

瞬态电子技术及其军事应用

魏 伟¹,任向红²,杜思燕²,周 锋²

(1. 中国人民解放军 68303 部队,青海格尔木 816099;2. 火箭军工程大学 306 教研室,陕西西安 710106)

摘 要: 基于可降解材料的瞬态电子器件,在完成指定功能或废弃后,受预定触发因素刺激,可实现短时间内部分退化或全部降解. 凭借先进加工工艺和特殊的功能材料,瞬态电子器件在性能方面可与传统电子器件相媲美,并在功能上形成补充,将应用范围扩展到绿色电子、信息安全存储、植入式医疗和环境监测传感器等前沿领域. 文章综合分析了瞬态电子的概念、组成、制造技术、降解机理以及重要瞬态器件,从信息安全存储、战场侦察监视、士兵伤情防治、物资精确投送 4 个方面,阐述了瞬态电子技术在军事方面的应用. 总结了瞬态电子技术发展存在的问题,展望了其未来研究的发展趋势.

关键词: 瞬态电子; 触发; 可生物降解; 军事应用

中图分类号: TN386; TN99

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2021)02-0362-10

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20200819

Transient Electronic Technology and Its Military Applications

WEI Wei¹, REN Xiang-hong², DU Si-yan², ZHOU Feng²

(1. A Unite of PLA, Golmud, Qinghai 816099, China;

2. Rocket Force University of Engineering, 306 Teaching and Research Section, Xi'an, Shaanxi 710106, China)

Abstract: Fabricated by degradable materials, transient electronics can dissolve in natural environments after completing the default tasks. Transient electronics can compare favorably with the traditional devices through advanced fabrication technology in terms of performance, exhibiting promising applications in fields of environmental protection, medical equipment and information security. This paper comprehensively analyzed its concepts, composition, fabrication technology, degradable process as well as transient devices, and the military application of transient electronic technology was expounded from four aspects: safe storage of combat information, reconnaissance and surveillance of battlefield conditions, monitoring, auxiliary diagnosis and treatment of soldiers' injuries, accurate delivery of urgently needed supplies. The existing problem in the development of transient electronic technology was pointed out, and its future development trend was prospected.

Key words: transient electronics; trigger; biodegradable; military applications

1 引言

随着信息技术的发展,电子产品广泛应用于人类活动的各方面,但大量电子设备由于损坏和淘汰而产生的电子废弃物^[1],以及因销毁处理不到位造成的信息失窃,已严重影响和危害人们的生活. 瞬态电子的概念与电子产品对长时间、稳定运行的要求不同,即在设计工作时间内能可靠运行,在完成预定任务或需要终止时,设备在环境因素或指令触发下,能够部分或完全的破坏退化,并在一定时间内降解到周围环境中^[2,3]. 当前,基于低毒、可降解材料的瞬态电子器件,在发展环保电子产品、信息安全存储、环境监测传感器、植入式辅

助诊断和治疗等方面有广阔应用前景^[4-7]. 具有良好生物相容性的电子设备植入式体内,可以为患者提供辅助诊断和治疗,在完成相应功能后无需去除,能够避免因二次手术可能造成的伤痛和副作用^[3].

新技术的出现往往最先应用于军事方面,军事上对于信息安全的考虑远高于其他社会活动,瞬态电子技术的颠覆性理念完全符合作战运用对电子设备的“生存状态”要求. 2012年,瞬态电子技术一经提出,隶属于美国国防部的高级研究计划局(DARPA)就立即宣布启动“消失可编程资源”(VAPR)项目,数月时间内与斯坦福国际研究所、施乐洛阿尔托研究中心和IBM公司等签署了1000多万美元的合同,推动VAPR成为军

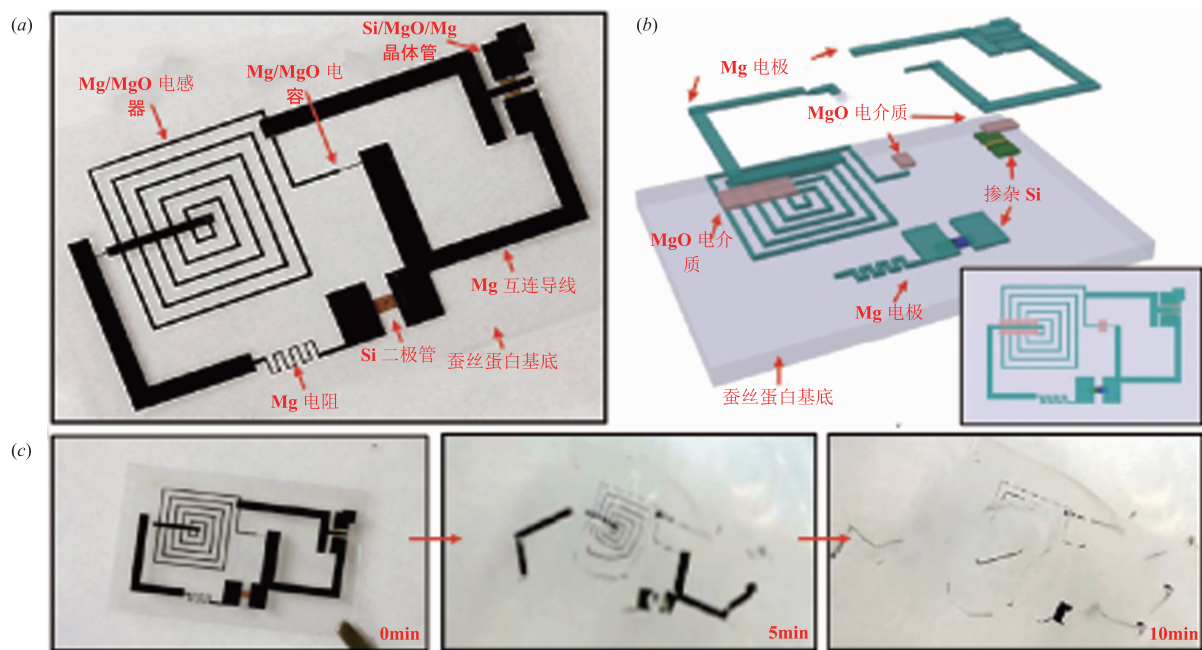
事信息技术应用的热点^[8]. 本文主要从瞬态电子的概念、组成、降解机理及其军事应用等方面进行论述,为瞬态电子器件的研发和应用提供参考.

2 瞬态电子技术

2.1 瞬态电子的概念

瞬态电子技术最早由美国伊利诺伊大学香槟分校的

Rogers 等提出,从材料、元器件、无线控制策略和降解理论基础等方面进行了全面阐述,并使用 Mg、MgO、硅纳米膜等材料在蚕丝蛋白基底上设计制备了一个可编程的植入式瞬态装置(见图 1),可提供短时间的热治疗,在植入小鼠体内 3 周后完全降解^[2]. 该研究提供了一个瞬态装置的系统级应用实例,奠定了瞬态电子研究的基础.



(a) 包括晶体管、二极管、电感器、电容、电阻、互连导线和介质层,以及蚕丝蛋白衬底的瞬态电子器件图像;
(b) 器件分解结构示意图和俯视图;(c) 器件在水中按时间顺序溶解的图像

图1 制备在蚕丝蛋白衬底上的瞬态电子演示电路^[2]

瞬态电子与传统电子器件的耐久性要求大不相同,其关键性特点是在一定程序时间内部分或完全降解,主要包括:(1)具备与传统电子产品相当的强度和适应性,能够满足使用性能要求。(2)能够在期望的短暂时间内,保持稳定的工作运行性能. 根据应用场景不同,时间尺度可能是几分钟到几十小时^[9]。(3)在预设程序触发时,能够部分或完全降解到周围环境中. 器件物理上消失的时机,可能是按照预定寿命设计自然溶解在环境中,也可能是在外界条件的刺激触发下,如水、氧气、pH、温度、光等,引起功能失效. 器件物理上消失速度,受元件设计、材料选择和制备、刺激作用的强度等因素影响,并可具体控制^[10]。(4)降解释放的最终产物,应是生物相容或环境无害^[11]. 用于植入式诊断或治疗,必须是可生物降解,且产物能够随新陈代谢分解排出;用作绿色电子时,在环境中应当溶解或分解成无毒产物,至少是环境能够净化的低毒产物.

2.2 瞬态电子器件组成

随着材料降解机理、制造方法和加工工艺的深入研究,涌现出了许多典型的瞬态电子器件,如场效应晶

体管^[12]、能量采集器^[13]、储能电池^[14]、感应天线^[15]、电阻式存储器^[5]、生物传感器等^[3]. 这些瞬态电子器件主要包括 5 个部分:基底、电极、电介质层、有源层(互连导线或半导体)和封装层^[1,16].

基底和封装层是实现瞬态电子的降解和触发的基础. 基底材料是整个瞬态电子器件的载体和支架,常用的材料主要有:天然高分子材料,如明胶、壳聚糖、蚕丝蛋白^[5]、石蜡^[17]、靛蓝^[18]、宣纸^[19]等;改性天然高分子材料,如改性纤维素、改性淀粉等;合成高分子材料,如聚乙烯醇(PVA)^[20,21]、聚乳酸(PLA)^[13]、聚己内酯(PCL)^[22]、聚乳酸羟基乙酸(PLGA)^[23]、聚碳酸酯(PC)^[24]、聚甲醛(POM)^[25]等. 封装材料对整个器件起到保护作用,直接影响器件的瞬态降解能力和有效功能寿命. 通常选用具有良好水氧阻隔性能的可降解材料,如蚕丝蛋白、PLGA、PC 等,也可通过磁控溅射、气相和原子层沉积等方法在器件表面制备 MgO、Al₂O₃、SiO₂ 等薄膜来完成封装.

电极、有源层和电介质层是瞬态电子功能实现的基础. 其中,电极材料作为加载电压的导体和控制载流

子注入的装置,必须具备良好的导电性,且与半导体材料能级匹配.电极一般使用 Mg、Ag、Mo、Cu、Al、Fe、W、Au 等金属,石墨烯和铟锡氧化物(ITO)等材料.有源层材料主要包括无机半导体材料 Si、Ge、GaAs、ZnO、无定型铟镓锌氧化物(a-IGZO)^[19,26]等,以及具有高电子迁移率的有机半导体材料并五苯、聚 3-烷基噻吩、富勒烯、氟化钛菁铜等.电介质层材料主要包括:有机介电材料,聚乙烯苯酚(PVP)、PVA、聚酰亚胺、聚甲基丙烯酸甲酯等;无机介电材料,SiO₂、Al₂O₃、Si₂N₄、CeO₂等;有机/无机复合介电材料兼具两者的优点,能够较大改善电介质层的性能,提高器件的电性能.

2.3 瞬态电子降解机理

降解机理对瞬态电子器件设计具有指导意义,按照降解触发方式不同,可从自然溶解、生物降解、水分触发、热触发、光响应、酸/碱触发等方面进行研究^[27].

2.3.1 自然溶解

自然溶解,主要是指基于材料的水溶性进行改性和成膜研究,实现对器件溶解时间的控制. Rogers 等^[28]以蚕丝蛋白为衬底, ZnO、MgO 为半导体和介质层材料,制备了水溶性晶体管(TFTs)和能量采集器阵列(MEHs), TFTs 的载流子迁移率为 0.95 cm²/V·S、开关电流比大于 10³, MEHs 的峰值输出功率为 10 nW/cm²、转换效率达 0.28%,器件在水中稳定工作 3h 后迅速退化降解. Zhao 等^[29]从橙皮中提取天然果胶,设计制备的 Ag/果胶/ITO 电阻式开关存储器,达到与无机电阻存储器同等性能,设定电压、复位电压平均值为 2.0V 和 -2.2V,无退化的可逆开关达 100 个周期,在水中

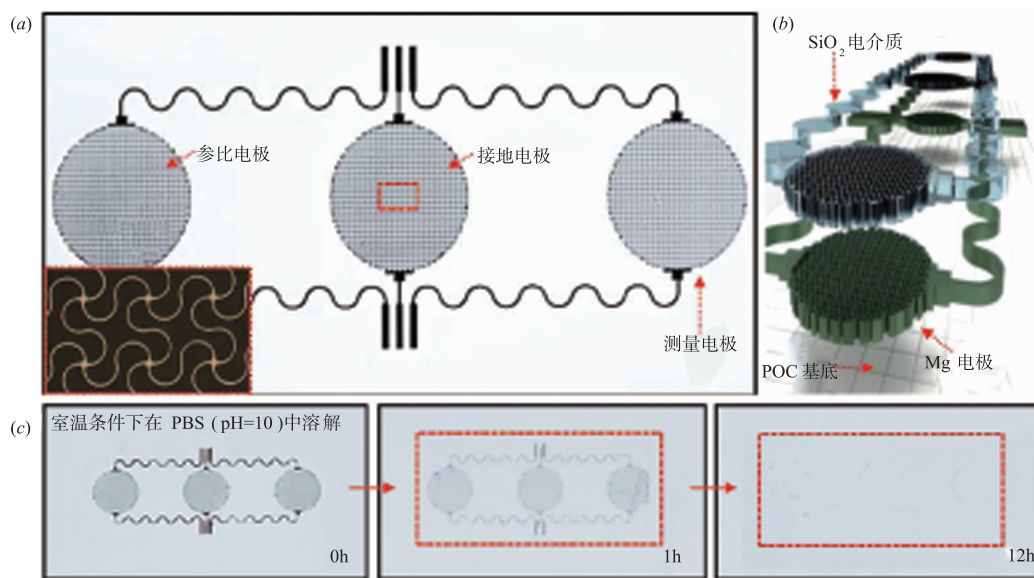
10min 内可完全溶解. Hwang 等^[30]以 Mg 为电极、Si 纳米膜为半导体材料制备的晶体管,迁移率和开关电流比分别为 475 cm²/V·S 和 10⁵,与非瞬态器件性能相当.通过材料改性,以苹果酸(MA)诱导发生额外缩合反应增加交联密度来改变果聚糖的化学结构和分子量,能够实现瞬态器件的可编程控制.

2.3.2 生物降解

生物降解,是指使用可生物降解材料制备瞬态功能电路和生物传感器,进行植入式医疗方面的应用探索. Jin 等^[31]以无定型铟镓锌氧化物(a-IGZO)、SiO₂ 为有源层和介质层材料,采用电子束蒸镀等方法在 PVA 基底上制备了薄膜晶体管(TFT)和环形振荡器(ROs), TFT 迁移率、开关电流比分别为 10 cm²/V·S 和 2 × 10⁶, ROs 在 19V 电压下 5.67 kHz 的振荡频率可与类似功能传统器件相媲美,器件在 60℃ 的 DI 和 PBS 中 30min 内溶解. Hwang 等^[32]用弹性体聚 1,8-辛二醇-柠檬酸作为衬底/封装材料,通过调整温度、pH 值、离子浓度、硅的掺杂水平等,控制材料的降解速率,设计制造了可生物降解的传感器(见图 2),包括基于掺杂硅纳米带的 pH 传感器和电容式电生理监测仪.传感器的 Mg 电极通过可生物降解弹性体薄膜与皮肤相连,可完成体液 pH 值和人体心电图的测量,室温条件下在磷酸缓冲盐溶液(pH=10)中 12h 内可完全溶解.

2.3.3 水分触发

水分触发,是以环境湿度为降解触发因素的瞬态设计,通过水分触发反应和器件的封装设计,可以精确调控器件的使用寿命. Yu 等^[33]在湿敏型聚酸酐衬底上

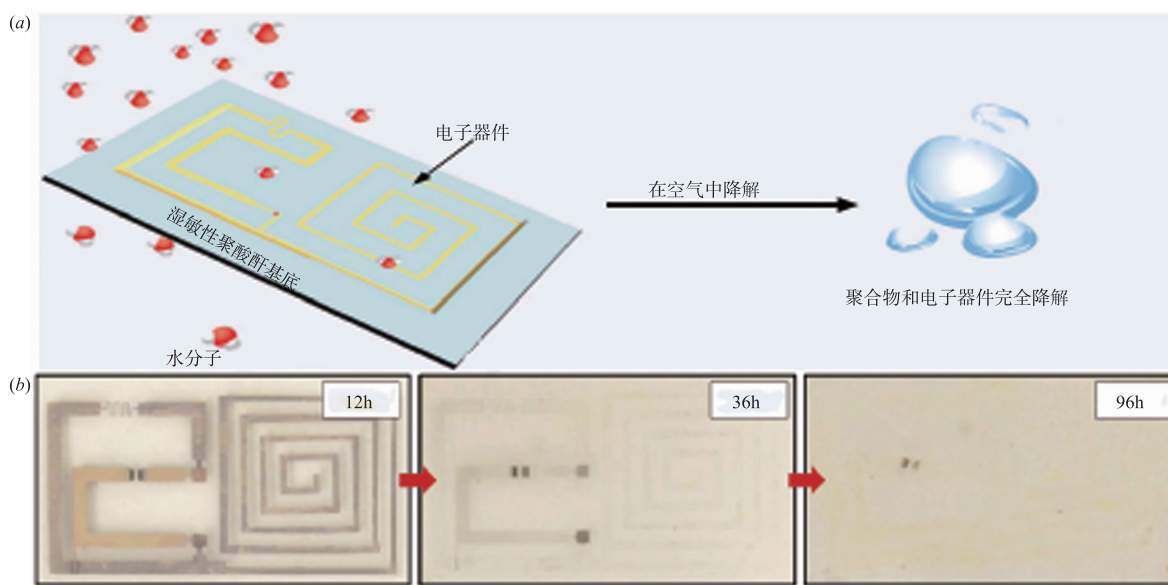


(a) 生物传感器的光学图像和网状电极的放大视图; (b) 传感器的分解结构示意图;
(c) 室温条件下传感器在磷酸缓冲盐溶液(pH=10)中溶解的图像

图2 可生物降解的电容式生理传感器^[32]

设计制备了水分触发的场效应晶体管(见图3),场效应迁移率和开关电流比分别为 $6.98\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{S}$ 和 7.93×10^4 ,可与在刚性晶片上制备的同类器件相媲美;衬底与环境水分子发生反应,生成具有腐蚀性的有机酸,能够溶解 Cu、MgO、IGZO 等电子材料.通过调控环境湿度、改变制备衬底的前驱液 PEG 含量,可以精确调节器件的降解时间. Yi 等^[34]以附着有 MoO_3/PLGA 复合膜的 Mo 箔作为电极,采用聚酸酐/PLGA 涂层的封装设计,制备了可生物降解电池. 电池的输出电压显著提

高,可持续 48h 提供 1.6V 的稳定电压,比一般 Mg-Mo 电池提高了 3 倍,使用寿命约 13 天. Jamshidi 等^[35]在 PVA/明胶共混膜中掺入造气剂碳酸氢钠(NaHCO_3)/柠檬酸($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$)和聚氧化乙烯(PEO)粉末,在乙醇中分散后,采用冲压的方法制成基底薄膜.当薄膜接触到水时,造气剂发生反应释放出 CO_2 气体,引发基底主动降解.通过改变 NaHCO_3 和 $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ 的混合比,可以调控基底的降解速率.



(a) 器件水分触发的降解示意图; (b) 在75%相对湿度条件下器件按时间顺序溶解图像

图3 水分触发瞬态电子器件^[33]

2.3.4 热触发

热触发,是以低温聚合物材料进行降解触发设计,通过温度控制引起瞬态装置的毁坏和降解. Liu 等^[36]采用气相沉积法在 POM 衬底上制备了 Cr/Au/SiO₂/Cu 记忆电阻器件,加热升温引发 POM 分解,器件在 180℃ 条件下 8min 后不能导电,42min 后完全销毁. Gao 等^[37]在弹性蛋白样多肽(ELPs)中混入银纳米线(AgNW)制备了 ELPs-AgNW 温度控制开关.添加冰袋降温至 10℃,能够在 160s 内关闭无线充电 LED 设备的照明. Mastangel 等^[38]提出了两种触发芯片瞬态物理自毁的设计方案:(1)通过微加热器触发涂覆在其表面的汽油凝胶薄膜燃烧,引发 CuO/nm Al 组成的瞬态层发生高能放热反应,使芯片熔化毁坏;(2)通过嵌入式微加热器触发帕利灵-C 储液罐下壁熔化破裂,释放腐蚀性化学制剂溶解功能芯片.

2.3.5 光响应

光响应,是以在光作用下材料的物态或理化性质发生改变进行瞬态设计,通过控制光发生器工作,引发器件的毁坏和降解. Zhao 等^[39]将交联剂与四臂聚乙二

醇胺混合生成网状结构水凝胶,制备了电阻式随机存取存储器(见图4),施加 $\pm 0.6\text{V}$ 电压扫描,显示了高阻与低阻状态的双极性切换行为.在紫外光作用下,水凝胶的偶氮键裂解,发生凝胶-溶胶不可逆相变,约 10min 触发器件降解. Badhulika 等^[40]采用水热处理法合成了水溶性衣康酸(IA)官能化硫化锌微球(IA-ZnS),并以可分解石墨烯(Gr)作为传输层和电极材料,在柔性 PVA 衬底上制备了 IA-ZnS/Gr 瞬态紫外光电探测器,响应度为 $1.08\text{mA}/\text{W}$,上升和下降时间分别为 6.1s 和 8.23s.光电探测器的电阻在紫外光照射下变小,当超过设定阈值时引发继电器打开电磁阀,来自蓄水池的供水完成对传感器的破坏.

2.3.6 酸/碱触发

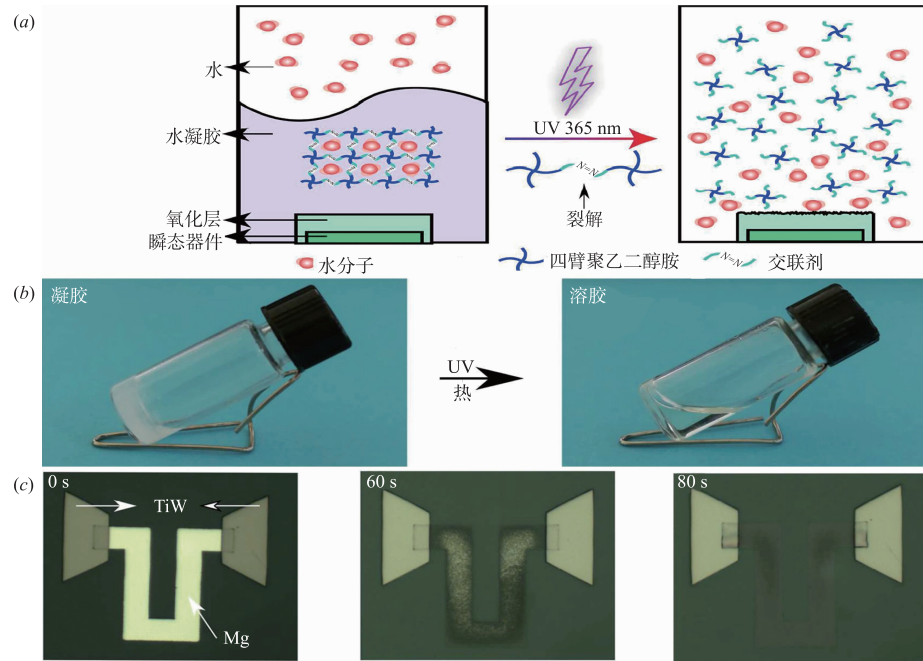
酸/碱触发,是通过基底或封装层在酸或碱的作用下快速溶解,引发器件在短时间内崩塌或降解. Hu 等^[41]采用折叠穿孔设计的 V_2O_5 作为阴极,由高容量的锂化铝合金、PEO 涂层和无硫铝箔导电带组成阳极,电纺 PVA 纤维膜作为分离器,ITO 作为导电材料制备了高面积能量密度的瞬态电池,能够提供约 $3\text{mAh}/\text{cm}^2$ 的

高面积容量和高于 2V 的工作电压. 电池采用 PVA 封装, 并用 PC 做防水涂层, 一旦与碱性 KOH 水溶液接触, 整个装置在 5min 内完全降解. White 等^[42]在酸敏感的低温聚合物环聚邻苯二甲醛(cPPA)衬底上制备了二极管阵列(见图 5). 采用熔融铸造的方法将纯硅蜡包覆在甲磺酸(MSA)上作为降解触发系统, 通过远端信号控制电阻式加热器升温至 75℃, 将蜡涂层熔化释放出

MSA, 数分钟内溶解包含 cPPA 基板在内的整个器件. 另外, 通过调节酸浓度、蜡保护层厚度和加热温度, 可调控器件的降解时间.

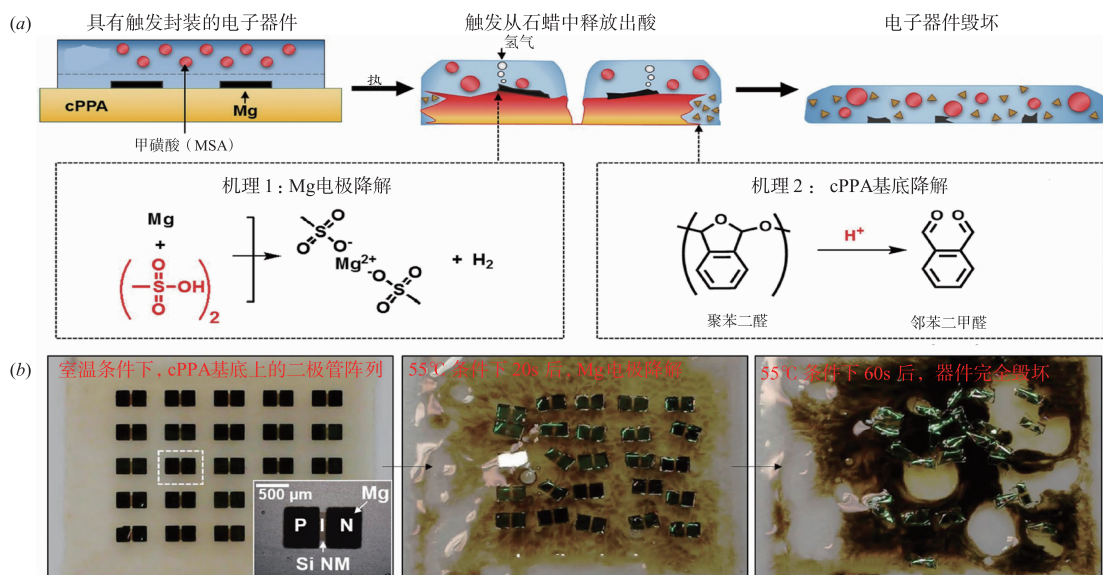
2.4 瞬态电子的制造技术

瞬态电子器件对水、氧气、温度、溶剂等较为敏感, 对制备环境要求严苛, 随着印刷电子技术的发展, 特别是转印、喷印、压印、溅射、光致成像等工艺的日趋成



(a)水凝胶/金属氧化物双层封装设计和紫外光/热触发降解示意图; (b)水凝胶在紫外光/热条件下由凝胶到溶胶转变的图像; (c)瞬态Mg电阻按时间顺序降解的图像

图4 光响应瞬态电子器件^[39]



(a)甲磺酸对镁电极和cPPA基底的降解示意图; (b) 55℃条件下40%甲磺酸/蜡涂层触发cPPA基底上二极管阵列的降解图像

图5 酸触发降解的瞬态电子器件^[42]

熟,为实现瞬态电子器件的大批量、低成本生产提供了解决方法。

Li 等采用转印技术,在 PVA 基底上制备了薄膜晶体管和环境监测传感器^[43]。具体制备步骤为:在晶圆上旋涂一层聚酰亚胺薄膜作为牺牲层,利用毛细管辅助电化学分层技术将预制备的器件从硅片上分离,采用电感耦合等离子体反应的干法刻蚀工艺去除聚酰亚

胺薄膜,将器件释放至 PVA 基底上,集成所需其他组件,形成完整电子系统(见图 6)。整个制备过程有效防止了对器件的机械损伤和化学污染,对牺牲层的去除较为彻底,确保了转印的高产量和器件的良好性能,平均器件产率为 96.6%,薄膜晶体管阈值电压的最小标准差为 55mV,该方法提供了一种可降解电子产品的晶圆级高产量制造工艺。

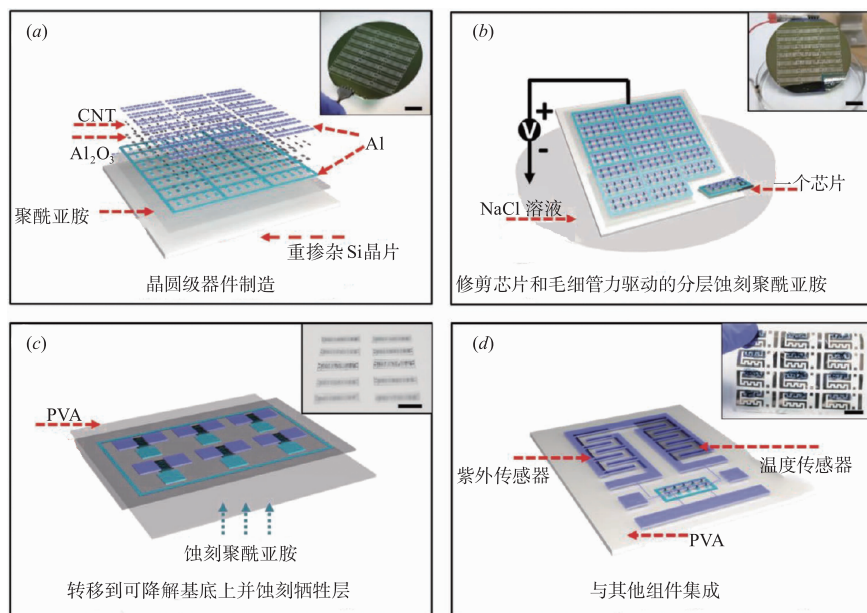


图6 瞬态电子器件晶圆规模制造过程示意图^[43]

Huang 等使用含有不规则纳米晶锌的油墨,通过光脉冲、激光烧结的方法,实现了常温条件下瞬态电子器件的快速制备^[44,45]。光脉冲烧结具体工艺过程为:以 0.1wt% 的 PVP 作为过程控制助剂防止锌粒子发生团聚,采用球磨法制备平均粒径约为 35nm 的不规则锌颗粒;采用丝网印刷或喷墨打印的方法在羧甲基纤维素钠基底上印制电路,通过光子烧结技术在非真空环境中完成对任意电路图案的制备(见图 7),锌金属导线导电率达到 44642.8S/m。激光烧结工艺,是在前面研究的基础上,将涂布有纳米锌的透明载玻片压盖在羧甲基纤维素钠基底上,使用连续激光辐射烧结。通过激光诱导蒸发和受限区域内的小间隙沉积,避免了锌纳米颗粒表面氧化物的影响,制备的锌图案导线导电率提高到 $1.124 \times 10^6 \text{S/m}$,并且可以实现线宽约为 $40 \mu\text{m}$ 且厚度为亚微米的锌迹线的制作。

3 瞬态电子的军事应用

3.1 信息安全存储

信息化作战条件下,争夺信息优势、保护信息安全比以往任何时候都更为重要。随着武器装备的信息化程度不断提高,涉密信息的安全存储成为亟待解决的

问题,瞬态电子技术的发展,为关键设备在信息安全存储方面提供了更多的选择。2015 年 DAPAR 在“等待·什么”未来科技论坛中展示了其研发的“自动销毁芯片”^[46]。该芯片使用离子交换技术将金刚玻璃与硅晶片封装,能够通过无线信号遥控启动自毁程序,激光对内部电阻进行加热升温致芯片在数秒内爆裂碎解,可用作无人机等军事设施设备核心控制部件。IBM 公司研制的一款依托活性金属氧化方式快速降解的芯片,可以通过遥控触发破坏密封玻璃涂层,引发活性金属与氧气发生剧烈反应,使芯片瞬间被高温烧成粉末。在国内也有相关类似研究,如存储设备制造商源科开发的 Invincible 固态硬盘(SSD),具备物理自毁机制,能有效防止敏感数据恢复,该 SSD 可以触发物理破坏功能,产生高电压和强电流摧毁 SSD 内部的记忆芯片^[47];王守旭等利用超声强化原位装药技术在多孔硅膜中填充高氯酸铵制备含能芯片,可通过加热触发芯片瞬间发生爆炸而彻底毁坏^[48]。

3.2 战场侦察监视

在作战行动中,各方部署在作战地域的电子设备往来来不及回收或难以回收,特别是通过抛投、播撒方式散落在敌方区域的,通常无法回收,一旦被敌方获

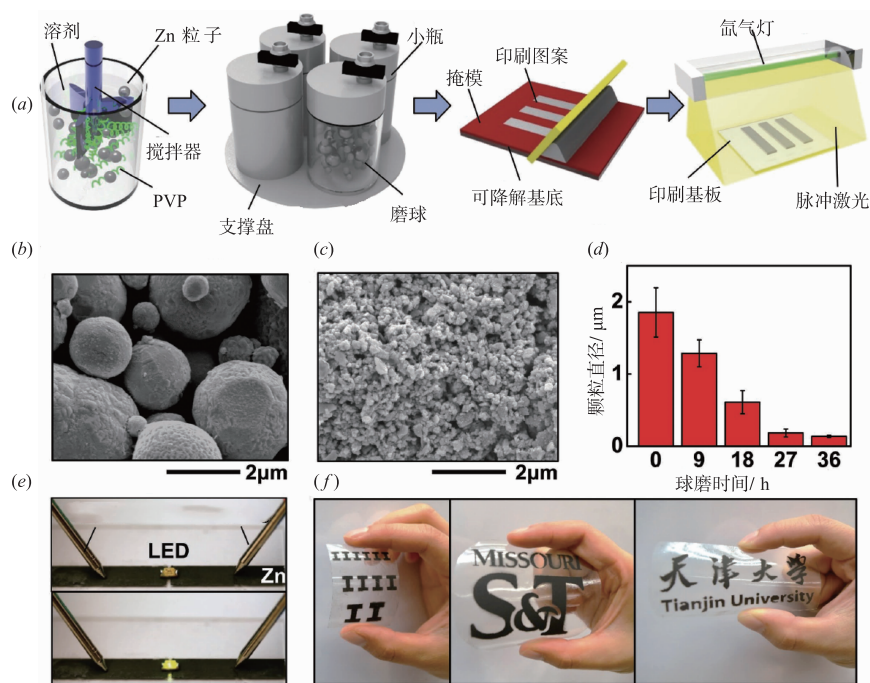


图7 制备不规则锌纳米粒子并印刷导电图案的过程^[44]

取,可能会造成涉密信息丢失或被敌方利用,实施电子对抗侦察和电子干扰.沙地直线计划是 DARPA 网络嵌入式系统技术项目的一部分,主要开发用于战场探测的无线传感器网络 (WSN)^[49],其网络节点由具备探测、计算和通信等不同功能的传感器组成.该技术面临的一个突出问题是无线传感器网络部署到作战区域以后无法回收,一旦被敌方发现,可能会被入侵网络进行对抗侦察,也可能被破解和仿制. VAPR 项目正是为了探索对电子产品“生存状态”的可编程,在可控的触发机制下溶解并消失在环境中,为完善和解决 WSN 项目的缺陷和不足而启动的.由美国爱荷华州州立大学研制的“实用型瞬态电池”,在水中半小时便会膨胀溶解,该锂离子电池大小仅为 $1\text{cm} \times 5\text{cm} \times 6\text{cm}$,由可降解的高分子复合材料制备,可提供 2.5V 电压,能持续稳定供电 15min ,主要用于执行军事任务的瞬态设备^[50].

3.3 士兵伤情防治

可生物降解材料和设备,包括免拆除的医用缝合诊断线、药物输送载体、用于组织再生的聚合物支架和辅助治疗的电子设备等,植入体内完成既定功能后无需手术去除,从而降低手术事故和感染的风险^[51].士兵在遂行多样化军事任务过程中,医疗条件和救治能力很难总是达到平时水平,植入式士兵健康监测和辅助治疗,能够赢得救治的第一时间,提高战场救护质量.早在 VAPR 项目之前, DARPA 就开展了“自溶解生物学植入物”项目研究,研制了一款小型电子设备,士兵受伤后将其吞入体内能够杀死病菌避免感染,设备可

溶解后被人体吸收,不会危害人体.2012 年, DARPA 提出了可植入纳米传感器愿景^[8],该计划主要是研究将新型纳米传感器植入士兵身体,用于监测士兵在未来战场上的健康状况,预估治疗所需的药品和器材,以便及时做出响应,实施精准保障.事实上,随着对植入芯片功能的完善,不仅能实现对军人多项生理指标的诊断和监测,提供药物辅助治疗,还能持续跟踪并掌握人员位置,为指挥员提供情报信息.

3.4 物资精确投送

随着信息技术的深入发展和广泛应用,作战反应时间大大缩短,对关键性战备物资的快速、精确保障提出了更高要求.基于瞬态电子技术的一次性运载工具精确投送,能够克服传统物资保障方式对战场环境的依赖性,在质量轻、体积小的重要物资投送方面有更好的效率,同时具有发射后不用回收,能够完全降解到周围环境中,不存在技术泄密隐患和环境污染问题,也不会给作战人员增加额外负担.2015 年 10 月, DARPA 正式启动“伊卡洛斯”项目,研究在完成的任务后能够自动降解消失的一次性运载工具的设计方案^[52].该项目设计指标是能够在 32 英尺高处对指定地点准确投送约 3 磅重的物资,在完成运输任务 4h 后自动降解. Otherlab 技术研究公司采用纸板制造的无人飞行器原型机,通过飞机高空发射,能够在预设地点 15m 内着陆,并在几个月内自动降解;可载重 1kg 以 88km/h 的速度飞行约 150km ,如数百架同时发射可覆盖数百公里区域的运输任务.下步 Otherlab 公司还将采用源于蘑菇的菌丝体材

料代替纸板,使用 DARPA 最新的瞬态溶解电路代替内部电子器件,研制真正意义的自销毁小型军用无人系统。

4 结论与展望

瞬态电子技术在可降解材料、触发降解机理、制造加工技术以及瞬态功能器件等基础性研究方面取得了明显成果,已形成较为完善的理论体系,但还存在材料合成制备复杂、成本高,降解过程不易控制,器件集成化程度低、电学性能不高,设备机械性能欠佳、环境适应性不好等问题,在商业化应用和规模化生产方面还存在一定困难。未来瞬态电子技术的主要研究方向有:

(1) 研发来源更广泛、综合性能更完备的衬底和封装材料,以满足瞬态电子器件多样化降解设计和不同工作环境使用的需求;开发电性能、热稳定性更好的金属和半导体材料,以满足印刷电子工艺和瞬态电子器件电学性能要求。

(2) 依据不同应用需求,探索瞬态电子器件的降解和扩散反应机理,优化设计器件的主动触发、可编程精确控制降解,提高瞬态电子器件的可靠性。

(3) 综合运用最新的器件设计理念和封装制备技术,加强瞬态电子器件与其他组件的集成研究,根据需要调整器件的机械强度、环境适应等性能,推动瞬态电子技术向实用型电子系统层级发展。

(4) 改进加工工艺,研发适合瞬态电子器件规模化生产的加工制造技术,逐步降低瞬态电子器件的生产成本,推广瞬态电子技术在更广泛的电子产品中应用。

(5) 在研发具有辅助诊疗作用的体内传感器和功能装置的同时,突出生物可降解能源器件的研究,进一步拓展瞬态电子技术在植入式医疗方面应用。

(6) 瞬态电子技术应用于军事领域,还需在器件的可靠运行、可控毁坏和可生物降解方面进一步研究。

随着新材料和新技术的快速发展,瞬态电子技术在环保、医疗、军事等领域必将有更为广阔的应用前景。

参考文献

- [1] M J Tan, C Owh, P L Chee, et al. Biodegradable electronics: Cornerstone for sustainable electronics and transient applications [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2016, 3(4): 5531 - 5558.
- [2] Hwang S W, Tao H, Kim D H, et al. A physically transient form of silicon electronics [J]. *Science*, 2012, 337(6102): 1640 - 1644.
- [3] Kang S, Yin L, Bettinger C. The emergence of transient electronic devices [J]. *MRS Bulletin*, 2020, 45(2): 87 - 95.
- [4] Tran H, Feig V R, Liu K, et al. Stretchable and fully degradable semiconductors for transient electronics [J]. *ACS central science*, 2019, 5(11): 1884 - 1891.
- [5] Ji X, Song L, Zhong S, et al. Biodegradable and flexible resistive memory for transient electronics [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2018, 122(29): 16909 - 16915.
- [6] Hu W, Jiang J, Xie D D, et al. Transient security transistors self-supported on biodegradable natural-polymer membrane for brain-inspired neuromorphic applications [J]. *Nanoscale*, 2018, 10(31): 14893 - 14901.
- [7] Koo J, Macewan M R, Kang S, et al. Wireless bioresorbable electronic system enables sustained nonpharmacological neuroregenerative therapy [J]. *Nature Medicine*, 2018, 24(12): 1830 - 1836.
- [8] 马文方. 暂态系统: 以安全的名义用后自毁 [N]. *中国计算机报*, 2014-02-24(5).
- [9] H Cheng, V Vepachedu. Recent development of transient electronics [J]. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 2016, 06(01): 21 - 31.
- [10] Kun Kelvin Fu, Zhengyang Wang, et al. Transient electronics: materials and devices [J]. *Chemistry of Materials*, 2016, 28(11): 3527 - 3539.
- [11] 高凌云. 可生物降解的电路 [J]. *科苑快讯*, 2013, 25(03): 55.
- [12] Acar H, Genc R, Urel M, et al. Self-assembled peptide nanofiber templated one-dimensional gold nanostructures exhibiting resistive switching [J]. *Langmuir*, 2012, 28(47): 16347 - 16354.
- [13] Li H, Zhao C, Wang X, et al. Fully bioabsorbable capacitor as an energy storage unit for implantable medical electronics [J]. *Advanced Science*, 2019, 6(6): 1801625.
- [14] Chen Y, Jamshidi R, White K, et al. Physical-chemical hybrid transiency: A fully transient li-ion battery based on insoluble active materials [J]. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 2016, 54(20): 2021 - 2027.
- [15] Jamshidi R, çinar S, Chen Y, et al. Transient bioelectronics: Electronic properties of silver microparticle-based circuits on polymeric substrates subjected to mechanical load [J]. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 2015, 53(22): 1603 - 1610.
- [16] 张颖, 陆炳卫, 徐航勋, 等. 瞬态电子器件研究最新进展 [J]. *中国科学: 物理学力学天文学*, 2016, 46(4): 044605. Zhang Y, Lu B W, Xu H X, et al. Recent progress in transient electronics [J]. *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2016, 46: 044605. (in Chinese)
- [17] Won S M, Koo J, Crawford K E, et al. Natural wax for transient electronics [J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(32): 1801819.
- [18] Irimia-Vladu M, Glowacki E D, Troshin P A, et al. Indigo: A natural pigment for high performance ambipolar organic

- field effect transistors and circuits [J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(3):375–380.
- [19] Hosseinz N R, Lee J S. Biocompatible and flexible chitosan-based resistive switching memory with magnesium electrodes [J]. *Advanced Functional Materials*, 2015, 25(35):5586–5592.
- [20] Xu F, Zhang H, Jin L, et al. Controllably degradable transient electronic antennas based on water-soluble PVA/TiO₂ films [J]. *Journal of Materials Science*, 2018, 53(4):2638–2647.
- [21] Xi H, et al. High performance transient organic solar cells on biodegradable polyvinyl alcohol composite substrates. [J]. *RSC Advances*, 2017, 7(83):52930–52937.
- [22] Li R, Wang L, Kong D, et al. Recent progress on biodegradable materials and transient electronics [J]. *Bioactive Materials*, 2018, 3(3):322–333.
- [23] Bettinger C J, Bao Z. Organic thin-film transistors fabricated on resorbable biomaterial substrates [J]. *Advanced Materials*, 2010, 22, 651–655.
- [24] Lee G, Kang S K, Won S M, et al. Fully biodegradable Microsupercapacitor for power storage in transient electronics [J]. *Advanced Energy Materials*, 2017, 7(18):1700157.
- [25] Feig V R, Tran H, Bao Z. Biodegradable polymeric materials in degradable electronic devices [J]. *ACS Central Science*, 2018, 4(3):337–348.
- [26] Kim D, Kim Y, Amsden J, et al. Silicon electronics on silk as a path to bioresorbable, implantable devices [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(13):133701.
- [27] 张颖. 刺激响应可降解聚合物的合成及应用研究 [D]. 合肥:中国科学技术大学, 2019.
Zhang Ying. *Synthesis and Applications of Stimuli-Responsive Degradable Polymers* [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019. (in Chinese)
- [28] Dagdeviren C, Hwang S, Su Y, et al. Transient, biocompatible electronics and energy harvesters based on ZnO [J]. *Small*, 2013, 9(20):3398–3404.
- [29] Xu J, Zhao X, Wang Z, et al. Biodegradable natural pectin-based flexible multilevel resistive switching memory for transient electronics [J]. *Small*, 2019, 15(4):1803970.
- [30] Kwon K Y, Lee J S, Ko G, et al. Biosafe, eco-friendly levan polysaccharide toward transient electronics [J]. *Small*, 2018, 14(32):1801332.
- [31] Jin S H, Kang S, Cho I, et al. Water-soluble thin film transistors and circuits based on amorphous indium-gallium-zinc oxide [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(15):8268–8274.
- [32] Hwang S, Lee C H, Cheng H, et al. Biodegradable elastomers and silicon nanomembranes/nanoribbons for stretchable, transient electronics and biosensors [J]. *Nano Letters*, 2015, 15(5):2801–2808.
- [33] Gao Y, Zhang Y, Wang X, et al. Moisture-triggered physically transient electronics [J]. *Science Advances*, 2017, 3(9):e1701222.
- [34] Huang X, Wang D, Yuan Z, et al. A fully biodegradable battery for self-powered transient implants [J]. *Small*, 2018, 14(28):1800994.
- [35] Jamshidi R, Chen Y, Montazami R. Active transiency: A novel approach to expedite degradation in transient electronics [J]. *Materials*, 2020, 13(7):1514.
- [36] Liu D, Zhang S, Cheng H, et al. Thermally triggered vanishing bulk polyoxymethylene for transient electronics [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1):18107.
- [37] Lin R, Yan X, Hao H, et al. Introducing temperature-controlled phase transition elastin-like polypeptides to transient electronics: Realization of proactive biotriggred electronics with local transience [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(50):46490–46496.
- [38] Pandey S S, Banerjee N, Xie Y, et al. Self-destructing secured microchips by on-chip triggered energetic and corrosive attacks for transient electronics [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2018, 3(7):1800044.
- [39] Zhong S, Ji X, Song L, et al. Enabling transient electronics with degradation on demand via light-responsive encapsulation of a hydrogel-oxide bilayer [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(42):36171–36176.
- [40] Sahatiya P, Shinde A, Kadu A, et al. Functionalized water soluble nanomaterials and their applications in wirelessly destructible programmed flexible transient photodetectors [J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2019, 93:324–330.
- [41] Fu K K, Wang Z, Yan C, et al. All-component transient lithium-ion batteries [J]. *Advanced Energy Materials*, 2016, 6(10):1502496.
- [42] Park C W, Kang S, Hernandez H L, et al. Thermally triggered degradation of transient electronic devices [J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(25):3783–3788.
- [43] Xiang L, Xia F, Zhang H, et al. Wafer-scale high-yield manufacturing of degradable electronics for environmental monitoring [J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(50):1905518.
- [44] Mahajan B K, Yu X, Shou W, et al. Mechanically milled irregular zinc nanoparticles for printable bioresorbable electronics [J]. *Small*, 2017, 13(17):1700065.
- [45] Shou W, Mahajan B K, Ludwig B, et al. Low-cost manufacturing of bioresorbable conductors by evaporation-condensation-mediated laser printing and sintering of Zn nanoparticles [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(26):1700172.
- [46] 柳琰, 杨碧瑶. 美研发“自动销毁芯片”保护涉密信息

- [J]. 保密科学技术,2015,(9):65.
- [47] Poluka Srilatha. Self destructing electronics [J]. IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering,2014,9(3):24-30.
- [48] 王守旭,沈瑞琪,叶迎华. 多孔硅含能芯片的制备工艺和性能研究[J]. 含能材料,2010,18(5):527-531.
- [49] 马文方. 无线传感器网跟物联网是两码事[N]. 中国计算机报,2010-02-08(24).
- [50] 自毁电池 [OL]. <http://www.news.iastate.edu/ne-ws/transient-batteries.html>,2016-08-04.
- [51] 陈桂,杨立宝. 生物可降解材料及其在生物医学上的应用[J]. 新材料产业,2018,12(09):38-41.
- [52] 胡燕萍. 侦察、安全、保密三者兼得——美国自销毁无人机研制进展与分析[N]. 中国航空报,2017-04-20(5).

作者简介



魏 伟 男,1989 年出生,硕士研究生,主要从事可降解材料和印刷电子技术等方面课题研究.
E-mail:178779043@qq.com

任向红 女,1970 年出生,教授、博士生导师. 从事装备研究工作.
E-mail:renxh701@163.com