

## 强光辐照下面阵探测器响应特性全流程仿真框架研究

许中杰<sup>1,2,3,4,5</sup>, 程湘爱<sup>1,2,3,4</sup>, 江天<sup>1,2,3,4</sup>, 苗锡奎<sup>6</sup>, 胡伟达<sup>5</sup>, 陈效双<sup>5</sup>

- (1. 国防科技大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073;
2. 湖南省高能激光技术重点实验室, 湖南 长沙 410073;
3. 湖南省高功率激光协同创新中心, 湖南 长沙 410073;
4. 高性能计算国家重点实验室, 湖南 长沙 410073;
5. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;
6. 光电对抗测试评估技术重点实验室, 河南 洛阳 471003)

**摘要:** 光电探测器的强光辐照效应是受到较多关注的物理问题之一。文中以红外面阵探测器为例, 介绍了一种光电探测器强光响应特性的全流程仿真框架。框架包括光在光学系统中的传播、焦平面上的热传导和光电输运, 以及后处理电路对光电流的处理及图像输出等多个物理过程。笔者试图通过接口的设计减小各个过程之间的耦合, 以便适应不同物理过程的不同模型。文中给出了一些简单的仿真结果, 重现了在之前的研究中发现的非常规响应现象。

**关键词:** 光电探测器; 强光; 响应特性; 仿真框架

**中图分类号:** TN977    **文献标志码:** A    **DOI:** 10.3788/IRLA201746.S106010

## Whole process simulation framework of the illumination effects of intense light on the flat panel detectors

Xu Zhongjie<sup>1,2,3,4,5</sup>, Cheng Xiang'ai<sup>1,2,3,4</sup>, Jiang Tian<sup>1,2,3,4</sup>, Miao Xikui<sup>6</sup>, Hu Weida<sup>5</sup>, Chen Xiaoshuang<sup>5</sup>

- (1. College of Opto-Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. Hunan Provincial Key Laboratory of High Energy Laser Technology, Changsha 410073, China;
3. Hunan Provincial Collaborative Innovation Center of High Power Fiber Laser, Changsha 410073, China;
4. State Key Laboratory of High Performance Computing, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
5. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
6. Key Laboratory of Electro-Optical Countermeasures Test & Evaluation Technology, Luoyang 471003, China)

**Abstract:** The illumination effects of intense light on detectors are attracting wide interests. A whole process simulation framework of the illumination effects was introduced. The framework was consisted of four component, including the propagation of light, the heat transfer on FPA, the transport process of photodiode and the effects of post process circuit. We are attempting to reduce the coupling between each component through proper interface design, which leads to better adaptability for various physical models. A simple example with this framework was calculated. An analytic model including only diffracting effects was considered, and the differences of Gaussian and parallel light were discussed. In the heat

收稿日期: 2017-06-21; 修订日期: 2017-07-25

基金项目: 重点实验室开放基金(GKCP2016005)

作者简介: 许中杰(1982-), 男, 博士, 主要从事激光与物质相互作用方面的研究。Email: zhongjie\_xu@qq.com

transfer component, the Fourier's Law was introduced, and a simplified heat sink configuration was used. In the transport process component, the drift-diffusion equation including temperature effects was used to calculate the transport effects of photo diodes. The influences of neighboring pixels were neglected. In the post process circuit component, the Correlated Double Sample (CDS) configuration was used. The results show good agreement with previous work.

**Key words:** detector; intense light; illumination; simulation framework

## 0 引言

光电探测器在强光辐照下的响应特性是相关领域较受关注的课题之一。过去几十年来,人们针对可见光及红外探测器的响应特性开展了大量研究工作。发现并解释了包括光学串扰<sup>[1-4]</sup>、次光斑<sup>[5]</sup>、热效应以及过饱和<sup>[6-8]</sup>等诸多非常规响应现象,获得了较大的成功。

导致探测器出现各种非常规响应现象的原因来自于强光与光电探测器相互作用的不同过程,例如次光斑效应主要由于狭缝侧壁的散射导致<sup>[5]</sup>;热效应主要由于强光聚焦加热焦平面产生;过饱和则可能由热效应和后处理电路的非线性响应导致<sup>[6-7]</sup>;而广义上的光学串扰则可由光学传播、载流子输运和后处理电路等多个过程产生<sup>[1-2]</sup>。目前,针对单一原因的探测器响应机理研究较为充分。但是,涉及强光辐照光电探测器全流程的研究工作并不多见。开展这方面的研究,有利于定量分析不同机制对于光电探测器件非常规响应的影响,提取其中的决定性因素。文中尝试从光电探测器整体的角度搭建全流程仿真的整体框架。整个框架包括光学传播、热传导、载流子输运和后处理电路等多个组成模块。文中在一定的简化假设下,以典型 HgCdTe 红外面阵探测器为例,建立了各个模块的简单模型,通过仿真得到了各个过程的光强、温度和电流密度分布数据,并给出了最终的输出图像。

受限于模型的精度,仿真数据与实际情况存在一定差异,但是各个模块之间的接口不依赖于具体的物理模型,在后续工作中可以在该框架下对每个模块开展深入的研究,以获得更为准确的仿真数据。

## 1 模型分析

如图 1 所示,功率密度为  $P_0$  的入射光经光学系

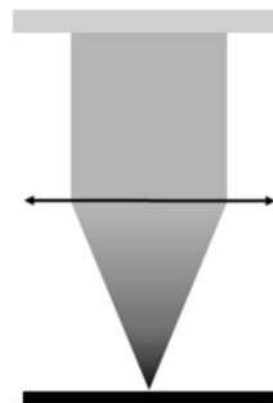


图 1 问题模型

Fig.1 Basic model

统聚焦后入射到焦平面上,形成一个光强分布  $P(x, y)$ , 其中  $(x, y)$  为面阵探测器上的坐标。由于激光的热效应,焦平面不同位置会有一定的温升,形成一个温度分布  $T(x, y)$ 。在光电二极管材料参数确定的情况下,光电二极管产生的光电流为:

$$I(x, y) = J(x, y) \cdot S = J(P, T, V_a) \cdot S \quad (1)$$

式中:  $J(x, y)$  为光敏元产生的光电流密度;  $S$  为光敏元面积;  $V_a$  为光电二极管的偏置电压,一般光电二极管处于零偏状态。问题的核心是求解不同位置处的光强  $P(x, y)$ 、温度  $T(x, y)$ , 并在此基础上求解光电流密度  $J(x, y)$ 。得到光电流密度  $J(x, y)$  后,需要将其作为后处理电路的输入条件,分析光电流信号经过处理后的输出信号。因此,可以将整个问题分为四个模块:(1) 强光在光学系统中的传播过程仿真,给出焦平面上的光强分布  $P(x, y)$ ;(2) 由光强分布和焦平面结构计算焦平面上的温度分布  $T(x, y)$ ;(3) 由光强分布和温度分布,结合不同层次的光电输运模型,计算得到焦平面上各个光敏元的光电流密度;(4) 由光电流密度分布,结合后处理电路的具体形式,得到探测器的实际输出图像。不同的模块可以采用不同的物理模型展开处理,而对后续模块的仿真不会造成明

显的影响。以光学传播过程为例,文中采用了基于菲涅尔衍射积分公式的数值计算模型。如果要考虑散射的影响,可简单将该模型替换为考虑散射的光线追迹问题进行处理,而不需要改动后续模块。

## 2 焦平面上的光强分布

简单起见,文中仅考虑光的衍射带来的光学响应。孔径光阑的衍射是成像光学系统中衍射的主要来源。当平行光束沿光轴满瞳入射时,在焦平面上接收到的孔径光阑的衍射可以等效为圆形孔径的夫琅和费衍射。由参考文献[9],可以得到距离像点较远处的衍射辐照度的平均渐近表达式为:

$$P_{\text{diff}}(r) = \frac{TP_0 R_{\text{ent}} f \lambda}{2\pi^2 r^3} \left( r \gg \frac{f \lambda}{2\pi R_{\text{ent}}} \right) \quad (2)$$

式中: $r$ 为焦平面上的点到焦点的距离; $T$ 为光学系统的透过率; $P_0$ 为入瞳处平均入射功率密度; $R_{\text{ent}}$ 为入瞳半径; $f$ 为等效焦距; $\lambda$ 为入射光的波长, $k=2\pi/\lambda$ 。上式说明,孔径光阑的衍射在焦平面上形成圆形的饱和区域,在距离像点较远处的衍射辐照度与该点到像点距离  $r$  的 3 次方成反比。

实际场景中,入射光多为高斯光,因此需要将平行光的结果推广到高斯光的情形。高斯光束的夫琅禾费衍射场中任意一点  $p$  的复振幅可以表示为:

$$U(p) = \iint_S U(\xi, \eta) \exp(-ik(\xi x + \eta y)/z) d\xi d\eta \quad (3)$$

式中: $S$ 代表在孔径光阑的范围内积分,而

$$U(\xi, \eta) = A e^{-\frac{(\xi^2 + \eta^2)/\omega_0^2}{\omega^2(z_0)}} e^{-ik(\xi^2 + \eta^2)/2r(z_0)} \quad (4)$$

式中: $\omega_0$ 是聚焦前高斯光束的束腰半径; $z_0$ 是高斯光束束腰到孔径光阑的距离; $k$ 为激光波矢。在一般情况下, $z_0 \ll k\omega_0^2$ ,将该条件代入公式(4),近似有:

$$U(\xi, \eta) = A \exp[-(\xi^2 + \eta^2)/\omega_0^2] \quad (5)$$

于是公式(3)积分变为:

$$U(p) = \iint_S e^{-\frac{(\xi^2 + \eta^2)/\omega_0^2}{\omega^2(z_0)}} e^{-ik(\xi x + \eta y)/z} d\xi d\eta \quad (6)$$

高斯光的夫琅和费衍射与平行光相比仅多出一个指数项,当高斯光的束腰  $\omega_0$  趋于无穷大时,积分趋于平行光的结果。

公式(6)的积分只有级数解,为了与平行光的情形作比较,对公式(6)进行数值积分,积分时考虑两

种情况,一种情况下高斯光束的束腰直径与孔径光阑相同,即  $\omega_0=R_{\text{ent}}$ ;另一种情况下高斯光束的束腰直径远大于孔径光阑,取  $\omega_0=10R_{\text{ent}}$ ,可以得到如图 2 所示的光强径向分布图。图中纵坐标为光强,横坐标为焦平面上的点到焦点的距离。在半对数坐标系下三条曲线基本重合,从放大的图中可以看到  $\omega_0=10R_{\text{ent}}$  时的光强分布与平行光差异很小,而  $\omega_0=R_{\text{ent}}$  时则有一定差异,图 3 画出了  $\omega_0=R_{\text{ent}}$  时光强与平行光情况下的比值,可以看到在光强的峰值位置附近,两者的比值约为 0.95。两者比值在衍射极小值附近的发散情况来源于数值计算的误差。

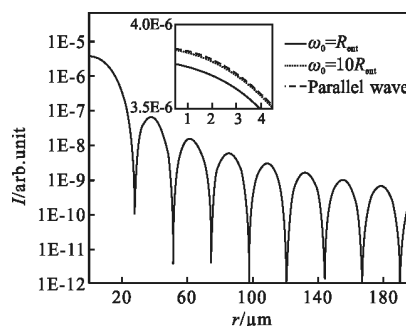


图 2 光强径向分布图

Fig.2 Radial distribution of light intensity

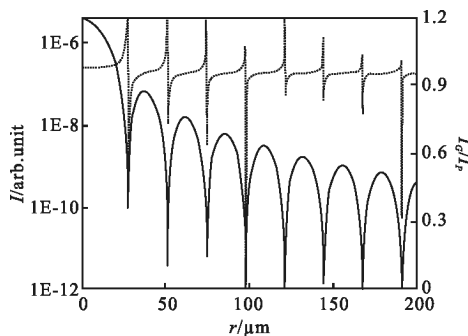


图 3  $\omega_0=R_{\text{ent}}$  时光强与平行光情况下的比值

Fig.3 Light intensity ratio between Gaussian wave and parallel light while  $\omega_0=R_{\text{ent}}$

需要说明的是,上述对高斯光的分析假设了  $z_0 \ll k\omega_0^2$  的前提条件,如果激光的传输距离较远,则需要重新分析。另外,文中没有考虑光学元件的散射效应和机械部件的衍射散射效应。如果加入上述效应,可以得到更精确的焦平面光强分布和输出图像。为此,可将此小节的问题用光线追迹方法进行仿真。这种物理模型的替换不会对后续模块的处理产生影响。

### 3 焦平面上的温度分布

值得指出的是, 由于整个焦平面上主要的功率密度集中在主光斑内, 高阶衍射的光虽然可以产生光响应, 但是其热效应基本可忽略, 在计算入射光的热效应时可只考虑高斯光斑的影响。

红外探测器的焦平面与热沉相连, 系统通过斯特林制冷或液氮制冷维持焦面的温度。图 4 为简化的探测器散热结构图。其中最上层是 HgCdTe 结构的光电二极管, 厚度设为  $10\ \mu\text{m}$ , 其下方为 Si 基底和处理电路, 厚度设为  $5\ \text{mm}$ , 随后是 Cu 制热沉, 厚度设为  $2\ \text{cm}$ , 热沉与制冷机相连, 假设入射光的总功率不会很高(确保焦点处的材料不会损伤), 所以整体散热量不大, 可以认为热沉底部保持制冷机的设定温度不变。此处假设系统采用斯特林制冷, 热沉底部温度保持  $120\ \text{K}$ 。假设光敏元表面的反射率为  $10\%$ , 其它激光能量最后均转化为热。将模型代入标准热传导方程中可以得到在不同入瞳功率密度下探测器的温升情况。

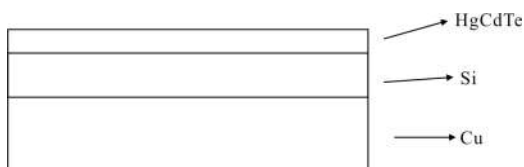


图 4 探测器散热结构

Fig.4 Configuration of heat sink

此处采用的热传导方程为:

$$C_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T + Q \quad (7)$$

式中:  $C_p$ ,  $\rho$  和  $k$  分别为定压比热容, 密度和热传导系数, 对于不同的材料, 具体值如表 1 所示; 而  $Q$  为热

表 1 材料传热学参数

Tab.1 Heat transfer parameters of considered materials

	$C_p/\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$\rho/\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3}$	$k/\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
HgCdTe	350	7.34	50
Si	703	2.33	628
Cu	385	9.01	410

源项, 由材料对激光的吸收而造成。此处采用线性吸

收模型, 热源项可以表示为:

$$Q = \alpha I_0(x, y) e^{-\alpha z} \quad (8)$$

式中:  $\alpha$  是材料对光的吸收系数;  $I_0$  是焦平面表面的光强。

图 5 所示为入瞳功率密度为  $100\ \text{mW}/\text{cm}^2$  时距离焦点不同位置处光电二极管的温度随时间变化情况。其中横坐标为对数坐标。可以看到, 焦平面处各点的温度在较短的时间内就达到了稳定, 距离焦点处  $200\ \mu\text{m}$  左右的温升已经基本可忽略。图 6 是稳定后焦平面温度随到焦点处距离  $r$  的变化曲线。可以看到, 入瞳功率密度从  $100\ \text{mW}/\text{cm}^2$  提高至  $400\ \text{mW}/\text{cm}^2$ , 焦点处的温度从  $170\ \text{K}$  提高至  $350\ \text{K}$ 。

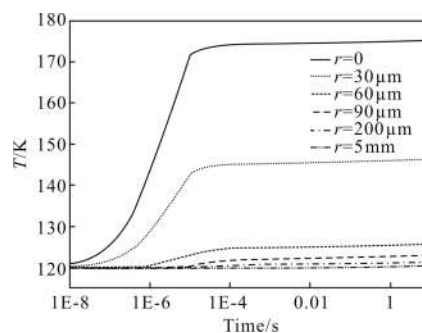


图 5 不同位置处的温升情况

Fig.5 Temperature raise at different positions

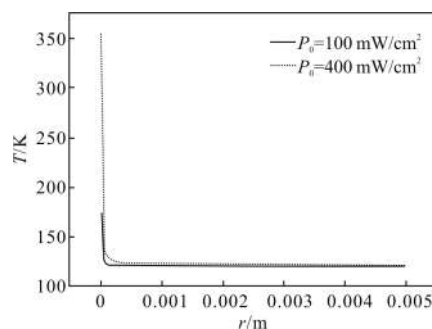


图 6 不同位置处的稳定温度

Fig.6 Final temperature at different positions

### 4 焦平面上的光电流密度

文中利用漂移扩散模型<sup>[10]</sup>计算焦平面的光电流密度。漂移-扩散模型是处理经典运输问题的常用模型, 对于通常情况下的常用半导体器件, 利用该模型可以得到很好的数值模拟结果。

在漂移-扩散模型中, 假定载流子和晶格之间处于热力学平衡状态, 用共同的温度来描述。主要包含

如下微分方程组:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n}{\partial t} - \frac{1}{q} \nabla \cdot J_n - G + R &= 0 \\ \frac{\partial n}{\partial t} + \frac{1}{q} \nabla \cdot J_n - G + R &= 0 \\ \nabla \cdot (\delta E) &= q(N_D^+ - N_A^- + p - n) \end{aligned} \quad (9)$$

漂移-扩散模型中的电流由漂移电流密度和扩散电流密度组成:

$$J_n = J_{n\text{-drift}} + J_{n\text{-diffuse}} = qn\mu_n E + qD_n \nabla n \quad (10)$$

公式(9)中产生率  $G$  和复合率  $R$  可以表示为:

$$\begin{aligned} R_{\text{SRH}} &= \frac{np - n_i^2}{\tau_n(p + n_i) + \tau_p(n + n_i)} \\ G &= \alpha I / h\nu \end{aligned} \quad (11)$$

在线性吸收的条件下,光强  $I$  可以表示为:

$$I = I_0(x, y) e^{-\alpha x} \quad (12)$$

文中假设焦平面是由  $256 \times 256$  个光电二极管组成,相邻的光敏元之间距离  $30 \mu\text{m}$ ,由于载流子在横向扩散过程中浓度呈指数衰减,相邻光敏元之间的载流子扩散现象不明显,因此在文中将每一个二极管看成独立的一维 PN 结进行模拟。根据前面的计算,每一个光敏元处都有一个与位置相关的光强  $P(x, y)$  和温度  $T(x, y)$ ,可以作为输入参数代入漂移扩散模型中进行有限元求解。进行有限元模拟时,载流子的基本方程为公式(9)~(12)。模型中的主要参数如表 2 所示。计算采用的几何模型为 1 维, N 区长  $1 \mu\text{m}$ , P 区长  $8 \mu\text{m}$ 。

表 2 漂移扩散模型主要参数

Tab.2 Main parameters of drift-diffusion model

Parameter	Value
Carrier life time/ $\mu\text{s}$	0.1
$N_D$ in N region/ $\text{cm}^{-3}$	$10^{18}$
$N_A$ in P region/ $\text{cm}^{-3}$	$10^{15}$
Electron mobility $\mu_n/\text{m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	$2.82 \times 10^5 / T^{2.2}$
Hole mobility $\mu_p$	$0.0765 \mu_n$
$E_g/\text{eV}$	0.38
$\epsilon_r$	11.1
Absorption coefficient/ $\text{m}^{-1}$	$4 \times 10^5$

首先计算了对于单个 PN 结,光电流与温度和入瞳光功率密度之间的关系。图 7 是当温度为 77 K 和 400 K 时,光电流随光功率密度的变化,图 8 是光

功率密度固定为  $1 \text{ mW}/\text{cm}^2$  时,光电流随温度的变化。可以看到,不考虑温度时,光电流随激光功率基本呈线性变化。而随着温度上升,光电流迅速减小。

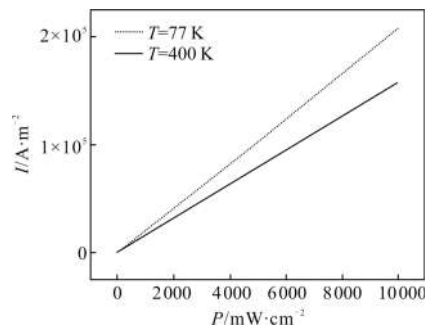


图 7 光电流随入瞳光功率密度的变化

Fig.7 Relation between photo currents and light intensities

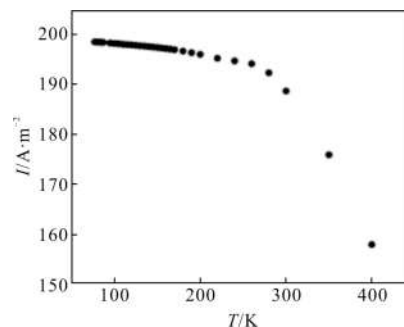


图 8 光电流随温度的变化

Fig.8 Relation between photo currents and temperature

随后计算了在考虑光学系统后,入瞳光功率密度分别为  $1 \text{ mW}/\text{cm}^2$  和  $100 \text{ mW}/\text{cm}^2$  时焦平面上的光电流分布作为典型结果,如图 9 所示。

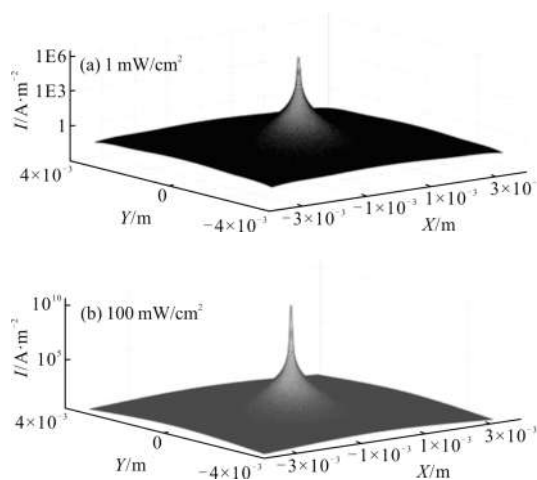


图 9 焦平面上的光电流分布

Fig.9 Photo current distributions in the FPA

对于尺寸不是很小的光敏元,上述一维漂移扩散模型可以得到较为准确的结果。如果希望进行更准确的仿真,可将此部分用二维或三维漂移扩散模型代替,并加入对光敏元间电荷扩散过程的仿真。

### 5 实际输出图像

光敏元产生的光电流经过后处理电路转换为电信号。典型的后处理电路形式如图 10 所示<sup>[6]</sup>,在 MCT 红外焦平面器件内部结构中,红外辐射在 P 区被吸收并激发出光生载流子,载流子扩散至 PN 结区,被内建电场分开通过外接电路形成光生电流。光生电流经电路中积分电容积分放大后通过相关双采样 CDS 电路输出,最终光信号为两个采样信号的相减  $V_2-V_1$ 。

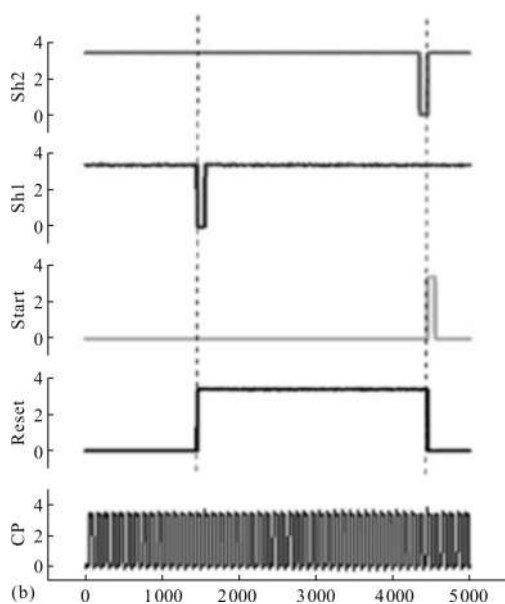
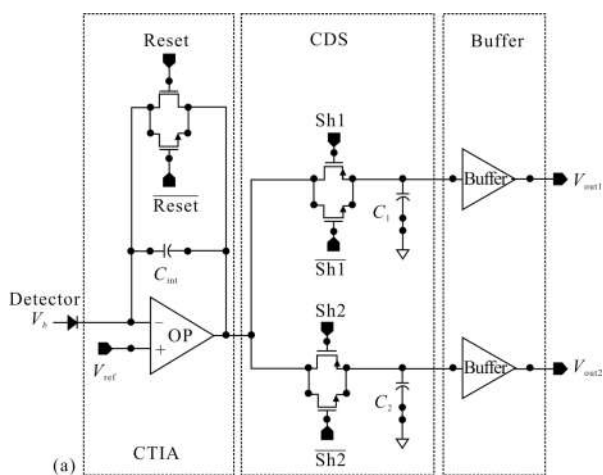


图 10 探测器的典型电路结构(a)和电路工作时序图(b)

Fig.10 Traditional circuit structure (a) and function timing (b)

线阵器件探测单元的输出电压  $V_{out}$  与 PN 结两端的偏置电压  $V_b$  和  $V_{ref}$  密切相关,实际工作中  $V_b=V_{ref}$ 。因此,运算放大器后输出电压为:

$$V_{out}=V_{ref}+\frac{I_p \cdot \tau}{C_{int}} \quad (13)$$

式中:  $I_p$  为光电流;  $V_{ref}$  为参考电压;  $C_{int}$  为积分电容;  $\tau$  为积分时间。

从相关双采样 CDS 电路工作时序,可以看出积分电容刚开始积分时,  $\Phi Sh1$  同时开启,积分电容  $C_{int}$  上的信号被采样并被存储在电容  $C_1$  中作为基底信号  $V_1$ ,实际电容  $C_{int}$  的积分时间即为采样时间  $\tau_1$ ,因此基底信号输出响应电压  $V_1$  为:

$$V_1=V_{ref}+\frac{I_p \cdot \tau_1}{C_{int}} \quad (14)$$

当采样脉冲  $\Phi Sh2$  同时开启时,积分电容  $C_{int}$  上的信号被采样并被存储在电容  $C_2$  中,输出电压  $V_2$ ,此时积分电容经历了一周的积分时间  $\tau$ ,输出响应电压  $V_2$  为:

$$V_2=V_{ref}+\frac{I_p \cdot \tau}{C_{int}} \quad (15)$$

因此,实际输出电压  $V$  可以表示为:

$$V=V_2-V_1=\frac{I_p \cdot (\tau-\tau_1)}{C_{int}} \quad (16)$$

此处并没有考虑到电容饱和的情况。当入射光功率密度很大时,  $C_{int}$  两侧的电压很快达到饱和,此时  $C_1$  采样得到的基底信号也将饱和,于是经过相减之后实际输出电压反而降为零,出现所谓的零压输出现象。

图 11 给出了积分时间固定,如同激光功率密度

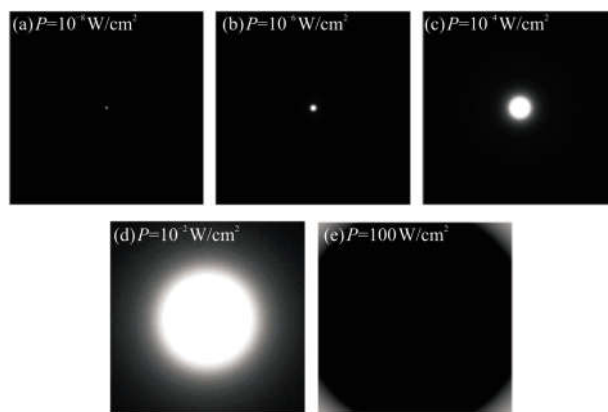


图 11 积分时间固定,入瞳激光功率密度逐渐增加时的干扰图像  
Fig.11 Output images at different illumination powers for fixed integration time

逐渐增加时的干扰图像。当积分时间继续增加时,干扰光斑将继续扩大,当入瞳功率密度达到 $100\text{ mW/cm}^2$ 时,可以看到明显的过饱和现象:以焦点为中心,将出现一个过饱和反黑的区域,这是由于背景采样信号 $V_1$ 饱和导致实际的输出信号 $V_2-V_1$ 降为零造成的。可见,背景采样信号的积分时间足够长时,在较强的激光辐照下将会出现过饱和现象。

## 6 结论

文中以红外面阵探测器为例,介绍了一种光电探测器强光响应特性的全流程仿真框架。框架依次计算光在光学系统中的传播、焦平面上的热传导、光敏元的光电输运和后处理电路对光电流的处理等多个物理过程,模拟探测器最终得到的图像数据。通过各个过程间接口的的设计,试图减小各个过程之间的耦合,以便适应不同物理过程的不同模型。文中给出了一些简单的仿真结果,重现了在之前的研究中发现的非常规响应现象。文中提出的框架可以为后续的深入研究提供参考。

### 参考文献:

- [1] Dvck R H, Steffe W. Effects of optical crosstalk in CCD image sensors [C]//Proc 5th Int. Conf. on Application of Charge-Coupled Devices, 1978.
- [2] Lavine J P, Chang W C, Anagnostopoulos C N. Monte Carlo simulation of the photoelectron crosstalk in silicon imaging devices [J]. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 2006, 4(4): 531–535.
- [3] Machet N, Kubert-Habart C, Baudinud V. Study of the mechanism of electronic diffusion in a CCD camera subject to intense laser illumination[C]//RADECS: 1997, 97: 417–423.
- [4] Zhen Z, The experimental study on the irradiation effects of visible light CCD [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005. (in Chinese)
- [5] Ke S, Liangjin H, Xiang'ai C, et al. Analysis and simulation of the phenomenon of secondary spots of the TDI CCD camera irradiated by CW laser [J]. *Opt Exp*, 2011, 19: 23901.
- [6] Weicheng Q, Rui W, Zhongjie X, et al, Study on the light response characteristics of PV HgCdTe linear array detector with CTIA circuit [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(6): 1394–1398. (in Chinese)
- [7] Tian J, Xiang'ai C, Xin Z, et al. The over-saturation phenomenon of a  $\text{Hg}_{0.46}\text{Cd}_{0.54}\text{Te}$  photovoltaic detector irradiated by a CW laser [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2011, 26: 115004.
- [8] Tian J, Xin Z, Xiang'ai C, et al, The carrier transportation of photoconductive HgCdTe detector irradiated by CW band-off laser[J]. *J Infrared Millim Waves*, 2012, 31(3): 1–6.
- [9] Ke S, Houman J, Xiang'ai C. Distribution of in-field stray light due to surface scattering from primary mirror illuminated by intense light [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(2): 493–499. (in Chinese)
- [10] Scharfetter D L, Gummel H K. Large signal analysis of a silicon read diode [J]. *IEEE Trans Electron Dev*, 1969, 16: 64–77.