

## 可调谐的声学型石墨烯等离激元增强纳米红外光谱\*

段谕<sup>1)2)</sup> 戴小康<sup>2)3)</sup> 吴晨晨<sup>2)3)†</sup> 杨晓霞<sup>2)3)‡</sup>

1) (郑州大学, 河南先进技术研究院, 郑州 450001)

2) (国家纳米科学中心, 中国科学院纳米科学卓越创新中心, 中国科学院纳米光子材料与器件重点实验室, 中国科学院纳米标准与检测重点实验室, 北京 100190)

3) (中国科学院大学, 材料与光电研究中心, 北京 100049)

(2024年4月9日收到; 2024年5月10日收到修改稿)

纳米红外光谱 (nano-infrared spectroscopy, nano-IR) 技术能够突破光的衍射极限, 实现约 10 nm 空间分辨率的红外光谱检测, 是研究纳米尺度物质化学成分和结构的重要手段. 然而, 由于纳米物质的尺寸与红外光的波长存在较大失配, 导致其红外吸收信号微弱. 本文理论提出了一种基于纳米腔室的声学型石墨烯等离激元 (nanocavity-acoustic graphene plasmon, n-AGP) 可调谐增强 nano-IR 检测平台. 该平台可实现超高光场压缩 (模式体积  $V_{n-AGP} \approx 10^{-7} \lambda_0^3$ ,  $\lambda_0 = 6.25 \mu\text{m}$ ) 和约 50 倍电场增强的 n-AGP 激发. 通过调控金纳米腔室结构和石墨烯费米能级, 我们实现了 n-AGP 的宽频段动态调控 (1290—2124  $\text{cm}^{-1}$ ). 此外, 由于 n-AGP 的电磁场高度局域在纳米腔室内, 具有高的探测灵敏度, 可实现单个蛋白质颗粒酰胺 I 带和酰胺 II 带振动指纹特征的探测 (灵敏度提高约 9 倍). 这一基于 n-AGP 的增强结构拓展了 nano-IR 技术在单分子尺度的表征能力, 可广泛应用于生物、催化等领域.

**关键词:** 石墨烯, 纳米腔室, 等离激元, 表面增强红外光谱**PACS:** 81.05.ue, 78.67.-n, 71.36.+c, 78.30.-j**DOI:** 10.7498/aps.73.20240489

## 1 引言

纳米红外光谱 (nano-infrared spectroscopy, nano-IR) 通过将原子力显微镜技术与傅里叶变换红外光谱 (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR) 结合, 能够突破光的衍射极限, 实现快速、无损和高空间分辨率的纳米物质化学成分检测. 近年来基于 nano-IR 的探测技术快速发展, 目前常用的仪器包括探测样品-针尖纳米区域远场散射光的散射扫描近场光学显微镜 (scattering scanning near-field optical microscopy, s-SNOM)<sup>[1,2]</sup>

和探测由于光场变化引起的悬臂振荡动力学变化的光热诱导共振显微镜 (photothermal-induced resonance microscopy, PTIR)<sup>[3-7]</sup>、峰值力红外显微镜 (peak force infrared microscopy, PFIR)<sup>[8-10]</sup> 以及光致力显微镜 (photo-induced force microscopy, PiFM)<sup>[11-13]</sup> 等. 这些技术已经在生物医学<sup>[14-16]</sup>、材料科学<sup>[17-19]</sup> 以及地质科学<sup>[20-22]</sup> 等领域展示了广阔应用. 例如 Nishida 等<sup>[23]</sup> 利用 s-SNOM 定量表征了蛋白质在单纳米尺度上高度局域化的近场相互作用; Tang 等<sup>[24]</sup> 利用 PTIR 研究了商业高抗冲聚丙烯的颗粒组成; Wang 等<sup>[10]</sup> 利用 PFIR 实现了对酵母细胞壁的化学成分分析和组分分布成像;

\* 国家重点研发计划 (批准号: 2023YFA1407003)、国家自然科学基金 (批准号: 52022025, 51972074)、中国科学院青年团队计划 (批准号: YSBR-086) 和中国科学院青年创新促进会资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wucc@nanoctr.cn

‡ 通信作者. E-mail: yangxx@nanoctr.cn

Patabendigedara 等<sup>[25]</sup>利用 PiFM 研究了矿石中水的含量和分布. 虽然上述几种 nano-IR 的空间分辨率和检测灵敏度都达到了 10 nm 量级, 但测量样品所得光谱的信号强度均受到红外光与物质相互作用弱的限制<sup>[8,26]</sup>.

在中红外频段, 石墨烯支持高光场局域和电磁场增强的等离激元 (graphene plasmon, GP), 是显著提高红外光与物质相互作用的有效途径. 研究表明, GP 可以将 FTIR 的灵敏度从微米级别提升至纳米级别, 并被成功应用于 PEO 薄膜<sup>[27]</sup>、蛋白质<sup>[28,29]</sup>和 SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O 气体<sup>[30,31]</sup>等的检测. 最近研究人员发现基于石墨烯自由电荷与金属镜像电荷相互作用而激发的声学型石墨烯等离激元 (acoustic graphene plasmon, AGP), 显示出了更强的光场局域和电磁场增强<sup>[32-36]</sup>. 此外, 通过设计单个石墨烯纳米圆盘可以调控 AGP 的电磁场分布, 从而实现单层蛋白质薄膜的增强 nano-IR 探测<sup>[37]</sup>. 然而受微纳加工技术的限制, 石墨烯纳米结构制备过程常常引入大量边缘缺陷<sup>[30]</sup>, 降低了实验中 AGP 的电磁场增强倍数和调制效率.

本文理论提出了一种基于纳米腔室 (nanocavity) 的 AGP (n-AGP) 结构设计, 可避免引入石墨烯纳米结构的边缘缺陷, 从而激发了高性能的声学极化激元模式. 通过研究 n-AGP 的电场增强和模式体积, 揭示了纳米腔室结构和石墨烯费米能级对 n-AGP 增强 nano-IR 探测的调控规律. 基于此, 可实现单个蛋白质纳米颗粒酰胺 I 带和酰胺 II 带的指认, 为实现 nano-IR 的高灵敏物质检测提供了新的研究平台.

## 2 模型设置

### 2.1 有限元模拟

这项工作使用商业软件 COMSOL Multiphysics 进行模型构建和计算. 将图 1(a) 中三维的 n-AGP 结构进行模型简化, 设计成二维几何模型. 在模拟中, 采用了散射边界条件, 单层石墨烯薄膜被放置在具有纳米腔室的金基底上. 具体地, 纳米腔室内部为空气层; 金的介电函数与波长相关, 取自参考文献<sup>[38]</sup>见补充材料图 S1 (online); 石墨烯被设置为厚度为 0.34 nm 的过渡边界条件, 其等效相对介电常数  $\epsilon_g$  为

$$\epsilon_g = 1 + \frac{i\sigma}{\epsilon_0\omega t_g}, \quad (1a)$$

其中  $\epsilon_0$  为自由空间的介电常数;  $\omega$  为入射光的角频率;  $t_g$  为石墨烯层的厚度;  $\sigma$  为石墨烯的电导率. 在长波极限和高掺杂情况下, 石墨烯电导率由带内电子跃迁过程主导, 因此可以用德鲁特模型近似描述<sup>[39]</sup>:

$$\sigma = \frac{ie^2 E_F}{\pi\hbar^2 (\omega + i/\tau)}, \quad (1b)$$

式中,  $e$  代表电子电荷;  $\hbar$  代表约化普朗克常数;  $E_F$  代表石墨烯的费米能级. 弛豫时间  $\tau = \mu \times E_F / e\nu_F$ , 其中  $\nu_F = 1 \times 10^6$  m/s 为费米速度, 载流子迁移率  $\mu \approx 2000$  cm<sup>2</sup>/(V·s). 石墨烯区域的最大网格尺寸为 0.34 nm.

为了模拟实验中 nano-IR 测量的红外光谱, 利用一个动量沿  $z$  方向的电偶极子源等效红外光照射下的金属针尖, 电偶极子源被放置在石墨烯正上方 200 nm 处. 通过提取有/无石墨烯电场的  $z$  分量 (即  $|E_z|/|E_{z0}|$  的值), 计算频率相关的归一化电场强度谱.

### 2.2 分子介电常数模型

通过拟合实验测量牛血清蛋白红外吸收峰的振荡强度和半峰宽获得蛋白质的介电常数  $\epsilon_{\text{protein}}$ <sup>[28,40]</sup>:

$$\epsilon_{\text{protein}} = \epsilon_\infty + \sum_{j=1}^2 \frac{f_j \omega_p^2}{\omega_j^2 - \omega^2 + i\Gamma_j \omega} \quad (j = 1, 2), \quad (2)$$

其中蛋白质的高频介电常数  $\epsilon_\infty = 2.08$ ; 蛋白质酰胺 I 带的谐振频率  $\omega_1 = 1655$  cm<sup>-1</sup>; 蛋白质酰胺 II 带的谐振频率  $\omega_2 = 1545$  cm<sup>-1</sup>;  $f$  代表在不同模式下的谐振强度,  $f_1 = 1$ ,  $f_2 = 0.34$ ; 等离子体频率  $\omega_p = 213$  cm<sup>-1</sup>;  $\Gamma$  代表在不同模式下的阻尼系数,  $\Gamma_1 = 55.6$  cm<sup>-1</sup>,  $\Gamma_2 = 62$  cm<sup>-1</sup>. 蛋白质设定为矩形, 其中心与石墨烯中心在  $x$  轴方向保持一致.

## 3 讨论部分

### 3.1 构筑石墨烯/金纳米腔室激发 n-AGP

图 1(a) 为本文提出的石墨烯/金纳米腔室结构: 当红外光束照射到金属针尖尖端, 针尖尖端会对入射光造成强烈的散射, 从而有效地激发石墨烯/金纳米腔室结构中的 n-AGP. 根据已有的实验工作报告, 将石墨烯转移到金纳米腔室结构上并且避

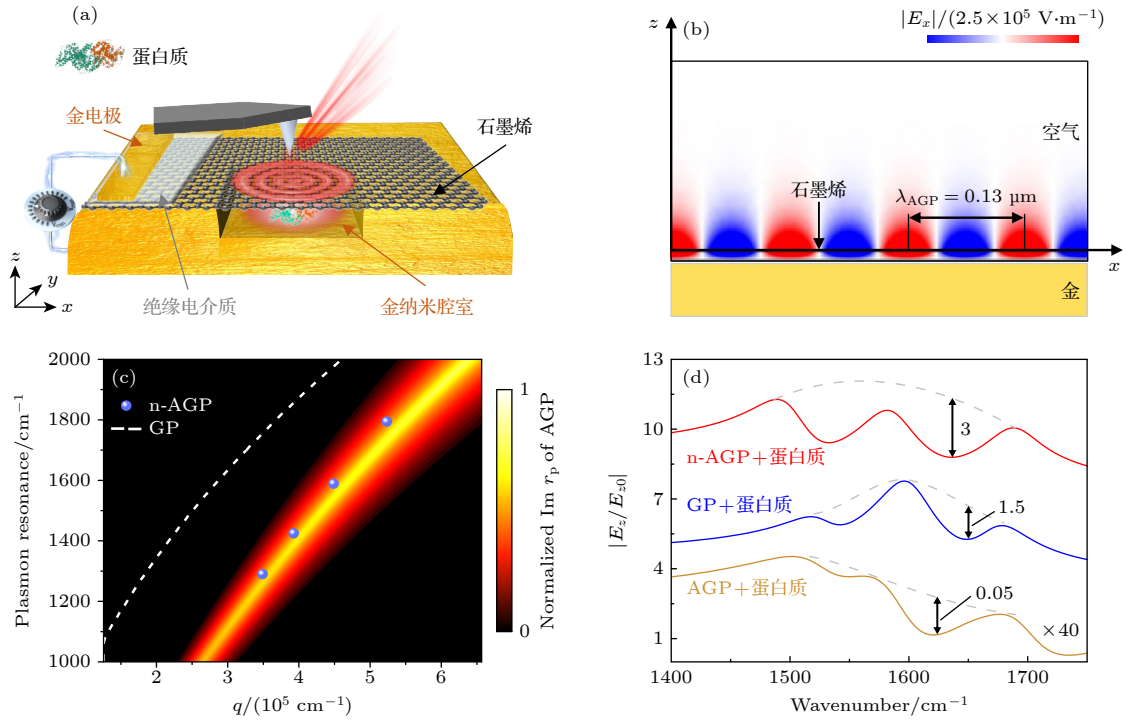


图 1 基于石墨烯/金纳米腔室的 n-AGP (a) 石墨烯/金纳米腔室结构示意图; (b) 共振频率为  $1600\text{ cm}^{-1}$  时, AGP 沿  $x$  轴的电场强度分布图 ( $E_x$ ); (c) n-AGP, GP 和 AGP 的色散关系. 白色虚线是 GP 的色散关系; 蓝色的点是从不同金纳米腔宽度的归一化电场强度谱提取的 n-AGP 色散散点; 伪彩图通过提取石墨烯/10 nm 空气间隙/金结构的归一化  $\text{Im} r_p$  ( $r_p$  为非涅耳反射系数) 获得, 展示了 AGP 的色散关系; (d) n-AGP, GP 和 AGP 与蛋白质振动模式耦合的归一化电场强度谱. AGP 与蛋白质振动模式耦合的归一化电场强度谱线放大 40 倍. 灰色虚线代表基线. 黑色箭头代表在酰胺 I 带处由于法诺共振现象造成的谱线凹陷最深处. 凹陷深度分别为 3 (n-AGP+蛋白质)、1.5 (GP+蛋白质) 和 0.05 (AGP+蛋白质). 蛋白质宽度为 60 nm、高度为 10 nm. 计算模型中设置空气间隙为 10 nm

Fig. 1. n-AGP based on graphene/gold nanocavity: (a) Schematic diagram of graphene/gold nanocavity; (b) electric-field distribution of AGP at a resonance frequency of  $1600\text{ cm}^{-1}$ ; (c) dispersion of n-AGP, GP, and AGP. The white dashed line represents the dispersion of GP; the blue dots are n-AGP dispersion scatter points extracted from normalized electric-field spectra of different nanocavity widths; the false-color background is obtained by the normalized  $\text{Im} r_p$  of graphene/10 nm air gap/gold structure, demonstrating the dispersion relationship of AGP ( $r_p$  is the Fresnel reflection coefficient); (d) normalized electric-field spectra of n-AGP, GP and AGP coupled with proteins. The normalized electric-field spectra of AGP-protein coupling is amplified by 40 times. The gray dashed line represents the baseline. The black arrow represents the deepest spectral line depression caused by the Fano resonance phenomenon in the Amide I region. The depth of the depression is 3 (n-AGP+protein), 1.5 (GP+protein), and 0.05 (AGP+protein), respectively. The protein has a width of 60 nm and a height of 10 nm. The thickness of air gap is 10 nm in the calculation model.

免褶皱在实验上是可行的<sup>[41-43]</sup>. 通常利用电子束曝光结合电子束沉积技术在金薄膜衬底上制备金纳米腔室阵列, 使用氧等离子体去除金表面的残留杂质. 通过机械剥离<sup>[44]</sup>或湿法转移<sup>[45]</sup>的方法可以将毫米级连续的单层石墨烯转移至金纳米腔室上方. 因为湿法转移石墨烯会不可避免地使石墨烯产生褶皱或者破损, 所以我们建议制备纳米腔室阵列, 通过扫描电子显微镜、原子力显微镜和拉曼光谱优选没有褶皱和破损的高质量石墨烯/金纳米腔室结构进行增强 nano-IR 测量. 金纳米腔室应预充满  $\text{N}_2$  气体, 通过石墨烯内部和外部的压力差避免石墨烯坍塌<sup>[44]</sup>. 然后使用对准转移技术在石墨烯

表面转移少层 hBN 或使用原子层气相沉积技术制备具有高介电常数的绝缘材料 (例如  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 作为栅极电介质层. 最后使用电子束曝光结合电子束沉积技术在绝缘层表面沉积金电极. 通过改变栅压, 可以调控石墨烯的费米能级, 进而实现 n-AGP 的动态调谐. 金纳米腔室的设计使得无需对石墨烯进行微纳加工 (如制备成为纳米条带、纳米圆盘等), 这避免了由于电子束曝光、等离子体刻蚀等过程中引入的石墨烯缺陷<sup>[46]</sup>和污染<sup>[47]</sup>; 同时利用金纳米腔室的边界反射还能进一步聚焦 n-AGP 的电磁场.

我们使用二维边界传输模型来计算 AGP 的电场分布. 为了测量 AGP 的波长, 提取了 AGP 沿

$x$  轴方向传播的归一化电场分布分量  $|E_x|$ , 如图 1(b) 所示. 作为对比, 补充材料图 S2 (online) 还展示了 GP 传播的  $|E_x|$ . 由于没有金的存在, GP 的电场分布在两侧表现出垂直对称性, 而 AGP 的电场高度局域并聚焦在石墨烯和金之间的纳米间隙中. 值得注意的是, AGP 的波长  $\lambda_{\text{AGP}} = 0.13 \mu\text{m}$ , 而 GP 的波长  $\lambda_{\text{GP}} = 0.21 \mu\text{m}$ . 说明 AGP 的波长压缩能力 ( $\lambda_0/\lambda_{\text{AGP}} = 48$ ) 比 GP 的波长压缩能力更强 ( $\lambda_0/\lambda_{\text{GP}} = 30$ ). 因此相比于 GP, AGP 可以更有效地提高光与物质相互作用的能力. 通过计算石墨烯/金纳米腔室结构的电场分布, 发现 n-AGP 具有极小的模式体积. 根据模式体积计算公式<sup>[34,36]</sup>:

$$V_{\text{n-AGP}} = \lambda_{\text{n-AGP}}^2 \times d, \quad (3)$$

其中  $\lambda_{\text{n-AGP}}$  为 AGP 的波长,  $d = 10 \text{ nm}$  (金纳米腔室的深度). 当  $\lambda_0 = 6.25 \mu\text{m}$  时,  $\lambda_{\text{n-AGP}} = 0.13 \mu\text{m}$ , 得出石墨烯/金纳米腔室的模式体积  $V_{\text{n-AGP}} = 0.000169 \mu\text{m}^3$ , 模式体积比  $V_{\text{n-AGP}}/V_0 \approx 6.9 \times 10^{-7}$  (自由空间下的模式体积为  $V_0 = \lambda_0^3$ ).

为了评估纳米腔室两侧金边界对 AGP 色散的影响, 通过提取不同纳米腔室宽度的归一化电场强度谱, 绘制了 n-AGP 的色散散点分布, 并将其与石墨烯/10 nm 空气间隙/金结构中 AGP 和石墨烯中的 GP 的色散关系作比较. AGP 和 GP 的色散是通过计算菲涅耳反射系数  $r_p(q, \omega)$  获得, 具体见补充材料注释 1 和图 S3 (online). 由于金纳米腔室的边界反射导致的 AGP 干涉, 电场  $E_x$  最大值分布在纳米腔室两侧 (图 S4 (online)), 因此 n-AGP 的波长 ( $\lambda_{\text{n-AGP}}$ ) 等效为腔体宽度的两倍. 如图 1(c) 所示, n-AGP 与 AGP 的色散基本一致, 且斜率小于 GP 的色散. 这说明金纳米腔室的引入可以兼顾 AGP 的高波长压缩能力.

我们计算了石墨烯/金纳米腔室结构的电场强度分布图 ( $|E_{\text{norm}}|$ ). 由于金表面的高电子密度, 电磁波可以在金纳米腔室边界发生反射并在纳米腔室中被局域共振增强, 见补充材料图 S5(a) (online). 同时, 通过比较没有金纳米腔室结构 (石墨烯/10 nm 空气间隙/金结构) 时激发的 AGP 电场 (补充材料图 S5(b) (online)), 我们发现由于缺少金纳米腔室两侧的电场反射增强, 该结构的电场强度明显下降. 我们从石墨烯正下方 5 nm 处提取石墨烯/金纳米腔室中心的归一化电场强度谱, 与没有增强结构相比, 在谐振频率处 ( $1800 \text{ cm}^{-1}$ ), 腔内电场强度提高约 50 倍 (补充材料图 S6 (online)).

我们还对比了 n-AGP 与 GP 和 AGP 的电场增强倍数, 在图 S6 (online) 中相近的谐振频率处, GP (谐振频率为  $1770 \text{ cm}^{-1}$ ) 和 AGP (谐振频率为  $1843 \text{ cm}^{-1}$ ) 的电场增强倍数分别约为 3 倍和 2 倍, 低于 n-AGP 的电场增强倍数. 这说明了 n-AGP 具有优异的电场增强能力. 由于分子振动信号与其所处位置的电磁场强度的平方成正比<sup>[48,49]</sup>, 因此高的电磁场强度有利于提高分子探测灵敏度. 通过放置蛋白质薄膜 (宽度为 60 nm, 高度为 10 nm), 我们验证这三种不同等离激元模式对蛋白质的探测灵敏度. 如图 1(d) 所示, 从石墨烯上方 15 nm 处提取归一化电场强度谱, 计算了等离激元模式与蛋白质分子振动模式法诺共振引起的谱线凹陷深度. 如图 1(d) 中的黑色箭头所示, 通过比较谱线的凹陷深度来评估每一种结构对蛋白质的探测灵敏度. 与蛋白质的归一化电场强度谱相比 (图 S7(a) (online)), n-AGP 可以有效放大蛋白质的 nano-IR 信号. 由于 AGP 的电场增强倍数比 GP, n-AGP 低一个数量级, 导致其归一化电场强度谱线难以在同一坐标轴中与 GP, n-AGP 比较. 为了让谱线特征更清晰, 将 AGP 与蛋白质振动模式耦合后的归一化电场强度谱线放大 40 倍 (标记为  $\times 40$ ). 值得注意的是, 当金基底上存在纳米腔室结构时, n-AGP 对蛋白质酰胺 I 带的探测灵敏度比 AGP 的探测灵敏度提高了约 60 倍. 这充分说明了金纳米腔室结构在保证 AGP 的高波长压缩能力的同时可以进一步聚焦光场.

### 3.2 金纳米腔室尺寸对 n-AGP 性能的影响

通过改变金纳米腔室的结构参数可以有效地调谐 n-AGP 的响应频率, 实现宽频段的增强 nano-IR 探测. 首先, 如图 2(a) 所示, 计算了当金纳米腔室的深度分别为 10, 14, 18 和 22 nm 时的归一化电场强度谱. 结果表明, 随着腔深度的增加, n-AGP 的电场增强提高, 且共振频率逐渐蓝移 (从  $1793 \text{ cm}^{-1}$  移到  $2124 \text{ cm}^{-1}$ ). 如 3.1 节所示, n-AGP 和 AGP 色散曲线基本一致. 因此为了简化模型计算资源, 使用 AGP 的色散说明腔深度的影响. 随着石墨烯/金基底之间的空气间隙增大 (即腔深度增加), 引起 AGP 波长压缩变弱 (见图 S8 (online)). 其次, 研究了金纳米腔室的宽度对 n-AGP 归一化电场强度谱的影响. 如图 2(b) 所示, 随着金纳米腔室的宽度增加, n-AGP 的共振频率红移 (从  $1793 \text{ cm}^{-1}$  移

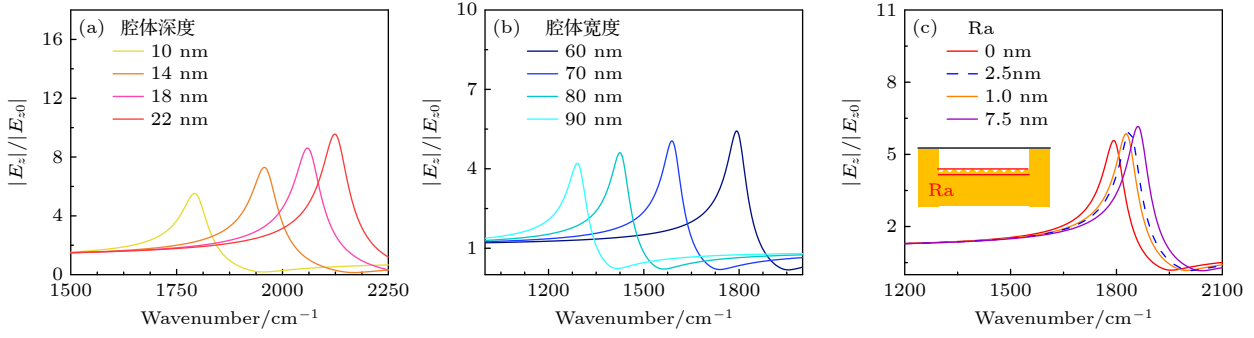


图2 金纳米腔室的不同结构参数对 n-AGP 共振频率的影响 (a) 腔体深度; (b) 腔体宽度; (c) 腔体下表面粗糙度 (Ra), Ra 为算数平均粗糙度. 在图 (a)–(c) 的模拟计算中, 石墨烯费米能级被设置为 0.5 eV

Fig. 2. Influence of different structural parameters of gold nanocavity on n-AGP resonance frequency: (a) Cavity depth; (b) width; (c) surface roughness (Ra), Ra is average roughness. In panels (a)–(c), the Fermi level of graphene is 0.5 eV.

到  $1290 \text{ cm}^{-1}$ ), 同时电场增强强度下降. 原因可能是由于金纳米腔室边界对腔内谐振电场具有反射增强的效果.

此外, 还研究了金纳米腔室底部的粗糙度 (Ra) 对于 n-AGP 电场增强的影响. 如图 2(c) 所示, 随着 Ra 从 0 nm 增加到 7.5 nm, n-AGP 的共振频率蓝移 (从  $1793 \text{ cm}^{-1}$  移到  $1861 \text{ cm}^{-1}$ ), 电场增强增加. 这是由于粗糙度的增加导致纳米腔的有效深度增加<sup>[50]</sup>. 调整金纳米腔室的结构参数, 包括增加腔深度、缩小宽度以及提高 Ra, 可以有效调控 n-AGP 的共振频率蓝移, 使其满足不同分子振动模式的增强探测需求.

### 3.3 石墨烯费米能级调控 n-AGP

利用微纳加工技术, 可以改变金纳米腔室的结构参数, 但是受加工精度以及石墨烯/金纳米腔室结构制备完成后难以调整的影响, 限制了单个器件的 n-AGP 响应频段. 根据石墨烯等离激元的色散关系<sup>[51]</sup>:

$$\omega_p^{\text{Graphene}} = \sqrt{\frac{e^2 |E_F| k}{2\pi\hbar^2 \epsilon_0 \epsilon_r}}. \quad (4)$$

可知, 石墨烯的结构和尺寸 ( $k$ )、石墨烯所在的介电环境 ( $\epsilon_r$ )、和石墨烯费米能级 ( $E_F$ ) 都会影响 n-AGP 的共振频率. 在不改变石墨烯/金纳米腔室结构参数的情况下, 通过化学掺杂或电学掺杂改变石墨烯费米能级, 可以实现 n-AGP 共振频率的动态调控, 保证 n-AGP 的低损耗和高灵敏探测. 例如, 在石墨烯表面转移或沉积绝缘电介质层 (例如氮化硼、氧化铝) 和金电极可以实现顶栅调控石墨烯的  $E_F$ .

当金纳米腔室结构尺寸被固定时 (腔深度为 10 nm, 宽度为 60 nm, Ra 为 0 nm), 调控石墨烯  $E_F$ . 如图 3(a) 所示, 随着  $E_F$  由 0.3 eV 增加到 0.6 eV, n-AGP 电场增强倍数明显增大, 并且 n-AGP 共振峰从  $1355 \text{ cm}^{-1}$  移到  $1973 \text{ cm}^{-1}$ . 我们使用 AGP 的色

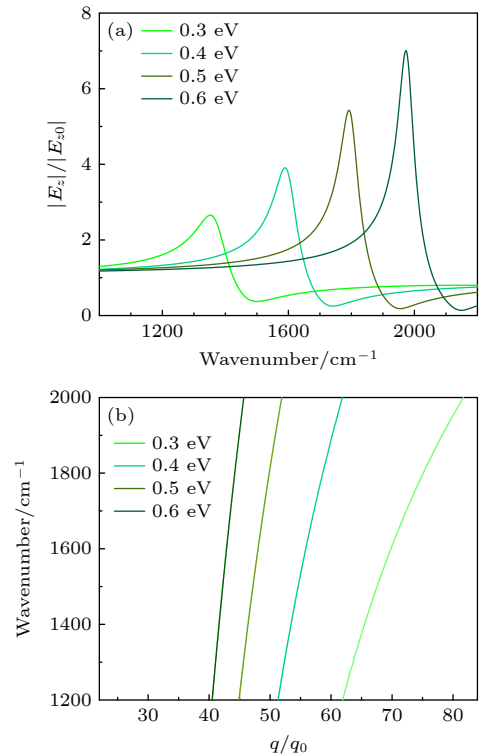


图3 石墨烯费米能级对 n-AGP 的影响 (a) 归一化电场强度谱对石墨烯费米能级的依赖性, 模拟中设置的金纳米腔室深度为 10 nm, 宽度为 60 nm; (b) 不同石墨烯费米能级下计算的 AGP 色散关系, 空气隙为 10 nm

Fig. 3. Effect of graphene Fermi level on n-AGP: (a) Dependence of normalized electric-field spectra on graphene Fermi level, and the depth of the gold nanocavity is 10 nm and the width is 60 nm in the simulation; (b) dispersion relationship of AGP corresponding to different graphene Fermi levels, and the thickness of air gap is 10 nm.

散说明费米能级的影响. 根据色散关系可知 (图 3(b)),  $E_F$  的增加将导致 n-AGP 的波长压缩能力下降, 从而导致谐振频率蓝移. 这些结果表明调节  $E_F$  能够有效调控 n-AGP 的响应频率, 并且可以实现动态可调, 这无疑降低了对 n-AGP 结构的加工要求, 扩大了对待测分子的检测范围.

### 3.4 n-AGP 的增强 nano-IR 探测应用

蛋白质的酰胺键  $H-N-C=O$  通常在红外频段有特征红外吸收信号: 振动频率范围分别为

1600—1700  $cm^{-1}$  的酰胺 I 带和 1500—1600  $cm^{-1}$  的酰胺 II 带 [52], 其中酰胺 I 带包含蛋白质中二级结构的信息 [13,53,54]. 因此利用红外光谱研究蛋白质在生物医学领域 [55-57], 尤其对疾病监测 [58]、生命过程研究 [59-61] 至关重要. 例如, 许多疾病, 包括癌症和神经退行性疾病 (如阿尔兹海默症), 在其早期阶段就会产生痕量的标志性蛋白质, 实现对这些蛋白质的高灵敏检测有利于疾病的早期诊断, 从而提高治疗的成功率 [62-64]. n-AGP 的高波长压缩和电场增强可以有效地提高红外光与物质相互作用, 实

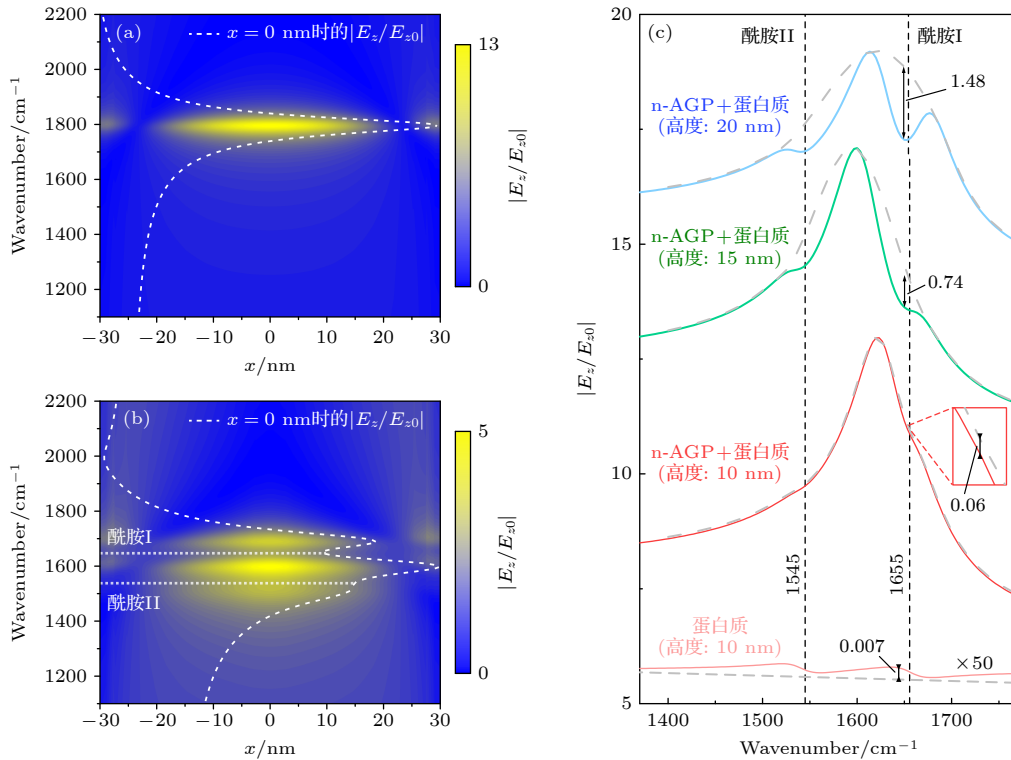


图 4 n-AGP 增强 nano-IR 在蛋白质检测中的应用 (a) n-AGP 场增强依赖频率和腔内位置变化的三维图. 白色虚线代表当  $x = 0$  nm 时, n-AGP 的归一化电场强度谱. 金纳米腔室宽度为 60 nm; (b) n-AGP 场增强依赖频率和腔内位置变化的三维图. 蛋白质的宽度为 10 nm, 高度为 10 nm. 蛋白质分子的酰胺 I 带对应的频率为 1650  $cm^{-1}$ , 酰胺 II 带对应的频率为 1532  $cm^{-1}$ ; (c) 不同尺寸蛋白质与 n-AGP 耦合的归一化电场强度谱. 蛋白质高度为 20 nm (蓝色)、15 nm (绿色)、10 nm (红色). 蛋白质高度为 10 nm 时, 无增强 nano-IR 结构的蛋白质的归一化电场强度谱 (浅红色, 放大 50 倍). 蛋白质的宽度为 10 nm. 灰色虚线代表基线, 黑色箭头代表由于法诺共振现象造成的谱线凹陷深度. 蛋白质高度为 20, 15, 10 nm 时, 谱线凹陷深度分别为 1.48, 0.74, 0.06. 在模拟中, 高度为 10 nm 的蛋白质在酰胺 I 带的谐振强度为 0.007

Fig. 4. Application of n-AGP-enhanced nano-IR in protein detection: (a) Three-dimensional diagram showing the dependency of n-AGP field enhancement on frequency and position. The white dashed line represents the normalized electric-field spectra of n-AGP extracted when  $x = 0$  nm, and the width of the gold nanocavity is 60 nm; (b) three-dimensional diagram showing the dependency of n-AGP field enhancement on frequency and position. The width of the protein is 10 nm and the height is 10 nm; The frequency corresponding to the amide I band of protein molecules is 1650  $cm^{-1}$ , and the frequency corresponding to the amide II band is 1532  $cm^{-1}$ ; (c) normalized electric-field spectra of proteins with different sizes coupled with n-AGP. Normalized electric-field spectra of proteins with height of 20 nm (blue curve), 15 nm (green curve), and 10 nm (red curve) at the center of the graphene/gold nanocavity enhanced structure. When the protein height is 10 nm, there is no enhanced nano-IR structure and the normalized electric-field spectrum (light red curve) is amplified 50 times. The width of the simulated protein is 10 nm. The gray dashed line represents the baseline, and the black arrow represents the depth of spectral line depression caused by the Fano resonance phenomenon. When the protein height is 20, 15 and 10 nm, the depth of spectral line depression is 1.48, 0.74, and 0.06, respectively. The resonance intensity of the simulated protein with a height of 10 nm at amide I band is 0.007.

现增强的 nano-IR 探测. 为了研究 n-AGP 增强 nano-IR 的蛋白质检测, 在模型设置中, 我们将不同尺寸的蛋白质颗粒 (高度分别为 20, 15 和 10 nm, 高度为 10 nm) 放入到石墨烯/金纳米腔室结构中 (腔宽度为 60 nm, 腔深度与蛋白质高度相同).

我们首先在石墨烯表面沿  $x$  轴方向进行扫描, 模拟得到不同位置的近场光学响应图像. 从图 4(a) 和图 4(b) 中的电场强度分布图可以观察到, 当在石墨烯下方加入蛋白质后, 由于介电环境发生变化, n-AGP 共振峰红移至蛋白质酰胺带附近. 蛋白质分子振动模式与 n-AGP 模式发生耦合, 两者交换能量, 导致 n-AGP 在蛋白质酰胺 I 带和酰胺 II 带区域有着明显的电场强度降低 (当  $x = 0$  nm 时,  $1655\text{ cm}^{-1}$  和  $1545\text{ cm}^{-1}$  附近电场强度降低). 从石墨烯上方 15 nm 处提取电场的  $z$  分量 (即  $|E_z|$  的值), 然后计算归一化电场强度谱. 图 4(c) 中展示的归一化电场强度谱表明, 具有不同尺寸的蛋白质颗粒在光谱上表现出了不同的凹陷深度. 具体来说, 由于高度为 20, 15 nm 的蛋白质存在, n-AGP 共振峰的强度分别下降了 1.48 和 0.74. 为了进一步探究该结构的检测极限, 模拟了单个蛋白质颗粒 (高度为 10 nm) 时的归一化电场强度谱 (图 4(c) 中的红色曲线). 结果显示, 在酰胺 I 带和酰胺 II 带区域仍然观察到了微弱的凹陷峰, 酰胺 I 带凹陷深度为 0.06, 比没有增强的单个蛋白质颗粒电场强度 (0.007) 约提高了 9 倍. 这证明了石墨烯/金纳米腔室结构能够有效提高 nano-IR 检测单个蛋白质颗粒的灵敏度.

## 4 结 论

本文理论提出了一种基于可调谐 n-AGP 的增强 nano-IR 结构. 通过改变石墨烯费米能级和金纳米腔室结构参数, 激发了可动态调控 ( $1290\text{--}2124\text{ cm}^{-1}$ )、超小模式体积 ( $V_{\text{n-AGP}} \approx 10^{-7} \lambda_0^3$ ,  $\lambda_0 = 6.25\text{ }\mu\text{m}$ ) 和电场增强 (腔内电场增强约 50 倍) 的 n-AGP. 基于石墨烯/金纳米腔室结构激发的 n-AGP, 不仅可以避免微纳加工引入的石墨烯材料和结构损耗, 而且极大地提高了红外光与物质的相互作用. 相比于 AGP, n-AGP 可将 nano-IR 的蛋白质检测灵敏度提升约 60 倍, 实现单个蛋白质颗粒的指纹识别. 这一方法有望为纳米尺度下的材料表征和单分子探测提供重要的检测平台. 这种基

于 n-AGP 的增强结构, 在纳米红外技术领域展现出了广泛的应用潜力, 为单分子层面上的生物和化学过程的研究提供了坚实的基础.

## 参考文献

- [1] Yao Z, Xu S, Hu D, Chen X, Dai Q, Liu M 2020 *Adv. Opt. Mater.* **8** 1901042
- [2] Chen X, Hu D, Mescall R, You G, Basov D N, Dai Q, Liu M 2019 *Adv. Mater.* **31** 1804774
- [3] Lahiri B, Holland G, Centrone A 2013 *Small* **9** 439
- [4] Centrone A 2015 *Annu. Rev. Anal. Chem.* **8** 101
- [5] Katzenmeyer A M, Holland G, Kjoller K, Centrone A 2015 *Anal. Chem.* **87** 3154
- [6] Dazzi A, Glotin F, Carminati R 2010 *J. Appl. Phys.* **107** 124519
- [7] Schwartz J J, Jakob D S, Centrone A 2022 *Chem. Soc. Rev.* **51** 5248
- [8] Wang L, Wang H, Xu X G 2022 *Chem. Soc. Rev.* **51** 5268
- [9] Wang L, Wang H, Wagner M, Yan Y, Jakob D S, Xu X G 2017 *Sci. Adv.* **3** e1700255
- [10] Wang H, Gonzalez-Fialkowski J M, Li W, Xie Q, Yu Y, Xu X G 2021 *Anal. Chem.* **93** 3567
- [11] Davies-Jones J A, Davies P R 2022 *Mater. Chem. Front.* **6** 1552
- [12] Rajapaksa I, Uenal K, Wickramasinghe H K 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 073121
- [13] Jahng J, Fishman D A, Park S, Nowak D B, Morrison W A, Wickramasinghe H K, Potma E O 2015 *Acc. Chem. Res.* **48** 2671
- [14] Xue M, Ye S, Ma X, Ye F, Wang C, Zhu L, Yang Y, Chen J 2022 *J. Am. Chem. Soc.* **144** 20278
- [15] Gamage S, Howard M, Makita H, Cross B, Hastings G, Luo M, Abate Y 2018 *PLoS One* **13** e0199112
- [16] Kim S Y, Khanal D, Kalionis B, Chrzanowski W 2019 *Nat. Protoc.* **14** 576
- [17] Goikoetxea M, Amenabar I, Chimentì S, Paulis M, Leiza J R, Hillenbrand R 2021 *Macromolecules* **54** 995
- [18] Tri P N, Prud'homme R E 2018 *Macromolecules* **51** 181
- [19] Morsch S, Liu Y, Lyon S B, Gibbon S R 2016 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **8** 959
- [20] Yang J, Hatcherian J, Hackley P C, Pomerantz A E 2017 *Nat. Commun.* **8** 2179
- [21] Hassenkam T, Andersson M P, Dalby K N, Mackenzie D M A, Rosing M T 2017 *Nature* **548** 78
- [22] Kebukawa Y, Kobayashi H, Urayama N, Baden N, Kondo M, Zolensky M E, Kobayashi K 2019 *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **116** 753
- [23] Nishida J, Otomo A, Koitaya T, Shiotari A, Minato T, Iino R, Kumagai T 2024 *Nano Lett.* **24** 836
- [24] Tang F, Bao P, Su Z 2016 *Anal. Chem.* **88** 4926
- [25] Patabendigedara S, Nowak D, Nancarrow M J B, Clark S M 2021 *Rev. Sci. Instrum.* **92** 023103
- [26] Yang X, Sun Z, Low T, Hu H, Guo X, Garcia de Abajo F J, Avouris P, Dai Q 2018 *Adv. Mater.* **30** e1704896
- [27] Hu H, Yang X, Zhai F, Hu D, Liu R, Liu K, Sun Z, Dai Q 2016 *Nat. Commun.* **7** 12334
- [28] Wu C, Guo X, Duan Y, Lü W, Hu H, Hu D, Chen K, Sun Z, Gao T, Yang X, Dai Q 2022 *Adv. Mater.* **34** 2110525
- [29] Rodrigo D, Limaj O, Janner D, Etezadi D, Garcia de Abajo F J, Pruneri V, Altug H 2015 *Science* **349** 165

- [30] Hu H, Yang X, Guo X, Khaliji K, Biswas S R, García de Abajo F J, Low T, Sun Z, Dai Q 2019 *Nat. Commun.* **10** 1131
- [31] Bareza N, Jr, Gopalan K K, Alani R, Paulillo B, Pruneri V 2020 *ACS Photonics* **7** 879
- [32] Alonso-González P, Nikitin A Y, Gao Y, Woessner A, Lundberg M B, Principi A, Forcellini N, Yan W, Vélez S, Huber A J, Watanabe K, Taniguchi T, Casanova F, Hueso L E, Polini M, Hone J, Koppens F H L, Hillenbrand R 2017 *Nat. Nanotechnol.* **12** 31
- [33] Menabde S G, Lee I H, Lee S, Ha H, Heiden J T, Yoo D, Kim T T, Low T, Lee Y H, Oh S H, Jang M S 2021 *Nat. Commun.* **12** 938
- [34] Epstein I, Alcaraz D, Huang Z, Pusapati V V, Hugonin J P, Kumar A, Deputy X M, Khodkov T, Rappoport T G, Hong J Y, Peres N M R, Kong J, Smith D R, Koppens F H L 2020 *Science* **368** 1219
- [35] Lundberg M B, Gao Y, Asgari R, Tan C, Van Duppen B, Autore M, Alonso-González P, Woessner A, Watanabe K, Taniguchi T, Hillenbrand R, Hone J, Polini M, Koppens F H L 2017 *Science* **357** 187
- [36] Alcaraz Iranzo D, Nanot S, Dias E J C, Epstein I, Peng C, Efetov D K, Lundberg M B, Parret R, Osmond J, Hong J Y, Kong J, Englund D R, Peres N M R, Koppens F H L 2018 *Science* **360** 291
- [37] Chen S, Autore M, Li J, Li P, Alonso-Gonzalez P, Yang Z, Martin-Moreno L, Hillenbrand R, Nikitin A Y 2017 *ACS Photonics* **4** 3089
- [38] Olmon R L, Raschke M B 2012 *Nanotechnology* **23** 444001
- [39] Low T, Avouris P 2014 *ACS Nano* **8** 1086
- [40] Adato R, Altug H 2013 *Nat. Commun.* **4** 2154
- [41] Du X, Skachko I, Barker A, Andrei E Y 2008 *Nat. Nanotechnol.* **3** 491
- [42] Rickhaus P, Maurand R, Liu M H, Weiss M, Richter K, Schönenberger C 2013 *Nat. Commun.* **4** 2342
- [43] Dorgan V E, Behnam A, Conley H J, Bolotin K I, Pop E 2013 *Nano Lett.* **13** 4581
- [44] Hu H, Yu R, Teng H, Hu D, Chen N, Qu Y, Yang X, Chen X, McLeod A S, Alonso-González P, Guo X, Li C, Yao Z, Li Z, Chen J, Sun Z, Liu M, García de Abajo F J, Dai Q 2022 *Nat. Commun.* **13** 1465
- [45] Lu Y H, Morales C, Zhao X, van Spronsen M A, Baskin A, Prendergast D, Yang P, Bechtel H A, Barnard E S, Ogletree D F, Altoe V, Soriano L, Schwartzberg A M, Salmeron M 2020 *Nano Lett.* **20** 6364
- [46] Farmer D B, Rodrigo D, Low T, Avouris P 2015 *Nano Lett.* **15** 2582
- [47] Zhuang B, Li S, Li S, Yin J 2021 *Carbon* **173** 609
- [48] Dregely D, Neubrech F, Duan H, Vogelgesang R, Giessen H 2013 *Nat. Commun.* **4** 2237
- [49] Kawata S 2001 *Near-field Optics and Surface Plasmon Polaritons* (Vol. 81) (Berlin: Springer Science & Business Media) p163
- [50] Miao X, Luk T S, Liu P Q 2022 *Adv. Mater.* **34** 2107950
- [51] Guo Q, Li C, Deng B, Yuan S, Guinea F, Xia F 2017 *ACS Photonics* **4** 2989
- [52] Schwaighofer A, Montemurro M, Freitag S, Kristament C, Culzoni M J, Lendl B 2018 *Anal. Chem.* **90** 7072
- [53] Kavungal D, Magalhães P, Kumar S T, Kolla R, Lashuel H A, Altug H 2023 *Sci. Adv.* **9** eadg9644
- [54] López-Lorente Á I, Mizaikoff B 2016 *Anal. Bioanal. Chem.* **408** 2875
- [55] Zhang W, Chen L, Chen J, Wang L, Gui X, Ran J, Xu G, Zhao H, Zeng M, Ji J, Qian L, Zhou J, Ouyang H, Zou X 2017 *Adv. Healthcare Mater.* **6** 1700121
- [56] Hoarau M, Badieyan S, Marsh E N G 2017 *Org. Biomol. Chem.* **15** 9539
- [57] Talari A C S, Martinez M A G, Movasaghi Z, Rehman S, Rehman I U 2017 *Appl. Spectrosc. Rev.* **52** 456
- [58] Araki K, Yagi N, Ikemoto Y, Yagi H, Choong C J, Hayakawa H, Beck G, Sumi H, Fujimura H, Moriwaki T, Nagai Y, Goto Y, Mochizuki H 2015 *Sci. Rep.* **5** 17625
- [59] Nabers A, Ollesch J, Schartner J, Kötting C, Genius J, Hauffmann U, Klafki H, Wiltfang J, Gerwert K 2016 *J. Biophotonics* **9** 224
- [60] Nabers A, Ollesch J, Schartner J, Kötting C, Genius J, Hafermann H, Klafki H, Gerwert K, Wiltfang J 2016 *Anal. Chem.* **88** 2755
- [61] Lashuel H A, Overk C R, Oueslati A, Masliah E 2013 *Nat. Rev. Neurosci.* **14** 38
- [62] Conway K A, Lee S J, Rochet J C, Ding T T, Williamson R E, Lansbury P T 2000 *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **97** 571
- [63] Hardy J A, Higgins G A 1992 *Science* **256** 184
- [64] Ballatore C, Lee V M Y, Trojanowski J Q 2007 *Nat. Rev. Neurosci.* **8** 663

# Tunable acoustic graphene plasmon enhanced nano-infrared spectroscopy\*

Duan Yu<sup>1)2)</sup> Dai Xiao-Kang<sup>2)3)</sup> Wu Chen-Chen<sup>2)3)†</sup> Yang Xiao-Xia<sup>2)3)‡</sup>

1) (*Henan Institute of Advanced Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China*)

2) (*CAS Key Laboratory of Nanophotonic Materials and Devices, CAS Key Laboratory of Standardization and Measurement for Nanotechnology, CAS Center for Excellence in Nanoscience, National Center for Nanoscience and Technology, Beijing 100190, China*)

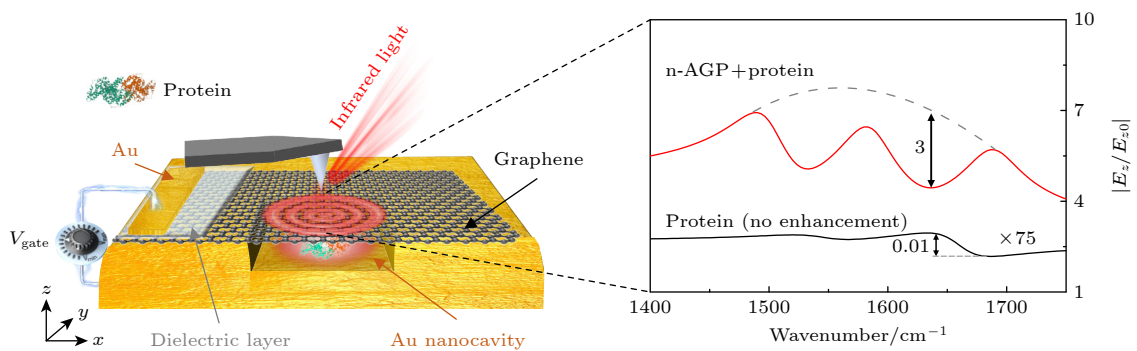
3) (*Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

( Received 9 April 2024; revised manuscript received 10 May 2024 )

## Abstract

Nano-infrared spectroscopy (nano-IR) technology can exceed the diffraction limit of light, achieving infrared spectroscopic detection with a spatial resolution of about 10 nm, which is an important technical means for studying the chemical composition and structure of molecules on a nanoscale. However, the weak infrared absorption signals of nanoscale materials pose a significant challenge due to the large mismatch between their dimensions and the wavelength of infrared light. The infrared absorption signals of molecular vibrational modes are proportional to the squares of the electromagnetic field intensities at their positions, implying that higher electromagnetic field intensity can significantly improve the sensitivity of molecular detection. Acoustic graphene plasmons (AGPs), excited by the interaction between free charges in graphene and image charges in metal, exhibit strong optical field localization and electromagnetic field enhancement. These properties make AGPs an effective platform for enhancing nano-IR detection sensitivity. However, the fabrication of graphene nanostructures often introduces numerous edge defects due to the limitations of nanofabrication techniques, significantly reducing the electromagnetic field enhancement observed in experiments. Here, we use finite element simulation to theoretically propose a tunable enhanced nano-IR detection platform based on nanocavity-acoustic graphene plasmons (n-AGPs), which utilizes a graphene/air gap/gold nanocavity structure. This platform avoids needing the nanofabrication of graphene, thereby preventing defects and contamination from being introduced in processes such as electron beam exposure and plasma etching. By plotting the dispersion of n-AGP, it is found that n-AGP has a high wavelength compression capability comparable to AGP ( $\lambda_0/\lambda_{\text{AGP}} = 48$ ). Additionally, due to the introduction of the gold nanocavity structure, n-AGP possess an extremely small mode volume ( $V_{\text{n-AGP}} \approx 10^{-7} \lambda_0^3$ ,  $\lambda_0 = 6.25 \mu\text{m}$ ). By calculating the electric field intensity distribution ( $|E_{\text{norm}}|$ ) and the normalized electric field intensity spectrum (i.e. the relationship between frequency and  $|E_z|/|E_{z0}|$ ) of the n-AGP structure, it is evident that due to the high electron density on the gold surface, electromagnetic waves can be reflected from the boundaries of the gold nanocavity and resonantly enhanced within the nanocavity. At the resonant frequency of n-AGP ( $1800 \text{ cm}^{-1}$ ), the electric field inside the cavity is enhanced by about 50 times. In contrast, at similar resonant frequencies, the electric field enhancement factor of Graphene plasmon (resonant frequency  $1770 \text{ cm}^{-1}$ ) and AGP (resonant frequency  $1843 \text{ cm}^{-1}$ ) are approximately 3 and 2 times, respectively, significantly lower than that of n-AGP. Furthermore, by placing a protein film (60 nm wide and 10 nm high) under the graphene, we calculate the spectral dip depths caused by Fano resonance between n-AGP and AGP with the vibrational modes of protein molecules, thereby validating the enhancement factors of different modes for protein vibrational mode infrared absorption. For the amide-I band of proteins, the detection sensitivity of n-AGP is about 60 times higher than that of AGP. Additionally, we find that by adjusting the structural parameters of the gold nanocavity, including cavity depth, width, and surface roughness, the response frequency band of n-AGP can be modulated (from  $1290$  to  $2124 \text{ cm}^{-1}$ ).

Specifically, as the cavity depth increases, the electric field enhancement of n-AGP is improved, and the wavelength compression capability of n-AGP decreases, causing the resonant frequency to be blue-shifted (from 1793 to 2124  $\text{cm}^{-1}$ ). As the cavity width increases, the resonant frequency of n-AGP is red-shifted (from 1793 to 1290  $\text{cm}^{-1}$ ), and the effectiveness of the gold nanocavity boundary in reflecting the resonant electric field within the cavity diminishes, resulting in a decrease in the electric field enhancement factor. With the gradual increase in the roughness of the gold nanocavity bottom, the effective depth of the gold nanocavity increases, causing the n-AGP resonant frequency to be blue-shifted (from 1793 to 1861  $\text{cm}^{-1}$ ) and the electric field enhancement factor to increase. Moreover, by adjusting the Fermi level of graphene (from 0.3 to 0.6 eV), we achieve dynamic tuning of n-AGP (from 1355 to 1973  $\text{cm}^{-1}$ ). As the Fermi level of graphene increases, the wavelength compression capability of n-AGP decreases, resulting in a blue-shift in the resonant frequency. Finally, by optimizing the structural parameters and Fermi level of n-AGP, and placing protein particles of different sizes (20, 15, and 10 nm high, all 10 nm wide) into the graphene/gold nanocavity structure, we verify the protein detection capability of n-AGP-enhanced nano-IR. We find that n-AGP can detect the vibrational fingerprint features of the amide-I band and amide-II band. For protein films (60 nm wide and 10 nm high), the sensitivity increased by approximately 300 times, and for a single protein particle (10 nm wide and 10 nm high), the sensitivity increased by approximately 9 times. This enhanced structure based on n-AGP holds promise for providing an important detection platform for nanoscale material characterization and single-molecule detection, with broad application potential in biomedicine, materials science, and geology.



**Keywords:** graphene, nanocavity, plasmon, surface enhanced infrared spectroscopy

**PACS:** 81.05.ue, 78.67.-n, 71.36.+c, 78.30.-j

**DOI:** 10.7498/aps.73.20240489

\* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2023YFA1407003), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 52022025, 51972074), the Chinese Academy of Sciences Project for Young Scientists in Basic Research (Grant No. YSBR-086), and the Youth Innovation Promotion Association of the Chinese Academy of Sciences, China.

† Corresponding author. E-mail: [wucc@nanoctr.cn](mailto:wucc@nanoctr.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [yangxx@nanoctr.cn](mailto:yangxx@nanoctr.cn)



可调谐的声学型石墨烯等离子激元增强纳米红外光谱

段瑜 戴小康 吴晨晨 杨晓霞

**Tunable acoustic graphene plasmon enhanced nano-infrared spectroscopy**

Duan Yu Dai Xiao-Kang Wu Chen-Chen Yang Xiao-Xia

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 138101 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240489

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240489>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

等离子激元增强的石墨烯光吸收

Enhanced optical absorption of graphene by plasmon

物理学报. 2020, 69(6): 067801 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191645>

基于纳米金属阵列天线的石墨烯/硅近红外探测器

Quaternary nanoparticle array antenna for graphene/silicon near-infrared detector

物理学报. 2024, 73(6): 064202 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231657>

基于纳米金属-石墨烯耦合的多频段等离子激元诱导透明

Multiband plasmon-induced transparency based on nanometals-graphene hybrid model

物理学报. 2020, 69(17): 174201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200200>

基于太赫兹石墨烯等离子激元的多参数相位可调谐结构及其应用

Multi-parameter tunable phase transition based terahertz graphene plasmons and its application

物理学报. 2021, 70(22): 224202 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210445>

二维有限元方法研究石墨烯环中磁等离子激元

Study of magnetoplasmons in graphene rings with two-dimensional finite element method

物理学报. 2023, 72(8): 087301 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222467>

渔网超结构的等离子激元模式及其对薄膜电池的陷光调控

Plasmon modes of fishnet metastructure and its trapping and control of light for thin film solar cells

物理学报. 2021, 70(21): 218801 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210693>