

分子束外延高铟组分 InGaAs 薄膜研究

杨 瑛^{1,2}, 王红真², 范柳燕³, 陈平平³, 刘博文², 贺训军^{1*}, 顾 溢^{2*}, 马英杰²,
李 淘², 邵秀梅², 李 雪²

(1. 哈尔滨理工大学 电气与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080;
2. 中国科学院上海技术物理研究所 传感技术国家重点实验室, 上海 200083;
3. 中国科学院上海技术物理研究所 红外物理国家重点实验室, 上海 200083)

摘要: 研究了分子束外延生长条件对高铟组分 InGaAs 材料性能的影响, 分析了生长温度、V/III 比和 As 分子束形态对 In_{0.74}Ga_{0.26}As 材料光致发光和 X 射线衍射峰强度、本底载流子浓度和迁移率的影响。测试结果表明: 适中的生长温度和 V/III 比可以提高材料晶格质量, 减少非辐射复合, 降低本底杂质浓度。As 分子束为 As₂ 时 In_{0.74}Ga_{0.26}As 材料质量优于 As₄ 分子束。当生长温度为 570 °C, As 分子束形态为 As₂, V/III 比为 18 时, 可以获得较高的光致发光和 X 射线衍射峰强度, 室温和 77 K 下的本底载流子浓度分别达到 6.3×10¹⁴ cm⁻³ 和 4.0×10¹⁴ cm⁻³, 迁移率分别达到 13 400 cm²/Vs 和 45 160 cm²/Vs。

关键词: InGaAs; 高铟组分; 短波红外; 分子束外延; 迁移率
中图分类号: TN215 **文献标识码:** A

Study on Molecular Beam Epitaxy of High indium InGaAs Films

YANG Ying^{1,2}, WANG Hong-Zhen², FAN Liu-Yan³, CHEN Ping-Ping³, LIU Bo-Wen², HE Xun-Jun^{1*},
GU Yi^{2*}, MA Ying-Jie², LI Tao², SHAO Xiu-Mei², LI Xue²

(1. College of Science, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;
2. State Key Laboratories of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences Shanghai 200083, China;
3. State Key Laboratory of Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences Shanghai 200083, China)

Abstract: The effects of molecular beam epitaxy growth parameters on the properties of high indium InGaAs materials have been investigated in this paper. The growth temperature, V/III ratio and arsenic dimer of In_{0.74}Ga_{0.26}As materials were investigated and adjusted to optimize the peak intensity of the photo luminescence and X-ray diffraction measurements, as well as background carrier concentration and mobility. Results show that moderate growth temperatures and V/III ratios are needed for the growth to improve the lattice quality, reduce the non-radiation recombination and decrease the background impurity concentration. The In_{0.74}Ga_{0.26}As materials grown using As₂ dimer show better material quality than those using As₄ dimer. For the material grown at 570 °C, As₂ dimer and V/III ratio of 18, relatively strong photo luminescence and X-ray diffraction peak intensity have been achieved. At room temperature and 77 K, the background carrier concentrations were 6.3×10¹⁴ cm⁻³ and 4.0×10¹⁴ cm⁻³, while the mobilities were 13 400 cm²/Vs and 45 160 cm²/Vs, respectively.

Key words: InGaAs, high indium composition, short-wave infrared, molecular beam epitaxy(MBE), mobility

收稿日期: 2022-05-05, 修回日期: 2022-09-02

Received date: 2022-05-05, Revised date: 2022-09-02

基金项目: 国家自然科学基金(62075229, 62175250), 上海市青年科技启明星(21QA1410600), 上海市国际合作项目(20520711200), 上海市学术带头人(21XD1404200)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (62075229, 62175250), the Shanghai Rising-Star Program (21QA1410600), the International Science and Technology Cooperation Program of Shanghai (20520711200), and the Program of Shanghai Academic/Technology Research Leader (21XD1404200)

作者简介 (Biography): 杨瑛 (1999—), 女, 湖南长沙人, 硕士研究生, 主要研究领域为 InGaAs 探测器材料生长与性能研究。E-mail: 362036375@qq.com

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: hexunjun@hrbust.edu.cn; guyi@mail.sitp.ac.cn

引言

短波红外 InGaAs 探测器具有高灵敏度、室温工作、抗辐照性能和均匀性好等特点,可广泛应用于环境监测、红外遥感、微光夜视、安全检查、激光探测和能源勘探等领域^[1-3]。与 InP 衬底晶格常数相匹配的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 探测器在长波方向的响应截止波长为 $1.7\ \mu\text{m}$,可广泛应用于光纤通讯领域,其焦平面探测器也在成像和检测方面有众多应用。此外,CO、CO₂、CH₄、NH₃等很多重要气体分子以及葡萄糖、乳酸、白蛋白、尿素、氨等液态生物分子中的化学键特征峰也主要分布在 $1.7\ \mu\text{m}$ 到 $2.5\ \mu\text{m}$ 范围内^[4-5]。例如,探测农产品中的水分就需要探测器响应波段覆盖水分子的特征峰而达到 $1.9\ \mu\text{m}$ 以上的截止波长,截止波长大于 $2.4\ \mu\text{m}$ 的 InGaAs 探测器能够以较高的测量精度获得大气中 CO、CH₄ 和 N₂O 的含量^[6];利用延伸波长 InGaAs 探测器还可以基于热辐射测试而对目标进行测温^[7]。因此,为实现对目标信息更为丰富的探测,研制截止波长大于 $1.7\ \mu\text{m}$ 的延伸波长 InGaAs 探测器具有十分重大的意义。

基于延伸波长 InGaAs 探测器的重要应用,国内外多个团队开展了相关研究。美国普林斯顿红外技术公司研制了截止波长为 $2\ \mu\text{m}$ 的 $1\ 280\times 1\ 024$ 规模 $\text{In}_{0.66}\text{Ga}_{0.34}\text{As}$ 探测器,吸收层浓度小于 $1\times 10^{16}\ \text{cm}^{-3}$ ^[8]。土耳其中东科技大学报道了截止波长 $2.65\ \mu\text{m}$ 的 640×512 规模 $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$ 探测器,吸收层的本底浓度为 $9\times 10^{14}\ \text{cm}^{-3}$,室温和 $200\ \text{K}$ 下的峰值探测率分别为 $2.5\times 10^{10}\ \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 和 $1\times 10^{12}\ \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ ^[9]。中科院上海技术物理研究所研制了 $1\ 280\times 1\ 024$ 规模的 $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$ 焦平面探测器, $180\ \text{K}$ 下截止波长达到 $2.45\ \mu\text{m}$,峰值探测率 $9.8\times 10^{11}\ \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ ^[10]。随着钢组分增加,延伸了探测器的截止波长,但也降低了器件性能。例如从 0.53 增加到 0.85 ,截止波长从 $1.7\ \mu\text{m}$ 增加到 $2.5\ \mu\text{m}$,但器件暗电流增加了约 4 个数量级^[11]。延伸波长 InGaAs 探测器暗电流的增加归根结底是与外延层和衬底之间的晶格失配有关,当探测器的截止波长从 $1.7\ \mu\text{m}$ 延伸到 $2.2\ \mu\text{m}$ 和 $2.5\ \mu\text{m}$ 时,InGaAs 和 InP 衬底之间将分别产生 $+1.2\ \%$ 和 $+2.1\ \%$ 的晶格失配^[12-13]。因晶格失配引起的材料质量降低,限制了器件性能的提高。因此,提升高钢组分 InGaAs 材料的质量成为延伸波长 InGaAs 探测器研究的难点和重点。

提升高钢组分 InGaAs 材料的质量主要从优化

缓冲层结构设计和优化生长工艺两方面展开。缓冲层材料有 InGaAs、InAlAs、InAsP 等多种结构^[14-16],而阶跃递变缓冲层、线性递变缓冲层、数字合金递变缓冲层等缓冲层结构也分别被不同的研究团队采用和比较^[17-19]。延伸波长 InGaAs 探测器材料的生长工艺也多有研究,但研究较多的主要是缓冲层的生长工艺^[20],而高钢组分 InGaAs 外延层的生长工艺对 InGaAs 吸收层材料的性能具有很大影响。此外,评价高钢组分 InGaAs 外延层质量的手段常用光学显微镜、原子力显微镜、X 射线衍射(XRD)、光致发光(PL)等测试,也多用透射电子显微镜分析材料中的位错情况^[21-23]。除了这些材料性能表征以外,材料的电学特性也是核心参数之一,材料的本底载流子浓度和迁移率体现了材料纯度和晶格完整性,也直接影响到光电探测器材料的重要参数少数寿命。晶格匹配的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 材料本底载流子浓度和迁移率研究较多,通过优化生长工艺,材料本底载流子浓度可以达到 $2\sim 3\times 10^{14}\ \text{cm}^{-3}$,而室温迁移率超过 $10\ 000\ \text{cm}^2/\text{Vs}$ ^[24],但是对于高钢组分 InGaAs 材料的本底载流子浓度和迁移率还没有深入的研究。本文对高钢组分 InGaAs 外延层的生长温度、V/III 比、As 分子束形态等生长条件进行了细致优化,分析了这些生长工艺对材料 XRD、PL 谱以及本底载流子浓度和迁移率的影响。

1 实验

本文利用 DCA P600 分子束外延系统生长高钢组分 InGaAs 薄膜,采用双温区源炉作为 In 和 Ga 束源炉,采用阀控 P 裂解炉和阀控 As 裂解炉分别作为 P 和 As 束源炉。为维持组分的一致,在实验之前用束流规对各个源炉的束流进行测试,得到不同束源炉的温度与束流的关系,再通过控制各源炉的温度使得各样品的 In 组分均为约 0.74 。将掺 Fe 的半绝缘 InP(100)衬底传送到生长室后升高衬底温度,在 $300\ ^\circ\text{C}$ 开 P 保护,继续升高衬底温度对衬底进行解析,此时反射高能电子衍射图案明显转变为 4×2 表面再构。在衬底解析完成后将衬底温度降至 InP 缓冲层的生长温度,然后开始材料生长。

图 1 为所生长的高钢组分 InGaAs 材料的结构示意图。在半绝缘 InP 衬底上首先生长 InP 缓冲层,然后进行从 P 到 As 的切换后生长组分渐变 $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ (x 从 0.52 渐变至 0.74),再调整衬底温度生长 $\text{In}_{0.74}\text{Ga}_{0.26}\text{As}$ 外延层,它们均为非故意掺杂。缓冲层的作用是限制由晶格失配引起的位错,减少向上

传输到吸收层中的位错,以此来提高材料生长质量。

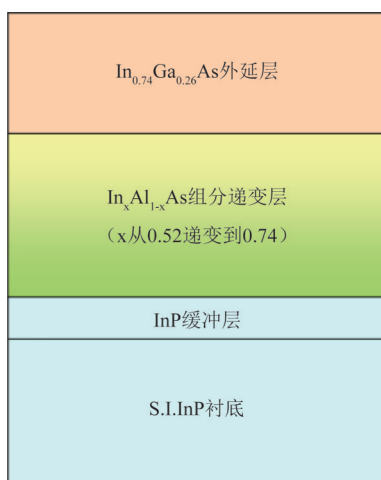


图1 高铟组分InGaAs材料结构示意图

Fig. 1 Schematic structure of high indium InGaAs materials

为优化高铟组分InGaAs材料的分子束外延工艺,生长了多组不同的样品,其生长参数如表1所示,分别介绍如下。

表1 不同样品的InGaAs外延层生长参数

Table 1 Growth parameters of InGaAs layers for different samples

样品编号	In _{0.74} Ga _{0.26} As层生长温度/°C	V/III比	As分子束形态
A	550	18	As ₂
B	570	18	As ₂
C	580	18	As ₂
D	590	18	As ₂
E	570	12	As ₂
F	570	36	As ₂
G	570	27	As ₄ &As ₂
H	570	36	As ₄

1.1 In_{0.74}Ga_{0.26}As层生长温度

采用As₂束流,V/III束流比约为18的情况下,对In_{0.74}Ga_{0.26}As外延层的生长温度进行了优化研究,生长了4组样品,样品编号分别为A、B、C和D,其In_{0.74}Ga_{0.26}As层的生长温度分别为550 °C、570 °C、580 °C和590 °C。

1.2 V/III比

研究了As₂束流情况下,As₂束流的增加对材料性能的影响。样品E、样品B和样品F,通过增加As炉的阀位,使得As₂的束流增加,As/(In+Ga)的束流

比(V/III比)相应增加,其V/III比分别为12、18和36。三组样品的In_{0.74}Ga_{0.26}As外延层生长温度均为570 °C不变。

1.3 As分子束

在分子束外延生长中,V族元素As一般是以As₂或As₄分子态形式存在的。通过改变As源裂解区的温度,对应不同的As分子形态,当As源裂解区温度为600和1000 °C时,As分子的形态分别为As₄和As₂;当As源裂解区温度为800 °C时,则包含了As₄和As₂的混合物。因为不同形态的As分子参与生长和反应的原子数不同,As₂分子形态下2个As原子都能参与InGaAs层的生长过程,而As₄分子形态下每4个原子只有2个原子参与到InGaAs层的生长过程,另2个原子会脱离衬底表面而不参与生长过程,所以设计样品B、G和H的V/III比分别为18、27、36,三组样品的In_{0.74}Ga_{0.26}As层生长温度均为570 °C。

材料生长完成后,用Leica光学显微镜对其表面进行细致观察。基于Nicolet iS50傅里叶变换红外光谱仪对材料进行室温PL测试,采用波长为532 nm的激光对材料进行激发,光谱仪采用液氮制冷InSb探测器对PL进行检测。利用PANalytical X'pert高分辨X射线衍射仪对材料结构特性进行表征。使用HMS-3000霍尔测试仪对材料室温和77 K时的载流子浓度和迁移率进行测试。

2 结果与分析

2.1 In_{0.74}Ga_{0.26}As层生长温度

图2为典型的室温PL和XRD测试曲线(样品E),图2(a)显示样品的PL波长为2.24 μm,图2(b)显示XRD外延峰与衬底峰的晶格失配度为7.2×10⁻³,铟组分约为0.74。本论文的所有样品A-H的曲线与样品E类似,主要区别体现在PL强度和XRD峰强度等。

为了更直观地分析PL和XRD随生长温度变化的影响,提取了PL相对强度以及XRD外延峰强度与衬底峰强度之比随In_{0.74}Ga_{0.26}As外延层生长温度的变化,如图3所示。随着In_{0.74}Ga_{0.26}As层的生长温度从550 °C升高到590 °C,PL相对强度整体呈现先增加后降低的趋势。例如,当温度为550 °C时PL约为2,温度增加到570 °C时PL接近5,温度进一步升高到580和590 °C时PL反而降为2左右。与PL强度的变化趋势相同,随着温度的升高,XRD外延峰强度与衬底峰强度之比首先从0.4增加到1.5,然后再降低到1;XRD外延峰半峰宽与强度成反比,在温

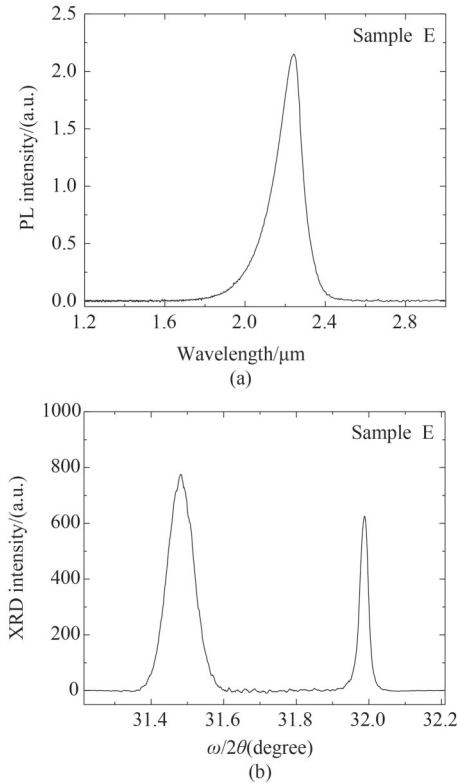


图2 样品E的(a)室温PL谱,(b)XRD测试曲线
Fig. 2 (a) PL spectra at RT, and (b) XRD scan curve of sample E

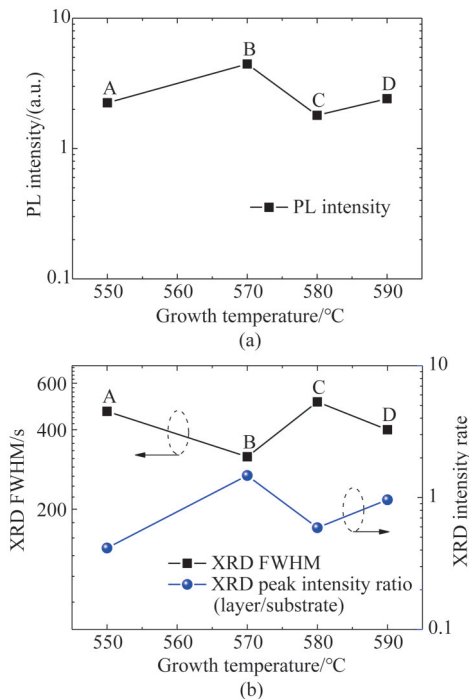


图3 (a)PL强度和(b)XRD外延峰半峰宽及XRD外延峰和衬底峰强度之比与生长温度的关系
Fig. 3 (a)PL intensity and (b)XRD FWHM and XRD peak intensity ratio (layer/substrate) as a function of growth temperatures

度为 570 °C 时最小为 316 s。从而可获得 570 °C 生长的 $\text{In}_{0.74}\text{Ga}_{0.26}\text{As}$ 材料的 PL 峰强度和 XRD 外延峰强度都最高, XRD 外延峰半峰宽最小。其原因是当生长温度从 550 °C 增加到 570 °C 时, 材料结晶质量有所改善, 所以 PL 和 XRD 强度都有所增加; 但当生长温度进一步增加时, 推测材料的结晶质量开始下降, 缺陷密度可能开始升高, 所以材料 PL 和 XRD 强度又有所降低。

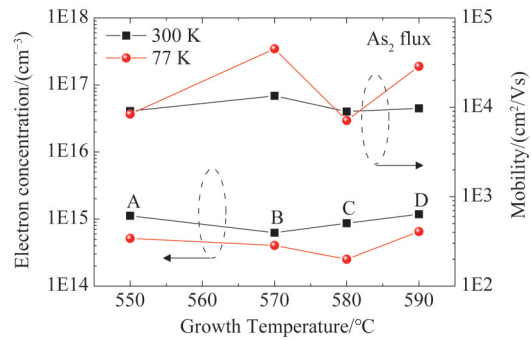


图4 载流子浓度和迁移率与 $\text{In}_{0.74}\text{Ga}_{0.26}\text{As}$ 层生长温度的关系
Fig. 4 Background carrier concentration and mobility as a function of growth temperatures of $\text{In}_{0.74}\text{Ga}_{0.26}\text{As}$ layers

图4 是不同生长温度 $\text{In}_{0.74}\text{Ga}_{0.26}\text{As}$ 外延层样品的霍尔测试结果。为了使霍尔测试结果反映材料外延层本身的晶体质量, 生长了与图1结构类似但只生长到 $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ 缓冲层而不生长 $\text{In}_{0.74}\text{Ga}_{0.26}\text{As}$ 吸收层的参考样品, 由于其霍尔测试在室温和 77 K 下的阻值均偏高, 超出了霍尔测试的范围, 所以可认为样品 A-F 的霍尔测试结果均体现了 $\text{In}_{0.74}\text{Ga}_{0.26}\text{As}$ 外延层的电学特性。随着 InGaAs 吸收层的生长温度从 550 °C 升高到 590 °C, 室温下的本底载流子浓度先降低后增加, 在生长温度为 570 °C 时本底载流子浓度最低, 为 $6.3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 。室温下材料迁移率则随着生长温度的升高先增加后降低, 生长温度 570 °C 时具有最高的室温迁移率, 达到 $13\,400 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 。在 77 K 下, 材料本底载流子浓度相对室温有所降低, 在 570 °C 时为 $4.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, 77 K 迁移率在 570 °C 时最高达到 $45\,160 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, 相对其室温迁移率显著提高。注意到对于样品 A 和 C, 在 77 K 下材料迁移率要略低于室温迁移率, 其主要原因是非故意掺杂下的材料由于本底杂质在材料杂质中占有较大的比例, 在低温下可能呈现较明显的杂质散射效应, 反而导致材料在低温下的迁移率降低。

2.2 V/III比

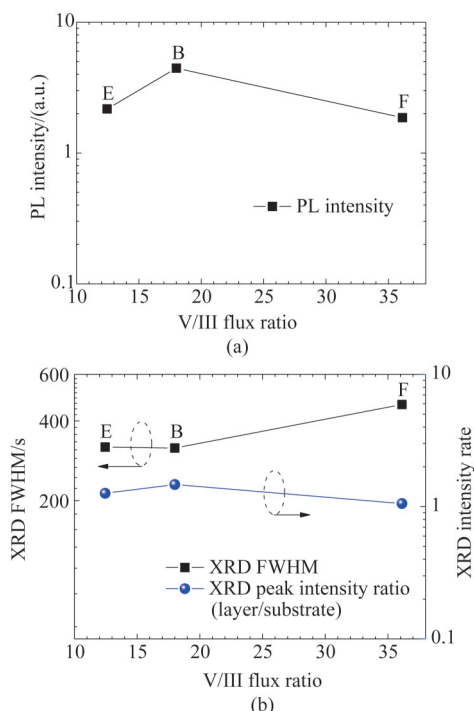


图5 (a)PL强度和(b)XRD半峰宽及XRD外延峰和衬底峰强度之比与材料生长V/III比的关系

Fig. 5 (a)PL intensity and (b)XRD FWHM and XRD peak intensity ratio (layer/substrate) as a function of V/III ratios

样品E、B和F生长时的V/III比不同,但其他生长条件一致。通过对样品进行PL和XRD测试,分析V/III比对高钢组分InGaAs薄膜的影响。PL相对强度以及XRD外延峰强度与衬底峰强度之比随V/III比变化如图5所示。随着生长 $\text{In}_{0.74}\text{Ga}_{0.26}\text{As}$ 层的V/III束流比从12提高到36,PL相对强度整体呈现先增加后降低的趋势,当V/III束流比为12时PL强度为2左右,V/III束流比增加到18时PL强度增加到接近5,V/III束流比为36时PL强度反而降低到 <2 。与PL强度的变化趋势相同,XRD外延峰强度与衬底峰强度之比也呈现先增加后降低的趋势,但变化幅度比较平缓;而XRD外延峰半峰宽与强度成反比,当V/III束流比为12和18时,半峰宽都为约320 s,V/III束流比为36时,半峰宽增大到461 s。 $\text{In}_{0.74}\text{Ga}_{0.26}\text{As}$ 层的V/III束流比为18时,生长的 $\text{In}_{0.74}\text{Ga}_{0.26}\text{As}$ 材料的PL强度和XRD外延峰强度最高,XRD外延峰半峰宽也最小。在材料生长过程中,V族As为过量饱和状态,但从图5的变化趋势可以看出,As原子过多会使PL强度和XRD外延峰强度降低,导致生长的 $\text{In}_{0.74}\text{Ga}_{0.26}\text{As}$ 薄膜质量变差。

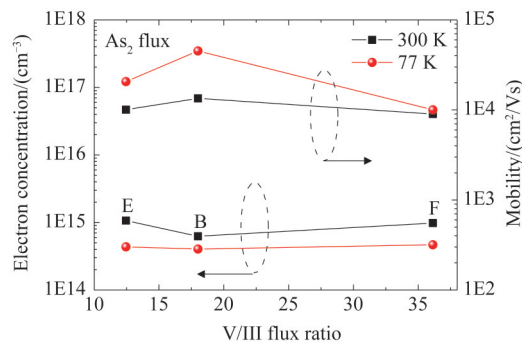


图6 载流子浓度和迁移率与材料生长V/III比的关系

Fig. 6 Background carrier concentration and mobility as a function of V/III ratios

对不同V/III比的样品E、B和F进行了室温和77 K霍尔测试,载流子浓度和迁移率与V/III束流比的关系如图6所示。当V/III比值从12增加到36时,室温下的本底载流子浓度先降低后增加,而当V/III比为18时达到最低为 $6.3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 。室温下的材料迁移率则是随着V/III束流比的升高,先增加后降低,V/III比为18时具有最高的室温迁移率,达到 $13400 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 。在77 K低温下,观察到与室温下载流子浓度有相同的变化趋势,但材料本底载流子浓度相对室温有所降低,当V/III比为18时载流子浓度为 $4.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 。而当V/III比从12变为18时,77 K时的迁移率从 $20650 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 增大到 $45160 \text{ cm}^2/\text{Vs}$;当继续增大V/III比为36时,迁移率反而降低为 $10020 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 。总之,在77 K下的载流子浓度随V/III比的变化要比在常温下变化平缓,这是因为常温下本底杂质电离率较高,而在低温下杂质电离率较低。此外,材料在77 K下的迁移率比在常温下的迁移率变化明显。这是因为 $\text{In}_{0.74}\text{Ga}_{0.26}\text{As}$ 层半导体的散射机制主要有晶格散射和电离杂质散射,由于非故意掺杂的材料杂质浓度较低,在常温下晶格振动散射占主导地位,杂质浓度的变化不会对迁移率产生显著影响,而在低温下散射机制以电离杂质散射为主,迁移率会随生长参数显著变化,且远高于常温下的迁移率。

2.3 As分子束

为了更直观地分析PL和XRD与不同As分子态成分之间的关系,提取了样品H、G和B的PL相对强度以及XRD外延峰强度与衬底峰强度之比,结果如图7所示。随着As源裂解区温度从 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 提高到 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$,As分子的形态依次为 As_4 、 As_3 和 As_2 混合、 As_2 ,PL相对强度呈现逐渐增加的趋势。例如,当As分子形态从 As_4 变为 As_3 和 As_2 混合以及

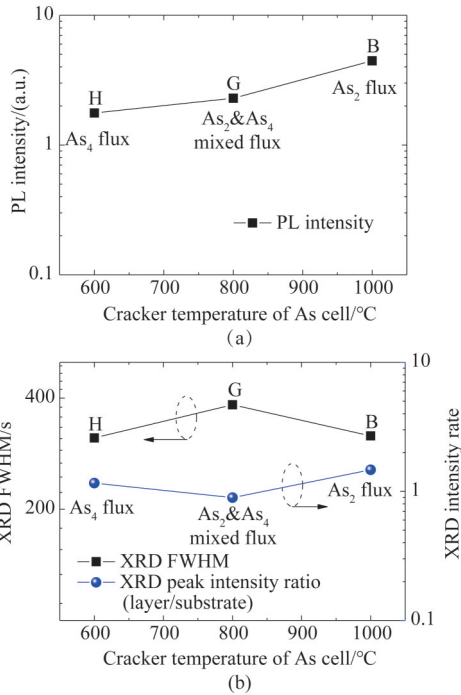


图7 (a)PL强度和(b)XRD半峰宽及XRD外延峰强度与衬底峰强度之比与As分子形态的关系

Fig. 7 (a)PL intensity and (b)XRD FWHM and XRD peak intensity ratio (layer/substrate) as a function of arsenic dimers

As₂时,PL强度从小于2先增加到2.3,然后再增加到5左右。As分子形态不同时,XRD外延峰强度与衬底峰强度之比整体相差不大,均为1左右。XRD外延峰半峰宽的变化趋势与XRD强度变化相符,符合XRD强度越高半峰宽越小的规律。综合PL和XRD结果可以看到,As₂分子形态条件下生长的In_{0.74}Ga_{0.26}As材料晶体质量最好,晶体缺陷较少;As₄以及As₂和As₄混合条件下生长出来的In_{0.74}Ga_{0.26}As材料晶体质量相对略差,推测材料深能级缺陷密度较大,光激发产生的载流子更多用于非辐射复合,导致PL强度减弱。这与文献中As₄条件下生长的GaAs材料含有更多的点缺陷的结果相一致^[25]。

图8是不同As分子形态下生长In_{0.74}Ga_{0.26}As外延层的霍尔测试结果。可以看出分子形态为As₄以及As₂和As₄的混合时,本底载流子浓度在室温下和低温下均无显著变化,室温时约 $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$,77 K时约 $4.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 。As₂分子形态下生长的样品本底载流子浓度相对较低,室温下为 $6.3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$,77 K下为 $4.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 。此外,As₄以及As₂和As₄混合生长样品的迁移率在室温和77 K下均约为 $10^4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$,随着测试温度的降低其迁移率变化不明显,而As₂分子形态下生长的样品在室温和77 K下的迁

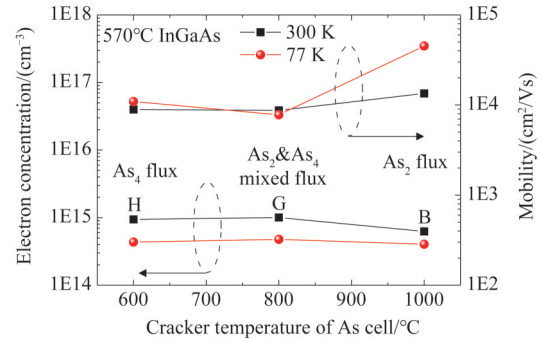


图8 载流子浓度和迁移率与As分子形态的关系

Fig. 8 Background carrier concentration and mobility as a function of arsenic dimers

移率要明显高于As₄以及As₂和As₄混合生长样品的迁移率,分别达到 $13\,400 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 和 $45\,160 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 。这是由于As₄分子形态下的吸附和生长机制较为复杂,生长过程中会发生多层成核,生长表面在原子尺度上相对更粗糙,引入更多可能的材料缺陷,使得材料本底载流子浓度增大,迁移率降低,且77 K下的迁移率与室温相比没有明显提高。采用As₂分子形态的生长过程更接近于二维生长,所以生长的外延层薄膜本底载流子浓度相对较低,迁移率更高^[26]。

在文献中对高In组分InGaAs的本底浓度和迁移率报道较少。采用电容-电压测试In_{0.7}Ga_{0.3}As探测器结构吸收层材料的本底浓度低于 $1\text{E}16 \text{ cm}^{-3}$ ^[27],不掺杂In_{0.7}Ga_{0.3}As材料作为沟道的HEMT器件霍尔迁移率为 $11\,300 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ^[28],In_{0.83}Ga_{0.17}As在浓度 $1\text{E}16 \text{ cm}^{-3}$ 时迁移率为 $13\,300 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ^[29]。因为InAs具有很高的迁移率,所以InGaAs材料会随着In组分的升高迁移率增加。可见本工作中In_{0.74}Ga_{0.26}As材料 $13\,400 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 的室温迁移率明显高于文献中相关的报道。室温下本底载流子浓度最低达到 $6.3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$,要高于晶格匹配InGaAs所报道的 $2 \sim 3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$,这其中增加的电子浓度主要来源于失配缺陷产生的施主,所以减少材料的失配缺陷成为进一步提高材料质量的关键。通过这些优化生长实现了具有低本底载流子浓度和高迁移率的高铟组分InGaAs薄膜材料,满足了延伸波长InGaAs探测器研制的需求,为研制延伸波长InGaAs探测器提供了材料支撑。

3 结论

本文研究了分子束外延生长温度、V/III比以及As分子束形态对高铟组分InGaAs材料光电性能的

影响。采用傅里叶光谱仪、高分辨X射线衍射仪和霍尔测试仪对不同工艺下生长的 $\text{In}_{0.74}\text{Ga}_{0.26}\text{As}$ 材料 PL 强度、XRD 峰强度以及室温和 77 K 的本底载流子浓度和迁移率进行了测试分析。结果表明,生长温度和 V/III 束流比适中时,所生长的高铟组分 InGaAs 薄膜具有较高的 PL 强度和 XRD 峰强度以及更优的本底载流子浓度和迁移率。采用 As_2 生长的 $\text{In}_{0.74}\text{Ga}_{0.26}\text{As}$ 材料质量优于采用 As_4 或 As_2 和 As_4 混合进行生长的材料。通过实验优化,发现在生长温度为 570 °C、采用 As_2 分子束且 V/III 比为 18 的条件下生长的 $\text{In}_{0.74}\text{Ga}_{0.26}\text{As}$ 材料可以实现较高的 PL 强度和 XRD 外延峰强度,在室温和 77 K 下,本底载流子浓度分别达到 $6.3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 和 $4.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$,迁移率分别达到 $13\,400 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 和 $45\,160 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 。这些工作有助于实现高质量延伸波长 InGaAs 探测器材料生长,也为研制高性能延伸波长焦平面探测器打下了基础。

References

- [1] Huang C C, Ho C L, Wu M C. Large-area planar wavelength-extended InGaAs pin photodiodes using rapid thermal diffusion with spin-on dopant technique [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2015, **36**(8):820-822.
- [2] Mushini P, Huang W, Morales M, et al. 2D SWIR image sensor with extended wavelength cutoff of 2.5 μm on InP/InGaAs epitaxial wafers with graded buffer layers [J]. *Infrared Technology and Applications XLII. SPIE*, 2016, **9819**: 78-86.
- [3] Verdun M, Beaudoin G, Portier B, et al. Dark current investigation in thin PIN InGaAs photodiodes for nano-resonators [J]. *Journal of Applied Physics*, 2016, **120**(8): 084501.
- [4] Mihalcea R M, Webber M E, Baer D S, et al. Diode-laser absorption measurements of CO_2 , H_2O , N_2O , and NH_3 near 2.0 μm [J]. *Applied Physics B*, 1998, **67**(3):283-288.
- [5] Amerov A K, Chen J, Arnold M A. Molar absorptivities of glucose and other biological molecules in aqueous solutions over the first overtone and combination regions of the near-infrared spectrum [J]. *Applied Spectroscopy*, 2004, **58**(10):1195-1204.
- [6] Schrijver H, Goede A P H, Dobber M R, et al. Retrieval of carbon monoxide, methane, and nitrous oxide from SCIAMACHY measurements [J]. *Optical Remote Sensing of the Atmosphere and Clouds. International Society for Optics and Photonics*, 1998, **3501**: 215-224.
- [7] Yoon H W, Eppeldauer G P. Measurement of thermal radiation using regular glass optics and short-wave infrared detectors [J]. *Optics Express*, 2008, **16**(2):937-949.
- [8] Eitenberg M H, Nguyen H, Martin C R, et al. High resolution 1.3 megapixel extended wavelength InGaAs [J]. *Infrared Technology and Applications XLIV. International Society for Optics and Photonics*, 2018, **10624**:1062404.
- [9] Arslan Y, Oguz F, Besikci C. 640×512 Extended Short Wavelength Infrared $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$ Focal Plane Array [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2014, **50**(12): 957-964.
- [10] Cheng J F, Li X, Shao X M, et al. 2.45- μm 1280×1024 InGaAs focal plane array with 15- μm pitch for extended SWIR imaging [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2022, **34**(4):231-234.
- [11] Olsen G H, Lange M J, Cohen M J, et al. Three-band 1.0-2.5 μm near-infrared InGaAs detector array [J]. *Infrared Detectors and Focal Plane Arrays III. International Society for Optics and Photonics*, 1994, **2225**:151-159.
- [12] Liu Ya-Ge, Ma Ying-Jie, Li Xue, et al. Noise behaviors of SWIR $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}/\text{InP}$ focal plane arrays as a function of lattice-mismatch degree [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2022: 104136.
- [13] Wang H Z, Gu Y, Yu C L, et al. Direct correlation of defects and dark currents of InGaAs/InP photodetectors [J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2021, **123**:105540.
- [14] Zhang Y G, 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.
- [15] Zhang Y G, Gu Y, Wang K, et al. Properties of gas source molecular beam epitaxy grown wavelength extended InGaAs photodetector structures on a linear graded InAlAs buffer [J]. *Semiconductor science and technology*, 2008, **23**(12):125029.
- [16] Hoogeveen R W M, Goede A P H. Extended wavelength InGaAs infrared (1.0-2.4 μm) detector arrays on SCIAMACHY for space-based spectrometry of the Earth atmosphere [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2001, **42**(1): 1-16.
- [17] Du B, Gu Y, Zhang Y G, et al. Effects of continuously or step-continuously graded buffer on the performance of wavelength extended InGaAs photodetectors [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2016, **440**:1-5.
- [18] Zhang Y G, Hao G Q, Gu Y, et al. InGaAs photodetectors cut-off at 1.9 μm grown by gas-source molecular beam epitaxy [J]. *Chinese Physics Letters*, 2005, **22**(1):250.
- [19] Ma Y J, Zhang Y G, Chen X Y, et al. A versatile digitally-graded buffer structure for metamorphic device applications [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2018, **51**(14):145106.
- [20] Gu Y, Zhang Y G, Wang K, et al. Effects of growth temperature and buffer scheme on characteristics of InP-based metamorphic InGaAs photodetectors [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2013, **378**:65-68.
- [21] Hsieh H K, Chou C, Lin H H, et al. Strain relaxation properties of $\text{InAs}_y\text{P}_{1-y}$ metamorphic buffer layers for SWIR InGaAs photodetector [C]//2018 7th International Symposium on Next Generation Electronics (ISNE). IEEE, 2018: 1-3.
- [22] Smiri B, Hidouri T, Saidi F, et al. Carriers' localization and thermal redistribution in InAlAs/InP grown by MOCVD on (311) A- and (311) B-InP substrates [J]. *Applied Physics A*, 2019, **125**(2):1-6.

- [23] Smiri B, Arbia M B, Ilkay D, *et al.* Optical and structural properties of In-rich $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ epitaxial layers on (1 0 0) InP for SWIR detectors [J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2020, **262**:114769.
- [24] Jin X, Pinsukanjana P, Pepper J, *et al.* Ultra low background InGaAs Epi-layer on InP for PIN applications by production MBE [C]//16th IPRM. 2004 International Conference on Indium Phosphide and Related Materials, 2004. IEEE, 2004:48-51.
- [25] Künzel H, Ploog K. The effect of As_2 and As_4 molecular beam species on photoluminescence of molecular beam epitaxially grown GaAs [J]. *Applied Physics Letters*, 1980, **37**(4):416-418.
- [26] Ogura T, Nishinaga T. Efficiency difference in Ga adatom incorporation in MBE growth of GaAs with As_2 and As_4 molecular beams [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2000, **211** (1/4):416 - 420
- [27] Zhang Y G, Gu Yi, 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.
- [28] Takahashi T, Kawano Y, Makiyama K, *et al.* Maximum frequency of oscillation of 1.3 THz obtained by using an extended drain-side recess structure in 75-nm-gate InAlAs/InGaAs high-electron-mobility transistors [J]. *Applied Physics Express*, 2017, **10**(2):024102.
- [29] Ma Y J, Gu Y, Zhang Y G, *et al.* Carrier scattering and relaxation dynamics in n-type $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$ as a function of temperature and doping density [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2015, **3**(12):2872-2880.