

PEDOT:PSS 掺杂丝素蛋白复合薄膜的半导体性能

徐翔宇^{1,2}, 李弘坤^{1,2}, 詹 达^{1,2,✉}, 刘向阳^{1,2}

1 厦门大学材料学院, 厦门 361005

2 厦门大学生物仿生及软物质研究院, 厦门 361005

为了揭示丝素蛋白与有机半导体聚合物聚 3,4-乙撑二氧噻吩:聚苯乙烯磺酸(PEDOT:PSS)复合薄膜作为有源层的场效应,采用旋涂制膜法在重掺杂氧化硅片上制备了厚度均匀、表面平整度较好的场效应晶体管,并探索了这种生物相容性可降解材料作为半导体的潜质。通过 XRD、紫外-可见分光光度计、FTIR 和拉曼光谱等表征手段研究了丝素蛋白与 PEDOT:PSS 复合薄膜的构象变化。复合薄膜晶体管的输出和转移特性曲线表明,器件的开关电流比为 3、阈值电压为 20 V、场效应迁移率为 $7.9 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 。实验结果表明,通过在丝素蛋白中添加 PEDOT:PSS 制备复合材料依然能够有效保留有机半导体的优良电学性质,证明了通过对生物材料进行掺杂是一种制备功能化生物复合材料的有效手段。

关键词 丝素蛋白 聚 3,4-乙撑二氧噻吩:聚苯乙烯磺酸(PEDOT:PSS) 有机场效应晶体管 功能化

中图分类号: TB34 文献标识码: A

Semiconducting Properties of PEDOT:PSS Doped Silk Fibroin Composite Film

XU Xiangyu^{1,2}, LI Hongkun^{1,2}, ZHAN Da^{1,2,✉}, LIU Xiangyang^{1,2}

1 College of Materials, Xiamen University, Xiamen 361005

2 Research Institution for Biomimetics and Soft Matter, Xiamen University, Xiamen 361005

In order to reveal the field effect of silk fibroin and organic semiconductor polymer (PEDOT:PSS) composite film as an active layer, the thin film with uniform thickness and good surface smoothness based transistor was fabricated onto heavily doped silicon dioxide by spin-coating method. The potential in semiconductor application of this biocompatible degradable material was investigated. The conformational evolution of silk fibroin and PEDOT:PSS composite film was analyzed by XRD, UV-Vis spectrophotometer, FTIR and Raman spectroscopy. The output and transfer characteristic curves of the device were analyzed and studied. The ratio of the switching current is about 3, the threshold voltage is 20 V, and the field-effect mobility is about $7.9 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$. The experimental results show that the composite material prepared by an appropriate process by mixing PEDOT:PSS to silk fibroin can still retain the excellent electronic properties of organic semiconductors. It is proved that doping in biological materials is an effective method to prepare functionalized biocomposites for broadening its applications.

Key words silk fibroin, PEDOT:PSS, organic field-effect transistor, functionalization

0 引言

在近一个世纪里,半导体科学技术的发展是人类文明最伟大的科技成果之一。20 世纪 50 年代,科学家通过不断改良硅的提纯工艺以及对其进行精确掺杂,获得了可控的半导体特性,以用于各种电子元件的制造,从而推动了光电信息技术的快速发展^[1]。日本化学家白川英树、美国化学家马克迪尔米德和物理学家艾伦黑格等于 20 世纪 70 年代研究发现,对聚合物分子进行掺杂可以改变聚合物的电子状态,从而显著提高材料的导电性能,为后来有机电子领域的崛起打下坚实的基础^[2]。如今,除了通过传统的硅基半导体制备工艺提升器件性能之外,能够灵活地应用于诸如生物/非生物交互界面等特殊的环境且具备生物相容性的半导体器件也是当前的研究热点。其中,电子器件的机械灵活性和生物相容性对生物表面有效贴附显得尤为重要。丝素蛋白(Silk fibroin, SF)被认为是开发柔性和生物器件的理想生物材料,它与生俱来的生物相容性、电绝缘性、高透明性、可控的力学性能和优异的生物可降解性等诸多性质使它在薄膜晶体管、生物显示器、有机发光器件和有机光伏器件等领域有着巨大的应用潜力^[3]。因此,在 SF 自身特性的基础上,通

过额外的功能化处理可以获得更多的非凡性能,拓展其在光、电、磁、热等领域的应用潜能^[4]。本工作对丝素蛋白材料功能化进行探索,将丝素蛋白与有机半导体相复合,以改变 SF 复合材料宏观的电学性能,对未来柔性、可植入电子器件的研究有着重要的意义。

场效应晶体管(Field-effect transistor, FET)是电子器件中最核心、最基础的器件单元,而导电聚合物薄膜(Conductive polymer, CP)是有机场效应晶体管(Organic field-effect transistors, OFETs)的重要组成部分,因此受到广泛关注。与传统的无机场效应晶体管相比,有机场效应晶体管更容易制备出具有柔性、质轻的电子器件,满足未来人们对柔性显示、柔性传感器等方面的迫切需求。载流子迁移率是衡量半导体性能的重要指标。随着近几年的快速发展,柔性 OFETs 的载流子迁移率达到甚至超过了非晶硅的水平,但是其仍然存在着不少问题,比如可拉伸性较差,有效增强器件的拉伸性能往往会导致迁移率的下降^[5-7],且绝大多数有机半导体具有毒性,无法生物相容,也不能安全应用在生物体内。从长远发展来看,复合材料 OFET 的研究是非常必要的,不仅可以改进电子器件加工技术,而且可以弥补场效应器件在生物医学领域的短板,成为未来生物纳米电子技术时代的核心元

基金项目:国家自然科学基金(11404272);中央高校基础研究基金项目(20720140514);福建省自然科学基金(22171024);国家教育部博士点专项基金(20130121110018)

This work was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (11404272), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (20720140514), the Natural Science Foundation of Fujian Province of China (22171024), and the Doctoral Fund of the Ministry (20130121110018).

✉ zhanda@xmu.edu.cn

1734

DOI: 10.11896/cldb.18040192

件。因此,本工作尝试将具有高载流子迁移率的有机半导体聚合物 PEDOT:PSS 掺杂到生物蛋白 SF 中,并以丝素蛋白/半导体复合材料作为有机场效应晶体管的有源层,研究共混薄膜的形貌结构和电学性质。

1 实验

1.1 再生 SF 溶液的制备

称取 10 g 家蚕茧,将其置于 2 L 0.5% (w/v) 的 NaHCO_3 溶液中煮沸两次,每次 30 min,洗去丝胶,再用蒸馏水清洗,之后将其烘干称重;配制浓度为 9.3 mol/L 的溴化锂溶液,按干燥的蚕丝质量:溴化锂溶液体积为 1:6 溶解丝素蛋白,然后放置在 60 °C 恒温干燥箱中干燥 4 h,随后装入截留分子量为 3 500 D 的透析袋透析两天。

1.2 SF-PEDOT:PSS(SF-PT) 复合材料有源层的制备

在 10 mg/mL 的 PEDOT:PSS (Sigma-Aldrich, 质量分数为 1.1% 的水分散液,中性 pH, USA) 溶液中缓慢滴加 SF 溶液,并配制成 SF/PEDOT 质量比为 3:1、溶质浓度为 20 mg/mL 的混合溶液。将重掺杂氧化硅片 (SiO_2 厚度为 300 nm, 电阻率:0.01~0.05 $\Omega \cdot \text{cm}$) 的抛光面涂上光胶保护,背面浸泡到缓冲溶液氧化物刻蚀液 (BOE) 中腐蚀掉氧化层,并溅射一定厚度的金属 Al 作为背栅电极。用丙酮洗去光刻胶,冲洗并吹干,在抛光面上旋涂制备 SF-PT 复合薄膜,再放入恒温恒湿干燥箱 (25 °C, 50% RH) 中固化薄膜,随后正面罩上镂空掩模板在电子束蒸镀仪下生长沟道宽度为 200 μm 、长度

为 1 500 μm 、厚度为 90 nm 的 Au 层作为源漏电极。

1.3 测试与表征

采用 Zeiss Sigma 扫描电镜和 Bruker Multimode 8 原子力显微镜观察薄膜的表面形貌。通过 Bruker D8-A25XRD 对薄膜进行 X 射线衍射表征,以分析复合材料的结晶情况。通过 PerkinElmer Lambda750 紫外-可见光谱分析仪测试薄膜在可见光区域的吸收。通过 Horiba Labram HR Evolution 拉曼光谱仪和 ThermoFisher Nicolet IN10 傅里叶变换显微红外光谱仪研究掺杂对丝素蛋白的二级结构和 PEDOT 分子链构象的影响。采用 Keithley 4200-SCS I-V 模块对制备的 OFET 器件进行电学性能测试。

2 结果与讨论

制备丝素蛋白/半导体复合材料时,需要考虑到生物蛋白在一定的外界条件下的构象会从无规卷曲向 β -折叠变化,使丝素蛋白从水溶性的状态向不溶于水的结晶状态转变^[8-9],这对功能材料的选择提出了要求。由于有机溶剂容易诱使 SF 二级结构发生改变^[10-12],影响体系的稳定性,不利于后续加工,本工作选择 pH 为中性且以水为溶剂的 PEDOT:PSS 半导体聚合物作为掺杂剂。PEDOT 为 π - π 共轭聚合物,本身表现出优异的电化学稳定性以及一定的氧化还原能力,其作为 OFET 有源层时可以在栅极电压的影响下在不同的氧化还原状态之间切换^[13-17],这种性质为制备 SF 复合半导体材料提供了有利的支持条件。

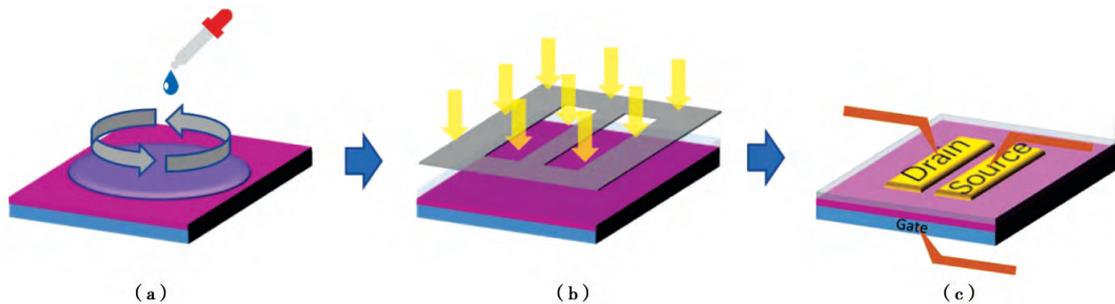


图 1 SF-PT 有机场效应管的制备流程示意图: (a) 在氧化硅片上旋涂制备复合薄膜; (b) 在薄膜上罩上镂空金属掩模板进行蒸镀; (c) 制备好的场效应管结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of preparation process of SF-PT organic field-effect transistor: (a) preparing a composite film by spin-coating on a silicon oxide wafer; (b) using a metal mask during the vapor deposition; (c) schematic diagram of a field-effect transistor

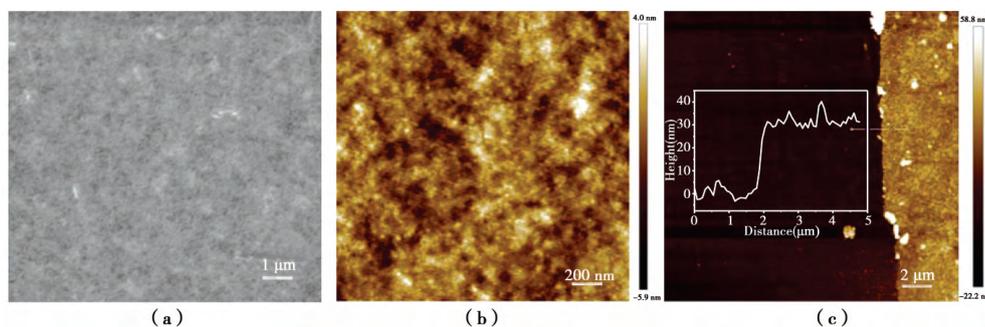


图 2 SF-PT 复合薄膜的 (a) SEM 图、(b) AFM 图、(c) 通过 AFM 进行薄膜厚度的表征图像(内嵌图显示薄膜的厚度为 30 nm 左右)

Fig.2 (a) SEM image, (b) AFM image of the SF-PT composite film surface, (c) the image of the thickness of composite film characterized by AFM (the inset image shows that the thickness is about 30 nm)

首先,通过旋涂的方法在氧化硅片上制备 SF-PT 复合材料薄膜,如图 1a 所示,随后将涂好膜的基底按照图 1b 所示盖

上图案化的镂空金属掩模板,在真空蒸镀仪中以镀 Au 薄膜图案作为源漏电极,制备好的器件结构如图 1c 所示。旋涂是一

种普遍采用的平面涂膜技术,非常适用于液体材料在小型器件上制备均匀且超薄的薄膜。有源层是否为均匀表面对于金属-半导体交界的界面特性有着较大影响,从而影响器件的整体性能^[18-19]。图2展示了通过旋涂法制备的SF-PT薄膜的SEM图以及原子力显微镜扫描图像,可以看出旋涂法制备的薄膜整体相对均一。通过AFM测试可知,薄膜厚度能够控制在30 nm左右,且表面粗糙度 R_a 可控制在8 nm左右。

为了进一步探究PEDOT:PSS、SF以及SF-PT内部的结构,图3给出了相关薄膜的XRD图,可以观察到纯SF膜在12.1°和20.1°处存在衍射峰,分别归属于Silk I(β -turn)和Silk II(β -sheet)结构^[20]。纯的PEDOT:PSS薄膜在10°附近的低角度出现特征衍射峰,对应于PEDOT和PSS两种不同交替排列的层片堆叠;其在25°附近的高角度附近出现宽的特征衍射峰,对应于PEDOT链间平面环的堆积^[21]。SF-PT复合薄膜在 $2\theta=20\sim 35^\circ$ 范围内显示出SF和PEDOT:PSS复合后较宽的衍射峰,且未出现新的额外峰位带,这表示两种材料在分子交联之后并没有引起新的相变,PEDOT:PSS在复合体系成膜后的结晶行为没有改变。

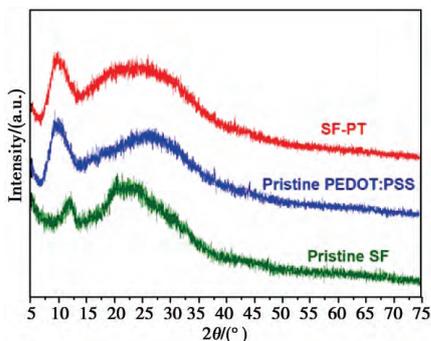


图3 纯PEDOT:PSS、SF以及SF-PT复合薄膜XRD图
Fig.3 XRD patterns of pristine PEDOT:PSS, regenerated SF and SF-PT composite films

为了清楚描述SF、PEDOT:PSS复合体系的分子与分子之间的互相影响,需要使用更加精确的表征手段来分析。通过拉曼光谱可以得到分子振动、转动方面的信息,常用它来研究分子的化学结构变化状态。图4是将纯PEDOT:PSS薄膜和SF-PT复合材料旋涂在硅片上制得的薄膜的拉曼光谱。从图4中可以看出,PEDOT:PSS薄膜在1300~1600 cm^{-1} 有三个主峰,在1521 cm^{-1} 处的峰为 $C_\alpha=C_\beta$ 双键的不对称振动,1437 cm^{-1} 处的峰可认为是PEDOT五元环上 $C_\alpha=C_\beta$ 双键的对称振动,1375 cm^{-1} 对应的是C-C单键的伸缩变形。与纯PEDOT:PSS薄膜相比,SF-PT薄膜的 $C_\alpha=C_\beta$ 双键伸缩振动峰红移至1433 cm^{-1} 附近,且该峰所在谱带1400~1480 cm^{-1} 明显收窄,这表明PEDOT:PSS分子链受到SF蛋白分子的影响,共振结构发生了变化,PEDOT分子链的共振结构由苯并醌型向醌型转变^[22-23]。

利用傅里叶变换红外光谱(FTIR)研究不同PEDOT:PSS含量的复合薄膜对SF内部二级结构的影响。共测试了四个样品SF-75、SF-85、SF-95、SF-100,分别表示复合薄膜中SF质量分数占75%、85%、95%、100%,对应的PEDOT:PSS则分别占25%、15%、5%、0%。图5为这四个样品在酰胺I区域经过归一化处理的FTIR光谱,可以看出每条曲线的峰位存在明

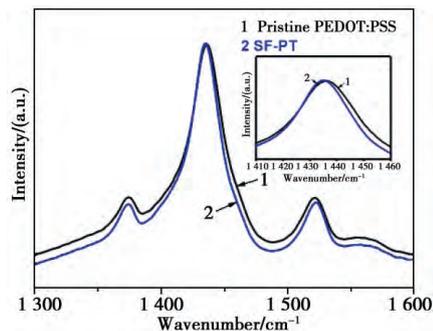


图4 纯PEDOT:PSS薄膜和SF-PT复合薄膜的拉曼光谱
Fig.4 Raman spectra of the pristine PEDOT:PSS film and composite film of SF-PT

显的位移,表明样品对应的二级结构确实发生改变。图5中所绘的灰色区域(1642~1654 cm^{-1})属于无规卷曲的特征峰区,粉色区域(1622~1627 cm^{-1})属于结晶蛋白质中典型的分子间 β 折叠带。从图5可以看出,随着PEDOT:PSS含量的增加,SF无规卷曲的峰的强度开始逐渐减弱, β 折叠的峰的强度开始逐渐增强,当PEDOT:PSS含量超过5%时,复合薄膜内部的SF以 β 折叠的构象为主。这充分说明了PEDOT:PSS的添加有利于SF的二级结构由无规卷曲向 β 折叠构象转变。

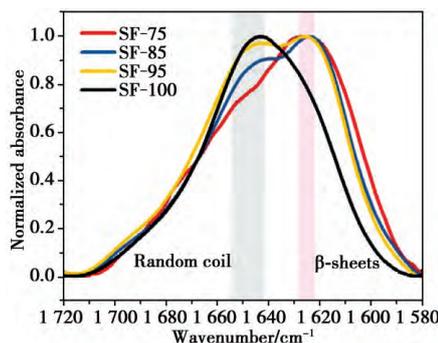


图5 不同SF含量的SF-PT复合溶液的FTIR光谱(电子版为彩图)
Fig.5 FTIR spectra of SF-PT composite solutions with different SF contents

本实验还使用紫外-可见分光光度计对复合薄膜在紫外-可见光范围内的吸收度进行分析与表征。如图6所示,将不同复合比例的SF-PT复合材料滴涂到玻璃片上干燥成膜,可以发现随着SF含量的增加,薄膜在可见光区的吸光度逐渐下降,而透明度逐渐增加,说明SF-PT复合材料具备作为透明电子器件的应用潜力。

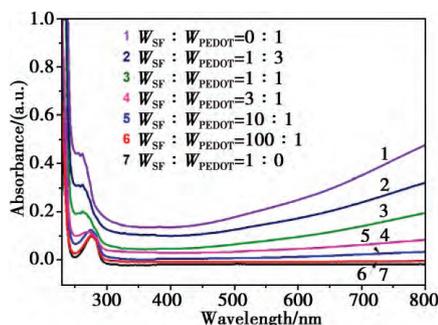


图6 不同SF与PEDOT:PSS质量比下复合薄膜的UV-Vis光谱
Fig.6 UV-Vis spectra of composite films with different weight ratios between SF and PEDOT:PSS

为了表征按图1制备的复合薄膜场效应晶体管的电学性能,通过 Keithley4200-SCS 测试了器件的输出特性曲线和转移特性曲线。从图 7a 可以看出 随着源漏电压 V_{DS} 从 0 V 以步进 3 V 的方式增加到 45 V 源漏电流 I_{DS} 逐渐从 120 μA 下降到约 40 μA , 并从线性区过渡到饱和区, 电流开关比 $I_{on/off}$ 约为 3 表现出明显的饱和特性和典型的 p 沟道特性。图 7b 为基于 SF-PT 复合薄膜作为有源层的 OFET 转移特性曲线, 可以得出阈值电压 V_{TH} 约为 20 V, 该 OFET 器件在饱和状态下的

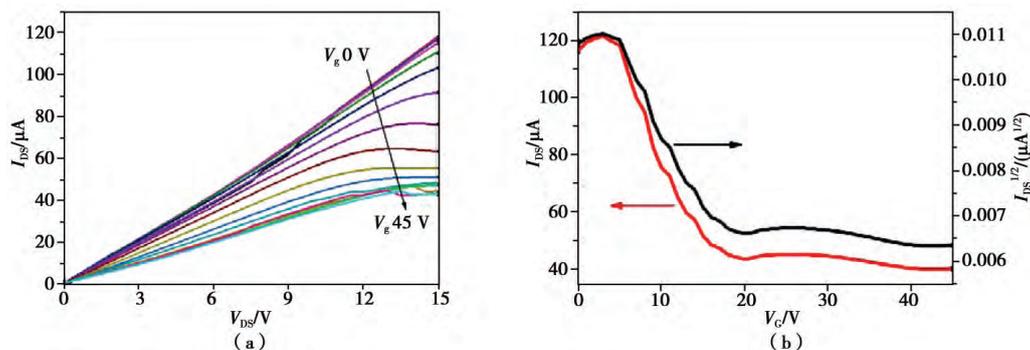


图 7 以 SF-PT 作为有源层的场效应晶体管的 (a) 输出特性曲线和 (b) 转移特性曲线

Fig.7 (a) Output characteristic curves and (b) transfer characteristic curves of field-effect transistor with SF-PT as active layer

从测试结果分析来看,由于 PEDOT:PSS 本身导电性较好,在施加了很高的栅压后,源漏电流无法下降到理想的区间,但在与 SF 复合后仍然显示出了一定的场效应特性。此外,值得注意的是,虽然电流的开关比较小,但作为一种处于探索阶段的以生物材料为基材的新材料器件,其开关比与石墨烯研究初期的效果相似^[24]。后续通过更多的对蚕丝材料自身结构的改性及复合工艺的调控,可以在缩小器件尺寸的同时进一步提高器件的电流开关比 $I_{on/off}$ 。

3 结论

利用丝素蛋白与有机半导体聚合物制备了复合材料,该材料可以在不破坏蛋白本身的情况下保持半导体的优良电学性能,成功制备出 SF-PEDOT:PSS 复合薄膜场效应晶体管。通过测试发现, SF 与 PEDOT:PSS 复合材料在成膜中结晶行为没有明显改变,由于受到 SF 的影响, PEDOT 分子链的共振结构由苯并醌型向醌型结构转变,而 PEDOT:PSS 的添加有利于 SF 的二级结构由无规卷曲向 β -折叠构象转变。通过测试发现,本实验的器件有明显的场效应,但电流开关比不高,阈值电压偏大,还未达到实际应用的标准,需要在后期研究中进行深入探索并优化相关工艺。实验结果很好地印证了此前的设想,对生物材料进行功能化掺杂是一种制备多性能生物复合材料的有效手段,可以拓展生物复合材料在生物相容柔性有机电子器件等方面的独特应用。

参考文献

- 1 Sze S M, Ng K K. *Physics of semiconductor devices*, Xi'an Jiaotong University Press, China, 2008 (in Chinese).
施敏, 伍国珏. 半导体器件物理, 西安交通大学出版社, 2008.
- 2 Hu W P. *Organic field effect transistor*, Science Press, China, 2015 (in Chinese).
胡文平. 有机场效应晶体管, 科学出版社, 2015.

场效应迁移率 μ 可以使用如下的关系式:

$$I_{DS} = \frac{W C_i \mu}{2L} (V_G - V_{TH})^2 \quad (1)$$

式中: W 是沟道宽度, L 是沟道长度, C_i 是每单位面积的栅极介电电容 (SiO_2 为 10 nF/cm^2), V_G 是栅极电压, V_{TH} 是阈值电压, I_{DS} 是饱和源漏电流, μ 是场效应迁移率。代入相关物理参数,由式 (1) 可以计算出以 SF-PT 复合薄膜为有源层的 OFET 器件的场效应迁移率 μ 为 $7.9 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 。

- 3 Zhu B W, Wang H, Leow W R, et al. *Advanced Materials*, 2016, 28 (22), 4250.
- 4 Xing Y, Shi C Y, Zhao J H, et al. *Small*, 2017, 13 (40), 1702390.
- 5 Xu J, Wang S, Wang G J N, et al. *Science*, 2017, 355 (6320), 59.
- 6 Roth B, Savagatrup S, de Los Santos N V, et al. *Chemistry of Materials*, 2016, 28 (7), 2363.
- 7 Wu H C, Benight S J, Chortos A, et al. *Chemistry of Materials*, 2014, 26 (15), 4544.
- 8 Lin N B, Liu X Y. *Chemical Society Reviews*, 2015, 44 (21), 7881.
- 9 Rockwood D N, Preda R C, Yucel T, et al. *Nature Protocols*, 2011, 6 (10), 1612.
- 10 Lawrence B D, Omenetto F, Chui K, et al. *Journal of Materials Science*, 2008, 43 (21), 6967.
- 11 Chen Z W, Zhang H H, Lin Z F, et al. *Advanced Functional Materials*, 2016, 26 (48), 8978.
- 12 Motta A, Maniglio D, Migliaresi C, et al. *Journal of Biomaterials Science: Polymer Edition*, 2009, 20 (13), 1875.
- 13 Lu J, Pinto N J, Macdiarmid A G. *Journal of Applied Physics*, 2002, 92 (10), 6033.
- 14 Hsu F C, Prigodin V N, Epstein A J. *Physical Review B*, 2006, 74 (23), 235219.
- 15 Liu J, Agarwal M, Varahramyan K. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2008, 135 (1), 195.
- 16 Kang H S, Kang H S, Lee J K, et al. *Synthetic Metals*, 2005, 155 (1), 176.
- 17 Macaya D J, Nikolou M, Takamatsu S, et al. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2007, 123 (1), 374.
- 18 Brandon E J, West W, Wesseling E. *Applied Physics Letters*, 2003, 83 (19), 3945.
- 19 Blanchet G B, Fincher C R, Lefenfeld M, et al. *Applied Physics Letters*, 2004, 84 (2), 296.
- 20 Ming J, Pan F, Zuo B. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2015, 75, 398.
- 21 Kim N, Lee B H, Choi D, et al. *Physical Review Letters*, 2012, 109 (10), 106405.
- 22 Semaltianos N G, Logothetidis S, Hastas N, et al. *Chemical Physics Letters*, 2010, 484 (4-6), 283.
- 23 Ouyang J, Xu Q F, Chu C W, et al. *Polymer*, 2004, 45 (25), 8443.
- 24 Lee E J H, Balasubramanian K, Weitz R T, et al. *Nature Nanotechnology*, 2008, 3 (8), 486.

(责任编辑 杨霞)

(下转第 1761 页)

参考文献

- 1 Bunn C W , Cobbold A J , Palmer R P. *Polymer Chemistry* , 2010 , 28 (117) , 365.
- 2 Speerschneider C J , Li C H. *Journal of Applied Physics* , 1962 , 33(5) , 1871.
- 3 McLaren K G , Tabor D. *Nature* , 1963 , 197 , 856.
- 4 Makinson K R , Tabor D. *Proceedings of the Royal Society of London* , 1964 , 281(1384) , 49.
- 5 Lancaster J K. *Wear* , 1972 , 5(6) , 249.
- 6 Tanaka K , Uchiyama Y , Toyooka S. *Wear* , 1972 , 23(2) , 153.
- 7 Tanaka K. *Wear* , 1982 , 75(1) , 183.
- 8 Blanchet T A , Kennedy F E. *Wear* , 1992 , 153(1) , 229.
- 9 Gong L , Xue Q J , Wang H L. *Wear* , 1989 , 134(2) , 283.
- 10 Qi Y , Gong J , Yang D Y , et al. *Functional Materials* , 2015(11) , 11069 (in Chinese) .
祁渊 龚俊 杨东亚 等. *功能材料* 2015(11) , 11069.
- 11 Zhang Z , Klein P , Friedrich K. *Composites Science and Technology* , 2002 , 62(7-8) , 1001.
- 12 Mi X , Gong J , Cao W H , et al. *Materials Review B: Research Papers* , 2017 , 31(9) , 102.
米翔 龚俊 曹文翰 等. *材料导报: 研究篇* 2017 31(9) , 102.
- 13 Qiao H , Guo Q , Tian A , et al. *Tribology International* , 2007 , 40(1) , 105.
- 14 Zhang G , Chang L , Schlarb A K. *Composites Science and Technology* , 2009 , 69(7-8) , 1029.
- 15 Avanzini A , Donzella G , Mazzù A , et al. *Wear* , 2013 , 57 , 22.
- 16 Lal B , Alam S , Mathur G N. *Tribology Letters* , 2007 , 25(1) , 71.
- 17 Schroeder R , Torres F W , Binder C , et al. *Wear* , 2013 , 301(1-2) , 717.
- 18 Burris D L , Sawyer W G. *Wear* , 2006 , 260(7-8) , 915.
- 19 Li F , Hu K , Li J , et al. *Wear* , 2001 , 249(10-11) , 877.
- 20 Sawyer W G , Freudenberg K D , Bhimaraj P , et al. *Wear* , 2003 , 254(5-6) , 573.
- 21 Ye J , Khare H S , Burris D L. *Wear* , 2013 , 297(1-2) , 1095.
- 22 Burris D L , Sawyer W G. *Tribology Transactions* , 2005 , 48(2) , 147.
- 23 Meelwain S E , Blanchet T A , Schadler L S , et al. *Tribology Transactions* , 2008 , 51(3) , 247.
- 24 Khare H S , Burris D L. *Polymer* , 2010 , 51(3) , 719.
- 25 Cao W H , Gong J , Yang D Y , et al. *Polymeric Materials Science and Engineering* , 2017 , 5(33) , 78.
曹文翰 龚俊 杨东亚 等. *高分子材料科学与工程* 2017 5(33) , 78.
- 26 Su F H , Zhang Z Z , Liu W M. *Wear* , 2008 , 264(7-8) , 562.
- 27 Xue Q J , Zhang Z Z , Liu W M. *Journal of Applied Polymer Science* , 2001 , 80(11) , 1891.
- 28 Beckford S , Wang Y A , Zou M. *Tribology Transactions* , 2011 , 54(6) , 849.

(责任编辑 李 敏)



Yuan Qi is a doctoral candidate in mechanical manufacturing and automation at Lanzhou University of Technology. He has published 7 journal papers as the first author. His research interests focus on the tribology of the polymer composite.

祁渊, 兰州理工大学机械制造及自动化专业在读博士研究生。以第一作者在国内学术期刊上发表论文 7 篇。主要从事复合材料摩擦学研究。



Jun Gong obtained his M.E. degree from the Lanzhou University of Technology and served in School of Mechanical and Electrical Engineering , and till now. He is currently a professor and doctoral supervisor. He has published more than 60 journal papers. His team's research interests are CNC honing machine , spray robot trajectory optimization and stirling engine sealing technology research , and so on.

龚俊, 兰州理工大学教授, 博士研究生导师。硕士毕业于甘肃工业大学机电工程系并留校至今。在国内学术期刊发表论文 60 余篇。其团队主要研究方向包括: 数控珩磨机床; 喷涂机器人轨迹优化研究; 斯特林发动机密封研究等。

(上接第 1737 页)



Xiangyu Xu studied at the College of Materials and Research Institute for Soft Matter and Biomimetics , Xiamen University , Fujian Province , from March 2015 to June 2018. He is mainly engaged in the preparation of biomolecules and two-dimensional composite materials. He received his M.S. degree in June 2018 from Xiamen University in engineering.

徐翔宇, 于 2015 年 3 月至 2018 年 6 月在福建省厦门大学材料学院、生物仿生及软物质研究院就学, 主要从事生物分子与二维复合材料的制备研究。2018 年 6 月毕业于厦门大学, 获得工学硕士学位。



Da Zhan received his Ph.D. degree in physics and applied physics from Nanyang Technological University in 2013. He is currently an associate professor in the College of Materials and Research Institute for Soft Matter and Biomimetics , Xiamen University. His main research interests are to detect the electronic band structure of two-dimensional electronic materials through the characteristics of biomolecules , including potential biosensing applications.

詹达, 福建省厦门大学材料学院生物仿生及软物质研究院 副教授。2013 年毕业于新加坡南洋理工大学, 获得物理与应用物理专业博士学位。主要研究领域是通过生物分子的特性来探测调制二维电子材料的电子能带结构状况, 包括潜在的生物传感等方面的应用。