

# 一种新的梳状基区 RF 功率晶体管

周 蓉 张庆中 胡思福

(电子科技大学微电子科学与工程系, 成都 610054)

**摘要:** 给出一种新的 RF 功率器件结构—梳状基区结构。在不增加本征集电结面积的情况下, 该结构能显著改善 RF 功率晶体管散热特性, 增大器件的耗散功率和输出功率, 较好地缓解了传统结构中高工作频率与大输出功率之间的矛盾。模拟分析表明, 采用该结构, 器件的雪崩击穿电压能提高到理想平行平面结的 90% 以上, 器件的大电流特性和频率特性也有所改进。采用该技术制作的试验样管 DCT375 同传统结构器件相比, 其热电特性得到显著的改善。这种结构为新型超高频、微波大功率管的研制开辟了新途径。

**关键词:** 梳状基区; 散热; 雪崩击穿; 功率管

**EEACC:** 2550E; 2560; 2560B

**中图分类号:** TN 323; TN 305. 94

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2001)09-1197-05

## 1 引言

射频功率晶体管的特性除了受到材料以及工艺制作水平的限制外, 最为重要的是器件结构的影响。功率晶体管的结构设计由器件的热性能和电性能的要求而定。为改善和提高器件热电性能, RF 功率管的结构已从早期单个的、具有大集电结面积的形式转化为由多个小晶体管单元构成的多子结构<sup>[1]</sup>。该结构一方面增大了基区周长, 减小了热阻; 另一方面由于各子单元间距增大, 热流截面积相应增大, 温度和电流分布的均匀性得以提高, 这对减小芯片热阻, 提高器件的热、电性能有利。目前, 所有的双极 RF 功率晶体管均采用这种多子器件结构。但由于多子器件结构仍然没有摆脱集电结截面积与热流截面积相同的传统结构模式, 子单元中心区域散热能力仍然较差, 温度最高。温度的不均匀分布导致电流分布不均, 引起单元内首先产生热电正反馈现象, 器件特性变坏, 最后导致器件被烧毁。RF 功率管被烧毁的原因 80% 以上均归因于器件的这种热电特性的变坏。

针对上述情况, 本文给出一种新的器件结构, 即梳状基区结构<sup>[2,3]</sup>。本文以 NPN 型器件结构为例, 详细分析梳状基区结构的组成和特点。模拟分析和试验结果均表明, 该结构不仅改善了器件的散热特性, 有效地提高了单元内电流和温度分布的均匀性, 而且对提高器件的雪崩击穿电压、改善 RF 功率管的大电流特性和频率特性也有利。该结构同样也适用于 PNP 型功率器件。

## 2 梳状基区结构

图 1(a) 为传统多子器件结构的子单元部分, 图 1(b) 为本文给出的梳状基区结构的子单元部分。两图相同之处在于场区以及衬底区域为 N<sup>-</sup> 集电区, P<sup>-</sup> 区为淡基区, 包括外基区和 N<sup>+</sup> 发射区正下方的本征基区, P<sup>+</sup> 区为浓基区。不同之处在于图 1(a) 的子单元包括 P<sup>+</sup> 场限环及其内部整个区域, 单元内均为基区, 单元的周界即为基区的周长, 其本征散热面积等于基区面积, 即本征集电结面积。图 1(b) 的子单元由环形阱(N<sup>-</sup> 区)、阱区(N<sup>-</sup> 区)和基区组成, 阱区镶嵌在浓基区枝条、主条以及发射极主条中间, 环

周 蓉 女, 1968 年出生, 讲师, 在职博士研究生, 从事半导体功率器件的研究和集成电路 CAD 工作。

张庆中 男, 1951 年出生, 副教授, 现从事半导体器件、工艺和集成电路设计方面的科研和教学工作。

胡思福 男, 1938 年出生, 教授, 现从事半导体器件与微细加工技术的研究。

形阱位于单元外围。环形阱和阱区深度远大于集电结结深，阱内填充物为绝缘导热的介质，因此，环形阱和梳状结构的阱区将基区分隔成若干个呈梳状结构的“小基区”。具有此单元结构的器件图形与传统结构相比，除了由相隔一定距离的多个小晶体管单元组成“多子器件”外，每个单元内部由于梳状阱、梳状基区的作用，又形成无数多个“小多子器件”。这种微型“多子”新结构对改善器件的特性非常有利。

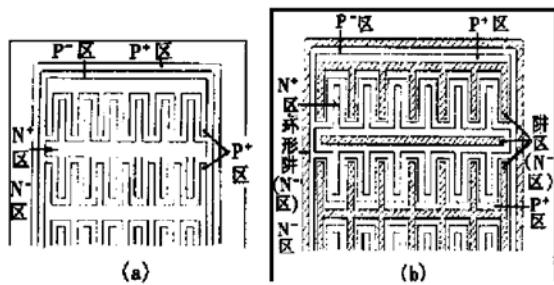


图1 多子器件的子单元结构 (a) 传统单元结构; (b) 梳状基区单元结构

FIG. 1 Sub-Structure of Poly-Unit Device (a) Traditional Structure; (b) Base-Combed Structure

### 3 梳状基区结构与器件特性的关系

#### 3.1 梳状基区结构改善了器件的散热特性

由于传统单元结构中基区周长短热阻较大，基区中心部位散热最差，结温最高，造成单元内各点间存在较大的温差，如图2中曲线a所示<sup>[1]</sup>。这一结温的不均匀分布将导致电流的不均匀分布，造成单元中心电流最大(耗散功率最大)，易产生过热点，导致正向二次击穿。而梳状基区结构从以下四个方面减小热阻，改善器件的散热特性。

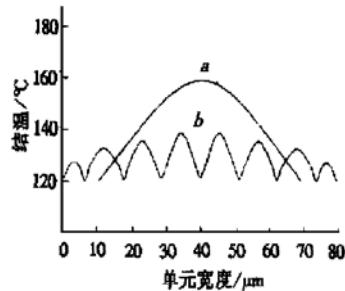


图2 两种结构的结温比较

FIG. 2 Comparison of Junction Temperature Between Two Structures

首先，梳状基区结构在保持单元内本征集电结

面积与传统结构相等的情况下，使单元的总面积即本征散热面积增加30%以上，如图1(b)所示。

其次，镶嵌在基区之间的绝缘阱提高了单元中心区域散热能力，单元内各点间的温度分布趋于平坦，如图2中曲线b所示，电流分布也会相应趋于均匀。

第三，在硅片和热源面积都相同时，把热源(即基区)设计成窄长形能得到较小的热阻<sup>[1]</sup>。梳状基区结构中除了整个单元呈窄长形外，单元内基区由若干个窄长形的“小基区”图形构成，此种结构的散热方式最好。

最后，硅片厚度一定时，热阻与基区总周长存在反比关系，周长越长，热阻越小，如图3所示<sup>[4]</sup>。梳状基区结构中，基区周长除了由单元周界长度组成外，还包括单元内无数个“小基区”的周长，其数量越多，基区总的周长就越大。经计算，在保持本征集电结面积相等的情况下，梳状基区单元结构的基区周长比传统单元结构可增大一个数量级以上。

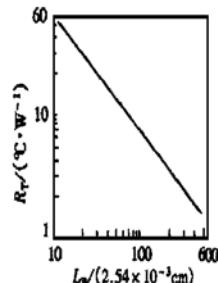


图3 高频Si功率晶体管  $R_T$  与  $R_B$  的关系曲线

FIG. 3  $R_T$ - $R_B$  Curve of High-Frequency Si Power Transistors

#### 3.2 梳状基区结构提高器件的雪崩击穿电压

传统单元结构通常采用P<sup>+</sup>场限环作为结终端保护，其形成的柱面结导致雪崩击穿首先在结电场集中处发生，且击穿电压仅为理想平行平面结的70%左右<sup>[5]</sup>。为达到理想的击穿电压值，须相应提高外延层的电阻率及其厚度，而功率管的其他特性参数如最大电流、饱和电压、输出功率等不可避免会受到影响。

梳状基区结构由环形阱终端替代P<sup>+</sup>场限环，阱的深度大于由雪崩击穿电压所决定的耗尽层宽度，阱的宽度大于在雪崩击穿电压下结的横向扩展宽度。图4为MEDICI软件<sup>[6]</sup>模拟结果，其中外延层厚

度为  $8\mu\text{m}$ , 外延层掺杂浓度为  $7.0 \times 10^{15}\text{cm}^{-3}$ , 阱深度为  $6\mu\text{m}$ , 阱宽度为  $4\mu\text{m}$ . 由图 4(a) 可见, 在反偏电压下耗尽层的展宽被阱完全限制在纵向, 形成的结近似于平行平面结, 雪崩击穿电压值为  $70\text{V}$ , 如图 4

(b) 所示, 接近理想平行平面结击穿电压  $75\text{V}$ . 因此, 梳状基区结构的环形绝缘阱终端消除了表面电场集中以及结电场集中对击穿电压的影响, 并将器件的雪崩击穿电压提高到理想平行平面结的 90% 以上.

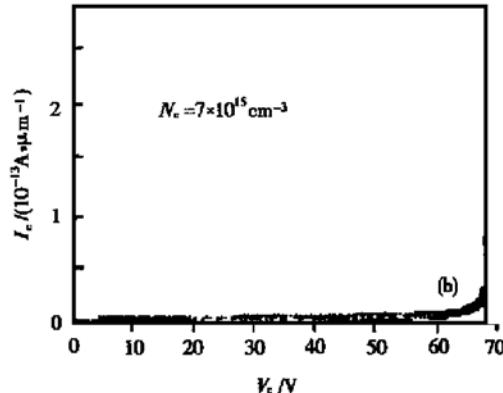
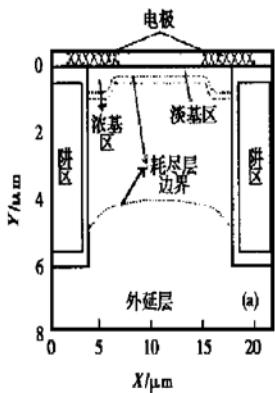


图 4 梳状基区结构的反向特性 (a) 反偏电压下耗尽层的展宽; (b) 反向  $I-V$  特性

FIG. 4 Reverse Characteristics of Base-Combed Structure (a) Depletion Layer Spreading Under Reverse Voltage; (b) Reverse  $I-V$  Characteristics

### 3.3 梳状基区结构有助于改善器件的其它特性

由上节分析可知, 在工作电压相等的情况下, 梳状基区结构的集电区电阻率可低于传统单元结构的数值, 这对减小器件的 Kirk 效应和饱和电压, 提高器件的临界电流密度和特征频率均有利<sup>[1]</sup>. 另外, 梳状基区结构中发射极主条上的绝缘阱增大了发射极周长, 这对提高器件的电流容量, 改善大电流特性也有利.

图 5 为采用 MEDICI 以及 SUPERM4 软件模拟分析的结果. 由图可见, 传统单元结构中有部分电流沿表面流动, 该电流在被集电极收集到时所经过的路径比其它区域的长, 器件的频率响应受到影响. 梳状基区结构的绝缘阱区阻止了电流的横向流动,

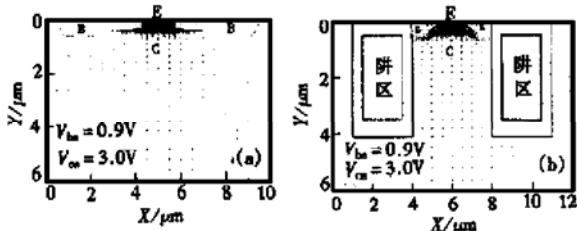


图 5 电流矢量分布图 (a) 传统单元结构; (b) 梳状基区结构

使其沿着垂直方向被集电极收集, 这对提高器件的频率特性有一定的益处. 再者, 环形绝缘阱与场限环相比, 只增大了本征散热面积, 而对本征集电结的面积没有影响. 因此, 梳状基区结构器件的频率特性优于传统单元基区结构, 模拟结果如图 6 所示.

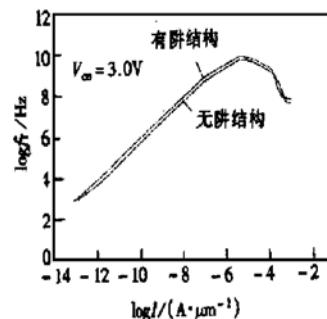


图 6 两种结构的频率特性比较

FIG. 6 Comparison of Frequency Characteristics Between Two Structures

## 4 实验结果

采用  $3\mu\text{m}$  硅双极工艺设计和制造了两种结构 RF 功率管, 其工作频率为  $175\text{MHz}$ , 额定输出功率为  $50\text{W}$ , 工作电压为  $12.5\text{V}$ , 参数如表 1 所示. 其中, 3DA 260 为传统单元结构器件, DCT 375 为具有

梳状基区结构器件, MRF247 为国外同类产品.

表 1 三种功率器件的参数比较

Table 1 Parameter Comparison Between Three Kinds of Power Transistors

参数\型号	3DA 260	DCT 375	MRF247
本征散热面积 $A_D/cm^2$	$8.18 \times 10^{-2}$	$11.04 \times 10^{-2}$	
本征集电结面积 $A_C/cm^2$	$2.75 \times 10^{-2}$	$2.61 \times 10^{-2}$	
发射结面积 $A_E/cm^2$	$9.7 \times 10^{-3}$	$8.6 \times 10^{-3}$	
基区周长 $L_B/cm$	1.3125	15.588	
发射极周长 $L_E/cm$	28.45	39.53	
最大电流 $I_{CM}/A$	15	25	20
最大输出功率 $P_O/W$	65	83	75
最大耗散功率 $P_D/W$	200	300	250
截止频率 $f_T/GHz$	0.75	1.2	

由上表可见,与传统单元结构 3DA 260 相比,梳状基区结构 DCT 375 的本征集电结面积以及发射结面积均小于前者,而本征散热面积增大 30% 以上,基区周长增加一个数量级以上,发射极周长增加近 40%,其最大电流容量、最大输出功率以及最大耗散功率等电参数明显优于传统单元结构的器件 3DA 260 和国外同类产品 MRF247. DCT 375 的截止频率为 3DA 260 的 1.6 倍. 表 2 为安装在相同散热板上,在相同功率的老化条件下(无功率输出,  $V_{CC}=18V, I_C=3A$ )以下三种器件的测试结果. 由表可见,具有梳状基区结构的 DCT 375 功率管管芯温度分布均匀,散热特性明显优于无此结构的功率管 3DA 260 和 MRF247.

表 2 测试结果

Table 2 Measurement Results

测量参数 管型	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
3DA 260	123	105	65	有一个
MRF247	112	101	62	有一个
DCT 375	99	96	58	无

## 5 结论

本文给出的梳状基区结构在不增加本征集电结面积的条件下,增大了器件的本征散热面积和基区周长,提高了单元内结温和电流分布的均匀性,降低了器件的热阻,提高了器件的耗散功率和输出功率,较好地缓解了目前传统结构中高频、微波大功率器件频率和功率的矛盾. 梳状基区结构的环形阱终端能将器件的雪崩击穿电压提高到平行平面结的 90% 以上. 采用梳状基区结构,器件的集电区掺杂浓度可适当提高,这对于减小 Kirk 效应和器件饱和电压,提高器件的临界电流密度,从而进一步提高器件的  $f_T, I_{CM}$  等参数非常有利. 采用上述技术研制出的试验管 DCT 375 在散热特性、功率特性、频率特性等方面均比传统结构器件具有较大的提高,与国外同类产品相比,上述各种特性也有相应的提高. 梳状基区结构技术为新型高频、微波大功率晶体管的研制开辟了新的途径.

## 参考文献

- [1] CHEN Xing-bi and TANG Mao-cheng, Transistors' Principle and Design, Chengdu: UESTC Press, 1987 (In Chinese) [陈星弼, 唐茂成, 晶体管原理与设计, 成都: 电子科技大学出版社, 1987].
- [2] Hu Si-fu, EP 0823736, 1997.
- [3] Hu Si-fu, DE 19632412, 1996.
- [4] AD827335, 译文刊于“半导体情报”第三期, 1974: 24.
- [5] B. J. Baliga, Power Semiconductor Devices, Boston: PWS Publishing Company, 1996.
- [6] TMA MEDICI User's Manual, Technology Modeling Associates, Inc., Palo Alto, CA, 1994.

## Novel Type of Base-Combed RF Power Transistors

ZHOU Rong, ZHANG Qing-zhong and HU Si-fu

(Department of Microelectronic Science & Engineering, University of Electronic Science  
and Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** A new base-combed structure of RF power transistor is proposed, which can markedly improve the heat-radiating property of RF power transistors, increase the dissipation power and out-put power, and alleviate the contradiction of high operation frequency and large out-put power in the RF power transistors with traditional structures. The simulation analysis indicates that with this structure the avalanche breakdown voltage of RF power transistors can be increased to be over 90% of that for an ideal parallel planar junction, and the large current characteristics and frequency characteristics can be improved, too. Compared with the transistors with traditional structure, the experimental sample DCT375 fabricated by using this technology has better thermoelectric characteristics. This structure paves a new path for the research and fabrication of new ultra high frequency and microwave large power transistors.

**Key words:** base-combed; heat-radiating; avalanche breakdown; power transistor

**EEACC:** 2550E: 2560B: 2560J

**Article ID:** 0253-4177(2001)09-1197-05

---

ZHOU Rong female, was born in 1968. She is now lecturer and PhD candidate. Her research areas include semiconductor power devices and IC CAD.

ZHANG Qing-zhong male, was born in 1951. He is an associate professor. He is engaged in research and teaching work on semiconductor devices, technology and circuit design.

HU Si-fu male, was born in 1938. He is a professor. He is engaged in research on semiconductor devices and fine process technologies.

Received 26 November 2000, revised manuscript received 23 February 2001

© 2001 The Chinese Institute of Electronics