

## 研究论文

# 一种用于癌细胞检测的高灵敏度多谐振太赫兹超表面生物传感器

黄育杰<sup>1,2</sup>, 郝亚峰<sup>1,2</sup>, 刘雨航<sup>2</sup>, 牛文字<sup>1,2</sup>, 李腾腾<sup>1,2\*</sup>

**摘要** 面对癌症发病率上升的现状,癌细胞早期、快速、高灵敏检测成为生物传感技术研究重点,传统生物检测方法存在诸多缺陷,太赫兹(THz)超表面传感器凭借无标记、非侵入、高灵敏度等优势在生物传感领域展现出良好应用潜力。针对现有 THz 超表面生物传感器谐振模式单一及性能有待提升的问题,提出了一种多谐振 THz 超表面生物传感器,该器件单元结构包括由 4 个开口谐振环(split ring resonator, SRR)与十字形金属复合的结构层、聚四氟乙烯(PTFE)介质间隔层、连续的底层金属。传感器在 2.933、3.412 和 3.637 THz 处产生 3 个窄带高吸收谐振峰,且在 1.00~1.40 的折射率变化范围内,谐振频率随折射率增加而红移,2.933 与 3.412 THz 处谐振峰的最大折射率灵敏度为 541 和 981 GHz/RIU,品质因子分别高达 320 与 82。本研究所设计的 THz 超表面结构在癌细胞及其相关生物标志物的高灵敏生物医学检测方面具有广阔应用前景。

**关键词** 太赫兹;超表面;生物传感;癌细胞检测;高灵敏度;高品质因子

癌症是全球主要的死亡原因之一,由于饮食、环境、人口老龄化等因素,全球癌症负担不断增加,2023 年,全球癌症新发病例约 1850 万例,死亡人数约 1040 万,预计到 2050 年,新发病例将激增至 3050 万<sup>[1]</sup>。因此,癌细胞的早期精准检测对提高患者生存率具有至关重要的意义。传统癌细胞检测技术主要依赖组织病理切片、血清肿瘤标志物检测、影像学诊断等方法,这些方法往往创伤大、检测周期长、样品预处理复杂、对细胞及分子水平的微小变化灵敏度较低,难以满足极早期预警需求<sup>[2]</sup>。

近年来,太赫兹(THz)超表面生物传感器凭借无标记、非侵入、高灵敏度等独特优势,为癌细胞的早期检测提供了全新途径<sup>[3-10]</sup>。THz 波是频率处于 0.1~10.0 THz 的电磁波,位于微波与红外波段之间<sup>[11-16]</sup>,对生物分子的氢键、水分子及细胞内介电常数变化高度敏感,能够在不破坏细胞结构的前提下,反映癌细胞与正常细胞在生化组成、微观结构及电学特性上的细微差异<sup>[17]</sup>。超表面作为一种由亚波长尺度人工微纳结构单元按特定规律排布构成的二维平面材料,其电磁响应特性可突破天然材料的固有物理限制<sup>[18-20]</sup>。依托微纳米尺度图案或周期性结构的复杂设计,可对等效介电常数与磁导率等电磁参数进行有效调控,从而实现局域电磁场增强,显著提升检测信噪比与品质因子,有效克服传统 THz 光谱灵敏度不足的问题<sup>[21]</sup>。与

1. 中北大学宽禁带半导体超越照明材料与技术全国重点实验室,太原 030051

2. 中北大学半导体与物理学院,太原 030051

收稿日期: 2026-03-27; 修回日期: 2026-04-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(62301509); 中国博士后科学基金面上项目(2025M770537)

作者简介: 黄育杰, 硕士研究生, 研究方向为光电超构器件及集成技术, 电子信箱: s202519024@st.nuc.edu.cn; 李腾腾(通信作者), 副教授, 研究方向为光电超构器件及系统集成技术、太赫兹功能器件、微纳光电材料与器件(探测传感方向)、激光产业化应用技术, 电子信箱: litengteng@nuc.edu.cn

引用格式: 黄育杰, 郝亚峰, 刘雨航, 等. 一种用于癌细胞检测的高灵敏度多谐振太赫兹超表面生物传感器[J]. 科技导报, 2026, 44(9): 116-123;

doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2026.03.00062

传统检测技术相比,基于 THz 超表面的无标记传感技术无须荧光染色、酶标记或复杂前处理,能够实现快速、原位、高灵敏的癌细胞识别与分析,在肿瘤早期筛查、精准诊断及动态监测等领域展现出重要的应用潜力<sup>[22]</sup>。其中,基于超表面的窄带吸波体折射率传感器凭借较高的品质因子与折射率灵敏度,在生物测试领域受到广泛关注<sup>[23-26]</sup>。Wang 等<sup>[17]</sup>设计了一种用于癌症诊断的 THz 超表面生物传感器,具有 504 GHz/RIU 的高灵敏度。Gao 等<sup>[27]</sup>设计并优化了一种双球结构 THz 吸波体生物传感器,实现了 451.88 的品质因子与 135 GHz/RIU 的灵敏度。She 等<sup>[28]</sup>基于连续谱中的准束缚态效应(quasi-bound state in the continuum, QBIC),开发了高灵敏度生物感测平台,能够在不引入抗体的情况下区分癌细胞。

然而,目前的相关工作基本存在谐振峰单一、制备难度高等缺点,且传感性能有待进一步提高。针对上述问题,本研究设计了一种易于加工的、基于多频段吸波效应的金属-绝缘层-金属(metal-insulator-metal, MIM)型 THz 超表面生物传感器。利用电磁仿真软件对所设计结构进行模拟,系统分析其谐振机理及关键结构参数对器件吸收性能的影响。在此基础上,进一步研究器件在不同折射率条件下的传感特性。研究表明,该器件在 THz 频段能够产生多个高吸收谐振峰,最高折射率灵敏度可达 981 GHz/RIU,品质因子可达 320,完全可以满足癌细胞及相关生物分子的高灵敏无标记检测需求。

## 1 结构设计与仿真

本研究所设计的传感器周期阵列结构如图 1 所示,单元结构包括由 4 个开口谐振环(split ring resonator, SRR)与十字形金属复合的结构层、聚四氟乙烯(PTFE)介质间隔层、连续的底层金属,结构层具有轴对称与中心对称特性,器件使用的所有金属材料均为铜(Cu)。THz 波从结构层入射,在特定 THz 频率条件下,SRR 可产生显著的场增强调制效应。经过优化后,确定超表面传感器的单元结构尺寸参数为: $L_1=6\text{ }\mu\text{m}$ ,  $L_2=12.5\text{ }\mu\text{m}$ ,  $L_3=2.56\text{ }\mu\text{m}$ ,  $L_4=4\text{ }\mu\text{m}$ ,  $L_5=80\text{ }\mu\text{m}$ ,  $R_1=15\text{ }\mu\text{m}$ ,  $R_2=11\text{ }\mu\text{m}$ ,  $T_1=0.2\text{ }\mu\text{m}$ ,  $T_2=26\text{ }\mu\text{m}$ ,  $T_3=0.1\text{ }\mu\text{m}$ 。

传感功能基于超表面的窄带吸波特性实现,为了

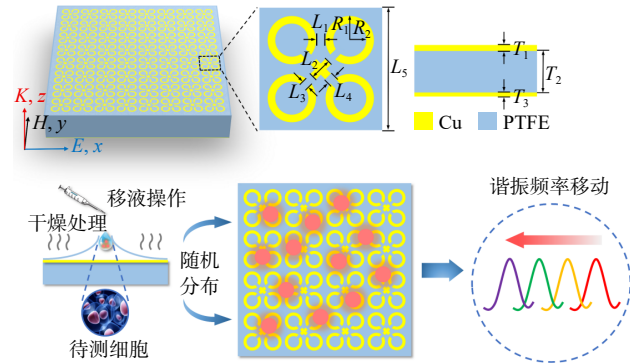


图 1 超表面结构示意图与应用原理

分析验证所提出的 THz 超表面生物传感器的具体性能,使用电磁仿真软件 CST Microwave Studio 2025 对结构进行建模与数值仿真计算。仿真时所选用的材料均可从材料库中获取,Cu 的电导率为  $5.8 \times 10^7\text{ S/m}$ ,PTFE 的相对介电常数为 2.1,损耗角正切值为 0.0002,同时,在  $x$ 、 $y$  方向配置周期性边界条件, $z$  方向则采用开放边界条件,通过频域求解器来计算器件的反射、透射、吸收系数,值得注意的是,吸收系数需要由下列公式计算得出

$$A = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 \quad (1)$$

式中, $S_{11}$  与  $S_{21}$  分别为反射系数与透射系数,由于器件底层金属的阻挡作用, $S_{21}$  的影响可以忽略不计。

由于结构对称,正入射时横电波(TE)模式与横磁波(TM)模式下的光谱响应应该相同<sup>[29]</sup>。图 2 展示了所设计的 THz 传感器在电磁波正入射时的 TE 极化吸收光谱,可以观察到,器件在  $f_1=2.933\text{ THz}$ 、 $f_2=3.412\text{ THz}$ 、 $f_3=3.637\text{ THz}$  处出现 3 个接近完美的窄带吸收谐振峰,对应的吸收率分别为 99.67%、99.87% 和 99.66%,表现出优异的吸波特性。

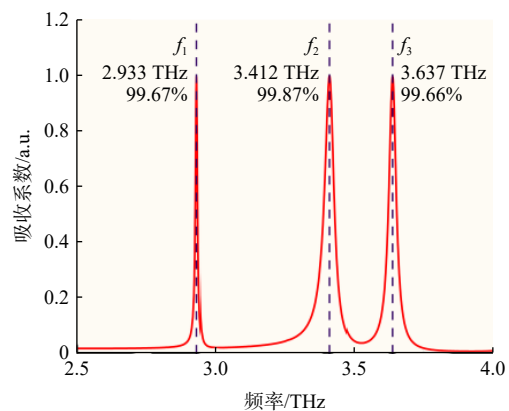


图 2 器件 3 个谐振峰对应的吸收系数

## 2 谐振机理与优化

### 2.1 谐振机理分析

为了进一步揭示器件的谐振机理,分别对谐振频率 $f_1=2.933$  THz、 $f_2=3.412$  THz、 $f_3=3.637$  THz 处的电磁场分布及表面电流分布进行模拟,如图 3 所示,通过观察不同谐振频率下局域电磁场增强区域及表面电流的主要流动路径,揭示该结构多频谐振形成的物理机制。

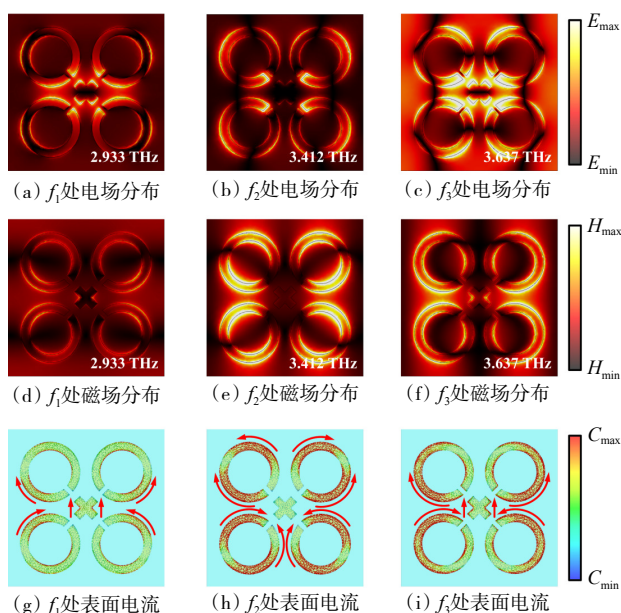


图3 超表面传感器在3个谐振峰处的电磁场及表面电流分布

谐振峰 $f_2$ 的电场主要集中在结构开口区域(图 3(b)),表明该谐振主要来源于单个 SRR 结构所产生的电容耦合效应。当 THz 波入射至结构层时,金属圆环两侧产生电荷积累,使开口间隙区域形成较强的电场集中。同时,由图 3(h)可知,电流主要沿着 SRR 流动,并在开口两侧形成显著的电流增强区域,表明电流在圆环结构中形成闭合回路。此时,圆环结构提供等效电感,而开口间隙则形成等效电容,二者共同构成典型的 LC 谐振单元,其谐振频率由下式表示

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2)$$

式中, $L$  为等效电感, $C$  为等效电容。

在该谐振模式下,顶部结构与底部金属层之间会产生反向电流,进而在介质层内部形成垂直于结构表面的磁场分布,产生明显的磁偶极共振。这种由电偶

极与磁偶极耦合产生的谐振模式能够有效调控结构的等效阻抗,使其在该频率附近接近自由空间阻抗,从而显著降低反射并实现接近完美的吸收<sup>[30]</sup>。

如图 3(a)与图 3(d)所示,谐振峰 $f_1$ 的电场主要分布在相邻结构单元之间的间隙区域,呈现出明显的跨单元耦合特征,且磁场强度较弱。与谐振峰 $f_2$ 不同,此时的电流在相邻 SRR 与十字结构之间形成振荡路径(图 3(g)),表明其谐振过程主要由单元之间的电偶极耦合所主导。

在 $f_3=3.637$  THz 处,可以观察到电场基本局域在中心区域(图 3(c))。与谐振峰 $f_1$ 与 $f_2$ 相比,该模式表现出更强的局域化特征,且主要电流分布联合了谐振峰 $f_1$ 与 $f_2$ 的相关特征(图 3(i)),属于由 SRR 的高阶本征谐振主导的联合模式,其谐振频率主要由金属环的几何尺寸及电流振荡路径决定。

通过 SRR 提供的核心谐振作用与中心十字结构发挥的弱耦合作用,使器件形成多个强局域电磁场增强点,为实现高灵敏度 THz 生物传感提供了重要的物理基础。

### 2.2 参数优化

为了系统分析器件核心结构参数变化对 THz 超表面传感器吸波特性的调控机制与影响规律,进而达成多频段高吸收率与高传感灵敏度协同优化的核心研究目标。本研究针对性选取金属圆环开口大小( $L_3$ )、内径( $R_2$ )以及器件周期( $L_s$ )作为关键结构设计变量,对上述结构参数与传感器谐振响应特性之间的关联规律开展深入研究。此外,依托 CST 电磁仿真软件搭载的优化器,采用遗传算法(genetic algorithm, GA),模拟生物进化理论,对器件进行全局优化。

如图 4(a)所示,当改变 $L_3$ 时,谐振峰 $f_2$ 与 $f_3$ 出现频率偏移,而 $f_1$ 几乎不受影响。这是因为开口尺寸直接决定 SRR 结构间隙电容的大小。当开口尺寸减小时,等效电容增大,从而使 LC 谐振频率降低。由于谐振峰 $f_2$ 与 $f_3$ 主要来源于 SRR 结构的本征谐振,因此对开口尺寸变化较为敏感,而由单元耦合主导的谐振峰 $f_1$ 则几乎不受影响。同理,由于改变 $R_2$ 会引起金属环电流路径长度变化,导致等效电感大小发生变化,使谐振峰 $f_2$ 与 $f_3$ 左右移动(图 4(b))。上述结果表明, SRR 结构尺寸对其本征谐振模式具有重要调控作用。



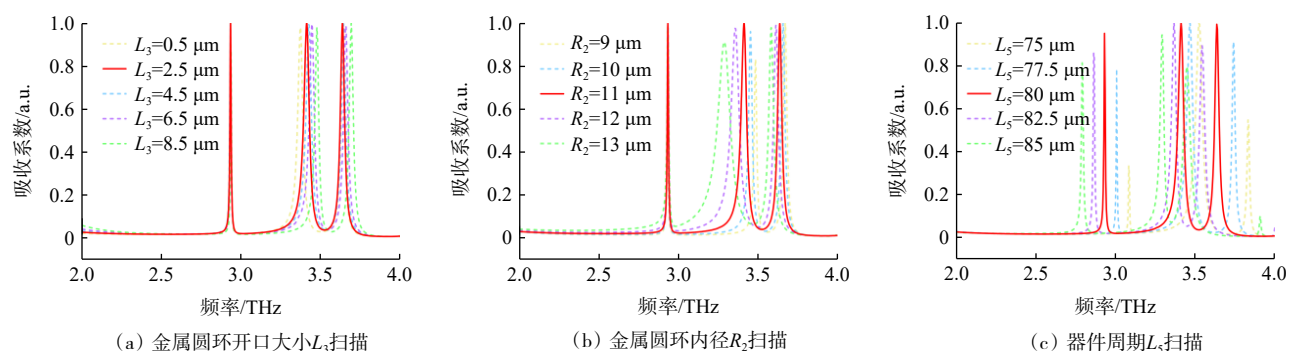


图4 器件参数设计优化

### 3 传感性能与应用

#### 3.1 传感性能分析

在 THz 频段, 正常细胞的有效折射率一般位于 1.34~1.37 之间, 而癌细胞由于在细胞密度、细胞核比例以及蛋白质与脂质含量等方面与正常细胞存在明显差异, 导致介电常数通常更高, 对应的有效折射率基本分布在 1.36~1.40 范围内<sup>[31]</sup>。当待测生物样本覆盖在传感器上时, 由于样本的折射率不同, 其局域电磁环境将发生改变, 从而导致器件谐振条件发生变化, 并引起谐振频率的偏移<sup>[32]</sup>。因此, 通过分析谐振频率随折射率变化的响应特性, 可以实现对癌细胞及其标志物的高灵敏识别。

在折射率逐渐增大的过程中, 由于谐振峰  $f_3$  出现吸收幅值衰减, 谐振特征减弱, 不利于准确提取谐振中心频率, 为保证传感检测结果的稳定性与可靠性, 在后续的折射率传感分析中仅选取吸收特性稳定且谱线清晰的谐振峰  $f_1$  与谐振峰  $f_2$  展开研究(图 5)。图 5(a)与图 5(d)分别模拟了  $f_1$  与  $f_2$  在待测物厚度为 25  $\mu\text{m}$  时, 1.00~1.40 折射率范围内的器件吸收光谱变化情况。可以观察到, 随着折射率逐渐增加, 2 个谐振峰均出现明显红移, 这是由于外界折射率增大会提高传感器表面的等效介电常数, 使局域电磁场储能增强, 从而改变谐振单元的等效 LC 参数并降低其固有谐振频率。

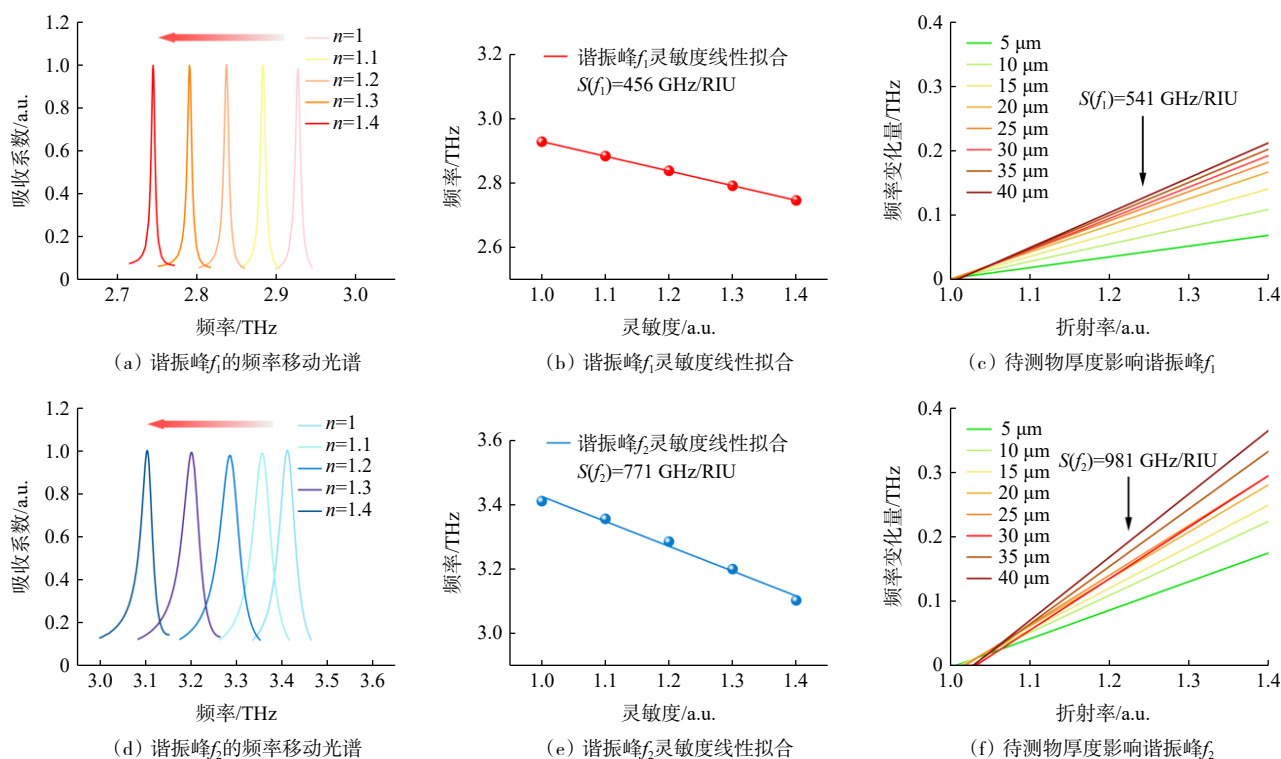


图5 器件折射率传感模拟

通过吸收光谱所反映的谐振特性与规律,可以进一步量化 THz 超表面传感器的 2 个关键性能指标,分别为品质因子( $Q$ )与折射率灵敏度( $S$ )。 $Q$  值代表着谐振峰的尖锐程度,其定义为

$$Q = \frac{f_0}{FWHM}$$

(3)

式中, $f_0$  为谐振峰的中心频率, $FWHM$  代表谐振峰的半高全宽。 $Q$  值越高,器件能量损耗越小,对折射率变化与微量待测物的检测分辨率越高。由式(3)可得,谐振峰 $f_1$ 与 $f_2$ 的 $Q$ 值分别为 320 与 82。

$S$  表征传感器谐振峰位移随外界折射率变化的响应能力,定义为

$$S = \frac{\Delta f}{\Delta n}$$

(4)

式中, $\Delta f$  为谐振峰因待测物折射率变化而产生的中心频移量, $\Delta n$  为待测物折射率变化量, $S$  值越大,传感器对微量待测物质与环境折射率变化越敏感,即传感性能越好。

根据式(4)进行计算与线性拟合处理, $S$  值分别为  $S(f_1)=456 \text{ GHz/RIU}$ (图 5(b))、 $S(f_2)=771 \text{ GHz/RIU}$ (图 5(e))。其中,谐振峰 $f_2$ 的电场主要集中在 SRR 开口间隙区域,局域电场增强更加显著,对外界介电环境变化表现出更高的敏感度。

此外,待测物层的厚度同样会对传感器的检测性能产生影响。待测物厚度变化对 $S(f_1)$ 与 $S(f_2)$ 的影响如图 5(c)与图 5(f)所示,当待测物厚度逐渐增加时, $S(f_1)$ 与 $S(f_2)$ 整体上均呈现增大趋势,且逐渐平稳,在待测物厚度为  $40 \text{ }\mu\text{m}$  时,分别可达 541、981 GHz/RIU。增大趋势的出现是因为随着待测物厚度的增加,外界折射率变化对谐振条件的调制作用增强。但超表面传感器的有效感测深度主要集中在结构表面附近的有限区域,电磁场在远离结构表面后迅速衰减,所以当厚度增加到一定程度后,灵敏度的增长趋势逐渐减缓并趋于稳定。

本研究提出的 THz 超表面传感器在 1.00~1.40 折射率变化范围内表现出明显的谐振频移特性与良好的线性响应关系。通过 $f_1$ 与 $f_2$ 这 2 个稳定谐振峰作为检测通道,可以实现对癌细胞的高灵敏度折射率传感检测。

3.2 传感性能比较

为了进一步评估本研究提出的 THz 超表面生物

传感器的综合性能,将所设计的器件与近年来的相关工作进行对比,如表 1 所示,对比指标主要包括谐振频率、最大折射率灵敏度以及品质因子。

表 1 传感性能对比

| 参考文献 | 谐振频率/THz            | 最大折射率灵敏度/(GHz·RIU <sup>-1</sup> ) | 最大品质因子 |
|------|---------------------|-----------------------------------|--------|
| [6]  | 0.732, 1.916, 2.602 | 572                               | 23     |
| [7]  | 1.170               | 165                               | 16     |
| [8]  | 2.320               | 700                               | 低于10   |
| [9]  | 0.617               | 60                                | 273    |
| [10] | 1.854               | 407                               | 112    |
| 本工作  | 2.933, 3.412, 3.637 | 981                               | 320    |

已有的相关研究在不同的传感性能方面取得了一定进展,同时揭示了多谐振峰、高品质因子与高灵敏度在 THz 超表面生物传感器中难以协同实现的挑战。相比之下,本研究所提出的结构同时具备多谐振检测通道、高品质因子以及高折射率灵敏度等优势。

3.3 工艺流程设计

在器件加工方面,本研究设计的 THz 超表面生物传感器可采用简单微纳加工工艺实现,制造流程如图 6 所示。首先,将 PTFE 薄膜介质层贴合在洁净的硅(Si)衬底上。随后,通过磁控溅射技术沉积一层连续的 Cu 金属薄膜,用于制造所设计的结构。接下来通过光刻工艺进行图形化处理,具体过程包括旋涂光刻胶、光刻机曝光后显影等步骤。下一步使用离子束刻蚀(ion beam etching, IBE)去除未被光刻胶保护的金属区域,并剥离残余光刻胶,得到所需结构。最后,从 Si 衬底上剥离 PTFE,在背面溅射一层 Cu 金属薄膜,作为器件的底层反射金属层。

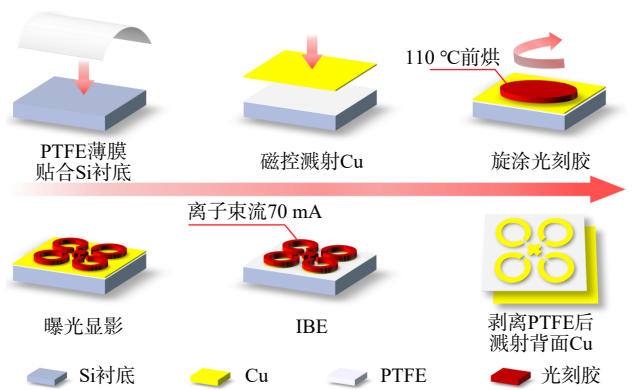


图 6 THz 超表面生物传感器制造工艺流程

## 4 讨论

本研究围绕结构设计与多谐振性能提升方面进行创新。已有的 THz 超表面传感器设计多通过优化单一谐振结构或引入复杂机制来提高传感性能,本研究则在相对简单的 MIM 结构基础上,通过对开口谐振环与十字结构的组合方式进行优化设计,实现多谐振模式的有效调控,进而获得较高品质因子与灵敏度,这验证了结构优化驱动性能提升的可行性。同时,不同谐振峰由不同物理机制主导的结果更体现结构在调控多模响应方面具有一定灵活性。需要指出的是,本研究结果主要基于理想电磁仿真条件获得,与实际应用场景之间存在一定差异。在器件制备方面,实际工艺条件中的金属损耗、加工误差及介质参数偏差等因素可能导致谐振峰出现偏移与展宽,从而影响传感性能。在生物测试方面,含水生物组织对 THz 波具有部分吸收效应,本研究采用的分析模型为等效折射率模型,忽略了吸收损耗,这可能使仿真结果偏向理想情况,实际测试时还需要对生物样品进行干燥处理。总体而言,本研究在多谐振结构设计与性能优化方面取得了一定的创新性进展,但后续仍需设计开展实验验证,为实现癌细胞检测应用提供更可靠的理论与技术支撑。

## 5 结论

本研究设计了一种 MIM 型多谐振 THz 超表面生物传感器,并对其电磁特性与折射率传感性能进行了系统研究。模拟结果说明,该器件在 2.933、3.412 和 3.637 THz 处产生 3 个窄带高吸收谐振峰,吸收率均接近 100%,表现出良好的多频段吸波特性。通过电磁场分布与表面电流分析发现,不同谐振峰分别来源于 SRR 结构的 LC 本征谐振、结构单元之间的电偶极耦合及高阶联合谐振模式,SRR 开口及结构间隙处形成的强局域电磁场增强为提高传感灵敏度提供了重要基础。在 1.00~1.40 折射率范围内,谐振峰随折射率变化呈现明显红移特性,其中谐振峰 $f_1$ 、 $f_2$ 的折射率灵敏度分别达 456、771 GHz/RIU,在待测物厚度为 40  $\mu\text{m}$  时最高可达 541、981 GHz/RIU,同时谐振峰 $f_1$ 的品质因子可达 320,展现出优异的传感性能。此

外,本研究提出的传感器结构相对简单,可通过常规微纳加工流程实现,涉及的工艺自动化程度高且发展成熟,有利于器件的实际制备与规模化生产应用。研究结果表明,该 THz 超表面生物传感器可为癌细胞及其生物标志物的高灵敏、无标记检测提供一种具有潜力的技术方案,在生物医学检测与肿瘤早期筛查领域具有一定应用前景。

## 参考文献(References)

- [1] Force L M, Kocarnik J M, May M L, et al. The global, regional, and national burden of cancer, 1990–2023, with forecasts to 2050: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2023[J]. *Lancet*, 2025, 406(10512): 1565–1586.
- [2] García-Hernández L A, Martínez-Martínez E, Pazos-Solís D, et al. Optical detection of cancer cells using lab-on-a-chip[J]. *Biosensors*, 2023, 13(4): 439.
- [3] Guo W J, Zhai L H, El-Bahy Z M, et al. Terahertz metamaterial biosensor based on open square ring[J]. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2023, 6(3): 92.
- [4] Aupiais I, Grasset R, Guo T W, et al. Ultrasmall and tunable TeraHertz surface plasmon cavities at the ultimate plasmonic limit[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 7645.
- [5] 沈莉然, 曹雨齐, 黄平捷, 等. 环十字形结构的高Q值太赫兹生物传感器[J]. *红外与激光工程*, 2026, 55(2): 20250547.
- [6] Wang Y L, Huang Y Z, Zhou G H, et al. Multi-resonances terahertz refractive index sensor based on a ring with embedded split rings metasurface array[J]. *Optics Communications*, 2023, 545: 129739.
- [7] Wang R D, Xu L, Wang J Y, et al. Electric Fano resonance-based terahertz metasensors[J]. *Nanoscale*, 2021, 13(44): 18467–18472.
- [8] MoradiFotouhi A, Pourfath M. Sensitive terahertz plasmonic metasurface biosensor integrated with microfluidics[J]. *Nanoscale Advances*, 2025, 7(15): 4600–4609.
- [9] Cui F Y, Huang X, Zhou Q Y, et al. Magnetic toroidal dipole resonance terahertz wave biosensor based on all-silicon metasurface[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2024, 177: 108128.
- [10] Zhang C B, Xue T J, Zhang J, et al. Terahertz toroidal metasurface biosensor for sensitive distinction of lung cancer

- cells[J]. *Nanophotonics*, 2022, 11(1): 101–109.
- [11] 司黎明, 董芳会, 董琳, 等. 2022年太赫兹人工表面等离子元科技热点回眸[J]. *科技导报*, 2023, 41(1): 173–183.
- [12] Jelic V, Adams S, Hassan M, et al. Atomic-scale terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Nature Photonics*, 2024, 18(9): 898–904.
- [13] Aupiais I, Grasset R, Daineka D, et al. Chiral terahertz surface plasmonics[J]. *ACS Photonics*, 2024, 11(10): 4184–4192.
- [14] Koch M, Mittleman D M, Ornik J, et al. Terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Nature Reviews Methods Primers*, 2023, 3: 48.
- [15] 司黎明, 马天宇, 党晨阳, 等. 无线输能超表面技术研究进展[J]. *科技导报*, 2025, 43(18): 23–40.
- [16] 司黎明, 陈璐璐, 孙厚军, 等. 涡旋波超表面研究现状与应用进展[J]. *科技导报*, 2024, 42(12): 107–124.
- [17] Wang P L, Lou J, Yu Y, et al. An ultra-sensitive metasurface biosensor for instant cancer detection based on terahertz spectra[J]. *Nano Research*, 2023, 16(5): 7304–7311.
- [18] Qin J, Jiang S B, Wang Z S, et al. Metasurface micro/nano-optical sensors: Principles and applications[J]. *ACS Nano*, 2022, 16(8): 11598–11618.
- [19] Huang C C, Liang L J, Chang P Y, et al. Terahertz liquid biosensor based on a graphene metasurface for ultrasensitive detection with a quasi-bound state in the continuum[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(11): 2310493.
- [20] Zhang Z Y, Wang Z, Zhang C, et al. Advanced terahertz refractive sensing and fingerprint recognition through metasurface-excited surface waves[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(14): 2308453.
- [21] Zhu J Z, Li C X, Fang B, et al. Advancements in biosensing detection based on terahertz metasurfaces[J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 176: 110978.
- [22] Kim T, Kwak J, Roh Y, et al. Terahertz metamaterial on-chip sensing platform for live cancer cell microenvironment analysis[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 509: 161370.
- [23] Han W L, Wang P, Zhang C R, et al. Pixelated toroidal metasurface sensor with broadband terahertz fingerprint enhancement for biochemical trace detection[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(51): 70795–70803.
- [24] Wang W, Wang W H, Yan F P, et al. Numerical research on supercavity sensing driven by guided resonance in a terahertz all-metal metamaterial absorber[J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 169: 110113.
- [25] Nickpay M R, Danaie M, Shahzadi A. A triple-band metamaterial graphene-based absorber using rotated split-ring resonators for THz biomedical sensing[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2023, 55(2): 193.
- [26] Jin R, Huang L J, Zhou C B, et al. Toroidal dipole BIC-driven highly robust perfect absorption with a graphene-loaded metasurface[J]. *Nano Letters*, 2023, 23(19): 9105–9113.
- [27] Gao S, Huang K, Lan C W, et al. Terahertz biosensor for amino acids upon all-dielectric metasurfaces with high-quality factor[J]. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2024, 7(3): 85.
- [28] She S C, Zuo J C, Li Y, et al. Terahertz metasurface biosensor empowered by quasi-bound states in the continuum for label-free identification of different cancers and trace molecular sensing[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 520: 165634.
- [29] Wang Y E, Li D X, Luo H W, et al. A comprehensive evaluation method for sensing characteristics of multi-peak terahertz metamaterials sensor in polarization mode[J]. *Photonic Sensors*, 2023, 13(4): 230414.
- [30] Chen X Y, Tian Z, Lu Y C, et al. Electrically tunable perfect terahertz absorber based on a graphene salisbury screen hybrid metasurface[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(3): 1900660.
- [31] Huang X, Wang B. High sensitivity terahertz sensor based on semiconductor material for biosensing detection[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2025, 13(10): 5148–5160.
- [32] Zhang X, Wang Y, Luo F, et al. High performance THz metasurface sensor based on modified-SWCNTs film for femtomolar protein detection[J]. *Carbon*, 2024, 227: 119273.

## A high-sensitivity multi-resonant terahertz metasurface biosensor for cancer cell detection

HUANG Yujie<sup>1,2</sup>, HAO Yafeng<sup>1,2</sup>, LIU Yuhang<sup>2</sup>, NIU Wenyu<sup>1,2</sup>, LI Tengting<sup>1,2\*</sup>

1. State Key Laboratory of Widegap Semiconductor Optoelectronic Materials and Technologies, North University of China, Taiyuan 030051, China

2. School of Semiconductor and Physics, North University of China, Taiyuan 030051, China

**Abstract** Conventional biological detection methods typically suffer from drawbacks such as long detection duration, low detection efficiency, and insufficient sensitivity. Terahertz (THz) metasurface sensors exhibit promising application potential in the field of biosensing owing to their merits of label-free detection, non-invasiveness, and high sensitivity. Aiming at the issues of single resonant mode and unsatisfactory performance of existing THz metasurface biosensors, a multi-resonant THz metasurface biosensor is proposed in this work. The device generates three narrowband high-absorption resonant peaks at 2.933, 3.412, and 3.637 THz, respectively. Within the refractive index range of 1~1.40, the resonant frequencies display a red-shift with the increase in refractive index. The maximum refractive index sensitivities of the resonant peaks at 2.933 and 3.412 THz are 541 and 981 GHz/RIU, with ultra-high quality factors of 320 and 82, respectively. The THz metasurface structure designed in this study holds broad application prospects for the highly sensitive biomedical detection of cancer cells and their related biomarkers.

**Keywords** terahertz; metasurfaces; biosensing; cancer cell detection; high-sensitivity; high-Q factor ●



(责任编辑 徐丽娇)