

飞秒激光脉冲数对 P 型 HgCdTe 激光打孔成结效果的影响

潘晨博¹, 陈熙仁², 公民¹, 戴晔¹, 邵军², 查访星^{1*}

(1. 上海大学 理学院物理系, 上海 200444;

2. 中国科学院上海技术物理研究所 红外物理国家重点实验室, 上海 200083)

摘要: 飞秒激光对 p 型 HgCdTe 打孔形成 PN 结. 该实验基于 1 kHz 低重复频率飞秒激光采用不同脉冲数在 p 型 HgCdTe 上打孔形成尺寸不同的微孔结构. 实验发现脉冲数是影响成结效果的重要参数. 激光诱导电流 (LBIC) 检测表明, 随着脉冲数由单个增至 10 个, 微孔侧壁反型层宽度由 13.5 μm 减小到 10.5 μm . 当脉冲数增大至 100 个时, 微孔 LBIC 信号曲线已严重偏离 PN 结所对应的正负峰对称线形, 意味着结特性趋于失效. 对 LBIC 曲线拟合表明, 单脉冲打孔形成的 PN 结给出最大的载流子扩散长度, 约为 17 μm , 而 10 个脉冲对应的环孔 PN 结扩散长度则减小为 12 μm .

关键词: 碲镉汞; PN 结; 激光束诱导电流; 飞秒激光打孔

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A

Influence of number of laser pulses on PN junction formation in p-HgCdTe induced by femtosecond laser drilling

PAN Chen-Bo¹, CHEN Xi-Ren², GONG Min¹, DAI Ye¹, SHAO Jun², ZHA Fang-Xing^{1*}

(1. Dept. of Physics, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. National Laboratory for Infrared Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: Femtosecond laser drilling induces PN junction in p-HgCdTe. In this work, femtosecond laser with repetition rate of 1 kHz was used to generate different micrometer-sized holes. It was found that the pulse number is an important parameter which influences the effect of junction formation. Laser beam induced current (LBIC) characterization shows that the inversion layer thickness reduces from 13.5 μm to 10.5 μm when the pulses increase from one to ten. The LBIC profile of a hole created with one hundred pulses deviates severely from the line shape of ideal PN junction, resulting in large leakage current. In addition, the fitting of LBIC curves shows that the diffusion length of the hole created by a single pulse is 17 μm whereas the one created by ten pulses reduces to 12 μm .

Key words: HgCdTe, PN junction, laser beam induced current, femtosecond laser drilling

PACS: 81.65.Cf, 78.66.Hf

引言

HgCdTe 探测器在红外技术中具有重要地位^[1]. PN 结成结工艺属于该探测器制备中的关键技

术. 离子刻蚀 HgCdTe 诱导的环孔 PN 结是重要成结方法之一, 而近来研究发现飞秒激光对 p 型 HgCdTe 打孔也会形成类似结构^[2-6]. 对此人们曾研究了飞秒激光功率、聚焦透镜的数值孔径等参数与打孔成结

收稿日期: 2015-06-03, 修回日期: 2015-10-25

基金项目: 国家自然科学基金 (61474073)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (61474073)

作者简介 (Biography): 潘晨博 (1990-), 男, 浙江丽水人, 硕士研究生, 主要从事红外半导体材料光谱表征的研究. E-mail: panchenbo@shu.edu.cn

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: fxzha@shu.edu.cn

Received date: 2014-06-03, revised date: 2015-10-25

效果的关联性^[3,6]. 不过实验表明上述参数的调控对于结特性的影响并不明显. 探索灵敏影响成结效果的激光加工参数, 是该新型成结技术走向实用的一个重要研究内容.

从激光打孔机理考虑, 若飞秒激光的重复频率不同, 热效应就不同. 在较高频率下(如 250 kHz)脉冲间隔很短而小于热扩散的时间^[7], 激光脉冲产生的热量就会发生积累而可能影响到成结质量. 单纯从激光加工的平整性而言, 这种热效应也是不利的, 会导致加工精度和结构质量的下降. 不同于以往 HgCdTe 激光打孔成结中所使用的 250kHz 高重复频率飞秒激光^[3-6], 本工作采用低重复频率的 1 kHz 的飞秒激光, 以期降低热量积累效应. 另一方面, 相同功率条件下, 低重复频率激光具有更高的单脉冲能量, 能够实现单一脉冲激光打孔. 我们仍然采用激光诱导电流(LBIC)表征技术检验 PN 成结效果. 实验测量给出作为空间坐标函数的光电流曲线, 并通过对样品表面的二维扫描获得以伪彩色显示的成结效果的空间分布影像图. 另外, 基于 LBIC 光电流空间分布曲线, 还通过拟合得到载流子扩散长度的信息, 给出不同脉冲数打孔成结特性的进一步比较.

1 实验

用于激光打孔实验的材料是经液相外延方法生长在碲镉衬底上的 p 型 $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$ 薄膜. 空穴浓度约为 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. 飞秒激光打孔实验所用的飞秒激光器为钛宝石激光器, 激光波长为 800 nm、脉宽为 120 fs 以及重复频率为 1 kHz. 激光经显微光学系统聚焦到置于三维加工平台的样品上. 激光功率由一个衰减器控制, 而脉冲数则由快门控制. 激光功率统一采用 15 mW, 本实验使用 $10 \times$ 显微物镜聚焦. 控制激光脉冲数的快门开启时间分别设置为 1 ms、10 ms、100 ms, 它们分别对应 1 个、10 个和 100 个脉冲数.

LBIC 是一种无损伤的、非直接接触表征技术, 对于微尺寸 PN 结检测具有明显优势^[8]. 图 1 所示的是我们自行搭建的测量系统示意图. 光源采用 632 nm 的 He-Ne 激光, 经过扩束器和倍率为 20 倍的物镜聚焦. CCD 相机可实时监控光斑尺寸, 可调节聚焦光斑的大小和位置. 聚焦在样品上的光斑为 $3 \mu\text{m}$. 样品置于低温杜瓦内可在 77 K 温度下测量. 杜瓦瓶固定放置在高精度二维平移台上. 通过计算机驱动平移台移动, 实现光斑在样品表面的二维扫描. 数据通过 SR830 型锁相放大器配合 SR540 斩波

器进行采集.

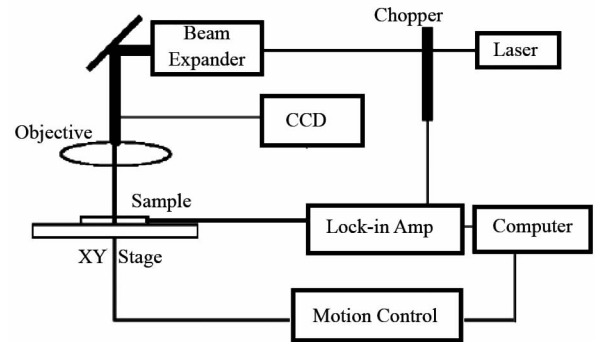


图 1 激光束诱导电流测试系统装置结构框图

Fig. 1 The setup of laser beam induced current (LBIC) mapping

2 实验结果与讨论

图 2 给出不同激光脉冲数下激光打孔的光学显微图. 脉冲数由电子快门启闭时间控制, 从右到左三列孔的快门开启时间分别为 1 ms、10 ms、100 ms. 孔中心之间的间距为 $60 \mu\text{m}$, 1 ms 和 10 ms 的刻蚀孔直径分别约为 $12 \mu\text{m}$ 和 $20 \mu\text{m}$. 随着脉冲数的增大, 微孔直径明显增大, 但是单脉冲作用时微孔边缘区域平整度明显改善.

目前实验已经证实, 上述 P 型 HgCdTe 激光打孔会形成类似于通过离子刻蚀构建的环孔 PN 结^[2,3]. 具体物理图像是, 孔的边缘区被诱导形成环状反型区(n 型). 该环状反型区与更外围的 P 型区形成环孔 PN 结. 它可以利用图 1 所示 LBIC 装置测试进行检测. 环孔 PN 结对 LBIC 测试响应机理如图 3 所示. He-Ne 激光照射到样品表面时会激发电子-空穴对. 当激光光点照射到孔区边缘附近的 PN 结耗尽区时, 电子-空穴对被结区电场分离产生光伏电势, 它作用于闭合回路产生光诱导电流. 当光点扫描到 PN 结界面位置时, 会有最强 LBIC 信号. 另外, 若光生载流子偏离 PN 结耗尽区却仍然落在距耗尽区一个扩散长度的范围内时, 仍然会对光电流有贡献. 如图 3, 当激光光点从左到右扫过微孔时, 孔左右两侧 PN 结界面处的电场强度方向相反, 所以 LBIC 曲线对应每一微孔显示正负双峰结构. 当我们采用每行依次逐点扫描样品表面的方式, 就得到样品表面二维 LBIC 信号数据. 如用伪彩色表示光电流强度, 则给出如图 4(a) 的影像结果. 该影像图中的颜色按如下规则表示光电流大小, 即 LBIC 光电流信号的大小由红色(正向最大)到蓝色(负向

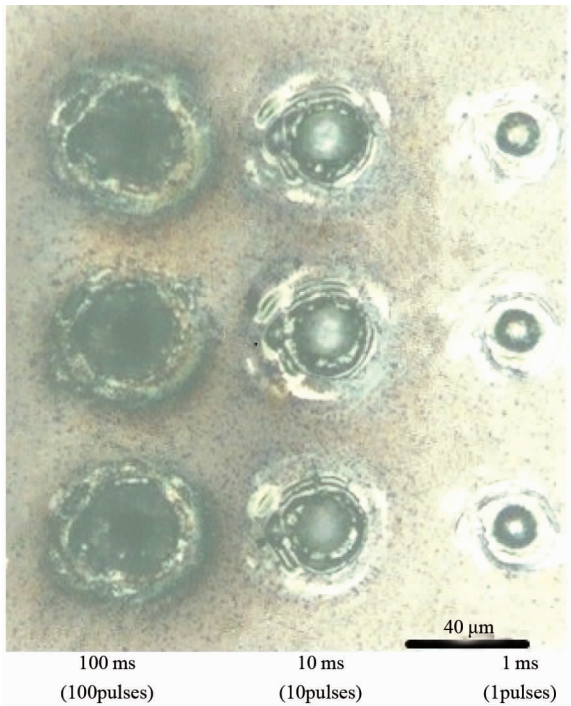


图2 不同脉冲数下刻蚀的孔的光学显微图像
Fig. 2 Optical micrograph of laser drilling induced holes generated with different drilling time

最大)逐步变化. 图中的黄红色和蓝色的区域分别对应电流正极大和负极大, 表明形成了 PN 结.

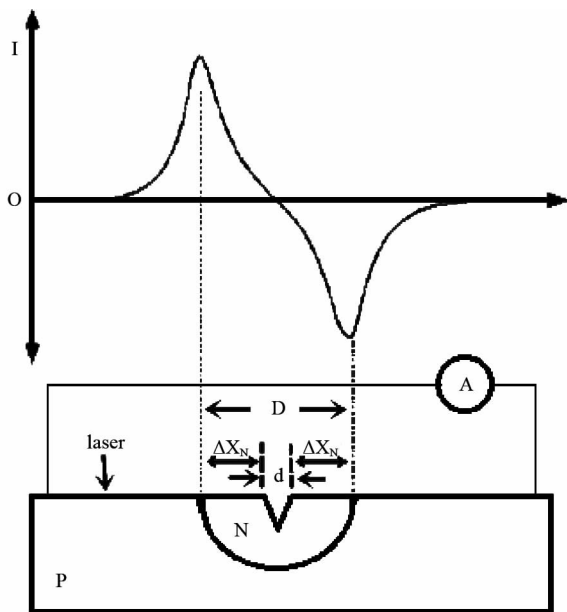


图3 环孔 PN 结的 LBIC 信号原理图
Fig. 3 The schematic illustration on the LBIC measurement of a loop-hole PN junction

另外, LBIC 信号强弱可以通过图 4(b) 所示光

电流~空间位置曲线进行更确切的比对. 对应于图 4(a) 中从右到左虚线指示的三列孔区的 LBIC 检测效果. 图中 1 ms 和 10 ms 形成的微孔均有明显的一对电流双峰, 说明每个孔侧壁反型形成 PN 结. 前面指出, 环孔 PN 结的形成说明孔边缘区被诱导反型, 图 3 所示环状反型区的宽度 ΔX_N 可以基于图 4(b) 的 LBIC 光电流曲线以及图 2 给出的孔几何尺寸进行如下推算. LBIC 曲线正负峰距离即对应孔两侧 PN 结界面间距, 设其为 D ; 另外孔的几何尺寸根据显微图测出为 d , 则反型区的宽度 $\Delta X_N = (D-d)/2$. 由此推算出 1 ms 和 10 ms 的激光打孔形成的侧壁反型层厚度分别为 $13.5 \mu\text{m}$ 和 $10.5 \mu\text{m}$. 因此单脉冲(1 ms) 打孔反而产生更大的反型宽度.

另外从图 4(b) 看到, 1 ms 打孔时间(即单脉冲打孔)形成的 PN 结结区最大 LBIC 信号大于 10 个脉冲打孔情形. 而 100 ms 形成的那一列孔的 LBIC 曲线明显不同于 1 ms 和 10 ms 两列情形; 前者正向电流强度很强而负向电流极其微弱, 这一不对称情况说明 PN 结特性已被严重破坏. 理想环孔 PN 结的 LBIC 信号(电流双峰)应当是正负对称的. 研究表明当 PN 结中存在漏电路径时, 上述 PN 的 LBIC 曲线上的正负峰呈现不对称分布, 出现类似图 4(b) 中沿 y 轴方向信号强度的偏移^[9-12]. Redfern 等人发现 HgCdTe 材料缺陷如空位、线位错等是导致 HgCdTe 光伏探测器红外焦平面阵列不能正常工作的主要原因, 同时一些缺陷也会引入 PN 结处的漏电路径^[11]. 而激光辐照会在 HgCdTe 中引入缺陷. 当激光打孔的脉冲数如 100 个较多脉冲时, 可认为对应引入了较大数量缺陷, 导致漏电流路径增多和漏电流强度增强, 使得 LBIC 信号发生明显偏移. 另外 100 ms 对应的微孔的 LBIC 信号强度增大, 还可能与长时间激光打孔下引入氧元素有关^[13]. 该现象和机理有待进一步研究.

载流子的扩散长度是一个用以表征材料质量和器件性能的关键参数^[14], 它可以从 LBIC 图像中提取. 在 LBIC 测试时, 当激光激发的载流子在结区外一个扩散长度 L 内, 仍可以通过扩散到达结区边界而产生信号, 但能收集到的载流子数目随着扩散距离的增大而指数衰减. 根据 Redfern 等人的研究结果^[15], 当外延层的厚度与碲镉汞少数子扩散长度近似相等或更大时, 可近似采用简单指数关系来拟合, 即

$$I = \exp\left(-\frac{x}{L}\right) + I_0 \quad , \quad (1)$$

其中, k 为比例常数, x 为光点离开结区边界的距离,

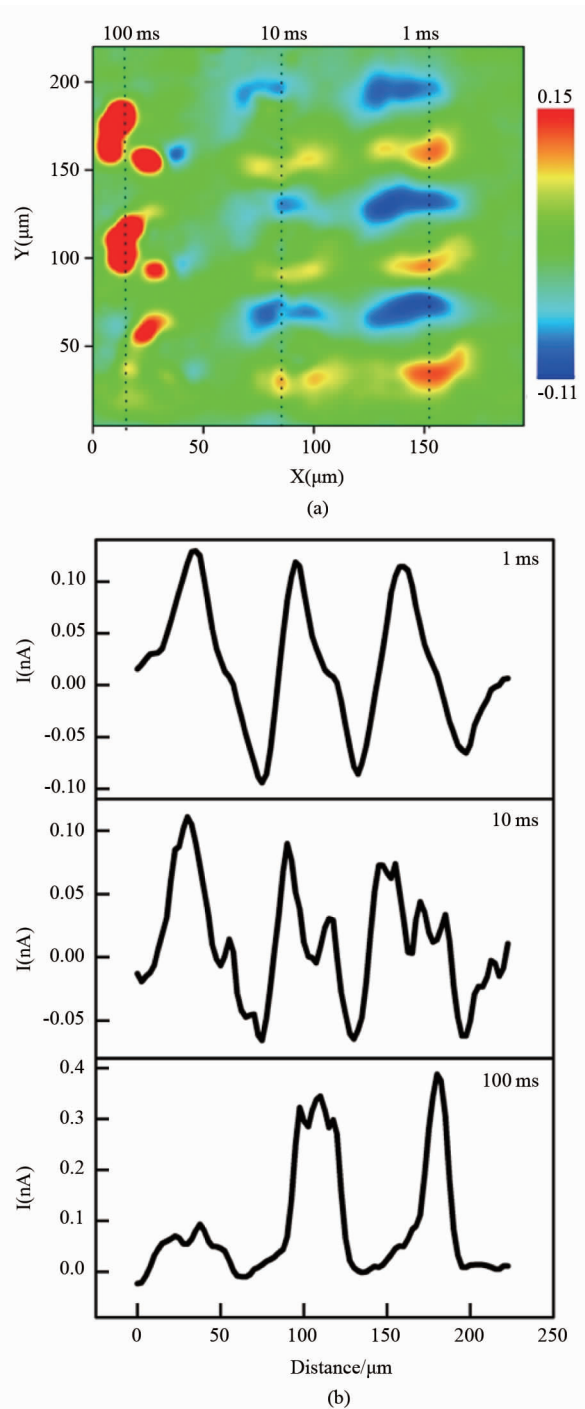


图 4 (a) LBIC 面扫描图像,虚线所在三列区域从左到右分别代表 100 ms 下,10 ms 下和 1 ms 下的刻蚀区。(b) 不同区域 LBIC 线扫描测试
 Fig. 4 (a) LBIC image of the femtosecond laser drilled holes. The drilling time for the three rows indicated by the dotted lines from left to right are 100ms, 10 ms and 1ms, respectively. (b) The line profiles of LBIC signal corresponding to the three dotted lines in (a)

L 为等效扩散长度, I_0 为背底信号。

如图 5(a) 为 1 ms 和 10 ms 下形成的 PN 结 p

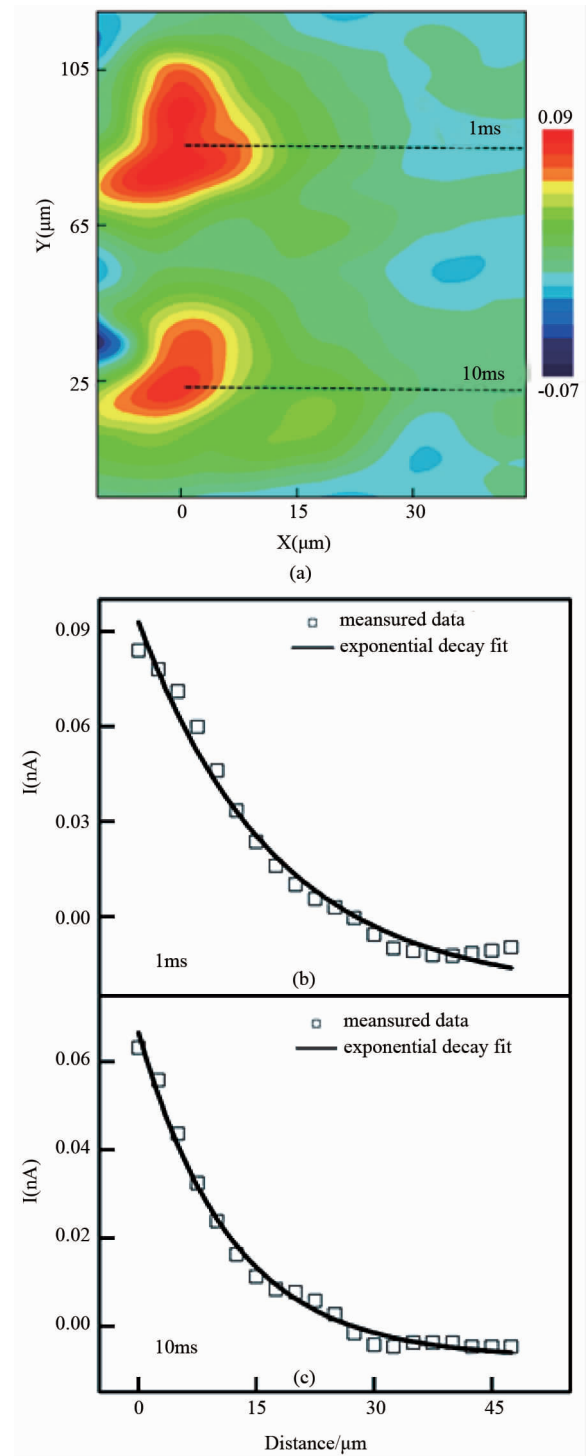


图 5 (a) p 型区 LBIC 图像; 区外的信号衰减及其指数拟合 (b) 1 ms (c) 10 ms
 Fig. 5 (a) LBIC mapping of p-type region; The LBIC signal decay and exponent fitting in p-type region. (b) 1ms (c) 10 ms

型区的 LBIC 扫描图像. 由于我们所采用的液相外延样品膜厚约 17 μm, 可采用上述简单拟合方法直接获得扩散长度. 沿图中虚线位置取峰值外侧的衰

减信号作指数拟合,得出在 1 ms 下的载流子等效扩散长度 L 约为 17 μm , 10 ms 的约为 12 μm , 如图 5 (b)、(c) 所示. 如果扩散长度越大, 则暗电流越小, PN 结阻抗越大, 所以单脉冲下形成的 PN 结性能更好.

3 结语

本文利用 1kHz 飞秒激光对 p 型碲镉汞材料进行打孔实验, 通过 LBIC 检测技术给出了样品表面光电响应特性空间分布的二维伪彩色影像图. 对单脉冲打孔成结和多脉冲打孔成结效果进行了对比. 根据 LBIC 测试给出的光电流强度、反型区宽度以及扩散长度等参数, 发现单脉冲打孔结特性最佳. 当打孔脉冲数增大, LBIC 谱线形严重偏离环孔 PN 结所应有的正负对称峰形, 说明结的漏电流随脉冲数增大变得严重, 最终会结特性失效. 这一现象或有助于更深入理解激光打孔引起 p 型碲镉汞反型的物理机制.

致谢

感谢上海技术物理研究所提供样品和李志锋研究员的有益建议.

References

- [1] Rogalski A. HgCdTe infrared detector material: history, status and outlook [J]. *Reports on Progress in Physics*, 2005, **68**(10): 2267.
- [2] Baker I M, Maxey C D. Summary of HgCdTe 2D array technology in the U. K [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2001, **30**(6): 682-689.
- [3] Zha F X, Zhou S M, Ma H L, *et al.* Laser drilling induced electrical type inversion in vacancy-doped p-type HgCdTe [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **93**(15): 151113.
- [4] Zha F X, Li M S, Shao J, *et al.* Femtosecond laser-drilling-induced HgCdTe photodiodes [J]. *Optics Letters*, 2010, **35**(7): 971-973.
- [5] Qiu W C, Cheng X A, Wang R, *et al.* Novel signal inversion of laser beam induced current for femtosecond-laser-drilling-induced junction on vacancy-doped p-type HgCdTe [J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, **115**(20).
- [6] ZHOU Song-Min, ZHA Fang-Xing, GUO Qing-Tian, *et al.* The Morphology of micro hole pn junction in p-type HgCdTe formed by femtosecond laser drilling [J]. *J. Infrared. Millim Waves* (周松敏, 查访星, 郭青天, 等. 飞秒激光对 P 型碲镉汞打孔的形貌和 PN 结特性研究. *红外与毫米波学报*), 2010, **29**(5): 337-341.
- [7] Eaton S M, Zhang H B, Herman P R. Heat accumulation effects in femtosecond laser-written waveguides with variable repetition rate [J]. *Optics Express*, 2005, **13**(12): 4708-4716.
- [8] YE Zhen-Hua, HU Xiao-Ning, CAI Wei-Ying, *et al.* Application of laser beam induced current for technology detecting of HgCdTe two-color detector [J]. *J. Infrared. Millim. Waves* (叶振华, 胡晓宁, 蔡炜颖, 等. 激光束诱导电流在 HgCdTe 双色探测器工艺检测中的应用. *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(6): 459-462.
- [9] Hong X K, Lu H, Zhang D B. Study on the structural characteristics of HgCdTe photodiodes using laser beam-induced current [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2013, **45**(7): 623-628.
- [10] Yin F, Hu W D, Zhang B, *et al.* Simulation of laser beam induced current for HgCdTe photodiodes with leakage current [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2009, **41**(11-13): 805-810.
- [11] Redfern D A, Musca C A, Dell J M, *et al.* Characterization of electrically active defects in photovoltaic detector arrays using laser beam-induced current [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2005, **52**(10): 2163-2174.
- [12] Feng A L, Li G, He G, *et al.* The role of localized junction leakage in the temperature-dependent laser-beam-induced current spectra for HgCdTe infrared focal plane array photodiodes [J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, **114**(17): 173107.
- [13] TANG Wei, GUO Jin, SHAO Jun-Feng, *et al.* Morphology and Chemical Composition Analysis on Multi-Pulsed CO₂ Laser Ablation of HgCdTe Crystals; International Symposium on photoelectronic Detection and imageing 2013: High Power Lasers And Applications, 2013 [C]. Beijing: A Tunnermann; Z Liu; P Wang, *et al.* 2013, 8904.
- [14] YIN Fei, HU Da-Wei, QUAN Zhi-Jue, *et al.* Determination of electron diffusion length in HgCdTe photodiodes using laser beam induced current [J]. *Acta Phys Sin* (殷菲, 胡伟达, 全知觉, 等. 激光束诱导电流法提取 HgCdTe 光伏探测器的电子扩散长度. *物理学报*), 2009, **11**(58): 7884-7890.
- [15] Redfern D A, Thomas J A, Musca C A, *et al.* Diffusion length measurements in p-HgCdTe using laser beam induced current [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2001, **30**(6): 696-703.