

文章编号: 1672-8785(2023)07-0001-07

# 不同像元间距红外探测器的 钢柱生长研究

张 鹏 马 毅 聂 媛

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

**摘 要:** 分析了红外探测器钢柱生长工艺中不同像元间距情况下钢柱光刻孔内部的钢沉积情况和微观结构。解释了 $10\ \mu\text{m}$ 小像元间距条件下钢柱高度较矮的原因, 并给出了像元间距大小与剥离后钢柱高度之间的关系。针对 $10\ \mu\text{m}$ 及以下像元间距红外探测器的钢柱生长, 给出了解决钢柱高度问题的办法。使用新方法后, 钢柱的高度可达到 $5\ \mu\text{m}$ 以上。

**关键词:** 红外探测器; 钢柱; 像元间距

**中图分类号:** TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2023.07.001

## Research on the Growth of Indium Bump for Infrared Detectors with Different Pixel Pitches

ZHANG Peng, MA Yi, NIE Yuan

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

**Abstract:** The indium deposition situation and microcosmic structure in the indium bump photoresist hole are analyzed in the indium bump growth process of infrared detectors with different pixel pitches. The reason for the low indium bump under the condition of  $10\ \mu\text{m}$  pixel pitch is explained. And the relationship between the pixel pitch and indium bump height after lift-off is given. For the indium bump growth of infrared detectors with a smaller pixel pitch of  $10\ \mu\text{m}$  and below, the methods to solve the problem of indium bump height are presented. After using the new methods, the indium bump height can reach more than  $5\ \mu\text{m}$ .

**Key words:** infrared detector; indium bump; pixel pitch

### 0 引言

红外焦平面探测器在军事、民用领域有着广泛的应用, 并具有非常巨大的发展潜力。二代、三代红外探测器正朝着大面阵、小间距、低成本的方向发展。由于大面阵探测器的制造难度很大, 减小像元间距是实现大面阵、超大

面阵( $2\text{k}\times 2\text{k}$ 、 $4\text{k}\times 4\text{k}$ )探测器的主要方法<sup>[1]</sup>。

像元间距的减小会导致读出电路打底层和钢柱尺寸缩小, 对钢凸点的尺寸和倒装互连技术提出了挑战<sup>[2]</sup>, 对于钢柱生长工艺也是如此。由于互连后探测器的光电流信号要通过钢连接引出, 所以钢柱生长质量的好坏会影响探

收稿日期: 2022-11-18

作者简介: 张鹏(1976-), 男, 河南郑州人, 高级工程师, 主要从事红外探测器器件工艺研究。

E-mail: zp3007@126.com

测器最终的整体性能。

为了保证互连的成品率,需要在红外探测器或者读出电路上制备出具有一定高度且均匀性好的钢凸点<sup>[3]</sup>。对于像元间距是 25  $\mu\text{m}$  和 15  $\mu\text{m}$  的钢柱生长工艺,湿化学剥离之后的钢柱高度足够高,且高度差异不大。但是当红外探测器的像元间距减小到 10  $\mu\text{m}$  时,采用常规剥离方法的钢柱生长工艺就会有一些问题。钢柱生长完成之后,剥离光刻胶后的钢柱高度不够,并且高度差异大,给互连工艺增加了难度,由此也降低了互连合格率。

在钢柱生长工艺中,钢柱高度除了与钢蒸发的工艺条件有关之外,还与钢柱光刻的条件、像元间距大小等因素存在一定关联。本文通过实验分析像元间距的大小对钢柱高度的具体影响,并研究如何减少和消除这种影响。

### 1 不同像元间距的钢柱生长实验

钢柱生长的工艺流程如下:在读出电路或者芯片的表面进行光刻;光刻好钢柱孔,再将其放入钢蒸发设备进行钢柱生长。生长完成后,进行湿化学剥离工艺,去除读出电路或者芯片表面的光刻胶及多余的钢膜层,留下钢柱。

本文选取 3 个实验片,分别光刻上不同的图形。每个图形的像元间距不同,分别为 25  $\mu\text{m}$ 、15  $\mu\text{m}$  和 10  $\mu\text{m}$ ;其余的条件都相同。在实验片上完成电极打底层之后再行钢柱孔光刻。光刻胶的厚度设定为 9  $\mu\text{m}$ ,钢柱光刻孔的直径分别设定为 20  $\mu\text{m}$ 、12  $\mu\text{m}$  和 5  $\mu\text{m}$ 。光刻完成后进行钢蒸发工艺。该工艺的条件如下:真空度为  $2.2 \times 10^{-4}$  Pa,样品盘的温度为 0 $^{\circ}\text{C}$ ,蒸发电流为 400 A,蒸发速率为 30  $\text{\AA}/\text{s}$ ,蒸钢的厚度为 6  $\mu\text{m}$ ,工艺时间为 33 min。

钢蒸发完成之后,取出实验片,用扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)观察钢膜层的表面形貌;随后利用聚焦离子束(Focused Ion Beam, FIB)技术将钢柱光刻孔从上向下垂直切开一部分,并用 SEM 观察钢柱光刻孔切开以后的内部详细结构。接着采用湿化学剥离工艺去除实验片表面的钢膜层,留下钢柱,然后测量钢柱的高度。

这三个实验片的钢膜层表面形貌如图 1、图 2 和图 3 所示;钢柱光刻孔被切开后的截面形貌如图 4、图 5 和图 6 所示。通过对比以上图片可以看出:

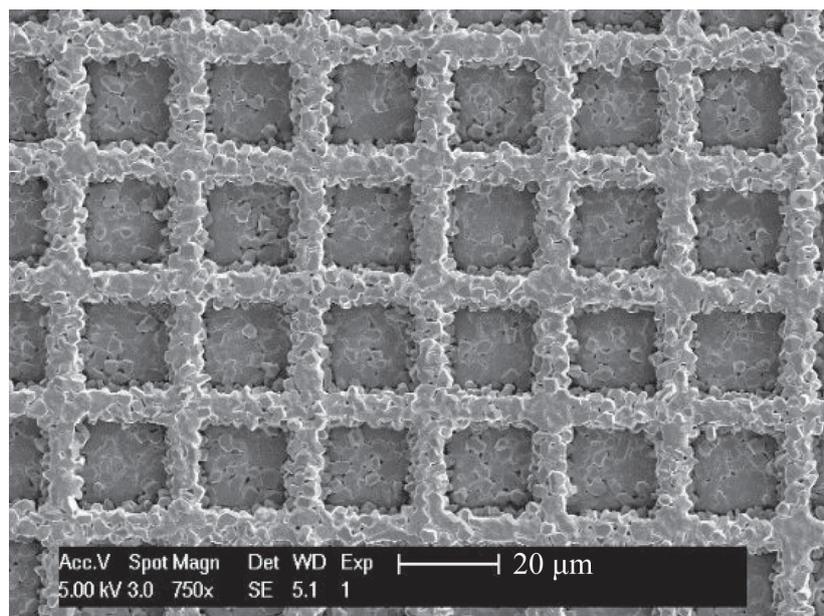


图 1 表面形貌图(像元间距为 25  $\mu\text{m}$ )

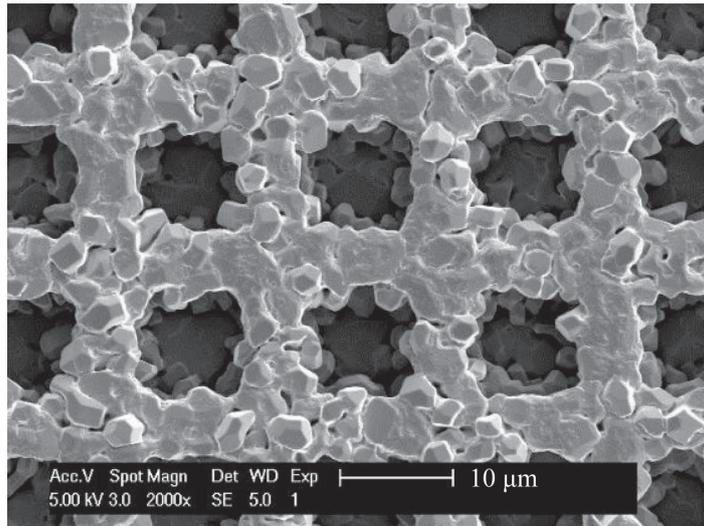


图 2 表面形貌图(像元间距为 15 μm)

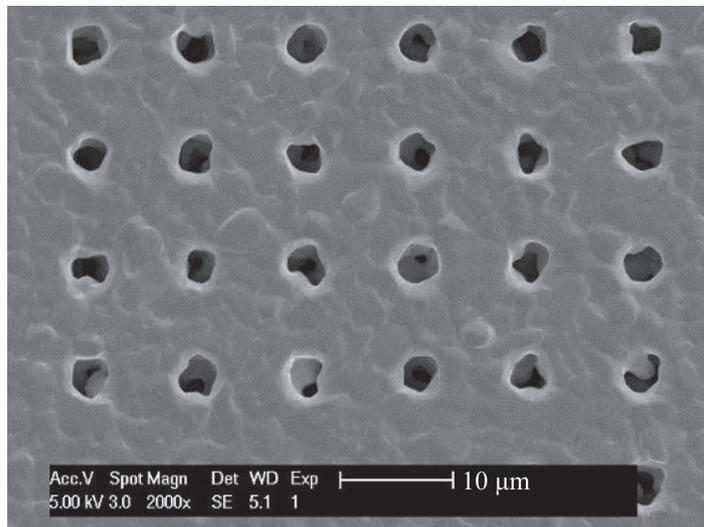


图 3 表面形貌图(像元间距为 10 μm)

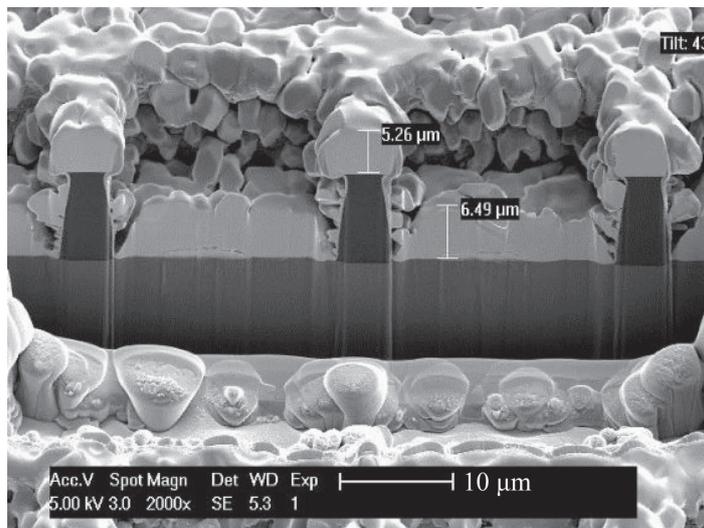


图 4 截面形貌图(钢柱光刻孔直径为 20 μm)

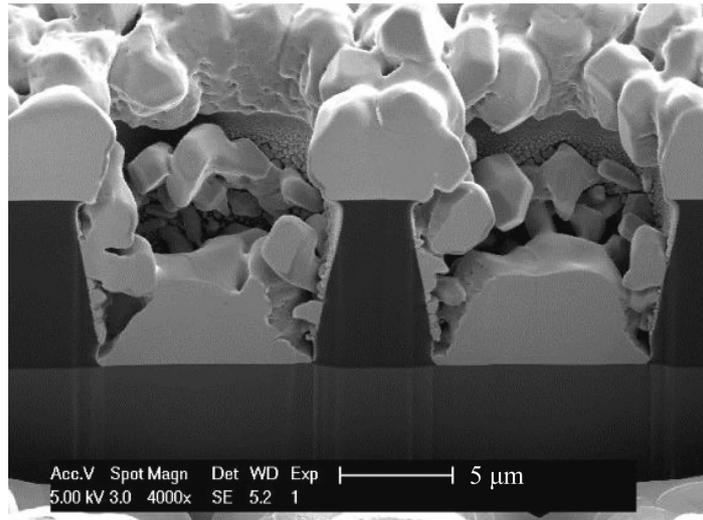


图 5 截面形貌图(钢柱光刻孔直径为 12  $\mu\text{m}$ )

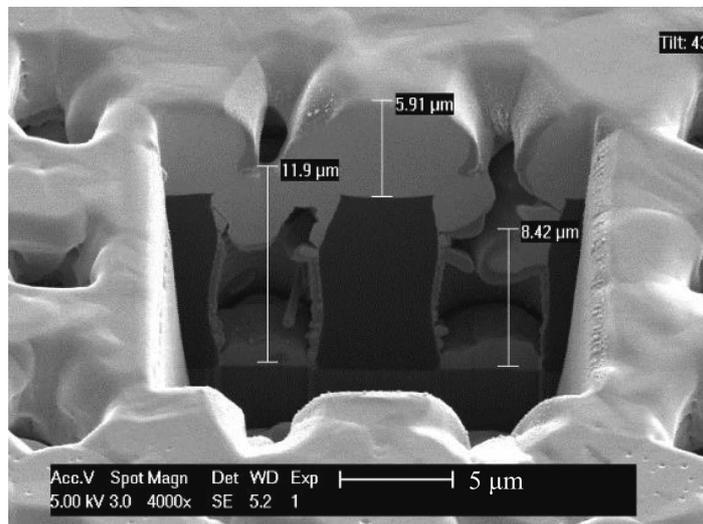


图 6 截面形貌图(钢柱光刻孔直径为 5  $\mu\text{m}$ )

(1)对于不同像元间距的实验片,钢膜层表面形貌图的差异很大。像元间距为 25  $\mu\text{m}$  和 15  $\mu\text{m}$  的实验片的钢柱孔开孔形状基本正常;像元间距为 10  $\mu\text{m}$  的实验片的钢柱孔开孔变得很小,形状也成了不规则的圆形。

(2)在截面形貌图中,深色部分是光刻胶,浅色部分是钢层,钢膜层主要沉积在钢柱孔底部和光刻胶顶部。钢柱孔底部的钢膜层厚度比光刻胶顶部的薄一些,截面呈上窄下宽的正梯形,这是因为在钢沉积时受到顶部钢遮挡的影响。而不同像元间距实验片的钢柱孔底部钢膜层的厚度、形貌存在差异。

(3)光刻胶顶部的钢膜层除了在垂直方向

生长之外,还发生了水平方向的生长。水平生长的钢膜层像个“帽子”一样盖在光刻胶顶部,对钢柱孔内的钢沉积产生遮挡的影响(见图 5)。在钢膜层不断沉积的过程中,“帽子”会越来越大,对钢柱孔底部钢沉积的遮挡影响也会越来越大。

(4)把光刻胶和多余的钢膜层用湿化学工艺剥离干净后,留下钢柱。通过测量获得钢柱的高度。不同像元间距实验片最后的钢柱高度也不相同,25  $\mu\text{m}$  时钢柱高度最高,10  $\mu\text{m}$  时钢柱高度最矮(具体数值将在后文分析)。

## 2 结果分析

在钢蒸发过程中,沉积到样品表面的钢原

子团一部分直接凝结, 还有一部分在钢的表面上迁移。钢原子团的迁移过程会导致原子团之间相互碰撞、合并并最终凝结<sup>[4]</sup>。由于芯片表面存在钢柱光刻孔而并不是一个平面, 所以在钢沉积过程中, 钢原子团有一部分沉积在钢柱光刻孔底部, 还有一部分沉积在光刻胶的顶部。

在钢膜层厚度增加的同时, 沉积在光刻胶顶部的钢膜层还会以一定的速度向水平方向生长。这个速度与钢的垂直生长速度、蒸发钢离子的入射角、光刻胶表面的结构特性等多种因素有关。这种水平生长会阻挡钢原子团向钢柱光刻孔内部的沉积, 而只有沉积到光刻孔底部的钢膜层才能形成钢柱, 所以这种水平方向的钢生长对钢柱沉积是不利的。

图 7 为钢柱光刻孔内的示意图。其中,  $G_V$  为钢膜层的垂直生长速度;  $G_H$  为光刻孔顶部的钢水平生长速度;  $d$  为钢柱顶部的直径;  $D$  为钢柱底部的直径, 其大小等于钢柱光刻孔的开孔直径;  $h$  为钢柱的高度;  $h_{max}$  为钢柱的最大高度。在钢蒸发的过程中, 刚开始时钢还没有产生遮挡, 所以钢柱光刻孔内的钢柱直径与光刻孔的开孔直径相等。蒸发过程中, 钢膜层

的厚度逐渐增大, 而钢在水平方向上不断生长, 产生了遮挡; 钢柱光刻孔的开孔直径逐渐减小, 光刻孔内的钢柱顶部直径也逐渐减小; 随着钢膜层厚度的不断增大, 钢柱光刻孔的开孔最终将闭合<sup>[5]</sup>。从以上分析能看出, 钢柱的最终高度  $h_{max}$  跟  $G_V$  和  $G_H$  的比值有关。

通过显微镜测量, 获得了不同实验片的钢水平生长宽度  $\omega$ , 并计算出了钢水平方向的生长速度  $G_H$  (结果见表 1)。从表 1 中可以看出, 虽然像元间距、光刻孔直径不相同, 但是钢水平生长的宽度接近, 钢水平生长速度也相差不大。

在钢生长过程中, 钢柱光刻孔顶部的钢朝水平方向不断生长, 光刻孔的开孔直径逐渐变小, 进入到孔内部的钢也会逐渐减少。钢生长结束后的钢柱光刻孔与最开始的光刻孔相比, 直径变小了, 光刻孔开孔的面积也变小了, 有一部分面积被钢堵塞了。假定蒸钢结束后, 钢柱孔开孔的面积与蒸钢前钢柱孔开孔面积的比值为  $P$ , 那么  $P$  就可以用式(1)算得:

$$P = \left(\frac{D - 2\omega}{D}\right)^2 \quad (1)$$

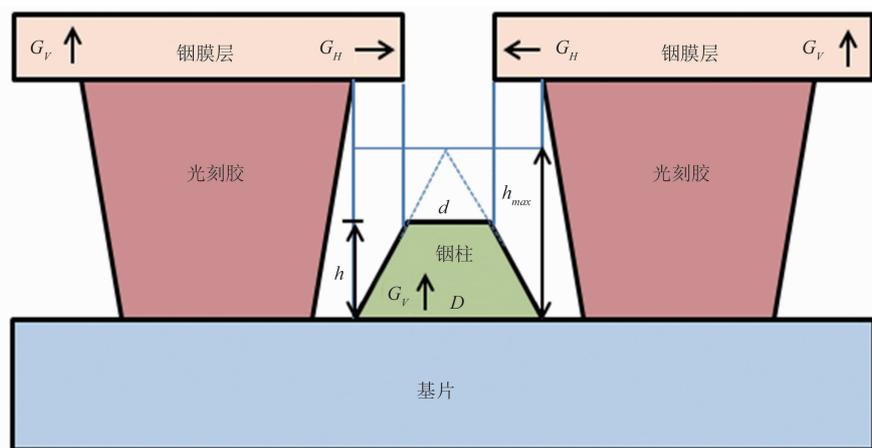


图 7 钢柱光刻孔内的示意图

表 1 不同像元间距实验片的钢水平生长速度

像元间距/ $\mu\text{m}$	光刻孔直径 $D/\mu\text{m}$	钢水平生长宽度 $\omega/\mu\text{m}$	钢水平生长速度 $G_H/(\text{\AA}/\text{s})$
25	20	1.80	9.00
15	12	1.67	8.35
10	5	1.67	8.35

式中,  $D$  为钢柱光刻孔的直径;  $w$  为钢水平生长宽度。

$D$ 、 $w$ 、 $P$  和剥离之后的钢柱高度  $h$  之间的关系如表 2 所示。可以看出,  $D$  越大,  $P$  就越大;  $D$  越小,  $P$  就越小。  $P$  越小, 蒸钢后钢柱孔的面积越小, 钢蒸发过程中进入钢柱孔内的钢越少, 最终形成的钢柱高度就越低。

本次实验中, 像元间距为  $25\ \mu\text{m}$  的实验片的光刻孔直径为  $20\ \mu\text{m}$ ,  $P$  为  $67\%$ , 钢柱的高度最高 ( $5.80\ \mu\text{m}$ )。像元间距为  $10\ \mu\text{m}$  的实验片的光刻孔直径为  $5\ \mu\text{m}$ ,  $P$  仅为  $11\%$ ; 光刻孔在蒸钢结束后, 大部分面积被遮挡, 所以钢柱的高度最低 ( $1.97\ \mu\text{m}$ ), 无法满足互连的要求。对于  $10\ \mu\text{m}$  以下的像元间距 (如  $7\ \mu\text{m}$ ), 要获得满足互连要求的钢柱高度, 则会更加困难。

### 3 解决办法

针对  $10\ \mu\text{m}$  及以下像元间距的大面阵红外探测器钢柱高度不够的问题, 通过长期实验得到以下几个解决办法。

#### 3.1 增加钢蒸发的速率

在蒸钢过程中增大蒸发速率后, 从钢材料表面逸出的钢原子所携带的能量更大, 钢原子就具有更强的迁移能力, 能够移动得更远, 即钢原子容易迁移到能量状态更低的位置。同时, 随着蒸钢速率的提高, 钢原子的临界核心半径和临界形核自由能减小, 形成更细密的膜层组织, 有助于提高钢膜层的质量。

#### 3.2 增大钢柱光刻孔的直径

像元间距一旦确定就无法更改, 但是钢柱光刻孔的直径在一定范围内是可以调整的。从前文的分析来看, 增大钢柱光刻孔的直径, 对于增加钢柱高度是有帮助的。在  $10\ \mu\text{m}$  像元间距的实验中, 钢柱光刻孔的直径为  $5\ \mu\text{m}$ , 剥离

后钢柱的高度比较矮。如果增大钢柱光刻孔的直径 (达到  $7\sim 8\ \mu\text{m}$ ), 那么在钢蒸发过程中进入到光刻孔内的钢会更多, 剥离后钢柱的高度就能增加。但是, 增大钢柱光刻孔直径的方法也会对光刻提出一些更高的要求。

#### 3.3 减小光刻胶的厚度

从前面实验中垂直切开的截面形貌图来看, 光刻胶的厚度较厚, 导致钢柱光刻孔的深宽比过大, 对剥离后的钢柱高度产生不利的影响。如果减薄光刻胶的厚度, 减小钢柱光刻孔的深宽比, 将有利于钢柱的沉积。但是, 若光刻胶的厚度过薄, 则会导致后续湿化学剥离工艺困难。因此, 光刻胶的厚度应通过实验选取最优值, 既有利于钢柱的沉积, 又不会影响湿化学剥离工艺。

在采用上述几种方法后, 重新开展了一次钢柱生长实验。像元间距设定为  $10\ \mu\text{m}$ , 钢柱光刻孔的直径增大到  $7\ \mu\text{m}$ , 光刻胶的厚度减小到  $7\sim 8\ \mu\text{m}$ , 并增大钢蒸发的速率。蒸钢工艺完成后, 用 SEM 观察钢表面形貌, 并用 FIB 将钢柱光刻孔垂直切开, 观察其内部结构 (结果见图 8 和图 9)。

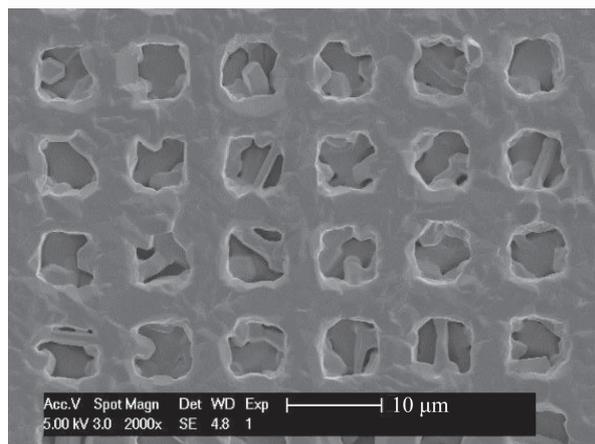
从图 8 和图 9 中可以看出, 钢柱光刻孔存在堵塞的情况, 但比上次实验明显好转; 这次钢柱光刻孔底部的沉积比较好。经测量, 钢水平生长宽度为  $1.78\ \mu\text{m}$ , 与上次实验结果接近;  $P$  为  $27\%$ , 优于上次实验中钢柱光刻孔直径为  $5\ \mu\text{m}$  时的结果; 剥离后钢柱的高度为  $5.05\ \mu\text{m}$ , 也优于上次实验的结果。

### 4 结束语

本文详细研究了在不同像元间距 ( $25\ \mu\text{m}$ 、 $15\ \mu\text{m}$ 、 $10\ \mu\text{m}$ ) 的条件下, 钢柱生长工艺完成后钢膜层表面的形貌和钢柱光刻孔截面的内部微观结构。在钢沉积的过程中, 钢原子团除了

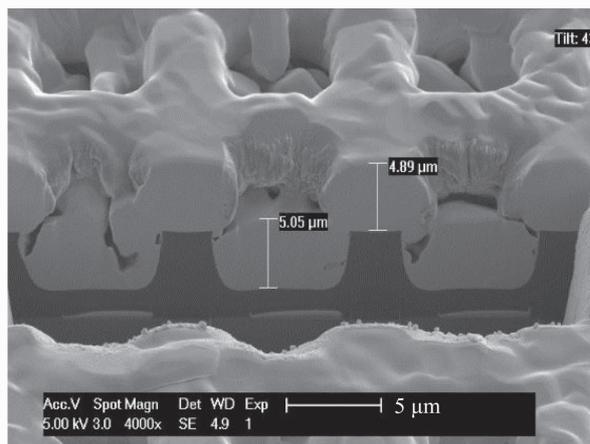
表 2 不同光刻孔直径时的蒸钢前后钢柱孔面积比值和剥离后钢柱高度

光刻孔直径 $D/\mu\text{m}$	钢水平生长宽度 $w/\mu\text{m}$	$P$	剥离后钢柱高度 $h/\mu\text{m}$
20	1.80	$67\%$	5.80
12	1.67	$52\%$	4.40
5	1.67	$11\%$	1.97

图 8 表面形貌图(像元间距为 10  $\mu\text{m}$ )

垂直生长之外,还在光刻胶的顶部以一定的速率朝水平方向生长。这种水平方向的生长会在光刻胶顶部形成一个“帽子”而产生遮挡,不利于光刻孔内的钢沉积,造成钢沉积量减少,剥离后的钢柱变矮。这在 25  $\mu\text{m}$  和 15  $\mu\text{m}$  像元间距时对钢柱高度的影响并不大;但在 10  $\mu\text{m}$  像元间距时对钢柱高度的影响会很大。

针对 10  $\mu\text{m}$  及以下像元间距的钢柱高度问题,给出了几种解决方法:增大蒸发速率、增大钢柱光刻孔直径和减小光刻胶厚度等。在新实验中使用了这几种方法,取得了比较好的结果:剥离后钢柱高度为 5.05  $\mu\text{m}$ 。下一步将重点研究更小像元间距(如 7.5  $\mu\text{m}$  或 5  $\mu\text{m}$ )条件下钢柱的生长情况、表面形貌,钢柱高度均匀性以及它们对互连工艺的影响。

图 9 截面形貌图(钢柱光刻孔直径为 7  $\mu\text{m}$ )

### 参考文献

- [1] 张轶. HgCdTe 红外探测器芯片微管电极的制备与应用 [J]. 激光与红外, 2019, 49(11): 1350-1352.
- [2] 谢珩. 百万像素级红外焦平面器件倒装互连工艺研究 [J]. 激光与红外, 2017, 47(3): 319-321.
- [3] 杨超伟. 钢凸点对倒装互连影响的研究 [J]. 红外技术, 2016, 38(4): 310-313.
- [4] 田民波. 薄膜技术与薄膜材料 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [5] 张鹏. 10  $\mu\text{m}$  小间距红外探测器的钢柱生长研究 [J]. 激光与红外, 2020, 50(10): 1219-1221.