

# 面向工程化应用的量子阱红外探测材料制备研究

杜 鹏, 周立庆

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

**摘 要:**为了得到高性能的量子阱红外探测材料, 本文通过建立系统的材料设计、材料生长及材料表征体系, 对面向工程化应用要求的单色以及双色红外探测的量子阱材料制备技术进行了较深入探索, 并得到了相应部分器件的测试结果, 实践证明, 通过工艺与控制过程优化, 量子阱红外探测材料的制备可实现高的可控性和稳定性。

**关键词:**量子阱红外探测器; 分子束外延; 材料; 表征

**中图分类号:** TN362      **文献标识码:** A

## Fabrication of QWIP material for mass production

DU Peng, ZHOU Li-qing

(North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

**Abstract:** In the past few years researchers have made impressive progress in III-V based low dimension infrared detector such as QWIP, QDIP and Sb based superlattice. QWIP technology has been proved an important candidate for the third generation IR systems for its high uniformity, yield, large format and multi-band capability in Europe and American, but is still in the Lab in China. So these kinds of production are important issues to be developed. The design and fabrication of high performance QWIP material is the first thing to be solved. How to keep a high quality, high yield, and high efficiency material growth is the basement of the whole project. Since 2007 we start our research in QWIP material. And much progress has been achieved with the foundation of the material design, growth and characterization. In this paper we present some recent results of our research in single color and two color QWIP material. As a result, highly controllable and stable material can be guaranteed by the optimization of process control.

**Key words:** QWIP; MBE; material; characterization

### 1 引 言

20世纪70年代量子阱、超晶格概念提出以来, 能带工程与技术快速发展, 量子阱超晶格材料应用于红外技术也位列其中<sup>[1-3]</sup>。1988年AT&T Bell实验室的研究人员制作出了世界上第一支量子阱红外探测器(QWIP)<sup>[4]</sup>, 在之后的十多年时间里西方发达国家完成了量子阱红外探测器从实验室到工程化应用的跨越, 实现了从单元器件到面阵器件、从单色到多色探测的巨大进步。

根据西方先进国家红外技术发展的路线和经验, 量子阱红外探测器是第三代红外探测器的一个重要方向。目前世界上最成功的几个红外探测器制

造商如: 法国Thales公司<sup>[5]</sup>、德国AIM公司<sup>[6]</sup>等, 都已投产单色或多色的量子阱红外探测器。其中德国AIM公司的长波低噪声量子阱红外探测器更是达到了NETD = 5 mK的水平。量子阱红外探测器具有工艺成熟、成品率高、容易制成双/多色器件以及成本较低等特点, 正在红外探测舞台上发挥越来越大的作用。

量子阱红外探测材料一般使用分子束外延

**作者简介:** 杜 鹏(1979-), 男, 满族, 工程师, 硕士, 主要从事 III-V 族低维红外探测材料研究。E-mail: charlie\_mailbox@yahoo.com

**收稿日期:** 2010-06-30; **修订日期:** 2010-09-01

(MBE) 或金属有机氧化物化学气相沉积法 (MOCVD) 技术制备, 其中 MBE 技术由于具有更好的界面特性而被更广泛的采用, MOCVD 则由于更高的产量而被部分公司作为生产型设备加以应用。材料的结构设计和生长工艺具有同样重要的地位, 好的结构设计对于实现所需目标探测波长、高性能以及易控的生长工艺都具有十分重要的意义。本文将从材料结构的设计、生长以及表征几个方面介绍华北光电技术研究所量子阱材料工程化方面的研究进展。

## 2 材料结构设计

目前采用的量子阱红外探测材料大致分为光导

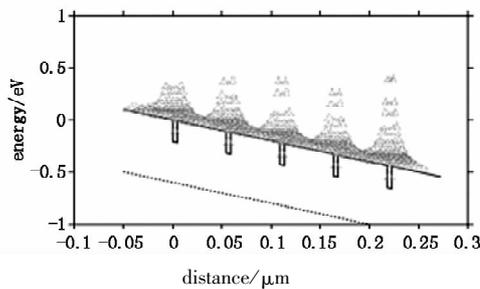


图1 计算得到的能带结构与2 V 偏压下电势分布

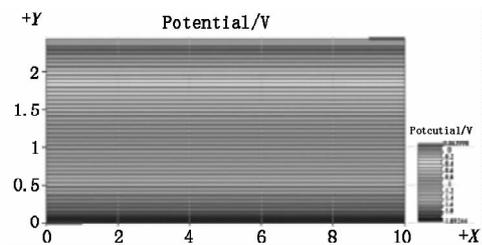
对于长波材料结构一般由  $1\ \mu\text{m}$  下电极接触层, 50 周期  $50\ \text{nmAl}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/5\ \text{nmGaAs}$ ,  $0.7\ \mu\text{m}$  上电极接触层以及盖层所组成。长波材料一般设计为探测波长对应  $8\sim 12\ \mu\text{m}$  大气窗口。中波材料结构一般为  $1\ \mu\text{m}$  下接触层, 20 周期  $40\ \text{nmAl}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/3\ \text{nmIn}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ ;  $0.7\ \mu\text{m}$  上接触层以及光栅层所组成, 对应峰值  $5\ \mu\text{m}$  左右的大气窗口。在中波材料体系中, 由于高 Al 组分的 AlGaAs 电学性能无法达到器件要求, 因而采用大应变的 InGaAs/AlGaAs 体系, 虽然给材料生长带来了挑战, 但实践表明通过优化工艺控制, 可制备出高质量的材料, 完全可以保证高性能器件的需求。双色材料则由长波材料和中波材料叠加而成, 中间生长  $1\ \mu\text{m}$  左右的公共电极接触层。出于对整体结构厚度的考虑, 中、长波部分都只生长 20 个周期左右。

对于某特定探测波长要求的材料, 经过优化和验证其结构便固定下来, 经过一定积累建立一个探测波长 - 最佳结构的资料库可供查询。

## 3 材料生长与表征

目前国外用于 QWIP 材料生产的 MBE 系统主要有 VEECO GEN2 或 3、Riber49 等, 其中 Riber49 系统属于面向生产型的大型系统。出于小批量生产与

型和光伏型两种结构, 本文报道的 QWIP 材料采用光导结构, AlGaAs/GaAs/InGaAs 材料体系, 其载流子激发和输运相对简单, 材料生长及器件制备工艺较为成熟, 材料结构均匀性好, 便于制作大规模面阵器件和进行批量生产。采用 Crosslight 公司的 Apsys 软件对结构进行分析和模拟, 并结合实验结果进行适当修正, 最终得到优化的设计结果。由于对较短积分时间的考虑, 材料结构设计为提供相对较高的量子效率的结构, 并对掺杂浓度进行相应优化。图 1 为对长波典型结构计算得到的能带结构以及 2 V 偏压下器件的电势分布。



研究的兼顾, 我们采用了 DCA P600 单片 4 in MBE 生长系统。

采用 4 in 半绝缘衬底。生长过程采用计算机程序控制, 高能电子衍射仪 (RHEED) 进行实时监控。AlGaAs/GaAs/InGaAs 体系薄膜的 MBE 生长工艺相对较为成熟, 但对于高质量的量子阱结构生长有以下几个问题需着重考虑。

首先为了保证材料的响应波长和性能, 需要对 AlGaAs 和 InGaAs 中的 Al 和 In 的组分进行精确控制, 目前一般采用生长时 RHEED 监测的振荡曲线与生长后 X - RAY 双晶衍射仪校准的方法对材料组分进行精确控制。图 2 为 Ga 源在某温度下进行生长速率较准时测得的振荡曲线, 该振荡曲线线形

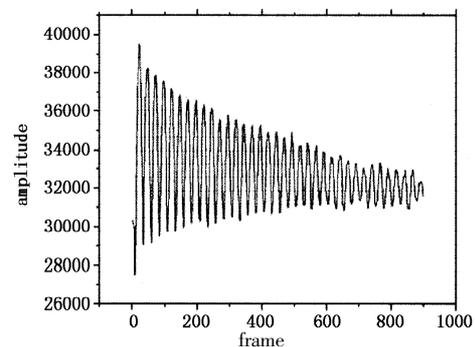


图2 Ga 生长速率测试

较好,可较准确地获得实际的生长速率。由于 Ga 在衬底温度高于 620 °C 生长时会出现脱附现象,因而在计算 AlGaAs 组分时需要引入一个修正系数来进行较准,该系数可通过测量 AlGaAs 的生长速率或 X-Ray 测试结果与 Ga 生长速率进行比对获得。图 3 为 AlGaAs 材料的 X 射线双晶摇摆曲线,做  $\Omega-2\theta$  联动扫描,通过测量 AlGaAs 与衬底间的衍射角可计算得到该材料的 Al 组分为 0.26。

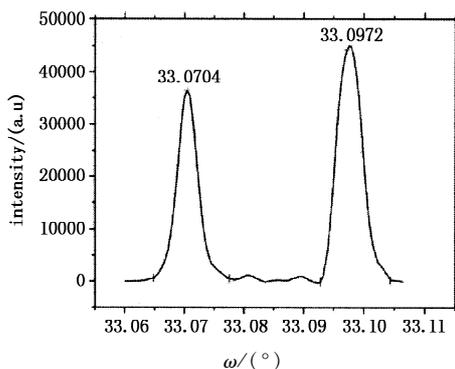


图3 长波材料 X 射线双晶摇摆曲线

其次对于含有 InGaAs 的材料,由于存在 In 偏析的现象使得情况变得较为复杂,一般来讲偏析的程度可由 RHEED 振荡峰值的衰减进行观测。对衰减进行指数拟合可近似得到材料在该生长条件下的偏析系数。图 4 为根据该理论进行的一个拟合试验,测得的偏析系数为 0.7。为了避免偏析现象过度影响结构性能可采用优化生长条件的方法或者采用提前补偿的方法<sup>[7]</sup>。以下简单介绍第二种方法,根据偏析理论在第二层未生长完成时第一层的 In 只会有的  $(1-R) \times n$  的 In 进入该层(其中  $R$  为偏析系数, $n$  为组分),那么如果在生长 InGaAs 的初始阶段生长一个组分合适的高 In 的 Seed 层那么可保证快门关闭前每层的 In 组分相同,对于快门关闭后的偏析状况可采用蒸发掉多余的 In 来解决。

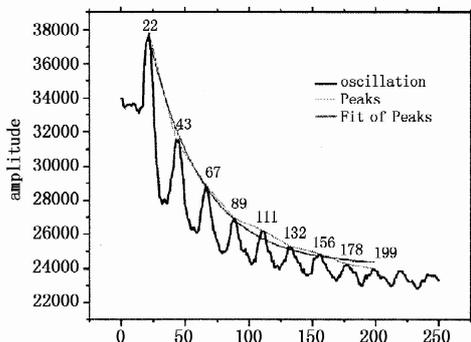


图4 Rheed 振荡测定偏析系数

最后为保证高的材料生长质量需要对 AlGaAs/

GaAs 体系和 InGaAs/AlGaAs 体系的生长温度进行平衡。对于 AlGaAs/GaAs 体系,AlGaAs 和 GaAs 的最佳生长温度相差 100 °C 左右,如采用较低温生长可能导致 AlGaAs 质量下降,器件暗电流增大,同时又需要避免生长时变温所导致的界面杂质沉积问题,所以需要找到一个较合适的生长条件以同时得到较高质量的 GaAs 和 AlGaAs。对于 InGaAs/AlGaAs 体系更是如此,错误的生长条件会导致中波器件性能恶化。根据 X-Ray 双晶摇摆曲线以及其他测试手段的分析结果,证明优化的生长条件完全可以保证材料的高性能。

为了具有较高产能,避免由于源炉升降温及稳定带来的时间损失以及更多的不确定性,材料必须连续生长。然而,考虑到由于源炉内源材料不断消耗所带来的实际生长速率的变化,必须采用一定的手段加以修正。

只从响应光谱的角度考虑,图 5 为连续生长的两片样品的中心点 FTIR 吸收曲线,可以看出已经出现了 0.05  $\mu\text{m}$  的偏差,而吸收强度也有些许变化。长波样品的生长时间大概为 10 h,在 10 h 之内源材料不断消耗所带来的实际生长速率的变化会导致一个样品自身结构的不均匀性而导致光谱宽化,而下一个样品就会出现光谱的偏离。X 射线衍射测得的 Al 组分偏差为 0.005,造成势垒高度有 3 meV 左右的一个变化,但这种阱宽和势垒高度的微小变化还不足以对光电子输运造成大的影响。如果不加以调整补偿继续生长,第三个样品就会出现更大的偏离,不仅响应峰值会出现较大变化,而且有可能导致结构变化过大,暗电流增大或者光电流变小。只采用束流计进行束流的简单监控和调整显然无法解决该问题,若无光学束流监控系统(OFM)等有效的更精确的监控手段,每批次以生长两个样品为宜,下一批次需要重新进行生长速率校准。

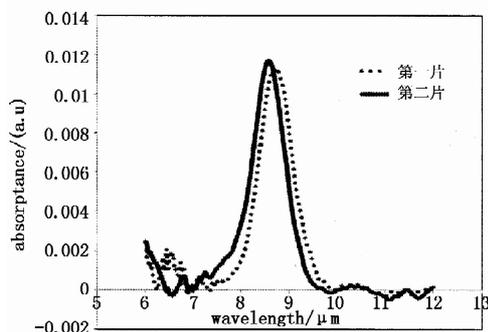


图5 两片连续生长样品的吸收谱

在 GaAs 系统中掺杂所用的 Si 源一般为升华源,但 Si 的蒸汽压很低,每次生长所喷出的 Si 量很小,所以在很长时间的生长过程中其掺杂浓度都不会发生大的变化,这对规模化生产是有利的。

如果采用一周连续生长的方式,每周可进行四批次样品生长,每批次可生长两个长波样品或者一个双色样品,尺寸均为 4 in。

关于量子阱材料的测试表征,常规外延材料可进行 FTIR 红外吸收谱和 X 射线双晶摇摆曲线测试,部分材料可减薄使用 PL 荧光光谱仪进行测试,或者经过制样使用 TEM 进行截面分析。FTIR 吸收测试可以较为准确的估计所制器件的响应光谱,虽然由于 Coulomb 相互作用等其他效应影响,室温 FTIR 吸收与低温器件响应之间存在一个小的偏差,但可根据理论及经验进行相应修正。通常 FTIR 吸收测试可采用  $45^\circ$  波导式结构或者采用 Brewster 角方式入射。Brewster 角方式入射由于不需复杂制样,光路配置简单,可以方便地进行材料生长后的快速检测。图 6 为某双色材料测试结果,图 7 为某中波样品 STEM 测试结果。

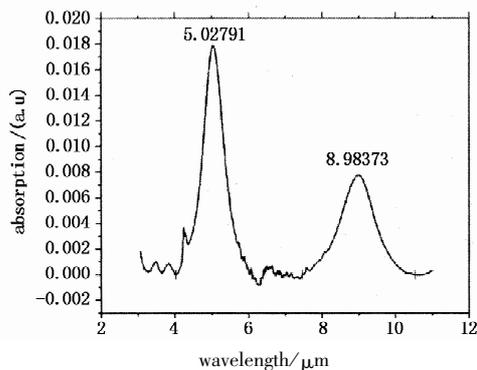


图 6 双色材料吸收光谱

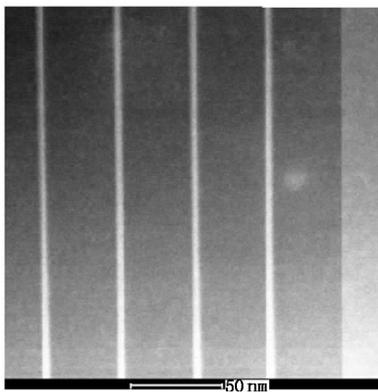


图 7 中波样品的 STEM 照片

对于 4 in 的 GaAs 样品,最多可制作 24 个  $25 \mu\text{m}$  中心距的  $640 \times 512$  芯片,其均匀性对于规模生

产而言具有十分重要的意义,因此必须从材料角度对其均匀性进行评估。为此可使用光致发光或者 X 射线双晶摇摆曲线测试其 Al 组分的均匀性,或者用扫描 FTIR 测试其吸收峰值波长分布。图 8 为一个 2 in 样品的 P1 扫描测试,其标准差为 0.000621,均匀性良好。

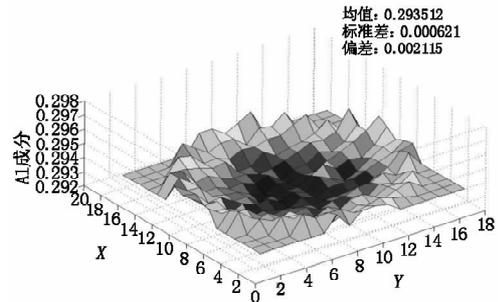


图 8 P1 扫描测试 Al 组分

#### 4 相应器件结果

焦平面器件工艺采用 Au/Ge/Ni 电极体系,刻蚀工艺均为干法刻蚀。器件在制备完成后与读出电路(ROIC)进行倒装互联。随后装入测试杜瓦或者配有小型制冷机的金属微杜瓦进行性能测试。目前  $30 \mu\text{m}$  中心距长波  $320 \times 256$  焦平面器件 70 K 峰值探测率可达  $3.2 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 。

#### 5 结论

大面积、高均匀性、高性能的量子阱材料是高性能量子阱红外探测器件的基础,出于工程化应用的考虑,必须获得高重复性的材料,并且需对工艺过程进行合理的安排与严格的技术监控。经过一段时间的研究,我们对量子阱红外探测材料的小批量生产进行了初步探索。其中长波材料已经达到较稳定的水平,已充分体现出量子阱红外探测材料工艺稳定性高、可控性强的优点。

**致谢:**衷心感谢华北光电技术研究所 MBE 小组的巩锋、刘铭、王经纬、常米、董瑞清、强宇和材料测试小组的折伟林、晋舜国、沈宝玉给与的帮助和卓有成效的工作。

#### 参考文献:

- [1] S D Gunapala, S V Bandara, et al.  $1024 \times 1024$  pixel mid-wavelength and long-wavelength infrared QWIP focal plane arrays for imaging applications [J]. *Semicond. Sci. Technol*, 2005, 20: 473–480.
- [2] S D Gunapala, S V Bandara, et al. Demonstration of  $640 \times 512$  pixels long-wavelength infrared (LWIR) quantum dot

- infrared photodetector ( QDIP ) imaging focal plane array [ J ]. *Infrared Physics & Technology*, 2007, 50: 149 - 155.
- [ 3 ] Pierre-Yves Delaunay, Binh Minh Nguyen, et al. Background limited performance of long wavelength infrared focal plane arrays fabricated from M-structure InAs/GaSb superlattices [ C ]. *Proc. of SPIE*, 2009, 7222: 72220W - 1.
- [ 4 ] Levine B F, et al. New 10  $\mu\text{m}$  infrared detector using intersubband absorption in resonant tunneling GaAlAs superlattices [ J ]. *Applied Physics Letters*, 1987, 50 ( 16 ): 296 - 301.
- [ 5 ] J A Robo, E Costard, et al. QWIP focal plane arrays performances from MWIR to VLWIR [ C ]. *Proc. of SPIE*, 2009, 7298: 72980F.
- [ 6 ] H Schneider, J Fleissner, et al. High-resolution QWIP FPAs for the 8 ~ 12  $\mu\text{m}$  and 3 ~ 5  $\mu\text{m}$  regimes [ C ]. *Proc. of SPIE*, 2003, 4820: 297.
- [ 7 ] Jean-Michel, et al. Growth of InGaAs/GaAs quantum wells with perfectly abrupt interface by molecular beam epitaxy [ J ]. *Applied Physics Letters*, 1993, 62 ( 26 ): 3452 - 3454.