

文章编号: 1671-251X(2025)02-0048-09

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.18220

# 基于连续域束缚态的太赫兹超表面甲烷传感器设计

刘海, 王麒尧, 高鹏, 王馨艳, 冯星宇, 崔鸿忠, 高鹏飞

(中国矿业大学 信息与控制工程学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 相较于传统矿用甲烷传感器, 超表面甲烷传感器在灵敏度、稳定性等方面具有较显著的优势, 能够更好地满足矿井生产实际需要。针对现有金属太赫兹超表面传感器对折射率的灵敏度相对较低的问题, 设计了一种基于连续域束缚态的太赫兹超表面甲烷传感器。超表面结构为金属-介质-金属 3 层结构, 其中金属材料为金, 介质材料为聚酰亚胺, 上层金属结构为圆环, 通过调节左侧开口大小改变结构的对称性, 从而引起准连续域束缚态 (QBIC)。分析结果表明, 左侧开口间距为  $5\ \mu\text{m}$  时调制深度最大, 为 95.69%。在超表面结构上覆盖 1 层甲烷气敏膜材料 (cryptophane-A), 得到甲烷传感器。选取 5 种体积分数的甲烷和 5 种环境折射率验证甲烷传感器检测性能, 结果表明: 金属太赫兹超表面传感器对折射率和甲烷体积分数的灵敏度分别为 949 GHz/RIU 和 4.4 GHz/%, 且折射率和甲烷体积分数与 QBIC 谐振峰的变化呈较好的线性关系。设计了一种方环金属超表面甲烷传感器, 将其与圆环结构进行对比, 发现圆环结构在  $Q$  因子、调制深度和灵敏度等方面均优于方环结构。

**关键词:** 甲烷传感器; 太赫兹超表面传感器; 连续域束缚态; 圆环结构; 折射率; 灵敏度

中图分类号: TD712

文献标志码: A

Design of terahertz metasurface methane sensor based on bound states in the continuum

LIU Hai, WANG Qiyao, GAO Peng, WANG Xinyan, FENG Xingyu, CUI Hongzhong, GAO Pengfei  
(School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** Compared to traditional methane sensors used in mines, the metasurface methane sensor has significant advantages in sensitivity, stability, and other aspects, making it better suited to meet the practical needs of mine production. To address the issue of relatively low sensitivity to refractive index in existing metal terahertz metasurface sensors, a terahertz metasurface methane sensor based on bound states in the continuum was designed. The metasurface structure consisted of a three-layer configuration: metal dielectric metal (MDM), where the metal material was gold, and the dielectric material was polyimide. The upper metal structure was a circle, and by adjusting the size of the opening on the left side, the symmetry of the structure could be altered, which in turn induced quasi bound states in the continuum (QBIC). The analysis results showed that when the left-side opening gap was  $5\ \mu\text{m}$ , the modulation depth was maximal at 95.69%. A methane-sensitive membrane material (cryptophane-A) was then applied to the metasurface structure to form the methane sensor. Five different methane volume fractions and five environmental refractive indices were selected to validate the methane sensor's detection performance. The results showed that the sensitivity of the metal terahertz metasurface sensor to refractive index and methane volume fraction were 949 GHz/RIU and 4.4 GHz/%, respectively, and both the refractive index and methane volume fraction exhibited a good linear relationship with the QBIC resonance peak shift. A square ring metal metasurface methane sensor was designed and compared with the circular ring structure. It was found that

收稿日期: 2024-11-06; 修回日期: 2025-02-20; 责任编辑: 胡娴。

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFC2902701); 国家自然科学基金项目 (51874301)。

作者简介: 刘海 (1983—), 男, 湖北仙桃人, 教授, 博士, 博士研究生导师, 主要研究方向为硅基集成光电器件、超表面器件、光学传感器等, E-mail: lhai\_hust@hotmail.com。

引用格式: 刘海, 王麒尧, 高鹏, 等. 基于连续域束缚态的太赫兹超表面甲烷传感器设计[J]. 工矿自动化, 2025, 51(2): 48-56.

LIU Hai, WANG Qiyao, GAO Peng, et al. Design of terahertz metasurface methane sensor based on bound states in the continuum[J]. Journal of Mine Automation, 2025, 51(2): 48-56.



扫码移动阅读

the circular ring structure outperformed the square ring structure in terms of  $Q$  factor, modulation depth, and sensitivity.

**Key words:** methane sensor; terahertz metasurface sensor; bound states in the continuum; circular ring structure; refractive index; sensitivity

## 0 引言

随着我国煤矿开采强度的提高、开采深度的增加,地质条件越来越复杂,导致矿井瓦斯爆炸等事故频发。近 20 a 来,我国共发生煤与瓦斯突出事故 484 起,死亡 3 195 人<sup>[1]</sup>,其中瓦斯爆炸事故占较大比例。甲烷作为瓦斯的主要成分之一,矿井不同地方对于甲烷浓度的要求不同<sup>[2]</sup>。因此,矿用甲烷传感器的灵敏度至关重要。目前,矿用甲烷传感器主要包括催化燃烧式、半导体、红外光谱和光离子化等类型<sup>[3-5]</sup>。在实际应用中,催化燃烧式传感器易受温度和湿度等环境因素的影响,且催化剂表面温度过高会使其成为爆炸源<sup>[6]</sup>;红外光谱传感器易因烷烃气体吸收谱线重叠而出现误差<sup>[7]</sup>。因此,开发一种新型矿用甲烷传感器显得尤为重要。

超表面是一种人工设计的具有亚波长厚度的电磁材料,已经广泛应用于传感<sup>[8]</sup>、滤波<sup>[9]</sup>、吸收<sup>[10]</sup>、成像<sup>[11]</sup>等领域。相较于普通气体传感器,超表面气体传感器具有体积小、灵敏度高、稳定性强等优势,能够更好地满足矿井复杂环境要求<sup>[12-13]</sup>。超表面气体传感一个重要的参考指标是  $Q$  因子,可用于衡量超表面传感器谐振品质、能量损耗和灵敏度等关键性能。为了提升超表面传感器的  $Q$  因子,一种基于连续域束缚态(Bound States in the Continuum, BIC)的超表面传感器应运而生。BIC 是一种广泛存在于许多物理场中的无泄漏模式,能够实现波的完美束缚<sup>[14]</sup>。BIC 分为偶然型 BIC 和对称保护型 BIC。偶然型 BIC 通过调节参数使不同种类波的干涉相消,从而使谐振线宽消失,实现 BIC。对称保护型 BIC 是不向外界辐射能量且线宽为零的理想状态,理论上具有无限大的  $Q$  因子。如果破坏结构的对称性,则 BIC 与不同对称性的辐射模耦合,产生辐射泄漏,实现 BIC 到具有有限  $Q$  因子的准连续域束缚态(Quasi Bound States in the Continuum, QBIC)的转变<sup>[15]</sup>。Liu Bingwei 等<sup>[16]</sup>通过在金属超表面结构中引入不对称结构,控制电四极子和磁偶极子之间的干涉耦合,折射率灵敏度为 420 GHz/RIU,在传感方面具有潜在应用前景。Wang Ride 等<sup>[17]</sup>设计了一种利用磁偶极子的 QBIC 太赫兹等离子体元传感器,折射率灵敏度为 674 GHz/RIU。但这些金属太赫兹超

表面传感器对折射率的灵敏度相对较低,难以满足矿井应用要求。

在先前工作中,笔者提出了基于 Fano 谐振的全介质超表面甲烷传感器,通过硅纳米结构实现了高灵敏度和偏振无关性<sup>[18]</sup>。本文进一步创新性地设计了一种基于 BIC 的金属圆环太赫兹超表面,实现了对不同浓度甲烷气体的检测。相较于全介质 Fano 结构,本文采用金属-介质-金属(Metal Dielectric Metal, MDM)圆环设计,在太赫兹波段实现了更高的折射率灵敏度和更好的线性拟合。

## 1 理论模型与结构设计

### 1.1 超表面结构设计

太赫兹超表面为 MDM 三层结构,其阵列如图 1(a)所示。上层和下层材料为金,厚度  $t_1=0.2 \mu\text{m}$ ,电导率  $\sigma=4.561 \times 10^7 \text{ S/m}$ ;中介质层材料为聚酰亚胺,厚度  $t_2=10 \mu\text{m}$ ,介电常数为 3.5。单元结构如图 1(b)所示, $x$  和  $y$  方向的周期  $P=P_x=P_y=20 \mu\text{m}$ ,圆环结构外径  $R_1=9 \mu\text{m}$ ,内径  $R_2=7 \mu\text{m}$ ,圆环右侧开口间距  $g_1=2 \mu\text{m}$ ,通过调节左侧开口间距  $g_2$  可实现对 QBIC 光谱的调节。

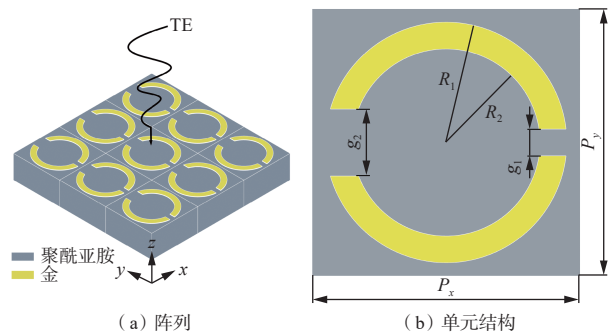


图 1 太赫兹超表面结构

Fig. 1 Terahertz metasurface structure

使用多物理场仿真软件 COMSOL Multiphysics 进行计算和仿真,计算过程选取超表面结构的 1 个周期作为仿真域。由于该结构打破的是  $y$  方向的对称性, $x$  方向仍然保持对称,所以将入射光设置为 TE 波(横电波),沿  $z$  方向垂直入射, $x$  和  $y$  方向设置为周期性边界条件, $z$  方向设置完美匹配层。

### 1.2 对称结构

当  $g_1=g_2=2 \mu\text{m}$  时,结构保持  $C_2$  对称性。通过仿真测试了超表面在入射 TE 波时的反射光谱特性

(图 2(a)), 反射光谱仅在 8.27 THz 出现了 1 个反射峰。该模式下的电场和磁场分布如图 2(b) 所示。电场能量主要集中在圆环左右 2 个狭缝处、圆环最高点和最低点。由于结构的对称性设计, 电场关于  $x$  轴和  $y$  轴方向对称分布。电场中红色区域表示正电场的强集聚点, 而蓝色区域则表示负电场的强集聚点, 在狭缝处、圆环最高点和最低点分别形成了等大反向的电场分布, 且上下 2 个半圆环的左右两端电场同向, 通过该电场分布能够很明显观察到电偶极子的存在。同时能够观察到  $y$  方向截面中环形磁场的分布, 这也说明了环偶极子的存在。为了定量分析该模式下谐振产生的物理机制, 在笛卡尔坐标系下对其进行多极分解, 分别计算了电偶极子、磁偶极子、环偶极子、电四极子和磁四极子的对数归一化散射功率<sup>[19]</sup>, 如图 2(c) 所示。

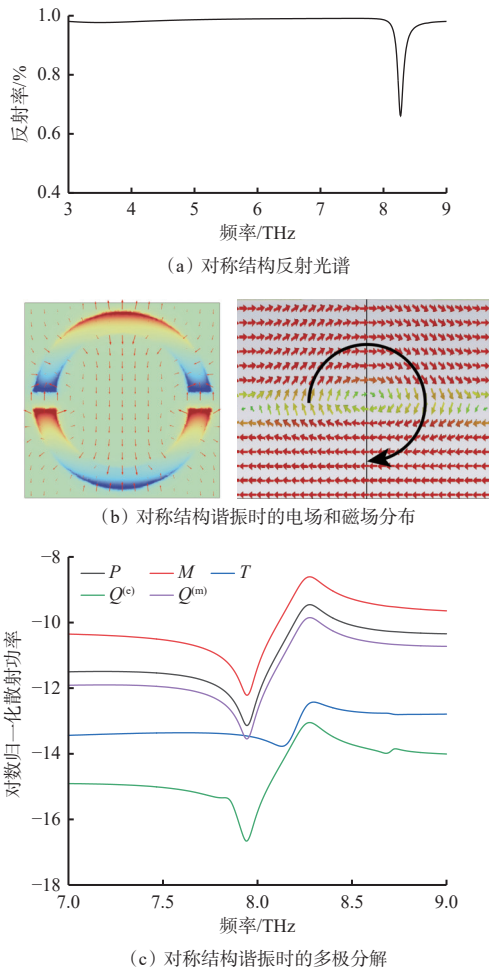


图 2 对称结构相关物理特性

Fig. 2 Physical properties related to symmetrical structure

电偶极子散射功率:

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

式中:  $\omega$  为角频率;  $\mathbf{j}$  为感应电流密度;  $\mathbf{r}$  为位置矢量。

磁偶极子散射功率:

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

式中  $c$  为真空中的光速。

环偶极子散射功率:

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

电四极子散射功率:

$$Q_{\alpha\beta}^{(e)} = \frac{1}{i2\omega} \int \left( r_\alpha j_\beta + r_\beta j_\alpha - \frac{2}{3}(\mathbf{r} \cdot \mathbf{j}) \right) d^3\mathbf{r} \quad (4)$$

式中  $\alpha, \beta$  表示  $x, y, z$  3 个方向的分量。

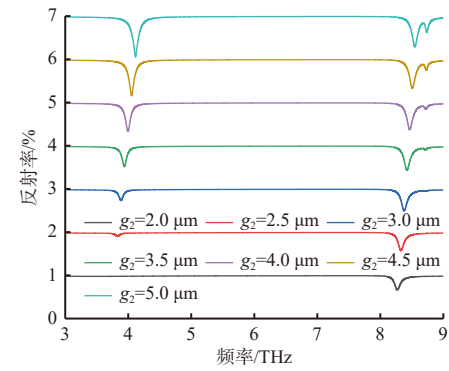
磁四极子散射功率:

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

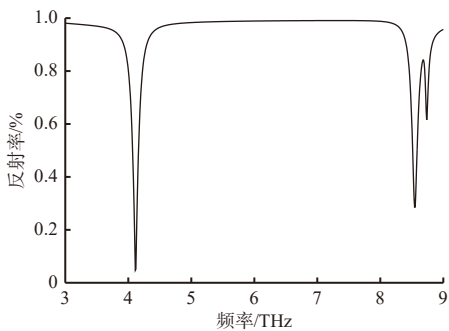
多极分解所计算的不同多极矩的散射功率可以展现不同极子在这一谐振频率中的贡献占比。从对称结构的远场散射功率随频率的变化情况可以直观地得到谐振频率附近不同极子的激发情况。在谐振频率 8.27 THz 附近, 电偶极子占比明显增多, 在远场散射功率中贡献最大, 其次是环偶极子, 说明在对称结构中, 谐振主要是由电偶极子所激发, 这与前面根据电场和磁场分布得出的分析结果基本一致。

### 1.3 非对称结构

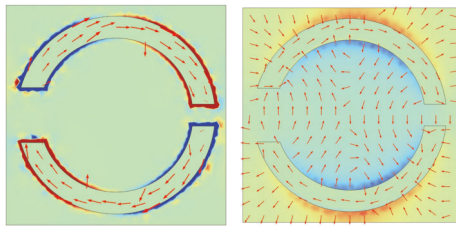
当  $g_2 \neq g_1$  时, 原结构的  $C_2$  对称性被打破, 出现辐射泄漏, 原本存在的辐射向高频移动, 同时在低频处出现了新的谐振, 即 QBIC 谐振。当  $g_2$  从  $2 \mu\text{m}$  增加到  $5 \mu\text{m}$  时, QBIC 谐振的线宽逐渐增大, 结构原本存在的谐振和新产生的 QBIC 谐振也逐渐向高频移动, 如图 3(a) 所示。随着对称结构被打破, 在原有反射峰的右侧也出现了一个小型的 QBIC 谐振峰。由于该峰性能较差且与原有谐振频率较为接近, 对于本文所要分析的传感特性意义不大, 所以重点分析左侧性能更好的 QBIC 峰。当  $g_2 = 5 \mu\text{m}$  时, 反射曲线如图 3(b) 所示, 原来存在的反射峰蓝移至 8.544 THz 处, QBIC 谐振出现在 4.112 THz 处。打破对称性后 QBIC 谐振下的金属圆环表面电场和磁场分布如图 3(c) 所示, 由于沿  $y$  方向的结构对称性被打破, 所以原本对称分布的电场不再沿  $y$  方向对称分布, 上下 2 个半环左右两端的电场反向分布。根据金属内部表面电流的流向和右手定则, 在圆环内部会形成一个负向磁场, 圆环外会形成一个正向磁场。金属圆环内部电场分布如图 3(d) 所示, 结合内部表面电流分布, 能够明显观察到电四极子的存在。同样, 在笛卡尔坐标系下, 利用电磁多极理论进行分析, 结果如图 3(e) 所示, 在 QBIC 谐振下, 磁偶极子占主导, 其次是电四极子。



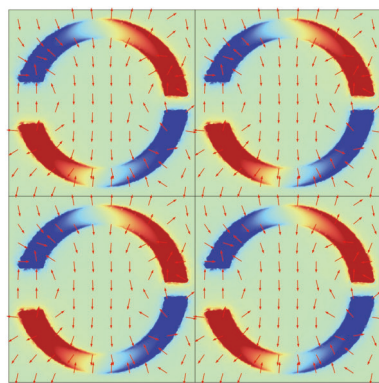
(a) 非对称结构的反射光谱



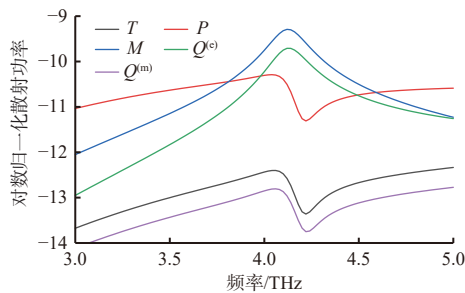
(b)  $g_1=5 \mu\text{m}$ 时结构的反射光谱



(c) QBIC谐振时金属圆环表面电场和磁场分布



(d) 金属圆环内部电场分布



(e) 非对称结构的多极分解

图3 非对称结构相关物理特性

Fig. 3 Physical properties related to asymmetric structure

结合电场和磁场分布情况可以发现,磁偶极子与电四极子是伴生的,这也证明了在3.8~4.2 THz附近存在一个无辐射损耗的对称保护型BIC。能量被完全束缚在结构中,不会向外泄漏到自由空间中,只有在打破对称性后,能量泄漏才能形成谐振。

$Q$ 因子和调制深度MD是衡量超表面结构光谱特性的重要指标,其计算公式分别为<sup>[20]</sup>

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f} \quad (6)$$

$$MD = \frac{|T_{\max} - T_{\min}|}{T_{\max}} \times 100\% \quad (7)$$

式中: $f_0$ 为谐振频率; $\Delta f$ 为半功率点的频宽,即3 dB带宽; $T_{\max}$ 为谐振峰处的反射率; $T_{\min}$ 为谐振谷处的反射率。

调制深度是在外部刺激下,超表面光学响应(如反射率、透射率或吸收率)相对于未调制状态下的变化程度。通过改变结构的几何参数,可改变QBIC谐振的2个性能参数 $Q$ 和MD。固定开口大小 $g_1$ 和圆环内径 $R_2$ 对 $Q$ ,MD的影响见表1。当 $g_1$ 为2  $\mu\text{m}$ 、 $R_2$ 为7  $\mu\text{m}$ 时传感性能较优,该条件下,金层厚度 $t_1$ 从0.02  $\mu\text{m}$ 增加至2  $\mu\text{m}$ 的反射光谱如图4所示。金层厚度变化对 $Q$ ,MD的影响见表2,可看出金层厚度为0.2  $\mu\text{m}$ 时传感性能较优。

表1 几何参数变化对 $Q$ ,MD的影响

Table 1 Influence of geometric parameter changes on  $Q$  and MD

$g_1/\mu\text{m}$	$R_2/\mu\text{m}$	$Q$	MD
1	6.8	18.53	58.49
	7.0	20.18	61.21
	7.2	18.89	63.34
2	6.8	41.76	96.41
	7.0	42.43	95.69
	7.2	41.30	96.24
3	6.8	45.74	58.10
	7.0	44.45	56.12
	7.2	41.69	53.84

## 2 QBIC 谐振传感性能验证

根据图3(a)和式(7)可知, $g_2=5 \mu\text{m}$ 时调制深度最大,光谱线较宽,谐振强度相对较强。此时存在原有谐振和QBIC谐振,为了检验2种谐振下传感器的性能,在超表面结构上覆盖1层甲烷气敏膜材料(cryptophane-A),得到甲烷传感器,膜的厚度为0.2  $\mu\text{m}$ ,

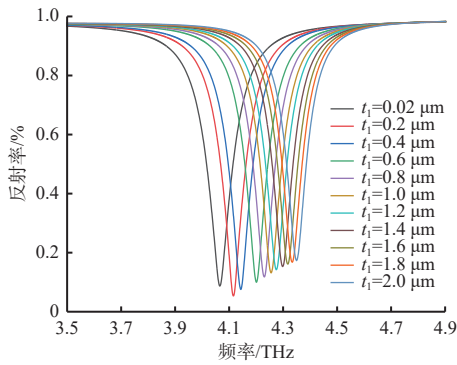


图 4 不同金层厚度下的反射光谱

Fig. 4 Reflection spectra at different gold layer thicknesses

表 2 金层厚度变化对 Q, MD 的影响

Table 2 Influence of gold layer thickness changes on Q and MD

$t_1/\mu\text{m}$	Q	MD	$t_1/\mu\text{m}$	Q	MD
0.02	38.69	92.29	1.2	46.43	86.62
0.2	42.43	95.69	1.4	47.73	65.65
0.4	41.77	94.02	1.6	48.21	84.47
0.6	44.68	91.88	1.8	48.17	83.90
0.8	43.36	89.35	2.0	48.35	83.38
1.0	45.27	88.18			

长度刚好覆盖上层金属结构。cryptophane-A 分子结构中 存在一个空腔,空腔大小与甲烷分子接近,当甲烷遇到这种材料时,会被捕捉到空腔内,如图 5 所示<sup>[21]</sup>。这种材料主要通过磁控溅射沉积技术、化学沉积技术、溶胶-凝胶技术等方法制备<sup>[22]</sup>,对于甲烷具有较高灵敏性,其折射率  $n_{\text{eff-CH}_4}$  与气体体积分数  $C$  之间的关系为<sup>[23]</sup>

$$n_{\text{eff-CH}_4} = 1.4478 - 0.0038C \quad (8)$$

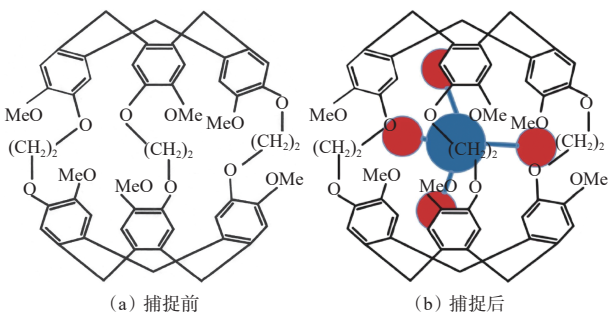
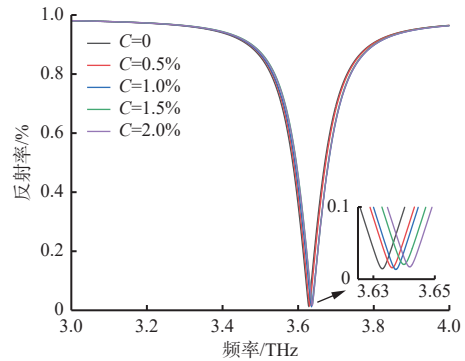


图 5 捕捉甲烷分子前后的 cryptophane-A 结构<sup>[21]</sup>

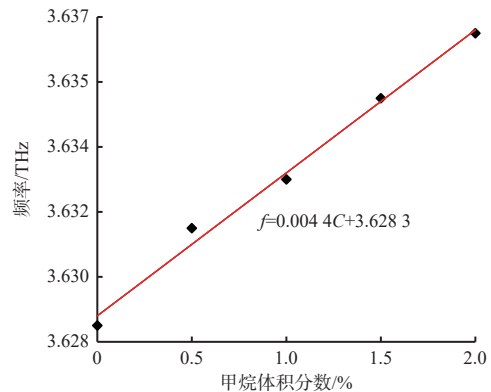
Fig. 5 Cryptophane-A structure before and after capturing methane molecules<sup>[21]</sup>

取体积分数分别为 0, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0% 的甲烷进行仿真,环境折射率为 1 时的反射光谱仿真结果如图 6(a)所示。随着甲烷体积分数增大,反射光谱的谐振频率逐渐增大,发生蓝移。谐振频率  $f$  与甲烷体积分数  $C$  呈明显的线性关系,即  $f=0.004\ 4C+3.628\ 3$ ,如图 6(b)所示,曲线的斜率为该传感器对甲

烷气体的灵敏度,为 4.4 GHz/%,线性拟合度达 99.18%,可用于井下甲烷检测。但实际煤矿生产环境中存在温度较高、气压较大等情况,会对环境折射率产生一定影响。因此,可以通过检测环境折射率来判断井下环境的具体情况,从而提高煤矿生产安全性。



(a) 不同甲烷体积分数下的反射光谱



(b) QBIC 谐振频率与甲烷体积分数的关系

图 6 不同体积分数下甲烷传感器性能仿真结果

Fig. 6 Simulation results of methane sensor performance at different volume fractions

设环境折射率  $n$  分别为 1.00, 1.02, 1.04, 1.06, 1.08, 1.10 进行仿真, QBIC 和原有谐振的反射光谱如图 7(a)所示。随着环境折射率逐渐增大,反射光谱的整体形状仅有微小变化,说明 2 种谐振下的  $Q$  因子基本不变,不会影响传感器基本性能。同时,2 种谐振下谐振频率均减小,即反射光谱发生红移。QBIC 谐振频率与环境折射率的关系如图 7(b)所示,通过线性拟合可得  $f = -0.949n + 5.059$ ,拟合度达 99.57%;原有谐振频率与环境折射率的关系如图 7(c)所示,通过线性拟合可得  $f = -1.040n + 9.857$ ,线性拟合度达 99.55%。曲线斜率表示折射率灵敏度, QBIC 和原有谐振折射率灵敏度分别为 949, 1 040 GHz/RIU。通过灵敏度和线性拟合度判断 2 种谐振下传感性能几乎无异,但通过计算得到 QBIC 和原有谐振的调制深度分别为 95.69% 和 71.20%。因此, QBIC 谐振的传感性能明显优于原有谐振。

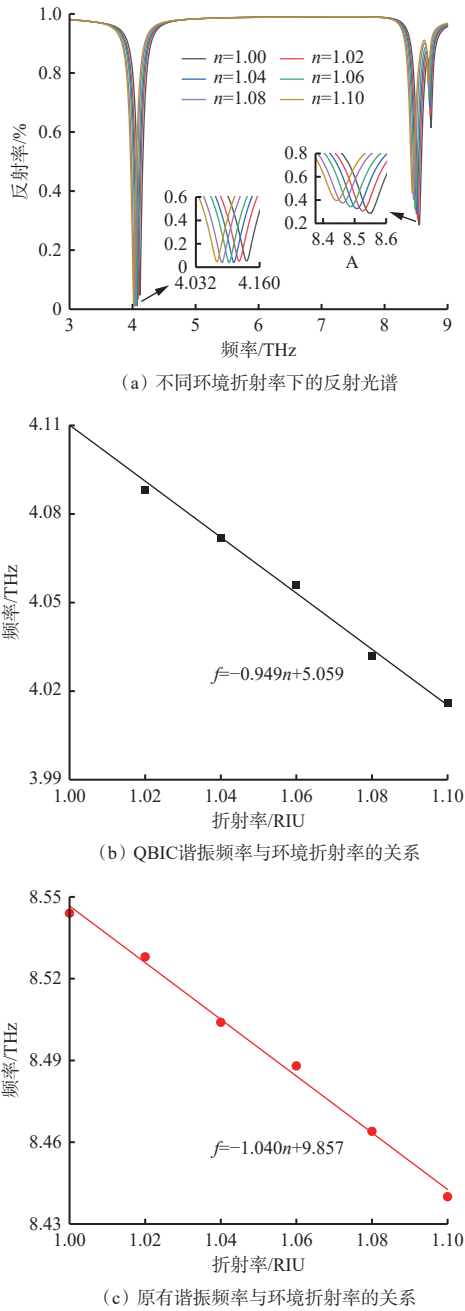
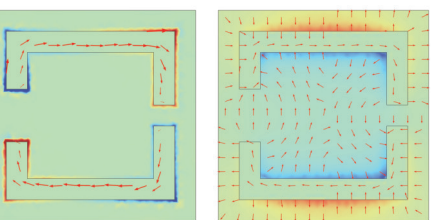
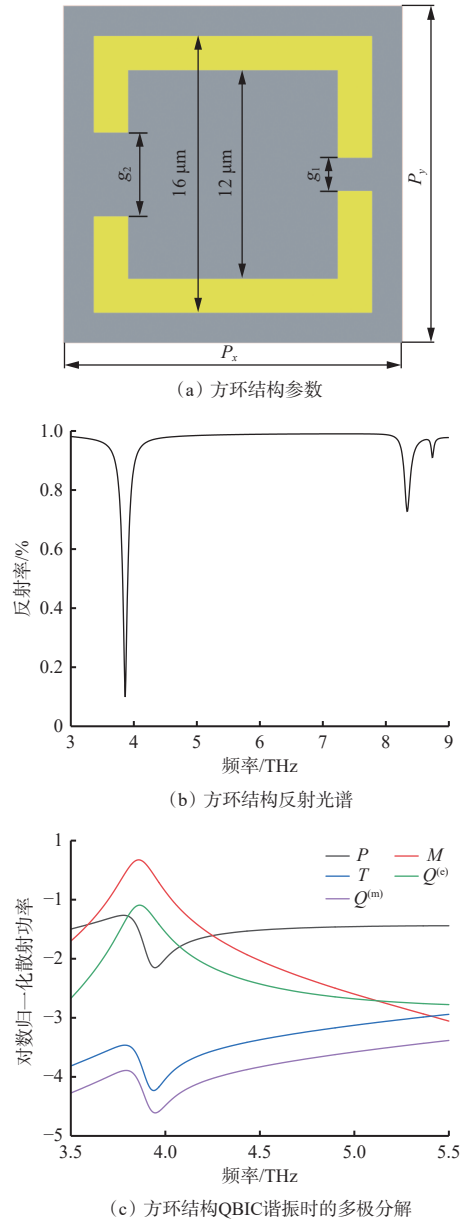


图7 不同环境折射率下甲烷传感器性能仿真结果

Fig. 7 Simulation results of methane sensor performance at different environmental refractive indices

### 3 与方环结构的性能对比

为了验证圆环结构的传感性能,设计了一种金属正方形环形结构,方环外围边长为  $16\ \mu\text{m}$ ,内侧边长为  $12\ \mu\text{m}$ ,在相同的不对称度下进行对比( $g_2=5\ \mu\text{m}$ ,  $g_1=2\ \mu\text{m}$ ),如图8(a)所示。在该结构下, QBIC 谐振出现在  $3.86\ \text{THz}$  处,如图8(b)所示,此时  $Q$  因子为  $41.45$ ,调制深度为  $90.01\%$ 。该结构 QBIC 谐振时的多极分解如图8(c)所示,电场和磁场分布如图8(d)所示,方环结构与圆环结构的结果基本相同,均为磁偶极子所激发。



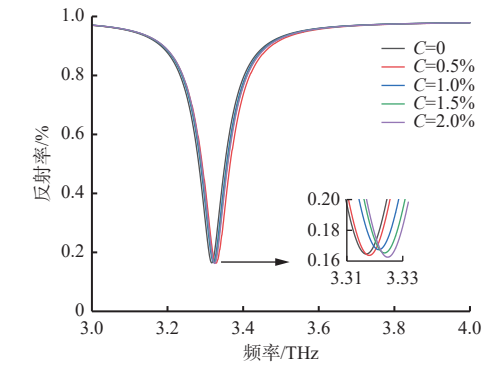
(d) 方环结构QBIC谐振时电场和磁场分布

图8 方环结构的参数和相关物理特性

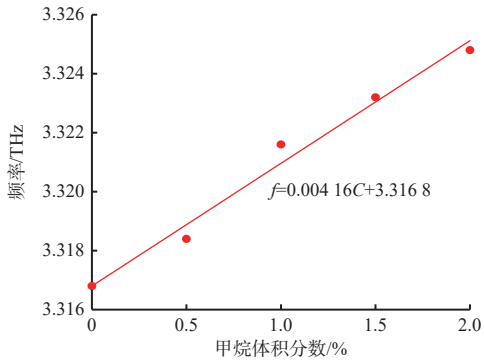
Fig. 8 Parameters and related physical properties of square ring structure

同样选取5种甲烷体积分数和6种环境折射率对方环结构QBIC谐振进行分析,结果如图9所示。

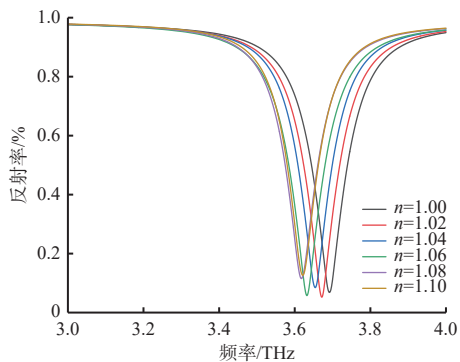
由图9(a)和图9(b)可知,随着甲烷体积分数升高,反射光谱的谐振频率逐渐增大,发生蓝移。谐振频率  $f$  与甲烷体积分数  $C$  呈明显的线性关系,即  $f=0.004\ 16C+3.616\ 8$ ,拟合度为  $98.26\%$ ,甲烷体积分数的灵敏度为  $4.16\ \text{GHz}/\%$ 。由图9(c)和图9(d)可



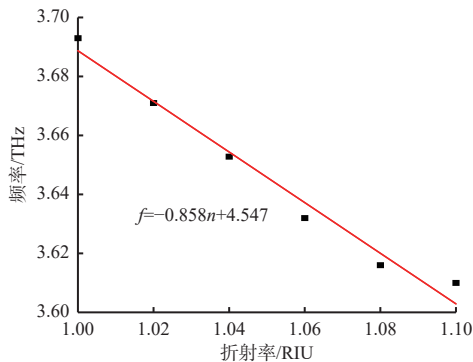
(a) 方环结构在不同甲烷体积分数下的反射光谱



(b) 方环结构QBIC谐振频率与甲烷体积分数的关系



(c) 方环结构在环境折射率的反射光谱



(d) 方环结构QBIC谐振频率与环境折射率的关系

图 9 方环结构传感器的性能仿真结果

Fig. 9 Simulation results of square ring structure sensor performance

知,随着环境折射率逐渐增大,谐振频率均减小,即反射光谱发生红移。谐振频率  $f$  与环境折射率呈明显的线性关系,即  $f = -0.858n + 4.547$ ,拟合度为 97.81%,

折射率灵敏度为 858 GHz/RIU。详细参数对比见表 3,可看出圆环结构传感器的基本性能和传感性能均优于方环结构。

表 3 圆环和方环结构传感器性能对比

Table 3 Comparison of performance between circular and square ring structure sensors

形状	性能参数	参数值
圆环	$Q$ 因子	42.43
	调制深度/%	95.6
	折射率灵敏度/(GHz·RIU <sup>-1</sup> )	949
	甲烷体积分数灵敏度/(GHz·% <sup>-1</sup> )	4.4
方环	$Q$ 因子	41.45
	调制深度/%	90.01
	折射率灵敏度/(GHz·RIU <sup>-1</sup> )	858
	甲烷体积分数灵敏度/(GHz·% <sup>-1</sup> )	4.16

本文设计的传感器与现有太赫兹超表面传感器的折射率灵敏度对比结果见表 4,可看出本文设计的太赫兹超表面甲烷传感器的灵敏度最高,具备良好的应用价值。

表 4 太赫兹超表面传感器折射率灵敏度对比

Table 4 Comparison of refractive index sensitivities of terahertz metasurface sensors

文献出处	原理类别	折射率灵敏度/(GHz·RIU <sup>-1</sup> )
文献[16]	QBIC	420
文献[17]	QBIC	674
文献[18]	QBIC	775.7
文献[24]	EIT	133.8
本文	QBIC	949

## 4 结论与展望

### 4.1 结论

1) 基于连续域束缚态设计了一种金属圆环的超表面结构,通过改变圆环左侧开口大小破坏结构的对称性,实现 BIC 向 QBIC 的转变。该结构调制深度为 95.69%,在金属超表面传感器中表现出优异性能。

2) 在超表面结构上涂敷甲烷气敏材料,实现对甲烷的传感检测。仿真结果表明,该超表面传感器对甲烷的灵敏度为 4.4 GHz/%,折射率灵敏度高达 949 GHz/RIU,线性拟合度均超过 99%。

3) 设计了一种方环金属超表面甲烷传感器,对比发现,圆环结构在  $Q$  因子、调制深度和灵敏度等方面优于方环结构,为超表面甲烷传感器的设计提供了思路。

### 4.2 不足与未来展望

基于连续域束缚态提出了一种灵敏度较高的超

表面甲烷传感器,但在以下方面仍存在一定局限性:

1) 仿真的局限性。研究完全基于电磁仿真平台(如 COMSOL Multiphysics),未涉及实际器件的制备与实验验证。仿真模型能反映理想条件下的性能,但实际加工中的工艺误差(如金属层粗糙度、介质层均匀性)可能显著影响 QBIC 谐振的  $Q$  因子和调制深度。此外,矿井实际环境中温度、湿度和气压等因素对传感器性能的影响需进一步探究。

2) 未考虑气敏材料稳定性。研究中气敏材料(cryptophane-A)的折射率与甲烷浓度呈完美线性关系,但实际应用中,材料可能受温度、湿度干扰或共存气体(如  $\text{CO}_2$ 、水蒸气)的影响,此外,在加工中甲烷气敏膜涂敷的均匀性等问题仍需进一步探究。

3) 参数优化的局限性。当前结构优化依赖手动参数扫描(如开口尺寸、金层厚度),缺少多种集合参数的协同优化,限制了性能进一步提升。未来可构建参数敏感度矩阵,结合机器学习驱动的优化框架,实现  $Q$  因子、灵敏度和调制深度的均衡提升。

针对上述局限性,在今后的研究中还需要开展以下工作:

1) 搭建太赫兹频段的实验平台,通过电子束光刻法<sup>[25]</sup>制备超表面器件,并利用太赫兹时域光谱系统实测反射谱。同时,设计甲烷浓度、温度和湿度等可控的气体测试腔,模拟矿井环境,验证仿真结果。

2) 可以结合机器学习开发自适应校准模型,以应对矿井环境的动态变化,采集多维度数据(如谐振频率、温度和湿度等),构建基于神经网络的回归模型,实时预测甲烷浓度,以提高检测的灵活性<sup>[26]</sup>。

3) 根据矿井实际工作环境,结合已有的矿井甲烷传感子系统和煤矿安全监测系统,设计超表面甲烷检测系统,通过煤矿安全监测系统的分层架构实现数据采集和传输,确保矿井内外的安全监控。

#### 参考文献(References):

- [1] 张超林,王恩元,王奕博,等.近20年我国煤与瓦斯突出事故时空分布及防控建议[J].*煤田地质与勘探*,2021,49(4):134-141.  
ZHANG Chaolin, WANG Enyuan, WANG Yibo, et al. Spatial-temporal distribution of outburst accidents from 2001 to 2020 in China and suggestions for prevention and control[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(4): 134-141.
- [2] 国家安全生产监督管理总局.煤矿安全规程[M].北京:煤炭工业出版社,2022.  
State Administration of Work Safety. Coal mine safety regulations[M]. Beijing: Coal Industry Press, 2022.
- [3] 马啸,卫琛浩,景欣瑞,等.矿井瓦斯传感器研究现状及

发展趋势[J].*煤炭与化工*,2023,46(3):99-102,105.

- MA Xiao, WEI Chenhao, JING Xinrui, et al. Research status and development trend of mine gas sensor[J]. *Coal and Chemical Industry*, 2023, 46(3): 99-102, 105.
- [4] 刘文鹏,陈向东,吴宇尘.基于脉冲供电的催化燃烧式气体传感系统[J].*信息技术*,2020,44(8):1-6,11.  
LIU Wenpeng, CHEN Xiangdong, WU Yuchen. Catalytic combustion gas sensing system based on pulse power[J]. *Information Technology*, 2020, 44(8): 1-6, 11.
- [5] CHEN Yang, ZHANG Wenshuang, LUO Na, et al. Defective ZnO nanoflowers decorated by ultra-fine Pd clusters for low-concentration  $\text{CH}_4$  sensing: controllable preparation and sensing mechanism analysis[J]. *Coatings*, 2022, 12(5). DOI: 10.3390/coatings12050677.
- [6] 陈享享,刘天豪,欧阳云飞,等.基于金属氧化物半导体的瓦斯气体传感器研究现状及进展[J].*金属矿山*,2023(11):34-44.  
CHEN Xiangxiang, LIU Tianhao, OUYANG Yunfei, et al. Research status and progress of coal mine gas sensor based on metal oxide semiconductor[J]. *Metal Mine*, 2023(11): 34-44.
- [7] 梁涛涛,陈成锋,田富超,等.甲烷气体检测技术及其在煤矿中的应用[J].*煤炭科学技术*,2021,49(4):40-48.  
LIANG Yuntao, CHEN Chengfeng, TIAN Fuchao, et al. Methane gas detection technology and its application in coal mines[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(4): 40-48.
- [8] FENG Jixin, WANG Xianghui, SHI Weinan, et al. Asymmetric dumbbell dimers simultaneously supporting quasi-bound states in continuum and anapole modes for terahertz biosensing[J]. *Nanophotonics*, 2024, 13(21): 4007-4017.
- [9] LYU Qihao, QIN Xu, HU Mingzhe, et al. Metatronics-inspired high-selectivity metasurface filter[J]. *Nanophotonics*, 2024, 13(16): 2995-3003.
- [10] QARONY W, MAYET A S, PONIZOVSKAYA-DEVINE E, et al. Achieving higher photoabsorption than group III-V semiconductors in ultrafast thin silicon photodetectors with integrated photon-trapping surface structures[J]. *Advanced Photonics Nexus*, 2023, 2(5). DOI: 10.1117/1.APN.2.5.056001.
- [11] LI Liu, WANG Shuai, ZHAO Feng, et al. Single-shot deterministic complex amplitude imaging with a single-layer metalens[J]. *Science Advances*, 2024, 10(1). DOI: 10.1126/sciadv.adl0501.
- [12] LIU Zeqian, WANG Bin, WANG Shang, et al. Mid-infrared high performance dual-Fano resonances based on all-dielectric metasurface for refractive index and gas sensing[J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 177. DOI: 10.1016/j.optlastec.2024.111140.
- [13] DANILA O, GROSS B M. Towards highly efficient nitrogen dioxide gas sensors in humid and wet

- environments using triggerable-polymer metasurfaces[J]. *Polymers*, 2023, 15(3). DOI: [10.3390/polym15030545](https://doi.org/10.3390/polym15030545).
- [14] MARINICA D C, BORISOV A G, SHABANOV S V. Bound states in the continuum in photonics[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(18). DOI: [10.1103/PhysRevLett.100.183902](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.183902).
- [15] 姚建铨, 李继涛, 张雅婷, 等. 周期光学系统中的连续域束缚态[J]. *中国光学(中英文)*, 2023, 16(1): 1-23. YAO Jianquan, LI Jitao, ZHANG Yating, et al. Bound states in continuum in periodic optical systems[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(1): 1-23.
- [16] LIU Bingwei, PENG Yan, JIN Zuanming, et al. Terahertz ultrasensitive biosensor based on wide-area and intense light-matter interaction supported by QBIC[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 462. DOI: [10.1016/j.cej.2023.142347](https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.142347).
- [17] WANG Ride, XU Lei, HUANG Lujun, et al. Ultrasensitive terahertz biodetection enabled by quasi-BIC-based metasensors[J]. *Small*, 2023, 19(35). DOI: [10.1002/smll.202301165](https://doi.org/10.1002/smll.202301165).
- [18] 刘海, 周彤, 陈聪, 等. 基于 Fano 共振的全介质型超表面甲烷传感器设计[J]. *工矿自动化*, 2023, 49(9): 106-114. LIU Hai, ZHOU Tong, CHEN Cong, et al. Design of all dielectric metasurface methane sensor based on Fano resonance[J]. *Journal of Mine Automation*, 2023, 49(9): 106-114.
- [19] CHEN Xu, FAN Wenhui, JIANG Xiaoqiang, et al. High-Q toroidal dipole metasurfaces driven by bound states in the continuum for ultrasensitive terahertz sensing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(7): 2181-2190.
- [20] LEI Pengliang, NIE Guozheng, LI Huilin, et al. Multifunctional terahertz device based on plasmon-induced transparency[J]. *Physica Scripta*, 2024, 99(7). DOI: [10.1088/1402-4896/ad5120](https://doi.org/10.1088/1402-4896/ad5120).
- [21] 王帅. 基于 SPR 的光纤甲烷气体传感研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2021. WANG Shuai. Research on fiber optic methane gas sensing based on SPR[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2021.
- [22] 郭岩宝, 刘承诚, 王德国, 等. 甲烷传感器气敏材料的研究现状与进展[J]. *科学通报*, 2019, 64(14): 1456-1470. GUO Yanbao, LIU Chengcheng, WANG Deguo, et al. Advances in the development of methane sensors with gas-sensing materials[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(14): 1456-1470.
- [23] YANG Jianchun, ZHOU Lang, CHE Xin, et al. Photonic crystal fiber methane sensor based on modal interference with an ultraviolet curable fluoro-siloxane nano-film incorporating cryptophane A[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, 235: 717-722.
- [24] CHEN Yuxuan, SUN Yongzheng, ZHOU Weijun, et al. Conductively coupled terahertz metamaterials with dual functions of electromagnetically induced transparent and Fano effects for sensing applications[J]. *Physica Scripta*, 2024, 99(10). DOI: [10.1088/1402-4896/ad7338](https://doi.org/10.1088/1402-4896/ad7338).
- [25] CHEN Yiqin, BI Kaixi, WANG Qianjin, et al. Rapid focused ion beam milling based fabrication of plasmonic nanoparticles and assemblies via "sketch and peel" strategy[J]. *ACS Nano*, 2016, 10(12): 11228-11236.
- [26] RUSSELL B J, MENG Jiajun, CROZIER K B. Mid-infrared gas classification using a bound state in the continuum metasurface and machine learning[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(19): 22389-22398.
- (上接第 47 页)
- [17] MAKDISSY T, GILLARD R, FOURN E, et al. Phase-shifting cell loaded with variable capacitances for dual linearly polarized reflectarrays[J]. *Electronics Letters*, 2012, 48(21): 1319-1320.
- [18] DORST L, FONTIJNE D, MANN S. Geometric algebra for computer science[M]. Amsterdam: Elsevier Science Ltd., 2007.
- [19] 李双德, 刘芫健, 林乐科. 28 GHz 室内毫米波信道路径损耗模型研究[J]. *电波科学学报*, 2017, 32(5): 602-611. LI Shuangde, LIU Yuanjian, LIN Leke. Path loss models of millimeter-wave channel in indoor environment at 28 GHz[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2017, 32(5): 602-611.
- [20] 方遥. 宽带平面反射阵设计及 5G 毫米波室内通信应用研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019. FANG Yao. Research on the design of broadband reflectarray antenna for indoor 5G millimeter wave communication applications[D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2019.
- [21] 乐舒瑶. 基于可重构反射超表面的室内无线信号覆盖[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2022. LE Shuyao. Indoor wireless signal coverage based on reconfigurable reflective metasurfaces[D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2022.