], 而 Ge/Si 量子点由于在价带表现出较大的能带不连续性, 也可能适合制备红外探测器^[16]。另外, Ge 量子点还有一个III-V 族量子点无法比拟的优点: 它与成熟的硅平面工艺相容, 只是目前对于 Ge 量子点的机理研究仍处于初步阶段。复旦大

学^[17, 18]在较低的温度下(550°C)在硅衬底上制备了 Ge 量子点, 并研究了量子点和量子阱结构随退火温度的变化, 另外他们初步讨论了硼原子对 Ge 量子点自组织生长的影响。本文报道了在多孔硅上成功地制备了 Ge 量子点, 傅里叶红外光谱显示在近红外有一明显的共振峰, 该吸收峰来自于量子点中的亚能带跃迁, 从而为 Ge 量子点红外探测器的使用提供理论基础。

2 实验

我们自制的电解多孔硅的装置如图 1 所示。硅片背面蒸发了一层铝, 然后用铜电极压在上面, 形成较好的欧姆接触, 以获得均匀的电流密度。制作多孔硅的硅片为 P {100}, 电阻率为 $10\Omega \cdot \text{cm}$ 左右, 电流密度为 $5\text{mA}/\text{cm}^2$, 我们在较小的电流密度下获得了比较均匀的量子尺寸的多孔硅。电解液为乙醇稀释的 HF, 浓度为 30%, 电解时间为 10min。多孔硅制好后, 用盐酸腐蚀去除蒸发的铝。再用改进的 RCA 清洗方法清洗硅片, 然后装入 UHV/CVD 系统。生长温度为 720°C , GeH_4 流量为 5sccm , 时间为 5min。多孔硅对 Ge 量子点的形成可能有下面的两个作用: 多孔硅相当于电子束辐射或全息光辐射后的生长表面, 提供一个成核中心; 由于应力效应, 改变材

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 69686002)。

王亚东 男, 1976 年出生, 硕士研究生, 从事硅基材料外延生长及性能研究。

2000-10-29 收到, 2001-02-24 定稿

©2001 中国电子学会

料的能带结构。

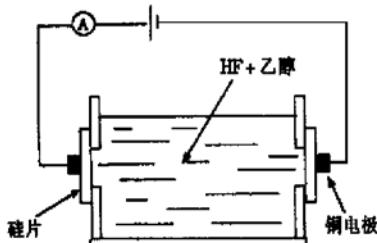


图 1 电解多孔硅的设备示意图

FIG. 1 Equipment of Anodic Porous Silicon

本实验采用的 PL 谱测试条件是: He-Ne 激光器(波长为 632.8nm), 温度为 10K, 使用 Ge 探测器, 液氮冷却. 傅里叶红外吸收光谱仪为 IFS-113V, 分辨率为 4cm^{-1} , 测量温度为 300K.

3 结果和讨论

图 2 是 Ge 量子点表面的原子力显微镜(AFM)像. 量子点呈现出比较均匀的扁椭球状结构, 基区宽度约为 42nm, 高度为 4.2nm. 尺寸非均匀性约为 5%. 图 3 是 Ge 量子点的 PL 谱. 图中在 0.874eV 处有一明显的发光峰, 对于体锗材料, 发光峰的能量位于 0.738eV, 因此我们可以看到, 由于量子限制效应的影响, Ge 的谱线向高能侧移动了 0.136eV, 表明量子点增加了限制能级. 而且近似地利用 Maeda^[19] 公式(把量子点看成球状), Ge 量子点的蓝移量与量子点尺寸基本复合(6nm 半径的量子点引起 0.136eV 的蓝移). 同时, 发光峰的半峰宽很窄, 表明量子点的排列较均匀, 这与 AFM 测试结果相一致.

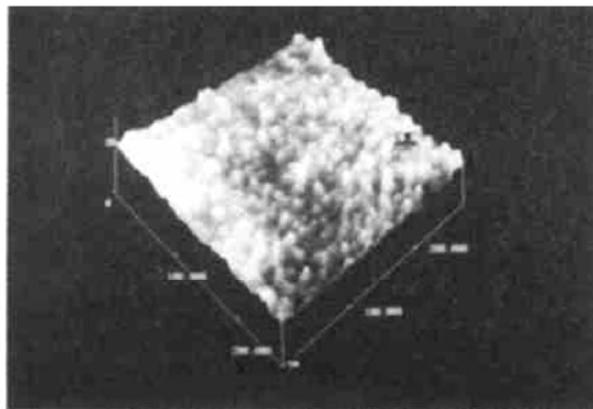


图 2 Ge 量子点的 AFM 像

FIG. 2 AFM Picture of Ge Quantum Dots

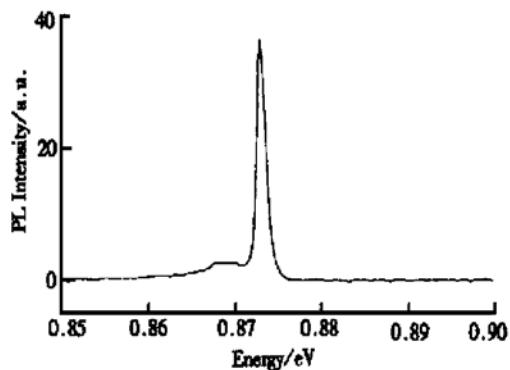


图 3 Ge 量子点的低温 PL 谱

FIG. 3 Photoluminescence of the Ge Quantum Dots at 77K

图 4 是样品的室温红外光谱. 在 1733cm^{-1} (215meV) 处有一明显的共振峰, 我们认为该吸收峰源于 Ge 量子点中前两个重空穴能级之间的跃迁. 量子点中的允许能级可用下面的公式来简单计算^[17]:

$$E_{n,k,l} = \frac{h^2}{8m^*} \left[\frac{n^2}{L_x^2} + \frac{k^2}{L_y^2} + \frac{l^2}{L_z^2} \right] \quad n, k, l = 1, 2, 3 \dots \quad (1)$$

其中 m^* 是电子(空穴)的有效质量(Ge 的两个重空穴分别为 $0.32m_0$ 和 $0.077m_0$); h 为普朗克常数; L_x, L_y 为基区尺寸; L_z 为高度. 在我们的研究中, 样品的基区宽度远大于高度, 因此前两项可省略. 计算可得前 2 个重空穴能级分别为 67meV 和 277meV . 因此两个重空穴之间的跃迁能为 210meV , 与实验测试结果非常接近(215meV). Phillips 在 InAs 量子点中也观察到了相似的吸收峰^[19].

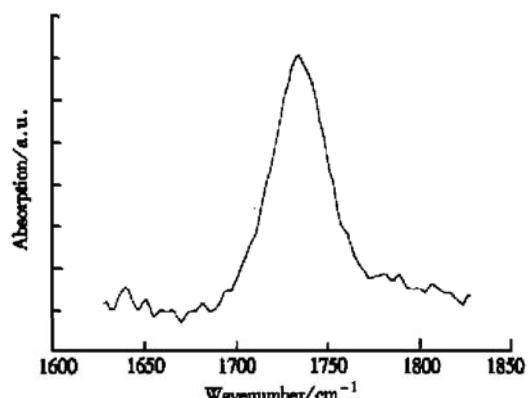


图 4 Ge 量子点的室温 FTIR 图谱

FIG. 4 Infrared Absorption Spectra of Ge Quantum Dots at Room Temperature

4 结论

我们利用超高真空化学气相沉积技术,成功地在多孔硅上生长了 Ge 量子点,并观察到由于量子限制效应而引起的锗 PL 谱的蓝移。并且在中红外区域观察到强烈的吸收峰,我们认为是由于 Ge 量子点的前两个重空穴能级之间的跃迁引起的,属于量子点的亚能带吸收。这些性质使得 Ge 量子点探测器成为可能。

参考文献

- [1] D. Leonard, M. Krishnamurthy, C. M. Reaves, S. P. Denbars and P. M. Petroff, Appl. Phys. Lett., 1993, **63**: 3203.
- [2] K. W. Berryman, S. A. Lyon and M. Segev, Appl. Phys. Lett., 1998, **34**: 1019.
- [3] S. Sauvage, P. Boucaud, F. H. Julien, J. M. Gerard and V. Thierry-Mieg, Appl. Phys. Lett., 1997, **71**: 2785.
- [4] J. M. Gerard, Solid-State Electron., 1996, **40**: 807.
- [5] J. Kim, L. Wang and A. Zunger, Phys. Rev., 1998, **B57**: R9408.
- [6] Hajime SHOJI, Yoshiaki NAKATA and Kohki MCKAL, Jpn. J. Appl. Phys., 1996, **35**: L903.
- [7] Saito H., Appl. Phys. Lett., 1996, **69**: 3140.
- [8] F. Schafer, J. P. Reithmayer and A. Forchel, Appl. Phys. Lett., 1999, **74**: 2915.
- [9] J. Phillips, K. Kamath and P. Bhattacharya, Appl. Phys. Lett., 1998, **72**: 2020.
- [10] Dong Pan and Elias Towe, Appl. Phys. Lett., 1998, **73**: 1937.
- [11] B. F. Levine, J. Appl. Phys., 1993, **74**: R1.
- [12] D. Pan, E. Towe and S. Kennerly, Electron. Lett., 1998, **34**: 1019.
- [13] I. Vurgaftman, Y. Lam and J. Singh, Phys. Rev., 1994, **B50**: 14309.
- [14] U. Bockelmann and G. Bastard, Phys. Rev., 1990, **B42**: 8947.
- [15] V. Le. Thanh, P. Boucaud, D. Debarre, Y. Zheng and J. M. Lourtioz, Phys. Rev., 1998, **B58**: 13115.
- [16] M. Asada, IEEE J. Quantum Electron., 1986, **QE22**: 1915.
- [17] ZHOU Xing-fei, SHI Bin, JIANG Wei-rong et al., Chinese Journal of Semiconductors, 2000, **21**: 765[周星飞, 施斌, 蒋伟荣, 等, 半导体学报, 2000, **21**: 765].
- [18] HU Dong-zhi, ZHU Hai-jun, JIANG Zui-min et al., Chinese Journal of Semiconductors, 1997, **18**: 939[胡冬枝, 朱海军, 蒋最敏, 等, 半导体学报, 1997, **18**: 939].
- [19] Y. Maeda, N. Tsukamoto, Y. Yazawa, Y. Kanemitsu and Y. Masumoto, Appl. Phys. Lett., 1991, **59**: 3168.

Optical Characterization of Ge Quantum Dots Grown on Porous Silicon by UHV/CVD*

WANG Ya-dong, HUANG Jing-yun, YE Zhi-zhen and ZHAO Bing-hui

(State Key Laboratory of Silicon Materials, Microsystem Research and Development Center,
Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The Ge quantum dots on anodized porous silicon layers are prepared by using area preferential nucleation at 700°C. PL reveals a large blue shift in energy due to the effect of the quantum size. Intersubband absorption in the valence band is observed around 215meV (5—6μm wavelength) using Fourier transform infrared spectroscopy. The absorption is attributed to the transitions between the first two heavy hole states of the Ge quantum dots. This study opens the potential route to the realization of Ge quantum dot infrared photodetectors.

Key words: quantum dots; intersubband absorption; infrared photodetectors

PACC: 6855; 8115H; 7865

Article ID: 0253-4177(2001)09-1116-03

* Project Supported by National Natural Science Foundation of China Under Grant No. 69686002.

WANG Ya-dong male, was born in 1976, master postgraduate, who is working on the Si-based materials.

Received 29 October 2000, revised manuscript received 24 February 2001

©2001 The Chinese Institute of Electronics