

10.6 μm 激光辐照碲镉汞红外探测器热损伤研究

栗兴良, 牛春晖, 马牧燕, 吕勇, 耿蕊

(北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100192)

摘要: 研究了 HgCdTe 红外探测器的结构以及材料特性, 阐述了激光损伤 HgCdTe 红外探测器的机理, 建立了 HgCdTe 红外探测器三维仿真模型, 利用有限元分析法, 对 10.6 μm CO₂ 激光辐照 HgCdTe 探测器的温度变化情况进行了仿真, 并通过参考已有文献的实验数据, 验证了模型的准确性。当 HgCdTe 探测器受到峰值功率密度为 $5 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 的单脉冲激光辐照时, HgCdTe 晶体的 Hg 离子开始析出, 探测器性能降低, 并不可恢复; 当激光峰值功率为 10^8 W/cm^2 , 探测器 HgCdTe 晶体开始出现熔融现象, 此时激光能量密度为 1 J/cm^2 ; 当激光峰值功率为 $2 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 时, 铟柱达到熔融温度, 探测器会出现铟柱脱落现象, 被彻底损坏。

关键词: HgCdTe; 红外探测器; 单脉冲激光; 激光损伤; 有限元分析法

中图分类号: TN216 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2016)01-0006-04

Research on the Thermal Damage of HgCdTe Infrared Detector under Laser Irradiation of 10.6 μm Wavelength

LI Xingliang, NIU Chunhui, MA Muyan, LYU Yong, GENG Rui

(School of Instrumentation Science & Optoelectronic Engineering,

Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: The structure and material properties of the HgCdTe infrared detector was studied, the mechanism of laser damaging HgCdTe infrared detector was described, and the 3D simulation model of HgCdTe infrared detector was built. The temperature changing of HgCdTe detector under 10.6 μm laser irradiation was simulated depending finite element analysis method. Accuracy of the model was verified by contrasting experimental data of the reference literatures. The simulation results show when the peak power density of the single pulse laser is $5 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$, Hg ion will separate from HgCdTe crystal and the properties of HgCdTe infrared detector is damaged and could not be restored. When the peak power density of the single pulse laser is 10^8 W/cm^2 , HgCdTe crystal of the detector starts to melt, and the laser fluence is 1 J/cm^2 . When the peak power density of the single pulse laser is $2 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$, indium column reaches the fusion point and will shed, then the HgCdTe infrared detector is completely damaged.

Key words: HgCdTe, infrared detector, single-pulse laser, laser damage, finite element method

0 引言

碲镉汞材料的发明, 揭开了红外科技的新篇章, 使红外技术进入了崭新的时代。碲镉汞卓越的性能, 是其他红外材料没法相比的。经过半个多世纪的发展, 碲镉汞探测器经历了 3 个阶段: 第一代陆军通用组件, 第二代高性能红外焦平面器件和第三代高清、多波段红外焦平面器件^[1]。在碲镉汞材料发明前, 红外探测主要采用非本征半导体来实现, 例如锗掺杂非

本征红外探测器, 这类探测器需要大幅度降低温度来抑制材料固有的高热激发噪声, 工作温度一般低于 28 K, 实际运用难度很大, 制造成本也很高。碲镉汞材料则很大程度上解决了这些难题, 碲镉汞探测器的研发经历了艰辛的历程, 要把碲、镉、汞 3 种元素组合在一起, 需要很高的汞蒸汽压, 巨大的汞压让研究设备发生了很多次爆炸, 研究人员不得不降低温度, 这样就直接影响了材料的机械性能。直到研究人员认识到用 CdTe 和 HgTe 两种化合物按比例混合来合成碲镉

收稿日期: 2015-07-20; 修订日期: 2015-09-24.

作者简介: 栗兴良 (1986-), 男, 山东临沂人, 硕士, 主要从事激光应用与光电检测方向研究。

基金项目: 北京市教委科研计划项目 (KM201511232005)。

汞晶体, 碲镉汞的研究道路才平坦了起来。碲镉汞材料吸收光子的高效性决定了其受到高能激光辐照之后温度会迅速升高, 探测效果受到干扰, 甚至永久性损伤。所以研究激光对碲镉汞探测器热损伤就非常有必要。碲镉汞探测器市场价格非常高, 决定了大部分情况无法通过大量实验来研究其损伤特性, 计算机仿真可以解决这一难题, 那么设计相对准确的仿真模型成为一种需求。

1 碲镉汞探测器特性和结构

1.1 碲镉汞材料特性

碲镉汞化学式 $Hg_{1-x}Cd_xTe$ 有量子效率高、响应速度快的特点, 可以通过改变镉组分 (x) 让它的光电响应覆盖 $1\sim 3\ \mu m$ 、 $3\sim 5\ \mu m$ 、 $8\sim 12\ \mu m$ 三个红外“大气窗口”, 以及 $18\ \mu m$ 以上的甚长波红外波段, 碲镉汞材料在碲镉汞探测器中以外延薄膜材料应用为主。

HgCdTe 材料在 80 K 时对于 $10.6\ \mu m$ 波长的介电常数实部为 3.54, 虚部为 0.24^[2]; 295 K 时, 实部为 3.54, 虚部为 0.78; CdTe 介电常数实部为 2.6 实部为 0^[3]。

HgCdTe 材料的导热系数为: $6.394041 - 0.02014959T + 5.954089 \times 10^{-5}T^2 - 1.134691 \times 10^{-7}T^3 + 8.148373 \times 10^{-11}T^4$, T 为热力学温度。

1.2 碲镉汞探测器模型

一代碲镉汞探测器为光导线列, 一维; 二代为光伏阵列器件, 二维, 如 240×4 , 288×4 , 480×4 等; 三代则为(二维, 光伏)大面阵凝视器件, 如 640×480 , 624×512 等^[4]。光导器件结构相对简单, 为第一代探测器, 光伏器件较光导器件功耗小, 响应快, 但结构复杂。现在只分析其热特性, 故将其结构简化。探测器分为 4 层, 首先在 CdTe 层上生长一层 HgCdTe 晶体作为光敏元, 然后焊接钢柱阵列, 最下边是硅基。其中 CdTe 层厚 $50\ \mu m$, HgCdTe 光敏层厚 $10\ \mu m$, In 柱高 $10\ \mu m$, 直径 $20\ \mu m$, Si 基厚 $50\ \mu m$, 整个模型为 11×11 个像素元。第三代碲镉汞红外探测器工作温度为 77 K, 需要液氮来冷却, 模型采用将表面温度设置为恒温 77 K 的方式, 来模拟液氮冷却场。

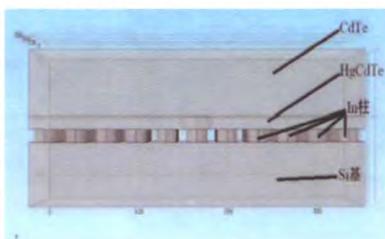


图 1 探测器模型结构

Fig.1 Structure of detector model

碲镉汞是一种主要由离子键结合的三元半导体

材料, 构成元素汞非常不稳定, 汞容易从碲镉汞材料中析出从而造成材料缺陷、材料不均匀以及器件性能不均匀^[5]。实验表明碲镉汞材料在 350 K 左右的时候即会产生 Hg 析出现象, 破坏 HgCdTe 晶体结构, 影响器件性能^[6]; 钢柱熔点为 426 K, 所以当钢柱温度达到 426 K 时, 钢柱就有可能脱落; HgCdTe 熔点约为 990 K, 当 HgCdTe 层温度达到熔点时, 探测器将被彻底破坏。

1.3 激光加热理论

当激光照射到材料表面时, 主要以光热模型为主^[7], 一部分激光能量被反射, 另一部分能量被激光作用区材料吸收, 在这个过程中, 激光束等效为一个具有一定时间和空间分布的热源。对于材料吸收的功率密度, 我们可以根据玻意耳定律表示:

$$Q(z) = Q_0(1 - R_\lambda)e^{-\alpha z} \quad (1)$$

式中: $Q(z)$ 为距表面 z 处单位体积材料吸收的辐射功率; Q_0 为材料表面接收到的激光功率; $1 - R_\lambda$ 为材料吸收率; α 为材料的吸收系数, cm^{-1} 。

热量传递分为导热、对流、辐射 3 部分, 它们的机理也是各不相同的, 方程也不一样。总的传热方程为:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p (\vec{u} \cdot \nabla) T = \nabla(k \nabla T) + Q(z) \quad (2)$$

式中: ρ 是材料密度; C_p 是材料比热容; T 是绝对温度; u 是速度矢量; ∇ 为几何梯度算子; k 为材料导热系数; $Q(z)$ 为激光热源; 等号左边第一项为热量积累, 第二部分为对流项, 等号右边第一项为热传导项。

采用三节点三角形对模型进行网格剖分, 三角形单元对复杂几何轮廓有较强的适应能力, 很容易通过增加三角形网格数量来精确的逼近复杂的几何边界^[8]。

1.4 有限元理论

有限元方法, 基础是变分原理和加权余量法, 基本思路是把求解域离散成有限个互不叠加的单元, 然后在每个单元内选择合适的节点作为插值点, 把待求的偏微分方程中的因变量改写成依据及节点上的值的插值函数组成的线性方程组^[9], 从而求得所需要的解。有限元方法能够处理复杂区域, 精度可根据需要调节, 缺点是计算量大, 但高性能计算机已经解决了这个问题。

2 激光辐照碲镉汞探测器仿真

2.1 波长为 10.6 μm、功率密度为 10⁶ W/cm² 激光辐照探测器

不同强度激光辐照碲镉汞探测器产生的结果有

很大的差别，以功率密度为 10^6 W/cm^2 为例。激光脉宽为 10 ns ，仿真时间为 $200 \mu\text{s}$ ，假设在光斑范围内，激光能量分布均匀。设置探测器上接收到的激光光斑半径为 $15 \mu\text{m}$ ，功率密度为 10^6 W/cm^2 。经过计算，CdTe 层和 HgCdTe 层吸收的激光能量密度分别如图 2 所示，横坐标为弧长，纵坐标为吸收能量密度。碲镉汞层和铟柱层温度分别如图 3 所示，横坐标为时间，纵坐标为相应温度。

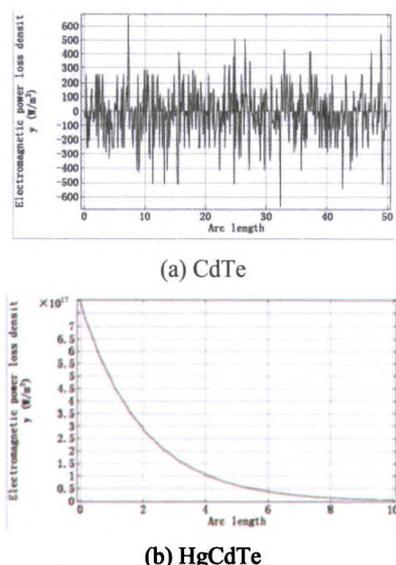


图 2 CdTe 层和 HgCdTe 层对激光的吸收
Fig.2 Absorption of CdTe and HgCdTe to laser

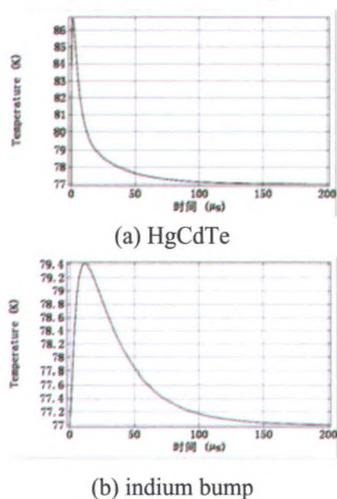


图 3 碲镉汞层和铟柱层温度

Fig.3 Temperature of HgCdTe and indium bump

我们可以看出，碲镉汞探测器受到 $10.6 \mu\text{m}$ 激光辐照时，CdTe 层对激光能量几乎没有吸收，而 HgCdTe 晶体对激光能量的吸收达到 93%。高效的激光能量吸收效率使 HgCdTe 材料受激光辐照时温度迅速上升，从如图 3 我们可以看出碲镉汞光敏层吸收激光能量之后，温度迅速上升，在极短的时间内达到 84 K 左右，然后温度上升趋势变缓，在 $1.5 \mu\text{s}$ 左右达到最大值 85.5 K ，然后缓慢下降。

开始温度迅速上升是因为激光脉冲辐照在探测器上面，探测器吸收了激光能量而发生的能量转换；然后温度升高变缓是由于温度升高之后，热传递和热辐射作用增强；最后缓慢降低，是因为激光脉冲结束，探测器内部液氮冷却和热传递作用导致。最后由于液氮制冷 HgCdTe 光敏层温度降为 77 K 。

铟柱温度上升所需要的能量基本上是由于 HgCdTe 层热传递而来。铟柱温度在 $10 \mu\text{s}$ 时间内持续上升，上升速度越来越缓慢，在 $12 \mu\text{s}$ 的时候温度停止升高，最大温度 80 K 左右，由于制冷作用此后开始降低，最后降低为 77 K 。

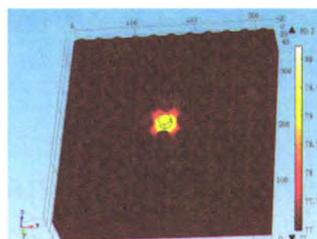


图 4 探测器温度分布图

Fig.4 Distribution of temperature about detector

模型整体分布温度如图 4 所示，从图中可以看出，GeTd 层温度较低，距离光斑较远的铟柱温度也较低；激光辐照区域的碲镉汞层温度较高，铟柱次之，距离光斑越远，温度越低，符合热力学理论。

2.2 不同功率密度的单脉冲激光辐照探测器

以不同强度的单脉冲激光辐照碲镉汞探测器进行仿真并记录实验数据。激光波长为 $10.6 \mu\text{m}$ ，脉宽为 10 ns 。激光功率密度依次为： $1 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 、 $1 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 、 $3 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 、 $4 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 、 $8 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 、 $1 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 、 $1 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ 。分别计算铟柱和 HgCdTe 层的温度，其中 $3 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 和 $3 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 的温度曲线如图 5 所示，其余数据经进一步整理成表格形式如表 1 所示。

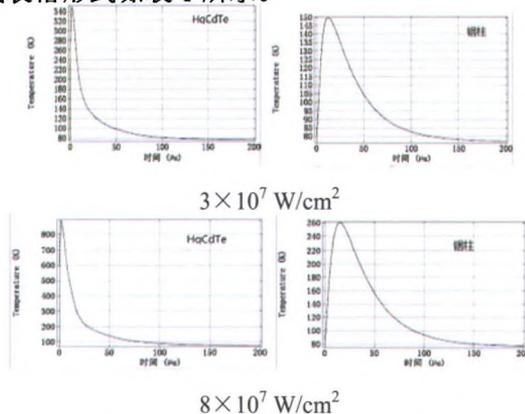


图 5 不同功率密度辐照下碲镉汞层和铟柱最高温度曲线
Fig.5 The highest temperature curves of HgCdTe and indium bump under different power density irradiation

表1 不同功率密度辐照下碲镉汞层和铟柱最高温度以及激光能量密度

Table 1 The highest temperature of HgCdTe and indium bump under different power density irradiation and the energy densities of the laser

Power density/ W/cm ²	Highest temperature of HgCdTe/ K	Highest temperature of indium bump/K	Energy density/ J/cm ²
1×10 ⁶	85.5	79.2	0.01
1×10 ⁷	180	102	0.1
3×10 ⁷	340	150	0.3
5×10 ⁷	500	200	0.5
8×10 ⁷	850	270	0.8
1×10 ⁸	1050	280	1
2×10 ⁸	1900	450	2

从图5和表1可以看出,当激光功率密度为3×10⁷ W/cm²时,探测器温度最高到340 K,并未达到碲镉汞晶体 Hg 离子析出和晶体熔化温度,此时探测器只受到软损伤,停止激光照射,探测器的性能还可以恢复。也就是说,当激光功率密度小于此阈值时,激光无法对碲镉汞平面造成硬损伤。激光功率密度增大到5×10⁷ W/cm²时,碲镉汞层可以温度升高到500 K,此时 HgCdTe 晶体会会有 Hg 元素析出,探测器性能降低,并且无法恢复。激光功率密度增大到10⁸ W/cm²时, HgCdTe 温度超过1000 K,达到了 HgCdTe 材料的融化温度,此时探测器受到熔融性损坏,无法修复。当激光功率密度增大到2×10⁸ W/cm²时,铟柱的温度达到了450 K,此时铟柱达到熔点,出现铟柱脱落现象,探测器彻底损坏。激光脉宽为10 ns,可以计算出 HgCdTe 发生熔融性损坏时,激光能量要大于1 J/cm²。

HgCdTe 层最高温度随功率密度变化如图6所示。从图中可以明显的看出来,激光功率和 HgCdTe 光敏层最高温度大致成线性关系,随着激光功率密度的增大, HgCdTe 层可以达到的最高温度也随之增大。

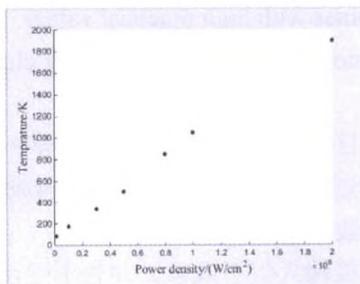


图6 HgCdTe 层最高温度随功率密度变化

Fig.6 The highest temperature of HgCdTe along with power density changes

2.3 仿真数据与实验对比

华中科技大学的蔡虎等人用 CO₂ 单脉冲激光器辐照碲镉汞晶片,当激光峰值功率密度达到1.67×10⁸ W/cm²时, HgCdTe 晶片表面出现凹凸不平现象,显示融化过。同时出现网状龟裂和长的裂缝^[10]。仿真的出的损伤功率密度阈值与之相符。

四川大学和中国人民解放军 63891 部队联合用10.6 μm 脉冲 CO₂ 激光辐照 PC 型 HgCdTe 探测器进行破坏阈值试验研究^[11],当激光脉宽为50 ns 时,探测器的破坏阈值为12.38 J/cm²,此时探测器的输出电压和电阻均增大,仿真的能量损伤阈值和实验基本相符。

3 结语

本文针对波长为10.6 μm 的激光辐照 HgCdTe 红外探测器产生的损伤效应进行了仿真计算,得出激光功率密度在10⁸ W/cm² 级别时,便能够对 CCD 探测器造成永久性损伤,若激光脉宽为10 ns,则激光能量密度为1 J/cm²,仿真数据量级与实验基本相符,变化趋势与实验一致。本仿真模型中加入了液氮的冷却,但是未考虑脉冲激光的爆轰波效应,使计算结果略有偏差,有待进一步改进。

参考文献:

[1] 曾戈虹. HgCdTe 艰辛的历程、辉煌的成就: 一、伟大的发明[J]. 红外技术, 2011, 33(5): 249-251.
ZENG Gehong. The arduous journey and brilliant achievements of HgCdTe: 1. great invention[J]. *Infrared Technology*, 2011, 33(5): 249-251

[2] Edward D. Palik. Handbook of Optical Constants of Solids II [Z]. San Diego: academic press.1998: 682

[3] Edward D. Palik. Handbook of Optical Constants of Solids I [Z]. San Diego: academic press. 1998: 413.

[4] 王忆锋, 唐利斌. 第三代碲镉汞器件的研发进展[J]. 光电技术应用, 2009(5): 17-22+66.
WANG Yi-feng, TANG Li-bin. Advances in third-generation HgCdTe devices[J]. *Electro-optic technology application*. 2009(5): 17-22+66.

[5] 史衍丽. 第三代红外探测器的发展与选择[J]. 红外技术, 2013, 35(1): 1-8.
SHI Yan-li. Choice and Development of the third-generation infrared detectors[J]. *Infrared Technology*. 2013, 35(1): 1-8.

(下转第20页)

- SIFT algorithm in text image matching[J]. *Computer Engineering*, 2013, 39(1): 239-243.
- [8] TANG CM, DONG Y, SU X H. Automatic registration based on improved SIFT for medical microscopic sequence images[J]. *Second International Symposium on Intelligent Information Technology Application*, 2008, 1(1): 580-583.
- [9] 刘焕敏, 王华, 段慧芬. 一种改进的 SIFT 双向匹配算法[J]. *兵工自动化*, 2009, 28(6): 89-91.
LIU Huan-min, WANG Hua, DUAN Hui-fen. A bidirectional matching SIFT algorithm[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2009, 28(6): 89-91.
- [10] 刘贵喜, 刘冬梅, 刘凤鹏. 一种稳健的特征点配准算法[J]. *光学学报*, 2008, 28(3): 454-461.
LIU Guixi, LIU Dongmei, LIU Fengpeng. A robust image registration algorithm based on feature points matching[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(3): 454-461.
- [11] 周剑军, 欧阳宁, 张彤. 基于 RANSAC 的图像拼接方法[J]. *计算机工程与设计*, 2009, 30(24):5692-5694.
ZHOU Jian-jun, OUYANG Ning, ZHANG Tong. Image mosaic method based on RANSAC[J]. *Computer Engineering And Design*, 2009, 30(24): 5692-5694.
- [12] 张晓茹, 肖珂. 基于角点匹配图像拼接方法的改进[J]. *河北农业大学学报*, 2008, 31(4): 119-122.
ZHANG Xiao-ru, XIAO Ke. The improvement of a feature-based image mosaics algorithm[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2008, 31(4): 119-122.
- [13] 张世良. 基于改进 RANSAC 算法图像自动拼接技术[J]. *三明学院学报*, 2012, 29(2): 46-50.
ZHANG Shi-liang. The improvement of a RANSAC-based image mosaics algorithm[J]. *Journal of Sanming University*, 2012, 29(2): 46-50.
- [14] 穆柯楠, 惠飞, 曹健明, 等. 一种基于几何约束的 RANSAC 改进算法[J]. *计算机工程与应用*, 2015, 51(4): 205-208.
MU Kenan, HUI Fei, CAO Jianming. Improved RANSAC algorithm based on geometric constraints[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2015, 51(4): 205-208.
- [15] Rodriguez A., Laio A.. Clustering by fast search and find of density peaks[J]. *Science*, 2014, 344(6191):1492-1496.
- [16] 李卫平. K-means 聚类算法研究[J]. *中国西部科技*, 2008, 7(8): 52-53.
LI Wei-ping. Research on K-means clustering algorithm[J]. *Science and technology in Western China*, 2008, 7(8): 52-53.

(上接第9页)

- [6] 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(4): 155-156.
JIANG Zhiping, LIANG Tianjiao, LU Qisheng, et al. Heat effect calculations of PC type HgCdTe detectors when irradiated by Laser[J]. *Applied laser*, 1995(4): 155-156.
- [7] 张震, 江天, 程湘爱, 等. CCD 强光串扰效应的串扰线缺口现象及其机制[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22: 1505-1510.
ZHANG Zhen, JIANG Tian, CHENG Xiang'ai, et al. Investigation into the dynamical subordinate facula in the video of the CCD irradiated by high repetition pulses laser[J]. *High power laser and particle beams*, 2010, 22: 1505-1510.
- [8] 王昂, 郭锋, 朱志武, 等. 连续激光与单脉冲纳秒激光对 CMOS 的损伤效应[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(9): 43-47.
WANG Ang, GUO Feng, ZHU Zhiwu, et al. Comparative study of hard CMOS damage irradiated by CW laser and single-lulse ns laser[J]. *High power laser and particle beams*, 2014, 26(9): 43-47.
- [9] 王刚, 安琳. COMSOL Multiphysics 工程实践与理论仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 22-23.
WANG Gang, AN Lin. COMSOL Multiphysics[M]. Beijing: Publishing house of electronics industry, 2012: 22-23.
- [10] 蔡虎. TEA-CO₂ 脉冲强激光对 Hg_{0.8}Cd_{0.2}Te 晶片的破坏研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
CAI Hu. Investigation of Hihg Intensity Pulsed TEA-CO₂ Laser-induced Damage on Hg_{0.8}Cd_{0.2}Te Wafer[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005.
- [11] 张红, 薛建国, 成斌, 等. 10.6 μm CO₂ 激光对 HgCdTe 探测器破坏阈值的实验研究[J]. *光电工程*, 2006(5): 41-43+56.
ZHANG Hong, XUE Jianguo, CHENG Bin, et al. Experiment study on the damage thresholds of HgCdTe detector irradiated by 10.6 μm CO₂ laser[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006(5): 41-43+56.