

面积的电流与电镀速率以及电镀表面质量关：单位面积的电流越大，电镀速率越快，电镀金属的表面质量越差；单位面积的电流越小，电镀速率越慢，电镀金属的表面质量越好。

晶片电镀层均匀度定义为：晶片电镀层厚度最厚处减去电镀层最薄处的差除以 2 倍电镀层的平均厚度：

$$\Delta = \frac{H_{MAX} - H_{MIN}}{2H_A} \times 100\% \quad (3.1)$$

表 3.2 中，四个晶片的面积大体相当，而晶片的厚度偏差差别比较大，表现为电镀时单位面积的电流越大，电镀的均匀性也好。认为引起这种现象的原因是：在电镀过程中，其镀层的电阻率远小于电镀液的电阻，当用一个电极给晶片加上电流，在晶片上能够形成比较均匀的电流输出，所以电镀层金属厚度的偏差不是很大。从表中数据知道的厚度偏差最大为 6.5%，该偏差不会引起器件特性重大差别，所以在电镀过程中，可以采用单电极供电，减少了工艺的复杂度和难度。当然，由于电阻的原因，电镀过程中如果采用单电极供电的方法，晶片的面积越大，其镀层的电阻增加越多，电镀层的厚度均匀性就会越差，这是可以采用多点供电的方法供电，或者使用一个电极，电镀一段时间后变化金片上接触电极的点，使得电镀金属的厚度均匀，达到设计的要求。

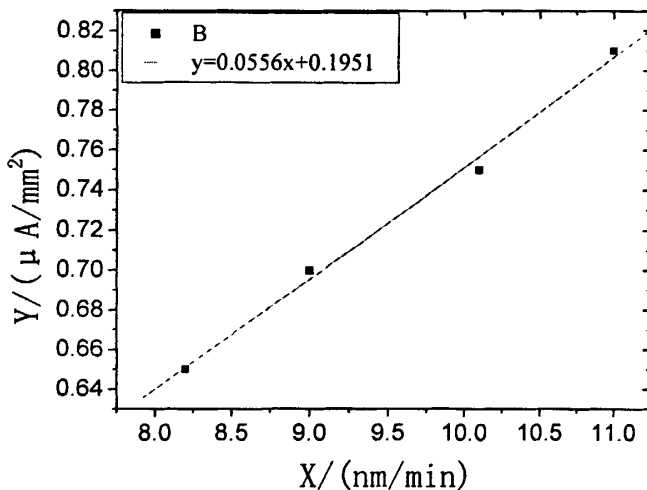


图 3.15 单位面积电流密度与电镀速率关系图

从上面的结果与分析中得到，如果电镀的速率过大，器件电镀金属的均匀性好，电镀规定厚度的金属时间短，但质量差；而电镀速率过慢，虽然能得到高质量的电镀层，但电镀层的均匀性变成，电镀时间长。所以电镀的速率是一个折中的过程，要采用一个合适的速率来确保金属的质量，金属层的均匀度，以及规定厚度金属层的电镀时间。图 3.15 是表 3.2 中四个晶片电镀结果单位面积电流密度

与电镀速率的关系图，采用线性拟合的方法得到在一定范围内达到所需电镀速率要求的单位面积电流：

$$Y = 0.0556X + 0.1951 \quad (3.2)$$

其中， Y 的单位为 $\mu\text{A}/\text{mm}^2$ ， X 的单位为 nm/min ，适应范围为：8-11nm/min 的电镀速率。

3.2.4 AlGaN/GaN HEMT 掩膜层、起镀层、牺牲层的除去

去除掩膜层光刻胶 EPI622 可以采用丙酮直接去除和曝光用显影液去除的方法。采用直接浸泡在丙酮中去除光刻胶的方法，会影响到牺牲层下面的光刻胶和剥离胶，引起镀层的起皱，再采用腐蚀工艺去除光刻胶时，牺牲层没能很好的保护栅金属和非电镀区域的金属。所以采用直接应用丙酮去除光刻胶的方法适合于

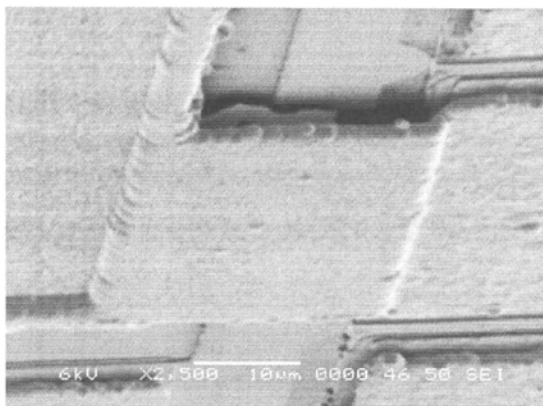


图 3.16 光刻的漂移引起的电镀区漂移以及没有去除干净的起镀层毛刺

与剥离去除起镀层的工艺相结合，但是由于采用剥离方法去除起镀层存在如图 3.16 的缺点，电镀层的边缘存在没有剥离干净的毛刺，毛刺的存在会影响器件的频率特性，因而本文采用另外一种去除掩膜层光刻胶。

采用曝光显影腐蚀的方法去除掩膜层。将晶片在到深紫外光刻机下泛曝光，牺牲层的光刻胶有起镀层的保护而不受影响。然后用显影液去胶，去除电镀掩膜层。再旋涂一层很薄的光刻胶（EPI622），软烘 10min，然后利用光刻版精确曝光光刻，把电镀区域保护起来，露出没有电镀较厚的起镀层金属。采用该方法的好处是：利用曝光显影的方法去除掩膜层，显影液不会溶解下层未曝光的光刻胶和剥离胶，因而牺牲层下的金属能得到很好的保护，提高制作器件的成品率；其次，用掩膜层保护电镀区域的电镀层，能确保质量较低的电镀层不被腐蚀而电镀的高度金属厚度不变，颜色不变；再而，利用掩膜层保护电镀区域，在腐蚀起镀层金属时，能得到整齐的边缘线条且腐蚀过程容易控制。此过程中的精确对准光刻能重要，要使光刻过程中产生大的偏差，就可能没办法把桥边的起镀层腐蚀干净，

而导致空气桥短路，如下图 3.17 所示。该过程也增加了器件工艺流程，稍微增长制作器件的时间。

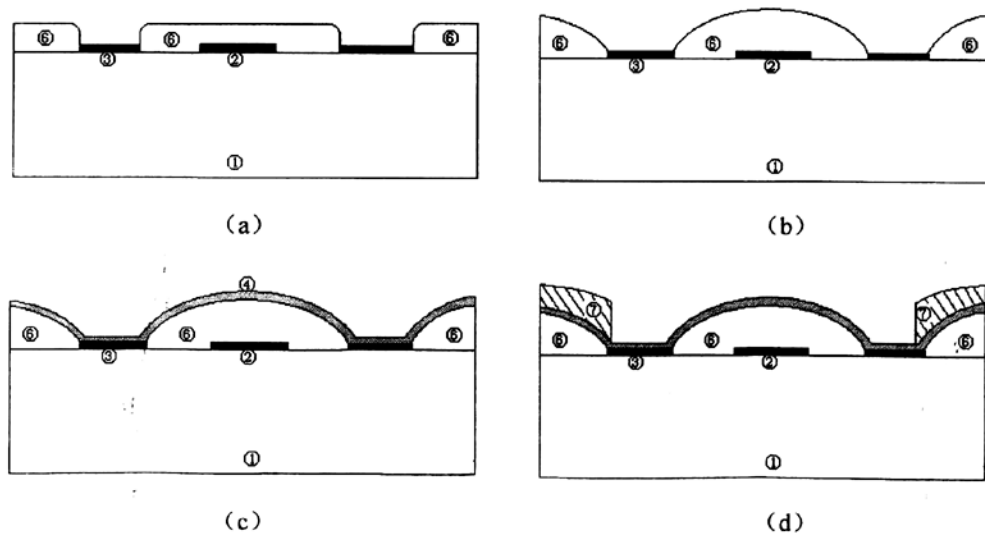


图 3.17 没有去除干净的牺牲层（引自 Cabacungan J 论文^[3.8]）

起镀层采用 KI 溶液腐蚀 Au 金属，用 1:10 的 HF 水溶液腐蚀 Ti 金属。实验中发现，用 KI 腐蚀电镀层的速率大概是 4nm/s，由于电镀层的 Au 质量较差，其腐蚀速度更快；HF 对 Ti 的腐蚀速率约为 0.5nm/s，当 HF 的浓度更高时，腐蚀速度会稍微加快，采用该方法短时间的过度腐蚀起镀层，不会对器件造成严重的影响。

空气桥最后一步工艺就是去除牺牲层光刻胶，现在丙酮溶液中溶解上层光刻胶，和保护电镀区域的掩膜层光刻胶（EPI622）；然后再到 50-60℃剥离胶液中用煮 5min，最后在去离子水中冲洗 10min，用氮气吹干，即得到完整的空气桥。

空气桥的完整制作工艺图如图 3.18 所示：其中，①为 AlGaIn/GaN 异质结材料，②为肖特基栅条，③为源接触金属，④为起镀层金属，⑤为电镀层金属，⑥复合胶牺牲层，⑦为掩膜层光刻胶。



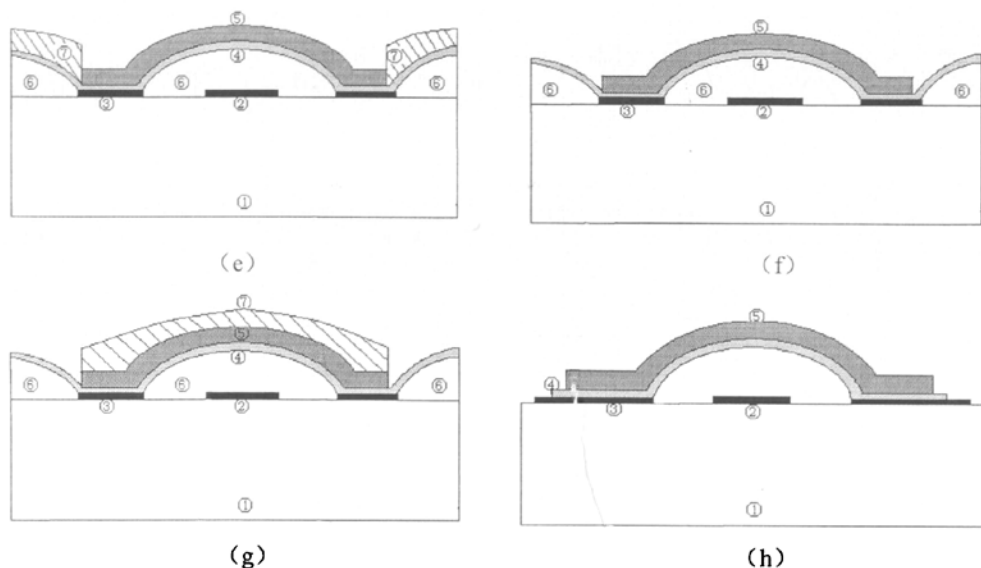


图 3.18 拱形空气桥的工艺流程

图 3.19 是在 AlGaIn/GaN HEMT 微波大功率器件上连接源端的空气桥, 拱桥的跨度为 $30.0\mu\text{m}$, 桥高为 $4.5\mu\text{m}$, 桥金属厚度为 $2.0\mu\text{m}$ 。

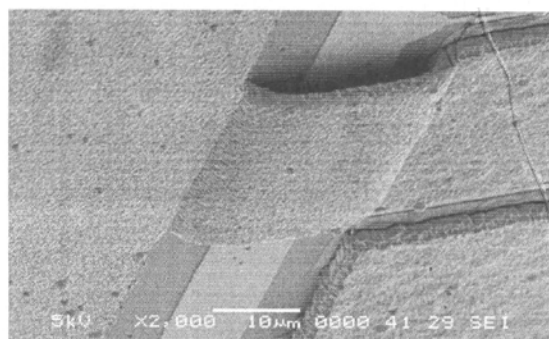


图 3.19 完整的空气桥 SEM 照片

§3.3 本章小结

本章具体介绍了目前空气桥制造过程中的关键步骤：旋涂的光刻胶与光刻、起镀层的沉积和电镀、腐蚀工艺，目前实现这些关键步骤采用的方法，并分析各种方法的优缺点。根据目前方法中的不足，提出一种结构强度高的拱形空气桥制造方法：利用保护性能很好，极容易拱形化的复合胶结构制作拱形牺牲层，垫高金属桥面；利用蒸发的方法沉积一层增强金属粘附强度的 Ti 金属，再加一层电阻率低且容易腐蚀的 Au 金属；采用无毒的 Au 电镀液进行电镀加厚金属，并总结出电镀高质量的金属层经验公式；最后采用显影去电镀掩膜层，再旋涂起镀层掩膜层，腐蚀起镀层，制出完美的拱形空气桥结构。采用该方法的优点是：能方面的

制备出高桥面、高结构强度的空气桥，相对其它制备空气桥的工艺，有着更高的成品率。

第四章 AlGaIn/GaN HEMT 多栅器件的制造与分析

要精确测定空气桥对器件的影响,需要有很稳定的 AlGaIn/GaN HEMT 制造工艺支持,否则很难从测试结果中辨认哪些因素是引入空气桥所带来的变化。下面就简单的介绍 AlGaIn/GaN HEMT 多栅器件的制作流程,以及一些参数的测试分析。

§4.1 AlGaIn/GaN HEMT 多栅器件的制造

4.1.1 AlGaIn/GaN HEMT 多栅器件关键工艺

与其它器件工艺相比,特别是单栅的 HEMT 工艺相对比较简单。此次制造的 AlGaIn/GaN HEMT 多栅器件,有以下四个关键工艺即:台面隔离刻蚀、源/漏欧姆接触、肖特基栅接触、空气桥制作。十栅器件的版图,如图 4.1 所示。

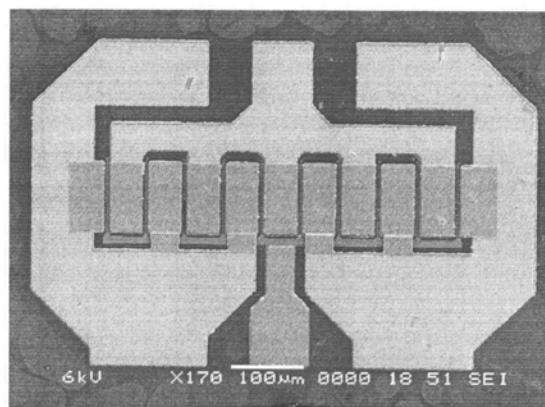


图 4.1 AlGaIn/GaN HEMT 十栅器件

1、刻蚀技术

由于 GaN 和 AlGaIn 的抗化学腐蚀能力很强,所以目前还没有开发出实用的湿法刻蚀技术用于栅槽和台面隔离的刻蚀。因此 GaN 和 AlGaIn 的刻蚀常用干法刻蚀^[4.1]。常用的干法刻蚀方法有 Cl 基反应离子刻蚀 (RIE)、Cl 基感应耦合等离子体刻蚀 (ICP)、电子回旋共振等离子体刻蚀 (ECR) 等。

各种刻蚀方法各有利弊。本文研究的样片采用 Cl 基感应耦合等离子体刻蚀 (ICP)。

2、肖特基接触

AlGaIn/GaN HEMT 的栅极为肖特基接触,其质量是器件特性的决定性因素之一:栅漏电是低频噪声的主要来源^[4.2],栅反向击穿电压决定着器件的工作电压和功率容限^[4.3、4.4]。为了降低肖特基栅的漏电和提高栅反向击穿电压,需要在 AlGaIn/GaN 异质结构上制作高质量的肖特基接触。不同金属与 GaN 形成的肖特基

势垒高度已经被研究。在 GaAs 中，表面费米能级总是被高密度的表面态钉扎在禁带中央。但是 GaN 与金属形成的肖特基势垒主要还是由功函数差决定的。因此不同金属与 GaN 的接触可以形成不同的肖特基势垒高度。根据已报道的实验结果，GaN 的电子亲和能为 4.2eV 。通常 Al（功函数为 4.2eV ）与清洁的 n-GaN 表面形成自然欧姆接触，而 Au、Pt 和 Ni（功函数在 $5\text{--}5.5\text{eV}$ ）在 n-GaN 上可以形成相对较高的肖特基势垒（ $0.8\text{--}1.1\text{eV}$ ）。对于 Al 组份不是特别高的 AlGaIn 层有类似的结论。

3、欧姆接触

欧姆接触也是 AlGaIn/GaN HEMT 制造中的关键工艺。欧姆接触质量的好坏决定着器件的许多主要参数（如电流密度、外部增益、最高工作温度和大功率性能等），要制备高性能的 AlGaIn/GaN HEMT，形成良好的金属与 AlGaIn 的欧姆接触是十分重要的。Ti/Al 是最常用的欧姆接触结构，经过退火，Ti 与 AlGaIn 中的 N 反应生成 TiN，同时使 AlGaIn 中产生了大量起施主作用的 N 空位，形成 n⁺层，从而使电子易于隧穿，形成欧姆接触^[4,5]。Al 能防止 AlGaIn 中 Ga 的外扩散所导致的施主浓度降低，但 Ti 和 Al 均容易被氧化而形成高阻氧化层，反而使接触电阻有所增大。通常在 Ti/Al 之上再覆盖一层 Au 加以保护^[4,1]。

4、空气桥制作

空气桥是制作 AlGaIn/GaN HEMT 多栅器件制造的最后一个重要工艺。空气桥质量的好坏不但影响了器件的许多主要参数，特别是截止频率和最高振荡频率，而且也影响器件在一些特定的环境下的可靠应用。目前，最优的空气桥结构为拱形结构，为了提高制备空气桥效率，采用电镀的方法沉积上一层高可靠性的 Au 金属。在空气桥制作的过程中，所涂得光刻胶都比较厚，所以精确的光刻有着重要的作用。

4.1.2 AlGaIn/GaN HEMT 多栅器件的材料参数和工艺流程

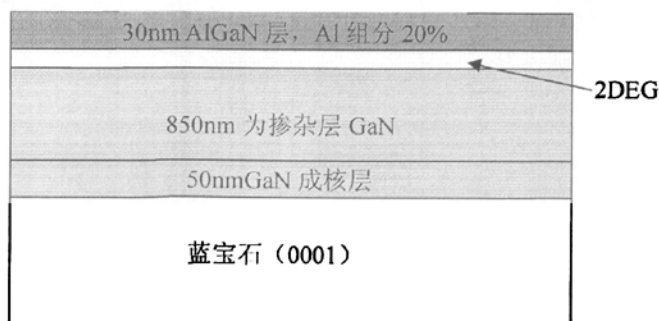


图 4.2 AlGaIn/GaN 异质结结构图

实验中采用低温 MOCVD 方法在蓝宝石（Sapphire）衬底基片（0001）面上外延生长 AlGaIn/GaN 异质结二维电子气（2DEG）材料，如图 4.2 所示。材料层结构由下而上依次为：先在 500°C 下生长厚度约为 50nm GaN 成核层，接着在高温下生长厚度约为 850nm 未掺杂 GaN 外延层， 30nm 的未掺杂 AlGaIn 层，PL 谱测量后

计算得到的 AlGaIn 层 Al 组分为 20%(Al_{0.2}Ga_{0.8}N)。Hall 效应测量显示，材料迁移率 μ 和 2DEG 浓度分别为 1263cm²/Vs 和 1.38×10¹³cm⁻²，材料方块电阻为 450Ω/□。

利用上面介绍的材料制作 AlGaIn/GaN HEMT 多栅器件，具体工艺流程在表 4.1 列出。

表 4.1 AlGaIn/GaN HEMT 多栅器件制备工艺流程表

序号	工艺步骤	工艺条件
1	基片清洗	丙酮、乙醇、去离子水超声，氮气吹干
2	沉积 SiO ₂	100-200nm
3	台面光刻	正胶
4	腐蚀成形掩膜	HF 溶液
5	ICP 刻蚀	上电极 600W，偏压 180V，压力 1Pa，Cl ₂ /Ar=3: 1，深度 300nm
6	腐蚀去除刻蚀掩膜	丙酮、HF 溶液，氮气吹干
7	源漏光刻	正胶
8	氧打底膜	上电极 600W，压力 3Pa，O ₂ 5sccm
9	源漏金属蒸发	Ti/Al/Ni/Au(30nm/120nm/50nm/40nm)
10	金属剥离	丙酮、乙醇超声，氮气吹干
11	源漏金属退火	N ₂ 气氛中。850℃ 30s
12	栅光刻	正胶
13	氧打底膜	上电极 600W，压力 3Pa，O ₂ 5sccm
14	栅金属蒸发	Ni/Au(30nm/200nm)
15	金属剥离	丙酮、乙醇超声，氮气吹干
16	光刻桥墩的位置	复合胶(比例 1: 1，厚 3μm)，注意精确套刻
17	烘烤牺牲层	140℃ 20min
18	氧打底膜	上电极 600W，压力 3Pa，O ₂ 5sccm
19	起镀层蒸发	Ti/Au(20nm/80nm)
20	光刻电镀掩膜层	正胶，厚出电镀层 0.5μm，精确套刻
21	氧打底膜	上电极 600W，压力 3Pa，O ₂ 5sccm
22	电镀金属	40℃，10nm/min 的电镀速率(2μm)
23	曝光去除掩膜层	采用泛曝光，显影去除光刻胶
24	光刻掩膜层	正胶，精确套刻
25	氧打底膜	上电极 600W，压力 3Pa，O ₂ 5sccm
26	腐蚀起镀层	KI 溶液腐蚀 Au，HF 酸腐蚀 Ti
27	去除光刻胶	丙酮腐蚀正胶，去胶液去除剥离胶

28	清洗	去离子水清洗 10min, N ₂ 吹干
----	----	---------------------------------

采用上面的工艺流程, 制备出的多栅器件如图 4.1 所示。

§4.2 AlGaIn/GaN HEMT 多栅器件特性

AlGaIn/GaN HEMT的极化以及迁移率大, 饱和电子速度高, 击穿电压高, 因此拥有良好的频率特性, 在制作耐高温的微波功率器件方面极具优势。

4.2.1 直流特性和频率特性介绍

1、直流特性

AlGaIn/GaN HEMT分为长栅和短栅器件。在长栅器件中, 电子漂移速度没有达到饱和, 而在短栅器件中, 电子以饱和漂移速度运动。长栅器件饱和区的电流—电压关系为:

$$I_{Dsat} = qw_D \mu / L \int_{V_G - V_{Dsat}}^{V_G} n_{2D}(u) du \quad (4.1)$$

式中 L 为栅长, w_D 为栅宽, μ 为电子迁移率, V_G 为栅电压, V_{Dsat} 是电流达到饱和时的漏电压; n_{2D} 为二维电子气浓度。

对应长栅器件饱和区的跨导为:

$$G_m = (qu / L) n_{2D} V_{GS} \quad (4.2)$$

对于短栅长器件, 饱和区的电流电压表达式为:

$$I_{Dsat} = (qV_{sat} / V_{Dsat}) [n_{2D} V_{GS} - n_{2D} (V_G - V_{Dsat})] \quad (4.3)$$

饱和区的跨导为:

$$G_m = qW_D V_{sat} n_{2D} V_{GS} \quad (4.4)$$

可以看出, AlGaIn/GaN HEMT功率器件参数的优化, 主要还是减少栅长 L 和增加栅宽 w_D 。此外还应该考虑源栅和漏栅间距, 从而减少源串联电阻和漏串联电阻。一般源漏金属第一层都选择Ti, 因为Ti与GaN势垒最小。而栅金属多用Au、Pt等能与GaN材料形成较高肖特基势垒的金属。

直流中的另一个重要参数是击穿电压, 从器件放大区的最大输出功率表达式[4.6]:

$$P = \frac{1}{8} I_{DS,MAX} (V_{BREAKDOWN} - V_{KNEE}) \quad (4.5)$$

式中 $I_{DS,MAX}$ 和 V_{KNEE} 分别为器件在直流扫描下测得的最大输出电流和膝点电压, $V_{BREAKDOWN}$ 是器件的击穿电压, 目前器件的击穿电压主要受栅漏之间过大的峰值电场影响。

由上面公式可以看出, 击穿电压的提高, 能过增大最大输出功率。目前通常

采用场板结构来提高器件的击穿电压,从而提高器件的功率密度、功率附加效率和相关增益。

2、频率特性

电流增益截止频率 f_T 和最大振荡频率 f_{MAX} 是微波功率晶体管的两个重要特征值。要测试这两个参数,器件要偏置在最大的 DC 跨导条件下,用网络分析仪测量其 S 参数。通过测量不同频率下的 S 参数,推导出电流的短路电流增益 H_{21} 和单向最大可用功率增益 MAG。绘出增益和频率的特性曲线,通过外推确定电流增益和单向电流增益达到 0 时的频率,分别为 f_T 和 f_{MAX} :

$$f_T = \frac{g_m}{2\pi(C_{gs} + C_{gd})} \quad (4.6)$$

$$f_{MAX} \cong \frac{f_T}{2\sqrt{(R_g + R_s + R_{gs})/R_{ds} + 2\pi f_T R_g C_{gd}}} \quad (4.7)$$

式中, g_m 为测量的跨导: $g_m = \frac{g_m^*}{1 + R_s g_m^*}$ 其中 g_m^* 为器件的本征跨导, C_{gs} 为栅

源电容, C_{gd} 为栅漏电容, R_s 为源端电阻, R_g 为栅电阻, R_{gs} 为栅源电阻, R_{ds} 为源漏电阻。

4.2.2 器件特性参数的测量

制备的 AlGaIn/GaN HEMT 十栅器件的测试采用一下设备:用 HP4156B 和 AgilentB1500 精密半导体参数测试仪、Signatone S1160 探针台测试器件特性, Agilent E8636 矢量分析仪,以及测试软件 ICS 进行测试。TLM 测试的材料方块电阻为 $500\Omega/\square$ 。

图 4.3 给出了测试样品的输出特性曲线,栅偏置从 1V 到-3.8V 变化。 $V_g=1V$ 时,最大饱和漏电流 $I_{dsat}=675mA/mm$,漏源饱和电压 $V_{dsat}=3.5V$ 。由于 V_d 的变化范围较小(最大 $V_{dmax}=10V$),因此输出特性饱和区并没有出现因自热效应引起的明显的负阻现象,随着漏压的增大负阻现象越明显。图 4.4 给出了该器件的转移特性和跨导特性曲线, $V_d=5V$ 时,夹断电压 $V_{th}=-4.5V$,最大跨导 $G_m=160mS/mm$ 。图 4.5 给出了器件的反向漏电,在 $V_{gd}=-20V$ 时,栅漏电流为 $I_g=0.3\mu A/mm$,已达到较高的水平。图 4.6 给出了测试器件的高频特性,器件的截止频率 $f_T=6GHz$,最大振荡频率 $f_{MAX}=7GHz$,截止频率远小于理论大约的计算值,即栅长为 $1.5\mu m$ 的 $15GHz$,而测试的最大振荡频率很小,说明器件的功率放大性能很差。从器件高频特性的测试结果中看出,多栅器件高频特性的严重降低不仅仅是引入空气桥的结果,要提高器件的各项特性还得从材料,器件的版图,工艺等等入手,争取研制

出高性能的 AlGaIn/GaN HEMT 微波大功率器件。

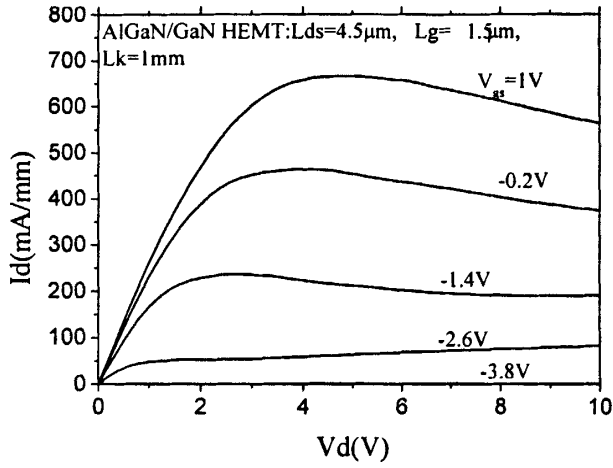


图 4.3 样品输出特性曲线

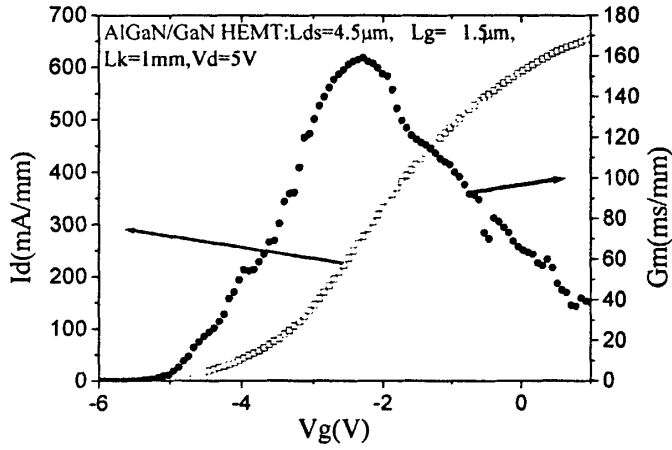


图 4.4 样品转移特性

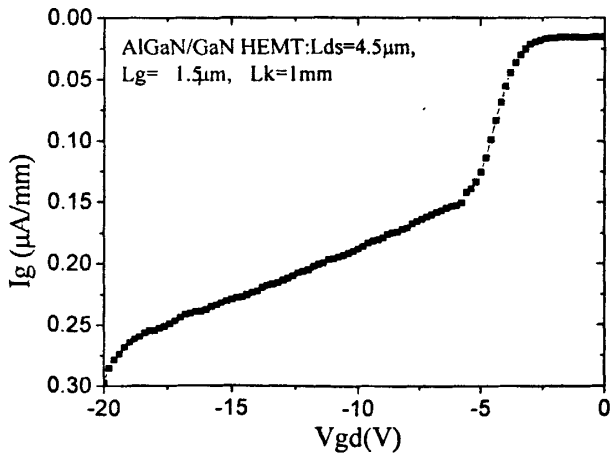


图 4.5 样品方向击穿电压

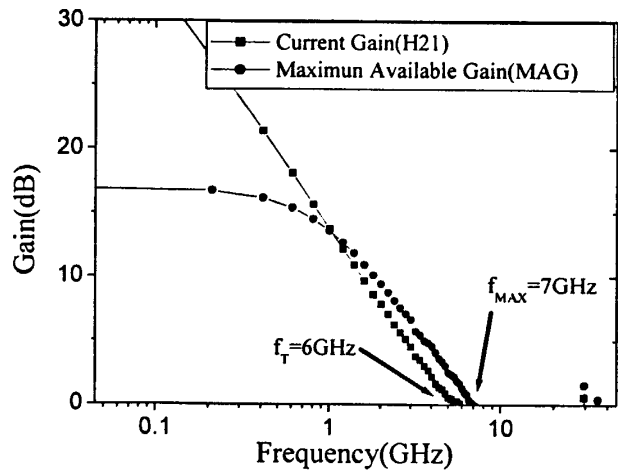


图 4.6 样品频率特性

§4.3 AlGaIn/GaN HEMT 多栅器件空气桥测试与分析

AlGaIn/GaN HEMT 微波大功率器件常用在一些恶劣的环境中，特别是一些高温环境中，要保证器件的正常工作，就必须保证空气桥在高温下，不出现任何的可靠性问题。

本文为了分析空气桥的耐高温情况，将多栅器件放在 RTP-500 快速热退火炉中做退化实验，研究空气桥在高温下的变化情况。如图 4.7 所示，图(a)为空气桥在 500℃的高温情况下退火 20min，发现电镀金属表面没有发生任何变化；(b)为空气桥在 550℃的高温情况下退火 20min，发现在源端上电镀加厚电极处的金属发生熔化的迹象；(c)为空气桥在 600℃高温情况下退火 20min，发现在源端上电镀加厚电极处的金属有明显的熔化现象，同时金属熔液在表面张力的作用下，形成了几个六角形的坑，但空气桥还是较为完整；(d)为空气桥在 650℃的高温情况下退火 10min，发现空气桥在源端处的桥墩金属发生明显的熔化，导致空气桥的塌陷。从上面的四个温度退火的实验中，可以认为：空气桥的最高温度最高可以达到 500℃，也就是说采用该方法制备空气桥的 AlGaIn/GaN HEMT 微波大功率器件的最高应用温度约为 500℃。如果在更高的温度环境下使用该器件，器件的电镀加厚金属会在源极上端，或者是空气桥源端一侧的桥墩产生熔化塌陷，从而影响器件的正常工作。

深入研究发现，器件在高温情况下总是在源端，或源端连接的桥墩先出现塌陷情况上。这个现象可以用合金相图^[4.7]的理论来解释。空气桥的起镀层电镀金属是 Ti/Au 合金，该合金在 Ti 和 Au 原子数比例为 19: 1 的熔点最低温度为 832℃，而实验退化的温度最高为 650℃，因而不是 Ti/Au 起镀层熔化引起的崩塌。而源端

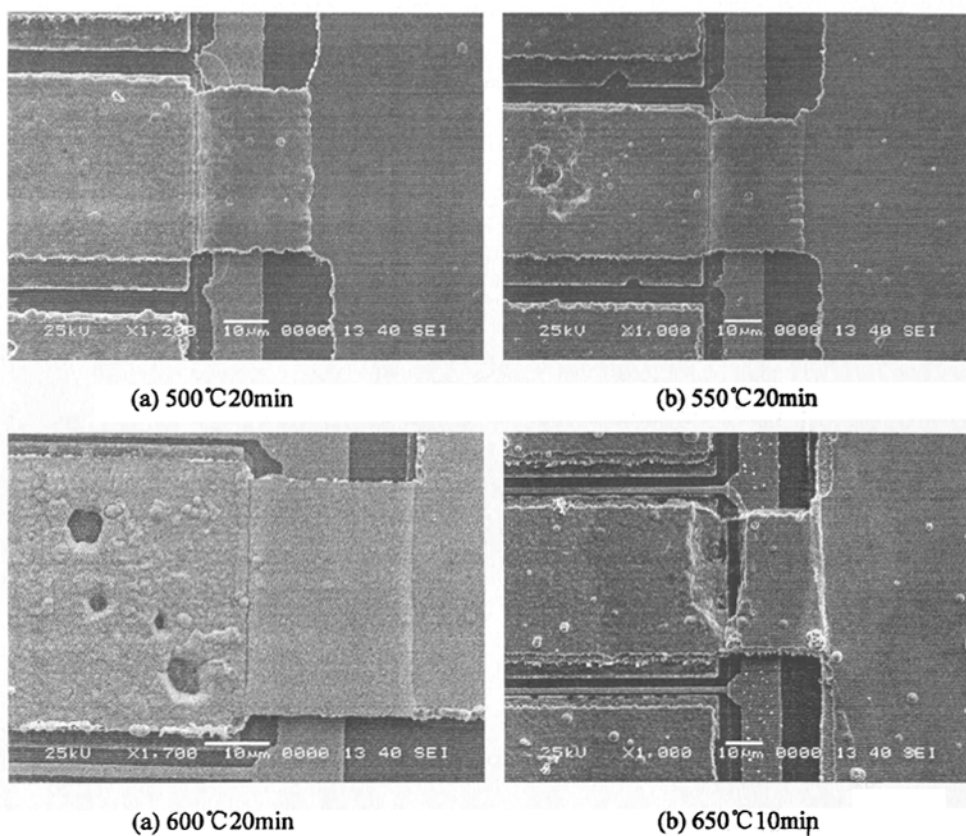


图 4.7 各种温度下空气桥的退化情况

的欧姆接触金属为 Ti/Al/Ni/Au，其中在 Al 和 Ni 原子比例为 19:1 时的合金最低熔点约为 660°C。从图 4.8 的 Al 和 Au 合金相图中可以发现，Al 和 Au 的合金最低熔点出现在 Au 的质量比占到 97% 时，其温度为 525°C。这可以用来解释图 4.7 中的 (b) 出现的情况，源端电镀 Au 加厚电极，金所占的比例变得非常大，源端欧姆接触上的 Au 质量达到 90%，此时 Al 和 Au 的合金熔化温度仅为 545°C。当在 550°C 退火时，合金开始熔化，随着时间的增长，金的比例过高时合金的熔化温度有逐渐上升，且起镀层 Ti/Au 中的 Ti 起到 Al 和 Au 之间阻挡层的作用，退化温度不是特别高、时间不是很长时，金属就只在局部发生熔化。(c) 采用 600°C 烘烤，在源端出现类似六角形的塌陷，主要是温度比较高，在这温度下能熔化的 Al 合 Au 比例范围更大，且 Al 和 Au 更容易透过薄的 Ni 阻挡层形成合金，在表面张力的作用下，形成更大的缺陷。(d) 采用 650°C 烘烤 10min，在桥墩的源端方向出现塌陷，是因为熔化的 Al 和 Au 合金在桥墩位置在桥的重力和金属熔液的表面张力共同作用下，形成的坍塌；而在空气桥的另一端，电镀层下主要是由电极层的 Ni/Au 和起镀层的 Ti/Au 组成，Ni 和 Ti 这两个中金属的任何比例合金的熔点都高于 650°C，所以在空气桥的另一端不会产生任何的熔化塌陷现象。

从上面的分析中，可以得出结论：限制空气桥高温应用的主要因素是电镀金