

文章编号: 2095-4980(2021)04-0747-06

## 微纳米分子系统研究领域的最新进展 ——IEEE NEMS 2021 国际会议综述

黄 锴, 龚 雪, 文丹良, 张晓升\*

(电子科技大学 电子科学与工程学院, 四川 成都 611731)

**摘 要:** 2021年4月25~29日, 由厦门大学、北京大学、电子科技大学联合举办的第十六届IEEE国际纳米/微米工程及分子系统大会(IEEE-NEMS 2021)于福建厦门顺利召开, 共有来自全球各地的500多名微纳米科技领域专家学者与会分享最新研究成果。本文从纳米生物技术与纳米医学、微纳米传感器/驱动器和系统、纳米材料、微纳米与分子制造等4个角度介绍本次大会所展现的最新成果, 并总结展望未来微纳米技术的发展趋势。

**关键词:** IEEE 国际纳米/微米工程及分子系统大会; 纳米材料; 纳米技术; 微纳机电系统

**中图分类号:** TB383

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA2021302

### Overview of IEEE NEMS 2021

HUANG Kai, GONG Xue, WEN Danliang, ZHANG Xiaosheng\*

(School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 611731, China)

**Abstract:** 2021 IEEE International conference on Nano/micro Engineered and Molecular Systems (IEEE-NEMS 2021) was held jointly by Xiamen University, Peking University and University of Electronic Science and Technology of China(UESTC) in Xiamen, China during April 25–29, 2021. More than 500 scientists world-wide participated in the conference to share the latest research results. In this review, the current research in nanobiology and nanomedicine, nano/micro sensors/drivers/systems, nanomaterials, nano/micro/molecular manufacturing were introduced. And finally, we summarized and forecasted the development trends of nano/micro technology in the future.

**Keywords:** IEEE-NEMS 2021; nano materials; nano technology; MEMS/NEMS

#### 1 会议概况

IEEE-NEMS 系列会议是国际电气与电子工程师学会(IEEE)旗下聚焦微米、纳米及分子系统领域的一项传统学术盛会, 其每年都会汇聚国际 MEMS 学界和业界的顶尖专家学者, 分享提供 M/NEMS、纳米技术和分子技术等最新研究成果。自 2006 年第一届 IEEE-NEMS 会议于珠海召开以来, 历经 15 年, IEEE-NEMS 已在曼谷、三亚、深圳、厦门、高雄、京都、苏州、夏威夷、西安、松岛湾和仙台、洛杉矶、新加坡等全球多座城市举办, 在微纳米及分子系统领域有着一定的学术影响力。



Fig.1 IEEE-NEMS 2021  
图 1 IEEE-NEMS 2021

收稿日期: 2021-08-11; 修回日期: 2021-08-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62074029; 61804023; 61971108); 四川省科技资助项目(2020ZHCG0038; 2019YJ0198; 2020YJ0015); 中央高校基本科研业务费资助项目(ZYGX2019Z002)

作者简介: 黄 锴(1998-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为微纳能源采集. email: hk806569446@163.com

\*通信作者: 张晓升 email: zhangxs@uestc.edu.cn

第十六届 IEEE-NEMS 会议于 2021 年 4 月 25~29 日在厦门召开<sup>[1]</sup>(见图 1), 此次会议共吸引全球 500 多位专家学者参与, 经由 90 名专家组成的技术委员会筛选, 共有 515 篇论文摘要被收录, 其中包含 174 篇口头报告以及 341 篇海报展示, 此外会议还组织评选出最佳会议论文、最佳学生论文、最佳海报展示以及 Chih-Ming Ho 最佳论文奖。此次 IEEE-NEMS 会议由厦门大学、北京大学、电子科技大学等多家机构联合举办, 大会主席为北京大学张海霞教授, 大会共同主席为厦门大学孙道恒教授, 技术委员会主席由厦门大学侯旭教授担任。同时, 今年正值会议举办地厦门大学建校 100 周年, 为纪念微纳传感器领域的先驱者以及厦门大学的优秀校友葛文勋教授, 会议还举办了专场纪念会, 并颁发首届葛文勋奖学/奖教金。由于全球新冠疫情的限制, 本次会议还为无法现场参会的人员准备了在线直播。

## 2 技术概述

IEEE-NEMS 2021, 从 4 月 25~29 日, 历时 5 天, 包括大会特邀报告、主题邀请报告、分专题口头报告以及张贴海报等内容。本次大会主题涵盖: 微纳米机电系统; 微纳米与分子制造; 纳米材料; 纳米光子与纳米级成像; 纳米级机器人、装配和自动化; 分子传感器、驱动器和系统; 微纳米流体; 微纳米力学; 纳米生物技术与纳米医学; 柔性及弹性器件及其应用; 纳米电磁系统产业化; 微纳米器件热科学和能量损耗问题; 能量转换和存储; 纳米生物界面; 微纳米孔道; 微纳与分子技术发展趋势等 16 个专题。

作为 IEEE-NEMS 会议的一大特色, 会议每年都会邀请全球各个领域的顶尖科学家做大会特邀报告(见图 2)。今年会议邀请到的嘉宾有: 1987 年诺贝尔化学奖得主 Jean-Marie Lehn; 2010 年诺贝尔物理学奖得主 Kostya S. NOVOSELOV; 2016 年诺贝尔化学奖得主 Jean-Pierre Sauvage; 中国科学院院士江雷; 中国科学院院士孙世刚; 美国艺术与科学学院院士 Paul S. Weiss; 新加坡工程院院士洪明辉; 澳大利亚科学院院士 Chennupati Jagadish; 哈佛大学教授 Joost J. Vlassak; 香港城市大学教授 Alex Jen 等顶级科学家。此外, 会议还邀请到 29 位专家学者进行主题邀请报告, 另有 121 位知名教授做分专题的邀请报告。会议报告现场, 不同专业背景的国内外参会专家代表针对 M/NEMS、纳米技术和分子技术的前沿研究进行了激烈的讨论, 推动了微纳米加工领域的进一步交叉融合。



Fig.2 Plenary speakers  
图 2 大会特邀报告人

## 3 突破性进展

从本次会议的交流热度来看, 最近几年的突破性进展主要集中在纳米生物技术与纳米医学、微纳米传感器/驱动器和系统、纳米材料、微纳米与分子制造等四个方面, 下面将重点介绍本次 IEEE-NEMS 大会这几个领域取得的成果。

### 3.1 纳米生物技术与纳米医学

纳米技术的不断发展同时推动生物医学的进步, 应用于生物医疗领域的纳米材料与器件也逐渐成为微纳米工程领域的研究热点。由于微纳米加工技术制备的器件具有体积小, 功耗低, 成本低以及生物兼容性好等优势, 已广泛用于生物检测、药物运输以及人造器官等先进生物医学领域, 有望在未来维护人类生命健康的医疗系统中发挥重要作用。

近年来, 微针给药系统取得了极大的发展, 未来可取代传统的皮下注射给药, 为患者提供无痛给药治疗。东京大学 Beomjoon Kim 教授研发了多种可用于药物传递的微针贴片, 采用模具<sup>[2]</sup>(如图 3 所示)制备生物可降解微

针结构，再通过传感器层分析微针提取的液体，可检测血糖等物质浓度，为广大糖尿病患者提供一种微创连续血糖监测方案。

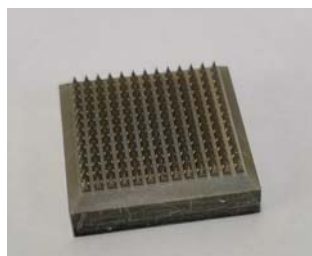


Fig.3 Micro needle mould  
图 3 微针模具

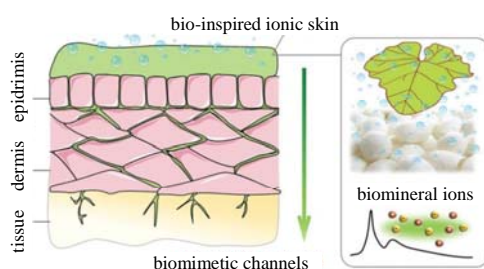


Fig.4 Bionic ionic skin  
图 4 仿生离子皮肤

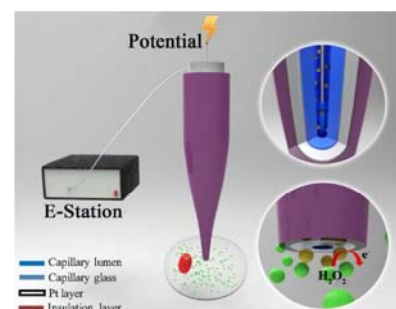


Fig.5 Nanokit for single-cell electrochemical analysis  
图 5 单细胞分析试剂盒

在生物离子通道中，离子的高速传输(每个通道每秒  $10^7$  个离子)是源于离子通道的小尺寸、结构、表面电荷分布等特殊性质，最终导致通道中的离子与分子可以以单链的形式进行超快传输。中国科学院院士江雷教授基于生物离子通道中的单链传输方式，首次提出了“量子限域超流体”这一概念<sup>[3]</sup>，并将孔道内离子与分子的有序超流称为“量子隧穿流体效应”，同时发现该“隧穿距离”与“量子限域超流体”的周期一致。近期的研究也证实，在人工仿生的离子和水高速传输通道上，确实存在“量子限域超流体”这一现象，这一技术概念将对生物、化学等领域的研究带来新的启示。

仿生智能皮肤逐渐成为生物材料研究的一大热点，在众多仿生皮肤策略中，基于水凝胶以及离子弹性体的离子皮肤在透明度、拉伸性、复合感知、可回收等方面呈现出明显的优势。东华大学武培怡教授在 IEEE-NEMS 大会上介绍了一种采用天然蚕丝蛋白和甜菜碱类似物等保湿因子组成的水凝胶仿生离子皮肤<sup>[4]</sup>(见图 4)，其可在生物皮肤表面构筑物质传输通道，实现小分子药物的无创定向传输。此类具有诊疗功能的新一代离子皮肤，将为便携式可穿戴智能医疗系统的开发提供一条新路径。

单细胞分析可以准确、全面地反映细胞的生理状态等信息，对生命科学的研究和重大疾病的早期诊断具有重要意义。目前单细胞分析主要通过设计特定识别探针来完成对细胞内生物分子的检测，但由于单细胞存在分子种类多、分子含量低、细胞体积小等特点，要实现单个活细胞重要生物分子的高灵敏、高特异、高通量分析仍存在很大的测量难度。南京大学江德臣教授介绍了一种“单细胞试剂盒”<sup>[5]</sup>的新型细胞分析方法(见图 5)，即在微纳尺度上建立了通用性强、通量高、可测量单细胞及细胞器内生物分子含量和活性的“单细胞试剂盒”，有望成为未来新一代单细胞分析仪器。

### 3.2 微纳米传感器/驱动器和系统

微纳米传感器/驱动器和系统一直是微纳分子工程研究的热点，探索如何缩小传感器/驱动器以及整个系统至微纳尺度需要电子、机械以及材料等多学科领域科研人员的共同努力。随着微纳加工技术的不断发展，微型机器人、微型传感器等微型器件逐渐成为现实，其有望给医学、微机电等领域带来革命性的突破。

无线小型医疗机器人可在体内进行非侵入式的医疗操作，德国马克斯普朗克智能系统研究所的 Metin Sitti 教授介绍了一种结合磁力与光学驱动微型机器人<sup>[6]</sup>(见图 6)，光驱动部分适用于工作在浅层透明的环境之中，而磁驱动的特性则使其可在非透明组织内仍具有高可控性。上海微系统与信息技术研究所李昕欣教授团队开发了一种基于 ZnO 纳米线的气体检测传感器<sup>[7]</sup>，器件整体集成在微型芯片中，可以检测微量  $H_2S$  气体。纳米尺寸效应的存在既影响  $H_2S$  引入时的硫化反应，又影响  $H_2S$  气体从空气中去除时的脱硫反应，这一特性使得该微型  $H_2S$  检测芯片具有极高的检测灵敏度。

随着电子科学技术的飞速发展，电子设备逐渐趋向于微型化、智能化以及集成化，这直接推动了智能可穿戴设备的进一步应用。然而，对于可穿戴设备仍有两个关键的问题需要解决：能源的可靠可持续供给以及多功能一体化集成。电子科技大学张晓升教授团队针对这些问题，提出了“全集成自驱动微系统”的解决方案<sup>[8-9]</sup>，采用摩擦电、压电、热释电等多种微纳能源持续供给微系统以实现主动式感知传感(见图 7)，是解决穿戴式电子器件能源可持续供给问题以及多功能集成化最有希望的有效途径之一。

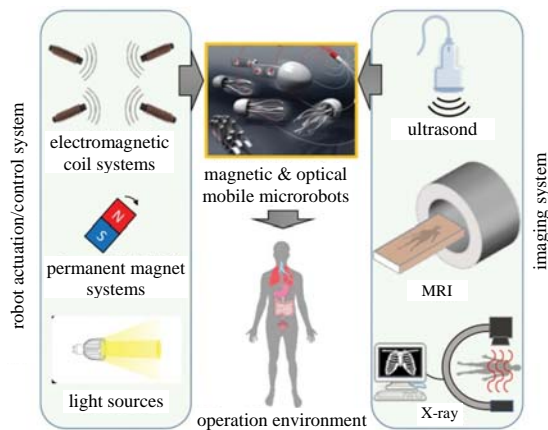


Fig.6 Mobile microrobot systems  
图 6 移动微型机器人

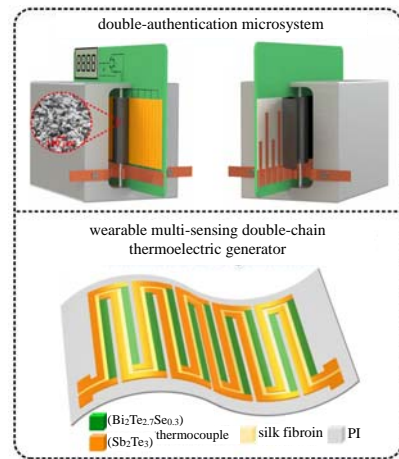


Fig.7 Self-powered microsystem  
图 7 自驱动微系统

### 3.3 纳米材料

纳米材料相比于宏观材料具有高表面效应、小尺寸效应和量子隧道效应等特殊性质,因此有异于普通材料的光、电、磁、热、力学、机械等优异性能。

太赫兹波段包括一个很宽的电磁频谱,涵盖了微波至红外光,广泛用于安检、通信、质量控制和医学成像等,同时也是基础科学研究的强有力工具。澳大利亚科学院院士 Chennupati Jagadish 在特邀报告上介绍了一种基于纳米技术的半导体太赫兹探测器<sup>[10]</sup>(见图 8),相比于其他太赫兹探测器只对一个偏振分量敏感,该探测器采用纳米线网络结构,可以记录太赫兹脉冲的全偏振态,即允许同时测量太赫兹电场矢量的正交分量,而没有串扰。

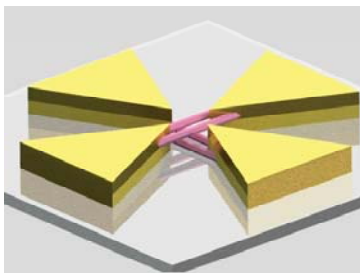


Fig.8 Nanowire terahertz detector  
图 8 纳米线太赫兹探测器

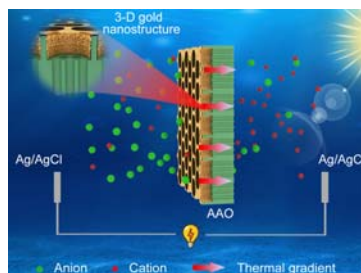


Fig.9 Thermoelectric nanofluid devices  
图 9 热电纳米流体器件

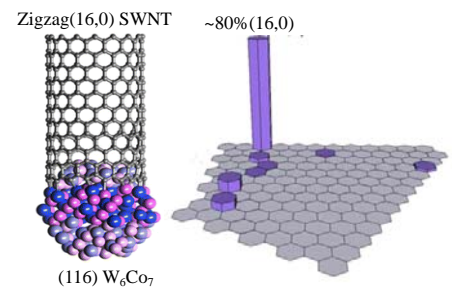


Fig.10 Controlled growth of single-walled carbon nanotubes  
图 10 单壁碳纳米管可控生长

当纳米通道的尺寸与双电层厚度相当时,通道内的离子运输主要由其表面性质决定,但同时其也可在外部场(如光和热等)的作用下得到调节。南京大学的夏兴华教授团队利用纳米通道控制热驱动的离子运输,制备了一种面向太阳能的热电纳米流体器件<sup>[11]</sup>(见图 9)。器件的金纳米结构受等离子体定向加热后,通道内离子电荷的分离得到了加强,从而增大了器件的热膜电位。该项研究提供了对纳米尺度热驱动离子运输的新理解,并为收集太阳能提供了一种新的策略方案。

单壁碳纳米管具有很高的电子和空穴迁移率,有利于制备性能优异的电子器件;同时,单层碳纳米管的带隙主要由其结构决定,因此如何控制单层碳纳米管的结构就成为碳基纳米电子学的一个关键问题。北京大学李彦教授介绍了一种利用固体合金催化剂控制单壁碳纳米管生长的方法<sup>[12]</sup>,李彦教授团队将  $W_6Co_7$  纳米晶体作为模板,成功生长出具有很高可控手性的单壁碳纳米管(见图 10),这对于推广单壁碳纳米管的实际应用具有很大的价值。

### 3.4 微纳米与分子制造

微纳米制造技术如今已成为推动现代先进科学技术发展的重要突破点之一,探索如何更精确地制造以及表征微纳米材料一直是此研究方向的核心问题。本次 IEEE-NEMS 大会也有众多微纳米制造技术的精彩报告,其中代表性的工作如下。

随着半导体产业的不断发展,电子器件的尺寸已经缩小至纳米级别,几乎接近现有技术方案的物理极限。电

子在单分子器件中的不同电通路之间,由于相位差的存在,会出现增强或相消等量子干涉效应。基于这一独特效应,厦门大学洪文晶教授在 IEEE-NEMS 大会上介绍了一种直接利用单个分子制备电化学晶体管(MCBJ)的前沿技术<sup>[13]</sup>(见图 11),这有望给“摩尔定律”即将失效的未来,提供一种潜在的工艺路线。

透射电子显微镜(TEM)作为一种工具,可以在原子尺度上诱导制造纳米结构。东南大学的孙立涛教授在 IEEE-NEMS 大会上进行了“基于 TEM 的原子尺度制造”的主题报告,总结了近年来在纳米器件的原子级制造以及动态表征方面的研究进展。孙立涛教授团队报道了一种利用基于电驱动阳离子交换在 TEM 中制备单个纳米结构的方法<sup>[14]</sup>(见图 12),成功做到了选择性生长单个纳米晶体。

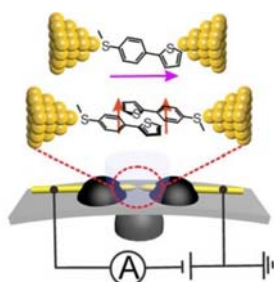


Fig.11 Electrochemically gated MCBJ  
图 11 电化学门控的单分子器件

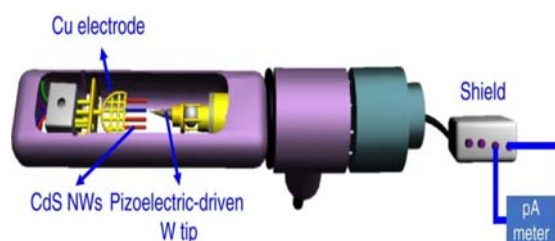


Fig.12 TEM based nanofabrication system  
图 12 基于 TEM 的纳米制备系统

微纳米尺度激光精密加工作为一种非接触工艺,具有设置灵活、可在空气环境中高速加工等独特优势,是制造高质量微纳米结构及其表面处理的先进制造手段。新加坡工程院院士洪明辉教授在大会上进行了题为“推动激光加工从微米到纳米的进展、挑战以及机会”的精彩特邀报告,并介绍了其团队在推动激光加工至纳米阶段的最新成果。洪明辉教授团队采用正交偏振双飞秒激光束<sup>[15]</sup>(见图 13)成功在硅表面加工 12 nm 特征尺度的纳米结构,这有望用于下一代先进纳米制造。

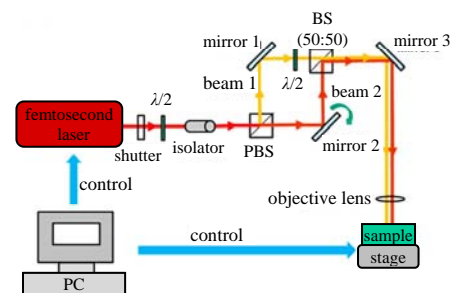


Fig.13 Laser nanofabrication system  
图 13 激光纳米加工系统

#### 4 Chih-Ming Ho 最佳论文奖

微纳米流体技术要求在微观尺度下完成对流体的复杂控制和检测等操作,是在微电子、微机械、生物工程和纳米技术基础上发展起来的一门全新交叉学科。经过近些年的发展,已广泛用于生物、化学、材料、医疗等各个领域。微流体技术一向是 IEEE-NEMS 大会讨论的重点主题之一,每年都会设立以加州大学洛杉矶分校 Chih-Ming Ho 教授命名的 Chih-Ming Ho 最佳论文奖,旨在奖励微流体技术领域的优秀研究成果,以下为部分本次大会获得 Chih-Ming Ho 最佳论文奖的优秀候选论文。

在电子器件不断追求小型化、高性能以及高可靠性的现在,热管理技术发挥着至关重要的作用。为提高散热系统的换热效率,人们进行了大量的研究,提出了嵌入式制冷等多种新型技术方案。然而目前还缺乏一个通用的测试平台来表征嵌入式结构的热学性能。为评价嵌入式微流控结构的冷却性能,中国科学院微电子研究所的 Yuxin YE 等提出了一种嵌入式微流控集成测试车<sup>[16]</sup>,为嵌入式冷却的性能分析提供了一种工具,也推动了其工作机理的进一步研究。

左旋多巴自诞生以来一直是治疗帕金森病最常用的药物,为了达到较好的疗效,其浓度必须保持在一个较窄的范围内。因此,为了可以客观、及时地调整用药剂量,监测帕金森患者的左旋多巴动态浓度就具有重要意义。然而,与左旋多巴共存的高浓度干扰物会给检测带来很大的不准确性。针对这一问题,浙江大学的 Hangxu REN 等提出了一种基于差分安培微针电极的高精度左旋多巴生物传感器<sup>[17]</sup>,实现了对左旋多巴的快速、实时监测。目前,分析检测神经毒剂甲基膦酸盐(DMMP)的方法,都存在如昂贵、笨重和耗时等局限性。上海微系统与信息技术研究所的 Xingqi LIU 等制备了基于高密度羟基硅纳米线阵列的微型传感器<sup>[18]</sup>,可用于检测 DMMP 蒸气,并且制作过程与 CMOS 技术高度兼容,有望实现 DMMP 蒸气的超灵敏、低成本检测。

## 5 总结

IEEE-NEMS 2021 的成功举办, 为微纳分子系统研究领域的专家学者提供了一个学术交流平台, 促进了该领域研究成果的共享, 进一步推动了各学科之间的交叉融合, 也标志着微纳分子系统研究成为了影响人类科技发展的重要技术之一。

本次会议所体现出的微纳技术最新发展有以下特点: a) 传感器件更加小型化、高灵敏、低功耗; b) 与生物医学领域结合更加紧密, 有望为下一代医疗技术带来革命性突破; c) 纳米材料的制备以及微纳结构的设计尤其重要。

### 参考文献:

- [ 1 ] IEEE NEMS 2021 conference. [Http://www.ieee-nems.org/2021](http://www.ieee-nems.org/2021).
- [ 2 ] BONFANTE G, LEE H, BAO L, et al. Comparison of polymers to enhance mechanical properties of microneedles for biomedical applications[J]. *Micro and Nano Systems Letters*, 2020, 8(1):13.
- [ 3 ] WEN L, ZHANG X, TIAN Y, et al. Quantum-confined superfluid: from nature to artificial[J]. *Science China Materials*, 2018, 61(8):1027–1032.
- [ 4 ] LEI Z, ZHU W, ZHANG X, et al. Bio-inspired ionic skin for theranostics[J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(8): 2008020.
- [ 5 ] PAN R, XU M, JIANG D, et al. Nanokit for single-cell electrochemical analyses[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(41):11436–11440.
- [ 6 ] SITTI M, WIERSMA D S. Pros and cons: magnetic versus optical microrobots[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(20):e1906766.
- [ 7 ] DING P, XU D, DONG N, et al. A high-sensitivity H<sub>2</sub>S gas sensor based on optimized ZnO–ZnS nano-heterojunction sensing material[J]. *Chinese Chemical Letters*, 2020, 31(8):2050–2054.
- [ 8 ] WEN D L, DENG H T, LIU X, et al. Wearable multi-sensing double-chain thermoelectric generator[J]. *Microsystems & Nanoengineering*, 2020, 6(1):68.
- [ 9 ] WEN D, HUANG P, QIAN H, et al. Hybrid nanogenerator-based self-powered double-authentication microsystem for smart identification[J]. *Nano Energy*, 2021(86):106100.
- [ 10 ] PENG K, JEVTICS D, ZHANG F, et al. Three-dimensional cross-nanowire networks recover full terahertz state[J]. *Science*, 2020, 368(6490):510–513.
- [ 11 ] LI Z, WU Z, DING X, et al. A solar thermoelectric nanofluidic device for solar thermal energy harvesting[J]. *CCS Chemistry*, 2021, 3(7):1–22.
- [ 12 ] YANG F, WANG X, ZHANG D, et al. Growing Zigzag(16,0) carbon nanotubes with structure-defined catalysts[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2015, 137(27):8688–8691.
- [ 13 ] LI X, WU Q, BAI J, et al. Structure-independent conductance of thiophene-based single-stacking junctions[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2020, 59(8):3280–3286.
- [ 14 ] ZHANG Q, YIN K, DONG H, et al. Electrically driven cation exchange for in situ fabrication of individual nanostructures[J]. *Nature Communications*. 2017, 8(1):14889.
- [ 15 ] LIN Z, LIU H, JI L, et al. Realization of 10 nm features on semiconductor surfaces via femtosecond laser direct patterning in far field and in ambient air[J]. *Nano Letters*. 2020, 20(7):4947–4952.
- [ 16 ] YE Y, ZHANG N, YU L, et al. Integrated Electrical test vehicle co-designed with microfluidics for evaluating the performance of embedded cooling[C]// 2021 IEEE 16th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems(NEMS). Xiamen, China:IEEE, 2021:21–25.
- [ 17 ] REN H, MAO X, ZHANG S, et al. Minimal-invasive levodopa sensing based on differential amperometry microneedle electrodes decorated with spike-like Au nanoparticles[C]// 2021 IEEE 16th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems(NEMS). Xiamen, China:IEEE, 2021:26–29.
- [ 18 ] LIU X, ZHANG H, HUANG Z, et al. Silicon nanowire array sensor for highly sensitive and selective detection of nerve agent simulant vapor via surface hydroxyl groups[C]// 2021 IEEE 16th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems(NEMS). Xiamen, China:IEEE, 2021:30–33.