

文章编号: 0258-7025(2003)09-0852-03

自由电子激光辐照半导体多量子阱的研究

邹睿¹, 林理彬¹, 张猛¹, 张国庆², 李永贵²

(¹ 四川大学物理系, 四川 成都 610064; ² 中国科学院高能物理所, 北京 100080)

摘要 利用低温光荧光谱研究了自由电子激光辐照对 GaAs/AlGaAs 多量子阱光学性质的影响。用波长为 8.92 μm , 光功率密度相应于电场强度为 20 kV/cm 的自由电子激光辐照多量子阱 60 min, 发现量子阱特征峰 797 nm 经过辐照后峰值发生红移至 812 nm, 波形展宽, 峰高降低。对此结果进行了讨论, 并与电子辐照的情况做了比较。

关键词 激光技术; 量子阱; 自由电子激光辐照; 低温光荧光谱; 红移

中图分类号 TN 248.6; O 472+.3 文献标识码 A

Free Electron Laser Irradiation Effects of GaAs/AlGaAs Quantum Wells

ZOU Rui¹, LIN Li-bin¹, ZHANG Meng¹, ZHANG Guo-qing², LI Yong-gui²

¹Department of Physics, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China

²Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

Abstract Photoluminescence (PL) was observed from GaAs/AlGaAs quantum wells structure excited by mid-infrared free electron laser (FEL) irradiation. The experimental results showed that the characteristic PL peak of quantum wells was shifted to longer wavelength (red shift) and the intensity was decreased much after FEL irradiation. The results are discussed and compared with that of electron irradiation.

Key words laser technique; quantum well; free electron laser irradiation; photoluminescence spectra; red shift

1 引言

自由电子激光器是一类新兴的激光器, 它是由相对论电子束通过摇摆器时产生的受激辐射。与常规激光器相比, 它有波长连续可调, 覆盖范围宽, 输出峰值功率高, 有精细而且可塑的脉冲结构, 光束质量好等一系列突出优点, 在半导体与微电子领域具有广泛的潜在应用前景^[1]。使用适当波长、极高峰值功率的自由电子激光脉冲对半导体材料进行照射, 可以改变材料的内部结构形式, 从而达到改变材料物理性质的目的。作为一种新型辐射源, 研究其辐照效应对量子阱材料光学性质的影响, 对改良红外探测器及其他光电器件的光电性能具有重要的意义。目前, 对 GaAs/AlGaAs 多量子阱辐照效应的研究主要集中在带电粒子辐照^[2,3]。

作者用波长为 8.92 μm , 电场强度为 20 kV/cm 的自由电子激光辐照多量子阱 60 min, 测量了辐照前后材料的低温光荧光谱。发现量子阱特征峰 797 nm 经过辐照后峰值发生变化, 波形展宽, 峰高降低, 得到了与文献[4]不同的新结果。本文对此情况进行了讨论, 并与电子辐照的情况做了比较。结果说明利用自由电子激光辐照可改变 GaAs/AlGaAs 多量子阱材料的原子分布情况, 从而实现对量子阱的能级分布的微调。

2 样品制备与辐照实验

由中国科学院半导体研究所采用分子束外延 (MBE) 方法生长的 GaAs/AlGaAs 多量子阱材料的结构如图 1 所示。在 n 型重掺杂的 GaAs 衬底上生

收稿日期: 2002-03-29; 收到修改稿日期: 2002-07-17

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 6008802)及全国高校博士点基金资助项目。

作者简介: 邹睿(1977—), 男, 硕士, 主要从事半导体材料、器件和集成电路设计的研究工作。E-mail: zourui@hotmail.com

长一层厚 200 nm 的 GaAs 缓冲层,然后在上层外延 30 个周期的量子阱,其中 GaAs 势阱厚 10 nm, $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 势垒厚 20 nm,最后在顶部长一层厚 50 nm 的 GaAs 保护层。

自由电子激光辐照是在中国科学院高能物理所自由电子激光装置(BFEL)上进行的。辐照条件是在室温下用波长为 8.92 μm ,宏脉冲能量为 1.29 mJ,光斑直径为 3.69 mm,相应于激光的电场强度为 20 kV/cm 的自由电子激光辐照多量子阱 60 min,其中每秒有 3 个宏脉冲。在 JJ2 型静电加速器上对样品进行电子束辐照实验。样品在室温条件下用固定能量为 1 MeV,注入量为 $1 \times 10^{16}/\text{cm}^2$ 进行辐照。

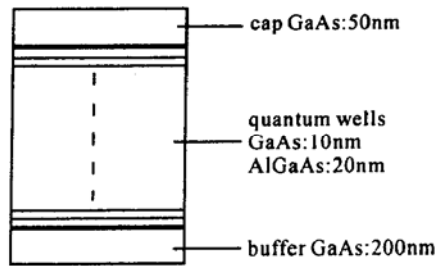


图1 样品结构

Fig. 1 Quantum wells structure

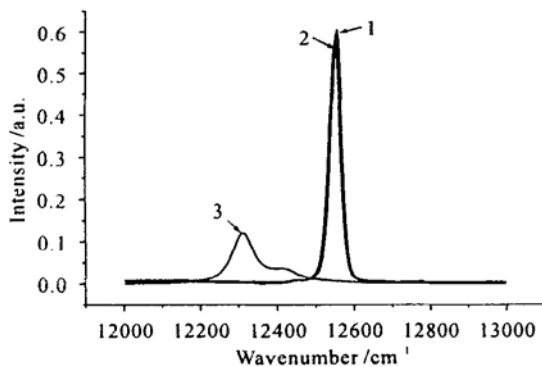


图2 低温光荧光光谱

Fig. 2 Photoluminescence spectra at 15 K

3 实验结果

光荧光谱(PL)是目前研究超晶格、量子阱导带与价带子带间跃迁及激子效应最常用的光学方法^[5]。本实验用 IFS120HR 红外傅里叶变换光谱仪对自由电子激光及电子辐照前后的样品进行了低温光荧光谱测试,激发光波长 514.5 nm,温度为 15 K,如图 2 所示。曲线 1 为辐照前样品的荧光光谱,波长为 797 nm 的荧光峰对应于量子阱导带中 $n = 1$ 的电子能态和价带重空穴能态之间的激子复合发

光,这是量子阱材料在光学应用中的主要光学参数之一。曲线 2 为经过能量为 1 MeV,注入量为 $10^{16}/\text{cm}^2$ 电子辐照样品的荧光光谱。与未辐照样品相比,量子阱特征峰位置不变,强度有所降低。曲线 3 为经过自由电子激光辐照后的荧光光谱,量子阱特征峰值发生红移至 812 nm,波形展宽,峰高大大降低。

4 讨论和结论

4.1 自由电子激光辐照分析

GaAs/AlGaAs 量子阱经过自由电子激光辐照后,量子阱特征峰值发生红移至 812 nm。这说明自由电子激光辐照使 Al 原子从势垒向势阱扩散,在界面处形成一过渡区,导致势垒变高,使得价带内重空穴能级位置与导带内第一激发态能级位置发生微调,两者之间的能量间距减小,从而使特征荧光峰波长由 797 nm 红移至 812 nm。

自由电子激光辐照样品,将能量传递给原子,使原子扩散增强。Al 原子在势阱与势垒界面的扩散导致 GaAs/AlGaAs 多量子阱界面混合。根据量子阱界面扩散理论^[6,7],可用 Al 组份的误差分布函数表示异质界面混合效果。在量子阱的异质结构界面处的 Al 组份 $x(z)$ 为

$$x(z) = x_0 \left[1 - \frac{1}{2} \left| \operatorname{erf} \left[\frac{L_z + 2z}{4L_d} \right] + \operatorname{erf} \left[\frac{L_z - 2z}{4L_d} \right] \right| \right] \quad (1)$$

其中扩散长度 $L_d = \sqrt{Dt}$, D 为扩散系数且是温度的函数: $D = D_0 \exp(-\Delta E/KT)$, $D_0 = 10^{17} \text{ cm}^2/\text{s}$, $\Delta E = 5.6 \text{ eV}$, t 为辐照时间。 x_0 是势垒中 Al 的成分分布, $\operatorname{erf}(x)$ 为余误差函数。按照方程(1),可得到量子阱参数。导带电子势函数为

$$U(z) = Q_c [E_g(z) - E_g(z=0)] \quad (2)$$

这里, E_g 为禁带宽度, Q_c 为能带分裂补偿。由方程(2)可以计算出界面混合效应的量子阱中的电子能级。通过自由电子激光辐照导致 AlGaAs 势垒中 Al 原子向 GaAs 势阱扩散,量子阱形状发生畸变,由标准方势阱变成抛物状势阱,使得量子阱特征峰波形展宽并且强度大为减弱。

4.2 电子辐照分析

量子阱中的激子由于受势垒的限制作用,只在平行于界面的平面内可自由运动,而在量子阱生长方向上(假设为 z 方向)运动受到限制,是准二维的。由文献^[8]可知,在二维情况下,激子的结合能

为

$$\epsilon_n^{2D} = - \frac{R_y^*}{\left[n - \frac{1}{2} \right]^2} \quad (3)$$

其中 R_y^* 为有效里德伯常数。激子的有效玻尔半径为

$$a_B^* = \frac{\epsilon_0 \hbar^2}{\mu e^2} \quad (4)$$

其中 μ 为电子和空穴的折合质量, ϵ_0 为量子阱材料的介电常数。激子的波函数为

$$\varphi_{1s}^{2D} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{2}{a_B^*} e^{-\frac{2r}{a_B^*}} \quad (5)$$

量子阱经过电子辐照后,引入缺陷,产生散射中心,破坏了材料晶格空间的完整性,导致激子的有效玻尔半径增大,使激子的波函数减小,从而使光跃迁强度减弱。但 1 MeV 电子辐照的射程在微米量级,远大于量子阱深度。并且电子质量小,其运动方向有很大改变,在穿过物质的路程轨迹中产生简单缺陷,如单空位等点缺陷,所以对量子阱结构破坏不大,只使量子阱特征峰位置不变,强度有所降低。

4.3 两种辐照效应比较

以上结果表明,利用自由电子激光辐照样品可增强扩散效应,改变 GaAs/AlGaAs 多量子阱结构的原子分布情况,从而实现量子阱能级的微调,而电子辐照只对量子阱结构有轻微的破坏作用。

致谢 感谢中国科学院半导体所曾一平研究员提供量子阱材料和陈涌海同志测试光荧光谱。

参 考 文 献

- 1 Hui Zhongxi, Yang Zhenhua. Free Electron Lasers [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1995. 1~ 4 (in Chinese)
- 2 Y. Berhane, M. O. Manasreh, B. D. Weaver. He⁺-ion irradiation effect on intersubband transitions in GaAs/AlGaAs multiple quantum wells [J]. *J. Appl. Phys.*, 2001, **89**(6): 3517~ 3519
- 3 Huang Wanxia, Lin Libin, Zeng Yiping *et al.*. Effects of optic character of GaAs/AlGaAs multiple quantum well with proton irradiation [J]. *Chinese J. Semiconductors* (半导体学报), 1999, **20**(11): 957~ 962 (in Chinese)
- 4 H. Nakano, H. Kubo, N. Mori *et al.*. Luminescence from GaAs/AlGaAs quantum wells induced by mid-infrared free electron laser pulses [J]. *Physica E*, 2000, **7**: 555~ 558
- 5 Shen Xuechu. Semiconductor Optics [M]. Beijing: Science Press. 1992. 633~ 636 (in Chinese)
- 6 E. H. Li, B. L. Weiss, K. S. Chan. Effect of interdiffusion on the subbands in an Al_xGa_{1-x}As/GaAs single quantum well structure [J]. *Phys. Rev. B*, 1992, **46**(23): 15181~ 15192
- 7 Li Ning, Liu Xingquan, Li Na *et al.*. Modification of GaAs/AlGaAs quantum well infrared photodetectors by rapid thermal annealing [J]. *Chinese J. Semiconductors* (半导体学报), 2000, **21**(3): 264~ 267 (in Chinese)
- 8 Xia Jianbai, Zhu Bangfen. Semiconductor Superlattice Physics [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1995. 86~ 87 (in Chinese)