

a-Si/SiO₂ 多量子阱材料光致发光特性^{*}

周赢武 郭亨群

(华侨大学电气技术系, 泉州 362011)

摘要 近年来硅发光已成为理论和材料研究的一个新热点, a-Si/SiO₂ 多量子阱材料就是人们研制出的一种新的量子结构. 有关理论表明, a-Si/SiO₂ 多量子阱中硅层(阱层)的电子和空穴都受到很强的量子限制效应, 硅层能带有可能由体硅的间接带隙转变为直接带隙, 该量子阱材料有可能具有较强的光致发光特性. 在 77 K 温度下实验, 观察到 a-Si/SiO₂ 多量子阱材料的光致发光, 光致发光峰的半峰宽(FWHM)为 10 nm. 将其与同温度下的纳米硅薄膜的光致发光进行了对比, 发现前者的光致发光峰的半峰宽较窄. 文中也对 a-Si/SiO₂ 多量子阱材料光致发光的机理作了探讨.

关键词 a-Si/SiO₂ 多量子阱, 光致发光, 量子限制效应

分类号 O 472.3

随着半导体能带工程的发展及制造工艺的不断进步, 近年来人们研制出了一种新的量子结构-Si/SiO₂ 多量子阱. 我们知道 SiO₂ 禁带宽度为 8.8 eV, 它同 Si 界面的能带排列如图 1 所示, 导带和价带的偏移分别达到 3.15 和 4.55 eV. 因此, SiO₂/Si/SiO₂ 组成的量子阱对电子和空穴都具有很强的量子限制效应. 目前, 国内外对 a-Si/SiO₂ 多量子阱材料实验方面的研究, 主要集中在光致发光及理论方面. 制备材料的方法主要有两种——分子束外延(MBE)法和等离子体增强化学气相淀积(PECVD)法. 在理论上, 夏建白等人^[1]利用赝势同质结模型方法得到了 a-Si/SiO₂ 多量子阱中硅层的能带结构. 由他们所得到的结果, 可知 Si 层由体硅的间接带隙半导体转变成直接带隙半导体, 因此其发光效率大大提高.

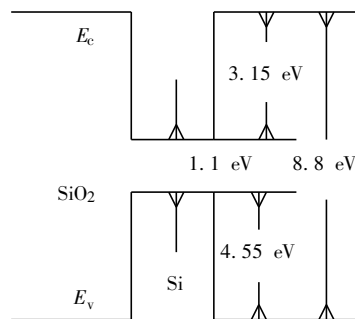


图1 Si/SiO₂的能带排列

2 实验部分

2.1 a-Si/SiO₂ 多量子阱样品

a-Si/SiO₂ 多量子阱的设想最早是由美国北卡大学夏洛特分校的朱兆祥提出的. 本实验所研究的 a-Si/SiO₂ 多量子阱样品由中科院半导体研究所提供^[1]. 该样品是在玻璃衬底上, 用等离子体增强汽相淀积方法(PECVD)淀积 10 个周期的 a-Si/SiO₂ 层. 其中 a-Si 层厚度为 4 nm,

而 SiO_2 层厚度为 10 nm. 淀积的 SiO_2 层厚度用椭偏仪和台阶仪测量, a-Si 层厚度用台阶仪测量. a-Si/ SiO_2 多量子阱厚度由淀积时间进行推算. 样品的晶化是在室温下进行的, 样品放在可作二维移动的平台, 由电机带动, 用 Ar^+ 激光器对样品表面进行扫描晶化. 激光光斑直径为 $100\ \mu\text{m}$, 扫描速度为 $4.5\ \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 扫描重复率为 50%.

2.2 光致发光实验

图 2 为光致发光实验装置图. 光源为 Ar^+ 激光器, 其输出光的波长为 514.5 nm. 我们分别测了样品在室温及 77 K 温度下的光致发光谱. 实验中, 搜集到的发光信号经单色仪分光后进入光电倍增管, 再由锁相放大器放大后由计算机绘出.

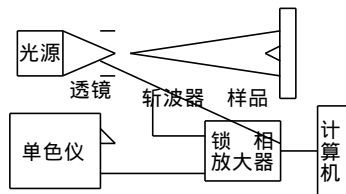


图2 光致发光实验图

3 结果及讨论

图 3 为该样品的室温光吸收谱, 从图中看不到激子吸收峰. 这可能是由于在室温下, 热运动使光照射下产生的激子很快离解. 在光致发光实验中, 发现在室温下观察不到样品的光致发光现象. 我们认为, 这是由于光泵浦产生的激子由于热运动等原因以非辐射复合而造成的. 其实, 夏建白等人^[1]的计算结果指出只有当 Si 层的厚度小于 4 nm 时, 在室温下才可观察到光致发光现象; 而当 Si 层的厚度大于 4 nm 时, 在室温下观察不到光致发光现象. 因此, 我们的实验结果是与该理论相符的. 当温度为 77 K, 可发现样品在光源发出的 514.5 nm 光照射下, 发出柔和的红光. 图 4 为样品在该温度下的光致发光谱, 从该图中可以看出在 650 nm 处有一个明显的发光峰.

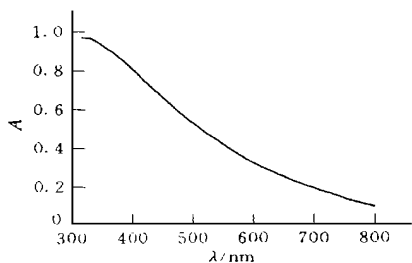


图3 样品在室温下的光吸收谱

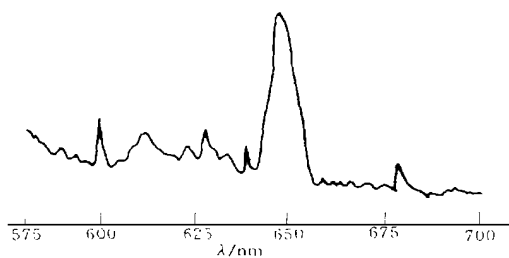


图4 a-Si/ SiO_2 超晶格样品在 77 K 温度下的光致发光谱

虽然人们已发现了纳米硅薄膜的光致发光现象, 但纳米硅薄膜与多孔硅一样有一个缺陷, 即硅晶粒的大小难以人为控制, 硅晶粒的尺寸极不均匀, 以致光致发光峰的半峰宽较宽, 这限制了它在实际中的应用. 对纳米硅薄膜的光致发光研究得较多的是何宇亮小组^[6,4], 他们的实验结果也揭示了纳米硅薄膜的光致发光峰的半峰宽较宽(大于 70 nm)这一缺点. 而 a-Si/ SiO_2 多量子阱是人工剪裁的材料, Si 层的厚度可以人为控制, 有可能得到较窄的发光峰. 从图 4 可以得到 PL 谱的半峰(FWHM)为 10 nm. 目前, 研究者对 Si 基材料光致发光实验结果的解释所采用的模型有两种: (1) 量子限制模型; (2) 发光中心模型. 量子限制模型认为, 对于硅纳米尺寸微晶粒, 随着晶粒尺寸减小, 由于量子限制效应(QCE)使能隙展宽, 其能隙大体上正比于

晶粒尺寸平方的倒数. 而发光中心(LCS)模型认为, 光致发光来自表面吸附的某些发光材料, 对于本征 nc-Si H 的薄膜, 其晶粒周围的表面都是由 H 饱和, (SiH)_n 在其中起着发光中心的作用.

对于本实验结果, 我们采用量子限制模型及发光中心模型相结合的方法进行讨论. 可以认为, 由于样品在制造过程中经过了晶化处理, 使在晶化后的 a-Si/SiO₂ 多量子阱材料中形成了纳米硅晶粒(大小约为 4 nm). 由于量子限制效应, 纳米硅晶粒中的电子-空穴对能量大于晶体硅的间接禁带宽度, 而纳米硅中的辐射复合的几率很小. 因此, 在激光激发下形成的电子空穴向晶粒的表面扩散, 并通过其表面处或表面外的发光中心复合发光.

4 结论

用氩离子激光器发出的波长为 514.5 nm 的光照射 a-Si/SiO₂ 多量子阱样品, 在 77 K 温度下, 观察到样品发出柔和的红光, 从光致发光谱图中看到在 650 nm 处有一个明显的发光峰. 由于量子限制效应, 纳米硅晶粒中的电子-空穴对能量大于晶体硅的间接禁带宽度, 而纳米硅中的辐射复合的几率很小. 于是, 在激光激发下形成的电子空穴向晶粒的表面扩散, 并通过其表面处或表面外的发光中心复合发光.

参 考 文 献

- 1 Xia J B, Cheah K W. Quantum confinement effect in silicon quantum well layers. Phys. Rev., 1997, B (56): 14 925 ~ 14 930
- 2 成步文, 余 钟, 于 卓等. a-Si/SiO₂ 多量子阱材料制备及其晶化和发光. 发光学报, 1997, 18(3): 217 ~ 221
- 3 余明斌, 李雪梅, 何宇亮等. 纳米硅薄膜的电致发光和光致发光. 半导体学报, 1992, 16(12): 913 ~ 917
- 4 窦红飞, 李建军, 何宇亮等. 纳米硅薄膜低温光致发光. 固体电子学研究与进展, 1998, 18(1): 38 ~ 43

Photoluminescence Characteristic of a-Si/SiO₂

Multiple Quantum Well Material

Zhou Yingwu Guo Hengqun

(Dept. of Elec. Tech., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

Abstract Silicon luminescence has become a hot spot in theoretical and material studies in the recent years, and the a-Si/SiO₂ multiple quantum well (MQW) material has been developed to be a new structure. Theoretically, both electrons and holes of Si layer (well layer) in a-Si/SiO₂ MQW are subjected to very strong quantum confinement effect, and in Si layer, energy band may be changed from indirect energy gap of volume Si into quasi-direct one, and thus the MQW material may have fairly strong photoluminescence characteristic. As observed by the authors, the photoluminescence of a-Si/SiO₂ MQW material has a full width at half maximum (FWHM) of 10 nm as its bandpass at the temperature 55 K, which is narrower than the FWHM of photoluminescence of nc-Si H film. A discussion is devoted to the mechanism of photoluminescence of the a-Si/SiO₂ MQW material.

Keywords a-Si/SiO₂ multiple quantum well, photoluminescence, quantum confinement effect