

# 电化学与生物传感器

——原理、设计及其在生物医学中的应用

张学记 鞠焯先 约瑟夫·王 主编

Xueji Zhang HuangXian Ju Joseph Wang

张书圣 李雪梅 杨 涛 等译

ELECTROCHEMICAL  
SENSORS, BIOSENSORS  
AND THEIR BIOMEDICAL  
APPLICATIONS



化学工业出版社

# 电化学与生物传感器

——原理、设计与其在生物医学中的应用

曹伟斌 曹德明 柯国良 王 磊 王琳

Yang Weibin Cao Deming Ke Guoliang Wang Lei Wang Lin

化学工业出版社 编 著 科学出版社

ELSEVIER  
BIOMEDICAL SENSORS AND BIOTECHNOLOGY  
APPLIED ELECTROCHEMISTRY  
APPLIED ELECTROCHEMISTRY



ELSEVIER

# 电化学与生物传感器

——原理、设计及其在生物医学中的应用

张学记 鞠焜先 约瑟夫·王 主编

Xueji Zhang HuangXian Ju Joseph Wang

张书圣 李雪梅 杨 涛 等译

**ELECTROCHEMICAL  
SENSORS, BIOSENSORS  
AND THEIR BIOMEDICAL  
APPLICATIONS**



化学工业出版社

· 北京 ·

本书详细论述了目前常用的电化学传感器装置的原理、设计方法及其在生物医学方面的应用；综述了离子选择性电极的发展趋势、电化学免疫传感器的发展、用于糖尿病检测的现代葡萄糖生物传感器、基于纳米材料（如纳米管或纳米晶）的生物传感器、检测氮的氧化物和过氧化物的生物传感器以及检测杀虫剂的生物传感器等；内容涵盖电化学传感器和生物传感器的所有范围。

本书取材新颖，内容丰富。适用于分析化学、材料化学、生物、医学、临床检验、工业分析、环境监测和农业分析等领域的工作人员使用。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

电化学与生物传感器——原理、设计及其在生物医学中的应用/张学记 (Xueji Zhang), 鞠焯先 (Huangxian Ju), 王 (Wang, J.) 主编; 张书圣等译. —北京: 化学工业出版社, 2009. 6

书名原文: Electrochemical Sensors, Biosensors and Their Biomedical Applications

ISBN 978-7-122-05017-5

I. 电… II. ①张…②鞠…③王…④张… III. ①电化学-化学传感器-应用-临床医学②生物传感器 IV. R4-39 TP212.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 033605 号

Electrochemical Sensors, Biosensors and Their Biomedical Applications / edited by Xueji Zhang, Huangxian Ju, Joseph Wang.

ISBN: 978-0-12-373738-0

Copyright©2008 Elsevier Inc. All rights reserved.

Authorized simplified Chinese translation edition of English Edition jointly published by Chemical Industry Press and Elsevier (Singapore) Pte Ltd., 3 Killiney Road, # 08-01 Winsland House I, Singapore 239579.

9789812723000

Copyright©2009 by Elsevier (Singapore) Pte Ltd.

Copyright©2009 by Chemical Industry Press

All rights reserved.

This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书中文简体字翻译版由化学工业出版社和 Elsevier (Singapore) Pte Ltd. 在中国大陆境内合作出版。本书仅限在中国境内（不包括香港特别行政区、台湾及澳门）出版及标价销售。未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分，违者必究。

北京市版权局著作权合同登记号：01-2008-5208

责任编辑：李晓红

装帧设计：关 飞

责任校对：宋 玮

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）

印 刷：北京永鑫印刷有限责任公司

装 订：三河市万龙印装有限公司

720mm×1000mm 1/16 印张 30¼ 彩插 3 字数 631 千字 2009 年 7 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899

网 址：http://www.cip.com.cn

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：88.00 元

版权所有 违者必究

# 译 序

化学与生物传感器的发展是目前分析研究中最活跃的领域之一。传感器是一种包括识别元件和信号变换器小型装置,可用于样品中待测物的直接检测。电化学传感器采用电极作为换能元件,是化学传感器中的一个重要分支。电化学传感器在目前的传感器中占有重要地位,广泛应用于临床、工业、环境和农业分析等领域。全书共十七章,主要内容及翻译工作具体分工如下。

第1章 NO 电化学传感器,由毕赛博士译。本章介绍了 NO 在生命科学中的重要性及其检测方法,对 NO 电化学生物传感器的原理、构造、标定方法及表征方式等进行了综述,重点介绍了 NO 微传感器在确定生物效应中的应用,对 NO 电化学生物传感器的深入研究具有重要意义。

第2章 农药生物传感器,由杨晓燕副教授译。本章介绍了农药生物传感器的必要性、发展现状和展望;讨论了酶在农药生物传感器中的应用、特性以及酶固定化方法;着重介绍了基于酶的各种农药生物传感器的检测原理及特点;列举了农药免疫传感器检测方法及几种免疫传感器的特点及应用;最后介绍了基于全细胞和细胞组织的农药生物传感器以及主要干扰物和样品预处理。

第3章 葡萄糖电化学生物传感器,由李英博士译。本章介绍了葡萄糖电化学生物传感器的发展历程、发展现状及展望;介绍了第一代葡萄糖生物传感器,包括氧化还原干扰和氧气的影响;第二代葡萄糖生物传感器,包括葡萄糖氧化酶与电极表面之间的电子传递、人工介体的使用及电子传递中继站装置;最后介绍了体外葡萄糖检测和连续实时体内监测,包括所需条件、皮下检测及无损伤葡萄糖检测。

第4章 离子选择性电极的新进展,由刘树峰副教授译。本章首先介绍了离子选择性电极的研究现状及其在生物医学领域的重要应用。对于离子选择性电极的工作原理、各种新型的能量转换原理、新型传感材料以及离子选择性电极的微型化技术进行了详细讨论。

第5章 电化学免疫分析及免疫传感器研究进展,由李雪梅副教授译。本章讨论了2002年以后关于电化学免疫分析的工作。主要介绍一些基础背景知识,包括抗体结构和抗体-抗原相互作用,这对所有采用特殊的免疫分析模式的免疫分析和免疫传感器来说,都是至关重要的因素。然后重点介绍电化学免疫分析和免疫传感器的发展现状,以便让非专业人士能够比较容易地理解该领域取得的成就,并加以应用。

第 6 章 超氧化物电化学生物传感器：原理、进展及应用，由高洪涛副教授译。本章介绍了  $O_2^{\cdot-}$  生物电化学生传感器的电化学生物检测应用进展，讨论了 SODs 电化学生传感器的结构、电子传输机理和传感器的研制情况，并就超氧化物电化学生物传感器的发展方向进行了展望。

第 7 章 场效应器件检测带电大分子：可行性和局限性，由聂广明副教授译。本章介绍了利用场效应器件检测带电大分子的研究进展，讨论了 EIS 电容器件的设计原理及检测机理，描述了裸 EIS 传感器和功能性 EIS 传感器的电容-电压特性，介绍了利用大分子自身所带电荷直接检测 DNA、免指示剂检测 DNA 以及利用聚电解质层和合成 DNA 的检测方法。

第 8 章 生物样品中  $H_2S$  产物的电化学生物传感器，由王卫副教授译。本章首先描述了  $H_2S$  在生命科学中的意义、生物样品中  $H_2S$  的检测及  $H_2S$  电化学生物传感器检测  $H_2S$  的优点，然后重点介绍了  $H_2S$  极谱传感器的构建、校准和表征，最后讨论了  $H_2S$  极谱传感器在生物样品中的应用。

第 9 章 免疫传感器的最新进展，由林洁华副教授译。本章介绍了免疫传感器的工作原理以及免疫活性单元的固定方法，介绍了不同类型的免疫传感器在临床分析上的性能特点以及应用前景。

第 10 章 用于体内 pH 测定的微电极，由孙雪梅副教授译。本章介绍了各种不同的 pH 微电极的工作原理、组装方法、应用现状及发展前景，综述了 pH 微电极在体内各部位应用的临床研究成果。各种 pH 测定的先进微电极系统的发展为体内 pH 的测定提供了实用和有效的方法，发展先进的 pH 微电极将继续成为研究的热点。

第 11 章 生物芯片——原理与应用，由于风丽博士、梅振华副教授译。本章主要介绍了多种生物芯片包括 DNA 芯片、蛋白质芯片、电学和电化学生物芯片的基本原理、制备方法、检测技术及其应用。最后介绍了芯片实验室中的微流控理论、芯片实验室的组成部件、生物微机电系统的制备方法以及芯片实验室的应用。

第 12 章 生物燃料电池，由万均副教授译。本章对生物燃料电池的研究进展进行了综述。燃料电池是通过电化学生物反应将储存在燃料中的能量直接转化为电能来发电的，可以避免传统电池燃烧污染和无效分配过程。主要内容包括：生物燃料电池的设计原理；电子传递反应；生物催化阳极和阴极；生物燃料电池的底物及葡萄糖- $O_2$  生物燃料电池的组装。

第 13 章 基于电活性无机多晶体的化学及生物传感器，由任锐博士译。本章介绍了以普鲁士蓝（即亚铁氰化铁）为代表的过渡金属亚铁氰化物在电化学生物传感器中的应用。最引人注目的成果如下：用基于亚铁氰化物的传感器检测没有氧化还原活性的离子如  $Na^+$ 、 $K^+$ ；用普鲁士蓝构建性能优越、成本低廉的  $H_2O_2$  传感器，检测限为  $10^{-8} mol/L$ ，线性范围跨越四个数量级；以上述  $H_2O_2$  传感器发展出的性能优越的生物传感器。

第 14 章 基于纳米粒子的生物传感器和生物分析，由丁彩凤副教授译。本章介绍了基于纳米粒子的光学生物传感器和电化学生物传感器及其在生物分子中的应用。在光学和电化学应用中，纳米标记物为蛋白质和核酸的超灵敏检测提供了基础。新的基于纳米粒子的传感技术的超常的灵敏度，为常规方法检测不到的疾病标志物、生物威胁试剂或传染试剂的检测提供了可能，还能够实现疾病的早期诊断或恐怖袭击预警。

第 15 章 基于碳纳米管的电化学传感器，由胡孔诚博士译。本章首先介绍了碳纳米管的结构和性质。重点综述了基于碳纳米管的电化学传感器的制备和应用，包括电极的制备及其电化学性质、提高生物小分子和药物分子电分析的灵敏性和选择性、电极上蛋白质和酶的直接电子传递和基于碳纳米管的电化学生物传感器。最后讨论了碳纳米管传感器的光谱表征，主要论述了碳纳米管及其修饰后的拉曼光谱和红外光谱。

第 16 章 基于溶胶-凝胶材料固定生物分子的生物传感器，由李峰副教授译。本章介绍了溶胶-凝胶材料的性质与性能特征。主要讨论了溶胶-凝胶包埋生物活性分子、微生物细胞及动植物细胞的优点和现状，以及溶胶-凝胶在酶生物传感器、光学蛋白质生物传感器、免疫传感器及免疫亲和柱中的应用与前景。

第 17 章 基于蛋白质直接电子转移的生物传感器，由杨涛副教授译。本章介绍了蛋白质的直接电子转移及基于此原理的生物传感器的应用。描述了蛋白质的固定方法，分别讨论了蛋白质的直接电子转移原理包括细胞色素 c、肌红蛋白、血红蛋白等；酶的直接电子转移原理包括辣根过氧化物酶、过氧化氢酶、葡萄糖氧化酶等，最后主要介绍了基于以上蛋白质直接电子转移的生物传感器的应用。

索引 由叶素娟博士译。

全书由张书圣教授统稿。

译者在翻译过程中力图忠实于原著。本书取材新颖，内容丰富，适用于分析化学、材料化学、医药学、临床检验、工业分析、环境监测和农业分析等领域的研究人员使用。

在本书编译过程中，化学工业出版社、青岛科技大学教务处给予了立项支持，在此一并表示感谢。

由于译者水平所限，译文中可能还有欠缺，不当之处在所难免，敬请同行和读者们批评指正。

译者  
2009 年 1 月

# 前 言

化学与生物传感器的发展是目前分析研究中最活跃的领域之一。传感器是一种集成识别元件和信号变换器的小型装置，可用于样品中待测物的直接检测。识别元件和信号变换器的结合方式有多种。电化学传感器采用电极作为换能元件，是化学传感器中的一个重要分支。电化学传感器在目前的传感器中占有重要地位，广泛应用于临床、工业、环境和农业分析等领域。传感器和电化学传感器领域通常是多学科交叉，各学科的发展将促进其进一步发展。

直到 20 世纪 60 年代，pH 玻璃电极是唯一得到广泛应用的化学传感器。现代生物传感器的概念是由 L. Clark Jr. 提出的，他在 1962 年提出了电流型葡萄糖酶电极。在过去的四十年中，我们见证了一些基于不同的换能原理和识别元件的经典传感装置的发展过程。随着 21 世纪的到来，这些传感器被应用到了很多领域，如临床、环境、工业和安全等。未来传感器的发展要求多学科的广泛发展以满足新出现的检测要求，包括疾病生物标志物的早期检测、葡萄糖和乳酸盐的连续监测、生物战剂的早期检测。如本书所述，电化学传感器及其生物医学应用研究正在各个方向蓬勃发展。

本书以涵盖电化学传感器和生物传感器的所有范围为宗旨，提供了目前常用的电化学传感器装置的原理、设计方法及其在生物医学方面的应用。本书适用于所有对化学传感器和生物传感器的发展和應用感兴趣的科学家和工程技术人员，通过讨论传感器的近期发展，希望在研究论文和标准教科书之间搭建桥梁。

本书分 17 章，涉及的主题包括：离子选择性电极的发展趋势、电化学免疫传感器的进展、用于糖尿病检测的现代葡萄糖生物传感器、基于纳米材料（如纳米管或纳米晶）的生物传感器、氮氧化物和过氧化物的生物传感器以及杀虫剂生物传感器等。

我们有幸总结了本领域顶尖专家的研究论文，感谢本书的所有贡献者。最后，感谢家人的支持。

**Xueji Zhang, Sarasota, FL, USA**  
**Huangxian Ju, Nanjing, P. R. China**  
**Joseph Wang, Tempe, AZ, USA**



# 作者名单

**Eric Bakker**, Nanochemistry Research Institute, Department of Applied Chemistry, Curtin University of Technology, Perth, WA 6845, Australia

**Jeannette E. Doeller**, University of Alabama at Birmingham, Department of Environmental Health Sciences 1665 University Boulevard, Ryals 530B Birmingham AL 35294-0022, USA

**Hua Dong**, School of Chemical and Biomedical Engineering, 70 Nanyang Drive, Nanyang Technological University, Singapore 637457

**Manliang Feng**, Department of Chemistry, Jackson State University, 1400 J.R. Lynch Street, Jackson, MS 39217, USA

**Jeremy M. Fowler**, Department of Chemistry and Biomolecular Sciences, Macquarie University, Sydney, NSW 2109, Australia

**Kai H. Goh**, School of Chemical and Biomedical Engineering, 70 Nanyang Drive, Nanyang Technological University, Singapore 637457

**H. Brian Halsall**, Department of Chemistry, University of Cincinnati, P.O. Box 210172, Cincinnati, OH 45221-0172, USA

**Heyou Han**, Department of Chemistry, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

**William R. Heineman**, Department of Chemistry, University of Cincinnati, P.O. Box 210172, Cincinnati, OH 45221-0172, USA

**Shengshui Hu**, Department of Chemistry, Wuhan University, Wuhan 430072, P.R. China

**Huangxian Ju**, Key Laboratory of Analytical Chemistry for Life Science (Education Ministry of China), Department of Chemistry, Nanjing University, Nanjing 210093, China

**Vivek Babu Kandimalla**, Key Laboratory of Analytical Chemistry for Life Science (Education Ministry of China), Department of Chemistry, Nanjing University, Nanjing 210093, China

**Arkady Karyakin**, Chemistry Faculty of M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

**David W. Kraus**, University of Alabama at Birmingham, Departments of Biology and Environmental Health Sciences 1665 University Boulevard, Ryals 530B Birmingham AL 35294-0022, USA

**Dónal Leech**, Department of Chemistry, National University of Ireland, Galway, Ireland Marie Pellissier and Frédéric Barrière Université de Rennes I, UMR CNRS 6226, 34052 Rennes, France

**Chang Ming Li**, School of Chemical and Biomedical Engineering, 70 Nanyang Drive, Nanyang Technological University, Singapore 637457

**Yuehe Lin**, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA, 99352, USA

**Guodong Liu**, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA, 99352, USA

**Qing Lu**, Department of Chemistry, Wuhan University, Wuhan 430072, P.R. China

**Sergey Makarychev-Mikhailov**, Department of Chemistry, Purdue University, West Lafayette, IN 47907, USA

**Lanqun Mao**, Center for Molecular Science, Institute of Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, P.R. China

**Takeo Ohsaka**, Department of Electronic Chemistry, Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, 4259 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama 226-8502, Japan

**Arshak Poghossian**, Aachen University of Applied Sciences, Jülich Campus, Institute of Nano- and Biotechnologies, Ginsterweg 1, D-52428 Jülich, Germany; and Research Centre Jülich, Institute of Bio- and Nanosystems, D-52425 Jülich, Germany

**Michael J. Schöning**, Aachen University of Applied Sciences, Jülich Campus, Institute of Nano- and Biotechnologies, Ginsterweg 1, D-52428 Jülich, Germany; and Research Centre Jülich, Institute of Bio- and Nanosystems, D-52425 Jülich, Germany

**Guoli Shen**, State Key Laboratory for Chemo/Biosensing and Chemometrics, College of Chemistry and Chemical Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, P.R. China

**Alexey Shvarev**, Department of Chemistry, Oregon State University, Corvallis, OR 97331, USA

**Hiroyasu Tachikawa**, Department of Chemistry, Jackson State University, 1400 J.R. Lynch Street, Jackson, MS 39217, USA

**Yang Tian**, Department of Chemistry, Tongji University, Siping Road 1239, Shanghai 200092, P.R. China

**Vijay Shyam Tripathi**, Key Laboratory of Analytical Chemistry for Life Science (Education Ministry of China), Department of Chemistry, Nanjing University, Nanjing 210093, China

**Hua Wang**, State Key Laboratory for Chemo/Biosensing and Chemometrics, College of Chemistry and Chemical Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082 P.R. China

**Joseph Wang**, Biodesign Institute, Center for Bioelectronics and Biosensors, Departments of Chemical and Materials Engineering and Biochemistry, Box 875801, Arizona State University, Tempe, AZ 85387-5801, USA

**Jun Wang**, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA, 99352, USA

**Danny K.Y. Wong**, Department of Chemistry and Biomolecular Sciences, Macquarie University, Sydney, NSW 2109, Australia

**Ruqin Yu**, State Key Laboratory for Chemo/Biosensing and Chemometrics, College of Chemistry and Chemical Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, P.R. China

**Jingdong Zhang**, College of Environmental Science and Engineering Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

**Xueji Zhang**, Department of Chemistry, World Precision Instruments Inc., 175 Sarasota Center Boulevard Sarasota, FL 34240-9258, USA

**David Daomin Zhou**, Second Sight Medical Products, Inc., Sylmar, California, USA

**Qin Zhou**, School of Chemical and Biomedical Engineering, 70 Nanyang Drive, Nanyang Technological University, Singapore 637457

**Yanxia Xu**, Department of Chemistry, Wuhan University, Wuhan 430072, P.R. China

# 目 录

<b>第 1 章 NO 电化学传感器</b> .....	1
1.1 前言 .....	1
1.1.1 NO 在生命科学中的重要意义 .....	1
1.1.2 生理学中 NO 的检测方法 .....	1
1.1.3 电化学传感器测定 NO 的优点 .....	1
1.2 电化学传感器检测 NO 的原理 .....	2
1.3 NO 检测电极的构造 .....	2
1.3.1 Clark 型 NO 电极 .....	2
1.3.2 碳纤维修饰 NO 微电极 .....	4
1.3.3 集成化 NO 微电极 .....	4
1.3.4 其它 NO 电极 .....	5
1.4 NO 电极的标定 .....	6
1.4.1 采用 NO 标准溶液法标定 NO 电极 .....	6
1.4.2 基于 SNAP 分解法标定 NO 电极 .....	6
1.4.3 基于化学生成 NO 法标定 NO 电极 .....	7
1.5 NO 电极的表征 .....	8
1.5.1 灵敏度和检测限 .....	9
1.5.2 选择性 .....	9
1.5.3 响应时间 .....	9
1.5.4 温度和 pH 对 NO 电极的影响 .....	10
1.6 NO 电极的应用 .....	10
1.7 结论及展望 .....	17
1.8 致谢 .....	17
1.9 参考文献 .....	17
<b>第 2 章 农药生物传感器</b> .....	24
2.1 前言 .....	24
2.1.1 农药生物传感器的必要性 .....	24
2.1.2 农药生物传感器的发展现状 .....	25
2.1.3 农药生物传感器的展望 .....	25

2.2	生物催化剂在农药生物传感器中的应用 .....	25
2.2.1	酶在农药生物传感器中的应用和特性 .....	25
2.2.2	酶固定化方法在农药生物传感器中的应用 .....	26
2.3	基于酶的生物传感器 .....	27
2.3.1	农药检测原理 .....	27
2.3.2	基于农药对酶活性抑制作用的生物传感器 .....	27
2.3.3	基于酶催化作用的生物传感器 .....	29
2.3.4	流动注射生物传感器 .....	30
2.3.5	酶的再活化 .....	31
2.4	农药免疫传感器 .....	32
2.4.1	农药免疫传感器的检测方法 .....	33
2.4.2	农药免疫传感器的类型 .....	33
2.4.3	农药免疫传感器的再生 .....	37
2.5	基于全细胞和细胞组织的农药传感器 .....	38
2.6	主要干扰物和样品预处理 .....	39
2.7	结论 .....	39
2.8	致谢 .....	40
2.9	参考文献 .....	40
<b>第3章</b>	<b>葡萄糖电化学生物传感器 .....</b>	<b>47</b>
3.1	简介 .....	47
3.2	四十年的发展历程 .....	47
3.3	第一代葡萄糖生物传感器 .....	48
3.3.1	氧化还原干扰 .....	48
3.3.2	氧气的影响 .....	50
3.4	第二代葡萄糖生物传感器 .....	50
3.4.1	葡萄糖氧化酶与电极表面之间的电子传递 .....	50
3.4.2	人工介体的使用 .....	50
3.4.3	电子传递中继站装置 .....	51
3.5	体外葡萄糖检测 .....	52
3.6	连续实时体内监测 .....	53
3.6.1	所需条件 .....	53
3.6.2	皮下检测 .....	54
3.6.3	无创葡萄糖检测的趋势 .....	54
3.7	结论与展望 .....	55
3.8	参考文献 .....	55
<b>第4章</b>	<b>离子选择性电极的新进展 .....</b>	<b>58</b>

4.1	前言	58
4.1.1	现状	58
4.1.2	离子选择性电极在生物医学领域的重要应用	59
4.2	传统离子选择性电极	62
4.2.1	工作原理	62
4.2.2	响应特征：选择性和检测限	66
4.2.3	参比电极	69
4.3	新的能量转换原理	69
4.3.1	聚离子选择性电极	69
4.3.2	恒电流控制传感器	73
4.3.3	伏安型离子选择性电极	76
4.3.4	光寻址电位传感器	77
4.4	新型传感材料	78
4.4.1	膜组成	78
4.4.2	固体接触传感材料	82
4.4.3	生物相容性改进	83
4.5	微型化	84
4.5.1	微型化	84
4.5.2	传感器阵列	85
4.6	结论与展望	87
4.7	致谢	87
4.8	参考文献	88
<b>第5章</b>	<b>电化学免疫分析及免疫传感器研究进展</b>	<b>93</b>
5.1	引言	93
5.2	抗体-抗原相互作用	93
5.3	免疫分析及免疫传感器	95
5.3.1	竞争性免疫分析体系	95
5.3.2	非竞争性免疫分析体系	96
5.4	抗体固定模式	98
5.4.1	生物素-(链霉)亲和素相互作用	98
5.4.2	抗体结合蛋白质	99
5.4.3	导电聚合物	100
5.4.4	自组装单层膜	101
5.4.5	抗体片段	103
5.5	电化学检测技术	104
5.5.1	电位型免疫传感器	104
5.5.2	电流型免疫传感器	105

5.5.3	伏安免疫分析 .....	107
5.5.4	阻抗免疫分析及免疫传感器 .....	108
5.6	微流控电化学免疫分析系统 .....	110
5.7	结论 .....	111
5.8	参考文献 .....	111
<b>第 6 章</b>	<b>超氧化物电化学及生物传感器：原理、进展及应用 .....</b>	<b>115</b>
6.1	超氧化物的化学和生物化学过程 .....	115
6.2	$O_2^-$ 生物检测综述 .....	116
6.3	$O_2^-$ 电化学及 $O_2^-$ 电化学传感器 .....	117
6.4	$O_2^-$ 电化学传感器 .....	117
6.4.1	除 SODs 外的酶生物传感器 .....	117
6.4.2	SODs 简介 .....	118
6.4.3	SODs 电化学 .....	119
6.4.4	基于 SOD 的 $O_2^-$ 电化学生物传感器 .....	129
6.4.5	基于 SOD 的 $O_2^-$ 微型生物传感器 .....	139
6.5	结论及展望 .....	141
6.6	致谢 .....	142
6.7	参考文献 .....	142
<b>第 7 章</b>	<b>场效应器件检测带电大分子：可行性和局限性 .....</b>	<b>149</b>
7.1	引言 .....	149
7.2	裸 EIS 传感器和功能性化 EIS 传感器结构的电容-电压特性 .....	153
7.3	利用大分子自身所带电荷直接检测 DNA .....	155
7.4	免指示剂检测 DNA 的新方法 .....	158
7.5	利用聚电解质层和合成 DNA 的检测结果 .....	161
7.6	结论与展望 .....	163
7.7	致谢 .....	164
7.8	参考文献 .....	164
<b>第 8 章</b>	<b>生物样品中 <math>H_2S</math> 产物的电化学传感器 .....</b>	<b>168</b>
8.1	引言 .....	168
8.1.1	$H_2S$ 在生命科学中的意义 .....	168
8.1.2	生物样品中 $H_2S$ 的检测 .....	170
8.2	电化学传感器测定 $H_2S$ 的优点 .....	171
8.2.1	电化学 .....	171
8.2.2	多传感器呼吸计量法 .....	173
8.3	$H_2S$ 极谱传感器的构建 .....	173

8.3.1	常量 H <sub>2</sub> S 极谱传感器	173
8.3.2	微型 H <sub>2</sub> S 极谱传感器	174
8.4	H <sub>2</sub> S 极谱传感器的校准	175
8.4.1	H <sub>2</sub> S 原液	175
8.4.2	H <sub>2</sub> S 的化学来源	175
8.5	H <sub>2</sub> S 极谱传感器的特点	175
8.5.1	选择性	177
8.5.2	灵敏度	178
8.5.3	检测限	178
8.5.4	稳定性	179
8.5.5	重现性、精密度和准确度	180
8.5.6	线性及动力学响应范围	180
8.5.7	响应时间	180
8.5.8	可靠性 (免维护使用期限)	180
8.5.9	生物相容性	180
8.6	H <sub>2</sub> S 极谱传感器在生物样品中的应用	181
8.6.1	H <sub>2</sub> S 生成量的检测	181
8.6.2	H <sub>2</sub> S 消耗量的检测	182
8.6.3	同时检测 H <sub>2</sub> S 水平及血管张力	185
8.6.4	血液和组织中稳态 H <sub>2</sub> S 水平的检测	185
8.7	结论及发展趋势	186
8.8	致谢	186
8.9	参考文献	186
<b>第 9 章 免疫传感器的最新进展</b>		
9.1	前言	189
9.1.1	免疫传感器的一般工作原理	189
9.1.2	免疫传感器在临床分析上的主要性能特点	189
9.2	免疫活性单元的固定	190
9.2.1	基于非共价作用的固定方法	190
9.2.2	基于共价键作用的固定方法	191
9.3	免疫传感器的主要类型	193
9.3.1	电化学免疫传感器	193
9.3.2	光学免疫传感器	196
9.3.3	微重量免疫传感器	198
9.3.4	其它类型免疫传感器	199
9.4	结论及展望	200
9.5	参考文献	201

<b>第 10 章 用于体内 pH 测定的微电极</b> .....	209
10.1 引言 .....	209
10.1.1 体内 pH 测定的重要性 .....	209
10.1.2 体内 pH 的测定技术 .....	210
10.1.3 用于 pH 测定的微电极的优点 .....	211
10.2 pH 微电极的表征 .....	211
10.2.1 pH 和 $pH$ 测定 .....	211
10.2.2 pH 微电极的校正曲线和线性响应斜率 .....	212
10.2.3 灵敏度 .....	213
10.2.4 响应时间 .....	213
10.2.5 重现性/准确度 .....	214
10.2.6 选择性 .....	215
10.2.7 稳定性和可靠性 .....	215
10.2.8 生物相容性 .....	215
10.3 用于 pH 测定的微电极的制作 .....	216
10.3.1 玻璃 pH 微电极 .....	216
10.3.2 聚合物膜 pH 微电极 .....	217
10.3.3 硅 pH 微电极 .....	218
10.3.4 金属/金属氧化物 pH 微电极膜 .....	220
10.3.5 Ag/AgCl 微参比电极 .....	222
10.4 pH 测量的先进微电极系统 .....	224
10.4.1 全固态 pH 微电极 .....	224
10.4.2 芯片实验室用 pH 微电极 .....	225
10.4.3 用于 pH 成像的微电极阵列 .....	226
10.4.4 用于体内 pH 连续记录的微电极 .....	228
10.4.5 植入型 pH 微电极 .....	228
10.4.6 无线 pH 测量系统 .....	229
10.5 pH 微电极在体内的应用 .....	230
10.5.1 体内 pH 的测量 .....	230
10.5.2 血液中 pH 的测量 .....	230
10.5.3 大脑内 pH 的测量 .....	231
10.5.4 心脏内 pH 的测量 .....	232
10.5.5 食道内 pH 的测量 .....	233
10.5.6 皮下 pH 的测量 .....	235
10.5.7 眼睛内 pH 的测量 .....	235
10.6 结论和展望 .....	236
10.7 致谢 .....	237



10.8 参考文献 .....	237
<b>第 11 章 生物芯片——原理与应用</b> .....	246
11.1 引言 .....	246
11.2 DNA 阵列 .....	247
11.2.1 DNA 阵列的类型 .....	248
11.2.2 DNA 阵列的制备 .....	249
11.2.3 杂交测序 .....	253
11.2.4 标记 .....	254
11.2.5 检测与数据分析 .....	258
11.2.6 应用 .....	263
11.3 蛋白质芯片 .....	264
11.3.1 蛋白质阵列和蛋白质组 .....	264
11.3.2 蛋白质芯片的制备 .....	265
11.3.3 蛋白质芯片的应用 .....	272
11.4 电学和电化学微阵列生物芯片 .....	274
11.4.1 理论基础 .....	274
11.4.2 制备技术 .....	276
11.4.3 电化学检测法 .....	281
11.5 芯片实验室 .....	285
11.5.1 微流控理论 .....	286
11.5.2 芯片实验室系统的组成 .....	288
11.5.3 生物微机电系统的制备 .....	292
11.5.4 应用 .....	294
11.6 参考文献 .....	297
<b>第 12 章 生物燃料电池</b> .....	305
12.1 前言 .....	305
12.2 生物燃料电池设计原理 .....	306
12.3 电子传递反应 .....	307
12.4 生物催化阴极 .....	308
12.4.1 酶和底物 .....	308
12.4.2 过氧化物酶 .....	308
12.4.3 加氧酶 .....	309
12.5 生物催化阳极 .....	313
12.5.1 酶和底物 .....	313
12.5.2 葡萄糖氧化酶 .....	314
12.5.3 脱氢酶 .....	316