

柔性传感器技术及其在智能包装中的应用

马艺宁, 李洁

(天津科技大学 中国轻工业食品包装材料与技术重点实验室, 天津 300457)

摘要: **目的** 随着 5G 技术的迅速发展, 智能包装受到了广泛关注。文中通过总结柔性传感器技术及其近年在智能包装领域的应用, 以期对未来智能包装技术的研发和应用提供参考依据。**方法** 通过文献分析柔性印刷电子技术、碳纳米技术以及硅光电子技术等柔性传感器技术的研究现状, 总结柔性传感器在食品质量检测、显窃启包装设计和电商物流监测三方面的相关应用, 为柔性传感器在智能包装中的进一步发展提供参考及建议。**结论** 大量研究表明, 目前柔性传感器在智能包装中的应用仍处于起步阶段, 各项技术仍在增长, 不具备完全的商业可行性。柔性传感器拓宽了智能包装的功能及应用领域, 可为内部产品提供良好的监测、记录和保障, 值得加大研发投入, 深入研究。

关键词: 智能包装; 柔性传感器; 食品质量检测; 显窃启包装

中图分类号: TB484 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2022)07-0225-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.07.029

Flexible Sensor Technology and Its Application in Intelligent Packaging

MA Yi-ning, LI Jie

(Key Laboratory of China Light Industry Food Packaging Materials and Technology, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China)

ABSTRACT: With the rapid development of 5G technology, intelligent packaging has attracted many concerns. The work aims to summarize the flexible sensor technology and its application examples in intelligent packaging in recent years so as to provide reference for the research and application of intelligent packaging technology in the future. Through the literature analysis of the research status of flexible sensor technologies such as flexible printing electronic technology, carbon nanotechnology and silicon optoelectronic technology, related applications of flexible sensors in food quality detection, tamper-evident packaging design and e-commerce logistics monitoring were summarized to provide reference and suggestions for further improvement of flexible sensors in intelligent packaging. A large number of studies show that the application of flexible sensors in intelligent packaging is still in its infancy, various technologies are still growing, and it does not have complete commercial feasibility. The flexible sensor broadens the function and application field of intelligent packaging, and can provide good monitoring, recording and guarantee for internal products. It is worthwhile to increase research and development investment and study in-depth.

KEY WORDS: intelligent packaging; flexible sensor; food quality detection; tamper-evident packaging

收稿日期: 2021-07-29

基金项目: 天津科技大学青年教师创新基金 (2017LG09)

作者简介: 马艺宁 (2000—), 女, 天津科技大学本科生, 主攻智能包装材料。

通信作者: 李洁 (1989—) 女, 天津科技大学讲师, 主要研究方向为生物可降解包装材料。

在5G时代浪潮下,人们生活水平不断提升,对食品、日用品、物流、医疗等领域的要求越来越高,智能包装成为提高国民生活品质的工具之一^[1-2]。《关于加快我国包装产业转型发展的指导意见》^[3]和《中国包装工业“十三五”发展规划》^[4]明确提出推进智能包装一体化发展,智能包装成为包装产业新的发展方向。

智能包装是在传统包装的基础功能上结合生物、材料、化学、物理、电子信息与通信等技术,实现对包装及内装物流通全过程的监测、记录、识别和控制,具有信息数据传输、记录、感知和交互等功能的包装技术^[5]。与传统的商业包装一旦离开包装厂就不具备监控产品质量的能力相比,智能包装描述了嵌入式系统技术在产品包装中的应用,能够通过各种方式继续监测产品品质,直到产品被消费^[6]。在现有的智能包装系统中,传感器的应用被认为是智能包装中最有创新的技术之一。相较于传统传感器,柔性传感器柔韧性较好,可适应复杂的表面和更多的应用场景,成为近年的研究热点。

文中总结国内外柔性传感器的最新技术进展及其在食品质量检测、显窃启包装设计,以及电商物流监测中的最新应用进展,讨论这一领域未来研究的挑战和机遇,以期为该领域的研究提供新的思路。

1 智能包装概述

智能包装(Intelligent Packaging)是一种通过运用生物学、化学、材料科学、人工智能、物理和电子信息等多元学科知识,以达到自动检测、传感、记录产品在运输和流通过程中的内部和外部环境变化的新技术。它是通过印刷、粘贴等方式与包装基材相结合成包装标签,根据环境变化该标签会产生物理变化,以告知消费者产品安全信息,从而促进消费者决策^[7-9]。智能包装目前作为集成各种创新技术的载体,随着科技的发展将更加智能可靠。一般来说,智能包装系统可以通过指示器、数据载体和传感器3种主要技术来实现。

指示器型可向消费者传达与某种物质存在与否及其浓度有关的信息。大多数情况下,这些信息通过即时的视觉变化来显示,其基本要求是这些颜色或强度的变化是不可逆的^[10]。指示器大致可以分为3类:时间-温度型指示器、气体指示型和新鲜度指标型。

数据载体可用于储存、分发、管理和产品追溯,包括条形码和射频识别标签(Radio Frequency Identification, RFID)^[7]。RFID目前已经是一种普及、主流技术,可通过固定频段的无线通信来识别物体^[11]。

传感器能够快速和明确地量化产品中的分析物^[12-13],是一种用来探测、定位或量化能量或物质的

装置,可用于探测或测量装置响应的物理、化学性质^[11]。根据不同的监测因素,传感器可以分为化学传感器、电化学传感器、光学传感器、生物传感器等。

在传统包装的基础上,智能包装通过采用新型科技手段在强化传统包装的保护、储存、运输、销售等基础功能的同时,还增加了食品质量检测、防窃启、运输物流检测等许多新的智能功能。智能包装正迅猛发展,并具有巨大的潜在市场^[14]。

2 柔性传感器技术概述

传感器作为智能包装中不可或缺的一部分,被认为是未来智能包装系统中最具前景和创新性的技术^[15-16]。它是一种利用识别元件感受检测信号,并按照一定规律通过转换元件转换成其他可用信号的装置,由敏感元件、转换元件和显示存储记录装置组成^[17]。能够快速、无损地检测包装中的化合物或气体^[7]。

传统的传感器柔韧性较差,难以适应产品包装的不规则表面,开发和生产成本较高,无法大批量地应用到包装中^[10]。这就需要进一步开发适应不规则表面且成本较低的柔性传感器。

近年来柔性传感器(Flexible Sensor)已经成为研究热点^[17-18]。制备柔性传感器所使用的衬底材料和器件材料都区别于传统传感器,柔性传感器的衬底材料一般使用聚乙烯醇、聚酰亚胺、聚酯、纸片、纺织材料等。器件材料分为金属材料、碳材料、无机材料和有机材料^[19]。柔性传感器具有优异的柔韧性、延展性以及可自由弯曲、折叠等优点,现广泛地应用于软机器人的健康监测、人体运动检测、生物医药和电子皮肤等多种场合^[20]。随着柔性印刷电子技术、碳纳米技术、硅光电技术等方面的研究发展,柔性传感器有望具备检出限低、灵敏度高、选择性好、价格低廉可批量生产等优点^[21-22]。

2.1 柔性印刷电子技术

柔性印刷电子技术(Flexible Printing Electronic Technology)是一种在柔性基底上印刷电子功能性油墨的新兴技术^[23]。该技术中油墨使用导电材料、智能感知材料等材质,通过常用的印刷技术(凹版印刷、喷墨印刷、丝网印刷)印制在软包装材料上,该方法是制造柔性电子器件(射频识别标签、显示器、传感器等)的一种技术创新^[24-25]。印刷电子传感器具有耗时少、成本低、重量轻、可弯曲、可滚动、便携等特性,同时具有在各种基底上创建传感器的可能性,是目前制作传感器的最佳方法^[26-27]。柔性印刷电子技术在可穿戴电子、人造皮肤、物联网设备等领域,尤其是智能封装领域,都广泛应用^[28]。

Javed等^[29]应用纳米银导电油墨在高压相纸上制

备湿度传感器, 这一传感器标签最适宜的带宽为 13.5 GHz, 具有 24 位的高数据容量、紧凑的尺寸和可靠的灵敏度函数, 并且该湿度传感器标签的直接印刷性非常适合智能包装和各种低成本应用。

Quintero 等^[30]采用局部喷墨的手段将电容传感器印刷在圆柱形的聚对苯二甲酸乙二醇酯 (Polyethylene Terephthalate, PET) 纤维上。根据 PET 纤维拉伸时自身尺寸变化而导致传感器电容值改变的原理设计的传感器, 可实现对聚合物的应变测量。实验得到, 在 10 m 长的 PET 纤维上印刷应变传感器, 可测量的应变高达 1%, 电容变化的最大值为 0.7%。该工艺也可扩展到其他电容 (湿度、水蒸气) 传感器的制造, 所制备的传感器有望在物流过程中实现对包装件所受应力 (湿度、水蒸气) 等因素的实时监测。

Emamian 等^[31]使用丝网印刷工艺成功地制造了一种复杂的压电式触摸传感器。传感器由顶部与底部的银电极层和二者之间的聚偏氟乙烯 (Polyvinylidene Fluoride, PVDF) 基压电层组成。所有这些层在 PET 和纸衬底上通过丝网印刷制备, 所得到的基于 PET 的触摸传感器的灵敏度为 1.2 V/N, 基于纸张的传感器的灵敏度为 0.3 V/N, 这表明这些传感器具有被用作触摸传感器或能量采集器的潜力。

Bariya 等^[32]在 PET 辊上制造了各种电化学传感器, 用于检测离子、代谢物、重金属和其他小分子。在该传感器中, 工作电极和对电极是碳极, 参比电极为银极, 封装材料是聚乙烯树脂。同时通过在印刷阵列上沉积能够选择性检测 pH、钠、钾、葡萄糖和钙等各种传感层, 证明了印刷电极的功能性。

2.2 碳纳米技术

纳米材料多应用于制备小型、高灵敏度、选择性和可逆性 (即允许多次连续测量) 的化学传感器, 这些传感器具有低检测限和低工作温度, 适用于多种领域 (生物医学、食品、战争等) 中的气体检测, 特别是碳纳米材料 (Carbon Nanomaterials, CNs)。CNs 具有高比表面积, 因此具有优异的检测灵敏度, 加上其优异的电性能 (高电流密度、高导电性) 和机械特性 (重量轻、易弯曲), 使其更适合应用于化学传感器, 如受体、传感器或两者兼有。CNs 是目前最受期待的柔性电子材料之一, 石墨烯、碳纳米管和炭黑等都是目前被广泛应用的碳纳米材料^[33]。

2012 年, Srikanth 等^[34]首次表明碳纳米管可以通过喷墨打印) 打印在 PET 和纸张上, 以产生化学传感器。该化学传感器不需要蒸汽浓缩器就可以在室温下检测环境中低浓度的 Cl_2 和 NO_2 蒸气。喷墨打印的碳纳米管薄膜比塑料基底上的浸涂薄膜更坚固。该薄膜具有传感器之间的低变化、自发信号恢复、可忽略的基线漂移, 以及在不损失传感器性能的情况下将传感器弯曲成折痕等性能。

刘坤林等^[35]应用丝网印刷工艺, 以石墨烯作为油墨 (温敏材料), 制备出石墨烯柔性温度传感器, 并证明该石墨烯为多层结构, 且经高温处理后形貌更平整, 导电性能更加稳定, 响应几乎不受形变影响等特性。

Shin 等^[36]开发了一种基于碳纳米管的导电油墨, 可用于制造 2D 柔性电子器件。以 DNA 为表面活性剂, 将碳纳米管分散在甲基丙烯酸和透明质酸中, 制备了环保型导电油墨。这种油墨由互连的多壁碳纳米管组成, 当其印制的柔性电子器件向内 (负角度) 折叠时, 会使碳纳米管之间产生更多连接, 从而导致电阻降低; 向外折叠且油墨拉伸时, 碳纳米管之间的连接松动或其中一些彼此断开, 会导致电阻增加, 因此不同的折叠角度下, 该柔性电子器件的电阻测量值也不同。当折叠角度为 180° 时, 其电阻测量值较初始状态增大了 25%。

2.3 硅光电子技术

硅光子传感器由集成在硅半导体材料中的光学电路组成, 是一种波导吸收光谱仪, 被认为是尺寸小且高效的光学传感器, 其表现出较高的折射率灵敏度, 目前正在研究将其应用于化学、生物传感器中。与电信号传感相比, 基于光学信号的传感器不需要电源, 并且可以通过使用紫外光、可见光或红外光从远处供能或读取结果。同时硅光子传感器还具有生产成本低和适合大规模生产的特点, 因此有望成为传统技术的商业可行替代品, 并可在 (生物) 医疗、环境和食品相关应用中得到大规模应用。光学信号传感器的开发有着诱人的前景^[10,24]。

Laplatine 等^[37]结合硅光子学和扇出晶圆级封装技术设计了一款低成本多路生物传感器。该传感器采用片上锗光电探测器, 将集成 16 个微环谐振器的 1 mm^2 芯片封装在具有电互连和微流体通道的环氧树脂盒中。该结构减少了硅芯片的尺寸, 同时简化了微流体和光学集成, 使读卡器设备更紧凑、更耐用。这一生物传感器表现出与无源电路相似的灵敏度。

Harras 等^[38]应用多孔硅 (Porous Silicon, PSi) 制作的化学传感器, 重点讨论了银电接触对传感器性能的影响。该传感器设计表现出良好的溶剂渗透蒸发可逆响应, 说明传感器没有与测试溶液发生化学反应或表面修饰。在重复使用时, 能够保持高的灵敏度, 对背面接触具有极好的存储稳定性, 可用于检测各种化学分析物, 具有显著的灵敏度和极快的响应。

Mourya 等^[39]研究了在多孔硅 (PSi) 衬底上生长的钯-铂 (Pd-Pt) 功能化碳化硅 (SiC) 薄膜具有氢气 (H_2) 传感特性, 并且这一 H_2 传感器有显著的优点, 例如稳定的高感测响应、大的可调谐检测范围、快速的响应/恢复时间、良好的再现性、高选择性、宽的工作温度范围和良好的耐久性等。

3 柔性传感器在智能包装中的应用

3.1 食品质量检测

食品安全已经成为社会关注的一个主要问题。食品随着时间、外界条件等的变化可能会发生生物、化学或物理反应,最终导致产品变质^[40-41]。在大多数情况下,消费者很难评估这些变化,这成为了影响消费者健康的重要因素,因此在食品销售过程中对其质量进行检测是必要的,一个可以准确、实时监控,并传达食品质量的包装就显得尤为重要。一款合格的智能包装不仅可以更好地保护顾客免受有害食品的损害,满足消费者的购买需求,还可以最大程度上提高食品行业的资源利用,减少食品浪费。

目前柔性传感器技术已在食品包装领域得到了初步应用。传感器通过检测包装内气体(CO₂、O₂)、pH值、温度、湿度和颜色等的变化,反馈产品的实时信息,从而达到对食品新鲜度、有害化学品残留等方面的监控和反馈,有效地监测产品质量,帮助消费者购买选择。

3.1.1 新鲜度检测

食品的新鲜度是消费者在选择食品时需要考虑的重要品质之一。因为许多人在没有设备或仪器的情况下很难确定新鲜度的高低^[42],所以需要智能包装中的传感器进行信息监测和反馈。新鲜度传感器是一种能够指示食品物理、化学特性(如pH值、温度、湿度和颜色等)变化的传感器。此外,新鲜度传感器对食品降解过程中发生的变化也很敏感,如颜色变化、食品腐败产生的气体和细菌计数等^[43]。文中简要介绍几种应用于食品新鲜度检测的柔性传感器。

3.1.1.1 肉制品新鲜度检测

Hasanah等^[44]成功地开发了一种利用发色团(声色离子载体)作为试剂的光学pH传感器来测定鱼的新鲜度。将发色团固定在果胶水凝胶膜上,通过发色团官能团的质子化和脱质子化来检测鱼肉表面pH值的变化。果胶水凝胶膜无毒,适合作为食品传感器基体。此外,果胶是一种亲水性聚合物,比疏水性合成聚合物具有更高的渗透性,可以增强发色团在聚合物中的吸附,从而对pH值变化做出快速反应。经过测试及性能分析,该传感器可以给出快速响应,并产生理想的线性和再现性。

Kuswandi等^[45]报道了一种以姜黄素为试剂的虾类腐败监测光学传感器。姜黄素是一种从草药姜黄中分离出来的天然染料色素。文中采用吸附法将姜黄素固定在细菌纤维素膜聚合物基质上。所制备的姜黄素细菌纤维素膜可随着pH值的升高,颜色由黄色变为橙色,再变为红橙色。红橙色阶段则说明虾仁已发生腐败。姜黄素对酸碱反应高度敏感,为检测食品新鲜度提供了一种简单的方法,这使得大规模生产低成本

传感器成为可能。

3.1.1.2 果蔬新鲜度检测

检测果蔬新鲜度的传感器大致分为2种原理,一种是直接从水果中检测特定的分析物,作为食品新鲜度的指标。另一种是基于果蔬的反应,检测某些新鲜度参数如温度、时间等,从而得到其新鲜度的反馈信息^[6]。通过将传感器安装在产品包装上,监控包装内外的环境,并告知消费者果蔬的新鲜度、成熟度或硬度,使消费者对产品的质量作出明智的判断,辅助其进行购买。

Maftoonazad等^[46]设计了一种pH生物传感器,可以检测枣果的新鲜度。这项研究通过从红甘蓝中提取花青素固定在聚乙烯醇(Polyvinyl Alcohol, PVA)中制备传感器膜,将传感器膜放置在包装薄膜内侧,然后根据枣果pH值的变化观察传感器膜的颜色变化。利用天然丰富的红甘蓝中的花青素作为pH传感器的指示剂,具有制备成本低等优点。所研制的pH生物传感器也具有一定的可塑性、稳定性和灵敏度。

Kim等^[47]开发了一种基于甲基红的比色传感器包装标签,可以检测苹果成熟过程中醛的释放。该传感器标签利用可印刷油墨在纸介质上构建,依赖于醛和氢氧化物之间的亲核加成反应引起碱性变化,并通过甲基红表现出颜色变化。这一传感器可用于检测溶液和蒸气中的醛,其颜色随着苹果成熟度增加(醛释放量增加)从黄色变为橙色,然后变为红色,因此,该传感器标签可用于苹果货架期内包装成熟度的实时监测。

此类柔性传感器智能包装通过颜色显示,可帮助消费者对产品的成熟度进行选择。同时这种传感器还可以减少消费者在选择和检查水果时可能造成的水果损伤,是较为卫生和环保的包装方案。

3.1.2 有害物质检测

食品的质量安全问题还主要存在于农药残留、微生物腐败和致病微生物的侵袭等方面,传感器可用于果蔬农药残留和食品中微生物及其代谢产物的检测^[16]。

Toxin GuardTM是加拿大Toxin Alert Inc公司开发的一种视觉生物传感器,该传感器可根据抗体-抗原反应检测可能污染食品的路原体或其他微生物,如弯曲杆菌属、黄曲霉毒素、沙门氏菌属、大肠杆菌O157、李斯特菌属等。Toxin GuardTM的工作原理是聚合物包装膜上的抗体-抗原反应:在病原菌存在的情况下,细菌毒素与抗体结合并固定在柔性聚合物薄膜(如聚乙烯、聚丙烯)的薄层上(包装内侧),使智能设备的颜色发生明显变化^[48]。基于同样的原理,Flex Alert公司目前已经开发出可商用的柔性生物传感器,可有效检测存在于食品中的大肠杆菌、黄曲霉毒素等有害菌种^[13]。

梁刚等^[49]采用丝网印刷碳纳米管电极(Screen-

printed Carbon-nanotube Electrode, CNTSPE), 利用层层组装技术将乙酰胆碱酯酶 (Acetylcholinesterase, AChE)、聚二烯丙基二甲基氯化铵 (Poly Dimethyl Diallyl Ammonium Chloride, PDDA) 逐层依次修饰于 CNTSPE 表面, 制备了 PDDA/AChE/PDDA/AChE/PDDA 修饰的 CNTSPE 传感器, 该电化学传感器对氧磷、毒死蜱 2 种农药的线性响应分别为 50 ~ 150 ng/mL 和 20 ~ 150 ng/mL, 检测限分别为 20、10 ng/mL。该传感器具有良好的准确性和灵敏性, 并且具有易操作、高灵敏、抗干扰能力强、环境污染小等特点, 可应用于实际产品中农药含量的检测。

3.2 显窃启包装设计

显窃启包装 (Tamper-Evident Packaging) 是一种为防止偷启、私启包装等非法行为而带有特别保护措施的功能性包装^[50], 其目的是让消费者能直接通过商品的外观直接辨别商品包装是否曾被人开启过^[51]。现有的显窃启包装一般不具有智能性, 智能型的显窃启包装必须依靠传感器等智能硬件来实现^[52]。

Ke 等^[28]采用简单的多元醇还原法制备了 V 形银纳米线。通过丝网印刷技术, 在 PET 表面制备了一种水基 Ag-NWs 导电油墨全印刷角度识别柔性传感器, 可用于防篡改包装。该可弯曲传感器显示了 Ag-NWs 层电阻与弯曲角度之间的对应变化关系, 在包装开启弯曲角度为 45°、90°和 135°时, 具有稳定的电阻灵敏度。同时表现出长期的机械循环稳定性 (1 000 次弯曲循环后无明显衰减) 和优异的黏附性能 (20 次后电阻无明显增加), 能够准确地检测出包装的开启状态。

3.3 电商物流监测

随着市场经济的快速发展, 商品流通频率增加、流通范围变广, 物流包装也成为了包装印刷行业中重要的市场领域^[53]。电商时代下物流包装的高速发展引起的一系列的连锁反应, 比如说暴力装运、产品污染、食品变质等。所以在运输中对商品进行实时监测、数据收集和损坏防治成为了物流运输过程中必须要面对且解决的问题。越来越多的物流信息技术受到人们的关注, 针对冷链物流、贵重物品物流、仓储定位等难题, 给出了各种新的解决方案。

Elin 等^[54]以电致变色 (Electrochromic, EC) 材料和器件为出发点, 创新采用共轭电致变色聚合物, 在减少层数的基础上进一步改进了印刷电子显示与灵敏度。这一研究不仅增强 EC 显示器的对比度和灵敏度, 而且通过去除占印刷标签成本相当一部分的底层导电层, 实现成本降低及生产简化。通过此工艺制备的传感器能够提供按需、可逆的色彩变化, 反馈时间从秒到分钟不等, 工作电压低于 1 V, 光学存储器超过 60 min, 保质期超过 12 个月。同时提供了一种

用户控制的、动态的、低功耗、低能耗的信息显示方式, 在物流运输和零售领域具有广阔的前景。

Bruno 等^[55]利用 Novacentrix 公司的 Metalon 水基银墨水, 通过低成本的全喷墨工艺制备出了一种基于 PET 基底的压力传感器。该传感器通过检测基底电阻的变化, 从而感知外界压力的变化情况, 低成本直接印刷的工艺所制备的压力传感器有望应用于监测包装运输过程中压力变化, 防止包装出现损坏。Sun 等^[56]通过优化调整聚氧乙烯 (Polyethylene Oxide, PEO) 基固态聚合物电解质材料, 进而以匹配混凝土硬化模型, 增强了 PEO 在 20~60 °C 温度范围内对温度的敏感性, 可制备监测温度变化的传感器, 用于生鲜、果蔬等对温度变化较敏感的产品的包装, 在产品运输过程中起到监测温度的作用。

4 结语

随着各种新兴技术的发展, 柔性传感器的功能将越来越完善, 其在产品包装上的应用将得到进一步的扩展和延伸。同样对智能包装的探索有利于进一步增加包装产品品种、提高包装产品品质, 更好地保护产品, 服务于消费者。除此之外, 柔性传感器技术在智能包装领域的应用也面临着诸多瓶颈与挑战。

柔性印刷电子技术具有大批量生产的优势, 有利于构筑多功能电子器件, 但是应用这一技术制备柔型传感器时所使用的导电油墨大多含有易挥发的有机溶剂和有毒物质, 这一缺点限制其在食品包装、药品包装等方面的应用。在制备柔型传感器过程中还要对印刷的速度、干燥时间、油墨黏度等因素进行调控, 从而提高柔型传感器在产品运输和储存过程中的灵敏度和选择性, 因此未来可重点发展无毒、环保的导电油墨, 并进一步优化导电油墨配方, 开发功能型油墨, 并匹配相应的印刷技术, 以适应产品的不同需求。

CNs 因其优越的灵敏度、电性能和力学性能, 有望成为新一代微型化、低功耗通用传感器的首选材料。柔性传感器中 CNs (碳纳米管、石墨烯等) 的制备技术工艺水平还不成熟, 且存在成本高昂、适用范围小、使用寿命短以及生物安全等问题, 无法实现工业化。使用 CNs 制备的柔型传感器必须避免表面存在的污染物, 这对柔性传感器的制备及使用造成了极大的困难。未来应侧重于传感器制备工艺的优化、选择性的改善和性能的改善等方面。

硅光电子技术常用于对食品包装顶部空间进行选择性地气体浓度检测。其优点是生产成本低, 并且可以使用与传统硅半导体生产相同的方法和基础设施进行大规模生产, 有望大规模应用于食品包装, 但是这项技术所面对的主要问题是噪声的敏感性, 检测灵敏度低, 以及用于传感器读数的红外激光器和探测器

高昂的开发和运行成本,因此还需进一步研发解决以上技术瓶颈。

虽然现在仍有许多障碍要克服,但是随着技术的进步和市场需求的增长,智能包装将在未来取得较大的突破,为消费者带来更多的利益和便利。

参考文献:

- [1] 陈克复, 陈广学. 智能包装——发展现状、关键技术及应用前景[J]. 包装学报, 2019, 11(1): 1-17.
CHEN Ke-fu, CHEN Guang-xue. Intelligent Packaging: Development Status, Key Technologies and Application Prospects[J]. Packaging Journal, 2019, 11(1): 1-17.
- [2] 仲波. 智能包装市场蓝海待开发[N]. 中国新闻出版广电报, 2020-08-19(D08).
ZHONG Bo. Blue Sea of Intelligent Packaging Market to Be Developed[N]. China Press, Publication, Radio and Television News, 2020-08-19(D08).
- [3] 工业和信息化部, 商务部. 关于加快我国包装产业转型升级发展的指导意见: 工信部联消费[2016] 397号[EB/OL]. [2017-11-01]. <http://www.mofcom.gov.cn/article/h/redht/201612/20161202273150.shtml>.
Ministry of Industry and Information Technology, Ministry of Commerce. Guidance on Accelerating the Transformation and Development of Packaging Industry in China: Consumer Goods Industry Division, Ministry of Industry and Information Technology [2016] No. 397 [EB/OL]. [2017-11-01]. <http://www.mofcom.gov.cn/article/h/redht/201612/20161202273150.shtml>.
- [4] 中国包装联合会. 中国包装工业发展规划(2016-2020年)[EB/OL]. [2017-11-01]. <http://www.cpta.org.cn/articleDetail.html?id=6821>.
China Packaging Federation. China Packaging Industry Development Plan (2016-2020)[EB/OL]. [2017-11-01]. <http://www.cpta.org.cn/articleDetail.html?id=6821>.
- [5] 王展, 钟云飞. 基于印刷电子的智能包装研究与应用[J]. 数字印刷, 2020(5): 16-25.
WANG Zhan, ZHONG Yun-fei. Research and Application of Intelligent Packaging Based on Printed Electronics[J]. Digital Printing, 2020(5): 16-25.
- [6] ALAM A U, PRANALI R, HEBA B, et al. Fruit Quality Monitoring with Smart Packaging[J]. Sensors, 2021, 21(4): 1509.
- [7] 薛佳祺, 王颖, 周辉, 等. 包装技术在肉制品保鲜中的研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(16): 367-373.
XUE Jia-qi, WANG Ying, ZHOU Hui, et al. Research Progress of Packaging Technology in the Preservation of Meat Products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(16): 367-373.
- [8] 黄少云. 新鲜度指示型智能包装的研究进展与展望[J]. 今日印刷, 2019(9): 71-74.
HUANG Shao-yun. Research Progress and Prospect of Freshness Indicating Intelligent Packaging[J]. Print Today, 2019(9): 71-74.
- [9] 付秋莹. 智能包装技术在食品行业的应用概述[J]. 印刷杂志, 2019(1): 49-53.
FU Qiu-ying. Intelligence Packaging Technologies in Food Industry[J]. Printing Field, 2019(1): 49-53.
- [10] VANDERROOST M, RAGAERT P, DEVLIEGHERE F, et al. Intelligent Food Packaging: The next Generation[J]. Trends in Food Science & Technology, 2014, 39(1): 47-62.
- [11] LEE S Y, LEE S J, CHOI D S, et al. Current Topics in Active and Intelligent Food Packaging for Preservation of Fresh Foods[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2015, 95(14): 2799-2810.
- [12] MÜLLER P, SCHMID M. Intelligent Packaging in the Food Sector: A Brief Overview[J]. Foods, 2019, 8(1): 16-16.
- [13] GHAANI M, COZZOLINO C A, CASTELLI G, et al. An Overview of the Intelligent Packaging Technologies in the Food Sector[J]. Trends in Food Science & Technology, 2016, 51: 1-11.
- [14] 刘辰雨, 张改梅, 宋晓利, 等. 智能包装的应用与发展趋势分析[J]. 包装工程, 2019, 40(15): 80-86.
LIU Chen-yu, ZHANG Gai-mei, SONG Xiao-li, et al. Application and Development Trend of Intelligent Packaging[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(15): 80-86.
- [15] KUSWANDI B, WICAKSONO Y, JAYUS, et al. Smart Packaging: Sensors for Monitoring of Food Quality and Safety[J]. Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety, 2011, 5(3/4): 137-146.
- [16] 邵平, 刘黎明, 吴唯娜, 等. 传感器在果蔬智能包装中的研究与应用[J]. 食品科学, 2021, 42(11): 349-355.
SHAO Ping, LIU Li-ming, WU Wei-na, et al. Research and Application of Sensors in Intelligent Packaging of Fruits and Vegetables[J]. Food Science, 2021, 42(11): 349-355.
- [17] JING Xin, MI Hao-yang, LIN Y J, et al. Highly Stretchable and Biocompatible Strain Sensors Based on Mussel-Inspired Super-Adhesive Self-Healing Hydrogels for Human Motion Monitoring[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10(24): 20897-20909.
- [18] LIU Si-jun, LI Lin. Ultrastretchable and Self-Healing Double-Network Hydrogel for 3D Printing and Strain Sensor[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(31): 26429-26437.
- [19] 田全慧, 张建青. 柔性传感器的制备[J]. 上海包装, 2020(4): 25-29.
TIAN Quan-hui, ZHANG Jian-qing. Preparation of Flexible Sensor[J]. Shanghai Packaging, 2020(4): 25-29.
- [20] WANG Hai-fei, WANG Zi-ya, YANG Jian, et al. Ionic Gels and Their Applications in Stretchable Electronics[J]. Macromolecular Rapid Communications, 2018, 39(16): 1800246.
- [21] WYSER Y, ADAMS M, AVELLA M, et al. Outlook and

- Challenges of Nanotechnologies for Food Packaging[J]. *Packaging Technology and Science*, 2016, 29(12): 615-648.
- [22] ZHANG Heng, XIANG Li, YANG Ying-jun, et al. High-Performance Carbon Nanotube Complementary Electronics and Integrated Sensor Systems on Ultrathin Plastic Foil[J]. *ACS Nano*, 2018, 12(3): 2773-2779.
- [23] BIJI K B, RAVISHANKAR C N, MOHAN C O, et al. Smart Packaging Systems for Food Applications: A Review[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2015, 52(10): 6125-6135.
- [24] 王志伟. 智能包装技术及应用[J]. *包装学报*, 2018, 10(1): 27-33.
WANG Zhi-wei. Intelligent Packaging Technology and Its Application[J]. *Packaging Journal*, 2018, 10(1): 27-33.
- [25] WANG Xin, WEI Miao-miao, LI Xiao-qian, et al. Large-Area Flexible Printed Thin-Film Transistors with Semiconducting Single-Walled Carbon Nanotubes for NO₂ Sensors[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(46): 51797-51807.
- [26] 陈广学. 用印刷技术提高智能制造水平[EB/OL]. [2018-04-17]. http://iot.china.com.cn/content/2018-04/17/content_40294968.htm
CHEN Guang-xue. Using Printing Technology to Improve the Level of Intelligent Manufacturing[EB/OL]. [2018-04-17]. http://iot.china.com.cn/content/2018-04/17/content_40294968.htm
- [27] 吴伟. 全印制柔性应变传感器的原理与智能包装应用[J]. *包装工程*, 2020, 41(11): 156-165.
WU Wei. Mechanisms and Application of Fully-Printed Flexible Strain Sensors for Smart Packaging[J]. *Packaging Engineering*, 2020, 41(11): 156-165.
- [28] KE S, GUO P, PANG C, et al. Screen-Printed Flexible Strain Sensors with Ag Nanowires for Intelligent and Tamper-Evident Packaging Applications[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2020, 5(5): 1901097.
- [29] JAVED N, HABIB A, AMIN Y, et al. Directly Printable Moisture Sensor Tag for Intelligent Packaging[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(16): 6147-6148.
- [30] QUINTERO A V, CAMARA M, MATTANA G, et al. Capacitive Strain Sensors Inkjet-Printed on PET Fibers for Integration in Industrial Textile[J]. *Procedia Engineering*, 2015, 120: 279-282.
- [31] EMAMIAN S, NARAKATHU B B, CHLAIHAWI A A, et al. Screen Printing of Flexible Piezoelectric Based Device on Polyethylene Terephthalate (PET) and Paper for Touch and Force Sensing Applications[J]. *Sensors & Actuators: A Physical*, 2017, 263: 639-647.
- [32] BARIYA M, SHAHPAR Z, PARK H, et al. Roll-to-Roll Gravure Printed Electrochemical Sensors for Wearable and Medical Devices[J]. *ACS Nano*, 2018, 12(7): 6978-6987.
- [33] 张洋, 褚夫强, 孙加振. 碳材料在柔性印刷电子中的应用进展[J]. *广东印刷*, 2020(5): 35-37.
ZHANG Yang, CHU Fu-qiang, SUN Jia-zhen. Application Progress of Carbon Materials in Flexible Printed Electronics[J]. *Guangdong Printing*, 2020(5): 35-37.
- [34] AMMU S, DUA V, AGNIHOTRA S R, et al. Flexible, All-Organic Chemiresistor for Detecting Chemically Aggressive Vapors[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2012, 134(10): 4553-4556.
- [35] 刘坤林, 刘杨. 基于石墨烯的柔性温度传感器制备[J]. *科技风*, 2021(2): 87-89.
LIU Kun-lin, LIU Yang. Preparation of Flexible Temperature Sensor Based on Graphene[J]. *Technology Wind*, 2021(2): 87-89.
- [36] SHIN S R, FARZAD R, TAMAYOL A, et al. A Bioactive Carbon Nanotube-Based Ink for Printing 2D and 3D Flexible Electronics[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(17): 2380-2389.
- [37] LAPLATINE L, LUAN En-xiao, CHEUNG K, et al. System-Level Integration of Active Silicon Photonic Biosensors Using Fan-out Wafer-Level-Packaging for Low Cost and Multiplexed Point-of-Care Diagnostic Testing[J]. *Sensors and Actuators: B Chemical*, 2018, 273: 1610-1617.
- [38] HARRAZ F A, ISMAIL A A, FAISAL M, et al. Organic Analytes Sensitivity in Meso-Porous Silicon Electrical Sensor with Front Side and Backside Contacts[J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2020, 13(1): 444-452.
- [39] MOURYA S, KUMAR A, JAISWAL J, et al. Development of Pd-Pt Functionalized High Performance H₂ Gas Sensor Based on Silicon Carbide Coated Porous Silicon for Extreme Environment Applications[J]. *Sensors & Actuators: B Chemical*, 2019, 283: 373-383.
- [40] HEISING J K, DEKKER M, BARTELS P V, et al. Monitoring the Quality of Perishable Foods: Opportunities for Intelligent Packaging[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2014, 54(5): 645-654.
- [41] FUNG F, WANG H S, MENON S. Food Safety in the 21st Century[J]. *Biomedical Journal*, 2018, 41(2): 88-95.
- [42] KHALID W E F W, JAIS N I A. A Mini Review on Sensor and Biosensor for Food Freshness Detection[J]. *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, 2021, 25(1): 153-164.
- [43] VARGAS-SANSALVADOR I M, ERENAS M M, MARTÍNEZ-OLMOS A, et al. Smartphone Based Meat Freshness Detection[J]. *Talanta*, 2020, 216: 120985.
- [44] HASANAH U, SETYOWATI M, EFENDI R, et al. Preparation and Characterization of a Pectin Membrane-based Optical pH Sensor for Fish Freshness Monitoring[J]. *Biosensors*, 2019, 9(2): 2-8.
- [45] KUSWANDI B, JAYUS, LARASATI T S, et al. Real-Time Monitoring of Shrimp Spoilage Using On-Package Sticker Sensor Based on Natural Dye of Curcumin[J]. *Food Analytical Methods*, 2012, 5(4):

- 881-889.
- [46] MAFTOONAZAD N, RAMASWAMY H. Design and Testing of an Electrospun Nanofiber Mat as a pH Biosensor and Monitor the pH Associated Quality in Fresh Date Fruit (Rutab)[J]. *Polymer Testing*, 2019, 75: 76-84.
- [47] KIM Y H, YANG Y J, KIM J S, et al. Non-Destructive Monitoring of Apple Ripeness Using an Aldehyde Sensitive Colorimetric Sensor[J]. *Food Chemistry*, 2018, 267: 149-156.
- [48] HAN J H. *Innovations in Food Packaging*[M]. Amsterdam: Ed Elsevier Academic Press, 2014: 3-12.
- [49] 梁刚, 张全刚, 赵杰, 等. 基于丝网印刷碳纳米管电极的电化学传感检测有机磷农药[J]. *分析试验室*, 2020, 39(6): 636-639.
- LIANG Gang, ZHANG Quan-gang, ZHAO Jie, et al. Commercial Screen-Printed Carbon-Nanotube Electrode-Based Electrochemical Biosensor for the Detection of Organophosphorus Pesticide[J]. *Chinese Journal of Analysis Laboratory*, 2020, 39(6): 636-639.
- [50] 金国斌. 显窃启包装技术的特点及开发[J]. *中国包装*, 1996, 16(2): 63-67.
- JIN Guo-bin. Features and Development on Tamper-Evident Packaging Technology[J]. *China Packaging*, 1996, 16(2): 63-67.
- [51] 张天涛, 刘媛. 食品包装的安全与防伤害设计探析[J]. *包装工程*, 2010, 31(16): 114-116.
- ZHANG Tian-tao, LIU Yuan. Analysis of Safety and Injury Prevention Design of Food Packaging[J]. *Packaging Engineering*, 2010, 31(16): 114-116.
- [52] 柯胜海. 基于印刷电子技术的智能显窃启包装材料设计研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2019: 20-22.
- KE Sheng-hai. Design and Research of Intelligent Tamper-Evident Packaging Materials Based on Printing Electronic Technology[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2019: 20-22.
- [53] 周广亮. 电商时代下物流包装发展的应对措施[J]. *今日印刷*, 2019(12): 52-54.
- ZHOU Guang-liang. Countermeasures for the Development of Logistics Packaging in the E-Commerce Era[J]. *Print Today*, 2019(12): 52-54.
- [54] HOWARD E L, ÖSTERHOLM A M, SHEN D E, et al. Cost-Effective, Flexible, and Colorful Dynamic Displays: Removing Underlying Conducting Layers from Polymer-Based Electrochromic Devices[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(14): 16732-16743.
- [55] ANDO B, BAGLIO S. All-Inkjet Printed Strain Sensors[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, 13(12): 4874-4879.
- [56] SUN Bing, TEHRANI P, ROBINSON N D, et al. Tailoring the Conductivity of PEO-Based Electrolytes for Temperature-Sensitive Printed Electronics[J]. *Journal of Materials Science*, 2013, 48(17): 5756-5767.

责任编辑: 曾钰婵