

微波和高温器件的一种空气桥互连方法*

林若兵[†] 魏 巍 冯 倩 王 冲 郝 跃

(西安电子科技大学微电子学院 宽禁带半导体材料与器件教育部重点实验室, 西安 710071)

摘要: 空气桥是单片微波集成电路 MMICs 的一种高速互连技术,其目的是减少微波大功率器件单位面积的寄生电容,提高器件的频率特性.文中提出了一种灵活性很强,应用于微波和高温器件的空气桥定型方法.该方法利用不同性质的光刻进行多层甩胶、低温烘烤牺牲层,制出弧度很好的桥区拱形牺牲层,经低温烘烤的牺牲层的高度比烘烤前的高出 60%.利用该方法可以制出高性能和高可靠性的空气桥互连结构.

关键词: 空气桥; 拱形; 牺牲层技术

PACC: 7280E; 6220F

中图分类号: TN305.99

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2008)02-0352-04

1 引言

微波大功率器件快速提高的特征频率和不断增大的功率,对高速互连线提出了更高的要求,这就需要发展一种寄生电容小,电阻小,工艺简单的互连技术来连接电路或器件的各个部分^[1,2].空气桥正是利用介电常数最低的空气作为电介质,最大地减少互连交叉处的单位面积寄生电容^[3],有利于器件频率特性的提高,同时减少器件面积,节约制造成本^[4].

目前已经有关于单片微波集成电路 MMICs 上利用空气桥结构减少寄生电容来提高电路频率特性的报道^[3,5],例如,采用高温(250~350℃)烘烤在金属桥底作牺牲层的光刻胶,在拱形牺牲层上制作空气桥,来提高器件上空气桥的结构强度,从而提高器件乃至电路的可靠性^[6,7].但高温烘烤会对一些利用二维电子气(2DEG)作为导电通道的异质结器件(例如 AlGaIn/GaN 微波器件)产生影响,降低器件二维电子气的导电特性,进而影响器件的功率和频率特性^[8].也有采用较低温度烘烤来制作拱形空气桥的^[9],但需要几个小时以上的长时间烘烤才能得到拱形牺牲层,降低了器件的制造效率.上面两种方法烘烤前后牺牲层的高度基本相同,在制造高桥面、低电容的空气桥时会增加光刻的难度.

针对目前存在的问题,考虑器件应用的极端条件,本文通过空气桥理论以及受力情况分析得出一种高可靠性空气桥结构,即拱形结构.从决定空气桥垂直结构的桥区牺牲层入手,研究如何在低温下制作高质量的桥区拱形牺牲层.通过同种和不同种光刻胶在各种烘烤温度下结构形状有差异的原理,得出最优拱形牺牲层的条件,并制出空气桥.

2 空气桥基本分析

互连线采用介质桥互连技术时,相互重叠的两层金属线和它们之间的绝缘介质组成电容.假设扁平的金属线的宽度大于介质的厚度,即 $a > d$,且其单位长度的面积远大于中间介质层厚度的平方,即 $S \gg d^2$.则重叠的金属线的单位面积电容近似为:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s S}{d} = \epsilon_s C_0 \quad (1)$$

其中 ϵ_0 为真空介电常数; ϵ_s 为介质材料的相对介电常数; C_0 为金属线重叠部分中间介质为真空时的单位面积电容.

为了减少寄生电容,采用相对介电常数最接近 1 的空气作为互连线的中间介质,其寄生电容是用普通材料作为介质时电容的 5%~20%^[5].另外,在互连线重叠面积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 MMICs 电路和微波大功率器件频率特性的目的.

图 1 是最简单的平板结构空气桥的受力情况.空气

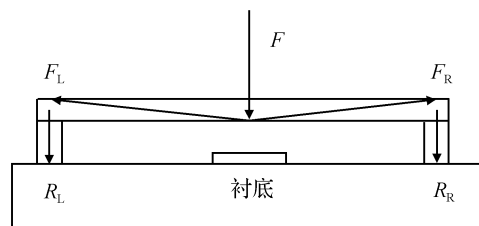


图 1 平板金属桥受力情况

Fig. 1 Situation of flat metal bridge under stress

* 国家重大基础研究计划资助项目(批准号:513080301)

[†] 通信作者. Email: ruobingl@126.com

2007-07-17 收到,2007-09-25 定稿

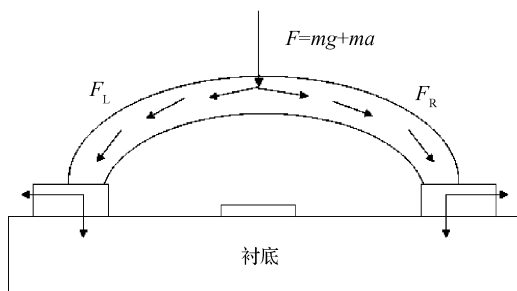


图 2 拱形金属桥的受力情况
Fig. 2 Situation of arched metal bridge under stress

桥在水平面上： $SF_x = F_{LH} + F_{RH} = 0$ 和垂直面上： $SF_y = F - R_L - R_R = F - F_{LV} - F_{RV} = 0$. 其中， F_{LH}, F_{RH} 为桥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_{LV}, F_{RV} 为垂直向上的分力， 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. 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. 两边的桥墩高度一定，由于力 F 存在，使桥的中心向下移位，桥面与水平面形成了一个夹角. 在一些特殊情况下，空气桥的跨度远大于桥的高度，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 MMICs 电路和微波大功率器件常用于一些极端的环境下，比如用于飞机、通信卫星等，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. 一些微波大功率器件可以在很高的温度下工作，如 AlGaIn/GaN 微波大功率器件能正常工作的最高温度可以达到 600°C ^[10]，从室温到 600°C ，空气桥金属体积膨胀，在力的作用下平板桥面会向着桥底突出. 这两个因素使得空气桥极易容易塌陷短路，严重影响了 MMICs 电路和微波大功率器件的可靠性. 因而需要受力能力更强，可提高器件可靠性的空气桥结构.

图 2 为拱形结构的空气桥的受力情况. 图中桥面与水平面有一个夹角，从对称中心越靠近桥墩夹角越大. 当拱桥受到一个向下力 $F = mg + ma$ 作用时，力在桥面上分解成左右两个分力，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，金属刚性的作用使得金属产生一个弹性力，反作用于拱形桥来平衡金属桥所受的压力. 当拱形桥所受的压力更大时，金属桥面产生更大的形变而产生大的弹性力. 拱形桥面到水平桥面之间有着很大的形变范围，该变化范围内金属桥长度有很大的变化量，因而能产生极大的弹性力来平衡所受的外界压力. 这就是拱形桥比水平桥面能承受更大压力的一个重要原因. 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，桥体

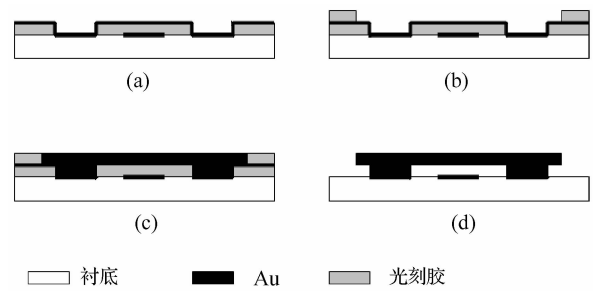


图 3 制作空气桥的基本流程
Fig. 3 Basic process of fabricating air-bridge

金属产生很大的弹性力，这个弹力分解成为一个垂直向上和一对水平方向的力. 因为拱形桥的对称性，水平方向的力互相抵消，垂直向上的力使得桥上的金属向上突出. 桥金属不会向下塌陷，确保了空气桥高温下的可靠性.

3 实验与分析

制作空气桥的基本步骤如图 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，腐蚀生长层，去除牺牲层. 最终得到一个完整的空气桥.

牺牲层的形状在空气桥的制作中起着决定性的作用，其厚度决定空气桥的高度. 实验中，第一层用 $4000\text{r}/\text{min}$ 的速度涂上一层剥离胶 (LOP5A)，用 160°C 前烘 20min . 第二层用 $4000\text{r}/\text{min}$ 的速度涂上一层光刻胶 (EPI622)，用 85°C 前烘 5min . 第三层用 $4000\text{r}/\text{min}$ 的速度涂上一层光刻胶 (EPI622)，用 85°C 进行前烘 5min . 曝光制作牺牲层，然后分别采用 $85, 100, 120$ 和 140°C 各烘烤 10min 和用 140°C 分别烘烤 $10, 20$ 和 30min .

图 4 是用 XP-1 台阶仪测出各个温度下，经过 10min 烘烤后桥区牺牲层的形状. 用 85°C 烘烤，牺牲层的高度有微小的下降，主要是由于上面两层的光刻胶的水分被烘干，牺牲层略有收缩，因而高度有微小的下

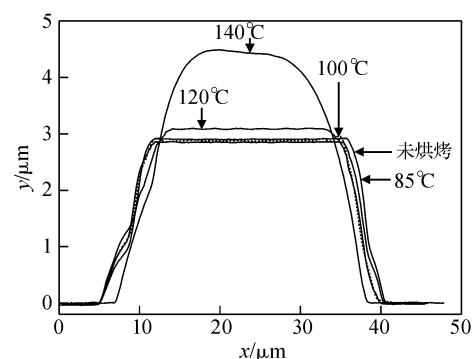


图 4 用不同温度烘烤得到的牺牲层图形
Fig. 4 Graph of sacrifice layer baked by different temperatures

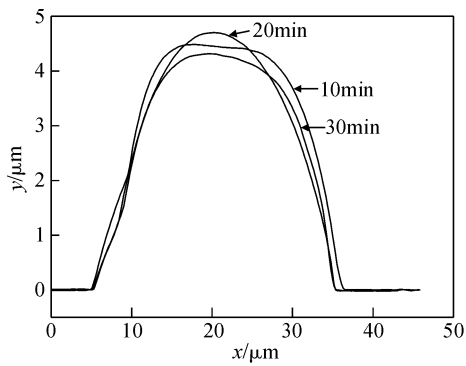


图 5 用不同时间烘烤得到的牺牲层图形图

Fig.5 Graph of sacrifice layer baked by different times

降.用 100°C 烘烤,由于牺牲层的边缘变的面积更大而比中间更容易吸收热量,使得牺牲层台面左右两个角横向收缩,而纵向则向上突出.用 120°C 烘烤,该温度使得上层的光刻胶有比较明显收缩,且在表面张力的作用下稍微向上凸起.用 140°C 烘烤,光刻胶在高温作用下变软,同时体积膨胀,在表面张力的作用下牺牲层的水平方向向中间迅速收缩,而垂直方向在左右两边压力的作用下向上突出.而最下面的剥离胶层所需的烘烤温度较高,在 140°C 的温度和上层光刻胶的作用下,剥离胶只有很小的收缩量,因而得到很好的拱形牺牲层.牺牲层的高度从烘烤前的 $2.9\mu\text{m}$ 到烘烤后的 $4.5\mu\text{m}$,比烘烤前高出了 50% .实验中,用 150°C 对牺牲层进行烘烤,发现牺牲层炭化变黑,在后续清洗牺牲层的过程中很难去除.

图 5 是在 140°C 下不同烘烤时间的桥区牺牲层图形.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,其高度最大,从烘烤前的 $2.9\mu\text{m}$ 到烘烤后的 $4.8\mu\text{m}$,比烘烤前高出 60% .主要是烘烤时间长短比较适宜,牺牲层的各个部分受热均匀,其受力对称均匀,在上层光刻胶体积膨胀和表面张力的共同作用下,形成了很好的拱形牺牲层.用 30min 烘烤,牺牲层也有着很好的拱形形状,但高度比 20 和 10min 烘烤的有明显的下降.在显微镜下观察,表面发黑,有被炭化的现象,特别是光刻胶的边缘部分被烧黑,使得牺牲层的高度反而降低. 140°C 烘烤,比底层的剥离胶的前

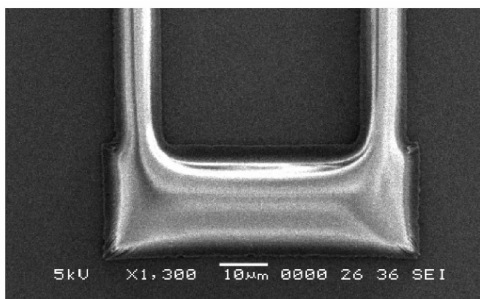
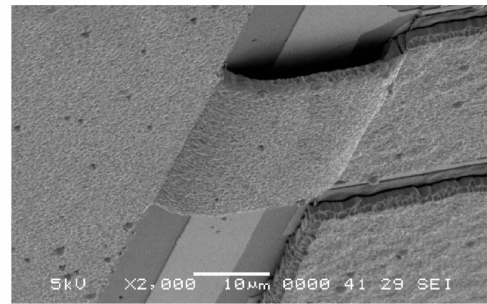
图 6 140°C 烘烤 20min 的牺牲层的 SEM 照片Fig.6 SEM of sacrifice layer baked at 140°C for 20min 

图 7 AlGaIn/GaN HEMT 器件上的空气桥 SEM 照片

Fig.7 SEM of air-bridge on AlGaIn/GaN HEMT devices

烘温度低,但剥离胶受到上层光刻胶张力的作用下,而向里收缩,其宽度有少量减少. 140°C 下经过三个不同时间的烘烤后牺牲层的宽度基本相同,比烘烤前的略小 10% .可以认为,牺牲层的宽度随烘烤温度的增加而变窄,而牺牲层的高度则随着时间增加先增后降.图 6 为用 140°C 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.

从上面的分析可以看出在 140°C 下烘烤 20min ,桥区的牺牲层的拱形结构最好,高度增加了 60% ,而其宽度收缩不到 10% .利用该条件可以制造出高桥面、高可靠性的拱形桥.图 7 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 $2.0\mu\text{m}$.

4 结论

本文对拱形结构空气桥进行了深入的分析.研究发现,决定拱形结构空气桥好坏的最重要因素是空气桥下面的牺牲层拱形结构的质量.对比各种温度下不同烘烤时间的牺牲层结构,分析得出, 140°C 烘烤 20min 得到的牺牲层拱形最好.桥高比烘烤前增加 60% ,而桥底宽度却只比原来缩小了 10% ,这样在保证牺牲层厚度不增加的基础上极大地增加了桥的高度,减小了光刻牺牲层的难度,更有利于减少空气桥的寄生电容.最后,根据理论分析结果,在 AlGaIn/GaN HEMT 上的源端上制出了高质量空气桥.

参考文献

- [1] Cabacungan J. Investigation and development of air bridges. Annual Microelectronic Engineering Conference, 2004: 71
- [2] Goldfarb M E, Tripathi V K. The effect of air bridge height on the propagation characteristics of microstrip. IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 1991, 1(10): 273
- [3] Inoue T, Tomita T, Kitaura Y, et al. A Rh/Au/Rh rigid air-bridge interconnection technique for ultra-high speed GaAs LSIs. IEEE GaAs IC Symposium, 1990, 90(4): 253
- [4] Nakanishi M, Noda M, Nakano T, et al. Test structures for the evaluation of air-bridge interconnection in GaAs IC's fabrication process. Conference on Microelectronic Test Structures, 1997, 10: 219
- [5] Vasilache D, Iordanesco S, Avramescu V, et al. Air bridge and

- planar inductors for MMICs. Proceeding of the International Semiconductor Conference, 1998, 2: 609
- [6] Ulliac G, Garidel S, Vilcot J P, et al. Air-bridge interconnection and bondpad process for non-planar compound semiconductor devices. *Microelectron Eng*, 2005, 81: 53
- [7] Garidel S, Vilcot J P, Zaknoute M, et al. Versatile bondpad report process for non-planar compound semiconductor devices. *Microelectron Eng*, 2004, 71: 358
- [8] Borzenko T, Lehmann F, Schmit G, et al. Metallic air-bridges on non-planar transport structures. *Microelectron Eng*, 2003, 67: 720
- [9] Schicke M, Schuster K F. Integrated niobium thin film air bridges as variable capacitors for superconducting GHz electronic. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2003, 13(2): 135
- [10] Tan W S. AlGaIn-GaN based heterostructure field-effect transistors. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, 2005: 507

An Air-Bridge Inter-Connection Method for Microwave and High Temperature Devices*

Lin Ruobing[†], Wei Wei, Feng Qian, Wang Chong, and Hao Yue

(Key Laboratory of the Ministry of Education for Wide Band-Gap Semiconductor Materials and Devices, Microelectronics Institute, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A flexible air-bridge method is proposed that is useful for high temperature microwave devices. This method makes use of different resists to give several resists as a sacrificial layer. After low temperature baking, a perfect arch sacrificial layer of bridges with a ratio higher than 60% is obtained. An air-bridge inter-connection structure with excellent characteristics and high reliability can be easily fabricated with this method.

Key words: air-bridge; arch; sacrificial layer technology

PACC: 7280E; 6220F

Article ID: 0253-4177(2008)02-0352-04

* Project supported by the National Major Fundamental Research Program of China (No. 513080301)

[†] Corresponding author. Email: ruobingl@126.com

Received 17 July 2007, revised manuscript received 25 September 2007