

文章编号: 1672-8785(2023)02-0013-06

碲镉汞离子注入温度研究

何 斌 张 桓 韩 岗 王旭升 刘 晨

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 作为 pn 结成型的重要参数, 离子注入温度对晶格缺陷和材料扩散的影响较大。在碲镉汞的离子注入过程中, 注入温度很大程度上影响着注入区的尺寸与光刻掩膜的形貌。从离子注入工艺的温度控制出发, 研究了该工艺中的束流、注入能量、接触面粗糙度等因素; 结合器件的 $I-V$ 曲线, 探究了注入温度对碲镉汞红外探测器性能的影响。结果表明, 较低的注入束流、冷却温度以及良好的导热面, 可以保证实际注入温度低于光刻胶的耐受温度, 从而提高工艺过程的成品率。同时, 较低的注入温度对于减小暗电流及注入区扩散面积起到了一定的作用, 提高了碲镉汞红外探测器光敏元的性能。

关键词: 离子注入; 碲镉汞; 注入温度; $I-V$ 曲线

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2023.02.003

Study on Ion Implantation Temperature of Mercury Cadmium Telluride

HE Bin, ZHANG Huan, HAN Gang, WANG Xu-sheng, LIU Chen

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: As an important parameter for p-n junction formation, ion implantation temperature has a great influence on lattice defects and material diffusion. During the implantation process of HgCdTe, the implantation temperature greatly affects the size of the implantation region and the morphology of the photolithographic mask. Based on the temperature control of ion implantation process, the beam current, beam energy, roughness of surface and other factors are studied. The influence of implantation temperature on the performance of HgCdTe infrared detectors is investigated by combining the $I-V$ curve of the device. The results show that low beam current, cooling temperature and fine heat conduction surface can ensure that the actual injection temperature is lower than the photoresist temperature, and improve the yield of the process. At the same time, the lower temperature reduces the dark current and diffusion area of the injection region, which contributes to the performance of HgCdTe infrared detectors.

Key words: ion implantation; HgCdTe; implantation temperature; $I-V$ curve

收稿日期: 2022-09-25

作者简介: 何斌(1995-), 男, 江西九江人, 助理工程师, 主要从事碲镉汞红外探测器研究。

E-mail: 1051464875@qq.com

0 引言

离子注入工艺是对高能离子进行分析、聚焦与调节后,以一种特定的扫描模式,将其均匀地注入芯片上。在离子注入的过程中,温度是 pn 结成型的重要参数,注入温度对增强扩散和晶格缺陷的影响很大。为了及时消除无用的缺陷,常采用热注入方式。有时对某些半导体材料需要有意利用沟道效应和低温注入^[1],使离子注入得很深。然而,对于碲镉汞的离子注入工艺而言,由于碲镉汞的特殊性,注入区原子的扩散过程不仅仅出现在热处理工艺中。如果注入工艺本身温度较高,那么原子的扩散过程在注入中就会发生。碲镉汞离子注入工艺本身就能直接形成较好的 n^+n^-p 结^[2]。因此,注入温度很大程度上影响着注入区的实际尺寸和有效结深^[3]。

从实际的芯片工艺考虑,芯片表面的温度对光刻胶与钝化层的影响较大。若芯片表面的温度较高,超过光刻胶的耐受温度,则光刻掩膜会变性甚至发生形变,导致注入区增大。对于 ZnS 与 CdTe 的复合钝化膜层,注入能量与束流过高引起的温差还会导致钝化膜层脱落,严重影响器件的 $I-V$ 特性^[4]。因此,离子注入技术中碲镉汞芯片的温度控制具有重要研究价值。

本文从离子注入工艺的温度控制出发,研究了离子注入工艺中的束流、注入能量、接触面粗糙度等因素对温控的影响,并结合器件的

$I-V$ 曲线,探究了碲镉汞红外探测器工艺中注入温度的影响。

1 实验

如图 1(a)所示,将温度试纸贴在芯片上,表征离子注入过程中芯片表面的实际温度。采用半导体参数测试仪采集器件的 $I-V$ 特性曲线。

如图 1(b)所示,采用液相外延工艺在 CdZnTe 衬底材料上生长 HgCdTe 外延层;使用磁控溅射设备在 HgCdTe 表面上生长 CdTe 及 ZnS 复合钝化膜层;基于离子注入技术,通过注入高能 B 离子,在 HgCdTe 上形成 pn 结;利用干法刻蚀技术在碲镉汞表面上刻蚀出电极接触孔,并用离子束沉积设备引出电极,完成器件的制备。

2 实验结果与讨论

2.1 注入能量与束流对芯片温度的影响

在离子注入过程中,注入能量是指注入离子携带的总能量,束流是指单位时间、单位面积内注入离子的数量。一般来说,注入能量与束流越高,芯片表面的热效应越大^[5-6]。如图 2 所示,当采用高能离子轰击芯片表面时,虽然芯片与硅片背面有冷却系统,但由于光刻胶的导热性差,巨大的热效应依然会导致芯片表面有一定温升,引起芯片的实际温度与设定温度不一致^[7]。

图 3 所示为采用不同的离子注入参数时,在 0℃ 与 20℃ 冷却温度下,芯片表面温度与注

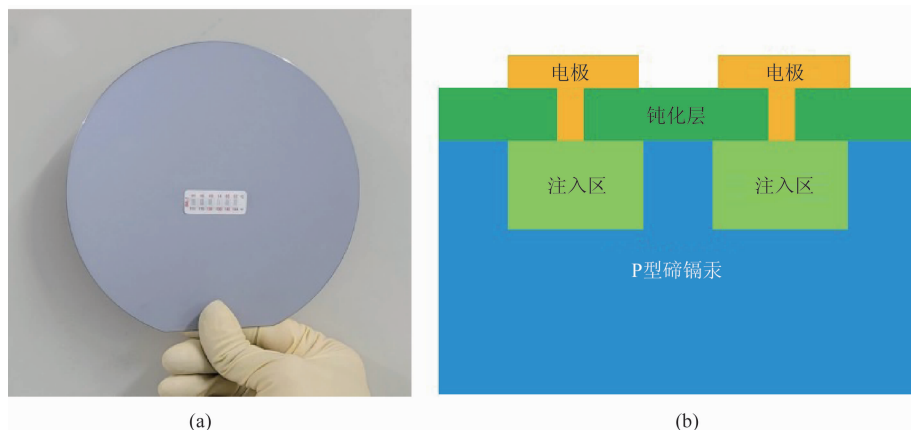


图 1 (a)离子注入温度测试图; (b)器件结构图

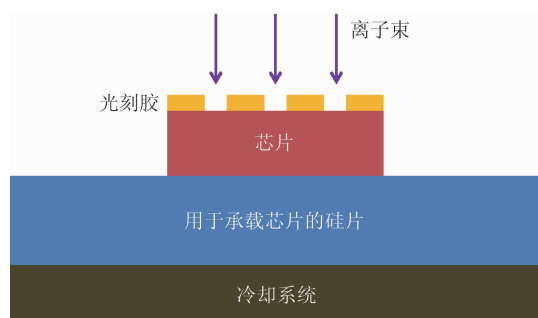


图 2 离子注入工艺模型图

入能量、束流的关系曲线。在图 3(a)中, 样品背面采用循环水实现 0°C 控温。当恒定注入能量分别为 150 keV、200 keV、250 keV、300 keV 时, 芯片表面温度随着注入束流的增大而升高。在小束流 $30\sim 60\ \mu\text{A}$ 范围内, 温度变化整体上较为缓慢; 在束流 $60\sim 120\ \mu\text{A}$ 范围内, 芯片表面温度与注入束流几乎成正比; 当束流大于 $120\ \mu\text{A}$ 时, 芯片表面温度开始陡增。

对比图 3(a)中注入能量分别为 150 keV、200 keV、250 keV 和 300 keV 时的温度-束流曲线, 可以发现注入能量增大也会增加芯片表面温度。当束流处于 $30\sim 60\ \mu\text{A}$ 且注入能量从 150 keV 增至 300 keV 时, 芯片温度升高 10°C ; 当束流处于 $60\sim 130\ \mu\text{A}$ 且注入能量从 150 keV 增至 300 keV 时, 芯片温度升高 $5\sim 19^{\circ}\text{C}$ 左右。

在图 3(b)中, 样品背面采用循环水实现 20°C 控温, 芯片表面温度随注入能量及束流的变化关系与图 2(a)极相似。当恒定注入能量为 150 keV、200 keV、250 keV、300 keV 且束流处于 $30\sim 60\ \mu\text{A}$ 时, 温度可控制在一个理想的范围内; 若继续增大束流, 芯片表面温度与注入束流成正比, 并逐渐开始失控。若恒定束流, 芯片表面温度也随注入能量的增大而上升; 注入能量从 150 keV 增至 300 keV 时, 芯片温度升高 $6\sim 14^{\circ}\text{C}$ 左右。

试验结果表明, 在离子注入工艺中束流与能量对芯片表面温度的影响较大, 过大的束流与能量都会让芯片表面温度失控。在实际工艺参数的选择中, 注入能量决定了离子的注入深度, 通常不会轻易变动。我们可以选择一个较

低的注入束流以及背面冷却温度, 以尽量降低芯片表面温度(保证低于光刻胶的耐受温度), 从而提高工艺过程的成品率。

2.2 接触面粗糙度对芯片温度的影响

如图 4 所示, 实际工艺中存在个别芯片背面较差、承载芯片的硅片在多次注入后稍粗糙等情况。为了探究不同导热接触面对离子注入工艺的影响程度, 本文选择背面粗糙度不同的芯片, 观察离子注入后的光刻掩膜图案。

如图 5 所示, 对于背面粗糙度不同的芯片 A 与 B, 采用相同的工艺参数, 试验结束后光刻掩膜的形貌差距较大。结果表明, 图 5(a)中芯片 A 背面整体高度较为均匀, 背面光滑; 图 5(b)中, 在离子注入后, 芯片 A 表面光刻掩膜正常, 并未有光刻胶变形等现象。然而, 图 5(c)中芯片 B 背面整体高度相差极大(最大达 $5\ \mu\text{m}$), 芯片背面呈现较多的小坑, 较为粗糙; 图 5(d)中, 在离子注入后, 芯片 B 表面光刻胶严重变形甚至裂开, 造成光刻掩膜失效。从传热学上看^[8-9], 在芯片和硅片导热系数不变时, 芯片面型差与硅片粗糙将减小传热面, 引起芯片温度极度失控。

在离子注入工艺中, 需要对芯片和硅片的接触面加以重视。在芯片背面, 我们可以采用磨抛工艺来降低粗糙度, 并采用表面光滑的硅片承载芯片。一个好的接触表面有利于增大换热面积, 降低区域温度升幅, 保证光刻掩膜不变形, 提高工艺过程的稳定性。

2.3 离子注入温度对碲镉汞红外探测器的影响

研究器件在很大程度上是研究漏电流与器件加工工艺的关系。为了探究离子注入温度对碲镉汞红外探测器的影响, 将同一片碲镉汞材料划开。图 6(a)与图 6(b)所示分别是注入温度为 0°C 与 85°C 时的 $I-V$ 曲线。

对比图 6(a)与图 6(b)的第四象限可知, 当反向电压为 50 mV 时, 注入温度为 0°C 的碲镉汞光敏元的反向电流为 8 nA, 注入温度为 85°C 的碲镉汞光敏元的反向电流为 14.9 nA。

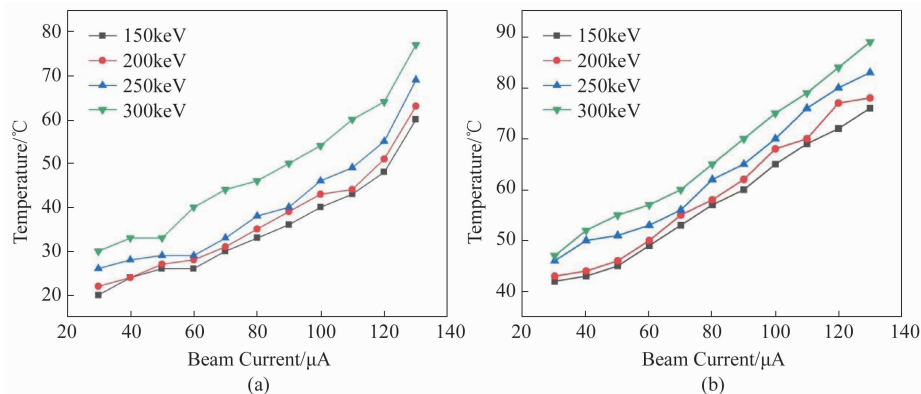


图 3 芯片表面温度与注入能量、束流的关系曲线：(a) 0℃控温；(b) 20℃控温

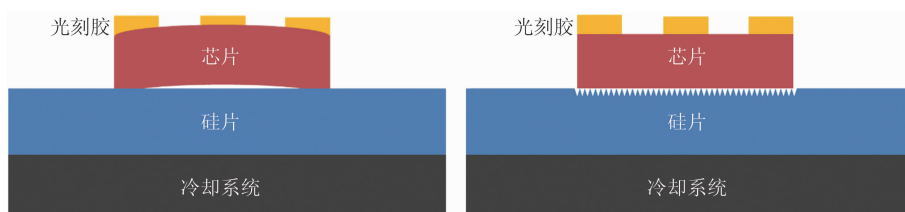


图 4 芯片与硅片接触面的模型图

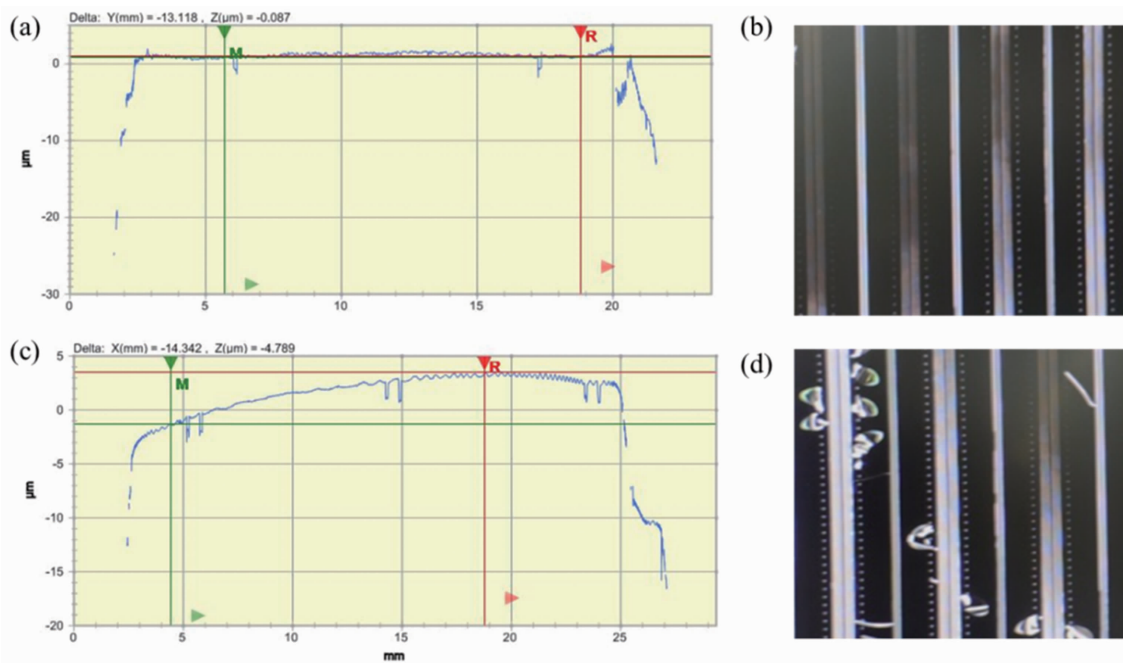


图 5 基于相同的工艺参数，试验结束后光刻掩膜的形貌：(a)芯片 A 的背面；(b)芯片 A 在离子注入后的光刻掩膜形状；(c)芯片 B 的背面；(d)芯片 B 在离子注入后的光刻掩膜形状

在 $I-V$ 曲线的第一象限内，注入温度为 0℃ 的碲镉汞光敏元的开启电压为 83.7 mV，注入温度为 85℃ 的碲镉汞光敏元的开启电压为 117.5 mV。对于相同的离子注入剂量及束流等条件，离子注入温度较高的碲镉汞芯片表现出更大的反向电流和开启电压。

根据图 6(a)与图 6(b)的开启电压与反向电流信息，可以发现注入温度越高，实际的注入区面积越大。一般认为碲镉汞 B 离子注入依靠损伤成结，其有效结深往往比注入深度延长 1~3 μm 左右^[10-12]。当 B 离子注入到碲镉汞芯片时，与内部晶格原子发生连续撞击，造成大

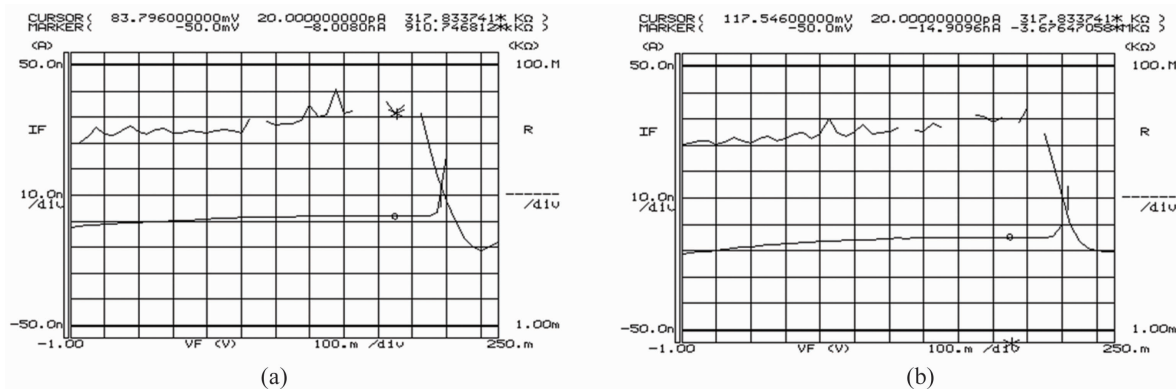


图 6 (a)注入温度为 0℃时的 $I-V$ 曲线; (b)注入温度为 85℃时的 $I-V$ 曲线

量的晶格损伤,表现出 Hg-Te 键断裂,大量间隙 Hg 原子形成 N 型层。当注入温度较高时,我们认为注入区 Hg 原子的扩散过程在注入中就会发生,大量的间隙 Hg 原子发生横向扩散,增大了 PN 结的面积^[2]。

对比图 6(a)与图 6(b)的反向电流与平坦电压信息可知,注入温度较高的 pn 结的反向漏电更易增加。这很可能是因为注入温度较高,原子晶格处于较高的能量状态,在被注入离子破坏后,容易得到较多的射程端缺陷和离子注入损伤^[13-14]。这些离子注入带来的晶格损伤在后续的退火工艺中无法完全消除,使得少子寿命降低,引入了较大的漏电流^[16]。若从光敏元的性能考虑,为了保证注入区的实际面积与设计面积接近,并避免较多的晶格损伤,我们应该尽量选择一个较低的注入温度。

3 结束语

本文研究了离子注入工艺中束流、注入能量、接触面粗糙度等因素对注入温度的影响,并结合器件的 $I-V$ 曲线,探究了碲镉汞红外探测器工艺中注入温度的影响。实验结果表明,束流、注入能量、冷却温度以及接触面对于控制芯片温度具有重要作用。为了保证注入温度低于光刻胶的耐受温度,提高工艺过程的成品率,我们可以选择较低的注入束流和冷却温度;同时在芯片背面,可以采用磨抛工艺来降低粗糙度,并选用表面光滑的硅片来优化导热面。从光敏元的 $I-V$ 曲线分析,较低的注入温度有利于减小 pn 结的暗电流,阻止注入区面

积的横向扩散,从而提高碲镉汞红外探测器的整体性能。后续将重点研究注入温度对碲镉汞的热扩散作用,并结合透射电镜和 $I-V$ 曲线等手段对注入机理作进一步解释。

参考文献

- [1] 刘振虎. 离子注入碲镉汞 [J]. 红外技术, 1988, 10(3): 37-45.
- [2] 杨建荣. 碲镉汞材料物理与技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [3] 刘心田, 沈新华, 刘志衡, 等. HgCdTe 注入过程温度特性研究 [J]. 激光与红外, 1998, 28(5): 301-304.
- [4] 刘心田, 包昌珍, 刘志衡, 等. HgCdTe 注入工艺研究 [J]. 红外与激光工程, 1998, 27(5): 36-38.
- [5] 董海青, 张照锋. 离子注入结深的参数影响分析 [J]. 中国新技术新产品, 2020, 28(12): 30-31.
- [6] 刘向华, 仲顺安, 曲秀杰. 一种 MCT 离子注入工艺的模型及其计算机模拟方法 [J]. 红外技术, 2001, 23(1): 19-22.
- [7] 卓祖亮, 张磊, 张丛, 等. 离子注入机静电夹持晶圆的温度仿真研究 [J]. 电子工业专用设备, 2020, 49(6): 13-16.
- [8] 刘金声. 离子束沉积薄膜技术及应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [9] 田人和, 顾永俦, 卢武星, 等. 强束流离子注入形成 SOI 结构时的温升效应的计算 [J]. 半导体学报, 1993, 14(8): 484-491.

(下转第 23 页)

用。在后续的研究中, 需要继续深入研究退火对 FWHM 的影响, 以获得质量更高的碲化镉材料。

参考文献

- [1] Gravrand O, Destefanis G, Bisotto S, et al. Issues in HgCdTe Research and Expected Progress in Infrared Detector Fabrication [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2013, **42**(11): 3349–3358.
- [2] Reddy M, Peterson J M, Vang T, et al. Molecular Beam Epitaxy Growth of HgCdTe on Large-Area Si and CdZnTe Substrates [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2011, **40**(8): 1706–1716.
- [3] 舒天宇. IV-VI 族半导体异质结制备及其能带结构研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [4] 傅小明, 杨在志, 孙虎. 材料制备技术与分析方法 [M]. 南京: 南京大学出版社, 2020.
- [5] Yamaguchi M, Yamamoto A, Tachikawa M, et al. Defect Reduction Effects in GaAs on Si Substrates by Thermal Annealing [J]. *Applied Physics Letters*, 1998, **53**(23): 4518–4522.
- [6] Farrell S, Brill G, Chen Y, et al. Ex Situ Thermal Cycle Annealing of Molecular Beam Epitaxy Grown HgCdTe/Si Layers [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2010, **39**(1): 43–48.
- [7] 王丛, 强宇, 高达, 等. 基于正交设计的 Si 基复合衬底优化工艺试验 [J]. *激光与红外*, 2019, **49**(11): 1353–1356.
- [8] Wijewarnasuriya P S. Dislocation Reduction in HgCdTe Grown on CdTe/Si [C]. *SPIE*, 2016, **9854**: 98540B.
- [9] 沈川, 顾仁杰, 傅祥良, 等. Si 基 CdTe/HgCdTe 分子束外延材料的位错抑制 [J]. *红外与毫米波学报*, 2011, **30**(6): 490–494.
- (上接第 17 页)
- [10] 施敏, 伍国珏. 半导体器件物理 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2008.
- [11] Talipov N K, Ovsyuk V N, Remesnik V G. Electrical Activation of Boron Implanted in p-HgCdTe ($x=0.22$) by Low-temperature Annealing Under an Anodic Oxide [J]. *Materials Science & Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*, 1997, **44**(1–3): 266.
- [12] Gopal V, Gupta S, Bhan R K, et al. Modeling of Dark Characteristics of Mercury Cadmium Telluride n^+-p Junctions [J]. *Infrared Phys Technol*, 2003, **44**(2): 143–152.
- [13] 刘心田, 包昌珍, 褚君浩, 等. HgCdTe 离子注入掺杂及损伤特性 [J]. *红外技术*, 1998, **20**(6): 22–24.
- [14] 王淑云. B^+ 离子注入 p 型 $Hg_{0.8}Cd_{0.2}Te$ [J]. *红外与激光技术*, 1991, **14**(6): 49–51.
- [15] Fiorito G, Gasparini G, Svelto F. Properties of Hg Implanted $Hg_{1-x}Cd_xTe$ Infrared Detectors [J]. *Applied Physics*, 1978, **17**(1): 105–110.
- [16] Hua H, Xie X, Hu X. Analysis of Dark Current in Long-wavelength HgCdTe Junction Diodes at Low Temperature and an Approximate Method to Calculate the Trap Density of Depletion Region [C]. *SPIE*, 2012, **8419**: 8419A.