

MOCVD 与 MBE 生长 GaAs/AlGaAs 量子阱材料的红外探测器特性比较*

李 娜 李 宁 陆 卫 窦红飞 陈张海 刘兴权 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, 中国)

H. H. Tan, Lan Fu, 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: 用金属有机物化学气相沉积法(MOCVD)生长 GaAs/AlGaAs 量子阱材料, 并制成红外探测器. 测量了材料的光致发光光谱和探测器的光电流响应光谱及其它光电特性, 峰值波长 $7.9\mu\text{m}$, 响应率达到 $6 \times 10^3 \text{V/W}$, 与分子束外延法(MBE)生长的材料和相关器件进行了比较, MOCVD 法可满足量子阱材料和器件的要求.

关键词: GaAs/AlGaAs; 量子阱红外探测器; MOCVD; MBE

PACC: 0762; 6865; 6855; 8115G

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2000)05-0441-04

Performance Comparison of GaAs/AlGaAs Quantum Well Infrared Photodetectors Grown by MOCVD and MBE*

LI Na, LI Ning, LU Wei, DOU Hong-fei,
CHEN Zhang-hai, LIU Xing-quan and X. C. SHEN

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

H. H. Tan, Lan Fu and C. Jagadish

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

* 国防科工委重点资助项目[Project Supported by National Defence Research Program of China].

李 娜 女, 1962年出生, 在上海技术物理研究所红外物理国家重点实验室从事量子阱器件及物理研究.
1999-03-13收到, 1999-05-31定稿

M. B. Johnston and M. Gal

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

Received 13 March 1999, revised manuscript received 31 May 1999

Abstract: GaAs/AlGaAs Quantum Well Infrared Photodetector (QWIP) structure is grown by using Metal Organic Chemical Vapor Deposition (MOCVD) and Molecular Beam Epitaxy (MBE). The differences of two kinds of material are compared by photoresponse and photoluminescence spectroscopy. The device performance fabricated by using them are compared from their responsivity and I - V characteristic. Peak wavelength of MOCVD QWIP is $7.9\mu\text{m}$ and its responsivity could be $6\times 10^3\text{V/W}$.

Key words: GaAs/AlGaAs MQW; Infrared Photodetector; MOCVD, MBE

PACC: 0762; 6865; 6855; 8115G

Article ID: 0253-4177(2000)05-0441-04

1 引言

对于红外探测器和大面积凝视成像阵列体系^[1,2],量子阱结构被认为是有前途的材料,量子阱红外探测器利用了势阱内基态到势垒边缘的激发态间的子带跃迁原理.由GaAs/AlGaAs, InGaAs/InP, InGaAs/GaAs, GeSi/Si等材料形成的量子阱探测器已经证明具有优越的成像性能. GaAs/AlGaAs量子阱焦平面探测器阵列的快速发展^[3,4]是,基于这种材料的均匀性和低造价.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.本文介绍用MOCVD法生长的用于制作红外探测器的GaAs/AlGaAs量子阱材料的特性及器件性能,以及与MBE结果比较.

2 材料生长及光致发光测试

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

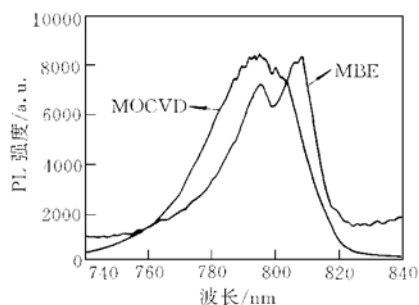


图1 GaAs/AlGaAs量子阱材料的光致发光光谱

FIG. 1 Photoluminescence Spectrum of GaAs/AlGaAs Quantum Well Sample Grown by MOCVD and MBE

MOCVD法生长GaAs和AlGaAs层的过程中,反应炉通入含有10%AsH₃的氢气作为As源,三甲基镓(TMGa)为Ga源,三甲基铝(TMAl)为Al源.红外加热使反应炉温度升至800℃.量子阱结构生长在(100)晶向的GaAs半绝缘衬底上,由50个周期5nm厚的GaAs和50nm厚的Al_{0.3}Ga_{0.7}As组成.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1μm, Si掺杂浓度为 $1\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$,掺杂用的气源为SiH₄.

为了进行光致发光光谱测试,将样品解理,用Ar⁺激光器作为激发源从侧面入射.图1是MOCVD和MBE生长的同样结构GaAs/AlGaAs量子阱材料的光致发光光谱图.光致发光光谱是确定带间跃迁能量的一般方法,图中峰位的能量值反映了量子阱中受限导带电子与价带空穴的基态间跃迁.图中所示的794.5nm和807.6nm的光致发光峰分别对

应 HH1 重空穴自由激子和 LH1 轻空穴自由激子辐射复合发光^[5], 说明两种方法生长的量子阱材料中的电子和轻重空穴能级分布相同, 由 MOCVD 方法形成的量子阱与势垒间的界面也是较为陡峭的. MOCVD 样品的 PL 谱稍宽, 则反映了相对于 MBE 生长方法, GaAs/AlGaAs 异质结之间存在的界面扩散, 使界面较为粗糙^[6], 这应是气源与固源材料生长的明显区别.

3 器件制作及特性测试

将生长的 GaAs/AlGaAs 量子阱材料, 以湿法刻蚀出台面, 以 AuGeNi/Au 层作上下电极的欧姆接触层, 制成面积为 $250 \times 250 \mu\text{m}^2$ 的单元红外探测器. 侧面 45° 抛光, 用金丝焊球引出电极引线后, 装入 80K 制冷杜瓦, 用于探测器光电特性测试.

在上述量子阱结构中, 阱内只有一个束缚态即基态, 另一束缚态即激发态在势垒边缘, 相应的子带间跃迁被称为束缚态到准束缚态的跃迁, 它介于束缚态到连续态跃迁和束缚态到束缚态跃迁之间, 克服了前者暗电流较大, 而后者响应较小的缺点. 根据是量子阱探测器的光响应电流谱, 如图 2 所示. MOCVD 法生长材料的红外探测器与 MBE 生长材料相同, 属于束缚态到准束缚态的跃迁, 峰值分别为 $7.93 \mu\text{m}$ 和 $8.01 \mu\text{m}$, 半高宽分别为 $1.1 \mu\text{m}$ 和 $1.3 \mu\text{m}$. MOCVD 生长的材料具有较宽的光响应电流谱, 且稍偏向于长波, 是由生长方向量子阱结构不均匀造成的.

红外探测器的响应率由下式给出:

$$R = \left[\frac{e}{h\nu} \right] \eta g \quad (1)$$

其中 量子效率 η 和光导增益 g 分别为:

$$\eta = (1 - e^{-2\alpha l})/2 \quad (2)$$

$$g = \mu \tau_n V_b / l \quad (3)$$

其中 l 为量子阱厚度; α 为吸收系数; τ_n 是热电子寿命; μ 是载流子迁移率; V_b 为外加电场.

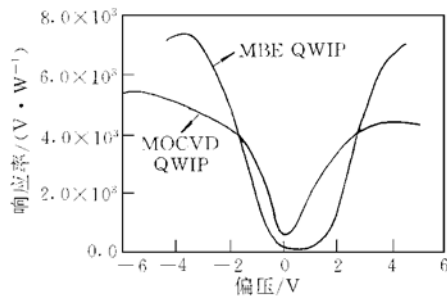


图3 MOCVD 和 MBE 样品的响应率随偏压的变化关系

FIG. 3 Responsivity GaAs/AlGaAs QWIP Grown by MOCVD and MBE

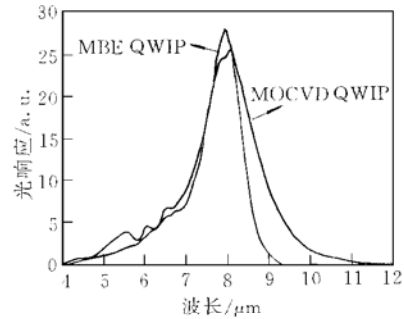


图2 量子阱红外探测器的光电流谱 ($T = 77\text{K}$)

FIG. 2 Photoresponse of GaAs/AlGaAs QWIP Grown by MOCVD and MBE

从光电流响应谱可看出 MOCVD 样品的响应电流较低, 响应率绝对值的测试证实了这一现象, 如图 3 所示. 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. 响应率随器件偏压逐渐增大并在一定工作电压下达到最大值. MOCVD 样品需更大的偏压达到响应率峰值 $6 \times 10^3 \text{V/W}$ ($\sim 4.6 \text{V}$), 说明这种材料具有较高的阻抗. 这是由于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, 如 (3) 式所示.

GaAs/AlGaAs 量子阱红外探测器另一基本特性参数是暗电流, 器件暗电流主要由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定义:

$$n(V) = \left[\frac{m^*}{\pi \hbar^2 L_p} \right] \int_0^\infty f(E) T(E, V) dE \quad (4)$$

其中 m^* 为有效质量; L_p 为量子阱周期; $f(E)$ 是费米因子, $f(E) = [1 + \exp((E - E_0 - E_F)/kT)]^{-1}$, 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. 如图 4 所示, MOCVD 材料器件的 $I-V$ 特

性与 MBE 材料具有相同的趋势和数量级。

由 MBE 法生长的 GaAs/AlGaAs 量子阱材料,其红外探测器的 $I-V$ 特性存在正反偏压下的非对称性.一般认为,正反向偏压下暗电流的非对称性一方面来自在不同生长次序中, 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.由图5所示,正反偏压下的暗电流比反映了探测器 $I-V$ 特性的非对称性程度.两组 MBE 样品的暗电流比,均在小偏压下小于1,随着偏压的增加逐渐上升.但 MOCVD 样品的暗电流比却有不同趋势,其数值上在1附近,说明相对于 MBE 样品,非对称性程度较小.引起非对称的原因也不相同,还有待于进一步分析.

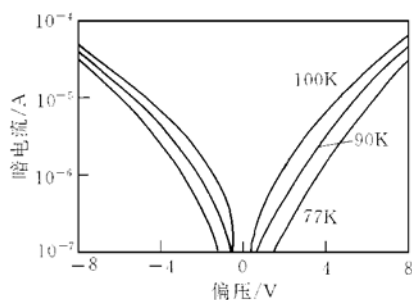


图4 MOCVD 红外探测器的 $I-V$ 曲线

FIG. 4 $I-V$ Curve of MOCVD QWIP Sample

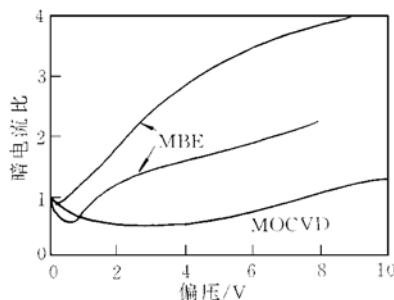


图5 探测器 $I-V$ 特性的非

对称性比较

FIG. 5 Asymmetry of $I-V$ Characteristics of QWIP

按照常规的黑体探测率定义:

$$D_b^* = \left[\frac{V_s}{V_n} \right] \sqrt{\Delta f A_d} / \left[\frac{\sigma(T_b^4 - T_0^4) A_b A_d}{2 \sqrt{2} \pi L^2} \right] \quad (5)$$

其中 V_s 是光诱导电压, 视场角为180度; 宽体黑体辐射源温度为 T_b ; V_n 是噪声电压; Δf 为带宽; A_b 与 A_d 分别是黑体源出口面积和器件光敏面积; T_0 是室温239K; L 是黑体源与器件之间的距离; $\sigma = 5.67 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$. 在偏压 $V_b = 4.6 \text{ V}$ 下测得的 $T_b = 500 \text{ K}$ 时的黑体探测率 $D_b^* = 6.67 \times 10^9 (\text{cm}^{-3} \cdot \text{Hz}^{1/2}) / \text{W}$.

4 结论

根据以上对 PL 谱, 光响应谱, 响应率和暗电流等参数的分析, 说明 MOCVD 法可用于生长制作红外探测器的 GaAs/AlGaAs 量子阱材料, 相对于 MBE 法, 材料及器件特性无明显差别, 而且操作简便, 造价低廉, 是研究量子阱材料和器件的基本生长方法之一. 由于 MOCVD 有生长速度快、低真空系统等造成的界面粗糙和生长不均匀的缺点, 今后还需优化设计生长方法, 使材料和器件性能得到进一步提高.

致谢 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.

参 考 文 献

- [1] B. F. Levine, J. Appl. Phys., 74, 1993(R1).
- [2] S. D. Gunapala, J. K. Liu, J. S. Park *et al.*, IEEE Trans. Electron Devices, 1997, 44(1): 51.
- [3] C. G. Bethea, B. F. Levine *et al.*, IEEE Trans. Electron Device, 1993, 4(10): 1957.
- [4] 万明芳, 欧海疆, 陆卫, 等, 红外与毫米波学报, 1998, 17(1): 74 [WAN Mingfang, OU Haijiang, LU Wei *et al.*, Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1998, 17(1): 74 (in Chinese)].
- [5] 沈学础, 半导体光学性质, 北京: 科学出版社, 1992, 633 [X. C. SHEN, Optical Properties of Semiconductors, Science Press, Beijing 1992, p633 (in Chinese)].
- [6] Y.-G. Zhao, Y.-H. Zou *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1998, 72(1): 97.