

# 光电工程

## Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊  
Scopus CSCD

### 基于连续域束缚态的全介质太赫兹超表面及其等效参数研究

贾兴宁, 王猛, 赵悦晗, 赵睿琦, 逯贵祯

#### 引用本文:

贾兴宁, 王猛, 赵悦晗, 等. 基于连续域束缚态的全介质太赫兹超表面及其等效参数研究[J]. 光电工程, 2025, 52(2): 240274.

Jia X N, Wang M, Zhao Y H, et al. All-dielectric terahertz metasurface based on bound states in the continuum and the research of its equivalent parameter[J]. *Opto-Electron Eng*, 2025, 52(2): 240274.

<https://doi.org/10.12086/oe.2025.240274>

收稿日期: 2024-11-25; 修改日期: 2025-01-15; 录用日期: 2025-01-15

### 相关论文

#### Efficient generation of vectorial terahertz beams using surface-wave excited metasurfaces

Zhuo Wang, Weikang Pan, Yu He, Zhiyan Zhu, Xiangyu Jin, Muhan Liu, Shaojie Ma, Qiong He, Shulin Sun, Lei Zhou  
*Opto-Electronic Science* 2025, 4(1): 240024 doi: [10.29026/oes.2025.240024](https://doi.org/10.29026/oes.2025.240024)

#### Racemic dielectric metasurfaces for arbitrary terahertz polarization rotation and wavefront manipulation

Jie Li, Xueguang Lu, Hui Li, Chunyu Song, Qi Tan, Yu He, Jingyu Liu, Li Luo, Tingting Tang, Tingting Liu, Hang Xu, Shuyuan Xiao, Wanxia Huang, Yun Shen, Yan Zhang, Yating Zhang, Jianquan Yao  
*Opto-Electronic Advances* 2024, 7(10): 240075 doi: [10.29026/oea.2024.240075](https://doi.org/10.29026/oea.2024.240075)

#### Hybrid bound states in the continuum in terahertz metasurfaces

Junxing Fan, Zuolong Li, Zhanqiang Xue, Hongyang Xing, Dan Lu, Guizhen Xu, Jianqiang Gu, Jianguang Han, Longqing Cong  
*Opto-Electronic Science* 2023, 2(4): 230006 doi: [10.29026/oes.2023.230006](https://doi.org/10.29026/oes.2023.230006)

#### 基于硫属化物相变材料的可重构太赫兹超表面器件的研究进展

张寿俊, 曹曦, 田震

光电工程 2023, 50(9): 230142 doi: [10.12086/oe.2023.230142](https://doi.org/10.12086/oe.2023.230142)

更多相关论文见光电期刊集群网站 



光电工程  
Opto-Electronic Engineering

<http://cn.ojournal.org/oe>



 OE\_Journal



Website

# 基于连续域束缚态的全介质太赫兹超表面及其等效参数研究

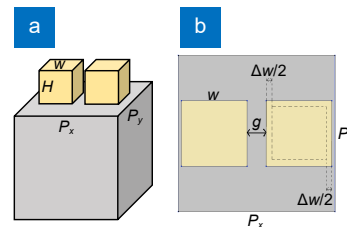
贾兴宁<sup>1</sup>, 王 猛<sup>2\*</sup>, 赵悦晗<sup>2</sup>, 赵睿琦<sup>3</sup>, 逯贵祯<sup>4</sup>

<sup>1</sup>宁夏大学电子与电气工程学院, 宁夏 银川 750021;

<sup>2</sup>天津理工大学集成电路科学与工程学院, 天津 300384;

<sup>3</sup>中国科学院空天信息创新研究院山东省低空监测网技术重点实验室, 山东 济南 250000;

<sup>4</sup>中国传媒大学媒体融合与传播国家重点实验室, 北京 100024



**摘要:** 本研究提出了一种基于连续域束缚态 (bound states in the continuum, BIC) 的全介质太赫兹超表面。超表面的每个结构单元由两个横截面为正方形的矩形块和衬底组成。衬底材料为石英, 表面矩形块材料为无折射率损耗的硅。矩形块横截面面积的改变破坏了超表面的对称性, 激发了准 BIC, 得到了具有极窄线宽的谐振。采用有限元方法 (finite element method, FEM) 和控制变量法研究了不同非对称参数、结构参数和材料参数下的透射光谱。同时, 对所提出的超表面的  $Q$  值进行了计算, 其  $Q$  值可达  $1.1006 \times 10^4$ , 高于列出的相关文献中的  $Q$  值。此外, 该研究针对目前对全介质超表面等效参数的研究相对较少的局限性, 利用  $S$  参数提取法计算并分析了所提出的超表面的等效参数, 并从该角度初步研究了超表面的物理性质。

**关键词:** 太赫兹超表面; 连续域束缚态; 全介质; 等效参数

**中图分类号:** O441.4

**文献标志码:** A

贾兴宁, 王猛, 赵悦晗, 等. 基于连续域束缚态的全介质太赫兹超表面及其等效参数研究 [J]. 光电工程, 2025, 52(2): 240274  
Jia X N, Wang M, Zhao Y H, et al. All-dielectric terahertz metasurface based on bound states in the continuum and the research of its equivalent parameter[J]. Opto-Electron Eng, 2025, 52(2): 240274

## All-dielectric terahertz metasurface based on bound states in the continuum and the research of its equivalent parameter

Jia Xingning<sup>1</sup>, Wang Meng<sup>2\*</sup>, Zhao Yuehan<sup>2</sup>, Zhao Ruiqi<sup>3</sup>, Lu Guizhen<sup>4</sup>

<sup>1</sup>School of Electronic and Electrical Engineering, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China;

<sup>2</sup>School of Integrated Circuit Science and Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China;

<sup>3</sup>Shandong Key Laboratory of Low-altitude Airspace Surveillance Network Technology, QILU Aerospace Information Research Institute (AIR), Chinese Academy of Sciences (CAS), Jinan, Shandong 250000, China;

<sup>4</sup>State Key Laboratory of Media Convergence and Communication, Communication University of China, Beijing 100024, China

收稿日期: 2024-11-25; 修回日期: 2025-01-15; 录用日期: 2025-01-15

基金项目: 宁夏重点研发计划 (2021BEB04068); 宁夏自然科学基金 (2024AAC03046)

\*通信作者: 王猛, wangmeng1993@email.tjut.edu.cn。

版权所有©2025 中国科学院光电技术研究所

**Abstract:** In this research, an all-dielectric terahertz metasurface based on bound states in the continuum (BIC) is proposed. Each structural unit of the metasurface consists of two rectangle blocks with square cross-sections and a substrate. The substrate material is quartz, and the rectangle block material of the surface is lossless silicon. The symmetry of the metasurface is broken by changing the cross-section area of the rectangle block, and the quasi-BIC is excited. The resonance with extremely narrow linewidth is obtained. The transmission spectra with different asymmetric, structural and material parameters are studied using finite element method (FEM) and control variable method. Meanwhile, the  $Q$  factor of the proposed metasurface is calculated, which can reach  $1.1006 \times 10^4$  and is higher than the  $Q$  factors from related listed references. In addition, this study is aimed at the limitations of the relatively limited research on the equivalent parameters of all-dielectric metasurfaces, the  $S$ -parameter extraction method is utilized to calculate and analyze the equivalent parameters of the proposed metasurface and the physical properties of the metasurface is studied from this perspective preliminarily.

**Keywords:** terahertz metasurface; bound states in the continuum; all-dielectric; equivalent parameters

## 1 引言

近年来, 太赫兹 (terahertz, THz) 技术发展迅速, 在频谱感知、违禁品检测、无线通信等领域中取得了令人瞩目的成就<sup>[1-2]</sup>, 其中具有高品质 (quality,  $Q$ ) 因子的太赫兹器件发挥着重要作用<sup>[3-4]</sup>。 $Q$  值常用于描述谐振特性, 高  $Q$  值意味着在特定频率下, 器件的能量损耗较低, 对特定频率的波具有更高的选择性。然而, 目前很多太赫兹器件的  $Q$  值都比较低, 相关性能不能满足工程应用的实际需求。太赫兹超表面作为众多太赫兹器件的一种, 凭借其出色的波调控能力, 在多个领域中都展现出了巨大的应用潜力和价值<sup>[5-6]</sup>。已有研究表明, 将连续域束缚态 (bound states in the continuum, BIC) 引入太赫兹超表面可以有效提高相关器件的性能<sup>[7]</sup>。

为了研究太赫兹波段 BIC 超表面的电磁特性, 文献 [8] 提出了一种狄拉克半金属超表面, 通过改变狄拉克半金属的费米能级实现从 BIC 到准 BIC (quasi-BIC, QBIC) 的动态转变, 同时打破表面结构的对称性, 实现了  $Q$  值为 147 的对称保护型 BIC。文献 [9] 提出了一种具有 Fano 共振的超表面, 同时具有 BIC 特性和环偶极子 (toroidal dipole, TD) 特性, 同时该研究首次将 TD-BIC 激发的 Fano 共振用于太赫兹波段基于纳米薄膜的传感。文献 [10] 提出了一种由金属开口谐振环 (split ring resonators, SRR) 构成的太赫兹超表面, 通过改变 SRR 的带隙宽度实现从 BIC 到准 BIC 的转变, 并通过数值仿真验证了该超表面的性能。虽然基于 BIC 的太赫兹金属超表面的性能得到了数值模拟和实验的验证, 但从已有的研究结果可以看出, 金属超表面的  $Q$  值普遍较低, 限制了其更广泛的应用<sup>[11]</sup>。为

了进一步提高  $Q$  值, 并不断拓宽太赫兹超表面的适用领域, 基于 BIC 的全介质超表面逐渐成为研究热点。2019 年, Han 等人首次通过实验证明了由 BIC 驱动的太赫兹超表面可以获得极窄的谐振<sup>[12]</sup>。此后, 文献 [13] 提出了一种具有超高  $Q$  值的太赫兹全介质超表面, 通过破坏表面对称性, 激发了由 BIC 调控的 TD 谐振。文献 [14] 提出了一种新颖的超表面结构, 可以在 BIC 的基础上获得尖锐的谐振。文献 [15] 开发了一种硅基双 D 型谐振器 (D-shaped resonator, DDR) 单元组成的非对称超表面结构, 实现了多个 Fano 共振。通过改变 DDR 的间隙, 可以增强电磁场。同时, 这两种被激活的 BIC 模式可以转换为准 BIC 模式。

本研究提出了一种新型的全介质太赫兹超表面, 每一个结构单元由一个横截面为正方形的石英衬底和两个具有正方形横截面的硅矩形块组成。通过改变正方形横截面的面积, 打破了表面的对称性, 激发了准 BIC, 得到了具有极窄线宽的谐振。数值仿真结果表明提出的超表面  $Q$  值可以达到  $1.1006 \times 10^4$ , 高于列出的相关文献中的  $Q$  值。并通过有限元法和控制变量法分析了不同结构参数与材料参数下超表面的性质。同时, 针对目前对于全介质超表面等效参数的研究相对较少的局限性, 利用  $S$  参数提取法计算并分析了所提出的超表面的等效参数, 并从该角度初步研究了超表面的物理性质。

## 2 结构设计

该研究提出的全介质超表面结构以及相关端口等设置如图 1 所示。衬底的边长  $P_x = P_y = 100 \mu\text{m}$ 。两个矩形块之间的距离为  $g = 12 \mu\text{m}$ , 高度  $H = 30 \mu\text{m}$ , 横

截面边长  $w = 42 \mu\text{m}$ 。非对称参数  $\Delta w$  定义为边长的减小量。衬底材料选择折射率为 1.48 的石英, 矩形块材料选择折射率为 3.48 的无折射率损耗的硅。

有限元方法 (Finite element method, FEM) 适合处理具有复杂边界条件和材料属性的结构或区域以及各种复杂的物理场分布问题。故该研究采用的电磁特性分析方法为有限元法, 端口以及完美匹配层 (perfect matched layer, PML) 等设置如图 1(c) 所示, 同时采用 Periodic Condition。首先, 分析提出的超表面在  $\Delta w = 0$  时的谐振特性, 频率范围设置为 1.65~1.78 THz。当非对称参数  $\Delta w = 0$  时, 超表面呈现完全对称结构。入射波的电场方向是指电磁波中电场矢量的振动方向, 当入射波的电场方向与超表面的结构对称性相匹配时, 入射波的电场矢量振动方向与超表面单元结构的某个对称轴或对称面平行或重合。这种匹配关系可以使得入射波与超表面之间的相互作用更加有效, 从而激发超表面的特定电磁响应, 因此为研究提出的超表面的

偏振依赖性, 分别采用  $x$  和  $y$  偏振入射波, 得到的透射光谱如图 2 所示。

从图 2(a) 可以看出,  $x$  偏振下的透射谱在 1.65~1.78 THz 内没有发生明显谐振。通过计算结果可知, 在该频段内最大透射率为 0.7660, 最小透射率为 0.7437, 频段内透射率都非常接近 0.75。从图 2(b) 可以看出,  $y$  偏振下的透射谱存在明显的透射峰, 谐振频率为 1.6776 THz。由于该超表面在两种偏振方式下的谐振特性明显不同, 证明其具有偏振依赖性。在  $x$  偏振下, 入射波的电场方向与超表面的结构对称性不匹配, 无法有效地激发超表面的谐振模式。因此, 入射波在超表面上的相互作用较弱; 在  $y$  偏振下, 入射波的电场方向与超表面的结构对称性相匹配, 能够有效地激发超表面的谐振模式, 入射波的能量被有效地耦合到超表面中, 并在透射谱中形成明显的透射峰。因此, 本研究后续的所有数值仿真都是基于  $y$  偏振进行计算分析。

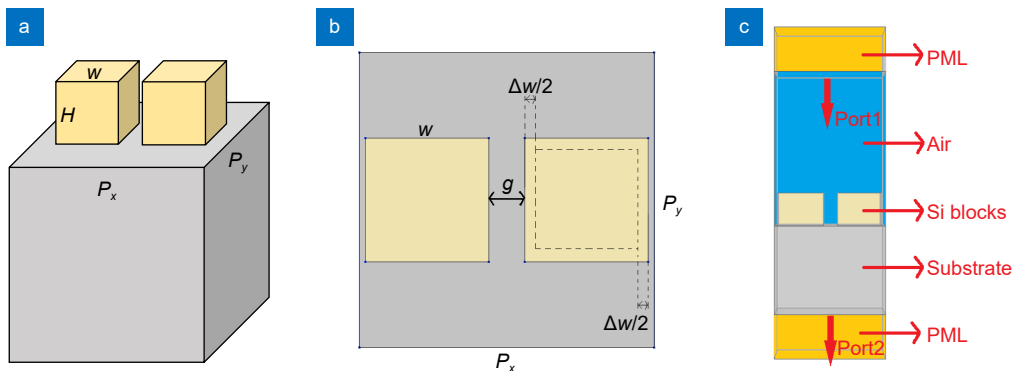


图 1 提出的全介质超表面结构与端口设置。(a) 正视图; (b) 俯视图; (c) 端口设置

Fig. 1 The structure of the proposed all-dielectric metasurface. (a) Front view; (b) Top view; (c) Port setting

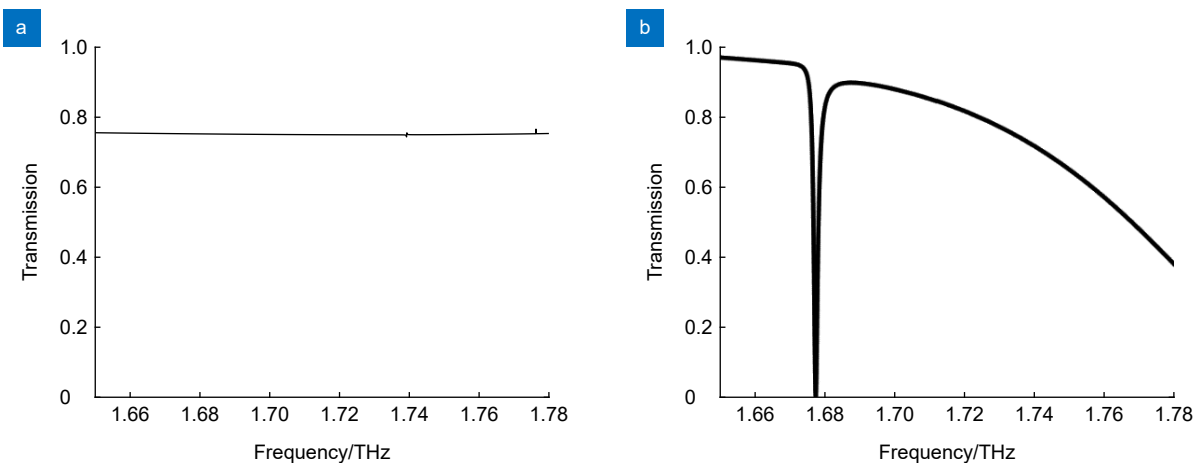
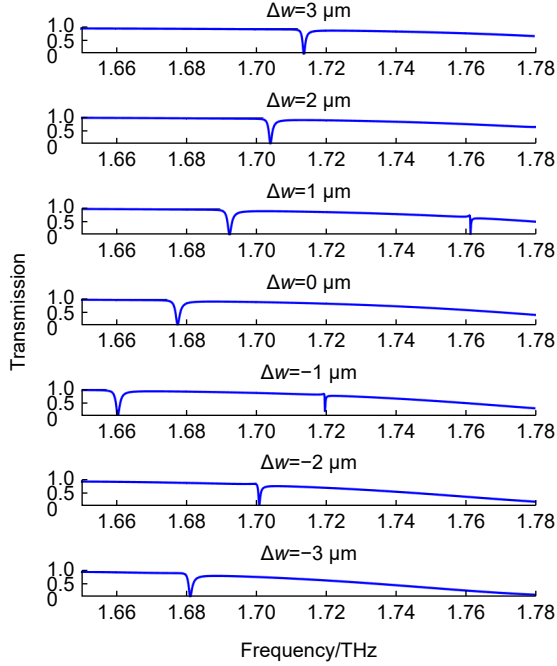


图 2 不同偏振入射下的透射谱图。(a)  $x$  偏振; (b)  $y$  偏振

Fig. 2 Transmission spectra under different polarization incidence. (a)  $x$ -polarization; (b)  $y$ -polarization

接下来, 将研究不同非对称参数 $\Delta w$ 下的透射光谱。首先, 定义矩形块横截面边长为 $w - \Delta w$ , 当 $\Delta w > 0$ 时, 表示矩形块横截面的边长减小。当 $\Delta w < 0$ 时, 表示矩形块横截面的边长增加; 当 $\Delta w = 0$ 时, 整个超表面是完全对称结构。不同 $\Delta w$ 下的透射光谱如图 3 所示。

图 3 不同 $\Delta w$ 下的透射谱图Fig. 3 The transmission spectra under different  $\Delta w$ 

从图 3 可以看出, 在  $3 \mu\text{m}$  到  $-1 \mu\text{m}$  的范围内, 随着 $\Delta w$ 的减小, 低频处的谐振频率发生了红移。同时, 当 $\Delta w$ 为 $\pm 1 \mu\text{m}$ 时, 在高频处出现了一个较窄的透射峰。为方便描述, 将 $\Delta w = 1 \mu\text{m}$ 时出现在  $1.6922 \text{ THz}$  处的谐振命名为 mode I, 将 $\Delta w = -1 \mu\text{m}$ 时出现在  $1.7611 \text{ THz}$  处的谐振命名为 mode II。由上述结果可以看出, mode I 处的谐振为超表面固有的谐振, 在完全对称结构下已经出现; 而 mode II 的谐振是在超表面对称性破坏后出现的极窄谐振, 因此 mode II 发生的谐振为 QBIC 谐振。

为了研究谐振频率处的谐振机理, 深入理解电场和磁场的特性和行为, 在笛卡尔坐标系下进行多极子分解。主要的极子类型可以分为电偶极子 (electric dipole,  $P$ )、磁偶极子 (magnetic dipole,  $M$ )、电四极子 (electric quadrupole,  $Q_e$ )、磁四极子 (magnetic quadrupole,  $Q_m$ ) 和环偶极子 (toroidal dipole,  $T_D$ )。在本研究中, 各个极子的计算方法采用文献 [16] 中的相关定义。

$$P = \frac{1}{i\omega} \iiint j d^3 r, \quad (1)$$

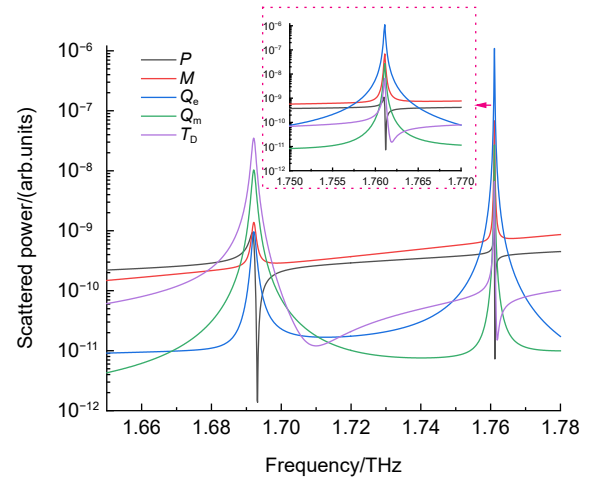
$$M = \frac{1}{2c} \iiint (\mathbf{r} \times \mathbf{j}) d^3 r, \quad (2)$$

$$T_D = \frac{1}{10c} \iiint [(\mathbf{r} \cdot \mathbf{j}) \mathbf{r} - 2r^2 \mathbf{j}] d^3 r, \quad (3)$$

$$Q_{e,\alpha\beta} = \frac{1}{i\omega} \iiint \left[ r_\alpha j_\beta + r_\beta j_\alpha - \frac{2}{3} (\mathbf{r} \cdot \mathbf{j}) \delta_{\alpha\beta} \right] d^3 r, \quad (4)$$

$$Q_{m,\alpha\beta} = \frac{1}{3c} \iiint [(\mathbf{r} \times \mathbf{j})_\alpha r_\beta + (\mathbf{r} \times \mathbf{j})_\beta r_\alpha] d^3 r, \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{r}$  为位置矢量;  $\mathbf{j}$  为体积电流密度;  $\omega$  为入射光频率;  $c$  为真空中的光速;  $\alpha, \beta = x, y, z$ ;  $d\mathbf{r}$  表示对一个超表面单元整体进行的体积分。 $\Delta w = 1 \mu\text{m}$  时的多极子分解结果如图 4 所示。

图 4  $\Delta w = 1 \mu\text{m}$  时的多极子分解结果Fig. 4 The result of multipole decomposition under  $\Delta w = 1 \mu\text{m}$ 

从图 4 可以看出, 在  $1.6922 \text{ THz}$  处,  $T_D$  占主导地位,  $Q_e$  被抑制, 因此此处的谐振类型为  $T_D$  谐振; 在  $1.7611 \text{ THz}$  处,  $Q_e$  占据主导地位,  $T_D$  被抑制, 因此此处的谐振类型属于  $Q_e$  谐振。接下来, 分析谐振频率处的电场、磁场和位移电流密度。选择矩形块  $H/2$  处的横截面并计算。相关结果如图 5 所示。

图 5 表明, 在  $1.6922 \text{ THz}$  处, 无形变的矩形块的位移电流密度呈现逆时针方向, 而有形变的矩形块的位移电流密度呈现顺时针方向。电场和磁场的分布是对称的。对于磁场分布, 两个矩形块的场数值符号相反。同时, 在  $1.7611 \text{ THz}$  处, 矩形块的位移电流密度均呈逆时针方向。电场和磁场的分布是对称的。对于磁场分布, 两个矩形块的场数值符号是一致的。但在磁场值方面, 形变后的矩形块的值要大于未形变的矩形块。

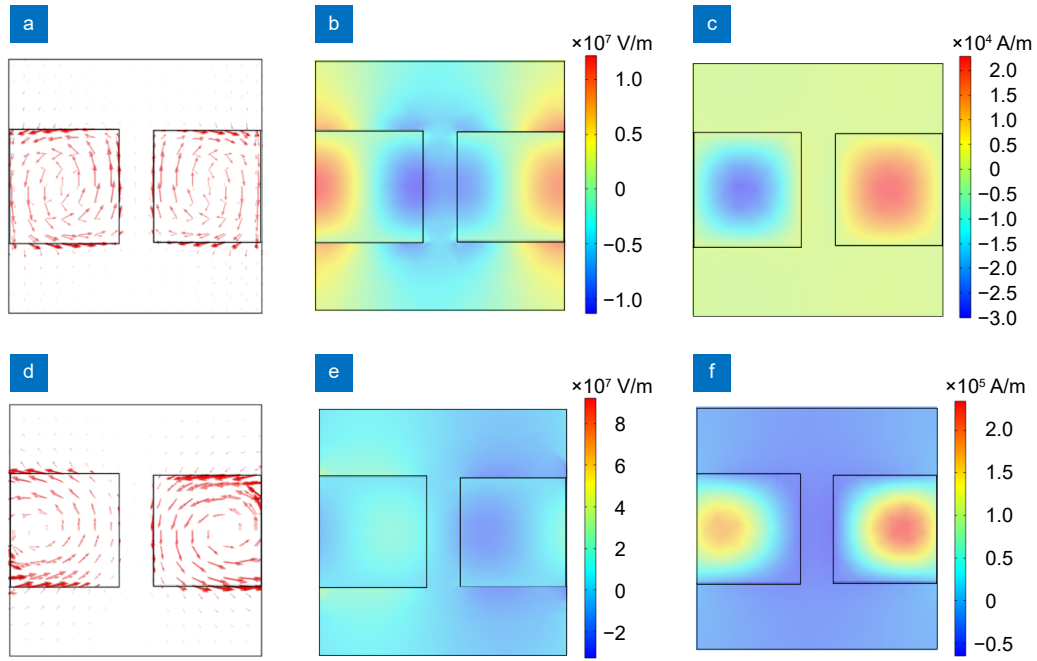


图5 1.6922 THz 与 1.7611 THz 处的位移电流密度、磁场分布与电场分布。(a) 1.6922 THz 处位移电流密度; (b) 1.6922 THz 处的电场; (c) 1.6922 THz 处的磁场; (d) 1.7611 THz 处位移电流密度; (e) 1.7611 THz 处的电场; (f) 1.7611 THz 处的磁场

Fig. 5 Displacement current density, magnetic field distribution and electric field distribution at 1.6922 THz and 1.7611 THz. (a) The displacement current density at 1.6922 THz; (b) The electric field distribution at 1.6922 THz; (c) The magnetic field distribution at 1.6922 THz; (d) The displacement current density at 1.7611 THz; (e) The electric field distribution at 1.7611 THz; (f) The magnetic field distribution at 1.7611 THz

在量子力学中, 微扰理论被广泛应用于研究系统的哈密顿量在受到微小扰动时的行为。在微扰理论中, 任何破坏结构对称性的策略都被认为是对原始结构的扰动, 这种扰动会改变原始结构的哈密顿量, 同时会引起 BIC 和辐射连续体之间的耦合, 即 BIC 模式不再完全抑制辐射, 而是开始与自由空间的电磁波模式相互作用。当闭合光学腔受到外部激励时, 其内部的光学模式会与辐射连续体发生相互作用。在结构对称性破坏时, 这种相互作用会导致原本被束缚在腔内的光学模式发生泄漏或耦合到辐射连续体中, 从而形成 QBIC。QBIC 被认为是闭合光学腔与辐射连续体相互作用后的本征共振态。

### 3 不同参数下透射谱的分析

在该小节, 采用有限元法和控制变量法分析了不同结构参数下的透射光谱。结构参数分别为衬底的边长  $P_x$ 、矩形块的高度  $H$ 、矩形块之间的距离  $g$  以及矩形块的横截面边长  $w$ , 并同时研究了硅的折射率损耗对透射光谱的影响。不同结构参数下的透射谱图如图 6 所示。

不同衬底尺寸下得到的透射光谱如图 6(a) 所示。

由于衬底的横截面为正方形,  $P_x$  和  $P_y$  具有相同的值, 因此本研究仅分析了  $P_x$  的变化。从透射光谱可以看出, 当  $P_x=100 \mu\text{m}$  时, 谐振频率为 1.6922 THz 和 1.7611 THz。随着  $P_x$  的增大, 低频处的谐振频率逐渐产生微小的红移。同时, 谐振峰的宽度逐渐减小。高频处的谐振频率逐渐产生明显的蓝移。当  $P_x=104 \mu\text{m}$  时, 高频谐振在 1.65~1.78 THz 范围内消失。

在矩形块的不同高度下得到的透射谱如图 6(b) 所示。 $H$  值设置为 30~38  $\mu\text{m}$ , 步进为 2  $\mu\text{m}$ 。从透射光谱可以看出, 当  $H=30 \mu\text{m}$  时, 谐振频率为 1.6922 THz 和 1.7611 THz。随着  $H$  的增大, 低频处的谐振频率逐渐产生明显的红移。同时, 谐振峰的宽度逐渐增大。高频处的谐振频率逐渐产生明显的等幅红移。当  $H$  继续增大到 36  $\mu\text{m}$  和 38  $\mu\text{m}$  时, 在 1.65 THz 到 1.78 THz 的频率范围内, 透射率较低, 但是出现了透射率显著增加的尖峰。在超表面结构中, 表面高度 (即厚度) 是影响辐射损耗的关键因素之一。辐射损耗的大小直接影响到太赫兹波在超表面中的传播和透射行为。当超表面的表面高度发生变化时, 会改变波在结构中的传播路径和相位分布, 从而影响其辐射损耗特性。具体来说, 表面高度的增加减少了太赫兹波在

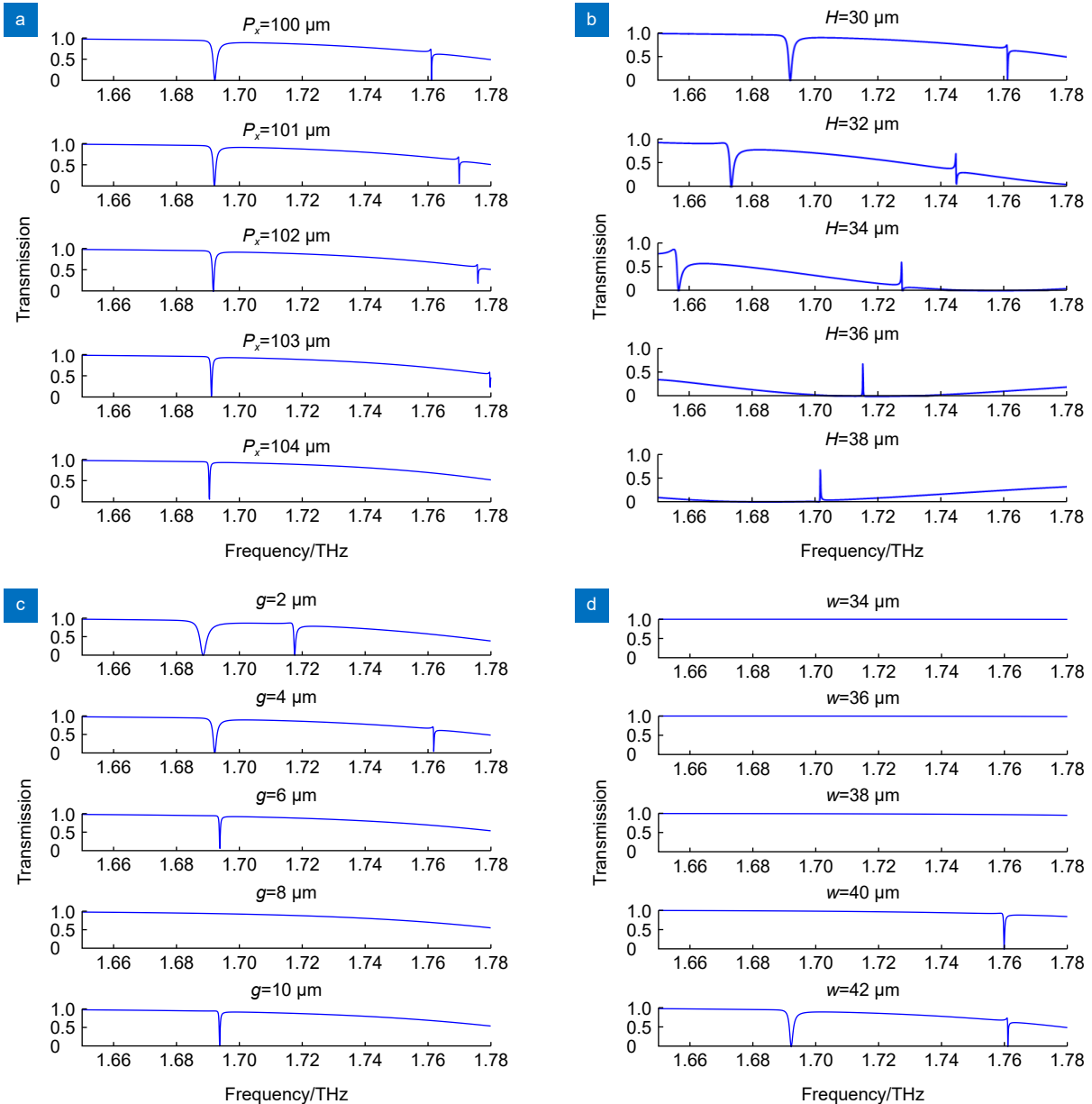


图6 不同结构参数下的透射谱图。(a) 衬底边长  $P_x$ ; (b) 矩形块高度  $H$ ; (c) 矩形块间距  $g$ ; (d) 矩形块横截面边长  $w$

Fig. 6 Transmission spectra under different structural parameters. (a) Substrate size  $P_x$ ; (b) Rectangular block height  $H$ ; (c) Rectangular block spacing  $g$ ; (d) Rectangular block side length  $w$

结构中的辐射损耗, 使得更多的波能够透过超表面, 导致透射率提高。

矩形块之间不同距离下得到的透射谱如图 6(c) 所示。当  $g=2\sim4 \mu\text{m}$  时, 低频和高频处的谐振频率点同时发生蓝移; 当  $g=6 \mu\text{m}$  时, 只有一个谐振发生在  $1.65\sim1.75 \text{ THz}$  的频率范围内; 当  $g=8 \mu\text{m}$  时, 在  $1.65 \text{ THz}$  到  $1.75 \text{ THz}$  的频率范围内没有发生谐振; 当  $g=10 \mu\text{m}$  时, 谐振发生在低频处。

在不同矩形块边长下得到的透射谱如图 6(d) 所示。在所提出的超表面中, 矩形块的横截面为正方形, 只

需研究  $w$  值的变化即可。从透射光谱可以看出, 当  $w$  的值在  $34 \mu\text{m}$  到  $38 \mu\text{m}$  之间时, 频率范围在  $1.65 \text{ THz}$  到  $1.78 \text{ THz}$  之间没有透射峰, 透射谱呈现为接近于 1 的直线, 说明没有发生明显谐振; 当  $w=40 \mu\text{m}$  时, 在高频处发生谐振; 当  $w=42 \mu\text{m}$  时, 低频处出现波谷, 高频处的谐振频率点相对于  $w=40 \mu\text{m}$  时的谐振峰发生蓝移。

折射率  $n$  是一个复数, 包含了实部和虚部。其实部决定了光在材料中的传播速度和相位变化, 虚部在一些文献中, 也被称为消光系数或吸收系数, 它描述

了材料内部的吸收损耗。不同材料折射率损耗下得到的透射光谱如图 7 所示。硅的折射率损耗依次设置为 0.1、0.01、0.001、0.0001 和 0。从透射谱可以看出, 随着折射率损耗的不断减小, 谐振现象逐渐明显, 谐振峰的线宽逐渐变窄变深。从透射光谱也可以看出, 折射率损耗的变化并不会显著影响共振频率的蓝移和红移。然而, 这将显著地影响谐振峰的特征和透射率。

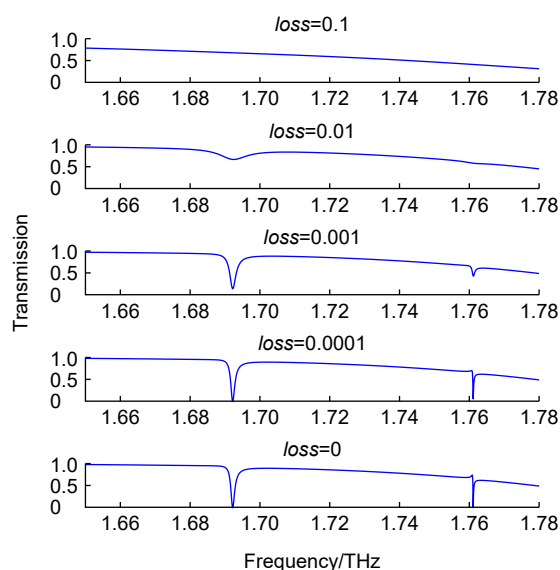


图 7 不同折射率损耗下得到的透射光谱

Fig. 7 Transmission spectra obtained under different refractive index losses

研究可知, 硅作为一种半导体材料, 在特定波长范围内 (尤其是接近其带隙的波长) 会表现出明显的吸收特性。这种吸收会导致波在通过硅层时能量被转化为热能或其他形式的能量, 从而减少透射光的强度。因此, 硅的折射率损耗 (即与吸收相关的虚部) 越大, 透射率就越低。在谐振结构中, 波在材料内部多次反

射和干涉, 形成谐振。如果材料吸收较少, 那么更多的波能量能够参与谐振过程, 而不是被材料吸收转化为其他形式的能量。因此, 谐振现象变得更加明显。

## 4 Q 值分析

对于部分太赫兹器件,  $Q$  值常用来衡量其固有的性能。它是一个非常直观的参数。 $Q$  值可以反映超表面光学谐振的特性。 $Q$  值越大, 谐振系统的损耗越小, 可以使谐振峰变窄, 越容易检测到光谱的变化。 $Q$  值可以由谐振频率和半峰全宽 (full width at half maximum, FWHM) 计算得到<sup>[17]</sup>。

$$Q = \frac{f_0}{X_{\text{FWHM}}}, \quad (6)$$

式中:  $f_0$  为谐振频率;  $X_{\text{FWHM}}$  为 FWHM。由于所提出的超表面在特定参数下可以激发出两个谐振峰, 因此取得到的最大  $Q$  值, 即 mode II 发生的 QBIC 谐振, 并与其他文献得到的  $Q$  值进行比较。结果见表 1。

从表 1 中可以看出, 相比于所列举的其他文献中的超表面, 所提出的超表面可以获得更高的  $Q$  值。为了进一步研究所提出的超表面的  $Q$  值与非对称参数之间的关系, 计算出不对称参数  $\Delta w$  在  $-3 \sim 3 \mu\text{m}$  范围内的  $Q$  值。 $Q$  值的变化趋势如图 8 所示。

从图 8 可以看出, 在选定的  $\Delta w$  下, 随着其绝对值的增大,  $Q$  值明显减小, 即在一定条件下,  $Q$  值与不对称参数呈逆二次关系, 满足  $Q \propto \Delta w^{-2}$ , 同时可以看出,  $\Delta w$  的绝对值越接近零, 获得的  $Q$  值越趋向于无穷, 符合 QBIC 特性。

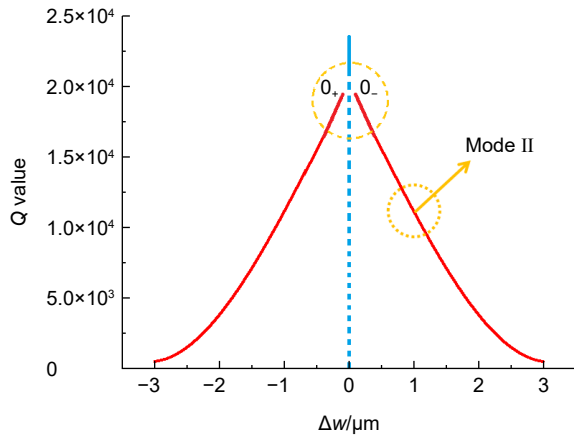
## 5 等效参数分析

在现有的文献中, 目前对全介质太赫兹超表面的分析大多集中在不同参数下的透射谱图分析, 对全介

表 1 不同文献中的  $Q$  值对比

Table 1 Comparison of  $Q$  values in different references

| 参考文献   | 结构            | 材料     | $Q$ 值                |
|--------|---------------|--------|----------------------|
| 文献[18] | 分裂环           | 金属     | 38.4063              |
| 文献[19] | 双倾斜长方体        | 非金属    | <1200                |
| 文献[20] | 三个平行的多边形      | 非金属    | 387.5                |
| 文献[21] | 一维周期性腔阵列      | 金属     | 1028                 |
| 文献[22] | 分裂环           | 金属     | <80                  |
| 文献[23] | 分裂环谐振器嵌套方环谐振器 | 金属+非金属 | 32                   |
| 文献[11] | 分裂环           | 金属     | 20.3                 |
| 文献[24] | 四圆柱聚体簇        | 非金属    | 2303.77              |
| 文献[25] | 双矩形块          | 非金属    | $1.08 \times 10^4$   |
| 本工作    | 双矩形块          | 非金属    | $1.1006 \times 10^4$ |

图 8  $Q$  值与  $\Delta w$  的关系Fig. 8 The relationship between the  $Q$  value and the  $\Delta w$ 

质太赫兹超表面的等效电磁参数研究相对较少。为了更好地研究所提出的超表面的宏观电磁响应, 研究所提出的超表面产生谐振的机理, 理解超表面的物理性质、优化其性能以及推动其在实际应用中的发展, 等效电磁参数的提取与分析是一个重要的策略。在计算等效参数时, 基于等效介质近似 (effective medium approximation, EMA) 的假设, 通常将超表面结构等效成一个均匀材料层, 即超表面结构在宏观尺度上可以被视为一个具有特定电磁响应的均匀介质。在这种近似下, 超表面结构被视为一个整体, 具有等效的电磁参数。这些参数可以直观地反映超表面对太赫兹波的作用效果。在众多等效参数的提取方法中, 本研究采用的方法是  $S$  参数提取法。

将太赫兹超表面试作一个整体, 其  $S$  参数满足下列方程:

$$S_{12} = S_{21} = \frac{1}{\left[ \sin(nkd) - \frac{i}{2} \left( Z + \frac{1}{Z} \right) \cos(nkd) \right] e^{ikd}}, \quad (7)$$

$$S_{11} = S_{22} = \frac{i}{2} \left( \frac{1}{Z} - Z \right) \sin(nkd). \quad (8)$$

利用  $S_{11}$  与  $S_{21}$ , 等效阻抗  $Z$  可以如下计算:

$$Z = \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}}. \quad (9)$$

利用真空波矢大小  $k$  与超表面表面结构厚度  $d$ , 等效折射率  $n$  可以如下计算:

$$n = \frac{1}{kd} \arccos \left[ \frac{1}{2S_{21}} (1 - S_{11}^2 + S_{21}^2) \right]. \quad (10)$$

然后, 超表面的等效介电常数  $\varepsilon$  和磁导率  $\mu$  可以利用  $Z$  和  $n$  来表征, 计算如下所示:

$$\varepsilon = \frac{n}{Z}, \quad (11)$$

$$\mu = nZ. \quad (12)$$

利用  $S$  参数得到的四个等效参数如图 9 所示。

图 9 表明, 四个等效参数的值发生突变的频率恰好是谐振频率。复折射率的实部是介质的折射率, 代表了色散, 虚部由波在介质中传播时的衰减决定。色散是指光在介质中的传播速度与光的频率有关的现象。不同频率的光在同一介质中可能具有不同的传播速度, 导致光的波长和波矢量发生变化。

整个超表面可以看作是一个无源电路, 因此复阻抗是一个可以反映其电学特性的物理量。复磁导率的意义既包括磁能的存储, 也包括磁能的损耗。对于复介电常数, 其虚部表示损耗, 损耗是指电磁波在材料内部传播时的损耗。实部为真实介电常数, 影响电磁波的波长。

在谐振频率的低频处, 所提出的超表面具有负的等效介电常数和磁导率, 因此在材料特性上可以等效为左手材料。等效相对介电常数在谐振频率的低频处也为负值, 因此该位置的振荡类似于等离子体谐振。由于透射谱在谐振频率处无限趋近于零, 为全反射现象, 能量集中。从等效阻抗图可以看出, 所提出的超表面同样具有 RLC 电路的性质。在高频谐振处, 提出的超表面的等效阻抗为负数, 该等效电路在该条件下不仅不消耗能量, 反而能够向外提供能量。由于高频处的谐振是由于超表面的表面对称性被打破, 激发准连续域束缚态后实现的, 由此说明虽然通常情况下 BIC 被局限在结构内部或特定区域内, 其能量被束缚在结构内, 不会自发地向外辐射, 但是在实际情况中, BICs 的稳定性可能受到多种因素的影响, 如结构的微小扰动、材料的非理想性、以及外部场的作用等。

## 6 结 论

本研究提出了一种 QBIC 控制的全介质太赫兹超表面。超表面的不对称性是通过改变矩形块的横截面积来实现的。数值仿真结果表明, 当  $\Delta w = 1 \mu\text{m}$  时, 获得的  $Q$  值显著提高, 达到  $1.1006 \times 10^4$ , 得到的  $Q$  值明显高于所列文献中的相关研究结果。同时, 该研究针对目前对全介质超表面等效参数的研究相对较少的局限性, 利用  $S$  参数提取法计算并分析了所提出的超表面的等效参数, 并从该角度初步研究了超表面的

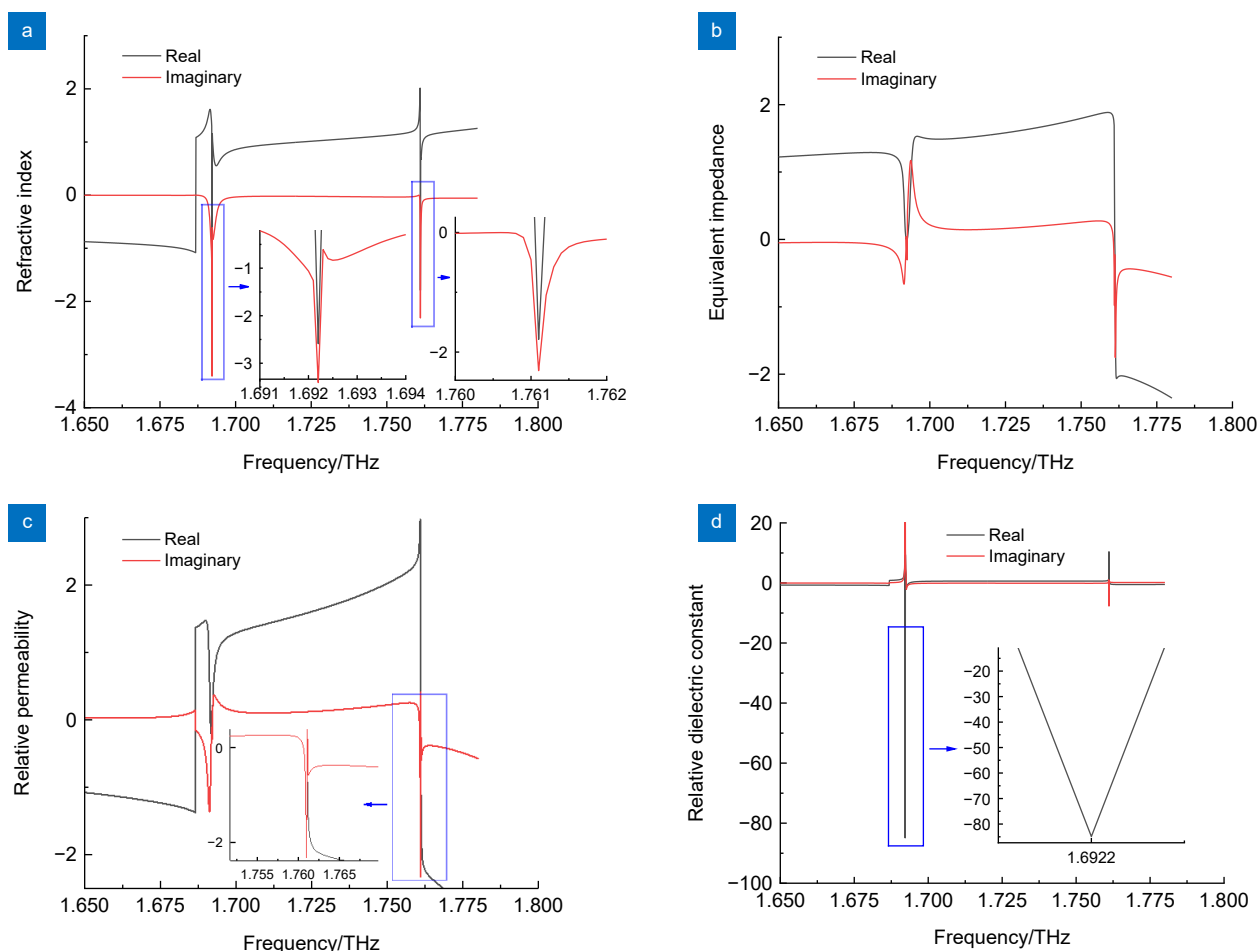


图 9 提出的超表面的等效参数。(a) 相对折射率; (b) 等效阻抗; (c) 相对磁导率; (d) 相对介电常数

Fig. 9 The equivalent parameters of the proposed metasurface. (a) Refractive index; (b) Equivalent impedance; (c) Relative permeability; (d) Relative dielectric constant

物理性质, 为太赫兹超表面的分析提供了一个新颖的方向。

## 参考文献

- [1] Wang J W, Li K, Cheng M, et al. Research progress and applications of dynamically tunable metasurfaces[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(8): 230141.  
王家伟, 李珂, 成茗, 等. 动态可调谐超表面的研究进展与应用[J]. *光电工程*, 2023, **50**(8): 230141.
- [2] xDeng H L, Zhou S L, Cen G L. Progress on infrared and terahertz electro-magnetic absorptive metasurface[J]. *Opto-Electron Eng*, 2019, **46**(8): 180666.  
邓洪朗, 周绍林, 岑冠廷. 红外和太赫兹电磁吸收超表面研究进展[J]. *光电工程*, 2019, **46**(8): 180666.
- [3] Yang R S, Lou J, Zhang F L, et al. Active control of terahertz toroidal excitations in a hybrid metasurface with an electrically biased silicon layer[J]. *Adv Photonics Res*, 2021, **2**(12): 2100103.
- [4] Yang R S, Fan Y C, Zhu W, et al. Terahertz silicon metagratings: high-efficiency dispersive beam manipulation above diffraction cone[J]. *Laser Photonics Rev*, 2023, **17**(7): 2200975.
- [5] Li J, Li J T, Yue Z, et al. Structured vector field manipulation of terahertz wave along the propagation direction based on dielectric metasurfaces[J]. *Laser Photonics Rev*, 2022, **16**(12): 2200325.
- [6] Li J, Lu X G, Li H, et al. Racemic dielectric metasurfaces for arbitrary terahertz polarization rotation and wavefront manipulation[J]. *Opto-Electron Adv*, 2024, **7**(10): 240075.
- [7] Wang P F, He F Y, Liu J J, et al. High-Q terahertz all-dielectric metasurface based on bound states in the continuum[J]. *Laser Technol*, 2022, **46**(5): 630-635.  
王鹏飞, 贺风艳, 刘建军, 等. 基于连续谱束缚态的高 Q 太赫兹全介质超表面[J]. *激光技术*, 2022, **46**(5): 630-635.
- [8] Gao J X, Liu H, Zhang M, et al. Dynamic switching between bound states in the continuum (BIC) and quasi-BIC based on a Dirac semimetal terahertz metasurface[J]. *Phys Chem Chem Phys*, 2022, **24**(41): 25571-25579.
- [9] Chen X, Fan W H, Yan H. Toroidal dipole bound states in the continuum metasurfaces for terahertz nanofilm sensing[J]. *Opt Express*, 2020, **28**(11): 17102-17112.
- [10] Zhang X Y, Shi W Q, Gu J Q, et al. Terahertz metasurface with multiple BICs/QBICs based on a split ring resonator[J]. *Opt Express*, 2022, **30**(16): 29088-29098.
- [11] Wang L, Zhao Z Y, Du M J, et al. Tuning symmetry-protected quasi bound state in the continuum using terahertz meta-atoms of rotational and reflectional symmetry[J]. *Opt Express*,

- 2022, **30**(13): 23631–23639.
- [12] Han S, Cong L Q, Srivastava Y K, et al. All-dielectric active terahertz photonics driven by bound states in the continuum[J]. *Adv Mater*, 2019, **31**(37): 1901921.
- [13] Wang Y L, Han Z H, Du Y, et al. Ultrasensitive terahertz sensing with high-Q toroidal dipole resonance governed by bound states in the continuum in all-dielectric metasurface[J]. *Nanophotonics*, 2021, **10**(4): 1295–1307.
- [14] Cen W Y, Lang T T, Wang J F, et al. High-Q Fano Terahertz resonance based on bound states in the continuum in all-dielectric metasurface[J]. *Appl Surf Sci*, 2022, **575**: 151723.
- [15] Song F H, Xiao B G, Qin J Y. High-Q multiple Fano resonances with near-unity modulation depth governed by nonradiative modes in all-dielectric terahertz metasurfaces[J]. *Opt Express*, 2023, **31**(3): 4932–4941.
- [16] Kaelberer T, Fedotov V A, Papasimakis N, et al. Toroidal dipolar response in a metamaterial[J]. *Science*, 2010, **330**(6010): 1510–1512.
- [17] Zhao R Q, Feng Y, Ling H T, et al. Enhanced terahertz fingerprint sensing mechanism study of tiny molecules based on tunable spoof surface plasmon polaritons on composite periodic groove structures[J]. *Sensors*, 2023, **23**(5): 2496.
- [18] Srivastava Y K, Ako R T, Gupta M, et al. Terahertz sensing of 7 nm dielectric film with bound states in the continuum metasurfaces[J]. *Appl Phys Lett*, 2019, **115**(15): 151105.
- [19] Zhong Y J, Du L H, Liu Q, et al. Ultrasensitive specific sensor based on all-dielectric metasurfaces in the terahertz range[J]. *RSC Adv*, 2020, **10**(55): 33018–33025.
- [20] Sang T, Dereshgi S A, Hadibrata W, et al. Highly efficient light absorption of monolayer graphene by quasi-bound state in the continuum[J]. *Nanomaterials (Basel)*, 2021, **11**(2): 484.
- [21] Liu Z Z, Wang L Y, Hua M, et al. High-Q metamaterials based on cavity mode resonance for THz sensing applications[J]. *AIP Adv*, 2020, **10**(7): 075014.
- [22] Tan T C, Srivastava Y K, Ako R T, et al. Active control of nanodielectric-induced THz quasi-BIC in flexible metasurfaces: a platform for modulation and sensing[J]. *Adv Mater*, 2021, **33**(27): 2100836.
- [23] Zhang D P, Li Z, Fan K F, et al. Dynamically tunable terahertz metamaterial sensor based on metal-graphene hybrid structural unit[J]. *AIP Adv*, 2022, **12**(2): 025206.
- [24] Wang M, Zhao X, Zhao R Q, et al. Dual resonance based on quasi-bound states in continuum in the all-dielectric terahertz metasurface and its application in sensing[J]. *Results Phys*, 2023, **49**: 106518.
- [25] Li K, Zhao X, Wang M, et al. All-dielectric terahertz metasurface governed by bound states in the continuum with high-Q factor[J]. *J China Univ Posts Telecommun*, 2024, **31**(2): 44–54.

## 作者简介



贾兴宁 (1990-), 男, 博士研究生, 讲师, 主要从事太赫兹超表面设计、智能优化等方面的研究。

E-mail: [nxujiagn@nxu.edu.cn](mailto:nxujiagn@nxu.edu.cn)



【通信作者】王猛 (1993-), 男, 博士研究生, 讲师, 硕士生导师, 主要从事太赫兹超表面、电磁兼容等方面的研究。

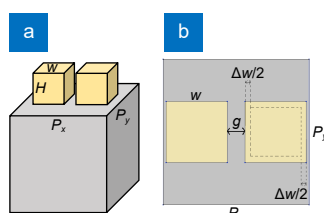
E-mail: [wangmeng1993@email.tjut.edu.cn](mailto:wangmeng1993@email.tjut.edu.cn)



扫描二维码, 获取PDF全文

# All-dielectric terahertz metasurface based on bound states in the continuum and the research of its equivalent parameter

Jia Xingning<sup>1</sup>, Wang Meng<sup>2\*</sup>, Zhao Yuehan<sup>2</sup>, Zhao Ruiqi<sup>3</sup>, Lu Guizhen<sup>4</sup>



The structure of proposed all-dielectric metasurface. (a) Front view; (b) Top view

**Overview:** In this research, an all-dielectric terahertz metasurface based on bound states in the continuum (BIC) is proposed. Each structural unit of the metasurface consists of two rectangle blocks with square cross-sections and a substrate. The asymmetric parameter  $\Delta w$  is defined as the reduction in edge length. The substrate material is quartz with a refractive index of 1.48, and the rectangular block material is silicon with a refractive index of 3.48 and no loss. The symmetry of the metasurface is broken by changing the cross-section area of the rectangle block, and the quasi-BIC is excited. The resonance with extremely narrow linewidth is obtained. The transmission spectra obtained from incident waves with different polarizations indicate that the resonance characteristics of the metasurface are significantly different under the two polarization modes, demonstrating its polarization dependence.

To study the resonance mechanism at the resonance frequency and gain a deeper understanding of the characteristics and behavior of the electric and magnetic fields, multipole decomposition is performed in Cartesian coordinates. At 1.6922 THz, the toroidal dipole ( $T_D$ ) dominates and the electric quadrupole ( $Q_e$ ) is suppressed, therefore the resonance type here is  $T_D$  resonance. At 1.7611 THz,  $Q_e$  dominates and  $T_D$  is suppressed, therefore the resonance type here belongs to  $Q_e$  resonance. The transmission spectra with different asymmetric, structural and material parameters are studied by using finite element method (FEM) and control variable method. Meanwhile, the  $Q$  factor of the proposed metasurface is calculated, which can reach  $1.1006 \times 10^4$ . From the table, compared to the metasurfaces listed in other literature, the proposed metasurface achieves a higher  $Q$  value. In addition, under the selected conditions, as the absolute value of  $\Delta w$  increases, the  $Q$  value decreases significantly. That is, under certain conditions, the  $Q$  value has an inverse quadratic relationship with the asymmetric parameter  $\Delta w$ , satisfying the equation  $Q \propto \Delta w^{-2}$ . At the same time, it can be seen that the closer the absolute value of  $\Delta w$  is to zero, the more the obtained  $Q$  value tends to infinity, which is in line with QBIC characteristics. In addition, this study is aimed at the limitations of the relatively limited research on the equivalent parameters of all-dielectric metasurfaces, the  $S$ -parameter extraction method is utilized to calculate and analyze the equivalent parameters of the proposed metasurface and the physical properties of the metasurface is studied from this perspective preliminarily.

Jia X N, Wang M, Zhao Y H, et al. All-dielectric terahertz metasurface based on bound states in the continuum and the research of its equivalent parameter[J]. *Opto-Electron Eng*, 2025, 52(2): 240274; DOI: 10.12086/oee.2025.240274

Foundation item: The Key Research and Development Program of Ningxia Hui Autonomous Region Fund (2021BEB04068), the Natural Science Foundation of Ningxia Hui Autonomous Region Fund (2024AAC03046)

<sup>1</sup>School of Electronic and Electrical Engineering, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China; <sup>2</sup>School of Integrated Circuit Science and Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China; <sup>3</sup>Shandong Key Laboratory of Low-altitude Airspace Surveillance Network Technology, QILU Aerospace Information Research Institute (AIR), Chinese Academy of Sciences (CAS), Jinan, Shandong 250000, China;

<sup>4</sup>State Key Laboratory of Media Convergence and Communication, Communication University of China, Beijing 100024, China

\* E-mail: wangmeng1993@email.tjut.edu.cn