

HgCdTe 长波光伏探测器的表面漏电流及 $1/f$ 噪声研究

孙 涛[†] 陈兴国 胡晓宁 李言谨

(中国科学院上海技术物理所功能材料器件中心, 上海 200083)

(2004 年 10 月 22 日收到 2004 年 12 月 9 日收到修改稿)

在同一 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 晶片上 ($x = 0.217$) 制备了单层 ZnS 钝化和双层 (CdTe + ZnS) 钝化的两种器件, 对器件烘烤前后的暗电流和 $1/f$ 噪声进行了测试, 烘烤前发现 ZnS 钝化的器件在反偏较大时具有较大的表面隧道电流, 而这种表面漏电流是 ZnS 钝化器件具有较大 $1/f$ 噪声电流的原因, 通过高分辨 x 射线衍射中的倒易点阵技术 (reciprocal space mapping, RSM) 研究了单双层钝化对 HgCdTe 外延层晶格完整性的影响, 发现单层 ZnS 钝化的 HgCdTe 外延层产生了大量缺陷, 而这些缺陷正是 ZnS 钝化器件具有较大表面漏电流和 $1/f$ 噪声的原因. 经过高温烘烤后, ZnS 钝化的器件暗电流和 $1/f$ 噪声增加, 而双层钝化器件经过高温烘烤后性能提高. RSM 的研究表明, 高温烘烤后 ZnS 钝化的 HgCdTe 外延层产生大量缺陷, 这些缺陷正是单层钝化器件表面漏电流和 $1/f$ 噪声电流增加的原因.

关键词: HgCdTe, 光伏探测器, 钝化, 表面漏电流, $1/f$ 噪声, 倒易点阵

PACC: 7340L, 6170T, 1420E

1. 引 言

HgCdTe 光伏探测器表面缺陷的存在会引入表面漏电流和 $1/f$ 噪声, 而这成为限制与 Si 读出电路耦合的红外焦平面性能的瓶颈, 需采用合理的钝化工艺来改善器件的表面状态^[1-6]. 在常规工艺中, 一般采取沉积 ZnS 和 CdTe 钝化探测器, 而最近 CdTe + ZnS 双层钝化的器件因其具有较佳的可靠性而得到了广泛应用^[7].

本文为了减少材料和成结工艺的影响, 在同一长波 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 晶片上 ($x = 0.217$) 制备了单层 ZnS 钝化和双层 (CdTe + ZnS) 钝化的两种器件, 对烘烤前后器件的暗电流和 $1/f$ 噪声进行了测试分析, 并通过高分辨 x 射线衍射中的倒易点阵技术 (reciprocal space mapping, RSM) 研究了单双层钝化和后处理工艺对 HgCdTe 外延层晶格完整性的影响, 研究表明, 不同钝化的长波 HgCdTe 光伏探测器其表面漏电流和 $1/f$ 噪声机理各不相同, 但都强烈依赖于钝化层与 HgCdTe 外延层之间的界面状况.

2. 实验方法

2.1. 钝化膜制备

分别用溅射和热蒸发的方法在 HgCdTe 外延层沉积 CdTe 和 ZnS. HgCdTe 为 MBE 生长的外延材料, 生长方向为 (211) 面.

2.2. 器件结构

器件结构选用 n-on-p 平面结器件, 材料选用 p 型的长波 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 材料, 组分为 0.217, 汞空位掺杂 N_A 为 $1.36 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, 经过 B^+ 注入形成 n 区成结, 然后将材料分割成两片, 一片用单层 ZnS 钝化, 另一片用双层 (CdTe + ZnS) 钝化, 开电极孔时结合干湿法腐蚀去除钝化层. 实际选用的器件为 256x1 线列, 单个光敏元面积为 $2.5 \times 10^{-5} \text{ cm}^2$.

2.3. 器件性能测试系统

两个器件倒焊封装在同一杜瓦中冷却到 77K

[†]E-mail: nextstars@163.com

进行电流电压和 $1/f$ 噪声电流测试, 电流电压测试系统选用 Keithley 236.

$1/f$ 噪声电流测试系统如下.

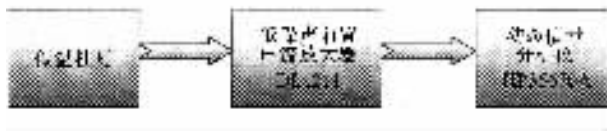


图 1 $1/f$ 噪声测试系统图

2.4. 倒易点阵技术

利用 Philips 公司生产的 Xpert-MRD(PW3120/60) 高分辨率 x 射线衍射仪对样品钝化及烘烤前后的 HgCdTe 外延层进行分析, 其衍射晶面为 (422), 为对称衍射. 衍射仪所用的单色器为 Gc(220) 四晶准直单色器, 其 $\Delta\lambda/\lambda$ 为 5×10^{-5} . 倒易空间作图术采用对每一 $0.0005^\circ\Delta\omega$ 步长采取一次 $\omega - 2\theta$ 连动扫描, 步长为 0.0005° .

3. 实验数据与分析

图 2 A 为单双层钝化器件暗电流分析, 电流机理考虑了扩散电流模型(diff)^[8]、产生-复合电流模型(g-r)^[8]、间接隧道电流模型(tat)^[9]、直接隧道电流模型(bbt)^[5]. 从拟合的结果中看出, 两种器件的扩散电流(diff)、产生-复合电流(g-r)和间接隧道电流(tat)相差无几, 但是当反偏超过 0.2V 时, ZnS 钝化的器件具有较大的直接隧道电流(bbt), 由于两种器件材料和成结工艺完全相同, 两者结区的隧道电流

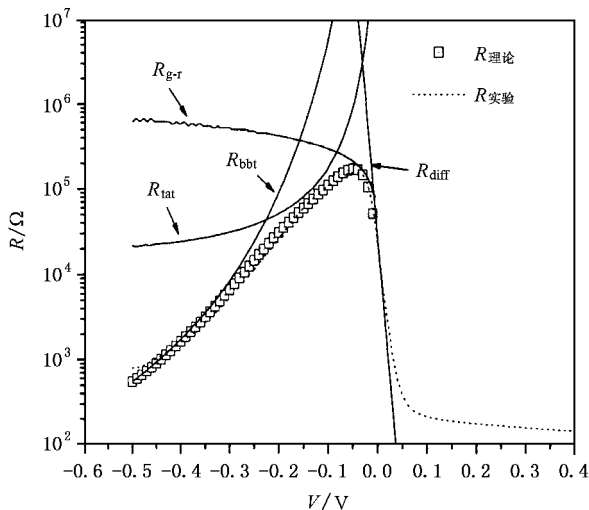


图 2 ZnS 钝化器件 R-V 拟合图

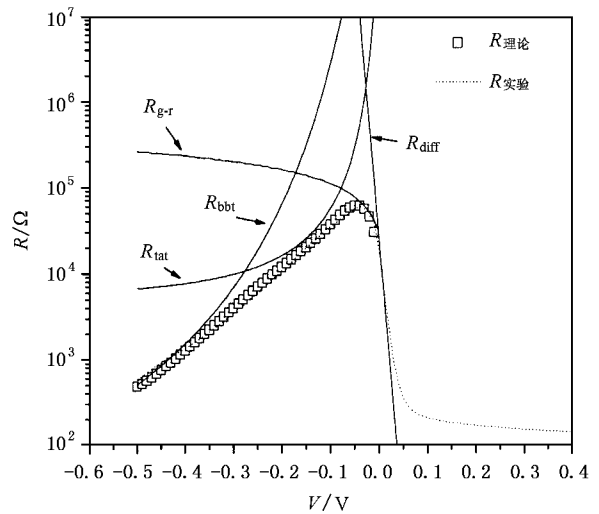


图 3 ZnS 钝化器件 80°C 烘烤 10 h 后的 R-V 拟合图

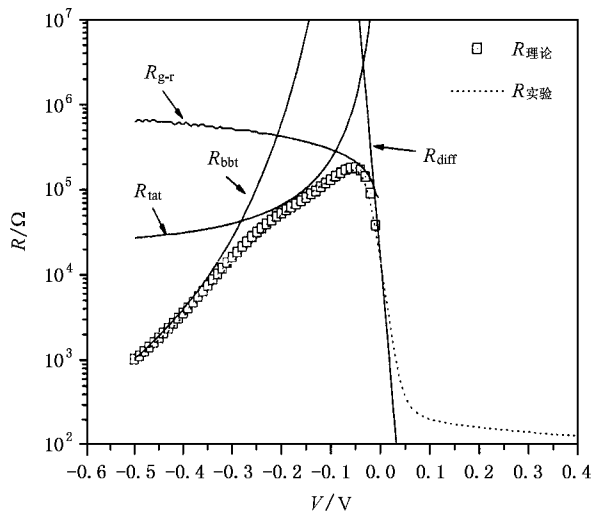


图 4 CdTe + ZnS 钝化器件 R-V 拟合图

应该相差不大, 只可能是两者的表面隧道电流不同. 对长波 HgCdTe 光伏探测器而言, 其表面状态能大大影响其结性能, 而表面状态主要受制于钝化膜的沉积方式, 为了得到 HgCdTe 与钝化层界面之间更多的信息, 得到无沉积损伤的 HgCdTe 外延层, 我们用高分辨 x 射线衍射中的 RSM 对钝化前后的 HgCdTe 外延层进行了分析^[10]. 图 6 是 ZnS 单层钝化 HgCdTe 前后的倒易空间图, 从图中看出, 钝化后衍射圆在 Q_y 方向出现轻微展宽, 说明钝化后在 HgCdTe 表面出现缺陷, 而这种缺陷正是单层钝化器件表面隧道电流较大的原因. 图 7 是 CdTe + ZnS 双层钝化 HgCdTe 前后的倒易空间图, 从图中可看出钝化后衍射圆对称完整, 较钝化前没有出现明显展宽, 说明

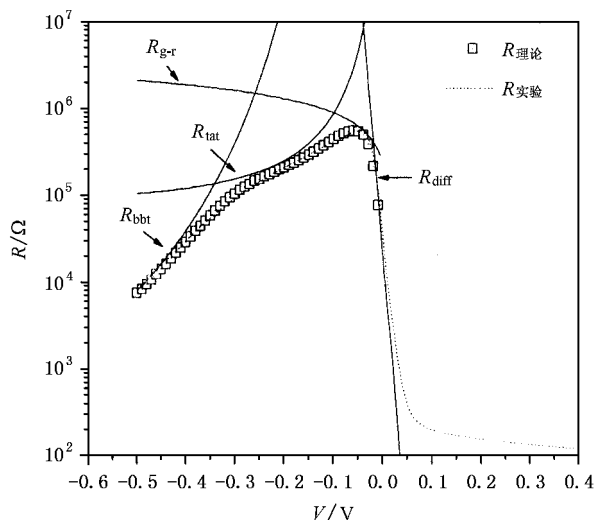


图 5 CdTe + ZnS 钝化器件 80℃ 烘烤 10 h 后的 $R-V$ 拟合图

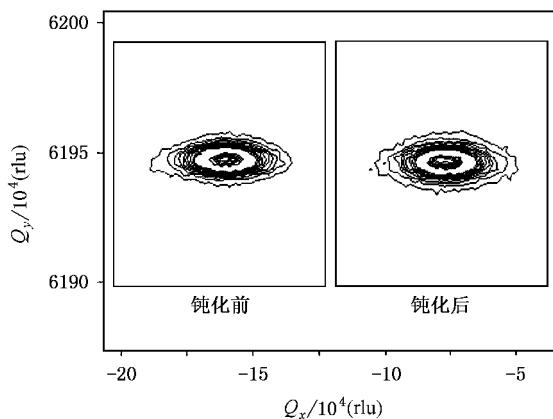


图 6 ZnS 单层钝化 HgCdTe 前后的 RSM 图

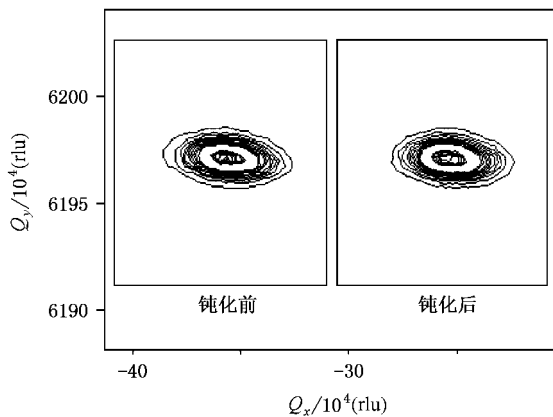


图 7 CdTe + ZnS 双层钝化 HgCdTe 前后的 RSM 图

HgCdTe 保持较高的晶体完整性,能大大降低表面隧道电流.从侧面也说明合理的钝化工艺也是提高器

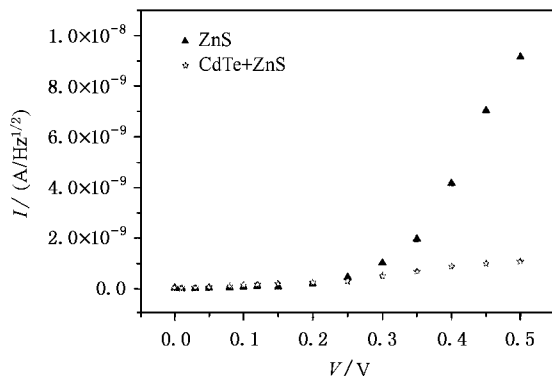


图 8 反向偏压下不同钝化器件的 $1/f$ 噪声电流

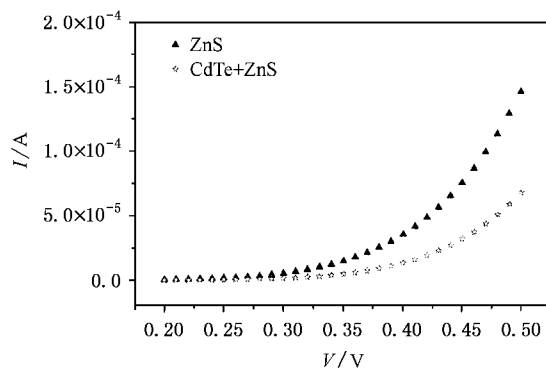


图 9 反向偏压下不同钝化器件的直接隧道电流

件性能的关键.

图 8 为两种器件在不同反向偏压下 8Hz 的 $1/f$ 噪声电流,从图中可以看出,在偏压小于 0.2V 时,两种钝化器件的 $1/f$ 噪声电流相差不大,而当偏压大于 0.2V 时,单层钝化器件的 $1/f$ 噪声电流迅速增加,而双层钝化器件增加不大.图 9 为反向偏压下的不同钝化器件的直接隧道电流图,从图中可看出,而两种器件的直接隧道电流趋势同图 8 的 $1/f$ 噪声电流完全相同.说明 ZnS 钝化的器件在反偏较大时其 $1/f$ 噪声主要受制于表面漏电流,而 CdTe + ZnS 钝化的器件由于其钝化过程中损伤小,其 $1/f$ 噪声电流在反偏较大时也能保持较低状态.上面的研究表明,长波光伏探测器的体内和表面漏电流是影响 $1/f$ 噪声的关键,而探测器的表面状态决定体内或表面漏电流起主要作用.

为了研究两种不同钝化的器件热稳定性的影响,我们将两种器件在真空中 80℃ 烘烤 10h 后对其 $R-V$ 和 $1/f$ 噪声特性进行了测试,图 3 是 ZnS 钝化的器件 80℃ 烘烤后的 $R-V$ 测试及拟合图,图 5 为 CdTe

+ ZnS 钝化的器件 80℃ 烘烤后的 $R-V$ 测试及拟合图。从图 2 和图 3 中的比较中可以看到, ZnS 钝化的器件高温烘烤后, 器件的产生-复合电流、辅助隧道电流和直接隧道电流均出现不同程度的增加, 而 CdTe + ZnS 钝化的器件各种暗电流降低, 器件性能提高, 同样地, 我们利用 RSM 对烘烤前后钝化层/HgCdTe 之间的界面性能进行了研究。

图 10 是 ZnS 单层钝化 HgCdTe 烘烤前后的倒易空间图, 从图中看出, 烘烤后衍射圆在 Q_x 方向变窄, 这是经过高温烘烤后, 热应力消除, 晶片弯曲得到改善, Q_x 方向变窄。在 Q_y 方向烘烤后出现展宽, 说明 HgCdTe 外延层出现缺陷, 这可能是 ZnS/MCT 之间出现互扩散, Zn 取代了 Hg 而与 Te 结合, 由于 ZnTe 较小的晶格常数导致失配出现缺陷, 使得 Q_y 方向却出现一定方向的展宽^[11, 42], 由于这种缺陷大量出现, 使得表面的产生-复合和缺陷辅助中心增加, 所以器件在零偏附近就受限于表面漏电流。而从烘烤前后的 $1/f$ 噪声电流对比中发现(见图 12), 由于烘烤后表面漏电流增加, 不同偏压下 $1/f$ 噪声均相应增加。

图 11 是 CdTe + ZnS 双层钝化 HgCdTe 烘烤前后的倒易空间图, 从图中可看出烘烤后 Q_x 方向变窄, 这也是热应力消除的原因, 而 Q_y 方向较烘烤前没有出现明显展宽, 说明 HgCdTe 保持较高的晶体完整性, 而且烘烤后形成良好的 CdTe/HgCdTe 界面过渡层, 能大大降低表面隧道电流, 同时也提高了器件的稳定性, 图 13 为烘烤前后不同偏压下的 $1/f$ 噪声电流比较图, 从图中看出, 由于烘烤后 CdTe/HgCdTe 界面得到了改善, $1/f$ 噪声得到进一步降低。另外也

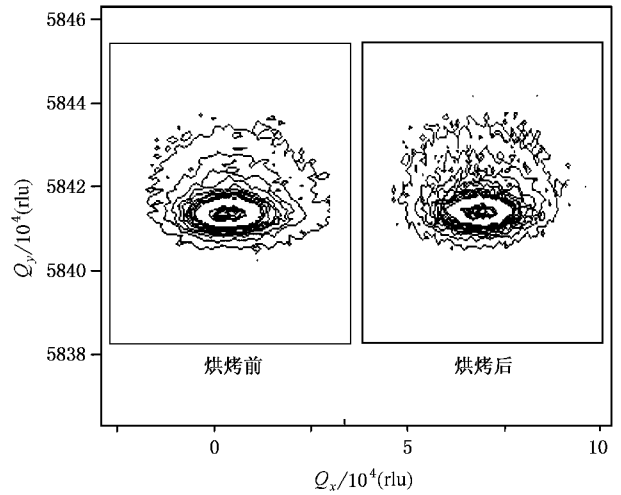


图 10 ZnS 单层钝化 HgCdTe 烘烤前后的 RSM 图

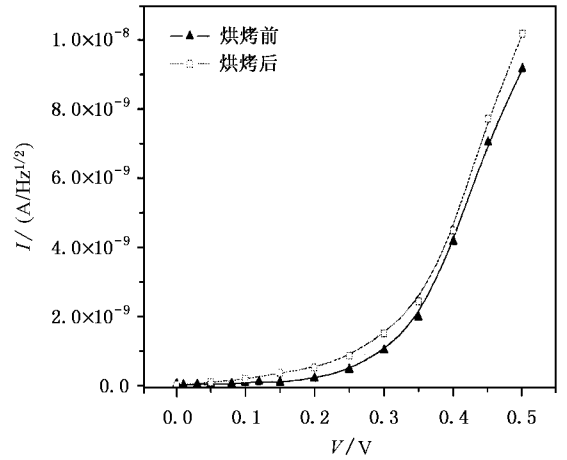


图 11 CdTe + ZnS 双层钝化 HgCdTe 烘烤前后的 RSM 图

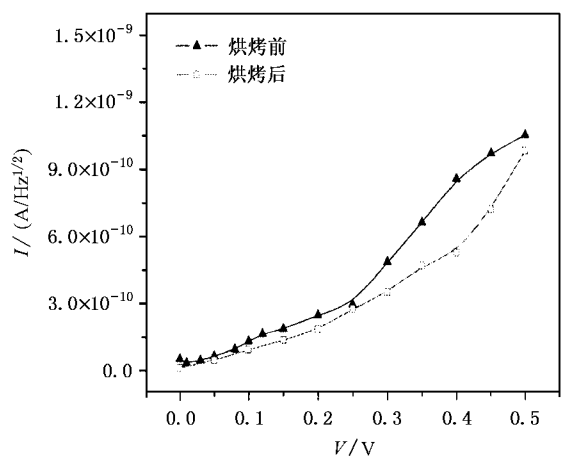


图 12 单层钝化器件烘烤前后的 $1/f$ 噪声电流

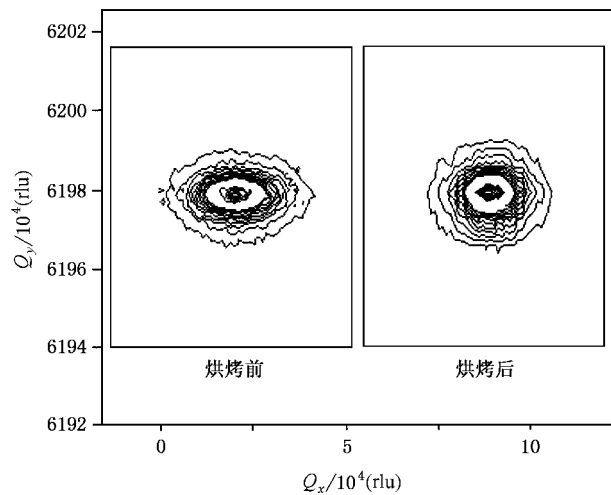


图 13 双层钝化器件烘烤前后的 $1/f$ 噪声电流

说明钝化后合理的后处理技术也是提高器件性能的关键.

上面的研究表明,不同钝化长波 HgCdTe 光伏探测器其表面漏电流和 $1/f$ 噪声机制各不相同,但都强烈依赖于钝化层/HgCdTe 的界面性能,而 x 射线衍射能提供大量界面间的信息,如缺陷、应力等等,可作为一种有效的钝化监测手段.

4. 结 论

HgCdTe 长波光伏探测器的性能常常受限于过高的表面漏电流和 $1/f$ 噪声,需采用合理的钝化技术来改善表面状态. 本文为了减少材料和成结工艺的影响,在同一长波 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 晶片上 ($x = 0.217$) 制备了单层 ZnS 钝化和双层 (CdTe + ZnS) 钝化的两种器件,对器件的暗电流和 $1/f$ 噪声进行了测试,在对暗电流的拟合计算中发现, ZnS 钝化的器件在反

偏较大的时候具有较大的表面隧道电流,而这种表面漏电流是器件具有较大 $1/f$ 噪声电流的原因,通过高分辨 x 射线衍射中的 RSM 研究了单双层钝化对 HgCdTe 外延层晶格完整性的影响,发现单层 ZnS 钝化的 HgCdTe 外延层产生了大量缺陷,而这些缺陷正是器件具有较大表面漏电流和 $1/f$ 噪声的原因. 在对不同钝化器件的热稳定性研究中发现,经过高温烘烤后, ZnS 钝化的器件暗电流和 $1/f$ 噪声增加,而双层钝化器件经过高温烘烤后性能提高. RSM 的研究表明,高温烘烤后 ZnS 钝化的 HgCdTe 外延层产生大量缺陷,这些缺陷正是单层钝化器件表面漏电流和 $1/f$ 噪声电流增加的原因. 上述研究表明,长波 HgCdTe 光伏探测器其表面漏电流和 $1/f$ 噪声机制强烈依赖于钝化层/HgCdTe 的界面性能,而 x 射线衍射能提供大量界面间的信息,可作为一种有效的钝化监测手段.

-
- [1] Bae S H *et al* 2000 *J. Electron. Mater.* **29** 877
 - [2] Chen G B *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1496 (in Chinese) [陈贵宾 等 2003 物理学报 **52** 1496]
 - [3] Chen G B *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 911 (in Chinese) [陈贵宾 等 2004 物理学报 **53** 911]
 - [4] Vurt I S *et al* 2002 *J. Electron. Mater.* **32** 831
 - [5] Nemirovsky Y *et al* 1992 *J. Vac. Sci. Technol. B* **10** 1602
 - [6] Wijewarnasuriya P S *et al* 1999 *J. Electron. Mater.* **28** 649
 - [7] White J K *et al* 2002 *J. Electron. Mater.* **31** 743
 - [8] Gopal V *et al* 2003 *Infrared Physics & Technology* **44** 143
 - [9] Rais M H *et al* 2003 *J. Crystal Growth.* **214/215** 1106
 - [10] Fewster P F 2000 *X-ray Scattering from Semiconductors* (London : Imperial College Press) p243
 - [11] Atsushi S *et al* 2000 *J. Crystal Growth.* **209** 21
 - [12] Manabe T *et al* 1998 *Thin Solid Films.* **323** 99

Analysis of surface leakage and $1/f$ noise on long-wavelength infrared HgCdTe photodiodes

Sun Tao[†] Chen Xing-Guo Hu Xiao-Ning Li Yan-Jin

(*Research Center for Advanced Materials and Devices , Shanghai Institute of Technical Physics , Chinese Academy of Sciences , Shanghai 200083 , China*)

(Received 22 October 2004 ; revised manuscript received 9 December 2004)

Abstract

The long-wavelength infrared $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ photovoltaic detectors with $x = 0.217$ passivated by single ZnS layer and dual (CdTe + ZnS) layers were fabricated in the same wafer. The fabricated devices were characterized by measurements of dark currents and $1/f$ noise. The diode passivated by dual (CdTe + ZnS) layers showed a higher performance compared to the diode passivated by the single ZnS layer at high reverse bias , and modeling of diode dark current mechanisms indicated that the performance of the diode passivated by single ZnS was strongly affected by tunneling current related to the surface defects , which was responsible for the dark currents and $1/f$ noise characteristics. By the analysis of x-ray reciprocal space map (RSM) , it was found that the Q_y direction broadening of HgCdTe epitaxial layer passivated by ZnS was wider after passivation , which confirmed the existence of defects in the surface of HgCdTe epitaxial layer passivated by ZnS. In order to investigate the effect of surface passivation on the stability of two kinds of diodes , dark currents and $1/f$ noise of the diodes were measured after vacuum baking for 10 h at 80°C . The dark current mechanisms indicated that the performance of the diode passivated by single ZnS was strongly affected by the surface defects. By the analysis of RSM , It was found that the Q_y direction broadening of HgCdTe epitaxial layer passivated by ZnS was wider after high-temperature baking , which also confirmed the existence of defects in the surface of HgCdTe epitaxial layer passivated by ZnS after baking.

Keywords : HgCdTe , photovoltaic detector , passivation , dark current , $1/f$ noise , reciprocal space map

PACC : 7340L , 6170T , 1420E

[†]E-mail : nextstars@163.com