

硅抛光片 (CMP) 市场和技术现状^{*}

张志坚, 张 凡, 邱光文, 彭茂公, 王红鹰, 俞 琨

(昆明冶研新材料股份有限公司, 云南 昆明 650031)

摘 要: 介绍了硅抛光片在硅材料产业中的定位和市场情况, 化学机械抛光 (CMP) 技术的特点, 硅抛光片大尺寸化技术问题和的发展趋势, 以及硅抛光片技术指标, 清洗工艺组合情况等。

关键词: 硅抛光片; CMP 技术; 清洗

中图分类号: TN304.1⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-0308 (2012) 01-0040-05

Market and Technical Status of Polished Silicon Wafer

ZHANG Zhi-jian, ZHANG Fan, QIU Guang-wen, PENG Mao-gong, WANG Hong-ying, YU Kun
(Kunming Yeyan New-Material Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650031, China)

ABSTRACT: The following situations are introduced in this paper: the orientation and market situation of polished silicon wafer in silicon material industry, the features of chemical mechanical polishing (CMP) technology, technical problems of large size polished silicon wafer and its development trend, as well as the technical index of polished silicon wafer, cleaning process combination etc.

KEY WORDS: polished silicon wafer; CMP technology; cleaning

引 言

2000 至 2010 年, 中国集成电路产量的年均增长率超过 25%, 集成电路销售额的年均增长率则达到 23%。中国集成电路产业规模已经由 2001 年不足世界集成电路产业总规模的 2% 提高到 2010 年的近 9%。中国成为过去 10 年全世界集成电路产业发展最快的地区之一, 国内集成电路市场规模也由 2001 年的 140 亿元扩大到 2010 年的 7350 亿元。化学机械抛光 (CMP) 技术作为目前唯一的可以提供在整个圆硅晶片上全面平坦化的工艺技术, 已广泛地应用到了半导体集成电路领域, 硅抛光片产业发展在国内有着良好前景, 从完善我国硅产业链、提升硅产业技术水平、发展技术创新产品的角度考虑, 国内研究、发展 $\phi 200 \sim 300$ mm IC 级硅抛光片的技术和产业非常必要, 硅抛光片在硅材料产业中的定位、市场需、CMP 工艺现状、趋势如何?

1 硅抛光片市场情况

1.1 抛光片在硅材料产业中的定位

从硅矿石开采、到矿热法冶炼工业硅、化学物理法提取多晶硅、切克劳斯基法 (CZ \ FCZ) 生长单晶、太阳能电池用硅切片、硅抛光片材料一系列产业链中, 硅抛光片产业处于硅材料产业链的顶端。

硅抛光片是集成电路圆晶生产基础材料, 相对于其它硅材料产业: 硅抛光片生产需要高的技术、设备、智力资源的集成度, 产业更依赖高精度技术设备和前沿技术研发能力; 其次, 硅抛光片技术标准与超大规模 (ULSI) 集成电路技术发展同步, 三是建立在知识产权拥有基础上的产业垄断, MEMC、SHE、SUMCO、Wacker 等四家大厂垄断了全球 90% 的 $\phi 300$ mm 抛光片市场, $\phi 200 \sim 300$ mm 英寸硅抛光片有硅材料产业链中相对高的产业利润率, $\phi 150$ mm 以下 IC 级硅抛光片由于被主流产品淘汰, 产业

^{*} 收稿日期: 2011-11-01; 修回日期: 2011-11-29

作者简介: 张志坚 (1962-), 男, 云南昆明人, 高级工程师。

利润逐渐下滑。表 1 是单位多晶硅消耗的太阳能电池硅片、硅抛光片的产值和产业利润情况。

表 1 太阳能电池硅切片、半导体抛光片单位多晶硅消耗的产值和产业利润

Tab. 1 Output value and industrial profit per unit poly-silicon consumption for solar cell silicon section and semiconductor polished wafer

多晶硅电池片 (156x156 mm)		IC 级 65 纳米抛光片 (φ300 mm)	
消耗 1.0 kg 多晶硅料的产值/元	840	消耗 1.0 kg 多晶硅料的产值/元	8 125
综合回收率/%	80	综合回收率/%	70
产品数/W	140	产品数/片	4.2
利润率/%	15~20	利润率/%	30~40

注: 消耗 1.0 kg 多晶硅料的产值是根据 2010 年平均价格计算

由表 1 可以看出, 硅抛光片单位多晶硅消耗产值和产业利润率远远高于太阳能电池用硅片, 每消耗一公斤多晶硅, 半导体抛光片生产约 8 125 元产值, 相对于太阳能电池硅片的每公斤多晶硅消耗生产约 840 元产值, 高出接近 10 倍。通常月产 20 万片的 φ300 mm 抛光硅片的生产线的投资约折合人民币 26~28 亿, 年产值约 45 亿, 年产 500 MW 太阳能硅片的生产线约投资 25 亿, 年产值约 30 亿, 前者利润率几乎是后者 2 倍多。

1.2 φ300 mm 抛光片市场快速增长

目前世界集成电路生产线共有 1 100 余条左右, 市场主流硅抛光片尺寸是 φ200~300 mm。预计到 2014 年, φ300 mm 硅抛光片的需求以约 30% 左右的高速度增长, 远高于半导体产业增长平均水平, 预计到 2014 年以前, φ300 mm 硅抛光片仍然属于卖方市场。

2008 和 2009 年由于金融危机影响, 半导体产业滑坡使半导体抛光片出货出现衰退, 2009 年末重新步入增长, 硅抛光片出货由 2009 年的 465 万 m² 上升到 2010 年约 574 万 m², 2010 年硅抛光片出货量增长约 23.6%, 预计 2011 年增长速度难以达到 2010 年的水平, iSuppli 公司预测, 2011 年半导体产业硅抛光片出货量比 2010 年增长 13% 左右, 到 2014 年, 硅抛光片出货量将达到 800 万 m²。图 1 所示为 iSuppli 公司对 2009~2014 年硅片按尺寸细分出货量的预测;

我国集成电路产业起步于 20 世纪 60 年代, 共有半导体企业 651 家, 从业人员约 11.5 万人; 其中芯片制造厂 46 家, 封装、测试厂 108 家、设计公司 367 家、分立器件生产 130 余家, 抛光片生产不到 10 家, 仅北京有研半导体材料股份有限公司

已建成 1 条 200 mm 硅抛光片小批量生产线和 1 条 φ300 mm 硅抛光片实验线, 国内已经有 φ200 mm、φ300 mm 芯片 FBA 代工生产线数十条, 每年需 φ200 mm 以上硅抛光片约 600 余万片 (约 20 万 m²), 几乎全部 φ200 mm、φ300 mm IC 级硅抛光片正片从美、日、德进口。目前国内生产 φ100~150 mm 硅抛光片的企业主要有宁波立立电子股份有限公司、上海合晶硅材料有限公司、洛阳麦斯克电子材料有限公司、峨眉 739 等。

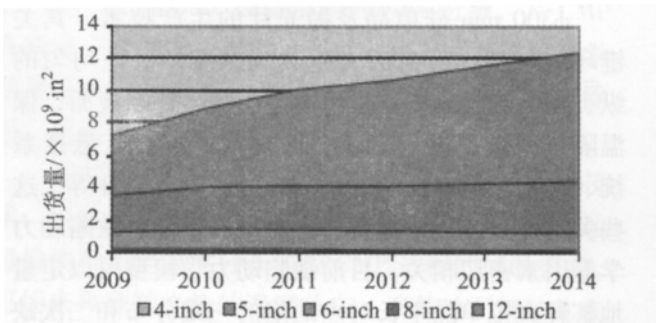


图 1 iSuppli 公司对 2009~2014 年硅片出货量的预测

Fig. 1 The prediction of silicon wafer shipment quantity in 2009~2014 made by iSuppli Company

2 硅抛光片技术现状

2.1 硅抛光片大尺寸化发展

硅抛光片由 φ200 mm 扩大至 φ300 mm 时, 面积增加 2.25 倍, 但相应的成本支出仅增加 30% 左右, 同时相对于 φ200 mm 晶圆生产线来说, φ300 mm 晶圆厂成本可降低 30%^[1], 并可减少边缘废料从而提高芯片产出率, 故近十几年来硅抛光片不断向大尺寸化方向发展。

目前 φ300 mm 硅抛光片已是主流产品。据统计; 2010 年 φ300 mm 硅抛光片产能为 2 479.36 万

片,折合月产能 206.6 万片,换算成 $\phi 200$ mm 月产能为 464.9 万片,占全球总产能的 52.23%。 $\phi 200$ mm 硅抛光片产能为 3 092.4 万片,折合月产 257.7 万片,占全球总产能的 28.96%,而 $\phi 200$ mm 以下产能为 845 万片,折合月产能为 70.4 万片 ($\phi 200$ mm 等值计),仅占总产能的 7.9%。随着国际企业集成电路生产由 $\phi 200$ mm 向 $\phi 300$ mm 转移, $\phi 200$ mm 产品有由集成电路生产线向分立器件转移的趋势,图 2 不同硅抛光片尺寸产能情况示意图;

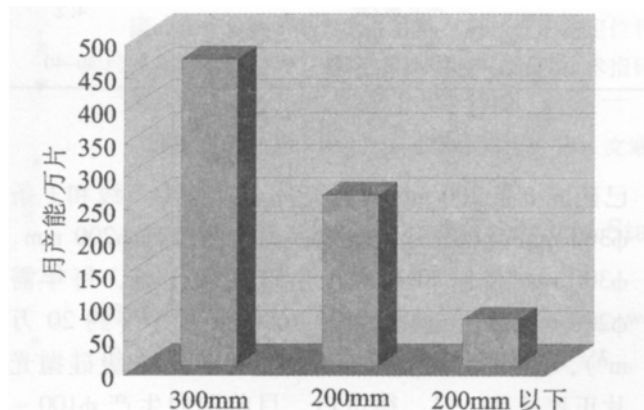


图 2 目前不同硅片尺寸产能情况示意图 (换算成 200 mm)

Fig. 2 Productivity situation schematic diagram of current different silicon wafer size (equivalent to $\phi 200$ mm)

$\phi 300$ mm 硅单晶及抛光片的生产技术,其关键环节包括:稳定的大型热场系统,保证均匀的纵、横向温度梯度,尽可能理想的生长固液面,保温隔热系统、磁场系统、低共振的提拉、悬挂系统、大型高纯、性能优良的石墨、石英器件等,这些关键环节杂质浓度场、热对流场以及点缺陷动力学等因素密切相关,目前缺陷动力学模型可以定量地解释直拉单晶生长时点缺陷的三维分布和二次缺陷(有氧和无氧存在)的形成过程。生长 $\phi 300$ mm 单晶,采用较粗籽晶及鼓包引晶工艺拉制无位错单晶;改进了籽晶夹持方式,消除了回熔的影响;缩颈时,直径减小到 6 mm,没有断裂发生^[2]。通过放肩籽晶提拉速度控制,减少悬挂系统共振提高晶体放肩成功率^[3]。硅片的热处理可降低原生缺陷(COP),近年来 MEMC 提出的基于快速热处理(RTP)的“内吸杂”工艺,在一定程度上缩短了热处理的时间,有利于降低整体微缺陷密度(BMD)^[4]。

根据国际半导体发展指南预测,直径 450 mm 硅单晶及抛光片将有可能在 2016 年左右投入应用,成为 $\phi 300$ mm 之后大规模应用的硅片。预计届时 DRAM 的线宽 32/28 nm,硅片的局部平整度要 \leq

20 nm,每片大于 11 nm 的表面颗粒 ≤ 95 个,晶体缺陷(氧化层错)密度 ≤ 0.2 个/ cm^2 。

尽管硅抛光片大尺寸化发展目前已经成为一种趋势,然而继续的大尺寸化也面临诸多瓶颈,大尺寸化使热场控制越来越困难、而且大尺寸高纯的石墨、石英器件、重力对翘曲度影响也成为需要考虑的因素。硅抛光片大尺寸化会有一个极限值,这极限值取决于其它技术发展的结果。

2.2 技术要求不断提高

硅抛光片技术标准由超大规模(ULSI)集成电路技术发展决定,随着集成电路集成度越来越高,集成电路线宽从上世纪 90 年代的 0.35 μm 、0.25 μm 、到本世纪的 0.18 μm 及 0.13 μm ,90 nm、65 nm、45 nm,目前 65 nm 应该是个公认的分界点。

硅抛光片平坦化工艺技术指标,对器件与集成电路的电学性能和成品率有着极其重要的影响,这主要是由于集成电路图形线宽的缩小使光刻机的景深越来越小,硅基底或薄膜层上极其微小的高度差异都会使 IC 的布线图形发生模糊、变形、扭曲、错位,结果会导致绝缘层的绝缘能力达不到要求,或金属连线错位而使集成电路产品报废。硅抛光片质量的重要参数主要有:硅片全局平整度(TIR 或 GBIR);硅片局部平整度(STIR);硅片表面微粗糙度;硅片表面的颗粒数(LPD)以及硅片表面的金属沾污情况等。表 2 国外某公司硅抛光片关键参数;

2.3 硅抛光片平坦化工艺现状

硅抛光片平坦化 CMP (Chemical-mechanical polishing) 工艺是 IBM 公司于 1985 年研发的技术,1990 年成功应用于 64MB 的 DRAM 生产。1995 年以后 CMP 技术应用于所有的 ULSI 生产。化学机械抛光(CMP)技术作为目前唯一的可以提供在整个圆硅晶片上全面平坦化的工艺技术,已被越来越广泛地应用到了半导体领域,过去研究开发主要以美国半导体制造技术联合会(SEMATECH)为主,现在已扩展到全球二十余家公司。韩国和我国台湾也研究应用较多,但国内的 CMP 研究处于起步阶段。

硅抛光片平坦化工艺是一个化学腐蚀和机械磨擦的结合工艺过程,自从 CMP 技术出现以后,市场上相继出现了各种形式的平坦化技术,如线性抛光、椭圆和轨道式抛光,在薄膜上旋转和选择性离子刻蚀等。但由于存在不同工艺缺点因素,其它的

表 2 国外某公司硅抛光片关键参数

Tab. 2 Critical Parameters of polished silicon wafer from a foreign company

线宽特征尺寸 /nm	100	90	65	20
晶片直径尺寸 /mm	300 ± 0.2	300 ± 0.2	300 ± 0.2	450 ± 0.2
晶片厚度 /μm	775 ± 15	775 ± 15	775 ± 10	850 ± 10
去边 /mm	1	1	1	1
电阻率 /B	0.5~50	0.5~50	0.5~50	0.5~50
电阻率均匀 (1-0-0/1-1-1) /%	<10	<10	<10	<5
全局平整度 GBIR /μm	≤3.5	≤2.0	≤1.5	≤1.5
局部平整度 SFQR /nm	≤100	≤70	≤45	≤20
Warp /μm	<50	<25	<20	<20
表面临界金属元素密度 (Cu、Cr、Ni、Fe) / (10 ¹⁰ at • mm ⁻²)	≤1.0	≤1.0	≤1.0	≤0.5
表面临界金属元素密度 (Al、Zn、K、Na、Ca) / (10 ¹⁰ at • mm ⁻²)	≤5.5	≤5.0	≤5.0	≤2.5
每片表面颗粒数量/尺寸	<30 个, >50 nm	<30 个, >35nm	<30 个, >25 nm	<90 个, >10 nm
中心氧含量与公差	5.0 ~ 7.8 × 10 ¹³ ± 0.5	5.0 ~ 7.8 × 10 ¹³ ± 0.5	5.0 ~ 7.8 × 10 ¹³ ± 0.5	4.8 ~ 7.8 × 10 ¹³ ± 0.5
复合寿命 /μs	≥325	≥350	≥350	≥400

技术方案大部分被放弃了。目前世界上的 CMP 技术几乎绝大部分采用旋转抛光方式, 通常旋转型研磨技术工艺将装在旋转的抛光头上, 抛光垫的以相反的方向旋转, 旋转的工件以一定的压力压在旋转的抛光垫上。抛光垫材料通常是有填充物的聚亚安酯铸件切片或聚氨酯涂层的无纺布。二氧化硅抛光液悬浮在适度的含氢氧化钾或氨水的腐蚀液中, 滴到抛光垫上。碱性抛光液在晶圆表面生成一薄层二氧化硅。抛光垫机以持续的机械磨擦作用去除氧化物, 晶圆表面的突出点被去除掉, 即在化学成膜和机械去膜的交替过程中实现超精密表面加工, 从而达到平坦化的目的。与二十多年前相比, CMP 已经从一种基于经验的工艺转变成一种成熟的由标准化技术支持的工艺, 可以很好地控制并提高系统和工艺的可重复性。

应用材料公司、日本荏原制作的旋转型研磨技术的 CMP 设备已成为世界上 CMP 设备的主流机型。应用材料公司于 1997 年推出其第一台 Mirra CMP 产品, 其旋转型 CMP 设备, 由于采用了氧化铈 (Ce) 研磨液, 且已具备了对铈研磨液提高研磨液混合比、流量等控制性能的硬件, 由于旋转式设计具有较大的半径, 其 φ300 mm 平台的最大研磨线速度可高达 502.92 m/min, 满足小于 65 nm

线宽特征尺寸硅抛光片技术要求, 目前应用材料公司占据了全球 CMP 设备市场约 70% 份额, 其 CMP 在线终点检测采用光学分光反射率方式, 通过光学信号模式识别算法, 当所要求的薄膜厚度被去除后, 机台自动停止抛光。

荏原制作所的旋转式抛光机采用的低压研磨技术, 以电场研磨、蚀刻相结合, 加入触媒材料, 通过检测抛光垫温度分布监控 CMP 过程的试验模型, 可用来预测抛光垫的温度分布, 清楚地了解硅片表面的抛光情况, 可满足小于 90 nm 线宽特征尺寸硅抛光片生产。Lam Research 公司的直线型 CMP 设备, 片子固定在抛光头上旋转运动, 抛光垫由空气轴承支撑做直线运动, 可以非常直观和连续地控制对圆片进行抛光, 由于有更多的调整区域, 可实现更高的均匀性和平整度, 线性研磨料喷嘴减少了研磨料的浪费, 增加了平整性调整的直观性, 消除了圆片平面内抛光线速度不均匀性问题, 使得低压下的高速研磨成为可能。尼康公司推出动态地控制抛光垫来控制研磨状态, 即加工压力利用一定的空气压力, 使用比硅圆片稍微小一点的抛光垫片让不均一性摇动速度发生变化, 即使表面形状和抛光垫片表面形状呈现凹面或凸面也能获得较好平坦化效果。东京精密 A-FP 系列 CMP 设备独特的高平面

度硬垫技术减少了 CMP 的加工时间和研磨液的消耗,可提高抛光垫的寿命和生产效率。并且采用了气囊,避免了与膜层的硬接触,有低压 (≤ 70 MPa) 控制的良好稳定性。

目前 $\phi 200$ mm 以上的硅抛光片均采用双面化学机械抛光。在双面化学机械抛光整个加工过程中,硅片的背面与正面同时在进行化学机械抛光,双面化学机械抛光在有效控制平整度的同时也可以有效地控制纳米形貌,获得高的平整度和局部平整度。与单面抛光相比,单面抛光后硅片的背表面为腐蚀面,其与抛光面相比有较大的表面粗糙度,极易附着沾污颗粒,在清洗中较难去除。附着在硅片背面的沾污颗粒在使用过程中容易从硅片的背面脱离,污染抛光面,影响集成电路器件的成品率。这对于线宽小于 90 nm 工艺的集成电路影响是致命的,双面化学机械抛光可以有效地避免该问题的出现。

在后续工艺中电化学机械抛光 (ECMP) 有可能取代 CMP 技术,IBM 研究表明,相比传统化学机械抛光工艺 (CMP),电化学机械抛光 (ECMP) 具有更强的工艺控制能力,特别是当抛光垫接近其使用寿命并成为影响工艺稳定性的主要因素的情况下,通常的化学机械抛光工艺中,抛光垫长时间的使用会使晶圆表面抛光形貌发生改变,而且会造成缺陷数目的大量增加,ECMP 工艺的优势在于允许精确控制晶圆的抛光过程,而不需要考虑抛光垫使用寿命的影响。

2.4 CMP 清洗

CMP 清洗的重点是去除研磨过程中带来的所有污染物,因为存在化学反应物以及在表面有研磨颗粒,CMP 工艺产生表面颗粒和污染,有效地去除这些表面污染为才能实现硅片表面的整体平坦化,目前大部分化学机械抛光设备都与清洗设备组合成整体生产线。

目前清洗设备可分为非接触式超声波清洗 (Megasonic)、接触式清洗 (PVC 刷洗)。超声波清洗是由超声波发生器发出的高频振荡信号,通过换能器转换成高频机械振荡而传播到介质产生空泡效应,破坏不溶性污物而使它们分散于清洗液中,从而达到清洗件表面净化的目的^[5]。接触式清洗

刷头材料一般是聚乙烯醇 (PVA),清洗过程中多孔海绵状呈挤压状态,可同时与 pH 值 2~12 的化学溶液使用,疏水性表面,如 HF 清洗过的 Si 以及部分介质硅片,很容易从刷子上粘附污染颗粒,而这些污染颗粒是从亲水性的晶圆表面吸附到刷子上的,憎疏水性的容易吸附表面颗粒是因为刷洗过程中疏水的界面存在多重的固-液界面。目前多数清洗设备由接触清洗、非接触清洗和甩干三部分的组合方式。

即使经过旋转甩干/干燥,硅抛光片表面还会有微小水滴,水滴内都会溶解一些微小颗粒,这将造成硅片表面的有机物残留或水印缺陷。如果残余物中的铜发生沉淀再结晶,那么水印缺陷将会在芯片上产生致命的失效。应用材料公司的清洗技术,是将洗的硅片沿垂直方向进入水箱。随着硅片缓慢地移出,将异丙醇喷涂在硅片与水之间,降低水膜的表面张力,从而消除了水印缺陷产生的可能。

3 结 语

虽然硅抛光片 CMP 技术已经发展和应用了多年,但是理论和技术仍然不断推陈出新,尤其是大直径硅片的双面化学机械抛光。国务院于 2011 年 1 月 28 日正式发布了《国务院关于印发进一步鼓励软件产业和集成电路产业发展若干政策的通知》(国发〔2011〕4 号)。明确了对半导体产业发展的鼓励与扶持,开展大直径硅片的双面化学机械抛光技术研究,引进关键技术设备,依靠技术创新发展中国硅抛光片产业,非常有必要而且发展前景广阔。

参考文献:

- [1] 闫志瑞,鲁进军,李耀东,等. 300 mm 硅片化学机械抛光技术分析 [J]. 半导体技术,2006 (8): 561-564.
- [2] 屠海令. 纳米集成电路用大直径硅及硅基材料研究进展 [J]. 功能材料,2004,35 (5): 65-68.
- [3] 张志坚. 大直径单晶水平放肩生长技术 [J]. 云南大学学报: 自然科学版,2004,24 (1A): 78-82.
- [4] 张厥宗. 硅片加工技术 [J]. 北京: 化学工业出版社,2008.
- [5] C. F. Yeh, C. W. Hsiao, W-S. Lee. Novel Post CMP cleaning using buffered HF Solution and ozone water [J]. Appl. Surf. Sci. 2003 (46): 213-215.