

2015 年摩擦学国家重点实验室年度报告

2015 年，摩擦学国家重点实验室继续面向学科前沿和国家重大需求开展研究工作，针对超大规模集成电路制造装备、航空制造、高温气冷堆核能装备、高档数控机床、风力发电装备、核聚变装置等国家重大工程中的表面界面问题和关键技术需求，在摩擦、润滑、减磨、延寿等方面开展了大量基础性和应用基础性研究工作，取得了一系列理论成果和关键技术突破。

实验室的主要研究工作集中在以下 5 个方向：（1）摩擦学理论与技术；（2）机械表面/界面科学与性能控制；（3）生物摩擦学与生物机械；（4）微纳制造理论与技术；（5）微纳光电测试理论与技术。一年来，相关方面的研究结果在国内外学术刊物和会议上共发表论文 255 篇，其中 SCI 收录（含网络版 SCI-EXPANDED）论文 195 篇，EI 收录 196 篇，其中在 1 区（JCR 分区）论文 96 篇，影响因子 $IF > 2$ 的论文总数为 91 篇。实验室获发明专利授权 140 项，并且多项研究成果在工程领域获得转化和应用。获省部级科技奖励 2 项：汪家道研究员等获教育部自然科学奖一等奖 1 项（排名 1）；李勇研究员等获 2015 年度中国机械工业科学技术一等奖 1 项（排名 1）。温诗铸教授荣获 2015 年度“国际摩擦学金奖”1 项。此外，陈恳研究员、徐静副研究员等获得国际会议最佳论文奖 2 项。

学术交流方面，实验室于 2015 年成功主办了第六届焊接科学与工程国际会议、The 2nd International Conference on Friction Based Processes、The 2nd Tsinghua-Caltech Workshop on Frontiers of Science and Technology 2015、International Workshop: Fundamental and Applications、第 2 届 XIN Innovation Forum 等会议。实验室的研究人员参加了 2015 IFToMM World Congress、7th China-UK Tribology Symposium on “Tribology in Transportation Systems”、2015 China-Korea Workshop of Diamond-like Carbon Films and Technology、16th Asian Pacific Vibration Conference 等约 30 多个国际会议，并在国内外重要会议上作邀请报告 16 次。

一、研究水平与贡献

1. 承担任务

摩擦学国家重点实验室承担了多项国家重要科研任务，目前在研项目共计 196 项，其中作为课题负责人的项目有 180 项。本年度进校科研经费约 1.01 亿元。主要在研课题包括：国家“973 计划”课题 10 项、“863 计划”课题 0 项、国家科技重大专项课题 3 项、国家科技支撑计划课题 2 项、国家自然科学基金项目 52 项等。2015 年度新增 5 项重要科研任务如下：

序号	课题名称	项目(课题)编号	负责人及单位	起止时间	总经费(万元)	本年度经费(万元)	经费来源	类别	类型	研究方向
1	机械摩擦学与表面技术	51425502	田煜,清华大学	2015/1/1-2018/12/31	400	200	国家基金委	主要负责	国家杰出青年基金	机械表面/界面科学与性能控制
2	带电润滑基础研究	20151710303	解国新,清华大学	2015/7/1-2018/7/1	300	100	中组部	主要负责	中组部千人计划	摩擦学理论与技术
3	异质微结构表面差异性同步去除与晶圆减薄新原理	2015CB057203	刘宇宏,清华大学	2015/1/1-2019/8/31	267	149	科技部	主要负责	973	微纳制造理论与技术
4	水润滑摩擦副结构优化理论与强化机理	2015CB057303	刘莹,清华大学	2015/1/1-2019/12/31	450	118	科技部	主要负责	973	摩擦学理论与技术
5	65nm 双工件台关键技术测试开发	20152001264	朱煜,清华大学	2015/10/20-2019/12/31	3000	1200	北京华卓精科科技股份有限公司	主要负责	横向	微纳制造理论与技术

2.研究工作水平

本年度的代表性研究进展如下:

1) 摩擦学理论与技术

本年度代表性成果:

序号	成果名称	完成人	刊物、出版社或授权单位名称	年、卷、期、页或专利号	类型	类别	研究方向
1	Water transport inside carbon nanotubes mediated by phonon-induced oscillating friction	Ming Ma, François Grey, Luming Shen, Michael Urbakh, Shuai Wu, Jefferson Zhe Liu, Yilun Liu and Quanshui Zheng	Nature Nanotechnology	2015, 10, 692	基础研究	论文	摩擦学理论与技术
2	Origins of hydration lubrication	Liran Ma, Anastasia	Nature Communications	2015, 6:6060	基础研究	论文	摩擦学理论与技术

		Gaisinskaya-Kipnis, Nir Kampf & Jacob Klein					技术
--	--	---	--	--	--	--	----

水在碳纳米管中流动的新机制：水资源危机是人类面临的最重大危机之一。在过去十年间，与纳米流动相关的研究已经在诸多重要领域产生了实际应用，例如海水淡化，纳米级过滤以及基于渗透作用的能量转换。其中，以碳纳米管的研究和应用最为广泛。这些领域均与解决水资源危机息息相关。因此，理解水在碳纳米管中的输运机制具有极其重要的意义。目前为止，尽管理论研究（例如分子动力学）已经在分子层面上揭示了许多该输运现象的相关机制，但是获得进一步的理解却十分困难。经过多年的努力，通过在 IBM 资助和上万名志愿者帮助下完成的海量数据计算和分析，郑泉水教授课题组发现了在流速和壁面阻力之间存在震荡关系。在此基础上，课题组进一步揭示了水在碳纳米管中流动的新机制，即该震荡关系是由水分子的运动与碳纳米管中声子耦合所导致。该机制可以解释许多新奇的现象，例如水在纳米通道里流动，将形成本征的共振；这个本征共振，可大大提高溶在水中的其他元素的扩散（提高 300%）。这项发现，有望解释重要的生物体系输运现象，并指导新的纳米通道设计，如引导新的类型的过滤膜，为解决水资源危机做出贡献。相关成果发表在 Nature Nanotechnology。

亚纳米级水合润滑层能量耗散机制研究：对水合润滑的本质规律展开研究，实现了对亚纳米级水合层行为的直接实验观测；实验获得了高载荷下盐离子水合层 0.0002 的超低摩擦系数；通过研究原子级光滑云母间水合离子所受到剪切力随剪切速率的变化规律，获得了不同载荷条件下的两种水合润滑能量耗散机制，得出水合润滑是一种不同于以往任何润滑模型的新润滑机制；得到较低载荷下水合层呈粘性耗散机制，并以此为基础，成功利用实验手段测得了与理论计算值吻合的钠离子水合层粘度。揭示了水合润滑的内在机制，并为液体超滑的进一步深入研究奠定了基础。相关研究成果发表于 Nature Communications。

2) 机械表面/界面科学与性能控制

序号	成果名称	完成人	刊物、出版社或授权单位名称	年、卷、期、页或专利号	类型	类别	研究方向
1	Spontaneous transition of a water droplet from the Wenzel state to the Cassie state: a molecular dynamics simulation study	Wang J, Chen S, Chen D.	Phys Chem Chem Phys	2015, 17(45):30533	论文	基础研究	机械表面/界面科学与性能控制
2	Indentation pop-in as a potential characterization of weakening effect in coating/substrate	Xiao Huang, Izhak Etsion, Tianmin Shao	Wear	2015, 338-339: 325-331	论文	应用基础研究	机械表面/界面科学与性能控

systems						制
---------	--	--	--	--	--	---

液滴润湿、颗粒聚合过程的界面力学研究：（1）发现了微液滴由Wenzel状态向Cassie状态自发转换的过程，探明其转换机理，获得其实现转换的表面形貌和表面能条件，这种全局最优Cassie状态的存在将极大扩展超疏水表面的应用。（2）发现了乳化液中油滴在固壁形貌表面上的Wenzel, Cassie和Cross三种状态，以及表面结构上水和油两种液体的复合润湿机理。（3）发现了远低于熔点情况下纳米金胶体颗粒间的吸附及聚合现象，探明其表面热力学波动及表面力相互作用的机理。相关成果发表在Physical Chemistry Chemical Physics上。

PVD涂层/基体系统的弱化效应及其对摩擦学性能影响的研究：在PVD涂层/基体系统的弱化效应研究方面，取得了一系列的研究进展。利用基于解析方法的应力场计算，揭示了涂层/基体系统中弱化效应的产生机理。同时，使用球形纳米压痕、聚焦离子束刻蚀、透射电子显微镜等分析手段，直接验证了弱化效应的真实存在。通过测试TiN和TiAlN涂层与纯铜、高速钢、硬质合金基体所组成涂层/基体系统的摩擦学性能，研究了弱化效应对摩擦学性能的影响，发现当涂层弹性模量高于基体材料时，涂层/基体系统的主要破坏形式是基体塑性变形和涂层裂纹，降低涂层与基体间弹性模量差值有利于提高涂层/基体系统摩擦学性能；当涂层弹性模量低于基体材料时，涂层/基体系统的主要破坏形式是涂层自身磨粒磨损，提高涂层硬度有利于提高涂层/基体系统摩擦学性能。通过应力场计算，表明弱化效应的影响因素为涂层与基体弹性模量比值、基体弹性模量与屈服强度比值及摩擦系数等，基于上述影响因素提出了PVD涂层/基体系统的优化设计准则。在考虑弱化效应的基础上，设计并制备了用于不锈钢表面强化的TiN/WC-Co/不锈钢复合涂层系统，实验室测试表明复合涂层系统的承载能力、耐磨损性能显著优于单一的TiN/不锈钢涂层系统，该复合涂层技术已成功应用于工程案例中。相关研究结果本年度在Wear发表系列论文2篇并在7th China-UK Tribology Symposium on “Tribology in Transportation Systems”做邀请报告。

3) 生物摩擦学与生物机械

序号	成果名称	完成人	刊物、出版社或授权单位名称	年、卷、期、页或专利号	类型	类别	研究方向
1	MC3T3-E1 cell response to stainless steel 316L with different surface treatments	Zhang, HY; Han, JM; Sun, YL; Huang, YL; Zhou, M	MATERIALS SCIENCE & ENGINEERING C-MATERIALS FOR BIOLOGICAL APPLICATIONS	2015, 56, 22-29	应用基础研究	论文	生物摩擦学与生物机械
2	Observations and	Zhao, CJ; Wu,	JOURNAL OF	2015, 118(19),	应用	论文	生物摩

	temporal model of a honeybee's hairy tongue in microfluid transport	JN; Yan, SZ	APPLIED PHYSICS	194701	基础研究		擦学与生物机械
--	---	-------------	-----------------	--------	------	--	---------

荧光寿命检测活细胞中的 mRNA 研究: 细胞中的肿瘤相关 mRNA 的表达水平能够为癌症的病程和预后提供重要信息, 因此检测细胞中特定 mRNA 对生物和细胞的研究具有重要意义。我们首次提出利用 nanoflares 这种纳米荧光探针的荧光寿命来检测细胞中特定的 mRNA。制备了靶向乳腺癌易感基因 (BRCA1) 的纳米探针, 并在细胞外实验中对其结构和性质进行了表征。研究表明, 这种纳米探具有一定的稳定性, 并且能够快速灵敏、选择性地检测靶分子, 证明了其用于检测目的基因的可行性。比较了靶向目的基因的 nanoflares 和非靶向目的基因的 nanoflares 处理 MDA-MB-231 乳腺癌细胞后的荧光分子的荧光寿命图像图像, 以及靶向目的基因的 nanoflares 处理敲除了目的基因的细胞的荧光分子的荧光寿命。并将荧光寿命结果与荧光强度的实验结果对比, 两者结果具有高度的一致性, 证明了利用荧光寿命检测细胞内 mRNA 的可行性。由于荧光基团的荧光寿命与荧光强度无关, 因此利用荧光寿命实现靶分子的检测能够排除荧光浓度等人为因素的影响, 消除假阳性结果。与基于荧光强度的检测相比, 基于荧光寿命的检测能够提供更准确可靠检测结果, 具有一定的优越性。相关成果分别在 MATERIALS SCIENCE & ENGINEERING C-MATERIALS FOR BIOLOGICAL APPLICATIONS。

蜜蜂带有刚毛的中唇舌微流体输运机制: 通过扫描电镜和高速摄像机对蜜蜂口器观测发现: 蜜蜂中唇舌表面密布有细长的刚毛; 蜜蜂饮水时由外颚叶、下唇须和中唇舌构成一个微泵, 依靠刚毛收拢一直竖-收拢运动和多关节中唇舌往复运动实现对高浓度蜜水的输运。基于实验结果, 提出了蜜蜂口器输运蜜水的微流量泵物理模型, 分析了蜜蜂饮水过程中刚毛直竖与中唇舌伸缩的运动协调机制以及微流体输运能力, 揭示了蜜蜂中唇舌在高浓度液体输运过程中的减阻机理。蜜蜂饮水机制的发现为开发新型的低能耗微流量泵提供了新的途径。相关研究成果发表于 JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 上。

4) 微纳制造理论与技术

序号	成果名称	完成人	刊物、出版社或授权单位名称	年、卷、期、页或专利号	类型	类别	研究方向
1	Kinematic analysis of in situ measurement during chemical mechanical planarization process	Li, HK; Wang, TQ; Zhao, Q; Meng, YG; Lu, XC	REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS	2015, 86(10), 105118	应用研究	论文	微纳制造理论与技术
2	Kinematic optimal design of a 2-degree-of-freedom 3-parallelogram planar	Liu, XJ; Li, J; Zhou, YH	MECHANISM AND MACHINE	2015, 87, 1-17	应用基础研究	论文	微纳制造理论

parallel manipulator		THEORY				与技术
----------------------	--	--------	--	--	--	-----

CMP 在线检测：基于 CMP 在线测量过程，本文建立了电涡流传感器探头在 300 mm 晶圆表面的测量轨迹模型与方程，同时基于真实工艺参数，全面系统地分析了测量轨迹分布，并进一步探讨了抛光头的摆动，抛光头/盘的转速及其初始角度对测量轨迹的影响及理想测量轨迹的参数条件。由计算结果可知，抛光头的摆动距离决定了晶圆圆心与测量轨迹曲线的最短距离；当抛光头/盘转速相等时，在线测量过程中所有测量轨迹重复为一条曲线；抛光头/盘的初始角度差则决定了测量轨迹的曲线开口。此外，分析了工艺过程中晶圆表面各分区的测量时间波动及相对速度变化，发现了测量速率在宏观上周周期性变化的规律及其在每次测量过程中的先增大后减小的变化特点。相关研究成果发表于 *Review of Scientific Instruments (RSI)*。

机构动力学优化设计研究：提出了机构的优质传递性能指标，并定义了相应的优质工作空间，为机构的性能评价提供了思路。在性能指标的基础上，采用机构空间模型获得了反映机构性能与尺度之间关系的性能指标，然后优化设计了机构的尺寸参数，本论文的研究为啄木鸟行为仿生机构的分析和设计奠定了基础。相关研究成果发表于 *MECHANISM AND MACHINE THEORY*。

5) 微纳光电测试理论与技术

序号	成果名称	完成人	刊物、出版社或授权单位名称	年、卷、期、页或专利号	类型	类别	研究方向
1	Optimization of structure parameters of concentric plasmonic lens for 355 nm radially polarized illumination	Ji, JX; Meng, YG; Zhang, J	JOURNAL OF NANOPHOTONICS	2015, 9, 93794	应用基础研究	论文	微纳光电测试理论与技术
2	High-efficiency 2 J, 20 Hz diode-pumped Nd:YAG active-mirror master oscillator power amplifier system	Fu, X; Liu, Q; Li, PL; Sui, Z; Liu, TH; Gong, ML	APPLIED PHYSICS EXPRESS	2015, 8(9), 92702	应用基础研究	论文	微纳光电测试理论与技术

纳米图案的旋转式近场光刻制造系统与关键技术：针对超高密度硬盘盘片纳米图案高效制造的要求，研制旋转式近场光刻的制造系统并开发其中的关键技术。实现了等离子体飞行头在有机光刻胶表面近场范围内的稳定飞行。利用反应离子刻蚀技术加工得到能够实现 5-50 nm 飞行高度的滑块结构，并在其尾部利用聚焦离子束加工能够实现超强聚束能力的表面等离子体透镜，通过与悬臂梁粘接，得到等离子体飞行头。等离子体飞行头在低表面粗糙度、低弹性模量的有机光刻胶表面的稳定飞行需要借助飞行过渡区。在 2.5 英寸盘片表面全盘旋涂 50 nm 有机光刻胶后，利用丙二醇甲醚醋酸酯的溶解性，将外径的光刻胶

在盘片高转速下溶解并甩离盘片表面，形成无光刻胶区。等离子体飞行头可先在无光刻胶区起飞，然后利用飞行头的自适应飞行特性，随着音圈电机在盘片径向位置的移动，实现在光刻胶表面的稳定飞行，为旋转近场光刻提供加工条件。完成了旋转式近场光刻原型系统研制，并开展了近场纳米光刻实验研究。通过综合调控等离子体透镜结构、飞行高度和光刻胶灵敏度，在 355 nm 连续和脉冲激光照射下，利用此系统在有机光刻胶表面均实现了高分辨（线宽 20~30 nm）、快速（11 m/s）、低成本加工，显示这种纳米加工技术具有工业化应用前景。本工作发表在 JOURNAL OF NANOPHOTONICS 上。

巨脉冲固体激光：基于液体直接冷却动镜结构，成功实现了焦耳级巨脉冲激光放大器。采用无耦合高亮度泵浦设计，提高泵浦传输效率；采用创新的网状致密提取构型，大幅度提高储能提取效率和模式匹配效率；采用高速流体匀化冷却的先进热管理技术，提高散热能力，降低热梯度和热退偏水平。巨脉冲固体激光器成功获得了 20Hz, 2.1J 的调 Q 输出，脉宽 20ns，光束质量 M^2 因子分别为 2.8 和 2.6，脉冲宽度为 15ns。放大系统的斜效率高达 47%，光光效率高达 35%，这是目前国际上已报道的单脉冲能量焦耳量级以上的二极管泵浦激光器所获得的最高光光效率。本工作发表在 APPLIED PHYSICS EXPRESS 上。

二、队伍建设和人才培养

摩擦学国家重点实验室由中心实验室和 5 个分室组成，目前有固定人员 83 人，其中教授/研究员 34 名，副教授/副研究员 40 名，中级职称 6 人。长江学者特聘教授 8 人，国家杰出青年科学基金获得者 9 人，国家优秀青年科学基金获得者 5 人，教育部跨/新世纪人才 12 人。其中，本年度刘辛军获批教育部长江学者特聘教授，刘宇宏获得“国家优秀青年科学基金”资助，吴军荣获中组部“青年拔尖人才”称号，马丽然获批教育部青年长江学者，谢国新荣获中组部“青年千人人才”称号。

刘辛军于 2000 年进入清华大学，2005 年从德国回国在清华大学任副研究员，2011 年升任教授。作为实验室的重点骨干，主要从事先进制造装备设计、机构学与机器人方面的研究工作。2014 年获得国家杰出青年科学基金资助，在机构学领域国际顶级学术期刊《Mechanism and Mechine Theory》、《Journal of Mechanisms and Robotics》等发表 SCI 收录论文 65 篇，SCI 他引 700 余次，出版 Springer 英文专著 1 部，获国家自然科学基金二等奖 1 项、教育部自然科学二等奖 2 项。

三、开放与合作交流

2015 年实验室参加出国讲学、短期工作访问或国际学术会议活动的师生有近 100 人次。实验室固定人员在国内外重要会议上作邀请报告共 16 次，其中雒建斌院士在台北举行的“2015 IFToMM World Congress”会议上作邀请报告；解国新在“第一届土耳其国际摩擦学会议”做 Plenary 报告；马丽然在“2015 年液滴会议”上做邀请报告。

本年度实验室邀请约四十多名国际知名专家学者来实验室访问、讲学和学术交流，其中包括以色列魏茨曼科学院的 Jacob Klein 教授等。实验室在 2015 年度分别与德国西门子

公司、芬兰 KONE Elevators 公司、日本三菱、挪威科技大学、比利时鲁汶大学等企业和研究单位开展合作项目。此外，实验室主办了多次国际学术会议和双边会议，如“The 2nd International Conference on Friction Based Processes”、“第六届焊接科学与工程国际会议”、“第 2 届 XIN Innovation Forum”、“International Wrokshop: Fundamental and Applications”、“The 2nd Tsinghua-Caltech Workshop on Frontiers of Science and Technology 2015”等。会议促进了中国和国际学者在表/界面研究和摩擦学领域的交流合作，在推动学科领域发展方面发挥了重要作用。

本年度实验室举行了首次国际咨询专家会议，8 位国际摩擦学领域的知名专家出席，就实验室的运行和发展提出了建设性的意见和建议。

摩擦学国家重点实验室还面向社会开放公共设备平台。实验室大型仪器设备年度总计对外服务机时近 2 万小时，其中场发射环境扫描电子显微镜、摩擦磨损实验机、原子力显微镜等多台大型仪器设备年单机服务机时超过 2000 小时。实验室全年共接待大、中、小学学生团体参观约 100 人次；企业、社会机构、团体等单位参观访问共计约 200 人次。

四、专项经费执行情况与效益分析

根据科技部 2008 年国家重点实验室科研业务费的使用管理规定，实验室通过自主研究课题继续加大对新兴的研究方向和年轻教师支持。截至 2015 年底，实验室共设立自主研究课题重点课题 24 项，自由探索课题 64 项，重点项目群 2 项和奖励课题（含主任基金）35 项。本年度，资助经费达 550 万元，其中重点课题资助总额达 290 万元。

本年度实验室进一步加强与国内和国际间的开放、交流和合作，通过设立开放课题，支持非重点实验室人员利用实验室开放平台进行摩擦学研究工作。今年，共有来自 20 余所高校和单位的科研人员提出 11 项开放课题重点项目和 15 项自由探索项目的申请。经实验室学术委员会审核批准，本年度开放课题共设立 8 项重点课题和 10 项自由探索课题。资助经费合计 88 万元，其中重点课题的资助总额 55 万元。

2015 实验室对正在执行和结题的自主研究课题与开放基金项目进行了考核。本年度结题的自主研究课题和开放课题均已完成了任务书所规定的研究内容，部分取得了重要理论研究进展和应用研究成果，但需要加强系统集成和成果申报。大多数在研项目根据项目计划书进展顺利，部分已取得了一定的研究成果，需要依据计划书进一步深入开展研究。

五、依托单位的支持

摩擦学国家重点实验室依托清华大学，挂靠在机械工程系。依托单位对实验室的人事调整、固定资产和财务工作进行统筹管理。2015 年度，在实验室设备采购的过程中，清华大学设备处在严格执行有关采购程序的前提下，提供了高效的设备采购服务，包括对招标、

谈判等关键环节严格把关，为实验室争取最优价格，并在水外贸进口、海关手续办理等环节积极协调，这为实验室顺利完成设备采购提供了有力支持和保障。

实验室管理工作也得到了机械工程系的大力支持，系领导非常关心和重视实验室的安全运行，对实验室工作进行了多次督导和检查，确保了科研工作安全有序进行。为加强安全管理工作，系里还为实验室增设夜间值班岗位，并实现和机械系的安全统筹管理，为实验室的运行提供了有力支持和保障。

类别	2015 年度	2016 年度	增长数	增长比率
专职管理人员（个）	1	1	0	0
专职技术人员（个）	4	4	0	0
硕士研究生招生（个）	45	50	5	11.1%
博士研究生招生（个）	47	52	7	14.9%
单位配套运行费（万元）	0	0	0	0
单位配套设备费（万元）	0	0	0	0
实验室总面积（平米）	3820	3820	0	0
实验室总资产（万元）	9574.6	12029.0	2454.4	25.6%