

护作用。

图 3.4 中表示掩膜层厚度与在金属电镀过程中的电场，以及最后电镀层金属形状的关系。掩膜层的厚度比电镀层金属厚，在电镀过程中，电镀金属的电力线近似均匀垂直电镀金属表面，指向电镀液。因而，金属能够均匀的沉积在电镀金属的表面，如图 3.8 之(a)所示，最后电镀层也是均匀的覆盖在电镀区域表面。而掩膜层较薄，开始在电镀液中电镀金属时，电力线也会近似均匀的垂直电镀金属指向电镀液，金属均匀沉积在电镀金属的表面，但到电镀金属层的厚度超过掩膜层厚度时，电力线在电镀金属和掩膜层交界处电力线发散，如图 3.4 之 (b) 所示，这导致电镀金属在交界处产生一个很粗的半柱形棱角，该棱角很难在后续工艺中去除。这增大器件设计的电镀区域面积，影响器件的特性，以及美观等等。因而，器件在设计过程中，掩膜层的厚度必须比电镀层（目前的制作空气桥的电镀层厚度大概为 $1.5\text{-}3\mu\text{m}$ ）高出至少 $0.5\mu\text{m}$ 。

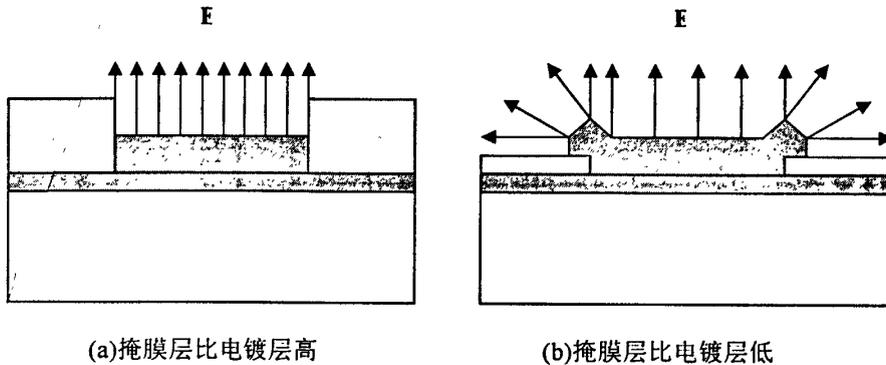


图 3.4 掩膜层厚度与电镀金属的关系

上面介绍了两层光刻胶作用的不同，因而这两种作用的光刻胶在烘烤光刻胶层时也应该注意其特点调整其烘烤时间。对于牺牲层光刻胶：将显影后的牺牲层放到烘烤炉或电热板上进行高温烘烤，使牺牲层的边缘光滑，出现一定的弧度，光滑带弧度的牺牲层边缘，确保后续制备的空气桥在牺牲层的边缘处不会出现断裂。对于掩膜层的光刻胶：要采用低温烘烤，减短烘烤时间，使光刻胶的边缘陡峭、垂直，确保电镀层的边缘整齐，垂直。

用光刻胶，必然就涉及到对准光刻。AlGaIn/GaN HEMT 微波功率器件引入了空气桥，器件的工艺复杂度增加。而牺牲层和掩膜层的光刻胶厚度比较大，光刻过程中的对准套刻难度比较大(特别是采用接触式曝光机曝光)，套刻时出现很小的误差，都有可能在后续制备空气桥的工艺中被放大，从而影响器件的成品率。因而在设计版图中要有高质量的对位标记，需用采用光刻胶时也要有较高透光性的光刻胶，或者采用对准性能更好的光刻设备进行光刻。

曝光时间精确控制。牺牲层和掩膜层光刻胶的厚度是根据实际设计的要求改

变而改变的，在牺牲层曝光光刻桥墩过程中必须精确控制好曝光的时间，确保不会因为过曝光而显影后的牺牲层产生毛刺，如图 3.5。或者是因为曝光时间不足而显影后桥墩位置的光刻胶没有去除干净。光刻胶曝光的时间应该确保光刻胶刚刚曝透，要得到整齐完整地边缘，而不过曝光，产生如图 3.6 的边缘光滑牺牲层。

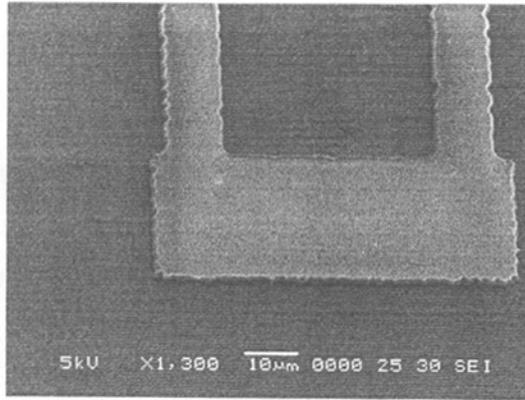


图 3.5 过度曝光的牺牲层 SEM 照片

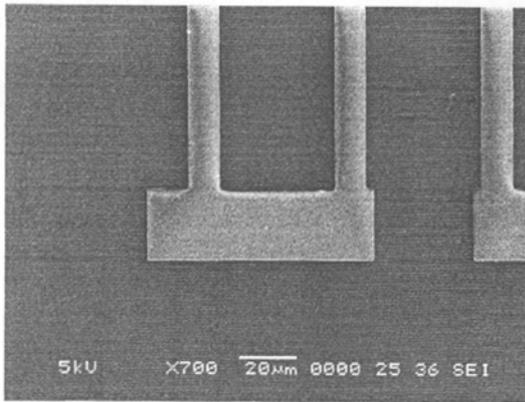


图 3.6 正常曝光的牺牲层 SEM 照片

3.1.2 起镀层的沉积和电镀

起镀层的作用是为后续电镀工艺起导电作用，因而起镀层金属材料的低电阻率，要求与器件电极的金属粘附稳定、坚固、易于腐蚀去除。

目前起镀层的沉积主要有两种方法：一为蒸发，一为溅射^[3,8]。其中，蒸发是指在一个真空容器(真空室)，把所要蒸发的金属加热到相当高的温度，使其原子或分子获得足够的能量，脱离金属材料表面的束缚而蒸发到真空中成为蒸汽原子或分子。当他们在飞行途中遇到待沉积的基片时，就沉积在基片表面形成一层薄的金属膜。而溅射是与气体辉光放电现象密切相关的一种薄膜沉积技术。在高真空室内充入放电所需要的惰性气体；在高空电场作用下气体放电，产生大量的离子，这些离子被强电场加速形成高能离子流，去轰击源材料(阴极或靶)；由于离子的

动能超过材料中原子和分子的结合能，使材料的原子或分子溢出，以高速溅射到阳极基片上，沉积薄膜。

蒸发和溅射方法沉积起镀层有各自的特点^[3.8]。采用蒸发方法：蒸发的设备简单，沉积层均匀，工作效率高，但其台阶覆盖性能差，当桥下牺牲层的边缘坡度较大时，用蒸发方法沉积起镀层，在桥墩陡坡处金属层很薄或者断裂，电镀金属后空气桥的桥墩会变薄或者断裂，如图 3.7 所示。

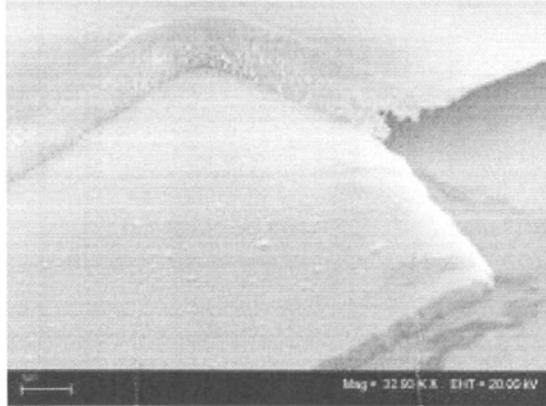


图 3.7 采用蒸发方法制作起镀层的空气桥（引自 Cabacungan J 论文^[3.8]）

采用溅射方法：可以沉积较难容的材料，薄膜质量比蒸发膜好，粘附性更好，台阶覆盖性能好，但大面积沉积膜的均匀性较差，沉积效率低。利用溅射起镀层的，台阶覆盖性很好，制作的空气桥墩也很均匀，如图 3.8 所示。

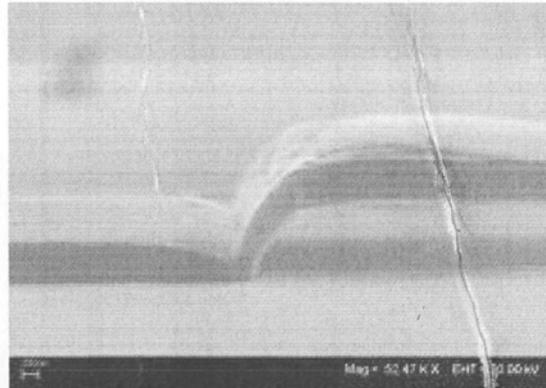


图 3.8 采用溅射方法制作起镀层的空气桥（引自 Cabacungan J 论文^[3.8]）

上面介绍了两种沉积的方法：蒸发和溅射，都可用来沉积金属和绝缘介质等。但上面介绍的两种方法都有共同的缺点：沉积以全面沉积的方式进行，材料的利用率很低，沉积速度慢，因而很难利用这两个工艺来沉积厚度较大的金属。因而，就得引入电镀工艺来加厚空气桥。

电镀(electroplating)被定义为一种电沉积过程^[3.9](electrode-position process)，是利用电极通过电流使金属附着于物体表面上，电镀的目的是在基材上镀上金属镀

层。电镀大部分在液体下进行，而且绝大部分又都在水溶液中电镀。约有30种的金属可由水溶液进行电镀，由水溶液电镀的金属有：铜Cu、镍Ni、铬Cr、锌Zn等。有些金属必须由非水溶液电镀如锂、钠、钾、铍、镁等。

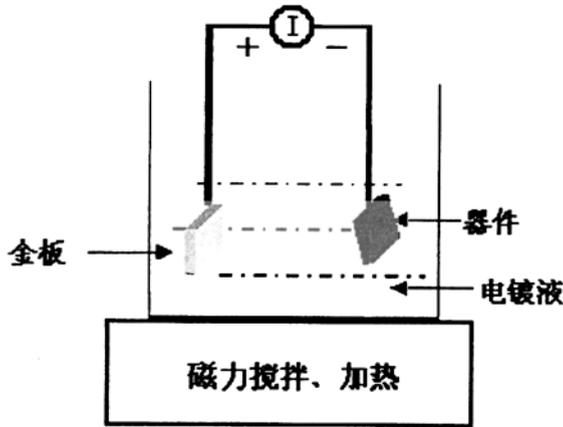


图3.9 电镀系统示意图（引自王冲博士论文）

组成一个电镀系统需要外部电路、可调直流电源、导线、电流计、电压计、阴极或镀件、挂具、电镀液、阳极、镀槽等。图3.9是一个简单的电镀系统示意图。在电镀中，一般都仅使用直流电流，直流电流中电子向一个方向流通，所以可以电沉积金属。但在有些特殊情况会使用交流电流或其它特殊电流，用来改善镀层光层、降低镀层内应力、镀层分布或是用于电解清洗等。

金属阳极分为溶解性及非溶解性阳极。溶解性阳极用于电镀中是为补充溶液中电镀所消耗的金属离子，是用一种金属或合金铸成、滚成或冲制成不同形状装入阳极篮内。非溶解性电极是在电镀过程中起导电作用，而不补充电镀液中的金属离子，电镀液中的金属离子补充的是靠定时、定量用化学方法溶解金属溶解进行金属补充。金属阴极是镀浴中的负电极，金属离子还原成金属形成镀层及其它的还原反应，如氢气形成于金属阴极上。

电镀效果从以下几个方面评价：1.密着性，指镀层与基材之间结合力，密着性不佳则镀层会有脱离现象；2.致密性，指镀层金属本身之间的结合力，晶粒细小，无杂质则有很好的致密性；3.连续性，指镀层是否有孔隙；4.均一性，指电镀浴能使镀件表面沉积均匀厚度的镀层之能力；5.美观性，镀件要具有美感，必须无斑点，气胀缺陷，表面需保持光泽、光滑；6.应力，镀层形成过程会残留应力，会引起镀层裂开或剥离；7.物理、化学机械特性，如硬度、延性、强度、导电性、传热性、反射性、耐腐蚀性、颜色等。

3.1.3 腐蚀工艺

在空气桥的制作过程中，主要有起镀层的非电镀区域需要去除实现电隔离，

和两层胶，即掩膜层和牺牲层光刻胶需要采用去胶液溶解，而形成空气桥。

起镀层的去除。目前起镀层的去除主要有两种方法：一是直接掩膜层去除干净的基片用腐蚀金属的溶液中，空气桥和起镀层同时腐蚀，因为空气桥金属远厚于起镀层，当起镀层腐蚀完全时，空气桥的电镀层只有少量被腐蚀，最后只剩下空气桥和电镀加厚区域的金属，以达到去除起镀层的目的。二是用剥离的方法去除起镀层，把基片泡到丙酮中，然后采用超声剥离，将起镀层剥离去除干净。采用这两种方法去除起镀层，有着各自的特点。采用腐蚀的方法去除起镀层，其工艺过程简单，但在腐蚀去除起镀层金属的过程中，也对电镀金属有一定的破坏作用，由于电镀金属的致密度不如蒸发或溅射方法沉积的致密，所以在腐蚀过程中，空气桥会被腐蚀更多的电镀金属，同时也会破坏电镀金属的光亮度。采用第二种方法剥离去除起镀层金属，此过程对电镀金属没有起腐蚀作用，但在剥离去除起镀层的过程中，在电镀的拐角处，较难剥离干净，而且超声对器件的电极金属等有一定的损伤。

掩膜层和牺牲层的去除。一般掩膜层的去除的时候必须保证牺牲层还完好无损的保护这栅金属以及非电镀区域，所以选用掩膜层光刻胶的去除方式应与牺牲层光刻胶的去除方式不同或者采用同一种光刻胶能，掩膜层经过一定的处理后去除，而牺牲层光刻胶得到很好的保护而没被腐蚀掉。

§3.2 改进的空气桥制造方法介绍

AlGaIn/GaN HEMT 微波大功率器件的制造有其自己特定的设备和工艺，在实验过程中结合我们实验室的实际情况，对空气桥的具体工艺进行改进，使得更适合于 AlGaIn/GaN HEMT 微波大功率器件的制作。

3.2.1 AlGaIn/GaN HEMT 拱形牺牲层的制作

空气桥的桥面越高其寄生电容越低（一般空气桥的高度为 2~6 μm ），而空气桥的高度主要是由牺牲层的厚度决定的，要得到越低的寄生电容就必须越厚的牺牲层，这给精确光刻带来不小的难度。同时，光刻后的牺牲层的台阶高度差很大，在沉积起镀层金属时很难均匀地覆盖台阶，特别是采用蒸发工艺时该问题尤为突出。考虑 AlGaIn/GaN HEMT 可能应用的极端条件，结合第二章空气桥的受力分析，提出一种高可靠性空气桥结构，即拱形结构。所以牺牲层就必须采用对拱形空气桥结构起决定作用的拱形牺牲层。

在拱形牺牲层的制作中，我们采用了性能更好的复合胶结构。底层用剥离胶（LOP5A），软烘(soft bake)温度 160 $^{\circ}\text{C}$ ，上层用光刻胶（EPI622），软烘温度 85 $^{\circ}\text{C}$ 。

利用了不同性质的光刻胶，在相同条件下烘烤光刻胶变化不同，以及不同性质光刻胶去胶方法不同的特性，来制作拱形牺牲层，增强对栅条和非电镀区金属的保护作用。用低于剥离胶的软烘的温度烘烤牺牲层时，桥区牺牲层下层剥离胶变化不大，而该温度高于上层的光刻胶软烘的温度，光刻胶在高温作用下，光刻胶体积膨胀椭圆化，很容易形成拱形牺牲层。

实验中，均匀的光刻胶层有利于降低光刻的难度以及提高曝光的成品率。本文采用多次高速甩胶，确保厚的牺牲层光刻胶的均匀分布。第一层用 4000r/min 的速度涂上一层剥离胶 (LOP5A)，用 160℃ 软烘 20min。第二层用 4000r/min 的速度涂上一层光刻胶 (EPI622)，用 85℃ 软烘 5min。第三层用 4000r/min 的速度涂上一层光刻胶 (EPI622)，用 85℃ 软烘 5min。其中，软烘 (soft Bake) 的主要目的是要移去光刻胶涂布后，光刻胶内残留的溶剂。此步骤将对后续的参数有着举足轻重的影响，如光刻胶附着力、溶解速率，线宽控制，以及光刻胶图形的定义。软烘温度较低，表示光刻胶含溶剂成分较多，此时显影速度快，对于线宽的控制较不容易，反之，若光刻胶内溶剂成分较少，相对地需要更大的曝光能量，但对线宽的控制较佳。

用定义桥墩和电镀区域的光刻版曝光制作牺牲层。然后分别采用 85℃、100℃、120℃、140℃ 各烘烤 10min。烘烤的目的是在移去剩余的溶剂以及水汽，使光刻胶内为溶解的感光化合物和树脂间结合更紧密，或者产生再分布。利用台阶仪 XP-1 测出各个温度下，经过 10min 烘烤，桥区牺牲层的横向表面形状变化，如图 3.10 所以。

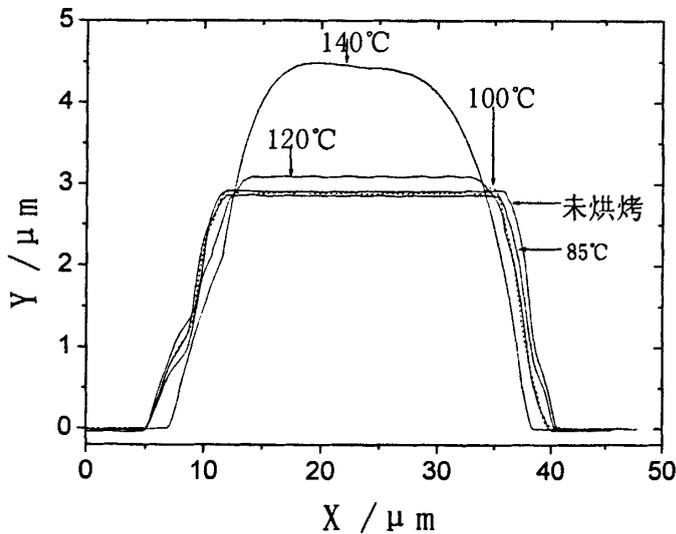


图 3.10 不同温度烘烤的牺牲层图形

从图 3.10 中看出，经过 10min 的烘烤，采用 85℃ 烘烤和 100℃ 烘烤的两曲线图形与未烘烤的牺牲层图形相似，横截面都为梯形，但略微小于未烘烤的图形；

采用 120℃ 烘烤, 牺牲层的两顶角变光滑, 其高度也稍微高出未烘烤的牺牲层图形, 采用 140℃ 烘烤, 牺牲层变成拱形形状, 其高度约高出原来为烘烤的牺牲层 50%, 实验中采用 150℃ 烘烤, 牺牲层炭化发黑, 在后面去除牺牲层的过程中有较大的难度。复合层牺牲层烘烤后的变厚相当于制作过程中牺牲层的光刻胶可以变薄, 而减小光刻等的难度。

用 10min 烘烤桥区得到的牺牲层形状, 用 85℃ 和 100℃ 烘烤, 牺牲层的高度有微小的下降, 主要是上层的光刻胶的水分和溶剂被烘干, 牺牲层略有收缩, 引起高度的微小的下降。用 120℃ 烘烤, 该温度使得上层的光刻胶有比较明显收缩, 表面稍微向上凸起, 主要是牺牲层光刻胶中水汽, 溶剂等在较高的温度作用下气化, 引起光刻胶体积的稍微膨胀。用 140℃ 烘烤, 光刻胶在高温作用下变软, 同时水分气化体积膨胀, 在表面张力的作用下牺牲层的水平方向向中间迅速收缩, 而左右两边压力的作用下, 牺牲层在垂直方向上突出。最下面的剥离胶层所需的软烘温度较高, 在 140℃ 的温度和上层光刻胶的作用下, 剥离胶出现很小的收缩量, 而得到很好的拱形牺牲层。牺牲层的高度从烘烤前的 2.9 μm 到烘烤后的 4.5 μm , 比烘烤前度高出了 50%。

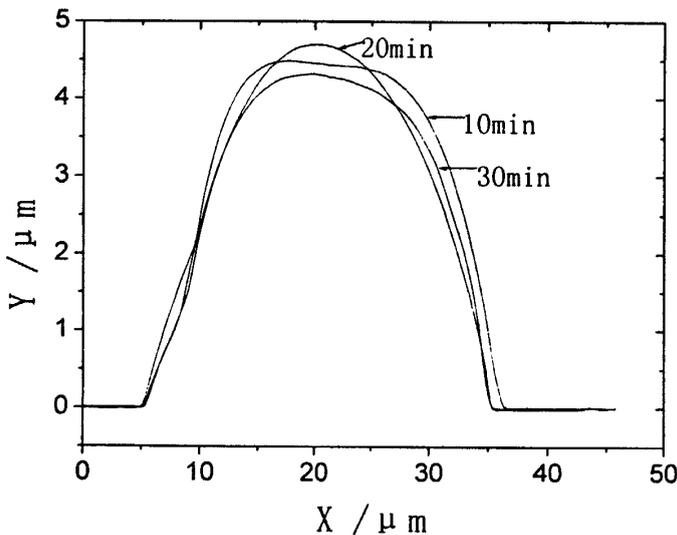


图 3.11 140℃ 高温烘烤不同时间牺牲层的变化

图 3.11 是在 140℃ 下分别烘烤 10min、20min、30min 的桥区牺牲层图形。用 10min 烘烤的牺牲层呈现出两个顶角为圆弧形的梯形状。主要是烘烤时间较短, 而光刻胶层较厚, 牺牲层的中间还没有完全的受热均匀, 完全软化、膨胀充分, 在短时间内没能产生高质量的拱形。用 20min 烘烤, 牺牲层呈现出最好的对称拱形, 其高度最高, 从烘烤前的 2.9 μm 到烘烤后的 4.8 μm , 比烘烤前高出 60%。主要是烘烤时间长短合适牺牲层的各个部分受热均匀, 其受力对称均匀, 在上层光刻胶在

水汽和有机溶剂的作用下体积膨胀，且有表面张力的作用，从而形成了很好的拱形牺牲层。如图 3.12 的 SEM 相片所示。用 30min 烘烤，牺牲层也有着很好的拱形形状，但高度比 20min 和 10min 烘烤的有明显的下降。在显微镜下观察，表面发黑，有被炭化的迹象，特别是上层光刻胶的边缘部分被烧黑，使得牺牲层的高度反而降低。140℃比底层的剥离胶的软烘温度低，但剥离胶受到上层光刻胶张力的作用下向里收缩，其宽度有少量减少。140℃下经过三个不同时间的烘烤后牺牲层的宽度是基本相同，比烘烤前时略小 10%。可以认为，牺牲层的宽度随烘烤温度增加而变窄，而牺牲层的高度则随着时间增加先增后降。图 3.12 为用 140℃烘烤 20min 的桥区拱形牺牲层 SEM 照片，可以看出桥区的牺牲层有着良好的拱形，且表面光滑，是制作拱形空气桥的理想条件。

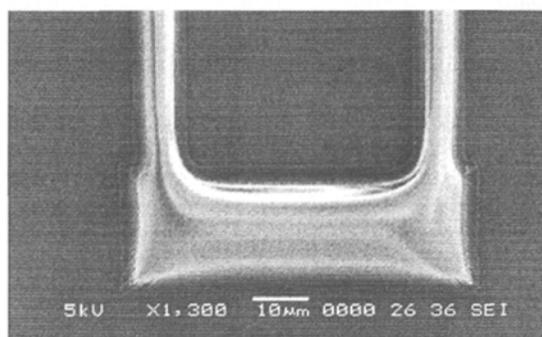


图 3.12 140℃20min 烘烤的拱形牺牲层 SEM 相片

下表 3.1 是采用不同比例、不同厚度的胶在 135-145℃，烘烤 20min 的情况：

表 3.1 各种比例、不同厚度复合胶在各个温度下烘烤情况

序号	LOP5A %	EPI622 %	重厚度 µm	烘烤温 度℃	烘烤后 高 µm	是否为 拱形
1	40	60	2	135	2.2	否
2	50	50	2	140	2.5	否
3	60	40	2	145	2.4	否
4	40	60	2.5	135	3.4	是
5	50	50	2.5	140	3.5	是
6	60	40	2.5	145	3.3	是
7	40	60	3.0	135	4.8	是
8	50	50	3.0	140	4.8	是
9	60	40	3.0	145	4.7	是
10	40	60	3.5	135	5.5	是
11	50	50	3.5	140	5.6	是

12	60	40	3.5	145	5.3	是
----	----	----	-----	-----	-----	---

实验中，旋涂复合胶的厚度低于 $2.5\mu\text{m}$ 时，桥区的牺牲层在烘烤以后得到两边突出的马鞍状结构，很难得到需要的拱形结构。当剥离胶的比例太低时，高温烘烤后，桥区牺牲层在上层光刻胶的作用下，收缩严重，而引起桥墩的移位，很难达到设计中所需的桥跨度，甚至引起桥底金属与桥墩的短接；剥离胶的比例过大时，烘烤以后牺牲层增高比例不大。在烘烤定型拱形桥的牺牲层时，温度太低，很难得到需要的拱形桥，即使长时间的烘烤能得到两个顶角圆滑的类梯形结构以后，但牺牲层基本上不会变高，而烘烤温度过高，上层的光刻胶容易变质而发黑，影响后续工艺中牺牲层的去除。

从表 3.1 的结果得出以下结论：1.旋涂的复合胶要超过一定的厚度，至少达到 $2.5\mu\text{m}$ ，但过厚的胶层会增加光刻的难度；2.复合胶中含剥离胶 LOP5A 的比例应在 40-60%，光刻胶 EPI622 的比例应该在 60-40%；3.烘烤温度可以在一定范围即 $135\text{-}145^\circ\text{C}$ 内波动，光刻胶(EPI622)的比例高，需用的烘烤温度相对低，而剥离胶 (LOP5A) 的比例高，选用的烘烤温度应该更高一些。

3.2.2 AlGaIn/GaN HEMT 起镀层的沉积和电镀区域的定义

牺牲层制作完成后，采用 O_2 等离子体打底膜，增强沉积起镀层金属的粘附性，然后再用 VPC-1100 电子束蒸发台沉积起镀层。

在制作 AlGaIn/GaN HEMT 微波大功率器件沉积源漏电极金属以及肖特基金属时，采用电子束蒸发沉积金属的方法，在剥离金属时能够得到整齐的边缘。沉积起镀层时，因为牺牲层采用了拱形结构，也可以采用电子蒸发的方法沉积起镀层，从而节约了溅射设备的成本。

前面的介绍中已经提过起镀层的作用。在起镀层金属的选择中，采用电阻率极低，且容易腐蚀的金属 Au，为了增强沉积金属跟电极表面金属的粘附强度和可靠性，在表面金属和沉积的 Au 中间加一层很容易腐蚀的 Ti。上面这两种金属都可以利用 VPC-1100 电子束蒸发台沉积，而 VPC-1100 电子束蒸发台能同时装四个源材料，所以 Ti 金属和 Au 金属能在一次装片过程中依次沉积。

Ti/Au 起镀层的厚度，主要决定了电镀时电极到个点的电阻，电极加电电镀时，决定了电镀时的均匀性。实验中采用的 Ti/Au 厚度基本上为 $5/95\text{-}20/80\text{nm}$ ，采用 VPC-1100 电子束蒸发台的沉积速率为 0.3nm/s 。过厚的起镀层浪费金属材料，增加腐蚀时间，而过薄的起镀层电阻太大，影响均匀性。

旋涂的光刻胶 EPI622 作为掩膜层要比设计中的电镀层厚出至少 $0.5\mu\text{m}$ ，但过厚的掩膜层也会影响后续的光刻。

然后用光刻版曝光，显影得到桥和桥墩，以及需要电镀加厚金属的区域。

3.2.3 AlGaIn/GaN HEMT 的电镀

电镀层金属对器件的质量有很大的影响，尤其与器件长期使用的可靠性和稳定性关系很大。要求电镀金属导电性能好，弹性小，稳定性好，容易与外接导线键合。所以选择了电镀 Au 的无氰化物电镀液，对器件进行电镀。

将上面工艺制作完成的晶片用 O_2 等离子体打底膜，去除没有显影干净的光刻胶，确保电镀区域能全部镀上 Au 金属。在电镀过程中，电镀上 Au 层的质量、分布情况、电镀的速率等与片子的形状，电镀的过程中电镀液的温度，单位面积的电流，以及起镀层的厚度等有关。

表 3.2 典型的晶片电镀参数

	1 片	2 片	3 片	3 片
1/ (nm)	1651	1671	1120	1829
2/ (nm)	1612	1663	1162	1765
3/ (nm)	1696	1536	1237	1691
4/ (nm)	1693	1600	1226	1694
5/ (nm)	1642	1573	1237	1737
6/ (nm)	1654	1609	1175	1623
7/ (nm)	1640	1613	1175	1734
起镀层厚 (nm)	100	100	100	100
平均值 (nm)	1541	1509	1078	1629
偏差 (%)	3.4	3.5	5.0	6.5
片子面积 (mm^2)	400	480	487	490
总电流大小 (μA)	325	360	340	320
电流密度 ($\mu A/mm^2$)	0.81	0.75	0.70	0.65
总时间 (min)	140	150	120	200
电镀速率 (nm/min)	11.0	10.1	9.0	8.2

表 3.2 测试所采用的四个片子都是四分之一 2 吋晶片，取点规制如图 3.13 所示，在四分之一晶片的边缘各均匀取三个点，然后在中间取一个点，每个四分之一片取 7 个点。四个晶片的起镀层都为 Ti/Au 厚度为 20/80nm，电镀都在同一个温度为 $40^\circ C$ 的恒温水浴槽中，电镀的条件都相对稳定，确保四组数据更有的代表性。

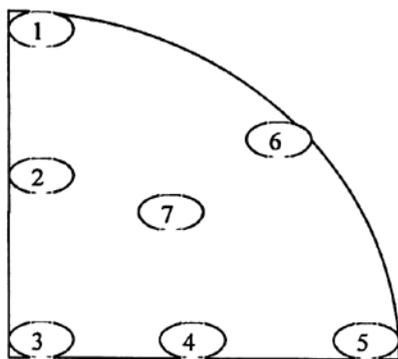
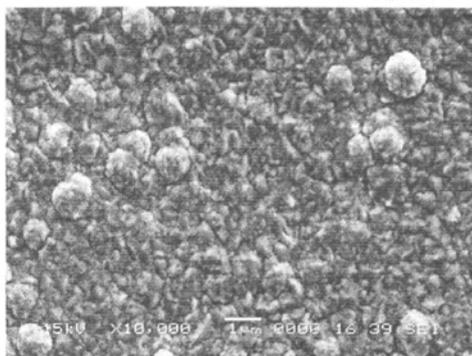
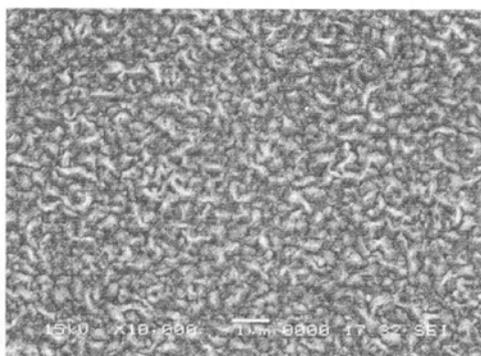


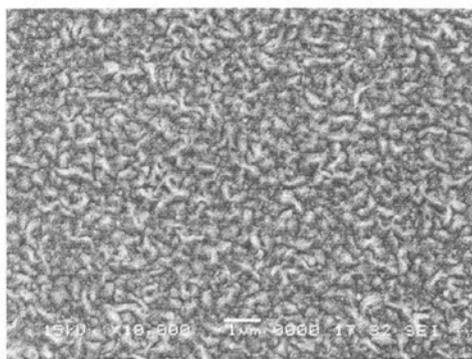
图 3.13 取点分布图



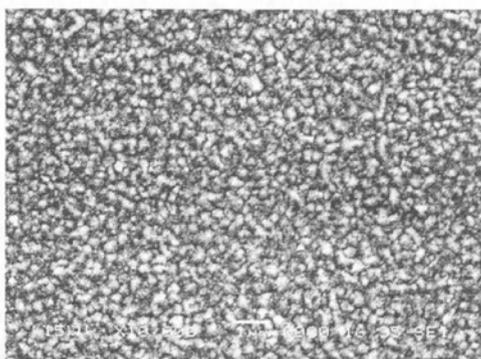
(一片)



(二片)



(三片)



(四片)

图 3.14 电镀速率不同的电镀层表面 Au 颗粒 SEM 对比图

图 3.14 是四个晶片在四种情况速率下电镀的表面 SEM 照片。从图中 10000 倍的 SEM 照片中相对比可以看出，一片的 Au 呈现球状比较粗糙的颗粒，且颗粒大小相差很大，不是特别均匀；二，三片的 Au 颗粒呈现长条小面包状，二片的颗粒相对较大一点；四片 Au 颗粒也呈现出小圆球颗粒，但是其颗粒均匀，细小。在 400 倍显微镜中观察一、二、三、四号镜片电镀表面的质量，四个片子都呈金黄色，且依次变亮，这表明四片的电镀金属表面质量最好。以上说明电镀过程中，单位