

# 等离子体刻蚀工艺的物理基础\*

戴忠玲 毛明 王友年<sup>†</sup>

(大连理工大学物理系 三束材料表面改性国家重点实验室 大连 116024)

**摘要** 介绍了等离子体刻蚀工艺背景以及有关等离子体刻蚀机理的研究进展,综述了等离子体刻蚀机理的研究方法,着重阐述了电容耦合放电和电感耦合放电等离子体物理特性,特别是双频电容耦合放电等离子体和等离子体鞘层研究中的关键问题。

**关键词** 等离子体 刻蚀 电容耦合放电 电感耦合放电 双频 鞘层

## The physics of plasma etching

DAI Zhong-Ling MAO Ming WANG You-Nian<sup>†</sup>

(State Key Laboratory of Materials Modification by Laser, Electron, and Ion Beams, Department of Physics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract** The background and progress in the development of plasma etching processes are reviewed. Studies of the mechanism of capacitively – and inductively – coupled discharges are discussed, especially the key problems of dual frequency capacitively – coupled discharge and plasma sheaths.

**Keywords** plasma, etching, capacitively-coupled discharge, inductively-coupled discharge, dual frequency, sheath

## 1 引言

目前,低温等离子体微细加工手段是材料微纳加工的关键技术,因为它是微电子、光电子、微机械、微光学等制备技术的基础。特别是在超大规模集成电路制造工艺中,有近三分之一的工序是借助于等离子体加工完成的,如等离子体薄膜沉积、等离子体刻蚀及等离子体去胶等,其中等离子体刻蚀成为最为关键的工艺流程之一,是实现超大规模集成电路生产中的微细图形高保真地从光刻模板转移到硅片上不可替代的工艺。目前在一些发达国家的实验室里,刻蚀线宽已经突破  $0.1\mu\text{m}$ ,并开始考虑挑战纳米芯片的加工技术。

在等离子体刻蚀工艺中,首先是在把硅晶片上面涂抹一层由碳氢化合物构成的光敏物质,并在光敏物质上盖上具有一定图形规则的金属模板。然后进行紫外曝光,使部分晶片的表面裸露出来。接着再

把这种待加工的硅晶片放置到具有化学活性的低温等离子体中(见图1),进行等离子体刻蚀。这种具有化学活性的等离子体通常是由氯气或碳氟气体放电产生的,它不仅含有电子和离子,还含有大量的活性自由基(如  $\text{Cl}^*$ ,  $\text{Cl}_2^*$ ,  $\text{F}^*$ ,  $\text{CF}^*$  等)。这些活性基团沉积到裸露的硅晶片上时,与硅原子相互结合而形成挥发性的氯化硅或氟化硅分子,从而对晶片进行各向异性刻蚀。另一方面,为了控制轰击到晶片上离子的能量分布和角度分布,还通常将晶片放置在一个施加射频或脉冲偏压的电极上面,在晶片的上方将形成一个非电中性的等离子体区,即鞘层。等离子体中的离子在鞘层电场的作用下,轰击到裸露的晶片表面上,并与表面层的硅原子进行碰撞,使其溅射出来,从而实现对各向异性刻蚀。

等离子体刻蚀工艺的核心问题是在提高刻蚀速

\* 国家自然科学基金(批准号:10572035)资助项目

2006-01-10 收到

<sup>†</sup> 通讯联系人. Email: ynwang@dlut.edu.cn

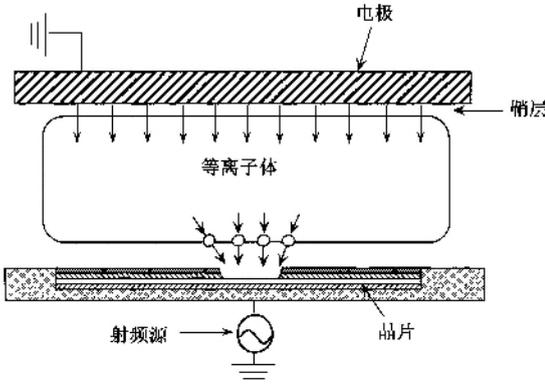


图1 在电容耦合放电等离子体(CCP)中进行的刻蚀过程示意图

率的同时,又能保证刻蚀过程具有较高的均匀性、较高的各向异性以及较低的辐照损伤.这不仅仅是一个单纯的技术性问题,更重要地是要对刻蚀过程中涉及到的一些复杂物理问题进行深层次地研究.这些物理问题包括:低气压放电条件下大面积高密度均匀等离子体的产生机理与方法、外界放电参数(如电源功率、频率、放电气压以及放电模式等)对等离子体参数的调控行为、射频偏压鞘层的物理特性、带电粒子(尤其是离子)与晶片表面的相互作用机理、刻蚀剖面的演化规律等.

## 2 大面积高密度均匀等离子体的产生机理及物理特性

微电子工业中所采用的等离子体是由放电产生的非平衡等离子体.这种等离子体最显著的特性是不同种类的粒子具有不同的能量,即电子的温度很高,一般是几个电子伏左右(约为几万度),而离子及活性粒子团的温度很低,约为室温.正是这些高能电子的存在,才能够引起非平衡化学反应,产生大量的化学活性粒子.为实现超微细、大面积和高速加工的目的,等离子体必须具备低气压(在 mTorr 量级)、大口径、高密度(在  $10^{10}—10^{12} \text{ cm}^{-3}$  范围)等特性.但是降低工作气压或者增加口径会导致等离子体密度的降低.解决这个矛盾的一种方案是采用高频放电的方法来产生等离子体,这样可以使电源功率更有效地耦合给等离子体,由此可以提高等离子体的密度.目前,最有代表性的高频放电方法有电容耦合放电、电感耦合放电、微波电子回旋共振放电、螺旋波放电及表面波放电等.下面仅就电感耦合放电和电容耦合放电产生等离子体的机理进行分析.

### 2.1 电感耦合等离子体

电感耦合等离子体(ICP)可以通过电流线圈缠绕充满气体的石英玻璃管进行放电来产生,电流源的频率通常为射频,即 13.56 MHz.用这种方法已有近百年的历史了,不过在早期研究中,由于放电气压较高( $10^2—10^5 \text{ Pa}$ ),产生的等离子体主要用于光源和电弧.在 20 世纪 90 年代,人们发现这种电感耦合放电可以在很低的工作气压( $0.1—1 \text{ Pa}$ )下进行,而且可以产生高密度的等离子体(在  $10^{17}—10^{18} \text{ m}^{-3}$ ),特别是不需要引入外磁场来增强这种放电.正是由于这些优点,近年来这种等离子体已经广泛地应用于硅半导体的刻蚀工艺中.

有两种不同方式的内电感耦合放电:一种是将射频线圈缠绕在柱状放电室的侧面,而另一种则是把线圈放置在放电室的顶部,如图 2(a)和(b)所示.在这两种放电装置中,线圈中的射频电流都在等离子体中产生沿环向的感应电流  $j_\phi$ .该感应电流会产生沿环向的感应电场  $E_\phi$  及沿轴向和径向的磁场  $B_z$  和  $B_r$ .这种感应等离子体有如下物理特征:

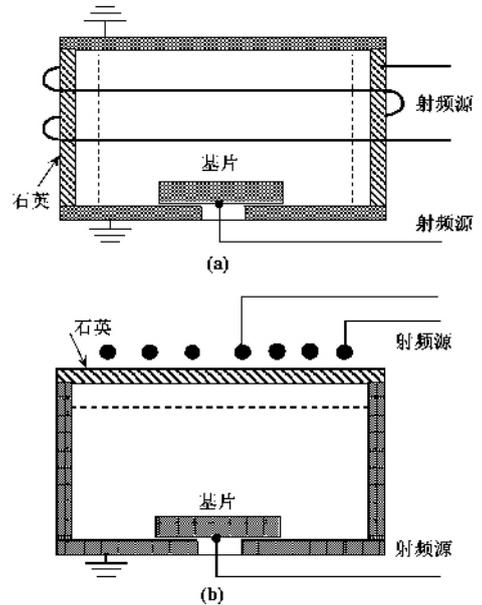


图2 (a)螺旋状线圈电感耦合放电等离子体(the solenoidal-type ICP)反应器示意图 (b)平面盘绕状电感耦合放电等离子体(the planar-type ICP)反应器示意图

(1)反常趋肤(anomalous skin)效应,即射频电场  $E_\phi$  在等离子体中的穿透深度远远大于经典趋肤深度,几乎可以到达等离子体内部,见图 3.目前对这种反常趋肤效应起源的解释主要有两种:一种是来自于电子的非局域热运动;另一种解释是来自于作用在电子上的非线性洛伦兹力  $-e\mathbf{u} \times \mathbf{B}^{[1]}$ ,其具

体表现为一个有质驱动力(ponderomotive force),它将推动电子向放电室的中心运动。

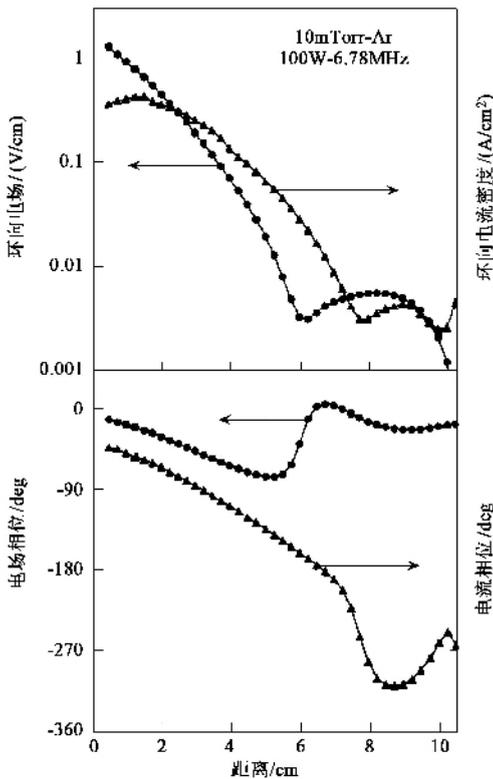


图3 射频电场及电流轴向分布的实验测量结果<sup>[1]</sup>

(2) 无碰撞加热(collisionless heating)<sup>[2]</sup>,即电子从射频电场中吸收的能量不是靠通常的欧姆加热机制实现的,而是由波与电子之间的相互作用来完成的.特别是对于这种等离子体,电子的能量分布函数(EEDF)呈现出很强的非Maxwellian分布。

(3) 负功率吸收<sup>[1,2]</sup>(negative power absorption),即射频电源的功率在等离子体中的吸收不是随穿透深度的增加呈单调下降,而是在等离子体内部功率吸收改变符号,并变为负的,见图4.也就是说,在某些区域等离子体从射频电场中吸收能量(图中标注有“+”的区域),而在另外一些区域,等离子体则把能量返给射频电场(图中标注有“-”的区域).由于电子的非局域热运动,使得等离子体中的感应电流 $j_{\varphi}$ 与感应电场 $E_{\varphi}$ 在空间分布上不是一一对应的,它们之间存在一个相位差 $\Delta\phi$ (见图3),这样就导致功率吸收 $P = \frac{1}{2} \text{Re}(E_{\varphi} j_{\varphi}^* \cos\Delta\phi)$ 在某些区域为负。

(4) 高次谐波电流,即等离子体中的感应电流 $j_{\varphi}$ 随时间 $t$ 的变化不是一个简单的正弦函数形式 $j_1 \sin(\omega t)$ ,而会出现高次谐波电流<sup>[3]</sup>,如二次谐波电

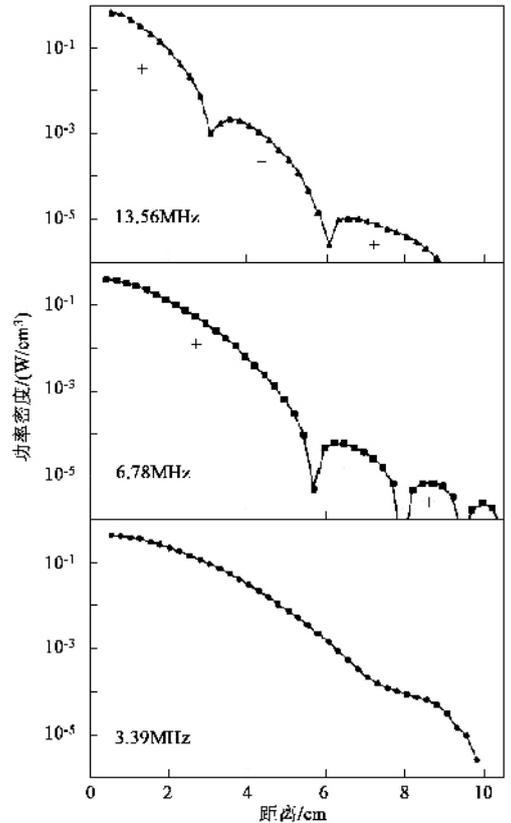


图4 功率吸收剖面的实验测量结果

流 $j_2 \sin(2\omega t)$ .产生这种高次谐波电流的原因也是由于非线性洛伦兹力作用的结果。

## 2.2 电容耦合等离子体

电容耦合等离子体是通过匹配器和隔直电容把射频电压加到两块平行平板电极上进行放电而生成的,两个电极和等离子体构成一个等效电容器.这种放电是靠欧姆加热和随机鞘层加热机制来维持的.由于射频电压的引入,将在两电极附近形成一个电容性鞘层,而且鞘层的边界是快速振荡的.当电子运动到鞘层边界时,将被这种快速移动的鞘层反射而获得能量.对于较高的射频电压,随机加热过程起主导作用<sup>[4]</sup>.关于射频鞘层的物理特性,我们将在下节详细介绍。

最早用于半导体刻蚀工艺的等离子体就是这种电容耦合射频放电等离子体,已经有30多年的历史了.不过在早期的等离子体刻蚀工艺中,都是采用单一射频功率源来驱动并维持放电.这种单一CCP放电的缺点之一是不能对等离子体密度和轰击到晶片上的离子能量进行独立控制.为了获得高密度等离子体,必须增加射频电源的电压,然而随着射频电压的增加,鞘层电势和轰击到晶片上离子的能量也随

着增加. 过大的离子能量将会导致不必要的溅射和晶片过热, 特别是导致晶片的损伤. 为了解决这个矛盾, 近几年人们提出了双频(或多频)电源驱动 CCP 放电<sup>[5]</sup>, 其中一个为高频电源, 另一个为低频电源. 两个电源施加在同一个极板上或分别施加在两个电极上, 如图 5 所示. 一般情况下, 两个电源的频率相差较大, 如 27 MHz 和 2 MHz. 根据熟知的定标关系可知<sup>[4]</sup>, 在电源偏压  $V_{rf}$  一定的情况下, 等离子体密度  $n$  正比于驱动电源频率  $\omega$  的平方, 即  $n \propto \omega^2 V_{rf}$ . 这样等离子体密度的大小是由高频电源所确定的. 实验测量<sup>[5]</sup>已经表明, 通过选择适当的频率和功率, 可以各自独立地控制等离子体密度和入射到基片上的离子能量. 一般说来, 低频电源主要对鞘层特性和参数有影响, 进而影响入射到基片上的离子能量分布, 而高频电源主要对等离子体参数有影响.

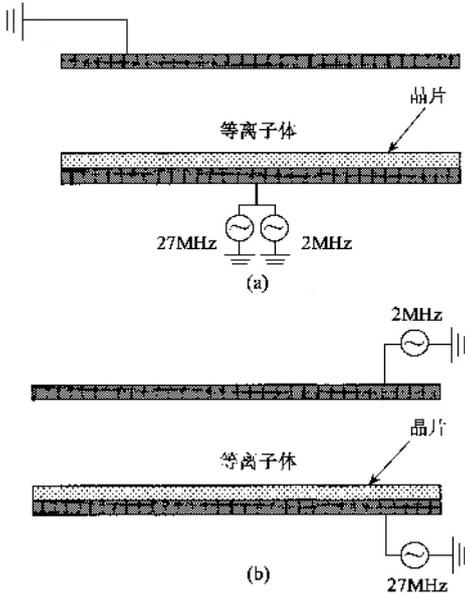


图 5 双频电源驱动等离子体放电示意图 (a)两个电源施加同一个极板上或 (b)分别施加在两个电极上

原则上讲, 采用这种双频驱动放电技术可以实现等离子体参数和离子能量分布的独立控制. 前提是高频电源的频率足够高, 否则当两个电源频率比较接近时, 将会存在很强的非线性相互作用效应. 但如果高频电源的频率太高时, 将会在等离子体中产生驻波和趋肤效应<sup>[6]</sup>, 这将影响等离子体密度的均匀性. 这是双频放电等离子体刻蚀工艺中一个急需解决的问题. 此外, 人们对双频电源的不同施加方式所产生的区别也不是太清楚, 即两个电源是施加在同一个电极上好, 还是分别施加在两个电极上好.

为了要满足刻蚀工艺的要求, 设计反应器和选

择运行参数非常关键, 因为许多外部控制的输入参数可以影响等离子体特性, 反过来又影响产量. 对于给定的反应器类型、尺寸和材料, 可以利用调控加工运行参数(气压、功率、频率等)去影响加工输出参数(如速率、均匀性、各向异性等). 目前在很大程度上等离子体反应器设计和加工过程还取决于经验和直觉. 由于微电子工业中超微细结构需要刻蚀尺寸越来越小, 因而加工要求也越来越严格, 而对等离子体物理特性进行理论研究和计算机辅助模拟不仅能够预测等离子体的关键特性参数, 并且更重要的是能够架起等离子体加工过程的输入参数和输出参数之间的桥梁, 因而几十年来一直倍受关注. 目前, 分别采用粒子模拟和蒙特卡罗模拟相结合的方法<sup>[7]</sup>以及动力学模拟<sup>[8]</sup>、流体力学模拟<sup>[7]</sup>, 等方法对上述 ICP 及 CCP 的物理特性进行了大量地研究, 能够在一定程度上解释实验观察到的一些物理现象. 特别是采用流体力学模拟方法, 能够给出等离子体的宏观参数(如密度和温度)的二维及三维空间分布, 这对指导刻蚀工艺的均匀性是非常重要的.

### 3 射频等离子体鞘层的物理特性

由于所有粒子都必须穿越鞘层才能与晶片发生相互作用, 因而鞘层在等离子体加工过程中具有重要的地位. 鞘层电场要比等离子体内部电场强两个数量级, 离子以玻姆(Bohm)速度进入鞘层后, 被鞘层电场加速, 以一定的能量轰击基板, 而电子则受到鞘层电场的排斥. 在气压较高情况下, 离子还将与其他中性粒子发生弹性和非弹性碰撞, 使离子以一定的角度轰击晶片. 换言之, 鞘层特性决定了离子轰击晶片的能量分布和角度分布, 而离子的能量分布和角度分布直接影响到刻蚀速率与刻蚀剖面, 进而影响着等离子体加工的产量和质量.

研究射频等离子体鞘层物理特性的方法主要有解析方法<sup>[9]</sup>、粒子模拟<sup>[10]</sup>、流体力学模拟<sup>[11]</sup>以及流体力学模拟和蒙特卡罗模拟相结合的混合方法<sup>[12]</sup>, 特别是采用混合方法, 能够给出离子轰击晶片的离子能量分布和角度分布, 这对指导刻蚀工艺的各向异性是非常重要的.

与直流等离子体鞘层相比, 射频等离子体鞘层的特点在于等离子体参数如鞘层的厚度和鞘层电位等物理量均随时间变化. 决定射频鞘层特性的关键物理量是外加射频场的频率  $\omega$  和离子等离子体频率  $\omega_{pi}$  之比  $\beta$ , 即  $\beta = \omega / \omega_{pi}$ , 这里  $\omega_{pi} =$

$(n_i z^2 e^2 / \epsilon_0 m_i)^{1/2}$ . 当外加射频偏压的频率远大于离子等离子体频率时 ( $\beta \gg 1$ ), 离子不能瞬时响应射频电场, 离子运动由平均场决定, 可以合理地假定离子在鞘层中的运动是稳态的. 当外加射频场的频率远小于离子等离子体频率时 ( $\beta \ll 1$ ), 鞘层中离子运动是由瞬时电势决定的, 这时, 每一时刻的射频鞘层特性都与电势为相应值的直流辉光放电的鞘层特性一样, 离子流密度呈现出随时间周期性振荡形式. 频率越低, 离子流密度的振荡幅值越大. 当外加射频偏压的频率和离子等离子体频率接近或相等时 ( $\beta \sim 1$ ), 离子只能部分地响应射频频率, 这时离子的运动行为较为复杂.

对于单一射频驱动的 CCP 放电, 鞘层电势相对于等离子体电势为负, 且有一个波峰和一个波谷. 在波峰和波谷两个相位处, 电势随时间变化缓慢, 因而进入鞘层离子较多. 在波峰时, 进入的离子获得的能量最小, 而在波谷时, 进入的离子获得的能量最大, 导致离子能量分布呈双峰结构. 研究表明, 在低频条件下 ( $\beta \ll 1$ ), 离子能量分布的高能峰和低能峰之间的宽度较宽, 且随着频率的增加而变窄; 在高频条件下 ( $\beta \gg 1$ ), 能量分布趋于单峰结构<sup>[13]</sup>, 见图 6.

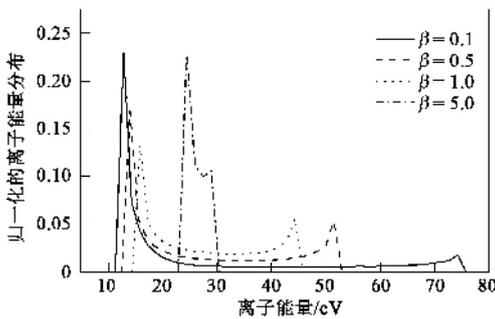


图 6 射频源频率和离子等离子体频率之比  $\beta$  值对离子能量分布的影响<sup>[13]</sup>

对于双频驱动的 CCP 放电, 同样会在晶片附近形成一个随时间瞬变的鞘层, 如图 7 所示. 可以看出, 双频鞘层电势降的特点是随时间缓慢变化的包络线受低频所调制, 而随时间快速振荡的鞘层电势降受高频调制. 在这样一个由低频偏压调制的鞘层电场作用下, 入射到晶片上的离子能量分布呈多峰结构<sup>[14]</sup>, 如图 8 所示, 这一点与单频鞘层有明显的不同. 这里需要说明的是, 当等离子体中的电子朝鞘层边界运动时, 将受到这种快速运动鞘层的反射, 产生所谓的随机加热效应. 此外, 由于所加高频较高, 所引起的驻波和趋肤效应<sup>[6]</sup>会对双频鞘层特性产生影响, 从而影响刻蚀均匀性.

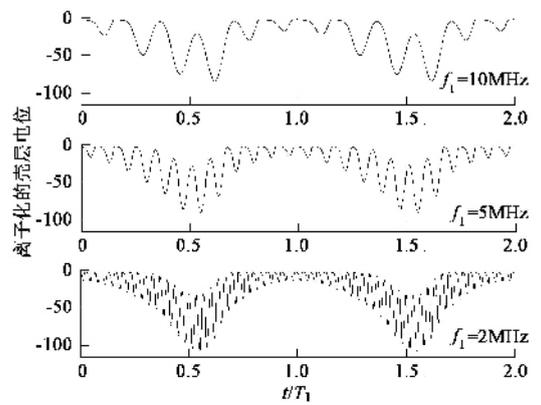


图 7 低频源频率对鞘层电势的影响<sup>[14]</sup>

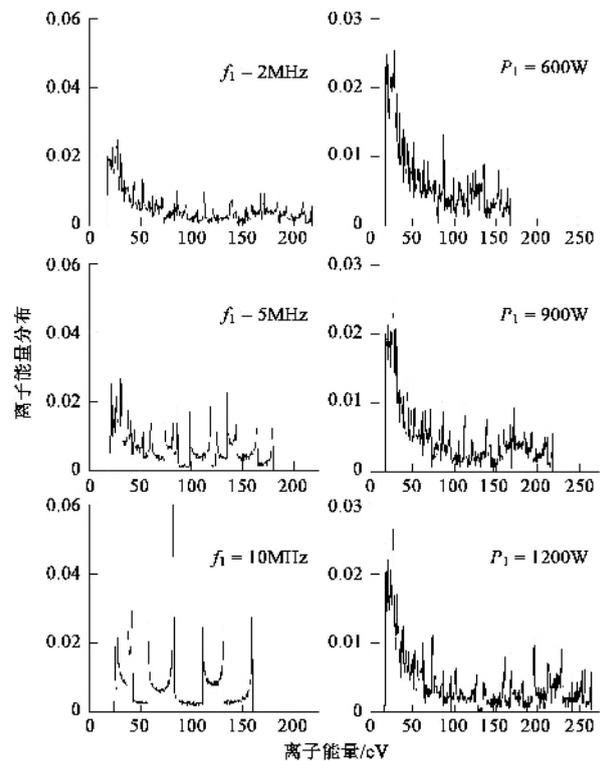


图 8 低频源频率和功率对轰击到极板上离子能量分布的影响<sup>[14]</sup>

## 4 刻蚀率及刻蚀剖面

等离子体刻蚀的最终目的是获得能够控制的刻蚀速率和刻蚀剖面. 刻蚀速率和刻蚀剖面除了取决于离子通过鞘层打到被刻蚀材料上的能量分布和角度分布, 还取决于等离子体与被刻蚀材料表面发生的物理化学过程.

一般来说, 总刻蚀速率  $ER_{tot}$  由三部分组成<sup>[15]</sup>: 物理溅射导致的刻蚀率  $ER_s$ , 化学刻蚀导致的刻蚀

率  $ER_c$  和离子增强刻蚀导致的刻蚀率  $ER_i$  ,即

$$ER_{tot} = ER_s + ER_c + ER_i.$$

这三种刻蚀过程是同时发生的. 决定总刻蚀速率的是物质系统(晶片和气体),中性粒子对离子流的比率以及离子能量.

在刻蚀过程中,离子能量是个非常重要的物理量,因为离子能量能够影响等离子体刻蚀的表面反应过程. 离子轰击可以导致晶格的断裂而产生活性空位,并用它来吸附原子团. 离子也可以促进被吸附物质与表面的反应,加速刻蚀剂与基片的反应. 离子还可以(通过溅射)清除被吸附的反应产物,使表面清洁有利于后续的刻蚀剂和表面的反应.

影响各向异性刻蚀的另一个重要的问题是,当纵横比增加时,离子和电子轰击晶片的充电效应会引起损伤. 因为离子具有比电子好的方向性,刻蚀槽的边缘会积累负电荷而底部会积累正电荷,形成一个局部的微区电场,导致离子轨迹偏转引起槽壁的刻蚀,即旁刻现象(notching). 这样,由于达到槽底部的离子流减小了,因而刻蚀速率也会减小.

等离子体刻蚀过程中的刻蚀速率可以由鞘层模型和蒙特卡洛模拟方法相结合而得到<sup>[16]</sup>,形貌演化过程可以采用特征线方法<sup>[17]</sup>来模拟.

## 5 尘埃颗粒的产生与控制

在等离子体加工中,放电室中的反应性气体聚合物会吸附周围的电子而带一定量的负电荷,形成尘埃颗粒( $\sim 10^{-8}$  m),这些尘埃颗粒在被加工芯片上方悬浮、聚集和运动,当放电结束时,这些尘埃颗粒会掉落在芯片表面,导致半导体芯片的损伤.

尘埃颗粒与等离子体中的离子和电子相比,具有较大的体积、质量、带电量和较小的荷质比. 带负电的尘埃颗粒在射频鞘层中会受到电场力、离子拖曳力、中性气体摩擦力以及与其他尘埃颗粒的相互作用力.

尘埃颗粒在鞘层中会表现出如下特性:尘埃颗粒会在外界周期扰动作用下发生共振,当这些共振在幅值较大时将会出现强烈的非线性现象. 尤其是在外界探针扰动下,单个尘埃颗粒可以在射频等离子体鞘层中作大振幅的非线性振荡,并出现多频共振和迟滞现象. 实验中发现,大量的尘埃颗粒( $\sim$

$10^{12}$ )会形成空间有序的尘埃晶格,它们是鞘层电场约束和尘埃颗粒之间的库仑排斥力以及尾流效应共同作用的结果. 此外,尘埃等离子体在磁场作用下还会产生旋转,在快速干扰下会在尘埃等离子体中激发出马赫锥<sup>[18]</sup>.

目前,尘埃颗粒在等离子体刻蚀加工中所造成的污染问题还无法得到控制或完全去除,只能想办法尽量减少污染. 比如在极板上刻一凹槽,以实现尘埃颗粒的径向约束<sup>[19]</sup>,然后再在壁上加以正偏压,将尘埃颗粒团吸引过来后抽走. 因此,目前尘埃颗粒对芯片的污染问题也是一个刻蚀工艺中未解决的问题之一.

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Godyak V A, Kolobov V I. Phys. Rev. Lett. ,1997 ,79 :4589
- [ 2 ] Godyak V. Phys. Plasmas ,2005 ,12 :055501
- [ 3 ] Godyak V A ,Piejak R B ,Alexandrovich B M *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1999 ,83 :1610
- [ 4 ] Lieberman M A ,Lichtenberg A J. Principle of Plasma discharges and Materials Processing. John Wiley & Sons ,INC ,2005
- [ 5 ] Goto H H ,Löwe H -D ,Ohmi T. J. Vac. Sci. Technol. A ,1992 ,10 :3048
- [ 6 ] Lieberman M A ,Booth J P ,Chaber P C *et al.* Plasma Sour. Sci. Technol. ,2002 ,11 :283
- [ 7 ] Kim H C ,F Iza ,S S Yang *et al.* J. Phy. D : Appl. Phys. ,2005 ,38 :R283
- [ 8 ] Kolobov V I ,Godyak V A. IEEE Trans. Plasma Sci. ,1995 ,23 :503
- [ 9 ] Lieberman M A. IEEE Trans. Plasma Sci. ,1989 ,17 :338
- [ 10 ] Procassini R J ,Birdsall C K ,Morse E C. Phys. Fluid ,1990 ,12 :3191
- [ 11 ] Edelberg E A ,Aydi E S. J. Appl. Phys. ,1999 ,86 :4799
- [ 12 ] Dai Z L ,Wang Y N. Phys. Rev. E ,2004 ,69 :036403
- [ 13 ] Dai Z L ,Wang Y N ,Ma T C. Phys. Rev. E ,2002 ,65 :036403
- [ 14 ] Guan Z Q ,Dai Z L ,Wang Y N. Phys. Plasma ,2005 ,12 :123502
- [ 15 ] Economou D J. Thin Solid Films ,2000 ,365 :348
- [ 16 ] Nishikawa K ,Ootera H ,Tomohisa *et al.* Thin Solid Films ,2000 ,374 :190
- [ 17 ] Scheckler E W ,Neureuther A R. IEEE Trans. Computer-Aided Design ,1994 ,13 :219
- [ 18 ] 侯璐景. 大连理工大学博士学位论文 2005[ HOU L J. Doctoral Dissertation Dlut 2005( in Chinese )]
- [ 19 ] Selwyn G S. Irw Final Report ,1995