

〈材料与器件〉

MBE 生长 InAs/GaSb II 类超晶格材料的界面控制方法分析

任洋, 李俊斌, 覃钢, 杨晋, 李艳辉, 周旭昌, 杨春章, 常超, 孔金丞, 李东升
(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要: 本文系统地介绍了 MBE 外延生长 InAs/GaSb II 类超晶格材料的界面控制方法, 主要包括生长中断法、表面迁移增强法、V 族元素浸润法和体材料生长法。短波(中波) InAs/GaSb 超晶格材料界面采用混合(mixed-like)界面, 控制方法以生长中断法为主; 长波(甚长波)超晶格材料界面采用 InSb-like 界面, 控制方法采用表面迁移增强法(migration-enhanced epitaxy, MEE)或 Sb soak 法及体材料生长相结合。讨论分析了 InAs/GaSb 超晶格材料界面类型选择的依据, 简述了界面控制具体实施理论, 以及相关研究机构对于不同红外探测波段的超晶格材料界面类型及控制方法的选择。通过界面结构外延生长工艺设计即在界面控制方法的基础上进行快门顺序实验设计, 有效地提高界面层的应力补偿效果, 这对于长波、甚长波及双色(甚至多色)超晶格材料的晶体质量优化和器件性能提升具有重要意义。

关键词: InAs/GaSb II 类超晶格; InSb-like 界面; GaAs-like 界面; 生长中断法; MEE

中图分类号: TN215, TN304 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2021)04-0301-11

Analysis of Interface Control Methods for InAs/GaSb Type-II Superlattice Materials Grown by MBE

REN Yang, LI Junbin, QIN Gang, YANG Jin, LI Yanhui, ZHOU Xuchang, YANG Chunzhang, CHANG Chao, KONG Jincheng, LI Dongsheng
(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: This article systematically introduces interface control methods for the MBE growth of InAs/GaSb type-II superlattice materials, including the interrupted growth epitaxy method, migration-enhanced epitaxy, V group element soak method, and bulk material growth method. The short-wavelength (mid-wavelength) InAs/GaSb superlattice material interface adopts a mixed-like interface, and the control method is mainly the interrupted growth epitaxy method, the long-wavelength (very long-wavelength) superlattice material interface adopts the InSb-like interface, and the control method adopts the migration-enhanced epitaxy (MEE) or Sb soak method combined with bulk material growth. The basis for selecting the interface type of InAs/GaSb superlattice material is discussed and analyzed, and the specific implementation theory of interface control is briefly described, along with the selection of interface types and control methods of superlattice materials in different infrared detection wavelength bands by related research institutions. To effectively improve the stress compensation effect of the interface layer, the interface structure epitaxial growth process design, that is, the experimental design of different shutter sequences based on the interface control method, was used. This is of great significance for the optimization of the crystal quality and device performance of long-wave, very long-wave, and two-color (even multi-color) superlattice materials.

Key words: InAs/GaSb type II superlattice, InSb-like interface, GaAs-like interface, interrupted growth epitaxy method, MEE

收稿日期: 2020-12-19; 修订日期: 2021-03-06.

作者简介: 任洋(1990-), 女, 河北保定人, 硕士, 工程师, 主要从事红外光电材料与器件方面的研究工作, E-mail: 1195947744@qq.com.

通信作者: 孔金丞(1979-), 男, 云南南华人, 研究员, 博士, 主要从事红外探测器材料与器件技术研究。E-mail: kongjincheng@163.com.

0 引言

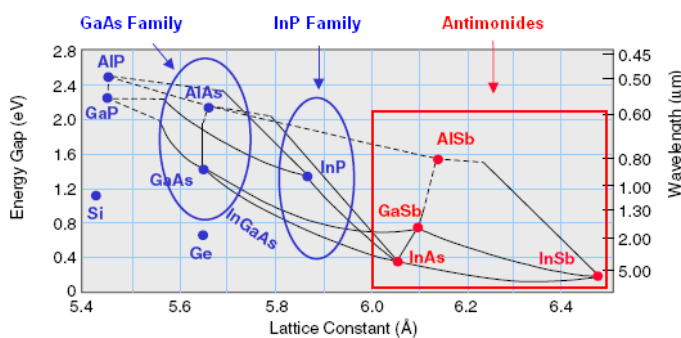
1977年 Sai-Halasz 等人第一次在理论上提出了 InAs/GaSb II 类超晶格 (superlattices, SLs) 的概念^[1-2]; 1987年 Smith 和 Maihiot 首次提出了 InAs/GaSb II 类超晶格可应用于红外探测技术的设想^[3-4]; 1990年 D. H. Chow 等人第一次生长制备得到 InAs/GaSb II 类超晶格^[5]; 1994年制备出第一个 p-n 结 InAs/GaSb II 类超晶格光电二极管^[6]; 1997年 APL 报道了高性能的 InAs/GaSb 超晶格光电二极管^[7]; 2003年西北大学首次研制出长波 256×256 焦平面探测器 (FPAs), 第一次实现了人像成像, 工作温度为 77 K^[8]; 2006年, 西北大学量子器件中心又研制出世界上第一个截止波长为 5 μm 的非制冷型中波 256×256 焦平面探测器^[9]; 2006年德国费朗霍姆 Fraunhofer IAF 和 AIM 实验室合作首次研制出中波双色 (3~4 μm 和 4~5.4 μm) 288×384 InAs/GaSb II 类超晶格焦平面探测器^[10], 将其应用于欧洲大型运输机 Airbus A400m 的导弹预警上, 标志着 InAs/GaSb II 类超晶格红外探测器开始走向实用化; 2008年 Rodriguez 等人研制出第一个 nBn 结构中波 320×256 InAs/GaSb II 类超晶格焦平面探测器^[11-12]; 2010年美国西北大学和喷气推进实验室先后成功地研制出规模 1 k×1 k 的长波 InAs/GaSb II 类超晶格红外焦平面探测器^[13]; 2011年西北大学首次报道了双色长波 FPAs^[14]; 2011年 Gautam 等人研制出了响应波段涵盖短波红外 (SWIR)、中波红外 (MWIR) 和长波红外 (LWIR) 的三色 InAs/GaSb II 类超晶格红外探测器^[15]; 2012年西北大学 Huang 等人报道了世界上第一个 640×512 双波段 InAs/GaSb II 类超晶格红外焦平面探测器, 截止波长分别为 9.5 μm 和 13 μm^[16]; 2013年西北大学量子器件中心制备出了高性能 320×256 中长双色 InAs/GaSb II 类超晶格焦平面探测器^[17]; 2016年西北大学量子器件中心报道了高性能

变偏压三波段短中长三色 InAs/GaSb/AlSb II 类超晶格探测器^[18]。

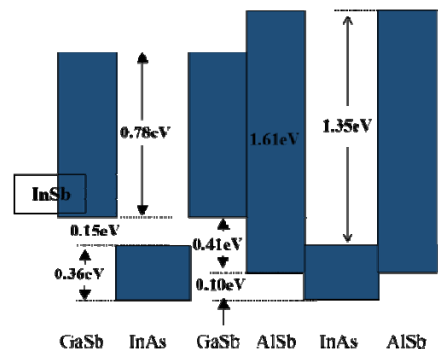
InAs/GaSb 超晶格是由二元材料 InAs 和 GaSb 交替生长构成, 改变超晶格的厚度与组分就能调节微带的位置, 从而实现调节体材料禁带宽度的类似效果^[19-21]。由于 InAs/GaSb II 类超晶格材料较大的电子有效质量及电子空穴对的空间分离, 使得器件具有更低的暗电流^[22-24], 同时具有同 HgCdTe 材料相近的量子效率。同 HgCdTe 材料相比, InAs/GaSb 超晶格在长波、甚长波段截止波长及均匀性的可控性更好。因此在长波、甚长波、双色乃至多色红外探测器的研制 InAs/GaSb 二类超晶格优势明显^[25-27]。近年来, InAs/GaSb II 类超晶格红外焦平面探测器的关键性能得到了迅速的提升, 正逐渐接近 HgCdTe 红外探测器性能, 显示了优良的应用前景。

为了获得高量子效率的长波探测, InAs/GaSb 超晶格周期厚度内的 InAs 厚度需要增加, 而 InAs 与 GaSb 的失配度约为 0.6%, InAs 材料会在 InAs/GaSb 超晶格中引入张应变。随着 InAs 厚度的增加, 引入的张应变会增加, 如果不进行应变控制, 材料会通过应变弛豫形成位错, 从而降低超晶格材料的晶体质量, 增加器件的暗电流和噪声, 导致器件性能的降低。因此 InAs/GaSb 超晶格外延生长时需对其应变进行控制即通过界面引入压应变补偿的方式进行调节整体的应变。

通过在超晶格周期结构内插入适当界面层的方式来实现超晶格材料的应力补偿, 这表明在任何超晶格材料结构中会存在大量的界面层, 从而界面结构与质量会对整个超晶格材料产生重要的影响。通过掌握生长异质界面的控制方法, 对分子束外延过程中各源炉快门开关顺序的设计, 达到控制界面类型, 调控超晶格结构应变状态, 从而实现平均应变越小越好。不同 III-V 族化合物半导体晶格常数及禁带宽度如图 1(a) 所示, InAs 与 GaSb 的带阶如图 1(b)^[28]所示。



(a) 不同 III-V 族化合物半导体的晶格常数及禁带宽度
(a) Energy gap versus lattice constant for the different III-V compound semiconductors



(b) 6.1 Å 化合物半导体能带排布^[28]
(b) 6.1 Å family is underlined: band line up for InAs, GaSb and AlSb

图 1 6.1 Å 材料体系的晶格常数、禁带宽度和能带排列

Fig.1 The lattice constant, bandgap and energy band alignment for these 6.1 Å family materials

对于 MBE 生长超薄异质结来说, 异质结界面的设计及控制是一个主要难点^[29]。由于在界面处阳离子和阴离子的变化, 可以得到两种截然不同的界面结构, 从而实现 Ga-As 或 In-Sb 型键合配置。在超晶格外延过程中处于富 V 族元素氛围生长, 自然生长情况下, 每一层材料生长完后, 表面都会残留该层的 V 族元素原子, 且在下一层材料生长初始掺入进去, 所以在无意识控制界面状态下, 严格意义上形成了“Ga-As-In-Sb”混合型界面^[30-31], 只是 InAs/GaSb 超晶格形成的界面从组分上更接近 InSb-like 界面或 GaAs-like 界面。As 背景掺入 GaSb 中可以形成 $\text{GaAs}_x\text{Sb}_{1-x}$ ($x=0.07\sim 0.30$)^[32]; Sb 掺入 InAs 中的情况不会像 As 掺入 GaSb 中那么严重, 但是研究人员确实观察到 $\text{InSb}_x\text{As}_{1-x}$ 的形成, 其中 x 是 Sb 束流的函数^[33]。

由于界面处发生互混, 超晶格材料的晶格失配会增加, 应变会增大, 易形成位错缺陷, 从而降低超晶格的晶体质量, 增加缺陷中心, 造成对器件光吸收和性能的影响。同时, 无论是 III 族元素还是 V 族元素发生互混都会导致探测波长的漂移, 如 In 和 Ga 的互混会导致波长的红移, As 和 Sb 的互混会导致波长的蓝移。对于长波超晶格材料, 界面控制的难度更大, 在很多外延生长情况下, MBE 快门开关的时间要小于 0.5 s。

本文系统介绍了 MBE 生长 InAs/GaSb II 类超晶格材料界面的控制方法, 包括生长中断法、表面迁移增强法、V 族元素浸润法和体材料生长法; 讨论分析了 InAs/GaSb 超晶格材料界面类型选择的理论依据, 如 InSb 界面和 GaAs 界面的优缺点等; 简述了界面控制具体实施理论, 以及相关研究机构不同红外探测波段 InAs/GaSb 超晶格材料所采用的界面类型及界面外延生长控制方法。

1 InAs/GaSb II 类超晶格界面选择

InAs/GaSb II 类超晶格中, InSb 的价带顶位于 GaSb 的价带顶之上, 这促使空穴有趋向于 InSb 层聚集的特性, 同时插入的 InSb 界面层拓宽了空穴势阱的宽度, 导致超晶格的空穴微带上移, 因此随着 InSb 界面厚度的增加, 其超晶格材料对应的探测波长逐渐红移。GaAs 界面对超晶格材料对应的探测波长的影响分析也类似。

R. H. Miles 等人^[32]通过计算两种类型界面的 InAs/InGaSb 超晶格的吸收系数, 发现 InSb 界面超晶格材料的带隙更小, 吸收更高。计算结果与 D. H. Chow 及其同事^[34-37]发布的霍尔数据非常吻合, 具有 InSb 界面的超晶格结构显示出更高的载流子浓度。

InAs/GaSb 超晶格的光电导数据也表明 InSb 界面比 GaAs 界面具有在更低能量下的吸收边缘。J. Bonnet 等人^[38-39]报道称采用 InSb 界面比采用 GaAs 界面的超晶格质量更好, 同时也允许厚结构的超晶格材料生长, 其总吸收区厚度能达到几微米, 以获得高光学吸收效率^[40]。此外, M. S. Dalryet 等人研究发现, 采用 InSb-like 界面超晶格材料的能带交叠要比采用 GaAs-like 界面的大 30 ± 10 meV, 但 GaAs-like 界面会降低超晶格微带中电子与空穴的波函数交叠程度, 其超晶格带隙 E_g 相对较大, 从而不利于保证超晶格材料的光吸收效率^[41-43]。

由于 In 的偏析效应会导致 GaSb-on-InAs 界面有部分 In 原子掺入进 GaSb 层^[44], 自然形成 InSb-like 界面。同时 Sb 的偏析效应^[45-48], InAs-on-GaSb 界面 Sb 掺入 InAs 层的量过大, InAs 超晶格层会形成 $\text{InAs}_x\text{Sb}_{1-x}$ 界面层^[49]。由于 InSb 的晶格常数为 6.4794\AA , 与 GaSb 的失配度约为 6.5%, 与 InAs 的失配度约为 7%, 当 InSb 界面厚度超过临界厚度发生弛豫时, 会产生大量的位错缺陷, 界面粗糙度增加, 引入缺陷态能级, 导致相应超晶格材料晶体质量下降^[50-52]。根据 Matthews 和 Fritz 报道的公式, 可以求出 InSb 在 GaSb 上外延生长的临界厚度^[53-54], 计算得到的 InSb 层厚度为特定值时可获得零失配, 但实际生长后测量得到的超晶格 InSb 界面层的厚度和计算值之间存在差异。通过实际生长对经验关系式得到的 InSb 界面厚度进行微调, 精确控制参数形成陡峭界面以平衡超晶格与 GaSb 衬底之间的应变, 同时保证良好的超晶格晶体质量。

对于 InAs/GaSb 超晶格在近红外及中波红外探测器方向应用, 由于在超晶格周期中 InAs 层要求比较薄, 如果仅采用 InSb-like 界面必然会使得超晶格与衬底失配过大, 产生位错, 降低探测器性能, 采用混合界面是减少应变, 提高探测器性能的一个折衷办法; 长波(甚长波)超晶格材料需要引入 InSb 层界面压应变补偿来进行应变调控, 但更容易受到界面组分、偏析等外延问题的影响^[55-58]。

2 InAs/GaSb II 类超晶格生长界面控制方法

2.1 界面控制方法

通常对界面形成进行控制的方法主要有生长中断法(interrupted growth epitaxy method)、表面迁移增强法(migration-enhanced epitaxy, MEE)、V 族元素浸润法(As soak, Sb soak)、体材料生长法。具体介绍如下:

1) 生长中断法, 具体是指在某一种超晶格材料层生长完成后停滞一段时间, 在此期间材料层表面处于相应的 V 族束流氛围下或者无 V 族束流保护, 随后继续生长下一种超晶格材料层, 这样就可获得所需界面类型。在中断生长过程中, V 族元素束流的大小和中断时间会对界面形态产生重要影响^[26]。生长中断法中降低 As/Sb 置换反应和 Sb 在 InAs 层中扩散的主要方法有生长速率的降低和较小的 V/III 束流比。无保护中断法快门顺序如图 2(a)所示 IF2 界面。

2) 表面迁移增强法, 主要是指在界面形成过程中利用 III 族原子的高的表面迁移速率在界面沉积一层均匀的原子层形成界面, 即在超晶格界面生长时, III 族与 V 族元素的束源炉快门分别开关。如在 GaSb 层上形成 InSb 界面, 首先在 GaSb 层生长完成后, Sb 束流保持一段时间, 然后关闭 Sb 快门, 无其它束流的情况下单独沉积一层 In 原子, 随后进行 InAs 层的生长, 如此就可得到了所需 InSb 层界面^[50-60]。采用 MEE 界面生长技术, 不仅可以实现对界面结构及界面厚度的精确控制, 同时, 由于一定量的 III 族原子在 GaSb 层表面的提前沉积, 能够有效抑制 As/Sb 置换反应, 提高界面质量, III 族原子起到了 As/Sb 有效隔离的作用。Q. Xie 等人发现, 在 Sb 终止的 GaSb 表面上, 不论 As 束流值为任意大小, 界面均会发生 As/Sb 置换, 促使 Sb 原子从表面析出并脱离表面, 而在 Ga 终止的 GaSb 表面上, 当 As 束流小于某一临界值时, As/Sb 置换反应不会发生^[61]。MEE 控制方法的难点在于实现界面生长时所用束流的精确控制, 特别是 III 族元素的束流, 通过在界面处沉积一层 III 族原子层的方式形成相应的界面层。快门顺序如图 2(b)所示。

3) V 族元素浸润法, 即通过在超晶格界面生长过程中利用 V 族元素之间的置换作用形成所需界面。V 族元素浸润法^[62-64]与无保护中断法^[26]在控制界面形成的原理上是一致的, 都是利用了界面处 As/Sb 的

交换反应。如在 InAs-on-GaSb 界面形成 GaAs-like 界面可采用在 GaSb 沉积完成之后进行 As soak。

4) 体材料生长法, 顾名思义, 即直接外延生长所需界面类型材料。体材料生长法一般与生长中断法相结合进行界面控制。如与无保护中断法结合控制快门顺序, 如图 2(a)所示 IF1 界面。

迁移增强外延生长过程中, 由于 III 族元素单独沉积生长时缺少与 V 族元素的成键, 也称之为 V 族限制生长的模式。类似于生长中断法的界面生长方法在其他文献报道中被称为传统的分子束外延^[65]。传统分子束外延实现界面生长时, III 族与 V 族的束源炉的快门同时开关。无论是传统的分子束外延还是表面迁移增强外延都是基于分子束外延技术, 只是根据生长方式的不同, 人为地进行了标定。

2.2 界面控制方法对比分析

根据已有的文献报道^[59,66], 在 GaSb-on-InAs 界面, 由于 In-Sb 的结合能小于 In-As 的结合能, Sb 原子难以置换出 InAs 层表面以下部分的 As 原子, 所以一般在 InAs 层表面形成 InSb 界面, 才能使整个超晶格材料体系的表面能最低。GaSb-on-InAs 界面不存在 As 的偏析情况, 因而需要考虑的是减少 InAs 层表面残留的 As 原子进入 GaSb 层以及降低 As 压。相关研究机构采用直接生长 InSb 层的方法人为形成 InSb 界面, 从而达到减少界面处 As 原子对 GaSb 层的掺入量。在 InAs-on-GaSb 界面, Sb 原子的偏析主要集中在第一个 InAs 原子层, 并且随 InAs 层厚度呈指数衰减。

若通过 Sb soak 来获得陡峭 InSb-like 界面, 只增加 Sb soak 时间, 超晶格的一级峰的半峰宽 (full-width half-maximum, FWHM) 和超晶格与衬底的晶格失配不会发生显著变化, 对超晶格表面形貌的影响也较小, 因而通过控制 Sb soak 时间可实现对超晶格应变的细微调整^[62]。若通过优化 As soak 参数来获得陡峭界面, InAs-on-GaSb 界面的 As soak 束流和时间决定

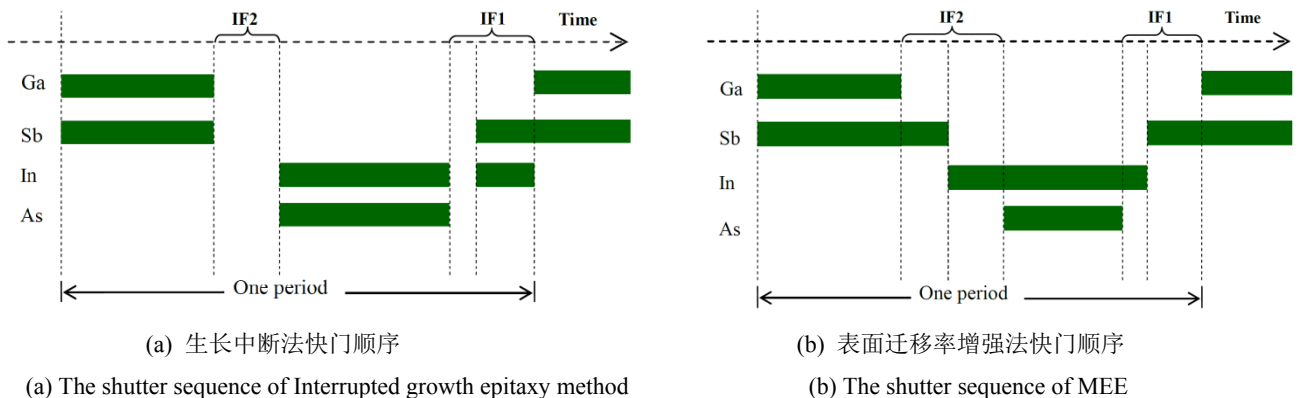


图 2 界面控制方法快门顺序^[28]

Fig.2 The shutter sequence based on the interface control method

了界面厚度。As soak 束流要足够高才能有效地移除 GaSb 层表面的 Sb 原子且避免表面分解, 同时, 又不能太高, 太高的束流值会导致在超晶格材料中产生非辐射点缺陷。过大的 As 束流会造成界面基本成为 InAs 层, 从而无法起到相应地应力补偿作用。为了提高应力补偿作用, 必要的措施是有效地降低 As 的组分, 方法之一就是采用小的 As 束流, 但太小的 As 束流会降低 InAs 层的晶体质量。这同样适用于 As soak 时间^[67-68]。仅仅通过驱动阴离子混合反应的力, 获得陡峭的 InAs/GaSb 界面是有一定难度的。这是因为 GaSb 中 As-for-Sb 交换的减少需要抑制平衡 GaAs 相, 而 InAs 中 Sb 掺入的减少需要增强平衡 InAs 相。因此, 减少 Sb 掺入的生长条件将倾向于增加 As 交换, 反之亦然。

综上所述, 生长中断法实际上难以精确控制界面的厚度, 也无法阻止界面反应的发生。仅仅采用长时间 V 族元素浸润法可以形成 GaAs-like 或者 InSb-like 界面, 但不能通过合适地控制得到高质量的陡峭界面。与其相比, MEE 法在抑制 V 族元素互混方面具有显著的优势, 迁移增强外延可有效地获得更长的 III 族元素扩散长度, 从而有利于外延层的二维生长, 尤其是异质界面结构的外延, 形成陡峭界面。但是生长中断法的控制要求相对简单, 在设备控制精度 (III 族束流、快门开关时间) 受限制的情况下这种方法则是一种生长短周期超晶格较为可行的手段。

3 InAs/GaSb 超晶格界面控制生长实例分析

魏亚军等人^[22,50]通过紧束缚的理论计算证明短波超晶格材料界面组分与中波超晶格材料的界面组分接近。对于短波 (中波) InAs/GaSb 超晶格材料, 界面采用 mixed-like 界面, 控制方法以生长中断法为主; 长波 (甚长波) 超晶格材料界面采用 InSb-like 界面, 控制方法采用表面迁移增强法 (MEE) 或 Sb soak 法及体材料生长相结合。

对于不同红外探测波段的超晶格材料, 相关研究机构对于超晶格界面类型及控制方法的选择也不尽相同。对于短波 (中波) InAs/GaSb 超晶格材料, 国内以中国科学院的文献报道为例, 性能最优的 4ML (monolayer, ML) InAs/8ML GaSb 超晶格、7ML InAs/7ML GaSb 超晶格和 8ML InAs/8ML GaSb 超晶格均采用 mixed-like 界面, 界面控制方法是生长中断法, 若形成 InSb-like 界面则通过 MEE 法^[69]或 Sb soak^[70]控制形成。文献报道的 12ML InAs/12ML GaSb 超晶格材料分别采用 MEE 法和传统的分子束外延生长法, 证明 MEE 界面控制方法更有利于 InSb-like 界面的生长^[58], 快门顺序如图 3 所示。

波兰研究人员报道的中波 9ML InAs/9ML GaSb 超晶格材料, InAs-on-GaSb 界面通过 As soak 形成 GaAs-like 界面, GaSb-on-InAs 界面通过 Sb soak 形成 InSb-like 界面^[67]。

蒙彼利埃大学文献报道的中波 10ML InAs/10ML GaSb 超晶格材料, 在 GaSb-on-InAs 界面插入 1ML 的 InSb 层, 采用无保护中断法和体材料生长 (传统分子束外延) 来形成界面^[27], 快门顺序如图 2(a) 所示。

对于长波 InAs/GaSb 超晶格材料, 半导体研究所报道的长波 (8~14 μm) 超晶格材料 (12ML InAs+0.8ML InSb/8ML GaSb+0.8ML InSb) 中的 InSb-like 界面采用的控制方法为 MEE 法^[22], 快门顺序如图 3(a) 所示。

文献^[71]报道的长波超晶格 Pin 结构包含 0.5 μm GaSb(Be) buffer, 100 周期的 8ML InAs/8ML GaSb(Be), 300 周期的 13ML InAs/8.5ML GaSb, 100 周期的 8ML InAs(Si)/8ML GaSb, 200Å InAs(Si)。采用 InSb-Like 界面的超晶格 50%截止波长为 9.6 μm, mixed-like 界面的超晶格 50%截止波长为 10.0 μm。InSb 界面控制方法为体材料生长、Sb soak 及无保护中断相结合; Mixed-like 界面为底部为 GaAs-Like, 顶部为 InSb-Like。快门顺序如图 4 所示。

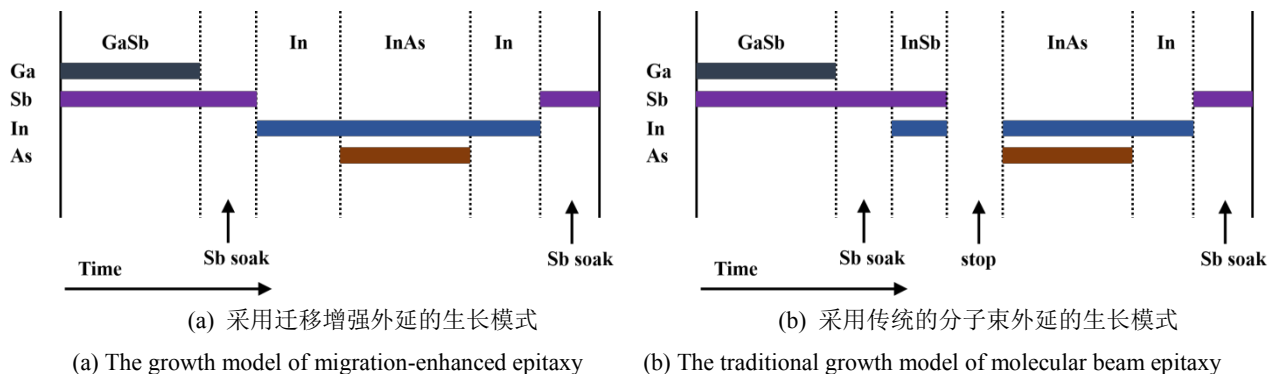


图 3 超晶格样品在外延生长时快门开关顺序示意图^[68]

Fig.3 Diagram of the shutter sequence during epitaxy growth of InAs/GaSb superlattice samples

新墨西哥大学报道的截止波长为 $\sim 8\ \mu\text{m}$ (300 K) 的 13ML InAs/7ML GaSb 超晶格材料在 GaSb-on-InAs 界面上采用体材料生长的控制方法形成 InSb 层。比如其报道的 nBn 探测器的吸收区域由 322 个周期[1s As Soak time/13ML InAs/0.45ML InSb/7ML GaSb] SLs 组成或吸收区为 13ML InAs/0.73ML InSb/7ML GaSb SLs(300 周期), 上接触层和下接触层均为 13ML InAs(Si)/0.73ML InSb/7ML GaSb SLs 均是采用的 InSb 界面^[51,66]。

对于甚长波 InAs/GaSb 超晶格材料, 半导体研究所报道的吸收层为 15.2ML InAs/10ML GaSb 超晶格 (50%截止波长为 $13.1\ \mu\text{m}$) 和吸收层为 16.2ML

InAs/10.75ML GaSb 超晶格(50%截止波长为 $14.5\ \mu\text{m}$) 的 Pin 器件结构, 均采用的体材料生长和 Sb soak 结合的控制方法形成 InSb 界面^[72], 界面控制快门顺序如图 4(a)所示。

海军研究实验室报道的相关文献^[73]提出为了确保良好的界面, 界面的生长由表面迁移增强外延控制。如文献报道的结构为 8ML InAs/12 ML GaSb 和 1ML InSb 或 GaAs(指定为 8-12-1), 以及 8-8-1 和 12-8-1 均是通过采用 MEE 法来改变界面类型。

国内外相关科研机构所采用的不同探测波段的超晶格材料界面具体控制, 如表 1 和表 2 所示。

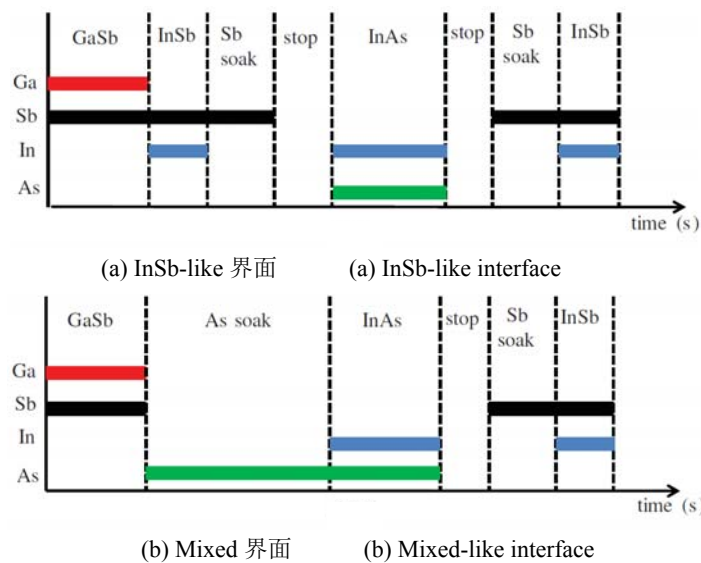


图 4 超晶格一个周期生长的快门顺序^[58]

Fig.4 The shutter sequence of a periodic growth of InAs/GaSb superlattices

表 1 国内相关科研机构所采用的不同探测波段的超晶格界面类型与控制方法

Table 1 The interface types and control methods of InAs/GaSb superlattices in different detection wavelength bands adopted by related research institutions in China

Research institutions in China	InAs/GaSb SLs structure (band)	Interface types and interface control methods	Year
	4ML InAs/8MLGaSb SLs (short wave- length)	Mixed-like interface; if InSb-like interface is formed (MEE method)	2008 ^[69]
	50 periods of 4MLInAs/8MLGaSb SLs (short-wavelength)	InAs-on-GaSb interface adopt interrupted growth epitaxy method; GaSb-on-InAs interface (InSb-like interface) adopts Sb soak method	2009 ^[70]
Institute of Semiconductors	InAs/GaSb (4ML/8ML) SLs and InAs/GaSb(8ML/8ML) SLs	Interrupted growth epitaxy method (a combination of unprotected interruption with bulk material growth method or conventional molecular beam epitaxy)	
	Long-wavelength SLs PIN structure	InSb interface; mixed-like interface: InAs-on-GaSb interface adopts GaAs-Like (As soak), GaSb-on-InAs interface adopts InSb-Like (a combination of bulk material growth, unprotected interruption and V group element soak)	2011 ^[71]

	Long-wavelength SLs Pin device: absorption layer consists of 15.2ML InAs/10ML GaSb SLs or absorption layer consists of 16.2ML InAs/10.75ML GaSb SLs	InSb interface	2012 ^[72]
	Mid-wavelength SLs (7ML InAs/7ML GaSb)	Interrupted growth epitaxy method	
	Long-wavelength SLs (12ML InAs+0.8ML InSb/8ML GaSb+0.8 ML InSb)	InSb-like interface (MEE method)	2012 ^[22]
Shanghai Institute of Technical Physics	9ML InAs/12ML GaSb SLs p-i-n structure (Mid-wavelength)	InSb interface (MEE method)	2011 ^[74]
	15ML InAs/7ML GaSb SLs PBIN structure	InSb interface (MEE method)	2013 ^[75]
	50 periods of 12ML InAs/12ML GaSb SLs	InSb-like interface (MEE method)	2014 ^[68]

表 2 国外相关科研机构所采用的不同探测波段的超晶格界面类型与控制方法

Table 2 The interface types and control methods of InAs/GaSb superlattices in different detection wavelength bands adopted by foreign related research institutions

Foreign Research Institutions	InAs/GaSb SLs structure (band)	Interface types and interface control methods	Year
Université de Montpellier and Northwestern University	An InAs/GaSb heterojunction allows a layer by layer growth mode	InSb-like interface (MEE method)	2000 ^[39]
Université de Montpellier	10MLInAs/10MLGaSb SLs	GaSb-on-InAs interface (InSb interface) adopts a combination of bulk material growth method and unprotected interrupted growth epitaxy method (conventional molecular beam epitaxy)	2004 ^[26]
University of New Mexico	13ML InAs/7ML GaSb SLs (~8-μm cutoff wavelength(300 K))	GaSb-on-InAs interface (InSb interface) adopts bulk material growth method or Sb-soak	2008 ^[62]
	Absorption region of NBN detector: 322 periods of [1s As Soak time/13ML InAs/0.45ML InSb/7MLGaSb] SLs	InSb interface (bulk material growth method)	
	Absorption region of NBN detector: 13ML InAs/0.73ML InSb/7ML GaSb SLs (300 periods), contact layer: 13ML InAs (Si)/0.73ML InSb/7ML GaSb SLs	InSb interface (bulk material growth method)	2010 ^[49]
Naval Research Laboratory(NRL)	40 periods of SLs structure: 8ML InAs/12ML GaSb and 1ML InSb or GaAs (8-12-1), as well as 8-8-1 and 12-8-1	Using MEE method to change the interface type ^[73]	
Institute of Electron Technology, Poland	9ML InAs/9ML GaSb SLs	InAs-on-GaSb interface adopts GaAs-like (As soak); GaSb-on-InAs interface adopts InSb-like (Sb soak)	2011 ^[67]

除了研究人员熟知的常规界面控制方法快门顺序外,界面进行结构设计还可以在界面控制方法不变的基础上进行不同快门顺序的实验设计。根据相关机构报道的文献^[68], InSb-like 界面控制方法仍是采用 MEE 法或和 Sb soak 法及生长中断法相结合等,实验主要是快门开关时间和次数的改变,具体实例为在 InAs 层生长完成后,停滞一段时间,该时间为 t_1 ,这

段时间的停顿可以使得 As 背景尽量被抽走,紧接着打开 Sb 快门, Sb 束流持续一段时间 t_2 后再关闭 Sb 快门,促使材料层表面存在一定量的 Sb,从而实现接下来的 In 沉积时更多地与 Sb 结合形成 InSb。通过改变此快门设计中时间 t_1 和 t_2 的大小,有效地降低界面处 As 的组分,从而实现失配度的更有效降低。实例的快门顺序如图 5 所示。

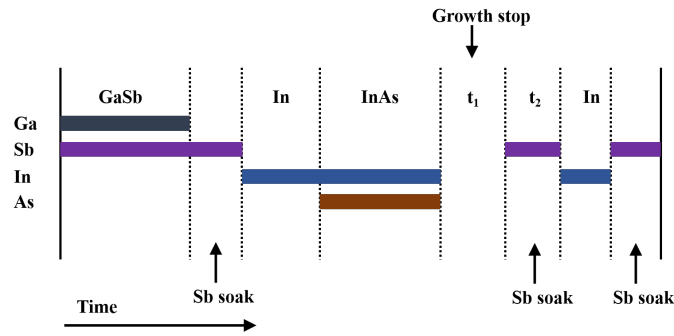


图 5 在界面控制方法不变的基础上进行不同快门顺序设计^[68]

Fig.5 The experimental design of different shutter sequences based on the interface control method

4 总结

本文系统介绍了 MBE 生长 InAs/GaSb II 类超晶格材料界面的控制方法大致分为生长中断法、表面迁移增强法、V 族元素浸润法和体材料生长法,概述了不同红外探测波段的 InAs/GaSb 超晶格材料的界面结构的选择及相应界面外延生长控制方法。对于短波(中波) InAs/GaSb 超晶格材料,界面采用 mixed-like 界面,控制方法以生长中断法为主;长波(甚长波)超晶格材料界面采用 InSb-like 界面,控制方法采用 MEE 法或 Sb soak 法及体材料生长相结合。讨论分析了 InAs/GaSb 超晶格材料界面类型选择的依据,并简单阐述了界面控制具体实施理论,综述了相关研究机构不同红外探测波段超晶格材料所采用的界面类型及界面外延生长控制方法。通过界面结构设计来有效地提高所引入的界面层的应力补偿效果,这对于长波(甚长波)超晶格材料具有重要意义。

参考文献:

[1] Sai-Halasz G A, Tsu R, Esaki L. A new semiconductor superlattice[J]. *Applied Physics Letters*, 1977, **30**(12): 651-653.
[2] Esaki L. InAs-GaSb superlattices-synthesized semiconductors and semimetals[J]. *Journal of Crystal Growth*, 1981, **52**(1): 227-240.
[3] Smith D L, Mailhlot C. Proposal for strained type II superlattice infrared detectors[J]. *Journal of Applied Physics*, 1987, **62**(6): 2545-2548.
[4] Mailhlot C, Smith D L. Electronic structure of (001) and (111) growth axis InAs-Ga_{1-x}In_xSb strained-layer superlattices[J]. *J. Vac. Sci. Technol. B.*, 1987, **5**(4): 1268-1273.

[5] Chow D H, Miles R H, Sderstrm J R, et al. Growth and characterization of InAs-Ga_{1-x}In_xSb strained-layer superlattices[J]. *Applied Physics Letters*, 1990, **56**(15): 1418-1420.
[6] YANG M J, Bennett B R. InAs/GaSb infrared photovoltaic detector at 77 K[J]. *Electronics Letters*, 1994, **30**(20): 1710-1711.
[7] Fuchs F, Weimer U, Pletschen W, et al. High performance InAs/Ga_{1-x}In_xSb superlattice infrared photodiodes[J]. *Applied Physics Letters*, 1997, **71**(22): 3251-3253.
[8] Manijeh Razeghi, Yajun Wei, Junjik Bae, et al. Type II InAs/GaSb superlattices for high-performance photodiodes and FPAs[A]. *Proc. of SPIE[C]*//2003, **5246**: 501-511.
[9] Razeghi M, Wei Y, Hood A, et al. Type II superlattice photodetectors for MWIR to VLWIR focal plane arrays[C]//*Proc. of SPIE*, 2006, **6206**: 62060N.
[10] Robert Rehm, Martin Walther, Johannes Schmitz, et al. 2nd and 3rd generation thermal imagers based on type-II superlattice photodiodes [C]//*Proc. of SPIE*, 2006, **6294**: 6294041-6294047.
[11] Rodriguez J B, Plis E, Bishop & G, et al. nBn structure based on InAs/GaSb type-II strained layer superlattices[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **91**(4): 043514.
[12] Kim H S, Plis E, Rodriguez J B, et al. Mid-IR focal plane array based on type-II InAs/GaSb strain layer superlattice detector with nBn design[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **92**(18): 183502.
[13] Gunapala S D, Ting D Z, Hill C J, et al. Demonstration of 1 k×1 k long-wave and mid-wave superlattice infrared focal plane array [C]//*SPIE*, 2010, **7808**: 78080201-78080206.

- [14] HUANG K W, Haddadi A, CHEN G, et al. Type-II superlattice dual-band LWIR imager with M-barrier and Fabry-Perot resonance[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(13): 2560-2.
- [15] Gautam N, Naydenkov M, Myers S, et al. Three color infrared detector using InAs/GaSb superlattices with unipolar barriers[J]. *Appl. Phys. Lett.* 2011, **98**: 121106.
- [16] Edward Kwei-wei Huang, Manijeh Razeghi. World's first demonstration of type-II superlattice dual band 640×512 LWIR focal plane array[C]//*Proc. of SPIE*, 2012, **8268**: 82680Z.
- [17] Razeghi M, Haddadi A, Hoang A M, et al. High-performance bias-selectable dual-band mid-/long -wavelength infrared photodetectors and focal plane arrays based on InAs/GaSb Type-II superlattices[J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2013, **8704**: 87040S.
- [18] Hoang A M, Dehzangi A, Adhikary S, et al. High performance bias-selectable three-color short-wave/mid-wave/long-wave infrared photodetectors based on type-II InAs/GaSb/AlSb superlattices[J]. *Rep.*, 2016, **6**: 24144.
- [19] Rogalski A, Antoszewski J, Faraone L. Third-generation infrared photodetector arrays[J]. *Journal of applied physics*, 2009, **105**(9): 4.
- [20] Mir R N, Frensley W R. Electrical design of InAs-Sb/GaSb superlattices for optical detectors using full band structure sp^{3s*} tight-binding method and Bloch boundary conditions[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, **114**(15): 153706.
- [21] Nguyen B M, Bogdanov S, Pour S A, et al. Minority electron unipolar photodetectors based on type II InAs/GaSb/AlSb superlattices for very long wavelength infrared detection[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, **95**(18): 183502.
- [22] WEI Y, Razeghi M, Brown G J, et al. Modeling type-II InAs/GaSb superlattices using empirical tight-binding method: new aspects[C]//*Quantum Sensing and Nanophotonic Devices*, International Society for Optics and Photonics, 2004, **5359**: 301-309.
- [23] Rogalski A. New material systems for third generation infrared detectors[C]//*Ninth International Conference on Correlation Optics*, International Society for Optics and Photonics, 2009, **7388**: 73880J.
- [24] Tobin S P, Hutchins M A, Norton P W. Composition and thickness control of thin LPE HgCdTe layers using x-ray diffraction[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2000, **29**(6): 781-791.
- [25] Grein C H, Young P M, Flatte M E, et al. Long wavelength InAs/InGaSb infrared detectors: optimization of carrier lifetimes[J]. *Journal of Applied Physics*, 1995, **78**(12): 7143-7152.
- [26] Rodriguez J B, Christol P, Cerutti L, et al. MBE growth and characterization of type-II InAs/GaSb superlattices for mid-infrared detection[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2005, **274**(1): 6-13.
- [27] Fuchs F, Weimer U, Pletschen W, et al. High performance InAs/Ga_{1-x}In_xSb superlattice infrared photodiodes[J]. *Applied physics letters*, 1997, **71**(22): 3251-3253.
- [28] 王国伟. 中长波 InAs/GaSb II类超晶格材料与红外探测器[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2012.
WANG Guowei. Mid-wavelength and Long-wavelength InAs/GaSb Type-II Superlattices Material and Infrared Photodiodes[D]. Beijing: Institute of Semiconductors Chinese Academy of Sciences Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2012.
- [29] Yano M, Yokose H, Iwai Y, et al. Surface-reaction of III-V compound semiconductors irradiated by As and Sb molecular-beams[J]. *J. Cryst Growth*, 1991, **111**(1-4): 609.
- [30] Twigg M E, Bennett B R, Thibado P M, et al. Interfacial disorder in InAs/GaSb superlattices[J]. *Philosophical Magazine A*, 1998, **77**(1): 7-30.
- [31] Jackson E M, Boishin G I, Aifer E H, et al. Arsenic cross-contamination in GaSb/InAs superlattices[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2004, **270**(3-4): 301-308.
- [32] Chow D H, Miles R H, Hunter A T. Effects of interface Stoichiometry on the structural and electronic-properties of Ga_{1-x}In_xSb/InAs superlattices [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 1992, **10**(2): 888-91.
- [33] WANG M W, Collins D A, McGill T C, et al. Ray photoelectron spectroscopy investigation of the mixed anion GaSb/InAs heterointerface[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 1993, **11**(4): 1418-22.
- [34] Bennett B R, Shanabrook B V, Wagner R J, et al. Interface composition control in InAs/GaSb superlattices[J]. *Solid-state Electronics*, 1994, **37**(4-6): 733-737.
- [35] Chow D H, Miles R H, Hunter A T, et al. Effects of interface stoichiometry on the structural and electronic properties of Ga_{1-x}In_xSb/InAs superlattices[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 1992, **10**(2): 888-891.
- [36] Omaggio J P, Meyer J R, Wagner R J, et al. Determination of band gap and effective masses in InAs/GaInSb Superlattices[J]. *Appl. Phys. Lett.* 1992, **61**(2): 207-209.
- [37] Youngdale E R, Meyer J R, Hoffman C A, et al. Recombination lifetime in InAs-GaInSb superlattices[J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 1994, **12**(2): 1129-1135.
- [38] Thibado P M, Bennett B R, Twigg M E, et al. Origins of interfacial disorder in GaSb/InAs superlattices[J]. *Applied Physics Letters*, 1995, **67**(24): 3578-3580.
- [39] Tahraoui A, Tomasini P, Lassabatere L, et al. Growth and optimization of InAs/GaSb and GaSb/InAs interfaces[J]. *Applied Surface Science*, 2000, **162**: 425-429.

- [40] Schmitz J, Wagner J, Fuchs F, et al. Optical and structural investigations of intermixing reactions at the interfaces of InAs/AlSb and InAs/GaSb quantum wells grown by molecularbeam epitaxy[J]. *Journal of Crystal Growth*, 1995, **150**(1): 858-862.
- [41] Booker G R, Klipstein P C, Lakrimi M, et al. Growth of InAs/GaSb strained layer superlattices II[J]. *Journal of Crystal Growth*, 1995, **146**(1-4): 495-502.
- [42] Daly M S, Symons D M, Lakrimi M, et al. Interface composition dependence of the band offset in InAs/GaSb [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 1996, **11**(5): 823-6.
- [43] Young M H, Chow D H, Hunter A T, et al. Recent advances in Ga_{1-x}In_xSb/InAs superlattice IR detector materials[J]. *Applied Surface Science*, 1998, **123-124**: 395-399.
- [44] Steinshnider J, Weimer M, Kaspi R, et al. Visualizing interfacial structure at non-common-atom heterojunctions with cross-sectional scanning tunneling microscopy[J]. *Physical Review Letters*, 2000, **85**(14): 2953-2956.
- [45] Steinshnider J, Harper J, Weimer M, et al. Origin of antimony segregation in GaInSb/InAs strained-layer superlattices[J]. *Physical Review Letters*, 2000, **85**(21): 4562-4565.
- [46] Feenstra R M, Collins D A, Mcgill T C, et al. Scanning tunneling microscopy of InAs/GaSb superlattices with various growth conditions[J]. *Superlattices and Microstructures*, 1994, **15**(2): 215-220.
- [47] Nosho B Z, Bennett B R, Whitman L J, et al. Effects of As₂ versus As₄ on InAs/GaSb heterostructures: As-for-Sb exchange and film stability[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2001, **19**(4): 1626-1630.
- [48] Nosho B Z, Barvosacar W, Yang M J, et al. Interpreting interfacial structure in cross-sectional STM images of III-V semiconductor heterostructures[J]. *Surface Science*, 2000, **465**(3): 361-371.
- [49] Plis E, Khoshakhlagh A, Myers S, et al. Molecular beam epitaxy growth and characterization of type-II InAs/GaSb strained layer superlattices for long-wave infrared detection[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena*, 2010, **28**(3): C3G13-C3G18.
- [50] WEI Y J, Razeghi M. Modeling of type-II InAs/GaSb superlattices using an empirical tight-binding method and interface engineering[J]. *Physical Review B*, 2004, **69**(8): 085316.
- [51] Szmulowicz F, Haugan H J, Brown G J, et al. Interfaces as design tools for short-period InAs/GaSb type-II superlattices for mid-infrared detectors[J]. *Opto-Electronics Review*, 2006, **14**(1): 71-7.
- [52] Luna E, Satpati B, Rodriguez J B, et al. Interfacial intermixing in InAs/GaSb short-period-superlattices grown by molecular beam epitaxy[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **96**(2): 021904 .
- [53] Matthews J W, Blakeslee A E. Defects in epitaxial multilayers: I. Misfit dislocations[J]. *Journal of Crystal Growth*, 1974, **27**: 118-125.
- [54] Fritz I J, Picraux S T, Dawson L R, et al. Dependence of critical layer thickness on strain for In_xGa_{1-x}As/GaAs strained - layer superlattices[J]. *Applied Physics Letters*, 1985, **46**(10): 967-969.
- [55] Razeghi M, WEI Y, GIN A, et al. High performance type II InAs/GaSb superlattices for mid, long, and very long wavelength infrared focal plane arrays[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, **5783**: 86-97.
- [56] WEI Y, Hood A, Yau H, et al. High-performance type-II InAs/GaSb superlattice photodiodes with cutoff wavelength around 7 μm[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, **86**(9): 091109.
- [57] Haugan H J, Szmulowicz F, Mahalingam K, et al. Short-period InAs/GaSb type-II superlattices for mid-infrared detectors[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, **87**(26): 261106.
- [58] ZHANG X, Ryou J, Dupuis R D, et al. Improved surface and structural properties of InAs/GaSb superlattices on (001) GaSb substrate by introducing an InAsSb layer at interfaces[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **90**(13): 131110.
- [59] Sullivan G J, Ikhlassi A, Bergman J, et al. Molecular beam epitaxy growth of high quantum efficiency InAs/GaSb superlattice detectors[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 2005, **23**(3): 1144-1148.
- [60] Waterman J R, Shanabrook B V, Wagner R J, et al. The effect of interface bond type on the structural and optical properties of GaSb/InAs superlattices[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 1993, **8**(1S): S106.
- [61] XIE Q, Van Nostrand J E, Brown J L, et al. Arsenic for antimony exchange on GaSb, its impacts on surface morphology, and interface structure[J]. *J. Appl. Phys.*, 1999, **86**(1): 329-37.
- [62] Khoshakhlagh A, Plis E, Myers S, et al. Optimization of InAs/GaSb type-II superlattice interfaces for long-wave (~ 8 μm) infrared detection[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2009, **311**(7): 1901-1904.
- [63] ZHONG M, Steinshnider J, Weimer M, et al. Combined x-ray diffraction/scanning tunneling microscopy study of segregation and interfacial bonding in type-II heterostructures[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 2004, **22**(3): 1593-1597.
- [64] Plis E, Annamalai S, Posani K T, et al. Midwave infrared type-II InAs/GaSb superlattice detectors with mixed interfaces[J]. *J. Appl. Phys.*, 2006, **100**(1): 4.
- [65] Horikoshi Y, Kawashima M, Yamaguchi H. Migration-enhanced epitaxy of GaAs and AlGaAs[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1988, **27**(part 1): 169-179.

- [66] Gadaleta C, Scamarcio G, Fuchs F, et al. Influence of the interface bond type on the far-infrared reflectivity of InAs/GaSb superlattices[J]. *Journal of Applied Physics*, 1995, **78**(9): 5642-5644.
- [67] Jasik A, Sankowska I, Pierścinska D, et al. Blueshift of bandgap energy and reduction of non-radiative defect density due to precise control of InAs-on-GaSb interface in type-II InAs/GaSb superlattice[J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, **110**(12): 123103.
- [68] 徐志成. InAs/GaSb II 类超晶格探测器结构 MBE 生长研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2014.
XU Zhicheng. Study on the Molecular Beam Epitaxy Growth of InAs/GaSb type II Superlattice Infrared Detection Structure[D]. Beijing: Institute of Semiconductors Chinese Academy of Sciences Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [69] Guo Jie, Sun Wei-Guo, Peng Zhen-Yu, et al. Interfaces in InAs/GaSb superlattices grown by molecular beam epitaxy[J]. *Chinese Physics Letters*, 2009, **26**(4): 047802.
- [70] 周志强. InAs/GaSb 超晶格及量子点材料生长研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2009.
ZHOU Zhiqiang. Study on the Growth of InAs/GaSb Superlattices and Quantum Dots[D]. Beijing: Institute of Semiconductors Chinese Academy of Sciences Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2009.
- [71] ZHANG Y, MA W, CAO Y, et al. Long wavelength infrared InAs/GaSb superlattice photodetectors with InSb-like and mixed interfaces[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2011, **47**(12): 1475-1479.
- [72] WEI Y, MA W, ZHANG Y, et al. High structural quality of type II InAs/GaSb superlattices for very long wavelength infrared detection by interface control[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2012, **48**(4): 512-515.
- [73] Twigg M E, Bennett B R, Shanabrook B V, et al. Interfacial roughness in InAs/GaSb superlattices[J]. *Applied Physics Letters*, 1994, **64**(25): 3476-3478.
- [74] 徐庆庆, 陈建新, 周易, 等. InAs/GaSb 超晶格中波焦平面材料的分子束外延技术[J]. *红外与毫米波学报*, 2011, **30**(5): 406-408.
XU Qingqing, CHEN Jianxin, ZHOU Yi, et al. Mid-wavelength infrared InAs/GaSb superlattice grown by molecular beam epitaxy[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2011, **30**(5): 406-408.
- [75] 周易, 陈建新, 徐庆庆, 等. 长波 InAs/GaSb II 类超晶格红外探测器[J]. *红外与毫米波学报*, 2013, **32**(3): 210-213.
ZHOU Yi, CHEN Jianxin, XU Qingqing, et al. Long wavelength infrared detector based on type-II InAs/GaSb superlattice[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2013, **32**(3): 210-213.