

文章编号: 2095-4980(2022)06-0565-05

复合鱼鳞型超构材料中光控 Fano 谐振的设计

史金辉, 董国华, 徐文霞, 王影, 孙梦柯, 李玉祥, 朱正, 吕博

(哈尔滨工程大学 物理与光电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150000)

摘要: 为解决传统超构材料存在的结构一旦形成, 其谐振特性便无法进行动态可调的问题, 本文将鱼鳞型超构材料与光电导材料硅相结合, 实现了太赫兹波段 Fano 电磁响应的动态调控。该复合超构材料由鱼鳞型金属线、硅层以及聚酰亚胺组成。在鱼鳞型结构的金属弧线无、有缝隙两种情况下, 研究了电磁波的入射角度和硅的电导率对 Fano 谐振的影响。当硅的电导率达到 1×10^3 S/m 时, 多频点电磁响应的调制深度都接近 1。结果表明, 调节缝隙宽度可以成为 Fano 谐振工作频率调控的有效方式。本文为实现超构材料中 Fano 谐振的可调谐特性提供了一种可行途径, 对实际应用中太赫兹波的主动调控、传感等方面具有重要意义。

关键词: 超构材料; 鱼鳞型; 可调谐; Fano 谐振; 硅

中图分类号: TN02; O43

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021253

Optically controlled Fano resonance in hybrid fishscale metamaterial

SHI Jinhui, DONG Guohua, XU Wenxia, WANG Ying, SUN Mengke, LI Yuxiang, ZHU Zheng, LYU Bo

(College of Physics and Optoelectronic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin Helongjiang 150000, China)

Abstract: The resonance features of traditional metamaterial are fixed and unable to be tuned dynamically. A hybrid fishscale metamaterial combined with integrated photoconductive silicon is proposed to realize a tunable THz Fano response. The hybrid metamaterial is composed of a metallic fishscale structure, silicon layer and polyimide substrate. The tunable Fano resonance is investigated by changing the incident angle and the conductivity of silicon layer in the proposed hybrid fishscale metamaterial without or with split in the metallic arc. When the conductivity of silicon layer reaches 1×10^3 S/m, the modulation depth reaches 1 at multiple THz frequencies. The proposed hybrid metamaterial offers an opportunity to achieve tunability of Fano resonance, and is of importance for active tuning, sensing in THz applications.

Keywords: metamaterial; fishscale; tunability; Fano resonance; silicon

太赫兹波是指频率在 0.1~10 THz 范围的电磁辐射波, 位于电磁波谱微波波段与红外波段之间。因为太赫兹波在电磁波谱上处于特殊位置, 决定了太赫兹波具有独特的应用前景^[1-2]。超构材料由亚波长的电磁谐振单元结构组成, 通过改变谐振单元的结构类型、尺寸或排布规律, 可获得自然材料中从未发现过的奇特电磁性质, 为太赫兹电磁波调控提供了前所未有的灵活性^[3], 也为太赫兹技术的应用提供了可能。

1961 年, Ugo Fano 研究了氦电子非弹性散射谱中的非对称谐振峰, 并给予理论解释, 因此人们将这种类型的谐振模式命名为 Fano(法诺)谐振^[4]。Fano 型谐振通常基于明-暗模之间的耦合^[5], 或来源于非对称结构的明-明亮模之间的耦合激发^[6]。近年来, 关于类电磁诱导透明(Electromagnetically Induced Transparency, EIT)和 Fano 谐振的超构材料研究受到了广泛关注。当谐振处于弱失谐、幅值适当、大谐振线宽差异状态时, 超构材料中的 Fano 谐振等同于众所周知的 EIT 现象^[7]。目前, 研究人员在很多结构中已经实现了 Fano 谐振和 EIT 现象, 如非对称分裂环结构^[8-10]、Dolmen 结构^[5]、鱼鳞型结构^[6]等。太赫兹频率范围内 Fano 谐振广泛用于生物和化学传感、非线性、医学诊断及环境监测应用等方面^[11-12], 可控 Fano 型超构材料的研究对未来新型传感、成像、非线性等领域的发展具有较为重要的意义。

一般情况下, 当超构材料的结构确定后, 它的谐振模式也随之确定, 从而抑制了它们对电磁波的动态调制。

收稿日期: 2021-06-15; 修回日期: 2021-07-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1931121); 黑龙江省自然科学基金重点资助项目(ZD2020F002; ZD2018015)

因此,在实际应用中,可调谐特性的超构材料具有巨大的吸引力。将超导体、半导体、石墨烯、二氧化钒等材料与超构材料结合,实现对太赫兹波段电磁波的动力学调制,外加激励,如温度^[13]、电压^[14]以及光激发^[15-17]等,对太赫兹响应实现灵活控制。本文将鱼鳞型结构与光电导材料硅相结合,实现了对太赫兹波段电磁响应的动态调制:通过改变电磁波的入射角度,实现Fano谐振的开关功能;同时,固定电磁波的入射角度,改变硅的电导率,实现对Fano谐振的动态调谐,当硅的电导率达到 1×10^3 S/m时,在多个频率处超构材料的电磁响应调制深度接近1。由于使用硅层,本结构制备相对简单,Fano电磁响应的光控对太赫兹动态传感的发展具有一定的借鉴作用。

1 设计建模

本文提出的复合鱼鳞型结构和光控示意图如图1所示,图1(a)为单元的正视图,其中鱼鳞型结构由金组成,其厚度为200 nm,圆弧半径 $r=36 \mu\text{m}$,垂直金属线长 $l=36 \mu\text{m}$,上层鱼鳞型金属线宽为 $w=24 \mu\text{m}$ 。图1(b)为单元结构的立体图,其中光电导材料硅介于金属线和聚酰亚胺之间,其厚度为 $d=2 \mu\text{m}$,基底厚度 $t=15.6 \mu\text{m}$ 。图1(c)为光控示意图,通过改变太赫兹波矢与超构材料表面之间的夹角,可以实现高的透射峰,相当于Fano谐振的“打开”状态,通过外加泵浦光可以改变硅的电导率。

2 数据分析与讨论

利用 CST Microwave Studio 电磁软件对超构材料的电磁响应进行数值仿真,单元结构在 x -和 y -方向上设置为周期性边界条件,选取的仿真频率范围为 0.4~1.0 THz,频率步长为 0.000 6 THz,将聚酰亚胺的介电常数设置为 $\epsilon=3+0.009i$,金的电导率设置为 4.56×10^7 S/m。光电导材料硅用泵浦光激励下的不同电导率表示^[13],在外加不同功率的泵浦光下,硅的电导率可以在 $1 \sim 5 \times 10^3$ S/m 范围内变化^[15]。通过改变太赫兹波入射的角度或硅的电导率来控制 Fano 谐振的幅度,达到开关功能。

1) 鱼鳞型结构圆弧上没有缝隙的情况,即 $g=0 \mu\text{m}$ 时,通过改变太赫兹波的入射角度和硅的电导率对 Fano 谐振进行控制。图 2(a) 为复合鱼鳞型超构材料中硅的电导率(σ)为 1 S/m 时,超构材料的透射曲线随不同倾斜入射角的变化情况。从图中可以看出,当整层硅的电导率为 1 S/m,且入射角 $\alpha=0^\circ$ 时,只在 0.65 THz 处出现一个透射谷;当入射角达到 10° 时,在 0.52 THz 左右出现呈非对称形状的透射谱线,即产生 Fano 谐振;随着入射角的增大,透射曲线的非对称性越来越明显,透射振幅值也越来越大,低频处的谐振向频率小的方向移动(红移),而高频处的谐振向频率大的方向移动(蓝移),使 Fano 谐振的通带变宽,Fano 谐振峰所处的频率呈现蓝移趋势;当太赫兹波矢与超构材料表面之间的倾斜入射角达到 50° 时,在 0.54 THz 频率处出现最明显的 Fano 谐振,透射振幅为 0.74,高低频透射谷谐振间距为 0.28 THz。图 2(b) 为硅的电导率增加至 $\sigma=5 \times 10^3$ S/m 时,超构材料的电磁响应随入射角的变化,从图中可以看出,无论如何改变太赫兹波矢与超构材料之间夹角的大小,都没有 Fano 谐振出现,只有幅值很低的平滑线。

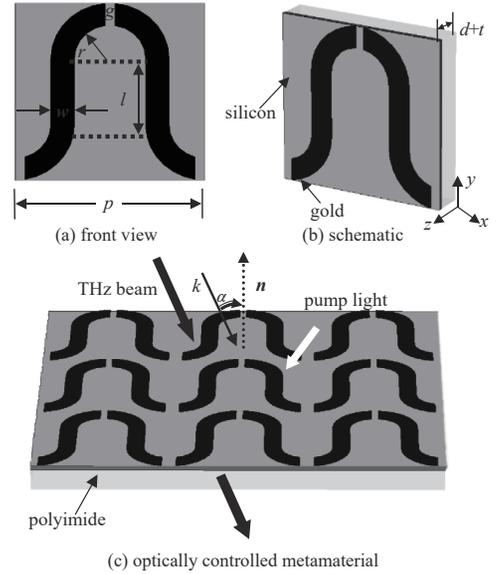


Fig.1 Schematic of the optically controlled hybrid fishscale metamaterial

图1 复合型鱼鳞结构示意图及光控示意图

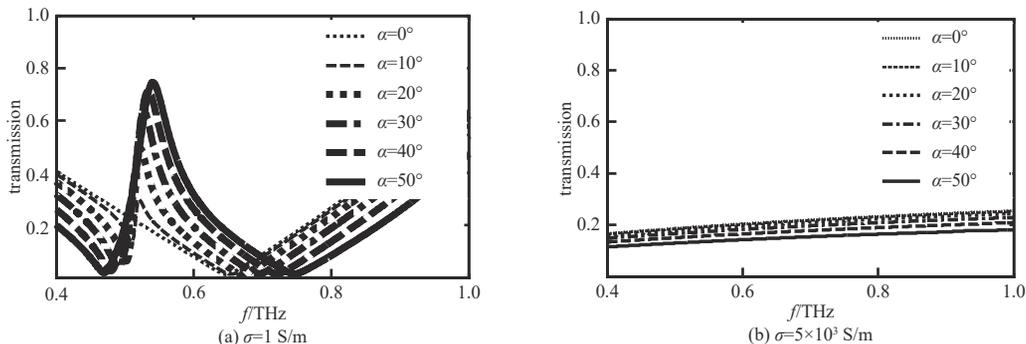


Fig.2 Angular dependence of the transmission spectra in the hybrid fishscale metamaterial ($g=0 \mu\text{m}$)

图2 $g=0 \mu\text{m}$ 时,入射角对透射曲线的影响

利用表面电流来解释出现上述现象的原因^[11]，当硅的电导率为 1 S/m，入射角 $\alpha=50^\circ$ 时，在谐振位置金属弧上激发的表面电流方向为反对称振动模式，产生的辐射场相消干涉，激发出 Fano 谐振模式。当整层硅的电导率调整为 5×10^3 S/m，入射角 $\alpha=50^\circ$ 时，相邻的金属条产生同向对称电流振动模式，与自由空间的耦合增强，透射减弱。因此，当硅的电导率为 1 S/m 时，通过改变太赫兹波矢与超构材料之间的夹角能够实现 Fano 谐振的开关功能。入射角在 $0^\circ \sim 50^\circ$ 的机械调制中，Fano 谐振可以实现从“关”到“开”的切换。随着泵浦光功率的增加，当硅的电导率达到 5×10^3 S/m 时，在 $0^\circ \sim 50^\circ$ 范围内，改变太赫兹波矢与超构材料之间的夹角都没有透射峰出现，这种情况不能实现开关切换功能。

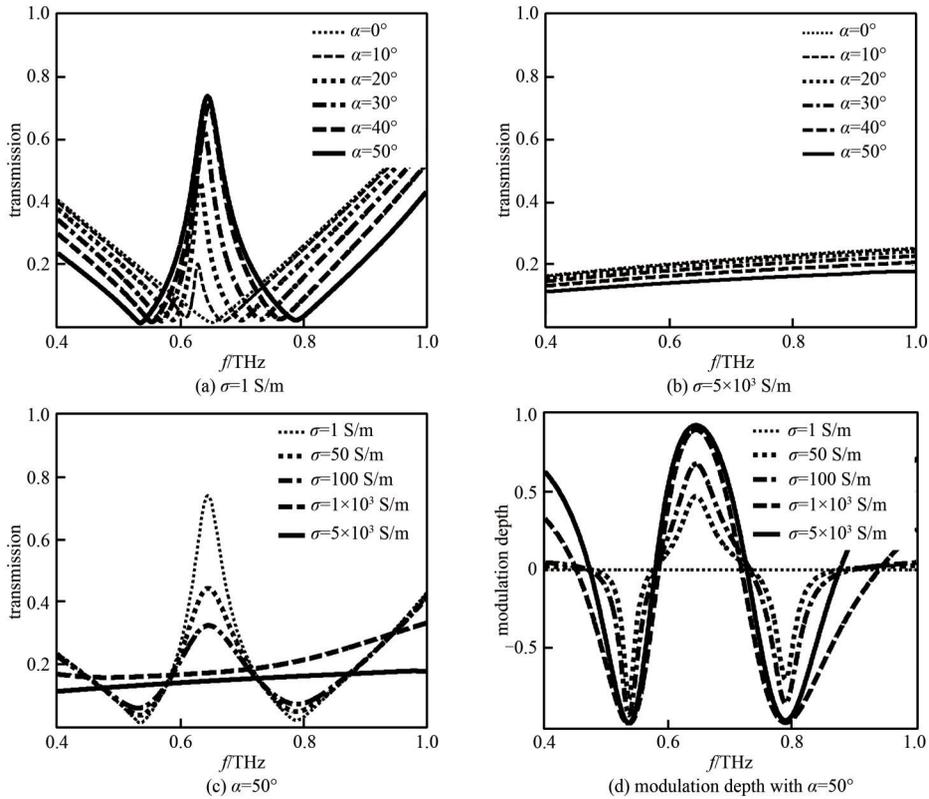


Fig.3 Angular and conductivity of silicon dependences of the transmission spectra and modulation depth in the split hybrid fishscale metamaterial with $g \neq 0 \mu\text{m}$

图 3 $g \neq 0$ 时,入射角和硅的电导率对超构材料的透射曲线以及调制深度的影响

2) 鱼鳞型结构圆弧上有缝隙的情况，缝隙宽度 g 固定为 $0.5 \mu\text{m}$ ，分别改变太赫兹波的入射角度和硅的电导率对 Fano 谐振进行调控。图 3(a) 为复合鱼鳞型超构材料的金属圆弧上缝隙宽度为 $0.5 \mu\text{m}$ ，固定硅层的电导率为 1 S/m，且其他参数保持不变时，超构材料的透射曲线随入射角变化的电磁响应情况。当入射角 $\alpha=0^\circ$ 时，大约在 0.65 THz 处出现一个谐振最小值；当 α 增大到 10° 时，在 0.62 THz 处出现透射峰，这个透射光谱可以由 Fano 谐振非对称来描述；随着入射角的增加，透射振幅值也越来越大，在 $\alpha=50^\circ$ 时，对应的透射振幅约为 0.74，说明当无泵浦光照射时，超构材料产生的 Fano 谐振完全依赖于太赫兹波矢与超构材料表面之间的夹角。图 3(b) 为其他参数保持不变的情况下，当硅的电导率增加为 5×10^3 S/m 时，复合鱼鳞型超构材料的透射曲线随入射角变化。当硅的电导率达到 5×10^3 S/m 时，改变入射角的大小，Fano 谐振都未出现。固定太赫兹波波矢与超构材料之间的夹角 $\alpha=50^\circ$ 不变，透射曲线随硅的电导率变化情况如图 3(c) 所示。当硅的电导率为 1 S/m 时，在 0.65 THz 频率处出现一个非对称形状的透射光谱，产生 Fano 谐振，振幅值约为 0.74，实现了具有高透射幅值的 Fano 谐振的“开”状态；随着硅电导率的增加，透射峰振幅越来越小，当电导率增大至 1×10^3 S/m 时，透射曲线变成了一条接近平滑的曲线；随着电导率的进一步增大，Fano 谐振仍处于“关”状态。当固定 $\alpha=50^\circ$ 不变时，进一步利用调制深度衡量开关状态，其表达式为 $M = (I_1 - I_2) / (I_1 + I_2)$ ，其中 I_1, I_2 分别代表泵浦光是否存在透射时的强度，如图 3(d) 所示。可以看出，在 0.65 THz 频率处，随着电导率的增大，调制深度也在相应增大，并且当硅的电导率达到 1×10^3 S/m 时，调制深度接近 1；之后再增大硅的电导率，调制深度几乎不变。在 Fano 透射谱的两个透射极小值处，调制深度为 -1，同样具有较好的开关效果。因此，硅层复合的超构材料可以实现多频的开关效果。由于硅层电导率相对

较低, 因此以较低的激光功率就可以获得较好的调制深度。为更好地了解复合鱼鳞型超构材料的光控开关特性, 在保持硅的电导率为 1 S/m , 入射角 $\alpha=50^\circ$ 不变的情况下, 分别研究了金属圆弧的缝隙宽度 g 和光电导材料硅的厚度 d 对 Fano 谐振的影响, 如图 4 所示。

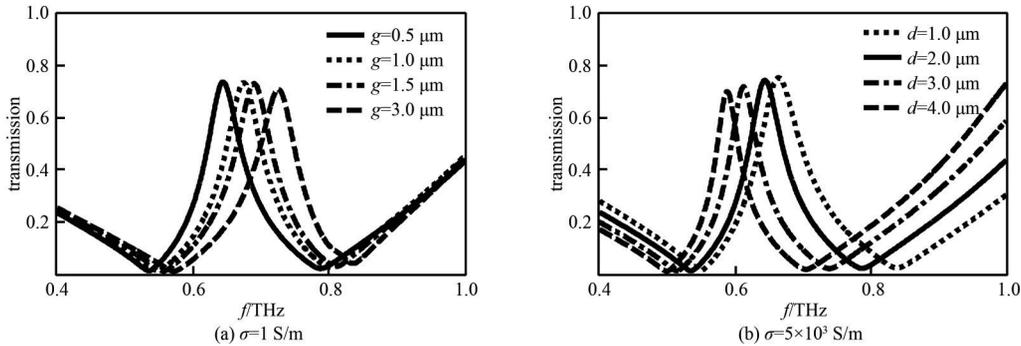


Fig.4 Transmission spectra of the split hybrid fishscale metamaterial with different g and d
图 4 缝隙复合鱼鳞型超构材料中结构参数对透射曲线的影响

图 4(a)给出了缝隙宽度分别为 $0.5 \mu\text{m}$, $1.0 \mu\text{m}$, $1.5 \mu\text{m}$ 和 $3.0 \mu\text{m}$ 时, 超构材料 Fano 谐振曲线。从图中可以看出, 随着缝隙宽度的增加, 透射峰幅值几乎没有发生变化, Fano 谐振峰频率发生蓝移, 说明通过调节缝隙宽度可以很方便地调整 Fano 谐振的工作频率。图 4(b)为金属圆弧的缝隙宽度固定在 $0.5 \mu\text{m}$ 且保持其他变量不变的情况下, 复合鱼鳞型超构材料中硅层厚度对透射峰的影响。当硅层的厚度由 $1 \mu\text{m}$ 逐渐增加至 $4 \mu\text{m}$ 时, 会发现 Fano 谐振所在的频率发生红移, 透射峰幅值略微减小, Fano 谐振的通带略微变宽。可以看出, 本文所提出的复合鱼鳞型超构材料开关特性可以很容易地通过金属圆弧缝隙宽度和硅层厚度来设计, 硅厚度的轻微改变会引起谐振频率较为明显的变化, 金属圆弧缝宽同样可用于设计不同谐振频率下的 THz 超构材料。

3 结论

本文设计了一种鱼鳞型结构与光电导材料硅组成的复合结构, 实现了对太赫兹波段 Fano 谐振的动态调控。通过改变太赫兹波矢的入射角度和硅的电导率, 实现了 Fano 谐振的“开”和“关”。无泵浦光入射, 入射角度达到 50° 时, 实现了 Fano 谐振“开”的状态, 其透射的幅值大约为 0.74 ; 当硅的电导率变化至 $1 \times 10^3 \text{ S/m}$ 时, 可实现 Fano 谐振在多个频率处近乎 1 的完美调制。当泵浦光功率使硅的电导率达到 $1 \times 10^3 \text{ S/m}$ 时, 单纯改变太赫兹波的入射角度不会激发 Fano 谐振, 即超构材料始终处于“关”的状态。此外, 研究还表明, 缝隙的宽度以及硅层的厚度变化可以很好地调控 Fano 谐振的工作频率。本文为实现超构材料中 Fano 谐振的可调谐特性提供了一种可行的途径, 对实际应用中太赫兹波的主动调控、传感等方面具有重要意义。

参考文献:

- [1] SIEGEL P H. Terahertz technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(3): 910–928. doi: 10.1109/22.989974.
- [2] RAHM M, LI J S, PADILLA W J. THz wave modulators: a brief review on different modulation techniques[J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2013, 34(1): 1–27.
- [3] 梅中磊, 张黎, 崔铁军. 电磁超材料研究进展[J]. 科技导报, 2016, 34(18): 27–39. (MEI Zhonglei, ZHANG Li, CUI Tiejun. Recent advances on metamaterials[J]. Science & Technology Review, 2016, 34(18): 27–39.) doi: CNKI: SUN: KJDB.0.2016–18–010.
- [4] FANO U. Effects of configuration interaction on intensities and phase shifts[J]. Physical Review, 1961, 124(6): 1866–1878. doi: 10.1103/PhysRev.124.1866.
- [5] ZHANG S, GENOV D A, WANG Y, et al. Plasmon-induced transparency in metamaterials[J]. Physical Review Letters, 2008, 101(4): 047401. doi: 10.1103/PhysRevLett.101.047401.
- [6] FEDOTOV V A, MLADYONOV P L, PROSVIRNIN S L, et al. Planar electromagnetic metamaterial with a fish scale structure[J]. Physical Review E, 2005, 72(5): 056613. doi: 10.1103/PhysRevE.72.056613.
- [7] LIMONOV M F, RYBIN M V, PODDUBNY A N, et al. Fano resonances in photonics[J]. Nature Photonics, 2017, 11(9): 543–554. doi: 10.1038/nphoton.2017.142.
- [8] FEDOTOV V A, ROSE M, PROSVIRNIN S L, et al. Sharp trapped-mode resonances in planar metamaterials with a broken structural symmetry[J]. Physical Review Letters, 2007, 99(14): 147401. doi: 10.1103/PhysRevLett.99.147401.

- [9] LU X Q, SHI J H, LIU R, et al. Highly-dispersive electromagnetic induced transparency in planar symmetric metamaterials[J]. Optics Express, 2012,20(16):17581–17590. doi:10.1364/OE.20.017581.
- [10] 唐雨竹, 马文英, 魏耀华, 等. 基于磁束缚模式相消干涉的类EIT超材料[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(2):191–194. (TANG Yuzhu, MA Wenying, WEI Yaohua, et al. A novel EIT-like metamaterial based on destructive interference between magnetic trapped modes[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(2):191–194). doi:10.11805/Atkyda201802.0191.
- [11] SRIVASTAVA Y K, CONG L, SINGH R. Dual-surface flexible THz Fano metasensor[J]. Applied Physics Letters, 2017,111(20):201101. doi:10.1063/1.5000428.
- [12] MANIJAPPA M, PITCHAPPA P, SINGH N, et al. Reconfigurable MEMS Fano metasurfaces with multiple-input-output states for logic operations at terahertz frequencies[J]. Nature Communications, 2018,9(1):4056. doi:10.1038/s41467-018-06360-5.
- [13] GU J, SINGH R, LIU X, et al. Active control of electromagnetically induced transparency analogue in terahertz metamaterials[J]. Nature Communications, 2012(3):1151. doi:10.1038/ncomms2153.
- [14] JUNG H, JO H, LEE W, et al. Electrical control of electromagnetically induced transparency by terahertz metamaterial funneling[J]. Advanced Optical Materials, 2019,7(2):1801205. doi:10.1002/adom.201801205.
- [15] XU Q, SU X, OUYANG C, et al. Frequency-agile electromagnetically induced transparency analogue in terahertz metamaterials[J]. Optics Letters, 2016,41(19):4562–4565. doi:10.1364/OL.41.004562.
- [16] HU Y, JIANG T, ZHOU J, et al. Ultrafast Terahertz frequency and phase tuning by all-optical molecularization of metasurfaces[J]. Advanced Optical Materials, 2019,7(22):1901050. doi:10.1002/adom.201901050.
- [17] WANG Y, ZHU J W, ZHANG H. Optically controlled redshift switching effects in hybrid fishscale metamaterials[J]. AIP Advances, 2018,8(5):055319. doi:10.1063/1.5023499.

作者简介：

史金辉(1979–), 男, 哈尔滨市人, 教授, 博士, 主要研究方向为超构材料及其应用. email: shijin-hui@hrbeu.edu.cn.

董国华(1993–), 女, 山东省日照市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为手性超构材料及可调谐特性.

徐文霞(1998–), 女, 山西省朔州市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为自旋角动量和轨道角动量的相互作用.

王影(1997–), 女, 辽宁省东港市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为天线与超构材料优化.

孙梦柯(1996–), 女, 安徽省宿州市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为超构材料及其应用.

李玉祥(1978–), 男, 哈尔滨市人, 讲师, 博士, 主要研究方向为图像处理和机器学习.

朱正(1980–), 男, 哈尔滨市人, 副教授, 博士, 主要研究方向为智能光电技术.

吕博(1984–), 男, 哈尔滨市人, 讲师, 博士, 主要研究方向为拓扑光学.