

不同钝化结构的 HgCdTe 光伏探测器暗电流机制

孙 涛 陈文桥 梁晋穗 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)

摘要: 在同一 HgCdTe 晶片上制备了单层 ZnS 钝化和双层 (CdTe + ZnS) 钝化的两种光伏探测器, 对器件的性能进行了测试, 发现双层钝化的器件具有较好的性能. 通过理论计算, 分析了器件的暗电流机制, 发现单层钝化具有较高的表面隧道电流. 通过高分辨 X 射线衍射中的倒易点阵技术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, 而这些缺陷正是单层钝化器件具有较高表面隧道电流的原因.

关键词: HgCdTe; 光伏探测器; 钝化; 倒易点阵; 暗电流

PACC: 6820; 6855; 6110

中图分类号: TN304.2

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)01-0143-05

1 引言

HgCdTe 光伏探测器的性能在很大程度上取决于它的 p-n 结特性, p-n 结特性决定了探测器的动态阻抗和热噪声, 从而决定了探测器的性能. 零偏压电阻面积乘积 (R_0A) 是衡量探测器性能的重要指标, 而决定结特性好坏和 R_0A 值大小的是 p-n 结的暗电流机制. 在低温下 MCT 光电二极管对表面状态非常敏感, 器件性能常常受到表面漏电的限制, 已成为制约光伏探测器性能的瓶颈, 需采用合理的钝化工艺来减少表面漏电流. 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 双层钝化的器件因具有较佳的可靠性而得到了广泛应用^[1~4].

本文在同一晶片上制备了单层 ZnS 钝化和双层 (CdTe + ZnS) 钝化的两种器件, 对器件的性能进行了测试, 并通过理论计算, 分析了器件的暗电流机构, 发现单层钝化具有较高的表面隧道电流, 并通过高分辨 X 射线衍射中的倒易点阵技术 RSM (reciprocal space mapping) 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, 而这些缺陷正是单层钝化器

件具有较高的表面隧道电流的原因.

2 实验

2.1 钝化膜制备

分别用溅射仪 (AC450 R&D Sputtering System) 和镀膜机 (北京仪器厂 DM-300B 型) 在 HgCdTe 外延层沉积 CdTe 和蒸发 ZnS. HgCdTe 为 LPE 生长的外延材料, 生长方向为 (111) 面.

2.2 倒易点阵技术

利用 Philips 公司生产的 Xpert-MRD (PW3120/60) 高分辨率 X 射线衍射仪对样品制备前后的 HgCdTe 外延层进行分析, 其衍射晶面为 (333), 为对称衍射. 衍射仪所用的单色器为 Ce (220) 四晶准直单色器, 其 $\Delta\lambda/\lambda = 5 \times 10^{-5}$. 倒易空间作图术采用对每一 $\Delta\omega$ 步长取一次 $\omega - 2\theta$ 连动扫描, 结晶学方向为 (111) (垂直于样品表面), $\Delta\omega$ 步长为 0.0005° , ω 方向平行于样品表面, 其结晶学方向为 (110).

2.3 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 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 材料,组分为 $x = 0.3071$,汞空位掺杂, $N_A = 6.59 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$,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 $(\text{CdTe} + \text{ZnS})$ 钝化,开电极孔时候通过湿法腐蚀去除钝化层.实际选用的器件为 256×1 线列,单个光敏元面积为 $9 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$.

2.4 器件性能测试系统

两个器件倒焊封装在同一杜瓦瓶中冷却到 77K 进行电流电压测试,并将电压对电流微分得到电阻,测试系统为 Keithley 2400 SourceMeter.

3 结果与理论计算

3.1 器件测试结果与分析

图 1 为不同钝化器件的 R - V 图,从图中看出,两个二极管的 R_0 相差无几,但是在反偏较大时,单层钝化的 R_0 明显下降较快,说明器件具有较大的隧道电流.

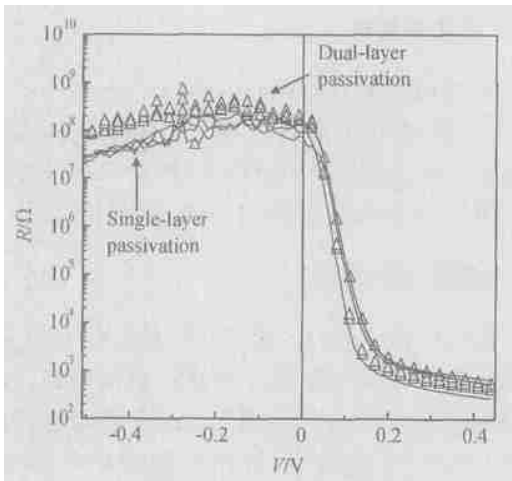


图 1 单双层钝化器件的 R - V 图

Fig.1 R - V characteristics of diodes passivated by different structure

3.2 暗电流模型

3.2.1 扩散电流模型(DIFF)

对于 $n^+ - p$ 的少子扩散电流可用下面的公式计算^[5]:

$$I_{\text{diff}} = \frac{qAn^2}{N_a} \left\{ \frac{kT}{q} \times \frac{\mu_n}{\tau_n} \right\}^{1/2} C \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right] \quad (1)$$

式中 N_a 为 p 区的受主浓度; n_i 为本征载流子浓

度; A 为结面积; V 为偏置电压; τ_n 电子寿命; μ_n 为电子迁移率; C 由表面产生-复合速率(S)和 p 区的厚度(d)决定^[5]:

$$C = \frac{S\tau_n \cosh \left(\frac{d}{L_n} \right) + L_n \sinh \left(\frac{d}{L_n} \right)}{S\tau_n \sinh \left(\frac{d}{L_n} \right) + L_n \cosh \left(\frac{d}{L_n} \right)} \quad (2)$$

其中 L_n 是少数载流子的扩散长度.

3.2.2 产生-复合电流模型(GR)

采用简化模型^[5]:

$$[I_{gr}]_{V < 0} = \frac{qAn_i W_{\text{dep}} V}{V_t \tau_{gr}} \quad (3)$$

$$[I_{gr}]_{V > 0} = \frac{qAn_i W_{\text{dep}} kT}{V_t \tau_{gr}} \sinh \left(\frac{qV}{2kT} \right) \quad (4)$$

其中 τ_{gr} 为产生-复合寿命; a 为乘法因子; W_{dep} 为耗尽层宽度^[5]:

$$W_{\text{dep}} = \left[\frac{2\epsilon_0 \epsilon_s V_t (N_a + N_d)}{qN_a N_d} \right]^{1/2} \quad (5)$$

其中 V_t 为总电势,计算公式为^[5]:

$$V_t = V_{bi} - V \quad (6)$$

V_{bi} 为内建电场,其计算公式为^[5]:

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} \quad (7)$$

3.2.3 辅助隧道电流(TAT)

辅助隧道电流可用以下公式计算^[6]:

$$I_{\text{tat}} = qAB \exp \left(\frac{-c}{V_t^{1/2}} \right) \quad (8)$$

其中 参数 $c = \left[\frac{4.3 \times 10^{10} E_g^{1/2} (E_g - E_t)^{3/2}}{N_a^{1/2}} \right]$; B 是与缺陷辅助隧穿中心密度相关的参数; E_t 是缺陷辅助隧穿中心相对于导带的能级.

3.2.4 直接隧道电流(BBT)

直接隧道电流可用下面公式计算^[7]:

$$I_{\text{bbt}} = 10^{-2} AN_a^{1/2} V_t^{3/2} \exp \left(\frac{-\beta E_g^2}{(N_a V_t)^{1/2}} \right) \quad (9)$$

式中 β 为指数因子,取值范围为 $3 \times 10^{10} \sim 4.3 \times 10^{10}$.

将上面计算出的电流对电压微分,然后再取倒数,即可求得 R 的理论值.

3.3 拟合结果及分析

图 2 和图 3 为通过调节产生-复合寿命 τ_{gr} ,与缺陷辅助隧穿中心密度相关的参数 B 和缺陷辅助隧穿中心相对于导带的能级 E_t 得到的 R - V 拟合结

果.从图中看出,在零偏附近,两种器件的阻抗由产生-复合电流决定;在中偏的时候,两种器件的阻抗由产生-复合电流和辅助隧道电流决定,其中辅助隧道电流对单层钝化器件的影响更大.

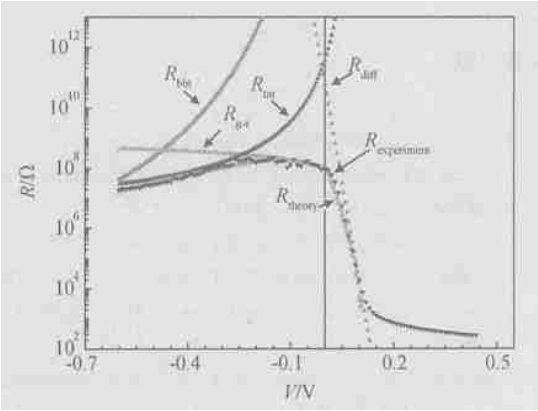


图 2 单层钝化器件的 R - V 拟合图

Fig.2 Measured and calculated R - V characteristics of diode passivated by single-layer passivation

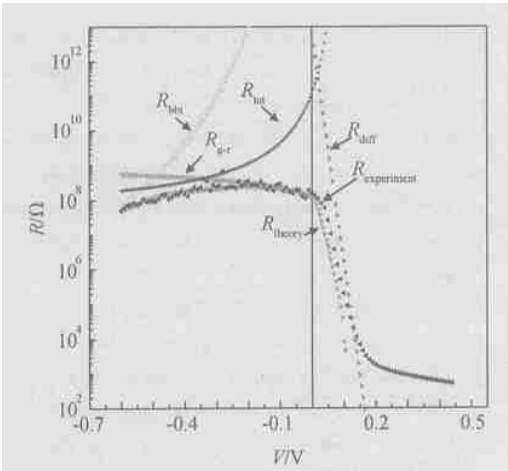


图 3 双层钝化器件的 R - V 拟合图

Fig.3 Measured and calculated R - V characteristics of diode passivated by dual-layer passivation

通过各理论和实验数据拟和的结果得到单层钝化器件的 τ_{gr} 为 $4.7 \times 10^{-7} \text{ s}$,与缺陷辅助隧穿中心密度相关的参数 B 为 $10^{18} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, E_t 为 $0.65 E_g$. 双层钝化器件的 τ_{gr} 为 $5 \times 10^{-7} \text{ s}$, B 为 $3.15 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, E_t 为 $0.65 E_g$. 从参数中可看出,两种器件除了与缺陷辅助隧穿中心密度相关的参数 B 相差较大以外, τ_{gr} 和 E_t 相差无几. 由于两种器件的成结工艺相同,说明结区的缺陷辅助隧道电流相差不大,只可能是两者的表面隧道电流不同,而我们通过高分辨

X 衍射仪中的倒易点阵技术 $\text{RSM}^{[8\sim 10]}$ 对不同工艺钝化前后的 HgCdTe 晶片 A 和 B (LPE 生长, (111) 方向) 进行了分析,发现两者确实存在较大差异.

3.4 HgCdTe 表面的 RSM 图谱及分析

图 4 和 5 是溅射 CdTe^+ 热蒸发 ZnS 双层钝化 HgCdTe 前后的倒易空间图. 从图 5 中可看出,钝化后衍射圆对称完整,较图 4 也没有出现明显展宽,说明 HgCdTe 保持较高的晶体完整性,能大大降低表面隧道电流.

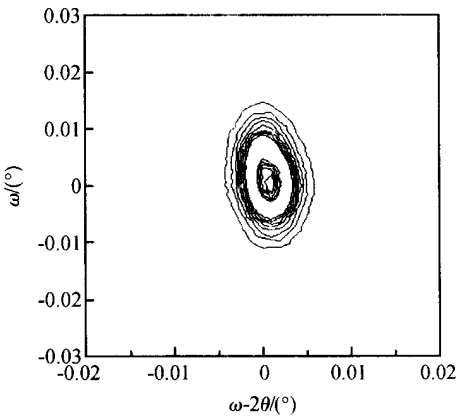


图 4 A 样品钝化前(333)面的倒易二维点阵图
Fig. 4 RSM of sample A before passivation

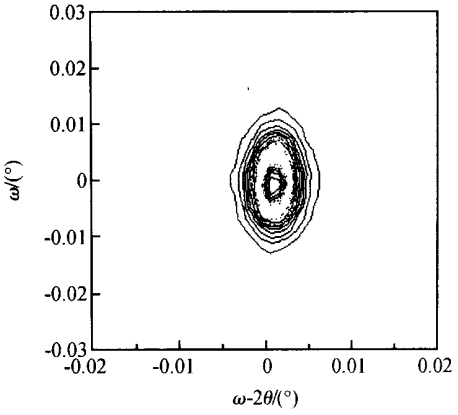


图 5 A 样品双层钝化后(333)面的倒易二维点阵图
Fig. 5 RSM of sample A after dual-layer passivation

图 6 和 7 是热蒸发 ZnS 单层钝化 HgCdTe 前后的倒易空间图. 从图 7 中看出,钝化后衍射圆在 $\omega-2\theta$ 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. 从侧面说明合理的钝化工艺也是提高器件性能的关键.

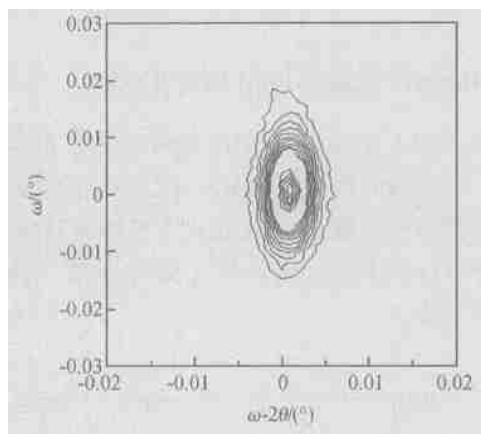


图 6 B 样品钝化前(333)面的倒易二维点阵图

Fig. 6 RSM of sample B before passivation

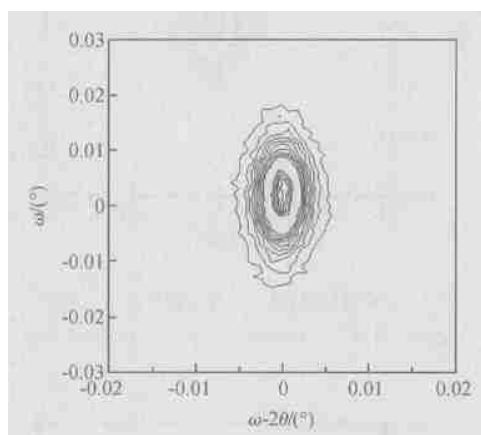


图 7 B 样品单层钝化后(333)面的倒易二维点阵图

Fig. 7 RSM of sample B after single-layer passivation

4 结论

本文在同一晶片上制备了单层 ZnS 钝化和双层 (CdTe + ZnS) 钝化的两种器件, 对器件的性能进行了测试; 并通过理论计算, 分析了器件的暗电流机制, 发现单层钝化具有较高的表面隧道电流. 通过高分辨 X 射线衍射中的倒易点阵技术 RSM 研究了单双层钝化对 HgCdTe 外延层晶格完整性的影响, 结果

表明单层 ZnS 钝化的 HgCdTe 外延层产生了大量缺陷, 而这些缺陷正是单层钝化器件具有较高表面隧道电流的原因.

参考文献

- [1] Chen M C, List R S, Chandra D, et al. Key performance-limiting defects in P-on-N HgCdTe LPE heterojunction infrared photodiodes. *J Electron Mater*, 1996, 25 (8) : 1375
- [2] Wijewarnasuriya P S, Zandian M, Yong D B, et al. Microscopic defects on MBE grown LWIR $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ material and their impact on device performance. *J Electron Mater*, 1999, 28 (6) : 649
- [3] Bhan R K, Koul S K, Basu P K. Analysis of the ideality factor in surface leaky HgCdTe photodiodes for the long-wavelength Infrared region. *Semicond Sci Tech*, 1997, 12 : 448
- [4] Sang Wenbin, Ju Jianhua, Shi Weiming, et al. Comparison of physical passivation of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$. *J Cryst Growth*, 2000, 214/ 215 : 265
- [5] Gopal V, Gupta S, Bhan R K, et al. Modeling of dark characteristics of mercury cadmium telluride n^+p junctions. *Infrared Physics & Technology*, 2003, 44 : 143
- [6] Rais M H, Musca C A, Antoszewski J, et al. Characterisation of dark current in novel $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ mid-wavelength infrared photovoltaic detectors based on p^+n junction formed by plasma-induced type conversion. *J Cryst Growth*, 2000, 214/ 215 : 1106
- [7] Nemirovsky Y, Unikovsky A. Tunneling and $1/f$ noise in HgCdTe photodiodes. *J Vac Sci Technol B*, 1992, 10 : 1602
- [8] Mi Kan, Sai Xiaofeng, Hou Xun. Characterization of GaAs/GaAlAs layer bounded to glass by X-ray diffraction. *Chinese Journal of Semiconductors*, 1999, 20 (2) : 152 (in Chinese) [米侃, 赛小峰, 侯洵. 研究与玻璃粘接的 GaAs/GaAlAs 外延层晶体质量的 X 射线衍射方法. *半导体学报*, 1999, 20 (2) : 152]
- [9] Fewster P F. X-ray scattering from semiconductors. London: Imperial College Press, 2000
- [10] Zhao Yongjun, Wang Minjuan, Yang Yongjun, et al. Study on stress of PECVD SiN_x film. *Chinese Journal of Semiconductors*, 1999, 20 (3) : 183 (in Chinese) [赵永军, 王民娟, 杨拥军, 等. PECVD SiN_x 薄膜应力研究. *半导体学报*, 1999, 20 (3) : 183]

Dark Current Mechanism of HgCdTe Photovoltaic Detector Passivated by Different Structure

Sun Tao , Chen Wenqiao , Liang Jinsui , Chen Xingguo , Hu Xiaoning , and Li Yanjin

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

Abstract : The HgCdTe photovoltaic detectors passivated by single ZnS layer and dual (CdTe + ZnS) layers are fabricated on the same wafer. The fabricated devices are characterized by measurements of the diode dark I - V characteristic. The dual-layer passivated diodes show higher performing compared to the single layer passivated diodes ,and modeling of diode dark current mechanisms indicate that the performance of the diodes passivated by single ZnS is strongly affected by tunneling current related to the surface defects ,which are generated by the technology of passivation. And the result is also supported by the analysis of X-ray reciprocal space map .

Key words : HgCdTe ; photovoltaic detector ; passivation ; reciprocal space map ; dark current

PACC : 6820 ; 6855 ; 6110

Article ID : 0253-4177(2005)01-0143-05