

SiGe/Si 量子阱结构材料的激子发光谱*

黄大鸣 杨敏 盛篪 卢学坤 龚大卫 张翔九 王迅

(复旦大学应用表面物理国家重点实验室 复旦大学李政道物理学综合实验室 上海 200433)

摘要 在用分子束外延生长的 SiGe/Si 多量子阱结构中, 观察到激子发光光谱, 从无声子参与的或 TO-声子参与的激子发光峰位能量, 计算了量子阱中合金的组份, 并与通过 X-射线衍射谱得到的结果作了比较, 发现在 Ge 的组份比较小时, 利用激子发光峰位能量确定合金组份比利用 X-射线衍射谱更为方便和精确。

PACC: 7865, 7855

SiGe 是一种间接带隙半导体, 对于理想的晶体, 电子空穴复合过程需要声子的参与, 以保证动量的守恒, 因此, 本征发光机率很小。与 III-V 族半导体相比, 这一体系激子发光的探测要困难的多。例如, SiGe/Si 量子阱中的激子发光谱是在 1991 年才首先报道的^[1], 样品是由化学气相外延 (RTCVD) 方法生长。最近, 从分子束外延 (MBE) 生长的量子阱中也观察到了激子发光^[2]。激子发光的探测, 不仅可以推动 SiGe/Si 体系的物理研究, 而且将为这类材料的检测和特性表征提供一种方便而灵敏的方法, 并与 Si 基材料的发光器件研究有着密切的联系, 因而受到国际上广泛的重视。

本文报道用分子束外延方法生长的 SiGe/Si 多量子阱材料的激子发光光谱。从无声子参与的或 TO-声子参与的激子发光峰位能量, 计算了量子阱中合金的组份, 并与通过 X-射线衍射谱得到的结果作了比较, 发现在 Ge 的组份比较小时, 利用激子发光峰位能量确定合金组份比利用 X-射线衍射谱更为方便和精确。

样品是在法国进口的 Riber-SSC 固态源分子束外延系统上生长的, 结构为生长在 Si(100) 衬底上的 20 个周期的 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 多量子阱, 从 X-射线衍射谱估计 Ge 的组份 x 约为 0.05, $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 和 Si 层的厚度约分别为 20 和 50 nm, 样品的生长温度为 580°C。光致发光测量中的激发光源为氩离子激光器的 488 nm 线, 功率为 200 mW, 测量(样品)温度为 10 K。发光信号由液氮冷却的 Ge 探测器探测, 经锁相放大器同步放大后, 由计算机记录。

图 1 给出了 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 多量子阱结构的光致发光谱。谱中有 4 个峰: X_{NP} , P_{TO} , X_{TO} 和 $P_{\text{TO}+G}$, 峰位分别在 1107 nm(1.119 eV), 1130 nm(1.097 eV), 1167 nm(1.062 eV) 和 1197 nm(1.035 eV)。其中 P_{TO} 和 $P_{\text{TO}+G}$ 两个峰来自于 Si 衬底, 分别为 TO-声子参与的激子峰和双声子 (TO + G) 伴线^[3], (来自衬底的无声子参与的激子峰 P_{NP} 没有

* 本工作得到国家科委基础及应用基础研究重点项目, 国家自然科学基金, 国家教委优秀年轻教师基金和上海市科委启明星计划的资助

1993 年 7 月 30 日收到本文, 1993 年 10 月 30 日收到修改稿

出现). 另外两个峰 (X_{NP} 和 X_{TO}) 来自多量子阱结构, 分别为无声子参与的和 TO-声子参与的激子峰, 两者的峰位相差一个 TO-声子的能量 (57 meV). 多量子阱的激子发光谱与 SiGe 应变合金中观察到的对应谱非常相似^[4].

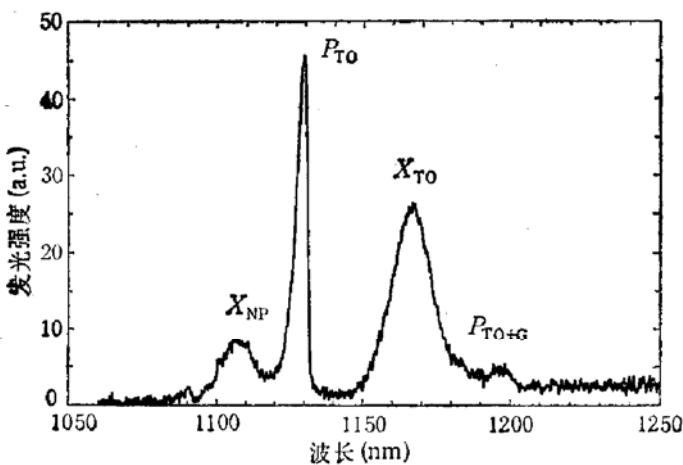


图 1 $Si_{1-x}Ge_x/Si$ 多量子阱结构的光致发光谱, 其中两个 P 峰来自 Si 衬底

量子阱的激子发光峰位能量与对应的衬底峰相比, 红移了 35 meV。红移量由下述三个因素决定: (1) 量子阱中 Ge 的组份, (2) 应变的大小, 和 (3) 量子限制效应(限制能). 在 Ge 的组份 x 比较小 ($<10\%$) 和阱较宽 ($>10nm$) 时, 由量子限制效应引起的限制能可以忽略. 在这种情况下, 量子阱中激子峰位随 x 的变化与 $Si_{1-x}Ge_x$ 应变合金层的结果相同. 文献[3]和[4—8]分别给出了 Si 和 $Si_{1-x}Ge_x$ 应变合金层的激子发光峰位随 x 变化的一些实验结果. 我们将这些数据综合起来, 并用 $E_x(x) = E_x(x=0) + Ax + Bx^2$ 加以拟合, 其中 $E_x(0) = E(P_{NP}) = 1.155 eV^{[3]}$, 可以得到: $A = -1.045 eV$, $B = 1.10 eV$, 结果示于图 2.

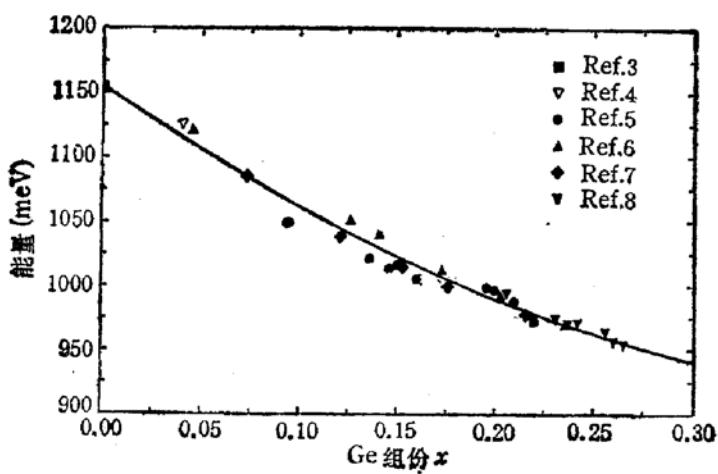


图 2 X_{NP} 峰位能量随 Ge 组份 x 的变化关系 图中实验数据引自文献[3—8], 实线由式 $E_x = 1.155 - 1.045x + 1.10x^2$ 给出

利用图 2 的结果, 可以从图 1 得到的激子发光峰位计算合金组份, 得到 $x=0.035$. 同时, 从激子峰的展宽(半高宽或者 FWHM), 可以估计整个量子阱结构的空间非均匀性.

这类非均匀性包括: (1)量子阱层厚度的起伏, (2)合金层中应变的起伏, (3)合金层中组份的起伏。在量子阱层厚度较大和合金组份较小的情况下, 引起发光峰展宽的主要原因来自不同量子阱层中合金组份的起伏。因此, 从实验测得的 FWHM, 利用图 2 或 $E_x(x)$ 关系, 可以得到不同量子阱层中 x 值的起伏。对应图 1 的样品, $\Delta E_x = \text{FWHM}(X_{\text{TO}}) = 13 \text{ meV}$, 因此, $\Delta x = 0.013$ 。

量子阱的结构参数也可用 X-射线衍射谱独立的确定^[9]。图 3 给出了同一样品的 X-射线衍射谱。谱中最强的两个峰(峰 5 和 6)分别对应于 Si(400) 衬底的 $K_{\alpha 1}$ 和 $K_{\alpha 2}$ 衍射峰。在衬底峰的小角端, 出现若干卫星峰(峰 1—4), 来自于多量子阱结构。从相邻卫星峰之间的角度差, 可以求出多量子阱的周期为 70 nm。从最高卫星峰的峰位可以粗略估算量子阱中 Ge 的组份(或其上限)。为了作定量的比较, 我们用 PL 谱中得到的 x 值(0.035), 计算了多量子阱结构的 X-射线衍射谱^[9], 其中假设 Si 层和 SiGe 层的厚度分别为 50 和 20 nm, 结果亦示于图 3 中。可以看出, 计算谱和测试谱的卫星峰峰位和相对强度基本相符, 但计算谱要比实际谱尖锐的多。实际 X-射线谱的展宽主要来自于不同量子阱之间的层厚和组份起伏, 而激子发光峰的展宽则主要来自后者。

当 Ge 的组份比较小时, 多量子阱的卫星峰很靠近衬底峰。同时, 在外延层不是很厚的情况下, 衬底峰一般比外延峰强得多。因此要从 X-射线衍射谱准确的分辨出各级卫星峰的相对强度是很困难的, 正如图 3 所示。在这种情况下, 通过计算谱与实际谱的拟合获得量子阱的结构参数(如 x 和层厚比 $d_{\text{Si}}/d_{\text{SiGe}}$ 等)非常困难。反之, 由于激子发光峰结构尖锐, E_x 随 x 值变化灵敏, 因此从激子发光峰位可以很精确的确定 x 值。另外, 从 X-射线衍射谱确定 x 值需对衍射谱作拟合。相比之下, 从激子发光峰位可以通过定标曲线(图 2)直接查出 x 值, 更为方便。

结论: 在用分子束外延生长的 SiGe/Si 多量子阱结构中, 观察到激子发光光谱。从发光峰位能量及展宽, 确定了量子阱中合金的组份以及不同量子阱层合金组份的起伏, 表明光致发光技术可为 SiGe/Si 材料的检测和特性表征提供一种有效的方法。

参 考 文 献

- [1] J. C. Sturm, H. Manoharan, L. C. Lenchyshyn, M. L. W. Thewalt, N. L. Rowell, J. P. Noel and D. C. Houghton, Phys. Rev. Lett., 1991, **66**: 1362.
- [2] N. Usami, S. Fukatsu and Y. Shiraki, Appl. Phys. Lett., 1992, **61**: 1706.
- [3] G. Davies, Phys. Rep., 1989, **176**: 83.
- [4] K. Terashima, M. Tajima and T. Tatsumi, Appl. Phys. Lett., 1990, **57**: 1925.
- [5] V. Arbet-Engels, J. M. G. Tijero, A. Manissadjian, K. L. Wang and V. Higgs, Appl. Phys. Lett., 1992, **61**: 2586.

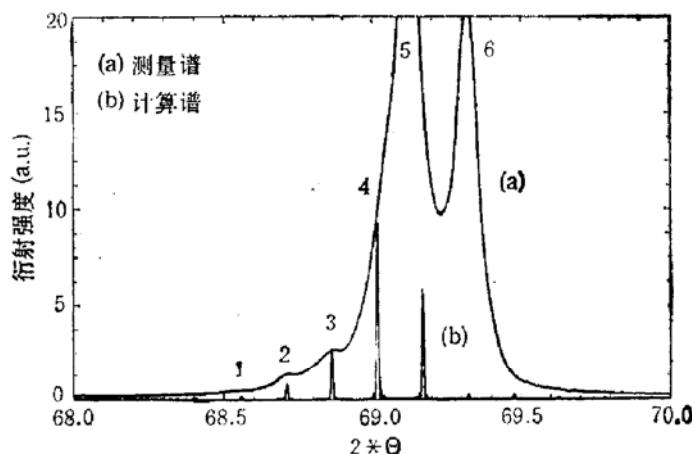


图 3 SiGe/Si 多量子阱结构的 X-射线衍射谱

- [6] D. J. Robbins, L. T. Canham, S. L. Barnett, A. D. Pitt and P. Calcott, *J. Appl. Phys.*, 1992, **71**: 1407.
- [7] D. Dutartre, G. Bremond, A. Souifi and T. Benyattou, *Phys. Rev.*, 1991, **B44**: 11525.
- [8] J. Spitzer, K. Thonke, R. Sauer, H. Kibbel, H. J. Herzog and Kasper, *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **60**: 1729.
- [9] V. S. Speriosu and T. Vreeland, Jr., *J. Appl. Phys.*, 1984, **58**: 1591.

Photoluminescence Spectra from SiGe/Si Strained Layer Quantum Well Structures

Huang Daming Yang Min Sheng Chi Lu Xuekun

Gong Dawei Zhang Xiangjiu Wang Xun

(*Surface Physics Laboratory, Fudan T. D. Lee Physics Laboratory,
Fudan University, Shanghai 200433*)

Abstract The excitonic transitions were observed in photoluminescence spectrum from SiGe/Si strained layer quantum well structure grown by solid source molecular beam epitaxy. From the peak energy of no-phonon or TO-phonon exciton line, the Ge composition in quantum well layers was determined. The result was compared with that obtained from the X-ray diffraction spectrum, and we found that it is easier and more accurate to determine the alloy composition from the excitonic photoluminescence spectra than from X-ray diffraction measurements for the structures with small Ge composition.

PACC: 7865, 7855