

VMOS电路设计及实验

(美) 罗伯特 T. 斯通

霍华德 M. 伯林

编著

上海市科技咨询服务中心情报中心

一九八五年十二月

VMOS电路设计及实验

(美) 罗伯特 T. 斯通

霍华德 M. 伯林

编著

周绍杰 王儒全 译

上海市科技咨询服务中心情报中心

一九八五年十二月

译 者 的 话

VMOS 功率晶体管一经问世，就受到了线路设计师们的重视，因而出现了不少的制造厂商。在这些制造厂商中，不仅有国际电报电话公司（ITT）、西门子公司、国际整流器公司这些老的半导体公司，还出现了Siliconix这类专业生产VMOS的公司。现在V—MOS功率器件其功率已达1千瓦水平，击穿电压达1000伏，频率也正在向超高频及微波方向发展。这些主要特性也正反映出这种器件的独特优点：兼有MOS器件和双极型器件之优点，即大电流（数安培至数百安培）、高速开关（数安培下仅10毫微秒），无二次击穿、高电压（数百伏）、高输入阻抗等。

国内，浙江大学、上海科技大学均先后研制成功V—MOS器件，目前已有天津半导体器件四厂、杭州电子管厂等单位在生产系列产品。这表明，国内各整机仪器仪表单位，已开始注意到这种新器件的优越性。

本手册的出版，无疑会推动V—MOS的应用工作。

本书系美国“Blacksburg编写组”出版的一套“知识更新再教育丛书”之一，至80年已印刷两次，由Howard W. Sams & Co.公司出版，表明本书在世界各国受到的欢迎。

译 者

85.11.8

前 言

1976年, Siliconix 公司推出了世界上第一个商用VMOS功率场效应晶体管。从此,这种激动人心的,或许是带有革命性的新型器件一直成了人们争论不休的焦点。VMOSFET (垂直金属一氧化物一半导体场效应晶体管)在许多方面向完美的有源电路元件迈进了一大步。在固体技术演变中,VMOS器件继承了双极型晶体管、场效应晶体管和CMOS的优点,显示了一系列令人印象深刻的优良特性。例如,高输入阻抗,毫微秒开关时间,低反馈电容,无热学漂移或二次击穿和高跨导。

尽管VMOS具有这些特性,许多制造厂家采取了保守的“观望”态度,而别的制造厂家却致力于开发这种潜在的器件。继Siliconix公司以后,包括Semtech公司、国际整流器公司、ITT公司和Supertex公司在内的其他一些厂家已经相继生产出了商用VMOS功率器件。

在全书的十一章中,我们讨论了VMOS电路设计的简洁性,旨在抛砖引玉,引起同行的兴趣。在阅读本书时,最好读完第一、第二和第三章后,再阅读下面有关音频应用、高频应用、电源应用和微机应用的几个章节。最后一章提供了一系列实验室型实验,以论证全书讨论的一些概念。另外,附录给出了术语汇编和几个厂家的VMOS数据单。

罗伯特 T·斯通

霍华德 M·伯林

目 录

第一章

VMOS: 向完美迈进了一大步 (1)

引言—目的一完美的线性元件—完美开关—线性应用—开关应用

第二章

半导体的工作原理、双极型晶体管和场效应晶体管..... (9)

引言—目的一导体—绝缘体—半导体—电流和荷电载流子—电流“错乱”—双极型晶体管工作—垂直场效应晶体管—开关速度—输入阻抗考虑—VMOS 缺点—为何使用 VMOSFET—六角形功率场效应晶体管—VMOS器件的变化

第三章

VMOS 器件的应用和限制 (25)

引言—目的一使用注意事项—功率考虑—VMOS 参数—保护栅与无保护栅

第四章

基本电路结构..... (33)

引言—目的一共源电路—共栅结构—源跟随器结构—开关考虑—感应开关负载—并联工作—串联工作

第五章

音频电路应用..... (48)

引言—目的一畸变——一种简单的音频功率放大器——一种简单的15瓦高保真放大器——一种40瓦高保真放大器——一种100瓦音频放大器——D类开关音频功率放大器——另一种高效设计：G类

第六章

射频应用..... (63)

引言—目的一——一种单 VMOS 40~220兆赫 宽带放大器——一种简单的1.8~54兆赫 16瓦宽带放大器

第七章

电源应用..... (71)

目的一开关调整器——VMOS 反相电路——线性调整器——过载保护

第八章

微型计算机应用..... (79)

引言—目的一逻辑电平接口——线驱动电路——外围接口——举例

第九章

特殊的器件和结构..... (89)

引言—目的一VMOS 恒流源——大电流可变电阻器——高效功率控制器——快速脉冲发生器电路——模拟开关——汽车点火系统

第十章

大规模集成电路..... (100)

引言—目的—VMOS 随机存取存储器—只读存储器—结论

第十一章

实验..... (105)

目的—建立实验的规则—实验构式—我该做多少个实验? —
设备—元件—实验介绍—实验 1—实验 2—实验 3—实验 4—实
验 5—实验 6—实验 7—实验 8—实验 9

附录

术语汇编..... (138)

附录

数据单..... (142)

第一章

VMOS: 向完美迈进了一大步

引言

最近, 由于引入了垂直金属—氧化物—半导体 (VMOS) 技术, 场效应晶体管现在可以为电路设计者提供综合特性更加接近完美的有源器件了, 而其他器件则望尘莫及。虽然早在 1925 年 J. E. Lilienfeld 最先描述了单极型或场效应晶体管 (FET) 的潜势, 令人激动人心, 但直到六十年代早期开发了平面技术以后, 才使生产成为现实。从此, MOS 型场效应晶体管使集成电路领域发生了革命性变化, 但分立器件只能在高频放大器和混频器中获得广泛应用。常规 FET 具有非常高的开态漏-源电压, 不适合作大电流开关用。另外, 它们还具有“平方律”转移特性, 无法用于线性、音频或视频等场合。VMOS 晶体管克服了场效应晶体管的这些严重缺陷, 并以下列特性向双极型晶体管提出了挑战:

- 高输入阻抗—与 CMOS 和 TTL 直接接口
- 毫微秒开关时间—低固有时间延迟
- 低反馈电容
- 无热学漂移或二次击穿
- 高跨导
- 线性转移特性

- 低开态电压一无补偿电压

本章叙述完美有源电路元件的基本概貌，并将它与双极型晶体管、FET和VMOS器件作一比较。

目 的

本章将学习：

- “完美”线性放大器件的特性。
- “完美”开关器件的特性。
- 以前的有源器件在满足这些完美时的缺陷
- VMOSFET提供的转移特性改进

完美的线性元件

一个完美的线性元件具有恒定“增益”，即尽管信号幅度、频率或温度这样的环境变化，输入信号变化和输出信号变化之间的关系是恒定的。为了尽量减少产生给定放大所需的元件数目，增益应该是高的，但不能高得产生噪声或乱真信号。

图1—1示出了表示两种类型的完美有源器件输入和输出之间关系的转移曲线。如果输入变量是电流，则器件应具有低输入阻抗，以尽量减少输入功率要求。反之，如果输入变量是电压，则器件应具有高输入阻抗。如果转移曲线与输出电压无关，静态工作点或零信号点位于转移曲线（如A级工作）中央，曲线A或B的器件能够进行线性放大。

叙述完美器件输出电流和电压关系的输出特性示于图1—2。应该指出的是，除在零伏以外，输出电压不影响输出电流。因此，象“A”线这样的负载线可用来获得与电源电压相等的电压输出变化，这对高的功率效率是很适宜的。

为使行为与频率无关，要求有源器件无任何电抗（电感或电

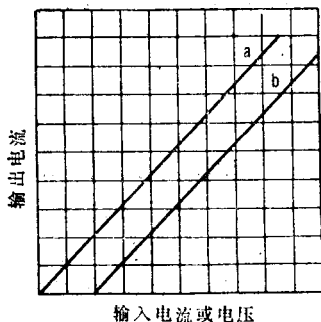


图 1—1 两种类型完美有源器件的转移曲线

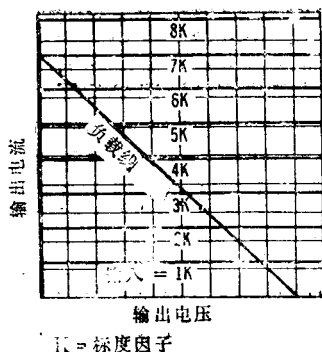


图 1—2 叙述完美器件输出电流和电压关系的输出特性

容)效应或其他时间延迟源或相位延迟源。

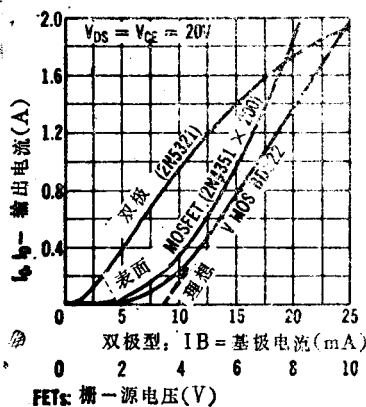
完 美 开 关

完美开关在来中断通过负载的电流时没有功耗，对重复频率也没有限制。这个简单定义提出了几个要求：在关态或开态时，器件端无升降。在开态或关态时，无电流流入负载。状态转换时，必无时间延迟。图 1—2 输出特性满足了最前面的两个要求，但第三个要求只能由无电抗效应或无其他时间延迟源的器件来完成。激励开关所需的能量也得注意。一般来说，能量要求越小越好，到系统噪声或乱真信号引起误差激励为止。图 1—1 示出的有转移曲线的那些器件能够具有零激励能量，即使需要有限的控制信号也是如此。对于电流控制器件，输入阻抗必须是零；而对于电压控制器件，则需要无限的输入阻抗。转移曲线“B”是优选的，因为器件在无输入信号提供时是截止的。

完美放大器的特性和开关的特性有许多共同之处，如零开态压降、高增益和无电抗效应。但图 1—1 的转移曲线 A 对线性放大器是优先的，而转移曲线 “B” 对开关是优先的。

线 性 应 用

图 1—3 示出了双极型晶体管、标准 MOSFET 和 VMOSFET 与完美器件相比较的典型静态转移曲线。显而易见，双极型晶体管的曲线是最非线性的，它的电流增益在低信号电平时受到表面复合和体内复合的严重影响。另外，在大电流时还受到发射极效率损耗、基区电流积聚和基区电导率调制的严重影响。因此，双极型功率晶体管的电流增益在其工作电流和温度范围内是决不会恒定的。双极型功率晶体管用于高保真放大器，这对电路设计者独具匠心的设计带来了很大的好处，他们可以应用大量的局部和全局负反馈了。



FET:

V_{GS} —栅-源电压(伏)

图 1—3 双极型晶体管、MOSFET 和 VMOSFET 的典型静态转移曲线的比较

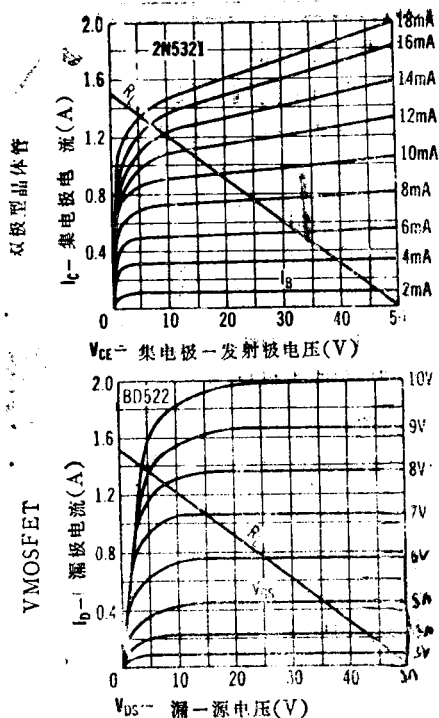
标准MOSFET的转移特性也是非线性的。它的图1—3曲线是通过把2N4351漏极电流按比例增大200倍获得的。“长”沟道FET特性是输出电流平方根与栅电压成正比。这种平方律特性可产生大量二次谐波和中间调制失真。这个问题和低增益一起解释了音频设备中很少见到常规FET的原因。但它们可以用于推挽放大器（B类或AB类），结果令人满意，但这种连接只能作为功率输出级规则才吸引人。

图1—3也示出了典型VMOS晶体管的转移曲线。除小电流区内的某种弯曲外，它极为近似于图1—1的完美转移曲线“B”。“短”沟道FET的固有特性是，在大部分工作范围内增益是恒定的。低失真则是明显的好处。

由于静态转移曲线是在固定的输出电压下测得的，仔细检查示出的输出阻抗效应处的输出特性，就能更清楚地了解线性应用。图1—4示出了芯片面积相等的双极型晶体管和VMOS晶体管的输出特性。前面提到的非线性因曲线间距不均匀，显得很明显。另外，全部非线性区存在于低压区，在双极型晶体管中称为饱和区，在FET中称为欧姆区。显然，负载线进入该区会产生严重的失真。这在图1—4中表现不明显，因为器件产生最大输出电压变化时并无严重畸变。

VMOS器件具有较高的饱和电阻，但双极型器件在较大电流电平下具有准静态区，令人大伤脑筋。从图1—4器件获得的动态转移曲线示于图1—5。

增益不受频率影响的完美要求是有源器件还没有完全达到的目标。双极型器件具有受到下面一些因素影响的频率响应：基区渡越时间、集电极耗尽层渡越时间和与发射极—基极和集电极—基极结电容有关的RC时间常数。场效应晶体管电容可以做得比等价双极型晶体管小得多，而且正如下节要讨论的那样，所有



(A) 双极型晶体管 (B) VMOSFET

图 1—4 芯片面积相等的晶体管输出特性

VMOS; V_{GS} —栅-源电压 (伏)

FET基本上没有别的时间延迟。当在后面一节考虑常规 FET 和 VMOSFET 结构时, 电容减小的原因就很清楚了。

开 关 应 用

前面图 1—4 示出的输出特性也指出了固体器件是如何近似

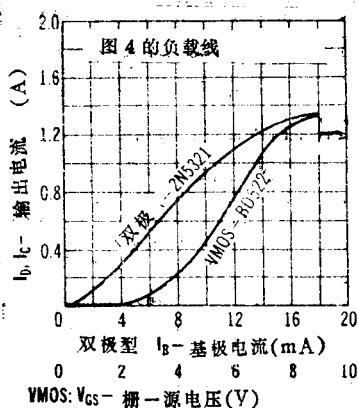


图 1—5 双极型晶体管和VMOSFET之间动态转移特性的比较

于图 1—2 图形指出的完美开关的。开态电压对 VMOS 晶体管来说，高于较大电流下的双极型晶体管。虽然图 1—2 不清楚，VMOS 曲线在 origin 相交，不禁止双极型器件的补偿电压特性，给 VMOS 在小电流下工作带来了好处。

与正在处理的负载电流相比，所有类型的硅固器件都具有满意的低漏泄电流。但是，双极型器件的漏泄电流流出基极，因此要求使用低的阻抗源，或提供某种手段使基极反偏置，以维持截止条件。VMOS 晶体管是一种增强型器件，即使栅上略有正向电压，也是截止的，并且具有极低的栅漏泄电流，使其能实用于直接与逻辑输出耦连和用于高阻抗电路。

开关速度与前面讨论的一样，直接与时间延迟和有源元件的电容有关。除频率响应限制以外，双极型晶体管受到存贮时间的影响，很难在功率晶体管中获得微秒级以下水平。另外，它不仅限制了开关速度，也使某些电路设计趋于复杂。例如 功率转换

器，必须在驱动电路中设计截止时间，以便在推挽电路中的一对器件同时导通时，避免过多功耗。所有场效应晶体管完全没有这种现象，并且由低阻抗源驱动时，在不到 4 毫微秒时间内开关 1 安培。开关时间主要由器件电容能够被充电的速率决定。限制开启时间约为 1 毫微秒，它仅是载流子在沟道中的渡越时间。

总之，VMOS 功率晶体管是最接近完美放大器或开关器件的电子器件。它们克服了双极型器件的严重非线性、开关速度限制以及常规 MOS 器件的劣质线性和高开启电压。双极型器件唯一的优点是当用作开关时，在开启电压方面具有优越性。在线性应用中，双极型器件的准饱和区可将负载线变化限制到大约与场效应晶体管同样的水平。

第 二 章

半导体的工作原理、双极型

晶体管和场效应晶体管

引 言

半导体是介于导体和绝缘体之间的一种固体物质。由于它的导电方式，半导体促进了固体二极管、双极型晶体管和场效应晶体管的发展。通过把场效应晶体管的几何结构改为V型短沟道结构，就成了垂直金属-氧化物-半导体场效应晶体管（VMOSFET），从而改进了特性。例如较快的开关速度、高输入阻抗、无二次击穿或电流错乱。

目 的

本章将学习：

- 导体、绝缘体和半导体的电学特性。
- 结型二极管和结型晶体管的特性。
- 垂直金属-氧化物-半导体场效应晶体管的工作原理。
- VMOSFET的优点。
- VMOSFET的缺点。

导体、绝缘体和半导体

所有固体大体可分为导体、绝缘体和半导体这三类。某些材

料之所以是固体的，是因为材料中每个原子的外层电子共享邻近原子，从而将结构中的每个原子束缚在某个地方。如果给原子的外层电子以足够能量，例如采用加热的方法，这些电子就从与它们相关的原子中挣脱出来，在材料中自由运动。

导体

导体是具有大量能在材料中自由运动的外层电子的材料。因此，当很小的电势能施加于象铜这样的导体时，众多电子运动，产生了电流。

绝缘体

绝缘体是基本上所有外层电子被材料中的原子束缚的材料。当电场施加于绝缘体时，无明显的电子运动发生，电流基本上不存在。

半导体

半导体是几个电子脱离其原子，而其余仍被束缚的材料。随着半导体被加热，自由电子增加，更多的电子参与电子运动。当电势能施加于纯净半导体时，少量电子流动。但是，如果半导体加热，则有更大的电流流动，因为这时有较多的电子在材料中自由运动。这三种材料的差别是自由电子的程度不同。

半导体有两种基本的导电方式。第一种如上所述，是自由电子从它们的母原子脱离出来运动。原子失去一个电子，就在固体材料的电子结构中留下一个“空穴”。邻近电子具有足够能量脱离母原子后，能方便地进入邻近空穴。如果空穴发生在电子源连接的材料点上，例如电池的负极，空穴将被填充。这时，这个空穴实际上已允许电流在整个材料中流动。