

等离子体科学

〔美〕 等离子体2010委员会 等 著

王文浩 译

PLASMA
SCIENCE



科学出版社

等离子体科学

[美] 等离子体 2010 委员会 等 著
王文浩 译

科学出版社

北京

图字：01-2012-3033 号

内 容 简 介

《等离子体科学》是由美国国家科学院国家研究委员会于2004年组织专家组成“等离子体2010委员会”编写的一份关于未来十年等离子体科学和工程领域发展的评估和前景的报告。本书全面概述了1994~2004十年间等离子体科学各分支学科的发展(实际采用数据截至2007年)。本书除了总结等离子体科学近期进展之外,很重要的一点是向政府科技管理部门提出适时改进管理结构以适应并进一步促进学科发展的建议,包括对各学科分支资助力度的加强。这对于我国各级政府的科技管理部门具有重要的参考价值。

本书适合高等院校应用物理和核工程方面的研究生和研究人员阅读,同时适合作为政府科技管理部门工作人员的参考资料。

This is the translation of *Plasma Science: Advancing Knowledge in the National Interest*, by Plasma 2010 Committee, Plasma Science Committee, National Research Council © 2007. First published in English by National Academies Press. All rights reserved. This edition published under agreement with the National Academy of Sciences.

图书在版编目(CIP)数据

等离子体科学/(美)等离子体2010委员会等著;王文浩译. —北京:科学出版社,2012

ISBN 978-7-03-034246-1

I. 等… II. ①等… ②王… III. 等离子体 IV. 053

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第088036号

责任编辑:孙力维 杨 凯 / 责任制作:董立颖 魏 谨

责任印制:赵德静 / 封面设计:卢雪娇

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>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012年6月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2012年6月第一次印刷 印张:14 1/2

印数:1—2 000 字数:300 000

定 价: 58.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

译者序

《等离子体科学》是由美国国家科学院国家研究委员会于 2004 年组织专家组成“等离子体 2010 委员会”编写的一份关于未来十年等离子体科学和工程领域发展的评估和前景的报告。它有一个副标题：“在国家层面上推进知识进步”。这份报告是十年评估与展望《物理学 2010》系列报告的一部分。从 20 世纪 60 年代起，美国国家科学院就有计划地每隔 10 年左右召集专家就物理学各基础学科的进展进行一次这样的总结和展望。科学出版社曾于 1992 ~ 1996 年间出版过一套“90 年代物理学”丛书，就是对美国国家科学院研究委员会于 1986 年编写出版的同名系列报告的系统译介。其中的《等离子体和流体》分册是由霍裕平院士领衔翻译的，它对促进等离子体科学在我国的发展和普及曾起到非常重要的作用。

本书通过 6 章 28 节全面概述了 1994~2004 年十年间等离子体科学各分支学科的发展(实际采用数据截止 2007 年)。从中我们可以清晰地看到，等离子体科学和技术的发展早已超出了聚变能研究和低温应用的范畴，成长为对能源研究、国家安全、经济增长和环境治理等方面有着巨大作用和效益，同时也为人类探索自然、寻求极端条件下的物理规律提供极好知识框架的全新学科。书中描述的很多等离子体现象及运用的术语，即使如我等从事等离子体研究的专业人员亦感到耳目一新。

应当说，本报告的目的，除了总结等离子体科学近期进展之外，很重要的一点是要向政府科技管理部门提出适时改进管理结构以适应并进一步促进学科发展的建议，包括对各学科分支资助力度的加强。这对于我国各级政府的科技管理部门具有重要的参考价值。随着等离子体科学和技术向各经济领域的全面扩展，在促进企业加强研发的同时，如何加强对等离子体基础学科研究的投入，形成具有创新性的知识产出和人才培养，将是政府科技管理部门的一项重要工作内容。在这方面，本报告具有良好的借鉴意义。

正是出于以上几点考虑，译者不揣孤陋，将其翻译过来，以方便我国科技界和科技管理部门借他山之石攻玉。对此，我还要衷心感谢科学出版社的孙力维编辑，是她慧眼识珠，很快办理了出版事宜，买下了版权，使本书得以最快速度面世。当然，由于书中涉及学科领域宽广，概念丰富，而译者水平有限，故文中难免疏漏舛错，敬请读者不吝指正。联系地址：whwang@tinghua.edu.cn.

美国国家科学院 (THE NATIONAL ACADEMIES)

——国家科学、工程和医学顾问

美国科学院(The National Academy of Sciences)是一个非官方的、非盈利性的自治机构,由从事科学和工程研究的杰出学者组成,致力于促进科学和技术进步及其在提高人类福祉方面的应用。它是于1863年由美国国会授权创立的,其任务是为联邦政府提供科学和技术方面的建议。美国科学院现任院长是拉尔夫·奇切罗内博士(Dr. Ralph J. Cicerone)。

美国工程院(The National Academy of Engineering)依据美国国家科学院的章程于1964年成立,是与美国科学院平行的优秀工程师组织。它在管理和成员遴选方面具有自主性,在为联邦政府提供咨询方面具有与美国科学院同样的责任。美国工程院还倡议旨在满足国家需要的工程项目,鼓励教育和研究,并对工程师的卓越成就进行认证。美国工程院现任院长是查尔斯·韦斯特博士(Dr. Charles M. Vest)。

美国医学研究所(The Institute of Medicine)依据美国国家科学院的章程于1970年成立,旨在确保为制定与公众健康有关的政策提供权威的、恰当的专业咨询服务。按照国会的授权,美国医学研究所代表美国科学院行使联邦政府顾问的权力,并主动担负起确定医疗、科研和教育等问题的责任。美国医学研究所现任所长是哈维·法恩伯格博士(Dr. Harvey V. Fineberg)。

美国国家研究委员会(The National Research Council)是美国科学院的执行机构,成立于1916年。其宗旨是发挥科技界在促进知识传播方面的作用,为联邦政府提供咨询和建议。按照美国国家科学院确定的大政方针,美国国家研究委员会已经成为美国科学院和美国工程院在服务于政府、公众、科学和工程学界方面的主要机构。委员会由美国科学院、美国工程院和美国医学研究所共同管理。美国国家研究委员会现任主席和副主席分别是拉尔夫·奇切罗内博士和查尔斯·韦斯特博士。

www.national-academies.org

等离子体 2010 委员会

Steven C. Cowley, 加利福尼亚大学洛杉矶分校, 联合主席

John Peoples, JR., 费米国家加速器实验室, 联合主席

James D. Callen, 威斯康星大学麦迪逊分校

Franklin R. Chang-DÍAZ, Ad Astra 火箭制造公司, 休斯敦, 得克萨斯州

Todd Ditmire, 得克萨斯大学奥斯汀分校

William Dorland, 马里兰大学帕克分校

Walter Gekelman, 加利福尼亚大学洛杉矶分校

Steven L. Girshick, 明尼苏达大学

David Hammer, 康乃尔大学

Erich P. Ippen, 麻省理工学院

Mark J. Kushner, 爱荷华州立大学

Kristinaa. Lynch, 达特茅斯学院

Jonathan E. Menard, 普林斯顿大学

Lia Merminga, 托马斯·杰斐逊国家加速器实验室

Eliot Quataert, 加利福尼亚大学伯克利分校

Timothy J. Sommerer, 通用电气公司

Clifford M. Surko, 加利福尼亚大学圣地亚哥分校

Max Tabak, 劳伦斯·利弗莫尔国家实验室

工作人员

Donald C. Shapero, 主任

Timothy I. Meyer, 项目高级官员

Michael H. Moloney, 项目高级官员

Pamela Lewis, 项目协理专员(至 2007 年 1 月)

Van an, 财务协理专员

等离子体科学委员会

Riccardo Betti, 罗切斯特大学, 主席

Michael R. Brown, 斯沃斯莫尔学院

Linda M. Cecchi, 桑迪亚国家实验室

Patrick L. Colestock, 洛斯阿拉莫斯国家实验室

S. Gail Glendinning, 劳伦斯·利弗莫尔国家实验室

Valery Godyak, Osram Sylvania 公司

Ian H. Hutchinson, 麻省理工学院

Chadrashekhhar Joshi, 加利福尼亚大学洛杉矶分校

Eliot Quataert, 加利福尼亚大学伯克利分校

Edward Thomas, JR., 奥本大学

Michael C. Zarnstorff, 普林斯顿大学等离子体物理实验室

Thomas H. Zurbuchen, 密歇根大学

工作人员

Donald C. Shapero, 主任

Timothy I. Meyer, 项目高级官员

Caryn J. Knutsen, 项目高级助理

物理学与天文学委员会

Anneila L. Sargent, 加利福尼亚理工学院, 主席

Marc A. Kastner, 麻省理工学院, 副主席

Joanna Aizenberg, 朗讯科技

Jonathan A. Bagger, 约翰·霍普金斯大学

James E. Brau, 俄勒冈大学

Ronald C. Davidson, 普林斯顿大学

Andrea M. Ghez, 加利福尼亚大学洛杉矶分校

Peter E Green, 密歇根大学

Wick C. Haxton, 华盛顿大学

Frances Hellman, 加利福尼亚大学伯克利分校

Joseph Hezir, EOP 集团公司

Erich P. Ippen, 麻省理工学院

Allan H. MacDonald, 得克萨斯大学奥斯汀分校

Christopher F. McKee, 加利福尼亚大学伯克利分校

Homer A. Neal, 密歇根大学

Jose N. Onuchic, 加利福尼亚大学圣地亚哥分校

William D. Phillips, 国家标准与技术研究所

Thomas N. Theis, IBM T. J. 沃森研究中心

C. Megan Urry, 耶鲁大学

工作人员

Donald C. Shapero, 主任

Timothy I. Meyer, 项目高级官员

Robert L. Riemer, 项目高级官员

Natalia J. Melcer, 项目官员

Brian D. Dewhurst, 项目高级副专员

David B. Lang, 研究副专员

Caryn J. Knutsen, 项目高级助理

Van an, 财务协理专员

致 谢

根据国家研究委员会报告评议委员会核准的程序,这份报告的草案由遴选出的具有不同观点和技术专长的独立评审人进行了评议。这项独立评议的目的是要评审人提供坦诚的批评性意见,这将有助于本机构公布的报告尽可能完满,并确保本报告符合本机构制定的客观、有据的标准,同时反映出项目研究经费的使用情况。为了保护议事过程的完整性,对审稿意见和报告草案仍予保密。我们要感谢下列评审人对本报告的评议:

Paul Bellan,加利福尼亚理工学院

Riccardo Betti,罗切斯特大学

Amitava Bhattacharjee,新罕布什尔大学

Patrick Colestock,洛斯阿拉莫斯国家实验室

Ronald C. Davidson,普林斯顿大学

Gary B. Forest,威斯康星大学麦迪逊分校

Edward Frieman,斯克里普斯海洋学研究所

Valery Godyak,OSRAM Sylvania 公司

W. G. Graham,皇后大学,贝尔法斯特

Mark C. Hermann,桑迪亚国家实验室

Ian H. Hutchinson,麻省理工学院

Arnold Kritz,利哈伊大学

J. Patrick Looney,布鲁克海文国家实验室

Thomas M. O'Neil,加利福尼亚大学圣地亚哥分校

Robert Rosner,阿贡国家实验室

Alvin W. Trivelpiece,橡树岭国家实验室(已退休)

Jonathan S. Wurtele,加利福尼亚大学伯克利分校

Michael C. Zarnstorff,普林斯顿大学等离子体物理实验室

虽然以上所列的评审人提供了许多建设性意见和建议,但没有要求他们同意本报告的结论或建议,也没有在报告公布前让他们看到最后的草案。本报告的评议是在 Sigma Xi 科学研究协会、杜克大学的 John R Ahearne 和普林斯顿大学的 Nathaniel J. Fisch 的监督下进行的。根据国家研究委员会的任命,他们负责确保本报告的独立检查是按照本机构的程序进行的,并且所有的审核意见都得到认真考虑。报告起草委员会和本机构对本报告的最终内容负责。

前 言

美国国家研究委员会(NRC)于2004年年中召开了“等离子体2010委员会”全体会议,向等离子体科学委员会下达一项重要任务:准备一份新的关于未来十年等离子体科学和工程领域发展的评估和前景的报告。这个项目得到了能源部、国家科学基金会和国家航空航天管理局的支持。委员会被要求对等离子体研究的进展作出评估,确认最紧迫的新的科学机遇,对更广泛的等离子体应用前景作出评价,并为政府和研究团体在实现这些机遇方面提供指导。完整的责任要求见附录A。在陈述这些责任时,委员会保持一种乐观的态度,并从需求方角度看问题,努力找出最迫切的科研机遇和实现它们的途径。这份报告有一种强烈愿望,就是商讨有关经费需求的问题。对此委员会努力做到在分析等离子体研究可以为国家作出什么贡献方面保持前瞻性。鉴于正在全国范围进行的关于美国竞争力的讨论,委员会认识到前瞻性的“国际标杆”演习的价值,也就是说,有必要将美国的等离子体科学和工程企业与世界其他地区的类似企业进行比较。但是,委员会认识到,它没有时间也没有资源来进行这项工作。

委员会的成员不仅包括等离子体各个分支学科(低温、磁约束聚变、高能量密度物理、空间物理和天体物理学,以及基础等离子体科学)领域的专家,而且也包括国家研究委员会邀请的来自等离子体科学以外的专家,目的是从更广泛的范围来帮助确立等离子体研究领域(委员会成员的简介见附录G)。在委员会看来,从一开始就准备一份能够以明确的、令人信服的方式来反映等离子体各分支学科之间科学联系的报告是非常重要的。

这份报告是美国国家研究委员会物理学与天文学委员会主持的项目——《物理学2010》系列报告中的第三卷。此报告的每一卷都审查了物理学的分支学科,评估了其地位,勾画了其未来前景。

由于委员会全面公布的报告约有250页,因此委员会还将提供一份精华本,其中只包括前页、摘要和第1章“概述”。

委员会共举行了三次全体会议,第四次小型会议是准备报告的第一稿完整草案(会议议程见附录F)。为了更好地完成任务,委员会将广泛的等离子体科学和工程领域分成若干个子领域,组成小组委员会深入研究每一个主题。成百的会议电话和电子邮件往来维持着委员会全体成员之间的协调工作。委员会认真研究了联邦政府

对等离子体科学提供支持的趋势和组织形式(简短的摘要见附录 D)。对 NRC 以前的等离子体科学报告的综述,见附录 E。

委员会采取了一些机制以便吸引更多的等离子体科学和工程研究人员关注此事。委员会小组访问过的主要等离子体研究中心的网站遍及全美。其中有麻省理工学院、普林斯顿大学、威斯康星大学、海军研究实验室、罗切斯特大学、桑迪亚国家实验室、洛斯阿拉莫斯国家实验室、橡树岭国家实验室、劳伦斯·利弗莫尔国家实验室、美国加利福尼亚大学圣地亚哥分校、通用原子公司等等。委员会感谢每一次访问时站点东道主提供的时间和支 持,这些讨论富于启发性,非常宝贵。委员会还举行了一系列与各种专业协会之间的会议,涉及单位和会议有:美国物理学会下属的等离子体物理分会,原子、分子和光学物理分会;大学聚变协会;美国地球物理联盟;IEEE 等离子体科学国际会议;美国真空协会下属的材料、界面和处理科学与技术分会;等离子体化学国际研讨会;气体电子学会议等。委员会感谢这些会议组织者的支持和鼓励。最后,委员会还制定了电子版书面问卷,收到了超过 100 份的回函,它们为委员会的讨论提供了宝贵意见。

委员会感谢各次会议上作正式发言的发言者,他们的演讲和随后的讨论提供了非常丰富的信息,并对委员会的审议工作产生了重要影响。作为共同主席,我们感谢委员会的所有同事,他们的耐心、智慧和奉献确保了本报告的完整性。我们特别感谢委员会以外的其他成员在协助编写本报告时所作出的承诺和奉献。他们提出的睿智的问题和创造性的建议大大提升了讨论的水平。最后,委员会还感谢国家研究委员会的工作人员在整个过程中提供的指导和帮助,他们是 Timothy Meyer, Michael Moloney, Don Shapero 和 Pamela Lewis。

史蒂芬 C. 考利,联合主席 约翰·小皮普斯,联合主席
等离子体 2010 委员会

摘要

等离子体科学正面临一个新时代。它已做好了在未来十年取得重大突破的准备,这些突破将彻底改变该领域的面貌。例如,国际磁约束聚变实验——更确切地说,国际热核聚变实验堆(ITER)——预计将首次约束住燃烧等离子体,从而在商用聚变能的道路上迈出关键一步。国家点火装置(NIF)计划实现聚变燃料靶丸点火,以获得有关提高核武器储备的安全性和可靠性的必要知识。低温等离子体应用已经带来了改变日常生活的新产品和新技术。人们还期盼着等离子体科学家能够帮助破解宇宙间各种奇异现象的奥秘。这种生机勃勃的未来前景不仅令人兴奋,也为这一领域带来了挑战,因此需要我们将全国范围的等离子体科学研究组织成一项协调有序的事业。这份报告审查了等离子体研究的广泛主题,并为未来发展提供了一种大胆设想。

主要结论 等离子体研究范围的扩大正创造出一系列新的科学机遇和挑战。这些机遇确保了等离子体科学在增强经济安全与繁荣、能源和环境安全、国家安全以及增进科学知识等方面的作用得到进一步提高。

等离子体科学有一个逻辑上连贯的知识框架,其众多分支在物理过程的同一性基础上得到统一。因此,正如本报告指出的,等离子体科学不仅仅是一系列应用。“等离子体 2010 委员会”认为,掌握等离子体科学的基本知识,以便推进科学认识,为扩大基于本学科的应用范围创造更多的机遇,对于等离子体科学的所有分支来说都是非常重要的。换言之,这些知识进展和机遇正是实现国家在诸如聚变能源、经济竞争力和核武器库存管理等优先发展目标的核心。

等离子体科学在过去十年的生命力证明,联邦政府对一些具体的等离子体科学项目的支持是成功的。然而,新的研究方向的出现使得联邦机构对等离子体科学的支持需要调整项目的结构和组合。委员会已经确定了 4 个按照目前的联邦政府等离子体科学管理结构无法获得最佳成效的重大研究性挑战:低温等离子体基础科学、发现推进型的高能量密度等离子体科学、中等规模的等离子体科学和跨学科等离子体研究。

尽管联邦政府资助的等离子体科学的个别项目取得了成功,但从整体来看,联邦政府的资助还缺乏协调性,忽视了科学的统一性,从而在应对研究性挑战,实现科学机遇,利用良好的应用前景等方面形成许多障碍。委员会认为,将等离子体科学作为一门统一的学科进行有效管理可能会加快等离子体科学在应用方面的发展。二十多年来,许多报告中都认定需要这种管理。研究领域的变迁只是加剧了管理方面的问

题。委员会的结论是,在这方面比以往更迫切地需要采用新方法。

考虑到既需要提供一种综合的方法,又需要将这门科学与应用及更广泛的科学领域联系起来,委员会为此审议了多种选择方案。通过权衡利弊,委员会建议如下:

主要建议 为了充分认识到等离子体研究的机遇,我们需要有一个统一的安排。因此,能源部科学办公室应调整其研究计划,以便将磁约束聚变和惯性约束聚变科学、基础等离子体科学、非国防任务型高能量密度等离子体科学和低温等离子体科学与工程统一起来。

科学办公室新的管理职能将远远超出聚变能科学办公室目前的任务和职能范围。它将包括更广泛的等离子体科学各子学科的组合,以及聚变能科学办公室目前所支持的研究。在这个学科组合里,有两个学科是新的:非任务驱动型高能量密度等离子体科学项目和低温等离子体科学与工程项目。新的管理架构不是要取代或重复其他机构的等离子体科学计划,相反,它将使联邦政府对等离子体方面研究的支持集中在以科学为基础的问题上。这些变化是渐进性的而非革命性的,它将适度地开始,并随着科学机遇的不断扩大而增长。委员会认为,这些新的方案需要新的资源,也许需要科学办公室更新组织结构。

为了确保取得圆满的成果,我们需要一种全面的管理战略。为实施这一设想的其他指导意见见主体报告。实施这一战略所涉及的问题有以下几项:

- 科学要素的整合。
- 战略规划过程的发展,这一规划不仅跨越整个领域,而且还须为每个分支领域提供指导。
- 风险识别和避免风险战略的实施。

美国等离子体科学与工程界将有一个辉煌壮丽的未来。但这需要等离子体科学的国家架构不断发展,适应新的机遇。只有这样,才能实现其巨大的潜力。

目 录

第 1 章 概 述	1
1.1 学科领域的界定	1
1.2 等离子体科学与工程的重要性	2
1.3 等离子体科学与工程的选择重点	5
1.3.1 生物技术及健康护理	5
1.3.2 用等离子体尾场加速粒子	7
1.3.3 磁瓶中的聚变燃烧等离子体	8
1.3.4 磁重联与自组织	9
1.3.5 爆丸内的聚变点火	10
1.3.6 等离子体物理与黑洞	11
1.4 最新科学进展的关键主题	12
1.4.1 等离子体科学的预测能力	12
1.4.2 新的等离子体运行模式	13
1.5 等离子体研究的共同知识主线	13
1.6 主要结论和建议	15
第 2 章 低温等离子体科学与工程	21
2.1 引言及统一的科学原理	27
2.1.1 等离子体的加热、稳定性和控制	28
2.1.2 效率和选择性	28
2.1.3 随机的、混沌的和集体行为	28
2.1.4 等离子体与表面相互作用	28
2.1.5 尘埃和其他非理想介质中的等离子体	29
2.1.6 诊断和预测模型	29
2.2 最新进展和发展趋势	29
2.2.1 甚小面积和甚大面积等离子体在低气压和高气压条件下的 产生、稳定性及其控制	30
2.2.2 等离子体与复杂表面的相互作用	31

2.2.3	复杂等离子体和液态等离子体中的湍性的、随机的和混沌的行为	31
2.2.4	等离子体行为的可靠的、定量的预言	32
2.2.5	弥散性高压非平衡等离子体的突现	33
2.3	未来的机遇	33
2.3.1	等离子体与有机材料和活体组织之间的相互作用	33
2.3.2	混沌与随机过程中等离子体行为的描述方法	33
2.3.3	大面积、均匀、高压等离子体的稳定性判据	34
2.3.4	高温稠密等离子体与表面的相互作用	34
2.3.5	灵活的非介入诊断技术	34
2.3.6	基础数据	35
2.4	国际前景	35
2.5	学术前景	37
2.6	产业前景	38
2.7	本领域的管理	39
2.8	主要结论和建议	40

第 3 章 高能量密度等离子体物理学 45

3.1	引 言	45
3.1.1	高能量密度等离子体物理学的主要内容	45
3.1.2	使能技术与高能量密度科学	46
3.2	本项研究的重要性	48
3.2.1	经济与能源安全	49
3.2.2	国家安全	49
3.2.3	知识的重要性	49
3.2.4	教育和培训的作用	51
3.3	最新进展和未来的机遇	51
3.3.1	惯性约束聚变	52
3.3.2	核武器库存管理	56
3.3.3	温稠密物质和热稠密物质的性质	57
3.3.4	基于等离子体的电子加速器	60
3.3.5	天体物理现象的实验室模拟	62
3.3.6	高能量密度基础研究	63
3.4	应对挑战	66
3.5	主要结论和建议	67

第 4 章 磁约束聚变等离子体科学	71
4.1 引 言	71
4.1.1 磁约束聚变研究的新时代	71
4.1.2 磁约束聚变概述	71
4.1.3 ITER 及其他位形概念的改进	74
4.2 本研究的重要性	76
4.3 最新进展和未来的机遇	77
4.3.1 宏观稳定性与动力学	78
4.3.2 微观不稳定性、湍流与输运	80
4.3.3 边缘区等离子体的性质与控制	84
4.3.4 聚变等离子体的波-粒相互作用	85
4.4 主要结论和建议	87
第 5 章 空间和天体等离子体	93
5.1 引 言	93
5.2 最新进展和未来的机遇	94
5.2.1 宇宙中磁化等离子体结构的起源与演化机制	95
5.2.2 粒子在宇宙中加速	101
5.2.3 等离子体与非等离子体的相互作用	104
5.3 主要结论和建议	107
第 6 章 基础等离子体科学	111
6.1 引 言	111
6.2 最新进展和未来的机遇	112
6.2.1 非中性等离子体和单成分等离子体	114
6.2.2 超冷电中性等离子体	115
6.2.3 尘埃等离子体	116
6.2.4 激光等离子体和高能量密度等离子体	117
6.2.5 微等离子体	119
6.2.6 湍流和湍性输运	119
6.2.7 发电机作用、磁重联和磁自组织	120
6.2.8 等离子体波、结构和流动	122
6.3 基础等离子体研究的改进方法	124
6.4 主要结论和建议	125
6.4.1 大学级别的研究	125
6.4.2 中等规模的装置	127

附录 A	委员会的责任	129
附录 B	国际热核聚变实验堆	131
附录 C	国家点火装置	133
附录 D	联邦政府对等离子体科学与工程研究的支持	135
D. 1	能源部	136
D. 1. 1	能源部聚变能科学办公室	136
D. 1. 2	能源部/OFES 对惯性聚变能和高能量密度物理的支持	136
D. 1. 3	能源部国家核安全管理局(NNSA)	137
D. 1. 4	能源部/高能物理办公室主管的先进加速器研究发展计划	138
D. 2	海军研究办公室	138
D. 3	国家科学基金会	139
D. 3. 1	工 程	139
D. 3. 2	天文学	139
D. 3. 3	物理学	139
D. 3. 4	国家科学基金会(能源部)关于基础等离子体科学与 工程的合作	140
D. 4	国家航空航天局(NASA)	140
附录 E	国家研究委员会关于等离子体科学的 历届报告概述	141
附录 F	委员会会议议程	147
F. 1	第一次会议	147
F. 2	第二次会议	148
F. 3	第三次会议	149
F. 4	第四次会议	149
附录 G	委员会成员和工作人员简介	151
G. 1	委员会成员	151
G. 2	委员会工作人员	156