

文章编号: 1672-8785(2021)05-0001-06

InAs/GaSb II 类超晶格长波红外 焦平面探测器研究

温 涛 邢伟荣 李海燕 李春领 刘 铭 李忠贺
郭 喜 亢 喆 张智超 陈彦冠
(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: InAs/GaSb II 类超晶格材料是第三代红外焦平面探测器的优选材料。报道了一种面阵规模为 320×256 、像元中心距为 $30 \mu\text{m}$ 的 InAs/GaSb II 类超晶格长波红外焦平面器件。在 77 K 时, 该器件的平均峰值探测率为 $7.6 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$, 盲元率为 1.46%, 响应非均匀性为 7.55%, 噪声等效温差 (Noise Equivalent Temperature Difference, NETD) 为 25.5 mK。经计算可知, 这种器件的峰值量子效率为 26.2%, 50% 截止波长为 $9.1 \mu\text{m}$ 。最后对该器件进行了成像演示。结果表明, 该研究为后续的相关器件研制奠定了基础。

关键词: InAs/GaSb II 类超晶格; 长波红外; 焦平面阵列

中图分类号: TN215 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2021.05.001

Research on Long-Wavelength Infrared Focal Plane Array Detector Based on Type-II InAs/GaSb Superlattice

WEN Tao, XING Wei-rong, LI Hai-yan, LI Chun-ling, LIU Ming, LI Zhong-he,
GUO Xi, KANG Zhe, ZHANG Zhi-chao, CHEN Yan-guan
(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: InAs/GaSb type-II superlattice materials are the preferred materials for the third-generation infrared focal plane detectors. An InAs/GaSb type-II superlattice long-wavelength infrared focal plane device with array size of 320×256 and pixel pitch of $30 \mu\text{m}$ is reported. At 77 K, the average peak detectivity of the device is $7.6 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$, the blind element rate is 1.46%, the response non-uniformity is 7.55%, and the noise equivalent temperature difference (NETD) is 25.5 mK. The calculation shows that the peak quantum efficiency of this device is 26.2%, and the 50% cut-off wavelength is $9.1 \mu\text{m}$. Finally, an imaging demonstration of the device is carried out. The results show that the research has laid the foundation for the subsequent development of related devices.

Key words: InAs/GaSb type-II superlattice; long-wavelength infrared; focal plane array

收稿日期: 2020-11-16

作者简介: 温涛(1982-), 男, 山西晋中人, 高级工程师, 主要从事红外探测器器件方面的研究。
E-mail: taotao0919@163.com

0 引言

随着红外焦平面探测器向着以大面阵、高性能、高温工作、多带/多色探测、低成本为特点的第三代红外探测器方向发展^[1], 碲镉汞(HgCdTe)材料本身的局限性越来越显著。首先, 随着截止波长的增加, 通过 Cd 组分调节 HgCdTe 红外探测器的波长越来越困难; 其次, 大尺寸 HgCdTe 材料制备的均匀性难以控制; 另外, 随着波长的增大, 带隙变窄, 电子有效质量变小, 探测器的隧穿电流增大。这些都限制了 HgCdTe 红外焦平面探测器的应用和发展。

InAs/GaSb II 类超晶格材料仅通过改变 InAs 层和 GaSb 层的厚度就能实现连续带隙可调(0~0.8 eV), 其红外响应波长可以覆盖 3.0~30 μm 的范围, 而且还具有量子效率高、俄歇复合率低、暗电流较小、大尺寸材料均匀性好等优点, 因此是第三代红外焦平面探测器的优选材料^[2]。尤其在长波、甚长波、双色红外探测上, InAs/GaSb II 类超晶格材料具有 HgCdTe 材料不可比拟的优势。本文主要报道我们在面阵规模为 320 \times 256、像元中心距为 30 μm 的 InAs/GaSb II 类超晶格长波红外焦平面器件上所取得的进展。

1 实验

长波 InAs/GaSb II 类超晶格材料采用 p- π -M-n 双异质结结构, 如图 1 所示。首先, 利用分子束外延(Molecular Beam Epitaxy, MBE)工艺在 N 型 GaSb(100)衬底上生长 P 型 GaSb 缓冲层, 然后生长 InAs/GaSb P 型接触层, 中间是 P 型弱掺杂的 InAs/GaSb 长波吸收层; 接着生长不掺杂的 InAs/AlSb 空穴势垒层和周期结构相同的 InAs/GaSb N 型接触层, 最后生长 InAs 盖层。

在完成长波 InAs/GaSb II 类超晶格材料生长后, 开始进行芯片制备(见图 2)。首先进行表面清洗及台面光刻, 然后用由磷酸、双氧水、柠檬酸、水配置而成的腐蚀液进行台面腐

蚀以及钝化前的表面处理。接着通过等离子体增强化学气相沉积(Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD)设备进行 $\text{SiO}_2/\text{SiO}_y\text{-N}_x$ 表面钝化, 随后利用氟化铵缓冲液进行电极孔腐蚀, 最后淀积 Ti/Pt/Au 金属体系并通过剥离工艺制备电极。对完成前道工序后的芯片(见图 3)进行 I-V 测试。图 4 所示为该芯片的典型 I-V 曲线。



图 1 p- π -M-n 双异质结 InAs/GaSb II 类超晶格长波材料的结构示意图

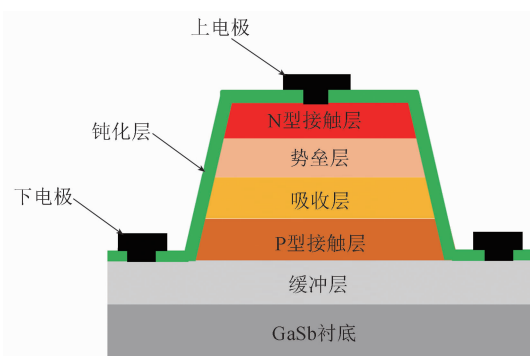


图 2 InAs/GaSb II 类超晶格长波芯片的示意图

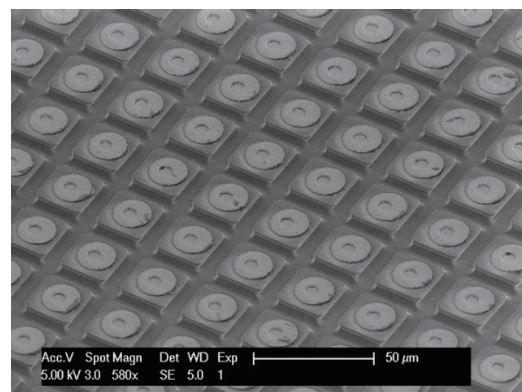


图 3 320 \times 256 (30 μm) InAs/GaSb II 类超晶格长波器件的扫描电镜图

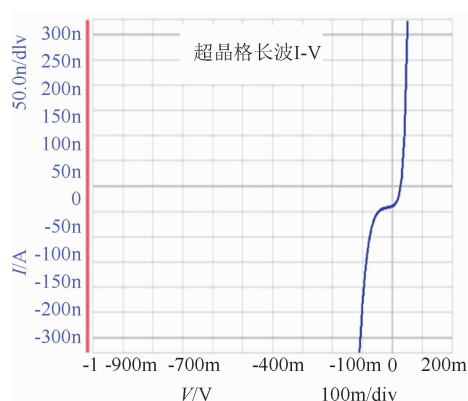


图 4 InAs/GaSb II 类超晶格长波芯片的典型 I-V 曲线

I-V 测试合格的 InAs/GaSb II 类超晶格长波芯片与读出电路通过钢柱倒装互连的方式实现键合。同时, 为了增强混成芯片的可靠性, 对互连后的混成芯片进行点胶及固化处理, 并进行背面减薄以实现光电转换效率的最大化, 最后将其封装到杜瓦结构中进行红外焦平面探测器性能测试。

2 关键技术分析与讨论

2.1 长波 InAs/GaSb II 类超晶格材料的设计及制备

对于 II 类超晶格中波红外探测器来说, 由于材料带隙较宽, 暗电流对探测器性能的影响较小, 采用 p-i-n 同质结能够达到良好的探测器性能。而超晶格长波红外探测器的带隙较小, 若仍使用简单的 p-i-n 同质结结构, 则器件中的隧穿电流、产生-复合电流、表面漏电流等将会大大增加, 从而严重制约器件性能^[3]。因此, 如何利用材料结构设计抑制暗电流成为器件制备的关键。通过引入双异质结结构, 可以对暗电流的抑制起到决定性作用。首先, 外加偏压的电场主要作用在宽带材料上, 使得空间电荷区主要在宽带材料里产生。这样能够有效抑制器件的产生-复合电流。其次, 由于宽带材料的引入, 器件的隧穿电流也得到极大抑制。最后, 在导电通道上引入宽带材料, 提高其表面电阻率, 能够使器件的整体漏电流得到有效抑制。通过用经验紧束缚方法计算超晶格材料的能带结构, 设计了基于双异质

结的长波结构。

对于光伏探测器来说, 有源层的背景载流子浓度对整个红外探测器件的性能具有至关重要的作用。它在很大程度上决定着少数载流子的寿命和扩散长度, 进而影响探测器的量子效率及探测率。通过优化温度、V/III 比、生长速率等生长条件可将吸收层的本征载流子浓度控制在合适的范围内。另外还可在外延过程中进行反掺杂, 即通过掺 Be 形成弱 p 吸收层。这样可以提高载流子迁移距离, 从而获得较高的量子效率。图 5 所示为长波 InAs/GaSb II 类超晶格材料的 X 射线衍射曲线。从图中可以看到超晶格结构的多级卫星峰, 其中 -1 级卫星峰的半峰宽小于 30 arcs。

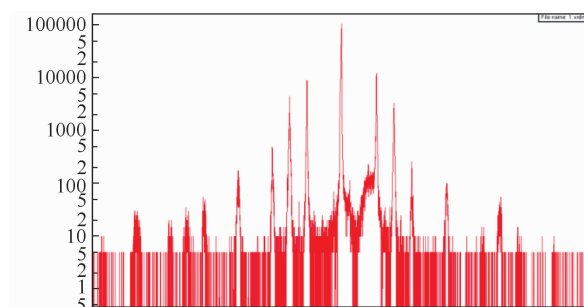


图 5 长波 InAs/GaSb II 类超晶格材料的 X 射线衍射曲线

2.2 台面成型

InAs/GaSb II 类超晶格探测器常用的台面制备工艺包括干法刻蚀和湿法腐蚀。其中, 干法刻蚀具有图形转移精度高、均匀性好、各向同性等特点^[4]。在其刻蚀过程中, 等离子体在偏压的作用下具有较强的方向性, 因而横向钻蚀几乎可以忽略不计。该方法的缺点在于, 刻蚀过程中的离子轰击不仅会引入新的损伤, 而且还可能会造成材料表面变性, 导致器件性能变差。湿法腐蚀具有各项同性的特点, 容易产生侧壁钻蚀, 影响器件的占空比。该方法的优点如下: 侧壁形貌好、成本低、选择比高且对材料几乎无损伤。

考虑到 30 μm 中心距芯片的工艺窗口较宽, 我们采用湿法腐蚀方式进行台面成型。通过对比不同腐蚀液体体系的腐蚀效果, 最终选择

了由柠檬酸、磷酸、双氧水和水组成的腐蚀液体系。通过优化腐蚀液配比，最终获得了侧壁和底面光滑平整、横向钻蚀相对较小、侧壁坡度利于钝化层覆盖的台面形貌(见图 6)。结果表明，器件的占空比为 64%。

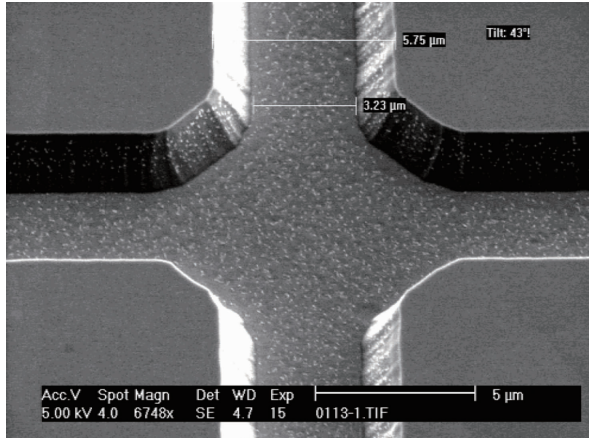


图 6 长波 InAs/GaSb II 类超晶格台面腐蚀后的形貌扫描电镜图

2.3 表面钝化

InAs/GaSb II 类超晶格完成台面成型后，材料表面态、悬挂键以及表面氧化层中存在的固定电荷、离子和陷阱等都会形成导电通路，使得器件的暗电流升高、噪声增加、探测率降低，从而严重影响器件性能^[5]。为了解决该问题并稳定超晶格表面性质和减少各种沾污对材料性能的影响，需要生长钝化层。我们优化了

钝化前处理工艺，并通过 PECVD 方式对超晶格芯片进行了 $\text{SiO}_2/\text{SiO}_x\text{N}_x$ 表面钝化。为了对钝化效果进行表征，我们制作了金属-绝缘层-半导体(Metal-Insulator-Semiconductor, MIS)结构，并进行了 C-V 测试(见图 7)。结果表明，器件钝化效果良好。

2.4 欧姆接触电极制备工艺

金属与半导体材料的接触分为欧姆接触和肖特基接触两种。在理想情况下，金属与半导体的接触处呈现很小的电阻，其上的压降可以忽略不计，而肖特基接触则具有整流特性。金属体系采用三层结构设计：通过淀积 Ti 获得良好粘附性和低接触电阻，然后用金属 Pt 阻止互扩散，最后淀积 Au 层，利用 Au 与 In 之间较高的互扩散能力实现电路与芯片间良好可靠的电学连接。最常用的欧姆接触制作方法就是用重掺杂的半导体与金属接触，同时还需要进行合适的热处理工艺。最终通过工艺优化并采用圆点传输线模型方法测得，P 型接触的比接触电阻率为 $6.05 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ ，N 型接触的比接触电阻率为 $1.65 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。如图 8 所示，I-V 曲线呈线性关系，说明形成了良好的欧姆接触。

2.5 背面减薄工艺

超晶格芯片与硅读出电路互连后采用背入

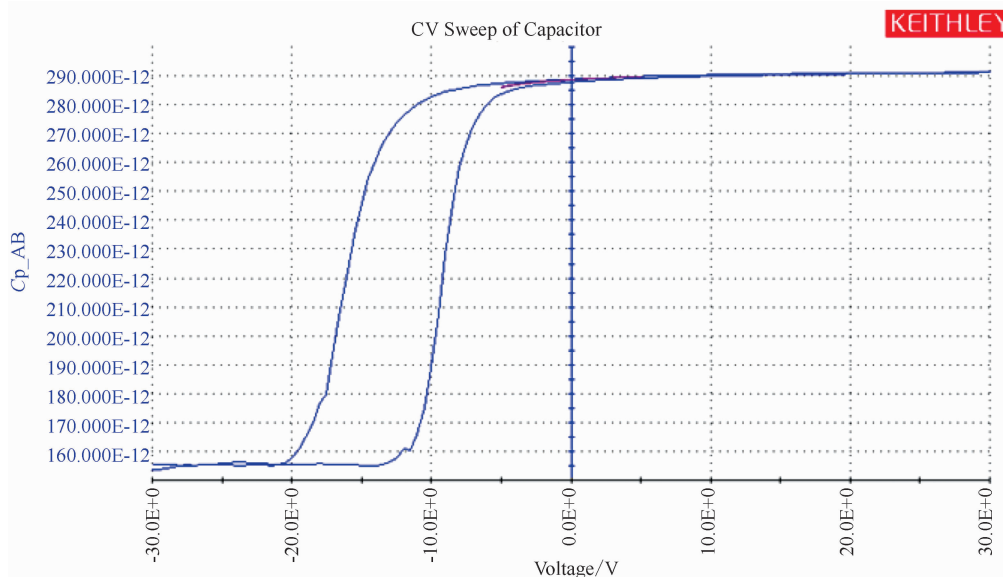


图 7 长波 InAs/GaSb II 类超晶格 MIS 结构的 C-V 曲线

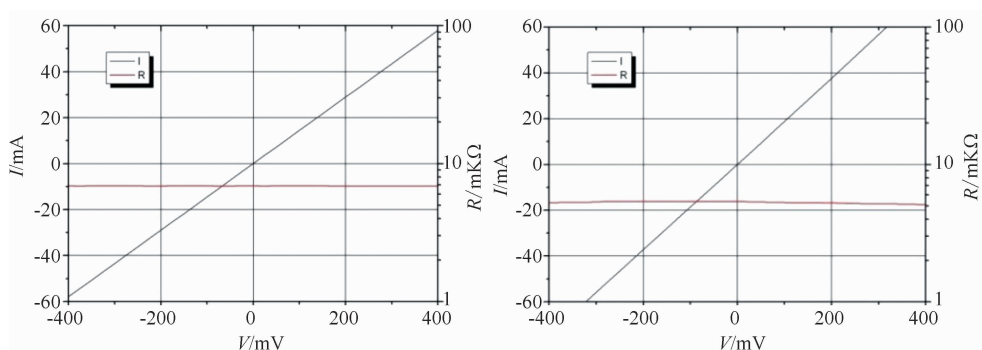


图 8 P 型接触(左)和 N 型接触(右)的 I-V 及 R-V 特性

射光照, 而 GaSb 衬底本身对红外波段有较强的吸收。此外, 由于超晶格材料与 Si 材料的热膨胀系数存在较大的差异, 每次开关机都要经受一次温差高达 220 K 的温度冲击, 使得器件内部的应力不断积累。为了同时提高量子效率和减小降温过程中积累的应力, 需对底部填充工艺后的剩余衬底材料进行背面减薄。在将探测器芯片经过单点金刚石精密车床车削、机械抛光、机械化学抛光和化学腐蚀后(见图 9), 最终使 GaSb 衬底减薄至 20 μm 左右, 同时需确保芯片表面光洁且无划痕(见图 10)。

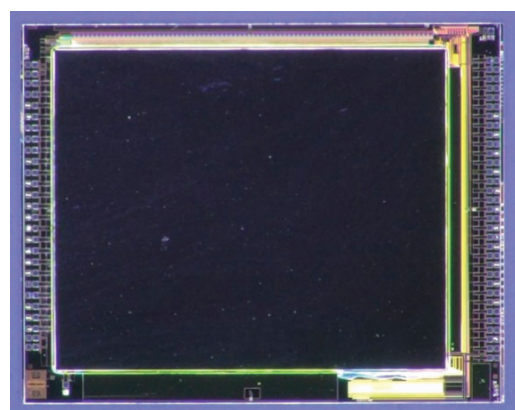


图 10 完成互连/点胶背减薄后的 320 \times 256 (30 μm) InAs/GaSb II 类超晶格长波混成芯片

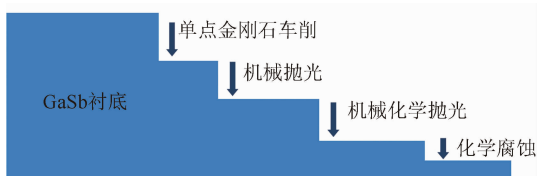


图 9 背面减薄工艺过程的示意图

3 器件性能测试

将制备好的 320 \times 256 (30 μm)长波超晶格芯片封到中测杜瓦内, 然后在 77 K 下用红外焦平面探测器测试系统进行黑体性能测试。主要性能指标的测试结果如下: 平均峰值探测率为

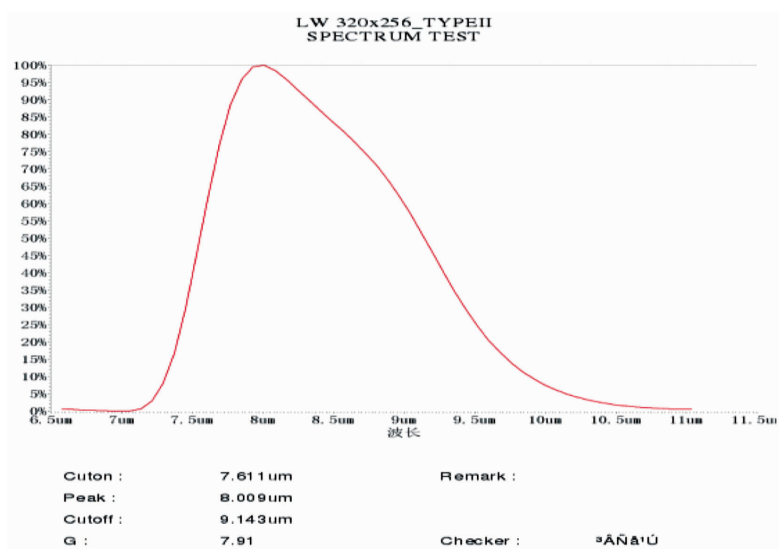


图 11 光谱曲线

$7.6 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$, 盲元率为 1.46%, 响应非均匀性为 7.55%, NETD 为 25.5 mK。通过计算可知, 该器件的峰值量子效率为 26.2%, 50%截止波长为 $9.1 \mu\text{m}$ (见图 11)。图 12 所示为该器件的成像演示结果。



图 12 器件成像演示

4 结束语

本文基于自研的采用 p- π -M-n 双异质结结构的长波 InAs/GaSb II 类超晶格材料, 通过台面腐蚀、表面钝化、电极制备、倒装互连、点胶固化和背面减薄等工艺, 获得了性能良好的面阵规模为 320×256 、像元中心距为 $30 \mu\text{m}$ 的 InAs/GaSb II 类超晶格长波芯片, 并进行了黑

体性能测试及成像演示。该研究为研制更大面阵规模、更小像元中心距的 InAs/GaSb II 类超晶格长波芯片奠定了基础。此外, 目前制备的 InAs/GaSb II 类超晶格长波芯片的 I-V 反向平坦区较窄, 器件截止波长较短, 后续还需要对相关材料及器件工艺进行优化。

参考文献

- [1] 史衍丽. 锑基 II 类超晶格红外探测器——第三代红外探测器的最佳选择 [J]. 红外技术, 2011, 33(11): 621-624.
- [2] 蒋洞微. InAs/Ga(In)Sb 超晶格长/远波段红外探测器研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [3] 宋淑芳, 巩锋, 周立庆. InAs/GaSb II 类超晶格红外探测器的研究进展 [J]. 激光与红外, 2014, 44(2): 117-120.
- [4] 亢喆, 温涛, 郭喜. InAs/GaSb 二类超晶格材料湿法腐蚀工艺研究 [J]. 激光与红外, 2018, 48(7): 867-871.
- [5] 巩锋, 马文全, 谭振, 等. 锑基二类超晶格中波红外焦平面探测器技术 [J]. 激光与红外, 2014, 44(3): 258-260.