

基于三维开口谐振环阵列和微流通道的太赫兹超材料吸收体传感器

王鑫, 王俊林*

内蒙古大学电子信息工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010021

摘要 基于三维开口谐振环(SRR)阵列和微流通道,在太赫兹频段内实现了一款基于超材料吸波器的高灵敏度折射率传感器,三维 SRR 阵列完全浸没于微流通道内,注入微流通道内的液相分析物在作为被测分析物的同时还充当了超材料吸波器的中介质层。当微流通道的高度固定为 $33.1 \mu\text{m}$,而注入微流通道内的液相分析物的折射率从 1.0 变化到 1.8 时,该太赫兹超材料吸波器可作为折射率传感器,对应的折射率频率灵敏度达到 379 GHz/RIU 。仿真结果表明,该太赫兹超材料吸收体传感器的谐振电磁场被扩展到三维空间,并在微流通道内得到了很大程度的集中和增强,从而实现了谐振电磁场与待测分析物的空间重叠,增强了谐振电磁场与被测分析物之间的相互作用,进而实现了对液相分析物的高灵敏度传感。同样基于 CST Microwave Studio 仿真软件仿真研究了微流通道的高度和顶层覆盖电介质的厚度对超材料吸收体传感器的折射率灵敏度的影响。通过选择合适的微流通道高度和覆盖电介质厚度可获得更高的折射率灵敏度。总之,基于三维 SRR 阵列和微流通道的太赫兹超材料吸收体传感器具有更高的品质因数和折射率频率灵敏度,在无标记的快速生物医学传感中具有潜在的应用。

关键词 探测器; 太赫兹; 超材料吸波器; 三维开口谐振环; 微流通道; 传感器

中图分类号 TP212

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1904001

Terahertz Metamaterial Absorber Sensor Based on Three-Dimensional Split-Ring Resonator Array and Microfluidic Channel

Wang Xin, Wang Junlin*

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

Abstract Based on the three-dimensional (3D) split-ring resonator (SRR) array and microfluidic channel, a high-sensitivity refractive index sensor based on a metamaterial (MM) absorber is realized in the terahertz (THz) band. The 3D SRR array is completely immersed in the microfluidic channel. The liquid-phase analyte in the microfluidic channel serves as the intermediate layer of the MM absorber while serving as the analyte to be measured. When the height of the microfluidic channel is fixed at $33.1 \mu\text{m}$ and the refractive index of the liquid-phase analyte injected into the microfluidic channel changes from 1.0 to 1.8, the THz MM absorber can be used as a refractive index sensor, and the refractive index frequency sensitivity reaches 379 GHz/RIU . Simulation results show that the resonant electromagnetic (EM) field of the THz MM absorber sensor is extended to 3D space, and is greatly concentrated and enhanced in the microfluidic channel, thereby realizing the spatial overlap of the resonant EM field and the analyte to be measured. The interaction between the resonant EM field and the measured analyte is enhanced, and thus the high-sensitivity sensing of liquid analytes is achieved. The influences of the height of the microfluidic channel and the thickness of the top-layer covering dielectric on the refractive index sensitivity of the MM absorber sensor are also studied based on CST Microwave Studio simulation software. In short, the THz MM absorber sensor based on the 3D SRR array and microfluidic channel has a higher quality factor and refractive index frequency sensitivity, and has potential applications in label-free fast biomedical sensing.

Key words detectors; terahertz; metamaterial absorber; three-dimensional split-ring resonator; microfluidic channel; sensors

OCIS codes 040.2235; 130.6010

收稿日期: 2020-04-09; 修回日期: 2020-05-17; 录用日期: 2020-06-15

基金项目: 国家自然科学基金(51965047)、内蒙古自然科学基金(2018MS06007)、内蒙古大学 2018 年高层次人才引进科研启动项目(21700-5185128,21700-5185131)

* E-mail: mems_wjl@163.com

1 引 言

生物传感器在环境监测、疾病诊断、食品安全和生物研究等方面具有重要的应用价值^[1-2]。目前,识别、检测生物目标物的常规方法是基于标记传感器的标记测定法,包括荧光标记、放射性核素标记、酶标记等,这些标记测定法已被广泛应用于基因、蛋白质等的定量测定方面^[3-4]。然而,采用标记测定法识别生物样品前,需要对样品进行修饰或其他前处理,这些前处理不仅过程复杂、耗时长,而且还可能会影响样品的原有性质,从而限制了其应用范围和检测精度。针对以上问题,研究人员逐步将研究重点转移到开发高度敏感的免标记生物传感器上。

超材料(MM)^[5-7]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,实现对入射电磁场的局域增强。基于超材料的生物传感器作为一种新的检测手段,能够突破传统生物传感器的分辨率极限,实现对生物分子的高灵敏度、无标记快速检测,在生物检测方面表现出巨大的发展潜力^[8-10]。超材料吸波器作为基于超材料的一种生物传感器,通常可通过将待测物质与超材料吸波器的表层金属谐振单元阵列相接触并监测超材料吸波器吸收频率的偏移来实现对待测生物样品的传感检测^[11-15]。

常见的太赫兹超材料吸收体传感器都是基于平面内的开口谐振环(SRR)结构^[16-19],入射电磁场会在 SRR 阵列中产生强烈谐振,从而实现对谐振电磁场的局域增强,当待测生物分析物与 SRR 阵列相接触时,可实现对生物分子折射率等介电参数的解析。然而,从谐振频率处的电磁场分布可以看到,对于平面 SRR 结构,一部分谐振模场被局域在谐振单元的开口处,而另一部分谐振模场被局域在介质层内部,因此限制了入射电磁场与被测物的相互作用。随着微加工工艺的发展,利用基于三维谐振结构的超材料吸波器可以实现对入射电磁波的完美吸收。基于三维谐振结构的超材料吸收体传感器可以将入射电磁场扩展到三维空间,从而增大与待测生物分析物相互接触的面积,因此其感测范围和灵敏度相较于平面超材料吸收体传感器会有大幅增大^[20-22]。此外,得益于待测生物分子与电磁场的空间重叠,将待测生物分子置于介质层中时将会极大地促进谐振场与待测生物分子之间的相互作用,进一步改善传感器的传感性能。

对于液相分析物的传感,考虑到微流体已在化

学反应、单细胞分析等微观领域被广泛使用的事实,将微流体技术与基于三维 SRR 阵列的超材料吸波器相结合实现液相生物分子的传感将会是一种非常有前途的方法。超材料和微流体的集成在待测物质和电磁谐振之间架起了一座桥梁,不仅可以实现对液相分析物的传感检测,而且还可以有效地增大超材料传感器的传感范围和灵敏度^[23-26]。

为了实现对液相分析物的高灵敏度、无标记快速检测,本文基于三维 SRR 阵列和微流通道,设计实现了一款太赫兹超材料吸收体传感器。微流通道位于顶层的覆盖介质层和底层的连续金属板之间,三维金属 SRR 阵列位于微流通道中,因此注入到微流通道中的液体在作为待测分析物的同时还可以充当超材料吸波器的中间介电层。为了研究该超材料吸波器在太赫兹频段作为传感器对液相分析物进行传感检测的可能性与灵敏度,将具有不同折射率的待测分析物分别注入微流通道中,并对其对应的谐振频率、折射率频率灵敏度、品质因数和 FOM (figure of merit,其值用 F_{OM} 表示)等进行了一系列的仿真计算。深入分析了谐振频率所对应的电磁场分布,揭示了基于三维 SRR 阵列和微流通道的太赫兹超材料吸收体传感器灵敏度高的原因。仿真研究了微流通道的高度和顶层覆盖介电层的厚度对太赫兹超材料吸收体传感器的折射率灵敏度的影响。依据仿真结果,选择合适的微流通道与覆盖介质层厚度可以提高传感器的灵敏度。综上所述,基于三维 SRR 阵列和微流通道的太赫兹超材料吸收体传感器具有高品质因数和高折射率灵敏度,可应用于对液相生物分析物的高灵敏度、无标记快速检测,在未来的生物医学传感中具有广阔的应用前景。

2 结构与仿真

基于三维 SRR 阵列和微流通道的太赫兹超材料吸波器的结构示意图如图 1 所示,该超材料吸波器自下至上分别由支撑基底、连续金属底板、微流通道、金属谐振单元阵列和覆盖介质层构成。其中,三维金属 SRR 阵列位于微流通道中,而微流通道位于顶层的覆盖介质层和底层的连续金属板之间,因此,注入微流通道的液体在作为待测分析物的同时还充当了超材料吸波器的中间介电层。

采用基于有限元法的电磁仿真软件 CST Microwave Studio 2015 的频域求解器对超材料吸波器的结构进行仿真优化。在仿真过程中,平面波

电场 E 沿着 x 轴方向, 磁场 H 沿着 y 轴方向, 波矢量 k 沿着 z 轴方向。另外, 在 xy 平面上设置周期性的边界条件, z 轴方向上设置开放性的边界条件, 以此来模拟无限周期阵列。最顶层的覆盖介质层采用无损的柔性聚酰亚胺 (PI) 材料, 设置其相对介

电常数 $\epsilon_r = 3.5$, 磁导率为 1, 电导率为 0; 三维金属 SRR 阵列和底层的连续金属板的材料均选用常见的金属铜, 并设置其电导率 $\sigma = 5.8 \times 10^7$ S/m, 介电常数为 1, 磁导率为 1; 底层的支撑基底采用二氧化硅材料。

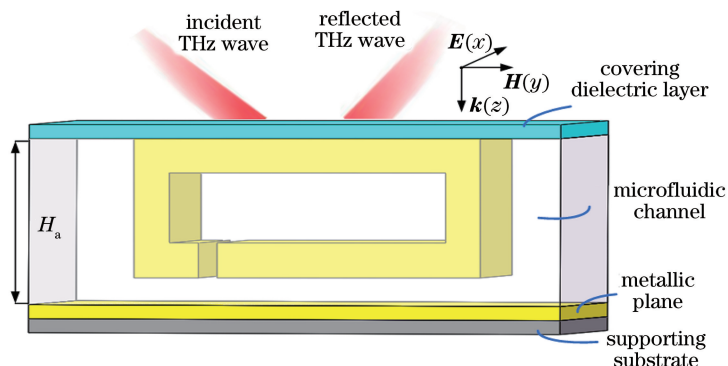


图 1 基于三维 SRR 阵列和微流通道的太赫兹超材料(MM)吸波器的单元结构示意图

Fig. 1 Unit structural diagram of THz MM absorber based on three-dimensional SRR array and microfluidic channel

基于三维 SRR 阵列和微流通道的太赫兹超材料吸波器的结构参数如图 2 所示: $L_1 = L_2 = 225 \mu\text{m}$, $L_3 = 12.5 \mu\text{m}$, $L_4 = 211.5 \mu\text{m}$, $W_1 = 7.5 \mu\text{m}$, $W_2 = 10 \mu\text{m}$, $H_1 = 30 \mu\text{m}$, 结构单元周期 $P = 245 \mu\text{m}$, 微流通道的高度 $H_a = 33.1 \mu\text{m}$, 顶层覆盖介质层的厚度 $H_t = 0.1 \mu\text{m}$, 底层金属板的厚度 $H_m = 0.2 \mu\text{m}$ 。当微流通道内的分析物为折射率 $n = 1$ 的空气时, 太赫兹波垂直入射所对应的吸收特性曲线如图 3 所示, 此时该太赫兹超材料吸波器在 $f_0 = 0.79$ THz 处产生了一个吸收率为 98.8% 的吸收峰。就谐振带宽而言, 该太赫兹超材料吸波器的谐振峰半峰全宽 (FWHM, 其值用 W_{FWHM} 表示) 为 15 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, 则传感器的灵敏度越高。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

器的品质因数可定义为 $Q(f_0) = f_0 / W_{\text{FWHM}}$ (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 $Q(f_0) = 53$, 较高的品质因数说明了该太赫兹超材料吸波器具有很好的频率选择性。

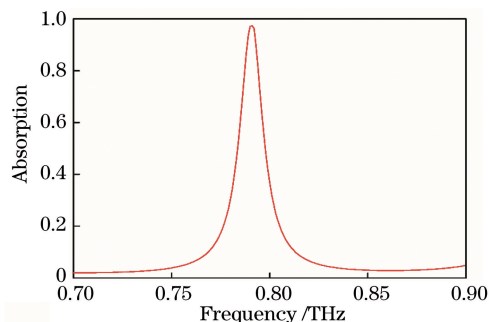


图 3 太赫兹超材料吸波器的吸收特性仿真曲线

Fig. 3 Simulated absorption characteristic curve of THz MM absorber

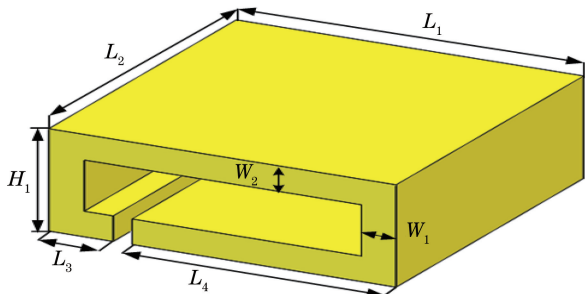


图 2 三维金属 SRR 的结构示意图和尺寸标识

Fig. 2 Structural diagram and size identification of three-dimensional metallic SRR

3 太赫兹超材料吸收体传感器的传感特性分析

对于所设计的基于三维 SRR 阵列和微流通道的太赫兹超材料吸波器来说, 将具有不同折射率的待测液相分析物注入到微流通道会引起三维金属 SRR 阵列周围环境介电参数的改变, 进而改变超材料吸波器的谐振特性 (谐振频率、吸收率、谐振峰 FWHM 等), 因此, 通过监测该超材料吸波器的谐振频率的偏移、吸收率的改变以及谐振峰 FWHM 的变化, 可实现对待测液相分析物的传感检测。

为了研究该太赫兹超材料吸波器作为传感器在太赫兹频段对不同的待测生物分析物进行传感检测的品质因数和灵敏度,将具有不同折射率的待测液相分析物分别注入到微流通道内,并对其对应的吸收特性进行了一系列的仿真研究。在整个仿真过程中,微流通道的高度 H_a 固定为 $33.1 \mu\text{m}$ 。由于许多生物分子的折射率都处在 $1.0 \sim 2.0$ 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 $1.0 \sim 1.8$ 。

当待测液相分析物的折射率从 $n=1$ 增加到 $n=1.8$,该太赫兹超材料吸波器的谐振频率发生红移。当分析物的折射率 $n=1$ 时,超材料吸波器的谐振频率 $f_0=0.79 \text{ THz}$,而当分析物的折射率增大到 $n=1.8$ 时,超材料吸波器的谐振峰向低频方向移动到 $f_0=0.47 \text{ THz}$,频率偏移量 Δf 达到 0.32 THz 。通常,传感器的折射率频率灵敏度定义为 $S(f)=df/dn$,其中 df 表示传感器谐振频率的变化, dn 表示待测分析物折射率的变化。由以上灵敏度的定义可知,为计算超材料传感器的折射率频率灵敏度,需要首先计算在微流通道注入不同折射率的待测液相分析物时的谐振频率相对于微流通道内的分析物为折射率 $n=1$ 的空气时的偏移量,之后将谐振频率偏移量与对应的折射率进行线性拟合,所得拟合曲线的斜率即为对应的折射率频率灵敏度。如图 4 所示,当微流通道的高度 H_a 固定为 $33.1 \mu\text{m}$,注入微流通道内的液相分析物的折射率以 0.1 为间隔从 $n=1$ 变化到 $n=1.8$ 时,该太赫兹超材料吸波器所对应的折射率频率灵敏度 $S(f_0)=379 \text{ GHz/RIU}$,其中 RIU 代表单位折射率。由此可见,所设计的基于三维 SRR 阵列和微流通道的太赫兹超材料吸波器可以作为折射率传感器实现对注入

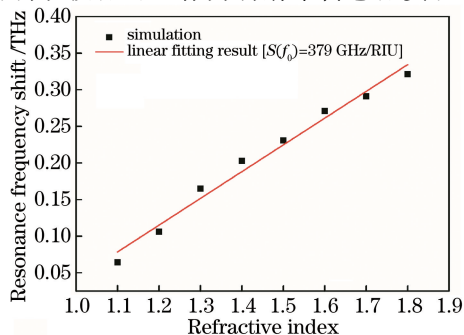


图 4 液相分析物折射率从 $n=1$ 变化到 $n=1.8$ 时的谐振频率偏移及线性拟合结果

Fig. 4 Resonance frequency shift when refractive index of liquid-phase analyte changes from $n=1$ to $n=1.8$ and linear fitting result

微流通道内的液相分析物的高灵敏度传感检测。

此外,对于该太赫兹超材料吸波器来说,当注入微流通道的待测液相分析物的折射率从 $n=1$ 增加到 $n=1.8$,不仅谐振频率会发生偏移,谐振峰所对应的 FWHM 也会发生变化,导致其对应的品质因数 Q 值在 $43 \sim 70$ 的范围内波动。虽然待测分析物的折射率对超材料吸波器的品质因数 Q 有一定的影响,但是在分析物折射率变化的过程中,对应的品质因数 Q 始终保持着较高值,由此可见,所设计的太赫兹超材料吸波器作为折射率传感器始终具有优越的频率选择性。

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 对传感器特性进行描述,当传感器的灵敏度相同时,FOM 值越大,则传感器的性能越好。对于该太赫兹超材料吸波器来说,当注入微流通道的待测分析物的折射率从 $n=1$ 增加到 $n=1.8$,对应的 FOM 值在 $25 \sim 47$ 的范围内变化,其原因主要是随着待测分析物折射率的逐渐增大,谐振峰所对应的 FWHM 在一定范围内产生波动,从而导致 FOM 值发生改变。总体来说,对于该太赫兹超材料吸波器来说,其 FOM 值始终保持着较高值,说明所设计的太赫兹超材料吸波器作为折射率传感器始终保持着优越的传感特性。

为了进一步研究所设计的基于三维 SRR 阵列和微流通道的太赫兹超材料吸收体传感器的传感机理,首先仿真研究了微流通道高度 $H_a=33.1 \mu\text{m}$ 、顶层覆盖介质层厚度 $H_t=0.1 \mu\text{m}$ 时,太赫兹超材料吸收体传感器在谐振频率 $f_0=0.79 \text{ THz}$ 处所对应的电磁场分布,如图 5 所示。其次,仿真研究了微流通道高度 $H_a=33.1 \mu\text{m}$ 、顶层覆盖介质层厚度 $H_t=0.1 \mu\text{m}$ 、待测液相分析物的折射率 $n=1.3$ 时,太赫兹超材料吸收体传感器在谐振频率 $f_0=0.62 \text{ THz}$ 处对应的电磁场分布,如图 6 所示,其中图 6(a)给出的是在 $y=0$ 截面处的电场分布图,图 6(b)给出的是在 $x=0$ 截面处的磁场分布。如图 5 和图 6 所示,谐振频率处所对应的谐振电场和共振磁场除少部分分布于顶层覆盖介质层内以外,几乎所有的谐振电磁场都集中在谐振结构单元表面和开口处以及微流通道内,即谐振单元表面和开口处以及微流通道内的谐振电磁场得到了集中和增强。

SRR 阵列可对入射电磁场产生强烈谐振,从而实现共振电磁场的局域增强,然而,从谐振频率处的电磁场分布可以看到,对于平面 SRR 结构来说,一部分谐振电磁场被局域在谐振单元的表面和开口

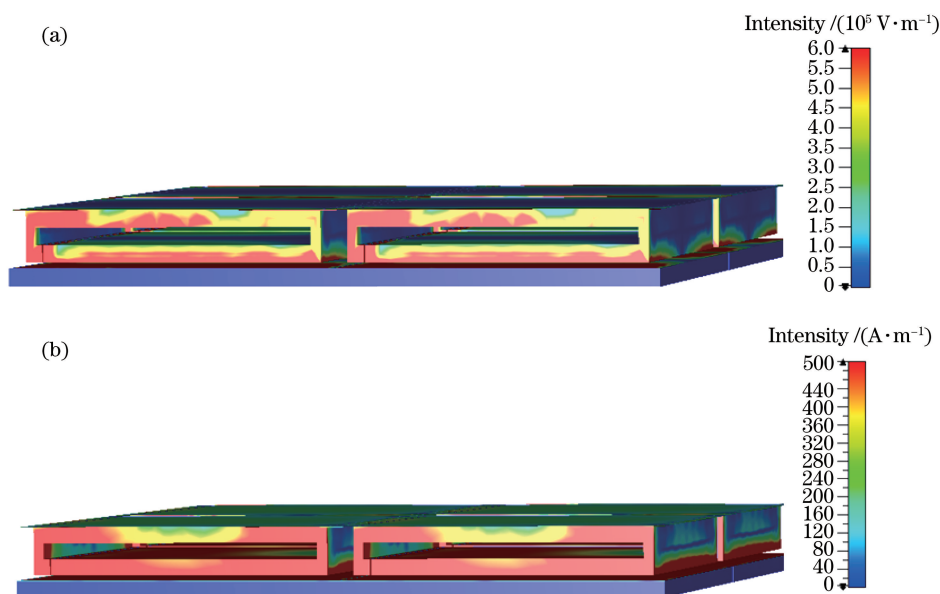


图 5 谐振频率处的电场分布和磁场分布。(a)电场分布;(b)磁场分布

Fig. 5 Electric field distribution and magnetic field distribution at resonance frequency.

(a) Electric field distribution; (b) magnetic field distribution

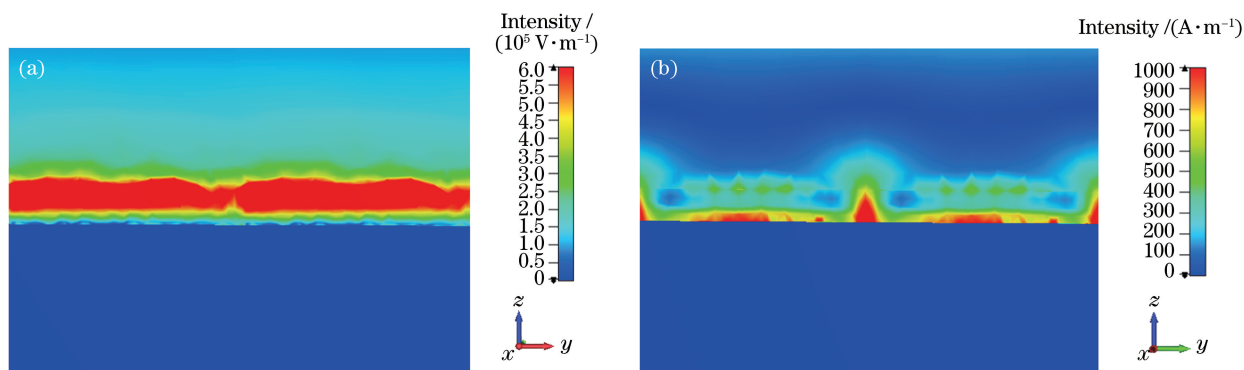


图 6 谐振频率处 $y=0$ 截面的电场分布和谐振频率处 $x=0$ 截面的磁场分布。

(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. 6 Electric field distribution of $y=0$ cross section at resonance frequency and magnetic field distribution of $x=0$ cross section at resonance frequency. (a) Electric field distribution of $y=0$ cross section at resonance frequency;

(b) magnetic field distribution of $x=0$ cross section at resonance frequency

处,而另一部分谐振电磁场被局域在介质层内部,这部分谐振电磁场无法与待测分析物充分接触,因此限制了谐振电磁场与被测物的相互作用,影响了基于平面 SRR 阵列的超材料传感器的传感特性。对于基于三维 SRR 阵列和微流通道的大赫兹超材料吸收体传感器来说,三维 SRR 阵列完全浸没于微流通道内,注入微流通道内的液体在作为待测分析物的同时还充当了超材料吸波器的中间介电层,因此无论是局域在谐振单元表面和开口处的谐振电磁场还是局域在介质层内部的谐振电磁场全部位于微流通道内。于是,对于基于三维 SRR 阵列和微流通道的大赫兹超材料吸收体传感器来说,谐振电磁场被

扩展到三维空间,这增大了谐振电磁场与被测分析物之间的接触面积,从而实现了谐振电磁场的强局域,降低了电磁能量的辐射损耗。当具有不同折射率的待测分析物被注入微流通道内并与谐振结构充分接触时,谐振结构周围环境的介电常数会发生变化,从而引起谐振频率的偏移,待测分析物与谐振电磁场的空间重叠将会极大地促进谐振电磁场与待测分析物之间的相互作用,改善传感器的传感性能,大幅增大传感器的感测范围和传感灵敏度。

为了探索微流通道的高度对太赫兹超材料吸收体传感器的折射率频率灵敏度的影响,在保持其他参数不变的前提下,分别仿真计算了微流通道的高

度以 $0.2 \mu\text{m}$ 为间隔从 $32.7 \mu\text{m}$ 变化到 $33.5 \mu\text{m}$ 时的折射率频率灵敏度变化。从图 7 可以看到,对于谐振频率 f_0 来说,随着微流通道的高度从 $32.7 \mu\text{m}$ 增加到 $33.1 \mu\text{m}$,传感器的折射率频率灵敏度逐渐增加;而当微流通道的高度从 $33.1 \mu\text{m}$ 继续增加到 $33.5 \mu\text{m}$ 时,传感器的折射率频率灵敏度逐渐减小。因此,该太赫兹超材料吸收体传感器的折射率频率灵敏度不会随着微流通道高度的增加而无限地增大,当微流通道的高度在 $32.7 \sim 33.5 \mu\text{m}$ 范围内变化时,在微流通道的高度为 $33.1 \mu\text{m}$ 时,传感器的折射率频率灵敏度达到最大值,即 379 GHz/RIU 。

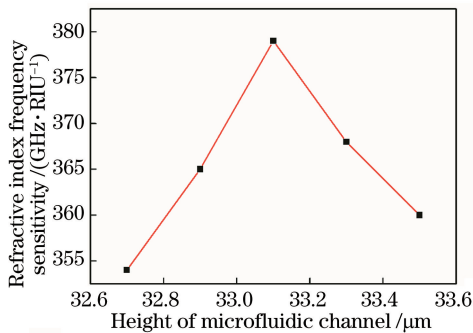


图 7 微流通道的高度从 $32.7 \mu\text{m}$ 增加到 $33.5 \mu\text{m}$ 时传感器折射率频率灵敏度的变化

Fig. 7 Change of refractive index frequency sensitivity of sensor when height of microfluidic channel increases from $32.7 \mu\text{m}$ to $33.5 \mu\text{m}$

此外,如图 6 所示,尽管谐振电磁场在微流通道中得到了集中和增强,但仍然有一小部分谐振电磁场分布于顶部的覆盖介电层中,从而影响了太赫兹超材料吸收体传感器的感测灵敏度。在微流通道的高度 H_a 固定为 $33.1 \mu\text{m}$ 且其他的结构参数均保持不变的情况,基于一系列数值仿真,研究了顶层覆盖介电层的厚度对该太赫兹超材料吸收体传感器的折射率频率灵敏度的影响。如图 8 所示,随着顶层覆

盖介质层的厚度从 $0.10 \mu\text{m}$ 增加到 $0.40 \mu\text{m}$,传感器的折射率频率灵敏度从 379 GHz/RIU 减小到 363 GHz/RIU 。由此可见,为了提高所设计的太赫兹超材料吸收体传感器的折射率频率灵敏度,在工艺允许的前提下,应尽量减小覆盖介电层的厚度,以减小谐振电磁场在覆盖介质层中的损耗,增强谐振电磁场与被测液相分析物的作用。

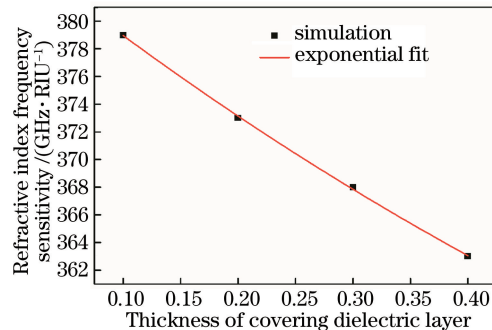


图 8 覆盖电介质厚度从 $0.10 \mu\text{m}$ 增加到 $0.40 \mu\text{m}$ 时的传感器折射率频率灵敏度的变化

Fig. 8 Change of refractive index frequency sensitivity when thickness of covering dielectric layer increases from $0.10 \mu\text{m}$ to $0.40 \mu\text{m}$

为了便于与其他传感器进行比较,将本文所设计的基于三维 SRR 阵列和微流通道的太赫兹超材料吸收体传感器与参考文献中涉及的太赫兹超材料传感器的谐振频率、折射率频率灵敏度、品质因数 Q 、FOM 值等参数进行了比较,具体参数如表 1 所示。从表 1 可以看出,本文所设计的太赫兹超材料吸收体传感器相对于参考文献中所报道的超材料传感器具有诸多优点,如较高的折射率频率灵敏度、高品质因数 Q 、高 FOM 值等,这充分说明所设计的基于三维 SRR 阵列和微流通道的太赫兹超材料吸收体传感器在提高传感器的灵敏度和改善其传感特性方面具有一定的优势。

表 1 基于三维 SRR 阵列和微流通道的太赫兹超材料吸收体传感器与参考文献所报道的传感器的性能比较

Table 1 Comparison of performance of THz MM absorber sensor based on three-dimensional SRR array and microfluidic channel with sensors reported in references

Design	Resonance frequency / THz	Sensitivity	FWHM	Q-factor	FOM
Ref. [10]	0.642	61 GHz/RIU		92	8.5
Ref. [11]	0.486	$4.05 \times 10^{-2} \text{ GHz/nm}$			
Ref. [12]	0.651	153.17 GHz/RIU			
Ref. [13]	2.249	300 GHz/RIU	0.102 THz	22.05	2.94
Ref. [14]	1.800	187 GHz/RIU		120	7.2
2.260	360 GHz/RIU		94	19.1	
Ref. [19]	1.670	455.7 GHz/RIU			
Ref. [22]	1.930	366 GHz/RIU	5.90 GHz	327	
This work	0.790	379 GHz/RIU	15 GHz	43-70	25-47

4 结 论

基于超材料的生物传感器能够突破传统生物传感器的分辨率极限,实现对生物分子的高灵敏度、无标记快速检测,在生物检测方面表现出巨大的发展潜力。为了提高太赫兹超材料传感器的感测灵敏度,提出了基于三维 SRR 阵列和微流通道的太赫兹超材料吸收体传感器,并对其传感特性与传感机理进行了深入分析和研究。当微流通道的高度固定,而注入微流通道内的液相分析物的折射率从 1 变化到 1.8 时,该太赫兹超材料吸收体传感器的谐振频率所对应的折射率频率灵敏度为 379 GHz/RIU,其可以作为折射率传感器实现对注入微流通道内的液相分析物的高灵敏度传感检测。此外,深入研究了微流通道的高度和覆盖介质层的厚度对该太赫兹超材料传感器的折射率频率灵敏度的影响,依据仿真结果选择合适的微流通道高度和覆盖介质层参数,可以提高传感器的灵敏度。基于三维 SRR 阵列和微流通道的太赫兹超材料吸收体传感器的谐振电磁场主要集中在微流通道内,而三维 SRR 结构完全浸没于微流通道内,因此,将谐振电磁场扩展到三维空间,可实现谐振电磁场与待测分析物的空间重叠,增大谐振电磁场与被测分析物之间的接触面积,大幅增大该传感器的感测范围和传感灵敏度。综上所述,基于三维 SRR 和微流通道的太赫兹超材料吸收体传感器具有更高的灵敏度,可用于无标记物快速分析物检测,这在未来的生物医学传感中非常有吸引力。

参 考 文 献

- [1] Fan X D, White I M, Shopova S I, et al. Sensitive optical biosensors for unlabeled targets: a review[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2008, 620(1/2): 8-26.
- [2] Lin V S, Motesharei K, Dancil K P, et al. A porous silicon-based optical interferometric biosensor [J]. *Science*, 1997, 278(5339): 840-843.
- [3] Yamana K, Ohtani Y, Nakano H, et al. Bis-pyrene labeled DNA aptamer as an intelligent fluorescent biosensor [J]. *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters*, 2003, 13(20): 3429-3431.
- [4] Liu B Q, Zhang B, Chen G N, et al. Biotin-avidin-conjugated metal sulfide nanoclusters for simultaneous electrochemical immunoassay of tetracycline and chloramphenicol [J]. *Microchimica Acta*, 2014, 181(1/2): 257-262.
- [5] Mao Q J, Feng C Z. Absorptance properties of nested-ring metamaterial absorbers based on magnetic polaritons [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(8): 0816001.
- 毛前军, 冯春早. 基于磁激元的嵌套环超材料吸波器的吸收特性 [J]. *光学学报*, 2019, 39(8): 0816001.
- [6] Huang W Y. Electromagnetic metamaterial unit loss and optimal design of terahertz absorber [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- 黄文媛. 电磁超材料单元损耗和太赫兹吸波体的优化设计 [D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- [7] Wang Y, Leng Y B, Dong L H, et al. Design of tunable metamaterial absorber based on graphene-metal hybrid structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(7): 0716001.
- 王越, 冷雁冰, 董连和, 等. 基于石墨烯-金属混合结构的可调超材料吸波体设计 [J]. *光学学报*, 2018, 38(7): 0716001.
- [8] Wang J, Wang S, Singh R, et al. Metamaterial inspired terahertz devices: from ultra-sensitive sensing to near field manipulation [J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, 11(1): 011602.
- [9] Chen T, Li S Y, Sun H. Metamaterials application in sensing [J]. *Sensors*, 2012, 12(3): 2742-2765.
- [10] Pan W, Yan Y J, Shen D J. Performance analysis of terahertz metamaterial sensor based on electromagnetically induced transparency [J]. *Infrared Technology*, 2018, 40(7): 707-711.
- 潘武, 闫彦君, 沈大俊. 基于类电磁诱导透明的太赫兹超材料传感器性能分析 [J]. *红外技术*, 2018, 40(7): 707-711.
- [11] Tao H, Strikwerda A C, Liu M K, et al. Performance enhancement of terahertz metamaterials on ultrathin substrates for sensing applications [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(26): 261909.
- [12] Zhang Y P, Li T T, Lü H H, et al. Study on sensing characteristics of I-shaped terahertz metamaterial absorber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(11): 117801.
- 张玉萍, 李彤彤, 吕欢欢, 等. 工字形太赫兹超材料吸波体的传感特性研究 [J]. *物理学报*, 2015, 64(11): 117801.
- [13] Saadeldin A S, Hameed M F O, Elkaramany E M A, et al. Highly sensitive terahertz metamaterial sensor [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(18): 7993-7999.
- [14] Janneh M, de Marcellis A, Palange E, et al. Design of a metasurface-based dual-band terahertz perfect absorber with very high Q-factors for sensing applications [J]. *Optics Communications*, 2018, 416: 152-159.
- [15] Li S Y, Ai X C, Wu R H, et al. Design and

- simulation verification an environmental change metamaterial sensor [J]. *Optics Communications*, 2018, 428: 251-257.
- [16] Sabah C, Dincer F, Karaaslan M, et al. Perfect metamaterial absorber with polarization and incident angle independencies based on ring and cross-wire resonators for shielding and a sensor application [J]. *Optics Communications*, 2014, 322: 137-142.
- [17] Wang W, Yan F P, Tan S Y, et al. Ultrasensitive terahertz metamaterial sensor based on vertical split ring resonators [J]. *Photonics Research*, 2017, 5(6): 571-577.
- [18] Singh R, Cao W, Al-Naib I. Ultrasensitive terahertz sensing with high-Q Fano resonances in metasurfaces [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 10(17): 171101.
- [19] Yan X, Yang M S, Zhang Z, et al. The terahertz electromagnetically induced transparency-like metamaterials for sensitive biosensors in the detection of cancer cells [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2019, 126: 485-492.
- [20] Chen J, Nie H, Peng C, et al. Enhancing the magnetic plasmon resonance of three-dimensional optical metamaterials via strong coupling for high-sensitivity sensing [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(16): 3481-3485.
- [21] Wu P C, Hsu W L, Chen W T, et al. Plasmon coupling in vertical split-ring resonator metamolecules [J]. *Scientific Reports*, 5(1): 9726.
- [22] Wang W, Yan F P, Tan S Y, et al. Symmetry breaking and resonances hybridization in vertical split ring resonator metamaterials and the excellent sensing potential [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(19): 5149-5157.
- [23] Withayachumnankul W, Jaruwongrungssee K, Tuantranont A, et al. Metamaterial-based microfluidic sensor for dielectric characterization [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, 189: 233-237.
- [24] Hu X, Xu G Q, Wen L, et al. Metamaterial absorber integrated microfluidic terahertz sensors [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2016, 10(6): 962-969.
- [25] Wiwatcharagoses N, Park K Y, Hejase J A, et al. Microwave artificially structured periodic media microfluidic sensor [C] // 2011 IEEE 61st Electronic Components and Technology Conference (ECTC), May 31-June 3, 2011, Lake Buena Vista, FL, USA. New York: IEEE Press, 2011: 1889-1893.
- [26] Kong Y, Cao J J, Qian W C, et al. Multiple Fano resonance based optical refractive index sensor composed of micro-cavity and micro-structure [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(6): 6804410.