

半导体制造中涂胶工艺的研究进展

向东¹ 何磊明¹ 瞿德刚^{1,2} 牟鹏¹ 段广洪¹

1. 清华大学, 北京, 100084 2. 后勤工程学院, 重庆, 400016

摘要:涂胶工艺过程质量的好坏直接影响到光刻工艺的质量, 综述了旋转涂胶法和雾化喷涂法两种涂胶方法的工艺特点和研究进展, 另外还对电沉积法、气相沉积法等工艺方法进行了简要介绍。对比了旋涂法、喷涂法和电沉积法等涂胶方法的工艺特点, 并对不同涂胶工艺方法的应用场合进行了总结。

关键词:旋涂; 喷涂; 电沉积; 光刻工艺

中图分类号: TN305

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2012.03.023

Development of Coating of Photoresist in Semiconductor Manufacturing

Xiang Dong¹ He Leiming¹ Qu Degang^{1,2} Mou Peng¹ Duan Guanghong¹

1. Tsinghua University, Beijing, 100084

2. Logistic Engineering University, Chongqing, 400016

Abstract: The quality of the coating of the photoresist impacts the quality of lithography directly. The spin coating and spray coating method and their development process were presented, as well as the electrodeposition(ED), vapor deposition methods. Advantage and disadvantages of the spin coating, spray coating and ED were outlined, and the applications of the different coating methods were summarized.

Key words: spin coating; spray coating; electro-deposition; photolithography

0 引言

在集成电路制造过程中, 光刻是最复杂、最昂贵和关键的工艺。现在的光刻成本占了芯片总制造成本的三分之一, 耗费的时间约占整个硅片生产时间的 40%~60%^[1]。对于光刻工艺来说, 硅片上光致抗蚀剂(俗称光刻胶)的厚度和均匀性是非常关键的质量参数, 它直接影响到后续光刻工艺的质量, 从而影响集成电路的性能、成品率及可靠性等。一般来说, 光致抗蚀剂薄膜的厚度从几百纳米到几十微米不等, 而且它的均匀性必须达到±1%的水平^[2]。微米级、均匀光刻胶的涂敷对涂胶工艺提出了非常高的要求。

目前大多数光刻胶涂胶工艺普遍采用的是旋转式涂胶方法, 即甩胶法。近年来, 随着微机电系统(micro electro mechanical systems, MEMS)、微光机电系统(micro optical electro mechanical system, MOEMS)等技术的发展, 甩胶工艺遇到越来越多的挑战, 雾化喷涂法和电沉积法等新的涂胶工艺方法开始出现。本文对涂胶工艺的国内外研究动态进行了介绍。

1 旋涂法

旋转涂胶就是将一定量的光致抗蚀剂溶液滴

在基片上形成初始薄膜, 然后基片加速旋转到预定速度, 在离心力的作用下光致抗蚀剂溶液沿径向外流, 液体薄膜厚度不断下降, 最终在基片表面形成均匀薄膜。如图 1 所示, 整个旋转涂胶过程可分成 4 个基本步骤^[3-6]: ①滴胶。滴胶工艺分为静止滴胶和动态滴胶, 即当硅片静止或旋转速度非常缓慢时, 将光致抗蚀剂溶液滴在硅片上。②旋转铺开。硅片加速旋转到一定的转速, 使光致抗蚀剂溶液铺展到整个表面。③旋转甩掉多余的胶。转速稳定在最后的速度(一般在 2000~8000r/min 之间)大约 10s, 甩出多余的光致抗蚀剂, 从而在硅片上得到厚度均匀的薄膜。④溶剂挥发。以固定转速继续旋转已涂胶的硅片, 直到溶剂全部挥发。

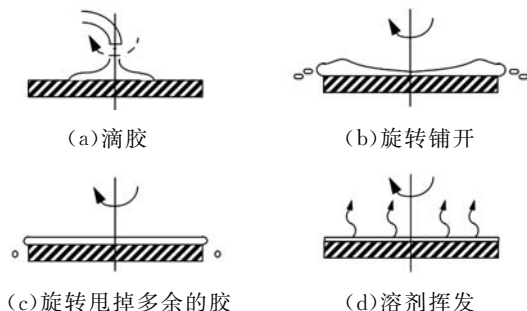


图 1 旋转涂胶过程^[3]

作为一种重要工业技术, 旋转涂胶在许多工业领域都有应用。1922 年, Waker 等^[7]最早描述

了旋涂技术,并将简易低速旋涂系统用于涂料薄膜生产。虽然该系统的转速只有 300r/min,但还是揭示了旋涂工艺的部分特性:即牛顿流体只要滴胶量足够,最终可获得均匀薄膜,且薄膜厚度和滴胶量无关;而 Bingham 塑性流体得到非均匀薄膜,在中心最厚,沿半径向外变薄。1953 年, Kleinschmidt^[8]研究了通过控制流体黏度和提高旋涂速度(4000r/min)得到沥青均匀膜(12 μm)的方法。1958 年, Emslie 等^[9]对无限大旋涂圆盘上恒定黏度牛顿流体的自由表面演变过程进行了分析研究。20 世纪 60 年代,随着微电子技术的发展,旋涂在工业中得到了广泛的应用。例如,在半导体制作中,在硅片上涂覆光敏材料,应用于硬盘、光学元件等生产中磁粉薄膜的制作等。1960 年, Acrivos 等^[10]将 Emslie 的研究扩展到非牛顿流体上,建立了简单的幂律流体模型。1979 年, Lai^[11]通过实验得到了光致抗蚀剂旋涂的膜厚公式。1984 年, Jenekhe 等^[12]建立了在低剪切力下限制牛顿黏度的 Ellis 模型,在近轴区得到了流体的近似均匀分布。1985 年, Jenekhe 等^[13]进行了 Bingham 弹性模型的研究,认为材料在低于屈服应力时表现出固态特性,而在高于屈服应力时就会跟牛顿流体一样表现出液态特性。1987 年, 陈文芳等^[14]研究了 Casson 流体在旋转圆盘上的流动特性,得到了其薄膜厚度随时间和流态参数变化的规律。上述研究是在没有考虑溶剂挥发和扩散的情况下得到的不同类型流体旋涂过程中的离心流动效应,然而实际旋涂过程中溶剂都是易挥发的。1978 年, Meyerhofer^[15]考虑了溶剂挥发对旋涂的影响,其得到的研究结果为:在起始阶段,径向流动占主要地位,而当膜厚到达临界点时,挥发占主导,薄膜厚度接近最终结果;当初始膜厚较小时,在低速下,径向外流和挥发都很弱;当转速较高时,挥发率较高;在其他工艺参数控制精度高的条件下,可得到与基片尺寸无关的均匀膜厚。1985 年, Sukanek^[16]在考虑旋涂溶液挥发和不挥发的情况下,通过求解其质量守恒方程,分析了薄膜厚度和旋涂参数的关系。1996 年, Birnie^[17]通过研究发现:流体挥发和流动效应对旋涂过程中液体薄膜变薄都有影响,其结果验证了 Emslie 等的理论分析。

集成电路的飞速发展,使得对涂胶工艺的要求日益严格。光致抗蚀剂薄膜的厚度与均匀性成为涂胶工艺重要的性能指标。对于旋转涂胶工艺来说,在保证严格的温湿度洁净环境条件下,影响光致抗蚀剂膜厚的关键参数是转速和光致抗蚀剂

的黏度。通常,黏度越高转速越低,薄膜越厚。而影响膜厚均匀性的因素主要有:环境温度、环境湿度、排风净压力、光刻胶温度、旋转马达的精度和重复性、预旋转速度、预旋转时间、最终旋转速度、最终旋转时间和最终旋转加速度、滴胶状况和回吸量等^[2]。2001 年, Myers 等^[18]研究了科氏力对旋涂的影响,其数值研究结果表明在轴对称流动的情况下,科氏力对薄膜厚度没有影响。2002 年, Kitamura 等^[19]使用接近法分析了旋涂圆盘上非均匀膜厚的流体薄膜不稳定流动性,在初始膜厚均匀、外界影响可以忽略的情况下,揭示了重力、表面张力和惯性力对薄膜平面度和薄化过程的影响规律。

在集成电路非平面表面的旋转涂胶过程中,三维微结构会通过表面张力影响液体的流动。1985 年, White 等^[20]发现表面形貌会引起膜厚的异常变化。其研究表明,在较低的转速下,能得到厚度均匀的薄膜。1989 年, Hwang 等^[21]分析了粗糙表面旋涂流动的数值解和解析解,其研究表明:流体膜厚越薄,表面形貌对其影响越大,不同的表面形貌会导致不同薄膜表面形貌的渐进趋向。1991 年, Peurrung 等^[22]研究了尺寸为 50~100 μm 的基片的表面形貌对薄膜平面化的影响规律。1994 年, Extrand^[23]研究了工艺参数对超薄高分子膜的影响,其研究表明:薄膜厚度与固体浓度成正比,与转速成反比。

大量学者的深入研究,使得旋涂工艺理论不断成熟,其工艺过程得到不断优化,然而由于其自身工艺技术特点的限制,旋转涂胶工艺正面临新的挑战。一方面随着硅片制造技术水平的提高和降低芯片制造成本的需要,半导体产业已经由直径 200mm 硅片全面转向直径 300mm 硅片的生产制造,未来将进一步增大(经英特尔公司证实,位于俄勒冈州的 D1X 生产线现已准备开始生产 450mm 的芯片晶圆^[24])。硅片尺寸越大,为保证涂胶薄膜的均匀性,旋涂方式涂胶时,必须采用更低的转速以使涂覆的光刻胶处于层流状态,从而会导致生产率大大降低^[25]。另一方面, MEMS 芯片中的各种三维微结构(V 形槽、沟槽、空腔等)会阻止光致抗蚀剂的流动形成均匀薄膜。如图 2 所示^[26],在微结构的旋转涂胶过程中,受重力和表面张力的影响,在台阶边缘处光致抗蚀剂薄膜会变薄甚至断连,而在腔底侧壁处光致抗蚀剂溶液容易聚集变厚,难以形成完整均匀的光致抗蚀剂薄膜。

旋转涂胶工艺还有一个重要的缺点,即大量

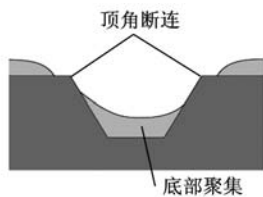


图 2 非均匀涂层示意图

的光致抗蚀剂(约 95%~98%^[27])会被甩离硅片,有效利用率低,造成极大的浪费。全世界每年所消耗的光致抗蚀剂的成本占到了整个光刻工艺过程材料成本的 3%^[28]。随着集成电路产业的迅猛发展,芯片集成度不断提高,线宽不断减小,涂胶所使用的光致抗蚀剂从 I 线向深紫外(DUV)转移,其价格也不断提高,DUV IV 型光致抗蚀剂的价格在每加仑 5000 美元以上^[29]。与此同时,光致抗蚀剂的需求呈不断上升之势,2003 年全球光致抗蚀剂市场销售额为 6.7 亿美元,较 2002 年同比增长 12.1%,2004 年上半年销售额为 3.8 亿美元,较 2003 年同期增长 20.4%^[30]。我国的光致抗蚀剂市场在 2003 年市场规模为 1 亿元,2005 年的市场规模已增长到 2.5 亿元左右,年增长率超过 50%,远远超过国际光致抗蚀剂的增长速度。1986 年时,旋涂工艺中光致抗蚀剂的利用率大概在 0.04%左右,1991 年光致抗蚀剂的利用率提高到 1.6%,1995 年增加到 6.3%^[28],但是依然有大量的光致抗蚀剂被浪费。因此,提高光致抗蚀剂的利用率一直是涂胶工艺研究者追逐的目标之一。此外,光致抗蚀剂中含有的各种化学溶剂会造成严重的环境污染,废液需要进行预先处理,其费用达到了光致抗蚀剂成本的 60%^[31]。为此,半导体制造业一直在探寻新的工艺方法。

2 喷涂法

喷涂法在很多工业领域都有广泛的应用,其工艺过程为:使用各种压力、静电雾化喷嘴将待喷涂介质雾化成细小的颗粒,喷射到待喷涂工件的表面,形成比较薄而均匀的介质膜,如汽车面漆的喷涂等。但是上述雾化喷涂工艺由于自身工艺特征的限制,加上其喷涂效果难以满足涂胶均匀性要求,因而没有应用于光刻工艺中的涂胶过程。

随着超声波喷嘴喷涂等精细雾化技术的成熟,喷涂法开始用于光刻工艺中的涂胶工艺,如美国专利 US4806455^[32]最早提出将 SONO-TEK 公司 8605 系列超声雾化喷嘴用于基片表面光致抗蚀剂薄膜热保护层的涂覆。

1999 年,奥地利 EV Group 公司推出了选用

超声雾化喷嘴作为喷涂工具的 EVG101 系列喷涂设备,用于光致抗蚀剂的喷涂^[33]。这种喷雾式涂胶技术的关键是超声波喷嘴,它利用压电夹心式换能器的振荡,在雾化表面形成表面波,将光致抗蚀剂雾化成精细液滴,其平均特征直径约为 20 μm 。为满足良好雾化的要求,选用的光致抗蚀剂的黏度必须低于 20 mm^2/s ^[34],对于高黏度光致抗蚀剂,可用相应的溶剂进行稀释。光致抗蚀剂溶液的输送采用自动注射泵系统,用计量泵进行精确控制。在喷涂过程中,喷嘴角度需保持某一角度不变,喷嘴沿直径方向在基片上方一定距离进行扫描,基片低速旋转,转速一般为 30~60 r/min^[34]。为保证膜厚均匀,喷嘴穿过硅片上方时扫描速度应是不断变化的,在中心位置速度最快^[35-37]。2000 年,德国 SUSS MicroTec 公司推出了与之类似的喷涂设备(SUSS Delta AltaSpray)^[38]。它与其他喷涂设备主要不同之处是选用的喷嘴为超精细压力雾化喷嘴。喷涂时选择恒压泵提供恒定压力的洁净空气或氮气进行压力雾化,并运用二维运动控制平台进行扫描式运动,将雾化成微细颗粒的光致抗蚀剂均匀喷涂至硅片上,形成均匀薄膜。喷涂时,由于压力喷嘴喷出的液滴速度较大,喷嘴离硅片的距离一般选择在 60~90 μm 之间。

由于雾化涂胶工艺方法出现的时间较晚,有关这方面的研究相对较少,现有的研究大多集中在实验验证分析相关工艺参数对薄膜厚度和均匀性的影响上。2000 年,Kitano^[39]、Ito 等^[40]研究了采用二维运动控制平台进行扫描式运动的雾化喷涂工艺,分析了接触角与薄膜均匀性之间的关系,认为当接触角小于 11.5°时,可以达到比较理想的喷涂效果,然后再合理选择扫描速度与加速度,可以有效地减少光刻胶的浪费。Brubaker 等^[41-43]、Pham 等^[34-37, 44-49]分别进行了不同实验条件下的喷涂工艺研究,认为薄膜的厚度、均匀性和粗糙度主要取决于固体含量(光致抗蚀剂的稀释浓度)、喷雾喷嘴的角度、光致抗蚀剂的流速、喷嘴的扫描速度、旋转主轴速度以及气体压力等工艺参数。基于 EVG 101 喷涂设备,Pham 等通过实验研究发现固体浓度、喷嘴扫描速度、液体供给速度对膜厚具有比较显著的影响,而对其均匀性影响不大。图 3 所示为在平面基片上进行光致抗蚀剂(AZ4823)的喷涂实验结果^[34],当液体供给速度从 30 $\mu\text{L}/\text{s}$ 增加到 80 $\mu\text{L}/\text{s}$ 时,平均膜厚从 4 μm 增加到 10 μm ,而均匀性变化不大,基本上都在 5%以内。图 4^[49]所示为 MEMS 芯片上不同

稀释浓度的光致抗蚀剂(AZ4562)的喷涂实验结果,固体浓度越高,最终膜厚也越大,而薄膜均匀性变化不大。Pham 等^[36-37]推导了一定实验条件下薄膜厚度与固体浓度、喷嘴扫描速度、液体供给速度等工艺参数之间的关系,当使用一定固体浓度的光致抗蚀剂喷涂时,在一定尺寸的基片上形成的薄膜厚度与液体供给速度成正比,与扫描速度成反比。Singh 等^[50-57]则研究验证了 Delta AltaSpray 喷涂设备在 MEMS 芯片等三维特征结构中的喷涂效果,认为采用该设备同样可以得到满足工艺要求的涂胶。2008 年, Koo 等^[25]为了提高雾化涂胶方法的均匀性,采用喷涂与旋涂结合的涂胶方法,实验分析了薄膜厚度、均匀性与转速、抗蚀剂黏度、供给速度等工艺参数以及温度湿度等环境参数之间的关系,当湿度较大时可以得到更好的均匀度。2010 年,电子科技大学李波等^[58]研究了采用超精细压力雾化喷嘴为喷涂工具的涂胶工艺工程,在均匀实验的基础上利用非线性回归方法得到了薄膜厚度与涂料压力、微调阀和雾化压力等工艺参数之间的数学模型。清华大学瞿德刚等^[59]通过 Dantec 公司的粒子动态分析(PDA)系统测试了超声波喷嘴雾化颗粒的粒径大小与分布,研究了相关工艺参数对超声喷嘴雾化效果的影响,为雾化喷涂工艺选择合适工艺参数提供了参考依据。

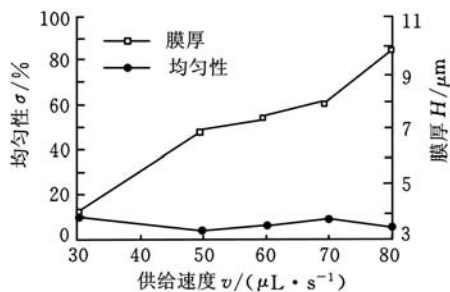


图3 平面基片上膜厚、均匀性与喷涂供给速度之间依赖关系的实验结果^[34]

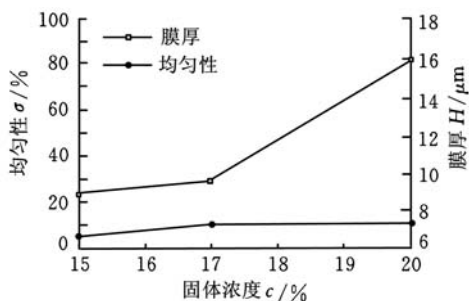


图4 膜厚、均匀性与固体浓度之间的关系^[49]

与旋转涂胶方法相比,雾化喷涂方法工艺控制参数相对较多,要达到理想的薄膜厚度与均匀性,必须选择合适的喷涂工艺参数,要满足集成电

路芯片中光刻工艺的要求,其均匀性也有待进一步提高。从当前实际应用来看,正如文献[43]中指出一样:雾化喷涂方法不仅可以满足 MEMS 领域中表面形貌起伏不平的圆片的涂胶,而且可横跨许多其他工业领域,在这些领域中,雾化喷涂方法比旋转涂胶方法更加有利,如:①对不规则形状和特重型基片的涂胶;②对多个小尺寸基片同时涂胶;③易碎结构的保护性涂胶;④填充悬空的应用。另外,雾化喷涂方法可大大提高光刻胶的利用率。

3 其他涂胶方法

除了上述两种涂胶工艺方法之外,电沉积方法也是一种在光刻工艺中得到实际应用的涂胶方法。电沉积方法基于电化学的电泳原理,在许多方面类似于电镀,但与电镀不同之处是电镀是连续的,电沉积工艺则是自行制约的。电解后的光敏抗蚀剂是非导电的,当达到一定厚度时将成为不导电的阻挡层。而电镀的金属镀层是导电性的,只要有电流通过,电镀过程就会持续不断。根据其表面带电电荷的不同,电沉积材料可分为阳离子和阴离子两类。美国专利 US4592816^[60]介绍了光敏聚合物形成均匀薄膜的电泳沉积方法, US5230984^[61]介绍了一种正性感光阴离子树脂涂层材料的组成及其电沉积制作工艺。文献[62]介绍了电沉积涂胶的光刻工艺过程,即先将基片用电子束蒸镀技术镀上一层金属导电层,再将光致抗蚀剂中的官能基经过亲水化以后,分散到水中形成乳浊液,然后将基片作为电极置于溶液槽中,在电解作用下光致抗蚀剂微团发生分解并附着于作为电极的基板上,当基板被光致抗蚀剂完全覆盖后沉积停止,最终形成均匀薄膜。

电沉积工艺过程复杂, Vidusek^[62]研究发现,在电沉积过程中,要保证薄膜均匀并且避免出现针孔的缺陷,要尽量减少抗蚀剂乳浊液中的气泡,同时为保证其浓度稳定,必须采用超滤法将电解沉积过程中产生的游离酸去除。电沉积方法形成的薄膜厚度取决于反应槽的温度和工作电压两个主要参数^[63]。

电沉积法最早应用于印刷电路板(PCB)上,至今已有近 20 年的历史,它能够在各种不规则表面如通孔上实现均匀的抗蚀剂薄膜涂覆。近年来,开始将电沉积法应用于芯片制造中^[64-66]。电沉积涂胶法最大的优点是可以适用于各种三维表面结构的涂胶,不管是台阶边缘还是底角处,均能形成满足工艺要求的均匀薄膜,当需要在竖直侧

壁上形成良好的涂胶薄膜时,旋转涂胶和雾化喷涂法都无法满足工艺要求,只有电沉积法能够实现。

中国专利 CN1501442A^[65]介绍了一种光刻胶沉积设备以及使用该设备形成光刻胶薄膜的方法。该方法先利用压电雾化装置将液体光刻胶雾化,再把雾化的光刻胶供给到较小大气压的真空室中,在真空室中,雾化的光刻胶在基片上沉积为光刻胶薄膜。文献[67]介绍了在密闭腔室中利用压电雾化器将光刻胶溶液破碎成雾滴,在载流气体氮气的带动下,雾滴到达上方的基片表面并不断沉积形成薄膜的方法。专利 US2009181162^[68]介绍了一种利用液体动态表面张力形成均匀薄膜的方法。当基片在外力作用下向上移动时,载流液体、光刻抗蚀剂聚合物及气相三者结合点处的表面张力会发生变化,载流液体与气相间的表面张力将大于载流液体与聚合物之间的表面张力及聚合物与气相间的表面张力之和,光致抗蚀剂在此作用下会随着基片向上移动,从而在基片上形成均匀的抗蚀剂薄膜。

4 三种涂胶工艺的对比

以上各种涂胶工艺方法因其原理各不相同,各具有其独特之处,表 1 对比了旋涂法、喷涂法和电沉积法三种涂胶方法的工艺特点,其他的涂胶方法目前应用较少。

表 1 三种涂胶工艺对比

	旋涂法	喷涂法	电沉积法
工艺过程	简单,单片生产	简单,可批量生产	复杂,但可实现批量生产
基片导电性	绝缘、导电	绝缘、导电	导电
膜厚影响因素	黏度、转速	固体浓度、液体供给速度、扫描速度、间隔或转速等	电压、温度
均匀性	小尺寸平片均匀性好,但重复性差,受基片形貌影响大	稍差,但重复性好,受基片表面形貌影响小	好且重复性好,不受基片表面形貌影响
光刻胶	各种型号,产品丰富	黏度小于 20mm ² /s、易于雾化,目前市场上型号少	专用电沉积光刻胶,涂胶时需保持浓度稳定
技术适应性	小尺寸平面基片	大尺寸、非圆片、各种三维微结构基片	基片上有金属导电层
经济性	材料利用率低(10%以下),浪费严重,处理费用高	材料利用率高,在 90%以上	材料利用率高,处理费用高
环境友好性	差	好	差

旋涂法最早应用于涂胶工艺过程,因其工艺控制参数较少、操作简单而在平面圆片涂胶过程得到广泛的应用,经过几十年的应用与研究,其技术和相关研究理论都已成熟。但在非圆片和非平面基片上涂胶时遇到不可克服的困难,并且材料浪费严重,需要寻找切实可行的替代工艺方法。近些年来,雾化喷涂法和电沉积法等作为克服旋转涂胶的缺陷而出现的涂胶工艺方法,逐渐在工程和学术上获得了越来越多的重视。电沉积涂胶方法最突出的优点为,对于各种形貌的基片表面的涂胶,均能达到均匀的涂覆,但由于其工艺需要导电层,因而其应用受到很大限制。喷涂法作为一种近年来逐渐兴起的方法,能够用于三维微结构表面的涂覆,并且具有便于工业化生产,材料利用率高、污染较少的优点,但因其喷涂设备本身价格较高,工艺控制参数较多,相关的理论研究还不充分,其薄膜均匀性也有待进一步提高。

5 结语

单纯从技术角度来看,因为各种涂胶工艺方法各有其优点和局限,针对不同应用场合,需要将几种涂胶工艺方法配合使用,发挥各自的优点,以便满足光刻工艺的涂胶需求。喷涂法具有材料利用率高的优点,这对于减少碳排放,促进可持续发展具有重大的意义,将成为未来优先发展的涂胶工艺方法。

参考文献:

- [1] Jackson K A. 半导体工艺[M]. 屠海令,万群,译. 北京:科学出版社,1999.
- [2] Van Z P. 芯片制造:半导体工艺制程实用教程[M]. 赵树武,朱践知,于世恩,等,译. 北京:电子工业出版社,2004.
- [3] Bornside D, Macosko C, Scriven L. On the Modeling of Spin Coating[J]. Journal of Imaging Technology, 1987, 13: 122-130.
- [4] Luurtsema G A. Spin Coating for Rectangular Substrates [D]. Berkeley: University of California, 1997.
- [5] Loreface B, Chen D, Mullen B, et al. How to Minimize Resist Usage During Spin Coating[J]. Semiconductor International, 1998, 21(6): 179-186.
- [6] Quirk M, Serda J. 半导体制造技术 [M]. 韩郑生,译. 北京:电子工业出版社,2004.
- [7] Waker P H, Thompson J G. Some Physiscal Properties of the Photoresist Film[J]. Proc. Am. Soc. Test Mater, 1922, 15(2): 464-484.

- [8] Kleinschmidt C K. Preparation of Bituminous Films by Spinning[J]. ASTM Bull, 1953,193: 53-55.
- [9] Emslie A G, Bonner F T, Peck L G. Flow of a Viscous Liquid on a Rotating Disk[J]. Journal of Applied Physics, 1958, 29(5): 858-862.
- [10] Acrivos A, Shah M J, Petersen E E. On the Flow of a Non-newtonian Liquid on a Rotating Disk [J]. Journal of Applied Physics, 1960, 31(6): 963-968.
- [11] Lai J H. Investigation of Spin Coating of Electron Resists [J]. Polymer Engineering and Science, 1979, 19(15): 1117-1121.
- [12] Jenekhe S A, Schuldt S B. Coating Flow of Non-newtonian Fluids on a Flat Rotating-Disk[J]. Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, 1984, 23(4): 432-436.
- [13] Jenekhe S A, Schuldt S B. Flow and Film Thickness of Bingham Plastic Liquids on a Rotating-disk[J]. Chemical Engineering Communications, 1985, 33(1/4): 135-147.
- [14] 陈文芳,蔡扶时,许元泽. Casson 流体在旋转圆盘上的流动[J]. 力学学报,1987,19(2): 111-117.
- [15] Meyerhofer D. Characteristics of Resist Films Produced by Spinning[J]. Journal of Applied Physics, 1978, 49(7): 3993-3997.
- [16] Sukanek P C. Spin Coating[J]. Journal of Imaging Technology, 1985, 11(4): 184-190.
- [17] Birnie D P. Combined Flow and Evaporation During Spin Coating of Complex Solutions[J]. Journal of Non-crystalline Solids,1997, 218: 174-178.
- [18] Myers T G, Charpin J. The Effect of the Coriolis Force on Axisymmetric Rotating Thin Film Flows [J]. International Journal of Non-linear Mechanics,2001, 36(4): 629-635.
- [19] Kitamura A, Hasegawa E, Yoshizawa M. Asymptotic Analysis of the Formation of Thin Liquid Film in Spin Coating [J]. Fluid Dynamics Research,2002, 30(2): 107-125.
- [20] White L K, Miskowski N. Topography-induced Thickness Variation Anomalies for Spin-coated, Thin-films[J]. Journal of Vacuum Science & Technology,1985, 3(3): 862-868.
- [21] Hwang J H, Ma F. On the Flow of a Thin Liquid-film over a Rough Rotating-disk[J]. Journal of Applied Physics,1989, 66(1): 388-394.
- [22] Peurrung L M, Graves D B. Film Thickness Profiles over Topography in Spin Coating[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1991, 138(7): 2115-2124.
- [23] Extrand C W. Spin-coating of very Thin Polymer-films[J]. Polymer Engineering and Science,1994, 34(5): 390-394.
- [24] 佚名. 英特尔研发生产第一块 450mm 晶圆[EB/OL]. [2010-12-11]. <http://www.k666.com/20101211/n42957.shtml>.
- [25] Koo J, Lee J, Jung C. Planarization During Spray Coating: Numerical Study[J]. Journal of Micro-mechanics and Microengineering,2008, 18:1-9.
- [26] Cooper K A, Hamel C, Whitney B, et al. Conformal Photoresist Coatings for High Aspect Ratio Features[C]//Proceedings of International Wafer Level Packaging Conference. http://www.suss.com/fileadmin/files/technical_publications/WP_Conformal_Photoresist_Coatings_for_High_Aspect_Ratio_Features_09.pdf.
- [27] Haaland P, Mckibben J, Paradi M. Fundamental Constraints on Thin Film Coatings for Flat-Panel Display Manufacturing [C]//The Proceedings of the Display Manufacturing Technology Conference. San Jose;SID,1995:79-81.
- [28] Moreau W, Cornett K, Fahey J, et al. The Shot Size Reduction of Photoresist Formulations [J]. Proceedings of the SPIE—the International Society for Optical Engineering,1995, 2438: 646-658.
- [29] Han S. Modeling and Analysis of Extrusion-spin Coating: an Efficient and Deterministic Photoresist Coating Method in Microlithography[D]. Massachusetts; Massachusetts Institute of Technology, 2001.
- [30] 郑金红. 光刻胶的发展及应用[J]. 精细与专用化学品,2006(16): 24-30.
- [31] Luurtsema G A. Spin Coating for Rectangular Substrates [D]. Berkeley: Univ. of California, 1997.
- [32] Labianca N C. Thermal Stabilising Process for Photoresist Images—applying Film Forming Polymer in Form of Atomised Droplet Pattern Which is Generated Using Ultrasonic Nozzle, To Photore-sistive Images:US, 4806455[P]. 1989-02-21.
- [33] Anon. Electronic Vision[EB/OL]. http://www.evgroup.com/zh/products/lithography/coaters_developers/evg101/.
- [34] Pham N P, Scholtes T, Klerk R, et al. Direct Spray Coating of Photoresist for MEMS Applications[J]. SPIE,2001, 4557: 312-319.
- [35] Pham N P, Bulcke M V, de Moor P. Spray Coating of Photoresist for Realizing Through-Wafer Interconnects[C]//Electronics Packaging Technology Conference. New York; IEEE, 2006: 831-836.
- [36] Pham N P, Burghartz J N, Sarro P M. Spray Coating of Photoresist for Pattern Transfer on

- High Topography Surfaces[J]. *Journal of Micro-mechanics and Microengineering*, 2005, 15 (4): 691-697.
- [37] Pham N P, Burghartz J N, Sarro P M. A Model for Film Thickness Using Direct Spray Coating [C]//*Electronics Packaging Technology*, 2003 5th Conference. New York:IEEE, 2003: 773-776.
- [38] Anon. Spin Coaters & Spray Coaters; SUSS MicroTec [EB/OL]. <http://www.suss.com/en/products/spin-spray-coater.html>.
- [39] Kitano T. Novel Coating Apparatus Using Nozzle-scan Technique[C]//*The Ninth International Symposium Semiconductor Manufacturing*. Tokyo, 2000: 395-398.
- [40] Ito S, Ema T, Kitano T, et al. Performances of Novel Nozzle-scan Coating Method[J]. *Japanese Journal of Applied Physics Part 1-Regular Papers Short Notes & Review Papers*, 2000, 39 (12B): 6972-6975.
- [41] Brubaker C, Wimplinger M, Lindner P, et al. Investigating the Use of Spray-coating Technology in MEMS applications[J]. *Micro*, 2004, 22 (2): 45.
- [42] Brubaker C, Wimplinger M, Mittendorfer, et al. Low-k Underfill Using Spray Coat Technology [EB/OL]. <http://www.csmantech.org/Digests/2004/2004Papers/8.11.pdf>.
- [43] Brubaker C, Wimplinger M, Lindner P, et al. 喷雾式涂胶的新应用[J]. *电子工业专用设备*, 2005 (9): 52-55.
- [44] Pham N P, Sarro P M, Ng K T, et al. A Micromachining Post-process Module with Pattern Transfer in Deep Cavities for RF Silicon Technology[C]//*The 14th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical System*. Interlaken, 2001: 345-348.
- [45] Pham N P, Scholtes T L M, Ruud K, et al. Direct Spray Coating of Photoresist-A New Method for Patterning 3-D Structures[J]. *Euro Sensors*, 2002, 16: 15-18.
- [46] Pham N P, Tezcan D S, Ruythooren W, et al. Photoresist Coating and Patterning for Through-silicon via Technology[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2008, 18 (12): 125008.
- [47] Pham N P, Boellaard E, Burghartz J N, et al. Photoresist Coating Methods for the Integration of Novel 3-D RF Microstructures[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2004, 13 (3): 491-499.
- [48] Pham N P, Boellaard E, Sarro P M, et al. Spin, Spray Coating and Electrodeposition of Photoresist for MEMS Structures - A Comparison[EB/OL]. <http://www.ims-chips.de/content/pdfpublicationorig/540orig.pdf>.
- [49] Pham N P, Sarro P M, Joachim N. Spray Coating of AZ4562 Photoresist for MEMS Applications [EB/OL]. <http://www.ims-chips.de/content/pdfpublicationorig/505orig.pdf>.
- [50] Singh V K, Sasaki M, Hane K, et al. Photolithography on Three-dimensional Structures Using Spray Coated Negative and Positive Photoresists[C]//*The 13th International Conference on Solid-state Sensors, Actuators and Microsystems*. New York:IEEE, 2005: 1445-1448.
- [51] Singh V K, Sasaki M, Hane K, et al. Deposition of Thin and Uniform Photoresist on Three-dimensional Structures Using Fast Flow in Spray Coating[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2005, 15(12): 2339-2345.
- [52] Singh V K, Sasaki M, Song J H, et al. Technique for Preparing Defect-free Spray Coated Resist Film on Three-dimensional Micro-electromechanical Systems[J]. *Japanese Journal of Applied Physics Part 1-Regular Papers Brief Communications & Review Papers*, 2005, 44 (4A): 2016-2020.
- [53] Singh V K, Sasaki M, Hane K, et al. Flow Condition in Resist Spray Coating and Patterning Performance for Three-dimensional Photolithography over Deep Structures[J]. *Japanese Journal of Applied Physics Part 1-Regular Papers Short Notes & Review Papers*, 2004, 43 (4B): 2387-2391.
- [54] Singh V K, Sasaki M, Song J H, et al. Heating Effect on Photoresist in Spray Coating Technique for Three-dimensional Lithography[J]. *Japanese Journal of Applied Physics Part 1-Regular Papers Short Notes & Review Papers*, 2003, 42 (6B): 4027-4030.
- [55] Singh V K, Sasaki M, Song J H, et al. Technique for Preparing Defect-free Spray Coated Resist Film[J]. *Boston Transducers'03: Digest Of Technical Papers*, 2003, 1/2: 817-820.
- [56] Singh V K, Sasaki M, Watanabe Y, et al. Improved Spray Coating of Photoresist for Three-dimensional Photolithography over Deep Structure [C]//*Microprocesses and Nanotechnology Conference*. New York:IEEE, 2003: 306-307.
- [57] Singh V K, Sasaki M, Song J H, et al. Spray Coated Photoresist over Anisotropically Etched Deep Si Cavities[C]//*2002 International Micropro-*

cesses and Nanotechnology Conference, New York;IEEE,2002; 188-189.

[58] 李波,安建欣,徐利梅. 喷涂工艺薄膜厚度模型的构建与应用[J]. 电子科技大学学报,2010, 39(3): 461-465.

[59] Qu Degang, Xiang Dong, He Leiming, et al. A Study of Atomization Characteristic of Ultrasonic Spray Nozzle[C]//2011 International Conference on Frontiers of Manufacturing Science and Measuring Technology. Chongqing,2011; 958-963.

[60] Emmons W D, Winkle M R. Electrophoretic Deposition Process;US, 4592816[P]. 1986-06-13.

[61] Hiro M, Tachiki S, Akahori T, et al. Positive Type Photosensitive Anionic Electrodeposition Coating Resin Composition; US, 5230984 [P]. 1993-06-27.

[62] Vidusek D A. Electrophoretic Photoresist Technology: an Image of the Future—today[J]. Circuit World,1989, 15(2): 6-10.

[63] Kersten P, Bouwstra S, Petersen J W. Photolithography on micromachined 3D Surfaces Using Electrodeposited Photoresists[J]. Sensors and Actuators a Physical,1995, 51(1): 51-54.

[64] 蒋进. 三维电子封装微凸点的电沉积制备及低温固态互连技术研究[D]. 上海:上海交通大学, 2010.

[65] 朴韩守,權寧鍾. 光刻胶沉积设备以及使用该设备形成光刻胶薄膜的方法:中国,02150649. 3[P]. 2004-06-02.

[66] Tajadod J, Hendriks H, Klocke J, et al. Electrophoretic Photoresist Application for High Topography Wafer Surfaces[EB/OL]. <http://www.cs-mantech.org/Digests/2003/2003PDF/12-4.pdf>.

[67] Yamazaki K, Namatsu H. New Resist—coating Technique Using Fine Mist for Three—dimensional Nanotechnology[M]. New York;IEEE, 2006.

[68] Schneider J. Method and Apparatus for Thin Film/Layer Fabrication and Deposition; US, 20090181162[P]. 2009-07-16.

(编辑 王艳丽)

作者简介: 向东,男,1972年生。清华大学精密仪器与机械学系副研究员、博士研究生导师。研究方向为绿色设计理论与方法、绿色制造、电子废料再资源化工艺及装备。发表论文 30 余篇。何磊明,男,1977年生。清华大学精密仪器与机械学系硕士研究生。瞿德刚,男,1970年生。清华大学精密仪器与机械学系博士研究生,后勤工程学院军事供油工程系副教授。牟 鹏,男,1977年生。清华大学精密仪器与机械学系助理研究员。殷广洪,男,1946年生。清华大学精密仪器与机械学系教授。

(上接第 353 页)

参考文献:

[1] 李莺莺,邵善锋,李学忠,等. 基于智能控制的装载机自动换挡策略[J]. 机械工程学报,2009,45(8): 216-220.

[2] 李长文,张付军,黄英,等. 基于 dSPACE 系统的电控单元硬件在环发动机控制仿真研究[J]. 兵工学报,2004,25(4):403-406.

[3] 张建国,雷雨龙,刘洪波,等. 干式双离合器自动变速器快速控制原型与台架试验[J]. 吉林大学学报,2010,40(4):901-905.

[4] 董其慧,胡建军,秦大同. 液力机械自动变速传动系统快速原型控制[J]. 重庆大学学报,2006,29(12): 13-17.

[5] 常绿. 基于实时工况的装载机智能换挡规律[J]. 农业工程学报,2009,25(3):69-73.

[6] 郑磊,郭孔辉,余天明,等. 自动变速器换挡规律的图解方法[J]. 吉林大学学报,2009,39(3):5-9.

[7] 邓涛,孙冬野,秦大同. 重型车辆 AMT 硬件在环仿真试验研究[J]. 中国机械工程,2010,21(2):245-251.

[8] Kenji H,Satoshi T,Yohei T,et al. The Development and Utilization of Hardware—in—the—loop Simulation for the Development of an Automatic Transmission Control System[J]. SAE Paper,2002-01-1255.

[9] 祝轲卿,王俊席,吴晨楠,等. 基于 Targetlink 的嵌入式系统控制软件开发[J]. 系统仿真学报,2007,19(7):1476-1479.

[10] Yan Quanzhong Kevin, Trush C J. Transmission Control Design Approach Using Simulation,Rapid Prototyping,and Auto Code Generation[J]. SAE Paper,2008-01-0536.

[11] 崔功杰,邓林,赵丁选,等. 工程车辆四参数自动变速器控制系统研究[J]. 工程机械,2007,38(5):18-21.

[12] 王宜怀,刘晓升,等. 嵌入式系统—使用 HCS12 为控制器的设计与应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2008:1-320.

(编辑 苏卫国)

作者简介: 张炳力,男,1968年生。合肥工业大学机械与汽车工程学院副教授。研究方向为电动汽车技术、汽车动力学及控制、工程机械混合动力驱动。董彦文,男,1986年生。合肥工业大学机械与汽车工程学院硕士研究生。胡福建,男,1987年生。合肥工业大学机械与汽车工程学院硕士研究生。刘亲其,男,1963年生。合肥工业大学机械与汽车工程学院博士研究生,安徽合力股份有限公司高级工程师。