

碲镉汞光导器件振动噪声

刘飞^{1,2}, 袁永刚³, 罗毅¹, 王继强¹, 李向阳¹

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 红外器件室, 上海 200083;

2. 中国科学院大学, 北京 100039;

3. 常州光电技术研究所, 江苏 常州 213164)

摘要:利用振动台和频谱分析仪对碲镉汞中波光导器件的噪声进行了研究. 随机振动的实验结果表明, 振动环境中测量到的噪声随着随机振动功率谱密度的增大而线性增加, 其比例系数是分段的, 当振动功率谱密度小于 $0.01 \text{ g}^2/\text{Hz}$, 为 $32 \mu\text{VHz}^{0.5}/\text{g}^2$, 大于 $0.01 \text{ g}^2/\text{Hz}$, 为 $80 \mu\text{VHz}^{0.5}/\text{g}^2$. 对实验结果进行了初步分析, 认为振动能量以一定的内耗系数转化为热能, 以声子的形式在碲镉汞材料内传递, 改变了晶格振动的能级, 影响了材料的散射特性, 从而影响器件的输运特性、电阻率等电学特性, 产生了附加的振动噪声.

关键词:碲镉汞; 随机振动; 振动噪声; 声子

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A

Vibration noise in HgCdTe photoconductive devices

LIU Fei^{1,2}, YUAN Yong-Gang³, LUO Yi¹, WANG Ji-Qiang¹, LI Xiang-Yang¹

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

3. Changzhou Institute of Optoelectronic Technology, Changzhou 213164, China)

Abstract: The noise of HgCdTe medium-wave photoconductive devices was studied by vibration test table and spectrum analyzer. The random vibration experimental results showed that the noise measured in vibration environment increased linearly with the increase of vibration power spectrum density (PSD). The linear dependence can be divided into two parts. The coefficient is $32 \mu\text{VHz}^{1/2}/\text{g}^2$ or $80 \mu\text{VHz}^{1/2}/\text{g}^2$ with the vibration PSD of $0.01 \text{ g}^2/\text{Hz}$ as the kink point. In order to explain the experimental results, we suggested that the vibration energy is absorbed with a certain coefficient by HgCdTe material and transformed into thermal energy. This gives rise to an increased scattering of charge carriers by the phonons in the material, eventually produces an extra vibration noise in the device.

Key words: HgCdTe, random vibration, vibration noise, phonon

PACS: 78.30.Fs, 78.20.Bh, 78.66.Hf

引言

碲镉汞(MCT)是一种禁带宽度连续可调的三元窄禁带半导体化合物,可以用来制造各种响应频段的红外探测器^[1]. 其中的中波光导探测器可以在近室温下工作,减少了对使用环境和体积的严苛要求,得到了广泛的应用. 但是在某些使用环境中,红外探测器不可避免的受到外界冲击和振动的影响,

造成前置放大器输出的噪声急剧增加,可达静态噪声的几倍到几十倍^[2].

振动噪声的来源包括:(a)触点噪声:机械振动改变了器件电阻以及电极、焊点的接触电阻,当恒定的工作偏流经过这些变化电阻时,产生了噪声电压;(b)颤噪效应:机械振动改变电容电极间的距离与相对位置,产生了附加的噪声电压;(c)磁场干扰:如果有磁场泄露进探测器组件,当光导器件和引线

收稿日期:2013-01-14,修回日期:2013-09-13

Received date: 2013-01-14, revised date: 2013-09-13

基金项目:常州市高技术研究重点实验室(CM20103004);中国科学院院地合作项目(BE2010056);常州市科技支撑计划(CE20110025);江苏省产学研联合创新资金-前瞻性联合研究项目(SBY201120177)

Foundation items: Supported by Changzhou HigTech Research Laboratory (CM20103004); Cooperation Projects of Chinese Academy of Science (BE2010056) Changzhou Science and Technology Support Program (CE20110056) Jiangsu Province joint innovation and research funding - prospective joint research projects (SBY201120177)

作者简介(Biography):刘飞(1984-),男,河南商丘人,博士,主要从事化合物光电探测器研究. E-mail:phy@mail.ustc.edu.cn

在磁场中振动,就会产生一定的噪声电压;(d)压电效应:碲镉汞是一种非极性材料,当振动引起材料的形变时,附着在其上的电极产生噪声电压^[3].其中,后三种效应分别依赖于电容电极的相对方向、磁场方向和材料的晶向,产生的噪声电压与振动的方向有很大关系.

本文利用振动台对碲镉汞中波器件施加了不同条件下的随机振动,研究其在不同的振动条件下的噪声特性,分析振动噪声的来源,采取针对性措施抑制振动噪声,对于提高探测器的可靠性,有着重要的意义.

1 实验

1.1 探测器结构

噪声测量所用的红外探测器是上海技术物理研究所生产的碲镉汞光导器件,Hg 组分为 0.27 左右.响应波段在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$,中心波长为 $4.6 \mu\text{m}$,面积为 $0.8 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$,探测率 $5 \times 10^8 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ (1 kHz),工作温度为 -20°C .如图 1 所示,探测器组件由红外探测器、半导体致冷器与热敏电阻构成,探测器透光窗口为蓝宝石片,管脚使用玻璃珠烧结,封装管帽和底座用压焊机粘结,组件内冲入高纯氮气,电极、热敏电阻和制冷器通过金丝和引脚连接^[4].

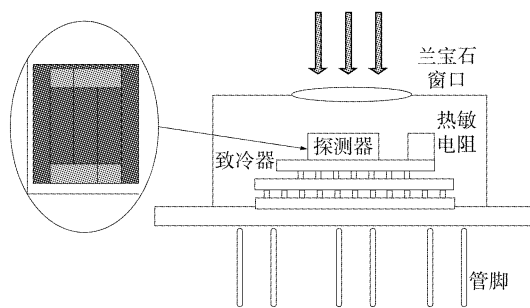


图 1 碲镉汞中波光导组件结构

Fig. 1 The structure of HgCdTe medium wave photoconductive module

1.2 测试系统

主要的测试系统如图 2 所示,其中探测器的振动环境采用上海技术物理研究所环境模拟组的 SA30/S452T 型电磁振动台来模拟^[4].噪声电压经过前置放大器被送入频谱分析仪转换为频域信息.为了防止电磁振动台内部的交变电磁场对待测器件产生影响,采用了 Fe-Cu 双层屏蔽的办法来抑制干扰,将有良好电磁屏蔽功能的同轴信号线直接焊接在碲镉汞中波光导器件组件的信号输出管脚,并用夹板

将信号线固定,排除了前置放大器等仪器受振动的影 响.前置放大器采用了专门的设计,并使用蓄电池供电,进一步降低了系统噪声.设计了 Labview 程序对频谱分析仪进行控制,并将数据采集到计算机上,以进行进一步的分析.

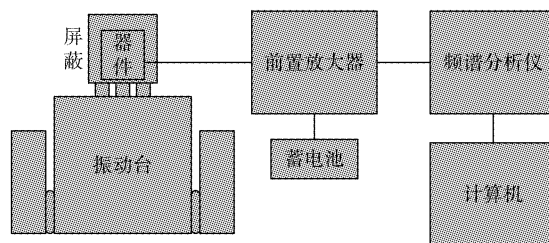


图 2 振动噪声测试系统

Fig. 2 The measurement system of vibration noise

2 结果与分析

器件做随机振动时,在时域上的振动加速度是不可预测的,但振动能量在频域上的分布是不随时间变化的,即振动的功率谱密度(PSD)是平稳的.考虑到器件的实际应用环境,利用振动台对器件施加如表 1 所示的随机振动,在 $80 \sim 350 \text{ Hz}$ 功率谱密度是平坦的,物理意义是单位频率单位时间内的振动能量,单位是 g^2/Hz .

表 1 随机噪声的功率谱密度分布

Table 1 PSD of random vibration

20 ~ 80 Hz	80 ~ 350 Hz	350 ~ 2 000 Hz
3 dB	$0.005 \sim 0.12 \text{ g}^2/\text{Hz}$	-3 dB

2.1 实验结果

碲镉汞中波光导器件的噪声经前置放大器放大之后,被频谱分析仪采集并转换为噪声电压的频谱 $V_n(f)$.为保证频谱分析仪有足够精细的频域分辨率,测量时选取了 $20 \sim 200 \text{ Hz}$ 频段进行分析.如图 3 所示,实线所示是无振动时的噪声频谱,虚线所示是振动功率谱密度为 $0.01 \text{ g}^2/\text{Hz}$ 时的噪声频谱($20 \sim 80 \text{ Hz}$ 频段的信号已按比例进行修正).从图中可以看出:器件受到随机振动时,噪声电压比无振动时的噪声电压大 1 ~ 2 个数量级;噪声频谱没有出现除工频干扰之外的尖峰,说明在此频段内,没有共振现象的发生.在 $80 \sim 140 \text{ Hz}$ 频域内,噪声电压基本上是平坦的,这与随机振动强度在频域内的分布一致;在小于 80 Hz 的低频段,器件噪声随着频率的降低而增大.

对探测器分别施加 X、Y、Z 三个方向的随机振

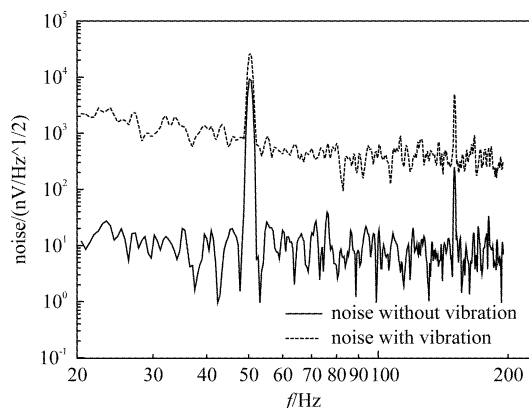


图3 碲镉汞中波光导器件噪声功率谱密度
Fig. 3 Noise PSD of HgCdTe medium wave photoconductive device

动,实验结果如图4所示,在同样的振动强度下,不同方向的振动噪声相差很小,说明了碲镉汞光导器件的振动噪声只与振动的强度有关,不明显依赖于振动的方向。因此,在各种影响振动噪声的机制中,不依赖振动方向的触点噪声是振动噪声的主要成分。

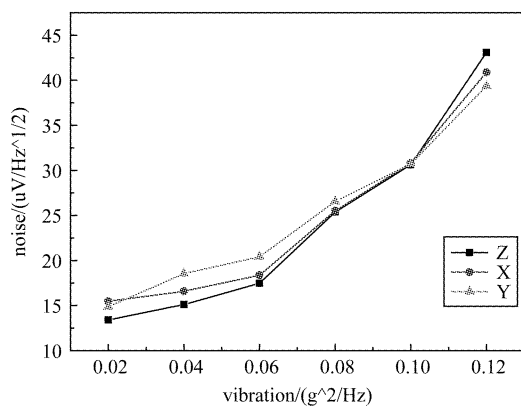


图4 器件振动噪声与振动方向的关系
Fig. 4 Vibration noise vs vibration direction

图5所示的是同一个器件在两次实验中的实验结果,为了便于比较和减小误差,用80~140 Hz这一频段噪声电压的平均值 V_n 来表征振动噪声的大小。从图中可以看出,除个别点外,两次实验采集到的数据基本一致。在图5中对第二次实验的数据进行了拟合,可以看出,振动噪声随着随机振动强度的增大而线性增加,即 $V_n \propto k_{v1} I_v$, 其中 I_v 为在相应频率振动 PSD, k_{v1} 为比例系数,当 I_v 小于 $0.01 \text{ g}^2/\text{Hz}$ 时, $k_{v1} = 32 \text{ } \mu\text{VHz}^{1/2}/\text{g}^2$, 当 I_v 大于 $0.01 \text{ g}^2/\text{Hz}$ 时, $k_{v1} = 73.5 \text{ } \mu\text{VHz}^{1/2}/\text{g}^2$ 。振动噪声与振动强度呈分段线性的关系,实验中其它的几个器件,也得出同样的规律。

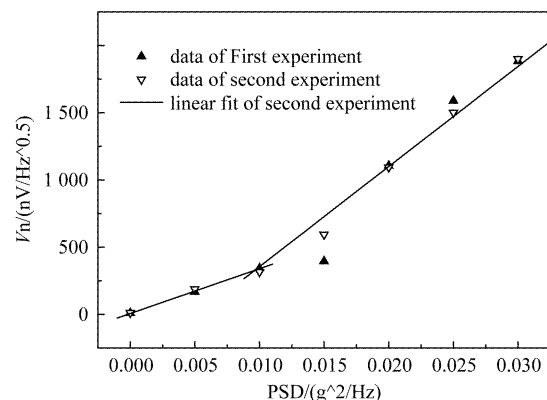


图5 同一器件在两次振动实验中,振动噪声与振动强度的关系
Fig. 5 Vibration noise vs vibration intensity in twice vibration experiment of same device

2.2 分析与讨论

当碲镉汞中波光导器件处于随机振动状态时,一部分机械能会转换成热能。这部分能量以声子的形式被晶格所吸收,加剧了晶格振动。在小电场驱动下做漂移运动的载流子,主要受声学声子散射,散射机率正比于晶格振动的能量。散射机率的变化,影响了载流子的动量弛豫时间,进而影响器件的迁移率及电导率,最终在器件的两电极间形成了和振动相关的随机电压,即振动噪声。

当碲镉汞器件受到外力作用时,会引起弹性变形,改变了晶格中的原子间距,相邻原子在新的位置上达到平衡时,由于原子间距的改变而变化的原子间作用力将抵消施加的外力。从施加外力到平衡状态需要一定的时间,所以应变落后于应力,具有相位差 φ 。相位差越大,内耗越大^[5-6]。

内耗的量度,一般用 Q^{-1} 表示

$$Q^{-1} = \frac{1}{2\pi} \frac{W_a}{W_t} = \sin\varphi \approx \varphi \quad (1)$$

其中, W_t 为碲镉汞器件总的振动能量, W_a 为由于内耗而被器件吸收的热能。

内耗的研究起始时偏重于金属和合金,近年来,研究的对象扩展到一些常见的半导体,比如 Si、MCT 材料的内耗研究没有在公开发表的文献中查到,只能根据一些合金以及半导体材料的内耗来大致估计。葛庭燧先生对 Al 材料的内耗进行了大量的研究,结论是对于低频(1 Hz 左右),内耗从室温到 $150 \text{ } ^\circ\text{C}$ 基本无变化^[6], Q^{-1} 一般是振动幅值、频率、和材料温度的函数,为 10^{-3} 到 10^{-2} 量级。

振动能量通过内耗转化为热能,在晶体中,热能

的传递和扩散以声子的形式进行. 假设晶格中的原子在随机振动过程中吸收了一个声子的能量达到高能级, 经过与其他原子的相互作用而回到平衡, 声子在晶格间传播, 并在表面和界面以热传递或热辐射的方式放出. 当吸收声子和放出声子的过程达到平衡时, 处在高能级的原子数目

$$N_V = W_a / \hbar\omega_0, \quad (2)$$

其中, $\hbar\omega_0$ 为一个声子的能量, W_a 为器件做随机振动时由于内耗而转化的热能, 与振动总能量 W_i 的关系如式(1)所示, 为 $2\pi Q^{-1} W_i$. 在内耗一定的情况下, 振动越剧烈, 振动能量越大, 转换成的热能也就越大, 即晶格中处在高能级的原子数目越多.

考虑一个理想完整晶格, 载流子在小电场的驱动下运动, 受到晶格振动的散射, 散射几率正比于晶格的振动能量:

$$1/\tau = \frac{\sqrt{2}\epsilon_d^2 m^{3/2} E^{1/2}}{\pi\hbar^4 c_1} n_q \hbar\omega_0 \propto n_q \hbar\omega_0, \quad (3)$$

其中, τ 为两次散射之间的平均自由时间, 是散射几率的倒数, ϵ_d 为形变势常量, m 为载流子有效质量, E 为载流子能量, c_1 为纵向弹性系数平均值, n_q 为晶格振动的声子数, $n_q \hbar\omega_0$ 即为晶格的振动能量.

根据式(2), 当晶格吸收了振动能量, 产生了 N_V 个高能级原子, 假设高能级原子与低能级原子对载流子的散射几率是独立的, 总体的散射几率应为两种散射几率之和^[5]:

$$1/\tau_{\text{total}} \propto \left(\frac{n_a - N_V}{n_a}\right) n_q \hbar\omega_0 + \frac{N_V}{n_a} (n_q + 1) \hbar\omega_0, \quad (4)$$

其中, n_a 为晶格中的总原子数. 式(4)可改写为:

$$1/\tau_{\text{total}} \propto n_q \hbar\omega_0 + \frac{N_V}{n_a} \hbar\omega_0 = 1/\tau + 1/\tau_{N_V}. \quad (5)$$

上式可解释为, 总体的散射几率为理想完整晶格的碰撞几率加上 N_V 个声子贡献的碰撞几率 τ_{N_V} . 由式(1)和式(5)可得

$$1/\tau_{N_V} \propto (N_V/n_a) \hbar\omega_0. \quad (6)$$

由式(6)可以看出, 当碲镉汞材料振动时, 载流子的碰撞几率和静止时相比有所增加, 增加量和振动能量正相关. 而在半导体中, 碰撞导致了载流子在电场中漂移速度降低, 迁移率产生相应改变^[6].

$$1/\mu = \frac{\sqrt{2}\epsilon_d^2 em^{5/2} E^{1/2}}{\pi\hbar^4 c_1} \left(k_B T + \frac{W_a}{n_a}\right). \quad (7)$$

晶格振动的强烈程度可用温度表征, 即

$$k_B T = n_q \hbar\omega_0. \quad (8)$$

由式(2)、式(7)、式(8)得:

$$1/\mu = \frac{\sqrt{2}\epsilon_d^2 em^{5/2} E^{1/2}}{\pi\hbar^4 c_1} \left(k_B T + \frac{W_a}{n_a}\right). \quad (9)$$

假设器件中碲镉汞材料的质量为 m_d , 则式(9)可改写为

$$1/\mu = \frac{\sqrt{2}\epsilon_d^2 em^{5/2} E^{1/2}}{\pi\hbar^4 c_1} k_B \left(T + \frac{W_a/m_d}{k_B/m_a}\right), \quad (10)$$

其中, $m_a = m_d/n_a$, 近似表示晶格中原子的平均质量(忽略电子质量), 即碲镉汞材料中碲、镉、汞三种原子质量的加权平均. k_B/m_a 为振动能量转换成热能的部分, k_B/m_a 具有热容的量纲, 值等于碲镉汞的热容 C , 则单位质量吸收的热能与热容的比值等于振动导致的温度的变化.

$$\Delta T = \frac{W_a/m_d}{k_B/m_a} = \frac{W_a/m_a}{C}. \quad (11)$$

电阻率由迁移率所决定:

$$\rho = \frac{1}{ne\mu}, \quad (12)$$

其中, n 是热平衡载流子浓度, e 是电荷电量.

对于 n 型碲镉汞材料, 器件的总电阻 R 与光敏区有效电阻 R_{eff} 有如下关系:

$$R = a_e R_{\text{eff}} = a_e L\rho/wd, \quad (13)$$

其中 a_e 为常数, 大小与电极结构有关, L 、 w 、 d 分别是探测器等效电阻的长度、宽度和厚度^[7].

根据式(5)~(13)可得, 振动增加了碲镉汞材料电阻率, 从而增加了器件的电阻, 增量与振动能量成正比:

$$\Delta R = \frac{a_e L}{wd} \frac{\sqrt{2}\epsilon_d^2 em^{5/2} E^{1/2} k_B}{\pi\hbar^4 n c_1} \frac{W_a/m_d}{C}. \quad (14)$$

碲镉汞中波光导器件正常工作时, 器件流经恒定的偏置电流 I_0 . 当对其施加随机振动时, 器件电阻发生变化, 变化量和单位时间单位频率内的振动能量成正比. 根据欧姆定理, 器件两电极间的噪声电压也和振动相关, 即

$$V_n = I_0 \Delta R. \quad (15)$$

当随机振动的 PSD 为 $0.01 \text{ g}^2/\text{Hz}$, 即单位时间单位频率碲镉汞光导器件单位质量的振动能量为 0.01 g^2 时, 测量得到的噪声为 $342 \text{ nV}/\text{Hz}^{-1/2}$, 可推出内耗为 0.018 , 与文献报道的金属和半导体的内耗相比略微偏大, 但在合理范围之内.

晶体的内耗机理和晶体内部的缺陷有关. 在振动强度很小时, 内耗依赖于碲镉汞材料本身的缺陷, 比如掺杂和位错. 当振动强度变大时, 晶体内的缺陷受到足够大的应力, 发生萌生、增殖和运动, 缺陷密度的变化以及变化的过程对内耗均有影响, 影响机

理较为复杂,但定性来说,缺陷密度增加,内耗增加,噪声随振动能量的变化系数也会增大。

以上只考虑了最简单的情况,实际的碲镉汞光导器件中存在大量杂质和缺陷,这可能是内耗偏大的原因。更符合实际情况的阐述是:随机振动的能量被碲镉汞材料中的晶格、杂质和缺陷吸收,增大了它们做为散射中心对载流子的碰撞几率,从而改变了器件电阻,当外界对器件施加恒定的工作电流时,器件两电极间形成了和振动能量成线性相关的噪声电压。

3 结论

研究了碲镉汞中波光导器件的振动噪声,发现了在随机振动时,振动噪声和振动强度是分段线性相关的,并利用声子理论给出了相应的解释。认为振动能量改变了碲镉汞材料中的晶格、杂质和缺陷对载流子的碰撞几率,影响了中波光导器件的电阻,产生了振动噪声,并利用吸收声子的量子性,很好的解释了实验中发现的分段线性关系。

Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge the HgCdTe sample supplied by National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences.

REFERENCES

- [1] QIAO Hui, JIA Jia, LI Xiang-Yang, *et al.* Influence of 1MeV electron irradiation on HgCdTe photoconductive detectors[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (乔辉,贾嘉,李向阳,等. 1MeV 电子辐照对碲镉汞中波光导器件的影响. *红外与毫米波学报*), 2004, **23**(3):172-175.
- [2] LIN Li, WANG Zhi-Min, LIU Li-Tian, *et al.* Vibration noise of the metal structure IR detector[J]. *Infrared and Laser Engineering* (林立,王志敏,刘理天,等. 金属结构红外探测器振动噪声的研究. *红外与激光工程*), 2006, **35**(3):281-284.
- [3] GAO Jin-Zhan. *Detection of weak signals*[M]. Beijing: Tsinghua University Press(高晋占. 微弱信号检测. 清华大学出版社)2011.
- [4] ZHOU Zan-Xi, LI Zhong-Min. Measurement method and apparatus for IR detector and J-T cryocooler module[J]. *Cryogenics and Superconductivity* (周赞熙,李中民. 红外探测器/节流制冷器组件性能测试方法及装置简述. *低温与超导*), 1993, **21**(4):39-41.
- [5] ZHANG Q M, SHAO H M, HUANG Y N, *et al.* Internal friction and lattice anomalies of single-phase Hg-1223[J]. *Solid State Communications*, 1997, **101**(2):133-135.
- [6] GE Ting-Sui. *Theoretical basis of solid internal friction*[M]. Science Press(葛庭燧. 固体内耗理论基础. 科学出版社) 2000.
- [7] ZHU Ke-Xue, LI Xiang-Yang, GONG Hai-Mei, *et al.* Changes of the electric parameters of LWIR HgCdTe PC detector by laser irradiation[J]. *Infrared and Laser Engineering* (朱克学,李向阳,龚海梅,等. 激光辐照对长波 HgCdTe 光导探测器电学参数的影响. *红外与激光工程*). 2002, **31**(1):55-59.
- [8] and applications [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2005, **29**: 59-163.
- [7] Lax B, Neustader S F. Transient response of a p-n junction [J], *J. Appl. Phys.*, 1954, **25**(9):1148-1154.
- [8] Neudeck P G. Perimeter governed minority carrier lifetime in 4H-SiC p⁺n diode measured by reverse recovery switching transient analysis [J], *J. Electronic Materials*, 1998, **27**(4):317-323.
- [9] Green M A. Minority carrier lifetime using compensated differential open circuit voltage decay [J], *Solide-State Electronics*, 1983, **26**(11):1117-22.
- [10] Sze S M. *Semiconductor devices physics and technology* [M]. Suzhou University Press, 2nd press, 2006: 66-68.
- [11] Cui H Y, Li Z F, Liu Z L, *et al.* . Modulation of the two-photon absorption by electric fields in HgCdTe photodiode [J], *Appl Phys Lett*, 2008, **92**(2):021128-30.
- [12] Yin F, Hu W D, Zhang B, *et al.* Simulation of laser beam induced current for HgCdTe photodiodes with leakage current [J], *Optical and Quantum Electronics*, 2009, **41**(11-13): 805-810.
- [13] Jozwikowskia K, Jozwikowskab A, Kopytkoa M, *et al.* Simplified model of dislocations as a SRH recombination channel in the HgCdTe heterostructures [J], *Infrared Physics and Technology*, 2012, **55**(1):98-107.
- [14] Drummond P J, Bhatia D, Ruzyllo J. Measurement of effective carrier lifetime at the semiconductor - dielectric interface by photoconductive decay (PCD) method [J], *Solid-State Electronics*, 2013, **81**:130-134.
- [15] Rose B H. Minority carrier lifetime measurements of Si solar cell using I_{sc} and V_{oc} transient decay [J], *IEEE Trans. Electron Dev.* 1984, **ED-31**:559-565.
- [16] Jain S C, Agarwal S K. Importance of emitter recombinations in interpretation of reverse-recovery experiments at high injections [J], *J. Appl. Phys.* 1983, **54**(6):3618-9.

(上接 121 页)