

文章编号: 1672-8785(2025)03-0001-07

ICP 刻蚀对超晶格红外探测器 电极制备的控制

任 昂 刘 铭 李景峰

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: II 类超晶格红外探测器通常利用台面结实现对红外辐射的探测, 其中金属电极的制备工艺至关重要。深入研究了电感耦合等离子体(Inductively Coupled Plasma, ICP)刻蚀系统中物理刻蚀与化学刻蚀对超晶格探测器电极孔形貌的控制以及对刻蚀速率的影响。通过调整 ICP 离子源功率、射频功率、刻蚀气体流量等参数, 打破了刻蚀系统中物理刻蚀与化学刻蚀之间的平衡, 实现了电极孔侧壁倾角从 70° 到 90° 的工艺控制。该方法可以获得平滑的电极孔侧壁以及合适的倾斜角度, 为金属电极的生长提供最佳沉积条件。

关键词: 红外探测器; ICP 刻蚀; 超晶格; 电极孔; 侧壁倾角

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2025.03.001

Control of ICP Etching on Electrodes Fabrication of Superlattice Infrared Detectors

REN Ang, LIU Ming, LI Jing-feng

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

Abstract: Type-II superlattice infrared detectors usually use mesa junctions to detect infrared radiation, in which the preparation process of metal electrodes is crucial. The control of physical etching and chemical etching on the morphology of superlattice detector electrode holes and the influence on the etching rate in the inductively coupled plasma (ICP) etching system are studied in depth. By adjusting parameters such as ICP ion source power, radio frequency power, and etching gas flow, the balance between physical etching and chemical etching in the etching system is broken, and the process control of the inclination angle of the electrode hole sidewall from 70° to 90° is achieved. This method can obtain smooth electrode hole sidewalls and suitable inclination angles, providing optimal deposition conditions for the growth of metal electrodes.

Key words: infrared detector; inductively coupled plasma etching; superlattice; electrode hole; sidewall inclination angle

收稿日期: 2024-08-06

作者简介: 任昂(1994-), 男, 山西运城人, 博士, 主要从事新型红外探测器材料及器件结构设计与工艺开发研究。E-mail: renang2024@163.com

0 引言

高性能红外探测器和焦平面阵列被广泛应用于医疗、天文、环境监测和军事防御等领域^[1-2]，近些年吸引了很大的研究兴趣与行业关注。其中，由 III-V 族半导体材料交替生长形成的周期性量子结构(II 类超晶格材料)是制备高性能红外焦平面的候选材料之一^[3-4]。II 类超晶格材料的能带结构可以从短波红外波段调节到甚长波红外波段，并且具有有效质量大、俄歇复合寿命长、暗电流易抑制等特点，因此成为第三、四代红外焦平面探测器研究的热点。尽管超晶格材料在理论和技术上具有很多优势，但超晶格探测器性能还远远没有达到理论值。超晶格红外探测器件的暗电流通常较高^[5]，这不仅会带来较大的噪声和盲元率，降低器件的灵敏度，而且还会影响焦平面的均匀性，限制超晶格探测器的进一步应用。因此，要想大规模开发和制备超晶格红外探测器，降低器件的暗电流是核心和关键。

在超晶格探测器芯片制备工艺方面，除了台面刻蚀、薄膜生长和钝化工艺之外，电极孔刻蚀也是降低器件暗电流的关键。电极孔的制备是实现电极欧姆接触的前提。为了最大程度地输出超晶格材料产生的电信号并通过读出电路读取，通常需要在超晶格台面上生长的钝化层上开孔(电极孔)，使后续沉积的金属能传导电信号。目前制备电极孔的工艺分为湿法腐蚀和干法刻蚀。其中，湿法腐蚀工艺容易产生严重的钻蚀，且存在均匀性不高、腐蚀深度重复性差等缺点，导致电极孔金属覆盖效果差，制备的焦平面阵列暗电流大，不适合超晶格红外探测器件的制备。与湿法腐蚀不同，干法刻蚀具有损伤低、加工精度高、刻蚀均匀性好、工艺稳定可控等优点，可应用于超晶格电极孔制备工艺。感应耦合等离子体刻蚀技术是现阶段干法刻蚀采用的主流工艺，其对材料的刻蚀分为物理刻蚀和化学刻蚀。然而，如何调节物理刻蚀与化学刻蚀之间的平衡，制备出具有良好金属覆盖的电极孔，对于减小超晶格器件的暗

电流是十分迫切的。

本文首先从理论和实验上系统地分析了 ICP 刻蚀中物理刻蚀与化学刻蚀各自起到的作用。在此基础上，通过调整 ICP 离子源功率、射频功率、腔室压力、刻蚀气体种类及流量等工艺参数，打破了刻蚀系统中物理刻蚀与化学刻蚀之间的平衡，实现了电极孔侧壁倾角从 70°到 90°的工艺控制。这项技术可以为超晶格红外探测器金属电极的生长提供最佳沉积条件，并可应用于大规模红外探测器制备。

1 实验

电极孔刻蚀是制备超晶格探测器件的重要工艺之一，决定了能否高效地输出超晶格产生的电信号。图 1 为超晶格红外焦平面器件的示意图。首先在超晶格材料表面上旋涂光刻胶作为刻蚀掩膜层，随后通过干法刻蚀超晶格形成台面结构，实现像元间的物理隔离。台面制备完成后，为防止超晶格材料受外界环境的影响，提高器件的稳定性、抗氧化性及耐热冲击性，通过等离子体增强化学气相沉积(Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD)设备进行表面钝化并光刻电极孔图形。电极孔刻蚀是通过干法刻蚀或湿法腐蚀的方式将超晶格形成的 P-N 结上方一定区域的钝化层刻透，使器件的上电极可以从电极孔中引出；随后光刻电极，溅射金属化体系并通过剥离工艺完成电极制备，以便输出电信号。本文利用 PECVD 设备生长 SiO_2 和 Si_xN_y 的复合膜层(作为钝化层)；使用 CHF_3 和 Ar 作为刻蚀气体，ICP 功率、射频(Radio Frequency, RF)功率、腔体压强根据实验条件变化；利用共聚焦显微镜测量样品的刻蚀深度，从而计算出刻蚀速率；然后使用扫描电子显微镜测量样品的刻蚀角度，并获得电极孔侧壁形貌。

图 2 为利用湿法腐蚀和干法刻蚀工艺制备得到的电极孔形貌的扫描电镜(Scanning Electron Microscope, SEM)图。从图 2(a)和图 2(b)中可以看出，干法刻蚀工艺得到的电极孔侧壁陡直，刻蚀均匀性好，工艺稳定可控；但是溅

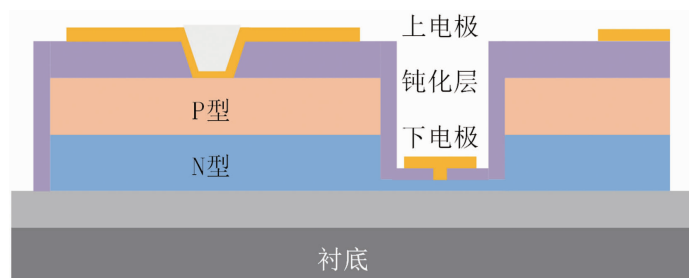


图 1 超晶格红外焦平面器件的示意图

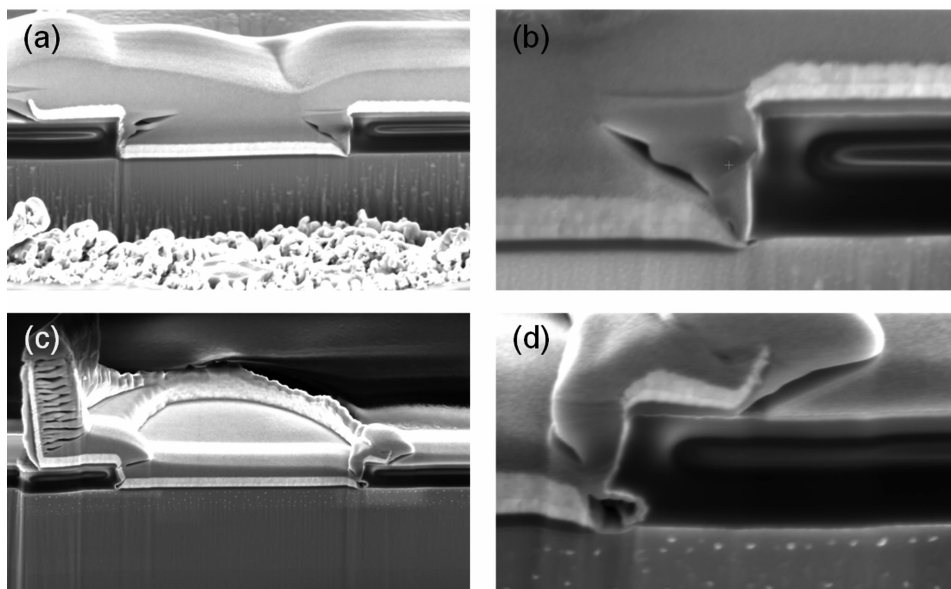


图 2 干法刻蚀与湿法腐蚀电极孔形貌的 SEM 图

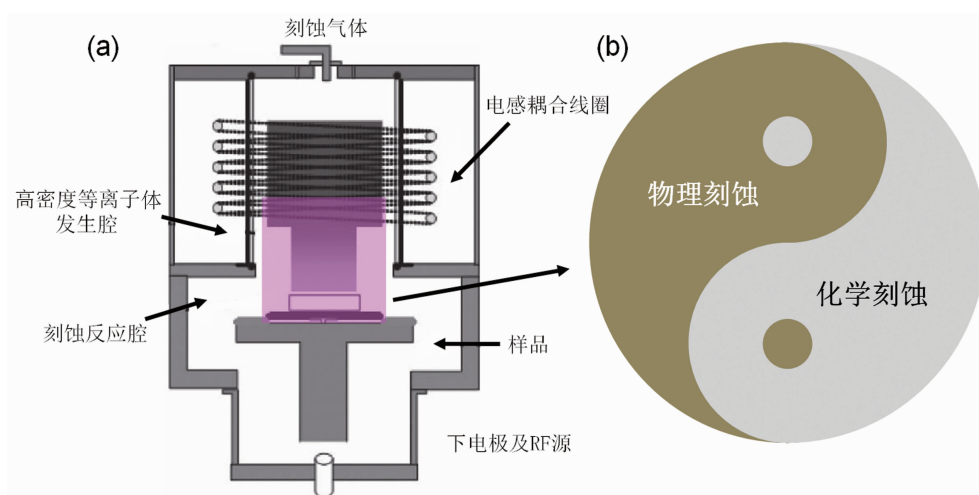


图 3 ICP 刻蚀系统的原理图

射的金属很难在侧壁形成良好的覆盖效果，通常表现出一定程度的断裂，严重影响后续与集成电路之间的倒装互连。随着时间推移，钢柱会逐渐渗透到超晶格材料中，产生漏电，导致

暗电流增大，影响超晶格器件的性能与稳定性。图 2(c)和图 2(d)为利用湿法腐蚀工艺制备得到的电极孔 SEM 图。可以看出，电极孔侧壁具有良好的倾角，溅射的金属能覆盖电极

孔表面。然而,钝化层与超晶格台面之间明显出现严重的钻蚀现象,而且湿法腐蚀使得电极孔尺寸扩大。这些结果会影响后续电路互连以及器件工作的稳定性。相比之下,湿法腐蚀在原理上存在较大的弊端。因此,如何通过干法刻蚀方法制备出金属完全覆盖侧壁的电极孔成为本文的研究重点。

2 结果与讨论

为了厘清干法刻蚀对电极孔制备的影响,从 ICP 刻蚀的原理分析:感应耦合等离子体刻蚀技术是利用气体辉光放电产生等离子体^[6],通过物理过程和化学过程双重作用的结果。如图 3(a)所示,当腔体处于真空低气压条件时,ICP 射频源产生的射频促使腔内以一定比例混合的反应气体辉光放电,获得高密度的等离子体;其通过 RF 源加速并轰击样品,打断材料的化学键,生成具有较强挥发性的物质;再通过设备真空管路抽离。化学刻蚀是利用等离子体在放电过程中产生的离子和中性活性物质(即自由基)引发各向同性反应;离子能够在电场作用下与基片发生反应,而且反应集中在电场方向上,是各向异性的^[7]。物理刻蚀可将腔内离子加速至撞击基片表面,使表面原子溅射出来,达到刻蚀的目的。总的来说,等离子体刻蚀是不同反应之间的组合。根据器件制备需求的不同,合理调节刻蚀参数,打破物理刻蚀与化学刻蚀的平衡(见图 3(b)),实现预期的刻蚀速率、侧壁角度、选择比等结果,从而达到最优刻蚀结果。

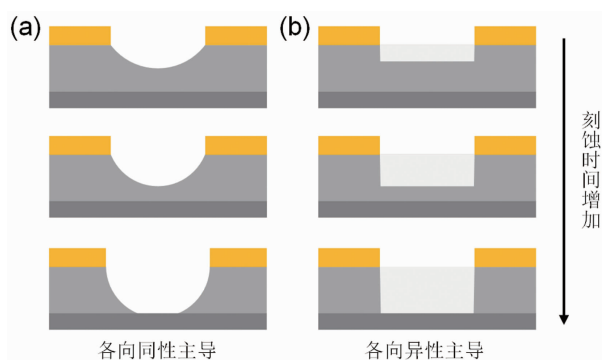


图 4 各向同性与各向异性刻蚀的剖面示意图

基于 ICP 刻蚀原理,从理论上分析,如果刻蚀过程中各向同性的化学反应占主导,则会在各个方向上表现出相同的刻蚀速率。如图 4(a)所示,刻蚀形貌呈圆形。随着刻蚀时间增加,将展现出较缓的侧壁形貌。如果充分发挥刻蚀的各向异性,控制电场,使更多的离子垂直轰击样品表面,则可以获得接近垂直的表面(见图 4(b))。

基于此,图 5 选用刻蚀工艺参数为各向异性占主导的条件。从截面 SEM 图中能看出,当刻蚀时间较短时(见图 5(a)),钝化层没有刻穿,侧壁呈陡直状态;随着刻蚀时间增加,钝化层完全刻透(见图 5(b)),电极孔侧壁依然陡直。相反,为了实现各向同性刻蚀,应增加离子浓度,减弱离子能量及运动的方向性。我们在上述条件下增大 ICP 功率、反应气体流量和气压,减小 RF 功率,得到的结果如图 6 所示。从中可以看出,钝化层没有被刻穿,刻蚀形貌呈碗状(见图 6(a)),表现为完全各向同性刻蚀。这些结果是由于刻蚀参数变化激发更多的气体,产生高浓度等离子体,降低刻蚀的各向异性。随着时间增加,钝化层底部逐渐显现(见图 6(b)~图 6(d))。对图 6(c)解剖后可知,其截面 SEM 图清楚展现出各向同性的刻蚀作用。以上结果表明,通过合理的参数设计,我们可以得到侧壁倾斜的电极孔结构。

为了更好地阐述刻蚀参数对电极孔侧壁形貌产生的影响,在图 5 对应的条件中改变刻蚀工艺参数,研究 RF 功率、ICP 功率、气体种类及流量、腔体压强等对电极孔的影响。图 7(a)对应的条件是减小 RF 功率。从截面 SEM 图上看到电极孔侧壁倾斜程度较大,几乎垂直,说明此时极板电压依然可以为等离子体提供垂直轰击作用。图 7(d)为不同 RF 功率(40~100 W)下的刻蚀速率曲线图。可以发现,在这个范围内增加 RF 功率,刻蚀速率逐渐增加,说明更多的等离子体被牵引并轰击样品表面。单独增加 ICP 功率,使反应腔内电离产生

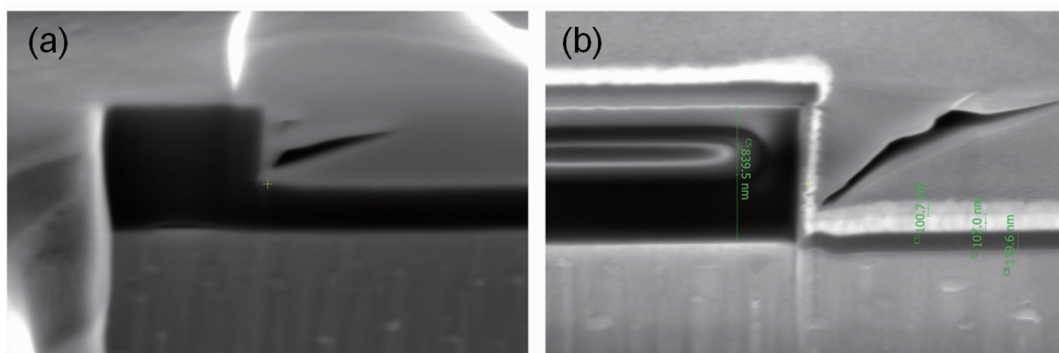


图 5 各向异性刻蚀电极孔形貌的 SEM 图

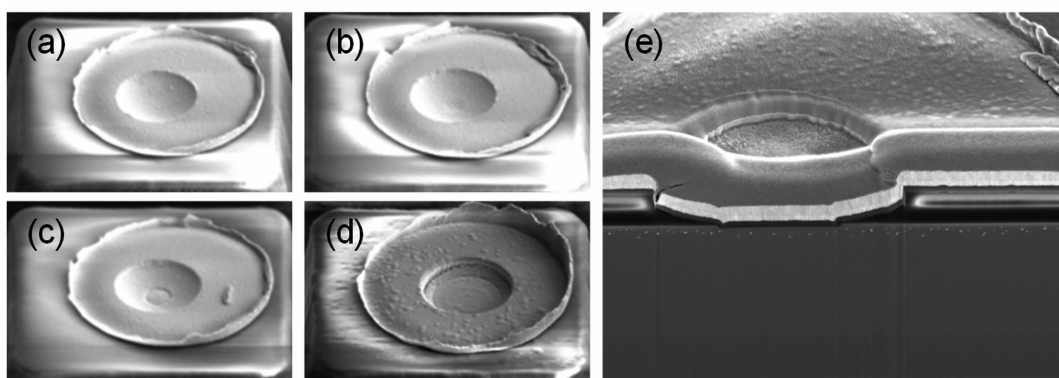


图 6 各向同性刻蚀电极孔形貌的 SEM 图

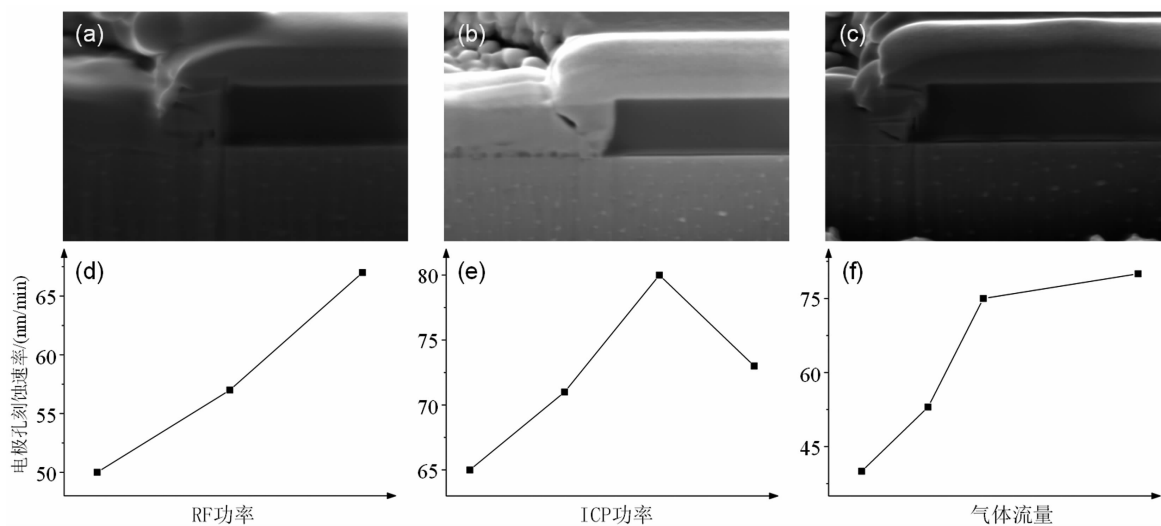


图 7 采用不同刻蚀参数制备电极孔形貌的 SEM 图

更多等离子体, 减小刻蚀的各向异性作用; 如图 7(b)所示, 侧壁倾角减小且表面相对光滑, 说明各向同性刻蚀发挥作用。图 7(e)为不同 ICP 功率 (200~600 W) 下的刻蚀速率曲线图。可以看到, 增加 ICP 功率后, 刻蚀速率增大, 说明有更多的等离子体与材料发生反应, 加速刻蚀进程。图 7(c)对应的是单独降低反应物流

量, 能看到侧壁倾角同样减小, 说明该条件下电离得到的等离子体减少, 垂直轰击变弱。同样通过对比不同反应物流量 (15~60 sccm) 发现, 刻蚀速率随流量的减小而降低 (见图 7(f))。以上结果表明, 改变刻蚀参数可以控制等离子体产生的作用, 实现各向异性与各向同性刻蚀反应, 从而影响电极孔侧壁的形貌。

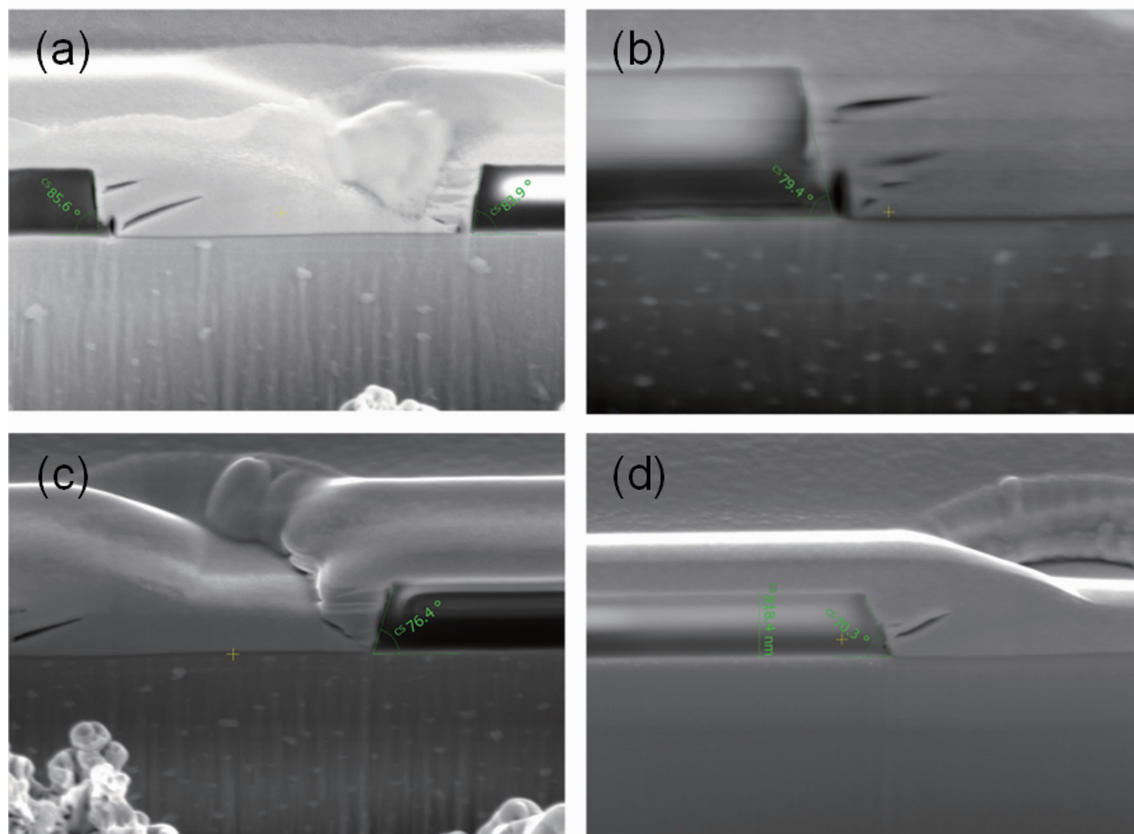


图 8 通过调节刻蚀平衡得到的电极孔形貌(SEM 图)

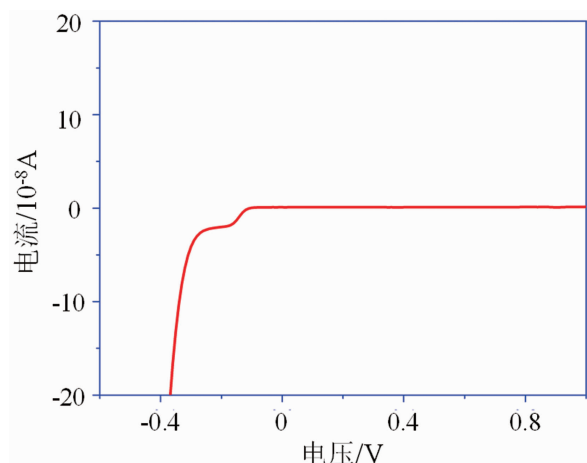


图 9 电极孔侧壁倾角为 70°时芯片对应的 $I-V$ 测试结果

在此基础上,同时调节 ICP 功率、反应物流量及腔室压力,控制各向同性刻蚀的程度,打破刻蚀系统中物理过程与化学过程之间的平衡。如图 8 所示,最终得到电极孔侧壁刻蚀倾角从 90°到 70°的变化,证实我们提出的策略可以打破刻蚀系统中物理刻蚀与化学刻蚀之间的平衡。随后,我们将得到的刻蚀参数应用到超

晶格材料电极孔制备中。对比具有不同电极孔侧壁倾角的器件性能后发现,侧壁倾角为 70°的电极孔具有较好的电极覆盖效果,其焦平面阵列器件展现出低暗电流优势(见图(9)),相应混成芯片的中测性能信号值、平均峰值探测率以及噪声等效温差也都明显好于其余电极孔刻蚀条件下制备的芯片。

3 结束语

通过分析 ICP 干法刻蚀参数并进行相应实验,得到适合超晶格红外探测器电极孔刻蚀的工艺条件。结果表明,合理地设计 ICP 功率、刻蚀气体流量和腔室压力,实现物理轰击与化学刻蚀相结合的工艺技术,可以平衡刻蚀系统中各向同性与各向异性的作用,获得良好的刻蚀效果,从而实现超晶格电极的良好覆盖。该研究为超晶格红外焦平面器件工艺路线的选取奠定了基础。但是要想实现金属完全覆盖电极孔,后续还需针对电极沉积工艺开展优化研究。

参考文献

- [1] Sai-Halasz G A, Tsu R, Esaki L. A New Semiconductor Superlattice [J]. *Appl Phys Lett*, 1977, **30**(12): 651–653.
- [2] Rogalski A, Martyniuk P, Kopytko M. InAs/GaSb Type-II Superlattice Infrared Detectors: Future Prospect [J]. *Appl Phys Rev*, 2017, **4**(3): 031304.
- [3] 马晓乐, 郭杰, 郝瑞亭, 等. InAs/GaSb 超晶格/GaSb 体材料中短波双色红外探测器 [J]. *红外与毫米学报*, 2021, **40**(5): 569–575.
- [4] Plis E A. InAs/GaSb Type-II Superlattice Detectors [J]. *Adv Electron*, 2014, **1**: 246769.
- [5] Marozas B T, Hughes W D, Du X, et al. Surface Dark Current Mechanisms in III-V Infrared Photodetectors [J]. *Opt Mater Express*, 2018, **8**(6): 1419–1424.
- [6] 李海燕, 谭振, 陈慧卿, 等. 干法刻蚀 InSb 时 Ar 气含量的选取 [J]. *激光与红外*, 2018, **48**(12): 1503–1508.
- [7] 姚刚, 石文兰. ICP 技术在化合物半导体器件制备中的应用 [J]. *半导体技术*, 2007, **32**(6): 474–477.