



Springer

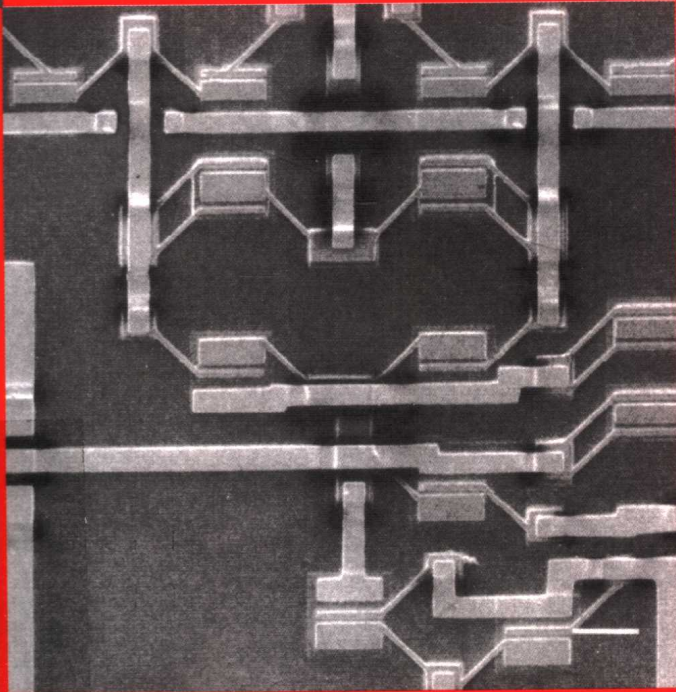
K.Goser P.Glösekötter J.Dienstuhl

纳电子学与纳米系统

Nanoelectronics and Nanosystems

从晶体管
到分子与量子器件

From Transistors
to Molecular
and Quantum
Devices



K·戈瑟
〔德〕P·格洛斯科特 著
J·迪恩斯塔尔

陈贵灿 等译



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS



Nanoelectronics and Nanosystems
From Transistors to Molecular and Quantum Devices

纳电子学与纳米系统

从晶体管到分子与量子器件

K·戈瑟

[德] P·格洛斯科特 著

J·迪恩斯塔尔

陈贵灿 等译



西安交通大学出版社

Xi'an Jiaotong University Press

内容提要

纳电子学是关于纳米器件及其信息处理的电路与系统的理论和技术的新学科。本书叙述了固体纳电子学、分子电子学和生物电子学的有关方面,内容包括:各种纳电子器件(分子器件、量子电子器件、谐振隧穿器件、单电子器件、超导器件、DNA和量子计算等器件)的新效应、新原理与新特性;纳电子学的若干物理基础和 Information 理论基础以及纳电子学发展的物理极限;各种创新的纳米电路与系统的结构与原理。

本书可以作为高等院校电子科学、信息处理、自动控制、计算机、生物、应用物理、电子工程和材料科学等学科的有关专业高年级学生及研究生的教材,也适于有关领域的科学家、工程师及高校师生参考。

Translation from the English language edition:
Nanoelectronics and Nanosystems by Karl Goser, Peter Glösekötter, Jan Dienstuhl
Copyright © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2004
Springer is a part of Springer Science+Business Media
All Rights Reserved

陕西省版权局著作权合同登记号:25-2005-002

图书在版编目(CIP)数据

纳电子学与纳米系统:从晶体管到分子与量子器件/
(德)戈瑟(Goser, K.), (德)格洛斯科特(Glösekötter, P.),
(德)迪恩斯塔尔(Dienstuhl, J.)著;陈贵灿等译.
—西安:西安交通大学出版社,2006.6

书名原文:Nanoelectronics and Nanosystems:From
Transistors to Molecular and Quantum Devices
ISBN 7-5605-2178-9

I. 纳... II. ①戈... ②格... ③迪... ④陈...
III. 纳米系统—电子器件 IV. TN103

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 055652 号

书 名:纳电子学与纳米系统:从晶体管到分子与量子器件
著 者:[德]K·戈瑟 等
译 者:陈贵灿 等
出版发行:西安交通大学出版社
地 址:西安市兴庆南路 25 号(邮编:710049)
电 话:(029)82668357 82667874(发行部)
(029)82668315 82669096(总编办)
电子邮件:xjtupress@163.com
印 刷:西安交通大学印刷厂
字 数:273 千字
开 本:687mm×1012mm 1/16
印 张:19.75
印 次:2006 年 7 月第 1 版 2006 年 7 月第 1 次印刷
印 数:0 001~3 000
书 号:ISBN 7-5605-2178-9/TN·87
定 价:38.00 元

版权所有 侵权必究

译者的话

最近几年关于纳电子学方面的研究十分活跃,纳电子学这门新学科正在迅速发展、引人注目。纳电子学是新兴的纳米科学与技术的重要组成部分,是未来的电子、计算机与信息等科学与技术的基础。纳电子学学科主要包括三个发展方面:固体纳电子学、分子电子学和生物电子学。

固体纳电子学是微电子学发展的必然趋势:在工艺与技术方面,它是微电子学的延续与创新;在理论方面,量子物理将取代经典物理。在SOC发展的同时,经过若干年(例如到2010年),集成电路的特征尺寸可达到10纳米的极限(相应的特征时间小于1皮秒),硅基半导体器件开始进入纳电子学的范围。固体纳电子学将在微电子学取得辉煌成就的基础上继续向前发展,预计可使集成度再提高2~4个数量级,存储量将达到太拉位。

在纳电子学各个方向发展的同时,将会出现结构非常小与复杂性非常高的、以信息处理为主导的各种纳米系统,从而将解决许多目前无法解决的难题,如功耗、产品的成品率和可靠性、并行计算的高效率和旅游推销商等问题。当然,要达到这些诱人的目标,一方面要在探索新材料和新原理的基础上开发出制造纳米结构的各种新工艺和新技术,另一方面系统设计人员要为100亿个(甚至更多)器件开发出合适的体系结构用于革命性的信息处理。

本书是纳电子学的导论,是德国多特蒙德大学一门课程的教材,作为教科书它具有以下特点:

- 内容比较全面,涉及了固体纳电子学、分子电子学和生物电子学的内容。讨论了纳电子学的若干物理基础和信息理论基础、各种纳米电子器件的新效应、新原理与新特性,以及纳电子学发展的物理

极限。

• 本书不仅涉及纳电子学的新工艺和新器件,还以较大的篇幅阐述创新的电路与系统的结构与原理。关于后者,目前的大多数文献均未涉及,正如作者前言所说:“本书的目的在于填补这个空白”。本书还展望了纳米系统和电路的各种应用的前景及其有希望的产品。

• 本书对未来纳米器件与纳米系统的叙述,语言通俗易懂,并附有大量的插图。

本书的内容包括了以下学科的发展趋势:电子科学、信息处理、自动控制、计算机、生物、应用物理、电子工程和材料科学等。从本书的内容可以看到,未来各个学科发展中存在相互交叉、相互融合的一个方面。从本书关于纳米系统的体系结构的探索中可以得到创新思维的启迪。因此,本书可以作为高等院校这些学科的有关专业高年级学生及研究生的教材,也适于有关领域的科学家、工程师及高校师生参考。

本书由陈贵灿组织翻译和审校。参加本书翻译的有:陈贵灿、蔡远利、齐勇、程军、张瑞智、刘纯亮、汪宏、朱长纯、张镇西、李同合、刘润民等。西安交通大学出版社的赵丽萍编审和鲍媛编辑在组织出版和编辑工作中给予了很大的支持,对他们表示衷心的感谢。

译者

2006年5月

于西安交通大学

前 言



近年来,纳电子学迅速地变得越来越重要,并且在微电子学取得显著成就的基础上正不断向前发展。研究纳电子学的大多数文献尽管涉及了它的工艺和器件,但从中几乎找不到关于电路与系统级的内容。很显然,来自纳电子学的挑战不仅在于精细结构和复杂器件的制造,还在于创新系统结构的开发,而且将来的小系统内必须协调地组合亿万万个器件。本书的目的在于填补这个空白。

本书是多特蒙德大学的一门课程的教材。因为该课程在工学院讲授,所以其重点是电子学以及基本物理现象的基本原理。

本书是纳电子学的导论,提供了许多不同技术的综述,并且涵盖了从技术到系统设计的各个方面。在系统的级别上叙述了不同的结构并讨论了重要的系统特征:可量测性、处理功率和可靠性。本书叙述了各种各样的技术(工艺、器件及其电路设计),包括分子技术、量子电子技术、谐振隧穿技术、单电子器件、超导器件、DNA 和量子计算的器件。此外,本书还包括纳电子学与硅技术现状的比较,讨论了纳电子学的极限和信息技术领域中未来纳米电子系统的美好前景。

本书写作的初衷是面向那些从事系统设计的人们,本书的内容不仅涵盖了纳米技术及其器件,还展望了系统和电路的前景,指出了纳电子学的各种应用及其有希望的产品。这本概论可供以下人员阅读:电子工程师、计算机科学工作者、商务人员和物理学家,也可为大学生、初学者和非专业人员提供学习的指南。

许多欧盟(EU)项目和多个欧盟计划形成了纳电子学领域当前研究活动的科学基础。我们要感谢布鲁塞尔的协调人员 Romano Compano 所做的有益的工作。另外,我们要感谢慕尼黑的英飞凌研究实验室的合作者,他们与我们进行了富有成效的讨论。我们还要

感谢德国合作研究中心,特别是合作研究中心 531 的支持,该中心以智能计算方法研究复杂技术过程与系统的设计和管理。

我们还要感谢辅导授课的助教和同事:C. Burwick、A. Kanstein、G. Wirch、M. Rossmann 和 C. Pacha。感谢为本书作图的助教:T. Kliem、G. Sapsford、K. Möschke 和 B. Rückstein。最后,要特别感谢 Karin Goser,他对本书的德文和英文版本进行了校正。

Karl F. Goser

Peter Glösekötter

Jan Dienstuhl

2003 年 7 月,于多特蒙德

目 录

译者的话

前言

第 1 章 发展中的纳电子学

- 1.1 微电子学的发展 (2)
- 1.2 纳电子学的范围 (5)
- 1.3 复杂的问题 (8)
- 1.4 纳电子学提出的挑战 (10)
- 1.5 小结 (12)

第 2 章 硅技术的发展潜力

- 2.1 半导体基础材料 (14)
 - 2.1.1 半导体的能带图 (14)
 - 2.1.2 非均匀半导体结构的能带图 (16)
- 2.2 技术 (17)
 - 2.2.1 不同类型的晶体管 (17)
 - 2.2.2 微细加工技术 (20)
- 2.3 关于硅器件微型化的方法和限制 (23)
 - 2.3.1 按比例缩小 (24)
 - 2.3.2 硅技术发展的里程碑 (26)
 - 2.3.3 对技术极限的估计 (27)
- 2.4 微电子机械系统(MEMS) (32)
 - 2.4.1 微机械技术 (32)
 - 2.4.2 纳电子学的微机械加工 (33)
- 2.5 集成光电子学 (35)
- 2.6 小结 (39)

第 3 章 纳电子学基础

- 3.1 若干物理基础 (42)
 - 3.1.1 电磁场和光子 (42)

3.1.2	作用量、电荷和磁通量的量子化	(44)
3.1.3	电子的波动性(薛定谔方程)	(45)
3.1.4	势阱中的电子	(48)
3.1.5	固体中光子与电子相互作用	(49)
3.1.6	扩散过程	(51)
3.2	信息理论基础	(55)
3.2.1	数据和位	(55)
3.2.2	数据处理	(59)
3.3	小结	(63)
第4章 生物学衍生的思想		
4.1	生物网络	(66)
4.1.1	生物神经元	(66)
4.1.2	神经元细胞的功能	(69)
4.2	生物学衍生的思想	(72)
4.2.1	硅片中的生物神经元细胞	(72)
4.2.2	用 VLSI 电路模拟神经元细胞	(74)
4.2.3	具有局部适应性和分布式数据处理功能的神经网络	(77)
4.3	小结	(80)
第5章 生物化学和量子力学计算机		
5.1	DNA 计算机	(82)
5.1.1	通过化学反应进行信息处理	(82)
5.1.2	纳米计算机	(83)
5.1.3	并行处理	(86)
5.2	量子计算机	(88)
5.2.1	比特和量子比特	(88)
5.2.2	一致与缠结	(91)
5.2.3	量子的并行化	(91)
5.3	小结	(93)
第6章 纳米系统的并行体系结构		
6.1	体系结构原理	(96)
6.1.1	单处理器和多处理器系统	(96)
6.1.2	对于并行数据处理的一些考虑	(98)
6.1.3	延迟时间的影响	(99)

6.1.4	功耗与并行性	(101)
6.2	纳米系统中并行处理的体系结构	(103)
6.2.1	经典脉动阵列	(103)
6.2.2	具有大容量存储器的处理器	(105)
6.2.3	SIMD 和 PIP 结构的处理器阵列	(106)
6.2.4	重构计算机	(108)
6.2.5	作为原型机的 Teramac 原理	(110)
6.3	小结	(112)
第 7 章 软计算与纳电子学		
7.1	软计算方法	(114)
7.1.1	模糊系统	(114)
7.1.2	进化算法	(119)
7.1.3	连接主义系统	(120)
7.1.4	计算智能系统	(123)
7.2	纳电子学中神经网络的特点	(124)
7.2.1	局部处理	(124)
7.2.2	分布式与容错存储	(125)
7.2.3	自组织	(127)
7.3	小结	(129)
第 8 章 复杂集成系统及其性质		
8.1	作为信息处理机的纳米系统	(132)
8.1.1	作为功能块的纳米系统	(132)
8.1.2	作为信息修正的信息处理	(133)
8.2	系统设计及其接口	(135)
8.3	进化硬件	(137)
8.4	对纳米系统的要求	(138)
8.5	小结	(140)
第 9 章 集成开关与基本电路		
9.1	开关和互连线	(142)
9.1.1	理想开关和实际开关	(142)
9.1.2	实际互连和理想互连	(146)
9.2	典型集成开关及其基本电路	(150)
9.2.1	典型开关实例:晶体管	(150)

9.2.2	常规的基本电路	(151)
9.2.3	阈值门	(153)
9.2.4	Fredkin 门	(156)
9.3	小结	(158)
第 10 章 量子电子学		
10.1	量子电子器件	(160)
10.1.1	即将出现的电子器件	(160)
10.1.2	介观结构中的电子	(162)
10.2	量子电子器件举例	(164)
10.2.1	短沟道 MOS 晶体管	(164)
10.2.2	分裂栅晶体管	(166)
10.2.3	电子波晶体管	(167)
10.2.4	电子自旋晶体管	(169)
10.2.5	量子单元自动机	(169)
10.2.6	量子点阵列	(173)
10.3	小结	(175)
第 11 章 生物电子学与分子电子学		
11.1	生物电子学	(178)
11.1.1	分子处理器	(179)
11.1.2	作为生物芯片的 DNA 分析器	(182)
11.2	分子电子学	(183)
11.2.1	概述	(183)
11.2.2	基于富勒聚合物和纳米管的开关技术	(185)
11.2.3	聚合体电子	(186)
11.2.4	自装配电路	(189)
11.2.5	光学分子存储器	(191)
11.3	小结	(193)
第 12 章 隧穿器件纳电子学		
12.1	隧穿元件	(196)
12.1.1	隧道效应和隧穿元件	(196)
12.1.2	隧穿二极管	(199)
12.1.3	谐振隧穿二极管	(202)
12.1.4	三端谐振隧穿器件	(205)

12.2	谐振隧穿二极管的工艺	(206)
12.3	基于 RTD 的数字电路设计	(209)
12.3.1	存储器中的应用	(209)
12.3.2	基本的逻辑电路	(209)
12.3.3	动态逻辑门	(210)
12.4	基于 RTBT 的数字电路设计	(214)
12.4.1	RTBT 型 MOBILE	(214)
12.4.2	RTBT 阈值门	(216)
12.4.3	基于 RTBT 的多路复用器	(217)
12.5	小结	(219)
第 13 章 单电子晶体管		
13.1	单电子晶体管的原理	(222)
13.1.1	库仑阻塞	(222)
13.1.2	单电子晶体管的性能	(223)
13.1.3	工艺技术	(227)
13.2	SET 的电路设计	(229)
13.2.1	布线与驱动	(229)
13.2.2	逻辑与存储电路	(230)
13.2.3	作为分布电路的一个实例的 SET 加法器	(233)
13.3	FET 与 SET 两种电路设计的比较	(235)
13.4	小结	(236)
第 14 章 超导器件纳电子学		
14.1	基础	(238)
14.1.1	宏观性能	(238)
14.1.2	宏观模型	(240)
14.2	超导开关器件	(241)
14.2.1	低温管	(241)
14.2.2	约瑟夫森隧道器件	(242)
14.3	基本电路	(244)
14.3.1	存储单元	(244)
14.3.2	联想或内容寻址存储器	(245)
14.3.3	超导量子干涉器件	(245)
14.4	磁通量子器件	(246)

14.4.1	LC 门	(246)
14.4.2	磁通量子-量子单元自动机	(247)
14.4.3	具有单磁通器件的量子计算机	(248)
14.4.4	单磁通量子器件	(248)
14.4.5	快速单磁通量子器件	(250)
14.5	超导器件的应用	(251)
14.5.1	集成电子电路	(251)
14.5.2	与场效应晶体管电子电路的对比	(252)
14.5.3	电标准	(254)
14.6	小结	(255)
第 15 章 集成电子学的极限		
15.1	对极限的观察	(258)
15.2	工艺的更替	(259)
15.3	电源和散热	(260)
15.4	参数值散布导致的限制效应	(264)
15.5	粒子热运动导致的极限	(270)
15.5.1	德拜长度	(270)
15.5.2	热噪声	(271)
15.6	可靠性作为极限因子	(272)
15.7	物理极限	(276)
15.7.1	热力学极限	(277)
15.7.2	相对论极限	(278)
15.7.3	量子力学极限	(279)
15.7.4	隧道效应和热噪声引起的相等失效几率	(279)
15.8	小结	(280)
第 16 章 集成电子系统的最终目标		
16.1	由纳米计算机消除不确定性	(282)
16.2	纳米系统中的不确定性	(284)
16.3	纳电子学发展中的不确定性	(285)
16.4	小结	(287)

参考文献

索引

第 1 章

发展中的纳电子学

- 1.1 微电子学的发展
- 1.2 纳电子学的范围
- 1.3 复杂的问题
- 1.4 纳电子学提出的挑战
- 1.5 小结

过去的经验表明,由于集成电路尺寸的减小,微电子技术始终在不断地进步,电子工业的产品已变得更加可靠、速度更快、功能更强和价廉物美。这些优势成为现代微电子工业发展的动力。这种发展的长期目标将导致纳米电子学(译者注:与微电子学相对应,本书较多地称为纳电子学)的产生。最初的微电子元件和系统相当昂贵,只有在宇宙飞行中才适于使用。今天,作为主要元件的集成电路被应用在广阔的领域中。半导体硅是微电子电路产品中最重要的材料。实际上,硅技术的限制来自制造工艺,而不是硅本身或物理定律。

在 1960 年的微电子技术发展之初,其发展的道路并不清楚。当时需要使用固体开关是显而易见的,而关于电路必须集成到硅上却完全不明显。通过几十年固体材料的广泛研究,双极晶体管的发明(巴丁、布里顿、肖克莱,1948 年)才可能出现。这种开拓性的工作获得了诺贝尔奖。至关重要,贝尔电报电话公司和发明者们都与大众共享他们的知识,而且进一步的发展不受专利的限制。1959 年 Kilby 和 Noice 发明了集成电路,在单个芯片上集成了一些晶体管和一些电阻,其成就同样是惊人的。为此,Kilby 得到了 2000 年的诺贝尔奖。我们现在可以看到,这种思想对微电子电路是正确的。然而,另一些思想并不那样引人注目,但它们同样影响着微电子技术的发展。这些思想的一些例子是:平面技术、微处理概念(1971 年 Hoff 关于 4004 微处理器)、MOS 器件的等比例缩小(丹纳德,1973 年)和设计规则的工艺不变接口(technology-invariant interface,米德和康韦,1980 年)^[1]。

作为一种基本的技术,微电子的意义在于被市场完全接收。今天我们认识到,微电子技术对于现在和将来的信息系统是十分重要的关键技术。将来,信息技术不断要求功能更强的微电子电路,将迫使它向纳电子学过渡。

1.1 微电子学的发展

微电子学的进步可以用过去几十年发展的集成度来表示。图 1.1 表

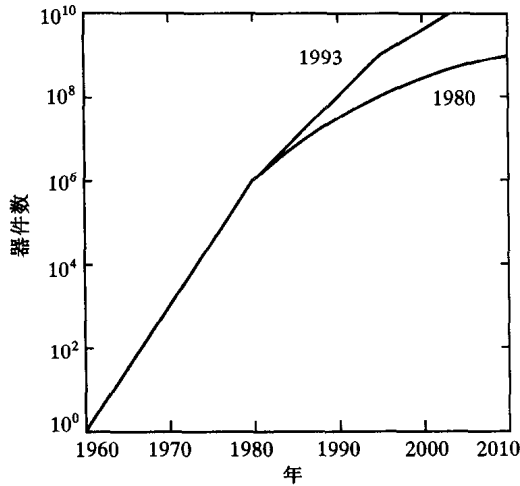


图 1.1 最高密度的存储器芯片的集成度。在过去的的时间里,集成度每 18 个月翻一番。1980 年由 J. Meindl 预测的规律被 1993 年的曲线替代,而实际的发展速度比这些预期的更快

示了 1980 年 J. Meindl 预测的发展曲线^[2]。戈登·摩尔(英特尔的创始人之一)提出了这种规律的表述。摩尔图表说明:集成度每 18 个月翻一番。图 1.1 表示了两种趋势,它们均对实际的发展过于保守,均应修正成更高水平的数值^[3]。今天我们具有的硅存储器芯片,其容量为 160 Gbit(4 Gbit 可以存储一部电影)。

微电子的这些趋势曲线表明了器件、系统或其他参数的基本特性,而且根据这些趋势可以推断将来的发展。这些定律主要是基于商业管理规律,并不是物理定律。这些定律之所以有效,是因为许多人工作在相同的经济条件和技术前提下以及处在相同的稳定社会中。在这种条件下,进步是连续不断的。此外,在科学定律允许这种发展的前提下上述的定律才是有效的。目前,正如本书第 15 章所叙述的那样,自然规律所规定的各种极限仍不会成为现实。

集成电路发明以来,我们可以看到集成电路的许多特性发生了数量级的变化(图 1.2)。如果我们考虑存储或处理 1 bit 所需要的原子数,我们可

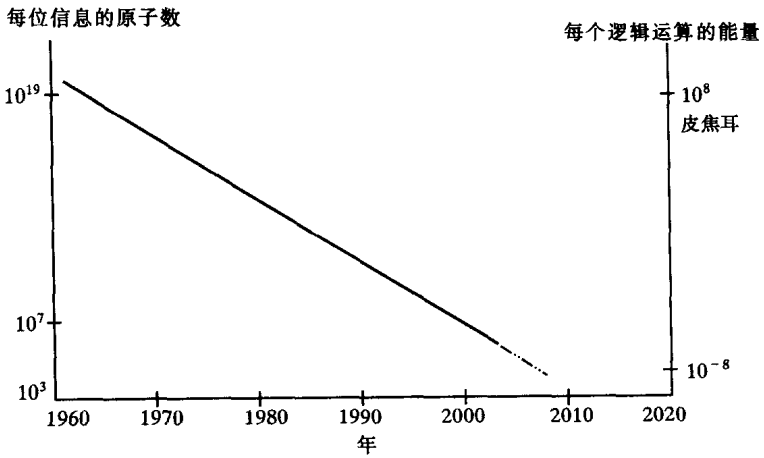


图 1.2 集成电路的发展表明各方面呈数量级的变化。运算操作 1 bit 所需的原子数和开关能量减小几个数量级

以看到惊人的发展。1960 年一个晶体管包含 10^{20} 个原子和 0.1 cm^3 的体积；2000 年减小为 10^7 个原子和 $0.01 \text{ }\mu\text{m}^3$ 。存储或运算操作 1 bit 所需的能量同样减小了，原因是对电容充、放电的能量减小了：电容器的面积从 1 cm^2 减至 $0.01 \text{ }\mu\text{m}^2$ ；电容器上的电压从 10 V 减至 1 V。12 个数量级的这种变化是微电子技术能达到如此高的集成度而不会出现功耗和过热问题的必要前提。

集成度的提高首先是由于器件特征尺寸的减小，其次是由于芯片面积的增大和功能的集成(图 1.3)。假定 2010 年硅技术能进一步小型化到大约 10 nm，则这个发展的过程中会受到许多限制。功能集成和三维集成是克服限制的可能的解决方案，另一种方案是纳电子学。

纳电子学将提供更高的集成度，比 2010 年微电子所能达到的高约 2~4 个数量级。因此我们可以预计，那时储存器的容量将达到太拉位(10^{12} bit)。纳电子学的特性是具有非常小的结构和非常高的复杂性。后继的各章将讨论这两个特性。