

等离子体——材料相互作用

等离子体诊断

第一卷

放电参量和化学

Orlando Auciello 编著
〔美〕 Daniel L. Flamm

郑少白 胡建芳 译
郭淑静 洪明苑



电子工业出版社

等离子体—材料相互作用

等离子体诊断

KG27/25

第一卷

放电参量和化学

[美] Orlando Auciello 编著
Deniel L. Flamm

郑少白 胡建芳 译
郭淑静 洪明苑



(京)新登字 055 号

内 容 摘 要

等离子体与材料相互作用的研究是一门新兴的交叉学科,是发展我们这个时代的关键技术如微电子、材料加工、聚变能源和空间航行等的核心。本书第一卷着重于等离子体工艺中的各种诊断技术的介绍。全书共七章,包括:低气压等离子体和等离子工艺的光学诊断技术;放电光源中的等离子诊断;朗缪尔探针的工作原理;等离子体质谱学;微波诊断;等离子体放电的顺磁共振诊断;热等离子体工艺中的诊断。

本书供从事等离子体科研与教学的人员参考;也可作研究生和本科生的教学参考书。

等离子体——材料相互作用

等离子体诊断

第一卷

放电参量和化学

[美]Orlando Auciello 编著

Daniel L. flamm

Copyright ©1989 by Academic press, Inc.

郑少白 胡建芳 译

郭淑静 洪明苑

责任编辑:陈晓莉 郭延龄

*

电子工业出版社出版(北京市万寿路)

电子工业出版社发行 各地新华书店经销

密云华都印刷厂印刷

*

开本:850×1168毫米 1/32 印张:15.125 字数:390千字

1994年3月第1版 1994年3月第1次印刷

印数:1000册 定价:25.00元

ISBN 7-5053-2174-9/TN. 648

序

(为本书中译本而作)

我们感到非常荣幸，由于郑少白和胡建芳教授等人的翻译，使我们编著的“等离子体诊断”第一卷更易被中国科学界所接受。在这里我们对他们卓越的工作表示感谢。

我们所有的人，包括郑少白、胡建芳，O. Auciello 和 D. L. Flamm，都希望这本书能促进全世界从事等离子体化学、等离子体加工和等离子体与表面相互作用的科学家之间的学术交流。这些学科是发展我们这个时代的关键技术如微电子学、材料加工、聚变能源和空间航行等的核心。等离子体工艺是现代微电子学的关键技术。如果没有等离子体辅助刻蚀和等离子体化学汽相沉积就不可能制造今天的超大规模集成电路 (ULSI)。同样，为了实现商用聚变电站以及未来宇宙航行和生存中避免宇宙飞船表面的剥蚀，必须了解和控制各种等离子体—表面的现象，如物理溅射、化学刻蚀及固体壁上粒子的捕获等等。

“等离子体诊断”各卷的作者们都是有名望的专家，他们将阐明如何开始、如何进行，如何解释测量结果，以及如何评价诊断数据的真实性和探测的复杂性。他们还给出为理解这些技术所必要的理论基础和关键的最新参考文献。现在译成中文的第一卷包括七章。它们是分析等离子体的重要诊断技术和这些技术在重要应用中的说明。它们是①低气压等离子体和等离子体工艺的光学诊断，②放电光源的等离子体诊断，③朗缪尔探针，④等离子体质谱，⑤微波诊断，⑥顺磁共振诊断和⑦热等离子体工艺的诊断。

第二卷包括材料经等离子体曝光之后的表面诊断。其章节

是：①研究等离子体与表面相互作用的石英晶体微量天平。②用电子和离子谱仪对处理过表面的元素分析。③等离子体过程中的光谱椭圆偏振测量，④经等离子体曝光后表面的离子束分析（卢瑟福背散射、弹性反冲测量、粒子诱导 X 射线发射和核反应分析）。⑤聚变实验中等离子体探针数据的解释。⑥经等离子体曝光后表面分析的非破坏性光声及光热技术。

我们很高兴地看到了“等离子体诊断”第一卷的中译本，同时我们希望第二卷和“等离子体与材料相互作用”系列丛书各卷都将被翻译以有益于中国的科学家和学生。我们真诚地希望这样的思想交流将促进世界大家庭内科学家和工程师的国际交流和合作。

Orlando Auciello
Research Triangle Park,
North Carolina, USA, 1993

Daniel L. Flamm
Berkeley, California, USA, 1993

译者的话

等离子体与材料作用的研究是一门新兴的学科，是当前国际上一个重要而活跃的前沿领域。它对于材料、信息、能源科学等都具有重要的意义。近期我国在这方面的研究也有可喜的进展，但基础还较薄弱，基础研究还不够深入。

1990年，我们有幸得到著名教授 Orlando Auciello 和 Daniel L. Flamm 编著的“等离子体-表面相互作用”系列著作——“等离子体诊断”（卷一，放电参量和化学；卷二，表面分析和相互作用），我们深感这是一套很有价值的书。本书第一卷着重于等离子体工艺中的各种诊断技术，第二卷着重于等离子体-表面相互作用的表面分析技术。本书作者均是各领域的著名专家，他们阐述了各领域的最新研究成果，除了实验技术的细致讨论和大量的文献综述外，特别是对各项技术的原理所做的相当深刻而又深入浅出的阐述，以及启示读者如何解释实验结果及实验中可能出现的问题，并给予适当的评论。本书不仅内容新颖，而且书中列出大量的数据和参考文献是研究人员所必需的。我们翻译此书，希望借鉴国外的经验促进我国在这方面的研究工作更加深入，并为从事这方面工作的科学技术人员提供方便。

译者十分感谢本书作者 Orlando Auciello 教授和 Daniel L. Flamm 教授以及 Academic Press, Inc 出版社给予我们的合作和支持；感谢中国科学院两位学部委员章综先生和吴承康先生的推荐。

由于译者水平有限，再加上时间仓促，译文中会有一些缺点和错误，热情希望得到广大读者和同行们的批评指正。

1993年4月

14.2
39

序

等离子体与材料的相互作用的研究已经发展成为重要而活跃的研究领域。了解这些相互作用的基本物理和化学过程是我们这个时代发展微电子学、表面改性、聚变、空间及其它关键技术的核心。等离子体工艺是现代微电子学的关键性技术。例如，如果没有等离子体刻蚀和等离子体化学汽相沉积就不可能制造超大规模的集成电路（ULSI）。类似还有为将来实现商用自持聚变反应堆电站必须了解和控制各种等离子体-表面的现象，如物理溅射、化学刻蚀及固体壁上粒子的捕获等等。等离子体与宇宙飞船表面的相互作用可产生有害的剥蚀，如在航天飞机货舱中观察到讨厌的热包层中的蚀刻。这些效应可能危及空间的长期飞行。所有这些问题现在正为全世界的科学家和工程师所研究。

遗憾的是，这些不同领域中的科学和技术信息常常发表在只供狭窄专业读者阅读的杂志上。我们正在编辑的“等离子体与材料相互作用”系列著作的主要目的是提供一个交叉学科的论坛，希望向全球公众传播物理化学过程和等离子体工艺的基础及应用的知识。这套系列著作的取材使学校、工厂及国家实验室中的科学家、工程师、学生以及从事技术的人员都能容易地理解。我们认为等离子体与材料的相互作用是一个对现在正在进行的技术革命作出重要贡献的研究领域。因此我们希望这套系列著作将有助于在相关的交叉学科领域中探索新的思想，拓宽科学和技术的视野。

要了解等离子体和暴露于等离子体中的固体表面首先需要诊断和表征的技术。遗憾的是所必要的知识都分散在各类文献中，

而在形式上也常常难以使用。因此我们为各学科领域的读者，选取权威的和最新的等离子体处理及表面诊断的资料，编写这套系列著作。作者们都是著名的专家，他们将阐明如何启动、运行和解释测量结果，以及如何评价诊断数据的正确性和探测的复杂性。最后他们还给出理解每项技术所必要的理论背景和最新的参考文献。由于材料如此丰富，因此这本书将分成两卷。

第一卷分七章，包括关于等离子体的重要诊断技术并阐述在特殊领域中的应用。这一部分有：①低气压等离子体和等离子体工艺的光学诊断，②放电光源的等离子体诊断，③朗缪尔探针，④等离子体质谱，⑤微波诊断，⑥顺磁共振诊断和⑦热等离子体工艺的诊断。

第二卷包括材料经等离子体曝光之后的表面诊断。其章节有：①研究等离子体和表面相互作用的石英晶体微量天平。②用电子和离子谱仪对处理过表面的元素分析。③等离子体过程中的光谱椭圆偏振测量，④经等离子体曝光后表面的离子束分析（卢瑟福背散射、弹性反冲测量、粒子诱导 X 射线发射和核反应分析）。⑤在聚变实验中等离子体探针数据的解释。⑥经等离子体曝光后表面分析的非破坏性光声及光热技术。

我们希望这本书以及以后的系列著作对专家和新手都一样有价值。“等离子体与材料的相互作用”中关于等离子体刻蚀技术和聚合物的等离子体沉积及刻蚀各卷正在付印之中。我们欢迎你们对以后各卷提出各种建议。

Orlando Auciello

Daniel L. Flamm

1989年1月

目 录

序 (为本文中译本而作)

译者的话

序

第一章 低气压等离子体和等离子体工艺的

光学诊断技术 (1)

I . 引言 (1)

II . 等离子体诱导光发射 (2)

III . 吸收光谱 (16)

A. 紫外和可见吸收 (16)

B. 红外吸收 (18)

IV . 激光技术 (19)

A. 激光诱导荧光 (LIF) (19)

B. 喇曼散射 (29)

C. 相干反射斯托克斯喇曼光谱 (CARS) (30)

D. 调谐红外激光吸收 (31)

E. 光伽伐尼 (OPTOGALVANIC) 效应 (35)

V . 等离子体—表面相互作用的光学技术 (36)

A. 激光干涉 (37)

B. 椭圆偏振测量 (38)

C. 二次谐波发生 (SHG) (40)

D. 激光的表面喇曼散射 (41)

E. 表面吸收和光声光谱 (42)

VI . 小结 (43)

VII . 致谢 (44)

参考文献 (44)

第二章 放电光源中的等离子体诊断	(51)
I . 引言	(51)
A. 放电灯的类型	(51)
II . 采用的诊断技术	(60)
A. 低气压放电中的朗缪尔探针诊断	(60)
B. 微波诊断	(78)
C. 低气压灯的光谱诊断	(78)
D. HID 灯的光谱诊断	(92)
E. 高气压放电灯中的激光诊断	(107)
F. 连续谱测量	(110)
G. 斯塔克位移	(111)
III . 小结	(111)
IV . 致谢	(111)
参考文献	(112)
第三章 朗缪尔探针的工作原理	(118)
I . 引言	(118)
II . 半无限平面朗缪尔探针数据的解释	(120)
A. 一般表达式	(120)
B. 无漂移速度的麦克斯韦分布电子	(122)
C. 各向同性的单能电子	(126)
D. 带漂移速度的麦克斯韦分布电子	(127)
E. 离子电流	(130)
F. 悬浮电位	(133)
III . 有限探针尺寸和形状的影响	(136)
A. 探针鞘层	(136)
B. 轨道理论	(138)
C. 离子束对非半无限平面探针的 I-V 特性曲线的影响	(140)
IV . 离子 - 中性粒子碰撞效应	(144)

A. 一般考虑	(144)
B. 薄鞘层	(146)
C. 厚鞘层	(146)
D. 处于等离子体电位的探针	(147)
E. 流动的等离子体	(148)
V. 磁场中的探针	(149)
VI. 二次电子效应	(151)
VII. 发射探针	(153)
A. 简化的理论	(153)
B. 强发射中的悬浮点	(157)
C. 零发射极限下的转折点	(157)
D. 真空中的发射探针	(159)
E. 差分发射探针	(159)
F. 二次发射电容型探针	(161)
G. 自发射探针	(164)
VIII. 探针干扰	(165)
A. 一般考虑	(165)
B. 鞘层中的探针测量	(166)
C. 浆状探针	(168)
D. 辉光放电中有关电离的数据	(168)
IX. 等离子体电位扰动	(170)
A. 简单模型	(170)
B. 正弦射频	(170)
C. 技术	(176)
X. 探针污染	(180)
XI. 朗缪尔探针电路	(181)
A. 简单电路	(181)
B. 曲线显示	(182)
C. 运算放大器电路	(183)
D. 发射探针电路	(184)
E. 探针结构	(184)

XII . 电子温度的直接测量	(185)
A. 双探针	(185)
B. 导纳探针	(187)
XIII . 定向探针	(189)
XIV . 小结	(190)
XV . 致谢	(191)
参考文献	(191)
第四章 等离子体质谱学	(195)
I . 引言	(195)
II . 等离子体流分析	(196)
III . 分压强分析	(199)
IV . 等离子体流分析中能量选择	(201)
A. 离子流和鞘层	(201)
B. 能量选择技术	(205)
V . 等离子体流分析的质量筛滤	(210)
A. 电子轰击后电离	(211)
B. 质量筛滤和离子的流分析	(212)
C. 离子流分析的一般考虑	(215)
D. 离子流分析的实验考虑	(218)
VI . 中性成份的流分析	(219)
VII . 等离子体流分析的实验考虑和应用	(223)
VIII . 等离子体分压强分析的实验考虑和应用	(228)
A. 减压和动态范围	(228)
B. 系统响应	(231)
C. 标定方法	(233)
D. 在磁约束核聚变装置中的应用	(237)
IX . 致谢	(240)
参考文献	(240)

第五章 微波诊断	(252)
I . 引言	(252)
II . 如何启动: 一个简单的微波诊断设备	(255)
III . 腔和波导的等离子体诊断技术	(262)
A. 以等离子体为负载的腔和波导	(262)
B. 谐振腔技术	(266)
IV . 干涉技术	(275)
A. 基本公式	(276)
B. 干涉仪的类型	(277)
C. 阿贝变换和多道干涉仪	(282)
D. 干涉仪的设计	(284)
E. 相位探针技术	(290)
V . 微波散射和辐射测量	(291)
A. 微波散射	(292)
B. 辐射测量	(294)
VI . 等离子体波和它在微波诊断中的应用	(295)
A. 冷等离子体的介电张量	(295)
B. 麦克斯韦方程	(299)
C. 波动方程及其解	(300)
D. 边界条件	(306)
E. 对诊断有意义的例子	(309)
F. 光学近似: 诊断应用	(315)
参考文献	(319)
第六章 等离子体放电的顺磁共振诊断	(328)
I . 引言	(328)
II . 基本理论	(329)
A. 原子	(330)
B. 分子	(336)
C. 选择定则	(343)

D. 多原子分子	(346)
III. 应用	(347)
A. 气相顺磁共振的装置	(348)
B. 定性和定量结果	(354)
IV. 讨论	(359)
A. 粒子	(359)
B. 顺磁共振诊断的例子	(360)
C. 总结	(361)
V. 致谢	(362)
参考文献	(362)

第七章 热等离子体工艺中的诊断

I. 引言	(365)
II. 等离子体产生的方法和特征	(367)
A. 电弧	(368)
B. 射频感应耦合放电	(371)
III. 有关在热等离子体条件下测量的特殊问题	(372)
A. 等离子体的亮度	(372)
B. 陡的梯度	(376)
C. 高热流	(377)
D. 固有涨落	(377)
IV. 等离子体流的诊断	(378)
A. 焓探测	(378)
B. 发射光谱	(380)
C. 吸收光谱	(414)
D. 激光光谱	(420)
E. 等离子体速度的测量	(423)
V. 热等离子体中粒子参数的测量	(427)
A. 粒子轨道分布	(427)

B. 粒子速度测量	(432)
C. 粒子尺寸测量	(447)
D. 飞行中的粒子表面温度的测量	(449)
VI. 小结	(459)
VII. 致谢	(460)
参考文献	(460)

第一章 低气压等离子体和等离子体工艺的光学诊断技术

V. M. Donnelly

I. 引言

近 20 年来微电子技术的发展已超出人们最乐观的估计；复杂设备的制造获得飞快的发展，例如动态随机存取存储集成电路的成功，其中一部分原因是工艺和过程控制方面的进步。低气压辉光放电已经在许多工序中得到应用^[1]。例如 $\text{SiH}_4/\text{N}_2\text{O}$ 和 SiH_4/NH_3 射频等离子体常用于沉积 SiO_2 和氮化硅薄膜，此膜用于栅极氧化层、器件的绝缘和密封、扩散掩膜和刻蚀掩膜； O_2 放电产生的氧原子用来清洗晶片表面和清除光刻胶。然而等离子体加工对硅集成电路技术最大的影响还在于对硅、金属和绝缘体的刻蚀，使垂直侧壁的亚微米图像成为可能。刻蚀和沉积两个过程的精确控制，常常需要一些原位探针来测量过程速率和检测薄膜被刻蚀的终点，当薄膜露出衬底时，探针有灵敏的反应。有几种光学技术已经成功地用在此项工作中。

有关刻蚀和沉积的等离子体参数（气体成份、气压、功率等）在实验上的最佳选择已产生许多成功的“处方”。然而随着诊断技术和计算机的日益先进，现在已能获得这些工艺等离子体及其与表面相互作用的非常详尽的化学和物理信息。在所有诊断