文章编号：1672-8785(2017)12-0017-04

分子束外延 InAs/GaSb II 类超晶格材料

邢伟荣　刘　铭　郭　喜　周　朋　周立庆

(华北光电技术研究所，北京 100015)

摘　要：InAs/GaSb II 类超晶格由于具有独特的能带结构和良好的材料性能被认为是第三代红外探测器的首选，近年来被广泛研究，并取得快速发展。分子束外延能够精确控制材料界面与周期厚度，是超晶格材料生长的主流手段。利用分子束外延技术在 GaSb 衬底上分别生长了中波、长波超晶格材料，并对所生长的超晶格材料的性能进行了全面表征，最后用制备的面阵器件验证了该材料的性能。

关键词：InAs/GaSb；II 类超晶格；分子束外延；红外探测器

中图分类号：TN2　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3969/j.issn.1672-8785.2017.12.004

InAs/GaSb Type-II Superlattice Material Grown by Molecular Beam Epitaxy

XING Wei-rong, LIU Ming, GUO Xi, ZHOU Peng, ZHOU Li-qing

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

Abstract: Because of the unique band structure and excellent properties, InAs/GaSb type-II superlattice material is regarded as the preference for the third-generation infrared detectors. In recent years, the material has been studied extensively and rapid advances are achieved. Molecular Beam Epitaxy (MBE) which can precisely control material interface and period thickness is the main means for superlattice material growth. Mid-wavelength and long-wavelength superlattice materials are grown on GaSb substrates by MBE. Their properties are characterized fully and are verified by the fabricated focal plane array devices eventually.

Key words: InAs/GaSb; type-II superlattice; molecular beam epitaxy; infrared detector

0 引言

红外探测器在国民经济和国防领域中发挥越来越重要的作用。随着应用需求的发展，双多色、大面阵、高性能和低成本[1]成为其发展方向。在目前用以制备红外探测器的材料中，HgCdTe 由于量子效率高、响应速度快而成为最重要的材料。但 HgCdTe 探测器本身存在均匀性差、长波暗电流大和成本高等不足之处。InAs/GaSb II 类超晶格自 1977 年被提出用于制备红外探测器以来[2]，由于独特的能带结构和良好性能，近年来得到广泛的研究并取得了较大的进展。

InAs/GaSb II 类超晶格由 InAs、GaSb 两种材料交替生长形成。该材料的电子有效质量大，隧穿电流小，轻重空穴带分离，俄歇复合受抑制；材料的稳定性好，大面积均匀性优；成本低，产业化优势明显。因此，Razeghi 等人[3]预言 InAs/GaSb II 类超晶格将是下一代红外探测

收稿日期：2017–09–22

作者简介：邢伟荣 (1986-)，男，河北邢台人，硕士，工程师，主要研究方向为 III–V 族红外探测器材料结构设计与材料生长。E-mail: xingwog@163.com

器的首选材料。

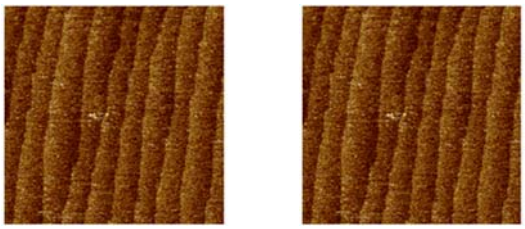
要使 InAs/GaSb Ⅱ类超晶格具有良好的光电性能，就要保证超晶格材料具有陡峭的异质界面；要精确控制其响应波长，就要准确控制其周期厚度。分子束外延 (Molecular Beam Epitaxy, MBE) 能够精确控制外延层的厚度 (达到原子级别)，并可以低温生长以防止界面的互扩散，是 InAs/GaSb Ⅱ类超晶格的主流生长技术。本文利用 MBE 技术生长了不同波段的 InAs/GaSb 超晶格材料，借助原子力显微镜 (Atomic Force Microscope, AFM)、表面颗粒度仪、高分辨 X 射线衍射仪 (High Resolution X-Ray Diffraction, HRXRD)、光致发光谱 (Photoluminescence, PL)，对该材料进行了测试表征，并用面阵器件验证了该材料的性能。

1 材料生长

外延设备为芬兰 DCA 公司的 P600 系统，该设备配备带针阀的 V 族裂解源 (砷源和锑源)，由在线离子规测试源束流，由 BandiT 实时测试样品的温度。超晶格材料在 Te 掺杂 GaSb(100) 衬底上外延生长，衬底首先经过进样室、缓冲室除气，以除去表面的水汽和残留物；然后被推入生长室，在 Sb_2 保护下升温到 560 ℃附近，去除表面氧化层。去氧化层过程由反射式高能电子衍射仪 (Reflection High-Energy Electron Diffraction, RHEED) 在线监测。当出现明亮的细条纹时，表明去氧化层过程完成；然后降温到 500 ℃，生长 0.5 μm 厚的 GaSb 缓冲层。生长完成后，再次降温到 400 ℃附近，进行 InAs/GaSb 超晶格材料的生长。中波材料吸收层为 8ML InAs/8ML GaSb，长波吸收层为 13ML InAs/7ML GaSb。界面控制时结合表面迁移率增强法和生长中断法两种方法，以生成质量良好的 InSb 型界面。

2 材料表征与讨论

分子束外延中底层材料的晶体质量对后续生长材料的质量影响很大。如果底层材料晶体的质量较差，在其上生长的材料的质量就会变得更差。因此 GaSb 衬底氧化层是否去除得彻底及 GaSb 缓冲层的质量是否良好，会直接影响继续生长的超晶格质量 [4]。所以首先优化了 GaSb 衬底去氧化层工艺和缓冲层生长工艺。去氧化层在足够大 (10^{-6}Torr) 的 Sb_2 束流保护下进行，在 560 ℃附近保持 20 min，以将表面氧化层中各种 Ga 和 Sb 的氧化物彻底去除。去除氧化层后，利用优化的 GaSb 缓冲层生长条件 (包括 Sb/Ga 束流比和生长温度) 生长了高质量的 GaSb 缓冲层。通过 AFM 测试，2 μm×2 μm 区域表面粗糙度的均方根 (Root Meam Square, RMS) 为 1.5 Å，可以观测到样品表面的单原子层台阶，图像显示该过程为理想的二维生长模式。获得的高质量缓冲层为下一步超晶格材料的生长奠定了良好基础。



(a) 二维图 (b) 三维图

图 1 GaSb 缓冲层 2 μm×2 μm AFM 图

研究表明，超晶格材料表面的缺陷会增大器件的暗电流，降低探测器的性能 [5]。由于 InAs、GaSb 两种材料的晶格常数存在差异，导致超晶格与衬底之间存在应变。随着超晶格生长周期的增加，应变释放，表面缺陷会越来越多。减少超晶格表面缺陷一直是超晶格材料生长的难题 [6]。通过前期研究不同缺陷的起源，采取相应措施和优化工艺，大幅降低了超晶格表面的缺陷密度 [5]。利用 KLA Tencor 公司生产的 Candela CS10 表面颗粒度仪测试了中波超晶格、长波超晶格材料表面的缺陷分布 (图 2)，二者的宏观缺陷 (大于 1 μm) 密度均低于 500 个 /cm^2。

表征材料的表面质量测试需将宏观和微观两种手段结合，才能使结果更加完整和准确。除了测试宏观缺陷的面分布，本文还用 AFM 分别测试了中波和长波材料 2 μm×2 μm 的微区表面，如图 3 所示。可以看到，中波材料和长波材料表面都有明显的原子台阶，台阶高度为 1 个原

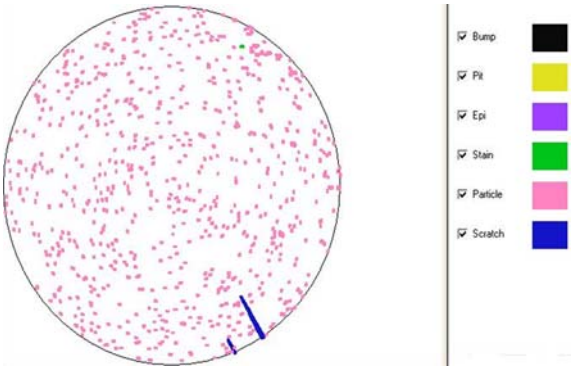
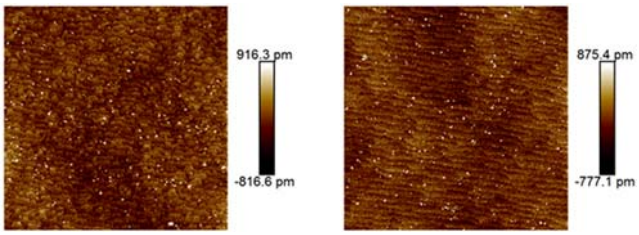


图 2　用表面颗粒度仪测试 2 in 超晶格材料表面的缺陷分布



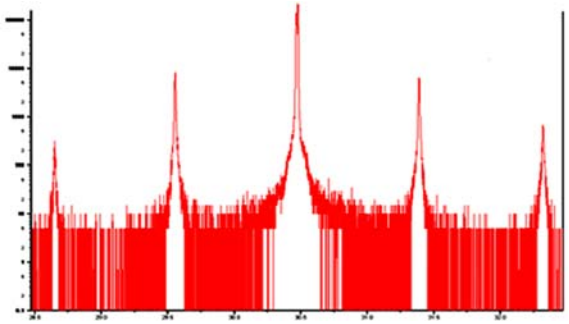
(a) 中波材料　　(b) 长波材料

图 3　不同波段超晶格材料的 2 μm×2 μm AFM 图片

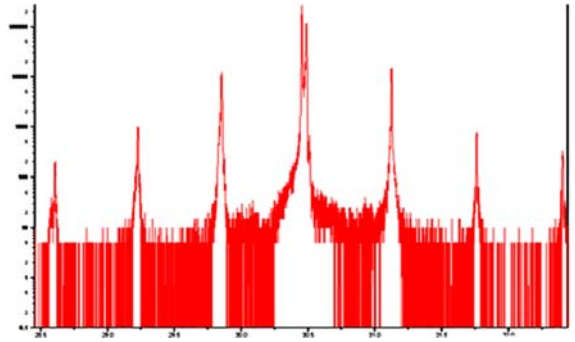
子层， RMS 分别为 1.8 Å和 1.7 Å，显示了超晶格表面原子级的平整度。

HRXRD 是表征超晶格材料的重要手段，它不仅能够获得晶格常数和测试周期厚度，还能评价超晶格的界面质量 [7]。利用 HRXRD 分别测试了外延生长的中波、长波超晶格材料，通过将超晶格零级峰与 GaSb 衬底峰对比，发现两种超晶格与 GaSb 衬底的应变均小于 0.1%，并且 –1 级半峰宽 (Full Width At Half Maximum, FWHM) 在 20 弧秒左右；较小卫星峰的 FWHM 和多级清晰卫星峰 (由于选择的测试角度范围小，未完全显示) 显示了一致的周期厚度和良好的界面质量。

在超晶格材料表征中，PL 也是一种重要的手段。PL 不仅能准确测试超晶格材料的禁带宽度 (即响应截止波长)，还能展示材料的整体质量 [7]。我们在 77 K 下测试了中波、长波超晶格的 PL 谱，获得了较强的发光峰。其中，中波材料的发光峰在 5.2 μm 处，长波材料的发光峰位于 9.8 μm 处，较强的发光峰显示超晶格材料具有良好的光电性能。



(a) 中波材料



(b) 长波材料

图 4　超晶格材料的 HRXRD 衍射曲线

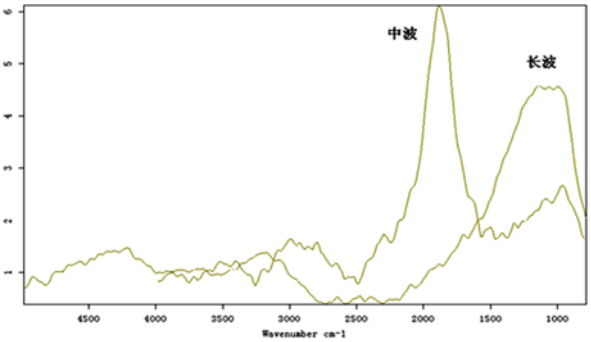


图 5　不同带隙超晶格材料的 PL 谱

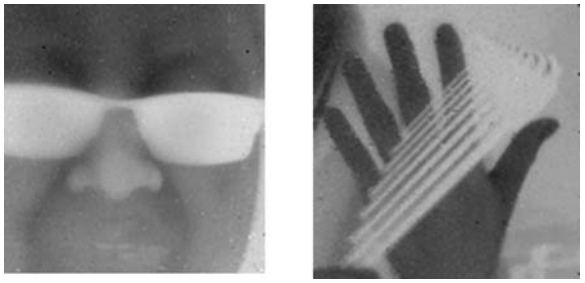


图 6　验证时的成像图

对生长的超晶格材料进行面阵器件制备验证。首先利用干法刻蚀获得台面，然后用 SiO_2 进行表面钝化以抑制表面漏电流，再以离子溅

射方式生长 Ti/Pt/Au 体系电极。与读出电路倒装互联后，对芯片进行背减去除 GaSb 衬底，最后将其装入杜瓦在 77 K 下进行测试。面阵器件进行了清晰的成像演示 (由于使用的是反向读出电路，图像中的温度分布与实际相反) 。

3 结论

对 GaSb 衬底进行预处理后，在高温下去除其表面氧化层，再生长高质量的 GaSb 缓冲层，然后在缓冲层上分别生长中波、长波超晶格材料。超晶格材料表面大于 1 μm 的缺陷的密度小于 500 个 /cm^2 ，表面达到了原子级平整度。HRXRD 测试的应变均小于 0.1% ， –1 级半峰宽在 20 弧秒左右，PL 谱具有较强的发光峰。用面阵器件验证了该材料的性能，结果表明该超晶格材料具有良好的外延质量。

致谢

感谢王丛、沈宝玉和刘建伟等人在测试中提供的帮助。

参考文献

[1] Rogalski A. New Material Systems for Third Generation Infrared Detectors [C]. *SPIE*, 2009, **7388**: 1–12.

[2] Sai-Halasz G A, Tsu R, Esaki L. A New Semiconductor Superlattice [J]. *Appl Phys Lett*, 1977, **30**(12): 651–653.

[3] Razegh I M. Overview of Antimonide Based III-V Semiconductor Epitaxial Layers and Their Applicationsat the Center for Quantum Devices [J]. *European Physical Journal - Applied Physics*, 2003, **23**(3): 149–205.

[4] Aifer E H, Jackson E M, Bennett B R, et al. Suppression of Bulk Defects in Antimonide Superlattice Infrared Photodiodes [C]. *Mat Res Soc Symp Proc*, 2002, **722**: 1–12.

[5] 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.

[6] Martin W, Robert R, Johannes S, et al. Defect Density Reduction in InAs/GaSb type-II Superlattice Focal Plane Array Infrared Detectors [C]. *SPIE*, **7945**: 1–10.

[7] Manijeh R, Siamak A P. Revolutionary Development of Type-II GaSb/InAs Superlattices for Third Generaation of IR Imaging [C]. *SPIE*, **8353**: 1–16.

（上接第 16 页）

3 结论

针对红外制导用小体积、快速启动红外探测器的应用要求，主要从探测器芯片、微杜瓦、快速启动制冷器等方面，对影响探测器快速启动的因素进行了分析。这些分析在实际中也得到了大量运用，对提高红外焦平面探测器的快速启动起了一定的指导作用。影响快速启动的因素很复杂，只有当制冷器和微杜瓦在结构、尺寸、功率、温度等方面都有很好的配合时才能最终达到好的制冷效果。因此，需要细心分析探测器组件中各个部件的工作情况，找出影响冷却效果的因素，进行优化设计以满足实际需求。

参考文献

[1] 孙维国，黄永安，李勇平，等. **空空导弹光电探测器设计** [M]. 北京：国防工业出版社，2006.

[2] 张莉，甘玉梅，杨桂兰. J–T 制冷器对红外探测器组件噪声的影响 [J]. **激光与红外**, 2000, **30**(5): 302–303.

[3] 牟宏山, 陈静, 乔育花. 快速制冷型红外焦平面成像制导系统设计 [J]. **红外与毫米波学报**, 2016, **35**(3): 310–316.

[4] 刘家琛. 微型红外探测器快速冷却过程分析与结构优化 [D]. 上海：上海交通大学，2015.