

银纳米材料的应用进展

康维刚 徐大鹏* 江恒泽 陈 建

(西安工业大学材料与化工学院,西安 710021)

摘 要 随着纳米技术的发展,银纳米材料独特的电学、光学、热学、催化及弹性等性能,使其在表面增强拉曼光谱、透明导电薄膜、催化剂、传感器及抗菌杀菌领域展现出广阔的应用前景。立足于近年来国内外银纳米材料的研究现状和热点问题,重点论述了银纳米材料的应用进展,指出了银纳米材料应用中面临的问题并对其未来的发展趋势进行了展望。

关键词 银纳米材料,表面增强拉曼光谱,透明导电薄膜,催化剂,传感器,抗菌杀菌

Research progress on application of silver nanomaterial

Kang Weigang Xu Dapeng Jiang Hengze Chen Jian

(School of Materials and Chemical Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021)

Abstract With the development of nanotechnology, silver nanomaterials have been widely applied in surface enhanced Raman spectroscopy, transparent conductive films, catalysis, sensor and antibacterial fields because of their unique electrical, optical, thermal, catalytic and elastic properties. Based on recent research status and hot issues of silver nanomaterials at home and abroad, research progress on application of silver nanomaterials were reviewed. At the same time, the problems and developing trends in the future of silver nanomaterials in application were prospected.

Key words silver nanomaterial, surface enhanced Raman spectroscopy, transparent conductive film, catalyst, sensor, antibacterial material

与块状金属银相比,银纳米材料由于小尺寸效应、表面效应、体积效应和宏观量子隧道效应而表现出补充或高于相应体材料的非同寻常的光子、电子、光电子及物化催化等性能。有关银纳米材料特性的研究仍然是银纳米材料领域的前沿和热点。利用银纳米材料的这些特性,可以构成功能奇特的纳米/微米尺度的光子、电子及化学传感与分析等器件。近年来,国内外有关银纳米材料应用方面的研究报道比较多,研究发现银纳米材料在表面增强拉曼光谱、透明导电薄膜、催化剂、传感器及抗菌杀菌领域具有非凡的表现。

在理论研究与应用前景的驱动下,人们合成了不同维度的纳米银,分别为一维纳米银、二维纳米银和三维纳米银。其中一维纳米银主要以纳米银线、纳米银棒和纳米银管为主^[1-2];二维纳米银包括纳米银三棱柱、纳米银六角片和纳米银圆盘,这 3 种纳米银材料结构相似并且能够相互转化^[3-5];三维纳米银

包括纳米银颗粒、纳米银枝状晶等结构^[6-7]。不同尺寸和形貌可控的纳米银有着不同的应用,因为纳米银的许多性质和应用不仅与纳米银尺寸有关,而且与纳米银形貌有关。

1 银纳米材料的应用

1.1 在表面增强拉曼光谱(SERS)领域的应用

表面增强拉曼散射是指吸附在纳米结构金属表面上的分子与金属表面发生的等离激元共振(SPR)相互作用而引起的拉曼增强散射现象,所得的光谱称为 SERS。20 世纪 90 年代, Nie 等^[8]报道了在少数单个棒状粒子或银纳米粒子聚集体上检测到高达 12~15 个数量级的拉曼增强信号,他们称这些具有极高 SERS 活性的银纳米粒子为“hot spots”。银纳米粒子某些活性部位高达 $10^{14} \sim 10^{15}$ 的增强因子使得用拉曼增强手段足以检测到单个分子的拉曼光谱^[9]。SERS 因具有高灵敏度、高选择性等特点,近

基金项目:国家自然科学基金(11504284);陕西省教育厅专项科研计划项目(16JK1377)

作者简介:康维刚(1994-),男,硕士研究生,主要研究方向为银纳米材料的应用。

联系人:徐大鹏(1981-),男,博士后,主要研究方向为纳米功能材料和表面腐蚀与防护。

些年已在食品安全、生物医学及水溶液物质结构研究领域显示出独特的潜在的应用前景。Li等^[10]以银纳米颗粒作为SERS基底,研究了水溶液和牛奶样品中三聚氰胺的检测浓度。结果表明,三聚氰胺在 681cm^{-1} 处的特征峰强度与其质量浓度在 $0.10\sim 5.00\text{mg/L}$ 范围内呈现良好的线性关系,即水溶液中的极限质量浓度为 1.00mg/L ,牛奶样品中的极限质量浓度为 0.5mg/L 。赵蕊池等^[11]通过多元醇法合成、流体流动法组装制备了有序的纳米银线作为三聚氰胺的SERS增强基底,检测质量浓度为 0.05mg/L 。该方法实现了牛奶样品中痕量三聚氰胺的快速灵敏检测,可为乳制品的检测提供技术支持。Zhang等^[12]将制备的纳米银线作为SERS活性基底用于检测福美双农药,结果表明基于银纳米线的SERS基底具有很高的灵敏度。Xu等^[13]利用固态离子学方法,在外加电流为 $3, 5, 8, 12\mu\text{A}$ 时制备了银纳米线并对其表面增强拉曼散射效应进行检测。检测过程中发现:当外加电流较小时,制备的银纳米线由于排列无序,拉曼光谱只检测到罗丹明6G分子的本征拉曼包络峰;外加电流增大时,制备的稀疏有序排列的银纳米线具有很强的SERS效应,在 $612, 773, 1128, 1184, 1310, 1361, 1506, 1573, 1597, 1650\text{cm}^{-1}$ 位置的R6G分子的本征拉曼峰全部显现出来。结果表明,稀疏有序排列的银纳米线作为SERS基底完全可以检测到R6G溶液的极限浓度,其值为 10^{-16}mol/L ,浓度远低于Nie等用银胶体纳米颗粒作为SERS基底探测到的R6G溶液浓度($2\times 10^{-11}\text{mol/L}$)^[8]。

1.2 在透明导电薄膜领域的应用

随着科技进步和智能电子设备的广泛应用,未来的电子产品将向小型化、智能化、轻便化方向发展,最具有代表性的钢锡氧化物(ITO)透明导电材料因资源短缺、价格昂贵及质地较脆等缺点而无法满足应用的需求^[14-15]。因此,开发一种能够替代ITO的高性能透明导电材料成为当前研究的热点。目前,最有望替代ITO的材料有碳纳米管、石墨烯和金属纳米线。理论上讲,碳纳米管和石墨烯均具有超高的导电性能,但其表面具有各种杂质和缺陷^[16-17]。此外,金和铜的导电性能与银相当,但是金和铜很难形成与银纳米线相同规格的纳米线^[18-19]。银纳米线不仅具有良好的导电率和导热性能,而且还可以在硬质基材或柔性基材上成膜。Lee等^[20]利用旋涂法在玻璃和聚对苯二甲酸乙二酯(PET)衬底上制备了透光率为 86.7% 、方块电阻为 $18\Omega/\text{sq}$

的银纳米线透明薄膜。银纳米线透明导电薄膜作为一种重要的光电材料,其关键性指标为透光率和方块电阻。然而,透光率和方块电阻是两个相对的因素,因此常以透明薄膜的电极性能作为参考,用品质因子(FOM)评估透明导电薄膜电极的综合性能。钱小立等^[21]研究发现,随着银纳米线透明导电薄膜方块电阻的增加,薄膜的FOM降低。在方块电阻为 $2\Omega/\text{sq}$ 时,薄膜的FOM值最高,可以达到410,超过了ITO的FOM值(350)^[22]。许多研究表明,银纳米线透明导电薄膜的透光率和方块电阻主要取决于纳米线的长度和直径。银纳米线长度越长,则直径越小,即细而长的银纳米线制备的薄膜具有更佳的光电综合性能^[23]。

目前,用银纳米线制备透明导电薄膜的方法有旋涂法、涂布法和喷涂法等。对于旋涂法而言,Lin等^[24]利用多元醇还原法制备了直径为 100nm 、长度为 $20\mu\text{m}$ 的银纳米线,制备的透明导电膜透光率为 92.15% ,方块电阻为 $20\Omega/\text{sq}$,制备的薄膜非常均匀且旋涂液与基底间的粘结力较好,但是薄膜导电层之间的接触性不是很好,会对薄膜的导电性造成一定影响。涂布法是用一根迈耶棒将涂到基底表面的分散液涂布均匀,薄膜导电性和透光率由银纳米线溶液的浓度与薄膜厚度决定^[25]。银纳米线透明导电薄膜由于具有高导电性、透明性、稳定性以及良好的弯曲性能等优点,因此已被广泛应用于触屏、薄膜加热器、太阳能电池、有机发光二极管、液晶智能窗等诸多领域。但是,银纳米线在空气中容易被氧化,并且所制薄膜与基底之间的附着力较差,这些缺陷限制了银纳米线薄膜的优异性能,对薄膜的实际应用造成很大影响,这也是目前银纳米线薄膜面临的主要问题。许多学者提出用其他材料作为保护层来制备银纳米线透明导电薄膜。Chen等^[26]用ZnO作为保护层成功制备了银纳米线透明导电复合薄膜,解决了银纳米线易氧化和粘连的难题,制备的透明复合薄膜还表现出优异的抗菌性能。

1.3 在催化剂领域的应用

银本身就具备良好的催化活性,用纳米工艺技术将其制备成纳米材料后,较小的尺寸和较大的比表面积导致银活性部位增加,从而具有较高的催化活性。Kwak等^[27]通过多元醇法合成银纳米线,将其作为催化剂并研究其催化性能,反应过程中银纳米线表现出较高的催化活性。银纳米线作为新型催化剂具有催化活性高、稳定性好、选择性强等优点,被广泛应用于催化还原和催化氧化反应。Xu

等^[28]以 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{Au}$ 为晶种合成堆叠断层富集银纳米线(SFEANWs),通过硼氢化钠(NaBH_4)还原硝基苯酚的方法评价 SFEANWs 的催化活性,借助紫外-可见吸光光度计检测反应时间,结合阿伦尼乌斯方程原理计算了 SFEANWs 催化反应的活化能。研究表明,SFEANWs 可以降低反应活化能,表现出极高的催化还原效率。梁殊等^[29]利用恒电压沉积法制备了不同形貌和尺寸的银纳米线电极,研究了该电极对低浓度甲醛催化氧化的影响。结果表明,与乙醛、乙醇和丁醇相比,银纳米线电极对甲醛表现出很好的选择性,且甲醛浓度在 $0.1\sim 3.7\text{mmol/L}$ 时,检测灵敏度为 $48.966\mu\text{A}/[\text{cm}^2 \cdot (\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1})]$,检测限达到 $6.48 \times 10^{-3}\text{mmol/L}$ 。此外,银纳米线作为催化剂还可以用于燃料电池的阴极反应。诸多燃料电池中,阴极反应几乎均为氧还原反应,氧还原反应是一个复杂的多电子转移过程,包括众多反应过程和中间产物且反应过程中还伴随着较高的过电势。目前,市场上使用的氧还原反应催化剂是 Pt 基催化剂,氧气在 Pt 上发生还原反应。由于 Pt 价格昂贵和资源短缺限制了其在燃料电池中的广泛应用,因此,开发新型催化剂、提高燃料电池的利用率已成为燃料电池的研究热点之一^[30]。倪昆等^[31]研究了银纳米线在燃料电池阴极上的催化性能,发现银纳米线在碱性介质中具有电催化还原氧的能力,却没有电催化氧化甲醇的能力,说明银纳米线对甲醇和氧气还原具有选择性和抗醇性能。胡永利等^[32]通过线性电位扫描法研究了银纳米线和银纳米粒子在碱性条件下对氧还原反应的电催化活性。催化性能研究表明,银纳米线比银纳米粒子表现出更好的催化性能。因此,要提高燃料电池的效率和性能,开发新型阴极催化剂具有非常重要的意义和应用价值,银纳米线有望成为燃料电池中优良的阴极催化剂。

1.4 在传感器领域的应用

传感器是一种能感受到被测量物信息并按照一定规律转换为可用信号的检测装置,是实现信息获取、信息输出和信息处理的重要工具。随着纳米技术的蓬勃发展,银纳米材料成为构筑超灵敏传感器的理想候选材料,因为其可以有效促进电子传递和氧化还原物质在电极表面反应的可逆性,从而实现低电位下的电分析,以避免高电位的噪音和干扰,为新型传感器的研制提供了更好的思路^[33]。2007 年,清华大学孙家林课题组发明了一种基于宏观长度银纳米线异质结构的光电流传感器,该发明推动了基

于银纳米线传感器的深入研究^[34]。

传感器作为基本的光子和电子元器件是科技发展中最为常用的一种装置,备受推崇并在工业生产、医药分析、食品安全等领域有着巨大的应用潜力。目前,国内外已报道了很多基于银纳米线的传感器,其中最主要的是生物传感器^[35-36]。它是将生物材料作为敏感元件,通过转换元件捕捉敏感元件与检测物之间的化学反应过程,借助电信号所形成的图像检测出物质浓度。Wang 等^[35]报道了银纳米线和壳聚糖(CS)-葡萄糖氧化酶(GOD)膜的安培葡萄糖生物传感器,制备的生物传感器不仅具有较宽的线性范围($10\mu\text{M}\sim 0.8\text{mM}$),而且具有较低的检测限度($2.83\mu\text{M}$)。除此之外,还有其他类型传感器,如常用的压力传感器、光敏传感器、气敏传感器、电容传感器等。Quan 等^[37]制备了基于银纳米线复合材料的压力传感器。与其他微结构的电极相比,制备的压力传感器具有较高灵敏度及较低检测限度,缩短了响应时间。然而,这些传感器的研发还处在实验阶段,对传感器的设计制作、性能测试和性能优化都还存在许多尚未解决的问题,为了促进银纳米线在传感器领域的实际应用,发展基于银纳米线传感器的设计制作和性能优化技术显得十分重要^[38-42]。

1.5 在抗菌杀菌领域的应用

抗菌材料是指在材料中添加一定抗菌剂,使其具有杀菌或抑制细菌、真菌等微生物繁殖的一种新型功能材料,如抗菌陶瓷、抗菌纤维与织物、抗菌塑料等。在诸多抗菌材料中,值得关注的是近些年研制开发的一种具有高效生物安全性、广谱性、无耐药性等优点的纳米银抗菌杀菌材料^[43-44]。Shrivastava 等^[45]研究了不同浓度纳米银对不同细菌的抑菌效果。研究结果表明,质量浓度为 $25\mu\text{g/mL}$ 纳米银能够完全抑制大肠杆菌的生长,对金黄色葡萄球菌的抑菌效果最差。纳米银作为一种新型的无机抗菌材料,主要应用于水体杀菌、食品安全和生物医学等诸多领域^[46-49]。然而,有关纳米银抗菌作用机理还没有明确的解释,大多数人认为有两种机理:一种是银离子的缓释抗菌机理,其实质是纳米银作为银源吸附在细胞膜表面,释放的银离子直接作用于菌体蛋白,破坏细菌的增殖能力^[50-51];另一种是在光催化作用下,纳米银在诱导作用下产生大量活性氧,活性氧能与细菌发生反应起到抑菌杀菌作用^[52]。Feng 等^[51]通过不断释放银离子破坏细菌的蛋白质,起到抗菌杀菌效果。现阶段,通过测试纳米银对某种菌体的最小抑菌浓度(MIC)和最小杀菌浓度(MBC)

来评价纳米银的抗菌杀菌能力。Jin 等^[53]以大肠杆菌作为目标菌种,研究了纳米银对大肠杆菌的抑菌性能,结果表明纳米银完全抑制细菌生长的浓度为 $150\mu\text{M}$ 。目前,有关银纳米线抗菌杀菌的报道较少,Schoen 等^[54]于 2010 年首次报道了银纳米线的杀菌性能,施加 20V 直流电压后,银纳米线对浓度为 10^7CFU/mL 的大肠杆菌水样的杀菌率可达到 80%~90%,推动了银纳米线抗菌杀菌的深入发展。熊旭华等^[55]研究了不同形貌纳米银对水中大肠杆菌的杀菌性能。结果表明,准球形银比银纳米线能够更充分地与细菌接触,表现出更强的杀菌性能。综上所述,纳米银对细菌的杀菌效果主要取决于纳米银的形貌和细菌的初始浓度。

2 银纳米材料应用中存在的问题

近些年,国内外的研究发现银纳米材料在生命医药、光学器件、化工催化、传感器、医药卫生等诸多领域表现出非凡的前景。根据研究领域的不同,该材料也面临一系列挑战。如生物医学方面,银纳米材料具有很好的抗肿瘤作用,能杀死癌细胞,但是银纳米材料的抗肿瘤机制目前尚不清楚,有待进一步研究。透明导电薄膜方面,高性能透明导电薄膜的关键还是银纳米线的制备,但用常规方法制备的银纳米线普遍受到溶液环境的束缚或制备的银纳米线长径比不高,从而制约了薄膜的性能。

3 总结与展望

近些年随着多向功能银基复合材料的发展,银纳米材料的应用越来越广泛,但同时也引起人们对其生物安全性的高度关注。由于银纳米材料的潜在毒性及其对人体健康的影响,未来对银纳米材料毒性的研究将会更加深入。随着银纳米材料应用研究的不断深入,人们将逐步研究出更多能广泛应用于生命医药、光学器件、化工催化、传感器和医药卫生等行业的银纳米材料产品,促进社会经济、航天航空和人类健康事业的发展。

参考文献

- [1] Jana N R, Gearheart L, Murphy C J. Wet chemical synthesis of silver nanorods and nanowires of controllable aspect ratio[J]. *Chemical Communications*, 2001, 2001(7): 617-618.
- [2] Wei G D, Nan C W, Yu D P. Large-scale self-assembled Ag nanotubes[J]. *Tsinghua Science & Technology*, 2005, 10(6): 736-740.
- [3] An J, Tang Bin, Ning Xiaohua, et al. Photoinduced shape evolution: from triangular to hexagonal silver nanoplates[J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2009, 111(49): 18055-18059.
- [4] Cao Z, Fu H, Kang L, et al. Rapid room-temperature synthesis of silver nanoplates with tunable in-plane surface plasmon resonance from visible to near-IR[J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2008, 18(23): 2673-2678.
- [5] Chen S, Zhiyong Fan A, Carroll D L. Silver nanodisks: synthesis, characterization, and self-assembly[J]. *Mrs. Proceedings*, 2002, 740(42): 10777-10781.
- [6] Khaydarov R A, Khaydarov R R, Gapurova O, et al. Electrochemical method for the synthesis of silver nanoparticles[J]. *Journal of Nanoparticle Research*, 2009, 11(5): 1193-1200.
- [7] Wang X K, Shao L, Guo W L, et al. Synthesis of dendritic silver nanostructures by means of ultrasonic irradiation[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2009, 16(6): 747-51.
- [8] Nie S M, Emory S R. Probing single molecules and single nanoparticles by surface-enhanced Raman scattering[J]. *Science*, 1997, 275(5303): 1102-1106.
- [9] Otto A. What is observed in single molecule SERS, and why? [J]. *Journal of Raman Spectroscopy*, 2002, 33(8): 593-598.
- [10] Li R, Yang J, Han J, et al. Quantitative determination of melamine in milk using Ag nanoparticle monolayer film as SERS substrate[J]. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 2017, 88: 164-168.
- [11] 赵蕊池, 王培龙, 石雷, 等. 自组装有序纳米银线表面增强拉曼光谱检测牛奶中三聚氰胺[J]. *分析化学*, 2017, 45(1): 75-82.
- [12] Zhang L, Wang B, Zhu G, et al. Synthesis of silver nanowires as a SERS substrate for the detection of pesticide thiram[J]. *Spectrochimica Acta Part A Molecular & Biomolecular Spectroscopy*, 2014, 133(5): 411-416.
- [13] Xu D P, Dong Z M, Sun J L. Fabrication of high performance surface enhanced Raman scattering substrates by a solid-state ionics method[J]. *Nanotechnology*, 2012, 23(12): 125705.
- [14] Li Y, Cui P, Wang L, et al. Highly bendable, conductive, and transparent film by an enhanced adhesion of silver nanowires [J]. *Applied Materials & Interfaces*, 2013, 5(18): 9155-9160.
- [15] Madaria A R, Kumar A, Ishikawa F N, et al. Uniform, highly conductive, and patterned transparent films of a percolating silver nanowire network on rigid and flexible substrates using a dry transfer technique[J]. *Nano Research*, 2010, 3(8): 564-573.
- [16] Ryu S, Lee P, Chou J B, et al. Extremely elastic wearable carbon nanotube fiber strain sensor for monitoring of human motion[J]. *Acs Nano*, 2015, 9(6): 5929.
- [17] Lee S, Yeo J S, Ji Y, et al. Flexible organic solar cells composed of P3HT:PCBM using chemically doped graphene electrodes[J]. *Nanotechnology*, 2012, 23(34): 344013.
- [18] Gonzalez-Garcia L, Maurer J H M, Reiser B, et al. Ultrathin gold nanowires for transparent electronics: breaking barriers

- [J].Procedia Engineering,2016,141:152-156.
- [19] Wang R,Ruan H.Synthesis of copper nanowires and its application to flexible transparent electrode[J].Journal of Alloys & Compounds,2016,656:936-943.
- [20] Lee S H,Lim S,Kim H.Smooth-surface silver nanowire electrode with high conductivity and transparency on functional layer coated flexible film[J].Thin Solid Films,2015,589(1):403-407.
- [21] 钱小立,张欢,王文韬,等.银纳米线柔性透明导电薄膜的可控制备和光、电性能[J].功能材料,2017,48(2):2107-2111.
- [22] De S,Higgins T M,Lyons P E,et al.Silver nanowire networks as flexible,transparent,conducting films;extremely high DC to optical conductivity ratios[J].Acs Nano,2009,3(7):1767-1774.
- [23] Bergin S M,Chen Y H,Rathmell A R,et al.The effect of nanowire length and diameter on the properties of transparent,conducting nanowire films[J].Nanoscale,2012,4(6):1996-2004.
- [24] Lin J Y,Hsueh Y L,Huang J J,et al.Effect of silver nitrate concentration of silver nanowires synthesized using a polyol method and their application as transparent conductive films[J].Thin Solid Films,2015,584(4):243-247.
- [25] Hu L,Han S K,Lee J Y,et al.Scalable coating and properties of transparent,flexible,silver nanowire electrodes[J].Acs Nano,2010,4(5):2955.
- [26] Chen Y,Lan W,Wang J,et al.Highly flexible,transparent,conductive and antibacterial films made of spin-coated silver nanowires and a protective ZnO layer[J].Physica E:Low-dimensional Systems and Nanostructures,2016,76:88-94.
- [27] Kwak W J,Jung H G,Lee S H,et al.Silver nanowires as catalytic cathodes for stabilizing lithium-oxygen batteries[J].Journal of Power Sources,2016,311(3):49-56.
- [28] Xu M,Yang F,Yuan Y,et al.Stacking faults enriched silver nanowires:facile synthesis,catalysis and SERS investigations[J].Journal of Colloid & Interface Science,2013,407(10):60-66.
- [29] 梁殊,陈爱华.FTO 基银纳米线电极的制备及电催化氧化甲醛的性能研究[J].航空学报,2014,35(10):2841-2849.
- [30] Shao M H,Sasaki K,Adzic R R.Pd-Fe nanoparticles as electrocatalysts for oxygen reduction[J].Journal of the American Chemical Society,2006,128(11):3526-3527.
- [31] 倪昆,吕功煊.银纳米线的制备及电催化还原氧性能研究[J].分子催化,2011,25(2):138-146.
- [32] 胡永利,彭程.银纳米材料的形貌可控制备及电催化氧还原性能[J].稀有金属材料与工程,2015,44(5):1197-1202.
- [33] Kim D G,Kim J,Jung S B,et al.Electrically and mechanically enhanced Ag nanowires-colorless polyimide composite electrode for flexible capacitive sensor[J].Applied Surface Science,2016,380:223-228.
- [34] 朱嘉麟,孙家林,张建红,等.基于宏观长度银纳米线异质结构的光电流传感器:中国,CN101026224[P].2007-08-29.
- [35] Wang L,Gao X,Jin L,et al.Amperometric glucose biosensor based on silver nanowires and glucose oxidase[J].Sensors & Actuators B Chemical,2013,176(1):9-14.
- [36] Yang X C,Lu Y,Wang M T,et al.A photonic crystal fiber glucose sensor filled with silver nanowires[J].Optics Communications,2016,359:279-284.
- [37] Quan Y,Wei X,Xiao L,et al.Highly sensitive and stable flexible pressure sensors with micro-structured electrodes[J].Journal of Alloys & Compounds,2017,699:824-831.
- [38] Amjadi M,Pichitpajongkit A,Lee S,et al.Highly stretchable and sensitive strain sensor based on silver nanowire-elastomer nanocomposite[J].Acs Nano,2014,8(5):5154-5163.
- [39] Hu W,Niu X,Zhao R,et al.Elastomeric transparent capacitive sensors based on an interpenetrating composite of silver nanowires and polyurethane[J].Applied Physics Letters,2013,102(8):1438-1487.
- [40] Kurowska E,Brzózka A,Jaros M,et al.Silver nanowire array sensor for sensitive and rapid detection of H_2O_2 [J].Electrochimica Acta,2013,104(8):439-447.
- [41] Wang J,Jiu J,Nogi M,et al.A highly sensitive and flexible pressure sensor with electrodes and elastomeric interlayer containing silver nanowires[J].Nanoscale,2015,7(7):2926-2932.
- [42] Wei Y,Chen S,Lin Y,et al.Silver nanowires coated on cotton for flexible pressure sensors[J].Journal of Materials Chemistry C,2016,4(5):935-943.
- [43] Rira Jung,Yeseul Kim,HunSik Kim,et al.Antimicrobial properties of hydrated cellulose membranes with silver nanoparticles[J].Journal of Biomaterials Science Polymer Edition,2009,20(3):311-324.
- [44] Wani I A,Khatoun S,Ganguly A,et al.Structural characterization and antimicrobial properties of silver nanoparticles prepared by inverse microemulsion method[J].Colloids & Surfaces B Biointerfaces,2013,101(1):243-250.
- [45] Shrivastava S,Bera T,Roy A,et al.Characterization of enhanced antibacterial effects of novel silver nanoparticles[J].Nanotechnology,2007,18(22):225103.
- [46] Hu R L,Li S R,Kong F J,et al.Inhibition effect of silver nanoparticles on herpes simplex virus 2[J].Genetics & Molecular Research,2014,13(3):7022-7028.
- [47] Jiang T,Feng L,Wang Y.Effect of alginate/nano-Ag coating on microbial and physicochemical characteristics of shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) during cold storage[J].Food Chemistry,2013,141(2):954-960.
- [48] Zhang H,Smith J A,Oyanedel-Craver V.The effect of natural water conditions on the anti-bacterial performance and stability of silver nanoparticles capped with different polymers[J].Water Research,2012,46(3):691-699.