

弹性磨抛轮加工硅片面形预测模型及试验验证

高尚*, 任佳伟, 康仁科, 张瑜, 李天润

(大连理工大学 高性能精密制造全国重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: **目的** 为分析弹性磨抛轮磨削硅片面形精度变化的影响因素, 优化加工参数以获得良好的磨削面形。**方法** 通过建立考虑弹性磨抛轮转速、硅片转速、偏心距等参数的弹性磨抛轮磨粒运动轨迹模型, 结合单颗磨粒切削深度, 提出了弹性磨抛轮加工硅片的面形去除非均匀性预测方法, 建立了基于弹性磨抛轮磨削硅片的面形预测模型, 并通过不同转速比下的磨削试验验证了预测模型的准确性。**结果** 面形预测模型仿真出的面形与弹性磨抛轮加工试验后的硅片面形一致, 均呈“凸”形, 且 PV 值随转速比的增大而增大。转速比为 1 时, 磨削后硅片面形 PV 值为 $0.54\text{ }\mu\text{m}$, 仿真模型计算出的 PV 值为 $0.49\text{ }\mu\text{m}$, 转速比为 5 时, 磨削后硅片面形 PV 值为 $2.12\text{ }\mu\text{m}$, 仿真模型计算出的 PV 值为 $2.38\text{ }\mu\text{m}$ 。**结论** 磨削试验面形 PV 值与模型计算面形 PV 值的预测误差小于 13%, 建立的面形预测模型能够成功预测硅片的面形规律, 可以分析加工参数对硅片面形的影响规律。由面形预测模型分析可知, 转速比对硅片面形精度有影响, 且随着转速比的增加, 硅片面形不断恶化, 因此在实际加工中, 应选择较小的转速比进行加工, 以获得更优的硅片面形精度。

关键词: 磨抛轮; 硅片; 面形仿真; 磨粒切削深度; 去除均匀性; 磨削

中图分类号: TG580.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2024)03-0022-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.03.002

Surface Shape Prediction Model of Silicon Wafers Ground by the Elastic Grind-polishing Wheel and Test Verification

GAO Shang*, REN Jiawei, KANG Renke, ZHANG Yu, LI Tianrun

(State Key Laboratory of High-performance Precision Manufacturing, Dalian University of Technology, Liaoning Dalian 116024, China)

ABSTRACT: Silicon wafer is the most widely used substrate material for integrated circuits. Ultra-precision grinding is widely used in the back thinning and flattening of silicon wafer and it can achieve high dimensional accuracy, fast material removal and relatively small wear. The elastic Grind-polishing wheel is a new type of non-woven structure grinding tool with low elastic modulus and ultra-fine abrasive grains, which can obtain high surface and subsurface quality grinding wafers. It is prepared by ultra-fine ZrO_2 abrasive particles and low elastic modulus wool fibers. The surface roughness of the silicon wafer after grinding can reach 0.45 nm , and the subsurface damage depth is about 67 nm . It has significant advantages in processing efficiency, process integration and environmental friendliness, and has great development potential. However, as one of the important evaluation indexes of the surface, the surface shape rule of the workpiece is rarely studied. The material removal of the silicon wafer during the grinding process is uneven and the surface profile of the workpiece is poor. The work aims to analyze the

收稿日期: 2023-10-21; 修订日期: 2023-12-22

Received: 2023-10-21; **Revised:** 2023-12-22

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFB3605902); 国家自然科学基金 (51975091, 51991372); 河南省重大科技专项 (221100230100)

Fund: National Key Research and Development Program of China (2022YFB3605902); National Natural Science Foundation of China (51975091, 51991372); Major Science and Technology Projects of Henan Province (221100230100)

引文格式: 高尚, 任佳伟, 康仁科, 等. 弹性磨抛轮加工硅片面形预测模型及试验验证[J]. 表面技术, 2024, 53(3): 22-27.

GAO Shang, REN Jiawei, KANG Renke, et al. Surface Shape Prediction Model of Silicon Wafers Ground by the Elastic Grind-polishing Wheel and Test Verification[J]. Surface Technology, 2024, 53(3): 22-27.

*通信作者 (Corresponding author)

affecting factors of the surface of the workpiece in the grinding by the elastic Grind-polishing wheel and optimize the processing parameters to obtain good surface shape. In previous studies, the surface shape rule was only speculated based on the distribution density of the abrasive trajectory on the surface of the silicon wafer, and the actual material removal amount could not be calculated to obtain an accurate surface shape. In this study, by establishing the elastic Grind-polishing wheel abrasive trajectory model based on the elastic Grind-polishing wheel speed, silicon wafer speed, eccentricity and other processing parameters, combined with the establishment of considering the calculation of Grit-cutting depth and calculating the material removal depth of different radial positions of the silicon wafer, the prediction method of material removal non-uniformity in silicon wafer grinding was proposed. The surface shape prediction model of silicon wafer ground by Grind-polishing wheel based on material removal depth was developed, and the accuracy of the prediction model was verified by grinding tests under different speed ratios. The surface shape simulated by the surface shape prediction model is the same as the silicon wafer after the elastic Grind-polishing wheel grinding test, both of which are convex, and the PV value increases with the increase of the speed ratio. When the speed ratio was 1, the PV value of silicon wafer after grinding was $0.54\text{ }\mu\text{m}$, and the PV value calculated by the simulation model was $0.49\text{ }\mu\text{m}$. When the speed ratio was 5, The PV value of silicon wafer after grinding was $2.12\text{ }\mu\text{m}$, and the PV value calculated by the simulation model was $2.38\text{ }\mu\text{m}$. The prediction error between the PV value of silicon wafer after grinding and the PV value calculated by the model is less than 13%. It shows that the model can successfully predict the surface shape of ground silicon wafers, the influence of processing parameters on the surface shape of silicon wafer can be analyzed. Surface shape prediction model analysis shows that the speed ratio has an effect on the surface accuracy of silicon wafers, and with the increase of the speed ratio, the surface shape of the silicon wafer deteriorates continuously. In the actual processing, a smaller speed ratio should be selected to obtain a better surface shape of the silicon wafer. The model has certain guiding significance for selecting appropriate grinding parameters to obtain ideal silicon wafer surface.

KEY WORDS: grind-polishing wheel; wafer; surface simulation; grit-cutting depth; removal uniformity; grinding

单晶硅是集成电路制造中应用最广泛的衬底材料,在各种芯片制造中担任极为重要的角色^[1-5]。为顺应电子产品便携化与小型化的发展要求,硅片平坦化和减薄工艺对表面质量提出了越来越高的要求^[6-7]。在硅片的制造和减薄过程中,超精密磨削被广泛应用^[8-9],其能实现较高的尺寸精度和快速的材料去除及相对较小的损耗^[10-11],如何通过超精密磨削获得高表面质量的硅片引起了学者们的关注^[12-15]。Kang 等^[16]开发了一种新型弹性磨削工具——磨抛轮。磨抛轮磨削后的硅片表面粗糙度可达 0.45 nm ,亚表面损伤深度约为 67 nm ,在加工效率、工艺集成及环境友好等方面具有显著优势,具有极大的发展潜力。

磨抛轮加工可以获得低表面粗糙度和低亚表面损伤的磨削硅片,但磨抛轮磨削硅片的面形规律仍未被揭示,且磨粒轨迹分布规律对面形规律有显著影响^[17-18]。面形是硅片加工后评价工件表面质量的重要指标之一^[19-20],许多学者对传统磨削工具加工工件的面形进行了研究。Wang 等^[21]以双面行星磨削机床为研究对象,分析了工件与磨粒之间的相对运动,建立了磨粒在工件表面的运动轨迹数学模型,通过仿真与试验验证了砂轮转速对工件的表面材料去除均匀性有显著影响。Fang 等^[22]建立了基于固定研磨垫几何形状及磨粒运动轨迹的数学模型,通过仿真和试验,验证了固定研磨垫几何形状对轨迹不均匀性和表面轮廓具有重要影响。Li 等^[23]在双面磨削工艺的基

础上,建立了磨削轨迹分布数学模型,通过仿真和试验研究发现,砂轮与工件的转速比对磨削表面轨迹分布和材料去除均匀性有重要影响。Tao 等^[24]基于材料去除过程随机特性分析和描述方法,对磨削后的硅片表面粗糙度进行了预测。Kim 等^[25]通过建立基于 CMP 加工去除均匀性的分析模型,发现基本运动学参数对加工材料的去除均匀性有重要影响。

由上述研究可知,磨粒运动轨迹及工艺参数对硅片的面形具有重要影响,且影响规律可以通过试验和数学模型仿真研究中获得。但以上研究只是基于磨粒轨迹在硅片表面的分布疏密去推测面形规律,无法计算出实际的材料去除量进而得到准确的面形。

为了实现高精度高表面质量硅片的磨抛加工,优化磨抛工艺,本文研究了考虑硅片初始面形、加工参数、单颗磨粒切深等多因素影响的硅片磨抛加工中材料去除非均匀性预测方法,建立了硅片磨抛去除非均匀性的预测模型,分析了单颗磨粒切深以及偏心距、磨抛轮及转台转速、磨抛轮与硅片尺寸等实际加工参数对去除非均匀性的影响规律。最后通过磨削试验验证了所建模型的准确性。

1 面形预测模型的建立

磨抛轮是一种新研制的超细磨粒非织造结构磨削工具,利用超细粒度的 ZrO_2 磨粒和低弹性模量的羊毛纤维制备而成,其中 ZrO_2 磨粒的粒径为 200 nm ,

磨抛轮加工可以获得高表面/亚表面质量的磨削硅片,磨抛轮实物如图1所示,磨抛轮为直径350 mm、厚40~50 mm的盘状结构,由黏接磨粒的羊毛毡体与铝合金基体组成。



图1 弹性磨抛轮

Fig.1 Elastic grinding-polishing wheel

通过扫描电子显微镜 (SEM, Q45, FEI, USA) 观察磨抛轮的微观结构,如图2所示。磨粒附着于纤维表面。当磨抛轮磨削硅片时,由于磨抛轮自身的旋转运动和与硅片之间的相对运动,磨粒会以特定的运动轨迹进行运动,切削状态下的磨粒在硅片表面上形成磨粒切削深度并去除材料。因此,对磨抛轮磨削硅片的面形进行分析,需要同时考虑磨粒的运动轨迹和切削深度。

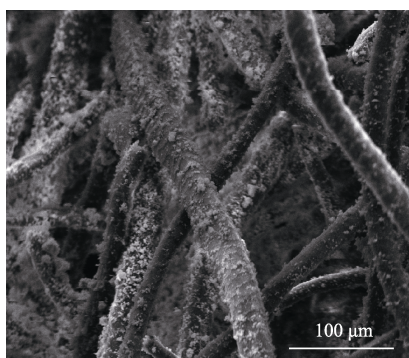


图2 磨抛轮 SEM 显微图像

Fig.2 SEM microscopic image of grinding-polishing wheel

1.1 磨粒轨迹模型的建立

磨抛轮转速及硅片转速的变化会导致磨粒运动轨迹发生相应改变,进而导致磨粒轨迹分布改变及材料去除均匀性变化。硅片上某一位置的磨削速度是随运动关系时刻变化的,且硅片径向各点的速度也是不一致的,某位置上磨削速度大时,单位时间划过该位置的磨粒就多,进而该位置去除深度增大,磨削速度小时则反之。硅片不同位置磨削速度的差异会导致去除深度的差异,进而导致材料去除的不均匀性,进而影响硅片的面形。

因此,为了通过计算材料去除的体积进而计算面形,需要对磨粒的轨迹进行建模和分析。磨抛轮磨削

硅片的运动学模型如图3所示。 XOY 是以磨抛轮的圆心为原点的固定坐标系, xoy 是以硅片的中心为原点的动态坐标系。磨抛轮中心与硅片中心之间的距离为 e 。硅片的半径为 r 。磨抛轮和硅片分别以角速度 ω_p 和 ω_w 旋转, p 代表磨抛轮上的磨粒。从磨粒到砂轮中心的距离为 r_p 。连接磨粒 p 和砂轮中心的直线与 X 轴之间的初始角度为 θ_p 。当磨抛轮相对于硅片移动时,磨粒 p 切过硅片的表面并形成具有以下等式的轨迹:

$$\begin{cases} x_p = r_p \cos(\theta_p + \omega_p t - \omega_w t) + e \cos(\omega_w t) \\ y_p = r_p \sin(\theta_p + \omega_p t - \omega_w t) - e \sin(\omega_w t) \end{cases} \quad (1)$$

其中, (x_p, y_p) 是划痕随时间的轨迹方程, t 是磨削时间。

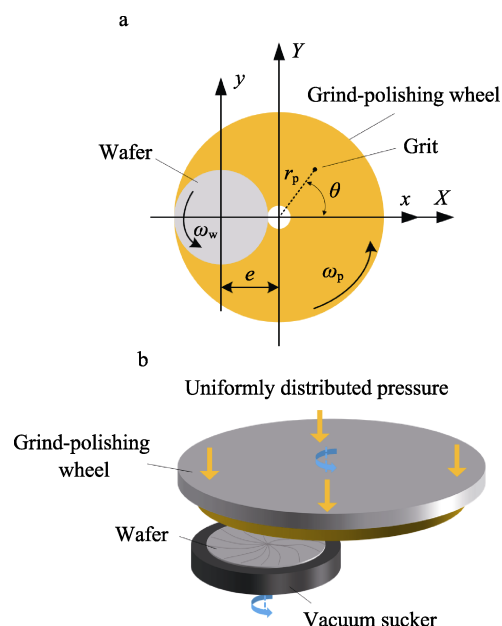


图3 运动关系模型 (a) 及加工示意图 (b)

Fig.3 Motion relationship model (a) and machining sketch chart (b)

1.2 磨粒切深模型的建立

当硅片被磨抛轮加工时,磨粒的切削部分被压入硅片表面,以磨粒切削深度造成材料去除。磨粒切削深度的大小决定了材料去除量。因此,在计算材料去除量时,有必要计算磨粒切削深度。由于磨削过程中磨粒负前角大,形状被假定为球形。

在加工过程中,硅片、磨粒和磨抛轮基底的微观接触状态如图4所示。由于砂轮机的高弹性,磨粒一部分压入基体,另一部分在硅片表面形成磨粒切削深度。磨粒切削深度可计算为:

$$2r_g = d_w + d_p \quad (2)$$

其中, r_g 是磨粒的半径, d_w 是硅片上的磨粒切削深度, d_p 是压入磨抛轮基底中的磨粒的深度。根据赫兹接触理论,可以计算出磨抛轮基底和硅片对磨粒的法向力。法向力可以表示为:

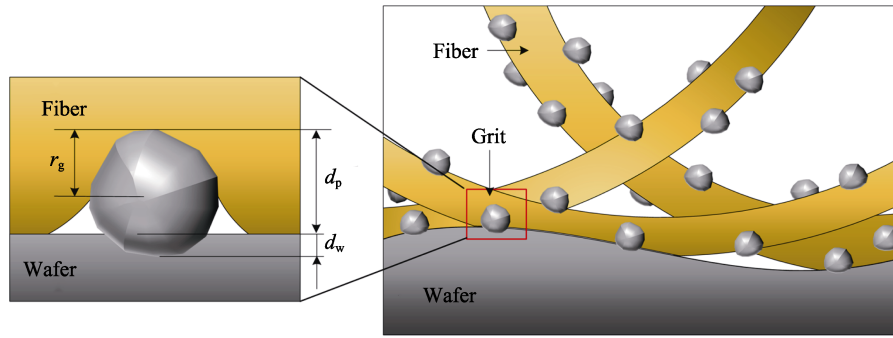


图 4 磨粒切削深度模型
Fig.4 Grit-cutting depth model

$$F = \frac{4}{3} E_w r_g d_w^2 \quad (3)$$

$$F = \frac{4}{3} E_p r_g d_p^2 \quad (4)$$

其中, E_p 是磨抛轮的杨氏模量, E_w 是硅片的杨氏模量。由于作用在磨粒上的法向力对于磨抛轮基体和硅片是相等的, 所以硅片上的磨粒切削深度 d_w 可以由式 (5) 表示。根据式 (5), 可计算出磨抛轮磨削硅片的磨粒切深为 0.4 nm。

$$d_w = \frac{2r_g E_p^{\frac{2}{3}}}{E_p^{\frac{2}{3}} + E_w^{\frac{2}{3}}} \quad (5)$$

1.3 面形预测模型计算流程

在面形仿真计算流程中, 基于 Matlab 计算软件

进行, 仿真计算基于以下假设: 1) 假设原始表面为水平面, 本文的面形计算是基于对硅片径向各位置的材料去除深度的计算, 然后再基于上一道面形轮廓计算出加工后的面形, 因此原始表面的设置对面形仿真结果影响较小; 2) 假设硅片单位面积上所受磨抛轮的压力相等, 由于磨抛轮的基体为弹性纤维基体, 且硅片的面形误差相对于其尺寸很小, 磨抛轮的旋转主轴与硅片旋转主轴平行, 压力垂直的作用在硅片上, 因此可以近似为硅片单位面积上所受磨抛轮的压力相等; 3) 假设磨粒粒径大小均为一致; 4) 将沟槽截面形状做近似处理。先将有效磨粒数量 K 均匀分布在磨抛轮仿真区域内。磨粒以指定的运动轨迹移动。当磨粒刮擦硅片的表面时, 在其表面上形成磨粒切削深度以实现材料去除。计算流程图如图 5 所示。

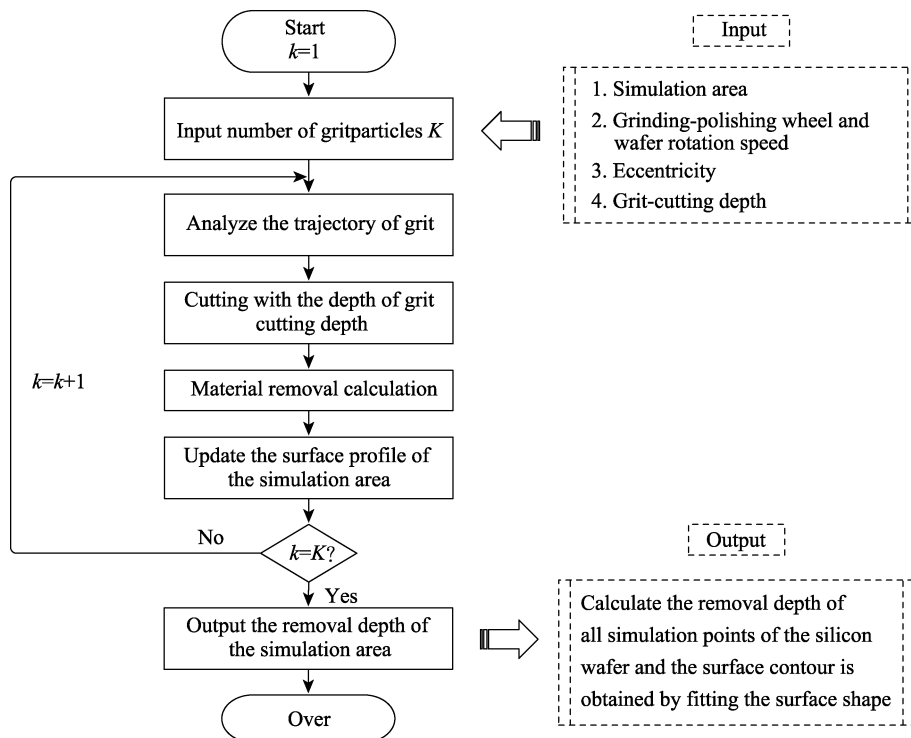


图 5 仿真计算流程图
Fig.5 Simulation calculation flow chart

首先,计算单颗磨粒的运动轨迹,使其根据运动轨迹方程在硅片表面运动。为了保证磨粒磨削与实际加工过程保持一致,需要设置时间间隔内的相邻2个磨粒的位置距离小于磨粒形状的半径,通过这样的方法,使得在仿真中磨粒的运动轨迹在满足仿真准确性要求的前提下实现磨粒运动轨迹的连续。接着,通过磨粒切削深度使磨粒对硅片表面进行切削作用,造成材料去除。切削过程可以看作是磨粒的切削刃扫掠形成的曲面与工件实体之间的布尔减法运算。对硅片具有切削效果的每个磨粒可以改变硅片表面形貌的初始轮廓高度,因此,在任一磨粒已经通过硅片表面之后,需要更新硅片表面。然后,进行下一颗磨粒的轨迹计算,依次循环直至遍历所有有效磨粒之后,对硅片表面的每个仿真区域中的材料去除进行计数,材料去除为磨粒切削深度的叠加,并且计算每个仿真区域中的材料去除量。由磨抛轮与硅片的相对运动关系可知,硅片上材料去除均匀性在硅片周向上一致,所以只在材料去除有差异的径向位置均匀选取仿真位置,得到不同径向位置的去除深度。由于在仿真过程中假设初始曲面形状完全平坦,因此最终曲面形状是初始曲面形状减去在每个位置处移除的材料量,最后基于输出的表面形状计算仿真硅片面形。

2 磨削试验

为了验证面形预测模型的正确性,开展了不同转速比下磨抛轮加工硅片的磨削试验。试验在基于工件自旋转原理的磨削机(MG7430A, Xiji, China)上进行,其装置如图6所示,磨抛轮直径为 $\phi 350$ mm,磨削试样为商用 $\phi 150$ mm(100)单面抛光硅片。硅片采用真空吸附的方法固定在多孔陶瓷吸盘上,加工时硅片旋转中心与磨抛轮旋转中心之间的水平距离为100 mm。磨削机配备在线磨削力控制系统,可以将磨削法向力控制在恒定值,加工时保持法向压力为100 N,试验采用的加工参数如表1所示,转速比为磨抛轮转速与工作台转速的比值。

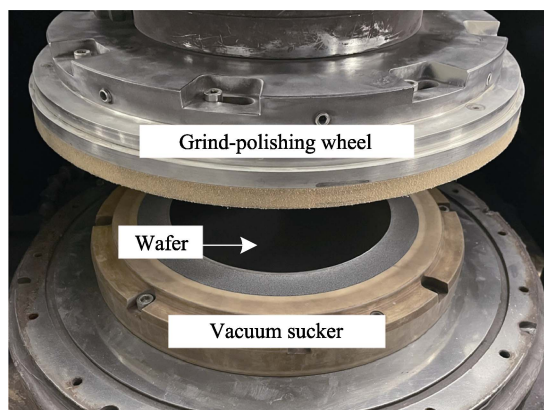


图6 试验设备
Fig.6 Test equipment

表1 磨抛轮及工件转速
Tab.1 Grinding-polishing wheel speed and workpiece speed

Speed ratio	Wheel speed/(r·min ⁻¹)	Workpiece speed/(r·min ⁻¹)
1	240	240
2	480	240
3	720	240
4	960	240
5	1 200	240

磨削后需要测量硅片的面形。通过维氏硬度测试仪测量硅片的面形,磨削前在硅片表面径向方向上以15 mm为间隔均匀压出6个凹坑,测量磨削之前和之后的凹坑深度,然后计算出磨削前后凹坑的深度差,以此统计硅片每个位置处的材料去除深度,最后通过每个仿真位置的去除深度拟合出加工后的面形轮廓,然后计算PV值来评估加工后硅片的面形。

3 试验结果

磨抛轮磨削硅片效果如图7所示,试验工件为#5000金刚石砂轮磨削前的硅片如图7a所示,可以观察到表面存在径向磨痕和周期性振动痕迹。磨抛轮加工后的硅片表面如图7b所示,可以看出,经过磨抛轮的加工后,硅片表面肉眼观察下无缺陷、磨痕和振动痕迹,实现了镜面效果。

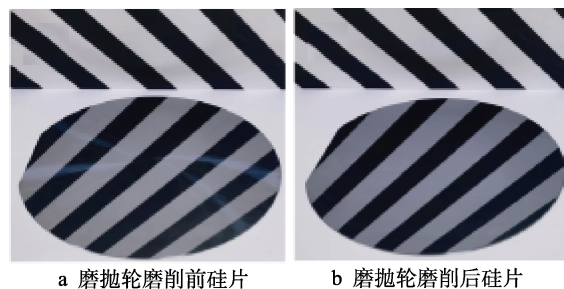


图7 #5000金刚石砂轮磨削硅片

Fig.7 Wafer ground by #5000 diamond grinding wheel: a) wafer before grinding by grinding-polishing wheel; b) wafer after grinding by grinding-polishing wheel

仿真结果和试验结果如图8所示。从图8a~e可以看出,面形呈现“凸”形,实测面形轮廓与仿真面形轮廓的形状与高度基本一致。不同转速比下仿真PV值与试验PV值对比如图8f所示,仿真PV值与试验测量得到的PV值相似,磨抛轮磨削硅片的PV值随着转速比的增加而逐渐增加。对磨削硅片的预测PV值误差小于13%,在可接受的范围内,可以认为所建立的模型是合理的。实测面形的轮廓高度与仿真面形轮廓高度未呈现规律大小关系的原因是:材料去除深度实际测量存在误差及仿真中的去除深度存在误差。

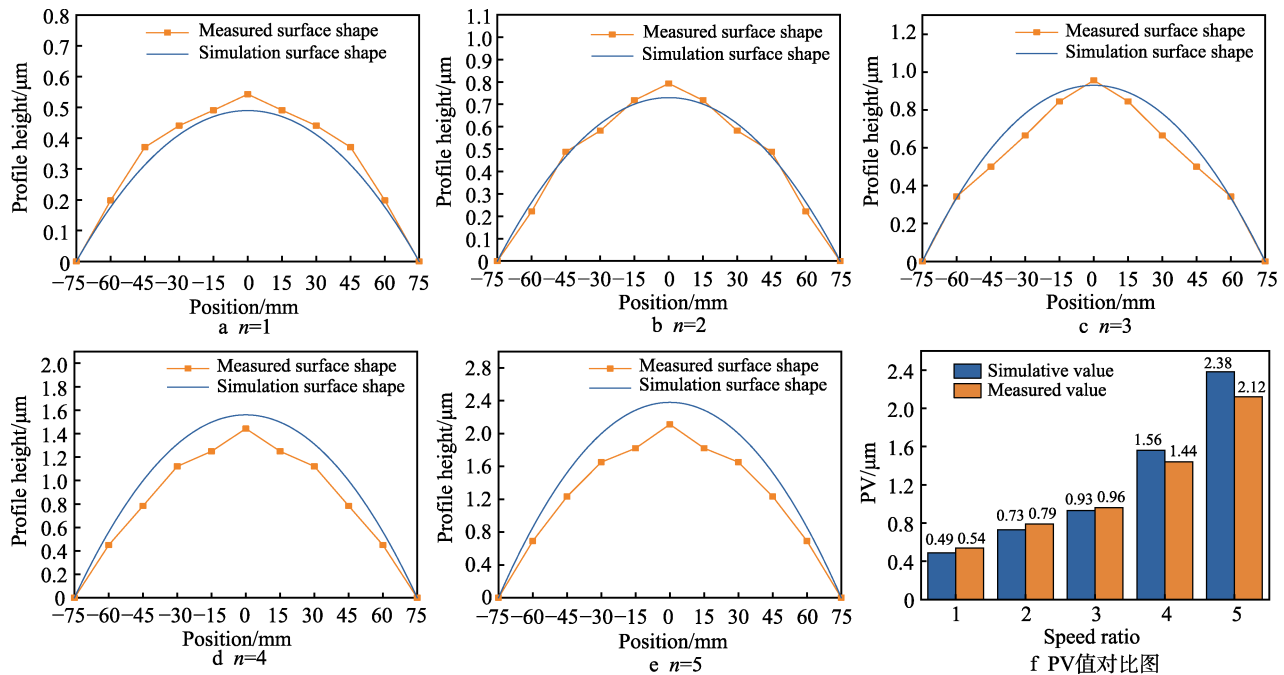


图 8 不同转速比下的试验结果与仿真结果对比
Fig.8 Comparison of test results and simulation results at different speed ratios: a) $n=1$;
b) $n=2$; c) $n=3$; d) $n=4$; e) $n=5$; f) PV comparison chart

4 结论

本文建立了考虑磨粒运动轨迹、加工参数、单颗磨粒切深的磨抛轮磨削硅片面形的预测模型,通过试验验证,仿真结果与试验结果之间的误差在 13%之内。因此本文建立的预测模型是合理的。此外,还发现 PV 值与转速比有关,随着速度比的增加,面形不断恶化,且转速比 w_p/w_w 在 1~5 的范围内,磨抛轮加工硅片,中心去除深度小,边缘去除深度大,整体面形呈“凸”形。因此,在实际加工中时,应尽可能选择较小的转速比。

参考文献:

- [1] 闫志瑞, 库黎明, 白杜娟, 等. 半导体硅片制备技术及产业现状[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2020, 40(4): 5-11.
YAN Z R, KU L M, BAI D J, et al. Manufacturing Technique and Industry Status of Semiconductor Silicon Wafers[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2020, 40(4): 5-11.
- [2] LEE S H, CHEN K N, LU J J Q. Wafer-to-Wafer Alignment for Three-Dimensional Integration: A Review[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2011, 20(4): 885-898.
- [3] PEI Z J, FISHER G R, LIU J. Grinding of Silicon Wafers: A Review from Historical Perspectives[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008, 48(12/13): 1297-1307.
- [4] PEI Z J, STRASBAUGH A. Fine Grinding of Silicon Wafers: Designed Experiments[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002, 42(3): 395-404.
- [5] YAO W H, KANG R K, GUO X G, et al. Effect of Grinding Residual Height on the Surface Shape of Ground Wafer[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 299: 117390.
- [6] DONG Z H, LIN Y W. Ultra-Thin Wafer Technology and Applications: A Review[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2020, 105: 104681.
- [7] GAO S, HUANG H, ZHU X L, et al. Surface Integrity and Removal Mechanism of Silicon Wafers in Chemo-Mechanical Grinding Using a Newly Developed Soft Abrasive Grinding Wheel[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2017, 63: 97-106.
- [8] HUO F W, ZHAO H H, ZHAO D J. Nanogrinding of Silicon Wafer Using a Novel Vitrified Diamond Wheel[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2011, 26(8): 977-981.
- [9] ZHANG Z Y, HUO F W, WU Y Q, et al. Grinding of Silicon Wafers Using an Ultrafine Diamond Wheel of a Hybrid Bond Material[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, 51(1): 18-24.
- [10] BIE X R, QIN F, ZHOU L F, et al. Impacts of Back-Grinding Process Parameters on the Strength of Thinned Silicon Wafer[C]//2016 17th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT). Wuhan: IEEE, 2016: 1197-1200.
- [11] 骆苗地, 赵金伟, 丁玉龙, 等. 磨料质量分数对磨硅片用金刚石砂轮磨削性能的影响[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2021, 41(6): 80-84.
LUO M D, ZHAO J W, DING Y L, et al. Effect of Abrasive Mass Fraction on Grinding Performance of Diamond Grinding Wheel for Grinding Silicon Wafer[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2021, 41(6): 80-84.

(下转第 46 页)