

# 短波碲镉汞光伏器件的低频噪声研究

黄杨程<sup>1,2)</sup> 刘大福<sup>1,2)</sup> 梁晋穗<sup>1,2)</sup> 龚海梅<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>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)

<sup>2)</sup>中国科学院研究生院,北京 100039)

(2004 年 6 月 8 日收到,2004 年 8 月 30 日收到修改稿)

对所研制的短波光伏碲镉汞器件进行了变温电流-电压特性和低频噪声研究,测试温度范围 255—293K. 实验结果表明随着温度的下降,器件的优值因子  $R_0A$  从  $4.5 \times 10^3 \Omega \text{cm}^2$  增加到  $7 \times 10^4 \Omega \text{cm}^2$ . 器件在低频区的主要噪声成分是  $1/f$  噪声和产生-复合噪声,在高频区主要是散粒噪声. 在测试的偏压内,器件的  $1/f$  噪声功率谱密度与流过器件的电流的平方成正比,器件的 Hooge 系数为  $3 \times 10^{-4} \sim 7 \times 10^{-4}$ . 从噪声功率谱密度曲线分析中得到产生-复合噪声的特征时间常数  $\tau$ , 通过  $\tau$  的温度特性得到了器件的深能级.

关键词:碲镉汞,优值因子,低频噪声,深能级

PACC: 7280E, 7270, 7155

## 1. 引言

碲镉汞三元系化合物半导体是一种优良的红外探测器材料,具有介电常数小、光学吸收系数大、载流子迁移率高等特点,特别是由于其禁带宽度随组分的变化连续可调,因此可用来制备各种响应波段的红外探测器<sup>[1]</sup>. 目前在卫星、遥感、夜视及红外制导等领域,由碲镉汞制备的红外探测器有着广泛的应用.

由于红外探测器的工作频率较低,因此器件的低频噪声是限制器件探测水平的关键因素之一,而且低频噪声能敏感地反映器件的许多潜在缺陷,其测量和分析已成为半导体器件质量表征和可靠性评估的一种新手段<sup>[2]</sup>,因此研究红外探测器的低频噪声具有重要的意义.

当前碲镉汞器件的研制一方面沿长线条、焦平面等大规模方向发展,另一方面器件的响应波长也沿着甚短波和甚长波的方向发展. 特别是在  $1\text{--}2\mu\text{m}$  的波长范围,由于很多物质在该波段具有独特的光谱特性,因此在空间对地探测,如了解资源分布、土壤水分监测、大气成分分析、农作物估产等方面,短波红外探测器有着广泛的需求. 本文研究了我所研制的短波碲镉汞光伏探测器的变温电流-电压特性和低频噪声特性,估算了温度对器件探测率的影响,并根据器件的低频噪声观察到器件中的一个深能级

缺陷.

## 2. 理论模型

### 2.1. 优值因子 $R_0A$

一般受热噪声限制的光伏型红外探测器的电流-电压特性可以近似地写为<sup>[3]</sup>

$$I = I_0 \left( \exp\left(\frac{qV}{nk_B T}\right) - 1 \right), \quad (1)$$

其中  $V$  为外加电压,  $q$  代表电子电荷,  $k_B$  为 Boltzmann 常数,  $T$  是器件温度,  $I_0$  是反向饱和电流,  $n$  称为理想因子,当器件由扩散电流限制时  $n = 1$ , 由产生-复合电流限制时  $n = 2$ , 当器件由两种电流机理共同影响时,  $n = 1\text{--}2$ . 器件的零偏电阻为

$$R_0 = \left( \frac{dI}{dV} \right)^{-1} \Big|_{V=0}, \quad (2)$$

可通过对电流-电压曲线进行微分求得.

光伏型红外探测器的探测率为<sup>[3]</sup>

$$D_\lambda^* = \frac{q\eta\lambda}{hc} \sqrt{\frac{R_0A}{4kT}}, \quad (3)$$

其中  $\eta$  为量子效率,  $A$  为光敏元面积,其他符号具有常用的含义,  $R_0A$  通常称为光伏型探测器的优值因子,是表征光伏型探测器性能的一个重要指标,由器件的零偏电阻乘以光敏元面积得到.

对于室温附近工作的  $n^+$ -on-p 碲镉汞光伏器

件,主要考虑基区的扩散电流和空间电荷区的产生-复合电流作用,其优值因子与温度的关系可表示为<sup>[3]</sup>

$$R_0 A \propto \exp(E_g/nkT). \quad (4)$$

因此通过对器件进行变温电流-电压特性测试,由电流-电压特性得到器件的优值因子  $R_0 A$ . 根据(3)式,可以估算温度对器件探测性能的影响,由(4)式得到理想因子  $n$ ,可以分析限制器件性能的电流机理.

## 2.2. 低频噪声

光伏探测器的噪声主要包括  $1/f$  噪声、产生-复合噪声和散粒噪声<sup>[2]</sup>.

$1/f$  噪声的基本特征是其功率谱密度与频率成反比,其基本表达式为

$$S_I(f) = AI^2/f^\gamma, \quad (5)$$

其中  $I$  为通过器件的电流; $f$  为频率,常数  $\gamma = 0.8-1.2$ ,典型值为 1.0;对于均匀材料  $\beta = 2.0$ ,对于结构较复杂的器件  $\beta = 1.0-2.0$ . 在低频区, $1/f$  噪声是光电探测器的主要噪声表现形式. Hooge<sup>[4]</sup>根据迁移率涨落模型给出了一个经验公式,即

$$S_I(f) = \alpha_H I^2/fN, \quad (6)$$

其中  $N$  为载流子数, $\alpha_H$  是 Hooge 系数. 载流子数由 Van Der Ziel<sup>[5]</sup>提出的方法

$$N = It/q \quad (7)$$

来确定,其中  $t$  为载流子的渡越时间. Hooge 系数  $\alpha_H$  可作为衡量器件  $1/f$  噪声水平的一个参数.

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,其表达式为

$$S_I(f) = \sum_{i=1}^m \frac{C_i \tau_i}{1 + (2\pi f \tau_i)^2}, \quad (8)$$

其中  $m$  代表深能级的个数,这里  $\tau$  为产生-复合噪声的特征时间常数,对于 p 型材料

$$\frac{1}{\tau} = \sigma_p v_{th} n \{1 + B \exp[(E_F - E_i)/kT]\}, \quad (9)$$

$$n = N_v \exp[-(E_F - E_v)/kT], \quad (10)$$

其中  $\sigma_p$  是空穴俘获截面, $v_{th}$  是空穴的平均热速度, $N_v$  是价带有效态密度, $E_v$  是价带顶能量, $E_i$  是陷阱能量. 由于  $v_{th}$  随  $T^{1/2}$  变化, $N_v$  有  $T^{3/2}$  关系,所以  $\tau$  的温度特性可以表示为

$$\frac{1}{\tau} = DT^2 \exp[-(E_i - E_v)/kT], \quad (11)$$

式中  $D$  是一个与温度无关的系数. 这样,由  $\ln(\tau T^2) - 1/T$  曲线的斜率即可得到激活能  $\Delta E = E_i -$

$E_v$ .

散粒噪声是白噪声,与频率无关,其直接起源于电子的粒子性,表达式为

$$S_I(f) = 2qI. \quad (12)$$

由实验测得的噪声谱是多种噪声的叠加,总的功率谱密度可表示为

$$S_I(f) = A + \frac{B}{f} + \sum_{i=1}^m \frac{C_i \tau_i}{1 + (2\pi f \tau_i)^2}, \quad (13)$$

式中  $A, B, C_i$  分别为散粒噪声分量、 $1/f$  噪声分量、时间常数为  $\tau_i$  的产生-复合噪声分量的幅度. 在许多情况下,尤其是频率较低时,产生-复合噪声与  $1/f$  噪声叠加在一起,表现为  $1/f$  曲线上的凸起或驼峰,为了精确测定产生-复合噪声的转折频率,通常将常规噪声功率谱  $S(f)$  转换为  $fS(f)$  谱来处理,即

$$fS(f) = Af + B + \sum_{i=1}^m \frac{C_i f \tau_i}{1 + (2\pi f \tau_i)^2}. \quad (14)$$

由  $fS(f)$  谱的峰值位置可较精确地确定产生-复合噪声的特征时间常数.

## 3. 实 验

实验采用的  $n^+ - on - p$  碲镉汞光伏器件是以改进的固体区溶法生长的组分  $x = 0.6$  的  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  晶体作为 p 型衬底材料,经过抛光、腐蚀、钝化等一系列表面处理工艺后,采用 B 离子注入形成 n 型区,再经过电极制备及划片封装等工艺制成.

对制作好的器件进行变温电流-电压测试,温度范围 255—293K,测试采用微机控制下的 Keithley236 型可编程电流-电压测试仪完成. 在器件的基座上贴有铂电阻,用来监测器件的实际温度. 器件的低频噪声测试是在安捷伦公司的动态信号分析仪 HP35670A 上进行的,该仪器可以直接进行 FFT 分析. 测试时先对器件进行有效的屏蔽,尽量减少外界因素的干扰. 然后给器件加上一定的偏压,噪声信号通过低噪声电流前置放大器送到信号分析仪上进行处理. 低噪声电流前置放大器采用的是美国 DL Instruments 公司的高速低噪声互阻抗前置电流放大器 DL1211,可以给输入端提供  $\pm 15V$  的偏压. 首先在室温下测试了不同偏压下器件的低频噪声;然后在  $-100mV$  固定偏压下,测试了不同温度下器件的低频噪声. 所有测量均在避光和电屏蔽的条件下进行的. 具体的测试装置如图 2 所示.

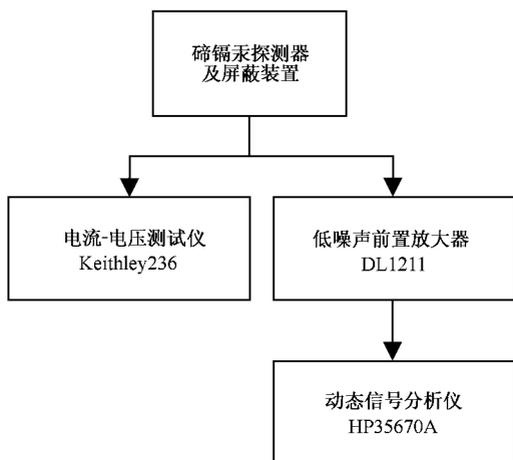
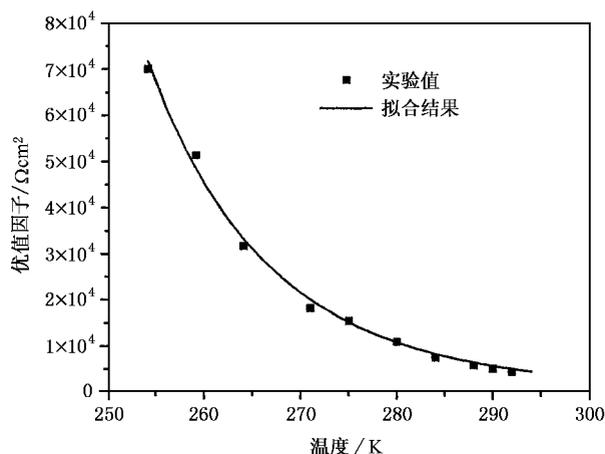


图1 电流-电压特性及低频噪声测试系统

图2 优值因子  $R_0A$  与温度的关系

## 4. 实验结果与讨论

### 4.1. 优值因子 $R_0A$

一般的短波光伏器件工作于室温,无需制冷,但随着对探测器性能要求的不断提高,室温工作的器件的性能逐渐难以满足要求,适当的低温能减小器件的暗电流,提高器件的性能。半导体致冷器具有体积小,功耗低,使用方便的优点,因此在半导体致冷温度范围内研究短波光伏器件性能与温度的关系具有重要意义。

图2是器件的优值因子  $R_0A$  与温度的关系。图中点是实验所得数据,测试温度范围 255—293K,实线是拟合得到的结果  $R_0A = 1120 \exp(5150/T)$ 。根据(4)式可知器件在这温度范围内的理想因子  $n$  约为 1.6,因此在这一温度范围内器件是由扩散电流和产生-复合电流机理共同限制的,而且产生-复合电流机理所起的作用更大。随着温度的下降,器件的优值因子由  $4.5 \times 10^3 \Omega \text{cm}^2$  增加到  $7 \times 10^4 \Omega \text{cm}^2$ ,由(3)式可知器件的探测率提高了 4 倍。

### 4.2. 低频噪声

图3是在室温下测试的不同偏压下器件的低频噪声功率谱。在较低偏压下,器件的噪声成分主要是  $1/f$  噪声和散粒噪声,随着偏压的增大,器件的噪声随之增大,而且产生-复合噪声成分也逐渐增大,在噪声功率谱上表现为曲线出现突起或驼峰,在低频区,噪声成分主要是  $1/f$  噪声和产生-复合噪声。图4

是室温时器件反向偏压下的电流-电压特性。室温时器件的暗电流成分主要是扩散电流和产生-复合电流,在小偏压下,产生-复合电流较小,随着偏压的增大,耗尽区的宽度随电压的平方根成比例的增大,产生-复合电流也随之增大。图4给出的两种电流成分随偏压变化的拟合结果表明,产生-复合电流逐渐占据主导地位,在噪声功率谱上表现为曲线出现突起,且成分逐渐增大。

图5是频率为 16Hz 时,器件的暗电流与噪声功率的关系。根据 Hooge 的经验公式,器件的  $1/f$  噪声功率与流过器件的电流的平方成正比,图5表明我们所研制的器件的噪声特性符合 Hooge 经验关系,由(6)和(7)式,取  $t = 10^{-7} \text{s}$ ,得到器件的 Hooge 系数为  $(3-7) \times 10^{-4}$ ,与国外同行给出的结果在同一数量级,说明目前研制的器件具有较好的低频噪声特性。对于  $1/f$  噪声来源的研究,主要有迁移率涨落模型和表面载流子数涨落模型,前者主要是体效应,后者主要是表面效应。不同的研究者在对碲镉汞光伏器件的研究过程中给出不同的结论。Tobin<sup>[6]</sup>在研究碲镉汞光伏器件的噪声时发现  $1/f$  噪声与光电流及扩散电流无关,但与表面复合电流成比例。Bajaj<sup>[7]</sup>在研究液相外延制备的碲镉汞光伏器件时认为  $1/f$  噪声起源于体内的耗尽区,与器件的表面状况关系不大。Beck<sup>[8]</sup>在研究金属与碲镉汞的欧姆接触时也观察到  $1/f$  噪声。van der Ziel<sup>[5]</sup>根据已经得到的理论和实验结果,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,其中位于空间电荷区、表面氧化层等处的陷阱中心对载流子的随机俘获与发射,引起载流子数涨落而产生的  $1/f$  噪声从本质上可以完全

消除 称为非基本  $1/f$  噪声. 而各种散射过程的随机性引起的迁移率涨落而产生的  $1/f$  噪声从本质上看是不能消除的, 故称为基本  $1/f$  噪声. 实验观测到的是两种噪声机理的共同结果. 本文测试结果表明我们研制的器件的  $1/f$  噪声与扩散电流及产生-复合电流都有关系, 与 Wu<sup>[9]</sup>和 van der Ziel 给出的结论一致, 说明目前的器件工艺还不能将非基本  $1/f$  噪声降低到可以忽略的程度. 这可能是由于离子注入成结中注入离子与碲镉汞相互作用引入的晶格缺陷和器件表面的缺陷引起载流子的涨落.

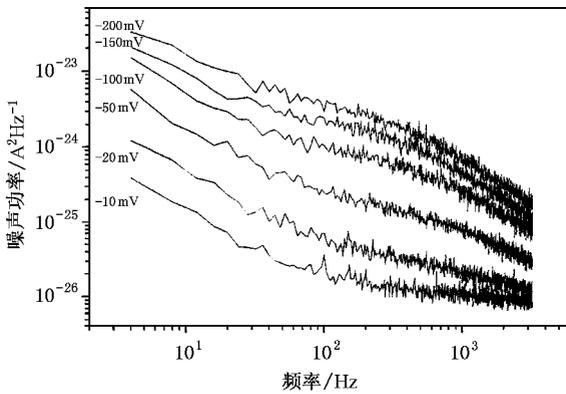


图 3 室温时不同偏压下器件的低频噪声功率谱

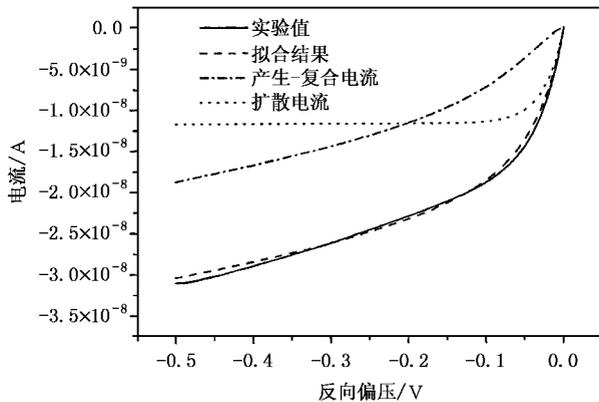


图 4 室温时器件的反偏暗电流

碲镉汞中深能级缺陷<sup>[10]</sup>一直都受到人们的广泛关注, 它是影响器件性能的一个主要的限制因素. 由于深能级关系到短程势而不能有效质量理论来描述, 其缺陷密度也较低, 从而使其检测非常困难<sup>[11-13]</sup> 特别是在窄禁带半导体碲镉汞材料中. 研究深能级缺陷的方法主要有深能级瞬态谱(DLTS)、导纳谱(AS)和热激电流(TSC)等方法, 但这些方法都需要比较复杂的理论和昂贵的仪器. 由于产生-复

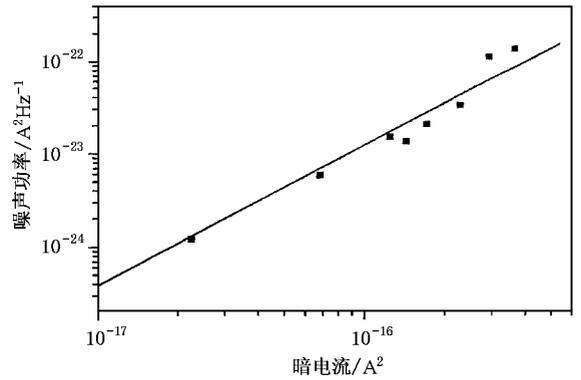


图 5 器件噪声功率与暗电流的关系

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, 因此通过研究器件的噪声特性也能得到器件的深能级. 而且与其他方法相比, 噪声测试更为容易, 所需实验设备也简单. 对于只需知道深能级杂质的能级或激活能的时候, 采用这种方法最为有效.

图 6 是器件的典型  $fS(f)$  谱, 由谱的峰值位置可以较为精确的确定产生-复合噪声的特征时间常数  $\tau = 1/2\pi f$ . 表 1 是根据不同温度的低频噪声谱得到的温度与特征频率的关系. 根据表 1 的数据对  $\ln(\tau T^2) - 1/T$  作图, 见图 7, 得到缺陷激活能  $\Delta E = 0.475\text{eV}$ . 一般认为碲镉汞中的深能级中心按激活能可分为三类, 一种是钉扎在禁带中央附近  $1/2E_g$  处, 另外两种就是在  $1/4E_g$  和  $3/4E_g$  处, 它们的起源还不是很清楚. 对于实验所用的器件, 其截止波长在  $1.7\mu\text{m}$  对应的禁带宽度约为  $0.7\text{eV}$ , 由噪声实验得到的深能级可认为是属于  $3/4E_g$ . 胡新文<sup>[14]</sup>在利用导纳谱研究短波碲镉汞光伏器件深能级时测得缺陷激活能为  $0.15\text{eV}$ , 认为该深能级属于  $1/4E_g$ , 在某些

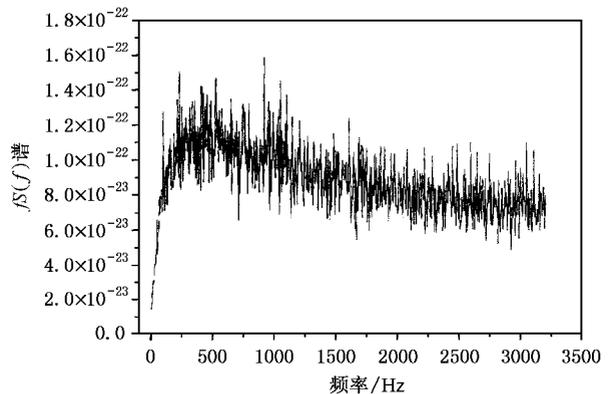


图 6 器件的典型  $fS(f)$  谱

器件中也观察到  $3/4E_g$  缺陷. 与胡新文给出的结果相比, 本文结果只给出一个缺陷能级, 可能与实验温度不够低或所采用的器件质量有关.

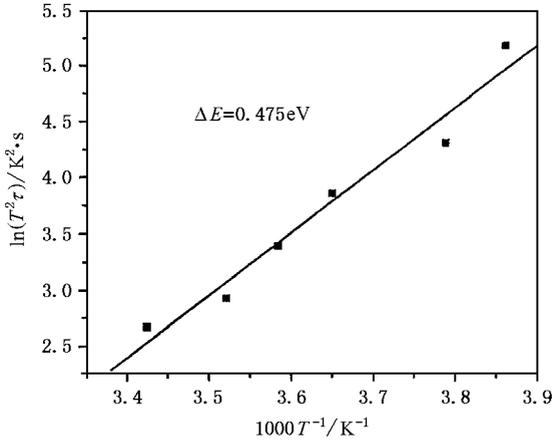


图7 由产生-复合噪声特征时间常数与温度关系得到的缺陷激活能

表1 温度与产生-复合噪声特征频率的关系

温度/K	259	264	274	279	284	292
频率/Hz	60	149	252	416	688	940

## 5. 结 论

对短波碲镉汞光伏器件进行了变温电流-电压特性和低频噪声研究, 得到以下结论.

1. 随着温度从 293K 降到 255K, 器件的优值因子  $R_0A$  值从  $4.5 \times 10^3 \Omega \text{cm}^2$  增加到  $7 \times 10^4 \Omega \text{cm}^2$ .
2. 器件在低频区的主要噪声成分是  $1/f$  噪声和产生-复合噪声, 在高频区主要是散粒噪声, 器件的 Hooge 系数为  $(3-7) \times 10^{-4}$ .
3. 由器件的噪声功率谱密度曲线分析中得到器件的一个深能级, 其激活能为 0.475eV, 认为该深能级属于  $3/4E_g$ .

[1] Willardson R K et al 1981 *Semiconductors and Semimetals* **18** (New York: Academic) p1

[2] Scholz F et al 1988 *Solid-State Electronics* **31** 205

[3] Tang D Y et al 1989 *Introduction of Photoelectric Device* (Shanghai: Shanghai Science and Technology Literature Publish Company) p320 (in Chinese) [汤定元等 1989 光电器件概论(上海:上海科技文献出版社)第320页]

[4] Hooge F N 1969 *Phys. Lett. A* **29** 139

[5] Van der Ziel 1988 *Proc. IEEE*. **16** 233

[6] Tobin S P et al 1980 *IEEE Transactions on Electron Devices* **ED-27** 43

[7] Bajaj J et al 1985 *J. Vac. Sci. Technol. A* **3** 192

[8] Beck W A et al 1990 *J. Appl. Phys.* **67** 6340

[9] Wu X L et al 1987 *IEEE Transactions on Electron Devices*, **ED-34** 1971

[10] Li Y et al 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 132 (in Chinese) [李毅等 2000 物理学报 **49** 132]

[11] Xiao X F et al 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 138 (in Chinese) [肖细凤等 2002 物理学报 **51** 138]

[12] Lu L W et al 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 372 (in Chinese) [卢励吾等 2002 物理学报 **51** 372]

[13] Xu L et al 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 877 (in Chinese) [徐岭等 2002 物理学报 **51** 877]

[14] Hu X W et al 1999 *Acta Phys. Sin.* **48** 1107 (in Chinese) [胡新文等 1999 物理学报 **48** 1107]

# Low frequency noise study on short wavelength HgCdTe photodiodes

Huang Yang-Cheng<sup>1 2)</sup> Liu Da-Fu<sup>1 2)</sup> Liang Jin-Sui<sup>1 2)</sup> Gong Hai-Mei<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>*State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China*

<sup>2)</sup>*Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*

(Received 8 June 2004; revised manuscript received 30 August 2004)

## Abstract

The current-voltage characteristics and the low frequency noise measured at 255—293K are reported. The figures of merit increase from  $4.5 \times 10^3$  to  $7 \times 10^4 \Omega \text{cm}^2$  as the temperatures decreases. At low frequencies the noise mainly consists of flicker noise and generation recombination (g-r) noise, while at high frequencies thermal noise is the dominant component. The flicker noise current is proportional to the detector current at reverse bias, and the Hooge parameter  $\alpha_H$  of the device is  $(3-7) \times 10^{-4}$ . In addition, the fluctuation time constant  $\tau$  of the g-r noise is extracted by fitting the curve of the low-frequency noise. Therefore, the trap thermal activation energy of the deep level is obtained from the relation between  $\tau$  and temperature.

**Keywords:** HgCdTe, figure of merit, low frequency noise, deep level

**PACC:** 7280E, 7270, 7155