

# 低成本低损耗微波集成电路新工艺 —FeCrAl—Cu—Cu—Au 金属系统

彭传才 金昭廷 谢淑云

**提 要** 本文提出了 FeCrAl—Cu—Cu—Au 金属系统制造微波集成电路的新工艺。实验研究表明, 该金属系统具有一系列优良的物理特性, 用它制造微波集成电路不仅性能优良, 而且成体很低。

## 前 言

微波集成电路应用的不断增长, 对制造工作者提出了两个迫切的问题, 一是降低成本, 二是提高性能。目前, 制造微波集成电路使用的金属系统, 大多数仍采用 Cr—Au—Au 或 NiCr—Au—Au。这是因为金具有较低的电阻率, 抗腐蚀性能好。但是, 由于该金属系统耗金量大, 金价上涨, 成本日趋突出。另一方面, 传统的 Cr (或 NiCr)—Au—Au 系统, 由于 Cr 在金中固相扩散, 使薄膜导体老化, 电阻率增高, 附着力降低, 容易剥离<sup>[1] [2]</sup>, 加之在通常的锡—铅焊料中溶解度大, 焊接时“吃金”严重<sup>[3]</sup>, 往往导致焊接失败。此外, Cr (或 NiCr)—Au—Au 系统的微波损耗也有待改善。

对于吸附层和导体材料系统有过不少研究<sup>[4~10]</sup>, 提出了不少金属系统, 如 Ta—Au, Ti—Au, Ti—Pd—Au, Mo—Au, Ti—Cu—Ni—Au, Ti—Cu, Ti—Pd—Cu—Ni—Au, Cu—(化学沉积)—Au 等。这些金属系统在某些方面有所改善, 但都有一定的局限性, 成本和性能二者不能兼顾。我们在 Cr—Cu—Cu—Au 金属系统的工艺基础上, 又提出了 FeCrAl—Cu—Cu—Au 系统。这个金属系统的优点是: 一、FeCrAl 跟基片的附着力强, FeCrAl 跟 Cu 等导体的吸附性能比 Cr 跟 Cu 的吸附性能好<sup>[8]</sup>。二、Cu 比金的导电性好, 因此 FeCrAl—Cu—Cu—Au 比 Cr (或 NiCr)—Au—Au 的微波损耗小<sup>[7]</sup>。三、导带采用蒸 Cu—镀 Cu—镀薄 Au 工艺, 大量节约金, 成本大大降低, 用 FeCrAl 作吸附层, 成本可进一步降低。四、FeCrAl 是良好的薄膜电阻材料, 可在微带电路上既作底层, 又作电阻薄膜, 使微波电路进一步集成化。

## 一、FeCrAl—Cu—Cu—Au 系微带制造工艺

FeCrAl—Cu—Cu—Au 系统微波集成电路制造工艺步骤如下:

(一) 清洗基片: 制备好的基片去腊后, 丙酮棉球擦洗, 用洗液超声清洗, 去离子水

冲洗，去离子水超洗，在 250—300℃ 烘干。也可以在丙酮棉球擦洗后，丙酮超洗，无水乙醇超洗，然后烘干。

(二) 蒸 FeCrAl—Cu：一般底层 FeCrAl 控制在几百埃，Cu 5000—10000 埃，真空度  $1 \times 10^{-5}$ — $8 \times 10^{-6}$  mmHg，蒸发速率没有严格限制。

(三) 镀 Cu (硷性无毒光亮镀 Cu)，约 6—8 微米。

(四) 涂光刻胶，曝光，显影，坚膜。

(五) 带胶电镀金 (硷性氰化物镀金)；约 2 微米。

(六) 去胶。

(七) 腐蚀 Cu 和 FeCrAl。

腐蚀 Cu 用  $\text{FeCl}_3$  溶液，腐蚀 FeCrAl 用稀盐酸，也可用碱和高锰酸钾水溶液。如果微带电路中要求同时制造薄膜电阻，则在第二步蒸 FeCrAl 时，按要求监控 FeCrAl 薄膜厚度，控制蒸发速率，基片温度，淀积参数，并在第七步用浓硝酸腐蚀铜后套刻电阻图形，然后腐蚀 FeCrAl，最后进行冷热循环处理和调阻。

## 二、FeCrAl 薄膜电阻的制造工艺

FeCrAl 作为电阻加热材料已为大家所熟悉，但用作薄膜电阻材料则是初次尝试。我们采用 FeCrAl 做薄膜电阻，主要考虑如下几个因素：

(一) FeCrAl 跟以铜为主导体的微带线工艺相容。我们曾经试图在以 Cu 为导体的微带工艺中用 NiCr 作底层，同时做出 NiCr 薄膜电阻，但遇到了困难。因为 NiCr 腐蚀液中含有硝酸，腐蚀 NiCr 又必须加热到较高的温度。因此很容易将铜腐蚀掉。(二) FeCrAl 可用钨丝或钨篮蒸发，但不象 NiCr 那样在蒸发条件下与钨形成合金，钨源可多次重复使用，因此既节约钨丝，又减少清洗、处理钨丝的工作量。(三) FeCrAl 的蒸发特性好。NiCr 是在比熔点温度高得多的条件下蒸发，蒸发源流动很严重，NiCr 中的 Ni 与钨起反应，Cr 又优先蒸发，因此蒸发的薄膜成分严重偏离原材料成分。FeCrAl 则不然，它在熔点温度附近就有较快的蒸发速率，可在半固相状态蒸发，源不呈液态流动，Cr、Al 等成分没有明显的优先蒸发，薄膜成分不会明显偏离原材料成分。因此蒸发重复性较好。(四) FeCrAl 薄膜电阻性能好，主要电性能与 NiCr 薄膜电阻相当 [11]。由于 FeCrAl 含有 Al，薄膜表面生成  $\text{Al}_2\text{O}_3$  保护膜，比 NiCr 更耐大气腐蚀。此外，FeCrAl 比 Cr 和 NiCr 等底层材料便宜。

我们用的原材料是北京钢丝厂生产的，规格为  $\phi 0.5$  毫米，标称化学成分 Cr25%，Al5.5%，余 Fe，每公斤十五元。加热源用两股  $\phi 1.2$  毫米和一般  $\phi 0.5$  毫米的钨丝绕成钨篮或螺旋状或直线形。FeCrAl 可用单股绕在钨丝 (篮) 上，也可制成 V 形挂上，根据我们的实际情况，选用的淀积参数是：基片加热 250—300℃，方阻根据需要控制在 20—300  $\Omega/\square$ ，蒸发时间几秒到几十秒，蒸发时的真空度  $1 \times 10^{-5}$ — $5 \times 10^{-5}$  mmHg。光刻腐蚀出电阻图形后在空气中室温  $\rightarrow 150^\circ\text{C}$  (2~3 小时) 冷热循环处理四次。最后超声调阻达到要求的阻值。

### 三、FeCrAl—Cu—Cu—Au 系的物理性能

#### (一) 附着力和焊接性

FeCrAl 跟基片、Cu 跟 FeCrAl、Au 跟 Cu 之间的附着力，我们未做定量的测试，只在蒸发、电镀 Cu 和最后腐蚀成形三个工序之后用胶带剥离试验，多批次的检验证明，它们之间的附着力是很好的。文献[8][9]对 FeCrAl—Cu 和 Cr—Cu 的附着力作了比较，认为 FeCrAl—Cu 的吸附性能更优。FeCrAl—Cu—Cu—Au 系的焊接性也比 Cr—Au—Au 系好，因为用锡—铅焊料焊接时，表面金被溶解，暴露的铜的新鲜表面，具有良好的焊接性能。而纯 Au 系统，由于锡—铅焊料对金溶解度大，往往在焊接时将金全部“吃光”，暴露出底层金属，以致无法焊接。

#### (二) 微波损耗

微带电路的一个主要性能指标是微波衰减。因此微波损耗是衡量微带导体系统优劣的主要标志。我们是采用直接测量微带线损耗的方法来比较导体系统的优劣。其方法是在 2 毫米厚的  $Al_2O_3$  (99瓷) 基片上，用 Cr—Au—Au，Cr—Cu—Cu—Au，FeCrAl—Cu—Cu—Au 分别制造一条 2 毫米宽的  $50\Omega$  传输线，导体总厚度均为 8 微米。然后分别测量传输线的损耗。表 1 列出了三种系统的微带线损耗的比较（归一化数据）。表列

各种金属系统微带线的损耗比较 表 1

损 耗 金属系统	频 率	
	1.5GC	2.1GC
Cr—Au—Au	1	1
Cr—Cu—Cu—Au	0.41	0.47
FeCrAl—Cu—Cu—Au	0.22	0.42

数据没有扣除转换接头的损耗，也包含了基片的介质损耗，因此测得的传输线损耗数值不是纯导体的损耗，但在测试条件及其它条件（基片厚度，表面光洁度，介电常数等）基本相同的情况下，作为比较数据是能说明问题的。从表 1 可以看出，FeCrAl—Cu—Cu—Au 系统损耗最小，Cr—Cu—Cu—Au 次之。以铜为主导体的微带线微波损耗比以金为主导体的微带线的微波损耗小，这是因为铜的导电率比金的导电率高的缘故。我们用 FeCrAl（或 Cr）—Cu—Cu—Au 系制造的微波集成晶体管放大器，其性能可与同频段下应用状态的参放电路媲美，经鉴定已在整机中大批量使用。

#### (三) FeCrAl 薄膜电阻特性

按照上述工艺制得的 FeCrAl 薄膜电阻特性，如图 1、2、3、4 及表 2 所示。表 2 列出了各种方阻的试样在 25—80°C 测得的电阻温度系数。一般地说，FeCrAl 薄膜电阻的电阻温度系数可控制在 15—40ppm/°C。图 1 表示方阻为  $200\Omega/\square$  的试样在空气中 30—150°C 冷热循环处理时电阻的变化曲线。由图可以看出，FeCrAl 薄膜电阻开始时，每做一次冷热循环处理，电阻都要向上漂移一点，升温降温曲线不重合，一直到

四次循环以后,电阻不再漂移,升温降温曲线基本重合,电阻随温度几乎成直线变化。

FeCrAl 薄膜电阻的电阻温度系数 (25—80°C 测得) 表 2

试样编号	方阻 ( $\Omega/\square$ )	TCR (PPm/°C)
1	30	-14
2	50	+37
3	100	+30
4	200	+40
5	300	+30

这说明电阻膜组织已稳定在某一状态,表面氧化趋于饱和。我们认为在空气中多次冷热循环处理是非常必要的。例如,经 320°C 真空热处理 30 分钟的试样,在室温干燥塔中放置三个月,阻值没有出现漂移,但在空气中 150°C 加热后,阻值很快发生变化,经多次冷热循环处理之后,电阻达到稳定状态。图 2 表明了这一情况。图中曲线 A 是未经冷热循环处理的试样在室温干燥塔中存贮三个月的电阻变化曲线,曲线 B 是同组试样室温存贮三个月后,又经四次 25—150°C 冷热循环处理后在 80°C 存贮测得的电阻变化。有的文献资料提出,FeCrAl 薄膜电阻在 25—300°C 冷热循环处理<sup>[11]</sup>,但对于 Cu 导体系统显然是不适合的。有的文献介绍真空 30—275°C 冷热循环处理数次<sup>[9]</sup>。但这种真空操作,周期时间太长,在真空条件下,表面氧化也不充分。我们选用 30—150°C 冷热循环处理工艺,既保证铜不被氧化(有镀金层保护),又能使电阻获得足够的稳定性。图 3 表示了一组试样在 30—150°C 冷热循环处理四次后,在 120°C 长期存贮的电阻变化情况。由图 2、3 可以初步看到,采用上述淀积参数及热处理方法获得的 FeCrAl 薄膜电阻器,稳定性是相当好的。这种高温长期稳定性试验,还在继续进行。

#### (四) 图形精度

我们对传统的蒸发 Cr, Au—光刻—电镀厚 Au 工艺和蒸发 Cr (或 FeCrAl) Cu—镀 Cu—光刻—带胶电镀薄金工艺的尺寸精度,用两毫米宽的线条作了测试比较。一般地说,传统工艺制得的线条相对于光刻版尺寸宽展 1—2%,而我们现在采用的工艺制得的线条,相对于光刻版尺寸,宽展小于 1%,有时无宽展或小于标称尺寸。其原因是镀铜层较厚,腐蚀时侧蚀大,但镀金时又有宽展,两者有相互补偿的作用。因此宽展大小取决于镀 Cu 和镀 Au 层的厚度。

由于传统工艺的尺寸宽展较大,对于制造狭缝图形往往构成短路。我们应用带胶电镀薄金工艺对制造某产品的耦合电路的成品率作了统计,成品率达到 60%,其图形如图 4 所示。狭缝宽 70 微米长 70 毫米。根据我们以往的经验,采用传统的蒸发—光刻—电镀厚金或蒸发—光刻—带胶电镀厚金工艺,欲获得这种图形是很困难的。

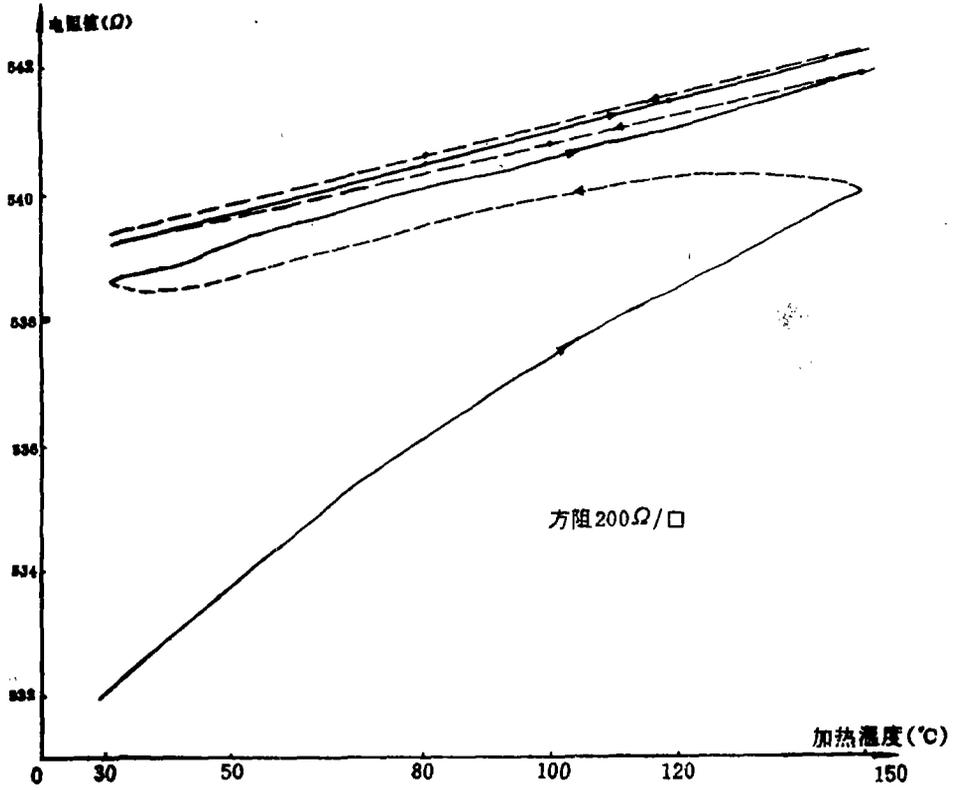


图 1, FeCrAl 薄膜电阻冷热循环处理电阻变化曲线

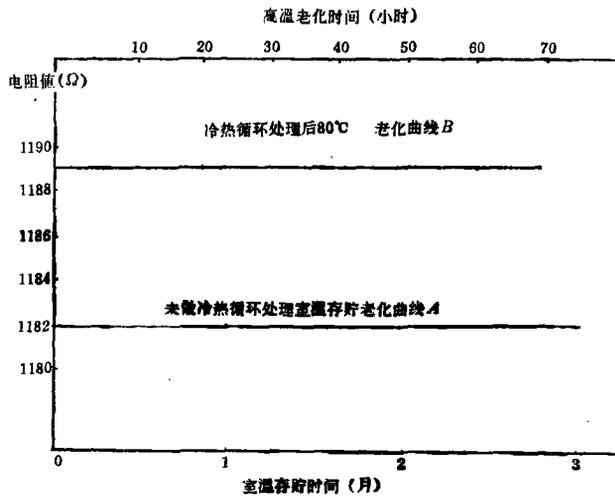


图 2, FeCrAl 薄膜电阻室温存贮和 80°C 存贮电阻变化曲线

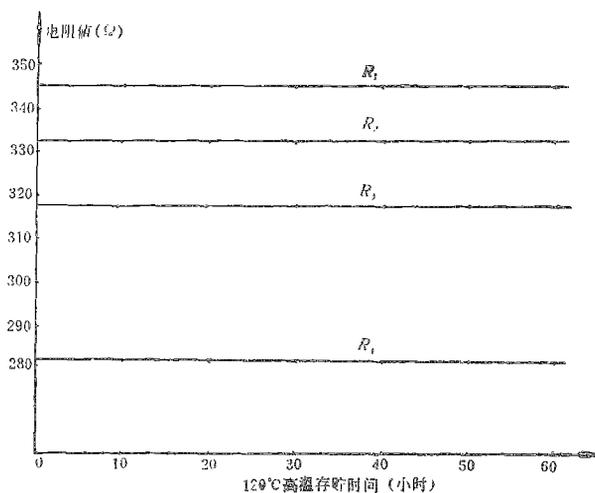


图 3. FeCrAl 薄膜电阻 120°C 存储电阻变化曲线

#### 四、结 论

FeCrAl—Cu—Cu—Au 金属系统，以 Cu 为主导体，不蒸金，仅在最后镀薄金作为保护层，因此大量节约金耗量，加之 FeCrAl 又比 Cr 和 NiCr 便宜，使微带电路成本大大降低。根据我们近三年统计，采用以 Cu 为主导体制造微波集成电路，节约金约 3 公

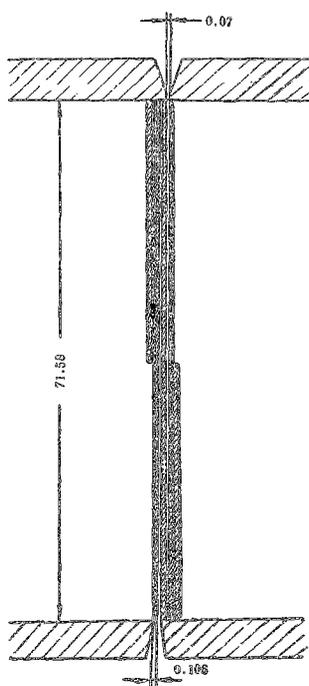


图 4. 叉指正交型耦合器

斤, 计约 5.4 万元 (纯度为 99.99% 的金, 每公斤 1.8 万元)。由于 Cu 的导电性好, 该系统的微波损耗小, 电路性能好, 已为批量生产的微波集成电路的优良性能所验证。FeCrAl 跟基片、跟 Cu 的附着性很好, 蒸发特性好, 钨源寿命长。应用一般蒸发工艺和采用 30—150°C 冷热循环处理能获得温度系数低, 稳定性好的 FeCrAl 薄膜电阻。此外, FeCrAl—Cu—Cu—Au 系统, 采用独特的带胶电镀薄金工艺, 图形尺寸宽展小, 能成功地制造长的细窄狭缝。因此用 FeCrAl—Cu—Cu—Au 金属系统可以制造出低成本、低损耗的微波集成电路。

### 参 考 文 献

- [1] "Structural and Resistivity changes in Heat-Treated Chromium-Gold Films" T. S. F. Vol. 37 No 2 1976
- [2] "Characterization of a Chromium Gold Deposition Process for the Production of Thin Film Hybrid Microcircuits" IEEE Trans Vol. PHP-10 No 4 1974.
- [3] "Aspects of Lead-Indium Solder Technology" Proceedings of the 1976 international microelectronics symposium.
- [4] "Performance of New Copper-Based Metallization Systems in an 85°C, 78%RH, SO<sub>2</sub> Contaminated Environment" IEEE Trans Vol CHMT-2 No 1979.
- [5] "Aging Properties of Gold layers With Different Adhesion Layers" T. S. F. Vol. 37 No 3 1976.
- [6] "Interface Behaviour Evaluation in Cr/Au, Ti/Au and Ti/Pd/Au Thin Film by Means of Resistivity and Stress Measurements" T. S. F. Vol. 36 No 2 1976.
- [7] "A New Electroless Method for Low-Loss Microwave Integrated Circuits" IEEE Trans Vol CHMT-1 No 4 1978.
- [8] "A Low-Cost Thin-Film Microcircuit Process" IEEE Trans Vol CHMT-2 No 2 1979.
- [9] "Low TCR Kanthal Resistive Films for Hybrid IC'S" Journal of Vacuum Science and Technology Vol. 7 No6 1970.
- [10] "Thin-Film Microwave Integrated Circuit" IEEE Trans Vol. PHP-12 No 4 1976.
- [11] "Properties of Thin Film of Kanthal" Journal of Vacuum Science and Technology Vol, 17, No 3 1980,

A New Technology of Microwave  
Integrated Circuit with Low Cost and Low Loss  
—Metal System FeCrAl—Cu—Cu—Au

Peng Chuan—cai    Jin    Zhao—ting    Xie    Shu—yun

**Abstract**

A new technology of microwave integrated circuits made from the metal system FeCrAl—Cu—Cu—Au is presented. The experimental investigation showed that the metal system exhibits a lot of excellent physical properties. Microwave integrated circuits produced from this metal system are not only high—grade in quality, but also quite low in cost.