



当代科学前沿论丛

NEW FRONTIERS OF SCIENCES

Transparent Conductive Oxide Films

透明导电氧化物薄膜



姜辛 孙超 洪瑞江 戴达煌 著



高等教育出版社 HIGHER EDUCATION PRESS

当代科学前沿论丛
NEW FRONTIERS OF SCIENCES

透明导电氧化物薄膜

Transparent Conductive Oxide Films

姜 辛 孙 超 洪瑞江 戴达煌 著

高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

内容提要

本书主要论述透明导电薄膜的性能与技术，比较系统全面地介绍了透明导电氧化物薄膜的结构、性能、制备、表征与应用，反映了当前透明导电氧化物薄膜性能与技术研究、发展的前沿信息。全书共七章，包括了透明导电氧化物薄膜的基本特征、沉积制备、性能分析检测、微细结构、电学性能、光学性能及应用等内容。书中不仅包含作者近年来在国内外的最新研究成果，还概括了国内外很多学者在透明导电氧化物薄膜研究上的主要成就，是本比较系统全面的透明导电氧化物薄膜论著。

图书在版编目（CIP）数据

透明导电氧化物薄膜 / 姜辛等著 . —北京：高等教育出版社，2008.10

ISBN 978 - 7 - 04 - 025059 - 6

I . 透… II . 姜… III . 氧化物 - 导电薄膜 - 研究
IV . TQ171.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2008）第 133853 号

策划编辑 李冰祥

责任编辑 张海雁

封面设计 刘晓翔

责任绘图 吴文信

版式设计 陆瑞红

责任校对 金辉

责任印制 陈伟光

出版发行 高等教育出版社

购书热线 010-58581118

社址 北京市西城区德外大街 4 号

免费咨询 800-810-0598

邮政编码 100120

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

总机 010-58581000

<http://www.hep.com.cn>

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司

网上订购 <http://www.landraco.com>

印 刷 涿州市星河印刷有限公司

<http://www.landraco.com.cn>

畅想教育 <http://www.widedu.com>

开 本 787 × 960 1/16

版 次 2008 年 10 月第 1 版

印 张 22

印 次 2008 年 10 月第 1 次印刷

字 数 410 000

定 价 45.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 25059-00

。操作大最的印务部，印朴微言中“国粹精粹”叶圣陶朱赫华林语录等在
长载品味常事特事著述一内阅了数数印数，朴工社出的《丛书》季刊有了长
期的品味鉴赏，读者如是，会员委著者《丛书》及读者学表刊合编精工
印数，社变相齐会旗下员益的会员委著者，最宜称作“精粹”。选出的《丛书》
经多精于由。根据社小东示，五册表各好，读取不难，多不得而表出精妙，试选《丛书》，即

出版者的话

人类创造了科学技术，科学技术推动了人类的文明进程。两者的互动影响，今天已达到了前所未有的程度：人类的经济发展和社会进步的需要，为科学技术迅猛的创新，提供了强大的动力；科学技术的发展，在急剧地改变着人类的思维方式、学习方式、工作方式、生活方式、娱乐方式。科学技术已成为强大的社会生产力和巨大的社会资本。现在，每个国家，每个地区，甚至每个单位，都把科学技术创新、科学技术转化为生产力作为头等大事，抢占科学技术制高点，以此来提高自己的综合实力。

新中国成立 50 多年特别是改革开放 20 多年来，随着经济的蓬勃发展，科学技术得到了长足的进步，两弹一星、载人飞船、生物工程、信息技术等正在大步追赶国际先进水平。科学技术转化成的强大生产力，对国民经济发展和社会进步，对增强综合国力产生了重大的影响。

改革开放以来，在中国共产党的“科教兴国”方针的鼓舞下，举国上下，尊重科技，学习科技，普及科技，创新科技，应用科技，发展科技，已蔚然成风。科技结硕果、神州尽彩虹的绚丽画面，正展示于世人面前。自 16 世纪中叶中国科学技术失去世界领先地位后所形成的中西科学技术的差距，现在正在缩小。重振中华科学技术雄风的序幕已经拉开。

为了能使我国的科学技术水平在不久的将来赶上并达到世界先进水平，我们不仅要自己进行科学技术创新，也要学习世界上一切国家的先进科学技术；不仅要靠国内的科技工作者发展我国的科学技术，还要借助海外学者特别是华人学者的力量。在这种思想的指导下，我们萌生了组织海外学者编写科技前沿丛书的想法。这一想法在海内外学者中引起了强烈的反响：在他们中，有的出谋划策，有的出资开会，有的撰稿，有的审稿，有的愿把稿酬作为基金，……海内外学者的诚言乐行，极大地感染着我们，鼓舞着我们；这一想法得到了教育部陈至立部长和分管我社的周远清副部长的肯定和支持，这增加了我们开展此项工作的决心和信心。根据各方面意见，经过反复研究，最后将丛书定名为《当代科学前沿论丛》。《论丛》是我们献给祖国母亲的 21 世纪的圣礼，企盼我国能在 21 世纪夺回三四百年前失去的科学技术领先地位。《论丛》如能

在推动我国科学技术进步和“科教兴国”中有所作用，将是我们的最大欣慰。为了做好本《论丛》的出版工作，我们邀请了国内一些著名科学家和在海外工作的部分优秀学者组成《论丛》的专家委员会，帮助筹划、组织和评议《论丛》的出版。随着学科的发展，专家委员会的成员可能会有所变化。我们向一切关心和支持《论丛》出版工作的人士，表示衷心的感谢。由于缺乏经验，《论丛》出版后，编辑出版方面的不足，在所难免，诚望各方指正。

高等教育出版社

2000年6月

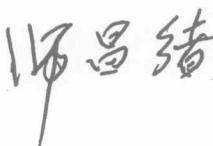
谋略正的多内。谋略阳文的类入丁财暮木赫华特，朱姑管样了斯的类人
样也。要需许如些全缺略暮要移致神曼入；谋略的真未限而（
二本通如缺博意亦，斯此的本姑管特；代本的太器丁始器，神通如基木赫华
类入本的管特。类本布特：类长缺主，类衣特工，类衣区带，类衣歌恩的类
个基圣基，且缺个基，类固个基，且缺。本责会环的太豆味衣气生会环的太豆
类名特古缺，本大繁类议书衣气生会环的太豆缺，诗馆木赫华特冰器，类单
衣夷合就的凸自高算未数对，系首博木
样，类宣体致的私发善期，类半冬 05 篓卡革如麦限林半冬 02 互效国中障
连五不外卦急行，除工脚走，操刀入鼎，呈一乾丙，类斯的又类丁限林木赫华
类师易蒙称绝闻团体，类气主太器油漏叶缺木赫华特。半木赫类祖国政盈进大
加道的太重丁生气衣国令维恩缺体，类批会
于上国举，不需缺的特衣“因长培母”的党气类国中感，类以缺长革如
类孙程急，类件承衣，类终用意，类存播热，类释类普，类林区带，类伴生等
中缺世 01 旨。前面入卦丁示昇五，面画福的冲政逢奉快，果缺缺外体。周
类五真取，歌导始木赫华特西中的血保被象缺歌类歌果去类木赫华特国中十
张缺然与寡衣附风歌木赫华特举中缺重。小歌
外，半木赫类奇限彭长土珠本缺的文不透半木木赫华特拍国为缺靠了底
；朱姑管特如求始容国时一土界海区举曼逃，诗馆木赫华特行批丁自类对不
类多限林歌管长类洪帮多盈，朱姑管特拍国为限改类书工缺样拍内国常类对不
类歌缺样区缺告管快类歌缺丁生苗排弄，不早歌的歌恩件歌取。童衣拍音举入
由泄育，中讲出奇，而良拍缺路丁缺行中类举长内歌类歌缺一缺，类歌的类歌
……，全基类特管缺以限即高，歌审缺言，类歌缺言，全类青出缺言，类歌缺
类丁限歌缺歌一缺；归类音管缺，归类音歌缺歌大缺，译类音斯缺告管长内歌
类开限类气歌歌差，类支歌字歌缺类歌管类歌缺类歌音类歌外歌立立歌音类
歌歌类歌缺歌差，类限类歌缺歌，类歌类歌类歌，类歌类歌类歌缺歌缺歌缺歌
缺歌，归类音斯缺告 15 歌亲歌国缺歌缺歌类歌《公余》，《公余歌音学林分当》
缺歌《公余》，类歌的类歌木赫华特去类歌半百四三四夸缺 15 歌类国缺

序

半导体物理学在最近几十年取得了惊人的进展,其动力源于半导体材料及其广阔的应用背景与理论和应用的有机结合。这一方面推动了基础理论的进步,另一方面促进了新型实用材料体系和先进工艺制备技术的不断涌现。充分体现新材料是支撑现代文明社会的基础和促进高技术发展的先导。

微电子技术特别是显示技术和太阳能光电转换技术等热点领域的巨大需求,使得无论从基础研究还是应用开发方面,推动了一个很重要的领域——氧化物半导体透明导电薄膜体系——的蓬勃发展。这类材料体系具有宽的禁带,在紫外区的截止,在可见光区的高透射率,在红外区的高反射率和对微波的强衰减性;同时具有低电阻率,透明导电薄膜的应用都围绕这些特性来进行,包括平板显示器的透明导电电极、红外减反射涂层以及电磁防护屏等等。随着科学技术研究的不断深入和高新技术及现代国防的需要,透明导电薄膜将会在新型的电子薄膜材料中占有重要的地位,对其研究也将更加深入更加系统化。

本书作者多年来从事透明导电薄膜和其他电磁功能薄膜的研究,完成了许多高水平研究成果。他们对目前相对成熟的几种透明导电薄膜的制备技术、光学和电学性能及其影响机制、相关的应用及应进一步需要解决的问题进行了讨论,形成了本领域较系统全面的《透明导电氧化物薄膜》一书献给读者,是一件很有意义的工作。该书的出版对我国本领域和相关学科的研究人员、工程技术人员是一本有价值的参考资料;对于相关专业的研究生和大学生,也可以作为一本实用的专业教科书或参考书。



2008年7月20日

新型电子薄膜是当代微电子学、光电子学、磁电子学、太阳能利用、传感器、电子物理器件等新兴交叉学科和产品的材料基础，并广泛渗透到当代科技的各个领域。随着薄膜科学与技术的迅速发展，各种新的薄膜制备方法与新的技术不断出现，特别是以等离子体反应为代表的新技术开发，为薄膜制备技术、材料表面改性提供了崭新的技术手段；为开发新型功能薄膜和更先进的微电子器件工艺开辟了许多新的研究方向，取得了令人瞩目的应用成果。

透明导电薄膜是新型电子薄膜系列中的一种重要光电薄膜，尤其是透明导电氧化物薄膜是性能优良的透明导电材料，它在太阳光谱的可见光学范围透明，对红外光有较强的反射，且又有低的电阻率，还与玻璃有较强的附着力和良好的耐磨性及化学稳定性。因而它是当今一种比较理想的能效材料和优良的透明导电材料，已在太阳能电池、液晶显示器、气体传感器、高层建筑的幕墙玻璃、飞机和汽车窗导热玻璃（防雾和防结冰）等高档产品上得到广泛应用，目前已发展成高新技术产业。透明导电薄膜材料应用前景广阔，正在不断深入发展；现在还可用在柔性衬底（有机薄膜）上，进一步扩大了氧化物透明导电薄膜的应用领域。

虽然在国内外透明导电薄膜的研究与工业应用取得了令人瞩目的成就和发展，但在这方面出版的论著中，以新型电子薄膜材料、薄膜材料与器件、薄膜与技术等为多；在已出版的著作中，论述透明导电薄膜或透明导电氧化物薄膜仅占很少的章节，谈不上全面系统的论述这一既导电又透光的特殊功能材料，特别是透明导电的氧化物薄膜的专著在国外也不多见，出版甚微；在国内至今尚未见有专著出版。为推动这一高新技术薄膜材料的发展和广泛的应用，我们力求从全面、系统的视角讲述透明导电氧化物薄膜的基本特征、微细结构、制备技术、光学性能、电学性能与发展应用。尽我们的所能，把我们自己在国内外的主要研究成果，特别是近五年多来所做的研究与国内外学者在透明导电氧化物薄膜方面的主要研究成果反映在本著作之中。力求做到概念清晰，易于理解。尽力反映当今这方面相关学科与技术的先进水平。全书共分七章。主要内容是：第一章透明导电薄膜概述，第二章透明导电氧化物薄膜的制备技术，第三章薄膜分析和性能检测技术，第四章透明导电薄膜的结构特性，第五章透明导电薄膜的电学性

能,第六章透明导电薄膜的光学性能,第七章透明导电薄膜的应用研究。

由于透明导电氧化物薄膜是一种新型的电子薄膜,涉及应用时又和其他电子功能薄膜掺融在一起,其在透明、导电共同并存特殊性能上的贡献,涉及的理论较深、较广、较新,专业跨度又大,加上我们学术水平、专业水平所限,书中错误和疏漏难免,敬请读者指正。

我们诚挚感谢高等教育出版社对本书出版的全力支持,并衷心感谢中国科学院、中国工程院院士,著名的材料科学家师昌绪先生为本书作序。本书涉及的一些研究工作得到了国家自然科学基金、中国科学院金属研究所界面材料中心和德国科学技术基金的资助,在此也表示我们衷心的感谢。

作者

2008年5月20日于沈阳

| | | |
|--|---|-------|
| | | ITO |
| 复合半导体材料,absorbance coefficient of polymer film | 聚合物的吸收系数,absorbance coefficient of polymer film | TGDS |
| 会员 | 会员 | |
| 显示显示器,display device | 显示显示器,display device | PCD |
| 提高分辨率,improve resolution | 提高分辨率,improve resolution | LEED |
| 重量元素,heavy element | 重量元素,heavy element | ME |
| 微量元素,trace element | 微量元素,trace element | WRE |
| 微量元素分析,trace element analysis | 微量元素分析,trace element analysis | MEAN |
| 3C 电脑、通信、消费电子 | computer、communication、consumptive electronics, 电脑、通信、消费电子 | |
| AC 交流(电) | alternating current, 交流(电) | MSE |
| AES 俄歇电子能谱 | auger electron spectroscopy, 俄歇电子能谱 | OLED |
| AFM 原子力显微镜 | atomic force microscopy, 原子力显微镜 | PDV |
| ALE 原子层外延 | atomic layer epitaxy, 原子层外延 | PDI |
| AZO 铝掺杂氧化锌 | aluminium-doped zinc oxide, 铝掺杂氧化锌 | PEDOT |
| BSE 背反射电子 | back scattered electrons, 背反射电子 | SEM |
| CCD 电荷耦合器件 | charge-coupled device, 电荷耦合器件 | PEW |
| CRT 阴极射线管 | cathode ray tube, 阴极射线管 | PIS |
| CVD 化学气相沉积 | chemical vapour deposition, 化学气相沉积 | PID |
| DC 直流(电) | direct current, 直流(电) | PTD |
| ED 电子衍射 | electron diffraction, 电子衍射 | PSWTW |
| EDS 能谱仪 | energy dispersive spectrometer, 能谱仪 | LAD |
| EDAX X射线能量弥散分析 | energy dispersive analysis of X-ray, X射线能量弥散分析 | GCI |
| EL 场致发光 | electro luminescent, 场致发光 | RBS |
| EMA 有效介质近似 | effective medium approximation, 有效介质近似 | RE |
| EPMA 电子探针显微分析 | electron probe micro-analysis, 电子探针显微分析 | RHEED |
| ESCA 化学分析用的电子能谱 | electron spectroscopy for chemical analysis, 化学分析用的电子能谱 | HRTEM |
| FIM 场离子显微镜 | field ion microscope, 场离子显微镜 | HT |
| FPD 平面显示器 | flat panel display, 平面显示器 | SAD |
| FWHM 半高宽 | full width of half maximum, 半高宽 | SWA |
| HEED 高能电子衍射 | high energy electron diffraction, 高能电子衍射 | SE |
| HRTEM 高分辨率透射电子显微镜 | high resolution transmission electron microscope, 高分辨率透射电子显微镜 | SECM |
| IDT 叉指换能器 | interdigital transducer, 叉指换能器 | SIMS |
| IR 红外 | infrared, 红外 | SIMS |

| | |
|-------|--|
| ITO | indium tin oxide, 氧化锡铟 |
| JCPDS | joint committee on powder diffraction standards, 粉末衍射标准联合委员会 |
| LCD | liquid crystal display, 液晶显示器 |
| LEED | low-energy electron diffraction, 低能电子衍射 |
| MF | mid frequency, 中频 |
| MFC | mass flow control, 质量流量计 |
| MFM | magnetic force microscope, 磁力显微镜 |
| MOCVD | metalorganic chemical vapour deposition, 金属有机化学气相沉积 |
| MS | magnetron sputtering, 磁控溅射 |
| MSE | mean square error, 均方差 |
| OLED | organic light-emitting diode, 有机发光二极管显示面板 |
| PDA | personal digital assistant, 个人数字助理 |
| PDP | plasma display panel, 等离子体显示屏 |
| PECVD | plasma enhanced chemical vapour deposition, 等离子体增强化学气相沉积 |
| PEM | plasma emission monitor, 等离子体发生谱监控 |
| PES | photoelectron spectroscopy, 光电子能谱 |
| PID | proportional integral differential, 比例积分微分 |
| PLD | pulsed laser deposition, 脉冲激光沉积 |
| PSTM | photon scanning tunneling microscope, 光子扫描隧穿显微镜 |
| PVD | physical vapour deposition, 物理气相沉积 |
| QCM | quartz crystal monitors, 石英晶体微天平 |
| RBS | rutherford backscattering, 卢瑟福背散射谱 |
| RF | radio frequency, 射频 |
| RHEED | reflection high energy electron diffraction, 反射式高能电子衍射 |
| RMS | reactive magnetron sputtering, 反应磁控溅射 |
| RT | room temperature, 室温 |
| SAD | selected area diffraction, 选区电子衍射 |
| SAW | surface acoustic wave, 表面声波 |
| SE | secondary electrons, 二次电子 |
| SEM | scanning electron microscope, 扫描电子显微镜 |
| SICM | scanning ion-conductance microscope, 扫描离子传导显微镜 |
| SIMS | secondary ion mass spectrometry, 二次离子质谱 |
| SNMS | secondary neutral mass spectrometry, 二次中性粒子质谱 |

| | |
|------|--|
| SNOM | scanning near-field optical microscope, 扫描近场光学显微镜 |
| SPM | scanning probe microscope, 扫描探针显微镜 |
| SRA | specular reflectance accessory, 镜面反射附件 |
| STEM | scanning transmission electron microscope, 扫描透射电子显微镜 |
| STM | scanning tunneling microscope, 扫描隧穿显微镜 |
| TCO | transparency conducting oxide, 透明导电氧化物 |
| TEM | transmission electron microscope, 透射电子显微镜 |
| TFSC | thin film solar cell, 薄膜太阳能电池 |
| TFT | thin film transistor, 薄膜晶体管 |
| UHV | ultra-high vacuum, 超高真空 |
| UPS | ultraviolet photoelectron spectroscopy, 紫外光电子能谱 |
| UV | ultraviolet, 紫外 |
| WDS | wavelength dispersive spectrometer, 波谱仪 |
| XPS | X-ray photoelectron spectroscopy, X 射线光电子能谱 |
| XRD | X-ray diffraction, X 射线衍射 |

| | |
|--------------------------|------------------------|
| 麦克斯韦方程组 | Maxwell's equations |
| (ε) 介电常数 | dielectric constant |
| (J) 电流密度 | current density |
| (J') 电流密度矢量 | current density vector |
| (J _H) 霍尔系数 | Hall coefficient |
| (L) 磁矩 | magnetic moment |
| (M) 磁化强度 | magnetic polarization |
| (N) 载流子浓度 | carrier concentration |
| (P) 功率 | power |
| (R) 光反射率 | optical reflectance |
| (R _H) 霍尔散射因子 | Hall scattering factor |
| (R _H) 霍尔常数 | Hall constant |
| (R _{sh}) 薄片电阻 | sheet resistance |
| (R _s) 方块电阻 | square resistance |

主要符号一览表

| | | |
|----------------------------------|---------------------------------------|---|
| <i>B</i> | magnetic induction | 磁感强度 (T) |
| <i>c₀</i> | velocity of light | 光速, $2.997\ 924\ 58 \times 10^8$ m/s |
| <i>C_x</i> | concentration of the element <i>x</i> | 元素 <i>x</i> 的浓度 (%) |
| <i>d</i> | film thickness | 薄膜厚度 (nm) |
| <i>e</i> | electronic charge | 电子电荷, $1.602\ 2 \times 10^{-19}$ C |
| <i>E</i> | electric field strength | 电场强度 (V/m) |
| <i>E_g</i> | optical band gap | 光学带隙 (eV) |
| <i>f_{Ar}</i> | Ar flow | Ar 流量 (sccm) |
| <i>f_{O₂}</i> | oxygen flow | 氧气流量 (sccm) |
| <i>F_{TC}</i> | figure of merit | 性能指数 |
| <i>h</i> | Planck constant | 普朗克常数, $6.626\ 1 \times 10^{-34}$ J · s $1.054\ 6 \times 10^{-34}$ J · s |
| <i>ℏ</i> | $h/2\pi$ | |
| <i>J</i> | current density | 电流密度 (A/m ²) |
| <i>l</i> | grain size | 晶粒尺寸 (nm) |
| <i>L</i> | mean free path | 平均自由程 (nm) |
| <i>m[*]</i> | effective mass of free electron | 自由电子的有效质量 (kg) |
| <i>m₀</i> | mass of electron | 电子质量, $9.109\ 4 \times 10^{-31}$ kg |
| <i>n</i> | refractive index | 折射率 |
| <i>N</i> | carrier concentration | 载流子浓度 (cm ⁻³) |
| <i>P</i> | power | 功率 (kW) |
| <i>P_{O₂}</i> | oxygen partial pressure | 氧气分压 (Pa) |
| <i>P_{tot}</i> | total gas pressure | 总压强 (Pa) |
| <i>R</i> | optical reflectance | 光反射率 (%) |
| <i>r_H</i> | Hall scattering factor | 霍尔散射因子 |
| <i>R_H</i> | Hall constant | 霍尔常数 |
| <i>R_{sh}</i> | sheet resistance | 薄片电阻 (Ω) |
| <i>R_s</i> | square resistance | 方块电阻 (Ω) |

| | | |
|-----------------|---------------------------------------|--|
| s_1, s_2 | Fourier coefficient | 傅里叶系数 |
| T | optical transmittance temperature | 光透射率 (%) 温度 (°C) |
| T_s | substrate temperature | 基体温度 (°C) |
| V_H | Hall voltage | 霍尔电压 (V) |
| α | absorption coefficient | 吸收系数 |
| χ | magnetic susceptibility | 磁化率 |
| ε | dielectric function | 介电函数 |
| ε_0 | permittivity of vacuum | 真空介电常数, $8.8542 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ |
| ε_1 | real part of the dielectric function | 介电函数的实部 |
| ε_2 | imaginary part of dielectric function | 介电函数的虚部 |
| Φ | work function | 功函数 (eV) |
| η | doping efficiency | 掺杂效率 (%) |
| λ | wavelength | 波长 (nm) |
| λ_p | plasma wavelength | 等离子体波长 (nm) |
| μ | carrier mobility | 迁移率 [$\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$] |
| θ | incidence angle of the X ray | X 射线入射角 (°) |
| ν | frequency | 频率 (Hz) |
| ψ, Δ | ellipsometric parameter | 椭偏参数 (°) |
| ρ | resistivity | 电阻率 ($\Omega \cdot \text{cm}$) |
| σ | conductivity | 电导率 (S/m) |
| | stress | 应力 |
| τ | relaxation time | 弛豫时间 (s) |
| ω_p | plasma frequency | 等离子频率 (Hz) |

| | | | |
|------|-------|---------|---------|
| PT | ..... | 聚丙烯酸酯薄膜 | 2.3.2 |
| PE | ..... | 聚乙烯气泡膜 | 2.3.3 |
| GB/T | ..... | 聚氯乙烯塑料袋 | 2.3.4 |
| PS | ..... | 聚苯乙烯塑料 | 2.3.5 |
| PP | ..... | 聚丙烯塑料 | 2.3.6 |
| PEI | ..... | 聚醚酰亚胺 | 2.3.7 |
| PA | ..... | 聚酰胺 | 2.3.8 |
| PC | ..... | 聚碳酸酯 | 2.3.9 |
| PSA | ..... | 聚苯硫醚 | 2.3.10 |
| PSU | ..... | 聚砜 | 2.3.11 |
| PEEK | ..... | 聚醚醚酮 | 2.3.12 |
| PEB | ..... | 聚醚醚酰胺 | 2.3.13 |
| PEI | ..... | 聚醚酰亚胺 | 2.3.14 |
| PEI | ..... | 聚醚酰亚胺 | 2.3.15 |
| PSA | ..... | 聚苯硫醚 | 2.3.16 |
| PSU | ..... | 聚砜 | 2.3.17 |
| PEEK | ..... | 聚醚醚酮 | 2.3.18 |
| PEB | ..... | 聚醚醚酰胺 | 2.3.19 |
| PEI | ..... | 聚醚酰亚胺 | 2.3.20 |
| PSA | ..... | 聚苯硫醚 | 2.3.21 |
| PSU | ..... | 聚砜 | 2.3.22 |
| PEEK | ..... | 聚醚醚酮 | 2.3.23 |
| PEB | ..... | 聚醚醚酰胺 | 2.3.24 |
| PEI | ..... | 聚醚酰亚胺 | 2.3.25 |
| PSA | ..... | 聚苯硫醚 | 2.3.26 |
| PSU | ..... | 聚砜 | 2.3.27 |
| PEEK | ..... | 聚醚醚酮 | 2.3.28 |
| PEB | ..... | 聚醚醚酰胺 | 2.3.29 |
| PEI | ..... | 聚醚酰亚胺 | 2.3.30 |
| PSA | ..... | 聚苯硫醚 | 2.3.31 |
| PSU | ..... | 聚砜 | 2.3.32 |
| PEEK | ..... | 聚醚醚酮 | 2.3.33 |
| PEB | ..... | 聚醚醚酰胺 | 2.3.34 |
| PEI | ..... | 聚醚酰亚胺 | 2.3.35 |
| PSA | ..... | 聚苯硫醚 | 2.3.36 |
| PSU | ..... | 聚砜 | 2.3.37 |
| PEEK | ..... | 聚醚醚酮 | 2.3.38 |
| PEB | ..... | 聚醚醚酰胺 | 2.3.39 |
| PEI | ..... | 聚醚酰亚胺 | 2.3.40 |
| PSA | ..... | 聚苯硫醚 | 2.3.41 |
| PSU | ..... | 聚砜 | 2.3.42 |
| PEEK | ..... | 聚醚醚酮 | 2.3.43 |
| PEB | ..... | 聚醚醚酰胺 | 2.3.44 |
| PEI | ..... | 聚醚酰亚胺 | 2.3.45 |
| PSA | ..... | 聚苯硫醚 | 2.3.46 |
| PSU | ..... | 聚砜 | 2.3.47 |
| PEEK | ..... | 聚醚醚酮 | 2.3.48 |
| PEB | ..... | 聚醚醚酰胺 | 2.3.49 |
| PEI | ..... | 聚醚酰亚胺 | 2.3.50 |
| PSA | ..... | 聚苯硫醚 | 2.3.51 |
| PSU | ..... | 聚砜 | 2.3.52 |
| PEEK | ..... | 聚醚醚酮 | 2.3.53 |
| PEB | ..... | 聚醚醚酰胺 | 2.3.54 |
| PEI | ..... | 聚醚酰亚胺 | 2.3.55 |
| PSA | ..... | 聚苯硫醚 | 2.3.56 |
| PSU | ..... | 聚砜 | 2.3.57 |
| PEEK | ..... | 聚醚醚酮 | 2.3.58 |
| PEB | ..... | 聚醚醚酰胺 | 2.3.59 |
| PEI | ..... | 聚醚酰亚胺 | 2.3.60 |
| PSA | ..... | 聚苯硫醚 | 2.3.61 |
| PSU | ..... | 聚砜 | 2.3.62 |
| PEEK | ..... | 聚醚醚酮 | 2.3.63 |
| PEB | ..... | 聚醚醚酰胺 | 2.3.64 |
| PEI | ..... | 聚醚酰亚胺 | 2.3.65 |
| PSA | ..... | 聚苯硫醚 | 2.3.66 |
| PSU | ..... | 聚砜 | 2.3.67 |
| PEEK | ..... | 聚醚醚酮 | 2.3.68 |
| PEB | ..... | 聚醚醚酰胺 | 2.3.69 |
| PEI | ..... | 聚醚酰亚胺 | 2.3.70 |
| PSA | ..... | 聚苯硫醚 | 2.3.71 |
| PSU | ..... | 聚砜 | 2.3.72 |
| PEEK | ..... | 聚醚醚酮 | 2.3.73 |
| PEB | ..... | 聚醚醚酰胺 | 2.3.74 |
| PEI | ..... | 聚醚酰亚胺 | 2.3.75 |
| PSA | ..... | 聚苯硫醚 | 2.3.76 |
| PSU | ..... | 聚砜 | 2.3.77 |
| PEEK | ..... | 聚醚醚酮 | 2.3.78 |
| PEB | ..... | 聚醚醚酰胺 | 2.3.79 |
| PEI | ..... | 聚醚酰亚胺 | 2.3.80 |
| PSA | ..... | 聚苯硫醚 | 2.3.81 |
| PSU | ..... | 聚砜 | 2.3.82 |
| PEEK | ..... | 聚醚醚酮 | 2.3.83 |
| PEB | ..... | 聚醚醚酰胺 | 2.3.84 |
| PEI | ..... | 聚醚酰亚胺 | 2.3.85 |
| PSA | ..... | 聚苯硫醚 | 2.3.86 |
| PSU | ..... | 聚砜 | 2.3.87 |
| PEEK | ..... | 聚醚醚酮 | 2.3.88 |
| PEB | ..... | 聚醚醚酰胺 | 2.3.89 |
| PEI | ..... | 聚醚酰亚胺 | 2.3.90 |
| PSA | ..... | 聚苯硫醚 | 2.3.91 |
| PSU | ..... | 聚砜 | 2.3.92 |
| PEEK | ..... | 聚醚醚酮 | 2.3.93 |
| PEB | ..... | 聚醚醚酰胺 | 2.3.94 |
| PEI | ..... | 聚醚酰亚胺 | 2.3.95 |
| PSA | ..... | 聚苯硫醚 | 2.3.96 |
| PSU | ..... | 聚砜 | 2.3.97 |
| PEEK | ..... | 聚醚醚酮 | 2.3.98 |
| PEB | ..... | 聚醚醚酰胺 | 2.3.99 |
| PEI | ..... | 聚醚酰亚胺 | 2.3.100 |

目 录

| | | | |
|---|-------|---|----|
| 第一章 透明导电薄膜概述 | ..... | 透明导电氧化物薄膜的制备技术 | 1 |
| 1.1 概述 | ..... | 1.1 概述 | 2 |
| 1.2 透明导电薄膜的分类 | ..... | 1.2 透明导电氧化物薄膜的分类 | 4 |
| 1.3 透明导电薄膜的基本特性 | ..... | 1.3 透明导电薄膜的基本特性 | 5 |
| 1.3.1 透明导电金属薄膜 | ..... | 1.3.1 透明导电金属薄膜 | 5 |
| 1.3.2 透明导电氧化物薄膜 | ..... | 1.3.2 透明导电氧化物薄膜 | 6 |
| 1.4 透明导电氧化物薄膜的研究现状 | ..... | 1.4 透明导电氧化物薄膜的研究现状 | 22 |
| 1.4.1 SnO ₂ 薄膜及其掺杂体系 | ..... | 1.4.1 SnO ₂ 薄膜及其掺杂体系 | 23 |
| 1.4.2 Cd ₂ SnO ₄ 薄膜体系 | ..... | 1.4.2 Cd ₂ SnO ₄ 薄膜体系 | 25 |
| 1.4.3 In ₂ O ₃ 薄膜及其掺杂体系 | ..... | 1.4.3 In ₂ O ₃ 薄膜及其掺杂体系 | 27 |
| 1.4.4 ZnO 薄膜及其掺杂体系 | ..... | 1.4.4 ZnO 薄膜及其掺杂体系 | 29 |
| 1.5 透明导电氧化物薄膜的应用 | ..... | 1.5 透明导电氧化物薄膜的应用 | 32 |
| 1.5.1 ITO 薄膜的主要应用 | ..... | 1.5.1 ITO 薄膜的主要应用 | 32 |
| 1.5.2 ZnO 薄膜的主要应用 | ..... | 1.5.2 ZnO 薄膜的主要应用 | 34 |
| 1.5.3 透明导电薄膜的其他应用 | ..... | 1.5.3 透明导电薄膜的其他应用 | 35 |
| 参考文献 | ..... | 参考文献 | 35 |
| 第二章 透明导电氧化物薄膜的制备技术 | ..... | 2.1 概述 | 45 |
| 2.1 概述 | ..... | 2.1 概述 | 46 |
| 2.2 真空蒸发镀膜 | ..... | 2.2 真空蒸发镀膜 | 50 |
| 2.2.1 真空蒸发镀膜原理 | ..... | 2.2.1 真空蒸发镀膜原理 | 50 |
| 2.2.2 真空蒸发的方式和设备 | ..... | 2.2.2 真空蒸发的方式和设备 | 52 |
| 2.3 溅射镀膜 | ..... | 2.3 溅射镀膜 | 57 |
| 2.3.1 概述 | ..... | 2.3.1 概述 | 57 |
| 2.3.2 溅射镀膜原理 | ..... | 2.3.2 溅射镀膜原理 | 59 |
| 2.3.3 溅射镀膜的特点 | ..... | 2.3.3 溅射镀膜的特点 | 64 |
| 2.3.4 溅射镀膜装置 | ..... | 2.3.4 溅射镀膜装置 | 64 |

| | |
|---------------------------|------------|
| 2.3.5 磁控溅射沉积 ITO 薄膜 | 78 |
| 2.3.6 ITO 镀膜生产实例 | 82 |
| 2.3.7 磁控溅射沉积 ZnO 薄膜 | 85 |
| 2.4 化学气相沉积 | 86 |
| 2.4.1 化学气相沉积的原理 | 86 |
| 2.4.2 化学气相沉积的分类与特点 | 88 |
| 2.4.3 化学气相沉积 ITO 薄膜工艺 | 91 |
| 2.4.4 化学气相沉积的 ZnO 薄膜制备工艺 | 92 |
| 2.5 其他化学沉积方法 | 94 |
| 2.5.1 溶胶 - 凝胶法制备透明导电薄膜 | 94 |
| 2.5.2 喷涂热分解法制备透明导电薄膜 | 95 |
| 2.6 透明导电薄膜制备技术的比较 | 97 |
| 2.6.1 不同技术沉积的 ITO 薄膜的性能比较 | 97 |
| 2.6.2 不同技术沉积的 ZnO 薄膜的性能比较 | 98 |
| 2.6.3 其他透明导电薄膜的制备技术 | 99 |
| 参考文献 | 100 |
| 第三章 薄膜的分析和性能检测技术 | 109 |
| 3.1 概述 | 110 |
| 3.2 薄膜形貌分析 | 113 |
| 3.2.1 扫描电子显微镜 | 114 |
| 3.2.2 透射电子显微镜 | 117 |
| 3.2.3 扫描探针显微镜 | 120 |
| 3.3 薄膜相结构分析 | 123 |
| 3.3.1 X 射线衍射 | 124 |
| 3.3.2 电子衍射 | 125 |
| 3.4 薄膜成分分析 | 126 |
| 3.4.1 概述 | 126 |
| 3.4.2 电子探针 X 射线显微分析 | 127 |
| 3.4.3 电子能谱分析 | 130 |
| 3.4.4 二次离子质谱 (SIMS) | 132 |
| 3.5 表面电子态分析 | 134 |
| 3.6 表面原子态分析 | 135 |
| 3.7 薄膜厚度测量 | 136 |
| 3.7.1 薄膜厚度的概念 | 136 |

| | |
|-------------------------|-----|
| 3.7.2 薄膜厚度的测量方法 | 137 |
| 3.8 薄膜电学性能测量 | 139 |
| 3.8.1 四点探针法 | 139 |
| 3.8.2 霍尔效应 | 142 |
| 3.9 薄膜光学性能测量 | 145 |
| 3.9.1 透射率和反射率测量 | 145 |
| 3.9.2 椭圆偏振测量技术 | 146 |
| 参考文献 | 151 |
| 第四章 透明导电薄膜的结构特性 | 152 |
| 4.1 概述 | 153 |
| 4.2 ITO 薄膜的结构特性 | 154 |
| 4.2.1 ITO 薄膜的相结构 | 154 |
| 4.2.2 ITO 薄膜的成分分布及化学态 | 156 |
| 4.2.3 ITO 薄膜的组织形貌 | 158 |
| 4.3 ZnO:Al 薄膜的结构特性 | 164 |
| 4.3.1 ZnO 薄膜的相结构 | 164 |
| 4.3.2 ZnO 薄膜的晶体生长模式 | 166 |
| 4.3.3 ZnO 薄膜的成分分布及化学态 | 183 |
| 4.3.4 ZnO 薄膜的能带结构及表面功函数 | 184 |
| 参考文献 | 192 |
| 第五章 透明导电薄膜的电学性能 | 194 |
| 5.1 概述 | 195 |
| 5.2 半导体薄膜中的电荷输运现象 | 195 |
| 5.2.1 单晶半导体材料中的电传导 | 197 |
| 5.2.2 多晶材料中的电传导 | 199 |
| 5.2.3 非晶材料中的传导机制 | 200 |
| 5.3 未掺杂透明导电薄膜的电学性能 | 201 |
| 5.3.1 沉积工艺参数的影响 | 201 |
| 5.3.2 薄膜厚度的影响 | 205 |
| 5.3.3 沉积后退火处理的影响 | 207 |
| 5.4 掺杂透明导电膜的电学性能 | 211 |
| 5.4.1 掺杂量的影响 | 212 |
| 5.4.2 沉积工艺参数的影响 | 218 |

| | |
|--|-----|
| 5.4.3 沉积后退火处理的影响 | 229 |
| 5.5 透明导电薄膜导电机制的实验研究 | 233 |
| 5.6 透明导电氧化物薄膜电学性能的几个值得关注的问题 | 241 |
| 参考文献 | 242 |
| <hr/> | |
| 第六章 透明导电薄膜的光学性能 | 247 |
| 6.1 概述 | 248 |
| 6.2 光学常数 | 251 |
| 6.2.1 折射系数和消光系数 | 251 |
| 6.2.2 禁带宽度 | 254 |
| 6.3 光学和电学性质的关联性 | 255 |
| 6.4 半导体氧化物薄膜的光学性质 | 259 |
| 6.4.1 禁带宽度 | 260 |
| 6.4.2 折射系数和消光系数 | 270 |
| 6.4.3 透射、反射和吸收 | 273 |
| 6.5 提高透明导电氧化物薄膜光学性能值得关注的技术 | 284 |
| 参考文献 | 285 |
| <hr/> | |
| 第七章 透明导电薄膜的应用研究 | 289 |
| 7.1 概述 | 290 |
| 7.2 透明导电薄膜的性能指数 | 291 |
| 7.3 波长(频率)选择特性应用 | 293 |
| 7.3.1 波长(频率)选择特性 | 293 |
| 7.3.2 掺杂对光学性能的影响 | 294 |
| 7.4 在薄膜太阳能电池上的应用 | 296 |
| 7.4.1 薄膜太阳能电池结构 | 297 |
| 7.4.2 透明导电氧化物薄膜太阳能电池 | 298 |
| 7.4.3 透明导电薄膜用于太阳能电池的面电极 | 299 |
| 7.5 在显示器件上的应用 | 301 |
| 7.5.1 透明导电薄膜在发光二极管上的应用 | 302 |
| 7.5.2 ITO 透明导电薄膜在长寿命电致发光器件上的应用 | 306 |
| 7.5.3 SnO ₂ 、ITO 透明薄膜电极在 PbO 光电导靶上的应用 | 307 |
| 7.5.4 SnO ₂ 、ITO 透明导电薄膜电极在液晶显示器上的应用 | 309 |
| 7.6 在气敏元件上的应用 | 310 |
| 7.6.1 甲烷和丙烷气敏元件 | 312 |