

# 考虑对流效应和磁场的 CMP 模型及其数值模拟<sup>1)</sup>

郑秋云 李明军<sup>2)</sup> 舒 适

(湘潭大学数学与计算科学学院, 科学与工程计算与数值仿真湖南省重点实验室, 湘潭 411105)

**摘要** 推导了具有对流效应的化学机械抛光 (chemical mechanical polishing, CMP) 润滑模型, 研究各参数对压力场分布的影响. 在此模型基础上, 研究了磁流体抛光液在外界磁场作用下的润滑模型, 以及外磁场对抛光过程中压力场分布的影响. 数值结果表明, 具有对流效应的润滑模型的压力分布与已有经验结果更一致, 能更为有效地解释 CMP 过程中的负压现象; 进一步通过外界磁场的作用, 可以有效地改变磁流体 CMP 的压力分布, 这为实现对晶片的全局抛光提供了一种可供参考的新途径.

**关键词** 化学机械抛光, 润滑模型, 磁流体, (抛光液) 对流效应, 晶片

**中图分类号:** O361.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0459-1879(2010)06-1060-08

## 引 言

随着电子产业的发展壮大, 半导体产业快速发展, 集成电路技术也随之获得扩大和发展. 为了得到更好的集成电路, 就需要精微线规精确的多平层的晶片. 目前, 化学机械抛光 (chemical mechanical polishing, CMP) 工艺是唯一适于获取全局和局部高级别平面度的技术<sup>[1]</sup>, 但是人们对诸如抛光参数对平面度的影响、抛光垫-浆料-晶片之间的相互作用、浆料化学性质对各种参数的影响等比较基础的基础机理了解甚少<sup>[2]</sup>, 从而使得这一技术的进一步应用受到限制. 数值计算 CMP 的应力偶模型以及分子动力学模型可以克服实验和测试的局限, 在 CMP 机理研究中得到大量应用, 目前已成为一个活跃

的领域. 在整个 CMP 过程中, 机床的速度、下压载荷和抛光液以及抛光垫都会影响到材料的抛光率、表面平坦率及晶片的平整性. 抛光液是 CMP 技术的一个关键因素, 对其流动规律的深入研究有助于理解 CMP 的机理. Levert 等<sup>[3]</sup> 的实验指出, 在 CMP 过程中, 流体通常出现负压, 之后, Tichy 等<sup>[4]</sup> 提出一个一维模型来解释这一现象. 随后, 许多学者通过求解 Reynolds 方程给出了抛光液的膜厚与压力之间的关系. 并进一步分析了 CMP 过程中的接触与流动

系<sup>[5-7]</sup>; 在此基础上, 高太元等<sup>[8]</sup> 利用 Chebyshev 加速超松弛技术对有离心力项的润滑方程进行求解, 得到离心力对抛光液压力分布的影响. 另外, 一些学者还对 CMP 过程中的润滑特征进行了分析, 建立了三维晶片尺度的流体动力学模型, 分析压力、剪切率与速度的关系. 考虑了多尺度下的 CMP 过程<sup>[9-12]</sup>; 在文献 [13-14] 中还考虑了温度对 CMP 过程的影响.

铁磁流体是一种人工材料, 它是由纳米级的铁磁颗粒均匀地分布在溶液中形成的悬浮系统. 铁磁流体中的铁磁颗粒可以通过外界磁场的改变影响流体的流动性能以及流体本身的特性, 在现代工业中有着广泛的应用. 铁磁流体的性质和应用在很多文献中都有介绍, 其中, Rosensweigh<sup>[15]</sup> 介绍铁磁流体的一些流体动力学特性. Odenbach<sup>[16]</sup> 详细地考察了铁磁流体的磁黏性效应, Yamaguchi<sup>[17]</sup> 从工程流体力学的角度介绍了铁磁流体的一些模型及其应用.

文章内容安排如下, 第 1,2 两节主要是 CMP 数学模型的建立. 首先, 在一定的假设条件下, 通过对 Navier-Stokes 方程组简化, 建立具有对流效应的 CMP 数学模型, 并推导出其对应的润滑方程. 然后, 在此基础上, 建立铁磁流体作为抛光流的 CMP 数学模型, 并推导出相应的润滑方程. 第 3 节对上述两种

2009-07-24 收到第 1 稿, 2010-01-07 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金 (10771178), 国家自然科学基金委员会-中国工程物理研究院联合基金 (10676031), 国家“863”高技术惯性约束聚变专题, 教育部博士点基金 (20070530003) 和教育部重点项目 (208093) 资助.

2) E-mail: limingjun@xtu.edu.cn

CMP 模型进行了压力场的数值模拟. 且对数值结构进行了分析, 并与已有的相关结果进行了比较. 第 4 节给出了所做研究的结论.

### 1 具有对流效应的 CMP 润滑方程的推导

在 CMP 中, 记流体密度为  $\rho$ , 速度为  $\mathbf{u} = [u_1, u_2, u_3]^T$ , 压力为  $p$ , 黏性系数为  $\eta$ , 单位质量的质量力分布函数为  $\mathbf{F}$ . 那么, 考虑不可压缩抛光液流体满足的连续性方程为

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \tag{1}$$

运动方程为

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla p + \eta \Delta \mathbf{u} + \rho \mathbf{F} \tag{2}$$

假设抛光液流体在流动过程中满足下面的假设条件:

(1) CMP 过程中载荷完全由抛光液来承载, 晶片由于抛光液的隔离完全与抛光垫分离, 因为膜厚比较薄, 忽略质量力.

(2) 假设抛光液是牛顿黏性流体, 在 CMP 过程中是稳态不可压的, 流体的黏性系数是常数  $\eta$ .

(3) 满足无量纲润滑条件.

(4) 在  $z$  轴方向总压力梯度为 0,  $z$  轴方向的速度忽略不计.

在上述假设条件下, 此时抛光液流体满足的连续性方程为

$$\frac{\partial u_1}{\partial x} + \frac{\partial u_2}{\partial y} = 0 \tag{3}$$

运动方程为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial x} + \rho u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} + \rho u_2 \frac{\partial u_1}{\partial y} &= \eta \frac{\partial^2 u_1}{\partial z^2} \\ \frac{\partial p}{\partial y} + \rho u_1 \frac{\partial u_2}{\partial x} + \rho u_2 \frac{\partial u_2}{\partial y} &= \eta \frac{\partial^2 u_2}{\partial z^2} \\ \frac{\partial p}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

将式 (3),(4) 化为柱坐标形式得

$$\frac{\partial r w}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial \theta} = 0 \tag{5}$$

$$\frac{\partial p}{\partial r} + \rho w \frac{\partial w}{\partial r} + \rho \frac{u}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} - \rho \frac{u^2}{r} = \eta \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \tag{6a}$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \rho w \frac{\partial u}{\partial r} + \rho \frac{u}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} + \rho \frac{w u}{r} = \eta \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \tag{6b}$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = 0 \tag{6c}$$

其中  $w, u$  分别为抛光液的径向速度与周向速度.

由式 (6c) 可知, 压力  $p$  变化只与  $x, y$  有关, 即  $p = p(r, \theta)$ . 若记

$$F(w, u) = \rho w \frac{\partial w}{\partial r} + \rho \frac{u}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} - \rho \frac{u^2}{r}$$

$$G(w, u) = \rho w \frac{\partial u}{\partial r} + \rho \frac{u}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} + \rho \frac{w u}{r}$$

则对式 (6a), (6b) 分别沿  $z$  轴在  $[0, z]$  上求两次积分有

$$\left. \begin{aligned} w &= \frac{z^2}{2\eta} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{\eta} \int_0^z \int_0^z F(w, u) dz dz + \left. \begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial z} \Big|_{z=0} z + w_0 \\ u &= \frac{z^2}{2r\eta} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \frac{1}{\eta} \int_0^z \int_0^z G(w, u) dz dz + \left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=0} z + u_0 \end{aligned} \right\} \tag{7} \end{aligned} \right\}$$

其中,  $w_0, u_0$  分别为  $w, u$  在  $z = 0$  时的值.

利用 Taylor 展开

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial z} \Big|_{z=0} &\approx \frac{w_h - w_0}{h} - \frac{h}{2} \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \Big|_{z=0} \\ \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=0} &\approx \frac{u_h - u_0}{h} - \frac{h}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \Big|_{z=0} \end{aligned} \right\} \tag{8}$$

其中,  $w_h, u_h$  分别为  $w, u$  在  $z = h$  时的值,  $h$  为膜厚.

注意到式 (8) 中的  $\frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \Big|_{z=0}$  和  $\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \Big|_{z=0}$  可由运动方程 (6a),(6b) 给出. 所以将式 (8) 代入式 (7), 然后再将式 (7) 代入连续方程 (5), 则有

$$\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial r} \left[ r \left( \frac{z^2 - hz}{2\eta} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{w_h - w_0}{h} z + w_0 + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \frac{1}{\eta} \int_0^z \int_0^z F(w, u) dz dz - \frac{hz}{2\eta} F(w_0, u_0) \right) \right] + \\ &\quad \frac{\partial}{\partial \theta} \left[ \frac{z^2 - hz}{2r\eta} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{u_h - u_0}{h} z + u_0 + \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{\eta} \int_0^z \int_0^z G(w, u) dz dz - \frac{hz}{2\eta} G(w_0, u_0) \right] = 0 \end{aligned}$$

上式沿  $z$  轴 ( $z \in [0, h]$ ) 积分, 对积分项用中矩形公式近似, 就可得到具有对流效应的 CMP 润滑方程

$$\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial r} \left( r h^3 \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) = \\ &\quad 6\eta \frac{\partial}{\partial r} [(w_h + w_0)h] + 6\eta \frac{\partial}{\partial \theta} [(u_h + u_0)h] + \\ &\quad \frac{\partial}{\partial r} [r h^3 (F(w_h, u_h) - 2F(w_0, u_0))] + \\ &\quad \frac{\partial}{\partial \theta} [h^3 (G(w_h, u_h) - 2G(w_0, u_0))] \tag{9} \end{aligned}$$

若记晶片中心处的膜厚为  $h_{piv}$ , 晶片的转角和倾角分别为  $\alpha, \beta$ , 则在坐标  $(r, \theta)$  处的膜厚  $h$  满足

$$h = h_{piv} - r \sin \alpha \cos \theta - r \sin \beta \sin \theta \quad (10)$$

抛光液在晶片与抛光垫之间的速度满足如下边界条件

$$\left. \begin{aligned} u &= (r + d \cos \theta) \omega_p \\ w &= d \sin \theta \omega_p, \quad z = 0 \\ u &= r \omega_w \\ w &= 0, \quad z = h \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

其中,  $\omega_w$  为晶片的转速,  $\omega_p$  为抛光垫的转速,  $d$  为抛光垫中心到晶片中心的距离.

## 2 具有对流效应的磁流体 CMP 润滑方程的推导

在上述具有对流效应的 CMP 模型中, 假设抛光液中的磨粒是顺磁材料, 且磁化过程是线性的, 磁化强度与磁场强度成正比. 这时在 CMP 过程中, 铁磁流体抛光液应满足下面几个基本方程:

### (1) 磁化强度关系

磁感应强度  $\mathbf{B} = [B_1, B_2, B_3]^T$ , 磁化强度  $\mathbf{M} = [M_1, M_2, M_3]^T$  和磁场强度  $\mathbf{H} = [H_1, H_2, H_3]^T$  之间的关系

$$\mathbf{M} = \chi \mathbf{H}$$

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) = \mu_0(1 + \chi)\mathbf{H} = \mu \mathbf{H}$$

其中,  $\chi$  为磁化率,  $\mu_0$  为真空磁导率,  $\mu$  为磁介质的绝对磁导率.

### (2) 连续方程

$$\frac{\partial u_1}{\partial x} + \frac{\partial u_2}{\partial y} = 0 \quad (12)$$

### (3) 运动方程

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial p^*}{\partial x} + \rho u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} + \rho u_2 \frac{\partial u_1}{\partial y} &= \eta \frac{\partial^2 u_1}{\partial z^2} + \mu_0 \left( M_1 \frac{\partial H_1}{\partial x} + M_2 \frac{\partial H_1}{\partial y} + M_1 \frac{\partial H_1}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial p^*}{\partial y} + \rho u_1 \frac{\partial u_2}{\partial x} + \rho u_2 \frac{\partial u_2}{\partial y} &= \eta \frac{\partial^2 u_2}{\partial z^2} + \mu_0 \left( M_1 \frac{\partial H_2}{\partial x} + M_2 \frac{\partial H_2}{\partial y} + M_1 \frac{\partial H_2}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial p^*}{\partial z} &= \mu_0 \left( M_1 \frac{\partial H_3}{\partial x} + M_2 \frac{\partial H_3}{\partial y} + M_1 \frac{\partial H_3}{\partial z} \right) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

其中,  $p^* = p + \mu_0 H^2 / 2$ .

### (4) Maxwell 方程组

进一步, 假定磁流体抛光液是不导电的, 这时 Maxwell 方程组为

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{0}$$

如果还假定磁场强度的变化只与  $x, y$  有关, 即  $\mathbf{H}(x, y)$ , 则运动方程简化为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial p^*}{\partial x} + \rho \left( u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} + u_2 \frac{\partial u_1}{\partial y} \right) &= \eta \frac{\partial^2 u_1}{\partial z^2} + \mu_0 \left( M_1 \frac{\partial H_1}{\partial x} + M_2 \frac{\partial H_1}{\partial y} \right) \\ \frac{\partial p^*}{\partial y} + \rho \left( u_1 \frac{\partial u_2}{\partial x} + u_2 \frac{\partial u_2}{\partial y} \right) &= \eta \frac{\partial^2 u_2}{\partial z^2} + \mu_0 \left( M_1 \frac{\partial H_2}{\partial x} + M_2 \frac{\partial H_2}{\partial y} \right) \\ \frac{\partial p^*}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

若用  $H_r, H_\theta$  分别表示磁场强度  $\mathbf{H}$  在  $r, \theta$  方向的分量,  $M_r, M_\theta$  表示磁化强度  $\mathbf{M}$  在  $r, \theta$  方向的分量, 则式 (12), (14) 的柱坐标形式为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial r w}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial \theta} &= 0 \\ \frac{\partial p^*}{\partial r} + \rho \left( w \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{u}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} - \frac{u^2}{r} \right) &= \eta \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + \mu_0 \left( M_r \frac{\partial H_r}{\partial r} + \frac{M_\theta}{r} \frac{\partial H_r}{\partial \theta} - \frac{M_\theta H_\theta}{r} \right) \\ \frac{1}{r} \frac{\partial p^*}{\partial \theta} + \rho \left( w \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{w u}{r} \right) &= \eta \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \mu_0 \left( M_r \frac{\partial H_\theta}{\partial r} + \frac{M_\theta}{r} \frac{\partial H_\theta}{\partial \theta} + \frac{M_r H_\theta}{r} \right) \\ \frac{\partial p^*}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

由式 (15) 的第 4 个方程可知: 压力  $p^*$  的变化只与  $r, \theta$  有关, 而与  $z$  无关, 即  $p^* = p^*(r, \theta)$ , 类似具有对流效应的 CMP 模型的推导, 记

$$\begin{aligned} F'(\mathbf{M}, \mathbf{H}) &= \mu_0 \left( M_r \frac{\partial H_r}{\partial r} + \frac{M_\theta}{r} \frac{\partial H_r}{\partial \theta} - \frac{M_\theta H_\theta}{r} \right) \\ G'(\mathbf{M}, \mathbf{H}) &= \mu_0 \left( M_r \frac{\partial H_\theta}{\partial r} + \frac{M_\theta}{r} \frac{\partial H_\theta}{\partial \theta} + \frac{M_r H_\theta}{r} \right) \end{aligned}$$

则由式 (15) 可得

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \left( \frac{z^2 - hz}{2\eta} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{w_h - w_0}{h} z + w_0 + \right. \right. \\ & \quad \left. \frac{1}{\eta} \int_0^z \int_0^z F(w, u) - F'(M, H) dz dz - \right. \\ & \quad \left. \frac{hz}{2\eta} (F(w_0, u_0) - F'(M, H)) \right) \Big] + \\ & \quad \frac{\partial}{\partial \theta} \left[ \frac{z^2 - hz}{2r\eta} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{u_h - u_0}{h} z + u_0 + \right. \\ & \quad \left. \frac{1}{\eta} \int_0^z \int_0^z G(w, u) - G'(M, H) dz dz - \right. \\ & \quad \left. \frac{hz}{2\eta} (G(w_0, u_0) - G'(M, H)) \right] = 0 \end{aligned}$$

上式对积分项采用中矩形公式, 就得到磁流体 CMP 的润滑方程

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial r} \left( rh^3 \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( rh^3 \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) = \\ & 6\eta \frac{\partial}{\partial r} [(w_h + w_0)h] + 6\eta \frac{\partial}{\partial \theta} [(u_h + u_0)h] + \\ & \frac{\partial}{\partial r} [rh^3 (F(w_h, u_h) - 2F(w_0, u_0))] + \\ & \frac{\partial}{\partial \theta} [h^3 (G(w_h, u_h) - 2G(w_0, u_0))] - \\ & \frac{\partial}{\partial r} [rh^3 F'(M, H)] - \frac{\partial}{\partial \theta} [h^3 G'(M, H)] \end{aligned} \tag{16}$$

磁流体 CMP 模型的边界条件和膜厚方程与第 2.1 节中的一样, 分别满足式 (11), (10). 外磁场条件近似为均匀磁场, 具体值将在数值实验中给出.

### 3 数值实验及其实验结果分析

下面根据具体的边界条件和膜厚方程进行数值实验, 通过数值结果来分析第 1.1 和 1.2 节中两种模型抛光液的流动规律及压力分布.

两种 CMP 模型的标准试验参数如下: 晶片转速  $\omega_w = 50 \text{ r/min}$ , 抛光垫转速  $\omega_p = 100 \text{ r/min}$ , 中心膜厚  $h_{\text{piv}} = 80 \mu\text{m}$ , 转角  $\alpha = 0.02^\circ$ , 倾角  $\beta = 0.018^\circ$ , 黏性系数  $\eta = 0.00214 \text{ kg}\cdot\text{m/s}$ , 外界压力  $p_0 = 101 \text{ kPa}$ , 晶片与抛光垫之间的中心距  $d = 150 \text{ mm}$ , 晶片半径  $r_0 = 50 \text{ mm}$ . 为减小数值误差, 首先对两种 CMP 模型润滑方程进行无量纲化, 对无量纲化后方程其微分离散都采用中心差分格式, 对方程的迭代求解都采用 Chebyshev 加速超松弛技术.

#### 3.1 具有对流效应的 CMP 模型的数值结果与分析

无量纲半径仍记为  $r$ , 一般润滑方程, 带离心力的润滑方程以及具有对流效应的 CMP (模型一) 的

润滑方程求解得到的二维无量纲压力分布图如图 1~图 3.

(1) 比较图 3 与图 1 可知, 因在模型中考虑增加对流项效应, 所以会显著地改变压力的分布, 而且对流项中含有的离心力项, 所以作用会把高压区略微推向中间, 这和只考虑离心力的图 2 类似. 并且从图 3 中可看出, 图 3 高压区的最高值会比图 1 高压区的最高值大, 这是因为在模型中考虑的对流项含有离心力项, 这也和只考虑离心力的图 2 类似.

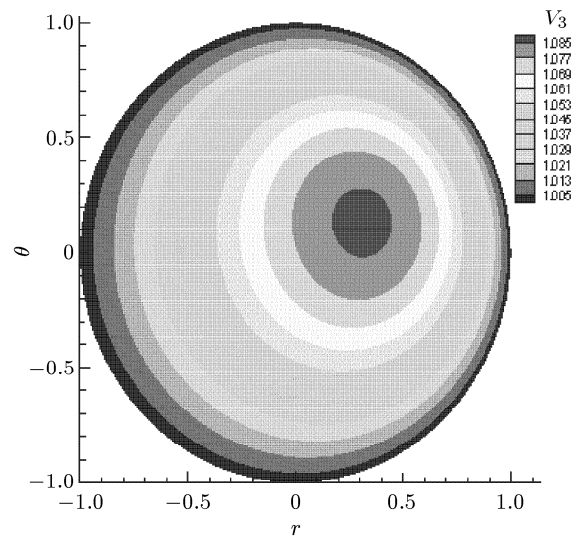


图 1 一般情况的无量纲二维压力分布图

Fig.1 2-D dimensionless pressure distributions in normal case

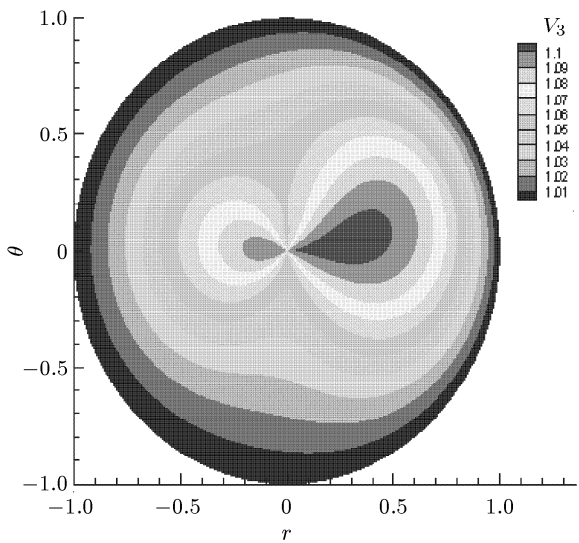


图 2 考虑离心力的无量纲二维压力分布图

Fig.2 2-D dimensionless pressure distributions with centrifugal force

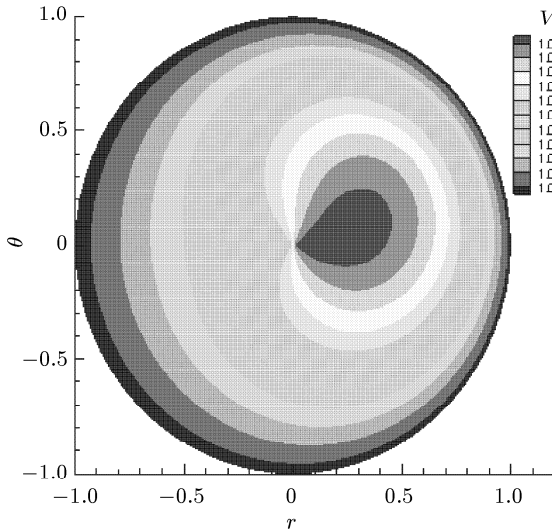


图 3 模型一的无量纲二维压力分布图

Fig.3 2-D dimensionless pressure distributions in model one

(2) 比较图 3 与图 2, 图 3 高压区的最大值比图 2 高压区的最大值要小. 这是因为图 2 只考虑离心力对压力的影响, 而图 3 的对流项中除了离心力外, 还考虑了其他的项, 如  $\rho\left(w\frac{\partial w}{\partial r} + \frac{u}{r}\frac{\partial w}{\partial \theta}\right)$ ,  $\rho\left(w\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r}\frac{\partial u}{\partial \theta}\right)$ , 对流体压力的影响, 从数值模拟的图形上也可看出, 这些多出的项会削弱离心力的影响.

(3) 综合比较图 1, 图 2, 图 3, 图 3 的压力分布介于图 1 与图 2 之间, 这也与各自相应的润滑方程相符合, 而且在图 3 的高压区对面会有一个相对的低压区, 这与一般的实验结果相吻合.

图 4 考察了模型一的中心膜厚  $h_{piv}$  对  $\bar{W}_f$ ,  $\bar{W}_x$ ,  $\bar{W}_y$  的影响, 从图中可以看出当中心膜厚逐渐增大的时候, 无量纲载荷以及转矩的绝对值都逐渐减小. 特别是当中心膜厚大于  $100\mu\text{m}$  时, 无量纲载荷趋于 1, 无量纲转矩都趋于 0. 这与一般的润滑方程计算的结果一致.

图 5 和图 6 分别给出了转角和倾角对无量纲载荷和转矩的影响. 无量纲载荷随转角的绝对值增大而增加, 特别地, 当转角大于  $0^\circ$  时, 增加比较快, 且并不关于  $0^\circ$  转角对称, 转矩的变化趋势基本符合一般规律. 值得注意的是, 在小于  $0^\circ$  时, 倾角  $\beta$  增加对  $\bar{W}_x$  的影响是直线下降, 但随着倾角的变大也逐渐增大, 这与已有润滑方程得到的结果有区别 (参见文献 [8]), 这主要是与流体流动的方向有关. 倾角角度对无量纲载荷以及  $\bar{W}_y$  的影响也基本符合一般规律.

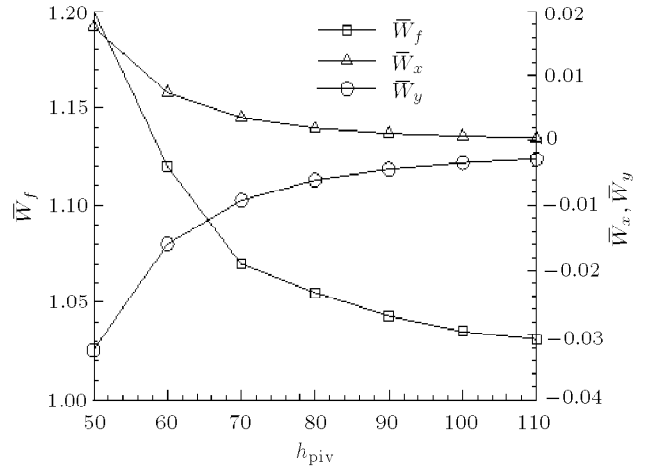


图 4 模型一的中心膜厚  $h_{piv}$  对  $\bar{W}_f, \bar{W}_x, \bar{W}_y$  的影响

Fig.4 Effects of standard nominal clearance  $h_{piv}$  on

$\bar{W}_f, \bar{W}_x, \bar{W}_y$  in model one

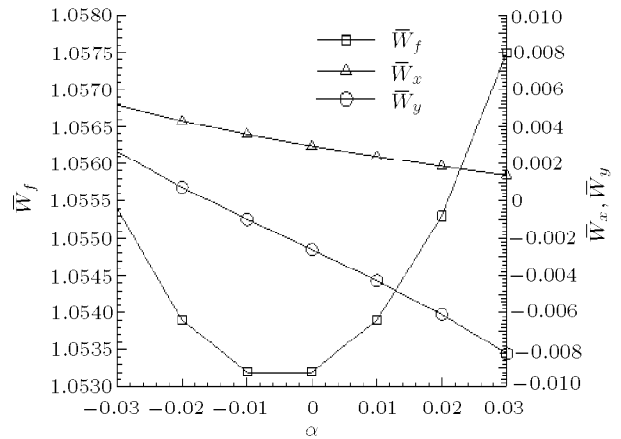


图 5 模型一的转角  $\alpha$  对  $\bar{W}_f, \bar{W}_x, \bar{W}_y$  的影响

Fig.5 Effects of rolling angle  $\alpha$  on  $\bar{W}_f, \bar{W}_x, \bar{W}_y$  in model one

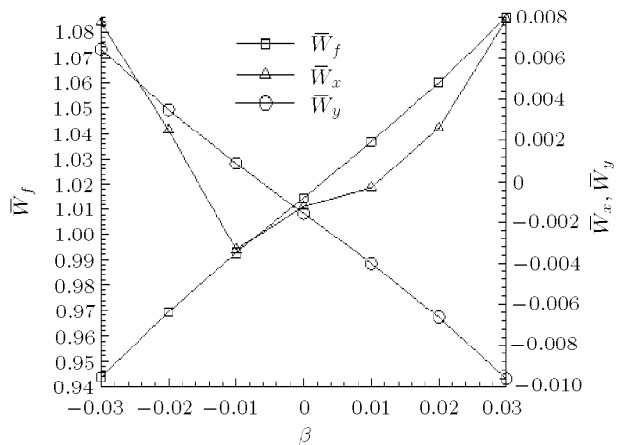


图 6 模型一的倾角  $\beta$  对  $\bar{W}_f, \bar{W}_x, \bar{W}_y$  的影响

Fig.6 Effects of pitch angle  $\beta$  on  $\bar{W}_f, \bar{W}_x, \bar{W}_y$  in model one

### 3.2 具有对流效应的磁流体 CMP 模型的数值结果与分析

在第一个模型的基础上，数值研究抛光液为铁磁流体且具有对流效应的 CMP 模型 (模型二). 加入的外磁场可以认为是由两块大的平行磁铁激发的，

其数值近似认为是线性的. 在数值计算中，外磁场不完全满足 Maxwell 方程. 图 7 给出不同磁场强度  $H$  的无量纲二维压力分布. 绝对磁导率  $\mu$  与密度成正比，其大小为  $|\mu| = |\rho|$ . 其他计算参数与第一个模型所给参数相同.

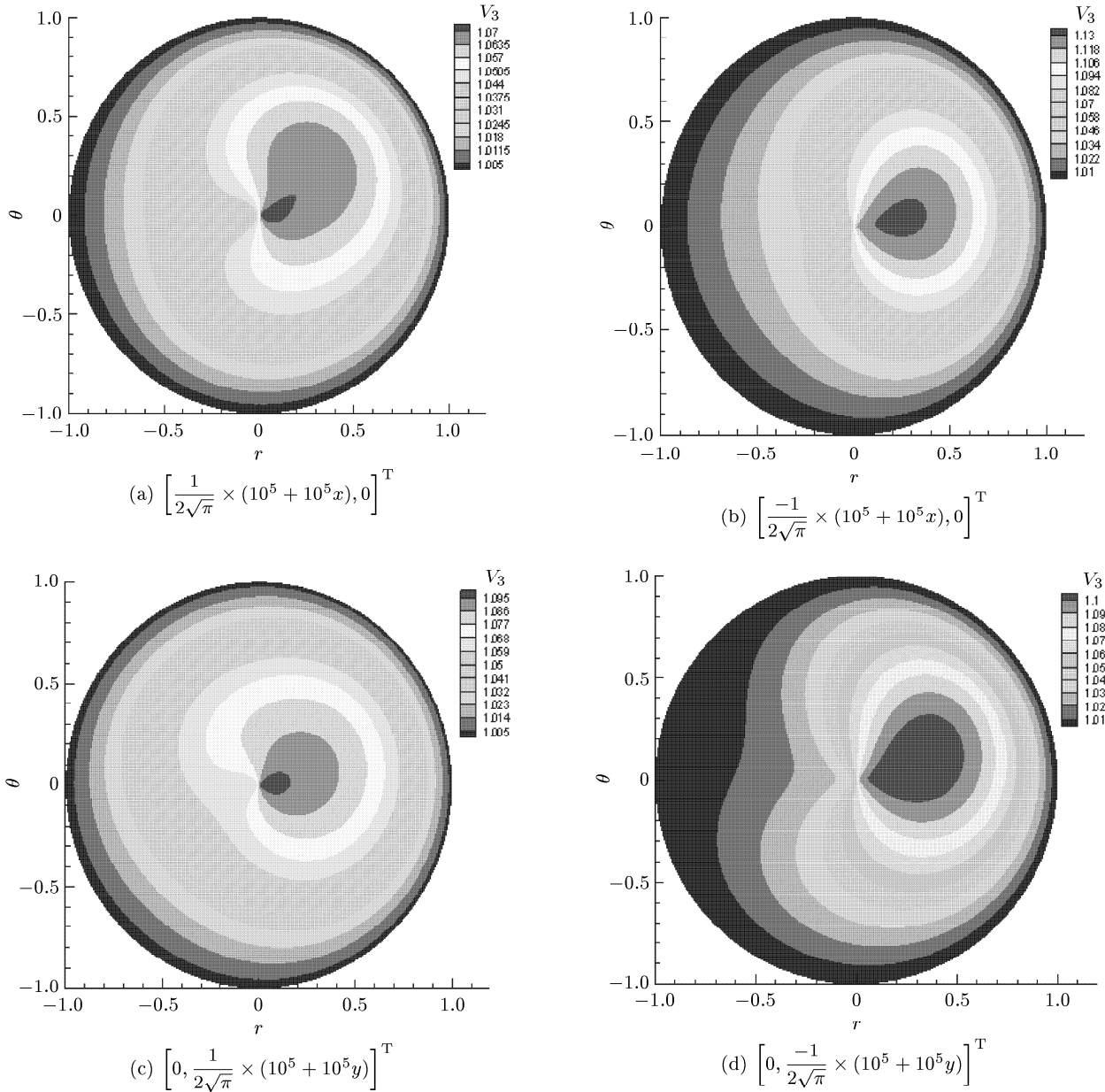


图 7 模型二不同磁场的无量纲二维压力分布图

Fig.7 2-D dimensionless pressure distributions with magnetic field in model two

图 7(a) 和图 7(b) 与图 3 比较可知，当磁场强度  $H$  与  $x$  轴的正方向平行时，磁场的加入会使得压力分布更加均衡，且会降低高压区的最大值，改变压力的分布，使得压力场的图形向上扭曲；当磁场强度  $H$  与  $x$  轴的负方向平行时，磁场的加入会使得高压区的最大值更大，但对压力场的图形变化不大。

图 7(c), 图 7(d) 与图 3 比较可知，当磁场强度  $H$  与  $y$  轴的正方向平行时，磁场的加入会使得压力分布更加均衡，且会降低高压区的最大值，压力场的图形向左扭曲；当磁场强度  $H$  与  $y$  轴的负方向平行时，磁场的加入会使得高压区的最大值增大，压力场的图形向右扭曲。

综合所述,在磁流体 CMP 过程中加入外磁场,可以通过对外磁场的调节,改变磁流体 CMP 过程中的流体流动性态,从而合理改变其压力的分布大小及均匀性.这样使得在 CMP 过程中的压力分布更加均匀合理,增加晶片的抛光质量.

#### 4 结 论

本文推导出具有对流效应的 CMP 润滑方程,且在此基础上研究磁流体 CMP 模型,并推导出磁流体抛光液的 CMP 润滑方程.获得如下数值结果:

(1) 考虑 CMP 过程中抛光液的对流效应,所得数值结果与实际情况更符合,能更真实反映 CMP 过程中流体的流动性能和压力分布,有助于更进一步对 CMP 机理的认识.

(2) 数值结果表明,当外界磁场对磁流体产生的开尔文力与流体产生的压力数量级相差不大的时候,可以通过对磁场的调节改变流体压力的分布大小,从而使得 CMP 中晶片的抛光更加平整迅速.这对开发新的 CMP 技术有一定的指导作用.

本文讨论的磁流体 CMP 模型中仅考虑了一种近似的磁场,如何分析真实磁场对 CMP 的影响还需进一步加以研究.

#### 参 考 文 献

- 张朝辉, 雒建斌, 温诗铸. 化学机械抛光流动性能分析. 润滑与密封, 2004, 4: 31-33 (Zhang Chaohui, Luo Jianbin, Wen Shizhu. Analysis on flow properties of chemical mechanical polishing process. *Lubrication Engineering*, 2004, 4: 31-33 (in Chinese))
- 雷红, 雒建斌, 马俊杰. 化学机械抛光 (CMP) 技术的发展、应用及存在的问题. 润滑与密封, 2002, 4: 73-76 (Lei Hong, Luo Jianbin, Ma Junjie. Advances and problems on chemical mechanical polishing. *Lubrication Engineering*, 2002, 4: 73-76 (in Chinese))
- Lever JA, Mess FM, Salant RF. Mechanisms of chemical-mechanical polishing of SiO<sub>2</sub> dielectric on integrated circuits. *Tribol Trans*, 1998, 41(4): 593-599
- Tichy J, Lever JA, Shan L, et al. Contact mechanics and lubrication hydrodynamics of chemical mechanical polishing. *J Electrochem Soc*, 1999, 146(4): 1523-1528
- Trinkanth Sundararajan, Dipto G. Thakurta, Donald W. Schwendeman, et al. Two-dimensional wafer-scale chemical mechanical planarization models based on lubrication theory and mass transport. *J Electrochem Soc*, 1999, 146(2): 761-766
- Zhang Chaohui, Luo Jianbin, Wen Shizhu. Multigrid technique incorporated algorithm for CMP lubrication equations. *Progress in Natural Science*, 2004, 14(4): 369-372
- 张朝辉, 杜永平, 雒建斌. CMP 中接触与流动关系的分析. 科学通报, 2006, 51(6): 1961-1965 (Zhang Chaohui, Du Yongping, Luo Jianbin. Analysis of relationships between contact and flow in CMP process. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(6): 1961-1965 (in Chinese))
- 高太元, 李明军, 胡利民等. CMP 流动的数值模拟及离心力影响分析. 力学学报, 2008, 40 (6): 729-734 (Gao Taiyuan, Li Mingjun, Hu Limin, et al. Hydrodynamic simulation and the effect of centrifugal force for chemical mechanical polishing process. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2008, 40(6): 729-734 (in Chinese))
- Zhou Chunhong, Shan Lei, Hiaht J. Robert, et al. Fluid pressure and its effects on chemical mechanical polishing. *Wear*, 2002, 253: 430-437
- Park Sang-Shin, Cho Chul-Ho, Ahn Yoomin. Hydrodynamic analysis of chemical mechanical polishing process. *Tribol Inter*, 2000, 33: 723-730
- Cho Chul-Ho, Park Sang-Shin, Ahn Yoomin. Three-dimensional wafer scale hydrodynamic modeling for chemical mechanical polishing. *Thin Solid Films*, 2001, 389: 254-260
- Seok Jongwon, Sukam Cyriaque P, Kim Andrew T, et al. Multiscale material removal modeling of chemical mechanical polishing. *Wear*, 2003, 254: 307-320
- Kwon Daechee, Kim Hyoungjae, Jeong Haedo. Heat and its effects to chemical mechanical polishing. *Journal of Material Processing Technology*, 2006, 178: 82-87
- Kim Nam-Hoon, Ko Pil-Ju, Choi Gwon-Woo, et al. Chemical mechanical polishing (CMP) mechanisms of thermal SiO<sub>2</sub> film after high-temperature pad conditioning. *Thin Solid Films*, 2006, 504: 166-169
- Rosensweig RE. Ferrohydrodynamics. New York: Cambridge University Press, 1985
- Odenbach S. Magnetoviscous Effects in Ferrofluids. Tokyo: Springer, 2002
- Yamaguchi H. Engineering Fluid Mechanics. Netherlands: Springer, 2008

(责任编辑: 刘俊丽)

## THE MODELS BY CONSIDERING MAGNETIC FIELD AND CONVECTION OF CHEMICAL MECHANICAL POLISHING AND THEIR NUMERICAL SIMULATIONS<sup>1)</sup>

Zheng Qiuyun Li Mingjun<sup>2)</sup> Shu Shi

(*School of Mathematics and Computational Science, Xiangtan University, Hunan Key Laboratory for Computation and Simulation in Science and Engineering, Xiangtan 411105, China*)

**Abstract** Chemical mechanical polishing (CMP) is one of the most effective technologies in modern ultra-precision processing. In this paper, firstly, we deduce the model of CMP with convection effects, and research the pressure distribution by changing different parameters. Then, we consider the model of CMP under the magnetic fluid slurry and external magnetic field, and research the pressure distribution in the external magnetic field. The numerical results show that pressure distribution of the model with convection is more consistent with the known empirical results, and more efficiently explain the sub-ambient pressure in the CMP. The results also show that we can efficiently change the distribution of pressure by external magnetic field, so these technologies can provide a new referenced way for the wafer's global planarization.

**Key words** chemical mechanical polishing, lubrication models, magnetic fluid, convection effects in slurry, wafer

---

Received 24 July 2009, revised 7 January 2010.

1) The project supported by the National Natural Science Foundation of China (10771178), NSAF: contract/grant (10676031), the National High-Tech (863) Program about ICF, the Ph. D. Programs Foundation of Ministry of Education of China (20070530003) and Ministry of Education Key Project (208093).

2) E-mail: limingjun@xtu.edu.cn