

单壁碳纳米管太赫兹超表面窄带吸收及其传感特性*

张向¹⁾ 王玥^{1)†} 张婉莹¹⁾ 张晓菊¹⁾ 罗帆¹⁾
宋博晨¹⁾ 张狂²⁾ 施卫¹⁾

1) (西安理工大学, 陕西省超快光电技术与太赫兹科学重点实验室, 西安 710054)

2) (哈尔滨工业大学电子与信息工程学院, 哈尔滨 150001)

(2023年8月20日收到; 2023年9月27日收到修改稿)

由于碳纳米管具有优异的电学和光学特性, 因此在光电子学领域具有广泛的应用前景. 本文使用真空抽滤法, 将单壁碳纳米管粉末分散液通过真空过滤的方式, 制备了一种各向同性的单壁碳纳米管薄膜; 进而提取了薄膜在 0.4—2.0 THz 范围内介电参数, 并设计了一种基于单壁碳纳米管薄膜的新型太赫兹超表面窄带吸收器, 这种超表面吸收器是由方形与工字形狭缝谐振器构成. 实验和仿真结果表明, 提出的太赫兹超表面吸收器在 0.65, 0.85, 1.16 和 1.31 THz 处存在 4 个明显的共振吸收峰, 实现了最高可达 90% 的完美吸收. 利用多重反射干涉理论阐明了这种多频带新型太赫兹超表面的吸收机制. 通过在超表面器件表面覆盖具有不同折射率的介质层, 深入研究了超表面作为折射率传感器的传感性能. 研究表明, 这种新型超表面吸收器用于折射率传感具有较高的灵敏度, 为进一步开发新型碳基太赫兹超表面吸收器提供了新的思路 and 方案.

关键词: 单壁碳纳米管薄膜, 太赫兹, 超表面, 折射率传感

PACS: 61.46.Np, 87.50.U-, 78.67.Pt, 42.81.Pa

DOI: 10.7498/aps.73.20231357

1 引言

太赫兹波 (THz) 因其光子能量低, 穿透性强, 以及光谱信息丰富等独特特性引起了研究人员的广泛关注^[1-5]. 特别是在生物和化学传感领域, 由于大多数生物大分子的振动和转动频率都落到了 THz 的波段范围^[6-8], 使得 THz 光谱成为一种新的且很有前途的技术, 可以实现生物化学物质的无损、无标记和非接触式传感与检测^[9-13]. 然而, 对于微量物质检测单纯使用 THz 时域光谱检测灵敏度较低. 因此, 将 THz 波和超表面传感芯片相结合用

于微量生物和化学物质的高灵敏度和选择性检测, 克服了传统 THz 光谱检测的灵敏度限制, 受到了研究人员的广泛关注. 超表面是一种由亚波长尺寸周期性结构阵列组成的人工材料, 相较于天然材料, 可以在亚波长尺度上对电磁波的幅值、相位和极化等参数进行调控^[14-17], 被广泛应用于构建小型化和集成化的 THz 功能器件^[18-20]. 此外, THz 超表面具有强的局域化电磁场增强效应, 对周围介电环境变化极为敏感, 这极大增强了 THz 波与微量及痕量分析物之间的相互作用, 进一步提高了 THz 光谱检测的效率和检测灵敏度. 然而, 虽然传统的基于金属和介质材料的 THz 超表面器件在微

* 国家自然科学基金 (批准号: 61975163)、陕西省重点研发计划 (批准号: 2023GXJH-038)、陕西省青年创新团队建设项目 (批准号: 21JP084)、西安市科技局重点产业链关键核心技术攻关项目 (批准号: 23LLRH0057)、西安理工大学博士学位论文创新基金和陕西省自然科学基金 (批准号: 2020JZ-48) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wangyue2017@xaut.edu.cn

量生物化学物质传感检测方面取得了显著的进展, 但是为了克服金属材料自身高的欧姆损耗以及进一步扩展 THz 超表面传感检测的实际应用范围, 开发与探索基于新型材料的超表面器件及其共振机制具有重要意义.

碳纳米管是一种具有特殊结构的新型一维量子材料. 尤其是高质量的单壁碳纳米管 (SWCNTs) 薄膜在 THz 频率范围内不仅具有高导电性、导热性以及较好的柔韧性 [21,22], 且具有优异的生物相容性以及可修饰性. 这些特性使得 SWCNT 在 THz 超表面微量生物化学传感器 [23-26] 以及刚性和柔性透明电子和光电子 [27] 等领域显示出了重要的应用潜力 [28].

本文设计并制备了一种可激发表面等离子体共振的新型 SWCNTs 薄膜 THz 超表面窄带吸收器, 它是由具有周期性亚波长阵列结构的 SWCNT 薄膜、聚酰亚胺介质层以及底部的金属反射层构成. 当 TE 极化的 THz 波照射到超表面吸收器表面时, 器件在 0.2—1.4 THz 范围内存在 4 个明显的共振吸收峰, 最大吸收率可达 90%, 非共振吸收较低. 通过分析单元结构中电场的分布, 定性地描述了这种超表面吸收器的共振模式. 此外, 利用多

重反射干涉原理研究了这种超表面吸收器的吸收物理机制, 理论计算、仿真及实验测试结果具有较好的一致性. 进一步详细分析了器件对周围环境物质折射率变化的敏感性, 结果显示, 在 1.31 THz 谐振点处, 该超表面吸收器的折射率传感灵敏度为 121 GHz/RIU. 因此, 作为对传统 THz 超表面器件的补充, 本文提出的这种新型超表面器件在 THz 波段作为传感器、探测器和其他光电器件具有重要的潜在应用.

2 器件的结构与设计

图 1(a) 展示了提出的基于 SWCNTs 薄膜的新型多频段窄带共振 THz 超表面吸收器件的单元结构. 超表面吸收器自上而下由具有谐振单元的 SWCNTs 薄膜、聚酰亚胺介质层以及底部金属反射层构成, 如图 1(b) 所示. 使用传统激光刻蚀技术对超表面器件进行了图案化加工, 其显微图像如图 1(c) 所示. 顶部图案化结构单元包括外部方形和内部工字形两种狭缝结构, 外部方形狭缝的最大边长为 $b = 104 \mu\text{m}$ 、线宽为 $f = 10 \mu\text{m}$, 内部工字形狭缝的线宽为 $g = 8 \mu\text{m}$. 超表面单元结构的周期

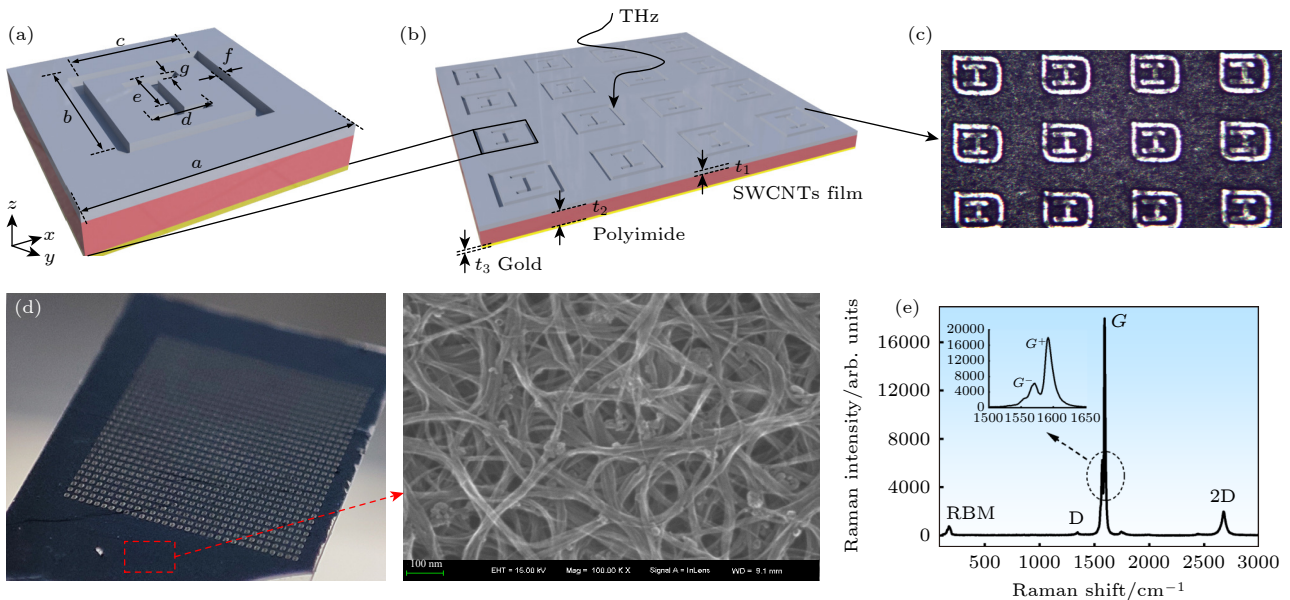


图 1 (a) 基于 SWCNTs 薄膜的 THz 超表面吸收器微结构单元, 其结构参数为: $a = 190 \mu\text{m}$, $b = 104 \mu\text{m}$, $c = 84 \mu\text{m}$, $d = 54 \mu\text{m}$, $e = 40 \mu\text{m}$, $f = 10 \mu\text{m}$, $g = 8 \mu\text{m}$; (b) 周期性结构列; (c) 制备的超表面结构显微照片; (d) 制备的超表面窄带吸收器以及 SWCNTs 薄膜的表面形貌照片; (e) SWCNTs 薄膜的拉曼光谱 (波长 532 nm)

Fig. 1. (a) The microstructure unit of THz metasurface absorber based on carbon nanotubes, the structural parameter is $a = 190 \mu\text{m}$, $b = 104 \mu\text{m}$, $c = 84 \mu\text{m}$, $d = 54 \mu\text{m}$, $e = 40 \mu\text{m}$, $f = 10 \mu\text{m}$, $g = 8 \mu\text{m}$; (b) periodic structure array; (c) microscopic photos of metasurface structure and (d) photos of prepared metasurface absorbers and surface morphology of SWCNTs thin films; (e) Raman Spectrum of SWCNTs films (at the wavelength of 532 nm).

为 $a = 190 \mu\text{m}$, 工字形狭缝沿 x 和 y 方向的长度分别为 $d = 54 \mu\text{m}$, $e = 40 \mu\text{m}$. 聚酰亚胺层厚度为 $t_2 = 15 \mu\text{m}$, 介电常数为 3.5. 底部金属层的厚度为 $t_3 = 200 \text{nm}$, 其电导率为 $4.56 \times 10^7 \text{S/m}$, 顶部采用真空抽滤法制备的各向同性 SWCNTs 薄膜, 其厚度为 $t_1 = 2 \mu\text{m}$. 图 1(d) 展示了实验制备的超表面器件及通过真空抽滤法制备的 SWCNTs 薄膜表面形貌显微照片. 结果显示, SWCNTs 薄膜在聚酰亚胺衬底上呈无序网状分布. 进一步, 利用拉曼光谱技术对 SWCNTs 薄膜的成膜质量进行了表征. 如图 1(e) 所示, 通过对 SWCNTs 薄膜的拉曼光谱主要特征峰 (约 200cm^{-1} 的径向呼吸模式 (RBM), 约 1350cm^{-1} 的 D 模式和约 1600cm^{-1} 的 G 模式 (G/D 比为 60) 和约 2620cm^{-1} 的 2D 模式) 的光谱位置和强度的分析, 充分说明和验证了实验制备的这种各向同性 SWCNTs 薄膜具有纯度高、结构缺陷少等特点.

进一步利用透射式 THz 时域光谱系统对制备的 SWCNTs 薄膜在室温干燥空气环境下的 THz

光谱特性进行了表征. 图 2(a) 中的蓝色和红色实线分别表示了 SWCNTs 薄膜样品信号和干燥空气的 THz 时域信号. 当各向同性网状结构 SWCNTs 薄膜和 THz 波相互作用时, 由于薄膜对 THz 波具有强的吸收特性, 样品的 THz 电场明显减弱.

另外, 基于 THz 透射时域光谱技术的光学参数提取方法获得了 SWCNTs 薄膜 0.4—2.0 THz 范围内的介电参数. SWCNTs 薄膜的复透射率随频率的变化关系遵循下列关系 [29–31]:

$$\tilde{t}(\omega) = \frac{E_{\text{SWCNTs}}(\omega)}{E_{\text{air}}(\omega)} = T(\omega) e^{i\phi(\omega)}, \quad (1)$$

其中, 透射率 $T(\omega)$ 和相对相位变化 $\phi(\omega)$ 直接由 THz 时域光谱系统测量获得. 复折射率的实部和虚部的一般表达式分别为 $n_r = \phi(\omega) \lambda / (2\pi d)$, $n_i(\omega) = \alpha(\omega) c / (2\omega)$, 其中, $\alpha(\omega)$ 是 SWCNTs 薄膜样品在 THz 范围内的吸收功率系数, 直接由实验测试结果获得, 如图 2(b) 所示. d 为样品的厚度, λ 为自由空间波长. 进一步根据复折射率与介电常数和电导率实部、虚部的关系, 可以获得 SWCNTs

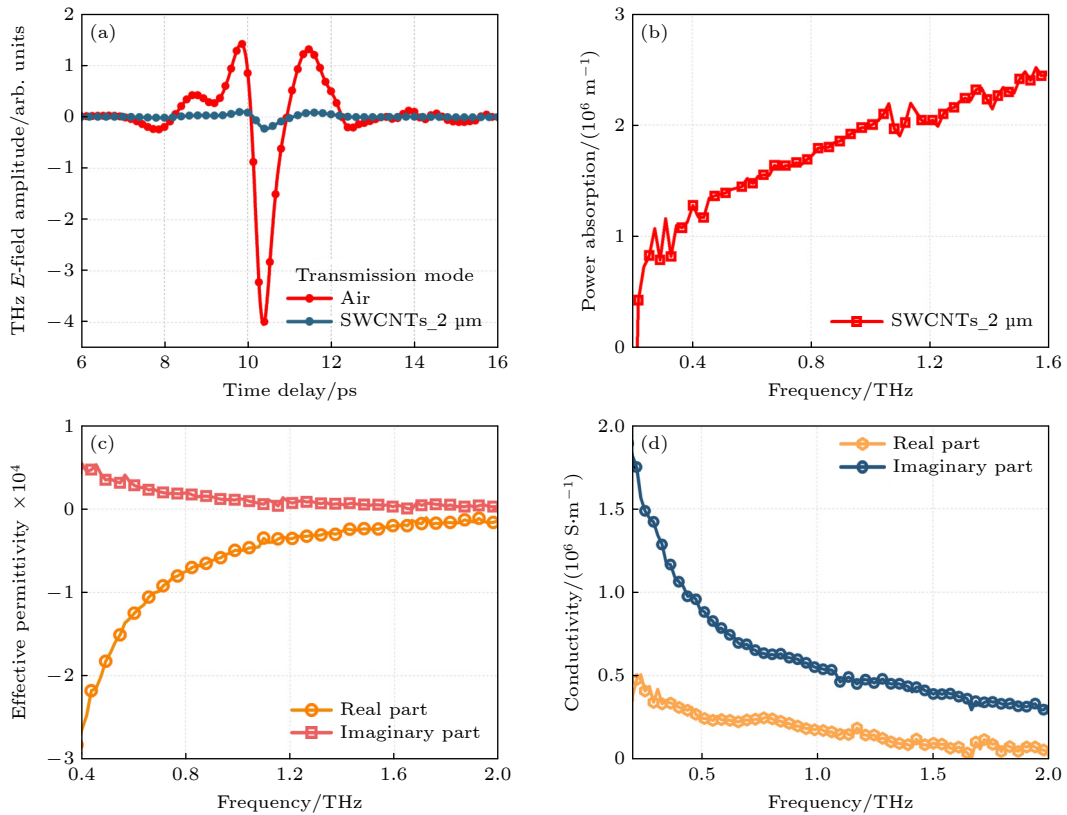


图 2 (a) SWCNTs 薄膜样品和自由空间参考的时域太赫兹时间信号; (b) 在 0.2—1.6 THz 范围内的功率吸收系数; (c) 提取的 SWCNTs 薄膜在 0.4—2.0 THz 范围内的介电常数; (d) 电导率

Fig. 2. (a) Time-domain terahertz signals of SWCNTs film samples and free-space references; (b) power absorption coefficient in the range of 0.2–1.6 THz; (c) effective permittivity of extracted SWCNTs films in the range of 0.4–2.0 THz; (d) electrical conductivity.

薄膜的介电常数以及电导率与频率的变化关系. 在这项研究中, 仿真建模过程中 SWCNTs 薄膜所采用的复介电常数及电导率分别如图 2(c) 和图 2(d) 所示, 其中方块和圆圈分别表示 SWCNTs 薄膜介电常数和电导率的虚部与实部.

3 结果与讨论

入射 THz 波在 TE 极化条件下 SWCNTs THz 超表面吸收光谱如图 3 所示. 吸收器的吸收率通常可以表示为 $A = 1 - (|S_{11}|^2 - |S_{21}|^2)$. 由于该吸收器底层存在金属层, THz 波的透射为零, 因此表达式可以简化为 $A = 1 - |S_{11}|^2$. 仿真结果显示, 当 TE 波入射时, 超表面吸收器在 0.2—1.4 THz 范围内存在 4 个明显的共振吸收峰, 分别将其标记为模式 I—IV, 最大吸收率可达 99%, 最小吸收超过了 75%, 非共振吸收较低, 如图 3(b) 所示. 将上述 4 种共振吸收模式的品质因数 (Q) 定义为 [32]

$$Q = \frac{f}{\text{FWHM}}, \quad (2)$$

这里, f 为共振频率位置, FWHM 为共振吸收峰的吸收带宽 (半峰全宽). 由 (2) 式可得, 模式 I—IV 的品质因数分别为 34, 30, 28, 20. 结果表明, 由于吸收带宽较窄, 这种超表面吸收器具有较强的频率

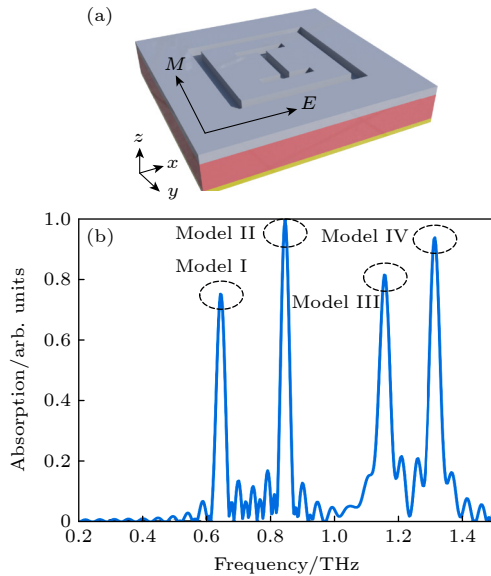


图 3 (a) 超表面 TE 极化条件下结构单元示意图; (b) 在 TE 极化下超表面的共振吸收幅值与频率的关系

Fig. 3. (a) Schematic diagram of structural units under metasurface TE polarization; (b) the relationship between the resonant absorption amplitude and frequency of the metasurface under TE polarization.

选择性. 其次, 在 TE 极化下这种超表面吸收器共振吸收峰表现的高 Q 值, 有望用于微量物质的高灵敏传感及检测.

为了更好地解释这种多频段窄带超表面吸收器的吸收机制, 研究了 TE 极化时吸收器在 4 个共振频率位置处 (0.65, 0.85, 1.16, 1.31 THz) 沿 x - y 平面的电场分布, 分别如图 4(a)—(d) 所示. 由图 4 可知, 当 THz 波照射到器件表面时, 器件表现出明显的等离子体共振, 模式 I 的电场主要集中在到了方形狭缝的内侧与工字形狭缝中. 与之相反的是, 模式 II 的电场分布主要在方形狭缝外侧, 内部电场分布较少. 模式 III 的主要共振位置为工字形狭缝和方形狭缝外侧, 模式 IV 主要为工字形狭缝. 上述结果表明, 由于外部方形狭缝与内部工字形狭缝的共振耦合, 这种超表面器件可同时在 4 个共振频点激发表面等离子体共振, 进而实现多频段窄带吸收.

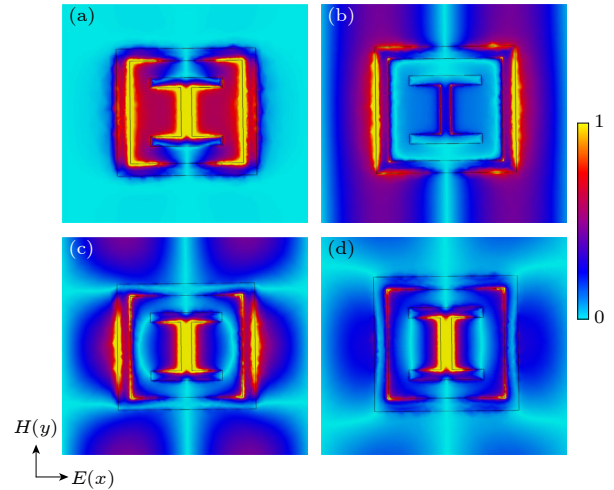


图 4 TE 极化时超表面在 x - y 平面内的电场分布 (a) 共振模式 I, $f = 0.65$ THz; (b) 共振模式 II, $f = 0.85$ THz; (c) 共振模式 III, $f = 1.16$ THz; (d) 共振模式 IV, $f = 1.31$ THz

Fig. 4. Field distribution of metasurface in x - y plane during TE polarization: (a) resonance mode I, $f = 0.65$; (b) resonance mode II, $f = 0.85$ THz; (c) resonance mode III, $f = 1.16$ THz; (d) resonance mode IV, $f = 1.31$ THz.

另一方面, 由于 THz 超表面是由周期性排列的亚波长结构组成, 当周围环境的介电常数或者结构几何形状发生微小变化时, 器件共振频率会受到影响. 这里, 首先分析了 SWCNTs 表面周期性微结构的关键几何参数 (周期 a 、工字形狭缝的线宽 g 、方形狭缝的线宽 f) 对器件吸收共振特性的影响.

如图 5(a) 所示, 当超表面结构单元的周期 a 逐渐减小时, 相邻结构单元之间的间隙减小, 结构之间的近场耦合增大. 对于相对更高频且共振敏感区域在方形狭缝外部的第 II 共振模式、第 III 共振模式, 出现了明显的蓝移. 通过图 4(a)—(d) 电场分布可以看出, 共振吸收模式 I, III 和 IV 在工字形狭缝处都具有明显的电场分布. 图 5(b) 显示了具有不同线宽工字形狭缝的超表面吸收器的共振吸收变化 ($g = 2, 4, 6, 8, 10 \mu\text{m}$). 结果显示, 当工字形狭缝的线宽变化时, 模式 I, III 和 IV 的共振频率位置发生了明显的变化, 相较于模式 I 和 III, 模式 II 的变化较小. 上述结果进一步验证了模式 I, III 和 IV 为提出的这种超表面吸收器的基本共振模式, 也验证了图 4(a)—(d) 电场分布的准确性. 同样, 当外部方形狭缝的线宽 f 和周期 b 发生变化时, 超表面的共振模式也发生了明显的变化, 如图 5(c) 和图 5(d) 所示.

利用多重反射干涉理论解释了这种多波段 THz 超表面吸收器的吸收机制. 如图 6(a) 所示, 根据干涉理论, 当 THz 波照射到顶部 SWCNTs 超表面时, 其被视作一层匀质薄膜作为部分反射层, 可以

反射/透射部分入射的 THz 辐射. 这里, SWCNTs 薄膜表面的反射定义为直接反射, 其复反射系数为 [33,34]

$$\tilde{r}_{12} = r_{12} \exp(i\phi_{12}). \quad (3)$$

另一部分 THz 波进入聚酰亚胺介质层, 此时复透射系数为

$$\tilde{t}_{12} = t_{12} \exp(i\theta_{12}). \quad (4)$$

值得注意的是, 当 THz 波进入聚酰亚胺介质层后直至到达金属反射层的过程中, 存在一个较为复杂的传播过程, 其多重反射相位延迟可以表示为

$$\tilde{\beta} = \beta_r + i\beta_i = \sqrt{\tilde{\epsilon}_{\text{spacer}}} k_0 d, \quad (5)$$

这里, k_0 为自由空间波数, β_r 为传播相位, β_i 为空间中的吸收, d 表示介质层厚度. 将第二次返回超表面层的复反射系数和复透射系数定义为 r_{12} 和 t_{21} , 与分层介质中的光传播规律类似, 根据 (3) 式、(4) 式和 (5) 式, 提出的这种超表面吸收器多重叠加后的整体复反射系数可以表示为

$$\tilde{r} = \tilde{r}_{12} - \frac{\tilde{t}_{12}\tilde{t}_{21} \exp(2i\tilde{\beta})}{1 + \tilde{r}_{21} \exp(2i\tilde{\beta})}, \quad (6)$$

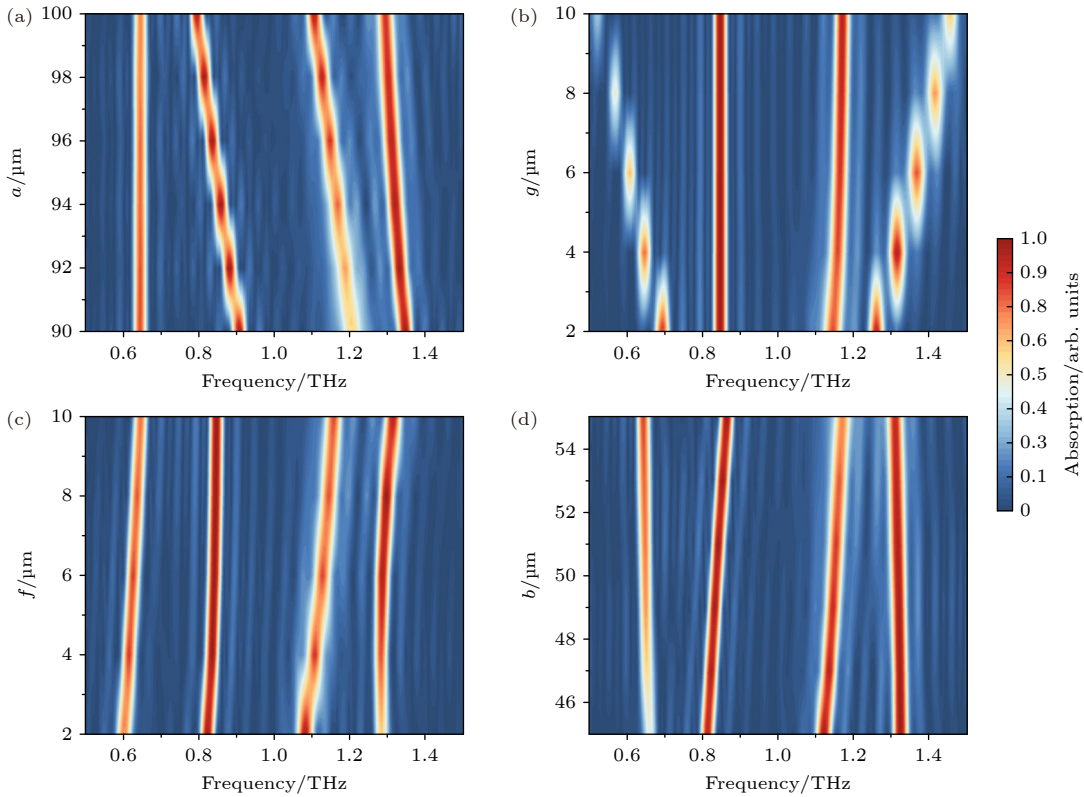


图 5 超表面微结构变化时模拟的器件吸收光谱 (a) 周期 a ; (b) 工字形狭缝的线宽 g ; (c) 方形狭缝的线宽 f ; (d) 方形狭缝的周期 b
 Fig. 5. Simulated absorption spectrum of the device when the metasurface unit structures change: (a) The period a ; (b) the line width of the I-slit g ; (c) the linear width of the square slit f ; (d) period b of the square slit.

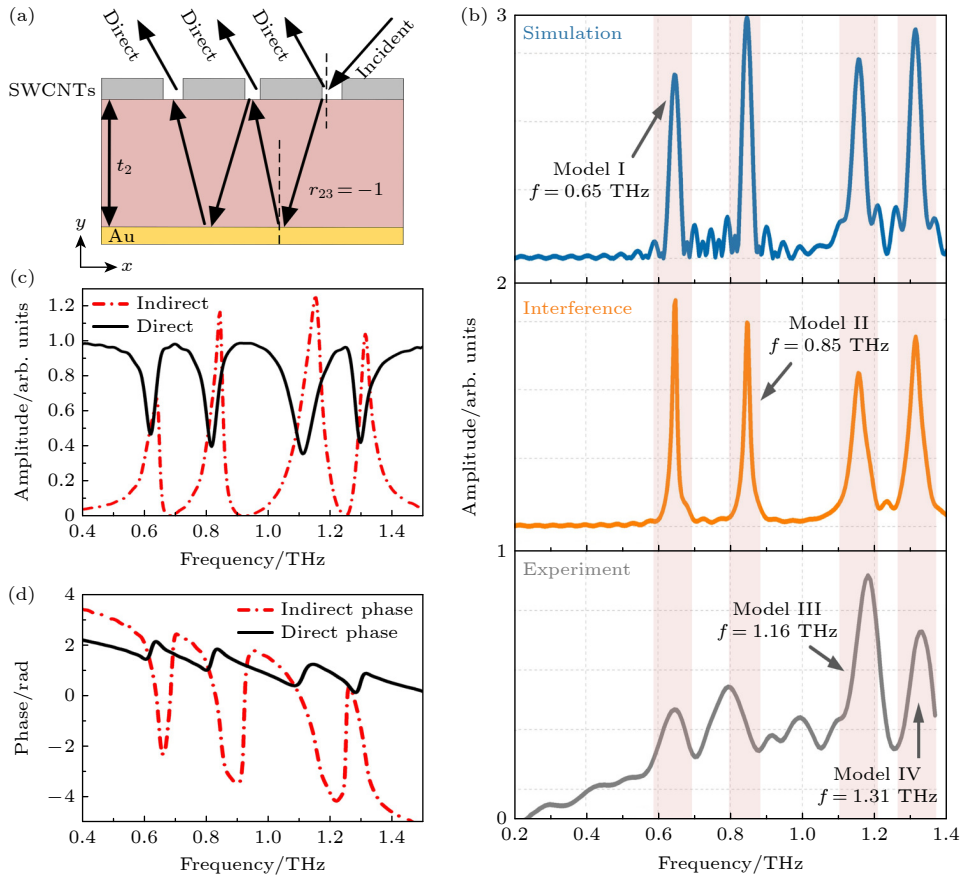


图 6 (a) 通过干涉理论计算界面复反射系数的物理模型; (b) 实验测试以及通过干涉理论计算和仿真得到的吸收光谱; (c) 计算得到的直接反射幅值和间接反射幅值; (d) 直接反射相位和间接反射相位

Fig. 6. (a) Physical model for calculating interface complex reflection coefficient through interference theory; (b) experimental tests and absorption spectra obtained by interference theory calculations and simulations; (c) the calculated direct reflection amplitude and indirect reflection amplitude; (d) direct reflection phase and indirect reflection phase.

式中, 第一项代表超表面层的直接反射, 第二项表示超表面微结构阵列和金属反射层之间的多次反射叠加产生的反射. 因此, 根据 (6) 式及吸收和反射系数的变换关系获得了超表面器件的吸收光谱, 如图 6(b) 所示. 可以看出, 理论计算和仿真模拟结果具有较好的一致性. 图 6(c) 和图 6(d) 分别显示了超表面微结构单元的缝隙处的直接和间接反射系数以及相位. 此外, 对加工的这种超表面结构进行了测试, 图 6(c) 的实验测试结果清晰地展示了超表面器件在 0.65, 0.85, 1.16 及 1.31 THz 位置处的共振吸收, 通过与仿真及理论计算对比, 测试的谐振吸收峰共振频率位置与仿真结果基本一致. 然而由于加工误差的存在, 实测不同谐振模式下的吸收峰幅值大小略有差异.

最后, 在超表面吸收器微结构表面负载介质层后, 通过研究在这种窄带吸收器的共振吸收峰频率位置随介质层折射率的变化关系, 验证了提出的这

种超表面吸收器用于折射率传感的可行性. 如图 7(a) 所示, 当超表面器件表面覆盖分析物层时, 模式 I, III 和 IV 三个主要共振模式的共振频率位置发生了明显的红移, 模式 II 的变化相对较小. 如图 7(b) 和图 7(c) 所示, 当分析物层折射率 (n) 由 1.3 逐渐增加到 1.7 过程中, 模式 III 和 IV 的共振频率分别由 1.155 THz 移动到了 1.086 THz 和由 1.314 THz 移动到了 1.23 THz. 图 7(d) 显示了共振频率随折射率变化的趋势, 在这两种共振模式下共振频率随折射率的变化分别遵循 $f = 1256.7 - 98.6n$ (GHz) 和 $f = 1432.5 - 121n$ (GHz) 的线性变化关系, 线性拟合优度高达 $R^2 = 0.99$. 为了进一步评价器件的传感性能, 将检测灵敏度 S 定义为

$$S = \Delta f / \Delta n. \quad (7)$$

根据 (7) 式, 这种超表面吸收器用于折射率传感时, 共振模式 III 和 IV 所表现出的传感灵敏度

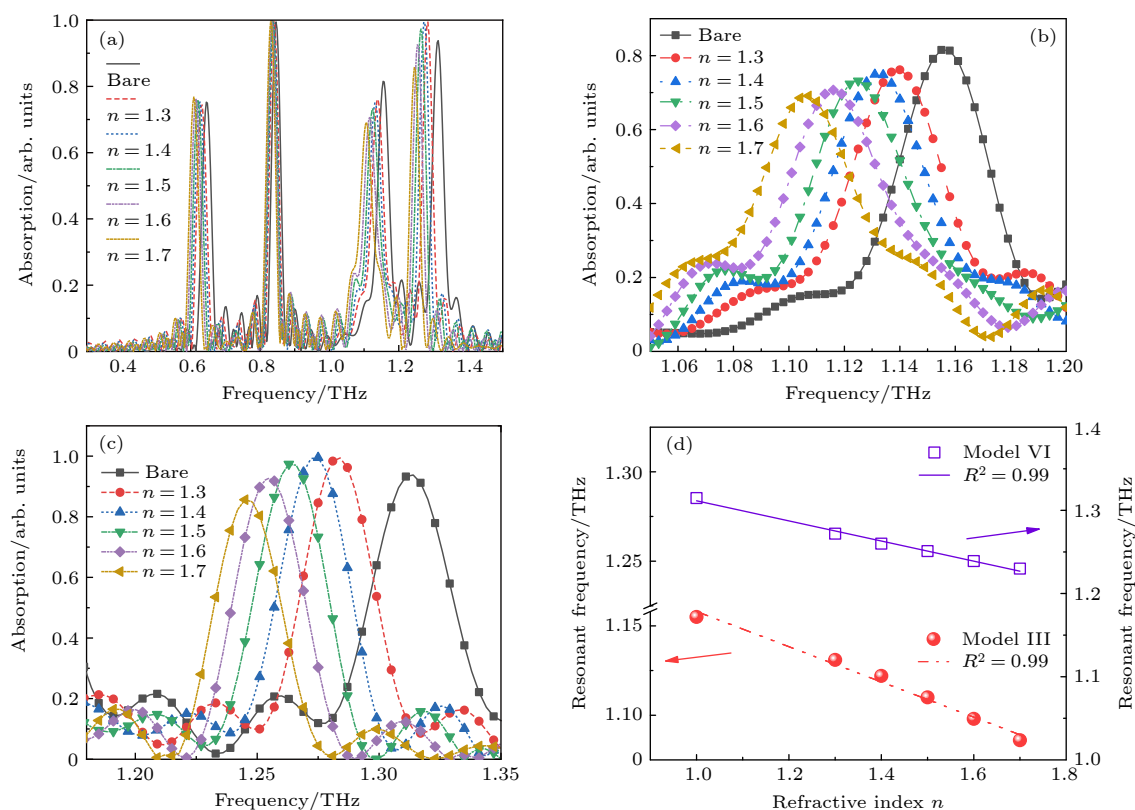


图 7 (a) 添加不同折射率的分析物后提出的这种 THz 超表面传感器的吸收光谱; (b) 共振模式 III 的缩放图; (c) 共振模式 IV 的缩放图; (d) 两种共振模式下共振频率 (方形和圆形符号) 随分析物折射率的变换和线性拟合 (实线和虚线)

Fig. 7. (a) The absorption spectra of the THz metasurface sensor proposed after adding analytes with different refractive indexes; the zoom view on (b) resonance mode III and (c) resonance mode IV; (d) transformation and linear fitting of resonance frequency (square and circular symbols) with the refractive index of analyte under two resonance modes (solid line and dotted line).

分别为 98.6 GHz/RIU 和 121 GHz/RIU. 因此, 所提出的这种基于 SWCNTs 薄膜的 THz 超表面吸收器在 THz 区域用于折射率传感具有高的灵敏度.

4 结 论

本文基于实验提取的 SWCNTs 薄膜介电参数, 设计并制备了一种可用于折射率传感的新型 SWCNTs 窄带 THz 超表面吸收器. 实验测试结果表明, TE 波入射条件下, 这种超表面吸收器在共振频率为 0.846 THz 时的吸收率可达 90%. 电场分布结果表明, 当 THz 波入射到超表面吸收器表面时, 超表面周期性阵列结构同时在 4 个共振频点激发的表面等离子共振是器件共振吸收的主要原因. 此外, SWCNTs 表面的亚波长微结构单元的几何参数的细微变化对超表面吸收器的吸收性能有显著影响. 采用多重干涉理论阐述了这种超表面吸收器吸收特性的物理机制, 理论计算和仿真结果具有较好的一致性. 最后, 将提出的这种超表面吸

收器用作折射率传感器时, 其共振模式 III 和 IV 所表现出的灵敏度分别为 98.6 和 121 GHz/RIU. 研究结果为进一步开发用于微量生物化学物质的多功能传感器提供了一种新的选择和潜在的可能.

参考文献

- [1] Chen Y Q, Liu H B, Deng Y Q, Schauki D, Fitch M J, Osiander R, Dodson C, Spicer J B, Shur M, Zhang X C 2004 *Chem. Phys. Lett.* **400** 357
- [2] Chen H Y, Liu H, Zhang Z M, Hu K, Fang X S 2016 *Adv. Mater.* **28** 403
- [3] Shi W, Wang Y Z, Hou L, Ma C, Yang L, Dong C G, Wang Z Q, Wang H Q, Guo J, Xu S L, Li J 2021 *J. Biophotonics* **14** e202000237
- [4] Abouelsayed A, Anis B, Eisa W H 2020 *J. Phys. Chem. C* **124** 18243
- [5] Shi C J, Zhu J, Xu M Q, Wu X, Peng Y 2020 *Sci. Program.* **2020** 8841565
- [6] He M X, Chen T 2013 *J. Electron. Meas. Instrum.* **26** 471 (in Chinese) [何明霞, 陈涛 2012 电子测量与仪器学报 **26** 471]
- [7] Qin J Y, Xie L J, Ying Y B 2016 *Food Chem.* **211** 300
- [8] Cheng R J, Xu L, Yu X, Zou L, Shen Y, Deng X H 2020 *Opt. Commun.* **473** 125850
- [9] Yan X, Yang M S, Zhang Z, Liang L J, Wei D Q, Wang M,

- Zhang M J, Wang T, Liu L H, Xie J H, Yao J Q 2019 *Biosens. Bioelectron.* **126** 485
- [10] Liu L, Li T F, Liu Z, Fan F, Yuan H F, Zhang Z Y, Chang S J, Zhang X D 2020 *Biomed. Opt. Express* **11** 2416
- [11] Peng X Y, Zhou H 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 240701 (in Chinese) [彭晓昱, 周欢 2021 物理学报 **70** 240701]
- [12] Zhao R, Zou B, Zhang G L, Xu D Q, Yang Y P 2020 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **53** 195401
- [13] Tan L, Guo Y, Shu Z, Xu K D 2023 *Opt. Express* **31** 2039
- [14] Peng Z, Zheng Z S, Yu Z S, Lan H T, Zhang M, Wang S X, Li L, Liang H W, Su H 2023 *Opt. Laser Technol.* **157** 108723
- [15] Hu F R, Xu X, Li P, Xu X L, Wang Y e 2017 *Chin. Phys. B* **26** 074219
- [16] Huang C C, Zhang Y G, Liang L J, Yao H Y, Yan X, Liu W J, Qiu F 2022 *Optik* **262** 169348
- [17] Pang J X, Dai Z J, Fu Z Q, Chen J, Wang F C, Yang J 2023 *Opt. Commun.* **527** 128975
- [18] Wang Y, Cui Z J, Zhang X J, Zhang D C, Zhang X, Zhou T, Wang X 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 247802 (in Chinese) [王玥, 崔子健, 张晓菊, 张达麓, 张向, 周韬, 王暄 2021 物理学报 **70** 247802]
- [19] Ren Z H, Chang Y H, Ma Y M, Shih K L, Dong B W, Lee C 2019 *Adv. Opt. Mater.* **8** 1900653
- [20] Beruete M, Jáuregui-López I 2019 *Adv. Opt. Mater.* **8** 1900721
- [21] Wang Y, Zhang X, Zhang X J, Zhou T, Cui Z J, Zhang K 2022 *J. Mater. Chem. A* **10** 1780
- [22] Wang Y, Cui Z J, Zhang X J, Zhang X, Zhu Y Q, Chen S G, Hu H 2020 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **12** 52082
- [23] Wang R Q, Xu W D, Chen D H, Zhou R Y, Wang Q, Gao W L, Kono J, Xie L J, Ying Y B 2020 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **12** 40629
- [24] Rasheed T, Nabeel F, Adeel M, Rizwan K, Bilal M, Iqbal H M N 2019 *J. Mol. Liq.* **292** 111425
- [25] De Volder M F L, Tawfick S H, Baughman R H, Hart A J 2013 *Science* **339** 535
- [26] Zhukova E S, Grebenko A K, Bubis A V, Prokhorov A S, Belyanchikov M A, Tsapenko A P, Gilshteyn E P, Kopylova D S, Gladush Y G, Anisimov A S, Anzin V B, Nasibulin A G, Gorshunov B P 2017 *Nanotechnology* **28** 445204
- [27] Zhao B H, Sivasankar V S, Dasgupta A, Das S 2021 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **13** 10257
- [28] Zhang X, Wang Y, Cui Z J, Zhang X J, Chen S G, Zhang K, Wang X 2021 *Opt. Mater. Express* **11** 1470
- [29] Naftaly M, Miles R E 2007 *Proc. IEEE* **95** 1658
- [30] Duvillaret L, Garet F, Coutaz J L 1996 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **2** 739
- [31] Nguema E, Vigneras V, Miane J L, Moumaix P 2008 *Eur. Polym. J.* **44** 124
- [32] Ou H L, Lu F Y, Xu Z F, Lin Y S 2020 *Nanomaterials* **10** 1038
- [33] Chen H T 2012 *Opt. Express* **20** 7165
- [34] Chen H T, Zhou J, O'Hara J F, Chen F, Azad A K, Taylor A J 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 073901

Narrow band absorption and sensing properties of the THz metasurface based on single-walled carbon nanotubes^{*}

Zhang Xiang¹⁾ Wang Yue^{1)†} Zhang Wan-Ying¹⁾ Zhang Xiao-Ju¹⁾
Luo Fan¹⁾ Song Bo-Chen¹⁾ Zhang Kuang²⁾ Shi Wei¹⁾

1) (*Key Laboratory of Ultrafast Photoelectric and Terahertz Science in Shaanxi, Xi'an University of Technology, Xi'an 710054, China*)

2) (*School of Electronics and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

(Received 20 August 2023; revised manuscript received 27 September 2023)

Abstract

Due to their excellent electrical and optical properties, carbon nanotubes have broad application prospects in the field of optoelectronics. In this work the vacuum filtration method is used to obtain an isotropic single-walled carbon nanotube film by the dispersion of single-walled carbon nanotube powder through vacuum filtration; on the basis of extracting the dielectric parameters of the thin film in a range from 0.4 to 2.0 THz, a novel terahertz metasurface narrowband absorber based on single-walled carbon nanotube films is designed and prepared. This metasurface absorber is composed of square and I-shaped narrow slot resonators. The experimental and simulation results show that the proposed terahertz metasurface absorber exhibits four distinct resonance absorption peaks at 0.65, 0.85, 1.16, and 1.31 THz, respectively, achieving a perfect absorption of up to 90%. The absorption mechanism of this novel multi band terahertz metasurface is elucidated by using the theory of multiple reflection interference. By covering dielectric layers with different refractive indices on the surface of metasurface device, the sensing performance of metasurface acting as refractive index sensor is studied in depth. The research results indicate that this new type of metasurface absorber has high sensitivity for refractive index sensing, providing new ideas and solutions for further developing carbon-based new terahertz metasurface absorbers.

Keywords: single-walled carbon nanotube thin film, terahertz, metasurface, refractive index sensor

PACS: 61.46.Np, 87.50.U-, 78.67.Pt, 42.81.Pa

DOI: [10.7498/aps.73.20231357](https://doi.org/10.7498/aps.73.20231357)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61975163), the Key Research and Development Program of Shaanxi Province, China (Grant No. 2023GXLH-038), the Youth Innovation Research Team of Shaanxi Higher Education Universities, China (Grant No. 21JP084), the Key Core Technology Research Project for Strategic Industry Chains of Xi'an Science and Technology Bureau, China (Grant No. 23LLRH0057), the Doctoral Dissertation Innovation Fund of Xi'an University of Technology, China, and the Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China (Grant No. 2020JZ-48).

† Corresponding author. E-mail: wangyue2017@xaut.edu.cn



单壁碳纳米管太赫兹超表面窄带吸收及其传感特性

张向 王玥 张婉莹 张晓菊 罗帆 宋博晨 张狂 施卫

Narrow band absorption and sensing properties of the THz metasurface based on single-walled carbon nanotubes

Zhang Xiang Wang Yue Zhang Wan-Ying Zhang Xiao-Ju Luo Fan Song Bo-Chen Zhang Kuang Shi Wei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 026102 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231357

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231357>

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

相变材料与超表面复合结构太赫兹移相器

Terahertz phase shifter based on phase change material-metasurface composite structure

物理学报. 2021, 70(7): 074201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201495>

基于反射超表面产生太赫兹涡旋波束

Terahertz vortex beam generation based on reflective metasurface

物理学报. 2019, 68(23): 238101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191055>

基于双开口谐振环超表面的宽带太赫兹涡旋光束产生

Broadband terahertz vortex beam generation based on metasurface of double-split resonant rings

物理学报. 2019, 68(10): 108701 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182147>

基于纳米印刷技术的双螺旋太赫兹可调超表面

Nano-printing technology based double-spiral terahertz tunable metasurface

物理学报. 2022, 71(11): 117801 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212408>

太赫兹波段电磁超材料吸波器折射率传感特性

Refractive index sensing characteristics of electromagnetic metamaterial absorber in terahertz band

物理学报. 2021, 70(3): 038102 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201054>

基于向日葵型圆形光子晶体的高灵敏度太赫兹折射率传感器

High sensitivity terahertz refractive index sensor based on sunflower-shaped circular photonic crystal

物理学报. 2019, 68(20): 207801 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191024>