材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20260323001

# 缓冲层厚度与层数对InP衬底上InGaAs材料性能的影响

吴　唯*，孟钰淋，赵　红，杨晓波，刘尚军，骆小顺，李志伟，漆雪松，舒治豪
（重庆光电技术研究所，重庆 400060）

**摘　要：** 文章系统研究了InP衬底上InGaAs缓冲层的厚度与层数对2 000 ppm晶格失配的$In_{0.44}Ga_{0.56}As$外延材料性能的调控规律。经研究发现，在固定晶格失配度下，存在缓冲层厚度与层数的最优匹配关系，可实现高质量失配InGaAs材料的可控制备。实验结果表明，当缓冲层层数为6、单层层厚为200 nm时，外延材料的综合性能最优，其XRD半峰宽低至31.3 arcsec，本征载流子浓度低至$5.5\times10^{14}$ $cm^{-3}$，核心指标与晶格匹配的$In_{0.47}Ga_{0.53}As$材料相当。研究进一步发现，缓冲层总厚度过厚或层数过多会引发晶格弛豫，造成晶体质量急剧退化，维持外延层应变状态是实现该类失配材料高质量生长的关键。该研究为高失配度Ⅲ-Ⅴ族半导体外延材料的结构设计与工艺优化提供了重要的实验依据。

**关键词：** 铟镓砷；金属有机化学气相沉积；铟镓砷缓冲层
**中图分类号：** TN304.2　**文章编号：** 1001－5868(2026)02－0345－05

## Effects of Buffer Layer Thickness and Number on Structural and Optical Properties of InGaAs on InP

WU Wei, MENG Yulin, ZHAO Hong, YANG Xiaobo, LIU Shangjun, LUO Xiaoshun, LI Zhiwei, QI Xuesong, SHU Zhihao
(**Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN**)

**Abstract:** This study investigates the influence of the thickness and number of InGaAs buffer layers on the performance of $In_{0.44}Ga_{0.56}As$ epitaxial materials with a lattice mismatch of 2 000 ppm on InP substrates. We demonstrate that, for a fixed lattice mismatch, an optimal buffer layer thickness - layer number relationship enables controlled growth of high-quality lattice-mismatched InGaAs materials. Experimental results demonstrate that a buffer structure consisting of 6 layers, each 200 nm thick, provides optimal material performance, achieving a full width at half maximum of the X-ray diffraction rocking curve as low as 31.3 arcsec and an intrinsic carrier concentration of $5.5\times10^{14}$ $cm^{-3}$. These results are comparable to those of lattice-matched $In_{0.47}Ga_{0.53}As$ materials. Our findings confirm that excessive total thickness or an overly large number of buffer layers can induce lattice relaxation, which significantly degrades crystal quality. Maintaining the strain state of the epitaxial layer is critical for achieving high-quality growth of these lattice-mismatched materials. This study provides essential experimental evidence for the structural design and process optimization of group Ⅲ-Ⅴ semiconductor epitaxial materials with large lattice mismatch.

**Key words:** InGaAs; metal-organic chemical vapor deposition; InGaAs buffer

**收稿日期：**2026－03－23.
*通信作者：吴　唯

## 0 引言

InGaAs基光电探测器(PDs)在量子通信[1]、夜视成像[2]、空间遥感[3]、环境监测[4]与工业检测成像[5]等领域具有广泛的应用前景。与InP衬底晶格匹配的InGaAs材料因外延制备工艺相对成熟,因此基于该体系的光电探测器已实现规模化应用[6]。然而,与InP晶格匹配的InGaAs材料的截止波长上限仅为1.7 μm,难以满足部分长波探测场景的应用需求,极大限制了此类探测器的应用边界,因此为拓展其应用场景,亟需进一步拓展探测器的截止波长[7-9]。

目前,已报道通过缓冲层技术实现了InGaAs光电探测器截止波长向2.6 μm及以上长波波段的拓展[10-12]。然而,随着探测波长的提升,InGaAs与InP衬底间的晶格失配度随之增大。高失配度会引发外延层中产生大量失配位错,造成材料晶体质量急剧退化,最终导致器件探测性能的显著劣化[13-16]。其中,截止波长为1.8 μm的InGaAs光电探测器在特定低温探测场景中具有不可替代的应用价值。根据Varshni定理,固定晶格组分的半导体材料的带隙宽度随温度降低而展宽,进而导致其探测截止波长发生蓝移。因此,在低温环境下,基于晶格匹配InGaAs吸收层的光电探测器会因截止波长蓝移而出现长波探测能力衰退,无法满足低温场景的实际应用需求。为使探测器在低温环境下仍能保持稳定的长波探测性能,需将其室温截止波长拓展至1.8 μm左右,对应的$In_{0.44}Ga_{0.56}As$材料与InP衬底间的晶格失配度约为0.2%。该失配度处于中等水平,基于该材料体系的1.8 μm截止波长探测器,可在满足低温场景应用需求的同时,兼顾器件的高性能输出。为在InP衬底上获得高质量的晶格失配外延材料,优化衬底与InGaAs吸收层之间的缓冲层结构与工艺参数是抑制失配位错增殖、提升材料晶体质量的关键[17]。现有研究多聚焦于缓冲层单一层厚或生长条件的单独优化,以实现晶体质量的提升[18-19],但针对缓冲层厚度与层数的协同调控对外延材料晶体质量的影响规律,目前仍缺乏系统的研究报道。

基于此,本文系统研究了缓冲层单层层厚与层数对InP衬底上0.2%失配度InGaAs材料晶体质量与光电性能的调控作用。实验采用X射线衍射(XRD)、电化学电容-电压测试(ECV)与光致发光光谱(PL)表征方式,对外延材料的综合性能进行全面表征与分析。经缓冲层厚度与层数的协同优化,确定了最优生长工艺参数:当缓冲层层数为6层时,最优单层层厚为200 nm;当缓冲层总厚度为1 200 nm时,最优层数为6层。在该最优参数下,外延材料的XRD半峰宽最窄,PL发光强度最高,晶体质量最优。在该最优条件下制备的失配InGaAs材料,本征载流子浓度低至$5.5\times10^{14}$ $cm^{-3}$,XRD半峰宽低至31.3 arcsec,与InP晶格匹配的InGaAs材料的参数水平相当。此外,当缓冲层层数过多或单层层厚过大时,缓冲层会发生晶格弛豫,进而导致外延材料晶体质量急剧退化。发生晶格弛豫的样品,其本征载流子浓度较应变保持型样品高约一个数量级,XRD半峰宽显著展宽,PL发光强度仅为非弛豫样品的1/3左右。该结果表明,对于该类晶格失配外延材料,维持外延体系的应变状态是实现高质量晶体生长的核心原则。

## 1 实验过程

研究采用水平式低压MOCVD系统生长所有样品,衬底采用硅掺杂的n型(100)InP衬底,使用三甲基镓(TMGa)和三甲基铟(TMIn)作为Ⅲ族源,砷烷($AsH_3$)和磷烷($PH_3$)作为Ⅴ族源,6N超纯氢气($H_2$)作为载气。所有衬底均在$PH_3$气氛中、700℃温度、环境压力为50 mbar的条件下进行脱氧处理。在生长缓冲层前,沉积50 nm的InP缓冲层以提供平滑的生长表面。随后,在恒定的衬底温度630℃的条件下,以0.6 nm/s的速率生长数层未掺杂的InGaAs梯度缓冲层,每层缓冲层具有相同的厚度。每一层缓冲层失配度梯度增加,如有$n$层缓冲层,其第一层缓冲层失配度为$(2\times10^{-3})/(n+1)$,此后每一层缓冲层失配度比上一层增加$(2\times10^{-3})/(n+1)$。最后,在缓冲层上沉积一层3 μm厚、相对于InP具有0.2%晶格失配的未掺杂的$In_{0.44}Ga_{0.56}As$层。外延材料的结构示意图如图1所示,外延层由数层InGaAs缓冲层和最外层$In_{0.44}Ga_{0.56}As$缓冲层组成。

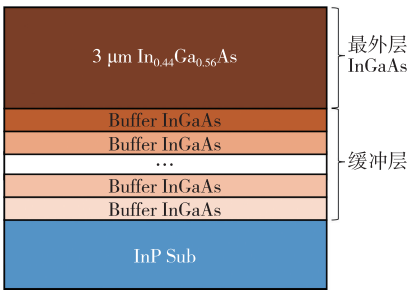



图1 实验样品外延结构示意图

研究中采用两种策略用于优化外延材料的晶体质量。首先，固定缓冲层层数为6层，通过改变缓冲层厚度来寻找最佳缓冲层厚度。研究发现，当层数为6层，缓冲层单层厚度为200 nm时，外延材料晶体质量最佳。通过该方案，可找到一个最佳的缓冲层总厚度。然后，利用此最佳总厚度，固定缓冲层总厚度为1 200 nm，通过优化缓冲层层数来获得最佳的外延层层数。表1总结了详细的结构参数。样品c，d和f均设计为6个缓冲层，单层缓冲层厚度从133 nm到250 nm，缓冲层总厚度则从798 nm到1 500 nm。样品b，d和e的缓冲层总厚度固定为1 200 nm，而缓冲层层数从4层变化到10层。

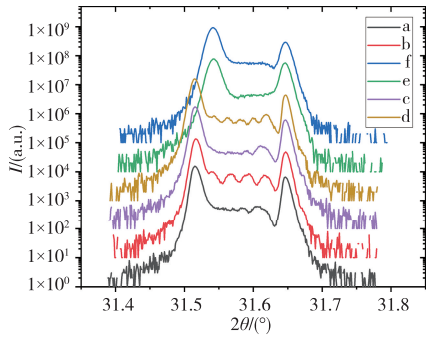
**表 1　样品结构汇总**

| 样品编号 | 缓冲层层数 | 缓冲层厚度/nm | 总厚度/nm | 最外层 $In_{0.44}Ga_{0.56}As$ 厚度/nm |
|---|---|---|---|---|
| a | 4 | 200 | 800 | 3 000 |
| b | 4 | 300 | 1 200 | 3 000 |
| c | 6 | 133 | 798 | 3 000 |
| d | 6 | 200 | 1 200 | 3 000 |
| e | 10 | 120 | 1 200 | 3 000 |
| f | 6 | 250 | 1 500 | 3 000 |

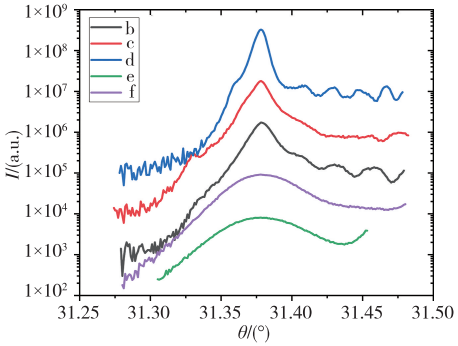
实验使用XRD测量外延层的晶格失配和摇摆曲线，通过半峰宽的宽度来评估外延材料晶体质量。然后，进一步通过光致发光谱中外延层的发光强度来评估材料晶体。最后，通过电化学电容-电压测试(ECV)，测量外延层的本征载流子浓度以评估材料的晶体质量。其中，所有的表征方法都是在相同的条件下进行。

## 2　结果与讨论

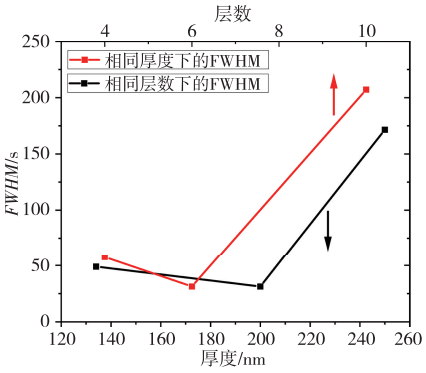
为了确定最佳的厚度，首先将缓冲层层数固定为6层，每层厚度从133 nm变化到250 nm(样品c，d，f)。采用三轴高分辨率XRD对样品进行扫描，然后对外延层进行摇摆曲线扫描，所有测量均沿(004)晶向进行。已有研究表明，晶体质量与外延层摇摆曲线的半峰宽相关[20]，因此实验采用最外层InGaAs峰摇摆曲线的半峰宽(FWHM)用作表征质量指标。当缓冲层厚度为200 nm时，可以获得最窄的半峰宽，即31.3 arcsec。随着缓冲层厚度的变化，半峰宽值从133 nm时的48.9 arcsec收窄到200 nm时的31.3 arcsec，然后在250 nm时增加到171.5 arcsec。这表明当缓冲层层数为6层时，存在一个最佳的缓冲层厚度。高分辨XRD的试结果如图2所示。




(a) 样品(004)面的XRD测试结果




(b) 最外层外延峰摇摆曲线



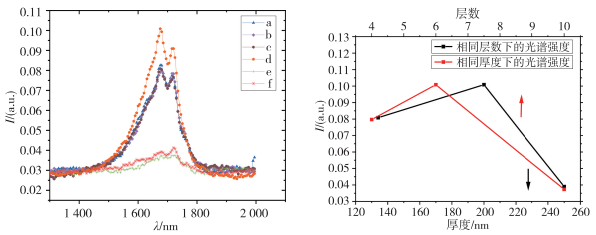

(c) 半高宽与缓冲层厚度、缓冲层数量的关系

图2　XRD测试结果

当缓冲层层数为6、缓冲层厚度为200 nm左右时可以获得最优晶体质量的外延材料。然而，尚不清楚导致这一结果的原因是缓冲层总厚度还是单层缓冲层厚度。为进一步探究起主要作用的因素，进一步将缓冲层总厚度固定在1 200 nm，将缓冲层层数从4层变化到10层。如图2(c)的数据显示，当缓冲层总厚度固定时，缓冲层层数为6层时是最优方案。随着缓冲层层数从4层变化到10层，半峰宽从57.5 arcsec(4层)减小到31.3 arcsec(6层)，然后增加到207.1 arcsec(10层)。因此，在固定缓冲层总厚度的情况下，同样存在一个最佳的缓冲层层

数，在该层数下可以获得最佳外延材料质量。通过XRD分析表明，当InGaAs失配为0.2%、缓冲层层数为6时，存在最佳的缓冲层厚度，当缓冲层总厚度固定为1 200 nm时，也存在最佳缓冲层层数。当缓冲层厚度为200 nm、缓冲层层数为6时，可以获得晶体质量最佳的InGaAs外延材料。通过XRD测试结果还发现，当缓冲层层数和总厚度超过一定范围时，外延材料（样品e，f）会发生弛豫现象。外延材料发生弛豫后，其晶体质量迅速下降，XRD的半峰宽明显展宽。

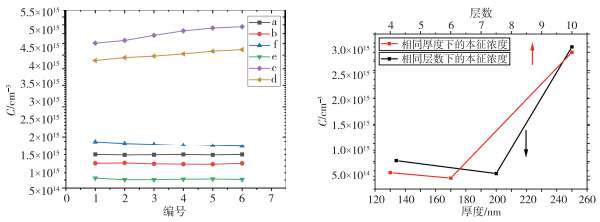
已有研究表明，PL光谱可以有效表征外延材料的晶体质量[21]。PL光谱强度越强表明外延材料晶体质量越优异，因为被激发的载流子会发生更多的辐射复合，而不是在缺陷处发生非辐射复合[18,21]。从图3（b）中可以看出，PL测试结果与XRD的测试结果一致，当缓冲层层数固定为6层时，单层缓冲层厚度从133 nm变化到250 nm的过程中，峰值强度出现在200 nm处（黑线）。固定缓冲层总厚度为1 200 nm，通过改变缓冲层层数，PL强度峰值出现在缓冲层为6层时（红线），强度从0.079（4层）增加到0.101（6层），然后下降到0.037（10层）。PL表征结果再次表明当缓冲层厚度为200 nm、缓冲层层数为6层时是生长该材料的最佳生长条件。




（a）样品PL光谱测试结果　（b）光谱强度与缓冲层厚度、缓冲层数量的关系

图3　样品PL光谱测试结果

为进一步验证生长该材料的最佳缓冲层层数与缓冲层厚度，采用ECV来评估所有样品的晶体质量。已有研究表明，非故意掺杂的高质量晶体材料表现出较低的本底载流子浓度，因为低质量外延材料中的缺陷常常会作为施主中心，给材料提供更多的载流子，从而提高载流子浓度[22-23]。图4展示了所有样品的ECV测试数据，为了增加数据的可读性，ECV测试数据省略了耗尽层宽度，只显示了前6个点浓度的测试数据。当缓冲层固定为6层时，外延材料本征浓度先随着层厚的增加而降低，然后随着厚度的继续增加而增加。当缓冲层总厚度固定为1 200 nm时，外延材料的本征浓度随着缓冲层的层数增加先变低后变高。这些结果与XRD和PL表征数据变化一致。当缓冲层层数为6层、缓冲厚度为200 nm时，可以得到本征浓度最佳的材料，其测试值浓度为$5.5\times10^{14}$ $cm^{-3}$，这个结果非常接近晶格匹配InGaAs背景载流子浓度。




（a）样品ECV本征浓度测试图　（b）本征浓度与缓冲层厚度、缓冲层数量的关系

图4　样品ECV测试结果

实验结果表明，对于生长失配为0.2%的InGaAs外延材料，缓冲层最佳结构是缓冲层厚度为200 nm，缓冲层层数为6层。值得注意的是，当缓冲层过厚或层数过多时，外延材料会发生弛豫现象，从而使材料质量显著下降。样品e和f的XRD数据显示其弛豫失配减小但其应变失配增加，而PL峰位保持不变，这说明外延材料已经发生弛豫。无论是样品e（总厚度1 200 nm，10层）还是样品f（总厚度1 500 nm，6层），在XRD、PL和ECV测量中都表现出晶体质量严重下降。这种质量恶化可能是缓冲层弛豫后，产生了更多的缺陷，同时产生的缺陷传播到InGaAs外延层中，从而影响材料的晶体质量。

## 3　结论

本文通过设计不同缓冲层外延方案，在InP衬底上制备了0.2%晶格失配的$In_{0.44}Ga_{0.56}As$外延层，系统研究了缓冲层厚度与层数对材料晶体质量的调控规律。结果表明，缓冲层最优参数为6层缓冲层、单层层厚为200 nm，并在此条件下制备的外延材料XRD半峰宽最优值达31.3 arcsec，最低本征载流子浓度为$5.5\times10^{14}$ $cm^{-3}$，核心性能与晶格匹配InGaAs材料相当。此外，还发现缓冲层总厚度过厚或缓冲层层数过多会引发晶格弛豫，导致晶体质量急剧退化。本研究结果为更高失配度Ⅲ-Ⅴ族半导体外延材料的结构设计与工艺优化提供了重要实验依据与研究思路。

## 参考文献：


[1] Zhang J, Itzler M A, Zbinden H, et al. Advances in InGaAs/InP single-photon detector systems for quantum communication[J]. Light: Science & Applications, 2015, 4(5): e286.

[2] Yang B, Yu Y, Zhang G, et al. Design and fabrication of broadband InGaAs detectors integrated with nanostructures[J]. Sensors, 2023, 23(14): 6556.

[3] Piotrowski J, Kaniewski J, Regiński K. Modeling and optimization of InGaAs infrared photovoltaic detectors[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2000, 439(2/3): 647-650.

[4] Ni Y, Arion B, Bouvier C, et al. Logarithmic InGaAs detectors with global shutter and active dark current reduction[J]. Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXⅦ, 2015, 9485: 94850L.

[5] Merken P, Vermeiren J P. InGaAs detectors and FPA's for a large span of applications: design and material considerations[J]. Proc. of SPIE, 2017, 10563: 1056313.

[6] 刘军华, 高新江, 周　勋. 短波红外InGaAs焦平面探测器的技术进展[J]. 半导体光电, 2015, 36(5): 683-688.
Liu Junhua, Gao Xinjiang, Zhou Xun. Developments and perspectives of SWIR InGaAs focal plane arrays[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2015, 36(5): 683-688.

[7] Kleipool Q L, Jongma R T, Gloudemans A M S, et al. In-flight proton-induced radiation damage to SCIAMACHY's extended-wavelength InGaAs near-infrared detectors[J]. Infrared Physics & Technology, 2007, 50(1): 30-37.

[8] Arslan Y, Oguz F, Besikci C. Extended short wavelength infrared In0.83Ga0.17As focal plane array[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2014, 50: 957-964.

[9] 莫才平, 陈　扬, 张圆圆, 等. 一种可见光波长拓展型InGaAs焦平面探测器[J]. 半导体光电, 2021, 42(6): 795-798.
Mo Caiping, Chen Yang, Zhang Yuanyuan, et al. 640 × 512 InGaAs focal plane arrays for visible and SWIR imaging[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2021, 42(6): 795-798.

[10] Zimmermann L, John J, Degroote S, et al. Extended wavelength InGaAs on GaAs using InAlAs buffer for back-side-illuminated short-wave infrared detectors[J]. Applied Physics Letters, 2003, 82(17): 2838-2840.

[11] Merken P, Zimmermann L, John J, et al. Extended-wavelength InGaAs-on-GaAs infrared focal-plane array[J]. Electronics Letters, 2002, 38(12): 588-590.

[12] John J, Zimmermann L, Merken P, et al. Extended-wavelength InGaAs on GaAs hybrid image sensors[J]. Infrared Spaceborne Remote Sensing XI, 2003, 5152: 263.

[13] Martinelli R U, Zamerowski T J, Longeway P A. 2.6 μm InGaAs photodiodes[J]. Applied Physics Letters, 1988, 53(11): 989-991.

[14] Jang J H, Cueva G, Dumka D C, et al. Long-wavelength $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ metamorphic p-i-n photodiodes on GaAs substrates[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2001, 13(2): 151-153.

[15] Zhang Y, Gu Y, Zhu C, et al. Gas source MBE grown wavelength extended 2.2 and 2.5 μm InGaAs PIN photodetectors[J]. Infrared Physics & Technology, 2006, 47(3): 257-262.

[16] Zhang Y, Gu Y, Tian Z, et al. Wavelength extended 2.4μm heterojunction InGaAs photodiodes with InAlAs cap and linearly graded buffer layers suitable for both front and back illuminations[J]. Infrared Physics & Technology, 2008, 51(4): 316-321.

[17] Ribas P, Krishnamoorthy V, Park R M. Device quality $In_{0.4}Ga_{0.6}As$ grown on GaAs by molecular beam epitaxy[J]. Applied Physics Letters, 1990, 57(10): 1040-1042.

[18] Li J, Wei X. Step-graded InAsP buffer layers with gradient interface grown *via* metal organic chemical vapor deposition[J]. SN Applied Sciences, 2019, 1(6): 585.

[19] Ji L, Lu S L, Zhao Y M, et al. Compositionally undulating step-graded $InAs_yP_{1-y}$ buffer layer growth by metal-organic chemical vapor deposition[J]. Journal of Crystal Growth, 2013, 363: 44-48.

[20] Lee S R, West A M, Allerman A A, et al. Effect of threading dislocations on the Bragg peakwidths of GaN, AlGaN, and AlN heterolayers[J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(24): 241904.

[21] Chen X Y, Zhang Y G, Gu Y, et al. GaAs-based $In_{0.83}Ga_{0.17}As$ photodetector structure grown by gas source molecular beam epitaxy[J]. Journal of Crystal Growth, 2014, 393: 75-80.

[22] Zhang Y W, Dong Z Y, Gao K H, et al. Electrical transport properties of unintentionally doped GaN crystals with dominant point defects[J]. Physica B: Condensed Matter, 2025, 710: 417237.

[23] Newman R C. The upper limits of useful n- and p-type doping in GaAs and AlAs[J]. Materials Science and Engineering: B, 1999, 66(1/3): 39-45.


## 作者简介：


**吴　唯**(1990—),男,工程师,主要研究方向为MOCVD Ⅲ-Ⅴ外延材料生长。