

文章编号: 1004-4353(2019)01-0027-04

太赫兹波导系统中的双带单向无反射现象

代天一, 赵菲, 金星日*

(延边大学 理学院, 吉林 延吉 133002)

摘要: 利用高阶等离子共振在 3 个桩状共振器边耦合到一个金属-绝缘体-金属等离子波导系统,并在该系统研究了双带单向无反射现象. 理论分析表明,在共振频率 5.594 THz 和 5.928 THz 处,向前方向的反射率均接近 0,向后方向的反射率分别约为 0.33 和 0.88,实现了双带的单向无反射. 双带单向无反射共振峰的品质因数分别为 25.4 和 49.4.

关键词: 太赫兹; 单向无反射; 异常点

中图分类号: O431

文献标识码: A

Dual-band unidirectional reflectionless phenomena in a terahertz waveguide system

DAI Tianyi, ZHAO Fei, JIN Xingri*

(College of Science, Yanbian University, Yanji 133002, China)

Abstract: The dual-band unidirectional reflectionlessness is studied in a system of three stub resonators side-coupled to a metal-insulator-metal plasmonic waveguide based on high-order plasmon resonance. Theoretical analysis shows that reflectance for forward direction is close to 0 and for backward direction is close to 0.33 and 0.88 at two resonance frequencies of 5.594 THz and 5.928 THz, respectively. Therefore, dual-band unidirectional reflectionlessness is realized. The quality factors of dual-band unidirectional reflectionless peaks are 25.4 and 49.4, respectively.

Keywords: terahertz; unidirectional reflectionlessness; exceptional point

0 引言

由于太赫兹(THz)波具有波长短、信噪比高、通信容量大等特点,使其在成像^[1]、通信^[2]和时域光谱^[3]等领域得到了广泛的应用. 近年来,许多 THz 功能器件也得到了快速发展,如滤波器^[4]、开关^[5]、调制器^[6]和完美吸收器^[7]等. 此外,一些基于 THz 波的现象也得到了进一步的研究,如 Fano 共振^[8]、电磁诱导透明^[9]、相位转变^[10]和单向无反射^[11-16]等. 最近,单向无反射的相关研究取得了一些进展. 例如:2013 年, Feng 等^[11]设计了一个被二氧化硅包裹的周期性调制硅波导,首次

在实验上验证了光学波导中的光频带单向无反射. 2015 年, Huang 等^[12]设计了两个桩状共振器边耦合一个金属-电介质-金属等离子波导的系统,实现了光频带单向无反射. 2016 年, Huang 等^[13]设计了一个增益-损耗不平衡的等离子波导-腔系统,实现了反射率差值更高的光频带单向无反射. 2017 年, Zhang 等^[14]基于近场耦合和远场耦合^[15],分别在等离子波导系统中实现了光频带单向无反射,且该结构不需要掺杂增益介质. 2018 年, Zhao 等^[16]基于近场耦合在表面等离子波导-腔系统中实现了光频带双带单向无反射. 上述研

究主要集中于光频带,而太赫兹频带的双带单向无反射还少有研究.基于此,本文设计了一个由 3 个等宽度、等间距的桩状共振器边耦合到一个金属-绝缘体-金属等离子波导上而组成的系统,通过选取合适的耦合相位,在两个异常点处实现了基于高阶等离子共振的太赫兹双带单向无反射.

1 模型与计算

图 1 为本文设计的金属-绝缘体-金属等离子波导结构示意图.3 个共振器(1、2 和 3) 沿着等离子波导上下交替放置,其宽度都为 $l = 3 \mu\text{m}$,间距为 $d = 2.5 \mu\text{m}$,高度分别为 $h_1 = 35 \mu\text{m}$, $h_2 = 37 \mu\text{m}$ 和 $h_3 = 38 \mu\text{m}$. 等离子波导和共振器中的绝缘体为空气,其周边金属材料为铝(介电常数为 $3.56 \times 10^7 \text{ S/m}$).数值模拟利用 CST Microwave Studio 软件完成.在模拟中,设铝板的宽度 $W = 100 \mu\text{m}$,长度 $L = 40 \mu\text{m}$.系统在 x 和 z 方向满足磁边界($H_t = 0$),在 y 方向满足电边界($E_t = 0$).

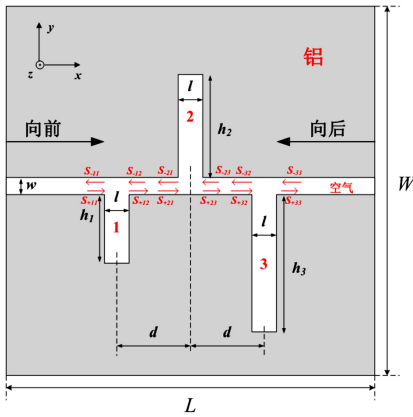


图 1 太赫兹等离子波导结构示意图

本文使用耦合模理论对结构进行研究.基于耦合模方程^[17-20],系统中 3 个共振器(1、2 和 3) 的时间演化振幅分别为 a_1 、 a_2 和 a_3 ,可以写为:

$$\frac{da_1}{dt} = (-i\omega_1 - \gamma_1 - \Gamma_1) a_1 + S_{+11} \sqrt{\Gamma_1} +$$

$$S_{-12} \sqrt{\Gamma_1} - ik_1 a_2,$$

$$\frac{da_2}{dt} = (-i\omega_2 - \gamma_2 - \Gamma_2) a_2 + S_{+21} \sqrt{\Gamma_2} +$$

$$S_{-23} \sqrt{\Gamma_2} - ik_1 a_1 - ik_2 a_3,$$

$$\frac{da_3}{dt} = (-i\omega_3 - \gamma_3 - \Gamma_3) a_3 + S_{+32} \sqrt{\Gamma_3} +$$

$$S_{-33} \sqrt{\Gamma_3} - ik_2 a_2.$$

其中, S_+ 和 S_- 分别表示等离子波导中向前和向后传输波的振幅, $\omega_{1(2,3)}$ 、 $\gamma_{1(2,3)}$ 和 $\Gamma_{1(2,3)}$ 分别表示共振器 1(2,3) 的共振频率、固有损失和衰减率.共振器 1,2(2,3) 之间共振模式的耦合系数为 $k_1(k_2)$.根据能量守恒,在等离子波导中传输波之间的关系可以表示为:

$$S_{+12} = S_{+11} - \sqrt{\Gamma_1} a_1, S_{-11} = S_{-12} - \sqrt{\Gamma_1} a_1,$$

$$S_{+23} = S_{+21} - \sqrt{\Gamma_2} a_2, S_{-21} = S_{-23} - \sqrt{\Gamma_2} a_2,$$

$$S_{+33} = S_{+32} - \sqrt{\Gamma_3} a_3, S_{-32} = S_{-33} - \sqrt{\Gamma_3} a_3,$$

且

$$S_{+21} = S_{+12} e^{i\varphi_1}, S_{-12} = S_{-21} e^{i\varphi_1},$$

$$S_{+32} = S_{+23} e^{i\varphi_2}, S_{-23} = S_{-32} e^{i\varphi_2},$$

其中,相位差 $\varphi_{1,2} = \omega \text{Re}(n_{\text{eff}})d/c$, n_{eff} 和 c 分别表示表面等离子激元(SPPs)^[21] 的有效折射率和真空中的光速.当 SPPs 沿着向前(向后)方向入射时,向前方向的透射系数 t_f 和反射系数 r_f 以及向后方向的透射系数 t_b 和反射系数 r_b 可以分别表示为:

$$t = t_f = \frac{S_{+33}}{S_{+11}} = t_b = \frac{S_{-11}}{S_{-33}},$$

$$r_f = \frac{S_{-11}}{S_{+11}}, r_b = \frac{S_{+33}}{S_{-33}}.$$

相应的,透射率、向前方向入射的反射率、向后方向入射的反射率分别为:

$$T = |t|^2, R_f = |r_f|^2, R_b = |r_b|^2. \quad (5)$$

图 2 为基于数值模拟和分析计算得到的反射光谱图.在分析计算中,相关参数分别取: $\varphi_1 = 1.073\pi$, $\varphi_2 = 1.029\pi$, $\gamma_1 = 0.06 \text{ THz}$, $\gamma_2 = 0.033 \text{ THz}$, $\gamma_3 = 0.03 \text{ THz}$, $\Gamma_1 = 1.45 \text{ THz}$, $\Gamma_2 = 3.2 \text{ THz}$, $\Gamma_3 = 1.68 \text{ THz}$, $k_1 = 0.137 \text{ THz}$, $k_2 = 0.03 \text{ THz}$.图 2 中,实线和点线分别代表数值模拟和分析计算的结果,粗黑色实线和点线表示向前方向入射的反射率 R_f ,细黑色实线和点线表示向后方向入射的反射率 R_b .显然,数值模拟结果和分析计算结果具有较好的一致性.从数值模拟的结果可以发现,在频率 5.594 THz 和 5.928 THz 处出现了 2 个单向无反射共振峰.在这 2 个共振频率处,向前方向的反射率均接近 0,向后方向的反射率约为 0.33 和 0.88.根据品质因数公式 $q = \frac{f}{\Delta f}$ (f 是共振频率, Δf 是半波宽),计算得到向前方向的

2 个反射光谱的品质因数分别为 25.4 和 49.4. 该结果表明,在 2 个 EPs 处实现了太赫兹双带单向无反射.

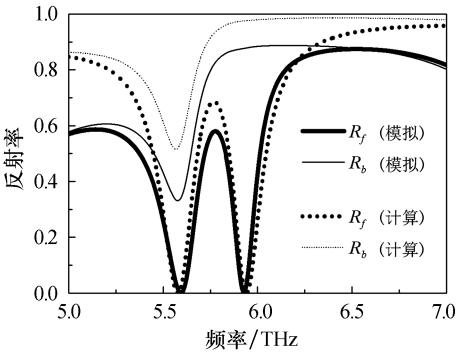


图 2 数值模拟和分析计算得到的向前和向后方向的反射光谱图

为进一步证明双带单向无反射现象,绘制向前和向后方向传输时 z 分量磁场分布图,如图 3 所示. 在共振频率 5.594 THz 处(图 3(a)),当 SPPs 沿着向前方向入射时,共振器 1、2 与共振器 3 的磁场分布相反,出现干涉相消,导致弱反射. 在共振频率 5.928 THz 处(图 3(c)),当 SPPs 沿着向前方向入射时,共振器 1、3 与共振器 2 的磁场分布相反,出现干涉相消,导致弱反射. 而当 SPPs 沿着向后方向入射时,在共振频率 5.594 THz 和 5.928 THz 处(图 3(b),图 3(d)),共振器 2 与共振器 3 的磁场分布相同,出现干涉相长,导致强反射. 从图 3 的磁场分布可以看到,每个共振器中都出现了高阶共振,这一现象与本征共振模式不同. 这表明,在太赫兹波导系统中实现了双带单向无反射.

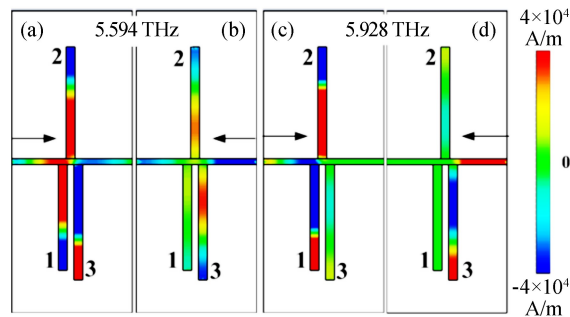


图 3 向前和向后方向传输的 SPPs 在 5.594 THz(a,b) 和 5.928 THz(c,d) 处的 z 分量磁场分布图

下面利用系统的散射矩阵 $S^{[11]}$ 进一步分析系统的物理特性.

$$S = \begin{pmatrix} t & r_b \\ r_f & t \end{pmatrix}.$$

相应的,散射矩阵 S 的本征值为

$$s_{\pm} = t \pm \sqrt{r_f r_b}.$$

当 $\sqrt{r_f r_b} = 0$ 时,2 个本征值合并,出现异常点,即在异常点处出现单向无反射. 图 4 给出了散射矩阵 S 本征值与频率的关系,图中实线和点线分别表示本征值 s_+ 和 s_- 的值. 由图 4 可以看到,在 2 个共振频率(5.594, 5.928 THz)处,本征值的实部合并,虚部交叉. 此时本征值 $s_+ = s_-$,即在 2 个 EPs 处, t 是复数, $\sqrt{r_f r_b} = 0$. 由此可知,在 5.594 THz 和 5.928 THz 处实现了双带单向无反射.

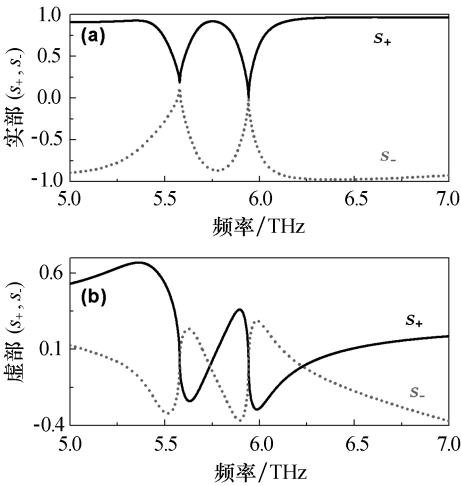


图 4 散射矩阵 S 的本征值 s_{\pm} 的实部(a)和虚部(b)

2 结论

本文在金属-绝缘体-金属等离子波导系统中基于高阶等离子共振实现了太赫兹频带的双带单向无反射. 与本征模式单向无反射相比,高阶模式单向无反射共振峰具有更高的品质因子,可以满足更高灵敏度器件的需求. 因此,本文结果对改良和开发太赫兹传感器、滤波器、类二极管等具有重要的参考价值.

参考文献:

[1] FERGUSON Bradley, ZHANG Xicheng. Materials for terahertz science and technology [J]. Nature Materials, 2002(1):26.
[2] TONOUCHI M. Cutting-edge terahertz technology [J]. Nature Photonics, 2007(2):97-105.

- [3] JEPSEN P U, COOKE D G, KOCH M. Terahertz spectroscopy and imaging-modern techniques and applications[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2011, 5:124-166.
- [4] YANG Kai, LIU Shuchang, Arezoomandan Sara, et al. Graphene-based tunable metamaterial terahertz filters[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(9):093105.
- [5] BAI Ruiping, ZHANG Cong, GU Xintong, et al. Switching the unidirectional reflectionlessness by polarization in non-ideal PT metamaterial based on the phase coupling[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1):10742.
- [6] CHEN Houtong, PADILLA W J, CICH M J, et al. A metamaterial solid-state terahertz phase modulator[J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(3):148.
- [7] BAI Ruiping, ZHANG Cong, GU Xintong, et al. Unidirectional reflectionlessness and perfect nonreciprocal absorption in stacked asymmetric metamaterial based on near-field coupling [J]. *Applied Physics Express*, 2017, 10(11):112001.
- [8] HE Xiaoyong, LIN Fangting, LIU Feng, et al. Terahertz tunable graphene Fano resonance [J]. *Nanotechnology*, 2016, 27(48):485202.
- [9] GU Jianqiang, SINGH Ranjan, LIU Xiaojun, et al. Active control of electromagnetically induced transparency analogue in terahertz metamaterials [J]. *Nature Communications*, 2012, 3:1151.
- [10] LAWRENCE Mark, XU Ningning, ZHANG Xueqian, et al. Manifestation of PT symmetry breaking in polarization space with terahertz metasurfaces[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(9):093901.
- [11] FENG Liang, XU Yelong, FEGADOLLI W S, et al. Experimental demonstration of a unidirectional reflectionless parity-time metamaterial at optical frequencies[J]. *Nature Materials*, 2013, 12(2):108.
- [12] HUANG Yin, VERONIS G, MIN Changjun. Unidirectional reflectionless propagation in plasmonic waveguide-cavity systems at exceptional points [J]. *Optics Express*, 2015, 23(23):29882-29895.
- [13] HUANG Yin, MIN Changjun, VERONIS G. Broadband near total light absorption in non-PT-symmetric waveguide-cavity systems [J]. *Optics Express*, 2016, 24(19):22219-22231.
- [14] ZHANG Cong, BAI Ruiping, GU Xintong, et al. Unidirectional reflectionless phenomenon in ultracompact non-Hermitian plasmonic waveguide system based on phase coupling[J]. *Journal of Optics*, 2017, 19(12):125005.
- [15] ZHANG Cong, BAI Ruiping, GU Xintong, et al. Unidirectional reflectionless propagation in plasmonic waveguide system based on phase coupling between two stub resonators[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(6):1-9.
- [16] ZHAO Fei, DAI Tianyi, ZHANG Cong, et al. Dual-band unidirectional reflectionlessness at exceptional points in a plasmonic waveguide system based on near-field coupling between two resonators[J]. *Nanotechnology*, 2018, 30(4):045205.
- [17] LU Hua, LIU Xueming, MAO Dong, et al. Induced transparency in nanoscale plasmonic resonator systems [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(16):3233-3235.
- [18] LU Hua, LIU Xueming, WANG Guoxi, et al. Tunable high-channel-count bandpass plasmonic filters based on an analogue of electromagnetically induced transparency[J]. *Nanotechnology*, 2012, 23(44):444003.
- [19] CAO Guangtao, LI Hongjian, ZHAN Shiping, et al. Uniform theoretical description of plasmon-induced transparency in plasmonic stub waveguide [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(2):216-219.
- [20] ZHANG Cong, BAI Ruiping, GU Xintong, et al. Dual-band unidirectional reflectionless phenomena in an ultracompact non-Hermitian plasmonic waveguide system based on near-field coupling[J]. *Optics Express*, 2017, 25(20):24281-24289.
- [21] WANG Kanglin, MITTLEMAN D M. Dispersion of surface plasmon polaritons on metal wires in the terahertz frequency range [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(15):157401.