

# 微腔调制常温 Ge 量子点光致发光特性\*

李传波 毛容伟 左玉华 成步文 余金中 王启明

(中国科学院半导体研究所 集成光电子国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 报道了微腔对 Ge 量子点常温光致发光的调制特性. 生长在 SOI 硅片上的 Ge 量子点的常温光致发光呈多峰分布, 随波长增加, 峰与峰之间的间隔增加. 这种多峰结构与 SOI 硅片所形成的微腔有关, 只有满足特定波长的光致发光才能透出腔体并被探测器搜集. 模拟结果与实验结果吻合得很好, 变功率实验也进一步证实了该结论.

关键词: 微腔; 光致发光; Ge 量子点; 调制

PACC: 7855C

中图分类号: TN305 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2005)S0-0020-04

## 1 引言

硅材料的间接带隙结构特性限制了其在光电子方面的应用, 人们寄希望于利用能带工程和量子尺寸效应实现硅基光子集成. Ge 与 Si 同族, 性质相似, 自组织生长 Ge 量子点是最有希望对 Si 基材料实现人工改性的途径之一. 而且因为与微电子工艺兼容, 价格便宜, 引起人们极大的兴趣<sup>[1]</sup>.

作为一种无损伤检测手段, 光致发光 (PL) 方法常被用来表征材料的光学、电学及能带结构的信息. 早期的光致发光实验集中对 Ge 量子点的形成过程进行研究, 观察到了量子点发光的红移现象, 辨别了量子点的直接辐射复合发光 (NP) 和对应的横光学声子参与的发光 (TO), 并认为 Ge 量子点的能带结构为 II 型能带结构<sup>[2~9]</sup>. 不过, 量子点均生长在普通硅片上, 并且大都限于讨论其低温光致发光特性. 本文讨论了生长在 SOI 衬底上的 Ge 量子点的常温光致发光特性, 并研究了 SOI 硅片中微腔对光致发光的调制作用.

## 2 实验

Ge 量子点的生长是在国产的超高真空化学气

相外延 (UHV-CVD) 设备上进行的. 生长的气源为高纯乙硅烷和锗烷. 生长背景真空为  $8 \times 10^{-8}$  Pa, 生长室装备了一台差分高能电子衍射系统, 可以在生长时监控表面质量. Ge 量子点的生长过程为: (001) 取向的 SOI 衬底经过异位化学清洗后装入 UHV 生长室, 加热到 930°C 脱氧, 然后降温至 850°C 生长一个 250nm 厚的 Si 的缓冲层, 继续降温到 650°C 生长 10 个周期的 Ge/Si 多量子阱 (每周期由 8 个单分子层 (ML) 的 Ge 和 35nm 的 Si 组成), 最后生长 150nm 的盖层硅. 光致发光实验均在常温下进行, 激发光源采用 532nm 半导体激光器, 激发功率在 5~100mW 可调, 光致发光被 InGaAs 探测器阵列接收. 原子力 (AFM) 图像是在 Digital Instruments Nanoscope III 原子力设备上以接触式模式测量. 用于原子力显微镜测试的参考样品结构为: 含有单个 Ge 层样品, 表面没有覆盖 Si 盖层.

## 3 结果与讨论

图 1 给出了生长在 (100) SOI 衬底和 Si 衬底上的多层量子点的常温光致发光谱. 虽然在未覆盖 Si 的 Ge 量子点上也观察到量子点的 PL 信号, 但由于表面复合中心的存在使光生载流子快速淬灭, 因此通常用盖 Si 的 Ge 量子点结构来分析其相应的光学

\* 国家重点基础研究发展规划 (批准号: G2000036603)、国家高技术研究发展计划 (批准号: 2002AA312010) 和自然科学基金重大基金 (批准号: 90104003, 60336010) 资助项目

李传波 男, 1976 年出生, 博士研究生, 主要从事硅基光电子材料与相关器件的研究. Email: cbli@red.semi.ac.cn

2004-09-04 收到, 2004-12-09 定稿

性质. 可以发现, 生长在 SOI 硅片上的常温光致发光具有 7 个窄线宽发光峰, 分别标为 P1, P2, P3, P4, P5, P6 和 P7. 峰与峰之间间隔并不均匀, 随波长增加, 间隔也在增加. 其中 P7 峰值波长为 1557.8nm, 光响应特性延伸到了很有意义的 1.55 $\mu\text{m}$  光通信波段. 而生长在普通硅衬底上的光致发光谱为一条很弱并且很宽的光谱, 其峰值波长位于 1370nm, 与 P5 峰的峰值波长基本一致.

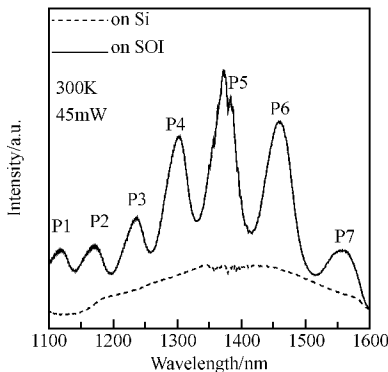


图 1 Ge 量子点常温光致发光特性

Fig. 1 PL spectra of the Ge/Si islands in multilayer structure grown on SOI and Si substrates at 300K

我们很容易解释生长在 Si 片上的常温光致发光特性. 由于 4.2% 的失配, 在硅上生长 Ge 材料时将遵从 SK 岛状生长模式, 表面起伏形成量子点. 图 2 给出了生长在 Si 衬底上的第一层 Ge 量子点的 2 $\mu\text{m}$   $\times$  2 $\mu\text{m}$  AFM 图像, 量子点的平均高度为 22nm, 底宽为 160nm 左右, 密度为 1.6  $\times$  10<sup>9</sup> cm<sup>-2</sup>. 由于 II 型能带结构的 Ge 量子点材料具有很大的价带偏移, 从而使量子点形成的空穴阱的深度大于空穴的常温自由能(25meV)<sup>[10]</sup>, 阱内可以聚集大量空穴, 并与垒层硅内的电子复合发光, 从而观察到了常温光致发光. 随着温度的升高, 由于载流子自由能的增加, 导致发光谱线展宽, NP 峰和 TO 峰展宽合并成如图 1 所示的宽而弱的谱线.

然而, 生长在 SOI 衬底上的这种强而尖的多峰结构却很难解释. 需要指出的是, 这些峰并非来源于位错引起的发光峰, 因为这些峰的位置与缺陷的特征发光峰(D1, D2, D3, D4)的位置并不一致<sup>[11~13]</sup>, 而且通过透射电镜也没有观察到缺陷的存在.

为了弄清这些多峰结构的来源, 我们曾用原位检测手段(反射式高能电子衍射仪)和原子力等方法分别研究了生长在普通 Si 衬底和 SOI 衬底上量子点的生长过程和表面形貌, 并没有发现任何差别. 我

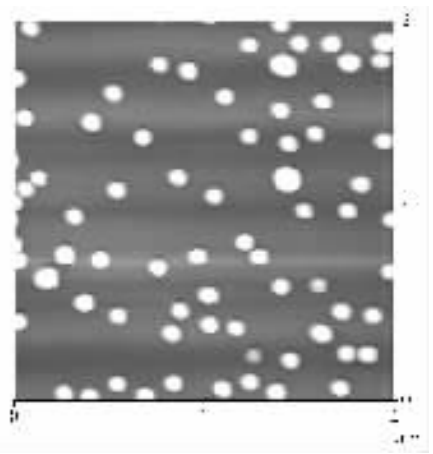


图 2 Ge 量子点 2 $\mu\text{m}$   $\times$  2 $\mu\text{m}$  AFM 图像

Fig. 2 2 $\mu\text{m}$   $\times$  2 $\mu\text{m}$  AFM topographs of the first Ge layer of Ge/Si islands grown on Si substrates

们认为这种常温光致发光的差别不应当来源于材料本身, 而是由 SOI 材料中的埋层 SiO<sub>2</sub> 和表面反射镜构成的微腔的调制作用造成的. 埋层 SiO<sub>2</sub> 的折射率为 1.46, 而 Si 的折射率为 3.5, 两者的差别使其构成了一个反射镜. 模拟结果表明, 200nm 的埋层 SiO<sub>2</sub> 所构成的反射镜在 1300nm 附近 400nm 的范围内具有大于 45% 的反射率; 而 Si 与空气界面 30% 的反射率构成了另一个反射镜, 两个反射镜形成了一个微腔, 将量子点夹在中间, 如图 3 所示.

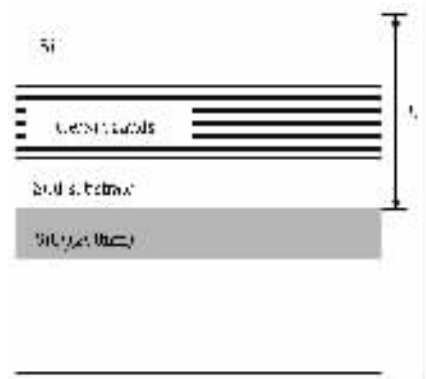


图 3 SOI 衬底所形成的微腔结构示意图

Fig. 3 Sketch of the cavity formed between the mirrors of air/Si interface and SOI/SiO<sub>2</sub> interface

这个微腔对光致发光具有一定的调制作用. 只有满足如下公式<sup>[14]</sup>的光致发光才能透出腔体并被探测器搜集, 形成如图 1 实线所示多峰光致发光谱.

$$2 \times \frac{2n\pi}{\lambda_0} L + \phi_1 + \phi_2 = 2m\pi, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

式中  $n$  为材料的折射率;  $L$  为腔长;  $\lambda_0$  为光致发光的波长;  $\psi_1, \psi_2$  分别为在两个反射镜上的相移.

与生长在 Si 衬底上的光致发光特性相比, 经过微腔调制的光致发光峰值强度有近五倍的增强. 我们认为, 这种增强源于两个方面的因素: (1) 由于埋层  $\text{SiO}_2$  的作用, 产生的光致发光向衬底泄漏的部分减小; (2) 微腔对激发光源有一个反射增强的作用.

由图 1 实线可见, 这种多峰结构中峰与峰之间的间隔并不均匀, 随波长的增加, 间隔增加, 这种现象正是微腔调制作用的结果. 峰与峰之间的间隔可用自由谱宽(FSR)来表示, 其满足如下关系:

$$\text{FSR} = \frac{\lambda^2}{2n_{\text{eff}}L_{\text{eff}}} \quad (2)$$

其中  $\lambda$  为光致发光的波长;  $n_{\text{eff}}, L_{\text{eff}}$  分别表示腔内材料的有效折射率和有效腔长.

图 4 给出了微腔对常温光致发光调制的模拟结果. 很明显, 模拟结果与实验结果吻合得很好. 在模拟过程中, 腔长取  $3.349 \mu\text{m}$ , 这一数值与扫描电镜结果一致. 实验中通过控制顶层 Si 的厚度来改变腔长做了一组实验, 发现: 调制后的光致发光谱各个峰的位置并不固定, 腔长增加, 各个峰位红移, 腔长减小, 峰位蓝移. 这说明了采用腔体调制作用来解释这种多峰结构的正确性, 这一点也被我们的变功率实验所证明.

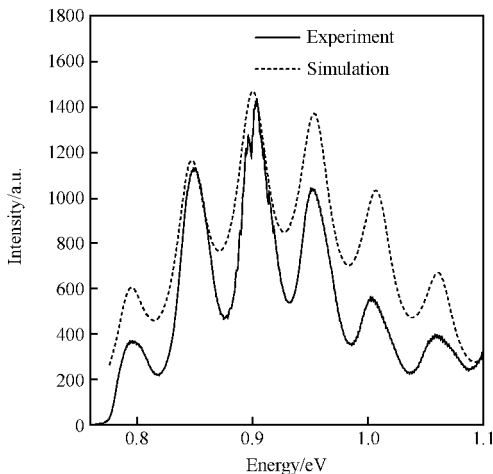


图 4 微腔调制光致发光实验结果与模拟结果

Fig. 4 Experiment and simulation results of the wavelength selective of the cavity

众所周知, 随激发功率的增加, 由于载流子的填充效应, 光致发光谱应当有一定程度的蓝移现象. 但在我们的变功率实验中却没有看到这种多峰结构峰

位的蓝移(如图 5 所示). 根本原因是各个峰位的位置只与腔长有关, 而与激发功率无关. 当然这也不能说我们的结论与前人矛盾, 更没有否定由于载流子填充所引起的蓝移现象. 仔细观察图 5 中不同激发功率下的曲线便可以发现: 在低激发功率下, P5 与 P6 两峰等高, 未调制 PL 谱的中心波长应当在两者之间. 随激发功率增加, P5 峰逐渐增强并成为最强峰, 即中心波长蓝移到该位置. 很明显, 由于载流子填充效应引起的光致发光的蓝移也可以在这个实验中得以体现.

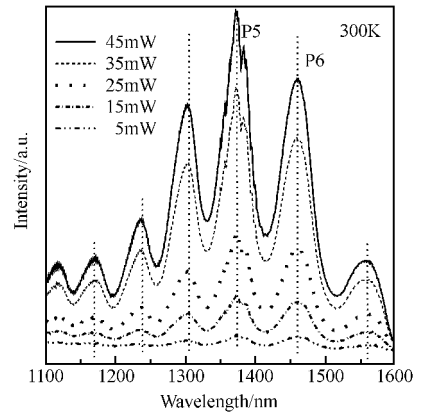


图 5 Ge 量子点变功率常温光致发光光谱

Fig. 5 PL spectra of Ge/Si islands in multilayer structure grown on SOI at various excitation power at 300K

## 4 结论

讨论了生长在 SOI 硅片上的 Ge 量子点材料的常温光致发光特性. 光致发光呈多峰分布, 随波长增加, 峰与峰之间的间隔增加. 我们认为, 这种多峰结构与 SOI 硅片所形成的微腔有关, 峰值波长的位置只与微腔的腔长有关. 该微腔对宽谱的光致发光具有一定的调制特性, 模拟结果与实验结果吻合得很好, 变功率实验也进一步证实了我们的结论.

## 参考文献

- [1] Bean J C. Silicon-based semiconductor heterostructures; column IV bandgap engineering. Proceedings of IEEE, 1992, 80: 571
- [2] Dashiell M W, Denker U, Muller C. Photoluminescence of ultrasmall Ge quantum dots grown by molecular-beam epitaxy at low temperatures. Appl Phys Lett, 2002, 80(7): 1279
- [3] Yakimov A I, Dvurechenskii A V, Proskuryakov Y Y, et al. Normal-incidence infrared photoconductivity in Si p-i-n diode

- with embedded Ge self-assembled quantum dots. *Appl Phys Lett*, 1999, 75(10):1413
- [ 4 ] Tong S, Liu J L, Wan J, et al. Normal-incidence Ge quantum-dot photodetectors at 1.5 $\mu$ m based on Si substrate. *Appl Phys Lett*, 2002, 80(7):1189
- [ 5 ] Dashiell M W, Denker U, Schmidt O G. Photoluminescence investigation of phononless radiative recombination and thermal-stability of germanium hut clusters on silicon(001). *Appl Phys Lett*, 2001, 79(14):2261
- [ 6 ] Schmidt O G, Lange C, Eberl K. Photoluminescence study of the initial stages of island formation for Ge pyramids-domes and hut clusters on Si(001). *Appl Phys Lett*, 1999, 75(13):1905
- [ 7 ] Sunamura H, Usami N, Shiraki Y, et al. Island formation during growth of Ge on Si(100): A study using photoluminescence spectroscopy. *Appl Phys Lett*, 1995, 66(22):3024
- [ 8 ] Schittenhelm P, Gail M, Nutzel J F, et al. Photoluminescence study of the crossover from two-dimensional to three-dimensional growth for Ge on Si(100). *Appl Phys Lett*, 1995, 67(9):1292
- [ 9 ] Huang C J, Tang Y, Li D Z, et al. Different transfer paths for thermally activated electrons and holes in self-organized GeSi(001) islands in a multilayer structure. *Appl Phys Lett*, 2001, 78(14):2006
- [10] Novikov A V, Lobanov D N, Yablonsky A N, et al. Luminescence study of Si/Ge quantum dots. *Phys E*, 2003, 16:476
- [11] Bremond G, Souifi A, Benyattou T, et al. Photoluminescence and electronic characterization of SiGe/Si heterostructures grown by rapid thermal chemical vapour deposition. *Thin Solid Films*, 1992, 222:60
- [12] Tanaka K, Suezawa M, Yonenaga I. Photoluminescence spectra of deformed Si-Ge alloy. *J Appl Phys*, 1996, 80:6991
- [13] Shi J L, Nanver L K, Grimm K, et al. Detect related photoluminescence of SiGe/Si heterostructures grow by APCVD. *Thin Solid Films*, 2000, 364:254
- [14] Ünlü M S, Strite S. Resonant cavity enhanced photonic devices. *Appl Phys Rev*, 1995, 78(2):607

## Modulated Photoluminescence of Ge Quantum Dots Grown on SOI Substrate\*

Li Chuanbo, Mao Rongwei, Zuo Yuhua, Cheng Buwen, Yu Jinzhong, and Wang Qiming

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Modulated photoluminescence(PL) of the Ge/Si quantum dots grown on SOI substrates is investigated. The PL spectrum presents multi-peak with different adjacent interval. With the increase of the wavelength, the interval increase. Simulation result indicates that the cavity formed by the mirrors at the surface and the buried SiO<sub>2</sub> interface has a modulation effect on the luminescence. And the independence of the peak position on the exciting power also suggests this cavity effect.

**Key words:** modulation; Ge; room temperature PL; silicon on insulator

**PACC:** 7855C

**Article ID:** 0253-4177(2005)S0-0020-04

\* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China(No. G2000036603), the National High Technology Research and Development Program of China(No. 2002AA312010), and the National Natural Science Foundation of China(Nos. 90104003, 60336010)