

(5)181-189

离子注入法制备 GaAs 量子阱集成 多波长发光芯片*

李志锋^{1,2)} 刘兴权^{1,2)} 陈昌明^{1,2)} 陆 卫¹⁾ 沈学础¹⁾
朱德彰²⁾ 潘浩昌²⁾ 胡 军²⁾ 李明乾²⁾

TN383.205

¹⁾中国科学院上海技术物理研究所, 红外物理国家重点实验室, 上海, 200083;

²⁾中国科学院上海原子核研究所, 核分析技术开放实验室, 上海, 201800)

摘要 报道了用离子注入方法和组合技术制备的 AlGaAs/GaAs 单量子阱多波长发光集成芯片, 利用量子阱界面混合原理在同一块 GaAs 衬底片上获得了 20 多个发光波长从 787~724nm 的 GaAs 量子阱发光单元, 研究了不同剂量的 As 和 H 离子分别单独注入和迭加组合注入对量子阱发光峰位的影响, 采用了组合技术和离子注入技术大大简化了制备工艺过程, 这种发光芯片对于波分复用器件和建立离子注入数据库等方面都有重要的意义。

关键词 GaAs 量子阱, 离子注入, 界面混合, 光致发光

突破线 多波长发光芯片

ION IMPLANTATION FABRICATED INTEGRATED GaAs QUANTUM WELL MULTI-WAVELENGTH LIGHT EMITTING CHIP*

LI Zhi-Feng^{1,2)} LIU Xing-Quan^{1,2)} CHEN Chang-Ming^{1,2)} LU Wei¹⁾ SHEN Xue-Chu¹⁾
ZHU De-Zhang²⁾ PAN Hao-Chang²⁾ HU Jun²⁾ LI Ming-Qian²⁾

¹⁾National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

²⁾Laboratory of Nuclear Analysis Techniques, Shanghai Institute of Nuclear Research,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract An integrated AlGaAs/GaAs single quantum well multi-wavelength light emitting chip fabricated by ion implantation and combined technology was reported. By interface intermixing more than 20 GaAs quantum well light emitting elements whose photoluminescence wavelength ranges from 787 to about 724nm were obtained. The effect of different doses of As⁺ and H⁺ and their combination on the shift of the photoluminescence wavelength of the quantum well was studied. With ion implantation and combined method the fabrication processes were drastically simplified. Such a kind of multi-wavelength light emitting chip has great potentiality both on the application of wavelength division multiplexing (WDM), in which many lasers with different wavelengths are required and on the setting up of a database for optimizing the ion implantation processes.

Key words GaAs quantum well, ion implantation, interface intermixing, photoluminescence.

引言

量子阱界面混合作为调节半导体量子阱能带特性的重要手段已经在量子阱激光器^[1,2]和红外探测器上^[3]获得了广泛的应用。通常,界面混合技术有直接快速热退火

(RTA)和离子注入后再进行快速热退火两种^[4],由于离子注入后进行快速热退火所诱导的界面混合能够更为有效地使量子阱能级发生移动^[4],因此目前普遍被采用。对注入元素的选择可以是多样的,我们选用 As 和 H 作为注入元素。一方面,As 作为自然成分的元素在 AlGaAs/

* 国家自然科学基金(编号 69676014)和上海市启明星计划(编号 98QA14004)资助项目
稿件收到日期 1999-11-09,修改稿收到日期 2000-01-11

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 69676014), and the Shanghai "Qi Ming Xing" Fund of China (No. 98QA14004)
Received 1999-11-09, revised 2000-01-11

GaAs 量子阱结构中不会成为具有电学活性的掺杂剂;另一方面,由于 H 的原子半径很小,在 RTA 过程中能够快速扩散到衬底内部,因此残留在量子阱有源层的原子很少^[6]. 由于注入离子的种类和剂量对能带结构起决定性作用,不同的注入将导致不同的能级移动. 我们利用组合方法^[6]对 GaAs/AlGaAs 单量子阱用 As^- 、 H^+ (质子)进行成组系列注入研究,将两种元素分别单独注入和迭加注入,得到一系列不同的单独注入和迭加注入的组分. 由于注入的系列性,可以系统地研究系列变化的注入情况下量子阱能级的移动,并可以建立离子注入的数据库以优化注入工艺. 对两种元素的迭加注入研究表明,迭加注入所造成的量子阱能级移动可以大到 63nm,大大超过单独注入的能级移动. 由于采用了组合方法,极大地简化了样品的制备工艺,整个注入过程只需要 2 块掩模板即可在同一块衬底上获得 24 个不同注入条件的发光单元. 这种将不同发光波长的发光单元集成在同一块芯片上的技术对实现“波分复用”(Wavelength Division Multiplexing, 简称 WDM)^[7]十分有益,在光纤通信的应用上将会有极大的应用前景.

1 实验

我们用分子束外延方法生长 $Al_{0.35}Ga_{0.65}As/GaAs$ 单量子阱. 在生长量子阱之前,先在 GaAs(001)单晶衬底上生长 $1\mu m$ 厚的 GaAs 缓冲层,然后顺序生长 $Al_{0.35}Ga_{0.65}As$ 势垒层、GaAs 势阱层和 $Al_{0.35}Ga_{0.65}As$ 势垒层,其厚度分别为 50nm、4nm 和 50nm. 最后生长 20nm 厚的 GaAs 覆盖层. 生长好的单量子阱样品在室温下顺序进行离子注入. 由于离子束辐照的面积足够大,我们用加掩模版的方法对晶片上的单量子阱进行选择区域的离子注入. 在实验中采用 2 块厚度为 0.5mm 的 Al 掩模板,这样厚度的 Al 板已足够满足我们实验对注入离子的遮挡要求. 其中一块为固定掩模板,分布有直径 $\phi 2mm$ 、中心间距 3mm 的小孔列阵,如图 1 所示. 在整个注入过程中这块板与量子阱表面接触并保持不动. 另外一块无图形的面积大于整个晶片面积的 Al 板被用来顺序移动,使得固定掩模板上的小孔逐行或逐列地顺序暴露在离子束中,以获得不同的注入剂量. 在实际过程中,先进行了逐行的 As 注入. 由于逐行打开小孔 4 次,可以顺序得到 4 种 As 注入剂量分别为 5×10^{15} 、 5×10^{13} 、 5×10^{11} 、 $5 \times 10^9 cm^{-2}$,图 1 中分别标示为 As_4 、 As_3 、 As_2 和 As_1 . 注入能量为 90keV,选择这样的注入能量是为了使注入离子分布在量子阱中心附近. 同样对列进行顺序注入,得到 4 列质子剂量分别为 5×10^{15} 、 5×10^{13} 、 5×10^{11} 和 $5 \times 10^9 cm^{-2}$,注入能量为 40keV. 由于在行注入和列注入时只移动掩模板 4 次,因此得到的第 5

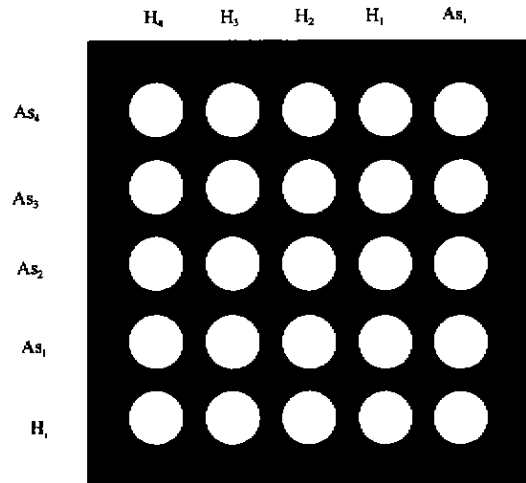


图 1 选择区域离子注入用 Al 掩模板示意图
Fig. 1 Schematic illustration of the fixed Al mask for the selective area ion implantation

行和第 5 列分别为单独质子注入和单独 As 注入的 4 个剂量,在图 1 中标示为 H_1 和 As_1 ,其相交点为未注入点,这样我们可以研究单独注入和迭加注入以及未注入之间的差别. 对完成注入后的芯片在氮气气氛中进行快速热退火,条件为 $900^\circ C$ 下 30s. 退火时将芯片的量子阱面向下放置在干净的 GaAs 晶片上,以防止量子阱层中 As 的挥发. 对获得的离子注入芯片进行了室温光致发光(PL)测试以表征量子阱的能级位置. 测试在 Dilor-INFINITY 显微喇曼/荧光光谱仪上进行,激发波长为 Ar^+ 激光器的 514.5nm. 由于使用了 100 倍的显微物镜,很容易实现在空间上的逐点测试.

2 结果与讨论

图 2 和 3 分别给出了 As^+ 单独注入和 H^+ 单独注入以及未注入时单量子阱单元室温 PL 谱. 可以看到,量子阱发光峰位随注入剂量的增加而不断蓝移,同时伴随着峰形展宽和高度下降. 由于测试条件完全相同,从发光峰的面积可以推断其发光强度也是随着注入剂量的增加而减弱的. 两种注入情况下 PL 峰位的移动表现出类似的行为,但对 As^+ 注入,当剂量大到 $5 \times 10^{15} cm^{-2}$ 时,光致发光峰消失.

上述 PL 峰位和峰形及强度随离子注入剂量的变化可以认为是典型的离子注入诱导的界面混合行为^[4]. 由于离子注入引入的位于量子阱及其界面附近的缺陷,使得在快速热退火时界面附近的原子能够以这些缺陷为路径进行更为有效的互扩散,从而导致界面附近的 AlGaAs/GaAs 的组分发生变化,量子阱势由方势阱转化为由误差函数决定的势能形状. 这种变

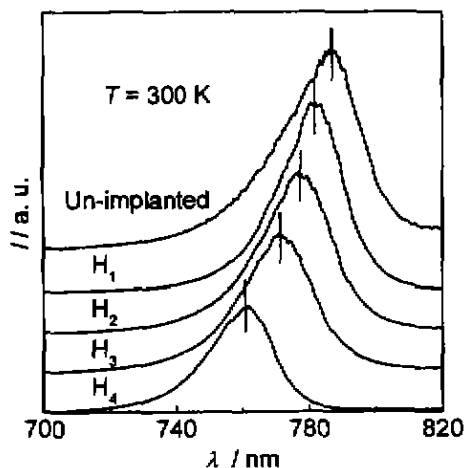


图 2 不同剂量下单独质子注入发光单元的室温光致发光谱

Fig. 2 Room temperature photoluminescence spectra for the light emitting elements with the proton-only implantation under different doses

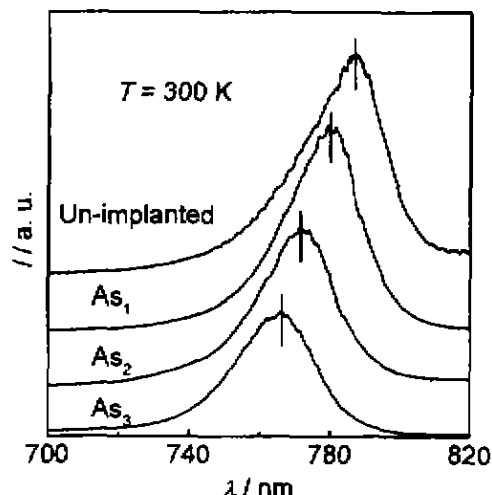


图 3 不同剂量下单独 As⁺注入发光单元的室温光致发光谱

Fig. 3 Room temperature photoluminescence spectra for the light emitting elements with As⁺-only implantation under different doses

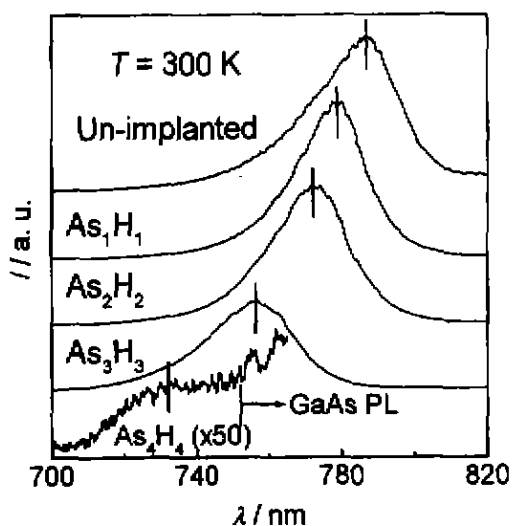


图 4 不同剂量下质子与 As⁺迭加注入发光单元的室温光致发光谱

Fig. 3 Room temperature photoluminescence spectra for the light emitting elements with the As⁺ and H⁺ combined implantation under different doses

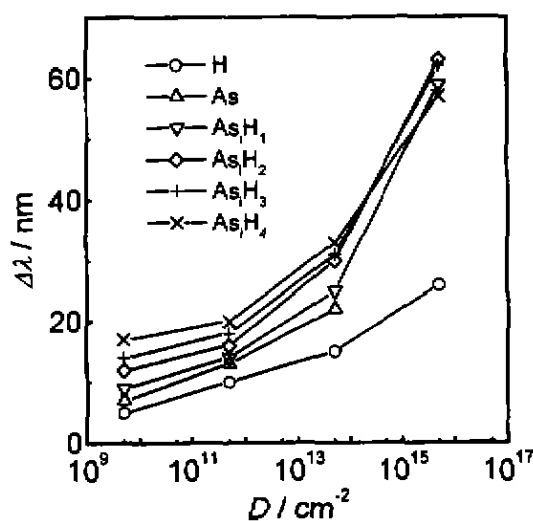


图 5 不同注入剂量 D 的 PL 峰位相对于未注入时的移动

Fig. 5 The PL peak shift $\Delta\lambda$ under different ion implantation dose D relative to the un-implanted PL wavelength

化的结果,使得原来最低的能级抬高,而最高的能级降低.由于 PL 反映的是最低能量状态之间的跃迁,因此表现出发光峰位的蓝移.峰形的展宽是由于界面混合的非均匀性,导致量子阱宽的非均匀性增加所致.同时离子注入引起的退火后的残留缺陷也会加强对电子能态的散射引起能态展宽.发光强度减弱则是因为离子注入不可避免地引入了缺陷,而 RTA 过程未能完全消除这些缺陷.这些缺陷对光生载流子起非辐射复合中心的作用,导致了参与发光的载流子数量减少.高

子注入的剂量越大,这种效应就越强,甚至导致在 As⁺注入剂量为 $5 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ 时发光的淬灭.

迭加注入的量子阱单元的室温 PL 谱由图 4 给出,由于单元数多达 16 个,图 4 中只给出了对角线上单元的测试结果.可以看出,迭加注入时 PL 峰的移动规律基本上与单独注入时相同,随着注入剂量的增加峰位蓝移,峰形展宽且高度下降,发光强度也逐步降低.特别值得注意的是,对于 As₄ 注入时已淬灭的发光在 As₄H₄ 时又得到了恢复,尽管发光的强度非常低.

导致这一现象的原因我们将在后文分析。

我们还考察了不同注入情况下发光峰位的移动程度。图5示出了所有单元的发光峰的波长相对于未注入但同样经过RTA过程的单元的PL峰位的移动随注入剂量的变化。在实际器件应用中,同一晶片上的发光单元之间波长的分离是至关重要的。可以看到,最大的移动出现在 As_4H_2 ,移动量为63nm(137meV)。就总体而言,迭加注入所导致的波长移动显著地大于任何一种单独注入的移动。这是合理的,因为迭加注入后的注入剂量总要大于单独注入时的剂量。同等注入剂量时,单独的As注入的移动要大于H注入,这与通常的结果一致,因为As的原子半径要远大于H,所引入的缺陷损伤也要大得多。单独的As注入和单独的H注入所导致的能够观测到的最大波长移动分别为22nm和26nm,迭加的注入可以进一步使波长移动增加到63nm。尽管注入剂量高时在室温下观察到的PL峰较宽且较弱,但如果制做成激光结构,由于谐振腔的作用,其出射激光的峰形将是非常窄的。

对于 As_4H_3 和 As_4H_4 ,其PL峰位的移动要小于 As_4H_2 ,表现出一种峰位移动的饱和效应。我们认为这种饱和效应来自过大剂量注入影响,注入引起的点缺陷在RTA过程中合并成为较大尺寸扩展的缺陷,这种缺陷不利于量子阱界面附近Al原子和Ga原子的互扩散。 As_4H_i ($i=1,2,3,4$)各单元的PL恢复可能也同样来源于缺陷的合并,合并后较大尺寸的扩展缺陷不利于俘获载流子,从而减少了非辐射复合中心,这种大注入剂量下的发光和缺陷效应尚有待于进一步研究。

3 结论

我们用离子注入方法并采用组合手段对不同注入

情况下GaAs量子阱界面混合导致的发光峰位的移动进行了研究,获得了20多个发光波长从787~724nm的GaAs量子阱发光单元。在波分复用的光通信中,要求在同一根光纤中传输多束激光并且相互之间不干扰,这就要求这几束光的波长之间有足够大的差别。通过不同剂量和不同元素的离子注入就有可能实现多种发光波长的激光器单片集成,从而为光通信应用提供重要的手段。

REFERENCES

- [1] FU L, Tan H H, Johnston M B, *et al.* Proton-irradiation-induced intermixing in InGaAs/(Al)GaAs quantum wells and quantum-well lasers, *J. Appl. Phys.*, 1999, **85**: 6786
- [2] Hiramoto K, Sagawa M, Kikawa T, *et al.* High-power and highly reliable operation of Al-free InGaAs-InGaAsP 0.98 μ m lasers with a window structure fabricated by Si ion implantation, *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, 1999, **5**: 817
- [3] Lee A S W, Li E H, Karunasiri G. Intermixing in strained InGaAs/GaAs quantum-well infrared photodetectors, *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **74**(8): 1102
- [4] Clibert J, Petroff P M, Werder D J, *et al.* Kinetics of implantation enhanced interdiffusion of Ga and Al at GaAs-Ga_xAl_{1-x}As interfaces, *Appl. Phys. Lett.*, 1986, **49**: 223
- [5] Redinbo G F, Craighead H G, Hong J M. Proton implantation intermixing of GaAs/AlGaAs quantum wells, *J. Appl. Phys.*, 1993, **74**: 3099
- [6] Xiang X D, Sun X D, Briceno G, *et al.* A combinatorial approach to materials discovery, *Science*, 1995, **268**: 1738
- [7] Cockerill T M, Lammert R M, Forbes D V, *et al.* 12-channel strained-layer InGaAs-GaAs-AlGaAs buried heterostructure quantum well laser array for WDM applications by selective-area MOCVD, *IEEE Photonics Technology Letters*, 1994, **6**: 786