

文章编号:1001-5078(2024)12-1879-06

· 红外材料与器件 ·

连续激光辐照碲镉汞探测器仿真研究

蒋成龙, 王彦斌, 肖文健, 张德锋, 周旋风
(中国人民解放军63892部队, 河南 洛阳 471003)

摘要:激光有源压制干扰是对抗红外成像导引头的有效手段,不同入射条件下的饱和阈值是研究对红外成像导引头干扰效果的核心参数。为获得红外成像导引头在强激光照射下的饱和阈值,本文基于COMSOL多物理场仿真平台,开展了连续激光干扰短波、中波和长波红外碲镉汞探测器的建模仿真。首先,对碲镉汞材料和典型的平面结碲镉汞像元结构进行了模型构建;然后采用电磁波与半导体耦合多物理场接口计算光生伏特效应,分析了不同激光波长、功率、工作温度等因素对零偏压碲镉汞红外探测器像元光生电动势的影响,展示了COMSOL多物理场仿真平台仿真激光辐照效应的可行性。仿真结果可为激光干扰效应半实物仿真提供参考依据。

关键词:碲镉汞;红外探测器;激光干扰;光生电动势;COMSOL

中图分类号:TN215;TN977 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2024.12.011

Simulation research on continuous laser irradiation of HgCdTe detectors

JIANG Cheng-long, WANG Yan-bin, XIAO Wen-jian, ZHANG De-feng, ZHOU Xuan-feng
(The 63892 Unit of the PLA, Luoyang 471003, China)

Abstract: Active laser jamming is an effective means to counter infrared imaging seekers, and the saturation threshold under different incident conditions is the core parameter for studying the jamming effect on infrared imaging seekers. To obtain the saturation threshold of infrared imaging seekers under strong laser irradiation, the modeling and simulation of continuous laser jamming on short-wave, medium-wave, and long-wave infrared HgCdTe detectors is conducted based on the COMSOL multi-physics simulation platform. Firstly, models of HgCdTe material and typical planar junction HgCdTe pixel structures are constructed. Then, the electromagnetic wave and semiconductor coupling multi-physics interface is used to calculate the photovoltaic effect, and the effects of different laser wavelengths, powers, operating temperatures, and other factors on the photogenerated electromotive force of zero-bias HgCdTe infrared detector pixels are analyzed to demonstrate the feasibility of simulating laser irradiation effects using the COMSOL multi-physics simulation platform. The simulation results can provide a reference for semi-physical simulation of laser jamming effects.

Keywords: HgCdTe; infrared detector; laser interference; photoelectric electromotive force; COMSOL

1 引言

激光有源压制干扰是对抗红外成像制导武器的重要手段^[1],通过采用大功率激光束辐照红外成像

引头内的探测组件,可扰乱其探测器光敏面上的能量分布,降低生成目标/背景图像的像面层次和清晰度,严重时造成整个像面无法识别,进而无法正常跟踪目

作者简介:蒋成龙(1996-),男,硕士研究生,研究实习员,主要从事光电对抗技术方面的研究。E-mail: jcl_cjy@163.com
通讯作者:王彦斌(1982-),男,博士,副研究员,主要从事光电对抗技术方面的研究。E-mail: wangyanbin82@163.com
收稿日期:2024-03-11

标,达到致盲导引头的目的。

在实际激光对抗过程中,不同发射参数(脉宽、功率等)的激光干扰装备在不同环境条件下对不同体制(PN结型、CMOS、CCD等)的红外成像导引头探测器的干扰效果也不同,因此试验得到的饱和阈值也不同。另外,外场实地对抗测试,协调实施难度大,光电探测器对激光极为敏感,稍有不慎就会损伤探测器,尤其红外探测器价格昂贵,会给国家造成不小的经济损失,因此通过大量开展外场测试获取饱和阈值的方式,费效比极高。从基本原理出发,构建激光辐照红外成像导引头探测器的效应模型,仿真不同条件下的饱和阈值,与典型试验结果验证比对,是目前研究激光辐照效应的有效手段^[2]。

碲镉汞($\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$)是一种禁带宽度连续可调的化合物半导体,自由电子迁移率高,光生少数载流子寿命长,具有较高的吸收系数和量子效率,可以通过改变镉(Cd)组分比例产生不同的禁带宽度,响应不同波长的红外光,覆盖1~30 μm 波段,在红外探测材料中始终占据主流地位^[3]。本文基于COMSOL Multiphysics 6.0有限元多物理场仿真软件对碲镉汞红外探测器进行光电效应的数值分析研究。COMSOL是一款基于先进数值方法的通用仿真软件^[4],能够模拟真实场景下的物理现象,设计和优化实际工程问题,支持单一物理场及多物理场耦合建模,从模型搭建到后处理结果输出都在同一界面完成,在诸多科研仿真领域都得到了广泛的应用。本文选取典型平面结碲镉汞像元结构,利用COMSOL软件耦合电磁波频域接口与半导体接口,仿真激光辐照半导体光电器件中的光跃迁过程,通过电路接口计算探测器光生电动势,从而得到不同激光波长、功率以及工作温度等因素对碲镉汞红外探测器光生电动势的影响,该研究加深了对激光干扰碲镉汞红外探测器背后半导体物理机制的理解,也为进一步开展激光干扰效应内外场试验提供了一定的参考。

2 HgCdTe材料及像元结构建模

2.1 HgCdTe材料建模

目前的COMSOL软件内置材料库中HgCdTe材料仅有一些简单的热力学和结构参数,缺乏仿真建模过程所需的一些器件参数。通过收集汇总相关文献,设定HgCdTe各项性能参数如下。

HgCdTe的禁带宽度 E_g 常用经验公式表示,它是

Cd组分 x 和温度 T 的函数^[5]:

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

电子亲和能是影响结区势垒的主要材料参数,HgCdTe材料的电子亲和能 χ (eV)经验公式为^[6]:

$$\chi(\text{eV}) = 4.23 - 0.813[E_g - 0.083] \quad (2)$$

HgCdTe空穴的有效质量 $m_h^* \approx 0.55 m_0$, m_0 是电子静止质量,HgCdTe电子的有效质量为^[6]:

$$m_e^* = \left[-0.6 + 0.633 \left(\frac{2}{E_g} + \frac{1}{E_g + 1} \right) \right]^{-1} m_0 \quad (3)$$

考虑非抛物线效应的HgCdTe本征载流子浓度(cm^{-3})的经验公式为^[7]:

$$n_i = (5.585 - 3.82x + 0.001753T - 0.001364xT) \times 10^{14} E_g^{3/4} T^{3/2} e^{-E_g/(2k_B T)} \quad (4)$$

在非简并情况下,非抛物线效应等价的导带和价带的有效状态密度 N_C 和 N_V 可以被写作^[7]:

$$N_V = 2 \left(\frac{2\pi m_h^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \quad (5)$$

$$N_C = \frac{n_i^2}{N_V} \exp\left(\frac{E_g}{kT}\right) \quad (6)$$

碲镉汞电子迁移率 μ_n 的经验表达式为^[8]:

$$\mu_n = 9 \times 10^4 \left(\frac{0.2}{x} \right)^{7.5} T^{-2 \left(\frac{0.2}{x} \right)^{0.6}} \quad (7)$$

在器件模拟中,通常采用电子和空穴的迁移率比 $\mu_n/\mu_h = 100$,来计算空穴迁移率。介电常数为^[8]:

$$\varepsilon = 20.5 - 15.5x + 5.7x^2 \quad (8)$$

碲镉汞材料折射率 $n = \sqrt{\varepsilon}$,当激光从空气端正入射时,碲镉汞材料的反射率为:

$$R = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \quad (9)$$

在本文中,主要考虑的复合机制包含非本征Shockley-Real-Hall(SRH)复合、材料固有的俄歇复合和辐射复合过程。电子和空穴的俄歇复合系数表示为^[9]:

$$C_n = \left[2n_i^2 \frac{3.8 \times 10^{-18} \varepsilon^2 \sqrt{(1+r)}(1+2r)}{\frac{m_e^*}{m_0} |F_1 F_2|^2 \left(\frac{k_B T}{E_g} \right)^{1.5}} \times \exp\left(\frac{1+2r}{1+r} \frac{E_g}{k_B T} \right) \right]^{-1} \quad (10)$$

其中, $r = m_e^*/m_h^*$,取布洛赫函数周期部分的重叠

积分 $|F_1 F_2| = 0.2$, 俄歇空穴复合系数表示为^[8]:

$$C_p = C_n \left[\frac{6(1 - \frac{5E_g}{4k_B T})}{1 - \frac{3E_g}{2k_B T}} \right]^{-1} \quad (11)$$

辐射复合系数 G_R 为^[9]:

$$G_R = 5.8 \times 10^{-13} \epsilon_s^2 \left(\frac{m_0}{m_e^* + m_k^*} \right)^{1.5} \left(1 + \frac{m_0}{m_e^*} \right) \times \left(\frac{300}{T} \right)^{1.5} (E_g^2 + 3kT E_g + 3.75k^2 T^2) \quad (12)$$

本文仿真过程中设计到的其他 HgCdTe 参数如表 1 所示。

表 1 HgCdTe 部分仿真参数

Tab. 1 Partial simulation parameters of HgCdTe

参数	具体值
Cd 组分“x”	0.22/0.285/0.41
P 区掺杂浓度 N_a/cm^{-3}	2×10^{16}
N 区掺杂浓度 N_d/cm^{-3}	2×10^{18}
缺陷能级 E_t	0.03 eV from conduct band
电子 SRH 寿命/ μs	0.4
空穴 SRH 寿命/ μs	0.02
自发光寿命/n s	2
表面电子复合速率/ $(cm \cdot s^{-1})$	170
表面空穴复合速率/ $(cm \cdot s^{-1})$	70
像元宽度/ μm	10
P 区厚度/ μm	8
N 区厚度/ μm	3
面外厚度/ μm	10

2.2 HgCdTe 探测器像元结构建模

HgCdTe 探测器像元结构建模主要使用 COMSOL 半导体模块、电磁波频域模块与电磁波-半导体耦合多物理场及电路模块。COMSOL 半导体模块基于漂移扩散理论,通过有限体积或有限元方法求解漂移扩散方程和泊松方程,求解电势和电子、空穴浓度对应的耦合偏微分方程组,既可以结合对有源或无源器件进行基于电路的建模,又可与电磁波频域接口耦合,研究半导体的光电效应,为更全面地理解半导体器件的工作机制和半导体技术的优化和创新提供了强大的支持。

图 1 设计了简化的 n-on-p 型 HgCdTe 红外探测器单元,在电磁波频域模块中主要设置如下:边界 1 是受光面,设置为散射边界条件,选择入射场为由电场定义电磁波,散射波类型为平面波,表示从光从该表面入射,并设置好电场强度。另外在半导体模块中设置边界 1 设置陷阱辅助表面复合边界条件,给定电子和空穴的表面复合速度以及缺陷和本征水平之间的能量差。边界 2 和 3 设置为电磁波模块的周期性边界条件,表示重复排列的像元结构;电极接触的地方在电磁波频率模块接口中设置为理想电导体边界条件,其余面设为散射边界条件,无入射波。

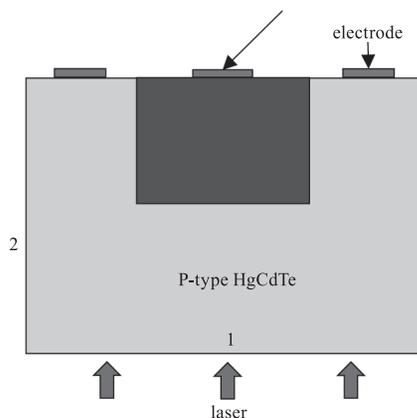


图 1 简化的 n-on-p 型 HgCdTe 红外探测器单元示意图

Fig. 1 Simplified schematic diagram of an n-on-p type HgCdTe infrared detector unit

图 2 给出了所有模块的节点设置,在 COMSOL 半导体模块中,通过解析掺杂模型设置半导体材料掺杂区域,其中 P 型掺杂为整个模型,N 区掺杂为模型中间区域。产生-复合机制包括:光跃迁、陷阱辅助复合、陷阱辅助表面复合、直接复合(即辐射复合)和俄歇复合。光跃迁节点默认使用直接带隙模型,其过渡矩阵元素采用自发光寿命来控制。通过光跃迁节点,COMSOL 能自动将受激吸收、受激发射和自发发射的产生和复合速率添加到半导体中,并计算相对介电常数的变化。陷阱辅助复合和陷阱辅助表面复合需设置电子和空穴寿命以及缺陷与本征水平之间的能量差,俄歇复合和直接复合需设置相应的俄歇复合因子和直接复合因子。电极(electrode)处在半导体模块接口中设置金属接触边界条件,与 P 区接触的终端类型为电压,设置其值为 0 V;与 N 区接触的终端类型为(电路)电流,来耦合到电路接口,在电路接口设置电流源 0 A,表示测量开路状态下的光生电动势。最后添加“半导体-电

磁波耦合”多物理场接口。本模型均采用 COMSOL 的“频域 - 稳态”研究步骤接口进行分析。

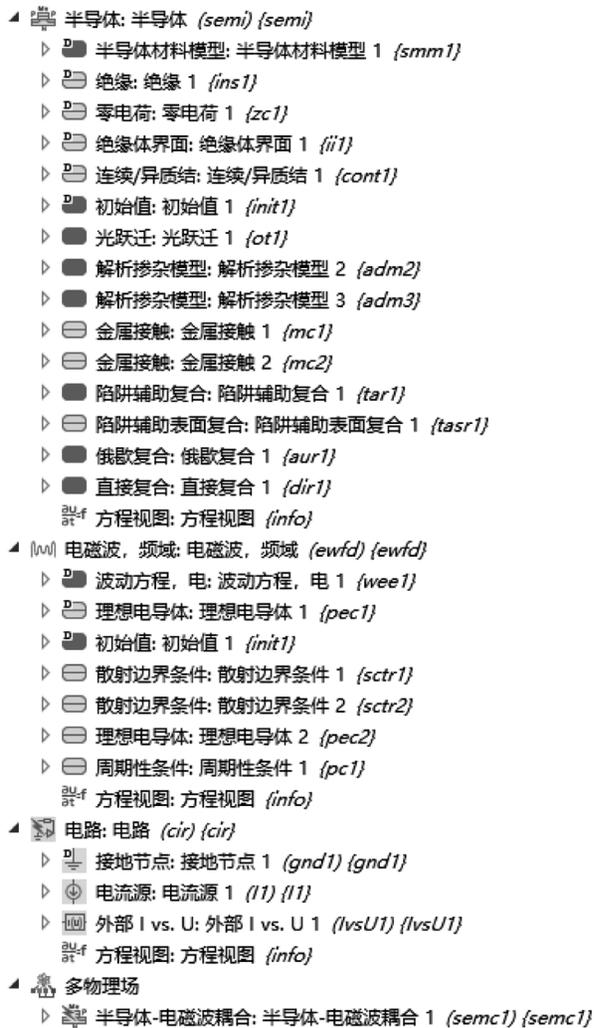


图 2 COMSOL 模块节点设置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of node settings for the COMSOL module

3 仿真计算与分析

为分析不同波段的碲镉汞红外探测器的饱和和效应,分别设置 Cd 组分“ x ”为:0.22、0.285、0.41;典型工作温度:77 K、110 K 和 200 K;中心波长:8 μm 、4 μm 和 2.4 μm ,分别对应长波(LW)、中波(MW)、短波(SW)红外碲镉汞的典型波长的辐照情形。仿真过程中碲镉汞探测器像素单元结构均不变,采用控制变量法分析激光波长、功率以及工作温度对碲镉汞红外探测器光生电动势的影响。

以长波红外碲镉汞为例,当 $x = 0.22$,温度为 77 K 时,HgCdTe 的截止波长为 9.74 μm ,选取入射波长为 8 μm ,设置入射功率为 1 W/cm^2 ,在 COMSOL 中得到单位体积的向上激发跃迁净速率如图 3 所示,从图中可以看出,光生伏特效应产生的非平衡载流

子主要分布在 P 区。

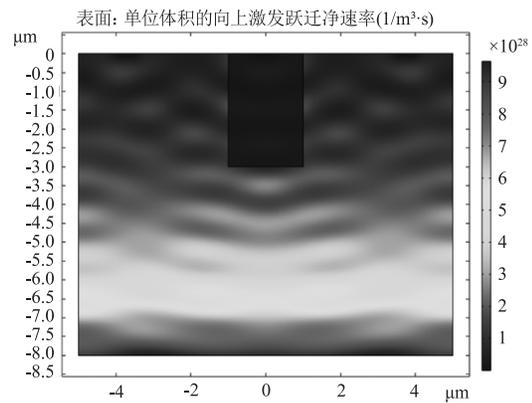


图 3 长波碲镉汞单位体积的向上激发跃迁净速率分布图

Fig. 3 Distribution diagram of upward excitation transition net rate

per unit volume of long-wave HgCdTe

在 COMSOL 研究拓展中勾选辅助扫描,可对不同波长红外碲镉汞材料进行不同参数的扫描,首先考虑功率的扫描,设定激光入射功率密度变化范围为 0.001 $\text{W}/\text{cm}^2 \sim 20 \text{W}/\text{cm}^2$,在不考虑温差电动势的情况下,将电路模块得到开路电压作为 HgCdTe 光生电动势,得到 HgCdTe 光生电动势随激光功率变化曲线图如图 4 所示。

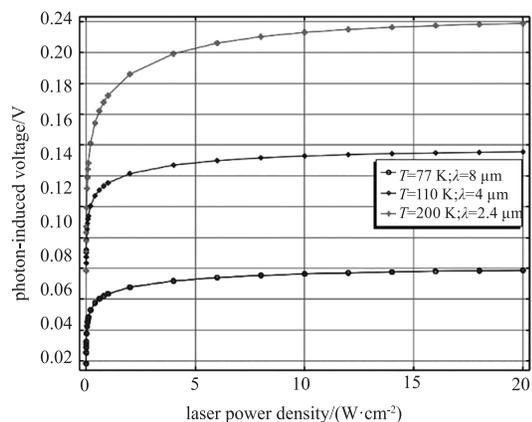


图 4 HgCdTe 光生电动势随激光功率变化曲线图

Fig. 4 Curve of photovoltaic potential of HgCdTe varying with laser power

相同入射激光功率下,短波红外碲镉汞探测器的光生电动势最大,最大能达到 0.2 V 以上,长波红外碲镉汞探测器的光生电动势最小,极限约为 0.08 V。当激光入射光功率小于 1 W/cm^2 时光生电动势随激光入射光功率增长较快,在之后出现明显的饱和效应,仿真结果和文献实验结果较为吻合,王思雯等采用高功率 CO_2 激光对远场 HgCdTe 探测器的干扰实验表明靶面处功率密度为 20.5 W/cm^2 时,对探测器产生饱和和干扰效果^[10]。图 5 是在 COMSOL 模型数据集中垂线上取截线,从而得到

长波 HgCdTe 电势变化曲线图,从图中可以看出随着入射激光光功率的提高,N 区和 P 区的势垒电势差逐渐降低,光生电动势最大为无光照时半导体 PN 结的势垒高度。

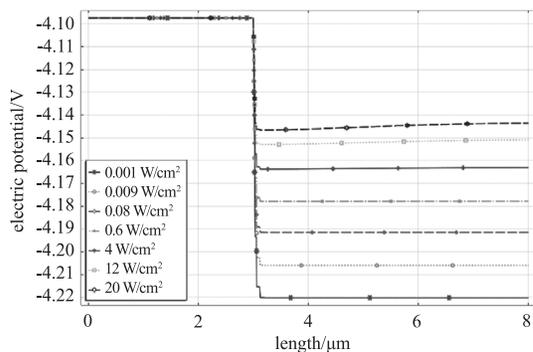


图5 HgCdTe 红外探测器单元中垂线上长波 HgCdTe 电势变化曲线图

Fig. 5 Curve of potential variation of long-wave HgCdTe along the vertical line in HgCdTe infrared detector unit

图6给出了不同组分的 HgCdTe 材料在不同入射波长下的光谱响应曲线,对于不同组分的 HgCdTe 材料最强的光谱响应波长分别为:2.5 μm 、4.7 μm 和 8.8 μm 。长波碲镉汞材料的光谱响应范围最宽,在 6~9 μm 范围内均有较强的光谱响应,短波的光谱响应范围最窄,中波次之。由于此时激光入射光功率 1 W/cm^2 已经使探测器饱和,在进行波长扫描时,HgCdTe 的光谱响应曲线下下降趋势并不明显,这一结果展示了在高功率激光照射下,HgCdTe 探测器的光谱响应特性。

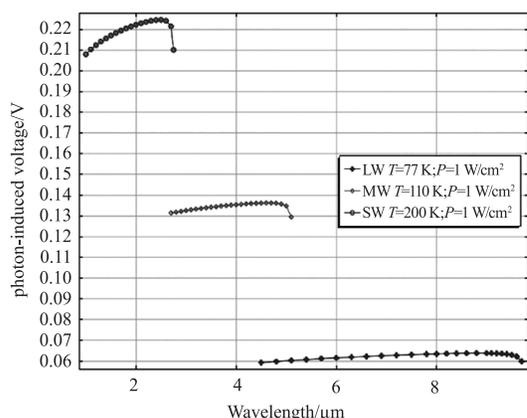


图6 HgCdTe 光生电动势光谱响应曲线图

Fig. 6 Spectral response curve of photovoltaic potential of HgCdTe

图7描绘了在不同波段的 HgCdTe 材料在相同激光功率入射情况下,其光生电动势随工作温度的变化情况。随着工作温度的逐渐升高,光生电动势大致呈现出线性下降的趋势,当温度继续升高至某

一特定值时,光生电动势的下降趋势开始变得平缓。这一现象与范永杰等人的理论计算结果相吻合^[11]。对于长波 HgCdTe 而言,当温度达到 118 K 时,其光生电动势已经降低至 77 K 时的一半。此时探测器的性能已经显著下降,150 K 被认为是长波 HgCdTe 的工作温度上限,超过这个温度,探测器无法正常工作。对于中波 HgCdTe,其性能随温度的变化趋势与长波相似。当温度达到 170 K 时,中波 HgCdTe 的光生电动势降为 110 K 时的一半,说明中波 HgCdTe 的制冷要求相对较低,可以在相对较高的温度下保持较好的性能,当温度升高至 220 K 时,探测器基本上已经失去了探测能力。至于短波 HgCdTe,其温度适应范围相对较大,可用在室温下正常工作,当温度达到 235 K 时,其光生电动势降为 150 K 时的一半,但相较于其他波段的 HgCdTe,其性能下降的速度相对较慢。

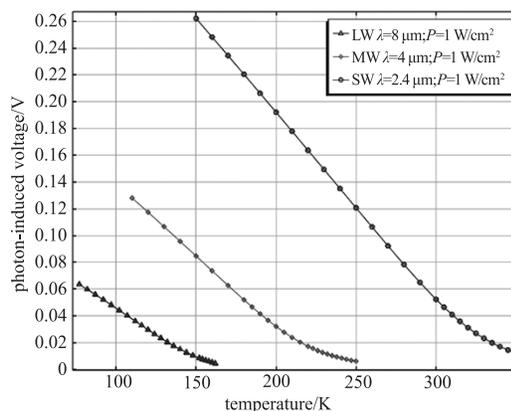


图7 HgCdTe 光生电动势随温度变化曲线图

Fig. 7 Curve of photovoltaic potential of HgCdTe varying with temperature

4 结论

本文对典型的平面结碲镉汞红外探测器进行了材料建模,建立了典型的平面结零偏压电路结构的碲镉汞像元信号级模型,基于 COMSOL 多物理场仿真软件对连续激光辐照碲镉汞红外探测器的半导体光电效应进行了仿真试验,考虑了半导体内不同的产生-复合机制和边界条件,得到了不同组分的碲镉汞材料在不同入射光波长、功率和工作温度下的光生电动势变化曲线,为分析激光干扰碲镉汞红外探测器饱和阈值提供了参考依据,展示了采用多物理仿真软件进行激光干扰效应研究的潜力,为下一步开展激光干扰红外成像导引头半实物仿真实验奠定了基础。

参考文献:

- [1] Shen Huiting, Chai Jinhua. Research on the scheme of anti-high repetition rate laser active interference [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2007, (2): 202 - 205. (in Chinese)
申会庭, 柴金华. 抗高重频激光有源干扰的方案研究 [J]. 量子电子学报, 2007, (2): 202 - 205.
- [2] Li Zhihan. Simulation research on imaging guidance performance of infrared seeker under laser interference [D]. Xi'an; Xi'an Electronic Technology University, 2021. (in Chinese)
李祉涵. 激光干扰红外导引头成像制导性能仿真研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
- [3] Chu Junhao. Narrow bandgap semiconductor physics [M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)
褚君浩. 窄禁带半导体物理 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [4] Li Chao. Research on the damage mechanism of CCD by nanosecond pulse/continuous laser [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
李超. 纳秒脉冲/连续激光对 CCD 的损伤机理研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2019.
- [5] He Jiale. Research on potential barrier blocking HgCdTe infrared detector [D]. Shanghai; Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, 2020. (in Chinese)
何家乐. 势垒阻挡型碲镉汞红外探测器研究 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所 中国科学院大
学, 2020.
- [6] Rogalski, Antoni. Infrared detectors, second edition [M]. Crc Press, 2010.
- [7] Wang Jun. Mechanism research on the photoelectric response characteristics of HgCdTe infrared detectors [D]. Hefei; University of Science and Technology of China, 2012. (in Chinese)
王俊. 碲镉汞红外探测器光电响应特性的机理研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012.
- [8] Li Long, Sun Hao, Zhu Xi'an. Simulation analysis of dark current in long-wave HgCdTe detectors [J]. Infrared Technology, 2014, 36(1): 73 - 78. (in Chinese)
李龙, 孙浩, 朱西安. 碲镉汞长波探测器暗电流仿真分析 [J]. 红外技术, 2014, 36(1): 73 - 78.
- [9] Emelie P Y. HgCdTe auger-suppressed infrared detectors under non-equilibrium operation. [J]. Dissertations & Theses Gradworks, 2009: 6372.
- [10] Wang Siwen, Guo Lihong, Zhao Shuai, et al. Interference experiment of high-power CO₂ laser on far-field HgCdTe detector [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(4): 798 - 804. (in Chinese)
王思雯, 郭立红, 赵帅等. 高功率 CO₂ 激光对远场 HgCdTe 探测器的干扰实验 [J]. 光学精密工程, 2010, 18(4): 798 - 804.
- [11] Fan Yongjie, Qin Qiang. Output characteristics and soft damage determination of HgCdTe detector under laser irradiation [J]. Infrared Technology, 2020, 42(9): 829 - 832. (in Chinese)
范永杰, 秦强. 激光辐照 HgCdTe 探测器输出特性与软损伤判定 [J]. 红外技术, 2020, 42(9): 829 - 832.