

文章编号: 0258-7025(2004)03-0342-05

# 光导型光电探测器瞬变行为的仿真

马丽芹<sup>1,2</sup>, 陆启生<sup>1</sup>, 杜少军<sup>1</sup>, 唐松生<sup>2</sup>, 程湘爱<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 国防科技大学理学院定向能研究所, 湖南 长沙 410073; <sup>2</sup> 青岛科技大学, 山东 青岛 266042)

**摘要** 较强功率的激光辐照半导体探测器时既产生光电效应又产生热效应, 提出了反映光电效应的载流子输运模型和反映热效应的热扩散模型。计算了不同激光辐照功率密度下 PC 型 HgCdTe 探测器内的光生载流子浓度和热平衡载流子浓度, 由此对探测器的瞬变行为进行了仿真计算, 仿真结果与实验结果相吻合。

**关键词** 光电子学; 光导型光电探测器; 瞬变行为; 热平衡载流子; 光生载流子

中图分类号 TP 211+.6 文献标识码 A

## Imitation of the Instantaneous Change Behaviors of Photoconductive Detectors

MA Li-qin<sup>1,2</sup>, LU Qi-sheng<sup>1</sup>, DU Shao-jun<sup>1</sup>, TANG Song-sheng<sup>2</sup>, CHENG Xiang-ai<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Science, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)  
(<sup>2</sup> Qingdao Science and Technology University, Qingdao, Shandong 266042, China)

**Abstract** Photoconductive effect and heat effect in semiconductor photoconductive detectors when they are irradiated by laser were considered simultaneously. A transportation model of photoconductive carriers and heat transmission model were established. The photoconductive carriers consistency and the heat equilibrium carriers consistency in PC-type HgCdTe detectors under various laser irradiation density were calculated. Instantaneous change behaviors of the detectors were imitated further. The imitative results are identical with experimental results.

**Key words** optoelectronics; photoconductive detector; instantaneous change behavior; heat equilibrium carriers; photoconductive carriers

## 1 引言

光导型 HgCdTe 光电探测器是一种很有前途的红外探测器, 因为可以改变  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  材料的组份  $x$  来改变其光谱响应范围, 而且在低温下具有响应快、探测率高、噪声小等优点, 被广泛应用到红外制导、夜视、激光通讯、遥感、测距等领域, 因此研究激光辐照该种器件而产生的各种效应具有重要的实际意义, 并且已做了不少工作<sup>[1,2]</sup>。我们认为当较强功率的激光辐照光导型半导体探测器时除产生光电导效应外还产生热效应, 表现为温度的升高以及温升造成的各种现象。本文同时考虑了这两种效应, 由激光辐照下半导体探测器内部的载流子输运

方程, 计算了光生载流子的浓度; 由热效应模型计算了探测器内的温度场分布、热平衡载流子的浓度与光照强度及光照时间的关系, 由此对激光辐照光导型探测器的瞬变行为进行了仿真计算。

## 2 光导型光电探测器瞬变行为的仿真

对于本征 PC 型光电探测器, 在光的辐照下探测器内载流子浓度可表示为  $n = n_0 + \Delta n$ ,  $p = p_0 + \Delta p$ , 其中  $n_0, p_0$  为热平衡电子和空穴的浓度,  $\Delta n, \Delta p$  为光生电子和光生空穴的浓度。在整个光电导过程中, 光生载流子与热平衡载流子具有相等的迁移率, 因此光照下探测器的电导率为

收稿日期: 2002-08-12; 收到修改稿日期: 2003-01-08

基金项目: 国家 863 激光技术领域(863-410-5)资助课题。

作者简介: 马丽芹(1963—), 女, 副教授, 博士生, 主要从事工程光学、激光与物质相互作用方面的教学与科研工作。

E-mail: maliqin@163.com

万方数据

$$\sigma = e[(n_0 + \Delta n)\mu_n + (p_0 + \Delta p)\mu_p] \quad (1)$$

式中  $e$  为电子电量,  $\mu_n, \mu_p$  为电子、空穴的迁移率。因为空穴的迁移率比电子的迁移率小得多, 故也可只考虑电子对电导率的贡献。探测器的电阻

$$R_D = \frac{l}{\sigma wd} \quad (2)$$

式中  $l, w, d$  分别表示探测器的长、宽和高。对于低阻的 PC 型 HgCdTe 探测器采用恒流电路工作方式, 此时在入射光辐照前后其电阻的变化行为就体现着探测器输出光电压信号的变化行为。

## 2.1 PC 型 HgCdTe 探测器内热平衡载流子浓度及暗电导率与温度的关系

实验中使用的探测器是 PC 型  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  探测器, 组份  $x = 0.205$ , 光敏元面积为  $0.2 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$ , 器件置于液氮冷却的杜瓦瓶内, 工作温度为 77 K。当组份  $x = 0.205$ , 温度  $T$  在 77~300 K 之间时, 电子迁移率近似为<sup>[3]</sup>

$$\mu_n = 2.84 \times 10^9 T^{-2.2} (\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}) \quad (3)$$

对于非简并半导体, 热平衡电子和空穴浓度(掺入浓度为  $n_d$  的施主杂质)

$$n_0 = \frac{n_d + \sqrt{n_d^2 + 4n_i^2}}{2}, \quad p_0 = \frac{-n_d + \sqrt{n_d^2 + 4n_i^2}}{2}$$

杂质浓度  $n_d \approx 8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ , 本征载流子浓度  $n_i$  与温度  $T$  及组份  $x$  有如下关系<sup>[4]</sup>

$$n_i = \frac{(1 + 3.25k_b T/E_g) \times 9.56(10^{14})E_g^{3/2}T^{3/2}}{1 + 1.9E_g^{3/4}\exp(E_g/2k_b T)} (\text{cm}^{-3}) \quad (4)$$

式中  $k_b = 8.625 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$ ,  $E_g$  为禁带宽度

$$E_g = -0.295 + 1.87x - 0.28x^2 + (6 - 14x + 3x^2) \times 10^{-4} T + 0.35x^4 (\text{eV}) \quad (5)$$

探测器暗电导率为

$$\sigma_0 = e(n_0\mu_n + p_0\mu_p) \quad (6)$$

由电子、空穴的有效质量分别为  $m_n^* = 0.013m_e, m_p^* = 0.17m_e$ <sup>[1]</sup> 得出:  $\mu_p = 0.0765\mu_n$ 。经计算得到的热平衡电子浓度与温度的关系、电导率与温度的关系分别如图 1, 2 所示。

由此可以得出结论:

1) 探测器内热平衡载流子的浓度在低温(100 K 之内)时很小,  $n_0 \approx n_d$ , 基本上与温度无关; 当温度升高到 150 K 以后  $n_0$  随温度  $T$  的升高而明显增大, 且温度越高  $n_0$  随  $T$  的增大速度越快。

2) 探测器暗电阻随温度的变化存在一个极大值, 极大值位置数据及组份  $x$  有关。当  $n_d = 8 \times 10^{14}$

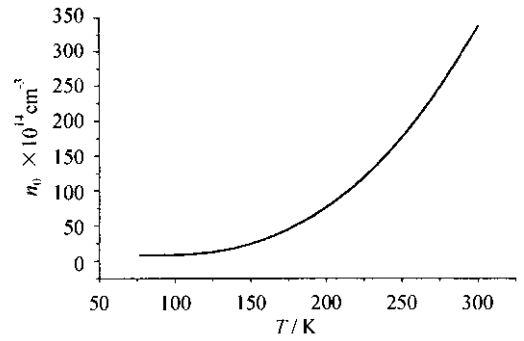


图 1 无光照时探测器内热平衡电子的浓度与温度的关系

Fig. 1 Heat equilibrium electrons consistency in the detector vs temperature without light irradiation ( $x = 0.205$ )

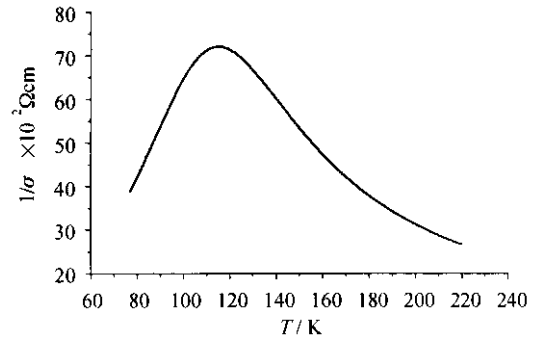


图 2 探测器暗电导率与温度的关系

Fig. 2 Electric conductivity of the detector vs temperature without light irradiation ( $n_d = 8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}, x = 0.205$ )

$\text{cm}^{-3}, x = 0.205$  时, 极大值位置在 115 K 左右。这与文献[2]中的实验结果完全一致。

## 2.2 激光辐照探测器的温度场计算和热平衡载流子浓度计算

PC 型 HgCdTe 探测器的性能对工作温度很敏感。下面计算激光辐照时探测器的温度变化情况。图 3 是探测器的结构示意图, HgCdTe 芯片以  $\text{Al}_2\text{O}_3$  为衬底, 之间用胶粘接, 把  $\text{Al}_2\text{O}_3$  再用胶粘于铜基座上, 铜基座用螺钉紧固于铝壳上, 杜瓦瓶内装液氮, 在 HgCdTe 芯片上用钢球焊出两根引出线作为信号线。实际的器件一般封装在液氮冷却的杜瓦瓶内, 杜瓦瓶被抽真空无对流散热。实验中激光束能完全覆盖住 HgCdTe 芯片表面, 且芯片表面尺寸远大于厚度, 因此可以按一维问题来处理。

热传导方程为

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \alpha(1-r)P_\lambda \exp(-\alpha y) \quad (7)$$

式中  $c, \rho, \lambda$  分别为材料的热容量、密度、热导率,  $P_\lambda$

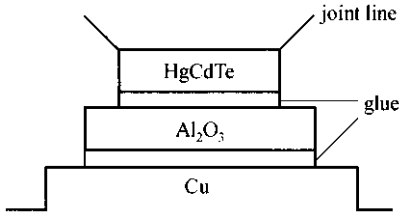


图 3 PC 型 HgCdTe 探测器结构示意图

Fig. 3 Structure sketch of the PC-type HgCdTe detector

为辐照光的功率密度,  $r$  为 HgCdTe 材料表面对入射光的反射率,  $\alpha$  为其对入射光的吸收系数, 当入射光波长为  $1.06 \mu\text{m}$  时,  $r = 0.35$ ,  $\alpha = 10^3 \text{ cm}^{-1}$ 。

采用隐式差分格式对式(7)进行求解。因为探测器由 5 种材料构成, 所以要分层计算, 各层参数见表 1 所示。HgCdTe 层, 前胶层,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  层, 后胶层, 铜基座的空间步长分别取  $0.1 \mu\text{m}$ ,  $0.6 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{m}$ ,  $0.6 \mu\text{m}$ ,  $1 \text{ mm}$ 。为了消除由面积差异产生的影响, 引入两个参数  $A_1, A_2$ , 认为  $\text{Al}_2\text{O}_3$  层、后胶层、铜基座的密度分别为  $A_1\rho_3, A_1\rho_4, A_2\rho_5$ 。初始条件为:  $T|_{t=0} = 77 \text{ K}$ , 边界条件为:  $\frac{\partial T}{\partial y}|_{y=0} = 0, T|_{y=d} = 77 \text{ K}$ 。

表 1 各层材料的典型参数

Table 1 Typical parameters of materials

Material	Density /kg/m <sup>3</sup>	Heat- capacity /J/kg · K	Heat- conductivity /W/m · K	Thickness /μm
HgCdTe	7600	150	20	15
Frontal glue	1250	1530	0.2	3
$\text{Al}_2\text{O}_3$	3980	174	1100	250
Back glue	1250	1530	0.2	3
Cu	8890	385	386	5000

通过计算得到温度的纵向分布结果为: HgCdTe,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  内部温度几乎相等, 铜基座的温度升高极小, 温度主要降于两层胶上, 胶层起热瓶颈作用。这是由于胶层的热导率比起  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , HgCdTe 层的热导率小得多的缘故。胶层的厚度对温升的影响很大, 因此制作器件时应尽量使胶层薄。图 4 表示不同激光辐照功率密度下 HgCdTe 层内的热平衡载流子浓度随时间的变化情况。

### 2.3 载流子输运方程及光生载流子浓度的计算

当激光辐照半导体探测器时, 载流子在探测器内输运所遵循的连续性方程为<sup>[5]</sup>

$$\frac{\partial p}{\partial t} = G - R - \frac{1}{e} \nabla \cdot \vec{J}_p \quad (8)$$

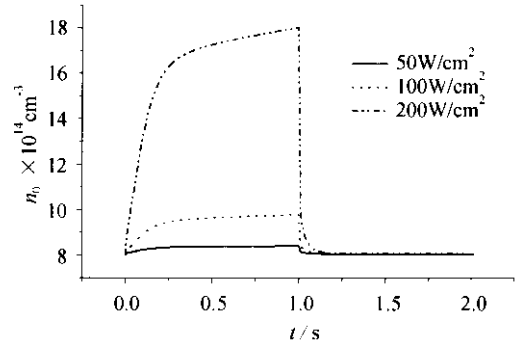


图 4 不同激光辐照功率密度下的热平衡载流子浓度-时间曲线

Fig. 4 Heat equilibrium carriers consistency vs time with different laser irradiation density

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G - R + \frac{1}{e} \nabla \cdot \vec{J}_n \quad (9)$$

式中  $p, n$  分别为空穴、电子的浓度,  $G, R$  分别为空穴电子对的产生率和复合率,  $\vec{J}_p, \vec{J}_n$  分别为空穴、电子的电流密度。

载流子的电流密度为其漂移电流密度和扩散电流密度之和, 即

$$\vec{J}_p = e\mu_p p \vec{E} - eD_p \nabla p \quad (10)$$

$$\vec{J}_n = e\mu_n n \vec{E} - eD_n \nabla n \quad (11)$$

其中  $\vec{E}$  为载流子所在点的电场强度,  $D_p, D_n$  分别为空穴、电子的扩散系数,  $D_p = \mu_p kT/e, D_n = \mu_n kT/e, k$  为普朗克常数。

单位体积内光生载流子的产生率为

$$G(y, t) = \alpha\eta(1-r)P_\lambda(t)\exp(-\alpha y)/h\nu \quad (12)$$

式中  $y$  为到半导体材料光照面的距离,  $\nu$  为入射光的频率,  $\eta$  为光子激发空穴-电子对的量子效率。在多数情况下, 经由复合中心的复合居于主导地位, 根据复合中心理论, 载流子的复合函数为

$$R(x, t) = \frac{pn - p_0 n_0}{\tau_n(n + n_1) + \tau_p(p + p_1)} \quad (13)$$

式中  $\tau_n, \tau_p$  分别为电子、空穴的寿命, 热平衡电子和空穴浓度  $n_0, p_0$  满足  $p_0 n_0 = n_i^2$ ,  $n_1, p_1$  分别为费米能级与复合中心能级重合时电子、空穴的浓度。由于实际上重要的复合中心都是深能级的, 所以  $n_1, p_1$  都比较小, 最典型的深能级是位于半导体的费米能级, 此时  $n_1, p_1$  就是探测器在温度  $T$  时的本征载流子浓度。

假设入射光垂直均匀地覆盖探测器的前表面, 则各物理量可作一维模型近似。对于均匀半导体热平衡载流子浓度与位置无关。外接偏置电阻比探测

器电阻大得多,可认为是恒流工作条件。因此导出光生载流子的连续性方程为

$$\frac{\partial \Delta p}{\partial t} = G - R - \mu_p E \frac{\partial \Delta p}{\partial y} - \mu_p p \frac{\partial E}{\partial y} + D_p \frac{\partial^2 \Delta p}{\partial y^2} \quad (14)$$

$$\frac{\partial \Delta n}{\partial t} = G - R + \mu_n E \frac{\partial \Delta n}{\partial y} + \mu_n n \frac{\partial E}{\partial y} + D_n \frac{\partial^2 \Delta n}{\partial y^2} \quad (15)$$

在载流子输运过程中,探测器内总电流密度为载流子电流密度与位移电流密度之和,因此有方程

$$\epsilon \frac{\partial E}{\partial t} = J - e(\mu_p p + \mu_n n)E + eD_p \frac{\partial \Delta p}{\partial y} - eD_n \frac{\partial \Delta n}{\partial y} \quad (16)$$

方程(14)~(16)联立,形成了完整地描述光导型半导体探测器内光生载流子输运现象的动力学方程,采用预测-校正格式<sup>[4]</sup>求其数值解。边界条件采用中心差分的方法来处理,以确保二阶离散精度。

计算中用到的参数如下:  $\tau_p \approx \tau_n = \tau = 10^{-7}$  s,  $\alpha = 10^3$  cm<sup>-1</sup>,  $\eta = 0.6$ ,  $r = 0.35$ , 组份  $x = 0.205$ , 波长  $\lambda = 1.06$   $\mu$ m,  $\epsilon = \epsilon_0[14(1-x) + 7.05x]$ , HgCdTe 层厚  $d = 15$   $\mu$ m, 探测器的工作温度为 77 K, 当光照方向垂直于偏置电流方向时, (16) 式中  $J = 0$ , 恒流工作方式可认为外电场也恒定。  $\Delta p, \Delta n$  的初始值为零, 边界条件为  $\frac{\partial \Delta p}{\partial y} \Big|_{y=0} = \frac{\partial \Delta n}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0$ , 在光照背面也有同样的边界条件。

为确保计算精度, 计算中取空间步长  $\Delta h = 0.1$   $\mu$ m, 时间步长  $\Delta t = 1$  ns。 计算结果表明, 在稳定光照射下光生载流子浓度很快达到平衡; 光生载流子浓度沿光照方向随位置的变化不大, 光照面和背面的电子浓度值相差不到 10%, 计算探测器的电阻时可以忽略这种差异。 造成这样的结果是因为

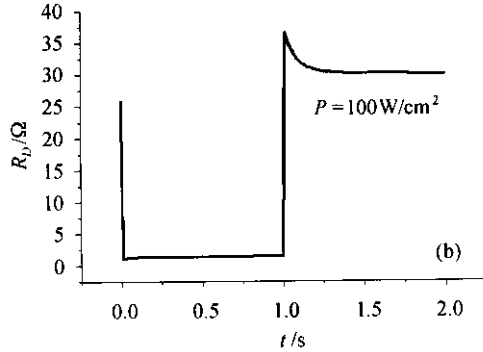
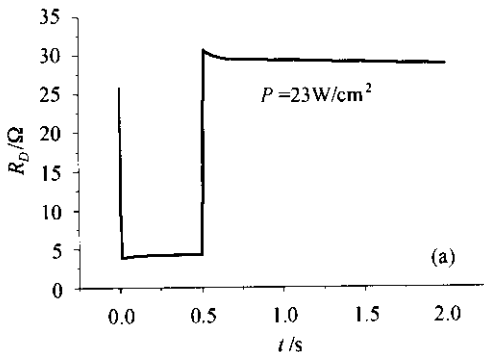


图 6 1.06  $\mu$ m 激光辐照下 PC 型 HgCdTe 探测器电阻的瞬变行为的仿真结果  
Fig. 6 Imitative results of instantaneous change behaviors of electrical resistance of the

PC-type HgCdTe detector irradiated by 1.06  $\mu$ m laser

HgCdTe 对 1.06  $\mu$ m 光的吸收系数较小 ( $10^3$  / cm<sup>-1</sup>), 表现为体吸收, 且层厚仅有 15  $\mu$ m。 激光辐照功率密度不同时, 探测器内光生载流子浓度随时间的变化如图 5 所示。

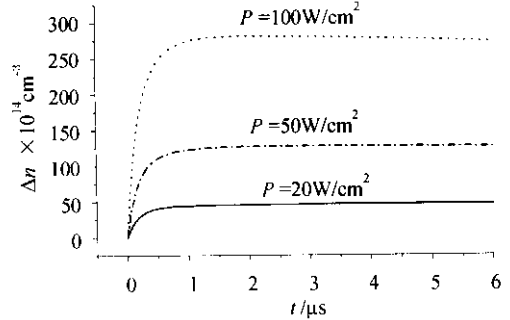


图 5 光生载流子浓度随时间的变化  
Fig. 5 Photoconductive carriers consistency change with time

### 2.4 探测器电阻的瞬变行为

在稳定光的照射下, 探测器内光生载流子浓度很快达到平衡。 当光照停止时, 探测器内虽然仍存在非平衡载流子, 但它们消失的时间是寿命量级。 在光照时间和信号采样时间为秒量级时, 光生载流子的弛豫时间可忽略, 这样使电阻的计算简化。

探测器电阻为

$$R_D = \begin{cases} \frac{l}{e[\mu_n(n_0 + \Delta n) + \mu_p(p_0 + \Delta p)]\omega d} & 0 < t \leq t_1 \\ \frac{l}{e(\mu_n n_0 + \mu_p p_0)\omega d} & t = 0, t > t_1 \end{cases}$$

$t_1$  为光照时间。 得到在 1.06  $\mu$ m 的激光辐照下  $R_D$  随光照时间的变化如图 6 所示。 激光辐照探测器时

光导效应很快产生,光生载流子浓度较大,所以电阻很快下降。激光停照时  $R_D$  没有立即恢复至激光辐照前的值,而是上升到某一值后,进入缓慢下降阶段,这是热效应引起的,激光辐照期间造成探测器温度逐渐升高,进而造成探测器暗电阻升高。

图 7 是  $1.319 \mu\text{m}$  激光辐照下另一 PC 型 HgCdTe 探测器(以下称为 2# 探测器)电阻瞬变行为的仿真结果。该探测器的组份  $x = 0.27$ , 杂质浓度  $n_d = 5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ , HgCdTe 晶片尺寸为  $1.25 \text{ mm} \times 0.25 \text{ mm} \times 0.015 \text{ mm}$ 。

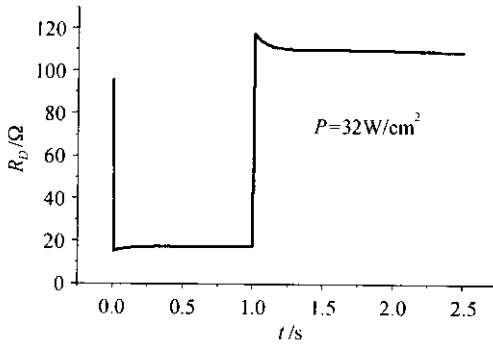


图 7  $1.319 \mu\text{m}$  激光辐照下 2# 探测器瞬变行为的仿真结果

Fig. 7 Imitative results of instantaneous change behaviors of 2# detector irradiated by  $1.319 \mu\text{m}$  laser

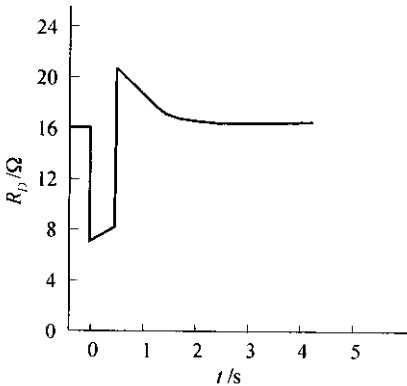


图 8  $1.06 \mu\text{m}$  激光辐照 PC 型 HgCdTe 探测器电阻的瞬变行为的实验结果

Fig. 8 Experimental result of instantaneous change behaviors of electrical resistance of the PC-type HgCdTe detector irradiated by  $1.06 \mu\text{m}$  laser

### 3 与实验结果的比较

图 8 为文献[2]中的  $1.06 \mu\text{m}$  激光辐照下 PC 型 HgCdTe 探测器电阻瞬变行为的实验结果,激光辐照功率密度为  $23 \text{ W/cm}^2$ , 辐照时间为  $0.5 \text{ s}$ 。把图 6 和图 8 进行对比可看出,探测器瞬变行为的规

律是一致的,只是数值上有些差异,这与计算中取的参量有关,特别是不知道当时实验中使用的探测器的真实尺寸,计算中取的尺寸是典型值,这对电阻值的影响很大。

图 9 是利用波长为  $1.319 \mu\text{m}$  的激光辐照 2# 探测器的实验曲线,激光辐照功率密度为  $32 \text{ W/cm}^2$ 。测量其暗电阻为  $98 \Omega$ , 而模拟计算出的暗电阻值为  $95.8 \Omega$ , 出现误差是因为存在接触电阻和引线电阻。实验中采集的是探测器上的电压信号,在恒流工作情况下电压信号与电阻是成正比例关系的。从图 7, 图 9 看出仿真结果与实验结果基本相同,证明我们设计的理论模型可以有效地仿真工程实践。

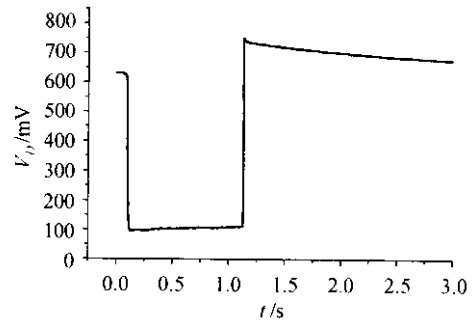


图 9  $1.319 \mu\text{m}$  激光辐照 2# 探测器瞬变行为的实验曲线

Fig. 9 Experimental result of instantaneous change behaviors of 2# detector irradiated by  $1.319 \mu\text{m}$  laser

### 参 考 文 献

- Lu Qisheng, Jiang Zhiping, Liu Zejin. The transient behavior of InSb (PV) detector irradiated by laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1991, **3**(1):102~108  
陆启生, 蒋志平, 刘泽金. 激光辐照下 InSb 探测器(PV 型)的瞬变行为[J]. *强激光与粒子束*, 1991, **3**(1):102~108
- Jiang Zhiping, Liang Tianjiao, Lu Qisheng et al.. Heat effect calculations of PC type HgCdTe detectors when irradiated by laser [J]. *Applied Laser*, 1995, **15**(4):155~156  
蒋志平, 梁天骄, 陆启生等. 激光辐照 PC 型 HgCdTe 探测器热效应的计算[J]. *应用激光*, 1995, **15**(4):155~156
- W. Scott. Electron mobility in  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  [J]. *J. Appl. Phys.*, 1972, **43**(3):1055~1062
- Chu Junhao, Wang Rongxing, Tang Dingyuan. Intrinsic carrier concentration in  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  semiconductors with nonparabolic band [J]. *Chinese J. Infrared Research*, 1983, **2**(4):241~249  
褚君浩, 王戎兴, 汤定元. 非抛物型能带半导体  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  的本征载流子浓度[J]. *红外研究*, 1983, **2**(4):241~249
- Sun Chengwei, LU Qisheng, Fan Zhengxiu et al.. Laser Irradiation Effect [M]. Beijing: National Defence Publishing Company, 2002. 340~341  
孙承绪, 陆启生, 范正修等. 激光辐照效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002. 340~341
- Lu Jinpu, Guan Zhi. Numerical Solution of Partial Differential Equations [M]. Beijing: Tsinghua University Publishing Company, 1987. 190~194  
陆金甫, 关治. 偏微分方程数值解法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1987. 190~194