

高传感性能的多波段太赫兹超材料吸收器

娄方勇*, 杨欢欢, 梁鑫, 向位

凯里学院微电子与人工智能学院, 微纳与智能制造教育部工程研究中心, 贵州 凯里

收稿日期: 2025年11月4日; 录用日期: 2025年11月28日; 发布日期: 2025年12月8日

摘要

在一个金属矩形结构中通过采取诱发其基模共振和多个高阶等离激元共振模式, 从而实现三波段完美吸收, 而当扩宽光源时, 实现了四波段吸收, 使得该多波段超材料吸收器在三波段和四波段吸收可以轻易实现, 首先利用激发多个高阶共振吸收, 使得该吸收器在宽带范围内实现多个频段的共振吸收。其次阐述了各个频率吸收峰的吸收机理, 以及高阶振动来源。最后通过改变环境因素分析其传感性能, 结果显示, 对于所设计的多波段超材料吸收器具有高品质因数(FOM)。该多波段超材料吸收器在传感、太阳能电池、成像、探测等领域有着潜在的应用。

关键词

超材料, 多波段, 等离激元, 太赫兹, FOM

High-Sensitivity Multi-Band Terahertz Metamaterial Absorber

Fangyong Lou*, Huanhuan Yang, Xin Liang, Wei Xiang

Ministry of Education Engineering Research Center for Micro-Nano and Intelligent Manufacturing, School of Microelectronics and Artificial Intelligence, Kaili University, Kaili Guizhou

Received: November 4, 2025; accepted: November 28, 2025; published: December 8, 2025

Abstract

In a metal rectangular structure, perfect three-band absorption is achieved by inducing its fundamental mode resonance and multiple high-order plasmon resonance modes. When the light source is broadened, four-band absorption is realized, making it easy for this multi-band metamaterial absorber to achieve three-band and four-band absorption. By stimulating multiple high-order resonance absorption, this enables the absorber to achieve resonant absorption in multiple frequency

*通讯作者。

文章引用: 娄方勇, 杨欢欢, 梁鑫, 向位. 高传感性能的多波段太赫兹超材料吸收器[J]. 应用物理, 2025, 15(12): 795-803. DOI: 10.12677/app.2025.1512083

bands within the broadband range. Secondly, the absorption mechanisms of each frequency absorption peak and the sources of high-order vibrations were expounded. Finally, the sensing performance was analyzed by changing the environmental factors. The results show that the designed multi-band metamaterial absorber has a high quality factor (FOM). This multi-band metamaterial absorber has potential applications in fields such as sensing, solar cells, imaging, and detection.

Keywords

Metamaterial, Multi-Band, Plasmons, Terahertz, FOM

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来, 超材料吸收器逐渐作为超材料的一个重要发展领域, 通过对超材料吸收器的合理设计和优化可以实现对不同频段光的完美吸收, 这一发现引起了研究者的极大关注。当前, 越来越多的超材料吸收器装置被人们广泛设计和制造, 以此来满足不同的应用要求[1][2]。但随着超材料吸收器的快速发展, 基于同一平面结构的超材料吸收器由于表面结构复杂, 制造难度过大等问题, 在实际制造以及应用过程中具有一定局限性[3][4]。随着人们研究的不断深入, 我们知道当前在超材料吸收器所设计的单元结构中不仅仅是包含基模共振, 在合理的设计优化下单个单元结构也会产生等离激元高阶共振。而由多个等离激元高阶共振模式所设计的超材料吸收器, 其吸收机制不同于简单的基模共振, 而且在一个简单结构中就可以实现多波段的完美吸收, 这样的单元结构不仅外形简单, 减少了结构设计的复杂性, 同时有利于制造应用。随着超材料多波段吸收器在各个波段范围的广泛应用, 基于太赫兹超材料吸收器在光谱成像, 有毒气体检测和大气环境监测等应用越来越广泛[5]。当前对所设计的超材料吸收器的品质因数(FOM)要求也越来越高, 因此需要结构简单, 便于制造且具有高品质因数(FOM)的多波段超材料吸收器成为了目前迫切需要解决的问题。因此, 在本文中我们通过在一个金属超材料结构中利用其高阶等离激元共振从而实现多波段吸收。最为重要的是, 所设计的超材料吸收器满足具有高品质因数(FOM)要求, 除此之外, 该吸收器不仅可以实现三个频率的完美吸收, 当扩展光源时, 呈现四频带吸收, 最后一个吸收峰的 FOM 远远高于前几个峰。

2. 结构与参数

多波段超材料吸收器结构示意图如图 1 所示。该结构同时由三个结构层组成, 顶部我们采用的是矩形金属片, 中间是电介质层, 底部金属是作为阻挡光穿透的挡板。此时 l_x , l_y 分别是矩形金属片的宽度和长度。我们设置其中 $l_x = 64 \text{ um}$, $l_y = 71 \text{ um}$ 。t 代表电介质的厚度。而 P 代表电介质的周期, 这里 $P = P_x = P_y = 79 \text{ um}$ 。顶部金属片和底部的金属挡板我们采用价格便宜的金属 Al, 金属的厚度为 0.5 um 。对于金属铝, 我们可以应用 Drude 模型来估算其电导率, 并用其物理参数来进行一些基本计算。此时应当考虑的是温度升高的情况, 电子散射会更频繁。通过查阅文献资料可以得到以下参数, 铝的电子密度大约为: $n \approx 2.9 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$, 平均自由时间(τ)= $1.23 \times 10^{-14} \text{ s}$, 电子的质量: $m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$, $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Ce}$, 将铝的参数代入 Drude 模型中计算, 得出铝的电导率 $\sigma \approx 1 \times 10^7 \text{ S/m}$, 因此此时我们设置金属(Al)的电导率 $\sigma = 1.0 \times 10^7 \text{ S/m}$, 中间的电介质层的厚度设置为 $t = 8 \text{ um}$, 其折射率为 $n = 3.2 + 0.025i$ 。

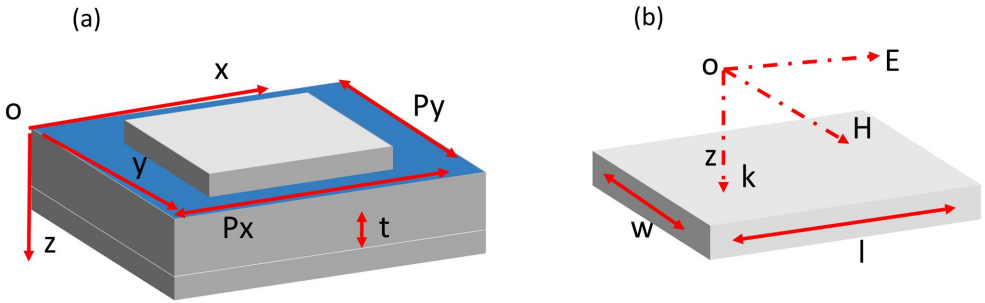


Figure 1. (a) Model of the multi-band metamaterial absorber, (b) Top metal structure
图 1. (a) 多波段超材料吸收器的模型, (b) 顶部金属结构

对于模拟软件采用基于时域有限差分法的 FDTD solutions。在 FDTD 网格设置中选择 79 μm 尺寸，使得整个周期结构在计算范围内部，在 x 与 y 面设置的边界条件为 Periodic 边界条件，在 z 面设置的边界条件为 PML 边界条件，所设计的超材料结构的吸收率用 $A = 1 - T - R$ 表示，其中 A 为吸收率，T, R 分别为透射率和反射率。当 T 和 R 都等于零时，我们可以得到完美的光吸收。由于底部金属板其厚度远远大于入射光束的趋肤深度[6] [7]。那么实际上 $T = 0$ ，这意味着超材料的吸收(A)可以由 $A = 1 - R$ 给出[8] [9]。

3. 仿真结果与性能分析

3.1. 多波段吸收

如图 2(a)所示，该超材料吸收器具有三个完美吸收峰，我们按照频率峰值大小依次定义为在(f1)、(f2)、(f3)，其中(f1)=0.635 THz、(f2)=1.872 THz、(f3)=2.874 THz，这三个共振峰的平均吸收系数超过 98%。

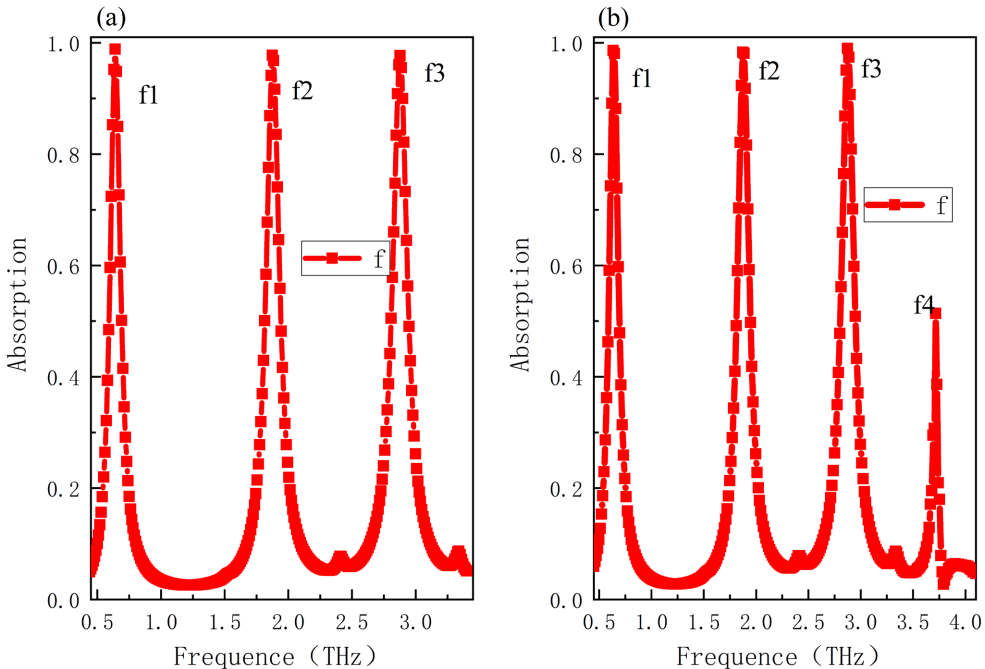


Figure 2. (a) Three-band absorption spectrum; (b) Four-band absorption spectrum after expanding the light source range
图 2. (a) 三波段吸收光谱; (b) 扩大光源范围后的四波段吸收光谱

从图 2(a)可以看得到在三个吸收频率附近出现非常窄的完美吸收。整个超材料吸收器的三个吸收峰带宽非常狭窄,而超材料的非共振吸收非常低(小于 20%),这表示三波段吸收器对入射光具有强烈的选择性吸收,这意味着三波段吸收器在传感和检测方面有着潜在应用。接下来,我们扩大了入射光光源范围,实现了四波段超材料吸收。对于前三个峰值没有变化,于是第四个峰我们定义为(f4),其中 $f4=3.71$ THz,对于该超材料多波段吸收器,我们发现通过控制光源来调节三波段吸收与四波段吸收的相互转换,表明了所设计的多波段吸收器件具有可调整特性,在实际生活中比如折射率传感,样品检测具有重要的应用前景。

3.2. 电场与磁场分布

接下来我们通过对三个不同峰值的电荷分布以及磁场分布来了解吸收器的吸收机理[10]-[12],在图 3(a)~(c)分别给出了给出频率点(f1)、(f2)、(f3)的电荷分布,图 3(d)~(f)是频率点(f1)、(f2)、(f3)在整个结构内的磁场分布。很明显,模式 f1 的电荷分布聚集在金属阵列的左右两侧的边缘部分,这是一个典型的偶极电荷分布,这意味着 f1 是偶极共振。在平面波的垂直入射下,金属平板发生等离激元共振,形成偶极子电荷分布。偶极子电荷分布导致顶部和底部金属层之间的形成一个电流回路,从而在超材料吸收器的电介质层中激发一个磁共振,如图 3(d)中的磁场分布,该共振产生一个共振吸收峰,也就是频率 f1,因此模式 f1 的共振模式是低阶共振[6] [7]。我们知道高阶谐振峰往往出现在整个频率波段的高频率段。对于模式 f2,如图 3(b)所示,很明显在入射波照射在金属平板下,激发了等离激元共振,从而导致正方形金属片中有三对正负电荷对。从金属层左侧边缘到右侧边缘,分别形成不同的三个电荷对,该三个电荷分布导致顶部和底部金属层之间形成三个电流回路,如图 3(e)中的磁场分布所示,顶部和底部金属层之间形成三个电流回路,产生了三个磁谐振子,这导致在吸收器的电介质层中激发三个磁共振。因此,模式 f2 是所提出的吸收体结构的三阶等离激元共振所产生的[13]。

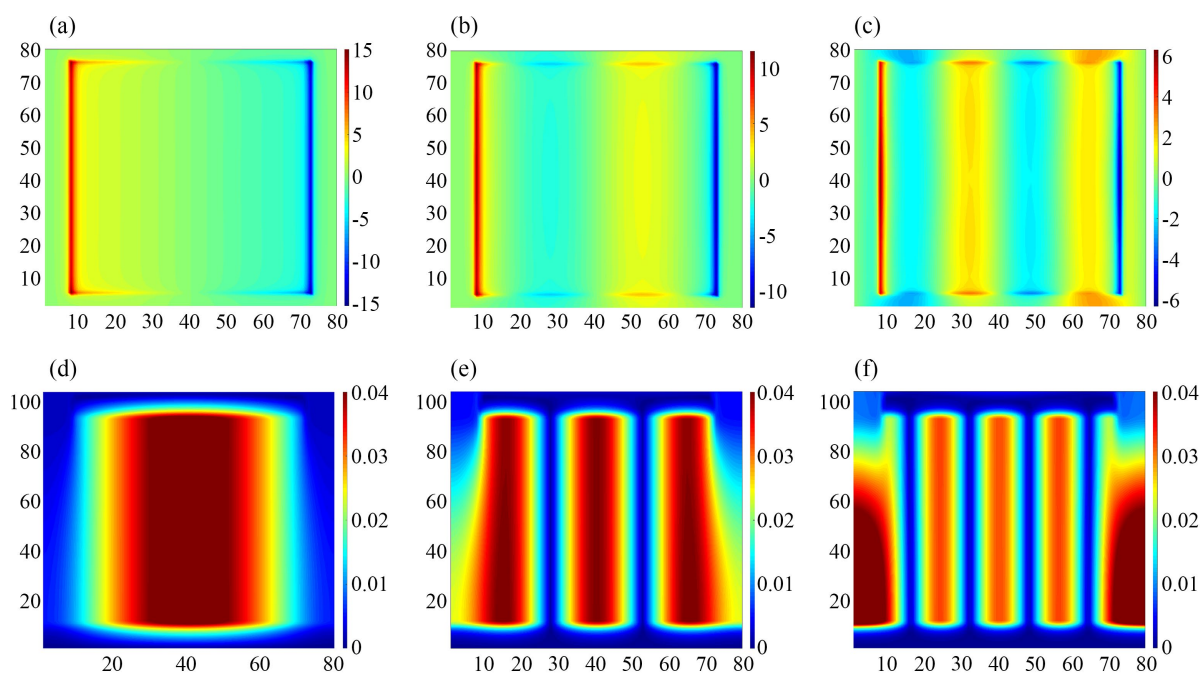


Figure 3. (a)~(c) Charge distribution corresponding to three different peaks (f1, f2, f3); (d)~(f) Magnetic field corresponding to three different peaks (f1, f2, f3)

图 3. (a)~(c) 三个不同峰值(f1、f2、f3)所对应的电荷分布; (d)~(f) 三个不同峰值(f1、f2、f3)所对应的磁场

同理,对于模式 f3,从图 3(c)可以看出,在金属顶部中存在五对正负电荷分布,依次从左侧边缘到右侧边缘,依次呈现五对正负电荷对,这五个电荷分布导致顶部和底部金属层之间形成五个电流回路。如图 3(f)中的磁场分布所示,顶部和底部金属层之间形成五个电流回路,产生了五个磁谐振子,这导致在吸收器的电介质层中激发五个磁共振。模式 f3 是所提出的吸收体结构的五阶等离子元共振产生的。因此,模式 f1、f2、f3 是所提出的吸收器结构等离子元共振的偶极共振、三阶共振以及五阶共振。

对于模式 f4 的物理吸收机理,我们分别在图 4(a)~(d)中分别给出该峰值所对应的电场分布、电荷分布、磁场分布以及表面电流分布,模式 f4 电场分布如图 4(a)所示,在整个四波段超材料周期结构中,金属平板左右两侧边缘中心部分受到相邻电介质层影响,从而产生相互作用,在相邻介质层左右两侧中心位置产生两处场强。从这两处电场强度可以看出,金属平板两侧边缘的中心部位受到相邻介质层的影响[14][15]。

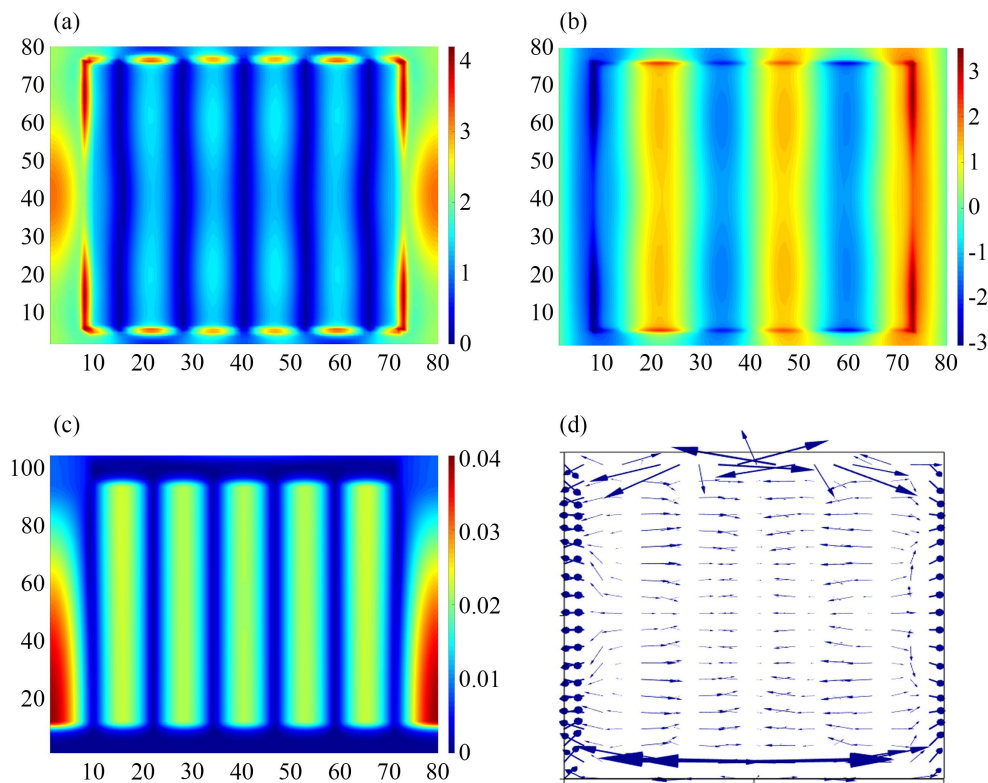


Figure 4. (a) Electric field distribution corresponding to peak f4; (b) Charge distribution; (c) Magnetic field distribution; (d) Surface current distribution

图 4. (a) 峰值 f4 所对应的电场分布; (b) 电荷分布; (c) 磁场分布; (d) 表面电流分布

与此同时在图 4(b)电荷分布以及图 4(d)表面电流分布可以看出,在金属平板上依旧是从左到右依次形成五个明显电荷对,但是由于受到介质层的影响,导致金属左右两侧边缘中心位出现分叉现象,于是我们通过观察场强分布发现,如图所示,在金属边缘中心两侧的介质层有大量的电荷聚集,从而影响了金属两侧边缘中心部分,形成耦合震荡。由于在微波中,当相邻单元相互接近时,它们之间的电磁场会相互影响。这种影响通常表现为近场耦合,即相邻单元之间通过电场或磁场的直接交互作用来传递能量。当相邻单元的电场相互作用时,单元中的电荷分布会发生改变,导致原本孤立的单元的电荷分布出现相互纠缠。特别是在共振条件下,这种电荷分布的变化会显著增强系统的响应。这个耦合作用使得单元间

的共振模式不再是孤立的，而是相互依赖的。由于近场耦合引起的电荷分布改变使得原本独立的低阶模式出现混合，形成新的高阶模式。耦合效应促使系统中的多个模式相互作用，导致频率的偏移，从而产生新的共振峰，促进高阶共振模式的形成。当多个单元之间的耦合变得足够强时，整个系统表现出集体振荡的行为。此时，共振不再是单独单元的叠加，而是由耦合的模式决定的，形成了全局的高阶共振模式。因此我们可以知道金属边缘左右两侧中心位置出现分叉是由于金属两侧边缘中心部分发生耦合震荡，发生耦合震荡的原因是由于受到介质层的影响，从而在整个周期结构中产生七个磁谐振子，在图 4(c)磁场图，呈现七个磁谐振，而对于左右边缘两侧磁谐振子，通过磁场可以得知，正是由于平板边缘两侧在中心位置的震荡耦合产生的，因此，模式 f4 是金属平板和相邻介质层相互作用下所产生的多阶响应共振。

4. 传感性能分析

接下来，我们将分析所设计的多波段超材料吸收器是否可应用于传感和检测领域。由于该结构尺寸是在多次优化后得到的对峰值的最佳吸收尺度，以此达到最优的 Q 值与 FOM 值，因此我们可直接探讨传感性能，首先由于 f1 在改变外部环境，其频率基本无变化，因此在这里我们只计算频率 f2 和 f3 的传感性能，首先是计算频率 f2 和 f3 两个不同峰值的半高全宽(FWHM)和品质因数(Q，定义为谐振频率除以半高全宽) [16]-[19]。频率 f2 和 f3 的 FWHM 分别为 0.13、0.143。对应的 Q 值为 14.4、20.5。高 Q 值表明，所设计的结构可应用于传感和探测等领域。与此同时，折射率灵敏度(S)也是直接描述超材料结构传感性能的重要因素，因此为了评估该四波段超材料吸收器的传感性能，我们计算了该四波段超材料吸收器的折射率灵敏度(S)，灵敏度(S)定义为 $S = \Delta f / \Delta n$ ，其中 Δf 是共振吸收频率的变化， Δn 是背景折射率的变化。于是我们首先通过改变背景折射率(RI)来分析频率点 f2、f3 在 $n = 1.00$ 到 $n = 1.10$ 的区间变化，通过改变背景折射率，如图 5 所示，通过计算得到的频率点 f2、f3 的 S 值，分别为 0.1 Thz/RIU，0.4 Thz/RIU。FOM (品质因数)是作为评估传感器质量的最为重要的因素[19] [20]，可以直接比较不同传感器之间的传感性能，FOM 越大，传感性能越好。

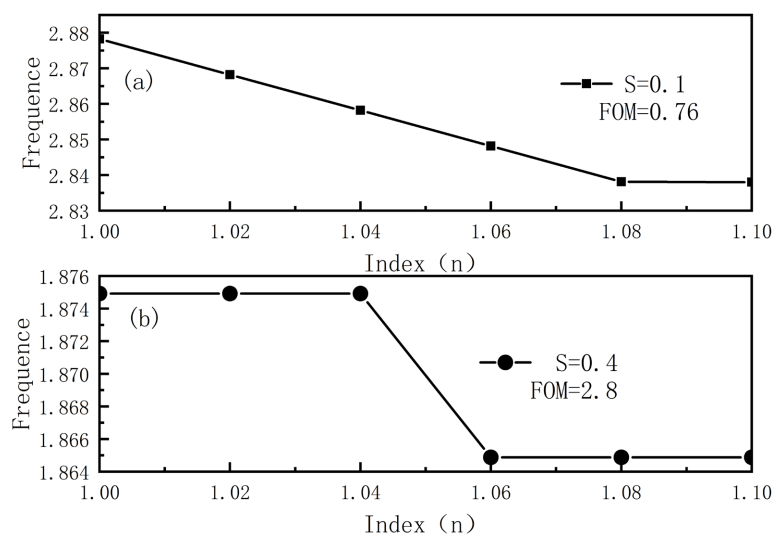


Figure 5. Corresponding S values and FOM at frequency points f2 and f3
图 5. 频率点 f2、f3 的所对应的 S 值和 FOM

FOM 的定义是: $FOM = \Delta f / (\Delta n \times FWHM) = S / FWHM$ ，从而计算出频率点 f2、f3 的 FOM 分别为 0.76 和 2.8。频率点 f3 的 FOM 优于频率点 f2 的 FOM。通过查阅文献可以得知，这类文献中并没有给出对应

峰值的半高全宽(FWHM)，但如表 1 所示，当前在大多数吸收器的计算所得出的 FOM 值普遍在于 1~3 以内[21]-[25]，频率点 f3 具有高 FOM，同时该超材料吸收器结构简单，便于制造。

Table 1. Q factor and FOM value of common terahertz absorbers

表 1. 常见的太赫兹吸收器的 Q 值与 FOM 值

文献	Q	FOM
21	11.6	2.3
22	15	3
23	7	1.5
24	41	2.3
25	7.8	0.7

而对于频率 f4，对于频率 f4，当改变背景环境折射率到一定范围时，这个范围非常的小，导致频率 f4 的吸收逐渐减小且会趋近于无，对于当背景环境折射率改变时，会出现非常强烈的频率变化，这说明了背景折射率变化对 f4 的频率和吸收系数具有强烈的影响。如图 6 所示，是频率点 f4 的所对应的 S 值和 FOM，我们发现对于频率 f4 其背景折射率在 $n = 1.00$ 到 $n = 1.02$ 区间其频率的吸收系数出现强烈的变动，因此我们通过计算频率点 f4 的频率移动变化。频率点 f4 其半高全宽(FWHM)为 0.05，通过在 $n = 1.00$ 到 $n = 1.02$ 区间改变背景环境，以此得到其频率变化值，计算得到的频率点 f4 的 S 值，为 1.2375 Thz/RIU，同时计算得出其 FOM 值为 24.75。

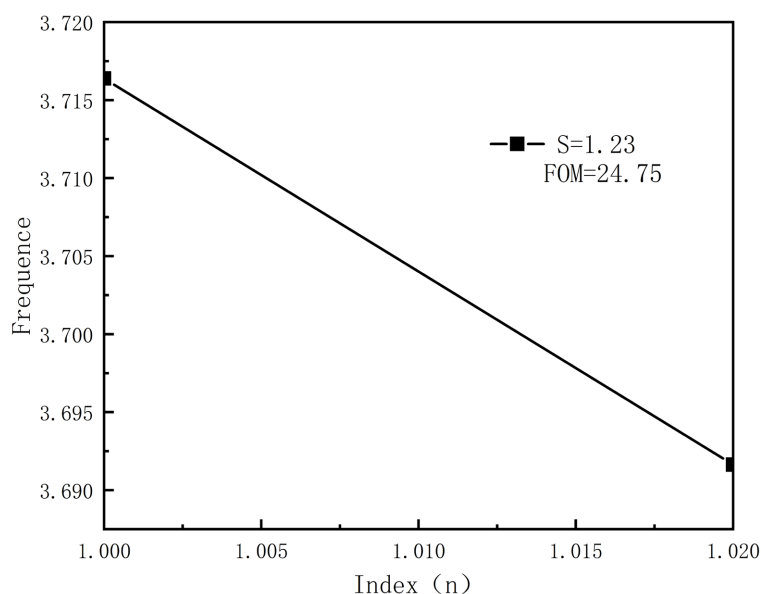


Figure 6. S value and FOM corresponding to frequency point f4

图 6. 频率点 f4 的所对应的 S 值和 FOM

这可以表明，在微小的环境变化下，其频率点数值和吸收系数出现强烈的变动，我们知道在传感器使用的时候过程中误差是永远不可能避免的，所以我们应当尽量减少误差，增加测量的安全性、准确性，

而频率 f_4 , 不仅具有极其高 FOM 值, 同时能够减少误差, 增加测量的准确性。这意味着频率点 f_4 可以应用于探测可燃、易燃、有毒气体的浓度或其存在与否, 也可以用于计算氧气的消耗量等。

5. 结论

通过在一个金属平板结构诱发其基模共振和多个高阶等离子激元共振模式从而实现三波段完美吸收, 而当扩宽光源时, 实现了四波段吸收, 其次阐述了各个吸收峰的吸收机理, 最后通过改变环境因素分析其传感性能, 结果显示, 对于所设计的多波段超材料吸收器具有高品质因数(FOM)。该超材料吸收器不仅结构简单, 同时便于制造, 结果显示该多波段超材料吸收器在传感、太阳能电池、成像、探测等领域有着潜在的应用。

基金项目

黔东南州玻璃重点实验室开放基金项目(WZG06)。

参考文献

- [1] Yahiaoui, R., Guillet, J.P., de Miollis, F. and Mounaix, P. (2013) Ultra-Flexible Multiband Terahertz Metamaterial Absorber for Conformal Geometry Applications. *Optics Letters*, **38**, 4988-4990. <https://doi.org/10.1364/ol.38.004988>
- [2] 边明明, 王世涛, 雷利华, 等. 太赫兹技术及空间应用国内外发展现状研究[J]. 空间电子技术, 2013, 10(4): 80-84.
- [3] Luo, C., Li, D., Luo, Q., Yue, J., Gao, P., Yao, J., *et al.* (2015) Design of a Tunable Multiband Terahertz Waves Absorber. *Journal of Alloys and Compounds*, **652**, 18-24. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.08.089>
- [4] Sarkar, R., Ghindani, D., Devi, K.M., Prabhu, S.S., Ahmad, A. and Kumar, G. (2019) Independently Tunable Electromagnetically Induced Transparency Effect and Dispersion in a Multi-Band Terahertz Metamaterial. *Scientific Reports*, **9**, Article No. 18068. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54414-5>
- [5] 孟庆龙, 张艳, 张彬, 等. 光控可调谐多频带太赫兹超材料吸收器的特性[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(10): 253-258.
- [6] Wang, B. (2017) Quad-Band Terahertz Metamaterial Absorber Based on the Combining of the Dipole and Quadrupole Resonances of Two SRRs. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **23**, 1-7. <https://doi.org/10.1109/jstqe.2016.2547325>
- [7] Meng, T., Hu, D. and Zhu, Q. (2018) Design of a Five-Band Terahertz Perfect Metamaterial Absorber Using Two Resonators. *Optics Communications*, **415**, 151-155. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2018.01.048>
- [8] Jung, S., Kim, Y.J., Yoo, Y.J., Hwang, J.S., Khuyen, B.X., Chen, L., *et al.* (2019) High-Order Resonance in a Multiband Metamaterial Absorber. *Journal of Electronic Materials*, **49**, 1677-1688. <https://doi.org/10.1007/s11664-019-07661-1>
- [9] Redo-Sanchez, A., Heshmat, B., Aghasi, A., Naqvi, S., Zhang, M., Romberg, J., *et al.* (2016) Terahertz Time-Gated Spectral Imaging for Content Extraction through Layered Structures. *Nature Communications*, **7**, Article No. 12665. <https://doi.org/10.1038/ncomms12665>
- [10] Slocum, D.M., Goyette, T.M., Giles, R.H. and Nixon, W.E. (2015) Experimental Determination of Terahertz Atmospheric Absorption Parameters. *SPIE Proceedings*. <https://doi.org/10.1117/12.2176455>
- [11] 郭林燕. 环形偶极子超介质的实现与特性研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 华中师范大学, 2016.
- [12] Peng, X., Wang, B., Lai, S., Zhang, D.H. and Teng, J. (2012) Ultrathin Multi-Band Planar Metamaterial Absorber Based on Standing Wave Resonances. *Optics Express*, **20**, 27756-27765. <https://doi.org/10.1364/oe.20.027756>
- [13] Hu, D., Wang, H., Tang, Z., Zhang, X. and Zhu, Q. (2016) Design of Four-Band Terahertz Perfect Absorber Based on a Simple #-Shaped Metamaterial Resonator. *Applied Physics A*, **122**, Article No. 826. <https://doi.org/10.1007/s00339-016-0357-4>
- [14] Meng, W.W., Lv, J., Zhang, L., Que, L., Zhou, Y. and Jiang, Y. (2019) An Ultra-Broadband and Polarization-Independent Metamaterial Absorber with Bandwidth of 3.7 THz. *Optics Communications*, **431**, 255-260. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2018.08.066>
- [15] Song, Z., Wei, M., Wang, Z., Cai, G., Liu, Y. and Zhou, Y. (2019) Terahertz Absorber with Reconfigurable Bandwidth Based on Isotropic Vanadium Dioxide Metasurfaces. *IEEE Photonics Journal*, **11**, 1-7. <https://doi.org/10.1109/jphot.2019.2898981>
- [16] Wang, R., Li, L., Liu, J., Yan, F., Tian, F., Tian, H., *et al.* (2017) Triple-Band Tunable Perfect Terahertz Metamaterial

-
- Absorber with Liquid Crystal. *Optics Express*, **25**, 32280-32289. <https://doi.org/10.1364/oe.25.032280>
- [17] Sellier, A., Teperik, T.V. and de Lustrac, A. (2013) Resonant Circuit Model for Efficient Metamaterial Absorber. *Optics Express*, **21**, A997. <https://doi.org/10.1364/oe.21.00a997>
 - [18] 李珍珍. 基于磁环偶极子的双频高 Q 值电磁波超材料的设计研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
 - [19] 娄方勇. 基于超材料的高阶共振电磁吸收特性研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春理工大学物理系, 2022.
 - [20] Hu, X., Xu, G., Wen, L., Wang, H., Zhao, Y., Zhang, Y., *et al.* (2016) Metamaterial Absorber Integrated Microfluidic Terahertz Sensors. *Laser & Photonics Reviews*, **10**, 962-969. <https://doi.org/10.1002/lpor.201600064>
 - [21] Cong, L., Tan, S., Yahiaoui, R., Yan, F., Zhang, W. and Singh, R. (2015) Experimental Demonstration of Ultrasensitive Sensing with Terahertz Metamaterial Absorbers: A Comparison with the Metasurfaces. *Applied Physics Letters*, **106**, Article ID: 031107. <https://doi.org/10.1063/1.4906109>
 - [22] Yahiaoui, R., Tan, S., Cong, L., Singh, R., Yan, F. and Zhang, W. (2015) Multispectral Terahertz Sensing with Highly Flexible Ultrathin Metamaterial Absorber. *Journal of Applied Physics*, **118**, Article ID: 083103. <https://doi.org/10.1063/1.4929449>
 - [23] Yahiaoui, R., Strikwerda, A.C. and Jepsen, P.U. (2016) Terahertz Plasmonic Structure with Enhanced Sensing Capabilities. *IEEE Sensors Journal*, **16**, 2484-2488. <https://doi.org/10.1109/jsen.2016.2521708>
 - [24] Al-Naib, I. (2017) Biomedical Sensing with Conductively Coupled Terahertz Metamaterial Resonators. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **23**, 1-5. <https://doi.org/10.1109/jstqe.2016.2629665>
 - [25] Meng, K., Park, S.J., Burnett, A.D., Gill, T., Wood, C.D., Rosamond, M., *et al.* (2019) Increasing the Sensitivity of Terahertz Split Ring Resonator Metamaterials for Dielectric Sensing by Localized Substrate Etching. *Optics Express*, **27**, 23164-23172. <https://doi.org/10.1364/oe.27.023164>