

文章编号: 1001-4322(2003)01-0033-04

半导体量子阱材料的自由电子激光辐照效应及 OTCS 测试研究*

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 高能物理研究所, 北京 100080)

摘 要: 利用低温光荧光谱(PL)和光瞬态电流谱(OTCS)研究了自由电子激光辐照对 GaAs/AlGaAs 多量子阱材料的光学性质以及缺陷能级的影响。用波长为 8.92 μm , 光功率密度相应于电场强度为 20kV/cm 的自由电子激光辐照多量子阱 60min, 分析 PL 谱发现量子阱特征峰(797nm)经过辐照后峰值发生红移至 812nm, 波形展宽, 峰高降低。分析 OTCS 谱发现自由电子激光辐照引入了新的缺陷能级, 量子阱结构发生变化, 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: 量子阱; 自由电子激光辐照; 低温光荧光谱; 红移; 光瞬态电流谱

中图分类号: TN246 **文献标识码:** A

为了研究半导体低维材料的强激光辐照效应, 作者使用了自由电子激光进行辐照。自由电子激光是由相对论电子束通过摇摆器时产生的受激辐射, 与通常的激光相比, 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^[1]。使用适当波长、高峰值功率的自由电子激光脉冲对半导体材料进行辐照, 可以改变材料的结构, 从而改变材料物理性质。自由电子激光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^[2~4]。

我们用波长为 8.92 μm , 电场强度为 20kV/cm 的自由电子激光辐照半导体多量子阱 60min, 测量了辐照前后材料的低温光荧光谱和 OTCS 谱。发现量子阱特征峰 797nm 经过辐照后峰值发生变化, 波形展宽, 峰高降低, 并引入新的缺陷, 得到了与文献[5]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, 从而实现量子阱的能级分布的微调。

1 实验方法

1.1 样品制备

采用分子束外延(MBE)方法生长的 GaAs/AlGaAs 多量子阱样品, 其结构如图 1 所示。在 n 型重掺杂的 GaAs 衬底上生长一层厚 200nm 的 GaAs 缓冲层, 然后上面外延 30 个周期的量子阱, 其中 GaAs 势阱厚 10nm, Al_{0.3}Ga_{0.7}As 势垒厚 20nm, 最后在顶部长一层厚 50nm 的 GaAs 保护层。

1.2 辐照实验

在北京自由电子激光装置(BFEL)上对半导体量子阱材料进行自由电子激光辐照。辐照条件是在室温下用波长为 8.92 μm , 宏脉冲能量为 1.29mJ, 光斑直径为 3.69mm, 相应于激光的电场强度为 20kV/cm 的自由电子激光辐照多量子阱 60min, 3 个宏脉冲每秒。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 1MeV, 注量为 $1 \times 10^{16}/\text{cm}^2$ 的电子束进行辐照。

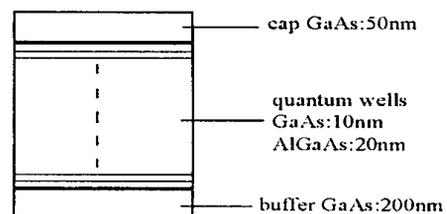


Fig. 1 Quantum wells structure

图 1 样品结构

* 收稿日期: 2002-03-28; 修订日期: 2002-08-29

基金项目: 国家自然科学基金资助课题(6008802); 全国高校博士点基金资助课题

作者简介: 邹睿(1977-), 男, 硕士, 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.

1.3 OTCS 测试

光瞬态电流谱(OTCS)是专门以高阻材料为研究对象设计的。其基本思想是:用适当波长的光在高阻材料中注入非平衡载流子,然后检测不同的深能级中心的热激发所产生的电流瞬态以得到各深能级中心的有关参数。因为OTCS克服了DLTS不能用于高阻材料的局限性,因而成为研究各种半绝缘材料和外延生长高阻缓冲层特性的有力工具。系统框图如图2所示。

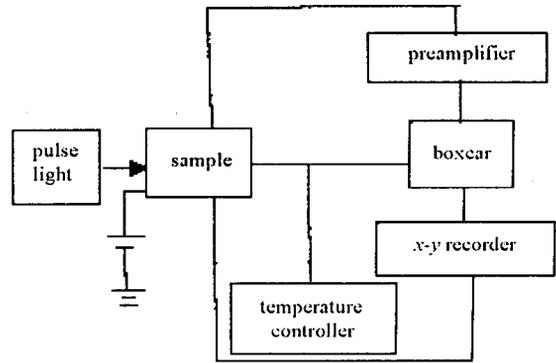


Fig. 2 Schematic diagram of OTCS set-up

图2 OTCS系统框图

2 结果与讨论

2.1 荧光分析

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^[6]。本实验用IFS120HR红外傅立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514.5nm,温度为15K,如图3所示。1#曲线为辐照前样品的荧光光谱,波长为797nm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。2#曲线为经过能量为1MeV,注量为 $10^{16}/\text{cm}^2$ 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。3#曲线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812nm,波形展宽,峰高大大降低。

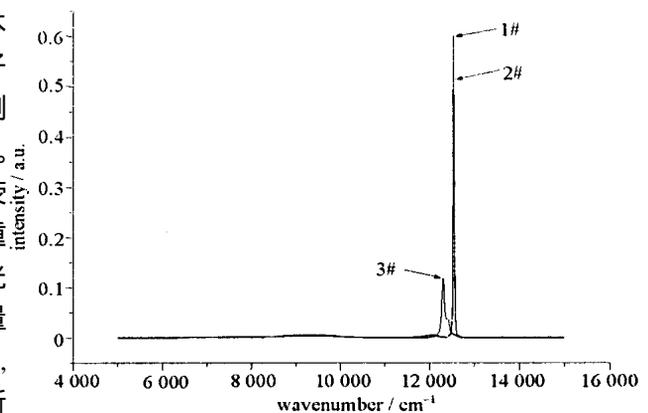


Fig. 3 Photoluminescence spectra at 15 K

图3 低温光荧光光谱

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812nm。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797nm红移至812nm。

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^[7,8],可用Al组分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组分 $x(z)$ 为

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

式中:扩散长度 $L_d = \sqrt{Dt}$, D 为扩散系数且是温度的函数: $D = D_0 \exp(-E/KT)$, $D_0 = 10^{17} \text{cm}^2/\text{s}$, $E = 5.6 \text{eV}$, 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

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

式中: 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。

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[9]可知,在二维情况下,激子的结合能为

$$\frac{2D}{n} = -R_y^* / (n - 1/2)^2 \quad (3)$$

式中: R_y^* 为有效里德伯常数。

激子的有效玻尔半径为

$$a_B^* = \epsilon_0 h^2 / \mu e^2 \tag{4}$$

式中: μ 是电子和空穴的折合质量; ϵ_0 是量子阱材料的介电常数。

激子的波函数为

$$\psi_{1s}^{2D} = \sqrt{\frac{2}{a_B^*}} \frac{2}{a_B^*} e^{-2r/a_B^*} \tag{5}$$

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 μm 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。

2.2 OTCS 分析

根据表 1, 波长为 $8.92\mu\text{m}$ 的自由电子激光的光学吸收长度超过 $70\mu\text{m}$, 远大于量子阱的厚度 $1.15\mu\text{m}$, 自由电子激光穿透过量子阱。

表 1 室温下对应各种波长 GaAs 的光学吸收长度($1/\lambda$) 和反射率(R)

Table 1 Absorption length and reflectivity of GaAs at room temperature

wavelength / μm	0.25	0.5	1.06	10.6
GaAs $1/\lambda$	6nm	100nm	70 μm	> 1cm
R	0.6	0.39	0.31	0.28

图 4 为自由电子激光辐照前后的 OTCS 谱, 测量时偏压为 22V, 率窗为 10ms。其中 1[#] 曲线为辐照前样品的 OTCS 谱, E_1 与 GaAs 有关, E_2 与 AlGaAs 有关。2[#] 曲线为辐照后样品的 OTCS 谱, E_3 是辐照引入的缺陷。由图可见, 辐照前有两种缺陷, 与其对应的能级分别为 E_1 及 E_2 , 辐照后其中 E_1 不变, E_2 的缺陷消失, 还出现新的缺陷 E_3 。

E_1 是原生缺陷, 一般认为它与 GaAs 有关。自由电子激光辐照后虽仍存在, 但受辐照的影响也有变化, 不仅峰位从 $E_c - 0.11\text{eV}$ 变到 $E_c - 0.1\text{eV}$, 而且峰值有所下降, 这说明还有因辐照引起的其它缺陷的存在。 E_2 在辐照前存在, 而辐照后的 E_2 缺陷峰消失的原因可以认为是在自由电子激光辐照过程中, E_2 与辐照产生的缺陷相互作用而形成新类型的缺陷, 而且因自由电子激光辐照的热效应的退火作用也可能造成 E_2 峰的消失。 E_3 则是由自由电子激光辐照引入的新缺陷, 其峰值较低。另外, 还产生了能级位置小于 0.1eV 的浅能级缺陷峰。但由于受仪器温度限制, 不能确定具体能级位置。

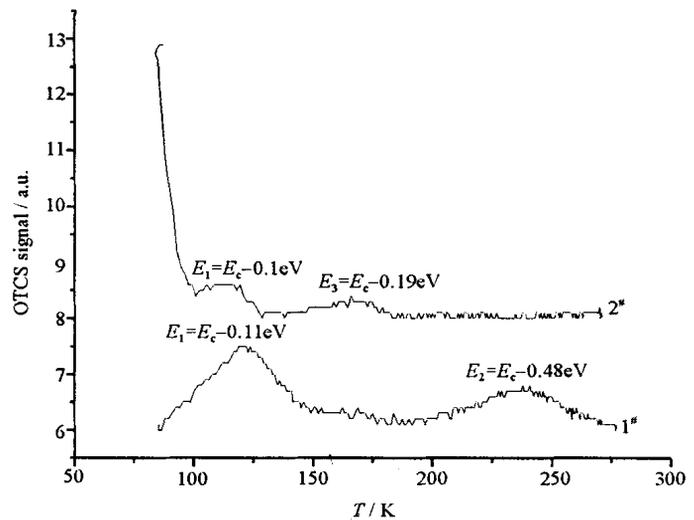


Fig. 4 Optical transient current spectra

图 4 OTCS 谱

自由电子激光引入了新的缺陷能级, 这可能是导致量子阱特征荧光峰红移的重要原因。

3 结 论

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破坏作用。

致 谢 感谢中科院半导体所曾一平老师提供量子阱材料、陈涌海同志测试光荧光谱以及卢励吾老师测试 OTCS 谱并进行有益的讨论。

参考文献:

[1] 惠钟锡, 杨振华. 自由电子激光[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995. 1—4. (Hui Z X, Yang Z H. Free electron lasers. Beijing: National Defence In-

- dustry Press, 1995. 1—4)
- [2] Berhane Y, Manasreh M O, Weaver B D. He⁺-ion irradiation effect on intersubband transitions in GaAs/AlGaAs multiple quantum wells[J]. *J Appl Phys*, 2001, **89** (6): 3517—3519.
- [3] 黄万霞, 林理彬, 曾一平, 等. 质子辐照对 GaAs/AlGaAs 多量子阱光学性质的影响[J]. 半导体学报, 1999, **20**(11): 957—962. (Huang W X, Lin L B, Zeng Y P, et al. Effects of optic character of GaAs/AlGaAs multiple quantum well with proton irradiation. *Chinese J Semiconductors*, 1999, **20**(11): 957—962)
- [4] 邹睿, 林理彬. 带电粒子辐射对 GaAs/AlGaAs 多量子阱光学性质的影响[J]. 固体电子学研究进展, 已录用. (Zou R, Lin L B. Irradiation effects on optic character in GaAs/AlGaAs quantum wells. *Progress & Research in Solid State Electronics*, accepted)
- [5] Nakano H, Kubo H, Mori N, et al. Luminescence from GaAs/AlGaAs quantum wells induced by mid-infrared free electron laser pulses[J]. *Physica E*, 2000, **7**: 555—558.
- [6] 沈学础. 半导体光学性质[M]. 北京: 科学出版社, 1992. 633. (Shen X C. Semiconductor optics. Beijing: Science Press, 1992. 633)
- [7] Li E H, Weiss B L, Chan K S. Effect of interdiffusion on the subbands in an Al_xGa_{1-x}As single quantum well structure[J]. *Phys Rev B*, 1992, **46** (23): 15181—15192.
- [8] 李宁, 刘兴权, 李娜, 等. 快速热退火对 GaAs/AlGaAs 量子阱红外探测器的修饰[J]. 半导体学报, 2000, **21**(3): 264—267. (Li N, Liu X Q, Li N, et al. Modification of GaAs/AlGaAs quantum well infrared photodetectors by rapid thermal annealing. *Chinese J Semiconductors*, 2000, **21**(3): 264—267)
- [9] 夏建白, 朱邦芬. 半导体超晶格物理[M]. 上海: 科学技术出版社, 1995. 86—87. (Xia J B, Zhu B F. Semiconductor superlattice physics. Shanghai: Science and Technology Press, 1995. 86—87)

Study on GaAs/AlGaAs multiple quantum wells irradiated by free electron laser and OTCS measurement

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

(1. Department of Physics, Sichuan University, Chengdu 610064, China;

2. Institute of High Energy Physics, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: Photoluminescence (PL) and optical transient current spectra (OTCS) were observed from GaAs/AlGaAs quantum wells structure excited by mid-infrared free electron laser (FEL) irradiation. The experimental results of PL showed that the characteristic PL peak of quantum wells shifted to longer wavelength (red shift) and the intensity decreased much after FEL irradiation. From the analysis of OTCS, extrinsic defects were found after FEL irradiation. This paper author discusses the results and comparison with that of electron irradiation.

Key words: GaAs/AlGaAs quantum wells; free electron laser irradiation; photoluminescence spectra; red shift; OTCS