

[美] R. S. 马 勒 T. I. 卡明斯 著

集成电路 器件电子学

科学出版社

73-755
465

集成电路器件电子学

〔美〕R. S. 马勒 T. I. 卡明斯 著

孙彦卿 译

陈 水 黄和鸾 校



科 学 出 版 社

1 9 8 5

8510589

内 容 简 介

本书从集成电路出发,结合半导体器件在集成电路中的应用,系统地介绍了半导体集成电路器件电子学。全书共分八章。第一章介绍半导体材料物理和工艺学。第二、第三、第四、第五、第七和第八章前半部分介绍金属-半导体接触、pn结、pn结电流、双极晶体管和MOS器件。第六章和第八章后半部分分别介绍双极晶体管和MOS晶体管的二级效应。

本书可作为高等学校教学参考书,适于大学高年级学生、研究生及研究所、工厂的科研、技术人员阅读。

R. S. Muller T. I. Kamins
DEVICE ELECTRONICS FOR INTEGRATED CIRCUITS
John Wiley & Sons, 1977

集成电路器件电子学

[美] R. S. 马勒 T. I. 卡明斯 著

孙彦卿 译

陈水 黄和鸾 校

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

*

1985年4月第一版 开本:787×1092 1/32

1985年4月第一次印刷 印张:15

印数:0001—10,200 字数:339,000

统一书号:15031·646

本社书号:3959·15—7

定价:3.50元

前 言

如果象我们相信的那样,过去是未来的指南,那么集成电路的重大进展,将由那些精通器件电子学的人来完成. 由于这个原因,在过去几年里,我们为加利福尼亚大学伯克利分校的学生开了一门课程,着重地介绍为集成电路器件操作和使用打基础的一些概念. 本书就是这种教学的结果,学生的兴趣从基础器件电子学到电路设计,各有不同. 对此课程大约经过了十年的教学实践,使我们有机会采用若干种方法进行试验,把那些构成器件电子学基础的固体物理学的许多内容变成能够运用的,而更重要的是能够消化的东西.

在试验了几个不同方案以后,本课程(以及本书)便这样形成了. 首先,我们把重点放在硅集成电路使用的最重要器件上. 经过这样选择后的内容完全可以在一个学期讲完. 而且,这样选择的课题范围可以引起学生浓厚的兴趣. 合乎阿纳托尔·弗朗斯 (Anatole France) 的精辟格言:“教学的全部艺术就是唤醒年轻心灵的天然好奇心.”

我们的下一步,是把有关器件列成表,并按读者理解基本知识所需的物理概念的多寡排成顺序. 因此,本书把各物理概念的讨论和这些概念在特定器件中的应用放在一起交替地进行叙述. 把器件应用放在每一章结尾. 这种方法具有下列主要优点:

1. 使读者了解比具体器件的详细描述更有永久意义的内容.
2. 强调科学事实和工程技术间的结合.

3. 按照由事实到应用的顺序叙述，所以有助于理解和记忆。

然而，用这种方法叙述很难把讨论保持在同一水平上。问题是由于虽然某些器件的操作可能只用几个概念就能加以说明，但从许多方面来说明器件仍然是十分复杂的。例如，只需几个物理原理就能说明第二章的肖特基势垒二极管，但要进行严谨地讨论，则需要复杂的分析，这将使该课题变得似乎过分混乱。为了避免这个问题，同时提供一个比较一致的讨论水平，我们用剑号 (†) 标出书中的某些节。它们一般要比没有标记的节的内容高深，如果读者只对主要的基本原理感兴趣，则可以略去它们。为了行文的连续性需要较高深课题的结果时，我们在有剑号的节的外面加了更容易理解的一些说明。

每章末尾有一个小结。目的是帮助学生回顾这一章内容，并注意这一章所叙述的基本概念。

每章末的大多数习题，是给读者一个应用已学过的各种概念的机会；只有少数简单的代公式习题，直接套用书中推导的公式就能得到答案。通常，选用这些习题，是使学生对各种量的数量级有一个印象。有些习题在书中只做了部分推导，要求学生把它完成。这将有助于强调某些特别重要的处理方法。有些地方给出了一些较难的习题，以使读者加深理解和推演出新的原理。这些习题以及那些着重于带剑号的节的内容的习题，我们都标上了剑号。

在加利福尼亚大学伯克利分校，主要是四年级学生使用这本书。但是，每季度也有一些三年级学生和少数研究生选修这门课程。要求这些学生要具有标准大学二年级学生的基础理论知识，其中包括基础化学、物理学（包括初等量子力学）、微积分教程、电路原理初级教程和材料性质教程（含有基本晶体结构）。我们发现，学好这门课程所需的最重要基础，

是掌握电磁理论和近代物理概要，特别是电子系统中允许能值的概念。

下边按章综述本书所涉及的课题。

第一章电子学和工艺学 本章介绍固体物理电子学，它是本书必要的基础知识。有些节的内容和加工工艺是任选部分，是为进一步讨论而编入的。本章介绍的器件是集成电路电阻。

第二章金属-半导体接触 本章给学生介绍不同固体间的热平衡概念；详细地介绍肖特基势垒接触电子学。结电流-电压关系、肖特基欧姆接触特性和金属-半导体接触表面效应的严密推导各节可任意选择。在讨论器件的一节中，考虑实际的肖特基二极管。

第三章 pn 结 本章的课题是有关非均匀掺杂半导体的电子学。详细地描述反向偏置 pn 结特性。有一节讲述结击穿，但也可以略去，无损于连贯性。最后一节讨论结型场效应晶体管。

第四章 pn 结电流 本章推导自由载流子连续方程。我们引进了产生和复合的概念，并用来描述正向(注入)偏置 pn 结电子学。少数载流子存贮和二极管模拟电路的讨论，是为后面研究晶体管等效电路奠定一个基础。任选部分有对 SHR (Shockley-Hall-Read) 复合理论的全面描述及空间电荷区的产生和复合。关于器件，主要讨论集成电路使用的结型二极管，特别是器件间的结隔离。

第五章双极晶体管 I: 基本操作原理 本章用累积电荷模型讨论结型晶体管。我们所熟悉的均匀掺杂晶体管作为一般理论的特殊情况处理。这种对双极晶体管的叙述方法，可自然地过渡到诸如偏压范围、电流增益和埃伯斯-莫尔 (Ebers-Moll) 模型等课题。关于器件的讨论主要放在用于放大和开

关平面集成电路晶体管的特性上。这一章只有处理晶体管参数倒易关系这一节适于作为进一步讨论的任选题。

第六章双极晶体管 II: 局限性和模型 初学者这一章大部分可以略去。然而, 本章讨论的内容与集成电路双极晶体管的实际问题密切相关。课题的选择倾向于晶体管的计算机模型。例如, 利用厄尔利 (Early) 电压引进了厄尔利效应, 利用累积电荷模型考虑了在低和高发射极-基极偏压下的各种效应。用同样方法描述基极渡越时间电子学。这个题目必然要讨论晶体管的电荷控制模型和应用电荷控制模型的例子。再从电荷控制模型导出小信号晶体管模型(混合- π 型), 并讨论晶体管各种表示之间的等效性。最后讨论的是计算机模拟模型。关于器件的讨论, 主要讨论集成电路 pnp 晶体管, 并介绍电路应用, 如集成注入逻辑。

第七章氧化物-硅系统的性质 本章对物理电子学基础进行了必要的补充, 这是讨论 MOS (金属-氧化物-半导体) 器件所必须的。叙述栅极控制半导体表面的堆积、耗尽和反型, 并且介绍了 MOS 系统中的平带和阈电压的基础性概念。任选部分描述 pn 结的各种表面效应。本章最后讨论集成电路 MOS 电容和电荷耦合器件 (CCD)。

第八章绝缘栅场效应晶体管 本章先从近似电荷控制模型推演出 IGFET (绝缘栅场效应晶体管) 的特性, 然后再根据分布模型进行比较严密的推导。本章描述器件的各个参数和一个电路设计模型。包括对一些工艺的讨论和一个与电路应用有关的任选部分。对器件的各种二级效应的讨论也是任选部分。最后一节介绍离子注入 n 沟道 IGFET 的设计和特性。(下略)

R. S. 马勒

T. I. 卡明斯

物 理 常 数

(以半导体电子学中经常使用的单位表示)

电子电荷	q	$1.602 \times 10^{-19} \text{C}$
真空中的光速	c	$2.998 \times 10^{10} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$
真空电容率	ϵ_0	$8.854 \times 10^{-14} \text{F} \cdot \text{cm}^{-1}$
自由电子质量	m_0	$9.11 \times 10^{-31} \text{kg}$
普朗克常数	h	$6.625 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{S}$ $4.135 \times 10^{-15} \text{eV} \cdot \text{S}$
玻耳兹曼常数	k	$1.38 \times 10^{-23} \text{J} \cdot \text{K}^{-1}$ $8.62 \times 10^{-5} \text{eV} \cdot \text{K}^{-1}$
阿佛加德罗常数	A_0	6.022×10^{23} 分子(克分子) ⁻¹
热电压	$V_s = kT/q$	0.025860V (80.6°F, 300K) 0.025256V (68°F, 293K)

换 算 因 数

- 1 密耳 = 10^{-3} 英寸 = 25.4 微米
- 1 电子伏 = 1.602×10^{-19} 焦耳
- 1 焦耳 = 10^7 尔格

材 料 性 质

- 半导体和绝缘体性质——pp32、33,
- 硅的性质——p34
- 硅的自由载流子迁移率——p26
- 硅电阻率与杂质浓度的关系——p24

选用的符号一览表

符号	定义
----	----

a	掺杂剂密度梯度
BV	击穿电压
C_s	掺杂剂的表面浓度
$C_{jc}(C_{je})$	集电极(发射极)小信号结电容
C_{ox}	氧化物电容
C_D	扩散电容
$D_n, (D_p)$	电子(空穴)的扩散常数
D_s'	表面态密度
$E_a, (E_d)$	受主(施主)能量
$E_c, (E_v)$	导带(价带)边缘能量
E_f	费米能量
E_i	本征费米能量
E_0	真空基准能量
\mathcal{E}_l	漂移速度达到极限时的电场
$\mathcal{E}_s' (\mathcal{E}_{ox})$	半导体(氧化物)中的电场
$f_D(E)$	费米-狄拉克分布函数
f_T	β_F 接近 1 时的频率
$g(E)$	允许态密度
$g_m, (g_{m sat})$	跨导(电流饱和区跨导)
$G(R)$	产生(复合)速率
$i_B (i_C) (i_E)$	总基极(集电极)(发射极)电流
I_n	通过基极的电子电流
I_{pE}	发射极空穴电流 (npn 晶体管)
I_{rB}	基极复合电流
$I_D, (I_{D sat})$	漏电流(饱和时)
$I_{CS}, (I_{ES})$	集电极(发射极)饱和电流
$J_n, (J_p)$	电子(空穴)电流密度
k'	简化 MOS 方程的常数
l	载流子平均自由程
$L_s, (L')$	沟道长(至夹断点的沟道长)
$L_n, (L_p)$	少数载流子-电子(空穴)的扩散长度

L_D	德拜长度
$m_n^*, (m_p^*)$	电子(空穴)的有效质量
m_0	自由电子质量
$n, (p)$	电子(空穴)密度
$n', (p')$	过剩电子(空穴)密度
$n_i, (p_i)$	本征电子(空穴)密度
$n_0, (p_0)$	热平衡电子(空穴)密度
$n_s, (p_s)$	表面电子(空穴)密度
$N_a, (N_d)$	受主(施主)密度
$N_c, (N_v)$	导(价)带中的有效态密度
N_t	俘获态密度
q	电子电荷
$q_F, (q_R)$	电荷控制理论中的正(反)向电荷分量
$q_{VE}, (q_{VC})$	发射极-基极(集电极-基极)结电荷
Q_d	耗尽区空间电荷
Q_s	半导体内空间电荷
Q_B	积分基极多数载流子电荷
R_{\square}	薄层电阻
s	表面复合速度
T_{tr}	表面沟道载流子渡越时间
U	复合速率
v_d	漂移速度
v_l	极限漂移速率
v_{th}	热速度
V_a	外加电压
V_0	正偏置二极管导通电压
V_t	热电压
V_A	厄尔利电压
V_T	截止电压 (JFET) 阈电压 (IGFET),
V_{FB}	平带电压
x_d	耗尽层宽度

x_x	结深
$x_n, (-x_p)$	n 型 (p 型) 半导体空间电荷区边界
x_{ox}	氧化物厚度
$x_B, (x_E)$	准中性基区 (发射区) 宽度
$\alpha_n, (\alpha_p)$	电子 (空穴) 电离系数
$\alpha_F (\alpha_R)$	正 (反) 向电流增益 I_C/I_B
α_T	基极输运系数
$\beta_F, (\beta_R)$	正 (反) 向电流增益 I_C/I_B
γ	发射极效率
δ	缺陷因子
$\epsilon_s, (\epsilon_{ox})$	半导体 (氧化物) 电容率
$\mu_n, (\mu_p)$	电子 (空穴) 迁移率
ρ	电阻率, 空间电荷密度
σ	电导率
$\sigma_n (\sigma_p)$	电子 (空穴) 的俘获截面
$\tau_n (\tau_p)$	电子 (空穴) 寿命
τ_r	介质弛豫时间
$\tau_{cn} (\tau_{cp})$	电子 (空穴) 的平均散射时间
τ_B	基极渡越时间
ϕ_i	结内建电势
$\phi_n (\phi_p)$	$n(p)$ 型硅电势
ϕ_s	表面势
$\Phi_M (\Phi_S)$	等效于金属 (半导体) 功函数的电势
X	电子亲和势

目 录

第一章 电子学和工艺学	1
1.1 半导体材料物理	2
1.2 晶体中的自由载流子	24
1.3 半导体工艺学	36
1.4 器件：集成电路电阻	61
小结.....	68
习题.....	70
第二章 金属-半导体接触	76
2.1 电子系统中的平衡	76
2.2 理想化的金属-半导体结	80
2.3 电流-电压特性	91
2.4 非整流(欧姆)接触	100
2.5 表面效应	106
2.6 金属-半导体器件：肖特基二极管	112
小结.....	116
习题.....	117
第三章 pn 结	123
3.1 缓变杂质分布	124
3.2 pn 结	130
3.3 反向偏置 pn 结.....	144
3.4 结击穿	150
3.5 器件：结型场效应晶体管	160
小结.....	169

习题	171
第四章 pn 结电流	177
4.1 连续性方程	177
4.2 产生与复合	180
4.3 pn 结的电流-电压特性	192
4.4 电荷存贮和二极管瞬变过程	209
4.5 器件: 集成电路二极管	220
小结	227
习题	228
第五章 双极晶体管 I: 基本操作原理	236
5.1 晶体管作用	237
5.2 有效偏压	246
5.3 晶体管开关	257
5.4 埃伯斯-莫尔模型	263
5.5 器件: 平面双极放大和开关晶体管	270
小结	277
习题	279
第六章 双极晶体管 II: 局限性和模型	284
6.1 集电极偏压变化效应(厄尔利效应)	285
6.2 低、高发射极偏压效应	290
6.3 基极渡越时间	307
6.4 电荷控制模型	311
6.5 小信号晶体管模型	326
6.6 计算机模拟双极晶体管模型 [†]	335
6.7 器件: pnp 晶体管	341
小结	350
习题	352
第七章 氧化物-硅系统的特性	361

7.1	MOS 结构	362
7.2	MOS 系统的电容	371
7.3	MOS 电子学	375
7.4	氧化物和界面电荷	383
7.5	pn 结的表面效应 [†]	390
7.6	MOS 电容器和电荷耦合器件 (CCD)	395
	小结	401
	习题	404
第八章	绝缘栅场效应晶体管	409
8.1	电流-电压特性	411
8.2	IGFET 参数	424
8.3	MOS 集成电路	434
8.4	二级近似考虑 [†]	441
8.5	器件: 离子注入 IGFET	450
	小结	457
	习题	460

第一章 电子学和工艺学

由日常经验我们知道,物质的电学性质的变化范围是很大的,在一个截面相同的匀质材料棒上施加电压 V ,如果测得流经该棒的电流为 I ,就可求出其电阻为 $R = \frac{V}{I}$. 电阻率 ρ 是组成棒的材料的一种基本电学性质,它与棒的电阻及几何尺寸的关系为

$$\rho = R \frac{A}{L}, \quad (1.1)$$

式中 L 和 A 分别是样品的长和横截面积.

通常用于固体器件的材料的电阻率,在室温下的数值范围是很大的.例如,制造典型的硅集成电路使用的材料,其电阻率范围就很大.集成电路各元件间的互连线是用电阻率很低的金属淀积成的窄条,最经常用的是铝,其室温时的电阻率约为 $10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$;电阻率大小的另一极端是用来隔离集成电路各个部分的绝缘材料,例如二氧化硅,其电阻率比铝的高 22 个数量级,约为 $10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$,用来封装集成电路的塑料的电阻率可以高达 $10^{18} \Omega \cdot \text{cm}$.这样,一个典型集成电路包含的材料的电阻率,可以有 24 个数量级的变化.可见,描述同一物理性质的量,其数值的变化范围是特别广泛的.

在电的应用中,通常是把材料按电阻率加以分类.电阻率小于 $10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ 的材料叫做导体,而电阻率大于 $10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ 的材料叫做绝缘体.电阻率值处于中间范围的材料叫做半导体.就电学性质来说,半导体之所以有深远的重要性,是因为

半导体的电阻率可以在很精确的控制下按设计要求而改变。同样重要的是，半导体经过处理能用两种载流子之一传导电流。半导体这些独特性质的利用是这本书的主要课题。

本章第一部分，我们研究是什么原因使固体有极大的电阻率范围。然后，我们简要地回顾一些半导体物理的重要概念。不过，为了侧重于器件，我们对材料只进行简要的讨论，并且假设读者对文献[1]中所阐述的半导体物理基础和固体物理已有一些了解。这里只是为了以后应用方便起见，回顾一些比较重要的概念。

在简要地回顾一下半导体物理以后，我们再详细地考查硅平面技术。由于经过10年以上的改进，这种技术更加完善了。在这种技术中，由于全部操作是在单晶硅的同一表面上完成的，因此取名为平面技术。这种技术目前还在继续改善中。硅平面工艺的优点和利用这些优点积累起来的经验，使我们确信，了解用这种工艺制造的器件的电子学乃是非常重要的。

1.1 半导体材料物理

首先考虑孤立原子中的电子，由此便可对固体中电子的物理学有所了解。以合理方式对固体中电子施加微扰，便可获得固体的许多重要的电子性质。

因此，我们首先考虑只受一个孤立原子芯影响的一个电子的各允许能量。然后，研究在这个原子附近添加其它原子的影响，以致这个原子芯对同其它原子结合的电子的影响，就像在真实的固体材料中一样。利用这种方法，我们可以研究晶体中原子芯对结合的电子特性的影响。接着研究加在固体材料上的电场对电子的影响。

在半导体物理的讨论中，使用两个相互补充的模型：能带模型和晶体键合模型。我们先描述能带模型，然后为了介绍其它概念而引入键合模型。

1.1.1 固体的能带模型

我们知道，一个电子受到一个原子核库仑势的作用，只能有确定的允许能量(图 1.1)。特别是，这个电子可以占据一系列能级

$$E_n = -\frac{Z^2 m_0 q^4}{8 \epsilon_0^2 h^2 n^2} \quad (1.1.1)$$

中的一个能级(能量基准取为零)。在方程 (1.1.1) 中, Z 为原子核的净电荷, m_0 为自由电子的质量, q 为电子电荷, ϵ_0 为自由空间的介电常数, h 为普朗克常数, n 为正整数。对氢原子, $Z=1$, 以零为能量基准, 允许能量为 $-2.19 \times 10^{-18}/n^2$ 焦耳, 或者为 $-13.6/n^2$ 电子伏 (eV)*。当温度很低, 且同原子结合的电子数大于 1 时, 电子从最低允许能级开始填充。按泡利不相容原理, 任一个能级最多只能容纳自旋相反的两个电子。

现在我们只考虑在原子的最高占有能级中的电子, 而忽略比较低的填满能级。当把两个孤立的原子分开一个很大的距离时, 同每一个原子结合的电子能量 E_n 由方程 (1.1.1) 给出。然而, 如果两个原子彼此接近, 就将有一个来自第二个原子核作用在第一个原子的电子上的力, 这就改变了决定电子能级的势。由于电势的这种变化, 所有允许的电子能级都发生了

* 在半导体物理学中, 使用单位电子伏 ($1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}$ 焦耳, 见封面内的转换因子) 是很方便的。因为它常常避开麻烦的指数。电子伏虽然不是绝对合理的单位, 但仍被广泛地使用着, 在我们的讨论中, 也广泛地使用它。