

室温中波红外碲镉汞探测器激光辐照饱和特性的仿真

李向阳^{1*}, 桑茂盛^{1,3}, 徐国庆¹, 乔辉¹, 储开慧¹, 杨晓阳¹, 杨鹏翎², 王大辉²

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

2. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对室温工作的光伏型碲镉汞中波红外探测器激光辐照饱和特性进行了仿真, 结果表明, 中红外激光对碲镉汞材料的加热效应以及光照导致零偏压阻抗降低, 是影响探测器输出量子效率的重要因素。利用一维数值仿真方法, 建立了室温碲镉汞pn结的模型, 计算了稳态激光辐照下器件量子效率以及零偏压阻抗。理论计算了激光辐照下的稳态温度分布近似模型, 并将温度场分布耦合到仿真计算中, 发现衬底厚度会影响芯片的温升, 从而显著影响器件饱和阈值的大小。另外, 计算表明, 随着光照强度的增加, 器件的零偏压阻抗降低, 并将仿真结果与实测芯片参数进行了比较。计算分析为设计高饱和辐照度阈值的中波红外碲镉汞探测器提供了参考。

关键词: 激光辐照; 温度场; 饱和特性; 数值仿真

中图分类号: O471.5; TN305.3

文献标识码: A

Simulation on the saturation properties of room-temperature mid-wave infrared HgCdTe detectors

LI Xiang-Yang^{1*}, SANG Mao-Sheng^{1,3}, XU Guo-Qing¹, QIAO Hui¹, CHU Kai-Hui¹,
YANG Xiao-yang¹, YANG Peng-Ling², WANG Da-Hui²

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Institute of Northwest Nuclear Technology, Xi'an 710024, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The photovoltaic mid-wave infrared HgCdTe detector, which is operated at room temperature, is simulated to explore laser irradiation saturation characteristics. The results reveal that the heating effect on the HgCdTe material and the lowering of the zero-bias impedance due to irradiation, are significant factors affecting the quantum efficiency of the detector. The model of HgCdTe pn junction is established, and a one-dimensional numerical simulation method is adopted to compute the quantum efficiency and zero-bias impedance of device. The device is irradiated under steady-state. Moreover, the temperature field distribution is coupled in the simulation, the thickness of substrate affects the temperature of the detector, which significantly affects the saturation threshold of the device. Furthermore, the calculations show that the zero-bias impedance of device decreases when the light intensity is raised. The result is compared to the measured performance of device. Finally, the computational analysis serves as a foundation for the development of mid-wave IR HgCdTe detectors with high saturation irradiance threshold.

Key words: laser irradiation, temperature field, saturation properties, numerical simulation

引言

任何光电探测器在一定的强光照射下都会出现响应信号偏离线性比例的现象,称之为饱和现象。通常情况下,饱和现象出现在较高的光照强度下,因此对于追求高灵敏探测精度的探测器研究人员来讲,对饱和情况出现机理的研究关心较少。然而在一些强光测量的领域,饱和问题会干扰测量工作。因此提高探测器饱和阈值是这类应用的一种需求。

随着激光器等高强度光源日益发展,探测器在强辐照下的实验报道,不时地以不同方式出现在有关文献中。当然,激光与探测器相互作用的研究不仅仅是输出饱和还有损伤和破坏机理等。早在1976年,美国海军实验室的F. Bartoli等人^[1]理论计算并研究了HgCdTe红外探测器的损伤阈值。他们通过解析计算和数值计算,利用热扩散方程计算出碲镉汞在激光照射下的表面温度升高超过熔点的激光辐照能量条件,并通过与实验结果比较,得到探测器损伤破坏阈值的关键因素是热损伤的结论。研究表明,当连续激光照射功率密度达到 $1\ 000\ \text{W}/\text{cm}^2$ 时,探测器的材料将得到破坏,出现永久损伤。Storeboe等人^[2]考虑多种吸收机制,计算中波碲镉汞的中红外激光的损伤条件,得到了在 $1\ \mu\text{s}$ 脉冲下,大约 $2\sim 3\ \text{J}/\text{cm}^2$ 的损伤阈值。2018年,英国的Burgess等人^[3]实际测量探测器的损伤阈值,测量结果表明,连续激光照射的损伤阈值最低,阈值大约在 $1.5\sim 5\ \text{W}/\text{cm}^2$ 。2020年,日本的Yuka Ikemoto和Heishun Zen^[4]研究了自由电子激光和同步辐射照射碲镉汞的饱和现象,他们的试验结果表明,这种液氮制冷的长波红外高灵敏碲镉汞探测器,其饱和阈值在 $0.2\ \text{mW}$ 以内,对应的功率密度约为 $0.3\ \text{W}/\text{cm}^2$ 。在国内,类似的研究也有得到大致的结果。例如国防科技大学江天等人^[5]实验测量的碲镉汞单元探测器的短波激光的损伤阈值大约是 $79.5\ \text{W}/\text{cm}^2$ 。关于激光与探测器相互作用研究表明,光电探测器在激光辐照足够强时,会出现光饱和^[6]、热效应^[7]、热损伤及热应力产生的力学损伤等现象^[8]。当激光能量使得探测器的输出信号达到饱和以后,激光能量只有少部分被吸收转化为有用的信号,大部分被散射和转化为热能,使得探测器材料升温,影响探测器的工作性能,如产生热噪声、出现异常输出或输出混乱^[9]。严重的升温会造成不可逆转的损伤,甚至严重破坏材料,导致器件的永久损坏^[10-13]。

通常来说,对于不同的激光、不同的探测器材料、不同的探测器结构,都会有不同的饱和、输出异常、眩光、损伤、破坏机制以及与此机制对应的辐照功率范围。对于关注器件饱和阈值的研究工作而言,拓展器件的线性响应范围,使其工作在大功率激光辐照下是器件的研制目标。因此,研究光电探测器在激光辐照下产生饱和的机理,可以针对性地调整材料的组成、探测器结构,对提高器件的饱和阈值、扩大探测器的激光测量使用范围是有现实意义的。

1 实验制备

利用液相外延的碲镉汞薄膜材料制备了室温工作的中波红外探测器,并测量了其饱和阈值。实验中采用汞空位掺杂的p型碲镉汞液相外延材料,材料的组分 x 为0.29,室温下p型空穴浓度约为 $1\times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$,利用 B^+ 离子注入的方法,制备 $\text{n}^+\text{-on-p}$ 平面型探测器芯片, n^+ 区电子浓度约为 $2\times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$ 。器件的结构如图1所示。

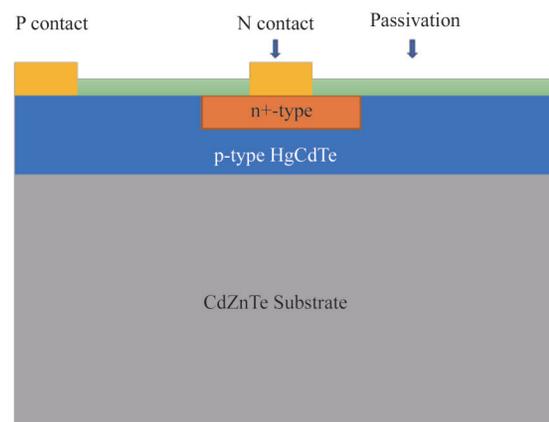


图1 中波红外碲镉汞光伏型探测器的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the structure of the mid-wave infrared HgCdTe photovoltaic detector

采用傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)测量了器件的响应光谱,表征了探测器光电流响应与入射波长的关系,结果如图2(a)所示。器件的伏安曲线如图2(b)所示。

通过金属管壳封装,将芯片制备为单元探测器。该探测器进行了 $3.8\ \mu\text{m}$ 激光照射的饱和特性测量,测量结果如图3所示。

根据实际测量结果可以看出,器件在 $1\ \text{W}/\text{cm}^2$ 功率密度下基本上能够保持线性,但是到了 $3\sim 4\ \text{W}/\text{cm}^2$ 照度下表现出饱和特征。按照 $0\sim 2\ \text{W}/\text{cm}^2$ 区间的线

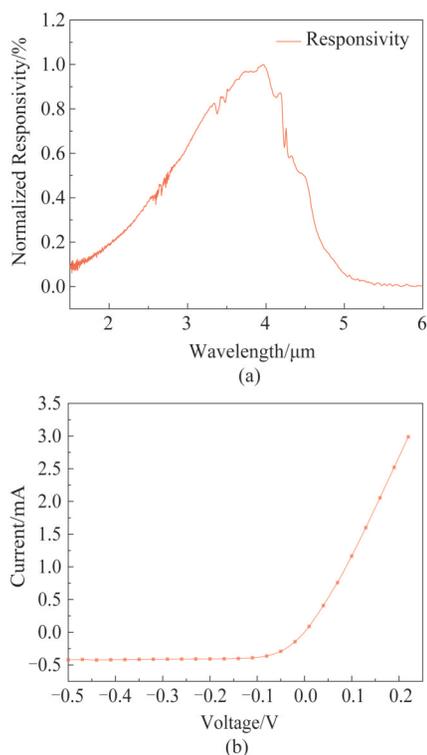


图2 碲镉汞光伏型探测器,(a)响应光谱,(b)伏安曲线

Fig. 2 HgCdTe photovoltaic detector, (a) response spectrum, (b) current-voltage curve

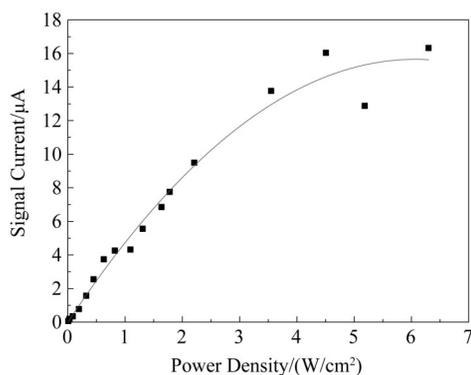


图3 中波红外碲镉汞光伏型探测器的激光响应曲线

Fig. 3 Current response curve of mid-wave infrared HgCdTe photovoltaic detector under laser irradiation

性推导,在 10 W/cm^2 照度下,外量子效率下降到只有原来的40%左右。

2 仿真

2.1 碲镉汞计算参数模型

碲镉汞的有关物理参数取自文献[14-15],其禁带宽度公式为:

$$E_g(x,T) = -0.295 + 1.87x - 0.28x^2 + (6 - 14x + 3x^2)10^{-4}T + 0.35x^4 \text{ (eV)}, \quad (1)$$

可见,对于组分在0.29附近的碲镉汞材料,其禁带

宽度随温度变化的系数约为 0.22 meV/K 。

碲镉汞的本征载流子浓度:

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

碲镉汞的电子迁移率:

$$\mu_e = 9 \times 10^8 b/z^{2a}, \quad (3)$$

其中, $b = \left(\frac{0.2}{x}\right)^{7.5}$, $a = \left(\frac{0.2}{x}\right)^{0.6}$, 当 $T > 50 \text{ K}$, $z = T$,

$T < 50 \text{ K}$, $z = \frac{1.18 \times 10^5}{(2600 - |T - 35|)^{2.07}}$, 空穴的迁移率

被认为是电子的1/100。

碲镉汞材料的吸收系数:

$$\alpha = \alpha_g \exp\left[\beta(E - E_g)\right]^{1/2} \text{ cm}^{-1}, (E \geq E_g), \quad (4)$$

其中, $\beta = -1 + 0.083T + (21 - 0.13T)x$, $\alpha_g = -65 + 1.88T + (8694 - 10.31T)x$ 。

本征俄歇1的复合时间为:

$$\tau_{A1}^i = 3.8 \times 10^{-18} \varepsilon_\infty^2 \frac{m_0}{m_e^*} \left(1 + \frac{m_e^*}{m_h^*}\right)^{\frac{1}{2}} \left(1 + \frac{2m_e^*}{m_h^*}\right) \left(\frac{E_g}{k_B T}\right)^{\frac{3}{2}} \exp\left[\left(1 + \frac{2m_e^*}{m_h^*}\right) \left(1 + \frac{m_e^*}{m_h^*}\right)^{-1} \frac{E_g}{k_B T}\right] |F_1 F_2|^{-2}, \quad (5)$$

式中, ε_∞ 值为:

$$\varepsilon_\infty = 15.19 - 14.52x + 11.06x^2 - 4.24x^3, \quad (6)$$

$|F_1 F_2|^{-2}$ 为布洛赫周期函数的交迭积分,取值为0.20。

俄歇过程1复合时间为:

$$\tau_{A1} = \frac{2n_i^2 \tau_{A1}^i}{(n_0 + p_0 + \Delta n)(n_0 + \Delta n)}. \quad (7)$$

俄歇过程7和过程1的本征复合时间之比为:

$$\Gamma = \frac{\tau_{A1}^i}{\tau_{A7}^i} = 2 \frac{m_c^*(E_{th})}{m_e^*} \frac{(1 - 5E_g/4k_B T)}{(1 - 3E_g/2k_B T)}, \quad (8)$$

其中, $m_c^*(E_{th})$ 是能量为 E_{th} 处导带电子的有效质量,对于过程7:

$$E_{th} \approx \frac{2 + m_c^*/m_{hh}^*}{2 + m_c^*/m_{hh}^* - m_{hh}^*/m_{hh}^*} E_g \approx E_g, \quad (9)$$

$$m_c^*(E_{th}) = m_c^* \left(1 + \frac{2E_{th}}{E_g}\right) = 3m_c^*. \quad (10)$$

俄歇过程七复合时间为:

$$\tau_{A7} = \frac{2n_i^2 \tau_{A7}^i}{(n_0 + p_0 + \Delta n)(p_0 + \Delta p)}. \quad (11)$$

辐射复合寿命:

$$\tau_R = \frac{1}{B(n_0 + p_0 + \Delta p)} \quad (12)$$

其中:

$$B = 5.8 \times 10^{-13} \varepsilon_2^{\frac{1}{2}} \frac{m_0}{m_e^*} \left(\frac{m_0}{m_e^* + m_h^*} \right)^{\frac{3}{2}} \left(1 + \frac{m_0}{m_e^*} + \frac{m_0}{m_h^*} \right) \left(\frac{300}{T} \right)^{\frac{3}{2}} (E_g^2 + 3k_B T E_g + 3.75(k_B T)^2) \quad (13)$$

通过复合中心的复合,也叫SRH复合:

$$\tau_{SRH} = \frac{1}{\tau_{n0}(p_0 + n_i) + \tau_{p0}(n_0 + n_i)} \quad (14)$$

所有复合机制总和的寿命按照下式计算:

$$\tau_n = \left(\frac{1}{\tau_{A7}} + \frac{1}{\tau_{SRH}} + \frac{1}{\tau_R} \right)^{-1} \quad (15)$$

2.2 光的吸收和热转换模型

显然,对于材料内部一个微区的光吸收而产生热能,按照以下公式计算:

$$\Delta P = \alpha \eta P_0 \exp(-\alpha x) \quad (16)$$

其中, α 是吸收系数, η 是光热转换比例,本次仿真计算中取0.5。 P_0 是入射到器件内表面的光强。根据一维热传导的微分方程,可知:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \Delta P \quad (17)$$

组分为0.29的碲镉汞的热导率大约是1.1 W/(m*K),比热容是170 J/(kg*K)^[16]。考虑一维情况,对于厚度约为10 μm 的碲镉汞,其热平衡的特征时间为0.1 ms。虽然这个特征时间与厚度存在平方关系,考虑到衬底有基本相同的热学参数,即使加上衬底的影响,厚度达到了500 μm ,其热平衡的特征时间也不超过0.3 s。这对于在秒的数量级上的实际测试工作虽有影响,但是仍然假设可以认为测量工作实际是在一个定态完成的。

对于定态可以简化上述微分方程,应用下述边界条件,可以得到一个解析表达式。边界条件是:假设样品厚度为 d 、光入射端面是绝热、另一个端面固定在室温,在这个条件下,微分方程的解析表达为:

$$T(x) = \frac{P_0}{\lambda} (d - x) + \frac{P_0}{\alpha \lambda} [\exp(-\alpha d) - \exp(-\alpha x)] \quad (18)$$

从以上式子可以看出:激光辐照端的温度 $T(0)$,是厚度 d 的增函数,也就是厚度越厚,表面升温越高;另外,对于pn结区深度一般在表面下0.2~0.5 μm 左右的位置,对于特定的器件,结深度是相对不变的,

因此对于结附近任意两点之间的温差是与厚度无关的,只与光照强度有关。

2.3 数值仿真方法及结果

采用公开源代码的一维数值仿真框架^[17],综合考虑了如前所述的碲镉汞禁带宽度、迁移率、复合机制、光学吸收和热传导等各项参数及其与温度的关系,根据上面得到的温度分布解析公式,为数值计算过程中每一个差分单元设定相应的温度,将光产生的产生项添加到漂移扩散方程的求解中,并将温度梯度产生的扩散项考虑进去。对器件特性进行了一维仿真计算。

利用该仿真程序计算得到的室温下器件典型伏安曲线如图4所示。

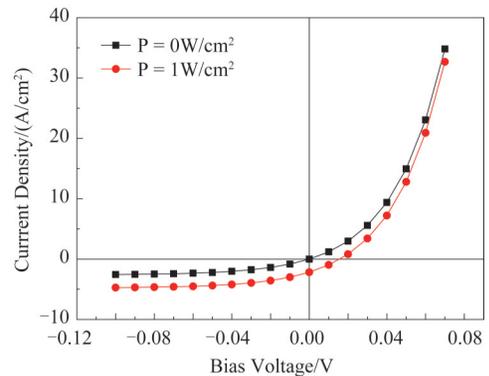


图4 中波红外碲镉汞pn结一维仿真得到的 I - V 曲线

Fig. 4 I - V curves obtained from 1D simulation of the pn junction in mid-wave HgCdTe detector

设置不同芯片温度计算得到暗场下器件的零偏压阻抗面积之积($R_0 A$)关系如图5所示。

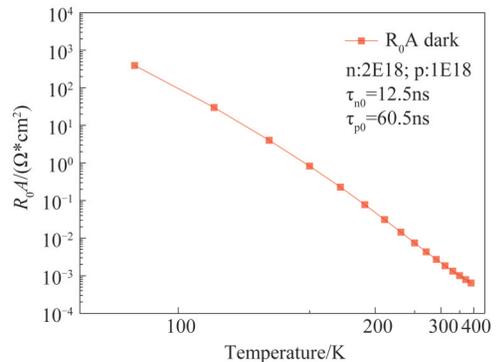


图5 中波红外碲镉汞pn结 $R_0 A$ 随温度变化的仿真结果

Fig. 5 Simulation results of $R_0 A$ with variable temperature for pn junction in mid-wave HgCdTe detector

将不同衬底厚度对应的温度分布代入到仿真的程序中,计算得到的结果如图6所示。

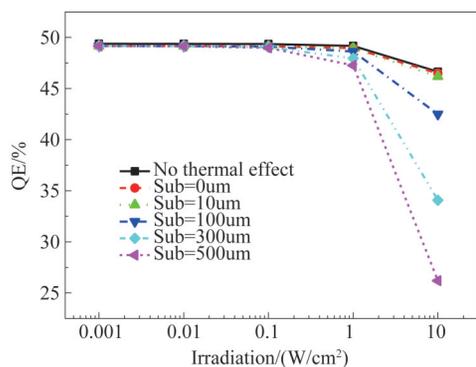


图6 考虑激光照射产生温升的影响,计算得到的器件内量子效率的变化

Fig. 6 Calculated variation of quantum efficiency with temperature under laser irradiation

计算结果表明,在 1 W/cm^2 照度附近下,随着衬底厚度的增加,即温升值的增加,量子效率线性下降。当入射功率很大的时候,衬底的厚度不能过大,且必须要保证传热的良好性,因此衬底厚度最好小于 $100 \mu\text{m}$ 。另外,即使没有考虑温升的影响,器件的量子效率也会随着 CdZnTe 衬底厚度的增大而降低。

仿真计算中器件在光照下的 R_0A 特性表现如图 7 所示。

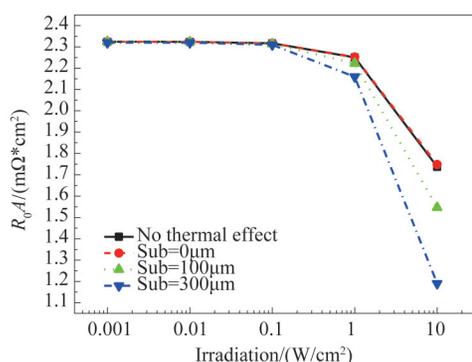


图7 计算得到的 R_0A 随照度发生变化的曲线

Fig. 7 Calculated curves of R_0A varied with laser irradiation

虽然衬底厚度不同导致的温度增加,影响了器件零偏压电阻,但是没有考虑温度效应的曲线也在光功率达到一定量级后出现了下降,呈现出饱和特性,这说明激光强烈的激发非平衡载流子,等效地导致了本征载流子浓度的增加,从而导致器件的零偏压阻抗急剧降低^[18,19]。

器件的零偏压电阻与电极欧姆接触等构成的等效串联阻抗共同影响外量子效率,所以制备高饱和和阈值探测器时,还需要考虑设计制备相对较小的

欧姆接触电阻。如果器件在室温工作,则器件的 R_0A 相对较小,比如 $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ 的探测器芯片结阻抗,室温下只有 $50 \sim 100 \Omega$ 。如果要求电极欧姆接触电阻的影响小于 10%,则等效总串联电阻要小于 10Ω 。根据推算,一根长 3 mm 直径 $20 \mu\text{m}$ 的金丝电阻就有 0.3Ω 左右。所以,在室温工作的中波红外探测器信号输出回路上,良好的导电性是研制高饱和阈值器件需要考虑的一个因素。在实测器件伏安曲线数据中,实测器件的总串联电阻高达 50Ω 左右,当电流较大时,串联电阻两端产生的电压降不可忽略,这个电压反作用在 pn 结两端,相当于理想 pn 结的工作点从零偏压向正向偏压移动,因此会显著降低外量子效率,这就严重影响了大信号的输出。在上述两种机制的共同作用下,仿真计算结果显示,器件出现饱和的激光辐照功率阈值范围在 $1 \sim 10 \text{ W/cm}^2$,与实验结果吻合较好。

3 结论

利用一维数值仿真计算了中波光伏型碲镉汞芯片的饱和阈值与温度的关系。仿真结果表明,探测器在激光辐照下,温升对器件电流输出饱和特性有较大影响。另外,还要关注器件在强光照下的等效 R_0A 变小的问题。由于目前研制探测器串联电阻较大,在大信号输出时电阻压降问题也是器件饱和和阈值限值重要因素之一。

References

- [1] Bartoli F, Esterowitz L, Allen R, *et al.* A generalized thermal model for laser damage in infrared detectors [J]. *Journal of Applied Physics*, 1976, **47**(7):2875-2881.
- [2] Storeboe A K, Brudevoll T, Stenersen K. Calculated temperature rise in midinfrared laser irradiated $\text{Hg}_{0.72}\text{Cd}_{0.28}\text{Te}$ [J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, **103**(5):053108.
- [3] Burgess C, Hill L, Lewins L, *et al.* Modelled and experimental laser-induced sensor damage thresholds to continuous wave infrared sources [C]. *Technologies for Optical Countermeasures XV*. SPIE, 2018, **10797**: 188-201.
- [4] Ikemoto Y, Zen H. HgCdTe detector saturation using infrared free electron laser and infrared synchrotron radiation [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2020, **106**:103268.
- [5] Jiang T, Cheng X A, Xu Z J, *et al.* Generation mechanism of two different over-saturation phenomena of photovoltaic HgCdTe detectors irradiated by CW band-in laser [J] (江天, 程湘爱, 许中杰, 等. 光伏型碲镉汞探测器在波段内连续激光辐照下的两种不同过饱和现象的产生机理. *物理学报*), *Acta Phys. Sin*, 2013, **62**(9):097303-1-10.
- [6] Yao M, Ye J F, Li L, *et al.* Analysis of the transient response signal of a silicon-based PIN photodiode irradiated by picosecond laser [J]. (姚猛, 叶继飞, 李兰, 等. 皮秒激光辐照硅基 PIN 光电二极管的瞬态响应信号分析. *红*

- 外与激光工程), *Infrared and Laser Engineering*, 2021, **50**(S2):20210305.
- [7] Wang T, Li P, Yu X, *et al.* High-energy hundred-picosecond fiber-solid hybrid laser and its application in laser-induced damage in PIN photodiode[J]. *Laser Physics*, 2020, **30**(3):036004.
- [8] Wang K, Yu X, Li P, *et al.* Laser-induced damage in a silicon-based photodiode by MHz picosecond laser[J]. *Laser Physics*, 2020, **30**(7):076002.
- [9] Xu L, Cai H, Li C, *et al.* Degradation of responsivity for photodiodes under intense laser irradiation [J]. *Optik*, 2013, **124**(3):225-228.
- [10] Kruer M, Allen R, Esterowitz L, *et al.* Laser damage in silicon photodiodes[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1976, **8**(5):453-458.
- [11] Arora V K, Dawar A L. Laser-induced damage studies in silicon and silicon-based photodetectors [J]. *Applied Optics*, 1996, **35**(36):7061-7065.
- [12] Bi J, Zhang X, Ni X. Numerical simulation of thermal damage process between laser and a photodiode for different magnitudes of pulse energy [J]. *Nonlinear Optics: Technologies and Applications. SPIE*, 2008, **6839**:459-464.
- [13] Watkins S E, Zhang C Z, Walser R M, *et al.* Electrical performance of laser damaged silicon photodiodes[J]. *Applied optics*, 1990, **29**(6):827-835.
- [14] Chu J, Sher A. *Physics and properties of narrow gap semiconductors*[M]. New York: Springer, 2008.
- [15] Yang J R. *Physics and Technology of HgCdTe Materials* [M]. National Defense Industry Press, Beijing.(杨建荣. 碲镉汞材料物理与技术。北京:国防工业出版社) 2012, -808431-3.
- [16] Capper P, Garland J. *Mercury Cadmium Telluride Growth, Properties and Applications* [M]. Wiley, 2011.
- [17] Linge S, Langtangen H P. *Programming for computations-Python: A gentle introduction to numerical simulations with Python 3.6*[M]. Springer Nature, 2020.
- [18] Lietoila A, Gibbons J F. Computer modeling of the temperature rise and carrier concentration induced in silicon by nanosecond laser pulses [J]. *Journal of Applied Physics*, 1982, **53**(4):3207-3213.
- [19] Guo Q, Chen F, Li X, *et al.* High-accuracy source-independent radiometric calibration with low complexity for infrared photonic sensors[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, **10**(1):1-12.