

文章编号: 2096-1618(2020)02-0134-05

基于吸波结构的 THz 谐振器及其传感特性

郭 函¹, 马文英¹, 马长伟¹, 唐雨竹²

(1. 成都信息工程大学通信工程学院, 四川 成都 610225; 2. 四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065)

摘要:设计了一种基于吸波结构的 THz 谐振器。该结构单元由三开口金属谐振环、有损绝缘基板及连续金属膜组成, 分别对 FR4 材料基板以及 PI 基板的 THz 谐振器进行仿真, 分析了两种介质损耗不同的中间层基板对 THz 谐振器的吸收率及品质因数的影响。结果表明, 选用较低介质损耗的 PI 材料作为中间层基板的 THz 谐振器, 其欧姆损耗吸波效应更明显, 吸波峰较选用较高介质损耗的材料作为中间层基板的 THz 谐振器有所频移, 吸收率有所衰减, 而 Q 值、灵敏度、FOM 值更高。通过优化, 在 0.982 THz 附近得到一个 3 dB 带宽约为 6.88 GHz 的吸波谱, 相应的 Q 值为 142.73, 其吸收率为 0.936。最后对 THz 谐振器的传感特性进行了测量, 其折射率灵敏度为 48.21 GHz/RIU, FOM 值为 7.01/RIU, 具有较高的传感特性。

关键词:太赫兹; 吸波结构; 谐振器; 传感特性

中图分类号:TP212

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2020.02.002

0 引言

超材料吸波结构是有效吸收入射电磁波的一类功能材料结构, 其设计思想是在尽量损耗电磁波能量的同时通过匹配自由空间的阻抗使电磁波反射最小化, 从而使吸收最大化^[1]。一般地, 超材料吸波结构通常由三层结构组成, 第一层是金属谐振单元, 中间层为有损材料制成的绝缘基板, 第三层为连续的金属膜或磁谐振单元^[2-15]。

超材料吸波结构于 2008 年由 Landy 等^[2]首次提出, 该结构由金属双开口谐振结构层、基板和磁谐振长导线结构层组成, 金属双开口谐振结构层和磁谐振长导线结构层分别与入射电磁波的电场和磁场耦合, 在 11.65 GHz 频点处吸收率高达 99%。之后, Tao 等^[3]提出了类似的结构, 在太赫兹频段实现了完美吸收。2009 年, Landy 等^[4]又提出了一种在太赫兹波段的偏振不敏感的超材料吸波结构, 这种结构由三层组成, 最上面一层是用于吸收电场分量的改进型的对称结构的电谐振器, 第二层是衬底, 第三层是一个耦合磁场分量的十字型磁谐振器, 十字形结构在垂直于电磁波传播方向的平面上的旋转对称性使吸收器对入射波的极化方向不敏感, 吸收率在 1.13 THz 频点处达到 95%。为了进一步提高实用性, Tao 等^[5]提出了一种在太赫兹波段的具有宽入射角度的超材料吸波结构, 与之前不同的是, 该吸波体的第三层是连续的金属层。

THz 谐振器在折射率传感方面具有良好的应用, 孙雅茹等^[6]设计了一种应用于生物传感方面的 THz 谐振器, 折射率灵敏度为 24.7 GHz/RIU, 郑伟等^[7]设计了一种基于 THz 谐振器的微流体折射率传感器, 当偏振光的偏振方向与开口垂直时, 其灵敏度高达 74.43 GHz/RIU。在表征折射率传感器传感性能时, 除了折射率灵敏度之外, 一般还用到 FOM (figure of merit) 值, 定义 FOM 值为折射率灵敏度除以谐振峰的 3 dB 带宽。这就需要更窄的 3 dB 带宽, 而基于超材料吸波结构的 THz 谐振器通常具有谐振峰尖锐的特点, 2018 年杨其利等^[8]设计了一种基于吸波结构的非对称双开口 THz 谐振器, 用其折射率传感特性感知固体厚度, 能够分辨出不同浓度的乙醇溶液。由以上研究背景, 本文提出了一种基于吸波结构的三开口中心对称 THz 谐振器, 并对吸波机理进行分析, 研究表明, 该 THz 谐振器可实现高灵敏度和高 FOM 值, 具有良好的传感特性。

1 单元结构设计

所设计的 THz 谐振器由三层周期性结构单元组成, 结构单元如图 1 所示。图 1(a) 是 THz 谐振器结构单元的底层示意图, 为连续的金属铜膜, 其几何尺寸为 l_1 和 l_2 , 电导率为 5.8×10^7 S/m; 中间层为有损绝缘材质的基板; 图 1(b) 是 THz 谐振器结构单元的顶层示意图, 为三开口金属谐振环, 与底层所用金属材料相同, 结构单元的周期尺寸为 P_x 和 P_y , 三开口金属谐振环的边长为 a , 线宽为 W , 开口大小为 g , 内侧线间距

收稿日期: 2019-10-10

基金项目: 四川省科技计划资助项目 (2017JY0332); 四川省科技创新苗子工程资助项目 (2017097)

为 d_1 , 外侧线间距为 d_2 。

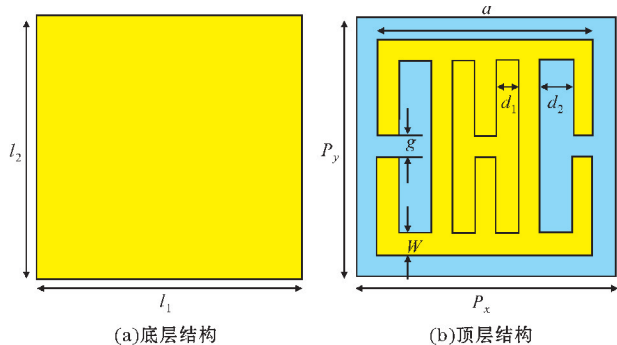


图1 THz 谐振器周期单元底层结构顶层结构

通过有限积分法对结构进行频域数值分析,由仿真优化,设置中间层基板厚度为 $30\ \mu\text{m}$,顶层与底层金属结构厚度均为 $0.2\ \mu\text{m}$,其余参数设置为: $P_x = P_y = 120\ \mu\text{m}$, $a = 100\ \mu\text{m}$, $W = 20\ \mu\text{m}$, $g = 20\ \mu\text{m}$, $d_1 = 20\ \mu\text{m}$, $d_2 = 30\ \mu\text{m}$, $l_1 = l_2 = 120\ \mu\text{m}$,太赫兹波的入射方向垂直于结构平面。

2 吸波机理分析

对于入射的电磁波,材料的吸收率 $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$,其中 $A(\omega)$ 、 $R(\omega)$ 和 $T(\omega)$ 分别表示结构的吸收率、反射率和传输率。提高吸收率首先需要降低材料的反射率。反射率为

$$R(\omega) = |S_{11}|^2 = \frac{Z_0 - Z_i}{Z_0 + Z_i} \quad (Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}, Z_i = \sqrt{\frac{\mu_i}{\epsilon_i}}) \quad (1)$$

其中, ϵ_0 和 μ_0 是自由空间的介电常数和磁导率, ϵ_i 和 μ_i 为吸波结构的介电常数和磁导率。若要实现吸波体的反射率为 0,应使吸波体的阻抗 Z_i 与自由空间的波阻抗相等,即 $Z_i = Z_0$ 。通过改变材料的 ϵ_i 和 μ_i ,使得

$\frac{\mu_i}{\epsilon_i} = \frac{\mu_0}{\epsilon_0}$,实现 $Z_i = Z_0$,此时,入射波能够全部进入吸波结构的内部而没有反射。

所设计的 THz 谐振器第一层的金属谐振单元既需要实现空间阻抗匹配,又需要通过谐振消耗电磁波的能量,因此设计为中心对称的金属开口谐振环结构,进而增大电磁波的欧姆损耗;中间层为有损绝缘介质,用于增大电磁波的介质损耗;第三层设计为连续的金属膜用于阻挡电磁波的透射,进而提高欧姆损耗和介质损耗。

如图 2 红线所示,中间层选用 FR4 材料,此时所设计的 THz 谐振器在 $0.849\ \text{THz}$ 处产生吸收峰,吸收率高达 0.970 ,反射率约为 0.016 ,透射率为 0.014 ,其吸收谱线的品质因数为 142.730 , $3\ \text{dB}$ 带宽为 $51.990\ \text{GHz}$ 。

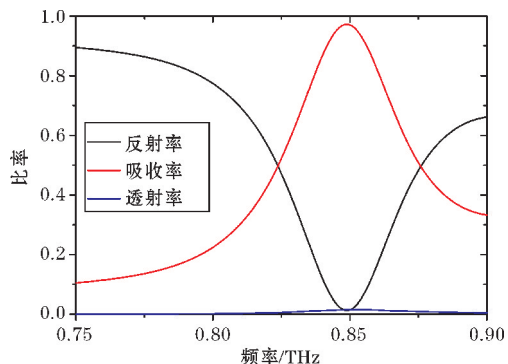


图2 FR4 基板的 THz 谐振器的反射率、吸收率和透射率

为了分析吸波谱线产生的机理,仿真了结构在 $0.849\ \text{THz}$ 频点的表面电流,如图 3 所示。三开口金属谐振环结构表面产生了复杂的偶极子电流,该电流的形成是 $0.849\ \text{THz}$ 频率入射波与 THz 谐振器三层结构发生电磁谐振的结果:入射波的电场分量直接激发了三开口金属谐振环结构,产生电谐振,形成了电偶极子;磁场分量则透过上层金属和中间层,在下层连续金属膜的作用下,形成了上层金属和下层金属的反向平行电流,进而激发上层金属即三开口金属谐振环结构的磁谐振,形成磁偶极子。当电谐振响应的等效介电常数和磁谐振响应的等效磁导率的比值与自由空间匹配时,反射率下降并趋近于 0。下层连续金属膜对电磁波的阻挡作用有效地降低了电磁波的透射率,而电磁波的能量则被中间层基板的介质损耗和金属层偶极子电流的欧姆损耗转换为热能,从而实现吸波。

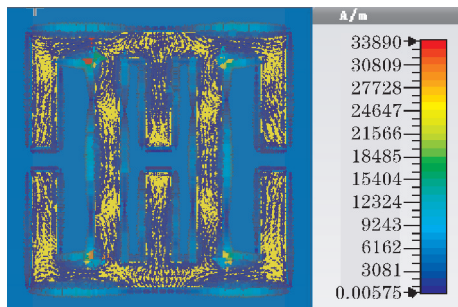
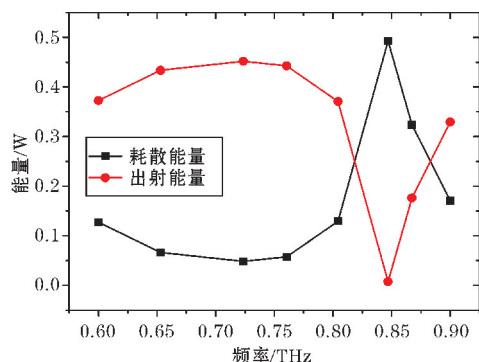
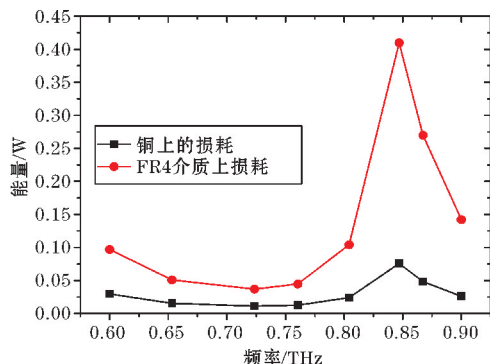


图3 上层结构的表面电流分布

为了进一步分析入射电磁波能量损失,首先仿真了 THz 谐振器的出射能量与耗散能量的频域分布曲线,如图 4(a) 所示,所设置的电磁波入射能量为 $0.5\ \text{W}$,在吸收峰处电磁波出射能量为 $0\ \text{W}$,耗散能量为 $0.5\ \text{W}$,进一步验证了理论分析。如图 4(b) 所示,吸收峰处,中间层基板介质损耗能量 $0.42\ \text{W}$,金属铜上的欧姆损耗为 $0.08\ \text{W}$ 。可见,金属层电磁谐振的阻抗匹配效应、欧姆损耗效应、中间层基板的介质损耗效应以及下层金属对电磁波的阻挡效应均关系着 THz 谐振器的吸波性能。



(a) 能量对比



(b) 能量损耗分布

图4 FR4基板的THz谐振器能量对比及能量损耗分布

3 仿真结果和特性分析

3.1 中间层材料对吸收谱的影响

根据前面的分析,中间层的介质损耗能力会对吸收谱线造成较大的影响,因此,使用了损耗较低的PI材料基板替换FR4基板进行仿真。如图5所示,吸收峰频点、吸收率、透射率和反射率均发生了变化,基于PI基板的THz谐振器的吸收峰频点约为0.982 THz,吸收率为0.936,反射率为0.061,透射率约为0,其吸收谱的品质因数为142.73,3 dB带宽仅为6.88 GHz。

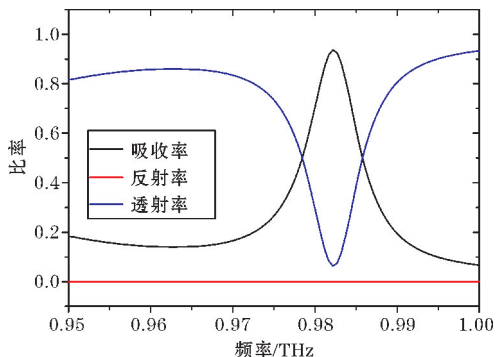
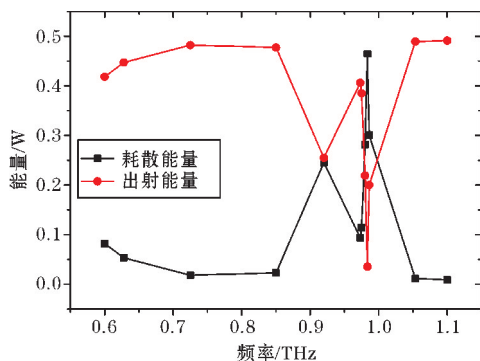


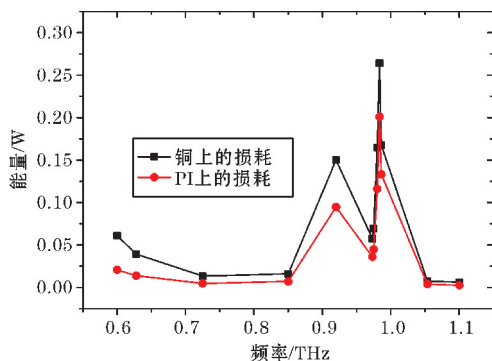
图5 PI基板的THz谐振器的反射率、吸收率和透射率

然后,进一步仿真基于PI衬底的能量耗散情况,如

图6(a)所示,所设置的电磁波入射能量为0.5 W,在吸收峰处电磁波出射能量为0.04 W,耗散能量为0.46 W。如图6(b)所示,吸收峰处,中间层基板介质损耗能量0.20 W,金属铜上的欧姆损耗为0.26 W。



(a) 能量对比



(b) 能量损耗分布

图6 PI基板的THz谐振器能量对比及能量损耗分布

由此可见,选用损耗相对较低的材料基板,金属层电磁谐振的谐振点发生频移,对于THz谐振器整体来说,欧姆损耗的作用增大,整体上吸收率指标有所降低,而品质因数大大提高,带宽大大变窄。

3.2 传感特性

对所设计的THz谐振器的传感性能进行仿真和计算,在结构表面覆盖一层3 μm厚的分析物,设置分析物折射率的变化从1到2,利用THz谐振器的反射谱分析其折射率传感特性,对FR4和PI两种损耗大小不同基底的THz谐振器折射率传感特性进行仿真,图7为不同折射率的反射谱。

由此可知,结构的谐振频率随着分析物折射率的增大出现了频移,将谐振频率的移动变化进行数据拟合,如图8所示,其中红线和黑线分别代表PI和FR4的折射率灵敏度,其值分别为48.21 GHz/RIU和38.99 GHz/RIU,对应的FOM值分别为7.01和0.76,由此可知,选用损耗更小的PI作为衬底时,结构对折射率的变化更加敏感,具有更好的传感特性。

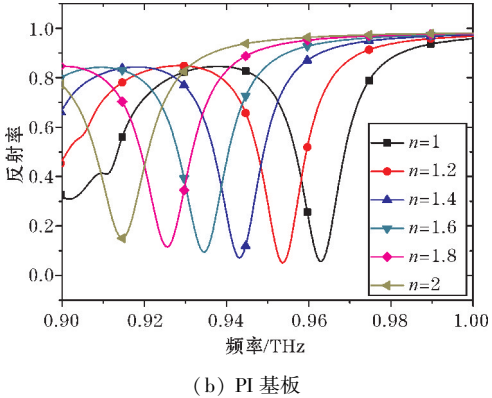
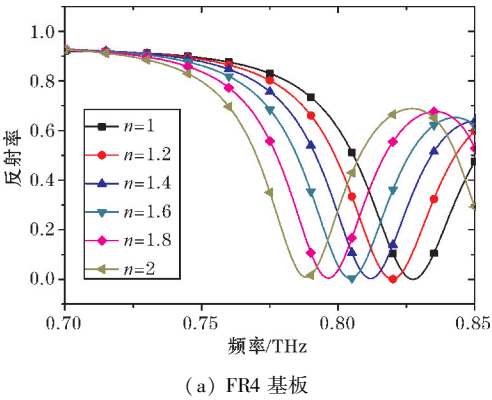


图 7 FR4 基板和 PI 基板的 THz 谐振器不同折射率的反射谱

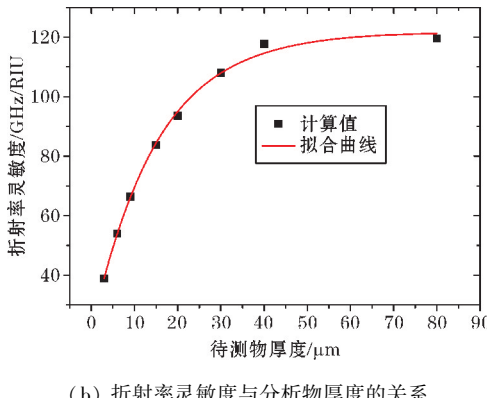
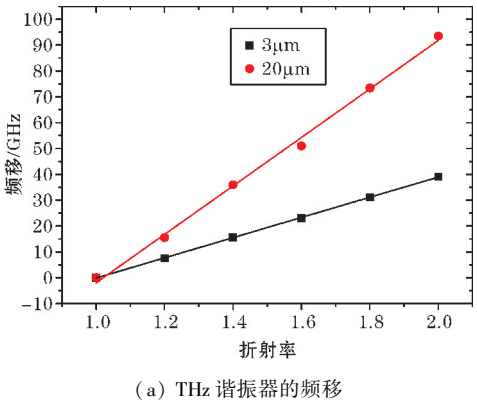
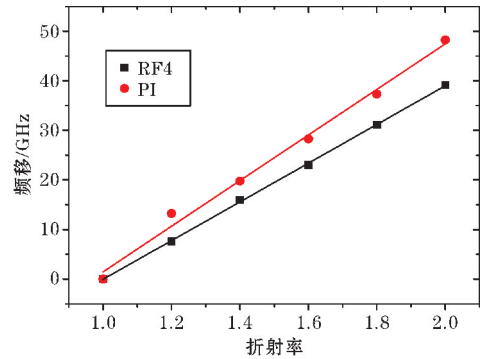


图 9 覆盖 3 μm 和 20 μm 厚度的分析物的 THz 谐振器的频移、折射率灵敏度与分析物厚度的关系



基于 FR4 衬底,仿真 3 μm 到 80 μm 不同厚度的分析物的折射率灵敏度。如图 9(a) 所示,红线为覆盖 20 μm 厚度分析物的谐振频率随折射率的移动情况,其拟合直线的斜率即为折射率灵敏度,其值达到了 93.54 GHz/RIU,相应的 FOM 值为 1.80。如图 9(b) 所示,可以看到,随着厚度的增加,其折射率灵敏度逐渐提高,当分析物厚度达到 40 μm 时,折射率灵敏度达到 117.61 GHz/RIU 之后,折射率灵敏度的增加极为缓慢,此时达到了厚度的极限值,因此适当地增加分析物的厚度有利于提高折射率传感性能。

4 结束语

提出了一种基于吸波结构的 THz 谐振器,该结构

单元由三开口金属谐振环、有损绝缘基板及连续金属膜组成。详细研究了该结构与入射电磁波之间的相互作用,并阐述了吸波机理。通过改变基板材料可以调节吸波峰频率以及吸波谱 Q 值,该结构用作折射率传感器具有高灵敏度和高 FOM 值,拥有较高的传感特性,同时通过仿真发现,适当增加 THz 谐振器表面覆盖的分析物的厚度有利于提高折射率传感性能。

致谢:感谢成都信息工程大学科研基金项目(J201505)对本文的资助

参考文献:

[1] 赵德林,宋耀良,朱艳萍. 一种新的基于谐振型高阻抗表面的微波吸波屏[J]. 南京理工大学学报(自然科学版),2010,34(1):136-140.

[2] Landy N,Sajuyigbe S,Mock J,et al. A Perfect Metamaterial Absorber[J]. Physical review letters, 2008,100:207402.

[3] Tao H,Landy N I,Bingham C M,et al. A metamaterial absorber for the terahertz regime:Design,fabrication and characterization[J]. Optics Express, 2008,16:7181.

[4] Landy N I,Bingham C M,Tyler T,et al. Design, theory,and measurement of a polarization insensi-

- tive absorber for terahertz imaging [J]. *Physical Review B*, 2009, 79: 125–104.
- [5] Tao H, Bingham C M, Strikwerda A, et al. Highly Flexible Wide Angle of Incidence Terahertz Metamaterial Absorber: Design, Fabrication and Characterization [J]. *Physical Review B*, 2008, 78 (24): 231–103.
- [6] 孙雅茹, 史同璐, 刘建军, 等. 太赫兹超材料类 EIT 谐振无标记生物传感 [J]. *光学学报*, 2016, 36(3): 261–266.
- [7] 郑伟, 范飞, 陈猛, 等. 基于太赫兹超材料的微流体折射率传感器 [J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(4): 123–128.
- [8] 杨利其, 梁兰菊, 刘凤收, 等. 基于太赫兹超材料吸波体的谐振及传感特性研究 [J]. *激光杂志*, 2018, 39(11): 62–65.
- [9] 高军, 张浩, 曹祥玉, 等. 一种双频超薄吸波结构在微带天线中的应用 [J]. *西安电子科技大学学报*, 2015, 42(1): 130–135.
- [10] Zuo W, Yang Y, Xiao Xi H E, et al. An ultra-wide-band miniaturized metamaterial absorber in the ultrahigh frequency range [J]. *IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 928–931.
- [11] Wang L, Jiang Y, Wang J, et al. An ultra-broadband THz absorber based on graphene [C]. *International Symposium on Antennas, Propagation and Em Theory*, 2017, [S. l.]: IEEE, 699–702.
- [12] Costa F, Monorchio A. A frequency selective radome with wideband absorbing properties [J]. *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, 2012, 60(6): 2740–2747.
- [13] Pan W, Yu X, Zhang J, et al. A broadband terahertz metamaterial absorber based on two circular split rings [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2017, 53(1): 1–6.
- [14] Chen J, Hu Z, Wang G, et al. High-impedance surface based broadband absorbers with interference theory [J]. *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, 2015, 63(10): 4367–4374.
- [15] Yoo M, Lim S. Polarization-independent and broadband metamaterial absorber using a hexagonal artificial impedance surface and a resistor-capacitor layer, *IEEE Transaction* [J]. *Antennas & Propagation*, 2014, 62(5): 2652–2658.

THz Resonator based on Absorbing Structure and its Sensing Characteristics

GUO Han¹, MA Wenyong¹, MA Changwei¹, TANG Yuzhu²

(1. College of Communication Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. College of Electronic Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: A THz resonator based on absorbing structure is designed in the paper. The structure unit consists of three open metal resonant rings, lossy insulating substrates and continuous metal films. The THz absorbing structure resonators based on FR4 substrates and PI substrates are simulated respectively. The effects of two substrates with different dielectric losses on the absorptivity and quality factor are analyzed. The results show that the THz resonator with lower dielectric loss has more obvious ohmic absorption effect than that with higher dielectric loss. The absorption peak of THz resonator with lower dielectric loss is blue-shifted and the absorption rate is attenuated, while the Q value, sensitivity and FOM value are higher. By optimization, a 3 dB bandwidth of 6.88 GHz is obtained near 0.982 THz, and the corresponding Q value is 142.73, with an absorptivity of 0.936. Finally, the sensing characteristics of THz resonator are measured. Its refractive index sensitivity is 48.21 GHz/RIU, FOM value is 7.01/RIU, and it has high sensing characteristics.

Keywords: terahertz; absorbing structure; resonator; sensing characteristics