

文章编号:1001-5078(2025)04-0569-06

· 红外材料与器件 ·

小间距碲镉汞红外探测器孔内电极制备研究

邢志韬, 孙玉杰, 宁 提, 何 斌, 牛佳佳, 王成刚
(中电科光电科技有限公司, 北京 100015)

摘 要: 缩小像元间距是提升红外探测器性能的重要方向之一, 像元尺寸的减小在红外探测器提高分辨率、降低制造成本、减小发热量、降低功耗等方面有着重要作用。电极作为连接碲镉汞芯片与外部读出电路的桥梁, 决定了器件的性能与可靠性。但是在小间距红外探测器的电极制备过程中经常出现剥离困难、电极覆盖情况差等现象, 本文分析离子束沉积中角度、温度等条件对电极生长的影响, 结果表明升高沉积温度使沉积的金属膜层与 HgCdTe 附着力变得更好, 沉积温度越高, 侧壁覆盖越好。沉积角度越接近 45° , 侧壁越薄, 较薄的侧壁电极可以使得剥离工艺难度更低, 降低孔内电极侧壁脱落的几率接触。同时沉积角度也是控制生长薄膜的粗糙度的重要参数, 改变沉积角度可以得到粗糙度更低的金属膜层。在沉积温度为 $T_0 + 40^\circ\text{C}$, 沉积角度为 45° 的条件下, 成功制备了易于剥离、粗糙度低、附着力好的孔内电极结构, 提高了碲镉汞红外器件性能。

关键词: 碲镉汞离子束; 沉积薄膜技术; 孔内沉积; 电极剥离

中图分类号: TN219; TN205 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2025.04.013

Study on preparation of in-hole electrodes for small-pitch mercury cadmium telluride infrared detectors

XING Zhi-tao, SUN Yu-jie, NING Ti, HE Bin, NIU Jia-jia, WANG Cheng-gang
(CETC Electro-Optics Technology Co. Ltd., Beijing 100015, China)

Abstract: Reducing the pixel pitch is a crucial approach to enhancing the performance of infrared detectors, and the reduction of pixel size plays an important role in infrared detectors to improve the resolution, reduce the cost of manufacturing and the heat generation, and lower the power consumption. However, the electrode, which serves as a vital link between the HgCdTe chip and the external readout circuit, poses challenges during preparation for small-pitch infrared detectors, often leading to stripping difficulties and inadequate electrode coverage. In this paper, the effects of angle, temperature and other conditions on the growth of the electrode are analyzed, and the results show that elevating the deposition temperature makes the deposited metal film layer with HgCdTe adhesion become better, and higher the deposition temperature, the better the sidewall coverage. The closer the deposition angle is to 45° , the thinner the sidewall is, and the thinner sidewall electrode can make the stripping process less difficult, and reduce the chance of contact with the electrode sidewall falling off in the hole. At the same time, the deposition angle is also an important parameter to control the roughness of the grown film, and changing the deposition angle yields a metal film layer with lower roughness. Under the condition of deposition temperature of $T_0 + 40^\circ\text{C}$ and deposition angle of 45° , the in-hole electrode structure with easy peeling, low roughness and good adhesion is successfully prepared, which improves the performance of HgCdTe infrared devices.

Keywords: MCT; ion beam deposition; thin film technology; intra-pore deposition; electrode stripping

收稿日期: 2024-08-09

1 引言

碲镉汞(HgCdTe)是一种用于制造红外探测器的半导体材料,因其优异的光电特性而被广泛的应用于红外探测技术中。目前,缩小像元间距是提升红外探测器性能的重要方向之一,像元尺寸的减小在红外探测器提高分辨率、降低制造成本、减小发热量、降低功耗等方面有着重要作用^[1]。电极作为连接 HgCdTe 芯片与外部读出电路的桥梁,是探测器的信号转换过程中的重要环节,决定了器件的性能与可靠性。

碲镉汞红外探测器的电极制备通过在刻蚀钝化层得到接触孔内沉积电极,使电极层嵌入 HgCdTe 内形成 N 型接触,从而增加电极层与 HgCdTe 的结合面积,增加电极导体层与 HgCdTe 的附着力,能够有效降低信号传输中产生的偏差,再通过剥离的方法去除接触孔外的金属膜层完成孔内电极成型^[2]。由于像元间距变小后,接触孔的直径需要进行相应的减小,接触孔的深宽比的增大会直接增加孔内电极工艺难度,导致小间距 HgCdTe 红外探测器器件电极制备过程电极覆盖差等现象的出现。电极

覆盖情况差会使得后续工艺中的金属与 HgCdTe 直接接触倒装原有的 pn 结变小、信号传输异常等情况^[3],严重影响红外探测器件的可靠性。

针对小间距红外探测器接触孔的深宽比的增大引起的电极侧壁覆盖难等问题,本文通过改变离子束沉积中角度、温度等条件研究其对电极生长的影响,采用了扫描电子显微镜(SEM)和原子力显微镜(AFM)表征不同电极的侧壁覆盖和剥离后的形貌,制备出具有易于剥离、粗糙度低、附着力好的孔内电极结构,并进一步探究不同电极接触形貌对探测器性能的影响。

2 实验

如图 1,在图 1(a)中在完成钝化后的芯片表面进行光刻接触孔,使用电感耦合等离子体(ICP)刻蚀机刻蚀出电极接触孔;在图 1(b)中使用离子束沉积设备生长一层金属膜层,完成电极侧壁覆盖;在图 1(c)中采用全自动剥离机对样品进行剥离,再用使用无水乙醇进行脱水,完成碲镉汞探测器的电极制备工艺。

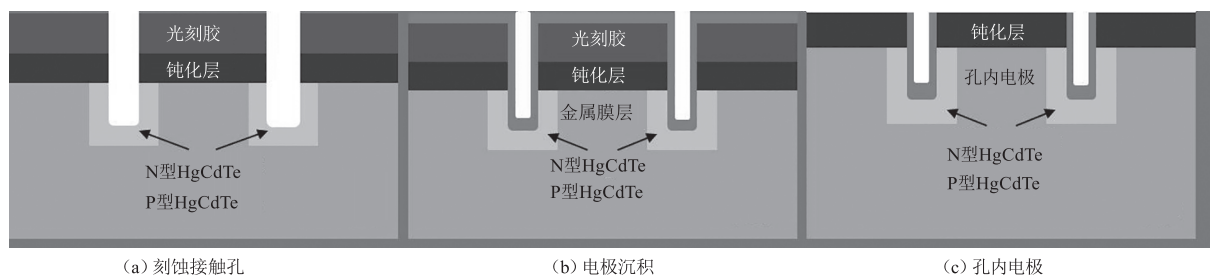


图 1 HgCdTe 红外探测芯片孔内电极制备模型图

Fig. 1 Model diagram of HgCdTe infrared detection chip in-hole electrode preparation

电极制备通常采用物理气相沉积(PVD)、化学气相沉积(CVD)、电镀或电极印刷等技术,其中最强大和通用的 PVD 技术之一是带有电子中和系统的离子束沉积(IBD),它可以进行各种化学结构和严格预定义的化学计量的高质量薄膜的合成,如复杂的金属合金或陶瓷^[4]。

在离子束沉积金属膜层过程中,IBD 设备结构图如图 2 所示,沉积角度是指样品盘与水平方向的夹角,沉积温度是指离子束沉积过程中基片所保持的温度。在 IBD 中,升高沉积温度可以增强碲镉汞与金属的附着强度,沉积角度是控制生长薄膜的粗糙度的重要参数,改变沉积角度可以得到侧壁覆盖更好的金属膜层。通过 A 组、B 组与 C 组实验对比研究沉积温度对孔内电极制备的影响,通过 D 组、E

组、F 组、与 G 组实验对比研究沉积角度对孔内电极制备的影响,如表 1 所示。

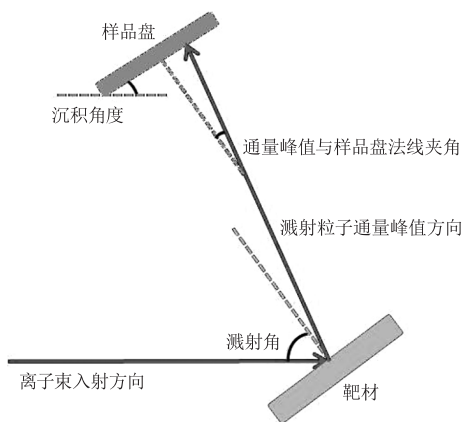


图 2 IBD 设备结构图

Fig. 2 Structure of IBD equipment

表1 不同样品电极沉积的沉积角度与基片温度

Tab.1 Deposition angle and substrate temperature for electrode deposition of different samples

序号	沉积角度/(°)	沉积温度/℃
A组	35	T_0
B组	35	$(T_0 + 20)$
C组	35	$(T_0 + 40)$
D组	30	$(T_0 + 40)$
E组	40	$(T_0 + 40)$
F组	45	$(T_0 + 40)$
G组	50	$(T_0 + 40)$

通过原子力分析系统 (AFM) 获得薄膜表面的粗糙度^[5], 并采用聚焦离子束与扫描电镜 (SEM) 表征样品的 CdTe/HgCdTe 界面特征, 通过半导体参数测试仪采集器件的 I-V 及 R-V 特性曲线。

3 实验结果与讨论

3.1 沉积角度和温度对电极制备的影响

图3是在沉积角度35°下对比不同沉积温度的金属膜层沉积和剥离后的形貌图。图(a1)是沉积温度 T_0 ℃下沉积的形貌, 图(a1)中接触孔侧壁电极厚度是51.22nm, 图(a2)是(a1)剥离后的形貌, 剥离后侧壁存在明显电极脱落现象; 图(b1)是 $(T_0 + 20)$ ℃下沉积的形貌, 图(b1)中接触孔侧壁电极厚度是56.68 nm, 图(b2)是(b1)剥离后的形貌, 剥离后侧壁存在明显部分电极脱落现象; 图(c1)是 $(T_0 + 40)$ ℃下沉积的形貌, 图(c1)中接触孔侧壁电极厚度是54.79 nm, 图(c2)是(c1)剥离后的形貌, 剥离后侧壁不存在明显电极脱落现象。

通过对比 A、B、C 三组样品沉积和剥离后的形貌图, 可以得到不同沉积温度下, 侧壁厚度基本相同, 但沉积温度越高, 剥离后侧壁覆盖越好。这是因为在 IBD 中升高沉积温度使沉积的金属膜层与 HgCdTe 附着力变得更好^[6], 由于升高温度可以使接触孔表面的原子活化, 提高表面原子的极化率, 从而缩短沉积原子与样品表面原子的距离, 使得沉积的金属薄膜厚度更小, 改善两种原子的结合能, 增强薄膜对样品的附着强度。同时, 升高沉积温度也可以减少膜层的应力积累提高薄膜质量, 由于 HgCdTe 材料的热稳定性较差, 工艺温度不宜过高^[7], 结果表明在沉积温度 $T_0 + 40$ ℃下可以得到金属膜层与 HgCdTe 附着强度较好的孔内电极。

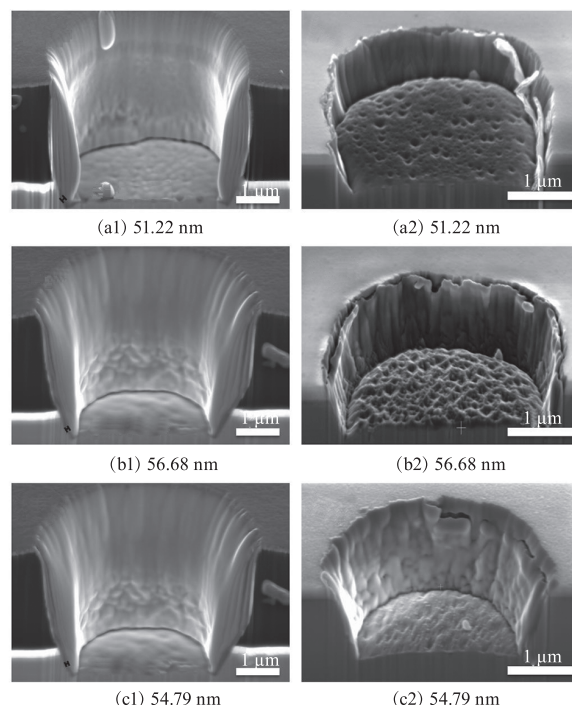


图3 不同沉积温度条件下样品沉积和剥离后的形貌图

Fig.3 Morphology of samples after deposition and stripping under different deposition temperature conditions

图4是在沉积温度 $T_0 + 40$ ℃下不同沉积角度的金属膜层沉积和剥离后的形貌图。图 a1 是沉积温度30°下沉积的形貌, 图 a1 中接触孔侧壁电极厚度是70.16 nm, 图 a2 是 a1 剥离后的形貌, 剥离后侧壁存在明显部分电极脱落现象。图 a1 是沉积温度40°下沉积的形貌, 图 b1 中接触孔侧壁电极厚度是33.43 nm, 图 b2 是 b1 剥离后的形貌, 剥离后侧壁不存在明显电极脱落现象。图 c1 是沉积温度45°下沉积的形貌, 图 (f1) 中接触孔侧壁电极厚度是21.63 nm, 图 c2 是 c1 剥离后的形貌, 剥离后侧壁不存在明显电极脱落现象。图 d1 是沉积温度45°下沉积的形貌, 图 d1 中接触孔侧壁电极层厚度是29.50 nm, 图 d2 是 d1 剥离后的形貌, 剥离后侧壁不存在明显电极脱落现象。

通过对比 C、D、E、F、G 五组样品沉积和剥离后的形貌图, 可以发现侧壁覆盖较厚也会导致剥离后侧壁脱落现象的出现, 并且沉积角度越接近45°, 侧壁越薄。较薄的侧壁电极可以使得剥离工艺难度更低, 降低剥离工艺后孔内电极侧壁脱落的几率。

总结出沉积角度与接触孔侧壁电极厚度关系如图5所示, 沉积角度从30°提高到50°的过程中, 侧壁厚度出现先减小再增大的现象, 其中在沉积角度

45°时达到最小值。这是由于在沉积角度接近 45°时,如图 2,轰击出来的金属粒子通量峰值方向接近

平行样品盘的法线方向,入射金属粒子沉积在侧壁的几率降低,得到最优的剥离角度。

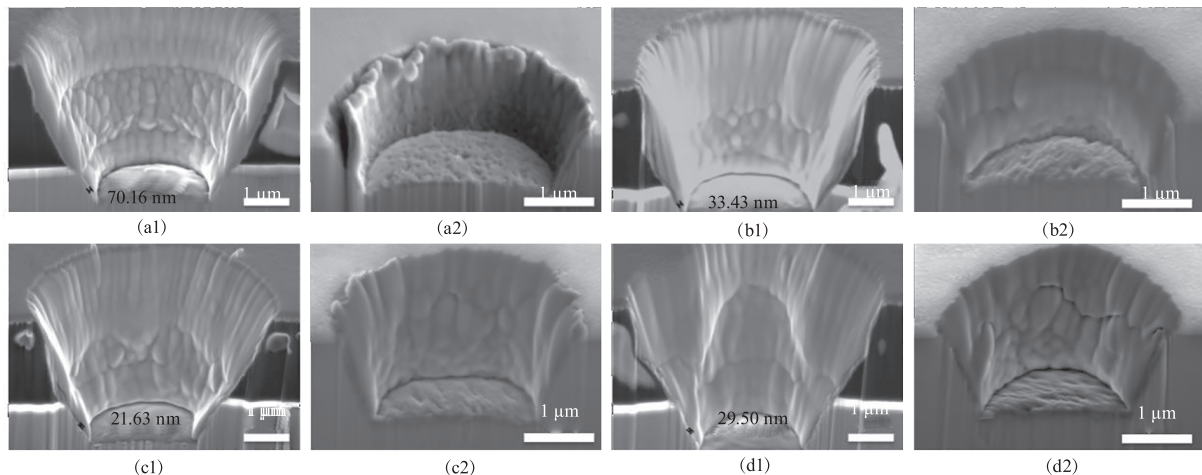


图 4 不同沉积角度条件下样品沉积和剥离后的形貌图

Fig. 4 Morphology of samples after deposition and stripping under different deposition angle conditions

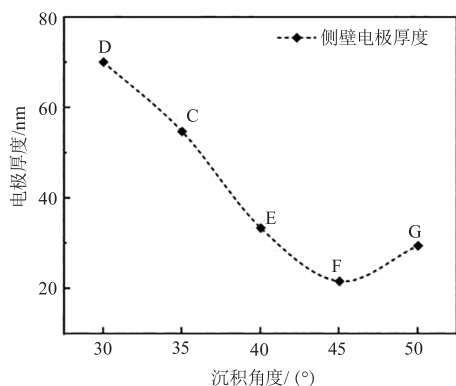


图 5 沉积角度与接触孔侧壁电极沉积厚度关系

Fig. 5 Deposition angle versus electrode deposition thickness on the sidewall of the contact hole

3.2 原子力显微镜与表面粗糙度测试

图 6 是采用 AFM 分析不同沉积条件下的表面粗糙度。在图 6(a)中,A 组样品表面粗糙度轮廓算术平均偏差(R_a)为 0.731 nm;在图 6(b)中,C 组样品的 R_a 为 0.503 nm;在图 6(c)中,F 组样品的 R_a 为 0.368 nm。

图 6(a)和图 6(b)相比,当沉积温度由 T_0 °C 上升到 $(T_0 + 40)$ °C,样品的 R_a 由 0.731 nm 减小到 0.503 nm,由于较高的沉积温度可以增加金属粒子的扩散能力,促进晶粒边界的迁移,使晶粒尺寸分布更加均匀^[8],从而有助于降低表面粗糙度,使得样品表面变得光滑。

在保持 80 °C 后改变沉积角度为 45°,F 组样品的 R_a 可以降低到 0.368 nm,调整沉积角度会改变入射金属粒子的方向,在轰击出来的金属粒子通量

峰值方向接近平行样品盘的法线方向时,入射的金属粒子转移给薄膜能量最充分,使沉积原子受到挤压而重新排列,引起沉积薄膜结构与性质的变化^[9]。表面沉积角度是控制生长薄膜的粗糙度的重要参数,改变沉积角度可以得到质量更高的金属膜层。

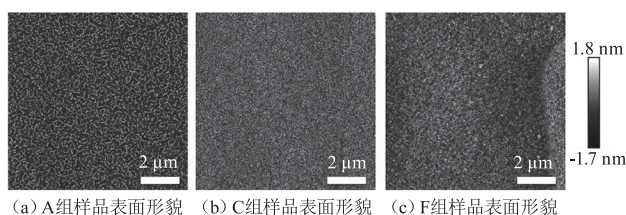


图 6 不同沉积条件样品的表面形貌

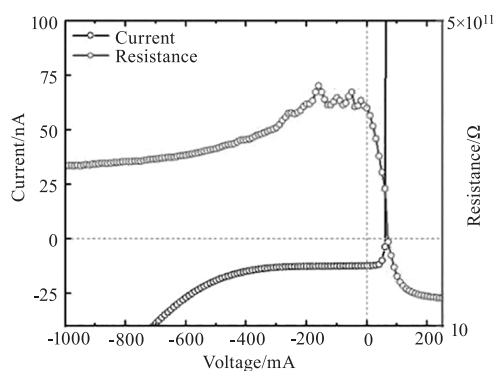
Fig. 6 Surface morphology of samples with different deposition conditions

3.3 半导体参数仪与器件性能测试

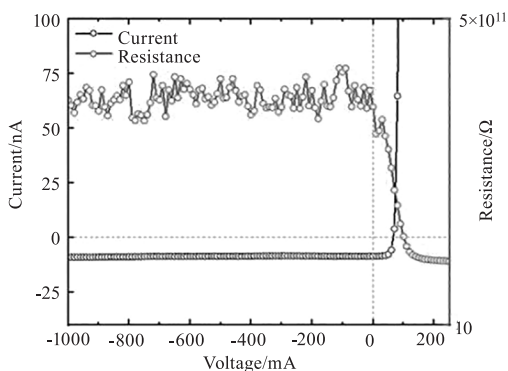
为了探究电极接触对探测器 I-V 曲线的影响,在实验室环境中,利用半导体参数仪在 77 K 下对 A 组与 E 组的 HgCdTe 红外探测器进行测试,获得的 I-V 与 R-V 曲线如图 7 所示。

对比图 7(a)和图 7(b)的暗电流与反向平坦区,A 组样品在 I-V 测试时呈现开启电压异常现象,从 R-V 曲线可以看出 A 组样品的暗电流偏大,反向平坦区较小。采用聚焦离子束 FIB 和 SEM 进行像元侧壁表征,如图 7(c)和图 7(d)所示,A 组样品接触孔侧壁电极掀起严重时会导致后续工艺中的 Au 与 n-HgCdTe 直接接触,二者直接接触时 Au 向内扩散至 HgCdTe 层,HgCdTe 中的 Te 向外

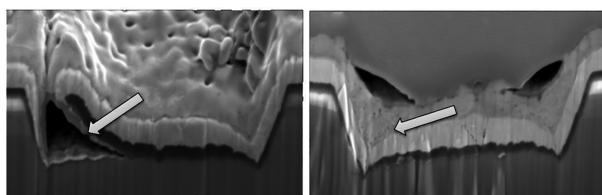
扩散进 Au 层形成轻掺杂,导致接触界面区域的 n 型 HgCdTe 转变为 p 型^[10],使原有的 pn 结变小,暗电流增大,反向平坦区减小,降低红外探测器件的效率和性能。在电信号读出过程中,金属与 HgCdTe 之间接触不良会导致信号传输延迟或失真,影响器件的响应速度和信号完整性,并且接触不良可能会在金属与半导体的界面处产生额外的界面态,这些界面态可以捕获或者释放电荷,影响半导体的电学性质^[11]。



(a) A组样品I-V与R-V曲线



(b) F组样品I-V与R-V曲线



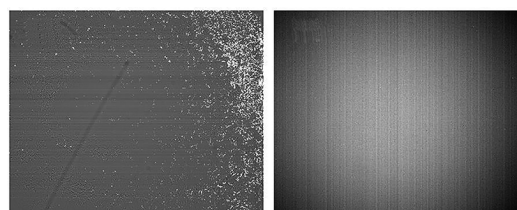
(c) A组样品像元形貌

(d) F组样品像元形貌

图7 不同沉积条件样品的I-V与R-V曲线及像元形貌

Fig.7 I-V and R-V curves and image element morphology of samples with different deposition conditions

将A组与F组样品分别封装杜瓦后测试,测试结果如图8所示,A组样品存在大量热盲元,盲元率大于10%,E组样品未出现大量热盲元现象,有效像元率大于等于99%,这表明改变沉积条件可以有效地减少热盲元出现的情况。



(a) A组样品测试电平图

(b) E组样品测试电平图

图8 测试结果

Fig.8 Test results

4 结论

本文分析离子束沉积中角度、温度等条件对电极生长的影响,结果表明升高沉积温度使沉积的金属膜层与 HgCdTe 附着力变得更好,沉积温度越高,侧壁覆盖越好。沉积角度越接近 45° ,侧壁越薄,较薄的侧壁电极可以使得剥离工艺难度更低,降低孔内电极侧壁脱落的几率接触。同时沉积角度也是控制生长薄膜的粗糙度的重要参数,改变沉积角度可以得到粗糙度更低的金属膜层。在沉积温度为 $(T_0 + 40)^\circ\text{C}$,沉积角度为 45° 的条件下,成功制备了易于剥离、粗糙度低、附着力好的孔内电极结构,提高了碲镉汞红外器件性能。

参考文献:

- [1] Zhou Liqing, Ning Ti, Zhang Min, et al. Developments of $10\ \mu\text{m}$ pixel pitch 1024×1024 MW infrared detectors [J]. Laser & Infrared, 2019, 49(8): 915 - 920. (in Chinese)
周立庆, 宁提, 张敏, 等. $10\ \mu\text{m}$ 像元间距 1024×1024 中波红外探测器研制进展 [J]. 激光与红外, 2019, 49(8): 915 - 920.
- [2] Ning Ti, Chen Huiqing, Tan Zhen, et al. Study on low damage dry etching technique of HgCdTe p-type contact hole [J]. Laser & Infrared, 2018, 48(5): 601 - 604. (in Chinese)
宁提, 陈慧卿, 谭振, 等. 碲镉汞 p 型接触孔低损伤干法刻蚀技术研究 [J]. 激光与红外, 2018, 48(5): 601 - 604.
- [3] Capper P, Elektromagnetismus. Narrow-gap II-VI compounds for optoelectronic and electromagnetic applications [J]. Crystal Research & Technology, 2009, 34(2): 196.
- [4] Goikhman A Y, Sheludyakov S A, Bogdanov E A. Ion beam deposition for novel thin film materials and coatings [J]. Materials Science Forum, 2011, 674: 195 - 200.
- [5] Bhikkaji B, Yong Y K, Mahmood I A, et al. Diagonal con-

- trol design for atomic force microscope piezoelectric tube nanopositioners. [J]. Review of Scientific Instruments, 2013, 84(2): 930 – 2689.
- [6] Liu Jinsheng. Ion beam deposition 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.
- [7] Yang Jianrong. Physics and technology of HgCdTe materials [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012. (in Chinese)
杨建荣. 碲镉汞材料物理与技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [8] Cheimarios N, To D, Kokkoris G, et al. Monte Carlo and kinetic Monte Carlo models for deposition processes: a review of recent works [J]. Frontiers in Physics, 2021, 9: 631918.
- [9] Hawkeye M M, Taschuk M T, Brett M J. Glancing angle deposition of thin films: engineering the nanoscale [M]. Chichester: John Wiley & Son Inc., 2014.
- [10] Wang Yifeng, Liu Liming, Yu Lianjie, et al. Research progress of metal/mercury cadmium telluride contacts [J]. Infrared, 2012, 33(5): 7 – 22. (in Chinese)
王忆锋, 刘黎明, 孙祥乐, 等. 金属/碲镉汞接触研究的发展 [J]. 红外, 2012, 33(5): 7 – 22.
- [11] Xu Zuodong, Zhang Jianmin, Lin Xinwei, et al. Transient response degradation of HgCdTe photovoltaic detectors under irradiation of nanosecond laser [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(1): 106001. (in Chinese)
徐作冬, 张检民, 林新伟, 等. 纳秒激光辐照下 HgCdTe 光伏探测器的瞬态响应特性退化 [J]. 红外与激光工程, 2018, 47(1): 106001.