

精准医疗中的柔性电子技术

赵一聪, 徐可欣, 黄显

天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072

摘要 精准医疗是一种以个人健康大数据为诊疗依据的高度个性化的新型医疗模式,其依靠的数据主要包括基因型数据、表型数据和环境数据,其中表型数据和环境数据的获取需要借助具有动态数据采集能力的移动测量装置。本文简述了精准医疗的一般概念,提出柔性电子技术能够为动态医学监测提供有力的技术保障,并从材料体系、结构设计、集成方式和数据传递方式等方面概述了柔性电子技术,结合了目前柔性电子技术在医学监测领域的研究成果展示了其在精准医疗领域的巨大应用潜力。提出可以从提高系统的供电能力、提高系统的集成度与复杂度以及深入研究化学量检测等方面进一步提升柔性医学监测系统的性能,使其更好地服务于精准医疗模式。

关键词 柔性电子技术;精准医疗;柔性传感器;表皮传感器;植入式传感器

1 精准医疗

2011年,美国国家科学院在《Toward precision medicine: Building a knowledge network for biomedical research and a new taxonomy of disease》(《迈向精准医疗:构建生物医学研究知识网络和新的疾病分类体系》)报告中正式提出精准医疗(precision medicine)的理念^[1]。2015年,美国政府正式从国家战略层面提出“精准医疗计划”,自此,精准医疗迅速成为全球医学界关注和研究的焦点。2015年2月,习近平总书记批示科技部和国家卫计委要求成立中国精准医疗战略专家组,随后,国家卫计委制定了“精准医疗”战略规划,并将其纳入国家“十三五”重大科技专项,预计到2030年,中央政府将在精准医疗领域投入200亿元,地方政府和企业将配套投入400亿元。

1.1 精准医疗的概念

精准医疗是指综合考虑基因组、生理状况、生活习惯、个人医疗史及生存环境等多种因素的共同作用,对疾病进行预防、诊断与治疗的新型医疗模式。相比传统的医学模式,精准医疗从基因层面、个体表型层面以及外部环境层面对某类疾病进行综合诊疗,旨在实现对患病风险的精准预测、对疾病的精确诊断与分类、治疗方法与药物的精确应用以及对疗效的精确量化,为提高人口健康水平、避免有害医疗和减少医疗资源浪费等提供更加科学合理的医疗体系^[2]。以糖尿病为例,其病因和发病机制尚不明确,通常认为是基因、生活习惯和环境等多种因素共同作用造成的。在精准医疗模式下,

结合糖尿病群体基因数据库对高危人群进行检测,预测患病风险,为具有高患病风险的人群提供相应指导方案预防糖尿病的发生;对已患糖尿病的个体进行精确诊断与分类,制定个性化治疗策略;在治疗期间对患者进行长期动态监测,精确量化药效,从而科学调整治疗方案。

1.2 精准医疗与移动测量传感技术

精准医疗要求结合基因组学数据、个体表型数据及环境数据,建立综合全面的个人健康大数据库,为疾病的预防、诊断和疗效评价提供科学客观的依据(图1),因此需要发展能够实时获取个体健康信息,并及时上传至健康管理平台或医疗服务机构的移动测量传感技术。互联网技术的发展和国内移动通信设备的普及,为发展基于互联网的移动测量传感技术带来了新契机。将医学检测装置获得的个人生理参数、生活习惯和环境状况等数据,通过手机等移动通信设备上传至云端服务器,在医疗系统、医生和患者之间构建信息闭环网络,有助于为患者提供个性化的疾病治疗和健康护理方案。可以预见的是,如果中国有几亿人口处于这样的闭环网络中,每个人都能方便地获取经过整合与分析的个人健康信息,及时调整自己的生活习惯以改善自身的健康状况,最终国人的整体健康水平都能得到提升。

2 柔性电子技术

精准医疗模式需要有移动测量传感技术的支持才能实现多维信息的实时获取与传输,这就要求医学测量装置能够

收稿日期:2017-08-04;修回日期:2017-09-14

基金项目:国家自然科学基金项目(61604108);天津市自然科学基金项目(16JCYBJC40600)

作者简介:赵一聪,博士研究生,研究方向为柔性传感器,电子信箱:zhaoyicong@tju.edu.cn;黄显(通信作者),教授,研究方向为柔性电子技术,电子信箱:huangxian@tju.edu.cn

引用格式:赵一聪,徐可欣,黄显.精准医疗中的柔性电子技术[J].科技导报,2017,35(23):76-81;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2017.23.012

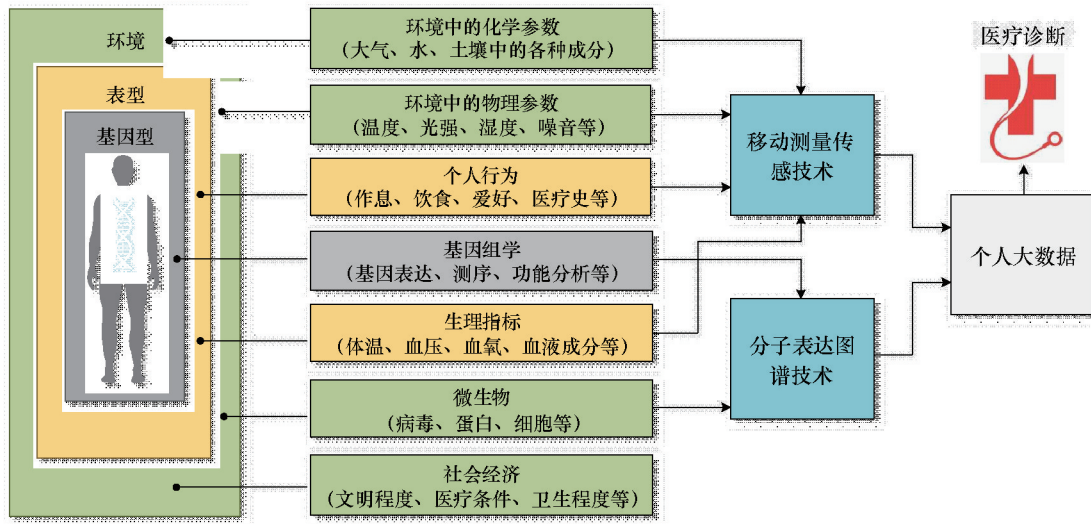


图1 精准医疗模式下医学大数据的构成

Fig. 1 Structure of medical big data in the model of precision medicine

长期跟随人体实现动态测量。然而,目前的医学测量装置通常基于刚性器件和封装,这类装置虽然技术成熟,但与人体的接触不可靠且不能随意形变,运动跟随性差,无法在精确性、重复性以及稳定性上满足精准测量的要求。近年来,柔性电子技术的兴起与发展为动态医学监测提供了新的解决方案。

与传统的基于刚性基底和刚性材料的电子电路技术不同,柔性电子技术是一种建立在可弯曲或可延展柔性基板上的全新的电子电路技术。它的基本概念是在柔性衬底上集成多种功能和材料的元器件,构建具有物理弯折能力和一定形变能力的电子器件或电子系统。20世纪70年代,光导有机材料、导电聚合物和共轭半导体聚合物等的相继发现引起了学者们对柔性电子器件的研究热潮,此后柔性器件被大量应用于显示领域。但当时还比较缺乏对柔性电子机理的研究,构建柔性电子器件的材料体系还不够完善、功能还不够多样、加工方法还不够多元,还未构建出一整套系统的柔性电子知识体系以及包含多种材料体系和器件种类的柔性电子系统。20世纪90年代,软光刻技术的发明标志着柔性电子进入了快速发展时期,随后柔性电子器件在信息、医学、航空航天和国防等领域均取得了许多进展。2000年,《Science》将有机电子学列为世界10大新兴科技之一。当时的一些研究已经可以通过使用减薄的刚性传感材料^[3]或将测量单元集成在柔性衬底^[4]或织物^[5]上构建柔性医学测量装置,这些装置具有一定的柔性但仍然无法跟随人体运动发生较大形变,且测量系统中采用的材料和元器件种类不够丰富,因此在重复性和精确性上仍然不足以达到精准医疗的要求。随后,可延展电子结构^[6]的出现解决了测量装置形变能力与器件性能之间的矛盾,使柔性测量装置在集成更多优良性能的材料与元器件的同时,能够获得更大的延展性。

经过近半个世纪的发展,柔性电子技术已经形成了一套相对完备的知识体系,对柔性电子热学、力学和电学机理的研究已经十分丰富,构建柔性电子器件的材料体系相对完整地涵盖了各类天然柔性材料和刚性材料,制造工艺涉及互补金属氧化物半导体(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)、微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)、打印和转印等多种加工方法,器件种类涉及了显示、传感、通信和能源等多个领域,各类柔性电子器件已经能够构建稳定可靠的柔性电子测量系统。如今的柔性医学检测装置具有功能丰富、质量轻、形态可变等特点,并且能够顺应人体组织形貌从而长期跟随人体实现动态监测,同时还能减少因测量位置改变造成的测量误差,满足精准测量的要求。进一步研究基于柔性电子器件的移动监测系统,能够为精准医疗的实现提供有力的技术保障。

2.1 柔性电子的相关技术

柔性电子技术涉及物理、电子、材料、微纳加工和系统集成等多门学科,在研究柔性医学监测系统时,需要综合考虑热场、电场和力场等多场耦合效应,下面将从材料体系、结构设计、集成方式和数据传递方式等方面对柔性电子采用的相关技术进行概述。

构成柔性电子器件的材料既包括天然的柔性材料,也包括经过特殊结构设计的刚性材料。柔性电子器件中采用的柔性材料如弹性体、导电聚合物或液态金属等,由于具有较低的杨氏模量(0~100 MPa)和较高的断裂应变(30%~1000%),因此很容易发生形变,使用这些材料构建柔性电子器件能够最大程度地减小器件对人体的束缚,可用于构成柔性电路中的基底、黏附层、黏连剂和传感单元等。同时,金属(如铜、金和钛)、半导体(如硅、砷化镓和聚(3-己基噻吩-2,5-二基))、电介质(聚酰亚胺、聚甲基丙烯酸甲酯和聚对二甲

苯)等刚性材料可以以薄膜形态用于构建柔性电子器件中的互连线、电极和其他电路元件(如电阻、电容和电感)。由于材料的最大弯曲曲率随厚度的减小而增大^[7],因此这些厚度范围仅为几十纳米至几十微米的薄膜具有可弯曲性、可折叠性和一定的延展性。为了进一步适应日常生理活动引起的皮肤或器官形变,一些柔性传感器的互连线采用了蛇形^[8]、岛桥形^[9]、螺旋形^[10]或分形^[11](图2)等特殊结构设计,使得这些器件在受力状态下,利用结构的形变去减小材料的形变,使材料内部的应变始终小于材料本身断裂应变,使得器件具有了更高的延展能力,从而保证了器件的可延展性。近年来,除了平面可延展和拉伸结构,空间可延展结构的研究也获得了进一步的突破,实现了利用平面预应力的释放,获得可控的空间弯折结构^[12],为实现三维电子器件的加工和集成奠定了基础。

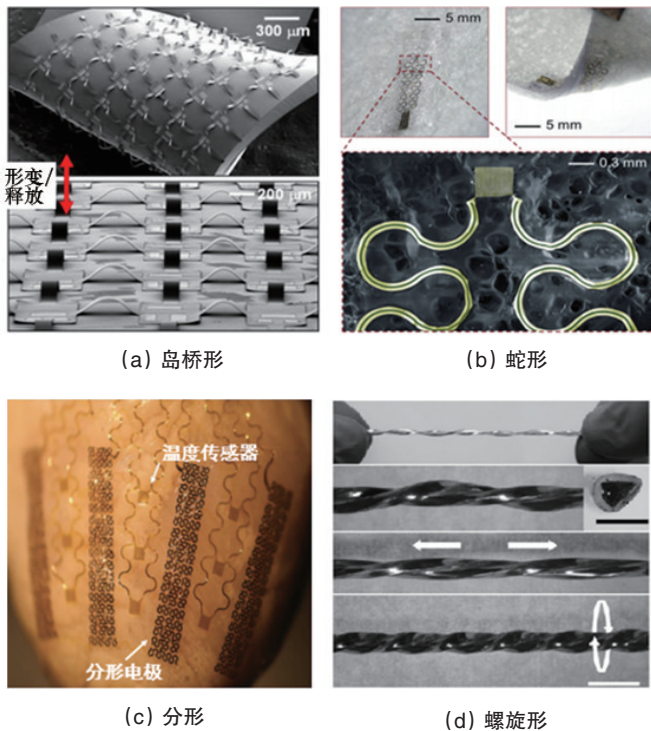
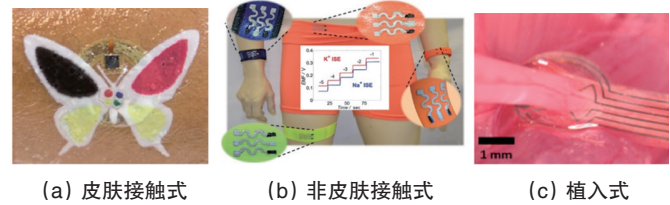


图2 柔性电子器件的各种结构设计

Fig. 2 Structure designs of flexible electronic devices

柔性电子器件可以通过不同的方式实现与生物组织的集成,主要包括了皮肤接触式(图3(a))、非皮肤接触式(图3(b))和植入式(图3(c))。其中,皮肤接触式是指借助薄膜材料与皮肤间的范德华力,使器件自发地吸附于皮肤表面,因此又称为表皮电子系统^[13]。柔性表皮电子器件在无需其他物理配件辅助的情况下,就能实现与皮肤表面的可逆粘贴,测量皮肤表面的各类物理参数和各类通过体液即可获取的化学参数。另外,表皮电子器件还可以通过采用具有高度生物亲合性的黏结剂(如硅胶和树脂胶)与皮肤实现可逆连接。非皮肤接触式是指将电子器件集成于衣服^[14]、袜子^[15]、手套^[16]、绷带^[17]等织物表面,或将这些织物本身的材料加以改造,实现

具有导电性的智能织物,这类电子器件目前主要应用于日常健康监测和康复监测等场合测量与人体运动相关的物理参数^[18]。植入式是指通过手术、注射、导管等方式将电子器件植入人体内,测量体内的化学成分或器官的性能与状态^[19]。一些植入式器件与体内器官表面的机械属性相似,因此能够顺应器官表面形态,实现与器官表面的紧密接触。值得一提的是,一些植入式器件采用了生物可吸收材料,器件在完成功能后不需要进行二次手术将其取出,而是通过水解或代谢作用被生物体吸收,此类器件也被称为瞬态可溶性电子器件^[20]。

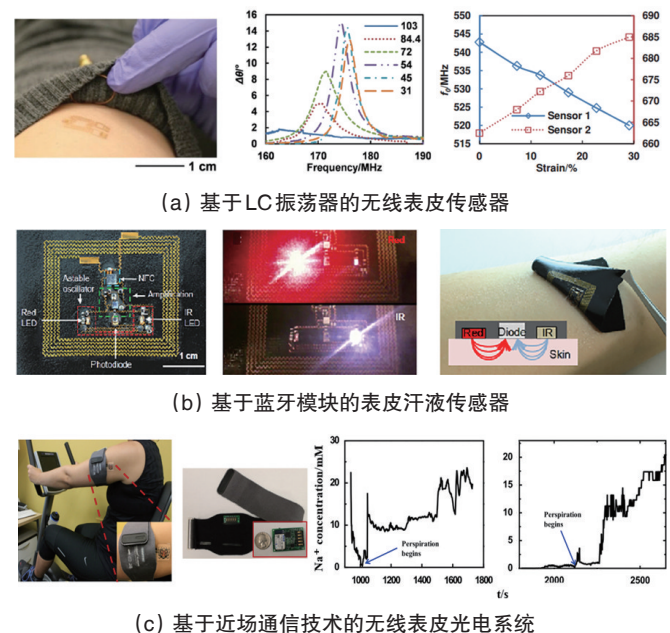


(a) 皮肤接触式 (b) 非皮肤接触式 (c) 植入式

图3 柔性电子器件的各种集成方式

Fig. 3 Integration approaches of flexible electronic devices

精准医疗模式要求医疗监测装置能够长期连续地对人体的各项生理参数、环境因素和行为习惯等进行测量,并将这些动态数据通过移动通讯设备及时上传至云端服务器,以便医生随时获取这些数据作为诊断和跟踪疗效的依据。这不仅需要医疗监测系统采用体积小、质量轻、运动跟随性强的柔性可延展传感装置,还需要监测系统具有无线数据传输能力(图4)。近年来,柔性传感器在无线信号传输方面取得了丰富的研究成果。例如,利用高频电磁波加载调频的蓝牙技术^[21]、通过调频和调幅等方式传递数据的近场通信技术^[22],或



(a) 基于LC振荡器的无线表皮传感器

(b) 基于蓝牙模块的表皮汗液传感器

(c) 基于近场通信技术的无线表皮光电系统

图4 各类无线柔性医学监测装置

Fig. 4 Various wireless flexible electronic devices

是利用压控振荡器产生的调制信号将未经模数转换的传感器获取的电压信号直接转化为频率信号,通过改变电磁波的频率实现数据的传递。

2.2 柔性电子器件在精准医疗中的应用

近年来,柔性电子器件在医学监测领域取得了丰富的研究成果,实现了对生理指标、生理电信号和生物化学分子等各类与人体健康相关的参数的监测。其中,生理指标的监测包括对血压^[23]、呼吸^[24]、脉搏^[25]、体温^[26]等基本物理量进行测量。例如,Zhang等^[27]展示了一种表皮差分温度传感器,实现了对人体中心体温的非侵入式测量;一种表皮无机光电传感器实现了对人体血氧和脉搏信号的动态监测,该传感器采用了整体浮岛结构的力学设计,使传感器的光路不受皮肤形变的影响^[28];一种网状石墨烯应变传感器实现了对呼吸、面部表情变化、眨眼、脉搏等微弱人体运动信号的监测,该传感器将网状石墨烯平铺在高聚物和医用胶带复合薄膜,因此与人体皮肤具有兼容性可以与皮肤紧密贴合^[29]。柔性电子器件在医学检测领域的另一个重要应用是对心电、脑电、肌电、眼电、神经电信号等各类生理电信号进行监测^[30]。一种具有多种测量功能的表皮电子系统,实现了对心电、肌电以及表皮温度等物理信号的测量,系统中的柔性可延展皮肤电极具有比传统干电极更小的接触电阻^[31];Kim等^[32]研发了一种植入式柔性光遗传光电系统,采用无线射频供电的方式驱动系统工作,实现小鼠多巴胺前体的受控分泌和神经信号测量。柔性电子器件在生物分子分析方面也取得了许多新进展。一种基于功能性基底的新型生物柔性传感器实现了对汗液的动态收集、测量和成分分析,极大简化了传统体液测量中的微流体样品采集方式^[33];一种采用打印技术制备的生物传感器,实现了对汗液中葡萄糖含量的检测^[34];Bandodkar等^[35]展示了一种具有蓝牙通讯功能的表皮纹身贴纸,实现了对汗液中的Na⁺浓度。除此之外,柔性电子器件还可应用于日常健康监测和康复监测^[36]领域。例如,一种基于聚合物/多壁碳纳米管复合材料的柔性压力传感器实现了对烧伤皮肤局部区域压力水平的测量,可以应用于对烧伤皮肤增生情况的长期监测^[36];Araki等^[37]提出了一种具有NFC功能的表皮紫外线传感器,利用比色法实现了对皮肤紫外线曝露水平监测;一种利用NFC技术提供电能和传输信息的表皮监测装置,实现了对心率、组织氧合、紫外线曝露水平和动脉血流量的监测^[38]。上述柔性电子器件具有良好的生物兼容性、轻薄的形态和稳定的数据传输能力,能够为诊断、治疗和康复监测等医疗过程提供精准的动态数据,不论在精确性、重复性还是稳定性上都能满足精准医疗对移动测量装置的要求,有望取代传统的刚性器件成为下一代医学检测器件。

3 结论与展望

当前中国的医疗体系存在着人均医疗资源不足、城乡医疗水平差别过大、医疗资源浪费等诸多问题,精准医疗模式的提出为解决上述问题提供了突破口。精准医疗模式的建

立需要发展能够实时获取个体健康信息并及时上传至健康管理平台或医疗服务机构的移动测量传感技术。近年来,柔性电子技术的蓬勃发展为移动测量传感装置的实现提供了新思路和新手段。柔性医学检测器件具有与人体皮肤、器官和衣服等柔软表面相似的机械属性,且具有体积小、质量轻、可形变等优势,因此能够在不影响人体正常活动的情况下对人体进行长期动态监测,为精准医疗模式需要的移动测量提供了有力的技术保障。

为了进一步提升柔性医学检测系统的性能,使其更好地服务于精准医疗模式,可以从提高系统的供电能力、集成度与复杂度以及深入研究化学量检测等方面入手。目前,柔性医学检测系统的供电方案主要是采用高能量密度的可充电电化学电池^[39],这种方法能够满足系统对待机时长和小体积的双重要求,为了进一步延长工作时间,可以采用光伏^[40]、热电^[41]、压电^[42]等技术为系统提供辅助小电能,也可以通过收集环境中以电磁场或电磁波形式存在的能量^[43],将其转换为直流电作为直接能量来源。在提升系统集成度与复杂度方面,可以通过集成多种传感单元和商业化的信号处理芯片,完善了检测系统的功能,为精确诊断提供了多方面的数据支撑。而对柔性化学检测器件的研究也取得了一些进展,采用表皮传感器已经实现对表皮汗液的动态采集、测量和成分分析^[44],此外,人体内的葡萄糖、病毒细胞、蛋白质和离子等各种生物分子也可以通过电化学测量、亲和力测量、荧光等方法实现。

如果将柔性医学检测装置获得的个体健康信息通过手机等移动通信设备上传至云端服务器,不仅有助于中国群体健康大数据库的构建,还能方便病患和医生通过手机随时获取个体健康数据,在个体和医疗机构之间建立更为高效和个性化的闭环医疗网络。现今中国具有将近14亿人口,手机上网用户数已超11亿,设想其中有2亿人处于这样的闭环网络中,每个人都能方便地获取经过整合与分析的个人健康信息,及时调整自己的生活习惯以改善自身的健康状况,最终整体健康水平得到提升。

参考文献(References)

- [1] Committee on a framework for development of a new taxonomy of disease, national research council. Toward precision medicine: Building a knowledge network for biomedical research and a new taxonomy of disease[R]. Washington DC: National Academies Press, 2011.
- [2] Jameson J L, Longo D L. Precision medicine—personalized, problematic, and promising[J]. New England Journal of Medicine, 2015, 372(23): 2229–2234.
- [3] Akiyama M, Ueno N, Nonaka K, et al. Flexible pulse-wave sensors from oriented aluminum nitride nanocolumns[J]. Applied Physics Letters, 2003, 82(12): 1977–1979.
- [4] Xiao S Y, Che L F, Li X X, et al. A temperature sensor array based on flexible MEMS skin technology[J]. Optics and Precision Engineering, 2005, 13(6): 674–680.
- [5] Sung M, Marci C, Pentland A. Wearable feedback systems for rehabilitation[J]. Journal of Neuroengineering & Rehabilitation, 2005, 2:17, doi:

- 10.1186/1743-0003-2-17.
- [6] Khang D Y, Jiang H Q, Huang Y, et al. A stretchable form of single-crystal silicon for high-performance electronics on rubber substrates[J]. *Science*, 2006, 311(5758): 208-212.
- [7] Rogers J A, Someya T, Huang Y. Materials and mechanics for stretchable electronics[J]. *Science*, 2010, 327(5973): 1603.
- [8] Liu Y, Norton J J S, Qazi R, et al. Epidermal mechano-acoustic sensing electronics for cardiovascular diagnostics and human-machine interfaces[J]. *Science Advances*, 2016, 2(11): e1601185.
- [9] Ko H C, Stoykovich M P, Song J, et al. A hemispherical electronic eye camera based on compressible silicon optoelectronics[J]. *Nature*, 2008, 454(7205): 748.
- [10] Cooper C B, Arutselvan K, Liu Y, et al. Stretchable capacitive sensors of torsion, strain, and touch using double helix liquid metal fibers[J]. *Advanced Functional Materials*, 2017, 27(20), doi: 10.1002/adfm.201605630.
- [11] Xu L, Gutbrod S R, Ma Y, et al. Membranes: Materials and fractal designs for 3D multifunctional integumentary membranes with capabilities in cardiac electrotherapy[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(10): 1731-1737.
- [12] Yan Z, Zhang M F, Wang M J, et al. Controlled mechanical buckling for origami-inspired construction of 3D microstructures in advanced materials[J]. *Advanced Functional Materials*, 2016, 26(16): 2629-2639.
- [13] Martirosyan N, Kalani M Y. Epidermal electronics[J]. *Science*, 2011, 333(6): 485-486.
- [14] Du D, Li P, Ouyang J. Graphene coated nonwoven fabrics as wearable sensors[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2016, 4(15): 3224-3230.
- [15] Guo X, Huang Y, Cai X, et al. Capacitive wearable tactile sensor based on smart textile substrate with carbon black /silicone rubber composite dielectric[J]. *Measurement Science & Technology*, 2016, 27(4): 045105.
- [16] Lee J, Kwon H, Seo J, et al. Conductive fiber-based ultrasensitive textile pressure sensor for wearable electronics[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(15): 2433-2439.
- [17] Parrilla M, Cánovas R, Jeeran I, et al. A textile-based stretchable multi-ion potentiometric sensor[J]. *Advanced Healthcare Materials*, 2016, 5(9): 996-1001.
- [18] Khan Y, Ostfeld A E, Lochner C M, et al. Monitoring of vital signs with flexible and wearable medical devices[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(22): 4373-4395.
- [19] Liu J, Fu T M, Cheng Z, et al. Syringe-injectable electronics[J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(7): 629-636.
- [20] Kang S K, Murphy R K, Hwang S W, et al. Bioresorbable silicon electronic sensors for the brain[J]. *Nature*, 2016, 530(7588): 71-76.
- [21] Bandodkar A J, Molinnus D, Mirza O, et al. Epidermal tattoo potentiometric sodium sensors with wireless signal transduction for continuous non-invasive sweat monitoring[J]. *Biosensors & Bioelectronics*, 2014, 54(15): 603-609.
- [22] Wen S, Heidari H, Vilouras A, et al. A wearable fabric-based RFID skin temperature monitoring patch[C]//Sensors, 2016 IEEE. Piscataway, NJ: IEEE, 2017, doi: 10.1109/ICSENS.2016.7808919.
- [23] Kim J, Salvatore G A, Araki H, et al. Battery-free, stretchable optoelectronic systems for wireless optical characterization of the skin[J]. *Science Advances*, 2016, 2(8): e1600418.
- [24] Luo N, Dai W, Li C, et al. Wearable sensors: Flexible piezoresistive sensor patch enabling ultralow power cuffless blood pressure measurement[J]. *Advanced Functional Materials*, 2016, 26(8), doi: 10.1002/adfm.201504560.
- [25] Boland C S, Khan U, Backes C, et al. Sensitive, high-strain, high-rate bodily motion sensors based on graphene-rubber composites[J]. *ACS Nano*, 2014, 8(9): 8819-8830.
- [26] Pang C, Koo J H, Nguyen A, et al. Sensors: Highly skin-conformal microhairy sensor for pulse signal amplification [J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(4): 634-640.
- [27] Webb R C, Pielak R M, Bastien P, et al. Thermal transport characteristics of human skin measured in vivo using ultrathin conformal arrays of thermal sensors and actuators[J]. *PLoS One*, 2015, 10(2): e0118131.
- [28] Zhang Y H, Webb R C, Luo H, et al. Theoretical and experimental studies of epidermal heat flux sensors for measurements of core body temperature[J]. *Advanced Healthcare Materials*, 2016, 5(1): 119-127.
- [29] Li H, Xu Y, Li X, et al. Epidermal inorganic optoelectronics for blood oxygen measurement[J]. *Advanced Healthcare Materials*, 2017, 6(9), doi: 10.1002/adhm.201601013.
- [30] Wang Y, Wang L, Yang T, et al. Wearable and highly sensitive graphene strain sensors for human motion monitoring[J]. *Advanced Functional Materials*, 2014, 24(29): 4666-4670.
- [31] Xu B X, Akhtar A, Liu Y H, et al. Flexible electronics: An epidermal stimulation and sensing platform for sensorimotor prosthetic control, management of lower back exertion, and electrical muscle activation [J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(22): 4462-4471.
- [32] Yeo W H, Kim Y S, Lee J, et al. Multifunctional epidermal electronics printed directly onto the skin[J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(20): 2773-2778.
- [33] Kim T I, Mccall J G, Jung Y H, et al. Injectable, cellular-scale optoelectronics with applications for wireless optogenetics[J]. *Science*, 2013, 340(6129): 211-216.
- [34] Huang X, Liu Y, Chen K, et al. Stretchable, wireless sensors and functional substrates for epidermal characterization of sweat[J]. *Small*, 2014, 10(15): 3083-3090.
- [35] Abellón-Llobregat A, Jeeran I, Bandodkar A, et al. A stretchable and screen-printed electrochemical sensor for glucose determination in human perspiration[J]. *Biosensors & Bioelectronics*, 2017, 91: 885-891.
- [36] Bandodkar A J, Molinnus D, Mirza O, et al. Epidermal tattoo potentiometric sodium sensors with wireless signal transduction for continuous non-invasive sweat monitoring[J]. *Biosensors & Bioelectronics*, 2014, 54(15): 603-609.
- [37] Hong G W, Kim S H, Kim J H. Flexible pressure sensors for burnt skin patient monitoring[C]//Proceedings of SPIE-Nanosensors, Biosensors, and Info-Tech Sensors and Systems 2015. New York: SPIE, doi: 10.1117/12.2084575.
- [38] Araki H, Kim J, Zhang S, et al. UV Sensors: Materials and device designs for an epidermal uv colorimetric dosimeter with near field communication capabilities[J]. *Advanced Functional Materials*, 2017, 27(2), doi: 10.1002/adfm.201604465.
- [39] Xu S, Zhang Y, Cho J, et al. Stretchable batteries with self-similar serpentine interconnects and integrated wireless recharging systems[J]. *Nature Communications*, 2013, 4(2), doi: 10.1038/ncomms2553.
- [40] Li Y, Meng L, Yang Y, et al. High-efficiency robust perovskite solar cells on ultrathin flexible substrates[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 10214.

- [41] Lu Z, Zhang H, Mao C, et al. Silk fabric-based wearable thermoelectric generator for energy harvesting from the human body[J]. Applied Energy, 2016, 164: 57-63.
- [42] Lee J H, Lee K Y, Gupta M K, et al. Highly stretchable piezoelectric-pyroelectric hybrid nanogenerator[J]. Advanced materials, 2014, 26(5): 765-769.
- [43] Fan Z, Zhang Y, Ma Q, et al. A finite deformation model of planar serpentine interconnects for stretchable electronics[J]. International Journal of Solids & Structures, 2016, 91: 46-59.
- [44] Huang X, Liu Y, Chen K, et al. Stretchable, wireless sensors and functional substrates for epidermal characterization of sweat[J]. Small, 2014, 10(15): 3083-3090.

Flexible electronics technology for precision medicine

ZHAO Yicong, XU Kexin, HUANG Xian

School of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract Precision medicine is a highly personalized medicine mode that relies on large amount of personal health data to conduct diagnosis and treatment. The personal health data consist of genomics, phenotype, and environmental information. The latter two need to be captured by mobile devices with capability of continuous monitoring. This paper introduces the concept of precision medicine and reveals that dynamical medical monitoring can be best achieved by flexible electronics technology. Then it summarizes flexible electronics technology concerning materials, design, integration methods and data transmission, and demonstrates some applications in precision medicine. Finally, the paper points out that flexible medical monitoring system can offer better service for precision medicine by optimizing system performance in terms of power supply, integration, complexity, and in-depth research of chemical signal measurement.

Keywords flexible electronics technology; precision medicine; flexible sensors; epidermal sensors; implantable sensors

(责任编辑 刘志远)