



·激光的热和力学效应·

# 脉宽对中红外激光带内损伤 HgCdTe 材料的影响

胡蔚敏<sup>1,3</sup>, 王小军<sup>1</sup>, 田昌勇<sup>1</sup>, 杨晶<sup>1</sup>, 刘可<sup>1</sup>, 彭钦军<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院理化技术研究所 固体激光重点实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院理化技术研究所  
功能晶体与激光技术重点实验室, 北京 100190; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 研究了脉宽对于中红外脉冲激光带内损伤碲镉汞 (HgCdTe) 材料阈值的影响, 使用一维自洽模型对激光辐照 HgCdTe 材料程中的载流子数密度, 载流子对数流, 载流子对能流, 载流子温度和材料晶格温度等相关参数进行仿真计算。仿真结果表明, 波长 2.85  $\mu\text{m}$ , 脉宽 30 ps~10 ns 单脉冲激光带内辐照 HgCdTe 材料的损伤阈值为 200~500  $\text{mJ}/\text{cm}^2$ 。其中, 300 ps~3 ns 脉冲激光的损伤阈值相近, 均为 200  $\text{mJ}/\text{cm}^2$  且低于其他脉宽激光的损伤阈值。搭建实验光路并进行相关实验验证仿真模型的正确性。实验发现, 波长 2.85  $\mu\text{m}$ 、脉宽 300 ps 的单脉冲激光带内辐照 HgCdTe 材料的损伤阈值在 200  $\text{mJ}/\text{cm}^2$  左右。相同条件下, 10 ns 单脉冲激光带内辐照 HgCdTe 材料的损伤阈值约 474  $\text{mJ}/\text{cm}^2$ 。百皮秒脉冲激光对 HgCdTe 材料的损伤过程结合了热击穿和光学击穿效应, 其独特的毁伤机理加剧了材料的损伤。

**关键词:** 激光辐照半导体; 碲镉汞; 损伤阈值; 自洽模型; 百皮秒脉冲激光

中图分类号: TL814

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210321

## Influence of mid-infrared laser pulse width on in-band damage threshold of HgCdTe

Hu Weimin<sup>1,3</sup>, Wang Xiaojun<sup>1</sup>, Tian Changyong<sup>1</sup>, Yang Jing<sup>1</sup>, Liu Ke<sup>1</sup>, Peng Qinjun<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Solid State Lasers, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Key Laboratory of Functional Crystals and Laser Technology, Technical Institute of Physics

and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

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

**Abstract:** To study the influence of pulse width on the damage threshold of HgCdTe material irradiated by mid-infrared in-band laser pulse, a one-dimensional model named self-consistent model is established. Some parameters including number density of carrier, carrier and energy current, temperature of carrier and lattice are calculated in the whole process. Damage thresholds of in-band single pulsed laser, whose wavelength is 2.85  $\mu\text{m}$  and pulse width ranges from 30 ps to 10 ns, are obtained. The results show that, damage threshold range of in-band laser is 200—500  $\text{mJ}/\text{cm}^2$ . Among them, the damage threshold of 300 ps to 3 ns laser pulses is about 200  $\text{mJ}/\text{cm}^2$ , which is lower than that of other pulsed lasers. The validity of simulation model is verified by setting up the experimental devices and carrying out relevant experiments. Using a single pulsed laser with wavelength of 2.85  $\mu\text{m}$  and pulse width of 300 ps as the light source, the damage threshold is about 200  $\text{mJ}/\text{cm}^2$ . Under the same conditions, when 10 ns single laser pulse is used, the damage threshold is greater than 474  $\text{mJ}/\text{cm}^2$ . The damage process of the HgCdTe material destroyed by hundred-picosecond pulsed laser combines thermal and optical breakdown effects, and its unique mechanism aggravates the destruction of material.

**Key words:** laser radiation semiconductor; HgCdTe; damage threshold; self-consistent model; hundred-picosecond pulsed laser

\* 收稿日期: 2021-07-26; 修订日期: 2021-12-01

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (61805259); 中国科学院固体激光重点实验室基金项目

联系方式: 胡蔚敏, huweimin18@mails.ucas.ac.cn。

通信作者: 王小军, wangxj@mail.ipc.ac.cn。

伴随着半导体材料的快速发展,各种类型的光电探测器不断涌现。光电探测器由于其结构复杂以及半导体材料对激光存在较强吸收等原因,易被激光辐照损伤<sup>[1]</sup>。长期以来,国内外对于激光辐照半导体材料及其所制成光电探测器的物理现象和机理开展了很多研究。

由于辐照激光的体制各不相同,激光的毁伤效果和损伤机理存在着巨大差别。Vohra 等人<sup>[2]</sup>实验发现硅(Si)材料表面越光滑,产生损伤所需的激光功率密度越高。Becker 等人<sup>[3]</sup>利用脉宽 10 ns 的 1.064  $\mu\text{m}$  激光辐照时间延时积分电荷耦合器件(TDI-CCD)探测器,发现当能量密度为 1 J/cm<sup>2</sup> 时,器件被严重烧蚀。王金宝等人<sup>[4]</sup>采用不同波长和脉宽的单脉冲激光对 Si 基 CCD 探测器进行辐照效应研究。发现带内激光具有更低的损伤阈值,且长脉冲激光具有更高的损伤阈值。朱志武等人<sup>[1]</sup>分别使用不同脉宽的 1.064  $\mu\text{m}$  单脉冲激光辐照损伤可见光 Si 基 CCD 探测器(型号 SONYICX405AL),得到了探测器在不同脉冲激光辐照下的损伤阈值。北京工业大学 Wang 等人<sup>[5]</sup>实验发现 302 ps 脉宽,500 Hz 的 1.064  $\mu\text{m}$  激光对于 Si 基 PIN 光电二极管的损伤阈值为 26 GW/cm<sup>2</sup>。百皮秒脉冲激光的损伤机制包括热损伤和等离子体损伤,损伤阈值较低。

上述工作主要集中在脉冲激光对于 Si 材料及其所制成 CCD 探测器的辐照损伤效应研究。自 20 世纪 60 年代末以来, HgCdTe 材料及其所制成的红外探测器因其优良的性能被广泛应用于光电探测技术中<sup>[6-7]</sup>。由于 HgCdTe 材料与 Si 材料存在巨大差异,脉冲激光对于 HgCdTe 材料及其所制成光电探测器的辐照损伤效应逐渐被研究人员所关注。Bartoli 等人<sup>[8]</sup>采用脉宽 100 ns 的 10.6  $\mu\text{m}$  激光辐照响应波段为 8~12  $\mu\text{m}$  的 Hg<sub>0.8</sub>Cd<sub>0.2</sub>Te 材料,得到其损伤阈值为 50 MW/cm<sup>2</sup>。Chen 等人<sup>[9]</sup>得到脉宽 10 ns 的 1.064  $\mu\text{m}$  激光对于 Hg<sub>0.8</sub>Cd<sub>0.2</sub>Te 晶体的平均熔化阈值为 8.4 MW/cm<sup>2</sup>。Garg 等人<sup>[10]</sup>通过改变 20 ns 脉宽,1.064  $\mu\text{m}$  激光的辐照能量密度和脉冲数量,研究不同条件下 Hg<sub>0.8</sub>Cd<sub>0.2</sub>Te 材料的损伤情况。许晓军等人<sup>[11]</sup>实验研究连续波 1.064  $\mu\text{m}$  激光对光导(PC)型 HgCdTe 探测器的损伤情况,得到单元探测器的损伤阈值小于 1.019 kW/cm<sup>2</sup>。郑业亮等人<sup>[12]</sup>利用有限元方法研究带内外激光的脉宽和重频对长波红外 HgCdTe 探测器损伤阈值的影响。Wang 等人<sup>[13]</sup>实验研究了脉冲 CO<sub>2</sub> 激光器对光伏(PV)型 HgCdTe 探测器的损伤情况。栗兴良等人<sup>[14]</sup>通过仿真和实验两方面对激光辐照 HgCdTe 探测器进行研究,得到脉宽 10 ns 的 10.6  $\mu\text{m}$  激光对于探测器的损伤阈值为 1 J/cm<sup>2</sup>。上述工作主要集中在研究脉宽为 10 ns~1  $\mu\text{s}$  或连续激光对于 HgCdTe 材料和探测器的辐照损伤特性,所使用激光的波长大多为 1.064  $\mu\text{m}$  和 10.6  $\mu\text{m}$ , HgCdTe 材料的响应波段在长波红外区域。脉宽在 ns 量级以下的中波红外脉冲激光带内辐照 HgCdTe 材料的损伤效应鲜少被提及,该类波长激光对 HgCdTe 材料的损伤特性,以及脉宽对损伤阈值的影响都有重要研究价值。

本文主要研究激光脉宽对于中红外脉冲激光带内损伤 HgCdTe 材料阈值的影响,通过仿真模型和实验两个方面得到了波长 2.85  $\mu\text{m}$ ,脉宽 30 ps~10 ns 的单脉冲激光带内辐照 HgCdTe 材料的损伤阈值。结果表明,脉宽 300 ps~3 ns 的脉冲激光具有较低的损伤阈值。分析认为百皮秒脉冲激光对 HgCdTe 材料的损伤过程结合了热击穿和光学击穿效应,其独特的毁伤机理加剧了材料的损伤。

## 1 激光带内损伤 HgCdTe 材料理论模型

### 1.1 HgCdTe 材料能带结构

HgCdTe 是一种直接带隙的半导体材料,其能带结构与 III-V 族半导体材料相类似,在最小禁带附近,能带结构由导带、价带(轻、重空穴带)和自旋轨道分裂带组成<sup>[6]</sup>。图 1(a)给出了  $\Gamma$  点(第一布里渊区中心)附近 Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te 材

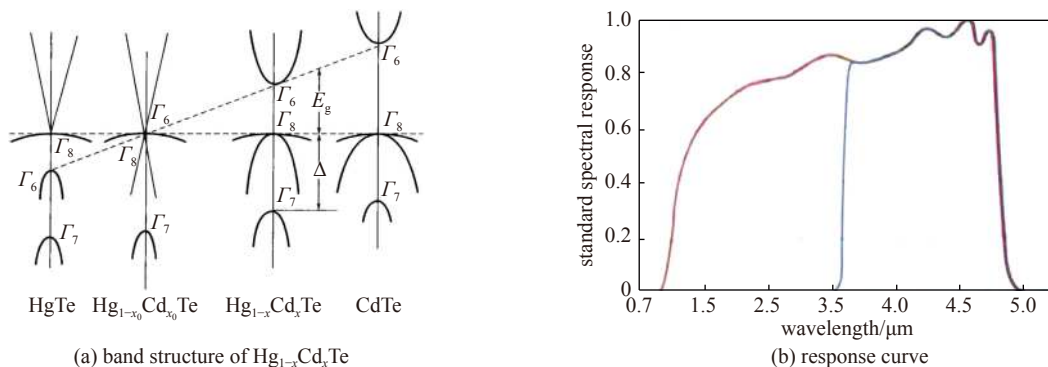


Fig. 1 Band structure of Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te changes with composition and image of response curve of HgCdTe material (red curve)

图 1 Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te 材料的能带结构随组分的变化关系和 HgCdTe 材料的响应曲线图(红色曲线)

材料的能带结构随组分的变化关系( $x$  为组分参数,  $E_g$  表示禁带宽度)<sup>[15]</sup>。由图得知,从碲化汞(HgTe)的负禁带结构到碲化镉(CdTe)的半导体结构(CdTe 在 77 K 的禁带宽度为 1.5 eV),材料能带变化接近于线性。当 HgCdTe 材料组分位于负禁带和正禁带的转换点时( $x=x_0$ ),在相对论效应的作用下,  $\Gamma_6$  反转到了  $\Gamma_8$  之上,随着组分不断增加,禁带宽度所对应的吸收波长可覆盖整个红外波段。本文使用的 HgCdTe 探测器的响应曲线图如图 1(b) 中的红色曲线所示,根据相关文献,其对应  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  材料的  $E_g = 0.25$  eV,组分  $x$  为 0.30 左右<sup>[15]</sup>。综合考虑,本文的仿真模型和实验装置均使用 2.85  $\mu\text{m}$  的脉冲激光作为光源。

## 1.2 理论模型

在考虑半导体材料中的载流子和声子时,由于被考虑对象数目巨大,必须采用统计力学原理对其化简,而相应的非热平衡过程,可以采用局域化的统计参量来描述<sup>[16]</sup>。基于上述思想,在 Goldsmid, Driel 等学者的工作基础上,从玻耳兹曼方程的弛豫时间近似条件出发,Chen<sup>[17]</sup> 等人建立了脉冲激光辐照下半导体材料中的输运动力学过程——自洽模型。该模型共包含载流子数密度方程(速率方程),晶格能量方程,载流子能量方程,载流子对数目流矢量方程和载流子对能流矢量方程。本文模型中所使用的光斑尺寸(几十  $\mu\text{m}$ )大于激光脉冲作用时间内热的纵向传播深度和横向传播距离(小于  $\mu\text{m}$  量级),所以可以采用一维传播模型描述辐照过程。此外,本文忽略材料晶格的横向热传导过程以及禁带宽度变化对模型的影响。所以自洽模型可以等效为<sup>[16]</sup>

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\alpha I(x,t)}{h\nu} + \frac{\beta I^2(x,t)}{h\nu} - \gamma n^3 + \theta n - \nabla \cdot \mathbf{J} \quad (1)$$

$$c_l \rho_l \frac{\partial T_l}{\partial t} = \frac{c_{e-h}}{\tau_e} (T_e - T_l) \quad (2)$$

$$c_{e-h} \frac{\partial T_e}{\partial t} = (\alpha + \theta n) I(x,t) + \beta I^2(x,t) - \nabla \cdot \mathbf{W} - \frac{c_{e-h}}{\tau_e} (T_l - T_e) - \frac{\partial n}{\partial t} [E_g + 3k_B T_l] \quad (3)$$

$$\mathbf{J} = -D \left( \nabla n + \frac{2n \nabla T_e}{T_e} \right) \quad (4)$$

$$\mathbf{W} = (E_g + 4k_B T_e) \mathbf{J} - k_e \nabla T_e \quad (5)$$

式(1)为速率方程,考虑到单、双光子的吸收过程,电子和空穴通过三体俄歇复合过程,碰撞电离产生新的电子和空穴对的过程。式(1)中  $I(x,t)$  为光强。 $n$  为载流子数密度。 $\alpha = 5.7 \times 10^3 e^{T_l/430} \text{ cm}^{-1}$  为单光子吸收系数<sup>[15]</sup>,  $T_l$  为晶格温度。 $h\nu$  表示单光子能量值。 $\beta = 1.5 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{W}$  为双光子吸收系数<sup>[18]</sup>。 $\gamma = 3 \times 10^{-31} \text{ cm}^6/\text{s}$  为俄歇复合系数<sup>[16]</sup>。 $\theta = 8 \times 10^{10} e^{-1.5E_g/k_B T_e} \text{ s}^{-1}$  为碰撞电离系数<sup>[19]</sup>,  $T_e$  为载流子温度,  $k_B$  为玻耳兹曼常数。 $\mathbf{J}$  为载流子对的数目流矢量。

式(2)为晶格能量方程,等式右边代表载流子和晶格之间的热交换。式中  $c_l = 0.18 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$  为晶格比热容<sup>[20]</sup>。 $\rho_l = 7.31 \text{ g}/\text{cm}^3$  为材料的密度<sup>[20]</sup>。 $c_{e-h} = 3nk_B \text{ J}/\text{K}/\text{cm}^3$  为电子空穴对比热容<sup>[16]</sup>。 $\tau_e = 0.2 \text{ ns}$  为载流子寿命<sup>[6]</sup>。

式(3)为载流子能量方程。等式右边第一、二项代表单光子吸收、自由载流子吸收和双光子吸收过程对于能量的贡献,第三项为载流子系统内的热扩散,第四项为载流子与晶格之间的热交换。最后一项是由于导带载流子数密度变化引起载流子能量的改变。式中  $\theta = 6.3 \times 10^{-18} \times (T_l/300) \text{ cm}^2$  为自由载流子吸收系数<sup>[15-16]</sup>。 $\mathbf{W}$  为载流子对能流矢量。

式(4)为载流子对数目流矢量方程,表示载流子数密度梯度和温度梯度对于载流子对数目流的影响。式(5)为载流子对能流矢量方程,表示温度梯度和载流子对数目流对于载流子对能流的影响。两式中  $D = 100 \text{ cm}^2/\text{s}$  为扩散系数<sup>[6]</sup>。 $k_e = \pi^2 k_B^2 n T_e / 3m_e$  为载流子热传导系数  $\text{W}/(\text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$ , 其中  $m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$  为电子质量。

上述模型所给出参数是从文献中直接给出的,或从文献所给图中得到的,或通过文献所给公式计算得到的。由于未找到 HgCdTe 材料俄歇复合系数和自由载流子吸收系数的确切值,两个参数的量级参考 Si 的参数值。此外,由于文献大多未给出参数随温度变化的规律,本文参数中随温度变化项也参考 Si 的参数值<sup>[16]</sup>。

将单光子吸收系数、双光子吸收系数和自由载流子吸收系数带入到光强随距离变化的微分方程中,由于上述三个参数均与距离无关,所以在方程中被看作为常量。此外,本文所用到激光脉冲为高斯脉冲。因此,透射进入半导体材料内激光强度随穿透深度的变化和入射表面处的激光强度随时间的变化可以分别表示为<sup>[16]</sup>

$$I(x,t) = \frac{(\alpha + \theta n) I_0 e^{-(\alpha + \theta n)x}}{(\alpha + \theta n) + \beta I_0 [1 - e^{-(\alpha + \theta n)x}]} \quad (6)$$

$$I_0(t) = \sqrt{\frac{\omega(1-R)\phi}{\pi}} \frac{1}{t_p} e^{-\omega\left(\frac{t-t_m}{t_p}\right)^2} \quad (7)$$

上两式中  $I_0(t)$  为入射面处的光强,  $\omega$  表示激光频率,  $t_p$  为脉冲宽度,  $t_m$  为激光光强的最大值处,  $R$  为反射率值 (20%),  $\phi$  为单脉冲能量密度。本文给出的脉宽为高斯光束半高全宽, 与  $t_p$  的定义有差异, 需做修改。并且, 本文认为  $t_m$  为 3 个半高全宽时, 光强达到最大值, 总的辐照时长依据情况而定。

根据上述假设, 并联立式(1)~(7), 可以得到激光辐照 HgCdTe 材料的一维模型。此外, 边界条件和初始条件分别为:  $n(x, 0) = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ,  $T_e(x, 0) = T_l(x, 0) = 97 \text{ K}$ ; 距离为 0 和  $L$  ( $L$  表示 HgCdTe 材料长度为  $50 \mu\text{m}$ ) 时,  $J(0, t) = J(L, t) = W(0, t) = W(L, t) = 0$ 。

## 2 仿真结果与分析

利用有限差分法求解上述微分方程组, 将空间步长定为  $0.01 \mu\text{m}$ , 时间步长则是根据不同的激光脉宽设定, 时间单步长比总辐照时长小 4 个数量级。图 2 为在脉宽 100 ps, 能量密度为  $200 \text{ mJ/cm}^2$  单脉冲激光辐照 HgCdTe 材料的仿真模型中入射处的  $n$ ,  $T_e$  和  $T_l$  随时间的变化情况。结合式(3)分析, 在激光脉冲辐照初期, 虽然 HgCdTe 材料吸收的激光能量较少, 但是由于此时载流子数密度较低, 载流子热容量非常小, 导致载流子温度上升迅速。随着辐照时间的增加, HgCdTe 材料吸收了大量的激光能量后, 载流子数密度显著增大(载流子数密度最大值为  $1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ ), 载流子和晶格相互作用并将能量传递给了晶格。载流子温度在达到最大值后(约  $30240 \text{ K}$ ), 尽管后续仍在吸收激光能量, 但载流子温度反而大幅降低<sup>[6]</sup>。最终, 在激光辐照结束后, 载流子温度和晶格温度快速趋于一致(约  $833 \text{ K}$ )。对比 HgCdTe 材料的熔化温度(约  $993 \text{ K}$ ), 该条件下 HgCdTe 材料的温度不足以使材料产生热烧蚀损伤。

改变入射激光的脉宽, 得到了能量密度  $200 \text{ mJ/cm}^2$ , 脉宽  $30 \text{ ps} \sim 10 \text{ ns}$  的不同激光脉冲作用于 HgCdTe 材料后晶格温度(以下用  $T_l$  表示)和载流子数目的变化(如图 3 所示)。从图中可以看出, 随着激光脉冲宽度的增加, 所激发产生的载流子数密度明显减小。这主要是因为相同的到靶能量密度下, 脉宽越窄, 峰值功率密度(光强度)就越大。结合式(1)分析, 光强度越大, 产生的载流子数量就越多; 此外,  $T_l$  在脉宽为几十 ps 时为  $655 \text{ K}$  左右。随着脉宽逐渐增大,  $T_l$  迅速增加, 当脉宽达到  $1 \text{ ns}$  附近时,  $T_l$  增速减缓并达到最大值约  $1115 \text{ K}$ 。当脉宽扩大至  $2 \text{ ns}$  后,  $T_l$  开始逐渐减小, 但下降速度变缓, 在  $10 \text{ ns}$  脉宽处,  $T_l$  约为  $796 \text{ K}$ 。对比 HgCdTe 材料的熔点, 脉宽  $30 \sim 200 \text{ ps}$  以及脉宽  $3.5 \sim 10 \text{ ns}$ , 能量密度  $200 \text{ mJ/cm}^2$  的单脉冲激光均不足以破坏 HgCdTe 材料。通过式(2), (3)分析可得, 相较于百 ps 以上的激光脉冲, 几十 ps 的激光脉冲虽然可以较快地激发(较大增长速率)出更大数密度的载流子, 拥有较大的载流子热容并且可以得到更高的载流子温度, 但脉冲作用时间较短, 载流子和晶格温度达到平衡的时间也较短, 最终晶格温度数值较低; 对于几 ns 以上的激光脉冲, 长脉宽导致其较低的光强度, 载流子温度最高可达几千 K, 所以最终晶格温度也较低; 而对于百 ps 的激光脉冲, 其作用时间较长, 材料晶格和载流子同时吸收能量。而且其光强度较大, 载流子温度最大可达几万 K, 所以最终载流子和晶格热平衡时的温度较高。

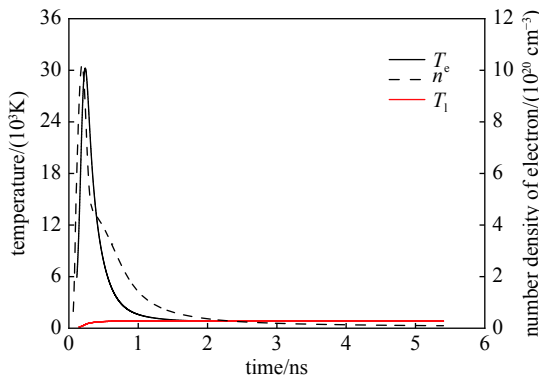


Fig. 2 Variation of carrier temperature, lattice temperature and number density of carrier with time at the incident plane (100 ps,  $200 \text{ mJ/cm}^2$  incident pulse)

图 2 入射面处载流子温度、晶格温度与载流子数密度随时间的变化 (100 ps,  $200 \text{ mJ/cm}^2$  的激光脉冲)

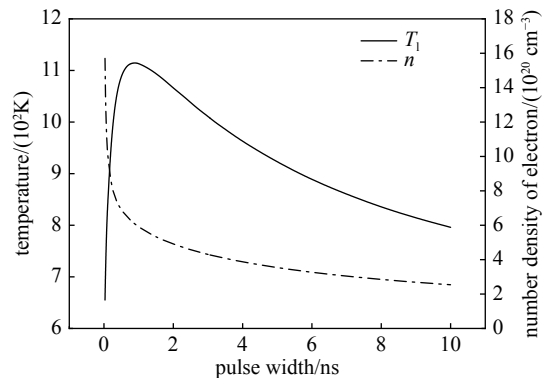


Fig. 3 Material's temperature and carrier density in the HgCdTe material change with pulse width (energy density is  $200 \text{ mJ/cm}^2$ )

图 3 HgCdTe 材料的温度和载流子数目随激光脉冲宽度的变化 (能量密度  $200 \text{ mJ/cm}^2$ )

为了研究不同脉宽的激光脉冲对 HgCdTe 材料的损伤阈值, 改变入射激光的能量密度, 得到了不同脉宽 ( $30 \text{ ps} \sim 10 \text{ ns}$ ) 作用下 HgCdTe 材料温度和载流子数密度随能量密度 ( $100 \sim 500 \text{ mJ/cm}^2$ ) 的变化情况(如图 4 所示)。图 4(a)

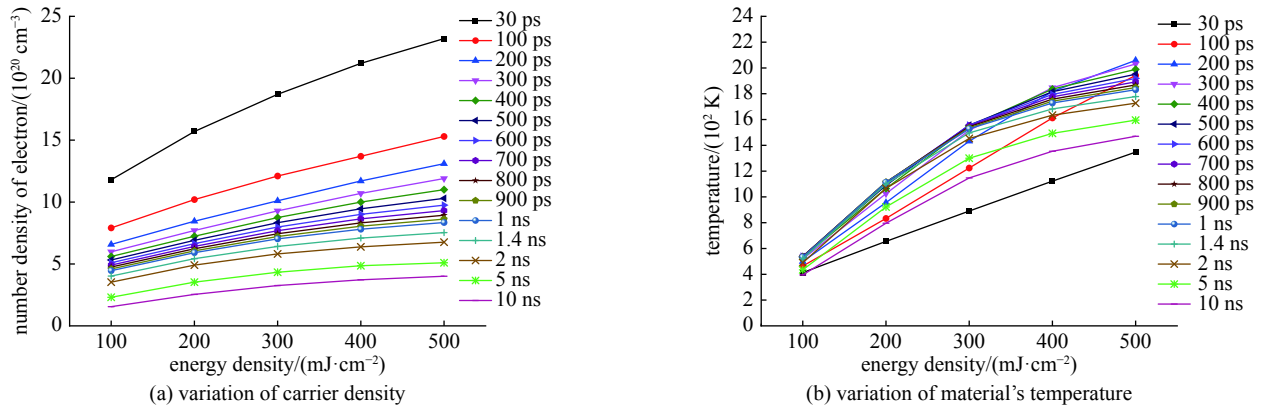


Fig. 4 Material's temperature and carrier density in HgCdTe material irradiated by different kinds of laser pulses change with energy density (pulse width is 30 ps ~ 10 ns. Energy density is 100~500 mJ/cm<sup>2</sup>)

图 4 不同脉宽(30 ps~10 ns)激光作用下 HgCdTe 材料温度和载流子数密度随入射能量密度的变化(能量密度 100~500 mJ/cm<sup>2</sup>)

为载流子数密度随能量密度的变化。随着脉冲宽度和能量密度的增加,载流子的数密度逐步增大,30 ps 脉冲比 10 ns 脉冲激发所得到的载流子数密度大约一个数量级。图 4(b)为 HgCdTe 材料的温度随能量密度的变化。随着能量密度的增加,HgCdTe 材料的温度也呈增长趋势。由图得:激光脉冲宽度在 300 ps~3 ns 的击穿阈值为 200 mJ/cm<sup>2</sup>,其中 800 ps~1 ns 的材料温度值最大(约 1115 K)。激光脉冲宽度在 30~300 ps 和 3~10 ns 的击穿阈值在 300~500 mJ/cm<sup>2</sup>。

### 3 激光带内辐照 HgCdTe 材料实验研究

#### 3.1 探测器构造

由于 HgCdTe 材料的组分易受温度影响(本文中的 HgCdTe 材料组分对应的温度值为 97 K),而且 HgCdTe 材料的制备需要碲镉锌(CdZnTe)材料作为衬底,所以本文采用中红外 HgCdTe 探测器作为实验对象,探测器采用液氮制冷,工作温度为 97 K。对于 PV 型 HgCdTe 红外焦平面探测器,由于其二维方向的像元数目均较多,一般采用直接倒焊的结构形式。探测器装置的分层结构示意图如图 5(a)所示<sup>[16]</sup>。探测器的第一层为 CdZnTe 材料,而后 HgCdTe 芯片和 Si 制无源 CMOS 电路通过钢柱实现互连,并在钢柱区填充低温胶以增强两者之间的机械强度。然后将倒焊后的模块通过环氧树脂胶贴接在宝石或陶瓷基板上,便于后端引线的引出<sup>[21]</sup>。最后将宝石基板用低温清漆胶固定在铜基座上,并将整个探测器封装在液氮制冷的杜瓦瓶内。本文使用探测器的像元大小为 30 μm,行列数分别为 320 行和 256 列,共 81 920 个像元(坏像元数小于 0.2%)。探测器芯片前装有滤光片,滤光片的透过率曲线如图 5(b)所示,由图得知 2.85 μm 激光的透过率为 80%。

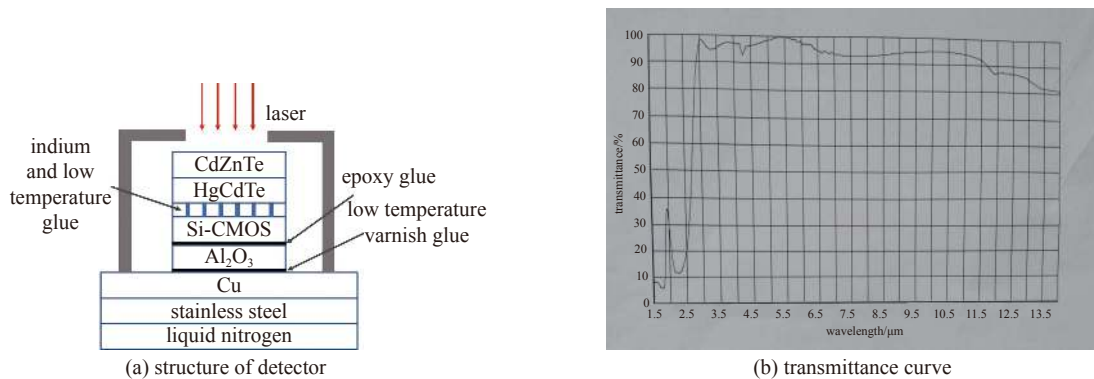


Fig. 5 Hierarchical structure diagram of HgCdTe detector and transmittance curve of optical filter

图 5 HgCdTe 探测器装置的分层结构示意图和探测器滤光片的透过率曲线

对比图 5 探测器分层结构示意图中 CdZnTe 材料层和 HgCdTe 芯片层对于激光的吸收系数可以发现, HgCdTe 层对激光的吸收系数较大,量级为 10<sup>3</sup> cm<sup>-1</sup><sup>[15]</sup>。衬底层的吸收系数在此波长下小于 1 cm<sup>-1</sup><sup>[22]</sup>,而且具有较高的透过率。所以本文中,激光对 HgCdTe 探测器的损伤实验结果可认为是激光对 HgCdTe 材料的损伤。

#### 3.2 实验装置

本文搭建的实验光路示意图如图 6 所示,主要实验装置包括激光器,快门,反射镜,衰减片,分光镜,功率计,聚

焦透镜,封装在杜瓦瓶内的探测器芯片,读出电路和电脑。激光器采用频率 10 kHz、脉宽 600 ps 的  $1.064\ \mu\text{m}$  激光作为种子源。光参量振荡器(OPO)和光参量放大器(OPA)均采用温控炉调谐的周期极化铌酸锂(PPLN)晶体产生  $2.85\ \mu\text{m}$  的激光,激光脉宽约为 300 ps。快门装置控制 OPO 腔输出单发脉冲激光。由于探测器芯片极易被损坏,事先在光路中加入适量衰减片起到保护作用。电脑软件用于观察光斑形态,并可设置积分时间,采集帧数,增益等相关参数。

进行损伤实验前,使用能量计测得激光单脉冲能量的最大值为  $27\ \mu\text{J}$ 。通过调节反射镜,使光束中心标高与探测器芯片的高度一致。调节聚焦透镜的位置,使聚焦光斑落在探测器芯片的焦平面上。由于 HgCdTe 探测器存在串扰机制<sup>[23]</sup>且本文中的探测器像元尺寸与聚焦光斑尺寸相近,分辨率不足以标定聚焦光斑的尺寸和能量密度。为标定激光入射到靶的平均能量密度,本文使用衰减法,得到探测器像元在不同衰减强度下的响应轮廓图(如图 7(a)所示)。当衰减片数量刚好使光斑中心像元响应度达到饱和时的光强度设为 1,依次减少衰减片数量,新出现有响应信号的像元根据衰减程度比值进行赋值。当衰减后强度变为原强度的  $6\times 10^{-11}$  时,光斑中心像元响应度达到饱和,此时共有 4 个像元有响应信号。当衰减后强度达到原强度的  $2.85\times 10^{-7}$  时,有响应信号的像元数目超过 80 个,探测器在此衰减强度下的光斑图如图 7(b)所示,中心四个像元的响应度均达到饱和状态(呈现为黑色),而当停止激光辐照后,中心像元恢复正常状态。由图得知,光斑能量主要集中在 4 个对称分布的像元上,尺寸为  $60\ \mu\text{m}$ 。通过图 7(a)计算不同衰减强度下的光斑面积,并根据相对强度值计算不同尺寸光斑所占能量与总入射能量的比值。结合入射激光能量,本文可以得到光斑在 4 个像元上的平均能量密度(光斑覆盖在 4 个像元上的能量占总能量的 79%)。本文对于探测器像元的损伤模式分为两种:一种为白点损伤,使像元永久输出饱和信号;一种为黑点损伤,使像元不输出任何信号。

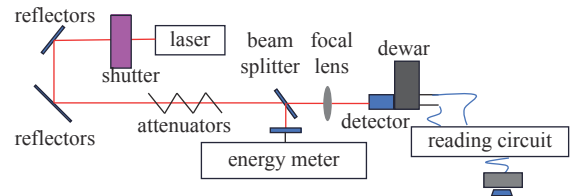


Fig. 6 Schematic diagram of experimental device

图 6 实验光路示意图

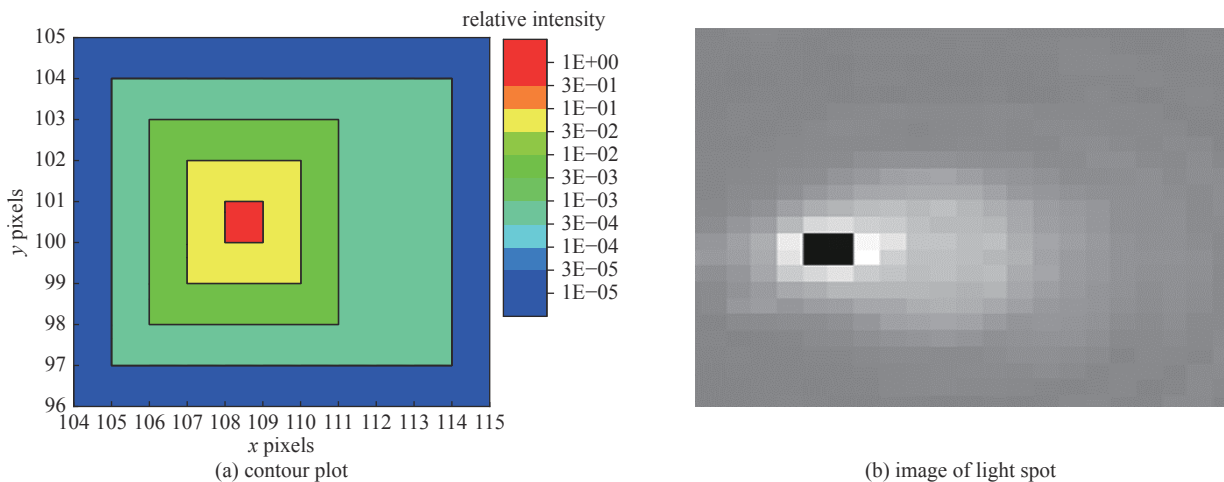


Fig. 7 Contour plot of detector pixels' response measured by attenuation method and image of light spot displayed by the detector (The light intensity attenuates to  $2.85\times 10^{-7}$  of the original intensity)

图 7 探测器像元在衰减法下的响应轮廓图和光强度衰减为原强度的  $2.85\times 10^{-7}$  时探测器显示的光斑图

### 3.3 实验结果

通过控制激光能量,改变激光入射到靶的能量密度。当到靶能量密度为  $105\ \text{mJ}/\text{cm}^2$  时,探测器像元出现可恢复的损伤,恢复时间 4~48 h。分析原因,推测为 HgCdTe 材料在温度达到 353 K 时,出现汞(Hg)析出的现象,材料组分的变化造成材料对入射激光吸收系数的改变。当温度恢复后,HgCdTe 材料各组分得以复原,探测器像元恢复响应;当到靶能量密度为  $193\ \text{mJ}/\text{cm}^2$  时,光斑中心像元最先遭到破坏,出现黑点损伤,结果如图 8(a)所示。图中左下方的插图为运用放大倍率为 500 的显微镜得到的探测器芯片表面损伤形貌图。点损伤区域为白色烧蚀坑,整体呈现为由 HgCdTe 材料熔融物堆积的岛状结构;当到靶能量密度为  $263\ \text{mJ}/\text{cm}^2$  时,激光光斑所照射的 4 个中心像元全部出现不可逆损坏。此时激光到靶能量密度已超过 HgCdTe 探测器的点损伤阈值;在更高的能量密度下,一些烧蚀坑外围出现环状结构,推测为材料表面出现剧烈汽化以及周围环境气体温度急剧升高,使得材料表面附近气

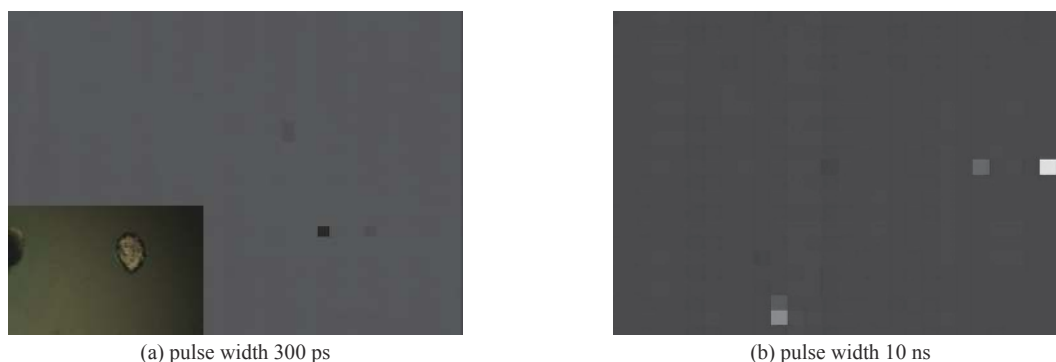


Fig. 8 Damage images of the detector pixel induced by 300 ps (energy density is 193 mJ/cm<sup>2</sup>) and 10 ns (energy density is 474 mJ/cm<sup>2</sup>) single pulsed laser

图 8 脉宽 300 ps(能量密度为 193 mJ/cm<sup>2</sup>)和 10 ns(能量密度为 474 mJ/cm<sup>2</sup>)的单脉冲激光造成探测器单像元损伤图像

体压力迅速增大,高压气体产生较强的冲击力,导致熔融物飞溅到距离损伤中心较远的区域。

使用脉宽 10 ns、波长 2.85 μm 的激光器,对 HgCdTe 探测器做了几组单脉冲对照实验。对照实验需要做到使激光波长,单脉冲激光能量以及聚焦光斑大小等这些无关变量基本一致,只有激光脉宽与之前实验不相同。当到靶能量密度为 474 mJ/cm<sup>2</sup> 时,共进行了 3 发实验,只能造成探测器单个像元发生永久性损伤,如图 8(b)所示。对比图 8(a)和图 8(b)所使用的激光单脉冲能量密度可以得出,10 ns 脉冲激光对于 HgCdTe 探测器的点损伤阈值高于 300 ps 脉冲激光的损伤结果。

对上述结果进行总结得到,在 300 ps 单脉冲激光辐照下,HgCdTe 材料的损伤(HgCdTe 探测器的点损伤)阈值为 200 mJ/cm<sup>2</sup> 左右。在 10 ns 单脉冲激光的辐照下,HgCdTe 材料的损伤阈值大于 474 mJ/cm<sup>2</sup>。实验结果表明百皮秒脉冲激光具有更低的损伤阈值。通过将实验结果与仿真结果进行对比,验证了理论模型的正确性。郑业亮等人利用有限元的方法模拟脉宽 10 ns 的 10.6 μm 单脉冲激光辐照响应波段为 8~14 μm HgCdTe 探测器的损伤阈值为 150 MW/cm<sup>2</sup>(1.5 J/cm<sup>2</sup>)<sup>[12]</sup>。栗兴良等人通过实验和仿真模型得到脉宽 10 ns 的 10.6 μm 激光辐照 HgCdTe 长波红外探测器的损伤阈值为 1 J/cm<sup>2</sup><sup>[14]</sup>。由于本文所采用的激光波段以及 HgCdTe 材料的种类(中波红外波段)与上述两项工作(长波红外波段)不同,所以实验结果不相同,但量级上接近。

结合相关文献<sup>[1]</sup>与本文 HgCdTe 探测器的损伤特性分析不同脉宽的脉冲激光对半导体材料的作用机理:长脉冲激光(10 ns 及其以上脉宽)作用时间较长,损伤形貌不规则,主要的损伤机制为热损伤;超短脉冲激光(10 ps 以下脉宽)作用时间小于电子和晶格能量转移的时间,材料表面会发生电离,产生等离子体,对靶材内部形成冲击应力,提高损伤效果,主要损伤机制为光学击穿损伤;百 ps 至 ns 量级的脉冲激光,具有合适的作用时间和较高的峰值功率,其损伤机制结合了热损伤和光学击穿损伤,加速损伤过程,降低损伤阈值。因此,采用脉宽为百 ps 至 ns 量级的激光脉冲辐照 HgCdTe 材料,其损伤阈值最低,损伤效果最优。

## 4 结 论

本文主要研究脉宽对于中红外脉冲激光带内损伤 HgCdTe 材料阈值的影响。仿真部分建立了一维自治模型,对激光辐照 HgCdTe 材料过程中的载流子数密度和材料晶格温度等相关参数进行仿真计算,得到了 300 ps~3 ns 的单脉冲激光对 HgCdTe 材料的损伤阈值为 200 mJ/cm<sup>2</sup>(HgCdTe 材料温度超过其熔点),其中 800 ps~1 ns 的材料温度值最大。30~300 ps 和 3~10 ns 的单脉冲激光对 HgCdTe 材料的损伤阈值为 300~500 mJ/cm<sup>2</sup>。实验部分使用脉宽分别为 300 ps 和 10 ns 的脉冲激光器带内辐照 HgCdTe 材料。结果表明,300 ps 单脉冲激光对 HgCdTe 材料的损伤阈值为 200 mJ/cm<sup>2</sup> 左右,10 ns 单脉冲激光对 HgCdTe 材料的损伤阈值大于 474 mJ/cm<sup>2</sup>。实验结果与仿真结果相近,验证了本文理论模型的正确性。本文表明脉宽为百 ps 至 ns 量级的脉冲激光对 HgCdTe 材料的损伤过程结合了长脉冲激光的热损伤机制和超短脉冲激光的光学击穿损伤机制,具有较低的损伤阈值,损伤效果最优。

本文仿真部分采用简化后的一维物理模型,计算结果有进一步改进的空间。

## 参考文献:

- [1] 朱志武. 短脉冲激光对可见光 CCD 及滤光片组件的损伤效应研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013: 45-74 (Zhu Zhiwu. Short pulsed laser induced damage to visible light CCD and optical filter module[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013: 45-74)

- [2] Vohra A, Bansal S K, Sharma R K, et al. Surface effects on laser-induced damage in Si[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1990, 23(1): 56-66.
- [3] Becker M F, Zhang Chenzhi, Watkins S E, et al. Laser-induced damage to silicon CCD imaging sensors[C]//Proceedings of SPIE 1105, Materials for Optical Switches, Isolators, and Limiters. 1989: 68-77.
- [4] 王金宝. 激光辐照可见光面阵Si-CCD探测器实验研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2003: 26-29 (Wang Jinbao. Experimental investigation of the visible light arrays of Si-CCD irradiated by the laser[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2003: 26-29)
- [5] Wang Tingting, Li Pingxue, Yu Xuyang, 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: 036004.
- [6] 杨建荣. 碲镉汞材料物理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012 (Yang Jianrong. Physics and technology of HgCdTe materials[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012)
- [7] 杨海峰. 线阵碲镉汞探测器的光致反常响应及门锁效应研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015: 1-6 (Yang Haifeng. Researches on the abnormal response and latchup effect of PV-HgCdTe linear array detector induced by light[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015: 1-6)
- [8] Bartoli F, Esterowitz L, Krueger M, et al. Irreversible laser damage in ir detector materials[J]. *Applied Optics*, 1977, 16(11): 2934-2937.
- [9] Chen C S, Liu A H, Sun G, et al. Analysis of laser damage threshold and morphological changes at the surface of a HgCdTe crystal[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2006, 8(1): 88-92.
- [10] Garg A, Kapoor A, Tripathi K N, et al. Laser induced damage studies in mercury cadmium telluride[J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, 39(7): 1319-1327.
- [11] 许晓军, 曾交龙, 陆启生, 等. 1.06  $\mu\text{m}$ 激光对PC型HgCdTe探测器的破坏阈值研究[J]. *强激光与粒子束*, 1998, 10(4): 552-556. (Xu Xiaojun, Zeng Jiaolong, Lu Qisheng, et al. Research of damage thresholds of PC-type HgCdTe detector under CW-YAG laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1998, 10(4): 552-556)
- [12] 郑业亮, 胡以华, 赵楠翔, 等. 脉宽及重频对HgCdTe探测器损伤阈值影响分析[J]. *激光技术*, 2018, 42(2): 265-270. (Zheng Yeliang, Hu Yihua, Zhao Nanxiang, et al. Analysis of the influence of pulse width and repetition frequency on damage threshold of HgCdTe detector[J]. *Laser Technology*, 2018, 42(2): 265-270)
- [13] Wang Xi, Wang Qingsheng, Hu Hongtao, et al. Experimental study of HgCdTe imaging sensor irradiated by pulse  $\text{CO}_2$  laser[C]//Proceedings of SPIE 10152, High Power Lasers, High Energy Lasers, and Silicon-based Photonic Integration. 2016: 1015202.
- [14] 栗兴良, 牛春晖, 马牧燕, 等. 10.6 $\mu\text{m}$ 激光辐照碲镉汞红外探测器热损伤研究[J]. *红外技术*, 2016, 38(1): 6-9,20. (Li Xingliang, Niu Chunhui, Ma Muyan, et al. Research on the thermal damage of HgCdTe infrared detector under laser irradiation of 10.6  $\mu\text{m}$  wavelength[J]. *Infrared Technology*, 2016, 38(1): 6-9,20)
- [15] 褚君浩. 窄禁带半导体物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2005 (Chu Junhao. Narrow gap semiconductor physics[M]. Beijing: Science Press, 2005)
- [16] 陆启生, 江天, 江厚满, 等. 半导体材料和器件的激光辐照效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015 (Lu Qisheng, Jiang Tian, Jiang Houman, et al. Laser radiation effects on semiconductor materials and devices[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015)
- [17] Chen J K, Tzou D Y, Beraun J E. Numerical investigation of ultrashort laser damage in semiconductors[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, 48(3/4): 501-509.
- [18] Seiler D G, McClure S W, Justice R J, et al. Nonlinear optical characterization of  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  using two-photon absorption techniques[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 1986, 4(4): 2034-2039.
- [19] Kinch M A. A theoretical model for the HgCdTe electron avalanche photodiode[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2008, 37(9): 1453-1459.
- [20] Adachi S. Properties of semiconductor alloys: group-IV, III-V and II-VI semiconductors[M]. Chichester: Wiley, 2009.
- [21] 陈星. 碲镉汞红外焦平面探测器可靠性相关技术研究[D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2014: 1-18 (Chen Xing. Research on the related technology of HgCdTe infrared focal plane detector reliability[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014: 1-18)
- [22] Syllaios A J, Liao P K K, Dean B E. Optical absorption coefficient of CdZnTe[C]//Proceedings of SPIE 2274, Infrared Detectors: State of the Art II. 1994: 49-54.
- [23] 邱伟成. 线阵光伏型碲镉汞探测器激光辐照效应若干问题研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012: 12-32 (Qiu Weicheng. Research on the irradiation effects of PV-HgCdTe linear array detector under laser[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012: 12-32)