

碲镉汞光伏探测器的变面积表面钝化研究

乔 辉[†] 徐国庆 贾 嘉 李向阳

(中国科学院上海技术物理研究所 传感技术国家重点实验室, 上海 200083)

摘要: 利用同一片碲镉汞材料制备了由单层 ZnS 和双层 CdTe/ZnS 作钝化膜的变面积光伏探测器, 对两种钝化膜结构的变面积器件进行了对比研究. 通过分析两种器件的电流-电压 ($I-V$) 特性曲线以及零偏电阻-面积乘积 ($R_0 A$) 与周长-面积比 (p/A) 的关系曲线, 发现 ZnS 钝化的器件具有较大的表面漏电流; 通过分析两种器件的电流噪声与暗电流的关系, 发现 ZnS 钝化的器件的噪声特性较接近散粒噪声, CdTe/ZnS 双层钝化的器件则表现出较好的基本 $1/f$ 噪声特性, 使得器件噪声要小于单层 ZnS 钝化的器件.

关键词: 钝化; 变面积; 散粒噪声; $1/f$ 噪声; 光伏探测器; 碲镉汞

PACC: 6820; 6855; 6110

中图分类号: TN304. 2

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2008)07-1383-04

1 引言

碲镉汞 ($Hg_{1-x}Cd_xTe$) 光伏探测器是一种重要的碲镉汞红外器件, 其中光伏焦平面器件 (FPA) 代表目前碲镉汞器件发展的方向. 碲镉汞光伏器件的表面钝化一直是器件制备中备受关注的问题, 因为表面钝化效果直接影响到器件最终的性能和成品率. 针对碲镉汞光伏器件的表面钝化, 降低器件表面漏电流, 人们已经提出了许多的钝化膜结构. 这些结构主要分为碲镉汞表面自身生长钝化膜和表面沉积钝化膜两类^[1]. 碲镉汞表面自身生长钝化膜包括阳极电化学钝化膜、等离子体氧化以及光化学氧化膜; 表面沉积钝化膜则尝试过 ZnS, SiO₂ 和 SiN_x 等. 自上世纪 90 年代开始, 人们开始提出用 CdTe 作为光伏器件的表面钝化膜, 并且取得了良好的效果. 目前 CdTe/ZnS 双层钝化膜因具有较好的钝化效果和可靠性而得到了广泛应用.

为了研究表面和界面对器件的影响, 人们提出了变面积线列器件结构^[2], 即通过同一材料上的相同工艺过程, 得到不同结面积的器件, 再通过对这些器件性能的研究, 确定表面和界面对器件影响程度的大小. 由于变面积器件的制备工艺与通常器件的制备工艺完全兼容, 使得其在研究器件表面钝化方面成为具有较强实用性的方法.

本实验中, 我们利用变面积方法研究了 ZnS 和 CdTe/ZnS 两种钝化膜结构对碲镉汞光伏探测器的钝化效果.

2 实验

实验中使用的碲镉汞光伏器件为 n-on-p 型平面器件, 器件结构如图 1 所示. 碲镉汞材料组分 x 为 0. 29,

通过在 p 型碲镉汞材料上进行 B⁺ 注入形成 n 型区, 然后生长钝化膜对表面进行钝化, 制备电极后封装于真空杜瓦内进行测试. 钝化膜的生长使用北仪 DM450C 型热蒸发镀膜机; 单层 ZnS 钝化膜结构为 ZnS/HgCdTe, ZnS 厚度为 200nm, 双层 CdTe/ZnS 钝化膜结构为 ZnS/CdTe/HgCdTe, ZnS/CdTe 厚度为 200nm/110nm. 器件光敏元面积从 $90\mu m \times 90\mu m$ 到 $270\mu m \times 270\mu m$, 器件测试温度为液氮温度 (77K), 测试内容包括器件的电流-电压 ($I-V$) 特性曲线和电流噪声.

3 结果与讨论

3.1 两种钝化膜结构对器件 $I-V$ 曲线的影响

pn 结作为碲镉汞光伏探测器的核心, 器件的暗电流机制直接决定其特性的好坏. 器件的 $I-V$ 特性曲线可以简单地反映器件的暗电流机制. 图 2 和图 3 给出了两种钝化膜结构的变面积器件的 $I-V$ 特性曲线.

从图 2 和图 3 可以明显看出两种钝化膜结构器件的 $I-V$ 特性的不同. 图 2 中所有面积的器件在反向偏压较大时暗电流都表现出增加的趋势, 并且器件面积越大增加越剧烈; 图 3 中只有面积最大的器件才在较大反偏

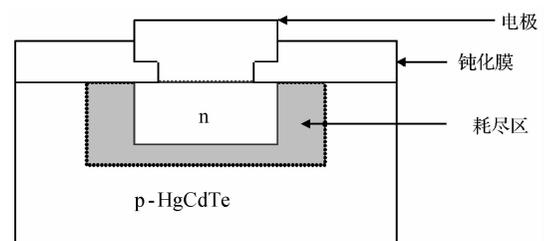
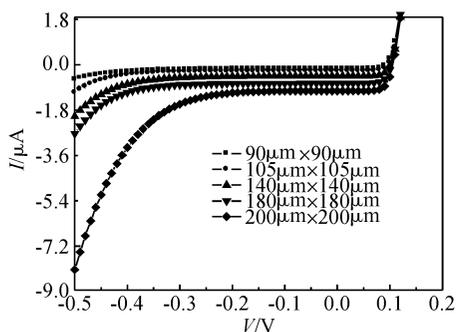
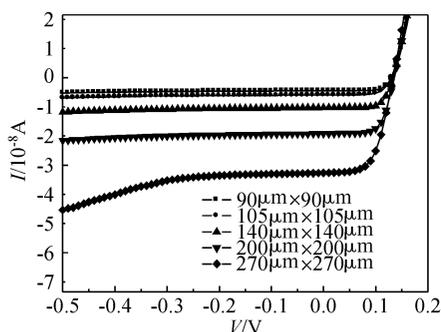


图 1 碲镉汞平面器件结构示意图

Fig. 1 Configuration of HgCdTe planar photodiode

[†] 通信作者. Email: qiaohui@mail. sitp. ac. cn

2007-11-29 收到, 2008-01-08 定稿

图2 ZnS 钝化的器件的 $I-V$ 曲线Fig.2 $I-V$ curves of detectors passivated by ZnS图3 CdTe/ZnS 钝化的器件的 $I-V$ 曲线Fig.3 $I-V$ curves of detectors passivated by CdTe/ZnS

时暗电流略有增加,且其增加幅度要小于图2. HgCdTe 光伏器件的暗电流机制主要包括体内的扩散电流、产生-复合电流、直接隧道电流和间接隧道电流以及表面漏电流^[3]. 由于两种器件在同一片材料上制备,制备过程除了钝化膜结构不同,其余都是同步工艺进行,因此对两种器件暗电流特性影响最大的是不同的钝化膜结构导致的钝化膜/碲镉汞界面特性的不同,即表面漏电流特性的不同. 根据文献^[3],在不考虑表面漏电流的情况下,器件体内产生的电流随面积增加呈线性增加关系,若器件具有较大的表面漏电则会使这一关系偏离线性. 由于光伏器件通常工作于零偏状态,我们将两种钝化膜结构器件的零偏暗电流与结面积的关系进行作图,如图4所示. 从中可以明显看出两种钝化膜结构器件的

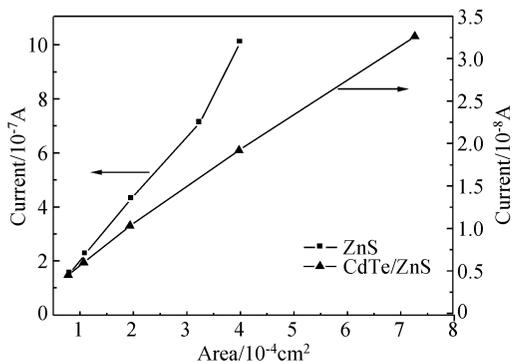


图4 两种钝化膜结构器件的零偏暗电流随结面积的变化

Fig.4 Zero-bias dark current as a function of area of detectors passivated by two types of layers

表1 两种钝化膜结构器件的 R_0A 因子随器件面积的变化Table 1 R_0A as a function of area of detectors passivated by two types of layers

ZnS		CdTe/ZnS	
Area/ μm^2	R_0A	Area/ μm^2	R_0A
90×90	8.10×10^3	90×90	1.38×10^5
105×105	9.58×10^3	105×105	1.44×10^5
140×140	1.12×10^4	140×140	1.57×10^5
180×180	1.30×10^4	200×200	1.74×10^5
200×200	1.33×10^4	270×270	1.84×10^5

区别, CdTe/ZnS 双层钝化的器件的零偏暗电流与结面积具有较好的线性关系,而 ZnS 钝化的器件的零偏暗电流与结面积的关系则逐渐偏离线性,因此说明 ZnS 钝化的器件具有较大的表面漏电,对器件的电流机制影响较大. 根据文献^[4],器件大反偏条件下的电流特性可以直接反映器件间接隧道电流特性,可以得出 ZnS 钝化的器件的表面漏电以表面间接隧道电流为主,这是因为 ZnS 与 HgCdTe 有较大的晶格失配,从而导致 ZnS/HgCdTe 界面具有较高的间接隧道中心密度,而 CdTe 与 HgCdTe 有良好的晶格匹配,因此采用 CdTe/ZnS 双层钝化结构可以降低间接隧道中心密度,从而降低表面间接隧道电流.

3.2 两种钝化膜结构对器件 R_0A 因子的影响

器件的零偏压电阻与面积的乘积 (R_0A) 是衡量光伏探测器性能的重要指标^[5]. 对于体内产生的电流,它的零偏压电阻与面积之积,应当与结面积无关. 当碲镉汞光伏器件的钝化膜/碲镉汞界面对 pn 结特性有影响时,不同结面积的器件就会有不同的 R_0A . 导致这种变化的主要原因是结耗尽区与不同结构钝化膜的界面不同而导致表面漏电流不同. 对于 ZnS 和 CdTe/ZnS 两种钝化膜结构的器件,器件的界面不仅因钝化膜种类的相异而不同,而且两种结构的钝化膜中的固定电荷密度也不相同,这会导致碲镉汞近表面能带的弯曲程度也不同^[1],更加加剧了两种器件钝化膜/碲镉汞界面的不同. 表1给出两种钝化膜结构器件的 R_0A 随着结面积增大而产生的变化. 可以看出随着面积增加,器件的 R_0A 因子都不断变化,说明两种钝化膜结构的器件都有表面漏电的影响. 通过分析不同结面积器件的 R_0A 与周长面积比 (p/A) 的关系可以很好地分离和表征表面漏电对器件暗电流的影响^[2]. 若无表面漏电影响, R_0A 与 p/A 应呈线性关系; 由于表面漏电的影响,随着 p/A 的变化,器件的 R_0A-p/A 关系偏离直线,并且影响越大,曲线变化越剧烈. 图5给出两种钝化膜结构器件的 R_0A-p/A 关系,可以看出 ZnS 钝化的器件的 R_0A-p/A 曲线的变化要比 CdTe/ZnS 钝化的器件更大,这也说明 ZnS 单层钝化膜比 CdTe/ZnS 双层钝化膜会产生更大的表面漏电而对器件有更为明显的影响.

3.3 两种钝化膜结构对器件电流噪声的影响

光伏探测器的噪声主要包括产生复合噪声、散粒噪声和 $1/f$ 噪声^[6], 其中产生复合噪声和散粒噪声为与频

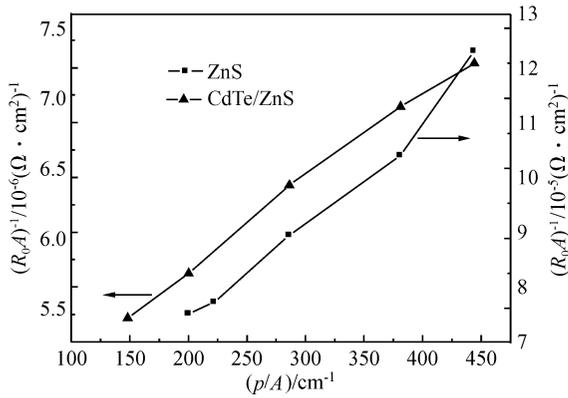


图 5 两种钝化膜结构器件的 $(R_0A)^{-1}$ 随周长面积比 (p/A) 的关系
Fig.5 $(R_0A)^{-1}$ values as a function of perimeter to area ratio of detectors passivated by two types of layers

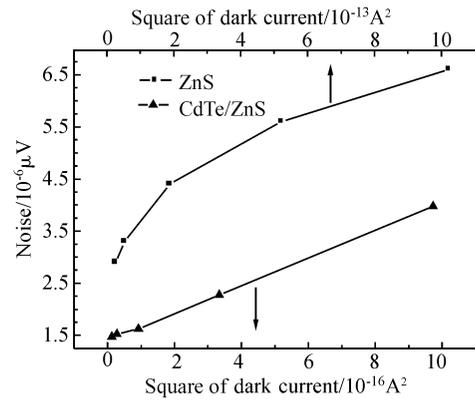


图 6 两种钝化膜结构器件的噪声功率与暗电流平方的关系
Fig.6 Noise power as a function of the square of dark current of detectors passivated by two types of layers

率无关的白噪声.产生复合噪声主要来源于禁带中部附近的深能级产生复合中心和陷阱中心,与耗尽区的宽度密切相关,而耗尽区的宽度随电压的平方根成比例增大,因此只有当反向偏压较大时产生复合电流才比较明显.在较低以及零偏压下,器件的噪声成分主要是 $1/f$ 噪声和散粒噪声. $1/f$ 噪声的来源主要有迁移率涨落模型和表面载流子密度涨落模型, Van der Ziel^[7] 据此把器件中的 $1/f$ 噪声分为基本 $1/f$ 噪声与非基本 $1/f$ 噪声.由载流子密度涨落而产生的 $1/f$ 噪声从本质上可以完全消除,称为非基本 $1/f$ 噪声;散射过程的随机性引起的迁移率涨落而产生的 $1/f$ 噪声从本质上是不能消除的,故称为基本 $1/f$ 噪声. Hooge^[8] 根据迁移率涨落模型提出了基本 $1/f$ 噪声 $S_1(f)$ 与暗电流 I 的经验公式:

$$S_1(f) = \alpha_H I^2 / fN \quad (1)$$

其中 α_H 为 Hooge 系数; N 为载流子数; f 为频率.此时器件的噪声与流过器件的暗电流的平方成正比.

散粒噪声与载流子的粒子性有关,起源于通过结区的载流子围绕平均值的涨落,其表达式为

$$S_1(f) = 2qI \quad (2)$$

其中 q 为电子电荷.可以看出,若器件的噪声由散粒噪声限制,噪声与暗电流呈正比关系.图 6 给出两种钝化膜结构的不同结面积的器件的电流噪声与零偏暗电流平方的关系曲线,可以看出 CdTe/ZnS 双层钝化的器件基本为直线,而 ZnS 钝化的器件明显偏离直线,但其电流噪声与零偏暗电流的曲线更接近线性关系,如图 7 所示.而 CdTe/ZnS 双层钝化膜器件的电流噪声与零偏暗电流的曲线则明显偏离直线关系.根据公式(1)和(2),说明 ZnS 单层钝化的器件具有明显的载流子密度涨落现象,因此其噪声更多表现出散粒噪声特性; CdTe/ZnS 双层钝化的器件由于基本消除了载流子的涨落而具有较好的基本 $1/f$ 噪声特性,因此 CdTe/ZnS 双层钝化的器件的噪声要明显小于 ZnS 单层钝化的器件,如图 6 和图 7 所示.在 3.1 中提到,由于 ZnS 与 HgCdTe 有较大的晶格失配,会导致 ZnS/HgCdTe 界面出现较多的间接隧道中心,这些隧道中心同样也会出

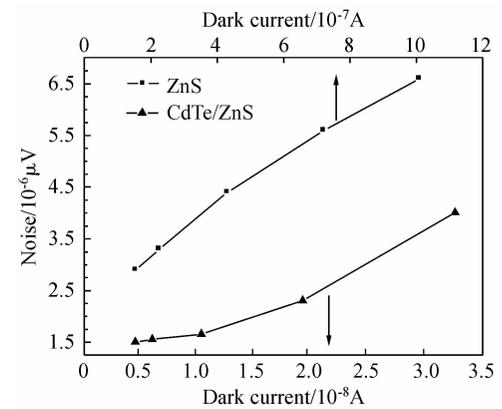


图 7 两种钝化膜结构器件的噪声功率与暗电流的关系
Fig.7 Noise power as a function of dark current of detectors passivated by two types of layers

现于靠近 HgCdTe 表面的耗尽区中,在耗尽区内建电场的作用下,间接隧道中心对载流子的随机捕获和释放会导致通过耗尽区的载流子密度出现一定的涨落,从而增大了与载流子涨落有关的噪声.由于 CdTe 与 HgCdTe 具有良好的晶格匹配,因此若在 ZnS 与 HgCdTe 的中间插入一层 CdTe 缓冲层构成 CdTe/ZnS 双层结构,则会大大改善由于晶格失配引起的载流子浓度涨落现象,从而实现降低器件噪声的效果. CdTe/ZnS 双层结构的厚度较 ZnS 单层结构增加了 110nm. 根据文献[9],单一膜层的内应力随着膜厚的增加而增大,可以推论 ZnS/HgCdTe 界面的间接隧道中心密度只会随着 ZnS 膜厚的增加而增大,因此可以排除双层结构产生的钝化膜厚度增加的影响.

4 结论

在同一材料上采用 ZnS 和 CdTe/ZnS 两种钝化膜结构制备了碲镉汞变面积光伏器件.通过对比两种钝化膜结构器件的 $I-V$ 曲线,以及两种器件的 R_0A 因子随周长面积比 (p/A) 的变化,发现 ZnS 钝化膜导致界面存在较大的间接隧道中心密度,使得器件有较大的表

面漏电,分析认为这是由于 ZnS 与 HgCdTe 之间较大的晶格失配导致;而当在生长 ZnS 之前先生长一层 CdTe,由于 CdTe 与 HgCdTe 之间有良好的晶格匹配,结果明显地改善了器件的暗电流特性,使得 CdTe/ZnS 双层钝化的器件的噪声明显小于 ZnS 单层钝化的器件.

参考文献

- [1] Nemirovsky Y, Bahir G. Passivation of mercury cadmium telluride surfaces. *J Vac Sci Technol*, 1989, A7(2): 450
- [2] McLevige W V, Williams G M, DeWames R E, et al. Variable-area diode data analysis of surface and bulk effects in MWIR HgCdTe/CdTe/sapphire photodetectors. *Semicond Sci Technol*, 1993, 8: 946
- [3] 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
- [4] Sun T, Chen W Q, Liang J H, et al. Dark current mechanism of HgCdTe photovoltaic detector passivated by different structure. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005, 26(1): 143 (in Chinese) [孙涛, 陈文桥, 梁晋穗, 等. 不同钝化结构的 HgCdTe 光伏探测器暗电流机制. *半导体学报*, 2005, 26(1): 143]
- [5] Willardson R K, Beer A C. *Semiconductors and semimetals*. New York: Academic Press, 1981
- [6] Huang Y C, Liu D F, Liang J H, et al. Low frequency noise study on short wavelength HgCdTe photodiodes. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54(5): 2261 (in Chinese) [黄杨程, 刘大福, 梁晋穗, 等. 短波碲镉汞光伏器件的低频噪声研究. *物理学报*, 2005, 54(5): 2261]
- [7] Van der Ziel. Unified presentation of $1/f$ noise in electronic devices; fundamental $1/f$ noise sources. *Proc IEEE*, 1988, 76: 233
- [8] Hooge F N. $1/f$ noise is no surface effect. *Phys Lett*, 1969, A29: 139
- [9] Zhong D S. *Vacuum film deposition-selection and application of optical materials*. Shenyang: Liaoning University Press, 2001 (in Chinese) [钟迪生. 真空镀膜-光学材料的选择与应用. 沈阳: 辽宁大学出版社, 2001]

Surface Passivation of Variable-Area HgCdTe Photovoltaic Detectors

Qiao Hui[†], Xu Guoqing, Jia Jia, and Li Xiangyang

(State Key Laboratories of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: Two types of variable-area photovoltaic detectors passivated by single ZnS layer and dual (CdTe/ZnS) layers have been fabricated on the same HgCdTe wafer. Through analyzing the current-voltage curves, the relation between the product of zero-bias resistance and area ($R_0 A$), and the ratio of perimeter and area (p/A) of the two types of detectors, it was found that the detectors passivated by ZnS had a significant surface leakage current. Through analyzing the relation of current noise and dark current, it was found the noise of detectors passivated by ZnS was close to shot noise, and the detectors passivated by CdTe/ZnS showed an obvious basic $1/f$ noise characterization, which caused lower noise than detectors passivated by ZnS.

Key words: passivation; variable-area; shot noise; $1/f$ noise; photovoltaic detector; HgCdTe

PACC: 6820; 6855; 6110

Article ID: 0253-4177(2008)07-1383-04

[†] Corresponding author. Email: qiaohui@mail.sitp.ac.cn

Received 29 November 2007, revised manuscript received 8 January 2008