

离子束刻蚀碲镉汞的沟槽深宽比改进

贾嘉^{1,2*}, 刘诗嘉^{1,2}, 刘向阳^{1,2}, 孙艳³, 李向阳^{1,2}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 传感技术国家重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院上海技术物理研究所 中科院红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083;

3. 中国科学院上海技术物理研究所 红外物理国家重点实验室, 上海 200083)

摘要: 高深宽比离子束刻蚀技术是实现碲镉汞红外焦平面探测器的关键工艺技术. 国内应用最广泛的双栅考夫曼刻蚀机束散角较大, 沟槽深宽比较低. 针对 Ar 离子束刻蚀机, 尝试了三种提高深宽比的方法: 选择不同的光刻胶做掩模、改变刻蚀角度和使用三栅离子源, 并通过扫描电子显微镜 (SEM) 观察了碲镉汞刻蚀图形的剖面轮廓并计算了深宽比. 分析了这些工艺方法对刻蚀图形轮廓的影响, 获得了一些有助于获得高深宽比的离子束刻蚀沟槽的实验结果.

关键词: 碲镉汞; 离子束刻蚀; 深宽比

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A

Improving the aspect ratio of ion beam etched trenches in HgCdTe

JIA Jia^{1,2*}, LIU Shi-Jia^{1,2}, LIU Xiang-Yang^{1,2}, SUN Yan³, LI Xiang-Yang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Key Laboratory of infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

3. National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: The aspect ratio of trenches is one of the key parameters in processing the HgCdTe infrared focal plane arrays (IRFPAS). The divergence angle of the two-grid Kaufman ion-beam source that is widely used in China at present is typically large. Using such an ion beam source, the aspect ratio of HgCdTe isolation trenches is comparatively low. Several methods were employed in the etching process to increase the aspect ratio of trenches etched by Ar⁺ ion beam apparatus, such as with different types of photoresists, changing the incidence angle of ion beam, and utilizing three-grid Kaufman ion-beam source. The cross-section profile of the trenches on HgCdTe arrays was studied with scanning electron microscope (SEM) and the aspect ratio was calculated. The influences of these methods on etching profiles were given and many results desirable for the design of high aspect ratio of ion beam etched trenches were achieved.

Key words: HgCdTe, ion beam etching, aspect ratio

PACS: 07.57.Kp

引言

碲镉汞 (Hg_{1-x}Cd_xTe) 材料可以通过组分 x 值的改变来制备各种波段的红外探测器, 在光电器件、传感器和环境检测等领域有着广泛的应用. 随着近些年新一代 HgCdTe 焦平面探测器的崛起, 使得碲镉汞探测器逐步向大规模、高集成发展. 探测器光敏元

尺寸和芯片线宽的日益减小, 都需要高深宽比的沟槽隔离技术来实现^[1], 这对芯片成型工艺中重要的一环——离子束刻蚀工艺提出了更高的深宽比要求. 为实现这些列阵的有效隔离和达到高的深宽比, 进行了离子束刻蚀碲镉汞沟槽的工艺研究, 重点分析了选用不同光刻胶型号、改变刻蚀角度以及使用三栅离子源对刻蚀深宽比的影响.

收稿日期: 2013-08-20, 修回日期: 2015-01-08

Received date: 2013-08-20, revised date: 2015-01-08

作者简介 (Biography): 贾嘉 (1976-), 男 (汉), 山东安邱人, 副研究员, 硕士, 主要研究领域为碲镉汞红外探测器的制备工艺、薄膜技术及可靠性评价.

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: jiasitp@sohu.com

1 离子束刻蚀简介及评价参数

离子束刻蚀是通过物理溅射功能进行加工的离子铣. 国内应用最广泛的双栅考夫曼刻蚀机通常由屏栅和加速栅组成离子光学系统,其工作台可以方便地调整倾角,使碲镉汞基片法线与离子束的入射方向成 θ 角,并绕自身的法线旋转,如图 1 所示^[2]. 而经过离子束刻蚀后的单个沟槽轮廓一般都呈如图 2 所示. 评价沟槽轮廓主要的参数有沟槽的开口宽度 W_0 、沟槽的刻蚀深度 H 、台面的坡度角 φ 和沟槽底部的宽度 W_b ^[3]. 我们常用的深宽比 (Aspect ratio) 是指槽深 H 和槽开口宽度 W_0 的比值,本文中用 R 表示. 深宽比是常用来作为衡量刻蚀工艺水平和刻蚀图形好坏的评价参数. 本文实验中使用的是北京埃德万斯离子束研究所生产的 LKJ-1C-100 型考夫曼 Ar 离子束刻蚀机.

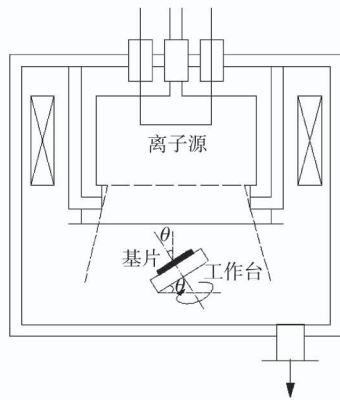


图 1 离子束刻蚀原理图
Fig. 1 Schematic of ion beam etching

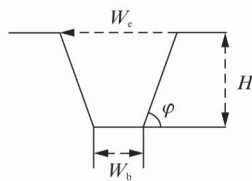


图 2 单个刻蚀沟槽的轮廓示意图
Fig. 2 Cross section of single etched trench

2 实验及结果

在本实验中设计了四条宽度分别为 $10\ \mu\text{m}$ 、 $8\ \mu\text{m}$ 、 $6\ \mu\text{m}$ 和 $4\ \mu\text{m}$ 的刻蚀槽,使用光刻胶作掩模,样品经过前烘、曝光、显影、定影和后烘的光刻标准工艺后在碲镉汞基片上形成需要的槽宽,然后在离子束刻蚀机上用常规刻蚀工艺条件(离子能量

$300\ \text{eV}$ 、离子束流 $55\ \text{mA}$ 、加速电压 $200\sim 220\ \text{V}$) 进行 Ar 离子束的物理刻蚀,刻蚀时间都为 $3\ \text{h}$. 刻蚀结束后将碲镉汞基片取出,去胶后用红外物理国家重点实验室的扫描电子显微镜 (SEM) 测量这些刻蚀沟槽的参数并计算其深宽比. 为了提高离子束刻蚀碲镉汞材料的深宽比,设计并尝试了三种方法,并通过实验验证了其可行性. 实验 1 和实验 2 中使用的是传统的双栅离子源,实验 3 中使用的是三栅离子源.

2.1 实验 1: 不同光刻胶的选用

掩模制作是高深宽比器件制作过程中的关键技术. 其中,光刻胶是刻蚀过程中最常用的掩模材料. 实验 1 中我们使用了三种性能不同的光刻胶,型号分别为薄胶 AZ1500、中厚胶 AZ5200 和厚胶 AZ4620,用标准匀胶转速和常规刻蚀工艺条件将碲镉汞刻蚀 $3\ \text{h}$ 后,测量碲镉汞基片上 4 个不同槽宽的刻蚀槽的轮廓数据如表 1 所示. 其中,为了使薄胶 AZ1500 确保能经受 $3\ \text{h}$ 的刻蚀,采用了在刻蚀 $1.5\ \text{h}$ 后重新光刻掩模再继续刻蚀的方法^[4].

从表 1 中可以看出: AZ1500 胶效果最差,刻出的槽宽最大,得到的深宽比最小; AZ4620 胶的效果最好,刻出的槽宽最小,得到的深宽比也最大. 原因可以分析如下: 基片与掩模的刻蚀速率的比值即选择比 (Selectivity) 在高深宽比的刻蚀过程中是一个很重要的参数,因为刻蚀高深宽比器件时所需刻蚀基材的速率相对掩模 (光刻胶) 要大的多,这样才能形成深高宽比的图形^[5]. 因为 AZ4620 胶的刻蚀速度最小,即这种胶的刻蚀选择比最大,因此它在刻蚀过程中的性状变化相对最小,最终可以获得相对较大的深宽比.

2.2 实验 2: 改变刻蚀角度

进行了改变刻蚀离子束入射角度的实验. 将待刻的碲镉汞基片用真空硅脂平坦地粘在工件台上. 在刻蚀时,使工件台绕其法线以 $10\ \text{r/min}$ 的速度匀速旋转,并调整工作台的角度,使离子束入射角度 θ 分别等于 0° 和 20° ,如图 1 所示. 测得的碲镉汞基片上 4 个不同槽宽的刻蚀槽轮廓数据如表 2 所示.

从表 2 可以看出: 对于 AZ5200 和 AZ4620 两种光刻胶,在相同的刻蚀条件下,刻蚀角度为 20° 的相比 0° 的样品来说,能获得更大的刻蚀深度,但刻蚀角度为 20° 的沟槽其开口宽度 W_0 也相应较大. 所以刻蚀角度较大的样品虽能获得较大的刻蚀深度,但增大刻蚀角度却不一定能获得大的深宽比,有时 (例如对光刻胶 AZ4620 而言) 增大刻蚀角度反而会

表 1 使用不同光刻胶(刻蚀角度 0°)常规刻蚀 3 小时后的深宽比Table 1 The aspect ratios of trenches processed with different photo resists by general etching for three hours ($\theta=0^\circ$)

样品 编号	光刻胶 型号	4 μm 槽宽			6 μm 槽宽			8 μm 槽宽			10 μm 槽宽		
		$W_e(\mu\text{m})$	$H(\mu\text{m})$	R	$W_e(\mu\text{m})$	$H(\mu\text{m})$	R	$W_e(\mu\text{m})$	$H(\mu\text{m})$	R	$W_e(\mu\text{m})$	$H(\mu\text{m})$	R
1-1	AZ1500	10.30	3.55	0.34	11.50	5.07	0.44	15.20	6.92	0.46	22.50	8.20	0.36
2-1	AZ5200	6.72	3.76	0.56	7.61	6.21	0.82	9.58	9.10	0.95	11.60	11.40	0.98
3-1	AZ4620	5.11	2.88	0.56	6.36	5.40	0.85	8.42	8.74	1.04	11.20	11.30	1.01

表 2 使用不同刻蚀角度(θ)常规刻蚀 3 小时后的深宽比Table 2 The aspect ratios of trenches processed at different etching angles (θ) by general etching for three hours

编号	刻蚀角	光刻胶 型号	4 μm 槽宽			6 μm 槽宽			8 μm 槽宽			10 μm 槽宽		
			$W_e(\mu\text{m})$	$H(\mu\text{m})$	R	$W_e(\mu\text{m})$	$H(\mu\text{m})$	R	$W_e(\mu\text{m})$	$H(\mu\text{m})$	R	$W_e(\mu\text{m})$	$H(\mu\text{m})$	R
2-1	0	AZ	6.72	3.76	0.56	7.61	6.21	0.82	9.58	9.10	0.95	11.60	11.40	0.98
2-2	20	5200	9.41	8.22	0.87	10.50	9.63	0.92	13.40	10.80	0.81	15.30	12.50	0.82
3-1	0	AZ	5.11	2.88	0.56	6.36	5.40	0.85	8.42	8.74	1.04	11.20	11.30	1.01
3-2	20	4620	6.63	3.52	0.53	9.24	6.30	0.68	10.90	8.95	0.82	12.80	12.06	0.94

表 3 使用双栅和三栅离子源(刻蚀角度 0°)刻蚀 3 小时后的深宽比Table 3 The aspect ratios of trenches using two-grid and three-grid ion sources ($\theta=0^\circ$) by general etching for three hours

编号	离子源	光刻胶 型号	4 μm 槽宽			6 μm 槽宽			8 μm 槽宽			10 μm 槽宽		
			$W_e(\mu\text{m})$	$H(\mu\text{m})$	R	$W_e(\mu\text{m})$	$H(\mu\text{m})$	R	$W_e(\mu\text{m})$	$H(\mu\text{m})$	R	$W_e(\mu\text{m})$	$H(\mu\text{m})$	R
2-1	双栅	Z	6.72	3.76	0.56	7.61	6.21	0.82	9.58	9.10	0.95	11.60	11.40	0.98
2-3	三栅	5200	7.88	16.10	2.04	10.20	14.90	1.46	11.60	18.40	1.59	13.50	18.50	1.37
3-1	双栅	AZ	5.11	2.88	0.56	6.36	5.40	0.85	8.42	8.74	1.04	11.20	11.30	1.01
3-3	三栅	4620	7.88	16.90	2.14	9.23	15.80	1.71	11.50	14.70	1.28	13.90	13.50	0.97

使深宽比降低. 这个现象可以用离子束入射角度与刻蚀速率的关系来定性解释^[6]: 在入射角为 $0^\circ \sim 30^\circ$ 的范围时, 刻蚀速率随离子束入射角度的增加而逐渐增加. 这是因为离子小角度入射(如 0° 法向入射时)离子动量矢量指向晶格点阵内部, 经级联碰撞转移给材料原子的动量矢量仍是指向内部分量占优势. 要形成原子溅射必须使受碰撞的表面原子获得向外的动量矢量. 所以对于多数材料, 都是小角度入射对应着较低的刻蚀速率. 另外, 实际刻蚀时掩模也要受到离子溅射的作用. 当刻蚀入射角较大时, 离子束对掩光刻胶侧壁的刻蚀速率也较大, 导致光刻胶侧壁很快被刻坏, 光刻胶的开口变大, 因此得到刻槽的开口宽度也比较大, 最终得到槽的深度比反而比较小.

2.3 实验 3: 三栅离子源

实验 3 中, 尝试使用了三栅的考夫曼离子源. 三栅的考夫曼离子源在加速栅后面还设置第三个栅极作为减速栅, 如图 3 所示^[6]. 本实验中使用的是由北京瑞得高尔科技开发有限公司研制的三栅离子源, 其在常规刻蚀工艺条件下, 与实验 1 和实验 2 中使用的双栅离子源对碲镉汞材料有着基本相同的刻蚀速率. 表 3 中给出了使用双栅和三栅离子源(刻蚀角度 0°)刻蚀 3 小时后的刻蚀沟槽深宽比数据, 图 4(a) 和(b) 还分别给出了用 AZ4620 光刻胶做掩模

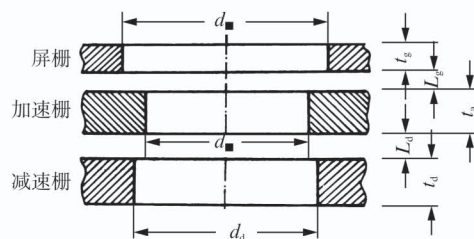


图 3 三栅离子束系统结构原理图

Fig. 3 Schematic diagram of the three-grid system

的情况下双栅和三栅离子源刻蚀 3 小时后的 SEM 图像.

从表 3 和中图 4 中可以看出: ① 不论是使用 AZ5200 还是 AZ4620 做掩模, 三栅离子源几乎都比常规的双栅离子源能获得更大的刻蚀沟槽深宽比; ② 而且随着刻蚀槽宽的减小, 三栅离子源对提高刻蚀深宽比的效果越显著; ③ 三栅离子源在用 AZ5200 和 AZ4620 做掩模, 刻蚀设计值为 4 μm 的槽宽时, 其深宽比都达到了 2 以上, 这个值比周文洪等人报道^[3]的用 OXFORD 公司诱导耦合离子增强型反应离子刻蚀(ICP-RIE)机刻蚀得到的碲镉汞沟的深宽比还要大; ④ 从 SEM 图像来看, 常规双栅离子源的刻槽轮廓呈 U 形, 槽底部的形状近似半圆, 而三栅离子源的刻槽轮廓呈倒梯形. 通过测量沟槽的开口宽度 W_e 、沟深 H 和沟底宽度 W_b (如图 4(b))

所示),能计算得到用三栅离子源刻蚀的四种宽度的刻蚀槽台面的坡度角 φ 都在 $75^\circ \sim 78^\circ$ 之间,说明虽然刻蚀时间已达到3h但三栅离子源的刻槽侧壁还是比较陡直的。

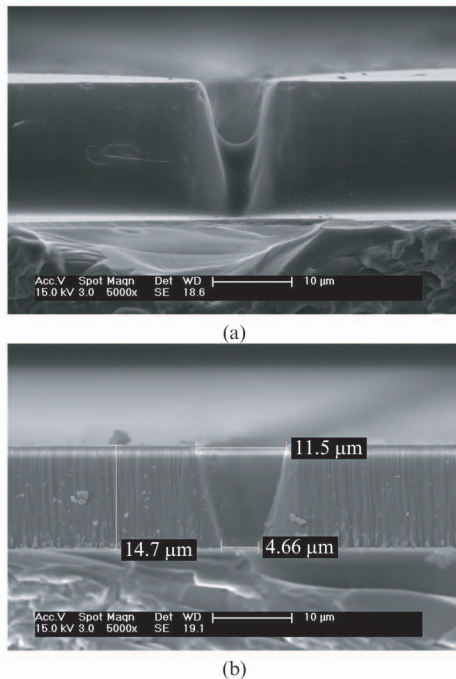


图4 分别用两种离子源刻蚀3小时后的SEM图像
(a)双栅离子源刻蚀槽(b)三栅离子源刻蚀槽
Fig.4 SEM images of trenches etched by two different ion sources for three hours(a) Trench formed by two-grid ion source (b) Trench formed by three-grid ion source

三栅离子源相对于常规的双栅(二栅)离子源能获得深度宽比更大的刻蚀槽的主要原理是:二者比较,三栅离子光学结构较二栅结构具有相对小的束散角.增加的第三个栅极电位为零,可以把减速场完全限制在加速栅和减速栅之间的 L_d 范围内,减速场的长度大大缩减,离子一旦进入减速栅孔即转入直线运动,不再增加束散角,因而三栅离子束准直性优于双栅离子源^[7],从而最终能获得更大的刻蚀深宽比。

3 结论

在Ar离子束考夫曼刻蚀机上,开展了提高碲镉汞刻蚀沟槽深宽比的方法研究.分别进行了选用不同光刻胶、改变刻蚀角度和使用三栅离子源的实验,并通过SEM测量了四条设计宽度依次为 $10\ \mu\text{m}$ 、 $8\ \mu\text{m}$ 、 $6\ \mu\text{m}$ 和 $4\ \mu\text{m}$ 的刻蚀槽的剖面轮廓,得到了影响刻蚀沟槽深宽比的初步结果.实验结果表明:

①要选用选择比高的光刻胶做掩模,才能获得相对深宽比高的沟槽,本实验中为AZ4620型光刻胶;
②在相同的刻蚀条件下,增大刻蚀角度虽能获得较大的刻蚀深度,但由于其开口宽度也相应较大,所以增大刻蚀角度并不能获得深宽比大的沟槽;
③三栅离子源相对于常规的双栅离子源具有相对小的束散角,因此能获得深度比更大的刻蚀槽,且随着刻蚀槽宽的减小,三栅离子源的效果越显著.综合以上3个实验的结果,可以知道三栅离子源在用AZ4620做掩模时对提高碲镉汞刻蚀沟槽深宽比的作用最佳,刻蚀设计值为 $4\ \mu\text{m}$ 的槽宽时其深宽比达到了2以上,对改进碲镉汞刻蚀沟槽的工艺方法给出了很有意义的指导性结论。

致谢

本文在实验与撰写过程中,得到了北京瑞得高尔科技开发有限公司刘焯的大力支持,以及他很多有益的建议,并在短时间内即提供了符合技术要求的三栅离子源,在此表示感谢。

References

- [1] TENNANT W E, THOMAS M, *et al.* A Novel Simultaneous Unipolar Multispectral Integrated Technology Approach for HgCdTe IR Detectors and Focal Plane Arrays [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2001, **30**(6): 590-594.
- [2] WANG Li-Heng, HUANG Yun-Tian, ZHENG Hai-Tao. Film Technology [M]. Beijing: TsingHua University Press (王力衡,黄运添,郑海涛.薄膜技术.北京:清华大学出版社),1991: 10-24.
- [3] ZHOU Wen-Hong, YE Zhen-Hua, XING Wen, *et al.* The Study on the Profile of HgCdTe Micro-mesa Arrays Isolated by Dry-etch Process [J]. *LASER & INFRARED*. (周文洪,叶振华,邢雯,等.碲镉汞深微台面阵列干法隔离的轮廓研究.激光与红外),2006, **36**(11): 1029-1031.
- [4] AUSNITZER T CI, LIMPET J, ZOLLNER K, *et al.* Highly efficient transmission gratings infused silica for chirped-puls eamplification systems [J]. *Applied Optics*, 2003, **42** (34): 6934-6938.
- [5] WANG Xu-Di, ZHANG Yong-Sheng, HU Huan-Lin, *et al.* Dry etching for high aspect ratio microstructures [J]. *VACUUM*. (王旭迪,张永胜,胡焕林,等.深高宽比微结构的干法刻蚀.真空),2004, **41**(5): 32-34.
- [6] LIU Jin-Sheng. *Ion Beam Technology and Applications* [M]. Beijing: National Defense Industry Press (刘金声.离子束技术及应用.北京:国防工业出版社), 1995: 81, 188-207.
- [7] You Da-Wei, Huang Xiao-Gang, Ren Jing-Xue, *et al.* Development of Broad Beam RF Ion Source for Thin Film Growth [J]. *VACUUM SCIENCE AND TECHNOLOGY (CHINA)*. (尤大伟,黄小刚,任荆学,等.用于薄膜制备的射频宽束离子源的设计.真空科学与技术学报), 2004, **24**(6): 451-454.