

Au/CdTe+ZnS/HgCdTe 双层介质膜 MIS 器件的制备及研究*

周咏东^{1,2} 方家熊³ 李言谨³ 龚海梅³ 吴小山¹ 靳秀芳³ 汤定元³

¹南京大学微结构物理实验室, 江苏, 南京, 210093.

²苏州大学物理系, 江苏, 苏州, 215006.

³中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083.

摘要 通过介质膜 ZnS、CdTe 薄膜材料的 Ar⁺ 束溅射沉积研究, 结合 HgCdTe 器件工艺, 成功制备了以 ZnS、CdTe 双层介质膜为绝缘层的 HgCdTe MIS 器件; 通过对器件的 C-V 特性实验分析, 获得了 CdTe/HgCdTe 界面电学特性参数. 实验表明, 溅射沉积介质膜 CdTe+ZnS 对 HgCdTe 的表面钝化已经可以满足 HgCdTe 红外焦平面器件表面钝化的各项要求.

关键词 CdTe 薄膜, HgCdTe 红外焦平面, 器件表面钝化, ZnS.

FABRICATION AND STUDY ON THE HgCdTe MIS DEVICE OF CdTe+ZnS DOUBLE INSULATOR FILMS*

ZHOU Yong-Dong^{1,2} FANG Jia-Xiong³ LI Yan-Jin³ GONG Hai-Mei³

WU Xiao-Shan¹ JIN Xiu-Fang³ TANG Ding-Yuan³

¹ Laboratory of Solid State Microstructures, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China;

² Physics Department of Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China;

³ Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract The HgCdTe MIS device of CdTe and ZnS double insulator layers was successfully fabricated by using the techniques of the Ar⁺ beam sputtering deposition of CdTe and ZnS films and the HgCdTe device manufacture. The MIS device C-V measurement was used to give the electric character of the CdTe/HgCdTe interface. It is proved that the CdTe+ZnS double layer passivant can satisfy the surface passivation of HgCdTe infrared focal plane array.

Key words CdTe film, HgCdTe infrared focal plane array, device surface passivation, ZnS.

引言

碲镉汞因为有很强的军事、航空航天应用背景而得到各发达国家的高度重视^[1]. 随着军用热成像系统从第一代向第二代的过渡, 要求 HgCdTe 红外焦平面 (FPA) 芯片必须以光伏形式工作^[2], 因此器件各关键工艺均必须作相应的调整. 具体到器件的表面钝化, 攻关的方案为碲镉汞表面的介质膜钝化

(成熟的自身阳极氧化膜由于太大的界面固定电荷密度而无缘于 HgCdTe FPA 器件工艺). CdTe 由于其化学组份、晶格常数、晶体结构等均与碲镉汞很接近, 完全耗尽的 CdTe 具有好的绝缘性, 加之 CdTe 有很好的稳定性、抗辐射能力而被认为是最理想的 HgCdTe FPA 器件芯片的表面钝化材料^[3]. ZnS 由于其光学常数适当, 被希望用来实现 HgCdTe 器件的表面抗反射^[4].

* 国家高技术航天领域青年基金(编号: 863-2.00.4)和江苏省教委自然科学基金(编号: 98KJB430001)资助项目
稿件收到日期 2001-01-19, 修改稿收到日期 2001-05-13

* The project supported by the the National Foundation of Young Scientists for High-technology and Space-flight (No: 863-2.00.4) and by the Natural Science Foundation of Educational Committee of Jiangsu Province (No: 98KJB430001).
Received 2001-01-19, revised 2001-05-13

HgCdTe MIS 器件的研究是一项专门的课题,通过 MIS 器件的制备可以在 HgCdTe 上实现 CCD、CID,是完成 HgCdTe 红外焦平面单片集成技术的首选路线;而且 HgCdTe MIS 器件本身也是一种红外敏感元件,但本文制备研究 HgCdTe MIS 器件的目的并不在于上述原因,而是为了更好地研究介质膜/MCT 界面电学特性。

利用 Ar^+ 束溅射沉积技术,获得了性能优良的 ZnS、CdTe 介质膜,介质膜具有优良的粘附性,在工作波段内有高的光透过率,表面形貌、组份均匀性良好,而且获得的介质膜/HgCdTe 界面,特别是 CdTe/HgCdTe 界面,具有和成熟的自身阳极氧化膜/HgCdTe 界面一样低的界面态密度、界面陷阱密度^[5,6],证明了这种介质膜已有相当水平的 HgCdTe 器件芯片表面钝化的能力,但作为 HgCdTe 光伏器件(HgCdTe FPA)的表面钝化,还有一项指标:要求保证芯片的 HgCdTe 晶体表面呈近平带,因此要求钝化介质膜与 HgCdTe 界面固定电荷密度必须足够小(小于 $5 \times 10^{16} \text{cm}^{-2}$)^[7],否则由于芯片表面势对 HgCdTe 表面能带的弯曲作用,芯片表面漏电流,可能会大到令器件失效的程度^[7]。为了获得可靠的介质膜/HgCdTe 界面电学特性的第一手数据,最好是直接利用相应的介质膜制备出 MIS 器件,对 MIS 器件的 C-V 特性研究可以给出所需要的介质膜/HgCdTe 界面电学特性参数值^[8]。这一课题的最大困难是高质量 HgCdTe MIS 器件的制备,它不仅要求介质膜必须有优良的绝缘性,而且介质膜必须致密均匀,具有很好的抗机械、热冲击能力(MIS 器件栅极引线时无法避免要对器件有一定的机械、热冲击),从另一角度讲:MIS 器件的制备也是对介质膜的质量、性能、材料生长技术以及器件工艺水平的一次全面检验。

1 实验

1.1 MIS 器件的制备

MIS 器件的成品率与 HgCdTe 晶体表面处理过程及介质膜生长厚度有关,研究认为^[9]: HgCdTe 表面化学机械抛光后,不经过化学腐蚀,制备的 MIS 器件成品率明显高于经过化学腐蚀后的 HgCdTe 表面制备的 MIS 器件;介质膜越厚, MIS 器件成品率越高, HgCdTe 光伏器件表面钝化介质膜的厚度一般仅在 200nm 左右,基于本文制备研究 MIS 器件的目的,本文 MIS 器件制备过程选择为:首先对 HgCdTe 晶体进行表面处理(机械抛光、化

学机械抛光、化学腐蚀),获得尽可能完整的 HgCdTe 晶体表面(HgCdTe 材料性能参数如下: $X = 0.2587$, $\lambda = 7.03 \mu\text{m}$, $n_{77\text{K}} = 2.76 \times 10^{14} \text{cm}^{-1}$, $n_{\text{室温}} = 1.63 \times 10^{16} \text{cm}^{-1}$, $\rho_{77\text{K}} = 7.91 \times 10^{-1} \Omega \cdot \text{cm}$, $\rho_{\text{室温}} = 8.44 \times 10^{-1} \Omega \cdot \text{cm}$, $\mu_{77\text{K}} = 2.89 \times 10^4 \text{cm}^2/\text{s} \cdot \text{V}$, $\mu_{\text{室温}} = 4.58 \times 10^4 \text{cm}^2/\text{s} \cdot \text{V}$);然后进行介质膜生长,介质膜溅射沉积条件为: CdTe 介质: Ar^+ 束能量为 250eV、束流为 40mA, CdTe 膜厚为 155nm; ZnS 介质膜: Ar^+ 束能量为 350eV、束流为 55mA, ZnS 膜厚为 132nm;然后进行光刻栅极孔、沉积金属栅极、去胶、引线(栅极面积为 $1.2 \times 10^{-3} \text{cm}^2$;栅极选择成熟的 Cr/Au 工艺),这样的工艺流程对介质膜的绝缘性、抗机械、热冲击能力提出了更高的要求(相对于光伏器件的表面钝化要求)。

1.2 MIS 器件的 C-V 特性测量

MIS 器件 C-V 特性的测量是在一套自建的宽频带阻抗测量系统中实现的,系统工作频带为 100Hz—100kHz,交流小信号幅度小于 10mV,电容测量精度高于 0.02PF,电导精度(G/W)可高于 0.2PF,即 100kHz 的频率下电导 G 的测量精度高于 $2 \times 10^{-7} \Omega^{-1}$ 。实际 MIS 器件 C-V 测量中,采用的交流小信号频率为 10kHz,振幅为 7.5mV,直流电压线性扫描速率小于 100mV/s,器件的 C-V 测量是在 77K 下进行的(将 MIS 器件直接浸没在液氮之中)。

2 结果与讨论

图 1 为 CdTe+ZnS 双层介质膜 HgCdTe MIS 器件的四张变偏压 C-V 特性曲线测量图谱,其中 a、b、c、d 曲线测量时的器件栅压变化范围 U_{gm} 分别为 $\pm 0.674\text{V}$ 、 $\pm 1.178\text{V}$ 、 $\pm 2.062\text{V}$ 、 $\pm 3.33\text{V}$ 。

从图 1 中不同栅压变化范围测量的 C-V 特性曲线可知,C-V 曲线同样存在着明显的滞后现象,而且偏压扫描范围越大,滞后现象也越严重,表明器件 CdTe/HgCdTe 界面附近存在一定数量的慢态,表 1 中列出了器件在不同栅压扫描范围 U_{gm} 内测量的 C-V 曲线滞后电压 U_L ,从图 1 中的最大电容值可知器件绝缘层电容为 $C_i = 31.5\text{PF}$,由此可以推算出不同栅压扫描范围内对测量电容产生影响的界面慢态密度值 N_s (见表 1),图 2 中画出了表 1 中器件慢态密度 N_s 随栅压扫描幅度 U_{gm} 变换情况,从图 2 中可见器件界面慢态密度与栅压幅度值间呈线性关系,表明界面慢态能级基本均匀地分布在 HgCdTe 能带内。

对比图 1 及表 1 中 MIS 器件的 C-V 曲线研究结果可知:随着测量栅压幅度 U_{gm} 的增加,器件最低

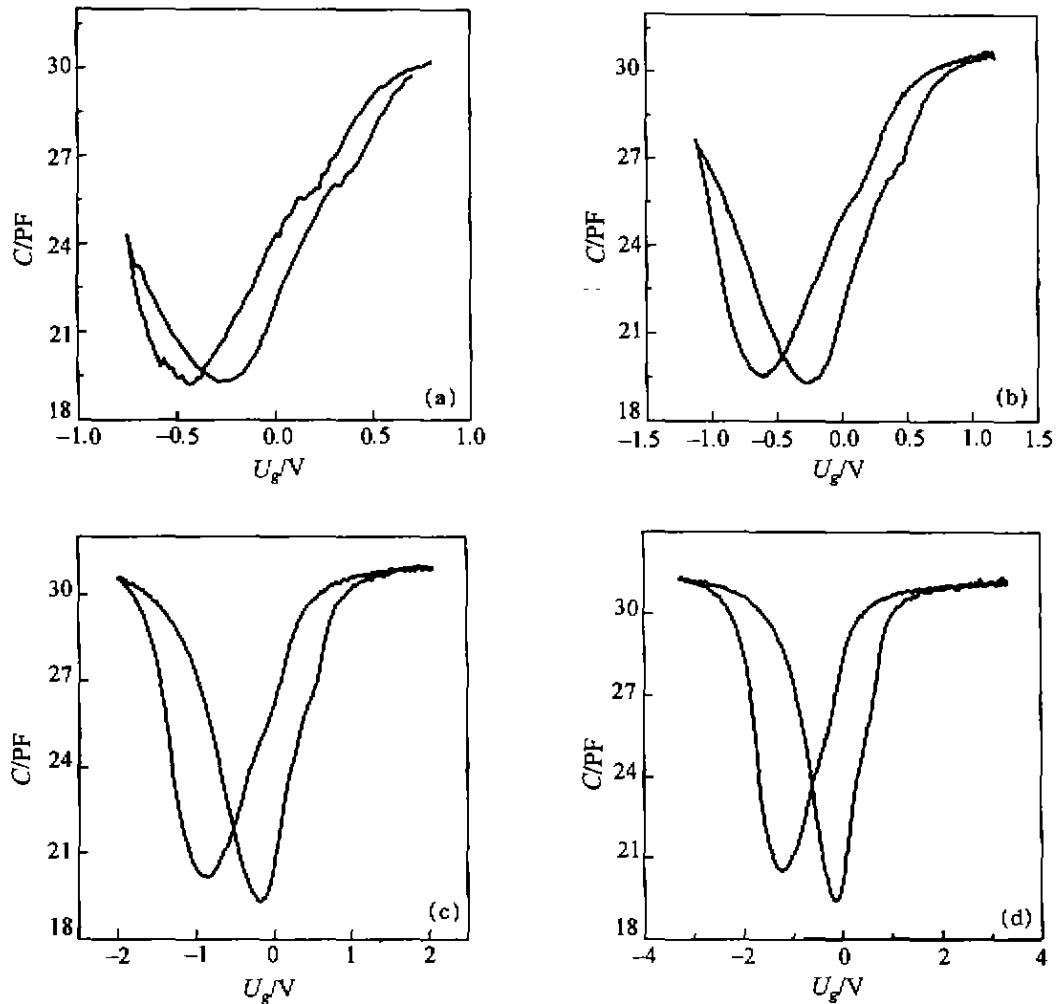


图 1 不同栅压变化下测出的 77K CdTe+ZnS 双层介质膜 n-HgCdTe MIS 器件 C-V 特性曲线

(a) 栅压变化范围 $\pm 0.674\text{V}$ (b) 栅压变化范围 $\pm 1.178\text{V}$

(c) 栅压变化范围 $\pm 2.062\text{V}$ (d) 栅压变化范围 $\pm 3.33\text{V}$

Fig. 1 the 77K C-V curves of n-HgCdTe MIS device of CdTe/ZnS double insulator layers measured in different grid bias voltage ranges (a) grid bias voltage range of $\pm 0.674\text{V}$ (b) grid bias voltage range of $\pm 1.178\text{V}$ (c) grid bias voltage of $\pm 2.062\text{V}$ (d) grid bias voltage range of $\pm 3.33\text{V}$

电容对应的器件栅压 $U_{l, \min}$ 也有差异. 栅压变化幅度 U_{gm} 越大, 器件正扫描(栅压由正电位向负电位变化)时最低电容对应的栅极电位 $U_{l, \min}$ 也越高, 表明

器件界面附近同样存在一定数量的电子陷阱, 且这些电子陷阱态在能带内也同样存在一定的分布.

根据 HgCdTe 材料电学参数确定的材料表面

表 I CdTe+ZnS 双层介质膜 HgCdTe MIS 器件 77K 时的滞后电压 U_d 、慢态密度 N_s 、最低电容栅压 $U_{C_{\min}}$ 、平带电压 U_{FB} 、固定电荷面密度 σ 的测量值随测量时加在器件栅极上的扫描电压变化范围 U_{gm} 的变化情况
Table I Electric parameters (lag voltage U_d , slow state density N_s , grid voltage at the minimum capacity $U_{C_{\min}}$, grid voltage at the flat surface band gap U_{FB} and fixed charge density σ) of the CdTe/HgCdTe interface of the MIS device tested in 4 different grid scanning voltage ranges U_{gm}

| U_{gm}/V | ± 0.674 | ± 1.178 | ± 2.062 | ± 3.33 |
|-------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
| U_d/V | 0.18 | 0.35 | 0.7 | 1.076 |
| N_s/cm^{-2} | $2.53 \cdot 10^{10}$ | $4.93 \cdot 10^{10}$ | $9.83 \cdot 10^{10}$ | $1.51 \cdot 10^{11}$ |
| $U_{C_{\min}}/\text{V}$ | -0.293 | -0.253 | -0.193 | -0.111 |
| U_{FB}/V | 0.1677 | 0.2077 | 0.2677 | 0.35 |
| σ/cm^{-2} | $-2.35 \cdot 10^{10}$ | $-2.9 \cdot 10^{10}$ | $-3.75 \cdot 10^{10}$ | $-1.9 \cdot 10^{11}$ |

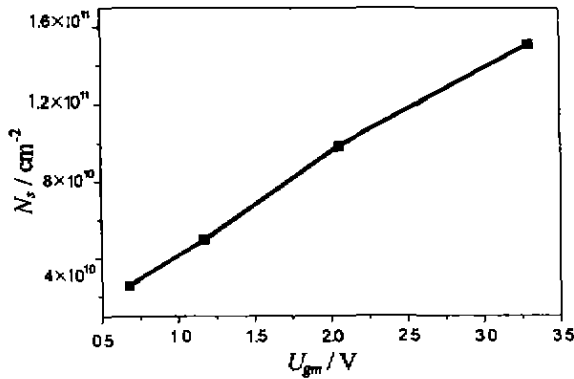


图2 CdTe+ZnS 双层介质膜HgCdTe MIS 器件 CdTe/HgCdTe界面慢态密度随栅压幅度变化情况图
Fig.2 The slow state density of the CdTe/HgCdTe interface of the MIS device versus the measurement grid bias voltage variation range

(界面)德拜屏蔽常数 L_D 可以确定材料平带时的表面电容 C'' , 从而可知器件的平带电容 C_{FB} . 从图 1 中可知栅压变化范围为 $\pm 3.33V$ 时, 器件的平带电压应为 $U_{FB}=0.35V$, CdTe/HgCdTe 界面固定电荷面密度 σ 为 $-4.9 \times 10^{10} cm^{-2}$ (其中应包含有此时界面电子陷阱中电子电荷的贡献), 所以器件的平带电压 U_{FB} 应低于 $0.35V$ (实际应低于 $0.1677V$), 界面固定负电荷密度值 σ 也应低于 $4.9 \times 10^{10} cm^{-2}$ (实际也应低于 $2.35 \times 10^{10} cm^{-2}$).

3 结论

总结上述 CdTe + ZnS 双层介质膜 HgCdTe MIS 器件的制备及 C-V 特性实验研究结果, 可以得到以下结论:

(1) 这里溅射沉积的 CdTe 介质膜与 HgCdTe 界面间存在 $1.51 \times 10^{11} cm^{-2}$ 的慢态密度, 这些慢态能级基本均匀地分布在 HgCdTe 能带内. 由于慢态能级中在能带较大范围内均匀分布着, 而实际 HgCdTe 光伏器件的动态范围不会很大, 因此对探测器造成严重影响的界面慢态密度应该很小.

(2) CdTe/HgCdTe 界面附近存在一定数量的固定负电荷和电子陷阱, 固定负电荷面密度值应低于 $2.35 \times 10^{10} cm^{-2}$, 因此能够满足 HgCdTe 光伏器件(HgCdTe FPA)表面钝化近平带的要求.

(3) CdTe + ZnS 双层介质膜(双层介质膜总厚度仅为 287nm)HgCdTe MIS 器件的成功制备, 证

明了用 Ar^+ 束溅射沉积法生长的介质膜(ZnS、CdTe)具有很好的致密性、绝缘性以及抗机械、热冲击的能力.

实验证明: 溅射沉积双层介质膜 CdTe + ZnS 对 HgCdTe 表面钝化已经可以满足 HgCdTe 红外焦平面器件芯片表面钝化的各项要求.

REFERENCES

- [1] PETER Capper. *Properties of Narrow Gap Cadmium-based Compounds*. London: the Institution of Electrical Engineers, EMIS datareviews Series No. 10, 1994
- [2] Paul R. Norton. Infrared image sensors. *Optical Engineering*, 1991, **30**(11): 1649-1663
- [3] ZHOU Yong-Dong, FANG Jia-Xiong, ZHAO Jun, et al. The device passivation study for the use of HgCdTe focal plane arrays. *Chinese Journal of Functional Materials*. (周咏东, 方家熊, 赵军, 等. 碲镉汞红外焦平面芯片钝化方案可行性的研究, *功能材料*), 1998, **29**(Supplement): 113-114
- [4] ZHOU Yong-Dong, FANG Jia-Xiong, Ye Hua-Wei, et al. The sputtering growth of ZnS and the effects on the carrier transfer property in the n-HgCdTe Hall device. *Chinese Journal of Functional Materials* (周咏东, 方家熊, 叶华伟, 等. ZnS 介质膜的溅射生长及其对 n-HgCdTe Hall 器件输运物的影响, *功能材料*), 1998, **29**(Supplement): 470-472
- [5] ZHOU Yong-Dong, Zhao Jun, GONG Hai-Mei, et al. Photoconductivity decay study on the ZnS passivated HgCdTe surface. *Acta Photonica Sinica* (周咏东, 赵军, 龚海梅, 等. ZnS 钝化的 HgCdTe 表面光导衰退实验表征, *光子学报*), 1998, **27**(z2): 102-106
- [6] ZHOU Yong-Dong, Zhao Jun, GONG Hai-Mei, et al. Surface recombination velocity of the HgCdTe surface passivated with sputtering CdTe film. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (周咏东, 赵军, 龚海梅, 等. CdTe 介质膜与 HgCdTe 晶片间界面特性的研究, *红外与毫米波学报*), 2000, **19**(1): 71-74
- [7] Willardson R K, Beer A C. *Semiconductors and Semimetals*. New York, Academic Press, a Subsidiary of Harcourt Brace Jovanovich, Publishers, 1981, **18**: 221
- [8] SUN Heng-Hui, BAO Zhong-Ming. *Semiconductor Physics Experiment*. Beijing: Press of Advanced Education (孙恒慧, 包宗明. 半导体物理实验, 北京: 高等教育出版社), 1985: 172
- [9] YUAN Hao-Xing. Dark current characteristic and surface passivation for $Hg_{1-x}Cd_xTe$ photo-voltaic detector. Doctoral Dissertation, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences (袁皓心. $Hg_{1-x}Cd_xTe$ 红外光伏探测器的暗电流机构和表面钝化. 博士学位论文, 中国科学院上海技术物理研究所), 1997