

ICP 等离子体刻蚀系统射频偏压的实验研究*

张庆钊[†] 谢常青 刘 明 李 兵 朱效立 陈宝钦

(中国科学院微电子研究所 纳米加工与新器件集成技术实验室, 北京 100029)

摘要: 对于上下电极双射频源的电感耦合(ICP)等离子体刻蚀设备的关键工艺参数——下电极射频偏压的变化特性进行了实验与物理定性分析. 实验以氧气作为反应气体, 采用可满足 300mm 硅晶片刻蚀的 ICP 刻蚀设备的射频系统进行实验数据测定. 结果表明, 下电极射频偏压与其他工艺参数在可适用的工艺窗口中(改变上下电极功率和气体压力)不再是平常认为的简单的比例关系, 而是随着条件的改变, 对应的趋势比例关系会发生转折性变化, 这种变化在高上电极射频、低下电极射频功率和低气压的条件下很容易发生.

关键词: 等离子体; 射频偏压; ICP; 干法刻蚀

PACC: 5225; 5250 **EEACC:** 2310; 2315

中图分类号: TN405. 98 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2008)05-0980-04

1 引言

在微电子器件的制造过程中, 作为图形精确转移的等离子体干法刻蚀工艺占有非常重要的地位, 特别是随着器件向深亚微米化发展, 干法刻蚀工艺本身面临着越来越严峻的挑战. 面对不断提升的工艺要求^[1], 技术人员主要从两个方面着手: 一是不断优化改进工艺^[2], 但这只是起到一定的缓解作用, 并没有从根本上解决问题; 二是优化设计刻蚀设备, 从根本上应对工艺发展的需要. 而优化设计刻蚀设备的前提是要对设备本身的各项机能有着透彻的了解. 在 ICP 等离子体刻蚀工艺中, 下电极射频源在被刻蚀晶片上所产生的直流偏压(V_{dc})^[3]是一个非常重要的刻蚀工艺参数, 射频偏压作为晶片表面轰击离子加速电压的体现与最终离子的能量大小有着非常直接的关系, 下电极射频偏压对轰击离子能量的作用最终决定了等离子体工艺的刻蚀速率. 在目前的文献中, 还没有专门对于下电极射频偏压与工艺中其他参数关系的研究报道. 本文通过实验对射频偏压和上下电极射频功率(SRF/BRF)的关系, 以及与气体压力的关系进行了探讨. 结果表明, 对可适用于 300mm 晶片的 ICP 等离子体刻蚀设备, 在一定的参数设定范围内, 射频偏压与上电极射频功率和气体压力之间并不是简单的近似线性关系, 随着上电极射频功率的变化, 会有相应的变化拐点存在.

2 实验

实验中所用 ICP 刻蚀装置如图 1 所示. 它是可适用于 300mm 晶片工艺的 ICP 刻蚀设备, 有上下两个

13.56MHz 射频源组成, 其中上射频源的主要作用是通过线圈的耦合作用产生等离子体, 它主要决定了腔室中等离子体密度的大小; 下射频源的主要作用是在被刻蚀晶片上产生射频偏压, 从而控制轰击离子的能量大小^[4]. 实验中射频偏压的值通过位于下射频源与被刻蚀晶片之间的传感器进行采集. 实验中反应气体为氧气, 流量为 200sccm.

3 结果与分析

下电极射频直流偏压不仅与气压、上下射频输入功率有关, 还与外加磁场的方向和分布、电子与离子温度等参数有关. 在本实验装置中没有附加外加磁场, 所以没有涉及磁场参数的影响. 实验主要对气压和上下射频输入功率的影响进行了实验探讨, 对于等离子体本身的一些参数如电子和离子温度等的影响, 将作为进一步研究方向, 在后续工作中进行探讨.

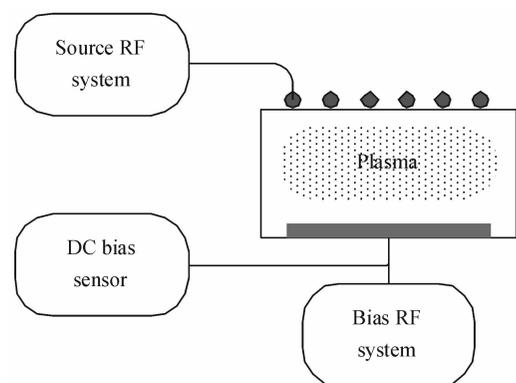


图 1 刻蚀设备原理轮廓图

Fig. 1 Schematic of the ICP etcher

* 国家高技术研究发展计划(批准号:2006AA843134)和国家重点基础研究发展规划(批准号:2007CB935302)资助项目

[†] 通信作者. Email: izqz@163.com

2007-10-08 收到, 2007-11-09 定稿

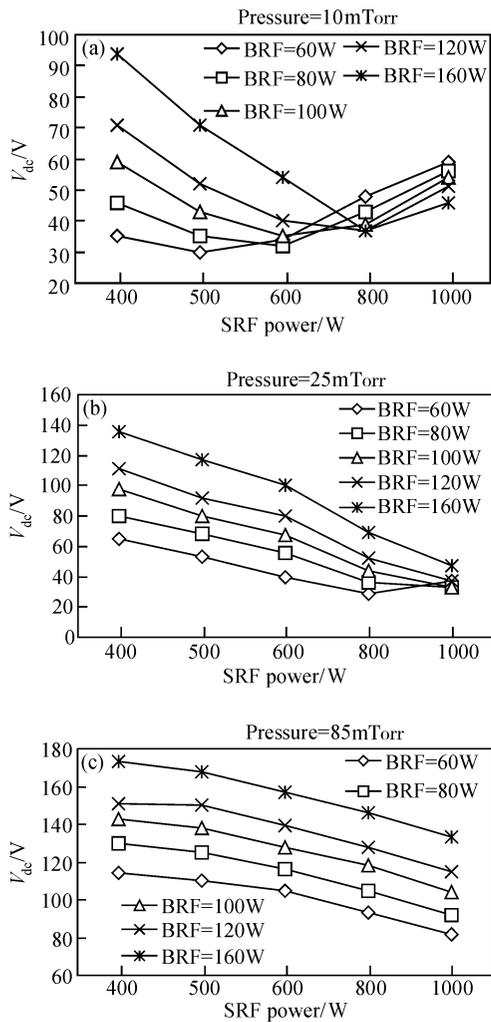


图 2 射频偏压与上射频功率的关系 (a) 气体压力为 10mTorr; (b) 气体压力为 25mTorr; (c) 气体压力为 85mTorr

Fig.2 Relationship between the V_{dc} and SRF (a) Gas pressure is 10mTorr; (b) Gas pressure is 25mTorr; (c) Gas pressure is 85mTorr

3.1 射频偏压与上射频功率的关系

分别固定气体压力为 10, 25 和 85mTorr; 下电极射频功率为 60, 80, 100, 120 和 160W, 测定下电极射频偏压与上射频功率的关系, 结果如图 2 所示。

从图 2 可以看出, 在总体趋势上, 随着上电极功率的增大, 在各个不同下电极功率的条件下射频偏压都呈现下降趋势, 特别是随着压力的增大, 当压力为 85mTorr 时, 这种趋势更加明显。但是随着压力的降低, 这种变化趋势开始发生改变, 尤其是下电极施加功率较低时, 射频偏压与上电极功率的趋势关系发生相反的变化。压力为 25mTorr 时, 在 60W 的下电极射频偏压下, 当上电极功率加到 800W 时, 射频偏压随上电极功率的变化趋势开始发生转折, 随着上电极射频功率的增大, 射频偏压开始呈现增大趋势。当压力继续下降, 设定在 10mTorr 时, 随着上电极射频功率的增加, 在 60W 到 160W 的下电极功率设定条件下, 在 800W 以上的上电极功率范围内, 射频偏压与上电极射频功率的趋势关系发生转折变化。对应关系如表 1 所示。

表 1 气体压力 10mTorr 时, 转折点对应的上下射频功率

Table 1 Values of SRF and BRF at turn points when gas pressure is 10mTorr

下电极功率/W	60	80	100	120	160
转折点对应上电极功率/W	500	600	600	800	800

在其他条件不变的情况下, 随着压力的降低, 等离子体中电子的平均自由程增大, 电子通过感应电场加速获得的能量增大, 使气体的电离率增大, 从而等离子体密度增大。对比图 2(a), (b) 和 (c) 可以看出, 在等离子体密度高的相对低气压条件下, 射频偏压随上电极射频功率的增加易发生转折性的趋势变化, 单从等离子体密度的角度看, 随着上电极射频功率的增加, 等离子体密度也在增大。但随着上电极功率的增加, 下电极射频偏压呈现出趋势上的转折性变化, 由反比例关系变为正比例关系, 且在相对低气压条件下, 也就是等离子体密度相对较高的条件下, 更易发生这种变化。这种现象可以用以下两种原因解释^[5,6]：

(1) 开始随着上电极功率的增加, 下电极射频偏压变小, 这是因为虽然高功率下等离子体密度增大, 但是由于单个电子电离率变大, 导致维持等离子体状态的电子数目反而相对减少, (朗缪尔探针测试结果), 如图 3 所示。

结果大部分的电子处于吸附状态, 在等离子体中以负离子的形态存在, 而射频偏压形成的最直接的原因^[7]是: 在相同的电场中获得同等能量后, 电子的运动速度要远大于离子的运动速度 (离子的质量远大于电子质量), 在下电极施加射频的正电压周期内下电极所收集到的电子数目要远大于在负电压周期内所收集到的正离子数目, 为了保持电中性, 从而在下电极上产生了射频偏压。当等离子体中电子数目减少时, 相应的下电极射频偏压也会减小; 随着上电极射频功率的继续增加, 下电极射频偏压开始变大, 这是因为等离子体中电子能量开始变大, 在下电极施加射频的正电压周期内下电极所收集到的电子数目相对增加, 电子能量随上电极射频功率的变化 (朗缪尔探针测试结果), 如图 4 所示。

(2) 可能是上下电极之间通过等离子体发生了某种作用, 如谐波耦合, 导致下电极有效施加射频功率减小, 在这种作用下, 上电极射频功率起着主导作用, 因为上电极射频功率要远大于下电极射频功率, 且随着上电极

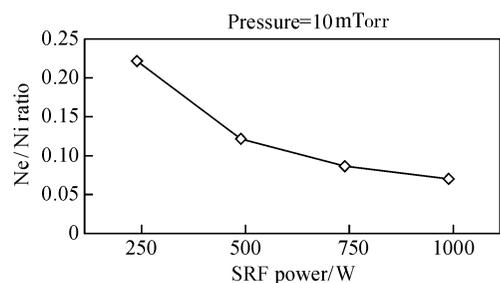


图 3 10mTorr 条件下, 不同上电极射频功率下等离子体中电子和正离子的数目比

Fig.3 Ratio of electron to positive ion, under different source RF powers when gas pressure is 10mTorr

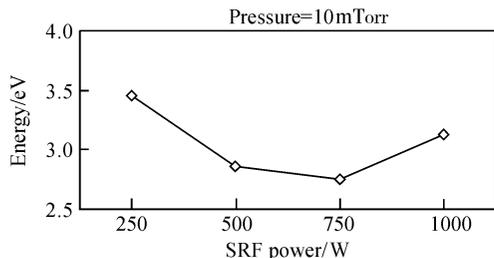


图 4 10mTorr 时,不同上电极射频功率下等离子体中电子能量
Fig.4 Energy of electron under different source RF powers when gas pressure is 10mTorr

功率的增大和等离子体密度的增大增强了这种耦合,而等离子体本身很可能是耦合的载体,这是因为在其他条件不变的情况下,压力的相对降低促进了变化转折的发生.

3.2 射频偏压与下射频功率的关系

分别固定气体压力为 10, 25 和 85mTorr; 上电极射频功率为 400, 500, 600, 800 和 1000W, 测定下电极射频偏压与下射频功率的关系, 结果如图 5 所示.

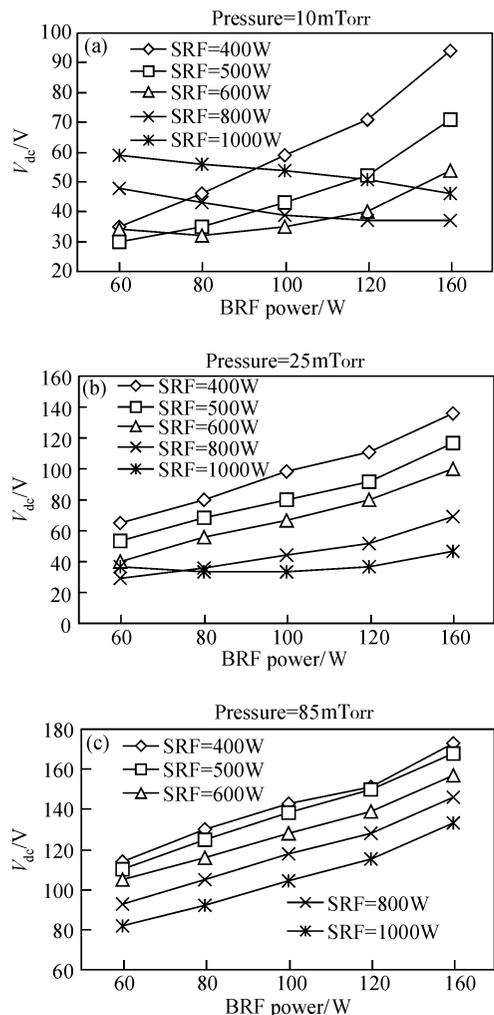


图 5 射频偏压与下射频功率的关系 (a) 气体压力为 10mTorr; (b) 气体压力为 25mTorr; (c) 气体压力为 85mTorr
Fig.5 Relationship between the V_{dc} and BRF (a) Gas pressure is 10mTorr; (b) Gas pressure is 25mTorr; (c) Gas pressure is 85mTorr

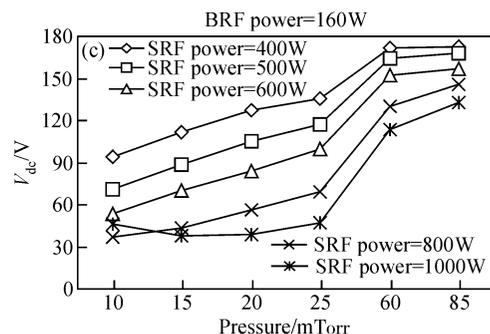
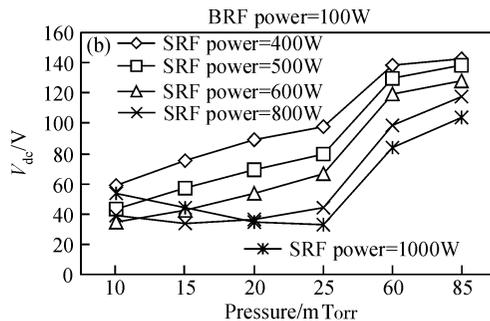
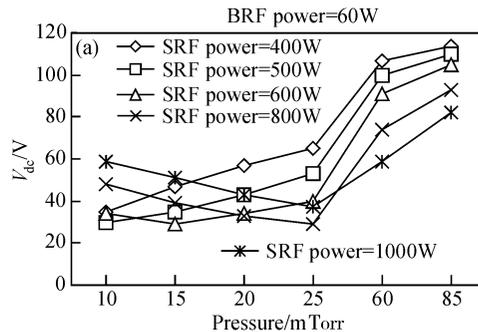


图 6 射频偏压与气体压力的关系 (a) 下射频功率为 60W; (b) 下射频功率为 100W; (c) 下射频功率为 160W
Fig.6 Relationship between the V_{dc} and gas pressure (a) BRF power is 60W; (b) BRF power is 100W; (c) BRF power is 160W

对比图 5 的实验结果, 可以看出在相对较高的压力下, 其他条件不变, 随着下电极射频功率的增加, 下电极射频偏压成正比例关系增加. 但是当压力降低后, 特别是压力变为 10mTorr, 上电极射频功率为 800 和 1000W 时, 下电极射频偏压与下电极射频功率成反比例关系. 结果进一步说明, 在相对低气压条件下, 下电极射频偏压与下电极射频功率的关系会随着上电极射频功率的大小而发生变化; 而在相对高压条件下, 下电极射频偏压与下电极射频功率的关系则相对稳定, 不受上电极射频功率大小影响. 相对低气压条件下, 随上电极射频功率增大虽然等离子体获得的射频耦合能量增加, 但维持等离子体状态的电子数目不是相对增加而是相对减少; 或者在相对高的上电极射频功率下, 分别连接射频源的上下电极通过较低气压下密度相对较高的等离子体产生了某种耦合效应. 实验结果表明, 这些效应更易在相对较低气压的等离子体状态下发生.

3.3 射频偏压与气体压力的关系

分别固定下射频功率为 60, 100 和 160W; 上电极射频功率为 400, 500, 600, 800 和 1000W, 测定下电极射频偏压与气体压力的关系, 结果如图 6 所示。

对比图 6 可以看出, 射频偏压与气体压力的趋势关系在相对高的上电极射频功率和相对低的下电极射频功率条件下很容易发生转折的变化, 从而在相对的高低气压条件下呈现不同的比例关系。在其他条件不变的情况下, 当下电极施加的射频功率越低时, 对应的射频偏压趋势关系越容易发生转折变化; 当下电极射频功率加大时, 射频偏压趋势关系发生转折, 所对应的上电极射频功率也相应地变大。一种可能的情况是上下电极射频发生某种耦合或串扰, 而当上电极射频功率增大, 下电极射频功率减小时, 这种耦合或串扰会增强。实验结果表明, 上电极射频功率增大将会促进下电极射频偏压变化关系发生转折, 而较高的下电极射频功率将会抑制下电极射频偏压的变化关系发生转折。

4 总结

对硅片刻蚀设备工艺中的一个关键参数——射频偏压进行了实验研究与探讨。结果发现, 下电极射频偏压与其他工艺参数在可适用的工艺窗口中(改变上下电极功率和气体压力)不再是平常认为的简单的比例关

系, 而是随着条件的改变, 对应的趋势比例关系会发生转折性变化, 这种变化在高上电极射频、低下电极射频功率和低气压的条件下很容易发生。转折变化的发生和等离子体本身的各个参数有着密切的关系, 如维持等离子体状态的电子密度、电子能量、正离子密度等。实验的结果与分析, 对于进一步明晰等离子体的物理性质及对于设备系统的进一步优化改进和工艺参数的调节给出了指示性的方向。

参考文献

- [1] International Technology Roadmap for Semiconductor, 2005
- [2] Tachi S. Impact of plasma processing on integrated circuit technology migration from 1nm to 100nm and beyond. *J Vac Sci Technol*, 2003, A21(5):131
- [3] Kelly P G, Hall R, O'Brien J, et al. Studies of mid-frequency pulsed DC biasing. *J Vac Sci Technol*, 2001, A19(6):2856
- [4] Lee J W, Donohue J F, Mackenzie K D, et al. Mechanism of high density plasma processes for ion-driven etching of materials. *Solid-State Electron*, 1999, 43:1769
- [5] Boyle P C, Ellingboe A R, Turner M M. Electrostatic modeling of dual frequency RF plasma discharges. *Plasma Sources Sci Technol*, 2004, 13:493
- [6] Mahony C M O, Maguire P D, Graham W G. Electrical characterization of radio frequency discharges. *Plasma Sources Sci Technol*, 2005, 14:60
- [7] Zhang H B, Zhang D. Plasma technology in electronic engineering. Beijing: Science Press, 2002 (in Chinese) [张海波, 张丹, 译. 等离子体电子工程学. 北京: 科学出版社, 2002]

RF Bias Voltage in ICP Etch Systems*

Zhang Qingzhao[†], Xie Changqing, Liu Ming, Li Bing, Zhu Xiaoli, and Chen Baoqin

(Laboratory of Nanofabrication and Novel Devices Integration, Institute of Microelectronics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: In order to understand the relationship between RF bias voltage on bottom electrode and other process parameters, we designed an experiment. The results indicated that the relationship varies depending on the other parameters' variation. The upper electrode RF power, the bottom electrode RF power, and gas pressure all distinctly affect this relationship.

Key words: plasma; RF bias voltage; ICP; dry etch

PACC: 5225; 5250 **EEACC:** 2310; 2315

Article ID: 0253-4177(2008)05-0980-04

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2006AA843134) and the State Key Development Program for Basic Research of China (No. 2007CB935302)

[†] Corresponding author. Email: izqz@163.com

Received 8 October 2007, revised manuscript received 9 November 2007