

基于环形电磁矩超材料的可调谐太赫兹吸收器

王若星 薛喻宸 龚瑞 李立

(哈尔滨工程大学 物理与光电工程学院、纤维集成光学教育部重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 本文提出一种反向开口双金属谐振环超材料集成微流通道的可调谐太赫兹波吸收器.数值分析了超材料环形电磁矩的高效激发,讨论了环形电磁矩的共振吸收谱对微流介质层的介电参数与磁参数调控的响应.采用可电控液晶材料注入微流通道的方案,通过太赫兹透明电极施加外部电场控制液晶折射率变化,实现太赫兹超材料吸收器工作频率的大范围动态调谐.频率移动量超过 100% 的共振带宽,相对调谐量($\Delta f/f$)可高达 15%,频率调谐呈现良好的线性操作特征和近 100% 吸收率的完美吸收性能.所提出的可调谐太赫兹吸收器在太赫兹探测和微流生化传感领域具有广阔的应用前景.

关键词 环形偶极共振;太赫兹超材料;完美吸收器;液晶调谐

中图分类号 O441.4

文献标识码 A

0 引言

太赫兹吸收器能够高效吸收特定波谱的太赫兹辐射,在快速发展的太赫兹技术领域有着非常重要的应用,如太赫兹隐身、探测、成像和传感等.由于太赫兹辐射的特殊性,大多数自然材料很难与其产生强的电磁相互作用,这就导致太赫兹吸收材料的匮乏.然而,新兴的超材料技术可以创造丰富多样的人造材料,且可以人工调控电磁性质,人工亚波长结构为开发太赫兹吸收器件提供了广阔的设计空间^[1-3].人工设计的周期性谐振单元组成的超材料,可以产生许多自然界中难以获得的神奇现象,例如电磁诱导透明^[4-6]、完美吸收^[7,8]、偏振转换等^[9-11],因而得到了广泛的研究.在超材料体系中,由于电多极矩和磁多极矩的激发,通常可以产生丰富的电磁谐振模式.尤其是,一种新颖的非辐射共振模式—环形电磁矩共振,最近在人工超材料体系中得到了特别关注^[12-14].这种电磁共振模式是由特殊结构的超分子形成表面环形电流,激发反相磁偶极子,产生首尾相继的闭合磁场涡旋,因此亦称之为无极共振超材料.这种环形电磁矩在原子物理、固体物理和经典电动力学等领域有着重要的意义^[15-17].

由于环形电磁矩与自由空间的耦合较弱,且远场辐射远小于电偶极矩和磁偶极矩,在早期的电磁技术发展中,环形电磁矩的作用一直被忽略.直到最近,人工超材料被提出来可以有效放大环形电磁矩的贡献,作为多极矩展开中的一种高阶修正,环形电磁矩诱发的无极共振作用在传感方面得到了深入研究^[18].由于在自然材料中高效地激发和探测环形电磁矩是一项巨大的挑战,因此,设计人工超结构成为了目前增强环形电磁矩响应的最有效途径.关于环形电磁矩的共振响应特性,近几年出现了许多研究报道,尤其是利用其对环境变化的敏感,设计开发了多种高灵敏度的传感器件等^[12-16].需要指出的是,当前报道的绝大多数设计都是静态工作器件,不具备可调控的工作能力.与静态器件相比,可调控的环形矩共振超材料无疑是开发多功能太赫兹器件的理想选择.最近在太赫兹器件领域,Cojocari 等人于 2017 年提出了一种基于环形矩共振的太赫兹超材料设计,利用半导体电导率变化可以产生共振谱蓝移和相位可调控^[19].Gerislioglu 等人于 2018 年利用混合环形矩对激发强度的依赖性,开发了一种太赫兹频段动态等离激元调制器件^[20].随后在 2019 年,

收稿日期:2019-04-26

基金项目:国家自然科学基金项目(61875043);黑龙江省自然科学基金项目(LH2019F012) 资助

通讯作者:李立,男,汉族,博士,教授,研究方向:激光与太赫兹器件物理,E-mail:lylee_heu@hrbeu.edu.cn.

Song 等人利用环形矩共振对氧化钽电导率的依赖关系,提出了一种在太赫兹频率工作的振幅调制器件^[18].然而,利用环形电磁矩共振(即无极共振)超材料,设计开发可调谐的太赫兹完美吸收器,当前尚未有广泛的研究报道.

本文提出了一种基于环形电磁矩超材料集成微流通道的液晶可调谐太赫兹完美吸收器.数值论证了环形电磁矩的高效激发,分析了环形矩共振对微流层的介电参数和磁参数调控的响应.采取液晶材料注入微流通道的方案,通过太赫兹透明电极施加外部电场,利用电控液晶分子取向控制介质层折射率变化,实现太赫兹超材料吸收器的工作频率的动态调谐操作.

1 太赫兹吸收器设计

图 1 给出了太赫兹超材料吸收器的设计和单元晶格.在结构上,主要包括反向开口金属谐振环阵列超表面、镀制金属反射层的介质衬底、微流通道和介质隔离层.在设计上,金属环结构超表面在 x 方向和 y 方向上均呈周期性排布,形成人工超晶格模式.通过改变金属谐振环的几何尺寸参数,可以将太赫兹共振吸收带调节至实际需求的频谱区^[6].金属环结构超表面被制作在顶部介质隔离层下表面,使其置于微流通道环境中.上下介质隔离层之间可用聚酰亚胺柱来支撑形成微流通道^[21].微流通道可以注入不同电磁性质的流体介质,用来改变太赫兹吸收器的吸收峰频率与幅值.采用可变电磁参数特性的微流介质,可以实现太赫兹波吸收器的可调谐操作.例如通入液晶材料对其进行电调谐,电压控制液晶分子转向的连续变化,或者通入磁流体材料对其进行磁调谐,磁场控制磁流体分子磁化率的连续变化,均可实现吸收峰频率的连续调节.微流通道层适当调整厚度,亦可作为法布里-珀罗腔,增强入射场与介质的电磁相互作用.而且,利用超表面的阻抗匹配条件,可以最大限度的减小入射波的反射损耗^[22].衬底的金属层设计可确保入射场的完全反射,在阻抗匹配下达到极强的共振吸收作用,获得高效的太赫兹波完美吸收.

如图 1 所示,对工作在 1 THz 波段的可调谐完美吸收器,通过结构协调增益优化给出几何设计参数.人工超晶格周期 $P_x = 66 \mu\text{m}$, $P_y = 41 \mu\text{m}$.金属超分子的边长 $l_x = 50 \mu\text{m}$, $l_y = 25 \mu\text{m}$,厚度 $t_1 = 200 \text{ nm}$,谐振环宽度 $w = 2 \mu\text{m}$,开口间隙 $g = 7 \mu\text{m}$.人工超结构材料选用贵金属金,利用 Drude 模型表征其介电性质,其介电参数表示为

$$\epsilon_{Au}(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega\gamma}, \quad (1)$$

式中等离子体频率 $\omega_p = 1.37 \times 10^{16} \text{ rad/s}$,碰撞频率 $\gamma = 1.2 \times 10^{14} \text{ rad/s}$ ^[23].金超晶格彼此间距 $2a = 16 \mu\text{m}$.集成微流通道的厚度 $t_2 = 20 \mu\text{m}$,其上下盖板的介质层厚度 $t_3 = 1 \mu\text{m}$.介质隔离层选用聚甲基戊烯(TPX),一种广泛用于 THz 波段的透明有机聚合物材料,其折射率为 1.46 ^[24].所提出的器件设计具有良好的太赫兹波电磁共振吸收性能.

2 环形电磁矩共振激发

反向开口双金属环阵列的环形电磁矩激发响应与共振光谱特性,采用 Comsol Multiphysics 软件平台进行全电磁波有限元仿真.太赫兹波由上方正入射,入射波电场 E 沿金属谐振环中心导线方向.金属谐振环阵列在 x 和 y 方向上均采用连续周期性边界条件,衬底部金属反射层可视为完美电导体边界.通过求解频域中的麦克斯韦方程,获得与电磁波反射相关的 S 参数,即反射率 $R(\omega) = |S_{11}|^2$.相应地,太赫兹波的吸收率为 $A(\omega) = 1 - R(\omega)$,数值仿真分析太赫兹波的完美吸收特性.

图 2 给出了微流通道内注入非磁性流体介质时的太赫兹波吸收谱,以及环形电磁矩共振特性.介电参数为 $\epsilon_r = 1.5$, $\mu_r = 1$.图 2(a)的共振吸收谱显示,超材料吸收器在 1.15 THz 处可获得入射太赫兹波的完美吸收,吸收率几乎达到 100%.针对环形电磁矩的激发特性,图 2(b)仿真了金属谐振环的表面环形电流分布.结果表明,当电场分量平行于中心导线入射时,作用场诱导的电流将沿着反向开口的两个子环表面流动,并在两个开口子环中分别产生磁偶极子.值得注意的是,开口环的局域等离子共振决定着表面电流的方向,由

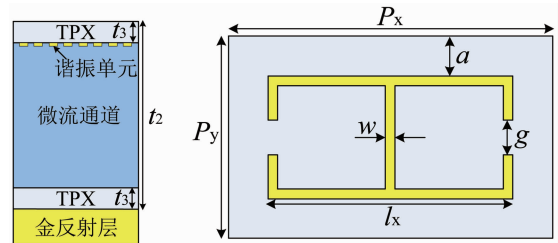


图 1 太赫兹超材料吸收器的结构图

于反向开口环的特殊结构设计,两个子环产生的磁偶极矩呈现出对称的反相分布,如图 2(c)的仿真结果所示.根据环形极化的概念,表面环形电流的反相振荡实际上抑制了磁偶极子的形成,进而产生沿 $x-z$ 面的首尾相继的环形电磁矩^[25].这将在空间形成封闭磁涡旋,激发出无极共振模式,如图 2(d)所示.激发的环形电磁矩具有独特的非辐射特性,可获得电磁场的强局域作用,增强了场与介质的相互作用,产生出丰富的物理效应,例如对环境变化的高敏感性、非互易折射、圆二色性、增强非线性磁化率产生二次谐波等,都可以通过环形电磁矩的高效激发来实现^[12, 14, 26].

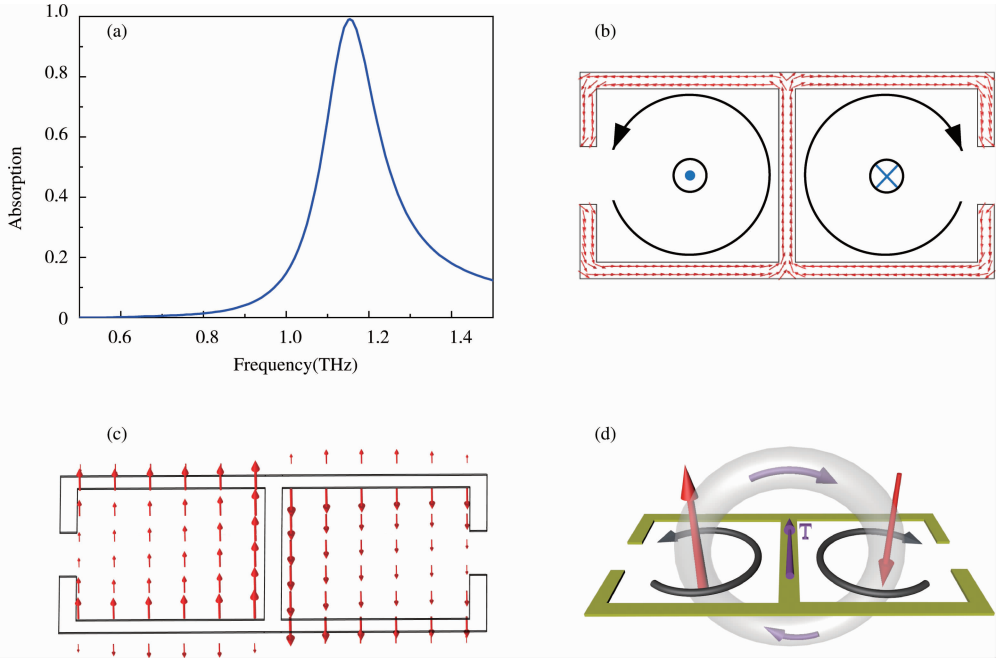


图 2 (a) 超材料吸收器的共振谱,(b)超分子的表面环形电流分布,(c)超分子在垂直表面的 z 方向激发出磁场分布,(d) 环形电磁矩的激励原理图

3 环形电磁矩共振的介电响应与磁响应

微流通道内填充介质的电磁性质变化,将会直接影响环形电磁矩的共振激发特性.图 3 仿真了微流层介质的电磁参数变化,即改变介电参数 ϵ_r 和磁导率 μ_r 对超材料吸收器的共振光谱作用.通过单参量调节方法,分别讨论介电参数与磁导率在同等变化量下,对环形共振超材料的吸收谱频率和幅值产生的影响.如图 3(a) 所示,当微流层介质的介电参数 ϵ_r 从 1.5 增加至 2 和 2.5 时,激发的环形矩共振频率将由 1.05 THz

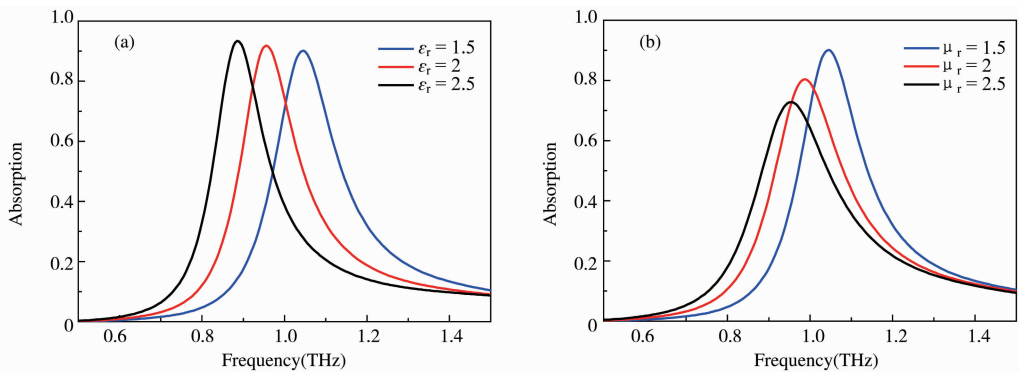


图 3 (a) 微流层介电参数的调节对环形偶极共振吸收谱的作用(磁导率 $\mu_r = 1.5$);

(b) 微流层磁导率的调节对环形偶极共振吸收谱的作用(介电参数 $\epsilon_r = 1.5$)

红移至 0.95 THz 和 0.89 THz,相应地,光谱频率敏感度为 $S = 0.16$ THz/RPU,其中 RPU (Relative permittivity unit) 代表一个介电参数单位.如图 3(b) 所示,当微流层介质的磁导率 μ_r 从 1.5 增加至 2 和 2.5 时,激发的环形偶极共振频率亦产生显著红移,由 1.04 THz 分别红移至 0.99 THz 与 0.95 THz,对应的光谱频率敏感度为 0.09 THz/MPU,其中 MPU (Magnetic permeability unit) 代表一个磁导率单位.而且由图

3 可见,当微流层介质的介电参数与磁导率改变时,伴随环形共振频率的变化,共振吸收谱的幅值也将发生明显的改变,这是由于改变电磁参数破坏了表面阻抗匹配条件造成的. 综上表明,在改变微流层的介电参数与磁导率时,介电参数对环形电磁矩的共振光谱频率可以产生更显著的调节作用.

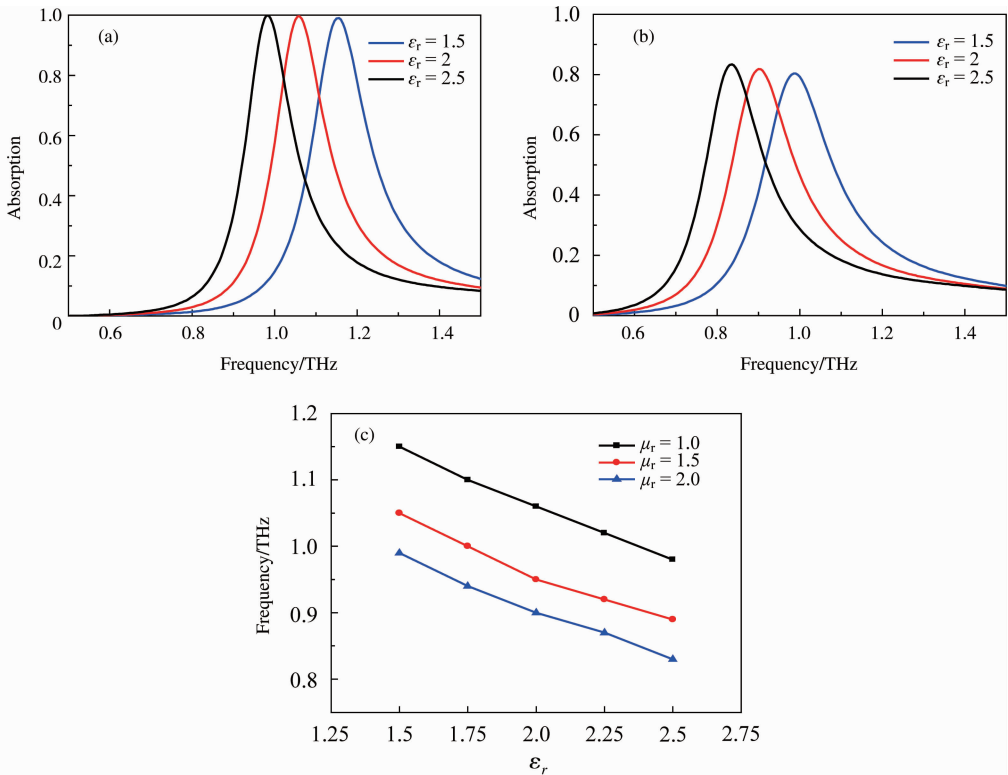


图 4 磁导率为(a) $\mu_r=1$ 和(b) $\mu_r=2$ 下, 环形电磁矩共振吸收谱随介电参数的变化结果;
(c) 不同磁导率下, 共振频率对介电参数的敏感度曲线

图 4 给出了在不同磁导率条件下, 环形电磁矩共振吸收谱对介电参数变化的敏感性分析. 如图 4(a) 所示, 当微流层介质的磁导率为 $\mu_r=1$ 时, 改变介电参数 ϵ_r 由 1.5 逐步增至 2 和 2.5 时, 环形极矩共振频率分别由 1.15 THz 红移至 1.06 THz 与 0.98 THz, 计算得到频率敏感度为 0.17 THz/RPU. 当微流层介质的磁导率为 $\mu_r=2$ 时, 如图 4(b) 所示, 改变介电参数由 1.5 逐步增至 2 和 2.5 的过程中, 环形极矩共振的激发频率将分别由 0.99 THz 红移至 0.9 THz 与 0.83 THz, 此时的频率敏感度为 0.16 THz/RPU. 这与图 3(a) 中磁导率为 $\mu_r=1.5$ 时的仿真结果几乎相同. 值得注意的是, 在 $\mu_r=2$ 时, 改变介电参数诱导了共振频率的移动, 共振吸收峰的吸收率大小基本不变, 但磁导率的增大破坏了超表面的阻抗匹配, 引起共振峰吸收率衰减, 维持在 80% 左右. 图 4(c) 给出了环形共振频率对介电参数的敏感度曲线. 在不同的磁导率条件下, 各敏感度曲线都呈现出良好的线性变化特征, 且具有几乎相同的曲线斜率, 即近似不变的敏感度. 上述分析结果表明, 微流层介质磁导率的变化和差异, 不会引起环形极矩共振频率对介电参数的敏感度变化, 即敏感度具有良好的磁变稳定性.

值得指出的是, 大多数材料的介电参数, 在外场调控 (如电控、光控、磁控、热控) 作用下, 其调节变化量有限, 难以获得大的动态变化范围, 这从一定程度上限制了太赫兹吸收器的可调光谱域. 相比之下, 铁磁性物质的磁导率可以有更大的可变范围, 甚至可以达 10^3 甚至 10^4 量级, 例如磁流体材料, 可通过控制磁流体中

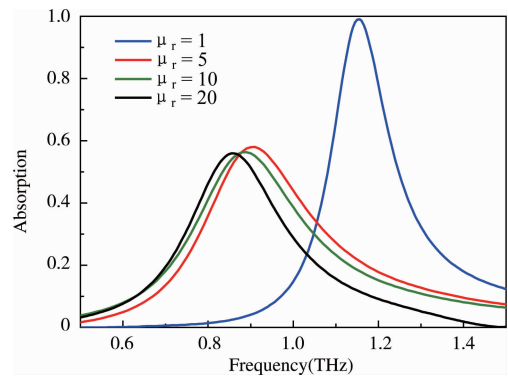


图 5 微流层介质磁导率为 $\mu_r=1, 5, 10$ 和 20 时, 太赫兹超材料吸收器的共振响应

铁磁性物质的浓度来改变磁导率, 其可调范围将会明显大于介电参数的调节量. 如图 5 所示, 当微流层介电参数为 $\epsilon_r=1.5$ 时, 改变磁导率由 $\mu_r=1$ 分别增至 $\mu_r=5, 10$ 和 20, 仿真结果表明, 分别在 0.91 THz, 0.88 THz 和 0.86 THz 谱峰处获得了环形电磁矩激发, 但是吸收峰的幅值劣化较严重. 结合图 3(b) 我们可以看

出,随着磁导率由 μ_r 的增加,谱峰红移量逐渐变小,吸收峰幅值劣化趋于平稳.相对于磁导率 $\mu_r=1$ 的情况,共振吸收峰的频移量可覆盖高达0.29 THz的光谱区域,频移量可明显超越介电参数改变所带来的共振谱移动范围.这为开发磁控太赫兹器件提供了一种可能机制.然而,与磁控器件相比,电调控器件由于具有操作方便、易于制备和集成等优点,在实际应用中具有更大的发展潜力.

4 太赫兹吸收器的液晶电调谐特性

当微流通道内注入电控液晶材料时,所提出的太赫兹超材料吸收器可以获得电调谐工作特性.混合物1825、5 CB和LCMS-107等液晶材料均适合应用在太赫兹超材料吸收器^[8, 21, 27].这里采用可电控的液晶混合物1825充满微流通道层.该类型液晶在太赫兹频段内性能优异,具有很高的双折射, $\Delta n \approx 0.4$,有利于获得大的介电参数变化量.而且,该类型液晶在工作波段0.5-2.5 THz范围内,折射率色散曲线平坦,本征损耗低($\alpha_o < 1.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^{-1}$, $\alpha_e < 2.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^{-1}$,损耗最大值发生在2 THz处),以及具有弱的二向色性.该液晶材料特别适用于小体积、可调谐和低损耗的太赫兹调制器件中^[28].而微流通道层的厚度仅约为工作波长的1/15,又因为液晶具有较低的二向色性,因此在建模过程中可将微流通道内液晶等效为均匀各项同性介质^[29].但在这里考虑了液晶介质的复折射率,其表达式为 $\tilde{n}(\lambda) = n(\lambda) + i\lambda\alpha(\lambda)/4\pi$,其折射率与液晶分子的取向直接相关,可以通过施加外部电场来控制液晶分子取向,进而电调控介电参数的变化.外控电场可以通过薄膜电极方便地施加,利用高电导率的太赫兹透明聚合物薄膜,可在微流通道的隔离层上制备电极^[30, 31].基于太赫兹波段液晶介电参数的实验测量结果^[28],在液晶折射率分别为 \tilde{n}_o 和 \tilde{n}_e 时,对环形电磁矩共振超材料的吸收光谱特性进行全电磁仿真.

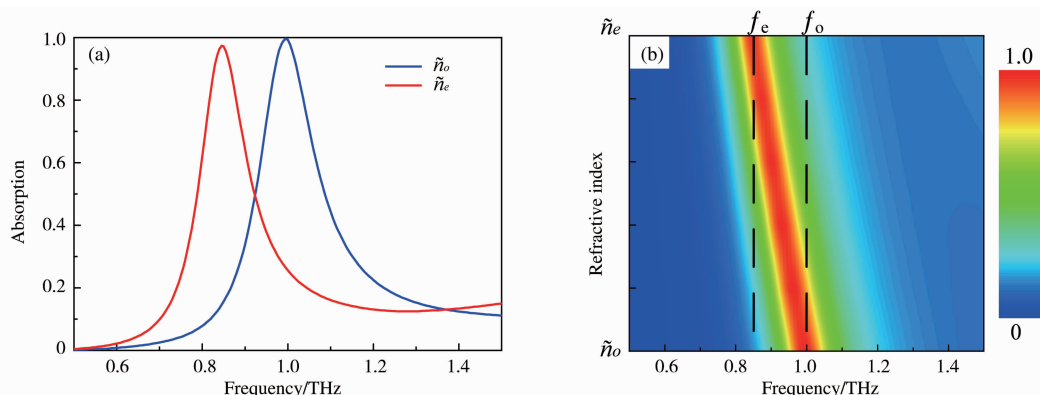


图6 (a)液晶折射率为 \tilde{n}_o 和 \tilde{n}_e 时,太赫兹超材料吸收器的共振谱响应;(b)折射率连续调谐时,太赫兹吸收率的工作频谱图

如图6(a)所示,给出了液晶折射率为 \tilde{n}_o 和 \tilde{n}_e 时,太赫兹超材料吸收器的共振谱响应.结果分析表明,通过电驱动液晶分子的极化方向,调控微流层折射率从 \tilde{n}_o 变化到 \tilde{n}_e ,将引起环形电磁矩的共振吸收频率产生显著的红移.计算表明,共振频率从 $f_o=1$ THz移动至 $f_e=0.85$ THz,大的频率移动量可超过100%的共振带宽.计算结果给出的共振频谱调谐量($\Delta f/f$)可高达15%,而且共振吸收幅值保持近100%的完美吸收效率不变.由于液晶折射率是可连续电调控的,因此基于液晶的太赫兹超材料吸收器可以实现动态的频率调谐操作.如图6(b)所示,给出了液晶折射率连续调谐时,太赫兹波吸收率的三维工作频谱图.仿真结果表明,当液晶折射率从 \tilde{n}_o 连续变化到 \tilde{n}_e 时,环形电磁矩共振的吸收峰频率可从较高频率 f_o 红移至较低频率 f_e ,如图6(b)中的标记说明.吸收频率调谐呈现出典型的线性操作特征,而且遍及整个频率调谐操作过程,太赫兹波的吸收率几乎保持近100%完美吸收特性.这一特性与基于石墨烯或半导体的可调吸收器相比^[32, 33],表现出了明显的优势,在改善频率调谐非线性和吸收率劣化问题上提供了一种可行的方案.

5 结论

本文提出了一种基于环形电磁矩超材料的可调谐太赫兹波吸收器.数值分析了在反向开口双金属谐振环超材料中的环形电磁矩的激发高效,讨论了环形电磁矩共振的介电响应与磁响应,仿真了太赫兹超材料吸收器的液晶电调谐特性.所提出的可调谐太赫兹吸收器,主要由反向开口环无极电磁共振超材料、微流通道层和金属反射层构成.仿真结果表明,环形电磁矩超材料的共振吸收谱对微流层的介电参数与磁导率变化具

有敏感响应特性,为设计电磁调控的太赫兹器件提供了可行的方案.由于介电参数变化可产生更高的频率敏感度,研究了液晶电控太赫兹吸收器的频率调谐和完美吸收特性.在微流层填充液晶材料,利用液晶折射率的可连续调谐性质,获得了太赫兹共振吸收频率的大范围动态调谐,频率移动量超过 100% 的共振带宽,频谱调谐量($\Delta f/f$)高达 15%. 频率调谐操作呈现出良好的线性特征和近 100% 吸收率的完美吸收特性,这在太赫兹波探测和微流生化传感技术领域具有潜在的应用前景.

参 考 文 献

- [1] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber [J]. *Phys Rev Lett*, 2008, 100(20): 207402.
- [2] 岳春云, 姜夕梅, 房文敬, 等. 非周期高透射亚波长会聚光栅的研究[J]. *聊城大学学报(自然科学版)*, 2018, 31(4): 13-17.
- [3] 孟现柱, 王明红, 孙桂芳, 等. 基于微型谐振腔的史密斯-帕塞尔自由电子激光[J]. *聊城大学学报(自然科学版)*, 2018, 31(4): 48-51.
- [4] Li Haiming, Liu Shaobin, Liu Siyuan, et al. Low-loss metamaterial electromagnetically induced transparency based on electric toroidal dipolar response [J]. *Appl Phys Lett*, 2015, 106(8): 083511.
- [5] Xu Quan, Su Xiaoqiang, Ouyang Chunmei, et al. Frequency-agile electromagnetically induced transparency analogue in terahertz metamaterials [J]. *Opt Lett*, 2016, 41(19): 4562-4565.
- [6] Guo Zhiwei, Jiang Haitao, Li Yunhui, et al. Enhancement of electromagnetically induced transparency in metamaterials using long range coupling mediated by a hyperbolic material [J]. *Opt Express*, 2018, 26(2): 627-641.
- [7] Yao Gang, Ling Furi, Yue Jin, et al. Dual-band tunable perfect metamaterial absorber in the THz range [J]. *Opt Express*, 2016, 24(2): 1518-1527.
- [8] Wang Ruoxing, Li Li, Liu Jianlong, et al. Triple-band tunable perfect terahertz metamaterial absorber with liquid crystal [J]. *Opt Express*, 2017, 25(26): 32280-32289.
- [9] Grady N K, Heyes J E, Chowdhury D R, et al. Terahertz metamaterials for linear polarization conversion and anomalous refraction [J]. *Science*, 2013, 340(6138): 1304-1307.
- [10] Huang Chengping. Efficient and broadband polarization conversion with the coupled metasurfaces [J]. *Opt Express*, 2015, 23(25): 32015-32024.
- [11] Wang Ruoxing, Li Li, Tian Hao, et al. Full telecomband covered half-wave meta-reflectarray for efficient circular polarization conversion [J]. *Opt Commun*, 2018, 427: 469-476.
- [12] Kaelberer T, Fedotov V A, Papasimakis N, et al. Toroidal dipolar response in a metamaterial [J]. *Science*, 2010, 330(6010): 1510-1512.
- [13] Dong Zhenggao, Ni Peigen, Zhu Jie, et al. Toroidal dipole response in a multifold double-ring metamaterial [J]. *Opt Express*, 2012, 20(12): 13065-13070.
- [14] Papasimakis N, Fedotov V A, Savinov V, et al. Electromagnetic toroidal excitations in matter and free space [J]. *Nat Mater*, 2016, 15(3): 263-271.
- [15] Ceulemans A, Chibotaru L F, Fowler P W. Molecular anapole moments [J]. *Phys Rev Lett*, 1998, 80(9): 1861.
- [16] Dubovik V M, Tugushev V V. Toroid moments in electrodynamics and solid-state physics [J]. *Phys Rep*, 1990, 187(4): 145-202.
- [17] Afanasiev G. Simplest sources of electromagnetic fields as a tool for testing the reciprocity-like theorems [J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2001, 34(4): 539-559.
- [18] Song Zhengyong, Deng Yide, Zhou Yuanguo, et al. Terahertz toroidal metamaterial with tunable properties [J]. *Opt Express*, 2019, 27(4): 5792-5797.
- [19] Cojocari M V, Schegoleva K I, Basharin A A. Blueshift and phase tunability in planar THz metamaterials: the role of losses and toroidal dipole contribution [J]. *Opt Lett*, 2017, 42(9): 1700-1703.
- [20] Gerislioglu B, Ahmadvand A, Pala N. Tunable plasmonic toroidal terahertz metamodulator [J]. *Phys Rev B*, 2018, 97(16): 161405(R).
- [21] Shrekenhamer D, Chen W C, W J Padilla. Liquid crystal tunable metamaterial absorber [J]. *Phys Rev Lett*, 2013, 110(17): 177403.
- [22] Zheng Guoxin, Mühlenbernd H, Kenney M, et al. Metasurface holograms reaching 80% efficiency [J]. *Nat Nanotechnol*, 2015, 10(4): 308-312.
- [23] Ding Fei, Wang Zhuoxian, He Sailing, et al. Broadband high-efficiency half-wave plate: A supercell-based plasmonic metasurface approach [J]. *ACS Nano*, 2015, 9(4): 4111-4119.
- [24] Sajadi M, Wolf M, Kampfrath T. Terahertz-field-induced optical birefringence in common window and substrate materials [J]. *Opt Express*, 2015, 23(22): 28985-28992.
- [25] Cong Longqing, Srivastava Y K, Singh R. Tailoring the multipoles in THz toroidal metamaterials [J]. *Appl Phys Lett*, 2017, 111(8): 081108.
- [26] Chen Xu, Fan Wenhui. Study of the interaction between graphene and planar terahertz metamaterial with toroidal dipolar resonance [J]. *Opt Lett*, 2017, 42(10): 2034-2037.

- [27] Wang Jing, Tian Hao, Wang Yu, et al. Liquid crystal terahertz modulator with plasmon-induced transparency metamaterial [J]. *Opt Express*, 2018, 26(5): 5769-5776.
- [28] Reuter M, Vieweg N, Fischer B M, et al. Highly birefringent low-loss liquid crystals for terahertz applications [J]. *APL Mater*, 2013, 1(1): 012107.
- [29] Isic G, Vasic B, Zografopoulos D C, et al. Electrically tunable critically coupled terahertz metamaterial absorber based on nematic liquid crystals [J]. *Phys Rev Appl*, 2015, 3(6): 064007.
- [30] Du Yan, Tian Hao, Cui Xuan, et al. Electrically tunable liquid crystal terahertz phase shifter driven by transparent polymer electrodes [J]. *J Mater Chem C*, 2016, 4(19): 4138-4142.
- [31] Du Yan, Tian Hao, Cui Xuan, et al. Super terahertz transparent electrodes [J]. *Opt Express*, 2016, 24(6): 6359-6366.
- [32] Ke Shaolin, Wang Bing, Huang He, et al. Plasmonic absorption enhancement in periodic cross-shaped graphene arrays [J]. *Opt Express*, 2015, 23(7): 8888-8900.
- [33] Seren H R, Zhang Jingdi, Keiser G R, et al. Nonlinear terahertz devices utilizing semiconducting plasmonic metamaterials [J]. *Light Sci Appl*, 2016, 5: e16078.

Tunable Terahertz Absorber based on Toroidal Resonance Metamaterial

WANG Ruo-xing XUE Yu-chen GONG Rui LI Li

(School of Physics and Optoelectronic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract The paper presents a tunable terahertz absorber with reverse-splitting twin-metallic resonant ring metamaterial integrated liquid crystal microfluidic channel. The efficient excitation of toroidal dipole resonance in the metamaterial is analyzed numerically. The absorption spectral response of toroidal electromagnetic resonance to the control of both dielectric and magnetic parameters of microfluidic layer is discussed. By infiltrating electrically-controlled liquid crystal mixtures into microfluidic channel and applying external electric field through terahertz transparent electrodes to change the refractive index of liquid crystal, the dynamic tuning of resonance frequency in the terahertz metamaterial absorber can be achievable. The amount of frequency shift can exceed 100% of resonance band, and the relative tuning ratio ($\Delta f/f$) can reach a high level of 15%. Meanwhile, the frequency tuning operation exhibits good linear characteristics, with near 100% absorbance of perfect absorption. The proposed scheme of tunable terahertz absorber has promising applications in spectra-selective terahertz detection and microfluidic biochemical sensors.

Key words toroidal dipole resonance; terahertz metamaterial; perfect absorber; liquid crystal tuning