

〈材料与器件〉

InAs/GaSb II 类超晶格材料界面特性的表征分析

任洋, 覃钢, 李俊斌, 杨晋, 李艳辉, 杨春章, 孔金丞

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要: 本文系统地介绍了国内外研究机构对超晶格界面进行研究时采用的测试分析手段。其中, 通过拉曼光谱、高分辨率透射电子显微镜 (HRTEM)、扫描隧道显微镜 (STM)、二次离子质谱 (SIMS)、X 射线光电子能谱 (XPS) 等测试方法可以对 InAs/GaSb II 类超晶格材料界面类型、界面粗糙度、陡峭性等特性进行测试分析, 从而评估超晶格界面质量。光致发光谱 (PL 谱)、高分辨率 X 射线衍射 (HRXRD)、霍尔测试、吸收光谱等测试方法则可以研究超晶格界面质量对超晶格材料能带、晶体质量、光学性质的影响。

关键词: InAs/GaSb II 类超晶格; InSb-like 界面; GaAs-like 界面; 陡峭性

中图分类号: TN215, TN304 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2022)02-0115-08

Characterization and Analysis of Interface Characteristics of InAs/GaSb Type-II Superlattice Materials

REN Yang, QIN Gang, LI Junbin, YANG Jin, LI Yanhui, YANG Chunzhang, KONG Jincheng

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: This article systematically introduces the testing and analysis methods used by domestic and foreign research institutions to study the superlattice interface. To evaluate the quality of the superlattice interface, the InAs/GaSb type-II superlattice interface type, interface roughness, abruptness, and other characteristics can be tested and analyzed using Raman spectroscopy, high-resolution transmission electron microscopy, a scanning tunneling microscope, secondary ion mass spectroscopy, and X-ray photoelectron spectroscopy. Photoluminescence spectroscopy, high-resolution X-ray diffraction, Hall measurements, and absorption spectroscopy can be used to study the effect of the superlattice interface quality on the energy band, crystal quality, and optical properties of superlattice materials.

Key words: InAs/GaSb type-II superlattice, InSb-like interface, GaAs-like interface, abruptness

0 引言

二元材料 InAs 和 GaSb 交替生长的 InAs/GaSb 超晶格 (superlattice, SL) 体系, 由于其特殊的 II 型离隙型能带排列^[1-3], 具有能带结构设计灵活 (有效带隙可以从 0 到 250 meV 连续可调, 实现探测波长 3~30 μm 范围的变化)、有效抑制俄歇复合、量子效率高等优点, 使得其在红外探测领域得到广泛的关注, 成为国内外众多研究机构的研究焦点^[4-7]。因为其具有与碲镉汞材料相当的光电性能, 与碲镉汞材料一起成为第三代红外探测器的首选材料^[8]。

由于 InAs/GaSb 超晶格材料中 InAs 的晶格常数

比 GaSb 的小 0.6%, 且高质量的超晶格结构生长在 GaSb 衬底上, 所以在每个周期中需插入适当的界面层 (interfaces, IFs) 以实现应力补偿, 这意味着在每一个超晶格探测结构中将存在大量的界面层, 从而界面结构与其质量将会对外延的整个超晶格材料的质量产生重要的影响。因为 InAs 和 GaSb 的 III、V 族原子均不相同, 所以 InAs/GaSb 超晶格界面会形成两种不同的界面类型: GaAs 界面和 InSb 界面。而实际材料生长时界面不可能是完全的 GaAs 或 InSb 界面, 所以这两种界面通常被称为 GaAs-like 界面和 InSb-like 界面。这两种不同的界面类型, 不论是对超晶格的材料质量还是器件性能的影响都是不同的。一

收稿日期: 2020-10-19; 修订日期: 2022-01-19.

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.

般认为, InSb-like 界面类型要优于 GaAs-like 界面, 使用 GaAs-like 界面的超晶格, 界面更为粗糙, 而界面粗糙度会引入缺陷态能级, 导致相应超晶格材料光学质量下降^[9-11]。

为了实现高性能红外探测器, 必须制备出高质量的 InAs/GaSb 超晶格材料, 而获得高质量的超晶格材料的关键在于获得平整陡峭的界面以及选择合适的界面平衡超晶格和衬底的应变。为此, 通过各种测试分析手段对超晶格界面质量的表征, 研究超晶格界面对超晶格材料晶体质量、能带结构、光电性质的影响就成了从事二类超晶格材料生长研究人员最关心的问题^[12]。

本文详细介绍了国内外研究机构利用光致荧光光谱 (photoluminescence spectroscopy, PL 谱)、高分辨 X 射线衍射仪 (high-resolution X-ray diffraction, HRXRD)、拉曼光谱、二次离子质谱 (secondary ion mass spectrometry, SIMS)、高分辨透射电子显微镜 (high-resolution transmission electron microscopy, HRTEM)、扫描隧道显微镜 (scanning tunneling microscope, STM)、X 射线光电子能谱 (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS)、霍尔测试及吸收光谱等测试表征技术对超晶格界面特性的研究, 讨论了 InAs/GaSb 超晶格材料的界面类型的判定、界面陡峭性及粗糙度的测试分析手段, 分析了界面质量对超晶格材料能带结构、晶体质量及光学性质影响的研究结果, 粗略地说明了获得高质量的具有陡峭界面的超晶格材料的特征及性质。

1 界面特性的表征分析

1.1 界面类型的判定及陡峭性(粗糙度)的表征分析

由于 GaSb 衬底上的 InAs/GaSb 超晶格处于拉伸应变, 在 SL 层中引入界面层, 从而实现应变补偿。超晶格材料所采用的不同类型界面, 对超晶格的材料质量和器件性能的影响都是不同的。InAs/GaSb 超晶格的光电导数据表明 InSb 比 GaAs 界面具有在更低能量下的吸收边缘。B. R. Bonnet 和 P. M. Thibado 等人^[13-14]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, 其总有源区厚度能达到几微米, 以获得高光学吸收效率^[15]。

据相关研究机构报道, 对超晶格材料界面类型的判定及界面陡峭性、粗糙度的表征分析方法主要有拉曼光谱、HRTEM、STM、SIMS 和 XPS 等测试技术。

拉曼光谱中, 通过分析光谱中光学声子振动模式来确定界面类型。因不同的界面类型 (InSb 或 GaAs)

具有相异的光学声子振动模式, 从超晶格材料的拉曼光谱中可以通过直观地观测峰位的不同位置来进行界面类型判定^[16]。拉曼光谱可以显示出良好分辨的 InSb-like 或 GaAs-like 界面模式, 具体取决于所生长超晶格材料界面的预期类型, 如图 1^[16]所示。

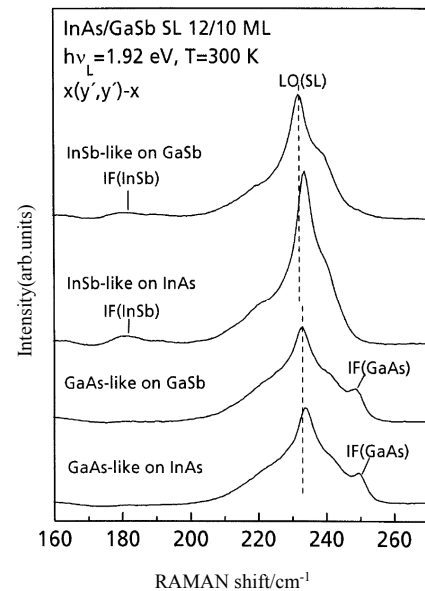


图1 在(0 0 1) GaAs 上生长的 InAs 或 GaSb 缓冲层具有 InSb 或 GaAs IF 的 InAs/GaSb SL 的室温拉曼光谱^[16]

Fig.1 Room-temperature Raman spectrum of InAs/GaSb SLs with InSb- or GaAs-like IFs grown on (0 0 1) GaAs using either InAs or GaSb buffer layers

通过横截面高分辨透射电子显微镜可以精确确定界面类型及特征。通过测量晶格条纹距离, 可以清楚地观察到界面构造 In-Sb 或 Ga-As 之间的差异, 另外, 基于键长的明显差异进行分析也可以确定界面的类型。如图 2 HRTEM 所示, 除了可以清晰地分辨出在 InAs 和 GaSb 层之间插入的界面层 (界面类型和厚度) 的明确存在之外, 也显示出超晶格的横向均匀性, 整个超晶格结构具有平滑和陡峭的界面^[17]。

文献[18]中通过对 HRTEM 图 3 分析表明: ① GaAs-like 的界面比 InSb-like 的界面更粗糙。②在 InAs 缓冲层上生长的 InAs/GaSb SL 的界面粗糙度大于在 GaSb 缓冲层上生长的相同 SL 的界面粗糙度。作者认为界面粗糙度的这种差异可能是由于处于压缩应变状态下材料界面粗糙度会大于处于拉伸应变状态下的界面状态。③在 GaSb 衬底上生长的 GaAs 和 InSb 键合的 InAs/GaSb SL 界面区域存在局部陡峭, 提出界面粗糙化的主要机制是成岛化的趋势。

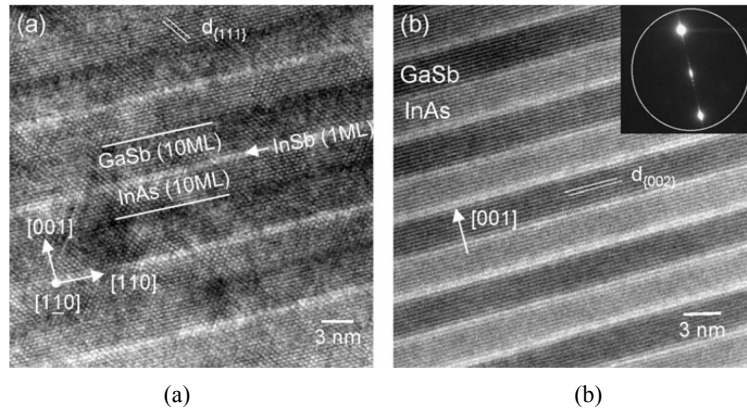
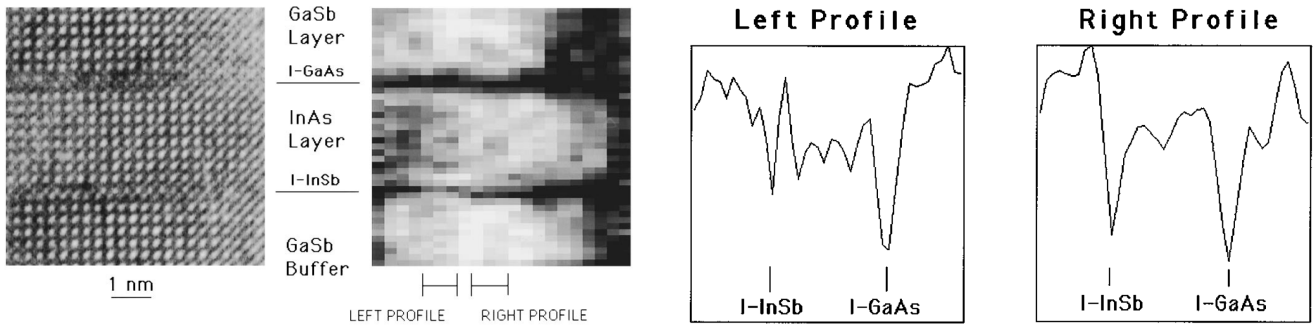


图2 在 GaSb (0 0 1)上生长的 InAs/GaSb 超晶格的 HRTEM 图像: (a) 沿着[1 1 0]区轴向上的 InAs/InSb/GaSb SL 的横截面 HRTEM 图像; (b) SL 的(0 0 2)晶格条纹图像^[17]

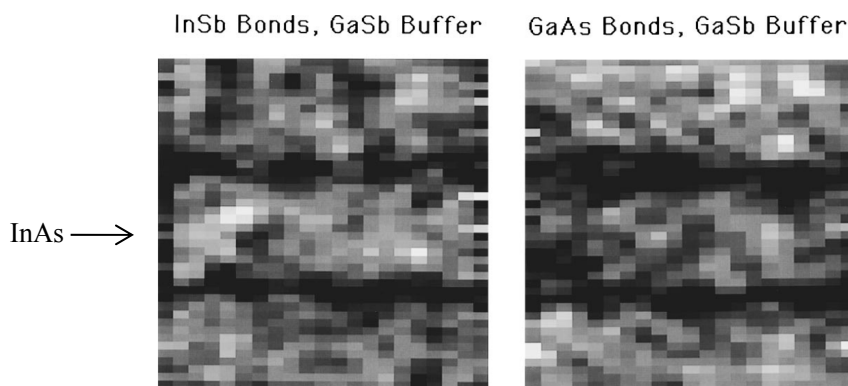
Fig. 2 HRTEM image of InAs/GaSb superlattice grown on GaSb (0 0 1): (a) Cross-sectional HRTEM images of the InAs/InSb/GaSb SL taken along the [1 1 0] zone axis; (b) Corresponding (0 0 2) lattice fringe image of the SL



(a) GaSb (0 0 1)衬底上生长的 GaSb 缓冲层上的 InAs/GaSb SL 样品的 HRTEM 图像 (左), 右图为处理后的图像

(a) To the left is a HRTEM image of cleaved specimen taken from an InAs/GaSb SL grown on a GaSb buffer layer and GaSb (001) substrate, (b) The {200} intensity profiles taken from the two columns designated in Fig. (a)

The processed image on the right, taken from the HRTEM image to the left



(c) GaAs (0 0 1)衬底上生长的 GaSb 缓冲层上的 InAs/GaSb SL 处理后的 HRTEM 图像^[18]

(c) Processed HRTEM images of InAs/GaSb SLs grown on GaSb buffer layers on GaAs (0 0 1) substrate, the middle layer is InAs

图3 GaSb (0 0 1)或 GaAs (0 0 1)衬底上生长的 GaSb 缓冲层上的 InAs/GaSb SL 样品的 HRTEM 图像

Fig.3 HRTEM images of InAs/GaSb SL samples on GaSb buffer layer grown on GaSb(0 0 1) or GaAs(0 0 1) substrate

因与 InAs/GaSb 外延相关的同价杂质表现出独特的特征, 通过扫描隧道显微镜图可以清晰精确地分辨出界面互混, 表面和体内 As 与 Sb 原子的交换反应,

V 族元素的掺入情况等^[19-20]。图 4(a)是不同 As 浸润时间情况下的 InAs/GaSb 超晶格界面 STM 测试结果, 从下到上 As₂ 浸润时间依次增加。下图是没有 As₂ 浸

润情况,界面呈现为 InAs-like; 中图为 4 s 浸润时间下,界面为 GaAs-like; 而上图为 15 s 浸润时间下, GaAs-like 界面变厚, 并且与 InAs 混在一起。结果表明将 GaSb 层暴露于 As-soak 下会导致界面质量变差, 不利于 InAs/GaSb 超晶格材料的晶体质量。图 4(b) 的 STM 结果中, GaSb 层中随机分布的黑点是 As 掺入 GaSb 的结果, InAs 层中类似的白点是从 GaSb 界面偏析进入 InAs 的 Sb 原子, 作者通过统计得出大约有 3% 的 Sb 进入到 InAs 层中。

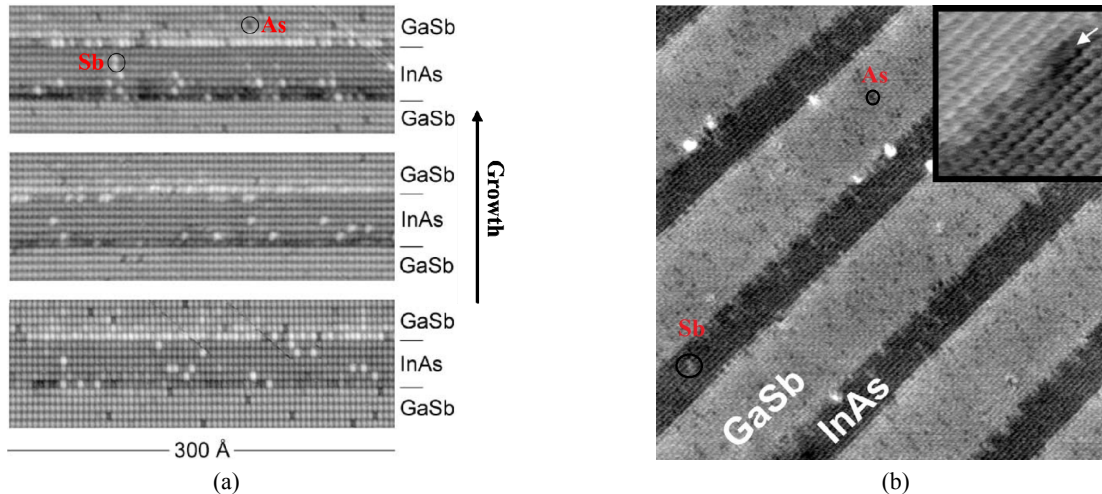


图 4 InAs/GaSb 超晶格样品的 XSTM 图像: (a) InAs/GaSb 超晶格样品在(110)横截面的 InAs-on-GaSb 和 GaSb-on-InAs 界面的阴离子亚晶格的原子分辨率 STM 图像^[19]; (b) Pb (As)= 5.3×10^{-6} Torr 下生长的 InAs/GaSb 超晶格的 XSTM(cross-sectional scanning tunneling microscopy) 图像^[20]

Fig. 4 XSTM images (anion sublattice) of InAs/GaSb SL samples: (a) STM images (anion sublattice) of InAs/GaSb SL samples in (1 1 0) cross section. As₂-soak times are 0 s (bottom), 4 s (middle), and 15 s (top), respectively; (b) XSTM image of a GaSb/InAs superlattice grown with Pb= 5.3×10^{-6} Torr revealing the anion sublattice (60 nm×60 nm). Inset: Close-up (7 nm×7 nm) of an InAs/GaSb interface where a segment of GaAs interfacial bonds are observed (dark area indicated by the arrow)

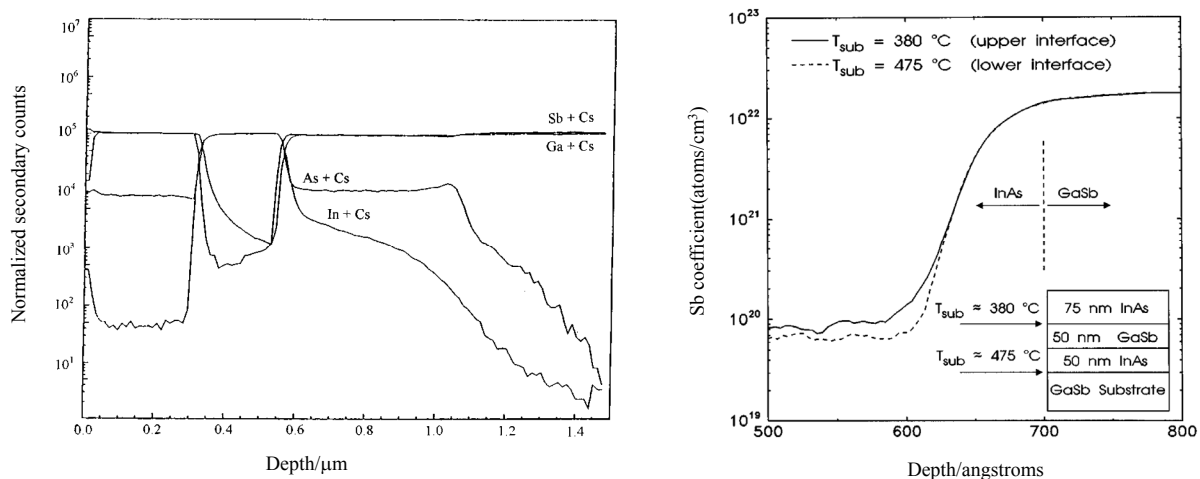


图 5 GaSb 层上生长的 InAs 层的 SIMS 测试: (a) GaSb 层上生长的 InAs 层的 SIMS 深度剖面^[21]; (b) 通过 SIMS 测量在不同衬底温度下生长的两个 InAs on GaSb 界面的 Sb 分布^[22]

Fig. 5 SIMS of InAs layer growing on GaSb layer: (a) SIMS depth profile of an InAs layer buried in GaSb; (b) Sb profile measured by SIMS for two InAs-grown-on-GaSb interfaces at substrate temperatures of 475 °C(dashed line) and 380 °C(solid line)

通过对多个 InAs/GaSb 超晶格样品（相同的生长条件）的界面进行多次 X 射线光电子能谱测量，利用 V 族元素与 III 族元素的峰强度比值的范围可以确定界面的互混情况及陡峭性。图 6 和表 1 是文献[22]的研究结果，其中 InAs/GaSb 异质结构元素峰强度比的范围远大于 GaSb/InAs 异质结构。GaSb/InAs 样品范围较小的峰强度比意味着界面组分变化很小，具有陡峭的界面。而 InAs/GaSb 样品峰强度比的范围较大，表明界面组分变化较大，说明其具有扩展的界面。另外，作者为了确定界面形成的过程中是否存在 As 对 Sb 的替换过程，通过 XPS 对 As 暴露下的 GaSb 表面进行了研究。图 7^[22]中上图(a)显示 As 3d 与 Ga 3d 峰强度比随着 As-soak 时间的增加有一个明显的上升过程。另外，图 7 中下图(b)随着 As-soak 时间的增加，Sb 4d 对 Ga 3d 的峰强度比下降。这些证据都证实了 As 暴露过程中 As-for-Sb 交换反应的存在。在一定的逃逸深度范围下，对 As 3d 与 Ga 3d 峰强度比进行分析，表明不仅在表面存在 As-for-Sb 反应，在 GaSb 体内同样存在交换反应。

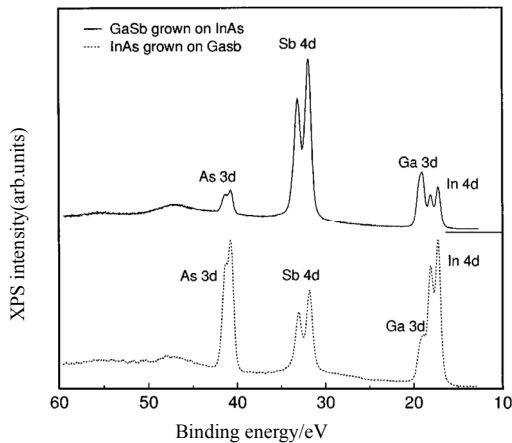


图 6 GaSb/InAs 和 InAs/GaSb 异质结构的代表性的 XPS^[22]

Fig. 6 Representative XPS scans of GaSb/InAs and InAs/GaSb scans used heterostructures. Measured variation in XPS peak intensity ratios, for both InAs/GaSb and GaSb/InAs growth orders

1.2 界面对超晶格能带的影响表征分析

M. S. Daly 等人研究发现，采用 InSb-like 界面的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，不利于保证材料的光吸收^[23-25]。在超晶格中，InSb 的价带顶位于 GaSb 价带顶之上，这使得空穴有趋向于 InSb 层聚集的特性，同时 InSb 层的插入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

探测波长逐渐增加。GaAs 界面对超晶格材料对应的探测波长的影响分析也类似。

表 1 GaSb/InAs 和 InAs/GaSb 界面的同一侧上的元素之间的 XPS 峰强度比率^[22]

Table 1 XPS peak intensity ratios between elements primarily on the same side of the interface of GaSb/InAs and InAs/GaSb

Structure	Measured range of XPS peak area ratios	
	Sb 4d/Ga 3d	As 3d/In 4d
GaSb/InAs 4g:7s	1.20-1.31	0.63-0.86
InAs/GaSb 12g:17s	0.55-1.24	0.81-1.37

Note: The notation $xg:y$ s specifies x growths and y XPS scans used to obtain a given set of values

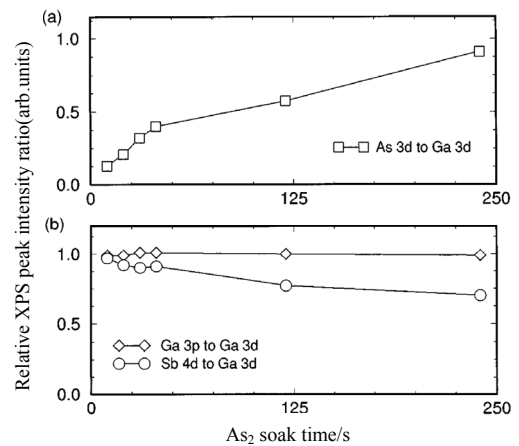


图 7 GaSb 表面的 As₂ 暴露的 XPS 峰强度比^[22]

Fig. 7 XPS peak intensity ratios for As₂ exposures of GaSb surfaces

对于界面对超晶格能带的影响，B. R. Bennett^[26]和 D. H. Chow^[27]等人分别利用测量光电导和不同温度下载流子浓度的方法，分析计算了 InAs/GaInSb 超晶格材料的禁带宽度，其结果表明具有 GaAs-like 界面的超晶格的禁带宽度较 InSb-like 界面的要高 $20 \sim 50$ meV^[28]。更直观的测试表征技术为 PL 谱和 XPS。

因外延超晶格材料的界面类型（InSb-like 或 GaAs-like 界面）及厚度等参数的不同，光致荧光光谱（PL 谱）峰位会随之发生位移。如图 8^[29]，随着 InSb 界面厚度的增加，超晶格 PL 谱的峰位逐渐红移。而图 9^[30]则是随着 GaAs 界面厚度增加，PL 谱峰位逐渐蓝移。与上述分析相一致。

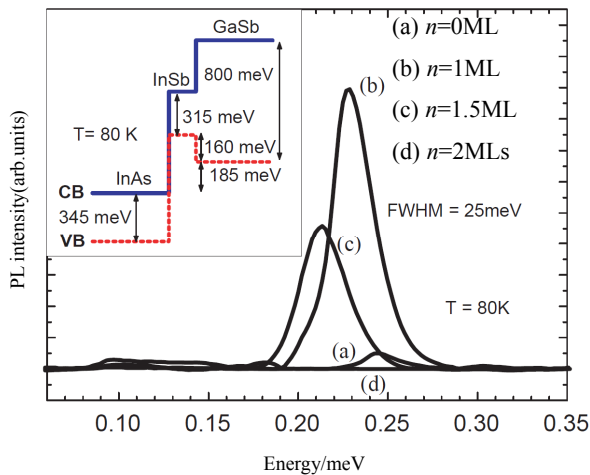


图8 $T=80\text{ K}$, 10MLs-InAs / n_{InSb} ML-InSb / 10MLs-GaSb SLs 的 PL 谱^[29]

Fig. 8 PL spectra of the 10MLs-InAs/ n_{InSb} ML-InSb/10MLs GaSb SLs collected at $T=80\text{ K}$. Inset: interface band alignment diagram at scale taking into account the inserted InSb layer at the InAs/GaSb heterointerface

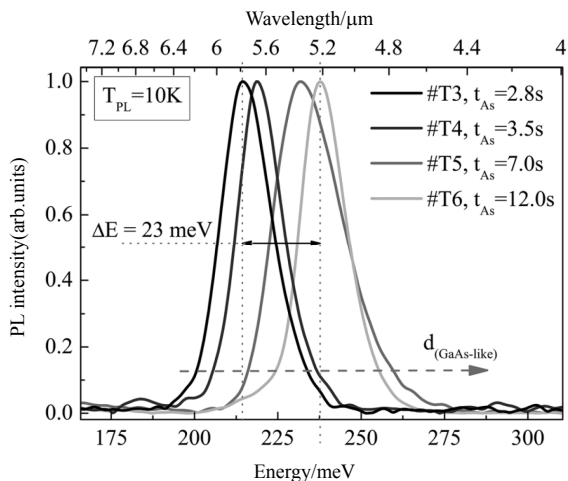


图9 $T_{\text{PL}}=10\text{ K}$, 在 InAs-on-GaSb 界面为 GaAs-like 界面的超晶格材料的 PL 谱^[30]

Fig. 9 $T_{\text{PL}}=10\text{ K}$ PL spectra for SLs structures grown at different As-soak times at InAs-on-GaSb interfaces (GaAs-like interfaces)

据文献[21]报道, (Ga, In) Sb 上的 InAs 的能带偏移也可由 XPS 确定。通过将实验得到的价带态密度 (valence-band density of states, VB DOS) 拟合到实验上扩展的理论 VB DOS, 获得了 InAs 和 GaSb 体材料的 In 4d 和 Ga 3d 电子态到价带顶的结合能差。

利用高斯-洛伦兹函数拟合 XPS 峰值确定了 InAs/GaSb 结构中 In 4d 和 Ga 3d 核心电子态之间的能量差, 得到能带偏移为 $0.62 \pm 0.1\text{ eV}$ 。

界面类型对价带偏移的影响现在还没有具体结论。Meyer 等研究人员^[31]的实验结果表明 GaAs 型界面的价带偏移较 InSb 型界面高 $14 \pm 5\text{ meV}$ 。而通过对 XPS 测试结果分析, Wang 等研究人员^[22,32]认为价带偏移不受界面组分的影响, 而与生长次序有关, 即在 GaSb 上生长 InAs 形成的价带偏移较在 InAs 上生长 GaSb 要高。相关文献报道的造成这种实验结果差异的主要原因可能是材料的生长方式和应变状态造成的^[28]。

1.3 界面对超晶格材料晶体质量、光学性质的影响

根据上述界面特性会对超晶格材料的晶体质量和光学性质造成影响, 相应地对超晶格材料的测试表征方法有 HRXRD、霍尔测试及吸收光谱。具体分析如下:

通过高分辨率 X 射线衍射失配度的计算来判定应力补偿效果, 也可通过观察围绕卫星峰 0 级的 Pendell Kosung fringes, 表明高的超晶格晶体质量, Pendell Kosung fringes 的情况可以评定 InSb 界面的 (临界) 厚度^[33], 超晶格卫星峰的相对强度也会受到 As/Sb 交换反应的影响。

霍尔测试结果参数中平面载流子迁移率是量化超晶格层质量和 IF 粗糙度散射 (IRS) 程度的有用工具。如表 2 所示, 不同 IF 类型时, 载流子浓度和迁移率的变化, 证明了 IF 质量对 IF 快门序列的敏感性^[34]。

室温 (room temperature, RT) 吸收系数 (吸收光谱) 是从样品的透射光谱与去除外延层之后衬底的透射光谱之间的比较推导出的。引入界面层的超晶格材料完成结构特征研究之后, 通过分析吸收光谱中多种高能跃迁参与的特征来表征证明高质量的超晶格材料光学性质。

有意引入 InSb 界面层的超晶格材料除了由于基态电子 (C_1) 和重空穴 (VH_1) 微带之间的吸收导致的 C_1 - VH_1 跃迁外, 从吸收光谱中也能够获得其他几种高能跃迁的参与, 如图 10 所示。根据对 InAs/GaSb 超晶格的精确计算, 作者提出几种高能跃迁可能是 C_1 - VL_1 跃迁 (约 300 meV) 和 C_1 - VH_2 跃迁 (约 430 meV), 从而将最低电子微带 C_1 与激发空子带相关联 (分别为第一轻空穴 VL_1 和第二重空穴 VH_2 子带) ^[17,23,35]。

表2 (InAs + IF)/(GaSb + IF) SLs 插入 InSb-like 或/和 GaAs-like 界面的数据汇总^[34]

Table 2 Data summary of (InAs+IF)/(GaSb+IF) SLs: the InSb-like or/and GaAs-like IFs were inserted between the layers and their values were estimated from shutter time

IF type	Period/Å	Strain/%	$R_s/(\Omega/\text{sq})$	$n_s/(\times 10^{11}\text{cm}^{-2})$	$\mu/(\text{cm}^2/\text{Vs})$
0/0	44.8	-0.13	8563	1.8	4104
InSb/GaAs	45.4	-0.08	3409	2.8	6579
InSb/InSb	45.5	+0.10	7020	2.0	4343
GaAs/GaAs	45.2	-0.30	7675	1.5	5548
GaAs/InSb	45.1	-0.15	45690	52.2	26

Note: The R_s , n_s , and μ represent the 10 K resistivity, hole density, and in-plane hole mobility

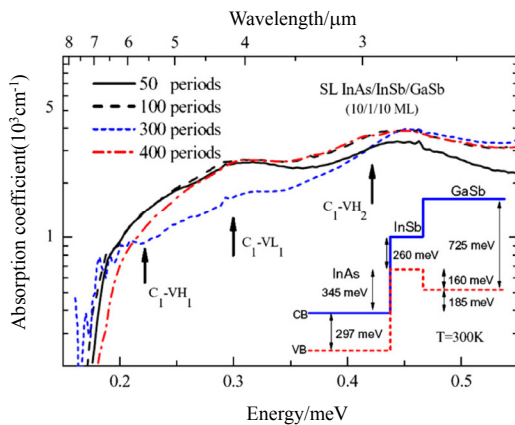


图10 InAs/InSb/GaSb (10/1/10 MLs) 超晶格的 RT 吸收光谱^[17]

Fig. 10 RT measured absorption coefficient of strain compensated InAs/InSb/GaSb (10/1/10 MLs) SLs

2 总结

对于 InAs/GaSb 超晶格来说, 界面控制极为重要。为了对超晶格界面详细研究, 反馈外延生长工艺, 对界面质量进行测试表征分析就显得非常重要。本文详细介绍了拉曼光谱、SIMS、HRTEM、STM、XPS、PL 谱、HRXRD、霍尔测试、吸收光谱等测试表征方法对 InAs/GaSb 超晶格界面特性的研究, 如界面类型的判定、界面陡峭性、粗糙度及界面反应(如界面互混、As/Sb 交换反应等)等, 分析了界面质量对超晶格材料能带结构、晶体质量、光学性质的影响。

参考文献:

[1] Chang L L, Saihalasz G A, Esaki L, et al. Spatial separation of carriers in InAs-GaSb superlattices[J]. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 1981, **19**(3): 589-591.
 [2] Brum J A, Voisin P, Bastard G, et al. Transient photovoltaic effect in semiconductor superlattices[J]. *Physical Review B*, 1986, **33**(2): 1063-1066.

[3] Smith D L, Mailhot C. Proposal for strained type II superlattice infrared detectors[J]. *Journal of Applied Physics*, 1987, **62**(6): 2545-2548.
 [4] Hood A, Hoffman D, WEI Y, et al. Capacitance-voltage investigation of high-purity InAs/GaSb superlattice photodiodes[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **88**(5): 052112.
 [5] Hoffman D, Gin A, Wei Y, et al. Negative and positive luminescence in midwavelength infrared InAs-GaSb superlattice photodiodes[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2005, **41**(12): 1474-1479.
 [6] 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): 69-75.
 [7] Christol P, Konczewicz L, Cuminal Y, et al. Electrical properties of short period InAs/GaSb superlattice[J]. *Physica Status Solidi(c)*, 2007, **4**(4): 1494-1498.
 [8] Neshor O, Klipstein P C. High-performance IR detectors at SCD present and future[J]. *Opto-electronics Review*, 2006, **14**(1): 59-68.
 [9] 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): 69-75.
 [10] 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.
 [11] 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.
 [12] Sarusi G. QWIP or other alternative for third generation infrared systems[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2003, **44**(5): 439-444.
 [13] 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.
 [14] Tahraoui A, Tomasini P, Lassabaterre L, et al. Growth and optimization of InAs/GaSb and GaSb/InAs interfaces[J]. *Applied Surface Science*, 2000, **162**: 425-429.

- [15] 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**: 858-862.
- [16] Wagner J, Schmitz J, Herres N, et al. InAs/(GaIn)Sb superlattices for IR optoelectronics: strain optimization by controlled interface formation[J]. *Physica E-low-dimensional Systems & Nanostructures*, 1998, **2**(1): 320-324.
- [17] Satpati B, Rodriguez J B, Trampert A, et al. Interface analysis of InAs/GaSb superlattice grown by MBE[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2007, **301**: 889-892.
- [18] Twigg M E, Bennett B R. Influence of interface and buffer layer on the structure of InAs/GaSb superlattices[J]. *Applied Physics Letters*, 1995, **67**(11): 1609-1611.
- [19] Kaspi R, Steinshnider J, Weimer M. As-soak control of the InAs-on-GaSb interface[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2001, **225**(2/4): 544-549.
- [20] 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): 301-308.
- [21] Zborowski J T, Vigliante A, Moss S C, et al. Interface properties of (In,Ga)Sb/InAs heterostructures[J]. *Journal of Applied Physics*, 1996, **79**(11): 8379-8383.
- [22] WANG M W. Study of interface asymmetry in InAs-GaSb heterojunctions[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 1995, **13**(4): 1689-1693.
- [23] 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.
- [24] 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): L823.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 邱永鑫. InAs/GaSb 超晶格界面微观结构研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- QIU Yongxin. Study on Interface Microstructure of InAs/GaSb Superlattice[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] Omaggio J P, Meyer J R, Wagner R J, et al. Determination of band gap and effective masses in $InAs/Ga_{1-x}In_xSb$ superlattices[J]. *Applied Physics Letters*, 1992, **61**(2): 207-209.
- [32] WANG M W, Collins D A, McGill T C, et al. Effect of interface composition and growth order on the mixed anion InAs/GaSb valence band offset[J]. *Applied Physics Letters*, 1995, **66**(22): 2981-2983.
- [33] Haugan H J, Brown G J, Grazulis L, et al. Optimization of InAs/GaSb type-II superlattices for high performance of photodetectors[J]. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 2004, **20**(3-4): 527-530.
- [34] Haugan H J, Elhamri S, Brown G J, et al. Growth optimization for low residual carriers in undoped midinfrared InAs/GaSb superlattices[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, **104**(7): 240.
- [35] Szmulowicz F, Haugan H J, Brown G J, et al. Effect of interfaces and the spin-orbit band on the band gaps of InAs/GaSb superlattices beyond the standard envelope-function approximation[J]. *Physical Review B*, 2004, **69**(15): 155321.