

# 局域等离激元复合谐振器中的高灵敏度传感器



陈云亮, 张青红, 潘鸿翔, 申加雄\*

贵州黔南科技学院计算机与电子信息学院, 贵州惠水 550600

**摘要:** 表面等离激元(Surface Plasmon Polaritons, SPP)是电磁振荡与金属中电子振荡强烈耦合产生的混合电磁模,但在微波和太赫兹波段,因金属趋肤效应减弱、有效电导率降低,难以直接激发。局域型人工表面等离激元(Localized Spoof Surface Plasmonic, LSSP)作为在此频段实现类似 SPP 电磁特性的功能材料,具备深度波长压缩、高灵敏度等独特优势。本论文围绕可调谐的 LSSP 器件展开研究,基于 LSSP 强色散和高场束缚性,设计出高灵敏度、高优值系数(Figures of Merit, FOM)的微波传感器,被测介质介电常数在 2 - 4 变化时,偶极模频移达 270 MHz,灵敏度为 135 MHz/RIU,引入裂纹后,在保持灵敏度的同时,偶极模 FOM 值提高约 4.4%,激励效率提升 22%。LSSP 复合谐振器凭借超紧凑有效波长、低成本制造工艺和高品质因数(Quality Factor, Q),在微量生物医学和化学传感等微波无损检测领域极具应用潜力,实现了对局域型人工等离激元电磁特性的精确调控。

**关键词:** 铁电复合谐振器; LSSP; 介电性能; 高灵敏度传感器; FOM

**DOI:** [10.57237/j.cst.2025.04.004](https://doi.org/10.57237/j.cst.2025.04.004)

## High-Sensitivity Sensor in Localized Plasmonic Hybrid Resonator

Yunliang Chen, Qinghong Zhang, Hongxiang Pan, Jiexiong Shen\*

Computer and Electronic Information College, Guizhou Qiannan University of Science and Technology, Huishui 550600, China

**Abstract:** Surface Plasmon Polaritons (SPP) are hybrid electromagnetic modes generated by the strong coupling of electromagnetic oscillations and electronic oscillations in metals. However, in the microwave and terahertz bands, due to the weakened skin effect of metals and the reduced effective electrical conductivity, they are difficult to be directly excited. Localized Spoof Surface Plasmonic (LSSP), as a functional material that achieves electromagnetic characteristics similar to SPP in this frequency band, has unique advantages such as deep wavelength compression and high sensitivity. This thesis focuses on the research of tunable LSSP devices. Based on the strong dispersion and high field restraint of LSSP, a microwave sensor with high sensitivity and high Figures of Merit (FOM) is designed. When the dielectric constant of the measured medium varies from 2 to 4, the dipole mode frequency shifts up to 270 MHz. With a sensitivity of 135 MHz/RIU, after introducing a crack, the FOM value of the dipole mode increased by approximately 4.4% while maintaining the sensitivity, and the excitation efficiency improved by 22%. The LSSP composite resonator,

基金项目: 贵州省高等学校本科教学内容和课程体系改革项目 (GZJG2024456).

\*通信作者: 申加雄, [jiexiong0703@163.com](mailto:jiexiong0703@163.com)

收稿日期: 2025-10-27; 接受日期: 2025-12-11; 在线出版日期: 2025-12-24

<http://www.computscitech.com>

with its ultra-compact effective wavelength, low-cost manufacturing process and high Quality Factor (Q), has great application potential in microwave non-destructive testing fields such as micro-biomedicine and chemical sensing, achieving precise regulation of the electromagnetic characteristics of local artificial plasmons.

**Keywords:** Ferroelectric Composite Resonator; LSSP; Dielectric Properties; High-sensitivity Sensor; FOM

## 1 引言

表面等离激元现象的起源可追溯至古罗马时期（约公元前 400 年），工匠通过在玻璃器皿中嵌入金微粒，利用其表面等离激元特性制作了著名的莱克斯杯，该器物在自然光下展现出独特的光学效应：反射光呈绿色而透射光呈红色，这种显色效应源自贵金属纳米颗粒受光激发引发的局域表面等离激元共振（Localized Surface Plasmon Resonance, LSPR），其机理可解释为当入射光波频率与纳米颗粒本征振荡频率达到相位匹配时，将引发光能吸收与电磁场增强的协同共振效应。根据电磁场空间分布特性，表面等离激元可分为两类：具有波导特性的表面等离极化激元和空间局域化的表面等离激元。表面等离激元是一种沿着金属与电介质界面传输的表面电磁波，是电磁场与导体自由电子振荡耦合产生的等离激元振荡。

局域表面等离激元表征贵金属纳米结构表面受限的电磁场模态，其物理本质可描述为：当亚波长维度金属粒子与特定波长电磁波相互作用时，会形成表面电荷振荡与近场增强分布。金属材料的本征等离子频率通常位于紫外光谱区，在远红外至微波等长波频域（THz 波段及以下），由于趋肤效应导致金属呈现理想导体特性，此时表面无法维持有效的电磁场束缚。为实现低频段人工表面等离激元效应，J. B. Pendry 等学者[1]在 2004 年提出的人工表面等离激元极化激元概念是一种在波纹金属中传播的人工电磁波，它模拟了金属表面自然固有的电子振荡，称为表面等离激元为实现低频段人工表面等离激元效应。2014 年，Tiejun Cui 等人推出了超薄二维 LSSP 结构，他们还首次研究了这些结构中的多能级共振现象[1-4]。Jaiswal 等人在 2018 年提出了基于赝表面等离子体激元的可重构带通滤波器，进一步拓展了 LSSP 结构在可重构功能器件中的应用[16]。LSSP 提供了一种有效的介电信号感测方法，依赖于由于被测样品的介电常数的变化而引起的谐振峰的移位。从实际工程的角度来看，较长的固有波长将降低传感器的区分能力，而具有更紧凑的有效波长的传感器可以提高检测限。

虽然具有紧凑波长的毫米波可以提高检测极限，但较高的工作频率通常使制造复杂化并增加成本。因此，在 GHz 范围内工作的 LSSP 传感器由于其高品质因数和灵敏度而特别有希望用于传感应用。例如 Taohai Zhu, Chuang Wang 等人提出的一种基于 Ag/TiO<sub>2</sub> 的拉锥多模光纤表面等离激元共振传感器[5]。Yang 等人则基于具有缺陷基底结构的欺骗式表面等离子体激元，设计出微型宽带高带外抑制带通滤波器，证明了 LSSP 在高频器件小型化，高性能化中的广泛适用性[12]。TiO<sub>2</sub> 增加传感器灵敏度保留了窄损耗谱线的优势，同时起到了保护 Ag 免受氧化的作用。该传感器具有高灵敏度和高质量指数的特点，在通信波长范围内表现出卓越性能，传感器实现了最大波长灵敏度达到 16000 nm/RIU，最大 FOM 值为 1920 RIU-1。本项工作为高性能表面等离激元共振传感器的设计提供了有价值的设计思路。

集成传感系统构建在的 PCB 上，无线连接到智能手机，在频率扫描和共振跟踪模式下运行，并实现 69 dB 的丙酮蒸汽传感信噪比[6]。Zhu 等人提出了基于深亚波长局域人工表面等离激元的超灵敏实时传感技术，进一步验证了 LSSP 在高灵敏度传感领域的核心优势[11]。鉴于 LSSP 传感器的巨大潜力，本文设计了一种局域等离激元共振器中的传感器，利用 LSSP 的特点进一步保持传感器的高灵敏度和高 FOM 性能。为了评估 LSSP 谐振器的性能，我们使用商用电磁仿真软件 CST Studio Suite 进行了多维仿真。由于设计的结构对覆盖在其表面的介电常数非常敏感，我们进一步设计了利用该特性的高灵敏度电容率检测传感器。结果表明，当被测材料的介电常数从 2 变化到 4 时，等离激元谐振器的偶极模频移达到，灵敏度达到 135 MHz/RIU。另外，我们在传感器上引入了缝隙对传感器进行扰动，当引入两个关于微带线对称的缝隙扰动传感器时，上述偶极模的 FOM 值从 144 增加到 149，增加了 4.4%，而灵敏度几乎保持不变。该传感器采用标准 PCB 工艺，具有极高的灵敏度、低成本和很强的实用性，在微波无损检测中具有巨大的应用潜力。

## 2 结构设计与结果讨论

### 2.1 传感器的设计

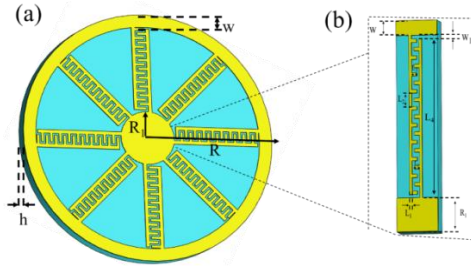


图 1 (a) 谐振器结构示意图, 参数如表 I 所示; (b) 谐振器单元结构示意图, 参数如表 1 所示

表 1 设计的谐振器每个部分的内涵和物理尺寸

| 结构        | 表示    | 尺寸 (mm) |
|-----------|-------|---------|
| 衬底厚度      | $h$   | 0.500   |
| 中心金属圆半径   | $R_1$ | 1.00    |
| 金属圆弧的外半径  | $R$   | 6.25    |
| 金属圆弧弧宽    | $w$   | 0.440   |
| 金属圆弧和辐条间隙 | $W_1$ | 0.100   |
| 金属横幅条长度   | $L_3$ | 0.100   |
| 金属横幅条之间间隔 | $L_2$ | 0.500   |
| 竖直金属辐条宽度  | $L_1$ | 0.100   |
| 竖直金属辐条长度  | $L_4$ | 4.71    |

如图 1 所示, 谐振器结构由波纹圆盘组成, 设计的该圆盘具有插趾电极结构, 可以同时增加谐振器的等效电容和电感, 与此同时不增加多余的面积, 这有利于结构的饿小型化, 衬底选用 Rogers RT5880, 电极运用退火铜。结构尺寸参数见表 1。Ding 等人基于 PCB 技术设计了伪表面等离子体激元可调谐液晶相移器, 验证了 PCB 工艺在 LSSP 器件制造中的可靠性与实用性[14]。本研究中传感器采用标准 PCB 工艺, 衬底选用 Rogers RT5880, 电极运用退火铜, 其结构设计与工艺选择均参考了相关成熟技术路线。

### 2.2 色散工程

谐振器的单元色散曲线如图 2 所示, 如图所示, 在大多数频率范围内, 谐振器的单位单元的色散曲线逐渐偏离光线, 这意味着谐振器的紧凑设计不仅满足感测和检测的小型化要求, 而且可以通过降低传感器的谐振频率来降低传感器的检测成本。理论上, 当谐振器的周长是传播等离激元激元模式的有效波长的整数倍时, Mie 共振显现。如图 2 所示, 黑色虚线表示谐振频率和相应的波矢量 ( $k = 2\pi/\lambda_{\text{eff}}$ , 其中  $\lambda_{\text{eff}}$  是有效波

长), 波矢量  $k_{\text{LSSP}}$  可以描述为:

$$k_{\text{LSSP}} = \frac{2n\pi}{L} \quad (1)$$

因此, 理论计算表明, 偶极模应该出现在 2.91 GHz, 而四极模则出现在 4.5 GHz, 这两种模式分别对应于  $n = 1$  和  $n = 2$ 。

### 2.3 CPR 的激励效率

馈电采用阻抗为  $50 \Omega$  的微带线, 馈电方式为单端口端口馈电。谐振器和微带线之间的间距设置为 0.03 mm。微带线宽度为 1.6 mm, 基板为 Rogers RT 5880, 介电常数为 2.2, 厚度为 0.5 mm。

如图 2 所示, 红色显示了拟合曲线 (拟合参数见表 2), 当谐振器由微带馈电时, 在 2.91 GHz 处激发出偶极谐振, 在 4.4 GHz 处观察到四极模, 这与从色散曲线导出的理论计算结果 (见图 2) 相一致。

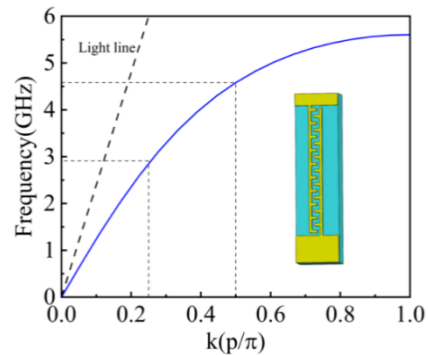


图 2 等离激元谐振器单元色散曲线 (虚线和插图分别表示偶极子、四极子出现的位置及单元结构示意图)

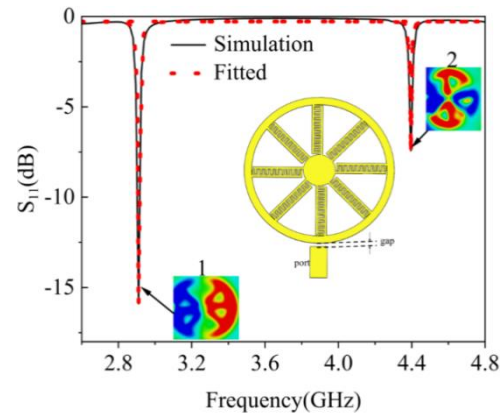


图 3 S 参数图及相应谐振点处的电场分布 (插图显示了馈电原理)

小的偏差由谐振器的单位单元结构和实际结构之间的差异引起。谐振模式是由插趾电极之间的强耦合



产生，强耦合模式能够实现亚波长谐振，同时进一步增强电场限制能力。对于谐振器的激励，高品质因数和高激励效率都是期望的，这反映了谐振器与环境之间相互作用的整体效果。参数品质因数，可以定义为评估谐振器中激发效率和  $Q$  因子的协同效应[7]

$$FOM = Q \times \delta I \tag{2}$$

其中， $\delta I$  是激发效率， $Q$  表示品质因数，其可以通过  $Q = f_0/\Delta f_{hdb}$  来计算，其中  $\Delta I$  是谐振峰值频率， $\Delta f_{hdb}$  是谐振峰值的半峰全宽。

采用如图 3 所示馈电方式时，根据仿真结果可以观察到，在 2.8-4.8 GHz 低频的范围内出现两个谐振峰，即  $f_1 = 2.91$  GHz 和  $f_2 = 4.4$  GHz。如图中  $E_z$  场分布所示，这些分别对应偶极和四极模式，这些峰的  $\delta I$  值分别为  $\delta I_1 = -16$  和  $\delta I_2 = -4.25$ ，相应的品质因子  $Q_1 = 200.5$  和  $Q_2 = 151.3$ 。因此，可以使用耦合模理论[8]定量分析馈电方法的激发效率。对于耦合情况下的  $S_{11}$  参数，反射率可以描述为：

$$r(\omega) = -1 + \sum_n \frac{\frac{2}{\tau_{n1}} e^{j\varphi_n}}{j(\omega - \omega_0) + \frac{1}{\tau_{n0}} + \frac{1}{\tau_{n1}}} \tag{3}$$

其中，参数  $n$  表示谐振阶数， $\omega_0$  和  $\tau_{n0}$  分别是第  $n$  谐振模式的谐振频率和固有衰减时间，其中， $\tau_{n1}$  是第  $n$  谐振模式与馈电端口之间耦合的衰减时间。对于米氏谐振，不同阶之间的重叠可以忽略，因此，对于特定的米氏谐振模式，仅需要考虑第  $n$  个谐振阶[9]。 $\omega_{n0}$  可以在谐振下降处考虑， $\tau_{n0}$  可以使用  $\tau_{n0} = 1 / 2\Delta f_{hdb}$  处带宽计算。 $\tau_{n1}$  值对应于耦合电容，因此确定耦合效率，其可以通过拟合  $S_{11}$  曲线来提取。根据先前的研究[10]，单端口耦合方案的激发效率和 FOM 高于双端口耦合方案，由于在此实验过程中讨论双端口馈电方式时，出现的谐振峰杂乱且不规则出现，不利于收集到目标谐振峰的变化情况，因此不利于做对比试验，所以，本研究只讨论单端口耦合激励情况的感测特性。

表 2 应用 TCMT 理论对端部耦合和横向耦合情况的拟合参数

| 参数    | $\tau_{n1}$ | 偶极子 $\tau_{n0}$        | 四极子 $\tau_{n0}$        |
|-------|-------------|------------------------|------------------------|
| 单端口馈电 | -           | $0.0110\pi$            | $0.00965\pi$           |
| 谐振频率  | 57 ns       | $2\pi \times 2.91$ GHz | $2\pi \times 4.40$ GHz |

当使用微带线来激励谐振器时(图 4)，可以发现，随着耦合间距 Gap 的逐步增大，偶极模的 FOM 值先增加到最大值，之后逐渐下降。当耦合间距为 0.01 mm 时，增加微带线单端口激励下偶极模的 FOM 值为 29，激励效率仅为 50%，表明谐振器工作在欠耦合状态。当差距为 0.03 mm 时，FOM 值增加到 130，激励效率达到 80%，将谐振器推入过耦合状态，因此，当谐振器和微带线之间的差距为 0.03 mm 时，谐振器实现其最佳 FOM。对于以下传感器应用，我们将使用具有此优化耦合间隙的单端口激励。

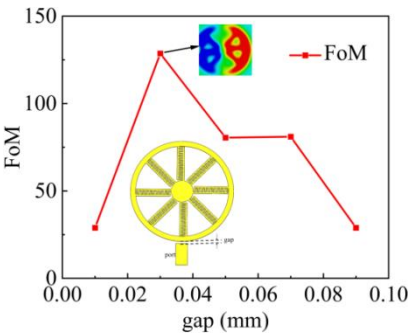


图 4 不同耦合间隙下，微带线馈电时偶极模的 FOM 值；插图表示所设计结构在最佳 FOM 处的电场  $E_z$  的模拟图

2.4 CPR 的传感特性

通常在现实研究中，传感器的研究需要考虑高灵敏度和高 FOM 值两个重要因素，这需要综合权衡。基于以上对谐振器的各个性能方面的实验研究，可以看出当耦合间距为 0.03mm 时单端口微带线端激励下复合型传感器 (Composite Sensor, CPR) 的 FOM 效果最好。

在此基础上，设计一款高灵敏性的介电常数检测传感器，该传感器由复合谐振器和单端口馈电微带线组成，旨在研究覆盖不同介电常数材料的 CPR 上的传感器特性。如图 5 所示。传感器结构由宽度为  $W = 1.6$  mm 的微带馈线和 CPR 组成。选用厚度为 0.018 mm 的铜作为金属，基板为 Rogers RT5880，基板厚度为  $h = 0.5$  mm，介电常数为 2.2，损耗角正切为 0.0009。

在 CPR 上覆盖待测材料之后，进一步对传感器的  $S$  参数进行研究，仿真模拟结果如图 5(a)所示。可以看出，在传感器中获得了极高的介电灵敏度。当样品的介电常数从 2 变化到 4 时，整个共振峰的位置发生红移，偶极模的共振频率在 2.84 GHz - 2.57 GHz 之间变化，红移幅度为 270 MHz，灵敏度为 135 MHz/RIU。W 等人基于高阶局域人工表面等离激元谐振器实现了

高灵敏度传感,其研究表明高阶 LSSP 模式是提升传感性能的重要路径[15]。本文设计的谐振器通过插趾电极

结构激发偶极模,四极模等多阶模式,与该研究思路形成呼应,相应的 FOM 从 114 变为 129,增加了 4%。

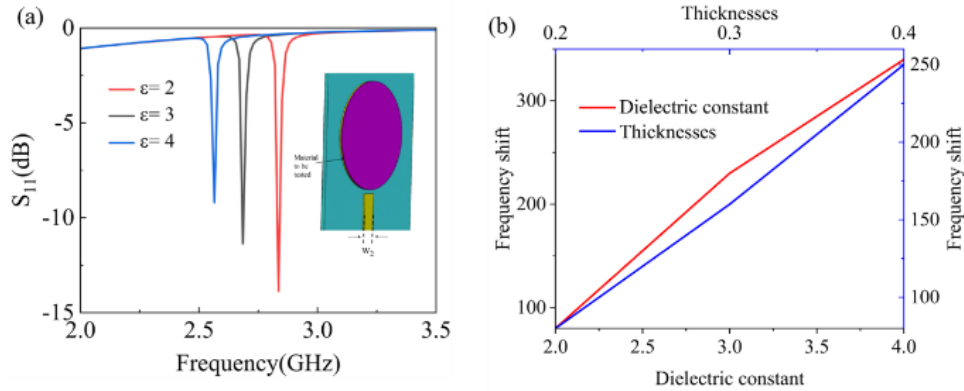


图 5 (a) 传感器的  $S_{11}$  参数,插图显示了传感器的结构; (b) 具有不同介电常数和 0.2 mm 厚度的电介质引起的频移,以及具有 2 个介电常数和不同厚度的电介质引起的频移

如图 5(b)所示,通过改变传感器上方的待测材料来检查传感器的性能。当测试材料的介电常数保持在 2 时,我们只改变材料的厚度。可以看出,传感器的偶极模的频移在厚度为 0.2 mm 到 0.4 mm 的范围内变化

几乎是线性的,当测试材料的厚度保持在 0.2 mm 时,我们改变材料的介电常数,可以观察到,对于介电常数,传感器的偶极模的频移在 2 至 4 的范围内也几乎是成线性变化的。

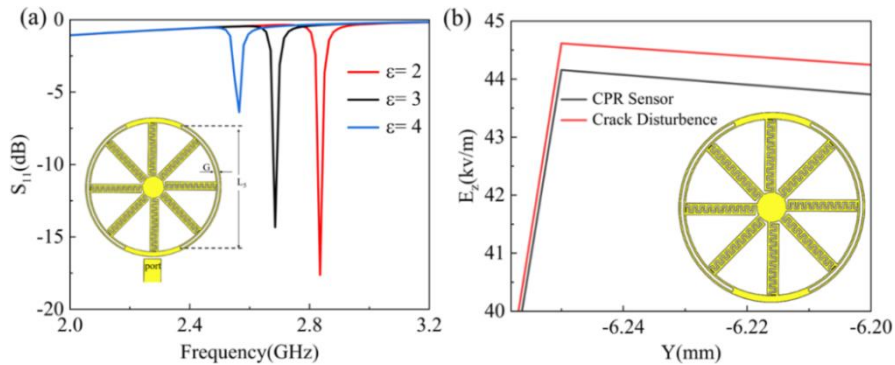


图 6 (a)引入狭缝干扰的 CPR 传感器  $S_{11}$  参数模拟图,待测材料厚度为 0.2 mm (插图显示了引入狭缝干扰的方式); (b)引入和不引入裂纹干扰时谐振器的电场  $E_z$  沿 Y 轴的比较

为了验证所研究结构的可行性与优点,我们接着做了一个对比实验,即引入一对对称的裂缝干扰来模拟此时传感器的性能,此对比实验只是引入了单独的裂缝,其它参数均与图 5 中结构参数保持一致。

该裂纹分布在馈电口,如图 6 所示。从(a)图中可以观察到的,相比于原始的传感器,引入干扰后的传感器的偶极子谐振模式的激发效率在被裂纹干扰之后显著改变。当  $L_5 = 7.087$  mm 时,偶极模的激发效率达到最佳,此时随着待测材料的介电常数从 2 变化到 4 时,偶极子谐振频率从 2.835 GHz 变化到 2.565 GHz,频移达到 270 MHz,与没有引入干扰的传感器部分参数对比见表 3,当引入  $L_5=7.087$  mm 的裂缝干扰时,传

感器的偶极模式的激励效率和 FOM 值都进一步得到提高,但是灵敏度与没有引入裂缝干扰时保持一致,这为如何进一步提升传感器的 FOM 和耦合激励效率提供了新思路。

为了使潜在的物理机制合理,我们进一步研究了引入和不引入裂缝干扰时复合谐振器的电场  $E_z$  沿着 Y 轴方向的对比情况,如图 6(b)所示,可以看出,裂缝的引入增加了谐振器耦合时的电场强度,特别是沿着传感器的裂缝,能使得 EM 能量更加集中,进一步提高了偶极模的耦合效率和 FOM 值。Zhang 等人通过电磁模态干涉在单一混合等离子体谐振器中实现了高 FOM 共振,为 LSSP 器件的 FOM 优化提供了重要参考[13]。

本文所提出的复合传感器与最近报道的比较情况见表 4，可以发现，本文利用单端口馈电激励复合谐振器时能保持较好的灵敏度和较高的 Q 值，同时还通过

引入狭缝的方式提升了激励效率，这为小型化的集成器件实时调控提供了新思路。

表 3 应用 TCMT 理论对端部耦合和横向耦合情况的拟合参数

| 结构    | 模式  | FOM | 灵敏度        | 激励效率 |
|-------|-----|-----|------------|------|
| 无引入裂缝 | 偶极模 | 114 | 135MHz/RIU | 65%  |
| 引入裂缝  | 偶极模 | 119 | 135MHz/RIU | 87%  |

表 4 所提出的复传感器与最近报道的传感器之间的比较

| S 参数 | 灵敏度         | Q 值   | 中心频率      | FOM   | 参考文献 |
|------|-------------|-------|-----------|-------|------|
| 本工作  | 288MHz/RIU  | 67    | 1.000GHz  | -     | [11] |
|      | 1100MHz/RIU | 153   | 8.960GHz  | 143.3 | [16] |
|      | 3680MHz/RIU | 340.6 | 14.32 GHz | -     | [13] |
|      | 135MHz/RIU  | 200.5 | 2.910 GHz | 130   |      |
|      |             |       |           |       |      |

3 小结

在这项研究中，我们设计了一个复合等离激元共振器，结构由同心向内和向外的插趾辐条组成，它可以强烈地限制到一个深亚波长尺度的所有米氏共振。等离激元激元模式的激发可以通过优化的单端口电容激发来实现，同时保持高效的灵敏度和 Q 值。

同时，基于等离激元谐振器，设计了一种高灵敏度的电介质材料检测传感器。当传感器上覆盖的被测介质的介电常数在 2 - 4 之间变化时，偶极模的频移达到最大值 270 MHz，灵敏度为 135 MHz/RIU。此外，在传感器的 Y 轴上引入一对沿着对称分布的裂纹，结果表明，在保持传感器灵敏度基本不变的情况下，偶极模的 FOM 值提高了约 4.4%，激励效率提高了 22%。我们注意到这项工作的重要性，因为两者都具有出色的传感器灵敏度和 FOM 值，这归因于局域人工表面等离激元传感器的深亚波长限制和高 Q 因子。LSSP 复合谐振器的超紧凑的有效波长、低成本的制造工艺和高 Q 值使其在微量生物医学和化学传感等微波无损检测领域具有广阔的应用前景。

参考文献

[1] Pendry J B, Holden A J Stewart, W J, et al. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures [J]. Physical Review Letters, 1996, 76(25): 4773.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.76.4773>

[2] Zayats A V, Smolyaninov I I, Maradudin A A. Nano-optics of surface plasmon polaritons [J]. Physics Reports, 2005,

408(3-4): 131-314.  
<https://doi.org/10.1016/j.physrep.2004.11.001>

[3] Garcia-Vidal F J, Martin-Moreno L, Pendry J B. Surfaces with holes in them: new plasmonic metamaterials [J]. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2005, 7(2): S97.  
<https://doi.org/10.1126/science.1098999>

[4] X Shen, T J CUI. Ultrathin plasmonic metamaterial for spoof localized surface plasmons: Spoof localized surface plasmons [J]. Laser & Photonics Reviews, 2014, 8(1): 137-145.  
<https://doi.org/10.1002/lpor.201300144>

[5] Zhang X, Cui T J. Deep-subwavelength and high-Q trapped mode induced by symmetry-broken in toroidal plasmonic resonator [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 69(4): 2122-2129.  
<https://doi.org/10.1109/TAP.2020.3026480>

[6] 朱海涛,王闯, 余柯涵. 拉锥光纤表面等离激元共振高性能传感器 [J].仪表技术与传感器, 2024, (10): 7-11.  
<https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-1841.2024.10.002>

[7] X Zhang, J W Zhu, T J CUI. An Ultracompact Spoof Surface Plasmon Sensing System for Adaptive and Accurate Detection of Gas Using a Smartphone [J]. Engineering, 2023, S2095809923002485.  
<https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.05.024>

[8] Homola J. Present and future of surface plasmon resonance biosensors [J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2003, 377: 528-539.  
<https://doi.org/10.1007/s00216-003-2101-0>

[9] Xu H T, Guan D F, Yang Z B, et al. An ultra-wideband out-of-phase power divider based on odd-mode spoof surface plasmon polariton [J]. International Journal of RF and Microwave Computer- Aided Engineering, 2021, 31(4): e22583.  
<https://doi.org/10.1002/mmce.22583>

- [10] Liu X, Feng Y, Chen K, et al. Planar surface plasmonic waveguide devices based on symmetric corrugated thin film structures [J]. Optics Express, 2014, 22(17): 20107-20116.  
<https://doi.org/10.1364/OE.22.020107>
- [11] Zhu J W, Zhang X, T J CUI. Ultra-Sensitive and Real-Time Sensing Based on Deep-Subwavelength Spoof Localized Surface Plasmons // 2021 Computing Communications and IoT Applications (ComComAp) [J]. IEEE, 2021, 352-355.  
<https://doi.org/10.1109/ComComAp53641.2021.9652993>
- [12] Yang L, Liu H, Cai B, et al. Miniaturized broadband high out-of-band rejection bandpass filter based on spoof surface plasmon polaritons with defected ground structure [J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 26722.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-024-77705-y>
- [13] Zhang X, Yan R T, T J CUI. High-FOM resonance in single hybrid plasmonic resonator via electromagnetic modal interference [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(8): 6447-6451.  
<https://doi.org/10.1109/TAP.2020.2970037>
- [14] Ding C, Meng F Y, Han J Q, et al. Design of filtering tunable liquid crystal phase shifter based on spoof surface plasmon polaritons in PCB technology [J]. IEEE transactions on components, packaging and manufacturing technology, 2019, 9(12): 2418-2426.  
<https://doi.org/10.1109/TCPMT.2019.2943149>
- [15] W J, LI Y, D F. High-Order Localized Spoof Surface Plasmons Resonator for High Sensitivity Sensing [J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(13): 12861-12868.  
<https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3180419>
- [16] Jaiswal R K, Pandit N, Pathak N P. Spoof surface plasmon polaritons based reconfigurable band-pass filter [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 31(3): 218-221.  
<https://doi.org/10.1109/LPT.2018.2889007>
- [17] Guo Y J, Xu K D, Deng X, et al. Millimeter-wave on-chip bandpass filter based on spoof surface plasmon polaritons [J]. IEEE Electron Device Letters, 2020, 41(8): 1165-1168.  
<https://doi.org/10.3389/fphy.2021.754510>