

西安电子科技大学

硕士学位论文

AlGa_N/Ga_N HEMT空气桥技术研究

姓名：林若兵

申请学位级别：硕士

专业：微电子学与固体电子学

指导教师：郝跃

20080101

摘 要

随着 AlGaIn/GaN HEMT 朝着高频、大功率的方向不断发展,采用空气桥实现独立源端或漏端的互连,具有低寄生电容、方便制备、高可靠性等优点,越来越体现出其重要性。本文首先从空气桥的相关理论入手,分析得出一种便于制备、结构强度高的拱形结构空气桥;然后,利用不同性质的光刻胶组成的复合胶结构,通过低温烘烤,很方便的制备出比所涂胶层厚出约 60%的拱形牺牲层,该牺牲层对桥下金属有极强的保护作用;接着,再采用无毒电镀液电镀加厚空气桥。试验摸索出电镀经验公式,根据所需金属质量的要求,利用公式能很方便的计算出所需要的电镀条件;最后,利用该空气桥工艺制备 AlGaIn/GaN HEMT 多栅器件,分析其可靠性,发现空气桥的最高工作温度约为 500℃。研究发现,主要是电镀过程中加大欧姆接触中 Al 和 Au 合金中的 Au 比例,当 Au 比例达到一定程度,导致合金熔点的降低。

关键词: AlGaIn/GaN HEMT 拱形空气桥 电镀技术

Abstract

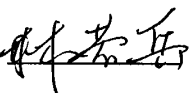
With continuous development of AlGaIn/GaN HEMT in the direction of high frequency and high-power, it becomes more and more important that air-bridge to be interconnected the independence sources or drains with low parasitic capacitance, easy fabrication and high reliability. In this paper, firstly, related theory of air bridge is studied and a convenient fabrication, and high structural strength arched structure air bridge is obtained. Secondly, with composite photoresist, the arched sacrificial layer which is about 60 percent thicker than spin coating is convenient acquired through low-temperature baking, and the arched sacrificial layer strengthen protective effect for the metal underneath the bridge. Thirdly, gold is plated by non-toxic electroplating liquid to thicken the air-bridge. Empirical formula of high quality electroplating is given after study, electroplating conditions can be easily calculated according to the quality requirements for metal through the empirical formula. Finally, AlGaIn/GaN HEMT multi-gate devices are produced using the air-bridge process, reliability analysis, it is found that the maximum temperature at which air-bridge can survival is approximately 500°C. After study, it shows that Au ratio in the Al and Au alloy of the ohmic contact increases to a certain extent in the electroplating process, which reduces the melting point of alloy.

Key words: AlGaIn/GaN HEMT arched air-bridge electroplating technology

创新性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢中所罗列的内容以外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果；也不包含为获得西安电子科技大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中做了明确的说明并表示了谢意。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任。

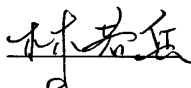
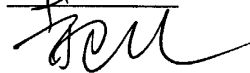
本人签名：

日期 08.6.23

关于论文使用授权的说明

本人完全了解西安电子科技大学有关保留和使用学位论文的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权单位属西安电子科技大学。本人保证毕业后离校后，发表论文或使用论文工作成果时署名单位仍然为西安电子科技大学。学校有权保留送交论文的复印件，允许查阅和借阅论文；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以允许采用影印、缩印或其它复制手段保存论文。（保密的论文在解密后遵守此规定）

本学位论文属于保密在____年解密后适用本授权书。

本人签名：
导师签名：

日期 08.6.23
日期 08.6.23

第一章 绪论

§1.1 GaN 材料与其异质结的微波优势

1.1.1 GaN 材料的介绍

GaN材料具有良好的电学特性^[1.1, 1.2], 如宽的禁带宽度, 高击穿电场, 较高的热导率, 耐腐蚀, 抗辐射等, 被誉为是继第一代Ge、Si 半导体材料、第二代GaAs、InP化合物半导体材料之后的第三代半导体材料, 是制作高频、高温、高压、大功率电子器件和短波长、大功率光电子器件的理想材料。

GaN 是由 Johnson 等人于 1928 年合成的一种 III-V 族化合物半导体材料, 由于晶体获得困难, 所以对它的研究未得到很好的进展。在 60 年代, 用 III-V 族化合物材料 GaAs 制成激光器之后, 才又对 GaN 的研究产生兴趣。1969 年, Maruska 和 Tietjen 成功制备出了单晶 GaN 晶体薄膜, 给这种材料带来了新的希望。但在此后很长时期内, GaN 材料由于受到没有合适的衬底材料、n 型本底浓度太高和无法实现 p 型掺杂等问题的困扰, 进展十分缓慢。进入 90 年代以来, 由于缓冲层技术的采用和 p 型掺杂技术的突破, 对 GaN 的研究热潮在全世界蓬勃发展起来, 并且取得了辉煌的成绩。

GaN是极稳定的化合物, 又是坚硬的高熔点材料, 熔点约为1700°C。GaN具有高的电离度, 在 III-V 族化合物中是最高的。在大气压力下, 六方纤锌矿结构GaN晶体, 它在一个元胞中有4个原子, 原子体积大约为GaAs的一半。因为其硬度高, 又是一种良好的涂层保护材料。在室温下, GaN不溶于水、酸和碱, 而在热的碱溶

表1.1 几种重要的半导体材料的基本参数

半导体材料	带隙类型	禁带宽度 (eV)	熔点 (°C)	热导率 (W/Kcm)	电子迁移率 (cm ² /Vs)	击穿场强 (V/cm)	介电常数	饱和速度 (cm/s)
Si	间接	1.12	1420	1.40	1350	6.0×10 ⁵	11.9	1.0×10 ⁷
GaAs	直接	1.43	1238	0.54	6000	6.5×10 ⁵	13.2	2.0×10 ⁷
SiC	间接	3.20	2830	4.90	800	3.5×10 ⁶	9.7	2.0×10 ⁷
ZnSe	直接	2.58	1500	-	100	-	8.1	-
GaN	直接	3.42	1700	1.50	900	5.0×10 ⁶	8.9	2.5×10 ⁷

液中以非常缓慢的速度溶解。GaN在HCl、H₂气或高温下呈现不稳定特性, 而在N₂气下最为稳定。

表1.1是GaN材料与其它半导体材料的参数比较。从各项参数中可以看出GaN材料参数具有明显的优点：其禁带宽度最宽，饱和电子速度也优于其它半导体材料，并具有很大的击穿场强和较高的热导率。

1.1.2 AlGaIn/GaN 异质结微波功率的优势

微波/毫米波器件和电路是当今微电子技术的一个重要发展方向，在国防电子通讯应用领域，大量集中在雷达、通信、电子战等方面。在民用商业应用领域主要集中在移动电话、无线通信、个人通信网、定位系统、卫星接收等方面。随着卫星通信、相控阵雷达和电子对抗等技术的发展，微波/毫米波器件及其电路的地位日渐提高。近年来，以 SiC、GaN 和半导体金刚石为代表的宽禁带半导体微波器件的研究开发引人注目。这类器件适宜在高频、高温(>500℃)、强辐照环境下工作，具有优异的微波功率性能。

通常用于表征半导体材料高频大功率应用潜力的指标有两个：Baliga品质因数^[1.3]和Johnson品质因数^[1.4]。

Baliga品质因数的表达式为

$$BFOM = \epsilon_0 \mu E_B^2 \quad (1)$$

其中， ϵ_0 介电常数， μ 为迁移率。

Johnson品质因数的表达式为：

$$JMF = \frac{E_B^2 v_s^2}{4\pi^2} \quad (2)$$

其中， E_B 为击穿场强， v_s 为电子漂移饱和速度。

表1.2给出了以Si的品质因数作为单位“1”然后利用表1.1数据得到Baliga品质因数和Johnson品质因数。从表1.2可以明显看出，宽禁带半导体SiC和GaN的Baliga品质因数和Johnson品质因数很高，而这两种材料的最高应用温度分别为600℃和700℃，所以非常适合于微波大功率应用。

表1.2 几种重要半导体材料的高频大功率应用潜力

半导体材料	异质结	迁移率 cm ² /Vs	BFOM品质系数	JMF品质系数	T _{MAX} (℃)
Si	SiGe/Si	1300	1.0	1.0	300
GaAs	AlGaAs/GaAs InGaP/GaAs AlGaAs/InGaAs	6000	9.6	3.5	300

SiC	None	800	3.1	60	600
GaN	AlGaN/GaN InGaN/GaN	1600 ¹	24.6	80	700

从表 1.2 中 SiC、GaN 的 Baliga 品质因数 and Johnson 品质因数都很高，该两种材料都适合于制作微波功率器件。然而，GaN 所属的 III—V 氮化物具有一些 SiC 材料没有的特性，使得 GaN 在高频大功率器件方面更有优势：

GaN 超过 SiC 最主要的原因就是利用 III—V 氮化物形成异质结结构。在 GaN 晶体上生长上一层 AlGaN，而形成了一种典型的异质结结构。通常 AlGaN/GaN 异质结中的 AlGaN 和 GaN 都是六方晶态，即纤锌矿结构。由于纤锌矿 AlGaN 和 GaN 晶体在(0001)方向不满足反转对称性，因此 AlGaN 和 GaN 沿着(0001)方向存在很强的自发极化效应^[1.5]，同时 AlGaN 与 GaN 界面晶格形变会引起很强的压电极化效应^[1.6]，这两种极化效应相互增强从而在 AlGaN/GaN 界面诱导出大量正极化电荷，正极化电荷吸引电子向 AlGaN/GaN 界面积累，从而形成高密度的 2DEG(高于 $2 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$)，该 2DEG 位于 AlGaN 和 GaN 交界界面处约为 40Å 厚的薄层中。即使不对 AlGaN/GaN 异质结进行任何有意掺杂，仅靠极化效应也能形成高浓度的 2DEG。实验研究已证实，AlGaN/GaN 异质结存在极强的压电极化和自发极化效应，从而在异质结界面形成高浓度的二维电子气(2DEG)。这些高密度在 2DEG 在薄层中相互屏蔽，减少了缺陷(杂质缺陷，晶格缺陷)对载流子的散射作用，提高了载流子的低场迁移率。理论上证明 AlGaN/GaN 异质结的二维电子气迁移率达到 $2000 \text{cm}^2/\text{Vs}$ ^[1.7]，室温下迁移率达到 $1600 \text{cm}^2/\text{Vs}$ ，而 GaN 和 SiC 的体材料的电子迁移率却分别为 $900 \text{cm}^2/\text{Vs}$ 和 $800 \text{cm}^2/\text{Vs}$ 。

由于 SiC 材料缺少异质结结构，其功率器件主要采用成金属半导体场效应管(MESFET)结构^[1.8, 1.9]。然而，金属半导体场效应管是表面器件，高频、高密度的电流通过半导体表面很薄的一个高掺杂的层时，会增加栅的漏电流，降低栅漏之间的击穿电压，从而限制了器件的最高输出功率。

同时，对比起 SiC 的 MESFET 晶体管，AlGaN 和 GaN 材料具有的强极化效应作用，即使 AlGaN/GaN HEFT 中肖特基加负压使得的 2DEG 的耗尽的情况下，也能把 2DEG 限定在 AlGaN/GaN 界面处。AlGaN/GaN 异质结 2DEG 出色的电流处理能力使得 AlGaN/GaN 异质结材料成为制造高频大功率器件的理想选择。而目前利用高热导率，低晶格匹配的 SiC 衬底外延 GaN，AlGaN 制作的 AlGaN/GaN 结构，更好的解决散热问题。

下图 1.1 更形象的说明了 GaN 材料宽禁带宽度和高饱和速率以及 AlGaN/GaN 异质结材料高电子面密度和高迁移率所带来的高功率、高频率、高效率和高温度应用的优势。

¹ 典型 AlGaN/GaN 异质结 2DEG 的迁移率

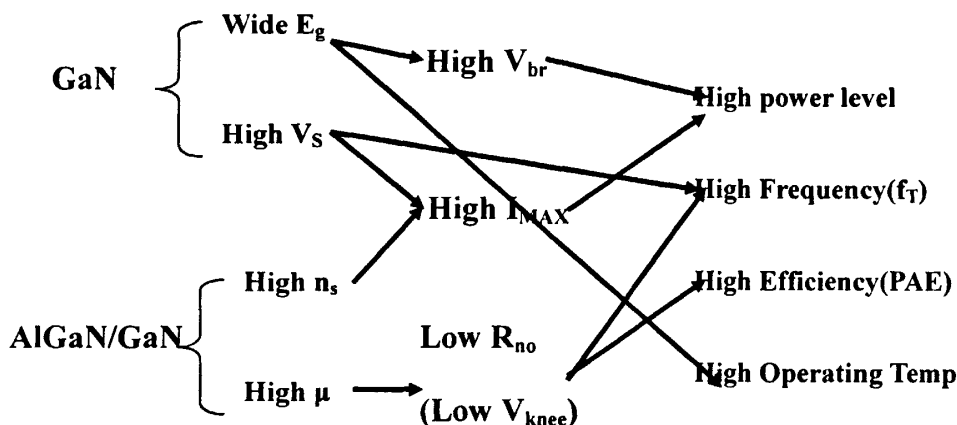


图 1.1 GaN 和 AlGaN/GaN 在微波大功率应用的优势

§1.2 AlGaN/GaN 微波器件的研究进展

1.2.1 国际上 AlGaN/GaN 微波器件的发展历程

1993 年 Khan 等人制造出第一只 GaN 场效应晶体管, GaN MESFET^[1.10], 同年他们也报道了第一只 GaN MISFET^[1.11]。第一只 GaN MESFET 采用 LPMOCVD 和薄 AlN 成核层在蓝宝石衬底上生长的 600nm 厚的无意掺杂 n-GaN 层作为晶体管沟道, 掺杂浓度和迁移率分别为 $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 和 $350 \text{cm}^2/\text{Vs}$ 。栅长为 $4 \mu\text{m}$ 的该器件获得了 175mA/mm 的最大电流密度和 23mS/mm 的峰值跨导。

对于 GaN MESFET 和 GaN MISFET 器件, 均以 n-GaN 层作为导电层, 最初由于外延工艺的问题 GaN 外延层中存在较高的缺陷密度, 同时由于杂质 C 和 O 分别引入的受主和施主杂质之间的补偿产生大量的电离杂质, 因此室温下 GaN 外延层的迁移率总是不高。为了提高导电性, 增加 n 型掺杂产生高浓度电子的同时迁移率会降得更低, 因此无法获得较高的功率密度和频率特性。由于上述原因, GaN MESFET 和 MISFET 没有引起人们太大的关注。

与此同时, AlGaN/GaN 异质结材料的电特性远远超出了 GaN 体晶材料的电特性, 因此从 1994 年至今 AlGaN/GaN 异质结材料的生长和 AlGaN/GaN HEMT 器件的研制始终占据着 GaN 电子器件研究的主要地位。

1992 年 Khan 等人在蓝宝石衬底上制造出 AlGaN/GaN 异质结材料, 并利用 SDH 量子霍尔效应证实了 AlGaN/GaN 界面二维电子气(2DEG)的存在。该 AlGaN/GaN 异质结 2DEG 的室温迁移率为 $834 \text{cm}^2/\text{Vs}$, 77K 迁移率为 $2626 \text{cm}^2/\text{Vs}$ 。室温 2DEG 密度为 $1 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$ 。

此后, 随着工艺水平的改进, 材料质量不断提高, 蓝宝石衬底 AlGaN/GaN 单

异质结(SH)的 2DEG 迁移率不断增加。1992 年, 低温(77K)2DEG 迁移率为 $2626\text{cm}^2/\text{Vs}$ ^[1.12]; 1995 年, 低温迁移率达到 $5000\text{cm}^2/\text{Vs}$ ^[1.13]; 1996 年, 低温迁移率提高到 $5700\text{cm}^2/\text{Vs}$ ^[1.14]; 1999 年, 低温迁移率提高到 $10300\text{cm}^2/\text{Vs}$ ^[1.15]。此后蓝宝石衬底 AlGaIn/GaN 异质结 2DEG 迁移率没有更高的报道。对于室温 2DEG 迁移率, 通常在 $800\text{--}1600\text{cm}^2/\text{Vs}$ 之间。

SiC 衬底与 GaN 之间的晶格失配较小, 因此 SiC 衬底 AlGaIn/GaN 单异质结 2DEG 迁移率更高一些。1999 年, 低温 2DEG 迁移率已达到 $11000\text{cm}^2/\text{Vs}$ ^[1.16]; 目前最高 2DEG 迁移率为 $28000\text{cm}^2/\text{Vs}$ (10K)。SiC 衬底 AlGaIn/GaN 异质结 2DEG 的室温迁移率通常在 $1000\text{--}2000\text{cm}^2/\text{Vs}$ 之间。

由于 Al 组份、AlGaIn 层结构(掺杂与厚度)、2DEG 面密度及测量条件对 AlGaIn/GaN 异质结 2DEG 迁移率测量均有较大影响。因此, 通常情况下, 蓝宝石衬底或 SiC 衬底的 AlGaIn/GaN 异质结 2DEG 的面密度和迁移率分别为 $0.8\text{--}3\times 10^{13}\text{cm}^{-2}$ 和 $800\text{--}2000\text{cm}^2/\text{Vs}$ 。由于 2DEG 面密度和迁移率之间存在着互斥关系, 即 2DEG 面密度较高时, 迁移率一般较低。前面报道的高 2DEG 迁移率数据通常都是在低 Al 组份(合金无序散射和界面应变散射小)和低 2DEG 面密度的情况下获得的。对于 HEMT 器件的制造, 由于饱和漏电流 I_{dsat} 和跨导 G_m 均正比于迁移率与面密度的乘积 μ_n , 所以经常以迁移率面密度积 μ_n 作为评价 2DEG 电特性的指标。通常迁移率面密度积 $\mu_n > 1\times 10^{16}$ 即为较好的材料。

AlGaIn/GaN 异质结材料性能不断提高的同时, AlGaIn/GaN HEMT 器件的性能也得到了不断的提高。1999 年 SiC 衬底 AlGaIn/GaN HEMT 器件获得了高达 $9.2\text{W/mm@}8\text{GHz}$ 的功率密度^[1.16]。2001 年 Vinayak T. 等人制造的 SiC 衬底 AlGaIn/GaN HEMT 器件获得了 $10.7\text{W/mm@}10\text{GHz}$ ^[1.17]。Conell 大学的 John Zolper 博士研制出功率密度达到 $11.7\text{W/mm@}10\text{GHz}$ 的 SiC 衬底 AlGaIn/GaN HEMT 器件^[1.18]。这近似为 GaAs PHEMT 器件功率密度的十倍。由于蓝宝石衬底的热导率低于 SiC 衬底, 因此蓝宝石衬底 AlGaIn/GaN HEMT 器件所能获得的功率密度通常要小于 SiC 衬底的同类型器件。直到前几年, 所获得的最大跨导分别是 402ms/mm ^[1.19] (蓝宝石衬底) 和 207ms/mm ^[1.20] (碳化硅衬底); 两种情况所对应的器件最大饱和电流分别为 1130mA/mm ^[1.21] 和 1710mA/mm ^[1.22], 截止频率 f_T 分别可达到 107GHz ^[1.22] 和 162GHz ^[1.23], 最大振荡频率 f_{MAX} 分别可达到 151GHz ^[1.24] 和 162GHz ^[23]。频率为 18GHz 时, 蓝宝石衬底上获得的最大输出功率密度为 3.3W/mm ^[1.21], 输出功率附加效率 (Power adder efficiency, PAE) 为 18.2%, 而在 SiC 衬底上, 频率为 20GHz 和 10GHz 时的最大输出功率密度分别为 2.97W/mm ^[1.25] 和 6.9W/mm ^[1.26], 对应的输出功率附加效率分别为 22.5% 和 51.0%。

1.2.2 国际上 AlGaIn/GaN 微波器件的新进展

在功率方面：2005 年《NEC 技报》报道了该公司开发了用于手机基站的大功率、小型、高校的单片 GaN 晶体管，该管的栅宽为 48mm，在 53V、2GHz 状态下获得 230W 的输出功率和 67% 的功率附加效率。2005 年，日本富士通公司研制出功率达到 250W 的 AlGaIn/GaN HEMT 器件^[1.27]，该器件具有很高的可靠性。2006 年 Maekawa 等人成功开发出 500W 的 AlGaIn/GaN HEMT 功率放大器^[1.28]，该放大器由四个 HEMT 芯片组成，工作在 1.5GHz 下具有高的线性增益 17.8dB。2007 年，同为日本 Eudyna Devices 实验室的 Eizo 等人报道了功率达到 800W 的 AlGaIn/GaN HEMT 功率放大器^[1.29]，其工作在 2.9-3.3GHz 功率附加效率为 50%，线性增益为 14.0dB。

在频率方面：2005 年《Jpn. J. Appl. Phys》报道，日本情报通行研究中心成功研制栅长为 60nm 的短栅器件，电流增益截止频率 f_T 为 152GHz，最大振荡频率 f_{MAX} 为 173GHz。同年，Rockwell Scientific Company 的 Boutros 等人报道了栅长为 100nm 的 AlGaIn/GaN HEMTs 器件^[1.30]，在饱和电流为 1.5A/mm 时其跨导为 350ms/mm，截止频率 f_T 为 152GHz，其最大振荡频率 f_{MAX} 为 173GHz。

在功率密度方面：2005 年 TriQuint Semiconductor 公司研究人员制造出世界上最大功率的 Si 衬底 AlGaIn/GaN HEMT 该器件在 10GHz 下的连续波输出功率密度达到 7W/mm。同年，RF Micro Devices 的 Vetury R. 等人报道了功率密度为 22.7W/mm@2.14GHz 的 AlGaIn/GaN HEMT^[1.31]，其功率附加效率达到 54%。2007 年南罗莱纳州大学 Koudymov 等人报道了高功率附加效率的 AlGaIn/GaN HFET^[1.32]，其功率密度 20W/mm@2GHz，其功率附加效率最高为 74%。Wu^[1.33] 等人报道了利用单层场板结构，当器件工作电压为 120V 时，4GHz 时的连续波输出功率密度 32.2W/mm，最大功率附加效率 (PAE) 为 54.8 %。

AlGaIn/GaN 器件所具有的极好高频大功率特性大大地增强了 GaN 微波功率器件研究和应用前景。

1.2.3 国内 GaN 的研究情况

国内 GaN 研究基本上和外国一样，也是从二十世纪九十年代开始。主要的研究单位有中科院半导体所、中科院物理所、南京大学、西安电子科技大学，55 所，13 所等。2000 年以前，主要的研究内容是异质结外延 GaN 晶体薄膜生长和 GaN 光电器件制造的研究，很少有单位从事 AlGaIn/GaN 异质结材料和 AlGaIn/GaN HEMT 器件的研究。

2000 年以后国内才开始重视 AlGaIn/GaN HEMT 器件的研究，2001 年北京大學^[1.33]和中科院半导体所^[1.34]分别报道了研制出的 AlGaIn/GaN HEMT 器件。栅长为

1 μm 的 Al 上制作出 0.25 μm 栅长的高电子迁移率功率晶体管^[1.35], 0.25 μm 栅长的单指器件测到峰值跨导为 250mS/mm, 特征频率为 77GHz, 功率器件的最大电流密度达到 1.07A/mm, 8GHz 频率下在片测试 80 $\times$ 10 μm 栅宽器件的输出功率为 27.04dBm, 同时功率附加效率达到 26.5%。2006 年中国科学院半导体所也报道了在 6H-SiC 衬底上,外延生长了 AlGaIn/GaN HEMT 结构^[1.36]。

与国外的 AlGaIn/GaN HEMT 器件研究相比, 国内目前存在着比较大的差距。

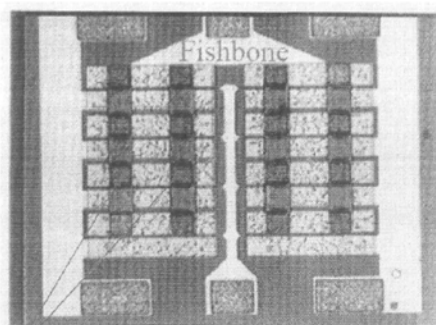
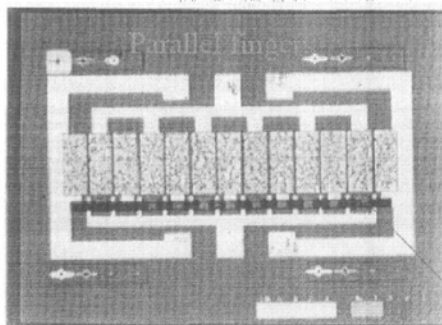
§1.3 本文的研究意义以及工作安排

1.3.1 本文的研究意义

从上面对 GaN 材料、AlGaIn/GaN 器件以及其发展历程的介绍中, 可以发现 AlGaIn/GaN HEMT 的截止频率、最大振荡频率越来越高, 而单管器件的功率越来越大。截止频率主要是由于器件的栅长度决定的, 栅长越短, 截止频率越高, 但栅条的电阻越大; 同时, 器件的功率密度是一定的, 要增大单管的功率, 就必须增大栅宽。减小栅条长度同时增加栅宽度, 必然导致栅条的电阻急剧的增加, 降低器件的最大振荡频率, 影响器件的功率放大能力。因而必须把器件制作成为多栅结构, 在器件制作的过程中产生独立的源端或者漏端, 这些独立的源端或者漏端需要相互连接起来, 形成统一的源端或漏端, 从而器件的制备就必须引入空气桥结构。

图1.2是平行栅结构的HEMT多栅器件, 图1.3是鱼骨栅的HEMT多栅器件。这两种结构有着各自的特点, 它们是目前AlGaIn/GaN HEMT微波大功率器件主要的结构。其中, 平行栅结构的特点是: 制作过程中, 空气桥引入的寄生电容比较小, 有利提高器件的截止频率和最大振荡频率, 但该结构在各个漏端收集的信号相位相差较大, 器件的工作在大功率下散热性能较差。晶体管漏端收集信号相位不同主要是由漏端离器件的通信中心的电距离所决定的, 随着栅条的增加, 该问题会变得更严重, 降低了器件的效率和功率增益。而采用鱼骨型栅结构能有效的避免平行栅结构中的相移问题。鱼骨栅结构中, 最早得到栅信号的栅指单元在漏端收集信号却最晚, 这保证每个栅指单元信号路程相同, 这就缩小了相移, 使得功率增益效率提高在鱼骨结构的两边漏端收集的信号相位差较小, 器件两边散热, 其散热性能更好, 其功率附加增益和功率密度更大。而该结构也存在缺点, 由于是在漏端上制作空气桥, 器件的寄生电容较大, 减低了器件的直接频率和最大振荡频率。

Parallel fingers or fishbone layout for 12 x 125 μm devices:



Air bridges

图 1.2 平行栅结构 HEMT 多栅器件

图 1.3 鱼骨栅结构 HEMT 多栅器件

(引自 EE class pages engine)

在微波大功率器件中，无论采用上面的那一个结构，空气桥是器件的一个重要组成部分，也是决定器件的电性能能否实现以及器件能否可靠工作的一个重要因素。一个微波大功率器件，必须有结构坚固可靠，耐高温的空气桥。但空气桥的引入增加了器件的制作复杂度，提高器件的制作难度，降低器件的成品率。因而，开发一种制作工艺简单、通用性强的空气桥是十分必要的。

空气桥的坚固可靠程度，耐高温能力等参数是由空气桥的结构、材料、以及工艺参数等决定，所以开发出的简单工艺还必须优化各项参数，以达到提高器件各项参数的目的。

1.3.2 本文的工作安排

本文的研究是在国家重大基础研究（973 计划）、国家预先研究等项目的支持下所开展 AlGaIn/GaN HEMT 器件及其相关基础研究。首先从理论的角度对 AlGaIn/GaN HEMT 器件引入空气桥的必要性进行深入的研究与分析，以及对空气桥的结构进行研究与分析；其次，从实验的角度研究了如何实现拱形结构的空气桥，并优化参数；最后，制备出器件，测试其特性，研究空气桥的可靠性。

具体章节安排如下：

第一章、绪论，介绍了国内外 AlGaIn/GaN 异质结器件的研究成果与现状，说明研究空气桥的必要性。

第二章、从理论角度阐述了 AlGaIn/GaN HEMT 器件引入空气桥的必要性，以及拱形空气桥的优势。

第三章、研究开发出一种制备高质量拱形空气桥的简单方法，并介绍制备的工艺步骤以及注意事项。

第四章、结合开发出的空气桥制备方法，制出 AlGaIn/GaN HEMT 多栅器件；测试器件的特性，重点研究器件中空气桥的耐高温特性，以及其退化的机理。

第五章、给出了本文的结论。

第二章 空气桥的理论分析

随着 AlGaIn/GaN 异质结的深入研究，以及制造技术的逐渐成熟，现阶段的 HEMT 朝着高频，大功率方向的迅速发展。其中，空气桥结构对器件特性的影响也是日趋严重。因而，发展高频、大功率的 AlGaIn/GaN HEMT 就必须对空气桥进行深入的研究。

§2.1 平板电容分析

2.1.1 真空平行板电容器

电容器的带电量与电势差 u_1-u_2 的比值称为电容器的电容。它只与组成电容器的极板大小，形状，两极板相对位置及其间所充的介质因素有关^[2.1]。

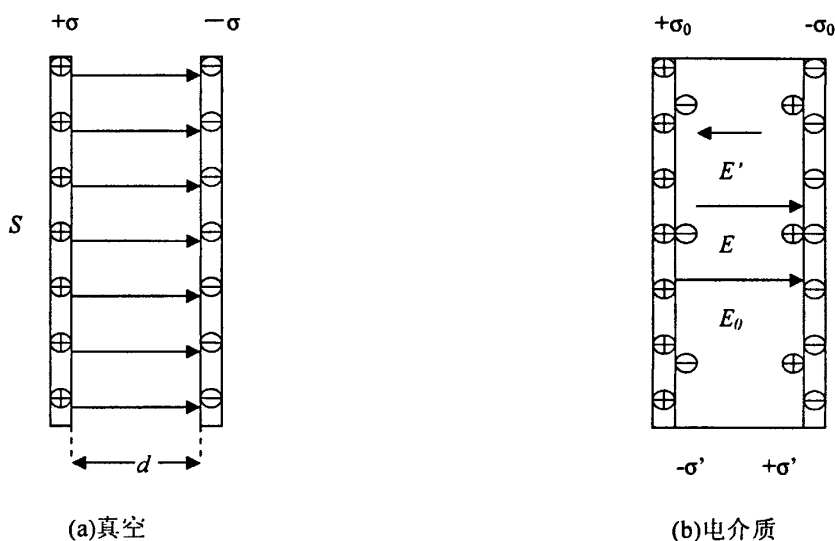


图 2.1 平板电容

图 2.1 中的两个电容器均为平板电容器，两极板的面积为 S ，其间的距离为 d ，且 $S \gg d^2$ ，这样就可以忽略边缘效应的影响。当两极板上带电量分别为 $+q$ 和 $-q$ 时，电荷均匀分布在相对的两个表面上，其面密度为 $+\sigma$ 和 $-\sigma$ 。

对于图 2.1(a)两平行电极板间为真空，则其电场强度为：

$$E_0 = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (2.1)$$

两极板之间的电势差:

$$u_1 - u_2 = E_0 d = \frac{\sigma}{\epsilon_0} d = \frac{qd}{\epsilon_0 S} \quad (2.2)$$

根据电容器的定义, 平板电容器的电容为:

$$C_0 = \frac{q}{u_1 - u_2} = \frac{\epsilon_0 S}{d} \quad (2.3)$$

从上面(2.3)中可以看出平板电容器的电容, 与极板的面积成正比, 与极板间的距离成反比。

2.1.2 均匀电介质平行板电容器

对于图 2.1(b)中, 平行电容器两极板之间充满电介质材料。根据分子电结构的不同, 可以把电介质分为两类, 一类为无极分子, 另一类为有极分子。无极分子是指分子中负电荷对称的分布在正电荷周围, 以致在无外电场作用时, 分子的正负电荷中心重合, 分子无电偶极矩。在无外电场作用时, 无极分子构成的电介质对外呈现电中性。有极分子是指在没有外电场作用时, 分子的正负电荷中心就不重合, 这时等量的分子正负电荷形成电偶极子, 具有电偶极矩 P 。在无外电场作用时, 大量有极分子组成的电介质, 由于分子的不规则热运动, 各分子电偶极矩取向杂乱无章, 因此宏观上对外也呈现电中性。

有极分子电介质放在均匀外电场中时, 各分子的电偶极子受到外电场力偶的作用, 都要转向外电场方向有序地排列起来, 结果在电介质的侧面出现极化电荷, 这种现象通常称为极化现象; 而无机分子电介质放在外电场中时, 由于分子中的正负电荷受到相反方向的电场力, 因而正负电荷中心将发生微小的相对位移, 从而形成电偶极子, 其电偶极矩将沿外电场方向排列起来, 这时, 沿外电场方向电介质的前后两侧也将分别出现正负极化电荷, 这种也是一种电介质极化现象。

电介质放在外加电场 E_0 中, 会产生极化现象, 在电介质的表面感应产生正负极化电荷, 产生的电场 E' 与外加电场方向相反。则加入电介质后两平行电极板之间的等效电场为:

$$E = E_0 - E' \quad (2.4)$$

从上式可以看出加入电介质后平行电极之间的电场强度降低, 而两平行电极板之间的电压为:

$$U = E \cdot d \quad (2.5)$$

由于等效电场强度的降低, 从而也导致了平行电极之间的电压的下降。试验证明^[2.11], 电容为 C_0 的平行板电容, 充电后电势差为 U_0 , 这时极板的电荷量为:

$Q_0 = C_0 \cdot U_0$ ，断开电源，并在两电极板间注入各向同性的均匀电介质，再测量两电极板间电势差 U ，发现 U 减少为 U_0 的 $1/\epsilon_r$ 倍，即：

$$U = \frac{U_0}{\epsilon_r} \quad (2.6)$$

其中，对于一定的各向同性均匀电介质， ϵ_r 为常数，称为该介质的相对电容率(或相对介电常数)。由于有无电介质极板上的电荷量 Q_0 不变，故有电介质的电容器的电容 C 应为：

$$C = \frac{Q_0}{U} = \frac{\epsilon_r Q_0}{U_0} = \epsilon_r C_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d} \quad (2.7)$$

从(2.7)式中可以看出，电容器的两平行电极板中间充满电介质，其电容是不填充电介质的 ϵ_r 倍。根据这一特性，在器件的制作和电路中的电容，可以根据要求，选用合适相对介电常数 ϵ_r 的电介质。如果需要大的电容，尽量选用相对介电常数大的电介质，如果需要小的电容，则选用介电常数小的电介质，采用真空作为电介质的电容最小，而干燥的空气相对介电常数很接近于 1，也是很好的低相对介电常数电介质。

在 AlGaIn/GaN HEMT 微波大功率器件的制作中，为了减少寄生电容，采用相对介电常数最接近于 1 干燥空气作为中间电介质来实现导线互连，干燥空气作为电介质是采用普通材料作为电介质时的电容的 5%-20%^[2.1]。另外，在互连线宽度一定的情况下也可以增大桥的高度 d ，来减少单位面积的寄生电容。以及减小重叠部分的面积 S 来减少整体寄生电容，同样达到提高微波大功率器件频率特性的目的。

§2.2 AlGaIn/GaN HEMT 截止频率和最高振荡频率

我们可以把 HEMT 看成一个二端网络^[2.3]。输入信号加在栅和源上，输出信号从源和漏间测得。定义 a_1 ， a_2 为入射波， b_1 ， b_2 为反射波并且各自相互独立，如图 2.2 所示：

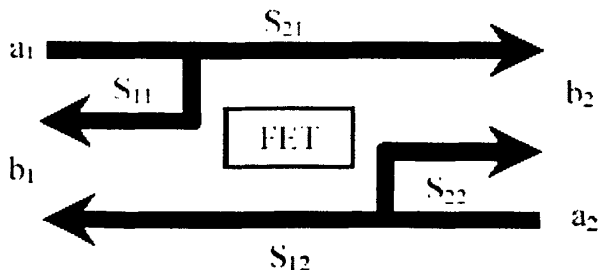


图2.2 S参数示意图

由二端网络可以得到线性网络方程:

$$\begin{cases} b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \\ b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \end{cases} \quad (2.8)$$

根据S参数的定义得到:

$$S_{ij} = \left. \frac{b_i}{a_j} \right|_{a_m=0}, \quad S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0}, \quad S_{12} = \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0}, \quad S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0},$$

$$S_{22} = \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0} \quad (2.9)$$

按定义测量HEMT的S参数, 式中 S_{11} 是器件输出接匹配负载时的输入端电压反射系数, S_{12} 是器件输入端接匹配负载时的反向传输系数, S_{21} 是器件输出端接匹配负载时的正向传输系数, S_{22} 是器件输入端接匹配负载时的输出端电压反射系数。用网络分析仪测量器件S参数, 从实测数据中可知S数随频率变化, 因此必须在使用具体频率、电压、电流工作点情况下测量器件的S参数。

S参数的有用性使其成为测量RF和微波及网络的主要方法。靠测量嵌入在50Ω和源之间的网络中一部分所传输和反射的复杂电压波形, 测量系统可以计算S参数。S参数以简单的增益和反射系统项(它们与功率增益和失配损耗紧密相关)完全表征网络。当用来表征工作在一起的RF和微波元件(如放大器、传输线、天线)时, S参数允许预测和计算元件之间的相互影响, 这使得功率传输、方向和频率响应等有可能具有最高性能。与其它参数相比, S参数除概念简单、分析方便外, 还具有容易测量、能工作在较高频率的特点。这是因为DUT端接在测量系统的特性阻抗中。特性阻抗终端在高频是精确的, 不需要调节终端器件增强稳定性并可进行宽带扫描测量。S参数测量向量定标有广泛的实用性, 可允许全部12误差校正。因此, 用S参数测量器件的增益, 比用基本的功率测量能提供更精确的结果。通过对S参数测量结果的分析可以得到 H_{21} 和UPG(unilateral power gain)从而得到器件的 f_T 和 f_{MAX} 。

$$h_{21}(dB) = 20 \log \left(\frac{-2S_{21}}{(1-S_{11})(1+S_{22}) + S_{12}S_{21}} \right) \quad (2.10)$$

$$UPG(dB) = 10 \log \left[|S_{21}|^2 \left(\frac{1}{1-|S_{11}|^2} \right) \left(\frac{1}{1-|S_{22}|^2} \right) \right] \quad (2.11)$$

f_T 定义为共源等效电路中, 通过输入电容的电流等于流过电流源的电流 $g_m V_{gs}$ 时的频率^[2.4]。有公式:

$$f_T = \frac{g_m}{2\pi(C_{gs} + C_{gd})} \quad (2.12)$$

式(2.12)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, R_s 为器件源端电阻, C_{gs} 为栅源电容, C_{gd} 为栅漏电容。

考虑工艺对器件截止频率的影响时有:

$$f_T = \frac{g_m/2\pi}{[C_{gs} + C_{gd}][1 + (R_s + R_d)/R_{ds}] + C_{gd}g_m(R_s + R_d)} \quad (2.13)$$

式中, R_d 为器件的漏端电阻, R_{ds} 为源漏电阻。

在输入输出匹配时 f_{MAX} 定义为单向功率增益等于1时的频率。

$$f_{MAX} \cong \frac{f_T}{2\sqrt{(R_g + R_s + R_{gs})/R_{ds} + 2\pi f_T R_g C_{gd}}} \quad (2.14)$$

式中, R_{gs} 为栅源电阻。

从式子(2.12)、(2.13)和(2.14)中看到 f_T 与 f_{MAX} 随着 C_{gs} 和 C_{gd} 的增加而减小, 而多栅器件比单栅器件有着更高的电容。如图2.3中, 可以把 C_{gs} 近似看为:

$$C_{gs} = C_0 \quad (2.15)$$

其中, C_0 为单栅器件的栅条 L_0 与源及之间的电容。

对于多栅器件, 如图2.4所示, 器件的 C_{gs} 主要有两部分组成:

$$C_{gs} = nC_0 + \frac{1}{2}(n-2)C_{A0} \quad (2.16)$$

其中, n 为多栅器件中的栅条个数, C_{A0} 为空气桥跨接处的电容寄生。从上一节的介绍中知道, 空气桥的寄生电容只有介质桥的5%-20%, 如果采用空气桥结构, 可

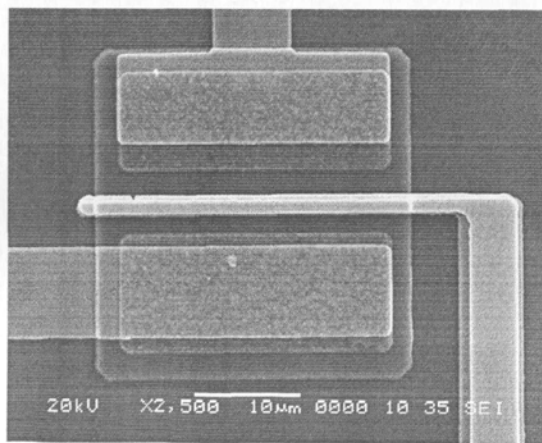


图 2.3 单栅器件

以极大的降低桥跨接引入的寄生电容对器件 f_T 和 f_{MAX} 的影响。

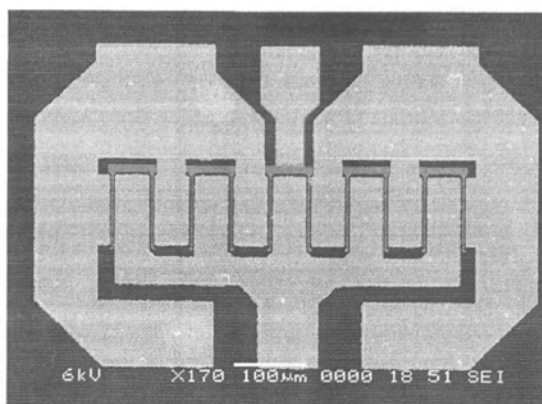


图 2.4 十栅器件

§2.3 空气桥的受力分析

2.3.1 平板结构空气桥受力分析

上面介绍了相同面积下的平行板电容器，当两平行电极板之间的介质为干燥的空气时该电容器的电容最小(接近于两平行电极之间为真空时的电容)。

我们在制作微波大功率 AlGaIn/GaN HEMT 时，为了器件能够得到高的截止频率和大的功率附加增益，微波大功率器件必须采用多栅结构，再利用空气桥技术将器件的孤立的源端或漏端分别实现互连，从而实现 AlGaIn/GaN HEMT 微波大功率器件的制作。

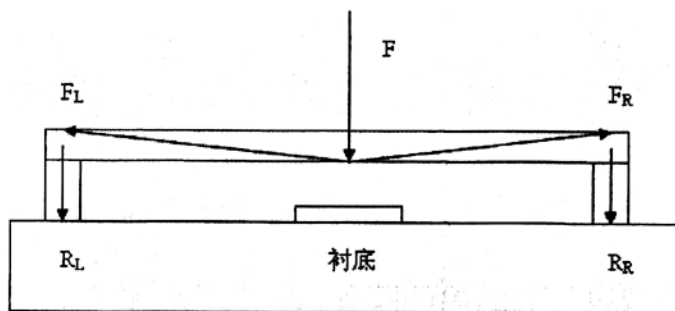


图 2.5 平面金属桥的受力情况

图 2.5 是最简单的平板结构空气桥的受力情况。空气桥在水平面：

$$SF_x = F_{LH} + F_{RH} = 0 \quad (2.17)$$

其中， F_{LH} 、 F_{RH} 为水平桥面金属斜向上的一对拉力在水平上分解为方向相反一对力， F_{LH} 为水平向左的力，而 F_{RH} 为水平向右的力。在垂直桥面上：

$$SF_y = F - R_L - R_R = F - F_{L'V} - F_{R'V} = 0 \quad (2.18)$$

其中, F 一般情况下为桥金属自身的重量, R_L 、 R_R 为桥墩对桥的作用力, $F_{L'V}$ 、 $F_{R'V}$ 为水平桥面金属斜向上的一对拉力在垂直向上的分力。

通常情况下, 当桥上受到一个向下的力 F 时, 桥的金属就会产生一对近似水平方向的拉力 F_L 、 F_R , 这一对拉力的合力与向下的力 F 大小相等方向相反。根据力的分解, 这对近似水平方向的力与水平面有一个向上的夹角, 夹角越小, 这对力越大。根据牛顿第三定律: 力的作用是相互的, 桥墩会产生一对拉力反作用于 F_L 、 F_R , 这两个力越大, 桥墩就必须产生一个更大的拉力与之相互作用。两边的桥墩高度一定, 由于力 F 存在, 使桥的中心有向下移位; 而 F_L 、 F_R 对桥墩的拉力作用, 会使得桥墩在一定程度上向里弯曲, 这加剧了桥中心向下移动的量, 而形成桥面与水平面形成了一个较大的夹角。在一些特殊情况下, 空气桥的跨度远大于桥面的高度, 这个微小的夹角会使得桥的中心金属相对有个大的下移, 桥中心的金属与桥底距离缩小, 很容易接触到桥底金属线而造成短路。

同时 AlGaIn/GaN HEMT 微波大功率器件常用于一些极端的环境下, 如用于飞机、通信卫星, 以及一些加速检验测试可靠性的环境中, 空气桥受到一个加速度作用, 这个加速度可达到十几个 g , 而在某些特殊情况下甚至更大, 可达上万个 g , 相当于在水平桥面上施加了上万倍于桥面金属重量的力, 这时桥面的形变更为严重, 更容易从中间塌陷, 导致器件短路而失效。

微波大功率器件可以在很高的温度下工作, 如 AlGaIn/GaN HEMT 微波大功率器件的最高温度可以达到 600°C [2.5]。在上面平板金属桥的受力分析中, 知道平衡的金属桥面是稍微向下弯曲的。当金属桥从室温被加热到 600°C , 桥金属在热的作用下体积有着很大的膨胀, 桥金属产生一个很大的弹性力, 在该力的作用下板桥金属会向着桥底突出, 来释放该弹性力, 此时更容易导致器件的短路失效。

上面介绍的两个因素使得空气桥极其容易塌陷短路, 严重影响了微波大功率器件甚至 MMICs 电路的可靠性。因而须要采用受力能力更强, 可提高器件可靠性的空气桥结构。

2.3.2 拱形结构空气桥受力分析

图 2.6 为拱形结构的空气桥的受力情况。从图可以看出拱形桥是以中轴线形成对称的, 从桥的中心到两个桥墩之间的桥面, 与水平面有一个夹角, 越向桥墩方向夹角越大。当拱桥受到一个向下力:

$$F = mg + ma \quad (2.19)$$

其中, m 为金属桥自身的质量, a 为受到外界加速度的作用, 力在桥面上分解成左

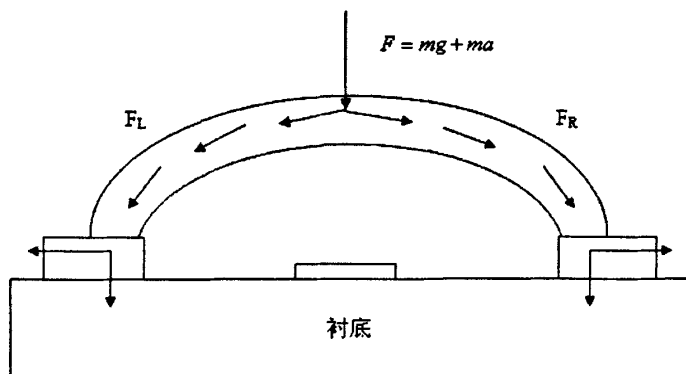


图 2.6 拱桥的受力情况

右两个分力，通过金属桥传导到左右两个桥墩上，再分解成一个水平方向和一个垂直向下的分力。同样，桥墩处会产生一个大小相等方、向相反弹性力，支撑整个金属桥。拱形桥受到向下的压力时金属桥体受压缩，金属刚性的存在使得金属受压缩时产生一个的弹性力，反作用于拱形桥来平衡金属桥受到的压力。当拱形桥受到的压力更大时，桥面会变得更低，金属桥有更大的形变而产生更大的弹性力，而拱形桥面到水平桥面之间有着很大的形变范围，这就拱形结构空气桥能承受更大压力的一个主要原因。

拱形桥面跟水平面有一个向上的夹角，在高温情况下是，金属体积膨胀，金属桥产生很大的弹性力，这弹力分解成为一个垂直向上和一个水平方向的力。因为拱形桥的对称性，水平方向的力相互抵消，垂直向上的力使得桥上的金属向上突出，释放金属体积膨胀说产生的弹性力。确保金属桥不会向下塌陷，所以器件能够在很高的温度下保持高可靠性。

对比平板结构的空气桥，拱形结构空气桥在结构上有着无与伦比的优势，使得拱形空气桥能够承受更大的压力，和更大的温度变化。

§2.4 本章小结

本章对比了真空平板电容与电介质平行板电容，说明了电介质电容的电容量增加主要是由于电介质在电场中产生极化现象产生反向电场，降低电容器两极板的电压所致。

同时，分析了多栅器件的截止频率 f_T 和最大振荡频率 f_{MAX} 都与器件的栅源寄生电容之间的关系，多栅器件的栅源寄生电容可以看成两部分组成，一为栅金属与源欧姆接触之间的寄生电容，此寄生电容的在器件的设计中很难避免；另一部

分为器件的源端跨接处与栅之间产生的寄生电容，该处的寄生电容可以采用版图设计以及工艺上采用高桥面的空气桥来减少其寄生电容，从而达到提高器件的截止频率和最大振荡频率的目的。

最后，对比分析了拱形桥结构和平板结构空气桥的受力、以及在高温下空气桥的形变情况，得出拱形结构空气桥有更大的抗压能力，能够更可靠的工作于大加速度和高温的环境中。

第三章 拱形空气桥的制作

在多栅器件中,每个独立的单元要互连在一起可以采用空气桥(Air-bridge)^[3.1, 3.2]来实现。由于AlGaIn/GaN HEMT都在蓝宝石或SiC衬底上,制作通孔很难实现;而采用倒扣技术制作大尺寸器件的技术还不十分成熟,所以空气桥技术来连接大尺寸器件单个单元被广泛采用。由于空气的介电常数最小,所以采用空气桥与采用介质桥相比,能大大减小寄生电容的产生,但是制作的难度有所增大。图3.1和图3.2为空气桥结构的俯视图和侧视图^[3.3],空气桥用于连接AlGaIn/GaN HEMT器件的源端。

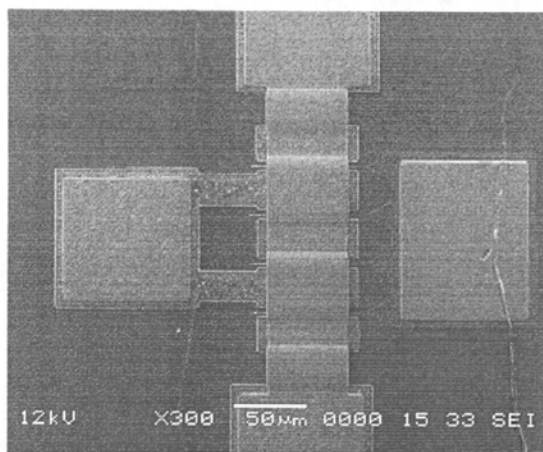


图3.1 空气桥结构的俯视图(引自王冲博士论文^[3.10])

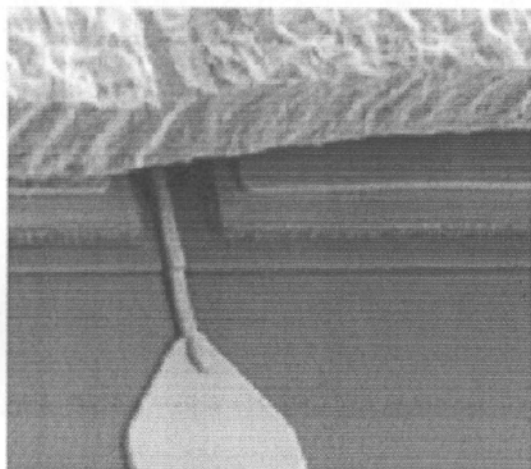


图 3.2 空气桥结构的侧视图(引自王冲博士论文^[3.10])

§3.1 制作空气桥关键步骤介绍

目前制作空气桥的基本步骤如图3.3所示：(a) 用光刻胶定型空气桥的桥墩，同时，这层光刻胶作为桥底的牺牲层，垫高金属桥；(b) 蒸发淀积金属生长层，用光刻胶定型出空气桥的图形；(c) 用电镀的方法，加厚空气桥；(d) 去掉定型空气桥的光刻胶，腐蚀起镀层，去除牺牲层。

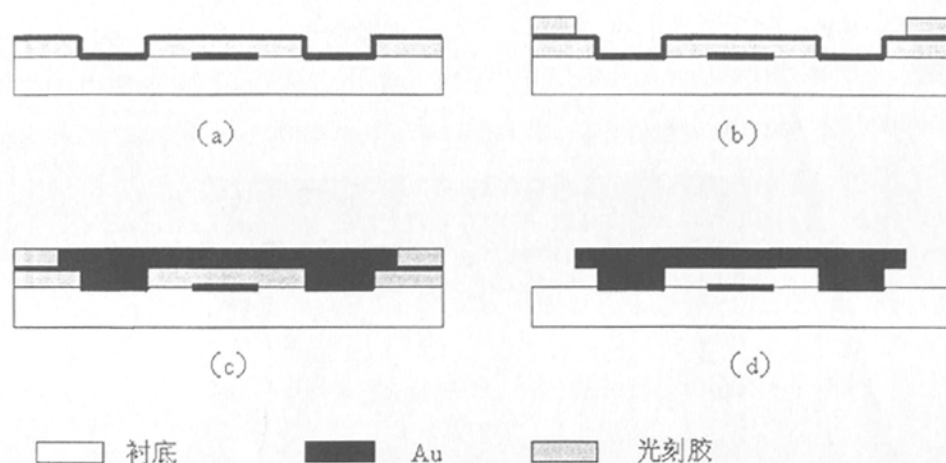


图 3.3 空气桥的基本流程

下面具体介绍目前空气桥制造中的关键步骤：

3.1.1 旋涂的光刻胶与光刻

光刻胶是一种材料物质，在光刻成像过程中，用它将光刻版上的图形暂时转移至晶片上，作为下一步可刻蚀或离子注入时的保护膜。而光刻胶在空气桥的制作过程中，有着自己所特有的作用，一个是起牺牲层作用；一个是电镀掩膜层作用。

牺牲层光刻胶，该光刻胶不仅仅起图形转移作用，还起到了垫高、定型金属桥面作为牺牲层，以及在后续去除起镀层时，对栅金属以及非电镀区域的保护作用。在制作空气桥的过程中就在该胶层上光刻桥墩，以及后续电镀过程中需要电镀加厚的区域。因而，一般对这层光刻胶的性质和所涂的胶厚度有特殊的要求：光刻胶必须容易旋涂较厚的胶层，光刻胶的透光性好，较厚的胶层在光刻后要有良好的边缘特性，光刻胶层在高温长时间烘烤，光刻胶的底层收缩量小，以及有良好的保护性能。目前国际上报道的用作牺牲层光刻胶有 PMMA, Su-8^[3.4-3.7]，光刻胶层的厚度一般达到 2~6 μm ，用来制备高约为 2~6 μm 空气桥。

掩膜层光刻胶，该层光刻胶主要是在器件的电镀过程中，对非电镀区域其保