

质子注入和快速退火对 GaAs/AlGaAs 量子阱红外探测器的影响

李娜 陆卫 李宁 刘兴权 袁先漳 龚红飞 沈学础

(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)

Lan, F

FU Lan Tan H H C Jagadish

(Department of Electronic Materials Engineering, The Research School of Physical Sciences and Engineering, The Australian National University, Canberra ACT 0200, Australia)

M B Johnston M Gal

(School of Physics, The University of New South Wales, Sydney, NSW 2052, Australia)

摘要: 利用质子注入和快速退火技术改变 GaAs/AlGaAs 量子阱能级分布, 使量子阱红外探测器的光电特性发生变化, 在较大范围移动了探测波长的同时, 探测器的响应率、探测率以及暗电流特性也发生相应变化。在质子注入剂量为 $2.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 、快速退火条件为 950 C、30s 时, 峰值探测波长移动 $2 \mu\text{m}$ 。

关键词: 质子注入, 快速退火, 量子阱红外探测器。

TN215

INFLUENCE ON GaAs/AlGaAs QUANTUM WELL INFRARED PHOTODETECTOR OF PROTON IMPLANTATION AND RAPID THERMAL ANNEALING

LI Na LU Wei LI Ning LIU Xing-Quan YUAN Xian-Zhang
DOU Hong-Fei SHEN Xue-Chu

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

FU Lan Tan H H C Jagadish

(Department of Electronic Materials Engineering, The Research School of Physical Sciences and Engineering, The Australian National University, Canberra ACT 0200, Australia)

M B Johnston M Gal

(School of Physics, The University of New South Wales, Sydney, NSW 2052, Australia)

Abstract The use of intermixing technique was demonstrated in modification of energy level distribution of GaAs/AlGaAs quantum-wells. A large response wavelength shift was achieved by the proton implantation followed by standard annealing procedures (950 C for 30s). The PL and photoresponse spectra were measured as a function of ion dose in the range from $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ to $2.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$, the peak photoresponse wavelength was tunable between $8.4 \mu\text{m}$ to $10.2 \mu\text{m}$ for the infrared and the PL peak for the related material changed from 1.62eV to 1.645eV. The influence on responsivity and dark current was analyzed.

Key words proton implantation, rapid thermal annealing, QWIP.

引言

GaAs/AlGaAs 量子阱红外探测器 (WEIP) 正迅速地向高性能和大面积发展^[1-3]。随着对子带物理的

深入研究及器件性能的优化设计, 一些研究小组利用两组量子阱结构或电压调节等方式进行了双色甚至多色红外探测器研究^[4-5]。除改变量子阱的生长结构外, 还可以利用量子阱界面混合技术对量子阱能级进行局

部微调^[6],从而改变探测波长,实现多通道探测.由于光电集成的需要,量子阱界面混合技术正受到越来越多的重视.这些技术使原有生长材料的禁带结构发生变化,同时使量子阱的形状和阱中子带发生变化.利用这种技术可以改变材料的折射率以形成波导,或改变激光器发射波段等.使用的方法主要有掺杂、离子注入及快速退火^[7-9].为了增强选择区域的界面混合,常采用离子注入和快速退火相结合的方法.以往所有的离子注入材料有 Zn、Si 和 As^[10]离子等,本文首次介绍用质子注入和快速退火使 GaAs/AlGaAs 量子阱红外探测器的探测波段向远红外方向有较大偏移.

1 离子注入和快速退火对量子阱结构的调整

离子注入同时会在晶体中造成辐射损伤,主要表现为缺陷增多,因此快速退火不仅进一步增强扩散,同时可以消除辐射损伤造成的缺陷,使损伤的晶格得到一定程度的恢复.根据量子阱界面混合理论^[3],在 GaAs/AlGaAs 量子阱中,由于原子的扩散,原子的浓度分布出现变化,特别是 Al 含量在界面的分布不再陡峭,而呈余误差函数分布,Al 和 Ga 原子的扩散使得量子阱的深度降低、宽度增加,并由标准方形势阱变为非方形势阱,阱的禁带宽度增加;同时阱中子带能级也发生相应变化,导带中基态位置逐渐上升,子带间距缩小.图 1(a)和(b)分别由荧光光谱和光响应谱反映出带间跃迁能量和子带间距随质子注入浓度的变化.

测试样品的量子阱结构由 50 个周期的 5nm 阱和 50nm 垒组成,阱中掺杂浓度为 $5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$,垒中 Al 含量为 0.3.量子阱的上下层为掺杂 $1 \cdot 10^{18} (\text{cm}^{-3})$ Si 和厚度 $1 \mu\text{m}$ 的 n^+ -GaAs 电极层.将 MBE 法生长的 GaAs/AlGaAs 量子阱材料,在同一样品上以金属片

为掩模版,以 TiH 作离子注入源,注入剂量从 $5 \times 10^{11} \sim 5 \times 10^{17} \text{cm}^{-2}$.将离子注入后的样品与未经注入的参考样品同时置于退火炉腔中,覆盖清洁的 GaAs 衬底片,以防 As 原子在高温下损失.退火温度 950C ,维持 30s.

腐蚀样品的上电极层后,以 0.5mW 的激光器作为激发源,用 CCD 作探测,在 77K 下进行荧光光谱测试.图 1(a)反映了 GaAs/AlGaAs 量子阱中随着注入剂量的变化发生较大的偏移,即 PL 谱峰位出现明显的蓝移,说明阱中的导带子带和价带子带间的带间跃迁能量不断提高,从 1.62eV 至 1.645eV,最大蓝移 25meV,即禁带间距逐渐增加,势阱深度逐渐缩小.在样品上用湿法刻蚀出台面,以 AuGeNi/Au 层作上下电极的欧姆接触层,制成面积为 $250 \mu\text{m} \times 250 \mu\text{m}$ 的单元红外器件.侧面 45° 抛光,用金丝球焊引出电极引线后,装入 80K 杜瓦瓶,然后用傅里叶转换光谱仪进行光响应谱测试.测试结果如图 1(b)所示.按照设计,量子阱的导带中有 2 个子带,在红外辐射下,电子从基态到激发态的跃迁能量为 151meV,对应的光响应峰值波长为 $8.1 \mu\text{m}$,波长半高宽约 $1 \mu\text{m}$.在同样的退火条件下,随着注入剂量的增加,响应波段向长波方向移动,意味着子带间距逐渐缩小.当注入剂量达到 $2.5 \cdot 10^{15} (\text{cm}^{-2})$ 时,子带间距缩小至 125meV,光响应峰值波长 $9.8 \mu\text{m}$.

2 离子注入及快速退火对量子阱红外探测器特性的影响

2.1 对响应率的影响

绝对响应率的测试是以 500K 黑体为红外光源,通过锁相放大器读出响应电压信号.在不考虑杜瓦瓶

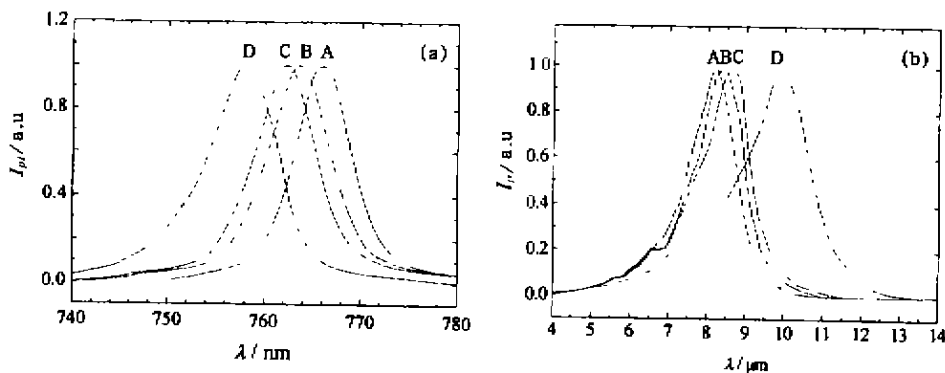


图 1 77K 下各种样品的(a)荧光光谱和(b)光响应谱,A 为原生量子阱材料,B 为快速退火参考样品(950 C 30s),C、D 分别对应注入剂量为 $1 \cdot 10^{15} \text{cm}^{-2}$ 和 $2.5 \cdot 10^{15} \text{cm}^{-2}$ (950 C 30s)
Fig. 1 PL (a) and photoresponse (b) spectra of QWIP, A as grown, B RTA (950 C 30s),
C proton implanted $1 \cdot 10^{15} \text{cm}^{-2}$, D proton implanted $2.5 \cdot 10^{15} \text{cm}^{-2}$ at 77K

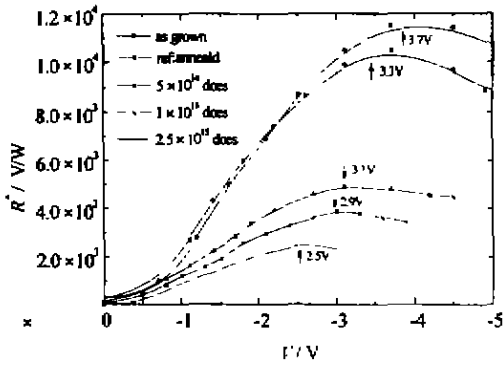


图2 红外探测器响应率在不同质子注入条件下与器件偏压的关系

Fig. 2 The responsivity vs. bias voltage for QWIP implanted by different proton dose

窗口等光学耦合和衰减因素的影响下,不同注入剂量样品的器件响应率随偏压的变化关系如图2所示. 原生长材料器件、退火参考样品及经不同注入剂量质子注入的探测器件的响应率随器件偏压的提高而逐渐增大,并在一定工作电压下达到最大值. 相对与原生样品及退火参考器件的响应率,经过质子注入和快速退火处理的探测器响应率,随着注入剂量的增加而下降,同时对应峰值响应率的偏压逐渐降低.

对上述现象可作如下解释:一方面如前所述,在界面混合增强的过程中,量子阱变浅,子带间距缩小,光生载流子不需要很高的外加电场即可逃逸出势阱,并达到电极层,另一方面质子注入和快速退火引起的杂质Si的扩散,使阱中的Si含量降低,并使峰值响应率及相应偏压降低.

2.2 对器件 $I-V$ 特性的影响

GaAs/AlGaAs 量子阱红外探测器另一个基本特性参数是暗电流,暗电流主要由逃逸出量子阱进入连续态的热激发电子组成. 由于势阱变浅,热电子逃逸几率增大,以及硅的扩散引起器件阻抗降低,当质子注入剂量达到 $2.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 时,器件的暗电流明显的提高,如图3(a)所示. 经小注入剂量 ($5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 和 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$) 处理的器件的 $I-V$ 特性与未经处理的器件相比,在数值上增幅较小.

质子注入和快速退火对量子阱结构及红外探测器特性的影响还可以从器件的正反向 $I-V$ 特性的变化中反映出来. 量子阱红外探测器的正向电流大于反向电流,这种正向偏压下暗电流的非对称性一方面来自同生长次序中, GaAs 与 AlGaAs 的界面不对称,另一方面是由于在生长方向上掺杂元素的扩散. 如图3(b)所示,正反偏压下暗电流之比反映了探测器 $I-V$ 特性的非对称性. 随着偏压的增加,暗电流比逐渐上升. 在快速退火和低剂量注入条件下,非对称性更为明显,说明界面混合进一步增加. 当注入剂量增至 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 时,暗电流比开始回落,至 $2.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 时,在足够的偏压下 ($>2\text{V}$),暗电流比下降并接近1,非对称性逐渐消失,说明在质子注入和快速退火的作用下, GaAs 和 AlGaAs 以及掺杂硅逐渐达到均匀分布,消除了生长过程中产生的非对称因素.

3 结论

根据以上的实验结果及分析,说明质子注入和快速退火产生的界面混合增强,使 GaAs/AlGaAs 量子阱红外探测器的量子阱结构和器件特性都发生了明显的变化. PL 谱峰值的蓝移和光电流谱的红移,意味着

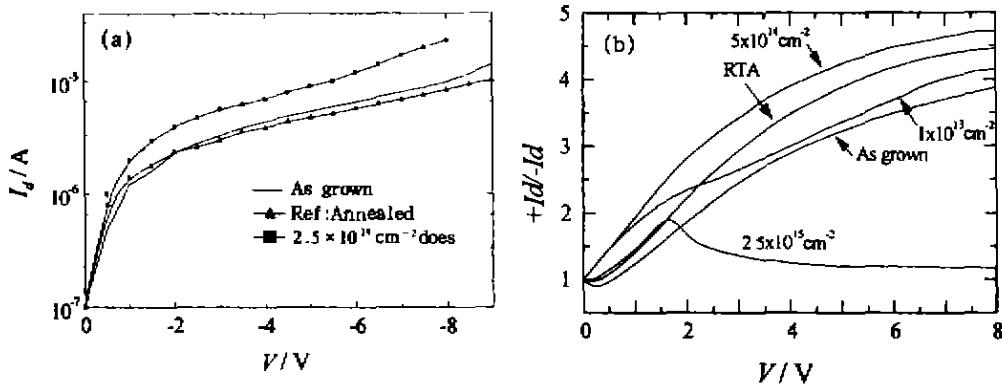


图3 质子注入和快速退火对量子阱红外探测器 $I-V$ 特性及其对称性的影响

(a) $I-V$ 特性, (b) 正反偏压的暗电流比

Fig. 3 Influence of proton implantation and rapid annealing on $I-V$ characteristic and symmetry of QWIP, (a) $I-V$ characteristic, (b) the dark current ratio at positive and negative bias

表1 质子注入和快速退火后 GaAs/AlGaAs 量子阱器件的各项参数的变化
Table 1 Parameter variation of GaAs/AlGaAs QWIP by proton implantation and rapid annealing

	As grown	RTA950 C 30s	$5 \cdot 10^{11} \text{cm}^{-2}$	$1 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$	$2.5 \cdot 10^{15} \text{cm}^{-2}$
探测峰值波长(μm)	6.1	8.4	8.5	8.7	9.8
光响应谱半高宽(μm)	1.2	1.3	1.4	1.4	1.9
器件外加偏压(V)	-3.7	-3.3	-3.1	-3	-2.5
响应率($\cdot 10^4 \text{V/W}$)	11.5	10.5	4.9	3.9	2.5
噪声($\cdot 10^{-2} \text{V/Hz}^{1/2}$)	2.3	1.92	2.7	2.24	6.26
探测率($\cdot 10^4 \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$)	11.0	11.1	4.42	3.97	1.01

量子阱区导带与价带之间距离增加,及导带内子带距离的缩小,质子注入和快速退火使器件响应率降低和暗电流增加。上述实验结果如表1。

质子注入样品的峰值波长比只作快速退火的样品有更大的移动,说明质子注入增强扩散效应对量子阱能带结构有更为重要的影响。这使得利用光刻技术实现单片多波长探测和其它光电集成应用成为可能。今后需进一步研究界面混合的深层次理论并优化实验条件。

致谢 感谢中澳政府合作研究基金及攀登计划的大力资助,感谢澳大利亚国立大学电子材料工程系和北京物理所为本研究提供材料样品。

REFERENCES

- [1] Levine B F. Quantum-well infrared photodetectors. *J. Appl. Phys.*, 1993, (R1), 74
- [2] WAN Ming-Fang, OU Hia-Jiang, LU Wei, *et al.* Infrared imaging of 128×1 GaAs/AlGaAs MQW infrared detector array. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, (万明芳, 欧海疆, 陆卫等. 128×1 GaAs/AlGaAs 多量子阱扫
- [3] FU Ying, LU Wei, XU Wen-Lan. Near-field coupling effect in normal-incidence absorption of quantum-well infrared photodetectors. *J. Appl. Phys.*, 1999, **85**(2): 1237
- [4] Chen C J, Choi K K, Chang W H, *et al.* Two-color corrugated quantum-well infrared photodetector for remote temperature sensing. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **72**(1): 7
- [5] Liu H C, Li J, Thompson J R. Multicolor voltage-tunable quantum-well infrared photodetector. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1993, **14**(12): 566
- [6] Steele A G, Buchanan M, Liu H C, *et al.* Postgrowth tuning of quantum-well infrared detectors by rapid thermal annealing. *J. Appl. Phys.*, 1994, **75**(12): 8234
- [7] Elman B, Koteles E S, Melman P, *et al.* GaAs/AlGaAs quantum-well intermixing using shallow ion implantation and rapid thermal annealing. *J. Appl. Phys.*, 1989, **66**(2): 2101
- [8] Tan H H, Williams J S, Jagdish C, *et al.* Large energy shifts in GaAs/AlGaAs quantum wells by proton irradiation-induced intermixing. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **68**: 1996
- [9] Li E H, Weiss B L, Chan K S. Effect of interdiffusion on the subbands in an $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ single quantum-well structure. *Phys. Rev. B*, 1992, **46**(23): 15181