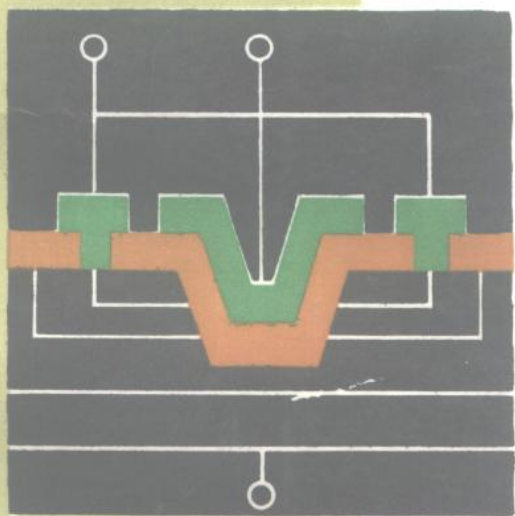


# VMOS 功率场效应 晶体管 及其应用



李中江 编著

人民邮电出版社

## 内 容 提 要

VMOS是一种新型的功率场效应晶体管,它的工作频率高、开关速度快、电流增益大、热稳定性能好,可应用于电源、音响、逻辑开关、接口电路以及节能等方面。

本书系统地介绍了VMOS功率场效应晶体管的原理和应用。内容深入浅出、结合实际,可供从事半导体器件生产、使用等方面的技术人员参考,也可作为半导体器件专业高校师生的参考书。

## VMOS功率场效应晶体管及其应用

李中江 编著

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

北京兴华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

开本: 787×1092 1/32 1988年9月第一版

印张: 7 页数: 112 1988年9月北京第1次印刷

字数: 106千字 印数: 1—3 500册

ISBN7-115-03685-3/TN·110

定 价: 2.60 元

## 前 言

1975年美国雷达(Siliconix)半导体公司发明了垂直导电MOS功率场效应晶体管,这是半导体功率器件领域内一件具有划时代意义的大事。

垂直导电MOS(简称VMOS)功率场效应晶体管,是具有电子管和晶体管两者优点的电压控制型功率半导体器件。它的低频电流增益高达 $10^8 \sim 10^9$ ,可以直接用集成电路驱动,使电路大为简化。在适当的驱动条件下,VMOS管的开关速度极高,可以在几纳秒到几十纳秒的时间内,开关几安培到几十安培的工作电流。VMOS管是短沟道器件,因而具有优越的线性放大特性和高频工作能力,与传统的MOS器件和双极器件相比,是最理想的线性功率放大器件和功率开关器件。此外,VMOS功率场效应晶体管没有“热崩”和“二次击穿”,容易并、串联使用,扩大了电压耐量和电流容量。

由于VMOS功率场效应晶体管具有上述一系列的优点,所以受到了生产者和使用者的普遍重视。近十年来,生产VMOS功率场效应晶体管的厂家猛增到几十家,有几十个系列、上千个型号。在应用方面,经过竞争,不仅占领了其它半导体功率器件的部分市场,而且还开拓了范围广阔的新的应用领域,扩大了半导体功率器件的应用范围。目前,在电子工业先进的国家,VMOS管已相当广泛地用于航天工业、航空工业、计算机工业、变换技术、通信工业、无线电仪器仪表、音响设备、电视工业、医疗设备、机械加工设备以及各种军事装备上。总之,VMOS的发展是十分令人振奋的,目前它已经成为半导体功率器件的一个十分重要的、十分有前途的分支。

了。

我国的VMOS功率场效应晶体管不论从生产上，还是从应用上看，都是比较薄弱的，目前虽有几十个型号的产品提供用户使用，但是与先进国家相比还有较大的差距，急待加速开发。编写本书的目的，是向广大读者介绍VMOS功率场效应管的基本工作原理、基本制造工艺过程、以及主要应用电路，以促进我国的VMOS功率器件的生产和应用，为祖国四个现代化略尽微薄的力量。

本书承西安交通大学罗晋生教授审阅，提出许多宝贵意见，谨致谢意。由于作者水平所限，缺点错误在所难免，欢迎指正。

作 者      1986年9月

# 目 录

## 前 言

### 第一章 概 述..... ( 1 )

#### 第一节 VMOS功率场效应晶体管的发展概况..... ( 1 )

#### 第二节 VMOS功率场效应晶体管的主要优点..... ( 11 )

#### 第三节 VMOS功率场效应晶体管的应用领域..... ( 23 )

#### 本章小结..... ( 31 )

### 第二章 VMOS功率场效应晶体管的原理和

#### 制造工艺..... ( 33 )

#### 第一节 p-n结..... ( 33 )

#### 第二节 金属—氧化物—半导体 ( MOS ) 系统的性质..... ( 44 )

#### 第三节 VMOS功率场效应晶体管的 工作原理..... ( 57 )

#### 第四节 VMOS功率场效应晶体管的 制造工艺..... ( 69 )

#### 本章小结..... ( 77 )

### 第三章 VMOS功率场效应晶体管的基本电路..... ( 78 )

#### 第一节 VMOS器件电路的优点..... ( 78 )

#### 第二节 VMOS器件的基本电路..... ( 81 )

#### 第三节 VMOS器件开关电路..... ( 91 )

#### 本章小结..... ( 99 )

|            |                      |         |
|------------|----------------------|---------|
| <b>第四章</b> | <b>VMOS音频功率放大器</b>   | ( 101 ) |
| 第一节        | 基本偏置电路               | ( 102 ) |
| 第二节        | 单管放大电路的分析方法          | ( 108 ) |
| 第三节        | VMOS音频放大器            | ( 112 ) |
| 第四节        | D类和G类音频功率放大器         | ( 118 ) |
|            | 本章小结                 | ( 124 ) |
| <b>第五章</b> | <b>VMOS高频功率放大器</b>   | ( 126 ) |
| 第一节        | 物理模型和等效电路            | ( 127 ) |
| 第二节        | 单管高频功率放大器            | ( 131 ) |
| 第三节        | 推挽宽带功率放大器            | ( 136 ) |
|            | 本章小结                 | ( 141 ) |
| <b>第六章</b> | <b>VMOS在变换技术中的应用</b> | ( 143 ) |
| 第一节        | VMOS逆变器              | ( 145 ) |
| 第二节        | VMOS开关稳压电源           | ( 156 ) |
| 第三节        | VMOS线性电源             | ( 164 ) |
|            | 本章小结                 | ( 167 ) |
| <b>第七章</b> | <b>VMOS在计算机中的应用</b>  | ( 169 ) |
| 第一节        | 接口电路的一般原则            | ( 169 ) |
| 第二节        | 实用接口电路               | ( 176 ) |
| 第三节        | VMOS功率晶体管模拟开关        | ( 184 ) |
|            | 本章小结                 | ( 194 ) |

**第八章 VMOS功率场效应晶体管的可靠性..... ( 195 )**

**第一节 静电放电失效..... ( 195 )**

**第二节 阈值电压漂移失效..... ( 199 )**

**第三节 使用VMOS功率场效应晶体管  
的注意事项..... ( 201 )  
本章小结..... ( 204 )**

**附 录**

**附表1 VMOS功率场效应晶体管参数表 ..... ( 205 )**

**附表2 二极管参数表 ..... ( 206 )**

**附表3 三极管参数表 ..... ( 207 )**

**附图1~13 集成电路图及主要参数 ..... ( 208 )**

# 第一章 概 述

## 第一节 VMOS功率场效应晶体管的发展概况

### 一、半导体功率器件领域中的重大突破

六十年代初期,金属—氧化物—半导体(简称MOS)场效应晶体管实现了商品化,同时促进了集成电路的发展。七十年代以后,MOS场效应晶体管朝着大规模集成电路和超大规模集成电路的方向发展,并获得广泛的应用。由于MOS场效应晶体管集成电路的高速发展,新工艺新技术(如微细加工技术、离子注入技术、多晶硅栅工艺、完善材料工艺等)得到开发,计算机辅助设计也被广泛应用。这些技术的进步,也不断地冲击传统的MOS场效应晶体管的设计思想。

早期的MOS场效应晶体管是平面水平沟道结构。在这种结构中,源极、漏极和栅极都处于硅单晶片的同一侧,源极与管壳相连,如图1-1所示。晶体管

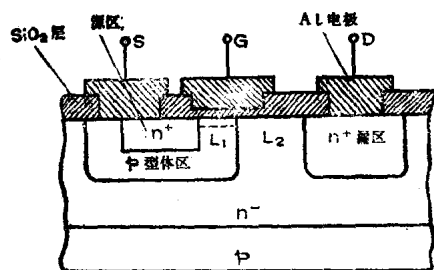


图1-1 平面水平沟道功率MOS场效应晶体管的典型结构

的沟道由感应部分 $L_1$ 和固定部分 $L_2$ 组成。感应沟道 $L_1$ 处于栅极下面,受栅压控制,因而可使MOS管产生所需要的功能。固定沟道 $L_2$ 可改善漏极与感应沟道之间的电位分布,使MOS管具有承受较高的漏源电压 $U_{DS}$ 的能力。这种水平沟道结构的MOS场效应晶体管,虽然漏极电流可达数安培,漏源电压可达100伏以上,但是,由于导通电阻 $R_{on}$ 大,频率特性差,硅片面积利用率低等缺点,因而一直未能得到推广。直到1975年VMOS技术移植到MOS功率器件后,MOS场效应晶体管才真正进入功率领域,从而产生了垂直导电型MOS功率场效应晶体管(简称VMOS管)。

VMOS功率场效应晶体的出现,是半导体功率器件领域中的一项重大突破。这种新型功率器件,不仅全部保留了MOS场效应晶体的优点,而且由于它具备短沟道、高电阻漏极漂移区和垂直导电结构等特点,从而大大提高了器件的耐电压能力、电流处理能力和开关速度,使MOS器件从小功率范围跨进到大功率范围。目前,VMOS功率器件的耐电压水平已经提高到1000V、电流处理能力达到200A、平均失效率达到0.001~0.0053%的水平。1980年以来,VMOS功率器件以高于双极型功率器件5~10倍的年增长速度迅猛发展,在电子学的许多应用领域内,向双极型功率器件提出了挑战。

## 二、VVMOS结构

VMOS功率场效应晶体管有两种结构,一种是VVMOS功率场效应晶体管,另一种是VDMOS功率场效应晶体管。

VVMOS结构是美国雷达半导体公司在1975年首先提出的,其结构如图1-2所示。这种结构是在 $n^+$ 衬底上的 $n^-$ 外延层上,先后进行p型区和 $n^+$ 型区两次选择扩散,然后利用硅的各向

异性刻蚀技术，刻蚀出V形槽。槽的深度由槽的开口宽度决定，槽壁与硅片平面成 $54.7^\circ$ 角。沟道长度由扩散的深度差决定，在 $1\sim 2\mu\text{m}$ 之间。漏极从芯片的背面引出。由于这种结构是利用V形槽实现垂直导电的，故称为VVMOS结构。

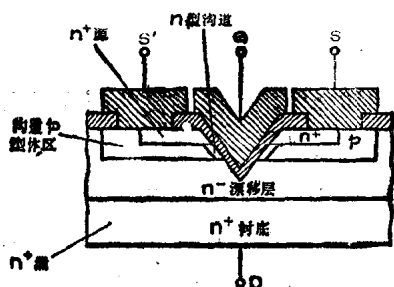


图1-2 雷达半导体公司VVMOS  
功率场效应晶体管

VVMOS结构第一次改变了MOS场效应管的电流方向，电流不再是沿表面水平方向流动，而是从 $n^+$ 源极出发，经过与表面成 $54.7^\circ$ 角的沟道流到 $n^-$ 漂移区，然后垂直地流到漏极。对于传统的MOS场效应管，这是一种崭新的结构和概念。1975年10月雷达半导体公司制成的VMP-1，是垂直导电型MOS功率器件最早的产品。VMP-1的功率为50瓦，大大超过了传统MOS器件的功率处理能力。VMP-1开关2A电流只需要5ns的时间，这是双极型功率晶体管所达不到的。VVMOS结构的 $n^-$ 型漂移区，不仅能提高器件的耐电压能力，而且还减少了栅电容。VMP-1的输入电容仅为35pF，反馈电容仅为8pF。这些参数远小于同面积的平面MOS器件。同时，垂直导电结构的漏极在芯片背面，因而提高了硅片的封装密度，VMP-1管芯片的面积仅为 $1.54\text{mm}^2$ 。

继VMP-1问世之后，该公司又生产了第一只射频MOS功率场效应管，命名为VMP-4。VMP-4可在200MHz频率下输出35瓦功率，功率增益为10dB。VMP-4的出现说明VVMOS功率晶体管在高频领域内也有极大的潜在能力。

### 三、VDMOS结构

1978年,美国主要的两家功率半导体器件公司(GE和IR)先后进入MOS功率器件的领域。IR公司生产了一个低压系列产品(IRF100)和一个高压系列产品(IRF300)。前者采用VVMOS结构,最大脉冲工作电流可达32A。后者采用VDMOS结构,耐电压达到400V,从而把MOS器件的耐压能力提高到了一个新水平,缩小了与双极型器件的差距。

所谓VDMOS结构,就是垂直导电的双扩散MOS结构,如图1-3所示。VDMOS与VVMOS不同,它不是利用V形槽形成导电沟道,而是利用两次扩散形成的p型区和n<sup>+</sup>型区,在硅片表面处的结深之差形成沟道。电流在沟道内沿表面流动,然后垂直地被漏极接收。

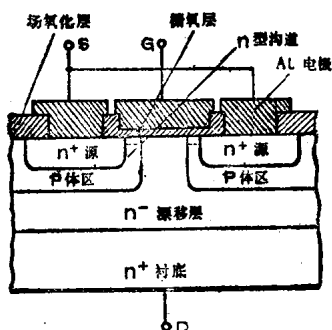


图1-3 IR公司的VDMOS功率场效应晶体管

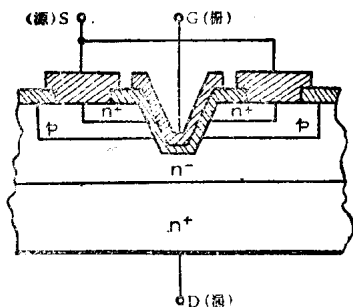


图1-4 U形槽VDMOS功率场效应晶体管

GE公司利用离子注入技术形成均匀表面电场,使器件的击穿电压达到了600V的水平。同时采取较大的栅-漏交叠面积降低导通电阻。GE公司提出的是一种所谓U形槽结构,如图1-4所示,槽底是平的。由于U形槽的深度不是由槽

的开口宽度自动控制的，所以对刻蚀工艺提出了新的要求，但沟道长度仍然由两次扩散结深之差决定。

#### 四、结构不断改进，产品日臻完善

在此之后，VMOS功率场效应晶体管的优异性能，得到了人们的广泛承认，因而发展十分迅速，各公司的新产品和新结构不断涌现。

首先，IR公司提出了称为HEX场效应管的新结构（见图1-5）。它实际上是IRF300系列的改进型。这种结构由数千个六边形几何结构的小单元密集排列构成，采用硅栅技术，大大提高了封装密度。最初的HEX场效应管包括三种低功率系列和两种能处理数百瓦功率的大功率系列产品。低功率系列产品有IRF130系列、

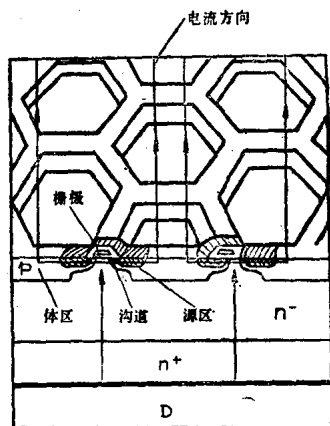


图1-5 HEX场效应晶体管结构示意图

IRF330系列以及IRF430系列。大功率系列产品有IRF150系列和IRF350系列。值得指出的是，IRF130系列、IRF330系列和IRF430系列的电流和导通电阻基本上与IRF100系列、IRF300系列相同，但管芯面积却降低了三分之二。IRF150系列的击穿电压为100V，最大脉冲工作电流可达56A，导通电阻仅为 $0.04\Omega$ ，通过25A电流时的饱和压降仅为1V。这样低的饱和压降丝毫不比双极型功率器件逊色，比达林顿功率晶体管还要低。IRF350系列是世界上第一批高压MOS功率器件，其漏源击穿电压为400伏，能连续开关4.4千瓦的功率。总之，

IR公司首先提出了分格结构，第一次制出了高击穿电压、低导通电阻的VMOS场效应晶体管。在VMOS功率器件的发展史上，又达到了一个新的阶段。

萨泼得克斯公司1979年生产了VN12和VP12两个低压大电流系列产品。其中，VN12是n沟道器件，VP12是p沟道器件。VP12的阈值电压比VN12略高一些。p沟道VMOS功率器件的出现，使互补功率输出得到实现。1980年该公司又生产了VN03和VN04两个高压系列产品，在承受电压、电流容量和导通电阻等方面都接近IR公司的水平。萨泼得克斯公司的器件采用交错叉指式结构，利用场板和场限制环技术，提高器件的工作电压。由于栅—源电容很小，萨泼得克斯公司的VDMOS具有很高的开关速度，例如：VN01系列产品电流容量为1A的器件可在2KMHz频率下工作，而电流为10A的器件可在500MHz下工作。

雷达半导体公司也在不断地改进VVMOS结构。1980年该公司的新产品VN400系列投入市场。这个系列的参数为：最大脉冲工作电流50A，工作电压400V，导通电阻 $0.1\Omega$ 。VN400系列的结构如图1-6所示。

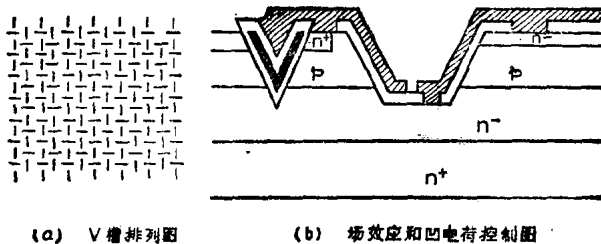


图1-6 雷达半导体公司的VVMOS新结构

西门子公司VDMOS器件称为SIPMOS功率场效应晶体管，它是由数千个正方形的小单元组合而成的，如图1-7所示。SIPMOS的先进结构和精密工艺使器件的性能达到更高的水平。1980年该公司的BUZ—54是世界上第一只1000V的VMOS功率器件。50V电压的BUZ—20的导通电阻只有 $0.01\Omega$ 。目前，西门子公司生产从50V到1000V的SIPMOS功率器件系列产品。

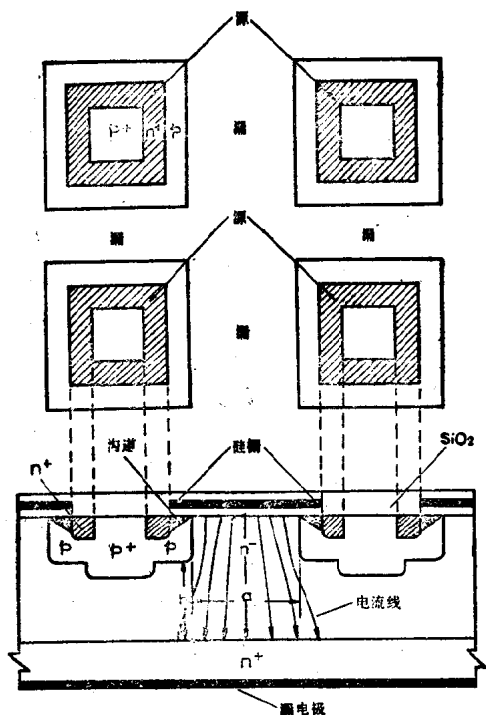


图1-7 SIPMOS结构示意图

同时，在1980年莫托罗拉公司的高压大功率 TMOS 晶体管投产。该器件也采用 VDMOS 结构，它由矩形小单元“品”字形排列而成（见图1-8）。产品包括 80 伏~100 伏的低压系列和 350~400V 以及 450~500V 的高压系列。低压系列的最小导通电阻为  $0.01\Omega$ ，电流达 20A。高压系列的最高电压为 1000V。

英特西尔公司采用了一种称为 ZMOS 的

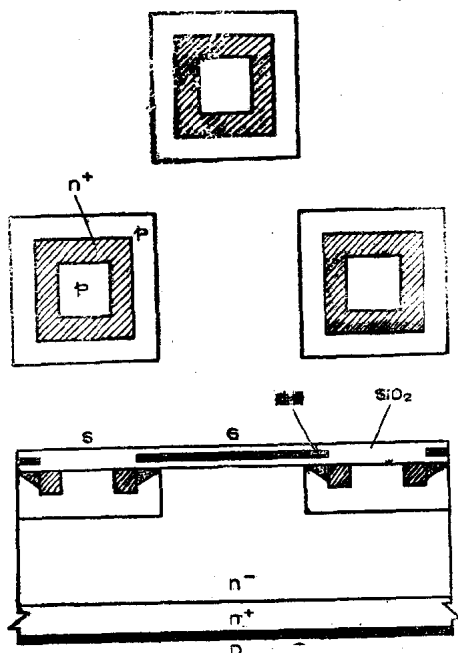


图1-8 TMOS结构示意图

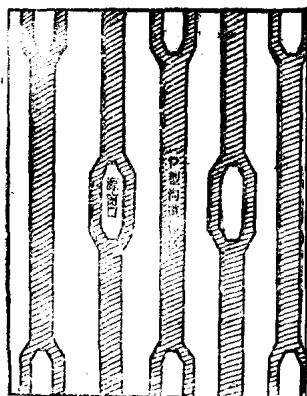


图1-9 ZMOS结构示意图

颇为新颖的 VDMOS 结构组态（见图1-9），制成了快速高压系列产品。其中，1981年初投入市场的 IVN6000 系列的耐压能力为 350~500V，略晚一点投入市场的 IVN6200 系列的耐压能力达到 700~800V。

在此期间，一些世界著名公司对 MOS 功率器件也进行了卓有成效的开发工作，生产了

TIP系列、HWPR系列、RCA系列、SD系列、UMIL系列、2SK系列和2SJ系列等，并且相继投入市场。

在1984年国际电子器件会议上，NEC公司报告了使用垂直导电双扩散双栅结构生产的MOS功率场效应晶体管，这种被命名为VD<sup>2</sup>MOS的功率场效应晶体管，在100MHz频率下工作时，最大输出功率为65W，功率增益为12dB，效率为45%，

表1-1 VMOS功率器件国外一些公司代表产品的主要参数表

| 厂 家       | 型 号            | 结 构                 | 耐压(V) | 电流(A) | R <sub>on</sub> (Ω) | 功率(W) |
|-----------|----------------|---------------------|-------|-------|---------------------|-------|
| Siliconix | VNC003A        | VV-MOS              | 60    | 60    | 0.035               | 250   |
| GE        |                | VD-MOS              | 60    | 80    | 0.015               |       |
| IR        | IRF151         | VD-MOS              | 60    | 40    | 0.055               | 150   |
| SPI       | SD900          | VD-MOS              | 120   | 30    | 0.1                 |       |
| Siemens   | 3UZ-34         | VD-MOS              | 80    | 40    | 0.14                |       |
| Siliconix | VNP006A        | VV-MOS              | 500   | 20    | 0.3                 | 250   |
| IR        | IRF450         | HEX<br>(VD-MOS)     | 500   | 13/52 | 0.4                 | 150   |
| Motorola  | MIMIN100       | T-MOS<br>(VD-MOS)   | 1000  | 1/6   | 10                  | 75    |
| Siemens   | BU254          | SIPMOS<br>(VD-MOS)  | 1000  | 4.7   | 2                   |       |
| 日立        | 2SK351         | VD-MOS              | 800   | 5     |                     | 125   |
| HP        | HPWR-6501      | VD-MOS              | 450   | 6     | 0.86                |       |
| Intrasil  | IVN6000<br>KNT | Z-MOS<br>(VD-MOS)   | 450   | 2.25  | 3                   |       |
| Supertex  | VNO350AI       | VD-MOS              | 500   | 8     | 1                   |       |
| RCA       |                | HEX<br>(VD-MOS)     | 500   | 10    |                     |       |
| NEC       | 双栅VMOS         | VD <sup>2</sup> MOS | 130   |       |                     | 65    |
| 日本        | 900MHz         | VDMOS               | 50    |       |                     | 100   |

可以承受130V电压。另一家日本公司则在会议上报告了他们的最新成就—在900MHz下可以处理100W功率的VDMOS功率场效应晶体管。

目前，VMOS器件已进入了实用阶段。表1-1列举了国外一些公司生产的VMOS产品的主要参数，供参考。

### 五、我国VMOS功率晶体管的发展概况

面对国际上VMOS功率场效应管高速发展的局面，我国的一些高等院校、研究单位和半导体器件生产工厂也相继地开

表1-2 我国VMOS功率器件发展概况表

| 日期    | 单 位     | 产品型号                       | 结 构    | $V_{DS}$<br>(V) | $I_D$<br>(A) | $R_{on}$<br>( $\Omega$ ) | $t_{on}$<br>(ns) | $t_{off}$<br>(ns) | $P_o$<br>(w) | 鉴定<br>类型 |
|-------|---------|----------------------------|--------|-----------------|--------------|--------------------------|------------------|-------------------|--------------|----------|
| 81.1  | 浙江大学    | VMPT-1                     | VV-MOS | 35~90           | 2            |                          | $\leq 10$        | $\leq 10$         | 25           | 技术鉴定     |
| 83.6  | 上海科技大学  | KDV05                      | VV-MOS | 60              | 2            | $1.8 \leq 4$             | $\leq 4$         |                   |              | 技术鉴定     |
| 83.6  | 天津半导体四厂 | VN902-B                    | VV-MOS | 90              | 1.5          | $5 \leq 10$              | $\leq 10$        |                   | 25           | 设计鉴定     |
| 83.8  | 杭州电子管厂  | VN05                       | VV-MOS | 90              | 1.0          |                          | $\leq 10$        | $\leq 10$         |              | 设计鉴定     |
| 83.12 | 709所    | VD-MOS350                  | VD-MOS | 350             | 10           | $1.5 \leq 50$            | $\leq 44$        |                   | 50           | 技术鉴定     |
| 84.6  | 877厂    | VN系列<br>(VN0301<br>VN0910) | VV-MOS | 35<br>~<br>90   |              | $1 < 3.0 \leq 10$        | $\leq 10$        |                   | 15           | 生产鉴定     |
|       |         |                            |        |                 |              | $2 < 2.5 \leq 10$        | $\leq 10$        |                   | 25           |          |
|       |         |                            |        |                 |              | $4 \leq 2.0 \leq 20$     | $\leq 20$        |                   | 40           |          |
|       |         |                            |        |                 |              | $6 \leq 1.2 \leq 20$     | $\leq 20$        |                   | 60           |          |
|       |         |                            |        |                 |              | $8 < 1.0 \leq 30$        | $\leq 30$        |                   | 80           |          |
|       |         |                            |        |                 |              | $10 < 0.8 \leq 40$       | $\leq 40$        |                   | 100          |          |