

基于不规则 U 型结构的高灵敏度太赫兹微流传感器

李宗仁¹, 邓琥^{1,2,3*}, 杨洁萍¹, 刘泉澄¹, 郭进¹, 尚丽平^{1,2,3}¹西南科技大学信息工程学院, 四川 绵阳 621010;²特殊环境机器人技术四川省重点实验室, 四川 绵阳 621010;³西南科技大学中国工程物理研究院激光聚变研究中心极端条件物质特性联合实验室, 四川 绵阳 621010

摘要 设计了一种基于不规则 U 型结构的高灵敏度太赫兹微流传感器,通过仿真软件研究了传感器金属结构中金属线的长度、宽度与夹角对品质因数与吸收率的影响,以及微流通道高度与盖层厚度对传感器性能的影响,最后仿真计算了传感器对不同质量分数葡萄糖溶液的检测性能。结果表明:传感器的最佳结构参数为 $L_1=84\ \mu\text{m}$ 、 $L_2=82\ \mu\text{m}$ 、 $L_3=52\ \mu\text{m}$ 、 $W=5\ \mu\text{m}$ 、 $\theta=60^\circ$,相应的传感器品质因数可达 24,灵敏度可达 313 GHz/RIU。这种具有高品质因数与高灵敏度的超材料传感器在无标记微量物质检测方面具有较高的应用价值。

关键词 传感器; 太赫兹; 高灵敏度; 品质因数

中图分类号 O434.3

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1928003

High-Sensitivity Terahertz Microfluidic Sensor Based on Irregular U-type Structure

Li Zongren¹, Deng Hu^{1,2,3*}, Yang Jieping¹, Liu Quancheng¹, Guo Jin¹, Shang Liping^{1,2,3}¹*School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China;*²*Key Laboratory of Special Environment Robotics of Sichuan Province, Mianyang, Sichuan 621010, China;*³*Joint Laboratory for Extreme Conditions Matter Properties, Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China*

Abstract A high-sensitivity terahertz microfluidic sensor based on the irregular U-type structure is proposed. The influence of the length, width, and angle of the metal wires in the sensor's metal structure on the quality factor (Q factor) and the absorptivity of the sensor and that of the microfluidic channel height and the cap thickness on the sensing properties of the sensor are studied with simulation software. Finally, the detection performance of the sensor in glucose solutions at different mass fraction is calculated by simulation. The results show that the best combination of structural parameters for the sensor is $L_1=84\ \mu\text{m}$, $L_2=82\ \mu\text{m}$, $L_3=52\ \mu\text{m}$, $W=5\ \mu\text{m}$, and $\theta=60^\circ$, in which case the Q factor of the sensor can reach 24 and the sensitivity can reach 313 GHz/RIU. In short, this kind of microfluidic sensor with a high Q factor and high sensitivity has great application value in the field of label-free trace detection.

Key words sensors; terahertz; high-sensitivity; quality factor**OCIS codes** 040.2235; 300.6495

收稿日期: 2021-02-22; 修回日期: 2021-03-29; 录用日期: 2021-04-23

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

通信作者: *denghu@swust.edu.cn

1 引言

太赫兹波具有能量低、宽带大、穿透性强等特性,在通信、安检、生物医学等方面应用广泛^[1-2],特别是用于生物传感,不会对生物材料的理化性质产生影响,能够激发生物大分子的集体振荡模式。目前,太赫兹生物传感器是太赫兹功能器件研究的热点^[3],不仅可以对成分进行检测,还可以对生物分子与药物之间的化学反应进行监测^[4],其传感器结构采用周期性排列的人工电磁材料^[5-8]。随着微纳加工技术的不断进步,太赫兹生物传感器相关研究日益增多^[9-10],这种传感器突破了传统生物传感器的分辨率极限,能够实现生物大分子高灵敏度无标记快速检测^[11];检测溶液的厚度为微米量级,能有效降低水对检测结果的影响^[12]。近年发展起来的微流控芯片技术是太赫兹生物传感器的典型代表^[13-15]。2016年,Hu等^[16]设计了一种周期金属结构-微流通道-反射层的太赫兹微流传感器,实现了220 GHz/RIU的高灵敏度。2019年,Lan等^[17]设计了一种太赫兹微流传感器,并对不同浓度的牛血清蛋白进行定量测量。2019年,Zhang等^[18]提出了一种用于小体积液体样品检测的多通道太赫兹微流传感器,增强了样品与太赫兹波的相互作用,提高了灵敏度。2019年,张赆佳等^[19]提出了一种微流控-超材料集成多带太赫兹传感器,利用高频处的三个

共振峰进行物质的量分数预测,其预测结果的误差小于1%。2020年,王鑫等^[20]提出了一种基于三维开口谐振环阵列的微流控太赫兹传感器,并将其谐振电磁场扩展到三维空间,增强了谐振电磁场与分析物的相互作用,从而提高了灵敏度。基于以上研究背景,为进一步提高传感器灵敏度,本文设计了一种基于不规则U型结构的太赫兹微流传感器,单元金属结构以U型结构为基础,通过调整结构的几何参数,仿真得到具有最佳品质因数和灵敏度的结构,该结构可用于生物与化学检测领域。

2 传感器结构设计

所设计的太赫兹微流传感器结构如图1所示。由图1(a)可知,传感器结构单元由顶部盖层、周期金属结构、微流通道、金属反射层和基底5个部分组成,单元结构的周期 $P=146\ \mu\text{m}$ 。其中,金属微结构与金属反射层的材料为铝(Al),电导率 $\sigma_{\text{Al}}=3.56\times 10^7\ \text{S}\cdot\text{m}^{-1}$,厚度 $t_b=t_c=0.2\ \mu\text{m}$ 。图1(b)所示为单元金属结构,金属微结构的边长 $L_1=84\ \mu\text{m}$ 、 $L_2=82\ \mu\text{m}$ 、 $L_3=52\ \mu\text{m}$ 、金属线宽 $W=5\ \mu\text{m}$,夹角 $\theta=60^\circ$,且固定 L_2 与 L_3 之间夹角为直角。另外,盖层与基底均采用介电常数 $\epsilon=3.75$ ^[21]的石英材料,盖层厚度 $t_a=35\ \mu\text{m}$ 、基底厚度 $t_d=10\ \mu\text{m}$ 。微流通道位于金属反射层与盖层之间,高度 $h=7\ \mu\text{m}$ 。

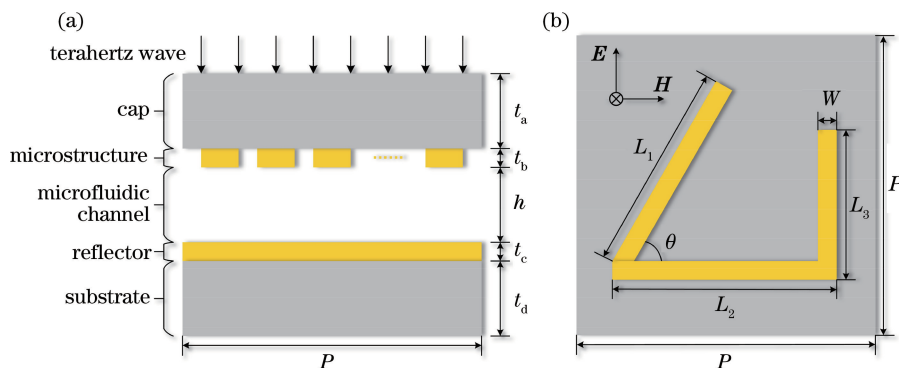


图1 太赫兹微流传感器。(a)传感器结构;(b)单元金属结构

Fig. 1 Terahertz microfluidic sensor. (a) Sensor structure; (b) unit metal structure

3 仿真结果及讨论

3.1 主要参数与物理机理

衡量传感器性能的主要参数有品质因数 Q 和灵敏度 S 。其中, Q 的计算公式为

$$Q = \frac{f}{W_{\text{FWHM}}}, \quad (1)$$

式中: f 为谐振频率; W_{FWHM} 为半峰全宽。 Q 反映了传感器的谐振特性, Q 值越大,则传感器对其能量集中区域的电磁场变化越敏感,且器件的相应能量越集中,电路的能量消耗越低,储能效率越高,越有利于增强传感器的灵敏度 S 。

S 的计算式为

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

式中: Δf 为谐振峰频率的变化量; Δn 为折射率的变化量, 单位为 GHz/RIU。 S 反映了被测对象单位折射率变化对应谐振频率的变化量, S 越大, 传感性能越佳。

记 $T(\omega)$ 为谐振峰透射率, $R(\omega)$ 为谐振峰反射率, 其中 $T(\omega) = |S_{21}(\omega)|^2$, $R(\omega) = |S_{11}(\omega)|^2$, $|S_{21}(\omega)|^2$ 与 $|S_{11}(\omega)|^2$ 分别为透射系数与反射系数, 则谐振峰的吸收率可表示为

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega) = 1 - |S_{11}(\omega)|^2 - |S_{21}(\omega)|^2. \quad (3)$$

所设计传感器金属反射层的厚度 $t_c = 0.2 \mu\text{m}$, 超过入射太赫兹波的趋肤深度^[22], 能够有效阻止太赫兹波的透射, 故传感器透射率 $T(\omega) = 0$, 此时, 传感器的吸收率公式为

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

本研究的超材料为典型的开口谐振环 (splitting resonator, SRR) 结构^[23]。根据入射太赫兹波激发的电场、磁场、金属结构表面电流分布的不同, 在低频段可将谐振来源分为如下两类。

1) LC 谐振。LC 谐振的主要来源在开口处, 当太赫兹波垂直照射到超材料结构时, 谐振环上会产生感应电流, 生成的电流沿着开口两边的金属环循环流动, 类似于电路的充放电过程, 电能与磁能分别交替存储在开口处和金属环处, 故将开口处视为电

容 C , 将谐振环视为电感 L , 于是整体等效为 LC 振荡。其等效 LC 振荡电路如图 2(a) 所示, 其谐振频率为^[24]

$$\omega_{LC} = (LC)^{-1} = \frac{1}{\sqrt{L} \sqrt{\epsilon_0 \int_v \epsilon(v) E(v) dv}}, \quad (5)$$

式中: L 为等效电感; C 为等效电容; $\epsilon(v)$ 为周围媒质的介电常数; $E(v)$ 为周围媒质的电场。由 (5) 式可知: LC 谐振频率主要由电容与电感决定, 而电容与周围环境的介电常数和电场有关, 当待测分析物发生变化时, 周围环境的介电常数也发生改变, 从而整体电容发生改变, 引起谐振频率也发生改变。而电感主要由超材料的几何结构参数决定, 故设计不同参数的超材料就可以获得高品质因数的空间电磁场分布, 进而提高传感器的灵敏度。

2) 偶极子谐振。当入射太赫兹波的电场偏振方向与 SRR 开口方向垂直时, 空间中的正电荷与负电荷会分别在金属环结构的两端聚集, 形成在金属环表面来回流动的感应电流, 即偶极子谐振, 其等效电路如图 2(b) 所示。由图 2 可知, 偶极子谐振的显著特征在于其开口两侧金属结构表面感应电流方向一致, 而 LC 谐振开口两侧金属结构表面感应电流方向相反并形成回路。

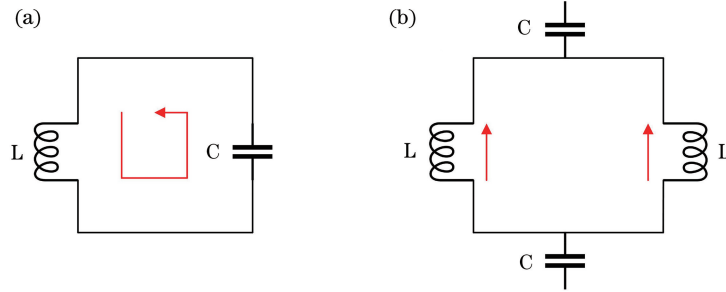


图 2 等效电路。(a) LC 谐振; (b) 偶极子谐振

Fig. 2 Equivalent circuit. (a) LC resonance; (b) dipole resonance

3.2 微纳结构几何参数对 Q 值的影响

本实验通过优化传感器结构参数来说明系统特性随微纳金属结构的变化趋势。采用 CST Studio Suite 2018 电磁仿真软件, 在保证其他参数不变的情况下, 分别研究了不同 L_1 、 L_2 、 L_3 、 W 和 θ 值对谐振峰 Q 值与吸收率 $A(\omega)$ 的影响。由图 3(b)~(f) 可知, 传感器谐振峰的 Q 值与吸收率 $A(\omega)$ 随微纳金属结构参数的变化而变化。其中, L_2 从 $78 \mu\text{m}$ 增加到 $86 \mu\text{m}$ 时, 吸收率与 Q 值基本保持不变。 L_1 、 L_3 、 θ 的变化对于吸收率与 Q 值的影响较大, 其

中金属线宽 W 的变化对于吸收率与 Q 值的影响最大, 随着金属线宽 W 增大, Q 值与吸收率均先增大后减小, 在金属线宽 $W = 5 \mu\text{m}$ 时, Q 值与吸收率均达到最大值 $Q = 24$ 、 $A(\omega) = 99.05\%$, 且 W 对 Q 值与吸收率的影响较其他结构参数的影响更加明显。综合各参数对 Q 值及吸收率的影响以及一系列对微纳金属结构参数的仿真优化, 选取的微纳金属结构参数为 $L_1 = 84 \mu\text{m}$ 、 $L_2 = 82 \mu\text{m}$ 、 $L_3 = 52 \mu\text{m}$ 、 $W = 5 \mu\text{m}$ 、 $\theta = 60^\circ$, 在 0.99 THz 处产生 Q 值为 24, $W_{\text{FWHM}} = 42 \text{ GHz}$, 吸收率 $A(\omega) = 99.05\%$ 的谐振峰。

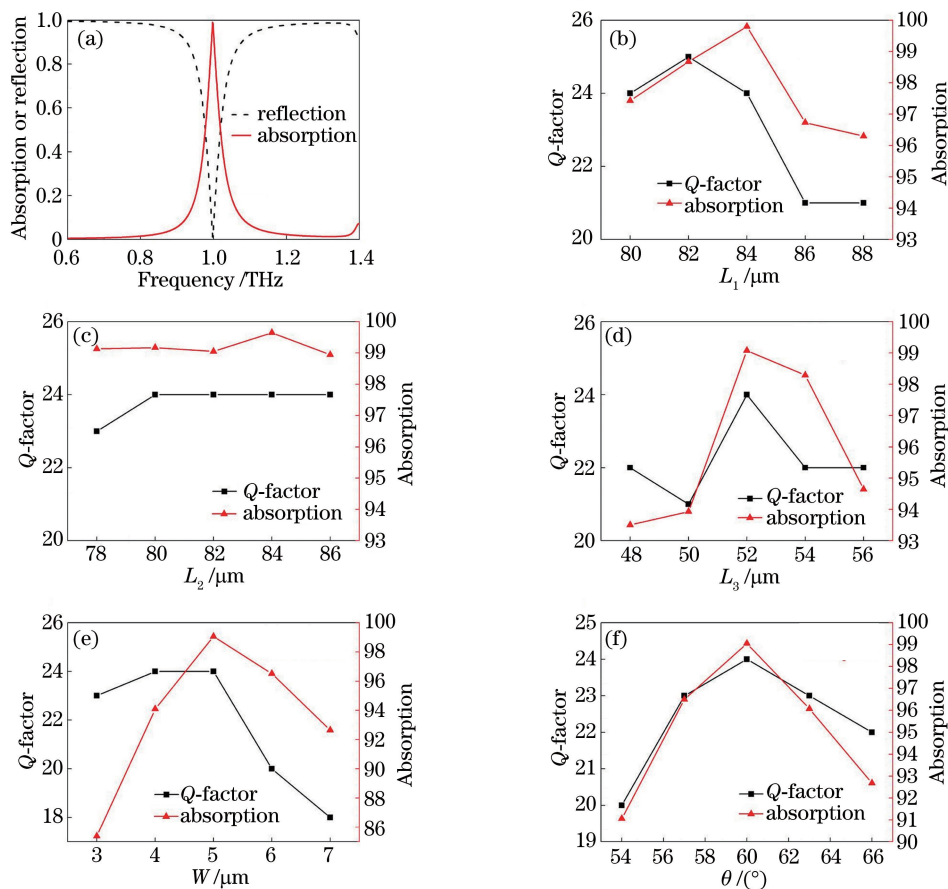


图 3 不同结构参数下 Q 值与吸收率的变化。(a)传感器的吸收与反射光谱;(b) L_1 ;(c) L_2 ;(d) L_3 ;(e) W ;(f) θ
 Fig. 3 Changes of Q-factor and absorption with different structural parameters. (a) Absorption and reflection spectra of the sensor; (b) L_1 ; (c) L_2 ; (d) L_3 ; (e) W ; (f) θ

3.3 微流通道高度与盖层厚度对传感性能的影响

利用所设计的传感器对不同待测生物分析物进行传感检测,将不同折射率的待测液体分析物依次注入微流通道,由于大部分生物大分子的折射率在 1.0~2.0 范围内,故将待测液体分析物的折射率 n 以 0.1 为间隔,设定为 1.0~1.8。所设计的传感器为反射式微流通道结构,能够使入射的太赫兹波在微纳金属结构与金属反射面之间的通道多次反射,从而提高分析物与太赫兹波激发场的相互作用,故微流通道对于传感器性能尤为重要。为了探究微流通道高度 h 对传感器性能的影响,在保证其他参数不变的情况下,以 0.1 μm 为间隔分别仿真计算了 h 从 5 μm 到 10 μm 时的 Q 值与吸收率,结果如图 4(a)所示;为了更好地说明 h 对传感器传感性能的影响,另计算了不同通道高度对应传感器灵敏度的变化,结果如图 4(b)所示。结果表明:当 h 从 5 μm 增大到 10 μm 时,传感器的 Q 值与灵敏度 S 不断减小,且 Q 值在 h 大于 7 μm 后下降明显,在 5~7 μm

范围内变化相对平缓;传感器的吸收率先增大后减小,且在 $h = 7 \mu\text{m}$ 时达到最大值 99.05%,相对于其他参数,吸收率的变化明显。

为研究盖层厚度对传感器性能的影响,在保证微纳金属结构参数与 $h = 7$ 不变的情况下,以 5 μm 为间隔分别仿真计算了盖层厚度 t_a 从 35 μm 增加到 90 μm 时传感器对应的灵敏度。由图 4(c)可知:当 t_a 从 35 μm 增加到 50 μm 时,灵敏度 S 下降明显,但是灵敏度 S 没有随着盖层厚度 t_a 增加而一直增大,当 t_a 从 50 μm 增加到 90 μm 时,灵敏度稳定保持在 270 GHz/RIU 左右。这是因为当 $t_a > 50 \mu\text{m}$ 后,盖层逐渐将太赫兹波所激发的电磁场全部覆盖,盖层厚度的增加不会再改变传感器的等效电容,从而灵敏度趋于饱和,不再随着盖层厚度的增加而明显变化。故在传感器的实际加工中,在加工技术允许的前提下应适当减小盖层厚度,进而增强盖层内电磁场与分析物的相互作用,并降低盖层对于谐振频率处电磁场的损耗,以达到提高传感器灵敏度的目的。

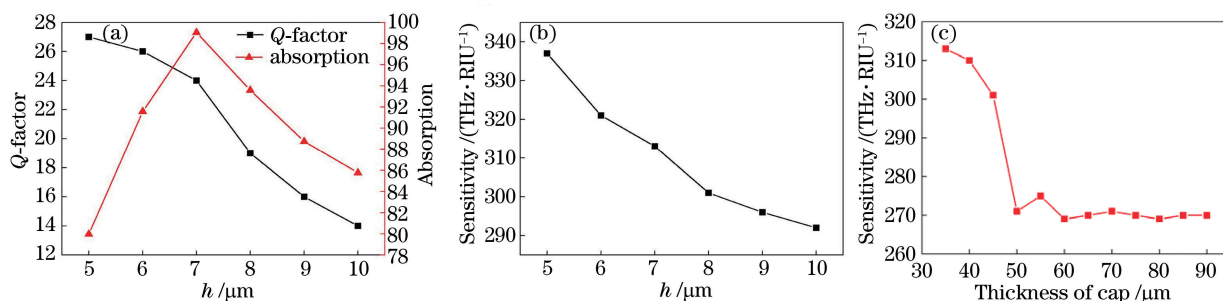


图 4 微流通道高度和盖层厚度对传感性能的影响。(a) Q 值与吸收率随微流通道高度的变化；(b)灵敏度随微流通道高度的变化；(c)灵敏度随盖层厚度的变化

Fig. 4 Effects of microfluidic channel height and thickness of cap on the sensing properties. (a) Changes of Q-factor and absorption with different microfluidic channel height; (b) changes of sensitivity with different microfluidic channel height; (c) changes of sensitivity with different thickness of cap

3.4 谐振产生机理

为进一步探究谐振频率的产生机理,仿真计算了在谐振频率 $f_0 = 0.99$ THz 下微纳金属结构的电场与表面电流的分布情况,如图 5 所示。由图 5(a)可知,在谐振点 f_0 处,开口金属棒左右两端处聚集有大量电荷,且由于电场偏振方向垂直于开口,在开口处金属棒表面产生感应电流,其中两侧金属棒表面电流方向与金属反射层对应位置的感应电流方向相反,从而形成电流回路,进而激发磁场,右边金属

棒的磁场方向与垂直入射的太赫兹波磁场偏振方向一致,左侧金属棒的磁场方向与金属表面形成的电流回路所激发的磁场方向也与入射太赫兹波磁场偏振方向相关,具体相关程度受夹角 θ 影响。从图 5(b)可以看出,表面电流主要在开口两侧的金属线上来回振荡且方向一致,故在两边各产生偶极子谐振,入射太赫兹波的能量以焦耳热的形式向外辐射,在谐振频率处对太赫兹波实现强吸收,反映在吸收谱上即实现高 Q 值与高吸收率。

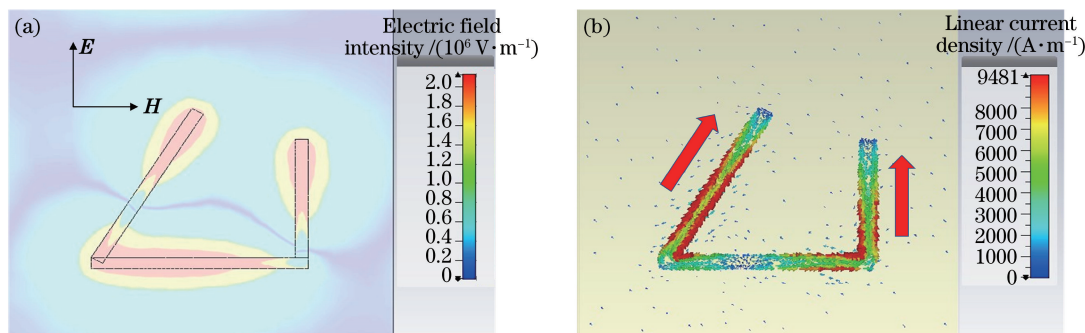


图 5 金属微结构在谐振频率点的电场分布和表面电流分布。(a)电场分布；(b)表面电流分布

Fig. 5 Electric field distribution and surface current distribution of metal microstructure at the resonance frequency point.

(a) Electric field distribution; (b) surface current distribution

为便于对所设计的传感器与现有其他太赫兹传感器进行比较,将所设计的太赫兹超材料传感器与相关研究涉及的太赫兹超材料传感器的谐振频率、品质

因数 Q、最大频率灵敏度进行比较,结果如表 1 所示。所设计的超材料传感器具有很高的 Q 值与灵敏度,这对设计高灵敏度传感器具有很大的参考价值。

表 1 所提出的传感器与已有的传感器性能对比

Table 1 Comparison of the proposed sensor with prior reported sensors

Method	Frequency /THz	Q-factor	Sensitivity $/(GHz \cdot RIU^{-1})$
Method in Ref. [16]	0.71		220
Method in Ref. [19]	1.0–1.2		192
Method in Ref. [20]	0.79	43–70	379
Method in Ref. [23]	0.4–0.7		153.17
Proposed method	0.99	24	313

3.5 应用仿真

为验证所设计传感器的传感性能,模拟在 20 °C 条件下将 5 种不同质量分数的葡萄糖溶液分别设置为传感器微流通道内液相分析物进行仿真计算,结果如表 2 和图 6 所示。仿真结果表明:随着微流通道中葡萄糖溶液浓度的增加,谐振频率向低频偏移,反射率减小, Q 值保持在 22 不变;传感器始终具有较高的 Q 值,当葡萄糖溶液的质量分数变化 1% 时,传感器频率偏移量增加了 0.475 GHz,表明所设计的传感器具有良好的分辨率与性能。

表 2 20 °C 时不同质量分数葡萄糖溶液的折射率^[25]

Table 2 Refractive index of glucose solution with different mass fractions at 20 °C^[25]

Mass fraction of glucose solution /%	2	10	18	26	34
Refractive index	1.336	1.347	1.360	1.373	1.384

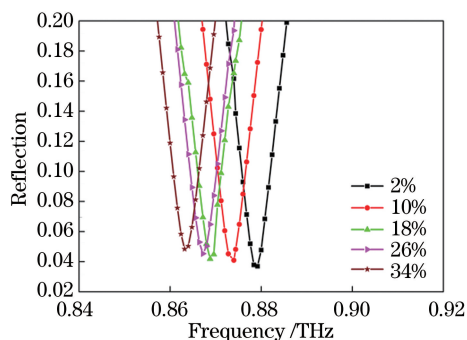


图 6 不同质量分数葡萄糖溶液的反射图谱

Fig. 6 Reflectance spectra of glucose solutions with different mass fractions

4 结 论

为了提高太赫兹生物传感器的灵敏度,设计了一种基于不规则 U 型结构的高灵敏度太赫兹微流传感器,对传感器金属结构中金属线的长度、宽度与夹角进行了优化,研究了不同微流通道高度与盖层厚度对传感器性能的影响,结果表明:传感器最佳 Q 值为 24,最佳灵敏度为 313 GHz/RIU,具有良好的传感性能。根据谐振频率对应的电磁场分布对传感机理进行了分析,通过对 20 °C 下不同质量分数葡萄糖溶液进行仿真计算,结果表明,传感器对不同质量分数葡萄糖溶液的谐振频率存在较大差异,具有良好的分辨率与灵敏度,可用于生物与化学检测领域。

参 考 文 献

- [1] Ahmadivand A, Gerislioglu B, Tomitaka A, et al. Extreme sensitive metasensor for targeted biomarkers identification using colloidal nanoparticles-integrated plasmonic unit cells[J]. *Biomedical Optics Express*, 2018, 9(2): 373-386.
- [2] Yang X, Zhao X, Yang K, et al. Biomedical applications of terahertz spectroscopy and imaging [J]. *Trends in Biotechnology*, 2016, 34(10): 810-824.
- [3] 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.
- [4] Xie L J, Gao W L, Shu J, et al. Extraordinary sensitivity enhancement by metasurfaces in terahertz detection of antibiotics[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 8671.
- [5] 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.
- [6] Liu Z W, Lee H, Xiong Y, et al. Far-field optical hyperlens magnifying sub-diffraction-limited objects [J]. *Science*, 2007, 315(5819): 1686.
- [7] Dubinov A E, Mytareva L A. Invisible cloaking of material bodies using the wave flow method [J]. *Physics-Uspekhi*, 2010, 53(5): 455-479.
- [8] Yen T J, Padilla W J, Fang N, et al. Terahertz magnetic response from artificial materials [J]. *Science*, 2004, 303(5663): 1494-1496.
- [9] Park S J, Hong J T, Choi S J, et al. Detection of microorganisms using terahertz metamaterials [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 4988.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Serita K, Murakami H, Kawayama I, et al. A terahertz-microfluidic chip with a few arrays of asymmetric meta-atoms for the ultra-trace sensing of solutions[J]. *Photonics*, 2019, 6(1): 12.
- [13] Fan N, Su B, Wu Y X, et al. Sandwich terahertz microfluidic chip [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(5): 1362-1367.
- [14] 范宁, 苏波, 武亚雄, 等. 夹心式太赫兹微流控芯片 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(5): 1362-1367.
- [14] Ou H L, Lu F Y, Xu Z F, et al. Terahertz metamaterial with multiple resonances for biosensing

- application[J]. *Nanomaterials*, 2020, 10(6): 1038.
- [15] Salim A, Lim S. Review of recent metamaterial microfluidic sensors[J]. *Sensors*, 2018, 18(1): 232.
- [16] Hu X, Xu G Q, Wen L, et al. Metamaterial absorber integrated microfluidic terahertz sensors[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2016, 10(6): 962-969.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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): 0614037.
张赆佳, 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): 0614037.
- [20] 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.
- [21] Wu X J, Quan B G, Pan X C, et al. Alkanethiol-functionalized terahertz metamaterial as label-free, highly-sensitive and specific biosensor[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2013, 42: 626-631.
- [22] Xing W. Studies of terahertz filters based on metamaterials [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
邢维. 基于超材料的太赫兹滤波器研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] Song Z Y, Feng G Y, Zhang T. Accurate measurement of the refractive index D-glucose solution at various concentrations at different temperatures[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(12): 1208008.
宋哲义, 冯国英, 张涛. 不同浓度不同温度下葡萄糖溶液折射率的精确测量 [J]. *中国激光*, 2014, 41(12): 1208008.