

清华大学信息科学技术学院教材——信息与通信工程系列

高等模拟集成电路

Higher Analog
Integrated Circuits

董在望 李冬梅 王志华 李永明 编著

Dong Zaiwang Li Dongmei Wang Zhihua Li Yongming

清华大学出版社

清华大学信息科学技术学院教材——信息与通信工程系列

高等模拟集成电路

Higher Analog Integrated Circuits

董在望 李冬梅 王志华 李永明 编著

Dong Zaiwang Li Dongmei Wang Zhihua Li Yongming

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书包括 CMOS 模拟集成电路基础、新电路技术和主要功能电路三个部分。第一部分主要介绍 CMOS 模拟集成电路基础(第 1 章),并简单介绍 CMOS 工艺过程(第 7 章)。第二部分主要介绍电流模电路(第 2 章)、抽样数据电路(第 3 章)和对数域电路(含在第 5 章中)的工作原理、性能特点和典型电路。第三部分主要介绍模数与数模转换器(第 4 章)、集成模拟滤波器(第 5 章)和射频前端电路(第 6 章)的构成原理和特点以及主要单元电路。

本书重点介绍具有高工作频率、低电源电压和高工作稳定性的新电路技术和在电子系统中占有重要地位的功能电路及其中的新技术。

本书可作为信息与通信工程和电子科学与技术学科相关课程的研究生教材或教学参考书,也可供相关专业的工程技术人员参考。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

高等模拟集成电路/董在望等编著. —北京:清华大学出版社,2006.2

(清华大学信息科学技术学院教材——信息与通信工程系列)

ISBN 7-302-12070-6

I. 高… II. 董… III. 模拟集成电路—研究生—教材 IV. TN431.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 128596 号

出版者:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦
http://www.tup.com.cn 邮 编:100084
社总机:010-62770175 客户服务:010-62776969

组稿编辑:陈国新 王仁康

文稿编辑:陈国新

印刷者:北京市清华园胶印厂

装订者:三河市新茂装订有限公司

发行者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×230 印张:21.75 字数:458 千字

版 次:2006 年 2 月第 1 版 2006 年 2 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-302-12070-6/TN·286

印 数:1~3000

定 价:35.00 元

《清华大学信息科学技术学院教材》

编 委 会

(以姓氏拼音为序)

主 任： 郑大钟

副 主 任： 蔡鸿程 邓丽曼 胡事民 任 勇 章 征

王希勤 王 雄 余志平

编 委： 高文焕 华成英 陆文娟 王诗宓 温冬婵

萧德云 谢世钟 殷人昆 应根裕 郑君里

郑纬民 周立柱 周润德 朱雪龙

秘 书： 王 娜

责任编辑： 马瑛琚 王一玲 陈国新 邹开颜

出版说明

本套教材是针对清华大学信息科学技术学院所属电子工程系、计算机科学与技术系、自动化系、微电子研究所、软件学院的现行本科培养方案和研究生培养计划的课程设置而组织编写的。这些培养方案和培养计划是基于清华大学对研究型大学的定位和对研究型教学的强调,吸纳多年来在教学改革与实践中所取得的成果和形成的共识,历经多届试用和不断修订而形成的。贯穿于其中的“本科教育的通识性、培养模式的宽口径、教学方式的研究型、专业课程的前沿性”的相关思想是我们组编本套教材所力求体现的基本指导原则。

本套教材以本科教材为主并适量包括研究生教材。定位上,属于信息学科大类中各个基本方向的基本理论和前沿技术的一套高等院校教材。层次上,覆盖学院公共基础课程、专业技术基础课程、专业课程、研究生课程。领域上,涉及6个系列14个领域,即学院公共基础课程系列,信息与通信工程系列(含通信、信息处理等领域),微电子光电子系列(含微电子、光电子等领域),计算机科学与技术系列(含计算机科学、计算机网络与安全、计算机应用、软件工程、网格计算等领域),自动化系列(含控制理论与控制工程、模式识别与智能控制、检测与电子技术、系统工程、现代集成制造等领域),实验实践系列。类型上,以文字教材为主并适量包括多媒体教材,以主教材为主并适量包括习题集、教师手册等辅助教材,以基本理论和工程技术教材为主并适量包括实验和实践课程教材。列入这套教材中的著作,大多是清华大学信息科学技术学院所属系所院开设的课程中经过较长教学实践而形成的,既有多年教学经验和教学改革基础上新编著的教材,也有部分已出版教材的更新和修订版本。教材在总体上突出求新与求实的风格,力求反映所属领域的基本理

论和新进展,力求做到学科先进性和教学适用性的统一。

本套教材的主要读者对象为电子科学与技术、信息与通信工程、计算机科学与技术、控制科学与工程、系统科学、电气工程、机械工程、化学与技术工程、核能工程等相关理工专业的大学生和研究生,以及相应领域和部门的科学工作者和工程技术人员。我们希望,这套教材既能为在校大学生和研究生的学习提供内容先进、论述系统和适于教学的教材或参考书,也能为广大科学工作者与工程技术人员知识更新与继续学习提供适合的和有价值的进修或自学读物。我们同时要感谢使用本系列教材的广大教师、学生和科技工作者的热情支持,并热忱欢迎提出批评和意见。

《清华大学信息科学技术学院教材》编委会

2003年10月

前言

Preface

近年来,随着集成电路工艺技术的进步,电子系统的构成发生了两个重要的变化:一个是数字信号处理和数字电路成为系统的核心,一个是整个电子系统可以集成在一个芯片上(称为片上系统)。这些变化改变了模拟电路在电子系统中的作用,并且影响着模拟集成电路的发展。

数字电路不仅具有远远超过模拟电路的集成规模,而且具有可编程、灵活、易于附加功能、设计周期短、对噪声和制造工艺误差的抗扰性强等优点,因而大多数复杂系统以数字信号处理和数字电路为核心已成为必然的趋势。虽然如此,模拟电路仍然是电子系统中非常重要的组成部分。这是因为我们接触到的外部世界的物理量主要都是模拟量,比如图像、声音、压力、温度、湿度、重量等,要将它们变换为数字信号,需要模拟信号处理和数据转换电路,如果这些电路性能不够高,将会影响整个系统的性能。其次,系统中的许多功能不可能或很难用数字电路完成,如微弱信号放大,很高频率和宽频带信号的实时处理等。因此,虽然模拟电路在系统中不再是核心,但作为固有的模拟世界与数字系统的接口,其地位和作用仍然十分重要。

片上系统要求将数字电路和模拟电路集成在一个芯片上,这希望模拟电路使用与数字电路相同的制造工艺。随着 MOS 器件的线宽不断减小,使 MOS 器件的性能不断提高, MOS 数字电路成为数字集成电路的主流,并因此促进了 MOS 模拟集成电路的迅速发展。为了适应电子系统功能的不断扩展和性能的不断提高,对模拟电路在降低电源电压、提高工作频率、扩大线性工作范围和提高性能指标的精度和稳定度等方面提出更高要求,促进了新电路技术的发展。

作为研究生课程的教材,本书内容是在本科相关课程基础上的深化和扩展,同时涉及实际设计中需要考虑的一些问题,重点介绍具有高工

作频率、低电源电压和高工作稳定性的新电路技术和在电子系统中占有重要地位的功能电路及其中的新技术。全书共7章,大致可分为三个部分。第一部分包括第1章和第7章。第1章为MOS模拟集成电路基础,比较全面地介绍MOS器件的工作原理和特性以及由MOS器件构成的基本单元电路,为学习本教材其他内容提供必要的知识。由于版图设计与工艺参数对模拟集成电路性能的影响很大,因此第7章简单介绍制造MOS模拟集成电路的CMOS工艺过程和版图设计技术,读者可以通过对该章所介绍的相关背景知识的了解,更深入地理解MOS器件和电路的特性,有助于更好地完成模拟集成电路的可实现性设计。第二部分为新电路技术,由第2章、第3章和第5章的部分组成,包括近年来逐步获得广泛应用的电流模电路、抽样数据电路和对数域电路,它们在提高工作频率、降低电源电压、扩大线性工作范围和提高性能指标的精度和稳定度方面具有明显的潜力,同时它们也引入了一些模拟电路的新概念。这些内容有助于读者开拓提高电路性能方面的思路。第2章介绍电流模电路的工作原理、特点和典型电路。与传统的以电压作为信号载体的电路不同,这是一种以电流作为信号载体的电路,虽然在电路中电压和电流总是共同存在并相互作用的,但由于信号载体不同,不仅电路性能不同而且电路结构也不同。第3章介绍抽样数据电路的特点和开关电容与开关电流电路的工作原理、分析方法与典型电路。抽样数据电路类似于数字电路,处理的是时间离散信号,又类似于模拟电路,处理的是幅度连续信号,它比模拟电路具有稳定准确的时间常数,解决了模拟电路实际应用中的一大障碍。对数域电路在第5章中结合其在滤波器中的应用介绍,这类电路除具有良好的电性能外,还提出了一种利用器件的非线性特性实现线性电路的新思路。第三部分介绍几个模拟电路的功能模块,它们是电子系统中的关键组成部分,并且与信号和信号处理联系密切,有助于在信号和电路间形成整体观念。这部分包括第4章至第6章。第4章介绍数据转换电路的技术指标和高精度与高速度转换电路的构成、工作原理、特点和典型电路。第5章介绍模拟集成滤波器的设计方法和主要类型,包括连续时间滤波器、对数域滤波器和抽样数据滤波器。第6章介绍通信系统中的收发器与射频前端电路,包括收信器、发信器的技术指标、结构和典型电路。因为载波通信系统传输的是模拟信号,射频前端电路的性能对整个通信系统有直接的影响,所以射频集成电路已成为重要的研究课题。

本书是在为研究生开设的“高等模拟集成电路”课程讲义的基础上整理而成,由董在望主编,第1、4、7章由李冬梅编写,第6章由王志华编写,第5章由李永明和董在望编写,第2、3章由董在望编写,李国林参加了部分章节的校核工作。

本书可作为信息与通信工程和电子科学与技术学科相关课程的研究生教材或教学参考书,也可作为本科教学参考书或选修课教材和供相关专业的工程技术人员参考。

清华大学出版社多位编辑为本书的出版做了卓有成效的工作,深致谢意。

限于编者水平,难免有错误和疏漏之处,欢迎批评指正。

编者

2005年4月于清华园

目 录

Contents

1	CMOS 模拟集成电路基础	1
1.1	MOS 器件基础及器件模型	1
1.1.1	结构及工作原理	1
1.1.2	衬底调制效应	5
1.1.3	小信号模型	6
1.1.4	亚阈区效应	8
1.1.5	短沟效应	9
1.1.6	SPICE 模型	10
1.2	基本放大电路	11
1.2.1	共源(CS)放大电路	11
1.2.2	共漏(CD)放大电路	15
1.2.3	共栅(CG)放大电路	17
1.2.4	共源共栅(CS-CG)放大电路	19
1.2.5	差分放大电路	21
1.3	电流源电路	29
1.3.1	二极管连接的 MOS 器件	29
1.3.2	基本镜像电流源	29
1.3.3	威尔逊电流源	30
1.3.4	共源共栅电流源	32
1.3.5	有源负载放大电路	33
1.4	运算放大器	38
1.4.1	运算放大器的主要参数	38
1.4.2	单级运算放大器	41

1.4.3	两级运算放大器	45
1.4.4	共模反馈(CMFB)	46
1.4.5	运算放大器的频率补偿	49
1.5	模拟开关	53
1.5.1	导通电阻	53
1.5.2	电荷注入与时钟馈通	54
1.6	带隙基准电压源	55
1.6.1	工作原理	56
1.6.2	与 CMOS 工艺兼容的带隙基准电压源	57
	思考题	58
2	电流模电路	59
2.1	概述	59
2.1.1	电流模电路的概念	59
2.1.2	电流模电路的特点	60
2.2	基本电流模电路	61
2.2.1	电流镜电路	61
2.2.2	电流放大器	62
2.2.3	电流模积分器	64
2.3	电流模功能电路	65
2.3.1	跨导线性电路	65
2.3.2	电流传输器	72
2.4	从电压模电路变换到电流模电路	74
2.5	电流模电路中的非理想效应	75
2.5.1	MOSFET 之间的失配	75
2.5.2	寄生电容对频率特性的影响	77
	思考题	79
3	抽样数据电路	80
3.1	开关电容电路和开关电流电路的基本分析方法	82
3.1.1	开关电容电路的时域分析	82
3.1.2	开关电流电路的时域分析	84
3.1.3	抽样数据电路的频域分析	86
3.2	开关电容电路	88

3.2.1	开关电容单元电路	88
3.2.2	开关电容电路的特点	95
3.2.3	非理想因素的影响	96
3.3	开关电流电路	101
3.3.1	开关电流单元电路	101
3.3.2	开关电流电路的特点	109
3.3.3	非理想因素的影响	109
	思考题	112
4	A/D 转换器与 D/A 转换器	113
4.1	概述	113
4.1.1	电子系统中的 A/D 与 D/A 转换	113
4.1.2	A/D 与 D/A 转换器的基本原理	115
4.1.3	A/D 与 D/A 转换器的性能指标	118
4.1.4	A/D 与 D/A 转换器的分类	122
4.1.5	A/D 与 D/A 转换器中常用的数码类型	123
4.2	高速 A/D 转换器	123
4.2.1	全并行结构 A/D 转换器	123
4.2.2	两步结构 A/D 转换器	130
4.2.3	插值与折叠结构 A/D 转换器	136
4.2.4	流水线结构 A/D 转换器	143
4.2.5	交织结构 A/D 转换器	146
4.3	高精度 A/D 转换器	147
4.3.1	逐次逼近型 A/D 转换器	147
4.3.2	双斜率积分型 A/D 转换器	149
4.3.3	过采样 $\Sigma\Delta$ A/D 转换器	150
4.4	D/A 转换器	157
4.4.1	电阻型 D/A 转换器	157
4.4.2	电流型 D/A 转换器	159
4.4.3	电容型 D/A 转换器	159
	思考题	161
5	集成滤波器	162
5.1	引言	162

5.1.1	滤波器的数学描述	163
5.1.2	滤波器的频率特性	164
5.1.3	滤波器设计的逼近方法	168
5.2	连续时间滤波器	172
5.2.1	连续时间滤波器的设计方法	172
5.2.2	跨导电容(Gm-C)连续时间滤波器	181
5.2.3	连续时间滤波器的片上自动调节电路	192
5.3	对数域滤波器	198
5.3.1	对数域电路概念及其特点	198
5.3.2	对数域电路基本单元	201
5.3.3	对数域滤波器	206
5.4	抽样数据滤波器	211
5.4.1	设计方法	212
5.4.2	S-Z 域映射	219
5.4.3	开关电容电路转换为开关电流电路的方法	229
	思考题	234
6	收发器与射频前端电路	236
6.1	通信系统中的射频收发器	236
6.2	集成收信器	238
6.2.1	外差式接收与镜像信号	238
6.2.2	复数信号处理	241
6.2.3	收信器前端结构	252
6.3	集成发信器	261
6.3.1	上变换器	262
6.3.2	发信器结构	264
6.4	收发器的技术指标	265
6.4.1	噪声性能	266
6.4.2	灵敏度	269
6.4.3	失真特性与线性度	270
6.4.4	动态范围	276
6.5	射频电路设计	278
6.5.1	晶体管模型与参数	279
6.5.2	噪声	281

6.5.3	集成无源器件	284
6.5.4	低噪声放大器	288
6.5.5	混频器	292
6.5.6	频率综合器	295
6.5.7	功率放大器	303
	思考题	307
7	CMOS 集成电路制造工艺及版图设计	309
7.1	集成电路制造工艺简介	309
7.1.1	单晶生长与衬底制备	309
7.1.2	光刻	310
7.1.3	氧化	312
7.1.4	扩散及离子注入	312
7.1.5	化学气相淀积(CVD)	313
7.1.6	接触与互连	313
7.2	CMOS 工艺流程与集成电路中的元件	314
7.2.1	硅栅 CMOS 工艺流程	314
7.2.2	CMOS 集成电路中的无源元件	317
7.2.3	CMOS 集成电路中的寄生效应	320
7.3	版图设计	321
7.3.1	硅栅 CMOS 集成电路的版图构成	322
7.3.2	版图设计规则	324
7.3.3	CMOS 版图设计技术	326
	思考题	330
	参考文献	332

1

CMOS 模拟集成电路基础

虽然模拟电路在早期主要是基于双极型电路,但随着 CMOS 工艺技术的不断发展,以及对数模混合集成电路需求的日益增长,采用与数字电路兼容的标准 CMOS 工艺实现模拟电路已成为一种必然的趋势。MOS 器件的速度逐渐提高,加之 MOS 工艺本身在成本、功耗及集成度等方面的优势,随着各种更易于集成的新型电路的出现,CMOS 电路在模拟集成电路方面显示出越来越大的发展潜力。

本章从 MOS 器件的基本特性及其模型入手,重点分析 MOS 器件构成的 CMOS 基本放大电路、电流源电路的原理及特性,进而对模拟电路的基本单元,即运算放大器电路的组成及特性,进行较深入的研究,同时对模拟电路中常用的基准电压源电路及模拟开关电路进行简要分析和介绍。

本章内容是 CMOS 模拟集成电路的基础,可帮助读者较容易地进入后续各章内容的学习。

1.1 MOS 器件基础及器件模型

MOS 场效应晶体管是组成 CMOS 集成电路的基本元器件,器件的物理模型和数学模型是合理、准确地设计集成电路的基础。

1.1.1 结构及工作原理

组成 CMOS 电路的有源器件是 N 沟道增强型和 P 沟道增强型 MOS 场效应晶体管,分别简称为 NMOS 管和 PMOS 管。图 1.1.1 显示了一个 NMOS 管的物理结构图及其电路符号。在 P 型衬底上有两个 N 型重掺杂区,称为源区和漏区。源区、漏区之间的硅表层是形成感应沟道的区域,沟道区表面覆盖一层 SiO_2 绝缘层,将其上方的多晶

硅栅极与沟道隔离开来。沟道的长度和宽度分别用 L 和 W 表示。这种场效应管也叫做绝缘栅型场效应管。CMOS 器件的制作工艺过程请参见第 7 章的内容。

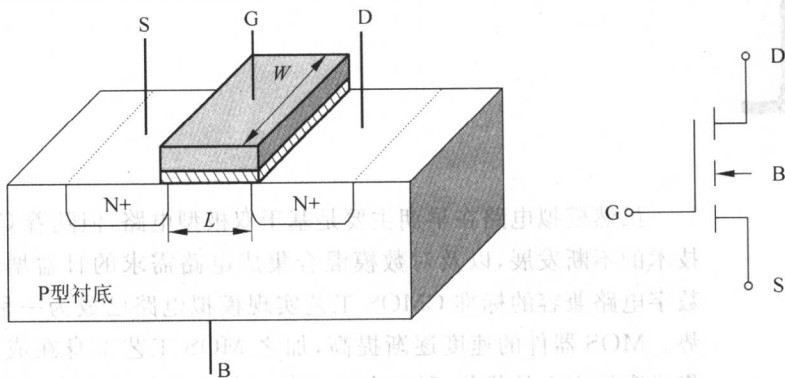


图 1.1.1 NMOS 管的物理结构图及其电路符号

图 1.1.1 所示的 NMOS 管的工作原理如下：

可以看到，栅极与衬底之间通过 SiO_2 绝缘层构成了一个平行板电容器。当栅极与衬底间存在电压时，与栅极相对的衬底表面就会产生感应电荷。考虑源极与衬底连接起来的情况，此时衬底与源极等电位。当栅源电压 $V_{GS} > 0$ 时，P 型衬底中的电子被吸引到表面，首先与表面的空穴复合，形成耗尽层；当 V_{GS} 继续增加，更多的电子聚集到表面，使得该区域内的电子成为多数载流子，表面层由 P 型转变为 N 型，也称为反型层。反型层将源区、漏区连接起来，成为导电沟道。参见图 1.1.2。

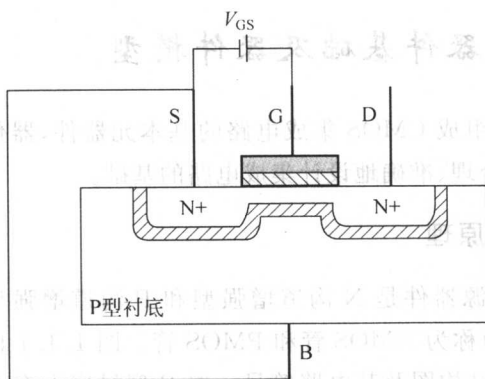
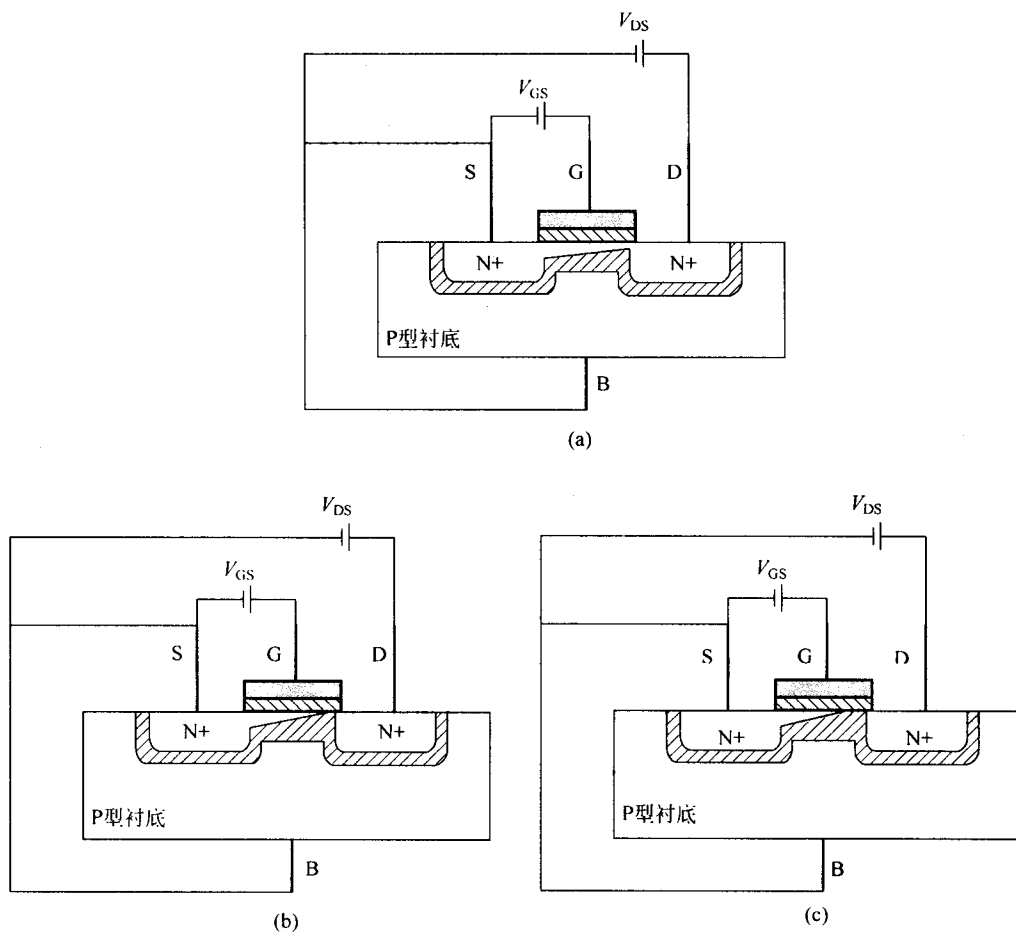


图 1.1.2 沟道的形成

导电沟道开始形成时所对应的栅源电压 V_{GS} 叫做阈值电压或开启电压，记作 V_{TH} 。 V_{GS} 越大，形成的沟道越厚，沟道的电阻越小。在沟道形成之前，即 $V_{GS} < V_{TH}$ ，源漏区之间没有导电通道，因此没有电流流过。

当形成沟道以后，即 $V_{GS} > V_{TH}$ ，只要源漏之间的电压 $V_{DS} > 0$ ，就会有电流从漏极通过导电沟道流向源极，形成漏极电流 I_D 。由于从漏极沿沟道到源极会产生压降，因此沟道上的各点与栅极的电压差不再相等，沟道的厚度也就不再均匀，靠近漏极端的沟道最薄，靠近源极端的沟道最厚，如图 1.1.3(a) 所示。此时 $V_{DS} < V_{GS} - V_{TH}$ ，虽然沟道的形状略有变化，但当 V_{GS} 一定时，沟道电阻基本不变，漏极电流 I_D 随 V_{DS} 线性增加，对应于图 1.1.4

图 1.1.3(a) 所示。此时 $V_{DS} < V_{GS} - V_{TH}$ ，虽然沟道的形状略有变化，但当 V_{GS} 一定时，沟道电阻基本不变，漏极电流 I_D 随 V_{DS} 线性增加，对应于图 1.1.4

图 1.1.3 V_{DS} 对沟道的影响

所示输出特性中的可变电阻区,也称为线性区(linear region)或三极管区(triode region)。

随着漏极电压的增加,漏端的沟道越来越薄。当漏端沟道的厚度减为零时,沟道夹断,此时栅极与漏极的电压 $V_{GD} = V_{TH}$,即 $V_{DS} = V_{GS} - V_{TH}$,如图 1.1.3(b)所示。沟道被夹断以后,若 V_{DS} 继续增加,即 $V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}$,则沟道的夹断点向源极方向移动,漏极附近出现由耗尽层构成的夹断区,如图 1.1.3(c)所示。由于夹断点与栅极之间的电压始终是 V_{TH} ,因此加在沟道上的电压也不发生变化,增加的压降全部落在夹断区上。此时的漏极电流 I_D 应该保持不变。但随着 V_{DS} 的增加,夹断区增大,沟道的长度减小,沟道电阻略有减小,因此,漏极电流 I_D 随 V_{DS} 的增加也略有增加。这就是沟道长度调制效应。沟道长度 L 越小,沟道长度调制效应越明显; L 越大,恒流特性越好。该区域的输出特性对应

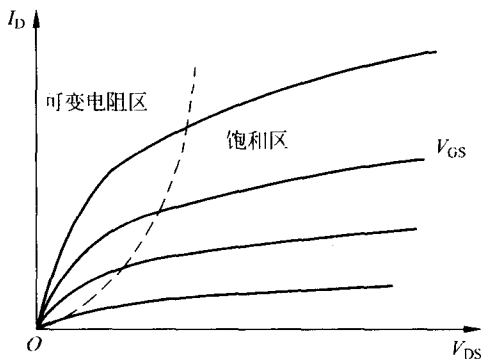


图 1.1.4 NMOS 管输出特性

于图 1.1.4 所示曲线的饱和区 (saturation region), 又称为夹断区 (pinch off region)。通常称 $V_{GS} - V_{TH}$ 为过驱电压 (overdrive), 用 V_{OV} 表示, 有时为方便起见, 在电路分析过程中常用 V_{OV} 代替 $V_{GS} - V_{TH}$ 。

在可变电阻区, 漏极电流 I_D 与 V_{DS} 的关系表示为

$$I_D = \frac{K_N}{2} \frac{W}{L} [2(V_{GS} - V_{TH})V_{DS} - V_{DS}^2] \quad (1.1.1)$$

其中 $K_N = \mu_n C_{ox}$, 称为 NMOS 管本征导电因子; μ_n 为沟道电子迁移率; C_{ox} 是栅氧化层的单位面积电容; W/L 是 MOS 管的宽长比。从式 (1.1.1) 可以看出, 当 V_{DS} 较小时, 可不考虑二阶效应, 即忽略其平方项。这时 I_D 与 V_{DS} 近似呈线性关系, 源漏之间的沟道可看作一个线性电阻 R_{on} , 表示为

$$R_{on} = \frac{L}{K_N W (V_{GS} - V_{TH})} \quad (1.1.2)$$

式 (1.1.2) 显示出电阻 R_{on} 随栅源电压 V_{GS} 变化的关系。通过改变 V_{GS} , 可以得到不同的电阻 R_{on} , 这也是可变电阻区的由来。由式 (1.1.1) 得到可变电阻区的跨导

$$g_m = \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} = K_N \frac{W}{L} V_{DS} \quad (1.1.3)$$

由于可变电阻区的 V_{DS} 较小, 所以跨导 g_m 也较小。

在饱和区, 漏极电流 I_D 可表示为

$$I_D = \frac{K_N}{2} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2 (1 + \lambda V_{DS}) \quad (1.1.4)$$

其中 λ 是沟道长度调制系数, $\lambda = 1/V_A$, V_A 是厄尔利电压 (Early voltage)。实验表明, λ 与沟道长度 L 近似成反比。

由式 (1.1.4) 可以得到跨导 g_m 和输出电阻 r_{ds} 分别为

$$g_m = \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} = K_N \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH}) (1 + \lambda V_{DS}) \quad (1.1.5)$$

$$r_{ds} = \frac{\partial V_{DS}}{\partial I_D} = \frac{1}{\lambda I_D} \quad (1.1.6)$$

若忽略沟道长度调制效应的影响, 即 $\lambda = 0$, 则饱和区的 I_D 可表示为

$$I_D = \frac{K_N}{2} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2 \quad (1.1.7)$$