文章编号:1007 - 4252(2021)05 - 0005 - 468

保持环在化学机械平坦化中的应用及研究进展

张思齐[1,3],任砚铭[2,3],黄嘉晔[3],唐睿智[3,*],李卫民[1,2,3,4,*]

(1. 上海大学 材料科学与工程学院,上海 200444; 2. 上海理工大学 材料与化学学院,上海 200093; 3. 上海集成电路材料研究院,上海 200050; 4. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所,上海 200050)

摘要:化学机械平坦化(Chemical mechanical polishing or planarization, CMP)作为目前唯一可以实现平面平坦化的工艺技术,是集成电路制造工艺过程中实现晶圆表面平坦化的关键技术。保持环(Retaining Ring)作为化学机械平坦化工艺的主要耗材之一,在 CMP 工艺中得到了广泛的应用。保持环主要用于 CMP 抛光工艺过程中固定晶圆,有助于研磨液通过保持环接触面上的多个沟槽输送到抛光垫-晶圆界面,提高了晶圆去除率的不均匀性(Within-wafer nonuniformity, WIWNU)。本文综述了近年来保持环材料、沟槽数、沟槽角度、沟槽接触角等因素结合 CMP 工艺(抛光液流量、转速、压力等)对 CMP 抛光效果(粗糙度、平坦度、去除率等)的影响。特别地,本文详细介绍了不同材料和结构的保持环与抛光垫之间的摩擦学和动力学行为、材料去除率(Material removal rate, MRR)和晶圆内去除率 WIWNU 的影响,期望为新型保持环结构的设计和制造提供新的研发思路。

关键词:化学机械平坦化;保持环;槽角度;去除率

中图分类号:TN305　　**文献标识码**:A

Application and Research Progress of Retaining Ring in Chemical Mechanical Planarization

ZHANG Si-qi[1,3], REN Yan-ming[2,3], HUANG Jia-ye[3], TANG Rui-zhi[3,*] LI Wei-min[1,2,3,4]

(1. School of materials science and engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. School of Materials Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 3. Shanghai Institute of IC Materials, Shanghai 200050, China; 4. Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

Abstract: Chemical mechanical polishing is widely adopted in semiconductor industry as an essential process for obtaining ultra-flat and ultra-smooth surface. As one of the major consumables in chemical mechanical planarization (CMP) processes, retaining rings have been widely used in CMP processes. While retaining rings are mainly used to secure the wafer during polishing, they also facilitate slurry

收稿日期:2021-08-23;　　**修订日期**:2021-09-18

基金项目:上海市集成电路科技支撑专项 (21DZ1101200).

作者简介:张思齐(1998-),男,硕士研究生,主要研究方向为抛光材料与工艺 (E-mail:skyler666@shu.edu.cn).

通信作者:唐睿智(1983-),男,博士,高级工程师,主要研究方向为先进半导体工艺与器件 (E-mail:trz200568@126.com).

李卫民(1969-),男,博士,研究员,主要研究方向为先进集成电路工艺与材料 (E-mail:weimin.li@mail.sim.ac.cn).

transport into the pad-wafer interface through a plurality of slots on their contacting surface and improve removal rate within-wafer nonuniformity (WIWNU). This paper introduced the effect of the retaining ring materials, slot numbers and angles, the contact angles of the retaining ring combined with the CMP process technology (slurry fluid, rotation rate, pressure, etc.) on CMP polishing effects (roughness, flatness, removal rate, etc.). In particular, the purpose of this study is to understand the effect of the retaining ring on tribological and kinetic attributes between pad, the profile of the material removal rate (MRR) and the WIWNU. The aim of this review is to open a new avenue towards the design and manufacture of new retaining rings for CMP.

Key words: Chemical mechanical polishing; Retaining rings; Slot angle; Removal rate

0　引言

化学机械平坦化技术(Chemical mechanical polishing or planarization,CMP)是一种通过化学试剂的化学腐蚀和纳米磨粒的机械研磨技术结合,实现晶圆表面微米/纳米级不同材料的去除,从而达到晶圆表面的高度(纳米级)平坦化效应的一种加工方式,是集成电路制造过程中实现晶圆表面平坦化的关键技术[1-2]。整个 CMP 系统是由旋转的抛光头、抛光垫工作台和抛光液供给装置三大部分组成。研磨液作为 CMP 工艺中的主要消耗品之一,大约占 45%的总消耗成本。然而,大部分研磨液在到达晶圆表面之前被抛光垫旋转产生的离心力甩出而被排放到废液中,从而导致研磨液的有效利用率只有 2% ~ 25%[3]。因此,需要通过优化抛光工艺和抛光机台设备结构参数,提高研磨液的有效利用率,降低生产成本和减少环境污染。保持环(Retaining Ring)是 CMP 抛光头的核心配件之一,属于易耗品,且价值高。文献研究结果表明[1,4-7],优化保持环的结构可以提高研磨液的有效利用率和 MRR,以及降低晶圆表面不均匀性。由此可见,保持环在化学机械平坦化工艺中起着至关重要的作用。

1　保持环概述

保持环是一个特种工程热塑料圆环,其突出的特点是耐高温、耐腐蚀和优越的机械性能,是 CMP 的抛光头的核心配件之一。目前,美国应用材料公司(Applied material)200 mm 和 300 mm 晶圆 CMP 抛光设备的保持环分别采用 12 槽和 18 槽的方式,如图 1 所示。

在抛光工艺的过程中,保持环的主要功能是固定晶圆在研磨头区域防止滑出。例如,在应用材料

图 1　300 mm 晶圆保持环

Fig.1 A typical retaining ring for 300 mm wafer polishing

Reflexion 抛光平台中,保持环对抛光垫的压力通常大于抛光头对晶圆的压力,防止晶圆的滑片。此外,与金属和陶瓷材料相比,高级工程塑料树脂具有非常低的离子杂质和无机元素污染水平,适用于先进集成电路设备材料的应用。目前,全球 8 寸和 12 寸晶圆代工厂主流 CMP 设备抛光头的保持环主要由聚苯硫醚(Polyphenylene sulfide, PPS)和聚醚醚酮(Poly(ether-ether-ketone),PEEK)两种材质构成。

保持环能够优化晶圆边缘压力,其表面的沟槽有助于晶圆表面与抛光垫之间内外新旧研磨液的交换,有利于提高晶圆表面材料的去除速率、降低不均匀性。保持环、研磨液、抛光垫之间的相互摩擦会导致抛光垫和研磨液的温度升高,反过来会影响研磨薄膜材料的去除速率和不均匀性。先进工程塑料学科的快速发展为不同材料和特性的保持环的构造提供了强有力的理论支撑。不同材料以及沟槽设计的保持环影响 CMP 工艺过程中抛光垫的摩擦力学、抛光垫表面微观结构、晶圆表面温度和研磨液在抛光垫的停留时间等行为。

2 保持环材料研究进展

Viswanathan[8]等研究了不同保持环材料的摩擦力学行为,5 种材料分别为:PPS(聚苯硫醚)、PC(聚碳酸酯)、Arlon1330(聚四氟乙烯增强(PTFE/PEEK))、ArlonEX-2618 和 Arlon1287(碳纤维增强聚醚醚酮(CF/PEEK))。实验结果表明,PC 和 PPS 的摩擦系数(Coefficient of friction,COF)较大,材料稳定性相对较差,磨损量大。Arlon1330 和 ArlonEX-2618 的 COF、材料稳定性和磨损量总体上比 PPS 和 PC 好。Arlon1287(CF/PEEK)在 5 种材料中 COF 最低。另外,PEEK 还能够满足一系列抛光工艺参数的关键要求,包括机械强度、自润滑性、耐腐蚀性、耐热性以及与抛光液成分的兼容性等。由于聚醚醚酮 PEEK 具有优良的综合性能,在许多特殊领域可以替代金属、陶瓷等传统材料,使之成为当今最热门的高性能工程塑料之一,它主要应用于航空航天、汽车工业、电子电气和医疗器械等领域。因此,CF/PEEK 是目前最理想的保持环制造材料之一。在此基础上,Gitis 等[9]人在具有多种传感器(力、声、磨损和电传感器)的 CMP 试验机上,研究了在 CMP 环境下保持环材料对抛光效果的影响。实验采用 PPS、PC、PEEK 三种聚合物及其复合材料试样,研究结果表明 PC 和 PPS 及复合材料试样均表现出高摩擦性、磨损性和振动性。PEEK 及其复合材料试样各种性能均比 PPS 和 PC 类试样优良。Sikder 等[10]详细研究了 PPS、PEEK、C-10TM 塑料保持环对不同 CMP 类型制程研磨液的摩擦力学行为。在钨研磨液系统中,相对磨损速率 C-10™ < PPS < PEEK,而在铜研磨液系统中,相对磨损速率 C-10™ < PEEK< PPS。C-10™塑料保持环在直接接触抛光方面显示出巨大的潜力,但是相关材料的物理化学性质没有详细的披露。

3 保持环工艺研究进展

Philipossian 等[11]利用 12 个等距、3 mm 宽槽的 200 mm 标准保持环和 36 个等距、11 mm 宽槽的 200 mm设计保持环两种 PEEK 保持环,采用原位双紫外发射增强荧光技术测量抛光过程中晶圆表面和抛光垫之间研磨液的厚度。研究了不同流速研磨液(150 ml/min,220 ml/min)、不同研磨压力(1.8 PSI,3.6 PSI)、不同转速(80 RPM,120 RPM)条件下保持环沟槽的数量和宽度对晶圆和研磨垫之间研磨液厚度的影响。研究结果表明研磨液薄膜随着流量的增大变厚,压力的增大会挤压晶圆和抛光垫之间的研磨液空间,导致研磨液薄膜变薄。高转速提供强离心力使研磨液从抛光垫中心朝着边缘甩出,导致研磨液薄膜厚度变薄(图 2,图 3)。有趣的是,他们研究进一步发现,晶圆受力不均而倾斜会导致晶圆前沿区域(A)的薄膜厚度小于 B 区域(图 4)。总体而言,在相同工艺条件下,与标准保持环相比,设计的新保持环可以提高 30%的研磨液薄膜厚度,提高抛光液的总体利用率,节省 CMP 工艺制造的成本。

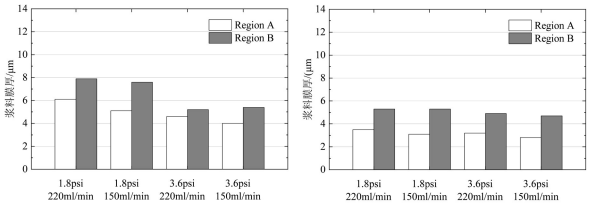

图 2 标准保持环抛光液膜厚(抛光盘转速 80 rpm 和 120 rpm)

Fig. 2 Slurry film thickness measurement for the retaining ring with standard slot design at the platen rotational rate of 80 rpm and 120 rpm

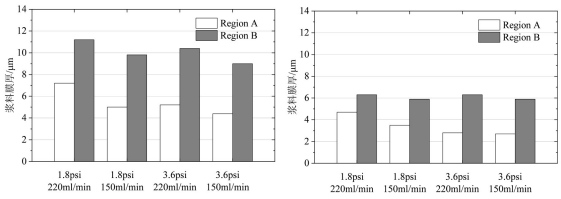

图 3 设计保持环抛光液膜厚(抛光盘转速 80 rpm 和 120 rpm)

Fig. 3 Slurry film thickness measurement for the retaining ring with alternative slot design at the platen rotational rate of 80 rpm and 120 rpm

Diaz 等[4]设计了由 PEEK 材质制成的两个保持环,一种是标准的尖槽,另外一种是圆形槽(图 5),规格都为 18 个 3 mm 宽,3 mm 深的等距槽。他们研究了这两种不同开槽方式的保持环在层间电介质 CMP 工艺(Inter-level Dielectric, ILD-CMP)和铜 CMP 工艺(Cu-CMP)中的摩擦力学行为。与尖形槽开口方式的保持环相比,由于圆形槽的“边界润滑作用”,对于 ILD-CMP 和 Cu-CMP,尖槽的 COF 均大于圆形。与 Cu-CMP 相比,ILD-CMP 工艺的

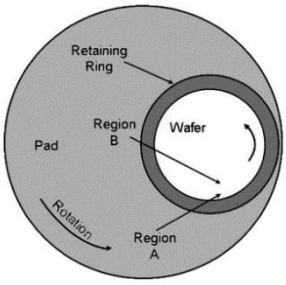

图 4　研磨系统俯视图,抛光头 A 区和 B 区

Fig. 4 Top view of polishing system and region A and region B locations

COF 值更高。在此基础上,Bengochea 等[12]进一步研究了保持环的沟槽设计,抛光垫调整器的结构和调整方式对 CMP 过程中研磨液在保持环周围分布的影响。研究结果表明,圆形沟槽的保持环,全平面抛光垫调整器会产生宽的研磨液弓形波,影响抛光液的利用率。

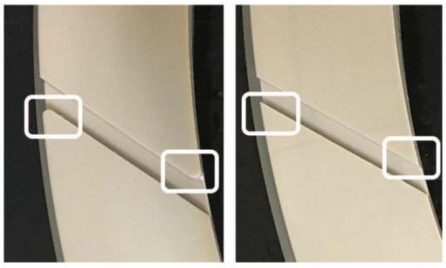

图 5　CMP 保持环开槽俯视图圆形槽(左)和尖槽(右)

Fig. 5 Top view of a section of CMP retaining rings having rounded (left) and sharp (right) slots

Wei 等[13]研究了 PPS 和 PEEK 两种保持环在 ILD-CMP 中的摩擦力学行为,在 4 h 磨损测试实验中,对于相同的研磨液,PPS 保持环比 PEEK 保持环具有较大的 COF,导致抛光垫温度提升较高,保持环的磨损较大。研究结果还表明,对于 PEEK 材质的保持环,尖形和圆角沟槽的设计对 COF、抛光垫的温度和保持环的磨损没有明显的影响。但是,在抛光的过程中,尖形的保持环容易嵌入抛光垫表面的绒毛中,导致抛光垫表面的粗糙度增加。Diaz 等[14]研究 18 个等距槽(宽度和深度为 3 mm)的 PPS 和 PEEK 保持环在不同压力和速度下对 Cu-CMP 和 ILD-CMP 工艺的影响。机台还配备带摩擦计的传感器,进行摩擦学测试,研究保持环材料对界面 COF 值和界面温度的影响。研究引入了一种“Stribeck+curve”的新方法,该方法构建了转速和压力与 COF 之间的关系,并且能够通过曲线判定抛光过程中晶圆的接触机制。与传统方法相比,大大减少了耗材和实验时间。实验结果表明:1)对于给定的抛光液类型,PPS 的 COF 值总是高于 PEEK;2)PPS 环的 COF 值平均比 PEEK 高 21%;3)PPS 环的平均垫表面温度比 PEEK 高 9~11℃。Diaz 等对 PPS 和 PEEK 两种保持环摩擦力学行为得到与 Wei 一样的结论,并且他们进一步研究表明 ILD-CMP 中的结论适用于 Cu-CMP。

Liao 等[5]设计了尖角槽和圆角槽两种不同结构的保持环,利用紫外增强荧光技术,研究了研磨液流速、保持环压力等抛光工艺条件对研磨液弓形波动力学的影响。相同的实验条件下,带有尖角槽的保持环(PEEK-1)比圆角槽的保持环(PEEK-2)产生的研磨液弓形波相对较厚(图 6)。对于 PEEK-1,研磨液流量增加、保持环压力的增加和转速的减小均会导致研磨液弓形波厚度增加。另一方面,随着抛光工艺条件的变化,PEEK-2 研磨液弓波的厚度不会显示明显的变化,研磨液弓波厚度具有较好的稳定性。因此,保持环的圆角槽设计,可以产生较薄的研磨液弓形波,允许更多的研磨液进入晶圆和抛光垫的接触面,提高研磨液的利用率。

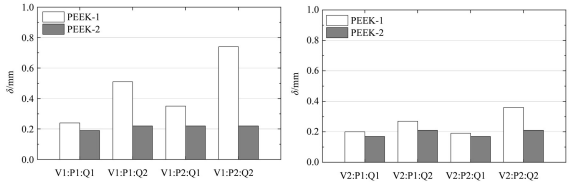

图 6　不同结构保持环沟槽对弓形波厚度的影响(P1 = 13.1 kPa, P2 = 26.2 kPa, V1 = 0.6 m/s, V2 = 1.2 m/s, Q1 = 150 ml/min, Q2 = 300 ml/min)

Fig. 6 Effect of retaining ring slot design on average bow wave thickness (P1 = 13.1 kPa, P2 = 26.2 kPa, V1 = 0.6 m/s, V2 = 1.2 m/s, Q1 = 150 ml/min, Q2 = 300 ml/min)

Smith 等[15]详细研究了 PPS 和 PEEK 保持环对 200 mm Cu-CMP 的影响。Cu-CMP 研磨工艺通常包括三步:第一步,在抛光台 1 上磨掉晶圆表面大部分铜;第二步,用和第一步相同的铜研磨液,在抛光台 2 利用较低的研磨速率去掉阻挡层接触的铜,并通过终点侦测技术将研磨停在阻挡层 Ta/TaN 上面;第三步,在抛光台 3 上用阻挡层研磨液磨掉阻挡

层以及少量的介质氧化层,并用大量的去离子水清洗研磨垫和晶圆(图 7)。当抛光台 1 的保持环由 PPS 换成 PEEK,由于 PEEK 的 COF 小于 PPS,因此铜的去除速率降低,但是晶圆之间的去除不均匀性有了明显提高。众所周知,Cu-CMP 主要受铜和研磨液化学反应的影响,而晶圆和抛光垫之间的温度又是影响化学反应的关键因素。在相同的工艺条件下,PEEK 保持环的 COF 小于 PPS,因此会产生相对较小的热量,快速达到温度平衡,导致铜去除速率的降低和不均匀性的升高。他们也详细研究了抛光台 2 中保持环由 PPS 换成 PEEK 的动力学行为,与抛光台 1 相比较,当抛光台 2 提高研磨头膜/保持环压力比,弥补了 PEEK 相对较低的 COF,PPS 和 PEEK 保持环显示几乎相同的去除速率。对于抛光台 3,在相同的工艺条件下,PPS 和 PEEK 对 TEOS 氧化硅有相同的机械和温度影响,从而显示出相同的去除速率。但是,PEEK 保持环的低磨损率和对抛光垫的低损伤可以节约生产成本。

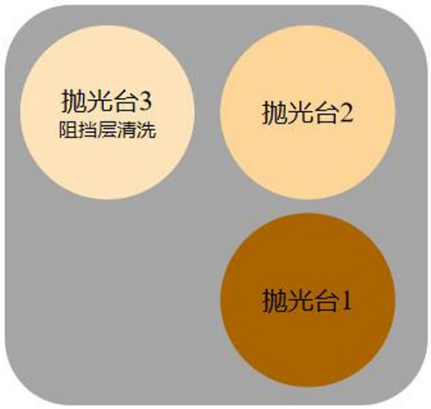

图 7 Cu-CMP 抛光台的分布

Fig.7 Distribution of polishing table in Cu-CMP

保持环与抛光垫的接触角度也是影响抛光液交换的一个重要因素。Park 等[6]研究了保持环与抛光垫接触角大小的改变量对晶圆的 MRR 以及整片晶圆 WIWNU 的影响(图 8)。通过仿真和实验研究,当保持环和抛光垫接触角为 0°时,晶圆边缘去除轮廓是最优的,整片晶圆的材料的去除不均匀性可低于 4%(图 9)。

Touzov 等[7]对标准的无台阶型保持环和 2 mm、5 mm、8 mm 长度台阶的保持环对氧化硅等离子体增强四乙基硅酸钠(Plasma-Enhanced Tetraethylosilicate, PETEOS)层进行 CMP 抛光,研究了不同压力条件下,保持环台阶长度对晶圆氧化硅 MRR 和 WIWNU 的影响(图 10)。保持环设计内缘台阶,减少 wafer 边缘滚降现象对边缘的去除率影响。实验发现加工上百片晶圆后,保持环的内侧摩擦由抛光垫的后缘引起,外侧摩擦由抛光垫的前缘引起。“垫波效应”引起晶圆边缘过度抛光,新型的阶梯型保持环能够达到有效的优化晶圆边缘过度抛光的目的。氧化硅材料 WIWNU 提升 6%左右的效果,从 9.32%(0 mm 台阶,保持环压力 3 psi)降低到2.76%(8 mm 台阶,保持环压力 3 psi),去除率也提升了 10%。随着台阶步长的增加,可以完全消除3~10 mm边缘区域的过度抛光。

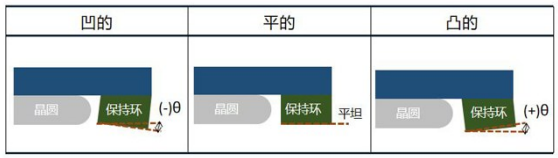

图 8 保持环结接触角构图

Fig.8 Schematics of contact angle of retaining ring

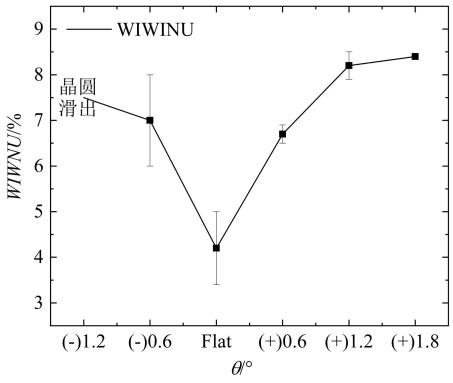

图 9 保持环接触角对晶圆薄膜去除不均匀性影响

Fig.9 Plot of WIWNU versus contact angle of retaining ring

通常,晶圆边缘部分由于保持环对抛光垫的压力产生回弹,导致边缘过抛,影响 MRR 和 WIWNU 的数值。美国应用材料公司 Osterheld 等人[16]开发了提高边缘抛光性能的新型抛光头(AEP™ ring)用于 IC 先进工艺制程,但是文献仅对实验测试结果与传统保持环进行了对比,对保持环的结构信息没有详细披露。与传统的保持环相比,通过优化 AEP 环压力以及转速可以明显改善边缘效应提高 WIWNU。AEP 环可以广泛用于 ILD-CMP、浅沟槽

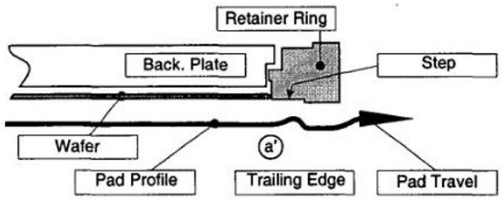

图 10　新型保持环的“波浪与回弹”效应

Fig.10 Pad “wave & rebound” effect for conventional carrier

隔离 CMP(Shallow Trench Isolation CMP, STI-CMP)、多晶硅 CMP(Poly Si-CMP)、钨 CMP(W-CMP)等工艺制程。

Chao Li 等[16]人设计了保持环和载具刚性连接结构和保持环中设置气囊连接结构两种装置(图 11),采用润滑弹流混合模型,模拟了保持环在抛光垫上不同的突出高度 L(-0.02 mm、-0.01 mm、0 mm、0.01 mm、0.02 mm)和不同压力(1.5 psi、2.0 psi、2.5 psi、3.0 psi、3.5 psi、4.0 psi)对浆液流量和 WIWNU 的影响。计算了接触压力和剪切速度的平均值 $\overline{PV}$ 作为 Preston 方程的 MMR 指标。如图 12 所示,研究结果表明 $\overline{PV}$ 值和 WIWNU 对保持环突出高度非常敏感,且 $\overline{PV}$ 值随着保持环 L 的增加而增加,WIWNU 在 L 为 0 mm 时达到最低。保持环压力对 $\overline{PV}$ 值和 WIWNU 的影响稍弱,相同的是,$\overline{PV}$ 值随着保持环压力的增加而增加,在压力略低于晶圆压力时 WIWNU 达到最低。并且,作者分别测量了不同保持环突出高度和不同压力下的研磨液流入晶圆-抛光垫间隙的流量,结果表明,保持环在低压和低突出高度时,抛光界面中研磨液流量更大。

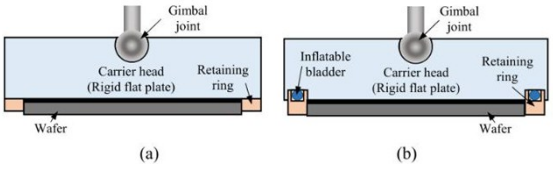

图 11　(a)保持环和载具刚性连接结构;(b)保持环中设置气囊连接结构

Fig. 11 The structure of (a) the first-generation carrier and (b) the second-generation carrier

Isobe 等[18]研究了 Cu-CMP 中保持环压力对缺陷形成的影响,研究结果发现,较高的保持环压力会

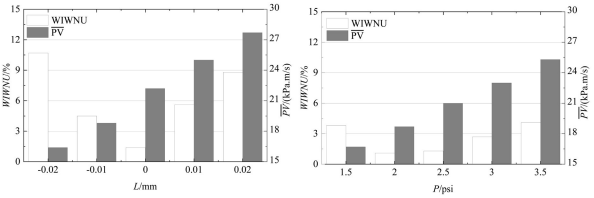

图 12　不同的保持环突出高度,压力对 WIWNU 和 $\overline{PV}$ 值的影响

Fig. 12 TheWIWNU and the $\overline{PV}$ with different protrusion, pressure of retaining ring in CMP process with the first-generation carrier

导致更多的缺陷。这一现象的机理被认为是抛光液中的大颗粒与来自保持环产生的聚合物磨屑反应,形成大的团聚体,从而造成划痕。增加保持环的压力会加速这种团聚。Cu-CMP 的抛光条件为:晶圆压力为 20.7 kPa,抛光盘转速为 83 转/min,晶圆转速为 78 转/min,保持环使用 10.3~41.4 kPa 之间的压力进行抛光。在抛光结束后,用 SEM 进行了缺陷分布观察,结果表明缺陷数和保持环压力之间有非常强的相关性,缺陷数随着保持环压力的增大而增加。通常 CMP 过程中,保持环会与抛光垫摩擦,磨损产生聚合物颗粒,该聚合物会与抛光液中的大颗粒发生反应,形成大团聚体,从而导致晶圆表面产生微划痕。因此,控制保持环压力,可以更好的控制晶圆边缘压力分布达到减少缺陷率的效果。

随着晶圆直径的增加,在 CMP 加工过程中,晶圆边缘容易出现“过磨(over-grinding)”现象,降低了平坦度和晶圆利用率。黄杏利等[19]利用有限元模拟的方法模拟分析了 PEEK 保持环的压力,结果表明,随保持环载荷与晶圆载荷的比值增大,晶圆边缘应力减小,达到一定程度,晶圆边缘应力小于晶圆中心区域。保持环与晶圆之间的间隙越小,晶圆边缘的峰值越小,抛光效果越好。

4　结论

在先进技术节点的集成电路制造的化学机械平坦化的工艺过程中,随着抛光方法的不断创新与联合应用,目前的抛光工艺已不再是一个简单的步骤,而是一个系统的工程。保持环作为 CMP 工艺的主要耗材之一,在 CMP 工艺中得到了广泛的应用。对新型结构保持环而言,借助国内外研究成果同时结

合理论模拟技术,进而优化保持环结构,在抛光液方面,可以提高利用率,节约成本,减少环境污染;在晶圆质量方面,可以改善晶圆抛光的边缘效应,提高晶圆的 MRR 和 WIWNU,对于完善 CMP 机理和模型,具有重要意义。

参考文献:

[1] Park J, Hong S, Lee S, et al. Investigation of step structure in CMP retainer ring to improve within-wafer non-uniformity [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2019, 33(7): 3391-3395.

[2] Krishnan M, Nalaskowski J W, Cook L M. Chemical mechanical planarization: slurry chemistry, materials, and mechanisms [J]. Chemical Reviews, 2010, 110(1): 178-204.

[3] Rosales-Yeomans D, Denardis D, Borucki L, et al. Evaluation of pad groove designs under reduced slurry flow rate conditions during copper CMP [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2008, 155(10): H812-H818.

[4] Diaz G, Sampurno Y, Philissian A. Insights into the tribological and kinetic attributes of retaining rings in chemical mechanical planarization [J]. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2018, 7(9): 447-451.

[5] Liao X, Sampurno Y, 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.

[6] Park Y, Lee H, Lee Y, et al. Effect of contact angle between retaining ring and polishing pad on material removal uniformity in CMP process [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2013, 14(9): 1513-1518.

[7] Touzov M M, Fujita T, Doy T K. Novel retaining ring to reduce CMP edge exclusion [C]. 2001 IEEE International Symposium on Semiconductor Manufacturing, San Jose, CA, 2001: 337-340.

[8] Viswanayhan R. Materials for generator retaining rings [J]. Journal of Engineering Materials and Technology-Transactions of the Asme, 1981, 103(4): 267-275.

[9] Gitis N V, Xiao J, Skider A K. Advanced specification and tests of CMP retaining rings [C]. Proceeding of 9th CMP-MIC conference, 2004: 252-255.

[10] Sikder A K, Giglio F, Wood J, et al. CMP tribological study of carrier ring plastic materials [J]. Electrical Materials, 2001, 30: 1520-1526.

[11] Wei X M, Samourno 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-H121.

[12] Bengochea L V, Sampurno Y, 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): 253-259.

[13] Wei X M, Zhuang Y, Sampurno Y, 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): 391-395.

[14] Diaz G, Peckler L, Sampurno Y, et al. Communication-Tribology of retaining rings in chemical mechanical planarization [J]. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2018, 7(5): 266-268.

[15] Smith J E, Wargo C, Kakireddy R, et al. Retaining ring design impact on CMP process stability and optimization [J]. MRS Online Proceedings Library, 2010, 201: 1249-1267.

[16] Osterheld T H, Zuniga S, Huey S, et al. A novel retaining ring in advanced polishing head design for significantly improved CMP performance [C]. 1999 MRS Spring Meeting: Symposium on Chemical-Mechanical Polishing-Fundamentals and Challenges, San Framcisco, CA, 1999, 566: 63-72.

[17] Li C, Zhou P, Jin Z J, et al. Numerical Analysis of Slurry Flow and Contact Pressure in CMP Considering the Effects of Retaining Ring [J]. Advanced Materials Research, 2016, 4231: 338-342.

[18] Isobe A, Komiyama T, Kurokawa S. New model of defect formation caused by retainer ring in chemical mechanical polishing [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2013, 52(12): 126502.

[19] 黄杏利,傅增祥,杨红艳,等. 晶圆化学机械抛光中保持环压力的有限元分析. 西北工业大学学报 [J], 2007, 25(04): 508-510.