

## 基于四峰超材料 THz 传感器的 B 族维生素检测

王月娥<sup>1,2</sup>, 李东霞<sup>2</sup>, 李智<sup>2,3\*</sup>, 胡放荣<sup>2\*</sup>

1. 西安电子科技大学机电工程学院, 陕西 西安 710071
2. 桂林电子科技大学广西自动检测技术与仪器重点实验室, 广西 桂林 541004
3. 桂林航天工业学院, 广西 桂林 541004

**摘要** 水溶性 B 族维生素是维持人体正常生理功能必需的营养成分, 摄取适量有益于生长、代谢和发育, 摄入过量严重危害身体。因此, 维生素检测方法的研究受到质量监控部门和国内外学者的重视。传统测量维生素的光谱法、化学法和高效液相色谱法存在操作繁琐、样品处理复杂、成本高等问题, 迫切需要开发操作简单快速准确的 B 族维生素检测技术。太赫兹波的特殊性使其广泛用于物质的检测, 超材料奇异的电磁特性和对表面介质的敏感性, 促进太赫兹波段内的超材料传感器在检测领域发展和应用。提出了一种利用四峰太赫兹超材料传感器进行同浓度水溶性 B 族维生素检测的方法。利用有限积分法设计了一种由不对称开口的正六边形和圆环组成的四峰超材料结构, 四峰的频率分别为 0.46, 0.57, 0.66 和 0.90 THz。通过表面电流研究四谐振峰的形成机理和传感性能, 四个谐振峰对入射的太赫兹波响应特性不同, 导致了其不同的传感灵敏度。实验过程中, 将同浓度 ( $0.5 \text{ mg} \cdot \mu\text{L}^{-1}$ ) 不同类型 B 族维生素  $B_1$ ,  $B_3$ ,  $B_5$  和  $B_6$  水溶液滴于超材料传感器表面, 利用太赫兹时域系统测量透射谱, 得到了四个谐振峰在测四种维生素时的频率偏移量。实验结果验证了由正六边形外环和内圆环组成的不对称开口环结构传感器的传感特性。结果表明, 由内外环耦合形成的传感器灵敏度明显大于仅由外环或内环的电偶极子振荡形成的传感器灵敏度。该太赫兹超材料传感器的四个峰均可用于物质传感, 其中内外环耦合形成的谐振峰传感灵敏度最高。不对称的双开口环具有优越的传感性能, 可用于生物医学等领域样品传感检测。

**关键词** 超材料; 多谐振峰; 太赫兹传感器; 水溶性维生素 B

**中图分类号:** TN214 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)06-1785-06

### 引言

B 族维生素是维持人体正常机能与代谢活动不可缺少的水溶性维生素, 也是酶的辅基和酶的主要组成部分, 它的缺乏不仅会导致营养不良、精神衰退、皮肤病等疾病, 也会使细胞功能下降, 引起代谢障碍, 从而引发多种疾病<sup>[1]</sup>。人体所需的 B 族维生素无法在身体内自行生成, 必须从饮食中补给。因此, B 族维生素检测方法的研究, 对于人们科学摄入维生素有重要意义。常见 B 族维生素的检测方法有: 光谱法<sup>[2]</sup>、高效液相色谱法<sup>[3]</sup>、液相-质谱联用<sup>[4]</sup>等, 这些方法存在检测过程复杂、实验周期长、样品处理难、仪器价格高等缺陷。因此, 样品处理简单、操作容易、省时、测量准确且灵

敏度高的检测方法, 对 B 族维生素的快速检测具有重要意义。

太赫兹波介于红外和微波频段之间, 光子能量低, 在非极性物质中穿透能力强, 又因其对应于许多有机分子、生物大分子的振动和转动能级, 所以太赫兹光谱技术在材料科学、食品安全、生物医学等方面有着广泛的应用<sup>[5]</sup>。然而, 这种检测技术主要依赖于太赫兹波的强度, 其检测灵敏度难以提高。超材料具有奇异的电磁特性, 如负折射率<sup>[6]</sup>、负磁导率<sup>[7]</sup>等, 因此被广泛用于调制器<sup>[8]</sup>、滤波器<sup>[9]</sup>、偏振转化<sup>[10]</sup>等领域。超材料中的谐振能改变局部电磁场的分布, 使超材料对金属表面的介质非常敏感, 这一特性可用于传感与物质检测<sup>[11]</sup>, 如研究超材料表面待测样品的厚度<sup>[12]</sup>和折射率<sup>[13]</sup>等。目前, 在太赫兹波段内常用超材料的单谐振峰或双

收稿日期: 2019-05-21, 修订日期: 2019-09-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(11574059, 61841502), 广西自然科学基金项目(2018JJA170155), 桂林电子科技大学广西自动检测技术与仪器重点实验室项目(YQ14114)资助

作者简介: 王月娥, 1974 年生, 西安电子科技大学机电工程学院博士研究生 e-mail: 249591932@qq.com

\* 通讯联系人 e-mail: cclizhi@guet.edu.cn; hufangrong@sina.com

谐振峰进行传感与检测<sup>[14]</sup>, 多峰传感检测较少。超材料的多峰是基于不同的谐振模式, 对附着在其表面的被测介质有不同的电磁响应特性, 研究超材料多峰的传感特性在生物检测方面具有重要的应用价值。

本文设计了一种四峰太赫兹超材料器件, 用于水溶性 B 族维生素(B<sub>1</sub>, B<sub>3</sub>, B<sub>5</sub>, B<sub>6</sub>)的鉴别检测。该传感器的结构单元是由正六边形外环和内圆环组成的复合结构, 在偏离中心的同一位置处开口, 形成开口不对称的双环 DASRR(double asymmetry split resonance ring)结构超材料。由于内外环的近场耦合, 透射谱线在 0.2~1.1 THz 间有四个谐振峰。利用有限积分法仿真分析了四个峰的形成机理和传感机理。通过太赫兹时域光谱系统对 B 族维生素(B<sub>1</sub>, B<sub>3</sub>, B<sub>5</sub>, B<sub>6</sub>)进行了鉴别传感实验, 表明传感器的内外环近场耦合形成的传感器传感灵敏度大于仅由其内环或外环的偶极子振荡形成的传感器灵敏度。这种不对称的双开口环具有优越的传感性能, 可用于生物医学等领域样品传感检测。

## 1 超材料的设计及机理分析

### 1.1 超材料的结构设计及优化

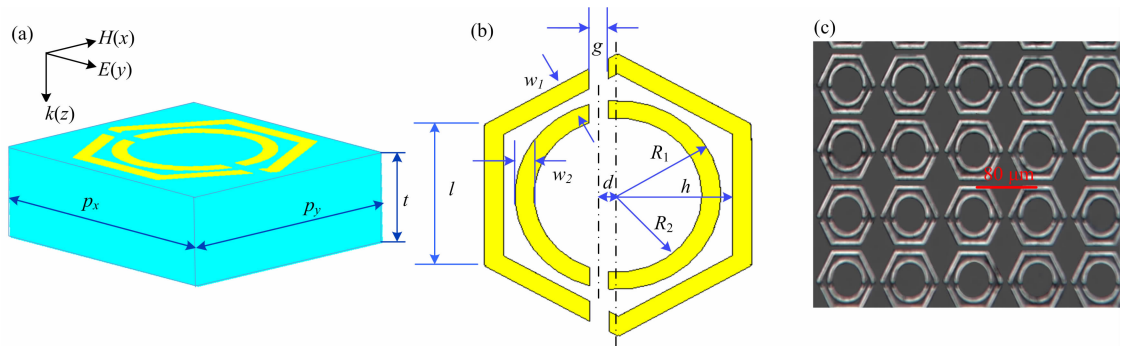


图 1 DASRR 的示意图

(a): DASRR 结构单元的斜视图; (b): DASRR 结构单元的俯视图; (c): DASRR 传感器的显微照片

Fig. 1 Schematic of the sample

(a): Oblique view of a unit cell; (b): Top view; (c): Micrograph of the sample

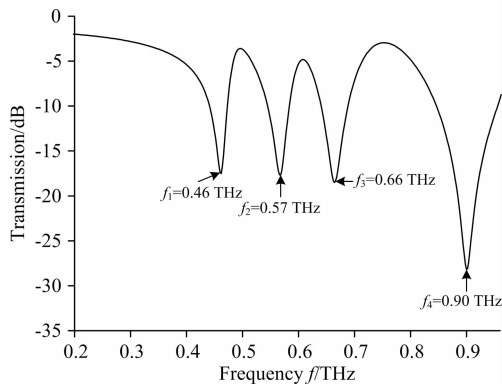


图 2 仿真的 DASRR 透射谱

Fig. 2 Simulated transmission of DASRR

图 1(a)和(b)为不对称开口双谐振环(DASRR)的结构示意图, 是由正六边形外环和内圆环组成, 在距离中心的同一位置处开口。其中,  $p_x$  和  $p_y$  分别为结构单元沿  $x$  轴和  $y$  轴的周期数,  $w_1$  和  $w_2$  分别为外环和内环金属线的宽度,  $g$  为环开口的宽度,  $l$  为外环的边长,  $h$  为外环内边距离结构单元中心的长度,  $d$  为开口中心距离结构中心的长度,  $R_2$  和  $R_1$  分别为内环的内外半径,  $t$  为基底的厚度。在 0.2~1.1 THz 频段内, 利用电磁仿真软件 CST Microwave Studio 对结构进行优化仿真。在 TE 模式条件下, 电磁波沿  $z$  轴垂直入射到结构 DASRR,  $x$  和  $y$  方向上的边界条件设为 unit cell 边界, 经优化最终确定结构单元各参数的值见表 1。图 1(c)是利用表面微加工工艺方法在 500  $\mu\text{m}$  厚的硅基底上制备的 DASRR 显微照片。

采用 CST 软件对结构进行仿真分析, 其中基底材料是 高导硅, 损耗较小以获得较高的灵敏度, 其介电常数设为 11.9, 结构材料选择金属铝, 其厚度是 200 nm, 电导率设为  $3.56 \times 10^7 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ 。当太赫兹波垂直入射到 DASRR 表面, 偏振方向平行于开口中心连线(沿  $y$  轴), 得到仿真透射谱如图 2 所示, 形成了 4 个谐振峰, 频率分别为  $f_1 = 0.46$ ,  $f_2 = 0.57$ ,  $f_3 = 0.66$ ,  $f_4 = 0.90$  THz。

表 1 优化后各参数值

Table 1 Optimized geometries of the sample ( $\mu\text{m}$ )

$p_x$	$p_y$	$l$	$d$	$h$	$w_1$	$w_2$	$g$	$R_1$	$R_2$
80	90	42	5	30	5	5	5	27	22

### 1.2 DASRR 的谐振机理分析

利用表面电流分析谐振的形成机理。电磁波垂直入射在结构表面, 极化方向沿着  $y$  轴, 谐振频率  $f_1, f_2, f_3, f_4$  的表面电流分布如图 3 所示。在外电场的驱动下, 表面电流沿着箭头指示方向在金属环上流动, 环可以看作作为电感, 开口处可视为电容<sup>[15]</sup>, 谐振频率可以近似地由式(1)估算

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (1)$$

式(1)中,  $L$  为电偶极子的等效电感, 正比于表面电流流过的长度即电偶极子的振荡长度,  $C$  为来源于开口环间隙的等效

电容。根据电感和电容的计算公式<sup>[15]</sup>，在后面的分析中主要考虑等效电感对谐振频率的影响。

为了清楚地解释原理，对电流图中电偶极子符号的下标进行说明：下标第一个字母是“H”或“R”，其中“H”表示电偶极子在正六边形外环上，“R”表示电偶极子在内环上；第

二个下标是数字“1”或“2”，“1”表示电偶极子在开口间隙的左边，“2”表示电偶极子在开口间隙的右边。譬如： $P_{H2}$ 代表在正六边形外环右边振荡的电偶极子、 $P_{R1}$ 代表在内环左边振荡的电偶极子。

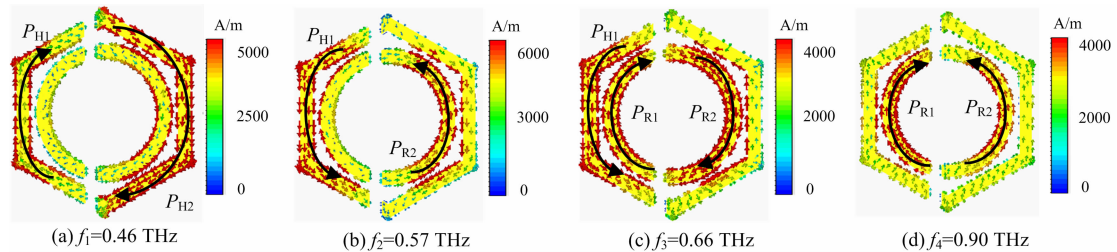


图 3 谐振  $f_1, f_2, f_3, f_4$  的表面电流分布

Fig. 3 Surface current distributions at  $f_1, f_2, f_3$  and  $f_4$

图 3(a)所示，DASRR 第一个吸收峰  $f_1$  是由外环的 LC 谐振形成的，也可以看作两个偶极子( $P_{H1}$  和  $P_{H2}$ )的串联。由于电流在外环上振荡，偶极子的振荡长度较长，等效电感值比较大，谐振频率较低。图 3(b)所示，谐振  $f_2$  的表面电流主要分布在外环左边和内环右边，形成偶极子( $P_{H1}$ )和偶极子( $P_{R2}$ )串联，整体在内外环上形成 LC 谐振。比较图 3(b)和图 3(a)，谐振  $f_2$  电流分布的长度明显小于谐振  $f_1$  电流分布的长度，图 3(b)表面电流所形成的等效电感小于图 3(a)的等效电感，所以 DASRR 谐振  $f_2$  的频率大于谐振  $f_1$  的频率。谐振  $f_3$  的电流分布如图 3(c)所示，振荡电流主要分布在内外环的左边，内环的两个电偶极子( $P_{R1}$  和  $P_{R2}$ )形成了 LC 振荡，外环左边电偶极子( $P_{H1}$ )的振荡方向与内环右边电偶极子  $P_{R2}$  的方向相同，可近似地看作偶极子  $P_{H1}$  和  $P_{R2}$  并联后和偶极子  $P_{R1}$  串联，相对于图 3(b)，图 3(c)谐振的等效总电感减少了，因此谐振  $f_3$  的频率大于谐振  $f_2$  的频率。图 3(d)所示谐振  $f_4$  的表面电流主要分布在内环的两边上，并且振荡方向相同，形成了两个偶极子( $P_{R1}$  和  $P_{R2}$ )。显然，对于同一结构的超材料，偶极子振荡形成的谐振频率明显高于 LC 谐振的频率<sup>[15]</sup>。DASRR 上表面电流分布不同，形成了不同的谐振，引起不同的表面场强分布，当表面覆盖介质时，各谐振的电磁响应特性随之发生变化，因此超材料 DASRR 可用作传感应用研究。

### 1.3 DASRR 的传感机理分析

超材料表面介质的厚度和介电常数影响着透射谱线的频移和幅度，借此可以进行物质鉴别。根据有效媒质理论，介质的折射率和厚度影响着电磁波的传输。首先，固定折射率，仿真分析表面介质厚度对透射谱的影响。因  $n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$ ， $\mu_r = 1$ ，则在数值上  $n = \sqrt{\epsilon_r}$ 。设介质层的折射率为  $n = 2$  即  $\epsilon_r = 4$ ，改变介质厚度  $\delta$  值，利用 CST 对介质厚度进行参数扫描，得到不同厚度时的频移，具体关系如图 4 所示。

当厚度大于  $5 \mu\text{m}$  时，曲线变得平滑。随着介质层厚度增大，损耗也增大，但频移近乎不变，因此介质不易过厚，取  $\delta = 5 \mu\text{m}$ ，仿真分析介电常数对 DASRR 透射谱的影响，图 5 所示。

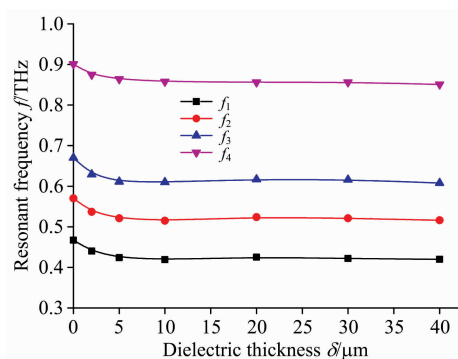


图 4 谐振 ( $f_1 - f_4$ ) 与介质层厚度之间的关系

Fig. 4 The relation between resonant frequency ( $f_1 - f_4$ ) and dielectric layer thickness

当增大覆盖介质的介电常数  $\epsilon_r$ ，介电常数会导致耦合电容的增大，谐振频率会减小，正如图 5(a)所示。为了进一步确定附着在传感器表面上介质的介电常数变化与谐振频移之间的关系，用 origin 进行拟合，如图 5(b)所示：以未附任何物质的传感器透射曲线作为参考，随着覆盖物质介电常数的增大，每一谐振的频移量都在增大；对于同一个介电常数 ( $\epsilon_r$ )，谐振  $f_2$  和  $f_3$  的频率偏移量明显大于谐振  $f_1$  和  $f_4$  的频率偏移量。根据折射率与介电常数之间的关系  $s = \frac{\Delta f}{f}$ ，可以计算出谐振频率  $f_1, f_2, f_3, f_4$  的单一折射率灵敏度分别为 39, 54, 56 和 37  $\text{GHz} \cdot \text{RIU}^{-1}$  (refractive index unit)，说明内外环耦合形成的谐振峰的传感灵敏度大于仅由内环或外环偶极子振荡形成的谐振峰的传感灵敏度。

## 2 B 族维生素( $B_1, B_3, B_5, B_6$ )传感实验

### 2.1 材料与仪器

四种水溶性维生素标准物质：维生素  $B_1$  (含量 98%，货号是 R033466)，购自上海易恩化学技术有限公司；维生素  $B_3$  (含量  $\geq 99\%$ ，货号是 S13023)、 $B_5$  (含量 99%，货号是 S13025)、 $B_6$  (含量 99%，货号是 S13026)，购自上海源叶生

物科技有限公司。本文实验所使用的仪器是美国 Zomga 公司生产的 Z-3 太赫兹时域光谱系统 (THz-TDS), 光谱范围: 0.1~3.5 THz。

## 2.2 溶液的配制及实验方法

样品溶液: 准确称取 100 mg 的样品维生素 B<sub>1</sub>, 溶于 200  $\mu\text{L}$  的去离子水, 溶解后用移液枪取出 5  $\mu\text{L}$  滴在传感器

DASRR 的表面, 进行晾干 (实验室温度低于 20  $^{\circ}\text{C}$ , 以保证维生素不变性), 大约 5 min 后, 在传感器表面形成了一层薄膜, 然后利用太赫兹时域系统进行测量, 得到附有 B<sub>1</sub> 维生素的太赫兹频率透射谱。用同样的方法可以测得附有同样浓度的维生素 B<sub>3</sub>, B<sub>5</sub> 和 B<sub>6</sub> 的透射谱, 以未覆盖任何物质在 DASRR 上的透射谱作为参考, 如图 6 所示。

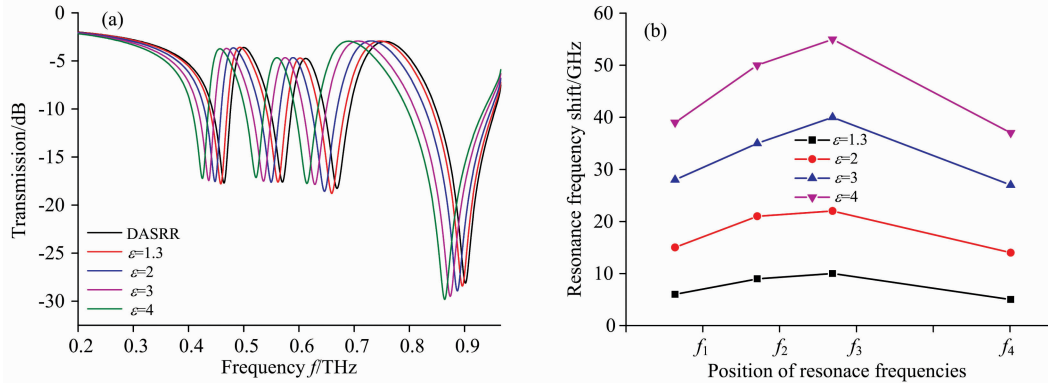


图 5 (a) 谐振  $f_1 \sim f_4$  随介电常数 ( $\epsilon_r$ ) 变化的传感器透射谱; (b) 谐振频率的变化与介电常数的关系

Fig. 5 (a) Variation of transmittance spectrum at different permittivity ( $\epsilon_r$ ), and (b) the relation between resonance frequencies ( $f_1 \sim f_4$ ) shift and permittivity of the dielectric

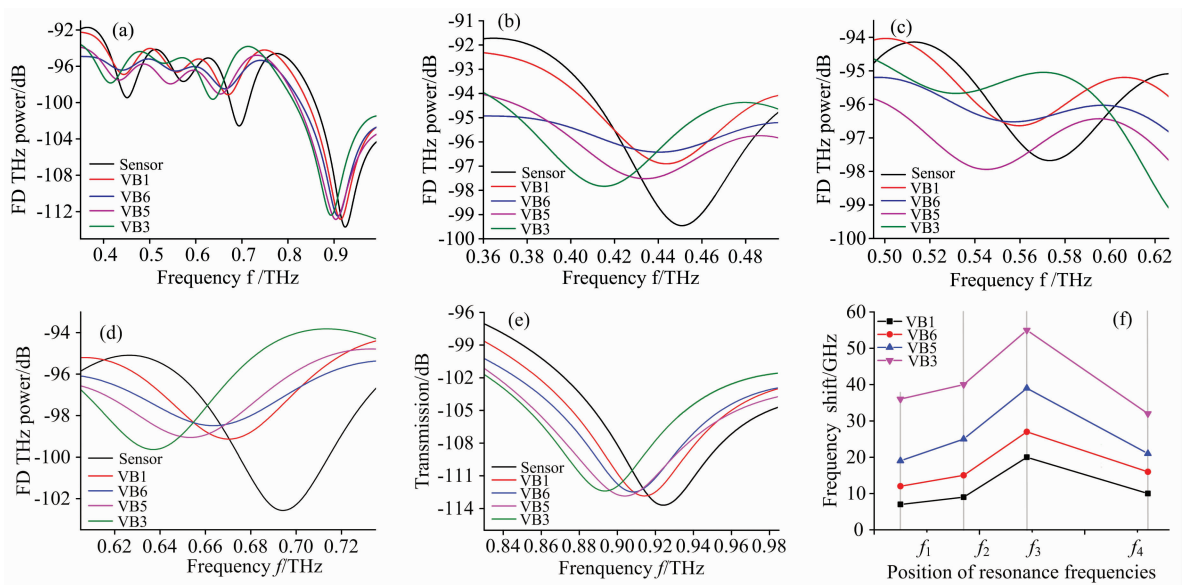


图 6 (a) DASRR 上附有同浓度 ( $0.5 \text{ mg} \cdot \mu\text{L}^{-1}$ ) B 族维生素 (B<sub>1</sub>, B<sub>3</sub>, B<sub>5</sub>, B<sub>6</sub>) 溶液后测得的透射谱,

(b—e) 谐振  $f_1 \sim f_4$  频移局部放大图, (f) 谐振  $f_1 \sim f_4$  的传感性能

Fig. 6 (a) Measured transmission spectrum of without and with different Vitamins (B<sub>1</sub>, B<sub>3</sub>, B<sub>5</sub>, B<sub>6</sub>) at the same concentration ( $0.5 \text{ mg} \cdot \mu\text{L}^{-1}$ ), (b—e) magnified view of the four resonance frequencies ( $f_1 \sim f_4$ ) shift, (f) sensing performance of the sensor DASRR at different resonance frequency

## 2.3 结果及分析

实验中, 用太赫兹时域系统测试了 DASRR 的传感实验, 如图 6 所示。从图中可知, 传感器表面附着同浓度的维生素 B<sub>1</sub>, B<sub>3</sub>, B<sub>5</sub> 和 B<sub>6</sub> 后, 传感器的每个谐振 ( $f_1 \sim f_4$ ) 都发生了频移。其中, 图 6(b—e) 所示分别为谐振  $f_1 \sim f_4$  频移的局部放大图。频移量的计算用传感器表面无介质时在各谐振

处的频率减去维生素溶液附着在传感器表面上晾干后测得的频率。图 6(f) 所示为附有不同维生素后各谐振峰频移量的拟合线, 具体数值见表 2。实验结果表明: 附着被测维生素 B<sub>1</sub>, B<sub>3</sub>, B<sub>5</sub> 和 B<sub>6</sub> 后, 谐振峰  $f_2$  和  $f_3$  的频率偏移量明显大于谐振峰  $f_1$  和  $f_4$  的频率偏移量, 变化趋势和仿真基本吻合, 说明这种传感器可以用来做生物传感方面的检测。

**表 2** DASRR 传感器表面附有同浓度的维生素 B<sub>1</sub>, B<sub>3</sub>, B<sub>5</sub>, B<sub>6</sub> 后在谐振  $f_1 \sim f_4$  的频移量

**Table 2** The frequency shift of resonance frequency  $f_1 \sim f_4$  with the same concentration of Vitamin B<sub>1</sub>, B<sub>3</sub>, B<sub>5</sub>, B<sub>6</sub> on the surface of DASRR

样品 ( $0.5 \text{ mg} \cdot \mu\text{L}^{-1}$ )	VB <sub>1</sub>	VB <sub>6</sub>	VB <sub>5</sub>	VB <sub>3</sub>
$\Delta f_1/\text{GHz}$	7	12	19	36
$\Delta f_2/\text{GHz}$	14	18	28	40
$\Delta f_3/\text{GHz}$	20	27	39	55
$\Delta f_4/\text{GHz}$	10	16	21	32

在 DASRR 上附有维生素 B(B<sub>1</sub>, B<sub>3</sub>, B<sub>5</sub>, B<sub>6</sub>) 后, 在每个谐振处不同维生素透射幅度不同, 但是频移变化的规律相同

$$\Delta f_{\text{VB3}} > \Delta f_{\text{VB5}} > \Delta f_{\text{VB6}} > \Delta f_{\text{VB1}}$$

这和物质本身的属性以及 DASRR 传感器灵敏度有关系。不

同物质的折射率不同, 覆盖在 DASRR 表面对电磁波的响应不同, 导致透射谱谐振的频移量不同。

### 3 结 论

利用超材料不对称结构的近场耦合, 设计了四谐振峰太赫兹传感器用于检测 B 族维生素(B<sub>1</sub>, B<sub>3</sub>, B<sub>5</sub>, B<sub>6</sub>)。通过 CST 软件仿真分析了四个峰的形成机理和传感特性。利用太赫兹时域系统测试了 DASRR 传感器表面附着水溶性 B 族维生素(B<sub>1</sub>, B<sub>3</sub>, B<sub>5</sub>, B<sub>6</sub>) 后的传感实验, 结果表明内外环相互耦合形成的传感灵敏度大于仅在内环或外环上的电偶极子振荡形成的传感灵敏度。仿真和实验结果表明由近场耦合形成的谐振传感器灵敏度较高, 研究结果为 THz 波段内多谐振峰超材料传感器应用于生物医学检测方面具有一定的参考价值。

### References

- [1] MAO Qing-lan, WANG An-na, WU Li-gen(毛青兰, 王岸娜, 吴立根). Cereals and Oils(粮食与油脂), 2017, 30(9): 5.
- [2] Chen Jing, Li Bao Qiong, Cui Ya Qin, et al. Journal of Food Composition & Analysis, 2015, 41: 122.
- [3] Gliszczynska-Swiglo Anna, Rybicka Iga. Food Anal. Methods, 2015, 8: 139.
- [4] Nurit E, Lyan B, Piquet A, et al. Anal. Bioanal. Chem., 2015, 407(12): 3471.
- [5] Han Xiaohui, Yan Shihan, Zang Ziyi, et al. Biomedical Optics Express, 2018, 9(3): 994.
- [6] Singh H, Sohi B S, Gupta A. Materials Research Express, 2019, 6(7): 075801.
- [7] Pandit S, Mohan A, Ray P. Applied Physics A, 2019, 125: 414.
- [8] Zhang Yaxin, Zhao Yuncheng, Liang Shixiong, et al. Nanophotonics, 2019, 8(1): 153.
- [9] Hu Fangrong, Fan Yixing, Zhang Xiaowen, et al. Optics Letters, 2018, 43(1): 17.
- [10] Huang Yuanyuan, Yao Zehan, Hu Fangrong, et al. Carbon, 2017, 119: 305.
- [11] Cong Longqing, Tan Siyu, Yahiaoui Riad, et al. Applied Physics Letters, 2015, 106(3): 031107.
- [12] ZHANG Yu-ping, LI Tong-tong, LÜ Huan-huan, et al(张玉萍, 李彤彤, 吕欢欢, 等). Acta Physica Sinica(物理学报), 2015, 64(11): 117801.
- [13] YANG Jie, WANG Jia-fu, QU Shao-bo, et al(杨杰, 王甲富, 屈绍波, 等). Journal of Air Force Engineering University • Natural Science Edition(空军工程大学学报 • 自然科学版), 2016, 17(5): 95.
- [14] SUN Ya-ru, SHI Tong-lu, LIU Jian-jun, et al(孙雅茹, 史同璐, 刘建军, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2016, 36(3): 0328001.
- [15] Wang Yuee, Li Zhi, Li Dongxia, et al. Materials Research Express, 2019, 6: 055810.

## Identification of Vitamin B Using a Quad-Peak Terahertz Metamaterials Sensor

WANG Yue-e<sup>1, 2</sup>, LI Dong-xia<sup>2</sup>, LI Zhi<sup>2, 3\*</sup>, HU Fang-rong<sup>2\*</sup>

1. School of Mechano-Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China

2. Guangxi Key Laboratory of Automatic Detecting Technology and Instruments, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China

3. Guilin University of Aerospace Technology, Guilin 541004, China

**Abstract** Water-soluble B vitamins are necessary nutrients to maintain the normal physiological function of the human body. Ingestion of proper amount is beneficial to growth, metabolism and development, but excessive intake is seriously harmful to the body. Therefore, the research of vitamin detection methods has attracted the attention of quality control departments and scholars at home and abroad. Traditional microbial, chemical and high performance liquid chromatography (HPLC) methods for vitamin determination have some problems, such as complicated operation, complex sample processing, high cost and so on. It is ur-



gent to develop a B-vitamin detection technology that is simple, fast, and accurate. Special characteristics of terahertz wave make it widely used in the detection of materials. The singular electromagnetic properties of metamaterials and the sensitivity to surface media promote the development and application of terahertz metamaterials in the field of detection. We present an identification method of water-soluble Vitamins B using quad-peak terahertz metamaterials. The sensor consists of an outside aluminum hexagon ring and an inner aluminum circle on high resistance silicon substrate, and are asymmetrically split at the same position deviating from the center of the unit cell. Firstly, the formation mechanism of four peaks and the sensing performance are revealed by using the finite-difference time-domain (FDTD) method, and the frequencies of the four peaks are 0.46, 0.57, 0.66 and 0.90 THz, respectively. During the experiment, the different types of vitamin B ( $B_1$ ,  $B_3$ ,  $B_5$  and  $B_6$ ) aqueous solution were dripped on the surface of the metamaterial sensor with the same concentration ( $0.5 \text{ mg} \cdot \mu\text{L}^{-1}$ ). The transmission spectra were measured by the THz time domain spectroscopy (TDS) system, and the frequency offsets of four resonance peaks were obtained. The simulation and experimental results show that the sensitivity of the sensor formed by the coupling of inner and outer rings are significantly higher than that of the sensor formed by the oscillation of the electric dipoles of the single outer or inner ring. The four peaks of the sensor can be used for sensing detection, and the sensing sensitivity of the resonance peaks formed by the coupling of inner and outer rings is relatively higher. The asymmetric double-open rings have excellent sensing properties and can be used for sample sensing in biomedicine and other fields.

**Keywords** Metamaterials; Multi-resonant peaks; Terahertz sensor; Water-soluble Vitamins B

(Received May 21, 2019; accepted Sep. 29, 2019)

\* Corresponding authors

## 关于《光谱学与光谱分析》调整审稿费收费标准的通知

尊敬的《光谱学与光谱分析》广大作者、读者：我刊自 2018 年 7 月 1 日以后登记的稿件向投稿作者收取审稿费 200 元/篇，在您投稿之前，为免受经济损失，请您必须考虑：

1. 没有创新的一般性稿件，请您不要投稿。
2. 没有国家级基金资助的稿件，请您不要投稿。
3. 不是光谱专业的稿件，请您不要投稿。
4. 与其他文章重合率超过 10% 的稿件，请您不要投稿。

所投稿件经初审通过后，作者会收到缴纳审稿费的通知。请作者及时从我刊网站 (<http://www.gpxygpfx.com>) 查询稿件是否处于交审稿费状态，在收到通知后，请及时缴纳审稿费；如在 10 天之内没有收到您的审稿费，被视为自动放弃，我刊不再受理。交费后我刊开据增值税电子普通发票，并传至作者提供的电子邮箱，作者可自行打印。

联系电话：010-62181070, 62182998

电子邮箱：chngpxygpfx@vip.sina.com

感谢您多年来对《光谱学与光谱分析》的支持和厚爱！

《光谱学与光谱分析》期刊社

2018 年 6 月 30 日