

文章编号:1007-2780(2020)XX-0001-09

光驱动软体致动器的制备及其信息安全应用

陈原浩, 吕鹏飞, 杨梦园, 冯奕钰*, 封伟, 王玲*
(天津大学材料科学与工程学院, 中国天津 300350)

摘要: 目的为了提高信息安全, 防止信息泄露, 进一步拓宽柔性器件在信息安全领域的应用, 本文报道了一种基于双层膜光驱动软体致动器的新型信息示假隐真技术。方法首先, 将所制得的不同长径比的金纳米棒通过图案遮罩和涂覆的方法, 均匀地分散到聚丙烯/聚酰亚胺复合薄膜体系中, 制得双层膜光热驱动软体致动器, 接着将软体致动器进行选择性地剪切。当无外界光刺激时, 我们把该双层膜所呈现的信息定义为第一种假信息; 当外界相应波长的激发光刺激该软体致动器时, 该器件由于发生形变可以展示出另外一种信息, 我们定义为第二种假信息; 由于不同的金纳米棒在相应波长光激发下才具有最高的光热转化效率, 因此通过红外相机所观察到的不同区域的温度呈现出一种新的图案, 我们定义为真信息, 起到信息示假隐真作用。结果实验结果表明: 未接受光照时, 软体致动器处于平整状态; 在相应波长激光刺激下, 被切割部分的软体致动器弯曲角可达到 50° 以上, 肉眼可以清晰地观测所显示信息; 而通过红外相机观测到光热区域与非光热区域温度相差至少在 10°C 以上, 可以明显看到所显示的真信息。结论将软体致动器与信息示假隐真结合在一起, 具有新颖性, 而且效果明显, 为信息示假隐真技术提供了一个新的解决方案。

关键词: 信息安全; 软体致动器; 金纳米棒; 光热效应

中图分类号: TP394.1; TH691.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/CJLCD.2020-1233

Fabrication of light-driven soft actuator and its information security application

CHEN Yuan-hao, LV Peng-Fei, YANG Meng-yuan, FENG Yi-yu*, FENG Wei, WANG Ling*

(School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: Objective In order to improve the security and reduce the leakage of information, and further broaden the application fields of information privacy, this work reported a novel information cheating technology based on a light-driven bimorph soft actuator. Method First, the as-prepared gold nanorods with different aspect ratios were uniformly dispersed into the polypropylene/polyimide system by means of mask depositing and coating, and then a photothermal biomorph soft actuator was fabricated, after that, the obtained bimorph soft actuator was selectively cut. Herein, we defined the state presented by the bimorph soft actuator without external light stimulation as the first information; only when triggered by the corresponding laser, this soft actuator could display second type of information, which we defined as the second false information; since the highest photothermal conversion of gold nanorods only occurred under the laser with corresponding wavelength, the temperature of different areas observed by the infrared camera showed

收稿日期: 2020-08-14; 修订日期: 2020-09-22.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 51973155)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51973155)

*通讯联系人, E-mail: lwang17@tju.edu.cn; fengyiyu@tju.edu.cn

the new information, which played an important role in information cheating. Results The experimental results showed that the soft actuator kept in flat state without illumination, and the cutting area of bimorph soft actuators reached a bending angle of at least 50° under the stimulation of corresponding laser, thus the displayed information can be clearly observed by the naked eye; while the difference of photothermal area and non-photothermal area can only be observed in the infrared camera, where the gap of temperature was at least 10°C , and the displayed real information could be clearly seen. Conclusion The combination of the soft actuators and the information cheating is novel and effective, which provides a new strategy toward development and future of information cheating.

Key words: information security; soft actuators; gold nanorods; photothermal effect

1 引言

随着大数据时代的来临,信息安全性已成为当前研究的热点^{[1][3]},伴随着各式各样的信息安全保护技术也得到了不断的发展。多年以来,已存在的解决信息安全问题的方法大部分是建立在设置密码基础之上,虽然设置密码会增加信息的安全性,但是同时存在两个不可忽略的问题,第一个是会增加破解者的猜疑以及感知到信息的潜在价值,这反而会增加信息被破解的风险;第二个是设置的密码也常常会被用户忘记,因此也带来极大的不便性。相对于设置密码而言,信息的隐密更为安全,因为信息的隐密是隐藏信息“存在性”,把机密信息隐藏在其他无关紧要的信息中形成隐形的信息通道,这样可以达到蒙蔽破解者的目的,因此相对信息加密,信息隐密会具有更高的安全性和价值^[4]。信息隐密是将信息隐藏起来,暂时阻碍了他们获取信息,但是这也不是绝对安全的,因为这些掩密技术只是相对地延长了那些没有获得任何信息的破解者破译的时间,并未彻底地解除破解者的猜疑。孙子说:“兵以诈立”,如果给破解者一些假的破译信息,在掩护真信息的同时,又可以进一步化解破解者的疑虑,做到混淆真假的目,那么便可以使信息的安全更上一个台阶,这就是基于信息示假隐真效果。

这里,我们将信息安全和隐密与时下较热的软体驱动材料相结合,展现一种新型的、有效的信息示假隐真技术。作为新型的驱动材料,软体驱动器具有非常明显的优势和运用空间^{[5][7]}。相对于刚性驱动而言,软体驱动器具有更高的空间自由度、更大的形变量,而且可以适应不断变化

的环境和动态的任务设置,以及更安全的人体交互能力,被广泛运用于智能装置^[5]、软体机器人^[9]、人工肌肉^[10]、微型操控器^[11],甚至运用于生物领域,例如药物传输^[12]等。尽管软体驱动器运用的领域非常广泛,但是据我们当前所了解的信息,软体驱动器几乎还没有运用到与信息安全相关的领域。因此,当信息安全问题和软体驱动材料相结合时,既可拓宽软体驱动材料应用领域,又能为信息安全问题提供一个新的解决方案和思路。因此本研究具有较强的新颖性和实用性,在未来情报传递、票据防伪等方面均具有极其重要的应用价值。

2 实验

2.1 材料和仪器

十六烷基三甲基溴化铵,对苯二酚,氯金酸,硼氢化钠,硝酸银,盐酸:化学纯,上海西格玛奥德里奇贸易有限公司;硝酸银:化学纯,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;水性丙烯酸酯:化学纯,深圳吉田化工有限公司;聚酰亚胺薄膜:东莞市优伦电子材料科技有限公司;聚丙烯薄膜:汕头冠华薄膜工业有限公司。

紫外-可见-红外光谱仪(UV-Vis-NIR)(日本 Shimadzu 公司 UV-3600 plus);透射电镜(TEM)(日本 JEM 公司 2100F);红外摄像机(IR camera)(德国 Fluke 公司 Germany);相机(Camera)(日本 Canon 公司 EOS 6D Mark II);等离子体清洗器(Plasma cleaner)(北京市迈可诺技术有限公司 PDC-32G-2)激光光源(Laser)(中国长春新产业光电技术有限公司 MDL-655, MDL-808, MDL-980)。

2.2 金纳米棒的合成与FDTD模拟

金纳米棒的合成采用无种子法^{[13][15]},如图1所示。具体实验过程如下:首先,将10 mL CTAB(aq, 0.1 M)和400 uL HAuCl_4 (aq, 0.01 M)与不同体积的 AgNO_3 (aq, 0.01 M)混合(用量从70 uL到160 uL不等)。然后,将20 uL HCl(1M)添加到生长溶液中以调节pH。在低速搅拌下加入对苯二酚(0.1 M)后,生长溶液的颜色从橙色变为透明。之后,在剧烈搅拌下使用移液枪快速地滴加20 uL新鲜制备的冰浴 NaBH_4 (aq)溶液。最后,将混合溶液保存在30 °C的温度下并静置10小时。将金纳米棒溶液以16000 rpm的转速离心30分钟。金纳米棒的FDTD模拟如下过程:FDTD Solutions 8.15软件来模拟金纳米棒的周围电场。我们选择了内置软件模型作为金纳米棒模型,并设置金纳米棒的长度方向平行于x轴。考虑到金纳米棒的对称性,金纳米棒的边界在x min轴上设置为反对称条件,在y min轴上设置为反对称条件。金纳米棒的周围介质的网格设置为0.25 nm,周围介质的折射率设定为1.33,即水的折射率。



图1 无种子法生长金纳米棒

Fig. 1 The Synthesis of gold nanorods based on seedless method

2.3 双层软体驱动器的制备及性能研究

聚丙烯薄膜和聚酰亚胺(PP/PI)双层软体驱动器具体制备过程如上图2所示。首先,使用等离子体清洗机处理聚丙烯薄膜和聚酰亚胺膜以获得更高的亲水性,然后将水性丙烯酸酯胶水均匀的旋涂在聚丙烯薄膜的表面上。为了使聚酰亚胺表面图案化,我们利用透明胶带作为遮罩基材部分地覆盖在聚酰亚胺薄膜的表面,然后将不

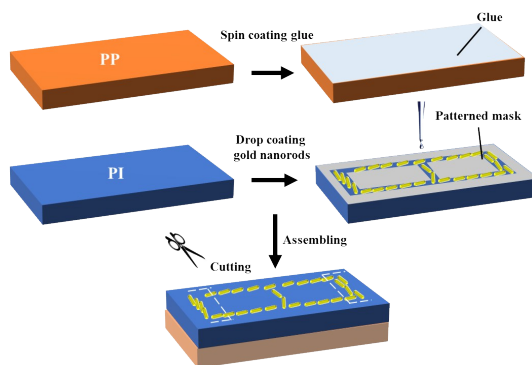


图2 双层软体驱动器制备过程

Fig. 2 The fabrication process of bimorph soft actuators

同长径比的金纳米棒选择性的涂覆在未遮罩的区域,当金纳米棒溶液水分在空气中自然挥发结束后,将聚酰亚胺表面的透明胶带揭下来,最后将表面具有水性丙烯酸酯的聚丙烯薄膜覆盖在聚酰亚胺薄膜的表面。此时可以通过肉眼观察到金纳米棒本身的颜色图案,为第一种信息。当使用手术刀在驱动表面进行切割时,那些切割的部分会在激光刺激下发生形变,与第一种信息复合产生第二种信息。由于金纳米棒的光热效应的,在红外相机里只能观察到相应激光激发所产生的图案,该图案是由驱动器表面的光热和形变复合而成的信息,为第三种信息。

3 结果与讨论

3.1 金纳米棒光吸收的选择性及其光热性能

金纳米颗粒可以吸收一定波长的激光以实现内部的电子的跃迁,即从基态转变成激发态,这样可以实现以热的形式释放热量。当入射波的频率和金纳米颗粒整体的振动频率一致时,此时会产生很强的光吸收,这种现象叫做表面等离子体共振(SPR)效应^{[16][18]},SPR峰的位置主要取决于纳米粒子的大小、表面的电荷、金纳米颗粒的形状等,金纳米颗粒由于表面等离子共振效应使其具有非常优异的光热转化效率。金纳米棒具有两个表面等离子共振峰,一个是横向表面等离子共振峰,一个是纵向表面等离子共振峰。横向等离子共振峰为固定值在520 nm波长左右,相对于横向表面等离子共振而言,其纵向表面等离子共振(LSPR)具有更强的光吸收和转化作用,而且其吸收峰的位置与金米棒的长径比有

关,因此改变金纳米棒的长径比就可以获得不同波长吸收的金纳米棒^{[19][22]}。纳米材料的制备影响因素很多,改变任意一种生长参数都会导致不同的形貌特征,对于金纳米棒的生长而言,硝酸银是一种非常理想的材料来调节金纳米棒的尺寸。我们使用的硝酸银(0.01 M)的量从 70 μ L 到 160 μ L, 获得了三种不同长径比的金纳米棒,如图 3 所示。图 3a、b、c 所示的金纳米棒,其长度分别为 45 ± 6 nm、 22 ± 4 nm、 35 ± 4 nm,直径分别为 25 ± 5 nm、 5 ± 2 nm、 6 ± 2 nm。另外,研究发现无论哪种金纳米棒,其金纳米棒中都会含有少量的金纳米球,这与加入的硼氢化钠的量有很大

的关系^[13]。

为了测量这些金纳米棒的 LSPR 的位置,我们进一步使用了紫外-可见-红外吸收光谱仪检测了金纳米棒的光谱吸收。测量的结果如图 4a 所示,其对应于图 3 所示的金纳米棒。其中图 3a 所示的金纳米棒的 LSPR 在 655 nm 左右,图 3b 的 LSPR 在 808 nm 左右,图 3c 的 LSPR 在 965 nm 左右。为了进一步揭示金纳米棒特异性吸收的原因,我们使用 FDTD Solutions 8.15 软件模拟了金纳米棒周围的电场。其仿真结果如图 4b 所示,我们发现在相应的波长激光激发下,金纳米棒周围的电场提升至原来的 50 倍左右,因此预期

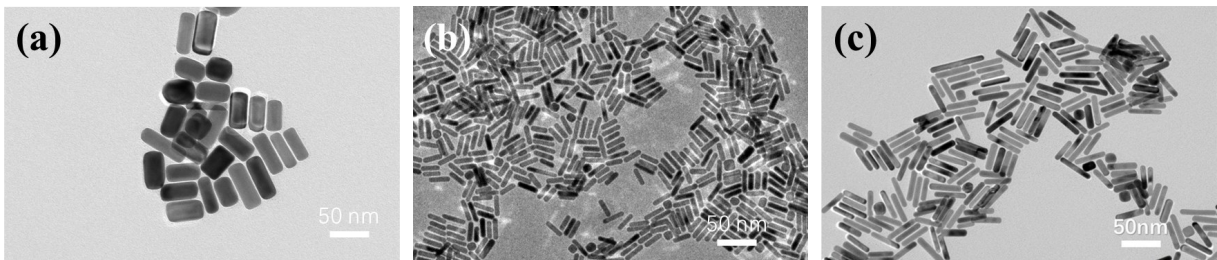


图 3 不同长径比的金纳米棒透射电镜图 (a) $45 \pm 6; 30 \pm 5$ nm; (b) $22 \pm 4; 5 \pm 2$ nm; (c) $35 \pm 4; 6 \pm 2$ nm

Fig. 3 TEM images showing the gold nanorods with different aspect ratio (a) $45 \pm 6; 30 \pm 5$ nm; (b) $22 \pm 4; 5 \pm 2$ nm; (c) $35 \pm 4; 6 \pm 2$ nm

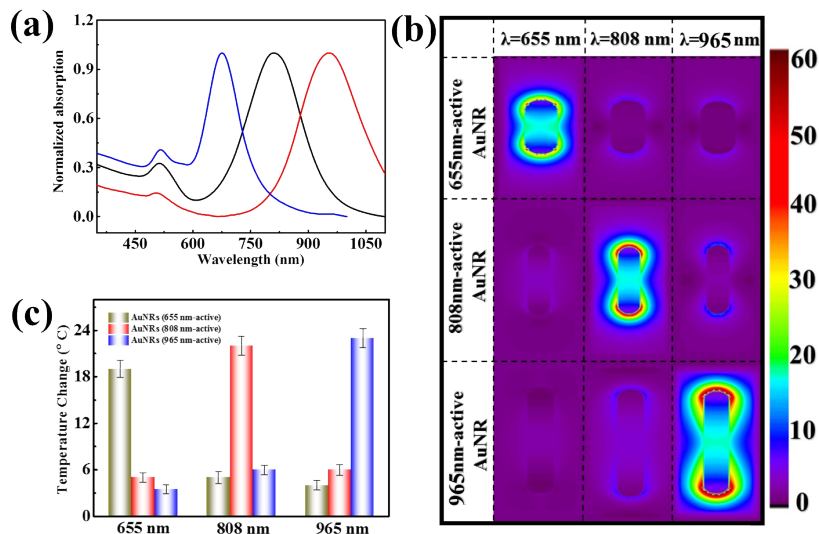


图 4 不同金纳米棒的表征 (a) 紫外可见吸收图谱; (b) FDTD 模拟金纳米棒周围电场强度; (c) 不同长径比金纳米棒在不同激光下最大的光热

Fig. 4 Characterizations of different gold nanorods (a) Normalized absorption spectra of gold nanorods with different aspect ratio; (b) Simulation of electric field enhancement of three different gold nanorods; (c) Maximum temperature of gold nanorods with different aspect ratio under the stimulation of different lasers.

有很高的光热转换效率,而在其他波长激光激发下,其周围电场并未出现明显的改变,这说明只有在相应波长激发下,金纳米棒才具有最强的光吸收作用。为了进一步的验证不同长径比的金纳米棒的光热性能和选择性吸收作用,我们使用激光波长在 655 nm、808 nm 和 980 nm 的激光进行刺激,响应的结果如图 4c 所示。在 80 mW/cm^2 的 655 nm 激光刺激响应下,图 3a 的金纳米棒最先达到最大温度在 20°C 左右,而且上升温度很快,而对于其他两种金纳米棒,在该波长的激光照射下,最大温度仅仅可以达到 5.5°C 和 4.8°C 左右,同样的,图 3b 的金纳米棒和图 3c 的金纳米棒分别在其各自的激发光(150 mW/cm^2)下可以达到其最大的光热温度,分别为 23°C 和 24°C 左右。

3.2 双层软体驱动器的机理及性能研究

对于光响应双层软体驱动器,目前的驱动机理可以大致分为光热驱动和光化学驱动。相对于光化学驱动而言,光热驱动具有较快的响应速度和较大的响应幅度,因此具有良好的应用前景。具体而言,光热驱动是在光热剂作用下,吸收一定波长的光,并且将其转化成热量,利用所产生的热量进行驱动。光热驱动双层软体驱动器又可以进一步分为光热膨胀驱动器、光热吸附/解吸附驱动器、光热相转变驱动器^{[23][25]}。相对于后两者而言,光热膨胀驱动机理更加简单而且制备方便,可重复驱动效果更好。

我们采取光热膨胀双层驱动机理,利用两种热膨胀系数差异较大的材料制备双层膜。第一层膜材料是聚酰亚胺,作为被动层,具有非常低的热膨胀系数,为 20 ppm/K ^[26],第二层膜材料是聚丙烯材料,作为主动层,具有较高的热膨胀系数,为 $100\text{-}200 \text{ ppm/K}$ ^[27],其热膨胀系数也与材料的加工方式有关。当外界温度增加时,由于两种膜材料各自都会因为受热发生体积膨胀,而由于聚酰亚胺的热膨胀系数要低于聚丙烯,因此在相同的温度下,其体积膨胀要明显的小于聚丙烯的体积膨胀,而且两者之间的界面限制了聚丙烯的体积膨胀,因此会导致聚丙烯膜弯向聚酰亚胺膜的方向,这就是热膨胀膜发生形变的基本原理,如图 5 所示。当该软体驱动器与光热剂结合时,利用光热剂吸收外界的光然后转化成一部分热量,产生的热量可以进一步驱动材料发生形

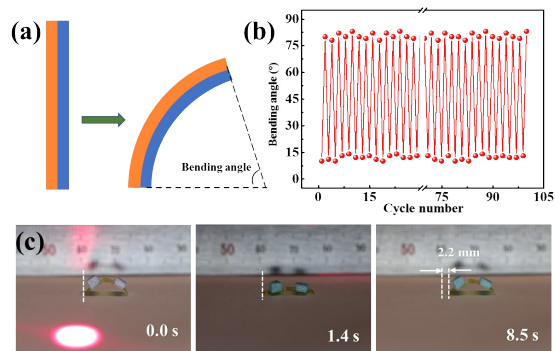


图5 基于金纳米棒的柔性双层膜驱动:(a)弯曲原理;(b)808纳米激光激发循环次数;(c)负重爬行软体驱动器

Fig. 5 The stimulation of soft actuators based on gold nanorods. (a) The scheme showing the mechanism of bimorph soft actuator; (b) Repeatable actuation of bimorph soft actuator under the 808 nm laser. (c) Photographs showing the burdening soft crawlers.

变,因此赋予材料的光响应性能。

该双层膜软体驱动器具有灵敏度高、变形大、可逆性好的特点。我们制备了 808 nm 激光响应的软体驱动器,并对此进行循环刺激测试,测试使用的激光强度为 150 mW/cm^2 。我们利用激光对尺寸为 $15 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 0.04 \text{ mm}$ 的软体驱动器进行 1000 次循环刺激,每次循环的周期为 2 s,每个周期内刺激与回复的时间各为 1 s。前 100 次循环刺激的结果如图 5b 中所示,在未收到受到激光刺激处于回复期时,该驱动器具有小幅度的弯曲角度为 10° 左右,当接受到激光刺激响应时,弯曲角度可达到 80° 左右,而且经过多次循环刺激,并未出现明显的疲劳和性能衰减,说明该驱动器具有良好的可循环性能。

基于金纳米棒良好的光热性能以及软体驱动器具有的优异的驱动性能,我们利用 655 nm 激光响应的软体驱动器制备一个负重软体爬行机器人。该爬行机器人本身质量为 1.5 mg ,两端各负载一个 15 mg 的聚氨酯泡沫,总的负载量为本身质量的 20 倍左右。首先,我们利用 60 mW/cm^2 光强的 655 nm 的激光刺激前腿,爬行软体机器人的前腿首先向下弯曲,前腿上与地面之间的摩擦力变小,然后可以向前移动。当撤掉 655 nm 的激光后,负重机器人又重新恢复到原来的形

状。当前腿恢复时,前腿的与地面的角度逐渐增大,因此与地面的弯曲角度也逐渐增大,又带着后腿往前移动。因为负重爬行机器人所负重的质量是本身质量的20倍,因此该爬行机器人向下弯曲的时间(1.4 s)要快于恢复的时间(7.1秒),如图5c所示。通过依次切换开关激光,爬行机器人的移动速度为15.5mm/min。尽管这个速度要低于先前报道的一些未负重的爬行机器人,比如 Ink/PET/Acrylic 爬行机器人(26 mm/s)^[28], RGO/PDMS 爬行机器人(16 mm/s)^[29], PDG-CNT/PVDF 爬行机器人(100 mm/s)^[30],但是该负重机器人比未负重的机器人具有更加广泛的应用领域,比如微型机器人,微型运输装置。

3.3 基于双层软体驱动薄膜的信息示假隐真技术

信息示假隐真技术可以混淆真假信息以到达蒙蔽信息窃取者和传递真信息的目的,广泛地应用于保密通信,可以有效的保护隐私和情报,因此对信息示假隐真技术的研究具有非常重要的实用价值。之前我们通过理论分析和实验测试了金纳米棒特异性吸收,结合柔性驱动器的优异驱动性能,这里,我们展示一种基于双层软体驱动器的信息示假隐真技术。

不同长径比的金纳米棒具有不同的LSPR,因此在相同的波长下,会产生不同的光热效应,我们将不同长径比的金纳米棒进行区域性涂覆,整个制备过程如图2所示,首先在聚酰亚胺表面制备第一层图案化遮罩,然后将不同长径比的金纳米棒区域化的涂覆在图案遮罩上,如图6a所示,首先将808 nm波长激发的金纳米棒和655 nm波长激发的金纳米棒部分地涂覆在聚酰亚胺薄膜上,形成金纳米棒图案,然后将金纳米棒图案化后的聚酰亚胺和聚丙烯膜通过胶水复合在一起,利用手术刀在驱动器上进行区域切割,最后将柔性驱动器的四周固定在玻璃基板上进行刺激响应。

如图6a所示,当未使用激光照射时,驱动器表面所显示的信息是数字8,这是假信息之一。当使用808 nm激光进行照射时,由于金纳米棒的光热效应,被手术刀切割的部分在激光照射下会发生形变,形变的角度至少在50°以上,通过肉眼观察,金纳米棒图案由原来的信息8变成了英

文字母H,这是肉眼所观测到的另外一个假信息。在红外相机观察下,因为不同长径比的金纳米棒光吸收的选择性,655 nm光响应的金纳米棒的区域与808 nm光响应的金纳米棒的区域光热存在明显差异,相差的温度在10 °C左右,因此显示的是另外一种真实信息为数字4,这就是基于

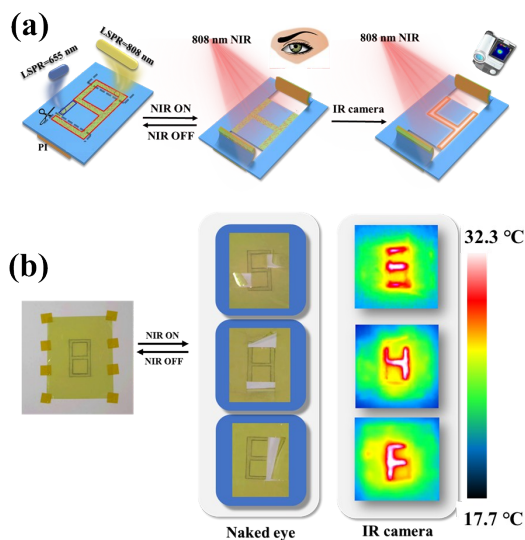


图6 基于软体驱动器的信息示假隐真技术:(a)信息示假隐真技术的示意图和(b)不同类型的信息示假隐真图片

Fig.6 Information cheating technology based on soft actuators: (a) The schematic illustration of information cheating technology; and (b) a series of photographs illustrating different kind of information cheating and displaying.

软体驱动器的信息示假隐真技术的机理。

我们将不同长径比的金纳米棒进行各种组合,得到一系列的图案,这些图案信息具有不同的隐藏信息内容,如图6b所示。将808 nm光响应的金纳米棒与980 nm光响应的金纳米棒区域性地涂覆在聚酰亚胺膜上,在环境光下,我们肉眼所观测的假信息是数字8,利用980 nm波长的激光照射时,由于软体驱动器光热发生形变,我们观察到的是假信息数字5,而在红外相机观测到的真实的信息是汉字三。此外,将980 nm波长的光响应的金纳米棒与655 nm的光响应的金纳米棒区域性地涂覆在聚酰亚胺膜上,我们利用980 nm的激光照射该图案时,肉眼所观测的假信

息是大写字母 E,利用红外相机观测到真实的信息是大写字母 F。这些隐藏的信息包括数字、字母、汉字也从另外一方面说明了示假隐真技术背后所容纳的信息的多元化和丰富性。此外,因为软体驱动器材料具有优异的可循环性能和耐疲劳性能,通过多次响应刺激后,我们发现驱动器依然具有优越的形变,而且所隐藏和传递的信息内容无论是通过肉眼观察和红外相机观察依旧清晰可见,因此该种信息假隐真技术具有良好的驱动稳定性和可重复性。值得一提的是,涂覆在聚酰亚胺表面的任何长径比的金纳米棒都可以用纯净水进行无痕擦除,又进一步保证了信息的绝密性,保证了信息传递的安全性。该信息假隐真技术也存在一些本身的限制,因为该驱动器本身是基于热驱动的,所以在温度较高时驱动器本身则会处于弯曲的状态,此时所显示的第一种信息则因驱动器本身形变会失效,而第二种和第三种信息依旧可以起作用。总体而言,本研究为解决信息安全问题提供了一个新的方案和

思路,我们在未来研究中会继续深入探索,进一步提高该技术的实用性。

4 结论

本文结合信息隐密的安全性,提出了一种基于双层软体驱动器的信息示假隐真技术。首先介绍了不同长径比的金纳米棒以及其优越的光热性能和光吸收的选择性,在一定波长的激光照射下,相应的金纳米棒的光热比其他长径比的金纳米棒 10 °C 以上,因此具有良好的光选择性。进一步探究了光热双层软体驱动器的驱动原理以及优异的驱动性能,在 1000 次循环中没有明显的性能衰减。最后,结合金纳米棒优异的光热效应以及双层软体驱动器的形变,提出了一种新型的信息示假隐真技术,在肉眼里看到的假信息与红外相机看到真实信息基本上满足了信息示假隐真的效果,达到了基本的保护信息的作用。

参考文献:

- [1] 覃德泽,李立信,李立礼. 5G 背景下高校信息安全风险分析及防范策略[J]. 网络安全技术与应用, 2020, 8: 93-94.
QIN D Z, LI L X, LI L L. Analysis of Security Risks of University Information and Prevention Strategies in the Background of 5G[J]. *Network Security Technology and Application*, 2020, 8: 93-94. (in Chinese)
- [2] 邱勤,张滨,吕欣. 5G 安全需求与标准体系研究[J]. 信息安全研究, 2020, 6(08): 673-679.
QIU Q, ZHANG B, LV X. Research on the Requirements and Standard System of 5G Cybersecurity[J]. *Information Security Research*, 2020, 6(08): 673-679. (in Chinese)
- [3] 孙强强,丘惠军,陈昊. 网络安全领域智能语义分析技术研究[J]. 网络安全技术与应用, 2020, 8: 60-61.
SUN Q Q, QIU H J, CHEN H. Research on Intelligent Semantic Analysis Technology in the Field of Network Security[J]. *Network Security Technology and Application*, 2020, 8: 60-61. (in Chinese)
- [4] 姚辉灿. 基于图像的信息掩密技术[D]. 西安:西北工业大学, 2004.
YAO H C. Image-based information hiding technology [D]. Xian, Northwestern Polytechnical University, 2004. (in Chinese)
- [5] 杨梦园,封伟,王玲,等. 近红外光响应液晶纳米智能材料[J]. 液晶与显示, 2020, 35(7): 631-644.
YANG M Y, FENG W, WANG L, et al. Near-infrared light-responsive intelligent liquid crystal nanocomposites [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(7): 631-644. (in Chinese)
- [6] LAN R, SUN J, SHEN C, et al. Near-infrared photodriven self-sustained oscillation of liquid-crystalline network film with predesignated polydopamine coating [J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(14): 1906319.
- [7] WANG L, LI Q. Photochromism into nanosystems: Towards lighting up the future nanoworld [J]. *Chemical Society Review*, 2018, 47(3): 1044-1097.
- [8] ZHANG X, YU Z, WANG C, et al. Photoactuators and motors based on carbon nanotubes with selective chirality distributions[J]. *Nature Communications*, 2014, 5(1): 1-8.
- [9] KWON G H, PARK J Y, KIM J Y, et al. Biomimetic soft multifunctional miniature aquabot [J]. *Small*, 2008, 4(12): 2148-2153.

- [10] HAN B, ZHANG Y L, ZHU L, *et al.* Plasmonic-assisted graphene oxide artificial muscles[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(5): 1806386.
- [11] MORALES D, PALLEAU E, DICKEY MD, *et al.* Electro-actuated hydrogel walkers with dual responsive legs [J]. *Soft matter*, 2014, 10(9):1337-1348.
- [12] FUSCO S, HUANG H W, PEYER K E, *et al.* Shape-switching microrobots for medical applications: The influence of shape in drug delivery and locomotion [J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2015, 7(12): 6803-6811.
- [13] CHEN Y S, ZHAO Y, YOON S J, *et al.* Miniature gold nanorods for photoacoustic molecular imaging in the second near-infrared optical window [J]. *Nature nanotechnology*, 2019, 14(5): 465-472.
- [14] SONG J, YANG X, JACOBSON O, *et al.* Ultrasmall gold nanorod vesicles with enhanced tumor accumulation and fast excretion from the body for cancer therapy[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(33): 4910-4917.
- [15] JIA H, FANG C, ZHU X M, *et al.* Synthesis of absorption-dominant small gold nanorods and their plasmonic properties[J]. *Langmuir*, 2015, 31(26): 7418-7426.
- [16] JUVE V, CARDINAL M F, LOMBARDI A, *et al.* Size-dependent surface plasmon resonance broadening in non-spherical nanoparticles: single gold nanorods[J]. *Nano letters*, 2013, 13(5): 2234-2240.
- [17] GABUDEAN A M, BIRO D, ASTILEAN S, *et al.* Localized surface plasmon resonance (LSPR) and surface-enhanced Raman scattering (SERS) studies of 4-aminothiophenol adsorption on gold nanorods [J]. *Journal of Molecular Structure*, 2011, 993(1-3): 420-424.
- [18] ZHANG Z, CHEN Z, QU C, *et al.* Highly sensitive visual detection of copper ions based on the shape-dependent LSPR spectroscopy of gold nanorods[J]. *Langmuir*, 2014, 30(12): 625-630.
- [19] KRISHNABISOYI H. Near-infrared light-directing self-organized 3D photonic superstructures loaded with mesogen-functionalized anisotropic plasmonic nanorods [J]. *Chemical Communications*, 2015, 51(81):15039-15042.
- [20] WANG L, KARLA G, GUTERREZ C, *et al.* Near-infrared light-directed handedness inversion in plasmonic nanorod embedded helical superstructure[J]. *Advanced Optical Materials*. 2016, 4(2):247-251.
- [21] GUTIERREZ-CUEVAS KG, WANG L, XUE C, *et al.* Near-infrared light-driven liquid crystal phase transition enabled by hydrophobic mesogen grafted plasmonic gold nanorods[J]. *Chemical Communications*, 2015, 51(48): 9845-9848.
- [22] XUE C, XIANG J, NEMATI H, *et al.* Light-driven reversible alignment switching of liquid crystals enabled by azo thiol grafted gold nanoparticles[J]. *ChemPhysChem*, 2015, 16(9): 1852-1856.
- [23] HU Y, LI Z, LAN T, *et al.* Photoactuators for direct optical-to-mechanical energy conversion: from nanocomponent assembly to macroscopic deformation[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(47):10548-10556.
- [24] HAN B, ZHANG Y L, CHEN Q D, *et al.* Carbon-based photothermal actuators [J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(40): 1802235.
- [25] YANG M J, Yuan Z K, LIU J, *et al.* Photoresponsive actuators built from carbon-based soft materials [J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(16): 1900069.
- [26] CHEN J, Feng J, Yang F, *et al.* Space-confined seeded growth of Cu nanorods with strong surface plasmon resonance for photothermal actuation[J]. *Angewandte Chemie*, 2019, 131(27): 9376-9382.
- [27] LI L, MENG J, Hou C, *et al.* Dual-mechanism and multimotion soft actuators based on commercial plastic film [J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2018, 10(17):15122-15128.
- [28] LI J, ZHANG R, MOU L, *et al.* Photothermal bimorph actuators with in-built cooler for light mills, frequency switches, and soft robots[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(27):1808995.
- [29] HU Y, WU G, LAN T, *et al.* A graphene-based bimorph structure for design of high performance photoactuators [J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(47):7867-7873.
- [30] WANG X Q, TAN C F, CHAN K H, *et al.* In-built thermo-mechanical cooperative feedback mechanism for self-propelled multimodal locomotion and electricity generation[J]. *Nature communications*, 2018, 9(1):1-10.

作者简介:



陈原浩(1995-),男,河南新乡人,硕士,2018年于天津工业大学获得学士学位,2018年至今就读于天津大学,现为天津大学材料与工程学院硕士,主要从事纳米光热材料、光驱动软体驱动器机器和智能材料研究。

E-mail:yuanhaochen@tju.edu.cn



王玲(1986-),男,云南曲靖人,博士,天津大学材料科学与工程学院教授、博士生导师。入选国家级优秀青年人才和天津大学“北洋青年学者计划”特聘教授。2013年6月获得北京科技大学材料化学博士学位。入职天津大学以前,先后就职于美国肯特液晶研究所和美国德州A&M大学化工学院,分别担任博士后研究员和高级研究助理。王玲实验室主要致力于软物质智能材料、仿生智能材料和功能纳米材料的设计与制备及其在软体机器人、智能隐身、4D打印、能源和安全等领域的应用研究。

E-mail:lwang17@tju.edu.cn