

InAs/GaSb II 超晶格光导型红外探测器研究

蒲季春¹, 陈慧娟¹, 郭杰^{1,2}, 彭震宇¹, 鲁正雄¹, 孙维国¹

(1 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009)

(2 西北工业大学 材料学院, 西安 710072)

摘要: 采用分子束外延 (MBE) 方法, 在 GaAs 衬底上生长 II 型超晶格 InAs(2ML)/GaSb(8 ML) 和 InAs(8 ML)/GaSb(8 ML). X 射线衍射 (HRXRD) 和室温红外吸收光谱验证了超晶格材料的晶体结构和禁带宽度, 制备了短波和中波的单元光导探测器. 在室温和 77 K 下进行黑体测试和光谱响应测试, D^*_{λ} 均超过 $2 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$, 77 K 下 50% 截止波长分别为 $\sim 2 \mu\text{m}$ 和 $5 \mu\text{m}$.

关键词: InAs/GaSb 超晶格; 红外探测器; 光谱响应; 探测率

中图分类号: TN304.2

文献标识码: A

0 引言

GaSb 和 InAs 及其组成的 III-V 族合金是重要的中红外光电子材料, 它们的室带隙可以通过改变 InAs 或 GaSb 层的厚度, 可以在很宽的光谱范围 (2~30 μm) 制作成双色、双波段红外探测器^[1-3]. 与传统的 HgCdTe 和 I 型量子阱相比较, InAs/GaSb II 型超晶格具有电子有效质量大、抑制俄歇复合速率及均匀性好等优点, 可以有效降低暗电流和在较高温度工作^[4-6]. 本文报道了在 GaAs 衬底上外延生长短周期 InAs/GaSb 超晶格材料: InAs(2 ML)/GaSb(8 ML) 和 InAs(8 ML)/GaSb(8 ML), 制备了短波和中波光导探测器. 响应光谱和黑体探测率实验结果对短波/中波双色红外探测器提供了开发的潜能. 特别是短波方面, InAs 与 GaSb 厚度仅为 0.6 μm 和 2.4 μm , 响应截止波长在 2 μm 是首次报道.

1 探测器芯片制备

1.1 材料设计与生长

InAs/GaSb II 型超晶格禁带宽度可调, 能带位置也可调, 可以采用不同的材料设计获得相同的能带宽度. 目前, 用于能带计算的理论方法或模型主要有: K.P.包络函数近似 (EFA), 经验的紧束缚方法 (ETBM) 和赝势平面波近似等. Dente 和 Tilton^[7] 采用赝势方法预测 InAs(8ML)/GaSb(8ML) 超晶格的截止波长在 4.27 μm 处, 后来 E.Plis 等^[8] 采用光致发光谱 (PL) 得到的结果与预测一致. 对超短周期 InAs(2 ML)/GaSb(8 ML) 超晶格进行的模拟计算并没有报道, 郝瑞亭等测出其 PL 谱峰值位置在 2.1 μm 处.

InAs/GaSb 超晶格一般采用晶格匹配的 GaSb 衬底, 但 GaSb 无半绝缘衬底, 价格昂贵, 且不同厂商的产品差别大, 因此在 GaAs 衬底上制备出高质量的

GaSb 体材料是国际上 InAs/GaSb 超晶格生长的新途径. 由于 GaAs 与 GaSb 的 7% 晶格失配会产生大量失配位错^[9]. 因此首先要在 GaAs 衬底上生长出低位错密度 GaSb 缓冲层, 才能进一步生长出 InAs/GaSb 超晶格. 郝瑞亭等^[10] 采用优化的 MBE 生长条件制备出低位错的 GaSb 外延层, 2 $\mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ 范围原子台阶清晰可见, 没有任何螺位错, 均方根粗糙度为 0.1 nm. 在此 GaSb 缓冲层上外延 50 个周期 InAs(2 ML)/GaSb(8 ML) 和 InAs(8 ML)/GaSb(8 ML) 超晶格. 采用的设备为 VG80H MK II 型分子束外延系统, Sb₄ 和 As₄ 为 K-cells 提供. 生长过程中表面形貌由反射式高能电子衍射 (RHEED) 进行原位监测. InAs 与 GaSb 被控制在较低的生长速率, 分别为 0.03 和 0.07 $\mu\text{m}/\text{s}$. 通过控制快门顺序形成 1ML InSb 界面. 超晶格上面是 20 周期 AlSb(5nm)/GaSb(5 μm) 超晶格, 用于限制阱内光生载流子. 最外面为 GaSb 盖层. 采用了 Bede 1 HRXRD 分析超晶格的晶体结构和轮廓仪观察表面形貌.

1.2 探测器制备

可供红外探测器采用的有光电导、光伏、金属-绝缘体-半导体 (MIS) 和肖特基势垒等多种结构. 采用本征半导体的光电导探测器需在偏流条件下工作, 存在热耗散问题, 并不是十分适合于大型阵列焦平面探测器的制造, 但该种器件结构简单, 对材料结构及性能要求相对较低, 便于对器件的制造工艺水平做出评价, 进而也能对外延材料和测评技术进行最终验证. 因此, 本文着重对简单的光导型探测器进行了研究, 如图 1.

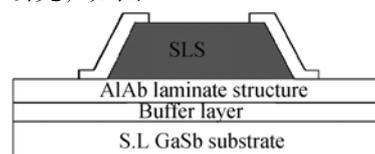


图 1 InAs/GaSb 超晶格光导探测器结构
Fig.1 the schematic diagram of the InAs/GaSb SLS photoconductor

单元光导器件采用标准光刻工艺和酒石酸腐蚀液将超晶格制作成台面结构, 如图 1. 光敏元面积为 $800\ \mu\text{m} \times 800\ \mu\text{m}$, 电极为 $\text{Ti} (50\ \mu\text{m}) / \text{Au} (200\ \mu\text{m})$, 采用溅射和剥离方法形成欧姆接触, 无钝化层和抗反射膜. 装入液氮杜瓦瓶内.

2 测试与分析

2.1 光谱测试

为了研究超晶格材料的禁带宽度, 将 GaAs 衬底进行减薄、抛光后, 采用傅里叶转换红外光谱仪对两种结构超晶格材料进行了室温光谱透过实验, 所得结果经换算, 得到吸收曲线, 如图 2. 从图中看出 InAs(2 ML)/GaSb(8 ML)和 InAs(8 ML)/GaSb(8 ML)超晶格在 $2.1\ \mu\text{m}$ 和 $5.0\ \mu\text{m}$ 处有明显的吸收. 但吸收边不陡直, 可能是由于衬底未去除, 其自由载流子吸收造成.

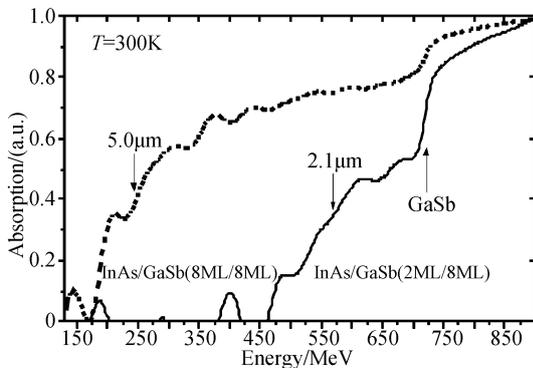


图 2 GaAs 基 InAs/GaSb 超晶格的室温吸收曲线
Fig.2 Typical absorbance spectra of the InAs/GaSb SLs at 300K

2.2 XRD 测试

图 3 是 1# 和 2# 超晶格样品的 XRD 扫描图, 以 GaSb (004) 为衍射面, 采用 $\omega/2\theta$ 联动方式对称扫描, 布喇格角等于 30.36° , 对应图中 0 坐标, 除 GaAs、GaSb、InAs 峰外, 每个图中都有两组超晶格卫星峰, 分别对应 AlSb/GaSb 和 InAs/GaSb^[11]. 图中可以观察到 InAs(2 ML)/GaSb(8 ML)超晶格的两级卫星峰, 计算周期为 $3.29\ \mu\text{m}$, 考虑界面厚度, 与设

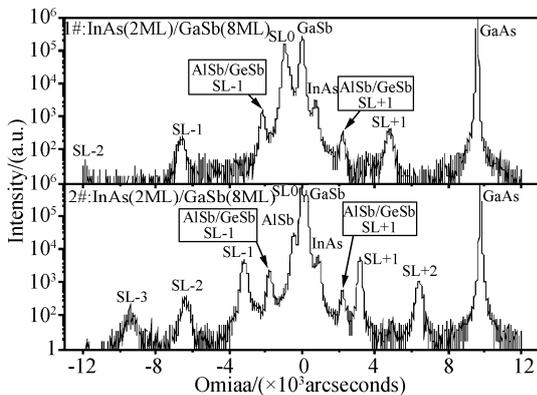


图 3 GaAs 基 InAs/GaSb 超晶格 HRXRD 图谱
Fig.3 High resolution XRD of the InAs/GaSb SLs for (004) atomic planes

计相吻合. 零级峰半峰宽为 $200\ \text{arcsec}$, 超晶格与衬底的晶格失配 $\Delta a/a = 7.8 \times 10^{-3}$, 与其它文献报道相比要大的多, 由于 InAs 厚度只有 2ML (约 $0.6\ \mu\text{m}$), 原子在界面发生聚集、互溶、替代等就十分显著, 使得晶格发生变化, 降低了超晶格晶体完整性. 从图 4 表面形貌看, 与 GaSb 衬底相比, 表面起伏较大, 粗糙度为 $1.2\ \text{nm}$. InAs(8 ML)/GaSb(8 ML)超晶格的卫星峰达到三级以上, 计算周期为 $5.8\ \mu\text{m}$, 比设计 $5.1\ \mu\text{m}$ 要大些, 可能是由于 Sb、As 为非裂解源, 腔内残留气体分子继续生长造成的. 但零级峰与失配都较小, $\Delta a/a = 2.0 \times 10^{-3}$. 从 XRD 可以得出, 在不匹配 GaAs 衬底上可以生长出较好的短周期超晶格.

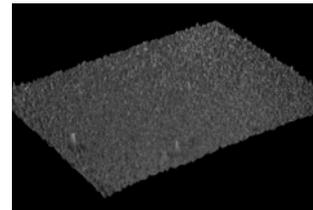


图 4 GaAs 基 2ML InAs/8ML GaSb 超晶格表面形貌
Fig.4 Surface morphology of the InAs/GaSb SLs

2.3 器件测试与分析

单元器件光敏面积为 $0.0064\ \text{cm}^2$, 短、中波器件电阻在 77 K 和 300 K 下分别为 $5.45\ \text{K}\Omega$ 、 $1.34\ \text{K}\Omega$ 和 $2.88\ \text{K}\Omega$ 和 $246\ \Omega$. 采用恒流源在 7~10 V 偏压下对器件进行响应光谱测试, 信号经自制前置放大器 and 傅里叶红外光谱仪转换(TGS 红外探测器)收集. 图 5 是两个器件在 77 K 和 300 K 的响应光谱曲线, 可以看出, 两个器件在长波方向都有明显的截止, 77 K 时, 50%截止波长分别为 $2.15\ \mu\text{m}$ 和 $5.05\ \mu\text{m}$, 与设

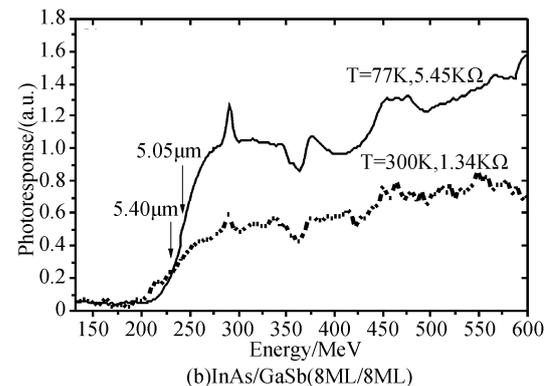
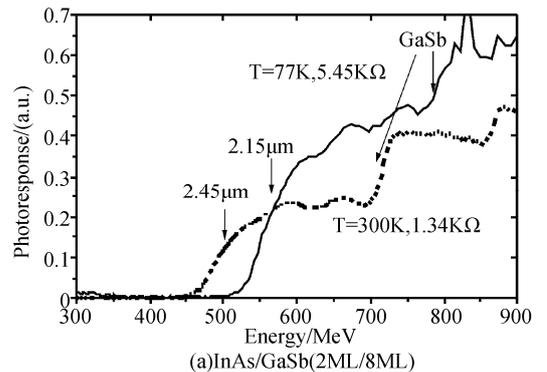


图 5 77K 和 300K 下 GaAs 基 InAs/GaSb 超晶格响应光谱
Fig.5 Spectral response from InAs/ GaSb SLs

计值基本一致. 室温下, 禁带宽度明显变小(红移), 说明 E_g 和温度有关. InAs(8 ML)/GaSb(8 ML)中波器件所测结果与理论预测 $4.27 \mu\text{m}$ 有偏离, 原因是超晶格结构周期与设计值不同, 正如 XRD 分析, 可能从空穴带向上移动.

黑体(短波器件 900 K, 中波器件 500 K)响应率和探测率也是采用自制前放, 经 1000 Hz 光斩波器调制, 输入信号分析仪得到. 响应率公式为

$$R_v = (V_{so} / G) / (\sqrt{T^4 D_A^2 A_d} / 4r^2) \quad (1)$$

式中, V_{so} : 前放输出电压, G : 前放放大倍数, α : 调制系数, σ : 斯忒潘-玻耳兹曼常数, T : 黑体温度, D_A : 黑体光阑口直径, A_d : 探测器有效光敏面积, r : 黑体到探测器距离. 短、中波器件 77 K 响应率分别为 $1.4 \times 10^3 \text{ V/W}$ 和 $1.8 \times 10^3 \text{ V/W}$, 短波器件 300 K 响应率为 30 V/W . 77 K 下, 对器件进行噪音测试后, 计算得出黑体峰值探测率 D^*_λ 超过 $10^9 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$.

3 结论

采用 MBE 方法, 在 GaAs 衬底上生长了两种晶体结构完整的短周期超晶格: InAs(2 ML)/GaSb(8 ML) 和 InAs(8 ML)/GaSb(8 ML), 并相应制备了短波和中波的单元光导探测器. 77 K 下 50% 截止波长分别为 $\sim 2 \mu\text{m}$ 和 $5 \mu\text{m}$. 响应率及 D^*_λ 等实验结果为国内开展 InAs/GaSb II 型超晶格红外探测器的研究提供了依据. 其中, 超短周期 InAs(2 ML)/GaSb(8 ML) 短波红外探测器使该材料体系截止波长范围延伸至

$2 \mu\text{m}$. 为实现焦平面和双色探测器, 研究方向将在 GaSb 衬底上生长性能更高的 pin 二极管.

参考文献

- [1] SAI-HALASZ G A, ESAKI R T L. A new semiconductor superlattice [J]. *Appl Phys Lett*, 1977, **30**:651-653.
- [2] TIAN Yuan, PENG Yu-heng, CHEN Wei-you, *et al*. Study on the band structure of superlattices composed with four materials[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1997, (7): 599-603.
田园, 彭宇恒, 陈维友, 等. 四种材料构成的超晶格能带结构的研究 [J]. 光子学报, 1997 (7): 599-603.
- [3] LI Xiao-ting, WANG Yi-ding, WANG Tao, *et al*. The study of inas_{sb}(1-x) on gasb substrate grown by LP-MOCVD[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, (9), 1363-1366.
李晓婷, 王一丁, 汪韬, 等. GaSb 衬底上外延 InAs_xSb_(1-x) 材料的 LP-MOCVD 研究 [J]. 光子学报, 2005, **34**(9):1363-1366.
- [4] FUCHS F, WEIMER U, PLETSCHE W, *et al*. High performance InAs/GaSb superlattice infrared photodiodes[J]. *Appl Phys Lett*, 1997, **71**:3251-3253.
- [5] MOHSENI H, WOJKOWSKI, RAZEGHI M, *et al*. Uncooled InAs/GaSb Type2 infrared detectors grown on GaAs substrates for the 8-12 μm atmospheric window[J], *Journal of Quantum Electronics*, 1999, **35**:1041-1044.
- [6] YOUNGDALE E R, MEYER J R, HOFFMAN C A, *et al*. Auger lifetime enhancement in InAs/GaSb superlattices[J]. *Appl Phys Lett*, 1994, **64**:3160-3162.
- [7] DENTE G C, TILTON M L J. Pseudopotential methods for superlattices: Applications to mid-infrared semiconductor lasers [J]. *Journal of Applied Physics*, 1999, **86**:1420.
- [8] PLIS E, ANNAMALAI S, POSANI K T, *et al*. Midwave infrared type-II InAs/GaSb superlattice detectors with mixed interfaces[J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, **100**: 014510.
- [9] HUANG S H, BALAKRISHNAN G, KHOSHAKHLAGH A, *et al*. Strain relief by periodic misfit arrays for low defect density GaSb on GaAs[J]. *Appl Phys Lett*, 2006, **88**:131911-1-3.
- [10] HAO Rui-ting, XU Ying-qiang, ZHOU Zhi-qiang, *et al*. Growth of GaSb layers on GaAs(001) substrate by molecular beam epitaxy[J]. *J Phys D:Appl Phys*, 2007, **40**:1080-1085.
- [11] ZHANG Dang-wei, ZHANG Jing-wen, HOU Xun. Superlattice usingamical theory and kinematical theory of X-ray diffraction[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002(8): 1007-1011.
张党卫, 张景文, 侯洵. 半导体超晶格属性的高分辨率X射线衍射研究[J]. 光子学报, 2002, (8):1007-1011.

Growth and Charaterization of InAs/GaSb Superlattices Photoconductors

PU Ji-chun¹, CHEN Hui-juan¹, Guo-Jie^{1,2}, PENG Zhen-yu¹, LU Zheng-xiong¹, SUN Wei-guo²

(1 Luoyang Optical Institute, P.O. Box 030-12, Luoyang Henan 471009, China)

(2 Material School, NorthWest Polytechnical University, Xi'an, 710000, China)

Received date:2008-05-16

Abstract: The short- and mid-wavelength infrared detectors were produced based on type2 superlattices: InAs(2ML)/GaSb(8ML) and InAs(8ML)/GaSb(8ML) grown on GaAs substrate by molecular-beam epitaxy. High resolution X-ray diffraction showed that SLs diffraction peaked up to the $\pm 3^{\text{rd}}$ order. Room-temperature optical transmittance spectra showed clear absorption edge at $\sim 2 \mu\text{m}$ and $\sim 5 \mu\text{m}$. The 50% cut-off wavelength of the two detectors was $2.1 \mu\text{m}$ and $5.05 \mu\text{m}$ at 77K respectively. The blackbody peak detectivity of both detectors was above $2 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ at 77K.

Key words: InAs/GaSb superlattices; Infrared detector; spectral response; Detectivity



PU Ji-chun was born in 1983 in Sichuan. He received the B.S. degree in physics department from Sichuan university in 2005. He is now working in CAMA and engage in the research and management of semiconductor.