

# 多源感应耦合等离子体的 产生及等离子体诊断\*

辛 煜 狄小莲 虞一青 宁兆元

(苏州大学物理科学与技术学院, 江苏省薄膜材料重点实验室, 苏州 215006)

(2005 年 11 月 28 日收到, 2005 年 12 月 15 日收到修改稿)

基于单组多匝线圈的小腔体感应耦合等离子体, 研究了线圈配置与耦合效率等之间的关联, 并将实验结果应用到多组并联螺旋天线感应耦合等离子体放电体系中. 采用了改进的朗缪尔探针方法对单源和多源感应耦合等离子体的电参量分别进行了表征. 结果表明, 使用多螺旋天线并联方式可以产生低气压高密度的感应耦合等离子体放电, 通过调整工艺参量, 可以将等离子体密度和光刻胶的刻蚀均匀性控制在 80% 以上.

关键词: 多源感应耦合等离子体, 朗缪尔探针, 等离子体灰化

PACC: 5250D, 5270D

## 1. 引 言

多年来, 为进一步削减生产开支, 半导体和平板显示工业采用了面积越来越大的衬底材料, 尤其是薄膜晶体管液晶显示领域, 在未来几年内, 有可能将衬底面积扩展到  $1200\text{mm} \times 1000\text{mm}$ . 大面积衬底加工需要大面积均匀的等离子体源的研制开发. 在众多的等离子体源中, 感应耦合放电是一种较为引人注目等离子体产生方式. 这种源的一个典型特征是将射频功率施加到感应线圈两端, 并通过一介质窗口耦合给等离子体, 而不像电容耦合等离子体 (CCP) 源那样将射频功率直接耦合给导电电极. 这种非电容耦合式的功率传输所产生的等离子体鞘层电压较低, 因而产生的等离子体密度较高. 另外, 感应耦合等离子体 (ICP) 源设计起来相对简单, 无需如电子回旋共振<sup>[1]</sup>和螺旋波源<sup>[2]</sup>中的多极磁场或外部磁场. 具有一定几何位形的感应线圈在真空中感应产生一射频电场, 并通过此电场影响着等离子体的功率吸收, 而射频场的空间分布又强烈地影响着空间等离子体的电子特性及其均匀性<sup>[3]</sup>. 这种等离子体的空间行为还受到反应气压和反应器尤其是晶片架高度的影响<sup>[4]</sup>. 单从感应耦合等离子体源的角度

上看, 线圈的几何结构无疑是决定等离子体特性的一个重要参量, 但线圈的几何位形对感应耦合等离子体的影响还需要进一步认识. 大面积感应耦合等离子体需要大面积感应线圈的激发, 然而由于大面积感应线圈所引发射频电流的驻波效应会使等离子体的功率沉降变得相当的不均匀, 进入应用还有一些距离, 虽然目前人们还在努力降低或利用这种驻波效应<sup>[5]</sup>, 以获得均匀的等离子体. 从另一个角度看, 并联式多线圈感应耦合等离子体是一种可选择方案, 德国学者研制的圆筒式多线圈方式实现感应放电<sup>[6]</sup>, 韩国学者采用了平板式多线圈方式实现感应放电<sup>[7]</sup>, 但两者所获得的等离子体密度还偏低, 因此, 线圈的结构及其物理参量的优化甚至如何提高等离子体密度等是一个迫切需要解决的问题.

本质上讲, 线圈匝数的改变不仅改变了等离子体空间中的射频场分布和等离子体行为, 同时也深刻地改变着线圈的外部电学参量. 本文通过改变输入的射频功率、放电气压等, 针对不同匝数 (1 匝、2 匝、3 匝和 4 匝) 的同心线圈配置对单源感应耦合等离子体功率耦合效率、等离子体的电学性质及光刻胶的刻蚀行为等的影响进行了研究, 优化方案应用到多源大面积感应耦合等离子体放电体系中, 并获得了大面积均匀的、密度高于  $5 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$  的感应耦

\* 国家自然科学基金 (批准号: 10305008) 资助的课题.

合等离子体.

## 2. 实 验

线圈位形的优化是在 ICP98-A 型刻蚀机上进行的.图 1(a)是感应耦合等离子体装置示意图,线圈放置在直径为  $\phi 330\text{mm}$ 、厚度为  $19\text{mm}$  的石英介质窗口上部,实验过程所使用的感应线圈的几何尺寸及物理参数见表 1. 所有线圈的材质均为外径为  $6\text{mm}$  的黄铜管. 等离子体的放电腔体的直径为  $\phi 350\text{mm}$ , 高度为  $250\text{mm}$ . 频率为  $13.56\text{MHz}$  的射功率施加在感应线圈上,真空腔体就会产生感应磁场. 根据法拉第电磁感应定律,磁场又会感应产生电场,此电场会加速等离子体中电子的运动,使之不断与原子或分

子碰撞离化,从而将射频能量耦合给等离子体,并维持其放电.线圈高压端产生的寄生电容耦合效应增强了等离子体射频电位,其存在不仅通过溅射窗口污染等离子体,而且也严重的影响着等离子体诊断.在线圈和介质窗口之间放置了厚度为  $1.5\text{mm}$  的敷铜印刷电路板做成的辐射状法拉第屏蔽结构可以有效地降低等离子体射频电位,避免了因射频电位给朗缪尔探针的等离子体诊断带来的偏差.基于单组线圈的感应耦合等离子体的实验依据,我们研制了多组并联式源感应耦合等离子体的装置,如图 1(b)所示.四组感应线圈浮置在高  $Q$  值的电感器件上,四组线圈的高压端相连,并与另一个高  $Q$  值的电感元件串联,并与匹配网络的射频输入端连接.腔体直径为  $\phi 800\text{mm}$ ,衬底与介质窗口的最大高度约为  $360\text{mm}$ .

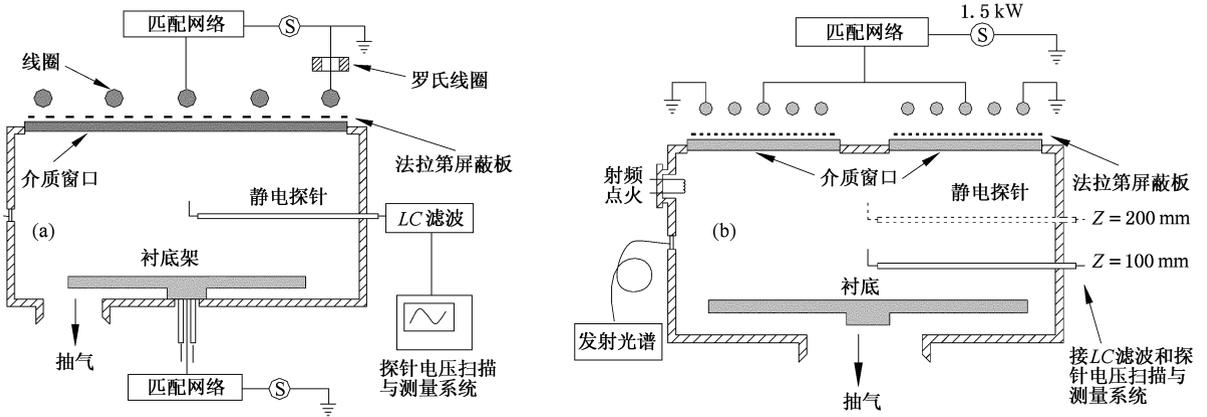


图 1 (a)单源感应耦合等离子体装置示意图 (b)多源感应耦合等离子体装置示意图

表 1 四种感应线圈的几何配置、电感量及其  $Q$  值

| 匝数 | 直径/mm    |          |          |          | 电感量/ $\mu\text{H}$ | $Q$<br>( $\omega L/R$ ) |
|----|----------|----------|----------|----------|--------------------|-------------------------|
|    | $\Phi_1$ | $\Phi_2$ | $\Phi_3$ | $\Phi_4$ |                    |                         |
| 1  | 250      | -        | -        | -        | $0.45 \pm 0.05$    | $200 \pm 5$             |
| 2  | 250      | 200      | -        | -        | $0.84 \pm 0.05$    | $250 \pm 5$             |
| 3  | 250      | 200      | 100      | -        | $1.19 \pm 0.05$    | $270 \pm 5$             |
| 4  | 280      | 250      | 200      | 100      | $1.94 \pm 0.05$    | $340 \pm 5$             |

高密度等离子体需要感应线圈与等离子体之间的高功率耦合效率.为此,我们采用 Rogowski 线圈法测量感应线圈中的放电电流,线圈感应信号大小由 54641D 数字示波器读出,从而计算出各种不同线圈的耦合效率. Rogowski 线圈在感应线圈中的几何放置对测量射频电流的大小较为敏感,其在测量不同种类的感应线圈电流时存在一定的误差.另外,由于

Rogowski 线圈没有经过校准,因而所测量得到的电流值不能代表实际电流值,但这并不影响同种感应线圈的功率传输效率的计算,因为在计算过程中会自动消去电流校正因子.

通常等离子体电学参量最直接有效的测量方法是朗缪尔探针法,我们曾在沉积性的感应放电气氛中研究了碳氟等离子体的电子特性<sup>[8,9]</sup>.然而,探针

在测量感应耦合等离子体时常受到介质板电容耦合效应引起的等离子体射频电位的干扰,抑制该射频电位的办法是在感应线圈和介质板之间添加一个接地的法拉第屏蔽板,并在探针后端接入多级 LC 谐振电路,以降低基波及其高次谐波的干扰信号,从而获得高质量的  $I-V$  特征曲线,并由此得出等离子体的各电学参量(等离子体密度、等离子体电位、电子温度及能量分布函数)。本实验中,具有三轴结构的朗缪尔探针通过法兰置于基片架正上方 30mm、介质板正下方 50mm 处,收集端是一直径 0.25mm、长 5mm 的钨丝,电源部分为中科院物理研究所研制的 LP-1 型朗缪尔探针扫描电源系统,测量的数据通过 12 位的 A/D 采集卡转换到计算机中,作进一步的软件处理。探针与扫描电源之间串联接入了三级可调的 LC 滤波电路,分别过滤掉 13.56MHz 的基波信号和 27.1MHz 和 41MHz 的高次谐波信号。为进一步降低射频电位对探针数据的干扰,还采取了以下措施:增加感应线圈和介质板之间的空气隙,使得一部分静电电压落在空气隙中,使朗缪尔探针针尖垂直于线圈平面,降低射频电位对探针的感应。上述几种措施的联合使用,可以大幅度降低探针中的射频感应电位,探针测量得到的等离子体电流电压曲线较为平滑。

在单源耦合等离子体的放电实验中,朗缪尔探针测量用的 Ar 气纯度为 99.999%,流量固定为 50-sccm,在气压保持不变的条件下,主要改变射频输入功率,变化范围为 100—500W。这里的功率值是功率表上的直读值(即输入功率与反射功率的差)。在多源感应耦合等离子体的放电实验中,放电气体为高纯 Ar 气,通过感应线圈的放电,使用朗缪尔探针方法对等离子体的性质进行了测量,并通过光刻胶的等离子体灰化处理揭示了大面积多源感应耦合等离子体的刻蚀性能。

### 3. 结果与讨论

#### 3.1. 单源感应耦合等离子体的等效电路模型

根据 Piejak 等人<sup>[10]</sup>关于感应耦合等离子体的变压器模型,我们可以把图 1(a)所示的单组线圈的感应耦合等离子体源描述为图 2 所示的电路模型,即把与匹配器相连的感应线圈处理成一个电感,线圈下方的等离子体则处理成一个电流环,该等离子体

具有一定的电感量和电阻,这样其电路方程可表示为

$$V = RI_s + \frac{1}{C_L} \int (I_s - I_c) dt, \quad (1)$$

$$\frac{1}{C_L} \int (I_c - I_s) dt + \frac{1}{C_T} \int I_c dt + L_c \frac{dI_c}{dt} + M_p \frac{dI_p}{dt} = 0, \quad (2)$$

$$L_p \frac{dI_p}{dt} + M_p \frac{dI_c}{dt} + R_p I_p = 0, \quad (3)$$

$$M_p = k \sqrt{L_c L_p}, \quad (4)$$

其中  $V$  是射频源的输出电压,网络参数  $C_L$  和  $C_T$  分别是匹配器的两个纵横电容,容值可从 0—1000pF 和 0—500pF 变化, $L_c$  和  $L_p$  分别是线圈电感和等离子体的电感, $R_p$  是等离子体电阻, $I_c$  和  $I_p$  为对应回路中的电流, $M_p$  为线圈和等离子体之间的互感, $k$  为线圈和等离子体之间的耦合系数。对于不同的线圈结构而言,耦合系数依赖于放电气压以及线圈与等离子体的间隔距离,不太依赖于射频功率。根据该等效电路模型以及朗之万方程,所导出的等离子体的耦合效率<sup>[10]</sup>可表示为

$$\xi = \frac{1}{1 + \frac{R_c}{R_p} \left( \frac{L_p}{M} \right)^2}, \quad (5)$$

式中计及了线圈内阻  $R_c$ 。不难看出,感应放电的耦合效率与线圈和等离子体的互感以及等离子体的电学特性有密切关系,即耦合效率随着线圈内阻的减小而增加,随着线圈电感量的增加而增加。

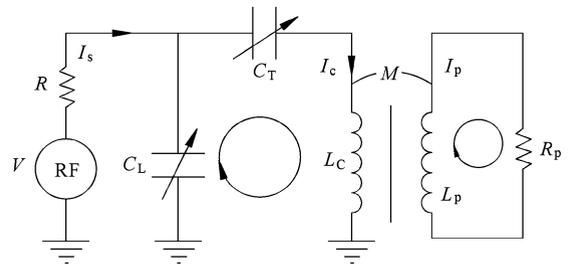


图 2 平板型感应耦合等离子体的等效电路模型

#### 3.2. 线圈的几何配置对功率传输效率的影响

在放电过程中,射频功率除了等离子体消耗一部分功率之外,在功率计和传输线以及感应线圈的焦耳加热也是射频功率另外的一个消耗源。在忽略功率计和传输线上的功率消耗条件下,若已知线圈的有效电阻值  $R_{eff}$ ,通过测量放电时感应线圈中的

射频电流  $I_{rf}$ , 就可以得到射频功率的传输效率, 即等离子体的耦合效率  $\eta$ ,  $\eta = 1 - I_{rf}^2 R_{eff} / P_{total}$ , 其中  $P_{total}$  是功率表中入射功率与发射功率的差值。

实现感应放电有两个前提: 其一是匹配器中电容与线圈电感能否满足谐振条件, 其二是感应线圈能否产生电容耦合式的放电点火所需的高压。因此, 线圈的电感量是决定能否实现感应放电的一个重要电学量。实验过程中我们注意到使用单匝线圈难以实现等离子体放电, 其根本原因在于过低的电感量产生的射频电压较小, 无法实现容式点火, 因而射频功率难以有效地传输给等离子体。使用 2、3、4 匝的线圈在网络参数  $C_L$  和  $C_T$  可调范围内满足共振条件, 均能实现感应耦合放电。

图 3 是放电气压为 0.25 Pa 时, 使用三种线圈(2 匝、3 匝和 4 匝)感应耦合等离子体的功率耦合效率随射频输入功率的变化趋势。不难发现, 2 匝和 3 匝线圈的变化趋势相似, 即耦合效率随着功率增加而增加并且逐渐呈饱和趋势。实验中我们注意到 4 匝线圈在功率高于 200 W 放电时, 反射功率和驻波比很大, 放电也变得非常不稳定, 无法获得准确的功率耦合效率值, 其可能的原因是 4 匝线圈具有较高的电感量, 高功率条件下很难在  $C_1$  和  $C_2$  的调节范围内实现射频阻抗的最佳共轭匹配。另外, 在低功率下 2 匝线圈的耦合效率要明显高于 3 匝线圈, 随着功率的增大, 两种线圈的耦合效率的差值越来越小, 在功率高于 400 W 时两者几乎相等。从前面提到的变压器模型分析可以看出, 感应线圈的  $Q$  值是关系到功率耦合效率高低的一个重要因素,  $Q$  值越高, 耦合效率越高, 然而实验结果似乎与模型预测结果是矛盾的。值得注意的是, 不同匝数的线圈几何量  $Q$  值在变化时, 线圈内阻也在发生相应的变化, 实验与模型结果相矛盾的根源可能在于线圈的内阻的变化。我们对上述的两种感应线圈(2 匝和 3 匝)电镀了约 15  $\mu\text{m}$  厚的银层, 使用阻抗仪测量后发现两种线圈的电感量几乎维持不变, 而  $Q$  值却增强了约 20%, 这意味着线圈内阻下降了约 20%。使用镀银线圈的放电实验表明, 在放电气压为 0.25 Pa 条件下, 感应放电的匹配性能显著改善, 驻波比以及射频反射功率均很小, 几乎可以忽略, 在同等功率的条件下 2 匝和 3 匝线圈对应的感应耦合等离子体耦合效率与未镀银的铜线圈相比提高了约 8%。由此可见, 为提高等离子体的耦合效率, 除了提高感应线圈的  $Q$  值之外, 还应设法降低线圈内阻, 如表面镀

银等电导率更高的金属涂层。

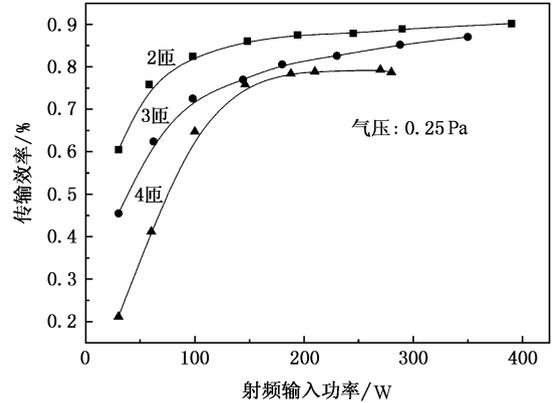


图3 耦合效率与射频输入功率和气压的关系

### 3.3. 单源的不同线圈几何结构对等离子体均匀性的影响

为获得等离子体的径向均匀性, 我们使用改进的朗缪尔探针对等离子体的电学参量(如电子密度、电子温度以及电子能量分布函数)进行了表征。这些等离子体的电学参量主要由 Druyvesteyn 计算方法得到。我们对朗缪尔探针测量所得到的伏安特性曲线数据进行了 3 点快速傅里叶变换平滑算法, 以更好地进行等离子体电学参量的计算。图 4 是 2 匝镀银线圈在不同输入功率的条件下 Ar 气压为 0.25 Pa 时的电子能量概率分布函数。从电子温度的定义  $T_e = -[\alpha \ln f_0(\epsilon) d\epsilon]^{-1}$ , 可以初步认为感应耦合等离子体中存在两种温度的电子群, 在较高射频输入功率放电条件下, 这种分布行为较为明显。3 匝线圈的电子能量分布与 2 匝线圈相类似。图 5 是使用两种线圈进行放电的等离子体电位和电子温度的径向分布情况, 输入的放电功率选定为 400 W, 气压为 0.25 Pa。

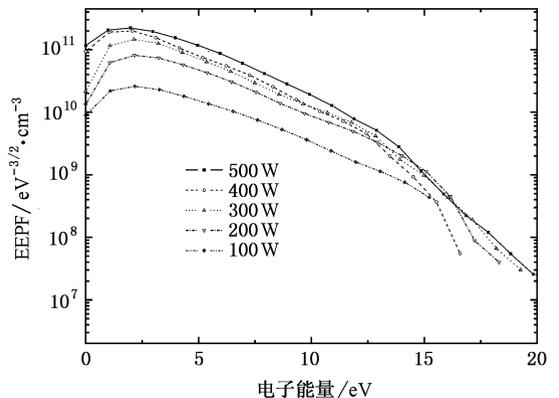


图4 Ar 等离子体的电子能量概率函数与输入功率之间的关系

对于两种线圈而言,有效电子温度在 2.5—4.5eV 之间变化,对径向的位置不敏感.等离子体的空间电位对径向位置较为敏感,呈典型的中空结构,两种线圈均在径向位置为 70mm 处表现出最大的等离子体空间电位,而等离子体的轴向位置则表现出最低的等离子体电位.另外,2 匝线圈的空间电位比 3 匝线圈略高 2—3V.图 6 是电子密度的径向分布情况,两种线圈的配置所测量的电子密度皆随径向距离的增大而下降,中心位置对应的电子密度为最大,约为  $r = 100\text{mm}$  处电子密度的 1.5 倍,这主要是由于等离子体的双极扩散行为所致.在相同功率条件下 2 匝线圈配置的等离子体测量得到的电子密度也略高于 3 匝线圈配置.这些诊断数据间接证明了 2 匝线圈对应的功率耦合效率优于其他线圈.

响较大,图 7 是射频输入功率为 150W、气压为 0.25Pa 条件下,三种镀银线圈的感应放电对 AZ306 光刻胶的刻蚀情况,刻蚀气体为 Ar 和  $\text{O}_2$ ,流量分别为 50 和 8sccm,刻蚀时间为 3min.从图中可以看出,使用 2 匝线圈光刻胶的平均刻蚀速率为 110nm/min,而使用 3 匝线圈为 100nm/min,也就是说使用 2 匝线圈所产生的等离子体浓度更高一些,这验证了 2 匝线圈的功率耦合效率高于 3 匝线圈的实验结果,有意思的是,3 匝线圈对应的光刻胶刻蚀均匀性却要好于 2 匝线圈.4 匝线圈产生的等离子体对光刻胶的刻蚀表现出了极大的径向不均匀性,其可能原因在于该线圈的长度超过了射频波长十分之一而引起的不均匀的等离子体功率沉降所导致的<sup>[3]</sup>,另外 4 匝线圈的放电不稳定也是另外一个可能的原因.

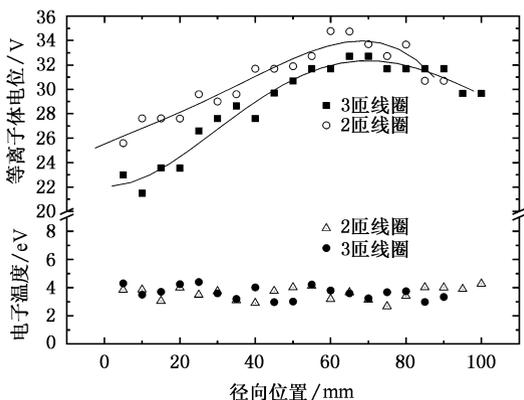


图 5 400W, 0.25Pa 放电条件下等离子体空间电位电子温度的径向分布

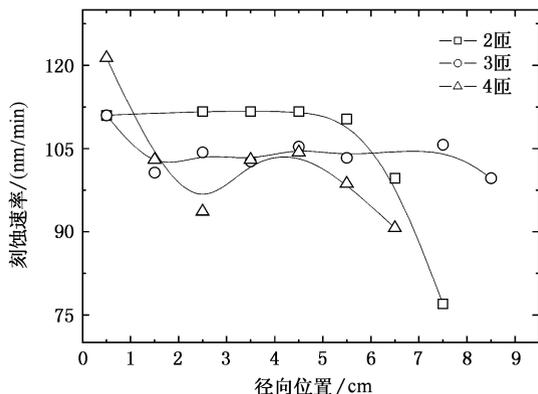


图 7 三种线圈的刻蚀速率的径向分布

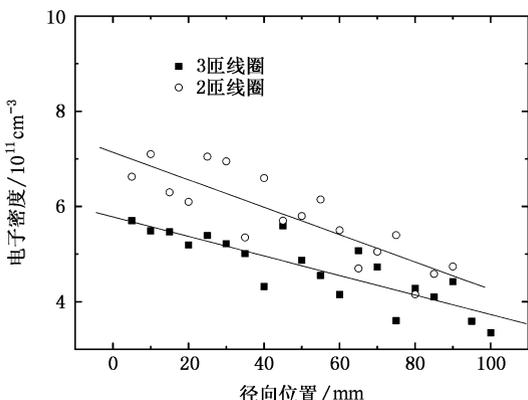


图 6 400W, 0.25Pa 放电条件下电子密度的径向分布

### 3.4. 单源的不同线圈几何结构对光刻胶刻蚀速率的影响

以上是基于感应耦合等离子体的变压器模型,分析讨论了影响功率耦合效率的内在因素,明确了线圈几何结构与功率耦合效率之间的关联.这些实验依据可应用于四组并联式浮置线圈的大面积感应耦合等离子体源的设计,以实现高密度等离子体感应放电.

### 3.5. 四组并联线圈的多源感应耦合等离子体产生及刻蚀均匀性

基于单组多匝线圈的实验依据,我们在直径为 800mm 的腔体中实现了四组并联式感应线圈的放电.装置图如图 1(b)所示,4 组最大直径为 200mm 的 3 匝螺旋线圈呈矩阵并联方式,分别与接地的高 Q 值电感元件相连接.4 组并联线圈的公用高压端与另一个高 Q 值的电感元件相连,并连接到网络匹配器的功率输入端,组成并联式浮置线圈的感应耦合等离子体源,如图 8 插图(a)所示.线圈按上述方

不同匝数的线圈配置对等离子体的刻蚀性能影

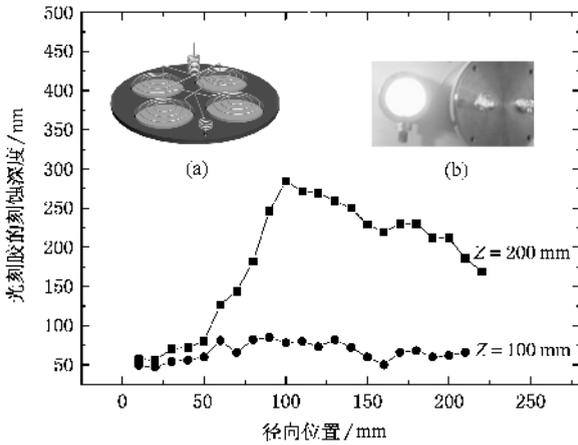


图 8 并联线圈的多源感应耦合等离子体的光刻胶刻蚀情况

式进行配置后, 通入放电气压  $A_r$ , 并给并联线圈馈入一定的射频功率, 调节网络匹配参量  $C_L$  和  $C_T$  到最佳谐振位置, 整个腔体中将产生明亮的放电等离子体, 其辉光放电情形如图 8 插图(b)所示. 放电实验结果表明, 该多源感应耦合等离子体具有较高的耦合效率, 产生的等离子体射频电位对朗缪尔探针的测量影响也较小. 大面积等离子体的朗缪尔探针测量结果表明, 当射频输入功率大于 700W 时, 介质窗口下方位置 ( $Z = 200\text{mm}$ ) 的等离子体密度超过  $5 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$ , 该密度超过了 Park 等人<sup>[7]</sup>使用阵列式线圈产生的等离子体密度. 图 8 是射频输入功率为 700W、气压为 1Pa 时对应的光刻胶的灰化速率在两

种位置的径向分布. 可以看出, 由于等离子体的双极扩散, 尤其是离子向下扩散的原因<sup>[7]</sup>, 使得  $Z = 100\text{mm}$  处的光刻胶灰化刻蚀的均匀性好于  $Z = 200\text{mm}$  处, 在  $Z = 100\text{mm}$  处光刻胶灰化刻蚀的均匀性好于 80%.

## 4. 结 论

大面积等离子体源的开发是衬底加工的核心, 感应耦合放电是众多等离子体源中较引人注目的一种放电模式. 本实验着重研究了感应耦合等离子体的线圈几何配置(1—4 匝同心线圈)对射频功率耦合效率和等离子体电学参量的影响. 实验结果表明, 实现感应耦合放电的感应线圈应具有一定的电感量, 放电等离子体的耦合效率因射频功率和气压导致的等离子体密度或电子与中性粒子的碰撞频率的增加而增大. 2 匝线圈的等离子体的密度要高于 3 匝线圈, 但 3 匝线圈表现出了较好的大面积等离子体刻蚀的均匀性. 基于单组多匝线圈对功率耦合效率的研究结果, 我们研制了并联多组线圈的大面积高密度感应放电源, 并采用了改进的朗缪尔探针方法对多源感应耦合等离子体的电参量分别进行了表征. 结果表明, 使用多螺旋天线并联方式可以实现低气压下的高密度感应耦合等离子体的放电, 通过调整工艺参量, 可以将等离子体密度提高到  $5 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$  以上, 其光刻胶的刻蚀均匀性可好于 80%.

- [1] Sato N, Iizuka S, Nakagawa Y et al 1993 *Appl. Phys. Lett.* **62** 1469
- [2] Tynan G et al 1997 *J. Vac. Sci. Technol. A* **15** 2885
- [3] Beale D F, Wendt A E, Mahoney L J 1994 *J. Vac. Sci. Technol. A* **12** 461
- [4] Mahoney L J, Wendt A E, Barrios E et al 1994 *J. Appl. Phys.* **76** 2041
- [5] Khate M H, Overzet L J 2000 *Plasma Sources Sci. Technol.* **9** 545
- [6] Heinrich F, Bannziger U, Jentzsch A et al 1996 *J. Vac. Sci.*

*Technol.* **B 14** 2000

- [7] Park S G, Kim C, Beom-hoan O 1999 *Thin Solid Films* **355-356** 252
- [8] Huang S, Ning Z Y, Xin Y et al 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3394 [黄松、宁兆元、辛煜等 2004 物理学报 **53** 3394]
- [9] Huang S, Xin Y, Ning Z Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1653 [黄松、辛煜、宁兆元等 2005 物理学报 **54** 1653]
- [10] Piejak R B, Godyak V A, Alexandrovich B M 1992 *Plasma Sources Sci. Tech.* **1** 179



# Generation of multi-source inductively coupled plasma and its diagnostics<sup>\*</sup>

Xin Yu Di Xiao-Lian Yu Yi-Qing Ning Zhao-Yuan

(*School of Physical Science and Technology, Provincial Key Laboratory of Thin Films, Suzhou 215006, China*)

(Received 28 November 2005; revised manuscript received 15 December 2005)

## Abstract

In recent years, in order to cut down the production cost, substrates with large area are used in semiconductor industry, especially in the field of thin film transistor display. Obviously, the key point for the substrate fabrication needs a uniform plasma sources with large area. Among them, inductively couple plasma is one of the good candidates. In our experiments, based on a small chamber of inductively coupled plasma with a single multi-turn coil, we investigated the relationship between coil configuration and power coupling efficiency, and applied these experimental results to the generation of large-area inductively coupled plasma with parallel-connected multi-sources. By using Langmuir probe measurement, plasma parameters of this kind of large area ICP were characterized. It was shown that the large-area ICP source with parallel-connected multi-sources can produce a plasma density larger than  $10^{10} \text{ cm}^{-3}$  under a rather low pressure ( $< 10 \text{ Pa}$ ). The uniformity of plasma density and the photoresist etching can be controlled to a level better than 80% by adjusting the process parameters.

**Keywords** : inductively coupled plasma with multi-sources, Langmuir probe, plasma ashing

**PACC** : 5250D, 5270D

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China( Grant No.10305008 ).