

基于介质超表面角度复用的太赫兹增强吸收谱

李向军 马婵 严德贤 裘国华 赵杨 杨佶 郭世辉

Enhancement of terahertz absorption spectrum based on the angle multiplexing of the dielectric metasurface

LI Xiang-jun, MA Chan, YAN De-xian, QIU Guo-hua, ZHAO Yang, YANG Ji, GUO Shi-hui

引用本文:

李向军, 马婵, 严德贤, 裘国华, 赵杨, 杨佶, 郭世辉. 基于介质超表面角度复用的太赫兹增强吸收谱[J]. *中国光学*, 2022, 15(4): 731-739. doi: 10.37188/CO.2021-0197

LI Xiang-jun, MA Chan, YAN De-xian, QIU Guo-hua, ZHAO Yang, YANG Ji, GUO Shi-hui. Enhancement of terahertz absorption spectrum based on the angle multiplexing of the dielectric metasurface[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(4): 731-739. doi: 10.37188/CO.2021-0197

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0197>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

电环形谐振腔表面几何参数对太赫兹超材料吸收体性能的影响

Influence of the geometric parameters of the electrical ring resonator metasurface on the performance of metamaterial absorbers for terahertz applications

中国光学. 2018, 11(1): 47 <https://doi.org/10.3788/CO.20181101.0047>

电磁编码超材料的理论与应用

Theory and application of coding metamaterials

中国光学. 2017, 10(1): 1 <https://doi.org/10.3788/CO.20171001.0001>

基于石墨烯的光学控制窄带太赫兹开关

Optically controlled narrowband terahertz switcher based on graphene

中国光学. 2018, 11(2): 166 <https://doi.org/10.3788/CO.20181102.0166>

太赫兹数字全息术的研究进展

Recent advances in terahertz digital holography

中国光学. 2017, 10(1): 131 <https://doi.org/10.3788/CO.20171001.0131>

太赫兹大气遥感技术

Terahertz atmosphere remote sensing

中国光学. 2017, 10(5): 656 <https://doi.org/10.3788/CO.20171005.0656>

基于太赫兹量子级联激光器的实时成像研究进展

Progress in real-time imaging based on terahertz quantum-cascade lasers

中国光学. 2017, 10(1): 68 <https://doi.org/10.3788/CO.20171001.0068>

文章编号 2095-1531(2022)04-0731-09

基于介质超表面角度复用的太赫兹增强吸收谱

李向军^{1,2,3*}, 马 婵¹, 严德贤^{1,2,3*}, 裘国华^{1,2}, 赵 杨¹, 杨 佶¹, 郭世辉³

- (1. 中国计量大学 浙江省电磁波信息技术与计量检测重点实验室, 浙江 杭州 310018;
2. 中国计量大学 太赫兹研究所, 浙江 杭州 310018;
3. 浙江中环检测科技股份有限公司, 浙江 温州 325000)

摘要:利用太赫兹波段独特的指纹谱可以实现有机大分子的快速检测识别,然而微量物质的太赫兹吸收谱测量仍非常有挑战性。本文针对微量有机物,提出了一种基于介质超表面角度复用的太赫兹吸收谱增强检测方案。其中超表面衬底和十字单元结构均为高阻硅,具有高 Q 谐振特性。不同太赫兹波入射角对应的超表面响应曲线上的谐振峰频率可覆盖0.50~0.57 THz。超表面上覆盖0.5~2.5 μm 乳糖薄膜作为待测物时,各入射角度对应的谐振峰幅度随待测物的吸收谱大幅度改变,其包络线组成的吸收谱峰值比没有十字单元结构时最多增强可达82.59倍。仿真结果表明该介质超表面经过角度复用可在宽带范围内有效增强太赫兹吸收谱,经过优化设计可用于检测不同特征峰微量有机物质。

关键词:太赫兹;超表面;吸收谱;角度复用;增强

中图分类号:TN214 文献标志码:A doi: 10.37188/CO.2021-0197

Enhancement of terahertz absorption spectrum based on the angle multiplexing of the dielectric metasurface

LI Xiang-jun^{1,2,3*}, MA Chan¹, YAN De-xian^{1,2,3*}, QIU Guo-hua^{1,2}, ZHAO Yang¹, YANG Ji¹, GUO Shi-hui³

- (1. *Key Laboratory of Electromagnetic Wave Information Technology and Metrology of Zhejiang Province, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;*
2. *Centre for THz Research, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;*
3. *Zhejiang Zhong Huan Detection CO., LTD, Wenzhou 325000, China*)

* *Corresponding author, E-mail: xiangjun_li@cjlu.edu.cn; yandexian1991@163.com*

Abstract: The rapid detection and identification of organic macromolecules can be realized by using the unique fingerprint spectrum of the terahertz band, but the measurement of terahertz absorption spectrum of trace analyte is still challenging. We proposed a detection scheme of enhancement of terahertz absorption

收稿日期:2021-11-12; 修订日期:2021-12-13

基金项目:国家重点研发计划资助项目(No. 2021YFF0600300); 国家自然科学基金(No. 62001444, No. 62175223); 浙江省自然科学基金(No. LQ20F010009); 浙江省基础公益研究计划项目(No. LGF19F010003); 温州市重大科技创新攻关项目(No. ZG2021037)

Supported by National Key R&D Program of China (No. 2021YFF0600300); National Natural Science Foundation of China (No. 62001444, No. 62175223); Natural Science Foundation of Zhejiang Province (No. LQ20F010009); Basic Public Welfare Research Project of Zhejiang Province (No. LGF19F010003); Wenzhou City Major Scientific and Technological Innovation Projects (No. ZG2021037).

spectrum for trace organic analyte based on angle multiplexing of the dielectric metasurface. The substrate and the cross-unit structure of metasurface are both high-resistance silicon which has high- Q resonances. The resonance frequency of the metasurface under terahertz incident with different angles can cover 0.50–0.57 THz. When a lactose film with the thickness of 0.5–2.5 μm as analyte is placed on the metasurface, the amplitude of the resonance peak corresponding to each incident angle changes greatly with the absorption spectrum of the analyte. The enhanced absorption spectrum built by the resonance frequencies envelope is 82.59 times larger than that without the cross-unit structure. The simulation results show that the metasurface has great potential to enhance the terahertz absorption spectrum through angle multiplexing, and it can be used to detect trace organic substances with different characteristic peaks after optimized design.

Key words: terahertz; metasurface; absorption spectrum; angle multiplexing; enhancement

1 引言

太赫兹通常指频率为 0.1~10.0 THz (1 THz= 10^{12} Hz) 的电磁波^[1-2], 该波段空间分辨率比下临的微波波段更好, 穿透性也比上临红外线更强。不仅如此, 太赫兹的频段能够直接探测到有机生物分子的独特指纹谱, 在生物安全、国土安全、环境保护等领域具有巨大应用价值^[3-6]。然而, 微量物质的太赫兹吸收谱测量仍非常有挑战性。目前通过压片技术测量固体样品的太赫兹吸收谱, 通常需要几百毫克至几克的待测物。为了测量微量样品对太赫兹波的响应, 需要额外的增强结构增强待测物与电磁波的相互作用, 如光子晶体光纤^[7]、谐振腔^[8]、金属光栅^[9]、金属开口谐振环超表面^[10-11]、全介质超表面^[12]、石墨烯^[13]等结构。与可见光和红外波段类似^[14-16], 太赫兹亚波长结构阵列组成的超表面结构是一类主要的敏感结构^[17-18]。

然而, 目前多数太赫兹或其他波段超表面高灵敏度传感器是基于高 Q 谐振结构的单频率谐振峰随微量待测物折射率变化的原理制备的。这些高 Q 结构只能在单频点增强波与物质的相互作用, 不能识别微量待测物较宽的特征吸收谱。而参数复用太赫兹超表面可以利用多个不同尺寸单元结构的超表面或多个入射波角度产生一系列谐振峰增强波与物质的相互作用, 特别是这些谐振峰的峰值随待测物吸收谱的改变而改变, 包络线与待测物特征吸收谱的形状一致, 而幅度比未

增强吸收谱大幅度提高。该复用机制可以直接显著增强微量待测物的太赫兹指纹吸收谱, 因此拥有巨大的应用价值。

2019 年, A. Leitis 等人发现支持连续域束缚态 (Bound State in the Continuum, BIC) 的高 Q 全介质超表面在角度复用后, 谐振峰在中红外波段覆盖较宽频带, 特别是其峰值幅度随微量待测物的吸收谱发生等比例剧烈改变, 谐振峰包络组成的待测物吸收谱幅度是直接测量的 50 倍, 检测灵敏度可达 3000 分子/ μm^2 ^[19]。在他们另外的工作中, 相同单元结构经过几何复用后, 吸收谱增强了 60 倍^[20]。随后 Y. Zhong 等基于类似形状 BIC 结构利用角度复用得到了 5 μm 厚乳糖薄膜太赫兹增强吸收谱^[21], 探测灵敏度达到 59.35 $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。但该结构需要将硅片减薄和与石英基底键合, 制作工艺相对复杂。J. Zhu 等基于光栅结构利用角度复用的方法在红外波段模拟增强了 hBN 的吸收谱, 增加幅度大约为 31.6 倍左右^[22], 在太赫兹波段模拟增强了乳糖和 2.4-DNT 的吸收谱, 幅度平均达到 20 倍左右^[23]。

本文提出了一种基于角度复用介质超表面用于乳糖的太赫兹吸收谱增强。超表面由高阻硅衬底上的十字形硅阵列组成, 具有高 Q 谐振特性^[24], 同时与金属光栅或金属超表面相比, 该超表面的材料具有低损耗特性, 使得局域场的能量更多地被待测物而不是被金属结构吸收。这有利于进一步提高待测物吸收谱的增强效果。其单元结构为对称的十字结构, 与衬底材料相同, 减少了加工难度, 有利于实际应用。通过改变太赫兹波的入

射角度, 该介质超表面谐振峰频率可覆盖 0.50~0.57 THz。同时, 在该超表面上覆盖 0.5~2.5 μm 厚的 α -乳糖作为待测物时, 仿真分析了经超表面角度复用后的吸收谱。结果表明: 超表面吸收谱的谐振峰幅度随待测物的吸收谱大幅度改变, 其包络线组成的增强吸收谱比没有单元结构时增强最多可达 82.59 倍。仿真结果表明: 经过角度复用, 该介质超表面对增强太赫兹吸收谱方面有很大潜力, 经过针对不同波段的优化设计, 可用于检测不同特征峰微量有机物质, 尤其是制作工艺相对简单, 易于实际应用。

2 工作原理与结构设计

本文设计的介质超表面及角度复用结构工作原理如图 1(a)(彩图见期刊电子版) 所示, 由十字型结构周期性排列在衬底上组成, 结构与衬底都采用高阻硅, 太赫兹波段高阻硅的介电常数实部为 11.9, 虚部损耗很小, 仿真计算中不予考虑。图 1(b)(彩图见期刊电子版) 为介质超表面的单元结构, 其中单元周期 $p_x=175 \mu\text{m}$ 、 $p_y=145 \mu\text{m}$, 十字结构的硅条长度为 $l=145 \mu\text{m}$, 宽度为 $w=39 \mu\text{m}$, 高度为 $h=108 \mu\text{m}$, 衬底的厚度为 $t=48 \mu\text{m}$ 。为了验证超表面的吸收谱增强能力, 这里利用基于有限元方法的电磁仿真软件计算其太赫兹波段的响应特性, 仿真过程中将 x 和 y 方向设为周期性边界, z 方向设为开放边界, 同时 xoz 平面内太赫

兹 TM 波以入射角 α 入射到超表面上。多个入射角将得到多条响应曲线, 用于增强待测物的吸收谱。

接下来, 将研究太赫兹波入射角以及超表面单元几何参数与反射曲线中形成的高 Q 谐振峰的关系。已知高 Q 谐振峰意味着峰值频率对应的电磁波在介质超表面结构周围形成较强的局域场, 从而可以增强电磁波与超表面微量待测物间的相互作用, 是后续吸收谱增强的重要物理基础。 Q 值用以下公式计算

$$Q = \frac{f}{\Delta f}, \quad (1)$$

其中 f 是谐振频率, Δf 定义为反射率达到最高值一半时的谐振峰频谱宽度。

经过电磁仿真软件计算, 得到了改变太赫兹波入射角以及超表面单元几何参数时超表面在 0.5~0.6 THz 波段内的反射曲线, 如图 2(彩图见期刊电子版) 所示。其中太赫兹波入射角 α 的变化范围为 $0^\circ \sim 80^\circ$, 超表面单元结构中硅条长度 l 的变化范围为 80~160 μm , 宽度 w 的变化范围为 40~80 μm , 高度 h 的变化范围为 60~100 μm 。几何参数扫描时, 入射角度为 $\alpha=30^\circ$, 其他参数值与图 1 一致。通过优化单元结构使得谐振峰具有较高的 Q 值, 同时, 其位置接近 0.53 THz, 这样可以通过随后的大幅度角度扫描 (以 $\alpha=30^\circ$ 为中心), 使谐振峰位置覆盖以 0.53 THz 为中心的较宽频带。各参数扫描仿真结果如下: α 在 $0^\circ \sim 80^\circ$ 扫描时, 谐振峰发生红移, 基本覆盖范围为 0.5~0.6 THz; 其它几何参数扫描增加时, 谐振峰发生红移, 移动的范围比较小, 覆盖范围为 0.01 THz~0.03 THz。谐振频率随参数增加而红移的原因是扫描过程中角度变化或几何参数增加造成等效超表面谐振体积增加, 从而使响应的谐振频率变小。

同时, 图 3 给出了太赫兹波入射角改变以及单元几何参数扫描时超表面反射曲线对应的 Q 值变化情况。其中当入射角从 0° 增加到 80° , 以及 l 从 80 μm 增加到 160 μm , Q 值逐渐增加并保持在 100 以上, 表明单元结构具有良好的电磁场约束能力。同时当 h 从 60 μm 增加到 100 μm 以及 w 从 40 μm 增加到 80 μm 时, Q 值从 100 以上逐渐减少, 相应超表面的电磁场约束能力有所

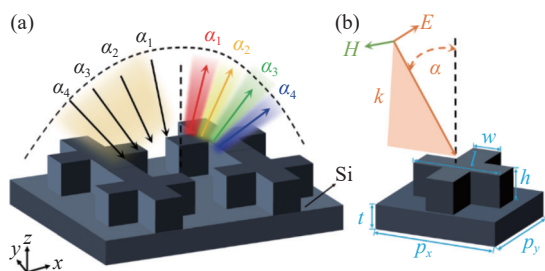


图 1 基于介质超表面角度复用的太赫兹吸收谱增强检测原理示意图。(a)全硅介质超表面角度复用原理; (b)超表面的单元结构

Fig. 1 Schematic diagram of enhanced detection of terahertz absorption spectrum based on dielectric metasurface angle multiplexing. (a) Angle multiplexing principle for all-silicon dielectric metasurface; (b) unit structure of the metasurface

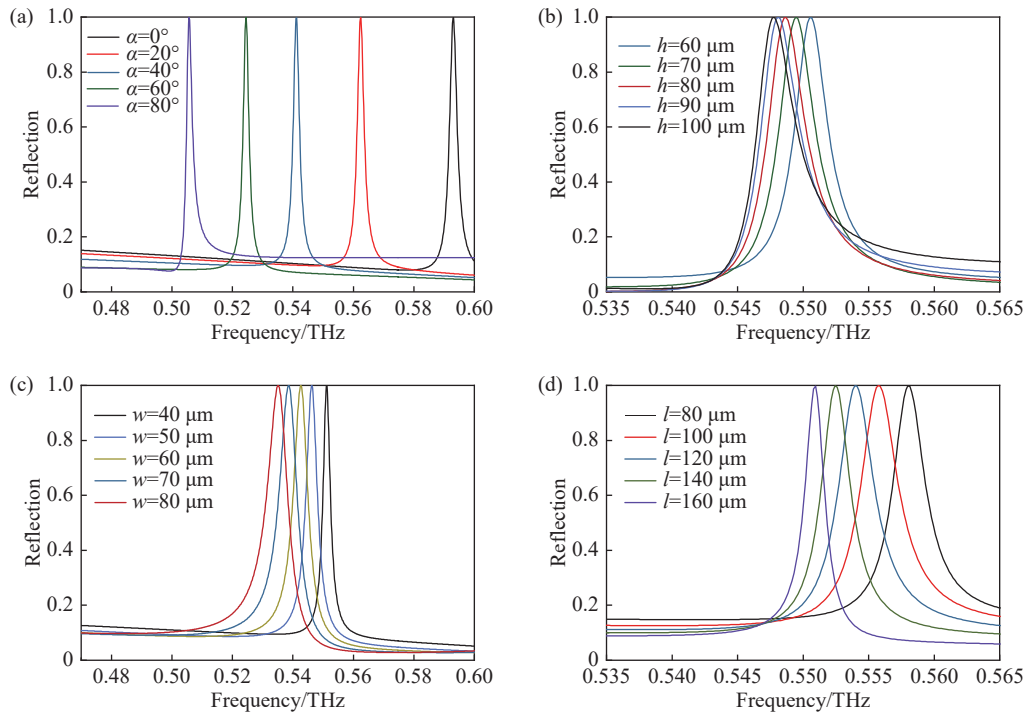


图 2 超表面的反射曲线随(a)太赫兹波入射角 α , (b) h , (c) w 及(d) l 的变化情况

Fig. 2 The reflections of the metasurface with changing of (a) the incident angle, (b) h , (c) w and (d) l

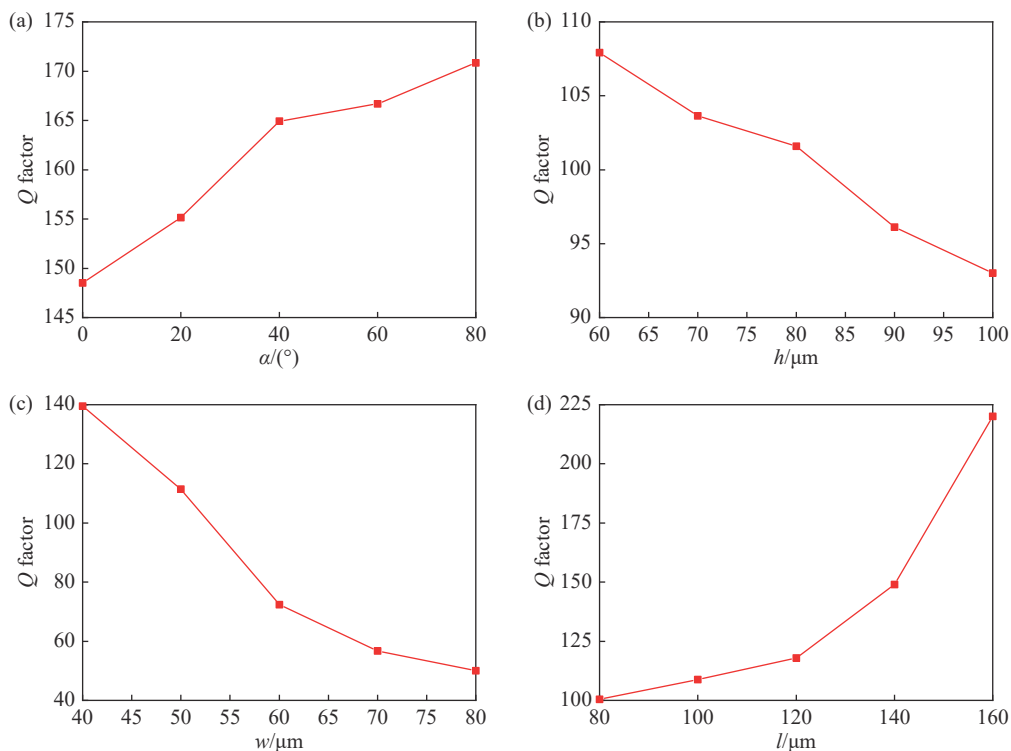


图 3 超表面反射曲线的 Q 值随(a)太赫兹波入射角, (b)高度 h , (c)宽度 w 及(d)长度 l 的变化情况

Fig. 3 Q values of the reflection curve of the metasurface varying with (a) the incident angle of the terahertz wave, (b) h , (c) w and (d) l

减弱。根据仿真结果综合考虑加工制作难度, 确定几何参数 l , w 和 h 的值, 图 1 所示, 作为超表

面角度复用时用于待测物太赫兹吸收谱增强的最终方案。

3 结果和讨论

为了验证本文提出的超表面对于微量待测物太赫兹吸收谱增强的有效性, 采用 α -乳糖作为待测物进行仿真验证。 α -乳糖是一种大分子有机物, 广泛用作分析试剂、生物培养基等, 在 0.529、1.20 和 1.38 THz 等频率附近具有较大的吸收系数, 形成具有指纹特征的吸收峰^[16]。这里把 0.529 THz 处的特征吸收峰作为吸收谱增强的目

标频率。 α -乳糖在 0.529 THz 附近的介电常数如图 4(a)(彩图见期刊电子版) 所示, 可以用一阶洛伦兹模型表示^[25]

$$\varepsilon_r(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\Delta\varepsilon_p \omega_p^2}{\omega_p^2 - \omega^2 - j\gamma_p \omega}, \quad (2)$$

式中, ε_∞ 表示高频介电常数, ω_p 和 γ_p 分别表示谐振角频率和阻尼率, $\Delta\varepsilon_p$ 是振荡强度因子, 这里 $\varepsilon_\infty = 3.145$, $\omega_p = 0.529 \times 2\pi \times 10^{11} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$, $\gamma_p = 1.59 \times 10^{11} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $\Delta\varepsilon_p = 0.052$ 。

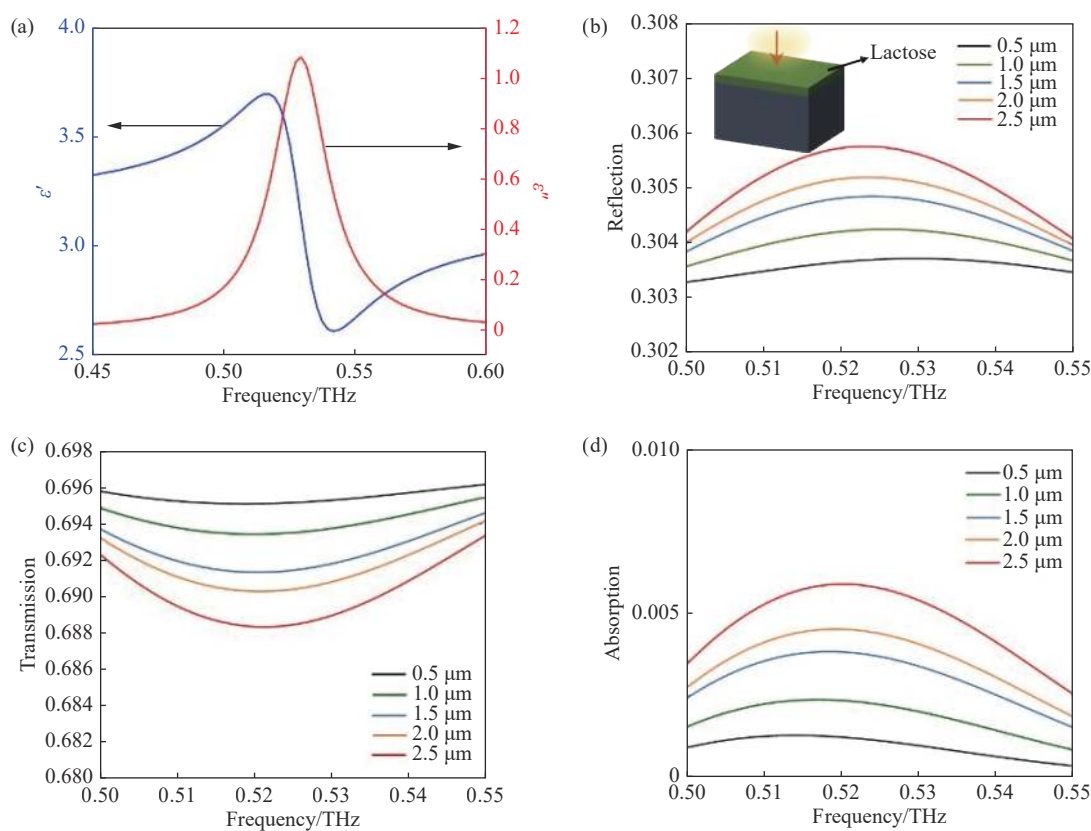


图 4 α -乳糖在 0.45 THz~0.6 THz 范围内的介电常数以及硅基底上涂布乳糖薄膜的响应曲线(0.50 THz~0.55 THz)。(a) 介电常数; (b) 反射率; (c) 透射率; (d) 吸收率

Fig. 4 The dielectric constant of α -lactose at 0.45 THz~0.6 THz and the response curve of a film of lactose coated on a silicon (0.50 THz~0.55 THz). (a) dielectric constant; (b) reflectance; (c) transmittance; (d) absorptivity

如果直接在硅基底涂敷 0.5~2.5 μm 厚的乳糖薄膜, 太赫兹波垂直入射时, 经过有限元仿真计算得到的反射率、透射率和吸收率如图 4(b)~4(d) (彩图见期刊电子版) 所示。这里吸收率 a 由以下公式计算

$$a = 1 - t - r, \quad (3)$$

其中, t 是透射率, r 是反射率。

图 4(d) 是在硅基底上直接涂敷 α -乳糖薄膜

的吸收率曲线, 可以看到在 0.53 THz 附近直接测量的峰值吸收率非常小, 对于 2 μm 乳糖薄膜只有 0.006 左右。这在实际测量中很容易被噪声淹没, 无法测量。因此, 需要利用超表面提供局域增强的电磁场增强与待测物的相互作用。如图 5(a) 所示, 在十字形单元表面涂敷 2 μm 薄膜, 太赫兹 TM 入射角从 0° 增加到 80°, 步长为 5°。从图 5(b) 和图 5(c) 可以看到: 在没有涂敷乳糖薄膜

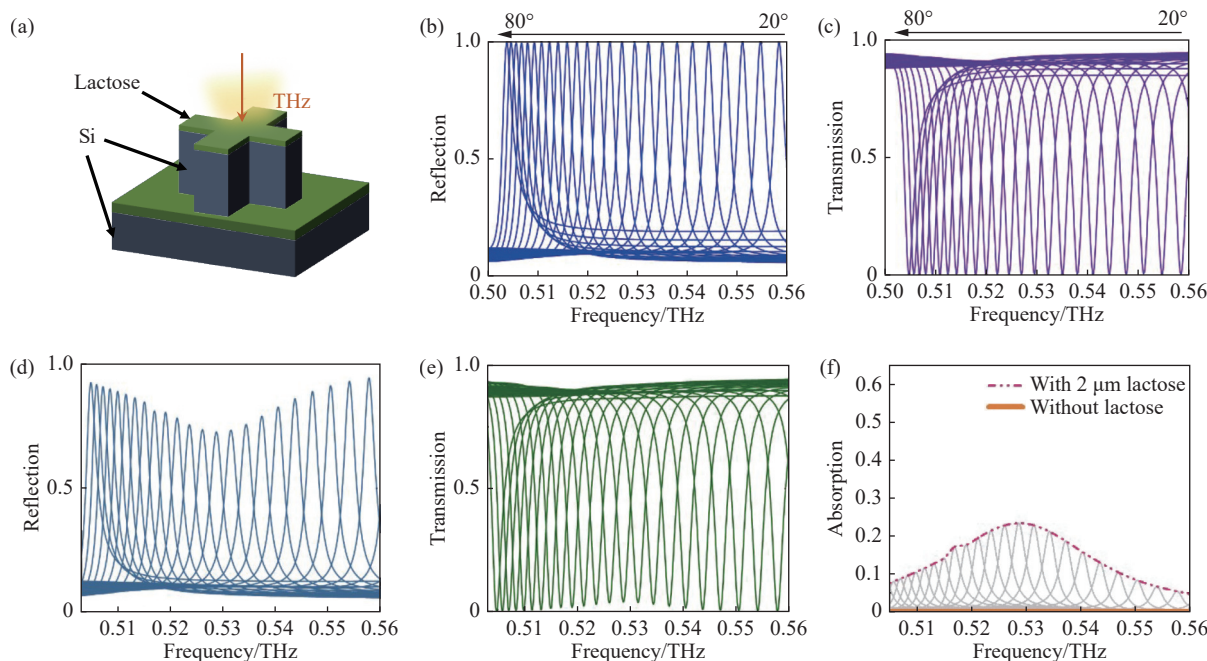


图 5 基于角度复用介质超表面的乳糖太赫兹吸收谱增强。(a)涂敷乳糖薄膜的介质超表面单元结构;(b)超表面没有涂敷乳糖的反射率;(c)超表面没有涂敷乳糖时的透射率;(d)超表面涂敷 $2\ \mu\text{m}$ 乳糖的反射率;(e)超表面涂敷 $2\ \mu\text{m}$ 乳糖的透射率;(f)超表面涂敷 $2\ \mu\text{m}$ 乳糖的吸收率与无涂敷情况对比

Fig. 5 Enhancement of the terahertz absorption spectrum of lactose on the dielectric metasurface based on angle multiplexing. (a) The metasurface unit structure of the medium coated with lactose film; (b) the reflectance of the metasurface without lactose coating; (c) the transmittance of the metasurface without lactose coating; (d) the reflection of metasurface coated with $2\ \mu\text{m}$ lactose; (e) the transmittance of metasurface coated on the $2\ \mu\text{m}$ lactose; (f) absorption of metasurface with and without lactose coating

的时候,超表面的反射率和透射率的谐振峰幅度随入射角变化时基本保持不变。而从图 5(d)和图 5(e)可以看到:在涂敷 $2\ \mu\text{m}$ 乳糖薄膜时,超表面的反射率和透射率的谐振峰幅度随入射角的变化发生显著变化。图 5(f)为由公式(3)计算出的随入射角变化时的超表面吸收率,这些谐振峰连接而成的包络线可以作为增强的乳糖吸收谱。具有十字单元的超表面增强后的乳糖薄膜吸收谱(谐振峰包络线)与没有十字单元衬底上直接仿真计算的乳糖薄膜吸收谱相比,吸收谱峰值幅度增强了 51.67 倍。由此看出,本文提出的介质超表面对微量待测物吸收谱的增强效果非常明显。

为了进一步说明本文提出的介质超表面吸收谱增强机理,给出了涂有 $2\ \mu\text{m}$ 乳糖薄膜的单元结构在 4 个不同入射角度下谐振频率的电场强度分布。如图 6(a)~6(d)(彩图见期刊电子版)所示,这 4 个角度分别是 25° 、 35° 、 45° 和 55° ,对应的谐振频率分别为 0.561、0.543、0.529、0.517 THz。可以看出:当谐振频率接近乳糖特征

吸收 0.529 THz 时,图 6(b)和 6(c)所示的十字硅棒周围的场强分布要高于图 6(a)和 6(d)所示的场强分布。这说明乳糖薄膜的吸收峰和介质超

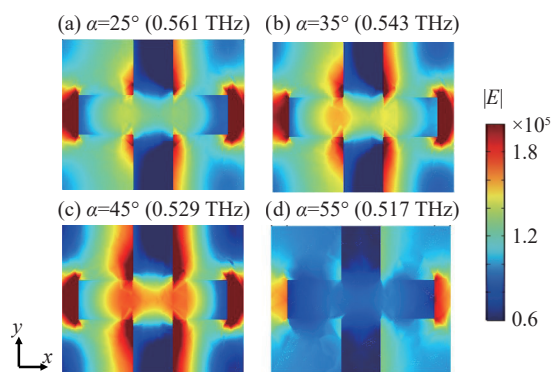


图 6 涂有乳糖薄膜介质超表面在角度复用时的电场分布。(a) $\alpha=25^\circ$ (0.561 THz); (b) $\alpha=35^\circ$ (0.543 THz); (c) $\alpha=45^\circ$ (0.529 THz); (d) $\alpha=55^\circ$ (0.517 THz)

Fig. 6 Electric field distributions of the dielectric metasurface coated with lactose film by multiplexing incident angle. (a) $\alpha=25^\circ$ (0.561 THz); (b) $\alpha=35^\circ$ (0.543 THz); (c) $\alpha=45^\circ$ (0.529 THz); (d) $\alpha=55^\circ$ (0.517 THz)

表面的吸收谐振峰发生有效的耦合,而且随着频率的变化,乳糖吸收率可以显著影响超表面吸收谐振峰所在频率的电场强度,从而达到增强乳糖吸收谱的效果。

在进一步研究中发现:乳糖的厚度也会影响吸收谱增强效果。本文研究了介质超表面涂敷0.5~2.5 μm 乳糖薄膜的吸收谱增强效果,厚度变化步长为0.5 μm 。经过介质超表面谐振峰的提取和包络链接可以得到各个厚度乳糖的增强吸收谱曲线,如图7(a)~7(e)(彩图见期刊电子版)所示。

7(f)(彩图见期刊电子版)给出了不同厚度乳糖的增强吸收谱曲线,可以发现增强吸收谱的峰值随乳糖厚度的增加而增加,但是增加的幅度逐渐变小。对比没有增强结构硅片上的相同厚度的薄膜乳糖,可以发现介质超表面对于0.5 μm 乳糖吸收谱峰值增强了82.59倍;对于1.0 μm 乳糖增强了71.16倍;对于1.5 μm 乳糖谱增强了55.87倍;对于2.0 μm 乳糖增强了51.67倍;对于2.5 μm 乳糖增强了45.35倍。

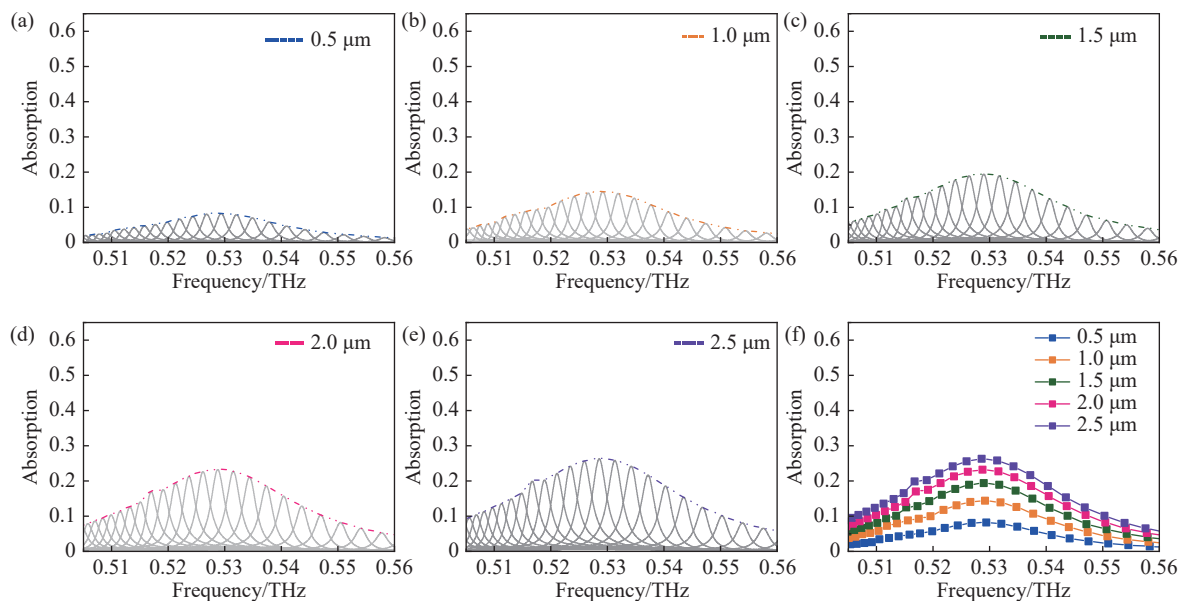


图7 介质超表面涂敷不同厚度乳糖的增强吸收谱。(a)0.5 μm 乳糖;(b)1.0 μm 乳糖;(c)1.5 μm 乳糖;(d)2.0 μm 乳糖;(e)2.5 μm 乳糖;(f)0.5~2.5 μm 乳糖增强吸收谱(包络曲线)

Fig. 7 Enhanced absorption spectra of dielectric metasurface coated with different thicknesses of lactose. (a) 0.5 μm lactose; (b) 1.0 μm lactose; (c) 1.5 μm lactose; (d) 2.0 μm lactose; (e) 2.5 μm lactose; (f) 0.5~2.5 μm lactose enhanced absorption spectra as envelope curves

为了进一步说明本文结构对微量样品太赫兹吸收谱的增强效果,表1列出了目前基于介质超表面或超光栅结构的最大增强倍数。结果表明本

文所提出的介质超表面吸收谱增强效果有较大提高,具有测量更加微量物质的太赫兹特征吸收谱的能力。

表1 本文结构与其它介质超表面或超光栅结构的吸收谱增强效果对比

Tab. 1 Comparison of absorption enhancement performances for the structure proposed in this paper and other metasurfaces and metaragratings

文献	单元结构	分析物	复用模式	工作波段	增强倍数
[16]	介质柱	PMMA	入射角	中红外	~50 倍
[17]	介质柱	PMMA	几何尺寸	中红外	~60 倍
[19]	介质光栅	α -lactose	入射角	太赫兹	~20 倍
[20]	介质光栅	hBN	入射角	中红外	~30 倍
本文	高阻硅十字	α -lactose	入射角	太赫兹	~80 倍

4 结 论

本文设计了一种基于角度复用太赫兹吸收谱增强介质超表面。超表面的单元结构由高阻硅衬底上的十字形硅阵列组成,可激发高 Q 谐振响应曲线。首先通过有限元电磁仿真软件模拟和分析不同几何参数对谐振峰 Q 值以及与谐振频率和入射角的关系,实现了 Q 因子、谐振峰频率可调谐范围针对特定待测物即乳糖薄膜的优化。设计结果是当 TM 偏振模式太赫兹波以 $20^\circ\sim 80^\circ$ 的入射角入射超表面,得到的谐振峰频率可覆盖 0.50~

0.57 THz, Q 值达到 100 以上。在该介质超表面上覆盖 $0.5\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 的 α -乳糖作为待测物,逐渐改变入射角度,吸收曲线谐振峰幅度随待测物的吸收谱大幅度改变,其包络线组成的吸收谱比直接测量的增强最多 82.59 倍。本文提出的基于角度复用的太赫兹吸收谱增强高 Q 介质超表面,在针对特定待测物进行优化后,其吸收谱得到有效增强,为对其进行微量甚至痕量检测提供有力工具。本文所设计的结构通过角度复用可以覆盖 0.5~0.57 THz 的频率范围,其它太赫兹频率范围可以通过改变单元结构结合角度复用覆盖,因此该结构具有更宽频率吸收谱增强的潜力。

参考文献:

- [1] ZHANG X CH, XU J ZH. *Introduction to THz Wave Photonics* [M]. Boston: Springer, 2010.
- [2] TONOUCI M. Cutting-edge terahertz technology[J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(2): 97-105.
- [3] SHEN J X, ZHU ZH J, ZHANG Z CH, *et al.*. Ultra-broadband terahertz fingerprint spectrum of melatonin with vibrational mode analysis[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2021, 247: 119141.
- [4] XU W D, XIE L J, ZHU J F, *et al.*. Terahertz biosensing with a graphene-metamaterial heterostructure platform[J]. *Carbon*, 2019, 141: 247-252.
- [5] FEDERICI J F, SCHULKIN B, HUANG F, *et al.*. THz imaging and sensing for security applications—explosives, weapons and drugs[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2005, 20(7): S266-S280.
- [6] ZHAN H L, ZHAO K, BAO R M, *et al.*. Monitoring PM_{2.5} in the atmosphere by using terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2016, 37(9): 929-938.
- [7] SULTANA J, ISLAM M S, AHMED K, *et al.*. Terahertz detection of alcohol using a photonic crystal fiber sensor[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(10): 2426-2433.
- [8] YEE C M, SHERWIN M S. High- Q terahertz microcavities in silicon photonic crystal slabs[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(15): 154104.
- [9] WANG Y H, LI X J, LANG T T, *et al.*. Multiband guided-mode resonance filter in bilayer asymmetric metallic gratings[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 103: 135-141.
- [10] GUPTA M, SRIVASTAVA Y K, MANJAPPA M, *et al.*. Sensing with toroidal metamaterial[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(12): 121108.
- [11] GOMON D, SEDYKH E, RODRÍGUEZ S, *et al.*. Influence of the geometric parameters of the electrical ring resonator metasurface on the performance of metamaterial absorbers for terahertz applications[J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(1): 47-59.
- [12] HAN S, CONG L Q, SRIVASTAVA Y K, *et al.*. All-dielectric active terahertz photonics driven by bound states in the continuum[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(37): 1901921.
- [13] ZHOU J Y, YAN SH, LI CH W, *et al.*. Perfect ultraviolet absorption in graphene using the magnetic resonance of an all-dielectric nanostructure[J]. *Optics Express*, 2018, 26(14): 18155-18163.
- [14] LONG ZH W, LIANG Y ZH, FENG L, *et al.*. Low-cost and high sensitivity glucose sandwich detection using a plasmonic nanodisk metasurface[J]. *Nanoscale*, 2020, 12(19): 10809-10815.
- [15] YESILKOY F, ARVELO E R, JAHANI Y, *et al.*. Ultrasensitive hyperspectral imaging and biodetection enabled by dielectric metasurfaces[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(6): 390-396.
- [16] LIANG Y ZH, CUI W L, LI L X, *et al.*. Large-scale plasmonic nanodisk structures for a high sensitivity biosensing platform fabricated by transfer nanoprinting[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(7): 1801269.
- [17] 李向军, 候小梅, 程钢, 等. 基于柔性基底动态调焦石墨烯超表面聚焦反射镜的仿真研究[J]. *中国光学*, 2021,

- 14(4): 1019-1028.
- LI X J, HOU X M, CHENG G, *et al.*. Simulation on tunable graphene metasurface focusing mirror based on flexible substrate[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(4): 1019-1028. (in Chinese)
- [18] 林婧, 李琦, 邱孟, 等. 人工原子间耦合: 超构表面调控电磁波的新自由度[J]. *中国光学*, 2021, 14(4): 717-735.
- LIN J, LI Q, QIU M, *et al.*. Coupling between Meta-atoms: a new degree of freedom in metasurfaces manipulating electromagnetic waves[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(4): 717-735. (in Chinese)
- [19] LEITIS A, TITTL A, LIU M K, *et al.*. Angle-multiplexed all-dielectric metasurfaces for broadband molecular fingerprint retrieval[J]. *Science Advances*, 2019, 5(5): eaaw2871.
- [20] TITTL A, LEITIS A, LIU M K, *et al.*. Imaging-based molecular barcoding with pixelated dielectric metasurfaces[J]. *Science*, 2018, 360(6393): 1105-1109.
- [21] ZHONG Y J, DU L H, LIU Q, *et al.*. Ultrasensitive specific sensor based on all-dielectric metasurfaces in the terahertz range[J]. *RSC Advances*, 2020, 10(55): 33018-33025.
- [22] XIE Y N, LIU X Y, LI F J, *et al.*. Ultra-wideband enhancement on mid-infrared fingerprint sensing for 2D materials and analytes of monolayers by a metagrating[J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(9): 2927-2935.
- [23] ZHU J F, JIANG SH, XIE Y N, *et al.*. Enhancing terahertz molecular fingerprint detection by a dielectric metagrating[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(8): 2335-2338.
- [24] RYBIN M V, KOSHELEV K L, SADRIEVA Z F, *et al.*. High- Q supercavity modes in subwavelength dielectric resonators[J]. *Physical Review Letters*, 2017, 119(24): 243901.
- [25] SHI X M, HAN ZH H. Enhanced terahertz fingerprint detection with ultrahigh sensitivity using the cavity defect modes[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 13147.

作者简介:



李向军(1976—),男,山西长治人,博士,副教授,2011年于浙江大学获得博士学位,主要从事太赫兹器件研究。E-mail: xiangjun_li@cjlu.edu.cn



严德贤(1991—),男,肃武威人,博士,副教授,2018年于天津大学获得博士学位,浙江大学博士后,主要从事太赫兹源及器件研究。E-mail: yandexian1991@163.com