

DOI:10.16136/j.joel.2022.02.0367

基于太赫兹布拉格光纤的表面生物传感器

石嘉^{1,2*}, 田琳琳¹, 苏梦雅¹, 白华¹, 徐伟^{1,2}, 姚建铨²

(1. 天津工业大学 电气与电子工程学院, 天津市光电检测技术与系统重点实验室, 天津 300387; 2. 天津大学 精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要:空心布拉格光纤在传感领域应用极为广泛。本文提出了一种基于带有缺陷层的太赫兹(terahertz, THz)空心布拉格光纤的表面生物传感器, 并对该传感器在太赫兹频段的细菌种类检测性能进行分析。在太赫兹布拉格光纤中, 高折射率光敏树脂层和低折射率空气层以纤芯为中心周期性排列, 在纤芯内壁沉积分析物引入缺陷模式。本文对提出的传感器性能进行了数值研究。仿真结果表明, 该传感器有很高的纤芯功率比, 限制损耗在 0.3—0.4 THz 和 0.45—0.55 THz 频段有损耗峰, 能得到可识别的特征频率, 此特征频率用于细菌种类检测。当频率大于 0.7 THz 时, 该传感器可实现厚度无关的表面生物传感。本文所提出的基于太赫兹空心布拉格光纤的表面生物传感器可用于检测细菌种类, 在微生物检测方面有很大的应用潜力。

关键词:太赫兹(terahertz, THz); 缺陷层; 空心布拉格光纤; 微生物传感

中图分类号: TN252 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2022)02-127-06

Surface bio-sensor based on terahertz Bragg fiber

SHI Jia^{1,2*}, TIAN Linlin¹, SU Mengya¹, BAI Hua¹, XU Wei^{1,2}, YAO Jianquan²

(1. Tianjin Key Laboratory of Optoelectronic Detection Technology and System, School of Electrical and Electronics Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 2. Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology (Ministry of Education), School of Precision Instruments and Opto-Electronic Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Hollow-core photonic Bragg fibers have a wide range of sensing applications. In this paper, a hollow-core photonic Bragg fiber with defect layers is proposed and analyzed for bacterium detection in the terahertz (THz) frequency range. The hollow core of the fiber is surrounded by a periodic sequence of high/low refractive index (RI) multilayers including the photosensitive resin and air. The analytes are deposited on the inner surface of the THz hollow-core Bragg fiber to induce the defect layer. The performance of the proposed surface bio-sensor is numerically investigated. The result shows that the proposed surface bio-sensor provides a high core power fraction. The confinement loss of the proposed surface bio-sensor takes on two peaks in the frequency range of 0.3—0.4 THz and 0.45—0.55 THz, respectively. The distinguishable characteristic frequencies of the proposed surface bio-sensor are obtained with different bacterium deposited on the inner surface of the THz Bragg fiber which can be used to recognize the kind of the bacterium. Furthermore, the thickness-independent surface sensing can be realized in the high frequency range. The proposed surface bio-sensor based on THz hollow-core Bragg fiber can be used to recognize the kind of the bacterium and has a great potential in microorganism detections.

Key words: terahertz (THz); defect layer; hollow-core photonic Bragg fiber; microorganism sensing

1 引言

太赫兹(terahertz, THz)波^[1]是对某个特定波段范围内的电磁波的总称, 其频率范围在毫米波

与红外线之间, 一般定义的范围为 0.1—10 THz (1 THz = 10^{12} Hz)。太赫兹波具有光子能量低、对极性分子敏感及指纹光谱特性, 在安检、生物技术、电信、军事和环境监测等方面有广泛的应用^[2]。

* E-mail: shijia@tiangong.edu.cn

收稿日期: 2021-05-29 修订日期: 2021-06-28

基金项目: 天津市教委科研计划项目(2019KJ015)资助项目

随着太赫兹波产生和检测技术的日益成熟,太赫兹技术的应用越发得到重视,这也促进了太赫兹源、太赫兹探测器、太赫兹光纤和其他太赫兹设备的产生及发展^[3]。其中,用光纤作为太赫兹波传输波导技术取得了很大程度上的进展。太赫兹光纤在滤波、传感、干涉、量子密钥分配和相干通信等领域得到了广泛的应用^[4],尤其是在传感方面的应用得到越来越多地关注。但是,目前太赫兹光纤在微生物检测中的应用较少。蛋白质等生物大分子物质吸收太赫兹波段的光,在红外波段没有可识别的指纹特性,所以,具有特征频率的太赫兹光纤传感器成为生物分析检测的理想选择,具有重要的应用意义。

太赫兹光纤大致可以分为实心光纤、空心光纤和光子带隙光纤^[5],空心光纤因其具有灵活的结构设计、低廉的价格等优势,其应用越来越广泛^[6]。空心布拉格光纤是较为典型的空心光纤结构,可以用于传感,且其已用于检测粉末的光学性能^[7]。对于医疗及食品行业的检测来说,高灵敏度、微量、无标签检测等都具有重要意义。

布拉格光纤具有光子带隙大、全反射率高、传输损耗低等优势^[8],对于空心布拉格光纤的研究已经成为一大热点。SKOROBOGATIY^[9]提出利用空心布拉格光纤之间的谐振定向耦合设计了定向耦合器。HE^[10]提出利用在布拉格光纤中引入缺陷层设计了带阻滤波器。HU等^[11]提出具有准周期介质多包层的空心布拉格光纤实现了低损耗传输。ZHENG等^[12]提出具有高度非线性色散展平的高折射率纤芯布拉格光纤用于产生超连续谱。此外,空心布拉格光纤在微生物领域也有很大的应用潜力。

本文对太赫兹空心布拉格光纤做了一些改动,通过在纤芯内壁沉积生物样品来引入缺陷模式,改动后的结构可用于表面生物传感,以实现生物检测的目的。仿真结果表明,在太赫兹空心布拉格光纤纤芯内壁沉积 60 μm 厚度的细菌条件下,当频率高于 0.7 THz 时,该传感器的纤芯功率比高达 99.8%。当沉积不同种类的细菌时,该传感器可以得到可识别的特征频率,此特征频率可以用于细菌种类检测。另外,当频率大于 0.7 THz 时,可以实现厚度无关的表面生物传感。因此,本文提出的表面生物传感器在微生物检测领域有很大的应用潜力。

2 原理分析与结构设计

用于表面生物传感器的太赫兹布拉格光纤的三维(three-dimensional, 3D)视图如图 1 所示,圆形的

树脂层和空气层围绕纤芯周期性排布,通过在纤芯内壁沉积一层薄的生物样品层来引入缺陷模式,以实现在带隙区域引入窄的损耗峰的目的。该太赫兹空心布拉格光纤可以用于表面生物传感。



图 1 太赫兹布拉格光纤的 3D 视图

Fig. 1 3D view of the proposed THz Bragg fiber

太赫兹布拉格光纤的横截面如图 2 所示。纤芯直径为 5 mm,折射率为 n_1 和 n_2 的介质层分别表示生物样品层和光敏树脂层,厚度均为 800 μm 的高/低折射率层所构建的一维周期结构包层,将光限制在直径为 5 mm 的纤芯中沿光纤轴向传输,周期为每层高低折射率层厚度之和。该传感器通过在太赫兹空心布拉格光纤纤芯内壁沉积一层薄的生物样品来引入缺陷模式。

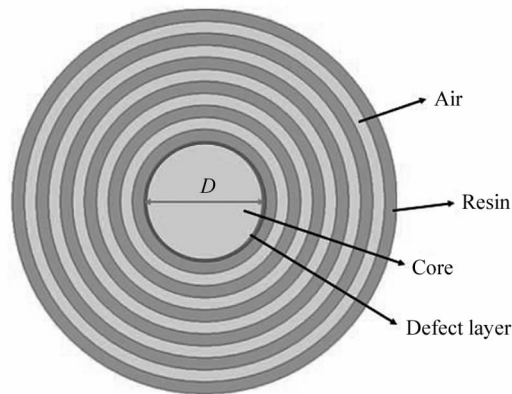


图 2 太赫兹布拉格光纤的横截面

Fig. 2 Cross section of the THz Bragg fiber

该传感器将几何缺陷引入到太赫兹布拉格光纤中,当光频率位于布拉格光纤的光纤带隙内时,光被约束在纤芯中传输。反之,当频率在光纤带隙之外时,光会从光纤纤芯泄漏到包层中。缺陷模式可以看作是位于几何缺陷附近的有损法布里-珀罗(FP)腔态。对于本文提出的太赫兹布拉格光纤,基模状态下的谐振频率 f_m 可以表示为^[13]:

$$f_m = \frac{mc}{2(d_1 \sqrt{n_1^2 - n_0^2} + d_2 \sqrt{n_2^2 - n_0^2})}, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

式中, f_m 为基模状态下的谐振频率, c 是真空光速, d_1 和 d_2 分别代表该传感器中生物样品层厚度和光敏树脂层厚度, n_1 和 n_2 分别代表生物样品层和光敏树脂层的有效折射率, n_0 代表纤芯材料的有效折射率, 在本文中, 纤芯材料为空气。

由式(1)可知, 沉积的生物样品层的有效折射率越小, 该传感器的谐振频率越高。纤芯有效折射率也会影响太赫兹布拉格光纤传感器的性能。另外, 太赫兹布拉格光纤的尺寸决定了带隙中心, 生物样品层越厚, 谐振频率越低, 所以, 本文可以通过调整生物样品层厚度和光敏树脂层厚度来获得特定的谐振频率。本文提出的传感器通过监控太赫兹布拉格光纤的特征频率来实现表面生物传感。

对传感器而言, 灵敏度可以用来监控样品层极其微小的折射率变化和厚度变化, 是尤为重要的参数。谱灵敏度可表示为:

$$S = \frac{\partial f_m}{\partial n_1} = -\frac{mcd_1}{2}(d_1 \sqrt{n_1^2 - n_0^2} + d_2 \sqrt{n_2^2 - n_0^2})^{-2} \left(1 - \frac{n_0^2}{n_1^2}\right)^{-1/2},$$

$$m = 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

由式(2)可知, 谱灵敏度由生物样品层的有效折射率和厚度决定, 生物样品层的有效折射率越大, 该传感器的灵敏度越高。除此以外, 生物样品层和纤芯的有效折射率越接近, 该传感器的灵敏度越低。所以, 对于本文所提出的表面生物传感器而言, 生物样品层和纤芯的有效折射率相差越大, 该传感器的灵敏度越高。

3 仿真结果与讨论

在这里本文证明了该传感器在检测出传染病中常见的四种细菌方面的潜力。为了更好地理解本文所提出的表面生物传感器的性能, 本文将生物样品层的厚度设为 $60 \mu\text{m}$ 。传染病中四种常见细菌分别为鲍曼不动杆菌(*A. baumannii*)、大肠杆菌(*E. coli*)、铜绿假单胞菌(*P. aeruginosa*)和金黄色葡萄球菌(*S. aureus*)。

纤芯功率比是传感器的一个重要参数。根据坡印廷矢量可知, 纤芯功率比可表示为^[14]:

$$P = \frac{\int_{\text{sample}} \text{Re}(E_x H_y - E_y H_x) dx dy}{\int_{\text{total}} \text{Re}(E_x H_y - E_y H_x) dx dy}, \quad (3)$$

式中, E_x , E_y 和 H_x , H_y 分别代表在基模状态下的电场和磁场。

沉积不同种类细菌时, 太赫兹布拉格光纤的纤芯功率比如图3所示。从文献[15]和[16]可以得到细菌和光敏树脂的有效折射率实部及虚部。结果表明, 在 $0.35\text{--}0.45 \text{ THz}$ 频段, 四种细菌的纤芯功率比均有一个谷值, 对于同一种细菌而言, 在谷值处, 从纤芯泄露到包层的光最多。另外, 当频率高于 0.75 THz , 纤芯功率比逐渐趋于平稳并达到 99.8% 。在高频区域, 光被紧紧限制在纤芯中传输。

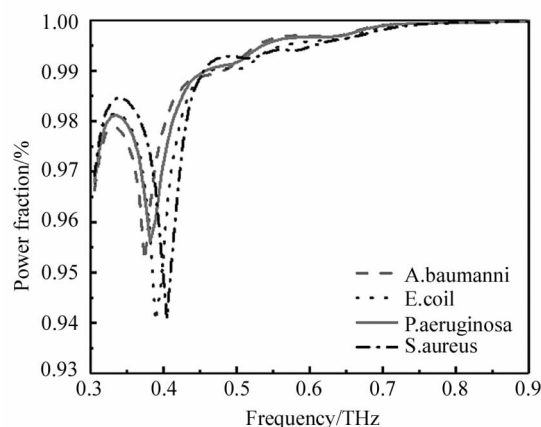


图3 沉积不同种类细菌时太赫兹布拉格光纤的纤芯功率比

Fig. 3 The core power fraction of the THz Bragg fiber with different bacterium

灵敏度是传感器的另一个重要参数, 传感器的相对灵敏度可表示为^[17]:

$$R = \frac{n_r}{n_{\text{eff}}} \times P, \quad (4)$$

式中, R 代表相对灵敏度, n_r 代表生物样品层的有效折射率, n_{eff} 代表整个太赫兹空心布拉格光纤的有效模式折射率实部。

沉积不同种类细菌时太赫兹布拉格光纤的相对灵敏度如图4所示。结果表明, 在 $0.3\text{--}0.9 \text{ THz}$ 频段, 随着频率的增加, 相对灵敏度逐渐减小, 四种细菌在 $0.35\text{--}0.4 \text{ THz}$ 频段都有谷值。另外, 沉积的细菌为 *A. baumannii* 时, 该传感器相对灵敏度最高, 细菌为 *S. aureus* 时, 该传感器相对灵敏度最低。由此可得, 沉积的生物样品有效折射率越高, 传感器的相对灵敏度越高。

沉积不同种类细菌时太赫兹布拉格光纤基模的有效折射率如图5所示。由图可知, 有效折射率实部不小于 0.988 , 并且在 $0.35\text{--}0.45 \text{ THz}$ 频段有谷值。在大于 0.45 THz 频段, 有效折射率随着频率增加而增加, 但同一频率下沉积不同种类细菌的传感

器有效折射率实部几乎没有变化。

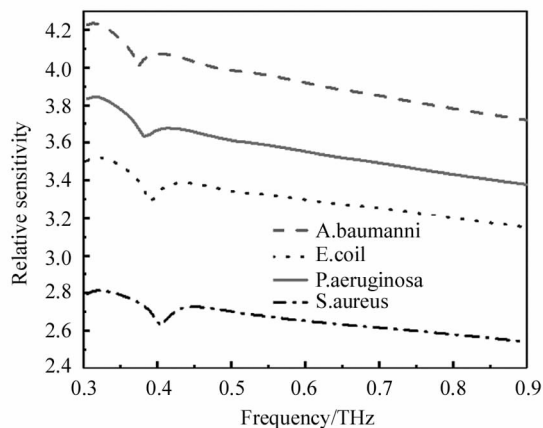


图4 沉积不同种类细菌时太赫兹布拉格光纤的相对灵敏度
Fig. 4 Relative sensitivity of the THz Bragg fiber with different bacterium

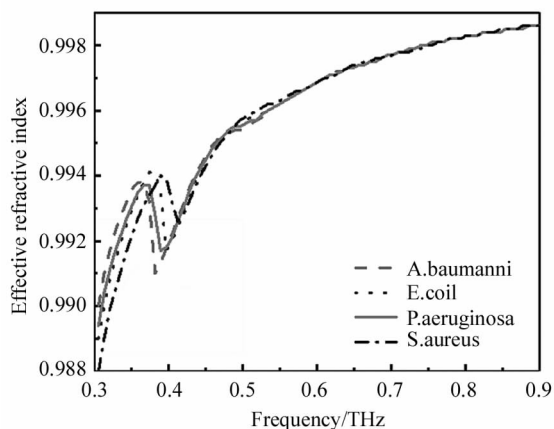


图5 沉积不同种类细菌时太赫兹布拉格光纤基模的有效折射率

Fig. 5 The effective refractive index of the fundamental mode in the THz Bragg fiber with different bacterium

在设计一个太赫兹光纤传感器时,有效材料损耗(effective material loss,EML)是一个不得不考虑的因素,主要由光纤传感器的材料和物理结构引起。对于设计光纤传感器来说,如何减小有效材料损耗是一个很大的挑战。有效材料损耗可表示为^[18]:

$$\alpha_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \left(\frac{\int_{\text{mat}} n_{\text{mat}} |E|^2 \alpha_{\text{mat}} dA}{\left| \int_{\text{all}} S_z dA \right|} \right), \quad (5)$$

式中, ϵ_0 和 μ_0 代表介电常数和真空磁导率, n_{mat} 和 α_{mat} 分别代表光敏树脂的有效折射率实部和吸收系数, S_z 表示 z 轴方向上的坡印廷矢量 $S_z = \frac{1}{2}(E \times$

$H^*)_z$, E 是电场分量, H^* 为磁场分量的复共轭。

沉积不同种类细菌时太赫兹布拉格光纤的有效材料损耗如图6所示,同一种细菌有效材料损耗随频率增加而增加,对于同一频率而言,不同种类细菌对应该传感器有效材料损耗没有太大变化。

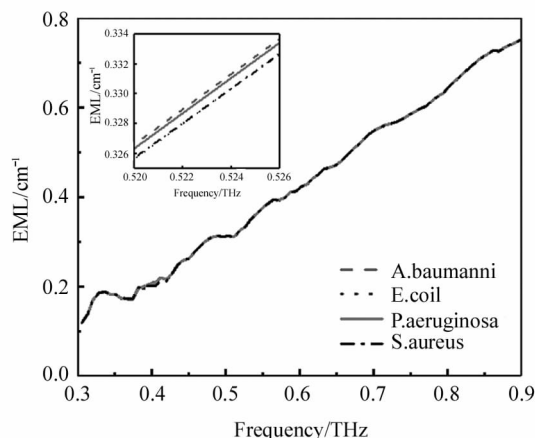


图6 沉积不同种类细菌时太赫兹布拉格光纤的有效材料损耗,内插图为0.520—0.526 THz频段太赫兹布拉格光纤的有效材料损耗

Fig. 6 The effective material loss of the THz Bragg fiber with different bacterium, where the inset is the effective material loss of the THz Bragg fiber in the frequency range of 0.520—0.526 THz

限制损耗取决于太赫兹布拉格光纤的纤芯尺寸和包层结构中树脂层的圈数。另外,限制损耗还与基模状态下复有效折射率虚部有关,可表示为^[19]:

$$L_c = 8.686 \times \left(\frac{2\pi f}{c} \right) \text{Im}(n_{\text{eff}}) \text{ (dB/cm)}, \quad (6)$$

式中, f 表示当下的频率, $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 表示基模状态下复有效折射率虚部。

沉积不同种类细菌时太赫兹布拉格光纤的限制损耗如图7所示。由图可知,限制损耗在0.35—0.45 THz和0.45—0.55 THz分别有两个峰值。同上限制损耗峰值效率如表1所示。由表1可知,当沉积不同种类的细菌时,该传感器能得到可识别的特征频率,此特征频率可以用于细菌种类检测。另外,沉积有S.aureus的传感器有最低的限制损耗峰,对应最高的峰值频率。

有效模场面积大的器件更适用于传感、激光和通信设备。光纤的有效模场面积计算式为^[20]:

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left[\iint |E(x,y)|^2 dx dy \right]^2}{\iint |E(x,y)|^4 dx dy}, \quad (7)$$

式中, $|E(x,y)|^2$ 表示光纤横截面的电场强度分布。

沉积不同种类细菌时太赫兹布拉格光纤基模的有效模场面积如图 8 所示。由图可知,有效模场面积在 0.3—0.4 THz 和 0.45—0.55 THz 分别有两个峰值。随着频率的增加,泄露到包层中的光增多。图 8 中沉积有 *A. baumannii* 的传感器有最大的有效模场面积峰值,对应最低的峰值频率。

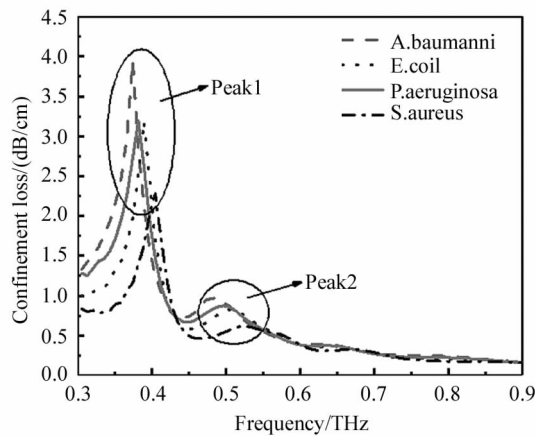


图 7 沉积不同种类细菌时太赫兹布拉格光纤的限制损耗
Fig. 7 The confinement loss of the THz Bragg fiber with different bacterium

表 1 沉积不同种类细菌时太赫兹布拉格光纤的限制损耗峰值频率

Tab. 1 The peak confinement loss of the THz Bragg fiber with different bacterium

Bacterium	Frequency ₁ /THz	Frequency ₂ /THz
A. baumannii	0.374	0.488
E. coli	0.389	0.511
P. aeruginosa	0.381	0.496
S. aureus	0.404	0.526

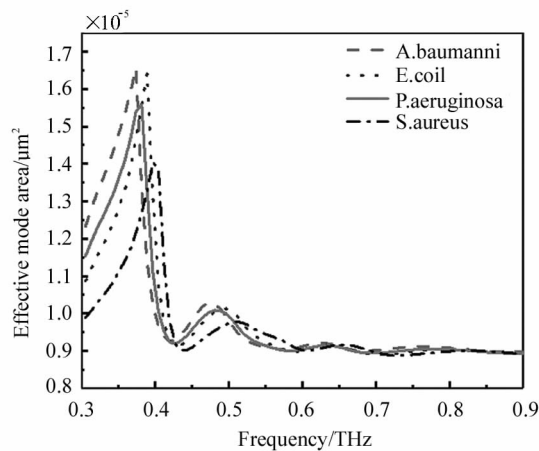


图 8 沉积不同种类细菌时太赫兹布拉格光纤基模的有效模场面积
Fig. 8 The effective mode area of the THz Bragg fiber with different bacterium

本文以 *S. aureus* 为例进行分析,沉积 *S. aureus* 厚度不同时太赫兹布拉格光纤的相对灵敏度如图 9 所示。由图可知,在 0.35—0.45 THz 频段内相对灵敏度都会出现谷值。随着厚度从 20 μm 增加到 100 μm ,相对灵敏度的谷值分别出现在图中①—⑤处,可以看出谷值对应频率越来越低。当频率高于 0.7 THz 时,同一频率下不同缺陷层厚度对应相对灵敏度几乎没有变化,可以实现厚度无关的表面生物传感。对于其他的细菌也能获得相似的传感性能。

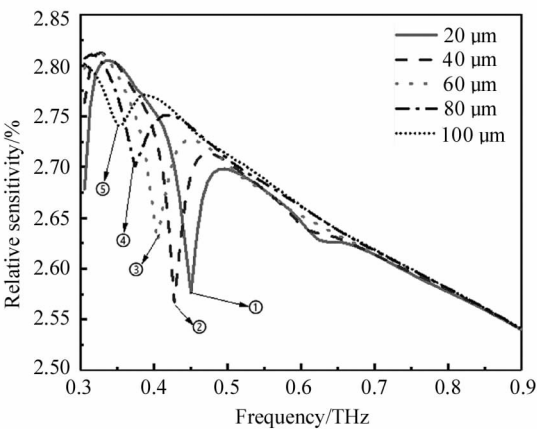


图 9 沉积 *S. aureus* 厚度不同时太赫兹布拉格光纤的相对灵敏度

Fig. 9 Relative sensitivity of the THz fiber with different thickness of *S. aureus*

4 结 论

本文提出了一种基于带有缺陷层的太赫兹空心布拉格光纤的表面生物传感器,并对该传感器在太赫兹频段的细菌种类检测性能进行了分析。仿真结果表明,该传感器将细菌沉积在纤芯内壁,当频率大于 0.7 THz 时,纤芯功率比高达 99.8%。沉积的细菌种类不同时,该传感器能得到可识别的特征频率,此特征频率可用于细菌种类检测。另外,当频率大于 0.7 THz 时,该传感器可实现厚度无关的表面生物传感。因此,本文提出的传感器在微生物检测方面有很大的应用潜力。

参考文献:

[1] SULTANA J, ISLAM M S, CORDEIRO C M B, et al. Exploring low loss and single mode in anti-resonant tube lattice terahertz fibers [J], IEEE Access, 2020, 8: 113309-113317.

[2] HABIB M A, ANOWER M S. Low loss highly birefringent

- porous core fiber for single mode terahertz wave guidance[J]. *Current Optics and Photonics*, 2018, 2(3): 215-220.
- [3] ISLAM M S, CORDEIRO C M B, FRANCO M A R, et al. Terahertz optical fibers [J]. *Optics Express*, 2020, 28(11): 16089-16117.
- [4] FAISAL M, ISLAM M S. Extremely high birefringent terahertz fiber using a suspended elliptic core with slotted airholes[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(13): 3340-3347.
- [5] MOLLAH M A, HABIB C M S, HABIB M S. Novel hollow-core asymmetric conjoined-tube anti-resonant fiber for low-loss THz wave guidance[J]. *OSA Continuum*, 2020, 3(5): 1169-1176.
- [6] ISLAM M S, SULTANA J, RIFAT A A, et al. Terahertz sensing in a hollow core photonic crystal fiber[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(10): 4073-4080.
- [7] LI J, NALLAPPAN K, GUERBOUKHA H, et al. 3D printed hollow core terahertz Bragg waveguides with defect layers for surface sensing applications[J]. *Optics Express*, 2017, 25(4): 4126-4144.
- [8] LIN C X, ZHANG W, HUANG Y D, et al. Defect Bragg fiber with low loss for broadband and zero dispersion slow light [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, 25(12): 3776-3783.
- [9] SKOROBOGATIY M. Resonant directional coupling of hollow Bragg fibers[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(18): 2112-2114.
- [10] HE Z J. Band-rejection filter based on a Bragg fiber with a defect layer[J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(3): 259-261.
- [11] HU D J, ALAGAPPAN G, YEO Y K, et al. Broadband transmission in hollow-core Bragg fibers with geometrically distributed multilayered cladding [J]. *Optics Express*, 2010, 18(18): 18671-18684.
- [12] ZHENG J J, LEI W J, QIN Y, et al. Highly nonlinear dispersion-flattened high-index-core Bragg fibres for supercontinuum generation[J]. *Journal of Modern Optics*, 2019, 66(20): 2008-2014.
- [13] LI J W, NALLAPPAN K. Optimization of hollow-core photonic Bragg fibers towards practical sensing implementations[J]. *Optical Materials Express*, 2019, 9(4): 1640-1653.
- [14] PAUL B K, AHMED K, VIGNESWARAN D, et al. Quasi-photonic crystal fiber-based spectroscopic chemical sensor in the terahertz spectrum; design and analysis[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(24): 9948-9954.
- [15] YANG X, WEI D S, YAN S H, et al. Rapid and label-free detection and assessment of bacteria by terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Journal of Biophotonics*, 2016, 9(10): 1050-1058.
- [16] YANG X, SHI J, WANG Y Y, et al. Label-free bacterial colony detection and viability assessment by continuous-wave terahertz transmission imaging[J]. *Journal of Biophotonics*, 2018, 11(8): e201700386.
- [17] SULTANA J, ISLAM M S, AHMED K, et al. Terahertz detection of alcohol using a photonic crystal fiber sensor [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(10): 2426-2433.
- [18] ISLAM M S, SULTANA J, DINOVTSEV A, et al. A novel Zeonex based oligoporous-core photonic crystal fiber for polarization preserving terahertz applications[J]. *Optics Communications*, 2018, 413: 242-248.
- [19] SULTANA J, ISLAM S, ATAI J, et al. Near-zero dispersion flattened, low-loss porous-core waveguide design for terahertz signal transmission[J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(7): 076114.
- [20] ISLAM M S, SULTANA J, AHMED K, et al. A novel approach for spectroscopic chemical identification using photonic crystal fiber in the terahertz regime[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(2): 575-582.

作者简介:

石 嘉 (1990—), 男, 博士研究生, 天津工业大学电气与电子工程学院副教授, 硕士生导师, 主要从事光纤传感器和太赫兹成像方面的研究。