

磁约束反应离子蚀刻装置的磁场优化*

敬小成 姚若河[†] 林玉树

(华南理工大学物理科学与技术学院, 广州 510640)

摘要: 应用有限元分析方法建立了多磁极约束磁增强型反应离子蚀刻装置内部的磁场分布模型. 通过研究磁极的配置及磁化方向的调整, 对蚀刻装置内部磁场的强度及其分布的均匀性进行了优化研究, 获得了在兼顾蚀刻速率和蚀刻均匀性的最优工艺要求.

关键词: 反应离子蚀刻; 磁约束; 等离子体装置

EEACC: 2550G; 3120E

中图分类号: TN305

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)S0-0422-04

1 引言

随着集成电路制造工艺的发展, 干法蚀刻以其能各向异性来实现细微图形的转换, 而成为亚微米及以下尺寸最主要的蚀刻方式^[1]. 气体压力、射频功率等是提高蚀刻速率的主要选择参数, 但其在提高蚀刻速率的同时, 往往会带来等离子体损伤、选择比等问题. 磁场的引入可以实现在低压高密度条件下进行等离子体蚀刻, 达到产能和器件性能较好的平衡^[1~4]. 由于器件内部的等离子体的强度及分布强烈地依赖外部磁场^[5,6], 从而使磁场成为干法蚀刻最主要的工艺参数之一, 也增大了器件结构设计对蚀刻的影响, 用计算机辅助设计方法可以在器件设计和工艺设计时选择最佳条件, 通过模拟蚀刻装置内磁场的分布, 从而选择不同的器件结构设计及最佳的工艺条件, 在保证蚀刻速率的同时, 使均匀性得到改善^[7~10].

多磁极约束磁增强型反应离子蚀刻装置是最常用的低压高密度等离子体蚀刻装置之一, 主要用于 SiO₂ 的干法蚀刻^[8], 其复杂的磁极结构及其磁极的磁化方向同蚀刻的均匀性密切相关. 本文应用有限元分析方法来模拟蚀刻腔体内的磁场分布, 研究不同的磁极配置及其磁化方向对蚀刻腔磁场分布的影响.

2 ANSYS 磁场模拟及结果分析

有限元法是一种数值分析算法, 它是将一个连续的求解域分割成彼此共用节点、互相联系的有限

个单元, 在单元体内假设近似解的模式, 用有限个结点上的未知参数表征单元的特性, 然后用适当的方法, 将各个单元的关系式组合成包含这些未知参数的代数方程, 得出各个结点的未知参数, 再利用插值函数求出近似解.

应用有限元法对磁体的磁场进行求解的一般过程为: 场域剖分, 单元分析, 总体合成, 处理边界条件, 解方程. 多磁极约束等离子蚀刻装置由永磁体提供其内部磁场. 首先将等离子蚀刻装置腔体分为有限数目的单元, 分别计算这些单元的磁场分布, 然后将这些单元整合起来, 形成了整个腔体内的磁场分布情况. 通常蚀刻装置为三维的圆柱形模型, 根据其柱高平面磁场分布的一致性, 将其简化为二维平面, 以简化运算. 对简单的几何实体, ANSYS 自身可以实现建模, 建立几何图形, 运用 OVERLAP 及 GLUE 命令进行平面间的合并, 得到所需实体. 其后确定材料的属性, 烧结钕铁硼永磁体(以 Nd₂Fe₁₄B 化合物为基体)的磁导率为 1.12, 顽矫磁力为 83600; 腔体铁材料磁导率为 4668.8; 腔体内部和外部磁导率为 1.0. 由于有限元模型中的任一单元都具有特定的属性, 对于单元属性的制定必须在网格划分前进行. 分析腔体内磁场的分布情况, 需要选择可以分析磁矢量势的分析单元, 单元 PLANE53 有 8 个节点, 每个节点最多有 4 个自由度, 适合分析的要求. 采用智能网格划分, 内部腔体取划分精度为 4, 永久磁铁取划分精度为 1, 腔体取划分精度为 2, 腔体外部取划分精度为 6. 磁场为“有源场”, 磁力线为闭合曲线, 由此给外边界施加平行边界条件.

实际应用中, 多磁极约束等离子体蚀刻装置可以设计成不同的磁极数目, 不同磁极数目其装置内

* 广东省重大科技专项基金资助项目(批准号: A1100501)

[†] 通信作者. Email: phrhyao@scut.edu.cn

2005-12-09 收到, 2005-12-29 定稿

磁场的分布会有所差异. 实验模拟了磁极数目分别为四、六、八三种磁极结构装置内不同磁场强度时的磁场分布. 并选取两种不同的磁化方式^[1]: 自由区域结构和 DRM(dipole-ring magnet)结构.

2.1 四磁极分析

图 1 为四磁极进行分析建模的结果, 其中箭头的方向为磁化的方向. 图 1(a)的磁化方式为自由区域磁化, 其磁化方向可以使腔体中心得到一定“自由区域”(无场区域), 然后磁场迅速增大, 磁场将等离子体束缚在此“自由区域”, 实现低压高密度等离子体蚀刻. 图 1(b)为 DRM 磁化, 可使腔体中心一定区域得到均匀的磁场, 然后磁场会迅速增大. 可见图 1(a)的自由区域和图 1(b)的均匀区域分别对两者的蚀刻均匀性起决定作用. 两种不同的磁化方向, 得到腔体内的磁场分布不同, 如图 2 所示.

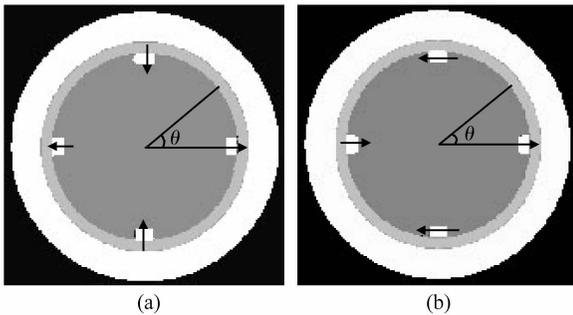


图 1 磁化方式的磁场分布 (a)自由区域结构;(b) DRM 结构

Fig.1 Distribution of magnetic field for mode of magnetization (a) Free field structure; (b) DRM structure

图 2 中横坐标表示腔体截面位置的半径, 原点为腔体的中心; 纵坐标表示截面上对应点的磁场强度. 图 2(a)中 1.1, 2.1, 3.1 分别对应图 1(a)的磁化方向且磁场依次增大, 1.2, 2.2, 3.2 分别对应图 1(b)的磁化方向且磁场依次增大. 图 2(b)是图 2(a)中磁场强度分别为 2.1 和 2.2, θ 在不同角度的磁场分布; 2.1, 1.1 为 $\theta=0^\circ$ 时的分布; 2.2, 1.2 为 $\theta=45^\circ$ 时的分布; 2.3, 1.3 为 $\theta=90^\circ$ 时的分布; 实线对应图 1(a)的磁化方向(即图 2(a)中的 2.1), 虚线对应图 1(b)的磁化方向(即图 2(a)中的 2.2).

由图 2(a)可知随着磁场的增大, 靠近腔体中心的均匀区域越小. 四磁极时采用图 1(a)的磁化方式比较难以实现中间的自由区域, 随着磁场的增大, 腔体中心向外的磁场分布越来越陡峭. 结合图 2(b)不同方向的磁场分布, 实线 1.2($\theta=45^\circ$)时, 磁场不太高时会先下降再升高, 这显然不利于约束等离子体. 使等离子体分布不仅出现沿腔体中心向周围分布不

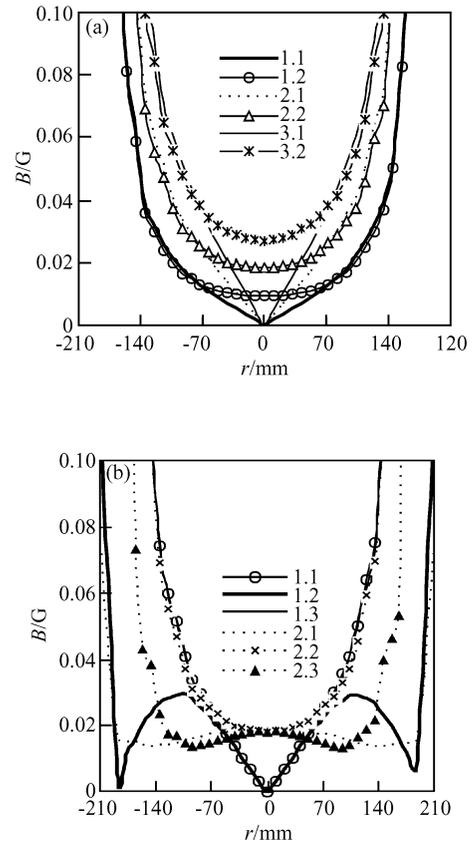


图 2 四磁极的磁场分布曲线 (a)不同磁场分布;(b)不同角度分布

Fig.2 Distributive curves of magnetic field of 4 magnets (a) Distribution of different magnetic fields; (b) Distribution of different angles

均, 在各个不同的角度也有差异. 增大磁场有利于改善不同角度的磁场差异, 却会使腔体中心的自由区域范围减小. 采用图 1(b)的磁化方式时, 增大磁场也使中间均匀区域减小. 但由图 2(b)虚线可知其不同角度磁场分布差异相对较小, 中间一段区域重合得很好, 而在 $\theta=45^\circ$, $\theta=90^\circ$ 时可以得到更宽的均匀区域. 模拟结果表明, 采用图 1(b)的磁化方式时, 四磁极小磁场强度($<0.01\text{T}$)运用时可望得到 150mm 及以下晶片的均匀蚀刻.

2.2 六磁极分析

与四磁极分析方法相同, 对六磁极进行分析, 得到腔体内不同的磁场分布如图 3 所示.

图 3(a)和(b)的分布分别对应图 2(a)和(b). 在图 3(b)中, 2.1, 1.1 为 $\theta=0^\circ$ 时的分布; 2.2, 1.2 为 $\theta=30^\circ$ 时的分布; 2.3, 1.3 为 $\theta=60^\circ$ 时的分布; 由图 3(a)可知随着磁场增大, 靠近腔体中心的均匀区域也就越小. 相比图 2(a)四磁极整体的磁场都有所增加, 这是由于每个磁极的磁化强度一样, 而磁极的

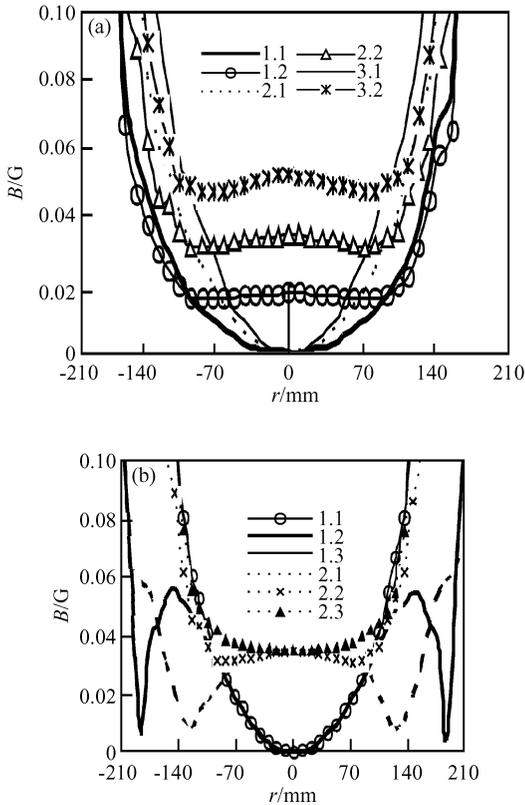


图 3 六磁极的磁场分布曲线 (a) 不同磁场分布; (b) 不同角度分布
 Fig. 3 Distributives curve of magnetic field of 6 magnets (a) Distribution of different magnetic fields; (b) Distribution of different angles

数目增加所引起的. 同时六磁极比四磁极可以得到范围更宽的均匀区域. 比较图 3(b)和图 2(b)可知, 自由区域磁化时, 六磁极在不同角度的磁场分布也有差异, 由实线 1.2($\theta = 30^\circ$)可知, 其磁场上升到一定值(比四磁极大很多)后才会出现一个下滑, 这样更有利于保证不同角度时等离子体密度约束的均匀. 而图 3(b)显示 DRM 磁化时, 对各个角度的磁场均匀性与四磁极基本相同. 两种磁化方式在实际运用时, 要达到的一定的均匀性, 磁场设置均不能太高. 而自由区域磁化方式还是不是很理想.

2.3 八磁极分析

同样为八磁极进行分析建模, 得到腔体内不同的磁场分布, 如图 4 所示. 图 4(a)和(b)的分布也分别对应图 2(a)和(b). 图 4(b)中, 2.1, 1.1 为 $\theta = 0^\circ$ 时的分布; 2.2, 1.2 为 $\theta = 22.5^\circ$ 时的分布; 2.3, 1.3 为 $\theta = 45^\circ$ 时的分布. 由图 4(a)可知, 八磁极时的腔体内磁场强度相比六磁极只有小的提高, 但均匀性却得到明显的改善. 其中间自由区域的范围较明显, 且由图 4(b)可知不同角度的影响进一步减小. 当采

用 DRM 磁化方式时, 不同方向的磁场在中间很宽的区域完全重合. 减小磁场, 可以使均匀区域更宽. 当设置磁场小于 0.02T 时, 有望实现 200mm 晶片的均匀蚀刻. 图 5 是图 4(b)中 DRM 磁化结构(对应图 4(a)中的 2.2 磁场)的 3D 表现形式, 其中 x 轴和 y 轴表示腔体所在的平面, 原点 ($x = 0, y = 0$) 对应腔体的中心, z 轴表示磁场强度, 由图 5 可见在腔体中间有很大范围(约 140mm)的均匀区域.

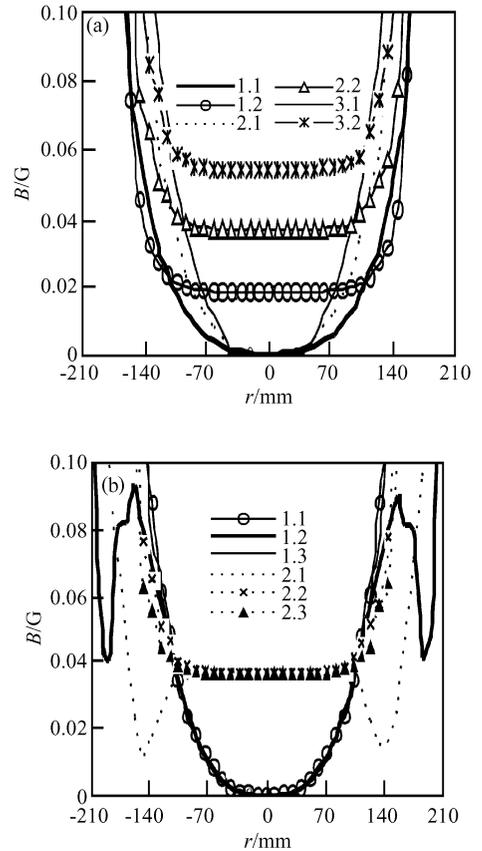


图 4 八磁极的磁场分布曲线 (a) 不同磁场分布; (b) 不同角度分布
 Fig. 4 Distributive curves of magnetic field of 8 magnets (a) Distribution of different magnetic fields; (b) Distribution of different angles

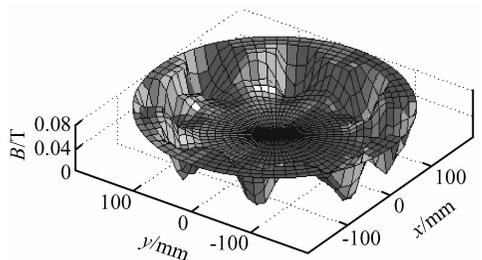


图 5 图 4(b) DRM 磁化结构的 3D 表现形式
 Fig. 5 There-dimensional representation of the DRM magnetization structure of Fig. 4(b)

3 结论

由以上对四、六、八磁极的分析可以得到：随着磁极数目的增加，腔体内磁场强度增大且增大的幅度逐渐减小，腔体内磁场均匀性逐渐变好。在实际生产中总希望通过提高磁场强度来提高腔体内等离子体密度，从而提高蚀刻速率，以达到一定的产能；但在给定磁极的蚀刻设备中，磁场的提高和均匀性总是相互矛盾。因此，通过对各种磁极条件下的磁场分布的模拟，综合兼顾各种因素，才能获得最优的工艺效能。

参考文献

- [1] Sekine M. Dielectric film etching in semiconductor device manufacturing: development of SiO₂ etching and the next generation plasma reactor. *Appl Surf Sci*, 2002, 192(1~4): 270
- [2] Puttock M. Problems and solutions for low pressure, high density, inductively coupled plasma dry etch applications. *Surf Coat Technol*, 1997, 97(1~3): 10
- [3] Samukawa S. Development of high-density plasma reactor for high-performance processing and future prospects. *Appl Surf Sci*, 2002, 192(1~4): 216
- [4] Takekida H, Nanbu K. Effect of multipolar magnetic field on the electron density in a plasma reactor. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2005, 33(2): 344
- [5] Yin Shengyi, Chen Guanghua, Wu Yueying, et al. MWE-CVD system with a new magnetic field and deposition of a-Si:H films. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2004, 25(5): 530 (in Chinese) [殷生毅, 陈光华, 吴越颖, 等. 一种新型磁场 MWE-CVD 和氢化非晶硅薄膜制备. *半导体学报*, 2004, 25(5): 530]
- [6] Zheng Yiyang. Plasma oscillation in purity GaAs. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2001, 22(10): 1329 (in Chinese) [郑一阳. 高纯 GaAs 中的等离子体振荡现象. *半导体学报*, 2001, 22(10): 1329]
- [7] Chung W Y, et al. Integrated simulation of equipment and topography for plasma etching in the DRM reactor. *Simulation of Semiconductor Processes and Devices*. *SISPAD*, 2000: 127
- [8] Economou D J. Modeling and simulation of plasma etching reactors for microelectronics. *Thin Solid Films*, 2000, 365(2): 348
- [9] Makabe M. Vertically integrated computer-aided design for device processing. *Appl Surf Sci*, 2002, 192(1~4): 176
- [10] Armaou A, Baker J, Christofides P D. Feedback control of plasma etching reactors for improved etching uniformity. *Chemical Engineering Science*, 2001, 56(4): 1467

Magnetic Field Optimization of a Reactive Ion Etching Device with Magnetic Containment*

Jing Xiaocheng, Yao Ruohe[†], and Lin Yushu

(School of Physics, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The FEM (finite element method) is used for building the magnetic field model in the MERIE (magnetically enhanced reactive ion etcher) apparatus. Investigation reveals that the value and distribution of the magnetic field can be optimized using proper configuration of the magnetic poles and adjust of the magnetization direction, then the best process can be achieved by improving dry etching uniformity as well as the etching rate.

Key words: reactive ion etching; magnetic containment; plasma reactor

EEACC: 2550G; 3120E

Article ID: 0253-4177(2006)S0-0422-04

* Project supported by the Important Science Research Program in Industry of Guangdong Province (No. A1100501)

[†] Corresponding author. Email: phrhyao@scut.edu.cn

Received 9 December 2005, revised manuscript received 29 December 2005

©2006 Chinese Institute of Electronics