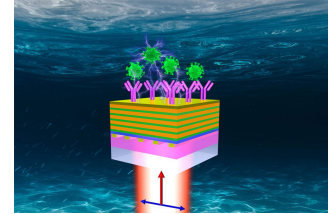


DOI: 10.12086/oe.2022.220217

## 传感品质因数增强的塔姆-表面等离激元杂化模式

魏欣然, 梁瑜章\*, 何怡瑾, 方蔚瑞, 彭 伟

大连理工大学物理学院, 辽宁 大连 116024



**摘要:** 基于棱镜耦合的金膜表面塔姆等离激元 (Tamm plasmon polariton, TPP) 与表面等离极化激元 (surface plasmon polariton, SPP) 的杂化耦合受到广泛的关注和研究, 但这种传统的激发装置由于拥有体积庞大的棱镜等光学元件以及对入射光角度精准控制有严格要求, 限制了其集成化发展和实际应用。为了简化 TPP 和 SPP 杂化耦合激发方式, 本文提出了一种光栅耦合型多层堆叠结构设计。该结构主要包括三部分: 顶部纳米厚度的金膜、中间一维布拉格光子晶体以及底部金纳米光栅。在该结构中利用底部纳米光栅的一级透射光同时实现了顶部金膜上下表面 SPP 和 TPP 共振激发。两种模式之间的耦合杂化作用极大地减少了模式的共振带宽, 从而使 TPP-SPP 模式的传感品质因数得到了显著的提高。此外, 通过改变纳米光栅的周期和组成一维布拉格光子晶体的介质层厚度, SPP 和 TPP 可以在较宽光谱范围内实现耦合杂化。相比于传统棱镜式的 TPP 和 SPP 双模式耦合结构, 设计的光栅耦合型的多层堆叠结构无需借助棱镜和对入射角精确调控, 在正入射光照射下就可实现两种模式的共振耦合, 这不仅易于结构的进一步集成和小型化, 同时对拓宽表面等离激元传感器的实际应用具有重要的意义。

**关键词:** 表面等离激元; 杂化模式; 金属纳米结构; 小型化; 生化传感

**中图分类号:** O441.4; TB383.1

**文献标志码:** A

魏欣然, 梁瑜章, 何怡瑾, 等. 传感品质因数增强的塔姆-表面等离激元杂化模式[J]. 光电工程, 2022, 49(11): 220217

Wei X R, Liang Y Z, He Y J, et al. Tamm-surface plasmon hybrid mode for improving sensing figure of merit[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(11): 220217

## Tamm-surface plasmon hybrid mode for improving sensing figure of merit

Wei Xinran, Liang Yuzhang\*, He Yijin, Fang Yurui, Peng Wei

School of Physics, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China

**Abstract:** The hybrid coupling of Tamm plasmon polariton (TPP) and surface plasmon polariton (SPP) on the surface of a gold film based on the prism coupling has attracted extensive attention and has been widely investigated. However, the traditional excitation configuration has bulky optical elements and requires accurate control of the angle of incident light, which limits its integration and practical application. In order to simplify the excitation condition of the TPP-SPP hybrid mode, a feasible grating-coupled multilayer stack structure is proposed in this paper. The structure mainly consists of three parts: a nanometric thin gold film on the top layer, a one-dimensional Bragg photonic crystal in the middle, and a gold nanograting on the bottom. In this structure, the SPR and TPP resonance excitations on the upper and lower surfaces of the top gold film are simultaneously achieved by

收稿日期: 2022-09-05; 收到修改稿日期: 2022-10-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (62171076, 12274052); 中央高校基本业务费 (DUT20RC(3)008)

\*通信作者: 梁瑜章, yzliang@dlut.edu.cn。

版权所有©2022 中国科学院光电技术研究所

utilizing the first-order transmitted light of the bottom nanograting. The hybrid coupling between the two modes greatly reduces the resonance bandwidth of the generated mode, thereby significantly improving the sensing figure of merit of the generated mode. Additionally, the hybrid coupling of both SPP and TPP modes can be realized in a wide spectral range by altering the period of the nanograting and the thickness of the one-dimensional Bragg photonic crystal. Compared with the traditional prism-coupled TPP and SPP dual-mode coupling structures, the designed grating-coupled multilayer nanostructure can realize the resonant coupling of the two modes at the normal incidence without prism and limitation of incident angle. This not only facilitates the further integration and miniaturization of the structure, but also has important significance for broadening the practical application of surface plasmon resonance sensors.

**Keywords:** surface plasmon resonance; hybrid mode; metal nanostructure; miniaturization; biochemical sensing

## 1 引言

表面等离子激元 (Surface plasmons, SPs) 由于其亚波长局域和近场增强特性<sup>[1-3]</sup>, 在新型光学检测领域受到广泛关注<sup>[4-5]</sup>。表面等离子激元传感技术, 因其灵敏度高、响应速度快、免标记、实时动态监测等优势在疾病检测<sup>[6]</sup>、环境监测<sup>[7]</sup>以及食品安全<sup>[8]</sup>等领域已经展现出巨大的应用前景。当前商品化的 SPs 传感平台主要是依赖于基于全内反射原理的棱镜耦合型表面等离子极化激元 (surface plasmon polariton, SPP)<sup>[9]</sup>。这种传统的 SPP 传感平台需要借助棱镜和特定角度斜入射的横磁 (transverse magnetic, TM) 偏振光满足波矢匹配条件, 从而激发金属膜与外部环境分界面处的 SPP 模式, 并通过解调共振位置处角度、波长、相位和强度等光学信号实现对待测物实时、高灵敏度的定量检测。另外, 人们还将功能性纳米材料, 如纳米粒子<sup>[10]</sup>、聚合物<sup>[11]</sup>、石墨烯<sup>[12]</sup>、双曲超材料<sup>[13]</sup>引入到棱镜耦合式 SPP 传感平台用于构建新型的棱镜式表面等离子激元传感器, 这极大地提高了表面等离子激元传感器的性能并且拓宽它的应用场景。然而该激发原理由于棱镜结构的存在和对入射角度的严格要求, 系统搭建通常需要价格昂贵且体积庞大的精密机械控制系统和光学元件, 很难做到集成便携式设计, 在很大程度上限制了它的应用领域。

塔姆等离子激元 (Tamm plasmon polariton, TPP) 作为一种特殊的等离子激元边界态模式, 通常利用一维布拉格光子晶体与金属膜之间的边界就可实现该模式激发。该模式在分界面处的强电磁场局域增强导致的强吸收使其在传感器、滤波器以及吸收器等新型光电子器件领域同样拥有广泛的应用前景<sup>[14-16]</sup>。不同于上述棱镜结构激发的 SPP 模式, TPP 模式的激发无需对入

射光进行波矢补偿且在任何偏振光下都可实现。然而, TPP 模式增强的电磁场主要局域在结构内部, 很难感知外界环境的变化, 这极大限制了它在生化传感领域的应用。为了突破这一限制, 研究人员将一维布拉格光子晶体结构集成到传统的棱镜结构上, 通过具有特定角度的入射光来同时激发金属膜外表面的 SPP 模式以及内表面的 TPP 模式<sup>[17-19]</sup>。由于 SPP 模式和 TPP 模式之间的强耦合作用, 生成的杂化模式呈现非常明显的反交叉特性, 同时获得窄线宽的杂化模式且该模式具有较高的品质因数。但是, 这种 TPP-SPP 杂化模式的生成同样需要体积庞大的棱镜和精密机械的入射光角度控制系统, 不利于结构的小型化和集成化应用。因此, 急需开发一种不仅能够实现两种模式的强耦合还能消除结构对棱镜光学元件和入射光角度的依赖的新型激发方式。

在本文中, 我们提出了一种纳米光栅耦合型多层堆叠结构, 该结构能够在正入射下实现 TPP-SPP 模式的杂化耦合, 无需棱镜结构和角度控制系统。该结构主要由三部分组成, 具体包括底部内嵌于紫外固化胶膜层的金纳米光栅、中间的一维布拉格光子晶体以及顶部纳米厚度的金膜。在该结构中, 它可以在正入射光的激发下在不同波长范围内产生 TPP-SPP 杂化模式。该方案的主要工作原理是: 正入射到金纳米光栅的偏振光以特定的角度衍射到中间一维布拉格光子晶体中, 衍射光同时激发顶部金膜/外界分界面和金膜/一维布拉格光子晶体分界面上的 SPP 和 TPP 模式, 两个模式之间的强耦合作用使结构中形成两个新的 TPP-SPP 杂化模式。相比于 SPP 模式, 短波长的 TPP-SPP 杂化模式发生蓝移且线宽急剧减少, 使得其传感品质因数得到了显著提高。此外, 通过改变纳米光栅的周期以及一维布拉格光子晶体的介质层厚度, 该结

构能够在较宽光谱范围内实现两种模式的强耦合。最后, 我们对比研究了不同波长范围内 SPP 模式和 SPP-TPP 杂化模式的体折射率灵敏度和传感品质因数。

## 2 设计原理和典型特征

图 1 描绘了用于高性能传感检测的纳米光栅耦合型多层堆叠结构。如图所示, 上表面内嵌金纳米光栅的紫外固化胶层集成在石英基底上, 5 对  $\text{TiO}_2$  和  $\text{SiO}_2$  交替层组成的一维布拉格光子晶体位于纳米光栅结构的上面, 纳米光栅与光子晶体之间用厚度为  $h_2$  的 ITO 介质层连接, 在结构最上面沉积一层厚度为  $h$  的金层, 待检测的生物分子层位于结构最上面的金层表面。我们可以通过真空镀膜、聚焦离子束和紫外固化胶转移<sup>[20-21]</sup>等方法实现该结构的制备。在该结构设计中, 所采用的结构参数如下: 结构底部的紫外固化胶和 ITO 连接层的折射率分别为 1.56 和 1.738; 底部金纳米光栅和最上面金层的介电常数来自于 Johnson 和 Christy 文献<sup>[22]</sup>, 结构上表面被折射率为 1.33 的液体溶液覆盖; 中间一维布拉格光子晶体中  $\text{TiO}_2$  和  $\text{SiO}_2$  层的折射率分别为 2.45 和 1.46; 结构底部金纳

米光栅的高度、周期和纳米线宽度分别用符号  $h_1$ 、 $P$  和  $w$  标注, 组成一维布拉格光子晶体的  $\text{TiO}_2$  和  $\text{SiO}_2$  厚度被分别用符号  $h_3$  和  $h_4$  标记, 且作为一种特殊的一维光子晶体, 它不仅折射率沿一个方向周期性变化, 其光学厚度还分别满足光子晶体带隙中心波长的四分之一, 使特定频率的反射光发生相长干涉并产生光子带隙, 即  $2.45h_3 = 1.46h_4 = \lambda_c/4$ , 其中  $\lambda_c$  为正入射光照下光子晶体带隙的中心波长 (以下简称为中心波长)。在模拟计算中结构参数的具体数值如表 1 所示。

设计结构具体的工作原理如下: 偏振垂直于光栅单元纳米线的宽谱光从石英玻璃底部正入射到内嵌于紫外固化胶中的纳米光栅下表面, 入射光因光栅衍射的作用而产生具有特定角度的一级衍射光斜入射到光子晶体中 (如图 1 右侧结构横截面中红色箭头所示), 然后与顶部的金层相互作用同时激发金膜上下分界面处的 SPP 模式和 TPP 模式, 两个模式之间共振耦合形成两个 TPP-SPP 杂化模式。在该结构中, 通过改变  $\text{TiO}_2$  和  $\text{SiO}_2$  的厚度可调节中心波长  $\lambda_c$ , 从而实现结构中 TPP 模式的调谐, 同样改变底部金纳米光栅的几何参数尤其是周期可实现 SPP 模式的波长调谐。

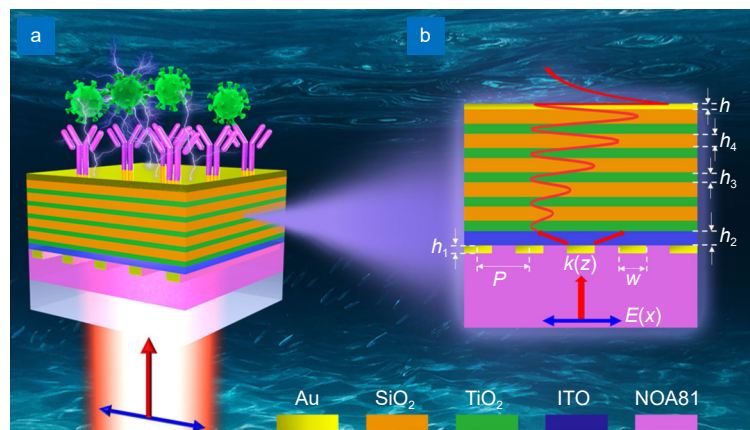


图 1 传感品质因数增强的纳米光栅耦合型多层堆叠结构。(a) 用于生物分子检测的三维结构示意图; (b) 结构的截面图和对应的材料组成。其中红色箭头代表了 TM 偏振光的传播路径, 红色曲线代表 SPP 和 TPP 的电场在结构中的分布特征

Fig. 1 Nanograting coupled multilayer stack structure for improving sensing figure of merit. (a) Three-dimensional schematic for biomolecule detection; (b) Cross-sectional view of the structure and corresponding material composition. The red arrows represent the propagation path of the TM polarized light, and the red curves represent the distribution characteristics of the electric field of SPP and TPP in the structure

表 1 工作在不同波长处高频 TPP-SPP 杂化传感结构的几何参数

Table 1 Geometric parameters of high-frequency TPP-SPP hybrid sensing structures operating at different wavelengths

| Wavelength/nm | $P/\text{nm}$ | $\lambda_c/\text{nm}$ | $w/\text{nm}$ | $h_1/\text{nm}$ | $h_2/\text{nm}$ |
|---------------|---------------|-----------------------|---------------|-----------------|-----------------|
| 631           | 453           | 1050                  | 180           | 40              | 60              |
| 737           | 536           | 1250                  | 240           | 40              | 50              |
| 844           | 617           | 1440                  | 240           | 30              | 50              |

因此, 通过调节结构参数可实现 TPP 模式和 SPP 模式在较宽范围内杂化耦合。

为了阐明 TPP-SPP 杂化模式的耦合机制, 我们首先对设计的结构进行了简化, 即用入射角等于一级衍射角的斜入射光取代结构中底部金纳米光栅的作用, 此时结构被简化为多层膜结构。在简化结构的模拟计算中, 应用传输矩阵法获得简化结构的反射光谱。其中, 纳米光栅的周期与简化计算中入射光角度的对应关系可以用光栅的一级衍射公式获得:  $\sin(\theta) = \lambda/(Pn_d)$ , 其中,  $\theta$  为一级衍射角,  $\lambda$  为入射光波长,  $n_d$  为纳米光栅相邻 ITO 层的折射率。从该公式可得知对于同一波长, 不同一级衍射角对应不同的光栅周期。结合波矢匹配条件:  $k_0 n_d \sin(\theta) = k_{\text{spp}}$ , 其中  $k_0$  和  $k_{\text{spp}}$  分别为入射光在真空中的波矢以及 SPP 的波矢, 光栅周期  $P$  为 536 nm 时所对应的一级衍射透射光正好在 750 nm 处激发金膜上表面的 SPP 模式。

我们首先将结构顶部的金膜厚度设置为 400 nm, 此时全反射激发的消逝光无法穿透金膜, 因此不能激

发金膜上表面的 SPP 模式, 从而可以单纯研究金膜下表面与光子晶体之间激发的 TPP 模式。此外,  $\text{TiO}_2$  和  $\text{SiO}_2$  的厚度根据中心波长的取值而做相应的调整。图 2(a) 显示了该结构中光子晶体中心波长  $\lambda_c$  的变化对 TPP 模式的影响。为了清晰地显示结果, 结构反射强度最小值用红色标注, 同样图中红色的位置代表着 TPP 模式的激发。从图中可以清晰地看到, 当光子晶体的中心波长低于 1000 nm 时, 简化结构中没有零阶 TPP 模式生成。随着光子晶体中心波长  $\lambda_c$  逐渐增加且大于 1000 nm 时, 低阶 TPP 模式导致反射最小值在反射光谱中出现, 并随着中心波长  $\lambda_c$  的增加, TPP 模式的共振波长逐渐红移, 这说明 TPP 模式的共振波长与光子带隙的中心波长  $\lambda_c$  成正比。

为了同时激发金膜上表面的 SPP 模式, 需要将金膜降到消逝光能穿透的厚度, 这里将金膜厚度设置为 40 nm。图 2(b) 展示了在光栅的一级衍射角下简化结构在不同光子带隙中心波长下的反射谱。同样, 当光子晶体的中心波长低于 1000 nm 时, 结构反射光谱

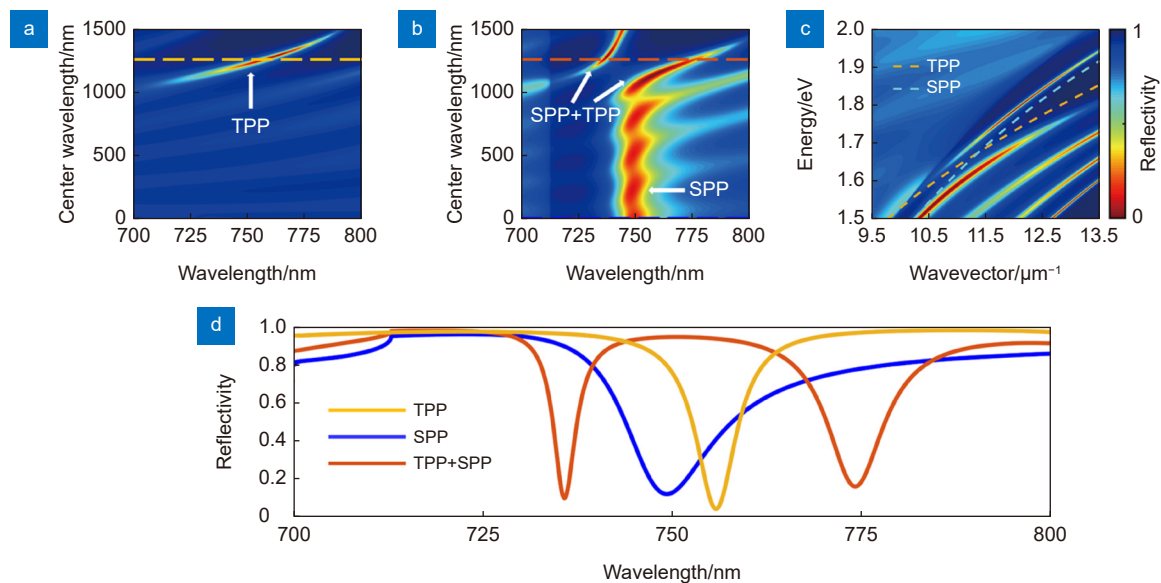


图 2 结构简化后的反射光谱。当入射光的角度等于周期为 536 nm 纳米光栅的一级衍射角并且结构上表面金膜厚度分别为 (a) 400 nm 和 (b) 40 nm 时, 光子晶体中心波长对金膜-光子晶体多层结构反射光谱的影响; (c) 结构中入射光波矢与能量之间的关系, 以及 SPP 模式 (黄色短虚线) 和低阶 TPP 模式 (青色短虚线) 单独激发时的色散曲线; (d) 仅激发 TPP 模式 (黄色曲线) 和 SPP 模式 (蓝色曲线) 结构的反射光谱以及 TPP 和 SPP 间强耦合 (红色曲线) 对应的反射光谱

Fig. 2 The reflection spectra of the simplified structure. When the incident angle is equal to the first-order diffraction angle of the nanograting with a period of 536 nm and the thicknesses of the gold film on the top surface of the structure are (a) 400 nm and (b) 40 nm, respectively, the effect of the center wavelength of the photonic crystal on the reflection spectra of the gold film-photonic crystal multilayer structure; (c) The relationship between the wavevector and the energy of the incident light in the structure, and the dispersion curves excited separately by the SPP mode (yellow short dashed curve) and the low-order TPP mode (cyan short dashed line); (d) The reflection spectra of the structure that only excites TPP mode (yellow curve) and SPP mode (blue curve), and the reflection spectra corresponding to the strong coupling between TPP and SPP (red curve)

中的 TPP 模式依旧不能被激发, 但由于斜入射的光能满足金膜上表面 SPP 模式的激发条件使得在反射光谱中出现 SPP 模式。随着光子晶体中心波长的增加, SPP 的共振波长几乎不变。这说明当结构中没有低阶 TPP 产生时, 高阶 TPP 模式几乎对 SPP 模式的共振波长以及共振线宽没有影响。当光子晶体的中心波长大于 1000 nm 时, 结构的反射光谱发生变化, 出现非常明显的反交叉特性。这主要是由于当中心波长大于 1000 nm 时, 结构中的 TPP 模式也会被激发, 此时结构中 TPP 和 SPP 模式之间发生强耦合形成两个 SPP-TPP 杂化模式, 分别位于未杂化 SPP 模式的高频和低频位置。当光子晶体中心波长进一步增加时, TPP 模式逐渐减弱使得两种模式之间耦合逐渐减弱直至耦合杂化消失, 最终反射光谱中仅有的 SPP 模式回到初始位置。为了进一步证明两种模式之间的杂化耦合作用, 我们通过传输矩阵法进一步给出了所设计结构的波矢与能量之间关系, 如图 2(c) 所示。SPP 模式和低阶 TPP 模式在单独激发时, 它们的色散曲线分别用黄色和青色的短虚线描绘。从图中明显发现, SPP 模式和低阶 TPP 模式单独激发时, 它们的色散曲线彼此相交, 这说明了在没有强耦合相互作用时, 两种模式可以在同一波长下被同时激发。然而, 当以上两种模式发生强耦合时, 色散曲线之间表现出明显的反交叉作用, 并形成间隙。这证明了两种模式之间存在的强耦合作用, 会产生两种新的杂化模式。

图 2(d) 中分别描述了三种结构的反射光谱: 黄色曲线为光子晶体中心波长 1250 nm 和金膜厚度为 400 nm 的结构在一级衍射角下的反射光谱; 蓝色曲线为光子晶体中心波长 0 nm (没有光子晶体存在) 和金膜厚度 40 nm 在一级衍射角下的反射光谱; 红色曲线为光子晶体中心波长为 1250 nm 和金膜厚度为 40 nm 在一级衍射角下的结构反射光谱。以上三种结构反射光谱在图 2(a) 和 2(b) 中用虚线标记。从图 2(d) 中可以清晰地看到, 相比于 SPP 模式, 由于模式间的强耦合导致的短波长 SPP-TPP 杂化模式的带宽明显减少, 这能有效提高传感器检测的品质因数, 从而增强传感器的检测性能。

以上仅模拟了简化多层结构中 TPP 和 SPP 模式间的杂化耦合, 并没有考虑实际纳米光栅结构的存在对两者间耦合的影响。下面我们采用时域有限差分法研究了设计结构的光学性质。与图 2(c) 相似, 图 3(a) 同样给出了三种典型结构的反射光谱。图 3(a) 中所采

用的结构参数与图 2(c) 中的相一致, 不同的是所有结构的底部均存在周期为 536 nm 的金纳米光栅、且均采用正入射。我们能清晰地看到图 3(a) 中的结果与图 2(c) 的几乎一致, 即由于 SPP (标记为  $D_1$ ) 和 TPP (标记为  $D_2$ ) 模式之间的强耦合生成两个杂化模式, 一个位于高频位置 (标记为  $D_3$ ), 一个位于低频位置 (标记为  $D_4$ )。但是, 结构底部存在纳米光栅结构时, 结构激发模式所对应的反射谷深度明显变浅, 这主要是因为结构中的 TPP、SPP, 以及 TPP-SPP 杂化模式的激发所用到的纳米光栅的一级衍射光效率无法达到 100%。相比于长波长的低频杂化模式, 短波长高频杂化模式不仅拥有高的共振深度还拥有窄的线宽, 因此在下面的传感研究中, 我们将主要研究该高频杂化模式的传感性能。为了进一步阐明三种结构中 SPP、TPP 以及 SPP-TPP 杂化模式的光学特性和生成机制, 图 3(b)~3(d) 分别给出了它们对应的共振波长处的空间电场强度分布。如图 3(b) 所示, 光子晶体中心波长为 0 时, 结构中不存在光子晶体。此时结构中的电场主要局域在金膜上表面且垂直表面方向呈指数衰减, 这是金膜表面 SPP 模式的典型特征, 电磁场分布表明该结构仅可激发上表面的 SPP 模式。图 3(c) 展示了在共振波长  $D_2$  处仅激发 TPP 模式的空间电场强度分布, 它的电场主要局域在顶部金膜与光子晶体的分界面附近, 并且电场强度在光子晶体中沿着光传播方向依次增强并且在金膜下表面达到最大值。在该结构中的 TPP 模式的电场无法渗透到外部环境而是分布在结构内部, 因此 TPP 模式不适用于检测外部环境变化。在本文设计的结构中两个 TPP-SPP 杂化模式对应的空间电场分布如图 3(d) 和 3(e) 所示, 对于在短波长  $D_3$  位置处的高频杂化模式, 空间电场强度分布既包含了 SPP 电场的特征又具有 TPP 电场的特征, 这充分体现了两个模式间杂化耦合。在金膜上表面处的电场强度变化与图 3(b) 中 SPP 的电场强度分布一致, 而在金膜下表面以及光子晶体中的电场与图 3(c) 中的 TPP 电场分布保持一致, 这说明当两个模式发生耦合时, 它们之间的能量有可能发生转化。长波长  $D_4$  位置处的低频杂化模式与高频  $D_3$  模式的电场分布几乎一致, 但其场强要弱得多且相对来说 TPP 模式分布更加明显。需要注意的是, 光栅的材料对结构的模式杂化影响较小, 但需调整改变光栅的参数。例如, 当底部金光栅换成二氧化钛介质光栅时, 光栅的厚度急剧增加。

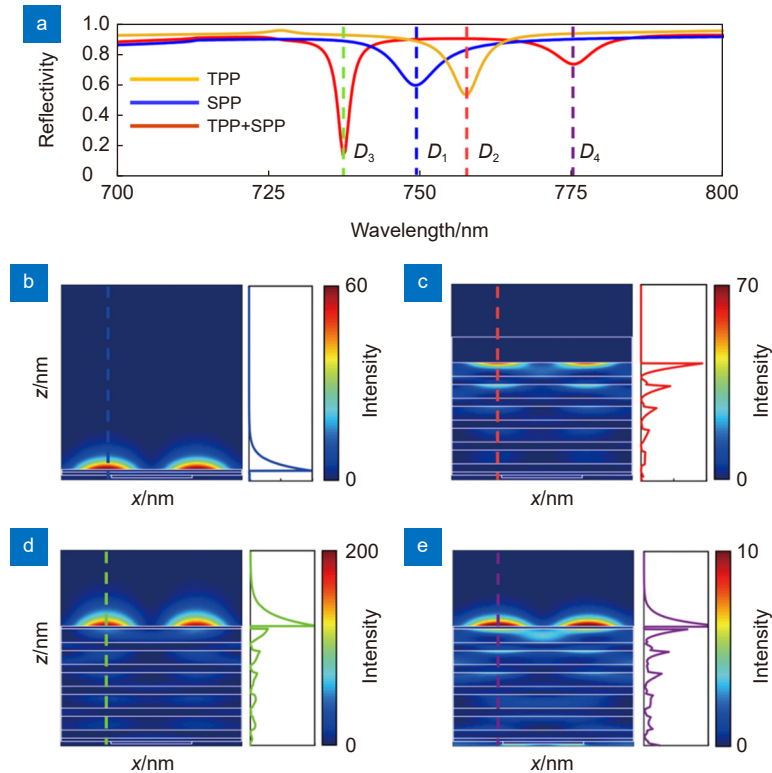


图3 光栅耦合型多层堆叠结构的反射光谱和共振位置处的电场分布。(a) 三种典型结构的反射光谱, 反射光谱中存在 TPP(黄色曲线)和 SPP(蓝色曲线)模式以及 TPP-SPP 杂化模式(红色曲线); (b) SPP 模式和 (c) TPP 模式的空间电场强度分布; (d) 高频和 (e) 低频 TPP-SPP 杂化模式对应的空间电场强度分布。

右侧插图中的曲线为电场强度分布图中虚线位置处的对应的电场强度变化

Fig. 3 Reflection spectra and electric field distributions at the resonance positions of the grating-coupled multilayer stack structure. (a) Reflection spectra of three typical structures, in which there are TPP (yellow curve) and SPP (blue curve) modes and TPP-SPP hybrid mode (red curve) generated; The spatial electric field intensity distributions of (b) SPP mode, (c) TPP mode; (d) High-frequency and (e) low-frequency TPP-SPP hybridization modes. The curve in the right inset is the variation of electric field intensity at the dotted line position in the electric field intensity distribution diagrams

### 3 传感性能研究和结果讨论

为了系统地评估窄线宽的高频 TPP-SPP 杂化模式的传感检测性能, 我们分别从体折射率灵敏度和传感品质因数两个方面对该杂化模式进行定量分析。首先, 图 4(a) 给出了结构顶部外界环境折射率变化对该杂化模式的影响。当外界环境折射率从 1.33 逐渐增加到 1.35 时, TPP-SPP 杂化模式的共振波长逐渐红移且保持窄的带宽, 但其共振深度有所减少, 这主要是源于环境折射率使得 SPP 共振峰红移从而使得其与 TPP 模式的耦合减弱。作为直接对比, 图 4(b) 还给出了在没有光子晶体的结构中仅激发的 SPP 模式在不同外界环境折射率下的变化。我们看到随着外界环境折射率逐渐增加, SPP 模式的共振波长同样也出现逐渐红移且共振深度几乎保持不变。但图 4(b) 中 SPP 模式的共振线宽要比图 4(a) 中的高频杂化模式要

宽的多, 这是两种模式之间最主要的不同。图 4(c) 总结了两种结构中各自模式在不同外界环境折射率下的波长漂移量, SPP 模式和 TPP-SPP 模式分别用蓝色星号和红色星号标记。通过线性拟合, 我们能够获得 SPP 模式和高频 TPP-SPP 模式的体折射率灵敏度分别为 537 nm/RIU 和 279 nm/RIU。因此, 相比于 SPP 模式, 杂化模式的体折射率灵敏度有一个明显的降低。除了体折射率灵敏度, 我们还调查了杂化模式传感品质因数 (figure of merit, FOM), 它被定义为共振模式的体折射率灵敏度与线宽之间的比值, 主要用于表征模式的传感精度<sup>[23]</sup>。图 4(d) 分别给出了在不同外界折射率下, SPP 和 TPP-SPP 杂化模式的传感品质因数。与体折射率灵敏度不同的是, TPP-SPP 杂化模式和 SPP 模式的传感品质因数在不同外界折射率下几乎保持不变且大约为 120 RIU<sup>-1</sup>(红色星号) 和 65 RIU<sup>-1</sup>(蓝色星号)。TPP-SPP 杂化模式的高传感品质因数源于其窄的线宽,

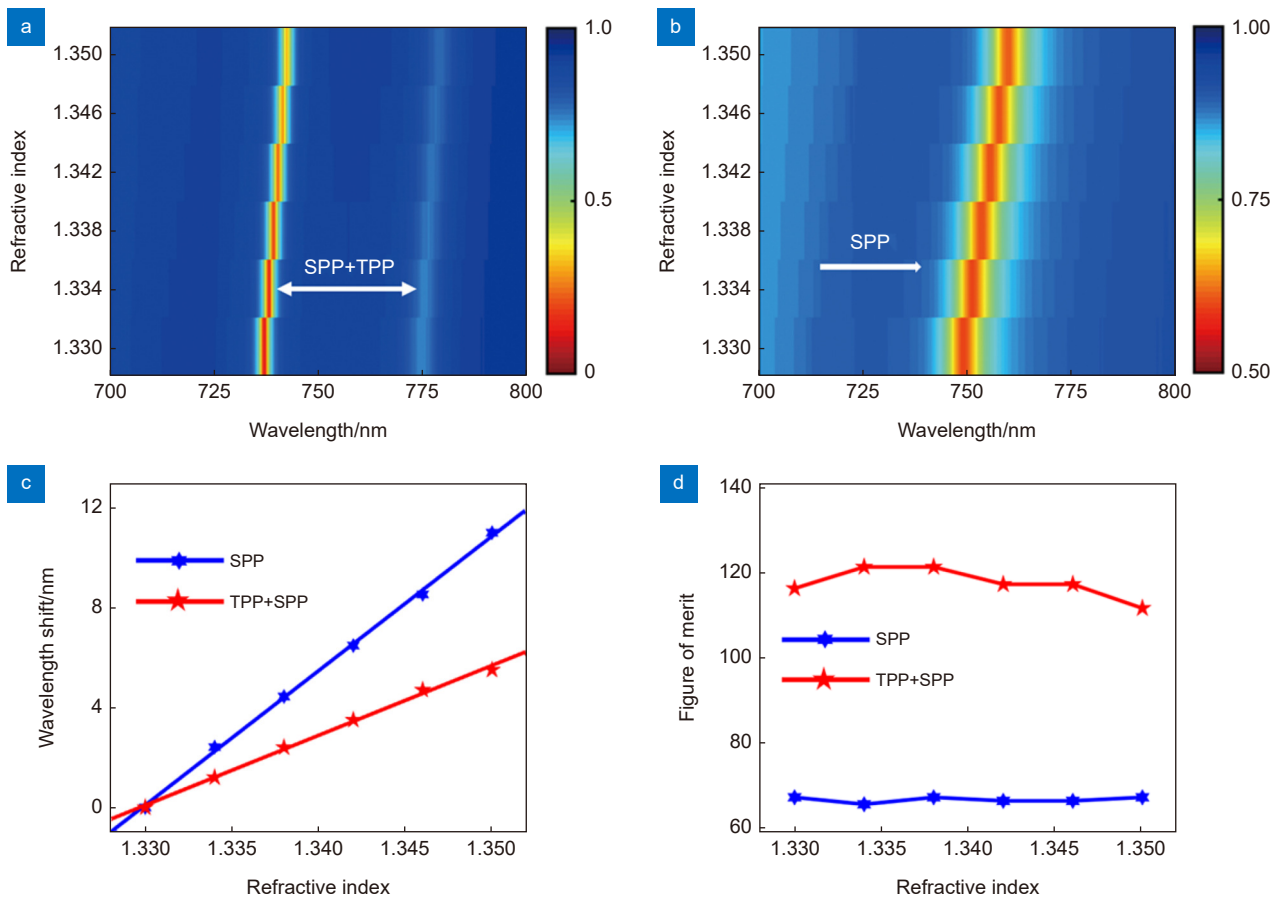


图 4 传感性能的定量评价。不同外界环境折射率下激发 (a) TPP-SPP 杂化模式和 (b) SPP 模式结构的反射光谱; (c) 外界折射率变化引起的共振波长的偏移量; (d) 不同外界环境折射率下 SPP 模式 (蓝色标记) 和 TPP-SPP 杂化模式 (红色标记) 的传感品质因数

Fig. 4 Quantitative evaluation of the sensing performance. Reflection spectra of structures with (a) TPP-SPP hybrid mode and (b) SPP mode at the ambient with different refractive indexes; (c) The amount of red-shift of the resonance wavelengths caused by the change of the external refractive index; (d) Sensing figures of merit of TPP-SPP hybrid mode (red mark) and SPP mode (blue mark) under the ambient surroundings with different refractive indexes

因此设计的光栅耦合型多层结构激发的杂化模式有效提高了传感的品质因数。

由于设计结构中的 SPP 模式和 TPP 模式独立可调谐性, 因此我们通过改变底部光栅的周期  $P$  以及光子带隙的中心波长  $\lambda_c$  可实现 TPP-SPP 杂化模式在较宽光谱范围内 (从 600 nm 到 900 nm) 调谐。作为代表性的例子, 我们在下面展示了高频 TPP-SPP 杂化模式在波长 631 nm 和 844 nm 处激发的结构, 相应的纳米光栅的周期  $P$  和光子晶体的中心波长  $\lambda_c$  的具体数值见表 1 所示。图 5(a) 和 5(b) 分别给出了工作在 631 nm 和 844 nm 波长处的高频 TPP-SPP 杂化模式所对应结构的反射光谱。作为对比, 仅激发 SPP 模式的结构反射光谱也被显示在图 5(a) 和 5(b) 中, 且共振波长分别位于 650 nm 和 850 nm 处。我们发现, 相比

于未耦合的 SPP 模式, 高频 TPP-SPP 杂化模式均发生蓝移、共振模式深度增加且线宽明显减少。为了进一步定量分析不同波长 (不同结构周期和不同光子晶体中心波长) 处杂化模式的传感性能, 图 5(c) 和 5(d) 分别给出了不同结构周期下 TPP-SPP 杂化模式和 SPP 模式的体折射率灵敏度和传感品质因数的对比结果。我们发现, 随着光栅周期的增加, TPP-SPP 杂化模式和 SPP 模式的共振波长增加, 相应的体折射率灵敏度也逐渐增强。在相同的结构周期下, SPP 模式的体折射率灵敏度始终高于 TPP-SPP 杂化模式 (图 5(c))。但由于 TPP-SPP 杂化窄的线宽导致其传感品质因数始终高于 SPP 模式, 并随着结构周期和共振波长的增加而增加 (图 5(d))。因此, 选择较长工作波长更有利于充分发挥出 TPP-SPP 杂化模式的传感优势。

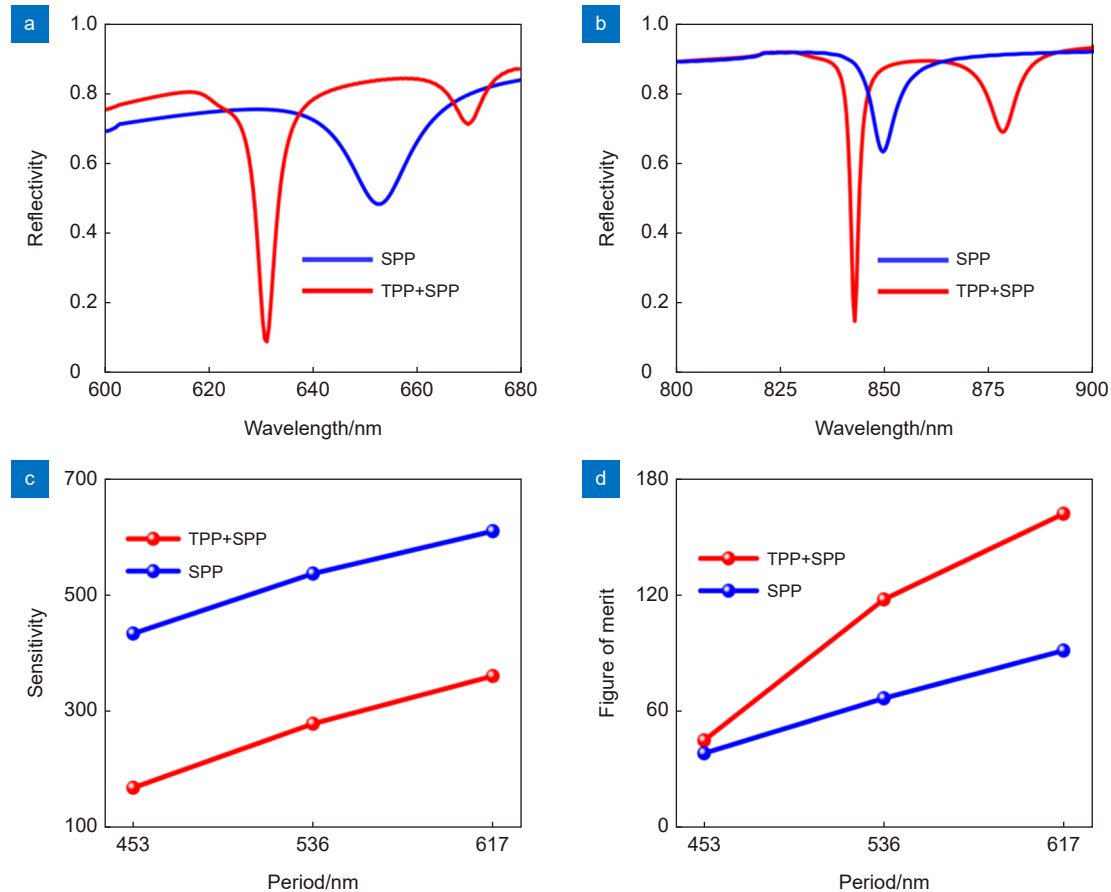


图 5 在波长 (a) 631 nm 和 (b) 844 nm 处激发高频 TPP-SPP 杂化模式所对应结构的反射光谱。SPP 模式的反射光谱作为参考。不同结构周期下 TPP-SPP 杂化模式和 SPP 模式的 (c) 体折射率灵敏度和 (d) 传感品质因数

Fig. 5 Reflection spectra of the structures corresponding to the excited high-frequency TPP-SPP hybrid mode structures at the wavelengths of (a) 631 nm and (b) 844 nm. The reflection spectra of the SPP mode are used as a reference; (c) Bulk refractive index sensitivity and (d) sensing figure of merit of TPP-SPP hybrid mode and SPP mode at different structural periods

## 4 结 论

总之,我们在理论上设计和提出了一种光栅耦合型的多层堆叠结构。在该结构中,利用底部纳米光栅对正入射光的衍射作用实现了金膜上下表面 SPP 和 TPP 模式的同时激发,从而产生杂化耦合。结构生成的高频 TPP-SPP 杂化模式由于其窄带的特性极大地提高传感检测的品质因数,因此该结构能被用于发展高性能传感检测平台。利用光栅衍射对入射光方向的调控作用,不仅取代了传统庞大棱镜激发装置还实现了入射光的正入射激发,使其设计的结构更易于小型化和集成化。最后,我们利用 SPP 和 TPP 模式的独立调谐性,实现了高频 TPP-SPP 杂化模式在宽谱范围内的激发,同时发现激发波长越长所激发的杂化模式的传感性能越好。该工作中所提出的结构设计不仅丰富了表面等离激元理论,还有效地扩展了表面等离激元传感器的实际应用场景。

## 参考文献

- [1] Singh P. SPR biosensors: historical perspectives and current challenges[J]. *Sens Actuators B Chem*, 2016, **229**: 110–130.
- [2] Wen X M, Bi Y G, Yi F S, et al. Tunable surface plasmon-polariton resonance in organic light-emitting devices based on corrugated alloy electrodes[J]. *Opto-Electron Adv*, 2021, **4**(8): 200024.
- [3] Hu A Q, Liu S, Zhao J Y, et al. Controlling plasmon - exciton interactions through photothermal reshaping[J]. *Opto-Electron Adv*, 2020, **3**(1): 190017.
- [4] Tong L M, Wei H, Zhang S P, et al. Recent advances in plasmonic sensors[J]. *Sensors*, 2014, **14**(5): 7959–7973.
- [5] Zhao Y, Tong R J, Xia F, et al. Current status of optical fiber biosensor based on surface plasmon resonance[J]. *Biosens Bioelectron*, 2019, **142**: 111505.
- [6] Shrivastav A M, Cvelbar U, Abdulhalim I. A comprehensive review on plasmonic-based biosensors used in viral diagnostics[J]. *Commun Biol*, 2021, **4**(1): 70.
- [7] Verma R, Gupta B D. Detection of heavy metal ions in contaminated water by surface plasmon resonance based optical fibre sensor using conducting polymer and chitosan[J]. *Food Chem*, 2015, **166**: 568–575.
- [8] Li Y, Liu X, Lin Z. Recent developments and applications of



- surface plasmon resonance biosensors for the detection of mycotoxins in foodstuffs[J]. *Food Chem*, 2012, **132**(3): 1549–1554.
- [9] Homola J, Yee S S, Gauglitz G. Surface plasmon resonance sensors: review[J]. *Sens Actuators B Chem*, 1999, **54**(1–2): 3–15. doi: 10.1016/S0925-4005(98)00321-9.
- [10] Kasani S, Curtin K, Wu N Q. A review of 2D and 3D plasmonic nanostructure array patterns: fabrication, light management and sensing applications[J]. *Nanophotonics*, 2019, **8**(12): 2065–2089.
- [11] Li D C, Wu J W, Wu P, et al. Affinity based glucose measurement using fiber optic surface plasmon resonance sensor with surface modification by borate polymer[J]. *Sens Actuators B Chem*, 2015, **213**: 295–304.
- [12] Wu L M, Guo J, Wang Q K, et al. Sensitivity enhancement by using few-layer black phosphorus-graphene/TMDCs heterostructure in surface plasmon resonance biochemical sensor[J]. *Sens Actuators B Chem*, 2017, **249**: 542–548.
- [13] Li C, Guo J J, Shafi M, et al. Optical fiber SPR biosensor complying with a 3D composite hyperbolic metamaterial and a graphene film[J]. *Photonics Res*, 2021, **9**(3): 379–388.
- [14] Kumar S, Maji P S, Das R. Tamm-plasmon resonance based temperature sensor in a Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> based distributed Bragg reflector[J]. *Sens Actuators A Phys*, 2017, **260**: 10–15.
- [15] Wang X, Jiang X, You Q, et al. Tunable and multichannel terahertz perfect absorber due to Tamm surface plasmons with graphene[J]. *Photonics Res*, 2017, **5**(6): 536–542.
- [16] Chang C C, Chen T Y, Lin T W, et al. Flexible and ultranarrow transmissive color filters by simultaneous excitations of triple resonant eigenmodes in hybrid metallic–optical Tamm state devices[J]. *ACS Photonics*, 2021, **8**(2): 540–549.
- [17] Buzavaite-Verteliene E, Plikusiene I, Tolenis T, et al. Hybrid Tamm-surface plasmon polariton mode for highly sensitive detection of protein interactions[J]. *Opt Express*, 2020, **28**(20): 29033–29043.
- [18] Afinogenov B I, Bessonov V O, Nikulin A A, et al. Observation of hybrid state of Tamm and surface plasmon-polaritons in one-dimensional photonic crystals[J]. *Appl Phys Lett*, 2013, **103**(6): 061112.
- [19] Bužavaitė-Vertelienė E, Vertelis V, Balevičius Z. The experimental evidence of a strong coupling regime in the hybrid Tamm plasmon-surface plasmon polariton mode[J]. *Nanophotonics*, 2021, **10**(5): 1565–1571.
- [20] He X L, Yi H, Long J, et al. Plasmonic crystal cavity on single-mode optical fiber end facet for label-free biosensing[J]. *Appl Phys Lett*, 2016, **108**(23): 231105.
- [21] Lei Z Y, Zhou X, Yang J, et al. Second-order distributed-feedback surface plasmon resonator for single-mode fiber end-facet biosensing[J]. *Appl Phys Lett*, 2017, **110**(17): 171107.
- [22] Johnson P B, Christy R W. Optical constants of the noble metals[J]. *Phys Rev B*, 1972, **6**(12): 4370–4379.
- [23] Hou Y B, Huo Y P, Jiang X Y, et al. Generation of multiple Fano resonance and high FOM resonance based on the crescent cross nanostructure[J]. *Opto-Electron Eng*, 2020, **47**(11): 200010.
- 侯艺博, 霍义萍, 姜雪莹, 等. 新月十字架纳米结构中多Fano共振的产生和高FOM共振(英文)[J]. *光电工程*, 2020, **47**(11): 200010.

## 作者简介



魏欣然(1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事微纳光子器件的研究。

E-mail: dutweixinran@163.com。

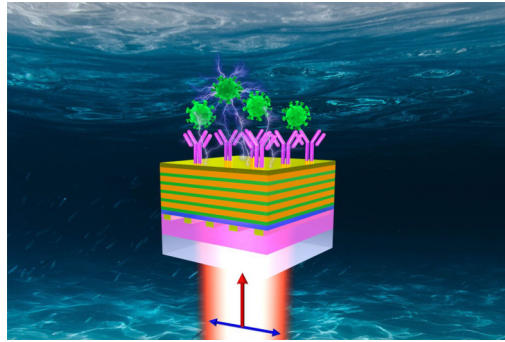


【通信作者】梁瑜章(1987-), 男, 博士, 副教授。2016年于大连理工大学获得光学工程博士学位, 毕业之后, 在南京大学从事博士后和专职科研工作。2019年加入大连理工大学物理学院。主要从事表面等离子体微纳结构光场和光谱调控机制以及生化传感应用研究。

E-mail: yzliang@dlut.edu.cn

# Tamm-surface plasmon hybrid mode for improving sensing figure of merit

Wei Xinran, Liang Yuzhang\*, He Yijin, Fang Yurui, Peng Wei



Three-dimensional schematic diagram of the biochemical sensing structure with Tamm-surface plasmon polariton hybrid mode

**Overview:** Surface plasmon resonance (SPR) sensing technology has attracted widespread attention due to its advantages of high sensitivity, label-free, and real-time dynamic monitoring. Traditional SPR sensing platform needs the use of a prism, and requires that the transverse magnetic (TM) polarized light incident at a specific angle to satisfy the wave vector matching condition and excite the surface plasmon polariton (SPP) mode at the interface between the metal film and the external environment. Moreover, Tamm plasmon polariton (TPP), as a special plasmon boundary state mode, can be excited by using the boundary between the one-dimensional Bragg photonic crystal (PC) and the metal film and has broad application prospects in the fields of new optoelectronic devices. Compared with SPP, the excitation of TPP does not require wavevector compensation for incident light and can be achieved at any polarization. However, the enhanced electromagnetic field of the TPP mode is mainly localized inside the structure and cannot sense the changes in the external environment, which greatly limits its application in the field of biochemical sensing. To break through this limitation, researchers integrated the one-dimensional Bragg PC structures onto the traditional prism structures to achieve hybrid coupling of SPP mode and TPP mode by using the oblique incident light, which could improve the sensing performance of the SPR sensors. However, this kind of TPP-SPP strong coupling excitation also requires a bulky prism and a precise incident light angle control system, which is not conducive to the miniaturization and integrated application of the structure. Therefore, we propose a feasible design of a grating-coupled multilayer stack in this paper. The structure mainly consists of three parts: a nanometric gold film on the top layer, a one-dimensional Bragg PC in the middle, and a gold nanograting on the bottom. In this structure, the SPP and TPP resonance excitations on the upper and lower surfaces of the top nano-gold film are simultaneously achieved by utilizing the first-order transmitted light of the bottom nanograting. The coupling hybridization between the two modes greatly reduces the resonance bandwidth of the generated hybrid mode, resulting in a significant improvement in its sensing figure of merit. In addition, the coupling hybridization of the SPP and the TPP can be realized in a wide spectral range by changing the period of the nanograting and the thickness of the dielectric layers constituting the one-dimensional Bragg PC. Compared with the traditional prism TPP and SPP dual-mode coupling structure, the designed multilayer nanostructure can realize the resonance coupling of the two modes over broad wavelength ranges at the normal incidence. These results not only make it easier to further integrate and miniaturize the structure, but also have important significance for broadening the practical application of the surface plasmon resonance sensors.

Wei X R, Liang Y Z, He Y J, et al. Tamm-surface plasmon hybrid mode for improving sensing figure of merit[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(11): 220217; DOI: [10.12086/oe.2022.220217](https://doi.org/10.12086/oe.2022.220217)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (NSFC) (62171076, 12274052) and Fundamental Research Funds for the Central Universities (DUT20RC(3)008).

School of Physics, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China

\* E-mail: [yzliang@dlut.edu.cn](mailto:yzliang@dlut.edu.cn)