

# $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 的稳态光电导响应和 瞬态响应分布研究

茅文英 褚君浩

(中国科学院上海技术物理研究所, 红外物理国家重点实验室, 上海, 200083)

李言谨 王子孟 方家熊

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

**摘要** 研究了  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  的稳态光电导响应和瞬态响应的均匀性, 用可调谐连续  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  激光测量稳态光电导, 用  $\text{GaAs}/\text{GaAlAs}$  脉冲激光激发瞬态光电导. 将两束激光会聚成直径约  $250\ \mu\text{m}$  的光斑, 使两光斑恰位于光导型  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  样品前表面的同一点上, 测量了样品光电导响应分布和相应光生载流子寿命分布. 实验表明, 稳态光电导响应分布的均匀性大大低于光生载流子寿命分布的均匀性, 并对结果进行了讨论.

**关键词**  $\text{HgCdTe}$ , 光电导响应, 瞬态响应, 光生载流子寿命.

## 引言

$\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  (MCT) 是一种广泛使用的红外探测器材料, 目前单元探测器已达到了背景极限, 线列器件及二维列阵探测器的研制也获得了很快发展. 研制这些器件需要晶体结构、组份、电子、光学参数均匀的大面积样品, 因此建立和发展 MCT 样品均匀性测试和分析技术就越来越重要了. 例如用光电导衰退法测量体寿命和表面复合速度分布<sup>[1]</sup>; 用氦离子激光束感应电流探测 MCT 材料的电活性缺陷分布, 以及检测大面积 p-n 结的质量<sup>[2]</sup>; 用光刻法在 MCT 晶片上作密布的电极, 用四探针法测微区的电阻率<sup>[3]</sup>等.

本文介绍一种新的测量 MCT 的稳态光电导响应分布和瞬态响应分布的方法. MCT 样品按照光电导探测器工艺制备电极, 将会聚成直径约  $250\ \mu\text{m}$  的可调谐  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  激光和脉冲  $\text{GaAs}/\text{GaAlAs}$  激光入射到 MCT 样品的同一点上, 逐点测量光电导响应和瞬态响应, 就可以获得样品上各点的光电导响应和瞬态响应的分布情况. 开展这一研究是很有意义的, 一方面它十分直观地给出 MCT 响应分布, 另一方面从光电导响应分布可以获得有关样品晶体结构、缺陷、电学、光学性质均匀性的更多的信息. 特别是从瞬态响应直接得到了载流子寿命, 从而可以对 MCT 材料的均匀性进行更深入的研究. 这对于生长

MCT 材料、研制多元线列器件及大面积焦平面面阵器件是有实用意义的。

## 1 原理

探测器的光电导响应率定义为入射的单位光功率所产生的电压变化, 这个输出电压变化与入射光所引起的附加电导率变化直接有关. 设  $I$  表示以光子数计算的光强度,  $\alpha$  为样品的吸收系数, 根据  $-di/dx = \alpha I$ ,  $\alpha I$  就是单位体积内光子的吸收率, 设  $\beta$  代表每吸收一个光子产生的电子-空穴对数, 则电子-空穴对的产生率为  $\alpha\beta I$ . 光生载流子的寿命为  $\tau$ , 假设限于小注入条件, 且假设陷阱数很少, 则光生空穴和电子的寿命可以认为相等, 所产生的电导率为

$$\Delta\sigma = eI\alpha\beta(\mu_n + \mu_p)\tau,$$

$\mu_n$ 、 $\mu_p$  分别为电子和空穴的迁移率,  $e$  为电子的电量.

由上式可见, 电导率与  $\mu$ 、 $\tau$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  等参量有关, 其中  $\alpha$  和  $\beta$  表征光和物质的相互作用, 决定光生载流子的激发过程, 而  $\mu$  和  $\tau$  则表征载流子与物质之间的相互作用, 决定着载流子运动和非平衡载流子的复合过程, 因此光电导响应是一个重要的参数. 光生载流子寿命也是一个十分重要的参数, 不仅与平衡载流子浓度有关, 更与复合机制有关, 是一个相当复杂的参数, 被认为是表征材料的品质因子之一, MCT 组份的变化会导致上述参量的变化, 然而 MCT 组份均匀性的控制是相当困难的, 因此 MCT 的均匀性问题显得特别重要.

MCT 样品在接收光照后, 在小电场时, 光电导的瞬态衰退过程是体寿命  $\tau$  的指数过程<sup>[4]</sup>, 故用光电导衰退法可测量寿命  $\tau$ <sup>[4]</sup>.

## 2 实验

研究光电导响应和光生载流子寿命分布的均匀性, 首要的问题是确定置于杜瓦瓶中样品的位置坐标, 为此我们采用双光路同时测量, 避免了绝对定标. 实验装置如图 1 所示. 光束 1 为  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  可调谐激光, 选用不同组份  $x$  的激光器, 可获得覆盖范围为  $2.5\sim 25\ \mu\text{m}$  的激光, 本工作用  $10\sim 12\ \mu\text{m}$  范围的激光, 恰好位于 MCT 的通常工作波段. 使用连续工作状态, 斩波器频率为  $200\ \text{Hz}$ , 用此光束进行稳态光电导响应测量. 光束 2 为  $\text{GaAs}/\text{GaAlAs}$  脉冲激光, 波长约为  $0.9\ \mu\text{m}$ , 脉冲宽度  $\leq 100\ \text{ns}$ , 重复频率  $5\ \text{kHz}$ . 用此光束激发附

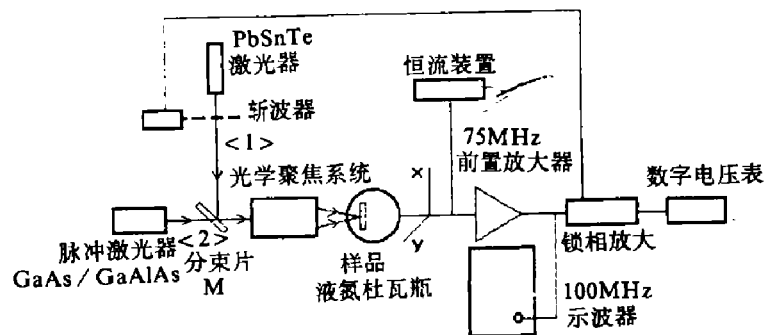


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Block diagram of experimental set-up

加光生载流子, 用光电子衰退法测量少子寿命  $\tau$ .  $M$  为分束片, 对中红外几乎全反, 对近红外大部分透过. 1、2 两光束经光学系统聚焦成直径约  $250 \mu\text{m}$  的光点, 且两光斑成像在同一点上, 将样品的前表面放在焦平面上, 使用  $X-Y$  调整架改变光点落在样品上的位置. 200 Hz 的稳态光电导信号和 5 kHz 的瞬态响应信号均经过 75 MHz 的前置放大 (EG&G Model 115), 光电导信号经锁相放大 (EG&G 5101), 最后用数字电压表读数, 而瞬态响应的高频信号输入至 100 MHz 示波器 (TEKTRONIK\*7633), 显示出光电导衰退曲线, 取衰退到峰值  $1/e$  点的时间作为光生载流子的寿命  $\tau$ .

选用了两种不同组份  $n$  型 MCT 材料. 1# 样品组份为 0.186, 尺寸为  $0.11\text{cm} \times 0.11\text{cm} \times 0.001\text{cm}$ , 液氮温度下的电阻为  $92 \Omega$ ; 2# 样品组份为 0.190, 尺寸为  $0.22\text{cm} \times 0.22\text{cm} \times 0.001\text{cm}$ , 液氮温度下的电阻为  $85 \Omega$ . 按照常规的光导探测器工艺制备样品, 样品置于液氮杜瓦瓶中, 杜瓦瓶窗口为 ZnS, 将杜瓦瓶置于  $X-Y$  调整架上, 以实现小光点扫描. 所加恒定偏流约为 10 mA, 以满足小注入条件.

对两个样品进行了单色光的光电导响应和载流子寿命分布测量. 考虑到光电导响应与迁移率、吸收系数、组份等有关, 显然与激发稳态光电导的波长有关, 故进行了光电导响应分布与单色光波长关系测量. 由于电场对载流子的漂移和扩散可能会产生影响, 故交换了正负电极的位置进行光电导响应测量.

### 3 结果和讨论

表 1 和 3 分别列出 1# 样品光生载流子寿命分布和对波长  $\lambda = 11.2 \mu\text{m}$  的稳态光电导响应分布. 表 2 和表 4 分别列出 2# 样品的光生载流子寿命分布和对波长  $\lambda = 11.0 \mu\text{m}$  的稳态光电导响应分布. 表 3 和表 4 中最后一行或最后一列为该行或该列的最大和最小光电导响应的比, 表中右下角代表整个样品上最大和最小光电导响应的比, 在表 4 中,  $X = 2.25\text{mm}$  的数据偏低, 估计有部分光落在光敏元外, 故不考虑此行数据. 表 1~4 中,  $X$  和  $Y$  分别表示样品的长和宽,  $\tau$  代表寿命,  $R$  代表光电导响应.

图 2 和 3 分别是 1# 样品和 2# 样品的典型光电导响应分布图.

从表中的数据可以看出, 光生载流子寿命分布的均匀性好于光电导响应的均匀性. 1# 样品寿命的不均匀性只有 10%, 而光电导响应的不均匀性高达 4 倍之多. 沿  $X$  方向出现

表 1 1# 样品寿命分布

Table 1 Distribution of lifetime of optically excited carriers (sample No. 1)

		$X$ (mm)				
		0.25	0.50	0.75	1.00	1.25
$Y$ (mm)	$\tau$ ( $\mu\text{s}$ )	0.11	0.12	0.12	0.11	0.11
	0.25	0.11	0.11	0.11	0.12	0.11
	0.5	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
	0.75	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
	1.0	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
1.25	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	

表 2 2# 样品光生载流子寿命分布

Table 2 Distribution of lifetime of optically excited carriers (sample No. 2)

$\tau$ ( $\mu\text{s}$ )	X (mm)								
	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25
0.25	0.50	0.50	0.50	0.50	0.45	0.45	0.42	0.42	0.40
0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.45	0.45	0.45	0.45
0.75	0.45	0.45	0.50	0.45	0.45	0.45	0.40	0.40	0.40
1.00	0.45	0.50	0.50	0.50	0.50	0.45	0.40	0.40	0.40
1.25	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.40	0.40	0.40
1.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.45	0.45	0.40
1.75	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.45	0.45
2.00	0.55	0.55	0.55	0.55	0.50	0.45	0.40	0.45	0.40
2.25	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50

表 3 1# 样品稳态光电导响应分布 ( $\lambda=11.2\mu\text{m}$ )Table 3 Distribution of the stable photoconductive response (sample No. 1), the test wavelength is  $11.2\mu\text{m}$ 

R	X (mm)					
	0.25	0.5	0.75	1.0	1.25	max/min
0.25	185	347	263	427	420	2.3
0.50	252	496	326	442	469	2.0
0.75	226	475	350	467	530	2.3
1.00	197	448	286	333	410	2.1
1.25	116	302	211	260	342	3.0
max/min	2.17	1.64	1.66	1.80	1.55	4.3

表 4 2# 样品稳态光电导响应分布 ( $\lambda=11.0\mu\text{m}$ )Table 4 Distribution of the stable photoconductive response (sample No. 2), the test wavelength is  $11.0\mu\text{m}$ 

R	X (mm)									
	0.25	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5	1.75	2.0	2.25	max/min
0.25	377	626	594	425	372	358	283	272	102	2.3
0.50	476	816	782	576	483	454	363	315	102	2.6
0.75	584	889	793	594	492	465	370	305	105	2.9
1.00	590	802	707	544	455	430	360	295	107	2.7
1.25	783	926	805	626	522	466	402	333	125	2.8
1.50	803	922	825	666	576	519	445	375	187	2.5
1.75	640	856	790	633	586	534	467	406	247	2.1
2.00	495	643	600	495	454	426	375	334	214	1.9
2.25	343	464	428	345	320	302	266	239	138	1.9
max/min	2.3	2.0	1.9	1.9	1.8	1.8	1.8	1.7	2.42	3.87

2 个响应率的极大值, 中间有一低谷. 从图 2 可以看到, 这一低谷几乎成一直线. 文献 [5] 已得出: 由 X 射线形貌检测得出, MCT 小晶片中普遍存在较多的晶体缺陷, 如亚晶界、

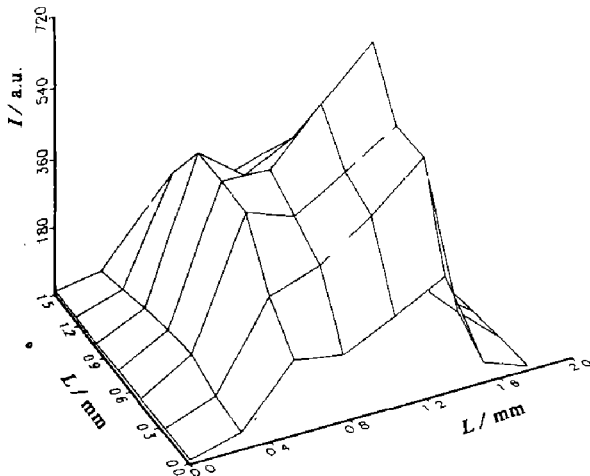


图 2 1# 样品的稳态光电导响应分布  
( $\lambda=11.2 \mu\text{m}$ )

Fig. 2 Spatial distribution of the stable photoconductive response (sample No. 1), the test wavelength is  $11.2 \mu\text{m}$

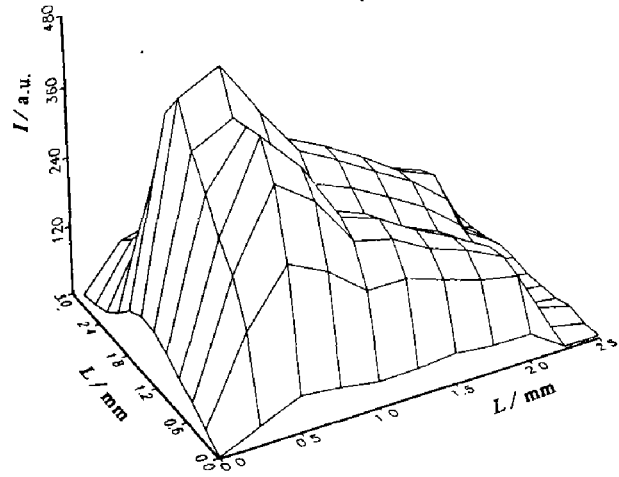


图 3 2# 样品的稳态光电导响应分布  
( $\lambda=11.0 \mu\text{m}$ )

Fig. 3 Spatial distribution of the stable photoconductive response (sample No. 2), the test wavelength is  $11.0 \mu\text{m}$

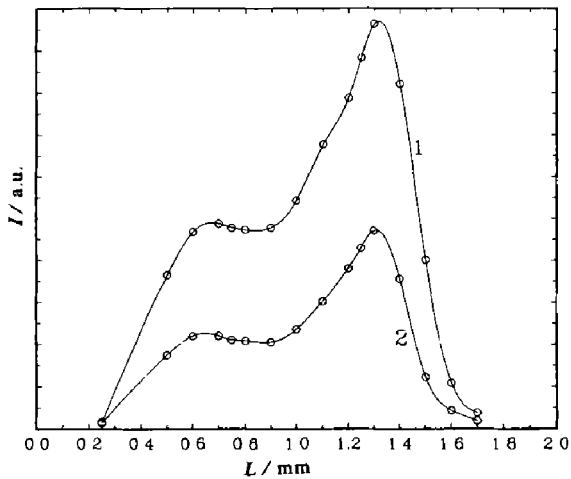


图 4 1# 样品稳态光电导响应沿 X 方向分布  
( $\lambda=10.1 \mu\text{m}$ ), 曲线 1 和 2 分别对应 Y 方向的  
2 个不同位置

Fig. 4 Distribution of the stable photoconductive response along the X direction (sample No. 1), the test wavelength is  $10.0 \mu\text{m}$  curves 1 and 2 correspond, respectively, to two different positions along the Y direction

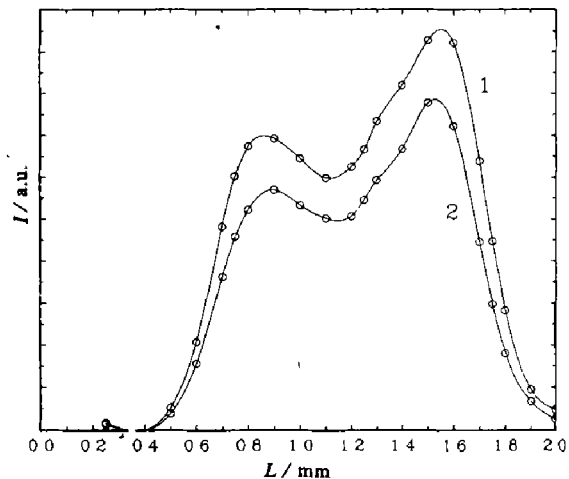


图 5 1# 样品稳态光电导响应沿 X 方向分布  
( $\lambda=10.5 \mu\text{m}$ ), 曲线 1 和 2 分别对应 Y 方向的  
2 个不同位置

Fig. 5 Distribution of the stable photoconductive response along the X direction (sample No. 1), the test wavelength is  $10.5 \mu\text{m}$ , curves 1 and 2 correspond, respectively, to two different positions along the Y direction

晶格扭曲和滑移线等. 它们都可能影响光电导. 2# 样品寿命的不均匀性已达  $\pm 20\%$ , 但光电导响应分布的均匀性并不比 1# 样品差, 这正说明光电导响应除取决寿命外还依赖于其它因素. 从图 3 看出靠近左边电极出现响应率的极大值, 从左向右响应率总的趋势是逐渐下降的, 改变单色光的波长, 光电导响应分布变化不大. 然而 1# 样品却非如此, 图 4、5

和 6 分别示出波长为 10、10.5 和 10.9  $\mu\text{m}$  时光电导响应分布曲线, 当波长改变时, 2 个极大值的峰值之比变化很大, 这一现象显然与组份的不均匀性有关, 但比值相差很大绝非仅与组份有关.

为了作些定量讨论, 在小光点条件下, 我们进行了简单估算. 用恒流装置对 MCT 样品加恒定电流  $I_0$ , 样品厚度为  $d$ , 假设光斑为方型, 边长为  $a$  光的频率为  $\nu$ , 入射光功率为  $\Phi$ , 假设光斑足够小, 样品足够薄, 且假设  $\Delta n = \Delta p$ , 于是在光入射到的小体积内产生的光电导可表示为

$$\Delta\sigma = \frac{\eta\Phi\tau}{h\nu a^2 d} e(\mu_n + \mu_p). \quad (1)$$

$\eta$  为量子效率, 它与每吸收一个光子所能产生的电子-空穴对的能力有关. 在小注入条件下, 在样品的两端产生电压变化为

$$\Delta V = \Delta R \cdot I_0 = I_0 \Delta\rho \frac{a}{ad} = \frac{I_0 \Delta\rho}{d} = \frac{I_0}{d} \left( \frac{1}{\sigma} - \frac{1}{\sigma_0} \right) = \frac{I_0 \Delta\sigma}{d\sigma_0^2}. \quad (2)$$

将式 (1) 代入式 (2) 得

$$\Delta V = \frac{I_0 \eta \Phi \tau}{(ad)^2 h \nu} \frac{e}{\sigma_0^2} [\mu_n + \mu_p]. \quad (3)$$

按定义, 光电导响应为

$$R = \frac{\Delta V}{\Phi} = \frac{I_0 \eta \tau}{(ad)^2 h \nu} \frac{e}{\sigma_0^2} [\mu_n + \mu_p]. \quad (4)$$

从式 (4) 看出, 在小光点情况下, 光电导响应除与材料的载流子寿命  $\tau$  成正比外尚与样品厚度的二次方、与电导率的二次方成反比. 我们仅估算此二项对光电导响应不均匀性的影响. 设样品厚度为 10  $\mu\text{m}$ , 如产生正、负 1  $\mu\text{m}$  的加工误差, 则对响应率不均匀性影响可达 1.5 倍以上. 在文献 [3] 中, 列出几种 MCT 体材料微区电阻率测量结果, 微区大小为 80  $\mu\text{m}$ , 在同一块体材料上电阻率变化为 0.022~0.038  $\Omega\text{cm}$ , 此项不均匀引起响应率变化可高达 3 倍左右. 交换电极后, 光电导响应分布没有变化, 因此可以认为外加电场影响可以忽略.

## 4 结论

4.1. 影响 MCT 材料光电导响应均匀性的因素除载流子寿命之外, 电导率、厚度、组

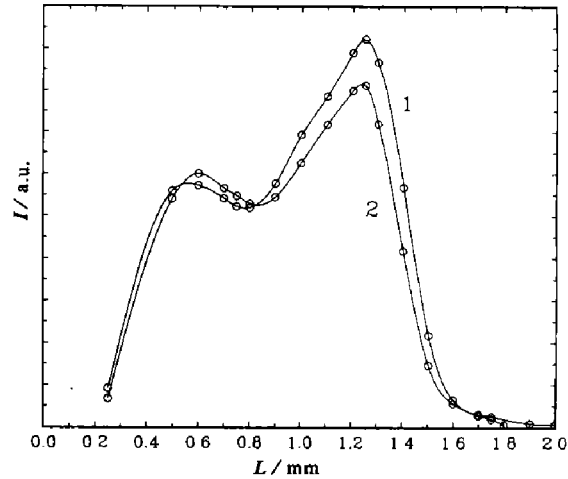


图 6 1# 样品稳态光电导响应沿  $X$  方向分布 ( $\lambda=10.9 \mu\text{m}$ ), 曲线 1 和 2 分别对应  $Y$  方向的 2 个不同位置

Fig. 6 Distribution of the stable photoconductive response along the  $X$  direction (sample No.1), the test wavelength is 10.9  $\mu\text{m}$ , curves 1 and 2 correspond, respectively, to two different positions along the  $Y$  direction

份均匀性等等都是极重要参数.

4.2. 用本文介绍的新技术来研究 MCT 材料的均匀性, 是相对简单、直观的研究手段, 因而是一种较好的方法.

4.3. 为了配合材料、器件研究的需要, 缩小光点的尺寸是必要的, 也是完全可能的.

**致谢** 本工作得到汤定元先生和沈学础先生的热情支持, 朱翠媛同志提供了分束片, 在工作中与青年学者姜山、龚海梅、欧海疆等进行过有益的讨论, 在此一并表示衷心的感谢.

### 参考文献

- 1 龚海梅. 中国科学院上海技术物理研究所博士论文, 1993
- 2 Baja J, Babulac L O, et al. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1987,A5(5):3186
- 3 Kopanski J J, Lowney J R, et al. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1992,B10(4):1553
- 4 李言瑾, 朱龙源, 方家熊. *红外与毫米波学报*, 1992,11(4):271
- 5 蔡毅, 郑国珍, 汤定元. *红外技术*, 1993,15(6):5

## STUDIES OF PROFILES OF STABLE-STATE PHOTOCONDUCTIVE RESPONSE AND TRANSIENT DECAY RESPONSE OF $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$

Mao Wenying Chu Junhao

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

Li Yanjin Wang Zimeng Fang Jiaxiong

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

**Abstract** The uniformity of the stable-state photoconductive response and the transient decay response of  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  (MCT) material is studied. The stable-state photoconductive response was measured with a tunable  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  diode laser operating at 10~20  $\mu\text{m}$  wavelength range and the transient decay process was measured with a pulsed GaAs/GaAlAs diode laser operating at about 0.9  $\mu\text{m}$  wavelength. The above two beams were focused to the same spots (about 250  $\mu\text{m}$  in diameter) in front of the sample of photoconductive MCT. The experiments indicated that the uniformity of the stable-state photoconductive response was far poorer than that of the transient decay response. These results are discussed in this paper.

**Key words** mercury cadmium telluride, photoconductive response, transient decay response, lifetime of optically excited carriers.