

Selected Foreign Text Books



MOS 晶体管的工作 原理及建模

[美]Y.P.希维迪斯 著
叶金官 等译
陈光遂 刘恩科 校

西安交通大学出版社

内 容 简 介

本书全面地论述了MOS晶体管的各种工作状态及相应的建模方法。全书共分10章,外加13个附录。其中第1至第4章由简单到复杂地介绍了MOS晶体管的基本工作原理及静态模型。第5、6两章介绍了小尺寸器件和离子注入器件的建模问题。第7至第9章连续讨论了MOS晶体管的大信号,低、中频小信号和高频小信号的建模方法。第10章概括地叙述了MOS晶体管的制造工艺。附录内容补充和加深了正文中的有些论述。

本书可以作为高等院校有关专业的高年级学生及研究生的教科书或参考书,也可供从事集成电路设计的科技人员阅读参考。

Operation and Modeling of The MOS Transistor

Y. P. TSIVIDIS

McGraw-Hill, Inc. 1987

MOS晶体管的工作原理及建模

[美] Y.P.希维迪斯 著

叶金官 等译

陈光遂 刘恩科 校

责任编辑 阎鸿森

*

西安交通大学出版社出版

(西安市咸宁路28号)

西安交通大学出版社印刷厂印装

陕西省新华书店发行 各地新华书店经售

*

开本787×1092 1/16 印张 23.625 字数: 565千字

1989年9月第1版 1989年9月第1次印刷

印数: 1—2000

ISBN7-5605-0192-3/TN·8

定价: 5.05

《外国教材精选》总序

近十年来,我国高等学校教材建设在经历了从无到有、巩固提高的过程之后,目前正进入向高质量、高层次、多品种发展的欣欣向荣,百花争艳时期。现在,教材建设仍是高等学校教学改革的重要方面,这里也存在一个改革开放的问题。在这种形势下:精选国外一些有影响、有特色、特别是世界上著名大学现用的优秀教材翻译出版,无疑将对我国当前教材建设起到借鉴、促进和填补某些学科空白的积极作用。为此,西安交通大学出版社决定组织翻译出版一套《外国教材精选》系列书。

外国教材专业面广,类型繁多、层次各异,我们这套系列书在选题时以专业面较广,内容新颖或具有明显特色的教材为目标。具体原则如下:

1. 列选的教材不限国别及语种,以便博采众长。
2. 国外著名经典性教材,多次修订重版经久不衰者。
3. 最新出版,为国外著名大学所采用,有独特风格、体系,能反映国外教育动向,可供借鉴者。
4. 反映最新科技成果,能填补国内某学科教材空缺者。

根据我校具体情况,《外国教材精选》系列书将以电类教材(含电力、电子、计算机与信息科学)为主。今后随着形势的发展和需要,再进一步组织其他学科的国外先进教材翻译出版。

我们期望这套系列书,不仅是高等学校的学生和教师的良师益友;而且对已在生产科研第一线的广大科技工作者的知识更新,吸取国外科技新成果方面也大有裨益。

这套《外国教材精选》虽然从搜求原著、遴选、翻译、审校等方面都做了较细致的工作,但从浩如烟海的外国教材中精选少数形成一套系列书,对我们毕竟还是一种尝试。书源还不够充分,经验也感不足,缺点在所难免。诚挚地希望读者予以指正。

西安交通大学《外国教材精选》编委会

1988年6月

译 者 序

MOS 晶体管是当代微电子技术中的一种主要器件,本书是第一本最详细介绍这一器件的教科书。作者在书中十分详细地叙述了这一器件的工作原理及其建模方法,这些都是 VLSI (超大规模集成)电路的设计者们所必须具备的基本知识。

书中对 MOS 晶体管的各种机制及物理现象提供了统一的、细致的处理方法,并在此基础上提出了器件的各种工作模型。本书不仅提供了从十分简单直到极为完善的各种模型,并且还明确地指出了相应的各种模型之间的联系。作者十分强调直觉知识和感性认识。通过广泛深入的讨论,使读者在学习每一种模型之后,不只是获得了一些抽象的数学表达式,而且还可从物理意义上获得对模型的深刻认识。作者和他的同事们就本书的内容,曾对在校学生及从事有关工作的工程技术人员进行过大量的教学实践,实践证明,书中所选的内容是恰当的,十分有用的。把这样一本好书介绍给中国读者,必定会有助于我国的微电子技术工作者们更新知识,提高自行设计的能力,从而促进和推动我国微电子工业技术的进一步发展。

本书既可供有关专业的大学高年级学生和研究生作为教材和参考书,又可用作有关工程技术人员的自学参考书。

本书第 1 章至第 6 章由叶金官翻译;第 10 章由刘恩科翻译;第 7 章至第 9 章由胡耀萍提供初译稿,并经叶金官修改后定稿。本书的审校人是陈光遂(第 1, 2, 3, 4, 5 章和附录)和刘恩科(第 6, 7, 8, 9, 10 章)。

原书有些小错误已在译文中改正。译文中肯定也难免会有一些小错误及不当之处,希望读者指正。

叶 金 官

1988 年 6 月于西安

单位

物理量	本书中所用的简便单位	与常用单位的等值关系
时间	ns	10^{-9}s
频率	GHz	10^9Hz
距离	μm	10^{-4}cm ; 10^3nm ; $10^4\text{\AA}$
面积	μm^2	10^{-8}cm^2
单位面积上的数目	μm^{-2}	10^8cm^{-2}
体积	μm^3	10^{-12}cm^3
单位体积中的数目	μm^{-3}	10^{12}cm^{-3}
电荷	fC	10^{-15}C
单位面积电荷	fC/ μm^2	10^{-7}C/cm^2
单位体积电荷	fC/ μm^3	10^{-3}C/cm^3
电压	V	V
电流	μA	10^{-6}A
电阻	M Ω	$10^6\Omega$
电导	μS	10^{-6}S
电容	fF	10^{-15}F
单位面积电容	fF/ μm^2	10^{-7}F/cm^2
电阻率	M $\Omega\cdot\mu\text{m}$	$10^2\Omega\cdot\text{cm}$
电导率	$\mu\text{S}/\mu\text{m}$	10^{-2}S/cm
介电常数(电容率)	fF/ μm	10^{-11}F/cm
电场强度	V/ μm	10^4V/cm
速度	$\mu\text{m}/\text{ns}$	10^5cm/s
迁移率	$\mu\text{m}^2/(\text{V}\cdot\text{ns})$	$10\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$
扩散常数	$\mu\text{m}^2/\text{ns}$	$10\text{cm}^2/\text{s}$

一些有用量的值

电子电荷 q	$1.602 \times 10^{-19}\text{C}$
300K时的热电压 $\phi_t = kT/q$	0.0259V
硅的介电常数 ϵ_s	0.104fF/ μm
二氧化硅的介电常数 ϵ_{ox}	0.0345fF/ μm
$F = \sqrt{2q\epsilon_s}$	$0.00579\text{fF}\cdot\text{V}^{1/2}\cdot\mu\text{m}^{-1/2}$

序 言

MOS 晶体管的设想在 30 年代提出, 60 年代走向实用, 70 年代和 80 年代已渗入我们日常生活的各个方面。如果没有这种器件, 当今的许多所谓“高技术”将是不可能实现的。写这本书的目的在于给决定 MOS 晶体管工作的许多现象提供一种统一的处理方法, 以及阐明如何对这些现象建立解析模型。作者认为下面几点是本书的重要特点:

(1) 本书从基本概念入手。即使原来不了解这种器件的读者也应能看懂。由于经常采用不同寻常的观点和方法来讨论这些概念, 因此使原来已接触过这些概念的读者也会感兴趣。

(2) 作者尽了一切努力对本书的内容作了精心处理。读者可能有时会感到作者的分析过于琐细, 作者宁可受这样的责备也不愿粗制滥造。MOS 晶体管是一种如此复杂的器件, 以致任何人若草率从事, 则事情将很快变得不可收拾, 结果他将得到一堆粗心推导的大杂烩, 一些互相矛盾的模型和许多拼拼凑凑的东西, 这一点无论如何要加以避免。还有, 有些地方过于繁琐的原因只有在往下阅读本书时才能体会到, 可以看到, 那些“过细的”分析正是极其重要的内容。在一些文献中往往用同一个名称来表示几个物理量, 例如在 MOS 晶体管中至少有 4 个不同含义的电压采用了同一名称“阈值电压”。虽然这里提醒读者不要这样做, 不过本书中已小心地避免出现这种情况。

(3) 重点放在阐述原理。为了说明原理, 广泛地推导和讨论了有关的模型。因而贯穿全书, 物理过程和建模是平行地加以讨论的。

(4) 在仔细地说明所作的一些假设后, 有逻辑地导出了解析结果, 尽可能避免经验的建模方法。然而有这样一些现象, 其唯一的解析结果是经验的或半经验的。为了完整性, 本书中介绍了这类结果, 并随后作了必要的说明。

(5) 许多重点放在为所讨论的各种现象提供直观知识。企图只靠一些解析关系式想处理 MOS 晶体管那样复杂的器件是行不通的。本书着重于直观解释, 所以有些冗长的讨论是难免的。

(6) 本书的进度不快。作者相信读者在学习书中的内容时可能速度更快些。因此, 虽然对某一问题的讨论可能长达数页, 但因为有详尽的推导和直观的讨论, 读者实际上只需化较少的时间去理解它。有时, 有些部分被重复多次, 使读者可能有记忆错觉之感, 这样做的目的是为了确这些内容不被遗漏, 特别是在不按次序阅读时。本书大体上采用这一风格写成, 作者想把任何一个他所面对的新主题都写成这一风格。他非常希望新主题被分析得淋漓尽致, 办法是同时采用几种观点来叙述一个新主题以增加分析深度, 并且注意多次重复。作者过去就喜欢这种处理方法, 且从未对它感到厌烦。如果有读者偏巧在这点上“快”于作者, 那他(她)可以不费力地跳过有些讨论。

(7) 本书所采用的单位是那些对于讨论 MOS 晶体管最有意义的单位。这是打破常规的做法, 因而将必然受到质问。然而, 可以体会到, 方便和一致的单位制有若干优点。例如, 本书中长度单位仅用微米(μm), 而不是栅长才用微米, 氧化层厚度用埃($\text{\AA}$)或毫微米(nm)。甚至当长度出现在其它量的量纲中时, 长度单位也总是用微米。例如, 体积单位用立方微米

(μm^3)和电场强度单位用伏/微米($\text{V}/\mu\text{m}$)。除一致性外,上述单位制还有另一个优点,也就是使用合适的单位制有助于加深对器件的理解。例如,当读者读到大约在 $3\text{V}/\mu\text{m}$ 时速度达到饱和,他便可立即把这个数值和通常所用的沟道长度和电压联系起来。于是自动形成这样一个概念:一个 $1\mu\text{m}$ 长,加有 3V 漏-源电压的现代MOS晶体管将出现速度饱和的迹象。如果某读者读到衬底掺杂浓度,例如是 $1000\mu\text{m}^{-3}$,于是读者便几乎能“看到”有1000个原子在一个现代器件的 $1\mu\text{m}\times 1\mu\text{m}$ 的栅下面 $1\mu\text{m}$ 深的区域里。重复接触这样一类数字能帮助读者获得定量概念,即使你原来并不熟悉它。反之,如果给定电场强度和掺杂浓度,比如说分别为 $3\times 10^4\text{V}/\text{cm}$ 和 10^{15}cm^{-3} ,这就比较难办了,因为一个人不可能每次读到这些数字时都停止片刻来思考一下。习惯于常用单位的读者可望在阅读一些内容之后会同意作者的这一观点。在本书目录前的一张转换表供单位之间的快速转换用。

(8) 本书不是一本综述、概论性的书。事实上作者也作了有意识的努力使之避免成为这类书。本书选择了一组密切相关的主题,并对其中大部分进行了详细的讨论。重点放在经过精心设计并工作在正常电压范围内的器件内部所遇到的现象。对于一些非正常现象,诸如击穿、穿通和热电子效应等仅作了简单的描述。除了一些特殊应用之外,为这些现象建立模型是十分重要的,因为这可使我们知道如何通过器件设计来设法避免这些现象,有关这一方面所作的努力本书未涉及。加之,这样一些现象很难用解析方法来处理,恰如其分地分析这些现象需要考察大量数值的或者半经验的方法,由于类似的原因,数值计算技术和二维或三维的分析方法本书也不涉及(除了用于建立短沟道和窄沟道模型的准二维方法之外)。然而,本书对给予详细分析和未经广泛讨论的两类主题都提供了参考文献。选用这些参考文献是由于它们具有如下的1个或几个特点:

1. 它们在技术上具有重要性。
2. 它们在文献中被广泛引用。
3. 它们具有历史意义。
4. 它们是尚未解决的部分争论。

(9) 大部分习题属于下列类型之一:

1. 它们概略地叙述了另外一些建模思想,这些思想在正文中未给出,但鼓励读者去尝试。
2. 它们把书中介绍的几种模型加以比较。
3. 它们要求计算和绘图,以有助于获得定量概念和研究各种特性。
4. 它们要求详细地推导,而这些推导在正文中未曾详细说明,以免分散主要论点。

本书可供大学四年级或研究生第一年的课程使用,而且特别适合于有实践经验的工程师们自学。可以认为,学习电气工程的学生可以从与本书主题有关的课程中获得许多知识。MOS晶体管是一种主要的超大规模集成电路(VLSI)器件。一门专用于MOS晶体管的课程对于那些打算从事器件物理及其建模的人们来说当然是非常宝贵的。对于这些人来说,在半导体器件方面的一些标准课程通常都包括了过多的不同种类的器件,以致使其中任何一种都得不到合理的对待。而且也不介绍在一个详细的建模方法中所包含的各种错综复杂的因素及其折衷处理。对于那些使用器件去设计符合当代技术水平的新电路的人们来说,一门专用于讨论MOS晶体管的课程也是有很高价值的。集成电路的设计者们要考虑使器件去适合电路的需要,如果他们真正懂得器件的工作情况,他们就能聪明地去做到这一点。当然,如果系统是

否具有优良性能这一点并不重要的话,则人们可以用预先设计好的部件块或“标准单元”作为黑匣子来设计电路系统。但是,当体现当代技术发展水平的性能指标是必须达到的,而且还经常具有竞争意义的时候,设计者就必须考虑器件的细节了。

本书所提供的材料应使读者能构思出新的模型,这些模型比从一些目前流行的电路模拟程序中能找到的模型更好。许多工业部门中的电路设计者们往往化费无穷尽的时间企图去“解释”那些由于不适当的建模方法而引起的稀奇古怪的电路模拟结果。现在这种问题还部分地存在着,因为电路的设计者们和为器件建模的人之间缺乏共同语言,而只有这种共同语言才能使前者把他们的需要与后者沟通起来。希望本书将为消除这一隔阂作出贡献,而且还希望本书能使电路设计者们得以改善他们所采用的模型。

下面给出各章名称及每章的特点:

第1章 半导体、接触和PN结

本章内容是熟悉MOS结构需要的所有预备知识。对于初学者来说,这部分内容是重要的,但是其中有部分内容应使原先已有一些基本知识的读者也感到兴趣。本章也包括接触电势方面的内容,这些内容在下一章中用起来很方便。

第2章 二端MOS结构

在这一章中,读者将学习分析只有栅端和衬底端的MOS结构。在这里,论述了和MOS晶体管中存在源和漏这个事实并无直接关系的一些概念。弱反型、中反型和强反型区都在本章中介绍。全章自始至终采用电势而不是能带。这一点不仅与当前文献中的做法是相同的,而且还有助于提供严格而直接的推导。例如,考虑在平带电压表达式中大家所熟悉的 ϕ_{ms} 项,在能带处理方法中,MOS结构中哪里确实存在这一电势是不清楚的。在本书中,显然 ϕ_{ms} 无非是一个接触电势而已,它存在的地方也是显而易见的。同时,它在平带电压表达式中的出现也通过克希霍夫电压定律严格地加以证实了。

第3章 三端MOS结构

这里,为了把反型层连向外部,在第2章的结构上再加上一端。本章介绍了与电流的流动无关的MOS晶体管概念,包括赋予充分讨论的重要的“衬底效应”。

第4章 四端MOS晶体管

本章中,在第3章的结构中再加上一端就得到四端MOS晶体管。在已介绍过的二端和三端结构概念的基础上,这器件现在就不难理解了。这是本书中核心的一章,详细地介绍了下列4种模型:

1. 计及漂移和扩散电流并适用于所有工作区的通用电荷薄层模型。多亏采用了简单化的推导,使这一内容简短而透彻。
2. 经典的精确的强反型模型。
3. 简单的,计算上有效的扩展的二次模型。
4. 弱反型模型。

对上述模型进行了多方面的阐述,并把它们互相作了比较。这一章中也包括了有些主题,如有效迁移率的降低、温度效应等等。贯穿全章,作者指明了模型的精确性和简单化之间的折衷观点。

第5章 短沟道和窄沟道效应

本章先讨论短沟道器件的沟道长度调制、速度饱和及有效阈值电压等问题,接着讨论窄

沟道效应, 然后给出一个例子, 例中介绍了一个综合反映上述若干效应的模型。本章中还考虑了别的“小几何尺寸”效应, 并且说明了有关晶体管“按比例缩小”的问题。

第6章 具有离子注入沟道的 MOS 晶体管

本章中考虑了两类有注入的器件——具有与衬底同型的注入离子的器件和具有与衬底异型的注入离子的器件。确定了若干工作模式, 并对这些模式导出了有用的模型。

第7章 动态工作下的 MOS 晶体管——大信号建模

本章主要用来讨论电荷建模。仔细地引入了准静态工作的概念, 并对一个有代表性的模型作了电荷计算, 以此为例, 说明一般的电荷计算技术, 然后介绍非准静态分析方法。

第8章 低频和中频的小信号建模

本章介绍与小信号建模有关的原理。讨论局限于准静态特性。为工作在低频和中频条件下的 MOS 晶体管提出了一种有用的小信号模型。在最后一节中介绍了噪声问题。

第9章 高频小信号模型

本章中导出了两种小信号模型。首先介绍完整的准静态模型, 这些模型与第8章中的模型相比, 区别在于它们包含了转移电容。本章对这些有争论的电路元件的本质进行了仔细的讨论。先从完整的准静态模型出发给出了严格导出等效电路拓扑结构的方法, 然后通过仔细推导晶体管的“传输线”方程, 引出了非准静态模型, 并且导出了适合高频应用的 y 参数模型。第8、9两章把习惯上分别讨论的概念集中到了一起。可以看出, 若频率足够地低, 则每一级模型便简化为下一级频率较低的模型。

第10章 MOS 晶体管的制造

本章从集成电路角度讨论 MOS 晶体管的制造问题。这一领域内的一位专家, 麻省理工学院(MIT)的安东尼亚迪斯(Antoniadis)撰写了这一章。本章介绍基本的制造工序, 指出每道工序后所形成的管子结构, 以及讨论现代工艺过程所要达到的目标和其中所遇到的一些问题。实际器件的各种复杂细节可从本章所提供的详细绘图中得到体会和理解。

本书包括13个附录, 内容有介绍能带概念、静电学的基本定律以及为避免分散读者的注意力而未放在正文中的若干一般性的但又是复杂的结论, 由于同样的原因, 某些内容被列入小体字部分或脚注, 或如前所述, 放在习题中讲解。这类内容包括相当细致的细节问题或另外一些观点等等。为避免分散注意力, 初读本书时最好先略去小体字脚注和附录, 正文内容本身是完整的, 由于这类内容与正文中的某些论点显然有联系, 故以后总还是要查阅的。对那些在某些特定问题的细节上感兴趣的读者来说, 以及从提供本书与技术文献的连贯性来看, 这类内容都被证明是有价值的。

如果课程时间是一学期, 在选择所教内容时可以有很多方案。例如, 一门重点放在一般原理的课程, 可选第1章至第3章, 第4章(在讲授第4章时, 对通用电荷薄层模型又有仔细地讲解和有选择地讲解两种方案), 第7章到第9章, 以及根据兴趣和现有的教学时间再从其余各章中选择一些内容。另一方面, 一门重点放在数字电路应用方面的实用模型的课程, 可选第1章至第4章(削弱电荷薄层模型和弱反型区), 第5章至第7章, 第8章的第4节和第10章。对于欲削弱的部分, 可主要借助于图示作快速的定性讨论。作者将乐意考虑个别的教学需要, 并对来与作者联系的教师提供有关特殊课程大纲的建议。

本书的内容无疑是属于那些只有通过实践才能透彻领会的科目。习题应有助于给建模分析工作提供感性认识(事实上, 在习题中提出的有些建模思想是新的, 以前未曾发表过的)。

可以鼓励学生边学习边编写计算各种量的子程序,并把它们存贮起来为以后所用。采用这样一种学习方法,他们就可逐渐建立起一个有用的子程序库,这些程序库不但对新习题,而且还对最终的课程设计(如果安排有课程设计的话)都有帮助。作者的经验是课程设计很有价值,且课程设计的内容越广泛,学生受益越多。课程设计可以采用这样的形式,即在计算机上实现各种模型。仅仅把书上的模型复制到计算机程序中去是不够的,而是要求学生必须考虑选择正确的模型,并把它们组合起来构成通用模型,且要求这些通用模型能保证被计算的量相对于给定的所有参数都是连续的等等。下面是一些课程设计的例子:

(1) 编写一个估算均匀衬底器件的漏端电流的程序,计及短沟道和窄沟道效应。这个电流对于任意输入参数(电压,几何尺寸等)都必须是连续的,并且对于每一个端电压的导数也必须是连续的。

(2) 开发一种适用于计算弱、中和强反型长沟道器件中的漏端电流的有效计算方法。为此,必须研究出可用的数值计算方法,因为通用电荷薄层近似若不加以修正,将使计算复杂化。这里也要求保证电流及其导数对所有参数具有连续性。

(3) 研制一个用于强反型离子注入器件建模的程序,也要求保证连续性。

(4) 研制一个适用于强反型低、中频小信号参数建模的程序,要求特别注意饱和区内的小信号漏端电导。所有小信号参数对所有输入参数都应连续。

(5) 研制一个用于计算所有电荷和小信号电容的程序。所有这些量对于任意一个输入参数都应是连续的。

(6) 研制一个参数值的提取程序,这些参数值用于一个给定的模型,此程序的输入数据假定由测量值组成。

另外,某些工作量大的习题很容易被扩展为课程设计。就一切情况而论,如果课程设计的结果与在实验室里得到的或从科技文献中得到的测量值具有可比性的话,(在后一种情况下,书中提供的参考文献是很有帮助的),则课程设计的价值和难度便可提高。做课程设计时,学生可以单独做,也可以小组为单位做,可视预先掌握的学生们的努力情况而定。

本书中的内容已由作者和 E. S. Yang 在哥伦比亚大学的有关 MOS 器件的研究生课程中采用过,麻省理工学院的 D. Antoniadis 在该院讲授研究生器件课程的 MOS 部分时,以及在数字设备公司(DEC)讲授一门加深的 MOS 晶体管课程时也曾采用过本书的内容。作者在哥伦比亚大学和麻省理工学院讲授 MOS 电路课程的器件部分时,以及在美国电话电报公司贝尔实验室(AT&T Bell Laboratories)讲授短学时课程时还曾用本书的部分内容作为教材。

作者对在本书定稿过程中作过贡献的人们表示致谢。感谢我的朋友和合著者,麻省理工学院(MIT)的 D. Antoniadis 为本书撰写了 MOS 晶体管的制造一章,并感谢他参与了有益的和长时间的讨论。感谢贝尔通讯研究中心(Bell Communications Research)的 Mehran Bogheri 为本书提供了他的研究成果,并评阅了几版手稿。感谢美国电话电报公司贝尔实验室的 J. Brews 和波洛纳(Bologna)大学的 Guido Masetti 对手稿所作的特别详细的评论。感谢曼尼托巴(Manitoba)大学的 Howard Card,美国电话电报公司贝尔实验室的 Renuka Jindal 和 Ed Nicollian,哥伦比亚大学的 Paul Diamant 和 Ed Yang,伯克莱加利福尼亚大学的 Ping-Keung Ko,麻省理工学院的 Charlie Sodini, TMA(Technology Modeling Associates)公司的 Don Ward,标准微系统公司(Standard Microsystems)的 Andy Lish

以及东芝公司(Toshiba)的 Ranjit Mand 等各不同章进行了评论。感谢哥伦比亚大学的许多学生们,他们发现并向作者指出了手稿中的一些小毛病。还要感谢 Jim Day, Gloria Gibson, Andy Russo, John Palasz 和 David Vallancourt 等为书稿进行加工,并对他们在大量修改中所表现的耐心致谢。

Yannis P. Tsividis

目 录

序言

第1章 半导体、接触和PN结

1.1 引言	(1)
1.2 半导体	(1)
1.3 导体	(5)
1.4 接触电势	(12)
1.5 pn 结	(17)
参考文献	(22)
习题	(23)

第2章 二端MOS结构

2.1 引言	(25)
2.2 平带电压	(25)
2.3 电势平衡和电荷平衡	(29)
2.4 栅-衬底电压对表面状态的影响	(30)
2.5 反型	(34)
2.6 小信号电容	(43)
2.7 关于中反型界限的精确定义	(48)
2.8 各反型区特性的总结	(50)
参考文献	(50)
习题	(51)

第3章 三端MOS结构

3.1 引言	(53)
3.2 与反型层接触	(53)
3.3 体效应	(60)
3.4 反型区	(61)
3.5 关于中反型界限的精确定义	(69)
参考文献	(70)
习题	(71)

第4章 四端MOS结构

4.1 引言	(73)
4.2 晶体管的工作区	(75)
4.3 通用电荷薄层模型	(76)
4.4 强反型	(83)
4.5 中反型	(95)

4.6 弱反型	(96)
4.7 以 V_{SB} 和 V_{DB} 表示的工作区	(100)
4.8 有效迁移率	(101)
4.9 温度效应	(105)
4.10 击穿	(107)
4.11 p 沟 MOS 晶体管	(107)
4.12 增强型晶体管和耗尽型晶体管	(108)
4.13 模型精度和参数提取	(109)
参考文献	(113)
习题	(120)
第 5 章 短沟道和窄沟道效应	
5.1 引言	(124)
5.2 沟道长度调制	(124)
5.3 速度饱和	(129)
5.4 势垒下降, 二维电荷共享和阈值电压	(133)
5.5 组合几种效应于一个模型之中	(143)
5.6 穿通, 击穿, 寄生电流和有关效应	(145)
5.7 源区的和漏区的串联电阻效应	(146)
5.8 按比例缩小	(147)
参考文献	(152)
习题	(163)
第 6 章 离子注入沟道 MOS 晶体管	
6.1 引言	(165)
6.2 与衬底同型的注入	(167)
6.3 与衬底反型的注入	(175)
参考文献	(184)
习题	(188)
第 7 章 动态工作下的 MOS 晶体管——大信号建模	
7.1 引言	(190)
7.2 准静态工作	(190)
7.3 准静态工作时的端电流	(193)
7.4 准静态工作下电荷的计算	(198)
7.5 直流条件下的渡越时间	(207)
7.6 准静态模型的局限性	(208)
7.7 非准静态建模	(211)
参考文献	(215)
习题	(217)
第 8 章 低频和中频的小信号建模	
8.1 引言	(219)

8.2	本征部分的低频小信号模型	(219)
8.3	本征部分的中频小信号模型	(233)
8.4	非本征部分的小信号建模	(246)
8.5	噪声	(249)
	参考文献	(256)
	习题	(266)
第9章	高频小信号模型	
9.1	引言	(268)
9.2	完整的准静态模型	(268)
9.3	y 参数模型	(283)
9.4	非准静态模型	(288)
9.5	模型的比较	(302)
9.6	其他效应	(303)
	参考文献	(304)
	习题	(307)
第10章	MOS 晶体管制造工艺 (麻省理工学院 D.Antoniadis)	
10.1	引言	(310)
10.2	MOS 晶体管制造工艺的基本工序	(311)
10.3	增强/耗尽型 NMOS 工艺流程实例	(315)
10.4	CMOS 工艺	(322)
10.5	小型化 (按比例缩小) 的考虑	(225)
10.6	布图和制版	(330)
	参考文献	(332)
附录		
A	能带及其相关的概念	(335)
B	一维静电学基本定律	(340)
C	pn 结中的电荷密度, 场强和电势	(344)
D	二端 MOS 结构的能带图	(345)
E	二端 MOS 结构中的电荷密度, 场强和电势	(347)
F	二端 MOS 结构的一般分析	(347)
G	三端 MOS 结构的能带图	(350)
H	三端 MOS 结构的一般分析	(352)
I	用准费米势导出漏端电流	(353)
J	关于饱和区漏端电流和漏端小信号电导公式详细推导的一些结果	(355)
K	本征部分的瞬态源端电流和瞬态漏端电流的计算	(356)
L	精确强反型模型的电荷	(358)
M	用于非准静态 y 参数模型推导中的一些量	(360)

第 1 章 半导体、接触和 PN 结

1.1 引言

本书中,对 MOS 器件的讨论是以懂得几个基本概念为基础的,本章收集了这些基本概念。首先介绍半导体和半导体中可动载流子浓度的估算,然后考虑半导体中电流输送的机制,接着讨论不同材料之间的接触和在这一接触处建立起来的静电势问题。本章最后讨论一种特殊的接触— pn 结。

本章内容主要用于复习,但却写得使原先没有接触过半导体电子学的读者也能看懂。上述问题的详细讨论可在若干教科书^[1-12]中找到。

1.2 半导体

半导体这个名称起因于这一事实:它们在传导电流方面优于绝缘体,但不如导体。目前最广泛使用的半导体材料是硅,所以下面的讨论集中在这一材料上,但是这里所用的一些定性的论点对于别的半导体材料也适用。全书中,我们假定不存在光照、辐射、机械应力和磁场,以及半导体各点上的温度相同(除指明外,这一温度应理解为室温)。在未作进一步说明前,我们还假定所讨论的半导体材料是没有外加电压或电流的独立体,并且它周围的电场为零(在本节后面,零电场的假定将放宽)。最后,我们假设所有上述条件已在长时间内满足,因而半导体内各种状态已经建立,于是这半导体被说成是处于平衡状态。

一块纯(本征)硅晶体由一个有序的三维原子阵组成。这一原子阵称为晶格,且含原子 5×10^{10} 个/ μm^3 ①(写成 $5 \times 10^{10} \mu\text{m}^{-3}$)。晶格上的原子依靠所谓价电子而聚集在一起,这些价电子构成了原子间的键。在温度为绝对零度时,所有这些电子被稳定地固定在应有的位置上,而且每个原子中的电子所带的总的负电荷被原子核内的正电荷所抵消。在较高温度下,晶格由于热能而振动,这一“热运动”使某些电子从母体原子中挣脱出来。从它们能在晶体内自由运动这一意义上来说,这些电子成了自由电子。“自由电子”这个名称用来把它们与其余那些仍是原子键的一部分且不能自由离开的电子相区别。如果自由电子的运动协调一致,便能引起电流流动。由于游离出电子来的原子本来是电中性的,因此现在它们带有净正电荷了。

现在考虑两个相邻的原子 A 和 B ,且假定有一个电子从 A 中脱离出来,在 A 中便有了一个电子空位,所以 A 总体上带正电。原子 B 的一个价电子可以移动并填充这一空位,因而在 B 中产生了一个空位。注意,这个电子只是从一个键移到了另一个键,即并未成为自由电子。这

① 通常给出 5×10^{22} 个/ cm^3 。在本书目录前有一张常用单位与本书中所用单位之间的转换表。本书中,我们选择这种单位制的理由已经在序言中说明了。

一价电子转移的结果是：A成了中性的，而B得到了一净正电荷。然后，B附近的原子C中的一个价电子又可以移动并填充B中的空位，从而使B成为中性，C带正电，如此等等。可见，这种机制把一个正电荷从A输送到B再到C。这样，在半导体中我们遇到了两种输送电荷的机制：(1) 在晶格中自由电子的运动，每个自由电子携带一负电荷；(2) 价电子从一个键到另一个键的运动，它对应于“空位”（与正电荷有关）向相反方向的运动。第二种现象可用一种虚构的自由粒子的运动来模拟，这种虚构的自由粒子称为空穴，它带一个正电荷，一个空穴对应于一个空位。如果一个电子的电荷用 $-q$ 表示，则一个空穴的电荷为 q 。当它们在晶格中游动时，一个空穴和一个电子可能相遇而湮灭，这一现象称为“复合”。这里所提供的这幅空穴和自由电子图对于我们已是足够用了。然而，读者应当特别注意，实际上这是一种很复杂的物理现象的组合，上面这种想像仅仅是一种简单的模型而已。

在我们现在所讨论的本征半导体中，由于每个空穴是靠一个电子挣脱出来成为自由电子而产生的，因此空穴和自由电子的数目是相等的。这样，若用 n_i 和 p_i 分别表示本征材料内电子和空穴的体浓度，则我们有

$$p_i = n_i \quad (1.2.1)$$

符号 n_i 经常用来表示两种浓度中的任意一种浓度，简称为本征载流子浓度。它的值对应于平衡状态下的浓度值，那时电子——空穴对的产生率和复合率相等。 300K （凯尔文度）时，硅的 n_i 值近似为 $0.0145\mu\text{m}^{-3}$ ，粗略地说，这意味着在 $1000\mu\text{m}^3$ 材料中可以找到15对电子一空穴。由于硅材料中有 5×10^{10} 个原子/ μm^3 ，因此每 10^{13} 个原子中只有3个原子贡献出电子一空穴对！根据前面的讨论，可预见到在较高温度下， n_i 将增加①。

在硅晶体中加入外来原子可使自由电子数不等于空穴数，这种原子称为杂质，加入这些原子的过程称为掺杂，掺杂后的半导体称为非本征半导体。如果希望增加自由电子总数，则可选择比硅原子高一价的掺杂原子，后者提供的价电子数比硅结构中完整的共价键需要的价电子数多出一个。于是，除了一个多余的价电子外，这些杂质原子用其余的所有价电子与相邻的硅原子形成共价键，多余的那个电子受母体原子的束缚较弱，在室温下，晶格的热振动足以使它成为自由电子。与本征半导体的情况相反，这个电子的离去使剩下的所有共价键完整无缺，因此在这些键中并不产生一个空位，也可以说并不留下一个空穴。然而，掺杂原子原来是电中性的，现在却带有一个净正电荷，这称为杂质原子被剥离了或者电离了。上述内容表示在图1.1a中。每个“ $-$ ”代表一个自由电子，每个“ $\oplus$ ”代表一个失去一个电子的杂质原子

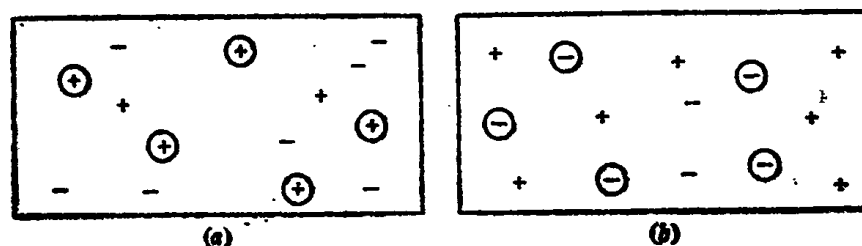


图 1.1 在非本征硅中的自由电子、空穴和电离杂质原子
(a) n型 (b) p型

① 把硅的 n_i 表示为绝对温度 T 的函数的近似公式为(1): $n_i = A_1 T^{3/2} \exp \frac{-A_2}{T}$, 式中 $A_1 = 38700\text{K}^{-3/2} \mu\text{m}^{-3}$, $A_2 = 7000\text{K}$.

子,因而带有一个净正电荷。正号外面的圆圈用来表明这个原子是晶格的一部分,是不可动的,因而它本身不能导电。在室温时,所有杂质原子实际上都电离了。因此,由于这种电离过程所产生的自由电子数实际上等于杂质原子数。每一个杂质原子贡献一个自由电子,但并不产生一个空穴。然而,因为还有前面已说过的在本征半导体内的电子—空穴对产生的机制,硅材料中仍可产生少量的电子—空穴对,图1.1a中包含了两对电子—空穴对。

因为所选的杂质原子能“施给”硅晶体一个自由电子,故被称为施主。通常用于对硅掺杂的施主材料是磷、砷和锑。在硅中加入极少量的施主原子,但是其浓度却通常选为比 n_i 高几个数量级。例如,施主原子浓度为每立方微米内500个原子(写为 $500\mu\text{m}^{-3}$),相当于在每 10^8 个硅原子中有一个施主原子,这一浓度仍然比室温下的本征载流子浓度 n_i 值大4个数量级以上。如无特别说明,将假定施主浓度是均匀分布的。一旦全部施主原子电离了,它们所贡献的自由电子数将大大超过前面说过的“本征”产生机制所贡献的电子数。因此,自由电子的浓度(用 n_0 表示),近似等于施主浓度(用 N_D 表示),即

$$n_0 \approx N_D \quad (1.2.2)$$

由于在晶格中有如此多的自由电子,在它们运动的路径上遇到空穴,从而填充空穴或称为“复合”的机会是很多的,于是空穴浓度(用 p_0 表示)较本征体内减少。事实上,复合的机会近似正比于 n_0 ,于是 p_0 减少的比例和掺杂后的 n_0 比本征 n_i 所增加的比例相同。因此乘积 $n_0 p_0$ 保持与本征情况下的值相同^[1],也就是等于 n_i^2 ,参看式(1.2.1),根据这一事实和式(1.2.2),可得:

$$p_0 \approx \frac{n_i^2}{N_D} \quad (1.2.3)$$

如果掺杂浓度很高(约高于 $10^6\mu\text{m}^{-3}$),上述结论将不再成立^[1,5,10]。具有极高掺杂浓度的半导体称为简并半导体。另外在温度很低或很高时,上面两个关系式也将不再成立。因为温度很低时,掺杂原子不能全部电离;温度很高时, n_i 增加,使 $N_D \gg n_i$ 的假设不再适用。每当上述关系式被采用时,这将意味着以上这些极端情况都不存在。

因为在掺入施主的半导体内 n 大于 p ,所以自由电子称为多数载流子,空穴称为少数载流子。由于多数载流子携带一个负电荷,故用施主杂质掺杂后的半导体称为 n 型半导体。

上述方法是用来增加电子的总数,与此相反,若要增加空穴的总数,可以把这样一种杂质原子掺入本征半导体,这种原子所具有的价电子数比与相邻硅原子完全共价结合所需要的电子数少一个,这样,当一个这种原子企图与周围的硅原子形成共价键时,就会缺少一个价电子。这时杂质原子可以从相邻的一个硅原子“偷”一个价电子,这一偷价电子的过程产生两个效果:第一,由于杂质原子起初是电中性的,而现在得到了一个额外的电子,故将带一个净负电荷,这个电荷是与偷电子的那个特定原子联系在一起的,所以不能用来导通电流,从这意义上来说,它是不可动的;第二,从一个相邻的硅原子偷走了一个电子,这一过程在硅原子中留下一个价电子的空位,从而产生了一个空穴,这个空穴可以像在本征(纯)晶体中那样地运动。但是请注意,这与本征情况不同,随着这个空穴的产生并不同时产生一个自由电子。由于杂质原子已从硅晶格中偷了或“接受”了一个价电子,故被称为受主。用于对硅掺杂的典型受主材料是硼、镓和铟。图1.1b表示用受主原子掺杂后的半导体中的电荷。“+”代表空穴,带圆圈的负号“ $\ominus$ ”代表电离后的受主原子(它们是不可动的),不带圆圈的负号“-”代表自由电子(与在施主掺杂后硅中的情况一样,由于存在着前已描述过的本征产