光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250324002

基于金三八面体的致密组装实现光纤LSPR传感器

石　与，魏泽铖，张　荣，孔　梅*

（长春理工大学 物理学院，长春 130022）

摘　要： 光纤局域表面等离激元共振（LSPR）传感具有无标记检测、样本消耗量少和远距离传感等优点。文章利用液-液界面自组装方法，在光纤上快速组装均匀且致密的金三八面体单层膜，成功制备了光纤LSPR传感器。表征结果显示，光纤表面金三八面体排列规则，分布均匀且覆盖率高，未出现纳米颗粒团聚现象。仿真分析表明，相较于同一尺寸的金纳米球，金三八面体的多尖端结构能够产生更显著的局部电场增强效应。结合微流控技术，利用该光纤LSPR传感器成功实现了不同浓度蔗糖溶液的折射率传感，最高灵敏度可达312 nm/RIU，展现了良好的检测性能。

关键词： 局域表面等离激元共振；光纤；金三八面体；自组装；折射率传感

中图分类号： TN253　**文章编号：** 1001－5868(2025)02－0195－07

Preparation of Optical Fiber LSPR Sensor Using Dense Assembly of Gold Trisoctahedra

SHI Yu, WEI Zecheng, ZHANG Rong, KONG Mei

(**School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, CHN**)

Abstract: Optical-fiber-localized surface plasmon resonance (LSPR) sensing offers the advantages of label-free detection, low sample consumption, and long-distance sensing. In this study, using the liquid-liquid interface self-assembly method, a uniform and dense gold trisoctahedral monolayer film is rapidly assembled on the surface of an optical fiber, following which an optical-fiber LSPR sensor is successfully prepared. Characterization test results show that gold trisoctahedra are regularly arranged and uniformly distributed without agglomeration, and that the surface of the optical fiber is well coated. Simulation analysis shows that compared with gold nanospheres of the same size, the multitipped structure of a gold trisoctahedron offers a more significant local electric field enhancement effect. Combined with microfluidic technology, the refractive index of sucrose solutions at varying concentrations is successfully sensed by the optical-fiber LSPR sensor, achieving a maximum sensitivity of 312 nm/RIU and demonstrating favorable detection performance.

Key words: localized surface plasmon resonance; optical fiber; gold trisoctahedra; self-assembly method; sucrose solution

0　引言

光纤局域表面等离激元共振（LSPR）传感技术具有成本低、体积小、灵敏度高、实时监测和抗电磁干扰等优势，广泛应用于生物传感、化学检测和环境监测等领域[1-2]。光在光纤内全反射传输时产生的倏逝波可以激发光纤上金属纳米颗粒的LSPR效应[3-5]。当入射光的频率与金属纳米颗粒中自由电子的振荡频率相匹配时，纳米颗粒的表面电子会发生集体振荡，并在光谱中表现为一个强烈的共振吸

收稿日期：2025－03－24.

基金项目：企业合作项目（KYC-HK-XM-2021-023）.

* **通信作者：**孔　梅

收峰[5-7]。通过监测LSPR峰的强度和位置变化，可以实现折射率传感检测[6]。LSPR峰对折射率的敏感性受金属纳米颗粒的尺寸、形貌、材料和间距等因素的影响[6-11]。通过调控金属纳米颗粒的形貌，可以优化光纤LSPR传感器的性能[10-13]。例如，基于金纳米棒和金纳米片等纳米颗粒的光纤LSPR传感器不仅具有可调节的峰值波长范围，还能够提供更高的灵敏度[12-13]。

在光纤上制备分散性良好的密集金属纳米颗粒单层膜是光纤LSPR传感器的主要研究方向之一[10-11]。目前，在光纤上组装金属纳米颗粒最常见的方法是硅烷法和静电吸附法[3]，但这两种方法均存在操作复杂、沉积时间长和纳米颗粒易团聚等问题[6]。金属纳米颗粒的间距过大或纳米颗粒团聚都会影响传感器的灵敏度和重复性[10]。Lin等提出一种能在平面基底（如硅片、纸基等）上制备致密金属纳米颗粒阵列的液-液界面自组装方法，其操作简便、低成本且省时[14]。本研究将此方法用于光纤表面金纳米颗粒的组装，制备光纤LSPP传感器。

本研究实现了一种基于金三八面体致密组装的新型无包层光纤LSPR传感器。首先，采用种子生长法制备了具有多个尖端的金三八面体纳米颗粒，利用FDTD Solutions软件计算其局部电场强度分布。然后，将其作为组装单元，利用液-液界面自组装方法成功制备了致密的金三八面体单层膜，并将其均匀组装在光纤上，制备得到光纤LSPR传感器。为评估传感器的性能，对不同浓度的蔗糖溶液进行了检测。实验结果表明，所制备的光纤LSPR传感器具有良好的灵敏度。本研究工作表明液-液界面自组装方法可为制备高灵敏度的光纤LSPR传感器提供新的途径。

1 金三八面体的合成与表征

1.1 材料

制备金纳米颗粒用到的材料包括：十六烷基三甲基氯化铵（CTAC，25 wt%）购自Sigma-Aldrich公司，抗坏血酸（AA，99.0%）购自Acros Organics公司，氯金酸（$HAuCl_4$）和正己烷购自国药集团化学试剂有限公司，无水乙醇（CH_3CH_2OH，99.7%）和二氯甲烷（CH_2Cl_2，99.5%）购自西陇科学公司，蔗糖（$C_{12}H_{22}O_{11}$，分析纯）购自天津纵联试剂公司，以及聚乙烯基吡咯烷酮（PVP）。实验中所有溶液均使用电阻率小于18 MΩ的超纯水来制备。

1.2 金三八面体的合成

采用种子生长法成功合成形貌均匀的金三八面体[15]。在该方法中，10 nm的金纳米球作为金种子溶液，$HAuCl_4$溶液、CTAC溶液和AA溶液分别作为金的前驱体、稳定剂和还原剂。在金三八面体的合成过程中，首先需要配置100 mL 0.10 mol/L的CTAC溶液。然后加入0.5 mL金种子溶液和6.5 mL 0.1 mol/L的AA溶液，形成混合溶液。在充分搅拌后，加入100 mL 0.5 mmol/L的$HAuCl_4$溶液。该混合溶液在27 ℃下反应15 min。随后通过7 250 rpm的转速进行15 min的离心，分离出金三八面体。收集的最终产物分散在20 mL 20 mmol/L的CTAC溶液中。此外，合成的金三八面体溶液呈现为紫红色且无明显的团聚现象，表明了合成过程中金三八面体具有良好的分散性。

为了后续的自组装实验，需要对金三八面体进行交换配体。将CTAC包覆的金三八面体溶液以8 250 rpm的转速离心两次，每次离心15 min，去除多余的CTAC。然后，加入PVP乙醇溶液，离心并收集最终产物。最后加入乙醇形成PVP包覆的金三八面体溶液。

1.3 金三八面体的光学表征

采用紫外-可见分光光度计（UV-1700）对合成的金三八面体溶液进行了光学表征，并设定测量吸收的波长（λ）范围为400～900 nm。如图1所示，在金三八面体的吸收光谱中位于543 nm处有一个较窄的吸收峰。这表明金三八面体具有较高的均匀性和分散性，有利于激发LSPR效应。

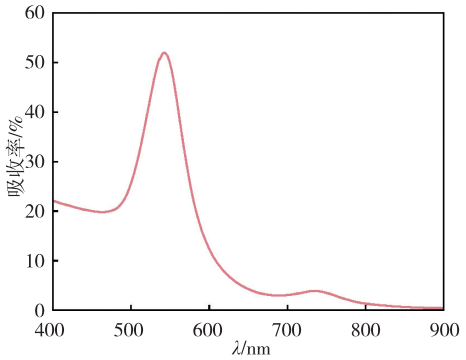
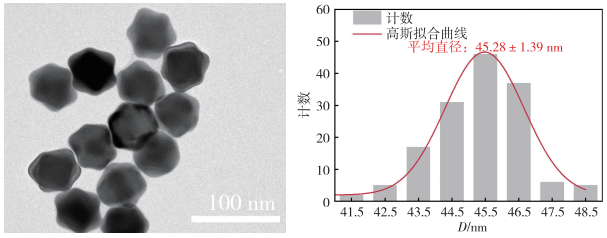


图1 金三八面体溶液的紫外-可见光吸收光谱

通过透射电子显微镜（TEM）对金三八面体的形貌进行表征。如图2(a)所示，合成的金三八面体呈现出明显的三角形金字塔形状，这种结构有利于更有效地激发LSPR效应。利用ImageJ软件测量

了 150 个金三八面体的直径(D)，计算得到其平均尺寸为(45.28±1.39) nm。绘制金三八面体的粒径分布统计图，如图 2(b)所示。从图中可以看到，金三八面体的尺寸分布区间和标准差较小。这种高度的均匀性和一致性对于制备良好的金属纳米颗粒单层膜至关重要。



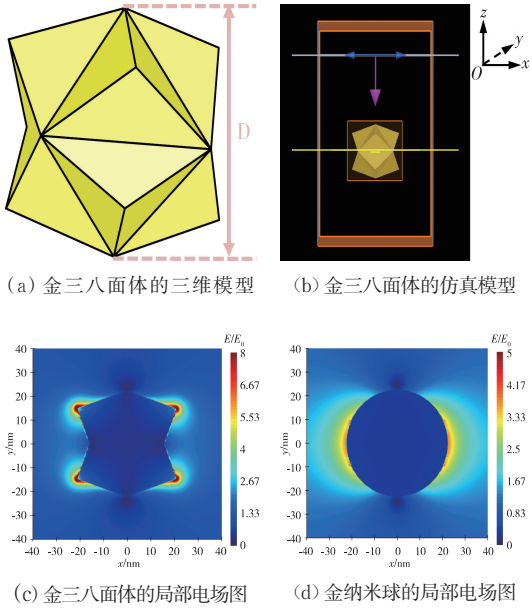
(a) 金三八面体的 TEM 图像　(b) 金三八面体的粒径统计图

图 2　金三八面体的形貌表征和粒径

2　金三八面体的模拟计算

基于金三八面体的 TEM 图像，利用 FDTD Solutions 软件模拟了单个 45 nm 金三八面体的局部电场分布情况。图 3(a)展示了金三八面体的三维模型，该结构由 8 个三角形金字塔组成[16]。金三八面体的直径 D 定义为一个顶点到对面顶点的距离。图 3(b)中展示了金三八面体仿真模型的 xOy 视图。在建模过程中，首先构建了精确的三八面体模型，其直径设为 45 nm；金的介电常数采用材料库中 Au-Johnson and Christy 1 的数据；背景折射率设置为 1.33，以模拟常见的环境条件；x 和 y 方向的网格精细度设为 0.1 nm，z 方向的网格精细度设为 1 nm；x 和 y 方向的边界条件设为周期性边界条件，z 方向设为完美匹配层边界条件，以减少反射波的影响；入射光设为向 $-z$ 方向传输的平面波，波长为 785 nm，偏振沿 x 方向。图 3(c)展示了金三八面体中心剖面电场强度的计算结果，其中电场强度相对于参考电场强度进行了归一化。从图中可以看出，金三八面体尖端附近产生显著的局部电场增强。这是由于在尖端效应的作用下，大量电荷聚集在顶部附近，产生集中在尖端的强电场，并且越靠近尖端归一化电场强度越大，最高可达 8。

为进行对比，采用相同的参数模拟了单个 45 nm 金纳米球的局部电场分布情况，如图 3(d)所示。从图中可以看出，金纳米球表面附近的归一化电场强度较弱，局部高强度值约为 4。可见，在同样的入射光激发下，单个金三八面体表面的归一化电场强度可达到同一尺寸金纳米球的两倍。这一差异表明，在金纳米颗粒表面引入多个尖端可显著增强局部电场，从而获得更剧烈的 LSPR 效应。因此，金三八面体比金纳米球更适合用于传感。



(a) 金三八面体的三维模型　(b) 金三八面体的仿真模型

(c) 金三八面体的局部电场图　(d) 金纳米球的局部电场图

图 3　金纳米颗粒的仿真模型及计算

金三八面体具有高度对称的几何结构，在 500～800 nm 波长范围内具有单一的峰。这种显著的单峰特性使该结构成为实现高灵敏度 LSPR 折射率传感的理想材料体系[17]。研究结果表明，随着尺寸的增加，金三八面体表面的局部电场强度逐渐增强，传感器灵敏度增加[16]。此外，光纤上金纳米颗粒的分布情况对光纤 LSPR 传感器的性能有重要影响[18-19]。金纳米颗粒的间距越小，颗粒之间相互作用越强，产生的局部电场增强效应越显著，传感器的灵敏度越高。但是，当间距过小时(如小于 5 nm)，金纳米颗粒容易发生团聚现象，会降低传感器的性能。因此，制备密集且分散的金纳米颗粒单层膜能够提升光纤 LSPR 传感器的灵敏度。

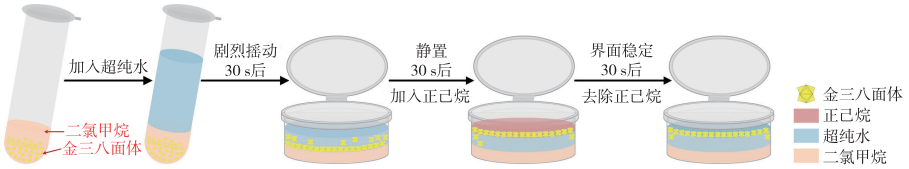
3　光纤 LSPR 传感器的制备与表征

3.1　无包层光纤 LSPR 传感器的制备

采用塑料包层二氧化硅多模光纤(HPCF200)制备无包层光纤。纤芯直径为 200 μm，包层直径为 230 μm。将光纤切成 35 cm 长的小段，然后用小刀去掉光纤中间 2 cm 的包层作为传感区域。

采用液-液界面自组装方法在光纤基底上成功组装了一层金三八面体单层膜[14]。具体的制备流

程如图4(a)所示。首先,在离心管中加入(1.4±0.2) mL PVP包覆的金三八面体溶液,随后依次加入一定量的二氯甲烷和水。剧烈摇动30 s后,将混合溶液迅速转移到PP塑料小圆盒中。静置30 s后,沿容器内壁缓慢加入一定量的正己烷,金三八面体在界面张力作用下自发从二氯甲烷/水界面移动到正己烷/水界面。待界面稳定30 s后,移除上层正己烷,在空气-水界面形成一层致密且具有金属光泽的金三八面体单层膜。最后,通过浸渍提拉法将单层膜转移到光纤表面,获得基于金三八面体单层膜的光纤LSPR传感器。图4(b)展示了基于金三八面体的无包层光纤LSPR传感器的结构示意图。



(a) 采用液-液界面自组装方法制备金三八面体单层膜的流程图



(b) 基于金三八面体的无包层光纤LSPR传感器示意图

图4 基于金三八面体单层膜的光纤LSPR传感器制备流程及其示意图

此外,传统上通常采用磁控溅射的方法制备光纤SPR传感器表面的金膜。但由于光纤是圆柱形状,需要在两面镀膜或使用旋转镀膜技术,导致设备成本昂贵,并且需要特殊设计的夹具或者旋转装置。相比之下,利用液-液界面自组装方法可以更简便、快速地制备光纤LSPR传感器表面的金膜。该方法只需将光纤浸入组装液中并缓慢提拉,就可以在光纤表面均匀组装致密的金纳米颗粒单层膜。图5展示了光纤LSPR传感器的实物图,能够看到光纤表面包覆着一层明亮的金膜,表明该组装方法不受基底形状的影响,适用于光纤LSPR传感器的制备。

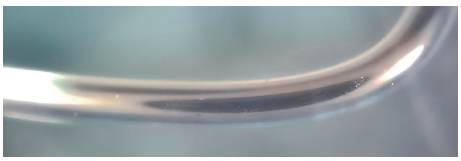
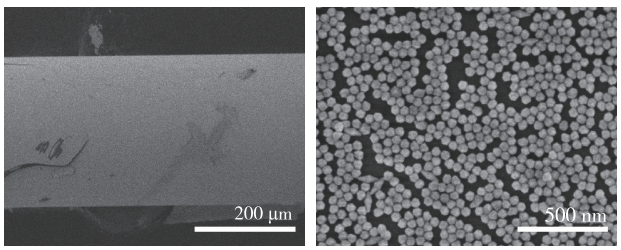


图5 利用液-液界面自组装方法制备的光纤LSRP传感器实物图

3.2 无包层光纤LSPR传感器的形貌表征

利用扫描电子显微镜(SEM)对制备好的光纤LSPR传感器的微观形貌进行表征。图6(a)为低倍SEM图像,展示了大面积金三八面体单层膜在光纤表面的分布情况。从图中可以看出,光纤表面的金三八面体薄膜覆盖率较高,排列均匀且致密。金三八面体之间的紧密排列表明其在光纤表面形成了致密的单层膜,这为增强LSPR效应提供了理想的结构基础。图6(b)展示了光纤LSPR传感器的高倍SEM图像。可以看出,金三八面体均匀分布在光纤表面,排列致密,且未出现明显的纳米颗粒团聚现象。利用ImageJ软件测量发现,大部分金三八面体之间的间距在2~10 nm范围,但部分区域存在较大的纳米级空隙,导致少数金纳米颗粒之间的间距超过了20 nm。结果表明,液-液界面自组装方法能够获得大面积致密且均匀的金三八面体单层膜,成功制备了光纤LSPR传感器。

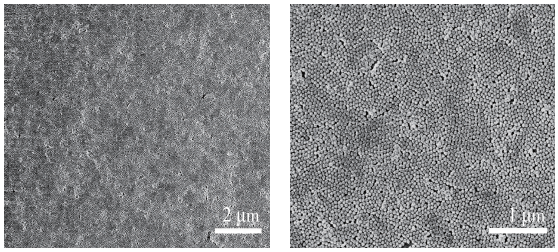


(a) 低倍SEM图像 (b) 高倍SEM图像

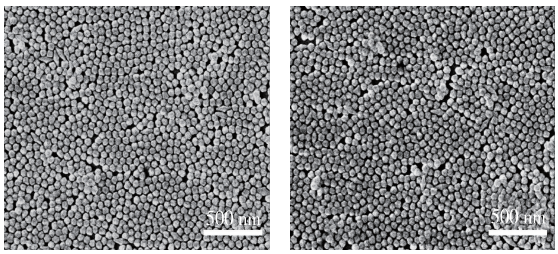
图6 金三八面体组装在光纤上的SEM图像

为研究该方法制备光纤LSPR传感器的重复性,在相同的实验条件下重复制备了基于金三八面体的光纤LSPR传感器,并获得了不同放大倍数的SEM图像。图7(a)和(b)为低倍的SEM图像,展示了光纤表面大面积金三八面体的分布情况;图7(c)和(d)为高倍的SEM图像,进一步表征了光纤LSPR传感器的微观结构。结果表明,金三八面体在光纤上形成了致密的单层膜,几乎没有较大的空隙,并且不存在堆积现象。因此,该方法制备的光

纤 LSPR 传感器具有较高的覆盖率，较好的均匀性和可重复性，且未出现团聚现象。这种结构有利于更有效地激发 LSPR 效应，从而实现高性能的光纤 LSPR 传感。



（a）和（b）光纤上金三八面体单层膜的低倍 SEM 图像



（c）和（d）光纤上金三八面体单层膜的高倍 SEM 图像

图 7　同一光纤 LSPR 传感器的不同放大倍数的 SEM 图像

4　光纤 LSPR 传感检测实验

4.1　光纤 LSPR 传感检测系统的搭建

为评估制备好的光纤 LSPR 传感器的折射率敏感性能，搭建了如图 8 所示的检测系统。光纤 LSPR 传感器的两端分别连接卤素灯（景颐光电，JY-L2000）和光谱仪（海洋光学，USB2000+）。为了确保测量过程中的稳定性，将光纤 LSPR 传感器固定于微流控芯片中。利用光谱仪对光信号进行采集和记录，并通过 Ocean Optics Spectra Suite 软件将 LSPR 谱实时显示在计算机屏幕上。此外，制备了不同浓度的蔗糖溶液（0，10%，20%，30%，40%，50%）作为待测液，并使用阿贝折射仪测定其折射率。

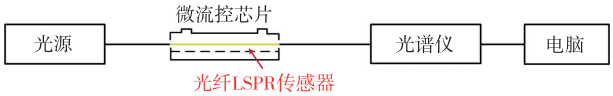
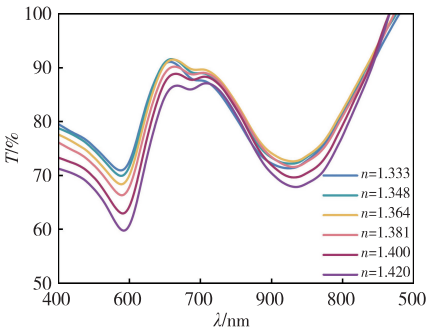


图 8　无包层光纤 LSPR 折射率传感实验系统

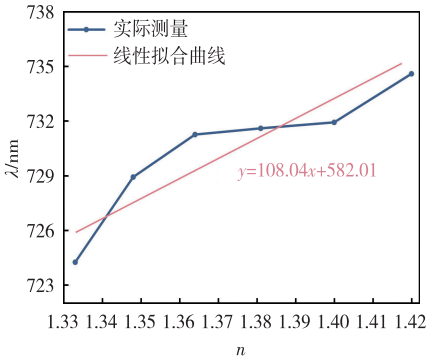
4.2　光纤 LSPR 传感器的折射率传感实验

为了表征制备的基于金三八面体的光纤 LSPR 传感器的传感性能，在折射率传感实验中，采集了不同浓度蔗糖溶液的 LSPR 光谱，并分析了共振波长随蔗糖溶液折射率的变化规律。为了保证检测的准确性，实验中按从低浓度到高浓度的顺序快速将不同浓度的蔗糖溶液注入到微流控芯片中。

在波长范围为 400～900 nm 下，得到了不同折射率下光纤 LSPR 传感器的透射光谱，如图 9（a）所示。其中，透过率用 T 表示。随着待测液折射率（n）的增加，基于金三八面体的光纤 LSPR 传感器的共振波长红移，并伴随着多个 LSPR 峰。这可能是由于金三八面体本身的三角形金字塔形状及其在光纤上的不同取向，激发了多种不同的等离激元模式，从而导致多峰现象[20]。通过极值法寻峰，建立了 LSPR 光谱的共振波长与待测液折射率之间的关系，如图 9（b）所示。灵敏度（S）定义为 LSPR 特征峰的共振波长偏移量（$d\lambda$）与待测液折射率变化量的比值。从图中可以看出，基于金三八面体的光纤 LSPR 传感器在不同折射率区间的响应程度有所差异。当待测液折射率从 1.33 增加到 1.42 时，共振波长从 724.23 nm 红移到 734.59 nm，对应的灵敏度为 119.08 nm/RIU，其线性拟合曲线为 $y=108.04x+582.01$，线性响应度约为 0.75。这种较低的线性响应度可能是由于更换不同浓度待测液时影响了 LSPR 光谱对灵敏度的响应，以及吸收峰的宽度较大导致共振波长的测量误差。其中，光纤



（a）不同折射率的透射光谱



（b）共振波长与折射率的关系

图 9　不同折射率下基于金三八面体的光纤 LSPR 传感器的透射光谱

LSPR传感器对1.33～1.34范围内的折射率变化最为敏感，计算得到最大灵敏度为312 nm/RIU。此外，对所有折射率小区间的灵敏度进行平均，得到平均灵敏度为125.82 nm/RIU。以上结果表明，使用液-液界面自组装方法制备的基于金三八面体的光纤LSPR传感器具有良好的性能，并且对折射率变化表现出较高的敏感性。

4.3 与其他组装方法的比较

在光纤LSPR传感领域，通常利用硅烷法和静电自组装法将金纳米颗粒组装到光纤上[3]。硅烷法利用3-氨基丙基三甲氧基硅烷等硅烷偶联剂对光纤表面进行改性，再通过共价键作用实现金纳米颗粒的固定。但该方法需要长时间浸泡在溶液中，且对反应温度和浸泡时间等条件要求严格[3,18-19,21]。静电自组装法则采用逐层沉积技术，先在羟基化光纤表面交替沉积带正电的聚烯丙胺盐酸盐和带负电的聚苯乙烯磺酸钠等聚电解质，再利用静电作用固定带相反电荷的金纳米颗粒[3,18-19]。这两种方法的应用都较为广泛，但普遍存在金纳米颗粒团聚的问题，进而影响光纤LSPR传感器的性能。模板法采用聚苯乙烯-b-聚丙烯酸在光纤表面形成有序纳米结构的嵌段共聚物（BCP）模板，再通过相互作用实现金纳米颗粒的定向吸附[18-19]。该方法能够形成较为均匀且致密的金纳米颗粒单层，显著减少纳米颗粒团聚现象。但是，该方法的工艺复杂度较高，且制备成本显著高于前两种方法。

表1对比了本研究使用的液-液界面自组装法和其他常用组装方法。可见，基于液-液界面自组装方法制备的无包层光纤LSPR传感器表现出良好的灵敏度。同时，相较于其他三种自组装方法，该方法具有成本低、操作简单和耗时短等优势，能够在光纤上组装一层致密且均匀的金纳米颗粒单层膜，并且不存在纳米颗粒团聚的现象。

表1 本文方法与制备光纤LSPR传感器常用方法的比较

组装方法	复杂性	成本	组装效果	金纳米颗粒直径/nm	金纳米颗粒的形状	灵敏度/(nm/RIU)
硅烷法	复杂	较高	容易团聚	33	球[19]	147
				38	三角形棱镜[21]	263
静电自组装法	复杂	高	容易团聚	31	球[18]	112
				33	球[19]	189
BCP模板法	复杂	高	团聚较少	31	球[18]	326
				33	球[19]	386
液－液界面自组装法	简单	低	没有团聚	45	三八面体(本文)	312

5 结论

本研究成功开发了一种基于金三八面体致密组装的光纤LSPR传感器，并用于折射率传感。仿真结果表明，在785 nm入射光的激发下，金三八面体的多个尖端会因LSPR效应形成大量的热点，产生局部电场增强效应。

利用液-液界面自组装方法制备了基于金三八面体单层膜的光纤LSPR传感器。光纤表面金三八面体排布致密均匀，能够有效激发LSPR效应。通过对不同浓度的蔗糖溶液进行检测，得到光纤LSPR传感器的最高检测灵敏度为312 nm/RIU，表明该方法制备的光纤LSPR传感器具有良好的灵敏度。此外，该传感器还具有制备简单、成本低和结构紧凑等优点，在环境监测、食品检测和生物传感等领域具有广阔的应用前景。

参考文献：

[1] 李钢敏，李致远，李正冉，等. 基于表面等离子体共振的高灵敏度光纤微流控芯片[J]. 中国激光，2021，48(1)：0106002.
Li Gangmin, Li Zhiyuan, Li Zhengran, et al. High-sensitivity optical-fiber microfluidic chip based on surface plasmon resonance [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(1): 0106002.

[2] 马金英，刘铁根，江俊峰，等. 光纤表面等离子体共振传感灵敏度提高研究进展[J]. 中国激光，2021，48(19)：1906002.
Ma Jinying, Liu Tiegen, Jiang Junfeng, et al. Progress in sensitivity enhancement for optical fibre surface plasmon resonance sensing [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(19): 1906002.

[3] Zhang H, Zhou X, Li X, et al. Recent advancements of LSPR fiber-optic biosensing: combination methods, structure, and prospects[J]. Biosensors, 2023, 13(3): 405.

[4] Klantsataya E, Jia P, Ebendorff-Heidepriem H, et al. Plasmonic fiber optic refractometric sensors: from conventional architectures to recent design trends [J]. Sensors, 2016, 17(1): 12.

[5] Kasani S, Curtin K, Wu N. A review of 2D and 3D plasmonic nanostructure array patterns: Fabrication, light management and sensing applications [J]. Nanophotonics, 2019, 8(12): 158.

[6] 崔颂雅. 表面等离激元共振传感器的结构设计及其应用[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
Cui Songya. Research of structural designs and applications of surface plasmon resonance sensors[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022.

[7] Shabaninezhad M, Ramakrishna G. Theoretical investigation of size, shape, and aspect ratio effect on the LSPR sensitivity of hollow-gold nanoshells [J]. The Journal of Chemical Physics, 2019, 150(14): 144116.

[8] Song H, Zhang H, Sun Z, et al. Triangular silver nanoparticle U-bent fiber sensor based on localized surface plasmon resonance[J]. AIP Advances, 2019, 9(8): 085307.

[9] Lu M, Zhu H, Lin M, et al. Comparative study of block copolymer-templated localized surface plasmon resonance optical fiber biosensors: Ctab or citrate-stabilized gold nanorods [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2021, 329: 129094.

[10] Lu M, Zhu H, Hong L, et al. Wavelength-tunable optical fiber localized surface plasmon resonance biosensor via adiblock copolymer-templated nanorod monolayer[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(45): 50929-50940.

[11] Calatayud-Sanchez A, Ortega-Gomez A, Barroso J, et al. A method for the controllable fabrication of optical fiber-based localized surface plasmon resonance sensors [J]. Scientific Reports, 2022, 12: 9566.

[12] 向晓英. 基于三角形金纳米片的光纤LSPR SARS-CoV-2传感器的研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2024.
Xiang Xiaoying. Research on optical fiber LSPR SARS-CoV-2 sensor based on triangular gold nanosheets[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2024.

[13] 孙广意. 金纳米棒光纤局域表面等离激元共振金属离子传感器的制备及应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
Sun Guangyi. Fabrication and application of fiber-optic localized surface plasmon resonance metal ion sensor based on gold nanorods[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.

[14] Lin X, Fang G, Liu Y, et al. Marangoni effect-driven transfer and compression at three-phase interfaces for highly reproducible nanoparticle monolayers [J]. The Journal of Physical Chemistry Letters, 2020, 11(9): 3573-3581.

[15] Zheng Y, Zhong X, Li Z, et al. Successive, seed-mediated growth for the synthesis of single-crystal gold nanospheres with uniform diameters controlled in the range of 5~150 nm [J]. Particle & Particle Systems Characterization, 2014, 31(2): 266-273.

[16] Zhang Q, Large N, Wang H. Gold nanoparticles with tipped surface structures as substrates for single-particle surface-enhanced Raman spectroscopy: Concave nanocubes, nanotrisoctahedra, and nanostars[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2014, 6(19): 17255-17267.

[17] Zhao G, Lochon F, Dembélé K, et al. Rapid and facile synthesis of gold trisoctahedrons for surface-enhanced Raman spectroscopy and refractive index sensing[J]. ACS Applied Nano Materials, 2024, 7(5): 5598-5609.

[18] Lu M, Zhu H, Geraldine Bazuin C, et al. Polymer-templated gold nanoparticles on optical fibers for enhanced-sensitivity localized surface plasmon resonance biosensors [J]. ACS Sensors, 2019, 4(3): 613-622.

[19] Lu M, Peng W, Lin M, et al. Gold nanoparticle-enhanced detection of DNA hybridization by a block copolymer-templating fiber-optic localized surface plasmon resonance biosensor[J]. Nanomaterials, 2021, 11(3): 616.

[20] Lee H, Kim H J, Park J H, et al. Effects of surface density and size of gold nanoparticles in a fiber-optic localized surface plasmon resonance sensor and its application to peptide detection[J]. Measurement Science and Technology, 2010, 21(8): 085805.

[21] Liyanage T, Lai M, Slaughter G. Label-free tapered optical fiber plasmonic biosensor[J]. Analytica Chimica Acta, 2021, 1169: 338629.

作者简介：

石　与(2000—),女,硕士研究生,主要研究方向为光纤局域表面等离激元共振传感器;

孔　梅(1967—),女,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为导波光学器件物理和应用,光学传感技术等。