第21卷第12期　　半　导　体　学　报　　Vol. 21, No. 12
2000年12月　　CHINESE JOURNAL OF SEMICONDUCTORS　　Dec., 2000

宽带3—5 m量子阱红外探测器的研制

李宏伟　李　卫　黄　绮　周均铭

(中国科学院物理研究所, 北京　100080)

摘要: 采用分子束外延方法在GaAs衬底上生长了n型掺杂的应变InGaAs/AlGaAs多量子阱结构, 制作成3—5μm波段的量子阱红外探测器, 响应峰值波长λ_p= 4.2μm, 响应带宽可达$\Delta\lambda/\lambda$ = 50%, 500K黑体探测率D^*_{BB}(500, 1000, 1)达1.7×10^{10}cm·$Hz^{1/2}$/W.

关键词: 量子阱红外探测器; 探测率; InGaAs/AlGaAs
PACC: 7240; 0762; 7320; 7830
中图分类号: TN215　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 0253-4177(2000)12-1220-04

Development of Broadband 3—5 m Quantum Well Infrared Photodetectors

LI Hong-wei, LI Wei, HUANG Qi and ZHOU Jun-ming

(*Institute of Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100080, *China*)

Received 10 September 1999, revised manuscript received 10 January 2000

Abstract: Broadband 3—5μm quantum well infrared photodetectors have been successfully grown by molecular beam epitaxy. High-quality strained InGaAs/AlGaAs multi-quantum wells with Si doping were acquired on GaAs substrate. The peak response λ_p is of 4.2μm and the response bandwidth $\Delta\lambda/\lambda$ to be 50%. The 500K blackbody detectivity D^*_{BB} (500, 1000, 1) of the detector can reach 1.7×10^{10}cm·$Hz^{1/2}$/W.

Key words: quantum well infrared photodetector; detectivity; InGaAs/AlGaAs
PACC: 7240; 0762; 7320; 7830
Article ID: 0253-4177(2000)12-1220-04

1　引言

几十年来, 在红外探测器领域, HgCdTe材料一直是人们研究的主要对象, 但目前仍存在许多困难, 如

LI Hong-wei was born in 1976. Now he works for his Ph. D degree, whose research interests include semiconductor MBE growth, material and device properties. E-mail: hw-li@263.net

1999-09-10收到, 2000-01-10定稿

大面积均匀性差、表面和界面不稳定、重复性低、成本高等. 而在近十年来发展起来的量子阱红外探测器与之相比, 具有明显的优势[1]. 主要在于用于量子阱红外探测器的Ⅲ-Ⅴ族半导体具有成熟的外延生长技术和器件制造工艺, 不仅可以克服 HgCdTe 的上述缺点, 而且波长易于调节, 可同时把实现3—5μm 和8—12μm 探测的材料生长在一起, 实现双色红外探测[2]. 在3—5μm 波段范围实现的量子阱红外探测器已见诸报道[3,4], 在 GaAs/AlGaAs 体系上实现的量子阱红外探测器因要采用的 Al 组分极高[3], 外延材料质量下降, 对器件性能影响很大. 另外, 在以前的报道中, 因结构设计等方面的问题, 响应带宽都很小, 不能有效覆盖3—5μm 的整个波段范围. 在这里, 我们报道 GaAs 衬底上生长的 $In_yGa_{1-y}As/Al_xGa_{1-x}As$ 体系的高均匀度量子阱红外探测器, 用于3—5μm 红外探测. 经过精心经过设计, 控制合适的 Al 和 In 组分, 我们生长了高质量的量子阱红外探测器材料, 500K 黑体探测率达 $1.7\times10^{10}cm\cdot Hz^{1/2}/W$. 同时, 响应带宽很宽, 达1.9μm, 能基本覆盖3—5μm 波段范围. 若在此结构上, 再同时生长探测波长8—12μm 范围的 GaAs/AlGaAs 多量子阱, 就可实现全波段红外探测.

2　原理及设计

量子阱红外探测器是利用半导体导带(价带)量子阱中子带间的红外吸收跃迁的原理制成的, 当入射红外光子能量刚好等于量子阱中两个子能级间(基态和第一激发态)的能量差时, 基态上的电子就可以吸收光子, 跃迁到第一激发态, 并在外电场作用下做垂直量子阱方向的运动, 形成光电流. 根据有效质量近似, 其跃迁矩阵元与入射光电场矢量方向有关[5], 只有当入射光具有与量子阱平面方向垂直的电场分量时. 跃迁才会发生. 这是因为在有效质量近似下. $\alpha\propto\cos^2\Phi$ 其中 α 为光吸收系数. Φ 为入射光电场矢量与量子阱平面的夹角. 垂直入射时, $\cos\Phi\approx0$, 无光吸收, 所以量子阱红外探测器多采用斜入射或光栅耦合方式.

要实现双色红外探测, 探测范围必须覆盖3—5μm 和8—12μm 两个大气窗口. 对8—12μm 来说, GaAs/AlGaAs 体系的量子阱红外探测器刚好落在这个范围内. GaAs/AlGaAs 体系失配极小, 材料生长及器件工艺都很成熟, 实现起来比较容易. 但对3—5μm 波段来说, 这个体系不合适, 因为过高的 Al 组分在生长时会引入较多的 DX 中心, 大大降低了材料的性能. 为了实现对3—5μm 波段的探测, 同时又便于与 GaAs/AlGaAs 体系集成, 我们仍采用了 GaAs 衬底上以 GaAs/AlGaAs 为主体的结构, 把 GaAs 量子阱部分的用禁带宽度更窄的 $In_yGa_{1-y}As$ 材料代替. 适当调节 In 组分及 $In_yGa_{1-y}As$ 层厚度, 把应变控制在一定范围内. 这样, 就可以实现3—5μm 红外光的探测, 同时又可以保证较好的材料生长质量及探测器性能.

设计的3—5μm 探测器的基本结构如图1所示, 势垒为450nm 的 $Al_xGa_{1-x}As$, Al 组分 $x=0.38$. 势阱为多层结构, 中间是2.5nm 的 $In_yGa_{1-y}As$, In 组分 $y=0.35$, $In_yGa_{1-y}As$ 层的两边各是大约0.7nm 的 GaAs 层, 其中 $In_yGa_{1-y}As$ 层为重掺杂层.

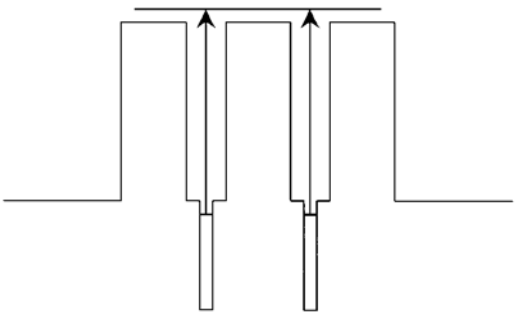

图1　QWIP 结构示意图

FIG. 1　Schematic Diagram of QWIP Structure

3　材料生长与器件制作

材料是用分子束外延(MBE)方法在英V80H型分子束外延设备上生长的, 采用 GaAs(100)向(111)A 面偏4°的衬底, 先生长1μm 厚的 Si 掺杂 GaAs 层作下电极. 然后是探测器 $Al_xGa_{1-x}As/GaAs/In_yGa_{1-y}As/GaAs$ 多量子阱结构. 共生长30个周期. 再盖一层450nm 厚的 $Al_xGa_{1-x}As$ 势垒, 最后是0.5μm 厚的 Si 掺杂 GaAs 上电极, 电极层掺杂浓度为 $1.0\times10^{18}cm^{-3}$, 势阱中的 $In_yGa_{1-y}As$ 为重掺杂层, 掺杂浓度为 $6.0\times10^{18}cm^{-3}$. 在 MBE 生长过程中, $Al_xGa_{1-x}As$ 和 $In_yGa_{1-y}As$ 所要求的衬底温度相差较大(~ 100℃), 为了获得晶体质量较好的材料, 在分子束外延生长

中,我们采用了中断变温的方法,中断生长时改变衬底温度,使 $Al_xGa_{1-x}As$ 和 $In_yGa_{1-y}As$ 分别在其最佳生长温度下生长,这样可保证 $Al_xGa_{1-x}As$ 势垒和 $In_yGa_{1-y}As$ 势阱都具有较好的质量及性能.

在生长过程中,中断会使界面吸附一些杂质,适当控制中断时间是非常重要的.因为量子阱区厚度很小,生长时间短,如果中断时间过短或不采用中断,在衬底温度降低到适合生长 $In_yGa_{1-y}As$ 之前,整个量子阱区已生长完毕.对 $Al_xGa_{1-x}As$ 势垒区来说若存在过厚的低温生长层,也会引入较多深能级降低材料质量性能.适当的中断时间既能达到升降衬底温度的要求,又不会引入过多的杂质缺陷.在实验中采用的中断时间为30—40s.对没有采用中断的样品,整个生长过程衬底温度一直保持不变,最后我们的测量结果表明探测器的响应率和探测率都比较差,这是因为阱区和垒区都没有在最佳生长温度下生长,质量较差.

在生长过程中 In 组分的控制与调节是生长出波长范围合适,晶体质量好的材料的关键.In 组分过低,波长很难达到3—5μm 范围,这样要求采用高 Al 组分的势垒层,但 Al 组分太高对生长不利,容易引入较多 DX 中心.In 组分很高时,应变较大,容易产生失配位错,影响材料光电性能.且高 In 组分下,量子阱宽度较小,使生长时厚度控制相对误差较大,波长容易偏离.在实验中,$In_yGa_{1-y}As$ 层中 In 的组分为0.35,$In_yGa_{1-y}As$ 层的厚度为2.4nm.

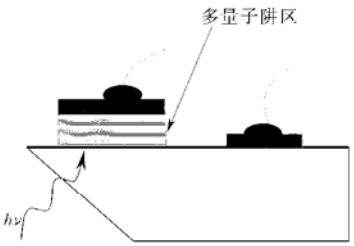

图2 器件单元结构示意图

FIG. 2 Schematic Diagram of Device Cell Structure

我们生长的结构中,$In_yGa_{1-y}As$ 为重掺杂层,掺杂浓度达6.0×$10^{18}cm^{-3}$.这是因为在可实现3—5μm 范围光探测的量子阱结构中,量子阱深度较大,处在量子阱中基态的电子热激发跳出阱外的几率较小.在这种情况下,可适当提高 Si 掺杂浓度,增加基态电子数以提高光响应而不会对暗电流噪声产生影响.同时,适当的 Si 掺杂可调节器件的电阻特性,使之与外读出电路相匹配.材料生长完成后,用光刻-湿法腐蚀刻出350μm×350μm 光响应台面,上下电极层同时光刻蒸发 AuGeNi/Au,去胶后合金退火,做欧姆接触电极.采用45°斜入射方式,台面附近侧面磨45°角并抛光,最后压焊电极(图2),装入杜瓦瓶就可以测试了.

4 结果分析

为了确保探测器材料质量,我们对生长的材料做了光致发光和 X 射线的测试.光致发光谱有较强的积分强度,显示了我们的材料有较好的光学性能.X 射线摇摆曲线有较多的卫星峰,见图3(可达14级),线宽较小(~ 30″),所有这些反映了:1) 材料晶体质量好,应变控制适当,没有出现大量位错;2) 30个周期多量子阱结构的重复性好,生长条件稳定.

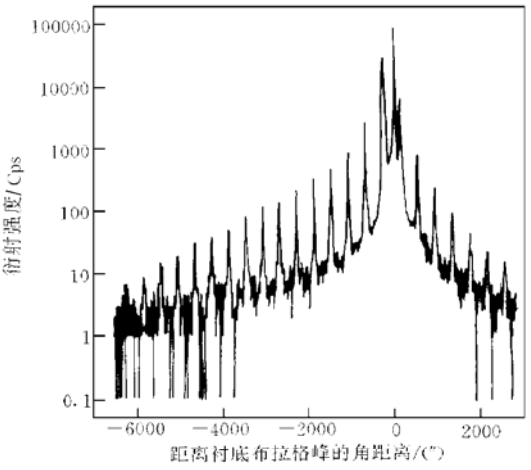

图3 QWIP 样品的 X 射线摇摆曲线

FIG. 3 XRD Curve of QWIP Sample

我们对器件在液氮温度下做了红外响应 R 的测试,测试条件为:黑体温度 T_b = 500K,探测器温度 T = 80K,调制频率为 f = 1000Hz,调制带宽为 Δf = 1Hz.图4给出了样品在500K 下的黑体响应率 $R(500)$ 随外偏压 V 变化的响应曲线,可看出探测器的最佳响应偏压为 V_b = 4.53V,曲线在正负偏压下的增长规律不同,主要是由于生长过程中存在 In 表面偏析,使由垒区到阱区和由阱区到垒区的界面处 In 组分不同,势阱两边的势垒高度有差异,造成电子易于向一个方向运动.

图5给出了样品在一定偏压下的波长 λ 响应曲线 $R(\lambda)$,峰值响应波长 λ_p = 4.2μm,截止波长 λ_c =

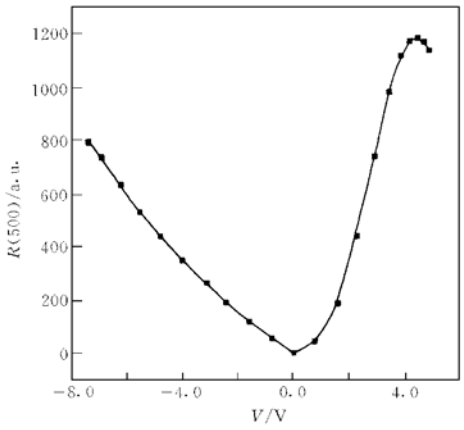

图4　探测器500K 黑体下的电压响应曲线

FIG. 4　500K Blackbody Voltage Dependence of Responsivity for QWIP

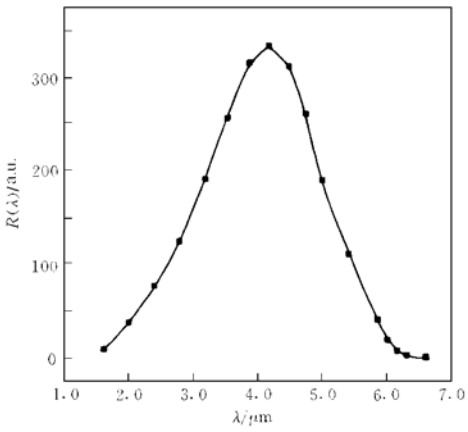

图5　探测器波长响应曲线

FIG. 5　Experiment QWIP Responsivity Spectrum Versus Wavelength

3.1μm, 响应线宽较宽 $\Delta\lambda/\lambda = 50\%$. 这说明第二个子带已落在阱口附近的连续区, 这与我们的设计十分符合.

在500K 黑体响应的测试中, 暗电流噪声很小, 器件信噪比可达2.8×10^4, 最后器件的500K 黑体探测器$D^*_{BB}(500, 1000, 1)$可达1.7×10^{10}cm·$Hz^{1/2}$/W, 这一结果完全达到了国际同类器件水平[6], 其比较见表1.

表1　我们的器件与国际同类器件结果比较

Table 1　Results of Our Device and Similar Structure of Other Groups

	Ours Group	Cui Liqiu *et al.*[3]	Tidrow *et al.*[6]
$\lambda_p/\mu m$	4.2	5.3	4.3
$\Delta\lambda/\mu m$	2.1	——	0.8
耦合方式	45°入射	45°入射	45°入射
D^*_{BB}/(cm·$Hz^{1/2}$/W)	1.76×10^{10}	3.1×10^9	——
$D^*_{\lambda_p}$/(cm·$Hz^{1/2}$/W)	——	5×10^{11}	1.4×10^{11}

5　结语

我们成功研制了 GaAs 衬底上的3—5μm 多量子阱红外探测器, 500K 黑体探测率达1.7×10^{10} cm·$Hz^{1/2}$/W, 这一结果与国外类似器件相当[3,6]. 在此基础上, 加上我们实验室已成熟的8—12μm GaAs/AlGaAs 量子阱红外探测器[7,8], 为进一步研制双色量子阱红外探测器打下了基础.

参　考　文　献

[1] A. Rogalski, Infrared Physics &Technology, 1997, **38**: 295.
[2] Y. H. Wang, Jung-chi Chiang and Sheng S. Li, J. Appl. Phys., 1994, **76** (4): 2538.
[3] 崔丽秋, 江德生, 张耀辉, 等, 半导体学报, 1997, **18**(8), 229—234[CUI Liqiu, JIANG Desheng, ZHANG Yaohui *et al.*, Chinese Journal of Semiconductors, 1997, **18**(8), 229—234(in Chinese)].
[4] 吴文刚, 常凯, 江德生, 李月霞, 郑厚植, 半导体学报, 1998, **19**(3): 229—234[WU Wengang, CHANG Kai, JIANG Desheng, LI Yuexia and ZHENG Houzhi, Chinese Journal of Semiconductors, 1998, **19**(3): 573—580(in Chinese)].
[5] B. F. Levine, J. Appl. Phys., 1993, **74** (8): R1.
[6] M. Z. Tidrow *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1997, **70**(7), 859.
[7] W. X. Wang, Q. Hu, Q. Huang, J. M. Zhou, D. F. Cui and Z. H. Chen, Acta Physica Sinica - Overseas Edition, 1995, **4** (11): 806—809.
[8] G. L. Luo, Q. Huang and J. M. Zhou, Thin Solid Films, 1998, **312** (1—2): 265—267.