



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
高等院校材料专业系列规划教材

半导体薄膜技术 与物理 (第二版)

叶志镇 吕建国 吕 斌 张银珠◎编著

材料科学与工程
Materials Science
and Engineering

PHYSICS
AND
TECHNOLOGY
OF
SEMICONDUCTOR
THIN
FILMS



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
 高等院校材料专业系列规划教材

Physics and Technology of Semiconductor Thin Films

半导体薄膜技术与物理

(第二版)

叶志镇 吕建国 吕 斌 张银珠 编著

图书在版编目(CIP)数据

半导体薄膜技术与物理 / 叶志镇等编著. —2版
—杭州: 浙江大学出版社, 2014. 12
ISBN 978-7-308-13910-6

I. ①半… II. ①叶… III. ①半导体薄膜技术—高等
学校—教材 IV. TN304.055

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 226037 号

半导体薄膜技术与物理(第二版)

叶志镇 吕建国 吕 斌 张银珠 编著

责任编辑 杜希武

封面设计 续设计

出版发行 浙江大学出版社

(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版 杭州好友排版工作室

印 刷 杭州杭新印务有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 16

字 数 389 千

版 次 2014 年 12 月第 2 版 2014 年 12 月第 4 次印刷

书 号 ISBN 978-7-308-13910-6

定 价 36.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部联系方式: (0571) 88925591; <http://zjdxcs.tmall.com>

叶志镇教授简介



叶志镇,男,1955年5月生于浙江温州。1987年获浙江大学光仪系工学博士学位;毕业后留校工作,1990—1992年留学美国麻省理工学院(MIT);1994年晋升为教授;1996年选为博导。现为浙江大学材料科学与工程学系系主任。

1988年进入浙江大学材料系,在硅材料国家重点实验室一直从事半导体薄膜教学科研工作。主要研究:半导体薄膜制备、物性调控与光电应用。现兼任中国电子学会理事,中国能源学会常务理事,中国电子材料委员会副主任,《材料科学与工程学报》主编, *J. Mater. Sci. & Tech.* 和《半导体学报》编委等。

在国内率先开展氧化锌薄膜 p 型掺杂研究,开发出具有自主知识产权的 p 型掺杂系列核心技术,率先研制了氧化锌 LED 原型器件并实现室温电致发光;发展了组分调控氧化锌薄膜光电性能的技术,透明导电薄膜的实际应用效果良好;自主发展了高真空 CVD 薄膜技术并在全中国推广应用;研制了一系列硅基薄膜材料与器件。负责的 ZnO 研究工作被国家自然科学基金委评为“光电功能材料重大计划”5 个亮点成果之一。先后承担国家“973”课题 2 项、国家自然科学基金 10 项(重点项目 3 项)、省部级科研项目 40 多项。“氧化锌基材料生长、p 型掺杂与室温电致发光研究”获 2007 年国家自然科学二等奖,此外在薄膜制备与光电应用方面还获得浙江省科技一等奖 3 项,省部级科技二等奖 3 项。授权国家发明专利 60 多项。出版学术著作 2 本,参编 3 本。发表 SCI 收录论文 400 余篇,其中 *Adv. Mater.*, *Nano Lett.*, *JACS*, *APL* 等国际著名期刊论文 100 余篇;论文被他引 5600 余次,其中 SCI 他引 4000 余次。国际大会报告 40 余次,邀请报告 20 余次。

1994 年被评为国家重点实验室全国先进工作者并获“金牛奖”;1995 年选为浙江省首批“中青年学术带头人”;1996 年入选教育部“跨世纪优秀人才”;1997 年入选国家“百千万人才工程”;1997 年享受国务院特殊津贴。2006 年被聘为浙江大学首批求是特聘教授;2007 年选为浙江省突出贡献中青年专家;2008 年被评为浙江省特级专家,获浙江省优秀回国人员称号;2008 年、2010 年获中国百篇优秀博士论文提名奖指导教师;2012 年评为浙江大学“三育人”标兵、浙江省“三育人”先进个人、全国宝钢优秀教师;2013 年评为浙江省师德先进个人。

内容简介

本书全面系统地介绍了半导体薄膜的各种制备技术及其相关的物理基础。全书共分十章。第一章概述了真空技术,第二至第八章分别介绍了蒸发、溅射、化学气相沉积、脉冲激光沉积、分子束外延、液相外延、湿化学合成等各种半导体薄膜的沉积技术,第九章介绍了半导体超晶格、量子阱的基本概念和理论,第十章介绍了典型薄膜半导体器件的制备技术。

本书文字叙述上力求做到深入浅出,内容上深度和宽度相结合,理论和实践相结合,以半导体薄膜技术为重点,结合半导体材料和器件的性能介绍,同时还介绍了半导体薄膜技术与物理领域的新概念、新进展、新成果和新技术。本书具有内容翔实、概念清楚、图文并茂的特点。

本书读者对象广泛,可作为高等院校材料、物理、电子、化学等学科的研究生或高年级本科生的半导体薄膜技术课程的教材,也可作为从事半导体材料、薄膜材料、光电器件等领域的科研人员、工程技术人员的参考书籍。

第二版前言

半导体材料是现代能源和信息产业的基础,半导体薄膜是新型光电子器件和超大规模集成电路的核心材料。在人类发展的历史中,先后使用的半导体材料有很多种,如 Ge、Si、GaAs、ZnSe、金刚石、SiC、GaN 和 ZnO 等。高质量半导体薄膜的实现取决于半导体薄膜制备技术,而半导体薄膜制备技术的发展,不仅为新型半导体器件的研制创造了条件,也为半导体理论进一步发展奠定了基础。

半导体薄膜技术与物理是一门内容丰富的专业课程。2008 年 9 月,作者结合多年的教学科研经验,出版了《半导体薄膜技术与物理》一书,系统论述了各种半导体薄膜制备技术及其物理基础。本书自出版以来,受到广大读者的欢迎,是半导体材料与技术领域的基础教材,推进了半导体薄膜材料技术及其理论的教学和科研发展。2012 年,入选第一批“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。

2013 年 12 月,作者对本书进行了修订,这次修订的幅度不大,但我们力求更加完善。本书特色明显,主要体现在五个方面:(1)目前已有多种薄膜制备技术的专著,但直接针对半导体薄膜制备的专门教材还很少,本书正是为此而编著,内容紧扣半导体薄膜制备技术,原创性显著。(2)本书介绍了各种半导体薄膜技术,不仅包括蒸发、溅射等传统镀膜技术,而且还重点阐述了应用于现代光电子和微电子的金属有机物化学气相沉积、分子束外延等先进半导体薄膜技术,此外还介绍了电化学沉积等传统湿化学方法在半导体薄膜中的应用,系统性明显。(3)基础性与前沿性相结合,全面介绍了半导体薄膜技术的经典基础知识、各个发展历程中的关键技术和重要方向,同时充实了高新科技领域中半导体薄膜技术与物理的新成果和新发展,如多量子阱和超晶格制备技术、GaN 和 ZnO 薄膜制备技术等,增强了内容的先进性和前沿性。(4)理论性和实用性相结合,深入介绍了半导体薄膜技术的物理基础,理论性强,同时每种制备技术均结合一种或几种典型半导体材料进行针对性论述,典型的半导体材料均可在本书中找到具体的例证,实用性强。(5)研究性与开放性相结合,本书融合了编著者多年的教学科研实践,特别是科研第一线的资料,同时强调开放式编撰思路,对各种可能的半导体薄膜技术均持包容态度,学术性强,是一本研究型的教材。

本书共分十章,以叶志镇教授“半导体薄膜技术物理”讲义为基础编撰而成。第一章叙述了真空技术的基本知识;第二章至第八章是本书的核心内容,结合各种半导体材料,详细介绍了蒸发、溅射、化学气相沉积、脉冲激光沉积、分子束外延、液相沉积和湿化学合成等半导体薄膜技术与物理;第九章介绍了半导体超晶格和量子阱的生长技术;第十章介绍了典型薄膜半导体器件的制备技术。本书由叶志镇主持撰写和统稿,主要参加撰写的有吕建国(第三、四、八、十章)、吕斌(第一、六、九章)和张银珠(第二、五、七章)。

本书是作者所在的课题组多年教学科研工作的结晶和总结,在此向课题组的赵炳辉、朱丽萍、黄靖云、彭新生、何海平、金一政、潘新花、卢洋藩、汪雷、李先航、叶春丽、叶启阔以及课题组历届所有的研究生表示感谢!本书的编写同时结合了国内外的最新研究进展,汇集了多方面材料,在此也对他(她)们的工作表示崇高的敬意!在本书的编写和修订过程中,得到了浙江大学领导的全力支持,得到了阚端麟院士和张泽院士的大力指导,也得到了各位同事和朋友的关心和帮助,作者在此表示衷心的感谢!本书可供从事半导体材料、薄膜材料、半导体器件、设备制造等领域的科研人员、工程技术人员和高等院校师生参考。由于作者水平有限,疏漏和不当之处在所难免,敬请读者批评指正!

叶志镇 吕建国 吕斌 张银珠

于浙江大学求是园

2003年12月

第一版前言

材料是人类物质生活和文明进步的基础,新材料是现代文明社会和高新技术发展的先导,半导体材料是支撑现代信息社会的基石。

在近三十年来,半导体材料得到了迅猛的发展,Ge、Si、GaAs、ZnSe、金刚石、SiC、GaN、ZnO,从窄禁带到宽禁带,从红外到紫外,半导体材料的研究掀起了一轮又一轮的高潮。随着半导体材料和微电子、光电子高科技的迅速发展,对薄膜材料和器件制备技术及其相关物理知识的了解和研究显得尤为重要。先进的薄膜生长制备技术是实现优质半导体材料和器件的基础和保证。从20世纪60年代初外延生长技术被应用在半导体领域以来,特别是最近几年,新型半导体材料、新型光电器件、超大规模集成电路的研制,促进了薄膜生长技术的发展。半导体薄膜制备技术的高度发展,不仅为新型半导体器件的研制创造了条件,也为半导体理论的进一步发展奠定了基础。

半导体薄膜技术与物理已成为一门内容丰富的专业课程,也是人们研究的一个重要方向。叶志镇教授从事半导体材料与器件的研究已有20余年,具有近20年半导体薄膜技术与物理的教学经验,为此,作者结合多年的教学科研实践,在本书中向读者全面地介绍了各种半导体薄膜技术与物理。本书除了介绍最基本的薄膜生长知识外,还尽量多地介绍了国内外最新的研究进展,特别是新型半导体薄膜材料的生长技术和物理基础。

本书共分十章,以叶志镇教授“半导体薄膜技术物理”讲义为基础编撰而成。第一章叙述了真空技术的基本知识;第二章至第八章是本书的核心内容,结合各种半导体材料,详细介绍了蒸发、溅射、化学气相沉积、脉冲激光沉积、分子束外延、液相沉积和湿化学合成等半导体薄膜技术与物理;第九章介绍了超晶格的相关知识,超晶格、量子阱是现代新型半导体器件的基础和关键;第十章介绍了典型薄膜半导体器件的制备技术,包括发光二极管、薄膜晶体管和紫外探测器。本书由叶志镇主持撰写和统稿,主要参加撰写的有吕建国(第三、四、八、十章)、吕斌(第一、六、九章)和张银珠(第二、五、七章)。

本书是作者所在的课题组通力合作完成的,在此向课题组的赵炳辉、朱丽萍、黄靖云、何

海平、金一政、汪雷、李先杭、叶春丽和叶启阔,以及课题组历届所有的研究生表示感谢!本书的编写同时结合了国内外的最新研究进展,汇集了多方面材料,在此也对他(她)们的工作表示崇高的敬意!在本书的编写过程中,得到了浙江大学领导的全力支持,也得到了阙端麟院士和硅材料国家重点实验室各位同仁的大力支持,作者在此表示衷心的感谢!

本书可供从事半导体材料、薄膜材料、光电器件等领域的科研人员、工程技术人员和高等院校师生参考。由于作者水平有限,疏漏和不当之处在所难免,敬请读者批评指正!

编著者

于浙江大学求是园

2008年8月

目 录

第 1 章 真空技术	1
§ 1.1 真空的基本概念	1
1.1.1 真空的定义	1
1.1.2 真空度单位	1
1.1.3 真空区域划分	2
§ 1.2 真空的获得	3
§ 1.3 真空度测量	10
1.3.1 热传导真空计	10
1.3.2 热阴极电离真空计	12
1.3.3 冷阴极电离真空计	14
§ 1.4 真空度对薄膜工艺的影响	16
参考文献	16
第 2 章 蒸发技术	17
§ 2.1 发展历史与简介	17
§ 2.2 蒸发的种类	18
2.2.1 电阻热蒸发	18
2.2.2 电子束蒸发	22
2.2.3 高频感应蒸发	24
2.2.4 激光束蒸发	25
2.2.5 反应蒸发	26
§ 2.3 蒸发的应用实例	27
2.3.1 Cu(In,Ga)Se ₂ 薄膜	27
2.3.2 ITO 薄膜	28
参考文献	29

第3章 溅射技术	30
§ 3.1 溅射基本原理	30
§ 3.2 溅射主要参数	33
3.2.1 溅射阈和溅射产额	33
3.2.2 溅射粒子的能量和速度	36
3.2.3 溅射速率和淀积速率	38
§ 3.3 溅射装置及工艺	39
3.3.1 阴极溅射	39
3.3.2 三极溅射和四极溅射	40
3.3.3 射频溅射	40
3.3.4 磁控溅射	41
3.3.5 反应溅射	43
§ 3.4 离子成膜技术	45
3.4.1 离子镀成膜	45
3.4.2 离子束成膜	47
§ 3.5 溅射技术的应用	50
3.5.1 溅射生长过程	50
3.5.2 溅射生长 ZnO 薄膜的性能	52
参考文献	55
第4章 化学气相沉积	57
§ 4.1 概 述	57
§ 4.2 硅化学气相沉积	58
4.2.1 CVD 反应类型	58
4.2.2 CVD 热力学分析	61
4.2.3 CVD 动力学分析	67
4.2.4 不同硅源的外延生长	70
4.2.5 成核	72
4.2.6 掺杂	74
4.2.7 外延层质量	77
4.2.8 生长工艺	78
§ 4.3 CVD 技术的种类	80
4.3.1 常压 CVD	80
4.3.2 低压 CVD	81
4.3.3 超高真空 CVD	83
§ 4.4 能量增强 CVD 技术	87

4.4.1 等离子增强 CVD	88
4.4.2 光增强 CVD	88
§ 4.5 卤素输运法	89
4.5.1 氯化物法	90
4.5.2 氢化物法	90
§ 4.6 MOCVD 技术	91
4.6.1 MOCVD 简介	91
4.6.2 MOCVD 生长 GaAs	95
4.6.3 MOCVD 生长 GaN	96
4.6.4 MOCVD 生长 ZnO	100
§ 4.7 特色 CVD 技术	105
4.7.1 选择外延 CVD 技术	105
4.7.2 原子层外延	108
参考文献	110
第 5 章 脉冲激光沉积	114
§ 5.1 脉冲激光沉积概述	114
§ 5.2 PLD 的基本原理	115
5.2.1 激光与靶的相互作用	115
5.2.2 烧蚀物的传输	117
5.2.3 烧蚀粒子在衬底上的沉积	118
§ 5.3 颗粒物的抑制	118
§ 5.4 PLD 在 II-VI 族化合物薄膜中的应用	120
5.4.1 ZnO 薄膜的 PLD 生长	120
5.4.2 其他 II-VI 族化合物的 PLD 生长	126
参考文献	126
第 6 章 分子束外延	129
§ 6.1 引 言	129
§ 6.2 分子束外延的原理和特点	129
§ 6.3 外延生长设备	131
§ 6.4 分子束外延生长硅	135
6.4.1 表面制备	135
6.4.2 外延生长	136
6.4.3 掺杂	141
6.4.4 外延膜的质量诊断	145
§ 6.5 分子束外延生长 III-V 族化合物半导体材料和结构	146

6.5.1	MBE 生长 GaAs	146
6.5.2	MBE 生长 InAs/GaAs	148
6.5.3	MBE 生长 GaN	150
§ 6.6	分子束外延生长 II-VI 族化合物半导体材料和结构	151
6.6.1	HgCdTe 材料	152
6.6.2	CdTe/Si 的外延生长	153
6.6.3	HgCdTe/Si 的外延生长	153
6.6.4	ZnSe、ZnTe	153
6.6.5	ZnO 薄膜	153
§ 6.7	分子束外延生长其他半导体材料和结构	155
6.7.1	SiC 材料	155
6.7.2	生长小尺寸 Ge/Si 量子点	156
6.7.3	生长有机半导体薄膜	156
	参考文献	158
第 7 章	液相外延	162
§ 7.1	液相外延生长的原理	162
7.1.1	液相外延基本概况	162
7.1.2	硅液相外延生长的原理	163
§ 7.2	液相外延生长方法和设备	166
§ 7.3	液相外延生长的特点	168
§ 7.4	液相外延的应用实例	169
7.4.1	硅材料	169
7.4.2	III-V 族化合物半导体材料	170
7.4.3	碲镉汞材料	171
7.4.4	SiC 材料	171
	参考文献	172
第 8 章	湿化学制备方法	173
§ 8.1	溶胶-凝胶技术	173
8.1.1	Sol-Gel 的生长机制	173
8.1.2	Sol-Gel 的工艺流程	174
8.1.3	Sol-Gel 合成 TiO ₂ 薄膜	178
8.1.4	Sol-Gel 的优点和缺点	179
§ 8.2	喷雾热分解技术	180
8.2.1	喷雾热分解的种类	180
8.2.2	喷雾热分解的生长过程	183

8.2.3 喷雾热分解的应用介绍	185
8.2.4 喷雾热分解制备 ZnO 薄膜	186
§ 8.3 液相电沉积技术	187
8.3.1 电沉积简介	187
8.3.2 电沉积制备类金刚石薄膜	189
参考文献	191
第 9 章 半导体超晶格和量子阱	193
§ 9.1 引 言	193
§ 9.2 半导体超晶格、量子阱的概念和分类	194
9.2.1 组分超晶格	194
9.2.2 掺杂超晶格	196
9.2.3 应变超晶格	196
9.2.4 调制掺杂超晶格	196
§ 9.3 半导体超晶格、量子阱的量子特性	197
9.3.1 量子约束效应	197
9.3.2 量子隧穿和超晶格微带效应	198
9.3.3 共振隧穿效应	200
§ 9.4 半导体超晶格、量子阱的结构和器件应用介绍	201
9.4.1 GaAs/Al _x Ga _{1-x} As 体系	202
9.4.2 ZnSe 基异质结、量子阱结构	203
参考文献	203
第 10 章 半导体器件制备技术	206
§ 10.1 衬底材料的清洗	206
§ 10.2 发光二极管	207
10.2.1 GaN 基 LED	208
10.2.2 ZnO 基 LED	213
10.2.3 白光 LED	218
§ 10.3 薄膜晶体管	221
10.3.1 薄膜晶体管的工作原理	222
10.3.2 非晶硅薄膜晶体管	223
10.3.3 多晶硅薄膜晶体管	224
10.3.4 有机薄膜晶体管	224
10.3.5 ZnO 薄膜晶体管	225
§ 10.4 光电探测器	226
10.4.1 光电导探测器	227

10.4.2	肖特基型光电探测器	229
10.4.3	p-n 结型光电探测器	230
10.4.4	改进型光电二极管	231
	参考文献	233
10.5	发光二极管(LED)	234
10.5.1	LED 的发展概况	234
10.5.2	LED 的结构	235
10.5.3	LED 的发光原理	236
10.5.4	LED 的制造工艺	237
10.5.5	LED 的应用	238
10.6	太阳能电池	239
10.6.1	太阳能电池的发展概况	239
10.6.2	太阳能电池的结构	240
10.6.3	太阳能电池的工作原理	241
10.6.4	太阳能电池的制造工艺	242
10.6.5	太阳能电池的应用	243
10.7	薄膜晶体管(TFT)	244
10.7.1	TFT 的发展概况	244
10.7.2	TFT 的结构	245
10.7.3	TFT 的工作原理	246
10.7.4	TFT 的制造工艺	247
10.7.5	TFT 的应用	248
10.8	有机发光二极管(OLED)	249
10.8.1	OLED 的发展概况	249
10.8.2	OLED 的结构	250
10.8.3	OLED 的发光原理	251
10.8.4	OLED 的制造工艺	252
10.8.5	OLED 的应用	253
10.9	量子阱激光器(QWLD)	254
10.9.1	QWLD 的发展概况	254
10.9.2	QWLD 的结构	255
10.9.3	QWLD 的工作原理	256
10.9.4	QWLD 的制造工艺	257
10.9.5	QWLD 的应用	258
10.10	超晶格(SG)	259
10.10.1	超晶格的发展概况	259
10.10.2	超晶格的结构	260
10.10.3	超晶格的工作原理	261
10.10.4	超晶格的制造工艺	262
10.10.5	超晶格的应用	263

真空技术作为一门独立的学科是从20世纪初开始的。随着现代科学技术的发展,电子器件、原子能、宇航、薄膜技术等对真空环境的需求越来越迫切,从而极大地促进了这一技术的进步。尤其是超高真空技术的出现,揭示了自然界中许多新颖的现象和规律,使真空技术逐渐形成了完善的理论体系,并在许多科学技术领域获得了广泛的应用。

§ 1.1 真空的基本概念

1.1.1 真空的定义

在薄膜技术和表面科学等诸多领域当中,真空科学起着越来越重要的作用。许多科学研究、产品制备都需要在真空条件下实现。因此,在真空行业当中,掌握一定的真空知识是必需的。本书所指的“真空”是指在给定的空间内压力低于一个大气压的稀薄气体状态。当气体处于平衡时,气体状态方程为

$$P = nkT \quad (1-1)$$

$$PV = \frac{m}{M}RT \quad (1-2)$$

在上述方程中

P : 压强(Pa); n : 气体分子密度(个/ m^3); k : 玻尔兹曼常数($1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$); V : 体积(m^3); m : 气体质量(kg); M : 摩尔质量(kg/mol); R : 普适气体常数; T : 绝对温度(K); $R = N_A \cdot k$; N_A : 阿佛伽德罗常数($6.023 \times 10^{23} / \text{mol}$)。

由此得到气体的分子密度

$$n = 7.2 \times 10^{22} \frac{P}{T} \quad (1-3)$$

在标准状态下,任何气体的分子密度均为 3×10^{19} 个/ cm^3 。由于气体分子密度这个物理量不容易量度,因此通常用压强为单位来描述“真空”状态下的气体稀薄程度——真空度。压强高则表示真空度低,压强低则表示真空度高。真空度高表示真空度“好”的意思,真空度低表示真空度“差”的意思。

1.1.2 真空度单位

在真空科学的不同学科领域当中,由于传统习惯的差异,采用的压强单位也不同,目前常用的有以下几种:

(1) 毫米汞柱(mmHg):真空技术中常用单位,是指 0°C 度时 1 毫米汞柱作用在单位面积上的力,为 13.5951 克/厘米²(g/cm²)。

1 标准大气压(atm)=1013250 达因/厘米²,通过换算,粗略等于(但不完全等于)760 毫米汞柱。

(2) 托(Torr):真空技术中最常用的单位,定义为

$$1 \text{ 托(Torr)} = \frac{1}{760} \text{ atm}$$

由于 1 毫米汞柱与 1 托的差别极为微小,人们习惯上将它们等同看待。

(3) 帕斯卡(Pa):目前国际上推荐的在真空中使用的国际单制(SI),简称“帕(Pa)”。

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ 牛顿/米}^2 = 1 \text{ 千克/米} \cdot \text{秒}^2 = 10 \text{ 达因/cm}^2 = 7.5 \times 10^{-3} \text{ Torr}$$

(4) 巴(bar):1bar=10⁵Pa

1.1.3 真空区域划分

真空度跨越了十几个数量级这样宽的一个范围。随着真空度的提高,“真空”的性质逐渐发生变化,经历着气体分子数的量变到“真空”质变的若干过程,构成了“真空”的不同区域。为了便于讨论和实际应用,在我国,常把真空定性地粗划分为粗真空、低真空、高真空和超高真空四个区域,如表 1-1 所示。

表 1-1 真空区域划分^[1,2]

真空区域	压强范围	
	托(Torr)	帕(Pa)
粗真空	760~10	101325~1333
低真空	10~10 ⁻³	1333~1.33×10 ⁻¹
高真空	10 ⁻³ ~10 ⁻⁸	1.33×10 ⁻¹ ~10 ⁻⁶
超高真空	<10 ⁻⁸	<10 ⁻⁶

按照这样划分后,各区域的真空物理特性如表 1-2 所示^[3]。可以看出,在气压高于 10Torr 的真空范围区域,气体性质和常压相仿,气流特性也以分子间的碰撞为主;当压力渐渐减小时,分子密度降低,平均自由程(λ)增加,分子间的碰撞开始减少;当达到高真空区域,真空特性以气体分子和真空器壁的碰撞为主;在超高真空区,气体分子在空间活动减少,而在固体表面上吸附停留为主。

表 1-2 各真空区域的物理特性

区域物理特性	粗真空	低真空	高真空	超高真空
真空区间(Torr)	760~10	10~10 ⁻³	10 ⁻³ ~10 ⁻⁸	<10 ⁻⁸
平均自由程(cm)	10 ⁻⁶ ~10 ⁻³	10 ⁻³ ~5	5~10 ⁴	>10 ⁴
气流特点	1. 以气体分子间的碰撞为主 2. 黏滞流	过渡区域	1. 以气体分子与器壁的碰撞为主 2. 分子流	同前
平均吸附时间	气体分子以空间飞行为主			气体分子以在固体上吸附停留为主