

# 质子辐照对 GaAs/AlGaAs 多量子阱材料光学性质的影响\*

黄万霞 林理彬

(四川联合大学物理系 国家教委辐射物理及技术开放实验室 成都 610064)

曾一平 潘量

(中国科学院半导体研究所材料科学中心 北京 100083)

**摘要** 用固定能量为 20keV, 剂量为  $10^{11} \sim 10^{13}/\text{cm}^2$  的质子和固定剂量为  $1 \times 10^{11}/\text{cm}^2$ , 能量为 30~100keV 的质子, 对 GaAs/AlGaAs 多量子阱材料进行辐照, 得到了材料的光致发光特性随质子能量和剂量的变化关系, 并进行了讨论。结果表明, 质子辐照对材料的光学性质有破坏性的影响, 这种影响是通过两种机制引起的。相同能量的质子辐照, 随着辐照剂量的增大, 对量子阱光致发光峰的破坏增大。相同剂量的质子辐照, 当辐照质子的射程刚好覆盖整个量子阱结构区域时, 对量子阱光致发光峰的破坏最严重, 当辐照质子的射程超过量子阱结构区域时, 对量子阱光致发光峰的破坏反而减小。

PACC: 6180, 6865, 7855

## 1 引言

自 1980 年日本富士通的 Minura<sup>[1]</sup> 利用调制掺杂技术研制成功第一只 n-AlGaAs/GaAs 高电子迁移率晶体管 (HEMT) 以来, 人们竞相采用 HEMT 于高速逻辑电路、高速计算机和信息系统。另一方面, 对于量子阱结构光学特性研究的不断深入, 导致了量子阱激光器、高速发光器件以及光敏器件等一系列光电子器件的出现, 并考虑将这些新型器件应用于空间技术及核技术有关的辐射环境中。为此, 研究 GaAs/AlGaAs 材料的辐照效应是很有意义的。用质子轰击量子阱激光器并对其深能级中心进行研究<sup>[2,3]</sup>, 发现质子轰击引起的损伤在量子阱中产生了一个浓度和俘获截面较大的高温电子陷阱或与材料原有的陷阱相互作用产生新的陷阱; HEMT 材料的电子辐射效应<sup>[4]</sup>, 得到了材料结构中的 2 维电子气的电输运性质随辐照电子能量和剂量的变化关系。在量子阱材料的光学性质的辐照效应方面, 尚未见到有关报道。

本文的工作是以固定能量为 20keV, 采用  $10^{11} \sim 10^{13}/\text{cm}^2$  的剂量和固定剂量为  $1 \times 10^{11}/$

\* 国家自然科学基金资助项目, 基金号 69576107; 国家教委高校博士学科点专项科研基金资助项目

黄万霞 女, 1973 年出生。现就读四川大学物理系凝聚态物理专业硕士, 主要从事超晶格材料的辐射效应研究。

1998-11-06 收到, 1999-02-09 定稿

$\text{cm}^{-2}$ , 采用能量 30~ 100keV 的质子束, 对 GaAs/AlGaAs 多量子阱材料进行辐照, 通过对辐照前后样品进行光致发光测试, 研究质子辐照能量及注量变化对材料光学性质的影响 实验结果表明, 经辐照后, 量子阱光致发光峰的强度变小, 相同能量的质子辐照, 随着剂量的增大, 量子阱光致发光峰的强度越来越小直至完全消失 相同剂量的质子辐照, 当能量为 80keV 时光致发光峰强度减至最小 经分析量子阱光致发光峰强度经辐照后变弱的原因有两个方面, 一是质子轰击产生损伤引入新的陷阱, 使一部分激子通过这些陷阱发光, 在光致发光光谱上我们看到在 1.49eV 和 0.75eV 处新出现两个较平缓的发光带; 二是质子轰击使材料晶格空间的完整性受到一定程度的破坏, 致使产生的激子数目减少, 从而导致发光强度变弱 当辐照质子的射程刚好覆盖整个量子阱结构区域时, 对量子阱光致发光峰的破坏最严重, 当辐照质子的射程超过量子阱结构区域时, 对量子阱光致发光峰的破坏反而减小

## 2 样品制备和辐照实验

本实验所用样品为中国科学院半导体研究所提供的用 MBE 法生长的 GaAs/AlGaAs 多量子阱材料, AlGaAs 中  $x$  值为 0.3 样品结构如图 1 所示

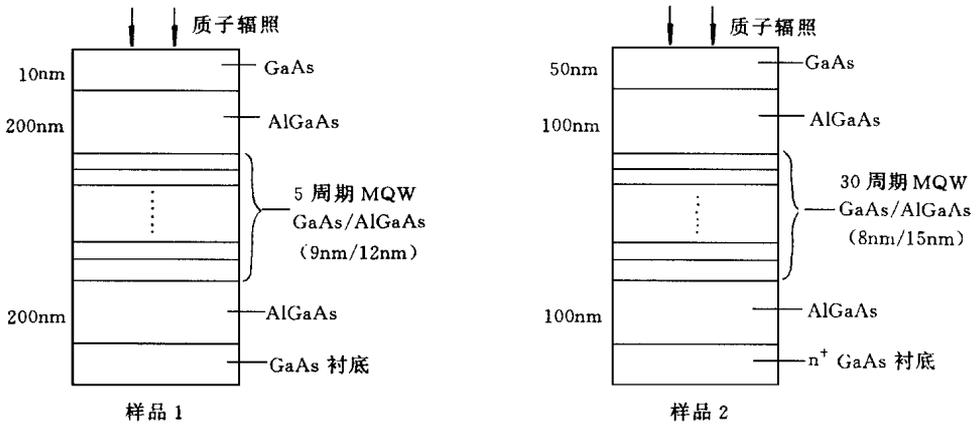


图 1 GaAs/AlGaAs 多量子阱结构示意图

质子辐照是在 K280 离子注入机上完成的, 对样品 1 采用固定能量为 20keV, 注入剂量分别为  $1 \times 10^{11}/\text{cm}^2$ ,  $1 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ ,  $1 \times 10^{13}/\text{cm}^2$  进行辐照 对样品 2 采用固定注入剂量为  $1 \times 10^{11}/\text{cm}^2$ , 能量分别为 30、50、80、100keV 进行辐照

## 3 实验结果

### 3.1 相同能量不同剂量的质子辐照对样品光致发光光谱的影响

对辐照前后的样品进行了光致发光测试, 激发光波长 514.5nm, 温度 15K. 图 2(a) 是能量为 20keV, 不同注入剂量的质子辐照后光致发光光谱的比较, 1# 曲线为辐照前样品的光致发光光谱, 波长为  $0.766\mu\text{m}$  的 A 峰 ( $E = 1.61\text{eV}$ ) 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 HEMT 材料在光学应用中的主要光学参数

之一。波长为  $0.801\mu\text{m}$  的  $B$  峰 ( $E = 1.55\text{eV}$ ) 对应于 GaAs 体材料的光致发光发射。2<sup>#</sup> 曲线是剂量为  $1 \times 10^{11}/\text{cm}^2$  的质子辐照后的光致发光谱, 图中在  $A$ 、 $B$  两峰相应位置仍然有两个很弱的峰, 分别对应于量子阱和 GaAs 体材料的光致发光发射, 但强度比未辐照的大大减小。3<sup>#</sup> 曲线是辐照剂量为  $1 \times 10^{12}/\text{cm}^2$  的光致发光谱, 图中  $A$ 、 $B$  两峰基本消失。4<sup>#</sup> 曲线为辐照剂量为  $1 \times 10^{13}/\text{cm}^2$  的光致发光谱, 同样  $A$ 、 $B$  两峰已消失。

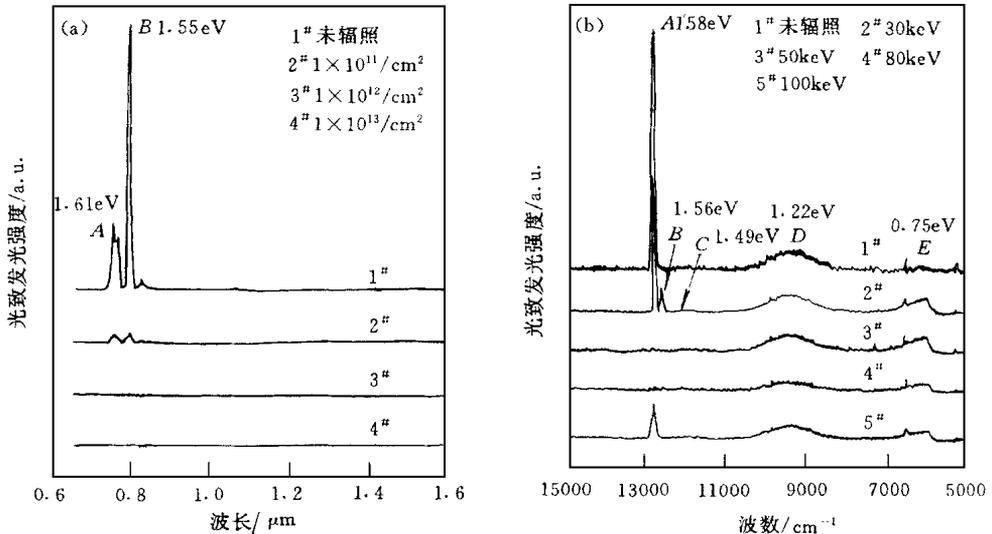


图 2 不同条件下的质子辐照对光致发光光谱的影响

(a) 相同能量, 不同剂量, (b) 相同剂量, 不同能量

### 3.2 相同注入剂量不同能量的质子辐照对样品光致发光光谱的影响

图 2(b) 是采用剂量为  $1 \times 10^{11}/\text{cm}^2$ , 不同能量的质子辐照后光致发光光谱的比较。图中可以看出, 辐照前的光致发光光谱在波长为  $0.78\mu\text{m}$  的  $A$  处 ( $E = 1.58\text{eV}$ ) 有一个很强的锐峰, 对应于量子阱的荧光反射, 在波长为  $1.01\mu\text{m}$  的  $D$  处 ( $E = 1.22\text{eV}$ ) 有一个较平缓的宽峰, 由样品的 DLTS 谱测得一深能级缺陷与之对应, 我们认为它对应于 AlGaAs 中 DX 中心的复合发光。经辐照后, 在波长为  $0.83\mu\text{m}$  的  $C$  处 ( $E = 1.49\text{eV}$ ) 和波长为  $1.65\mu\text{m}$  的  $E$  处 ( $E = 0.75\text{eV}$ ) 均出现两个低缓的宽峰且量子阱的光致发光峰强度变弱。辐照能量为 30keV 时, 量子阱光致发光峰强度减为辐照前的一半, 且在波长为  $0.8\mu\text{m}$  的  $B$  处 ( $E = 1.56\text{eV}$ ) 出现了较弱的 GaAs 体材料的本征光致发光峰, 辐照能量为 50keV 时量子阱的光致发光峰减小到几乎消失, 能量增大为 80keV 时, 量子阱光致发光峰彻底消失, 且  $C$ 、 $D$ 、 $E$  三处的宽峰与其他能量辐照的光致发光谱相比强度减弱近一半。当辐照能量继续增大为 100keV 时, 量子阱光致发光峰又出现并且有一定的强度。

## 4 讨论

(1) 由图 2(a) 可见, 质子辐照对样品的光学性质起破坏性作用。相同能量的质子辐照, 随着辐照剂量的增大, 这种破坏性也增强, 辐照对样品的光学性质产生完全破坏性影响的剂量阈值为  $1 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ 。为了进一步分析质子辐照对样品的光致发光光谱产生的这种破坏性

影响的机理,我们首先研究 GaAs/AlGaAs 多量子阱材料的发光过程 在超晶格量子阱等准二维体系中,激子的基态束缚能趋近三维系中的 4 倍,因而激子效应很明显 GaAs 量子阱的光跃迁过程,常常是自由激子起主要作用的本征过程 当一定波长的激光照样品时,电子吸收光子能量 $\hbar\omega$ 以后,从价带跃迁到导带,在价带中产生空穴,它和导带电子之间由库仑引力可能形成电子和空穴束缚状态的激子,激子中的电子不能稳定地存在,它通过从导带跃迁回价带和空穴复合而放出能量,并发射光子 图 2(a)中的 A 峰即是激子中的电子从导带的电子能带  $E_1$  跃迁到价带的重空穴能带 HH1 的发光峰

我们知道,只有在完整和纯净的晶体中才能观察到较明显的激子效应,这是因为激子的波尔半径较大,激子的波尔半径<sup>[5]</sup>为:

$$a_{\text{exc}} = \frac{\epsilon_r}{m_r/m_0} a_{\text{B}} \quad (1)$$

式中  $a_{\text{B}}$  是氢原子的波尔半径,  $m_r = 1/(m_n^{-1} + m_p^{-1})$ , 经计算得到在 GaAs 中激子的波尔半径约为 10nm, 因此在这样大范围内晶体完整性的破坏必将对激子效应产生影响,从而影响激子的产生和存在 在本实验中,经质子辐照后样品中将产生大量缺陷,使 GaAs/AlGaAs 多量子阱材料的晶格空间的完整性受到破坏,致使产生的激子数量减少,因而量子阱的光致发光峰强度变弱 当辐照剂量增大,晶格空间完整性的破坏进一步增大,产生的激子数进一步减少直至没有激子的产生,相应的量子阱的光致发光峰强度变弱直至完全消失

(2) 辐照质子剂量一定量,辐照对材料光学性质的破坏不是随着质子能量的增大而一直增大,见图 2(b). 当能量较小时,随着质子能量的增大,对材料的破坏性增大,当能量为 80keV 的破坏性达到最大,量子阱的光致发光峰彻底消失,能量继续增大到 100keV 时破坏性反而减小,量子阱的光致发光峰出现并有一定强度 出现这种现象的原因是由于当带电粒子穿过物质时,在其射程末端产生的比电离最多<sup>[6]</sup>,因而其在射程末端产生的缺陷也最多. 当能量为 80keV 的质子轰击样品时,其射程末端刚好处于量子阱区域,在量子阱中产生大量的缺陷,因此对量子阱光致发光峰的破坏最大;当能量低于 80keV 时,质子射程没有完全覆盖量子阱区域,即有一部分量子阱区域没有受到质子的轰击,因此在量子阱中产生的缺陷少,对量子阱的破坏也较小;当能量高于 80keV 时,入射质子中的一部分已打过了量子阱区域,其射程末端位于量子阱之外,落在量子阱区域的只是质子射程的中间段,因而在量子阱中产生的缺陷反而减小,对量子阱的破坏也减小

从图中我们还看到,经辐照后量子阱的光致发光峰强度变弱,而在  $E = 1.49\text{eV}$  和  $E = 0.75\text{eV}$  处出现两个新的低缓的宽峰 这说明质子轰击对材料产生损伤,在量子阱的禁带中引入两个新的深能级中心,使一部分激子通过这两个深能级中心发光,因而量子阱的光致发光峰强度减弱 对比能量为 50keV 和 80keV 的质子辐照我们发现,量子阱的光致发光峰强度都已减至最小,几乎完全消失,而对 C、D、E 三处的宽峰相比较,80keV 比 50keV 强度减弱近一半,这说明量子阱光致发光峰的消失,除了因为一部分激子通过深能级中心复合发光外,还存在另一种机制,即质子轰击产生损伤使晶格空间的完整性受到破坏,使激子效应受到影响,从而使激子数目减少. 由于 80keV 的质子对量子阱区域的覆盖比 50keV 的大,产生的损伤和缺陷更多,对晶格空间完整性的破坏也更大,激子数目减少更严重,因而在 C、D、E 处的宽发光峰的强度也比 50keV 的弱 由此我们认为,质子辐照对材料光学性质的破坏,是通过两种机制引起的,一是质子轰击产生损伤引入新的陷阱,使一部分激子通过这些陷阱发

光;二是质子轰击使材料晶格空间的完整性受到破坏,致使产生的激子数目减少。

(3)用 Trim 96 程序计算了质子轰击材料后,在材料中的射程及分布情况 Trim 96 程序采用的是以蒙特卡洛方法为基础的统计方法,由于在计算分层材料时,总共只能计算到第 8 层,因此我们对量子阱区域作了一定的简化 图 3 是用 Trim 96 程序计算的 80keV 质子和 100keV 质子在材料中的射程及分布情况 图 3(a)是 80keV 的质子在样品中的分布情况,可以看出,大部分的入射质子部分布在量子阱结构区域 图 3(b)是 100keV 的质子在样品中的分布情况,有相当一部分质子已打出量子阱区域 由此可见,80keV 质子与 100keV 质子相比,落在量子阱区域的质子数更多,因此在量子阱中引起的损伤和缺陷更多 其计算结果与我们的实验结果一致

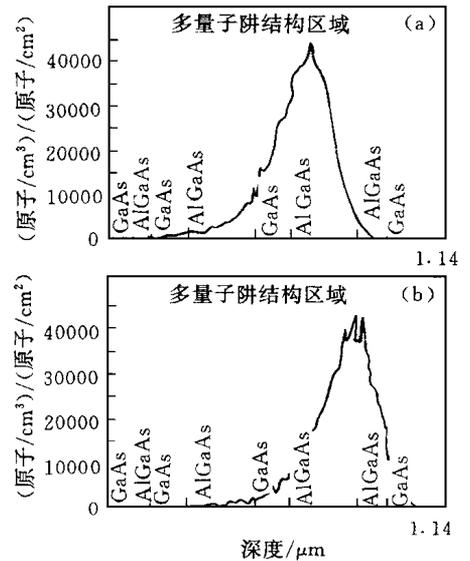


图 3 辐照质子在样品中的射程及分布情况  
(a) 80keV, (b) 100keV.

## 5 结论

通过以上结果及讨论,得出质子辐照对材料产生完全破坏性影响的剂量阈值为  $1 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ ,当辐照质子射程刚好覆盖整个量子阱结构区域时,对量子阱的破坏最严重 这种破坏性是由于晶格空间完整性的破坏导致激子数目的减少和新的陷阱的产生使激子通过这些陷阱复合发光引起的

## 参 考 文 献

- [ 1 ] T. Minura *et al* , Jpn J. Appl Phys , 1980, **19**:L225
- [ 2 ] 卢励吾,等,半导体学报,1994, **15**(5): 785
- [ 3 ] 卢励吾,等,半导体学报,1992, **13**(3): 155
- [ 4 ] 林理彬,等,四川大学学报(自然科学版),1995, (2): 39
- [ 5 ] K. Seeger, 半导体物理学, 408~ 410
- [ 6 ] 原子核物理实验方法,原子能出版社,55
- [ 7 ] 彭英才,半导体超晶格物理与器件,半导体杂志,1991, (9), 46
- [ 8 ] 沈学础,半导体光学性质,北京:科学出版社,633
- [ 9 ] 刘恩科,半导体物理学, 225

## Effects of Optic Character of GaAs/AlGaAs Multiple Quantum Well With Proton Irradiation

Huang W anxia, Lin Libin

*Department of Physics, Radiation & Technology Laboratory,  
Sichuan University, Chengdu 610064*

Zeng Yiping, Pan Liang

*Institute of Semiconductor, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083*

Received 6 November 1998, revised manuscript received 9 February 1999

**Abstract** The materials of GaAs/AlGaAs multiple quantum well are irradiated by proton beam with fixed energy 20keV, dose from  $10^{11}$  to  $10^{13}/\text{cm}^2$  and with fixed  $1 \times 10^{11}/\text{cm}^2$ , energy from 30keV to 100keV. The change of the photoluminescence of GaAs/AlGaAs material depended on the irradiating proton energy and has been observed. The experimental results show that proton irradiation does greatly damage to optic characteristics of the material and the damage is the greatest while the range of proton covers the whole quantum well area. When the project range of proton goes beyond the quantum well area, the damage decreases instead.

**PACC:** 6180, 6865, 7855