

# 工件旋转式磨削大直径硅片技术的研究进展

孙玉利 左敦稳 朱永伟 布光斌 王鸿翔

(南京航空航天大学机电学院,南京 210016)

**文 摘** 在分析单晶硅片的典型加工工艺基础上,介绍了基于工件旋转式磨削法的大直径硅片超精密加工技术的原理及特点,综述了该项技术的试验研究进展及建立的数学模型,分析了有限元法在工件旋转式磨削硅片研究中的应用,最后提出了工件旋转式磨削大直径硅片技术目前存在的问题和今后的发展趋势。

**关键词** 大直径硅片,超精密加工,工件旋转式磨削,平整度

## Research Advances of the State-of-Art of Work-Rotation Grinding for Large-Scale Silicon Wafers

Sun Yuli Zuo Dunwen Zhu Yongwei Bu Guangbin Wang Hongxiang

(College of Mechanical & Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

**Abstract** Based on analysis of the typical processing technics for silicon wafers, the mechanism and characteristics of work-rotation grinding-based method are presented. The latest development in the experimental study of ultra-precision machining technology for large-scale silicon wafers based on work-rotation and the mathematical models are introduced. The application of the finite element method in this field is analyzed. Finally, the problems and development trends of this technique are pointed out.

**Key words** Large-Scale silicon wafers, Ultra-Precision machining, Work-Rotation grinding, Flatness

### 1 引言

集成电路(IC)的发展离不开晶体完整高纯度、高精度、高表面质量的硅晶片,据统计全球所制造的所有半导体器件95%以上,集成电路的99%是用硅材料生产制造的<sup>[1]</sup>,全球每年大约生产 $1.5 \times 10^8$ 片不同尺寸规格的硅片<sup>[2]</sup>。2004年,全球硅片的销售额达73亿美元<sup>[3]</sup>,而半导体的销售额达2130亿美元<sup>[4]</sup>。随着IC集成度不断提高,芯片面积不断增大,为提高生产率降低生产成本,所用硅片(单晶)直径也不断增大。据测算,晶片直径从200mm增大到300mm可使生产成本下降30%~40%<sup>[5]</sup>。

目前,硅片主流产品是200mm,将逐渐向300mm过渡。据预测,对于300mm的硅片到2006年将从2000年的1.3%增加到21.1%<sup>[6]</sup>。根据美国半导体工业协会(SIA)提出的微电子技术发展构图,到2008年,将开始使用直径450mm的硅片,实现特征线宽 $0.07 \mu\text{m}$ ,芯片集成度达到9000万个晶体管/ $\text{cm}^2$ 等要求<sup>[7]</sup>。

下一代IC要求高品质的硅片,即要求硅片具有高的面型精度和表面完整性。表1所示为2006~2009年对大尺寸硅片(直径300mm)平整度的技术要求<sup>[8]</sup>。

收稿日期:2005-11-01;修回日期:2006-03-13

基金项目:江苏省自然科学基金前期预研资助项目(BK2005215)

作者简介:孙玉利,1970年出生,博士研究生,主要从事精密、超精密加工技术及自动化方面的研究工作

表 1 硅片平整度的技术要求 (2006 ~ 2009年)

Tab 1 Specification for the flatness of silicon wafer (from 2006 to 2009)

年度	局部平整度 (SFQR) /mm (26 mm × 8 mm)
2006年	71
2007年	64
2008年	57
2009年	51

显然, 现有的小尺寸硅片加工工艺和设备不能满足要求。因此, 直径 300 mm 硅片的应用将对硅片的超精密加工技术提出新的挑战。

## 2 硅片的典型平整加工工艺

将单晶硅棒制造成合格的晶片, 需经过切片、倒角、研磨 (磨削)、刻蚀、粗抛、精抛和清洗等加工工序<sup>[9-11]</sup>, 其中保证表面完整性和宏微观几何精度的核心工序是硅片的研磨 (磨削)、刻蚀和抛光。通过研磨直接去除切片带来的变质层, 获得高的平面度和较好的表面完整性; 通过刻蚀达到去除研磨变质层为抛光获得超光滑表面做准备; 在这些工序中, 如果有一道工序达不到预想的效果, 就会导致生产率下降, 后续工序无法达到所需的质量。

目前, 在硅片的加工中, 普遍采用基于研磨的加工方法。但这种方法有如下缺点<sup>[12]</sup>。

(1) 湿法刻蚀处理对平整度有负面影响, 而过度抛光又会使平整度恶化。对硅片进行湿法刻蚀处理并且抛光加工时间很长。

(2) 抛光加工需去除大量材料且费用高。为了去除由于刻蚀而形成的表面缺陷, 需从刻蚀后的表面上抛去厚度为 15 μm 以上的材料。

(3) 加工工序较多。由于频繁地装夹硅片, 需有较多的加工设备。设备占用空间大, 造成缺陷的可能性较高, 从而使加工成本增高。

(4) 研磨加工时, 硅片装卸需人工操作, 这不仅增加了劳动成本, 还经常使硅片破损。

随着硅片直径的不断增大, 采用传统加工工艺所加工的硅片的平整度和生产效率等方面的缺点将更加突出。为此基于工件旋转磨削法的微粉金刚石超精密加工工艺已引起了工程研究者的广泛关注。

## 3 工件旋转式磨削硅片技术的原理及特点

1988年日本学者 S Matsui提出了工件旋转式磨削硅片的方法, 其加工原理如图 1所示, 采用略大于硅片尺寸的工件转台, 硅片通过多孔陶瓷真空吸盘夹持在工件转台的中心, 硅片的中心与转台的中心重合, 杯形金刚石砂轮的内外圆中心线调整到硅片的中心位置。磨削时, 硅片和砂轮绕各自的轴线回转, 砂轮只是相对于硅片进行轴向进给<sup>[13]</sup>。

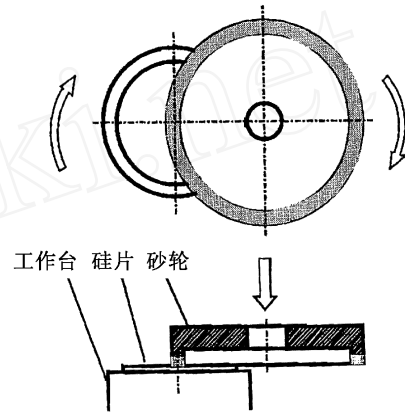


图 1 工件旋转式磨削硅片的工作原理

Fig 1 Principle of the work-rotation grinding method

工件旋转式磨削硅片具有以下优点。

(1) 可以改善硅片的平整度<sup>[13]</sup>

如图 2所示, 由于杯形金刚石砂轮进行轴向切入磨削, 砂轮与硅片的接触长度、接触面积、切入角固定不变, 因而磨削力恒定, 加工状态稳定, 可以避免硅片出现中凸和塌边现象, 从而可以改善硅片的平整度。

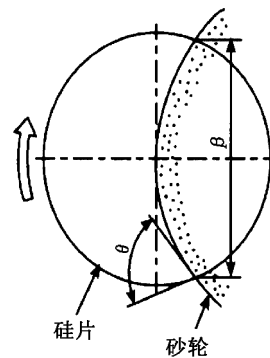


图 2 硅片旋转式磨削时的接触长度和切入角

Fig 2 Contact length and edge angle

(2) 可以实现硅片的延性域磨削和高效磨削<sup>[13]</sup>

国内外研究人员通过大量的理论分析和实验证明,脆性材料在适当的加工条件下仍能以塑性去除的方式对之进行加工,得到粗糙度很低的光滑表面。实现脆性材料延性域超精密磨削的条件是:砂轮单个磨粒的最大切削深度应小于脆性材料的临界切削厚度  $a_c$  [14]。

利用工件旋转式磨削硅片时,硅片每转的磨削深度  $t$  与砂轮的轴向进给速度  $f$  和硅片转速  $n$  的关系为:

$$t = f/n \quad (1)$$

由公式 (1) 可知,对给定的轴向进给速度,如果工作台的转速足够高,就可以使磨削深度足够小,从而可以实现延性域磨削。另外,通过同时提高硅片转速和砂轮的轴向进给速度,在保持与普通磨削同样的磨削深度情况下,达到较高的材料去除率,从而实现高效磨削。

(3) 可以主动控制硅片的平整度 [15]

如图 3 所示,陶瓷吸盘修整成具有很小锥度的圆锥形。当硅片装夹到吸盘上时,会发生弹性变形而成圆锥形,这样可使砂轮与硅片半接触。调整砂轮轴线和硅片轴线之间的夹角  $\beta$ , 就可以控制硅片的形状。角较大时硅片成凸形,较小时成凹形。

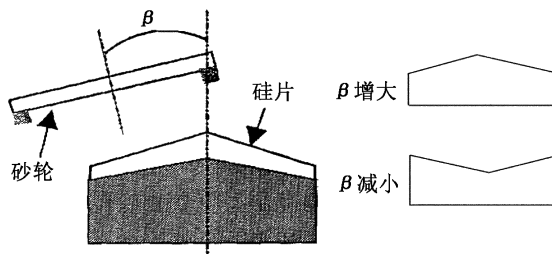


图 3 硅片形状控制

Fig 3 Wafer shape control

(4) 适应大余量磨削 [16]

随着硅片直径增大,磨削加工余量也相应增大。利用工件旋转式磨削硅片时,砂轮进行连续的轴向切入磨削,不受硅片加工余量大小和一致性的限制,适应大余量磨削。

(5) 与基于研磨方法的硅片精密加工相比,该法对环境友好,无污染;可提高劳动生产率、降低成本;能实现加工过程的自动控制等。

由于上述优点,目前,基于工件旋转式磨削原理的超精密磨削技术成为硅片特别是大直径硅片制造宇航材料工艺 2006年 第 5期

普遍采用的加工技术。

## 4 工件旋转式磨削技术的研究进展

### 4.1 试验研究

自 1988 年 S Matsui 提出工件旋转式磨削硅片方法后,基于工件旋转式磨削原理的微粉金刚石超精密磨削技术成为国内外学者研究的热点。H. Ohmori 等人将开发的电解修锐技术 (ELD) 应用于硅片的旋转式磨削工艺,如图 4 所示,采用铸铁纤维结合剂微粉金刚石砂轮,以恒压力切入进给磨削方式磨削硅片,通过硅片材料塑性模式去除机理的研究和对超精密磨削关键技术的研究,获得表面粗糙度为纳米和亚纳米级的镜面,直径 60 mm 硅片的平整度达到  $\pm 0.4 \mu\text{m}$  ( $\lambda/4$  ( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ )), 由于实现了硅片的延性域磨削,亚表面损伤层深度小于  $0.4 \mu\text{m}$ , 只有传统研磨硅片损伤层深度的  $1/3 \sim 1/10$  [17]。

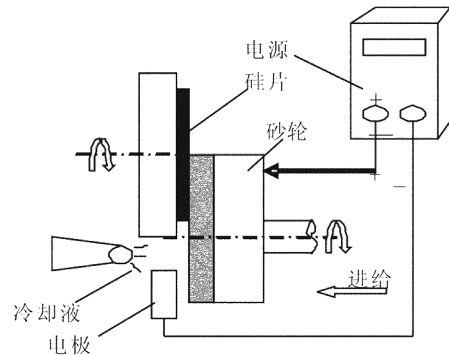


图 4 应用 ELD 技术的硅片旋转式磨削

Fig 4 Work-rotation grinding for silicon wafer by ELD

Z J. Pei 等人对硅片旋转式精密磨削进行了系统的研究,他们首先对磨削所产生的亚表面损伤进行了试验研究,认为金刚石砂轮粒度对亚表面损伤影响最大,随着金刚石砂轮粒度的增大,亚表面裂纹的深度也增大 [18]。之后,对硅片进行了如下系列化研究。

(1) 介绍了硅片精密磨削时,对砂轮、磨床设计及加工参数优化的特定要求。通过试验说明了正确选择砂轮、加工参数的重要性,并讨论了冷却液流速及喷嘴位置的作用 [19]。

(2) 通过三因素二水平实验设计,对直径为 200 mm 的硅片进行了磨削试验,研究了砂轮转速、工件转速和进给速度对磨削力、砂轮主轴电机电流、表面粗糙度、磨削纹路和亚表面裂纹深度的影响 [20]。为

了适应硅片大尺寸化的要求,又通过三因素二水平实验设计对直径为 300 mm 的硅片进行了磨削试验<sup>[21]</sup>,研究表明:

1)砂轮主轴电机电流和磨削力随砂轮转速的变化趋势不同,但砂轮主轴电机电流的变化量和磨削力随砂轮转速的变化趋势一致;

2)砂轮转速较低,进给速度较大时,表面粗糙度较大;

3)磨削纹路之间的距离  $L$  取决于砂轮转速和工件转速,

$$L = 2 R_w \frac{N_c}{N_s} \quad (2)$$

式中,  $R_w$  为硅片半径,  $N_c$  为工件转速,  $N_s$  为砂轮转速。

4)砂轮转速、工件转速和进给速度对亚表面裂纹深度无明显影响。

目前,国内在大直径硅片旋转式磨削的研究方面刚处于起步阶段。田业冰等利用基于工件旋转式磨削原理的超精密机床,研究了砂轮粒度、砂轮转速、工件转速及砂轮进给速度等主要因素对材料去除率、砂轮主轴电机电流以及磨削后硅片表面粗糙度的影响<sup>[22]</sup>,但仅研究了直径为 200 mm 的硅片。

## 4.2 数学模型

为进一步研究工件旋转式磨削硅片,吸盘形

$$L = 2 \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{S^2 + R^2 - r^2}{2RS}}} \right) \left\{ R + \frac{S}{-1} - \frac{RS}{6[S + R(-1)]} \left( \cos^{-1} \frac{S^2 + R^2 - r^2}{2RS} \right)^2 \right\} \left\{ \cos^{-1} \frac{S^2 + R^2 - r^2}{2RS} \right\} \quad (3)$$

式中,  $r$  为硅片半径,  $R$  为砂轮半径,  $S$  为工作台与砂轮的圆心距,  $\frac{S}{R}$  为砂轮与工作台的转速比。

研究发现单个磨粒经过硅片中心与边缘的次数之比对硅片的影响很大;砂轮与工件的转速比以及砂轮进给速度对硅片的总厚度变化(TTV)影响较大,为改善硅片的总厚度变化必须适当调整砂轮轴线的倾角<sup>[27]</sup>。

## 4.3 有限元法在工件旋转式磨削硅片研究中的应用

Liu等利用有限元法模拟了研磨和磨削线切割时硅片表面波纹的变形,解释了研磨和磨削是如何去除或减少波纹的,以及在去除波纹时磨削效果不同于研磨效果的原因。另外,还研究了有效磨削区

状、磨削条纹产生机理及其相互关系,Z. J. Pei等建立了相关的数学模型。

(1)为了克服吸盘制作时的困难与不确定性,建立了有关吸盘形状的数学模型。已知砂轮与吸盘相接触时的三点高度,即可利用该模型绘制出吸盘形状<sup>[23]</sup>。

(2)为了克服对磨削纹路缺乏了解的障碍,建立了有关磨削条纹轨迹及磨削条纹间距的数学模型,利用该模型研究了砂轮转速、工件转速、砂轮直径与磨削纹路之间的关系。研究表明利用该模型可优化加工参数,从而磨削纹路可被后续的抛光工序去除<sup>[24]</sup>。

(3)建立了有关硅片形状的数学模型,该模型有助于进一步研究吸盘形状对硅片平整度和磨削纹路的影响<sup>[25]</sup>。

(4)建立了有关吸盘形状对磨削纹路深度影响的数学模型,该模型为精密磨削硅片时正确选择吸盘形状奠定了理论基础<sup>[26]</sup>。

Tso等建立了基于工件旋转式磨削原理对硅片进行超精密加工时的动力学模型,并利用该模型计算了单颗磨粒在硅片上的运动轨迹,单颗磨粒在硅片上产生的划痕长度可由下式计算:

方向、磨削力、波纹长度及高度对减少或去除波纹的影响并通过试验验证了研磨比磨削更能有效去除波纹<sup>[28]</sup>。

Z. J. Pei等利用四因素二水平全因素实验设计对线切割硅片磨削进行了有限元分析。他们认为硅片厚度、波纹长度、磨削力以及它们之间的交互作用对波纹去除有显著影响;波纹高度对波纹去除无显著影响;硅片厚度、波纹长度和磨削力三因素交互作用对波纹去除也有显著影响;当硅片较厚、波纹较短、磨削力较小时能有效去除波纹<sup>[29]</sup>。

X. K. Sun等利用四因素二水平全因素实验设计对线切割硅片“软垫”磨削进行了有限元分析后,认为采用“软垫”磨削可有效去除波纹<sup>[30]</sup>。Z. J.

Pei等利用“软垫”对线切割硅片进行了磨削试验,结果显示“软垫”磨削能有效去除波纹。另外,研究发现硅片表面出现“磨削雾”,其原因有待于进一步研究<sup>[31]</sup>。

Z J. Pei等在硅片精密磨削机械设计方面也做了较为深入的研究,提出了一种全新的机器配置,已知砂轮和硅片直径就可计算出两主轴之间的夹角,这样就可以方便地对角度进行调整,从而可避免以往频繁地调整两主轴之间的夹角所带来的不便<sup>[32]</sup>。

从以上分析可以看出,国外学者对工件旋转式磨削大尺寸硅片的研究较为深入,但其试验因素仅采用高低两个水平,不能得出不同因素的影响规律。国内对大直径硅片超精密磨削技术还没有进行深入研究,尚未掌握直径为300 mm及以上大直径硅片的超精密磨削技术。

## 5 结束语

随着硅片尺寸的增大,基于工件旋转式原理采用微粉金刚石砂轮的超精密磨削工艺被认为是在大直径(300 mm)硅片制备过程中,获得高精度超光滑无损伤表面的理想工艺,代表了大直径硅片超精密加工的发展方向,也将是今后超精密加工更大直径硅片的有效方法。但是该方法若要取代或部分代替目前普遍采用的基于研磨的硅片超精密加工工艺,还需在以下几个方面进行深入研究:

(1)由于尚不清楚采用多线切割硅片时波纹的产生机理,因此,如何有效去除波纹还需进一步研究;

(2)为去除磨削纹路,应确定最小的抛光去除量,研究抛光参数对最小抛光去除量的影响;

(3)应认真分析硅片中心平整度较差的原因,研究在整个硅片上如何获得较好的局部平整度;

(4)采用“软垫”磨削时,硅片表面出现“雾”状缺陷,应进一步分析形成原因及机理。

另外,目前对直径为200 mm的硅片的加工工艺研究较多,而对直径300 mm的硅片研究较少,因此,下一步应加强对大直径(300 mm)硅片的加工工艺研究。

## 参考文献

1 Jakubowski A, Lukasia L, Jurczak M. Silicon microelectronics for speed In: Kumar V, Agamal S K ed Phys of 宇航材料工艺 2006年 第5期

semicon, devices-99. vl USA. Allied pub Ltd, 2000: 297 ~ 302

2 Tricard M, Kassir S, Heron P et al New abrasive trends in manufacturing of silicon wafers In: Proceedings of Silicon Machining Symposium, 1998: 165 ~ 170

3 Online Staff Silicon shipments, revenues rise, Electronics News, 2/9/2005, 2005, available: com/article/CA502571

4 Online Staff Global semi sales hit record high, Electronics News, 2/9/2005, 2005, available: com/article/CA502571

5 Illuzzi F. Silicon wafer requirements for ULSI device processing In: Raineri V, Priol F, Kittler Metal eds Solid state phenomena 82/84 Switzerland: Scitec publications, 2002: 1 ~ 6

6 蒋荣华,肖顺珍,张建新等.新世纪国内外半导体材料的新发展.新材料产业,2004;124(3):30~38

7 Hahn P O. The 300mm silicon wafer-A cost and technology. Microelectronic Engineering, 2001; 56 (2): 3 ~ 13

8 <http://www.itrs.net/Common/2004Update/2004Update.htm>

9 Bawa S, Petro E F, Grimes H M. Fracture strength of large diameter silicon wafer Semiconductor International, 1995; 18(3): 115 ~ 118

10 Fukami T, Masumura H, Suzuki K et al Method of manufacturing semiconductor mirror wafers EP0782179A2, 1997 - 07 - 27

11 Tonshoff H K, Schmieden W V, Inasaki I et al Abrasive machining of silicon Annals of CIRP, 1990; 39 (2): 621 ~ 630

12 Pei Z J, Fisher G R, Milind Bhagavat et al A grinding-based manufacturing method for silicon wafers: an experimental investigation International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005; 45(10): 1140 ~ 1151

13 Matsui S An experimental study on the grinding of silicon wafer-the wafer rotation grinding method (1<sup>st</sup> report). Bull Japan Soc Prec Eng, 1988; 22 (1): 295 ~ 300

14 Sun W P, Pei Z J, Fisher G R. Fine grinding of silicon wafers: effects of chuck shape on grinding marks International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005; 45 (6): 673 ~ 686

15 Bifano T G, Dow T A, Scattergood R O. Ductile-regime grinding: a new technology for machining brittle materials ASME Journal of Engineering for Industry, 1991; 113 (2): 184 ~ 189

- 16 郭东明,康仁科,金洙吉. 大尺寸硅片的高效超精密加工技术. 世界制造技术与装备市场, 2003; (1): 35~40
- 17 Ohmori H, Nakagawa T. Mirror surface grinding of silicon wafers with electrolytic in-process dressing. Annals of CIRP, 1990; 39(1): 329~332
- 18 Pei Z J, Billigsby S R, Miura S. Grinding-induced subsurface cracks in silicon wafers. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1999; 39(7): 1103~1116
- 19 Pei Z J, Strasbaugh A. Fine grinding of silicon wafers. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2001; 41(5): 659~672
- 20 Pei Z J, Strasbaugh A. Fine grinding of silicon wafers: designed experiments. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002; 42(3): 395~404
- 21 Pei Z J. A study on surface grinding of 300 mm wafers. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002; 42(3): 385~393
- 22 田业冰, 郭东明, 康仁科. 大尺寸硅片自旋转磨削的试验研究. 金刚石与磨料磨具工程, 2004; 142(4): 1~4
- 23 Chidambaram S, Pei Z J, Kassir S. Fine grinding of silicon wafers: a mathematical model for the chunk shape. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003; 43(7): 739~746
- 24 Chidambaram S, Pei Z J, Kassir S. Fine grinding of silicon wafers: a mathematical model for grinding marks. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003; 44(1): 11~19
- 25 Sun W P, Pei Z J, Fisher G R. Fine grinding of silicon wafers: a mathematical model for the wafer shape. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004; 44(7): 707~716
- 26 Sun W P, Pei Z J, Fisher G R. Fine grinding of silicon wafers: effects of chunk shape on grinding marks. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005; 45(6): 673~686
- 27 Tso P L, Teng C C. A study of the thickness variation in the grinding of ultra-precision substrates. Journal of Materials Processing Technology, 2001; 116(2~3): 182~188
- 28 Liu W J, Pei Z J, Xin X J. Finite element analysis for grinding and lapping of wire-sawn silicon wafers. Journal of Materials Processing Technology, 2002; 129(1): 2~9
- 29 Pei Z J, Xin X J, Liu W J. Finite element analysis for grinding of wire-sawn silicon wafers: a designed experiment. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003; 43(1): 7~16
- 30 Xuekun Sun, Pei Z J, Xin X J et al. Waviness removal in grinding of wire-sawn silicon wafers: 3D finite element analysis with designed experiments. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004; 44(1): 11~19
- 31 Pei Z J, Kassir S, Milind Bhagavat et al. An experimental investigation into soft-grinding of wire-sawn silicon wafers. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004; 44(2): 299~306
- 32 Sun W P, Pei Z J, Fisher G R. Fine grinding of silicon wafers: machine configuration for spindle angle adjustments. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005; 45(1): 51~61

(编辑 任涛)

## 有关版权转让声明

凡向本刊所投稿件,全体作者需在投稿时签署《论文著作权转让书》,将该论文的复制权、发行权、信息网络传播权、汇编权等权利在全世界范围内转让给本刊。本刊已加入《中国学术期刊光盘版》、《中国期刊网》、《万方数据数字化期刊群》等,被中国核心期刊(遴选)数据库收录。凡被本刊录用的稿件将同时通过因特网进行网络出版或提供信息服务,稿件一经刊用,将一次性支付作者著作权使用报酬(包括印刷版、光盘版和网络版等各种使用方式的报酬)。

说明:编辑部在收到作者签署的《论文著作权转让书》后方进行稿件审查。本规定从2007年1月1日起执行。

《宇航材料工艺》编辑部