

① 98,17(2) 81-80

空间用 $1.6\mu\text{mHg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 室温光伏探测器

王勤 刘激鸣[✓] 方家熊

TN215

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

摘要 报道了采用改进的区熔工艺生长的三元系金属化合物半导体 HgCdTe 材料研制的短波光伏探测器。其工作温度为室温(300K),在响应波段 $1.58\sim 1.64\mu\text{m}$ 内探测率优于 $3.0\times 10^{11}\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$,量子效率达 70%。暗电流主要受制于扩散电流与产生复合电流,器件经环境模拟试验,定标与联试,完全符合空间工程应用的要求。

关键词 HgCdTe , 光伏探测器。

汞碲 室温 红外探测器

引言

$\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 三元系金属化合物属于窄禁带半导体材料,广泛应用于研制高性能红外探测器,通过对组分 x 的控制,探测器可工作于 $1\sim 20\mu\text{m}$ 红外波段。通常,为了减小器件噪声电流,得到高的 D^* 探测率,探测器都需要在低温(77K, 105K)下工作,这就带来了器件封装与使用上的不便。因此室温工作的 HgCdTe 探测器的研制就变得十分有意义。

目前,国外已采用薄膜材料与薄膜技术进行短波 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 红外探测器的研制,并有这方面的报道^[1],但就国内而言,薄膜材料的研制尚不成熟,工艺条件有待进一步探索,故采用体材料研制单元探测器并应用于空间工程任务仍具有其现实意义。经过长期的研究,采用组分 $x\approx 0.6$ 的 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 晶体材料,应用离子注入技术,成功地研制出工作波段为 $1.58\sim 1.64\mu\text{m}$,探测率优于 $3.0\times 10^{11}\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ 的室温红外光伏探测器。

1 理论与计算

光伏型红外 HgCdTe 探测器是利用 p-n 结光生伏特效应,在红外辐照下产生的电子和空穴扩散到空间电荷区或直接在空间电荷区受强电场的作用而漂移,从而在外电路产生光电流^[2]。黑体辐照下电流电压关系为^[2]

$$I = I_0[\exp(eV/kT) - 1] - I_s \quad (1)$$

$$I_s = \frac{\eta e \lambda}{hc} \varphi_s \quad (2)$$

$$\varphi_s = \int_{\Delta\lambda} M_s d\lambda \frac{AA_B}{\pi L^2} \quad (3)$$

式中 I_0 为器件暗电流, I_s 为辐照下产生的光电流信号, η 为量子效率, φ_s 为器件接受的黑体红外辐射功率, A 为器件光敏面面积, A_B 为黑体孔径, L 为测试距离。

受热噪声限制的探测器的响应率、零偏均方噪声电流、波段探测率、量子效率分别为

$$R_i = \frac{\eta e \lambda}{hc} = \frac{I_s}{\varphi_i}, \quad (4)$$

$$I_n = 2eI_0 \Delta f, \quad (5)$$

$$D_i^* = \frac{\sqrt{A \Delta f}}{I_n} R_i = R_i \sqrt{\frac{4kT}{R_0 A}}, \quad (6)$$

$$\eta = \frac{hc}{e \lambda} R_i, \quad (7)$$

其中, R_0 为器件零偏阻抗, Δf 为前置放大器输入带宽.

光伏器件性能主要由器件量子效率 η 与暗电流 I_0 决定, 除了器件表面反射损失外, 由于器件表面态和材料体内损伤等一些复合机构的存在, 使得少子在扩散过程中产生极大的复合损失, 从而限制了量子效率^[3]; 除了 p-n 结本身少子扩散电流、势垒区产生一复合电流外, 由于表面损伤引入的表面漏电流, p-n 结掺杂浓度、深能级引入的直接与间接隧道电流构成了光伏器件暗电流主要机构^[4]. 为了得到高的 D^* 探测率, 应有较高的量子效率与尽可能小的暗电流.

对于短波器件, 材料对红外短波辐射的吸收系数很大, 入射辐射在非常接近表面处就完全被吸收, 几乎所有电子空穴对都产生在表面附近, 为了得到高的量子效率, p-n 结深度应很浅 ($< 1 \mu\text{m}$), 以减少扩散过程中的复合损失^[2]. 对于 $n^+ - p$ 型光伏探测器, 通过合理选择材料掺杂浓度, 离子注入能量与剂量, 及加强表面处理与钝化工艺 (减少表面损伤), 可大大降低隧道电流和表面漏电流^[5], 使得工作于室温时器件暗电流主要受扩散电流与产生一复合电流限制, 并可根据材料参数预言器件的理论极限性能^[4].

对于工作波段为 $1.58 \sim 1.64 \mu\text{m}$, p 型衬底材料组份 x 为 0.6, 掺杂浓度 N_a 为 10^{16}cm^{-3} , 电子寿命 τ_e 为 10^{-8}s , 电子迁移率 μ_e 为 $650 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 的 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 光伏器件, 工作于室温受扩散电流限制时理论极限性能为:

$$R_i = \frac{\eta e \lambda}{hc} = 1.29 \text{AW}^{-1}, \quad (8)$$

$$R_0 A = \frac{(kT)^{1/2}}{q^{3/2} n_i^2} N_a \left(\frac{\tau_e}{\mu_e} \right)^{1/2} = 1.76 \times 10^4 \Omega \text{cm}^{-2}, \quad (9)$$

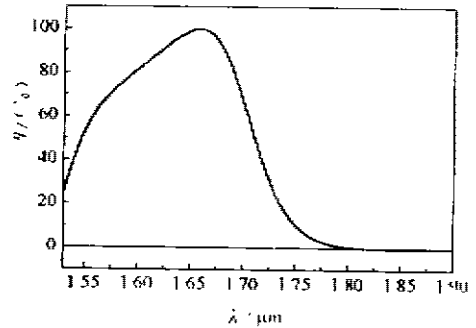


图1 器件室温光谱响应曲线
Fig. 1 Spectral response of the implanted photovoltaic $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ detector operating at 300K

$$D_s^* = \frac{\sqrt{A\Delta f}}{I_n} R_s = \frac{\eta q}{hc} \sqrt{\frac{r_0 A}{4kT}} = 1.34 \times 10^{12} \text{cmHz}^{1/2} \text{W}^{-1}, \quad (10)$$

其中 η 取 1, λ 取 $1.61\mu\text{m}$; 本征载流子浓度 n_i 可由下式确定^[6]:

$$n_i(x, T) = [5.585 - 3.820x + 1.753 \times 10^{-3}T - 1.364 \times 10^{-3}xT] \\ \times 10^{14} E_g^{3/4} T^{5/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right). \quad (11)$$

2 实验与讨论

我们选用由改进的区熔工艺生长, 组份 $x \approx 0.6$ 的 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 晶体作为器件 p 型衬底材料, 经抛光、腐蚀、钝化等一系列表面处理工艺后, 采用离子注入形成 N 型区, 再经电极工艺及划片制得 Non P 型光伏探测器。对于工作波段为 $1.58 \sim 1.64\mu\text{m}$ 的室温光伏器件, 采用 1000K 黑体为辐射源, 在调制频率 $f=1\text{kHz}$, 频带宽 $\Delta f=100\text{Hz}$ 的条件下测量其波段探测率, 用傅里叶光谱仪测其光谱响应曲线, 并测量器件 $I-V, C-V$ 特性。

短波 p 型 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 晶体, 组份 $x \approx 0.6$, 掺杂浓度 $N_a=10^{16}\text{cm}^{-3}$, $\tau_c \approx 10^{-8}\text{s}$, $\mu_c \approx 650\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}$, 截止波长 $\lambda_c \approx 1.7\mu\text{m}$, 器件光敏面 $A=0.4 \times 0.4\text{mm}^2$, 工作温度 $T=300\text{K}$, 工作波段 $\Delta\lambda=1.58 \sim 1.64\mu\text{m}$, 波段探测率 $D_s^* \geq 3.0 \times 10^{11}\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$, 噪声 $V_n \leq 5 \times 10^{-8}\text{VHz}^{-1/2}$ 。各器件具体性能参数见表 1。

根据所测得的器件性能参数(见表 1)与 $I-V$ 曲线(见图 2), HgCdTe 短波室温探测器具有良好的 p-n 结反向特性(见图 3), 在 -2V 的偏压下器件反向饱和电流小于 $2 \times 10^{-7}\text{A}$, 并且没有因隧道电流、表面漏电等机制产生的软击穿现象, 在室温工作下 D_s^* 优于 $3.0 \times 10^{11}\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ 、量子效率达 70%, R_0A 大于 $1 \times 10^3\Omega\text{cm}^2$ 。此外, 器件的电容($1/C^2$)与电压(V)较好地符合线性关系(见图 4 和图 5), 表明 B^+ 注入所形成的是 n^+-p 突变结。对于扩散电流限制的 n^+-p 突变结, 工作于室温、峰值波长 $1.6\mu\text{m}$ 、 η 取为 1 时按衬底材料参数计算得 D_s^* 约为 $1 \times 10^{12}\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ (见式 10); R_0A 理论值约为 10^4 (见式 9), 与 Rogalski 给出的

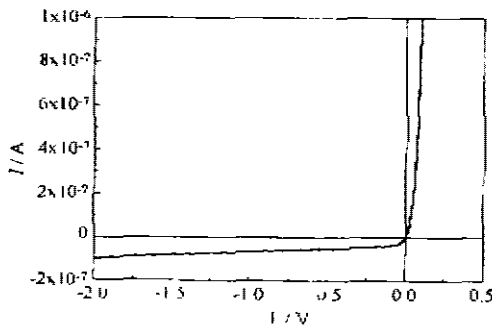


图 2 器件室温 $I-V$ 特性
Fig. 2 $I-V$ characteristic of a $1.6\mu\text{m}$
 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ photovoltaic detector
measured at 300K

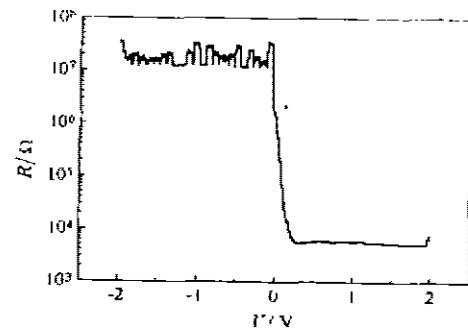


图 3 器件室温 $R-V$ 特性
Fig. 3 $R-V$ characteristic of a $1.6\mu\text{m}$
 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ photovoltaic detector
measured at 300K

$n^+ - p$ 型光伏器件在室温时的 R_0A 理论值相符^[4]. 因此通过合理选择材料掺杂浓度和离子注入能量与剂量, 加强表面处理与钝化工艺可大大降低隧道电流和表面漏电流, 使在 300K 下 $n^+ - p$ 型短波室温探测器的 R_0A 主要受制于扩散电流和产生一复合电流, 从而得到性能优良的室温探测器.

表 1 短波室温光伏探测器性能测量值

Table 1 Measured detectivities, quantum efficiencies, zero-biased resistances for photovoltaic detector, operating at ambient temperature

器件编号	$R_0A(\Omega\text{cm}^{-2})$	$R_{sh}(\text{VW}^{-1})$	$R_{sr}(\text{AW}^{-1})$	$\eta_A(\%)$	$D_f^*(\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1})$
S9609	2.49×10^3	6.83×10^5	0.93	72	3.82×10^{11}
S9611	1.58×10^3	6.12×10^5	0.91	70	3.19×10^{11}
S9613	1.58×10^3	5.34×10^5	0.85	66	2.94×10^{11}
S9626	1.20×10^3	5.47×10^5	0.96	74	3.02×10^{11}
S9627	1.34×10^3	6.12×10^5	0.91	70	3.46×10^{11}
S9628	1.34×10^3	5.92×10^5	0.96	74	3.35×10^{11}
S9633	1.26×10^3	6.18×10^5	1.01	79	3.37×10^{11}

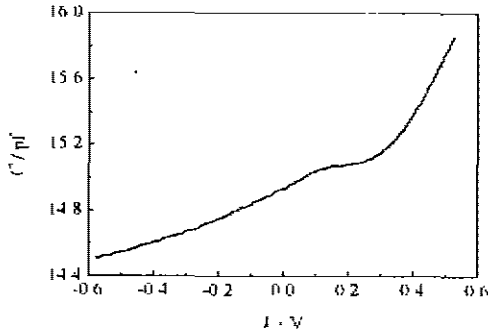


图 4 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 器件
C-V 特性曲线
Fig. 4 Measured capacitance vs
bias voltage for a
 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ photodiode

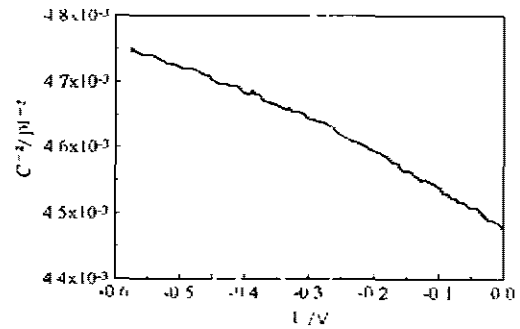


图 5 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 器件 $1/C^2 - V$ 关系曲线
Fig. 5 $1/C^2$ vs. voltage for a B^+ -implanted
 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, demonstrating abrupt
 $n^+ - p$ junction as indicated by the
linearity shown

3 环境条件试验

为了保证空间用器件的高可靠性, 根据遥感系统环境模拟试验条件分别对封装后器件进行了振动试验、冲击试验、加速度试验和 γ 射线照射试验. 具体试验条件如下: 在三个频

段 $10\sim 42\text{Hz}$, $42\sim 300\text{Hz}$, $300\sim 2000\text{Hz}$ 分别向 X 、 Y 、 Z 方向进行 2min 的振动试验; 冲击试验的轴向加速度为 $50g$, 横向加速度为 $25g$, 持续 10min , 脉冲波形近似为正弦波; 加速度试验分为轴向与横向, 量级分别为 $10g$ 和 $2g$, 持续时间大于 2min , 通过三项力学试验无一发生管壳脱落、开裂、芯片脱落和器件断路等现象. γ 射线照射剂量为 $2\times 10^4\text{rad}$, 实验后第二天即进行复测, 与实验前比较 D^* 无明显衰减或器件失效现象.

由于该器件首次被用于空间工作, 按可靠度 $R=0.97$ 、工作寿命二年投入 33 只器件做寿命试验, 在超高真空环境下存放 6816h , 器件经复测无一发生失效性变化. 对寿命试验结果进行可靠性试验的统计分析, 采用定时截尾寿命试验, 为便于分析假设失效一只、置信度为 80% , 经查表计算得寿命约为 16 年.

器件经定标与联试, 性能完全符合空间工程应用的要求.

4 结语

经过长期的器件研制表明, 在 HgCdTe 材料上采用离子注入技术, 可以制得高性能的短波室温探测器, 除具有光伏探测器的性能高、响应时间短、无需偏置电流等特点外, 并具有封装简便、性能稳定、无需制冷、使用方便等优点, 可成为性能良好的空间用探测器.

致谢 对我所包昌珍、胡亚春、叶丽萍等同志在器件工艺中所做的大量工作和陈竹华同志所做的器件测量工作, 以及司承才与朱三根高级工程师在器件研制与封装上提供的帮助深表谢意.

REFERENCES

- 1 Bubulac L O, Tennant W E, et al. *Journal of Electronic Material*, 1997, **26**(6): 649
- 2 Tang D Y, Mi Z Y, et al. *Introduction to Optoelectronic Devices*, Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Literature Publishing House (汤定元, 糜正瑜, 等. 光电器件概论, 上海: 上海科技文献出版社), 1989, 320
- 3 Willardson R. K., Beer A. C.. *Semiconductor and Semimetals*, Academic Press, 1981, **18**: 229
- 4 Dogalski A. *Infrared Phys.*, 1988, **28**: 139
- 5 Yuan H X. *Dark Current Mechanism and Surface Passivation in HgCdTe Infrared Photovoltaic Detectors*. Doctoral Dissertation. Shanghai Inst. of Tech. Phys., Chinese Academy of Sciences, (袁皓心. 红外光伏探测器的暗电流机构和表面钝化, 中科院上海技术物理研究所博士学位论文)1993
- 6 Hansen G. L., Schmit J. L., *J. Appl. Phys.*, 1983, **54**: 1640

SPACE-BORNE 1.6 μm Hg_{1-x}Cd_xTe PHOTOVOLTAIC DETECTOR OPERATING AT AMBIENT TEMPERATURE

WANG Qin LIU Ji-Ming FANG Jia-Xiong

(National Laboratory for Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical
Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract Some n⁻-on-p photovoltaic detectors of Hg_{1-x}Cd_xTe semiconductor material were fabricated with B⁺ implantation to create n⁺-type region. The implanted diodes with an area of 400 μm × 400 μm and a cutoff wavelength of around 1.7 μm operated at ambient temperature (300k). The specific detectivities of these detectors are above 3.0 × 10¹¹ cmHz^{1/2}W⁻¹ in the range 1.58~1.64 μm with a quantum efficiency as high as 70%. The dark current of the photodiodes is mainly limited by diffusion mechanism outside the depletion region and generation-recombination within it. Furthermore, after a series of experiments, the detectors were proved to get along well with the space-borne application.

Key words HgCdTe, photovoltaic detector.