

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2018.05.016

金谐振环对的光学性质研究

周 昕, 徐承杰, 李经纬, 欧阳鑫, 何 军

(湖南工业大学 理学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 运用时域有限差分方法, 研究内置金纳米双棒的谐振环对的光学性质。研究发现: 谐振环对的光学透射谱受纳米棒间距、开口缝宽度及填充介质的介电常数影响。基于瞬时电场分量 E_x 、 E_y 分布情况, 揭示了共振峰源于 0-相共振模式, 共振谷源于 π -相共振模式。

关键词: 谐振环对; 光学透射谱; 表面等离子体; 电场分布

中图分类号: TN751.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2018)05-0092-05

Research on the Optical Properties of Au Split Ring Pairs

ZHOU Xin, XU Chengjie, LI Jingwei, OUYANG Xin, HE Jun

(College of Science, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: A research has been carried out on the optical properties of double gold nanobars embedded in split ring pairs by adopting the finite difference time domain method. The study shows that the optical transmission spectra of the resonant ring pairs are influenced by the distance between the nanorods, the width of the opening slot and the dielectric constant of the filling medium. Based on the distribution analysis of the electric fields E_x and E_y , it is revealed that the resonance peak originates from 0-phase resonance mode, and the resonance dip originates from π -phase resonance mode.

Keywords: split ring pair; optical transmission spectrum; surface plasmon; electric field distribution

1 研究背景

近年来, 由亚波长电磁谐振腔构成的超材料已成为物理学前沿领域的热门话题, 超材料作为一种人工材料具有控制电磁波传播的特殊优势, 尤其是人们可以通过不同的设计或调整元胞内组成基元的位置来调整光的偏振状态。超材料能实现自然材料不具备的超常电磁特性, 在许多领域实现了应用, 例如超透镜、

负折射材料、磁表面等离子体、隐形斗篷等^[1-4]。其中, 金属分裂环谐振腔 (split ring resonators, SRRs) 尤其吸引研究者的注意, 常用来构建实现负磁导率超材料的元素^[5-7]。如果分裂环元胞被合适偏振的电磁波激发, 分裂环会由于激发了磁共振而出现一个很强的磁响应。除磁场激发外, 分裂环结构中的电场激发展示出多极模式等离子共振, 基于入射电场的偏振性质, 被分为电和磁共振本征频率。有学者设计将谐振

收稿日期: 2017-07-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11604094, 61703154, 61401153), 湖南省自然科学基金资助项目 (2017JJ2068), 湖南省教育厅优秀青年基金资助项目 (16B070)

作者简介: 周 昕 (1979-), 女, 湖南株洲人, 湖南工业大学副教授, 博士, 主要从事微纳光子材料与器件方面的研究, E-mail: xzhou522@163.com

通信作者: 徐承杰 (1982-), 男, 湖北汉川人, 湖南工业大学讲师, 博士, 主要从事多智能体系统协调控制与神经网络研究, E-mail: xu-chengjie@163.com

环与金属棒阵列相结合, 这种超材料结构在微波区域已被证实具有负折射率^[8]。金属谐振环还被证实更高的频率区域表现出共振响应^[9]。Liu N. 等^[10]通过理论和实验研究表明, 谐振环阵列的光学性质可以通过改变不同层间分裂环的扭转角度来调制。R. Singh 等^[11]设计了由2个开口不同且间隔很近的谐振环构成的超材料, 证实电磁诱导透明是暗模式和亮模式之间相互耦合的结果。有研究者报道了分裂环有效参数的数值模拟结果^[12-13]以及传输特性^[14]。无序和周期性排列的分裂环^[15-16]的传输特性采用实验的方法已经作了详细研究。还有许多学者研究了谐振环的光学传输特性、电磁共振特性、共振峰及谷的性质等^[17-19]。

当电磁波与纳米尺度的金属粒子相互作用时, 能激发金属电子云的集体振荡, 导致局域表面等离子体 (surface plasmon, SP) 共振。当纳米粒子距离很近时, 它们的等离子体模式会相互耦合, 造成等离子体共振频移。纳米结构阵列的表面等离子体行为高度依赖于其结构参数, 例如组成元素的形态、大小和周期性等^[20]。在复杂纳米金属结构里的等离激元杂化及耦合是在纳米尺度范围内调整光谱响应及增强局域场的强有力手段。金属二聚物纳米结构也有着许多迷人的效应, 例如辐射阻尼改性、光学混频以及等离激元 Fano 共振等^[21]。受以上研究启发, 本文设计了一种谐振环对超材料, 研究结构参数对此种超材料结构的光学传输特性及表面等离子体共振性能的影响。

2 模型与方法

本文研究的超材料结构元胞由一对金分裂环共振子组成, 每个分裂环内置一对金纳米棒, 结构 xy 平面横截面图如图1所示。

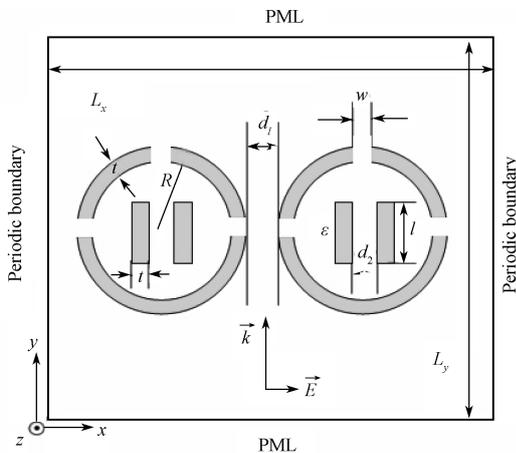


图1 谐振环对超材料横截面结构图

Fig. 1 Cross section of the metamaterial with resonant rings 设计每个谐振环上有3个宽度相同的开口缝,

缝宽用 w 表示。内置双纳米棒间距离用 d_2 表示, ϵ 表示分裂环内填充介质的介电常数。两分裂环间距 $d_1=40$ nm, 分裂环外半径 $R=50$ nm 及宽度 $t=10$ nm, 金纳米棒长度 $l=30$ nm 及宽度 $w=10$ nm 在本文中均保持不变。考虑的波长范围为 $0.4\sim 2.0$ μm 。

采用二维时域有限差分方法 (finite-difference time-domain method, FDTD) 进行模拟计算。超材料结构的 FDTD 元胞尺寸设置为 $L_x \times L_y=400$ nm \times 600 nm, 时间步长取 $\Delta t=\Delta x/2c$ (c 为真空中光速), 空间步长取 $\Delta x=\Delta y=1$ nm。 x 方向偏振的平面电磁波沿 y 方向正入射至模拟结构, 模拟空间沿 x 方向用周期性边界条件, y 方向用完全匹配层条件。

与频率有关的金属介电常数采用 Drude 模型进行修正, 可用式 (1) 表示:

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

式中: ω_p 为等离子体频率;

ω 为入射电磁波频率;

γ 为阻尼系数, 与能量损失有关。

根据参考文献 [22], 本文研究金属为金, 其参数分别为 $\omega_p=1.374 \times 10^{16}$ s^{-1} , $\gamma=4.08 \times 10^{13}$ s^{-1} 。

3 结果与讨论

3.1 纳米棒间距变化对透射谱的影响

首先研究谐振环内金纳米棒距离变化对结构光学透射谱的影响, 所得结果如图2所示。

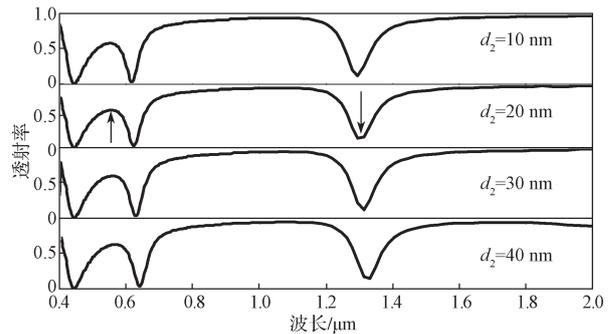


图2 纳米棒间距变化时谐振环对的光学透射谱

Fig. 2 Optical transmission spectra of resonant ring pairs with different distances between the double nanobars d_2

保持缝宽 $w=10$ nm, 谐振环内介质介电常数 $\epsilon=1$ 不变, 纳米棒间距 d_2 从 10 nm 变化至 40 nm。从图2可以看出, 在波长 λ 处于 $0.8\sim 1.2$ μm 区间, 以及在波长大于 1.5 μm 区域, 透射效率极高, 达到98%以上。从图中明显看出, 随着 d_2 的增加, 整个光学透射谱出现轻微红移。这可能是因为金纳米棒距离的增加, 减少了双棒之间的等离子体耦合, 因此需要的驱动

共振能量降低, 导致透射谱红移。此外, 短波区域出现一个透射峰, 当 d_2 从 10 nm 增加到 40 nm 时, 透射峰位置从 0.554 μm 处红移到 0.566 μm 处, 透射效率从 57.6% 增加到 62.0%。与之对应的是, 长波区域出现一个透射谷, 此时的透射效率仅在 11% 左右。理论和实验研究结果均已经表明, 周期性的复合金属结构的光学透射谱中会出现尖锐的透射谷, 谷的出现对应于结构中激发的相位共振, 相位共振导致了透射效率的突然降低以及内部场的明显增强。Wu S. 等^[23]以理论和实验研究了同轴正方形分裂环三明治结构中的类相位共振, 发现对于 π - 相共振模, 能量由于相消干涉不能够隧穿样品, 因此在透射谱中出现透射谷。而对于 0- 相共振模, 将会由于相长干涉出现透射峰。

为了进一步了解透射峰及透射谷产生的原因, 图 3 给出当 $d_2=20$ nm 时, 共振峰及谷 (图 2 中箭头所示) 波长处的瞬时电场分量 E_x 和 E_y 的分布情况。图 3a、3b 对应位于波长 $\lambda=0.557$ μm 处的共振峰, 图 3c、3d 对应位于波长 $\lambda=1.296$ μm 处的共振谷。

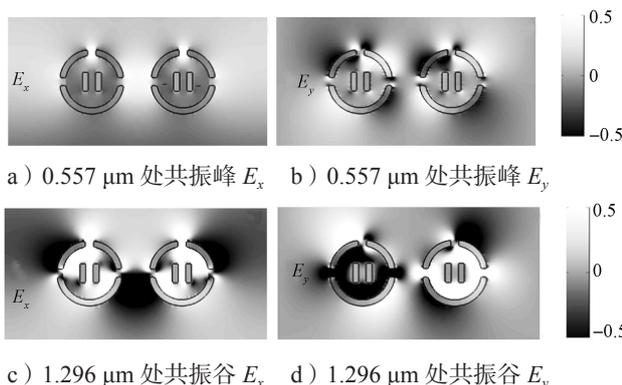


图 3 共振峰/谷瞬时电场分量 E_x 和 E_y 空间分布图

Fig. 3 Spatial distribution of instantaneous electric field components E_x and E_y at the resonance peak and dip

首先, 图 3a 显示电场分量 E_x 在两个谐振环内有非常微弱的负电场分布, 在上端开口缝位置局域了强烈的正电场, 两个谐振环之间也有较强的正电场分布。对于电场分量 E_y 分布来说, 图 3b 显示 E_y 主要局域在谐振环的金属壁周围及纳米棒的边缘, 这属于边缘效应。另外, 谐振环的外部及开口缝间展示出四极子分布模式。对于共振峰而言, 在谐振环内的电场分布 E_x 、 E_y 几乎一致, 仅有一些细微的强度差异。所以, 谐振环内的相位分布同相位, 也就是 0- 相共振模式, 对应的是共振峰。

但是, 对于透射谷来说, 情况刚好相反。图 3c 显示电场分量 E_x 在谐振环内表现为四极子分布模式, 在缝平行于外电场极化强度方向时 (上方开口缝), 缝内表现为电场偶极模式分布, 在缝垂直于外电场

极化强度方向时 (左右两侧开口缝), 缝内展现出电场单一模式分布。图 3d 显示 E_y 电场偶极模式在左右两侧开口缝内被激发, 而单一模式分布在上方开口缝内。在谐振环和开口缝内局域了强烈的电场, 左侧谐振环内局域负电场, 右侧谐振环内局域强烈的正电场, 两谐振环内电场振动方向相反, 所以电磁场在两环内分布是反相的, 也就是 π - 相共振模式被激发, 这种现象对应于共振谷。图 3 中的电场分布情况说明了图 2 中共振峰及谷的起源。

3.2 缝宽变化对透射谱的影响

接下来研究谐振环上开口缝宽变化对结构光学透射谱的影响, 结果见图 4。参数 $d_2=20$ nm, $\epsilon=1$ 保持不变, 开口缝宽度 w 从 8 nm 增加到 14 nm。

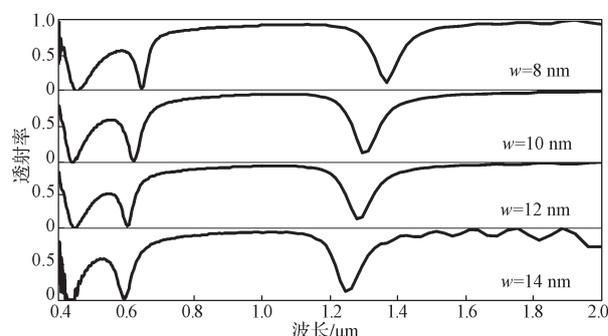


图 4 开口缝宽度变化时谐振环对的光学透射谱

Fig. 4 Optical transmission spectra for the resonant ring pairs with the variation of opening widths

从图 4 可以看出, 当缝宽不断增加时, 光学透射谱明显蓝移。开口缝结构可以类比于平行板电容器, 即开口缝两侧当作两个厚为 10 nm 的金属平板间隔距离 w 放置^[24], 可用等效 LC 电路来描述此结构, 谐振环上的缝及谐振环分别当做等效电容 (C) 及等效电感 L ^[25], 缝的形状决定了等效电容 C , 而谐振环的几何形状决定了等效电感 L ^[26], 结构的谐振频率用下式表示:

$$\omega = 1/\sqrt{LC}, \quad (2)$$

$$C \propto \epsilon S/w. \quad (3)$$

式 (3) 中: ϵ 为介质的介电常数;

S 为电容面积。

根据式 (3), 当缝宽 w 增大时, 依赖于开口缝几何参数的等效电容会减小, 根据式 (2), 这将增大谐振频率, 因此谱线蓝移。

3.3 谐振环内介质介电常数变化对透射谱的影响

最后研究谐振环内介质介电常数变化对结构光学透射谱的影响, 所得结果如图 5 所示。开口缝宽 $w=10$ nm, 金纳米棒间距 $d_2=20$ nm 保持不变, 介电常数 ϵ 从 1 增加到 4。

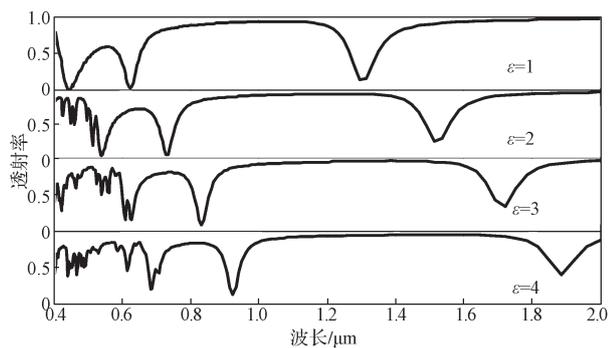


图5 谐振环内介质介电常数变化时谐振环对的光学透射谱

Fig. 5 Optical transmission spectra for the resonant ring pairs with different environmental dielectric constants ϵ in the resonant rings

从图5可以看到,填充不同介质对于光学透射谱的影响很大。首先,光谱随介电常数增大发生了显著的红移;其次,在可见光区出现了许多不规则的谐振峰,数量随着介电常数的增大而增多;最后,当 ϵ 从1变化至4时,原位于 $0.557\ \mu\text{m}$ 的谐振峰强度由0.586增加到0.837,原位于 $1.296\ \mu\text{m}$ 处的共振谷强度由0.135增加到0.397。加入介质对于光学谱的影响主要来源于金属结构和介质交界面的诱导镜像电荷,如果此结构处在依赖于时间的外场中,介质会被极化并且在谐振环内产生额外的极化分量,电子不仅会对原来的电磁场产生影响,并且由介质极化所产生的电磁场也会被影响^[27]。所以短波区域内的谐振峰数量不断增多。另外,等离子体共振被认为是一种电子气振荡,回复力由诱导的表面电荷提供,当谐振环内填充介质时,介质会被极化并因此减小表面电荷强度。因此回复力减小、等离子体能量降低^[18]。介电常数越大,极化效应越明显。这是透射谱红移的原因。

4 结论

本文运用FDTD方法,研究内置金纳米双棒的谐振环对的光学性质,可得出如下结论:

1) 课题组发现当纳米棒距离增大时,光学透射谱出现轻微红移,通过研究电场分布情况,课题组发现共振峰起源于 0^- 相共振模式,共振谷起源于 π^- 相共振模式;

2) 当开口缝宽不断增加时,依赖于开口缝几何参数的等效电容会减小,从而导致光学透射谱明显蓝移;

3) 填充不同介质对于光学透射谱的影响非常大。透射谱随介电常数的增大发生显著红移,且在可见光区出现越来越多的不规则谐振峰。

近年来,纳米谐振环被越来越多的研究者关注^[28-34],本文结果对新型谐振环以及光子器件的设计具有理论指导意义。

参考文献:

- [1] KASCHKE J, WEGENER M. Optical and Infrared Helical Metamaterials[J]. *Nanophotonics*, 2016, 5(4): 510-523.
- [2] LIU Y, ZHANG X. Metamaterials: a New Frontier of Science and Technology[J]. *Chemical Society Reviews*, 2011, 40(5): 2494-2507.
- [3] ZHENG X, SMITH W, JACKSON J, et al. Multiscale Metallic Metamaterials[J]. *Nature Materials*, 2016, 15(10): 1100-1106.
- [4] 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.
- [5] SOUKOULIS C M, DECKER M, WEGENER M, et al. Twisted Split-Ring-Resonator Photonic Metamaterial with Huge Optical Activity[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(10): 1593-5.
- [6] BAENA J D, MARQUES R, MEDINA F, et al. Artificial Magnetic Metamaterial Design by Using Spiral Resonators[J]. *Physical Review B*, 2004, 20(1): 1985-1988.
- [7] CHENG Y, YANG H, CHENG Z, et al. Perfect Metamaterial Absorber Based on a Split-Ring-Cross Resonator[J]. *Applied Physics A*, 2011, 102(1): 99-103.
- [8] SMITH D R, PADILLA W J, VIER D C, et al. Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84(18): 4184-4187.
- [9] LAHIRI B, KHOKHAR A Z, RICHARD M, et al. Asymmetric Split Ring Resonators for Optical Sensing of Organic Materials[J]. *Optics Express*, 2009, 17(2): 1107-1115.
- [10] LIU N, LIU H, ZHU S, et al. Stereometamaterials[J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(3): 157-162.
- [11] SINGH R, ROCKSTUHL C, LEDERER F, et al. Coupling Between a Dark and a Bright Eigenmode in a Terahertz Metamaterial[J]. *Physical Review B*, 2009, 79(8): 085111.
- [12] OKAMOTO T, OTSUKA T, SATO S, et al. Dependence of LC Resonance Wavelength on Size of Silver Split-Ring Resonator Fabricated by Nanosphere Lithography[J]. *Optics Express*, 2012, 20(21): 24059-24067.

- [13] DECKER M, FETH N, SOUKOULIS C M, et al. Retarded Long-Range Interaction in Split-Ring-Resonator Square Arrays[J]. *Physical Review B*, 2011, 84(8): 3189–3197.
- [14] NIESLER F B, FETH N, LINDEN S, et al. Second-Harmonic Optical Spectroscopy on Split-Ring-Resonator Arrays[J]. *Optics Letter*, 2011, 36(9): 1533–1535.
- [15] YAN S, VANDENBOSCH G A E. Compact Circular Polarizer Based on Chiral Twisted Double Split-Ring Resonator[J]. *Applied Physics Letter*, 2013, 102(10): 211.
- [16] NI B, CHEN X S, HUANG L J, et al. A Dual-Band Polarization Insensitive Metamaterial Absorber with Split Ring Resonator[J]. *Optics & Quantum Electronics*, 2013, 45(7): 747–753.
- [17] SHI J H, ZHU Z, MA H F, et al. Tunable Symmetric and Asymmetric Resonances in an Asymmetrical Split-Ring Metamaterial[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 112(7): 788-R.
- [18] LIU X, LIU H, SUN Q, et al. Metamaterial Terahertz Switch Based on Split-Ring Resonator Embedded with Photoconductive Silicon[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(11): 3478–3483.
- [19] PAPASIMAKIS N, THONGRATTANASIRI S, ZHELUDEV N I, et al. The Magnetic Response of Graphene Split-Ring Metamaterials[J]. *Light Science & Applications*, 2013, 2(7): e78.
- [20] ZHOU X, FANG J, TANG B, et al. Transmission of Light Through Double Gold Nanobars Embedded in Split Ring Pair Array[J]. *Optics Communications*, 2015, 355: 156–160.
- [21] MORENO E, FERNÁNDEZ-DOMÍNGUEZ A I, CIRAC J I, et al. Resonant Transmission of Cold Atoms Through Subwavelength Apertures[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 95(17): 170406.
- [22] PALIK E D, GHOSH G. *Handbook of Optical Constants in Solids: Volume 3*[M]. Boston: Academic Press, 1998: 12–13.
- [23] WU S, ZHOU L, WANG Y M, et al. Phaselike Resonance Behavior in Optical Transmission of Sandwich Coaxial Square Ring Arrays[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(25): 253102-3.
- [24] LIU S D, ZHANG Z S, WANG Q Q. High Sensitivity and Large Field Enhancement of Symmetry Broken Au Nanorings: Effect of Multipolar Plasmon Resonance and Propagation[J]. *Optics Express*, 2009, 17(4): 2906–2917.
- [25] BAENA J D, MARQUES R, MEDINA F, et al. Artificial Magnetic Metamaterial Design by Using Spiral Resonators[J]. *Physical Review B*, 2004, 20(1): 1985–1988.
- [26] CHEN C Y, UN I W, TAI N H, et al. Asymmetric Coupling Between Subradiant and Superradiant Plasmonic Resonances and Its Enhanced Sensing Performance[J]. *Optics Express*, 2009, 17(17): 15372–15380.
- [27] PRODAN E, LEE A, NORDLANDER P. The Effect of a Dielectric Core and Embedding Medium on the Polarizability of Metallic Nanoshells[J]. *Chemical Physics Letters*, 2002, 360(3/4): 325–332.
- [28] SHADRIVOV I V, MORRISON S K, KIVSHAR Y S. Tunable Split-Ring Resonators for Nonlinear Negative-Index Metamaterials[J]. *Optics Express*, 2006, 14(20): 9344-9.
- [29] SALIM A, LIM S. Complementary Split-Ring Resonator-Loaded Microfluidic Ethanol Chemical Sensor[J]. *Sensors*, 2016, 16(11): 1802.
- [30] NASIRI B, ERRKIK A, ZBITOU J, et al. A New Compact Microstrip Band-Stop Filter by Using Square Split Ring Resonator[J]. *International Journal of Microwave & Optical Technology*, 2017, 12(5): 367–373.
- [31] WEI F, QIN P Y, GUO Y J, et al. Compact Balanced Dual- and Tri-Band BPFs Based on Coupled Complementary Split-Ring Resonators(C-CSRR)[J]. *IEEE Microwave & Wireless Components Letters*, 2016, 26(2): 107–109.
- [32] ALAHNOMI R A, ZAKARIA Z, RUSLAN E, et al. A Novel Symmetrical Split Ring Resonator Based on Microstrip for Microwave Sensors[J]. *Measurement Science Review*, 2016, 16(1): 21–27.
- [33] GUI Y, YANG B, ZHAO X, et al. Angular and Polarization Study of Flexible Metamaterials with Double Split-Ring Resonators on Parylene-C Substrates[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(16): 011303-227.
- [34] FATHNAN A A, AMRULLAH Y S, WIJAYANTO Y N, et al. A Compact X-Band Bandpass Filter Using Rectangular Split Ring Resonators for Radar Applications[C]// *International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications*. Bandung: IEEE, 2016: 60–63.

(责任编辑: 申 剑)