

硅双极功率晶体管镇流技术的改进*

周蓉** 胡思福 张庆中

(电子科技大学微电子科学与工程系 成都 610054)

【摘要】 从可靠性和功率增益两方面对现有硅双极功率晶体管镇流技术作了仔细分析,并提出了改进措施。结果表明,采用改进的复合镇流技术,不仅有效地防止热斑和电流二次击穿现象,提高了器件的可靠性和工作寿命,而且有助于提高器件的功率增益。

关键词 硅化物; 氮化钛; 镇流电阻; 多晶硅

中图分类号 TN432

硅双极功率晶体管在电视差转与发射、军用和民用电台、雷达、电子对抗等通信领域应用广泛,除了需较大的功率增益外,对器件的可靠性和工作寿命有较高的要求。就硅器件而言,一般认为其结温每降低 10°C ,工作寿命可提高一倍。因此,降低器件工作结温是提高硅双极功率晶体管工作寿命的关键。另外,硅双极器件具有温度电流正反馈特点,尤其是高频大功率及微波功率晶体管有源面积和功率增益大,且功率密度高,更易发生热电正反馈使芯片局部区域电流集中,温度升高,形成热斑,严重时甚至发生热崩(即电流注入型二次击穿),造成功率管突然毁坏或失效。目前器件设计中已将有源区分割成有一定间距的热源区,采用“集电极网”形成多子器件,有利于消除中心高温。但对每个子器件而言,由于寄生参数不一定完全一致,将导致每个子器件耗散功率各不相同。故对多子器件而言,较有效的措施是在发射极采用镇流电阻减小或避免电流集中现象。目前通常采用镍铬电阻、扩散电阻和多晶硅电阻作镇流电阻,但研究表明上述三种镇流电阻都有不足。镍铬电阻容易发生“起皮”、断裂或烧毁;扩散电阻通常是制作在发射极条的根部,无法实现对整个发射区处处镇流;而多晶硅电阻虽可实现处处镇流,但多晶硅电阻在器件使用温度范围内不能表现出良好的正温度效应,镇流效果不够理想。本文提出采用TiN、Ti的硅化物和多晶硅电阻组成复合镇流电阻技术,即在发射极根部采用TiN镇流电阻,而在发射极指条处采用多晶硅和Ti的硅化物镇流电阻,可实现对发射极电流二次镇流。采用该技术能充分利用各种结构的优点,减小或避免了电流集中的现象,可有效地避免热击穿或二次击穿,大大提高了可靠性,并且有助于功率增益的提高。

1 复合镇流电阻的制备

器件的制备除镇流电阻与电极外,均采用常规的硅双极晶体管工艺。在发射区As离子注入形成发射结后,开出基极引线孔,采用超高真空三源电子束蒸发台在整个芯片表面淀积一层纯Ti膜,厚度约100 nm。在氮气氛下采用两步退火工艺,使Ti与Si充分反应生成 TiSi_2 。第一步退火后,片子表面的Ti由银灰色变成金黄色,表明上表面的Ti已转换成TiN,其方块电阻为 $7\sim 8\ \Omega/\square$,去掉TiN和未反应的Ti,片子表面变得粗糙,测定方块电阻为 $15\ \Omega/\square$ 左右,此时反应生成物主要为TiSi。经过第二步退火后,测定片子的方块电阻为 $2\sim 3\ \Omega/\square$,片子表面变得非常粗糙并且略带金黄色,表明已形成 TiSi_2 ,并带有较薄的一层TiN。然后再淀积50~100 nm厚的Ti,刻蚀出镇流电阻版图形,在 N_2 气氛下直接氮化生成TiN,适当控制温度和时间,其方块电阻可达 $4\sim 5\ \Omega/\square$ 。由于TiN镇流电阻采用如图1所示非均匀电阻形式,即中间区域电阻大,向两头电阻递归减小,有助于提高电流分布的均匀性。TiN是一种十分稳定的化合物,较通常的Ni-Cr电阻可靠。同时, TiSi_2 的阻值可通

1998年12月17日收稿

* 四川省应用基础研究专项基金资助项目

** 女 29岁 在职博士生 讲师

过控制 Ti 膜厚度、反应的温度和时间来控制。由于 TiN、TiSi₂ 的电阻随温度升高而增大，整个镇流电阻呈正电阻温度系数，有助于防止热斑和二次击穿的发生。

由于 TiSi₂ 镇流电阻强烈地依赖于 Ti-Si 界面的清洁度、Ti 膜厚度和纯度、Ti 的淀积条件、反应条件（包括反应时间、温度及气氛中是否有氧气等）以及后工序条件，因此形成的 TiSi₂ 存在以下不利因素：1) Ti 与 Si 反应必须在清洁、尽量不含氧的系统中进行，因为 Ti 或 Ti 的硅化物极易与氧反应生成 Ti 的氧化物^[1]，Ti 的氧化物很难去掉。Ti-Si 反应温度和时间是两个最重要的常数。温度必须足够高及时间尽量长才能获得均匀、完全的反应。反应的温度上限是 700℃，超过 700℃，Ti 将与 SiO₂ 反应形成 Ti 的氧化物。2) Ti 与 Si 反应将消耗大量的 Si(100 nm Ti 将消耗 227 nm Si，生成 250 nm TiSi₂)^[2]，因此极易造成浅结器件的 E-B 结漏电，更不利于形成亚微米及深亚微米级的结。3) TiSi₂ 的生成使发射区表面的杂质浓度下降，与基区掺杂浓度相差不大，造成发射极注入效率降低。同时，P、As 在 TiSi₂ 中的扩散系数比在 Si 中大三个数量级，更进一步减小了注入效率。

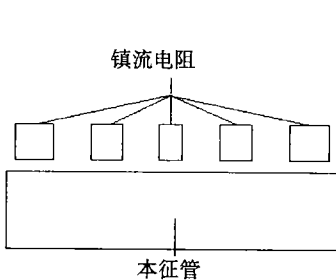


图 1 TiN 非均匀镇流电阻

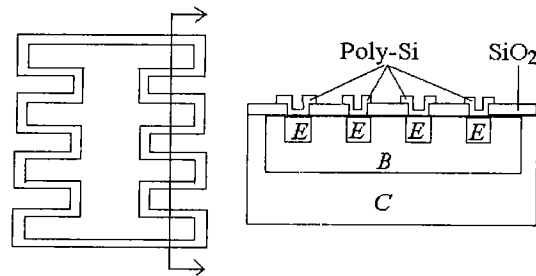


图 2 多晶硅电阻镇流

若仅采用多晶硅作镇流电阻，也可取得一定的镇流效果，如图 2 所示。实验中利用多晶硅发射区的多晶硅薄层电阻作垂直镇流，工艺简便，比集中式的扩散镇流均匀性更容易控制。但这种镇流方式的缺点在于多晶硅电阻在使用温度范围内不能表现出良好的正温度效应。由掺 As 多晶硅电阻率 ρ 与掺杂浓度的关系^[3]可知，掺杂在 $10^{18} \sim 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 的多晶硅电阻率 ρ 随掺杂浓度剧烈变化，掺杂在 10^{20}cm^{-3} 附近，这种变化才趋于缓和。这一特性造成工艺上难于控制所需的合适的多晶硅电阻值。为获得良好的重复性，必须采用高掺杂 ($\sim 10^{20} \text{cm}^{-3}$) 的多晶硅，这就导致多晶硅电阻偏低。因而，当器件出现热斑时，随着热斑处温度升高，该处多晶硅电阻率并不能明显增大，因而多晶硅镇流电阻在热斑处无法引入额外的负反馈来抑制发射极电流的集中。

进一步的改进是采用多晶硅加上 Ti 的化合物复合镇流电阻技术，其结构见图 3。即在保持多晶硅垂直镇流的同时，在金属发射极条根部引入 TiN 镇流电阻，组成以 TiN 为主的复合镇流电阻。

器件的制备除发射极外均采用常规的硅双极晶体管工艺。在发射极窗口开出之后，采用 LPCVD 生长一层高浓度掺 As 500 nm 厚多晶硅，然后 LPCVD 淀积一层 300 nm 厚的 SiO₂ 以防止 As 外扩散，经 950℃ 退火 20 min，形成 150 nm 深的结。腐蚀掉多晶硅表面的 SiO₂，测出多晶硅薄层电阻为 50 Ω/\square 。再通过两次蒸发 Ti 形成 TiN/TiSi₂。由于发射区窗口均直接与多晶硅薄层电阻接触，可

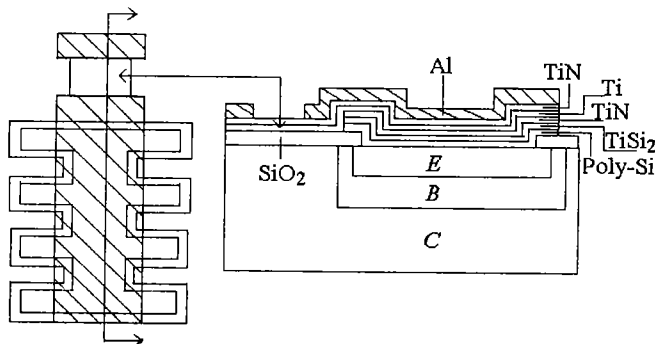


图 3 复合镇流电阻

以做到处处垂直镇流。

图3仅为一条发射极主条,每个单元管芯中由若干个这样的主条构成,其TiN镇流电阻均采用非均匀电阻形式。由于TiN/TiSi₂具有正温系数,故整个复合镇流电阻呈现正电阻温度系数,器件具有良好的热稳定性,可以实现对发射极电流的二次镇流。TiN电阻以均衡各个发射极主条之间的电流,而多晶硅电阻主要是对流入每个发射极主条的电流进行二次调节,使主条上的电流分布均匀,同时,使每个发射极小枝条上的电流也分布均匀。这样,由于多晶硅电阻的垂直镇流作用,整个发射极上电流分布较为均匀,减小了发射极电流的集边效应。

该结构的工艺步骤仅在TiN以及Ti的硅化物镇流技术中增加了多晶硅的淀积工艺,却同时兼顾了两者的优点。由于Ti淀积在Poly-Si上,故TiSi₂的形成仅消耗多晶硅,对已形成的发射结毫无影响,有利于浅结器件的形成;而采用多晶硅发射极结构可适当提高基区掺杂浓度,有利于增加线性电流和厄尔利电压,提高了输出功率。硅化钛具有较低的电阻率(约为多晶硅的十分之一),较好的高温稳定性和抗电迁移性能,改善了多晶硅电阻镇流技术中互连材料的局限性,提高了系统的可靠性。

2 实验结果

表1给出了采用不同镇流电阻结构,具有相同镇流电阻值、相同的芯片面积和硅片厚度,安装在相同管壳和散热板上,在相同的外加直流功率下的器件测试结果。

表1 器件测试结果

镇流电阻结构	芯片中心区的结温/(°C)	芯片边缘区的温度/(°C)	管壳表面的温度/(°C)	是否形成热斑
TiN、TiSi ₂	104	96	63	有一个
多晶硅	107	98	67	有两个
复合器件	97	92	60	无

由表1可见,仅采用一种镇流电阻结构,芯片中心和边缘最大温差为8~9°C;而采用复合镇流电阻结构的器件,芯片中心和边缘最大温差为5°C,其峰值结温降低了7~10°C,管壳表面的温度也降低了3~7°C,因此对提高器件的工作寿命和功耗非常有益。另外,采用复合镇流电阻结构的超高频大功率线性双极晶体管,最大承受电流可提高1A,输出功率可提高1~3W,其抗烧毁能力大大提高^[5]。

3 讨论

采用TiN、TiSi₂及多晶硅复合镇流电阻结构,不仅大大提高了器件工作寿命和抗烧毁能力,而且在版图设计、工艺上以及对器件性能均有较大的好处。首先,TiN以及钛的硅化物镇流电阻版的图形,除了发射极条根部镇流电阻的图形外,其余与Al版完全一致,因此,大大简化了版图设计。其次,采用两步退火技术可在发射区和基极引线孔处自对准生成TiSi₂和TiN,并防止Ti的氧化物形成。TiSi₂具有低的电阻率(~15Ω·cm)和高温稳定性^[4],低电阻率的TiSi₂有助于增大发射极指条长度,提高电流容量,增大输出功率。采用自对准工艺减小了工艺套刻次数,减小了横向尺寸,有助于集成度的提高^[5]。

采用TiN以及钛的硅化物镇流电阻技术可同时形成高可靠的电极^[5],即Al/TiN/Ti/TiN/TiSi₂/Si系统。该结构中第一层TiN是在N₂气氛中形成硅化物时形成的,第二层TiN与发射极根部TiN镇流电阻同时形成。多次实验证明,TiN是一种十分有效的扩散阻挡层,在温度高于550°C退火,系统显示了温度的稳定性,且漏电流极小,有效地防止浅结器件中Si穿过TiSi₂与铝反应。TiN是非常稳定的化合物,并且在HF:H₂O=1:3溶液中腐蚀1min,其方块电阻几乎保持不变;而在同样条件下,

TiSi₂的方块电阻上升100倍。该特性使得TiN镇流电阻的阻值在后工序能保持不变,同时也保证了TiSi₂结构的稳定性。TiN的电导率比纯Ti更高,而TiSi₂具有极高的熔点($T_m=1540^{\circ}\text{C}$),因而Al/TiN/Ti/TiN/TiSi₂/Si系统极为可靠。

多晶硅发射极器件的共发射极放大系数 β 在同等基区掺杂浓度下,比常规NPN晶体管的大10倍左右。因此,在保证与常规的NPN晶体管相同的 β 条件下,基区掺杂浓度可以适当地提高,基区电阻可以降低,从而有利于提高器件的输出功率,降低噪音。

4 结 论

硅双极功率晶体管的发射极镇流技术是改善发射极电流分布不均匀性和降低器件峰值结温的有力措施。本中采用改进的发射极复合镇流结构,充分利用TiN、TiSi₂正电阻温度系数特性和多晶硅发射极的优点,不仅有效地改善发射极电流分布不均匀性,降低了器件峰值结温,提高了器件可靠性和工作寿命,同时有助于提高器件的临界电流密度和输出功率。

参 考 文 献

- 1 Adams E D, Ahnk Y, Brodsky S B. Formation of TiSi₂ and TiN during nitrogen annealing of magnetron sputtered Ti films. J Vac Technol A, 1985, 3(6):2 264~2 267
- 2 Muraka S P. 硅化物及其在超大规模集成电路中的应用. 天津: 南开大学出版社, 1987
- 3 王阳元, 卡明斯 T I. 多晶硅薄膜及其在集成电路中的应用. 北京: 科学出版社, 1988
- 4 Muraka S P. Refractory silicides of titanium and tantalum for low-resistivity gates and interconnects. IEEE Trans Electron Devices, 1980, 27(7): 1 409~1 413
- 5 周蓉, 胡思福, 张庆中. 硅化物自对准双极硅功率晶体管. 电子科技大学学报, 1994, 23 (增刊): 128~132

Improvement of Ballasting for Silicon Bipolar Power Transistor

Zhou Rong Hu Sifu Zhang Qinzong

(Dept of Microelectronic Science and Technology, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract From the reliability and the gain, the existing ballasting resistor for silicon bipolar power transistor is carefully analyzed, and the improved method is proposed. The results indicate the improved compound ballasting resistor not only effectively prevents the "Runaway" and the second breakdown caused by current concentrating, improves transistor's reliability and life time, but also helps improve power transistor's power gain.

Key words silicide; TiN; ballasting resistor; poly-Si