

# 微波放电等离子体源的研究\*

吴锦发 张二力 甄汉生 管祚尧  
(清华大学无线电电子学系)

## 提 要

利用电子迴旋共振(ECR)的原理,在  $10^{-3}$ — $10^{-1}$ Pa 的低压强下,已成功地产生了高活性,高密度的微波等离子体。运用静电探针装置,研究了  $N_2$ 、Ar 放电中微波功率、气体压强对等离子体参量的影响,并对放电等离子体进行了质谱分析。

## 一、引 言

在电子迴旋共振(ECR)条件下,等离子体中的带电粒子能最有效地与微波场作用,可以在高真空 ( $10^{-3}$ Pa) 下放电,生成高密度、高活性的等离子体。因此,这种微波放电的效率从机理上优于其它形式的放电,是一种有广泛应用价值的等离子体技术。

近年来,随着大规模集成电路的发展和新材料,新工艺的迅速开发,对等离子源不断提出新的要求。利用电子迴旋共振原理的 ECR 等离子体源是一种新型等离子源,目前已经广泛地应用于反应离子刻蚀、等离子体 CVD、等离子体聚合、离子束刻蚀和注入用的离子源以及燃料(煤、石油)脱硫、人造金刚石等领域中<sup>[1]</sup>。因此,对 ECR 微波等离子体源进行研究和开发,对我们的科学技术发展和经济建设都具有一定意义。

## 二、实验装置

ECR 微波等离子体源实验装置示于图 1。微波功率源 1 是一只千瓦级连续波磁控管,工作频率为 2450MHz。它通过波导系统 2 与微波放电腔联接。入射功率和反射功率由定向耦合器-功率计系统 3、4、5 测量。微波放电腔是一个工作在  $TE_{11}$  模的圆波导,放电腔 6 的上端通过一个密封陶瓷窗与波导系统连接,下端与加工室 7 相连。加工室的直径为 40cm,高为 35cm。工件台可以通水冷却。一个可移动的探针 8,光谱监测诊断装置 9,四极滤质器 10 和真空规管 11 也装在加工室侧壁和底盘上。真空系统由一只 800l/s 的扩散泵、机械泵和高真空阀门组成。真空度可达  $10^{-4}$ Pa。工作气体由放电室的上端引入。反应气体由加工室侧壁引入。两种气体均由质量流量计控制和监测流量。放电腔 6 外装有产生共振磁场的线圈,可以得到 875Gs 以上的磁场,并且由上往下磁场逐渐减弱以阻止等离子体中带电粒子对陶瓷窗片的轰击并迫使带电粒子往加工室漂移。四极滤质器带有

\* 1985年10月8日收到。

差分排气系统。它是由复合电离钛泵和吸附泵组成,它可使本底真空度达  $10^{-5}$ Pa。

### 三、实验结果

#### 1. 击穿场强的研究

由于击穿功率很小,实验中我们在波导系统中加了一段衰减器。入射和反射功率用定向耦合器和功率计测量。

实验中我们测量了 Ar, N<sub>2</sub> 气在不同压强下的击穿功率。由于实验条件的限制以及为今后工艺研究摸索规律,气体压强可在  $8 \times 10^{-2}$ — $10^{-1}$ Pa 范围内变化。图 2 和图 3 给出了 Ar 和 N<sub>2</sub> 的实验曲线。

实验结果表明,击穿场强与气体种类有关。对于同一种气体,击穿场强在我们研究的气压范围内随着气压增高而减小。它相应于直流放电巴邢

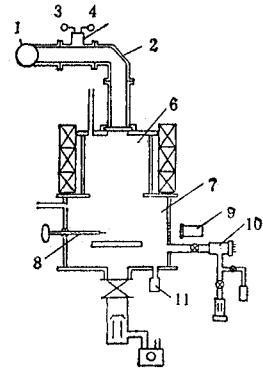


图1 ECR 实验装置图

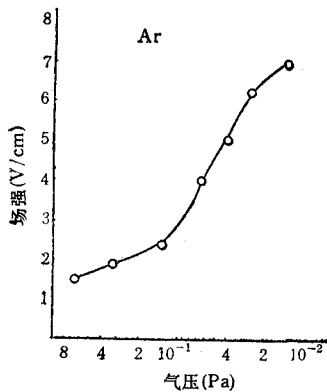


图2 氩气中 ECR 击穿场强与气压的关系

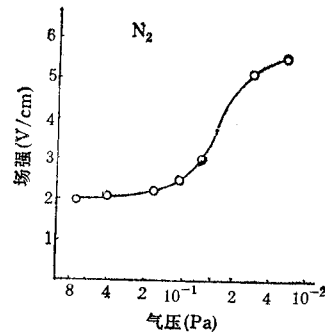


图3 氮气中 ECR 击穿场强与气压的关系。

曲线的左枝。实验中还发现,当磁场偏离共振值( $\sim 875$ Gs)时击穿场强迅速增高。

#### 2. 等离子体密度和电子温度的研究

对于 CVD 和刻蚀用的等离子体而言,等离子体密度和电子温度是非常重要的参量。它不仅影响成膜和刻蚀的速率,而且影响成膜和刻蚀的质量。我们用探针测量了 ECR 等离子体的等离子体密度和电子温度。在以前的工作中<sup>[2,3]</sup>,我们曾经用微波干涉法和消电离时间法对探针诊断进行了核校,表明我们的实验诊断系统是可靠的。

实验装置中,探针是放在接近工件台的低磁场区,探针与磁力线是垂直的,并且以测量饱和离子流来计算等离子体密度,因而磁场的影响可以忽略。<sup>[4]</sup>

由于我们是在远离放电腔的等离子体区进行测量的,因而测得的等离子体密度和电子温度都远小于 ECR 区内的数值。但是由于探针处在工件的近邻,因而能较好地反映工件附近等离子体的特征。

图 4 和图 5 给出了 Ar 和 N<sub>2</sub> 气中等离子体密度与功率的关系。图 6 和图 7 给出了电子温度与功率的关系。图 8 给出了功率固定为 250W 时等离子体密度与气压的关系。

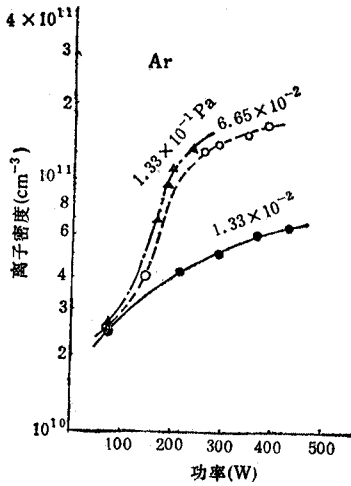


图4 不同气压下 Ar 放电中等离子体密度与微波功率的关系

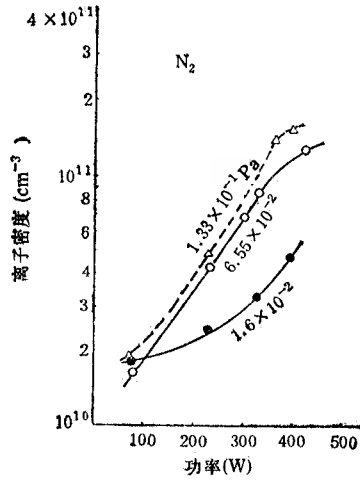


图5 不同气压下 N₂ 放电中等离子体密度与微波功率的关系

所给出的功率值为入射功率与反射功率之差。

上述实验结果都是同一磁场分布下测得的。实验表明，当线圈电流变化或磁场分布变化时，等离子体参量都将有显著的改变。

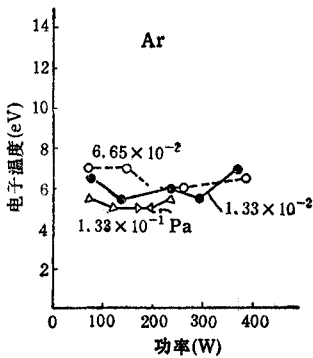


图6 不同气压下, Ar 放电中电子温度与微波功率的关系

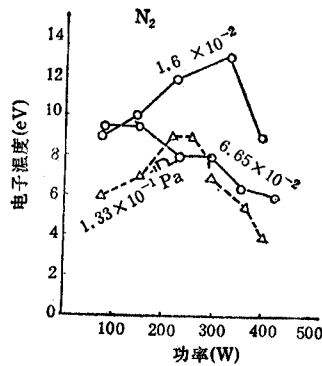


图7 不同气压下, N₂ 放电中电子温度与微波功率的关系

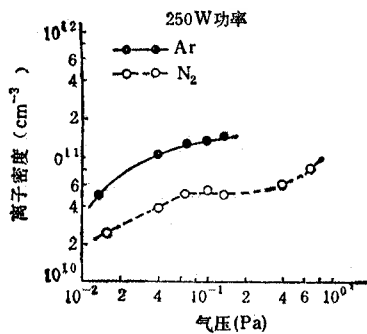


图8 Ar, N₂ 放电时等离子体密度与气压的关系

从上述实验结果可以得到以下结论:

(1) 当气体压强不变时, 等离子体密度随微波功率增大而增大。这种增大的速率与气体压强有关, 压强越高增长越快。

(2) 压强固定时, 电子温度随吸收的微波功率的变化不太明显, 只是在气压较高时有些波动, 这可能与用作图法计算电子温度时的误差有关。此外, 测得的电子温度偏低, 这是由于探针位远置离 ECR 区的缘故。

(3) 微波功率固定时, 等离子体密度随气压增高而增大。在  $2 \times 10^{-2}$  Pa 以下, 等离子体密度很低。当气体压强高于  $6 \times 10^{-4}$  Pa 时, 它随气压增高而有所增大。而在  $5 \times 10^{-5} \sim 10^{-2}$  Pa 范围内改变不大。因而, 这个气压范围适宜选作 ECR 等离子体的工作区。这时气压改变对等离子体参量的影响可以忽略。

(4) 实验表明, 当微波功率不变时, 电子温度随气体压强降低而增高。这显然是由于电子与气体分子碰撞的频率降低, 通过非弹性碰撞传递给分子的能量减少, 使电子的平均能量增大的原故。

### 3. 与其它类型放电的比较

从以上实验结果可以看到, 微波 ECR 放电与直流和射频放电相比, 可以很容易地在低气压下、低功率下形成高密度的等离子体。引出腔体以后, 电子的温度也很低。ECR 等离子体在低气压下能达到很高的电离度(等离子体密度与中性气体分子密度之比)。所有这些都表明, ECR 微波放电能最有效地产生带电粒子, 它们与电磁波场的互作用效率最高。表 1 中给出了不同类型放电产生的等离子体的参量。<sup>[5]</sup>

表 1 不同类型放电等离子体的参量

	MW ECR 等离子体	管式反应器中的等离子体	平行板间的等离子体
频率 (MHz)	2450	1356	0.03—1356
气体压强 (Pa)	$5 \times 10^{-2}$	10—100	1—10
电子温度 (eV)	5—6	8	8
离子密度 (cm <sup>-3</sup> )	$10^{10} \sim 10^{11}$	$10^{10}$	$10^{10}$
电离度	$10^{-2}$	$10^{-6}$	$10^{-3}$

## 四、质谱分析结果<sup>[6]</sup>

我们用四极滤质器对放电前和放电中的气体进行了质谱分析。为了保护滤质器免受油蒸汽沾污, 我们在取样装置和滤质器之间装有超高真空角阀(见图 1), 因而无法对等离子体中离子直接取样。我们实际上只对中性气体粒子进行质谱分析。图 9、图 10、图 11 给出了 Ar、空气、CF<sub>4</sub> 放电前和放电时的质谱图。放电室(包括加工室)真空度为  $10^{-2} \sim 5 \times 10^{-2}$  Pa, 滤质器内真空度为  $10^{-4} \sim 10^{-3}$  Pa。

由上述质谱图可以得到以下初步结论:

(1) 从图 9 可以看到, 纯氩放电时除有 H<sub>2</sub><sup>+</sup>(2) 外, 只有 Ar<sup>+</sup>(40)、Ar<sup>++</sup>(20) 的峰,

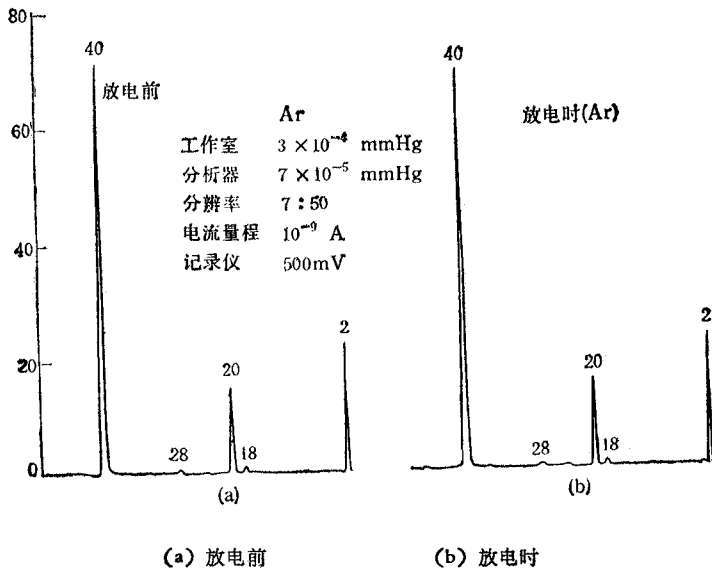


图 9 纯氩放电的质谱图

表明没有发生化学反应。

(2) 比较图 10 中空气放电前和放电时的质谱图, 可以看到放电时  $O_2(32)$  含量减小, 出现  $NO(30)$ ,  $CO_2(44)$  的峰。14 和 28 的峰增大, 表明有 CO 生成。这些可以说明在放电时  $O_2$ 、 $N_2$ 、C 之间发生了化学反应。氮放电与空气放电类似, 只是含氧量很少, 生成的  $CO_2$ 、CO、NO 也很少。

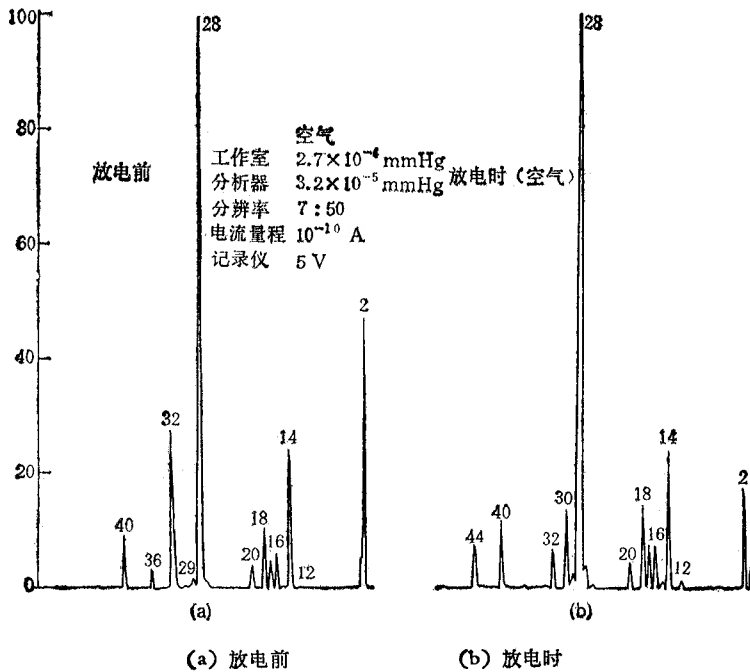


图 10 空气放电的质谱图

(3) 四氟化碳的质谱分析(见图 11)表明,  $\text{CF}_4$  很易分解为  $\text{CF}_3(69)$ 、 $\text{CF}_2(50)$ 、 $\text{CF}(31)$  等。放电时  $\text{CF}_3$  明显减少, 出现  $\text{SiF}_3(85)$ 、 $\text{SiF}_2(66)$ 、 $\text{SiF}(47)$ 、 $\text{CO}_2(44)$  等, 而  $\text{CO}(28)$  增多。这表明系统内有含 Si 物质, 如玻璃以及氧等存在, 放电时发生了化学反应。

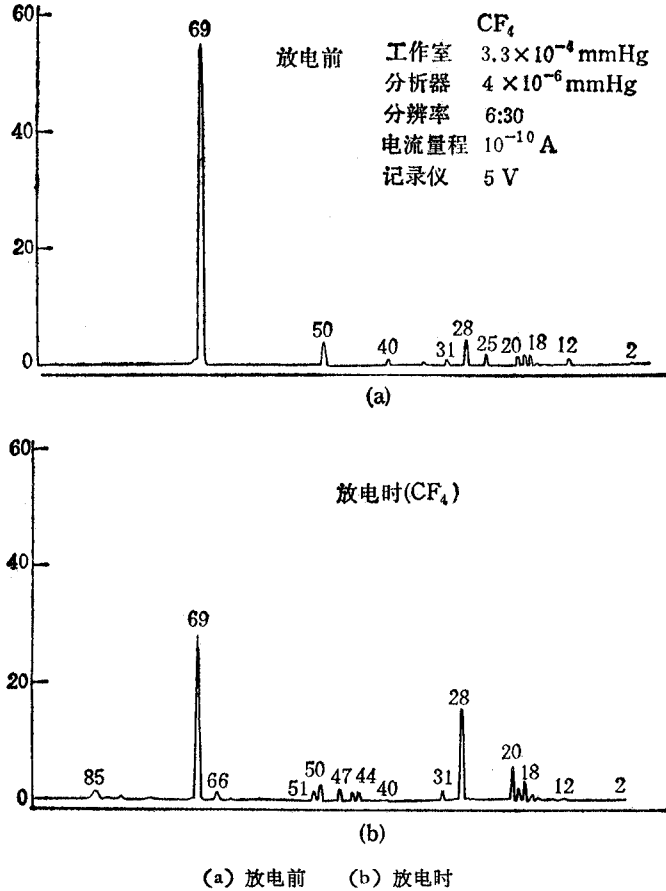


图 11 四氟化碳放电的质谱图

## 五、结 束 语

我们进行了微波 ECR 放电的实验研究。结果表明, 利用 ECR 放电构成的微波等离子体源能工作在高真空度下, 并有较高的等离子体密度和化学活性。采用梯度磁场将等离子体引出时, 等离子体的电子温度较低。因而这种等离子体源适合用于薄膜沉积<sup>[7]</sup>、聚合和反应等离子体刻蚀, 也可以用于反应离子束、离子注入离子源的等离子体发生器<sup>[8]</sup>。

参加本课题工作的还有陈克强、张秀华、马永琴、丁辉、李捷、毕友、张云、金明等同志。中国科学院电子学研究所四室的同志在建立实验条件上给予很大帮助, 在此一并表示感谢。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 张二力、吴锦发、甄汉生,真空科学与技术,1985年,第6期,第49页.
- [ 2 ] 吴锦发等,微细加工技术,1985年,第2期,第6页.
- [ 3 ] 甄汉生等,电子科学学刊,9(1987), 135
- [ 4 ] 项志遵等著,高温等离子体诊断技术,上海科学技术出版社,1982.
- [ 5 ] 铃木敬三等,电子材料(日), 20(1981)5,111.
- [ 6 ] 管祚尧等,北京真空学会技术报告,1985,7.
- [ 7 ] C. Cohen, *Electronics*, 54(1981)22, 82.
- [ 8 ] M. Miyamura et al., *J. Vac. Sci. Technol.*, 20(1982), 986.

## RESEARCH ON MICROWAVE PLASMA SOURCE

Wu Jinfa, Zhang Erli, Zhen Hansheng, Guan Zuoyao

(Department of Radio and Electronics, Tsinghua University)

Using the principle of electron cyclotron resonance, the microwave plasma with high degree of ionization and activity is obtained under the lower pressure from  $10^{-3}$  to  $10^{-4}$  Pa. In this paper, the influences of the microwave input power and gas pressures on the parameters of plasma in nitrogen and argon are studied with Langmuir probe, and mass spectrographic analysis is also made.