

文章编号:1001-5078(2024)09-01410-07

· 红外材料与器件 ·

碲镉汞红外探测器离子束刻蚀研究

宁提,何斌,刘静,徐港
(华北光电技术研究所,北京 100015)

摘要:电极成型技术是红外焦平面探测器的重要组成部分,离子束刻蚀技术由于具有高各向异性和高分辨率等诸多优点,适用于制备低损伤、高均匀性以及可生产性的电极体系。本文采用离子束刻蚀制备了平面型、台面型器件的电极结构,通过FIB和SEM表征了不同刻蚀条件下的电极形貌和结构,研究了不同刻蚀角度、能量以及热处理对碲镉汞红外探测器的影响。结果表明,离子束刻蚀技术具有侧边平滑、均匀性高、稳定性强以及工艺重复性好等诸多优点。另外,离子束刻蚀可以实现台面结器件的电极隔离,但台面侧壁存在一定金属电极残留,需要进一步优化台面形貌和刻蚀角度。在热处理对刻蚀的影响上,低能量刻蚀形成的晶格损伤,经过高温可以修复;高能量刻蚀将同时造成晶格损伤和电学损伤,热处理只能一定程度上改善pn结性能,电学损伤将在刻蚀后表面形成严重的漏电效应,降低了探测器的品质因子 R_0A 。

关键词:碲镉汞;离子束刻蚀;电极接触;热处理

中图分类号:TN213;O436 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2024.09.011

Study of the electrode etching in HgCdTe infrared detector

NING Ti, HE Bin, LIU Jing, XU Gang
(North China Research Institution of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: Electrode shaping technology is an important part of infrared detector, and ion beam etching technology is suitable for preparation of low-damage, high-uniformity and productive electrode systems due to its many advantages such as high anisotropy and high resolution. In this paper, the electrode structures of the planar and mesa devices are prepared by ion beam etching. The morphology and structure of the electrodes under different etching conditions are characterized by FIB and SEM, and the effects of different etching angles, energies as well as heat treatment on the infrared detector are studied. The results show that the ion beam etching technology has many advantages such as smooth sidewalls, high uniformity, strong stability, and high process repeatability. Moreover, ion beam etching can also achieve electrode isolation of mesa junction devices, but there are certain metal electrodes on the sidewall of the mesa, which require further optimization of the etching angle. On the effect of heat treatment on etching, the lattice damage caused by low energy etching can be repaired after high temperature activation. High energy etching causes both lattice and electrical damage, and heat treatment can only improve the performance of the PN junction to a certain extent. The Electrical damage forms a serious leakage effect on the surface of the PN junction, weakening the quality factor R_0A of the detector.

Keywords: HgCdTe; ion beam etching; electrode contact; annealing

1 引言

红外对薄膜材料进行局部分割或表面去除的工艺称为刻蚀工艺,包括干法刻蚀和湿法刻蚀两种^[1-2]。在常规的碲镉汞器件制备工艺中,干法刻蚀一般用于在材料表面留下刻蚀图形,湿法刻蚀一般用于对薄膜材料的表面进行选择去除。第一代 HgCdTe 线列红外探测器像元的特征尺寸约 50 ~ 60 μm ,传统的湿法腐蚀即可满足工艺需求^[3]。第二代 HgCdTe 焦平面探测器特征尺寸约 10 ~ 15 μm ,传统的湿法腐蚀工艺已经无法实现对像元的精准隔离,因此大量的干法刻蚀工艺被引入到探测器制备工艺中。第三代 HgCdTe 红外探测器,如双色(dual-band)、异质结等台面器件,则对干法刻蚀工艺提出了更高的要求,很多结构需要对像元进行台面的隔离,高深宽比刻蚀需求促进了干法刻蚀技术的快速发展^[4-6]。

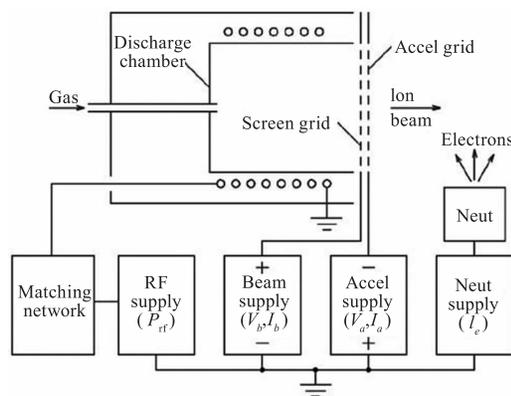
在离子束刻蚀、反应离子束刻蚀及等离子体刻蚀等多种干法刻蚀技术中,离子束刻蚀是把惰性气体电离后,通过电场加速,使惰性气体离子(通常为氩离子)以一定能量轰击材料表面,使材料中的原子获得较大能量溅射出材料表面,从而达到去除表面原子的目的^[7]。相比反应离子束刻蚀和等离子体刻蚀,离子束刻蚀过程中高能离子的定向运动和物理溅射效应使刻蚀图形具有较高的分辨率^[8]。在对材料原子层连续去除的过程,离子束的准直性为刻蚀图形轮廓带来了高各向异性,同时溅射刻蚀产物主要是材料的原子,在刻蚀过程中无二次污染,在红外探测器制备过程中,离子束刻蚀通常用于金属材料刻蚀,制备红外探测器电极结构。

然而离子束刻蚀是纯物理刻蚀过程,对 HgCdTe 这种键能很弱的材料会造成十分严重的刻蚀损伤。Bahir 和 Finkman^[9]研究了离子束刻蚀对 HgCdTe 晶体表面的电学性能影响,他们发现离子束刻蚀有可能在材料表面形成 N 型层。在浅表层 N 型性质表现为高载流子浓度和极短的寿命,他们将浅表层区域归结为晶格损伤,在经过 70 ~ 80 $^{\circ}\text{C}$ 下的低温退火即可消除。材料内部归结为电学损伤,主要表现为 Hg 填隙原子在 HgCdTe 材料中表现出的施主特性。

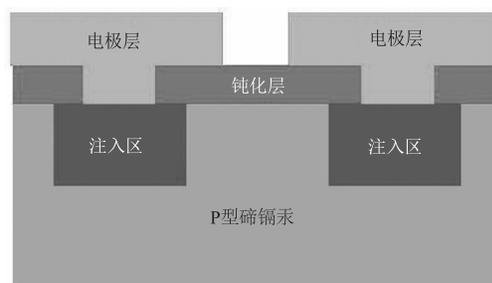
本文采用离子束刻蚀制备了平面型和台面型器件的电极结构,通过 FIB 和 SEM 表征了不同刻蚀条件下的电极形貌和结构,研究了不同刻蚀角度、能量以及热处理对碲镉汞红外探测器的影响。

2 实验

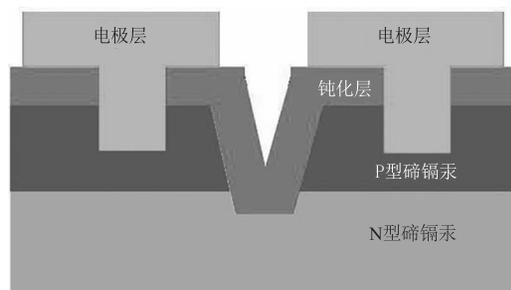
图 1 是离子束刻蚀机原理图、平面型以及台面型红外探测器结构图。在图 1(a)中,离子束刻蚀机主要由离子源和腔室组成,放电室的线圈在感耦合作用下产生等离子体,离子向所有的边界扩散,并且在等离子体与边界之间形成离子鞘。栅极为多孔边界,离子被屏栅筛选后会通过加速栅进行加速,在栅网下游处,通过中和器向离子束注入电子形成电荷平衡,减少离子束由于同类电荷相互排斥引起的发散。最终,离子束经栅极进行加速和聚焦形成离子束。



(a) 离子束刻蚀机原理图



(b) 平面型红外探测器结构图



(c) 台面型红外探测器结构图

图 1 离子束刻蚀机原理图、平面型以及台面型红外探测器结构图

Fig. 1 The modle diagram of iron beam etch, planar junction devices and hetero junction mesa photodiode

平面型红外探测器技术路线:先采用液相外延工艺在 CdZnTe 衬底材料上生长 HgCdTe 外延层,在 HgCdTe 表面生长 CdTe 及 ZnS 复合钝化膜层,采用离子注入技术,在 HgCdTe 上制备 pn 结,用低损伤刻蚀技术在碲镉汞表面刻蚀出电极接触孔,生长多层复合电极,最后采用离子束刻蚀进行像元隔离,完成图 1(b)样品制备。

台面型红外探测器技术路线:先采用液相外延工艺或分子束外延在衬底材料上生长 HgCdTe 外延层,使用低损伤刻蚀技术制备台面 pn 结,并在 HgCdTe 表面生长 CdTe 及 ZnS 复合钝化膜层,在碲镉汞表面刻蚀出电极接触孔,并生长多层复合电极,最后采用离子束刻蚀进行像元隔离,完成图 1(c)样品制备。

在此基础上,研究不同热处理条件对刻蚀损伤的影响,通过半导体参数测试仪分析器件的 I-V 特性曲线,采用聚焦离子束与扫描电镜表征金属电极成型后的界面。

3 实验结果与讨论

3.1 平面型红外探测器电极制备

由于碲镉汞材料性质比较敏感,红外探测器的电极制备一直是一项具有挑战性的任务。主要难点在于制备侧边平滑、均匀性高的电极形貌,同时需要满足低损伤、高工艺重复性的要求。

图 2 对比了碲镉汞平面结器件电极制备技术中经常采用的湿法和干法刻蚀技术。其中图 2(a)和(b)是采用金属腐蚀液对电极进行湿法蚀刻完成光敏元隔离后的像元形貌,图 2(c)和(d)中采用离子束刻蚀机对电极进行干法刻蚀完成光敏元隔离后的像元形貌。

在图 2(a)和(b)中,图 2(a)由于腐蚀时间不足导致探测器钝化层表面的电极没有去除干净,并存在少量钻蚀现象。图 2(b)为了保证腐蚀效果采用过腐蚀方案,光敏元电极边缘存在侧壁过度钻蚀现象,无法获得侧边平滑、均匀性高的电极形貌;在钝化层出现不同大小的凹坑,这是由于金属腐蚀液对钝化层表面起到了腐蚀作用。因此,湿法刻蚀工艺重复性、操控性较差,在实际生产中难以控制。

在图 2(c)和(d)分别表征了离子束刻蚀后的电极形貌以及均匀性。图 2(c)采用离子束刻蚀技术制

备出了侧边平滑的电极形貌,可以实现电极之间 2.6 μm 的小间距图案。这是由于离子束刻蚀过程中高能离子的定向运动和物理刻蚀效应使刻蚀图形具有较高的分辨率,可以获得线宽极小的图案。图 2(d)是焦平面探测器阵列下的电极图案,离子束刻蚀技术在小间距大规模阵列上表现出了较好的刻蚀效果,可以获得侧边平滑、高均匀性、高重复性的电极图案。

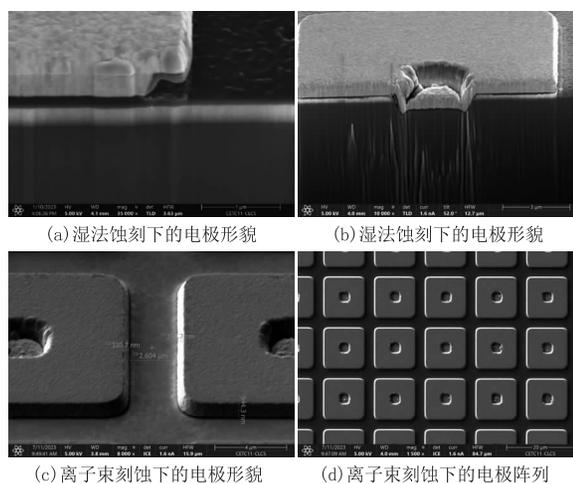


图 2 碲镉汞平面结器件湿法和干法刻蚀的电极形貌

Fig. 2 The electrode morphology of wet and dry etching in MCT planar junction devices

3.2 台面型红外探测器电极制备

随着红外焦平面探测器技术发展,双色、异质结等多种器件的发展越来越快,两种器件均为台面结构^[10-11]。针对小间距下的台面阵列的电极体系,需要研究离子束刻蚀技术获得更高的均匀性、工艺重复性的电极图形。

图 3 研究了离子束刻蚀技术在台面型器件电极上应用效果。图 3(a)是台面结在扫描电镜下的阵列图案,图 3(b)是采用聚焦离子束和扫描电极拍摄的像元截面图。在图 3(a)中,台面结的上表面通过离子束刻蚀实现了像元隔离,获得了高一一致性电极形貌。在图 3(b)中,先对台面沉积一层 Pt 金属,再采用聚焦离子束进行截面处理,便于获得更好的观测效果;从截面图中发现,在台面侧壁上存在金属电极残留。这是由于离子束刻蚀过程中台面上、下以及侧壁角度不同,导致刻蚀速率不同。在刻蚀过程中,上表面和下表面和离子束形成的倾角相同,上表面和下表面保持着相似的刻蚀角度;但由于台面下侧壁存在斜坡,而且斜坡和离子束接近平行,根据胡

新宁等人研究^[12-14],当离子束和被刻蚀物体表面法线的角度接近 90°略过刻蚀物体时,材料基本无刻蚀效果,因此表面斜坡处的刻蚀速率最慢。

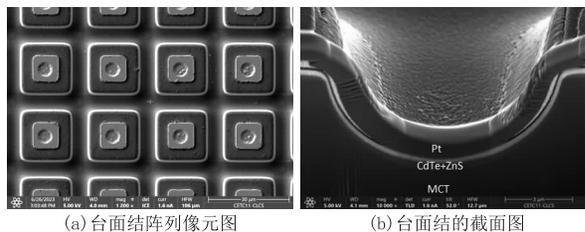


图 3 采用离子束刻蚀台面型器件的电极形

Fig.3 The electrode morphology of ion beam etched tabletop devices

综上所述,采用离子束刻蚀可以实现台面结器件的上下表面的电极隔离,制备高均匀性、可生产性的电极成型体系。但是台面侧壁还存在一定电极残留,需要进一步优化台面形貌和刻蚀角度。

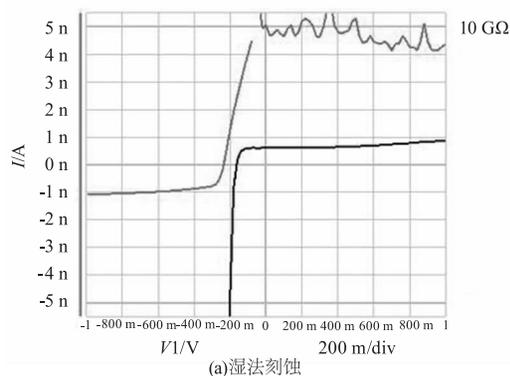
3.3 热处理对刻蚀损伤的影响

离子束刻蚀造成的刻蚀损伤包括晶格损伤和电学损伤。晶格损伤主要是 Ar 离子轰击 HgCdTe 晶格,部分原子溅射出材料表面后留下不完整的晶格(主要以孪晶或小角晶面存在)和悬挂键。电学损伤则主要表现为 Hg 填隙原子在 HgCdTe 材料中表现出的施主特性^[9]。离子束刻蚀工艺主要参数为束压、束流,束压是指从离子源射出惰性气体离子携带的能量,束流是指单位时间单位面积从离子源中发射的离子数量,其中束压对损伤的影响较大,通常可以通过热处理进行损伤修复^[15]。

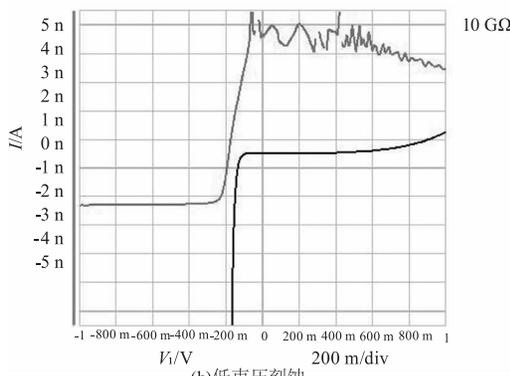
为了进一步对比不同电极刻蚀技术、刻蚀参数对碲镉汞探测器中的影响,使用一个材料片完成了表面钝化、接触孔刻蚀、电极生长等工艺,在电极生长后划开进行不同电极成型工艺,制备了中波640 × 512 中波碲镉汞探测器芯片,研究了不同工艺条件 IV 曲线、中测性能情况。

图 4 研究了湿法和干法刻蚀下不同束压以及热处理条件的影响。在 I - V 曲线中,图 4(a)经过湿法处理有 10 GΩ 的零偏结阻抗、390 mV 的平坦电压以及 170 mV 的开启电压。经过干法处理后,图 4(b)具有 7 GΩ 的零偏结阻抗、400 mV 的平坦电压以及 150 mV 的开启电压。图 4(c)具有 10 GΩ 的零偏结阻抗、380 mV 的平坦电压以及 150 mV 的开启电压,经过热处理后芯片零偏结阻抗提高,平坦电压

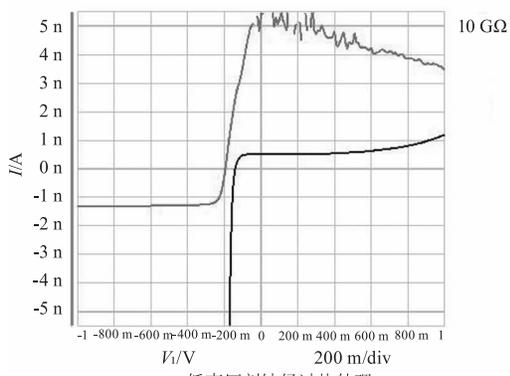
相当,这表明在较低束压刻蚀下,只对材料表面造成了一定的晶格损伤,经过热处理活化晶格后可以适当修复。对于图 4(d)和 4(e),较高能量的 Ar⁺ 离子轰击芯片后,开启电压、反向平坦以及零偏结阻抗都严重下降;其中图 4(e)经过热处理后,I-V 曲线的零偏结阻抗从 100 MΩ 升高到 1 GΩ。这表明反射粒子能量较大,造成了严重的晶格损伤和电学损伤;其中晶格损伤经过热处理被一部分修复,但是为以 Hg 填隙原子表现为施主特性的电学损伤将造成材料反型,在台面的侧壁形成漏电效应,降低 pn 结的结阻抗。P-on-N 型台面结的侧壁在刻蚀过程中会形成较多的 Hg 原子进入材料内部。



(a)湿法刻蚀



(b)低束压刻蚀



(c)低束压刻蚀经过热处理

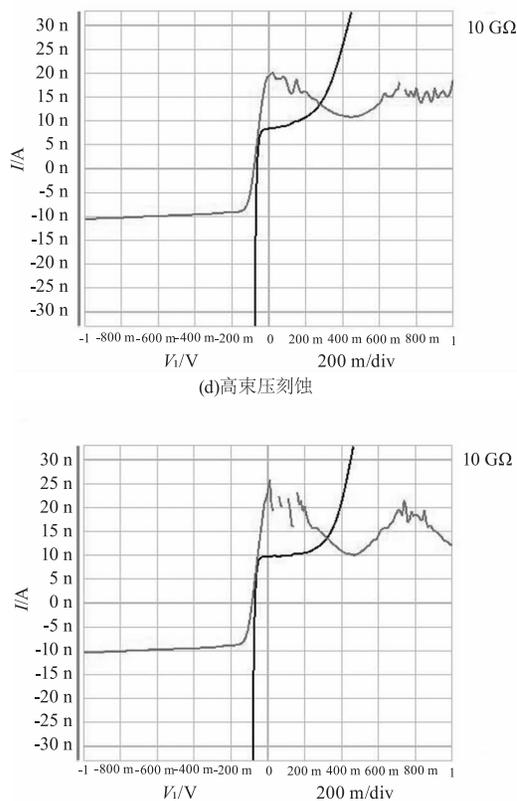


图 4 不同束压、束流以及后续热处理条件下电学测试结果

Fig. 4 The electrical test under different beam pressure, beam currents, and heat treatment conditions

徐国庆^[16-17]等人认为,这些 Hg 原子一部分会填入 HgCdTe 晶格中形成 Hg 填隙原子,呈现施主型掺杂;Hg 原子在向材料内部扩散过程中与 Hg 空位复合,使材料由 P 型转变为剩余施主杂质(浓度大约为 10^{14} cm^{-3} 量级)占主导的 N 型材料^[18]。最终在 pn 结侧壁上形成严重的漏电效应,减弱了探测器的品质因子 R_0A 。

图 5 研究了在 77 K 下采用低损伤干法刻蚀、热处理以及湿法刻蚀后的中波 640×512 碲镉汞红外探测器的盲元图。

图 5(a) 和 (b) 是湿法刻蚀形成的无损伤电极体系,组件盲元率为 0.11%,在拉偏 300 mV 后增加至 0.23%,采用湿法成型的红外探测器电极体系具有较少的盲元率以及较高的 Gpol 稳定性。图 5(c) 和 (d) 是干法刻蚀形成具有一定损伤电极体系,具有较高的盲元率,组件在 Gpol 拉偏 300 mV 后,表现出 Gpol 稳定性较差,过热盲元较多。图 5(e) 和 (f) 采用干法刻蚀结合热处理技术后,该红外探测器电极体系获得了 0.15% 的盲元率,在拉偏 300 mV

盲元率仅增加至 0.22%,采用干法刻蚀结合热处理的红外探测器电极体系具有和湿法刻蚀一样的盲元率以及 Gpol 稳定性。

综合电极形貌和探测器性能,离子束刻蚀结合热处理技术具有侧边平滑、均匀性高、稳定性强以及可生产性等诸多特点,在电极成型的量产工艺上优于湿法刻蚀技术。

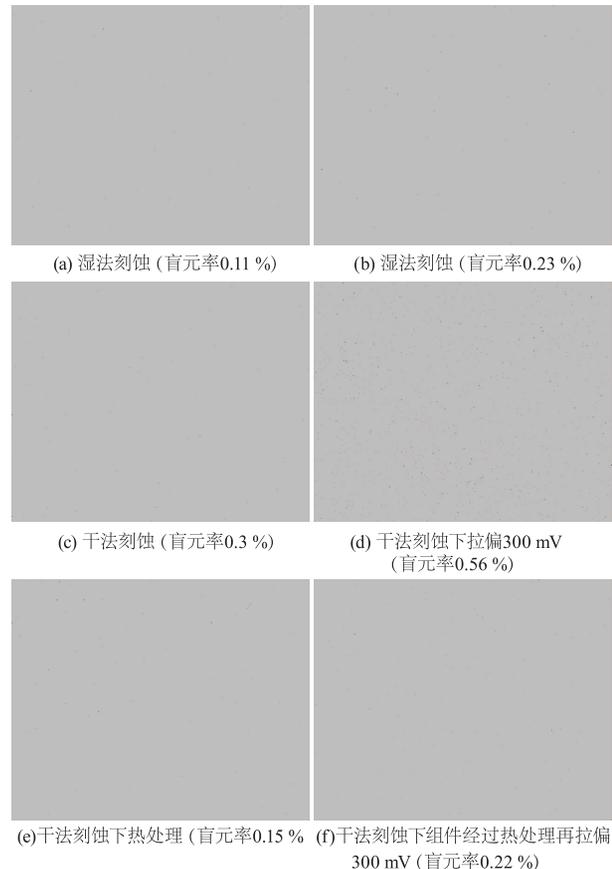


图 5 在 77 K 下不同条件处理下的中波 640×512 碲镉汞红外探测器的盲元图

Fig. 5 The image pixel of medium wave 640×512 MCT infrared detector at 77 K

4 结论

本文采用离子束刻蚀制备了平面型和台面型红外探测器电极接触,通过 FIB 和 SEM 表征了不同刻蚀条件下的电极形貌和结构,研究了不同刻蚀条件以及热处理对碲镉汞红外探测器电学性能的影响。结果表明,相比于湿法刻蚀工艺,离子束刻蚀技术具有侧边平滑、均匀性高、稳定性强以及可生产性等诸多特点。离子束刻蚀可以实现台面结器件的电极隔离,但台面侧壁存在金属残留,需要进一步优化离子束刻蚀工艺。刻蚀损伤方面,

小能量刻蚀形成的晶格损伤,经过高温活化晶格可以修复;大能量刻蚀将同时造成晶格损伤和电学损伤,热处理只能一定程度上改善 pn 结性能,电学损伤将在 pn 结侧壁上形成严重的漏电效应,减弱了探测器的品质因子 R_0A 。

参考文献:

- [1] Yang Jianrong. Physics of technology of HgCdTe materials [M]. Beijing: Publish House of Electronics Industry, 2012. (in Chinese)
杨建荣. 碲镉汞材料物理与技术[M]. 国防工业出版社, 2012.
- [2] Srivastav V, Pal R, Vyas H P. Overview of etching technologies used for HgCdTe [J]. Optoelectronics Review, 2005, 13(3): 197.
- [3] Wang Yifeng, Tang Libin. Research progress on wet and dry processes for preparation of mercury cadmium tellurium detectors [J]. Optoelectronic Technology Application, 2009, 24(3): 1-8, 14. (in Chinese)
王忆锋, 唐利斌. 碲镉汞探测器制备湿法和干法工艺的研究进展 [J]. 光电技术应用, 2009, 24(3): 1-8, 14.
- [4] Benson J D, Stoltz A J, Kaleczyc A W, et al. Effect of photoresist-feature geometry on electron-cyclotron resonance plasma-etch reticulation of HgCdTe diodes [J]. Journal of Electronic Materials, 2002, 31(7): 822-826.
- [5] LI Hao. Preparation and noise study of mercury cadmium telluride avalanche photodiode device [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese)
李浩. 碲镉汞雪崩光电二极管器件制备及噪声研究 [D]. 上海: 中国科学院大学, 中国科学院上海技术物理研究所, 2019.
- [6] 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.
- [7] Zhao Lihua, Zhou Minghui, Wang Shuming, et al. Ion beam etching [J]. Semiconductor Technology, 1999, (1): 39-42. (in Chinese)
赵丽华, 周名辉, 王书明, 等. 离子束刻蚀 [J]. 半导体技术, 1999, (1): 39-42.
- [8] Liu Ying, Xu Dequan, Xu Xiangdong, et al. Study on ion beam etching characteristics of several commonly used optical materials [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2007, 37(4-5): 536-538, 553. (in Chinese)
刘颖, 徐德权, 徐向东, 等. 几种常用光学材料的离子束刻蚀特性研究 [J]. 中国科学技术大学学报, 2007, 37(4-5): 536-538, 553.
- [9] Bahir G, Finkman E. Ion beam milling effect on electrical properties of $Hg_{1-x}Cd_xTe$ [J]. Journal of Vacuum Science & Technology A Vacuum Surfaces & Films, 1989, 7(2): 348-353.
- [10] Tian Zhen, Song Shufang, Wang Xiaojun, et al. Preparation of mercury cadmium tellurium p-on-n longwave heterojunction detector materials [J]. Laser & Infrared, 2018, 48(6): 730-734. (in Chinese)
田震, 宋淑芳, 王小菊, 等. 碲镉汞 p-on-n 长波异质结探测器材料的制备研究 [J]. 激光与红外, 2018, 48(6): 730-734.
- [11] Ye Zhenhua, Wu Jun, Hu Xiaoning, et al. Study on mercury cadmium tellurium p+-on-n long-wave heterojunction detector [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2004, (6): 423-426. (in Chinese)
叶振华, 吴俊, 胡晓宁, 等. 碲镉汞 p+-on-n 长波异质结探测器的研究 [J]. 红外与毫米波学报, 2004, (6): 423-426.
- [12] Hu Xinning, Liu Gang, Tian Yangchao. Study on the effect of incidence angle of ion beam etching on the steepness of pattern sidewall [J]. Microfabrication Technology, 2003, (4): 14-17. (in Chinese)
胡新宁, 刘刚, 田扬超. 离子束刻蚀入射角对图形侧壁陡度影响的研究 [J]. 微细加工技术, 2003, (4): 14-17.
- [13] Luo Yuandong, Zhu Xuejin, Peng Qiangxiang, et al. Study on ion beam etching surface morphology of PZT ferroelectric thin films [J]. Journal of Xiangtan University: Natural Science Edition, 2019, 41(3): 30-38. (in Chinese)
罗远东, 朱学进, 彭强祥, 等. PZT 铁电薄膜的离子束刻蚀表面形貌研究 [J]. 湘潭大学学报: 自然科学版, 2019, 41(3): 30-38.
- [14] Luo Yuandong, Zhu Xuejin, Peng Qiangxiang, et al. Study on ion beam etching surface morphology of PZT ferroelec-

- tric thin films[J]. Journal of Xiangtan University; Natural Science Edition, 2019, 41(3): 30-38. (in Chinese)
- 罗远东, 朱学进, 彭强祥, 等. PZT 铁电薄膜的离子束刻蚀表面形貌研究[J]. 湘潭大学学报: 自然科学版, 2019, 41(3): 30-38.
- [15] Liu Jinsheng. Ion beam deposition thin film technology and application [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003. (in Chinese)
- 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.
- [16] Xu Guoqing, Liu Xiangyang, Wang Yi, et al. Transition width in mercury cadmium telluride etched by ion beam [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2014, 33(5): 477-480. (in Chinese)
- 徐国庆, 刘向阳, 王仍, 等. 离子束刻蚀碲镉汞中转型宽度[J]. 红外与毫米波学报, 2014, 33(5): 477-480.
- [17] Xu Guoqing, Liu Xiangyang, Zhang Kefeng, et al. Study on electrical characteristics of mercury cadmium tellurium crystals etched by ion beams [J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(11): 305-308. (in Chinese)
- 徐国庆, 刘向阳, 张可锋, 等. 离子束刻蚀碲镉汞晶体的电学特性研究[J]. 物理学报, 2015, 64(11): 305-308.
- [18] Blackman M V, Charlton D E, Jenner, M D, et al. Type conversion in $Cd_xHg_{1-x}Te$ by ion beam treatment [J]. Electronics Letters, 1987, 23(19): 978.