



半导体科学与技术丛书

有机电子学

黄维 密保秀 高志强 著



科学出版社

www.sciencep.com

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

半导体科学与技术丛书

有机电子学

黄 维 密保秀 高志强 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书从有机电子学的角度,深入浅出地总结了有机电子材料中的电子结构与过程,并以此为基础,阐述了有机固体凝聚态的各种性质,这些性质对实际应用中的有机光电器件的行为起决定性作用。基于对理论的理解,书中介绍了有机电子材料性质的测试表征方法,讨论了有机薄膜材料在实际电子器件中的各种应用,例如,有机场效应晶体管、基于有机材料的太阳能电池、基于有机电致发光的信息显示与照明、有机传感器、有机存储器及有机激光等。对于各种应用器件,本书主要强调它们的基础知识、基本原理、器件结构和性能表征。

本书可供初涉有机电子学领域的人员参考,也可供从事有机电子材料领域研发的科技人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

有机电子学/黄维, 密保秀, 高志强著. —北京: 科学出版社, 2011

(半导体科学与技术丛书)

ISBN 978-7-03-030245-8

I. ①有… II. ①黄… ②密… ③高… III. ①有机半导体-半导体电子学 IV. ①TN304.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 021413 号

责任编辑: 张 静 钱 俊 / 责任校对: 李 影

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 王 浩

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>

北京天竺彩色印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 1 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2011 年 1 月第一次印刷 印张: 27 1/2

印数: 1—3 500 字数: 530 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《半导体科学与技术丛书》编委会

名誉顾问: 王守武 汤定元 王守觉

顾问: (按姓氏拼音排序)

陈良惠 陈星弼 雷啸霖 李志坚 梁骏吾 沈学础
王 圩 王启明 王阳元 王占国 吴德馨 郑厚植
郑有爔

主 编: 夏建白

副 主 编: 陈弘达 褚君浩 罗 毅 张 兴

编 委: (按姓氏拼音排序)

陈弘毅 陈诺夫 陈治明 杜国同 方祖捷 封松林
黄庆安 黄永箴 江风益 李国华 李晋闽 李树深
刘忠立 鲁华祥 马骁宇 钱 鹤 任晓敏 邵志标
申德振 沈光地 石 寅 王国宏 王建农 吴晓光
杨 辉 杨富华 余金中 俞育德 曾一平 张 荣
张国义 赵元富 祝宁华

《半导体科学与技术丛书》出版说明

半导体科学与技术在 20 世纪科学技术的突破性发展中起着关键的作用，它带动了新材料、新器件、新技术和新的交叉学科的发展创新，并在许多技术领域引起了革命性变革和进步，从而产生了现代的计算机产业、通信产业和 IT 技术。而目前发展迅速的半导体微/纳电子器件、光电子器件和量子信息又将推动本世纪的技术发展和产业革命。半导体科学技术已成为与国家经济发展、社会进步以及国防安全密切相关的重要的科学技术。

新中国成立以后，在国际上对中国禁运封锁的条件下，我国的科技工作者在老一辈科学家的带领下，自力更生，艰苦奋斗，从无到有，在我国半导体的发展历史上取得了许多“第一个”的成果，为我国半导体科学技术事业的发展，为国防建设和国民经济的发展做出过有重要历史影响的贡献。目前，在改革开放的大好形势下，我国新一代的半导体科技工作者继承老一辈科学家的优良传统，正在为发展我国的半导体事业、加快提高我国科技自主创新能力、推动我们国家在微电子和光电子产业中自主知识产权的发展而顽强拼搏。出版这套《半导体科学与技术丛书》的目的是总结我们自己的工作成果，发展我国的半导体事业，使我国成为世界上半导体科学技术的强国。

出版《半导体科学与技术丛书》是想请从事探索性和应用性研究的半导体工作者总结和介绍国际和中国科学家在半导体前沿领域，包括半导体物理、材料、器件、电路等方面的进展和所开展的工作，总结自己的研究经验，吸引更多的年轻人投入和献身到半导体研究的事业中来，为他们提供一套有用的参考书或教材，使他们尽快地进入这一领域中进行创新性的学习和研究，为发展我国的半导体事业做出自己的贡献。

《半导体科学与技术丛书》将致力于反映半导体学科各个领域的基本内容和最新进展，力求覆盖较广阔的前沿领域，展望该专题的发展前景。丛书中的每一册将尽可能讲清一个专题，而不求面面俱到。在写作风格上，希望作者们能做到以大学高年级学生的水平为出发点，深入浅出，图文并茂，文献丰富，突出物理内容，避免冗长公式推导。我们欢迎广大从事半导体科学技术研究的工作者加入到丛书的编写中来。

愿这套丛书的出版既能为国内半导体领域的学者提供一个机会，将他们的累累硕果奉献给广大读者，又能对半导体科学和技术的教学和研究起到促进和推动作用。

夏建白

2005 年 3 月 16 日

序

人们认为有机材料是绝缘体的传统观念正在日益转变。20 世纪 40 年代科学家们发现了有机半导体，70 年代发现了有机导体，80 年代发现了有机超导体，90 年代发现了有机铁磁体。诺贝尔奖作为现代科学发展史的里程碑，也见证了有机电子学令人鼓舞的发展脉络：2000 年，艾伦·黑格等 3 人因为发现了导电聚合物被授予诺贝尔化学奖，开拓了有机电子学的新时代；而在有机电子学的另一个新兴领域，英国曼彻斯特大学两位科学家安德烈·盖姆和康斯坦丁·诺沃肖罗夫因在石墨烯方面的开创性实验而荣膺 2010 年的诺贝尔物理学奖。这 10 年间两次诺贝尔奖的颁发见证了历史，也记载着有机电子学从热点转为焦点，从基础研究走向产业开发，为人类文明与科学技术的进步作出日益突出贡献的发展历程。

在各种电子器件中，诸如场效应晶体管、太阳能电池、电致发光、存储、传感、激光器等，有机材料都相继出现并被证明有广阔的应用前景。通常，化学家们专注于功能性有机光电材料；而物理及材料学家们最感兴趣的是器件物理；面向产业的研发则比较关注性能优异器件的实际应用。但是，在实际研究中，以上的方方面面相互交叉，互相促进又互相制约。因此，对材料、器件、物理等领域的全面理解和掌握，对有机电子学的发展十分必要。

继往开来，目前有机电子学的研究方兴未艾。相对于理论、材料、器件机理及应用都已成熟的硅基电子学，有机电子学还处于发展、探索阶段，很多理论都是借鉴于无机体系，没有形成定论。人们急需系统阐述有机材料中的电子过程及材料特性，各类器件结构、工作机制及表征手段的书籍，它既可以作为入门基础用书，又可以作为深入研究的参考资料。基于此，由黄维、密保秀和高志强 3 位教授所撰写的《有机电子学》这一专著应运而生。

在内容结构方面，该书首先从有机光电材料的性质与化学结构关系出发，对有机材料的光学和电学性质作了详细的论述：阐释相关概念，讨论各种机理，并对重要表征方法做了概括介绍。在后续的各章节中分别对有

机场效应晶体管、有机太阳能电池、有机电致发光、有机传感器、有机存储及有机激光器进行了分析和讨论。在每个章节中，不仅总结和介绍了基本概念和器件工作机制、表征方法和功能有机材料，还对每个方向的发展状态、发展前景或者潜在应用作了相应的分析和评述。

该书的作者黄维、密保秀和高志强 3 位教授都是十几年来专门从事有机电子学领域研究的学者。特别是黄维教授，20 世纪 90 年代初就介入这一领域，并一直活跃于有机电子学研究的前沿，在有机半导体带隙工程、高效稳定蓝光有机半导体材料的开发、有机光电信息器件的研制、有机电子材料凝聚态过程的微观调控等方面开展了深入系统的研究工作，有许多重要和富有创造性的学术观点和科学成果。因此，相信该书将对有机电子学这一新兴交叉学科的形成和发展有相当大的促进作用。它的出版，必将引起国内外同行的关注和思考，从而带动有机电子学学科在我国的发展及产业化进程的推进。

该书作为我国在有机电子学领域内容全面翔实、学术价值较高的学术专著，从材料组织到文字撰写上，都颇具匠心和学术功力。由于该书是由长期从事有机电子学研究的专家据其掌握的知识和体会凝练所得，故而深入浅出、通俗易懂。相信它既可作为初涉有机电子学领域的人员作为入门的基础读本，也会对多年从事有机电子学领域研究的专业人士在了解学科前沿进展、开阔研究视野、启发研究思路等方面有所裨益，可以预期该书将有比较广泛的读者群。



2010 年 10 月 16 日

前 言

在传统观念上,有机材料是以碳原子为基础的绝缘体,通常不具备光、电、磁等导体或半导体的性质。20 世纪 70 年代末,Alan J. Heeger 等发明导电高分子,孕育并开辟了有机电子学这一新兴学科领域,并因此获得了 2000 年的诺贝尔化学奖。至此,有机材料的光、电、磁性质逐渐开始被人类所认识,同时它们在各种电子器件中的应用也得到了研究者们的青睐。

近十几年来,在基于传统无机半导体的电子材料和器件不断发展成熟和广泛应用之后,人们对有机材料的光、电、磁性质的认识进一步深入,它们在电子器件等方面的研究与应用逐步得到国内外学术界及产业界的关注,其中有多方面的原因,譬如:① 无机材料的电子性能发展到了接近极限的地步,继续提高性能、减小尺寸、降低成本等都是非常困难的事情。因为单位面积上基于无机半导体材料的器件数量不可能按照摩尔定律的方式无限增长,小尺寸下器件性能将面临诸多问题,如量子隧穿效应引起的电流泄漏等。② 与有限的无机硅及锗半导体材料相比,有机材料的数量成千上万,功能可通过化学合成与修饰等手段得到无限量的调制,比较容易满足不同的功能需求。同时,有机材料相对廉价,使器件制备的成本大幅度减低。③ 有机材料具有柔软性和可适应性,非常适合印刷等大面积、低成本制备工艺,有潜力用以制备柔性器件。④ 当然,最主要的是,有机材料可实现硅等无机半导体的信息显示、传感、存储、光电转换等功能。这不但可以对无机半导体器件起到补充及扩展作用,在未来的电子器件应用方面,也将具有无限的潜力。⑤ 最后,由于有机材料与生物体的相容性高于无机材料,可以作为无机材料与生物体系联系的桥梁。正是由于上述原因,基于有机功能材料、面向器件应用等方面的研究日益发展,并在化学、物理、材料、生物、电子信息等学科领域高度交叉,进而逐步形成了有机电子学研究体系。

有机电子学是一门新兴交叉和前沿学科,它凭借着有机光电材料及半导体材料独特的分子特性、软物质行为和超分子结构,已成为继真空电子、固体电子、光电子之后的国际研究热点。由于有机电子学的形成与发展所经历的时间较短,迄今国内外还鲜有对有机电子学进行系统、全面论述的

专著。在国际上, 2006 年 Wiley-VCH 出版的 *Organic Electronics: Materials, Manufacturing, and Applications*, 主要是针对有机场效应晶体管器件中的材料、制备和应用, 而其他有机电子器件, 诸如有机太阳能电池、有机电致发光等都没有进行介绍。在国内, 近年来陆续出版了与有机电子学相关的几部专著, 如 2005 年复旦大学出版社出版的《有机电致发光材料与器件导论》、2006 年化学工业出版社出版的《有机电致发光材料及应用》、2006 年化学工业出版社出版的《有机太阳能电池与塑料太阳能电池》、2007 年清华大学出版社出版的《OLED 有机电致发光材料与器件》、2008 年科学出版社出版的《有机半导体异质结导论》等。但是据我们了解, 国内外对有机电子学进行系统、全面论述的专著, 仍然比较缺乏。

本书的作者们十多年坚持从事有机电子学领域研究, 活跃在有机电子学领域的前沿, 包括各种功能材料设计、器件机理及物理过程等, 取得了大量原创性的科研成果, 形成了自身的研究特色, 在国内外有一定影响, 同时, 也非常了解本学科国际前沿的发展状况及理论基础。加上作者先后在新加坡国立大学、复旦大学和南京邮电大学讲授“有机电子学导论”、“有机光电功能材料”及“有机平板显示技术”等有机电子学相关课程, 积累了大量有机电子学方面的素材及讲义。通过课堂讲授与讨论, 形成了比较系统的有机电子学的知识体系。同时, 作者也意识到撰写一本能够较系统地阐述有机电子学理论基础及各种器件应用的书籍非常有必要, 既可以为入门者提供系统的介绍, 又可以为专业人士提供思考和讨论。

基于对有机电子学相关理论和应用的理解, 结合我们十多年从事有机光电材料研究、教学与产业化的经历, 聚焦于前沿研究方向, 将有机电子学领域的理论基础、动态及进展系统化及条理化, 撰写了《有机电子学》这本专著。在撰写过程中, 除了主要引用包括作者所在团队以及国内外同行的大量工作之外, 我们也参考了如下几本书籍: ① *Organic Molecular Solids*, Wiley-VCH (2007); ② *Organic Electronics: Materials, Manufacturing, and Applications*, Wiley-VCH (2006); ③ *Organic Light Emitting Devices: Synthesis, Properties and Application*, Wiley-VCH (2006); ④ *Electronic Processes in Organic Crystals and Polymers*, Oxford University Press (1999); ⑤ 《OLED 有机电致发光材料与器件》, 清华大学出版社(2007); ⑥《固体中的电输运》, 科学出版社(1991); 等等。

在内容方面, 作者主要从有机电子学的角度, 深入浅出地概括总结了有机电子材料中的电子结构与过程, 并解释了有机固体凝聚态的各种性质。

这些性质对实际应用中的有机光电器件的行为起决定性的作用。随后,介绍了有机材料光电性质的测试表征方法以及有机薄膜的制备手段。最后,再将理论与实践相结合,介绍和讨论了有机薄膜材料在实际电子器件中的各种应用,例如,有机场效应晶体管、基于有机材料的太阳能电池、基于有机电致发光的信息显示与照明、有机传感器、有机存储器 and 有机激光器等。针对各种应用器件,本书主要强调它们的基础知识、基本原理、器件结构和表征方法。同时,在相应的领域,总结了研究进展,进行了评述、讨论,并结合有机电子学发展态势提出了自己的观点。

本书的特色在于通过分子的电子结构理论解释有机固体聚集态的光电过程与特性,进而阐述它们的器件应用。本书将 20 多年来有机电子学的理论发展与材料、器件、结构研究以及各类应用有机地结合在一起,通过理论阐述材料及器件的性能,指出进一步努力的方向。

本书所系统总结和呈现的相当一部分工作得到了国家科技部“973”重大科学研究计划项目“有机纳米材料在显示器件中的应用及相关原理”(2009CB930600)、国家杰出青年科学基金项目“光学和光电子材料”(60235412)、教育部“长江学者奖励计划”[信息材料(有机电子学)]、国家自然科学基金委员会国际科技合作与交流专项“高效大面积有机太阳能电池”(BZ2008117)和纳米科技重大研究计划重点项目“有机/无机纳米杂化材料的光电器件制备和研究”(90406021)、教育部重大培育基金项目“杂化型稀土功能材料与半导体器件”(707032)、教育部“新世纪优秀人才”支持计划“基于磷光机制的三基色 OLED 材料的设计原理和器件应用”(NCET-08-0697)、江苏省“创新学者攀登项目”“基于有机纳米半导体的显示与照明器件研究”和高等学校优秀科技创新团队“有机电子与纳米技术”(TJ207035)等一批科研项目的支持下展开的;在作者近二十年来从事有机电子学的研究过程中,一大批合作者、博士后、博士生、硕士生和实验技术人员对本书内容的形成作出了不同角度的贡献,尤其需要指出的是,在书稿撰写过程中,得到了作者所在的南京邮电大学信息材料与纳米技术研究院、有机电子与信息显示国家重点实验室培育基地的范曲立教授、赵强教授、陈润锋副教授、陈淑芬副教授、黄艳琴副教授、姜鸿基副教授、解令海副教授、赖文勇副教授、刘淑娟副教授、唐超副教授等老师的帮助,南京邮电大学信息材料与纳米技术研究院的研究生王海珊、李志刚、孙辉岭等同学在绘图和初稿校对方面付出了劳动。

作者在本书出版过程中得到了一些专家和学者的启发、鼓励和指导。特别需要指出的是，中国科学院半导体研究所研究员、中国科学院院士夏建白先生盛情邀请作者总结所在团队的工作并撰写本书，而且将其纳入《半导体科学与技术丛书》之中；中国科学院半导体研究所研究员、中国科学院院士王占国先生，中国科学院半导体研究所研究员、中国科学院院士王圩先生和中国科学院微电子研究所研究员、中国科学院院士吴德馨先生分别通读了本书初稿并提出了非常具体的很有价值的建议，对本书最后的完成作出了很大贡献；我国有机电子学领域的领军学者、中国科学院化学所研究员、中国科学院院士朱道本先生在百忙中欣然提笔为本书作序，为本书增色不少，作者非常感激。此外，本书的编辑出版得到了国家科学技术学术著作出版基金的资助。科学出版社编辑张静、钱俊为本书的编辑和校对付出了大量辛勤的劳动。限于篇幅，对本书的形成和撰写作出过贡献的其他人士恕不能在此一一指出。借本书出版付梓之际，作者对国家自然科学基金委员会、科技部、教育部、上海市、江苏省、复旦大学和南京邮电大学等有关单位和国内外同行、同事、学生长期以来所给予的关心、指导、支持和帮助一并表示衷心的感谢和诚挚的敬意。

本书旨在通过对有机电子学领域的基础知识及应用机理的系统介绍和阐述，促进有机电子学学科的形成、在国内的普及及相关专业人才的系统培养，并对同行在有机电子学领域开展深入研究提供思路。同时，我们相信本书的出版必将对促进我国有机电子材料与器件的产业化、提高我国在有机电子科学与技术领域的竞争力有一定的裨益。近几年来，由于有机电子学的迅速发展，新材料、新器件、新现象和新观点不断出现，很多方面还存在不同的看法，没有形成共识和定论。鉴于作者知识面和水平所限，书中不妥和错误之处在所难免，恳请各位专家学者和广大读者不吝批评指正，以便在本书再版之际能够得以进一步修改、更正、补充和完善。

黄 维 密保秀 高志强

2010年5月1日于金陵

目 录

序

前言

第1章 引言	1
1.1 有机材料概念及发展简史	1
1.2 电子学与有机材料	4
1.3 有机半导体与无机半导体比较	6
1.4 有机光电材料中的电子过程及相关性质简介	8
1.5 有机电子学及其应用简介	13
1.5.1 有机场效应晶体管	15
1.5.2 有机太阳能电池	17
1.5.3 有机电致发光	19
1.5.4 有机传感器和存储器	25
参考文献	27
第2章 有机材料中的电子结构与过程	29
2.1 有机分子内成键及相关概念	30
2.1.1 固体物质的成键方式	30
2.1.2 原子的电子轨道和电子云	31
2.1.3 原子之间的杂化轨道	32
2.1.4 σ 键与 π 键, 单键、双键与三键, 饱和键与不饱和键	33
2.1.5 价电子、 σ 电子、 π 电子和n电子	34
2.1.6 实例: 化学成键与材料性质	34
2.2 有机材料的电子结构及相关理论简介	40
2.2.1 分子轨道理论	40
2.2.2 配位场理论	42
2.2.3 能带理论	43
2.2.4 有机材料中电子能级	46
2.3 有机材料分子间作用力及其晶体堆积方式	56

2.3.1	作用力	56
2.3.2	有机分子晶体结构	60
2.4	有机材料中与光/能量相关的概念及电子过程	64
2.4.1	分子内光激发态及其衰变过程	64
2.4.2	聚集分子中的激发态及衰变特点	69
2.4.3	光跃迁规律	80
2.4.4	激子的产生	90
2.4.5	激子的分类	91
2.4.6	激子输运 —— 能量传递/转移	93
2.4.7	激子扩散	100
2.4.8	激子的动力学过程	101
2.4.9	物质的发光	105
2.5	有机材料中与电学性能相关的概念及电子过程	116
2.5.1	有机材料电学性质研究历史	116
2.5.2	描述电学性质的基本概念	118
2.5.3	有机材料中载流子类型	124
2.5.4	光生载流子	125
2.5.5	掺杂型载流子	126
2.5.6	注入型载流子	128
2.5.7	载流子注入效率	142
2.5.8	载流子输运的两种极限模式	143
2.5.9	非晶 (无序) 有机材料中载流子迁移率的理论模型	144
2.5.10	导电有机材料	149
2.6	有机电子材料性能表征	155
2.6.1	热稳定性分析	155
2.6.2	HOMO/LUMO 及三线态能级	156
2.6.3	载流子迁移率	158
2.6.4	功函数测量	164
2.6.5	发光量子产率	165
	参考文献	167
第 3 章	有机场效应晶体管	170
3.1	场效应晶体管发展简史	170

3.2 有机场效应晶体管的结构	174
3.3 场效应晶体管工作原理	175
3.3.1 聚集模式与耗尽模式	175
3.3.2 n型和p型有机场效应晶体管	178
3.4 有机场效应晶体管器件性能表征	179
3.4.1 转移特性曲线和输出特性曲线	179
3.4.2 线性区域、饱和区域和夹断电压	181
3.4.3 阈值电压、亚阈值漂移、电流开关比	183
3.4.4 载流子迁移率	185
3.4.5 接触电阻	188
3.5 场效应晶体管中的有机半导体材料	192
3.5.1 小分子与聚合物半导体材料在场效应晶体管中应用比较	192
3.5.2 p型有机半导体材料	194
3.5.3 n型有机半导体材料	205
3.6 有机场效应晶体管的潜在应用和挑战	213
参考文献	213
第4章 有机太阳能电池	216
4.1 太阳能电池简介	217
4.2 太阳辐射光谱	222
4.3 有机太阳能电池的工作原理	224
4.3.1 激子产生 —— 光吸收过程	225
4.3.2 激子扩散	227
4.3.3 激子解离 (电荷的转移和分离)	228
4.3.4 电荷的输运与收集	230
4.3.5 有机太阳能电池中的电流	233
4.4 有机太阳能电池的器件结构	235
4.4.1 单层器件	235
4.4.2 双层异质结器件	236
4.4.3 本体异质结器件	237
4.4.4 分子D-A结器件	238
4.4.5 叠层结构器件	239
4.4.6 器件结构的界面修饰	240

4.5 有机太阳能电池的性能表征	241
4.5.1 开路电压和填充因子	241
4.5.2 器件的短路电流及其影响因素	242
4.5.3 有机太阳能电池器件的效率	243
4.6 有机光伏活性材料介绍	244
4.6.1 C60 及其衍生物	245
4.6.2 噻吩类材料	246
4.6.3 PPV 及其衍生物	249
4.6.4 芳香胺类材料	250
4.6.5 稠环芳香化合物	251
4.6.6 酞菁染料及卟啉金属配合物	253
4.6.7 无机纳米材料	254
4.6.8 碳纳米管及石墨烯	254
4.6.9 同质双极 D-A 结材料	255
4.7 目前研究状况及展望	257
参考文献	260
第 5 章 有机电致发光	265
5.1 研究简史	266
5.2 有机电致发光器件机理	268
5.2.1 电致发光种类	268
5.2.2 电荷注入	272
5.2.3 载流子输运及器件电流	288
5.2.4 载流子复合产生激子及其光辐射衰减过程	289
5.2.5 主体材料中掺杂磷光材料的电场激发过程和机制	292
5.3 有机电致发光的器件结构及相关工作机制	298
5.3.1 主体发光与掺杂发光器件结构	299
5.3.2 单层器件结构	300
5.3.3 双层器件结构	301
5.3.4 三层器件结构	302
5.3.5 多层器件结构	303
5.3.6 白光器件结构	305
5.4 有机电致发光器件表征	307

5.4.1 开启电压和驱动电压	307
5.4.2 发光效率	307
5.4.3 色度坐标	309
5.4.4 白光的色温及显色指数	311
5.4.5 器件寿命	312
5.5 有机电致发光器件的功能材料研究进展	313
5.5.1 OLED 功能材料的一般研究方法	313
5.5.2 各类 OLED 功能材料	316
5.5.3 OLED 功能材料的问题及挑战	348
参考文献	348
第 6 章 有机传感	354
6.1 传感的重要性	354
6.2 传感的基本概念	356
6.3 有机传感器的检测机制	357
6.3.1 导电法	358
6.3.2 电位法	359
6.3.3 色度法	362
6.3.4 表面等离子共振法	366
6.3.5 石英晶体微天平法	369
6.3.6 荧光法	370
6.4 有机传感材料	377
6.4.1 小分子传感材料	377
6.4.2 导电聚合物及荧光聚合物	380
参考文献	383
第 7 章 有机存储	384
7.1 存储器简介	384
7.2 有机光存储	386
7.2.1 二维存储光盘和三维存储光盘	386
7.2.2 光盘及其相应有机活性材料	388
7.3 有机电存储	392
7.3.1 简介	392
7.3.2 电阻型有机存储的电压-电流曲线特征	393

7.3.3 电阻型有机存储器的活性材料研究进展·····	396
参考文献·····	402
第8章 有机激光 ·····	403
8.1 激光简介·····	403
8.2 激光的基本组成及工作原理·····	404
8.3 激光特性表征·····	410
8.3.1 输出频率及波长·····	410
8.3.2 阈值增益系数·····	411
8.3.3 输出功率·····	412
8.3.4 激光增益材料的放大自辐射特性·····	413
8.4 光泵浦有机激光·····	414
8.4.1 有机染料激光·····	415
8.4.2 有机半导体激光·····	417
8.5 电泵浦有机激光·····	419
参考文献·····	420
《半导体科学与技术丛书》已出版书目·····	422