

微流控-超材料集成多带太赫兹传感器

张贇佳¹, 王少飞¹, 钟高超¹, 韩森¹, 王培², 银珊^{1,3*}

¹桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004;

²玉林师范学院广西高校复杂系统优化与大数据处理重点实验室, 广西 玉林 310027;

³桂林电子科技大学广西光电信息处理重点实验室, 广西 桂林 541004

摘要 设计了一种新型的微流控-超材料集成多带太赫兹传感器。模拟了该传感器在探测不同摩尔分数乙醇水溶液时的反射谱。结果表明,随着乙醇摩尔分数的升高,反射谱中四个共振峰的反射率逐渐减小,而峰位逐渐蓝移。分析了传感器共振峰的频率和反射率与乙醇摩尔分数的定量关系,并将其应用于乙醇水溶液的摩尔分数检测中。利用高频处的三个共振峰进行摩尔分数预测,其预测结果误差小于 1%。以上结果有助于促进太赫兹时域光谱技术在快速、微量和实时的物质鉴定和生物传感中的应用。

关键词 太赫兹; 超材料; 微流控; 传感器

中图分类号 O441

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0614038

Metamaterial-Based Terahertz Multi-Band Sensors Integrated with Microfluidic Channels

Zhang Yunjia¹, Wang Shaofei¹, Zhong Gaochao¹, Han Sen¹, Wang Pei², Yin Shan^{1,3*}

¹School of Electrical Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;

²Key Laboratory of Complex System Optimization and Big Data Processing of Guangxi Colleges, Yulin Normal University, Yulin, Guangxi 310027, China;

³Guangxi Key Laboratory of Optoelectronic Information Processing, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China

Abstract In this study, we designed a metamaterial-based terahertz multi-band sensor integrated with microfluidic channels. We simulated the reflection spectra of the sensor during the detection of ethanol-water mixtures containing different concentrations of ethanol. The simulation results show that an increase in the ethanol concentration correlates with a decrease in the reflectivity at the resonant dips and a blue shift of the resonant frequency. We analyzed the quantitative relationship between resonant frequency or reflectivity of the sensor with ethanol concentration, which is in turn used for the prediction of the ethanol concentration in an ethanol-water mixture. Three resonance dips are used for predicting the ethanol concentration and the predicted errors are smaller than 1%. The above results demonstrate the utility of the terahertz time-domain spectroscopic technique in the rapid, real-time, and infinitesimal material identification and bio-sensing.

Key words terahertz; metamaterials; microfluidic channels; sensors

OCIS codes 300.6495; 160.3918; 130.6010

1 引言

太赫兹辐射是近十几年的热门研究领域之一。

因太赫兹辐射拥有较宽的频率范围以及极低的光子能量,太赫兹光谱技术在通信和成像等领域的应用引起了广泛关注。太赫兹光谱技术在分析生物分子

收稿日期: 2019-01-31; 修回日期: 2019-03-11; 录用日期: 2019-03-13

基金项目: 广西自然科学基金(2017GXNSFBA198116)、广西高校复杂系统优化与大数据处理重点实验室开放课题(2017CSOBDP0203)、广西光电信息处理重点实验室基金(GD18101)、广西高校大学生创新创业训练计划(201810595204)

* E-mail: syin@guet.edu.cn

的电磁响应方面亦有巨大优势。由于大量分子的转动能级和振动能级处于太赫兹波段的能量范围,太赫兹光谱能够获得丰富的分子结构信息,特别适用于蛋白等生物大分子的结构分析。此外,太赫兹光谱技术采用非接触式测量,不会对待测物造成污染和损耗,可用于毒品、爆炸物等危险物品的探测,以及微量物证的检验和鉴定,在公共安全领域也具有重要应用价值。

太赫兹生物传感器是太赫兹功能器件中的研究热点。通过生物传感器,不仅可以方便地对不同成分的样品进行检测,还可以对生物分子与药物之间发生的化学反应进行监测。因此,发展高灵敏度的太赫兹生物传感器,具有重要的研究价值和意义。目前,太赫兹生物传感器多采用超材料制备而成。超材料即亚波长尺度范围内的人工设计结构^[1-3]。超材料具有超常的物理性质,可在一定程度上实现对电磁波的人为调控。太赫兹波段的生物传感技术尚未成熟,其主要难点在于克服水对太赫兹波的强烈吸收。早期的工作是利用超材料作为传感器,实现干燥后附着在超材料表面的生物蛋白^[4]和抗生素^[5-6]等样品的传感检测。但由于干燥样品与实际的生物体所处的溶液环境差别很大,以上方法的实用性受到限制。为了保持生物体的溶液环境,尽量减少溶液的厚度是降低水对太赫兹波吸收的有效方法。研究者们将超材料置于溶液腔中探索其在药物反应监测^[7]和混合物检测^[8]方面的应用,但实现定量检测依然非常困难。

近年来发展起来的微流控芯片技术为制作太赫兹生物传感器提供了新途径^[9-11]。微流控芯片技术可以将微流控通道精确地控制在微米量级,是制作太赫兹生物传感器的理想选择。近年来微流控芯片被应用于太赫兹波段异丙醇-水和乙腈-水混合物的

传感探测^[12]和特定病毒样品的检测^[13]中。但单纯用微通道作为传感器,测量结果不够直观,为结果分析增加了难度。因此,将具有特定共振响应的超材料与微流控芯片结合起来,通过观察超材料共振峰在频谱内的移动,可方便地观测微通道中液体特性的变化。2016年,中外几个研究组尝试将超材料集成微流控芯片用于不同有机物溶液^[14]和葡萄糖等溶液^[15-16]的检测。近期,部分工作也展示了其在肝癌诊断^[17]和生物传感^[18]等方面的发展潜力。

本文设计了一种新型的微流控-超材料集成多带太赫兹传感器。通过模拟该传感器在探测不同摩尔分数乙醇水溶液时的反射谱,得到传感器四个共振峰的频率和反射率与乙醇摩尔分数的定量关系,并应用于对乙醇水溶液的摩尔分数检测。利用高频处的三个共振峰进行摩尔分数预测,其结果误差小于1%。

2 传感器结构设计

所设计的微流控-超材料集成多带太赫兹传感器由如图1(a)所示的三个部分组成,分别是作为盖层的顶层结构,底层结构,以及二者之间的微流控通道。顶层结构由石英衬底和镀在其下表面的超材料结构组成;底层结构由石英衬底和镀在其上表面的金属薄层组成。顶层结构的超材料为在 xy 平面内的二维周期性阵列结构,其单元结构如图1(b)所示,每个单元包含两个U形金属结构。内U形金属结构的三个臂长均为 $81\ \mu\text{m}$,外U形金属结构的三个臂长均为 $116\ \mu\text{m}$,两个金属结构的底边间隔为 $9\ \mu\text{m}$,所有金属结构的线宽均为 $8\ \mu\text{m}$ 。单元在 x 和 y 方向的周期均为 $125\ \mu\text{m}$ 。金属层厚度设为 $0.2\ \mu\text{m}$,衬底厚度设为 $50\ \mu\text{m}$,微流控通道高度设为 $12\ \mu\text{m}$ 。

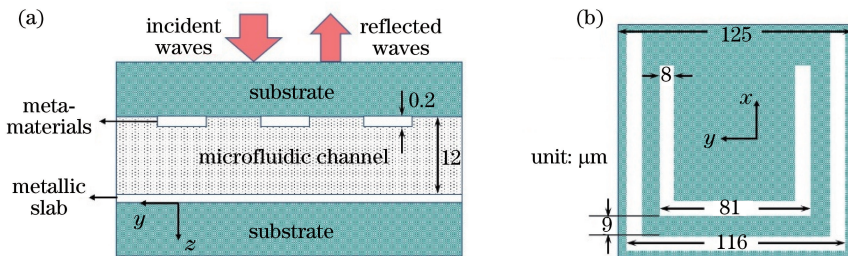


图1 所设计的传感器结构示意图。(a)传感器侧视图;(b)传感器盖层结构的超材料单元

Fig. 1 Structural diagram of proposed sensor. (a) Lateral view of sensor; (b) unit cell of the metamaterials-based sensor's cap

3 模拟计算及建模方法

利用 CST(Computer Simulation Technology)

微波实验室^[19]对传感器的反射谱进行模拟计算。令沿 y 轴偏振的太赫兹波从顶层沿 z 轴正入射至传感器的盖层。为了消除盖层衬底中多次反射回波

的影响,在入(出)射面设置了完美匹配层,计算得到反射谱。模拟计算中,铝的电导率设为 $3.56 \times 10^7 \text{ S/m}^{[20]}$,石英的介电常数设置为 $3.82^{[21]}$ 。微流控中的材料设置为空气或介质(如乙醇水溶液)。乙醇和水的复介电常数 $\tilde{\epsilon}(\omega)$ 采用德拜模型^[22-23] 进行描述:

$$\tilde{\epsilon}(\omega) = \epsilon_{\infty} + \sum_{j=1}^n \frac{\epsilon_j - \epsilon_{j+1}}{1 + i\omega\tau_j}, \quad (1)$$

式中, ω 表示圆频率, j 表示阶次(取整数), n 为总阶

表 1 乙醇和水的德拜模型参数

Table 1 Debye model parameters of ethanol and water

Liquid	ϵ_1	τ_1 / ps	ϵ_2	τ_2 / ps	ϵ_3	τ_3 / ps	ϵ_{∞}
Ethanol	24.35	161.00	4.15	3.30	2.72	0.22	1.93
Water	78.36	8.24	4.93	0.18			

根据(2)式计算得到不同乙醇摩尔分数时乙醇水溶液的介电常数,其实部和虚部的色散曲线分别如图 2(a)和(b)所示。利用折射率 $n(\omega)$ 、消光系数 $\kappa(\omega)$ 及吸收系数 $\alpha(\omega)$ 与介电常数的关系^[25] (c 为真空中的光速):

$$\begin{cases} n^2(\omega) - \kappa^2(\omega) = \text{Re}[\tilde{\epsilon}_{\text{mix}}(\omega)] \\ 2n(\omega)\kappa(\omega) = \text{Im}[\tilde{\epsilon}_{\text{mix}}(\omega)] \\ \alpha(\omega) = 2\omega\kappa(\omega)/c \end{cases}, \quad (3)$$

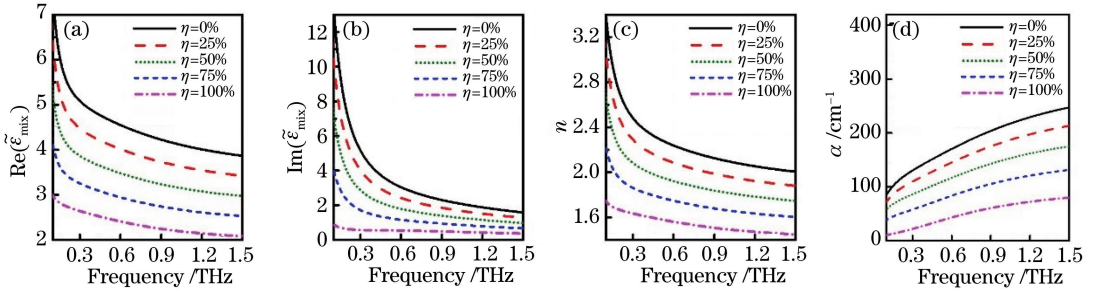


图 2 不同乙醇摩尔分数下乙醇水溶液的色散曲线。(a)介电常数的实部;(b)介电常数的虚部;(c)折射率;(d)吸收系数
Fig. 2 Dispersion curves of ethanol-water mixtures with different mole fractions of ethanol. (a) Real part of permittivity; (b) imaginary part of permittivity; (c) refractive index; (d) absorbance

4 结果和讨论

4.1 传感器的响应特性

首先模拟了在沿 y 轴偏振的太赫兹波从盖层正入射条件下,微流控通道中为空气时传感器的反射谱,结果如图 3(a)所示。此时反射谱在有效探测频段内有四个共振峰,从低频至高频分别标记为 A、B、C 和 D。由于所设计的传感器的盖层为超材料结构,入射的太赫兹波在超材料的金属结构中激发表面等离子激元^[26]。通过分析图 3(b)所示的四个共振频率处的表面电流分布,可知共振峰 A 和 C 分别对

数, ϵ_j 为介电常数, ϵ_{∞} 为高频极限值, τ_j 为弛豫时间。根据文献[22-23]的测量结果,乙醇和水的德拜模型参数如表 1 所示。通过改变乙醇和水的混合比例^[24],获得不同摩尔分数乙醇水溶液的复介电常数 $\tilde{\epsilon}_{\text{mix}}(\omega)$:

$$\tilde{\epsilon}_{\text{mix}}(\omega) = \eta\tilde{\epsilon}_{\text{eth}}(\omega) + (1 - \eta)\tilde{\epsilon}_{\text{wat}}(\omega), \quad (2)$$

式中, η 表示乙醇在溶液中的摩尔分数, $\tilde{\epsilon}_{\text{eth}}(\omega)$ 和 $\tilde{\epsilon}_{\text{wat}}(\omega)$ 分别表示乙醇和水的复介电常数。

可提取出不同乙醇摩尔分数的乙醇水溶液的折射率和吸收系数的色散曲线,分别如图 2(c)和(d)所示。由于水的折射率和吸收系数大于乙醇的折射率和吸收系数,因此,随着乙醇摩尔分数升高,乙醇水溶液的折射率和吸收系数减小。

应外 U 形金属结构中的 1 阶和 3 阶局域表面等离子共振模;共振峰 B 和 D 分别对应内 U 形金属结构中的 1 阶和 3 阶局域表面等离子共振模。以共振峰 B 为例,计算该频率处的电场分布情况和电场强度,分别如图 3(c)和(d)所示。由此可知,因盖层超材料和底层金属板距离较近,底层金属亦会产生感应电荷,双层金属之间的电磁场满足阻抗失配条件^[15, 27],使得局域电场得到增强,电磁场被有效地束缚在该区域内,从而形成了高品质因数(Q 值)的共振响应。

由于表面等离子激元对表面环境非常敏感,当微流控通道中的介电常数变化时,传感器盖层超材料

中的表面等离子共振特性发生变化,导致传感器的四个共振峰的频率和幅值发生变化。具体地说,因表面等离子激元共振的频率与表面环境的折射率成反比^[26],因此随着微流控通道中介质折射率的增加,

传感器的共振峰会向低频移动;当微流控通道中介质的吸收系数增大时,双层金属之间阻抗失配条件被破坏,电磁场不能被有效地束缚在双层金属之间,因而共振峰的 Q 值降低,导致幅值有较大变化。

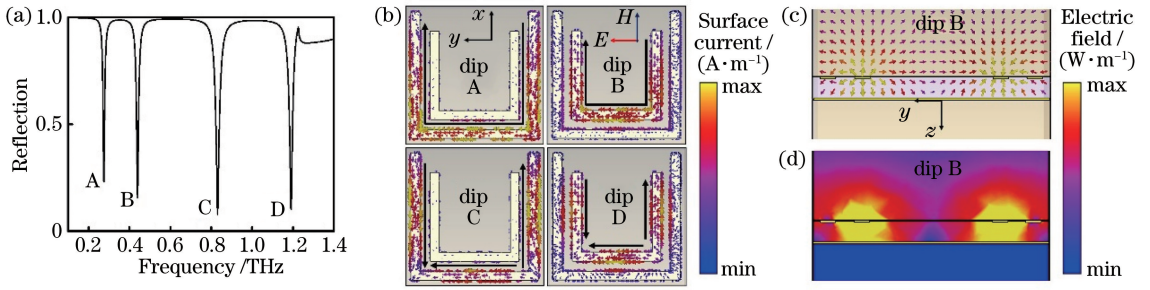


图 3 传感器的电磁响应。(a)传感器的反射谱;(b)各共振频率处的表面电流分布;(c)共振峰 B 处的电场分布;(d)共振峰 B 处的电场强度

Fig. 3 Electromagnetic response of sensor. (a) Reflection spectrum of sensor; (b) surface current distributions at different resonant dips; (c) electric field lines at resonant dip B; (d) electric field intensity distribution at resonant dip B

4.2 传感器的灵敏度

为讨论传感器的灵敏度,模拟了微流控通道中充满不同折射率的无吸收介质时传感器的反射谱。如图 4(a)所示,当微流控通道的介质折射率由 1 逐渐改变为 2 时,可以观察到传感器的四个共振峰同时红移。从反射谱中提取出四个共振峰的频率随微流控通道中介质折射率的变化,结果图 4(b)所示,可见频率越高的共振峰频移量越大。利用灵敏度公

式计算出传感器四个共振峰对应的灵敏度:

$$S = \Delta f / \Delta n, \quad (4)$$

式中, Δf 为共振峰频移量, Δn 为折射率变化量。由如图 4(c)所示的灵敏度结果可见,所设计的传感器最高频共振峰 D 的灵敏度达到 192 GHz/RIU (RIU 为单元折射率)。因此,将其应用在介电常数差别较大的乙醇水溶液的探测中,可以观察到较明显的共振峰频移量。

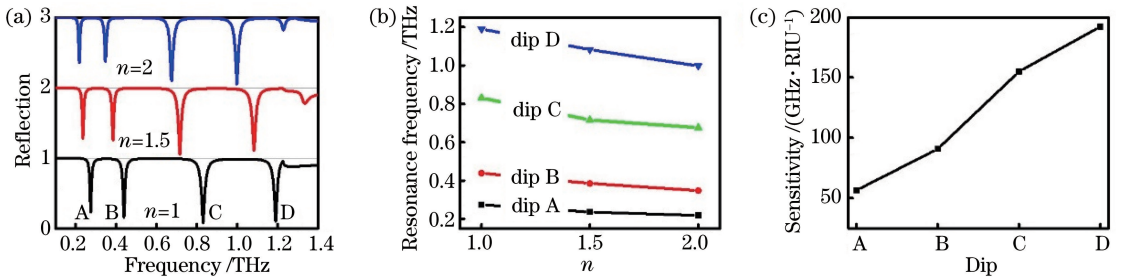


图 4 传感器的反射谱和灵敏度。(a)传感器的微流控通道中介质折射率不同时的模拟反射谱;(b)各反射峰共振频率随微流控通道中介质折射率的变化;(c)传感器的各反射峰的灵敏度

Fig. 4 Reflection spectra and sensitivity of sensor. (a) Simulated reflection spectra of sensor when refractive index of dielectric in microfluidic channel changes; (b) resonant frequency of each reflection dip in reflection spectra versus refractive index of dielectric in microfluidic channel; (c) sensitivity of each reflection dip in reflection spectra

4.3 传感器的标定

根据(2)式计算乙醇摩尔分数从 0% 到 100% (间隔为 5%) 的 21 组乙醇水溶液的复介电常数,并将其设置为传感器微流控通道中的介质参数,计算对应的反射谱,部分结果如图 5(a)所示。得出反射谱中四个共振峰的频率和反射率与乙醇摩尔分数的关系,分别如图 5(b)和(c)中的点所示。结合乙醇水溶液的折射率和吸收系数的色散曲线[见图 2(c)

和(d)]可知,当乙醇摩尔分数逐渐升高时,乙醇水溶液的折射率和吸收系数均减小,所以反射谱中四个共振峰的峰位逐渐蓝移,共振峰的 Q 值增大,因而反射率逐渐减小。需要指出的是,由于低频处的共振峰 A 和 B 距离较近,当乙醇摩尔分数较低时,共振峰的 Q 值减小,即线宽增加,导致两个峰位难以分辨,因此在图 5(b)和(c)中缺失了乙醇摩尔分数低于 35% 时共振峰 A 和 B 的数据点。

因表面等离子激元共振的频率与表面环境的折射率成反比^[26],所以可以对传感器的共振峰频率 f 与乙醇摩尔分数 η 的关系($f-\eta$)进行线性拟合;因电磁波与吸收系数成指数关系^[25],可对传感器的共振峰反射率 r 与乙醇摩尔分数 η 的关系($r-\eta$ 关系)进行指数拟合:

$$\begin{aligned} f &= f_0 + b\eta \\ r &= r_0 - d \exp(\eta/g), \end{aligned} \quad (5)$$

式中, f_0 与 r_0 分别表示乙醇摩尔分数为 0% 的溶液(即水)对应的共振峰频率和反射率, b 、 d 和 g 均为拟合系数。拟合结果分别如图 5(b)和(c)中的曲线

所示,各拟合曲线的具体参数见表 2。

可以看到,除了最低频的振荡峰 A 处传感器的共振峰频率 f 与乙醇摩尔分数 η 的拟合结果外,其余的拟合结果的校正决定系数均达到 0.99 以上,说明该传感器对不同乙醇摩尔分数的乙醇水溶液的响应可以利用(5)式对共振峰的频率和反射率与乙醇摩尔分数的关系进行标定。且传感器的共振峰反射率 r 与乙醇摩尔分数 η 的拟合结果的校正决定系数 R^2 保持在 0.995 以上,比共振峰频率 f 与乙醇摩尔分数 η 的拟合结果更为准确,因此,用前者进行乙醇水溶液的乙醇摩尔分数预测准确度通常更高。

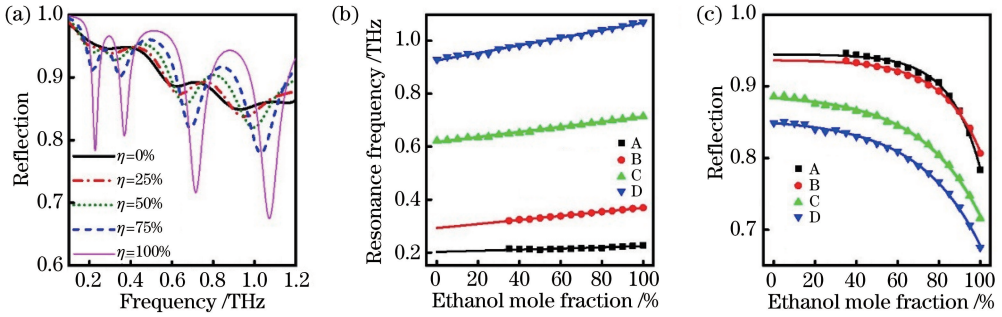


图 5 传感器的标定。(a)传感器对不同乙醇摩尔分数的乙醇水溶液的反射谱;(b)传感器的共振峰频率与乙醇摩尔分数的关系;(c)传感器的共振峰反射率与乙醇摩尔分数的关系

Fig. 5 Calibration of sensor. (a) Reflection spectra of sensor filled with ethanol-water mixtures under different mole fractions of ethanol; (b) resonant frequency of sensor versus ethanol mole fraction; (c) reflectivity at resonant dips of sensor versus ethanol mole fraction

表 2 拟合系数及 R^2

Table 2 Fitting coefficients and R^2

Dip	Frequency-mole fraction relation			Reflectivity-mole fraction relation			
	f_0 /THz	b / 10^{-4}	R^2 /THz ²	r_0	d / 10^{-4}	g	R^2 /THz ²
A	0.20198	2.19407	0.78220	0.94446	2.08723	15.08538	0.99599
B	0.29246	7.66286	0.99815	0.93668	6.09503	18.72250	0.99703
C	0.61742	9.53600	0.99338	0.88920	56.00000	29.33330	0.99760
D	0.92603	14.30000	0.99001	0.85464	60.90000	29.72570	0.99811

4.4 传感器对乙醇摩尔分数的预测

根据对传感器的标定结果,可以利用传感器共振峰的频率和幅值的变化,对填充在微流控通道中的被测物(乙醇水溶液)的乙醇摩尔分数进行预测。分别计算乙醇摩尔分数为 24%、47%、73%和 86%时传感器的反射谱,并提取出四个共振峰的频率和反射率,利用(5)式和表 2 中的参数反推乙醇的摩尔分数。

图 6(a)为利用传感器共振峰频率(实心点)和反射率(空心点)与乙醇摩尔分数的关系的预测结果,其中实线为乙醇摩尔分数的实际值;图 6(b)为预测值与实际值的差值。从结果可知,乙醇摩尔分数较大($\eta \geq 47\%$)时,由于共振峰的线宽较窄,分辨

率较高,降低了提取共振峰频率和反射率时的读数误差,因此预测值更接近实际值。此时,除了共振峰 A 的预测值偏差较大,其余共振峰的预测值与实际值的误差均控制在 4%以内。而对于乙醇摩尔分数较小($\eta = 24\%$)的情况,由于共振峰的线宽较宽,增大了峰值读取误差,因此预测值的误差较大。但由于有多个数据维度,可以通过对多个预测值取平均值的方法提高预测的准确率。剔除误差较大的共振峰 A 对应的数值,对剩余所有预测值取平均值,所得结果如图 6 中星形点所示,该平均值与实际乙醇摩尔分数的误差都在 1%以内,比利用单个共振峰频率或反射率的预测值准确度更高。由此证明,利

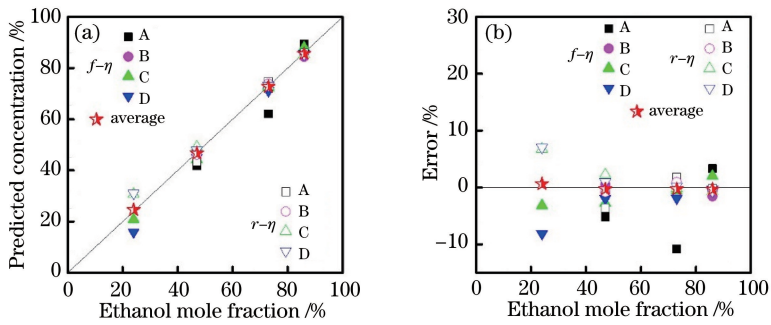


图 6 传感器预测的摩尔分数及误差值。(a)预测的乙醇摩尔分数;(b)预测的乙醇摩尔分数与实际乙醇摩尔分数的误差值

Fig. 6 Predicted ethanol mole fraction and error by sensor. (a) Predicted ethanol mole fraction;
(b) error between predicted ethanol mole fraction and real one

用所设计的多带传感器可以快速、准确地预测乙醇水溶液的乙醇摩尔分数。

5 结 论

设计了一种新型的微流控-超材料集成多带太赫兹传感器。传感器由底层的金属平板,盖层的超材料,以及二者之间的微流控通道构成。模拟了该传感器在探测不同摩尔分数乙醇水溶液时的反射谱。结果表明,随着乙醇摩尔分数的升高,反射谱中四个共振峰的幅值逐渐降低,而峰位逐渐蓝移。分析了传感器四个共振峰的频率和幅值与乙醇摩尔分数的定量关系,并应用于被测乙醇水溶液的摩尔分数检测。利用高频处的三个共振峰提供的多维数据进行摩尔分数预测,其预测值与实际值之间的差值小于1%,说明所设计的传感器可以对乙醇水溶液的摩尔分数进行快速准确的检测。该方法与常用的化学方法^[28-29]相比,具有快速、不破坏样品的优势。由于该传感器是根据被测液体的折射率以及吸收系数的变化对摩尔分数进行测定,可以将本工作的结论推广应用到其他混合溶液的摩尔分数检测中。这些结论对于促进太赫兹光谱探测技术在微量物质检测、生物传感、药物反应和活体监测等研究领域的应用具有一定的意义。

参 考 文 献

[1] Pendry J B. Negative refraction [J]. Contemporary Physics, 2004, 45(3): 191-202.
 [2] Withayachumnankul W, Abbott D. Metamaterials in the terahertz regime [J]. IEEE Photonics Journal, 2009, 1(2): 99-118.
 [3] Wang Y R, Liang L J, Yang M S, *et al.* Terahertz metamaterial based on controllable electromagnetic induced transparency structure [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(4): 041603.

王娅茹, 梁兰菊, 杨茂生, 等. 一种光控的电磁诱导透明太赫兹超材料[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(4): 041603.

[4] 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.
 [5] 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.
 [6] Yang A K, Li Z Y, Knudson M P, *et al.* Unidirectional lasing from template-stripped two-dimensional plasmonic crystals [J]. ACS Nano, 2015, 9(12): 11582-11588.
 [7] Hu F R, Guo E Z, Xu X, *et al.* Real-time monitoring the interaction between bovine serum albumin and drugs in aqueous with terahertz metamaterial biosensor [J]. Optics Communications, 2017, 388: 62-67.
 [8] Chen M, Singh L, Xu N N, *et al.* Terahertz sensing of highly absorptive water-methanol mixtures with multiple resonances in metamaterials [J]. Optics Express, 2017, 25(13): 14089-14097.
 [9] Han X, Su B, Zhang C L. A kind of terahertz microfluidic chip [J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015, 13(4): 536-539.
 韩雪, 苏波, 张存林. 一种太赫兹微流控芯片 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015, 13(4): 536-539.
 [10] Salim A, Lim S. Review of recent metamaterial microfluidic sensors [J]. Sensors, 2018, 18(1): 232.
 [11] Huang S G, Jin X Y, Lin R Z, *et al.* Microfluidic chip based nucleic acid analyzer and its application in precision medicine [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(3): 0307002.
 黄世光, 靳翔宇, 林荣赞, 等. 微流控芯片核酸分析系统及其精准医学应用 [J]. 中国激光, 2018, 45

- (3): 0307002 .
- [12] Liu L, Jiang Z G, Rahman S, *et al.* Quasi-optical terahertz microfluidic devices for chemical sensing and imaging[J]. *Micromachines*, 2016, 7(5): 75.
- [13] Tang Q, Liang M, Lu Y, *et al.* Microfluidic devices for terahertz spectroscopy of live cells toward lab-on-a-chip applications[J]. *Sensors*, 2016, 16(4): 476.
- [14] Park S J, Yoon S A N, Ahn Y H. Dielectric constant measurements of thin films and liquids using terahertz metamaterials[J]. *RSC Advances*, 2016, 6(73): 69381-69386.
- [15] Hu X, Xu G Q, Wen L, *et al.* Metamaterial absorber integrated microfluidic terahertz sensors[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2016, 10(6): 962-969.
- [16] Liang L, Hu X, Wen L, *et al.* Unity integration of grating slot waveguide and microfluid for terahertz sensing[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2018, 12(11): 1800078.
- [17] 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: 16378.
- [18] Shih K, Pitchappa P, Jin L, *et al.* Nanofluidic terahertz metasensor for sensing in aqueous environment[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 113(7): 071105.
- [19] CST microwave studio [OL]. [2019-01-28]. <https://www.cst.com/products/cstmws>.
- [20] Srivastava Y K, Manjappa M, Cong L Q, *et al.* Ultrahigh-Q Fano resonances in terahertz metasurfaces: strong influence of metallic conductivity at extremely low asymmetry [J]. *Advanced Optical Materials*, 2016, 4(3): 457-463.
- [21] Lu X C, Han J G, Zhang W L. Localized plasmonic properties of subwavelength geometries resonating at terahertz frequencies [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2011, 17(1): 119-129.
- [22] Kindt J T, Schmuttenmaer C A. Far-infrared dielectric properties of polar liquids probed by femtosecond terahertz pulse spectroscopy [J]. *The Journal of Physical Chemistry*, 1996, 100(24): 10373-10379.
- [23] Swithenbank M, Burnett A D, Russell C, *et al.* On-chip terahertz-frequency measurements of liquids[J]. *Analytical Chemistry*, 2017, 89(15): 7981-7987.
- [24] Jepsen P U, Møller U, Merbold H. Investigation of aqueous alcohol and sugar solutions with reflection terahertz time-domain spectroscopy [J]. *Optics Express*, 2007, 15(22): 14717-14737.
- [25] Fang R C. *Solid spectroscopy*[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2001: 1-16.
方容川. *固体光谱学*[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001: 1-16.
- [26] Yin S, Hu F R, Chen X Y, *et al.* Ruler equation for precisely tailoring the resonance frequency of terahertz U-shaped metamaterials [J]. *Journal of Optics*, 2019, 21(2): 025101.
- [27] Todorov Y, Andrews A M, Sagnes I, *et al.* Strong light-matter coupling in subwavelength metal-dielectric microcavities at terahertz frequencies [J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102(18): 186402.
- [28] Wang H F, Wang T, Liu W, *et al.* Progress of the research of certified reference materials for water content of liquid and solid [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2017, 37(1): 9-13.
王海峰, 汪婷, 刘卫, 等. 系列液体和固体水分标准物质的研制[J]. *计测技术*, 2017, 37(1): 9-13.
- [29] Chen D D, Shi Y Y, Zhu Y, *et al.* Improvement of the method of detecting ethanol concentration in wine [J]. *Fujian Analysis & Testing*, 2017, 26(6): 31-33.
陈丹丹, 施炎炎, 朱云, 等. 酒中乙醇浓度国标检测方法的改进[J]. *福建分析测试*, 2017, 26(6): 31-33.