

过程工程学报

The Chinese Journal of Process Engineering

ISSN 1009-606X, CN 11-4541/TQ

《过程工程学报》网络首发论文

题目: 化学机械抛光中保持环对抛光液利用率影响的有限元模拟
作者: 屈朋阳, 黄盼, 练成, 林绍梁, 刘洪来
收稿日期: 2023-03-15
网络首发日期: 2023-06-01
引用格式: 屈朋阳, 黄盼, 练成, 林绍梁, 刘洪来. 化学机械抛光中保持环对抛光液利用率影响的有限元模拟[J/OL]. 过程工程学报.
<https://kns.cnki.net/kcms2/detail/11.4541.TQ.20230531.1032.002.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

Finite element simulation of the effect of retaining ring on the slurry effective utilization in chemical mechanical polishing

Pengyang QU¹, Pan HUANG², Cheng LIAN^{1,2*}, Shaoliang LIN³, Honglai LIU^{1,2}

1. School of Chemistry and Molecular Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China

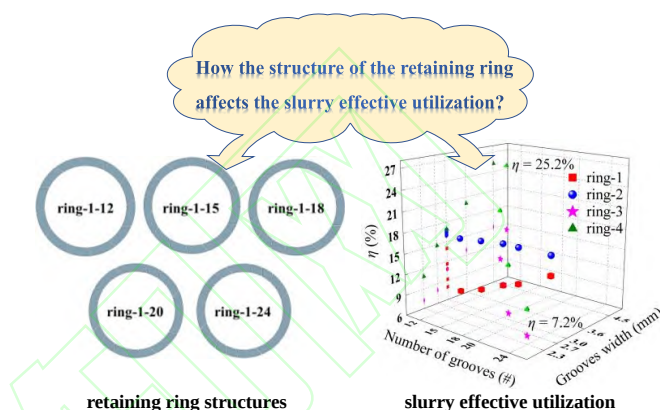
2. School of Chemical Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China

3. School of Materials Science and Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China

Abstract: Chemical mechanical polishing (CMP) enables global and local flatness polishing of a wide range of materials and is now widely used in the field of integrated circuit manufacturing. As one of the main consumables in the CMP process, slurry accounts for 50% of the total cost of the CMP process. However, most of the slurry is discharged into the waste stream by centrifugal force before it reaches the polishing pad-wafer interface, resulting in a

very low slurry effective utilization rate. Therefore, optimizing the CMP process parameters to improve the slurry effective utilization can not only reduce the polishing cost but also solve some environmental problems. For the CMP process, the retaining ring not only fixes the wafer to prevent it from slipping out but also helps the slurry to transfer between the pad-wafer interfaces through its multiple grooves to improve the slurry effective utilization. Consequently, in this work, construct a dynamic coupling model of slurry flow and retaining ring rotation, and the finite element method (FEM) was employed to investigate the effect of retaining ring structure (including the number of grooves, groove width, groove area, and the presence of rounded corners at the grooves) on the slurry effective utilization during the CMP process. The results showed that the slurry effective utilization improved with the increase of retaining ring groove number with the same groove width (3 mm). For the same groove area (1785.4 mm²±0.3 mm²), the increase of retaining ring groove number lead to a decrease in the slurry effective utilization. And the same number of grooves, the larger the groove width, the greater the slurry effective utilization. Rounded grooves had a higher slurry effective utilization rate than sharp-edged grooves. When the groove width of the retaining ring was enlarged and the groove of the retaining ring was designed as rounded, the slurry effective utilization rate could be improved significantly. This work optimizes the CMP process parameters by FEM simulation and provides theoretical guidance to reduce the CMP cost.

Keywords: chemical mechanical polishing; retaining ring; slurry; finite element simulation; effective utilization



收稿：2023-03-15，修回：2023-04-18

基金项目：中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(编号：2022ZFJH004)；能源清洁利用国家重点实验室开放项目(编号：ZJUCEU2021005)

作者简介：屈朋阳，硕士研究生，物理化学专业，E-mail: Y30200335@mail.ecust.edu.cn；通讯联系人，练成，教授，研究方向为材料设计与工艺仿真，E-mail: liancheng@ecust.edu.cn.

引用格式：屈朋阳，黄盼，练成，等. 化学机械抛光中保持环对抛光液利用率影响的有限元模拟. 过程工程学报

Pengyang QU, Pan HUANG, Cheng LIAN, et al. Finite element simulation of the effect of retaining ring on the slurry effective utilization in chemical mechanical polishing (in Chinese). Chin. J. Process Eng., DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.222460.

化学机械抛光中保持环对抛光液利用率影响的有限元模拟

屈朋阳¹, 黄盼², 练成^{1,2*}, 林绍梁³, 刘洪来^{1,2}

1. 华东理工大学化学与分子工程学院, 上海 200237

2. 华东理工大学化工学院, 上海 200237

3. 华东理工大学材料科学与工程学院, 上海 200237

摘要: 化学机械抛光(CMP)过程中抛光液占其总成本的50%, 然而其有效利用率却非常低。改进保持环的沟槽结构可以提高抛光液的有效利用率。本工作, 构建了抛光液流动与保持环转动的动态耦合模型, 采用有限元方法(FEM)探究了CMP过程中保持环结构(包括沟槽数量、沟槽宽度、沟槽面积以及沟槽处是否有圆角)对抛光液有效利用率的影响。结果表明, 同沟槽宽(3 mm)时, 抛光液的有效利用率随着保持环沟槽数量的增加而提高。而同沟槽面积($1785.4 \text{ mm}^2 \pm 0.3 \text{ mm}^2$)时, 保持环沟槽数量的增加会导致抛光液的有效利用率下降。在其他条件相同的情况下, 圆角型沟槽比尖角型沟槽有着更高的抛光液有效利用率。本工作通过FEM优化了CMP工艺参数, 为降低CMP成本提供了理论指导。

关键词: 化学机械抛光; 保持环; 抛光液; 有限元模拟; 有效利用率

中图分类号: TQ051

文献标识码: A

1 前言

化学机械抛光 (Chemical Mechanical Polishing, CMP) 是通过化学腐蚀和机械磨削的混合作用来消除硅片表面材料的一种加工方式。相较于传统的只能实现局部平坦化的技术而言, CMP 具有全局平坦化能力, 且能够适用于多种材料的平坦化加工^[1-4], 目前 CMP 已在集成电路制造中被广泛应用。在 CMP 过程中, 晶圆由旋转的载体和保持环固定, 并被压向旋转的抛光垫。同时, 含有研磨颗粒和化学物质的抛光液注入到抛光垫中心附近, 并将其运输到晶圆和抛光垫之间的区域^[5-7]。在这个区域内, 机械力和化学作用力均会打磨晶圆表面, 使其更为平坦。

在 CMP 过程中, 抛光液是最昂贵的消耗品, 据统计抛光液占 CMP 过程总成本的 50%^[8]。然而, 注入的大部分抛光液在到达抛光垫与晶圆界面之前, 由于离心力的平流而浪费, 导致抛光液的使用效率不高。Mu 等^[9]研究表明, 抛光液的有效利用率随着抛光条件的不同而改变, 当抛光垫的垫槽宽度从 300 μm 增加到 600 μm 时, 抛光液的有效利用率明显增加。因此, 优化 CMP 过程的工艺参数可以提高抛光液的有效使用率, 从而降低抛光成本。影响 CMP 过程中抛光液有效利用率的工艺参数众多, 其中之一是保持环的结构^[10]。保持环不仅可以固定晶圆防止晶圆滑出, 还可以使晶圆外围的材料去除率更均匀, 同时有助于抛光液通过其多个沟槽传输到抛光垫-晶圆界面之间, 以提高抛光液的有效利用率^[10-12]。

Wei 等^[13]发现保持环沟槽的设计对抛光垫-晶圆界面之间的抛光液流动有很大影响, 即更多更大的沟槽可允许更多的抛光液被引导到抛光垫-晶圆界面区域, 抛光液的平均液膜厚度更高。Bengoechea 等^[14,15]研究了尖/圆角槽保持环对晶圆下方抛光液液膜厚度的影响, 结果表明具有圆角槽构型的保持环其抛光垫-晶圆界面中的抛光液薄膜厚度更厚, 即抛光液的利用率更高。

然而, 晶圆和晶圆载体组件不透明, 晶圆与抛光垫之间的液膜厚度无法通过实验直接测量。研究^[15]表明, 抛光垫-晶圆界面中抛光液的液膜厚度和保持环外围弓形波厚度有一定的关联性。通过紫外增强荧光技术测量保持环周围的弓形波厚度, 可以间接反映晶圆与抛光垫之间的液膜厚度^[15,16]。但是, 间接测量方法存在较大的误差, 且保持环的结构多种多样, 实验测量会耗费大量的人力物力, 存在一定的局限性。由于在实验中不能直接观察到 CMP 过程的细节^[17], 对于人们理解 CMP 过程的机理仍是一个挑战^{[18][6]}, 因此, 通过理论建模和仿真揭示 CMP 机制成为当下研究的热点之一。目前, 大部分仿真模拟探究了抛光液^[17-21], 磨料^[17,22-26], 抛光垫^[27], 调节器^[28]对 CMP 过程的影响机制, 而对于保持环结构的研究较少。因此, 使用有限元模拟探究不同保持环结构对抛光液有效利用率的影响尤为重要。

本工作采用有限元模拟, 基于商用的保持环结构, 研究了不同保持环结构(包括保持环沟槽个数, 保持环沟槽宽度, 保持环沟槽面积以及尖/圆角沟槽)对抛光液有效利用率(η)的影响。该工作可以为 CMP 过程中, 保

持环结构参数的优化提供理论指导,以提高抛光液的有效使用率,降低抛光成本。

2 计算模型和方法

2.1 计算模型

在实际的抛光过程中,抛光液的流动是非常复杂的,将复杂的问题放到数学模型中,合理的假设是有必要的^[29]。例如,Runnels等^[30]在基于流体力学理论首次研究抛光液的流动时做了很多强制性假设:晶片与抛光垫均为刚性体,表面平滑,且晶片表面被视为大半径的球面。Levert等^[31,32]在描述晶片-抛光垫-抛光液接触及抛光液流动的模型时对实际工况做了大量简化,将晶片假想为宽度无限的刚性长方体,抛光垫的厚度无穷大,抛光垫基面为半空间体。因此,对于本工作所研究的体系,为了使问题简化引入了一些假设,以便构成一个可以数值求解的仿真模型。

首先考虑到计算资源与计算时间的限制,忽略次要

因素,将实际的三维体系简化为二维计算模型。其次,考虑到本工作探究的是保持环结构对抛光液有效利用率的影响,主要通过对保持环内抛光液的平均流速进行数值模拟,以评估抛光液通过不同保持环上的沟槽进入抛光垫-晶圆界面的难易程度,从而得到保持环结构对抛光液有效利用率影响的定性关系。且由于抛光液的利用率与保持环内晶圆下方抛光液的平均流速有关,而保持环外抛光液的流动方式对抛光液利用率的影响不大^[33]。因此,忽略保持环外抛光液的流动方式对抛光液有效利用率的影响,将保持环外抛光液的离心流流动简化为压差流流动,以获得易于数值求解的压差流模型。计算模型示意图如图1所示,不考虑抛光盘转动的影响,把圆形的抛光盘简化为一个长方形的抛光盘。模型参数^[34]设置如下,长方形抛光盘的长度 L 为1500 mm,宽度 W 为600 mm,保持环内圆半径 r_1 为150 mm,外圆半径 r_2 为180 mm,抛光液以初始速度 V_0 为2.5 m/s从入口处流入,经过保持环时部分抛光液通过沟槽流入保持环内部,同时保持环以 ω 为65 rad/min的转速转动。

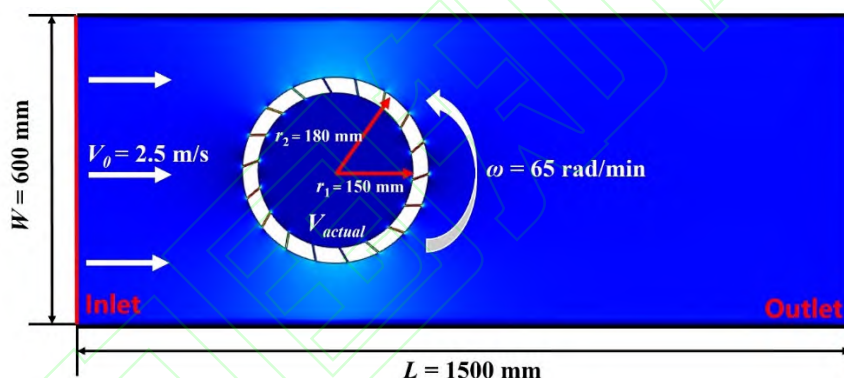


图1 计算模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of the calculation model

2.2 保持环构型设计

以商用的保持环(其接触面上有18个等距的3 mm宽的平行四边形沟槽)^[13]为初始结构并以此建立不同的保持环模型。从沟槽数量、沟槽宽度、沟槽面积以及沟槽处是否有圆角四个方面建立了四大类模型。第一类模型具有相同的沟槽宽度(3 mm)、沟槽处为尖角沟槽、不同的沟槽数(12, 15, 18, 20, 24),命名为Ring-1- x ,其中 x 代表沟槽数量($x=12, 15, 18, 20, 24$)。第二类模型具有相同的沟槽宽度($d=3$ mm)、沟槽处为圆角沟槽、不同的沟槽数,命名为Ring-2- x 。第三类模型具有相同的沟槽面积、沟槽处为尖角沟槽、不同的沟槽数,命名为Ring-3- x 。(沟槽面积为商用保持环的沟槽总面积 $1785.4 \text{ mm}^2 \pm 0.3 \text{ mm}^2$,因为保持环的沟槽总面积相同,所

以改变保持环的沟槽数时,沟槽的宽度也会随之改变,不同沟槽数对应的沟槽宽度见表1。第四类模型具有相同的沟槽面积,沟槽处为圆角沟槽、不同的沟槽数,命名为Ring-4- x 。图2显示的是保持环的沟槽数为12时,四类模型的保持环结构示意图以及沟槽处的细节展示。建立的20种保持环结构的详细参数信息见表2。

2.3 计算方法

采用有限元模拟软件COMSOL5.6中的流体流动-单相流模块对CMP中保持环内抛光液的平均流速进行数值模拟计算。通过几何建模、模型参数设置、网格构建、物理场定义、边界条件施加、求解步骤设置等过程实现数值模拟计算。

2.3.1 抛光液流场的假设

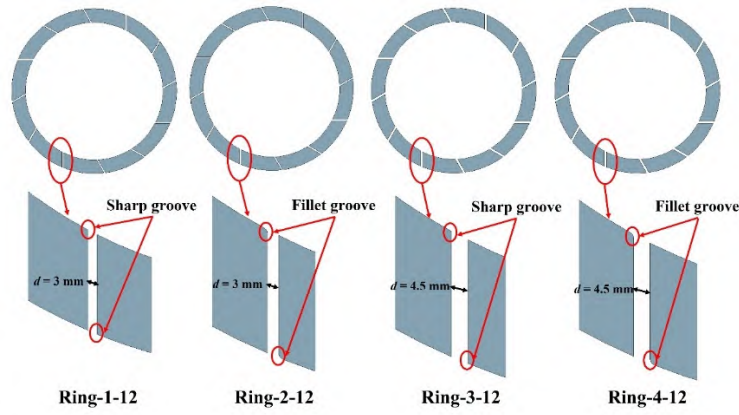


图2 保持环的沟槽数为12时, 4模类型的保持环结构示意图

Fig.2 Schematic diagrams of four types of retaining ring structures when the number of grooves is 12

表1 保持环相同沟槽面积($1785.4 \text{ mm}^2 \pm 0.3 \text{ mm}^2$)不同沟槽数所对应的沟槽宽度Table 1 The groove width corresponding to different groove numbers of the retaining ring with the same groove area ($1785.4 \text{ mm}^2 \pm 0.3 \text{ mm}^2$)

Number of grooves	Groove width/mm	Groove area/ mm^2
12	4.5	1785.7
15	3.6	1785.6
18	3.0	1785.4
20	2.7	1785.2
24	2.3	1785.7

表2 20种保持环的结构信息

Table 2 Structure information of 20 types of retaining rings

Name	Number of grooves	Sharp/Fillet groove	Groove width/mm
Ring-1-12	12	Sharp groove	3.0
Ring-1-15	15	Sharp groove	3.0
Ring-1-18	18	Sharp groove	3.0
Ring-1-20	20	Sharp groove	3.0
Ring-1-24	24	Sharp groove	3.0
Ring-2-12	12	Fillet groove	3.0
Ring-2-15	15	Fillet groove	3.0
Ring-2-18	18	Fillet groove	3.0
Ring-2-20	20	Fillet groove	3.0
Ring-2-24	24	Fillet groove	3.0
Ring-3-12	12	Sharp groove	4.5
Ring-3-15	15	Sharp groove	3.6
Ring-3-18	18	Sharp groove	3.0
Ring-3-20	20	Sharp groove	2.7
Ring-3-24	24	Sharp groove	2.3
Ring-4-12	12	Fillet groove	4.5
Ring-4-15	15	Fillet groove	3.6
Ring-4-18	18	Fillet groove	3.0
Ring-4-20	20	Fillet groove	2.7
Ring-4-24	24	Fillet groove	2.3

由于抛光液中仅含有少量的其他化学物质,对液体黏性影响很小,所以可以将抛光液视为水,密度和黏度均依照纯水的参数取值。基于以上假设,抛光液流动状态可以用不可压缩流体的运动方程描述:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho F_b + \text{div} P \quad (1)$$

$$\text{div} P = \frac{\partial p_x}{\partial x} + \frac{\partial p_y}{\partial y} \quad (2)$$

式中, ρ 表示不可压缩流体的密度(kg/m^3), u 表示流体的速度矢量(m/s), t 表示时间(s), ρF_b 表示单位体积流体上的质量力(N), $\text{div} P$ 为作用于单位体积流体上的表面力(N)。下标 x 和 y 表示在笛卡尔坐标中的坐标分量。

2.3.2 单相流流体理论

该模型是基于单相流体流动的,CMP过程中抛光液流动的雷诺数小于2000为层流^[33]。而层流的单相流体流动界面基于纳维-斯托克斯方程,其一般的形式为:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (3)$$

$$\rho \frac{\partial p}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-pI + K] \quad (4)$$

式中, p 表示压力为一个大气压(Pa), K 为黏性应力张量(Pa), I 表示单位矩阵。

2.3.3 边界条件

如图(1)所示,模型左侧设置为入口,入口处的初始流速为 $V_0 = 2.5 \text{ m/s}$,模型右侧设置为压力出口,出口压力为 $P_0 = 101.325 \text{ kPa}$,模型的上下两侧设置为固定壁,不产生滑移。

2.3.4 抛光液的有效使用率

在CMP工艺中,只有一小部分抛光液是实际上到达抛光垫-晶圆界面处并参与晶圆抛光的。抛光液の利用效率(η)^[8,9]可以定义为

$$\eta = \frac{V_{\text{actual}}}{V_0} \times 100\% \quad (5)$$

式中, V_{actual} 是通过模拟计算得出的抛光盘-晶圆界面处抛光液的平均流速(m/s), V_0 是输入抛光液的初始流速(m/s), 在本工作中 V_0 保持在 2.5 m/s 不变。

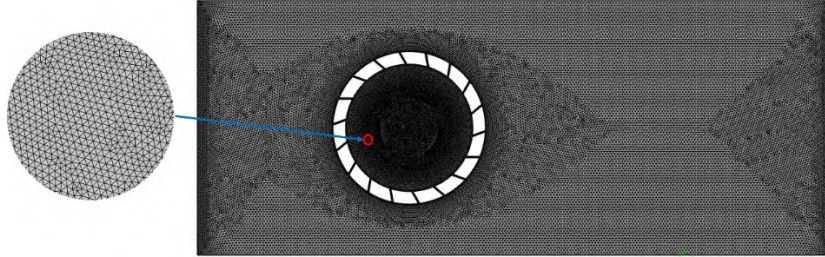


图3 网格结构模型

Fig.3 Structure model of grids

为了进行网格无关性验证, 改变保持环内网格的最大尺寸, 选择了数量分别为 9.82 万、10.05 万、10.49 万、11.45 万、14.11 万、17.77 万和 20.64 万的七种网格。在 $V_0 = 2.5$ m/s, $\omega = 65$ rad/min 的计算条件下, 通过 V_{actual} 进行网格无关性验证, 如图 4 所示。结果表明, 随着网格数量的增加, V_{actual} 的变化趋向平缓。与数量为 20.64 万的网格相比, 其他数量网格的偏差范围在 0.02%~1.08% 之间, 网格数量为 14.11 万时, 偏差值为 0.04%。在确保计算精度的前提下, 考虑到时间成本和资源合理利用, 选择了数量为 14.11 万的网格进行数值模拟计算。

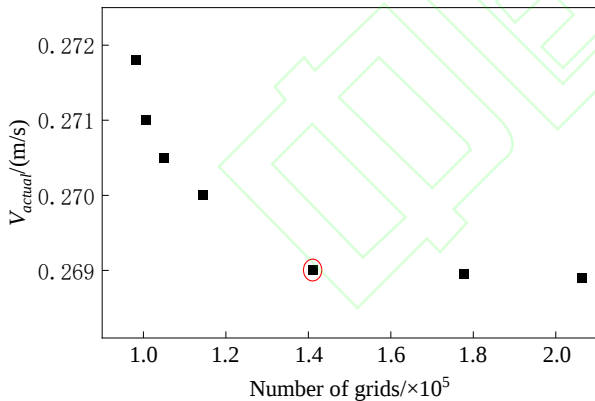


图4 网格无关性验证

Fig.4 Grids independence verification

3 结果与讨论

为了提高 CMP 过程中抛光液的有效利用率, 降低 CMP 的成本, 研究了保持环的结构对抛光液有效利用率的影响, 不同保持环结构所对应的抛光液有效利用率在图 5 中展示。结果表明 ring-4-12 型的保持环对应的抛

2.4 网格无关性验证

所有模拟均使用三角形网格。网格被设置为在保持环内的密度最大, 其中最大网格尺寸为 2 mm, 最小网格尺寸为 0.5 mm, 如图 3 所示。保持环外的网格最大尺寸为 5 mm, 最小尺寸为 1 mm。

光液利用率最高, 达到 25.2%, 而 Ring-3-24 型的保持环对应的抛光液利用率最低, 为 7.2%。从 yoz 平面的投影图中可以看出, 保持环的沟槽宽度越大, 沟槽处有圆角时抛光液的利用率也越高。这表明保持环的沟槽宽度越宽, 沟槽为圆角沟槽时, 抛光液更容易通过沟槽进入抛光垫-晶圆界面处, 从而抛光液的有效利用率也更高。

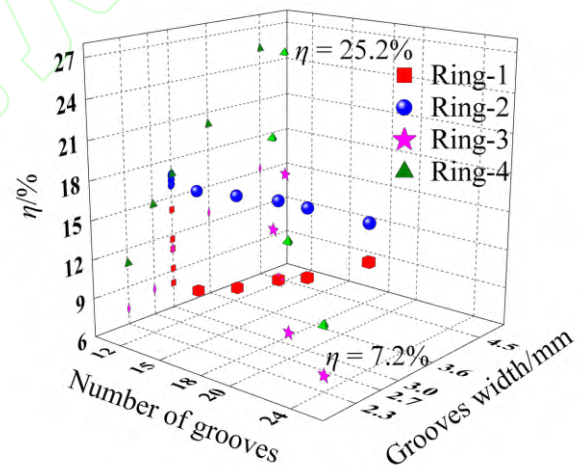


图5 不同保持环结构对抛光液有效利用率的影响

Fig.5 Effect of different retaining ring structures on slurry effective utilization

3.1 沟槽数的影响

以 ring-1 为例, 保证沟槽宽度相同并改变了沟槽数量, 探究了同沟槽宽时不同的沟槽数量对抛光液有效利用率的影响, 结果在图 6 中展示。从图 6(a)中可以看出, 随着沟槽数量由 12 增加到 24, 抛光液的有效使用率也由 8.0% 提高到 14.0%。这表明沟槽宽度相同时保持环上的沟槽数越多, 抛光液越容易通过沟槽在抛光垫-晶

圆界面处传输,从而抛光液的有效利用率越高。从图6(b)中可以看出,对于Ring-1型保持环,抛光液的有效利用率与保持环的沟槽数量有一个良好的线性关系。这是因为保持环上的沟槽宽度相同时,随着保持环沟槽数

量的增大,保持环上的沟槽面积也随之增大。因此,当保持环上的沟槽为宽度相同的尖角沟槽时,抛光液的有效利用率随着保持环沟槽数量的增加而呈现线性增加。

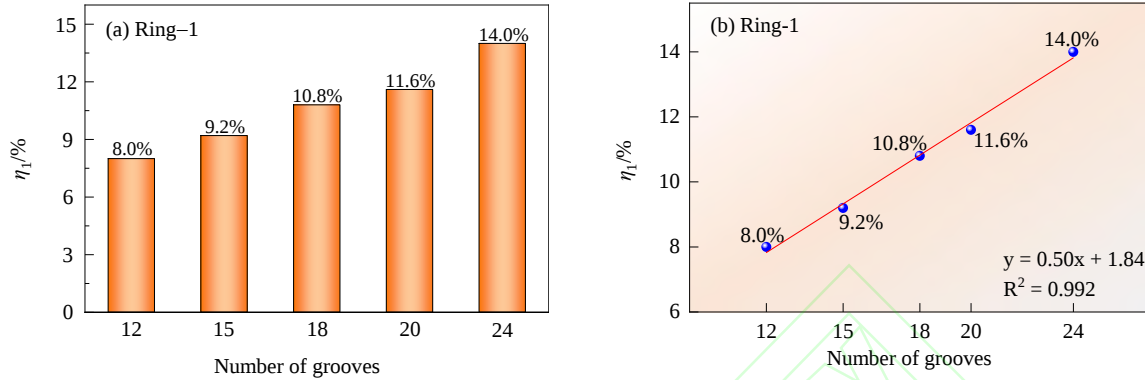


图6 (a) Ring-1型保持环沟槽数量不同时抛光液的有效利用率; (b) Ring-1型保持环的沟槽数量与抛光液有效利用率的线性关系

Fig.6 (a) Slurry effective utilization rate of Ring-1 type retaining ring with different groove numbers; (b) the linear relationship between groove number and the slurry effective utilization rate

3.2 尖角槽和圆角槽的影响

对于同沟槽宽度圆角沟槽型的保持环,随着沟槽数量的增加,抛光液有效利用率也增加[图7(a)],这与尖角沟槽型的保持环得到的结果一致。值得注意的是,圆角沟槽型的保持环随着沟槽数量的增加,抛光液有效利用率提高的并不明显(16.0%~16.8%),沟槽数量达到18以后抛光液有效利用率基本不变,稳定在16.8%。这表明当保持环上的沟槽为宽度相同的圆角沟槽时,沟槽数量的改变对抛光液有效利用率影响并不大。当保持环的沟槽数量增加到18时,抛光液有效利用率达到最大,继

续增加沟槽数量则抛光液的有效利用率不再随着沟槽数量的增加而变化。图7(b)显示的是沟槽数相同时,圆角沟槽保持环与尖角沟槽保持环抛光液有效利用率的差值。首先可以看出差值都是正的,当沟槽数量从12增加到24时,差值从8.0%降到2.0%。这表明当保持环的沟槽宽度和沟槽数量都相同时,相较于尖角沟槽型保持环,抛光液更容易通过圆角沟槽型保持环在抛光垫-晶圆界面处传输,从而抛光液的有效利用率更高,而且沟槽数量越少时效果尤为明显。图8显示的是保持环的沟槽数同为18,沟槽宽度同为3 mm时,尖角槽和圆角槽局

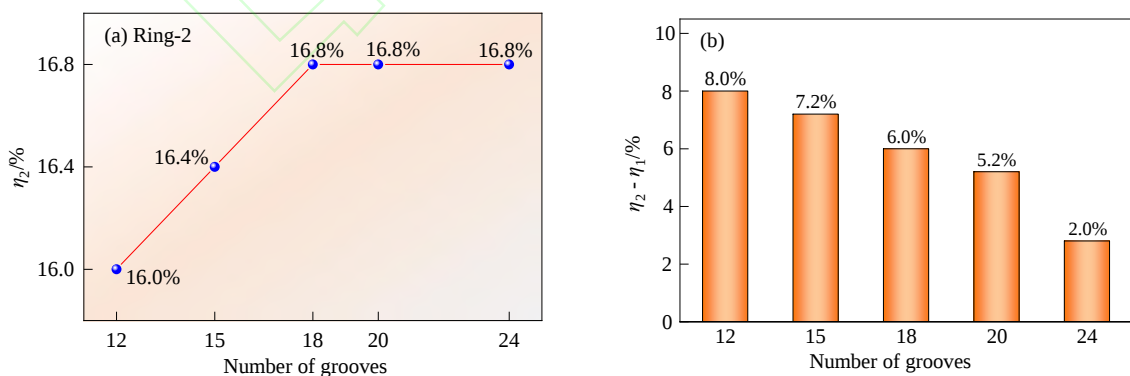


图7 (a) Ring-2型保持环沟槽数量不同时抛光液的有效利用率; (b) Ring-2型和Ring-1型保持环沟槽数量相同时, 抛光液有效利用率的差值

Fig.7 (a) Slurry effective utilization rate of Ring-2 type retaining ring with different groove numbers; (b) difference of slurry effective utilization rate when the groove number of Ring-2 and Ring-1 type is the same

部的流动信息。从图中可以看出,圆角型沟槽内抛光液的流速比尖角型沟槽内抛光液的流速大得多,这表明有更多的抛光液通过圆角型沟槽进入抛光垫-晶圆界面。

进一步地证明了圆角型沟槽比尖角型沟槽设计的保持环有更高的抛光液有效利用率。

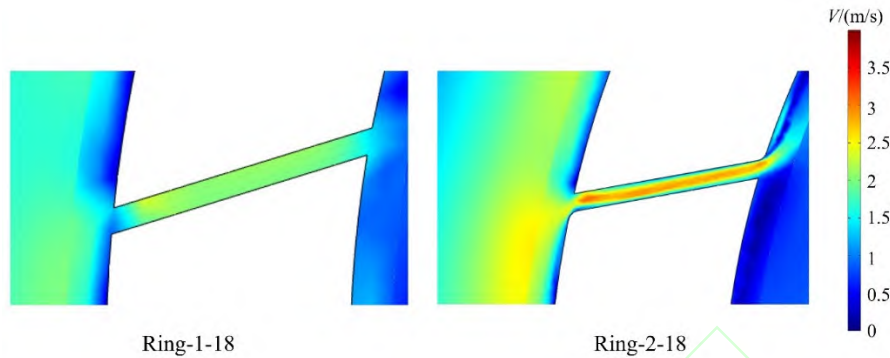


图8 Ring-1-18和Ring-2-18型保持环的局部流动信息

Fig.8 The partial flow information of Ring-1-18 and Ring-2-18 type retaining rings

3.3 沟槽宽度的影响

不同的保持环的沟槽宽度如表2所示,对于Ring-1型和Ring-2型保持环,其沟槽宽度同为3 mm并且不随沟槽数量的变化而变化。而对于Ring-3型和Ring-4型保持环,由于保持环的沟槽总面积相同,所以保持环的沟槽宽度随沟槽数量的增大而减小。当沟槽数量为18时沟槽宽度等于3 mm,沟槽数量小于18时沟槽宽度大于3 mm,而沟槽数量大于18时沟槽宽度小于3 mm。图

9(a)和9(b)分别显示了尖角型沟槽和圆角型沟槽的保持环在沟槽数量相同时,不同的沟槽宽度对抛光液有效利用率的影响。从图中可以看出,对于相同沟槽数的保持环,沟槽的宽度越大抛光液的有效使用率也越高,这表明更大的沟槽宽度可以使抛光液更容易通过沟槽在抛光垫-晶圆界面处传输,从而提高抛光液的有效利用率。

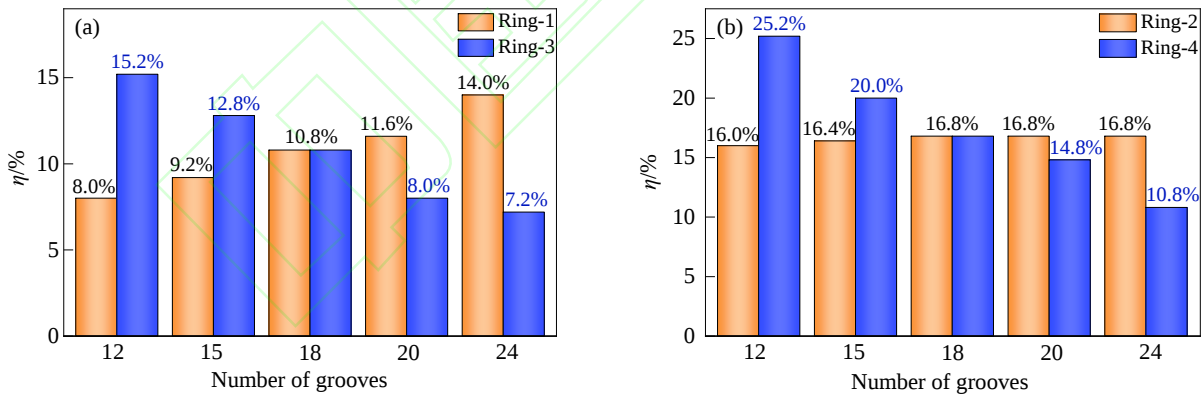


图9 保持环在沟槽数量相同时不同沟槽宽度对抛光液有效利用率的影响: (a) 尖角型沟槽和 (b) 圆角型沟槽

Fig.9 Effects of groove width on the slurry effective utilization for the retaining ring with the same groove number: (a) sharp groove and (b) fillet groove

3.4 计算与实验的对比

为了验证计算结果的准确性,将本工作的模拟计算结果与Liao等^[15]的实验结果进行对比分析。实验中使用的保持环结构是商用的具有18个等距3 mm宽的平行四边形斜槽,其中一个为尖角槽设计另一个为圆角槽

设计,这与本工作中Ring-1-18和Ring-2-18的保持环构型一致,增加了数据的可对比性。由于实验中无法通过测量数据直接获得抛光液的有效利用率,因此通过对比实验和计算中获得的抛光液有效利用率的变化趋势来证明计算模型的准确性。实验中通过测量保持环外

抛光液的平均弓形波厚度来反映抛光盘-晶圆界面中的抛光液液膜厚度,较厚的弓形波对应抛光盘-晶圆界面中较薄的抛光液膜,即较低的抛光液有效利用率。而本工作计算通过测量抛光盘-晶圆界面中抛光液的平均流速来反映抛光液的有效利用率,较大的流速说明有更多的抛光液进入到抛光盘-晶圆界面中,即较大的抛光液有效利用率。实验结果表明,具有圆角槽设计的保持环外有更薄的弓形波,即抛光液有效利用率更大。理论计算结果表明圆角槽设计的保持环内抛光液的平均流速更大,即圆角槽设计的保持环比尖角槽有更高的抛光液有效利用率。这与实验中得到的结果有相同的趋势,证明了计算所得结果的准确性,同时也验证了压差流模型的合理性。

4 结论

本工作建立了20种保持环结构模型,使用有限元模拟探究了保持环结构(包括保持环沟槽数量,保持环沟槽宽度以及尖角沟槽和圆角沟槽)对抛光液有效利用率的影响。结论如下:

(1) 当保持环上的沟槽为相同宽度(3 mm)的尖角沟槽时,抛光液的有效使用率随着保持环沟槽数的增加而呈现线性增加。

(2) 当保持环上的沟槽为相同宽度(3 mm)的圆角沟槽时,抛光液的有效使用率随着沟槽数量的增加而变化不大。当沟槽数增加到18时,抛光液的有效利用率不再随着沟槽数量的增加而变化。当保持环的沟槽数量和沟槽宽度都相同时,圆角沟槽更有利于抛光液在抛光垫-晶圆界面处传输,从而实现更高的抛光液有效利用率。

(3) 保持环的沟槽面积相同($1785.4 \pm 0.3 \text{ mm}^2$)时,沟槽的宽度越大,越有利于抛光液通过沟槽在抛光垫-晶圆界面处传输,从而抛光液的有效利用率也更高。

(4) 本工作提供了一种基于压差流模型研究保持环结构的数值模拟方法,相比于传统的离心流模型,保证计算结果准确性的同时,计算成本更低,可为实验上保持环的设计提供理论指导。

致谢

本工作非常感谢上海集成电路材料研究院黄嘉晔的讨论支持。

参考文献

- [1] Zhao D W, Lu X C. Chemical mechanical polishing: theory and experiment [J]. *Friction*, 2013, 1(4): 306–326.
- [2] Dong Y, Lei H, Liu W Q, et al. Preparation of non-spherical silica composite abrasives by lanthanum ion-induced effect and its

- chemical - mechanical polishing properties on sapphire substrates [J]. *Journal of Materials Science*, 2018, 53(15): 10732–10742.
- [3] Lei H, Tong K Y. Preparation of La-doped colloidal SiO_2 composite abrasives and their chemical mechanical polishing behavior on sapphire substrates [J]. *Precision Engineering*, 2016, 44: 124–130.
- [4] Zhang B C, Lei H, Chen Y. Preparation of Ag_2O modified silica abrasives and their chemical mechanical polishing performances on sapphire [J]. *Friction*, 2017, 5(4): 429–436.
- [5] Zhong Z W. Recent advances in polishing of advanced materials [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2008, 23(5): 449–456.
- [6] Shi X L, Xu L, Zhou Y, et al. An in situ study of chemical-mechanical polishing behaviours on sapphire (0001) via simulating the chemical product-removal process by AFM-tapping mode in both liquid and air environments [J]. *Nanoscale*, 2018, 10(42): 19692–19700.
- [7] Zhang Z F, Zhang W J, Zhang S D, et al. Study on chemical mechanical polishing performances of sapphire wafer (0001) using silica-based slurry [J]. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2017, 6(10): P723.
- [8] Philipossian A, Mitchell E. Slurry utilization efficiency studies in chemical mechanical planarization [J]. *Japanese journal of applied physics*, 2003, 42(12R): 7259.
- [9] Mu Y, Zhuang Y, Sampurno Y A, et al. Effect of pad groove width on slurry mean residence time and slurry utilization efficiency in CMP [J]. *Microelectronic Engineering*, 2016, 157: 60–63.
- [10] Wei X M, Zhuang Y, Sampurno Y A, et al. Tribological, thermal, and wear characteristics of poly (phenylene sulfide) and polyetheretherketone retaining rings in interlayer dielectric CMP [J]. *Electrochemical and Solid-State Letters*, 2010, 13(11): H391.
- [11] Yang T S, Wang Y C, Chen K S, et al. Optimization of wafer-back pressure profile in chemical mechanical planarization [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2008, 155(10): H720.
- [12] Doy T K, Seshimo K, Suzuki K, et al. Impact of novel pad groove designs on removal rate and uniformity of dielectric and copper CMP [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2004, 151(3): G196.
- [13] Wei X M, Sampurno Y A, Zhuang Y, et al. Effect of retaining ring slot design on slurry film thickness during CMP [J]. *Electrochemical and solid-state letters*, 2010, 13(4): H119.
- [14] Bengochea L V, Sampurno Y A, Stuffle C, et al. Effect of retaining ring slot designs, conditioning discs and conditioning schemes on the slurry bow wave width during chemical mechanical planarization [J]. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2018, 7(5): P253.
- [15] Liao X Y, Sampurno Y A, Zhuang Y, et al. Effect of retaining ring slot designs and polishing conditions on slurry flow dynamics at bow wave [J]. *Microelectronic Engineering*, 2012, 98: 70–73.
- [16] Liao X Y, Sampurno Y A, Zhuang Y, et al. Effect of slurry application/injection schemes on slurry availability during chemical mechanical planarization (CMP) [J]. *Electrochemical and Solid-State Letters*, 2012, 15(4): H118.
- [17] Guo X G, Yuan S, Wang X L, et al. Atomistic mechanisms of chemical mechanical polishing of diamond (100) in aqueous H_2O_2 /pure H_2O : molecular dynamics simulations using reactive force field (ReaxFF) [J]. *Computational Materials Science*, 2019, 157: 99–106.
- [18] Nguyen N Y, Tian Y, Zhong Z W. Modeling and simulation for the distribution of slurry particles in chemical mechanical polishing

- [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 75(1): 97–106.
- [19] Shi X L, Zou C L, Pan G S, et al. Atomically smooth gallium nitride surface prepared by chemical–mechanical polishing with $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ – Fe^{2+} based slurry [J]. Tribology International, 2017, 110: 441–450.
- [20] Lin Z C, Wang R Y, Ma S H. Theoretical model and experimental analysis of chemical mechanical polishing with the effect of slurry for abrasive removal depth and surface morphology of silicon wafer [J]. Tribology International, 2018, 117: 119–130.
- [21] 花成旭. 化学机械抛光中抛光液流动特性研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017: 1–78.
- Hua C X. Research on flowing features of slurry in chemical mechanical polishing [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017: 1–78.
- [22] Wen J, Ma T, Zhang W, et al. Atomistic mechanisms of Si chemical mechanical polishing in aqueous H_2O_2 : ReaxFF reactive molecular dynamics simulations [J]. Computational Materials Science, 2017, 131: 230–238.
- [23] Rastegar V. Effect of large particles during chemical mechanical polishing based on numerical modeling of abrasive particle trajectories and material removal non-uniformity [J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 2018, 31(2): 277–284.
- [24] Zhu A B, He D Y, Luo W C, et al. Role of crystal orientation on chemical mechanical polishing of single crystal copper [J]. Applied Surface Science, 2016, 386: 262–268.
- [25] Zhu A B, He D Y, He S L, et al. Material removal mechanism of copper chemical mechanical polishing with different particle sizes based on quasi-continuum method [J]. Friction, 2017, 5(1): 99–107.
- [26] Kawaguchi K, Ito H, Kuwahara T, et al. Atomistic mechanisms of chemical mechanical polishing of a Cu surface in aqueous H_2O_2 : tight-binding quantum chemical molecular dynamics simulations [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8(18): 11830–11841.
- [27] Yu T Y, Li Z X, Wu D Z. Predictive modeling of material removal rate in chemical mechanical planarization with physics-informed machine learning [J]. Wear, 2019, 426: 1430–1438.
- [28] Chen C C A, Pham Q P. Study on diamond dressing for non-uniformity of pad surface topography in CMP process [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(9): 3573–3582.
- [29] Nanz G, Camilletti L E. Modeling of chemical–mechanical polishing: a review [J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 1995, 8(4): 382–389.
- [30] Runnels S R, Eyman L M. Tribology analysis of chemical–mechanical polishing [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1994, 141(6): 1698.
- [31] Levert J A, Mess F M, Salant R F, et al. Mechanisms of chemical–mechanical polishing of SiO_2 dielectric on integrated circuits [J]. Tribology Transactions, 1998, 41(4): 593–599.
- [32] Tichy J, Levert J A, Shan L, et al. Contact mechanics and lubrication hydrodynamics of chemical mechanical polishing [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1999, 146(4): 1523.
- [33] 冯春阳. 纳米集成电路化学机械抛光工艺建模与仿真及可制造性设计技术研究 [D]. 上海: 复旦大学, 2010: 1–100.
- Feng C Y. Research on modeling and simulation of chemical mechanical polishing process for nanointegrated circuits and design for manufacturability technology [D]. Shanghai: Fudan University, 2010: 1–100.
- [34] 潘江. 300 mm 硅片化学机械抛光工艺参数研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2016: 1–55.
- Pan J. Research on 300 mm wafer chemical mechanical polishing process recipe parameters [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016: 1–55.