

GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As QWIP 暗电流特性 HRTEM 研究

胡小英,刘卫国,段存丽,蔡长龙,韩 军,刘 钧

(西安工业大学 光电工程学院,陕西 西安 710032)

摘 要: 采用金属有机物化学气相沉积法(MOCVD)生长 GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As 量子阱材料,制备 300 μm×300 μm 台面,内电极压焊点面积为 20 μm×20 μm,外电极压焊点面积为 80 μm×80 μm 的单元样品两种。用变温液氮制冷系统对样品进行 77~300 K 暗电流特性测试。结果显示,器件暗电流曲线呈现出正负偏压的不对称性。利用高分辨透射扫描电镜(HRTEM)获得样品纳米尺度横断面高分辨像,分析结果表明:样品横断面处存在不同程度的位错及不均匀性。说明样品内部穿透位错造成相位分离是引起量子阱光电性能变差的根本原因,不同生长次序中 AlGaAs 与 GaAs 界面的不对称性与掺杂元素的扩散现象加剧了暗电流曲线的不对称性。

关键词: 量子阱红外探测器; GaAs/AlGaAs; 金属有机物化学气相沉积; 暗电流; 高分辨透射扫描电镜

中图分类号: TN215 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)09-3057-04

Dark current of GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As quantum well infrared photodetector by HRTEM

Hu Xiaoying, Liu Weiguo, Duan Cunli, Cai Changlong, Han Jun, Liu Jun

(School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)

Abstract: The method of Metal Organic Chemical Vapor Deposition (MOCVD) was used to grow GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As quantum well material. Which is prepared for quantum well infrared photodetectors(QWIP). The two sample-devices have large surface area 300 μm×300 μm. But its pressure welding area of inside electrode is 20 μm×20 μm while that of the one outside is 80 μm×80 μm. Refrigerating machine of liquid nitrogen was adopted to do dark current test under variable-temperature from 77 K to 300 K. The dark current was studied under different bias voltages. The results show that dark current curves is asymmetric under positive and negative bias voltage. The crystal structure is investigated by use of high-resolution transmission electron microscope (HRTEM) to determine the exact reson. Which shows that there is thread dislocation and nonuniformity in different degrees. The follows is known from above: It is the phase separation caused by the threading dislocation that leads to photoelectric performance variation essentially. At the same time, it is interfacial asymmetry between AlGaAs and GaAs in different growing

收稿日期:2013-06-10; 修订日期:2013-07-25

基金项目:西安工业大学光电工程学院重点院长基金(13GDYJZ01);总装先进制造(51318020303);陕西教育厅项目(12Jk0980);国防基础研究项目(A0920110019);陕西省薄膜技术与光学检测重点实验室开放基金(ZSKJ201401)

作者简介:胡小英(1978-),女,讲师,博士,主要从事新型光电器件,微电子技术方面的研究。Email: 490027874@qq.com

orders and the doping element diffusion that intensifies asymmetry of dark current.

Key words: quantum well infrared photodetectors; GaAs/AlGaAs; metal organic chemical vapor deposition (MOVCD); dark current; high-resolution transmission electron microscope (HRTEM)

0 引言

GaAs/AlGaAs 量子阱红外探测器(Quantum Well Infrared Photodetector, QWIP)是先进的薄膜生长技术与微电子学相结合的一种新型红外探测器^[1-3]。从上世纪末报道量子阱红外探测器的研究至今,其相关技术得到了快速的发展,国外从单元器件到焦平面器件都有成熟的产品^[4-7],但国内这方面的研究相对比较薄弱^[8]。尤其随着对子带物理及器件性能优化设计的研究,如何提高器件的探测率,减小暗电流成为亟待解决的问题。

因为 GaAs/AlGaAs QWIP 工作于光电导模式,即使在无光照射的情况下,仍有一个微小的电流输出,该电流称为暗电流。从量子阱红外探测器工作原理可知,其暗电流主要源于以下三种方式^[9]:基态隧穿电流,热激发电流及热助隧穿电流。其中只有基态隧穿电流与温度无关,且只在温度较低时起主导作用;而热激发电流及热助隧穿电流与温度有关,是温度较高时暗电流的主要来源。而暗电流是器件产生噪声的主要原因,不但对器件噪声和工作温度有很大影响,且直接限制了器件最小可探测功率^[10]。暗电流的增加,不但会降低器件灵敏度,增大探测器噪声功率,而且影响器件探测性能^[11]。

因此开展对 QWIP 暗电流的研究是必要且重要的。笔者利用高分辨透射扫描电镜获得的样品横断面高分辨像,并解释了器件出现宏观暗电流特性的原因,旨在掌握暗电流产生机制,改善器件暗电流特性,提高 QWIP 组建信噪比,为器件的优化设计提供理论依据。

1 量子阱材料生长与制备

GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As 量子阱材料是采用 MOVCD 系统在半绝缘(100)面 GaAs 衬底上生长而成。其中 Al 源为三甲基铝(TMAL),Ga 源为三甲基镓(TMGA),As 源为反映炉中通入含有 10%AsH₃,硅掺杂用的气源为 SiH₄,反应炉温度为 1 073 K。采用 n 型掺杂量

子阱结构,材料外延层包括 n 型重掺杂上下欧姆接触层。GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As 多量子阱层叠采用 40~50 周期的 Al 吸收层量子阱结构,而 GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As QWIP 垒层约为 50 nm,以及 GaAs 阱厚度约为 5 nm。其中 GaAs 阱层掺 Si 浓度约为 $5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 。采用常规 n 型 GaAs 欧姆接触多层金属结构 AuGeNi/Au 作为欧姆接触电极,通过剥离与快速退火的方式形成欧姆接触合金。结合外延材料设计、生长并制备量子阱红外探测器测试样品数个。

采用湿法将基于 MOVCD 生长 GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As 量子阱材料刻蚀出台面面积为 $300 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$,上下电极的欧姆接触层使用 AuGeNi/Au,制备出电极面积和位置不同的 QWIP 样品,如图 1 所示。

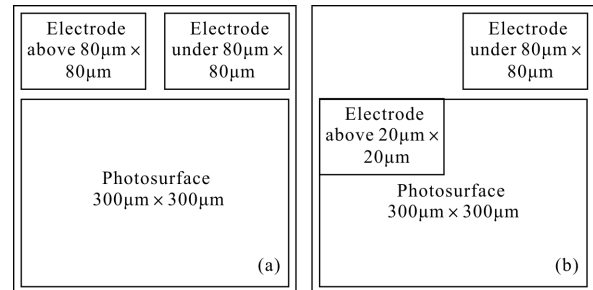


图 1 QWIP 样品结构示意图

Fig.1 Structure of QWIP samples

其中图 1(a)为 1# 样品,它的上下电极均位于光敏面之外,压焊点面积是 $80 \mu\text{m} \times 80 \mu\text{m}$;而图 1(b)为 2# 样品,它的上电极在内,下电极在外,其压焊点面积分别是 $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$, $80 \mu\text{m} \times 80 \mu\text{m}$ 。分别对两样品进行侧面 45° 抛光,用金丝球焊出电极引线以备测试使用。

2 暗电流测试及分析

将 1#、2# 样品装入杜瓦瓶中,采用 Keithely 236 测试仪搭建量子阱红外探测器液氮至常温(77~300 K),不同偏压条件的暗电流测试系统。其中偏压范围为 $-1.0 \sim 1.0 \text{V}$,电压扫描步进为 0.01V 。1#、2# 样品暗电流特性曲线分别如图 2(a)、(b)所示。

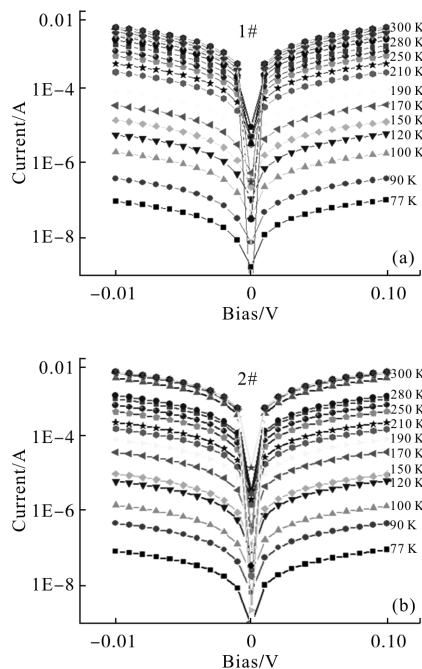


图2 1#、2# 样品暗电流曲线

Fig.2 Dark current curves of 1# and 2#

由图2样品暗电流曲线可知:两样品暗电流都具有随工作温度的升高而增大的趋势;两样品正偏暗电流不小于反偏的,即呈现出正负偏压的不对称性,且相同温度时1#样品暗电流较2#的小些。

QWIP暗电流在77~100 K范围内增长速度较缓慢,这是因为热辅助隧穿和热电子发射机制不再是形成本征暗电流的主导因素,而与温度无关的场辅助隧穿占据主导地位。因此,低温时QWIP暗电流随温度变化不明显;而在110~200 K范围内其增长速度较快,这主要是因为温度升高致使热电子发射数增加,此时与温度相关的热辅助隧穿和热电子发射机制是本征暗电流形成的主导因素;而在温度上升至200 K及以上时,出现了暗电流随温度与偏压绝对值的增加而不变化的现象,即特性曲线趋于水平,且在反向偏压下出现了较早达到饱和的现象。这是由于量子阱的阱中热激发电子已达到饱和所致。

3 HRTEM 对实验结果分析与探讨

鉴于高分辨技术是观察分析研究量子阱材料界面结构最有效的方法,只有利用电子显微镜从微观尺度对GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As材料界面结构进行分析研究才能准确把握器件的宏观光电特性^[12]。所以其采

用高分辨透射扫描电镜对样品进行分析,图3(a)、(b)分别为1#、2#样品横断面结构形貌图。

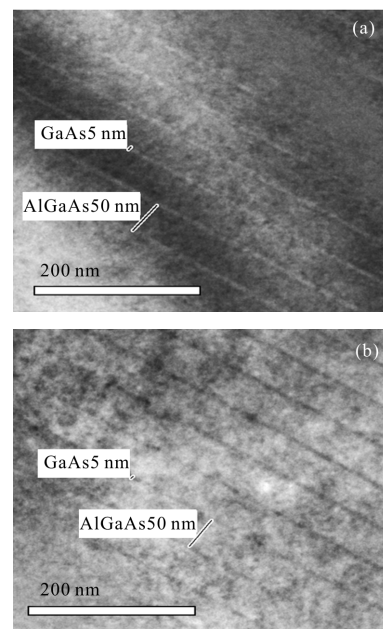


图3 1#、2# 样品横断面结构形貌

Fig.3 Interface structure of 1# and 2#

由图3可以看出,GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As量子阱红外探测器由厚度较薄的外延层材料GaAs夹在两层较厚的外延层宽禁带材料AlGaAs之间交替生长而成。所设计GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As QWIP 垒层为50 nm,GaAs阱厚度为5 nm。其中1#样品界面出现了亮暗程度不同的衬度带,而2#样品出现了明显的亮衬度带,并且在接近中心的区域出现了亮点极值。

根据样品暗电流曲线呈现正负偏压不对称性,及正向暗电流明显大于负暗向电流的现象。结合样品微观界面结构形貌图。其认为:样品位错穿过区域靠近AlGaAs层附近衬度区域的加宽,致使Al原子从AlGaAs层析出,导致穿透位错造成相位分离,这正是造成阱中热激发电子速度与方向发生改变,并过早地达到饱和,即出现暗电流的平行线现象的原因。根据暗电流的产生机理,温度较低时,它主要决定于基态隧穿电流,其大小由材料缺陷程度决定。而GaAs薄膜中含有大量的缺陷,其中包括有掺杂或者生长技术带来的点缺陷以及由衬底异质外延晶格失配引起的缓冲层位错与缺陷,这无疑增大了暗电流。随着温度的不断升高,由热激发到同一子带但不同波矢能态上,然后在一定偏压下隧穿势垒顶部的热

助隧穿电流对暗电流有很大贡献。接着暗电流主要由热激发而直接到达连续态的热激发载流子决定。另外,样品生长工艺引起的不同生长次序中 AlGaAs 与 GaAs 界面的不对称性,以及掺杂元素的扩散现象。这些都是引起宏观暗电流增大,及特性曲线出现不对称的根本原因,这与样品微观结构形貌是相符的。

由图 3 可知,1# 样品的不均匀性弱于 2# 样品的,结合相同温度时 1# 样品暗电流始终不大于 2# 样品的暗电流,说明样品界面处不均匀性的强弱直接影响着器件暗电流的大小。

4 结 论

根据样品暗电流特性曲线,结合高分辨透射扫描电镜对器件微观结构形貌的分析研究,解释了样品正负偏压暗电流不对称的现象,说明样品穿透位错与材料生长过程中精度控制不够是造成器件宏观光电特性变差的根本原因。样品横断面不均匀性则加剧了暗电流。另电极压焊点面积大小与位置对器件暗电流也有一定影响。

参 考 文 献:

- [1] Li N, Xiong D Y, Yang X F, et al. Dark currents of GaAs/AlGaAs quantum-well infrared photodetectors[J]. *Appl Phys A*, 2007(89): 701-705.
- [2] Nutku F, Erol A, Gunes M, et al. I-V characterization of a quantum well infrared photodetector with stepped and graded barriers [J]. *Superlattices and Microstructures*, 2012 (52): 585-593.
- [3] Choi K K, Jhabvala M D, Forrai D P, et al. Electromagnetic modeling of quantum well infrared photodetectors [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2012, 48(3): 384-393.
- [4] Hu Xiaoying, Liu Weiguo, Chen Zhili. Dark current characteristic analysis of GaAs/AlGaAs quantum well infrared photodetectors based on MOVCD [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2012, 33(06): 809-812. (in Chinese)
- [5] Lu Wei, Li Ning, Zhen Honglou, et al. A new group of infrared opto-electronics quantum well infrared photodetectors [J]. *Science in China*, 2009, 39(3): 336-343. (in Chinese)
- [6] Jin Jupeng, Liu Dan, Wang Jianxin, et al. 320 × 256 GaAs/AlGaAs long-wavelength quantum well infrared photodetector focal plane array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 833-837. (in Chinese)
- [7] Guzman A, Sanchez-Rojas J L, Tijero J M G, et al. Growth and characterization of a bound-to-quasi-continuum QWIP with Al-graded triangular confinement barriers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, 11(12): 1650-1652.
- [8] Eric Costard, Bois P, Alfredo De Rossi, et al. QWIP detectors and thermal imagers [J]. *C R Physique (Comptes Rendus Physique)*, 2003(4): 1089-1102.
- [9] Ribet-Mohamed I, Rouzo J L, Rommeluere S, et al. Advanced characterization of the radiometric performances of quantum well infrared photodetectors [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2005, 47: 119-131.
- [10] Li Xianjie, Liu Yingbin, Feng Zheng, et al. AlGaAs/GaAs quantum well infrared photodetector focal plane array based on MOCVD technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(4): 435-438. (in Chinese)
- [11] Shi Yanli. 320 × 256 GaAs / AlGaAs quantum well infrared photodetector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 42-44. (in Chinese)
- [12] Hu Xiaoying, Liu Weiguo. Microstructure studies of GaAs/Al_xGa_{1-x}As quantum well infrared photodetector [J]. *High Power Laser and Particals Beams*, 2013, 25(6): 1405-1408.