

# GaAs/AlGaAs 量子阱红外探测器特性非对称性分析

李娜 李宁 陆卫 袁先璋 李志锋 冀红飞 刘京郊 沈学础

(中国科学院上海技术物理研究所红外物理国家实验室, 上海, 200083)

金莉 李宏伟 周均铭 黄绮

(中国科学院北京物理研究所, 北京, 100080)

**摘要** 在分子束外延生长量子阱材料过程中, 分析了在不同的 GaAs/AlGaAs 异质结生长次序中 Ga 的解吸附速率不同和量子阱中掺杂的扩散造成量子阱结构的不对称, 讨论了 GaAs/AlGaAs 量子阱红外探测器的性能参数相对于正负偏压的不对称性, 并与金属有机化合物汽相沉淀法生长的量子阱材料和相应器件进行了比较. 发现, 采用分子束外延方法生长器件的不对称性更明显.

**关键词** 量子阱红外探测器, 不对称性, 解吸附速率.

## ASYMMETRY IN THE CHARACTERISTIC OF GaAs/AlGaAs QUANTUM WELL INFRARED PHOTODETECTOR

LI Na LI Ning LU Wei YUAN Xian-Zhang LI Zhi-Feng

DOU Hong-Fei LIU Jing-Jiao SHEN Xue-Chu (S. C. Shen)

National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics,

Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

JIN Li LI Hong-Wei ZHOU Jun-Ming HUANG Yi

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

**Abstract** The asymmetry in the characteristic of GaAs/AlGaAs quantum well infrared photodetector (QWIP) due to different Ga desorption rate upon opening /closing the Al shutter and different diffusion of Si doping in the quantum well during MBE growth was analyzed, and that in the parameters of GaAs/AlGaAs QWIP versus bias was discussed and compared with the materials and devices grown by MOVCD method. It was found that the asymmetry of QWIP grown by MBE is higher than that of QWIP grown by MOVCD.

**Key words** QWIP, asymmetry, desorption rate.

### 引言

近 10 年来,量子阱红外探测器(QWIP)在长波红外应用方面得到迅速发展<sup>[1~3]</sup>,与其它红外技术相比,QWIP具有大面积均匀、低噪声等效温差、高分辨率、高产出、低造价等优点.QWIP的另一主要优点是电压调节具有进行多色探测的能力<sup>[4,5]</sup>.GaAs/AlGaAs量子阱红外探测器是利用掺杂量子阱的导带中形成的子带间跃迁,并将从基态激发到第一激发态的电子通过电场作用形成光电流这一物理过程,实现对红外辐射的探测.在这些量子阱结构中,量子阱子带运输的激发态被设计在势垒的边缘

或稍低于势垒顶,以便获得最优化的探测灵敏度,并使子带间距适合于探测 8~10 $\mu\text{m}$  大气窗口.

目前的 GaAs/AlGaAs 量子阱结构大多采用分子束外延(MBE)法在(100)半绝缘衬底上依次生长  $n^+$ -GaAs 下电极层,50 个周期 5nm 厚的 GaAs 和 50nm 厚的  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  组成的量子阱区,和  $n^+$ -GaAs 上电极层.势阱中硅的掺杂浓度为  $5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ ,势垒中 Al 含量为 0.3,用于探测器结构的上下电极层  $n^+$ -GaAs 的厚度是  $1\mu\text{m}$ ,Si 掺杂浓度为  $1 \times 10^{18} \mu\text{m}^{-3}$ .上述结构参数如阱宽和 Al 含量等决定了量子阱中基态和激发态的位置,从而确定了探测峰值波长在  $8\mu\text{m}$  附近.

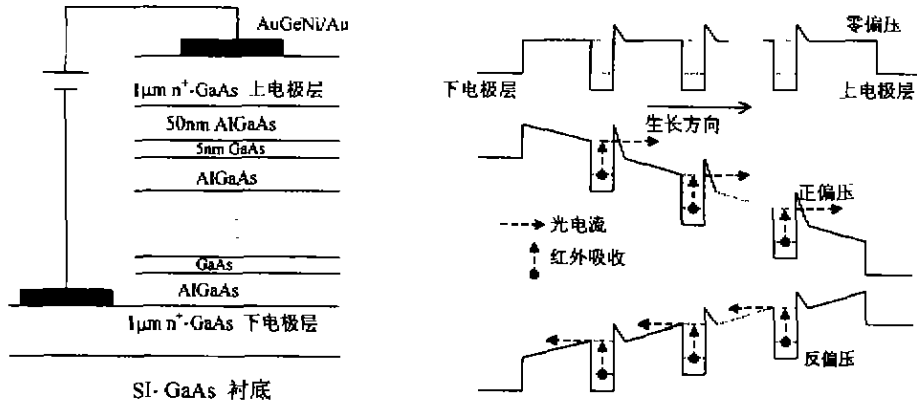


图1 量子阱红外探测器生长结构及能级结构示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of growth and band structure of a QWIP

在理论设计中,假设 GaAs/AlGaAs 量子阱为矩形势阱、异质结界面为理想界面以及上述量子阱结构是对称的.但在实际生长过程中,由于生长控制精度的局限,除阱宽、垒厚等结构参数有偏差外,还有因异质结生长前后不同,而使量子阱两边的势垒不对称,因此造成实际能带尤其是激发态的波函数与根据矩形量子阱模型计算的结果有一定的差异.

量子阱红外探测器的基本性能参数有响应率、暗电流和光谱响应波长等,本文根据上述性能参数相对于正负偏压的不对称性,讨论生长的不对称对量子阱器件性能的影响,并进一步采用金属有机化合物汽相沉淀法(MOCVD)生长的同样结构量子阱材料,比较不同生长方法造成的器件不对称性差别.

### 1 MBE 量子阱材料生长及相应量子阱能级结构

GaAs/AlGaAs 量子阱材料是在分子束外延设备上制备的,衬底为 2in(100)GaAs,生长时衬底温度为 600 °C,生长过程中 Ga、Al、As 束流强度保持不变,生长速率约为 1μm/h.由于 QWIP 材料是在较高温度下生长的,生长过程中存在 Ga 的解吸附(desorption)现象<sup>[5]</sup>,并且 Ga 的解吸附速率与生长过程中 V/Ⅲ 族元素束流比有关.生长 GaAs 时 As、Ga 的束流比为 30,而生长 AlGaAs 时 As、(Ga + Al)的束流比为 30/(1+0.33).由于在 GaAs 层上生长 AlGaAs 势垒层时 V/Ⅲ 元素束流比减小,Al 源快门刚开启时 Ga 的解吸附速率急剧上升,然后减小到 AlGaAs 的稳定值,这使得界面处的 Al 组份增大;而在 AlGaAs 层上生长 GaAs 阱层时情况正好相反,关闭 Al 源后, V/Ⅲ 束流比增加, Ga 的解

吸附率下降.因此 GaAs 两边的异质结生长结构的不对称,引起量子阱势垒不对称(见图 1).

在量子阱中心掺杂 3μm 厚、浓度为  $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  的硅,是为了提供光激发载流子.由于衬底温度较高,掺杂硅向生长方向扩散,甚至进入势垒层,使得硅在量子阱中心的分布不完全对称,这将对 GaAs 阱中子带的位置和电子费米能级产生影响<sup>[5]</sup>.由于以上两种量子阱结构不对称因素,必将导致在正反方向外电场作用下的光致激发载流子的输运条件不同,使得器件的性能参数相对于正反偏压不对称.以下将对这一现象作详细分析.

### 2 QWIP 器件性能参数的不对称性

将 MBE 生长出的 GaAs/AlGaAs 量子阱材料,用湿法刻蚀出面积为  $250 \times 250 \mu\text{m}^2$  台面,以 Au-GeNi/Au 层作上下电极的欧姆接触层,制成单元红外探测器器件.在台面制作工艺前刻蚀出光栅结构或侧面 45°抛光以实现光学耦合,用金丝球焊引出

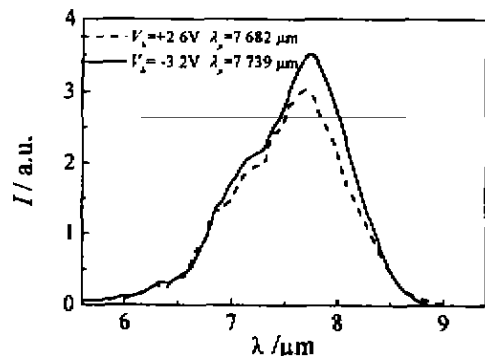


图2 77K 正反偏压下 QWIP 的光电流谱  
Fig. 2 Photo-current spectrum of QWIP as a function of bias at 77K

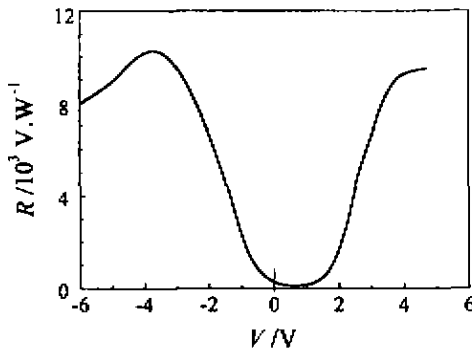


图3 77K QWIP 的绝对黑体响应率与偏压的关系  
Fig. 3 Absolute blackbody responsivity of QWIP versus bias at 77K

电极引线后,装入 77K 液氮制冷杜瓦,给器件加偏压,直接获得的电流信号为器件的暗电流值.将杜瓦放入傅利叶光谱仪的样品室中,用前置放大器放大光电流信号并传输到光谱仪的数据处理系统,选择适当的测试条件进行测量,可得到器件的光响应谱.如以 500K 黑体为红外辐射光源,经锁相放大器测得响应电压信号,则可获得器件的绝对黑体响应率.以上测试均以电源正极接上电极层为正向偏压.

图 2 反映了 QWIP 器件的光响应谱在正反偏压下峰值响应波长的移动.在正向偏压下峰值响应波长较短,说明量子阱中子带间距与反向偏压时相比大 1.4 meV.结合图 1 可看出这是由于存在高于正常势垒的阻挡层,加正向偏压时,激发态偏高.由图 3 可发现绝对黑体响应率随正反偏压有明显的不对称.当给器件加反向偏压时,响应率随偏压的增加持续上升,偏压到 -3.8V 时,响应率达到最大值.当正向偏压 < 2V 时,量子阱探测器的光响应信号很小,逐渐增加偏压至 4.2V 时,响应率上升并饱和.这说明光生载流子需更强的正向电场作用才能越过阻挡层.

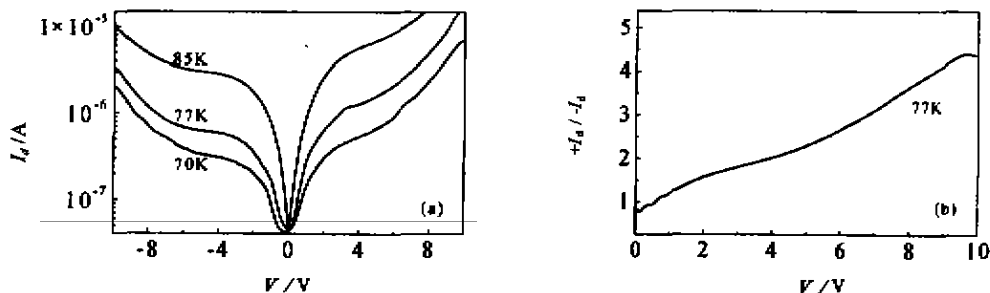


图4 量子阱红外探测器  $I$ - $V$  特性的非对称性  
(a)不同温度下暗电流与偏压的关系 (b)正反向暗电流比( $T=77$ )  
Fig. 4 The asymmetry in  $I$ - $V$  characteristic of QWIP  
(a) dark current versus bias at different temperature  
(b) dark current ratio versus bias at 77K

量子阱红外探测器的暗电流主要由两部分组成,即隧穿电流和阱中基态电子热激发电流.由于目前采用的量子阱结构中,势垒较厚(> 300nm),隧穿电流对暗电流的贡献可忽略不计,因此在无光照时,器件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.有效电子个数如下式表示<sup>[7]</sup>:

$$n(V) = \left[ \frac{m^*}{\pi \hbar^2 L_p} \right] \int_{E_0}^{\infty} f(E) T(E, V) dE. \quad (1)$$

式(1)中  $m^*$  为有效质量,  $L_p$  为量子阱周期,  $f(E)$  是费米因子,  $f(E) = [1 + \exp((E - E_0 - EF)/kT)]^{-1}$ ,  $E_0$  是基态能级,  $E_F$  是费米能级.  $T(E, V)$  是与偏压相关的隧穿电流因子.热激发电流的大小不仅与阱深和垒厚有关,也与阱中掺杂的多少和分布有关.图 4(a)反映了在不同温度下暗电流与偏压的关系.从图 4(a)中可明显发现暗电流相对正反偏压是不对称的,在相同偏压下,正向电流大于反向电流.可以用正反向电流比 ( $+I_d / -I_d$ ) 对这种不对称性进行评价(见图 4(b)),随着偏压的增加,不对称性加强,反映了阱中的掺杂硅向势垒的扩散程度.

### 3 不同生长方法的不对称性比较

以往对 GaAs/AlGaAs 量子阱材料和器件的研究是以分子束外延法(MBE)生长的材料为基础,这种方法在材料生长的均匀性、精细结构的控制和实时监控等方面都有较大的优越性.金属有机物化学气相沉积法(MOCVD)也是一种广泛应用的材料生长方法,在激光器、量子点、量子线等材料及器件的研究中起着重要的作用.一般情况下,MBE 法生长材料采用固体为生长源,而 MOCVD 法则以气体为生长源这是两者的基本区别.在 MOCVD 法生长 GaAs 和 AlGaAs 层过程中,反应炉通入含有 10% AsH<sub>3</sub> 的氢气作为 As 源,三甲基镓(TMGA)为 Ga

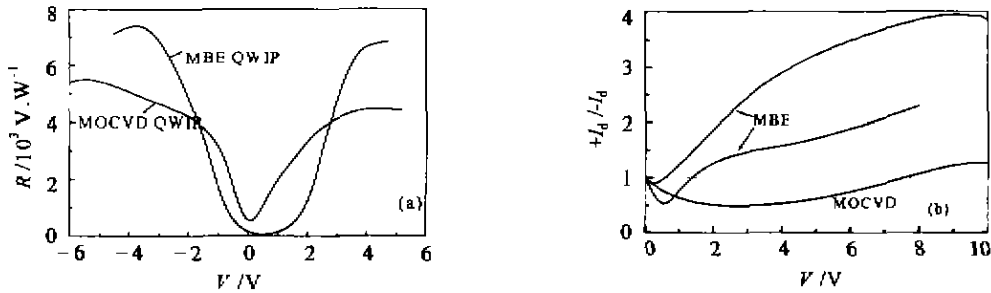


图5 MOCVD和MBE方法生长QWIP的响应率及暗电流特性的比较

(a) 响应率随偏压的变化关系 (b) MOCVD和MBE器件暗电流特性的比较

Fig. 5 Comparison of responsivity and dark current of QWIP grown by MOCVD and MBE

(a) responsivity versus bias (b) dark current ratio versus bias for MOCVD and MBE QWIP

源,三甲基铝(TMAL)为Al源,Si掺杂用的气源为SiH<sub>4</sub>,红外加热使反应炉温度升至800℃,用两种方法生长同样的QWIP结构,虽然响应峰值波长基本相同,响应率和暗电流在同一数量级,但相对于正反偏压的不对称方式有明显不同,见图5(a)和5(b),

MOCVD样品相对于MBE样品的非对称性较小,正反向暗电流比在1附近.虽然气源的开启和关闭以及掺杂的扩散也会引起不对称,但MOCVD样品的不对称主要是由于MOCVD法的生长温度较高,GaAs/AlGaAs异质结之间存在界面扩散,而且相互扩散的程度不同,引起量子阱两边的界面粗糙程度不对称.一般情况是在GaAs上生长AlGaAs的界面比在AlGaAs上生长GaAs更为光滑,光生载流子在沿着生长方向扩散的过程中,在粗糙界面发生散射,造成迁移率和热电子寿命的降低,因此正向响应率和暗电流较低.当偏压较高时,阱中掺杂的扩散将起更主要的作用,正向暗电流逐渐大于反向暗电流,如图5(b).

#### 4 结论

由以上讨论可知,在MBE生长量子阱红外探测器过程中,由于在Al源开启或关闭前后Ga的解吸附速率变化,引起量子阱两边的势垒不对称,使得正反偏压下的峰值响应波长和绝对黑体响应率不对称.同时,由于量子阱中掺杂的Si杂质在量子阱生长过程中向生长方向扩散,引起量子阱探测器I-V特性不对称.比较MBE和MOCVD法生长的QWIP特性,发现两种器件的响应率和暗电流的不对称特点不同,后者的不对称程度较低,是由量子阱界面条件不同造成的.要使MBE器件保持良好的对称性,可在生长过程中降低生长温度和生长速度,防止掺杂元素扩散和Al源开关前后束流比变化引

起Al含量较大的差别.生长工艺的完善,将使量子阱红外探测器的性能提高,并达到实用的要求.

致谢:作者在此感谢中澳政府合作研究基金的大力资助,感谢澳大利亚国立大学电子材料工程系和中国科学院北京物理研究所为本研究提供材料样品.

#### REFERENCES

- [1] Levine B F. Quantum-well infrared photodetectors. *J. Appl. Phys.*, 1993, **74**(8):R1
- [2] Gunapala S D, Liu J K, Park J S, *et al.* 9- $\mu\text{m}$  cutoff 256  $\times$  256 GaAs/AlGaAs quantum well infrared photodetector band-beld camera. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1997, **44**(1):51
- [3] LI Ning, LI Na, LU Wei, *et al.* Development of 64  $\times$  64 GaAs/AlGaAs MQW long-wave infrared FPAs. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (李宁,李娜,陆卫,等. 64  $\times$  64 元 GaAs/AlGaAs 多量子阱长波红外焦平面研制, *红外与毫米波学报*), 1999, **18**(6):427.
- [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):256
- [6] Mahalingum K, Dorsey D L, Evans K R, *et al.* The origin gallium desorption transients during AlGaAs/GaAs heterointerface formation by molecular beam epitaxy. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **70**(23):3143
- [7] Levine B F, Bethea C G, Hasnain G, *et al.*, High sensitivity low dark current 10 $\mu\text{m}$  GaAs quantum well infrared photodetectors. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**(3):851
- [8] Liu H C, Wasilewski Z R, Buchanan M, *et al.* Segregation of Si doping in GaAs-AlGaAs quantum well and the cause of the asymmetry in the current-voltage characteristics of intersubband infrared detector. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **63**(6):761