

基于狄拉克半金属纳米线的太赫兹可调 七波段完美吸收器的模拟仿真*

卢文强^{1) #} 易颖婷^{2) #} 宋前举^{1) †} 周自刚¹⁾

易有根²⁾ 曾庆栋³⁾ 易早^{1) 4) ‡}

1) (西南科技大学数理学院, 绵阳 621010)

2) (中南大学物理学院, 长沙 410083)

3) (湖北工程学院物理与电子信息工程学院, 孝感 432000)

4) (吉首大学化学化工学院, 吉首 416000)

(2024 年 10 月 29 日收到; 2024 年 12 月 10 日收到修改稿)

设计了一种高灵敏度、高品质因子、高品质因数、高频探测、双固定功能的太赫兹可调完美吸收器. 该吸收器可实现 4—14.5 THz 范围内 7 个波段的完美吸收. 在进行结构设计时将线阵结构的参数与周期进行了关联. 通过计算吸收器的相对阻抗来对器件宏观层面的电磁进行解释, 并通过分析共振频率点的表面电场和磁场分布, 来分析该器件的物理机制. 计算了 7 个共振频点的品质因子 Q , 其中最大 Q 值为 219.41. 通过改变外部折射率, 该吸收器的灵敏度和品质因数数值最大可达 5421.43 GHz/RIU 和 35.204 RIU⁻¹. 通过讨论关键参数对器件的影响, 得出该器件可实现双固定性能的选择、七波段吸收以及全波段反射. 通过改变狄拉克半金属的费米能级, 证明该吸收器具有良好的动态调节能力. 通过改变外部电磁波的入射角发现该器件在中低频段具有良好的稳定性, 但在高频段受外部入射角影响较大. 本文所提出的吸收器在成像、探测、检测等领域具有巨大的应用潜力, 相关工作对光电器件的设计提供了思路.

关键词: 超材料, 太赫兹, 狄拉克半金属, 电磁多频吸收, Fano 谐振, 可调

PACS: 41.20.Jb, 78.20.Ci, 42.70.Qs

DOI: 10.7498/aps.74.20241516

CSTR: 32037.14.aps.74.20241516

1 引言

太赫兹波是介于微波与红外波之间, 频率范围是在 0.1—10 THz 波段的电磁波^[1–3]. 迄今为止, 相对于其他波段, 研究者们对于太赫兹波段的研究较为有限, 对应太赫兹器件研究也不如其他波段^[4–6]. 所以, 对于发展太赫兹波段的器件研究依旧是时代

所需. 近年来, 诸多太赫兹器件应运而生, 包括太赫兹探测器、太赫兹传输器以及太赫兹吸收器等^[7–9]. 这些太赫兹器件在通信、探测、医学成像、国家安全等领域都具有非常大的应用潜力^[10–12]. 但是, 传统材料在应用到太赫兹器件的时候, 其劣势非常明显. 尽管有少部分材料可以通过构筑谐振腔体来实现对太赫兹波的吸收, 但其作用效果却总不明显^[13,14]. 太赫兹吸收器的工作原理基于不同材料与太赫兹

* 国家自然科学基金 (批准号: 12204388, 12074151) 和四川省科学技术厅科研基金 (批准号: 2022NSFSC1804) 资助的课题.

同等贡献作者.

† 通信作者. E-mail: qjsong@swust.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: yizaomy@swust.edu.cn

辐射的相互作用. 常见的吸收机制包括: 电导吸收、带隙吸收、界面吸收与共振吸收. 对于共振吸收来说, 在特殊材料或结构中, 当太赫兹波的频率与材料或器件的固有频率相匹配时, 会发生共振吸收. 这种共振吸收通常出现在具有周期性结构 (如表面等离激元、超表面) 的材料中. 而传统金属材料往往面临不可调节性的问题, 因此所设计的太赫兹器件发挥的作用单一, 没有多种用途, 这极大地限制了太赫兹器件的发展.

作为一种人工自主设计结构的材料, 超材料为解决上述问题提供了一种有效且可行的方案. 自2000年超材料被成功报道出来后, 目前, 超材料已被广泛地应用在电磁学领域 [15–17]. 由于自身结构的特殊性, 超材料具备自然材料所不具备的诸多特性, 例如负折射率、可动态调控、完美吸收等 [18,19]. 2008年, Landy 等 [20] 设计出第一个太赫兹波段的超材料吸收器, 其表现出良好的吸收性能. 目前, 采用超材料来构筑的太赫兹波吸收器成为大家的研究热点 [21,22]. 其中, 由于其特殊的传感潜力, 窄带超材料吸收器得到了广泛研究.

狄拉克半金属 (BDS) 的费米能级具有线性色散关系, 类似于狄拉克费米子的色散关系 [23,24]. BDS 的介电常数可以通过改变费米能级来控制, 而费米能级可以通过化学掺杂来实现. 此外, 由于晶体对称性保护作用, BDS 具有很高的载流子迁移率. Borisenko 等 [25] 在他们的 Cd_3As_2 实验中展示了 BDS 的优越性能. 基于 BDS 的吸收器器件, 具有优越的传感性能 [26–28].

本文提出了一种基于 BDS 的七波段完美吸收器. 所设计的结构是 BDS-介质-金属的三层结构. 该吸收器可实现 4—14.5 THz 范围内 $f_1 = 5.032$ THz (84.43%), $f_2 = 5.859$ THz (96.23%), $f_3 = 7.674$ THz (91.36%), $f_4 = 9.654$ THz (99.02%), $f_5 = 11.656$ THz (93.84%), $f_6 = 12.514$ THz (98.47%), $f_7 = 14.01$ THz (97.32%) 7 个波段的完美吸收. 通过阻抗匹配理论证实了这一结果, 并通过分析 7 个频点的电场和磁场得到吸收器的物理机制. 探究了器件吸收峰的品质因子和灵敏度, 得到每个吸收峰的品质因数. 讨论了关键的结构参数对器件吸收率的影响. 通过外加偏置电压以及化学掺杂等手段改变 BDS 的费米能级, 实现吸收器的动态调节. 最后, 研究了外部入射的电磁波的角度对吸收率的影响, 发现中低频段的吸收可用稳定到 50° 之前, 但在高频段的吸收

只能稳定到 20° .

2 模型与计算方法

本文所提出完美吸收器的结构及具体参数如图 1 所示. 从图 1 可知, 该器件有 3 层结构. 它的底部由金 (Au) 薄膜组成, 其厚度 $H_1 = 0.5 \mu\text{m}$. 中间采用了无损的二氧化硅 (SiO_2) 作为介质层, 其介电常数 $\varepsilon_{\text{SiO}_2} = 2.13$, 厚度 $H_2 = 17.0 \mu\text{m}$. 顶部采用的是 BDS 材料, 我们将其设计成线阵结构. 纳米线 BDS 的半径为 $R = 2.1 \mu\text{m}$, 线阵中心的差值 $W = 6.3 \mu\text{m}$. R 和 W 是与周期有关的参数, 即 $R_1 = P/10$, $W = 3R_1$. 周期 $P_x = P_y = 2P = 42 \mu\text{m}$, $P = 21 \mu\text{m}$. 线阵在 y 方向的长度为 $L = 37.8 \mu\text{m}$, 其值也与 P 相关, $L = KP/10$, 其中 K 表示权重, $K = 9$. 这样设置线阵的参数有利于我们结构的稳定, 通过改变半周期 P 与权重 K 的值的大小, 可以调整微结构之间的比例关系. 上述的这些参数的设定可以使得我们所提出的吸收器在 4—14.5 THz 波段实现良好的电磁响应.

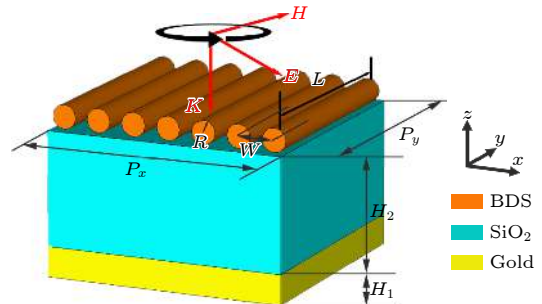


图 1 吸收器的单元结构组成及其结构参数

Fig. 1. Unit structure of the absorber and its structural parameters.

本文使用 CST 仿真软件, 并基于 FDID 算法进行了模拟仿真. 通过在 X 和 Y 方向设置周期性的边界条件, 在 Z 方向上设置开放的边界条件, 让电磁波沿 Z 轴的负方向正入射到该吸收器的表面 [29–31]. 我们利用单个周期单元实现对全部周期的仿真, 在保证结果正确的情况下, 加快了计算速度, 得到 S 参数. 利用 S 参数, 分别计算了吸收率 (A) 和传输率 (T), 其中, $A = 1 - R - T$, 其中 R 为反射率, $R = |S_{11}|^2$, 而传输率 $T = |S_{21}|^2$. 由于底部 Au 的厚度远大于 THz 波对 Au 的趋肤深度, 可以认为传输接近于 0, 因此, 该吸收器的吸收率可以简化为 $A = 1 - R$ [32,33].

本吸收器的金属膜衬底可以通过沉积工艺实现,接着可利用化学蒸汽法形成 SiO_2 层. 周期性阵列可以通过自组装方法实现. 之前关于单层阵列的金属纳米线的自组装的报道具有制造可行性 [34]. 例如, 导电纳米线可以通过施加交变电场进行自组装 [35]. 此外, 利用嵌段共聚物, 可以实现介电圆柱形谐振器从垂直方向到平行排列的方向转变 [36]. 而金属辅助化学刻蚀和组装技术可以为纳米结构引入新的制造方法 [37].

利用随机相位近似理论 (RPA) 获得 BDS 的复导电率, BDS 的动态导电率表示为 [23]

$$\text{Re}\{\sigma(\Omega)\} = \frac{e^2}{h} \frac{gk_F}{24\pi} \Omega G(\Omega/2), \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{Im}\{\sigma(\Omega)\} = & \frac{e^2}{h} \frac{gk_F}{24\pi^2} \left\{ \frac{4}{\Omega} \left[1 + \frac{\pi^2}{3} \left(\frac{T}{E_F} \right)^2 \right] \right. \\ & \left. + 8\Omega \int_0^{\varepsilon_c} \left[\frac{G(\varepsilon) - G(\Omega/2)}{\Omega^2 - 4\varepsilon^2} \right] \varepsilon d\varepsilon \right\}, \quad (2) \end{aligned}$$

式中, $G(E) = n(-E) - n(E)$, 其中 $n(E)$ 为费米分布函数; $\Omega = \hbar\omega/E_F + i\hbar\tau - 1/E_F$; $k_F = E_F/(\hbar v_F)$ 为费米动量, $v_F \approx 10^6$ m/s 表示费米速度; $\varepsilon = E/E_F$, $\varepsilon_c = E_c/E_F$ (E_c 为狄拉克谱, 不是线性的截止能量); 简并因子 $g = 40$. 在带电子跃迁的情况下, 可以通过使用双带模型来获得 BDS 的介电常数 [24]:

$$\varepsilon = \varepsilon_b + \frac{i\sigma}{\omega\varepsilon_0}, \quad (3)$$

式中, ε_0 为真空介电常数, $\varepsilon_b = 1$ 为有效背景介电常数. 将 (1) 式和 (2) 式代入 (3) 式, 得到不同费米能级下 BDS 介电常数实部和虚部随频率的变化, 如图 2 所示.

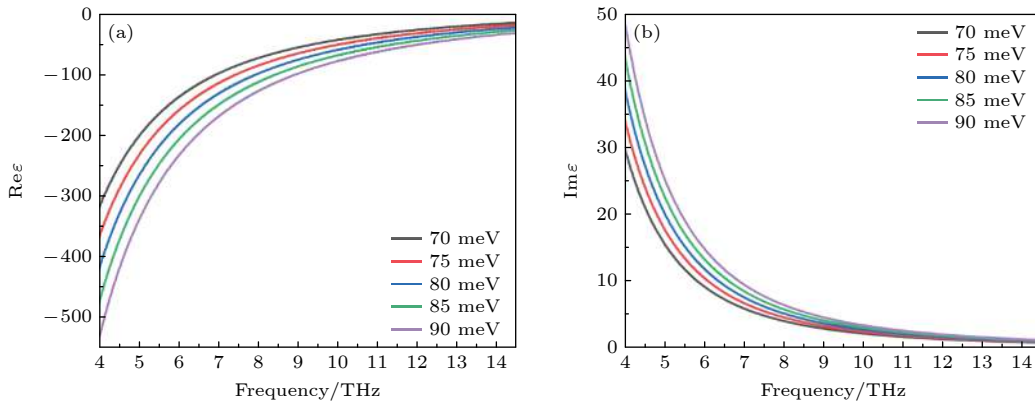


图 2 不同费米能级下 BDS 介电常数的实部 (a) 和虚部 (b) 随频率的变化

Fig. 2. Variations of real part (a) and imaginary part (b) of the permittivity of BDS with frequency at different Fermi levels.

3 结果与讨论

通过器件结构参数优化, 得到完美吸收器在 4—14.5 THz 范围内的特征光谱, 如图 3(a) 所示. 该吸收器可实现在 $f_1 = 5.032$ THz, $f_2 = 5.859$ THz, $f_3 = 7.674$ THz, $f_4 = 9.654$ THz, $f_5 = 11.656$ THz, $f_6 = 12.514$ THz, $f_7 = 14.01$ THz 一共 7 个频率点的高吸收. 从图 3(a) 可以看到, 其中有 6 个频率点的吸收率都超过了 90%. 这里 f_1 处的吸收率为 84.43%, f_2 处的吸收率为 96.23%, f_3 处的吸收率为 91.36%, f_4 处的吸收率为 99.02%, f_5 处的吸收率为 93.84%, f_6 处的吸收率为 98.47%, f_7 处的吸收率为 97.32%. 该结果说明该吸收器对外部正入射的电磁波具有良好的特性响应. 此外, 图 1 表明该器件的结构并不是旋转对称的, 所以可以预测到对于 TE 和 TM 两种极化模式下的光谱图并不一致. 说明该器件具有极化相干性.

为了解释上述结果, 先从宏观电磁学的层面, 利用阻抗匹配理论对其进行分析. 相对阻抗 Z 的表达式为 [38,39]

$$Z = \pm \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}}. \quad (4)$$

如图 3(b) 所示, 通过参数反演给出了该吸收器在 4—14.5 THz 范围内相对阻抗的实部和虚部曲线. 根据阻抗匹配理论, 当吸收器的等效阻抗与自由空间的阻抗 Z_0 相匹配时, 吸收器可以表现出良好的电磁响应, 这里 $Z_0 = 376.7 \Omega$. 此时吸收器的相对阻抗 Z 应等于 1. 从图 3(b) 可以观察到, 在 7 个共振频率点处, 吸收器的相对阻抗的实部靠近 1,

虚部靠近 0. 这表明该吸收器在这 7 个频率点处达到临界耦合条件, 系统的反射被抑制, 从而显示出强电磁吸收特性^[40]. 图 3(b) 的理论推导与图 3(a) 的仿真结果均表明在这 7 个频率点发生完美吸收.

为了进一步说明该吸收器背后的物理机理, 如图 4 和图 5 所示, 通过添加场监视器分别探究了该吸收器在 7 个频率点处的超材料表面电场和整体的磁场分布情况. 图 4 展示了电场能量聚集的区域, 表征共振强度的分布情况. 而图 5 则展示出磁能分布, 表征了能量的变化趋势. 图 4(a)–(g) 给出了上述 7 个波段处顶部电场分布情况. 从 f_1 – f_7 的表面电场分布情况可以发现一个统一的规律, 电场主要分布在 BDS 线阵结构的表面, 尤其是在在

y 方向上的 BDS 线阵的端面处, 电场更加集中. 这一现象可利用 Fano 共振的等离子体来进行理解^[41,42]. 7 个频率点的电磁波入射到器件的表面激发了等离子体. 并在此区域发生了强烈的 Fano 共振, 入射电磁波的能量被转化成微结构表面的等离子体振动能量, 等离子体 Fano 共振具有较窄的光谱线宽, 所以我们才能看到电场在该区域高度集中, 吸收光谱的线宽较窄^[43]. 同时, 电场分布的特性也表明共振吸收是沿着纵向方向激发的. 此外, 还可以观察到部分电场集中于 BDS 线阵的间隔区域, 电场同样集中于相邻线阵的边缘处. 这很明显是偶极性等离子体共振和相邻的等离子体的近场耦合效应的表现形式. 特别地, f_4 相对于 f_1 而言,

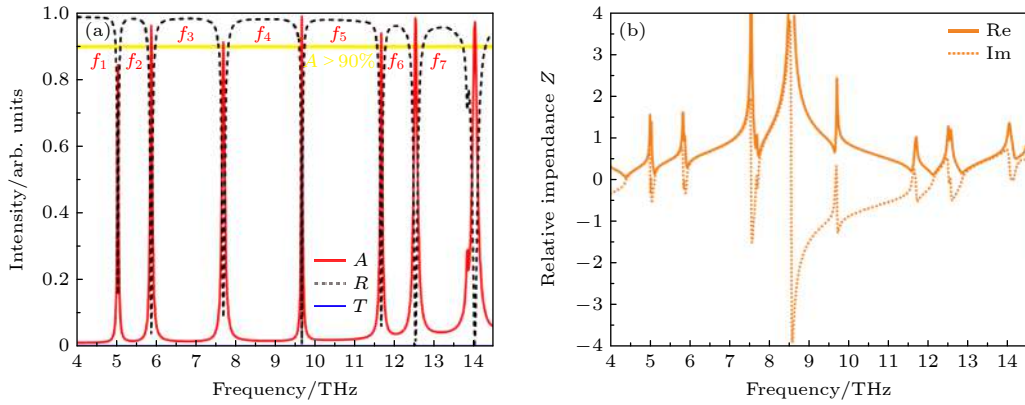


图 3 (a) 吸收器在 4–14.5 THz 范围内的特性曲线; (b) 吸收器在其工作区间的相对阻抗 (实部和虚部) 示意图

Fig. 3. (a) Characteristic curves of the absorber in the range of 4–14.5 THz; (b) diagram of the relative impedance (real and imaginary parts) of the absorber in its operating interval.

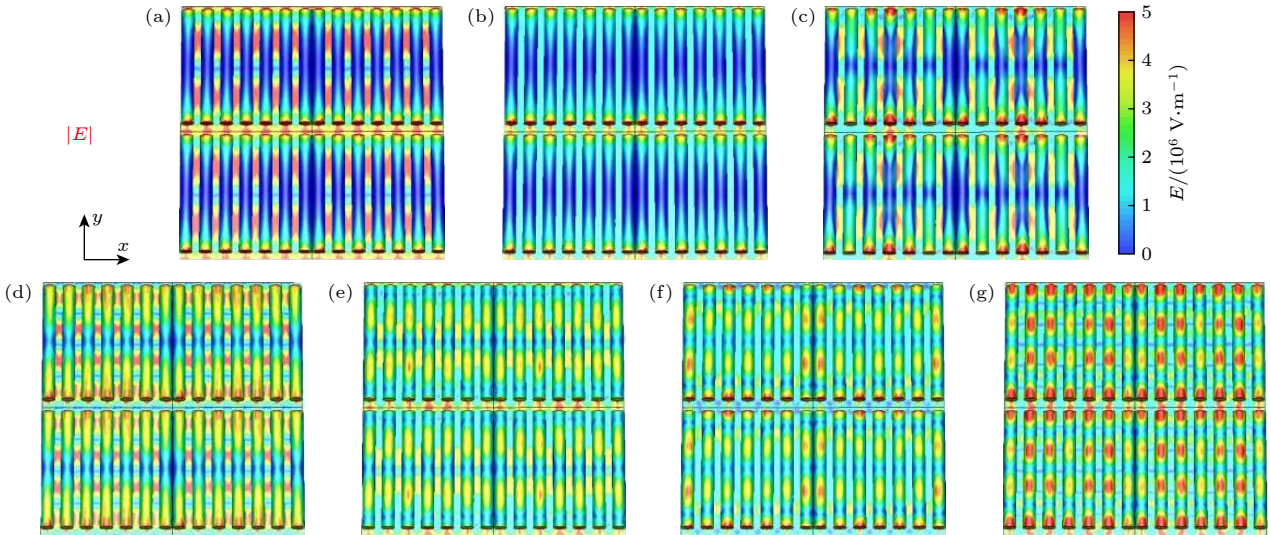


图 4 吸收器在不同频率处的电场分布 (a) $f_1 = 5.032$ THz; (b) $f_2 = 5.859$ THz; (c) $f_3 = 7.674$ THz; (d) $f_4 = 9.654$ THz; (e) $f_5 = 11.656$ THz; (f) $f_6 = 12.514$ THz; (g) $f_7 = 14.01$ THz

Fig. 4. Electric field distribution of absorber at different frequencies: (a) $f_1 = 5.032$ THz; (b) $f_2 = 5.859$ THz; (c) $f_3 = 7.674$ THz; (d) $f_4 = 9.654$ THz; (e) $f_5 = 11.656$ THz; (f) $f_6 = 12.514$ THz; (g) $f_7 = 14.01$ THz.

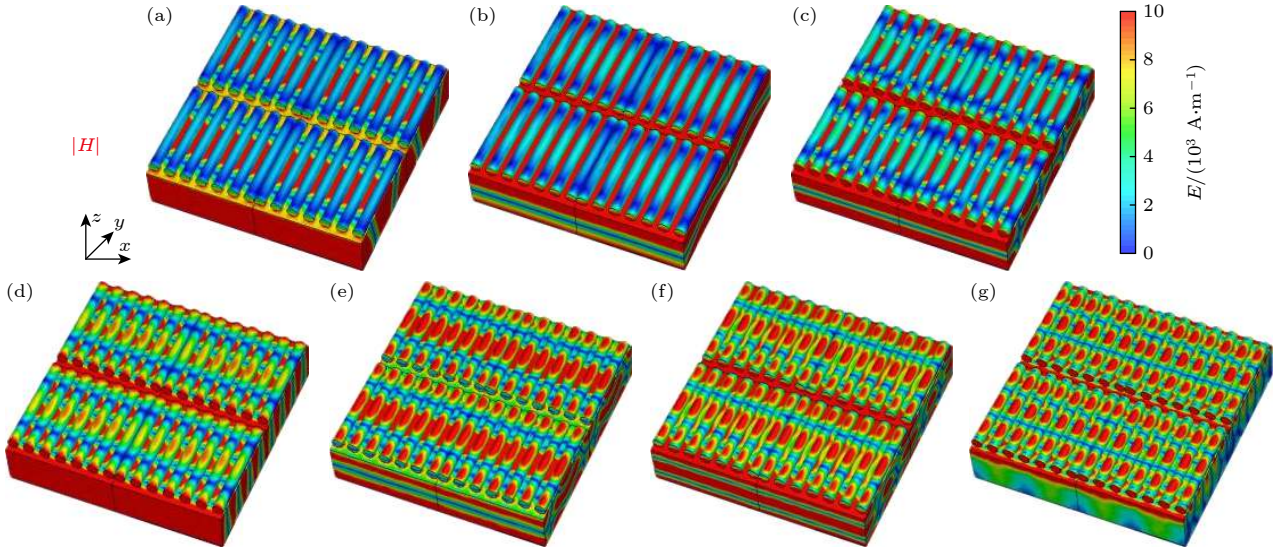


图 5 吸收器在不同频率处的磁场分布 (a) $f_1 = 5.032$ THz; (b) $f_2 = 5.859$ THz; (c) $f_3 = 7.674$ THz; (d) $f_4 = 9.654$ THz; (e) $f_5 = 11.656$ THz; (f) $f_6 = 12.514$ THz; (g) $f_7 = 14.01$ THz

Fig. 5. Magnetic field distribution of absorber at different frequencies: (a) $f_1 = 5.032$ THz; (b) $f_2 = 5.859$ THz; (c) $f_3 = 7.674$ THz; (d) $f_4 = 9.654$ THz; (e) $f_5 = 11.656$ THz; (f) $f_6 = 12.514$ THz; (g) $f_7 = 14.01$ THz.

耦合效益最为强烈且集中, 这也是 f_4 吸收率最高且峰值最窄的原因. 而 f_7 则是偶极性等离子体共振最为强烈.

接着又探究了该吸收器在 7 个共振频率点处的磁场分布, 如图 5(a)–(g) 所示. 当观察 y - z 截面处的磁场分布时, 可以看出当电磁波正入射到吸收器上时, 电磁波将通过线阵结构之间的缝隙进入到吸收器中间的 SiO_2 介质层中. 于是底部的 Au 和顶部的 BDS 就会形成法布里-珀罗谐振腔^[44,45]. 电磁波在其中不断地来回反射, 电磁波的能量由此被消耗掉. 此外可以观察到在线阵的顶部存在磁能的聚集, 顶部磁场的强度分布也证实了吸收是由顶部的 Fano 共振引起的. 同时证实了共振所导致的吸收是线阵的纵向特性. 我们还可以观察到有一部分磁能被限制在 BDS 的内部. 这是因为线阵是存在间隙的, 腔内反射的能量与吸收器周期边缘入射的能量相互耦合使得能量不再被消耗于介质层内, 而部分被分散到 BDS 中. 如图 5 所示, 随着频率的增大, 电磁波的能量会随着变大, Fano 共振以及耦合的程度也会加深.

品质因子 (Q 值) 是谐振模式电磁存储能力的一个重要评价指标, Q 值越大往往代表着吸收带宽越小, 探测更加灵敏. Q 值的表达式为^[46,47]

$$Q = \frac{f_0}{\text{FWHM}}, \quad (5)$$

式中 FWHM 表示半峰全宽, 7 个频率点的 FWHM

值见补充材料表 S1 (online), 对应的 Q 值也如表 S1 (online) 所列. 其中 f_4 频率点处吸收峰的品质因子最大为 219.41, 这非常有利于高精度的信号聚集与探测. 本文吸收器的 Q 值与近年来类似吸收器之间的比较见表 1, 可以看出, 我们所提出的吸收器对于能量的集中和探测具有优势^[48–52].

表 1 本文所提出的吸收器的 Q 值与近年来类似吸收器之间的比较

Table 1. Comparison of the Q value of the proposed absorber with similar absorbers in recent years.

参考文献	[48]	[49]	[50]	[51]	[52]	本文
Q	55.59	73	77.89	106	154	219.41

此外, 灵敏度作为传感器的一个主要指标会影响吸收器的应用范围. 为此, 探究了吸收器的吸收率随外部折射率的变化情况, 如图 6 所示. 图 6(a) 是外部折射率分别为 1, 1.02, 1.04, 1.06, 1.08, 1.1 时吸收器的吸收峰值的变化情况. 图 6(b) 是吸收频点随外部折射率的变化情况. 当外部折射率增大时, 吸收器的 7 个吸收峰都发生了红移, 这使得吸收器具有跟随外部环境来动态调节吸收峰的能力. 图 6(c) 是 7 个吸收峰的峰值随外部折射率的变化情况. 可以看出, 在外部折射率变大时, f_1 频点处的吸收率表现出先减少后上升的趋势, 整体表现出下降的趋势; f_2 频点处的吸收率的变化趋势则与 f_1 相反; f_3 频点处的吸收率则是先下降后上升, 但

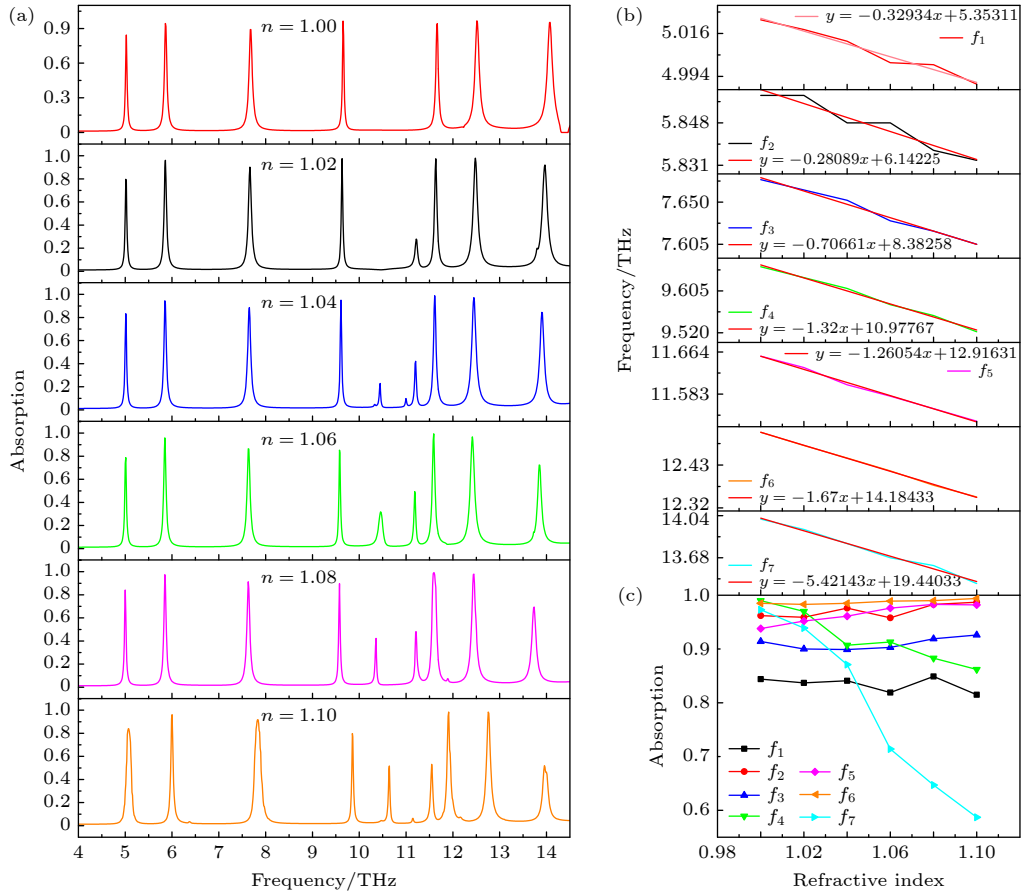


图 6 (a) 不同折射率下吸收器的吸收光谱; (b) 谐振频率点随折射率的变化; (c) 7 种模式的吸收率与折射率的对应关系

Fig. 6. (a) Absorption spectra of absorbers with different refractive indices; (b) the change of resonant frequency points with refractive index; (c) the corresponding relationship between absorptivity and refractive index of 7 modes.

整体吸收率略微升高; f_5 频点处的吸收率整体表现出上升的趋势; f_6 频点适合于固定的检测. 而 f_4 和 f_7 频点处的吸收率都表现出快速的下降; f_7 频点处吸收率的下降趋势最为强烈, 表明 f_7 受外部折射率的影响最大.

结合图 6(c) 的变化趋势和图 6(b) 拟合出的直线方程, 可以得到评判吸收器应用领域的另一个非常重要的指标——灵敏度, 其表达式如下 [53]:

$$S = \frac{\Delta f}{\Delta n}, \quad (6)$$

式中 Δf 表示频点的变化, Δn 表示外部折射率的变化. 根据图 6(b) 拟合直线的斜率可以得到 7 个频点的灵敏度, 见补充材料表 S2 (online). 同时, 在频率增加的过程中, 伴随着 Fano 共振以及耦合程度的加深, 介质层中的能量逐渐转移到器件顶部的 BDS 结构中. 其中在 f_7 频点 (14.01 THz) 处能量被分散的最为强烈, 所受影响最大. 同时当外部折射率增大时, 进入到介质层的光场减小, 这也会引起吸收率的下降.

吸收器的另一个重要指标是 FOM 值 (品质因数), 其表达式如下:

$$\text{FOM} = \frac{S}{\text{FWHM}}. \quad (7)$$

7 个频点的 FOM 值也列于补充材料表 S2 (online), 可以看到 7 种吸收模式下 FOM 值最高的是 f_7 , 达到了 35.204 RIU^{-1} . 上述结果表明, 该吸收器的特性与外部折射率紧密相关. 表 2 对比了近些年所提出的吸收器 [51, 54–57], 可以看出我们所提出的工作具有更优异的灵敏度.

表 2 本文所提出的吸收器的灵敏度与近年来类似吸收器之间的比较

Table 2. Comparison of the sensitivity of the proposed absorber with similar absorbers in recent years.

参考文献	[51]	[54]	[55]	[56]	[57]	本文
$S/(\text{GHz} \cdot \text{RIU}^{-1})$	23.8	74.43	96.2	560	2475	5421.43

以上所有讨论都是在理想结构参数下的吸收器对外部正入射的电磁波的响应状态. 但是在实际操作中, 往往会存在对结构大小和形状的制造误

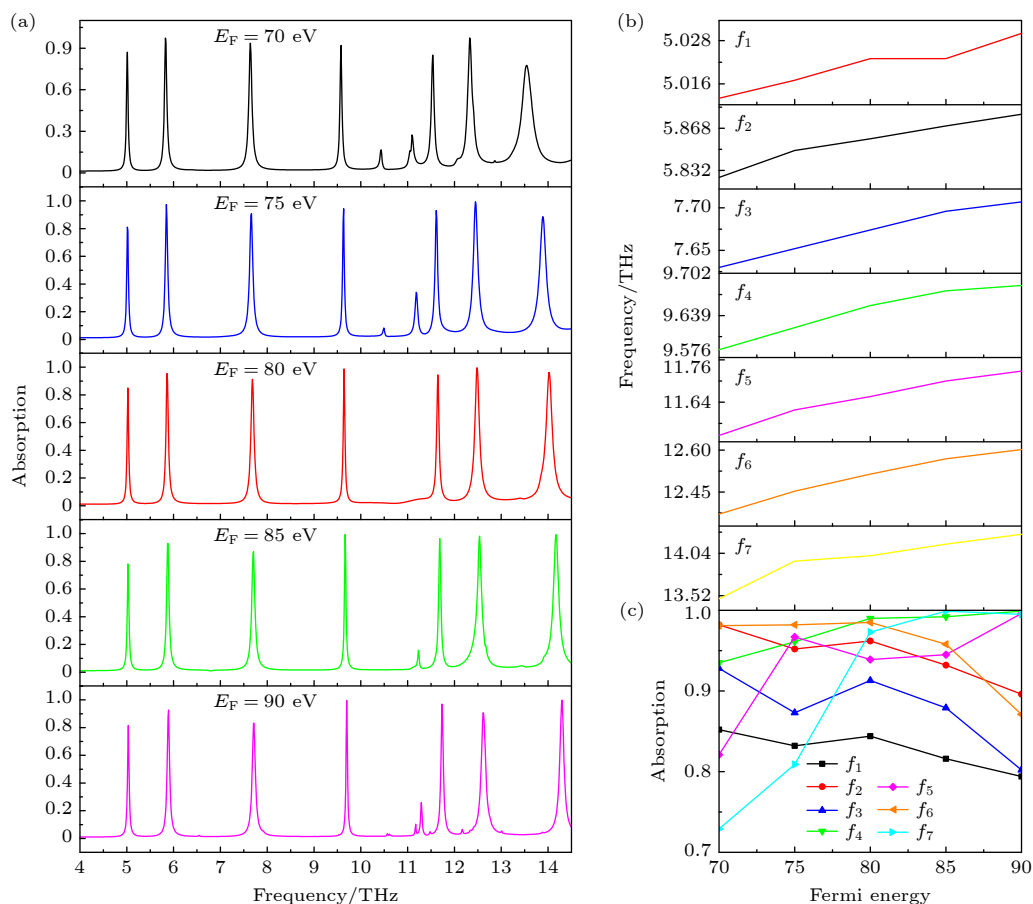


图 7 (a) 不同 BDS 的费米能对吸收率的影响; (b) 7 个共振频率点与费米能的关系; (c) 7 个共振频率点处吸收率与费米能的关系
Fig. 7. (a) Effect of Fermi energy of different Dirac semi-metals on absorption efficiency; (b) the relationship between seven resonance frequency points and Fermi energy; (c) the relationship between the absorption rate and Fermi energy at seven resonance frequency points.

差, 以及对器件是否具有动态调节能力的需求等. 因此我们所提出的吸收器是否具有制造容忍性、使用稳定性和良好的调节性将决定了吸收器的应用范围. 在其他参数保持在最佳水平的条件下, 研究每个特定参数对器件性能的影响, 具体结果见补充材料图 S1 和图 S2 ([online](#)).

BDS 的一个显著特性是可以通过调整费米能量 E_F 来改变其电学特性^[25–28]. 可以通过在吸收器表面涂上等离子体凝胶来施加外部偏压或者化学掺杂实现对 BDS 费米能的改变. 图 7 给出了不同 E_F 下器件的吸收率. 从图 7(b) 可看到, 随着 BDS 费米能的增大, 7 个频点的位置都发生了蓝移. 同时从图 7(c) 可以看到, 在这一过程中, f_4, f_5, f_7 频点处的吸收率在提升, 在 $E_F = 90$ meV 时接近于 100%, f_1 和 f_3 频点处的吸收率虽然有些下降, 但在 $E_F = 90$ meV 时仍保持着 79.4% 和 80.24% 的吸收率. 整个过程中, f_2 频点处的吸收率一直保持

在 90% 以上, f_6 频点处的吸收率先基本保持不变, 在 $E_F = 90$ meV 时降至 87.11%. 综合来看, 利用 BDS 的费米能可以很好地实现吸收器的化学调谐性能.

除了对上述各种参数的讨论外, 还需要考虑在实际应用环境中, 往往不是垂直入射的平面波, 为此, 需要探究不同入射角的电磁波对吸收效应的影响, 具体结果见补充材料图 S3 ([online](#)), 该吸收器在 0—10 THz 波段内的吸收率在 50° 之前都是很优异的.

4 总 结

本文提出了一种基于 BDS 纳米线的七波段太赫兹可调完美吸收器. 该吸收器可实现对 $f_1 = 5.032$ THz, $f_2 = 5.859$ THz, $f_3 = 7.674$ THz, $f_4 = 9.654$ THz, $f_5 = 11.656$ THz, $f_6 = 12.514$ THz, $f_7 =$

14.01 THz 一共 7 个频率点的高吸收. 先从阻抗匹配理论的角度出发证实了结果的正确性. 接着通过分析 7 个频率点处的表面电场和磁场, 利用 Fano 共振原理解释了吸收形成背后的物理机理. 计算了 7 个吸收峰的 Q 值, 最大品质因子为 219.41. 通过改变外部折射率的变化探究了吸收器的最大灵敏度为 5421.43 GHz/RIU, 最大品质因数 FOM 值为 35.204. 然后又讨论了关键参数对吸收器吸收率的影响, 说明该吸收器具有双固定性能的选择能力. 通过外部施加偏置电压或是化学掺杂改变 BDS 的费米能以实现吸收器的动态协调. 最后为了使该器件可以应用在合适的场合, 探究了外部电磁波的入射角对吸收率的影响, 表明该吸收器在中低频对外部电磁波的入射角的改变可稳定到 50° 之前, 但在高频处却只能维持到 20° . 综上所述, 本器件具备简单结构、完美吸收、适用于中低频并能够额外检测高频的特点, 在传感和光电相关器件领域具有很好的参考价值.

参考文献

- [1] Li J T, Wang G C, Yue Z, Liu J Y, Li J, Zheng C L, Zhang Y T, Zhang Y, Yao J Q 2022 *Opto-Electron Adv.* **5** 210062
- [2] Zhang X J, Lu Y Q, Chen Y F, Zhu Y Y, Zhu S N 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 148705 (in Chinese) [张学进, 陆延青, 陈延峰, 朱永元, 祝世宁 2017 物理学报 **66** 148705]
- [3] Huang R T, Li J S 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 054203 (in Chinese) [黄若彤, 李九生 2023 物理学报 **72** 054203]
- [4] Yue Z, Li J T, Li J, Zheng C L, Liu J Y, Wang G C, Xu H, Chen M Y, Zhang Y T, Zhang Y, Yao J Q 2022 *Opto-Electron Sci.* **1** 210014
- [5] Li W X, Zhao W C, Cheng S B, Yang W X, Yi Z, Li G F, Zeng L C, Li H L, Wu P H, Cai S S 2023 *Surf. Interfaces* **40** 103042
- [6] Sun W F, Wang X K, Zhang Y 2022 *Opto-Electron. Sci.* **1** 220003
- [7] Li W X, Yi Y T, Yang H, Cheng S B, Yang W X, Zhang H F, Yi Z, Yi Y G, Li H L 2023 *Commun. Theor. Phys.* **75** 045503
- [8] Chen J, Yang M S, Li Y D, Cheng D K, Guo G L, Jiang L, Zhang H T, Song X X, Ye Y X, Ren Y P, Ren X D, Zhang Y T, Yao J Q 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 247802 (in Chinese) [陈俊, 杨茂生, 李亚迪, 程登科, 郭耿亮, 蒋林, 张海婷, 宋效先, 叶云霞, 任云鹏, 任旭东, 张雅婷, 姚建铨 2019 物理学报 **68** 247802]
- [9] Zhao H, Wang X K, Liu S T, Zhang Y 2023 *Opto-Electron Adv.* **6** 220012
- [10] Song H J, Nagatsuma T 2011 *IEEE T. Thz. Sci. Techn.* **1** 256
- [11] Gigli C, Leo G 2022 *Opto-Electron Adv.* **5** 210093
- [12] Li F Y, Li Y X, Tang T T, Liao Y L, Lu Y C, Liu X Y, Wen Q Y 2022 *J. Alloys Compd.* **928** 167232
- [13] Zhu J, Xiong J Y 2023 *Measurement* **220** 113302
- [14] Cheng Y Z, Withayachumnankul W, Upadhyay A, Headland D, Nie Y, Gong R Z, Bhaskaran M, Sriram S, Abbott D 2015 *Adv. Opt. Mater.* **3** 376
- [15] Li W X, Cheng S B, Zhang H F, Yi Z, Tang B, Ma C, Wu P H, Zeng Q D, Raza R 2024 *Commun. Theor. Phys.* **76** 065701.
- [16] Chen H T, Padilla W J, Zide J M O, Gossard A C, Taylor A J, Averitt R D 2006 *Nature* **444** 597
- [17] Cao T, Lian M, Chen X Y, Mao L B, Liu K, Jia J Y, Su Y, Ren H N, Zhang S J, Xu Y H, Chen J J, Tian Z, Guo D M 2022 *Opto-Electron Sci.* **1** 210010
- [18] Shen X P, Cui T J, Ye J X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 058101 (in Chinese) [沈晓鹏, 崔铁军, 叶建祥 2012 物理学报 **61** 058101]
- [19] He M Y, Wang Q Q, Zhang H, Xiong J, Liu X P, Wang J Q 2024 *Phys. Scr.* **99** 035506
- [20] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, Smith D R, Padilla W J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 207402
- [21] Zhan Y, Yin H Y, Wang J H, Yao H W, Fan C Z 2022 *Res. Opt.* **8** 100255
- [22] Mao Y, Zhang H, Xiong J, Liu X P, Wang Q Q, Wang J Q 2024 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **57** 255111
- [23] Ullah K, Meng Y F, Sun Y, Yang Y K, Wang X J, Wang A R, Wang X R, Xiu F X, Shi Y, Wang F Q 2020 *Appl. Phys. Lett.* **117** 011102
- [24] Moll P J W, Nair N L, Helm T, Potter A C, Kimchi I, Vishwanath A, Analytis J G 2016 *Nature* **535** 266
- [25] Borisenko S, Gibson Q, Evtushinsky D, Zabolotnyy V, Büchner B, Cava R J 2014 *Phys. Rev. Lett.* **113** 027603
- [26] Cheng S B, Li W X, Zhang H F, Akhtar M N, Yi Z, Zeng Q D, Ma C, Sun T Y, Wu P H, Ahmad S 2024 *Opt. Commun.* **569** 130816
- [27] Chen Z Y, Cheng S B, Zhang H F, Yi Z, Tang B, Chen J, Zhang J G, Tang C J 2024 *Phys. Lett. A* **517** 129675
- [28] Li W X, Ma J, Zhang H F, Cheng S B, Yang W X, Yi Z, Yang H, Zhang J G, Wu X W, Wu P H 2023 *Phys. Chem. Chem. Phys.* **25** 8489
- [29] Liang S R, Cheng S B, Zhang H F, Yang W X, Yi Z, Zeng Q D, Tang B, Wu P H, Ahmad S, Sun T Y 2024 *Ceram. Int.* **50** 23611
- [30] Li W X, Zhao W C, Cheng S B, Zhang H F, Yi Z, Sun T Y, Wu P H, Zeng Q D, Raza R 2024 *Opt. Lasers Eng.* **181** 108368
- [31] Ma J, Wu P H, Li W X, Liang S R, Shangguan Q Y, Cheng S B, Tian Y H, Fu J Q, Zhang L B 2023 *Diam. Relat. Mater.* **136** 109960
- [32] Zhu J, Xiong J Y 2023 *Opt. Express* **31** 36677
- [33] Huang S L, Chen Y, Yu C C, Chen S J, Zhou Z K, Liang J, Dai W 2024 *Chinese J. Phys.* **89** 740
- [34] Wang J L, Hassan M, Liu J W, Yu S H 2018 *Adv. Mater.* **30** 1803430
- [35] Cheng C, Gonela R K, Gu Q, Haynie D T 2005 *Nano Lett.* **5** 175
- [36] Qu T, Zhao Y B, Li Z B, Wang P P, Cao S B, Xu Y W, Li Y Y, Chen A H 2016 *Nanoscale* **8** 3268
- [37] Fu R, Chen K X, Li Z L, Yu S H, Zheng G X 2022 *Opto-Electron Sci.* **1** 220011
- [38] Shangguan Q Y, Zhao Y, Song Z J, Wang J, Yang H, Chen J, Liu C, Cheng S B, Yang W X, Yi Z 2022 *Diam. Relat. Mater.* **128** 109273
- [39] Li W X, Liu Y H, Ling L, Sheng Z X, Cheng S B, Yi Z, Wu P H, Zeng Q D, Tang B, Ahmad S 2024 *Surf. Interfaces* **48** 104248
- [40] Liang S R, Xu F, Li W X, Yang W X, Cheng S B, Yang H, Chen J, Yi Z, Jiang P P 2023 *Appl. Therm. Eng.* **232** 121074

- [41] Zhang Y J, Yi Y T, Li W X, Liang S R, Ma J, Cheng S B, Yang W X, Yi Y G 2023 *Coatings* **13** 531
- [42] Huang X M, Chen Y, Chen S J, Yang K, Liang J, Zhou Z K, Dai W 2023 *Res. Phys.* **47** 106364
- [43] Zeng C, Lu H, Mao D, Du Y Q, Hua H, Zhao W, Zhao J L 2022 *Opto-Electron. Adv.* **5** 200098
- [44] Li W X, Liu M S, Cheng S B, Zhang H F, Yang W X, Yi Z, Zeng Q D, Tang B, Ahmad S, Sun T Y 2024 *Diam. Relat. Mater.* **142** 110793
- [45] Liang S R, Xu F, Yang H, Cheng S B, Yang W X, Yi Z, Song Q J, Wu P H, Chen J, Tang C J 2023 *Opt. Laser Technol.* **158** 108789
- [46] Shangguan Q Y, Chen Z, Yang H, Cheng S B, Yang W X, Yi Z, Wu X, Wang S, Yi Y, Wu P H 2022 *Sensors* **22** 6483
- [47] Shangguan Q Y, Chen H, Yang H, Liang S R, Zhang Y J, Cheng S B, Yang W X, Yi Z, Luo Y, Wu P H 2022 *Diam. Relat. Mater.* **125** 108973
- [48] Sourav A, Li Z, Huang Z, Botcha V D, Hu C, Ao J P, Peng Y, Kuo H C, Wu J, Liu X, Ang K W 2018 *Adv. Opt. Mater.* **6** 1800461
- [49] Piper J R, Liu V, Fan S 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 251110
- [50] Li H J, Qin M, Wang L L, Zhai X, Ren R Z, Hu J G 2017 *Opt. Express* **25** 31612
- [51] Wang Y L, Cheng W, Qin J Y, Han Z H 2019 *Opt. Commun.* **434** 163
- [52] Zhou K, Cheng Q, Lu L, Li B W, Song J L, Luo Z X 2020 *Opt. Express* **28** 1647
- [53] Li W X, Xu F, Cheng S B, Yang W X, Liu B, Liu M S, Yi Z, Tang B, Chen J, Sun T Y 2024 *Opt. Laser Technol.* **169** 110186
- [54] Zheng W, Fan F, Chen M, Bai J J, Chang S J 2017 *Infrared Laser Eng.* **46** 420003
- [55] Pan W, Yan Y J, Ma Y, Shen D J 2019 *Opt. Commun.* **431** 115
- [56] Lu W Q, Wu P H, Bian L, Yan J Q, Yi Z, Liu M S, Tang B, Li G F, Liu C 2024 *Opt. Laser Technol.* **174** 110650
- [57] Chen T, Jiang W J, Yin X H 2021 *Micro. Nanostructures* **154** 106898

Simulation of terahertz tunable seven-band perfect absorber based on high frequency detection function of Dirac semi-metallic nanowires^{*}

LU Wenqiang^{1) #} YI Yingting^{2) #} SONG Qianju^{1) †} ZHOU Zigang¹⁾

YI Yougen²⁾ ZENG Qingdong³⁾ YI Zao^{1) 4) ‡}

1) (*School of Mathematics and Science, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China*)

2) (*College of Physics, Central South University, Changsha 410083, China*)

3) (*School of Physics and Electronic-information Engineering, Hubei Engineering University, Xiaogan 432000, China*)

4) (*School of Chemistry and Chemical Engineering, Jishou University, Jishou 416000, China*)

(Received 29 October 2024; revised manuscript received 10 December 2024)

Abstract

In this work, a tunable perfect absorber in the terahertz range is designed based on Dirac semimetal nanowires, featuring high sensitivity, quality factor, and dual functionality. The absorber achieves perfect absorptions across seven bands in a range of 0–14.5 THz: $f_1 = 5.032$ THz (84.43%), $f_2 = 5.859$ THz (96.23%), $f_3 = 7.674$ THz (91.36%), $f_4 = 9.654$ THz (99.02%), $f_5 = 11.656$ THz (93.84%), $f_6 = 12.514$ THz (98.47%), and $f_7 = 14.01$ THz (97.32%). To ensure structural stability during design, the periodicity of the wire array structure is carefully considered. Verification of the absorber's performance is conducted through the calculation of impedance matching. The analyses of the surface electric field and magnetic field at resonance frequency elucidate the underlying physical mechanisms governing the absorber's characteristics. The values of quality factor (Q) for the seven resonance points are computed, with a maximum Q of 219.41. Further investigations by changing the external refractive index show that the maximum sensitivity value and the figure of merit (FOM) value are 5421.43 GHz/RIU and 35.204 RIU⁻¹, respectively. Then, by discussing the influence of key parameters on the device, we conclude that the device can achieve the choice of dual fixed performance. Dynamic modulation capabilities are demonstrated by changing the Dirac semimetal's Fermi energy. Additionally, by changing the incident angle of the external electromagnetic wave, it is found that the device has good stability in the medium frequency band and low frequency band, but it is greatly affected by the external incident angle in the high frequency band, thus necessitating careful consideration in practical applications. In conclusion, the proposed absorber holds significant promise for imaging, sensing, and detection applications, providing the valuable insights for designing optoelectronic devices.

Keywords: metamaterial, terahertz, Dirac semi-metal, electromagnetic multifrequency absorption, Fano resonance, tunable

PACS: 41.20.Jb, 78.20.Ci, 42.70.Qs

DOI: 10.7498/aps.74.20241516

CSTR: 32037.14.aps.74.20241516

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12204388, 12074151) and the Scientific Research Foundation of the Science and Technology Department of Sichuan Province, China (Grant No. 2022NSFSC1804).

These authors contributed equally.

† Corresponding author. E-mail: qjsong@swust.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: yizaomy@swust.edu.cn



基于狄拉克半金属纳米线的太赫兹可调七波段完美吸收器的模拟仿真

卢文强 易颖婷 宋前举 周自刚 易有根 曾庆栋 易早

Simulation of terahertz tunable seven-band perfect absorber based on high frequency detection function of Dirac semi-metallic nanowires

LU Wenqiang YI Yingting SONG Qianju ZHOU Zigang YI Yougen ZENG Qingdong YI Zao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 034101 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20241516

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241516>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于遗传算法的太赫兹多功能可重构狄拉克半金属编码超表面

Genetic algorithm based terahertz multifunctional reconfigurable Dirac semi-metallic coded metasurface

物理学报. 2024, 73(14): 144204 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240225>

基于双开口金属环的太赫兹超材料吸波体传感器

Double-opening metal ring based terahertz metamaterial absorber sensor

物理学报. 2022, 71(10): 108701 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212303>

超材料赋能先进太赫兹生物化学传感检测技术的研究进展

Research progress of metamaterials powered advanced terahertz biochemical sensing detection techniques

物理学报. 2021, 70(24): 247802 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211752>

基于相变材料的慢光和吸收可切换多功能太赫兹超材料

Switchable multifunctional terahertz metamaterial with slow-light and absorption functions based on phase change materials

物理学报. 2023, 72(8): 084202 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222336>

基于超材料复合结构的太赫兹液晶移相器

Terahertz liquid crystal phase shifter based on metamaterial composite structure

物理学报. 2022, 71(17): 178701 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212400>

基于VO₂的波束可调太赫兹天线

Beam steerable terahertz antenna based on VO₂

物理学报. 2022, 71(18): 188703 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220817>