

超材料吸收器集成微流控的双带太赫兹传感器

杨洁萍¹, 王民昌², 邓琥^{1,3}, 康莹², 李宗仁¹, 刘泉澄¹, 熊亮¹, 武志翔¹, 屈薇薇¹, 尚丽平^{1,3*}¹西南科技大学信息工程学院, 四川 绵阳 621000;²西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065;³特殊环境机器人技术四川省重点实验室, 四川 绵阳 621000

摘要 为了降低检测溶液样本时水对太赫兹的强烈吸收并提高传感器的灵敏度, 提出了两种超材料吸收器集成微流控的双带太赫兹传感器。两种传感器的单元谐振结构均由金属环和双“P”型交叉结构组成, 在 0.2~1.4 THz 频段内可产生两个完美吸收峰, 折射率灵敏度可达 300 GHz/RIU。实验结果表明, 设计的两种双带太赫兹传感器具有偏振不敏感性和宽入射角不敏感性, 在-4%~4%的制造公差范围内能保持良好的传感性能, 在生物医学领域具有潜在的应用价值。

关键词 传感器; 太赫兹; 超材料吸收器; 微流控

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2328001

Dual-Band Terahertz Sensor Based on Metamaterial Absorber Integrated Microfluidic

Yang Jieping¹, Wang Minchang², De Hu^{1,3}, Kang Ying², Li Zongren¹, Liu Quancheng¹, Xiong Liang¹, Wu Zhixiang¹, Qu Weiwei¹, Shang Liping^{1,3*}¹ School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621000, China;² Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an, Shaanxi 710065, China;³ Robot Technology Used for Special Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Mianyang, Sichuan 621000, China

Abstract In order to reduce the strong absorption of terahertz by water when detecting solution samples and improve sensitivity of sensor, we propose two dual-band terahertz sensors based on metamaterial absorber integrated microfluidic. The unit resonance structure of the two sensors is composed of metal ring and double I-type cross structure, which produces two perfect absorption peaks in the frequency range of 0.2–1.4 THz, and the refractive index sensitivity can reach 300 GHz/RIU. Experimental results show that the designed two dual-band terahertz sensors have polarization insensitivity and wide incident angle insensitivity, and keep good sensing performance within fabrication tolerance range -4%–4%, and have potential application in the field of biomedicine.

Key words sensor; terahertz; metamaterial absorber; microfluidic**OCIS codes** 280.4788; 040.2235; 130.6010

1 引言

太赫兹波指频率在 0.1~10 THz 范围内的电

磁波, 介于微波与红外波之间^[1], 具有低光子能量、强穿透力、生物分子指纹谱特性^[2]等独特性质, 在物质检测^[3]、生物医学^[4]等方面受到了人们的广泛关

收稿日期: 2021-05-11; 修回日期: 2021-06-07; 录用日期: 2021-06-15

基金项目: 国家自然科学基金(11872058)、国防技术基础项目(JSZL2017404A001, JCKY2018404C007, JSZL2018204C002)、四川省科技厅重点研发项目(2019YFG0114)

通信作者: *shangliping@swust.edu.cn

注。超材料是一种新型人工复合电磁材料^[5],通过调节单元结构能产生特殊的电磁特性^[6-7];且对周围环境介电性质的变化非常敏感,因此,可将其应用于传感检测领域^[8]。Landy 等^[9]提出的超材料吸收器具有高吸收率、强局域电磁场等优越性能,作为超材料结构的一类典型代表在生物传感领域^[10-11]具有广阔的应用前景,基于超材料吸收器的太赫兹传感器^[12-14]近年来也成为太赫兹传感领域的一大研究热点。

微流控技术可实现微米甚至纳米量级分析物的检测,在传感领域中得到了广泛应用^[15-17]。将超材料吸收器与微流控技术相结合可为太赫兹传感器的设计提供新思路。当电磁波入射时,超材料吸收器的法布里-珀罗结构将入射波的能量束缚在吸收器的腔体内^[18],用微流通道内的分析物充当超材料吸收器的介质层,与反射腔体重合,使局域电磁场得到显著增强,有效提高了传感器的灵敏度。此外,微流通道将溶液体积控制在微米量级,有效减小了水对太赫兹波的吸收,有助于实现溶液样本的高灵敏检测。已有集成超材料吸收器和微流控的太赫兹传感器在葡萄糖检测^[19-20]、癌症诊断^[21]、生物医学^[22-23]等方面具有较大的发展潜力。

本文提出了两种集成超材料吸收器和微流控的双带太赫兹传感器,其单元谐振结构均由金属环和双“T”型交叉结构组成,可在 0.2~1.4 THz 频段内产生两个吸收率高达 99% 的完美吸收峰,传感器的折射率灵敏度可达到 300 GHz/RIU。此外,这两种双带太赫兹传感器的单元结构均为四倍对称结构,具有偏振不敏感性和宽入射角不敏感性,在-4%~4% 的制造公差范围内可保持良好的传感性能。实验结果表明,这两种传感器在生物医学领域具有重

要的应用前景。

2 结构设计

图 1(a)为两种超材料吸收器集成微流控双带太赫兹传感器的单元结构示意图。两种传感器均由五层组成,从上到下依次为盖层、金属微结构、微流通道、金属反射层、基底。其中,盖层采用介电常数 $\epsilon = 3.75 + i0.015$ 、厚度为 50 μm 的石英材料。金属采用电导率 $\delta = 3.56 \times 10^7 \text{ S/m}$ 、厚度为 200 nm 的铝。基底作为载体和接地面时电磁特性不会对传感器性能产生影响,因此用介电常数为 11.9、厚度为 500 μm 的硅作为基底。单元结构周期 $P = 125 \mu\text{m}$ 。微流通道位于金属反射层与金属微结构之间,其高度 $h = 5 \mu\text{m}$ 。双带太赫兹传感器金属微结构单元 A、B 均由金属谐振环与双“T”型交叉金属结构组成,如图 1(b)和图 1(c)所示,优化后的结构几何参数如表 1 所示。采用电磁仿真软件 CST Microwave Studio 的频域求解器对两种双带太赫兹传感器进行数值仿真,在 x - y 平面设置周期边界条件,在 z 平面设置开放边界条件,电磁波沿 z 轴从盖层入射。

表 1 传感器金属微结构单元的几何参数

Table 1 Geometric parameters of the sensor metal

microstructure unit		unit: μm	
Sensor A	Value	Sensor B	Value
r	53	r_1	57
w	5	r_2	37
l_x	39	w	6
l_y	58	g	15

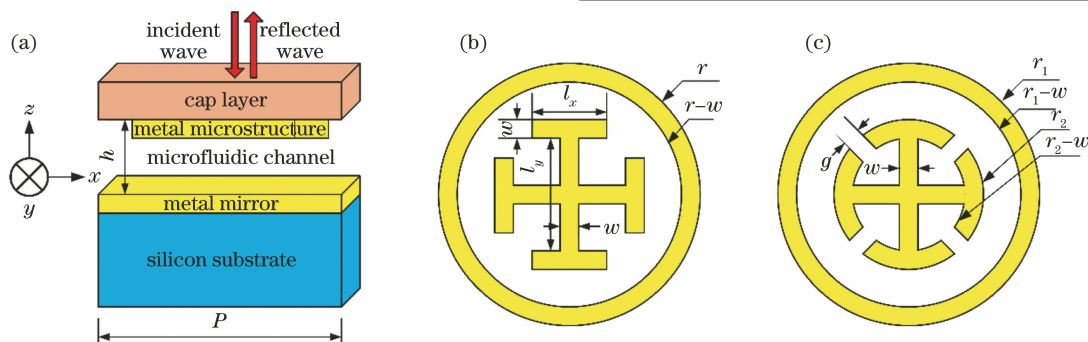


图 1 双带太赫兹传感器的单元结构示意图。(a)单元结构侧视图;(b)传感器 A 的金属微结构单元;(c)传感器 B 的金属微结构单元

Fig. 1 Schematic diagram of the unit structure of dual-band terahertz sensor. (a) Side view of unit structure; (b) metal microstructure unit of sensor A; (c) metal microstructure unit of sensor B

3 实验结果与分析

3.1 传感性能指标

品质因子 Q 可用来体现传感器的光学共振性质, Q 越大, 表明共振体系的损耗越小, 共振峰越窄, 测量光谱的变化越容易被区分^[24]。传感器的 Q 可表示为

$$Q = f_0 / X_{\text{FWHM}}, \quad (1)$$

式中, f_0 为共振频率, X_{FWHM} 为半峰全宽。折射率灵敏度 S 是衡量传感器性能的一个重要指标, 其值越大, 表明越容易在光谱上反映出传感器周围介电性质的微小变化, 可表示为

$$S = \Delta f / \Delta n, \quad (2)$$

式中, Δf 为共振频率的变化量, Δn 为折射率的变化量, 单位为折射率单元(RIU)。

品质因数(FOM)可表征传感器的整体性能, 更合理地分析不同频段的传感器性能, FOM 的值越大, 表明传感器的整体性能越好。FOM 的计算公式可表示为

$$X_{\text{FOM}} = S / X_{\text{FWHM}}. \quad (3)$$

3.2 传感性能分析

传感器的吸收率可表示为

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega) = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2, \quad (4)$$

式中, ω 为频率, $R(\omega)$ 为反射率, $T(\omega)$ 为透射率, S_{11} 为反射系数, S_{21} 为透射系数。实验设计的两种双带太赫兹传感器金属反射层的厚度为 200 nm, 远大于太赫兹波在金属中的趋肤深度, 太赫兹波无法透过金属反射层, 透射率几乎为 0, 即 $T(\omega) = 0$ 。

图 2 为两种双带太赫兹传感器在微流通道内无分析物时的反射和吸收谱。可以发现, 传感器 A 在 0.64 THz (Mode A) 和 0.88 THz (Mode B) 处产生了吸收率高达 99.9% 的吸收峰, 根据 (1) 式计算得到传感器 A 在 Mode A 和 Mode B 的 Q 值分别为 32 和 44; 传感器 B 在 0.6 THz (Mode A) 和 0.86 THz (Mode B) 处产生了吸收率高达 99.9% 的吸收峰, Q 值分别为 30 和 43。

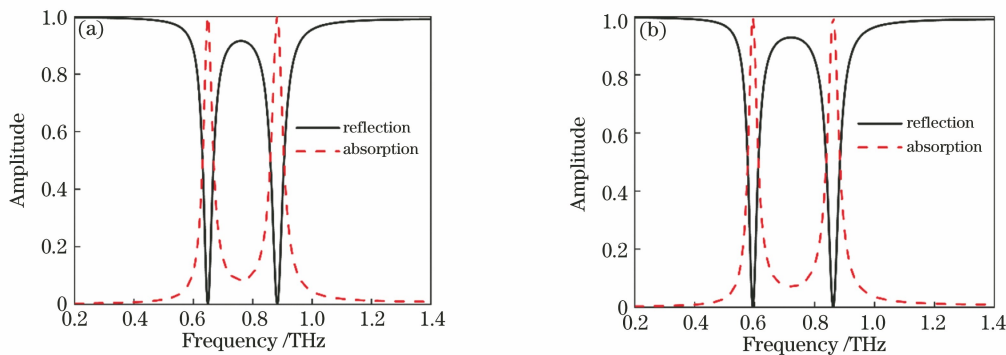


图 2 微流通道内无分析物时传感器的反射和吸收谱。(a)传感器 A;(b)传感器 B

Fig. 2 Reflection and absorption spectra of the sensors when there is no analyte in the microfluidic channel.

(a) Sensor A; (b) sensor B

为了进一步分析两种双带太赫兹传感器的共振吸收原理, 计算了传感器 A、B 在横电模 (TE) 偏振电磁波垂直入射时其共振频率处的电场和表面电流分布, 结果如图 3 所示。可以发现, 在 Mode A 的谐振频率处, 圆形金属环上下两侧的电场强度最高, 表面电流从上方经左右两侧流向下方, 产生偶极子共振, 由此形成 Mode A 的谐振峰; 在 Mode B 的谐振频率处, 纵向“I”型金属结构的电场强度最高, 表面电流从下方流向上方, 产生偶极子共振, 由此形成 Mode B 的谐振峰。这表明两种双带太赫兹传感器在电磁波偏振方向上均存在由电场引起的偶极子谐振, 使入射电磁波的能量在谐振频率处被消耗, 从而获得了近乎完美的吸收。此外, 传感器 A 的谐振电

场强度比传感器 B 略大, 因此, 其 Q 值略高于传感器 B。

图 4(a1) 和图 4(b1) 为两种双带太赫兹传感器微流通道内为不同折射率分析物时对应的吸收谱。可以发现, 当分析物的折射率 n 从 1.0 变化到 1.6 (步长为 0.2) 时, 两种传感器的谐振峰出现了明显的红移 (向低频移动)。原因是位于微流通道内的分析物折射率变化导致超材料周围的介电环境发生变化, 超材料敏锐地将这种变化转化为太赫兹波信号的变化, 体现在光谱上为谐振曲线的变化。此外, 两种双带太赫兹传感器的折射率检测范围在许多物质的折射率范围内, 如 DNA 的折射率为 1.4~1.6^[25]、健康人的血液折射率为 1.35^[26]、浓度为 40%~60%

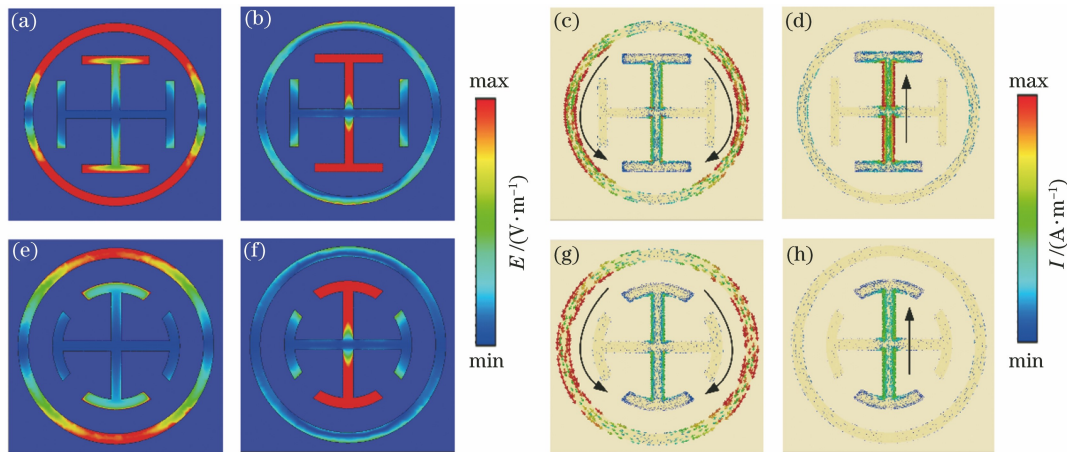


图 3 传感器在共振频率处的电场和表面电流分布。(a)、(c)传感器 A 的 Mode A; (b)、(d)传感器 A 的 Mode B; (e)、(g)传感器 B 的 Mode A; (f)、(h)传感器 B 的 Mode B

Fig. 3 Electric field and surface current distribution of the sensors at the resonance frequency. (a), (c) Mode A of sensor A; (b), (d) Mode B of sensor A; (e), (g) Mode A of sensor B; (f), (h) Mode B of sensor B

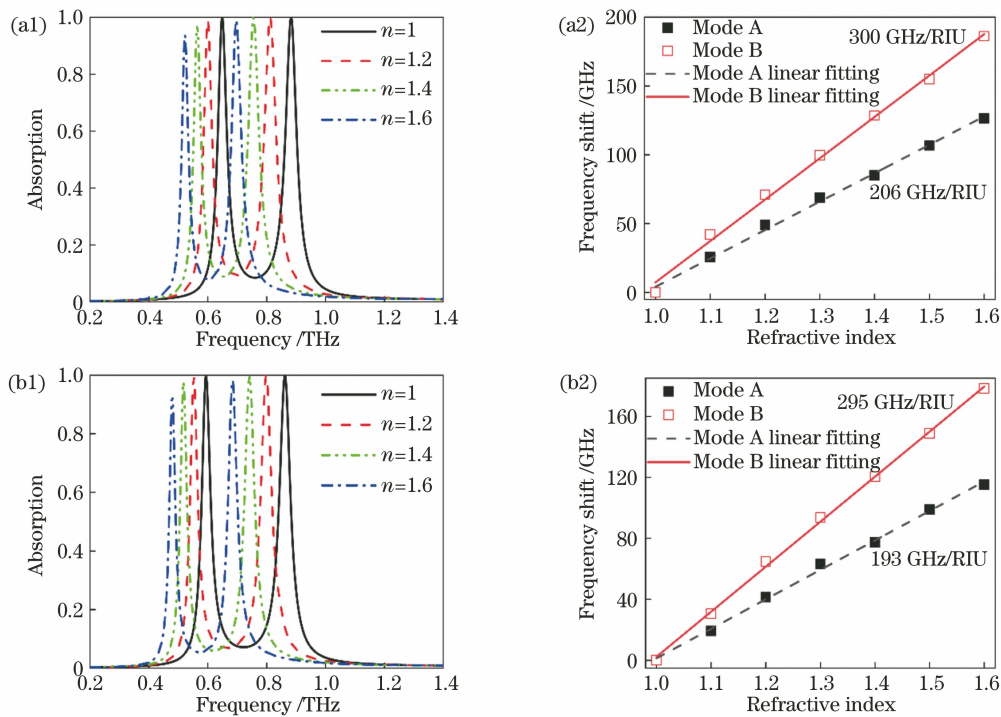


图 4 传感器的折射率检测特性。(a)传感器 A; (b)传感器 B

Fig. 4 Refractive index detection characteristics of the sensors. (a) Sensor A; (b) sensor B

的正常基底细胞折射率为 1.36^[27], 这表明可将该传感器用于生物医学样品的检测。图 4(a2) 和图 4(b2) 为两种双带太赫兹传感器频移与折射率变化量之间的关系。可以发现, 传感器 A 在分析物折射率 n 从 1.0 变化到 1.6 (步长为 0.1) 时, 谐振频移逐渐增大, 与折射率基本保持线性关系。线性拟合结果表明, 传感器 A 在 Mode A、Mode B 下的灵敏度分别为 206 GHz/RIU、300 GHz/RIU, FOM 值分别为 10.3、15.0。传感器 B 在 Mode A、Mode B

下的灵敏度分别为 193 GHz/RIU、295 GHz/RIU, FOM 值分别为 9.7、14.8。这表明传感器 A 的折射率检测性能略优于传感器 B。图 5 为两种双带传感器在谐振频率处 $x-z$ 平面的电场分布。可以发现, 入射的电磁波能量多集中在微流通道和盖层, 且传感器 A 拥有更多的电磁波能量与分析物作用, 因此其灵敏度高于传感器 B。

表 2 为两种双带太赫兹传感器与其他参考文献中传感器的性能对比结果。可以发现, 本方案设计

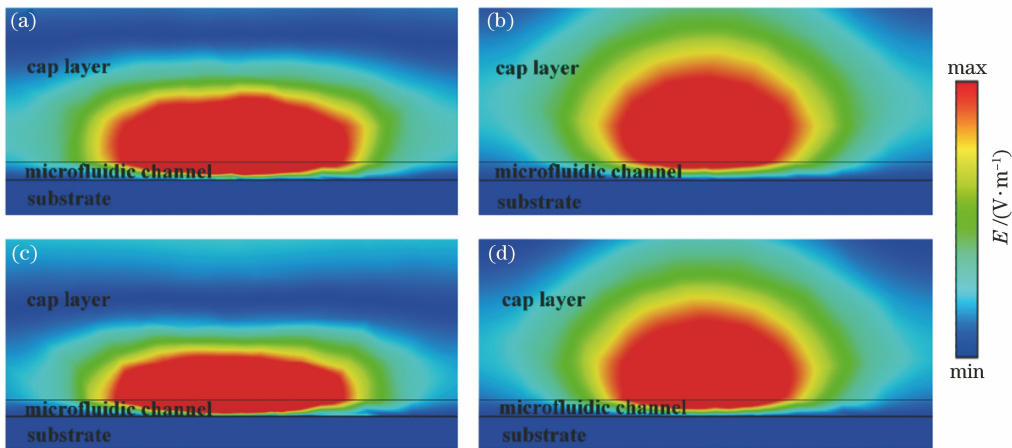


图 5 传感器在谐振频率处 x - z 平面的电场分布。(a)传感器 A 的 Mode A;(b)传感器 A 的 Mode B;
(c)传感器 B 的 Mode A;(d)传感器 B 的 Mode B

Fig. 5 Electric field distribution in the x - z plane of the sensors at the resonant frequency. (a) Mode A of sensor A;
(b) Mode B of sensor A; (c) Mode A of sensor B; (d) Mode B of sensor B

表 2 不同传感器的性能

Table 2 Performance of different sensors

Scheme	Resonance frequency /THz	Sensitivity	Q-factor	FOM	Absorptivity /%	
Ref. [11]	2.249	300 GHz/RIU	22.05	2.94	99	
	13	4.2 THz/RIU	/	12.5	/	
Ref. [15]	19.5	7.6 THz/RIU	/	12.5	/	
	25.9	10 THz/RIU	/	24.5	/	
Ref. [16]	2.06	72 GHz/RIU	/	1.58	/	
Ref. [19]	0.76	0.47/RIU	14.4	3.7	/	
	1.28	0.51/RIU	23	9.4	/	
Ref. [20]	6.4	3.5 THz/RIU	/	/	/	
Ref. [22]	0.79	379 GHz/RIU	53	25	98.8	
Ref. [23]	/	192 GHz/RIU	/	/	/	
Ours	Design A	0.64	206 GHz/RIU	32	10.3	99.9
		0.88	300 GHz/RIU	44	15.0	99.9
	Design B	0.60	193 GHz/RIU	30	9.7	99.9
		0.86	295 GHz/RIU	43	14.8	99.9

的两种双带太赫兹传感器具有高吸收率、高 Q 值、高灵敏度和高 FOM 值的特点,在传感检测领域具有潜在的应用价值。

3.3 稳定性分析

在实际应用中,具有偏振不敏感特性的传感器可以避免位置不同引入的误差,进而提高检测效率。实验设计的两种双带太赫兹传感器的单元结构均为四倍对称结构,具有偏振不敏感性。图 6 为 TE 和横磁模(TM)偏振电磁波下两种太赫兹传感器的吸收谱,可以发现,两种偏振模式下的吸收谱保持高度一致,这表明电磁波的偏振方向对传感器的检测结果无影响。

图 7 为两种双带太赫兹传感器在 TE 偏振模式下入射角度对传感器传感性能的影响,由图 7(a)和图 7(c)可知,当微流通道内样品折射率 $n=1$,且入射角 θ 小于 35° 时,传感器 A 的低频吸收峰吸收率大于 85% ,高频吸收率大于 95% ,谐振频率未发生明显偏移;在入射角 θ 小于 60° 时,传感器 B 的吸收率均大于 95% ,谐振频率也没有明显偏移。这表明两种双带太赫兹传感器均具有宽入射角不敏感性,且传感器 B 的入射角不敏感性优于传感器 A。由图 7(b)和图 7(d)可知,当微流通道内样品折射率保持恒定时,随着入射角的增大,两种传感器的频移量几乎恒定。这表明两种传感器分别在入射角为

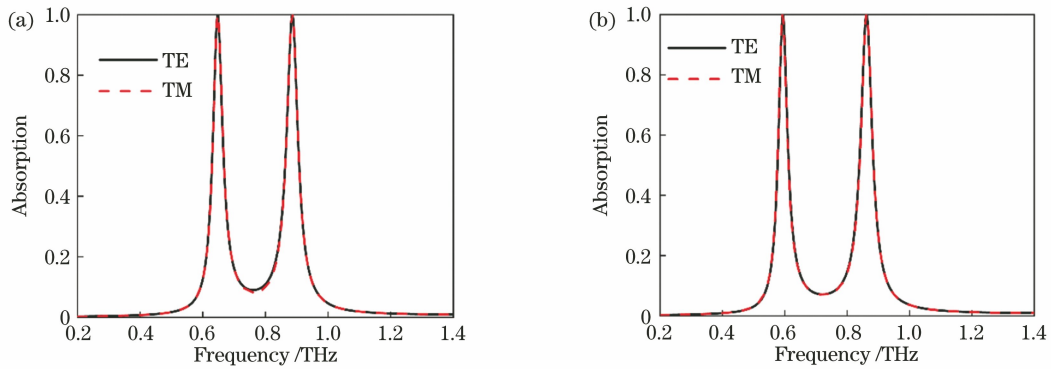


图 6 TE 和 TM 偏振电磁波下传感器的吸收谱。(a)传感器 A;(b)传感器 B

Fig. 6 Absorption spectra of the sensors under TE and TM polarized electromagnetic waves. (a) Sensor A; (b) sensor B

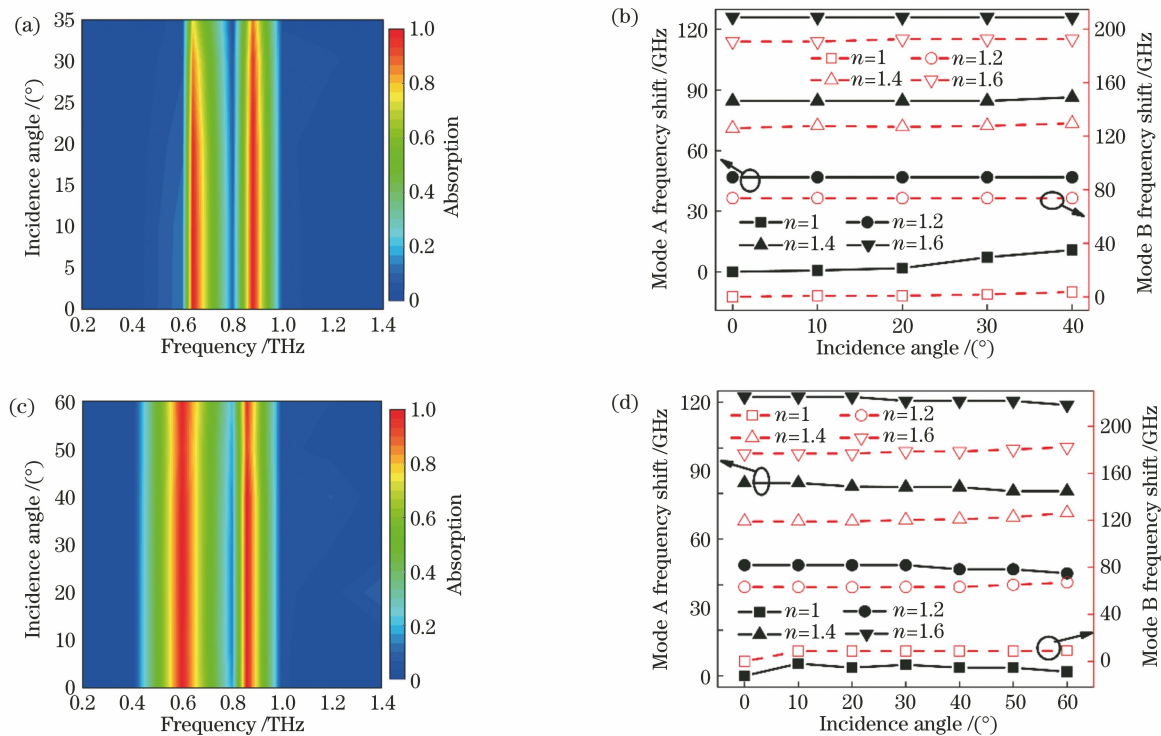


图 7 传感器的吸收率、频移随入射角的变化情况。(a)~(b)传感器 A;(c)~(d)传感器 B

Fig. 7 Absorption and frequency shift change of the sensors with incident angle. (a)–(b) Sensor A; (c)–(d) sensor B

$0^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 、 $0^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 范围内表现出良好的传感性能。图 8 为极化角度对两种传感器吸收率的影响。可以发现,当入射角 $\theta=0^{\circ}$, 相位角 φ 在 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 范围内变化时,两种传感器的谐振频率及吸收率均保持不变,这表明两种太赫兹传感器均具有良好的偏振不敏感特性。

在太赫兹传感器的制造过程中,结构尺寸不可避免地会存在误差,从而影响传感器的传感性能,图 9 为制造公差对两种双带太赫兹传感器传感特性的影响。可以发现,当传感器 A 的制造公差在 $-4\%\sim 4\%$ 范围内时,除了共振频率和振幅的微小变化外,反射曲线没有差异。当制造公差为 4% 且

微通道内无分析物时,传感器 A 的低频谐振位置的最大偏差为 31 GHz,高频谐振位置的最大偏差为 48 GHz。制造公差对传感器 A 折射率灵敏度的影响如图 9(b) 所示。可以发现,当制造公差为 -4% 时,由 $n=1.6$ 的分析物引起的相对于原始低频频移 (126 GHz) 的最大偏差为 27 GHz,相对于原始灵敏度 (211 GHz/RIU) 的最大偏差为 45 GHz/RIU。当制造公差为 4% 时,相对于原始高频频移 (186 GHz) 的最大偏差为 28 GHz,相对于原始灵敏度 (310 GHz/RIU) 的最大偏差为 46 GHz/RIU。当传感器 B 的制造公差在 $-4\%\sim 4\%$ 范围内变化时,反射曲线同样无太大差异。当制造公差为 4% 时,

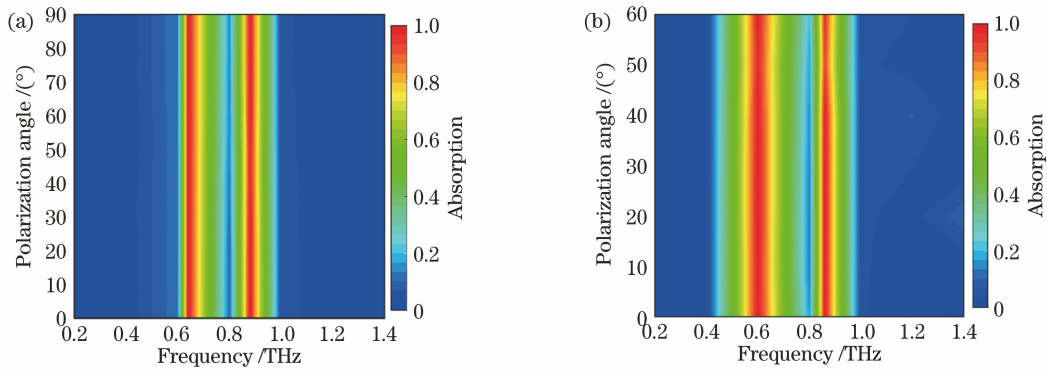


图 8 传感器的吸收率随极化角度的变化情况。(a)传感器 A;(b)传感器 B

Fig. 8 Absorption change of the sensors with the polarization angle. (a) Sensor A; (b) sensor B

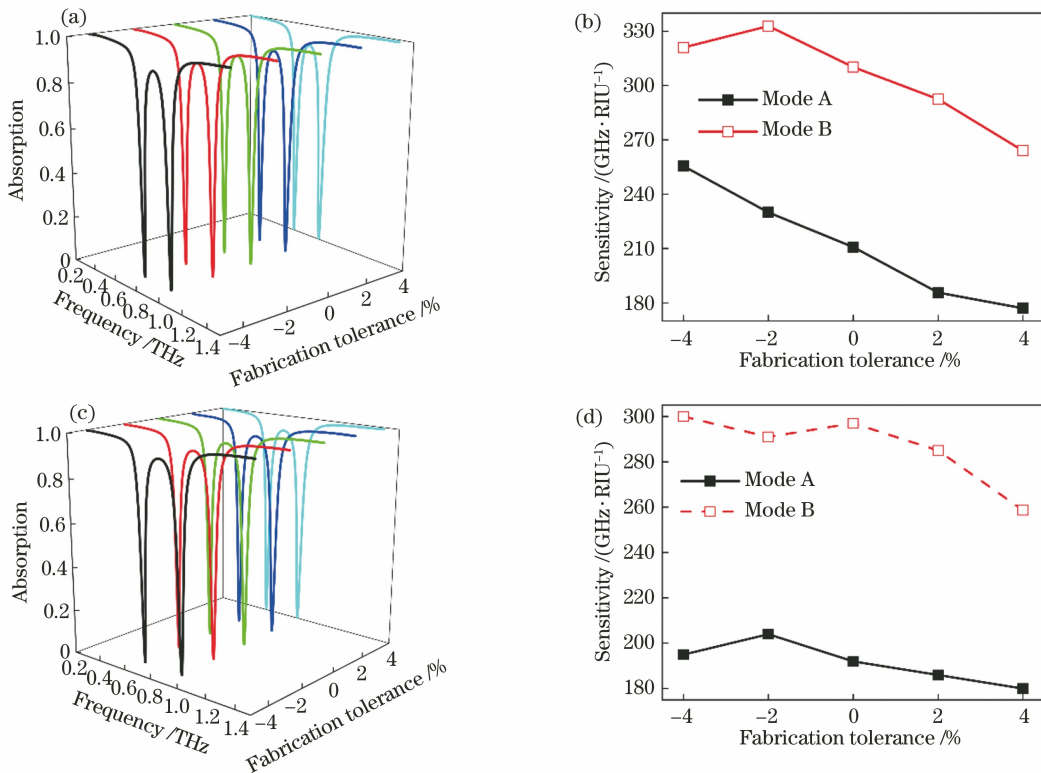


图 9 制造公差对传感器传感性能的影响。(a)~(b)传感器 A;(c)~(d)传感器 B

Fig. 9 Influence of manufacturing tolerances on sensing performance of the sensors. (a)~(b) Sensor A; (c)~(d) sensor B

传感器 B 低频谐振位置的最大偏差为 23 GHz, 高频谐振位置的最大偏差为 40 GHz。制造公差对传感器 B 折射率灵敏度的影响如图 9(d) 所示。可以发现, 当制造公差为 -2% 时, 由 $n=1.6$ 的分析物引起的相对于原始低频频移 (115 GHz) 的最大偏差为 7 GHz, 相对于原始灵敏度 (192 GHz/RIU) 的最大偏差为 12 GHz/RIU。当制造公差为 4% 时, 相对于原始高频频移 (178 GHz) 的最大偏差为 23 GHz, 相对于原始灵敏度 (297 GHz/RIU) 的最大偏差为 38 GHz/RIU。综上所述, 用本方案设计的两种双带太赫兹传感器在公差范围为 $-4\% \sim 4\%$ 时

可保持良好的感测性能, 且传感器 B 的稳定性优于传感器 A。

4 结 论

为了降低溶液样本检测时水对太赫兹的强烈吸收, 提高太赫兹传感器的传感性能, 提出了两种超材料吸收器集成微流控双带太赫兹传感器。两种太赫兹传感器的谐振结构均由金属环和双“1”型交叉结构组成, 在 $0.2 \sim 1.4$ THz 频段内产生了两个吸收率高达 99.9% 的吸收峰。同时, 分析物位于微流通道内可增强其与局域电磁场的相互作用, 传感器折

射率灵敏度可达 300 GHz/RIU。传感器 A 的 FOM 值最大为 15.0, 传感器 B 的 FOM 值最大为 14.8, 传感器 A 的检测性能略优于传感器 B。此外, 两种太赫兹传感器的单元结构均为四倍对称结构, 具有偏振不敏感性和宽入射角不敏感性, 在 $-4\% \sim 4\%$ 的制造公差范围内保持良好的感测性能。其中, 传感器 A、B 分别在 $0^\circ \sim 35^\circ$ 、 $0^\circ \sim 60^\circ$ 的入射角范围内表现出良好的传感性能, 且传感器 B 的稳定性优于传感器 A, 两种超材料吸收器集成微流控的双带太赫兹传感器在生物医学领域具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Zhang X C. Terahertz wave imaging: horizons and hurdles[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2002, 47(21): 3667-3677.
- [2] Romain X, Baida F D, Boyer P. Extended malus law with terahertz metallic metamaterials for sensitive detection with giant tunable quality factor [J]. *Physical Review B*, 2016, 94(4): 045407.
- [3] Peng Y, Shi C J, Xu M Q, et al. Qualitative and quantitative identification of components in mixture by terahertz spectroscopy[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2018, 8(6): 696-701.
- [4] Danciu M, Alexa-Stratulat T, Stefanescu C, et al. Terahertz spectroscopy and imaging: a cutting-edge method for diagnosing digestive cancers [J]. *Materials*, 2019, 12(9): E1519.
- [5] Sihvola A. Metamaterials in electromagnetics [J]. *Metamaterials*, 2007, 1(1): 2-11.
- [6] Smith D R, Pendry J B, Wiltshire M C K. Metamaterials and negative refractive index [J]. *Science*, 2004, 305(5685): 788-792.
- [7] Zhang F L, Zhao Q, Kang L, et al. Experimental verification of isotropic and polarization properties of high permittivity-based metamaterial [J]. *Physical Review B*, 2009, 80(19): 195119.
- [8] Yan X, Zhang X F, Liang L J, et al. Research progress in the application of biosensors by using metamaterial in terahertz wave[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(9): 2365-2371.
闫昕, 张兴坊, 梁兰菊, 等. 太赫兹波段超材料在生物传感器的应用研究进展 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(9): 2365-2371.
- [9] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(20): 207402.
- [10] Liu J J. High-sensitivity detection method for organochlorine pesticide residues based on loop-shaped absorber [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2020, 242: 122542.
- [11] 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.
- [12] Islam M S, Sultana J, Biabanifard M, et al. Tunable localized surface plasmon graphene metasurface for multiband superabsorption and terahertz sensing[J]. *Carbon*, 2020, 158: 559-567.
- [13] Zhou H, Yang C, Hu D L, et al. Terahertz biosensing based on bi-layer metamaterial absorbers toward ultra-high sensitivity and simple fabrication [J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 115(14): 143507.
- [14] Li F Y, He K, Tang T T, et al. The terahertz metamaterials for sensitive biosensors in the detection of ethanol solutions [J]. *Optics Communications*, 2020, 475: 126287.
- [15] Yan F, Li L, Wang R X, et al. Ultrasensitive tunable terahertz sensor with graphene plasmonic grating[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(4): 1103-1112.
- [16] Zhang R, Chen Q M, Liu K, et al. Terahertz microfluidic metamaterial biosensor for sensitive detection of small-volume liquid samples [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2019, 9(2): 209-214.
- [17] Huang S T, Hsu S F, Tang K Y, et al. Application of a terahertz system combined with an X-shaped metamaterial microfluidic cartridge[J]. *Micromachines*, 2020, 11(1): 74.
- [18] Tan S Y. Study on the terahertz high refractive index metamaterial and the sensing characteristics of the metamaterial absorbers[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
谭思宇. 太赫兹高折射率超材料及吸收体传感特性的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [19] Lan F, Luo F, Mazumder P, et al. Dual-band refractometric terahertz biosensing with intense wave-matter-overlap microfluidic channel [J]. *Biomedical Optics Express*, 2019, 10(8): 3789-3799.
- [20] Hu X, Xu G Q, Wen L, et al. Metamaterial absorber integrated microfluidic terahertz sensors[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2016, 10(6): 962-969.
- [21] Geng Z X, Zhang X, Fan Z Y, et al. A route to terahertz metamaterial biosensor integrated with microfluidics for liver cancer biomarker testing in early stage [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 16378.

- [22] Wang X, Wang J L. Terahertz metamaterial absorber sensor based on three-dimensional split-ring resonator array and microfluidic channel [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(19): 1904001.
王鑫, 王俊林. 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[J]. *光学学报*, 2020, 40(19): 1904001.
- [23] Zhang Y J, Wang S F, Zhong G C, et al. Metamaterial-based terahertz multi-band sensors integrated with microfluidic channels [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(6): 0614038.
张贇佳, 王少飞, 钟高超, 等. 微流控-超材料集成多带太赫兹传感器[J]. *中国激光*, 2019, 46(6): 0614038.
- [24] Liang L, Wen L, Jiang C P, et al. Research progress of terahertz sensor based on artificial microstructure [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(2): 0203001.
梁丽, 文龙, 蒋春萍, 等. 人工微结构太赫兹传感器的研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(2): 0203001.
- [25] Cong L Q, Tan S Y, Yahiaoui R, et al. Experimental demonstration of ultrasensitive sensing with terahertz metamaterial absorbers: a comparison with the metasurfaces[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(3): 031107.
- [26] Jindal S, Sobti S, Kumar M, et al. Nanocavity-coupled photonic crystal waveguide as highly sensitive platform for cancer detection [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(10): 3705-3710.
- [27] Ayyanar N, Raja G T, Sharma M, et al. Photonic crystal fiber-based refractive index sensor for early detection of cancer [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(17): 7093-7099.