

引用格式: SU Xiaoqiang, HUANG Yucong, LI Shaoxian, et al. Spoof Plasmonic On-chip Sensor Based on Electromagnetically Induced Transparency (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(10):1052408

苏晓强, 黄宇聪, 李绍限, 等. 基于电磁诱导透明的人工表面等离激元片上传感器(特邀)[J]. 光子学报, 2023, 52(10):1052408

基于电磁诱导透明的人工表面等离激元片上传感器(特邀)

苏晓强¹, 黄宇聪¹, 李绍限², 宋歌¹, 许全³

(1 山西大同大学 物理与电子科学学院 微结构电磁功能材料省市共建山西省重点实验室, 大同 037009)

(2 杭州电子科技大学 电子信息学院 智能微传感器与微系统教育部工程研究中心, 杭州 310018)

(3 天津大学 精密仪器与光电子工程学院 太赫兹研究中心, 天津 300072)

摘要: 利用排布在人工表面等离激元传输线两侧的微结构谐振组实现了波导类电磁诱导透明 (Electromagnetically Induced Transparency, EIT) 效应, 并基于此开发了结构紧凑的片上传感器。根据电场分布的特性, 发现片上类 EIT 效应的传感工作机理主要是利用暗模谐振器内部的强局域化电场对周围介质的敏感程度, 能够反映到 EIT 特征频率的偏移量和谐振幅度的变化。进一步地, 详细仿真了待测物的折射率、正切损耗、厚度、半径等参数变化对 EIT 透明窗口的响应规律, 发现该片上传感器在 1.26~1.79 折射率变化范围下的灵敏度可达 1.12 GHz/RIU, 传感品质因数值为 5.45。实验中通过对三种食用油进行传感测量, 验证了所提出的基于类 EIT 效应的片上传感器具有高灵敏度、无标记检测和实验灵活的特点。

关键词: 人工表面等离激元; 电磁诱导透明; 片上系统; 折射率传感; 近场耦合

中图分类号: O439

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20235210.1052408

0 引言

表面等离激元 (Surface Plasmon Polaritons, SPPs) 是金属表面的自由电子在外部电磁场的激发下所产生的一种沿金属-介质界面传输的特殊电磁模式, 作为连接电子学与光子学的天然纽带, SPP 波导能够实现亚波长尺度的光信息传输与处理, 从而作为信息载体在光子集成回路中显示出巨大的应用前景^[1-3]。传统 SPPs 的研究局限在近红外及可见光波段, 随着工作波长的逐渐增大, 尤其在太赫兹和微波波段, 金属的介电常数逐渐趋于无穷大, 使得表面等离激元演变成掠入射的电磁波, 无法形成强束缚性的传输场。通过设计结构化的金属表面 (如挖孔或刻槽等方式) 来改变有结构金属区域的有效等离频率, 使其往低频靠拢, 进而在低频波段下类似光波段 SPPs 的特性, 称之为人工表面等离激元 (Spoof SPPs, SSPPs)^[4-8], 同时可以通过改变金属结构的几何形状以及周围介质的介电常数来实现对 SSPPs 色散特性的有效调控。利用 SSPPs 在深亚波长尺度的场束缚特性以及对周围介质的敏感特性, 可实现在生物医学、化学分析、环境监测等领域的传感检测。ZHANG X 等利用^[9-10] 基于亚波长深槽波纹形金属图案构建了人工局域表面等离激元 (Spoof Localized Surface Plasmons, SLSPs), 通过激发各种多阶/高阶谐振模式研究结构的几何参数和对周围环境折射率的敏感程度, 并实现了高品质因数 Q、高灵敏度的传感检测。ANNAMDAS V G M 等^[11] 提出通过测量超薄刻槽金属圆盘结构在垂直方向上载荷电磁波的近场强度, 实现了 SLSPs 共振模式对轴向载荷的非接触式监测。SHAO R L 等^[12] 利用二分之一或者四分之一的 SLSPs 结构通过微流体通道注入 3.9 μL

基金项目: 国家自然科学基金 (Nos. 62005193, 61935015), 山西省基础研究计划项目 (No. 202203021211328), 光电信息技术教育重点实验室 (天津大学) 开放基金 (No. 2023KFKT015), 山西省留学回国人员科技活动择优资助项目 (No. 20230037)

第一作者: 苏晓强, xiaoqiang.su@sxdtdx.edu.cn

通讯作者: 许全, quanxu@tju.edu.cn

收稿日期: 2023-06-30; **录用日期:** 2023-08-22

<http://www.photon.ac.cn>

纯乙醇实现了 940 MHz 的共振频率偏移。此外,GAO F 等^[13]设计了一种在垂直平面方向上堆叠刻槽金属圆盘来激发近场耦合,LIAO Z 等^[14]实验验证了由两个半径不同的超薄刻槽圆盘所组成的平面系统通过发生相消干涉作用而产生多级法诺共振现象,这些工作同样可以作为微量物质的传感检测手段,而且在高阶模式下所引起的频率偏移比低阶模式更为灵敏。尽管已有由不同样式的谐振器结构所构成的平面传感器具有较好的传感性能^[15-16],但这些结构大多是基于 SLSPs 的电磁模式,器件的小型化、集成度和共振模式的激发效率有待提升。

电磁诱导透明(Electromagnetically Induced Transparency, EIT)是指原子三能级系统中发生量子干涉效应,在强烈的吸收峰附近会产生尖锐的透射窗口。基于人工微结构实现的类 EIT 效应是指通过明模-暗模的近场耦合所产生的电磁诱导透明现象^[17-20]。类 EIT 效应由于其灵活的结构设计与丰富的应用场景一直以来都是电磁功能调控领域的研究热点,而且因其透明窗口轮廓较窄、高 Q 值以及高透射峰等优势已经被广泛应用于微量物质的高灵敏度传感检测,其工作原理是利用 EIT 效应的特征频率/波长的移动变化量来等效计算周围环境折射率的变化程度,其具体的性能指标则通过灵敏度 S 和性能系数(Figure of Merit, FOM)来衡量,S 和 FOM 越大则传感性能越好,反之,则其传感检测的效果越差。然而,目前类 EIT 效应的传感检测大多局限于空间波的激发与探测^[21-23],而在片上的应用鲜有报道。

本文提出在 SSPP 波导附近放置谐振频率基本相同但 Q 值不等的两个开口谐振器,通过与波导的近场耦合作用进而产生片上的类 EIT 效应。利用类 EIT 现象发生时在暗模谐振器中心开口处较强的场局域特性,将周围环境的折射率变化反馈到类 EIT 效应特征频率的偏移以及谐振强度的变化,从而实现片上的传感检测。在电磁仿真方面分析了待测物折射率、正切损耗、厚度以及半径等参数对传感特性的影响,并在实验上分别对三种食用油进行测量,证明所提出的 SSPP 波导片上传感器具有较高的灵敏度和 FOM 值,而且测试过程方便灵活。随着印刷集成电路、无线通信、可穿戴设备以及物联网等技术的进步,基于类 EIT 效应的片上传感技术有望获得更为广阔的发展前景。

1 片上类 EIT 结构设计

利用人工微结构来构造的类 EIT 效应其实现方式主要有以下三类:1)与激发场耦合的低 Q 值明模+与明模耦合的高 Q 值暗模;2)与激发场强耦合的低 Q 值明模+与激发场弱耦合的高 Q 值暗模;3)结构不对称所产生的法诺谐振效应。本文采用第二类产生方式,如图 1 所示,采用侧边开口的金属方环作为明模,边长 $p_x=p_y=6$ mm,线宽 $w_1=0.75$ mm,开口高度 $g_1=1$ mm,开口宽度与线宽一致;中心开口的特殊金属环作为暗模,边长与明模谐振器相同,线宽 $w_2=0.4$ mm,开口高度 $g_2=0.25$ mm,开口宽度 $d_2=2.7$ mm,二者之间的间距 $s=0.5$ mm。通过全波电磁仿真软件对这两种谐振器结构进行性能仿真,电磁波的传播方向垂直于结构平面,使用波端口对结构的边界进行设置,y 方向为电边界,x 方向为磁边界,在结构的正(背)面分别设置波端口为 1(2),通过透射系数 S_{21} 来表征结构的电磁响应,金属材质设置为铜,厚度为 0.018 mm,基底材料为高频介质板 F4B,介电常数为 2.65,正切损耗为 0.002,厚度为 0.5 mm。分别对独立的明模、独立的暗模以及明-暗模组合结构进行仿真模拟,得到三种结构的透射率谱线,如图 1(b)所示,由于明模和暗模谐振器的开口方向都是朝着 y 方向,因此独立明模和独立暗模都会在外界电场的作用下诱发 LC 谐振,并在 6.08 GHz 附近的频率处产生一个谐振吸收峰。值得注意的是,暗模谐振器结构相比明模谐振器结构在开口处的宽度大,从而导致暗模的等效电容较大,根据 RLC 谐振电路的工作特性,暗模谐振的 Q 值比明模的要更高,因此在明-暗模组合结构中,两种结构会发生强烈的近场耦合作用,导致在原来的吸收峰位置处出现了一个较窄的透射窗口。进一步分析透明窗口所对应谐振频率的场分布情况,能够发现大部分电场能量局域在暗模的中心开口位置处,此现象符合类 EIT 效应的典型特征。

为了能够在片上传输波导上实现类 EIT 效应,采用了经典的基于双侧周期均匀开槽的金属条带作为 SSPP 传输波导^[24-25],如图 2 所示,其结构参数为高度 $H=8$ mm,凹槽的周期 $p=5$ mm,槽宽 $a=2$ mm,厚度 $t=0.018$ mm,基底同样采用高频介质板 F4B。SSPP 波导的色散关系依赖于金属凹槽的深度 h ,随着开槽深度的增加,色散曲线逐渐偏离光线并接近截止频率,同时双侧金属条带提供的倏逝场局域束缚性逐渐增强。两端采用了从共面波导至开槽金属条带的过渡设计,实现了 SSPPs 的高效激发,过渡段宽度 $w=25$ mm,长

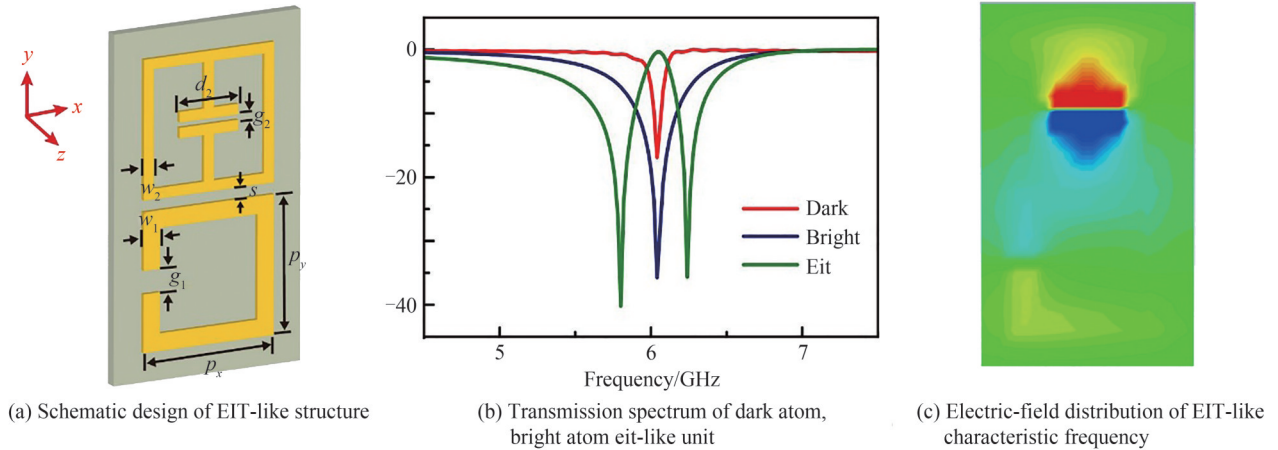


图1 类EIT结构设计示意图、透射谱和电场分布

Fig.1 Schematic design of EIT-like structure, transmission spectrum and electric-field distribution

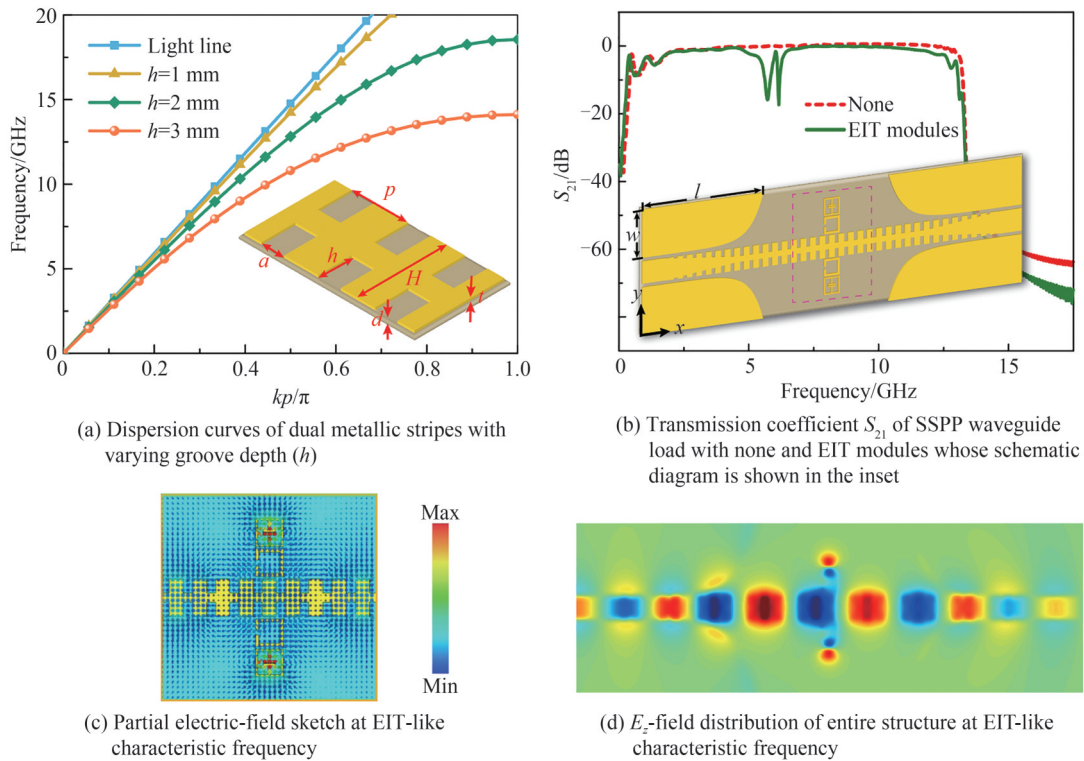


图2 SSPP传输线的类EIT效应及特征频率下的电场分布

Fig.2 EIT-like effect of SSPP transmission lines and electric-field distribution at characteristic frequency

度 $l=60$ mm。整个 SSPP 波导的传输系数 S_{21} 在传输通带为 1.1~12.8 GHz 范围内大于 -3 dB, 其中波导的左(右)侧定义为端口 1(2)。将两对能够实现类 EIT 效应的明-暗模组合结构沿 x 轴镜像放置在 SSPP 波导结构的两侧, 明模放置在内侧, 暗模放置在外侧, 由于在 SSPP 波导的周围分布有 y 方向的电场, 越靠近 SSPP 波导电场越强, 因而能够激发两种谐振器结构的 LC 谐振, 并且导致它们与 SSPP 波导之间发生近场耦合作用, 从而在传输系数 S_{21} 的通带内会出现一个类 EIT 效应的透射峰, 其频率为 6.03 GHz, Q 值可通过 $Q=f_{\text{EIT}}/\text{FWHM}$ 来计算, f_{EIT} 指的是类 EIT 透射峰值所对应的频率, FWHM(Full Width at Half Maxima)指的是类 EIT 透明窗口的半高宽, 计算可得 Q 为 28.575。值得注意的是, SSPP 波导的类 EIT 现象相比之前只有明-暗模组合结构时的效果较弱, 同时透明窗口的特征频率也略有偏移, 主要是因为 SSPP 波导周围的倏逝场成局域紧束缚的分布特性。为了分析其谐振特性, 图 2(c)和(d)给出了 SSPP 波导加明-暗模组合结构在 x - y 平面内特征峰所在的频率处的电场分布情况, 首先强倏逝场激发明模的 LC 谐振, 弱倏逝场激发暗模的 LC

谐振,同时由于近场耦合效应,被激发起来的明模在附近所形成的电场也会激发暗模的LC谐振,而暗模的谐振电场同时也会反向激发明模,从而导致明模的两条激发路径发生干涉相消,产生了SSPP波导的类EIT现象,邻近波导的明模谐振模式被强烈抑制,而外侧的暗模谐振模式在中心开口位置处表现出明显的电场局域增强。

2 片上传感机理与性能仿真

在发生类EIT效应时,明模与暗模谐振器之间的近场耦合作用,使暗模谐振器结构中心的开口区域处聚集了高强度的电磁能量,导致该位置对周围环境折射率的变化非常敏感。当暗模结构中心开口区域正上方的折射率发生变化时,将会反映到SSPP波导类EIT效应特征峰的频率偏移和强度变化,因此利用这一特点开展了基于片上类EIT效应的传感性能仿真分析。

选用圆形的待测物作为研究对象,在暗模谐振器结构中心的开口区域正上方放置不同的材料,分别模拟仿真了待测物的折射率 n 、正切损耗 $\tan \sigma$ 、厚度 t_h 和半径 r 等四种参数的变化对SSPP波导传输系数 S_{21} 的影响,其主要反映在类EIT透明窗口的频率漂移和透射峰的强弱变化。图3(a)给出了待测物厚度为0.6 mm、正切损耗为0、半径为1.5 mm的情况下,其折射率值在1.26~1.79(对应介电常数实部在1.6~3.2)变化时 S_{21} 的响应特性,随着折射率的增加,整个EIT透明窗口向低频漂移。这一现象可以从明-暗模的耦合机理来解释,中心开口的暗模谐振器类似平行板电容器,电容 C 大小与周围环境的折射率成正比,随着待测物折射率的增大,暗模谐振器的电容也随之增大,导致其谐振频率 $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ (L, C 分别代表电感和电容)产生了红移,

进而使得明-暗模耦合产生的类EIT透明窗口也发生了红移。利用类EIT透射峰值频率在单位折射率变化内的平移量来衡量其传感的灵敏度 S 大小,其值为 $S = \Delta f / \Delta n$,单位为GHz/RIU,其中 Δf 和 Δn 分别是特征频率的偏移量以及所对应的折射率变化量。图3(b)显示了提取出的类EIT效应透明窗口的频率随折射率的变化关系,数据拟合显示二者呈线性关系,直线的斜率为该片上传感器的折射率灵敏度,具体大小为0.91 GHz/RIU。此外,FOM值也是常用的评价传感器性能的参数,其定义为待测物单位折射率变化所引起谐振峰频率的变化与谐振峰半高宽的比值,FOM值比灵敏度多考虑了谐振峰线宽的因素,反映了传感器的整体性能指标。由于图3(a)中5种情况下谐振峰半高宽各不相同,这里取它们的平均值来计算得到基于SSPP波导类EIT效应透射峰频率偏移传感的FOM为4.39。

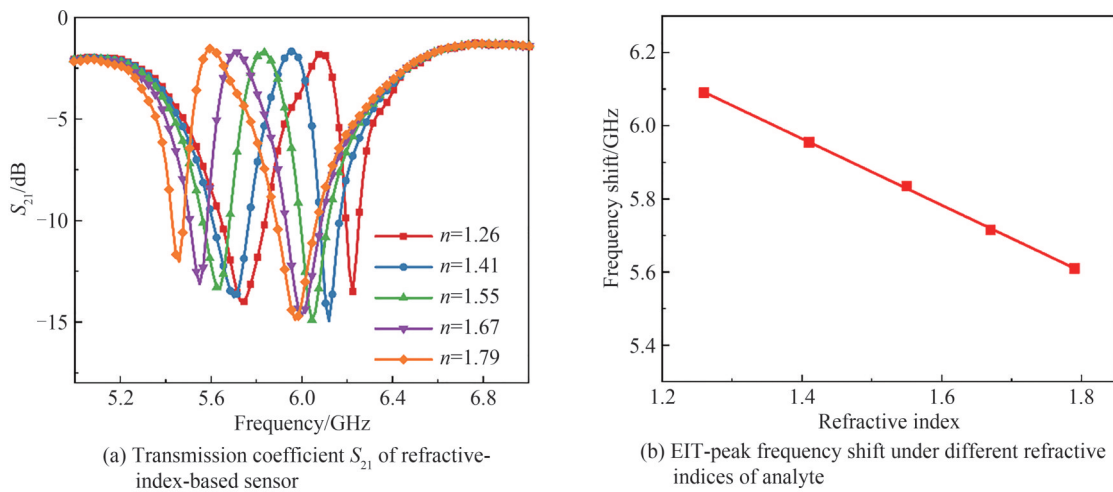


图3 待测物不同折射率下对应的传输系数 S_{21} 及类EIT峰值频率与折射率的拟合线型

Fig.3 Transmission coefficients S_{21} under different refractive indices of the analytes and the fitting line shape between EIT-like peak frequency and refractive index

待测物介电常数的虚部会对暗模谐振器的谐振峰和 Q 值产生影响,进而会对明-暗模的近场耦合产生影响,设待测物的复介电常数为 $\epsilon = \epsilon_r + \epsilon_i$,折射率 $n = \sqrt{\epsilon_r}$,正切损耗 $\tan \sigma = \epsilon_i / \epsilon_r$,图4(a)给出了待测物厚度为0.6 mm、折射率为1.55(对应介电常数实部为2.4)、半径为1.5 mm的情况下,其正切损耗 $\tan \sigma$ 分别为0、

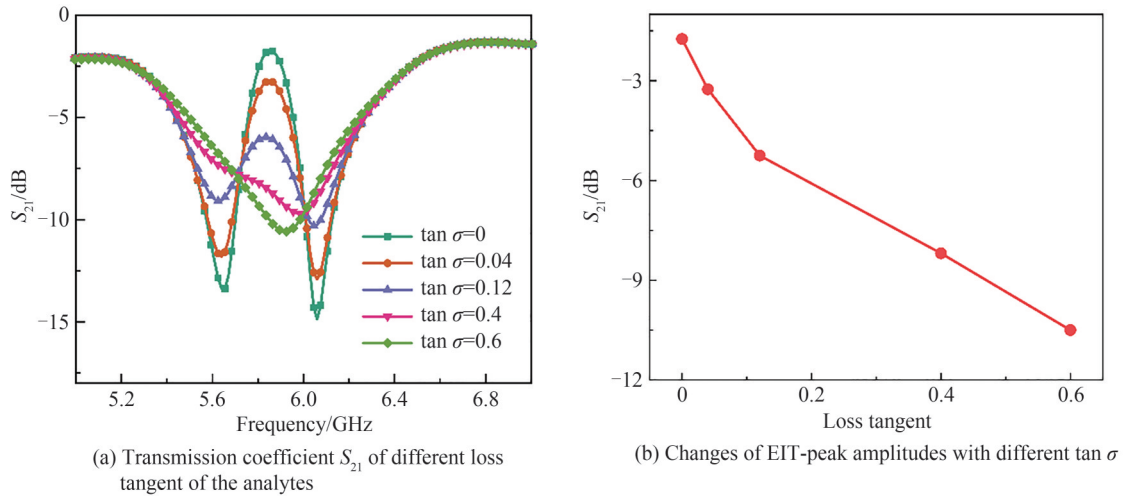


图4 待测物的正切损耗对类EIT效应的影响
Fig.4 Influence of tangent loss of the analytes on EIT-like effect

0.04、0.12、0.4、0.6变化时 S_{21} 的响应特性,随着待测物正切损耗 $\tan \sigma$ 的增大,即复介电常数虚部 ϵ_2 增大,意味着待测物的损耗变大,导致SSPP波导类EIT透射峰的强度逐渐减小直至演变成只由明模谐振器与SSPP波导耦合所形成的吸收谷。图4(b)显示了提取出的类EIT透射峰值随正切损耗的变化曲线,峰值强度的逐渐降低主要是因为暗模谐振器受待测物正切损耗的增大其谐振特性逐渐减弱,导致无法形成有效的近场耦合以致不能形成透明窗口。

图5(a)给出了待测物折射率为1.55(对应介电常数实部为2.4)、正切损耗为0、半径为1.5 mm的情况下,待测物的厚度 t_h 分别为0.6 mm、0.7 mm、0.8 mm、0.9 mm、1.0 mm变化时 S_{21} 的响应特性。可以看出,随着待测物厚度的增加,整个EIT透明窗口也发生了向低频漂移的现象,其原因是由于待测物厚度的增加会使暗模谐振器的电容变大,使得其谐振频率减小,从而导致产生的类EIT透射峰发生红移。图5(b)显示了在待测物不同厚度的情况下其类EIT透射峰频移量与折射率变化之间的关系曲线,二者明显成线性关系,通过线性拟合可以得到直线的斜率,其对应的是不同厚度下的折射率传感灵敏度。可以发现,待测物半径一定的情况下,随着厚度的增加其单位折射率变化所对应的类EIT峰值频率的偏移量逐渐增加,拟合线的斜率也逐渐增大,其灵敏度在待测物厚度在0.6~1.0 mm变化下值为0.91~1.12 GHz/RIU,相应地,FOM值在4.39~5.45之间变化。

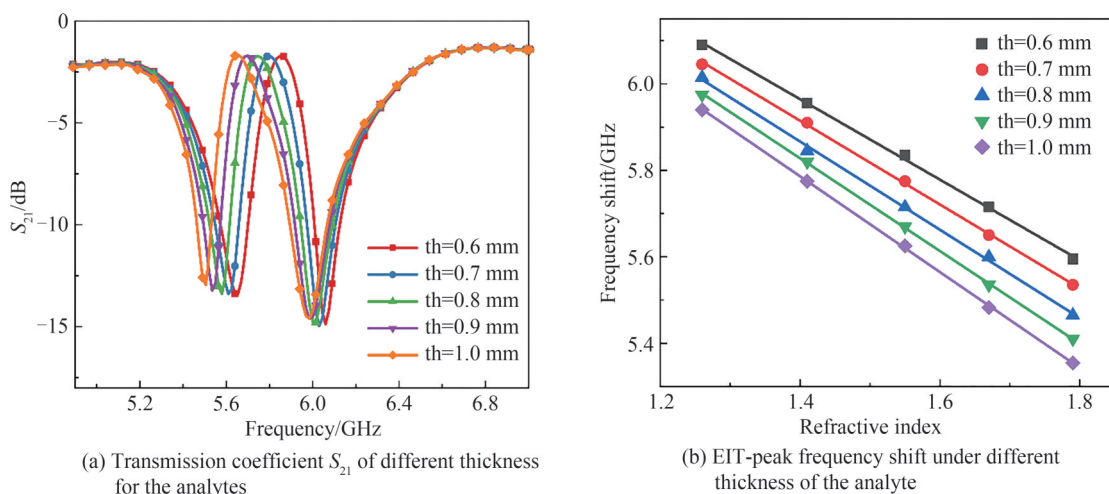


图5 待测物不同厚度下对应的传输系数 S_{21} 及类EIT峰值频率与折射率的拟合线型

Fig.5 Transmission coefficients S_{21} under different thickness of the analytes and the fitting line shape between EIT-like peak frequency and refractive index

图6(a)给出了待测物折射率为1.55(对应介电常数实部为2.4)、正切损耗为0、厚度为0.6 mm的情况下,其待测物的半径 r 分别为1.5 mm、2.5 mm、3.5 mm、4.5 mm变化时 S_{21} 的响应特性。可以看出,随着待测物半径的增加,整个EIT透明窗口同样也发生了向低频漂移的现象。图6(b)显示了在待测物不同半径的情况下其类EIT透射峰频移量与折射率变化之间的线性关系,拟合直线的斜率为不同半径情况下的折射率传感灵敏度,其值在0.91~1.06 GHz/RIU之间变化,对应FOM值在4.39~5.13之间逐渐增大。值得注意的是,随着待测物半径的逐渐增大,其灵敏度也在逐渐增大,但受待测物半径影响的灵敏度增加并不是没有限制,当半径大于3.5 mm以上时灵敏度的变化趋势慢慢趋于恒定。这是由于电磁场能量主要局域在暗模谐振器中心开口处的区域,当待测物所覆盖的区域逐渐大于场局域的区域时,其对暗模谐振特性的影响也将趋于饱和,因此相应的类EIT透射峰的频移量也逐渐趋于恒定。

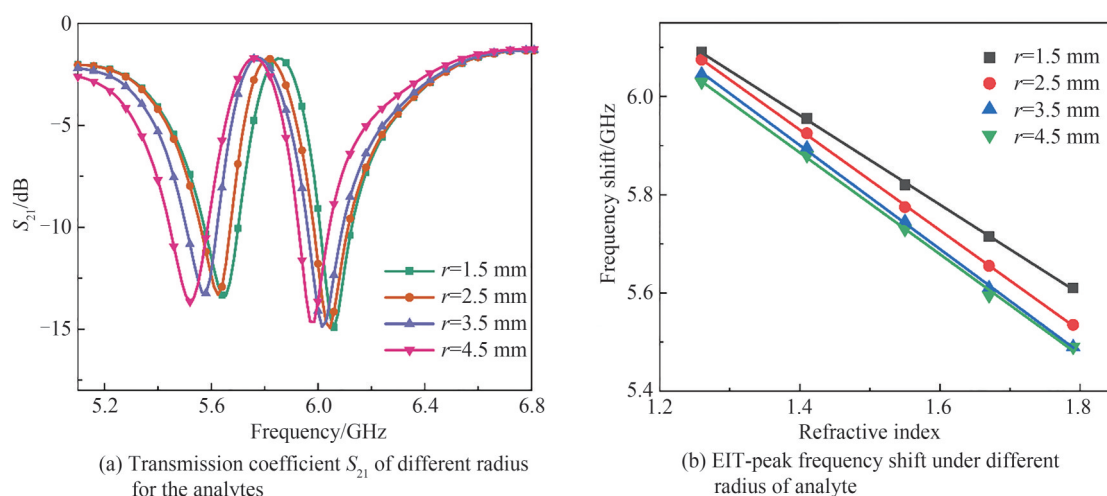


图6 待测物不同半径下对应的传输系数 S_{21} 及类EIT峰值频率与折射率的拟合线型

Fig.6 Transmission coefficients S_{21} under different radius of the analytes and the fitting line shape between EIT-like peak frequency and refractive index

3 实验验证及结果分析

为了验证所提出的片上SSPP波导基于类EIT效应的传感性能,首先利用传统的印刷电路板对设计的器件进行了加工,样品如图7(a)所示,在SSPP波导两端的共面波导区域焊接上迷你版A型连接器(SubMiniature Version A, SMA),并通过两根50 Ω 阻抗的同轴电缆连接到矢量网络分析仪(Agilent

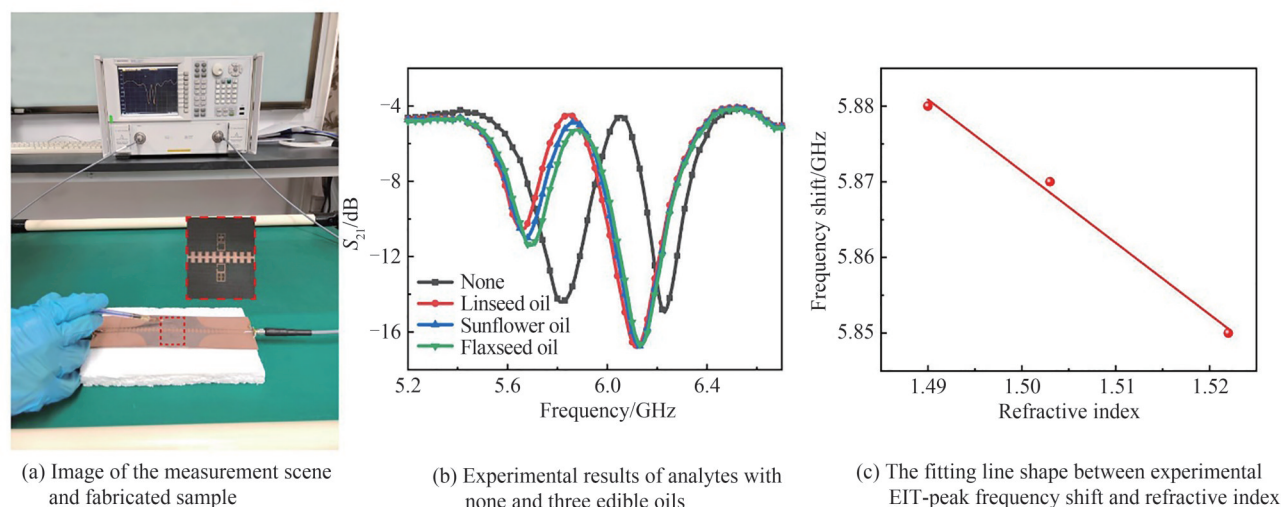


图7 基于类EIT效应的SSPP传输线对三种食用油的实验结果

Fig.7 Experimental results of SSPP transmission line based on EIT-like effect for three edible oils

N5230C)的两个端口1和2,透射系数的测量值 S_{21} 显示了在无待测物(none)的情况下通带内有一个类EIT的透明窗口,如图7(b)所示,相比模拟结果略有差异的原因是由加工误差和介质基底F4B的介电常数不准确所造成的。其次进一步利用该器件对三种常用的食用油进行了传感检测,分别是胡麻油(linseed oil)、葵花油(sunflower oil)和亚麻籽油(flaxseed oil),不同种类食用油的区分主要在于脂肪的含量有所不同,导致其相应的折射率会有所差异。采用带针头的针筒注射器将每种待测的食用油滴在暗模谐振器中心开口的位置处,而且同时在SSPP波导两侧对称的暗模结构处各注射1滴,注射器的规格型号为1 mL,匹配针头型号为0.45*16 RWLB。实验中为了避免待测食用油对器件的污染,方便重复多次地快速检测,使用超薄的保鲜膜紧贴在SSPP波导器件的上方,将待测食用油滴在传感位置对应上方的保鲜膜上,该方法已被验证所测量的实验数据与直接滴在器件上的效果一致,所有实验数据都是经过多次取平均后的结果。将三种食用油的实验测量结果与仿真结果进行了对比,当仿真设置中待测物厚度为0.6 mm,半径为1.5 mm,正切损耗为0,折射率分别为1.52、1.50、1.49时,仿真结果的类EIT透射峰值频率与实验结果相匹配,相应的曲线走势也基本一致,如图7(c)所示,拟合得到灵敏度大小约为0.95 GHz/RIU,进一步可计算FOM约为4.32,表明所设计的传感器能够对折射率差别在0.01左右的不同待测物有着较为明显的检测鉴别能力。

4 结论

本文利用SSPP波导与其放置在附近的明-暗模谐振器组合构成了片上的类EIT现象,结合电场强度的分布解释了类EIT效应的产生机理。进一步利用暗模谐振器在类EIT透射峰值频率处对周围环境折射率敏感的特性,实现了片上的传感检测,分别对待测物的折射率、正切损耗、厚度以及半径变化所引起的类EIT效应特征频率的偏移量和透射强度变化进行了仿真分析,得到该传感器在1.26~1.79折射率变化下的灵敏度最高可达1.12 GHz/RIU,FOM值可达5.45。实验上制备了SSPP波导器件样品,并对三种食用油进行了测量,验证了基于类EIT效应的片上传感性能。所提出的基于类EIT效应的SSPP波导片上传感器具有结构设计简单、易于集成、传感灵敏度较高等特点,并且通过在SSPP波导两侧同时放置不同特征频率的类EIT谐振结构,可实现多种物质的同时在线检测,为片上传感的设计提供了新的思路。

参考文献

- [1] ZHANG J, ZHANG L, XU W. Surface plasmon polaritons: physics and applications[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2012, 45(11): 113001.
- [2] PITARKE J M, SILKIN V M, CHULKOV E V, et al. Theory of surface plasmons and surface-plasmon polaritons[J]. Reports on Progress in Physics, 2006, 70(1): 1-87.
- [3] ZHANG X Q, XU Q, XIA L B, et al. Terahertz surface plasmonic waves: a review[J]. Advanced Photonics, 2020, 2(1): 014001.
- [4] GARCIA-VIDAL F J, FERNANDEZ-DOMINGUEZ A I, MARTIN-MORENO L, et al. Spoof surface plasmon photonics[J]. Reviews of Modern Physics, 2022, 94(2): 025004.
- [5] CHENG Z W, WANG M, YOU Z H, et al. Spoof surface plasmonics: principle, design, and applications[J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 2022, 34(26): 263002.
- [6] ZHANG J, ZHANG H C, GAO X X, et al. Integrated spoof plasmonic circuits[J]. Science Bulletin, 2019, 64(12): 843-855.
- [7] XU Q, LANG Y H, JIANG X, et al. Meta-optics inspired surface plasmon devices[J]. Photonics Insights, 2023, 2: R02.
- [8] SU X Q, XU Q, LU Y C, et al. Gradient index devices for terahertz spoof surface plasmon polaritons[J]. ACS Photonics, 2020, 7(12): 3305-3312.
- [9] ZHANG X, CUI W Y, LEI Y, et al. Spoof localized surface plasmons for sensing applications[J]. Advanced Materials Technologies, 2021, 6(4): 2000863.
- [10] ZHANG X, CUI T J. Contactless glucose sensing at sub-micromole level using a deep-subwavelength decimeter-wave plasmonic resonator[J]. Laser & Photonics Reviews, 2022, 16(10): 2200221.
- [11] ANNAMDAS V G M, SOH C K. Contactless load monitoring in near-field with surface localized spoof plasmons—a new breed of metamaterials for health of engineering structures[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2016, 244: 156-165.
- [12] SHAO R L, ZHOU Y J, YANG L. Quarter-mode spoof plasmonic resonator for a microfluidic chemical sensor[J]. Applied Optics, 2018, 57(28): 8472-8477.
- [13] GAO F, GAO Z, ZHANG Y, et al. Vertical transport of subwavelength localized surface electromagnetic modes[J]. Laser & Photonics Reviews, 2015, 9(5): 571-576.

- [14] LIAO Z, PAN B C, SHEN X, et al. Multiple Fano resonances in spoof localized surface plasmons[J]. *Optics Express*, 2014, 22(13): 15710-15717.
- [15] ZHOU J, CHEN L, SUN Q, et al. Terahertz on-chip sensing by exciting higher radial order spoof localized surface plasmons[J]. *Applied Physics Express*, 2019, 13(1): 012014.
- [16] CAI J, ZHOU Y J, ZHANG Y, et al. Gain-assisted ultra-high-Q spoof plasmonic resonator for the sensing of polar liquids[J]. *Optics Express*, 2018, 26(19): 25460-25470.
- [17] PAPASIMAKIS N, FEDOTOV V A, ZHELUDEV N I, et al. Metamaterial analog of electromagnetically induced transparency[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(25): 253903.
- [18] LIU N, WEISS T, MESCH M, et al. Planar metamaterial analogue of electromagnetically induced transparency for plasmonic sensing[J]. *Nano Letters*, 2010, 10(4): 1103-1107.
- [19] GU J Q, SINGH R, LIU X, et al. Active control of electromagnetically induced transparency analogue in terahertz metamaterials[J]. *Nature Communications*, 2012, 3(1): 1151.
- [20] LIU N, LANGGUTH L, WEISS T, et al. Plasmonic analogue of electromagnetically induced transparency at the Drude damping limit[J]. *Nature Materials*, 2009, 8(9): 758-762.
- [21] XU Z, WANG Y, LIU S, et al. Metamaterials with analogous electromagnetically induced transparency and related sensor designs—a review[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(7): 6378-6396.
- [22] HUANG P, YAO Y, ZHONG W, et al. Optical sensing based on classical analogy of double electromagnetically induced transparencies[J]. *Results in Physics*, 2022, 39: 105732.
- [23] SUN Zhanshuo, WANG Xin, WANG Junlin, et al. Sensing and slow light properties of dual-band terahertz metamaterials based on electromagnetically induced transparency-like[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(13): 138101.
孙占硕, 王鑫, 王俊林, 等. 基于类电磁诱导透明的双频段太赫兹超材料的传感和慢光特性[J]. *物理学报*, 2022, 71(13): 138101.
- [24] MA H F, SHEN X, CHENG Q, et al. Broadband and high-efficiency conversion from guided waves to spoof surface plasmon polaritons[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, 8(1): 146-151.
- [25] SU X Q, DONG L J, WEN H L, et al. Cascaded plasmon-induced transparency in spoof surface plasmon polariton waveguide[J]. *Results in Physics*, 2022, 43: 106044.

SpooF Plasmonic On-chip Sensor Based on Electromagnetically Induced Transparency (Invited)

SU Xiaoqiang¹, HUANG Yucong¹, LI Shaoxian², SONG Ge¹, XU Quan³

(1 *College of Physics and Electronic Science, Shanxi Province Key Laboratory of Microstructure Electromagnetic Functional Materials, Shanxi Datong University, Datong 037009, China*)

(2 *MOE Engineering Research Center of Smart Microsensors and Microsystems, School of Electronics and Information, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China*)

(3 *Center for Terahertz Waves and College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

Abstract: SpooF Surface Plasmon Polaritons (SSPPs) are a surface electromagnetic modes of the low-frequency regime with characteristics similar to those of surface plasmons in the optical regime. By altering the geometric parameters of the metal structure, the localized electromagnetic field can be manipulated, enabling its significant role in various fields such as on-chip communication, signal processing, and sensing detection. Herein, we propose a novel strategy to achieve the refractive index sensor on chip. The classical two-side metallic stripes are utilized as SSPP waveguide, and two types of meta-particles with diverse Q -factors and identical resonant frequencies are employed as a bright-dark module along the propagating trajectory of the waveguide structure. Due to the near-field interactions between resonant modes of meta-particles and the evanescent field of waveguide, Electromagnetically Induced Transparency (EIT) effect is achieved on planar SSPP waveguide. The working frequency is 6.03 GHz and Q -factors can be up to 28.575. Due to the characteristics of the electric-field distribution at the EIT-like peak frequency, a compact refractive-index sensor on-chip is developed. The sensing mechanism of the on-chip EIT-like effect primarily relies on the sensitivity of the strongly confined electric-field inside the dark mode resonators to the refractive-index of surrounding medium. This sensitivity can be reflected into the shift of

the EIT-like characteristic frequency and changes in the resonance amplitude. The circular analyte is chosen as the study object and positioned above the center of the dark mode resonators. The full-wave simulations are conducted to investigate the response characteristics of the EIT transparency window to variations in parameters such as the refractive index n , tangent loss $\tan \sigma$, thickness t_h , and radius r of the analytes. The increase of refractive index n contributes to redshift of EIT window, which show the linear relationship and the slope is described as the sensitivity of sensor on-chip. As the thickness t_h and radius r of the analytes increase, the relationship between redshift and refractive index still maintains a linear trend. The simulated results have shown that the on-chip sensor exhibits maximum sensitivity of 1.12 GHz/RIU within the refractive index range from 1.26 to 1.79 (corresponding to dielectric constants in the real part of 1.6 to 3.2), and $t_h=1.0$ mm, $\tan \sigma=0$, $r=1.5$ mm, respectively. Correspondingly, the Figure of Merit (FOM) value is calculated to be 5.45. To experimentally validate the proposed on-chip sensor based on the EIT-like effect, the SSPP device is fabricated using the process of printed circuit board, and sensing measurements are performed on three types of edible oils, including linseed oil, sunflower oil and flaxseed oil. Three types of edible oils differ mostly owing to their fat contents, which causes a variation in the related refractive index. Use a syringe with a needle to drop each edible oil to the position of the center of the dark mode resonators, the results have confirmed that the sensor exhibits high sensitivity, label-free detection capability, and experimental flexibility. As the parameters of analytes are $t_h=0.6$ mm, $r=1.5$ mm, $\tan \sigma=0$, $n=1.52$, 1.50, and 1.49 in the simulation, the simulated results agree well with the experimental results. The proposed on-chip sensor based on the EIT-like effect in SSPP waveguide possesses several key characteristics, including simple structural design, easy integration, and high sensing sensitivity. Extendedly, by placing EIT-like modules with different characteristic frequencies along the SSPP waveguide, simultaneous sensing detection of multiple analytes will be achieved. This approach provides a novel perspective for the design of on-chip sensing devices.

Key words: Spoof surface plasmon polaritons; Electromagnetically induced transparency; On-chip system; Refractive index sensing; Near-field coupling

OCIS Codes: 240.6680; 130.6010; 230.3120; 230.5750