

# The Optimization of the InGaAs/InP Material for Photodetectors

Ying Tian, Jun Deng<sup>#</sup>, Linjie He, Yujie Du, Xiaochen Niu, Wei Xia

Key Laboratory of Opto-electronics Technology of Education Ministry, College of Electronic Information & Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

## Abstract

Room-temperature photoluminescence was used to study the influence of growth temperature on InP/InGaAs quantum well grown on InP substrate by method of metal-organic chemical vapor deposition(MOCVD). The growth temperature of InGaAs and InP was studied and analyzed in two experiments, and the best growth temperature of InGaAs and InP was found to be 650°C and 600°C respectively. Preparation the material of In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As/InP PIN detector using the optimized conditions, the dark current of the detector is obtained by optimizing before is 2 orders of magnitude less.

**Keywords:** InP/InGaAs Quantum Well; Infrared Detector; PL Spectrum

## InGaAs/InP 基探测器材料的外延生长优化<sup>\*</sup>

田迎, 邓军, 何林杰, 杜玉杰, 牛晓晨, 夏伟

北京工业大学电子信息与控制工程学院, 光电子技术省部共建教育部重点实验室, 北京 100124

**摘要:** 利用室温光致荧光光谱(PL)研究金属有机物化学气相沉积(MOCVD)方法中温度参数对 InP 衬底上生长 In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As/InP 量子阱材料质量的影响。通过两组实验分别研究并分析了生长温度对 In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As 层和 InP 层材料质量的影响, 得到了 In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As 层和 InP 层最佳生长温度分别为 650°C 和 600°C。利用优化条件制备 In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As/InP 基 PIN 型探测器, 得到器件的暗电流较优化前小 2 个数量级。

**关键词:** InP/InGaAs; 量子阱; 红外探测器; PL 谱

## 1 引言

在夜暗环境中存在少量的夜天光, 如月光、星光、大气辉光等, 能量集中在可见到近红外波段。传统的微光夜视系统采用电真空器件, 根据阴极材料的不同, 一般的探测波长为 0.4μm~1.1μm, 无法覆盖能量集中的红外波段。利用晶格与 InP 材料匹配的 In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As/InP 材料制作光电探测器, 其吸收波长为 0.9μm~1.65μm, 进一步调整 In 的组分达到 0.7, 就可以使长波扩展到 2μm, 如果采用背入射并去除 InP 衬底, 还可以使器件的短波扩展到 0.4μm, 使器件的探测波长完全覆盖夜天光的波段<sup>[1]</sup>。

为了实现以 In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/InP 材料为基础的全固态微光夜视器件替代传统的电真空器件, 首先要提高 In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/InP 基光电探测器的光电性能, 提升 In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/InP 外延材料质量是关键所在。制备 In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/InP 外延材料可以采用多种先进的外延技术, MOCVD 外延制备技术作为其中的一种, 能在纳米尺度上精确控制外延层的厚度、组分、掺杂及异质结界面, 是一种广泛应用于制备化合物半导体材料的方法, 特别是应用于光电器件材料的制备。

评价 In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/InP 基光电探测器的性能的主要指标是器件的光响应度和暗电流。研究表明, 无论是 PIN 结构还是 APD 结构的 In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/InP 基光电探测器, In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/InP 材料界面缺陷、位错是造成器件光响应下

<sup>\*</sup>基金资助: 受中国国家自然科学基金支持资助 (U1037602)。

降和暗电流增加的主要因素之一<sup>[2-5]</sup>。国内外对  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$  材料的 MOCVD 外延界面生长方法<sup>[6-9]</sup>、材料生长温<sup>[10,11]</sup>、V/III 比对杂质并入的影响<sup>[12,13]</sup>等都进行了较为深入的研究。为了更加清楚的研究界面质量对器件性能的影响，本文将更易受到界面质量影响的  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$  量子阱外延材料做为研究对象，通过改变量子阱界面的生长温度、停顿等工艺参数，利用光之荧光谱进行表征，优化界面外延参数，并将优化的外延参数用于  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$  基光电探测器件的材料制备中，很好地降低了器件的暗电流，器件的光响应特性得到提高。

## 2 实验方法

为了更好的研究外延参数对  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$  材料质量的影响，本实验样品采用  $\text{InP}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$  量子阱结构。相比于  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$  体材料，采用量子阱结构，材料的界面变化能更灵敏的反映于 PL 谱上。外延的结构图如图 1 所示，其中  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  量子阱厚度为约为 8nm。

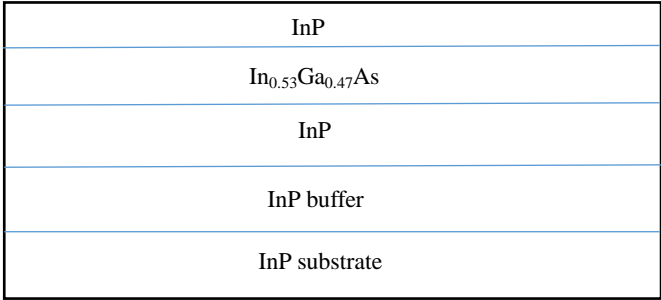


图 1 量子阱外延结构

本实验利用 Emcore D125 型 LP-MOCVD 系统进行外延生长,反应室压强为 80mbar,托盘转速为 1000r/s, TMIn 和 TMGa 为 III 族源,  $\text{AsH}_3$  和  $\text{PH}_3$  为 V 族源, 载气为钽管纯化后的  $\text{H}_2$ , 采用半绝缘 InP 衬底。

由于 InP 和  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  层的最佳生长温度不同，因此外延生长时需要在 InP 层和  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  层界面处进行停顿变温。在所有的试验样品中，除了 QW2（InP 层和  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  层生长温度均为 625℃）不需要生长停顿外，其余样品均带有生长停顿，InP 层向  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  层转换时，停顿采用通入  $\text{PH}_3$  保护， $\text{PH}_3$  流量渐变， $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  层向 InP 层转换时，停顿采用通入  $\text{AH}_3$  保护， $\text{AH}_3$  流量渐变。

第一组实验中 InP 层的生长温度固定为 625℃，分别在 625℃，595℃，650℃，680℃的条件下生长  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  层，停顿期间温度改变采用线性渐变方式。生长出的 4 个样品，分别为 QW2，QW3，QW4，QW5。样品用 Philips PLM100 型 PL 测试系统进行室温 PL 测量。

第二组实验基于第一组的测试结果，固定  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  的生长温度,改变量子阱两侧 InP 层的生长温度，分别在 625℃,650℃,600℃的温度下生长 InP 外延层,停顿期间温度改变也采用线性渐变方式.分别为 QW4，QW6，QW7，样品在相同的条件下进行室温 PL 谱测量。

## 3 实验结果

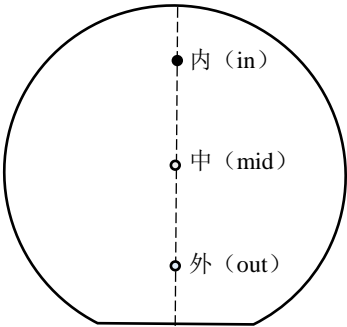


图 2 外延片测试点分布

每个样品都选取 3 个不同位置进行 PL 谱测量，测量点位置如图 2 所示，选取 3 个点用于片内的均匀性校正。取中点（mid）的测量数据进行样品间的比较。

固定 InP 层生长温度为 625℃，改变 In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As 层生长温度的第一组外延片 midpoint PL 数据列于表 1。

表 1 In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As 生长温度变化得出的 PL 谱数据

样品名称	量子阱生长温度（℃）	波长（nm）	峰值强度（AU）	半宽（nm）
QW2	625	1522	21415	92.2
QW3	595	1522	22102.9	90.4
QW4	650	1520	24797.2	85.4
QW5	680	1536	18598.6	81.5

QW3，QW4，QW5 升温停顿时间为 120s，降温停顿时间为 180s，停顿时间是基于实验室 MOCVD 系统反应室温度达到设定值并能够稳定的最短时间选取。

样品 QW2 与 QW3 各项数据都较为接近，没有较大差异。而温度升高到 650℃生长出的 QW4 的 PL 谱峰值强度相对 QW2，QW3 有较为明显的提升，半宽(FWHM)减小，这说明材料的外延质量有较大的提高<sup>[14]</sup>；温度进一步升高到 680℃时，QW5 的峰值半宽明显减小，但峰值强度也有较为明显的降低。

对比以上实验数据，650℃的生长温度较为适宜 In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As 量子阱的生长，固定 In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As 材料的生长温度为 650℃，进一步优化 InP 材料的生长温度，生长数据如表 2 所示。

表 2 InP 生长温度变化得出的 PL 谱数据

样品名称	InP 生长温度（℃）	波长（nm）	峰值强度（AU）	半宽（nm）
QW4	625	1520	24797.2	85.4
QW6	650	—	—	—
QW7	600	1576	23724.6	79.9

实验中仍然选取样品中点的 PL 数据进行比较。样品 QW6 的 InP 生长温度为 650℃，测试时 in 和 mid 两点都没有测出 PL 强度，仅在 out 点测出峰值强度为 16198.1，波长为 1498nm，半宽为 116.1nm 的数据。样品 QW7 的 InP 生长温度为 600℃，与 QW4 相比较，峰值波长变长，峰值强度有所降低，但半宽由 85.4nm 减小到 79.9nm。

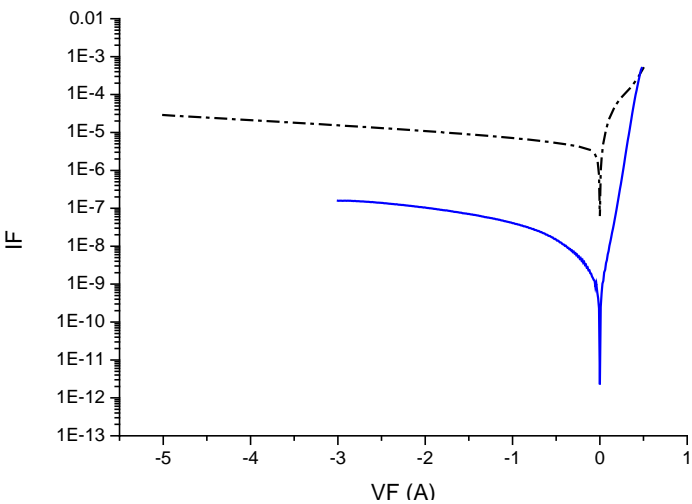


图 3 不同生长条件的 In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As/InP PIN 结构探测器暗电流对比

图 3 给出了两种外延条件下 In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As/InP PIN 结构材料在相同工艺下制作的探测器暗电流对比。图中黑虚线探测器的材料是在 625℃下外延制备完整的 In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As/InP PIN 结构，制备过程中没有变温和停顿。图中蓝实线探测器的材料是根据上面两组实验确定的优化条件制备的：600℃下外延 InP 层，在渐变 PH3 的

保护下, 经过 120s 的升温停顿, 在 650℃下外延  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  层, 然后在渐变  $\text{AsH}_3$  的保护下, 经过 180s 的降温停顿, 回到 600℃下继续外延  $\text{InP}$  层, 直到完成整个结构。从图 3 中两条曲线的明显差别可以看出, 没有采用变温停顿生长的材料在制作成器件后, 暗电流为  $1 \times 10^{-5} \text{A} @ -2\text{V}$ , 采用变温停顿外延技术的材料在制成器件后, 暗电流只有  $1 \times 10^{-7} \text{A} @ -2\text{V}$ , 合理的使用变温停顿外延技术能有效地提高材料的质量, 减小器件的暗电流, 提高器件的光电特性。

## 4 结论

通过实验研究和数据的对比分析, 可以得到: 1)  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$  材料中  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  外延层生长的最佳温度为 650℃;  $\text{InP}$  外延层生长的最佳温度为 600℃; 2) 采用合理的停顿和变温工艺可以有效地改善材料的性能, 提高  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$  材料探测器的光电特性。

## REFERENCES

- [1] GUO Hui, PENG Cha-xia, JIAO Gang-cheng, HUANG Jian-min. Shortwave-infrared-extended image intensifier technology and its application 2014, 35(3): 478-483
- [2] T S M Arshad M A Othman N Y M Yasin et al. Comparison on IV Characteristics Analysis between Silicon and InGaAs PIN Photodiode[J]. IEEE 2013 3rd International Conference on Instrumentation, Communications, Information Technology, and Biomedical Engineering (ICICI-BME) 75 Bandung, November 7-8, 2013
- [3] Williams G M Compton M Ramirez D A Multi-Gain-Stage InGaAs Avalanche Photodiode With Enhanced Gain and Reduced Excess Noise[J]. IEEE 2013, Vol. 1, No. 2: 54-65
- [4] M R Ravi Amitava DasGupta Nandita DasGupta Silicon nitride and polyimide capping layers on InGaAs/InP PIN photodetector after sulfur treatment[J]. Journal of Crystal Growth, 2004, 268: 359-363
- [5] G. Salvati C. Ferrari L. Lazzarini et al. Structural characterization of InGaAs/InP heterostructures grown under compressive and tensile stress[J]. Applied Surface Science, 2002, 188: 36-48
- [6] Kamei H Hayashi H .OMVPE growth of GaInAs/InP and GaInAs/GaInAsP quantum wells[J]. Journal of Crystal Growth, 1991, 107: 567-572
- [7] Yong Huang Jae-HyunRyou RussellD.Dupuis et al. Optimization of growth conditions for InGaAs/InAlAs/InP quantum cascade lasers by metalorganic chemical vapor deposition[J]. Journal of Crystal Growth, 2011, 316: 75-80
- [8] Masanori Shinohara Naohisa Inoue Behavior and mechanism of step bunching during metalorganic vapor phase epitaxy of GaAs[J]. Appl Phys Lett, 1995, 66: 1936-1938
- [9] Dong J R Chua S J WangY J et al. Substrate orientation dependence of In composition of AlGaInP epilayers grown by MOCVD[J]. Journal of Crystal Growth, 2004, 269: 408-412
- [10] Zorn M TrepkT Schenk T et al. AlGaInP growth parameter optimisation during MOVPE for opto-electronic devices[J]. Journal of Crystal Growth, 2007, 298: 23-27
- [11] Bass S J Barnett S J Brown G T et al. Effect of growth temperature on the optical, electrical and crystallographic properties of epitaxial indium gallium arsenide grown by MOCVD in an atmospheric pressure reactor[J]. Journal of Crystal Growth, 1986, 79: 378-385
- [12] Harunaka Yamaguchi Takashi Nagira Zempei Kawazu et al. Stable growth of ruthenium doped InP at the current blocking layer for buried-heterostructure lasers[J]. Journal of Crystal Growth, 2014
- [13] Yong Huang Jae-Hyun Ryou Russell D Dupuis et al. InP/InAlGaAs light-emitting transistors and transistor lasers with a carbon-doped base layer[J]. Journal of Applied Physics, 2011, 109, 063106
- [14] Fry K L Kuo C P Cohen R M et al. Photoluminescence of organometallic vapor phase epitaxial GaInAs[J]. Appl Phys Lett, 1985, 46: 955-957

## 【作者简介】



田迎（1988-），男，硕士研究生，就读于北京工业大学。主要从事半导体光电子器件的 MOCVD 生长研究。