

现代应用物理学丛书

CAMBRIDGE

射频等离子体物理学

〔法〕帕斯卡·夏伯特

〔英〕尼古拉斯·布雷斯韦特 著

王友年 徐军 宋远红 译



科学出版社

现代应用物理学丛书

射频等离子体物理学

[法]帕斯卡·夏伯特 著

[英]尼古拉斯·布雷斯韦特

王友年 徐 军 宋远红 译

科学出版社

北 京

图字:01-2014-1161

内 容 简 介

从微电子工业到航天器推进系统乃至高效光源,低温射频等离子体在各种前沿技术中扮演着重要的角色,而且它是物理学、化学及工程学之间相互交叉的一个学科。本书主要聚焦在物理学方面,所以主要适用于应用物理及电子工程专业的研究生及科研人员。

本书不仅对射频等离子体的前沿进展进行综述,同时也包括一些等离子体物理基础知识,如有界等离子体的输运及电学诊断。本书的风格有助于激发读者学习的兴趣,帮助读者建立物理图像和数学分析方法。通过实例分析,将理论应用到实际问题中,并留有超过 100 道的简答题,让读者能够快速掌握新知识,有信心解决与实验相关的物理问题。

Physics of Radio-Frequency Plasmas, first edition (978-0-521-763004) by Pascal Chabert, Nicholas Braithwaite first published by Cambridge University Press 2011

All rights reserved.

This simplified Chinese edition for the People's Republic of China is published by arrangement with the Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom. © Cambridge University Press & Science Press 2015

This book is in copyright. No reproduction of any part may take place without the written permission of Cambridge University Press and Science Press

This edition is for sale in the People's Republic of China (excluding Hong Kong SAR, Macau SAR and Taiwan Province) only.

此版本仅限在中华人民共和国境内(不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区)销售。

图书在版编目(CIP)数据

射频等离子体物理学/(法)夏伯特(Chabert, P.), (英)布雷斯韦特(Braithwaite, N.)著;王友年,徐军,宋远红译.—北京:科学出版社,2015.10
书名原文:Physics of Radio-Frequency Plasmas
ISBN 978-7-03-045919-0

I. ①射… II. ①夏…②布…③王…④徐…⑤宋… III. ①射频-等离子体物理学 IV. ①053

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 238458 号

责任编辑:钱俊 裴威 / 责任校对:钟洋

责任印制:徐晓晨 / 封面设计:陈敬

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

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 10 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2015 年 10 月第一次印刷 印张:20 5/8

字数:404 000

定价:128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

帕斯卡·夏伯特:法国科学院研究中心(CNRS)主任,目前是法国巴黎综合理工学院等离子体物理实验室低温等离子体研究小组的负责人,专长是等离子体物理及等离子体工艺。

尼古拉斯·布雷斯韦特:英国开放大学工程物理教授,所带领的研究小组主要从事技术等离子体物理研究。自1998年起,一直是《等离子体源科学及技术》(*Plasma Sources Science & Technology*)的编委。

译者序

夏伯特及布雷斯韦特两位教授是国际上的著名学者,在低温等离子体物理方面的研究多有建树。他们合作撰写了《射频等离子体物理学》一书,由剑桥大学出版社于2011年正式出版。该书不仅介绍了部分低温等离子体物理的基础知识,如粒子的碰撞和反应过程、等离子体的电磁特性、等离子体输运以及等离子体鞘层等,同时还重点描述了三种射频等离子体(容性耦合等离子体、感性耦合等离子体及螺旋波等离子体)的物理特性及其前沿研究进展。此外,该书还对实际的工艺等离子体以及等离子体诊断方法进行了介绍。该书非常适合作为低温等离子体物理领域的研究生教材及科研人员的参考用书。

为了把该书的中文译本呈献给国内的同行,我们历时两年终于完成了该书的翻译。该书的翻译分工如下:第5~9章及书后附录由王友年翻译,第1~3章及第10章由徐军翻译,第4章由宋远红翻译。最后由徐军对全书进行了统稿。在翻译过程中,我们纠正了原著中的一些笔误,并进行了标注。此外,我们对原著中的一些物理符号的使用进行了统一的约定,如分别用 m_e 、 M_i 及 k_B 表示电子质量、离子质量及玻尔兹曼常数。该书的翻译过程给我们提供了一个很好的学习机会,但是由于我们的能力所限,加之东西方语言的差异,在翻译过程中难免会出现一些不当之处,敬请读者批评指正。

在该书翻译及出版过程中,得到了科学出版社钱俊先生的大力支持和帮助,在此表示感谢。同时也感谢本书原著的两位作者及剑桥大学出版社对该书翻译成中文本的授权。

王友年 徐军 宋远红

2015年3月于大连理工大学

致 谢

作者感谢那些从本书构思到出版过程中给予关心和帮助的许多同事。特别感谢 J. P. Booth、V. Godyak、M. Lieberman、J. L. Raimbault 等的详细的建议和指导,以及 R. Boswell、M. Bowden、C. Charles、B. Graham、A. Paterson 等的意见及鼓励。本书中等离子体物理的观点来自于我们的博士生和博士后的贡献,他们在确定本书的内容和风格方面起着重要作用。本书的作者之一帕斯卡·夏伯特感谢他在巴黎综合理工学院过去及现在的博士研究生:J. Arancibia, E. Despiau-Pujo, C. Lazzaroni, G. Leyray, P. Levif, L. Liard, A. Perret 和 N. Plihon, 以及先前的博士后: A. Aanesland, C. Corr 和 A. Meige。本书的另一位作者尼古拉斯·布雷斯韦特,感谢他在英国开放大学先前及现在的(低温等离子体)博士研究生: G. Ingram, S. Goruppa, S. Yang, P. Barroy, P. Lima, E. Vasekova 和 V. Samara, 以及先前的博士后: C. Mahony, A. Goodyear, J. Alkuzee 和 T. Matsuura。

我们也感谢与 J. Allen、R. Franklin、A. Lichtenberg、L. Pitchford 及 M. Turner 等的交流以及来自他们的鼓励。与我们进行交流的国际同行很多,在此不能一一致谢。在过去 15 年间,我们与这些国际同行分别在国际大会和研讨会上进行交流。我们在本书中引用这些同行的工作时,他们无私地向我们提供了原始数据。

我们也衷心地感谢不同机构的支持。感谢伦敦英国物理学会及我们各自的实验室(巴黎综合理工学院的等离子体物理实验室及英国开放大学的原子分子及等离子体物理小组)给予的支持。同等重要的是,也要感谢我们的国家研究基金委员会 CNRS 和 EPSRC,以及其他不同的基金对我们的经费资助。如果没有这些资助,我们很难完成本书的出版。尽管在本书的写作过程中我们倾尽全力,但难免会出现一些误解和错误。我们对这些误解和错误负责,并争取再版时加以更正。

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 等离子体	1
1.2 微电子学中的等离子体工艺	3
1.3 等离子体推进	8
1.4 射频等离子体:E,H 和 W 模式	12
1.5 内容简介.....	15
第 2 章 等离子体动力学与平衡	17
2.1 微观描述.....	18
2.2 宏观描述.....	33
2.3 整体粒子和能量平衡.....	36
2.4 电动力学描述.....	39
2.5 本章总结.....	48
第 3 章 有界等离子体	51
3.1 空间电荷鞘层区.....	53
3.2 等离子体/鞘层过渡	62
3.3 等离子体区:输运模型	67
3.4 本章总结.....	77
第 4 章 射频鞘层	83
4.1 响应时间.....	83
4.2 离子动力学.....	87
4.3 电子动力学.....	95
4.4 (高频)RF 鞘层的解析模型	99
4.5 重要结果归纳	110
第 5 章 单频容性耦合等离子体	111
5.1 恒定离子密度下电流驱动的对称模型	112
5.2 非均匀离子密度的电流驱动模型	123
5.3 整体模型	130
5.4 其他放电参数范围及放电位形	139
5.5 重要结果归纳	145
第 6 章 多频容性耦合等离子体	147
6.1 静电近似下的双频 CCP	148

6.2	高频情况下的电磁模式	156
6.3	重要结果归纳	181
第 7 章	感性耦合等离子体	183
7.1	电磁模型	185
7.2	等离子体自身的阻抗	194
7.3	变压器模型	198
7.4	纯感性放电的功率转换效率	201
7.5	容性耦合	203
7.6	整体模型	205
7.7	重要结果归纳	210
7.8	进一步考虑	211
第 8 章	螺旋波等离子体	217
8.1	在无界等离子体中的平行传播	220
8.2	柱状等离子体中传播的螺旋波	224
8.3	螺旋波模式存在的条件	229
8.4	波功率的吸收:加热	231
8.5	E-H-W 模式转换	235
8.6	重要结果归纳	237
第 9 章	真实等离子体	239
9.1	高密度等离子体	240
9.2	磁化等离子体	244
9.3	电负性等离子体	248
9.4	扩展等离子体	260
第 10 章	电测量	265
10.1	静电探针	266
10.2	用于射频等离子体的静电探针	284
10.3	减速场分析器	291
10.4	共振及波诊断	296
10.5	重要结果归纳	306
附录:习题解	307
参考文献	313

第 1 章 概 论

1.1 等 离 子 体

等离子体是一种包含自由运动的电子、离子的电离气体。等离子体通常非常接近电中性,也就是说,等离子体中的负电荷粒子的数密度等于正电荷粒子的数密度,正负电荷的数密度偏差在千分之几以内。带电粒子在电场中的运动是相互耦合的,因此它们的运动会对外加电磁场作出集体响应。在低频电磁场中,等离子体表现为导体;当外加电磁场的频率足够高时,等离子体的行为更像电介质。在弱电离等离子体中(工业应用中大部分属于这种情形),除了电子和离子之外,还存在大量中性粒子,如原子、分子和自由基团等。本书主要讨论低气压射频(radio frequency, RF)放电产生的弱电离等离子体。

从质量和体积两方面来看,等离子体是宇宙中可见物质的主要存在形式。恒星是由等离子体构成的,同样,星际空间也充满等离子体。这两种等离子体有很大差别:恒星的星核是高温稠密的等离子体,而星际空间则是稀薄的冷等离子体。地球上人造等离子体也有同样的差别:既有高温高密度等离子体,也有低温低密度等离子体。受控热核聚变堆就是一种高温高密度的人造等离子体,它是完全电离的。目前,对于受控热核聚变研究,其挑战性的问题是如何长时间地约束这种高温高密度等离子体,从而使其发生轻核聚变,释放出巨大的聚变能。另一类温度较低的弱电离等离子体,又被称为低温等离子体,包括从照明到半导体工艺等各种工业应用等离子体。低温等离子体可通过气体放电来产生,放电电源的频率可以从直流(direct current, DC)到微波波段(GHz)。放电气压可以在小于 1 Pa 到数倍大气压之间(10^5 Pa)。

对于具有金属电极的大气压直流放电,通常是工作在强电流区,其中在由带电粒子和中性粒子组成的等离子体中形成了一个狭窄的电流通道。在这种直流大气压等离子体中,带电粒子和中性粒子接近热平衡(各种粒子大致处于相同温度,大约 10 000 K)。相似的情形也可以在巨型闪电及用于焊接和切割的电弧等离子体中看到。由于中性气体组分的温度过高,电弧等离子体不适于软材料表面的处理。但是,如果可以抑制达到热平衡的条件,就可以避免大气压放电中气体的过度加热,从而产生一大类被广泛应用的等离子体,即非热(平衡)等离子体。在这种等离子体中,电子的温度远高于离子和气体原子的温度。产生非平衡等离子体的方法之一是射频激励介质阻挡放电(dielectric barrier discharge, DBD)。这种放电装置

中,在电极表面覆盖一层电介质,这样在电极产生弧光放电前,电介质表面的电荷积累会自动终止放电。短脉冲介质阻挡放电通常工作在丝状放电模式,每个丝状放电通道的电流很小,但其中的电子密度及电子温度足以使相当一部分中性气体解离和电离。中性气体仍处于低温状态,而且在一个电流脉冲内,等离子体中的各种组分来不及达到热平衡状态。DBD 等离子体在低成本工业应用中的重要性日益增加,例如,在医用材料的消毒,以及空气中可挥发有机化合物的去除等方面的应用。在一些情况下,某些气体的放电会呈现出比 DBD 更强的扩散模式。对于这类气体放电,由于约束等离子体的空间过于狭小,等离子体各组分之间难以达到热平衡。在大气压下,这种放电形式被称为微放电,其特征放电尺度小于 1 mm。

在低气压下更易于产生大面积低温非热平衡等离子体。低气压放电系统通常由真空室(典型尺度为几厘米)、配气系统及馈入电能的电极(或天线)构成。在低气压下,放电过程发生在所谓的辉光区,此时等离子体几乎占据整个放电室,这与大气压丝状放电模式下观察的现象形成鲜明的对照。低气压辉光放电中,放电室中大部分区域充满准中性等离子体,在等离子体和放电室器壁之间有一层很薄的空间正电荷层。这些位于器壁表面的空间正电荷层,或者称为“鞘层”,其空间尺度一般小于 1 cm。鞘层源于电子和离子迁移率的差别。等离子体中的电势分布倾向于约束电子,而把正离子推入鞘层。

由于电子首先吸收电源的馈入能量,然后被加热至数万摄氏度,而重粒子几乎处于室温。正是由于低气压等离子体具有这种非热力学平衡的特性,其在工业中有着重要的应用。在温度高达 10 000 K 的电子能量分布中,有相当一部分能量用于解离工作气体分子,使之成为活性物种(原子、基团和离子)。因此,非平衡等离子体实际上是将电能转变为工作气体的化学能和内能,并且可以将这种化学能和内能用于材料表面改性。等离子体鞘层在材料表面改性中起着重要的作用,这是因为,鞘层区中的电场可以将电源的电场能转变为轰击到材料表面的离子的动能。轰击到材料表面的离子能量是材料表面改性的一个主要工艺参数,这个能量可以轻易地增加到小分子及固体原子结合能的数千倍。正是低温等离子体的这种非热力学平衡现象,带来了等离子体处理技术的多样性,这种多样性可以从高分子材料的表面活化一直到半导体离子注入等一系列应用中看出。

等离子体处理技术在很多制造业中得到应用,特别是在汽车、航空及生物医用部件的表面处理方面,因为减少了有毒液体的使用,等离子体技术在环保上显示出优越性。同时,由于兼容纳米制造,等离子体技术在大规模工业制造中也具有优势。等离子体技术对制造业的最大冲击体现在微电子工业上。如果没有等离子体的相关技术,大规模集成电路的制备就不能实现。在接下来的几节中,我们将介绍低气压射频等离子体的一些工业应用的实例,以便为后续各章的详细分析打下基础。

1.2 微电子学中的等离子体工艺

集成电路中包含精心设计的多层半导体、电介质、导体薄膜,并由具有复杂架构的金属布线相互连通(图 1.1)。首先是借助于等离子体工艺来沉积这些薄膜,并进一步使用反应性等离子体对其进行刻蚀,最终形成尺度为数十纳米的图形。集成电路中各种薄膜刻蚀的特征尺度小于人体头发直径的百分之一。

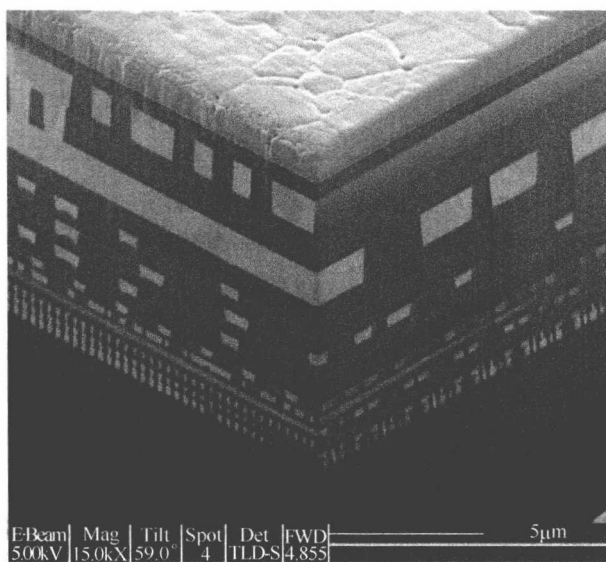


图 1.1 超大规模集成电路中多层金属介质互连

大规模集成电路的基本器件是金属-氧化物-半导体场效应晶体管(metal-oxide-semiconductor field effect transistor, MOSFET),如图 1.2 所示。通常,在单晶硅半导体衬底上,利用硅的外延生长技术,生长出高质量的外延硅层,来制备这种场效应晶体管。通过门电极,控制从“源区”到“漏区”的电流通道,以达到调节电流的目的。门电极通过一层几纳米厚的介电层和电流通道隔离(绝缘),一般使用二氧化硅作为门介电层。MOSFET 是非常有效的流经“源”和“漏”之间的电流开关。门电极的偏压可以触发这个开关。门电极的几何尺度是决定器件速度及集成度的特征尺寸。在所谓的互补型金属-氧化物-半导体(complementary metal-oxide-semiconductor, CMOS)技术中,存储和逻辑电流单元正是基于这种 CMOS 器件,该器件包括一个 n 沟道(电子沟道)和一个 p 沟道(空穴沟道)的 MOSFET。CMOS 技术是包括微处理器、存储器以及专用集成电路制备的主要半导体技术。CMOS 的主要优点是较低的能耗。

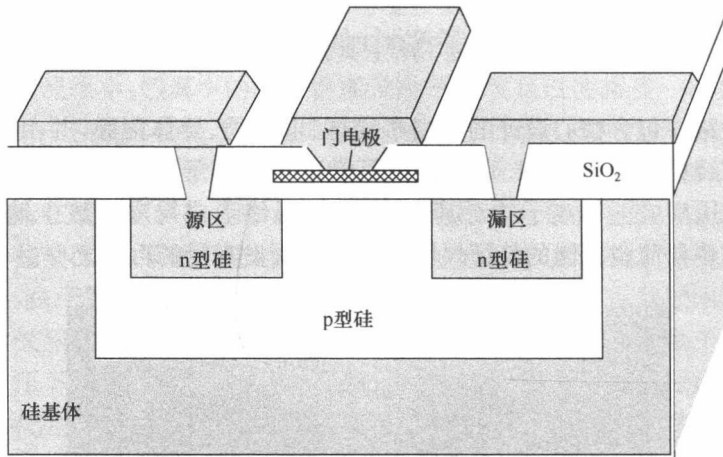
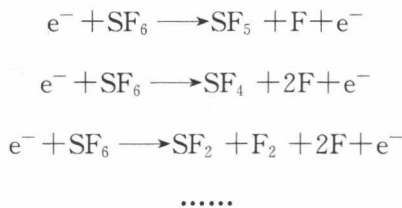


图 1.2 硅集成电路中的 MOSFET 结构示意图。其中门电极控制由 n 型硅构成的源和漏之间的沟道电流

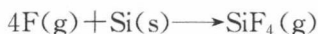
摩尔定律通常被用来描述微电子技术的进化史。戈登·摩尔于 1965 年曾作出预测：最复杂的集成电路芯片中，所集成的晶体管的数量大约每两年翻一番。这个预测成了集成电路市场发展的一个非常好的指针。需要说明的是，集成电路市场的快速发展得益于等离子体相关工艺技术。

1.2.1 等离子体刻蚀

等离子体刻蚀的原理如下：第一步，衬底上需要刻蚀的材料涂上一层厚度小于 $1\ \mu\text{m}$ 的光刻胶涂层。第二步，通过曝光、显影工艺将光刻胶涂层图形化，其中利用紫外线(UV)对附有掩膜的光刻胶涂层曝光。被曝光的光刻胶在 UV 的作用下分解，而被掩膜覆盖的光刻胶则被保留下来，这样光刻胶涂层就被图形化，从而形成材料刻蚀的窗口。第三步，经过涂胶-曝光-显影一系列图形化工艺后，将晶圆放入等离子体反应室。如果需要刻蚀的是硅基材料，则刻蚀气体通常是一种或几种卤族化合物分子(如 CF_4 、 SF_6 、 Cl_2 或 HBr)。刻蚀气体在放电腔室中形成等离子体，气体分子在电子碰撞下被解离，从而产生活性物种。以 SF_6 气体为例，它与电子碰撞后，可以产生如下解离过程：



气相中的 F 原子是一种有效的硅刻蚀剂,气相(g)F 原子与固相(s)表面的 Si 原子发生如下反应,生成挥发性的刻蚀反应产物,这些反应产物会被真空系统抽走:



在没有离子轰击且无晶体各向异性效应时,刻蚀速率在各个方向是相等的,也就是说,这时刻蚀是各向同性的,这是因为刻蚀剂原子到达刻蚀材料的方向是随机的,如图 1.3(a)所示。湿法刻蚀同样会得到各向同性的刻蚀形貌,这种各向同性的刻蚀不适用于高集成度芯片中的高深宽比图形的刻蚀(深宽比是指被刻蚀沟槽的深度与宽度之比)。

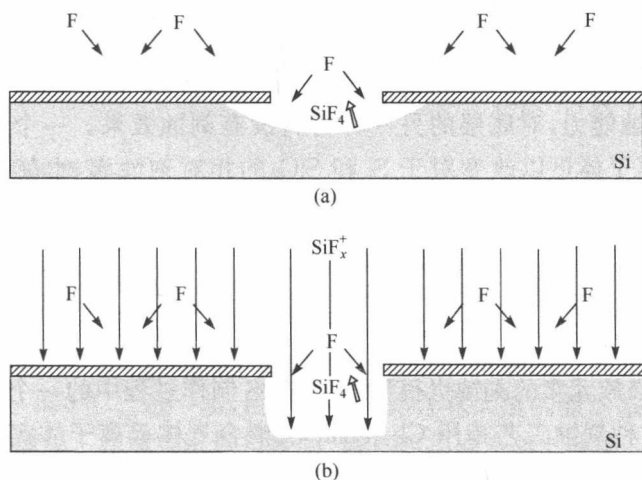


图 1.3 (a)各向同性化学刻蚀;(b)各向异性反应离子刻蚀

1979 年, Coburn 和 Winters^[1]使用原子束与离子束相结合的方法,证明荷能离子对材料表面的轰击作用,可以将中性刻蚀剂原子的刻蚀速率提高一个数量级。荷能离子和刻蚀剂原子的这种协同作用很容易在等离子体刻蚀中实现,因为等离子体既有激活的中性基团,又有荷能离子,其中荷能离子在等离子体鞘层中被加速。此外,由于鞘层的存在,离子在鞘层中是在垂直于刻蚀材料的表面方向被加速的。人们发现,这些垂直加速的离子可以大大增加垂直刻蚀的速率,而对侧向刻蚀影响很小。因此,具有离子轰击协同作用的刻蚀倾向于各向异性。有效地利用荷能离子来增强刻蚀反应速率,这种工艺被称为反应离子刻蚀。

问题:列举两种高密度等离子体和高(各向异性)刻蚀速率之间的关联因素。

答案:高的电子密度,一般会增加活性基团数量,导致高刻蚀速率;轰击表面的离子流量密度的增加,也会增强各向异性刻蚀。

尽管离子轰击有助于各向异性刻蚀,但在 CMOS 技术中,由于对刻蚀图形形貌的控制要求很高,单纯的离子轰击协同作用难以达到这一要求。因此,聚合化学反应被引入刻蚀工艺中,用来在刻蚀图形的某个表面形成聚合物刻蚀阻挡层。当使用 CF_4 作为等离子体刻蚀气体时,等离子体中会生成自由基,如 CF 和 CF_2 ,这些自由基会倾向于在刻蚀图形的侧壁发生聚合反应,形成所谓的刻蚀钝化层。面向等离子体的刻蚀区域,由于不断地受到垂直方向荷能离子的轰击,不能形成这种刻蚀钝化层。例如, CHF_3 、 CF_4 、 C_2F_6 、 C_4F_8 等碳氟气体,在等离子体状态下均具有这种发生聚合反应的倾向,因此它们通常被用于微电子中电介质材料的刻蚀。为了控制聚合反应程度,经常在刻蚀工作气体中增加氧气,促进聚合层表面氧化生成 CO_2 ,这样,氧化反应可以和聚合成膜反应形成竞争。聚合反应也是控制刻蚀选择性的一个有效途径,所谓选择性是指只对一种特定的材料具有刻蚀能力,对底层的另一种材料没有刻蚀效果。一个典型的例子就是 CF_4/O_2 等离子体可以改变对于 Si 和 SiO_2 的相对刻蚀率,也就是说可以改变对这两种材料的刻蚀选择性:富氧的 CF_4/O_2 混合气体等离子体对纯 Si 的刻蚀率要高于 SiO_2 ,贫氧 CF_4/O_2 混合气体等离子体则相反,对 SiO_2 的刻蚀率高于纯 Si 。由于硅集成电路制作过程中很多工艺涉及硅和二氧化硅的刻蚀,碳氟等离子体得到极大的关注^[2-4]。

其他基于卤族元素的刻蚀也很重要:CMOS 制作过程中的一个关键步骤是门叠层的刻蚀,这种刻蚀工艺是用 $\text{Cl}_2/\text{HBr}/\text{O}_2$ 混合气体等离子体实现的。这时刻蚀钝化层涉及硅基聚合物 SiO_xCl_y 的形成^[5]。刻蚀工艺的不稳定性被归因于这种聚合物在反应室器壁上的沉积^[6]。

在光电子学及光子学中,等离子体刻蚀也是一个关键的技术。例如,利用等离子体工艺很容易制备具有高深宽比、陡峭脊梁的 InP 基异质结构,它是制造光子学器件的重要模块。这种模块制备过程中,需要用到等离子体刻蚀工艺,刻蚀出狭窄的脊背形单模波导管;为了使光学散射最小化^[7],要求这种波导管的刻蚀具有光滑的侧壁,并且没有过刻或旁刻现象发生。

在所谓的“深刻”(深度到达数十微米)技术中,等离子体刻蚀在大量材料的去除中同样发挥作用^[8]。深刻蚀技术已被用于制备微机电系统(micro-electro-mechanic-system, MEMS)。微机电系统是由微齿轮、枢轴、铰链、悬臂梁、微流通道及其他构件组成的,这些构件是在硅基体上刻蚀出来的。在苛刻的使用环境中,碳化硅基微机电系统更有竞争力。这些碳化硅基材料的深刻蚀需要高密度等离子体,以使刻蚀时间控制在可以接受的范围内。图 1.4 给出了一个碳化硅深刻蚀的例子,其中使用了 SF_6/O_2 螺旋波高密度等离子体,见 1.4 节^[9-11]。

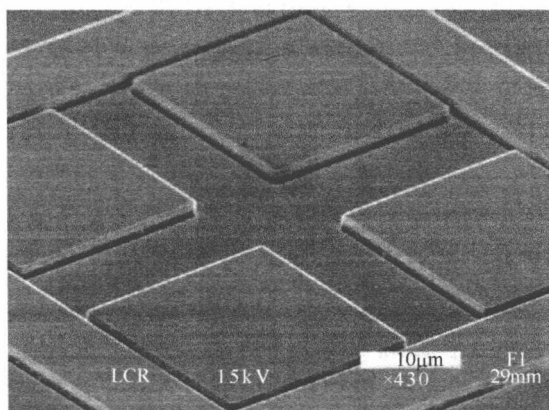


图 1.4 使用 SF_6/O_2 螺旋波高密度等离子体在 SiC 上刻蚀的微米级结构

1.2.2 等离子体沉积

等离子体增强化学气相沉积(plasma-enhanced chemical vapor deposition, PECVD)可以在低于传统化学气相沉积(chemical vapor deposition, CVD)温度下沉积各种薄膜。例如,一般 CVD 技术沉积高质量二氧化硅薄膜需要的沉积温度为 $650\sim 850\text{ }^\circ\text{C}$ 。如果使用等离子体来增强沉积,在同样薄膜质量的情况下,沉积温度只有 $300\sim 350\text{ }^\circ\text{C}$ 。进一步,由于等离子体含有大量的激活基团,即使在室温下也可以沉积薄膜。在薄膜沉积过程中,需要在基体表面上凝聚一些基团,正是这些基团的凝聚导致了薄膜的生长(这与刻蚀过程恰恰相反,刻蚀时选择基团和材料表面的原子反应生成挥发性产物的化学过程)。

除了微电子以外,PECVD 的另一个最重要的应用就是平面显示器的制造^[12]。液晶显示器特别适合于笔记本电脑及平板监视器。当每个像素和一个晶体管开关组合在一起时,特别容易实现主动矩阵显示(active matrix display, AMLCD),这种显示技术具有高分辨率(几百万像素)、大尺寸、全彩及电视兼容的响应时间等特点。AMLCD 显示器由两片玻璃平板及介于其中的一薄层液晶构成,在其中一片玻璃板上制备了薄膜晶体管(thin film transistors, TFT)阵列。由氧化铟锡透明电极上的电压控制的单个薄膜晶体管开关定义了一个像素。在另一片玻璃板上覆盖滤色片和共用电极(背电极)。TFT 阵列是由等离子体相关技术工艺制备的,制备过程中等离子体薄膜沉积和薄膜图形化交替进行。设计用于 TFT 制备的等离子体系统的一个主要挑战是,如何在整个显示器面积上保持等离子体的均匀性。对于市场,显示器越大越好。相关大面积均匀等离子体源话题将在后续章节中详细讨论。

等离子体也在物理沉积技术(如溅射技术)中得到应用,该技术通常被用于半导体电路中金属层的沉积。在溅射沉积系统中,低气压等离子体提供离子(如 Ar^+),这些离子被加速轰击处于负偏压的金属靶。离子在加速过程中可以获得约1000 eV的能量,从而在与靶碰撞时,把靶表面的原子撞出(或溅射出),形成一个气化喷射等离子体羽。溅射是一个纯物理的、非图形化的刻蚀过程。被溅射出的原子有效地喷射到置于溅射靶附近的衬底上,以每分钟几十纳米的速率凝聚成膜。常用的溅射沉积装置是所谓的磁控溅射系统,该系统有一个平行于溅射靶表面的磁场分量,能够有效地约束电子的运动,从而增加溅射气体的电离效率及等离子体密度。磁控溅射系统的工作原理如图 1.5 所示。在磁控靶附近形成的高密度等离子体环,由于高密度离子的轰击,磁控靶表面邻近等离子体环区域的刻蚀速率远高于其他区域。交叉电场磁场作用在电子上,使电子沿着等离子体环做螺旋运动,生成所谓的“霍尔电流”。在 1.3 节将要讨论的一种等离子体推进器中,也会遇到这种电磁场位形,其中霍尔电流是这种推进器的关键参数。

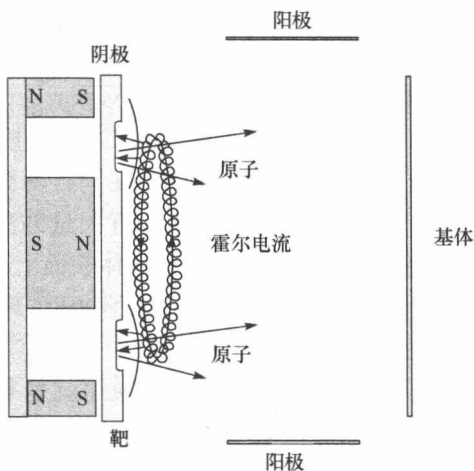


图 1.5 直流磁控溅射示意图。溅射靶材在邻近霍尔电流环区域被强烈溅射刻蚀,形成环状刻蚀沟

1.3 等离子体推进

火箭驱动的航天器在自由飞行时通过火箭喷出物质(推进剂)获得加速。运动方程符合动量守恒定律,航天器和喷出物质的动量变化率相等:

$$m \frac{dv}{dt} = - \frac{dm}{dt} v_g \tag{1.1}$$

式中, m 为给定时间航天器的总质量(包括没使用的燃料); $\frac{dv}{dt}$ 为航天器的加速度; v_g 为推进剂的喷射速度(相对于航天器); $\frac{dm}{dt}$ 是推进剂的喷出所致航天器总质量的变化速率($\frac{dm}{dt} < 0$)。航天推进的挑战是, 获得尽可能最高的推进剂喷射速度, 并使推进剂完全电离, 以便使推进剂得到更有效的利用。在一定的推进剂喷射速度下, 对方程(1.1)从初始质量 m_0 到终质量 m_f 积分, 积分结果如下:

$$\Delta v = v_g \ln \frac{m_0}{m_f} \quad (1.2)$$

式(1.2)表明, 在给定推进剂消耗质量时, 航天器在一个加速阶段速度的变化量与推进剂喷射速度 v_g 成正比。在推进领域, 通常用两个参量表征一个推进器特性: 一个是推力 $T = \frac{dm}{dt} v_g$, 另一个是特征冲量 $I_s = v_g/g$, 其中, g 为地球海平面处的重力加速度。可以看出, 这两个参量均与推进剂喷射速度成正比。

1.3.1 传统等离子体推进器

可以将电推进技术分为三类^[13]: ①电热推进, 这种推进技术是用电加热将推进剂气化, 然后经过热力学膨胀由喷嘴喷出; ②静电推进, 被电离的推进剂离子经一个电场加速; ③电磁推进, 这时推进剂等离子体中的驱动电流和一个内部或外部的磁场相互作用, 从而产生一个宽束流体推力。下面将对最常见的推进器系统进行简短的描述。

1. 阻性炬和电弧炬

它们均属于第一类推进技术, 其中阻性炬是通过器壁或螺旋电加热器将推进剂气化, 而电弧炬是用电弧气化推进剂, 气化的推进剂经过喷嘴加速喷出。这类推进器具有有限的特征冲量(小于 1000 s), 同时也面临高温技术的挑战。

2. 静电离子推进器

由 DC、RF 或微波产生的等离子体(一般为磁化等离子体), 其中带正电离子用一个施加直流偏压的栅极(栅网)加速引出。为了维持整体的电中性, 引出的离子束需要被中和, 通常使用热灯丝发射的电子或其他电子源在下游中和被加速的离子束。静电推进已被证明是一种成功的推进技术, 可以提供非常高的特征冲量, 但是荷能离子对加速栅极网的刻蚀限制了这种推进器的寿命。