文章编号:1007 - 4252(2024)02 - 0002 - 084　　DOI: 10.20027/j.gncq.2024.0011

基于狄拉克半金属超表面的太赫兹调制技术研究

杨祉烜[1],王　长[2],谭智勇[2],曹俊诚[1,2,*]

(1.上海科技大学信息学院,上海 201210;2. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所,集成电路材料全国重点实验室,上海 200050)

摘要:本文设计了一种非对称双开口环超表面结构的狄拉克半金属太赫兹谐振器,并研究分析了结构参数与费米能级对共振幅度的影响。研究结果表明,随着对称缺损程度的增加,谐振器的共振峰逐渐红移,共振幅度呈现先增加再减少的趋势。随着狄拉克半金属材料费米能级的增加,谐振器的共振峰幅值增加。当费米能级在 40-200meV 时范围变化时,在 0.38 THz 附近实现了 99.4% 的幅值调制深度,在太赫兹波调控方面有很好的应用价值。

关键词:狄拉克半金属;超表面;连续域束缚态;太赫兹;调制技术

中图分类号:O441.4; TB34　　**文献标志码**:A

Terahertz modulation technology based on Dirac semimetal metamaterial

YANG Zhixuan[1], WANG Chang[2], TANG Zhiyong[2], CAO Juncheng[1,2,*]

(1. School of Information Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China;

2. National Key Laboratory of Materials for Integrated Circuits, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, 865 Changning Road, Shanghai 200050, China)

Abstract: In this article, we designed a Dirac semimetal metamaterial resonator in terahertz with an asymmetric double open loop metasurface structure. It Can be applied in amplitude modulation of terahertz frequency band. The study compared the influence of structural parameters and Fermi level on resonance amplitude. The results indicate that as the degree of symmetry defect increases, the resonance peak of the resonator gradually shifts red, and the resonance amplitude shows a trend of first increasing and then decreasing. As the Fermi level of Dirac semimetal metamaterial increases, the resonance peak amplitude of the resonator increases. When the Fermi level is 200meV, a 99.4% amplitude modulation

收稿日期:2024-01-26;　　**修订日期**:2024-03-11

基金项目:国家自然科学基金(No. 12333012, 61927813, 61975225)、上海市科学技术委员会(21DZ1101102)资助项目.

作者简介:杨祉烜(1996-),男,硕士研究生,主要研究方向为太赫兹调制器,太赫兹超表面(E-mail:yangzhx@shanghaitech.edu.cn).

通信作者:曹俊诚(1967-),男,博士,研究员,主要研究方向为半导体太赫兹量子器件及其通信与成像应用(E-mail:jccao@mail.sim.ac.cn).

depth is achieved near 0.38 THz.

Key words: Dirac semimetal; Metasurface; Bound states in the continuum; Terahertz; Modulation

0　引言

近年来,太赫兹(terahertz, THz)波在通信[1]、生物成像[2]、高速检测[3]等领域有着越来越多的应用。随着太赫兹技术的发展,对器件的性能需求也越来越高。超表面是由周期分布的表面结构组成,用以调节入射波电磁特性的谐振器。例如,利用数字编码超材料、现场可编程超材料及信息超材的电磁波调控实现成像和无线通信系统[4-5],超表面吸波器以及结合二氧化钒相变的传感应用[6],以及应用于生化传感等[7]。其中,损耗与调制深度是衡量超表面调控性能的两个重要因素。

为了追求更低的损耗、更高的 Q 值,需要通过表面结构增强材料与电磁波的耦合关系。连续域束缚态(bound states in the continuum, BIC)[8-10]是在连续光谱中的非辐射局域共振现象,在理论上拥有无限高的 Q 值与零线性展宽的性质。然而,由于理想的 BIC 完全束缚在单一的频点且没有辐射泄漏,需要通过施加扰动,造成对称性缺损,将零泄漏的 BIC 拓展成可以被识别和利用有较高 Q 值与较小线性展宽的准 BIC 模式。

目前通过打破超表面结构动量空间与几何空间对称性形成的准 BIC 模式一般分为两种:电磁诱导透明(Electromagnetically induced transparency, EIT)和 Fano 共振。EIT 是通过对称性破缺使得表面波矢与外界实现横向波矢匹配,形成以 BIC 模式频率为中心的两个对称泄漏通道,在这两个泄漏通道中,电磁波以波导的方式分别向着相反的方向传递[11]。Fano 共振是表面等离子激元的电偶极子振荡与结构 C_2 对称性的破缺形成的相位失配打破了原本的模态模式的对称性所形成满足 Fano 线性方程的泄漏模式[12]。2019 年,南洋理工大学的丛龙庆团队在通过打破金属方环结构的 C_2 对称性,从实验上验证了两种准 BIC 模式的电磁特性[13]。例如,基于 H 型阵列设计的一种太赫兹全金属超结构连续域束缚态,可以得到高 Q 因子的谐振模式,并将其应用于太赫兹薄膜传感[14];基于金属-介质光子晶体激发 TM 偏振的表面等离激元,结合双折射特性,可以实现 BIC[15]结构参数才能改变谐振器的谐振特性。例如,利用石墨烯膜和 Si 纳米盘构建的 BIC 结构,可以通过电压改变石墨烯的费米能级调制吸收峰值的带宽[16]。然而,石墨烯的厚度仅为数个原子层厚度的数量级,这限制了它与入射波的耦合效率。狄拉克半金属超材料(Dirac semimetal metamaterial, DSM)是一种新型的拓扑超材料,拥有与石墨烯相似的能带结构与高载流子迁移率,且可以通过调节偏置电压的方式动态地改变 DSM 的费米能级,使得 DSM 的介电特性在金属与介质之间动态变化,这为实现高 Q 可调的超表面谐振器提供了一种新的可能。

本文利用了结构对称缺损打破 BIC 对称保护,实现准 BIC 的能量泄漏,采用了 DSM 与 GaAs 两种高载流子迁移率的材料,设计了一种非对称双开口环超表面结构谐振器,在固定结构参数的情况下,通过调节 DSM 的费米能级,实现 THz 频段的幅值调制。表 1 列出了一些基于超表面或新型材料的太赫兹调制技术的工作。

表 1　近年一些太赫兹调制器性能比较

Tabel 1 Some THz modulator performance comparisons in recent years

调制器	中心频率/THz	结构材料	衬底	调制深度	文献
硅基光调制	0.2-1	石墨烯	硅	76%	Ref. [17], 2020
石墨烯超材料	1.23	石墨烯	石英	86%	Ref. [18], 2024
VO_2超表面	0.79	VO_2	蓝宝石	71%	Ref. [19], 2021
等离子波导	1	DSM	硅	66.5%	Ref. [20], 2022
等离子 EIT	0.5-0.8	DSM	石英	99.1%	Ref. [21], 2022
等离子波导	0.4	DSM	硅	95%	Ref. [22], 2023
热调制波导	4.5	DSM	硅	96%	Ref. [23], 2023
Fano 透射	1.3	DSM	聚合物	49.5%	Ref. [24], 2023
本文工作	0.38	AlCuFe	GaAs	99.5%	

1 结构设计与仿真

1.1 结构设计

图 1(a)为太赫兹可调谐狄拉克半金属谐振器结构单元的结构示意图,由顶层的厚度为 1 μm 的 DSM 超表面结构与厚度为 3 μm 的 GaAs 衬底组成。图 1(b)显示了一个周期单元的俯视图,单元结构的周期 P=210 μm,圆环结构的外径 R =75 μm,内径 R_2=50 μm,d 是圆环上方空隙中心与中轴线之间的距离。

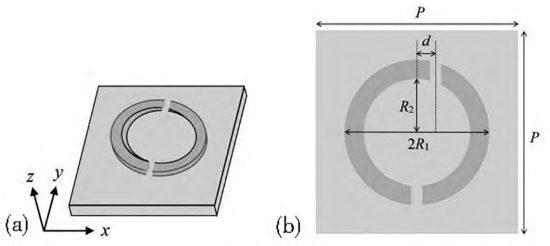

图 1 太赫兹可调谐狄拉克半金属谐振器结构示意图 (a) 立体图;(b) 俯视图

Fig. 1 Schematic diagram for the proposed terahertz tunable DSM resonator (a) stereo view; (b) top view

1.2 材料参数

基于随机相位近似理论,在温度对应的热子能量远小于费米能级 E_F 时,通过 Kubo 公式可以计算得到 DSM 的电导率[25],

$$\mathrm{Re}[\sigma(\Omega)]=\frac{e^2 g k_F}{24\pi\hbar}\Omega G\left(\frac{\Omega}{2}\right) \tag{1}$$

$$\mathrm{Im}[\sigma(\Omega)]=\frac{e^2 g k_F}{24\pi\hbar}\left[\frac{4}{\Omega}-\Omega\ln\left(\frac{4\varepsilon_c^2}{|\Omega^2-4|}\right)\right] \tag{2}$$

式中:σ 为复电导率,$Cm^{-1}V^{-1}s^{-1}$;$\Omega=\hbar\omega/E_F$,无量纲,在 Drude 阻尼修正下,$\Omega\rightarrow\Omega+i\hbar\tau^{-1}/E_F$;ħ 为约化普朗克常数,Js;ω 是角频率,$s^{-1}$;$E_F$ 为费米能级,J;$\tau=\mu E_F/(ev_F^2)$ 为弛豫时间,s; μ 为载流子迁移率,$m^2V^{-1}s^{-1}$;e 为电子电荷量,C;$v_F\approx10^6$ m/s 为费米速度,ms^{-1};g 为是材料的简并因子,无量纲;$k_F=E_F/v_F$ 为费米动量,mkg/s;G(E)=n(−E)−n(E),无量纲;n(E)为费米-狄拉克分布函数,无量纲;$\varepsilon_c=E_c/E_F$,无量纲;E_c 是截止能量,J,大约是费米能级的 3 倍。DSM 的复电导率可以表示为 σ(Ω)=Re[σ(Ω)]+Im[σ(Ω)]。[25]

DSM 的复介电常数可以表示为,

$$\varepsilon(\omega)=\varepsilon_b+i\sigma(\omega)/\omega\varepsilon_0 \tag{3}$$

式中:ε_b 是有效背景介电常数,Fm^{-1};ε_0 是真空介电常数,Fm^{-1}。

本研究中选用了 AlCuFe 准晶体[25]作为 DSM 层,g=40,$\mu=3\times10^4\ cm^2V^{-1}s^{-1}$。GaAs 在 0.1-0.5 THz 范围内可以视为无损介质,其折射率为 3.585。

1.3 仿真设计

本研究使用了 FDTD solution 软件对可调谐狄拉克半金属谐振器进行仿真模拟。在对结构与材料参数建模之后,在 x 与 y 方向应用了周期性边界条件,在 z 方向应用了完美吸收边界条件,使用 y 方向偏振的 TE 入射波作为 THz 光源,在 0.1-0.5 THz 频段测试谐振器的透射与电磁特性。其中选用的频率步长为 0.005 THz,满足采样条件。

2 结果与分析

首先,通过将圆环下方开口固定,上方开口右移距离 d,打破圆环结构对称性对谐振器 BIC 模式的影响。根据圆环结构的 C_2 对称性与镜像对称性,定义结构的不对称参数 $\alpha=d/R_1$,DSM 的费米能级选择了 200 meV。

通过仿真得到了不同 α 下结构的透射谱变化,如图 2 所示。

由图可知,在 α=0 时,由于没有打破结构的对称性,BIC 状态下能量被完全约束,在宽光谱上观测不到透射峰。随着不对称参数 α 增加,结构的对称约束被打破,BIC 模式逐渐转换为准 BIC 模式,电磁能量随着结构参数造成的扰动而泄露出谐振器,形成了狭窄的透射峰。但是随着对称性进一步被打破,共振峰值向着远离 BIC 的方向移动,准 BIC 模式也逐渐向着正常的连续域变化,器件的 Q 值也随之发生先增后减的过程。由图 2 可知,0.38 THz 附近出现明显的 Fano 共振峰,并随着 α 的增加逐渐红移。

图 3 分别给出了 α=0 与,α=0.2,α=0.4 对应结构在 0.38 THz 处的电场分布,由于电场大量集聚在圆环的空缺处,为了使电场的分布更加明显直观,在处理数据时对电场强度取了对数。

由图可知,明显的表面等离子激元偶极子模式被激发,对于 α=0 时的对称结构,表面模式为在圆

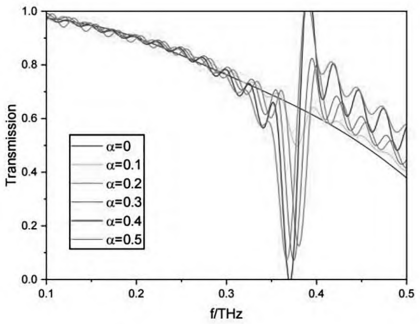

图 2　不同 α 下 DSM 谐振器的透射谱

Fig. 2 Transmission of DSM resonator with different α

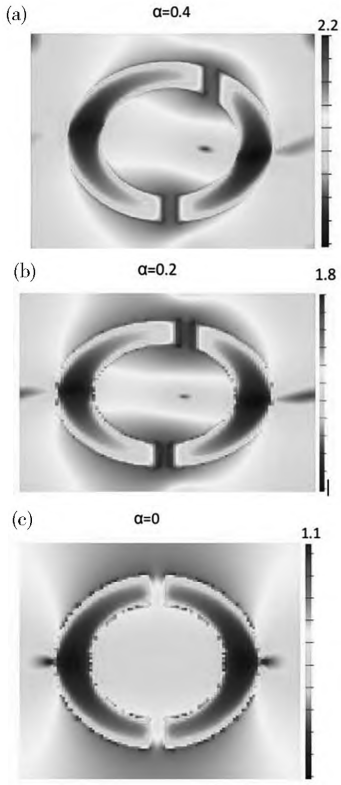

图 3　0.38THz 处 DSM 谐振器的电场分布图 (a) α=0.4; (b) α=0.2;(c) α=0

Fig. 3 Electric field distribution map of DSM resonator at 0.38 THz (a) α=0.4; (b) α=0.2;(c) α=0

环外表面沿着 y 轴方向的传播表面等离子激元倏逝波,而非对称结构的准 BIC 模式下电场更多地集聚在圆环缺口中。这是由于表面电磁场与外空间电磁场的波矢失配,使得表面集聚效应更加显著,且随着 α 的增加而增强,在 α=0.4 时达到峰值,与 C_2 对称性结构相比,电场强度增强了超过 10 倍。

此外,为了 DSM 在不同费米能级的透射率谱变化,我们选取了 α=0.4 的谐振器结构,通过调节栅极电压可以实现 DSM 超表面的费米能级调制,从而实现对 BIC 的主动调制。我们仿真计算了 DSM 费米能级在 40-200 meV 变化范围的透射谱,结果如图 4 所示。

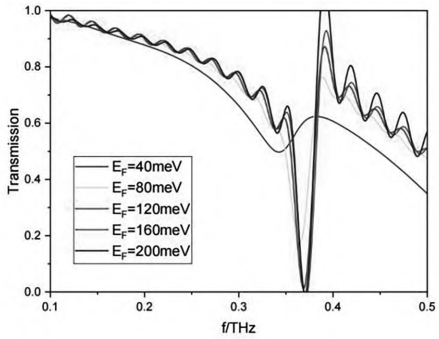

图 4　不同费米能级下 DSM 谐振器的透射谱

Fig. 4 Transmission of DSM resonator with different Fermi energies

从图 4 可知,随着 DSM 费米能级的提高,材料载流子浓度不断上升,谐振器的准 BIC 模式振荡逐渐增强,当费米能级是 200 meV 时,谐振器在 0.372 THz 处透射率谷值约为 0.003,费米能级是 40 meV 时,谐振器在 0.342 THz 处透射率谷值约为 0.497。在频率 0.372 THz 处,图 4 中最高透射率为 0.613,对应的费米能级为 40 meV。因此,0.372 THz 的费米能级 200 meV 与 40 meV 之间的调制深度为 $T_{0.372\mathrm{THz}}=(T_{40\mathrm{meV}}-T_{200\mathrm{meV}})/T_{40\mathrm{meV}}=99.5\%$。

3　结论

本文设计了一种基于狄拉克半金属准 BIC 模式的超表面太赫兹可调谐 DSM 谐振器。研究了结构不对称参数与费米能级对准 BIC 模式的 Fano 共振幅值的影响。通过偏置电压调节费米能级,实现了 THz 频段 Fano 共振峰的幅度调制。在 0.372 THz 处费米能级在 40-200 meV 范围内调制深度可达 99.5%。在 THz 频段的光开关、传感、数字调制等方面具有应用前景。

参考文献:

[1]Zeng H X, Liang H J, Zhang Y X, et al. High-precision digital terahertz phase manipulation within a multichannel

field perturbation coding chip[J]. Nature Photonics,2021, 15(10): 751-757.

[2]Kim S M, Hatami F, Harris J S, et al. Biomedical terahertz imaging with a quantum cascade laser [J]. Applied Physics Letters, 2006, 88(15): 153903.

[3]Qiu F C, Tan Z Y, Fu Z L, et al. Reflective scanning imaging based on a fast terahertz photodetector [J]. Optics Communications, 2018, 427: 170 - 174.

[4]Ma Q and Cui T J. Information Metamaterials: Bridging the physical world and digital world [J]. PhotoniX, 2020, 1 (1): 1-32.

[5]崔铁军, 吴浩天, 刘硕. 信息超材料研究进展. 物理学报, 2020, 69(15): 158101.

[6]王帅钊. 超表面吸波器和多功能器件研究[D]. 桂林: 桂林电子科技大学光学工程学院, 2022.

[7]Li Y, Yang S, Lin Q W, et al. Actively tunable plasmon-induced transparency in terahertz based on Dirac semimetal metamaterials [J]. Applied Optics, 2023, 62(27): 7139 -7144.

[8] Stillinger F H and Herrick D R. Bound states in the continuum. Physical Review A, 1975, 11(2): 446-454.

[9]姚建铨,李继涛,张雅婷 等. 周期光学系统中的连续域束缚态[J]. 中国光学, 2023, 16(1): 1-23.

[10]He X Y, Lin F T, Liu F, et al. 3D Dirac semimetals supported tunable terahertz BIC metamaterials [J]. Nanophotonics, 2022; 11(21): 4705-4714.

[11]Cong L Q , Sing R J . Symmetry-Protected Dual Bound States in the Continuum in Metamaterials [J]. Adv. Optical Mater. 2019, 7, 1900383.

[12]Lim W X, Manjappa M, Singh R, et al. Shaping High-Q Planar Fano Resonant Metamaterials toward Futuristic Technologies [J]. Adv. Optical Mater. 2018. 6. 1800502

[13]Tan T C, Srivastava Y K, Manjappa M, et al. Lattice induced strong coupling and line narrowing of split resonances in metamaterials [J]. Appl. Phys. Lett. 2018. 112, 201111.

[14]王乐乐. H 型全金属超结构太赫兹连续域束缚态及在传感中的应用研究[D]. 上海: 上海师范大学数理学院, 2022.

[15]唐宏珍. 基于金属-介质光子晶体的连续谱中束缚态的研究[D]. 重庆: 重庆大学物理学院, 2022.

[16]Wang X, Duan J Y, Chen W Y, et al. Controlling light absorption of graphene at critical coupling through magnetic dipole quasi - bound states in the continuum resonance [J]. Physical Review B, 2020, 102(15): 155432.

[17]王卓然, 文天龙, 张怀武. 二维材料异质结增强的硅基太赫兹光调制器. 压电与声光, 2020, 42(3): 386 -389.

[18]Yang Y P, Fan S T, Jingjing Zhao J J, et al. A multi-functional tunable terahertz graphene metamaterial based on plasmon - induced transparency [J]. Diamond & Related Materials, 2024, 141: 110686.

[19] JiangM Z, Hu F R, Zhang L H, et al. Electrically triggered VO_2 reconfigurable metasurface for amplitude and phase modulation of terahertz wave [J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(11): 3488-3494.

[20]Liang Y B, Wang G Q, Cheng Y, et al. Investigation of 3D Dirac semimetal supported terahertz dielectric-loaded plasmonic waveguides [J]. Communications in Theoretical Physics, 2022, 74: 125702.

[21]Jin C M, Liu C, Tan Q L, et al. Tunable plasmon - induced transparency based on Dirac semimetals [J]. Plasmonics, 2022, 17: 1183-1190.

[22] Wang G Q, Cao W H, He X Y. 3D Dirac semimetal elliptical fiber supported THz tunable hybrid plasmonic waveguides [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2023, 29(5): 8400207.

[23]Cheng Y, Cao W H, Wang G Q, et al. 3D Dirac semimetal supported thermal tunable terahertz hybrid plasmonic waveguides [J]. Optics Experess, 2023, 31 (11): 17201.

[24]He X Y, Cao W H. Tunable terahertz hybrid metamaterials supported by 3D Dirac semimetals [J]. Optical Materials Experess, 2023, 13(2): 413-422.

[25]Han, S, Cui J Y, Yunda Chua Y D, et al. Electrically-pumped compact topological bulk lasers driven by band-inverted bound states in the continuum[J]. Light: Science & Applications,2023,12 : 145.