红外与激光工程
INFRARED AND LASER ENGINEERING
EI, SCOPUS, CSCD等收录期刊

碲镉汞红外光电探测器局域场表征研究进展（特邀）

刘书宁　唐倩莹　李庆

Research progress on local field characterization of mercury cadmium telluride infrared photodetectors (*invited*)

Liu Shuning, Tang Qianying, Li Qing

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3788/IRLA20220277

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

γ辐照导致中波碲镉汞光伏器件暗电流退化的机理研究

Study on the mechanism of dark current degradation of HgCdTe photovoltaic devices induced by γ-irradiation

红外与激光工程. 2019, 48(9): 916001　https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0916001

中波碲镉汞红外偏振焦平面探测器的制备研究（特邀）

Preparation of medium wave mercury cadmium telluride infrared polarization focal plane detector (*Invited*)

红外与激光工程. 2021, 50(1): 20211008　https://doi.org/10.3788/IRLA20211008

碲镉汞高工作温度红外探测器

HgCdTe high operation temperature infrared detectors

红外与激光工程. 2021, 50(4): 20200328　https://doi.org/10.3788/IRLA20200328

AlGaN日盲紫外雪崩光电探测器暗电流研究

Research on dark current of AlGaN solar-blind ultraviolet avalanche photodetectors

红外与激光工程. 2018, 47(9): 920003　https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0920003

二维半导体红外光电探测器研究进展（特邀）

Research progress of two-dimensional semiconductor infrared photodetector (*Invited*)

红外与激光工程. 2021, 50(1): 20211017　https://doi.org/10.3788/IRLA20211017

碲化锡的制备、结构、性质及红外光电探测研究进展(特邀)

Preparation, structure and properties of tin telluride and its research progress in infrared photodetection (*Invited*)

红外与激光工程. 2021, 50(1): 20211019　https://doi.org/10.3788/IRLA20211019

碲镉汞红外光电探测器局域场表征研究进展 (特邀)

刘书宁[1,2], 唐倩莹[1], 李　庆[1,2*]

(1. 国科大杭州高等研究院 物理与光电工程学院, 浙江 杭州 310024;
2. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘　要：碲镉汞材料 (HgCdTe) 是第三代红外探测系统中使用的重要探测材料,其发展水平能基本反映当前红外探测器最优性能指标。近年来,天文、遥感和民用设备对探测器性能提出了更高的要求,这对 HgCdTe 红外探测器的设计和制备提出了新的挑战。HgCdTe 红外探测器更精细的设计和加工技术为提高 HgCdTe 红外探测器性能提供解决思路。抑制器件的有害局域场、调控器件的有益局域场可以实现器件性能进一步的突破。但是,如何对 HgCdTe 光电器件局域场进行表征与分析,澄清 HgCdTe 光电器件中局域场相关的噪声及暗电流起源,是推动器件性能突破需解决的重要关键科学与技术问题。文中将总结 HgCdTe 红外光电探测器局域场表征与分析的研究进展,为新一代 HgCdTe 红外光电探测器发展提供基础支撑。

关键词：碲镉汞器件；　微区光电流扫描技术；　局域场；　暗电流

中图分类号：TN21　　**文献标志码：**A　　**DOI：**10.3788/IRLA20220277

Research progress on local field characterization of mercury cadmium telluride infrared photodetectors (*invited*)

Liu Shuning[1,2], Tang Qianying[1], Li Qing[1,2*]

(1. Hangzhou Institute for Advanced Study, University of Chinese Academy of Sciences, Hangzhou 310024, China;
2. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: Mercury cadmium telluride (HgCdTe) material is an important detection material used in third-generation infrared detection systems, and its development level can reflect the optimal performance indicators of current infrared detectors. In recent years, astronomical, remote sensing, and civil equipment have put forward higher requirements for detector performance, which has brought new challenges to the design and preparation of HgCdTe infrared detectors. The finer design and processing technology of HgCdTe infrared detectors provide solutions for improving the performance of HgCdTe infrared detectors. Suppressing the harmful local field of the device and regulating the beneficial local field of the device can achieve further breakthroughs in device performance. However, how to characterize and analyse the local field of HgCdTe optoelectronic devices and clarify the origin of dark current and related noise in HgCdTe optoelectronic devices have become key scientific and technical issues to be solved to promote device performance breakthroughs. This paper summarizes the research progress of local field characterization and analysis of HgCdTe infrared photodetectors and provides basic support for the development of a new generation of HgCdTe infrared photodetectors.

收稿日期:2022−04−23;　**修订日期:**2022−05−24

基金项目:国家重点研发计划 (2020 YFB2009300); 上海市科技计划 (21 ZR1473400); 杭州市科技发展计划 (2020 ZDSJ901)

作者简介:刘书宁, 男, 硕士生, 主要从事新型红外探测器机理、器件表征方面的研究。

导师(通讯作者)简介:李庆, 男, 博士, 主要从事红外探测机理、器件与应用方面的研究。

Key words: mercury cadmium telluride device; scanning photocurrent microscopy; local field; dark current

0 引 言

碲镉汞 (Mercury Cadmium Telluride, HgCdTe) 由 II-VI 族半金属 HgTe(E_g = −0.3 eV) 和半导体 CdTe (E_g =1.5 eV) 混合制备的赝二元直接带隙半导体材料[1−2], 通过调控 Cd 组分变化可以改变其敏感波段以至覆盖整个红外区间。HgCdTe 拥有较高的吸收系数、高光电转化效率、高迁移率和与硅匹配的热膨胀系数, 经历 60 多年的发展, HgCdTe 已经成为整个红外探测材料体系中最重要的窄带隙材料[3−18]。目前, HgCdTe 红外探测器已经发展了三代。但是, 天文、遥感和民用设备等对探测器性能提出了更高的要求, 多维信息感知、片上智能化、局域场调控型的高灵敏度大规模焦平面等成为最新一代 HgCdTe 红外探测器发展的重要方向, 如图 1 所示。这对 HgCdTe 红外探测器的设计和制备提出了新的挑战[19−27]。

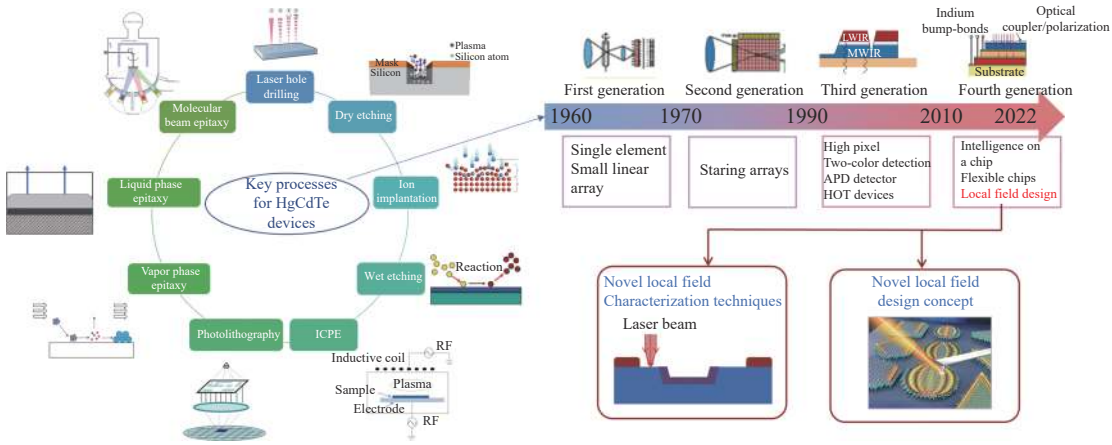


图 1 HgCdTe 红外探测技术发展历程和新型局域场调控理念

Fig.1 Development history of HgCdTe infrared detection technology and novel local field modulation concept

HgCdTe 红外探测器更精细的设计和加工技术为进一步提高 HgCdTe 红外探测器性能提供解决思路。纵观 HgCdTe 红外探测器发展历程, 材料生长工艺与器件加工技术的进步促成了 HgCdTe 红外探测器由单元发展至超大规模阵列, 由线列扫描发展至多维信息智能成像等。气相外延、液相外延和分子束外延等材料生长工艺的发展, 保证了 HgCdTe 材料质量的提高和芯片规模的扩大; 离子注入、激光打孔、刻蚀等工艺, 能为大规模焦平面器件的制备提供低损伤技术保障。当前, HgCdTe 红外探测器处于第三代到新一代发展的跨越期, 提出了多维信息感知、智能化探测甚至柔性芯片等设计理念。新型可调控局域场的引入, 不仅能够能为高工作温度、高灵敏度器件等第三代 HgCdTe 红外探测器的发展提供支撑, 也能为新一代 HgCdTe 红外探测器关键技术攻关提供解决思路, 如图 1 所示。文中将通过对 HgCdTe 红外探测器中局域场表征方法及设计思路的介绍, 总结局域场理念, 及其应用在当前 HgCdTe 红外光电探测器跨代发展中的主要研究进展, 为新一代 HgCdTe 红外探测器发展提供优化思路。

1 局域场光电表征方法

器件的局域场表征方法包含激光束诱导光电流测试、电子束诱导电流测试、扫描近场显微测试和微区傅里叶光谱测试等, 这些技术各有优势。目前对 HgCdTe 红外探测器的局域场表征方面, 激光束诱导光电流测试方法应用最为广泛。激光束诱导光电流测试采用的是微区光电流扫描技术 (Scanning photocurrent microscope, SPCM), 能够通过激光局部激发光电流来表征光电流的分布, 该技术具有高信噪比, 高空间分辨率的特点, 而且测试过程中对材料没有损伤, 测试效率高。因此, 近些年, SPCM 技术广泛应用

于 HgCdTe 探测器阵列的测试与表征中。HgCdTe 半导体器件加工过程中使用多种工艺，如离子注入、激光打孔、刻蚀等，这些加工工艺都会给 HgCdTe 半导体器件带来损伤，从而引入电活性缺陷。利用 SPCM 方法可以验证这些关键工艺对器件造成的影响。

SPCM 方法拥有较长的历史，1949 年，Haynes 和 Shockley 发表了一项实验的结果，在该实验中，探针在 n 型锗表面上扫描，记录了几个位置的电流随时间的变化[28]。从这些数据中，他们能够推断出载流子迁移率和空穴寿命的估计值。这个简单的实验装置作为随后的扫描测量的概念前身。1954 年，Van Roosbroeck 发表了一篇关于确定各种激发源进入 p-n 结的寿命和表面复合速度的论文[29]，为研究人员提供了一种从实验数据中推导出相关参数的方法。1983 年，Marek 发表了一篇题为“Light-beam-induced current characteristic of grain boundary”的论文[30]，提出了评估晶界光电流分布的定量理论。考虑到材料吸收截面、波长和激光光斑尺寸，将提出的理论与实验进行比较，显示出极好的一致性，为实验者提供了一种以定量和普遍的方式分析这些数据的方法。这篇论文表明了利用激光束诱导光电流的方法作为一种测量材料特性和器件结构特征的方法已经成熟[31−32]。

当前常用的 SPCM 系统通常由 4 部分组成：激发源、聚焦光学器件、位置控制器和电气测量单元。SPCM 技术主要存在两种扫描模式，这两种模式各有优缺点：其中一种模式如图 2(a) 所示，激光通过物镜聚焦后保持位置不变，样品固定在压电驱动的二维平台上随着平台移动，从而对样品进行扫描；该模式优点在于激光光路调整好就不需要移动，光路稳定性大大提高，但是缺点在于在测试过程中样品移动会导致样品的震荡，导致样品测试结果出现偏差。第二种模式如图 2(b) 所示，样品固定不动，激光经过压电驱动的反射镜片在样品表面进行扫描。这种模式优点在于固定样品不动，不需要考虑样品移动所带来的震动影响，缺陷在于对光路的精密性有很高要求。

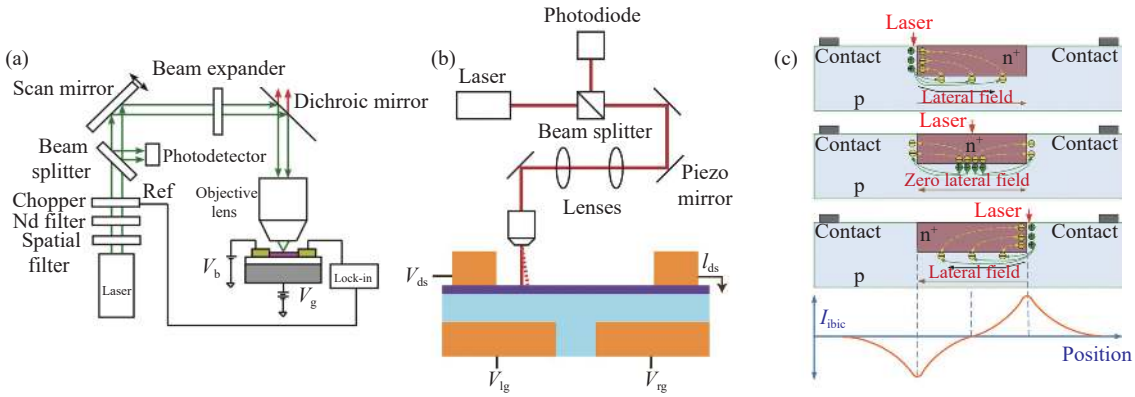


图 2 (a) 激光通过物镜聚焦后保持位置不变，样品随着压电驱动平台进行移动实现激光扫描[33]；(b) 样品固定不动，激光由压电驱动反射镜片反射到样品表面进行扫描[34]；(c) 激光束诱导产生电流原理图和典型 SPCM 曲线[35]

Fig.2 (a) The laser is focused through the objective lens and remains in position, and the sample moves with the piezo-driven stage to achieve laser scanning[33]; (b) The sample is held stationary and the laser is reflected by a piezoelectrically driven reflector lens onto the sample surface for scanning [34]; (c) Schematic diagram and typical SPCM curve of laser beam induced current[35]

SPCM 方法不仅可以直接获得器件光响应分布，而且能够表达材料或器件成结效果。这种方法对检测效率高且对材料没有损伤，可一次性大范围检测和筛选，这种无损的局域场检测方法对 HgCdTe 红外光电探测器的表征有重要意义。激光扫描样品过程中，激光照射到样品上的位置改变影响激光诱导产生的横向电场变化，也会影响 SPCM 信号的极性，对理想的 n-on-p 型 HgCdTe 光伏器件而言，SPCM 的信号如图 2 (c) 所示为对称的正负双峰曲线。假定从左到右为电流的负方向，SPCM 双峰特性解释如下：

(1) 激光扫描点在 p-n 结左侧

激光照射到器件表面激发出光生载流子，被 p-

n 结收集后进行分离，分离后结区左侧空穴堆积，因此横向电场为自左向右，也就是负方向。如图 2 (c) 所示，此时 SPCM 的信号为负值，激光光束距离 p-n 结距离越远，光生载流子被 p-n 结区域所收集的越少，SPCM 信号就越弱。当然，扫描光束距离 p-n 结越近，SPCM 信号值就越强。只有激光照射在空间电荷区几个少数载流子的扩散长度范围内，光生载流子在漂移过程时完全复合之前才有可能被结区收集，产生 SPCM 信号[36]。

(2) 激光扫描点在 p-n 结右侧

激光扫描点在结区右侧时，与 (1) 类似，不同的是在 p-n 结右侧被 p-n 结收集后进行分离的是材料在激光照射后产生的光生空穴，光生空穴积累在结区右侧。因此形成的横向电场方向为从右向左，因此 SPCM 信号为正，推断 SPCM 两个峰值之间的间隔代表 p-n 结光敏元在扫描方向的横向宽度。

(3) 激光扫描点在 p-n 结中央

激光扫描到 p-n 结中间位置，光生空穴被内建电场所分离，因此均匀分布在结区两侧，横向电场强度为 0，所以 SPCM 信号为零。

基于以上原理，SPCM 技术可以清晰地表征 HgCdTe 器件制备工艺可能会引入的“有害”局域场类型及其特点，如激光脉冲打孔成结会引入反型层，离子注入时会引入损伤，刻蚀损伤等。这些损伤造成的结属性变化。当激光束扫描到这些区域时，会产生相应的 SPCM 信号，可以通过这些信号来对器件结区进行分析。

1.1 B^+离子注入成结的局域场表征

目前，广泛应用于天文、民用、军事探测等领域的探测器主要为 HgCdTe 光伏型红外探测器。现有的成熟制备 HgCdTe 光伏器件工艺为 B^+离子注入成结技术，主要操作方式为利用强电场加速后的高能 B^+离子对 p 型 HgCdTe 材料表面进行注入，从而实现材料表面向 n 型转变，进而形成 n^+-on-p 型平面结。它的主要优势在于这种工艺可操作性强，可应用于制造大面阵器件。但是，在 B^+离子注入材料表面的过程中会引起材料性质的一些变化以及引进一些缺陷，这些对材料的影响进而导致器件的性能变化，所以需要利用 SPCM 技术来表征和分析 B^+离子注入成结的 HgCdTe 光伏器件的性能，从而能够更准确地认识离子注入技术对 HgCdTe 光伏器件的影响以及背后的物理机制。参考文献 [37−39] 报道，对 As 掺杂长波 HgCdTe 器件而言，在利用 B^+离子注入工艺进行器件制备过程中会将扩展缺陷引入到器件表面，这些缺陷在器件表面会导致器件的红外探测性能有所降低。但是，关于在利用 B^+离子注入工艺进行制备 Hg 空位掺杂的中波 HgCdTe 阵列器件过程中的器件性能变化，以及利用这种工艺制备过程中所引起的离子注入损伤区的空间信息和结类型的转换过程背后的物理机制少有人研究。注入过程中引入的这些缺陷对温度很敏感，这些缺陷对 p-n 结类型的转变也有很大影响，因此会导致不同温度时 SPCM 曲线的形状发生变化。利用 SPCM 技术在不同的温度下对中波 HgCdTe 阵列器件分别进行表征，可以通过 SPCM 实验曲线分析出离子注入过程中所引入的缺陷以及这些缺陷对中波红外 HgCdTe 器件性能的影响[39]。

SPCM 的信号表现出周期分布的特点，单个周期的 SPCM 信号表示器件中一个光敏元光电特征的空间分布信息。如图 3(a)、(b) 所示为 Qiu 等人[39] 测试离子注入中波 HgCdTe 器件后，在 300 K 和 87 K 时 SPCM 测试曲线。Qiu 等人[39] 分析，SPCM 信号中间的正负双峰间隔和设计结区的宽度相对应，SPCM 信号外侧正负双峰间隔和一个光敏元总的有效光敏尺寸相对应，比设计结区宽度要大。将 87 K 和 300 K 的 SPCM 曲线进行对比后发现，峰间宽度与光敏宽度的大小几乎相同，因此没有光敏区域的扩展效应。同时，将 300 K 下的实验曲线和 87 K 下的实验曲线进行对比，发现从 87 K 到 300 K 时 B^+离子注入区实验所得 SPCM 信号极性反转，说明在较低温度到较高温度转换过程中，器件表面 B^+离子注入区域的电学性质有所变化。

以往研究发现，在利用 B^+离子工艺注入器件成结的过程中，反转 n^+层 (即 n^+-on-p 结) 逐渐在 p 型 HgCdTe 器件表面形成，同时在离子注入成结区的范围内也会引入深能级结构缺陷[40−43]。在低温时，位于离子注入所引入的缺陷大部分都尚未达到被激活的条件，这时候缺陷对 HgCdTe 器件性能影响不是很大，这时候的 HgCdTe 器件呈现 n-on-p 结的结构特征。温度达到室温时，由离子注入工艺所引入的大部分的深能级结构缺陷达到被激活的条件，因为缺陷被激活，离子注入区域从 n^+反型逐渐向着弱 n^-型或 p 型变化。因此，在室温情况下，HgCdTe 红外器件的结类

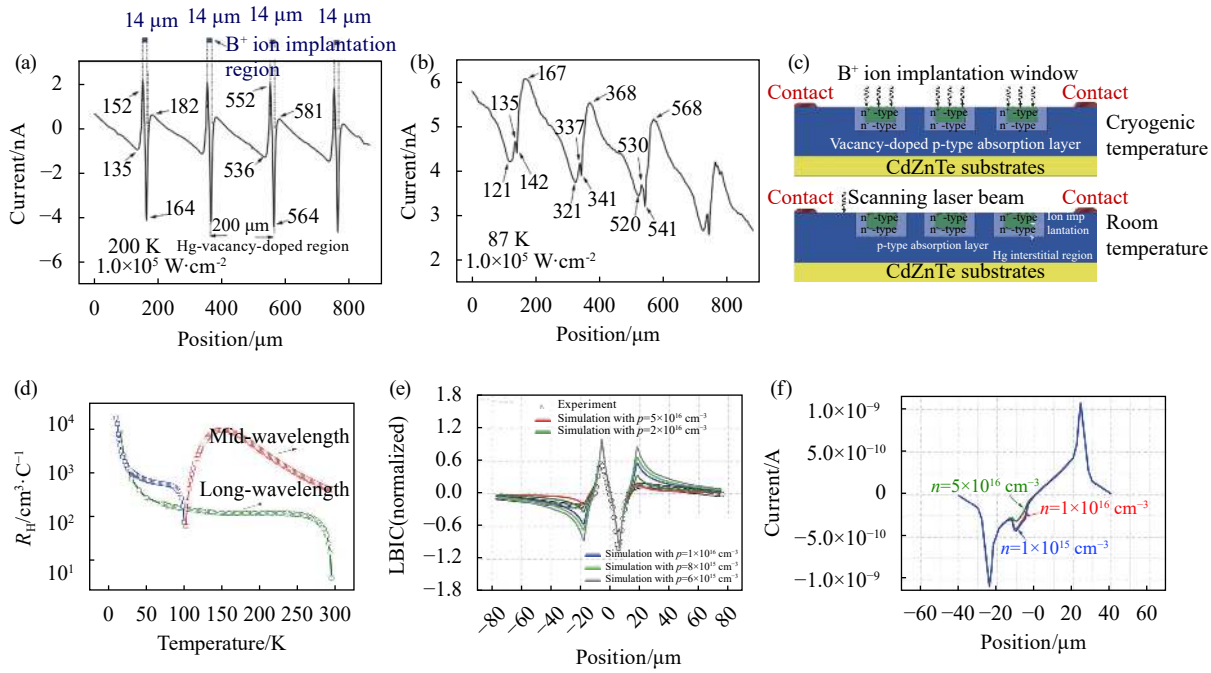


图 3 B⁺离子注入中波 HgCdTe 器件 SPCM 分析下的 SPCM 实验曲线。(a) 300 K ; (b) 87 K; (c) 87 K, 300 K 时器件的 p-n-on-p 结转换模型示意图; (d) 中波和长波 p 型 HgCdTe 样品材料霍尔系数随温度变化的测量曲线; (e) 300 K 时, 离子注入区域不同缺陷浓度下的 SPCM 仿真曲线; (f) 87 K 时, 掺杂浓度不均匀的 SPCM 仿真曲线[39]

Fig.3 SPCM analysis of B⁺ ion-implanted mid-wavelength HgCdTe devices SPCM curve at (a) 300 K and (b) 87 K, respectively; (c) schematic of the p-n-on-p junction transition model of the device at 87 K, 300 K; (d) Measured curves of Hall coefficients of mid-wavelength and long-wavelength p-type HgCdTe materials vs temperature; (e) SPCM simulation curve at 300 K for different defect concentrations in the ion injection region; (f) SPCM simulation curve at 87 K for non-uniform doping concentration[39]

型为 p-n-on-p 转换结。Qiu 等人提出的理论模型示意图如图 3(c) 所示。同时由于处于间隙的 Hg 原子在离子注入区范围扩散, 导致 B⁺离子注入窗口的尺寸相对有效的光敏尺寸要小。

Hu 等人[37−38] 发现 HgCdTe 长波材料的混合电导效应的存在可以使吸收层由 p 型向着 n 型转变。这种混合电导效应主要是由于电子迁移率比空穴高, 温度升高可以产生大量本征载流子, 禁带宽度越窄, 混合电导效应越明显。图 3(d) 为中波和长波 p 型 HgCdTe 中作为温度函数的实验测量霍尔系数曲线, 在温度低于 100 K 时, p 型长波 HgCdTe 器件的霍尔系数表现为正 (图中蓝色方块标记), 温度高于 100 K 时, p 型长波 HgCdTe 器件的霍尔系数表现为负 (图中红色方块标记); p 型 HgCdTe 中波材料在整个测量温度霍尔系数都为正 (绿色圆形标记)。分析可得, 在温度大于 100 K 时, Hg 空位掺杂 p 型 HgCdTe 长波材料的霍尔系数由正值转为负值, 从空穴导电为主转化为电子导电为主, 由表现 p 型材料特征转变为表现 n 型材料特征。然而, 由 Hg 空位掺杂的 HgCdTe 中波材料一直表现为 p 型材料, 没有出现这种转变的现象。由于中波 HgCdTe 材料的带隙结构较宽, 混合导电效应因此减弱, 因此导致不再出现有效光敏尺寸的扩展现象。如图 3(e)、(f) 所示, Qiu 等人[39] 基于载流子漂移-扩散方程建立了器件仿真模型, 利用这个模型对处于 300 K 和 87 K 温度的中波 HgCdTe 器件的 SPCM 曲线进行模拟, 仿真曲线与实验结果吻合较好。300 K 时仿真结果如图 3(e) 所示, 分析发现新的 SPCM 曲线极性反转信号在 300 K 温度下器件实验和模拟的 SPCM 曲线都有出现。同时发现, 此反转 SPCM 信号值与原始结 SPCM 信号的比值受受主类型的缺陷密度所影响, 离子注入区的缺陷浓度越高, SPCM 曲线的极性反转信号就越强。同时, 如图 3(f)87 K 时的仿真结果, 87 K 下 SPCM 实验曲线存在一个窄小的低谷信号, 这主要是由于离子注入过程中不同区域的掺杂浓度不同所导致的。所以参考文献 [39] 中模拟过程假设结区中心左侧存在一个掺杂浓度较低的小区域,

经过模拟后对模拟数据和实验数据进行对比，模拟数据也出现了一个窄小的低谷信号，同时发现随着这一区域的掺杂浓度的逐渐下降，模拟曲线上的小窄谷信号值也降低。

总之，使用 SPCM 表征方法可以研究通过 B^+离子注入技术制备的中波 HgCdTe 光伏阵列中结性能的温度依赖性。相关结果表明，离子注入和 Hg 填隙扩散引入的温度激活深缺陷是 B^+离子注入区 SPCM 信号与反极性耦合的主要机制。对于中波 HgCdTe 器件，更宽的带隙可能会导致结扩展效应在 87 K 和 300 K 之间消失。这些工作有助于更好地理解 p 型 HgCdTe 上的离子注入诱导结转变以及增加 B^+离子注入技术制造的中波长 HgCdTe 红外探测器的应用。

1.2 脉冲激光打孔成结的局域场表征

Dawar[44–45] 通过实验发现激光对器件的局部照射会改变 HgCdTe 材料照射区域的电学性质，这个发现为后来的 HgCdTe 材料的研究和制备提供了一种新的方法。飞秒脉冲激光的二维阵列输出可以利用分束、光掩模等工艺实现。脉冲激光打孔成结可以大幅降低 HgCdTe 红外焦平面阵列器件的制备繁琐程度，将提升器件的制备速度。但激光打孔也容易引入损伤，参考文献 [35] 中采用 SPCM 技术对激光打孔成结特性进行了深入研究。

Qiu 等人[35] 对激光打孔成结的器件进行 SPCM 测试。检测结果如图 4(a)、(b) 所示，由图可以发现，脉冲激光打孔后的 p 型 HgCdTe 材料局部电学性质发生变化，具有 p-n 结特性。同时，p-n 结的 SPCM 曲线分布和检测温度有很大关系，当样品处于 300 K 情况下，实验测得 SPCM 曲线形状为四峰特征，其中中间两峰为不正常的 SPCM 信号反转现象；样品处于低温 (87 K) 情况下实验测得 SPCM 曲线形状为简单的双峰特征。结果表明，激光钻孔引入的结构损伤区域中的陷阱可以在高温下捕获自由电子，从而可以缩短少数载流子的寿命。这种现象说明样品在激光打孔区域局部的电学性质在由低温 (87 K) 到高温 (300 K) 过程中也有所变化。

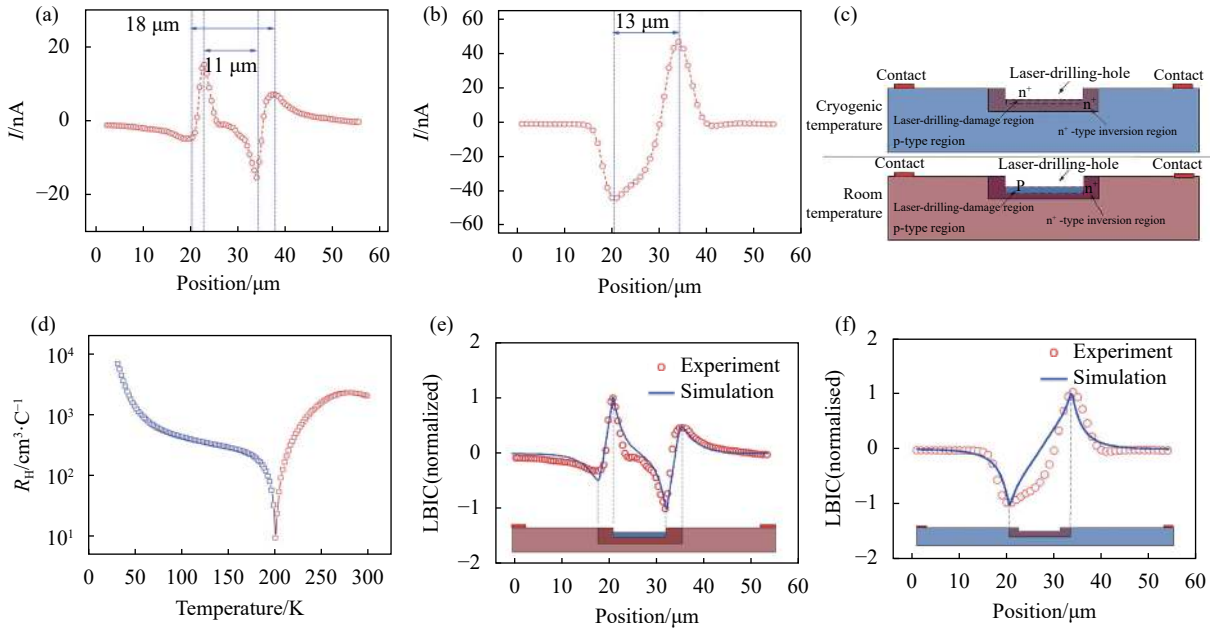


图 4 激光打孔成结 HgCdTe 器件 SPCM 分析。(a) 300 K 下的 SPCM 实验曲线；(b) 87 K 下的 SPCM 实验曲线；(c) 低温和室温下样品器件的 p-n 结转换模型；(d) 霍尔系数的温度依赖性；(e) 300 K 激光打孔成结 SPCM 模拟和实验结果曲线；(f) 87 K 激光打孔成结 SPCM 模拟和实验结果曲线[35]

Fig.4 SPCM analysis of laser punched junction-forming HgCdTe devices. (a) Experimental SPCM curve at 300 K; (b) Experimental SPCM curve at 87 K; (c) Model of p-n junction transition for sample devices at low and room temperatures; (d) Temperature dependence of Hall coefficient; (e) 300 K laser perforated junction SPCM simulation and experimental results curves; (f) 87 K laser perforated junction SPCM simulation and experimental results curves[35]

据 Qiu 等人[35] 分析，单个 p-n 结的 SPCM 信号为对称的双峰分布特征。因此，87 K 时激光打孔结构的 SPCM 实验曲线特征和 n^+-on-p 结的 SPCM 曲线特征相似，这证明了在激光打孔区域存在 n 反型区域。虽然激光打孔处理半导体材料后其打孔区域电学性质发生变化的实验现象早已被发现，但是其打孔区域电学性质发生变化背后的具体机理还没有相应的物理解释[46−47]。

因此，提出 p-n^+-on-n 结转换模型，如图 4(c) 所示。已知激光打孔成结技术会增加电活性缺陷[44−45]。电活性缺陷包含两种 (施主类型或受主类型)，电活性缺陷类型对最终 p-n 结类型有重大影响。和离子注入技术类似，如图 4(b) 所示，样品在较低温度时，在 n^+反型区内缺陷大部分都没有被激活，因此，在低温时激光打孔引入的缺陷对样品基本没有影响，激光打孔区域的电子准费米能级与刻蚀形成的 n^+反型层相同。但是，如图 4(a) 所示，在室温条件下，SPCM 信号出现了极性反转与耦合效应，SPCM 信号的变化表示，激光打孔工艺过程中引入的一部分缺陷被温度变化所激活，同时器件中陷阱的存在将捕获很多的自由移动电子，这也就引起了损伤区 n^+反型层向着新的弱 n^-型或 p 型层转变，使得成结区域存在新的耦合结。除此之外，在 p 型 HgCdTe 材料中存在着混合电导效应，这也会影响成结区的电学性质，如图 4(d) 所示，当温度低于 200 K(蓝色方形符号) 时，霍尔系数为正，当温度高于 200 K(红色方形符号) 时为负。由 Hg 空位掺杂的 p 型 HgCdTe 材料在大于 200 K 的环境下，器件霍尔系数从正值转为负值，也就是说从表现 p 型材料特征转变为表现 n 型材料特征。所以，在室温条件下，经过激光打孔的器件最终转化为 p-n^+-on-n 耦合结结构。参考文献 [35] 基于载流子的漂移-扩散模型，采用二维有限元模型。如图 4(e)、(f) 给出了 300 K 和 87 K 下仿真曲线和实验曲线对比图，实验结果和仿真结果非常吻合，验证了 p-n^+-on-n 耦合结仿真模型的准确性。

参考文献 [35] 通过 SPCM 表征技术研究了由飞秒激光钻孔引起的空位掺杂 p 型 HgCdTe 结。实验和模拟结果都表明，材料表面的电反转层和陷阱是通过激光钻孔产生的。电反转层、陷阱和混合导电有助于 SPCM 在高温下产生新颖的信号反转和耦合效应。此工作可为更好地理解空位掺杂 p 型 HgCdTe 上激光钻孔诱导结转变提供实验和理论依据，并为激光钻孔形成的 HgCdTe 红外探测器的应用提供指导。

1.3 干法刻蚀损伤的局域场表征

刻蚀工艺是指对目标材料表面进行部分遮盖后，将未遮盖部分部分去除的工艺，刻蚀工艺分为湿法刻蚀、干法与湿法相结合的刻蚀技术以及干法刻蚀，如图 5 所示[48]。湿法刻蚀优势在于操作简单，可靠性高并且适合大批量生产，因此其在半导体工艺中被广泛采用。但是这种刻蚀方式也存在其缺陷，因为湿法刻蚀各向异性差，台面刻蚀较低的纵横比，不适合刻蚀深度较大的情况，应用在红外焦平面阵列制备时，会导致红外焦平面阵列的填充因子比较低。与湿法刻

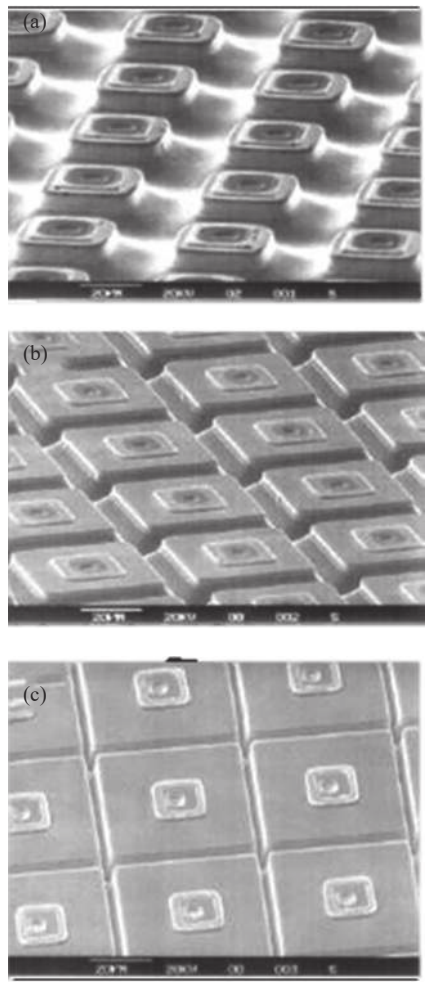


图 5 HgCdTe 光电二极管阵列台面刻蚀 SEM 图。(a) 湿法腐蚀；(b) 干、湿结合刻蚀；(c) 干法刻蚀[48]

Fig.5 SEM image of HgCdTe photodiode array mesa etching. (a) Wet etching; (b) Dry and wet combined etching; (c) Dry etching[48]

蚀相比，干法刻蚀中的等离子刻蚀对红外焦平面阵列制备过程中的台面的形成有很多优势，其各向异性高，所以可以用来制造高填充因子的红外焦平面阵列；但是这种等离子刻蚀工艺也有着它的缺点，例如制备过程中很容易使材料表面出现损伤，因此需要后续的热处理技术来减轻这些刻蚀带来的损伤。目前，已经使用了各种干法刻蚀技术，例如离子束刻蚀、反应离子刻蚀 (RIE)、电感耦合等离子体 (ICP) 刻蚀[49] 和电子回旋共振 (ECR) 刻蚀[50−52]。

Rogalski [53−54] 提到，因为 Hg-Te 键强度较低以及 CdTe 成分的挥发性较低，所以干法刻蚀更容易损伤 HgCdTe 材料表面，同时干法刻蚀坑表面也会因为刻蚀的影响转变其电学性质，这种损伤对红外焦平面探测器整体来说是不可忽视的。Li 等人[55] 利用 SPCM 对不同刻蚀温度下的干法刻蚀样品在同一温度下进行测试，测试结果如图 6(a) 所示。

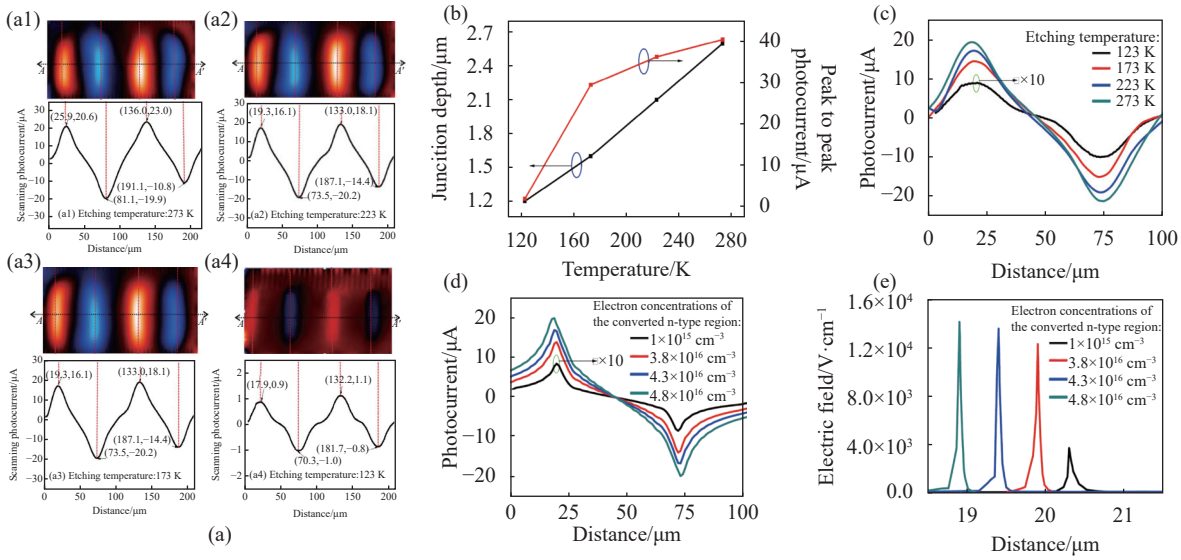


图 6 干法刻蚀 HgCdTe 器件 SPCM 分析。(a) 81 K 下测量的不同刻蚀温度 p-HgCdTe 样品的 SPCM 曲线；(b) 损伤结深度 (左) 和 SPCM 信号峰峰值 (右) 作为刻蚀温度的函数；(c) 不同刻蚀温度下第一周期的实验信号分布；(d) 模拟具有不同电子浓度器件的 SPCM 信号分布；(e) 扫描具有不同电子浓度的第一个刻蚀凹槽，模拟电场作为激光束位置的函数[55]

Fig.6 SPCM analysis of dry etched HgCdTe devices. (a) SPCM curves of p-type HgCdTe samples with different etching temperatures measured at 81 K; (b) Damage junction depth (left) and SPCM signal peaks (right) as a function of etching temperature; (c) Experimental signal distribution for the first cycle at different etching temperatures; (d) Simulation of SPCM signal distribution for devices with different electron concentrations; (e) Scan of the first etched notch with different electron concentrations and simulated electric field as a function of laser beam position[55]

图 6(a) 展示了在 81 K 测量的不同刻蚀温度刻蚀 p 型 HgCdTe 样品的 SPCM 线轮廓和二维 SPCM 映射。分析可知，峰谷形成的原因是干法刻蚀引起的损坏导致在台面侧壁上进行类型转换。在刻蚀过程中空位掺杂的 p 型 HgCdTe 中类型转换现象的出现被广泛解释为 Hg 原子在表面附近的物理位移，从而产生了间隙 Hg 原子。这些间隙 Hg 原子导致残留的未补偿供体主导导电性，从而通过消除受损区域内的受体空位将区域转化为 n 型。图 6(a) 还显示了不同刻蚀温度下，实验测得 SPCM 信号的峰值变换，可以分析随着刻蚀温度的逐渐降低 (从 273~123 K)，SPCM 信号的峰值也降低，SPCM 信号峰值之间的间距代表着光敏元的宽度，也就是 n 型反型层的宽度，将刻蚀坑的宽度减去实验测得的反型层宽度就是刻蚀坑边缘 n 型扩展区的宽度。图 6(b) 为测量干法刻蚀引起的损伤结深度作为刻蚀温度的函数 (左) 和实验测得 SPCM 信号峰的峰值作为刻蚀温度的函数 (右)。可以分析，逐渐提升刻蚀温度的过程中，pn 结深度也增加，说明刻蚀台面的 pn 结深度与刻蚀时的温度呈现正相关的关系。同时表示随着刻蚀温度的逐渐提升，n 型扩展区的宽度也增加，表明在刻蚀坑的边缘部分的 n 型扩展区的宽度和刻蚀时的温度呈现正相关的

关系。究其背后的原因，在较高的刻蚀温度下进行刻蚀，较高的刻蚀温度引起器件中的 Hg 间隙原子的扩散程度提高，因此在 HgCdTe 材料刻蚀区域中的 n 型反型区域扩大。随着刻蚀温度降低，实验所得的 SPCM 信号的峰值也降低的现象，主要是由于在比较低的温度下进行刻蚀后，刻蚀区域的 n 型反型能力减弱，转换后 n 型区域中的电子浓度随刻蚀温度的降低而降低，因此 n 型区域的电场强度随着刻蚀温度的降低逐渐减小，SPCM 实验峰值也随着刻蚀温度的降低而降低。

Li 等人[55] 建立了实验过程中不同时刻温度下的基本物理过程的模拟验证了这种理论。图 6(c)、(d) 为在不同刻蚀的温度时的 SPCM 测试数据和 n 型区域内具有不同电子浓度的 SPCM 模拟信号图，对比发现采用特定的电子浓度进行模拟后的 SPCM 信号数据比较符合实验测得的 SPCM 数据，这个结果证实随着刻蚀温度的降低，转换后的 n 型区域中不同的电子浓度是引起 SPCM 曲线的峰值降低的现象的重要原因。图 6(e) 显示了转换后的 n 型区域内不同电子浓度的干法刻蚀器件的模拟电场分布，从而表明较低的刻蚀温度会产生较弱的内置电场和较弱的损伤诱导型反转，验证了上面的结论。

转换后的 n 型区域中的电子浓度变化是引起 SPCM 实验曲线峰值随着刻蚀温度降低而降低的重要原因。在较低的刻蚀温度下，由干法刻蚀引起的刻蚀凹槽上的类型转换变得更弱。这些发现可以帮助大家通过 SPCM 方法更好地识别 Hg 空位掺杂 p 型 HgCdTe 材料的刻蚀凹槽，可以更好地将这些技术应用在第 3 代 HgCdTe 红外焦平面探测器的制备工艺过程中。

2 局域场调控设计方法

随着 HgCdTe 红外探测器的发展，一些新型器件结构设计方案逐渐被提出。如图 7 所示，这些新型结构设计多为精细的局域场设计方案。

针对 HgCdTe 雪崩光电探测器易受表面局域电

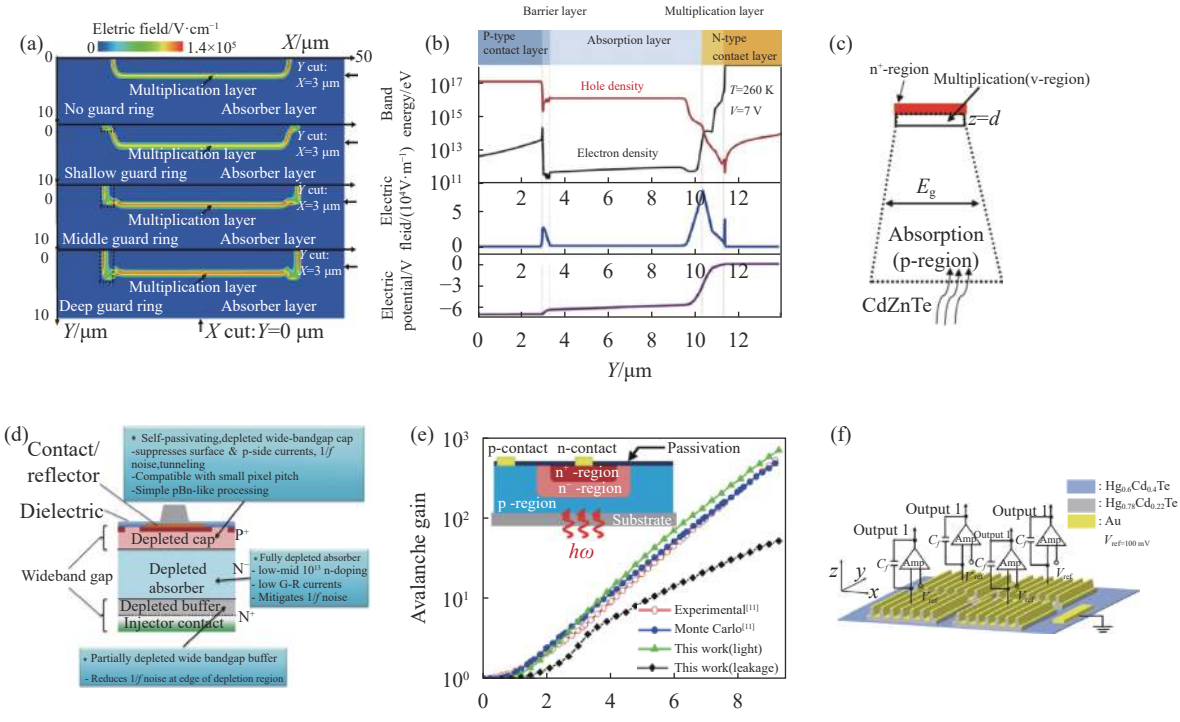


图 7 (a) 保护环结构的电场分布[56]; (b) pBp-APD 结构在−7 V 的载流子密度、电场和电势模拟图[57]; (c) 变组分 APD 器件的吸收区带隙[58]; (d) 异质结 P-i-N 探测器架构[59]; (e) 基于局域场理论的 APD 增益特性分析[20]; (f) 局域光场结构 HgCdTe 光电二极管示意图[60]

Fig.7 (a) Electric field distribution of the protection ring structure [56]; (b) Simulated plots of carrier density, electric field and potential at −7 V for the pBp-APD structure[57]; (c) Band gap in the absorption region of the variable component APD device[58]; (d) heterojunction P-i-N diode architecture [59]; (e) APD gain characterization based on local field theory [20]; (f) Schematic of the local field structure HgCdTe photodiode[60]

场的影响导致器件表面隧穿电流大、预击穿等问题，Li 等人[56] 设计了具有保护环结构的 HgCdTe 雪崩光电二极管 (Avalanche Photon Diode, APD)，如图 7(a) 所示，通过分析不同的保护环结构设计发现，通过引入深阱保护环可以有效抑制表面局域电场，而不会抑制光生载流子输运方向上的纵向电场，这种 HgCdTe 器件可以在不降低增益的情况下大大减小噪声电流，提升了器件的增益噪声比。He 等人[57] 在高温长波 HgCdTe 的 APD 研究中提出一种基于单极阻隔结构的 pBp-APD 新型结构 (如图 7(b) 所示)。通过耦合 APD 中的阻隔层结构可以有效降低吸收区内的载流子浓度，使得所有与温度相关的暗电流机制都失效，从而允许工作温度的大幅度提高。pBp-APD 的势垒层在-7 V 偏置电压情况下传导势垒约为 0.13 eV，可以保证结构在高偏置下也能保持优异的电子阻隔效果并抑制暗电流。印度 Anand Singh 等人[58] 针对 HgCdTe APD 带宽限制，提出了一种变组分的器件结构设计 (如图 7(c) 所示)，器件在吸收区内采用 Cd 缓变的设计，在吸收区内形成较大的局域电场，可以有效地促进吸收区内载流子的输运，这种方法实现了带宽的提升。美国 Teledyne 公司[59] 提出了一种 P-i-N 的器件结构 (如图 7(d) 所示)，在吸收区是采用窄带隙材料，两端电极层采用了宽带隙 HgCdTe 材料，这样的器件结构会在吸收区内自发耗尽，形成耗尽型的器件结构设计，这样相当于进一步降低了吸收区材料的本征载流子浓度，实现 Auger 复合抑制，提高器件的背景限温度。Xie 等人[20] 在对 HgCdTe 的局域场理论修正方面提出了一些新的想法，提出了一种起源于量子力学的窄带材料 HgCdTe 的无参数雪崩分析理论，避免了任何拟合参数或任何统计估计，同时利用了具有拟合参数的宏观经验模型和具有统计估计的微观过程模拟，这是一种较为完善的雪崩过程的空间描述和广义历史依赖理论，对 HgCdTe 噪声起源分析及抑制有较高的参考价值。图 7(e) 展示了 Xie 等人提出的模型对 APD 光电流增益和漏电流增益以及实验增益和蒙特卡洛模拟增益的比较结果。Ge 等人[60] 针对 HgCdTe 薄层吸收量子效率较低的难题，提出了一种光电联合调控的局域场增强设计，采用趋肤效应设计了新型结构，如图 7(f) 所示，实现了薄层 HgCdTe 材料的吸收率的进一步提高，这将有助于器件带宽的提高。

3 结束语

文中综述 HgCdTe 红外探测器的局域场光电表征方法与局域场设计理念。总结了利用 SPCM 技术对 HgCdTe 材料生长与器件加工工艺诱导的结转换特性和损伤区空间分布等无损测量方法，实现有害局域场的可视化表征，为 HgCdTe 红外探测器制备提供指导。进一步，总结了 HgCdTe 红外探测器的局域场设计理念，为 HgCdTe 红外探测器提供了结构优化方案，能够对新一代 HgCdTe 红外探测器发展提供思路。

局域场表征与设计理念表现出 HgCdTe 红外探测器正向更精细的方向发展，这决定着器件性能或功能的进一步提升。在局域场表征方面，SPCM 方法需要进一步突破更高分辨率、多维成像和多光谱成像，这样能够反馈出器件更深层次信息。在局域场设计方面，需要面向应用需求提出更巧妙的设计方案，随着器件加工技术的进一步成熟，器件内微纳结构构造以及器件与人工微结构耦合将会不仅仅是概念。将来，随着先进的局域场表征技术与设计理念的实施，将对新一代 HgCdTe 红外探测器发展提供理论与技术支撑。

参考文献：

[1] Rogalski A. HgCdTe infrared detector material: History, status and outlook [J]. ***Reports on Progress in Physics***, 2005, 68(10): 2267-2336.

[2] Yakovkin I N, Petrova N V. Band inversion and absence of surface states in IV – VI semiconductors [J]. ***Physics Letters A***, 2021, 403: 127398.

[3] Hu W D, Li Q, Chen X S, et al. Recent progress on advanced infrared photodetectors [J]. ***Acta Physica Sinica***, 2019, 68(12): 120701. (in Chinese)

[4] Ye Z H, Li H H, Wang J D, et al. Recent hotspots and innovative trends of infrared photon detectors [J]. ***Journal of Infrared and Millimeter Waves***, 2022, 41(1): 15-39. (in Chinese)

[5] Hu W D, Ye Z H, Liao L, et al. 128×128 long-wavelength/mid-wavelength two-color HgCdTe infrared focal plane array detector with ultralow spectral cross talk [J]. ***Optics Letters***, 2014, 39(17): 5184-5187.

[6] Chen J, Chen J, Li X, et al. High-performance HgCdTe avalanche photodetector enabled with suppression of band-to-

band tunneling effect in mid-wavelength infrared [J]. ***NPJ Quantum Materials***, 2021, 6(1): 1-7.

[7] Fadeev M A, Troshkin A O, Dubinov A A, et al. Mid-infrared stimulated emission in HgCdTe/CdHgTe quantum well heterostructures at room temperature [J]. ***Optical Engineering***, 2020, 60(8): 082006.

[8] Hackiewicz K, Kopytko M, Gawron W. MOCVD-grown HgCdTe photodiodes optimized for HOT conditions and a wide IR range [J]. ***Sensors and Actuators A: Physical***, 2020, 309: 112008.

[9] He J L, Wang P, Li Q, et al. Enhanced performance of HgCdTe long-wavelength infrared photodetectors with nBn design [J]. ***IEEE Transactions on Electron Devices***, 2020, 67(5): 2001-2007.

[10] Ismayilov N J, Rajabli A A. Large area $Cd_xHg_{1-x}Te$ photodiode with picosecond response time τ_{RC} [J]. ***Low Temperature Physics***, 2022, 48(2): 161-164.

[11] Lei W. A review on the development of GaSb alternative substrates for the epitaxial growth of HgCdTe [J]. ***Journal of Nanoscience and Nanotechnology***, 2018, 18(11): 7349-7354.

[12] Martyniuk P, Rogalski A, Krishna S. Interband quantum cascade infrared photodetectors: Current status and future trends [J]. ***Physical Review Applied***, 2022, 17(2): 027001.

[13] Mynbaev K D, Bazhenov N L, Dvoretsky S A, et al. Photo-luminescence of molecular beam epitaxy-grown mercury cadmium telluride: Comparison of HgCdTe/GaAs and HgCdTe/Si technologies [J]. ***Journal of Electronic Materials***, 2018, 47(8): 4731-4736.

[14] Nordin L, Muhowski A J, Wasserman D. High operating temperature plasmonic infrared detectors [J]. ***Applied Physics Letters***, 2022, 120(10): 101103.

[15] Qiu X F, Zhang S X, Zhang J, et al. Microstructure and optical characterization of mid-wave HgCdTe grown by MBE under different conditions [J]. ***Crystals***, 2021, 11(3): 296.

[16] Vallone M, Goano M, Tibaldi A, et al. Quantum efficiency and crosstalk in subwavelength HgCdTe dual band infrared detectors [J]. ***IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics***, 2022, 28(2): 1-9.

[17] Vallone M, Tibaldi A, Hanna S, et al. Plasmon-enhanced light absorption in mid-wavelength infrared HgCdTe detectors [J]. ***IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics***, 2022, 28(2): 1-10.

[18] Voitsekhovskii A V, Nesmelov S N, Dzyadukh S M, et al. An experimental study of the dynamic resistance in surface leakage limited nBn structures based on HgCdTe grown by molecular beam epitaxy [J]. ***Journal of Electronic Materials***, 2021, 50(8): 4599-4605.

[19] Guo J X, Xie R Z, Wang P, et al. Infrared photodetectors for multidimensional optical information acquisition [J]. ***Journal of Infrared and Millimeter Waves***, 2022, 41(1): 40-60. (in Chinese)

[20] Xie R Z, Li Q, Wang P, et al. Spatial description theory of narrow-band single-carrier avalanche photodetectors [J]. ***Optics Express***, 2021, 29(11): 16432-16446.

[21] You C, Deng W, Liu M, et al. Design and performance study of hybrid Graphene/HgCdTe mid-infrared photodetector [J]. ***IEEE Sensors Journal***, 2021, 21(23): 26708-26715.

[22] Zhang W T, Ye W C, Chen X, et al. Study of the spectral response for HgCdTe long-wavelength detectors with applied stress [J]. ***Optical and Quantum Electronics***, 2022, 54(2): 1-12.

[23] Zhang W K, Lin J M, Chen H L, et al. Analysis injection area-dark current characteristics for mid-wavelength HgCdTe photodiodes [J]. ***Infrared Physics & Technology***, 2018, 93: 70-76.

[24] Zholudev M S, Rumyantsev V V, Morozov S V. Calculation of discrete and resonant states of Coulomb acceptor in HgCdTe alloys [J]. ***Semiconductor Science and Technology***, 2021, 37(2): 025003.

[25] Zholudev M S, Rumyantsev V V, Morozov S V. Calculation of the temperature dependence of the Coulomb-Acceptor state energy in a narrow-gap HgCdTe solid solution [J]. ***Semiconductors***, 2022, 55(12): 907-913.

[26] Zhu L Q, Guo H J, Deng Z, et al. Temperature-dependent characteristics of HgCdTe mid-wave infrared e-avalanche photodiode [J]. ***IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics***, 2022, 28(2): 1-9.

[27] Li Q, Xie R, Wang F, et al. SRH suppressed P-G-I design for very long-wavelength infrared HgCdTe photodiodes [J]. ***Optics Express***, 2022, 30(10): 16509-16517.

[28] Haynes J R, Shockley W. Investigation of hole injection in transistor action [J]. ***Physical Review***, 1949, 75(4): 691-691.

[29] Van Roosbroeck W. Injected current carrier transport in a semi-infinite semiconductor and the determination of lifetimes and surface recombination velocities [J]. ***Journal of Applied***

Physics, 1955, 26(4): 380-391.

[30] Marek J. Light-beam-induced current characterization of grain boundaries [J]. ***Journal of Applied Physics***, 1984, 55(2): 318-326.

[31] Raynaud C, Nguyen D-M, Dheilly N, et al. Optical beam induced current measurements: Principles and applications to SiC device characterization [J]. ***Physica Status Solidi A:Applied Research***, 2009, 206(10): 2273-2283.

[32] Li Q, He T, Zhang K, et al. Direct mapping and characterization of the surface local field in InGaAs/InP avalanche photodetectors [J]. ***Infrared Physics & Technology***, 2022, 123: 104162.

[33] Graham R, Yu D. Scanning photocurrent microscopy in semiconductor nanostructures [J]. ***Modern Physics Letters B***, 2013, 27(25): 1330018.

[34] Baugher B W, Churchill H O, Yang Y, et al. Optoelectronic devices based on electrically tunable p-n diodes in a monolayer dichalcogenide [J]. ***Nature Nanotechnology***, 2014, 9(4): 262-267.

[35] 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): 204506.

[36] Musca C A, Redfern D A, Smith E P G, et al. Junction depth measurement in HgCdTe using laser beam induced current (LBIC) [J]. ***Journal of Electronic Materials***, 1999, 28(6): 603-610.

[37] Hu W D, Chen X S, Ye Z H, et al. Dependence of ion-implant-induced LBIC novel characteristic on excitation intensity for long-wavelength HgCdTe-based photovoltaic infrared detector pixel arrays [J]. ***IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics***, 2013, 19(5): 1-7.

[38] Hu W D, Chen X S, Ye Z H, et al. Polarity inversion and coupling of laser beam induced current in As-doped long-wavelength HgCdTe infrared detector pixel arrays: Experiment and simulation [J]. ***Applied Physics Letters***, 2012, 101(18): 181108.

[39] Qiu W C, Hu W D, Lin T, et al. Temperature-sensitive junction transformations for mid-wavelength HgCdTe photovoltaic infrared detector arrays by laser beam induced current microscope [J]. ***Applied Physics Letters***, 2014, 105(19): 191106.

[40] Gumenjuk-Sichevskaja J V, Sizov F F, Ovsyuk V N, et al. Charge transport in HgCdTe-based n^+-p photodiodes [J]. ***Semiconductors***, 2001, 35(7): 800-806.

[41] Polla D L, Reine M B, Jones C E. Deep level studies of $Hg_{1-x}Cd_xTe$. II: Correlation with photodiode performance [J]. ***Journal of Applied Physics***, 1981, 52(8): 5132-5138.

[42] Jones C E, James K, Merz J, et al. Status of point defects in HgCdTe [J]. ***Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films***, 1985, 3(1): 131-137.

[43] Turinov V I. A study of deep levels in CdHgTe by analyzing the tunneling current of photodiodes [J]. ***Semiconductors***, 2004, 38: 1092-1098.

[44] Dawar A L, Roy S, Mall R P, et al. Effect of laser irradiation on structural, electrical, and optical properties of p-mercury cadmium telluride [J]. ***Journal of Applied Physics***, 1991, 70(7): 3516-3520.

[45] Dawar A L, Roy S, Nath T, et al. Effect of laser annealing on electrical and optical properties of n-mercury cadmium telluride [J]. ***Journal of Applied Physics***, 1991, 69(7): 3849-3852.

[46] Zha F X, Li M S, Shao J, et al. Femtosecond laser-drilling-induced HgCdTe photodiodes [J]. ***Optics Letters***, 2010, 35(7): 971-973.

[47] 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.

[48] Qiu W C, Hu W D. Laser beam induced current microscopy and photocurrent mapping for junction characterization of infrared photodetectors [J]. ***Science China Physics, Mechanics & Astronomy***, 2015, 58: 1-13.

[49] Smith E P, Gleason J K, Pham L T, et al. Inductively coupled plasma etching of HgCdTe [J]. ***Journal of Electronic Materials***, 2003, 32: 816-820.

[50] Stoltz A J, Benson J D, Boyd P R, et al. The effect of electron cyclotron resonance plasma parameters on the aspect ratio of trenches in HgCdTe [J]. ***Journal of Electronic Materials***, 2003, 32(7): 692-697.

[51] Zhong F, Wang H, Wang Z, et al. Recent progress and challenges on two-dimensional material photodetectors from the perspective of advanced characterization technologies [J]. ***Nano Research***, 2020, 14(6): 1840-1862.

[52] He T, Wang Z, Zhong F, et al. Etching techniques in 2D materials [J]. ***Advanced Materials Technologies***, 2019, 4(8): 1900064.

[53] Rogalski A. Recent progress in infrared detector technologies [J]. ***Infrared Physics & Technology***, 2011, 54(3): 136-154.

[54] Rogalski A, Antoszewski J, Faraone L. Third-generation infrared photodetector arrays [J]. ***Journal of Applied Physics***, 2009, 105: 091101.

[55] Li Y T, Hu W D, Ye Z H, et al. Direct mapping and characterization of dry etch damage-induced PN junction for long-wavelength HgCdTe infrared detector arrays [J]. ***Optics Letters***, 2017, 42(7): 1325-1328.

[56] Li Q, Wang F, Wang P, et al. Enhanced performance of HgCdTe midwavelength infrared electron avalanche photodetectors with guard ring designs [J]. ***IEEE Transactions on Electron Devices***, 2020, 67(2): 542-546.

[57] He J L, Li Q, Wang P, et al. Design of a bandgap-engineered barrier-blocking HOT HgCdTe long-wavelength infrared avalanche photodiode [J]. ***Optics Express***, 2020, 28(22): 33556-33563.

[58] Singh A, Shukla A K, Pal R. Performance of graded bandgap HgCdTe avalanche photodiode [J]. ***IEEE Transactions on Electron Devices***, 2017, 64(3): 1146-1152.

[59] Lee D, Carmody M, Piquette E, et al. High-operating temperature HgCdTe: A vision for the near future [J]. ***Journal of Electronic Materials***, 2016, 45(9): 4587-4595.

[60] Ge H N, Xie R Z, Chen Y F, et al. Skin effect photon-trapping enhancement in infrared photodiodes [J]. ***Optics Express***, 2021, 29(15): 22823-22837.