



从“0-1”，敢为人先——纳米能源所建所十年科研成就综述

中国科学院北京纳米能源与系统研究所(以下简称“纳米能源所”)是中国科学院与北京市人民政府于2012年围绕引进王中林院士及其科研团队而联合共建的新型科研单元。2018年,纳米能源所被北京市列入首批建设世界一流新型研发机构的支持名单。建所11年来,在中国科学院和北京市及有关部门的支持下,纳米能源所坚持从“0-1”的研究,致力于原始创新,围绕纳米能源与纳米自驱动系统这个核心领域,布局了一棵树的发展蓝图和学科布局。在这棵树形的学科发展图上,学科树的根基和主干是基于动生麦克斯韦方程组理论的纳米发电机技术及基于压电电子学、压电光电子学、摩擦电子学等学科的第三代半导体。发展十余年来,这个大树已逐步长成参天栋梁之材,枝繁叶茂,硕果累累。目前,该研究所已经成为全球纳米能源、纳米自驱动系统、基于压电的半导体器件研发的主要创立者和引领者。

党的十八大以来,党中央高度重视科技创新,坚持把科技创新摆在国家发展全局的突出位置。1月31日下午,习近平总书记在主持中央政治局第二次集体学习时指出:要加快科技自立自强步伐,解决外国“卡脖子”问题。健全新型举国体制,强化国家战略科技力量,优化配置创新资源,使我国在重要科技领域成为全球领跑者,在前沿交叉领域成为开拓者,力争尽早成为世界主要科学中心和创新高地。如今,在中国科学院和北京市的坚实领导与支持下,纳米能源所已经成为在纳米能源、纳米自驱动系统研究领域的全球领跑者,在纳米科技、纳米能源研究这个重要的前沿交叉学科成为开拓者。

纳米能源所的成功是我国发挥体制优势,建立和培育确系原创、全球领先并掌握主要知识产权的某一科技领域的典型案例。在纳米能源所建所十周年之际,我们较全面地推介该所及其科研成就,为如何加速提高科研机构的原创能力提供借鉴,以飨读者。

1 创立“一棵树”的发展蓝图,坚持原始创新、主线发展

用“一棵树”来展现研究布局是王中林院士2010年首创的一种模式:树有根系,代表学科有深厚的科学原理与理论;树有年轮,代表建立一个领域或学科要多年的发展与培育;树有主干,代表该领域是有基本科学原理原创的主线;树有枝叶,代表学科有多方面的重要应用领域;树是向上生长的,代表学纳米能源所是科研主线引导下的自由发展式科研模式;树有果实,代表纳米能源所的科研成果枝繁叶茂、硕果累累(图1)。

这颗学科树已成为纳米能源所标志性的科研图腾。树根就是基于动生麦克斯韦方程组理论的纳米发电机技术和压电电子学、压电光电子学及摩擦电子学等学科理论。树干代表着基于纳米发电机技术的纳米能源、纳米自驱动系统和基于压电(光)电子学的第三代半导体技术。树枝树叶和果实,代表着上述原创理论和技术在复合能源、海洋蓝色能源、自驱动传感、物联网传感器、半导体器件、医疗健康、环境保护、人工智能等重大领域的应用和重大成果。如今,该所的相关原创成果已经开始应用到一些重大科技需求和关键技术领域的攻关方面。纳米能源所的原创技术具有极

引用格式: 王中林, 李伟. 从“0-1”, 敢为人先——纳米能源所建所十年科研成就综述. 中国科学: 技术科学, 53, 53
Wang Z L, Li W. From “0 to 1” and being the pioneers of innovation - A review of ten years of scientific research achievements of Beijing Institute of Nanoenergy and Nanosystems (in Chinese). Sci Sin Tech, 53, 53, doi: 10.1360/SST-2023-0042

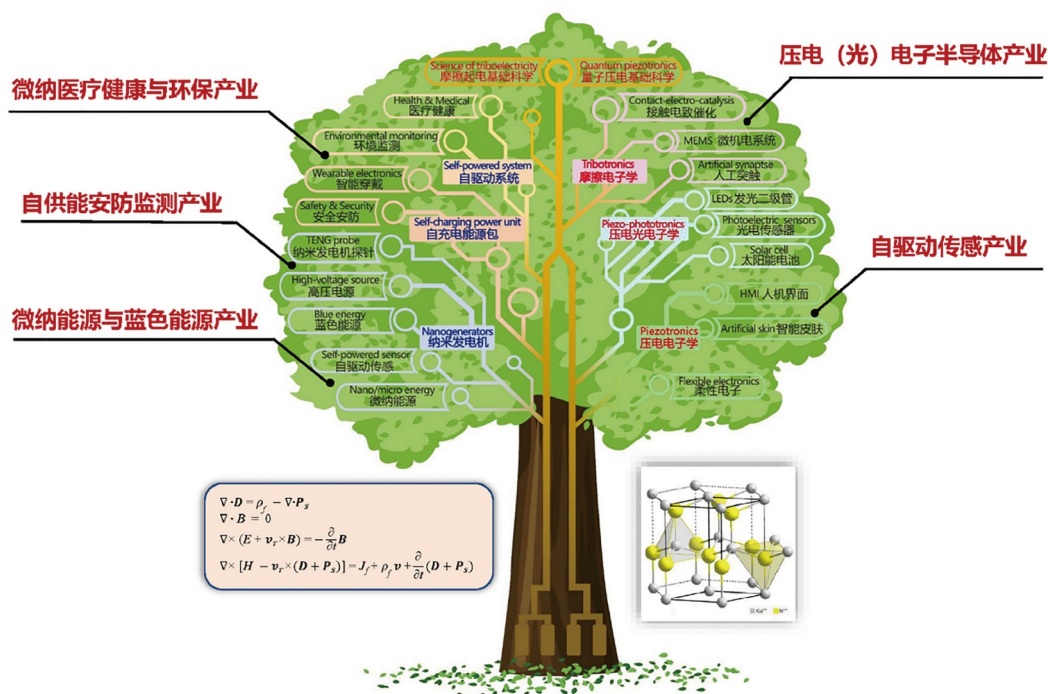


图1 纳米能源所的“一棵树”的发展理念与蓝图

强的产业应用前景，至少可在微纳能源与蓝色能源产业、自驱动传感产业、微纳医疗健康与环保产业、自供能安防监测产业、压电(光)电子半导体产业等方面带来可预期的前景。

可以说，纳米能源所的原创技术对现代工业、科技和人们生产生活来说，是一个横切面式的技术，我们相信在不久的将来将广泛影响每个人的生活。

2 建立起基于纳米发电机技术的纳米能源领域和高熵能源体系

十多年来，王中林院士带领纳米能源所取得了诸多世界一流的成就。这些成就可以概括为1-2-3-4-5-6-7. 具体如下。

建立1个全新的研究体系——基于纳米能源的高熵能源与新时代能源体系(高熵能源是指散落在环境中的低密度、低质量、碎片化的机械能和热能，并可通过纳米发电机收集转换为电能)(图2)。 **开创2个研究领域**，即基于纳米发电机的自驱动系统与蓝色能源宏大领域，基于压电电子学与压电光电子学效应的第三代半导体的崭新领域(图3)。 **创立3个国际公认的学科：**

压电电子学、压电光电子学和摩擦电子学。 **研发出4项核心技术：**微纳能源、自驱动传感与系统、蓝色能源、微型高压电源。 **奠定5大产业方向：**微纳能源与蓝色能源产业、自驱动传感产业、微纳医疗健康与环保产业、自供能安防监测产业、压电(光)电子半导体产业。 **发现6个新的物理效应，**即压电电子学效应、压电光电子学效应、压电光子学效应、摩擦伏特效应、热释光电子效应和交流光伏效应。 **作出7个方面的具体科学贡献：**(1) 初步建立了动生麦克斯韦方程组(Maxwell equations for a mechano-driven slow-moving media system)，奠定了纳米发电机的理论基础，开启了非惯性系中麦克斯韦方程组在能源与传感领域应用的新篇章；(2) 统一了摩擦起电(接触起电)的物理模型，明确了跨原子间电子转移与跃迁的接触起电的根本机理，解决了“摩擦起电的机理”这一已有2600年历史的科学问题；(3) 提出并验证了跨原子电子转移是气体-液体-固体多相间接触起电的普适性机理，并首次提出接触起电所致的界面光谱学与接触电致催化化学；(4) 确定了液体-固体接触中界面电子转移的过程，并提出形成双电层结构的两步走机理模型，即先是电子转移，然后是离子吸附；(5) 系统发展了声子散射在高能电子衍射

与成像中的动力学理论，提出了高角度环形暗场扫描透射电子显微镜(HAADF STEM)成像模拟理论；(6)发现了称量单个纳米颗粒质量的方法，开创了电子显微镜原位纳米测试技术；(7)发现氧化物纳米带，开启了研究氧化锌纳米结构的历程。

3 做出了具有世界一流水平的科研成果与科学贡献

纳米能源所是国际纳米能源、纳米自驱动系统领域和基于压电电子学的第三代半导体技术的主要创立者、推动者和引领者。截至2022年底，全所已经有近700人的科研团队，初步形成了以王中林院士为首、在本领域具有一流水平的全职的高端人才队伍。目前，该所围绕纳米能源、自驱动系统、第三代半导体等三个主干方向，在微纳能源、海洋蓝色能源、复合能源、海洋蓝色能源、海上物联网、自驱动传感器件、自驱动(自充电)器件及其在微电子系统、人工智能、电子皮肤、第三代半导体等领域的应用，取得了一系列重大成果。

(1) 在纳米能源领域的主要成果。基于纳米发电技术的高熵能源研究是该所的主干研发领域。目前，纳米能源所研发团队不断开发出高性能的摩擦纳米发电机(TENG)，如采用接触分离模式摩擦纳米发电机并抑制空气击穿效应并通过复合材料优化设计将电荷密度提升到新的里程碑高度，TENG的最大功率密度可以进一步提升10倍以上，从而为低成本连续制造高性能TENG及其广泛应用于国家能源发展奠定了基础。再如，在海洋蓝色能源研发方面，研发团队设计了蜂窝式多层立体结构发电单元组，每立方米阵列峰值功率密度达到76.7 W，成功驱动航标灯工作，并成功实现了给大容量的商用磷酸铁锂电池充电，为TENG技术高效收集海洋蓝色能源、海洋航标供电和海上物联网领域的实际应用奠定了重要基础。在能量存储技术方面，制备出的一种超薄的能量采集与存储系统，其体能量密度接近锂离子薄膜电池，体功率密度接近超级电容器，与TENG相结合，集成器件(包含封装层)的整体厚度控制在200 μm 以内，为发展新型电池和储能技术，特别是收集储存高熵能源上，提供了新的技术选择。

(2) 在自驱动传感领域的主要成果。TENG在传感器件领域发展前景广阔。例如，在可植入式医疗器件研

究方面，十年磨一剑，取得了自驱动心脏起搏器技术攻关胜利，该所科研团队已经研制出新一代、真正意义上的自驱动心脏起搏器——共生型心脏起搏器(SPM)，SPM在每次心动周期所收集的能量已经超过了起搏人类心脏所需要的能量。在安防监测领域，研发团队设计了适合于工业环境微幅振动条件下的振动摩擦纳米发电机，完全实现对振动设备的无线温振监测，该成果为TENG技术在工业振动设备监测和工业物联网领域的实际应用奠定了重要基础。在密码应用领域，该所研发的基于TENG智能键盘，让传统密码增加了一个立体维度，可记忆主人输入密码时的力度和速度等习惯，使力度和速度成为密码的一部分，即使密码被盗其他人也无法通过输入密码实现开机。在自供电可穿戴织物技术方面，王中林院士团队通过从人类的身体和生活环境中获取能量，为微纳米系统提供可持续的自给自足的电源，并将其应用于个人/移动电子产品、医疗保健/科学、环境/基础设施监测和其他相关领域。这是目前世界范围内一个非常有吸引力的研究领域。

(3) 在半导体器件领域的主要成果。王中林院士团队先后发现了压电电子学、压电光子学和压电光电子学三个物理效应，并围绕这三个新的物理效应创立了压电电子学、压电光子学和压电光电子学三个新的学科。压电(光)电子学效应(上述三个物理效应的统称)最主要的用途就是在第三代半导体技术和未来信息科学技术的应用方面。该效应的发现，不仅极大地丰富了传统半导体物理学，而且将变革第三代半导体关键器件的设计理念及制造技术。该效应已成为目前纳米科学和信息技术的重要前沿和竞争热点，引起了国际学术界和企业界的广泛关注。

第三代半导体中的压电(光)电子学效应提供了环境与电子设备无缝、实时、准确的相互作用的新途径，在触觉传感器、与硅基技术相连的人机界面、微电子系统、纳米机器人等领域同样具有重要的应用前景，是后摩尔时代信息技术最重要的发展方向之一。压电(光)电子学大大促进了高灵敏、高集成的仿生触觉感知技术的研发。纳米能源所研发了一种大尺寸、柔性、三维压电电子学晶体管阵列，还提出利用压电光电子学构建力-电-光耦合的触感成像人机界面。这种全新的触感成像技术独辟蹊径地开拓了一条人机界面新途径，极大推动人机界面感知功能达到甚至超越生体感知能力，在电子皮肤、手写签章、生体成像、光

机电耦合系统等领域有重大的应用前景. 例如, 该所构建了一个刷新纪录的高性能摩擦电子晶体管阵列, 可进一步推动人机界面、AI系统与智能传感领域的技术发展, 为机械行为驱动的电子终端、交互智能系统、人造皮肤等提供了有效的研发平台.

(4) 在基础学科理论方面的主要成果. 在致力于微纳能源与传感领域科技创新的同时, 王中林院士带领团队不断探索相关物理领域的理论发展和创新.

(i) 建立摩擦起电机理及纳米发电机理论框架. 2017年, 王中林院士拓展了位移电流的表达式, 在电位移矢量中首次引入由于机械运动而产生的 P_s 项, 即动生极化, 用来推导纳米发电机的输出功率. 2019年, 他推导出纳米发电机的输运方程, 即 P_s 项的解析表达式, 以及不同负载下纳米发电机的输出功率和空间电磁场分布及其辐射的通用表达式, 同时给出摩擦纳米发电机4种模式的解析解, 奠定了纳米发电机的整体理论构架, 形成该领域发展的基本理论基础.

(ii) 提出动生麦克斯韦方程组的相关理论. 着眼于工程的实际应用, 经过不断深化研究, 王中林院士已经明确推导出动生麦克斯韦方程组理论区别于传统麦克斯韦方程组的4个主要方面: 1) 加速运动的非惯性系与匀速直线运动的惯性系; 2) 包括费曼提出的“反通量法则”例子的电磁理论与不包括“反通量法则”情况的电磁理论; 3) 多个运动介质的电动力学问题与单个运动介质的电动力学问题; 4) 全场(近场+远场)电动力学与远场电动力学. 目前的一些实验已经证明了构建动生麦克斯韦方程组的必要性, 该方程组的科学意义和潜在技术应用需要进一步的实验验证和深化.

(iii) 建立了多相间界面电子转移的物理模型. 证明了固体-固体、液体-固体、液体-液体以及气体-固体多相间接触起电的主要机理为电子转移, 并丰富了界面电子转移理论, 为双电层的形成及其相关领域, 如机械化学、电催化、电化学存储、电泳以及液固摩擦纳米发电机, 提供了新的见解. 由此首次发现了摩擦伏特效应及其机理.

(5) 建立起本领域立体化的学术平台和阵地. 纳米能源所发起的“纳米能源与纳米系统国际学术会议”(在国内举办)和“纳米发电机与压电电子学国际学术

会议”(在国外轮办)均已举办5届和6届, 现场参会人数分别达到1200和600人, 成为纳米能源与纳米系统学术领域的重要国际会议. 王中林院士创立的*Nano Energy*期刊影响因子达到19.06 (2022年10月数据), 成为纳米能源领域的高引期刊, 并在全球774个材料学期刊中位列第5位(Research.com数据).

(6) 坚持产业与科研并重, 推动成果既要上书架子, 又要上货架子. 纳米能源所坚持研究成果“既要上书架子, 又要上货架子”和“敢为人先、创新为民”的理念, 积极推进成果转化与产业化工作. 目前, 上述研究成果已经获得发明专利百余件, 推动实施“自驱动智能水表产业化关键技术研究”、“采用摩擦纳米发电机的智能康复支具”、“人机界面的智能键盘”、“心脏起搏器的自驱动”、“中医数字化的脉搏传感与分析系统”等20余个产业化专项, 成立了“北京中科纳清科技股份有限公司”、“北京中科启林科技有限公司”等6家孵化企业. 中科纳清公司是以摩擦电空气净化技术为基础转化的企业, 目前该企业具有空气净化、消毒杀菌的全新风系统, 已与世界500强企业合作, 生产的新产品已应用于北京地铁, 助力地铁防疫. 随着纳米能源与自驱动传感技术在全球的进一步发展, 相关产业应用也将更多地呈现在人们的面前.

4 纳米能源所在科技领域与日增强的国际影响力

纳米能源所在国际科技领域的影响力不断增强, 体现在多方面.

(1) 首席科学家王中林院士在世界材料学、能源领域和纳米科技领域具有独特的影响力. 他是国际公认的纳米科技领域领军型科学家和纳米能源研究领域奠基人, 国际能源领域的著名科学家. 王中林院士在多个国际科研大数据排名中位列前列. 根据世界科学期刊最大出版商Elsevier与美国斯坦福大学在2022年10月公布的数据, 王中林院士在世界横跨所有领域前10万科学家终身科学影响力排第3名, 2021、2020、2019三个年度科学影响力排第1名¹⁾. 2022年11月国际知名科技数据网站Research.com发布数据, 王中林院

1) <https://elsevier.digitalcommonsdata.com/datasets/btchxktzyw/4>

士在材料学领域排名第1，全科排名第9位²⁾。根据2022年12月Google Scholar最新数据，王中林教授论文被引数超36万次，标志影响力的H指数是290，在全球纳米科技和材料领域排世界第1名。此外，微软学术官网在2019年公布的1929年以来材料与工程领域100万学者排名中，王中林获得5项指标中的3项世界第1名。王中林院士还是国际纳米能源领域著名刊物*Nano Energy* (最新IF: 19.06)的创刊主编和现任主编。

王教授凭借在微纳能源和自驱动系统领域的开创性成就，先后获得18项国际科技大奖，包括2019年爱因斯坦世界科学奖(Albert Einstein World Award of Science)、2018年世界能源与环境领域最高奖——埃尼奖(Eni Award)，此两项大奖均为华人科学家首次获得，以及2015年有“诺贝尔奖风向标”之称的汤森路透引文桂冠奖，此外还包括2011年美国材料学会奖章、2014年美国物理学会詹姆斯·马克瓦迪新材料奖等。

(2) 纳米能源与纳米系统领域已被多个国内外权威机构认可。2022年6月17日，由欧盟和俄罗斯共同设立的全球能源协会(Global Energy Association)发布的年度报告《未来十年能源领域的十大突破性构想.2022》中，以摩擦纳米发电机为核心的高熵能源技术入选其中。2022年12月15日，在中国工程院、科睿唯安公司与高等教育出版社联合发布的《全球工程前沿2022》报告中，摩擦纳米发电技术入选该报告中的机械与运载工程领域前10大工程研究前沿问题，并排序在第三位。本年度两次入选国际重要评估报告，进一步体现了国内外能源界、产业界与工程界对我们创立的纳米能源领域的高度认可，体现了在工程和工业领域的巨大应用前景。2022年12月27日，中国科学院与科睿唯安联合发布的《2022研究前沿》报告中，遴选和展示了11大学科领域中的110个热点前沿和55个新兴前沿。纳米能源所原创的基于摩擦纳米发电机的自供电可穿戴织物技术，入选化学与材料科学领域十大热点前沿。

(3) 纳米能源与纳米系统领域在全球的拥趸和跟随者越来越多。截至2022年12月25日，根据对WOS进行文献梳理，有83个国家和地区，超过1500个科研机构或单元，12000余名研究人员参与纳米发电机相关研究。全国50余个高校和科研机构设立纳米发电机相关的研究单元。自2019年开始，美国可再生能源国家实验室(National Renewable Energy Laboratory)和美国西北太平洋国家实验室(Pacific Northwest National Laboratory)两家美国的国家级能源实验室正式将王中林院士创立的纳米能源相关方向列入实验室研究方向，并建立研究单元。在另外一个原创领域——压电电子学研究方面同样呈现出生机勃勃的发展态势。据不完全统计，目前全球有40多个国家，400多个研究单元，近4000人在跟随纳米能源所开展压电(光)电子学的相关研究。美国、韩国、新加坡以及欧洲等数十个国家和地区相继开展了该方向的研究和探索，美国Sandia国家实验室将其列为在后场效应三极管(FET)时代与量子电子学、自旋电子学等平行的新生关键技术。

5 结语

当前，纳米能源所正在围绕海洋蓝色能源、复合型分布式能源、微纳自驱动传感、基于压电电子学的第三代半导体等多个重点方向和领域展开技术攻关，这些原创性成果将广泛应用于能源、物联网、传感、医疗、安防、通信、人工智能、化学催化等多个领域，也将会有更多的技术成果实现产业化，将在多个方面改变人们的生产生活。



王中林^{1,2}，李伟^{1,2}

1. 中国科学院北京纳米能源与系统研究所，北京 101400
2. 中国科学院大学纳米科学与技术学院，北京 100049

2) <https://research.com/scientists-rankings/materials-science>