(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国 际 局

(43) 国际公布日
2019 年 2 月 28 日 (28.02.2019)

WIPO | PCT

(10) 国际公布号
WO 2019/037282 A1

(51) 国际专利分类号:
G01N 19/06 (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2017/109913

(22) 国际申请日: 2017 年 11 月 8 日 (08.11.2017)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
201710718588.8 2017年8月21日 (21.08.2017) CN

(71) 申请人: 大连理工大学 (DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) [CN/CN]; 中国辽宁省大连市高新园区凌工路2号, Liaoning 116024 (CN)。

(72) 发明人: 周平 (ZHOU, Ping); 中国辽宁省大连市高新园区凌工路2号, Liaoning 116024 (CN)。 黄宁 (HUANG, Ning); 中国辽宁省大连市高新园区凌工路2号, Liaoning 116024 (CN)。 康仁科 (KANG, Renke); 中国辽宁省大连市高新园区凌工路2号, Liaoning 116024 (CN)。 郭东明 (GUO, Dongming); 中国辽宁省大连市高新园区凌工路2号, Liaoning 116024 (CN)。 闫英 (YAN, Ying); 中国辽宁省大连市高新园区凌工路2号, Liaoning 116024 (CN)。

(74) 代理人: 大连东方专利代理有限责任公司 (DALIAN EAST PATENT AGENT LTD.); 中国辽宁省大连市西岗区黄河路263号608室, Liaoning 116011 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(54) **Title:** NANOMETER DEPTH OF CUT HIGH-SPEED SINGLE-POINT SCRATCHING TEST APPARATUS AND TEST METHOD THEREFOR

(54) 发明名称: 一种纳米切深高速单点划擦试验装置及其试验方法

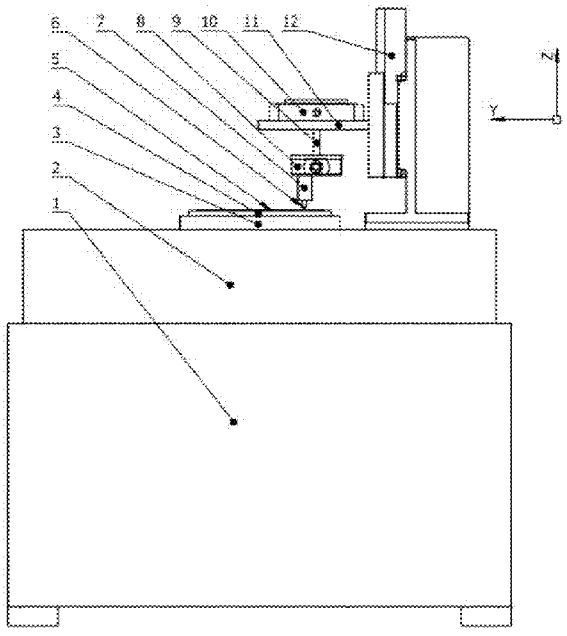


图 1

(57) **Abstract:** A nanometer depth of cut high-speed single-point scratching test apparatus and a test method therefor. The test apparatus comprises a workbench (2), an air-floated turntable (3), a specimen fixture (4), a specimen (5), a Z-direction feeder apparatus (12), a nano-movement platform (10), a force sensor (8), and a scratching tool (6). The specimen (5) is provided at a position to be scratched with a length- and height-controllable micro-protruding structure (14). The test apparatus and the test method therefor improve from μm/s to m/s in terms of scratching speed, faithfully restore the processing speed of abrasive grains in an ultra-precise grinding process, accurately collect in a high-speed scratching condition scratching force signals of different nanometer depth of cut conditions, provide clear scratching force-scratching depth correlations, and, by forming the micro-protruding structure (14) on the surface of the specimen (5), prevent a diamond needle from leaving a long scratch on the surface of an entire wafer, provide rich test data in a short scratch, greatly increase the content of valid information per unit of scratch length, facilitate subsequent scratch analysis and feature recognition of a residual scratch, and ensure the integrity of the scratching tool (6).

WO 2019/037282 A1

[见续页]

(84) 指定国(除另有指明，要求每一种可提供的地区保护)：ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布：

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

(57) 摘要：一种纳米切深高速单点划擦试验装置及其试验方法，试验装置包括工作台(2)、气浮转台(3)、试件夹具(4)、试件(5)、Z向进给装置(12)、纳米运动平台(10)、力传感器(8)和划擦工具(6)，试件(5)的待划擦位置制有长度、高度可控的微凸结构(14)。试验装置及其试验方法在划擦速度方面从μm/s提升至m/s，真实地还原了超精密磨削过程中磨粒的加工速度，在高速划擦条件下准确采集不同纳米切深条件下的划擦力信号，划擦力-划擦深度对应关系明确，通过在试件(5)表面构造微凸结构(14)，避免了金刚石针尖在整个晶圆表面留下很长划痕，在较短划痕内提供了丰富的试验数据，极大地提高了单位划擦长度内有效信息的含量，有利于后续的划痕分析和残留划痕的特征识别，保证了划擦工具(6)的完整性。

一种纳米切深高速单点划擦试验装置及其试验方法

技术领域

本发明属于机械加工中的材料测试及超精密加工领域，具体涉及一种纳米切深高速单点划擦试验装置及其试验方法。

背景技术

超精密磨削加工可以以纳米级切深高效地去除材料，从而获得较高的形状精度和表面质量，是精密零件加工的重要工艺之一。其加工机理的本质是磨具表面大量形状各异的磨粒以纳米量级的切削深度共同参与切削而实现的加工过程。因此，在超精密磨削机理的研究中，人们常常设计纳米切深单点划擦试验作为理解超精密磨削过程的重要手段。纵观国内外文献，不同材料的单点划擦试验已经得到了广泛和深入的研究，但是现有的试验设备和试验方案仍然存在着一些不足之处。

最常见的纳米切深单点划擦试验一般基于原子力显微镜（英语：Atomic Force Microscope，缩写为 AFM）或在纳米压痕仪等精密仪器上进行。在名称为“Analysis of ductile mode and brittle transition of AFM nanomachining of silicon”的文章中（Lee, S. H.，Int. J. Mach.Tools Manuf., 2012, 61, 71-79），作者采用 AFM 装置，实现了不同划擦深度的纳米划擦试验，借助场发射扫描电子显微镜进一步观测分析了划擦试件在试验过程中弹塑性和脆塑性变形机理之间的转变。但是该试验所采取的划擦速度为μm/s 量级（5μm/s），远远低于实际磨削过程中磨粒 m/s 量级的磨削速度。

为了实现高速单点划擦试验，尽可能还原真实的加工状态。有学者采用单摆式划擦方法，在名称为“On the effect of crystallographic orientation on ductile material removal in silicon”的文章中（Brian P. O’Connor, Int. J. Precis. Eng., 2005. 29(1): p. 124-132.），作者 O’Connor 通过划擦工具的高速回转运动实现切深由浅入深再变浅的高速单点划擦。据文献报道，硬脆材料划擦过程中，切屑产生点和脆塑转变点等特征对应的临界切削深度通常在 50nm 以内（Lee, S.H., Analysis of ductile mode and brittle transition of AFM nanomachining of silicon. International

Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012. 61: p. 71-79.），受单摆式划擦方法采用的划擦工具回转半径的限制，切深在百纳米量级以内的残留划痕长度较短，受限于测力仪的采样频率（假设最大划擦深度取μm，单摆半径取 150mm，会产生长度 1095μm 的划痕，切深小于 100nm 的塑性段划痕长度约为 28μm，在划擦速度为 1m/s 的情况下，如果切深每变化 10nm 采一个数据，采样频率需要达到 357kHz），单摆式划擦方法无法在高速（m/s 量级）划擦条件下准确采集不同纳米切深条件下的切削力和划擦力信号。

中国专利 CN201610077965.X 公开了《一种单颗磨粒高速连续划擦试验机及其应用》，发明人基于球盘式划擦方法，利用电主轴带动试件的高速旋转产生高速划擦所需的高线速度；将单点工具的直线运动与圆周运动结合起来，同样实现了与实际磨削速度相仿的高速单点划擦。但是该专利提供的划擦的方法存在的问题主要表现在两个方面：首先，在高速划擦过程中无法准确实现将划擦深度控制在纳米量级，试验例中划擦轮廓测量结果表明：残留划痕的深度约为 20 微米，划擦工具可以实现的稳定切削深度为微米量级，即使专利中的 Z 轴设定器的定位精度优于 100nm，综合考虑电主轴旋转过程中的端面跳动和待划擦工件的表面轮廓，仍然无法在在高速划擦条件下保证纳米量级切削深度的控制；另一方面，该划擦试验机利用端面跳动和工件表面轮廓的起伏固然可以实现切深渐变的高速划擦，但是对于微米/亚微米曲率半径单点工具，极有可能在划擦过程中遇到较大的工件起伏或端面跳动，磨粒切削深度急剧增加、导致划擦工具崩碎，长时间连续接触也容易导致单点工具磨损。因此，该专利提供的试验方法无法在高速划擦条件下，研究微米/亚微米曲率半径磨粒划擦硬脆材料的切屑产生点和脆塑转变点等特征。

在超精密磨削加工领域，纳米切深高速单点划擦试验是揭示超精密磨削机理的重要手段。要实现这一试验方式，工艺方法和试验设备都有待进一步研究和改进，首先需要保证划擦长度可控，即：在保证不同切深均可以获得足量数据的前提下，尽量缩短划痕长度，减少试验后期在显微镜下寻找观测划痕的难度；此外，为了揭示超精密磨削过程中，磨粒以纳米量级的切削深度进行切削的加工机理，要近似地控制最大划擦深度在百纳米量级，并在长度有限的划痕上实现切深由浅入深再变浅的高速划擦试验过程；最后，还要保证大量的力信号数据点能够和残留划痕轮廓位置实现一一对应。中国专利 CN201410324503.4

公开了《一种亚微米曲率半径单颗粒金刚石针尖纳米深度高速划擦方法》，其利用硅片的平面度和磨床的端面跳动的组合偏差，完成亚微米曲率半径单颗粒金刚石针尖纳米深度高速划擦试验。该专利提供了整体上实现高速划擦的方法，但不能获取划擦过程中的力信号，并且划痕位置是随机的，观测定位困难。

综上所述，为了进一步揭示超精密磨削机理，目前的单点划擦试验方法存在以下三点问题。

1)基于 AFM 或在纳米压痕仪等精密仪器的单点划擦试验受直线划擦运动原理的限制，无法实现实际磨削过程中磨粒 m/s 量级的划擦速度。

2)单摆式划擦方法受限于划擦工具回转半径以和测力仪的采样频率，无法在高速划擦条件下准确采集不同纳米切深条件下的划擦力信号。

3)球盘式划擦方法受限于划擦工具的进给速度，无法在高速划擦条件下有效地控制划痕长度，使得划擦残留轮廓特征点在显微镜下的寻找过程变得十分困难。

发明内容

为解决现有技术存在的上述问题，本发明要设计一种能够实现以下目的的纳米切深高速单点划擦试验装置及其试验方法：

1）微米/亚微米曲率半径纳米切深高速单点划擦试验能有效地还原真实的超精密磨削状态，具体目的为：单点划擦工具的曲率半径尺度从 mm 量级降低至微米/亚微米量级，可以还原超精密磨削过程中磨粒的有效刃圆半径；切削深度控制在纳米量级，可以还原超精密磨削过程中磨粒的有效切削深度，并保证划擦工具在高速划擦中的完整性；划擦速度从μm/s 提升至 m/s，可以还原超精密磨削过程中磨粒的实际加工速度；

2）高速划擦条件下准确采集不同纳米切深条件下的划擦力信号，划擦力-划擦深度对应关系明确；

3）划擦长度可控，在保证划擦力-划擦深度对应关系明确以及划擦残留轮廓特征点清晰可辨的基础上，缩短划擦长度，方便划擦试验后在显微镜下观察划擦残留轮廓，分辨弹塑性、脆塑性转变点等特征，同时减少单点工具和工件作用时间，控制磨损。

为了实现上述目的，本发明的技术方案如下：

一种纳米切深高速单点划擦试验装置，包括：

基座；

水平放置的工作台，固定安装在基座顶面；

竖直放置的气浮转台，固定安装在工作台上；

试件夹具，装接在气浮转台顶部端面，且与气浮转台同轴，通过气浮转台带动试件夹具旋转；所述试件夹具是真空吸盘、磁力吸盘或机械结构夹具；

试件，装接在试件夹具上；

Z 向进给装置，装接在工作台顶面，沿气浮转台回转轴线方向进给；所述 Z 向进给装置通过螺纹连接的方式装接在工作台顶面，其定位精度优于 5μm；

纳米运动平台，通过纳米运动平台连接件装接在 Z 向进给装置上；

力传感器，通过力传感器连接件装接在纳米运动平台上；所述力传感器具有测量法向力和切向力功能，法向即 Z 向，切向即 X 向；

划擦工具，通过划擦工具连接件装接在力传感器上；

所述试件为有色金属、黑色金属或硬脆材料，在试件待划擦位置制作长度、高度可控的微凸结构，划擦深度 d 所对应的微凸结构沿划擦方向的长度 L_x 满足下式：

$$L_x \geq \frac{vq}{f}$$

其中，v 为试验所需的划擦速度，m/s；q 为有效划擦区域内、试验所需的力信号点数；f 为力传感器设定的采样频率，Hz；

所述微凸结构沿径向的长度 L_y 不小于划擦过程中划擦工具沿 Y 方向的进给步长 l_y；

所述微凸结构沿 Z 向的最大高度 H 大于试验所需的最大切削深度 d_{max}；

所述微凸结构的 Y 截面形状呈圆弧状或折线状，根据划擦试验设定的划擦速度、划擦深度以及划擦长度，选取圆弧半径或直线斜率。

进一步地，所述气浮转台采用伺服电机驱动，所述伺服电机安装在工作台底面，所述气浮转台通过皮带与伺服电机连接；所述气浮转台为空气轴承机械气浮转台；所述气浮转台的端面跳动量和径向跳动量均小于 0.5 μm；所述气浮转台、试件夹具和试件三者在 Z 方向的相对位置固定。

进一步地，所述试件的形状关于 Z 轴中心对称，在试件待划擦位置制作长度、高度可控的微凸结构，通过试件夹具固定安装在气浮转台上，所述试件的

中心对称轴与转台回转轴线重合。

进一步地，所述试件的形状关于 Z 轴中心对称且试件的厚度小于 1mm，在试件背面粘贴长度（Y 方向）不低于 5mm、宽度（X 方向）不低于 1mm、高度（Z 方向）不低于 10μm 的弹性薄膜，此时，仅采用具有平坦表面的磁力吸盘或真空吸盘进行装夹，在装夹的过程中，借助平坦的真空吸盘/磁力吸盘表面和弹性薄膜，通过真空吸附/磁力吸附作用，使得试件表面产生弹性变形，形成长度、宽度和高度可控的微凸结构，所述试件的中心对称轴与气浮转台回转轴线重合。

进一步地，所述试件为形状不规则的块状试件，在试件待划擦位置制作长度、高度可控的微凸结构；试件通过试件夹具装夹在气浮转台端面；为了确保高速回转运动中气浮转台端面的动态平衡，在试件夹具上额外安装配重物块，所述配种物块的重心和试件的重心关于气浮转台的旋转轴线呈中心对称。

进一步地，所述划擦工具包括单点工具和固定单点工具的固定座，所述单点工具的材料为比试件硬度高且具有加工出微米/亚微米曲率半径尖点特性的材料，包括金刚石、立方氮化硼（英文：Cubic Boron Nitride，缩写 CBN）或陶瓷；所述单点工具通过粘接、钎焊或电镀固结在所述固定座的顶端。

进一步地，所述纳米运动平台为纳米直线位移平台，在竖直方向即 Z 向和气浮转台端面径向方向即 Y 向上实现纳米精度的直线位移；所述纳米直线位移平台通过纳米运动平台连接件装接在 Z 向进给装置上，其 Z 向闭环直线运动精度优于 10nm，Z 向闭环直线运动行程不低于 10μm，Y 向闭环直线运动精度优于 100nm，Y 向闭环直线运动行程不低于 100μm。

进一步地，所述纳米运动平台为纳米偏摆平台，在竖直方向即 Z 向上实现纳米精度的直线位移，并且绕 X 轴实现偏摆运动，通过调整偏摆半径，间接地在气浮转台径向方向即 Y 向和竖直方向即 Z 向实现微量进给；其 Z 向闭环直线运动精度优于 10nm，Z 向闭环运动行程不低于 10μm，X 向闭环偏摆运动精度优于 1μrad，X 向闭环偏摆运动行程不低于±0.5mrad。

进一步地，一种纳米切深高速单点划擦试验装置的试验方法，包括以下步骤：

A、装夹试件

根据试件形状选择装夹试件的方式，如果试件为轴对称形状试件，则转步骤 A1，如果试件为形状不规则的块状试件，则转步骤 A2；

A1、对于轴对称形状的试件，在试件待划擦位置制作长度、高度可控的微凸结构，通过试件夹具固定安装在气浮转台上；转步骤 B；

A2、对于形状不规则的块状试件，在试件待划擦位置制作长度、高度可控的微凸结构，通过试件夹具将试件装夹在气浮转台端面，并安装相应的配重物块，确保高速回转运动中气浮转台端面的动态平衡，所述配种物块的重心和试件的重心关于气浮转台的旋转轴线呈中心对称；

B、通过 Z 向进给装置控制划擦工具向试件表面逼近；

旋转气浮转台，使待划擦试件表面的微凸结构位于划擦工具的正下方；

在试件微凸结构上粘贴厚度为 T 的保护薄膜，并控制划擦工具沿径向方向（即 Y 向）运动至纳米运动平台的负极限位置，借助在线显微观测系统，控制 Z 向进给装置使划擦工具快速向试件微凸结构逼近；

C、对刀

C1、打开 Z 向进给装置的锁止机构，

C2、通过纳米运动平台控制划擦工具沿 Z 向以小于弹性薄膜厚度 T 的步长向试件步进；

C31、如果力传感器检测到力信号明显上升，即划擦工具接触到试件微凸结构粘贴的保护薄膜，转步骤 C6；否则转步骤 C32；

C32、如果纳米运动平台步进至其 Z 向负极限位置，转步骤 C4；否则，转步骤 C2；

C4、解除 Z 向进给装置的锁止机构，控制纳米运动平台抬起至其 Z 向正极限位置；

C5、控制 Z 向进给装置向试件方向进给规定距离，所述距离不超过纳米运动平台 Z 向的行程极限与 Z 向进给装置定位精度的差值；转步骤 C1；

C6、停止纳米运动平台沿 Z 向的进给，揭下保护薄膜，完成对刀步骤（此时，划擦工具距离试件待划擦位置的距离不超过保护薄膜的厚度 T）；

D、对试件进行划擦

启动气浮转台，根据以下公式计算并设定气浮转台的转速 n，单位为 rpm：

$$n = \frac{30v}{\pi R}$$

其中，R 为微凸结构所在气浮转台端面的回转半径，m；v 为划擦试验所需

的划擦速度，m/s；试件装夹在试件夹具上随气浮转台按照设定的转速 n 做回转运动；

控制纳米运动平台和 Z 向进给装置实行交替划擦进给策略，所述交替划擦进给策略包括以下进给运动：

D1、打开 Z 向进给装置的锁止机构；

D2、通过纳米运动平台，控制划擦工具以 10~1000nm 的步长向试件以步进的方式进给，所述步进式进给分解为 Z 向负方向的进给和 Y 向负方向的进给；如果是同一划痕的单次划擦，转步骤 D21；如果是同一划痕的多次划擦，转步骤 D22；

D21、对于同一划痕的单次划擦，气浮转台带动试件每旋转一周，所述划擦工具步进式进给的步长在 Z 向的分量 f_z 不小于划擦试验所需的最小切削深度 d_{min}，且不大于划擦试验所需的最大切削深度 d_{max}，即 $d_{min} \leqslant f_z \leqslant d_{max}$；所述划擦工具步进式进给的步长在气浮转台端面径向即 Y 向的分量 f_y 不小于 10μm，使得沿 Y 向分布的，且切深渐变的划痕彼此相互独立、互不干扰；转步骤 D3；

D22、对于同一划痕的多次划擦，划擦工具步进式进给运动完成一次步进后，停留时间 t，直至达到试验所需的划擦次数 s，再继续向试件以步进方式进给，所述停留时间满足 $s/n \leqslant t < (s+1)/n$；所述划擦工具步进式进给的步长在 Z 向的分量 f_z 不小于划擦试验所需的最小切削深度 d_{min}，且不大于划擦试验所需的最大切削深度 d_{max}，即 $d_{min} \leqslant f_z \leqslant d_{max}$；所述划擦工具步进式进给的步长在气浮转台端面径向即 Y 向的分量 f_y 不小于 10μm，使得沿 Y 向分布的，且切深渐变的划痕彼此相互独立、互不干扰；

D3、如果所述的步进式进给在 Z 方向的累计位移超过了试验所需的最大切削深度，或者所述的纳米运动平台行至其 Y 向负限位，或者所述的步进式进给在 Z 方向的累计位移达到了纳米运动平台在 Z 向负限位，停止步进式进给，转步骤 D31；否则，转步骤 D2；

D31、分析进给期间力传感器采集的力信号，如果检测到划擦力信号，即表明划擦工具在在试件的微凸结构表面进行了高速划擦，转步骤 D5；否则，转步骤 D32；

D32、如果纳米运动平台已行至其 Y 向负限位，制纳米运动平台运动至其 Y

向正限位，转步骤 D2；否则，转步骤 D33；

D33、如果纳米运动平台已行至其 Z 向负限位，转步骤 D4；否则，转步骤 D2；

D4、解除 Z 向进给装置的锁止机构，通过所述 Z 向进给装置控制划擦工具向试件表面进给，使划擦工具进一步逼近试件表面。为了避免逼近过程中划擦工具接触到微凸结构，Z 向进给装置的进给量不超过纳米运动平台 Z 向的行程与 Z 向进给装置定位精度的差值，控制纳米运动平台移动至其 Z 向正限位；转步骤 D1；

D5、解除 Z 向进给装置的锁止机构，通过所述 Z 向进给装置控制划擦工具向上抬起，停止所述气浮转台，完成划擦试验。

进一步地，步骤 A2 所述的轴对称形状试件如果厚度小于 1mm 时，在试件背面粘贴长度不低于 5mm、宽度不低于 1mm、高度不低于 10μm 的弹性薄膜，采用具有平坦表面的磁力吸盘或真空吸盘进行装夹，在装夹的过程中，借助平坦的真空吸盘/磁力吸盘表面和弹性薄膜，通过真空吸附/磁力吸附作用，使得试件表面产生弹性变形，形成长度、宽度和高度可控的微凸结构。

本发明和背景技术相比，具有以下优点：

1、真实地还原了超精密磨削过程中磨粒的加工速度。本发明选用空气轴承机械气浮转台，利用高精度、低端跳的高速回转运动实现高速划擦，利用划擦试件表面的微凸结构以及纳米运动平台和 Z 向进给装置组成分级精密运动系统，在纳米尺度上实现了划擦深度可控，与目前的划擦方式相比，本发明在划擦速度方面从μm/s 提升至 m/s，真实地还原了超精密磨削过程中磨粒的加工速度；在划擦深度方面实现了纳米尺度上的控制，在划擦工具尺寸方面，实现了微米/亚微米曲率半径划擦工具的高速划擦。

2、高速划擦条件下准确采集不同纳米切深条件下的划擦力信号，划擦力-划擦深度对应关系明确。本发明在试件表面构造了微凸结构，相比于钟摆式划擦方法，有效地延长了纳米切深下的划擦长度，与此同时，待划擦区域的微凸结构还实现了划擦的过程中划擦深度渐变。进而在保证划擦力-划擦深度对应关系明确的基础上，准确地采集了足量不同切深对应的划擦力信号。

3、划擦长度可控。本发明在试件表面构造了微凸结构，避免了金刚石针尖

在整个晶圆表面留下很长的划痕，在较短的划痕内提供了丰富的试验数据，极大地提高了单位划擦长度内有效信息的含量，有利于后续的划痕分析和残留划痕的特征识别，同时，通过控制划痕总体长度，保证了划擦工具的完整性。

附图说明

图 1 是本发明试验装置的主视图。

图 2 是图 1 的俯视图。

图 3 是工件微凸结构的示意图。

图 4 是图 3 的 A-A 剖视图。

图 5 本发明试验方法的流程图。

图中：1、基座；2、工作台；3、气浮转台；4、试件夹具；5、试件；6、划擦工具；7、划擦工具连接件；8、力传感器；9、力传感器连接件；10、纳米运动平台；11、纳米运动平台连接件；12、Z 向进给装置；13、弹性薄膜；14、微凸结构。

具体实施方式

下面结合附图对本发明进行进一步地描述。如图 1-4 所示，一种纳米切深高速单点划擦试验装置，包括：

基座 1；

水平放置的工作台 2，固定安装在基座 1 顶面；

竖直放置的气浮转台 3，固定安装在工作台 2 上；

试件夹具 4，装接在气浮转台 3 顶部端面，且与气浮转台 3 同轴，通过气浮转台 3 带动试件夹具 4 旋转；所述试件夹具 4 是真空吸盘、磁力吸盘或机械结构夹具；

试件 5，装接在试件夹具 4 上；

Z 向进给装置 12，装接在工作台 2 顶面，沿气浮转台 3 回转轴线方向进给；所述 Z 向进给装置 12 通过螺纹连接的方式装接在工作台 2 顶面，其定位精度优于 5μm；

纳米运动平台 10，通过纳米运动平台连接件 11 装接在 Z 向进给装置 12 上；

力传感器 8，通过力传感器连接件 9 装接在纳米运动平台 10 上；所述力传感器 8 具有测量法向力和切向力功能，法向即 Z 向，切向即 X 向；

划擦工具 6，通过划擦工具连接件 7 装接在力传感器 8 上；

所述试件 5 为有色金属、黑色金属或硬脆材料，在试件 5 待划擦位置制作长度、高度可控的微凸结构 14，划擦深度 d 所对应的微凸结构 14 沿划擦方向的长度 L_x 满足下式：

$$L_x \geq \frac{vq}{f}$$

其中，v 为试验所需的划擦速度，m/s；q 为有效划擦区域内、试验所需的力信号点数；f 为力传感器 8 设定的采样频率，Hz；

所述微凸结构 14 沿径向的长度 L_y 不小于划擦过程中划擦工具 6 沿 Y 方向的进给步长 l_y；

所述微凸结构 14 沿 Z 向的最大高度 H 大于试验所需的最大切削深度 d_{max}；

所述微凸结构 14 的 Y 截面形状呈圆弧状或折线状，根据划擦试验设定的划擦速度、划擦深度以及划擦长度，选取圆弧半径或直线斜率。

进一步地，所述气浮转台 3 采用伺服电机驱动，所述伺服电机安装在工作台 2 底面，所述气浮转台 3 通过皮带与伺服电机连接；所述气浮转台 3 为空气轴承机械气浮转台 3；所述气浮转台 3 的端面跳动量和径向跳动量均小于 0.5 μm；所述气浮转台 3、试件夹具 4 和试件 5 三者在 Z 方向的相对位置固定。

进一步地，所述试件 5 的形状关于 Z 轴中心对称，在试件 5 待划擦位置制作长度、高度可控的微凸结构 14，通过试件夹具 4 固定安装在气浮转台 3 上，所述试件 5 的中心对称轴与转台回转轴线重合。

进一步地，所述试件 5 的形状关于 Z 轴中心对称且试件 5 的厚度小于 1mm，在试件 5 背面粘贴长度不低于 5mm、宽度不低于 1mm、高度不低于 10μm 的弹性薄膜 13，采用具有平坦表面的磁力吸盘或真空吸盘进行装夹，在装夹的过程中，借助平坦的真空吸盘/磁力吸盘表面和弹性薄膜 13，通过真空吸附/磁力吸附作用，使得试件 5 表面产生弹性变形，形成长度、宽度和高度可控的微凸结构 14，所述试件 5 的中心对称轴与气浮转台 3 回转轴线重合。

进一步地，所述试件 5 为形状不规则的块状试件 5，在试件 5 待划擦位置制作长度、高度可控的微凸结构 14；试件 5 通过试件夹具 4 装夹在气浮转台 3 端面；为了确保高速回转运动中气浮转台 3 端面的动态平衡，在试件夹具 4 上额外安装配重物块，所述配种物块的重心和试件 5 的重心关于气浮转台 3 的旋转

轴线呈中心对称。

进一步地，所述划擦工具 6 包括单点工具和固定单点工具的固定座，所述单点工具的材料为比试件 5 硬度高且具有加工出微米/亚微米曲率半径尖点特性的材料，包括金刚石、立方氮化硼或陶瓷；所述单点工具通过粘接、钎焊或电镀固结在所述固定座的顶端。

进一步地，所述纳米运动平台 10 为纳米直线位移平台，在竖直方向即 Z 向和气浮转台 3 端面径向方向即 Y 向上实现纳米精度的直线位移；所述纳米直线位移平台通过纳米运动平台连接件 11 装接在 Z 向进给装置 12 上，其 Z 向闭环直线运动精度优于 10nm，Z 向闭环直线运动行程不低于 10μm，Y 向闭环直线运动精度优于 100nm，Y 向闭环直线运动行程不低于 100μm。

进一步地，所述纳米运动平台 10 为纳米偏摆平台，在竖直方向即 Z 向上实现纳米精度的直线位移，并且绕 X 轴实现偏摆运动，通过调整偏摆半径，间接地在气浮转台 3 径向方向即 Y 向和竖直方向即 Z 向实现微量进给；其 Z 向闭环直线运动精度优于 10nm，Z 向闭环运动行程不低于 10μm，X 向闭环偏摆运动精度优于 1μrad，X 向闭环偏摆运动行程不低于±0.5mrad。

如图 1-5 所示，一种纳米切深高速单点划擦试验装置的试验方法，包括以下步骤：

B、装夹试件 5

根据试件 5 形状选择装夹试件 5 的方式，如果试件 5 为轴对称形状试件，则转步骤 A1，如果试件 5 为形状不规则的块状试件，则转步骤 A2；

A1、对于轴对称形状试件，在试件 5 待划擦位置制作长度、高度可控的微凸结构 14，通过试件夹具 4 固定安装在气浮转台 3 上；转步骤 B；

A2、对于形状不规则的块状试件，在试件 5 待划擦位置制作长度、高度可控的微凸结构 14，通过试件夹具 4 将试件 5 装夹在气浮转台 3 端面，并安装相应的配重物块，确保高速回转运动中气浮转台 3 端面的动态平衡，所述配种物块的重心和试件 5 的重心关于气浮转台 3 的旋转轴线呈中心对称；

B、通过 Z 向进给装置 12 控制划擦工具 6 向试件 5 表面逼近；

旋转气浮转台 3，使待划擦试件 5 表面的微凸结构 14 位于划擦工具 6 的正下方；

在试件 5 微凸结构 14 上粘贴厚度为 T 的保护薄膜，并控制划擦工具 6 沿径

向方向运动至纳米运动平台 10 的负极限位置，借助在线显微观测系统，控制 Z 向进给装置 12 使划擦工具 6 快速向试件 5 微凸结构 14 逼近；

C、对刀

C1、打开 Z 向进给装置 12 的锁止机构，

C2、通过纳米运动平台 10 控制划擦工具 6 沿 Z 向以小于弹性薄膜 13 厚度 *T* 的步长向试件 5 步进；

C31、如果力传感器 8 检测到力信号明显上升，即划擦工具 6 接触到试件 5 微凸结构 14 粘贴的保护薄膜，转步骤 C6；否则转步骤 C32；

C32、如果纳米运动平台 10 步进至其 Z 向负极限位置，转步骤 C4；否则，转步骤 C2；

C4、解除 Z 向进给装置 12 的锁止机构，控制纳米运动平台 10 抬起至其 Z 向正极限位置；

C5、控制 Z 向进给装置 12 向试件 5 方向进给规定距离，所述距离不超过纳米运动平台 10Z 向的行程极限与 Z 向进给装置 12 定位精度的差值；转步骤 C1；

C6、停止纳米运动平台 10 沿 Z 向的进给，揭下保护薄膜，完成对刀步骤；

D、对试件 5 进行划擦

启动气浮转台 3，根据以下公式计算并设定气浮转台 3 的转速 *n*，单位为 rpm：

$$n = \frac{30v}{\pi R}$$

其中，*R* 为微凸结构 14 所在气浮转台 3 端面的回转半径，m；*v* 为划擦试验所需的划擦速度，m/s；试件 5 装夹在试件夹具 4 上随气浮转台 3 按照设定的转速 *n* 做回转运动；

控制纳米运动平台 10 和 Z 向进给装置 12 实行交替划擦进给策略，所述交替划擦进给策略包括以下进给运动：

D1、打开 Z 向进给装置 12 的锁止机构；

D2、通过纳米运动平台 10，控制划擦工具 6 以 10~1000nm 的步长向试件 5 以步进的方式进给，所述步进式进给分解为 Z 向负方向的进给和 Y 向负方向的进给；如果是同一划痕的单次划擦，转步骤 D21；如果是同一划痕的多次划擦，转步骤 D22；

D21、对于同一划痕的单次划擦，气浮转台 3 带动试件 5 每旋转一周，所述划擦工具 6 步进式进给的步长在 Z 向的分量 f_z 不小于划擦试验所需的最小切削深度 d_{min}，且不大于划擦试验所需的最大切削深度 d_{max}，即 $d_{min} \leqslant f_z \leqslant d_{max}$；所述划擦工具 6 步进式进给的步长在气浮转台 3 端面径向即 Y 向的分量 f_y 不小于 10μm，使得沿 Y 向分布的，且切深渐变的划痕彼此相互独立、互不干扰；转步骤 D3；

D22、对于同一划痕的多次划擦，划擦工具 6 步进式进给运动完成一次步进后，停留时间 t，直至达到试验所需的划擦次数 s，再继续向试件 5 以步进方式进给，所述停留时间满足 $s/n \leqslant t < (s+1)/n$；所述划擦工具 6 步进式进给的步长在 Z 向的分量 f_z 不小于划擦试验所需的最小切削深度 d_{min}，且不大于划擦试验所需的最大切削深度 d_{max}，即 $d_{min} \leqslant f_z \leqslant d_{max}$；所述划擦工具 6 步进式进给的步长在气浮转台 3 端面径向即 Y 向的分量 f_y 不小于 10μm，使得沿 Y 向分布的，且切深渐变的划痕彼此相互独立、互不干扰；

D3、如果所述的步进式进给在 Z 方向的累计位移超过了试验所需的最大切削深度，或者所述的纳米运动平台 10 行至其 Y 向负限位，或者所述的步进式进给在 Z 方向的累计位移达到了纳米运动平台 10 在 Z 向负限位，停止步进式进给，转步骤 D31；否则，转步骤 D2；

D31、分析进给期间力传感器 8 采集的力信号，如果检测到划擦力信号，即表明划擦工具 6 在在试件 5 的微凸结构 14 表面进行了高速划擦，转步骤 D5；否则，转步骤 D32；

D32、如果纳米运动平台 10 已行至其 Y 向负限位，制纳米运动平台 10 运动至其 Y 向正限位，转步骤 D2；否则，转步骤 D33；

D33、如果纳米运动平台 10 已行至其 Z 向负限位，转步骤 D4；否则，转步骤 D2；

D4、解除 Z 向进给装置 12 的锁止机构，通过所述 Z 向进给装置 12 控制划擦工具 6 向试件 5 表面进给，使划擦工具 6 进一步逼近试件 5 表面。为了避免逼近过程中划擦工具 6 接触到微凸结构 14，Z 向进给装置 12 的进给量不超过纳米运动平台 10Z 向的行程与 Z 向进给装置 12 定位精度的差值，控制纳米运动平台 10 移动至其 Z 向正限位；转步骤 D1；

D5、解除 Z 向进给装置 12 的锁止机构，通过所述 Z 向进给装置 12 控制划擦工具 6 向上抬起，停止所述气浮转台 3，完成划擦试验。

进一步地，步骤 A2 所述的轴对称形状试件 5 如果厚度小于 1mm 时，在试件 5 背面粘贴长度不低于 5mm、宽度不低于 1mm、高度不低于 10μm 的弹性薄膜 13，采用具有平坦表面的磁力吸盘或真空吸盘进行装夹，在装夹的过程中，借助平坦的真空吸盘/磁力吸盘表面和弹性薄膜 13，通过真空吸附/磁力吸附作用，使得试件 5 表面产生弹性变形，形成长度、宽度和高度可控的微凸结构 14。

本发明不局限于本实施例，任何在本发明披露的技术范围内的等同构思或者改变，均列为本发明的保护范围。

权 利 要 求 书

1、一种纳米切深高速单点划擦试验装置，其特征在于：包括：

基座（1）；

水平放置的工作台（2），固定安装在基座（1）顶面；

竖直放置的气浮转台（3），固定安装在工作台（2）上；

试件夹具（4），装接在气浮转台（3）顶部端面，且与气浮转台（3）同轴，通过气浮转台（3）带动试件夹具（4）旋转；所述试件夹具（4）是真空吸盘、磁力吸盘或机械结构夹具；

试件（5），装接在试件夹具（4）上；

Z 向进给装置（12），装接在工作台（2）顶面，沿气浮转台（3）回转轴线方向进给；所述 Z 向进给装置（12）通过螺纹连接的方式装接在工作台（2）顶面，其定位精度优于 5μm；

纳米运动平台（10），通过纳米运动平台连接件（11）装接在 Z 向进给装置（12）上；

力传感器（8），通过力传感器连接件（9）装接在纳米运动平台（10）上；所述力传感器（8）具有测量法向力和切向力功能，法向即 Z 向，切向即 X 向；

划擦工具（6），通过划擦工具连接件（7）装接在力传感器（8）上；

所述试件（5）为有色金属、黑色金属或硬脆材料，在试件（5）待划擦位置制作长度、高度可控的微凸结构（14），划擦深度 d 所对应的微凸结构（14）沿划擦方向的长度 L_x 满足下式：

$$L_x \geq \frac{vq}{f}$$

其中，v 为试验所需的划擦速度，m/s；q 为有效划擦区域内、试验所需的力信号点数；f 为力传感器（8）设定的采样频率，Hz；

所述微凸结构（14）沿径向的长度 L_y 不小于划擦过程中划擦工具（6）沿 Y 方向的进给步长 l_y；

所述微凸结构（14）沿 Z 向的最大高度 H 大于试验所需的最大切削深度 d_{max}；

所述微凸结构（14）的 Y 截面形状呈圆弧状或折线状，根据划擦试验设定的划擦速度、划擦深度以及划擦长度，选取圆弧半径或直线斜率。

2、根据权利要求 1 所述的一种纳米切深高速单点划擦试验装置，其特征在于：所述气浮转台（3）采用伺服电机驱动，所述伺服电机安装在工作台（2）底面，所述气浮转台（3）通过皮带与伺服电机连接；所述气浮转台（3）为空气轴承机械气浮转台（3）；所述气浮转台（3）的端面跳动量和径向跳动量均小于 0.5 μm；所述气浮转台（3）、试件夹具（4）和试件（5）三者在 Z 方向的相对位置固定。

3、根据权利要求 1 所述的一种纳米切深高速单点划擦试验装置，其特征在于：所述试件（5）的形状关于 Z 轴中心对称，在试件（5）待划擦位置制作长度、高度可控的微凸结构（14），通过试件夹具（4）固定安装在气浮转台（3）上，所述试件（5）的中心对称轴与转台回转轴线重合。

4、根据权利要求 1 或 3 所述的一种纳米切深高速单点划擦试验装置，其特征在于：所述试件（5）的形状关于 Z 轴中心对称且试件（5）的厚度小于 1mm，在试件（5）背面粘贴长度不低于 5mm、宽度不低于 1mm、高度不低于 10μm 的弹性薄膜（13），采用具有平坦表面的磁力吸盘或真空吸盘进行装夹，在装夹的过程中，借助平坦的真空吸盘/磁力吸盘表面和弹性薄膜（13），通过真空吸附/磁力吸附作用，使得试件（5）表面产生弹性变形，形成长度、宽度和高度可控的微凸结构（14），所述试件（5）的中心对称轴与气浮转台（3）回转轴线重合。

5、根据权利要求 1 所述的一种纳米切深高速单点划擦试验装置，其特征在于：所述试件（5）为形状不规则的块状试件（5），在试件（5）待划擦位置制作长度、高度可控的微凸结构（14）；试件（5）通过试件夹具（4）装夹在气浮转台（3）端面；为了确保高速回转运动中气浮转台（3）端面的动态平衡，在试件夹具（4）上额外安装配重物块，所述配种物块的重心和试件（5）的重心关于气浮转台（3）的旋转轴线呈中心对称。

6、根据权利要求 1 所述的一种纳米切深高速单点划擦试验装置，其特征在于：所述划擦工具（6）包括单点工具和固定单点工具的固定座，所述单点工具的材料为比试件(5)硬度高且具有加工出微米/亚微米曲率半径尖点特性的材料，包括金刚石、立方氮化硼或陶瓷；所述单点工具通过粘接、钎焊或电镀固结在所述固定座的顶端。

7、根据权利要求 1 所述的一种纳米切深高速单点划擦试验装置，其特征在于：所述纳米运动平台（10）为纳米直线位移平台，在竖直方向即 Z 向和气浮

转台（3）端面径向方向即 Y 向上实现纳米精度的直线位移；所述纳米直线位移平台通过纳米运动平台连接件（11）装接在 Z 向进给装置（12）上，其 Z 向闭环直线运动精度优于 10nm，Z 向闭环直线运动行程不低于 10μm，Y 向闭环直线运动精度优于 100nm，Y 向闭环直线运动行程不低于 100μm。

8、根据权利要求 1 所述的一种纳米切深高速单点划擦试验装置，其特征在于：所述纳米运动平台（10）为纳米偏摆平台，在竖直方向即 Z 向上实现纳米精度的直线位移，并且绕 X 轴实现偏摆运动，通过调整偏摆半径，间接地在气浮转台（3）径向方向即 Y 向和竖直方向即 Z 向实现微量进给；其 Z 向闭环直线运动精度优于 10nm，Z 向闭环运动行程不低于 10μm，X 向闭环偏摆运动精度优于 1μrad，X 向闭环偏摆运动行程不低于±0.5mrad。

9、一种纳米切深高速单点划擦试验装置的试验方法，其特征在于：包括以下步骤：

A、装夹试件（5）

根据试件（5）形状选择装夹试件（5）的方式，如果试件（5）为轴对称形状试件，则转步骤 A1，如果试件（5）为形状不规则的块状试件，则转步骤 A2；

A1、对于轴对称形状试件，在试件（5）待划擦位置制作长度、高度可控的微凸结构（14），通过试件夹具（4）固定安装在气浮转台（3）上；转步骤 B；

A2、对于形状不规则的块状试件，在试件（5）待划擦位置制作长度、高度可控的微凸结构（14），通过试件夹具（4）将试件（5）装夹在气浮转台（3）端面，并安装相应的配重物块，确保高速回转运动中气浮转台（3）端面的动态平衡，所述配种物块的重心和试件（5）的重心关于气浮转台（3）的旋转轴线呈中心对称；

B、通过 Z 向进给装置（12）控制划擦工具（6）向试件（5）表面逼近；

旋转气浮转台（3），使待划擦试件（5）表面的微凸结构（14）位于划擦工具（6）的正下方；

在试件（5）微凸结构（14）上粘贴厚度为 T 的保护薄膜，并控制划擦工具（6）沿径向方向运动至纳米运动平台（10）的负极限位置，借助在线显微观测系统，控制 Z 向进给装置（12）使划擦工具（6）快速向试件（5）微凸结构（14）逼近；

C、对刀

C1、打开 Z 向进给装置（12）的锁止机构，

C2、通过纳米运动平台（10）控制划擦工具（6）沿 Z 向以小于弹性薄膜（13）厚度 T 的步长向试件（5）步进；

C31、如果力传感器（8）检测到力信号明显上升，即划擦工具（6）接触到试件（5）微凸结构（14）粘贴的保护薄膜，转步骤 C6；否则转步骤 C32；

C32、如果纳米运动平台（10）步进至其 Z 向负极限位置，转步骤 C4；否则，转步骤 C2；

C4、解除 Z 向进给装置（12）的锁止机构，控制纳米运动平台（10）抬起至其 Z 向正极限位置；

C5、控制 Z 向进给装置（12）向试件（5）方向进给规定距离，所述距离不超过纳米运动平台（10）Z 向的行程极限与 Z 向进给装置（12）定位精度的差值；转步骤 C1；

C6、停止纳米运动平台（10）沿 Z 向的进给，揭下保护薄膜，完成对刀步骤；

D、对试件（5）进行划擦

启动气浮转台（3），根据以下公式计算并设定气浮转台（3）的转速 n，单位为 rpm：

$$n = \frac{30v}{\pi R}$$

其中，R 为微凸结构（14）所在气浮转台（3）端面的回转半径，m；v 为划擦试验所需的划擦速度，m/s；试件（5）装夹在试件夹具（4）上随气浮转台（3）按照设定的转速 n 做回转运动；

控制纳米运动平台（10）和 Z 向进给装置（12）实行交替划擦进给策略，所述交替划擦进给策略包括以下进给运动：

D1、打开 Z 向进给装置（12）的锁止机构；

D2、通过纳米运动平台（10），控制划擦工具（6）以 10~1000nm 的步长向试件（5）以步进的方式进给，所述步进式进给分解为 Z 向负方向的进给和 Y 向负方向的进给；如果是同一划痕的单次划擦，转步骤 D21；如果是同一划痕的多次划擦，转步骤 D22；

D21、对于同一划痕的单次划擦，气浮转台（3）带动试件（5）每旋转一周，所述划擦工具（6）步进式进给的步长在 Z 向的分量 f_z 不小于划擦试验所需的最小切削深度 d_{min}，且不大于划擦试验所需的最大切削深度 d_{max}，即 $d_{min} \leqslant f_z \leqslant d_{max}$；所述划擦工具（6）步进式进给的步长在气浮转台（3）端面径向即 Y 向的分量 f_y 不小于 10μm，使得沿 Y 向分布的，且切深渐变的划痕彼此相互独立、互不干扰；转步骤 D3；

D22、对于同一划痕的多次划擦，划擦工具（6）步进式进给运动完成一次步进后，停留时间 t，直至达到试验所需的划擦次数 s，再继续向试件（5）以步进方式进给，所述停留时间满足 $s/n \leqslant t < (s+1)/n$；所述划擦工具（6）步进式进给的步长在 Z 向的分量 f_z 不小于划擦试验所需的最小切削深度 d_{min}，且不大于划擦试验所需的最大切削深度 d_{max}，即 $d_{min} \leqslant f_z \leqslant d_{max}$；所述划擦工具（6）步进式进给的步长在气浮转台（3）端面径向即 Y 向的分量 f_y 不小于 10μm，使得沿 Y 向分布的，且切深渐变的划痕彼此相互独立、互不干扰；

D3、如果所述的步进式进给在 Z 方向的累计位移超过了试验所需的最大切削深度，或者所述的纳米运动平台（10）行至其 Y 向负限位，或者所述的步进式进给在 Z 方向的累计位移达到了纳米运动平台（10）在 Z 向负限位，停止步进式进给，转步骤 D31；否则，转步骤 D2；

D31、分析进给期间力传感器（8）采集的力信号，如果检测到划擦力信号，即表明划擦工具（6）在在试件（5）的微凸结构（14）表面进行了高速划擦，转步骤 D5；否则，转步骤 D32；

D32、如果纳米运动平台（10）已行至其 Y 向负限位，制纳米运动平台（10）运动至其 Y 向正限位，转步骤 D2；否则，转步骤 D33；

D33、如果纳米运动平台（10）已行至其 Z 向负限位，转步骤 D4；否则，转步骤 D2；

D4、解除 Z 向进给装置（12）的锁止机构，通过所述 Z 向进给装置（12）控制划擦工具（6）向试件（5）表面进给，使划擦工具（6）进一步逼近试件（5）表面；为了避免逼近过程中划擦工具（6）接触到微凸结构（14），Z 向进给装置（12）的进给量不超过纳米运动平台（10）Z 向的行程与 Z 向进给装置（12）定位精度的差值，控制纳米运动平台（10）移动至其 Z 向正限位；转步骤 D1；

D5、解除 Z 向进给装置（12）的锁止机构，通过所述 Z 向进给装置（12）控制划擦工具（6）向上抬起，停止所述气浮转台（3），完成划擦试验。

10、根据权利要求 9 所述的一种纳米切深高速单点划擦试验装置的试验方法，其特征在于：步骤 A2 所述的轴对称形状试件（5）如果厚度小于 1mm 时，在试件（5）背面粘贴长度不低于 5mm、宽度不低于 1mm、高度不低于 10μm 的弹性薄膜（13），采用具有平坦表面的磁力吸盘或真空吸盘进行装夹，在装夹的过程中，借助平坦的真空吸盘/磁力吸盘表面和弹性薄膜（13），通过真空吸附/磁力吸附作用，使得试件（5）表面产生弹性变形，形成长度、宽度和高度可控的微凸结构（14）。

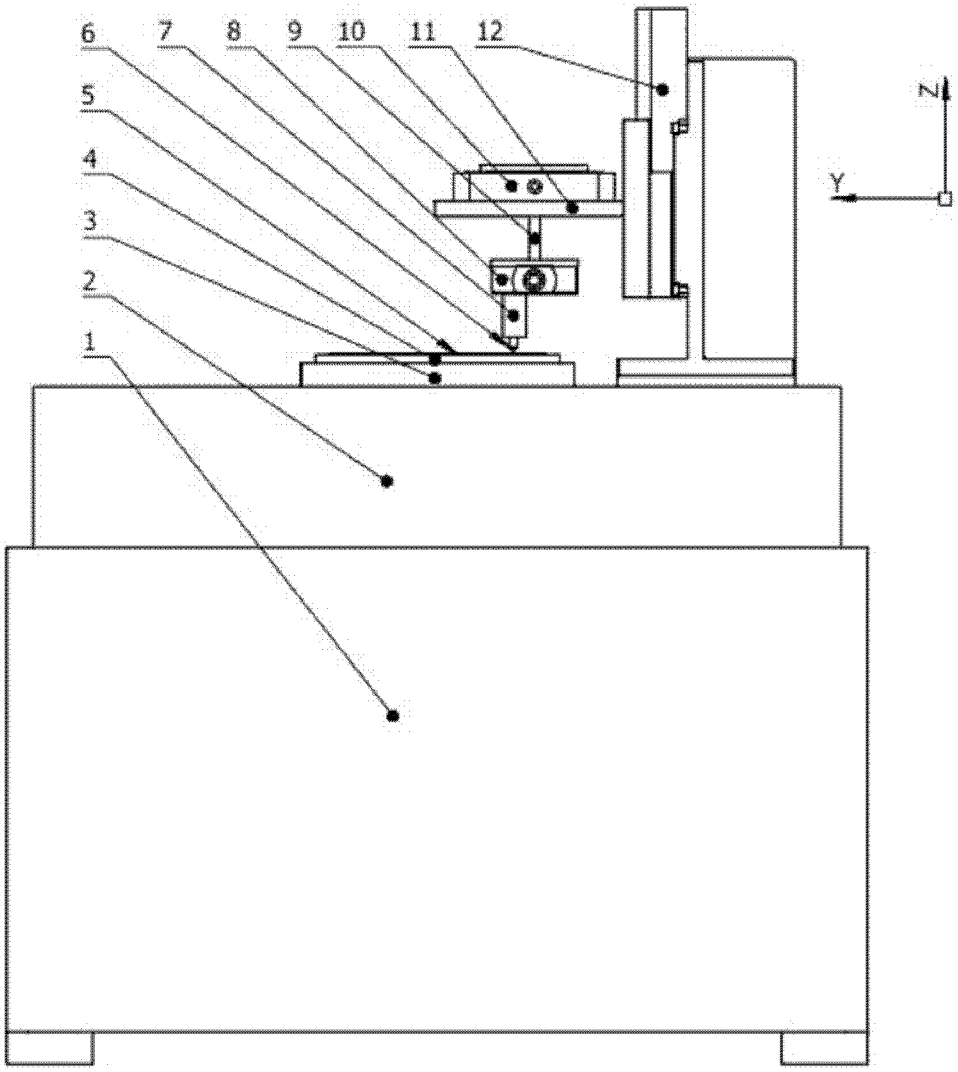


图 1

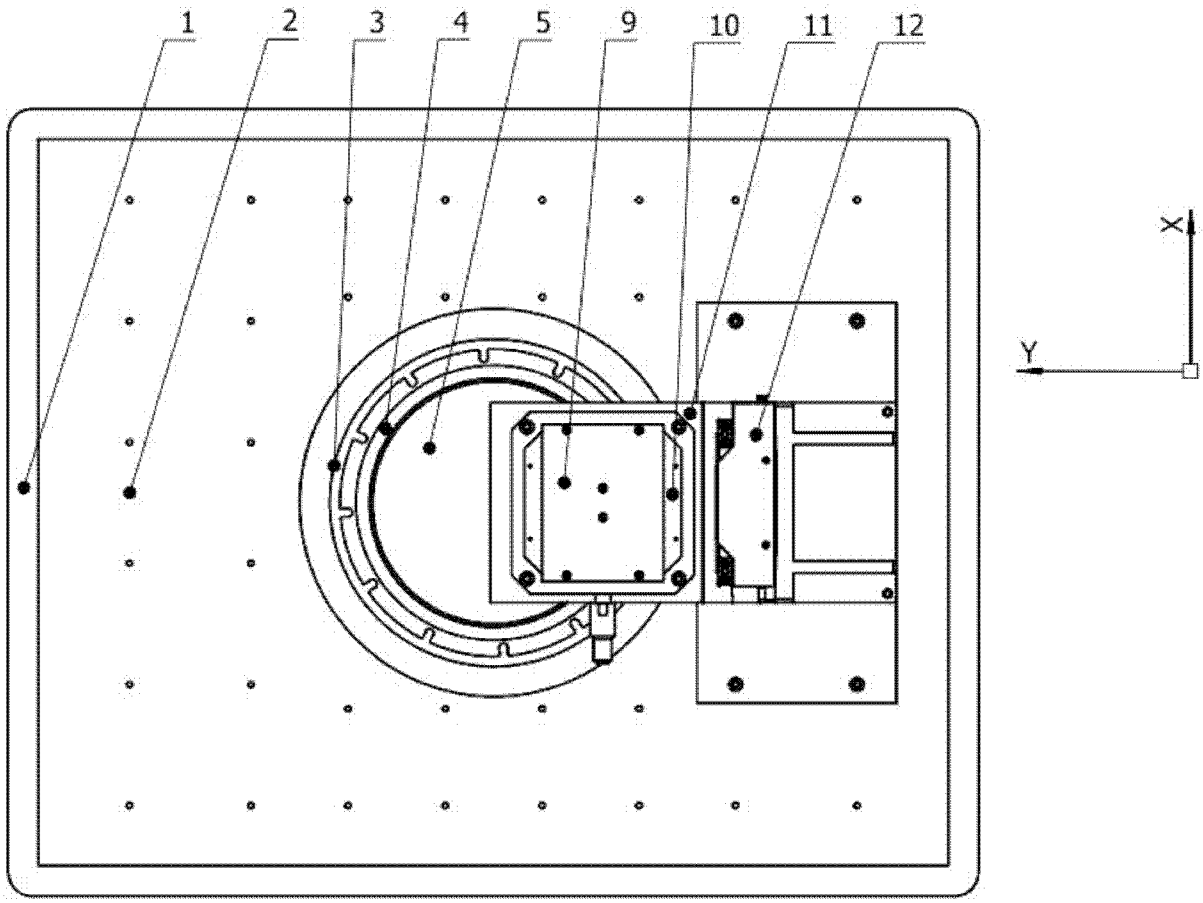


图 2

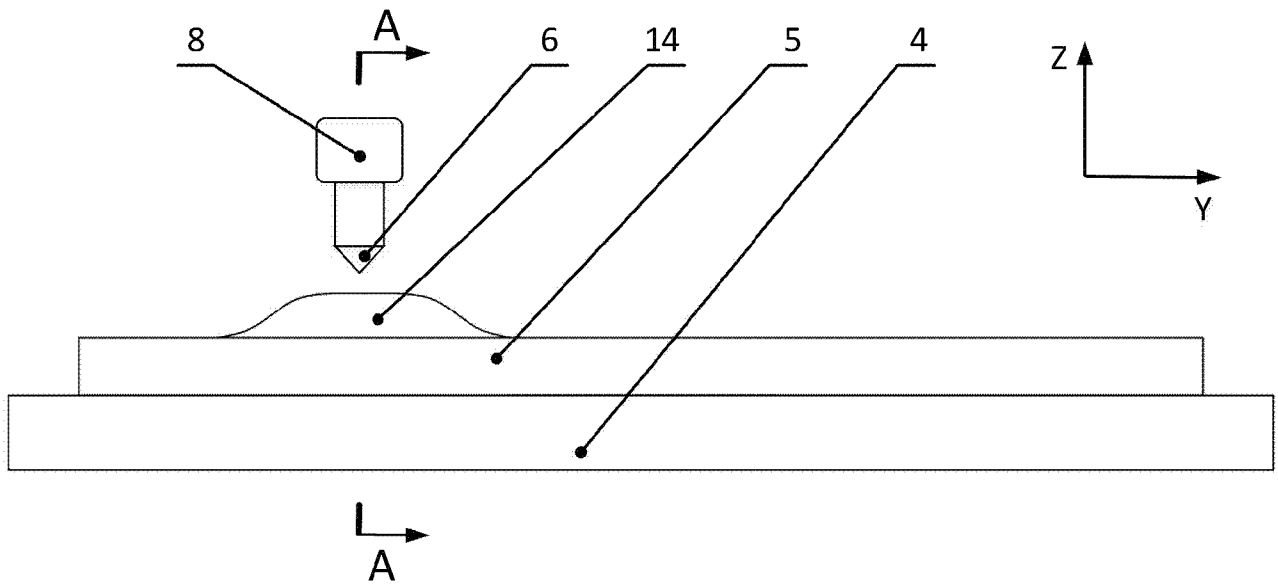


图 3

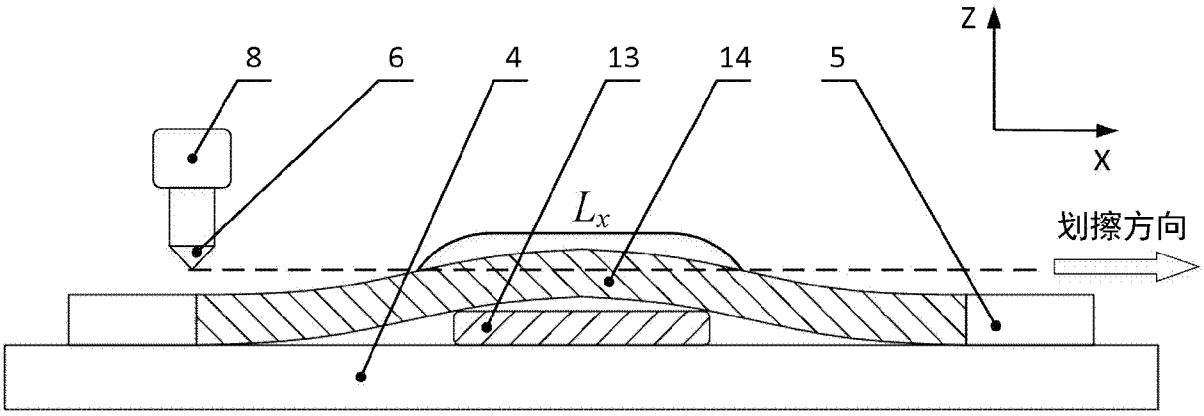

8
6
4
13
14
5
Z
X
L_x
划擦方向

图 4

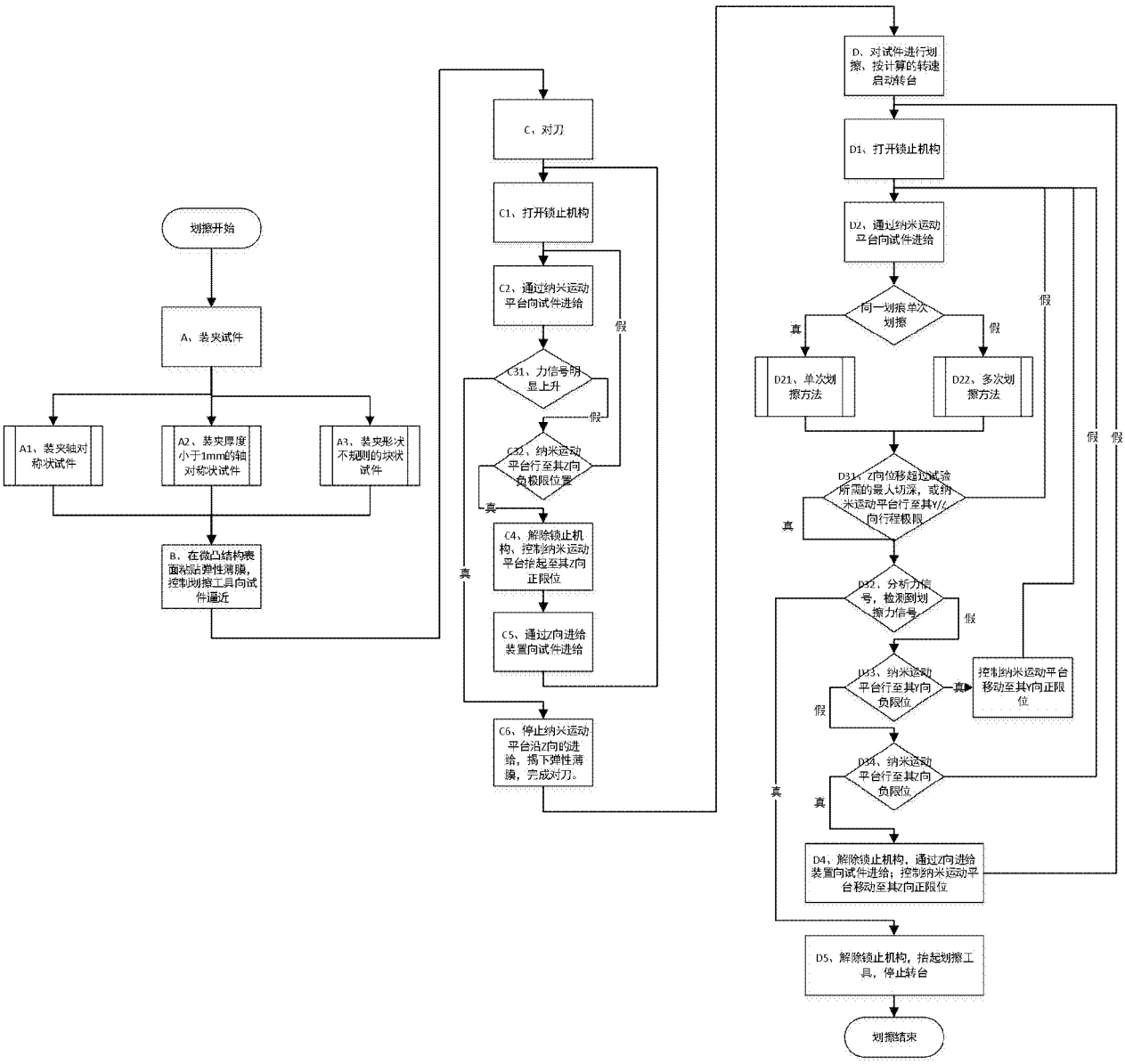

划擦开始
A、装夹试件
A1、装夹轴对称状试件
A2、装夹厚度小于1mm的轴对称状试件
A3、装夹形状不规则的块状试件
B、在微凸结构表面粘贴弹性薄膜，控制划擦工具向试件逼近
C、对刀
C1、打开锁止机构
C2、通过纳兴运动平台向试件进给
C31、力信号明显上升
C32、纳米运动平台行至其Z向负极限位置
C4、解除锁止机构，控制纳米运动平台抬起至其Z向正限位
C5、通过Z向进给装置向试件进给
C6、停止纳兴运动平台沿Z向的进给，揭下弹性薄膜，完成对刀。
D、对试件进行划擦、按计算的转速启动转台
D1、打开锁止机构
D2、通过纳米运动平台向试件进给
同一划痕单次划擦
D21、单次划擦方法
D22、多次划擦方法
D31、Z向位移超过试验所需的最大切深，或纳米运动平台行至其Y/向行程极限
D32、分析力信号，检测到划擦力信号
D33、纳米运动平台行至其Y向负限位
控制纳米运动平台移动至其Y向正限位
D34、纳米运动平台行至其Z向负限位
D4、解除锁止机构，通过Z向进给装置向试件进给；控制纳米运动平台移动至其Z向正限位
D5、解除锁止机构，抬起划擦工具，停止转台
划擦结束
真
假

图5

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2017/109913

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01N 19/06 (2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01N; B24B; B23B; B23C; B23D

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNPAT, CNKI, EPODOC, WPI, USTXT, EPTXT, WOTXT: 磨削, 切削, 削, 磨, 划擦, 划痕, 压痕, 凸, 突, 曲面, 弯曲, 弧, 隆, 拱, 垫片, 薄膜, 纳米, 长度, 深, 力, 进给, 运动, scratch+, scarification, indentat+, grind+, spacer, gasket, shim, film, protuberance, arch+, salient+, boss, protrud+, arc, curve, nano+, length, depth, feed+, mov???, shift+, force

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 105717002 A (HUAQIAO UNIVERSITY) 29 June 2016 (29.06.2016), description, paragraphs [0060]-[0109], and figures 1-12	1-10
A	CN 102107391 A (BEIJING TANKEBLUE SEMICONDUCTOR CO., LTD. et al.) 29 June 2011 (29.06.2011), entire document	1-10
A	CN 103878392 A (TIANJIN UNIVERSITY) 25 June 2014 (25.06.2014), entire document	1-10
A	CN 102564336 A (ZHEJIANG UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 11 July 2012 (11.07.2012), entire document	1-10
A	CN 1254154 A (ALPS ELECTRIC CO., LTD.) 24 May 2000 (24.05.2000), entire document	1-10

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&"document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
12 April 2018	23 May 2018
Name and mailing address of the ISA State Intellectual Property Office of the P. R. China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088, China Facsimile No. (86-10) 62019451	Authorized officer GENG, Na Telephone No. (86-10) 53962385

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2017/109913

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 104907417 A (HARBIN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) 16 September 2015 (16.09.2015), entire document	1-10
A	CN 105628611 A (HUAQIAO UNIVERSITY) 01 June 2016 (01.06.2016), entire document	1-10
A	CN 105021478 A (JILIN UNIVERSITY) 04 November 2015 (04.11.2015), entire document	1-10
A	US 2009145208 A1 (CSM INSTRUMENTS SA) 11 June 2009 (11.06.2009), entire document	1-10
A	JP 01138437 A (NEC CORPORATION) 31 May 1989 (31.05.1989), entire document	1-10

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2017/109913

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN 105717002 A	29 June 2016	None	
CN 102107391 A	29 June 2011	CN 102107391 B	15 January 2014
CN 103878392 A	25 June 2014	CN 103878392 B	20 April 2016
CN 102564336 A	11 July 2012	CN 102564336 B	04 June 2014
CN 1254154 A	24 May 2000	CN 1146866 C	21 April 2004
		US 6123608 A	26 September 2000
		US 6276991 B1	21 August 2001
		JP 2000155921 A	06 June 2000
CN 104907417 A	16 September 2015	CN 104907417 B	21 September 2016
CN 105628611 A	01 June 2016	None	
CN 105021478 A	04 November 2015	None	
US 2009145208 A1	11 June 2009	EP 2065695 A1	03 June 2009
		US 8261600 B2	11 September 2012
		JP 5311983 B2	09 October 2013
		EP 2065695 B1	15 July 2015
		JP 2009128368 A	11 June 2009
JP 01138437 A	31 May 1989	None	

国际检索报告

国际申请号 PCT/CN2017/109913

A. 主题的分类

G01N 19/06(2006.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

G01N; B24B; B23B; B23C; B23D

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称，和使用的检索词（如使用））

CNPAT,CNKI,EPODOC,WPI,USTXT,EPTXT,WOTXT: 磨削，切削，削，磨，划擦，划痕，压痕，凸，突，曲面，弯曲，弧，隆，拱，垫片，薄膜，纳米，长度，深，力，进给，运动，scratch+, scarification, indentat+, grind+, spacer, gasket, shim, film, protuberance, arch+, salient+, boss, protrud+, arc, curve, nano+, length, depth, feed+, mov???, shift+, force

C. 相关文件

类 型*	引用文件，必要时，指明相关段落	相关的权利要求
A	CN 105717002 A (华侨大学) 2016年 6月 29日 (2016-06-29) 说明书第[0060]-[0109]段，图1-12	1-10
A	CN 102107391 A (北京天科合达蓝光半导体有限公司 等) 2011年 6月 29日 (2011-06-29) 全文	1-10
A	CN 103878392 A (天津大学) 2014年 6月 25日 (2014-06-25) 全文	1-10
A	CN 102564336 A (浙江工业大学) 2012年 7月 11日 (2012-07-11) 全文	1-10
A	CN 1254154 A (阿尔卑斯电气株式会社) 2000年 5月 24日 (2000-05-24) 全文	1-10
A	CN 104907417 A (哈尔滨理工大学) 2015年 9月 16日 (2015-09-16) 全文	1-10
A	CN 105628611 A (华侨大学) 2016年 6月 1日 (2016-06-01) 全文	1-10

☑ 其余文件在C栏的续页中列出。

☑ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型：

"A" 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

"E" 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

"L" 可能对优先权要求构成怀疑的文件，或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件（如具体说明的）

"O" 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

"P" 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

"T" 在申请日或优先权日之后公布，与申请不相抵触，但为了理解发明之理论或原理的在后文件

"X" 特别相关的文件，单独考虑该文件，认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

"Y" 特别相关的文件，当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时，要求保护的发明不具有创造性

"&" 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期	国际检索报告邮寄日期
2018年 4月 12日	2018年 5月 23日
ISA/CN的名称和邮寄地址 中华人民共和国国家知识产权局(ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10)62019451	受权官员 耿娜 电话号码 86-(10)-53962385

表 PCT/ISA/210 (第2页) (2015年1月)

国际检索报告

国际申请号
PCT/CN2017/109913

C. 相关文件

类 型*	引用文件，必要时，指明相关段落	相关的权利要求
A	CN 105021478 A (吉林大学) 2015年 11月 4日 (2015-11-04) 全文	1-10
A	US 2009145208 A1 (CSM INSTRUMENTS SA) 2009年 6月 11日 (2009-06-11) 全文	1-10
A	JP 01138437 A (NEC CORP.) 1989年 5月 31日 (1989-05-31) 全文	1-10

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号
PCT/CN2017/109913

检索报告引用的专利文件			公布日（年/月/日）	同族专利			公布日（年/月/日）
CN	105717002	A	2016年 6月 29日	无			
CN	102107391	A	2011年 6月 29日	CN	102107391	B	2014年 1月 15日
CN	103878392	A	2014年 6月 25日	CN	103878392	B	2016年 4月 20日
CN	102564336	A	2012年 7月 11日	CN	102564336	B	2014年 6月 4日
CN	1254154	A	2000年 5月 24日	CN	1146866	C	2004年 4月 21日
				US	6123608	A	2000年 9月 26日
				US	6276991	B1	2001年 8月 21日
				JP	2000155921	A	2000年 6月 6日
CN	104907417	A	2015年 9月 16日	CN	104907417	B	2016年 9月 21日
CN	105628611	A	2016年 6月 1日	无			
CN	105021478	A	2015年 11月 4日	无			
US	2009145208	A1	2009年 6月 11日	EP	2065695	A1	2009年 6月 3日
				US	8261600	B2	2012年 9月 11日
				JP	5311983	B2	2013年 10月 9日
				EP	2065695	B1	2015年 7月 15日
				JP	2009128368	A	2009年 6月 11日
JP	01138437	A	1989年 5月 31日	无			