

文章编号: 1001-9014(2009)03-0165-03

GaAs 基短周期 InAs/GaSb 超晶格红外探测器研究

郭杰^{1,2}, 彭震宇², 鲁正雄², 孙维国^{1,2}, 郝瑞亭³, 周志强³, 许应强³, 牛智川³

(1. 西北工业大学 材料学院, 陕西 西安 710072; 2. 洛阳光电技术发展中心, 河南 洛阳 471009;

3. 中科院半导体研究所, 北京 100083)

摘要: 采用分子束外延(MBE)方法, 在(001)GaAs 衬底上生长了短周期 II 型超晶格(SLs): InAs/GaSb (2ML/8ML) 和 InAs/GaSb (8ML/8ML). 从 X 射线衍射(HR-XRD)中计算出超晶格周期分别为 31.2 Å 和 57.3 Å. 室温红外透射光谱表明两种超晶格结构在短波 2.1 μm 和中波 5 μm 处有明显吸收. 通过腐蚀、光刻和欧姆接触, 制备了短波和中波的单元光导探测器. 在室温和低温下进行光谱响应测试和黑体测试, 77K 下, 50% 截止波长分别为 2.1 μm 和 5.0 μm, 黑体探测率 D_{bb}^* 均超过 $2 \times 10^8 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$. 室温下短波探测器 D_{bb}^* 超过 $10^8 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$.

关键词: 超晶格; InAs/GaSb 红外探测器; 分子束外延; 光谱响应

中图分类号: TN304 **文献标识码:** A

SHORT PERIOD InAs/GaSb SUPERLATTICE INFRARED DETECTOR ON GaAs SUBSTRATES

GUO Jie^{1,2}, PENG Zhen-Yu², LU Zheng-Xiong², SUN Wei-Guo^{1,2},
HAO Rui-Ting³, ZHOU Zhi-Qiang³, XU Ying-Qiang³, NIU Zhi-Chuan³

(1. Material School, North West Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Luoyang Optoelectronics Institute, Luoyang 471009, China;

3. Institute of Semiconductors, CAS, Beijing 100083, China)

Abstract: Two type II superlattices (SLs): InAs(2ML)/GaSb(8ML) and InAs(8ML)/GaSb(8ML) were grown on GaAs substrates by molecular-beam epitaxy. High resolution X-ray diffraction showed the periods of the two SLs were 31.2 Å and 57.3 Å, respectively. Room-temperature optical transmittance spectra showed that there were clear absorption edges at 2.1 μm and 5 μm for the two SLs. The SWIR and MWIR photoconductor devices were fabricated by standard lithography and etched by tartaric acid solution. The spectral response and blackbody tests were carried out at low and room temperatures. The results show that the 50% cutoff wavelengths of the two photoconductors are 2.1 μm and 5.0 μm respectively and D_{bb}^* is above $2 \times 10^8 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ for two kinds of photoconductors at 77K. D_{bb}^* is above $10^8 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ for SWIR photoconductor at room temperature.

Key words: superlattice; InAs/GaSb infrared detector; molecular-beam epitaxy(MBE); spectral response

引言

自从 1977 年 Esaki 等提出 InAs/GaSb II 型超晶格红外探测器以来, 其独特的“错开型”能带结构和潜在应用受到广泛的关注. 通过改变 InAs 或 GaSb 层的厚度, 使截止波长在很宽的光谱范围(3 ~ 30 μm)变化, 因此适合制作晶格匹配的双色、双波段红外探测器. 与传统的 HgCdTe 材料相比较, 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, 可以有效降低隧穿电流和工作在较高温度^[1-3]. 本文报道了在 GaAs 衬底上外延生长短周期 II 型超晶格材料: InAs/GaSb (2ML/8ML) 和 InAs/GaSb (8ML/8ML), 并制备了基于该两种超晶格的短波和中波光导探测器. 特别是短波方面, 首次报道了响应截止波长在 2.1 μm 的 InAs(6 Å)/GaSb(24 Å) 红外探测器.

1 探测器芯片制备

收稿日期: 2008-06-21, 修回日期: 2009-03-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60607016, 60625405)

作者简介: 郭杰(1979-), 男, 河南安阳人, 博士研究生, 主要从事红外材料与探测器方面的研究.

Received date: 2008-06-21, revised date: 2009-03-18

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^[4]采用赝势方法预测 InAs/GaSb (8ML/8ML) 超晶格的截止波长在 4.27 μm 处,对超短周期 InAs/GaSb (2ML/8ML) 超晶格进行的模拟计算并没有报道,郝瑞亭等^[5]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,因此首先要在 GaAs 衬底上生长出低位错密度的 GaSb 缓冲层,才能进一步生长出 InAs/GaSb 超晶格.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,表面均方根粗糙度只有 0.1nm.在此 GaSb 缓冲层上,外延生长 20 周期 AlSb(50Å)/GaSb(50Å) 超晶格缓冲层,用于阻挡 InAs/GaSb 超晶格内光生载流子与衬底的复合.其后是 GaSb 层,然后外延生长 200 周期两种超晶格: InAs/GaSb (2ML/8ML) 和 InAs/GaSb (8ML/8ML).超晶格表面为 GaSb 盖层.整个生长过程在 VG80H MK II 型分子束外延系统内完成,其中 Sb₄ 和 As₄ 由 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 0.3 和 0.7Å/s.通过控制快门顺序形成 InSb 界面调节应力.

1.2 探测器制备

单元光导探测器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.光敏元面积为 800 $\mu\text{m} \times 800\mu\text{m}$,采用磁控溅射方法生长电极为 Ti(500Å)/Au(2000Å),剥离成条状,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

图 1 是两个超晶格样品的 XRD 扫描图,以 GaSb(004) 为衍射面,采用 $\omega/2\theta$ 联动方式对称扫描,布拉格角等于 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.采用 Bede

Rads 软件对超晶格 XRD 结果进行模拟,为方便比较,模拟中没有考虑缓冲层 AlSb/GaSb 超晶格,只有 InAs/GaSb 超晶格.可以观察到 InAs/GaSb (2ML/8ML) 超晶格出现两级卫星峰,拟合周期为 31.2Å,与设计的 31.5Å 基本吻合.零级峰半峰宽为 200arcsec,超晶格零级峰与 GaSb 缓冲层的晶格失配 $\Delta a/a = 7.8 \times 10^{-3}$. InAs(8ML)/GaSb(8ML) 超晶格的卫星峰达到五级,拟合周期为 57.3Å,相比设计 50Å 要大些,原因是由于 Sb、As 为非裂解源,关闭快门时仍有残留气体分子继续生长造成周期厚度大于设计值.但零级峰半峰宽与失配都较小, $\Delta a/a = 2.0 \times 10^{-3}$.与在 GaSb 衬底上生长的超晶格相比^[6],结果相当.说明在不匹配 GaAs 衬底上可以生长出结构完整的 InAs/GaSb 超晶格.但是原子在界面发生的聚集、互溶、替代等对超晶格结构影响十分显著,导致超晶格卫星峰展宽和应力.界面的起伏也会使超晶格表面粗糙度增大,图 2 为 4 $\mu\text{m} \times 4\mu\text{m}$ 范围内原子力显微镜照片.可以观察到表面起伏较大,均方根粗糙度约为 5nm.

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 3 所示.从图中

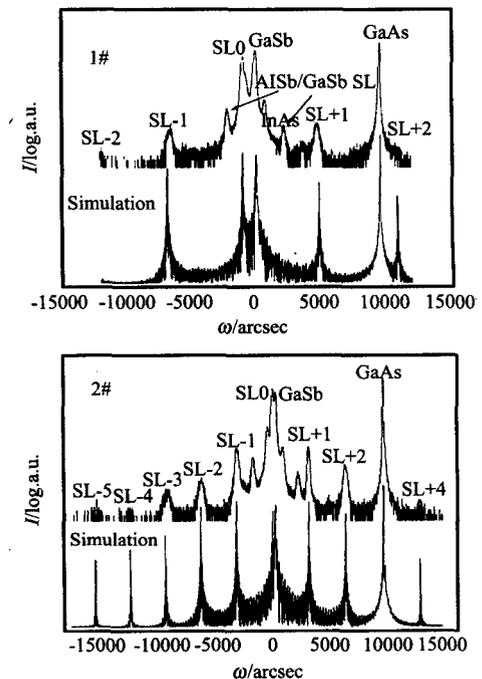


图 1 InAs/GaSb 超晶格 HRXRD 图谱(1#:2ML/8ML,2#:8ML/8ML)

Fig.1 High resolution XRD of the InAs/GaSb SLs. (1#:2ML/8ML, 2#: 8ML/8ML)

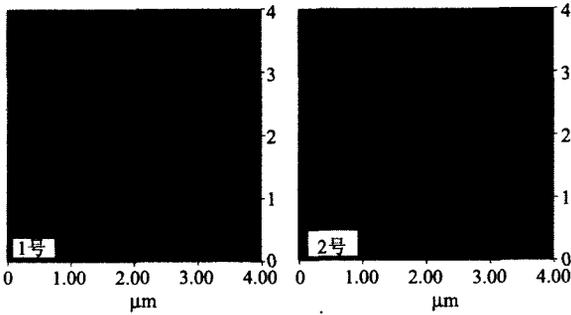


图 2 InAs/GaSb 超晶格表面形貌(1#:2ML/8ML,2#:8ML/8ML)

Fig. 2 Surface morphology of the InAs/GaSb SLs

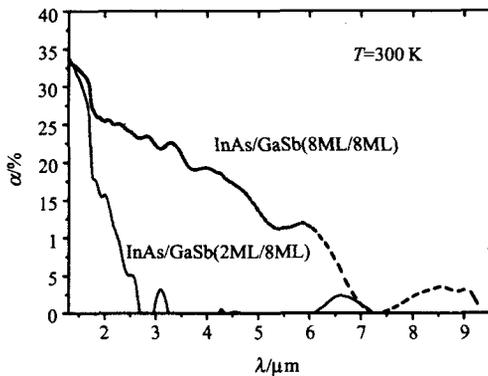


图 3 InAs/GaSb 超晶格的吸收曲线

Fig. 3 Absorption spectra of the InAs/GaSb SLs

看出 InAs/GaSb (2ML/8ML) 和 InAs/GaSb (8ML/8ML) 超晶格在 2.1 μm 和 5.0 μm 处有明显的吸收, 对应超晶格中由于电子波函数和空穴波函数交叠后产生的导带和重空穴带的带间跃迁. 整个吸收边并不陡直, 原因是超晶格结构不完整产生的缺陷能级以及空穴带分离后引起的其它较高能带间跃迁.

单元器件光敏面面积为 0.0064 cm^2 , 在 77K 和 300K 下, 短波器件电阻分别为 5.45k Ω 、1.34k Ω , 中波器件电阻分别为 2.88k Ω 和 246 Ω . 采用恒流源在 7~10V 偏压下对器件进行正入射响应光谱测试, 信号经自制前置放大器放大, 采用傅里叶转换红外 (FTIR) 光谱仪得到两个器件在 77K 和 300K 的响应光谱曲线, 如图 4 所示. 从图中可以看出, 在 77K 时, 两个器件 50% 截止波长分别为 2.1 μm 和 5.0 μm . InAs/GaSb (2ML/8ML) 短波器件中, 1.7 μm 处是 GaSb 缓冲层的响应. 在超晶格响应处朝短波方向增强原因是由于器件吸收层厚度仅有 0.6 μm 小于吸收深度导致量子效率比较低, 在这样的厚度下, 短波处吸收系数大, 造成低于 2.1 μm 的响应更强, 同时也有超晶格其它子带间的跃迁贡献. InAs/

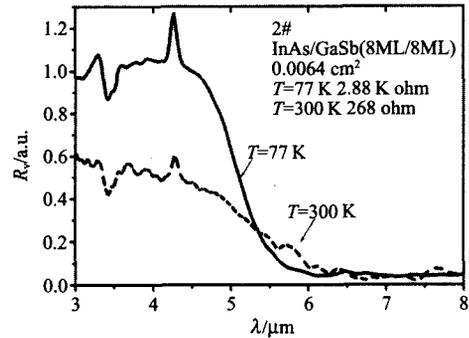
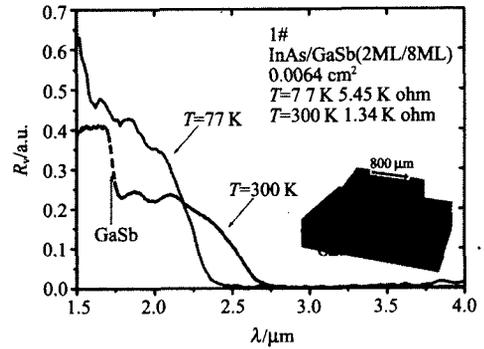


图 4 77K 和 300K 下 InAs/GaSb 超晶格响应光谱(1#: 2ML/8ML, 2#: 8ML/8ML). 内图为光导探测器结构
Fig. 4 Spectral response of InAs/GaSb SLs at 77K and 300K. Inset: the schematic diagram of photoconductor

GaSb (8ML/8ML) 中波器件所测结果与理论预测得到的 4.27 μm 有偏离, 原因可能是超晶格结构周期与设计值的偏差的影响, 正如 XRD 中分析, GaSb 与 InAs 实际厚度变大.

300K 下, 光电流强度变弱, 同时截止边向长波方向移动 (红移), 短、中波探测器禁带宽度分别减少约 50meV 和 30meV. Wei 等^[7] 采用 ETBM 方法计算认为, 温度变化导致各层材料晶格常数的变化并不会引起超晶格禁带宽度发生较大改变.

黑体 (短波器件 900K, 中波器件 500K) 响应率和探测率也是采用自制前放, 经 1000Hz 光斩波器调制, 输入信号分析仪得到. 为消除 GaSb 缓冲层在探测器中的响应, 将一滤光片 (截止波长在 1.7 μm) 置于样品前对黑体辐射进行滤光. 短、中波器件 77K 响应率分别为 $3 \times 10^3 \text{ V/W}$ 和 $1.8 \times 10^3 \text{ V/W}$, 短波器件 300K 响应率为 25V/W. 在 77K 下, 对器件进行噪声测试后, 计算得出短、中波器件黑体探测率分别为 $5 \times 10^8 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 和 $2 \times 10^8 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$. 在 300K 下, 短波器件黑体探测率超过 $1 \times 10^8 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$, 已达到 InGaAsSb PIN 探测器^[8] 的水平. 与 InGaAs 短波探测器^[9] 相比仍有差距, 主要有两方面原因: 一、

(下转 228 页)

Published by the press Syndicate of the university of Cambridge, 2002.

- [6] WANG Shao-Qing, REN Zhong-Jing, ZHANG Xi-Ming. Study of calculating method of mie scattering coefficient [J]. *Applied optics* (王少清, 任中京, 张希明等. Mie 散射系数计算方法的研究. *应用光学*), 1997, **18**(2): 4—9.
- [7] SUN Jing-Qun. *Atmosphere Detection by Laser* [M]. Beijing: Science Press, 1986. (孙景群. *激光大气探测*), 北京: 科学出版社, 1986.
- [8] Vul' fson A N. Spectral modification beer's law and relation from humidity attenuation coefficient in the atmospheric maritime mist [J]. *Proceedings of SPIE*, 2000, **4341**: 649—655.
- [9] YAN Feng-Qi, HU Huan-Ling, ZHOU Jun. Measurements of number density distribution and imaginary part of refractive index of aerosol particles [J]. *Acta Optica Sinica* (阎逢旗, 胡欢陵, 周军. 大气气溶胶粒子数密度谱和折射率虚

部的测量. *光学学报*), 2003, **23**(7): 855—859.

- [10] HAN Yong, RAO Rui-Zhong, WANG Ying-Jian. Multi-wavelength aerosol optical characteristics obtained by atmospheric visibility [J]. *Infrared and Laser Engineering* (韩永, 饶瑞中, 王英俭. 利用大气能见度获取多波长气溶胶光学特性. *红外与激光工程*), 2007, **36**(2): 265—269.
- [11] Horvath H. Atmospheric visibility [J]. *Atmospheric Environment*, 1981, **15**: 1785—1796.
- [12] RONG Zhi-Guo, ZHANG Yu-Xiang, JIA Feng-Min, et al. On-orbit radiometric calibration of fengyun geostationary meteorological satellite's infrared channels based on sea-surface measurements in the south china sea [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (戎志国, 张玉香, 贾凤敏, 等. 利用南海水面开展我国静止气象卫星红外通道在轨辐射定标. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(2): 97—101.

(上接 167 页)

受 MBE 设备影响, 材料生长仍然没有最优化; 二、目前的光导探测器在厚度, 载流子浓度钝化等方面没有优化. 因此, 量子效率及噪声随着器件结构改善仍会有较大提高. 但是 InAs/GaSb 超晶格具有上述两种材料不具备的在匹配衬底上从短波到甚长波范围工作的特点.

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 InAs/GaSb 超晶格: 2ML/8ML 和 8ML/8ML, 并相应制备了短波和中波的单元光导探测器. 77K 下, 50% 截止波长分别为 2.1 μm 和 5.0 μm . 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/GaSb (2ML/8ML) 短波红外探测器使该材料体系截止波长范围延伸至 2 μm . 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.

REFERENCES

- [1] Sai-Halasz G A, Tsu R, Esaki L. A new semiconductor superlattice [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1977, **30**: 651—653.
- [2] Mohseni H, Wojkowski J, Razeghi M, et al. Uncooled InAs/GaSb type-II infrared detectors grown on GaAs substrates for the 8 ~ 12 μm atmospheric window [J]. *Journal of*

Quantum Electronics, 1999, **35**: 1041—1044.

- [3] XU Xiang-Yan, YE Zhen-Hua, LI Zhi-Feng, et al. Numerical modeling of middle wavelength two-color photovoltaic HgCdTe detectors [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (徐向晏, 叶振华, 李志锋, 等. 中波双色光伏型 HgCdTe 红外探测器模拟研究. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(3): 164—169.
- [4] Dente G C, Tilton M L. Pseudopotential methods for superlattices: Applications to mid-infrared semiconductor lasers [J]. *J. Appl. Phys.*, 1999, **86**: 1420—1423.
- [5] Hao R T, Xu Y Q, Zhou Z Q, et al. MBE growth of very short period InAs/GaSb type-II superlattices on (001) GaAs substrates [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2007, **40**: 6690—6693.
- [6] Walther M, Schmitz J, Rehm R, et al. Growth of InAs/GaSb short period superlattices for high performance resolution mid-infrared focal plane array detectors [J]. *J. Crystal Growth*, 2005, **278**: 156—161.
- [7] Wei Y J, Hood A, Yau H, et al. Uncooled operation of InAs/GaSb type II superlattices photodiodes in the mid-wavelength infrared range [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **86**: 233106-1-3.
- [8] Liu Y X, Xia G Q, Tang S Q, et al. Antireflection coating for GaInAsSb/GaSb PIN infrared photodetectors [J]. *J. Functional Materials and devices* (刘延祥, 夏冠群, 唐绍裘, 等. GaInAsSb/GaSb 红外探测器抗反膜的研究. *功能材料与器件*), 2005, **11**: 327—332.
- [9] TIAN Zhao-Bing, GU Yi, ZHANG Yong-Gang. Quantum efficiency optimization of InP-based In_{0.53}Ga_{0.47}As photodetectors [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (田招兵, 顾溢, 张永刚. InP 基 In_{0.53}Ga_{0.47}As 光电探测器的量子效率优化. *红外与毫米波学报*), 2008, **27**(2): 81—85.
- [10] LIU Yu-Dong, ZHANG Gang, CUI Jian-Guo, et al. Effects of texture on the shear strength of In bump [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (刘豫东, 张钢, 崔建国, 等. 织构对铟凸点剪切强度的影响. *红外与毫米波学报*), 2004, **23**(3): 225—228.

(上接 197 页)

- [9] LI Zhong-Ya, CHENG Lei, LI Cheng-Fu. Study of Laser Damage of Silica and Sapphire Crystal [J]. *Chinese Journal of Lasers* (李仲伢, 程雷, 李成富. 熔石英玻璃和白宝石晶体激光损伤的研究. *中国激光*), 2002, **A29**(10): 920—924.