

纳|米|科|学|进|展|系|列

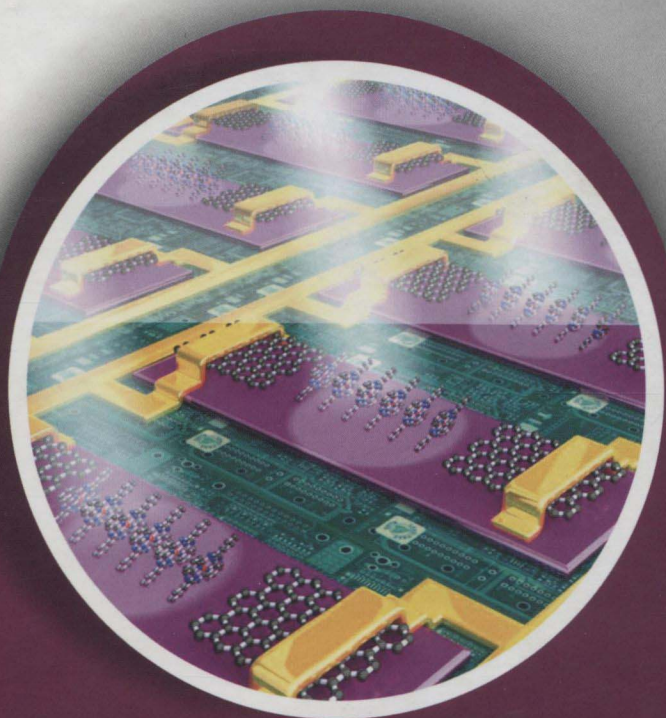
纳电子学

纳米线，分子电子学和纳米器件

Nanoelectronics

Nanowires, Molecular Electronics, and Nanodevices

Krzysztof Iniewski



科学出版社

Nanoelectronics

Nanowires, Molecular Electronics,
and Nanodevices

纳电子学

纳米线，分子电子学和纳米器件

Edited by

Krzysztof Iniewski



科学出版社

北京

图字: 01-2011-3998 号

Krzysztof Iniewski

Nanoelectronics; Nanowires, Molecular Electronics, and Nanodevices

ISBN: 978-0-07-166488-6

Copyright © 2011 by The McGraw-Hill Companies, Inc.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including without limitation photocopying, recording, taping, or any database, information or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

This authorized Bilingual edition is jointly published by McGraw-Hill Education (Asia) and Science Press. This edition is authorized for sale in the People's Republic of China only, excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan.

Copyright © 2011 by McGraw-Hill Education (Asia), a division of the Singapore Branch of The McGraw-Hill Companies, Inc. and Science Press.

版权所有。未经出版人事先书面许可, 对本出版物的任何部分不得以任何方式或途径复制或传播, 包括但不限于复印、录制、录音, 或通过任何数据库、信息或可检索的系统。

本授权双语版由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司和科学出版社合作出版。此版本经授权仅限在中华人民共和国境内(不包括香港特别行政区、澳门特别行政区和台湾)销售。

版权© 2011 由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司与科学出版社所有。本书封面贴有 McGraw-Hill 公司防伪标签, 无标签者不得销售。

本版本只限于在中华人民共和国境内销售

图书在版编目(CIP)数据

纳电子学: 纳米线, 分子电子学及纳米器件 = Nanoelectronics; Nanowires, Molecular electronics, and Nanodevices: 英文/ (波) 印纽斯基 (Iniewski, K.) 编著. —北京: 科学出版社, 2011.9

ISBN 978-7-03-032263-0

I. 纳… II. 印… III. 纳米材料—电子器件—英文 IV. TN103

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 179579 号

责任编辑: 田慎鹏/责任印制: 钱玉芬

封面设计: 耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

http://www.sciencep.com

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 9 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2011 年 9 月第一次印刷 印张: 35.5

印数: 1—1 500 字数: 710 000

定价: 150.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

导 读

本书的编者长期在学术及工业界工作,汇集了30多位国际纳电子器件研究领域的学者和专家,他们长期在世界上(美国、意大利、加拿大、瑞士、德国等国)的顶级大学、国际知名研究机构和工业界从事纳电子学的教学、研究及实践工作。他们的研究工作属于国际一流水平,各章节内容基本基于各位作者自己的研究工作。本书由三个基本独立的部分组成:纳米线、分子电子器件和纳米器件,介绍了纳电子学的一些重要研究领域,对于从事相关领域研究的科研人员有一定的参考价值,可以作为研究人员和工程技术人员的参考书。但全书系统性不强,内容稍显杂乱,不适合作为本科生或研究生的教科书。

第1章综述了金属纳米线的电特性,介绍了纳米线的基本电特性,如电阻率及电阻率的温度系数,讨论了诸如尺寸和表面效应等参数在纳米尺度下对于电特性的影响。最后讨论了金属纳米线的失效机制,如焦耳热和电致迁移引起的失效,为进行纳米尺度电系统设计的研究人员提供了有用的信息,使他们能够在制作器件前了解相关纳米线的基本电特性。

第2章讨论了影响铜互联线质量的几种因素,包括电迁移、金属晶体结构和微结构等。本章给出了互联线失效研究的具体实验过程和结果,分析了失效机理。在集成电路中连接不同器件的材料被称作互联,它是集成电路中信息传输的途径。集成电路的性能随着元件尺寸的缩小不断提高。随着原件最小尺寸进入纳米尺度,现在普遍接受的观点是集成电路总体性能由所集成的器件连接在一起的效率,而不是由单个器件的速度决定。由于意识到了铜的高电导率有一些决定性的优点,使得信号在芯片上可以传播的更快。半导体行业这些年来逐渐开始了从铝基到铜基互联的转变。这样可以使芯片拥有更快的速度和更高的效率。

第3章介绍作为互联线的碳纳米管的研究现状。集成电路的性能在过去几十年通过晶体管和互联线的微型化得到了稳步的提高。除了缩小基本单元的尺寸,新的材料不断地被引入集成电路的制造过程中,以进一步提高它们的性能。现在最先进的集成电路在一个一平方厘米大小的硅芯片上,集成了几百万个(甚至几十亿个)晶体管,数公里长的铜线将它们连在一起。在一个单独芯片上的晶体管数目预期将进一步增加,在未来需要用更小的晶体管和更细的铜导线。但是,尺寸缩小降低了互联线在延时、信号保真和可靠性等方面的性能,因此互联线被认为是进一步小型化进程的重要障碍,要求我们必须探索新的材料作

为未来硅芯片的互联线。由于金属碳纳米管所具有的优良电特性，它们有可能成为未来集成电路互联线的材料。本章讨论了作为互联线的碳纳米管性能，仿真结果显示利用碳纳米管可以得到更有能量效率和更快的集成电路。

第4章综述了纳米线的制备、结构及电学光学性能表征、纳米线组合器件的制备，以及用印刷工艺制备各种纳米线器件。纳米线是一类可以在固体和柔性衬底上制备具有所需功能的各类器件的新型合成电子材料。虽然在其合成和制备工艺上有了很大进展，但目前还不知道它们是否具有大面积高均匀度和高度复杂性使其能够用在集成电路制造中。不过到目前为止，大面积的简单电路元件显示了它们的多面性和在大规模集成电路中的应用前景。

第5章介绍印刷有机电子学。印刷有机电子学是一项新颖的非传统技术，有望根本改变电子学并带来新的应用前景。有机电子学提供了许多和标准非有机电子学不兼容的有魅力的可能性。利用低成本和低温技术制作廉价和大面积的器件的可能性，使有机电子学非常适合在塑料衬底的柔性应用，因此提供了非常宽范围的新应用的可能。从1983年第一个有机薄膜晶体管的实现，提高有机材料的性能和发展用于低成本电子的新颖的积淀和制造技术已成为研究重点。到目前为止，已开展了大量有机薄膜晶体管在不同领域的应用研究，如可卷曲显示屏的有机发光二极管的底板、化学和生物传感器、RFID相关的简单逻辑电路、薄膜电池和电子纸等诸多功能系统。本章讨论了目前采用的有机电子学的技术框架并综述在该领域的进展，介绍了印刷和压印工艺，给出了最小尺寸达到200纳米的成型结果。所选择的制造工艺代表了制造有机器件如有机薄膜晶体管的完整工艺流程的关键部分。

第6章综述了用各种纳米线及除碳纳米管以外的纳米管进行化学和生物传感的新进展。

第7章介绍了横截面成像在复杂结构分析中的应用。介绍了截面的制备过程，重点放在如何在保持材料结构完整性的条件下对纳米和有机物器件作电子显微研究。接下来，给出两个不同的材料类型的横截面的制备和检查过程，包括有机纳米粒子集合和复杂聚合物器件。最后讨论横截面研究如何能够对其他系统的研究提供新的有价值的帮助。

第8章介绍纳米颗粒掺杂的导电聚合物的微细加工和应用。聚合物材料在微电子学和其他微系统应用中得到了越来越多的应用。聚合物和其他材料相比有很多优点，例如低成本，机械性能如柔展性和机械屈服性，以及很容易低成本加工等。本章讨论纳米结构聚合物的一般性质，纳米结构聚合物可以通过将纳米粒子（纳米尺寸的薄片，球体，圆柱体和管等）埋置在作为基体的聚合物网络中得到。有时候加入其他的聚合物或其他材料以增加聚合物的性能或帮助纳米粒子扩散。本章讨论了导电纳米结构聚合物常用的不同纳米粒子材料和形

态,主要讲到可微细加工的导电纳米结构聚合物。列出不同纳米粒子掺杂物,讨论了每种材料有代表性的研究,它的制备和微加工工艺,以及导电纳米结构聚合物的典型应用。

第9章综述了制备单电子器件的方法,包括采用有机材料和固体半导体材料的实验,并对过去20年的相关专利做了综述。现在集成电路芯片生产在90纳米节点技术,预期将在下一个15年内达到小于10纳米的范畴。利用现有器件看起来并不能实现继续小型化,单电子晶体管可以视为晶体管小型化的终极产物,有可能在未来大规模集成电路中得以应用。自从1986年第一篇理论文章预测库仑阻塞效应出现后,已有大量研究来制造基于单电子俘获的晶体管。在最初十年里,已制造出可以在几度绝对温度工作的器件,第一个可以在室温工作的器件出现在1997年的文献中。

第10章介绍超分子结构。从定义完好的分子前体组装而成的超分子材料已在许多领域得到了应用。虽然集成电路工业可以制作纳米结构元件,不过在软材料领域采取类似的工艺却是非常困难。而利用自组装技术可以制造一维、二维和三维尺寸在1到100纳米范围的先进材料。本章首先讨论一些构造超分子材料需要交换的焓和熵的额度,并强调如何用它们来构造新颖的电子结构。有机电子材料在许多临床生物材料应用中已变得非常重要,将它们的尺寸降到纳米尺度将有可能带来许多新颖治疗方法。随后讨论有机生物电子目前的最好水平,并讨论将有机电子材料制作成和细胞外网络的结构单元类似的一维纳米尺度微丝的新进展。

第11章介绍锂离子电池中所用到的纳米结构。锂离子电池是一种重量轻、效率高的可充电电源。传统结构的锂离子电池,虽然能量密度高,但其功率密度却比较低。解决这个问题的一個方法是利用纳米结构电极材料来提供大的表面积和短的扩散路径,本章介绍了一系列的纳米结构阴极和阳极材料。

第12章回顾了单电子器件运行的基本物理原理,介绍了小尺寸器件中的经典单电子效应及传统理论,讨论了由于小尺寸而引入的量子效应。本章的后半部分介绍了基于碳纳米管的量子点器件。每一小节给出了在局部改变碳纳米管电特性的一种特定效应,随后讨论了制作碳纳米管量子点的各种方法。

第13章介绍了作为电机械促动器的单个碳纳米管,讨论了仿真和初步试验结果。缩小集成电子电路和机械装置的愿望,产生了微机电系统(MEMS),现在更促进了纳米尺度的机械装置的发展。人们设想亚微米尺度的机器和促动器能够移动单个原子和分子而生成人造纳米结构。虽然纳米轮子和别的类似结构已被演示,纳米尺度的机械操纵和能够可控施加大作用力的微型促动器的缺乏依然是面临的挑战。本章首先综述了碳纳米管促动器的研究,在介绍了这种纳米促动器的背景和潜力后,从理论、仿真和实验几个方面综述了单个碳纳米管

促动器的研究。

第 14 章讨论纳米尺度的微弱电信号测量。纳米技术有可能在很多方面提高我们的生活质量。为了能够使这些变为现实,研究者必须能够迅速和准确地表征这些纳米材料和器件的特性。光学和电子光学表征技术,如扫描电镜、发射显微镜、原子力显微镜等可以提供纳米结构有用的信息,但是电学测量是得到纳米材料表面以下发生的现象的基本手段。纳米材料和结构的电学测量的一个主要挑战是极低的信号电平。另一个挑战是这些材料和元件可能显示的表象非常宽泛。本章给出了对纳米材料和器件的微弱直流和脉冲信号进行精确测量的最好的实际操作步骤。这些信息有助于理解在实验室观测到的微弱信号,并能够帮助了解测量微弱电流、高电阻、低电压和低电阻时的理论和实际考虑。

第 15 章介绍纳米 ESD: 纳米电子学时代的静电放电。随着半导体电子器件的缩小,静电放电现象变得更加严重。进行这方面的研究是为了能够制造纳米结构而使它们不被静态电荷和静电放电现象损坏。本章首先讨论当器件中有空气间隙或暴露表面时 ESD 失效的例子,不管这些器件是机械上静态的还是动态的结构。本章重点讨论光刻板,磁存储器件和微机电器件 (MEMS),不过这个问题和所有静电促动和悬浮结构 (如电容器和电感器) 都有关。本章随后讨论硅器件,从体材料 CMOS 到硅在绝缘体 (SOD),以及纳米结构 FINFET 和纳米线等。

第 16 章有关纳米封装。电子器件封装目前的关注点是热、嵌入式无源器件和三维封装,本章综述了和这些内容相关的纳米封装的最新进展。

陈 炜

清华大学微电子研究所

前 言

纳电子学是一门新兴的多学科领域，具有广泛的应用前景。目前，虽然没有一个纳电子学的确切定义，但通常认为它是一种在纳米尺度控制物质以建造具有新颖特性（物理的、化学的或生物的）和功能（例如，量子效应）的新型材料的能力。近年来，由于它们迷人的性能，以及作为电子学、光电子学和传感器应用的基本组件的可能性，新型纳米材料和器件结构吸引了研究人员的广泛关注。

这些年来，已有很多替代传统 CMOS 晶体管的新型开关器件的研究。这些包括不同的量子器件（如单电子晶体管和量子点），其中一些在本书中有所讨论。虽然这些的替代品可以提高器件速度，但无法解决连接器件的导线所固有的根本问题，需要考虑的重要因素是器件驱动导线的的能力。为此，在本书的第一部分专门讨论纳米线。其中第 1 章给出了电性能的一般引言，第 2 章考虑铜互联线和相关的电迁移问题，基于碳纳米管的未来的互联线在第 3 章进行讨论，第 4 章介绍了纳米线集成电路的创新的制作方法。

纳电子学的第二个支柱和分子有关。科学家们在逐步了解细胞工程的基础上，提出了许多分子电子器件方案。我们应该认识到利用这些器件的经典计算是没有效率的，它们太慢而且不可靠。但是，用它们来制作材料和从环境感知信号却是非常好。它们也许能够改变活的组织使其具有不同的反应。为此，本书的第二部分专门讨论分子电子学。

第 5 章介绍了令人兴奋的印刷有机电子学技术。第 6 章讨论利用纳米结构的化学传感，而第 7 章有关复杂有机结构分析。第 8 章介绍纳米粒子掺杂聚合物的应用。第 9 章描述了有机单电子器件。第二部分的最后一章介绍合成超分子生物电子纳米结构。

最后，本书的第三部分介绍了纳米器件相关的一些内容。第 11 章给出了用于新型电池的纳米结构电极材料。第 12 章和 13 章用来讨论碳纳米管的不同应用。纳米尺度的测量在第 14 章讨论。而纳米器件的 ESD 保护在第 15 章。本书最后讨论纳米封装，一个使纳米器件成为现实的常常被忽略但重要的问题。

很高兴我有这样一个机会编撰本书，希望读者也能够喜欢这本书。纳电子学充满了令人兴奋的可能性，我相信我们仅仅看到了它能够完成的任务中很小的一部分。

克里斯托夫·印纽斯基

（陈炜 译）

List of Authors

- Chuan Cai** *Department of Mechanical Engineering, Louisiana State University, Baton Rouge, LA (CHAP. 11)*
- Sandro Carrara** *EPFL—Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne, Switzerland (CHAP. 9)*
- Gael F. Close** *IBM Research Laboratory, Zurich, Switzerland (CHAP. 3)*
- Stephen R. Diegelmann** *Johns Hopkins University, Baltimore, MD (CHAP. 10)*
- Zhiyong Fan** *University of California at Berkeley, Berkeley, CA (CHAP. 4)*
- Luigi Fortuna** *Dipartimento di Ingegneria Elettrica Elettronica e dei Sistemi, Università degli Studi di Catania, Italy (CHAP. 5)*
- Mattia Frasca** *Dipartimento di Ingegneria Elettrica Elettronica e dei Sistemi, Università degli Studi di Catania, Italy (CHAP. 5)*
- Bonnie L. Gray** *Engineering Science, Simon Fraser University, Burnaby, BC, Canada (CHAP. 8)*
- Dongsheng Guan** *Department of Mechanical Engineering, Louisiana State University, Baton Rouge, LA (CHAP. 11)*
- Johnny Chung Yin Ho** *University of California at Berkeley, Berkeley, CA (CHAP. 4)*
- Qiaojian Huang** *University of Illinois at Chicago, Chicago, IL (CHAP. 1)*
- Ali Javey** *University of California at Berkeley, Berkeley, CA (CHAP. 4)*
- Ajit Khosla** *Engineering Science, Simon Fraser University, Burnaby, BC, Canada (CHAP. 8)*
- Manuela La Rosa** *Technology R&D, ST Microelectronics, Italy (CHAP. 5)*
- Carmen M. Lilley** *Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Illinois at Chicago, Chicago, IL (CHAP. 1)*

- Aihua Liu** *Qingdao Institute of Bioenergy and Bioprocess Technology, Chinese Academy of Sciences, China (CHAP. 6)*
- John D. W. Madden** *Department of Electrical and Computer Engineering, University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada (CHAP. 13)*
- Nunzia Malagnino** *Technology R&D, ST Microelectronics, Italy (CHAP. 5)*
- Alessandro Marcellino** *Technology R&D, ST Microelectronics, Italy (CHAP. 5)*
- Tissaphern Mirfakhrai** *Department of Electrical and Computer Engineering, University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada (CHAP. 13)*
- Kabir Mirpuri** *Intel Corp., Chandler, AZ (CHAP. 2)*
- James E. Morris** *Department of Electrical & Computer Engineering, Portland State University, Portland, OR (CHAP. 16)*
- Ali Kashefian Naieni** *Department of Electrical and Computer Engineering, University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada (CHAP. 12)*
- Donata Nicolosi** *Technology R&D, ST Microelectronics, Italy (CHAP. 5)*
- Alireza Nojeh** *Department of Electrical and Computer Engineering, University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada (CHAP. 12)*
- Luigi Occhipinti** *Technology R&D, ST Microelectronics, Italy (CHAP. 5)*
- Fabrizio Porro** *Technology R&D, ST Microelectronics, Italy (CHAP. 5)*
- Giovanni Sicurella** *Technology R&D, ST Microelectronics, Italy (CHAP. 5)*
- David W. Steuerma** *University of Victoria, Victoria, BC, Canada (CHAP. 7)*
- Jerzy Szpunar** *Department of Mining and Materials Engineering, Montreal, QC, Canada (CHAP. 2)*
- John D. Tovar** *Johns Hopkins University, Baltimore, MD (CHAP. 10)*
- Jonathan Tucker** *Keithley Instruments, Inc., Cleveland, OH (CHAP. 14)*
- Elena Umana** *Dipartimento di Ingegneria Elettrica Elettronica e dei Sistemi, Università degli Studi di Catania, Italy (CHAP. 5)*
- Raffaele Vecchione** *Technology R&D, ST Microelectronics, Italy (CHAP. 5)*
- Steven H. Voldman** *IEEE Fellow, Vermont (CHAP. 15)*

Brian D. Wall *Johns Hopkins University, Baltimore, MD* (CHAP. 10)

Erich C. Walter *3M Display and Graphics Business Laboratory, 3M Center, St. Paul, MN* (CHAP. 7)

Ying Wang *Department of Mechanical Engineering, Louisiana State University, Baton Rouge, LA* (CHAP. 11)

Horst Wendrock *IFW-Dresden, Dresden, Germany* (CHAP. 2)

Preface

Nanoelectronics is an emerging, enabling, and multidisciplinary field with a wide range of potential applications. Although no single definition of nanoelectronics exists, it is commonly understood as an ability to control matter on a nanometer scale for the construction of new materials with novel properties (physical, chemical, and biological) and functions (e.g., quantum effects). In recent years, new nanomaterials and device structures have attracted an enormous amount of attention because of their fascinating properties and potential as building blocks for electronics, optoelectronics, and sensor applications.

Over the years, there have been many proposals for new electronic switching elements that could replace traditional CMOS transistors. They include various quantum devices (such as single-electron transistors and quantum dots), some of which are described in this book. Although this replacement improves the intrinsic device speed, it does not solve a key problem with the wires that connect devices. In most integrated circuits, a significant consideration is the ability of the devices to drive the wires. For this reason, we have devoted Part I of the book to the topic of nanowires.

Chapter 1 provides a general introduction to electrical properties, and Chapter 2 deals with copper interconnect lines and related electromigration problems. Futuristic interconnects based on carbon nanotubes are described in Chapter 3. Finally, Chapter 4 presents innovative ways of producing nanowire integrated circuitry.

A second important thrust in nanoelectronics is related to molecules. Scientists are beginning to understand cell engineering, and various molecular devices have been proposed. One should keep in mind that classical computing with these devices is not efficient; they are simply too slow and unreliable. However, they can be very good for creating materials and sensing signals from the environment, and they can possibly modify living tissue so that it acts

differently. For these reasons, Part II of the book is devoted to molecular electronics.

Chapter 5 introduces the exciting technology of printed organic electronics. Chapter 6 describes nanostructure-enabled chemical sensing, whereas Chapter 7 deals with the analysis of complex organic structures. Chapter 8 describes applications of nanoparticle-doped polymers, and Chapter 9 characterizes single-electron organic devices. Part II of the book closes with a chapter on developments toward the synthesis of supermolecular bioelectronic nanostructures.

Finally, Part III of the book deals with various phenomena related to nanodevices. Chapter 11 provides an introduction to nanostructured electrode materials for advanced battery concepts. Chapters 12 and 13 are devoted to various aspects of carbon nanotubes. Measurements at the nanoscale are treated in Chapter 14 and ESD protection for nanodevices in Chapter 15. The book closes with the topic of nanopackaging, a frequently omitted but critical topic in making nanodevices a reality.

I hope the reader enjoys reading this book as much as I enjoyed putting it together. Nanoelectronics is full of exciting potential, and I am sure we have seen only a small part of what it can accomplish.

Krzysztof (Kris) Iniewski
Vancouver, BC

Nanoelectronics

