



纳米科学与技术

纳米传感器

物理、化学和生物传感器

〔印〕 V. K. 康纳 著
张文栋 等 译



科学出版社



纳米科学与技术

纳米传感器

物理、化学和生物传感器

(印) V.K. 康纳⁴著

张文栋 等 译



科学出版社

北京

图字: 01-2013-6657 号

Nanosensors: Physical, Chemical, and Biological/ by Vinod Kumar Khanna/ ISBN: 978-1-4398-2712-3

Copyright© 2012 by CRC Press.

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC; All rights reserved. 本书原版由 Taylor & Francis 出版集团旗下 CRC 出版公司出版, 并经其授权翻译出版。版权所有, 侵权必究。

Science Press is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (simplified characters) language edition. This edition is authorized for sale throughout Mainland of China. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher. 本书中文简体翻译版授权由科学出版社独家出版并仅限在中国大陆地区销售。未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal. 本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签, 无标签者不得销售。

图书在版编目 (CIP) 数据

纳米科学与技术 / 白春礼总主编. —北京: 科学出版社, 2014

国家出版基金项目

ISBN 978-7-03-042826-4

I. ①纳… II. ①白… III. ①纳米技术 IV. ①TB383

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 299072 号

丛书策划: 杨 震 / 责任编辑: 顾英利 高 微 / 责任校对: 邹慧卿

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 陈 敬

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>

北京厚德则铭印刷科技有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2015 年 1 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2015 年 1 月第一次印刷 印张: 32 1/4

字数: 660 000

定价: 12 000.00 元 (全 80 册)

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《纳米科学与技术》丛书编委会

顾 问 韩启德 师昌绪 严东生 张存浩

主 编 白春礼

常务副主编 侯建国

副主编 朱道本 解思深 范守善 林 鹏

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

陈小明	封松林	傅小锋	顾 宁	汲培文	李述汤
李亚栋	梁 伟	梁文平	刘 明	卢秉恒	强伯勤
任咏华	万立骏	王 琛	王中林	薛其坤	薛增泉
姚建年	张先恩	张幼怡	赵宇亮	郑厚植	郑兰荪
周兆英	朱 星				

《纳米科学与技术》丛书序

在新兴前沿领域的快速发展过程中,及时整理、归纳、出版前沿科学的系统性专著,一直是发达国家在国家层面上推动科学技术发展的重要手段,是一个国家保持科学技术的领先权和引领作用的重要策略之一。

科学技术的发展和应用,离不开知识的传播:我们从事科学研究,得到了“数据”(论文),这只是“信息”。将相关的大量信息进行整理、分析,使之形成体系并付诸实践,才变成“知识”。信息和知识如果不能交流,就没有用处,所以需要“传播”(出版),这样才能被更多的人“应用”,被更有效地应用,被更准确地应用,知识才能产生更大的社会效益,国家才能在越来越高的水平上发展。所以,数据→信息→知识→传播→应用→效益→发展,这是科学技术推动社会发展的基本流程。其中,知识的传播,无疑具有桥梁的作用。

整个 20 世纪,我国在及时地编辑、归纳、出版各个领域的科学技术前沿的系列专著方面,已经大大地落后于科技发达国家,其中的原因有许多,我认为更主要的是缘于科学文化的习惯不同:中国科学家不习惯去花时间整理和梳理自己所从事的研究领域的知识,将其变成具有系统性的知识结构。所以,很多学科领域的第一本原创性“教科书”,大都来自欧美国家。当然,真正优秀的著作不仅需要花费时间和精力,更重要的是要有自己的学术思想以及对这个学科领域充分把握和高度概括的学术能力。

纳米科技已经成为 21 世纪前沿科学技术的代表领域之一,其对经济和社会发展所产生的潜在影响,已经成为全球关注的焦点。国际纯粹与应用化学联合会(IUPAC)会刊在 2006 年 12 月评论:“现在的发达国家如果不发展纳米科技,今后必将沦为第三世界发展中国家。”因此,世界各国,尤其是科技强国,都将发展纳米科技作为国家战略。

兴起于 20 世纪后期的纳米科技,给我国提供了与科技发达国家同步发展的良好机遇。目前,各国政府都在加大力度出版纳米科技领域的教材、专著以及科普读物。在我国,纳米科技领域尚没有一套能够系统、科学地展现纳米科学技术各个方面前沿进展的系统性专著。因此,国家纳米科学中心与科学出版社共同发起并组织出版《纳米科学与技术》,力求体现本领域出版读物的科学性、准确性和系统性,全面科学地阐述纳米科学技术前沿、基础和应用。本套丛书的出版以高质量、科学性、准确性、系统性、实用性为目标,将涵盖纳米科学技术的所有领域,全面介绍国内外纳米科学技术发展的前沿知识;并长期组织专家撰写、编辑出版下去,为我国

纳米科技各个相关基础学科和技术领域的科技工作者和研究生、本科生等,提供一套重要的参考资料。

这是我们努力实践“科学发展观”思想的一次创新,也是一件利国利民、对国家科学技术发展具有重要意义的大事。感谢科学出版社给我们提供的这个平台,这不仅有助于我国在科研一线工作的高水平科学家逐渐增强归纳、整理和传播知识的主动性(这也是科学研究回馈和服务社会的重要内涵之一),而且有助于培养我国各个领域的人士对前沿科学技术发展的敏感性和兴趣爱好,从而为提高全民科学素养作出贡献。

我谨代表《纳米科学与技术》编委会,感谢为此付出辛勤劳动的作者、编委会委员和出版社的同仁们。

同时希望您,尊贵的读者,如获此书,开卷有益!



中国科学院院长

国家纳米科技指导协调委员会首席科学家

2011年3月于北京

谨以此书献给先父

Shri Amarnath Khanna,

感谢他的培养和教育！

同时，也献给我的母亲 Shrimati Pushapa Khanna,

我的女儿 Aloka Khanna 和我的妻子 Amita Khanna,

感谢她们的爱和支持！

作者简介

康纳(Vinod Kumar Khanna)于1975年获得勒克瑙大学(University of Lucknow)理学硕士学位,1988年获得古鲁格舍德拉大学(Kurukshetra University)博士学位,博士论文题为 *Development, Characterization and Modeling of the Porous Alumina Humidity Sensor* (《多孔氧化铝湿度传感器的研发、表征与建模》)。1980年4月21日,他加入了CSIR-CEERI固体器件分部。在过去30余年里他主要从事功率半导体器件和传感器等各种固态设备的设计、制造和表征工作。他一直积极参与薄膜湿度传感器、高压TV偏转晶体管、交流电动机驱动器的功率达林顿管、快速整流晶闸管、大电流高电压整流器、中子剂量探测器二极管、功率DMOSFET和IGBT、PMOSFET伽马射线剂量计、基于微机电系统(MEMS)技术的微传感器、离子选择性的场效应晶体管(ISFET)、基于化学和生物传感器的离子选择性场效应晶体管、电容性MEMS超声换能器(cMUT)、声学传感器、压力传感器、微悬臂、MEMS陀螺仪、MEMS热板气体传感器等不同项目的研究和开发。

康纳博士的海外经历包括:1986年,在美国科罗拉多州丹佛市IEEE工业应用学会年会上展示研究论文;1999年,德国达姆施塔特工业大学,CSIR-DLR合作项目;2008年,德国库尔特-施瓦贝测量与传感技术研究所,CSIR-DAAD交换科学家项目;俄罗斯新西伯利亚无机化学研究所(Institute of Inorganic Chemistry)的印度-俄罗斯工作室,印度代表团成员之一。

他著有六本书,其中的《IGBT理论和设计》已经在2003年由新西兰IEEE Press/Wiley-Interscience出版。他还发表了115篇知名国际/国家级期刊研究论文和会议论文,并且还拥有三项专利。

康纳博士是印度电气和电信工程师协会的会士、印度物理学会(IPA)的终身会员;担任IPA彼拉尼分会主席,也是印度半导体协会和印度-法国技术协会的终身会员。入编《科学工程名人录》、《亚洲名人录》等。

他的专业领域是功率半导体器件、MEMS和微传感器。他在CSIR-CEERI担任首席科学家,并为MEMS和微传感器研究组的带头人。

前 言

近年,传感器领域有了很大的发展。纳米技术很有希望使传感器领域发生革命性变化。传统的传感器正在从纳米技术的角度被重新设计和制造,新的传感器设计被引入。利用纳米技术,传感器的敏感性、检测范围、响应时间都有了显著的改进。更快、更好、更便宜、更小的传感器正在变得容易获取。

传感器在纳米技术时代的发展,是当代最热门的研究主题,也是本书的主题。本书评价了纳米技术为传感器领域带来的新机遇和进展。

纳米传感器作为一个新的课题,在学术期刊和报告中的相关信息还是纷杂散乱的。涉及这个领域的图书少之又少。本书旨在将零散的相关知识整理汇编成一部易于读懂的书籍,这将有利于纳米传感器的研究者参考查阅。

第1章提出一些纳米技术的引导性问题,初步介绍一些背景材料,为读者理解全书打下基础。

第2章讲述制备纳米传感器的可用材料,如金属、半导体、绝缘体的纳米颗粒、量子点以及碳纳米管。这些结构的纳米材料构成了纳米传感器的建造基石。

第3章描绘纳米传感器制备和特性测试的实验室。这类实验室汇集了诸多不同领域的各种信息与资源。不过将这些设备完美的整合是一项艰巨的任务。

剩余的章节则讲述不同种类的纳米传感器。

第4章专门介绍纳米机械传感器,如MEMS和NEMS谐振器以及基于单电子晶体管的位移传感器、电子隧道加速度计、CNT力、压力和流量传感器等。

第5章涉及温度传感器,如小型化的热电偶、CNT电阻、比例荧光强度传感器、热电子辐射热测量计等。

第6章详细描述光学纳米传感器,如基于表面等离子体共振、表面增强拉曼散射的传感器、色度传感器、光纤纳米传感器、PEBBL,特别是FERET型纳米传感器的量子点器件等。光学纳米生物传感器也在本章中有所阐述。

第7章的主题是磁纳米传感器,磁电效应的发现大大推动了纳米电磁传感器的发展,并由此开发出许多里程碑式的纳米生物传感器,本章将讨论其中的一些。磁弛豫现象已被广泛应用于纳米生物传感器的设计中,在这里只是简要提及。

第8章介绍纳米生物传感器,它使生活中的物理与化学领域融为一体。生物分子与纳米技术的“联姻”往往会产生新的传感器概念。这样的生物传感器对不同领域(如医药、食品技术、环境、化学、生物技术以及信息处理等)都产生了显著影响。这类传感器以及其他类型的传感器,近年来一直是全球深入研究的主题。有

关此领域的研究出版物也大量涌现,因为它关系到人类的健康和福祉。本章全面调研电化学纳米生物传感器,报道多种纳米颗粒修饰的电极。除了这些纳米传感器,还概述基于微米或纳米级悬臂的纳米机械传感器和使用适配体的光学纳米传感器。

第9章为化学纳米传感器,主要用于检测气态化合物、元素和一些参数,如水溶液的pH。利用金属纳米颗粒、金属氧化物纳米颗粒、原始的或功能化的碳纳米管,开发出一系列的传感器用于化学分析,这对分析化学家非常有帮助。由纳米结构氧化锡薄膜覆盖的MEMS热板制作的化学电阻在气体检测中有很高的灵敏性。纳米材料方面的进展为气体传感器的改进提供了巨大的机遇。在基于纳米颗粒的半导体气体传感器中,检测阈值要低至商业化传感器几分之一,甚至更低。

最后一章,第10章回顾与反思各类纳米传感器的主要发展历程,评估目前的情况。基于所有情况,受人关注的主要研究领域被加以强调。对研究人员面临的核心问题,特别是纳米传感器与宏观世界的接口等议题进行了讨论。

与传统的宏观与微观相比,纳米传感器是一个跨学科领域,吸引着科学家、工程师和学生等群体。为了迎合如此广泛的受众,本书采用了特别朴实的写法。某个领域的专业人士可能不熟悉其他学科的术语,因此本书清晰地解释不同领域的关键术语。人们很希望一个主题对于不同领域的人来说都可以理解。本书另一个值得注意的特点是,行文不枯燥、脉络不单调,以有问有答的方式来保持读者的新鲜感,通过提出一个又一个发人深省的问题来引起读者的兴趣。

全书中,附于章末的练习题将重燃读者的兴趣。此外,详尽的例题贯穿全书以补充正文内容。

我们期待本书将为包括科学家、工程师、教师和学生等广阔领域的读者提供一个有益的讨论平台。无论对于科研还是教学,它都将成为有用的资源。

V. K. 康纳

CSIR-CEERI, 彼拉尼, 拉贾斯坦邦, 印度

致 谢

本书在编撰初期进行了大量的文献研究。在此衷心感谢本书中提到的所有书籍、期刊以及网站的作者。在每一章节的结尾处参考文献中包含了他们当中大多数人的优秀研究报告、论文以及网页。有些文献可能会因疏忽而遗漏,敬请谅解。

衷心感谢彼拉尼 CSIR 中央电子工程研究所主任在我研究和学术追求方面无私鼓励。

衷心感谢 Taylor & Francis/CRC 出版社的物理学高级策划编辑 John Navas 博士和 Taylor & Francis 图书编辑项目开发的项目协调人 Amber Donley,感谢他们对这项工作所展现出的浓厚的兴趣。John Navas 博士曾于 2009 年 4 月 29 日邀请我考虑编写一本涉及物理、化学和生物领域的纳米传感器方面的图书。我对于纳米传感器的研究如痴如醉,因此这一机遇是我梦寐以求的。

衷心感谢我的女儿和妻子,感谢她们在过去两年里对我撰写这本书所耗费的大量时间给予的宽容、爱与关怀。没有她们的爱与关怀,我的写作是不可能完成的。

主 译 简 介

张文栋 教授,博士生导师,1962年9月生于河南太康。1997年获得“第五届中国青年科技奖”,1998年获得国家杰出青年科学基金。2004年入选“新世纪百千万人才工程”国家级人选,所带领的团队被评为教育部、科技部、国防科工委和山西省高等学校优秀创新团队。

任总装备部科技委兼职委员、国家安全重大基础研究计划(国防“973”)项目技术首席、总装备部微米纳米专家组副组长、国防科技大学光子/声子晶体教育部重点实验室学术委员会主任,兼任山西省政协常委、山西省科协副主席、中国兵工学会副理事长、中国微米纳米学会和中国高等教育学会常务理事、美国 IEEE 学会高级会员。

多年来,先后主持完成了国防“973”计划、国家“863”计划、国家杰出青年科学基金等 40 余项科研项目,获得国家技术发明奖二等奖 3 项、三等奖 1 项,国家科学技术进步奖二等奖 1 项,高等教育国家级教学成果奖二等奖 1 项,省部级科技进步奖一、二等奖 9 项。1998 年、2001 年、2006 年、2007 年,张文栋教授分别于美国加州大学伯克利分校传感器与执行器中心作高级访问学者、日本通产省工业技术研究院担任客座研究员、法国高等师范大学(ENS)与埃夫里大学担任访问教授、曾参加英国牛津大学-中国地方高校校长培训班,多次前往美、日、英、澳、加、韩、瑞士等国进行学术交流和访问。

译者的话

纳米科学技术是指在纳米尺寸上研究物质的特性和相互作用以及利用这种特性开发新产品的一门科学技术。纳米科学技术以许多现代先进科学技术为基础,它是现代科学(混沌物理、量子力学、介观物理、分子生物学)和现代技术(计算机技术、微电子和扫描隧道显微镜技术、核分析技术)结合的产物。它基于物理、化学的微观理论,以当代精密仪器和先进的分析技术为手段,是一个内容广阔的多学科群。

传感器技术是当今世界迅猛发展的高新技术之一,也是当代科技发展的一个重要标志,它与通信技术及计算机技术构成信息产业的三大支柱。纳米电子技术和纳米制造技术的发展促进了纳米传感器(nanosensor)的诞生,极大丰富了传感器的理论,拓宽了传感器的应用领域。纳米传感器是纳米器件研究与开发中的一个极其重要的领域,它在生物、化学、机械、航空、军事等方面具有广阔的发展前途。

许多发达国家(如美国、日本以及欧洲一些国家)鉴于纳米传感器技术的重要经济潜力和发展前景,都开始投入资金、人力等对纳米传感器技术进行研发。国际上,科学家也开始将纳米传感器技术与航天航空、电子信息等作为战略高科技来看待。纳米传感器技术已进入全面发展阶段。

我国同样注意到纳米传感器技术的巨大潜力及其蓬勃发展的前景。我国的纳米科技研究领域主要以金属和无机非金属纳米材料为主,约占80%。研究项目主要集中在纳米材料的合成和制备、扫描探针显微学、分析电子学和一些纳米技术的应用等方面。目前,我国纳米产业正蓬勃发展,已初步形成以北京、上海、深圳、苏州等地为研发核心并辐射四周的纳米科技格局。

原著 *Nanosensors: Physical, Chemical, and Biological* 是一本为数不多的关于物理、化学、生物纳米传感器方面的重要论著,作者康纳(Vinod Kumar Khanna)是微机电系统和微传感器领域的专家。此书几乎涉及纳米传感技术的所有研究领域,填补了该领域长久以来的空白;将零散的相关知识整理汇编成一本易于读懂的书籍,供研究纳米传感器的人员参考查阅。另外本书提供了大量的参考文献,为读者参考国外相关的研究领域提供了全面的背景资料,是一本难得的参考书。

本书由张文栋教授担任主译,桑胜波担任副主译,共同负责全书的翻译和校对。本书翻译工作的分工如下:张文栋、李朋伟翻译第1章,桑胜波翻译第2章,李刚翻译第3章,冀健龙翻译第4章,营傲群、桑胜波翻译第5章,营傲群翻译第6章,胡杰、营傲群翻译第7章,段倩倩翻译第8章,胡杰、段倩倩翻译第9章,段倩倩

翻译第 10 章。

本书是在原著作者康纳(Vinod Kumar Khanna)的委托和授权下翻译的,在此对他所给予的信任与合作表示感谢。在全体译者的通力合作下,译书顺利完成,在此也对他们表示感谢。另外在翻译的过程中还得到许多其他同志的帮助,对于在这里没有提到而给予帮助的同志,同样表示最诚挚的谢意。

因翻译和学术水平有限,译书中不妥之处在所难免,恳请广大读者给予批评指正。



2014 年 8 月

目 录

《纳米科学与技术》丛书序

作者简介

前言

致谢

主译简介

译者的话

第 1 章 纳米传感器概论	1
1.1 纳米传感器入门	1
1.2 自然科学	1
1.3 物理学	1
1.3.1 物理学的定义	1
1.3.2 物理学的分支	2
1.3.3 物质的状态、材料及粒子	2
1.3.4 分子、原子以及原子结构	2
1.3.5 力学	3
1.3.6 热学	5
1.3.7 声学	5
1.3.8 光学	5
1.3.9 电学	6
1.3.10 磁学	6
1.3.11 电磁学	7
1.3.12 国际单位制	7
1.4 化学	8
1.4.1 化学的定义	8
1.4.2 元素和化合物	8
1.4.3 有机化合物和无机化合物	8
1.4.4 化学的分类	8
1.4.5 自然元素和人造元素	8
1.4.6 金属、非金属和准金属	9
1.4.7 元素周期表	9

1.4.8	化学变化与化学反应	9
1.4.9	元素的电子结构	10
1.4.10	化学键	10
1.4.11	氧化和还原	10
1.4.12	酸、碱、盐	10
1.4.13	溶液和气体的浓度表达	11
1.4.14	烃类：饱和的与不饱和的	11
1.4.15	烷基和芳基	11
1.4.16	醇和酚	12
1.4.17	羧酸	12
1.4.18	醛和酮	12
1.4.19	胺和氨基酸	12
1.4.20	脂	12
1.4.21	糖类	12
1.4.22	蛋白质和酶	13
1.5	生物学	13
1.5.1	生物学是什么	13
1.5.2	生物学的分支	13
1.5.3	生命的起源和进化	13
1.5.4	细胞	13
1.5.5	细菌和病毒的区别	14
1.5.6	遗传、染色体、基因以及相关术语	15
1.6	半导体电子学	15
1.6.1	什么是半导体电子学	15
1.6.2	导体、半导体和绝缘体中的能带	15
1.6.3	半导体的特性	16
1.6.4	P-N 结	17
1.6.5	双极面结型晶体管	18
1.6.6	金属-氧化物-半导体场效应晶体管	19
1.6.7	模拟电路和数字电路	20
1.7	纳米及其量级衡量	20
1.8	纳米科学和纳米技术	21
1.9	纳米材料及其在纳米尺度下的特性	22
1.10	传感器和换能器：“传感器”和“换能器”术语的含义	24
1.11	传感器参数和特性的定义	25

1.12 半导体微传感器的发展历程	26
1.13 传感器微型化发展历程及纳米尺寸测量的必要性	26
1.13.1 微型传感器的优势	27
1.13.2 功耗问题	28
1.13.3 低响应时间	28
1.13.4 多目标检测与多功能性	28
1.13.5 灵敏度考量和功能化需求	29
1.13.6 生物分子接口技术	29
1.13.7 低成本	30
1.13.8 纳米传感器的潜在应用	30
1.14 纳米传感器的定义与分类	30
1.15 物理、化学和生物纳米传感器	32
1.16 纳米传感器实例	33
1.16.1 常见的纳米传感器	33
1.16.2 基于碳纳米管的纳米传感器	34
1.16.3 纳米薄膜传感器	34
1.16.4 基于微悬臂和纳悬臂的纳米传感器	34
1.17 分析和表征工具:纳米材料和纳米传感器的显微技术	34
1.17.1 扫描电子显微镜	35
1.17.2 透射电子显微镜	36
1.17.3 扫描隧道显微镜	36
1.17.4 原子力显微镜	37
1.18 纳米材料和纳米传感器化学成分分析的光谱技术	38
1.18.1 红外光谱	39
1.18.2 紫外-可见光谱	39
1.18.3 拉曼光谱	40
1.18.4 X射线能量色散谱	41
1.18.5 俄歇电子能谱	41
1.18.6 X射线衍射	41
1.18.7 X射线光电子能谱或化学分析电子光谱	41
1.18.8 二次离子质谱	42
1.19 位移纳米传感器:STM	42
1.19.1 操作原理	42
1.19.2 透射系数	44
1.19.3 隧穿电流	48