

## 研究综述

【特邀稿】

## 化学机械抛光中的接触状态研究概述

张朝辉, 耿旭, 李梓万, 王智源, 鲁智德

(北京交通大学 机械与电子控制工程学院, 北京 100044)

**摘 要:** 化学机械抛光是获取高表面平整度的有效关键技术, 获得了广泛的研究和应用, 其表面材料的去除作用依赖于所处的真实接触状态。归纳了抛光垫/晶圆相互作用的形式, 即相互滑过而没有直接接触、混合润滑和直接接触。分析了接触状态及其转变过程中的影响因素, 包括抛光垫的变形、釉化和磨损, 抛光液中磨粒的影响及表面活性剂对钝化层厚度的改变等。重点总结了化学机械抛光中接触状态问题的研究进展, 包括光学显微镜测量计算接触面积比、薄膜传感器测量接触面积比、利用双发射激光诱导荧光技术测量抛光液厚度、抛光垫表面形貌演变对材料去除速率的建模等方法的特点及存在的问题。最后提出了纳米间隙测量技术测量化学机械抛光中接触率动态变化, 从而得到真实接触状态和接触状态转变规律的新思路。

**关键词:** 化学机械抛光; 接触状态; 平坦化; 材料去除; 纳米间隙测量

**中图分类号:** TG356.28   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1001-3660(2020)03-0050-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.03.007

An Overview of Research on Contact State in  
Chemical Mechanical Polishing

ZHANG Chao-hui, GENG Xu, LI Zi-wan, WANG Zhi-yuan, LU Zhi-de

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

**ABSTRACT:** Chemical mechanical polishing (CMP) is an effective key technology for obtaining high surface flatness, and has been widely studied and applied. The removal of its surface material depends on the actual contact state it is in. The form of polishing pad/wafer interactions is summarized in the paper, including slipping through each other without direct contact, mixed lubrication, and direct contact. The contact state and its influencing factors are analyzed, including the deformation, glaze and wear of the polishing pad, the influence of abrasive particles in the polishing solution, and the change of the thickness of the passivation layer by the surfactant. The research progress of the contact state in chemical mechanical polishing is summarized, including the calculation of the contact area ratio by optical microscopy, the measurement of the contact area ratio of the thin film sensor, the measurement of the thickness of the polishing solution by the dual emission laser induced fluorescence technique, and modeling of material removal rate by polishing surface morphology evolution. The characteristics of these methods and the problems that exist are pointed out in the article. Finally, a new idea of nanogap measurement technology to measure the dynamic change of contact rate in chemical mechanical polishing to obtain the true contact state and contact state transition law is proposed.

收稿日期: 2019-08-28; 修订日期: 2019-11-11

Received: 2019-08-28; Revised: 2019-11-11

作者简介: 张朝辉 (1972—), 男, 博士, 教授, 博导, 主要研究方向为精密制造与摩擦学。邮箱: zhhzhang@bjtu.edu.cn

**Biography:** ZHANG Chao-hui (1972—), Male, Doctor, Professor, Doctoral tutor, Research focus: precision manufacturing and tribology. E-mail: zhhzhang@bjtu.edu.cn

引文格式: 张朝辉, 耿旭, 李梓万, 等. 化学机械抛光中的接触状态研究概述[J]. 表面技术, 2020, 49(3): 50-56.

ZHANG Chao-hui, GENG Xu, LI Zi-wan, et al. An overview of research on contact state in chemical mechanical polishing[J]. Surface technology, 2020, 49(3): 50-56.

**KEY WORDS:** Chemical mechanical polishing; contact state; planarization; material removal; nano gap measurement

先进电子制造业是当今世界竞争最激烈、发展最迅速的产业，是向机械制造科学与技术提出超越当代制造极限的挑战，必须对制造原理、工艺与装备进行本质变革。在集成电路芯片制造中，金属互连常通过多层金属结构来实现，此时金属互连分布在由介电层区隔的多个平面中。为了光刻和刻蚀的需要，每一层都需足够平整，平坦化是这一技术的关键一环。1985 年，化学机械抛光（Chemical mechanical polishing, CMP）技术由 IBM 引入用于 CMOS（Complementary metal oxide semiconductor）产品制造，并且最初主要用于抛光  $\text{SiO}_2$  和抛光钨金属层。随后化学机械抛光作为芯片制造加工中的关键一环，获得了广泛应用，并得到深入研究<sup>[1-4]</sup>。

照相平板印刷技术（Photolithography）需要投射光在晶片表面上，因而晶片的全局平整度非常重要，如果表面不够平整，聚焦将不正确，从而引起不正确的线宽和互连结构的空隙。另外，IC（Integrated circuit）通常都是多层结构，随着层数的增加，不平度将累积，所以需要利用化学机械抛光技术以产生出理想的平整表面。

在 IC 中应用最广的电导体和绝缘体材料分别是 Al 和  $\text{SiO}_2$ 。因为 Cu 的电阻率更低，近年来有取代 Al 的趋势。Cu 互连常通过大马士革方法（Damascene process）实现，它是将通路或沟槽刻蚀在级间介电层（Interlevel dielectric, ILD）上，然后涂覆金属，再抛光表面。

与半导体行业密切相关的计算磁记录系统，在尺寸和存储量上，发展都非常迅速。化学机械抛光是适于实现计算机硬盘、大尺寸硅片等盘片的高精度抛光，获取全局和局部高级别平面度的技术。它不仅应用到 Ni-P 合金为表面层的硬盘盘片、硅片，还可以用到锗、钨、铜、玻璃、宝石等材料的表面高精度抛光<sup>[5]</sup>。

在抛光过程中材料的切除和晶片表面的抛光是衬底（抛光垫）、磨粒和化学反应剂等联合作用的结果。研究者针对它们之间的相互作用，从各个方面出发进行物理建模，以表征化学机械抛光的加工能力和作用机理。分析和研究加工过程中所处的真实接触状态及其转变规律，将有助于更好地理解化学机械抛光的作用机理和加工特性。本文总结了接触状态研究的现状，分析了接触状态及其转变过程中的影响因素，研究加工过程中所处的真实接触状态及其转变规律，并指出当前的研究模型中存在的问题，对其发展趋势进行了展望。

## 1 化学机械抛光中的接触状态问题

在化学机械抛光中，旋转的被抛光晶片被压在旋

转的弹性抛光垫（二者通常有相同的旋转方向）上，而含有磨粒和化学反应物的抛光液则在晶片与抛光垫板之间流动（如图 1 所示）。材料的去除和晶片表面的抛光是衬底（抛光垫）、磨粒和化学反应剂联合作用的结果。化学机械抛光技术综合了化学作用与机械作用，实现表层材料的精密去除和/或钝化，形成超精表面。

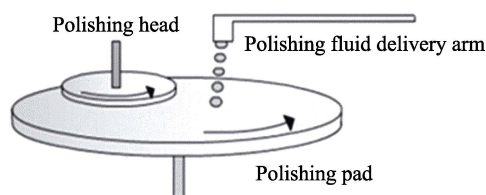


图 1 化学机械抛光原理图

Fig.1 Schematic diagram of chemical mechanical polishing

化学机械抛光包含晶圆、抛光垫和抛光液之间的相互运动及其机械行为<sup>[6]</sup>，大部分物理模型基于三者之间的相互作用<sup>[7-8]</sup>。抛光液在相对运动的晶圆和抛光垫之间流动，抛光垫/晶圆相互作用可能有以下三种形式：（1）相互滑过而没有直接接触<sup>[9-10]</sup>，流体运动产生的应力提供去除力；（2）混合润滑状态<sup>[11-14]</sup>；（3）直接接触<sup>[15-16]</sup>。在化学机械抛光的过程中，被抛光材料有不同的材料特性<sup>[17]</sup>，有可能产生塑性变形<sup>[18]</sup>，其应力分布受到下压力大小、保持器（包括背载薄膜）、晶圆和抛光垫的物理性质等因素的影响。

研究者提出了各种不同的化学机械抛光模型来描述其过程<sup>[19-22]</sup>。每个模型都对给定条件下的部分因素进行了解释，因而都具有积极的意义。一方面，依赖于尺寸大小不同<sup>[23-27]</sup>，常见的化学机械抛光模型有宏观和微观等类型：晶圆尺度<sup>[28-30]</sup>和特征尺度<sup>[31-33]</sup>。晶圆尺度模型主要涉及晶圆上的物理现象，通常尺寸在几百毫米（比如抛光液分布与全局抛光速率）。特征尺度模型主要用于研究晶圆上典型设备特征，尺寸范围常为几微米或更小。这些模型通常能够在加入某些假定的条件下给出平均材料去除加工的特征，但对机理的揭示作用比较有限。特征尺度模型更多关注局部的去除速率而不是全局的去除速率，一般能够表征材料的局部去除原因。由于抛光质量和速率等均与其所处的接触状态及接触状态的转变息息相关，该过程受较多因素的影响，这一信息在目前的模型中没有得到完整的体现，值得深入研究。

## 2 接触状态的影响因素

不同材料的接触副所处的接触状态是其机械力学行为的基础。材料在受载过程中将经历各种变化，一般而言，由于材料性质不同，可能有弹性变形、塑

性变形或两者同时存在的弹塑性变形等。在化学机械抛光过程中, 由于以下原因会有不同的接触状态。

在抛光过程中, 抛光垫是高弹性、多孔隙、粗糙的<sup>[34-36]</sup>, 它比较软因而在力作用下容易变形<sup>[37-38]</sup>, 因此在考虑这一因素建模时, 抛光垫的机械特性会因为吸水而产生变化<sup>[39]</sup>, 抛光垫会经历釉化和磨损变得光滑, 从而引起接触状态的变化<sup>[40-41]</sup>。同时由于受热等因素的影响, 聚合物抛光垫在抛光时性能也不一样<sup>[42]</sup>, 这同样会有可能产生接触状态的转变<sup>[43]</sup>。

抛光过程中的另一影响因素是抛光液, 它是一种含有化学剂和磨粒等在内的混合物<sup>[44-45]</sup>。抛光液中磨粒的类型、大小、硬度和形状等因素均影响化学机械抛光的效果。混合磨粒还具有不同的硬度<sup>[46]</sup>, 一般来说, 较软的磨粒对晶圆表面粗糙度控制有利, 而对提高抛光速率则不然。晶圆/磨粒/抛光垫系统的接触情况比较复杂, 同时存在不同的接触情况。磨粒浓度是接触状态的潜在影响因素<sup>[47-49]</sup>。表面活性剂和其他化学物质一般不改变磨粒的硬度<sup>[50]</sup>, 对系统中粒子的接触变形影响不大。然而, 它们能够改变钝化层的厚度, 对抛光垫表面接触状态及其转化起到作用。

在铜和其他可能的金属抛光过程中, 材料去除也可以通过其他机制实现。商用抛光液通常包括络合剂, 通过溶解机械研磨材料和/或直接从晶圆氧化区域去除铜来协助去除过程。考虑溶解步骤可更准确地确定化学和机械作用。此外, 还有钝化膜的形成。因此有 Cu 抛光的三步模型<sup>[51]</sup>, 如图 2 所示。铜金属层首先和化学剂结合, 形成与基体不同的钝化层, 随后通过机械作用去除或溶解作用实现表面的平坦化。可见在形成钝化层和溶解过程中, 参与抛光的系统产生了不同的接触关系, 而且随着抛光过程的进行, 接触状态会发生动态变化。

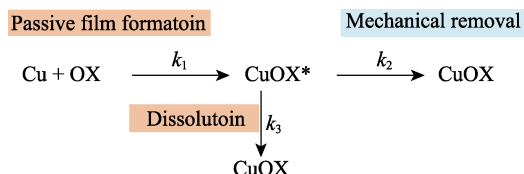


图 2 三步骤铜抛光模型<sup>[51]</sup>

Fig.2 Three-step copper polishing model<sup>[51]</sup>

接触状态的影响因素众多, 既与材料物理性质相关, 也与工况参数相关, 还与使用的抛光液化学成分等因素有关, 而且各种因素相互影响、相互作用, 使得在抛光过程中的真实接触状态产生转变。目前, 对此尚缺乏全面研究和准确揭示, 使得化学机械抛光的机理在某种程度上仍然是一种“黑箱技术”。

### 3 接触状态研究现状

#### 3.1 测量接触面积比

为了研究化学机械抛光中的接触问题, Yang 等<sup>[52]</sup>

利用图 3 所示设备模拟测量了接触面积比。接触面积的测量工具由一个夹具(顶板上的一个开孔用于光学显微镜观测)、一个光学玻璃(在测量区域  $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$  内的表面粗糙度为  $0.704 \text{ nm}$ ) 和一个  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  的抛光垫样品组成。通过使用螺钉给顶板施加位移从而改变载荷, 测量中施加的载荷为  $0.0207 \text{ MPa}$ 。利用程序分析光学图像(测量数据放大率为  $100\times$ ), 可计算接触面积比: 将图像的白色区域(即接触区域)除以抛光垫的总面积。应当指出, 设备测量的并非晶圆/抛光垫的接触面积比。

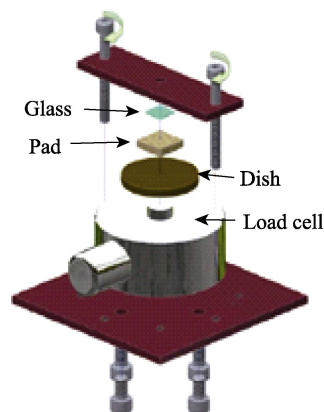


图 3 抛光垫接触测量设备<sup>[52]</sup>

Fig.3 Polishing pad contact measuring device<sup>[52]</sup>

他们比较了抛光垫/晶圆界面间接触面积和推测垂直分布的情况, 用  $70 \text{ mm}$  金刚石处理的抛光垫的估计接触面积百分比为  $5.2\%$  (图 4a), 经  $180 \text{ mm}$  处理的衬垫的估计接触面积百分比为  $7.5\%$  (图 4b)。与多孔型垫的接触面积相比,  $70 \text{ mm}$  金刚石的接触粗糙度比  $180 \text{ mm}$  金刚石的接触粗糙度小。从图 4b 的扫描电镜照片来看,  $180 \text{ mm}$  金刚石产生的大而规则的粗糙度主要导致接触面积的增加。在相同的下压力作用下, 由于接触面积减小, 局部接触压力增加会导致晶圆去除率增加。通过调节器金刚石尺寸的变化来减少接触面积是增加化学机械抛光去除率的直接来源。

#### 3.2 双发射激光诱导荧光技术测量抛光液厚度

有研究认为颗粒-晶圆接触是化学机械抛光中平坦化的原因。由于颗粒位于抛光垫表面, 这意味着去除率应与抛光垫和晶圆接触面积相关。Gary<sup>[53]</sup>使用双发射激光诱导荧光 (Dual emission laser induced fluorescence, DELIF) 技术, 原位测量了抛光垫与晶圆的接触。用 DELIF 技术测量流体薄膜厚度, 实现了高空间分辨率 ( $2.9 \mu\text{m}/\text{像素}$ ) 的抛光液厚度的即时测量。模型分析与标定实验表明化学机械抛光的 DELIF 图像强度和流体层厚度在  $0 \sim 133 \mu\text{m}$  范围内存在线性关系。通过绘制图像强度直方图, 可以分析抛



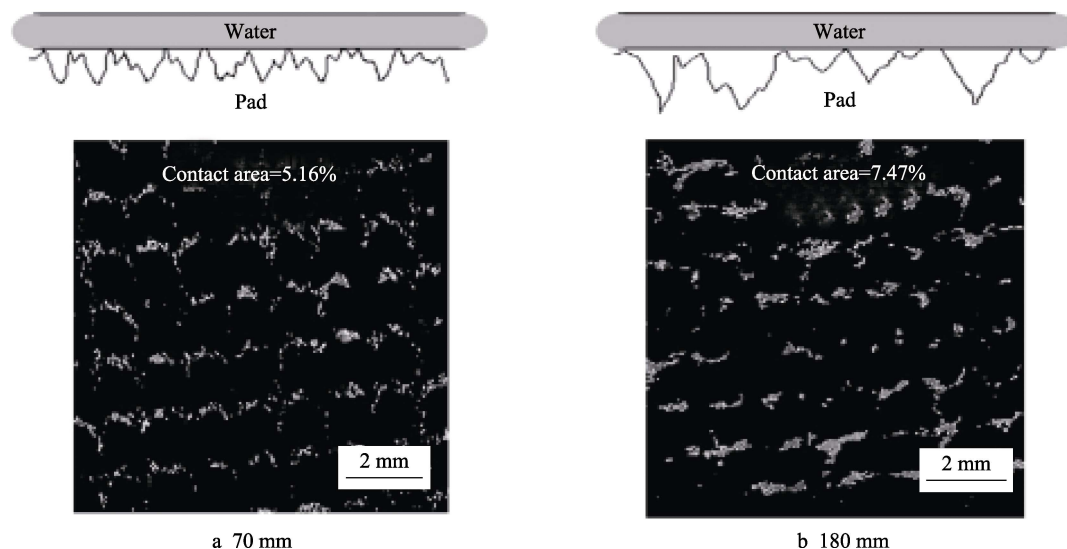


图 4 晶圆/抛光垫的接触及不同修整器的接触面积测量结果<sup>[52]</sup>  
Fig.4 Contact of wafer/polishing pad and contact area measurement of different trimmers<sup>[52]</sup>

光液厚度的 DELIF 图像, 以进行接触情况分析。该直方图代表抛光垫的粗糙峰高度分布, 当抛光垫与晶圆接触时, 粗糙峰变平, 在代表接触的低强度极限处形成二次峰。用 DELIF 测得的化学机械抛光动态条件下接触率的变化如图 5 所示。

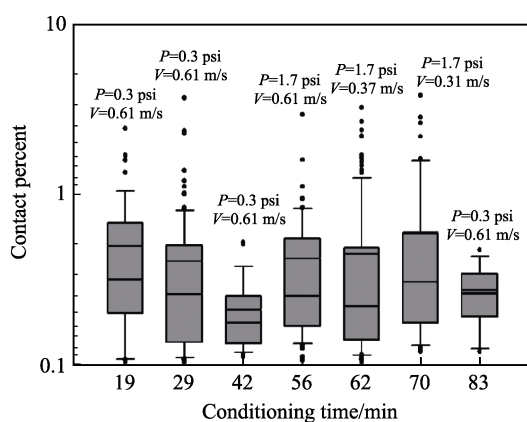


图 5 接触率随抛光时间的变化  
(CMC D00 抛光垫, DELIF 技术)<sup>[53]</sup>  
Fig.5 Contact rate as a function of polishing time  
(CMC D00 polishing pad, DELIF technology)<sup>[53]</sup>

他们的结果发现, 可测量的接触面积百分比随着修整时间的增加而减小, 随着压力的增加而增加, 随着速度的增加而减小。但是所有测试工艺条件下的平均测量接触百分比小于 1%。由于与 DELIF 相关的高测量噪声, 系统无法测量低于 0.1% 的接触情况。

### 3.3 抛光垫表面形貌对材料去除速率的建模

抛光垫是软弹性材料, 在化学机械抛光过程中, 由于水的浸泡作用, 抛光垫的弹性模量等物理性质会产生较大的变化<sup>[42]</sup>, 从而会引起抛光时的接触状态变化。另外, 由于抛光垫在加工过程中的釉化, 其表面

变得越来越不能维持加工速率所需的表面粗糙程度。如果抛光垫在化学机械抛光过程中没有修整, 则材料去除速率 (Material remove rate, MRR) 会随着时间而较快衰减。

Borucki 提出了一个考虑抛光垫表面粗糙峰磨损引起的抛光速率下降的动态过程<sup>[54]</sup>。在 Borucki 模型的基础上, Wang<sup>[55]</sup>在对 MRR 衰减的研究中, 研究了抛光垫表面形貌的随机变化, 考察了抛光垫表面韧性 (而晶圆认为是光滑和平整的), 利用抛光垫与晶圆间的弹性/非弹性接触对化学机械抛光的 MRR 进行了建模。观察到抛光垫表面形貌的演变显著影响 MRR 的变化, 这一模型的显著特点是 MRR 是基于材料的每一个粗糙峰的去除。结果表明, 弹性接触模型的 MRR 结果有明显低估。

在 MRR 随时间演化的模型中, 抛光垫粗糙峰分布的初始概率密度函数 (Probability distribution function, PDF) 的选择很关键, PDF 参数数值的微小变化可能对材料去除模型预测的准确性产生重大影响。

### 3.4 薄膜传感器测量接触面积比

笔者对化学机械抛光中静态和动态下实际抛光过程中晶圆表面的压力分布进行了研究。用薄膜传感器测出静态下抛光头上下压力的分布情况 (图 6), 红色区域 (接触区中心部分) 表示能达到的最大标定压力, 即抛光头上的设置压力 (处于直接接触状态)。图 6 中给出了直接区域面积占总面积的比例与压力大小的数值。红色区域面积占总面积的比例随力大小的数值变化关系可进一步如图 7 所示, 在 (静态) 加压过程中, 抛光垫的接触变形是非线性的, 抛光垫在此时的接触状态不是纯弹性或纯塑性的, 而是二者都存在 (弹塑性转变需进一步研究)。

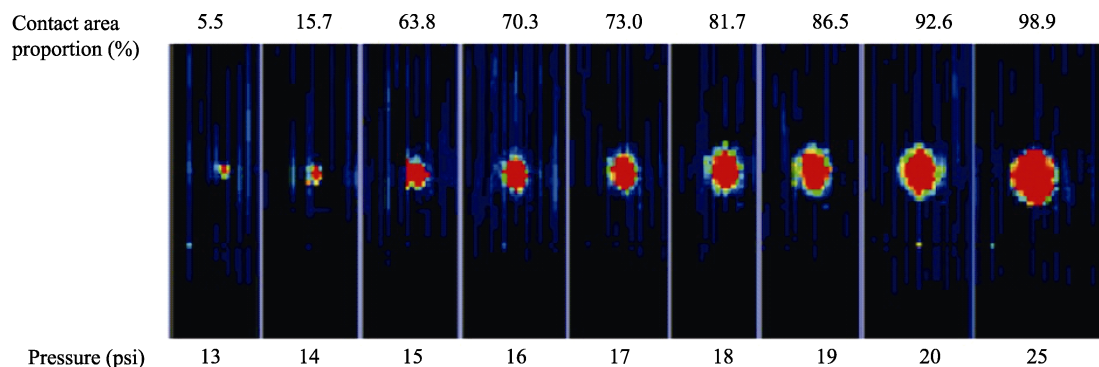


图6 薄膜传感器测得静态压力分布

Fig.6 Static pressure distribution measured by a thin film sensor

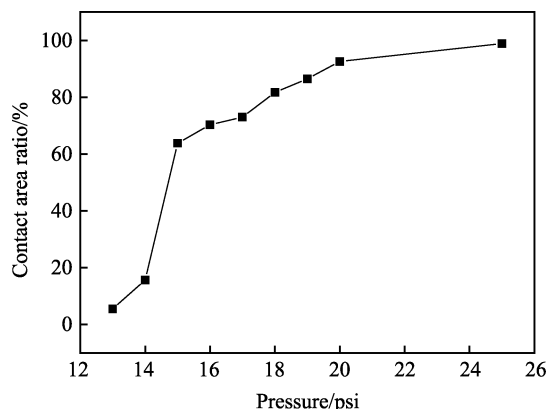


图7 红色区域面积占比随压力变化

Fig.7 The proportion of red area under different pressures

### 3.5 纳米间隙测量法

前述关于接触状态的研究多是静态的,提供的关于真实接触状态的信息不够多,特别是缺少真实接触状态动态转变的有效数据。可以看出,制约接触状态研究的阻碍在于缺少真实接触状态的测量技术,最近发展起来的相对光强干涉技术等为解决这一问题提供了一种可能<sup>[56]</sup>。

采用纳米间隙测量手段测量模拟化学机械抛光条件下的接触率变化规律,从而得到化学机械抛光中真实接触状态和接触状态的转变规律。在这一测量中,由于间隙的分辨率为 0.5 nm 左右,设定测量所得间隙小于 1 nm 的区域为直接接触区,大于 1 nm 的区域为非接触区。由于透光的要求,选取晶圆材料也限于 SiO<sub>2</sub> 和蓝宝石等材料,以及通过 CVD (Chemical vapor deposition) 进行 SiO<sub>2</sub> 和蓝宝石表面改性的其他材料。抛光液和抛光垫材料不受限制,接触率的变化即可反映真实接触状态关系。

## 4 结论与展望

化学机械抛光是现代 IC 制造产业中的关键环节,也是不断发展中的新技术。化学机械抛光的材料去除和加工质量均依赖于加工过程中的真实接触状

态以及接触状态的转变。

参与化学机械抛光作用的晶圆/抛光液/抛光垫系统中,影响真实接触状态的因素很复杂,包括晶圆在抛光液化学和物理冲击下的钝化层形成与去除、晶圆表面加工中的粗糙度变化,抛光垫在加工过程中的物理和化学性质的变化,以及在微观材料去除时产生的温度变化与其他因素作用等,要建立模型来预测加工中的实际接触情况及其变化很困难。另外,这些因素之间也相互作用,在加工去除的过程中,系统所处的真实接触情况实时变化,从而使得目前的已有研究没能完整地提供化学机械抛光的真实接触状态以及其转变规律的相貌。

用 DELIF 技术和薄膜传感器测量发现接触面积百分比随着修整时间的增加而减小,随着压力的增加而增加,随着速度的增加而减小,抛光垫所处的接触状态不是纯弹性或纯塑性的,而是二者都存在,但是没有给出弹性/塑性的占比及变化。

用纳米级膜厚测试技术可以测量运动时的接触状态变化,可模拟测量化学机械抛光中接触率的动态变化,可为化学机械抛光中真实接触状态以及真实接触状态变化的研究提供新思路和新技术。

### 参考文献:

- [1] NANZ G, CAMILLETI L E. Modeling of chemical-mechanical polishing: A review[J]. IEEE transactions on semiconductor manufacturing, 1995, 8(4): 382-389.
- [2] ZANTYE P B, KUMAR A, SIKDER A K. Chemical mechanical planarization for microelectronics applications[J]. Materials science and engineering R, 2004, 45(3-6): 89-220.
- [3] THAGELLA S, SIKDER A K, KUMAR A. Tribological issues and modeling of removal rate of low-*k* films in CMP[J]. Journal of the electrochemical society, 2004, 151(3): 205-215.
- [4] HARTMANNSGRUBER E, ZWICKER G, BEEKMANN K. A selective CMP process for stacked low-*k* CVD oxide

- films[J]. *Microelectronic engineering*, 2000, 50(1-4): 53-58.
- [5] 雷红, 雒建斌, 张朝辉. 化学机械抛光技术的研究进展[J]. *上海大学学报*, 2003, 9(6): 494-502.
- LEI H, LUO J B, ZHANG C H. Advances in chemical mechanical polishing[J]. *Journal of Shanghai University*, 2003, 9(6): 494-502.
- [6] CHANG A K. Investigation of mechanical aspects of chemical mechanical polishing[D]. Berkeley: University of California, 2002.
- [7] THAKURTA D G, BORST C L, SCHWENDEMAN D W, et al. Pad porosity, compressibility and slurry delivery effects in chemical-mechanical planarization: Modeling and experiments[J]. *Thin solid films*, 2000, 366(1-2): 181-190.
- [8] JIANG M, WOOD N O, KOMANDURI R. On chemo-mechanical polishing (CMP) of silicon nitride ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) work material with various abrasives[J]. *Wear*, 1998, 220(1): 59-71.
- [9] PARK S S, CHO C H, AHN Y. Hydrodynamic analysis of chemical mechanical polishing process[J]. *Tribology international*, 2000, 33(10): 723-730.
- [10] LU J, ROGERS C, MANNO V P, et al. Measurements of slurry film thickness and wafer drag during CMP[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2004, 151(4): 241-247.
- [11] KIM T W, CHO Y J. Average flow model with elastic deformation for CMP[J]. *Tribology international*, 2006, 39(11): 1388-1394.
- [12] FREDHIGGS C, NG S H, BORUCKI L, et al. A mixed-lubrication approach to predicting CMP fluid pressure modeling and experiments[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2005, 152(3): 193-198.
- [13] JENG Y R, HUANG P Y, PAN W C. Tribological analysis of CMP with partial asperity contact[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2003, 150(10): 630-637.
- [14] KASAI T. A kinematic analysis of disk motion in a double sided polisher for chemical mechanical planarization (CMP)[J]. *Tribology international*, 2008, 41(2): 111-118.
- [15] LIANG H. Chemical boundary lubrication in chemical-mechanical planarization[J]. *Tribology international*, 2005, 38(3): 235-242.
- [16] ZHAO Y W, CHANG L. A micro-contact and wear model for chemical-mechanical polishing of silicon wafers[J]. *Wear*, 2002, 252(3-4): 220-226.
- [17] WANG Y L, WU J, LIU C W, et al. Material characteristics and chemical-mechanical polishing of aluminum alloy thin films[J]. *Thin solid films*, 1998, 332(1-2): 397-403.
- [18] LIANG H, KAUFMAN F, SEVILLA R, et al. Wear phenomena in chemical mechanical polishing[J]. *Wear*, 1997, 211(2): 271-279.
- [19] LEVERT J A, MESS F M, SALANT R F, et al. Mechanisms of chemical-mechanical polishing of  $\text{SiO}_2$  dielectric on integrated circuits[J]. *Tribology transactions*, 1998, 41(4): 593-599.
- [20] ZHAO Y W, CHANG L, KIM S H. A mathematical model for chemical-mechanical polishing based on formation and removal of weakly bonded molecular species[J]. *Wear*, 2003, 254(3-4): 332-339.
- [21] JENG Y R, TSAI H J. Improved model of wafer/pad powder slurry for CMP[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2003, 150(6): 348-354.
- [22] CASTILLO-MEJIA D, BEAUDOIN S. A locally relevant prestonian model for wafer polishing[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2003, 150(2): 96-102.
- [23] SEOK J, SUKAM C P, KIM A T, et al. Multiscale material removal modeling of chemical mechanical polishing[J]. *Wear*, 2003, 254(3-4): 307-320.
- [24] CHANG L. On the CMP material removal at the molecular scale[J]. *Journal of tribology*, 2007, 129(2): 436-437.
- [25] WANG Y, CHEN Y, QI F, et al. A molecular-scale analytic model to evaluate material removal rate in chemical mechanical planarization considering the abrasive shape[J]. *Microelectronic engineering*, 2015, 134: 54-59.
- [26] MAO Z. Macroscopic and microscopic modelling in chemical-mechanical polishing (CMP) process[D]. Berkeley: University of California, 2003.
- [27] YERUVA S B. Particle scale modeling of material removal and surface roughness in chemical mechanical polishing[D]. Berkeley: University of Florida, 2005.
- [28] LEE H, JEONG H. A wafer-scale material removal rate profile model for copper chemical mechanical planarization[J]. *International journal of machine tools & manufacture*, 2011, 51(5): 395-403.
- [29] LUO J. Integrated modeling of chemical mechanical planarization/polishing (CMP) for integrated circuit fabrication: From particle scale to die and wafer scales[D]. Berkeley: University of California, 2003.
- [30] SEOK J, SUKAM C P, KIM A T, et al. Material removal model for chemical-mechanical polishing considering wafer flexibility and edge effects[J]. *Wear*, 2004, 257(5-6): 496-508.
- [31] CHOI J. Chip scale modeling of chemical mechanical planarization (CMP) for layout dependent variation[D]. Berkeley: University of California, 2006.
- [32] SAXENA R, THAKURTA D G, GUTMANN R J, et al. A feature scale model for chemical mechanical planarization of damascene structures[J]. *Thin solid films*, 2004, 449(1): 192-206.
- [33] QIN K. Multi-scale modeling of the slurry flow and the

- material removal in chemical mechanical polishing[D]. Gainesville: University of Florida, 2003.
- [34] THAKURTA D G, BORST C L, SCHWENDEMAN D W, et al. Pad porosity, compressibility and slurry delivery effects in chemical-mechanical planarization: Modeling and experiments[J]. *Thin solid films*, 2000, 366(1-2): 181-190.
- [35] LEE S. The effects of pad design on chemical mechanical planarization (CMP) performance[D]. Berkeley: University of California, 2006.
- [36] CASTILLO-MEJIA D, KELCHNER J, BEAUDOIN S. Polishing pad surface morphology and chemical mechanical planarization[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2004, 151(4): 271-278.
- [37] SHI F G, ZHAO B. Modeling of chemical-mechanical polishing with soft pads[J]. *Applied physics A (materials science processing)*, 1998, 67(2): 249-252.
- [38] LEE H, ZHUANG Y, SUGIYAMA M, et al. Pad flattening ratio, coefficient of friction and removal rate analysis during silicon dioxide chemical mechanical planarization[J]. *Thin solid films*, 2010, 518(8): 1994-2000.
- [39] CHARNS L, SUGIYAMA M, PHILIPPOSIAN A. Mechanical properties of chemical mechanical polishing pads containing water-soluble particles[J]. *Thin solid films*, 2005, 485(1-2): 188-193.
- [40] HOOPER B J, BYRNE G, GALLIGAN S. Pad conditioning in chemical mechanical polishing[J]. *Journal of materials processing technology*, 2002, 123(1): 107-113.
- [41] LI W D, SHIN D W, TOMOZAWA M, et al. The effect of the polishing pad treatments on the chemical-mechanical polishing of  $\text{SiO}_2$  films[J]. *Thin solid films*, 1995, 270(1-2): 601-606.
- [42] WHITE D, MELVIN J, BONING D. Characterization and modeling of dynamic thermal behavior in CMP[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2003, 150(4): 271-278.
- [43] TREGUB A, SOROOSHIAN J, MOINPOUR M. Thermoanalytical characterization of thermoset polymers for chemical mechanical polishing[J]. *Thermochimica acta*, 2005, 439(1/2): 44-51.
- [44] VOLKOV D O, DANDU P R V, GOODMAN H, et al. Influence of adhesion of silica and ceria abrasive nanoparticles on chemical-mechanical planarization of silica surfaces[J]. *Applied surface science*, 2011, 257(20): 8518-8524.
- [45] LI Z, INA K, LEFEVRE P, et al. Determining the effects of slurry surfactant, abrasive size, and abrasive content on the tribology and kinetics of copper CMP[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2005, 152(4): 299-304.
- [46] XU Y C, LU J, XU X P. Study on planarization machining of sapphire wafer with soft-hard mixed abrasive through mechanical chemical polishing[J]. *Applied surface science*, 2016, 389: 713-720.
- [47] LEE H, PARK B, JEONG H. Mechanical effect of process condition and abrasive concentration on material removal rate profile in copper chemical mechanical planarization[J]. *Journal of materials processing technology*, 2009, 209(4): 1729-1735.
- [48] DEVARAPALLI V K. CMP of tantalum and understanding the effect of abrasives in the barrier slurry using modeling[D]. Potsdam: Clarkson University, 2009.
- [49] LARSEN-BASSE J, LIANG H. Probable role of abrasion in chemo-mechanical polishing of tungsten[J]. *Wear*, 1999, 233-235: 647-654.
- [50] BU K H. Surfactant mediated passivation to achieve chemical mechanical polishing selectivity[D]. Gainesville: University of Florida, 2007.
- [51] WEI Xiao-min. Fundamental characterization of tribological, thermal, fluid dynamic and wear attributes of consumables in chemical mechanical planarization[D]. Tucson: University of Arizona, 2010.
- [52] YANG J C, CHOI J H, HWANG T, et al. Effects of diamond size of CMP pad with micro-holes[J]. *International journal of machine tools & manufacture*, 2010, 50(10): 860-868.
- [53] GRAY C. Detecting pad-wafer contact in CMP using dual emission laser induced fluorescence[D]. Medford: Tufts University, 2008.
- [54] BOCKI L. Mathematical modeling of polish-rate decay in chemical mechanical polishing[J]. *Journal of engineering mathematics*, 2002, 43(2-4): 105-114.
- [55] WANG C X. Stochastic models for material rate (MRR) in chemical mechanical planarization (CMP) process[D]. Ames: Iowa State University, 2004.
- [56] ZHANG C H. Research on thin film lubrication: state of the art[J]. *Tribology international*, 2005, 38(4): 443-448.