

微波功率器件金属化布线回流加固结构^{*}

孙英华 李志国 程尧海 张万荣

(北京工业大学电子工程系, 北京 100022)

摘要: 在回流动力学理论和实验研究的基础上, 将回流加固结构应用于实际微波功率器件。结合器件具体结构和制备工艺, 对金属化布线电流分布和最佳回流长度进行了模拟计算和分析, 结合实际工艺优化设计了回流加固结构, 制备了六种结构样管, 电热应力试验结果表明: 采用一个缝隙、缝隙宽度为 $3\mu\text{m}$ 的结构回流加固效果最好, 抗热电徙动能力最强。利用回流效应可有效降低微波管中的纵向(Al-Si 界面)电迁徙失效, 提高器件可靠性。

关键词: 回流结构; 金属化; 微波功率器件

PACC: 6610; 0620 EEACC: 0170N

中图分类号: TN 305 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2000)07-0705-06

Novel Backflow Structure Hardening Metallization System in Microwave Power Device^{*}

SUN Ying-hua, LI Zhi-guo, CHENG Yao-hai and ZHANG Wan-rong

(Department of Electronic Engineering, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022, China)

Received 8 April 1999, revised manuscript received 18 July 1999

Abstract: A novel structure has been designed and applied in metallization system of microwave power device, in which backflow effect is taken to increase the electromigration resistance. Current density distribution and backflow threshold length in metallization are simulated and analysed and therefore backflow structure is optimized. Six kinds of samples have been manufactured with different backflow lengths and gap widths. Electromigration acceleration experiments prove that the structure with one $3\mu\text{m}$ backflow gap has the highest resistance of electromigration.

Key words: backflow structure; metallization; microwave power device

PACC: 6610; 0620 EEACC: 0170N

Article ID: 0253-4177(2000)07-0705-06

* 北京市自然科学基金和北京市科技新星计划资助[Project Supported by Natural Science Foundation of Beijing and by New -Star Plan of Science and Technology of Beijing].

孙英华 女, 1968 年出生, 副教授, 从事专业: 半导体器件可靠性物理。

李志国 男, 1941 年出生, 教授, 博士生导师, 从事专业: 半导体器件可靠性物理。

1999-04-08 收到, 1999-07-18 定稿

1 引言

随着微电子技术向纳米级发展,半导体器件和VLSI/ULSI特征尺寸迅速下降。在提高器件性能和集成度的同时,其复杂性与可靠性的矛盾日渐突出。金属化布线的尺寸缩小和有源区深度的减小尤为显著,产生的高电流密度和热效应导致金属化布线中电徙动失效日益严重。在金属化抗电迁徙技术及结构研究方面,人们已经提出了一些行之有效的措施,如:合金膜、钝化层覆盖、多层次金属化结构等,试验及应用表明他们均可不同程度地缓解电迁徙失效的威胁,但尚不能满足日益提高的可靠性要求。深入分析现有的抗电迁徙方法,将发现均为被动阻碍电迁徙离子流,并未从根本上抑制电迁徙,至少从理论上讲,电迁徙寿命仍是有限的。1977年Blech^[1]发现:在电迁徙过程中电子风引起的金属离子流在正极形成质量堆积,在负极区造成质量耗尽。正极的质量堆积会产生一反向于电迁徙方向的压力(化学势),这个压力将引起堆积的金属离子反向扩散,可以抵消电迁徙离子流,人们称此反向离子流为“回流”。可以想象理论上总有一个时刻,正向离子流和回流将完全相互抵消,使净离子流迁徙为零。1992年我们^[2]首次提出了回流加固结构的概念——即利用电徙动过程中的回流效应在特定结构下实现离子流的动态平衡,消除离子流散度,从而在本质上抑制电徙动失效。在此基础上深入开展了电徙动动力学理论和回流加固试验结构模型的探讨研究,从理论和样品试验方面证实了其良好的抗电徙动性能^[3,4]。

2 回流效应及其试验研究

所谓电徙动是指在高能电子风的作用下金属离子迁移的现象。从其理论机理上分析,如果在迁移过程中离子流散度为零,即不存在质量的堆积和耗尽,那么电徙动并不会引起器件或电路失效。但是在实际金属互连线中不可避免地存在着各种因素影响着离子流散度,这些因素主要表现为电流密度梯度、结构梯度、温度梯度、浓度梯度等。若在布线设计中充分考虑上述因素的作用,并对其加以合理的利用,则可有效提高布线的抗电徙动能力。回流效应与结构梯度和浓度梯度密切相关,在电迁徙离子流密度公式中可以将回流以浓度梯度扩散项的形式表示出来^[2]:

$$J_b = \frac{\delta D_b}{S} \left[-N_b + \frac{N_b}{f k T} Z_b q \rho_b j \right] \quad (1)$$

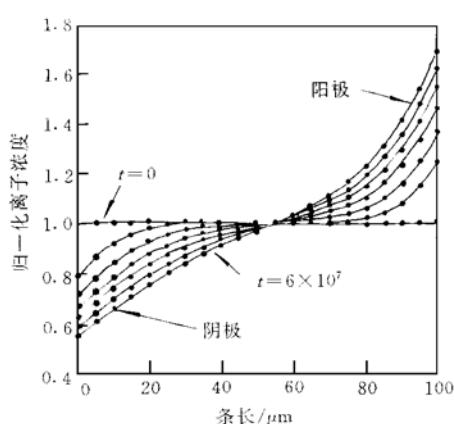


图 1 离子浓度随时间位置的变化

FIG. 1 Ion Concentration Versus Time and Stripe Length

其中 N_b 是金属离子浓度,梯度项前面的负号表示回流方向与电迁徙方向相反,脚标 b 表示晶界参数。随着电迁徙的发生,质量堆积和耗尽不断加剧,沿条长方向的离子浓度梯度逐渐增大,因此回流对电迁徙的抵消作用加强。当二者达到平衡时,净离子流为零。

$$N(x, t) = \frac{N_0 nl}{e^{nl} - 1} e^{nx} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{8N_0}{nl} \left[\frac{2k\pi}{nl} \right]^2 \frac{1 + (-1)^{k+1} e^{-nl/2}}{1 + \left[\frac{2k\pi}{nl} \right]^2} \times \left[\cos \frac{k\pi}{l} x + \frac{nl}{2k\pi} \sin \frac{k\pi}{l} x \right] e^{\frac{nl}{2} x} e^{\frac{nl}{4} \left[\frac{4k^2 n^2}{l^2} + n^2 \right] t} \quad (2)$$

上式为离子浓度 N 与位置、时间的关系,图 1 给出了不同时刻的 $N(X, t)$ 。可以看出在零时刻时,离子分布是均匀的, $N(X, 0) = N_0$, 当施加了一定时间的电热应力后,离子浓度梯度出现;随着回流的增强,离子堆积与耗尽的速度逐渐降低,最后呈现稳态分布。清楚地表明了回流和电徙

动离子流相互作用的动态平衡关系。

回流效应不仅可以用于提高金属互连线抗横向电徙动能力,而且可以应用于接触孔和通孔附近增强其抗纵向电徙动性能,提高界面稳定性。图2显示了回流效应对接触孔的保护作用,当电流从金属化层流向衬底时,电子风将挟带Al、Si离子离开界面流向金属化层正极(图2(a)),从而在界面处形成空洞,加入回流缝隙后,离子流将在缝隙处堆积,建立一定的浓度梯度后,形成动态回流,防止界面空洞的出现;当电流从衬底流向金属化时(图2(b)),电子风将挟带Al离子向界面和衬底迁移,在界面形成离子堆积,产生压应力,致使Al离子加速进入衬底,而回流缝隙的出现一方面可有效将Al离子流截断,从而减缓界面的压应力,提高其稳定性;另一方面可在回流结构和EB界面间形成短的回流长度,从而在较低的浓度梯度下即可实现离子流的动态平衡。

我们在理论模型分析的基础上进行了回流效应动力学的实验研究^[3,4]: 分别设计了用SiO₂覆盖效应建立的回流结构、利用Al/Ti双层金属化结构建立回流效应和VLSI接触孔回流加固结构。研究表明回流加固结构明显提高了Si-Al界面的可靠性,减小了压应力,减缓Al-Si的互扩散。试验结果表明:回流加固结构样品比普通样品的抗电迁徙寿命高一个数量级;回流加固结构的温度耐力比普通结构高出42℃。

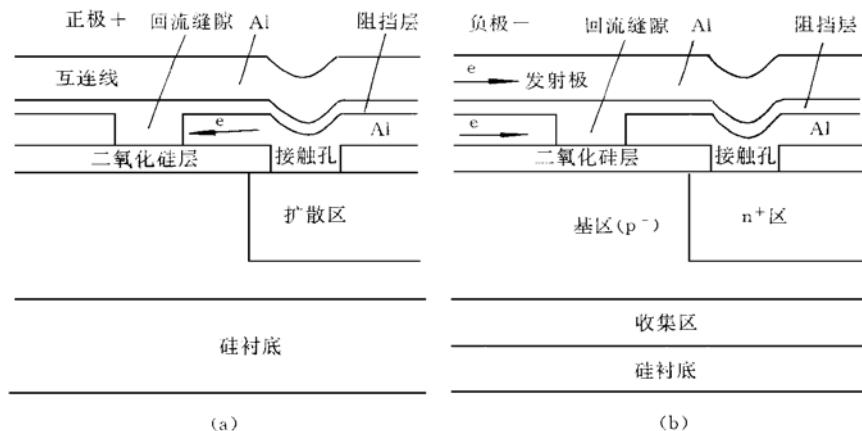


图2 利用回流效应加固接触孔示意图

FIG. 2 Diagram of Hardening Contact Holes

3 微波功率器件金属化回流加固结构的优化设计

在电热应力作用下,金属和半导体界面处的离子迁移和互扩散对系统参数稳定性和可靠性有显著的影响。在Al、Si系统中,微量的Al离子进入有源区,将严重影响器件性能,导致器件特性退化乃至短路失效。在高温和大电流密度下,Al、Si离子在强劲电子风的作用下,大量迁移离开界面,Al离子进入有源区而造成结漏电和短路,在界面处形成空洞,导致串联电阻增加或开路失效。微波功率器件具有浅结和高电流密度的特点,极易在发射极引线根部和引线孔处失效,这成为影响微波功率器件可靠性的关键问题之一。

我们在回流效应试验研究基础上,结合具体器件参数和结构特点,建立了回流加固结构优化设计原则,将其应用于3DA86微波功率管中。3DA86为Si微波功率器件,单胞功率为1W, $f_T > 800\text{MHz}$,发射区结深0.3μm,发射极条宽为10μm,长106μm,共6个梳状条,每条之中均匀分布7个引线孔。

3.1 发射极金属化层电流分布

pn结电流电压方程表明EB结电流随电压增加呈指数形式上升:

$$J \propto J_s e^{\frac{qU}{mkT}} \quad (3)$$

其中 $J_s = qD_n n_{p0}/L_n + qD_p p_{n0}/L_p$, 是与电子、空穴的扩散系数、平衡电子浓度及扩散长度相关的量, 在具体 pn 结中基本为常数. q 为电子电荷, v 为 EB 结的压降, k 为玻尔兹曼常数, T 为工作温度. m 为常数在 1—2 之间变化, 在低的偏压下, $m=2$, 势垒区的复合电流起主要作用; 正偏压较大时, $m=1$, 扩散电流起主要作用.

根据微波管 EB 结 $I-V$ 特性曲线可得到其动态电阻随电流的变化, 随着电流的增加, 动态电阻呈指数形式迅速下降. 当输出功率为 1W 时, 电流为 280mA, 此时的微波管的动态等效电阻约为 12.5Ω , 阻值很小, 在这种情况下, 发射区金属条上将产生较大的分压, 同时根据 pn 结电流电压方程, 发射极电流在金属条上沿条长方向呈指数形式减小.

首先见图 3 发射极金属条结构示意图和其等效电路图, L_M 是引线孔间距, 为 $15\mu\text{m}$, 膜厚 $1\mu\text{m}$, 宽 $10\mu\text{m}$, 薄膜电阻率 $6 \times 10^{-6}\Omega \cdot \text{cm}$ (大于体电阻率), L_M 相应电阻 $R_M = 0.09\Omega$, 电流为 280mA 时, EB 结正向压降为 3.5V, 共六个发射极条, 每条上的电流为 46.7mA, R_M 上的压降 $V_M = 0.004\text{V}$. 设第 i 个引线孔的电流为 J_i . 根据 pn 结电流电压方程, 即可得到第 i 个引线孔与第一引线孔的电流比为:

$$\frac{J_i}{J_1} = \exp(q(V_i - V_1)/kT) \quad (4)$$

从而得到沿条长方向电流的分布比例, 如图 4 所示, 纵坐标为第 i 个引线孔与第一个引线孔的电流比值, 横坐标为第 i 个引线孔, 与条的长度成正比. 其数据点的下降趋势为指数形式, 图中曲线为指数拟合曲线. 也就是说此梳状条根部电流密度最大, 相应其热效应也最为明显, 这意味此处失效的几率最大. 总之微波功率器件其可靠性的薄弱环节在发射级的根部, 所以只需重点加固发射极根部的引线孔, 即可达到提高其可靠性的目的; 而且尽量少地引入缝隙, 也减少了热效应和工艺隐患.

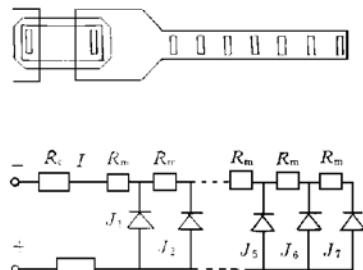


图 3 发射极结构示意图和其等效电路图

FIG. 3 Diagram of Emitter Structure and Its
Equivalent Circuits

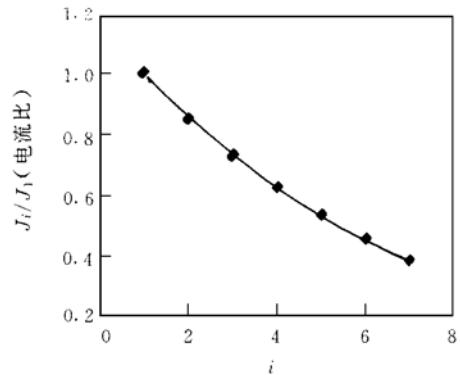


图 4 发射极引线孔电流分布比例

FIG. 4 Current Distribution Passing Different
Contact Holes on Emitter

3.2 回流长度

根据理论、试验和器件的特征尺寸确定合理而有效的回流长度. 根据多年来人们的电徙动试验结果和理论分析表明: 一定材料和结构的金属化, 在一定的电流密度和工作温度下, 存在一阈值回流长度 L_c , 当金属条长度小于此阈值长度时, 回流将与电迁移离子流达到一动态平衡, 在相当长的时间内保持稳定, 金属条将具有很强的抗电徙动能力. 对于具体结构 L_c 存在一最佳长度范围, 它的选取对回流作用至关重要. L_c 过长, 则回流效应较弱, 不能有效实现加固目的; L_c 过短, 则缝隙过多引入不必要的串联电阻. 设计原则为:

$$\begin{cases} L_{BF} \leq L_c \\ R_{BF} = R_{min} \end{cases} \quad (5)$$

L_{BF} 为回流长度; R_{BF} 为回流结构电阻.

根据形变结构图模型(MMP)对电流、温度和机械应力的综合模拟, 阈值回流长度与薄膜材料、晶粒尺

寸、厚度密切相关,与电流密度成反比^[1,5]:

$$j L_c = \beta = \gamma \frac{\sigma_s \Omega}{Z^* e \rho} \quad (6)$$

其中 j 为电流密度, L_c 为阈值回流长度, β 、 γ 为常数, Ω 为原子体积, Z^* 为离子有效电荷, ρ 为电阻率, σ_s 为离子流应力, 可表示为:

$$\sigma_s = \mu b \left[\frac{\alpha}{h} + \frac{\beta}{g} + (3r)^{1/2} + \frac{\xi}{x} \right] + \sigma_{PN} \quad (7)$$

σ_{PN} 为 Pieris-Nabarro 应力, μ 、 b 分别为剪切模量和布格矢量, x 为位错间距, α 、 β 、 ξ 为常数, h 为膜厚, g 为平均晶粒尺寸, r 为位错浓度. 根据式(6)和(7)可模拟计算回流阈值长度与薄膜厚度和晶粒尺寸的关系, 见图 5 的模拟结果, 图标为薄膜中不同晶粒尺寸.

在 3DA86 微波管中, 工作电流密度为 10^4 A/cm^2 量级. 发射极引线孔间距为 $15 \mu\text{m}$, 根据理论预测, 确定回流长度控制在 $10 \mu\text{m}$ 长度之内. 回流缝隙要避开台阶和结构梯度较大的区域, 因此设计了三种回流加固结构, 见图 6, 分别为 1、2、3 个缝隙, 并具有不同的回流长度和缝隙位置, 重点保护发射极根部引线孔.

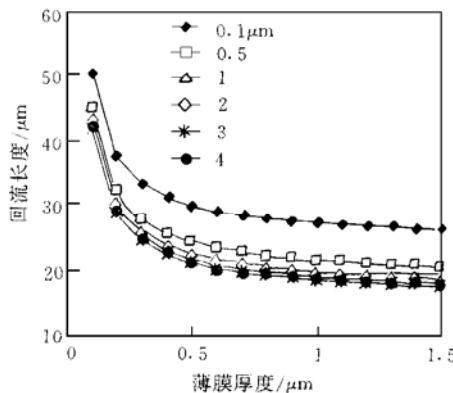


图 5 阈值回流长度与晶粒尺寸及薄膜厚度的关系

FIG. 5 Threshold Backflow Length Versus Crystallite Size and Film Thickness

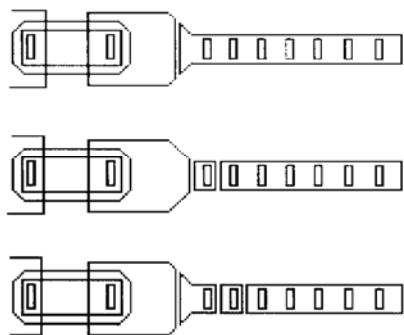


图 6 样品回流加固结构示意图

FIG. 6 Diagram of Sample Backflow Structure Hardening

3.3 工艺条件和热效应

设计的结构必须与器件工艺水平相结合, 目前此器件的 Al 金属化布线刻蚀工艺为湿法刻蚀, 可实现宽度约为 $2\text{--}3 \mu\text{m}$. 因此为了考察与器件的实际工艺条件相符合的情况, 改进后的结构采用两种回流缝隙尺寸: $2 \mu\text{m}$ 和 $3 \mu\text{m}$, 共计六种样品, 依次为:

缝隙宽度为 $2 \mu\text{m}$ 的样品: 1 号样品- 1 个缝隙; 2 号样品- 2 个缝隙; 3 号样品- 3 个缝隙.

缝隙宽度为 $3 \mu\text{m}$ 组样品: 4 号样品- 1 个缝隙; 5 号样品- 2 个缝隙; 6 号样品- 3 个缝隙.

改进后的微波管金属化结构为五层复合结构, 为减小串联电阻和焦耳热采用 TiN 作为阻挡层, Al-Si($1 \mu\text{m}$) (上层导电层)/Ti(10 nm) (粘附缓冲层)/TiN(50 nm) (阻挡层)/Ti(10 nm) (粘附缓冲层)/Al-Si(400 nm) (下层导电层). 其它结构均未改动, 对器件原制备工艺流程影响较小, 易于实现.

4 热电应力试验和结果

4.1 斜坡电流应力试验测试

采用微机控制的高精度快速自动测量系统, 利用 HP VEE 语言进行测试软件编程和界面设计.

在 100°C 的环境温度下对六种样品(共 60 只)进行了 EB 结正向 $5\text{ mA}/3\text{ min}$ 斜坡电流应力试验, 约为

300 器件小时, 得到样品的平均电流、电压耐力和耐受功率, 六种样品承受能力有着明显的差别, 其中 1 号和 4 号样品效果最好, 电流耐力要高于 3 号 15%; 功率耐力分别比 3 号高 12% 和 10%。样品 1、4 只有一个缝隙, 有效地保护了根部发射极引线孔, 获得了最好的效果, 与以前的试验结果及理论预测结果相吻合。 $2\mu\text{m}$ 的回流加固结构的串联电阻比 $3\mu\text{m}$ 缝隙的大很多, 失效分析表明是由于淀积金属薄膜时, 较窄缝隙处金属薄膜填充效果较差, 电流耐力降低。4、5、6 号样品采用了 $3\mu\text{m}$ 的缝隙, 抗热电应力的能力较强, 在高温大电流下, 焦尔热效应不明显, 使得缝隙处可靠性较高。

电流斜坡试验主要考核器件承受高电流、电压、温度的能力, 实验表明在电流斜坡应力下, 采用回流加固结构的六种微波管, 其抗大电流、电压和温度的能力因结构的不同而有所区别, 其中 1、4 号样品效果最好, 实现了较好的抗热电徙动能力。

4.2 高温大电流应力试验

对 6 种样品进行了 EB 结正向大电流应力试验, 环境温度为 100°C , 应力电流为 280mA , 发射极梳状条电流密度为 $4.7 \times 10^5 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$, 试验中适时监测 EB 结正向电压的变化, 每组 5 个样品, 6 组样品共 30 只管子, 有效实验共累计 150 器件小时, 失效判据为电压上升 20%。根据样品寿命的累积失效率得到中值寿命, 见表 1。

表 1 6 组样品的中值寿命/min

Table 1 Mean Time of Failure MTF for 6 set of Samples

样品序号	1	2	3	4	5	6
MTF/min	269	165	248	334	207	226

试验结果表明 4 号样品中值寿命最长, 综合两个实验结果可以看出, 4 号样品具有更强的抗热电迁徙性能, 即采用一个缝隙、缝隙间距为 $3\mu\text{m}$ 的回流加固结构最为有效。

5 结论

通过研究电迁徙动力学理论, 利用回流效应设计了特殊金属化结构, 实现了新的抗电徙动方法, 并将其应用于实际微波功率器件中; 结合器件具体结构和制备工艺, 进行了回流加固结构的优化设计, 并在实际工艺中加以实现, 降低了微波管中的纵向(EB 结和 Al-Si 界面)电迁徙失效, 提高了器件金属化的可靠性。

- (1) 对微波器件金属化布线中电流分布进行了模拟分析, 发射极引线孔的电流沿条长方向按指数形式下降, 发射极根部接触孔电流密度高, 热电效应明显, 是可靠性关键环节, 保护根部接触孔具有重要意义。
- (2) 根据回流阈值长度与电流密度、薄膜结构和物理性质的数值关系, 确定器件的最佳阈值回流长度。
- (3) 结合器件具体特征尺寸和制备工艺进行了回流加固结构设计和优化。
- (4) 对回流加固结构样品进行了热电流应力试验, 结果表明不同结构的样品的电流、电压和功率耐力明显不同, 其中采用一个回流缝隙、缝隙宽度为 $3\mu\text{m}$ 的结构加固效果最好, 抗热电徙动能力最强。

致谢 北京市东方电子集团东方半导体器件厂强桂华高工等协助进行了样品的制备, 并提出了有益的设计建议, 在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] I. A. Blech, J. Appl. Phys. Lett., 1977, **30**: 1203.
- [2] Li Xuexin, Zhang Wei, Ji Yuan et al., IEEE Proc. of IRPS', San Diego, 1992, 211.
- [3] 李志国, 张炜, 孙英华, 等, 半导体学报, 1996, **17**(12): 914[LI Zhiguo, ZHANG Wei, SUN Yinhua et al., Chinese Journal of Semiconductors, 1996, **17**(12): 914(in Chinese)].
- [4] Zhang Wei, Li Zhiguo, Cheng Yaohai et al., IEEE Proc. of IRPS, Las Vegas, 1995, 365.
- [5] V. M. Kileshko and I. V. Kiryushin, Thin Solid Films, 1990, **192**: 181.