

■ 加利福尼亚大学、清华大学、波鸿-鲁尔大学、大阪大学、
衣阿华州立大学等国际著名高等学府经典教材

工程技术丛书

等离子体放电原理 与材料处理

[美] 迈克尔·A. 力伯曼 著
阿伦·J. 里登伯格 著
蒲以康 等 译

图字: 01-2006-0928 号

内 容 简 介

本书全面深入地介绍等离子体物理和化学的基本原理,以及工业等离子体材料处理的原理,并应用基本理论分析各种常见等离子体源的放电状态。书中还介绍半导体材料的刻蚀、薄膜沉积,离子注入等低温等离子体在材料处理方面的应用,反映本领域的最新研究进展。全书共 18 章,内容包括等离子体的基础知识、等离子体放电过程中的粒子平衡和能量平衡、容性和感性放电、波加热的气体放电、直流放电、刻蚀、沉积与注入、尘埃等离子体,以及气体放电的动理论等。

本书可供等离子体物理领域的研究生、技术人员,以及微纳电子领域的科技研发人员参考学习。

图书在版编目(CIP)数据

等离子体放电原理与材料处理/(美)迈克尔·A. 力伯曼(Michael A. Lieberman),阿伦·J. 里登伯格(Allan J. Lichtenberg)著;蒲以康等译.
—北京:科学出版社,2007

(工程技术丛书)

ISBN 978-7-03-018659-1

I. 等… II. ①迈…②阿…③蒲… III. 放电-等离子体 IV. 0461

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 026772 号

责任编辑:刘红梅 崔炳哲 / 责任制作:魏 谨

责任印制:赵德静 / 封面设计:朱 平

北京东方科龙图文有限公司 制作

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

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>

源海印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 3 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2007 年 3 月第一次印刷 印张: 39

印数: 1—4 000 字数: 737 000

定 价: 75.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

中文版序

非常高兴为这本教学和科研用书“等离子体放电原理与材料处理”的中文版写一个序。正如 1994 年我们在原著第一版的前言中写到的那样,在电子、航空航天、汽车及生物医疗等工业领域,等离子体工艺技术是不可缺少的。在 21 世纪,等离子体材料处理技术将发挥更重要的作用。目前中国正在成为一个世界的高科技制造业中心,所以现在是本书出版发行的一个大好时机。这是因为制造业的发展,必然会带动研发工作。对于电子工业中基于等离子体的高新技术尤为如此。本书也列举了许多这方面的应用实例。大约在 60 年前人们发明了晶体管,50 年前发明了集成电路,微处理器的发明至今也有 30 年了。随着技术的不断创新,目前“微电子”变成了“纳电子”,这使得相关工艺对等离子体技术提出了更苛刻的要求。这些相关工艺包括在制造现代微处理器和记忆存储器件过程中的对薄膜的沉积、图形制造和刻蚀。所以,随着技术的不断发展,相关等离子体工艺也需要不断地技术革新。在这个快速发展、不断创新的领域中,本书所强调的相关基础知识会显得格外必要。

我们非常感谢北京清华大学的蒲以康教授和他的合作者,为本书中文版的诞生作出了贡献。在他们翻译本书的过程中,发现并改正了原著中的一些笔误和其他错误,所以,本书的中文版会比原著更完善。我们衷心希望中国的同行们能在等离子体材料处理领域的发展中,取得巨大的成绩。

迈克尔·A. 力伯曼

阿伦·J. 里登伯格

2006 年 11 月 8 日

Foreword to the Chinese Language Edition

It is a great pleasure to write a foreword to this Chinese language edition of our research monograph and textbook, "Principles of Plasma Discharges and Materials Processing." As noted in our first Preface written in 1994, plasma-based processes are indispensable for manufacturing in the electronics, aerospace, automotive, and biomedical industries. Plasma processing of materials will be even more important in the 21st century. The rise of a new world center of high-tech manufacturing in China make this edition especially timely, for where manufacturing is established, research and development inevitably follow. This is especially true for the high-tech plasma processing used in the electronics industry, from which we draw many of our examples. It is almost 60 years since the invention of the transistor, 50 years since the invention of the integrated circuit, and 30 years since the invention of the microprocessor. As innovation continues, "microelectronics" becomes "nanoelectronics", placing incredible demands on the plasma technology used to deposit, pattern, and etch the films in modern microprocessors and memory technology. Hence there is a need for continued innovation in plasma processing to meet the requirements of the changing technology. The emphasis that we place on the fundamentals of these processes will be necessary to continuing progress in this rapidly changing field.

We are greatly indebted to Prof. Yi-Kang Pu at Tsinghua University in Beijing, and to his collaborators, for their dedication to realizing the Chinese language edition of our book. They have been diligent in carefully reading and translating the text, and in correcting typographical and other errors that appear in the English language edition, so that the Chinese edition is even more "correct" than the English edition. We wish that our colleagues in China have a great success in advancing the technology of the plasma processing of materials.

Michael A. Lieberman
Allan J. Lichtenberg
November 8, 2006

中译本序

我非常高兴为本书写序。

一年前,当蒲以康教授和我提及翻译这本书的计划的时候,我就觉得这是一个非常好的想法。主要原因在于我国缺乏关于低温等离子体物理和应用的教材,而国家近年来在各工业领域(特别是微电子领域)的发展向我们提出了极为迫切的人才需求。本书的原著是力伯曼和里登伯格教授在原书第一版(1994年出版)的基础上,花了三年时间修改、增补而成。它既包括基本概念和基本原理,又包括和当代实际应用密切相关的一些实例,并详细阐述了如何应用书中介绍的基本理论对具体等离子体放电装置进行分析。另外,本书还对1994—2005年的新研究结果作了综述。所以,它既是一本很好的研究生教材,也是一本应用价值很高的科研用书。

力伯曼教授是我们的老朋友。他出色的研究工作使其近年来频频获奖。本书所包含的内容,反映了作者广博的知识和对这个领域的深入而独到的见解。力伯曼教授提出的整体模型(书中第10章)既简单又实用,而且功能强大,因此许多科研工作者都用它来解释各种实验现象。

翻译小组为这本书的中文版付出了辛勤的劳动,我也非常感谢为本书的翻译出版作出贡献的专家、学者及学生。

我坚信本书的出版发行对我国低温等离子体领域的教学和科研的发展会有很大的推动作用。同时,正像力伯曼和登伯格教授在他们的中文版序中所提到的那样,本书出版得非常及时,因为中国正在成为一个世界的高科技制造中心。我衷心希望读者能喜欢本书。

中国科学院院士 吴承康
中国科学院力学研究所研究员
2006年12月

译者序

经过翻译小组一年多的艰苦努力,本书的翻译工作终于完成了。通过这项工作,我们小组中的每一个成员都深深体会到翻译工作的艰难和自己能力的有限。可以说,这项工作向我们提供了一个学习和提高自己能力的很好的机会。虽然在翻译过程中,我们发现并纠正了原著中的六十多处笔误,但由于本书涉及的领域非常广泛,加之我们在物理与中英文方面知识的欠缺,翻译不当之处在所难免,敬请读者批评指正。

作者在每一章(除了第4、5章)开头都写了引言,即对该章内容作了一个小结。读者在读引言时,可能不容易读懂,但若耐心地将全章读完,心中的疑问便会一一解开。

本书的翻译工作安排如下:蒲以康(第一版前言,第二版前言,第1、7、18章,附录A、B、C,清华大学),朱悉铭(第2、8章,清华大学),郭志刚(第3、15章,清华大学),王久丽(第4、16章,国家自然科学基金委员会),毛志国(第4章,清华大学),冯阳(第5章,美国加州大学伯克利分校),王旭(第6、14章,美国科罗拉多大学),宋旭波(第9章,北京大学),马杰(第10至13章,英国布里斯托大学),张谷令(第16章,中国科学院物理研究所),马锦秀(第17章,中国科学技术大学),陈宇(符号和缩写,物理常数和转换因子,实用公式,清华大学)。蒲以康对全书稿作了统一整理,郭志刚和朱悉铭也参加了校订工作。

由于本书涉及的物理与化学内容广泛,我们邀请了相关领域的一些专家协助审校书稿。他们是:俞昌旋教授(第5、6章及名词和术语,中国科学技术大学),文克玲教授(第3、8章,清华大学),朱祖凯先生(第10章中的部分内容,美国普林斯顿大学),李业栋教授(第7章,清华大学)和高喆副教授(第18章,清华大学)。另外,本书的作者 Mike Lieberman 教授不厌其烦地为我们解答了很多问题,在此对他表示深深的感谢。

在本书的翻译过程中,清华大学的曾实教授、张小章教授和李丽教授,美国休斯顿大学的 Vincent Donnelly 教授,复旦大学的徐学基教授,上海的严永欣博士等给我们提出了修改意见或解答了一些问题。清华大学工程物理系的一些研究生、本科生及其他单位的研究生也为此书的翻译工作作出了贡献,他们是李晶、蒲昱东、阿芒(Aman-ur-Rehman, 巴基斯坦籍)、胡大为、薛会、黄梦琦、王英和李静等。

在翻译过程中,我们还得到了中国科学院力学研究所吴承康院士、物理研究所杨思泽研究员、Wiley 公司中国代表处的方圆女士和科学出版社崔炳哲先生的大力支持和许多帮助,在此向他们表示感谢。

蒲以康

2006 年 9 月于清华大学

puyikang@tsinghua. edu. cn

第二版前言

本书第一版问世以来的十年间,与等离子体相关的半导体技术有了突飞猛进的发展,但该技术的基础知识框架并未有明显的改变。本书的前九章是关于基础理论的内容:第2~6章介绍低气压部分电离等离子体的基础知识;第7~9章阐述在气相和表面发生的物理化学过程。根据近年来的教学经验和对该领域知识的深入了解,作者对这九章的内容进行了修订,使得这部分内容表述得更加清晰。具体对以下章节进行了重大改动和增补:5.2节和5.3节(讨论扩散和扩散方程的解);6.2节(介绍玻姆判据);6.4节(阐述存在多种离子的鞘层);6.6节(阐明在时变电磁场中朗缪尔探针的工作原理);我们还修订了描述气相和表面物理化学过程的9.2和9.3节(关于溅射物理、由中性粒子扩散造成的损失率和表面损失几率);在第3章和第8章中对氩气和氧气反应速率的数据也进行了更新。

我们在第10~14章中对放电物理进行了修订和扩充。在过去的十年里,通过认真研究含氟、氯和氧气的等离子体放电特性,人们对电负性气体稳态放电机理有了更深入的了解,这些新内容充实了10.3节~10.5节。脉冲放电作为等离子体材料处理的一个新的重要生长点,被安排在10.6节。介绍电容放电的第11章中也增加了许多新内容,包括无碰撞鞘层、双频反应器、高频反应器和电负性气体放电。在新增加的11.5节和11.6节中,阐述了高密度等离子体射频鞘层和离子能量分布,这些内容对理解存在射频偏压时的高密度等离子体的工作原理十分重要。在第12章“感应耦合放电”中增加的内容包括考虑到电子惯性电感^①的新放电模型和对滞回现象及不稳定现象的讨论,这两种现象会影响等离子体材料处理的效果。在13.2节“螺旋波(Helicon)”中,增加了对螺旋波电场能量吸收和中性气体浓度亏损的内容。这些内容包含了新的科研成果,对建立放电模型将起重要作用。另外还增加了关于空心阴极放电和电离化物理气相沉积(ionized physical vapor deposition)的内容(14.4节和14.6节)。空心阴极放电在材料处理和气体激光器中都有重要的应用,对于分析低压直流辉光放电也是一个很好的例子。电离化物理气相沉积,作为一个直流和射频放电共存的典型例子,在薄膜沉积方面有重要的应用。

在第15、16章增加了刻蚀、沉积和离子注入方面的最新进展。15.4节阐述铜的刻蚀,新添的15.5节介绍电荷累积效应(charging effect)。人们已对在基片不同区域上形成的累积电荷量的不同及其对氧化物薄膜的损伤有了较多了解。

^① electron inertia inductance,其物理含义将在第12章中详细描述。——译者注

在过去的十年中,人们对放电中颗粒形成的研究主要集中在以下两个方面:一方面是降低它们的生成速度以减少在工艺过程中由它们产生的缺陷;另一方面是用它们来产生粉体和纳米尺度的晶体颗粒材料。新增的第17章介绍尘埃等离子体这一重要领域中的物理原理和相关技术,其中包括颗粒荷电量的计算、稳态放电模型、颗粒数平衡方程、颗粒形成和生长、颗粒的诊断以及消除或生长颗粒的技术。

同样在过去的十年中,以动理论为基础的放电分析有了长足的发展,人们越来越多地使用动理学方法分析等离子体。在新增的第18章中讨论动理论的一些基本概念,局域和非局域动理论、准线性扩散、随机加热和一些用动理论建立的放电模型的例子。

我们订正了第一版第一次和第二次印刷中出现的错误。对书中讨论的内容进行了更新,并介绍了科研上的最新进展和最新的参考文献。这使得参考文献部分的篇幅增加了很多。

因为我们强调的是在学生头脑中打好物理化学的基础,所以这几年来,课程的内容并没有太多的改变。电气工程系、化学系、化学工程系、核工程系、材料科学系和物理系的研究生要在一学期里学完这本书中的主要内容。在第一版前言中描述的30次课、每次90分钟的课程安排仍然适用。当然,讲授者可根据情况增加一些对电负性等离子体平衡态和脉冲等离子体的讨论(本书对有些章节的顺序作了一些调整)。

我的同事 C. K. Birdsall 和 J. P. Verboncoeur 以及伯克利(Berkeley)的等离子体理论和模拟课题组(PTSG)仍在不断改进和提供一套可在个人计算机和工作站上运行的辅助教学和示范软件。从他们的网站(<http://ptsg.eecs.berkeley.edu>)上可下载这些软件及使用手册。

在第一版的修订过程中,我们得到了很多朋友和同事的鼓励,并从和他们的讨论中受益良多。感谢 I. D. Kaganovich 对第18章“动理论”的认真细致的审阅;感谢 J. T. Gudmundsson 对更新氩和氧的反应速率数据方面提供的帮助(更完全的数据可以从他的网站 <http://www.raunvis.hi.is/tumi/>上获得);感谢 Z. Petrović 和 D. Marić. 对更新第14章中出现的场致增强电离系数和击穿电压数据方面提供的帮助;感谢 B. Cluggish, R. N. Franklin, V. A. Godyak 和 M. Kilgore, 他们的建议使书中的分析和计算过程变得更加清晰。我们从以下同事对等离子体的理解和建议中受益很大,他们是 C. K. Birdsall, J. P. Booth, R. W. Boswell, P. Chabert, C. Charles, S. Cho, T. H. Chung, J. W. Coburn, R. H. Cohen, D. J. Economou, D. Fraser, D. A. Graves, D. A. Hammer, Y. T. Lee, L. D. Tsendin, M. Tuszewski, J. P. Verboncoeur, A. E. Wendt 和 H. F. Winters。近年来加入我们组的博士后 S. Ashida, J. Kim, T. Kimura, K. Takechi 和 H. B. Smith, 以及研究

生 J. T. Gundmundsson、E. Kawamura、S. J. Kim、I. G. Kouznetsov、A. M. Marakhtanov、K. Patel、Z. Wang、A. Wu 和 Y. Wu 也让我们学到了很多知识,而且他们的一些工作成果也编入了本书。非常感谢澳大利亚国立大学的 R. W. Boswell 和伦敦的 M. G. Haines 的热情接待。本书中的很多内容都是在这两个地方修订完成的。

迈克尔·A. 力伯曼

阿伦·J. 里登伯格

第一版前言

本书介绍部分电离的等离子体的基本原理及其在薄膜处理工艺方面的应用。这种等离子体有较强的化学活性,而且能在纯化学方法不可能达到的工艺参数条件下对材料进行处理,这促成了等离子体材料处理这门学科的诞生。作为高科技领域的一门交叉学科,它涉及等离子体物理、表面科学、气相化学及原子和分子物理等诸多内容。各种等离子体工艺的共同点是产生等离子体并利用它在基片表面上引发一系列化学反应。本书只讨论小于 1 Torr^① 的低气压放电过程,这种等离子体能在不对表面进行加热的条件下,为表面提供(化学反应所需的)活化能。在集成电路制造工艺中,等离子体表面处理技术起着不可替代的作用,因而我们以其中的材料处理工艺为例进行分析。此外,等离子体在航空航天、汽车制造、钢铁冶炼、生物医学和有害废弃物处理等其他领域,也有重要的应用。

我们在本书内容的选取方面作了一些考虑。希望读者通过阅读本书能够建立较强的理论基础,并了解一些基本的物理和化学原理。这些原理对了解放电物理、在气相和表面发生的物理化学过程很有帮助。本书不侧重于描述等离子体技术和薄膜处理工艺的最新进展。尽管这些工艺技术不断变化,然而它们的理论基础始终不变。我们在对相关物理化学过程作定量描述的同时,侧重帮助读者建立物理思想,培养简单估算(back-of-the-envelope)和粗略分析(first-cut analysis)的能力,并使读者学会设计放电参数和薄膜处理工艺。为此,书中给出了一些对放电分析有实用价值的图表,并在各章节中列举了很多实例。

本书既可作为研究生教材(书中附有一定量的习题),又可作为工程师和科研人员的参考书。阅读本书的读者应具有一般本科毕业生的数理化基础,包括两年的数学、一年半的物理和半年或一年的化学课程的学习。另外,读者还需具备电磁学或流体力学中涉及的求解偏微分方程的基本知识。

本书的第 1 章为概述,其余内容主要分四部分:第 2~6 章介绍低气压部分电离放电过程;第 7~9 章阐述发生在气相中和表面上的物理和化学动力学过程;第 10~14 章阐述各种等离子体放电过程;第 15~16 章介绍等离子体工艺过程。第 3 章和第 8 章在内容上相对独立,分别讨论原子和分子碰撞过程。它们分别出现在介绍相应动力学过程的章节之前,读者可以根据实际需要略读或精读。有关等离子体诊断的内容放在相关章节的最后(如 4.6 节、6.6 节、8.8 节和 11.6 节)。我们往往将诊断技术作为理论分析的应用实例。

① 1 Torr = 1 mmHg = 1.333 22 × 10² Pa。

在过去的五年中,我们一直在讲授一门以本书内容为基础的研究生课程。选修该课程的研究生大多来自电机工程系、化学工程系、核工程系、材料科学与工程系。这门课程每学期讲授 30 课时,每课时 90 分钟。课程进度安排如下:

章	讲课次数和内容	章	讲课次数和内容
1	1	9	3
2	2	10	1(省略 10.3 节)
3	2(略讲)	11	2(只讲 11.1 节、11.2 节)
4	1(只讲 4.1 节和 4.2 节,不包括波)	12	1(只讲 12.1 节)
5	2(只讲 5.1 节~5.3 节)	13	1(只讲 13.1 节)
6	3(省略 6.4 节)	14	2
7	2	15	3
8	2(略讲,省略 8.6 节)	16	2(省略 16.4 节)

本书的核心内容在第 2 章、第 4~7 章、第 9 章和第 10 章的部分节中加以阐述。我们在讲解原子和分子碰撞过程(第 3 章和第 8 章)时可以有所侧重,但应当对这两章的内容作一些基本介绍。上述章中部分小节的内容和第 11~16 章的内容则相对独立,教师可根据需要选择讲授。部分内容专业性较强,如导向中心运动(4.3 节),动力论(4.4 节),波(4.5 节)和磁化等离子体的扩散(5.4 节、5.5 节)等,可在讲授学完核心内容之后再行介绍。

我们的同事 C. K. Birdsall 和 V. Vahedi 以及伯克利等离子模拟课题组的其他成员共同开发了可在个人计算机和工作站上运行的软件。这些软件可用于计算机辅助教学和课堂演示。它给出的模拟计算结果可用来阐明放电物理中的很多概念(参见图 1.11,图 2.2 和图 6.3)。我们通常在课堂上利用这些软件作 4~5 次、每次 20 分钟的模拟演示。读者若对这些软件感兴趣,可以直接同加州大学伯克利分校的软件发放办公室联系。他们的地址是:Software Distribution Office, Industrial Liaison Program, Department of Electrical Engineering and Computer Sciences, University of California, Berkeley, CA 94720; 电子邮件地址:software@eecs.berkeley.edu, 电话号码是(510) 6436687, 传真号码是(510) 6436694。

在撰写本书的三年间,我们得到了很多朋友和同事的鼓励与支持,也从和他们的讨论中受益匪浅。在此,我们向那些对此作出重要贡献的人致谢。感谢 D. L. Flamm,他在 1988—1989 年间作为伯克利的 Mackay 访问讲师,和 Allen J. Lichtenberg 一起讲授了等离子体材料处理中的化学原理部分; Michael A. Lieberman 和同事 C. K. Birdsall、D. B. Graves 及 V. Vahedi 一起,多次开办了短期培训班,为半导体工艺工程师讲授本书中精简后的基础内容。这些同事对

本书内容的理解、领悟和提出的一些建议使我们获益颇多。我们也从 N. Cheung, D. Graves, D. Hess, and S. Savas, 博士后 C. Pico 和 R. Stewart, 研究生 D. Carl, K. Kalpakjian, C. Lee, R. Lynch, G. Misium, R. Moroney, K. Niazi, A. Sato, P. Wainman, A. Wendt, M. Williamson, 和 B. Wood 等那里学到了很多知识。书中内容也包括了他们的一些工作成果。第 10 章、第 12 章和第 13 章的一些内容来自 R. A. Gottscho 和本书作者之一 (M. A. L.) 合写的一篇综述文章, 该文章发表在 *Physics of Thin Films*, 第 18 卷, (1994)。该书的主编为 M. Francombe 和 J. L. Vossen, 出版商为 Academic Press, New York。我们感谢 V. A. Godyak, M. B. Lieberman 和 S. Brown, 他们审阅了书中部分章节并提出了一些建议, 使文字表述更为清晰; W. D. Getty 曾使用本书初稿作为教材, 讲授一门类似的课程。在本书终稿的修订过程中, 他的评论和建议也给我们带来不少帮助。本书中很多成果也是在科研工作中获得的。这些科研工作得到了美国国家自然科学基金会、能源部、洛伦斯-利物莫国家实验室、加州 MICRO 项目、加州有竞争力技术项目、SEMATECH 和半导体研究公司 (Semiconductor Research Corporation)、IBM、应用材料公司和摩托罗拉公司的赞助和支持。非常感谢伦敦帝国学院 M. G. Haines 和澳大利亚国立大学的 R. Boswell 的热情款待。本书很多内容是在这两处写就的。E. Lichtenberg 和 P. Park 录入了本书的部分内容, 在此也向她们表示感谢。

迈克尔·A·力伯曼
阿伦·J·里登伯格

符号与缩写含义

表 I 符号含义

符号	含义及举例
a	半径(m);原子半径; a_0 ,玻尔半径; a_j ,粒子 j 的化学活性; a_v ,刻蚀各向异性
a	加速度(m/s^2)
A	面积(m^2);常数; A_R ,约化质量(amu)
b	碰撞半径(m);半径(m)
B	磁感应强度(T);一个常数; B_{rot} ,分子转动常数
c	真空中光速
C	常数;电容(F/m); C_V ,定容比热(J/mol K); C_p ,定压比热
\mathcal{C}	周线或闭合环
d	表示一个恰当微分
\bar{d}	表示一个非恰当微分(第7章)
d	距离(m);等离子体尺寸(m)
D	扩散系数(m^2/s);位移向量(C/m^2); D_a ,双极扩散系数; D_{a+} ,负离子存在下的双极扩散系数; D_v ,速度空间扩散系数(m^3/s^3); D_e ,能量扩散系数(V^2/s); D_{SiO_2} ,二氧化硅沉积速率(m/s)
e	一个电子的无符号电量($1.602 \times 10^{-19} C$)
e	自然对数之底(2.718)
E	电场强度(V/m);刻蚀(或沉积)速率($\text{\AA}/min$)
\mathcal{E}	与能量等同的电压值(V);例如,能量(J) = $e\mathcal{E}$ (V)
f	频率(Hz);分布函数($m^{-6}s^3$); f_m ,麦克斯韦分布; f_{pe} ,电子等离子体频率; f_{pi} ,离子等离子体频率
f_c	单位体积碰撞力(N/m^3)
F	力(N)
g	简并度; \bar{g} ,统计权重;能量分布函数;重力常数
g	表示一种气体
G	吉布斯自由能(J);体积电离率($m^{-3} \cdot s^{-1}$); G_i ,吉布斯生成自由能; G_r ,吉布斯反应自由能;电导(Ω^{-1});粒子密度源($m^{-3} \cdot s^{-1}$)
h	中心与边界密度比; h_l ,轴向比; h_R ,径向比
H	焓(J);磁场强度(A/m);高度(m); H_f ,生成焓; H_r ,反应焓
H	玻尔兹曼 H 函数
i	整数

符号	含义及举例
I	电流(A);微分散射截面(m^2/sr); $I_{\text{AB}}, I_{\text{mol}}$, 分子转动惯量($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)
I	第一类修正贝塞尔函数
j	$\sqrt{-1}$; 整数
J	电流密度(A/m^2); 转动量子数
J	第一类贝塞尔函数
j	j , 表示化学粒子 j
k	玻尔兹曼常数($1.3817 \times 10^{-23} \text{J}/\text{K}$); 波数或波矢量(m^{-1})
K	一阶(s^{-1}), 二阶(m^3/s)或三阶(m^6/s)速率常数
K	第二类修正贝塞尔函数
X	平衡常数
l	放电长度(m); 天线长度(m); 量子数; 整数
l	表示一种液体
l	表示长度或一个线积分
L	长度(m)体积损失速率($\text{m}^{-3}\text{s}^{-1}$); 电感(H); 粒子密度损失速率($\text{m}^{-3}\text{s}^{-1}$)
m	电子质量($9.11 \times 10^{-31} \text{kg}$); 质量(kg); 角向模量; m_l, m_s, m_j , 轨道, 自旋, 总角动量的轴向分量 子数
M	离子质量(kg)
\mathcal{M}	化学粒子数
n	粒子密度(m^{-3}); 主量子数(整数); n_i , 离子密度; n_e , 电子密度; n_g , 中性气体密度
n'	面积密度(m^{-2}); n_0' , 表面位点的面积密度
N	物质的量(mol); 波的折射率
\mathcal{N}	圈数
p	压力(N/m^2); 粒子动量($\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}$); p^\ominus , 标准气压(1 bar 或 1 atm); p_d , 电偶极矩($\text{C} \cdot \text{m}$); p_{ohm} , 欧姆功率密度(W/m^3)
P	功率(W); 概率
q	电荷(C)
q	热流矢量(W/m^2)
Q	热量(J); 电荷(C)
\mathcal{Q}	共振电路或谐振腔品质因子
r	径向位置(m); r_c , 回旋半径; r_{ce} , 电子回旋半径
R	气体常数($8.314 \text{J}/(\text{K mol})$); 圆柱半径(m); 质心坐标(m); 核间距离(m); 反应速率($\text{m}^{-3}\text{s}^{-1}$); 电阻(Ω)
s	鞘层厚度(m); 粘附系数; \bar{s} , 热粘附系数; s_v 或 s_h , 刻蚀选择性

续表 I

符号	含义及举例
s	表示一种固体
S	能量通量($W/(m^2 \cdot s)$); 熵(J/K); 封闭表面面积(m^2); S_p , 抽速(m^3/s)
\mathcal{S}	表示一个封闭表面
t	时间(s)
T	温度(K); T_0 , 标准温度(298 K)
T	以伏为单位的温度(V)
u	平均速度(m/s); u_B , 玻姆速度; u_E , $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 速度; u_D , 抗磁性漂移速度
U	能量(J); 内能(J); 势能(J)
v	速度(m/s); 转动量子数; \bar{v} , 平均速度; v_{th} , 热速度; v_R , 相对速度; v_{ph} , 相速度
V	电压或电势(V); \bar{V} , 射频电压; \bar{V} , 直流或时均电压
\mathcal{V}	体积(m^3)
w	单位体积能量(J/m^3); 宽度(m)
W	动能(J); 功(J)
x	直角坐标(m); x_j , 粒子 j 的摩尔分数; x_{iz} , 电离率
X	电抗(Ω)
y	直角坐标(m)
Y	导纳(Ω^{-1})
z	直角或轴向的柱坐标(m)
Z	离子的相对电量; 以 e 为单位; 阻抗(Ω)
α	空间变化率(m^{-1}); 空间衰减或衰变常数(m^{-1}); 第一汤姆逊系数(m^{-1}); 负离子与电子密度比; α_j , 粒子 j 的化学计量系数; α_p , 原子或分子极化率(m^3)
β	空间变化率(m^{-1}); 一个常数
γ	二次电子发射系数; 器壁损失概率; 电子离子温度比; 比热比; 复传播常数; γ_{se} , 二次电子发射系数; γ_{sput} , 溅射系数
Γ	粒子流($m^{-2} \cdot s^{-1}$)
Γ	Gamma 函数
δ	狄拉克-德耳塔函数; 层厚度(m); δ_p , 无碰撞趋肤深度(m); δ_c , 碰撞趋肤深度; δ_e , 反常趋肤深度(m)
Δ	一个量的变化量
ϵ	介电常数(F/m); ϵ_0 , 真空介电常数($8.854 \times 10^{-12} F/m$); ϵ_p , 等离子体介电常数
ζ	一个微小位移; ζ_L , 弹性碰撞能量损失比例
θ	角(rad); 球极角; 实验室坐标系中的散射角; 表面覆盖率
Θ	质心坐标系中的散射角(rad)

符号	含义及举例
η	效率因子
κ	相对介电常数; κ_p , 等离子体相对介电常数; κ_T , 热导率
λ	平均自由程(m); λ_c , 碰撞平均自由程; λ_e , 电子平均自由程; λ_i , 离子平均自由程; λ_{De} , 电子德拜长度(m)
Δ	扩散长度(m); 德拜长度与最小碰撞参数比
μ	迁移率($\text{m}^2/\text{V} \cdot \text{s}$); 化学势(J/mol); μ_0 , 真空磁导率($4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$); μ_{mag} , 磁矩
ν	碰撞或相互作用频率(s^{-1} 或 Hz); ν_c , 碰撞频率
ξ	一个常数
π	3.141 6
Π	压力张量(N/m^2)
ρ	体积电荷密度(C/m^3); ρ_S , 表面电荷密度(C/m^2)
σ	截面(m^2); σ_{dc} , 直流电导率($\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$); σ_{rf} , 射频电导率
τ	平均自由时间(s); 时间常数(s); τ_c , 碰撞时间
ϕ	角度(rad); 球坐标中的方位角
φ	磁通量(T m^2)
Φ	电势(V); Φ_p , 等离子体电位; Φ_w , 器壁电位
χ	角度(rad); χ_{01} , 零阶贝塞尔函数的第一个零点的坐标
ψ	球坐标下速度空间的极向角
Ψ	螺距(rad)
ω	角频率(rad/s); ω_{pe} , 电子等离子体频率; ω_c , 回旋频率; ω_{ce} , 电子回旋频率
Ω	立体角(sr)
∇, ∇_r	空间矢量导数; ∇_v , 速度矢量导数; ∇_T , 总能量坐标系中的矢量导数
A	标量
\mathbf{A}	矢量
\hat{A}	单位矢量(具有单位大小)
\tilde{A}	一个量中的振荡或射频成分
\bar{A}	一个量中的时间平均或直流成分; 平衡态时的值
\dot{A}	dA/dt
\ddot{A}	d^2A/dt^2
$\langle A \rangle$	平均值
A'	面密度(m^{-2}); 积分变量
$ A $	绝对值