

文章编号: 1005-5630(2022)01-0042-07

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2022.01.007

人工局域表面等离子体中环偶极子耦合 效应研究

李泽宇, 袁英豪, 陈 麟

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 为了研究微波频率下人工局域表面等离子体中环偶极子的激励和耦合效应, 设计了双层紧凑型金属圆盘结构。该金属圆盘结构由双层单裂谐振环阵列及介质板组成。采用微波激发该结构上层环偶极子模式, 再利用介质板耦合到下层环偶极子, 实现环偶极子级联耦合。通过调整上下谐振环的阵列数量, 谐振口的大小以及中间介质板的介电系数的变化, 获得双层阵列的上下环偶极子模式的耦合结果。研究表明, 该模式可以产生多峰环偶极子效应, 丰富了对人工局域表面等离子体中环偶极子模式间耦合效应的认识, 可为新型传感器的设计和应用提供参考。

关键词: 环偶极子; 介质板; 三维超材料; 人工局域表面等离子体; 开口谐振环; 耦合
中图分类号: O 441 **文献标志码:** A

Study on the coupling characteristics of ring dipole in artificial localized surface plasmons

LI Zeyu, YUAN Yinghao, CHEN Lin

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for
Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to investigate the coupling effect of the two-layer array and the resulting upper and lower ring dipole modes, a microwave method was used to introduce a split resonant ring array structure in which the intermediate separator and the upper and lower surface were placed. Firstly, the upper ring dipole mode of the structure is excited by microwave, and then the dielectric plate is coupled to the lower ring dipole to realize the ring dipole cascade coupling, by adjusting the resonant ring up and down the number of array, the size of the resonant mouth, as well as the change of the medium plate in the middle of the dielectric coefficient. The excitation and coupling effects of ring dipoles in artificial localized surface plasmas by microwave frequencies can be studied. The results show that this mode can produce multi-peak ring dipole effect, which enriches

收稿日期: 2021-03-25

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC0810900)

作者简介: 李泽宇(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为太赫兹技术应用。E-mail: lizeyu@126.com

通信作者: 袁英豪(1984—), 男, 副研究员, 研究方向为太赫兹时域光谱、太赫兹频率梳光谱技术。
E-mail: yhyuan@usst.edu.cn

the understanding of the coupling effect between artificial local surface plasmon ring dipole modes, and lays a foundation for the design and application of new sensors.

Keywords: ring dipole; medium plate; 3D metamaterials; artificial local surface plasma; open resonant ring; coupling

引 言

环偶极子效应是由 Zel'dovich 在 1958 年提出的^[1], 与普通的电偶极子或磁偶极子相反, 环偶极子和多重偶极子构成了第三个独立的基本电磁极子。环偶极子是通过诱导磁偶极子首尾相连产生的^[2]。由于其不同寻常的电磁特性, 引发了人们的极大研究兴趣^[3]。在微波频率范围内已经成功激发了这种环偶极子模式^[4-7], 并在激光产生、传感和吸收等领域应用广泛^[8-9]。

近年来, 超材料已引起了各国科学家极大的研究热情。超材料具有诸多优点, 比如可以通过调整人工分子或人工原子的几何尺寸来对电磁波进行精准操控^[10-13]。超材料结构也可以用来诱导环偶极子模式。2007 年, Marinov 等从理论上提出了环偶极子超材料的概念^[14]。2010 年, Kaelberer 等在微波波段用实验证明了基于四个三维分裂谐振环超材料结构可以激发环偶极子模式^[15]。随后, 许多分裂谐振环超材料结构被提出, 用于产生环偶极子共振, 如分环谐振腔, 双棒、低聚物纳米空腔等结构^[16-22]。

表面等离子体激元因其在光频段具有亚波长场约束和场增强的特性而成为光子学领域的研究热点。表面等离子体激元可分为两种类型: 表面等离子体激元和局域表面等离子体激元。前者由光和沿介质与金属交界面传播的电子的集体振荡耦合而产生; 而后者是亚波长金属粒子提供的闭环共振模式。与表面等离子体激元不同的是, 局域表面等离子体激元是由亚波长金属粒子在振荡电磁场中的散射作用引起的非分布激励。为了将光频段局域表面等离子体激元特性转移到低频波段, 人工局域表面等离子体激元概念近年来被提出。在太赫兹和微波波段, 已经有人提出用超材料结构来产生人工局域表面等离子体激元^[23-27]。人工局域表面等离子体激元的许多新现象, 如磁

共振、Fano 效应等, 近年来也被广泛关注。最近, 在单开环型谐振器阵列结构中, 发现了基于人工局域表面等离子体激元的环偶极子效应^[28-30]。由于环偶极子模式的辐射损耗较小, 其具有 Q 值高, 光与物质相互作用强等优点。对于缺陷环型谐振器阵列结构以及不对称环型谐振器阵列结构也被人们研究, 其中的模式耦合效应丰富了环偶极子在人工局域表面等离子体激元中的应用。但以上所有的研究都是基于单层单开环型谐振器阵列, 对于双层阵列以及由此产生的上下环偶极子模式的耦合效应, 此前并没有受到人们重视, 而这将对基于环偶极子的纵向能量传递效应及其应用产生重要的影响。

本文提出了一种新型基于双层单裂谐振环阵列超材料结构的人工局域表面等离子体, 并研究了其中环偶极子的耦合效应。

1 双层紧凑型金属圆盘结构设计及性能

图 1 是设计的双层紧凑型金属圆盘结构, 分为三层, 上下两层金属结构由圆柱单元绕着结构中心旋转一周排放得到, 中间是一块介质板。其设计的具体结构参数如下: 结构单元的半高 $d=4$ mm, 单元中的最薄处 $t=0.2$ mm, 开口高度 $g=0.4$ mm, 介质板的半径 $r_d=20$ mm, 介质板中心至金属单元边缘距离 $R=6$ mm, 单元个数 $N=12$, 介质板采用介电常数 $\epsilon=3.7$ 的聚酰亚胺, 金属为有损铜。由于整个结构镜像对称, 所以在任意一个单元的开口处设置一个点光源来分析其电磁响应。在数值模拟中, 结构沿 x 、 y 和 z 方向均设置为开放 (open) 边界条件。为了得到近场透射谱的仿真结果, 在模型的一个开口谐振间隙 (缝隙) 处引入一个微波离散端口, 目的是激发电磁谐振, 在下面相反方向的另一个开口谐振环的间隙 (缝隙) 处引入另一个微波离散端

口，作为探针(探测器)。本文使用基于时域有限差分法的商用 CST 软件中的微波工作室模块对所建模型进行电磁仿真。首先，通过数值模拟，得到结构在微波频段点光源激发下的反射图谱，如图 2 所示，在模拟的同时，研究了单元个数 N 对反射谱的影响。由图 2 可知：当 N 较小

时，结构在微波的作用下，表现出的共振不明显；然而，随着 N 的增大，反射谱中出现了多个极为明显的共振谷(如图标注的 1、2、3、4)。这是因为当单元数量 N 从 4 增加到 12 时，两个相邻单元之间的距离变小，使两者之间的耦合效应更加明显。

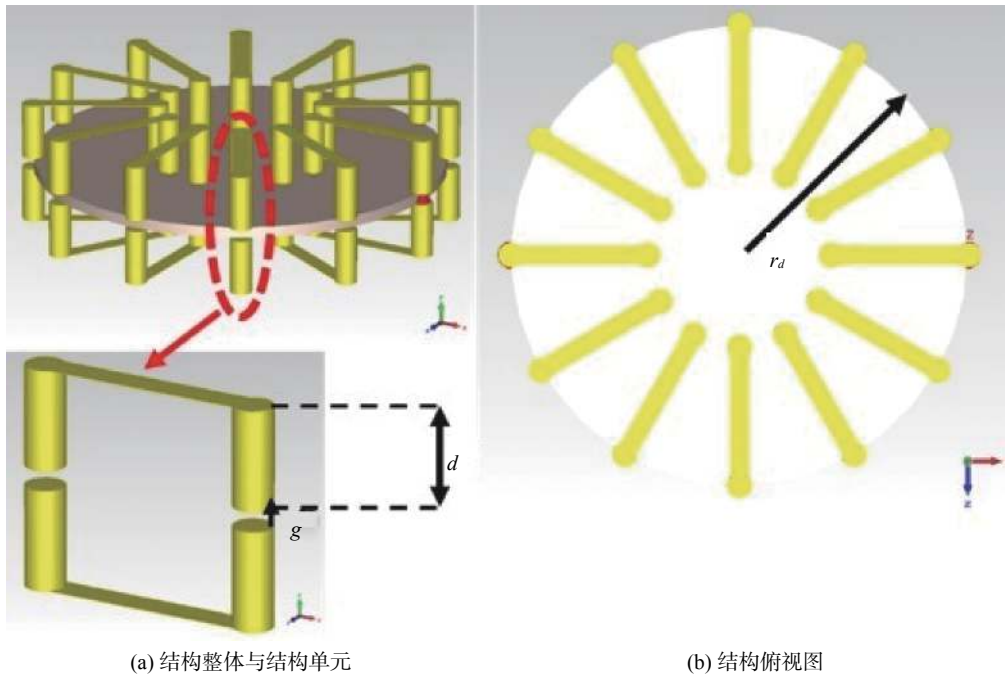


图 1 金属圆盘结构图

Fig. 1 Metal disc structure

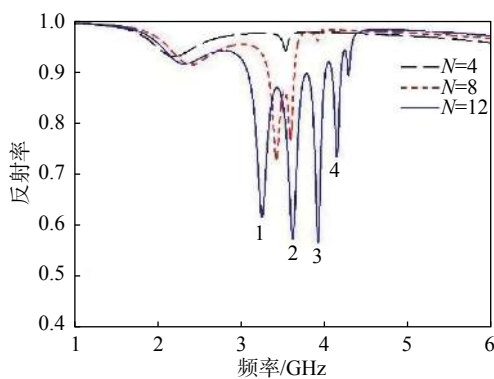


图 2 金属单元数量 N 变化时金属圆盘的反射谱

Fig. 2 Reflection spectrum of a metal disk as the number of metal elements N changes

2 双表面电磁场分布

为了研究这种多共振模式，在每个共振频点

都设置了场监视器以及表面电流监视器。通过计算，得到了场分布 i、ii 以及表面电流分布 iii，如图 3 所示。根据环偶极子的形成原理，在场分布 i 中可以明显观察到：共振模式 1 是一个大的涡旋磁场分布，共振模式 2 是一个磁偶极子的场分布，共振模式 3 是在局部有多个小的涡旋磁场，共振模式 4 是类似共振模式 3 的情况。通过表面电流分布，确认了各共振谷的共振类型，从理论上定性分析了该模式的类型。

为了定量描述各共振谷的共振类型，在各个共振频点附近计算了其远场散射情况，结果如图 4 所示。图 4 中 I_p 、 I_m 、 I_t 、 I_{qe} 和 I_{qm} 分别表示电偶极子极矩散射功率、磁偶极子极矩散射功率、磁环偶极子极矩散射功率强度、电四极子极矩散射功率强度及磁四极子极矩散射功率强度。在共振频率 1 处，即 $f=3.24$ GHz 处，磁环偶极子极矩散射功率 I_t 明显高于其他极子的散射功

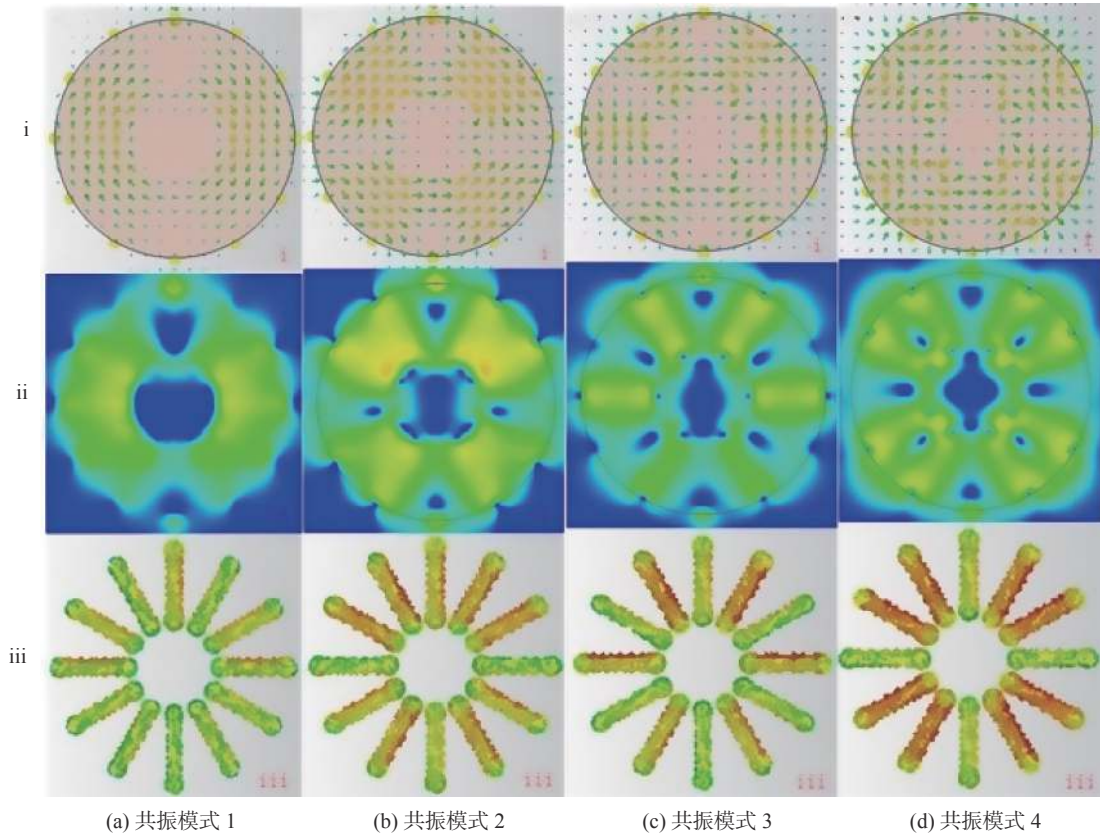


图 3 不同共振模式的场分布及表面电流分布

Fig. 3 Field distribution and surface current distribution of the different resonant modes

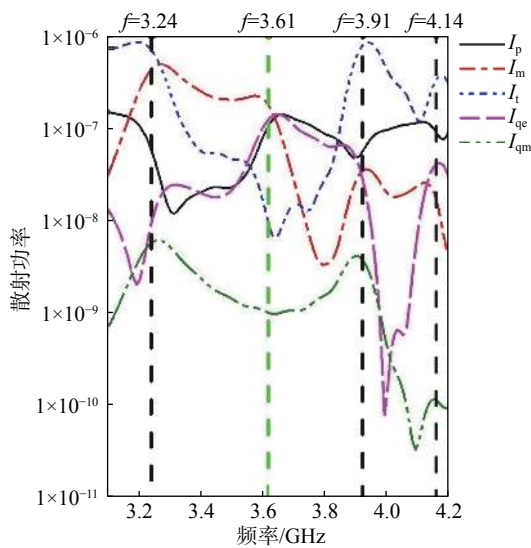


图 4 极子的散射功率谱

Fig. 4 Scattered power spectrum of dipole

率, I_t 的散射功率大约是最底的 I_{qe} 的 100 倍, 该计算结果与之前观察到的场分布情况一致。在共振频率 2 处, 即 $f=3.61$ GHz 处, 磁偶极子极

矩的散射功率强度最高, 而 I_p 和 I_{qe} 的强度基本相当, 略低于 I_m , 此时 I_t 处于较低水平, 几乎比最高的 I_m 小了 90%, 结合该频点处的场分布, 说明在该频点附近, 磁偶极子占据主导地位, 且抑制了磁环偶极子。在共振频率 3 处, 即 $f=3.91$ GHz 处, 此时磁环偶极子 I_t 表现出了极强的主导作用, 几乎比第二高的 I_p 多了超过 10 倍的强度, 约是最底的 I_{qm} 的 10^3 倍。在共振频率 4 处, 即 $f=4.14$ GHz 处, 磁环偶极子 I_t 依然占主导作用, 约是最底的 I_{qm} 的 10^4 倍。

3 关键参数分析

仅改变环的开口 g 的大小或者仅改变单元高度 d 时, 得到的反射谱如图 5 所示。由图 5(a) 可见: 随着 g 的增大(由 $g=0.2$ mm 依次间隔 0.1 mm 增加到 $g=0.6$ mm), 共振谷往高频处移动; 如果把结构中的单元看成是圆形电磁线圈构成的 LC 振荡电路, 谐振频率 $\omega^2 = 1/(LC)$ (其中电容

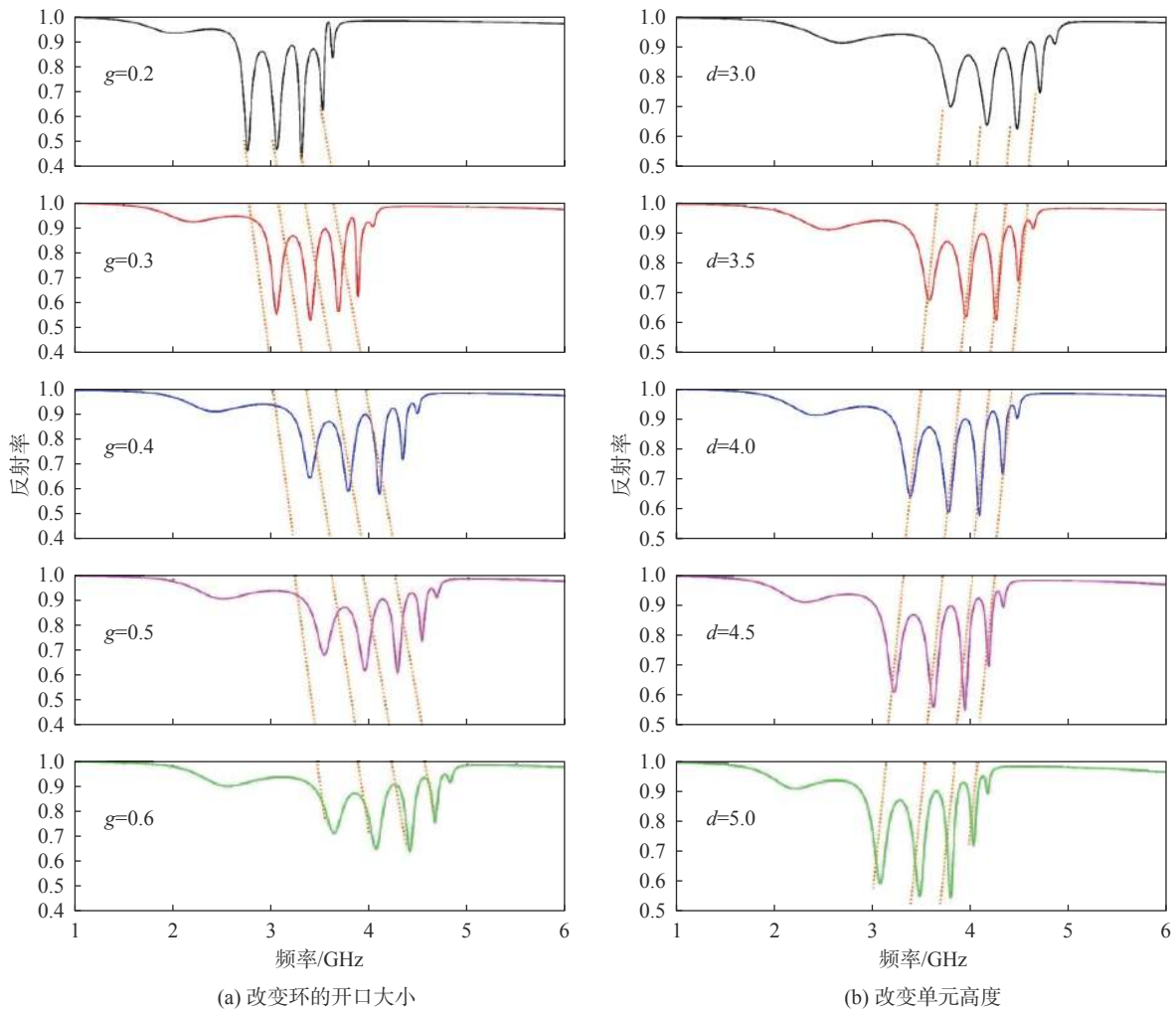


图 5 仅改变环的开口大小 g 时以及仅改变单元高度 d 时超材料的反射谱

Fig. 5 Reflection spectra of metamaterials are obtained when only the ring opening size g is changed and only the cell height d is changed

C 和 S 成正比, S 为开口上下横截面积即开口大小乘以金属环厚度), g 越大则 C 越小, 那么 ω 就越大, 所以共振谷发生蓝移。由图 5(b) 可见: 随着 d 的增大(由 $d=3$ mm 依次间隔 0.5 mm 增加到 $d=5$ mm), 共振谷往低频处移动; 由于增大 d , 等同于增大等效电感 L , 使得共振频率变小。

为了对结构中的介质层进行分析, 将介质层的介电常数设置为 1, 等价于未放置介质层, 使得金属圆盘上下两层悬空。通过计算得到该情况下的反射谱, 如图 6 所示, 原本在改变单一结构参数时保持稳定频率漂移的四个共振谷都消失了, 而当把介质层再次放置, 并改变介电常数 ϵ 的值(由 $\epsilon=2$ 依次间隔 1 增加到 5)时, 四个共

振谷又出现了, 且保持稳定的频率漂移。

4 结 论

本文提出了一种人工局域表面等离子体结构。通过在双层单裂谐振环阵列中引入介质板, 使上下共振腔内的环偶极子模式产生耦合和磁场增强。本文给出了双环超材料的物理模型, 并讨论了其反射光谱。此外, 定量分析了环偶极子耦合和共振, 计算了辐射功率。研究表明, 双层超材料可以激发环偶极子并产生耦合。最后, 本文分析了介质板的介电系数等参数对耦合效应的影响。研究结果对环偶极子的能量传输及新型传感器设计等有着很好的参考价值。

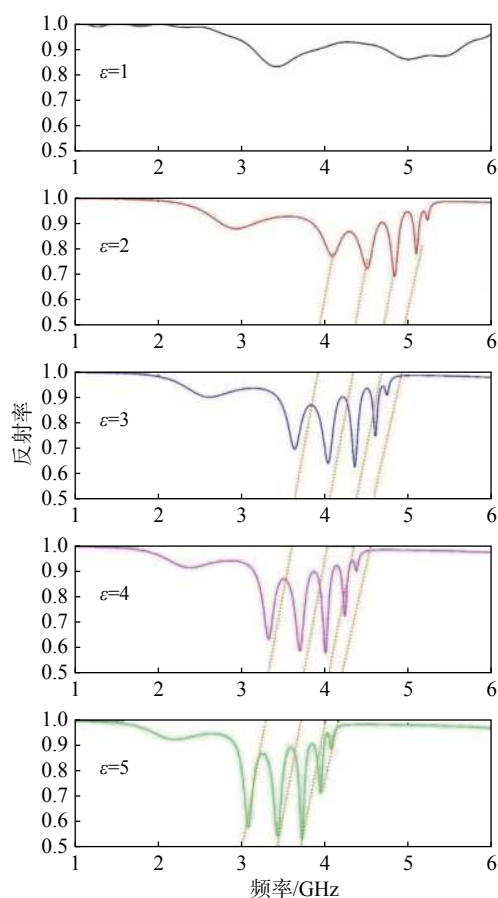


图 6 改变介质板的介电常数 ε 时超材料的反射谱

Fig. 6 Reflection spectrum of metamaterials when the dielectric constant of dielectric plate ε is changed.

参考文献:

- [1] ZEL'DOVICH I B. Electromagnetic interaction with parity violation[J]. *Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1958, 6: 1184.
- [2] DONG Z G, NI P G, ZHU J, et al. Toroidal dipole response in a multifold double-ring metamaterial[J]. *Optics Express*, 2012, 20(12): 13065 – 13070.
- [3] PAPASIMAKIS N, FEDOTOV V A, SAVINOV V, et al. Electromagnetic toroidal excitations in matter and free space[J]. *Nature Materials*, 2016, 15(3): 263 – 271.
- [4] SAYANSKIY A, DANAEIFAR M, KAPITANOVA P, et al. All-dielectric metalattice with enhanced toroidal dipole response[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(19): 1800302.
- [5] GUO L Y, LI M H, YE Q W, et al. Electric toroidal dipole response in split-ring resonator metamaterials[J]. *The European Physical Journal B*, 2012, 85(6): 208.
- [6] STENISHCHEV I V, BASHARIN A A. Toroidal response in all-dielectric metamaterials based on water[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 9468.
- [7] LIU W, ZHANG J F, MIROSHNICHENKO A E. Toroidal dipole-induced transparency in core-shell nanoparticles[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2015, 9(5): 564 – 570.
- [8] YE Q W, GUO L Y, LI M H, et al. The magnetic toroidal dipole in steric metamaterial for permittivity sensor application[J]. *Physica Scripta*, 2013, 88(5): 055002.
- [9] LI J, WANG Y H, JIN R C, et al. Toroidal-dipole induced plasmonic perfect absorber[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2017, 50(48): 485301.
- [10] CHEN L, LIAO D G, GUO X G, et al. Terahertz time-domain spectroscopy and micro-cavity components for probing samples: a review[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2019, 20(5): 591 – 607.
- [11] CHEN L, ZHU Y M, ZANG X F, et al. Mode splitting transmission effect of surface wave excitation through a metal hole array[J]. *Light: Science & Applications*, 2013, 2(3): e60.
- [12] BASHARIN A A, CHUGUEVSKY V, VOLSKY N, et al. Extremely high Q -factor metamaterials due to anapole excitation[J]. *Physical Review B*, 2017, 95(3): 035104.
- [13] WU P C, LIAO C Y, SAVINOV V, et al. Optical anapole metamaterial[J]. *ACS Nano*, 2018, 12(2): 1920 – 1927.
- [14] MARINOV K, BOARDMAN A D, FEDOTOV V A, et al. Toroidal metamaterial[J]. *New Journal of Physics*, 2007, 9(9): 324.
- [15] KAELBERER T, FEDOTOV V A, PAPASIMAKIS N, et al. Toroidal dipolar response in a metamaterial[J]. *Science*, 2010, 330(6010): 1510 – 1512.
- [16] HUANG Y W, CHEN W T, WU P C, et al. Design of plasmonic toroidal metamaterials at optical frequencies[J]. *Optics Express*, 2012, 20(2): 1760 – 1768.
- [17] SONG Z Y, DENG Y D, ZHOU Y G, et al. Terahertz toroidal metamaterial with tunable properties[J]. *Optics Express*, 2019, 27(4): 5792 – 5797.
- [18] DONG Z G, ZHU J, RHO J, et al. Optical toroidal dipolar response by an asymmetric double-bar metamaterial[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(14): 144105.
- [19] ÖGÜT B, TALEBI N, VOGELGESANG R, et al. Toroidal plasmonic eigenmodes in oligomer nanocavities for the visible[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(10): 5239 –

- 5244.
- [20] LIU W, ZHANG J F, LEI B, et al. Invisible nanowires with interfering electric and toroidal dipoles[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(10): 2293 – 2296.
- [21] BASHARIN A A, KAFESAKI M, ECONOMOU E N, et al. Dielectric metamaterials with toroidal dipolar response[J]. *Physical Review X*, 2015, 5(1): 011036.
- [22] FEDOTOV V A, ROGACHEVA A V, SAVINOV V, et al. Resonant transparency and non-trivial non-radiating excitations in toroidal metamaterials[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3(1): 2967.
- [23] CHEN L, WEI Y M, ZANG X F, et al. Excitation of dark multipolar plasmonic resonances at terahertz frequencies[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 22027.
- [24] CHEN L, XU N N, SINGH L, et al. Defect-induced fano resonances in corrugated plasmonic metamaterials[J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(8): 1600960.
- [25] CHEN L, GE Y F, ZANG X F, et al. Tunable phase transition via radiative loss controlling in a terahertz attenuated total reflection-based metasurface[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2019, 9(6): 643 – 650.
- [26] ZHOU J, CHEN L, SUN Q Y, et al. Terahertz on-chip sensing by exciting higher radial order spoof localized surface plasmons[J]. *Applied Physics Express*, 2020, 13(1): 012014.
- [27] SHEN W W, XIE J Y, ZANG X F, et al. Coupling terahertz wave into a plasmonic waveguide by using two ribbon waveguides[J]. *Results in Physics*, 2020, 19: 103653.
- [28] QIN P F, YANG Y H, MUSA M Y, et al. Toroidal localized spoof plasmons on compact metadisks[J]. *Advanced Science*, 2018, 5(3): 1700487.
- [29] SUN B, YU Y Y. Double toroidal spoof localized surface plasmon resonance excited by two types of coupling mechanisms[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(6): 1444 – 1447.
- [30] SUN B, YU Y Y, ZHANG S, et al. Propagation of toroidal localized spoof surface plasmons using conductive coupling[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(15): 3861 – 3864.

(编辑: 刘铁英)