

化学机械抛光中纳米颗粒的作用分析^{*}

张朝辉^{1)†} 雒建斌²⁾ 温诗铸²⁾

¹⁾ (北京交通大学机电学院, 100044)

²⁾ (清华大学摩擦学国家重点实验室, 100084)

(2004 年 9 月 16 日收到, 2004 年 10 月 18 日收到修改稿)

化学机械抛光(chemical mechanical polishing, CMP)是用于获取原子级平面度的有效手段. 目前, CMP 的抛光液通常使用纳米级颗粒来加速切除和优化抛光质量. 这类流体的流变性能必须考虑微极性效应的影响. 对考虑微极性效应的运动方程的求解, 有助于了解 CMP 的作用机理. 数值模拟表明, 微极性将提高抛光液的等效黏度从而在一定程度上提高其承载能力, 加速材料去除. 这在低节距或低转速下尤为明显, 体现出其具有尺寸依赖性. 通过改变抛光液中粒子的微极性, 用实验研究了微极性效应对 CMP 中材料去除速率的影响, 证明了分析的合理性.

关键词: 化学机械抛光, 微极流体, 抛光液, 流变特性, 材料去除速率

PACC: 4790, 7420D, 6740B, 5190

1. 引 言

现代芯片制造领域中有两个相互矛盾的趋势: 被加工件的尺寸越来越大, 而所需的加工精度要求却越来越高. 比如下一代集成电路中的晶片要求直径大于 300mm 而表面粗糙度和波纹度要小于几个埃. 这样, 有必要对材料进行分子级的去除, 化学机械抛光(chemical mechanical polishing, CMP)是一种合适的技术^[1,2]. 另外, 要获取低介电常数的材料来取代 SiO₂ 材料也需要 CMP 技术^[3,4]实现表面抛光. 因应技术的需求, CMP 技术现在已经发展为制造过程中的一个完整手段^[5].

经过科学家与工程师们的不懈努力, 在 CMP 应用研究方面取得了许多重大进展, 目前已被认为接近其极限. 然而在很大程度上, CMP 仍然是一门黑箱技术: 它依靠经验或半经验的数据来获取良好的抛光效果. 对于其机理了解的缺乏制约了 CMP 技术的进一步应用.

抛光液是 CMP 的一个关键因素, 对其流动规律的了解将有助于理解 CMP 的机理. Levert 等^[6]的实验发现了负压的存在, Tichy 等^[7]提出了一个初步的二维接触模型来解释 Levert 等的结果. 其研究忽略

了无直接接触抛光的情形. 然而, 在某些特殊场合, 如进行纳米级超精抛光, 或者在通常抛光的最后步骤中, 流动效应将完全平衡外加的载荷. Runnels 等^[8]就通过求解 Navier-Stokes 方程讨论了润滑性能和磨损率问题. Sundararajan 等^[9]求解 Reynolds 方程给出了抛光液的膜厚和压力关系. Cho 和 Park^[10,11]建立了一流动模型来描述硅片 CMP 过程. 张等建立了三维流动模型^[12], 并且研究了 CMP 中液体的流动规律^[13].

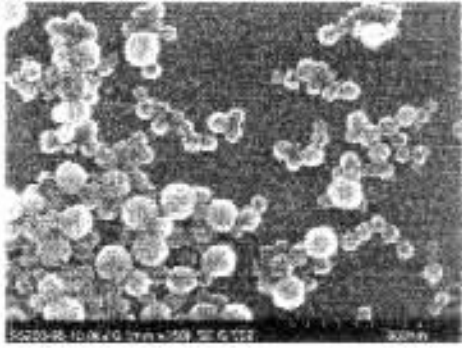
抛光液的流变性能对去除率和抛光质量有重要作用^[14]. 大多数的抛光液都含有固体粒子, 如胶体 SiO₂ 抛光液, 来达到高的平整度^[2,15]. 这样改变了其流变性能, 不能再视为牛顿流体^[16]. 由于 SiO₂ 粒子为圆形, 如图 1 所示(SiO₂ 粒子的平均粒径为 30nm). 用考虑微结构的流体来表征这种流体是一个较好的选择^[17,18]. 本文考察抛光液中纳米级粒子的微极性对流动性能的影响, 数值模拟结果表明微极性将增加等效黏度从而增强承载能力, 并体现出尺寸依赖性.

2. 数学模型

考虑抛光液中纳米粒子的微极性, 其流动方程

^{*} 国家自然科学基金(批准号 50390060)资助的课题.

[†] E-mail: zhangchaohui@tsinghua.org.cn

图 1 纳米 SiO₂ 图像

为

$$\begin{aligned} & \nabla \cdot \left(\frac{\varphi(N, l, h) h^3}{12\eta} \nabla p \right) \\ & = \nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_2}{2} \mathbf{h} \right), \end{aligned} \quad (1)$$

式中 h 为流体膜厚, η 为流体黏度, p 为压力, $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2$ 分别为晶片和抛光垫的速度向量. $\nabla = \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial}{r\partial\theta}$, 并

且有

$$\varphi(N, l, h) = \frac{1}{12} + \frac{l^2}{h^2} - \frac{Nl}{2h} \coth\left(\frac{Nh}{2l}\right), \quad (2)$$

式中 N 是耦合数, l 是特征长度.

方程 (1) 的分量形式为

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{h^3 \varphi(N, l, h)}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial r} \right) \\ & + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{h^3 \varphi(N, l, h)}{12\eta} \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) \\ & = \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{w_1 + w_2}{2} h \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{u_1 + u_2}{2} h \right), \end{aligned} \quad (3)$$

式中 w_1, w_2, u_1, u_2 分别为速度边界条件,

$$w_1 = \omega_p d \sin\theta, \quad (4)$$

$$u_1 = (r + d \cos\theta) \omega_p, \quad (5)$$

$$w_2 = 0, \quad (6)$$

$$u_2 = r \omega_w. \quad (7)$$

上述各式中, d 是晶片和抛光垫之间的中心距离, ω_w 和 ω_p 是晶片和抛光垫的转速.

在抛光中, 晶片相对抛光垫成一定角度倾斜(由转角 α 和倾角 β 决定), 以产生收敛楔效应. 于是任一点的流体膜厚度为

$$h = h_{\text{piv}} - r \sin\alpha \cos\theta - r \sin\beta \sin\theta, \quad (8)$$

式中 h_{piv} 是节距高度值.

基于晶片半径 r_0 和参考压强 p_0 引入如下无量纲量:

$$\begin{aligned} \chi &= \frac{r_0}{h_{\text{piv}}} \Lambda = \chi^2 \frac{6\eta\omega_p}{p_0}, \\ \bar{r} &= \frac{r}{r_0}, \quad \bar{h} = \frac{h}{h_{\text{piv}}}, \\ \bar{p} &= \frac{p}{p_0}, \quad \bar{D} = \frac{d}{r_0}, \\ \bar{l} &= \frac{l}{h_{\text{piv}}}, \quad \bar{\xi} = \frac{\omega_w}{\omega_p}. \end{aligned}$$

膜厚方程为

$$\bar{h} = 1 - \chi \bar{r} \sin\alpha \cos\theta - \chi \bar{r} \sin\beta \sin\theta. \quad (9)$$

无量纲流动方程为

$$\begin{aligned} & \bar{r}^2 \frac{\partial}{\partial \bar{r}} \left(\bar{h}^3 \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{r}} \varphi(N, \bar{l}, \bar{h}) \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial \bar{\theta}} \left(\bar{h}^3 \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{\theta}} \varphi(N, \bar{l}, \bar{h}) \right) \\ & = \chi \Lambda \bar{r}^2 (\bar{r} + \bar{\xi} \bar{r} + D \cos\theta) (\sin\alpha \sin\theta - \sin\beta \cos\theta) \\ & - \Lambda \bar{r} D \sin\theta, \end{aligned} \quad (10)$$

且有

$$\varphi(N, \bar{l}, \bar{h}) = \frac{1}{12} + \frac{\bar{l}^2}{\bar{h}^2} - \frac{N\bar{l}}{2\bar{h}} \coth\left(\frac{N\bar{h}}{2\bar{l}}\right). \quad (11)$$

无量纲载荷和转矩给出如下:

$$\bar{W}_r = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 \bar{p} \bar{r} d\bar{r} d\theta, \quad (12)$$

$$\bar{M}_x = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 \bar{p} \bar{r}^2 \sin\theta d\bar{r} d\theta, \quad (13)$$

$$\bar{M}_y = -\frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 \bar{p} \bar{r}^2 \cos\theta d\bar{r} d\theta. \quad (14)$$

真实载荷和转矩为 $W_r = \pi p_0 r_0^2 \bar{W}_r$, $M_x = \pi p_0 r_0^3 \bar{M}_x$, $M_y = \pi p_0 r_0^3 \bar{M}_y$, 横轴方向连接晶片和抛光垫的中心.

3. 计算结果与讨论

计算中未指明的变量采用表 1 所示的数据.

表 1 计算参数

参数	取值
ω_w (r/min)	50
ω_p (r/min)	100
h_{piv} / μm	100
α ($^\circ$)	0.02
β ($^\circ$)	0.018
η / Pa·s	0.0214
d / mm	150
r_0 / mm	50
p_0 / kPa	20

图 2 和图 3 分别为节距高度对无量纲载荷与力矩的影响。显然,增加节距高度值(即晶片与抛光垫之间的距离)将导致承载能力的降低,所以在 CMP 中需要慎重选择合适的间隙值(过大的间隙将降低承载能力,从而降低抛光速率,而过小的间隙将妨碍抛光液中固体颗粒和磨屑的带出,从而恶化抛光质量)。另外,纳米粒子引起的微极性将增加承载能力,增加特征长度 l 或耦合数 N 都将增加承载能力,高的承载能力对应于高的抛光速率。间隙值越小,这种效应越明显,体现出微极性的尺寸依赖性。

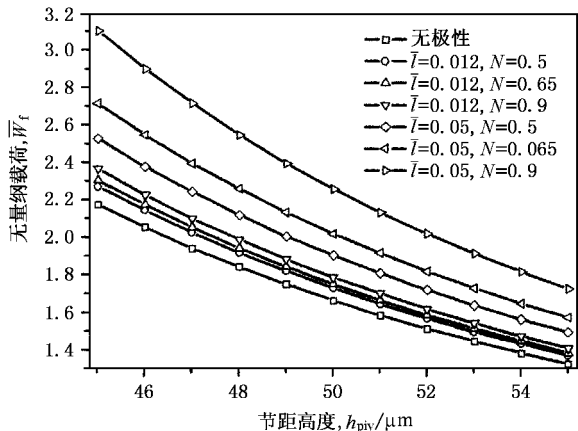


图 2 载荷与节距高度的关系

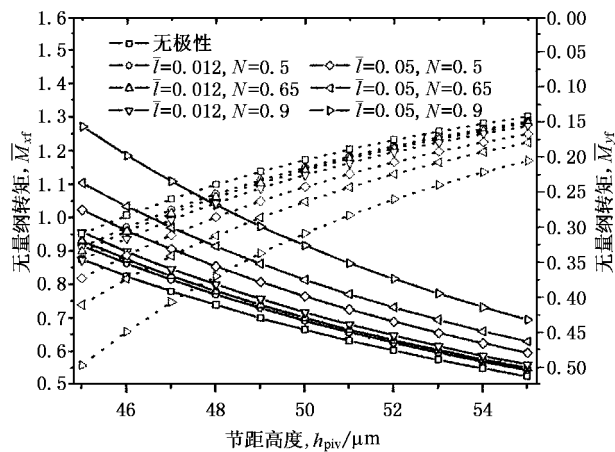


图 3 转矩与节距高度的关系

抛光垫转速对无量纲载荷与转矩的影响分别如图 4 和图 5 所示。一个显著特征即是无量纲载荷与转矩与抛光垫转速呈线性关系变化。另外,微极性同样将增加承载能力从而提高抛光速率。耦合数 N 或特征长度 l 的增加将提高承载能力,同时增加耦合数 N 和特征长度 l ,效果更加显著。另外,在低速下

这种效应也越明显,体现出微极性的尺寸依赖性。

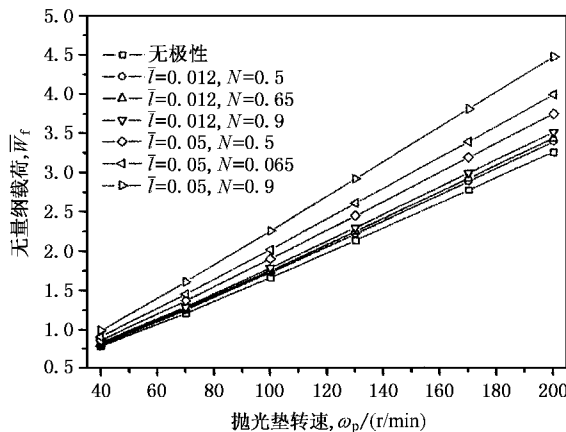


图 4 载荷与抛光垫转速的关系

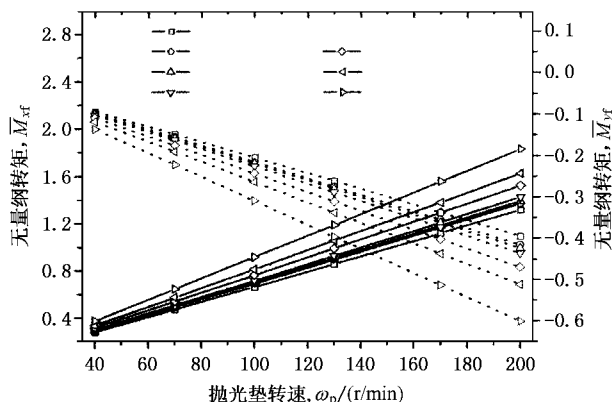


图 5 转矩与抛光垫转速的关系

4. 实验

我们用两种手段改变了抛光液中粒子的微极性

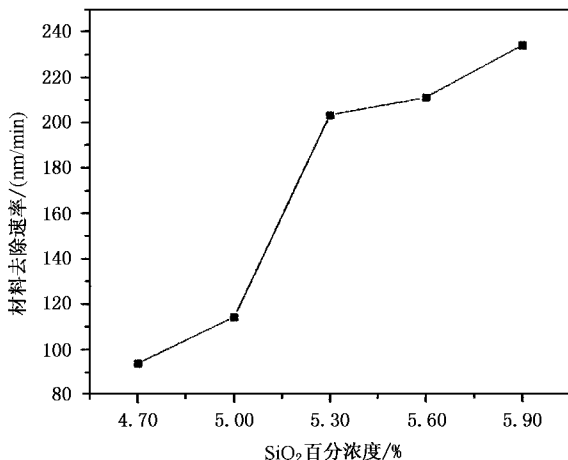


图 6 纳米 SiO₂ 粒子的浓度与去除速率的关系

在 SPEEDFAM-16B-4M 双面抛光机上研究了其抛光行为. 首先是通过改变纳米 SiO_2 颗粒的粒径来考察其材料去除速率. 我们选择 15, 30, 50, 60, 80nm 的 SiO_2 粒子进行了对比实验. 结果证明, 在相同条件下, 颗粒越大(因而微极性效应也越大), 去除率越高. 其次通过改变纳米 SiO_2 颗粒的浓度从而改变微极性效应来考察其对材料去除速度的影响, 实验结果如图 6 所示, 实验中所采用的纳米 SiO_2 颗粒平均粒径为 30nm. 可以看出, 随着纳米 SiO_2 颗粒浓度的增加(因而微极性效应也相应增加), 材料的去除速率也相应增加. 这与上面的分析是一致的.

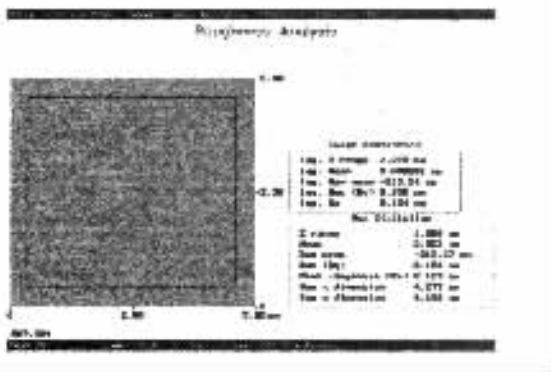


图 7 抛光盘片的 AFM 测量结果

选用合适的纳米 SiO_2 粒子的粒径和浓度值等配比出抛光液, 用于硬盘盘片的抛光, 得到的表面波纹度 W_a 达到 0.05nm, 表面粗糙度 R_a 达到 0.041nm (Chapman MP2000⁺ 测量结果), 为目前报到的最好值. AFM 的测量结果如图 7 所示.

5. 结 论

CMP 合适于获取高级别平面度, 目前对其的研究已经进入探索其机理的层次. 抛光液的流动特性对 CMP 的行为有很大的影响. 由于抛光液通常含有纳米级的圆形固体颗粒来加速抛光、提高抛光表面质量, 利用微极流体可以模拟粒子的微旋运动对抛光性能的影响.

模拟结果表明微极性将增加承载能力, 从而有利于提高抛光速率. 这一特性在低节距或低转速下更为显著, 体现出尺寸依赖性. 通过改变抛光液中粒子的微极性, 用实验研究了微极性效应对 CMP 中材料去除速率的影响, 证明了分析的合理性.

这一分析模型忽略了抛光垫和其他一些因素的影响, 因而其结果只有定性意义.

本研究得到雷红和马俊杰等的帮助.

- [1] Hooper B J, Byrne G and Galligan S J 2002 *Materials Processing Technology* **123** 107
- [2] Lei H, Luo J B, Pan G S, Gao F and Ma J J 2002 *Int. J. Nonlinear Sci. Numerical Simulation* **3** 455
- [3] Borst C L, Gill W N and Gutmann R J 2002 *Chemical-mechanical polishing of low dielectric constant polymers and organosilicate glasses: fundamental mechanisms and application to IC interconnect technology* (London: Kluwer Academic Publishers)
- [4] Karniadakis G E and Beskok A 2002 *Micro Flows-Fundamentals and Simulation* (New York: Springer)
- [5] Braun A E 2001 *Semiconductor Int.* **11** 54
- [6] Levert J A, Mess F M and Salant R F 1998 *Tribol. Trans.* **41** 593
- [7] Tichy J, Levert J A, Shan L and Danyluk S. 1999 *J. Electrochem. Soc.* **146** 1523
- [8] Runnels S R and Eyman L M 1994 *J. Electrochem. Soc.* **141** 1698
- [9] Sundararajan S and Thakurta D G 1999 *J. Electrochem. Soc.* **146** 761
- [10] Cho C H, Park S S and Ahn Y 2001 *Thin Solid Films* **389** 254
- [11] Park S S, Cho C H and Ahn Y 2000 *Tribol. Int.* **33** 723
- [12] Zhang C H, Luo J B and Wen S Z 2004 *Lubrication Engineering* **4** 31 (in Chinese) 张朝辉、雒建斌、温诗铸 2004 润滑与密封 **4** 31]
- [13] Zhang C H, Luo J B and Wen S Z 2004 *Prog. Nat. Sci.* **14** (3) 81
- [14] Grover G S, Liang H, Ganeshkumar S and Fortino W 1998 *Wear* **214** 10
- [15] Lei H, Luo J B and Zhang C H 2003 *J. Shanghai Univ.* **6** 494 (in Chinese) 雷红、雒建斌、张朝辉 2003 上海大学学报 **6** 494]
- [16] Zhang Chaohui, Luo Jianbin and Wen Shizhu 2004 *Tsinghua Science and Technology* **9** (3) 270
- [17] Zhang C H, Wen S Z and Luo J B 2002 *Sci. China (Ser. B)* **45** (2) 166
- [18] Zhang C H, Luo J B and Wen S Z 2004 *Acta Mechanica Sin.* **36** 208 (in Chinese) 张朝辉、雒建斌、温诗铸 2004 力学学报 **36** 208]

Effects of nano-scale particles in chemical mechanical polishing process ^{*}

Zhang Chao-Hui^{1)†} Luo Jian-Bin²⁾ Wen Shi-Zhu²⁾

¹⁾ School of Mechanical , Electronic and Control Engineering , Beijing Jiaotong University , Beijing 100044 ,China)

²⁾ State Key Laboratory of Tribology , Tsinghua University , Beijing 100084 , China)

(Received 16 September 2004 ; revised manuscript received 18 October 2004)

Abstract

Chemical mechanical polishing(CMP) is a manufacturing process used to achieve the high levels of global and local planarity required. Currently , the slurries used in CMP usually contain particles at nano scale to accelerate the material remove ratio(MRR) and to optimize the planarity. Micro polar theory will provide a feasible candidate to describe the rheology of these fluids . It will provide some insights into the mechanism to solve the flow equation of CMP with the micro-polar effect considered. The effects of micro polarity on load and moments are simulated and computation results are given. The results show that micro-polarity will give rise to an increase in load capacity to a certain extent by increasing the equivalent viscosity of the slurries , through which the material removal can be accelerated. The size-dependent feature can be seen since it becomes more prominent with low pitch height and low pad velocity. The effects of micro-polarity on material removal rate in CMP process were experimentally investigated by altering the polarity of the slurries , which support the theoretical analysis.

Keywords : CMP , micro-polar fluids , slurry , rheology , material removal rate

PACC : 4790 , 7420D , 6740B , 5190

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No.50390060)

[†] E-mail : zhangchaohui@tsinghua.org.cn