

场效应和双极型功率 晶体管物理

A. 布利舍 著

科学出版社

场效应和双极型功率 晶体管物理

A. 布利舍 著

叶润涛 李世诚 王正儒 译

科学出版社

1988

内 容 简 介

本书系统地阐述了各类功率晶体管的理论、结构、特性、设计和制造技术,概念清楚,理论和设计紧密结合,实用性较强,是一本高水平的专著。全书共分三篇。第一篇记述功率晶体管共同的器件物理问题,并介绍了制造功率晶体管的最新技术。第二篇记述双极型功率晶体管的结构和其电学-物理模型。第三篇记述场效应功率晶体管。

本书可作为大学高年级学生、研究生的教科书,也可供从事功率晶体管设计、研制和使用的科研和工程技术人员参考。

Adolph Blicher

FIELD-EFFECT AND BIPOLAR POWER TRANSISTOR PHYSICS

Academic Press 1981

场效应和双极型功率晶体管物理

A. 布利舍 著

叶润涛 李世诚 王正儒 译

责任编辑 王昌泰

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1988 年 9 月第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1988 年 9 月第一次印刷 印张: 10 7/8

印数: 0001—4,760 字数: 241,000

ISBN 7-03-000512-0/O · 136

定价: 5.20 元

前 言

本书是一本论述功率晶体管工作原理的入门书。它既论及最近才商品化的场效应功率晶体管，也论及双极型器件。简而言之，本书介绍了功率晶体管设计方面所取得的各种最新进展。它是为从事功率晶体管电路设计的电气工程师，器件物理学家和器件设计人员及大学生而写的。读者应已相当熟悉小信号晶体管物理，这相应于四年级大学生或一年级研究生的水平。本书重点放在概念方面，所需的数学基础不超出初等微分方程。

本书由三部分组成。第一部分专门论述一般的原理，它包括：对半导体表面理论的论述，该理论是用以理解表面现象，特别是理解表面场效应器件工作原理的基础；关于高载流子浓度对半导体性质影响的讨论；以及对 pn 结雪崩击穿各种改进技术（如斜削法、耗尽区造形法和电阻性场板法）的评价。

第一部分中有选择地描述了一些制造方法，主要是为了论述某些最新的工艺技术，例如离子注入和中子嬗变掺杂。全面地讨论所有现今已使用的器件工艺将超出本书的范围，有许多教科书已对这些工艺技术进行了论述。

第二部分论述双极型晶体管，并从功率晶体管基本结构的论述开始。随后讨论双极型晶体管几种不同电学模型及这些模型的局限性。

第二部分中着重论述了高载流子浓度下的电流增益特性。充分地分析了禁带宽度变窄、俄歇复合、基区展宽和发射极电流集中等效应，并向读者介绍了改进增益的若干方法，例

如叉指法和异质结型的发射区法。第二部分中还论述了双极型晶体管的饱和和准饱和、频率响应和微波晶体管。这一部分的最后一章专门讨论热现象和电热不稳定性，例如正向和反向二次击穿和它们的改进方法。

本书的第三部分全部用来论述结型场效应和表面场效应晶体管。第十一章论述了结型场效应功率晶体管的工作理论和它们的各种结构，并讨论了类五极管的器件特性和类三极管的器件特性。这一章还论述了金属肖特基势垒场效应晶体管 (MESFET)。最后两章着重讨论绝缘栅场效应晶体管 (IGFET)，特别是称作金属-氧化物-半导体场效应晶体管 (MOSFET 或 MOST) 的这一支类。第十二章讨论具有类五极管特性及类三极管特性的 MOS 晶体管的静态和动态性能。第十三章评述二维和三维金属-氧化物-半导体 (MOS) 功率晶体管的结构，它们包括：诸如具有垂直漏极的高压 DMOS 晶体管和 V 形槽 MOS 晶体管。这一章的大部分内容是直接介绍 MOS 功率晶体管的设计思想。

符 号 表

A	面积,发射区面积	C_{SB}	砷掺杂发射区的表面浓度 7.6
A_C	集电区面积 7.2	C_{Si}	式(1.37)定义的电容 1.7
A_E	发射区面积 10.5	C_{ss}	式(1.38)定义的电容 1.7
A_n, A_p	常数 3.1	C_{TC}	集电极结电容 9.1
a_s	屏蔽半径 2.5	C_{TC}	沟道-本体电容 12.7
B_n, B_p	常数 3.1	C_{TD}	漏-本体电容 12.7
BV	击穿电压 3.1	C_{TB}	发射极结电容 9.1
BV_{CBO}	集电极击穿电压(发射极开路) 8.2	C_{TS}	源-本体电容 12.7
BV_{CEO}	集电极击穿电压(基极开路) 8.2	C_{th}	热容 10.1
$BV_{CEO(sat)}$	集电极-发射极击穿维持电压 4.7	C_s	表面浓度 3.1
BV_D	漏极击穿电压 11.5	d	冶金沟道宽度 11.1
BV_{FP}	带场板时的击穿电压 4.1	D_n	双极扩散系数 2.1
$BV_{平面}$	平面型结击穿电压 4.1	D_B	基区中的扩散常数 10.5
$BV_{平板}$	平板型结击穿电压 4.1	D_c	高注入时的电子扩散系数 7.3
BV_{SiO_2}	SiO_2 介质击穿电压 12.9	D_n	电子扩散系数 7.3
C	栅电容 1.7	D_p	空穴扩散系数 2.1
C	常数 2.5	D_{th}	热扩散系数 10.2
C_B	衬底杂质浓度 3.1	E	电场 3.1
C_D	扩散电容 6.2	E_b	击穿时的结电场 4.9
C_G	栅的总电容 11.2	E_c	导带底的能量 1.1
C_{gd}	栅-漏电容 11.2	E_{crit}	雪崩击穿临界电场 13.7
C_{gs}	栅-源电容 11.2	$E_{crit}(v)$	载流子速度饱和时的临界电场 11.6
C_i	单位面积的栅氧化物电容 1.1	E_F	费米能级 1.2
C_{in}	输入电容 11.2	E_g	禁带宽度 2.5
		E_{so}	外推到 $T = 0 K$ 时的

	禁带宽度 2.5		度 11.1
E_i	半导体本征能级 1.2	h_0	零栅偏压时的耗尽层宽度 11.1
E_1	栅电场 12.1		
E_s	表面电场 1.3	I_B	基极电流 6.2
$E_{s/b}$	反向二次击穿 10.5	I_C	集电极电流 6.2
F_i	复合中心的能级 2.4	I_{CBO}	集电极泄漏电流 6.2
E_T	Si-SiO ₂ 介面处的平均横向电场 12.6	I_{CR}	交叉电流 7.3
E_V	满带顶的能量 1.1	I_D	漏极电流 11.1
$E_c(r)$	离原点距离为 r 处的未屏蔽电场 2.5	I_{D0}	零栅偏压时的漏极电流 11.1
f	频率 1.2	I_B	发射极电流 6.2
f_T	增益-带宽乘积 6.2	I_G	附加的栅电流 1.3
g	增量电导 1.1	I_n^*	对电子的电离积分 3.1
g_{be}	式(6.71)定义的电导 6.2	I_p^*	对空穴的电离积分 3.1
g_c	增量集电极电导 6.2	I_r	复合电流 6.2
g_d	增量漏极电导 11.1	$I_{s/b}$	正向二次击穿 10.5
g_{do}	JFET 线性区的增量漏极电导 11.1	I_{sub}	附加的衬底电流 12.10
g_m	跨导 6.2	I_0	$t = t_0$ 时的集电极电流 9.2
$g_{m,sat}$	饱和区跨导 11.1		
G_0	电导, 式(11.10) 11.1	I_{gen}	空间电荷产生的电流密度 2.6
$h = x_j$	JFET 的耗尽区宽度 11.1	J_n	电子电流密度 6.2
h_{CR}	交叉增益 7.3	$J_n(0)$	发射区-基区边界处的电子电流密度 6.3
h_D	JFET 漏侧的耗尽层宽度 11.1	J_p	空穴电流密度 6.2
$h_{e,c}$	共发射极小信号电流增益 6.2	$J_p(0)$	发射区-基区边界处的空穴电流密度 6.2
h_{FB}	共发射极直流电流增益 6.2	J_{rec}	空间电荷复合的电流密度 2.6
h_{FEO}	有源区中共发射极峰值电流增益 8.2	J_s	熵流量 10.4
h_{RE}	反向共发射极电流增益 6.2	J_s	发射极饱和电流密度 7.4
h_s	JFET 源侧的耗尽层宽	J_{SCL}	空间电荷限制电流 12.9
		J_0	n^+p 晶体管基区展

	宽的临界电流密度 7.2	n_s	表面电子浓度 1.2
		n_0	体内平衡电子浓度 1.2
J_0	n^+p 结构中基区展宽的临界电流密度(高电场情况) 7.2	N_0	表面浓度 7.1
J_0''	n^+p 结构中基区展宽的临界电流密度(低电场情况) 7.2	p'	非平衡空穴浓度 2.1
		p_s	表面空穴浓度 1.2
		P_T	耗散功率 10.1
		p_0	体内平衡空穴浓度 1.2
k	玻尔兹曼常数 1.2	$p'(0)$	$y=0$ 处的注入空穴浓度 8.2
k	热导率 10.2	$p(0)$	p 结边缘处的总空穴浓度 8.2
K	辐照损坏系数 5.4	q	电子电荷 1.1
L	杂质扩散系数 7.1	q_B	总的基区非平衡电荷 6.2
L	沟道长度 12.3	Q_B	基区中总的多数载流子电荷 6.2
L'	漂移区长度 12.8	Q_{BO}	基区中总的多数载流子电荷(平衡态) 6.2
L'	扩展电阻计算时的中心-中心间距 13.4	Q_{BO}/qAD_n	Gummel 数 6.2
L_B	发射极条的半宽 7.2	Q_d	表面耗尽区中电荷 1.3
L_n	电子扩散长度 6.2	Q_{dmax}	Q_d 的最大值 1.3
M	雪崩倍增因子 3.1	Q'_{dmax}	表面耗尽区中非平衡电荷 1.5
n	电子浓度 2.1	q_E	发射区总的非平衡电荷 6.2
n'	非平衡电子浓度 2.1	Q_{eff}	氧化物分布电荷的集总等效量 1.2
N	杂质浓度 3.3	Q_{E0}	发射区中平衡多数载流子电荷 7.4
N_A	单位立方厘米中 p 型硅受主浓度 1.1	Q_F	正向导通时基区中非平衡多数载流子电荷 6.2
N_b	衬底掺杂浓度 5.2	Q_G	单位面积栅电荷 1.2
N_{BO}	发射区下面的基区杂质浓度 10.5	Q_G'	总的栅电荷 12.7
N_D	单位立方厘米中 n -型硅施主浓度 1.1	Q_H	图 4.30 定义的电荷
N_{dose}	单位面积的总注入剂量 5.2		
N_{E0}	发射区表面浓度 10.5		
N_{FS}	快表面态密度 1.8		
n_i	本征载流子浓度 1.2		
n_{ie}	有效本征浓度 2.5		
$N_I(x)$	单位面积注入浓度对深度 x 的函数 5.2		

	4.6	R_p	杂质注入范围 5.2
Q_1	注入剂量 4.9	R_s	源极串联电阻 11.1
Q_L	图 4.30 定义的电荷 4.6	R_{sth}	散热器空气之间的热阻 10.3
Q_n	n型沟道中的电荷 1.3	R_{sub}	衬底寄生电阻 12.10
$q\phi_m$	金属功函数 1.1	$R_{th}(t)$	热阻 10.1
$q\phi_{ms}$	金属-硅功函数 1.1	R_s	冶金沟道电阻 11.1
$q\phi_{sl}$	硅功函数 1.1	S	熵 10.4
$q\phi_{ss}$	硅-硅功函数 1.4	S	热稳定因子 10.5
Q_R	图 4.30 定义的电荷 4.6	S_D	熵产生率 10.4
Q_R	晶体管反向工作时的基区非平衡多子电荷 6.2	T_A	散热器(或环境)的温度 10.3
Q_s	单位面积硅表面总电荷密度 1.3	t_d	延迟时间 13.2
Q_{ss}	单位面积固定的氧化物正电荷 1.1	t_f	下降时间 13.2
Q_{TC}	集电区-基区过渡电容中的电荷 6.2	t_r	上升时间 13.2
Q_{TB}	发射区-基区结电容中的电荷 6.2	t_s	存储时间 9.2
q_{th}	单位体积中产生的热量 10.2	T_s	表面温度 10.3
r	离原点的距离 2.4	T_1, T_2, T_3	沟道渡越时间 12.8
R_B	基极串联电阻 10.5	U	非平衡载流子复合率 2.4
R_C	集电极串联电阻 9.2	v	载流子速度 9.1
R_d	漏极串联电阻 11.1	V_A	厄莱(Early)电压 6.2
R_E	发射极串联电阻 10.5	V_{AP}	外加电压 6.1
R_{gen}	电流发生器内阻 13.2	V_B	反向厄莱(Early)电压 6.2
r_1	结的半径和深度 12.3	V_{BC}	集电极-基极电压 6.2
R_L	负载电阻 9.2	V_{BE}	发射极-基极电压 7.6
R_{on}	MOS 晶体管导通电阻 13.4	V_{BG}	背栅电压 12.1
		V_{CC}	集电极电源电压 9.1
		V_D	漏极-本体电压 11.1
		V_{Dsat}	饱和漏极电压 11.1
		V_{FB}	平带电压 1.1
		V_G	栅电压 1.2
		V_{GG}	栅极电源电压 13.2
		V_i	内建结电压 9.1

V_{OX}	氧化物上的电压降 1.3	x_0	氧化物厚度 4.1
V_{Pt}	穿透电压 10.5	x_0	相交点(图 7.2) 7.1
V_{Pt}	电流流动时的穿透电 压 10.5	Y_B	腐蚀范围 4.8
V_R	反向偏置结电压 3.1	y_0	电流集中的特征长度 7.4
v_s	饱和漂移速度 2.4	Z	* 方向的发射区宽度 7.3
V_{SBR}	二次击穿电压 13.7	Z	* 方向的沟道宽度 11.1
V_T	平衡阈值电压 1.3		晶体管共基极电流增 益 6.2
V'_T	非平衡阈值电压 1.5	α	有效电离率 3.1
V_{ti}, V_{tl}	异质结内建电压 7.6	α_{eff}	正向 α 6.2
W	空间电荷区宽度 2.6	α_n	电子电离率 3.1
W	能量 13.2	α_p	空穴电离率 3.1
W	系统的失序数(熵) 10.4	α_R	晶体管的反向 α 6.2
W_B	基区宽度 6.2	α_S	小信号共基极电流增 益 6.2
W'_B	Van der Zier-Agourdis 模型的基区宽度 7.2	α_T	基区输运因子 6.2
W_{Beff}	基区展宽情况下的基 区总宽度 7.3	γ	结深与耗尽区宽度的 比值 3.4
W_{CIB}	集电极感生基区 7.2	γ	发射极效率 6.2
W_E	有效发射区宽度 6.2	γ'	式(4.8)定义的量 4.1
W_H	重掺杂硅的耗尽层宽 度 4.6	γ_n	共发射极连接的发射 极效率 6.2
W_L	轻掺杂硅的耗尽层宽 度 4.7	δ	电流传输亏损因子 7.7
W_n	低浓度 $n(n^-)$ 集电区 的宽度 7.2	ΔE	激活能 10.5
X	腐蚀深度 4.8	σ_1	绝缘体介电常数 1.3
x_d	结耗尽区宽度 3.1	σ_i	半导体介电常数 1.3
x_{dmax}	沟道-本体最大耗尽层 厚度 1.3	ζ	边缘-中心电流的比值 7.3
x_{dmap}	平板型结的最大耗尽 层宽度 4.1	η	与器件结构有关的因 子 11.5
x_i	栅氧化物厚度 12.1	θ	式(4.13)定义的有效 斜削角 4.6
x_{inv}	本征半导体表面下的 距离 1.1	θ	热时间常数 10.3
x_j	结深 3.4		

$\theta(x)$	图18.30定义的电流扩展距离 13.7	τ_{eff}	总的时延 9.1
λ	空间常数 4.6	τ_F	有效基区寿命 6.2
μ	载流子迁移率 2.1	τ'_F	基区渡越时间 6.2
μ^*	晶体管放大因子		基区展宽后的基区渡越时间 9.2
μ_n	双极迁移率 2.1	τ_{HL}	高注入时寿命 5.4
μ_A	式(2.3)定义的双极迁移率 2.1	τ_{LL}	低注入时寿命 5.4
μ_{cc}	载流子-载流子散射迁移率 2.2	τ_n	电子寿命 2.4
μ_{eff}	有效表面迁移率 1.11	τ_{n0}	低注入时电子寿命 2.4
μ_n	电子迁移率 1.11	τ_p	空穴寿命 2.4
μ_p	空穴迁移率 2.1	τ_{p0}	低注入时空穴寿命 2.4
μ_0	未掺杂半导体的迁移率 2.3	τ_{SRH}	SRH复合寿命 7.1
$n = n^-$	低掺杂n型硅 6.1	τ_x	通过空间电荷区的渡越时间 9.1
ρ	电荷 7.2	τ_0	空间电荷区中的载流子寿命 2.4
ρ	电阻率 8.2	τ_1, τ_2	时间常数 9.2
ρ_B	基区平均电阻率 7.3	ϕ	电子辐照量 5.4
ρ_C	ν 区电阻率 7.2	ϕ	第一类不闭合椭圆积分的值 7.3
$\rho(n)$	n 点处单位面积的电荷密度 11.1	ϕ_F	费米能级 1.3
ρ_s	材料电阻率 10.4	ϕ_{FG}	硅栅的费米势 1.4
σ	电导率 11.1	ϕ_n	n沟道的准费米势 1.5
σ_n	电子俘获截面 2.4	ϕ_p	p沟道中的准费米势 1.5
σ_p	空穴俘获截面 2.4	ϕ_s	表面势 1.2
τ	少数载流子寿命 2.1	$\omega_T = 2\pi f_T$	角增益-频带乘积 9.1
τ_A	俄歇 (Auger) 复合寿命 7.1		
τ_{bc}	发射极和集电极之间		

注：每个符号后所给出的章节是第一次使用的章节。

目 录

前言.....	v
符号表.....	vii
第一章 半导体表面理论概念.....	1
§ 1.1 平带电压	1
§ 1.2 平衡时的表面势	5
§ 1.3 强反型时的表面电荷	8
§ 1.4 强反型时的阈值电压	9
§ 1.5 非平衡条件下的阈值电压	12
§ 1.6 非平衡强反型条件下的沟道电荷	14
§ 1.7 MOS 电容	14
§ 1.8 硅表面电荷和表面态	17
§ 1.9 辐照效应	21
§ 1.10 硅氧化表面处的杂质再分布	22
§ 1.11 表面迁移率	23
参考文献	25
第二章 高载流子浓度下的半导体性质.....	27
§ 2.1 双极迁移率和扩散系数	27
§ 2.2 载流子-载流子散射	28
§ 2.3 迁移率与杂质浓度的关系	30
§ 2.4 高注入时的载流子寿命	31
§ 2.5 载流子浓度使硅禁带宽度变窄的效应	33
§ 2.6 高掺杂时的本征载流子浓度	37
参考文献	39
第三章 雪崩击穿.....	41
§ 3.1 雪崩击穿电压的计算	41

§ 3.2	pin 二极管的雪崩击穿.....	43
§ 3.3	平板型(一维)结的击穿	44
§ 3.4	平面型结的击穿	48
§ 3.5	雪崩击穿电压的温度关系	52
	参考文献	53
第四章	雪崩击穿的改进方法.....	54
§ 4.1	场板	54
§ 4.2	扩散保护环	61
§ 4.3	等位环和沟道终止环	62
§ 4.4	电阻性场板	62
§ 4.5	场限制环	67
§ 4.6	结的斜削	70
§ 4.7	耗尽区腐蚀法	80
§ 4.8	衬底腐蚀终端法与正斜削法的比较	85
§ 4.9	用离子注入控制耗尽区电荷	87
	参考文献	88
第五章	选择的制造技术.....	90
§ 5.1	中子嬗变掺杂(NTD)	90
§ 5.2	离子注入	92
§ 5.3	干式刻蚀	95
§ 5.4	少数载流子寿命的控制	98
§ 5.5	表面稳定性和器件钝化	102
	参考文献	106
第六章	功率晶体管结构和双极型晶体管模型.....	108
§ 6.1	功率晶体管结构	108
§ 6.2	双极型晶体管模型	113
	参考文献	130
第七章	高载流子浓度时的电流增益.....	131
§ 7.1	发射极效率和发射区浓度之间的关系	131
§ 7.2	大电流基区展宽	141
§ 7.3	发射极电流集中	149

§ 7.4 大电流时电流增益的下降	157
§ 7.5 电流增益的温度关系	160
§ 7.6 增益改进的方法	162
参考文献	172
第八章 功率晶体管的电流-电压特性	174
§ 8.1 饱和区	174
§ 8.2 准饱和区	175
§ 8.3 集电极-发射极击穿电压	179
参考文献	182
第九章 频率响应、开关瞬变、微波晶体管	183
§ 9.1 双极型功率晶体管的频率响应	183
§ 9.2 双极型功率晶体管的开关瞬变	185
§ 9.3 双极型微波晶体管	190
参考文献	193
第十章 晶体管热特性和不稳定性	194
§ 10.1 结温	194
§ 10.2 晶体管的等效热路	196
§ 10.3 热击穿	197
§ 10.4 最小嫡产生原理、电流线的形成、热点	199
§ 10.5 二次击穿	204
§ 10.6 安全工作区(SOA)	218
§ 10.7 稳定的热点	222
参考文献	223
第十一章 结型场效应晶体管 (JFET)	225
§ 11.1 结型场效应晶体管的电流-电压特性	227
§ 11.2 结型场效应晶体管的增量电路模型	234
§ 11.3 附加的栅极泄漏电流和漏极击穿	236
§ 11.4 结型场效应晶体管的输出功率	238
§ 11.5 具有类三极管(非饱和)特性的结型场效应晶体管	238
§ 11.6 结型场效应晶体管的结构	243
参考文献	250

第十二章 绝缘栅场效应晶体管·····	252
§ 12.1 MOS 晶体管静态特性·····	255
§ 12.2 沟道中的二维电 流 流 动 ·····	261
§ 12.3 短沟 MOS 晶体管的阈值电压 ·····	262
§ 12.4 对阈值电压的背面偏置效应 ·····	264
§ 12.5 MOS 晶体管阈值的控制·····	264
§ 12.6 MOS 晶体管的增量参数·····	265
§ 12.7 MOS 晶体管增量电路模型·····	273
§ 12.8 截止频率 f_T ·····	275
§ 12.9 具有类三极管特性的 MOS 晶体管 ·····	277
§ 12.10 MOS 晶体管的电压击穿·····	280
§ 12.11 热电子效应 ·····	288
参考文献 ·····	289
第十三章 MOS 功率晶体管的结构和设计思想 ·····	291
§ 13.1 MOS 晶体管用作功率放大器 ·····	291
§ 13.2 MOS 功率晶体管用作开关 ·····	293
§ 13.3 MOS 功率晶体管的结构 ·····	297
§ 13.4 DMOS 功率晶体管的设计思想·····	307
§ 13.5 具有漂移区的 MOS 晶体管的栅电容 ·····	321
§ 13.6 DMOS 晶体管的电压击穿·····	322
§ 13.7 DMOS 晶体管的二次击穿·····	324
§13.8 MOS 晶体管特性的温度效应——安全工作区 (SOA) ·····	326
参考文献 ·····	330

第一章 半导体表面理论概念

半导体的表面性质对于理解所有类型的半导体器件都是重要的, 这些器件包括那些以主要发生于半导体表面的现象为工作机理的器件(如金属-氧化物-半导体晶体管, 即 MOS 晶体管), 和那些主要由体内性质决定其性能的器件(例如平面型和台面型双极晶体管)。不同的表面电荷和表面态的存在对功率 MOS 和双极型功率晶体管的电特性都有深刻的影响, 我们的论述仅局限于硅晶体的表面性质, 因为从实际的观点看, 它是研究得最深入也是最重要的。

§ 1.1 平带电压

MOS 二极管, 也称为 MOS 电容(图 1), 由金属电极(栅)和硅衬底上的 SiO_2 层组成, 它是研究表面性质的一个有用工具。

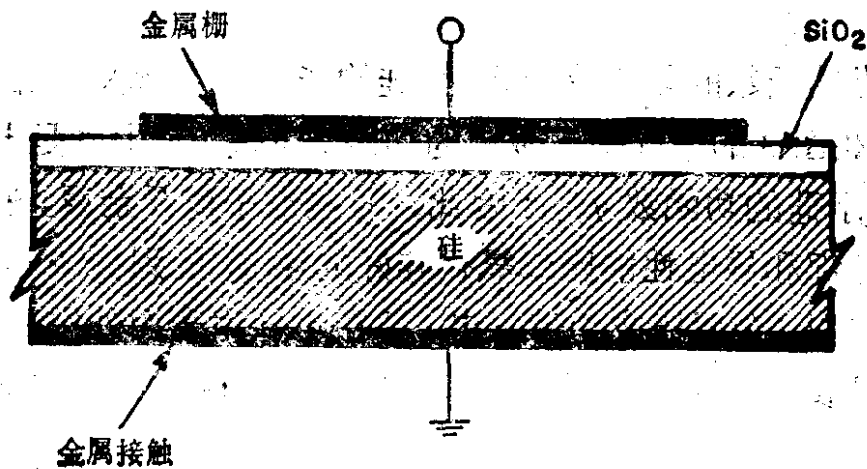


图 1 金属栅-MOS 二极管(电容)。

在理想条件下，亦即当所用金属和硅之间不存在功函数差和二氧化硅中没有电荷时，P型硅的能带图可用图2表示，其中 $q\phi_m$ 和 $q\phi_{si}$ 分别是金属和硅的功函数。理想条件还假设电介质的电阻为无穷大。在这样的条件下，器件处于热平衡，金属和硅的费米能级成一直线，因而能带是平的。

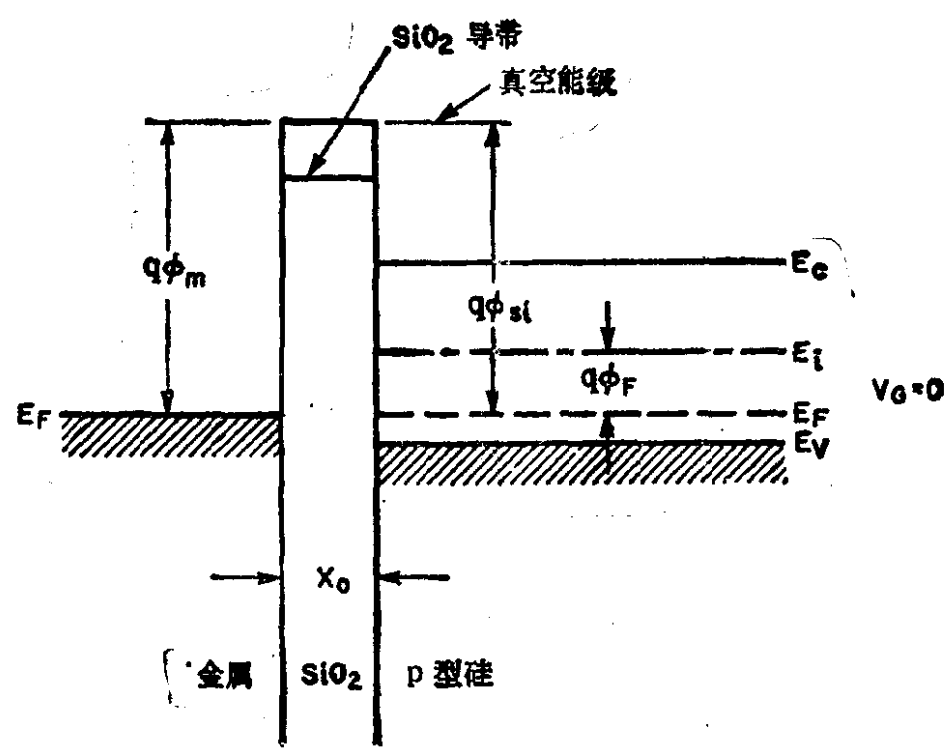


图2 平衡状态下($q\phi_m = q\phi_{si}$)硅-二氧化硅系统的能带。

当功函数的差不等于零时，硅的能带发生弯曲，如图3所示。在图3的情况中，金属的功函数 $q\phi_m$ （其中 q 是电子电荷）小于硅的功函数 $q\phi_{si}$ ；因此，有些电子离开金属，通过二极管外部和导电性能比二氧化硅好的通道而到达P型硅晶体。所以，金属栅成为带正电，并在半导体表面处排斥空穴，产生带负电的未补偿受主而形成空间电荷区。因为半导体表面处的空穴数少于其掺杂所应产生的数量，因而硅能带弯曲，以使费米能级 E_F 靠近本征能级 E_i 。由于外部导电通道的存