

文章编号: 1672-8785(2025)04-0011-09

低缺陷 3 in 中波 InAs/InAsSb 材料 分子束外延工艺研究

闫 勇 周 朋 游聪娅 刘 铭 胡雨农 金姝沛

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 通过改变材料源的束流大小和材料生长温度对 3 in 数字合金(Digital Alloy, DA)-nBn 型 InAs/InAs_{1-x}Sb_x II 类超晶格材料进行分子束外延工艺研究。结果表明, 当 Sb 束流大小为 3×10^{-7} torr、生长温度为 470 °C 时生长的材料质量最好, 材料表面上直径在 3 μm 以上的缺陷密度为 64 cm^{-2} , 总厚度偏差为 8.16 μm , 材料相对于基准面的粗糙度均方根值为 0.339 nm, -1 级衍射卫星峰的半高宽为 16 arcsec。所生长的材料平整均匀, 具有较好的晶格质量。光致发光(Photo-luminescence, PL)光谱结果显示, 材料在 75 K 下的发光峰位于 4.69 μm 处; 随着温度的升高, 峰位产生红移。研究 Sb 束流大小与实验工艺的对应关系以及材料生长温度与材料缺陷的影响规律, 对于生长高质量 3 in InAs/InAs_{1-x}Sb_x II 类超晶格材料具有重要意义。

关键词: 分子束外延; InAs/InAsSb; GaSb 衬底

中图分类号: TN215 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2025.04.002

Study on Molecular Beam Epitaxy Process of Low-Defect 3 in Mid-Wave InAs/InAsSb Materials

YAN Yong, ZHOU Peng, YOU Cong-ya, LIU Ming, HU Yu-nong, JIN Shu-pei

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

Abstract: The molecular beam epitaxy process of 3 in digital alloy (DA)-nBn InAs/InAs_{1-x}Sb_x type-II super-lattice materials is studied by changing the beam size of the material source and the material growth temperature. The results show that the quality of the grown material is the best when the Sb beam size is 3×10^{-7} torr and the growth temperature is 470 °C. The density of defects with a diameter of more than 3 μm on the surface of the material is 64 cm^{-2} , the total thickness deviation is 8.16 μm , the root mean square value of the roughness of the material relative to the reference surface is 0.339 nm, and the full width at half maximum of the -1st order diffraction satellite peak is 16 arcsec. The grown material is flat and uniform, with good lattice quality. The photoluminescence (PL) spectroscopy results show that the luminescence peak of the material at 75 K is located at 4.69 μm ; with the increase of temperature, the peak position produces a red-shift. The corresponding relationship between the Sb beam size and the experimental process, as well as the influence of ma-

收稿日期: 2024-07-22

作者简介: 闫勇(1998-), 男, 河北张家口人, 硕士, 主要从事红外探测材料及器件研究。

E-mail: m17803328732@163.com

terial growth temperature and material defects are studied, which is of great significance for the growth of high-quality 3 in InAs/InAs_{1-x}Sb_x type-II superlattice materials.

Key words: molecular beam epitaxy; InAs/InAsSb; GaSb substrate

0 引言

红外探测器是将接收的红外辐射转换成可以计量的物理量的器件,广泛应用于导弹探测、大气监测、红外成像等多个领域。常见的红外探测器主要包括量子阱红外探测器(Quantum Well Infrared Photodetector, QWIP)^[1]、碲镉汞(Mercury Cadmium Telluride, MCT)红外探测器^[2]以及 II 类超晶格(Type-II Superlattice, T2SL)红外探测器^[3]。其中, QWIP 基于成熟的 III-V 族半导体工艺,容易制造面阵规格大、均匀性好、成本低的红外探测器。但其光生载流子跃迁属于子带跃迁,只对窄带的平行光响应,从而导致极低的吸收系数和量子效率。这限制了 QWIP 的应用领域。通过调节碲镉汞材料的组分可以实现带隙调控,使其探测波段覆盖从短波红外到长波红外的整个范围。而且碲镉汞属于直接带隙半导体材料,具有较高的吸收系数和量子效率。但碲镉汞材料主要由离子键构成,相互作用力小,导致稳定性较差,容易在生长过程中出现缺陷以及材料不均匀等问题^[4]。T2SL 探测器集上述两种红外探测器的优点于一身,是目前具有良好前景的红外探测器之一。

T2SL 探测器通过改变势阱层和势垒层的厚度来调节带隙,其光谱响应范围可覆盖 2~30 μm 的短波至甚长波波段^[5]。T2SL 材料由 III-V 族共价键构成,材料结构稳定,工艺较为成熟,能够实现大面阵材料的制备^[6]。随着工作温度的升高,红外探测器的暗电流会急剧增加,最终导致噪声太大,影响器件正常工作。因此,为了抑制暗电流,探测器需要在液氮温度或者更低的温度下工作。这限制了探测器的使用场景。如果探测器正常工作时的温度可以提高,就可以加快探测器的启动速度,进

一步增加探测器组件的寿命和可靠性^[7]。相关研究表明,当探测器的工作温度提高 20%~30%时,组件的寿命增加 50%~150%^[8]。

InAs/InAs_{1-x}Sb_x T2SL 材料是以 DA 方式,利用周期厚度不一的 InAs 与 InAsSb 两种材料在纳米尺度上交替生长形成的多周期结构。通过改变单周期内 InAs 与 InAsSb 的层数比来改变超晶格材料的禁带宽度。其中, InAs 充当电子的势阱, InAsSb 充当空穴的势阱。当 InAs 与 InAsSb 交替外延时,在各个势阱中形成量子化能级,相邻势阱内载流子波函数重叠,最后形成虚拟微带,与体材料的能带结构相近。在有辐射光进入的情况下,微带间的电子和空穴将出现与直接禁带半导体相似的跃迁行为,从而达到对光吸收与检测的目的^[9]。DA-nBn InAs/InAs_{1-x}Sb_x 红外探测器是以 DA-InAs/InAs_{1-x}Sb_x 材料为吸收层材料,以 AlAs_{0.08}Sb_{0.92} 材料为势垒层材料制备而成。在此结构中, AlAs_{0.08}Sb_{0.92} 材料作为电子的单级势垒阻挡电子向正极运动而不影响空穴的传输,可通过抑制肖克利-里德-霍尔(Shockley-Read-Hall, SRH)过程降低产生-复合(Generation-Recombination, G-R)暗电流,从而提高探测器的工作温度^[10]。InAs_{0.91}Sb_{0.09} 体材料在外延生长过程中与 GaSb 衬底匹配时,材料对应的探测波长为 4.2 μm。当探测其他波长时,需要对材料进行 DA 结构制备。通过改变 DA-InAs/InAs_{1-x}Sb_x 材料单周期内的 InAs 与 InAsSb 厚度比,可以实现材料从中波到甚长波波长的探测^[11]。因此,制备大面阵 DA-InAs/InAs_{1-x}Sb_x 材料对于灵活调整高温工作探测器的探测波长以及提升探测器的产量具有重要意义。

本文通过研究材料源的束流大小和外延材料的生长温度对分子束外延(Molecular-Beam Epitaxy, MBE) 3 in DA-nBn InAs/In-

$\text{As}_{1-x}\text{Sb}_x$ 材料质量的影响, 确定了最佳 MBE 生长条件。通过光学显微镜、原子力显微镜 (Atomic Force Microscopy, AFM)、光学轮廓仪、高分辨 X 射线衍射仪 (High-Resolution X-Ray Diffractometer, HRXRD) 和 PL 光谱仪测试对材料进行表征分析。

1 实验

本文采用 4 in MBE 系统, 包括进样室、预处理室和生长室。其中, 生长室装有 In、Ga、Al III 族源, Sb、As V 族裂解源以及 Be、Si 掺杂源, 还有用于监测束流大小的离子规。实验用到的衬底材料为 Te 掺杂的 3 in GaSb (100) 材料, MBE 生长过程中的温度由热电偶结合 BandiT 系统进行监测^[12]。在生长材料前, 需要对衬底进行处理。首先将衬底装在干净的钨托上, 然后依次放入进样室(去除水汽)和预

处理室(去除表面残余物), 最后进入生长室: 在大束流(2×10^{-6} Torr)的 Sb 源保护环境中, 高温(600 °C)下去除表面氧化层。此时通过反射高能电子衍射仪 (Reflection High-Energy Electron Diffractometer, RHEED) 监测衍射条纹, 可以看到晶体生长过程中由于衍射产生的明亮清晰的点状条纹(见图 1(a)), 说明氧化层已被去除。然后将衬底温度降至 520 °C, 生长 GaSb 缓冲层, 以去除衬底表面的缺陷, 从而提供一个平整的生长表面。此时观察 RHEED 监测的衍射条纹, 可以看到明亮清晰的条状条纹(见图 1(b)), 说明原子正在表面逐层生长, 且表面已达到原子级平整度。接着降低 GaSb 衬底的温度。在此过程中, RHEED 条纹由少变多, 如图 2 所示。转变过程的温度区间可作为合适的外延生长区间。

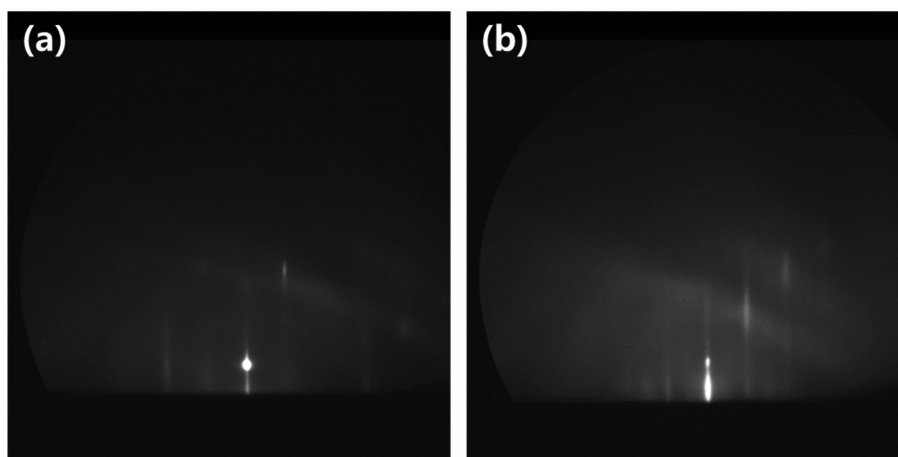


图 1 (a) 600 °C 下的 RHEED 衍射条纹; (b) 520 °C 下的 RHEED 衍射条纹

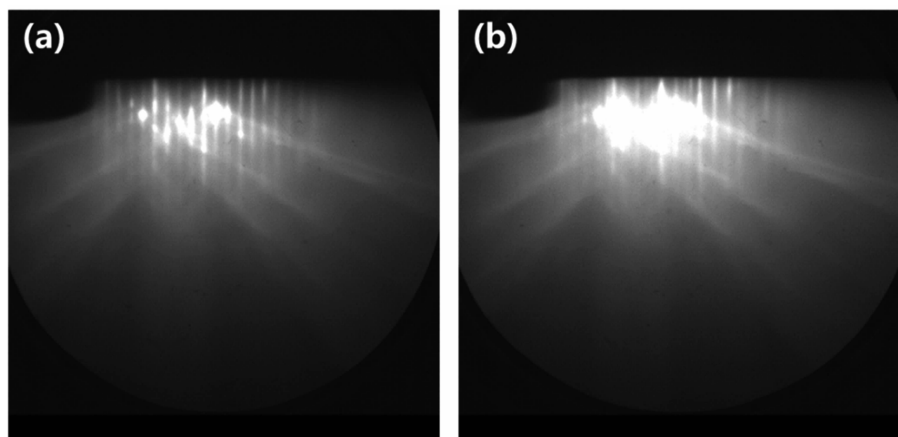


图 2 (a) 2×5 RHEED 衍射条纹; (b) 1×3 RHEED 衍射条纹

制备 500 nm 的 GaSb 缓冲层之后, 生长 N 型掺杂的 DA-InAs/InAs_{0.66}Sb_{0.34} 材料(500 nm) 作为下接触层, 其中 Si 材料作为 N 型掺杂源。接着生长 2 μm 的非故意掺杂 DA-InAs/InAs_{0.66}Sb_{0.34} 材料作为吸收层。为了与 GaSb 衬底晶格匹配, 生长 300 nm 的 AlAs_{0.08}Sb_{0.92} 材料作为单级势垒层; 接着生长 300 nm 的 DA-InAs/InAs_{0.66}Sb_{0.34} 材料作为上接触层, 最后生长 20 nm 的 InAs 盖层。生长过程中使用较大的 V 族束流、较低的衬底生长温度和较慢的生长速率。由于 InAs 和 InAsSb 材料具有共同的原子, 因此在生长过程中不需要考虑不同材料之间的界面问题。

对于 InAsSb 材料而言, 当 As 组分为 91% 时可以使材料的晶格常数与 GaSb 材料匹配, 这样在外延生长过程中会获得较好的外延材料。将 DA-InAs/InAsSb 材料用作超晶格结构时, 需要 As 组分为 66%, 从而使超晶格材料晶格大小与 GaSb 匹配。因此在生长过程中, 需要对材料源的束流大小进行精确调控。对于小组分 Sb 的束流优化, 通过精确调节 Sb 的束流大小, 使得 Sb 组分达到预期组分, 从而实现晶格匹配。优化前 Sb 的束流大小根据其与 As 组分之间的比例来确定: As 的束流大小为 1×10^{-6} torr, 在生长 InAsSb 的过程中, 调控 Sb 的束流大小为 5×10^{-7} torr。但生长的材料表面有明显的网格线, 如图 3(a) 所示。这是因为超晶格材料的晶格常数与衬底材料不匹配, 存在应力,

由应变弛豫造成的^[13]。

对所生长的材料进行 X 射线衍射仪(X-Ray Diffractometer, XRD)测试(结果见图 4(a))。结合维加德定律进行组分计算, 发现 Sb 的组分为 5×10^{-7} torr, 比预期设计值高 9%。解决这一问题的方法是降低 Sb 源的束流大小。掺入的小组分 V 族源的束流大小与大组分 V 族源的束流大小的比例关系和组分之间的比例关系不相同, 需要进一步降低束流大小。降低后的 Sb 源束流大小为 3×10^{-7} torr。使用光学显微镜观察其表面(结果见图 3(b))。可以发现, 相较于束流优化前, 明显消除表面上由应变弛豫引起的网格线。XRD 测试结果如图 4(b) 所示。结合维加德定律计算可知, Sb 组分为 9%, 符合设计值。

在确定材料源束流大小后, 根据去除氧化层的温度确定材料的最佳生长温度。实验共分四组, 相应的材料生长温度分别为 450 $^{\circ}\text{C}$ 、460 $^{\circ}\text{C}$ 、470 $^{\circ}\text{C}$ 和 480 $^{\circ}\text{C}$ 。所生长的材料结构如上所述, 所用的材料源束流为优化后的材料源束流。对所生长的 3 in 外延材料进行光学显微镜观察, 结果如图 5 所示。其中, 450 $^{\circ}\text{C}$ 、460 $^{\circ}\text{C}$ 和 480 $^{\circ}\text{C}$ 时均有缺陷产生。分析其原因可知, 450 $^{\circ}\text{C}$ 和 460 $^{\circ}\text{C}$ 时衬底温度低, 导致表面吸附到的原子没有足够大的能量迁移到合适的晶格位置, 从而容易在生长过程中成为缺陷形核中心, 直到 470 $^{\circ}\text{C}$ 生长温度时缺陷几乎消失。统计直径大于 2 μm 的缺陷: 共观察了 9 个区域, 计算缺陷个数的平均值。视场面积为

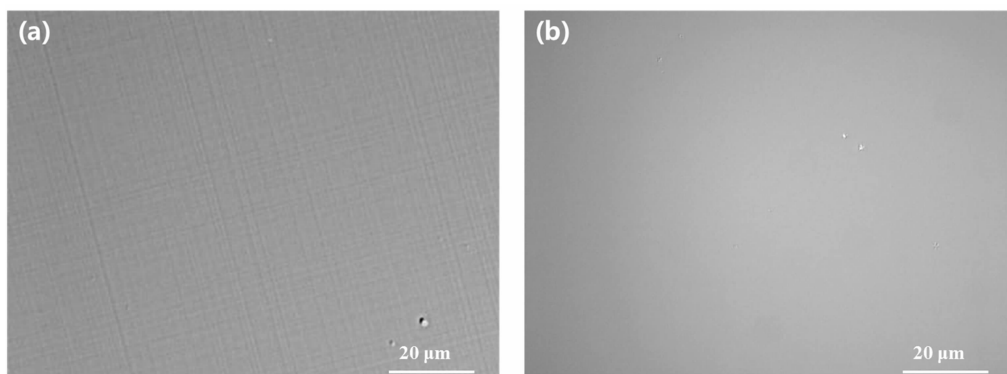


图 3 生长材料表面: (a) Sb 束流大小优化前; (b) Sb 束流大小优化后

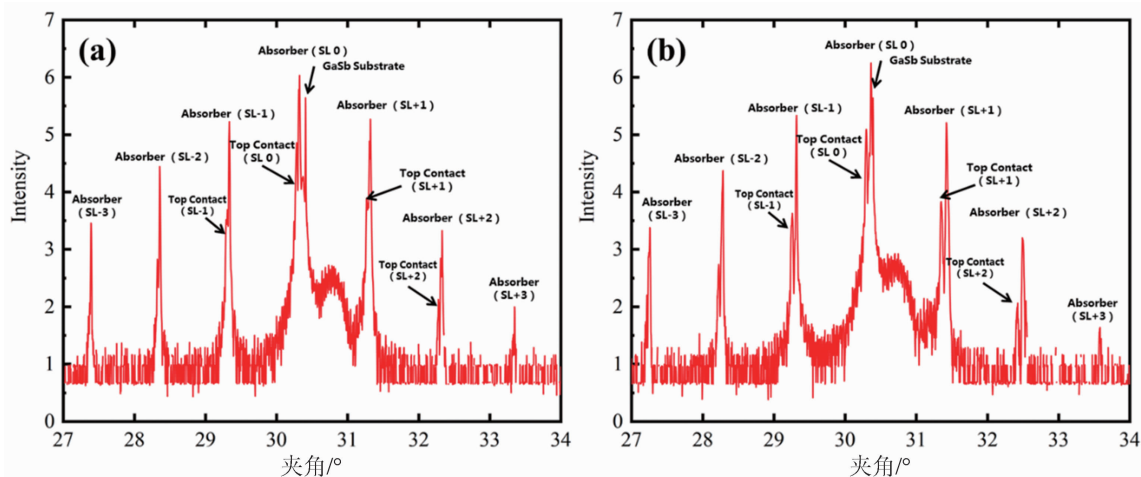


图 4 3 in DA-nBn 材料的 XRD 测试图: (a) Sb 束流优化前; (b) Sb 束流优化后

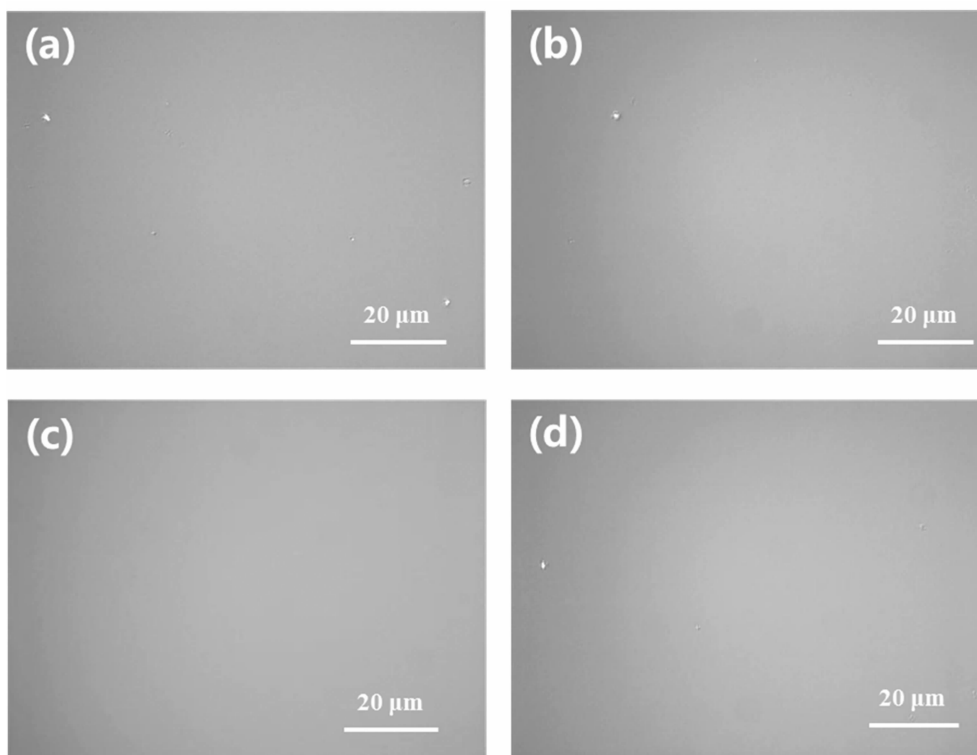


图 5 3 in DA-nBn 材料表面的光学显微镜图: (a) 材料生长温度为 450 °C; (b) 材料生长温度为 460 °C; (c) 材料生长温度为 470 °C; (d) 材料生长温度为 480 °C

$3.62 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$, 计算得到样品 1 的表面缺陷密度为 64 cm^{-2} , 证明材料具有较高的质量。而 480 °C 时又出现缺陷。这是因为较高的衬底温度造成生长表面台阶密度增大, 成为缺陷形核中心的台阶边缘增多, 导致缺陷个数增加^[13]。经过以上实验结果分析, 确定 470 °C 附近的衬底温度为 3 in DA-nBn 材料的最佳生长温度。接下来对使用优化后生长条件得到的

3 in 材料进行表征分析。

2 表征与分析

2.1 材料表面形貌

使用光学轮廓仪对生长的 3 in DA-nBn 材料进行平整度测试。该方法利用干涉原理对材料进行测试。当两束相干光之间的光程差发生变化时, 干涉条纹会发生偏移; 由于相干光经过的几何路程或者介质折射率改变, 相干光的

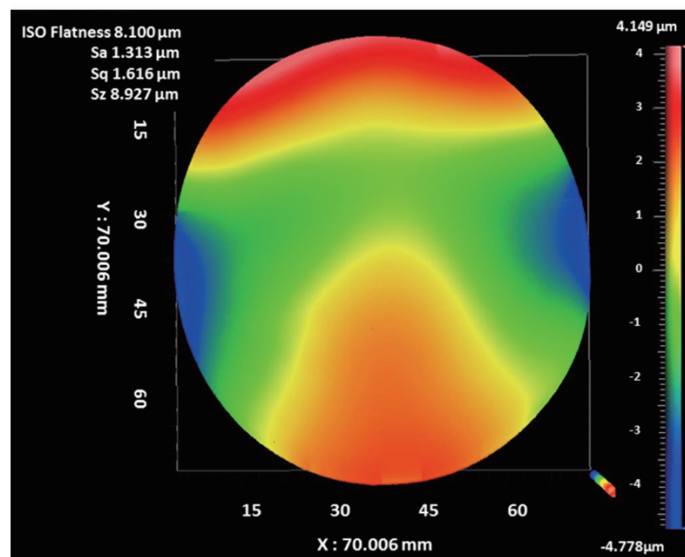


图 6 3 in DA-nBn 材料的光学轮廓仪测试图

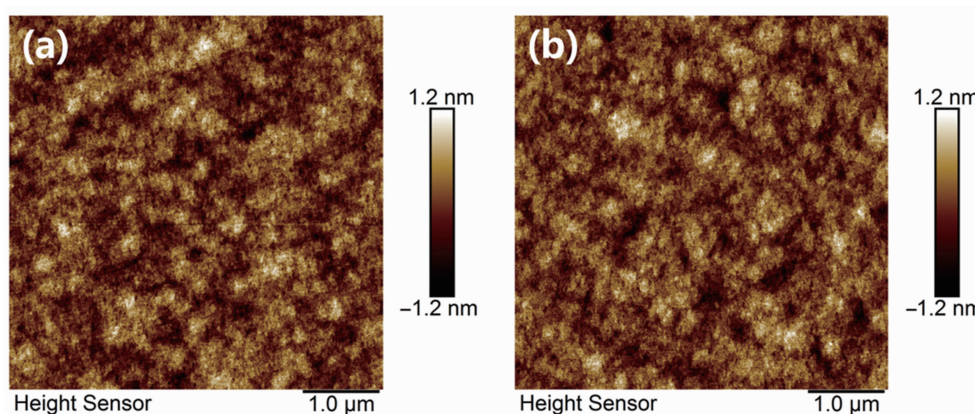


图 7 3 in DA-nBn 材料表面的光学轮廓仪测试图：(a)中心处；(b)边缘处

光程产生变化。因此，通过测量干涉条纹的位移变化，可以得到几何长度或折射率的微小变化量。光程差的精度决定测量精度，光程差改变一个波长与干涉条纹移动一个条纹间距是相对应的。由于轮廓仪以光波波长为单位对光程差进行测量，所以其测试精度非常高。本次测试的扫描直径为 70 mm，结果如图 6 所示。可以看出，材料的平整度良好，最高点与最低点的高度差为 8.9 μm ；不同区域高度不同，可能是由设备对 GaSb 衬底加热的温度、束流大小在不同位置有轻微差异造成的。

为了观察材料表面微观尺度下的形貌，使用 AFM 在峰值力模式下对 3 in 材料进行原子层级的面扫描。AFM 的主要构件为激光聚焦的悬臂端部固定的原子尺度针尖，它对微弱力

非常敏感。AFM 的分辨率可以达到原子级，对样品表面进行形貌检测的方式主要包括接触式、非接触式、点击式等。本文采用非接触模式对超晶格样品的表面形貌进行测量。该模式下，扫描过程中悬臂振荡于样品表面，针尖与样品之间保持很近的距离(0.1~0.2 nm)，这是原子间作用力曲线的吸引力区。为使尖端与样品表面之间的作用力恒定，通常采用反馈电路来调整针尖与样品的间距。此次测试的扫描范围为 5 $\mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ 。测试结果见图 7：图 7(a)所示为材料中心处的表面粗糙度，均方根数值为 0.339 nm；图 7(b)所示为材料边缘处的表面粗糙度，均方根数值为 0.338 nm。两者均为一个单原子层量级，且可以清晰地看到表面原子台阶，表明材料具有原子级别的平整度和

良好的均匀性。

2.2 X 射线衍射谱与 PL 谱

HRXRD 测试技术可用于表征各种低维半导体异质结构的晶格应变, 也可以反映晶体周期厚度与质量, 在材料测试领域具有广泛的应用。在本文的样品测试中, X 射线衍射装置如图 8 所示。测试方法如下: 首先寻找衬底的衍射峰位(ω_0), 然后将 X 射线和样品的入射角 ω 选定在 ω_0 附近; 在测试过程中, 样品以某角速度 γ 转动而探测器以 2γ 角速度转动, 通过 ω 扫描找到样品表面的 θ 之后, 将探测器固定在相应 2θ 角度 (2θ 为衍射角), 最后得到衍射强度和 2θ 的摇摆曲线。

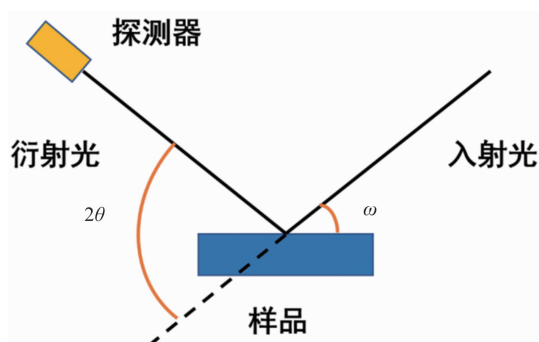


图 8 X 射线双晶衍射装置示意图

对于 T2SL 而言, 利用 HRXRD 测量时, 主要参数为衍射峰的位置和半峰宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)。根据衍射峰的位置可推算出外延层厚度与材料之间存在的应变, 其强度随着晶体厚度的增加而变大。半峰宽可以表示材料质量的好坏, 半峰宽越小, 材料的晶体质量越好。本文实验中使用的 X 射线源为 Cu 的 $K_{\alpha 1}$ 线(波长为 $1.546 \mu\text{m}$)。在 GaSb (004)附近对制备的 3 in 材料进行 HRXRD 测试(结果见图 9)。图 9(a)和图 9(b)所示分别为材料中心处和边缘处的测试结果。

从图 9 中可以看出, 中心处的衬底峰位为 30.355° , 边缘处的衬底峰位 30.363° 与外延层材料的零级峰几乎重合, 证明外延材料与衬底之间几乎不存在应变。生长的超晶格材料的 XRD 曲线出现了十分尖锐的衍射卫星峰。出现两组 XRD 曲线的可能原因是在生长上接触层 DA-InAs/InAs_{0.66}Sb_{0.34} 材料时, 源束流大小发生了轻微变化; 但周期厚度及材料组分与设计值没有太大偏差, 计算结果如表 1 和表 2 所示。中心处和边缘处的一级半峰宽大小分别为 24.42 arcsec 和 16 arcsec , 吸收层材料的单

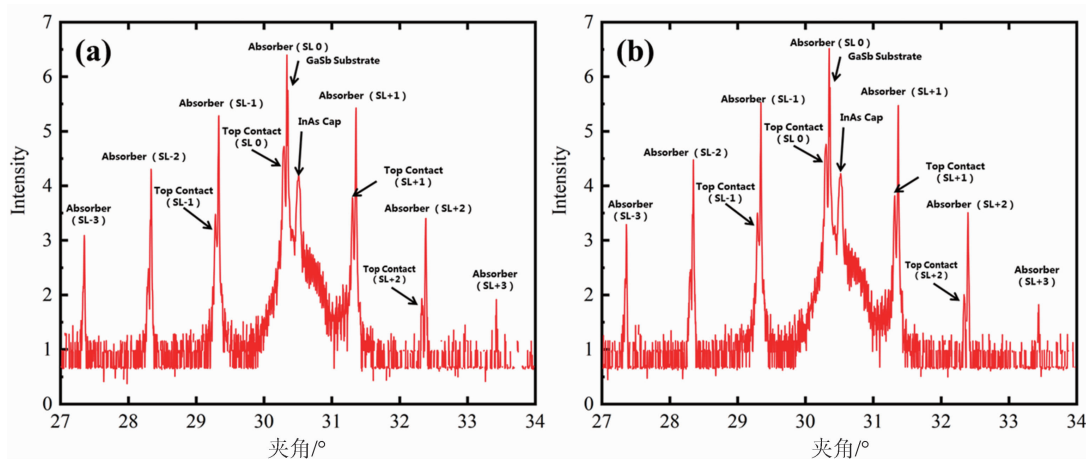


图 9 3 in DA-nBn 材料的 HRXRD 测试图: (a)中心处; (b)边缘处

表 1 材料中心处的 XRD 测试数据及计算分析结果

功能层结构	主峰 $2\theta/^\circ$	应变值/%	生长周期厚度/ $\text{\AA}$	设计周期厚度/ $\text{\AA}$
n 型下接触层 InAs/InAs _{0.66} Sb _{0.34}	30.337	0.05	50.54	50.0
吸收层 InAs/InAs _{0.66} Sb _{0.34}	30.337	0.05	50.54	50.0
n 型上接触层 InAs/InAs _{0.66} Sb _{0.34}	30.295	0.18	50.57	50.0

表 2 材料边缘处的 XRD 测试数据及计算分析结果

功能层结构	主峰 $2\theta/^{\circ}$	应变值/ $\%$	生长周期厚度/ $\text{\AA}$	设计周期厚度/ $\text{\AA}$
n 型下接触层 InAs/InAs _{0.66} Sb _{0.34}	30.35	0.04	50.53	50.0
吸收层 InAs/InAs _{0.66} Sb _{0.34}	30.35	0.04	50.53	50.0
n 型上接触层 InAs/InAs _{0.66} Sb _{0.34}	30.303	0.18	50.57	50.0

周期厚度分别为 50.54 $\text{\AA}$ 和 50.53 $\text{\AA}$ ，上接触层材料的单周期厚度分别为 50.57 $\text{\AA}$ 和 50.57 $\text{\AA}$ ，证明超晶格材料的厚度和晶格质量都具有良好的均匀性。

接着利用 PL 光谱仪对所生长的超晶格材料的荧光发光波长进行变温测试。图 10 所示为 3 in DA-nBn 材料在 75~170 K 温度下的 PL 谱。可以看出，DA-InAs/InAs_{0.66}Sb_{0.34} (37 $\text{\AA}$ /13 $\text{\AA}$) 构成的超晶格结构在 75 K 下的发光峰位于 4.69 μm 处，符合预期设计值。随着温度升高，光谱中的发光峰位轻微右移，说明材料的禁带宽度随温度的升高而变小。

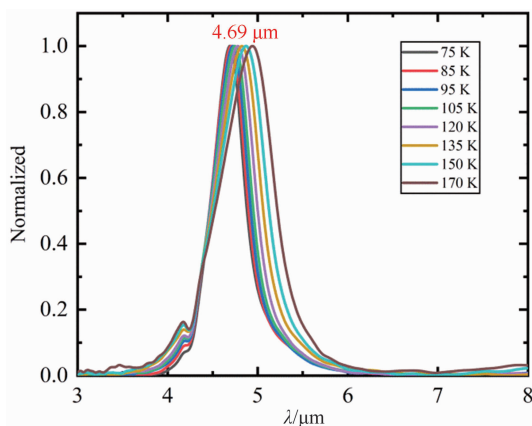


图 10 3 in DA-nBn 材料的变温 PL 谱

3 结束语

本文研究了束流大小与生长温度对 3 in DA-nBn 材料制备的影响。研究发现：(1) 掺入的小组分 Sb 源的束流大小与大组分 As 源的束流大小的比例关系和组分之间的比例关系不相同，需要进一步降低束流大小。(2) 生长温度对材料表面缺陷的数量具有重要的影响。较低的衬底温度会导致表面吸附的原子没有足够的能量迁移到合适的晶格位置，从而容易在生长过程中成为缺陷形核中心。衬底温度较高时，

材料生长表面的台阶密度增大，从而会增多缺陷形核中心的台阶边缘，最终导致缺陷增加。最终确定了最优生长条件：Sb 束流大小为 3×10^{-7} torr，材料生长温度为 470 $^{\circ}\text{C}$ 。

对制备的 3 in DA-nBn 材料进行了材料表面形貌以及组分 PL 谱测试分析。结果表明：(1) 材料表面上直径大于 2 μm 的缺陷密度为 64 cm^{-2} ；(2) 材料最高点与最低点的高度差为 8.9 μm ；(3) 材料中心处和边缘处的表面粗糙度均方根值分别为 0.339 nm 和 0.338 nm；(4) 材料应变值为 0.05%，所生长的厚度与预期厚度的偏差为 0.54 $\text{\AA}$ ；(5) 75 K 条件下，PL 谱测试结果为 4.69 μm ，符合预期值。研究 Sb 束流大小与实验工艺的对应关系以及材料生长温度与材料缺陷的影响规律，对于生长高质量 3 in InAs/InAs_{1-x}Sb_x II 类超晶格材料具有重要意义。

参考文献

- [1] Levine B F. Quantum-well Infrared Photodetectors [J]. *Journal of Applied Physics*, 1993, **74**(8): 1-81.
- [2] Rogalski A. HgCdTe Infrared Detector Material: History, Status and Outlook [J]. *Reports on Progress in Physics*, 2005, **68**(10): 2267-2336.
- [3] Rogalski A, Martyniuk P, Kopytko M. InAs/GaSb Type-II Superlattice Infrared Detectors: Future Prospect [J]. *Applied Physics Reviews*, 2017, **4**(3): 031304.
- [4] Kinch M A. HgCdTe: Recent Trends in the Ultimate IR Semiconductor [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2010, **39**(7): 1043-1052.
- [5] Kinch M A. Fundamentals of Infrared Detector Materials [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2007, **29**(6): 809-817.

- [6] Rogalski A. Recent Progress in Infrared Detector Technologies [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2011, **54**(3): 136–154.
- [7] 周朋, 温涛, 邢伟荣, 等. nBn 型 InAsSb 探测器的材料及器件研究 [J]. *红外*, 2019, **40**(11): 7–12.
- [8] Glozman A, Harush E, Jacobsohn E, et al. High Performance InAlSb MWIR Detectors Operating at 100 K and Beyond [C]. *SPIE*, 2006, **6206**: 6206M1.
- [9] Webster P, Riordan N, Liu S, et al. Absorption Properties of Type-II InAs/InAsSb Superlattices Measured by Spectroscopic Ellipsometry [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, **106**(6): 061907.
- [10] Maimon S, Wicks G W. nBn Detector, an Infrared Detector with Reduced Dark Current and Higher Operating Temperature [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **89**(15): 4429.
- [11] Kim H, Cellek O, Lin Z-Y, et al. Long-wave Infrared nBn Photodetectors Based on InAs/InAsSb type-II Superlattices [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, **101**(16): 159.
- [12] 胡雨农, 邢伟荣, 刘铭, 等. 3 in 长波分子束外延工艺优化研究 [J]. *红外*, 2021, **42**(11): 1–8.
- [13] 邢伟荣, 刘铭, 尚林涛, 等. 分子束外延 InAs/GaSb II 类超晶格的缺陷研究 [J]. *激光与红外*, 2016, **46**(9): 1106–1109.