



太赫兹波段电磁超材料吸波器折射率传感特性

王鑫 王俊林

Refractive index sensing characteristics of electromagnetic metamaterial absorber in terahertz band

Wang Xin Wang Jun-Lin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 038102 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201054

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201054>

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

基于超材料的可调谐的太赫兹波宽频吸收器

Tunable terahertz wave broadband absorber based on metamaterial

物理学报. 2019, 68(24): 247802 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191216>

基于石墨烯编码超构材料的太赫兹波束多功能动态调控

Dynamic multifunctional control of terahertz beam based on graphene coding metamaterial

物理学报. 2018, 67(11): 118102 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180125>

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>

基于石墨烯的太赫兹波散射可调谐超表面

Graphene based tunable metasurface for terahertz scattering manipulation

物理学报. 2017, 66(20): 204101 <https://doi.org/10.7498/aps.66.204101>

应用太赫兹焦平面成像方法研究氧化镁晶体在太赫兹波段的双折射特性

Birefringence characteristics of magnesium oxide crystal in terahertz frequency region by using terahertz focal plane imaging

物理学报. 2020, 69(20): 208702 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200766>

电磁超材料吸波体的研究进展

Research progress of electromagnetic metamaterial absorbers

物理学报. 2020, 69(13): 134101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200355>

太赫兹波段电磁超材料吸波器折射率传感特性*

王鑫 王俊林[†]

(内蒙古大学电子信息工程学院, 呼和浩特 010021)

(2020年7月3日收到; 2020年9月4日收到修改稿)

太赫兹超材料吸波器作为一类重要的超材料功能器件,除了可以实现对入射太赫兹波的完美吸收外,还可以作为折射率传感器实现对周围环境信息变化的捕捉与监测.通常从优化表面金属谐振单元结构和改变介质层材料和形态两个方面出发,改善太赫兹超材料吸波器的传感特性.为深入研究中介质层对太赫兹超材料吸波器传感特性的影响,本文基于金属开口谐振环阵列设计实现了具有连续介质层、非连续介质层和微腔结构的3款太赫兹超材料吸波器,并对其传感特性与传感机理进行了深入研究.结果表明,为了提高太赫兹超材料吸波器的折射率灵敏度、最大探测范围等传感特性,除了可以选用相对介电常数较小的材料作为中介质层外,还可以改变中介质层的形态,进而减小中介质层对谐振场的束缚,增强谐振场与被测分析物之间的耦合.与传统的具有连续介质层的太赫兹超材料吸波器相比,具有非连续介质层和微腔结构的超材料吸波器具有更优越的传感特性,可应用于对待测分析物的高灵敏度、快速检测,在未来的传感领域具有更加广阔的应用前景.

关键词: 太赫兹, 超材料吸波器, 传感**PACS:** 81.05.Xj, 87.50.U, 07.07.Df**DOI:** 10.7498/aps.70.20201054

1 引言

太赫兹 (terahertz, THz)^[1]波通常是指频率在 0.1—10 THz 范围内,波长在 30—3000 μm 的电磁波,在电磁波谱中介于红外光与微波之间.太赫兹技术^[1-4]融合了宏观电子学与微观光子学的优势,广泛涉及物理学、光学、电磁场与微波技术、材料学等学科,因此相关的研究对各个学科的相互借鉴和融合具有重大的科学意义.

自然材料难以对太赫兹波产生强烈响应,而电磁超材料的出现弥补了自然材料对太赫兹波缺乏响应的缺陷,于是,研究人员逐步将研究重点转移到基于超材料的太赫兹器件中.超材料 (Metamaterials, MMs)^[5-7]通常是由刻蚀在半导体衬底或电介质基底上,按照特定规则排列的具有亚

波长或深亚波长尺寸的金属谐振单元阵列构成的人工电磁材料,具有自然材料所不具备的超常物理性质,能够以一定的方式操控电磁波.超材料对周围环境介电性质的改变具有敏感特性,且对入射电磁场的局域性增强具有很强的光谱特性^[8-10],当外围环境的介电特性发生改变时,太赫兹波通过超材料后的谐振特性 (谐振幅度、谐振频率等) 会随之发生变化,因此通过观察或测定该变化,可以实现对超材料周围非线性物质的探测和对极少量待测物的选择.

太赫兹超材料吸波器^[11-13]作为太赫兹超材料的一种典型结构,在完美吸收体、传感器、成像系统、热辐射器等领域发挥着重要的作用.自太赫兹超材料吸波器被广泛应用于实现对待测生物分析物的传感检测后,研究人员一直致力于不断提高太赫兹超材料吸波器的品质因数 Q 、折射率灵敏度、

* 国家自然科学基金 (批准号: 51965047)、内蒙古自然科学基金 (批准号: 2018MS06007) 和内蒙古大学 2018 年高层次人才引进科研启动项目 (批准号: 21700-5185128, 21700-5185131) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: wangjunlin@imu.edu.cn

FOM (figure of merit) 值等各项传感特性指标. 首先, 从改变超材料表面金属谐振单元结构出发^[14–22], 考虑引入 LC 谐振、偶极子谐振、四偶极子谐振、Fano 谐振、类电磁诱导透明效应等, 产生更加尖锐的谐振峰, 进而提高传感器的品质因数 Q ; 其次, 从改变介质材料和介质层形态出发^[23–32], 减小介质层效应, 进而提高传感器的灵敏度; 此外, 通过设计合适的谐振单元结构, 实现具有多谐振峰的超材料吸波器^[33,34], 实现传感器与待测物质之间特征频率的多点匹配, 增加反映被测物质差异的信息量, 提高物质探测的精确度和灵敏度.

为了改善超材料吸波器作为折射率传感器的传感能力, 本文拟从改变介质层材料和形态出发, 基于开口谐振环单元阵列设计实现具有连续介质层、非连续介质层和微腔结构等 3 款可工作于太赫兹频段的超材料吸波器. 基于电磁仿真软件, 首先对太赫兹超材料吸波器的吸收特性进行数值计算, 其次通过考察超材料吸波器对金属谐振单元阵列周围的待测物质参数响应的变化, 验证其作为折射率传感器的可行性, 最后通过数值计算对超材料吸波器的传感特性进行深入比较. 通过对具有连续介质层的太赫兹超材料吸波器谐振场分布的仿真研究, 深入分析了超材料吸波器作为折射率传感器的传感机理, 揭示了各类超材料吸波器传感特性存在差异的内在原因. 与传统的具有连续介质层的太赫兹超材料吸波器相比, 基于非连续介质层和微腔结构的超材料吸波器具有更优越的传感特性, 可应用于对待测物质的高灵敏度、快速检测, 在未来的传感领域具有更加广阔的应用前景.

2 具有连续介质层的太赫兹超材料吸波器

2.1 结构设计与仿真

基于连续介质层和金属开口谐振环阵列的太赫兹超材料吸波器的结构示意图如图 1 所示, 该超材料吸波器具有典型的“三明治”结构, 即自下向上分别由底层的连续金属层、中间连续介质层和顶层的金属开口谐振环阵列构成. 其中, 底层的连续金属层和顶层的开口谐振环阵列的材料均采用金属铜 (电导率 $\sigma = 5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$), 而中间的连续介质层采用无损的柔性聚酰亚胺 (polyimide, PI) 材料 (相对介电常数 $\epsilon_r = 3.5$).

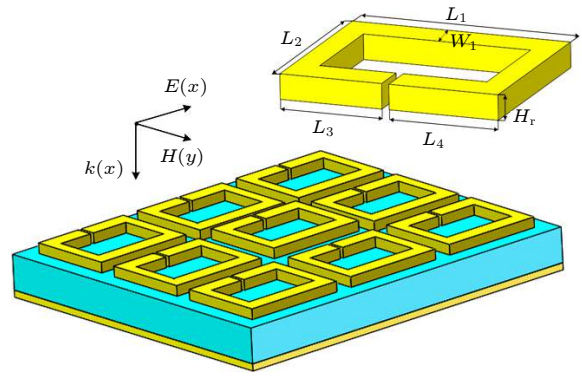


图 1 基于连续介质层和金属开口谐振环阵列的太赫兹超材料吸波器的结构示意图

Fig. 1. Schematic diagram of THz MM absorber based on continuous dielectric layer and metallic split-ring resonator array.

采用基于有限元法的电磁仿真软件的频域求解器对该太赫兹超材料吸波器的结构进行仿真优化. 在仿真过程中, 太赫兹波垂直入射到超材料吸波器表面, 波矢量 \mathbf{k} 沿着 z 轴方向, 电场 \mathbf{E} 沿着 x 轴方向, 而磁场 \mathbf{H} 沿着 y 轴方向. 另外, 在 x - y 平面上设置周期性的边界条件, z 平面上设置开放性的边界条件, 以此来模拟无限周期阵列.

当太赫兹波垂直入射, 且基于开口谐振环阵列的太赫兹超材料吸波器取如下优化的结构参数, 即 $L_1 = L_2 = 230 \mu\text{m}$, $L_3 = L_4 = 112.5 \mu\text{m}$, $W_1 = 12 \mu\text{m}$, $H_r = 0.3 \mu\text{m}$, 结构单元周期为 $P = 250 \mu\text{m}$, 中间介质层的厚度为 $H_d = 25 \mu\text{m}$, 底层金属底板的厚度为 $H_m = 2 \mu\text{m}$, 对应的吸收特性曲线如图 2 所示. 该超材料吸波器在 $f_0 = 0.183 \text{ THz}$ 处产生了一个吸收率为 99.97% 的吸收峰, 实现了对入射太赫兹波的“完美”吸收. 就谐振带宽而言, 该太赫兹超材料吸波器的谐振峰半高宽 (full width half

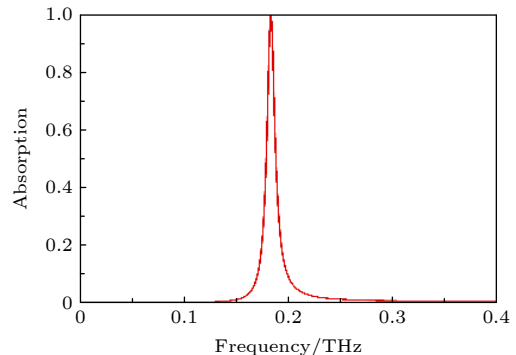


图 2 具有连续介质层的太赫兹超材料吸波器的吸收特性仿真曲线

Fig. 2. Simulated absorption characteristic curve of THz MM absorber with continuous dielectric layer.

maximum, FWHM) 为 9.3 GHz. 通常, 品质因数 Q 反映了传感器的谐振特性, 即谐振峰越尖锐, 其对应的 Q 值越大, 传感器的灵敏度也越高. 此外, Q 值也决定了传感器的分辨率, Q 值越大, 传感器的分辨率也越高. 传感器的品质因数 Q 可定义为 $Q(f_0) = f_0/\text{FWHM}$, 其中 f_0 为谐振峰的谐振频率. 对于该太赫兹超材料吸波器来说, 谐振峰所对应的品质因数为 $Q(f_0) = 19.7$, 较高的品质因数说明了该太赫兹超材料吸波器具有较强的频率选择性.

为了进一步理解该太赫兹超材料吸波器的谐振机理, 数值仿真研究了谐振频率处的表面电场、表面电流及 $y = 0$ 截面的电场和 $x = 0$ 截面的磁场分布. 如图 3(a) 所示, 谐振频率处开口谐振环的表面电流主要集中在左右两个边缘处, 且电荷在上下两个端点处交替积累, 说明该谐振峰源于开口谐振环中的电偶极子谐振. 从图 3(b) 可以看出, 谐振频率处的表面电场主要分布在开口谐振环的上下两端, 而这两端正是图 3(a) 所示的电荷累积的地

方, 因此, 图 3(a) 所示的表面电流分布与图 3(b) 所示的表面电场分布实现了良好的吻合.

虽然, 开口谐振环阵列可对入射电磁场产生强烈谐振, 实现对谐振电磁场的局域增强, 然而, 从谐振频率处 $y = 0$ 截面的电场和 $x = 0$ 截面的磁场分布可以看到 (如图 4(a) 和图 4(b) 所示), 对于具有连续介质层和金属开口谐振环阵列的超材料吸波器来说, 有很大一部分谐振电磁场被局限在了中介质层的内部, 而这部分谐振场很难与涂覆于金属谐振单元阵列表面的待测分析物充分接触, 因此对由待测分析物改变而引起的周围环境介电性质的改变缺乏敏感性.

2.2 传感特性与传感机理研究

为研究该太赫兹超材料吸波器作为传感器对待测分析物参数的电磁响应特性, 将待测分析物涂覆于超材料吸波器的金属谐振单元阵列表面, 并对其参数变化时的吸收特性进行一系列仿真分析.

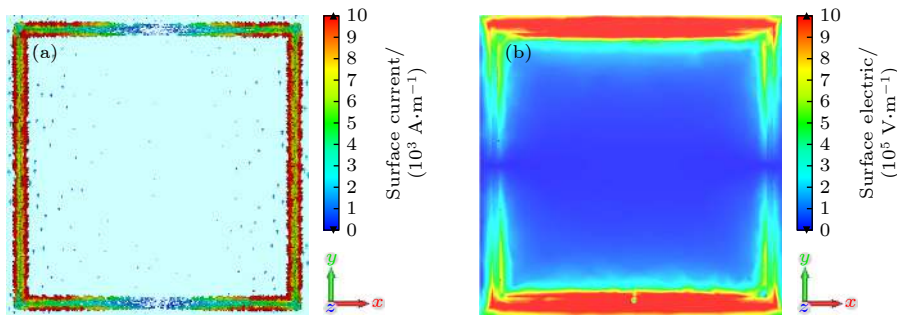


图 3 (a) 谐振频率处的表面电流分布; (b) 谐振频率处的表面电场分布

Fig. 3. (a) Surface current distribution at the resonance frequency; (b) surface electric field distribution at the resonance frequency.

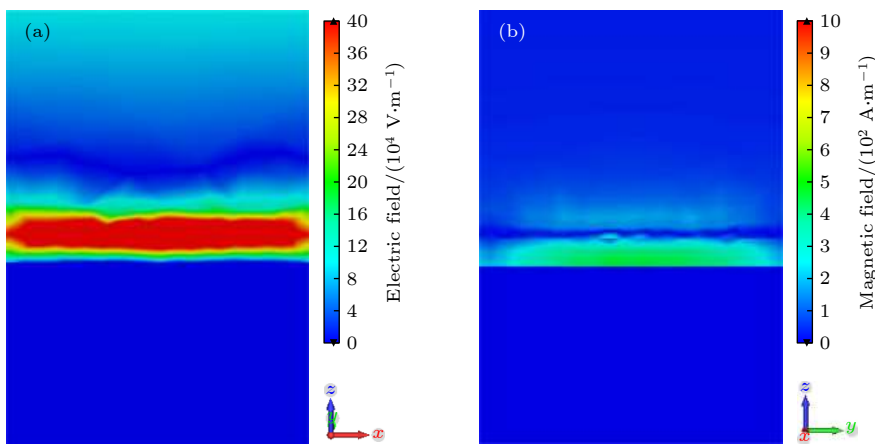


图 4 (a) 谐振频率处 $y = 0$ 截面的电场分布; (b) 谐振频率处 $x = 0$ 截面的磁场分布

Fig. 4. (a) Electric field distribution at cross section of $y = 0$ at the resonance frequency; (b) magnetic field distribution at cross section of $x = 0$ at the resonance frequency.

由于许多生物分子的折射率都处在 1.0—2.0 范围内, 因此, 在整个仿真过程中将待测生物分析物的折射率范围设定为 1.0—1.8. 当涂覆于超材料吸波器表面的待测分析物的厚度固定为 $H_a = 0.3 \mu\text{m}$ (金属开口谐振环阵列的高度, 恰好将金属开口谐振环阵列浸没于待测分析物中) 不变, 而折射率从 $n = 1$ 增加到 $n = 1.8$, 该太赫兹超材料吸波器的谐振频率发生明显红移 (如图 5 所示). 通常, 传感器的折射率频率灵敏度定义为 $S(f) = df/dn$, 其中, $df = f - f_1$ 表示传感器谐振频率的变化 (f 为超材料吸波器表面涂覆具有不同折射率的待测分析物后所对应的谐振频率, f_1 为待测分析物为折射率 $n = 1$ 的空气时所对应的谐振频率); dn 表示待测分析物折射率的变化. 如图 6 所示, 当待测分析物的厚度固定为 $H_a = 0.3 \mu\text{m}$ 时, 而折射率以 0.1 为间隔从 $n = 1$ 增加到 $n = 1.8$ 时, 该太赫兹超材料吸波器所对应的折射率频率灵敏度 $S(f)$ 为 8.6 GHz/RIU, 其中 RIU (refractive index unit) 代表单位折射率.

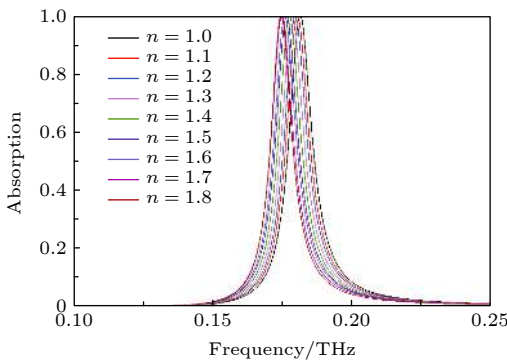


图 5 在分析物折射率从 $n = 1$ 变化到 $n = 1.8$ 时具有连续介质层的太赫兹超材料吸波器的吸收特性仿真曲线
Fig. 5. Simulated absorption characteristic curves of THz MM absorber with continuous dielectric layer under analyte refractive index changes from $n = 1$ to $n = 1.8$.

为了对工作在不同频段的传感器性能进行更加合理的比较, 通常采用 FOM 值对传感器特性进行描述, 当传感器的灵敏度 S 相同时, FOM 值越大, 则传感器的性能越好. FOM 值可定义为 $FOM = S/FWHM$, 其中 S 表示传感器的折射率频率灵敏度. 对于该太赫兹超材料吸波器来说, $FOM = 0.92$.

由此可见, 基于连续介质层和开口谐振环阵列的太赫兹超材料吸波器可以作为折射率传感器实现对涂覆于其表面具有不同折射率的待测分析物的传感检测, 但是从其对应的折射率频率灵敏度

$S(f)$ 和 FOM 值可以看出, 该传感器的检测灵敏度有限, 其传感性能仍有待提升. 究其原因, 主要是由于该太赫兹超材料吸波器的谐振电磁场大部分被紧密束缚在中间介质层中 (如图 4 所示), 只有延伸到超材料吸波器谐振单元列表面的边缘场才能与待测分析物充分接触, 发生传感现象, 而这部分场的强度直接决定了传感器的灵敏度.

为了提高该太赫兹超材料吸波器的折射率频率灵敏度, 在所有参数均保持不变的情况下, 仅改变中间介质层的材料, 则传感器的折射率频率灵敏度发生了明显改变, 如图 7 所示. 当中间介质层材料为相对介电常数 $\epsilon_r = 4.4$ 的 FR-4 时, 折射率频率灵敏度 $S(f) = 8.3 \text{ GHz/RIU}$, 而当中间介质层材料为相对介电常数 $\epsilon_r = 2.68$ 的 PDMS 时, 折射率频率灵敏度 $S(f) = 15.2 \text{ GHz/RIU}$, 实现了灵敏

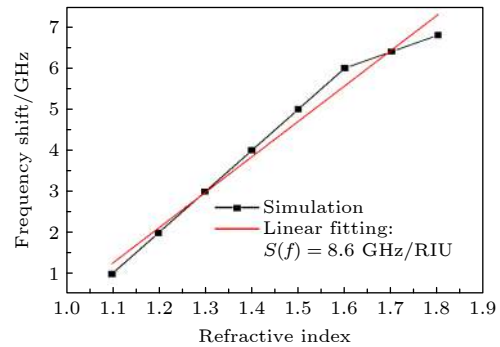


图 6 在分析物折射率从 $n = 1$ 变化到 $n = 1.8$ 时具有连续介质层的太赫兹超材料吸波器的谐振频率偏移及其线性拟合

Fig. 6. Resonance frequency shifts and linear fitting of THz MM absorber with continuous dielectric layer under analyte refractive index changes from $n = 1$ to $n = 1.8$.

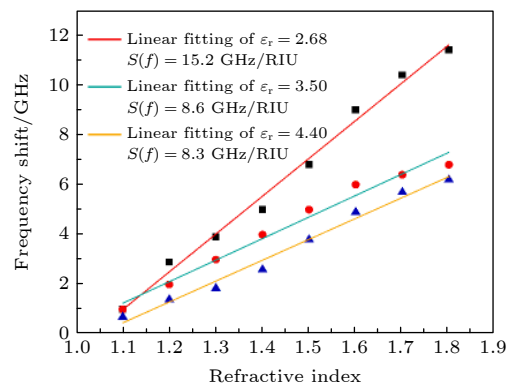


图 7 介质层材料的相对介电常数变化对传感器折射率频率灵敏度的影响

Fig. 7. Influence of relative permittivity of dielectric layer material on the refractive index frequency sensitivity of the sensor.

度的大幅提升. 中介质层材料的介电常数越小 (折射率越低), 则对谐振场的束缚越小, 因此有更多的谐振场扩展到了开口谐振环阵列表面, 实现了与待测分析物的充分接触, 提高了传感器的灵敏度.

以上仿真分析已经验证了所设计的基于连续介质层的太赫兹超材料吸波器对涂覆于其表面的待测分析物的折射率存在不同的电磁响应, 下面通过仿真分析深入探讨该太赫兹超材料吸波器的最大探测范围, 即可以检测的被测分析物的最大厚度.

如图 8 和图 9 所示: 当涂覆于超材料吸波器表面的待测分析物的厚度 H_a 从 $0.3 \mu\text{m}$ (金属开口谐振环阵列的高度, 恰好将金属开口环谐振阵列浸没于待测分析物中) 逐渐增大到 $25 \mu\text{m}$, 待测分析物与超材料吸波器表面的边缘场从部分接触逐步实现了充分的全接触, 于是太赫兹超材料吸波器的折射率频率灵敏度 $S(f)$ 从 8.6 GHz/RIU 呈指数趋势增大到 34.8 GHz/RIU ; 然而, 超材料吸波器周围的谐振场属于近场, 超过一定的空间范围后, 远离超材料表面的谐振场将呈指数下降. 因此, 当待测分析物的厚度 H_a 从 $25 \mu\text{m}$ 继续增大到 $80 \mu\text{m}$, 该太赫兹超材料吸波器的折射率频率灵敏度 $S(f)$ 从 34.8 GHz/RIU 小幅增加到 36.2 GHz/RIU , 并逐渐趋于饱和, 即对待测分析物的厚度已不再敏感.

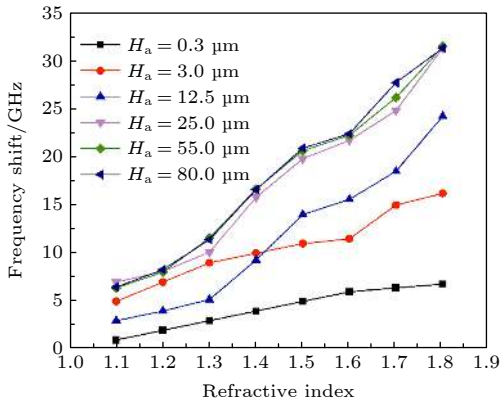


图 8 在分析物厚度不同条件下, 分析物折射率从 $n = 1$ 变化到 $n = 1.8$ 时具有连续介质层的太赫兹超材料吸波器的谐振频率偏移
Fig. 8. Resonance frequency shifts of THz MM absorber with continuous dielectric layer under analyte refractive index changes from $n = 1$ to $n = 1.8$ for different thicknesses of the analyte.

因此, 对于该太赫兹超材料吸波器而言, 为获得较高的传感灵敏度, 应根据实际需要选择在金属谐振单元阵列表面涂覆较厚的待测分析物, 但是并

不意味着折射率频率灵敏度会随着分析物厚度的增大而无限制的增大下去, 当待测分析物的厚度为 $80 \mu\text{m}$ 时, 可以获得很高的传感灵敏度.

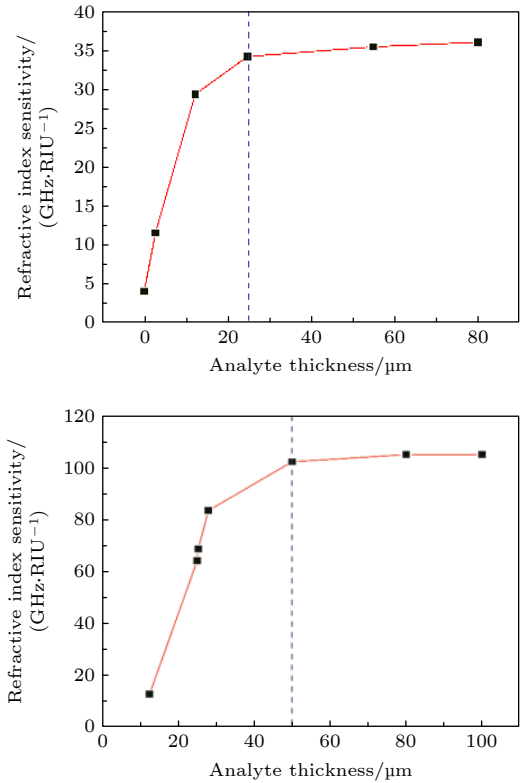


图 9 选用连续介质层的太赫兹超材料吸波器作为传感器时, 被测分析物厚度对传感器折射率频率灵敏度的影响
Fig. 9. Influence of the thickness of the analyte to be measured on the refractive index frequency sensitivity of the sensor for the THz MM absorber with continuous dielectric layer.

3 具有非连续介质层的太赫兹超材料吸波器

3.1 结构设计与仿真

基于对具有连续介质层的太赫兹超材料吸波器的传感特性与机理的深入分析, 我们知道, 连续介质层对谐振电磁场的强烈束缚, 限制了谐振电磁场与被测分析物之间的相互作用, 最终影响了太赫兹超材料吸波器作为传感器的折射率频率灵敏度. 虽然通过选用相对介电常数 (折射率) 较低的材料作为中介质层, 可以在一定程度上改善传感器的灵敏度, 但是其作用仍然有限.

为了进一步提升太赫兹超材料吸波器的折射率频率灵敏度, 减小中介质层对谐振电磁场的束缚, 增强谐振电磁场与被测分析物之间的相互作用

用, 实现两者之间的紧密耦合, 提出了具有非连续介质层的太赫兹超材料吸波器结构, 如图 10 所示, 该超材料吸波器自下向上分别由底层的连续金属层、中间的非连续介质层和顶层的金属开口谐振环阵列构成, 其中非连续介质层与金属开口谐振环阵列的形状完全相同. 该太赫兹超材料吸波器所采用的材料和对应的结构参数与具有连续介质层的太赫兹超材料吸波器完全一致, 两者之间的唯一区别仅在于介质层的形态不同.

如图 11 所示, 当太赫兹波垂直入射时, 具有非连续介质层的太赫兹超材料吸波器在 $f_0 = 0.245$ THz 处产生了 1 个吸收率为 93.3% 的吸收峰, 对应的谐振峰半高宽 FWHM 为 13 GHz, 对应的品质因数为 $Q(f_0) = 18.8$. 与图 2 所示的具有连续介质层的太赫兹超材料吸波器的吸收特性曲线相比, 该太赫兹超材料吸波器的谐振峰发生了蓝移, 吸收率有所下降, 谐振峰半高宽 FWHM 增大, 品质因数 Q 小幅减小, 这主要源于本设计所采用的不连续介质层. 由于中间介质层的不连续, 使得原来局限在连续介质层当中的谐振电磁场发生了泄

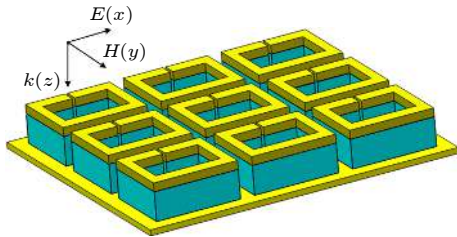


图 10 基于非连续介质层和金属开口谐振环阵列的太赫兹超材料吸波器的结构示意图

Fig. 10. Schematic diagram of THz MM absorber based on discontinuous dielectric layer and metallic split-ring resonator array.

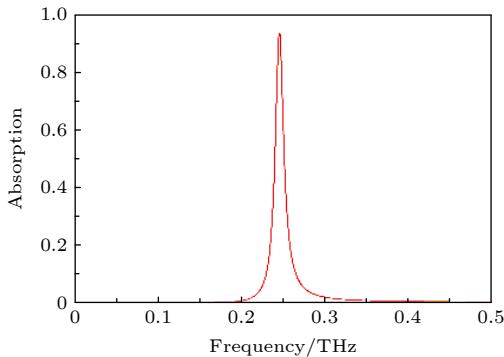


图 11 具有非连续介质层的太赫兹超材料吸波器的吸收特性仿真曲线

Fig. 11. Simulated absorption characteristic curve of THz MM absorber with discontinuous dielectric layer.

漏, 因此影响了该太赫兹超材料吸波器的吸收特性.

3.2 传感特性与传感机理研究

当涂覆于超材料吸波器表面的待测分析物的厚度固定为 $H_a = 25.3 \mu\text{m}$ (中间介质层的高度与金属开口谐振环阵列的高度之和, 恰好将金属开口谐振环阵列浸没于待测分析物中) 不变, 而折射率从 $n = 1$ 增加到 $n = 1.8$, 如图 12 所示, 该太赫兹超材料吸波器的谐振频率发生明显红移, 对应的吸收率逐渐增大. 当分析物折射率为 $n = 1.8$ 时, 与具有连续介质层的太赫兹超材料吸波器一样, 实现了对入射电磁波的“完美”吸收.

如图 13 所示, 当待测分析物的厚度固定为 $H_a = 25.3 \mu\text{m}$, 而折射率以 0.1 为间隔从 $n = 1$ 增加到 $n = 1.8$ 时, 该太赫兹超材料吸波器所对应的折射率频率灵敏度 $S(f) = 65.8 \text{ GHz/RIU}$, $\text{FOM} =$

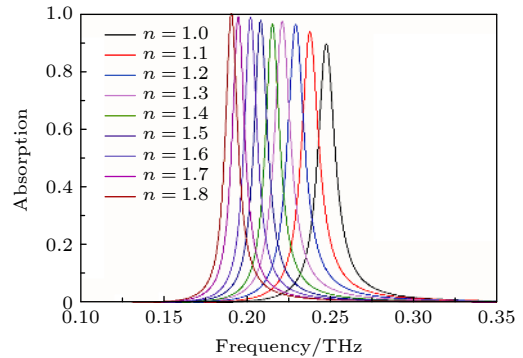


图 12 在分析物折射率从 $n = 1$ 变化到 $n = 1.8$ 时具有非连续介质层的太赫兹超材料吸波器的吸收特性仿真曲线

Fig. 12. Simulated absorption characteristic curves of THz MM absorber with discontinuous dielectric layer under analyte refractive index changes from $n = 1$ to $n = 1.8$.

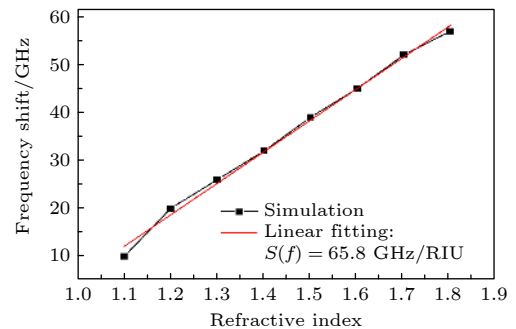


图 13 在分析物折射率从 $n = 1$ 变化到 $n = 1.8$ 时具有非连续介质层的太赫兹超材料吸波器的谐振频率偏移及其线性拟合

Fig. 13. Resonance frequency shifts and linear fitting of THz MM absorber with discontinuous dielectric layer under analyte refractive index changes from $n = 1$ to $n = 1.8$.

5.06, 远高于具有连续介质层的太赫兹超材料吸波器的折射率频率灵敏度 $S(f) = 8.6 \text{ GHz/RIU}$ 和 $\text{FOM} = 0.92$. 由此可见, 所设计的基于非连续介质层与开口谐振环阵列的太赫兹超材料吸波器可以作为折射率传感器实现对涂覆于其表面的待测分析物的高灵敏度传感检测.

如图 14 和图 15 所示: 当涂覆于超材料吸波器表面的待测分析物的厚度 H_a 从 $12.5 \mu\text{m}$ (中间介质层高度的一半) 增大到 $25 \mu\text{m}$ (中间介质层的高度), 继续增大到 $25.3 \mu\text{m}$ (中间介质层的高度与金属开口谐振环阵列的高度之和, 恰好将金属开口谐振环阵列浸没于待测分析物中), 直到 $50 \mu\text{m}$ 时, 待测分析物与超材料吸波器的边缘场从部分接触逐步实现了紧密的全接触, 于是太赫兹超材料吸波器的折射率频率灵敏度 $S(f)$ 从 12.75 GHz/RIU 呈指数趋势增大到 102.4 GHz/RIU ; 同样, 由于远离超材料吸波器表面的谐振场呈指数下降, 因此, 当待测分析物的厚度 H_a 从 $50 \mu\text{m}$ 继续增大到 $100 \mu\text{m}$, 该太赫兹超材料吸波器的折射率频率灵敏度 $S(f)$ 逐渐趋于饱和, 基本保持在 $S(f) = 105.2 \text{ GHz/RIU}$ 不变. 对于该太赫兹超材料吸波器而言, 为获得较高的传感灵敏度, 应根据实际需要选择在其表面涂覆厚度大于中间介质层高度与金属开口谐振环阵列高度之和的待测分析物. 当待测分析物的厚度为 $80 \mu\text{m}$ 时, 即可获得很高的传感灵敏度, 之后待测分析物的厚度继续增加, 不会再对其传感灵敏度产生明显影响.

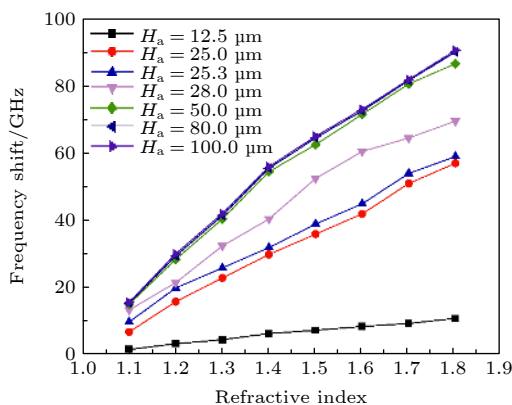


图 14 在分析物厚度不同条件下, 分析物折射率从 $n = 1$ 变化到 $n = 1.8$ 时具有非连续介质层的太赫兹超材料吸波器的谐振频率偏移

Fig. 14. Resonance frequency shifts of THz MM absorber with discontinuous dielectric layer under analyte refractive index changes from $n = 1$ to $n = 1.8$ for different thicknesses of the analyte.

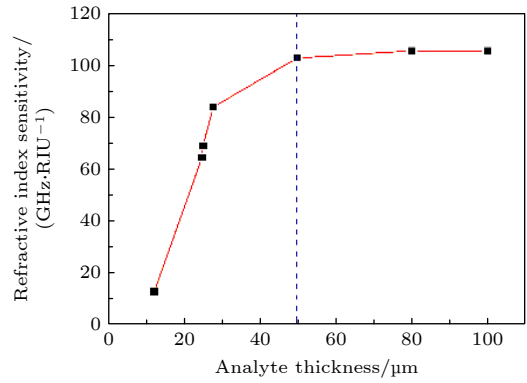


图 15 选用非连续介质层的太赫兹超材料吸波器作为传感器时, 被测分析物厚度对传感器折射率频率灵敏度的影响
Fig. 15. Influence of the thickness of the analyte to be measured on the refractive index frequency sensitivity of the sensor for the THz MM absorber with discontinuous dielectric layer.

仿真结果表明, 基于连续介质层与非连续介质层的太赫兹超材料吸波器对待测分析物的最大探测厚度基本都可以达到 $80 \mu\text{m}$. 对基于连续介质层和非连续介质层的太赫兹超材料吸波器在不同待测分析物厚度情况下的折射率频率灵敏度进行比较会发现 (比较图 9 和图 15), 当待测分析物厚度较薄 ($H_a \leq 12.5 \mu\text{m}$) 时, 选用具有连续介质层的太赫兹超材料吸波器作为传感器可获得更高的灵敏度, 而当待测分析物厚度较厚 ($H_a \geq 25 \mu\text{m}$), 选用具有非连续介质层的太赫兹超材料吸波器作为传感器获得的传感灵敏度会更高.

4 具有微腔结构的太赫兹超材料吸波器

4.1 结构设计与仿真

为了进一步减小介质层对谐振场的束缚, 增强谐振场与被测分析物之间的相互作用, 提升太赫兹超材料吸波器的折射率频率灵敏度, 提出具有微腔结构的太赫兹超材料吸波器, 如图 16 所示. 该超材料吸波器自下向上分别由底层的连续金属板、中间的微腔结构、顶层的金属开口谐振环阵列和支撑层构成. 所谓的微腔结构其实就是在底层的连续金属板与顶层的支撑层之间形成的微米级别的空隙, 填充到微腔结构中的待测分析物可充当该太赫兹超材料吸波器的中间介质层. 该太赫兹超材料吸波器所采用的材料和对应的结构参数仍然与具有连续介质层的太赫兹超材料吸波器保持完全一致, 且

金属谐振单元阵列的下表面与底层连续金属层之间的距离设置为 $H_d = 25 \mu\text{m}$ 。

如图 17 所示, 当太赫兹波垂直入射时, 该太赫兹超材料吸波器在 $f_0 = 0.277 \text{ THz}$ 处产生了 1 个吸收率为 86.6% 的吸收峰, 对应的谐振峰半高宽 FWHM 为 15 GHz, 品质因数为 $Q(f_0) = 18.4$ 。与图 2 和图 11 所示的太赫兹超材料吸波器的吸收特性曲线相比, 该太赫兹超材料吸波器的谐振峰发生蓝移, 吸收率下降, 谐振峰半高宽 FWHM 增大, 品质因数 Q 小幅减小, 这样的差异源于仿真过程中在金属谐振单元阵列与底层连续金属层之间未填充任何物质, 因此影响了该太赫兹超材料吸波器的吸收特性。

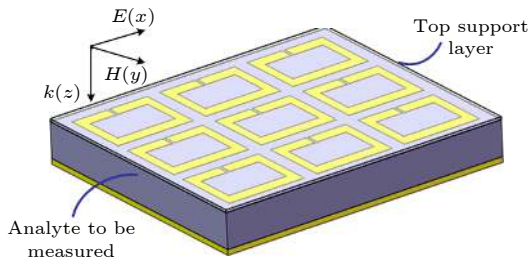


图 16 待测分析物充当介质层的太赫兹超材料吸波器的结构示意图
Fig. 16. Schematic diagram of THz MM absorber whose analyte to be measured acts as dielectric layer.

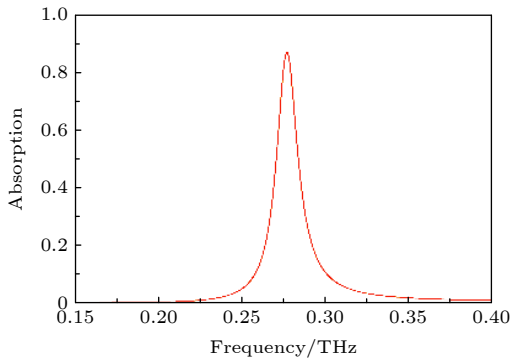


图 17 未填充待测分析物的太赫兹超材料吸波器的吸收特性仿真曲线
Fig. 17. Simulated absorption characteristic curve of THz MM absorber without filling the analyte to be measured.

4.2 传感特性与传感机理研究

充当中间介质层的待测分析物厚度固定为 $H_a = 25.3 \mu\text{m}$ (金属开口谐振环阵列的上表面与底面连续金属板之间的高度, 恰好将金属谐振环阵列浸没于待测分析物中) 不变, 而折射率从 $n = 1$ 增加到 $n = 1.8$, 如图 18 所示, 该太赫兹超材料吸

波器的谐振频率同样发生明显红移, 对应的吸收率逐渐增大. 当分析物折射率为 $n = 1.8$ 时, 实现了对入射电磁波的“完美”吸收。

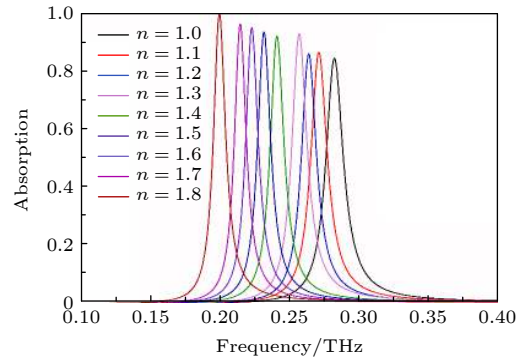


图 18 分析物折射率从 $n = 1$ 变化到 $n = 1.8$ 时具有微腔结构的太赫兹超材料吸波器的吸收特性仿真曲线
Fig. 18. Simulated absorption characteristic curve of THz MM absorber with microcavity structure under analyte refractive index range from $n = 1$ to $n = 1.8$.

如图 19 所示, 当待测分析物的厚度固定为 $H_a = 25.3 \mu\text{m}$, 而折射率以 0.1 为间隔从 $n = 1$ 增加到 $n = 1.8$ 时, 该太赫兹超材料吸波器所对应的折射率频率灵敏度 $S(f) = 101.5 \text{ GHz/RIU}$, $\text{FOM} = 6.77$, 远高于具有连续介质层和非连续介质层的太赫兹超材料吸波器的折射率频率灵敏度. 对于该太赫兹超材料吸波器来说, 待测分析物充当了中间介质层, 当待测分析物的厚度为 $H_a = 25.3 \mu\text{m}$ 时, 金属开口谐振环阵列完全浸没于待测分析物中, 原本局限于中间介质层中的谐振电磁场与待测分析物实现了空间上的完全重叠, 因此, 与前两种太赫兹超材料吸波器相比, 待测分析物作为

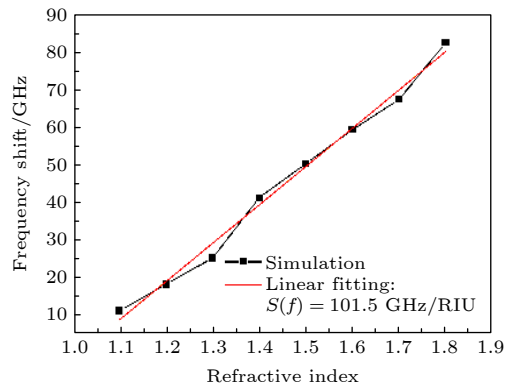


图 19 分析物折射率从 $n = 1$ 变化到 $n = 1.8$ 时具有微腔结构的太赫兹超材料吸波器的谐振频率偏移及其线性拟合
Fig. 19. Resonance frequency shifts and linear fitting of THz MM absorber with microcavity structure under analyte refractive index changes from $n = 1$ to $n = 1.8$.

中介质层实现了与谐振电磁场的最紧密的全接触,进而大幅提升了其作为传感器的灵敏度。

表1分别列举了具有连续介质层、非连续介质层和微腔结构的太赫兹超材料吸波器的吸收特性参数及其作为传感器的传感特性参数。从表1可以看出,不断削弱中介质层对谐振场的局限作用,一方面会降低太赫兹超材料吸波器谐振峰的吸收率、谐振峰半高宽和品质因数,但是另一方面会大幅提升太赫兹超材料吸波器作为传感器的折射率灵敏度和FOM值。

表1 太赫兹超材料吸波器的参数对比
Table 1. Comparison of parameters of THz MM absorbers.

| 太赫兹超材料吸波器的 吸收与传感特性参数 | 具有不同介质层的太赫兹超材料吸波器 | | |
|------------------------------------------------|-------------------|--------|-------|
| | 连续介质层 | 非连续介质层 | 微腔结构 |
| 谐振频率/THz | 0.183 | 0.245 | 0.277 |
| 吸收率/% | 99.97 | 93.30 | 86.60 |
| 谐振峰半高宽 FWHM/GHz | 9.3 | 13.0 | 15.0 |
| 品质因数 Q | 19.7 | 18.8 | 18.4 |
| 折射率灵敏度 $S/(\text{GHz}\cdot\text{RIU}^{-1})$ | 8.6 | 65.8 | 101.5 |
| FOM值 | 0.92 | 5.06 | 6.77 |

5 结论

本文对基于开口谐振环阵列的太赫兹超材料吸波器作为传感器的传感特性与传感机理进行了深入的仿真研究。基于连续介质层的太赫兹超材料吸波器的中介质层对谐振电磁场具有强烈的束缚,导致待测分析物与谐振场之间缺乏紧密耦合,从而影响了传感器的灵敏度和品质因数。为了释放被超材料吸波器中介质层所束缚的谐振场,增强待测分析物与谐振场之间的相互作用,进一步提升传感器的传感灵敏度,本文基于开口谐振环阵列分别提出了具有非连续介质层和微腔结构的两款太赫兹超材料吸波器。研究发现,虽然介质层的不连续或缺失会在一定程度上影响超材料吸波器的谐振频率、吸收率、半波带宽等参数,但是减小介质层对谐振场的束缚,降低介质层效应,在一定程度上对提高超材料吸波器作为传感器的传感特性是十分有效的。与传统的具有连续介质层的太赫兹超材料吸波器相比,本文所设计的具有非连续介质层和微腔结构的超材料吸波器具有更优越的传感特性,可应用于对待测分析物的高灵敏度、快速检测。本文的研究为实现超灵敏的太赫兹超材料传感器

开辟了一种新的途径,也为探索物质与太赫兹源之间的相互作用的创造了新平台,太赫兹超材料在未来的传感领域必将具有更加广阔的应用前景。

参考文献

- [1] Lee Y K 2012 *Principles of Terahertz Science and Technology* (Beijing: National Defense Industry Press) pp1–30 (in Chinese) (in Chinese) [Lee Y K 2012 太赫兹科学与技术原理 (北京:国防工业出版社) 第1—30页]
- [2] Zhang X C, Alexander S, Zhang Y 2017 *Nat. Photonics* **11** 16
- [3] Zhang X C, Xu J Z 2010 *Introduction to THz Wave Photonics* (New York: Springer US) pp1–26
- [4] Zhang H 2018 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Xidian University) (in Chinese) [张活 2018 博士学位论文 (西安:西安电子科技大学)]
- [5] Wang J, Wang S, Singh R 2013 *Chin. Opt. Lett.* **11** 011602
- [6] Wang X, Zhang B Z, Wang W J, Wang J L, Duan J P 2017 *IEEE Photonics J.* **9** 4600512
- [7] Huang W Y 2013 *M. S. Dissertation* (Chengdu: Southwest Jiaotong University) (in Chinese) [黄文媛 2013 硕士学位论文 (成都:西南交通大学)]
- [8] Li S Y, Ai X C, Wu R H 2018 *Opt. Commun.* **428** 251
- [9] Yan X, Zhang X F, Liang L J, Yao J Q 2014 *Spectrosc. Spect. Anal.* **2365** (in Chinese) [闫昕, 张兴坊, 梁兰菊, 姚建铨 2014 光谱学与光谱分析 **2365**]
- [10] Chen T, Li S, Sun H 2012 *Sensors* **12** 2742
- [11] Zhang Y P, Li T T, Lv H H 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 117801 (in Chinese) [张玉萍, 李彤彤, 吕欢欢 2015 物理学报 **64** 117801]
- [12] Wang X, Zhang B Z, Wang W J, Duan J P 2017 *IEEE Photonics J.* **9** 4600213
- [13] Mao Q J, Feng C Z 2019 *Acta Opt. Sin.* **39** 0816001 (in Chinese) [毛前军, 冯春早 2019 光学学报 **39** 0816001]
- [14] Wang W, Yan F P, Tan S Y 2017 *Photonics Res.* **5** 571
- [15] Yan X, Yang M S, Zhang Z 2019 *Biosens. Bioelectron.* **126** 485
- [16] Srivastava Y K, Cong L Q, Singh R 2017 *Appl. Phys. Lett.* **111** 201101
- [17] Ahmed S, Sungjoon L 2018 *Biosens. Bioelectron.* **117** 398
- [18] Han B J, Han Z H, Qin J Y 2019 *Talanta* **192** 1
- [19] Singh R, Al-Naib A I, Koch M 2010 *Opt. Express* **18** 13044
- [20] Saraswati B, Kyoungsik K 2019 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **52** 275106
- [21] Li W Y, Su Y, Zhai X 2018 *IEEE Photonic. Tech. Lett.* **30** 2068
- [22] Shen S M, Liu Y L, Liu W Q 2018 *Mater. Res. Express* **5** 125804
- [23] Hu T, Strikwerda A C, Liu M 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 261909
- [24] Moritake Y, Tanaka T 2018 *Opt. Express* **26** 3674
- [25] Brian B, Sepúlveda B, Alaverdyan Y, Lechuga L M, Käll M 2009 *Opt. Express* **17** 2015
- [26] Wang W, Yan F P, Tan S Y 2020 *Photonics Res.* **8** 519
- [27] Meng K, Park S J, Burnett A D 2019 *Opt. Express* **27** 23164
- [28] Hu T, Chieffo L R, Brenckle M A, et al. 2016 *Adv. Mater.* **23** 3197
- [29] Dmitriev A, Hägglund C, Chen S 2008 *Nano Lett.* **8** 3893
- [30] Whitesides G M 2006 *Nature* **442** 368
- [31] Zhou H, Hu D L, Yang C 2018 *Sci. Rep.* **8** 14801
- [32] Hu X, Xu G Q, Wen L 2016 *Laser Photonics Rev.* **10** 962
- [33] Janneh M, De Marcellis A, Palange E 2018 *Opt. Commun.* **416** 152
- [34] Wang B X, Zhai X, Wang G Z 2015 *Appl. Phys.* **117** 014504

Refractive index sensing characteristics of electromagnetic metamaterial absorber in terahertz band*

Wang Xin Wang Jun-Lin †

(College of Electronic Information Engineering, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China)

(Received 3 July 2020; revised manuscript received 4 September 2020)

Abstract

Terahertz metamaterial (THz MM) absorber, as an important type of MM functional device, can not only achieve perfect absorption of incident THz waves, but also act as a refractive index sensor to capture and monitor changes in the information about surrounding environment. Generally, the sensing characteristics of the THz MM absorber can be improved by optimizing the structure of the surface metal resonance unit and changing the material and shape of the dielectric layer. In order to further study the influence of the intermediate dielectric layer on the sensing characteristics of the THz MM absorber, in this paper we implement three THz MM absorbers with continuous dielectric layer, discontinuous dielectric layer and microcavity structure based on the metallic split-ring resonator array, and conduct in-depth study of their sensing characteristics and sensing mechanism.

The THz MM absorber with continuous dielectric layer and metallic split-ring resonator array can be used as a refractive index sensor to realize the sensing detection of analytes coated on its surface with different refractive indexes. However, it can be seen from its corresponding refractive index frequency sensitivity and FOM value that the detection sensitivity of this sensor is limited, and its sensing performance still needs improving. The main reason is that most of the resonant electromagnetic (EM) field of the THz MM absorber is tightly bound in the intermediate dielectric layer, and only the fringe field extending to the surface of the MM absorber resonant unit array can interact with the analyte to be measured, and the intensity of this part of the field directly determines the sensitivity of the sensor. In order to further improve the refractive index frequency sensitivity of the THz MM absorber, reduce the restriction of the intermediate dielectric layer to the resonant EM field, and enhance the interaction between the resonant EM field and the analyte to be measured, a THz MM absorber with discontinuous dielectric layer is proposed and studied. Compared with the THz MM absorber with continuous dielectric layer, the THz MM absorber based on discontinuous dielectric layer can be used as a refractive index sensor to realize higher-sensitivity sensing and detection of the analyte coated on the surface. In order to further enhance the interaction between the resonant EM field and the analyte to be measured, and improve the refractive index frequency sensitivity of the THz MM absorber, a THz MM absorber with a microcavity structure is proposed. For this THz MM absorber, the analyte to be measured filled in the microcavity structure can serve as the intermediate dielectric layer of the THz MM absorber, and when the metallic split-ring resonator array is completely immersed in the analyte to be measured, the resonant EM field originally confined in the intermediate dielectric layer and the analyte to be measured completely overlap in space. Therefore, compared with the first two THz MM absorbers, THz MM absorber with a microcavity structure achieves the tightly and fully contacting the resonant EM field, thereby greatly improving its sensitivity as a sensor.

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51965047), the Inner Mongolia Natural Science Foundation, China (Grant No. 2018MS06007), and the Inner Mongolia University 2018 High-level Talent Introduction and Research Startup Project, China (Grant Nos. 21700-5185128, 21700-5185131).

† Corresponding author. E-mail: wangjunlin@imu.edu.cn

The results show that in order to improve the sensing characteristics of the THz MM absorber, such as the refractive index sensitivity and the maximum detection range, in addition to using the materials with lower relatively permittivity as the intermediate dielectric layer, the morphology of the intermediate dielectric layer can be changed, thereby reducing the restraint of the intermediate dielectric layer on the resonant field and enhancing the coupling between the resonant field and the analyte to be measured. Compared with the conventional THz MM absorber with continuous dielectric layer, the MM absorber with discontinuous dielectric layer and microcavity structure have many superior sensing characteristics, and can be applied to the high-sensitivity and rapid detection of analytes to be measured, and has a broader application prospect in the future sensing field.

Keywords: terahertz, metamaterial absorber, sensing

PACS: 81.05.Xj, 87.50.U, 07.07.Df

DOI: [10.7498/aps.70.20201054](https://doi.org/10.7498/aps.70.20201054)