

# 光导型 HgCdTe 光电探测器对双波段组合 激光辐照动态响应的数值模拟

李 莉 陆启生

(国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 采用数值方法, 考虑波段内激光的本征载流子带间跃迁吸收和波段外激光的自由载流子带内跃迁吸收的光吸收机制, 以及器件温升对载流子寿命、浓度、迁移率和光吸收系数等材料参数的影响, 通过求解粒子数平衡方程和热传导方程的联立方程组, 研究了 PC 型 HgCdTe 光电探测器在波段内和波段外双光束组合激光辐照下的动态响应过程。计算结果证实了探测器对波段内和波段外激光的电压响应方向相反; 结果显示探测器对波段外激光的反向电压响应随波段外激光功率升高迅速增大, 线性区间的波段内背景光辐照使波段外光响应迅速增大, 随波段内激光使探测器趋于饱和, 波段外光响应逐渐减小。

**关键词** 光导型 HgCdTe 光电探测器; 激光辐照效应; 波段内激光; 波段外激光

**中图分类号** TN249      **文献标识码** A      **doi**: 10.3788/AOS20082810.1952

## Numerical Simulation of Dynamic Response of PC-Type HgCdTe Detector Irradiated by in-Band and Out-of-Band Laser Beams

Li Li Lu Qisheng

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology,  
Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** By means of numerical methods, solving equations of current continuity and energy transport, the dynamic response of PC-type HgCdTe detector irradiated by in-band and out-of-band laser beams is studied in which two absorption mechanisms, including intrinsic carriers inter-band transition and free carriers inner-band transition, and dependence of material parameters, lifetime, concentration, transport rate and photoabsorption coefficient of carriers, on detector temperature are considered. It is proved that voltage response of the detector to the irradiation of out-of-band laser is opposite to that of in-band laser. The inverse voltage response to out-of-band laser increases rapidly with laser power. The voltage response to the out-of-band laser increases in the linear region for background-light illumination and decreases while in-band laser power reaches to the saturation threshold.

**Key words** PC-type HgCdTe detector; effect of laser irradiation; in-band laser; out-of-band laser

### 1 引 言

随着光电探测器在军事和民用许多领域的广泛应用, 光电探测器的激光辐照效应在理论和实验方面都得到了广泛深入的研究, 尤其是波段内激光对

光电探测器的干扰和毁伤在实验和数值计算方面<sup>[1~4]</sup>。由于武器用激光波长经常会处于探测器的响应波段以外, 因此光电探测器对响应波段以外的激光辐照效应的研究逐渐展开, 王睿<sup>[5]</sup>等人在实验

收稿日期: 2008-01-07; 收到修改稿日期: 2008-04-28

基金项目: 国防预研(2004413260101)资助课题。

作者简介: 李莉(1979-), 女, 博士研究生, 主要从事激光与物质相互作用方面的研究工作。

E-mail: lilyamon@sina.com。

导师简介: 陆启生(1942-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光与物质相互作用、非线性方面的光学研究。

E-mail: luqsheng@public.cs.hn.cn。

中首次发现了在波段外激光辐照下光电探测器的电压响应与波段内激光的正常电压响应方向相反的现象(简称对波段外激光辐照的反向电压响应现象);李修乾等<sup>[6,7]</sup>从热效应出发,对此现象进行了定性分析;之后,文献[8]又报道了光导(PC)型 CdS 光电探测器对波段内和波段外双光束组合激光辐照的动态响应的实验结果,进一步证实了波段外激光辐照的反向电压响应的结果,指出了波段内激光辐照对于增大波段外激光的吸收系数,从而降低波段外激光对探测器的破坏阈值具有重要意义。

本文对波段内和波段外双光束组合激光辐照光导型光电探测器的动态响应进行了数值模拟,以 PC 型 HgCdTe 光电探测器为样本。

## 2 物理模型

### 2.1 模型建立

模型以液氮制冷的 PC 型  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  ( $x = 0.27$ ) 光电探测器为样本,模拟其在以波段内  $3.8 \mu\text{m}$  激光为背景光辐照的过程中,开启和关闭波段外  $10.6 \mu\text{m}$  激光辐照的过程的动态响应。

液氮制冷的 PC 型 HgCdTe 光电探测器是把 HgCdTe 芯片用胶粘贴在  $\text{Al}_2\text{O}_3$  衬底上,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  粘贴在 Cu 基座上,器件被封装在液氮冷却的杜瓦瓶内,杜瓦瓶抽真空,其结构如图 1,其中 HgCdTe 芯片、前胶层、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  层、后胶层、Cu 层厚度分别为  $15 \mu\text{m}$ 、 $3 \mu\text{m}$ 、 $250 \mu\text{m}$ 、 $3 \mu\text{m}$ 、 $5000 \mu\text{m}$ 。HgCdTe 芯片两端引出信号线,与  $300 \Omega$  电阻串联,接入恒流电路中,导线边界欧姆接触。两束激光垂直辐照在探测器光敏面上,光敏面大小为  $1.25 \text{ mm} \times 0.25 \text{ mm}$ ,光敏面上激光功率密度均匀,方程作一维处理。

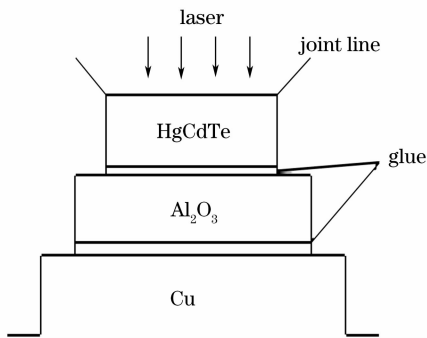


图 1 PC 型 HgCdTe 结构示意图

Fig. 1 structure sketch of PC-type HgCdTe detector

### 2.2 数学描述

模型采用粒子数平衡方程和热传导方程联立求解,电子和空穴的粒子数平衡方程:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \frac{\partial J_n}{\partial x} - (R - G), \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \frac{\partial J_p}{\partial x} - (R - G), \quad (2)$$

式中  $q$  为单位电荷,  $n, p$  分别为单位体积内的电子空穴浓度,  $J_n, J_p$  分别为电子、空穴电流密度, 包含外电场作用下电子空穴定向移动产生的漂移电流和由于载流子浓度差、温度差产生的扩散电流,  $R, G$  分别为电子空穴对的复合和产生率。方程中考虑了在外电场作用下, 电子和空穴定向移动产生电流导致单位体积内电子和空穴浓度瞬态变化的过程, 以及由于光吸收导致电子空穴对产生和复合的瞬态非平衡过程。

热传导方程:

$$C_j \rho_j \frac{\partial T_j}{\partial t} = -\kappa_j \frac{\partial^2 T_j}{\partial x^2} - W_j, \quad (3)$$

式中下标  $j$  分别对应探测器、前胶层、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、后胶层、Cu,  $T_j$  为温度,  $W_j$  为单位时间、单位体积内的热能损失率,  $C_j, \rho_j, \kappa_j$  分别为热容、质量密度、热导率。(3)式考虑了由于热传导导致的各层能量的变化, 以及由于光吸收、热载流子弛豫和外加电场等因素引起的各层温度的变化。

### 2.3 载流子的光吸收和热载流子

探测器对不同波段、不同功率密度激光的响应是由半导体材料对激光的吸收决定的, 半导体的光吸收有电子吸收、晶格吸收、激子吸收、等离子体振子吸收等多种机制<sup>[9,10]</sup>。对于波段内激光, 单光子能量  $E_{\text{opt\_in}}$  大于材料的禁带宽度  $E_g$ , 其吸收主要考虑载流子的带间跃迁吸收。HgCdTe 属于直接带间跃迁的半导体, 电子吸收激光能量, 从价带跃迁到导带, 产生电子空穴对, 在外电场作用下电子和空穴定向运动形成电流。对于波段外激光, 由于其单光子能量小于禁带宽度, 主要考虑自由载流子的带内跃迁吸收, 自由载流子吸收激光能量向带内高能态跃迁, 为了保持波矢平衡, 一般伴随有其他散射机制发生。HgCdTe 材料在低于室温时, 其自由载流子吸收主要伴随极化光学声子散射<sup>[11]</sup>。

通常情况下, 不论是波段内光吸收还是波段外光吸收都会产生热载流子。波段内激光单光子能量一般远大于材料的禁带宽度, 电子吸收激光能量跃迁至高于导带底能量的能级上, 产生载流子温度高于晶格温度的热载流子; 电子吸收波段外激光, 在导带的低能态跃迁至高能态也会产生热载流子。热载流子的弛豫过程往往伴随晶格的温升, 即电子弛豫至导带底, 同时能量变成了晶格振动能。但热载流

子的带内弛豫时间很短,一般在  $10^{-10} \sim 10^{-12}$  量级,远远低于带间能量弛豫时间,在计算中近似认为热载流子带内弛豫过程瞬间完成,其高于晶格能量的部分直接转化为晶格热能。

## 2.4 计算参数与晶格温度的关系

探测器的响应速度以及电压响应幅值是由器件内的自由载流子寿命、浓度及迁移率等参数决定的,而这些参数值都直接或间接与晶格温度有关。非平衡载流子复合,热载流子弛豫、外加电场以及各层之间的热传导等都会使半导体晶格的温度发生变化。

当  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  中  $x > 0.23$  时,经由复合中心的 S-R 复合成为主要复合机制<sup>[7]</sup>,复合率为

$$R_{\text{S-R}} = \frac{np - n_0 p_0}{\tau_n(n + n_0) + \tau_p(p + p_0)}, \quad (4)$$

式中  $\tau_n$  和  $\tau_p$  分别为电子与空穴复合寿命,低温下  $\tau_n, \tau_p$  与温度基本无关,中温下  $\propto \exp[-(E_g -$

$E_i)/k_B T]$ 。复合率对晶格温升的贡献:  $W_{\text{S-R}} = E_g \cdot R_{\text{S-R}}$ 。波段内激光产生的热载流子弛豫能量为

$$W_{\text{in}} = (E_{\text{opt\_in}} - E_g) \cdot G, \quad (5)$$

主要是高于禁带宽度的光子能量通过弛豫转化为晶格温升。波段外激光产生的热载流子弛豫能量  $W_{\text{out}}$  近似认为其吸收光能瞬间弛豫转换为晶格温升:

$$W_{\text{out}} = \alpha_{\text{out}} P_{\text{out}} \exp(-\alpha_{\text{out}} y). \quad (6)$$

式中  $\alpha_{\text{out}}$  为波段外激光吸收系数,  $P_{\text{out}}$  为波段外激光功率密度。外加电场对晶格温升也有贡献,但相比光吸收的温升贡献小得多,其产生的热载流子弛豫能量可以近似为

$$W_{\text{efield}} = qV_D/l, \quad (7)$$

式中  $V_D$  为探测器端电压,  $l$  为探测器沿电场方向长度。

反过来晶格温度的变化对材料的参数也会产生影响。其中本征载流子浓度、波段内激光吸收系数和载流子迁移率分别为<sup>[11]</sup>

$$n_i = (1 + 3.25k_B T/E_g)9.56 \cdot 10^{14} E_g^{3/2} T^{3/2} [1 + 1.9E_g^{3/4} \exp(E_g/2k_B T)]^{-1}, \quad (8)$$

$$\alpha_n = [-65 + 1.88T + (8694 - 10.31T)x] \exp[-(-1 + 0.083T + (21 - 0.13T)x)(E_{\text{opt\_in}} - E_g)]^{1/2}, \quad (9)$$

$$\mu_n = 2.84 \times 10^9 \times T^{-2.02} \quad (10)$$

波段外激光吸收系数受自由载流子浓度和载流子迁移率的影响<sup>[11]</sup>:

$$\alpha_{\text{out}} = \frac{\lambda^2 n(T) q \hbar}{137 \pi c^2 n_r} \left( \frac{1}{m_n^2(T) \mu_n(T)} + \frac{1}{m_p^2(T) \mu_p(T)} \right) \quad (11)$$

式中  $c$  为光速,  $n_r$  为折射率,  $\hbar$  为普朗克常数。

由于激光辐照功率密度较大,晶格的温升不可避免,而晶格温度变化与器件内各计算参量之间相互影响,互相耦合,最终计算探测器的宏观电压输出:

$$\bar{R}_D = \frac{l}{\int q(n\mu_n + p\mu_p) \omega dx}, \quad (12)$$

式中  $\omega$  为探测器截面。

## 3 计算结果和讨论

考虑到  $\text{HgCdTe}$  探测器在 350 K 左右温度时,会产生 Hg 析出现象,  $\text{HgCdTe}$  晶体结构破坏,使得探测性能会产生不可恢复性的改变,所以计算以 350 K 作为毁伤阈值<sup>[4]</sup>。计算探测器动态响应都是考虑在低于毁伤阈值情况下的结果。

计算模拟把探测器连接在电路中且没有激光辐照作为初始和结束状态,波段内  $3.8 \mu\text{m}$  激光作为背景光,在背景光辐照过程中,开启和关闭波段外  $10.6 \mu\text{m}$  激光。本文主要分析探测器对不同功率密度波段外激光的响应规律和不同功率密度的波段内背景光辐

照对于探测器对波段外激光响应的规律。

### 3.1 不同波段外激光功率密度辐照下的结果

图 2(a)、(b)、(c) 分别为波段内  $3.8 \mu\text{m}$  背景激光功率密度为  $0.5 \text{ W/cm}^2$  不变,  $0 \sim 600 \text{ W/cm}^2$  不同功率密度的波段外  $10.6 \mu\text{m}$  激光辐照时探测器端压响应曲线、探测器表面温度随时间变化曲线、探测器表层载流子浓度随时间变化曲线。

图 2(a) 与文献[4]中实验结果一致:波段内背景光辐照时探测器正常光响应电压下降;在背景光辐照过程中开启波段外激光瞬间,电压响应瞬间上升;双光束辐照过程中,探测器端压缓慢上升;波段外激光停止瞬间,电压响应瞬间下降;波段外激光停止后,由于温升引起的附加电阻尚存在,使得探测器对波段内激光的响应远高于辐照前;激光停照后,电压响应随温度下降逐渐恢复。

由图 2(b) 可见,探测器在波段外激光辐照过程中温升明显,由于波段外激光的自由载流子带内跃迁吸收产生的热载流子弛豫时间很短,所以波段外激光开始辐照瞬间,吸收能量瞬间增大,产生温度的跳变,辐照过程中热电子能量不断转化为晶格能量,

热激发自由载流子浓度增大,波段外激光吸收系数也随之增大,使晶格温度上升速度逐渐增大。

由图 2(c)可见,自由载流子浓度的变化主要由波段内激光的带间跃迁吸收引起,而波段外激光辐照,对自由载流子浓度变化没有贡献。随器件温度

的升高,其热激发自由载流子浓度会增加,对应图中波段外辐照时间内的小尖峰,但相对波段内激光带间跃迁吸收产生的自由载流子浓度变化要小得多,在温度不是很高的情况下,可认为自由载流子浓度基本不变。

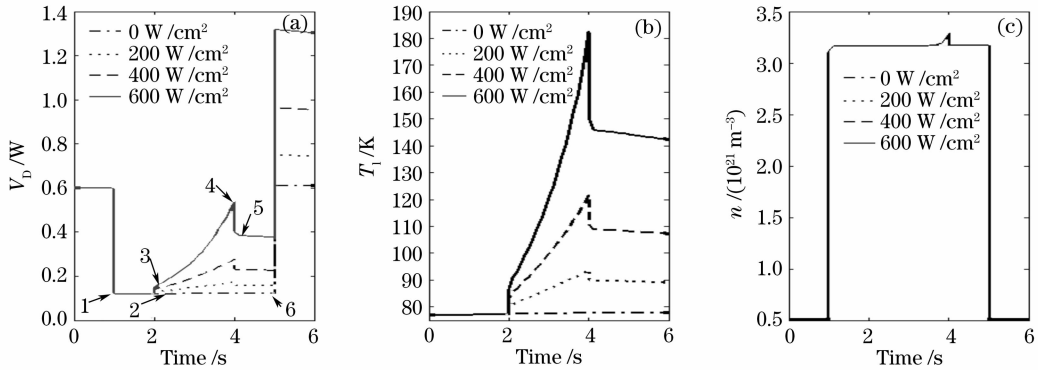


图 2 波段外不同激光功率密度辐照下探测器端压(a)、温度(b)和载流子浓度(c)的响应曲线  
Fig. 2 Voltage (a), temperature (b) and free carrier concentration (c) response at different out-of-band laser power densities

通过数值模拟还可得到不同波段外激光功率密度下,在波段外激光开启和关闭的瞬间以及双光束辐照过程中,探测器的端压变化  $\Delta V$ 、温度变化  $\Delta T$ 、载流子浓度变化  $\Delta n$  随波段外激光功率密度变化曲线,如图 3。在波段内背景光辐照功率密度不变的情况下,随波段外激光功率密度的增大,产生与正常探测信号电压相反的响应电压越大,也就是波段外激光的干扰信号越强;而且探测器的温度变化

也不是线性增大,而是增大的速度逐渐增加,也就是高功率密度的波段外激光使器件温升速度更快;自由载流子浓度的突变是与探测器的温度有关的,波段外激光辐照没有光激发的自由载流子产生,其载流子浓度变化主要是由器件温升导致的热激发引起的,因此在较低功率密度下,载流子浓度随功率密度近线性变化,但是由于较高功率密度波段外激光使器件温度变化较大,故自由载流子浓度也快速升高。

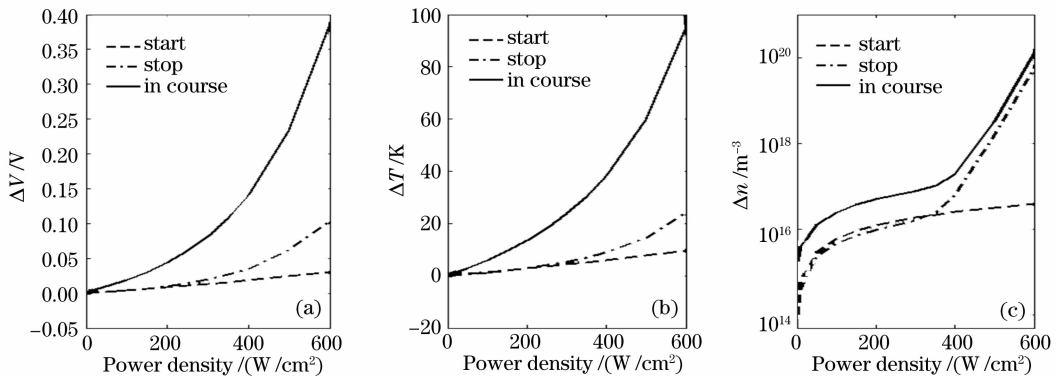


图 3 波段外激光开启和关闭的瞬间以及双光束辐照过程中,探测器的端压变化(a)、温度变化(b)、载流子浓度变化(c)曲线

Fig. 3 Voltage (a), temperature changes of (b) and free carrier concentration (c) at the moment out-of-band laser on and off and in the course of two lasers beams irradiation

值得注意的是,当外激光功率密度超过一定值,或者波段外激光辐照超过一定时间时,会出现探测器温度快速上升,而探测器端压响应突然下降的现象,如图 4 为波段外激光功率密度为  $670 \text{ W/cm}^2$  时探测器端压、温度和载流子浓度响应曲线。由计

算分析可知,探测器端压在双光束辐照过程中的突变是由于器件的电导率随温度变化在  $300\text{K}$  左右有一拐点造成的。

### 3.2 不同功率密度波段内背景激光辐照下的结果

图 5 中(a)、(b)、(c)分别为波段外  $10.6 \mu\text{m}$  激

光功率密度  $200 \text{ W/cm}^2$  不变,而波段内  $3.8 \mu\text{m}$  背景光功率密度为  $0\sim 50 \text{ W/cm}^2$  时,探测器端压响应

曲线、探测器表面温度随时间变化曲线、探测器表层载流子浓度随时间变化曲线。

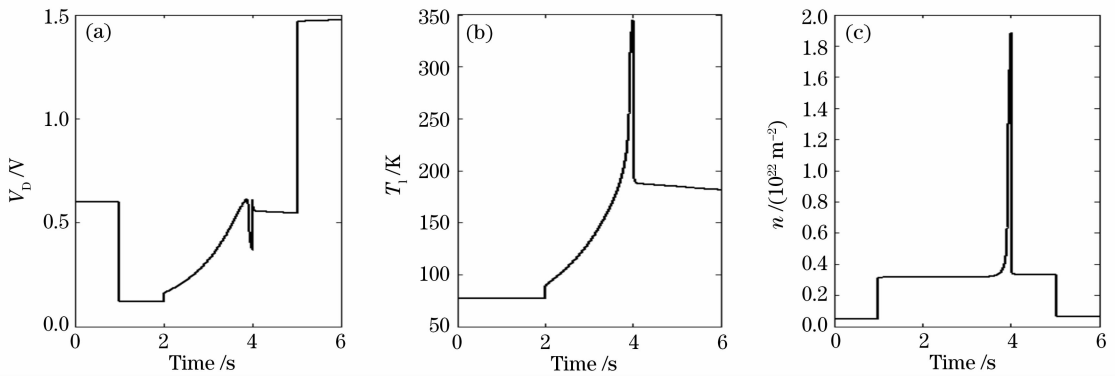


图 4 波段外激光功率密度为  $670 \text{ W/cm}^2$  时探测器端压、温度和载流子浓度响应曲线

Fig. 4 Voltage (a), temperature (b) and free carrier concentration (c) response for  $670 \text{ W/cm}^2$  out-of-band laser irradiation

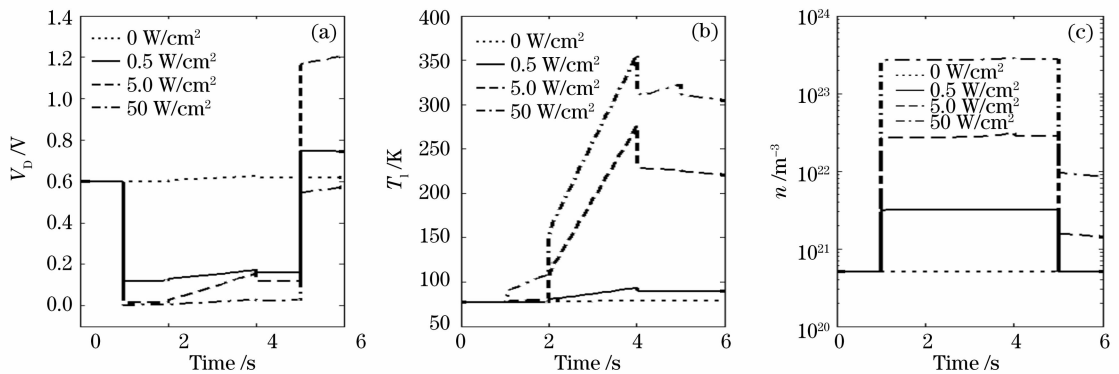


图 5 波段内不同背景激光功率密度时探测器端压(a)、温度(b)和载流子浓度(c)曲线

Fig5 Voltage (a), temperature (b) and free carrier concentration (c) at different in-band laser power densities

图 6 为图 2 中 1~6 时间点的探测器端压、器件表面温度和载流子浓度随波段内激光功率密度变化曲线,1~6 时间点分别为波段内激光开始瞬间、波

段内激光辐照 1 s 后、波段外激光开始瞬间、双光束辐照 2 s 后、波段外激光停止瞬间、波段内激光辐照 1 s 后。

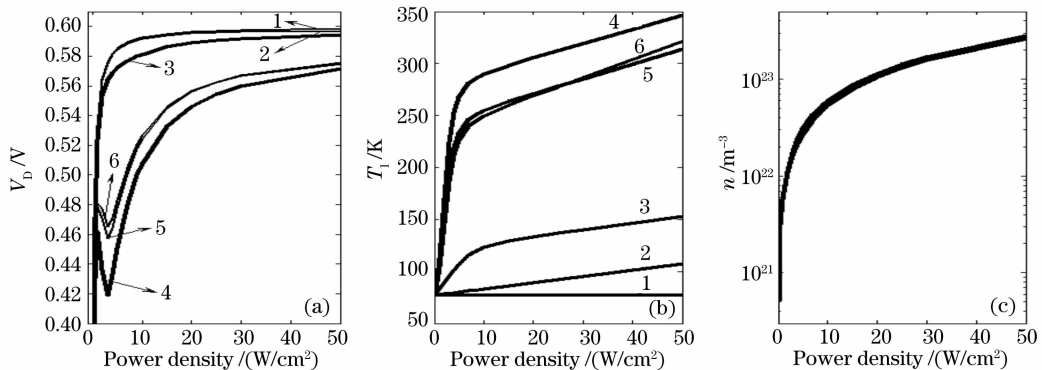


图 6 对应图 2 中 6 个时间节点探测器的端压(a)、温度(b)和载流子浓度(c)曲线

Fig. 6 Voltage (a), temperature (b) and free carrier concentration (c) at the moments corresponding to the 6 points in Fig. 2

图 6(a)中点 1 的曲线是熟知的波段内激光响应曲线,可见波段内激光功率在  $2 \text{ W/cm}^2$  附近探测

器对波段内激光的电压响应达到饱和,其余时间点的电压响应与波段内响应曲线趋势基本一致。点

2、3 的曲线在点 1 曲线的基础上有一个小的幅值变化，而点 4、5、6 的曲线在波段内激光的饱和和阈值附近偏离曲线 1 较大，且产生响应电压值的突然减小，也就是反向偏压的突然增大现象。

图 6(a) 的电压响应曲线主要由图 6(b), (c) 的温度和载流子浓度响应曲线决定。图 6(b) 中，在只有波段内激光辐照下的温度(点 1、2 的曲线)呈线性变化，在加入波段外激光辐照后(点 3、4、5、6 曲线)，当波段内背景光低于其饱和和阈值时，温度上升速度很快，而波段内背景光超过其饱和和阈值后，温度上升速度减慢。图 6(c) 中不同功率密度波段内背景光辐照下，1~6 时间点的载流子浓度之间差别不大，主要是带间跃迁产生的光激发自由载流子，各曲线之间的差值主要由器件温度变化引起的热激发载流

子浓度变化。

图 7 是波段外 10.6  $\mu\text{m}$  激光开始和停止辐照瞬间以及辐照过程中，探测器端压、器件表面温度和载流子浓度的变化幅度值随波段内 3.8  $\mu\text{m}$  激光功率密度变化曲线。可见随波段内背景激光功率密度的增大，探测器对波段外激光的响应的电压变化幅度值先增大后减小，而温度则先快速增大后缓慢增大，载流子浓度变化近乎线性。电压变化幅值和温度变化幅值的拐点均出现在波段内 3.8  $\mu\text{m}$  激光的 4~5  $\text{W}/\text{cm}^2$  附近，也就是探测器对波段内激光响应的饱和和阈值附近，此结果与文献[8]中实验结果一致，即线性工作区间内的波段内激光辐照使探测器对波段外激光的吸收明显增强。

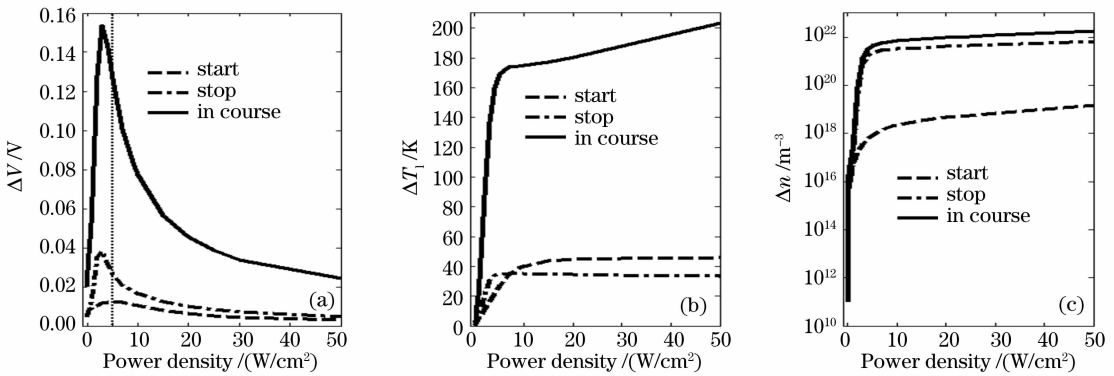


图 7 波段外激光开启和关闭的瞬间以及双光束辐照过程中，探测器的端压变化(a)、温度变化(b)、载流子浓度变化(c)曲线

Fig. 7 Change of voltage (a), temperature (b) and free carrier concentration (c) at the moment out-of-band laser on and off and in the course of two lasers beam irradiation

由图 6、7 可知，当波段外激光功率密度一定，波段内激光功率密度在使探测器开始达到饱和时会产生最大的信号干扰，即产生与正常探测信号电压相反的反应电压。对于温度响应，波段内激光功率密度大于拐点功率后，其功率密度的增大不能增加探测器的温升速度。

### 4 小 结

采用载流子输运的漂移扩散模型和热传导模型相结合，可半定量模拟光导型探测器在双波段组合激光辐照下的动态响应过程，为研究双波段组合激光对光电探测器的高效毁伤提供了理论指导。计算模拟结果不仅证实了实验中探测器对波段外激光的反向电压响应现象，从器件温度和载流子浓度变化的角度解释了探测器对波段外激光响应是由于自由载流子带内跃迁吸收产生热效应的结果。通过计算

探测器对不同功率密度波段内和波段外激光组合辐照的响应，得到了探测器对不同功率密度波段外激光辐照的响应规律，以及不同功率密度波段内背景激光辐照探测器对波段外激光响应的的影响。数值模拟得到的探测器响应规律与实验结果吻合，只是在数值上还有一定差异，这是由于计算模拟中忽略了实际器件的接触电阻、引线电阻和噪声等影响。

### 参 考 文 献

- 1 Cheng Xiangai, Lu Qisheng, Ma Liqin *et al.*. Experimental study of HgCdTe(PV) detector irradiated by CW 1.319  $\mu\text{m}$  laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(5): 622~626 (in Chinese) 程湘爱, 陆启生, 马丽芹 等. 1.319  $\mu\text{m}$  连续波激光辐照 PV 型 HgCdTe 探测器的实验研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(5): 622~626
- 2 Qiang Xiwen, Liu Feng, Zhang Jianquan *et al.*. An numerical simulation of the melt-threshold of InSb induced by CW laser beams[J]. *Chin. J. Laser*, 2000, **27**(4): 372~376 (in Chinese) 强希文, 刘峰, 张健泉 等. 连续波激光辐照半导体 InSb 材料的熔融破坏[J]. *中国激光*, 2000, **27**(4): 372~376

- 3 Ma Liqin, Lu Qisheng, Du Shaojun *et al.*. Imitation of the instantaneous change behaviors of photoconductive detectors[J]. *Chin. J. Laser*, 2004, **31**(3): 342~346 (in Chinese)  
马丽芹, 陆启生, 杜少军等. 光导型光电探测器瞬变行为的仿真[J]. *中国激光*, 2004, **31**(3): 342~346
- 4 Duan Xiaofeng, Niu Yanxiong, Zhang Chu. Calculation of laser irradiation effect and analysis of laser-induced damage threshold in semiconductor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1057~1061 (in Chinese)  
段晓锋, 牛燕雄, 张 雏. 半导体材料的激光辐照效应计算和损伤阈值分析[J]. *光学学报*, 2004, **24**(8): 1057~1061
- 5 Wang Rui, Si Lei, Lu Qisheng *et al.*. The experiment study on HgCdTe(PC type) detector system irradiated by laser out of response waveband[J]. *Laser & Infrared*, 2003, **33**(5): 335~338 (in Chinese)  
王 睿, 司 磊, 陆启生等. 响应波段外激光辐照 PC HgCdTe 探测器系统实验研究[J]. *激光与红外*, 2003, **33**(5): 335~338
- 6 Li Xiujian, Cheng Xiangai, Wang Rui *et al.*. Experimental study on the response of HgCdTe(PC) detector irradiated by laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(1): 40~44 (in Chinese)  
李修乾, 程湘爱, 王 睿等. 激光辐照 PC 型 HgCdTe 探测器的实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(1): 40~44
- 7 Li Xiujian, Cheng Xiangai, Wang Rui *et al.*. Investigation of thermal effect of HgCdTe detector with irradiation by off-band CW CO<sub>2</sub> laser[J]. *Chin. J. Laser*, 2003, **30**(12): 1070~1074 (in Chinese)  
李修乾, 程湘爱, 王 睿等. 波段外 CW CO<sub>2</sub> 激光辐照 HgCdTe 探测器热效应研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(12): 1070~1074
- 8 Li Li, Lu Qisheng, Jiang Houman *et al.*. Photoconduction-Type CdS Detector Irradiated by Two Laser Beams[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 85~89 (in Chinese)  
李 莉, 陆启生, 江厚满等. 双光束组合激光辐照光导型 CdS 光电探测器的实验研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1): 85~89
- 9 Jiang Zhiping, Liang Tianjiao, Lu Qisheng, *et al.*. Heat effect calculations of PC type HgCdTe detector irradiated by CW 1.319 $\mu$ m laser[J]. *Applied Laser*, 1995, **15**(4): 155~156 (in Chinese)  
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
- 10 Sun Chengwei, Lu Qisheng, Fan Zhengxiu *et al.*. *Effect of Laser Irradiation* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002, 341~360 (in Chinese)  
孙承伟, 陆启生, 范正修等. *激光辐照效应* [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002, 341~360
- 11 Chu Junhao. *Narrow-Bandgap Semiconductor Physics* [M]. Beijing: Science Press, 2005 (in Chinese)  
褚君浩. *窄禁带半导体物理学* [M]. 北京: 科学出版社, 2005