

In_{0.22}Ga_{0.78}As/GaAs 量子阱光致发光谱 电子辐照效应研究

玛丽娅^{1,2}, 郭 旗¹, 艾尔肯¹, 李豫东¹, 李占行^{1,2}, 文 林¹, 周 东¹

¹中国科学院新疆理化技术研究所特殊环境功能材料与器件重点实验室,
新疆电子信息材料与器件重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 对未掺杂的 In_{0.22}Ga_{0.78}As/GaAs 量子阱材料开展了能量为 1 MeV、电子注量达 $1 \times 10^{16} / \text{cm}^2$ 的电子束辐照实验。实验结果显示, 电子束轰击量子阱材料, 通过能量传递在材料中引入缺陷, 导致光致发光减弱; 电子束辐照后的量子阱中同时存在应力释放和原子互混现象, 导致量子阱的发光峰先红移后蓝移; 辐照后的量子阱发光波长取决于应变弛豫和扩散的共同作用。

关键词 材料; 辐射; 损伤; 光致发光谱; 量子阱

中图分类号 O59 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0216002

Photoluminescence Spectrum Study of Electron Beam Irradiated In_{0.22}Ga_{0.78}As/GaAs Quantum Well

Ma Liya^{1,2}, Guo Qi¹, Ai Erken¹, Li Yudong¹, Li Zhanhang^{1,2}, Wen Lin¹, Zhou Dong¹

¹Key Laboratory of Functional Materials and Devices for Special Environments, Xinjiang Key Laboratory of Electronic Information Materials and Devices, The Xinjiang Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, Xinjiang 830011, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The experiment of 1 MeV electron beam irradiating undoped In_{0.22}Ga_{0.78}As/GaAs quantum well material with electron dose of $1 \times 10^{16} / \text{cm}^2$ is conducted. The experimental results indicate that, when quantum well material irradiated, the defects occur as a result of energy transfer in the material which degrades the photoluminescence. As for the irradiated quantum wells, the stress relaxation and atom intermixing coexist which result in the photoluminescence peak first red-shifting and then blue-shifting, and their photoluminescence wavelengths are determined by the coaction of strain relaxation and diffusion.

Key words materials; irradiation; damage; photoluminescence spectrum; quantum well

OCIS codes 160.4760; 350.5610; 350.1820; 250.5230

1 引 言

在低维量子结构半导体材料中, 量子限制效应使系统产生分立能级, 其态密度函数较体材料的有很大不同, 具有许多独特的光学性质和电学性质, 可以通过调整层厚、组分和掺杂等对其进行人工改性^[1]。低维材料特有的优异光学和物理特性为实现高增益、宽光谱的光电器件提供了可能^[2-4], 其中 In_xGa_{1-x}As (x 为 In 的组分) 三元化合物体系的低维结构在光电子器件领域具有广泛应用^[5-6], InGaAs 低维光电材料与器件在光电集成、集成光学和纳米器件领域具有良好的应用前景^[7-12]。

收稿日期: 2016-08-15; **收到修改稿日期:** 2016-09-20

基金项目: 国家自然科学基金(11275262, 61534008)

作者简介: 玛丽娅(1987—), 女, 博士研究生, 主要从事光电材料辐射效应方面的研究。E-mail: maria0511@163.com

导师简介: 郭 旗(1964—), 男, 本科, 研究员, 博士生导师, 主要从事半导体器件辐射效应方面的研究。

E-mail: guoqi@ms.xjb.ac.cn(通信联系人)

受太阳宇宙射线、银河宇宙射线及地球自身磁场的影响,航天器及卫星处于极为复杂的空间辐射环境中。高能粒子及射线能穿透航天器的屏蔽层与电子系统发生相互作用,导致电子系统性能发生退化甚至丧失,对航天器的安全及寿命造成威胁。复杂的空间辐射环境对应用于空间载荷中的光电器件威胁很大,其中辐射损伤引起的晶格位移缺陷是导致器件性能退化的关键因素^[13]。辐照条件下量子阱材料光电特性衰减规律直接影响着半导体激光器等光电器件在空间技术中的稳定可靠的应用。

国内外研究人员对量子阱材料辐射效应已开展了不少工作。Tanaka 等^[14]研究了 5~25 keV 的电子束辐照 GaAs/AlGaAs 量子阱产生的辐照损伤与电子束能量、注量之间的关系。Manasreh 等^[15]用能量为 1 MeV 的质子辐照 GaAs/AlGaAs 多量子阱,发现注量为 $4 \times 10^{14} / \text{cm}^2$ 时子带间的光跃迁发生退化甚至完全消失,光致发光(PL)强度经过小于 650 °C 的退火后恢复至初始值的 80%。Aierken 等^[16]研究了 InGaAs/GaAs 量子阱和量子点材料的光致发光谱和时间分辨光致发光谱在 γ 射线和电子束辐照前后的变化情况,发现经辐照后所有样品的 PL 强度和载流子寿命都有不同程度的退化。黄万霞等^[17]对 GaAs/AlGaAs 多量子阱材料开展了辐射效应研究,得到了多量子阱材料的光致发光特性与质子能量和注量的变化关系。车驰等^[18-20]对量子点激光器、量子阱激光器及发光二极管等器件的辐射损伤特性及规律开展了研究。为获得 InGaAs/GaAs 量子阱材料在高能粒子辐照后的损伤规律,本文对 $\text{In}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}/\text{GaAs}$ 量子阱材料经 1 MeV 能量电子束辐照前后的光致发光谱进行了研究,结合量子阱中载流子的稳态速率方程和原子扩散理论对实验中产生的发光强度衰减和峰值波长移动的机理进行了深入分析。研究结果为提高 InGaAs/GaAs 量子阱材料抗辐射能力提供了一定的参考。

2 实 验

2.1 样品选取

在低维量子结构材料中,以 GaAs 基材料为代表的 III-V 族低维半导体材料禁带宽度大、发光效率高、量子效应明显,得到了研究人员的广泛关注。InGaAs 和 GaAs 两种材料晶格常数不同,但通过调节材料中 In 的组分,可生长出失配度小、层厚小于弹性形变临界厚度、能够在平行于界面的方向上产生统一的平衡晶格常数的 $\text{In}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}/\text{GaAs}$ 量子阱材料。InGaAs 应变层的引入使原来晶格的对称性发生变化,平行结平面两个方向的晶格常数小于原来的晶格常数,因而晶格受到双轴压应力,而在垂直结平面方向,晶格得到延伸。该晶格对称性的改变直接导致了能带结构的改变,即轻、重空穴带分开,能带形状发生改变,这种能带结构的变化改变了无应变量子阱激光器中小导带态密度与大价带态密度之间的不对称性,减弱了价带内的自由载流子吸收和俄歇复合。这种应变异质结不仅拓展了材料体系,而且使半导体激光器等光电器件性能得到进一步提高,与传统晶格匹配的器件相比具有更低的阈值电流、更高的特征温度和更大的微分增益。

为了获得用于制备空间载荷的红外光电器件的异质结量子阱材料的辐射规律及损伤机理,选取了未掺杂的 $\text{In}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}/\text{GaAs}$ 外延薄膜量子阱材料作为研究对象,侧重考察了 $\text{In}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}/\text{GaAs}$ 量子阱材料的光致发光谱在辐照前后的变化规律,而对于样品本身的生长细节及性能参数不再赘述。实验所用样品结构如图 1 所示,先在衬底上生长一定厚度的 GaAs 缓冲层,再在 510 °C 条件下生长 7 nm 厚的 InGaAs 层,再生长 40 nm 厚的 GaAs 层和 50 nm 厚的 InGaAs 层,最后生长 GaAs 盖层。

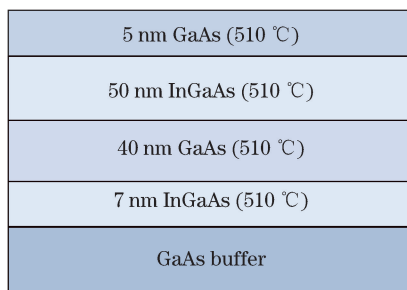


图 1 $\text{In}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}/\text{GaAs}$ 量子阱样品结构图

Fig. 1 Schematic diagram of $\text{In}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}/\text{GaAs}$ quantum well sample

2.2 辐照实验

采用俄罗斯 ELV-8 II 的高频高压电子加速器,其能量范围为 1.0~2.0 MeV,束流范围为 $5 \times 10^7 \sim 1 \times 10^{12} / (\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$,注量率范围为 $1 \times 10^{10} \sim 5 \times 10^{13} / \text{s}$,可产生低通量、高稳定性的电子束。选取的电子束能量为 1.0 MeV,注量范围为 $5 \times 10^{13} \sim 1 \times 10^{16} / \text{cm}^2$,采用垂直入射的方式。

2.3 参数测试

对辐照前后样品的光致发光谱进行了测试,图 2 为光致发光测试系统装置图,其中 ADC 是模数转换器。为了使激发光源能量大于半导体材料的禁带宽度,选择波长为 532 nm 的激光作为激发光源激发被测样品,同时选用 InGaAs 光探测器接收并识别被测样品发射的光信号。使用通频带较窄的干涉滤光片过滤消除激光器红外波段的弱发射谱线对样品发光特性的影响,同时采用锁相放大技术对信号进行放大。测试在低温 (10 K) 环境下进行。

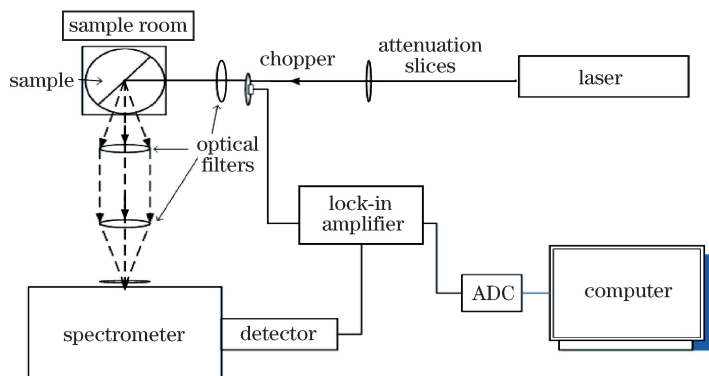


图 2 光致发光谱测试系统装置图

Fig. 2 Schematic diagram of photoluminescence spectrum testing system

3 结果与讨论

当辐照注量分别为 $0, 5 \times 10^{13}, 1 \times 10^{14}, 5 \times 10^{14}, 1 \times 10^{15}, 1 \times 10^{16} / \text{cm}^2$ 时,将样品取出进行光致发光谱测试。为保证测试数据准确,测试时辐照前后的激发光入射点的位置保持一致,温度用温度控制器控制在 10 K,只改变激发光的功率密度,范围为 $26 \sim 704 \text{ mW/cm}^2$ 。

3.1 光致发光谱

图 3 为 1.0 MeV 电子辐照 InGaAs/GaAs 量子阱样品的 PL 谱随电子注量的变化情况。可以看到,随着辐照注量的增加,样品光致发光谱衰减非常明显。当注量达到 $5 \times 10^{13} / \text{cm}^2$ 时,PL 强度已衰减至初值的 60%;当注量累积至最大注量 $1 \times 10^{16} / \text{cm}^2$ 时,样品的 PL 强度仅有初始值的 20%。在 10 MeV 质子辐照实验中有类似的变化规律,如图 4 所示。实验中选取的注量点与 1.0 MeV 电子实验中的位移损伤注量点保持一致。

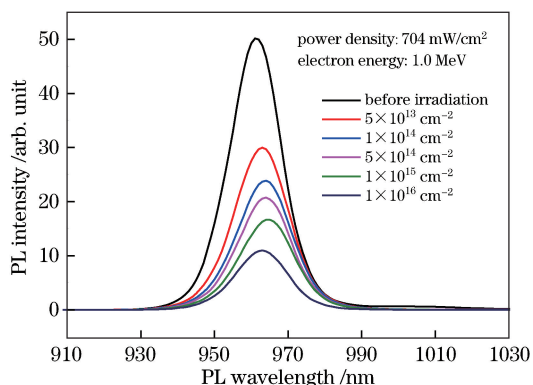


图 3 InGaAs/GaAs 量子阱 PL 谱随电子注量的变化
Fig. 3 Variance of PL spectra of InGaAs/GaAs quantum wells with electron dose

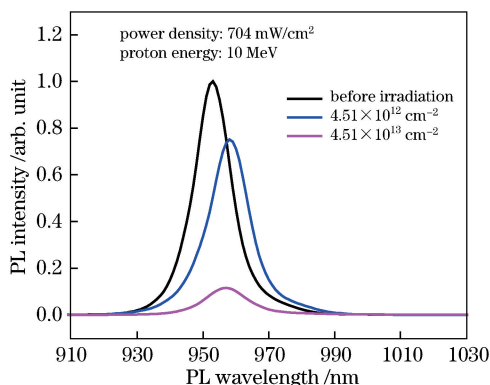


图 4 InGaAs/GaAs 量子阱 PL 谱随质子注量的变化
Fig. 4 Variance of PL spectra of InGaAs/GaAs quantum wells with proton doses

表 1 给出了量子阱样品的 PL 归一化积分强度和发光峰峰值能量随质子注量的变化。可以看出,当注量达到 $4.51 \times 10^{11} / \text{cm}^2$ 时,PL 强度已衰减至初值的 73%;当注量累积至最大注量 $4.51 \times 10^{12} / \text{cm}^2$ 时,样品的 PL 强度仅为初始值的 10%。PL 谱的发光峰峰值能量出现了先红移后蓝移的现象。

表 1 量子阱样品 PL 归一化积分强度和发光峰峰值能量移动随质子注量的变化

Table 1 Variance of normalized PL integrated intensity and peak energy shift of quantum well samples with proton doses

Dose of 10 MeV proton / cm^2	0	4.51×10^{-11}	4.51×10^{-12}
Normalized PL integrated intensity	1	0.734806	0.104508
Peak energy shift /MeV	0	-2.679800	1.341290

图 5 为 InGaAs/GaAs 量子阱样品在不同电子注量下的 PL 积分强度随激发功率密度的变化情况。从图 5 可以看出,辐照前 InGaAs/GaAs 量子阱的 PL 强度随激发功率密度的增强而增强;随着辐照注量的增加,不同激发功率密度下的 PL 积分强度均发生了衰减,且在较低注入条件下就达到了饱和。

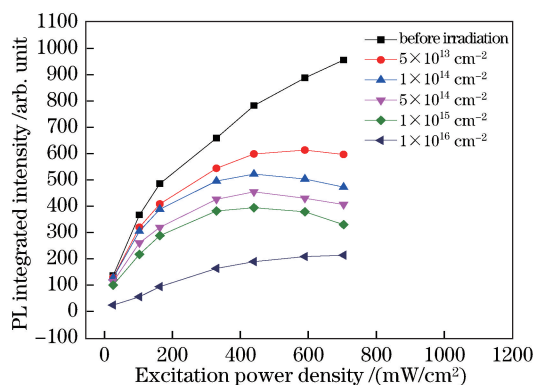


图 5 InGaAs/GaAs 量子阱样品在不同电子注量下的 PL 积分强度随激发功率密度的变化

Fig. 5 Variation of PL integrated intensity of InGaAs/GaAs quantum well samples with excitation power density under different electron doses

当用高能电子束辐照 InGaAs 量子阱材料时,电子会和材料中的晶格原子发生弹性碰撞或非弹性碰撞,通过碰撞将一部分能量传给晶格原子,使晶格原子发生位移,离开原来的位置,成为间隙原子;原子离开原来的位置,产生一个空位,如图 6 所示,原子和空位合称为弗伦克尔缺陷对。这些缺陷和材料中的一些杂质会破坏晶格的周期性,从而在晶格禁带中产生局部的、分立的能级缺陷,在半导体中起着复合中心、俘获陷阱和散射中心的作用,影响少数载流子寿命、掺杂浓度及载流子的迁移率等。

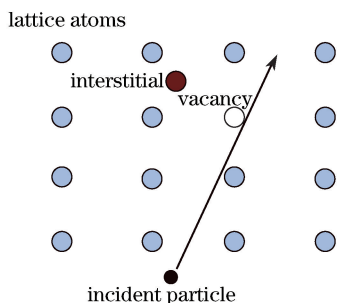


图 6 高能粒子入射材料内部产生间隙原子-空位示意图

Fig. 6 Schematic diagram of high-energy particles entering into materials and inducing interstitial-vacancy

量子阱模型如图 7 所示,其中 n 、 m 分别为势垒和量子阱中的载流子占有数, P 为载流子在势垒中的产生率, R' 为载流子在势垒中的非辐射复合率, R 为量子阱中载流子的辐射复合率, U 为从势垒到量子阱的载流子俘获率, E_A 为受主能级, K 为玻尔兹曼常数, T 为热力学温度。 $U \exp[-E_A/(kT)]$ 表示从量子阱到势垒的载流子热激发率。量子阱受到外界激发在势垒中产生电子-空穴对,俘获、热激发和辐射共同决定了量子阱的发光强度。在势垒中,载流子的非辐射复合过程与温度无关。量子阱中载流子的稳态速率方程为^[21]

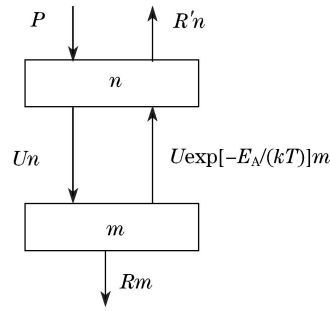


图 7 量子阱模型示意图^[16]

Fig. 7 Schematic diagram of quantum well model^[16]

$$dn/dt = P - (U + R')n + U\exp[-E_A/(kT)]m = 0, \quad (1)$$

$$dm/dt = Un - \{U\exp[-E_A/(kT)] + R\}m = 0, \quad (2)$$

由(1)、(2)式可得发光强度

$$I = Rm = \frac{P}{1 + (R'/R)\exp[-E_A/(kT)] + R'/U} \quad (3)$$

辐射粒子入射材料内部产生点缺陷(结构型缺陷),它既可能形成非辐射复合中心,如 p-GaAs 中的 V_{Ga} ,也可能形成辐射复合中心,也就是所谓的发光中心,如 ZnS 中的 V_{Zn} (自激活蓝色发光带)。半导体材料受到光的本征激发(光子能量大于或等于禁带宽度),电子从价带跃迁到导带,产生了非平衡载流子;非平衡载流子的复合过程按照能量交换的方式可以大致分成辐射复合和非辐射复合两种。辐射复合是指非平衡载流子复合后将多余的能量以光子的形式放出,非辐射复合是指非平衡载流子复合后以除光子辐射之外的其他方式释放能量。在平衡态,载流子的产生率与复合率相等。实验结果表明,随着辐照注量的增加,量子阱材料的 PL 效率减小。这是因为,为保持复合率不变,非辐射复合中心数量的增加导致载流子通过不发射光子的方式进行复合,从而减小了辐射复合率。电子束辐照产生的弗伦克尔缺陷在量子阱材料中起着非辐射复合中心的作用,能够有效增加非辐射复合率 R' ;随着辐照注量的增加,非辐射复合中心数量也逐渐增加,导致量子阱中载流子的辐射复合率 R 也随之显著减小。由(3)式可知,在光注入条件不变的情况下,高能粒子入射材料内部导致的非辐射复合率的增大和辐射复合率的减小导致量子阱的发光强度 I 显著减小。

3.2 发光峰中心波长

图 8 为 InGaAs/GaAs 量子阱样品在不同激发条件下的发光峰中心波长随电子注量的变化情况。由图可见,不同激发功率密度下样品的峰值波长在辐照前均为 961 nm,辐照后发生了不同程度的红移现象,最大可至 963 nm;当辐照注量达到 $1 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ 时,样品的发光峰中心波长蓝移。表 2 给出了量子阱样品在三种激发功率密度下的发光峰峰值能量随电子注量的变化情况。可以清晰地看到,量子阱的发光峰峰值能量发生了明显的先红移后蓝移的现象。

表 2 量子阱样品在三种激发功率密度下的发光峰峰值能量移动随电子注量的变化

Table 2 Variance of photoluminescence peak energy shift in quantum well samples with electron dose under three excitation power intensities

Electron dose / cm^{-2}	Peak energy shift /MeV		
	440 mW/ cm^2	590 mW/ cm^2	704 mW/ cm^2
0	0	0	0
5×10^{13}	-1.34129	-1.34129	-2.6798
1×10^{14}	-1.34129	-2.67980	-2.6798
1×10^{15}	-1.34129	-2.67980	-2.6798
1×10^{16}	0	-1.34129	0

在晶格失配的 $\text{In}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}/\text{GaAs}$ 量子阱中,晶格的对称性由于应变层的引入发生了变化,平行结平面的两个方向上的晶格常数相比原晶格常数小,晶格受到双轴压应力,导致量子阱晶格的对称性和能带结构发生

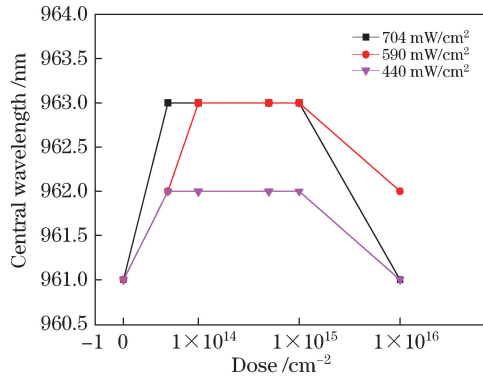


图 8 InGaAs/GaAs 量子阱样品在不同激发功率密度下的发光峰中心波长随电子注量的变化

Fig. 8 Variation of central wavelength of photoluminescence peaks of InGaAs/GaAs quantum well samples with electron dose under different excitation power intensities

变化。在双轴压应变层中,净带隙移动为^[22-23]

$$\Delta E = -\alpha \epsilon, \quad (4)$$

式中 α 为形变势,与材料的弹性系数等有关; ϵ 是应变。量子阱的总跃迁能为

$$E_t = E_{cl} + E_{hh1} + E_g + \Delta E, \quad (5)$$

式中 E_{cl} 和 E_{hh1} 分别为导带和价带第一束缚能级, E_g 为禁带宽度, ΔE 为净带隙移动。电子和材料中的晶格原子发生弹性碰撞或非弹性碰撞,通过碰撞将一部分能量传给晶格原子,使晶格原子离开原来的位置,形成缺陷。通过缺陷的引入,部分失配应变弛豫,导致 $\text{In}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}$ 应变层的晶格常数与 GaAs 不再相等,即 $a_{\text{layer}}^{\text{strain}} \neq a_{\text{sub}}$, 其中 $a_{\text{layer}}^{\text{strain}}$ 表示应变层的原始晶格常数, a_{layer} 表示经过应力弛豫后应变层的晶格常数, a_{sub} 表示 GaAs 层的晶格常数。应变层的部分弛豫率可以由弛豫参数表示为

$$R = (a_{\text{layer}}^{\text{strain}} - a_{\text{sub}}) / (a_{\text{layer}} - a_{\text{sub}}). \quad (6)$$

$R = 0$ 表示应变弛豫未发生 ($a_{\text{layer}}^{\text{strain}} = a_{\text{sub}}$), $R = 1$ 表示完全弛豫 ($a_{\text{layer}}^{\text{strain}} = a_{\text{layer}}$)。应变的范围为 $0 \leq |\epsilon| \leq (a_{\text{layer}} - a_{\text{sub}}) / a_{\text{sub}}$ 。当应变弛豫未发生时,应变量值最大;当发生完全应变弛豫时,应变量值最小。因此,电子辐照量子阱材料产生发光峰波长红移是有限度的,当缺陷累积到一定程度时应变完全弛豫,红移现象结束。

另一方面外,由于 $\text{In}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}/\text{GaAs}$ 界面两边的浓度差和两种原子迁移能力的不同,入射电子将能量传给晶格原子,原子间发生互扩散。In-Ga 原子互扩散会导致发光峰波长蓝移。该蓝移与量子阱形状改变导致的电子和空穴的子能级的增加有关。而量子阱形状的改变正是跨越量子阱异质结界面的 In-Ga 原子互扩散导致的^[24-25]。这种互扩散现象是随着注量的增加而增强的。

综上所述,应变弛豫提供了 PL 峰值能量移动的初始值,应变弛豫造成了 PL 峰值能量的红移;此后,随着辐照注量的增加,出现 In-Ga 原子互扩散,应变逐渐接近完全弛豫,辐照后样品的 PL 峰值能量主要受扩散的影响而蓝移。辐照后的 $\text{In}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}/\text{GaAs}$ 量子阱的发光波长取决于应变弛豫和扩散的共同作用。

4 结 论

对 $\text{In}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}/\text{GaAs}$ 量子阱材料开展了能量为 1 MeV 电子束的辐照实验,注量达 $1 \times 10^{16} / \text{cm}^2$ 。在辐照前后进行了 PL 谱测试,结果显示,样品的 PL 峰强度随着辐照注量的增大而显著减小。经分析,得到如下结论。

1) 电子轰击材料晶格,通过能量传递在材料中引入缺陷,形成弗伦克尔缺陷对。弗伦克尔缺陷对在量子阱材料中起着非辐射复合中心的作用,能够有效增加非辐射复合率,导致量子阱中载流子的辐射复合率随之显著减小。在光注入条件不变的情况下,弗伦克尔缺陷对导致量子阱的光谱发光强度显著减小。

2) 量子阱的发光峰中心波长发生了先红移后蓝移的现象。在辐照后的量子阱中同时存在应力的释放和原子的互混。应变弛豫造成了 PL 峰值能量的红移;此后随着辐照注量的增加,发生 In-Ga 原子互扩散,应变逐渐

接近完全弛豫,辐照后样品的 PL 峰值能量主要受扩散的影响而出现蓝移现象。辐照后 $\text{In}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}/\text{GaAs}$ 量子阱的发光波长取决于应变弛豫和扩散的共同作用。

相关结论为航天用光电器件的辐射损伤机理分析及抗辐射加固研究提供了参考。

5 致 谢

感谢苏州大学彭长四课题组提供实验样品,感谢中国科学院新疆理化技术研究所的吕小龙老师、于刚老师在辐照实验过程中给予的大力支持和帮助。

参 考 文 献

- [1] Wang Zhanguo. Research progress of low dimensional semiconductor materials and devices[J]. World Science and Technology Research and Development, 2000, 22(1): 1-8.
王占国. 低维半导体结构材料及其器件应用研究进展[J]. 世界科技研究与发展, 2000, 22(1): 1-8.
- [2] Lin Weizhu, Qiu Zhiren, Xu Wencheng. Femtosecond relaxation of excited carriers in AlGaAs/GaAs multiple quantum wells[J]. Acta Optica Sinica, 1992, 12(5): 390-395.
林位株, 丘志仁, 徐文成. AlGaAs/GaAs 多量子阱结构中受激载流子的飞秒弛豫特性[J]. 光学学报, 1992, 12(5): 390-395.
- [3] Wei Guohua, Wang Bin, Li Junmei, *et al.* Temperature dependence of the photoluminescence properties and the research on the mechanism of $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ single quantum well[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2010, 31(5): 619-623.
魏国华, 王 斌, 李俊梅, 等. $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ 单量子阱 PL 谱温度特性及其机制[J]. 发光学报, 2010, 31(5): 619-623.
- [4] Wei Quanxiang, Wu Bingpeng, Ren Zhengwei, *et al.* Photoluminescence study of two layer stacked InAs/GaAs quantum dots[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0125001.
魏全香, 吴兵朋, 任正伟, 等. 双层堆垛长波长 InAs/GaAs 量子点发光性质研究[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0125001.
- [5] Li Xueqian, Qu Yi, Song Xiaowei, *et al.* Experimental study of GaAlAs/GaAs quantum well structure[J]. Acta Optica Sinica, 1997, 17(2): 146-149.
李学千, 曲 轶, 宋晓伟, 等. GaAlAs/GaAs 量子阱结构的实验研究[J]. 光学学报, 1997, 17(2): 146-149.
- [6] Wu Dianzhong, Wang Wenxin, Yang Chengliang. InAs quantum dots with InGaAs caplayer infrared detector grown by MBE[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2009, 30(2): 209-213.
吴殿仲, 王文新, 杨成良, 等. 带有 InGaAs 覆盖层的 InAs 量子点红外探测器材料的发光与光电响应[J]. 发光学报, 2009, 30(2): 209-213.
- [7] Dingle R, Wiegmann W, Henry C H. Quantum states of confined carriers in very thin $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}-\text{GaAs}-\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ heterostructures[J]. Physical Review Letters, 1974, 33(14): 827-830.
- [8] Dingle R, Gossard A C, Wiegmann W. Direct observation of superlattice formation in a semiconductor heterostructure [J]. Physical Review Letters, 1975, 34(21): 1327-1330.
- [9] Weisbuch C, Miller R C, Dingle R, *et al.* Intrinsic radiative recombination from quantum states in GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ multi-quantum well structures[J]. Solid State Communications, 1981, 37(3): 219-222.
- [10] Wood T H, Burrus C A, Miller D A B, *et al.* High-speed optical modulation with GaAs/GaAlAs quantum wells in a p-i-n diode structure[J]. Applied Physics Letters, 1984, 44(1): 16-18.
- [11] Kondo K, Saito J, Igarashi T, *et al.* MBE as a production technology for HEMT LSIs[J]. Journal of Crystal Growth, 1989, 95(1-4): 309-316.
- [12] Sonoda T, Ito M, Kobiki M, *et al.* Ultra-high throughput of GaAs and (AlGa)As layers grown by MBE with a specially designed MBE system[J]. Journal of Crystal Growth, 1989, 95(1-4): 317-321.
- [13] Johnston A H. Radiation damage of electronic and optoelectronic devices in space[C]. 4th International Workshop on Radiation Effects on Semiconductor Devices for Space Application, 2000.
- [14] Kawanishi H, Sugimoto Y, Tanaka N, *et al.* Sub-100 nm patterning of GaAs using *in situ* electron beam lithography [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1993, 32: 4033-4037.
- [15] Manasreh M O, Ballet P, Smathers J B, *et al.* Proton irradiation effects on the intersubband transition in GaAs/

- AlGaAs multiple quantum wells with bulk or superlattice barriers[J]. Applied Physics Letters, 1999, 75(4): 525-527.
- [16] Aierken A, Guo Q, Huhtio T, *et al.* Optical properties of electron beam and γ -ray irradiated InGaAs/GaAs quantum well and quantum dot structures[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2013, 83: 42-47.
- [17] Huang Wanxia, Lin Libin, Zeng Yiping, *et al.* The effects of proton irradiation on optical properties of GaAs/AlGaAs quantum wells[J]. Chinese Journal of Semiconductors. 1999, 20(11): 957-962.
黄万霞, 林理彬, 曾一平, 等. 质子辐照对 GaAs/AlGaAs 多量子阱材料光学性质的影响[J]. 半导体学报, 1999, 20(11): 957-962.
- [18] Che Chi, Liu Qingfeng, Ma Jing, *et al.* Displacement damage effects on the characteristics of quantum dot lasers[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(9): 094219.
车 驰, 柳青峰, 马 晶, 等. 位移效应对量子点激光器的性能影响[J]. 物理学报, 2013, 62(9): 094219.
- [19] Ma Jing, Che Chi, Han Qiqi, *et al.* Displacement damage effect on the characteristics of quantum well laser[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(21): 214211.
马 晶, 车 驰, 韩琦琦, 等. 位移辐射效应对量子阱激光器性能的影响[J]. 物理学报, 2012, 61(21): 214211.
- [20] Zhou Yanping, Hao Na, Yang Rui, *et al.* Electron radiation effect of LED[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(2): 454-458.
周彦平, 郝 娜, 杨 瑞, 等. 发光二极管电子辐照效应的研究[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(2): 454-458.
- [21] Lambkin J D, Dunstan D J, Homewood K P, *et al.* Thermal quenching of the photoluminescence of InGaAs/GaAs and InGaAs/AlGaAs strained-layer quantum wells[J]. Applied Physics Letters, 1990, 57(19): 1986-1988.
- [22] Anderson N G, Laidig W D, Kolbas R M, *et al.* Optical characterization of pseudomorphic $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ single quantum well heterostructures[J]. Journal of Applied Physics, 1986, 60(7): 2361-2367.
- [23] Ye Zhicheng, Shu Yongchun, Cao Xue, *et al.* Strain effect on temperature dependent photoluminescence from $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ quantum wells[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2011, 32(2): 164-168.
叶志成, 舒永春, 曹 雪, 等. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 量子阱应变对变温光致发光谱的影响[J]. 发光学报, 2011, 32(2): 164-168.
- [24] Ryu S W, Kim I, Choe B D, *et al.* The effect of strain on the interdiffusion in InGaAs/GaAs quantum wells[J]. Applied Physics Letters, 1995, 67(10): 1417-1419.
- [25] Zhao Jie, Wang Yongchen. Effects on optical and electrical properties of InGaAs(P)/InP MQW structure by quantum well intermixing[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2002, 23(6): 540-548.
赵 杰, 王永晨. InGaAs(P)/InP 量子阱混合处理对其光电特性的影响[J]. 发光学报, 2002, 23(6): 540-548.