

90nm 硅栅过刻蚀工艺中功率对等离子体性质的影响*

张庆钊[†] 谢长青 刘 明 李 兵 朱效立

(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: 通过实验对适用于 90nm 多晶硅栅刻蚀工艺中过刻蚀阶段等离子体的性质进行了研究分析. 实验采用满足 200mm 硅晶片刻蚀的电感耦合多晶硅刻蚀设备, 借助等离子体分析仪器(朗缪尔探针)进行实验数据测定, 得到了等离子体性质与功率、气体流量等外部参数的关系. 实验表明在射频功率增加的过程中, 能量耦合系数处于一个相对稳定的常值; 当等离子体处于局部加热状态时, 绝大部分的电子处于附着状态, 维持等离子体的电子数目相对减少. 等离子体中的射频能量耦合空间随着射频功率的增加, 分布状态会变得更加一致化.

关键词: 等离子体; 鞘层理论; 干法刻蚀; 朗缪尔探针

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

中图分类号: TN305.99 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2007)10-1611-04

1 前言

在集成电路的工艺制造中, 随着器件特征尺寸的不断缩小, 集成度的不断提高, 工艺控制变得更加严格, 刻蚀工艺条件正面临着越来越多的新问题^[1], 新材料如高 k 栅介质和金属栅电极的引入^[1], 尤其是大尺寸硅片的应用, 使这一挑战变得更加严峻. 目前集成电路等离子体刻蚀工艺中遇到的主要问题是关键尺寸的控制、关键尺寸刻蚀的均匀性、刻蚀线条的侧面形貌及剩余栅介质层的均匀性等, 与上述问题关系最密切的是刻蚀工艺中等离子体的物理化学性能和在工艺过程中等离子体各项参数的变化情况, 特别是等离子体刻蚀工艺过程的最后一步——过刻蚀将直接决定刻蚀线条的侧面形貌陡直性及剩余栅介质层的厚度和均匀性, 这些方面将直接影响到所形成器件的最终性能. 相关学者对等离子体刻蚀时反应物和被刻蚀物的物理化学反应及过程模拟进行了大量的研究^[2-5], 本文从过刻蚀时等离子体本身的物理性质出发, 就 200mm 硅片 90nm 硅栅工艺刻蚀时, 在过刻蚀阶段典型工艺条件下借助鞘层理论模型^[6]对等离子体的一些基本性能做了初步探讨.

2 实验

随着刻蚀线条的微细化, 硅栅等离子体刻蚀工

艺也变得越来越具有挑战性, 特别是刻蚀工艺的最后一步——过刻蚀, 既要保证足够的刻蚀选择比, 又要保证被刻蚀线条的最终形貌满足工艺要求, 这一步面临的一个非常大的技术难点是被刻蚀线条的底部形貌问题: 既要保证没有底切现象又要保证没有底脚现象, 如图 1 所示. 工艺上的要求对硅栅过刻蚀步中等离子体各项参数性质的深入了解提出了迫切的需求. 以工艺需求为出发点, 本文在实验的基础上对过刻蚀步中等离子体性质与功率、气体流量等外部参数的相应关系进行了相应的实验研究, 进一步深化对过刻蚀步中等离子体性质的了解.

实验采用 200mm 硅片电感耦合等离子体刻蚀装置, 如图 2 所示, 腔室直径为 40cm, 高度为 25cm (石英平板下表面到静电卡盘上表面), 13.56MHz 的射频电源借助射频匹配器通过线圈将能量耦合进

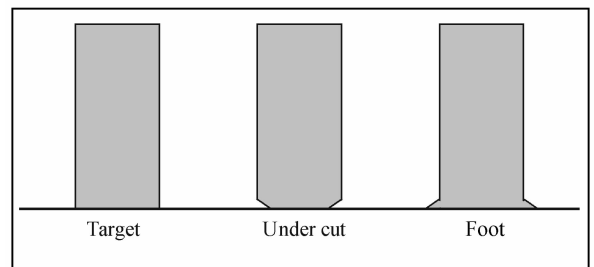


图 1 刻蚀后线条的形貌结果

Fig.1 Profile of gate after etching

* 国家自然科学基金(批准号:60236010,60376020)和国家重点基础研究发展计划(批准号:G200036504)资助项目

[†] 通信作者. Email: izqz@163.com

2007-02-28 收到, 2007-06-02 定稿

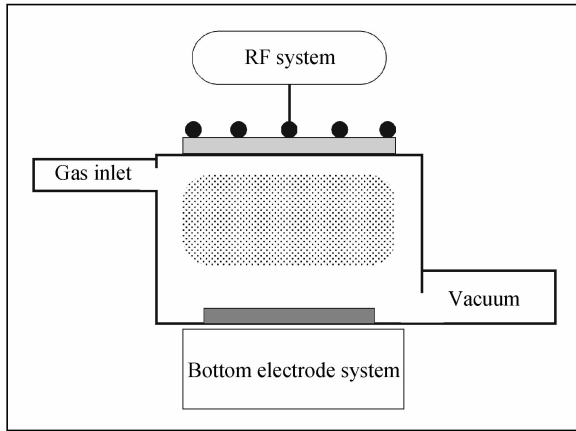


图 2 刻蚀设备原理轮廓图

Fig.2 Schematic of the ICP etcher

等离子体腔室,线圈与腔室之间用石英平板隔开.工艺腔室侧壁温度设定为 60℃;静电卡盘固定的硅片温度通过氦气背吹进行控制.为了测定比较不同条件下的等离子体性能,本实验中采用氩气,这是由于氩气物理化学性能较为单一,能更好地表征等离子体的物理性质;但是同时也存在着相应的问题,因为在实际的刻蚀条件中反应气体为多种气体的混合气体,而且各种气体性质多样化,在等离子体中存在着很多种具有不同化学活性的粒子,且各种粒子之间存在着复杂的物理化学反应,这对等离子体性质的表征研究带来了很大的问题,为了从较为单一的气体条件入手,更好地反应等离子体的基本物理性质,实验中采用了氩气.实验中设定腔室气压为 10Pa,射频电源输出到射频耦合线圈的功率为 100~600W,气体流量设定为 250sccm,在上述条件下进行等离子体起辉实验,测定等离子体各项性能参数.

等离子体参数^[7~9]的测定采用朗缪尔探针测量设备进行,由于本探针采用了补偿电极设计结构,很好地避免了射频源对测量参数的影响.朗缪尔探针测试点距离硅片表面 7.5mm,由于实验中等离子体密度数量级为 10^{15} m^{-3} ,因此德拜长度约为几十微米,等离子体鞘层厚度约为几倍的德拜长度^[6],因此在实验中探针测试点的位置处于等离子体鞘层以外.朗缪尔探针测试点选取如图 3 所示.

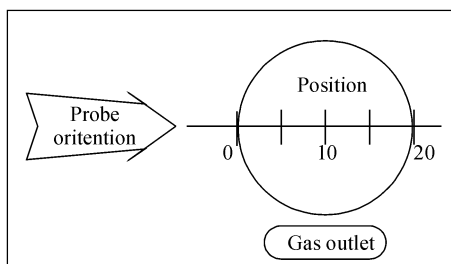


图 3 朗缪尔探针测试示意图

Fig.3 Measuring schematic of the Langmuir probe

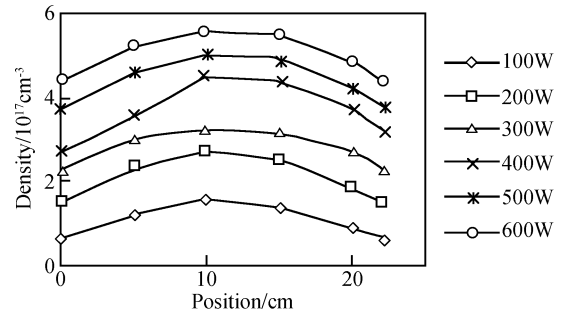
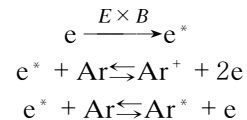


图 4 不同功率下,等离子体中的正离子密度随不同位置分布曲线

Fig.4 Positive ions density versus different position under different source power

3 结果与分析

由等离子体的基本理论可以知道,在硅栅过刻蚀典型工艺条件下,压力设定为 10Pa 时,粒子平均自由程约为几百微米,因此努森常数^[6] $K_n = \lambda/L \ll 0.01$,其中 λ 为气体粒子平均自由程, L 为等离子体腔室轴向的线度.由于努森常数远小于 0.01,等离子体中气体粒子(氩气)运动主要的物理过程可以表述为:



在局部电磁场作用下,电子获得能量后由于其平均自由程很短,通过频繁碰撞将能量传递给其他粒子(主要是离子、中性粒子以及气体分子);对于其他带电粒子而言,其质量要远大于电子质量,可以忽略它们在电磁场中的能量获得过程.由于实验条件的基本满足,本次实验基于等离子体鞘层模型的理论基础^[2],对等离子体进行基本性能的分析.

从图 4 可以看出,在相同条件下,随功率的变化,在一定的输入功率范围内等离子体中正离子的密度正比于射频源功率,外部射频源以一个基本不变的耦合系数(由硬件决定)将外部能量耦合进等离子体内部,射频耦合能量是等离子体密度增加的最直接因素;同时不同功率条件下,正离子的空间分布情况几乎是不变的,这也说明了输入功率对等离子体中正离子密度的空间分布没有什么影响.在气体压力相对较高的 80mT 情况下,作为能量主要转换媒介的电子,在电磁场中通过电磁效应获得能量,并通过局部频繁碰撞将能量传递出去.另一方面,从图 5 可以看出,实验测得的正离子平均密度值同正离子平均密度和电子平均密度的差值近乎相等,为了保持等离子体的电中性,绝大部分的电子处于附着状态,在等离子体中形成了大量的带负电粒子,图

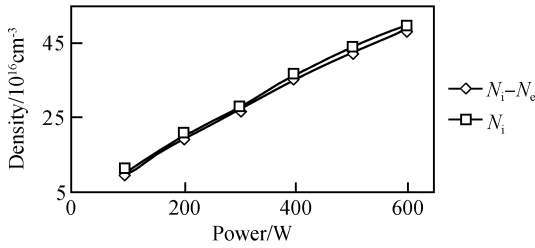


图 5 等离子体中的正离子与电子平均密度差值 ($N_i - N_e$) 及正离子平均密度 (N_i) 随功率变化趋势曲线

Fig.5 Density difference of positive ions and electron, and the density of positive ions under different powers

4 和图 6 的对比可以看出,正离子密度和电子密度相差一个数量级以上,等离子靠数量相对较少的电子来保持,主要是由于在相对较高的气压下,电子平均自由程很短,碰撞频繁,氩分子的离化能要大于电子附着时所需能量,即 $E_1 > E_2$, 其中:



在这样的条件下,等离子体的状态是依靠相对正离子较少的电子来维持,且大部分电子处于附着状态.

由于气体压力值相对较大,粒子平均自由程较短,粒子局部碰撞频繁,电子在局部区域电磁场中获得能量后,很快通过频繁碰撞将能量传递出去,等离子体源处于局部加热状态^[10,11].

如图 7 所示,通过实验数据可以看到,当对等离子体所加功率值较小时,如 $P = 100W$, 等离子体中电子温度空间分布处于非一致状态,在测试平面的中心处有一个峰值,而中心两边为对称下降趋势.随等离子体源外加功率值的增加,中心测量点的电子温度峰值相对两侧减小,峰值中心两边电子温度对称下降趋势变的平滑,最后当所加功率大于一定值时,在整个测量空间中,电子温度分布变得相当一

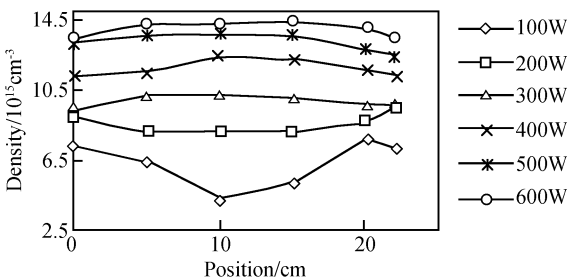


图 6 不同功率下,等离子体中的电子密度在不同位置的分布曲线

Fig.6 Electron density versus different position under different source powers

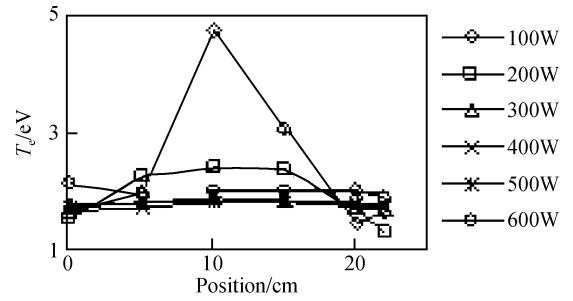


图 7 不同功率下,等离子体中的电子温度 (T_e) 在不同位置的分布曲线

Fig.7 Electron temperature (T_e) versus different positions under different source powers

致.由电子温度分布情况随外部所加功率变化的趋势经分析可知:当外加功率值较低时,等离子体中的电磁耦合能量主要集中于轴向,随轴向边缘辐射方向电磁耦合能量呈递减趋势,并且这种现象相当明显.从图 6 可以看出外加功率为 $100W$ 时,轴向附近电子密度较低且温度较高,这是由于在轴向附近相对较少的高能电子便可以保持等离子体的稳定性.随外加功率值变大,最终使得电子温度空间分布变得平缓一致.一个可能的原因是当外加功率变大时,在相同的耦合平面上电磁场分布情况差异变小,从而使能量耦合变得均匀;另一个可能的原因是当外加功率变大时,等离子体中带电粒子密度增加,由带电粒子所产生的附加场作用趋于明显,等离子体中的电子不仅受外部电磁场的作用,同时还受到等离子体内部附加场的作用,从而导致电子温度和密度空间分布趋于一致.

对比图 8 和图 7,等离子体悬浮电位的空间分布值和电子温度空间分布值的相比较可以看出: $|V_f| \propto T_e$, 悬浮电位和电子温度的近似关系,较好地符合了依据鞘层模型的计算结果: $V_f = \kappa T_e$, 其中 κ 为比例常数.图 9 与图 5 的比较看出:等离子体电位 V_p 的分布也较好地保持了与电子密度的一致性,在电子密度较大的地方,等离子体的电导率较大,从而对应的 V_p 值较小.

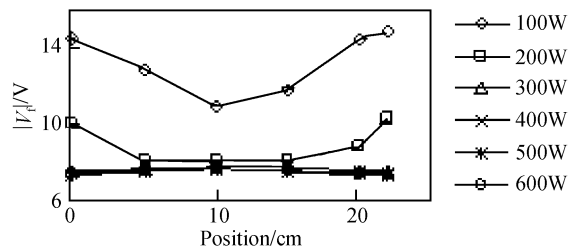


图 8 不同功率下,等离子体中悬浮电压 ($|V_f|$) 在不同位置的分布曲线

Fig.8 Absolute float voltage value ($|V_f|$) versus different position under different source powers

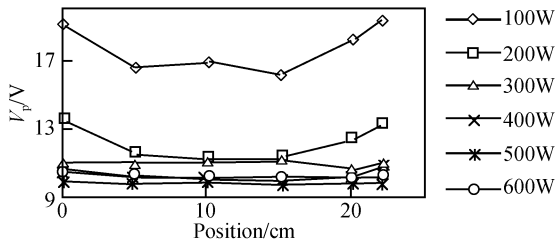


图9 不同功率下,等离子体电压在不同位置的分布曲线

Fig.9 Plasma voltage value versus different position under different source powers

4 总结

对于 200mm 硅片的 90nm 硅栅刻蚀工艺,在硅栅过刻蚀阶段,借助等离子体鞘层模型理论,通过实验对等离子体性能进行了初步的研究:功率的增加是等离子体密度增加的最直接的因素;在功率的增加过程中,功率耦合系数为一个较为稳定的值;在局部加热效应较强的等离子体中,大部分的电子处于附着状态,等离子体的状态依靠数量相对较少的电子来维持;在外加功率值较小的情况下,等离子体中耦合能量空间分布明显处于不一致状态,随外加功率值增加,这种情况明显改善,耦合能量空间分布趋于一致,通过电子温度很好地表征了这一现象.由实验数据也看出,等离子体电位和悬浮电位与电子温度及电子密度的关系较好地符合了模型理论.实验本身也存在着一定的局限性,实验中所用气体为氩气而不是实际工艺中的混合气体,这就忽略了很多种具有化学活性的粒子之间的相互作用,不能完全地对实际工艺条件进行表征,但是在不考虑活性粒子相互作用的条件下,基于基本物理性质的研究,特

别是通过等离子体性能的实验分析,对集成电路的干法刻蚀工艺具有进一步的指导意义.

参考文献

- [1] 2003 International Technology Roadmap for Semiconductor (Front End Processes)
- [2] Schneider T P, Dostalík W W, Springfield A D, et al. Langmuir probe studies of a helicon plasma system. *Plasma Sources Sci Technol*, 1999, 8:397
- [3] Tae K M. Kinetics of etching in inductively coupled plasmas. *Appl Surf Sci*, 2004, 228:245
- [4] Kawamura E, Vahedi V, Lieberman M A, et al. Ion energy distributions in RF sheaths: review, analysis and simulation. *Plasma Sources Sci Technol*, 1999, 8:45
- [5] Mahony C M O, Maguire P D, Graham W G. Electrical characterization of radio frequency discharges. *Plasma Sources Sci Technol*, 2005, 14:60
- [6] Zhang H B, Zhang D. *Plasma technology in electronic engineering*. Beijing: Science Press, 2002 (in Chinese) [张海波, 张丹. 等离子体电子工程学. 北京: 科学出版社, 2002]
- [7] Gaboriau F, Peignon M C, Cartry G, et al. Langmuir probe measurements in an inductively coupled plasma: Electron energy distribution functions in polymerizing fluorocarbon gases used for selective etching of SiO₂. *J Vac Sci Technol A*, 2002, 20(3):919
- [8] 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
- [9] Tachi S. Impact of plasma processing on integrated circuit technology migration from 1nm to 100nm and beyond. *J Vac Sci Technol A*, 2003, 21(5):131
- [10] Khater M H, Overzet L J. Chlorine plasma and polysilicon etch characterization in an inductively coupled plasma etch reactor. *Plasma Source Sci Technol*, 2004, 13:466
- [11] Efremov A M, Kim D P, Kim C I. Inductively coupled Cl₂/Ar plasma: experimental investigation and modeling. *J Vac Sci Technol A*, 2003, 21(4):1568

Effect of Power on Property of Plasma in Polysilicon Gate over Etch Process*

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

(Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: The relations between the parameters of plasma and those of RF power and gas flow were analyzed under the conditions of over etch step in semiconductor plasma etching, by Langmuir probe. The results show that as the RF power was increasing, the RF couple coefficient was comparatively stable. When in a local heating state, most of the electrons were in an adhesive status. The distribution of power couple space in the chamber can be improved as the RF power increases. These results can help to develop plasma dry etching.

Key words: plasma; sheath theory; dry etching; Langmuir probe

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

Article ID: 0253-4177(2007)10-1611-04

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (No. G200036504) and the National Natural Science Foundation of China (Nos. 60236010, 60376020)

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

Received 28 February 2007, revised manuscript received 2 June 2007

©2007 Chinese Institute of Electronics