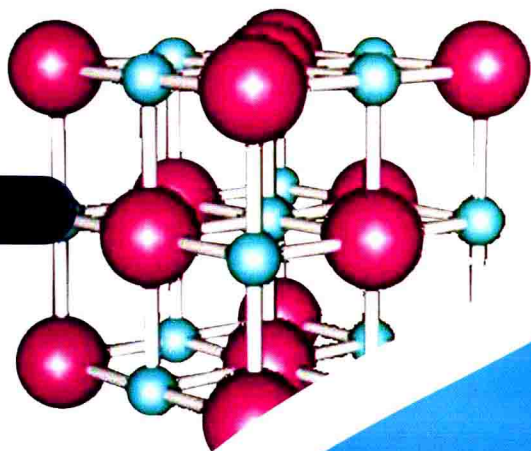



氧化锌和氮化铝

薄膜制备与表征实例

赵祥敏 赵文海 著



 冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

氧化锌和氮化铝 薄膜制备与表征实例

赵祥敏 赵文海 著

北京
冶金工业出版社
2015

内 容 提 要

本书以实例的形式,介绍了用磁控溅射法制备氧化锌(ZnO)薄膜、氮化铝(AlN)薄膜和ZnO/AlN复合膜的详细工艺和性能表征。全书共分8章,第1章主要介绍ZnO的晶体结构、能带结构、性能与应用;第2章主要介绍AlN的晶体结构、能带结构、性能与应用;第3章主要介绍ZnO和AlN薄膜的常用制备方法 & 性能表征手段;第4~6章分别介绍了AlN薄膜、ZnO薄膜、ZnO/AlN复合膜的制备方法与性能表征;第7章主要介绍不同溅射时间下AlN缓冲层对ZnO薄膜的影响;第8章主要介绍退火温度对N掺杂ZnO薄膜的影响。

本书可供从事薄膜材料、功能材料、半导体材料及其相关器件研究等领域的科研人员、工程技术人员阅读,也可作为高等院校材料、物理、化学、电子等相关专业师生的参考书籍。

图书在版编目(CIP)数据

氧化锌和氮化铝薄膜制备与表征实例/赵祥敏,赵文海著. —北京:冶金工业出版社,2015.6

ISBN 978-7-5024-6917-7

I. ①氧… II. ①赵… ②赵… III. ①氧化锌—薄膜技术 ②氮化铝—薄膜技术 IV. ①TB43

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第111609号

出版人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷39号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn

责任编辑 夏小雪 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 郑娟 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-6917-7

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2015年6月第1版,2015年6月第1次印刷

148mm×210mm;4.5印张;133千字;132页

25.00元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街46号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

曾有科学家将过去的 20 世纪称为电子学的世纪。直至今日，20 世纪已经过去十多年，更有科学家预言了 21 世纪将是光学和光电子学的世纪。半导体材料已经成为 21 世纪信息社会高技术产业的基础材料。回顾半导体材料的发展历史，其经历了几次大的变革。1948 年，锗晶体管的诞生打破了电子管一统天下的局面，引起了电子工业的革命，人类从使用电子管的时代进入半导体时代。进入 20 世纪 60 年代，以硅氧化和外延生长为先导的硅平面器件工艺的形成，使硅基集成电路的研制获得成功，引起了以集成电路为核心的微电子工业的飞速发展，而大规模的集成电路已成为微电子技术的核心，为航天技术、高速计算技术等高科技的发展提供了条件，促进了整个社会的技术革命。随着科学技术的进一步发展，以 GaAs 为代表的第二代半导体材料应运而生，它们电子迁移率高，是目前制备高速半导体器件、高亮红光发射二极管 (LEDs) 和红外激光器 (LDs) 的基础材料。第三代半导体材料的兴起，是以 GaN 材料 p 型掺杂的突破为起点，以高效蓝光 LED 和 LD 的研制成功为标志。

ZnO 是继 GaN 之后出现的又一种宽禁带半导体材料，它有着与 GaN 相似的晶体结构，在某些方面具有比 GaN 更优越的性能。ZnO 室温带隙约为 3.37eV，激子结合能高达 60meV，远大于其室温下的离化能 26meV；ZnO 的熔点高达 1975℃，具有很高的化学和热稳定性，抗辐射能力强，远远超过 GaN；ZnO 薄膜是一种光

学透明薄膜，纯 ZnO 及其掺杂薄膜具有优异的光电性能，用途广阔，而且原料易得、价廉、毒性小，是最有开发潜力的薄膜材料之一。自 1998 年 ZnO 薄膜的室温紫外受激发射报道以来，ZnO 成为继 GaN 之后光电子领域内又一研究热点。

ZnO 薄膜通常沿着 [0001] 方向优先生长，即具有 c 轴择优取向。在多晶和非晶衬底上通常只能得到六方柱状多晶薄膜；在单晶衬底（如 c 面或 a 面蓝宝石单晶片）上可以实现 ZnO 外延薄膜的生长；在 r 面蓝宝石衬底上则可以得到 (1120) 取向的 ZnO 外延薄膜。衬底不同会对 ZnO 外延薄膜的质量产生很大影响，一般来说，衬底选择主要考虑以下几个因素：(1) 衬底材料的晶体结构与 ZnO 的晶体结构类似；(2) 衬底与 ZnO 之间的晶格失配小；(3) 衬底与 ZnO 的线膨胀系数接近；(4) 衬底热稳定性和化学稳定性高。ZnO 体单晶衬底自然是 ZnO 薄膜最好的衬底材料，但目前价格还比较昂贵，只适合于科研用途。蓝宝石衬底由于在 GaN 材料中取得的巨大成功，被视为 ZnO 理想的异质衬底材料，人们已经在蓝宝石衬底上生长得到了高质量的 ZnO 外延薄膜。Si 和 GaAs 材料已经在半导体工业中得到了大规模的应用，如果 ZnO 光电器件能够与这些成熟的半导体工艺相集成，将有不可估量的发展前景。所以，Si 和 GaAs 也成为近年来人们选择较多的 ZnO 衬底材料。另外，日本科学家以与 ZnO 晶格失配很小（约 0.09%）的 ScAlMgO_4 (SCAM) 晶体作衬底，外延生长出优质的 ZnO 薄膜，并成功制备出 ZnO/ZnMgO 多量子阱和超晶格结构，但 SCAM 衬底价格昂贵，且不易获得。

大量研究表明，在 Si 衬底上生长 ZnO 薄膜具有重要的意义，但是由于 Si 与 ZnO 的晶格常数及线膨胀系数的失配度均很大，难

以实现高质量 ZnO 薄膜的外延生长，因此采用中间缓冲层是一种值得研究的工艺。由于 AlN 和 ZnO 具有相同的六方纤锌矿结构，而且两者晶格失配度较小，线膨胀系数相近，所以可作为生长 ZnO 薄膜的缓冲层，并可改善 ZnO/AlN 界面结构。

本书重点探讨了以 AlN 作为 ZnO 的缓冲层来制备和研究 ZnO 薄膜的性能，因此不但对 ZnO 做了详细的介绍，同时也对 AlN 做了详尽的介绍。

本书由牡丹江师范学院的赵祥敏主持撰写和统稿，黑龙江商业职业学院的赵文海参加了第 1 章、第 2 章和第 3 章第 1、2 节的撰写。

本书在编写过程中，参阅了大量国内外有关的著作、硕博士论文和期刊文献，在此谨对撰写这些文献的同志表示衷心的感谢！

ZnO 薄膜目前还处于研究阶段，有些成果尚未得到统一认识，限于编者学识有限，疏漏和不当之处在所难免，敬请读者批评指正！

著 者

2015 年 2 月

目 录

1 ZnO 概述	1
1.1 引言	1
1.2 ZnO 的晶体结构	2
1.3 ZnO 的结构形态	3
1.3.1 ZnO 体单晶	4
1.3.2 ZnO 薄膜	4
1.3.3 ZnO 纳米结构	4
1.4 ZnO 的能带结构	5
1.5 ZnO 的基本性质	6
1.5.1 ZnO 的电学性质	7
1.5.2 ZnO 的光学性质	7
1.5.3 ZnO 的其他特性	8
1.6 ZnO 薄膜的应用	9
1.6.1 声表面波器件	9
1.6.2 紫外光电探测器	10
1.6.3 肖特基紫外探测器	11
1.6.4 稀磁半导体	12
1.6.5 发光器件	12
1.6.6 气敏传感器	13
1.6.7 压敏器件	13
1.6.8 透明电极	13
1.6.9 缓冲层	14
1.6.10 ZnO 基 LED	15
1.7 ZnO 的本征缺陷	17
1.7.1 ZnO 的本征点缺陷	17
1.7.2 ZnO 薄膜的能级	18

1.8 ZnO 的掺杂	18
1.8.1 控制本征缺陷制备 p 型 ZnO	19
1.8.2 I 族元素单一受主掺杂	20
1.8.3 IB 族元素单一受主掺杂	21
1.8.4 V 族元素单一受主掺杂	21
1.8.5 受主-施主共掺杂	24
1.8.6 双受主共掺杂	24
1.8.7 稀土掺杂	25
参考文献	26
2 AlN 概述	34
2.1 引言	34
2.2 AlN 的晶体结构	35
2.3 AlN 的能带结构	36
2.4 AlN 的特性	37
2.4.1 硬度	37
2.4.2 化学稳定性	38
2.4.3 热稳定性	38
2.4.4 电学性能	38
2.4.5 光学性能	39
2.5 AlN 薄膜的应用	40
2.5.1 声表面波器件	40
2.5.2 发光材料	41
2.5.3 滤波器、谐振器	41
2.5.4 生物传感器	42
2.5.5 能量搜集器	42
2.5.6 紫外探测器	43
2.5.7 缓冲层	44
2.5.8 SOI 材料的绝缘埋层	45
2.5.9 单色冷阴极材料	45
2.5.10 刀具涂层	46

2.5.11	作为磁光记录材料表面的增透膜	46
	参考文献	47
3	ZnO 和 AlN 薄膜的常用制备方法及其性能表征手段	52
3.1	引言	52
3.2	ZnO 和 AlN 薄膜常用的制备方法	53
3.2.1	超声喷雾热分解 (USP)	54
3.2.2	溶胶-凝胶 (sol-gel)	54
3.2.3	分子束外延 (MBE)	55
3.2.4	金属有机物气相沉积 (MOCVD)	55
3.2.5	脉冲激光沉积 (PLD)	56
3.2.6	真空蒸发 (VE)	57
3.2.7	电子束蒸发 (E-beam evaporation)	58
3.2.8	离子束辅助沉积 (IBAD)	59
3.2.9	溅射法	60
3.3	溅射镀膜的基本原理	60
3.3.1	辉光放电和溅射机理	60
3.3.2	溅射特性	63
3.3.3	溅射过程	65
3.3.4	射频磁控反应溅射技术	67
3.4	多靶磁控溅射技术	72
3.5	实验设备	72
3.5.1	多靶磁控溅射仪	72
3.5.2	高真空烧结炉	74
3.6	ZnO 和 AlN 薄膜常用的性能表征手段	74
3.6.1	X 射线衍射分析 (XRD)	74
3.6.2	原子力显微镜 (AFM)	76
3.6.3	霍尔效应测试 (Hall)	79
3.6.4	扫描电子显微镜 (SEM)	81
3.6.5	紫外分光光度计	82
3.6.6	荧光分光光度计 (PL)	84

3.6.7 拉曼光谱仪	85
3.6.8 电子探针显微分析 (EPMA)	86
参考文献	87
4 AlN 薄膜的制备与性能表征	89
4.1 引言	89
4.2 过渡层概述	89
4.3 AlN 薄膜的制备	90
4.3.1 实验装置	91
4.3.2 衬底的预处理	91
4.3.3 样品制备工艺参数	92
4.3.4 制备 AlN 薄膜的实验步骤	92
4.4 工艺参数对 AlN 薄膜性能的影响	93
4.4.1 衬底温度对 AlN 薄膜性能的影响	93
4.4.2 工作气压对 AlN 薄膜性能的影响	95
4.4.3 溅射功率对 AlN 薄膜性能的影响	96
4.5 AlN 薄膜性能表征的分析总结	97
参考文献	98
5 ZnO 薄膜的制备与性能表征	100
5.1 引言	100
5.2 ZnO 薄膜的制备	100
5.2.1 实验装置	100
5.2.2 衬底的预处理	100
5.2.3 样品制备工艺参数	101
5.2.4 制备 ZnO 薄膜的实验步骤	101
5.3 工艺参数对 ZnO 薄膜性能的影响	102
5.3.1 衬底温度对 ZnO 薄膜性能的影响	102
5.3.2 工作气压对 ZnO 薄膜性能的影响	103
5.3.3 溅射功率对 ZnO 薄膜性能的影响	105
5.4 ZnO 薄膜性能表征的分析总结	106

参考文献	107
6 ZnO/AlN 复合膜的制备与性能表征	108
6.1 引言	108
6.2 ZnO/AlN 复合薄膜的制备	108
6.2.1 实验装置	108
6.2.2 衬底的预处理	108
6.2.3 样品制备工艺参数	109
6.2.4 制备 ZnO/AlN 复合膜的实验步骤	109
6.3 ZnO/AlN 复合膜与 ZnO 单层膜的对比	110
6.3.1 ZnO/AlN 复合膜与 ZnO 单层膜 XRD 测试对比	110
6.3.2 ZnO/AlN 复合膜与 ZnO 单层膜原子力显微镜测试对比	112
6.3.3 ZnO/AlN 复合膜与 ZnO 单层膜电学参数及导电类型对比	113
6.4 ZnO/AlN 复合膜与 ZnO 单层膜的对比分析总结	114
参考文献	114
7 不同溅射时间下 AlN 缓冲层对 ZnO 薄膜的影响	115
7.1 引言	115
7.2 AlN 薄膜、ZnO/AlN 复合薄膜的制备	115
7.2.1 实验装置	115
7.2.2 衬底的预处理	115
7.2.3 样品制备工艺参数	116
7.2.4 制备 AlN 薄膜和 ZnO/AlN 复合膜的实验步骤	116
7.3 不同溅射时间下 AlN 缓冲层对 ZnO 薄膜的影响	117
7.3.1 表面形貌分析	117
7.3.2 XRD 测试分析	119
7.3.3 霍尔测试分析	121
7.4 不同溅射时间下 AlN 缓冲层对 ZnO 薄膜的影响分析总结	122

参考文献	122
8 退火温度对 N 掺杂 ZnO 薄膜结构和电学性能的影响	123
8.1 引言	123
8.2 退火处理模型	123
8.3 N 掺杂 ZnO 薄膜的制备	125
8.3.1 实验装置	125
8.3.2 衬底的预处理	125
8.3.3 样品制备工艺参数	126
8.3.4 制备 N 掺杂 ZnO 薄膜的实验步骤	126
8.4 退火温度对 N 掺杂 ZnO 薄膜的影响	127
8.4.1 XRD 测试分析	127
8.4.2 表面形貌分析	129
8.4.3 霍尔测试分析	131
8.5 退火温度对 N 掺杂 ZnO 薄膜的影响分析总结	132
参考文献	132

1 ZnO 概述

ZnO 是 II-VI 族化合物，室温下带隙宽度为 3.37eV，具有紫外截止特性，ZnO 薄膜的电阻率高于 $10^{-8} \Omega \cdot \text{cm}$ 。改变生长、掺杂或退火条件可形成简单半导体，导电性能大幅提高，电阻率可降低到 $10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ 数量级。ZnO 还具有熔点高、制备简单、沉积温度低和较低的电场诱导缺陷等优点。硅基生长的 ZnO 有望将光电子器件制作与传统的硅平面工艺相兼容。另外，在透明导电膜的研究方面，掺铝 ZnO 膜 (AZO) 也有同 ITO 膜可比拟的光学电学性质。

ZnO 薄膜的高电阻率与单一的 c 轴结晶择优取向决定了它具有良好的压电常数与机电耦合系数，可用作各种压电、压光、电声与声光器件。因具有电阻率随表面吸附的气体浓度变化的特点，ZnO 薄膜还可用来制作表面型气敏元件。通过掺入不同元素，可应用于还原性酸性气体、可燃性气体、CH 族气体探测器、报警器。此外，它还在蓝光调制器、低损失率光波导、液晶显示、光催化、电子摄影机、热反射窗等领域具有潜在应用。

1999 年 10 月，在美国召开的首届 ZnO 专题国际研讨会，认为“目前 ZnO 的研究如同 Si、Ge 的初期研究”。世界上逐渐掀起了 ZnO 薄膜研究开发应用的热潮^[1]。

1.1 引言

在高新技术行业，薄膜科学与技术起着关键性的作用。薄膜在光学仪器上的应用是众所周知的。薄膜材料的开发和研究关系到信息技术、微电子技术、计算机科学技术等领域的发展方向和进程。在一定意义上讲，可以认为集成电路的制造过程就是将各种图形转移到各种薄膜上的过程。在诸如太阳能转换器、表面声波器件和超导元件等领域中，薄膜同样也是关键性的组成部分。在信息存储普遍应用的今天，存储密度在日新月异的快速发展，它在很大程度上依赖于磁性薄

膜的研究。光电薄膜也是重要的信息功能材料。

薄膜与日俱增广泛地进入人类生活领域，如透光材料在建筑、装潢等方面被广泛应用，在房屋、车辆、太阳能电池、太阳能热水器等的透明光窗上采用增透、防辐射和反射等薄膜^[2]。

近年来，由于光电子器件潜在的巨大市场，使光电材料成为研究的重点。ZnO 薄膜是一种光学透明薄膜，纯 ZnO 及其掺杂薄膜具有优异的光电性能，用途广阔，而且原料易得、价廉、毒性小，成为最有开发潜力的薄膜材料之一。

ZnO 薄膜通常沿着 (002) 面方向优先生长，即具有 c 轴择优取向。在多晶和非晶衬底上通常只能得到六方柱状多晶薄膜；在单晶衬底（如 c 面或 a 面蓝宝石单晶片）上可以实现 ZnO 外延薄膜的生长。衬底不同会对 ZnO 外延薄膜的质量产生很大影响，一般来说，衬底选择主要考虑以下几个因素：（1）衬底材料的晶体结构与 ZnO 的晶体结构类似；（2）衬底与 ZnO 之间的晶格失配小；（3）衬底与 ZnO 的线膨胀系数接近；（4）衬底热稳定性和化学稳定性高。

大量研究表明，在 Si 衬底上生长 ZnO 薄膜具有重要的意义，但是由于 Si 与 ZnO 的晶格常数及线膨胀系数的失配度均很大，难以实现高质量 ZnO 薄膜的外延生长，因此采用中间缓冲层是一种值得研究的工艺^[3]。由于 AlN 和 ZnO 具有相同的六方纤锌矿结构，而且两者晶格失配度较小，线膨胀系数相近，所以可作为生长 ZnO 薄膜的缓冲层，并改善 ZnO/AlN 界面结构。

本章将对 ZnO 的晶体结构、形态、能带结构、基本性质、应用、缺陷与掺杂等方面做简要介绍。

1.2 ZnO 的晶体结构

ZnO 最普通的晶体结构是纤锌矿结构，另一种稳定的晶体结构是闪锌矿结构，它的晶格能量稍高^[4]，还有一种是在高压下稳定的岩盐矿结构，三种结构如图 1-1 所示。通常，ZnO 在 9.5GPa 的压强下，能由纤锌矿结构转化为岩盐矿结构。六方纤锌矿结构是 ZnO 的热稳定相，它具有六方对称性。Zn 原子和 O 原子各自组成一个六方密堆积结构的子格子，这两个子格子沿 c 轴平移 0.385c 套构形成纤锌矿

结构。每个 Zn 原子最近邻的四个 O 原子构成一个四面体结构，同样，每个 O 原子与最邻近的四个 Zn 原子构成一个四面体。Zn 原子和 O 原子相互四面体配位，从而 Zn 和 O 原子在位置上是等价的。Zn 原子的 3d 电子和 O 原子的 2p 电子发生杂化从而形成共价键。

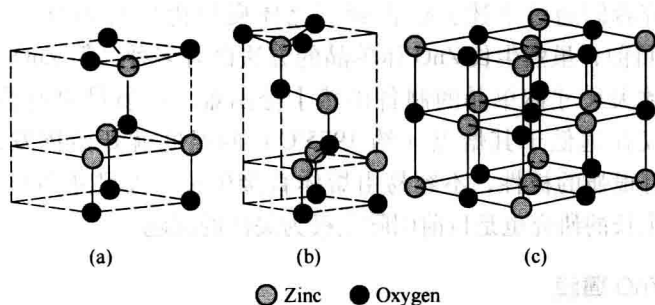


图 1-1 ZnO 的三种晶体结构

(a) 纤锌矿；(b) 闪锌矿；(c) 岩盐矿

ZnO 的晶胞结构如图 1-2 所示，ZnO 纤锌矿的晶格常数是 $a = 0.325\text{nm}$ ， $c = b = 0.521\text{nm}$ 。ZnO 的纤锌矿结构相当于 O 原子构成简单六方密堆积，Zn 原子则填塞于半数的四面体空隙中，而半数四面体空隙是空的。这种纤锌矿结构相对开放，外来掺杂物容易进入 ZnO 的晶格。这种开放结构也影响到缺陷的性质和扩散机制，最普通的缺陷是填隙 Zn 原子和 O 空位^[2]。

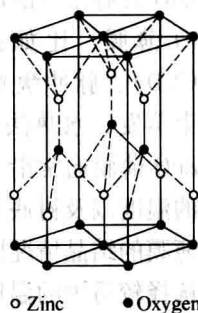


图 1-2 ZnO 纤锌矿晶胞结构

1.3 ZnO 的结构形态

ZnO 以矿物的形式存在于自然界中，人们在研究过程中发现 ZnO 有粉体、陶瓷、单晶体、薄膜和纳米材料等多种形态。本节主要介绍 ZnO 的体单晶、薄膜和纳米结构。

1.3.1 ZnO 体单晶

ZnO 体单晶材料的生长无论是对其理论研究还是实际应用都具有重大的意义,是制备 ZnO 基发光器件的一种重要的衬底材料。

迄今为止,生长 ZnO 体单晶的方法很多,主要包括水热法、气相法、助溶剂法、坩埚下降法、均匀沉积法和高温氧化法等。近年来,研究者们通过上述方法得到了晶体质量优良的 ZnO 体单晶材料^[5]。目前,虽然生长 ZnO 体单晶的方法已有多种,但 ZnO 的生长习性导致大尺寸体单晶的制备仍然十分困难,且质量也有待提高。ZnO 不仅在远低于其熔点(约 1975℃)的温度就开始挥发,而且 ZnO 具有很强的极性,不容易由熔体直接生长。大尺寸高质量 ZnO 体单晶生长的研究也是目前国际上极为关注的课题。

1.3.2 ZnO 薄膜

ZnO 薄膜广泛应用于 ZnO 的研究及应用中。制备性能优良的 ZnO 薄膜(特别是获得稳定可重复的 p 型 ZnO 薄膜)是实现 ZnO 基光电器件大规模应用的前提。

ZnO 具有很好的成膜性,常用的薄膜制备技术几乎都可以用来生长 ZnO 薄膜,比如磁控溅射(MS)、金属有机化学气相沉积(MOCVD)、脉冲激光沉积(PLD)、分子束外延(MBE)、热蒸发、电子束蒸发、水热法、溶胶凝胶法、原子层沉积法以及喷雾热解法等。ZnO 薄膜通常沿(002)方向择优生长(即 c 轴方向),生长过程中的温度以及衬底材料的选择是影响 ZnO 薄膜成膜质量的重要因素,薄膜的结晶情况以及表面平整度是薄膜质量表征的基本指标。因此,选择较适中的温度、衬底以及制备手段对制备高质量 ZnO 薄膜是非常重要的。

1.3.3 ZnO 纳米结构

纳米 ZnO 作为优异的半导体氧化物材料是目前研究的最热门课题之一。在光电和化学方面等表现出优越性能,主要体现在纳米 ZnO 具有量子限域效应和载流子传输、紫外激光发射、紫外吸收、压电以

及光催化等方面的性质。

制备 ZnO 纳米材料的方法有很多,包括 PLD、PECVD、MOCVD、MBE、MS、热蒸发法、气相模板法、喷雾热解法、溶剂热法、水热法、微乳液法、有机物辅助热液法、化学反应自组装法、液相模板法以及光刻等。不同形貌的 ZnO 纳米材料的性能各不相同。近年来,为了提高纳米 ZnO 材料的性能或者挖掘新的性能,国内外研究者对 ZnO 量子点、纳米线、纳米棒、纳米管、纳米带、量子阱、纳米巢等进行了大量研究^[6]。

1.4 ZnO 的能带结构

ZnO 是一种直接宽禁带半导体材料,室温下的禁带宽度为 3.37eV。因为六角纤锌矿结构的对称性比较低,ZnO 的能带结构比较复杂。ZnO 中由于自旋-轨道分裂和晶体场分裂而形成的能带图如图 1-3 所示。ZnO 的导带呈 s 型,具有 Γ_7 对称性;价带呈 p 型,由于自旋-轨道分裂和晶体场分裂的影响,价带顶部 (VBM) 将会分裂为三个二重简并的价带能级,自上而下依次称为 A、B、C 能级,对应于不同自由激子的发射态,分别具有 Γ_7 、 Γ_9 、 Γ_7 对称性,其中 A、B 能级的间距为 4.9meV, B、C 能级的间距为 43.7meV。能带间隙与温度之间的依赖关系可以持续到 300K,遵循式 (1-1) 所示关系^[7]。

$$E_g(T) = E_g(T=0) \frac{5.05 \times 10^{-4} T^2}{900 - T} \quad (1-1)$$

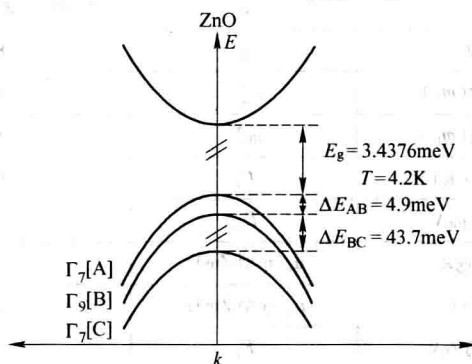


图 1-3 ZnO 中由于自旋-轨道分裂和晶体场分裂而形成的能带图