CMP 中接触与流动关系的分析

张朝辉 杜永平 雒建斌

(北京交通大学机电学院, 北京 100044; 清华大学摩擦学国家重点实验室, 北京 100084.
E-mail: zhangchaohui@tsinghua.org.cn)

摘要 分别考虑抛光垫基体和粗糙峰变形建立化学机械抛光(chemical mechanical polishing/planarization, CMP)的一维两层接触模型和抛光液流动模型, 分析了 CMP 中接触压力和流动的关系, 利用数值方法模拟了抛光垫基体和粗糙峰变形情况, 以及接触压力和流体压力的分布情况. 分析表明在晶片入口区附近形成了发散间隙, 从而抛光液流体出现负压, 在晶片边缘形成了高应力集中导致的过度抛光, 解释了 CMP 的这两个基本特征.

关键词 化学机械抛光 接触压力 流体负压

化学机械抛光(chemical mechanical polishing/planarization, CMP)是集成电路(integrated circuit, IC)制造技术中实现晶片表面抛光的一门重要技术^[1]. 然而, 在很大程度上人们仍然需要经验或半经验的数据来优化过程中的各个参数以达到最优的抛光结果^[2], 使得这一技术的进一步应用受到限制^[3].

在 CMP 中, 旋转的被抛光晶片被压在旋转的弹性抛光垫上, 而含有磨粒和化学反应物的抛光液则在晶片与抛光垫之间流动. CMP 涉及复杂的摩擦行为, 包含化学反应和机械作用. 大多数抛光液都含有硅基的纳米粒子, 这些粒子的内在运动影响抛光质量, 因而流体的微结构^[4,5]的作用也得到了研究.

抛光垫是 CMP 的一个重要组成部分, 对抛光的机械作用和化学作用两方面都非常关键^[6]. 它可以将抛光液、水和化学剂等带到晶片表面上, 并带走 CMP 过程中的副产品(如抛光废液等). 同时, 它提供 CMP 过程的部分机械行为(如与晶片表面发生直接接触等), 并维持合适抛光的化学与机械环境.

抛光垫表面通常被修整得足够粗糙, 并且为了有利于带出磨屑而维持孔隙结构. 一般来说, 硬抛光垫对平整性(planarity)有较好的作用, 而软的抛光垫则有利于形成更好甚至无缺陷的表面.

Levert 等人^[7]的实验指出, 在晶片、抛光液和抛光垫构成的系统中, 通常有流体负压存在, 其负压值通常小于气穴压力. Tichy 等人^[8]曾提出了一个一维模型来解释这一现象, 然而由于在其分析中采用了过于简单的假定使得分析显得不足. 本文在其分析的基础上, 修正了一些假定进而分析 CMP 中的接触

和流体流动关系.

1 模型分析

所用的一维分析模型如图 1 所示. 抛光垫表面非常粗糙且具有弹性, 因而可以看作是由基体和粗糙峰两部分组成. 在图 1 中, 粗糙峰部分的高度用其平均值表示, 粗糙峰部分与基体在压力作用下的弹性变形有不同的规律. 晶片在外载荷下将产生向下的位移, 分别由粗糙峰和抛光垫基体的变形组成. 为了简单起见, 分析引入下述假定:

() 假定晶片是刚性的, 而变形(包括抛光垫基体和粗糙峰的压缩变形)是完全弹性的(尽管在实际的 CMP 过程中都伴随有塑性变形).

() 抛光垫的变形计算可以看作是半无限体. 常用的抛光垫厚度约为 1 mm, 而基体变形通常约为几微米, 因而这一假定是可信的.

() 外加的载荷由粗糙峰的固体接触与抛光液流体共同承担. 流体的流动是一维的.

() 抛光液流体被认为是在产生压缩形变后的粗糙峰之间流动, 其流体膜厚度相当于由粗糙峰构成的等效高度.

() 抛光液流体被认为是牛顿黏性流体. 抛光液通常都含有纳米级固体或胶体颗粒, 但它们对流体流动的影响较小, 因而此处忽略其微结构效应.

由经典半无限体接触公式可以计算抛光垫基体的变形, 假定粗糙峰的变形相互独立而服从 Mattress 模型, 则可以计算粗糙峰的变形^[9].

图1 分析模型简图

$$u_p(x) = \frac{2(1-\nu^2)}{\pi E} \int_0^{2a} p_s(s) \ln \left| \frac{x-s}{x_0-s} \right| ds + \frac{(1-2\nu)(1+\nu)}{2E} \left(\int_0^x q(s) ds - \int_x^{2a} q(s) ds \right) + \frac{(1-2\nu)(1+\nu)}{2E} \left(-\int_0^a q(s) ds + \int_a^{2a} q(s) ds \right), \quad (1)$$

$$u_a(x) = \frac{p_s(x)}{K}. \quad (2)$$

(1)和(2)式中, ν 为泊松比, E 为抛光垫基体的弹性模量, a 为晶片半径, p_s 为固体接触压力, q 为抛光垫上的剪应力分布(假定剪应力对粗糙峰的法向变形无影响). K 为粗糙峰弹性常量. 下标 p 表示抛光垫基体, 而下标 a 表示粗糙峰区, 二者承受相同的固体接触压力作用.

x 方向为抛光液流动方向, 起点为晶片的流入处. x_0 为抛光垫基体在没有剪应力作用时的零法向变形处, 它在理论上应取为无限远处. (1)式还假定在晶片中心处剪应力引起的转矩为零. 这两个假定均是对文献 [8] 的修正. 与此类似, 为简化计算, 假定在表面上的剪应力均匀分布, 即处处为 q_0 , 且晶片无倾斜. 法向平均载荷为

$$\frac{\int_0^{2a} (p_s + p_f) dx}{2a} = p_{app}, \quad (3)$$

式中 p_{app} 为外加平均载荷, p_f 为流体压力.

假定在没有外加载荷时粗糙峰的等效高度为 h_0 , 则由几何关系(见图 1)可得到

$$h_0 = \delta + h(x) - u_p(x) = h(x) + u_a(x), \quad (4)$$

式中 δ 为晶片的刚性位移, $h(x)$ 为等效抛光液流体膜

的厚度.

从(4)式可得到

$$\delta = u_a(x) + u_p(x). \quad (5)$$

综合上述各式, 可以得到如下变形关系:

$$\delta + \frac{(1-2\nu)(1+\nu)}{E} q_0(x-a) = \frac{p_s(x)}{K} - 2 \frac{(1-\nu^2)}{\pi E} \int_0^{2a} p_s(x) \ln \left| \frac{x-s}{x_0-s} \right| ds. \quad (6)$$

在静止时无剪应力作用, (6)式可简化为

$$\delta = \frac{p_s(x)}{K} - 2 \frac{(1-\nu^2)}{\pi E} \int_0^{2a} p_s(x) \ln \left| \frac{x-s}{x_0-s} \right| ds. \quad (7)$$

(6)和(7)式是关于未知量 $p_s(x)$ 的积分方程, 可以用迭代的方法进行求解.

假定流动为不可压缩的一维牛顿流体, 抛光液流体压力由下述关系求解:

$$\frac{d}{dx} \left(h^3 \frac{dp_f}{dx} \right) = 6\eta U \frac{dh}{dx}, \quad (8)$$

其中

$$h(x) = h_0 - \frac{p_s(x)}{K}. \quad (9)$$

2 计算方法

2.1 积分的计算

(6)或(7)式中的积分可以离散后进行计算.

$$I(x_i) = \int_0^{2a} p_s(s) \ln |x_i - s| ds = \sum_{j=1}^N C_{ij} p_s(x_j), \quad (10)$$

$$C_{ij} = (i - j + 0.5) \Delta (\ln(|i - j + 0.5| \Delta) - 1) - (i - j - 0.5) \Delta (\ln(|i - j - 0.5| \Delta) - 1), \quad (11)$$

式中 i 和 j 为离散节点坐标, N 为离散节点总数. Δ 为步长 ($\Delta = 2a/N$).

2.2 分布松弛迭代

(6)或(7)式的求解需要用迭代的方法. 由于一点的压力改变会引起其他各点处的弹性变形的变化, 因此无论是 Gauss-Seidel 迭代还是 Jacobi 迭代都可能不收敛. 为此应当用分布松弛(distributive relaxation)^[10]将由压力的改动引起的弹性变形变化限制到最小. 即与通常仅修改节点 i 处的值的松弛迭代不同, 在每个迭代中计算 i 点和 $i-1$ 点压力值的改变 δ_i 和 $-\delta_i$ 以满足离散的方程, 同时对这两个节点的压力值进行修改.

2.3 计算流程

计算流程可简述如下: 先假定弹性变形总量 δ (即晶片刚性位移), 由(6)式离散后迭代计算出接触压力 p_s , 再计算出 u_p 和 u_a . 然后由(9)式计算流体压力 p_f . 根据接触压力与流体压力之和与外加载荷的差来修正弹性变形量 δ , 重复上述过程到满足载荷平衡时终止迭代, 计算完成.

3 计算结果

3.1 静止接触

计算中采用的数据如下: 抛光垫基体弹性模量 $E = 40$ MPa, 泊松比 $\nu = 0.4$, 晶片半径长度 $a = 0.05$ m. 粗糙峰弹性常数 $K = 5.0 \times 10^9$ Pa/m, 假定总弹性变形量为 $\delta = 40$ μ m. 利用上述方法求解(7)式.

图 2 比较了抛光垫基体在压力作用下法向变形为零点(x_0 处)的选择对计算结果的影响. 图中实线表示的是 $x_0 = 0$ 时的计算结果(即与文献 [8] 中假定的一致). 图中虚线表示的是 $x_0 = -5a$ 的计算结果. 可以看出, $x_0 = 0$ 时的计算压力要大得多, 约为 2 倍左右. 由弹性理论可知, x_0 代表了弹性变形的积分常数, 理论上其应当取值在无穷远处. 在实际的计算中, 取 $x_0 = -5a$ 即可得到相当精确的解(此值应用于后面的所有计算).

图 3 给出了粗糙峰弹性常数对静止接触压力的影响. 可以看出, 在边界区域有应力集中出现. 粗糙峰接近刚性时的接触压力比弹性情况有更明显的应力集中出现, 而在接触中心区域, 接触压力的增加较小.

图 2 零变形点对静止接触时压力分布的影响

图 3 粗糙峰弹性常数对静止接触压力的作用

弹性: $K = 1.5 \times 10^9$ Pa/m; 近刚性: $K = 1.5 \times 10^{10}$ Pa/m

与图 3 对应的抛光垫基体和粗糙峰的变形情况如图 4 和 5 所示. 图 4 为弹性情形, $K = 1.5 \times 10^9$ Pa/m. 图 5 所示为粗糙峰接近刚性时的情形, $K = 1.5 \times 10^{10}$ Pa/m. 注意限定了关系式 $\delta = u_a(x) + u_p(x)$. 可以看出, 对于较柔软的粗糙峰(图 4), 粗糙峰和抛光垫基体的变形大致相当. 而在粗糙峰接近刚性情况下, 变形主要由抛光垫基体承担(图 5). 另外, 柔性粗糙峰时将构成较大的发散区间, 从而将引起较大的流体负压, 这与 Levert 等人^[2]的实验结果一致.

3.2 滑动问题

计算中采用的与静态接触不同的参数值如下: 外加平均载荷 $p_{app} = 25$ kPa, 摩擦剪应力 $q = 10$ kPa(即有典型的摩擦系数值 0.4), 抛光液黏度 $\eta = 0.0025$

图4 弹性粗糙峰时的变形($K = 1.5 \times 10^9$ Pa/m)

图6 滑动时的接触压力

图5 刚性粗糙峰时的变形($K = 1.5 \times 10^{10}$ Pa/m)

图7 滑动时抛光垫与粗糙峰的变形

Pa·s, 速度 $U = 0.4$ m/s. 粗糙峰弹性常数 $K = 2.5 \times 10^9$ Pa/m, 未加载荷时的粗糙峰等效膜厚取为 $65 \mu\text{m}$.

图6为计算得到的接触压力. 由于摩擦剪应力的存在, 曲线不再关于晶片中心对称(对比图2和3). 仍然在晶片边缘有应力集中存在, 而在接触中心区接触压力基本一致. 计算出的平均接触压力值约为 26 kPa .

抛光垫基体与粗糙峰的弹性变形如图7所示. 同样, 由于摩擦剪应力, 曲线不关于晶片中心对称. 这样, 在入口区加大了粗糙峰的变形(如图8所示), 从而导致较大的发散区, 有利于抛光液流体负压的形成.

图8是计算的抛光液膜厚分布情况, 图9是其相应的流体压力分布. 可见入口区膜厚小于出口区膜厚, 在入口区形成了发散的膜厚分布, 这是形成负压

的条件. 由于摩擦剪应力存在, 使得膜厚在入口处的发散区间大于出口处的收敛区间, 从而形成较大的负压区. 计算得到最大负压值约为 50 kPa , 平均流体压力约为 1.06 kPa . 该值比通常测量得到的数据偏大, 表明可能高估了粗糙峰的作用. 另外, 也可能是由于忽略了抛光垫的多孔隙特性而引起的(因为在负压区流体可以通过孔隙补充从而减小负压值). 具体原因需要进一步的分析.

图10是总的压力分布图. 在边界处形成了应力集中, 并且在入口附近压力下降较快, 可能存在负压区. 应当指出, 在边界处总压力形成的应力集中将导致边缘处的磨损加速, 从而有过快的抛光速率, 因而对抛光质量有不利影响(在实践中边界区的一段由于抛光过多而不能形成有效抛光^[11]). 因而减小在边界

图 8 抛光液膜厚的分布

图 9 抛光液流体压力分布

图 10 总体压力分布

提高被抛光晶片表面的质量。

4 结论

提出了一个初步的一维接触模型来描述化学抛光过程中的接触和流体压力。该模型将抛光垫基体和粗糙峰的变形进行区分,并分别计算。假定粗糙峰变形形成有效的流体流动间隙(在入口区发散),解释了流体负压现象。

接触压力在晶片边界处形成应力集中,粗糙峰弹性系数越大越明显。柔软的粗糙峰将导致较大的发散区,从而有较大的流体负压值。

考虑摩擦剪应力可能形成更大的发散区从而增加负压值。这一模型能够正确预测负压的存在和晶片边缘的应力集中引起的快速磨损,然而可能高估了粗糙峰的作用。模型仍然过于简单,忽略了抛光垫的多孔特性和转矩等因素,且只考虑了一维情形,因而其结果只具有定性的意义,有待进一步完善。

致谢 本工作受国家自然科学基金重大项目(批准号:50390060)和北京交通大学“十五”项目(编号:2004SM041)资助。

参 考 文 献

- 1 Lei H, Luo J B. CMP of hard disk substrate using a colloidal SiO_2 slurry: Preliminary experimental investigation. *Wear*, 2004, 257: 461—470 [DOI]
- 2 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
- 3 徐进, 雒建斌, 路新春, 等. 超精密表面抛光材料去除机理研究进展. 科学通报, 2004, 49(17): 1700—1705
- 4 Zhang C H, Luo J B, Wen S Z. Modeling chemical mechanical polishing with couple stress fluids. *Tsinghua Sci Techn*, 2004, 9(3): 270—273
- 5 张朝辉, 雒建斌, 温诗铸. CMP 中纳米颗粒的作用分析. 物理学报, 2005, 54(5): 2123—2127
- 6 Hooper B J, Byrne G, Galligan S. Pad conditioning in chemical mechanical polishing. *J Mater Process Techn*, 2002, 123: 107—113 [DOI]
- 7 Levert J A, Mess F M, Salant R F. Mechanisms of chemical-mechanical polishing of SiO_2 dielectric on integrated circuits. *Tribol Trans*, 1998, 41(4): 593—599
- 8 Tichy J, Levert J A, Shan L, et al. Contact mechanics and lubrication hydrodynamics of chemical mechanical polishing. *J Electrochem Soc*, 1999, 146(4): 1523—1528 [DOI]
- 9 Johnson K L. *Contact Mechanics*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1985
- 10 Venner C H, Lubrecht A A. *Multilevel Methods in Lubrication*. New York: Elsevier, 2000
- 11 Lei S. Mechanical interactions at the interface of chemical mechanical polishing. Dissertation for the Doctoral Degree. Georgia: Georgia Institute of Technology, 2000

处应力集中并使整个接触区内的压力接近一致,将 [doi/10.1360/csb2006-51-16-1961](https://doi.org/10.1360/csb2006-51-16-1961) (2006-01-17 收稿, 2006-06-12 接受)