

电流冲击对长波光导 MCT 探测器的影响

刘大福[†] 吴礼刚 徐国森 章连妹 靳秀芳 龚海梅

(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: 对长波光导 MCT 红外探测器进行了大电流长时间的冲击, 对比了冲击前后探测器的电阻温度特性, 并用该参数研究了器件的电学参数; 测量了冲击前后探测器的黑体性能变化、响应光谱以及少子寿命. 实验结果显示: 短时间(42mA, 70h)的电流冲击对探测器性能影响不大, 探测器组分减小, 截止波长变长; 冲击时间长到(42mA, 100h)一定程度后, 探测器性能有不同程度的下降, 组分变大, 截止波长变短. 这是因为电流产生的热效应加强了 Hg 扩散效应, 从而使器件截止波长发生变化.

关键词: 电流冲击; MCT; 光导探测器; 响应光谱; 少子寿命

EEACC: 2560

中图分类号: TN36

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)S0-0314-04

1 引言

由于 MCT(HgCdTe)材料的禁带宽度随组分的变化可以从 0 到 1.6eV 连续可调, 并且制成的探测器性能优异, 因而在资源卫星、气象卫星以及夜视、火控、制导等领域得到广泛的应用, 特别是由体材料制成的长波探测器在 FY-1, FY-2 气象卫星中发挥了重要的作用. 工程应用中探测器的可靠性是重要的评价参数之一, 对于长波光导 MCT 探测器也是如此.

可靠性试验特别是寿命试验是获得探测器可靠性指标的重要手段. 随着科技的发展和工艺的进步, 探测器的寿命越来越长, 国内 MCT 探测器的平均寿命已经达到了 10 年以上^[1]. 按照传统的可靠性试验方法, 很难在短时间内获得探测器的可靠性数据及其失效模式. 人们已经研究了各种辐照和强激光对 MCT 探测器的影响^[2~5]. 图 1 是一个典型的 MCT 光导器件的电路图, 从图中可以看出工作状态下, 器件上有一定的电流. 研究^[6]表明电流对器件是有影响的, 但电流对 MCT 探测器的影响很少报道, 为了在比较短的时间内获得探测器的可靠性信息, 我们给探测器芯片施加了一个比较大的偏置电流, 以研究大电流冲击对长波光导 MCT 探测器性能的影响及失效机理. 由于制备好的探测器材料很薄, 一般在 10~20 μm , 因此通常是粘在宝石衬底上以增加强度, 同时器件表面大都做了钝化处理以提高探测器性能, 因而用光学的方法测量探测器参数的变化是不可行的; 另外, 制成的光导器件不能满足霍尔

测量需要的四电极条件. 比较容易测量的参数有电阻、黑体性能、响应光谱及少子寿命等. 文中根据冲击前后探测器的这些参数的变化分析了电流冲击对它的影响, 同时分析了引起性能变化的因素.

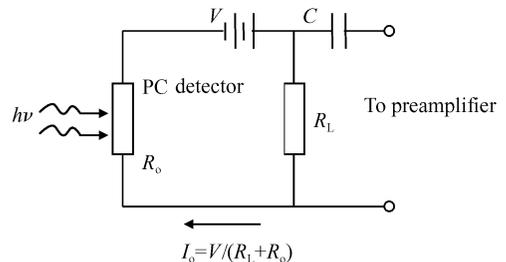


图 1 典型 MCT 光导器件电路图

Fig.1 A typical circuit for MCT photoconductive detector

2 实验

材料经过抛光、腐蚀、阳极氧化、贴片后, 光刻、生长电极, 最后制成光导器件. 器件厚度一般在 10~15 μm . 器件制备完成后, 装入杜瓦, 测量器件的变温电阻、低温黑体响应、少子寿命、响应光谱等参数.

采用 Keithley2400 型电流源表作为恒定电流源, 给器件通电, 通电过程中同时记录器件两端电压, 通电一段时间后, 取下器件放置 12h, 然后测量器件的变温电阻、低温黑体响应、少子寿命、响应光谱等参数.

为使测量的变温电阻准确, 首先在杜瓦内加入液氮, 待杜瓦内温度稳定后, 倒出液氮, 使杜瓦自然

[†] 通信作者. Email: fallwolf@163.com

2005-11-20 收到

升温,同时测量并记录杜瓦内温度和探测器芯片的阻值.

3 结果与讨论

3.1 理论概述^[7]

分析表明,对于光导型 MCT 探测器,器件总电阻 R 与 MCT 材料的电阻率有如下关系:

$$\lg R = \lg \rho(x, T) + C \quad (1)$$

其中 C 是一个只与探测器尺寸和电极结构相关的常数.

MCT 光导探测器的电阻率 ρ 由材料的电子迁移率和热平衡电子浓度 n_0 决定,即:

$$\rho(x, T) = 1/en_0(x, T)\mu_e(x, T) \quad (2)$$

在高温区,对小组分 MCT,热平衡载流子浓度 n_0 近似等于材料的本征载流子浓度 n_i . 褚君浩等人^[8]利用 Kane 的非抛物线能带模型以及费米-狄拉克统计推算得到 MCT 的本征载流子浓度公式,得到在高温区, $\lg n_i$ 与 $1000/T$ 呈线性关系,

$$\lg n_i = (0.4699 - 4.0974x)(1000/T) + A \quad (3)$$

式中 A 是与温度无关的常数.

桂永胜等人^[7]根据文献^[9]的实验数据拟合得到了高温区 $\lg \mu_e$ 与 $1000/T$ 的近似关系:

$$\lg \mu_e = (0.3726 - 0.9638x + 0.8534x^2) / (1000/T) + B \quad (4)$$

式中 B 是与温度无关的常数.

综合(2)~(4)式,得到:

$$\lg \rho = C_0 + C_1(1000/T) \quad (5)$$

其中:

$$\begin{aligned} C_0 &= -A - B, \text{是与温度无关的常数,} \\ C_1 &= -0.81 + 5.0612x - 0.8534x^2 \end{aligned} \quad (6)$$

根据(1)~(6)式,对以 $\lg R(x, T)$ 为纵坐标, $1000/T$ 为横坐标的数据进行线性回归拟合,可以得到 C_1 ,进而得到探测器芯片组分 x . 在实际拟合中发现采用了二次多项式代替一次多项式求得的组分 x 更加准确,即:

$$\lg \rho = C_0 + C_1(1000/T) + C_2(1000/T)^2 \quad (7)$$

3.2 实验结果

图 2~5 是实验样品在电流冲击前后的电阻-温度曲线,对高温区(160~250K)部分进行了两次多项式拟合,得到公式(6)中的 C_1 ,解一元二次方程,得到组分值 x ,求解的结果如表 1 所示.

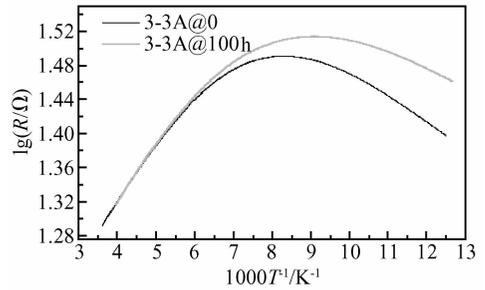


图 2 3-3A 样品电流冲击前后电阻-温度曲线
Fig.2 Resistance versus temperature for 3-3A sample before and after shock

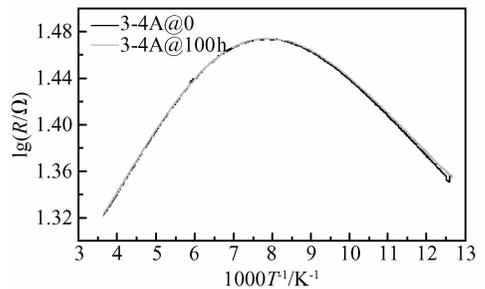


图 3 3-4A 样品电流冲击前后电阻-温度曲线
Fig.3 Resistance versus temperature for 3-4A sample before and after shock

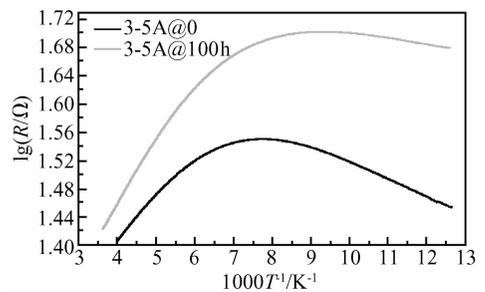


图 4 3-5A 样品电流冲击前后电阻-温度曲线
Fig.4 Resistance versus temperature for 3-5A sample before and after shock

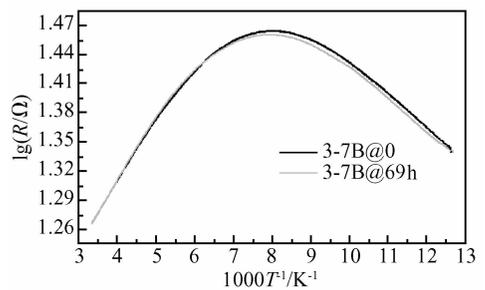


图 5 3-7B 样品电流冲击前后电阻-温度曲线
Fig.5 Resistance versus temperature for 3-7B Sample before and after shock

表 1 冲击前后实验拟合计算得到的组分 x 值
Table 1 Theoretically calculated composition x before and after shock

样品编号	冲击前	冲击后	冲击时间/h
3-3A	0.1866	0.1916	100
3-3B	0.18	0.1881	
3-4A	0.1794	0.1828	
3-5A	0.1930	0.1944	
3-6A	0.1898	0.1959	
3-6B	0.1943	0.1946	
3-7A	0.1864	0.1807	69
3-7B	0.1899	0.1831	
3-8A	0.1945	0.1852	
3-8B	0.1893	0.1921	
3-9A	0.1974	0.188	
3-9B	0.1967	0.1905	

表 2 冲击前后探测器截止波长的变化

Table 2 Theoretically calculated and measured cutoff wavelengths before and after shock

样品编号	冲击前		冲击后		冲击时间/h	备注
	拟合 x 计算	光谱测量	拟合 x 计算	光谱测量		
3-3A	15.590	13.609	14.129	13.288	100	截止波长变短
3-3B	18.058	13.751	15.121	13.49	100	
3-4A	18.322	14.972	16.921	13.022	100	
3-6A	14.622	13.075	13.076	12.951	69	
3-6B	13.449	13.026	13.378	12.918	69	
3-8B	14.765	13.981	13.998	13.904	69	
3-7A	15.655	14.951	7.7601	5.005	69	截止波长变长
3-7B	14.594	14.841	6.8081	4.993	69	
3-8A	13.401	13.943	16.055	14.007	69	
3-9A	12.745	13.091	15.151	13.104	69	
3-9B	12.898	13.063	14.426	13.08	69	
3-5A	13.768	13.088	13.425	13.134	100	

表 3 冲击前后探测器信号和少数寿命变化

Table 3 Detector signal and minority lifetime before and after shock

样品编号		3A	3B	4A	5A	6A	6B	7A	7B	8A	8B	9A	9B
信号/ μV	冲击前	2.3	2.21	2.71	2.7	4.68	4.3	3.46	3.39	4.42	1.33	4.67	5.5
	冲击后	1.47	2.11	2.84	0.11	4.07	3.41	3.09	3.02	4.23	1.13	3.36	4.97
少数寿命 /ns	冲击前	289	319	260	286	324	281	302	300	318	228	319	307
	冲击后	210	252	289	181	361	358	285	288	372	270	374	340

3.3 讨论

探测器经过短时间的通电冲击后,组分 x 有不同程度的减小,从而探测器的截止波长变长;经过比较长时间电流冲击的器件,其组份 x 反而会“增大”,截止波长变短.这可能是由于探测器芯片在通电冲击过程中,焦耳热的作用使芯片温度升高,同时芯片与冷头接触面小,热交换能力差,产生的热量不能迅速带走,这也加强了芯片的温升效应.温升加强了汞原子的扩散,使表面的汞原子一部分向外逃逸,一部分向体内扩散,同时体内的汞原子也会向表面

自 20 世纪 70 年代以来,很多人研究了 MCT 的禁带宽度与组分 x 及温度 T 的关系,其中 Hansen^[10]、Seiler^[11]、Brice^[12]、褚君浩^[13] 等人的研究成果应用相对比较广泛.本文采用了褚君浩的禁带宽度公式:

$$E_g = -0.259 + 1.87x - 0.28x^2 + (6 - 14x + 3x^2) \times 10^{-4} T + 0.35x^4 \quad (8)$$

计算得到的截止波长如表 2 所示,同时表中列出了用光谱方法测试得到的探测器截止波长.从表中可以看出,理论拟合的结果和光谱测量的结果在变化趋势上具有一致性,但两者的数据结果相差比较大,这可能是由于在理论计算中用本征载流子浓度近似热平衡载流子浓度引起的,也有可能是拟合中累积误差造成的,或是两者共同作用的结果.

扩散,这与激光辐照对探测器的作用相似^[3].短时间的通电冲击过程中,表面汞原子逸出的数量加上向体内扩散的要比从体内扩散上来的多,因此表现为组份 x 的减小;当通电时间足够长时,汞原子总体运动趋势为体内的向表面扩散并在表面累积,从而组份 x 表现为“增大”.

4 结论

探测器在电流冲击过程中,由于焦耳热的作用,使得探测器芯片的温度升高;又由于 MCT 本身具

有热稳定性差, Hg - Cd 键比较弱, 容易发生 Hg 逸出现象, 因而在电流冲击过程中, 出现了 Hg 逸出现象。通电时间比较短时, 主要表现为 Hg 从探测器芯片表面向外逸出, 引起探测器的组份 x 减小; 冲击时间比较长时, 表面 Hg 逸出现象不再明显, 主要是体内的 Hg 向表面逸出并累积, 这时表现为探测器的截止波长变短, 组份 x “增大”。

参考文献

- [1] Tang Dingyuan, Mi Zhengyu. Fundamentals of photoelectric devices. Shanghai: Shanghai Scientific Technological Literature Publishing House, 1989 (in Chinese) [汤定元, 糜正瑜. 光电器件概论. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1989]
- [2] Hu Xinwen, Li Xiangyang, Lu Huiqing, et al. Effects of gamma irradiation on performance of MWIR HgCdTe photoconductive device. Infrared and Laser Engineering, 1998, 27(6): 48 (in Chinese) [胡新文, 李向阳, 陆慧庆, 等. γ 射线辐照对长波 HgCdTe 光导器件性能的影响. 红外与激光工程, 1998, 27(6): 48]
- [3] Zhu Kexue, Zhang Yun, Li Xiangyang, et al. Effect of laser irradiation for the performance of LW IR HgCdTe PC detector. Laser & Infrared, 2001, 31(4): 234 (in Chinese) [朱克学, 张贇, 李向阳, 等. 激光辐照对 HgCdTe 长波光导探测器性能的影响. 激光与红外, 2001, 31(4): 234]
- [4] Huang Yangcheng, Cao Guangming, Liu Dafu, et al. Effect of γ irradiation on InGaAs infrared detectors. Journal of Functional Materials and Devices, 2005, 11(1): 68 (in Chinese) [黄杨程, 曹光明, 刘大福, 等. InGaAs 红外探测器的 γ 辐照研究. 功能材料与器件, 2005, 11(1): 68]
- [5] Huang Yangcheng, Qiao Hui, Jia Jia, et al. Influence of 1 MeV electron irradiation on HgCdTe photovoltaic detectors. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(1): 25 (in Chinese) [黄杨程, 乔辉, 贾嘉, 等. 1 MeV 电子辐照对短波 Hg_{1-x}Cd_xTe 光伏探测器的影响. 强激光与粒子束, 2005, 17(1): 25]
- [6] Liu Dafu, Xu Guosen, Huang Yangcheng, et al. Electrical shock effect on HgCdTe photoconductive detectors. Proc of SPIE, 2004, 5640: 34
- [7] Gui Yongsheng, Cai Yi, Zheng Guozhen, et al. The relationship between resistance and temperature at high temperature region for Hg_{1-x}Cd_xTe photoconductors. J Inf Rared Millim Waves, 1996, 15(4): 297 (in Chinese) [桂永胜, 蔡毅, 郑国珍, 等. 高温区 Hg_{1-x}Cd_xTe 光导器件的温度 - 电阻关系. 红外与毫米波学报, 1996, 15(4): 297]
- [8] Chu J H, Wang R X, Tang D Y. Intrinsic carrier concentration in Hg_{1-x} Cd_xTe semiconductors with nonparabolic band. Chin J IR Res, 1983, 2(4): 241 (in Chinese) [褚君浩, 王戎兴, 汤定元. 非抛物型能带半导体 Hg_{1-x}Cd_xTe 的本征载流子浓度. 红外研究, 1983, 2(4): 241]
- [9] Willardson R K, Beer A C. Semiconductors and Semimetals, Vol 18, New York: Academic Press, 1981
- [10] Hansen G L, Schmit J L, Casselman T N. Energy gap versus alloy composition and temperature in Hg_{1-x}Cd_xTe. J Appl Phys, 1982, 53(10): 7099
- [11] Seiler D G, Lowney J R, Littler C L, et al. Temperature and composition dependence of the energy gap of Hg_{1-x}Cd_xTe by two-photon magnetoabsorption techniques. J Vac Sci Technol A, 1990, 8(2): 1237
- [12] Brice J, Capper P. Properties of mercury cadmium telluride. London and New York: INSPEC, 1987
- [13] Chu Junhao, Xu Shichou, Tang Dingyuan. Energy gap versus alloy composition and temperature in Hg_{1-x} Cd_xTe. Appl Phys Lett, 1983, 43(11): 1064

Electrical Shock Effects on MCT Long-Wavelength PC Detectors

Liu Dafu[†], Wu Ligang, Xu Guosen, Zhang Lianmei, Jin Xiufang, and Gong Haimeii

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

Abstract: This study is concerned with electrical shock effect on performance of the n-type HgCdTe photoconductive detector with a composition of $x \approx 0.2$ in order to improve the reliability under this certain situation. An electrical shock was applied on long wavelength PC MCT detectors. Before and after the shock the resistance, response spectra, blackbody signal and minority carrier lifetime of detectors were measured at normal conditions. Experimental results show that short time shock has no obvious effects on detector performance and the composition have a tendency of decrease. When shock time increase the composition have a tendency of increase, and the detectors performance are decreasing, even wear out. Analysis proves the effect of electrical shock mainly is Joule heat, which is similar to laser irradiation effects.

Key words: electrical shock; MCT; PC detectors; response spectra; minority carrier lifetime

EEACC: 2560

Article ID: 0253-4177(2006)S0-0314-04

[†] Corresponding author. Email: fallwolf@163.com

Received 20 November 2005