

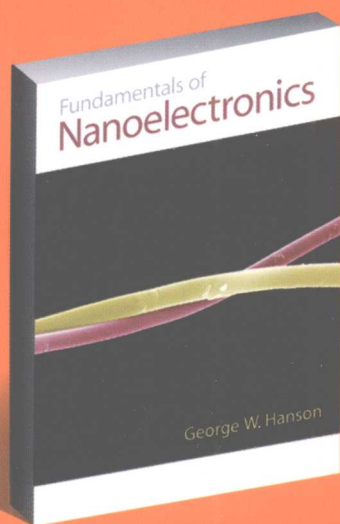


国外经典教材·电子信息

PEARSON
Prentice
Hall

Fundamentals of Nanoelectronics

纳电子学基础



George W. Hanson 著
侯士敏 高 旻 梁学磊 译

清华大学出版社

国外经典教材·电子信息

纳电子学基础

George W. Hanson 著

侯士敏 高旻 梁学磊 译

清华大学出版社
北京

Simplified Chinese edition copyright © 2008 by PEARSON EDUCATION ASIA LIMITED and TSINGHUA UNIVERSITY PRESS.

Original English language title from Proprietor's edition of the Work.

Original English language title: Fundamentals of Nanoelectronics by George W. Hanson, Copyright © 2008
EISBN: 0-13-195708-2

All Rights Reserved.

Published by arrangement with the original publisher, Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall.

This edition is authorized for sale only in the People's Republic of China (excluding the Special Administrative Region of Hong Kong and Macao).

本书中文简体翻译版由 Pearson Education(培生教育出版集团)授权给清华大学出版社在中国境内(不包括中国香港、澳门特别行政区)出版发行。

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2007-5192 号

本书封面贴有 Pearson Education (培生教育出版集团) 激光防伪标签, 无标签者不得销售。
版权所有, 侵权必究。侵权举报电话: 010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

纳电子学基础/(美)汉森(Hanson, G. W.)著;侯士敏等译. —北京:清华大学出版社, 2009.1

书名原文: Fundamentals of Nanoelectronics

ISBN 978-7-302-18625-0

I. 纳… II. ①汉… ②侯… III. 纳米材料: 电子材料—基本知识 IV. TN04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 145014 号

责任编辑: 龙啟铭 李玮琪

责任校对: 徐俊伟

责任印制: 王秀菊

出版发行: 清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社总机: 010-62770175

投稿与读者服务: 010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈: 010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

地址: 北京清华大学学研大厦 A 座

邮编: 100084

邮购: 010-62786544

印装者: 北京鑫海金澳胶印有限公司

经销: 全国新华书店

开本: 185×260 印张: 17.5

字数: 423 千字

版次: 2009 年 1 月第 1 版

印次: 2009 年 1 月第 1 次印刷

印数: 1~3000

定价: 35.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题, 请与清华大学出版社出版部联系调换。
联系电话: 010-62770177 转 3103 产品编号: 027027-01

译 者 序

诺贝尔奖获得者美国物理学家理查德·费曼早在 1959 年就指出了纳米科技的重要意义,而纳电子学(也常被称为“纳米电子学”)则是纳米科技的重要分支之一。美国 Intel 公司已于 2007 年发布了 45 纳米线宽的制程高端处理器,这虽然在技术路线和器件工作原理上仍然是传统微电子技术的延续,但也预示着在不久的将来我们会真正地迎来纳电子时代。因此,在大学本科和研究生教学中开设纳电子学方面的专业课程对促进我国纳电子学的发展和提高我国在这一热点研究领域的国际竞争力是非常必要的。

在译者三人从事与纳米科技和纳电子学相关的教学和科研工作中,始终感觉到对于这样的一门新兴学科要找到一本适合本科生和研究生使用的入门教材或参考书是很不容易的。国内已有的为数不多的纳电子学方面的专著,大多内容较深,不太适合初学者使用。我们认为美国威斯康星大学乔治·汉森教授所著的“纳电子学基础”一书,是一本较好的纳电子学方面的基础读物。该书从纳电子学的两大基础——量子力学和固体物理学入手,分析了量子阱、量子线、量子点、碳纳米管等纳米材料的电子结构,深入讨论了纳电子器件的两个基本概念——单电子现象和电导量子化,并介绍了纳电子学两个前沿课题——分子电子学和自旋电子学。该书的突出特点是内容简明扼要,论述条理清楚,既系统阐述了作为纳电子学核心的原理和现象,也涵盖了必要的基础物理知识。本书适合作为高年级本科生和低年级研究生系统学习纳电子学的基础教材,也可作为刚刚步入这一领域的研究人员的入门参考书。

本书的 1~4 章由高旻翻译,5~7 章由梁学磊翻译,8~10 章以及附录由侯士敏翻译,最后由侯士敏对全书进行了统稿。在翻译过程中,凡是译者发现的原书中存在的印刷错误或笔误,都已与原作者确认并且在中文译版中改正,但一般没有加译注。从本书的翻译到出版,清华大学出版社的龙启铭编辑都给予了很多关心和支持,在此译者三人表示感谢。由于时间紧迫和译者水平有限,不妥或错误之处敬请广大读者批评指正。

前 言

纳米技术是指任何利用纳米尺度的物体或纳米器件的技术,而纳米器件是指尺寸在一纳米(一纳米等于十亿分之一米)量级的器件。一纳米大约是我们将一小粒沙子缩小一千倍再缩小一千倍所得到的尺寸。因此,纳米技术是在非常小尺度上的技术。

尽管在大众媒体上对纳米技术的美好前景和可能的危险性都已经有了相当多的报导,但是实际上纳米技术还处于初创阶段。现在还不可能知道正在研究的纳米技术中的哪些方面将成为成熟和有建树的领域并且得到实际应用。但是,可以肯定的是会有许多我们至今还未想到过的纳米技术将在未来得到发展。另外可以肯定的是随着纳米器件从实验室进入商品市场,纳米技术将在人类的日常生活中起到日益重要的作用。

为了发展纳米技术,科学研究人员和工程技术人员需要理解支配尺寸在纳米量级的物体的基本物理规律。一般来说,这是量子力学的范畴,也涉及到固体物理学、化学和生物学的相关领域。例如,尽管有很多提议要发展基于金属和半导体中的电子运动的纳米器件,但是人们对发展超出传统电子物理专业之外的其他信息处理器件也有相当大的兴趣。

本书为电子工程师和应用技术人员提供了有关纳电子学基本概念的简单介绍,这包括单电子效应和纳米体系中的电子输运。本书适合于大学三年级和四年级本科生学习,不过也可作为本领域低年级研究生的入门读物。书中相当重要的概念是理解量子点、量子线和量子阱以及这些纳米结构在纳电子学中的应用。特别是,本书的重点集中在电学特性的量子化,例如电导量子化和低维系统中的弹道输运,来源于电子波动性质的量子干涉效应,以及纳电子器件中的隧穿现象。本书的题材选择在很大程度上注重强调三年级和四年级本科生所熟知的经典电子器件和电学器件例如晶体管和导线的量子对应物。本书写作时假设读者具备一定的基础物理知识,包括力学、能量和电磁学的基本概念,以及电路和传统电子学的基本概念。另外,掌握场效应管物理机制的一些基础知识也是大有裨益的。在多数大学电子工程系的学生课程中,通常是在三年级的某个时间段来讲授这些基础知识。

尽管本书对量子力学和固体物理学作了简单介绍,但是本书并不是用来替代这些领域中的专著和专门课程。不过,在多数大学日益密集的本科生课程中,一门比如说以本书为教材的课程可作为纳米科技的入门课程,并激发学生今后学习纳米科技的兴趣。

致谢

我非常感谢 Patricia Whaley 和量子点公司的同仁们所提供的有益意见,感谢 Peter Burke 让我分享他的专业知识以及他对本工作的深入思考。我还要感谢 Wisconsin 大学 Milwaukee 分校的 Richard Sorbello 和 Carolyn Aita 对我的帮助和鼓励以及他们对本领域的兴趣。另外,我要感谢各位匿名评审人,他们提供的详细的意见和建议使本书增色很多。

目 录

第一部分 纳米尺度物理学基础

第 1 章 纳电子学简介	3
1.1 “自上而下”路线	5
1.1.1 光刻(曝光)	6
1.2 “自下而上”路线	8
1.3 为什么学习纳电子学	9
1.4 纳米技术的潜力	10
1.5 本章要点	11
1.6 练习题	12
第 2 章 经典粒子、经典波和量子粒子	13
2.1 经典系统和量子系统的比较	13
2.2 量子力学的起源	15
2.3 光的波动性和光的粒子性	15
2.3.1 早期的认识:光是粒子或者可能是波	16
2.3.2 稍后的认识:光是波	16
2.3.3 最终,光是量子粒子	18
2.4 电子的粒子性与波动性	21
2.4.1 早期的认识:电子是粒子	21
2.4.2 晚一些时候:电子(和其他所有东西)是量子粒子	21
2.4.3 量子力学的进一步发展	23
2.5 波包与不确定性	24
2.6 本章要点	29
2.7 练习题	30
第 3 章 电子的量子力学	32
3.1 量子力学的基本假设	33
3.1.1 算符	35
3.1.2 本征值和本征函数	35
3.1.3 厄米算符	36
3.1.4 量子力学中的算符	39
3.1.5 测量概率	41
3.2 不含时薛定谔方程	46

3.2.1	波函数的边界条件	48
3.3	量子力学和经典电磁理论之间的类比	51
3.4	概率流密度	52
3.5	多粒子系统	54
3.6	自旋和角动量	57
3.7	本章要点	59
3.8	练习题	59
第4章	自由电子和受束缚电子	63
4.1	自由电子	63
4.1.1	一维空间	64
4.1.2	三维空间	65
4.2	金属的自由电子气理论	67
4.3	限制在有限空间区域中的电子和量子数	67
4.3.1	一维空间	67
4.3.2	三维空间	71
4.3.3	周期性边界条件	72
4.4	费米能级和化学势	73
4.5	部分受限电子——有限势阱	74
4.5.1	有限矩形势阱	75
4.5.2	抛物线形势阱——谐振子	79
4.5.3	三角形势阱	80
4.6	限制在原子中的电子——氢原子和周期表	80
4.6.1	氢原子和量子数	81
4.6.2	氢原子之后——多电子原子和周期表	84
4.7	量子点、量子线和量子阱	87
4.7.1	量子阱	88
4.7.2	量子线	89
4.7.3	量子点	90
4.8	本章要点	91
4.9	练习题	91
第5章	周期势中的电子——固体能带论	94
5.1	晶体材料	94
5.2	周期势中的电子	96
5.3	能带结构的克勒尼希-彭尼模型	97
5.3.1	有效质量	100
5.4	固体能带论	106
5.4.1	半导体中的掺杂	109
5.4.2	相互作用系统模型	110

5.4.3	电场对能带的作用	112
5.4.4	一些半导体的能带结构	113
5.4.5	电子的能带跃迁——电磁能与材料的相互作用	114
5.5	石墨片与碳纳米管	118
5.5.1	石墨片	118
5.5.2	碳纳米管	120
5.6	本章要点	123
5.7	练习题	123

第二部分 单电子和少电子的现象与器件

第 6 章	隧道结与隧穿的应用	129
6.1	穿过势垒的隧穿	130
6.2	材料界面处的势能分布	133
6.2.1	金属-绝缘体结、金属-半导体结和金属-绝缘体-金属结	133
6.3	隧穿的应用	136
6.3.1	场发射	136
6.3.2	MOSFETs 中的栅氧化物隧穿与热电子效应	139
6.3.3	扫描隧道显微镜	141
6.3.4	双势垒隧穿和共振隧穿二极管	143
6.4	本章要点	146
6.5	练习题	146
第 7 章	库仑阻塞与单电子三极管	148
7.1	库仑阻塞	148
7.1.1	纳电容器中的库仑阻塞	149
7.1.2	隧道结	154
7.1.3	电流源激励的隧道结	155
7.1.4	量子点电路中的库仑阻塞	157
7.2	单电子三极管	163
7.2.1	单电子三极管逻辑	168
7.3	其他 SET 与 FET 结构	170
7.3.1	碳纳米管三极管(FETs 与 SETs)	170
7.3.2	半导体纳米线 FETs 与 SETs	172
7.3.3	分子 SETs 和分子电子学	174
7.4	本章要点	176
7.5	练习题	177

第三部分 多电子现象

第 8 章	粒子统计和态密度	181
8.1	态密度	181

8.1.1	低维结构的态密度	183
8.1.2	半导体的态密度	184
8.2	经典和量子统计	185
8.2.1	材料中的载流子浓度	187
8.2.2	费米电子的重要性	189
8.2.3	半导体中的平衡载流子浓度和费米能级	190
8.3	本章要点	192
8.4	练习题	192
第9章	半导体量子阱、量子线和量子点模型	194
9.1	半导体异质结和量子阱	195
9.1.1	限制模型和二维电子气	197
9.1.2	量子阱中的能带跃迁	200
9.2	量子线和纳米线	204
9.3	量子点和纳米粒子	206
9.3.1	半导体量子点的应用	207
9.3.2	等离子共振和金属纳米粒子	211
9.3.3	功能化的金属纳米粒子	212
9.4	纳米结构的加工技术	213
9.4.1	光刻	213
9.4.2	纳米压印制图技术	214
9.4.3	分裂门技术	215
9.4.4	自组装	216
9.5	本章要点	217
9.6	练习题	217
第10章	纳米线、弹道运输和自旋运输	220
10.1	经典和半经典运输	221
10.1.1	电导的经典理论——自由电子气模型	221
10.1.2	电导的半经典理论——费米气体模型	223
10.1.3	经典电导和电阻	225
10.1.4	金属纳米线的电导率——线半径的影响	226
10.2	弹道运输	229
10.2.1	电子碰撞和长度标度	229
10.2.2	弹道运输模型	230
10.2.3	量子电阻和电导	231
10.2.4	量子电阻的起源	236
10.3	碳纳米管和纳米线	237
10.3.1	纳米线半径对波速的影响和损耗	240
10.4	自旋运输和自旋电子学	242

10.4.1 自旋输运·····	242
10.4.2 自旋电子器件和应用·····	245
10.5 本章要点·····	246
10.6 练习题·····	246
附录 A 符号和缩略语·····	249
附录 B 材料的物理性质·····	251
附录 C 传统 MOSFET·····	255
附录 D 练习题解答·····	257
参考文献·····	262

第一部分

纳米尺度物理学基础

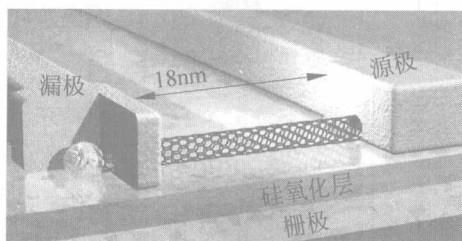
本书分为三大部分。第一部分“纳米尺度物理学基础”介绍作为纳米尺度现象起因的一些基本原理,包括波和粒子的概念,量子理论,电荷限域,固体材料,以及量子点、量子线和量子阱的基本概念。大体上,这部分内容包括了研究各类纳电子学器件所需的基本物理知识。

第二部分“单电子和少电子的现象与器件”介绍隧穿的概念,并描述与之相关的现象如库仑阻塞。然后将应用这些概念来解释所谓的“单电子器件”(包括单电子三极管)的基本原理。这类器件已经在电子学领域引起了较强的反响,并被认为是将在未来的电子学和光子学系统中起重要作用。这些单电子器件的运行依赖于单个电子的运动(更一般地说,依赖于相对较小数量的电子的运动)。这标志着单电子器件与传统电子器件的一个主要的区别,后者的运行用到多得多的电子。

第三部分“多电子现象”介绍经典统计和量子统计以及相关的电子现象。我们把这些概念应用于半导体量子阱、量子线和量子点以扩充第一部分讨论过的类似内容。然后,我们介绍弹道输运,这对应于电子通过相对于其平均自由程来讲较小的空间区域,这样在理想情况下电子在穿过材料的过程中不会有散射,这使得我们必须引入与传统宏观电路中遇到的完全不同的电阻概念。

非常笼统地说,本书的第一部分介绍理解纳电子器件所需的物理原理,第二部分描述具有单电子精度的纳电子器件,而第三部分考虑“纳米”固体,例如半导体量子点和纳米线。

第1章 纳电子学简介



碳纳管三极管示意图

在详述纳米尺度现象之前,我们首先来认识一下“纳米”尺度的大小。表 1.1 列出了常用的典型长度单位。

在表 1.1 中没有列入长度单位埃(\AA), $1\text{\AA}=10^{-10}\text{ m}$, 或者说是 1 纳米的十分之一。1 埃是一个典型的原子尺度,所以,粗略地说,大约 10 个原子就对应于 1 纳米。

表 1.1 纳米技术中常用的典型长度单位

名称	符号	大小	名称	符号	大小
米	m	1	皮米	pm	10^{-12} m
毫米	mm	10^{-3} m	飞米	fm	10^{-15} m
微米	μm	10^{-6} m	阿米	am	10^{-18} m
纳米	nm	10^{-9} m			

表 1.2 列出了一些微小物体和它们的典型尺寸。可以看出原子、DNA、蛋白质、病毒和晶体管都属于我们广义上定义的纳米尺度物体的范畴(大概在 1 纳米的 100 倍范围之内),而作为对比来讲,生物细胞则比 1 纳米大出 1 万倍。

表 1.2 常见微小物体和它们的典型尺度

物 体	典型 尺寸
原子	$1\text{\AA}=0.1\text{ nm}$
DNA(直径)	1nm
蛋白质	10nm
晶体管氧化层厚度	1.2nm
晶体管栅极长度	35nm
病毒	100nm
红细胞	$10\mu\text{m}=10\,000\text{ nm}$
人类头发直径	$150\mu\text{m}=150\,000\text{ nm}$
沙粒	$1\text{ mm}=1\,000\,000\text{ nm}$

Chart of the Electromagnetic Spectrum

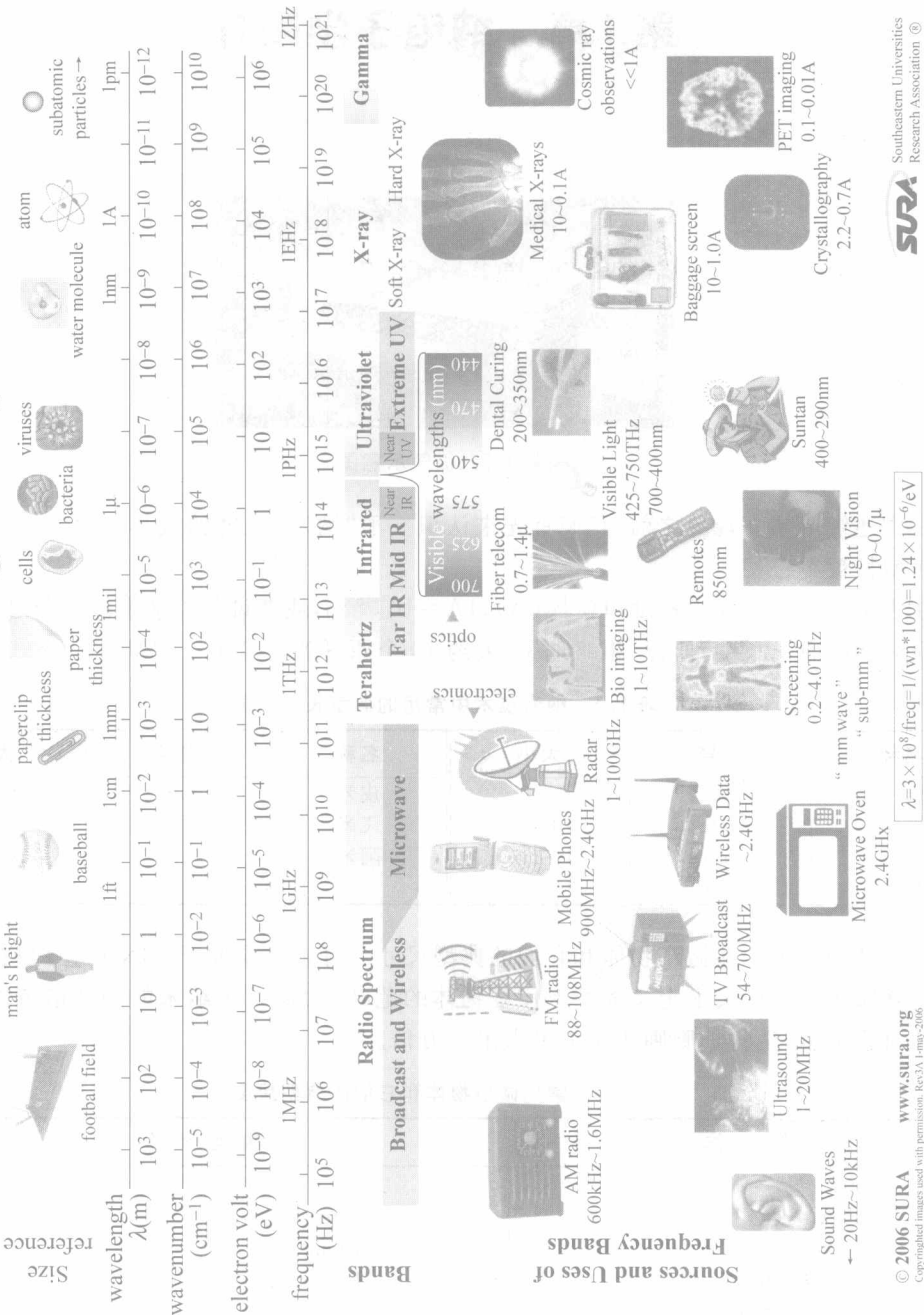


图 1.1 电磁波谱示意图

为了更进一步认清纳米技术所涉及的尺寸概念,表 1.3 中给出了电磁波谱中的一些点,并且显示在图 1.1 中,可以看出由紫外线(UV)到 X 射线的波长区间是在纳米量级。

表 1.3 电磁波谱

通用名称	λ (m)	λ (nm)	f (GHz)
调幅无线电波	10^4	10^{13}	0.00003
调频无线电波	1	10^9	0.3
微波	10^{-2}	10^7	30
红外线	10^{-4}	10^5	3000
可见光-红色	7×10^{-7}	700	428 571
可见光-紫色	4×10^{-7}	400	750 000
紫外线	10^{-8}	10	30 000 000
X-射线	10^{-10} (1 Å)	0.1	3 000 000 000
γ -射线	10^{-12}	0.001	300 000 000 000

说明:通用名称表示的是一个频率范围;表中给出的是典型的数值。

1.1 “自上而下”路线

微电子工业也许是纳电子学发展的最大单一推动力,而微电子的名字也正在快速地变为过时。微电子工业诞生的标志是 Bell 实验室的 William Shockley、Walter Brattain 和 John Bardeen 在 1947 到 1948 年发明的晶体管以及 1958 年美国德州仪器(Texas Instrument)的 Jack Kilby 和美国仙童半导体公司(Fairchild Semiconductor Corporation)的 Robert Noyce(创始人之一)发明的集成电路(IC)。在谈到 IC 的发明时 Kilby 通常是最经常被提到的人,不过实际上 Noyce 和 Kilby 的工作是各自独立完成的而且互相并不知道另一个人的努力,他们都在 1959 年申请了和 IC 相关的专利。

1965 年,摩尔(Gordon Moore, Intel 公司的创始人之一)注意到每平方英寸 IC 芯片上的晶体管的数目每 12 个月就大约翻一番。这一经验法则现在被称为摩尔定律,直到目前为止这一定律都是近似成立的,不过现在翻一番的时间是 18~24 个月。当然,电子工业和普通公众都希望这一不断小型化的过程可以持续下去。然而最近,科学工作者(即使是那些工作在 Intel 公司的)预言到 2015~2018 年摩尔定律将要走到终点,人们预期到那时制造特征尺寸为 16 纳米的晶体管将成为可能。

图 1.2 展示了历史上的第一个晶体管,这是一个双极型器件,包括两个和锗基底接触的尖金属线(发射极和集电极),而锗又与基极相连。到 1960 年,晶体管的最小特征尺寸已经下降到 $100\mu\text{m}$ 。这个数值在 1980 年已经接近

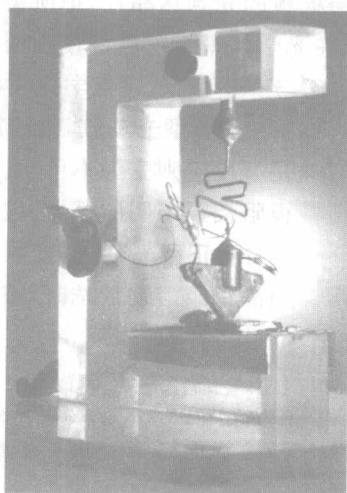


图 1.2 于 1947 年在贝尔实验室发明的第一个晶体管

1 μm ,而在2001年则达到130纳米的量级。接着在2003年和2005年分别实现了90纳米和65纳米的制造。45纳米技术预定在2007年完成^①,而32纳米技术也计划在不远的将来实现^②。

鉴于晶体管和其他元件特征尺寸的缩小,有人会说电子工业已经在“做”纳米技术。然而,根本的转变看起来还在酝酿中。100纳米量级的晶体管仍然在一定程度上遵循由量子理论修正的经典物理。随着特征尺寸向1纳米逐渐缩小,越来越多的纯量子效应开始出现。例如,当金属-氧化物-半导体场效应管(MOSFET)中的栅极氧化物厚度降低到1~2 nm时,就会发生显著的穿过栅极的隧穿,这是一种纯粹的量子现象^③。另外,当三极管的沟道长度接近几个纳米时,相当一部分电子会以弹道方式穿过沟道,即没有发生通常传导中标志性的碰撞。最后,随着沟道长度的持续缩短,源-漏之间的直接隧穿将发生。所有这些效应的作用将显著改变器件的性能。

在缩小特征尺寸方面另一个非常重要的实际问题是必须改变制造工艺过程,这需要很高的成本。建造一个新的集成电路制造厂的费用可能高达数十亿美元,并且随着特征尺寸的缩小而增加。而且,目前采用的各种各样的光学曝光技术大概只能满足小到几十纳米的应用,要进一步缩小尺寸则需要发展其他技术(也许不是基于光刻的技术)。

1.1.1 光刻(曝光)

很容易理解利用光学曝光技术所制造的器件在缩小尺寸时所遇到的问题。在这里,我们可以广义地定义“光刻”或者“曝光”是为了加工电路而利用电磁能将图形从掩模板转移到基底(我们将称之为晶片)表面上沉积的抗蚀剂层的过程。下面我们对这一基本的工艺过程作一个简化的描述(图1.3描绘了步骤1~步骤3)。

1. 把感光乳剂(称为光刻胶)涂在晶片(绝大多数情况是硅)上。

2. 光能(光^④)照在含有透明和不透明区域(对应于所需图形)的光学掩模板上。透过光学掩模板的光到达晶片,把所需图形照在光刻胶上。在半导体工业最常用的投影式曝光术中,在光学掩模板前后都使用透镜对光进行聚焦。

3. 光刻胶被透过光学掩模板的光曝光的部分发生化学反应。

(a) 对于**负型光刻胶**,抗蚀剂材料初始时对用在显影中的特定溶剂是可溶的,而通过曝光时的化学反应则变为不可溶。当晶片稍后在溶剂中清洗时,没有曝光的区域(也就是被光学掩模板阻挡了照明的区域)被溶解,而对应于掩模板透明部分的曝光区域则保留下来。

(b) 对于**正型光刻胶**,抗蚀剂材料初始时是不可溶的,而通过曝光发生的化学反应变成可溶。当晶片经溶剂清洗时,被光照过的区域被溶解,没有曝光的区域则保留下来。

① 美国 Intel 公司已于 2007 年 11 月 11 日正式发布了 45nm 制程高端处理器。

② 90nm、65nm、45nm、32nm 等对应于半导体工艺路线图中的“技术节点”。这里指的是“国际半导体技术发展路线图”(ITRS),它是工业制造商和供应商、政府组织和大学提供的对半导体工业技术需求的评估,是非常有影响力的合作产物。

③ 虽然对三极管的运行起到核心作用的能带理论和有效质量的概念等都是量子效应,不过在某种意义上它们的作用是对半导体中电子的经典行为进行修正。

④ 这里我们用“光”的广义含义,不必仅指可见光。

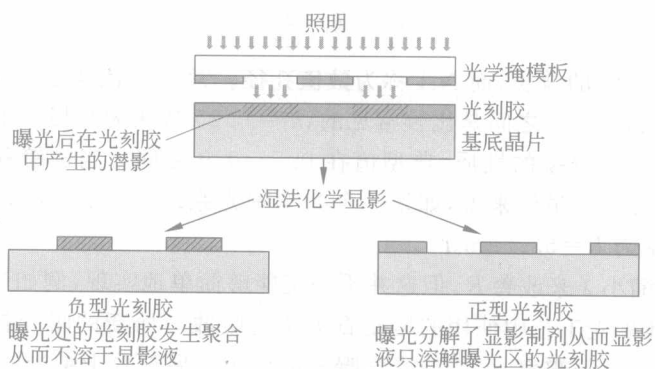


图 1.3 光刻过程中步骤 1~步骤 3 的示意图

4. 然后采用不同的步骤可以把图形从光刻胶转移到晶片上。例如

(a) 可以通过刻蚀来去掉基底材料。(关于刻蚀和材料沉积可以参考 9.4 节中的简要介绍)光刻胶作为抗蚀剂可以阻挡刻蚀并保护被胶覆盖的晶片部分。刻蚀后去掉光刻胶就得到所需要的结构。

(b) 可以在晶片上沉积材料,例如,表面金属化。然后去掉光刻胶(沉积在光刻胶上的材料也随之被去掉,这称为剥离),这样沉积的材料就留在没有覆盖光刻胶的区域。

(c) 还可以掺杂。例如,掺杂离子束被加速射向晶片,光刻胶阻挡离子到达其覆盖的晶片区域,这样就在没有光刻胶覆盖的区域引入掺杂。这被称为离子注入。

我们将在 9.4 节进一步讨论光刻和其他形成纳米结构的方法。

光学曝光工艺的分辨率 R 描述成像系统分辨空间中两个临近物体的本领,实际上并不是指刻印物体的最小特征尺寸。我们可以通过考虑光(实际上可以是任何电磁能)透过光学掩模板上的透明区域形成的图形来理解得到好的分辨率所面临的一般性问题。由于衍射(基本上是指光在边角处弯曲的能力)过程,光通过模板的小孔时会倾向于模糊化。如图 1.4 所示。

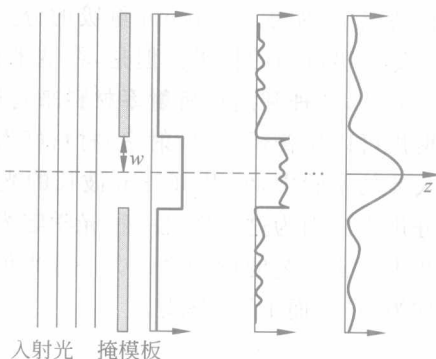


图 1.4 通过不透明挡板上一个小孔的光衍射示意图

当光从模板左侧入射时,在紧靠模板的右侧,照明生成的图形将具有相对清晰的边界,而离模板更远一些,图形就成为图 1.4 中显示的那样^①。在小孔尺寸 $2w$ 、波长 λ 和位置 z 之间有相互影响,不过一般来说,对于固定的位置 z ,小孔相对于波长越小,光束展宽越大。固定小孔的尺寸,我们可以使用更短的波长来得到更清晰的图形。当然,这里忽略了用于聚焦照明光的透镜的存在,不过这可以使我们对通过曝光形成图形技术中波长的作用有一个了解。

在包含透镜的光学曝光工艺中,其分辨率可近似表示为

^① 接触式曝光法就是把光刻胶紧靠在掩模板的后面从而改善分辨率,不过这种方法本身也有一些技术困难。