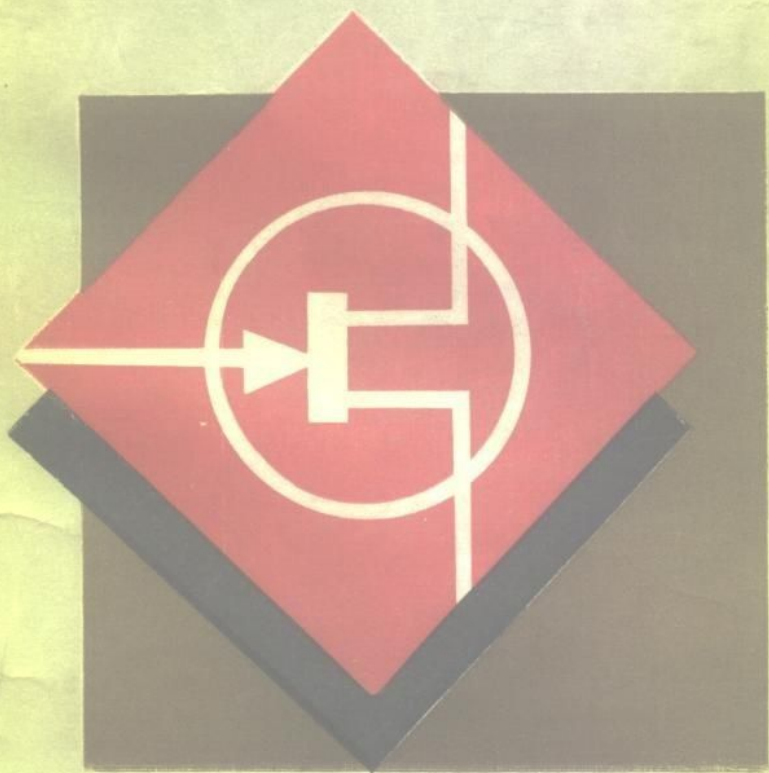


场效应晶体管 电路设计

〔美〕A·D·埃文斯 主编

亢宝位 孙吾云 译



人民邮电出版社

73/324
627

场效应晶体管电路设计

〔美〕 A.D. 埃文斯 主编
亢宝位 孙吾云 译

人 民 邮 电 出 版 社

DESIGNING WITH FIELD-EFFECT TRANSISTORS

Editor in Chief A.D.Evans

McGRAW-HILL BOOK COMPANY 1981

内 容 提 要

本书主要介绍了如何用场效应晶体管设计电子电路，还提供了具有实用价值的各种设计实例，包括放大器、模拟开关、压控电阻器、恒流源及集成电路等，并指出了这些设计的优越性。本书内容的选择突出了场效应晶体管的特点，叙述简明，物理概念清晰，对从事电子电路设计和生产的科技人员及大专院校有关专业的师生是很有帮助的。

场效应晶体管电路设计

Changxiaoying Jingtiguan Dianlu Sheji

〔美〕 A.D. 埃文斯 主编

亢宝位 孙吾云 译

责任编辑：张卫红

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：850×1168 1/32 1988年7月 第一版

印张：10 页数：160 1988年7月北京第1次印刷

字数：264千字

印数：1—3 000册

ISBN7-115-03626-8/TN·071

定价：3.80 元

前 言

本书是美国西里科奈克斯公司 (Siliconix Inc.) 应用工程编写的。该公司生产的场效应晶体管 (FET) 在国际上有一定的地位。本书的目的是帮助电路设计工作者更合理、更广泛地使用 FET。本书既不同于专门论述 FET 设计的书, 也不同于专门论述电路技术的书。本书的重点是集中讨论: 在各个不同的电子技术应用领域中, 用 FET 代替其他器件的优、缺点; 如何针对不同用途更合理地把 FET 应用于电路中, 以发挥其优点; 如何针对不同用途选用更适合的 FET 型号等。另外, 由于本书的撰稿人是长期从事实际工作的, 在内容阐述上紧密结合实际, 并举有大量实例。该书对电路设计者来说, 是一本很需要的书。同时, 从事 FET 设计制造的技术人员也可从中得到不少启发。

本书也有一些局限性。由于编者身份所限, 几乎所举实例中的 FET 都是编者所在公司生产的, 对世界上其他厂家产品涉及甚少。也正因为这样, 所讲的 FET 门类不够全面。例如十分重要的砷化镓金属-半导体场效应晶体管 (GaAs-MESFET) 基本没有提到, 近几年发展特别快的功率 MOSFET 阐述的也还不够。但每一本书都可以有所侧重, 这些局限性并不影响本书是一本颇有参考价值的书。

由于译者各方面的水平所限, 译文错误与不妥之处一定不少, 深望读者指正。

译者 1986.8.

作 者 前 言

本书的目的是帮助电路设计师使用场效应晶体管 (FET)。自1962年左右场效应晶体管在实验室里研究成功以来*,它已成为电子工业中重要而广泛应用的电子器件。

不管作为分立器件或集成器件,场效应晶体管的重要性与年俱增。一个电路设计师必需清楚地了解场效应晶体管在各种不同电路条件和环境状况下的性能。了解场效应晶体管的物理性能与电气特性之间的相互关系对此是有所裨益的。本书在场效应晶体管理论方面的叙述深度对于本书的读者对象来说恰到好处。

第一章是引论,描述场效应晶体管是如何工作的。第二章描述场效应晶体管各特性之间的相互关系,并讨论这些特性与一般产品参数表中所列参数的联系。

以后各章分别论及场效应晶体管的各种应用领域。有关应用的各章的排列次序是随便的,各章都可以独立成篇。为了用实例解释各种电路应用,本书举了不少详细的电路设计例子。

当这本书正要出版的时候,功率场效应晶体管迅速发展起来。本书中功率场效应晶体管一章集中讨论了这一新的领域。

A. 埃文斯

* 这里是从工业生产角度看问题。科学研究样品研究成功要早得多,尤其对JFET。
——译者注

目 录

第一章 场效应晶体管理论	1
1-1 引言	1
1-2 结型场效应晶体管	4
1-3 金属-氧化物-半导体 (MOS) 场效应晶体管 (绝 缘栅型场效应晶体管)	14
1-4 场效应晶体管的符号	18
1-5 场效应晶体管的物理特征	19
1-6 小结	25
第二章 场效应晶体管的参量与规格	27
2-1 引言	27
2-2 JFET的静态特性	28
2-3 栅流特性	34
2-4 小信号特性	35
2-5 JFET中的电容	39
2-6 噪声特性	41
2-7 特性参量间的相互关系	43
2-8 MOSFET的特性.....	48
2-9 模拟开关参量	56
2-10 温度效应	61
2-11 额定功耗衰减系数	63
2-12 术语与符号汇总	64
第三章 低频电路	66
3-1 引言	66
3-2 工作区的边界	67

3-3	设计举例	68
3-4	确定工作点与建立偏置的方法	69
3-5	输入电容	72
3-6	如何选用FET——一个设计实例	73
3-7	恒流源偏置	82
3-8	共源共栅电路	84
3-9	源极跟随器 (共漏放大器)	90
3-10	差分放大器	98
3-11	FET放大器的失真	121
3-12	音频噪声特性	133
第四章	高频电路	147
4-1	高频技术	147
4-2	高频放大中的问题	149
4-3	“完美”的高频FET	151
4-4	稳定性	153
4-5	功率增益	156
4-6	晶体管的两端口网络 (四端网络) 参量	157
4-7	放大器	162
4-8	混频器	173
4-9	平衡混频器	181
4-10	双平衡混频器	186
4-11	振荡器	194
4-12	高频功率FET	198
4-13	噪声温度与噪声系数	203
第五章	模拟开关	208
5-1	作模拟开关用的FET	208
5-2	直流等效电路	209
5-3	作开关用的JFET	212
5-4	开关高频信号	215

5-5	MOSFET开关	221
5-6	CMOS开关	222
5-7	VMOS开关	224
5-8	直流漏电特性	232
5-9	电容与开关过渡过程	238
5-10	用模拟开关进行信号变换	246
5-11	小结	251
第六章	电压控制电阻器和FET电流源	252
6-1	电压控制电阻器 (VCR) 的性质	252
6-2	FET VCR的特性	252
6-3	如何把FET用作VCR	255
6-4	信号失真: 起因	256
6-5	信号失真的减小	257
6-6	用VCR进行线性增益控制	259
6-7	反馈线性化了的VCR的分析	262
6-8	用FET作恒流源	265
6-9	共源共栅FET电流源	269
6-10	稳流二极管	270
6-11	使用稳流器的波形发生器	273
6-12	用FET作电流源时的使用要点	275
第七章	功率场效应晶体管	276
7-1	引言	276
7-2	VMOS技术	277
7-3	垂直JFET和DMOS技术	279
7-4	VMOS的特性	281
7-5	一般开关应用	283
7-6	驱动考虑	294
7-7	温度考虑	295
7-8	并联与串联工作	297

7-9 放大应用.....	298
7-10 射频功率放大应用.....	303
7-11 小结.....	303
第八章 集成电路中的场效应晶体管	304
8-1 引言.....	304
8-2 MOSFET的各种基本制造工艺	304
8-3 双极晶体管与FET的结合	308

第一章 场效应晶体管理论

- 1-1 引言
- 1-2 结型场效应晶体管
- 1-3 金属-氧化物-半导体(MOS)场效应晶体管 (绝缘栅型场效应晶体管)
- 1-4 场效应晶体管的符号
- 1-5 场效应晶体管的物理特征
- 1-6 小结

1-1 引 言

本书主要是为场效应晶体管的使用者编写的。本书的显著特点是使读者能迅速掌握必要的知识而无须陷入复杂的理论分析之中。开头两章提供了足够的基础知识，用以解答场效应晶体管电路设计工程师可能提出的许多有关问题。这两章的目的是让电路设计工程师能够凭直观感觉判断出，如何巧妙地处理以后各章中所遇到的电路。这两章中既有理论分析又有种种应用。本书设想读者已具有半导体理论方面的某些知识。对于电子与空穴导电、 $p-n$ 结正、反向特性和 $p-n$ 结耗尽层等概念有初步的了解对于理解场效应晶体管理论是很有帮助的。

晶体管有两大类：双极〔型〕晶体管和单极〔型〕晶体管。本书描述的对象是单极晶体管，它的更通用名称是“场效应晶体管(FET)”。在双极晶体管发明之前，就有人提出了用电场来控制固体中电子导电的概念。李林费尔特(J.E.LiLienfeld)在1925年就申请了关于这种器件的专利，如图1-1所示。肖克莱(Shockley)

Patented Jan. 23, 1930

1,745,175

UNITED STATES PATENT OFFICE

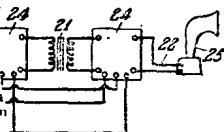
JULIUS EDGAR LILIENTHAL, OF BROOKLYN, NEW YORK

METHOD AND APPARATUS FOR CONTROLLING ELECTRIC CURRENTS

Application filed October 3, 1928. Serial No. 140,361, and in Canada October 22, 1928.

The invention relates to a method of and apparatus for controlling the flow of an electric current between two terminals of an electrically conducting solid by establishing a third potential between said terminals; and is particularly adaptable to the amplification of oscillating currents such as prevail, for example, in radio communication. Heretofore, thermionic tubes or valves have been generally employed for this purpose, but the present invention has for its object to provide a method and apparatus for controlling electric currents in a receiving circuit in which the novel amplifier is employed for two stages of radio frequency amplification.

Fig. 1.



INVENTOR
Julius Edgar Lilienthal
BY
B. B. B. B.
ATTORNEY

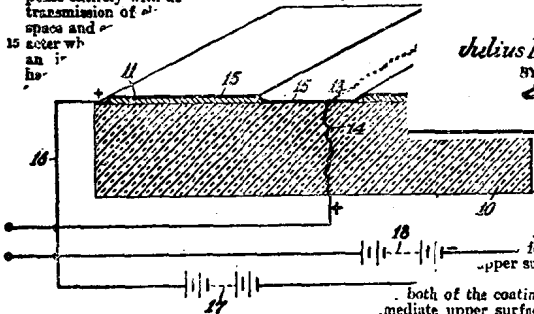


Fig. 3 is a diagrammatic view of a radio receiving circuit in which the novel amplifier is employed for two stages of radio frequency amplification. The circuit includes a vacuum tube 11, a base 12, a surface 13, a terminal 14, a terminal 15, a terminal 16, a terminal 17, a terminal 18, a terminal 19, a terminal 20, a terminal 21, a terminal 22, a terminal 23, a terminal 24, a terminal 25, a terminal 26, a terminal 27, a terminal 28, a terminal 29, a terminal 30, a terminal 31, a terminal 32, a terminal 33, a terminal 34, a terminal 35, a terminal 36, a terminal 37, a terminal 38, a terminal 39, a terminal 40, a terminal 41, a terminal 42, a terminal 43, a terminal 44, a terminal 45, a terminal 46, a terminal 47, a terminal 48, a terminal 49, a terminal 50, a terminal 51, a terminal 52, a terminal 53, a terminal 54, a terminal 55, a terminal 56, a terminal 57, a terminal 58, a terminal 59, a terminal 60, a terminal 61, a terminal 62, a terminal 63, a terminal 64, a terminal 65, a terminal 66, a terminal 67, a terminal 68, a terminal 69, a terminal 70, a terminal 71, a terminal 72, a terminal 73, a terminal 74, a terminal 75, a terminal 76, a terminal 77, a terminal 78, a terminal 79, a terminal 80, a terminal 81, a terminal 82, a terminal 83, a terminal 84, a terminal 85, a terminal 86, a terminal 87, a terminal 88, a terminal 89, a terminal 90, a terminal 91, a terminal 92, a terminal 93, a terminal 94, a terminal 95, a terminal 96, a terminal 97, a terminal 98, a terminal 99, a terminal 100.

Both of the coatings 11 and 12, the immediate upper surface portion of the glass 10, and the edge of the foil 13 is provided a film or coating 15 of a compound having the property of acting in conjunction with said metal foil electrode as an element of uni-directional conductivity. That is to say, this coating is to be electrically conductive and possess also the property, when associated with other suitable conductors, of establishing at the surface of contact a considerable drop of potential. The thickness of the film, moreover, is minute and of such a degree that the electrical conductivity therethrough would be influenced by applying thereto an electrostatic force. A suitable material for this film and especially suitable in conjunction with aluminum foil, is a compound of copper and sulphur. A convenient way of providing the film over the coatings 100

图 1-1 “场效应晶体管” 专利文件

在1952年提出了场效应晶体管的系统理论。然而，场效应晶体管的大批商品化生产却是在六十年初期才开始，这比双极晶体管晚了八到十年。在许多电路应用中，场效应晶体管比过去采用的双极晶体管或真空管具有更好的性能，这使它作为一种新的电子元件迅速地发展起来。

已用来制造场效应晶体管的半导体材料有硅、锗、砷化镓等，而目前应用最广的是硅。所以，除特别注明外，本书所讨论的所有器件都是用硅材料制造的。

场效应晶体管是这样一类半导体器件，用加于栅极与沟道之间的电场来控制源极与漏极之间的“沟道”的电导。传导沟道电流的可以是 n 型载流子（电子）也可以是 p 型载流子（空穴）。控制沟道电导的电场可以经 $p-n$ 结引入（对于结型场效应晶体管），也可经金属板引入，该金属板由一层氧化物介质与半导体沟道隔开（对于金属-氧化物-半导体场效应晶体管），也可以两种方法并用*。控

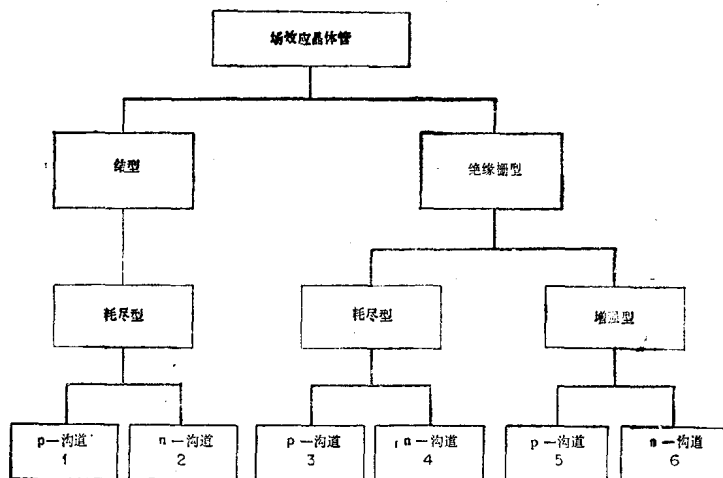


图 1-2 场效应晶体管的分类

- * 还有一种极为重要的类型——“金属-半导体场效应晶体管 (MESFET)”，其中控制沟道电导的电场是由肖特基结引入——译者注

制沟道电导的电场的方向因沟道中载流子的类型不同而不同。场效应晶体管的分类见图1-2。

1-2 结型场效应晶体管

结型场效应晶体管 (junction field-effect transistor, 缩写为JFET) 的剖面图见图1-3。在源极与漏极之间, 一个 n 型“沟道”隐埋在 p 型硅衬底中。由于 $p-n$ 结形成了阻止电流流动的势垒 (barrier), 所以沟道电导是沟道宽度、长度和厚度, 以及沟道中载流子密度和迁移率的函数。在这种结构中, 电流沿任何方向通过沟道都是一样的, 即相对于源极来说, 漏极电压的极性可正可负。

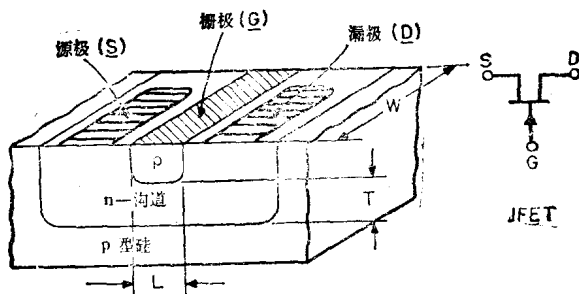


图 1-3 结型场效应晶体管

1-2-1 沟道电导 (g_{ds})

我们将分析加于栅区-沟道之间的电压是怎样控制沟道电导的。如图1-4(a)所示, 在 $p-n$ (栅区-沟道) 结附近有一个耗尽层。如果栅区 (p 型) 的空穴密度远高于沟道区 (n 型) 的电子密度, 并且 p 区向 n 区的过渡是突变的, 那么耗尽层的大部分宽度将产生在沟道中。耗尽层的宽度与结电压的平方根成正比,

$$W_d = \left(\frac{V_{bi} \pm V_{GS}}{K_1 N_C} \right)^{1/2}$$

其中 W_d ——栅区-沟道 p - n 结耗尽层宽度

V_{bi} ——栅区-沟道 p - n 结的自建电势

V_{GS} ——栅区-沟道 p - n 结上的外加电压（反偏或正偏）

K_1 ——常数

N_C ——沟道中的载流子密度

若耗尽层宽度增加, 则沟道电导减小。这样, 就可以通过栅-源电压 V_{GS} 来控制沟道的电导。

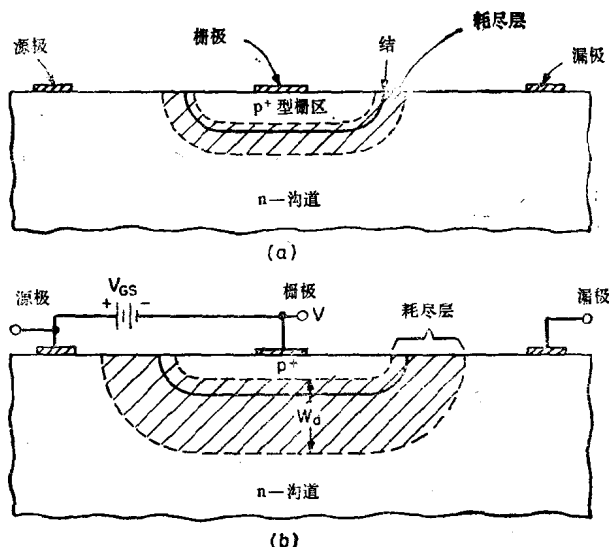


图 1-4 p - n 结的耗尽层

典型的JFET的沟道电导 g_d 与外加于栅-沟结上的结电压间的关系如图1-5所示。图中所示的特性是漏-源之间电压为零时的情况, 这时耗尽层厚度沿沟道长度方向是均匀的。沟道电导趋近于零时的栅源电压称为“栅截止电压”, 以符号 $V_{GS(off)}$ 表示。 $V_{GS(off)}$ 的极性应使栅-沟 p - n 结处于反偏。栅-沟结正偏将造成耗尽层宽度

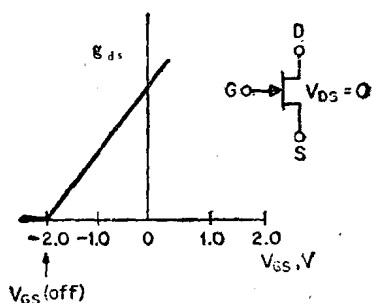


图 1-5 沟道电导与栅-沟电压间的关系

减小，使沟道电导增大；然而，正如图1-6所示，栅-沟结正偏会使栅极电流大大增加。在图1-5所示的FET符号中，栅-沟结箭头所指的方向是栅电流容易流通的方向（这和 $p-n$ 结二极管的符号是相似的）。当栅-沟结处于反偏时，栅极“漏泄”电流仅有几个皮安，因此，FET的低频输入阻抗是非常高的。但当栅-沟结正偏时，JFET的输入阻抗很低，因此，大多数应用中不使用栅-沟处于正偏的工作模式。当栅-沟间反向偏压达到某一较高数值时，在 $p-n$ 结处会发生雪崩击穿，它决定了器件工作电压的上限。

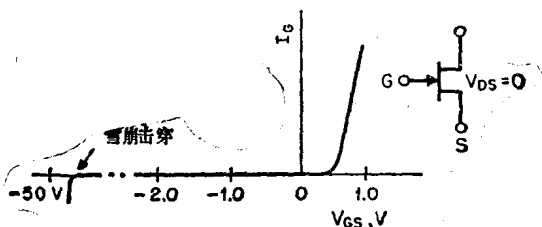


图 1-6 栅极电流与栅-源电压间的关系

图1-7是不同栅-沟电压下沟道中耗尽层的大致情况。各图均假设漏极电流为零，这样沿沟道长度方向上没有电压降。当栅-源电压为零时，若漏极相对于源极加正电压，则沿沟道长度方向上耗尽层的宽度将是不均匀的，如图1-8所示。这时，若 V_{DS} 进一步增大，沟

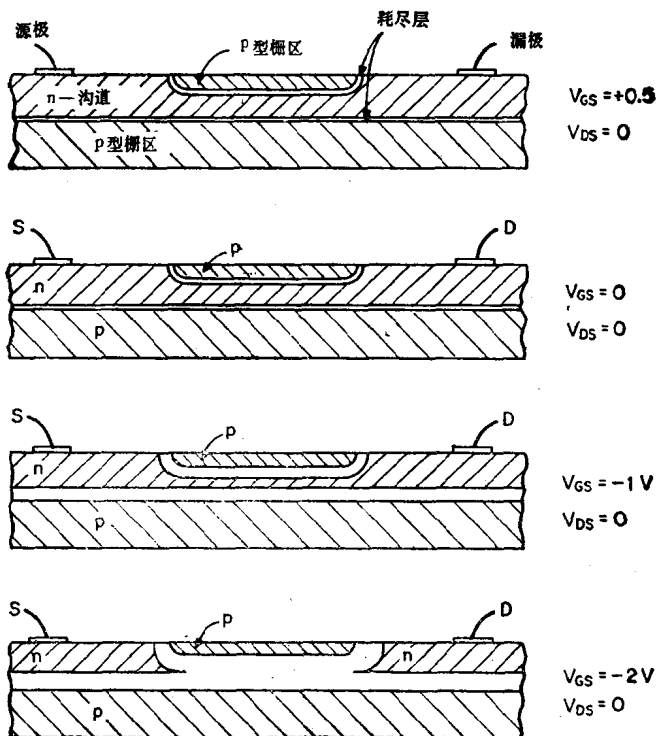


图 1-7 沟道中的耗尽层随栅-沟电压变化的情况 ($V_{DS} = 0$ 时)

道中靠近漏极端的耗尽层宽度则进一步增加，这使增量沟道电导减小*。如果沟道是属于长沟道（以其厚度来度量），则在漏-栅电压约等于 $-V_{GS(off)}$ 时，沟道在近漏端发生“夹断” (pinch off)，沟道电流开始达到饱和。其后漏源电压的进一步增加对漏极电流影响很小，因此我们称之为漏极电流“饱和”了。

图1-9示出了在栅-源电压 V_{GS} 等于零时，漏极电流 I_D 与漏-源电压 V_{DS} 的关系。当 V_{DS} 沿正方向变得更大时，沟道中近漏端耗尽

* 增量沟道电导的定义是单位漏-源电压变化所引起的漏极电流变化，即 $\Delta I_D / \Delta V_{DS}$ ，与后面用 g_o 表示的输出电导意义相同——译者注

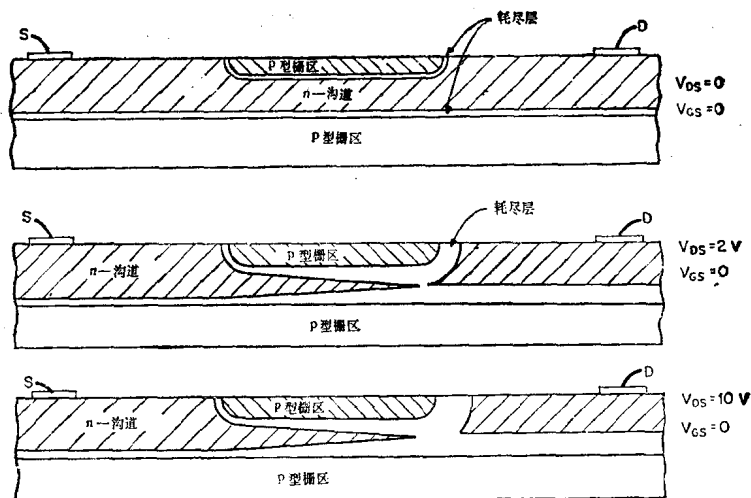


图 1-8 沟道中的耗尽层与漏-源间电压的关系

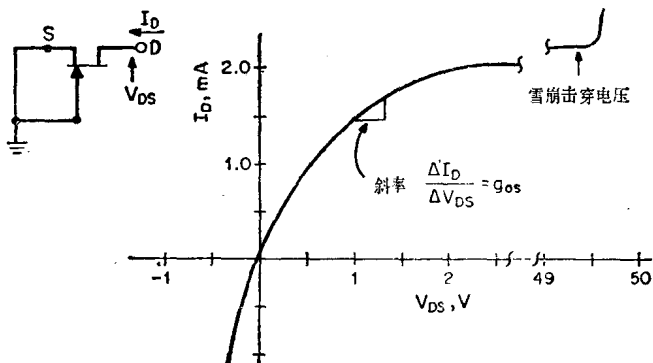


图 1-9 漏极电流与漏-源电压的关系

层宽度增加, 这样增量沟道电导减小。在 V_{DS} 达到某个高压值使其发生雪崩击穿以前, 斜率 $\Delta I_D / \Delta V_{DS}$ 将随 V_{DS} 的增大而连续减小。当栅-源电压为正值时, 由于漏-栅结变为正偏, 使得漏极电流急剧增加。所以, 结型场效应晶体管通常不采用大于零点几伏的正栅