

基于电磁诱导透明耦合共振的无源多端口环形器

付新铭

上海理工大学理学院, 上海

收稿日期: 2024年4月27日; 录用日期: 2024年5月22日; 发布日期: 2024年5月31日

摘要

受到集成光子学和硅光子学研究需求增大的影响, 片上集成系统中的光隔离器引起了人们的极大兴趣。最近的研究工作探索了非互易光隔离器, 并证明了当波向前或向后传输时的非互易传输对比。环形器属于隔离器的一种非互易器件, 然而, 这种环形器能否在特定条件下提供指定环形方向传输仍然是一个问题。本文分析了基于类电磁诱导透明原理的光环形器的动态非互易性。结果表明, 当能量传输时, 这种环形器可以实现非单一频率下的信号隔离与特定方向传输。

关键词

特异材料, 电磁诱导透明, 非互易, 环形器

Passive Multiport Circulator Based on Electromagnetically Induced Transparent Coupling Resonance

Xinming Fu

College of Science, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 27th, 2024; accepted: May 22nd, 2024; published: May 31st, 2024

Abstract

Due to the increasing research demand of integrated photonics and silicon photonics, optical isolators in integrated systems on chip have attracted great interest. Recent research efforts have explored non-reciprocal optical isolators and demonstrated non-reciprocal transmission contrasts

when waves are transmitted forward or backward. A circulator belongs to a class of nonreciprocal devices of isolators. However, it is still questionable whether such circulators can provide specified ring-direction transmission under specific conditions. In this paper, we analyze the dynamic nonreciprocity of optical circulators based on the principle of electromagnetic-like induced transparency. The results show that such a circulator can achieve signal isolation with specific directional transmission at non-single frequencies when energy is transmitted.

Keywords

Specific Material, Electromagnetically Induced Transparent, Non-Reciprocal, Circulator

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近来, 有很多学者探究了光隔离器的构造[1]。为了证明这些隔离器的非互易性, 通常在特定的功率范围内发射向前或向后的输入波, 以证明系统的正向高传输和反向低传输。建立非互易器件需要一个机制来打破洛伦兹对称互易性[2]。大多数非互易器件如光隔离器和环形器都是基于磁光法拉第效应, 其系统需要(电)磁铁的集成[3]。实现光学非互易的方法包括人工设计的波导[4]、构建光力学系统[5]、谐振器系统中的宇称时间对称性破缺[6]和布里渊散射[7]。其他系统包括基于微谐振器系统的空间非对称“光二极管”[8]。该器件基于非对称热共振频移现象进行工作, 但缺点是在正向传输光的光谱附近会发生动态反向传输[9]。

环形器相较于隔离器而言具有多个端口, 且能够同时工作进行处理信号的传输。在特定条件下输入能量, 以能够只在指定的方向上循环传输。目前, 在很多领域已经实现环形器器件的研究, 例如角动量偏置原理[10]、铁磁材料[11]、克尔效应[12]、光力学系统[13] [14]、范诺谐振器[15]、超导光机械电路[16]等。本文设计了基于特异材料的非互易器件, 应用电磁诱导透明原理, 可以实现电磁波信号的单向传输, 并且能实现电路中上下级之间的隔离。在小型化无线通信系统中, 该超宽带方型环形器工作在 0.2 GHz~1.2 GHz 的毫米波频段处, 实现了非单一频率工作的非互易隔离器。这项工作为非互易传输提供了一个巧妙的设计方案, 而且为后续研究工作提供了新的思路, 结构简单且实用可广泛应用于光子集成领域。

2. 类电磁诱导透明结构

构建了如图 1 所示的特异材料结构, 结构由完全对称的四个电路组成, 由四个相同的环路依次连接, 每个部分是通过微带线传输电磁波, 系统结构是分别由亮态(梳状线结构)和暗态(开口谐振环结构)组成。结构是由介电常数为 2.2 的介质基板上正面加载厚度为 0.787 mm 的金属铜以及背面覆相同厚度的铜组成。结构中外侧微带线 $s = 90$ mm, 内侧微带线 $t = 7$ mm, 线宽均为 2.4 mm。亮态谐振器是长 $l = 71.5$ mm, 线宽为 1.1 mm, 其中微带线与平行的微带线距离 $r_1 = 3.9$ mm 的梳状线结构。暗态谐振器即开口谐振环为 16 mm $\times$ 5 mm 的长方形, 线宽为 0.8 mm, 开口长度为 0.8 mm, 开口处加载电容 2.33 pf, 与梳状线结构距离 $r_2 = 0.3$ mm, 以便于能量耦合, 其中暗态结构与微带线距离较远 $d = 15$ mm, 是为了使能量不能够通过微带线进行耦合。在波导结构系统中, 微带线与梳状线结构进行耦合是二能级对应的经典系统, 再加载一个只与梳状线结构进行近场耦合的开口谐振环结构后, 便构成三能级 Λ 型系统。在这个结构中, 因

为梳状线结构能够与入射光直接耦合，因此对应为“亮态”原子；SRR 的能量只能通过“亮态”进行近场耦合，所以对应为“暗态”原子。当三能级结构中亮态结构与暗态结构的共振频率相同的时候，就会在此频率处出现一个透明窗口，这个频率便是 EIT 频率，那么此时结构便构成了 EIT 结构。其系统中的能量主要集中在暗态原子中，也就是 SRR 结构中，那么 SRR 的开口处会有很强的场局域。

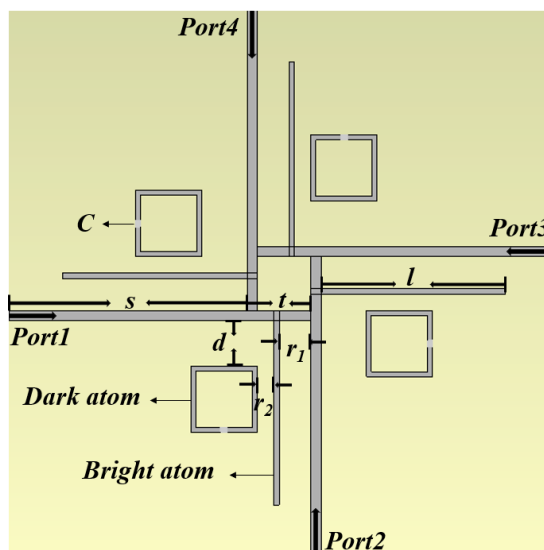


Figure 1. Schematic representation of fully symmetrical specific material structures

图 1. 完全对称的特异材料结构示意图

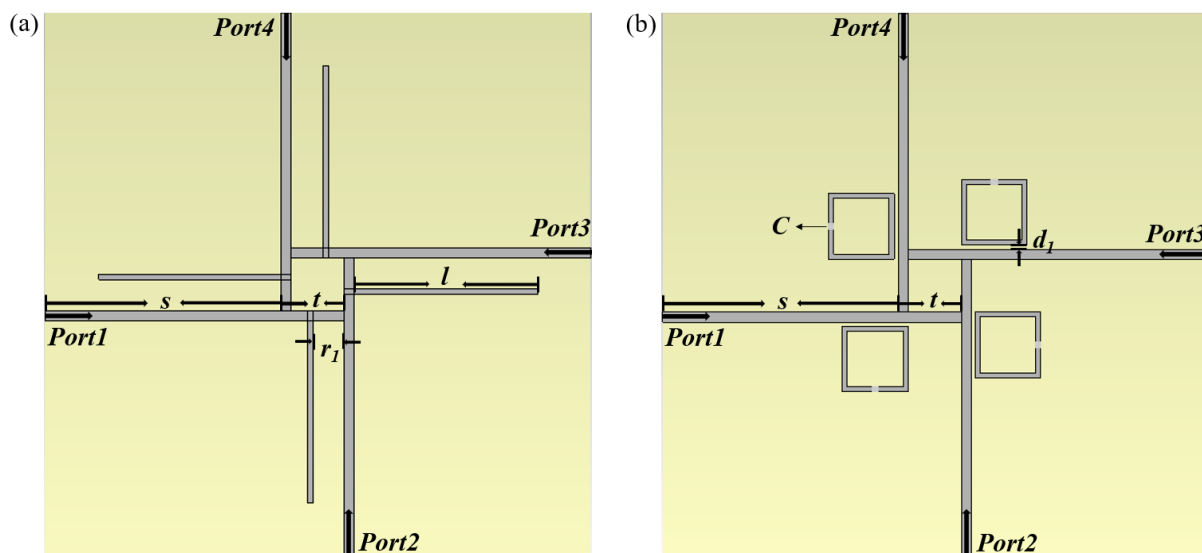


Figure 2. (a) Diagram lines of bright resonators; (b) Diagram lines of dark resonator

图 2. (a) 亮态谐振器的示意图; (b) 暗态谐振器的示意图

应用 CST(电磁仿真软件)分别计算结构传输能量过程中的透射结果。为了计算结果可靠，本文中所有结构都采用了在 CST 仿真软件中设置模拟环境为电磁板块，计算每个结构的时域结果，毫米波的频率范围为 0.2 GHz~1.2 GHz。首先在整个电路板结构的每个环路中分别只加载亮态原子(Bright atom)和暗态

原子(Dark atom)时计算透射谱线的共振频率。如图 2(a)所示, 在每个相同的环路中只加载了梳状线, 计算亮态谐振器的透射传输曲线, 进而分析亮态结构的共振频率。为了模拟结果更加准确, 在图 2(a)结构中的参数与图 1 结构的参数完全相同。如图 2(b)所示, 在每个相同的环路中只加载了暗态原子, 即加载了 2.33 pf 电容的开口谐振环结构。此时 SRR 与微带线距离较近 $d_1 = 0.3 \text{ mm}$, 是为了使暗态结构能够与微带线进行耦合能量, 模拟计算此暗态谐振器的透射传输曲线, 从而分析暗态结构的共振频率。为了模拟结果更加准确, 除了 SRR 与微带线距离不同外, 结构中的其它参数均与图 1 结构的参数相同。

由于图 2 所示结构是完全相同的四个电路, 所以计算从任一端口向其相邻另一端口的能量传输情况都是相同的。如图 3 所示结果, 取四个端口中相邻两个端口的能量传输透射曲线, 其中亮态谐振器的共振频率为 0.809 GHz, 当开口谐振环在开口处加载电容为 2.33 pf 时暗态谐振器的共振频率为 0.814 GHz, 此时表明通过调节结构的参数使二者具有几乎相同的共振频率。

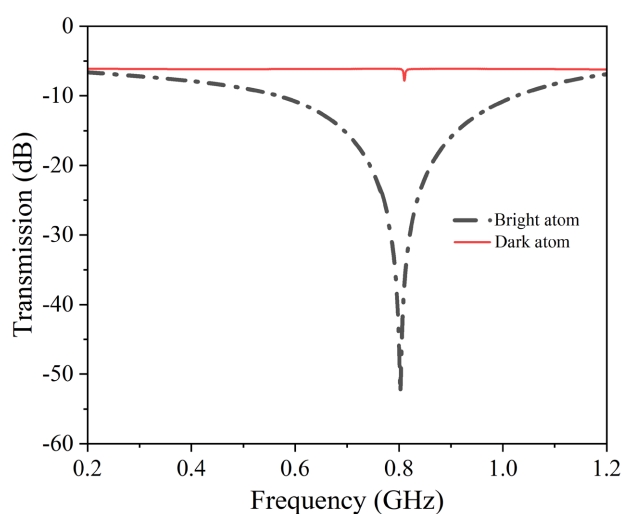


Figure 3. Transmission lines of bright and dark resonators

图 3. 亮态谐振器和暗态谐振器的透射谱线

如图 1 所示完全对称的特异材料结构示意图, 此时将具有共振频率几乎相同的亮态谐振器和单个暗态谐振器进行耦合。由于结构仍是相同的四个环路并且每个环路为对称系统, 所以应用 CST 仿真模拟软件分别计算图 1 所示结构和图 4(a)的结构中能量从某一端口向相邻的另一端口传输的透射曲线。电磁仿真图 1 所示结构的透射曲线为如图 4(b)中红色曲线代表结构的四个端口中任一相邻两个端口的能量传输透射曲线, 图谱显示透射曲线中存在一个波峰, 即在频率为 0.812 GHz 处出现透明窗口, 这表明结构的透射曲线形成了 EIT 曲线, EIT 频率便为 0.812 GHz, 即符合电磁诱导透明理论。进而分析当结构中加载两个暗态原子的情况, 如图 4(a)所示在每个环路的梳状线同侧多加载了一个 SRR。在图 4(a)结构中, 除了暗态原子的数量与图 1 不同外, 结构中其他所有参数都与图 1 相同。为了方便区分, 距离梳状线结构较近的暗态原子称为 Dark atom1, 与梳状线结构较远的暗态原子称为 Dark atom2。Dark atom1 和 Dark atom2 的尺寸的大小相等, 并且与微带线的距离完全相同, 以及在开口处加载的电容 $C_1 = C_2 = 2.33 \text{ pf}$, 所以 Dark atom2 不能够与微带线进行直接耦合, 同样是暗态结构。两个暗态结构距离较近 $r_2 = r_1 = 0.3 \text{ mm}$, 由于 Dark atom2 与亮态原子和微带线都距离较远, 所以 Dark atom2 只能与 Dark atom1 能够进行近场耦合, 从而进行传输能量。得到了如图 4(b)中黑色曲线为此时结构的透射传输曲线, 在透射传输谱线中出现了两个波峰, 频率分别为 0.778 GHz 和 0.854 GHz。结构中加载两个暗态原子与结构中加载单个暗态原

子相比, 曲线的波峰数量变多了, 并且两个波峰的频率分别为 EIT 频率红移和蓝移得到的结果, 便可以表明此时图 4(a)中双环结构是具有两个透明窗口的, 代表着通过增加暗态原子的数量能够使结构在多个频率处实现相应效果。

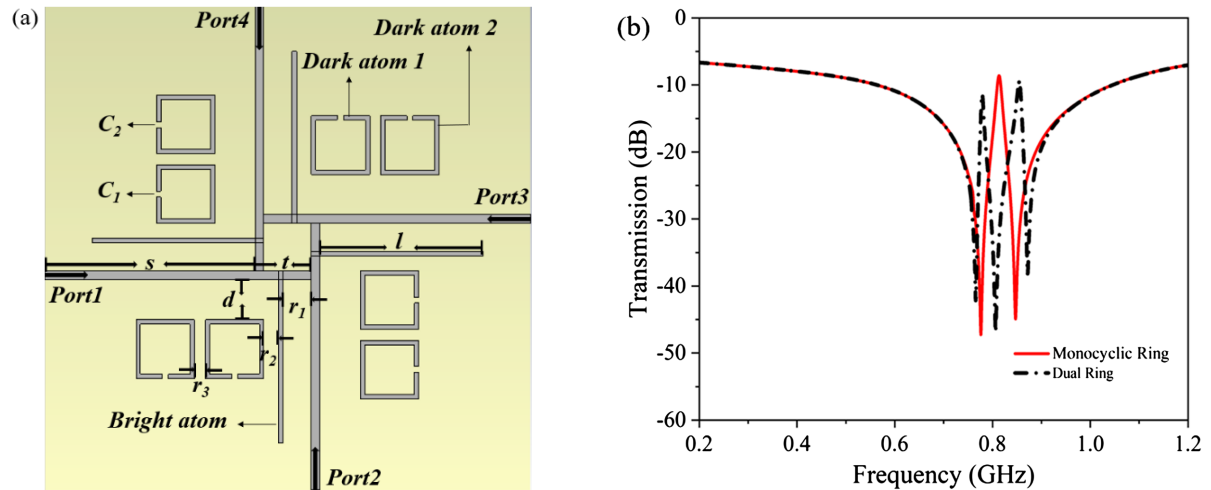


Figure 4. (a) Schematic of the structure of the specific material with a fully symmetric double dark state structure; (b) EIT transmission pattern

图 4. (a) 完全对称双暗态结构的特异材料结构示意图; (b) EIT 透射图谱

3. 双环环形器的电磁仿真

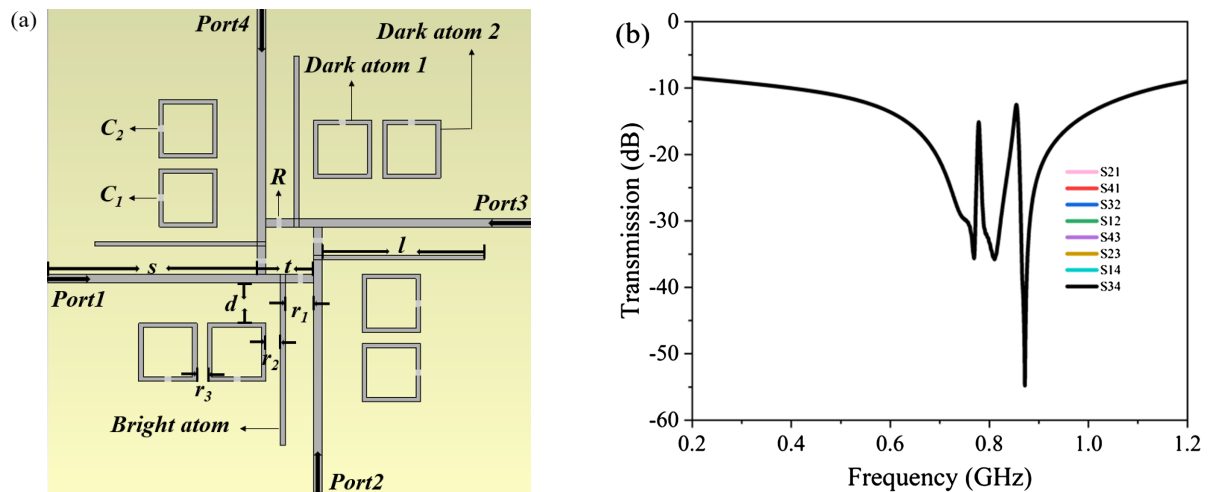


Figure 5. (a) Schematic structure of a double-ring circulator; (b) Transmission curve of a double-ring circulator

图 5. (a) 双环环形器结构示意图; (b) 双环环形器透射曲线

如图 5(a)双环环形器结构示意图所示, 基于图 4(a)所示四端口双暗态结构的每个环路中亮态结构一侧的微带线进行开口 1.2 mm, 在开口处都加载与其微带线阻抗匹配的电阻 $R = 50\Omega$, 其结构的参数与图 4(a)所示的结构参数完全相同。通过 CST 电磁仿真软件模拟计算当某一端口输入能量与其相邻的两端口的能量输出情况, 对应得到了八条透射曲线。例如, 当能量从 port1 输入, 分别测量 port2 和 port4 的输出能量的情况, 对应曲线分别为 S21 和 S41。同样测量其他三个端口的输入波导与其相邻的两个端口的

波导输出情况。得到如图 5(b)所示的透射曲线图谱, 结果显示当能量从不同的四个端口输入后, 分别传输到相邻的两个端口处的透射情况是完全相同的, 并且出现了两个明显的峰值, 对应的频率分别为 0.778 GHz 和 0.854 GHz, 这便代表着无论从任何一个端口输入能量传输到相邻的端口的情况都是相同的, 此双环环形器结构的两个波峰频率为 0.778 GHz 和 0.854 GHz。

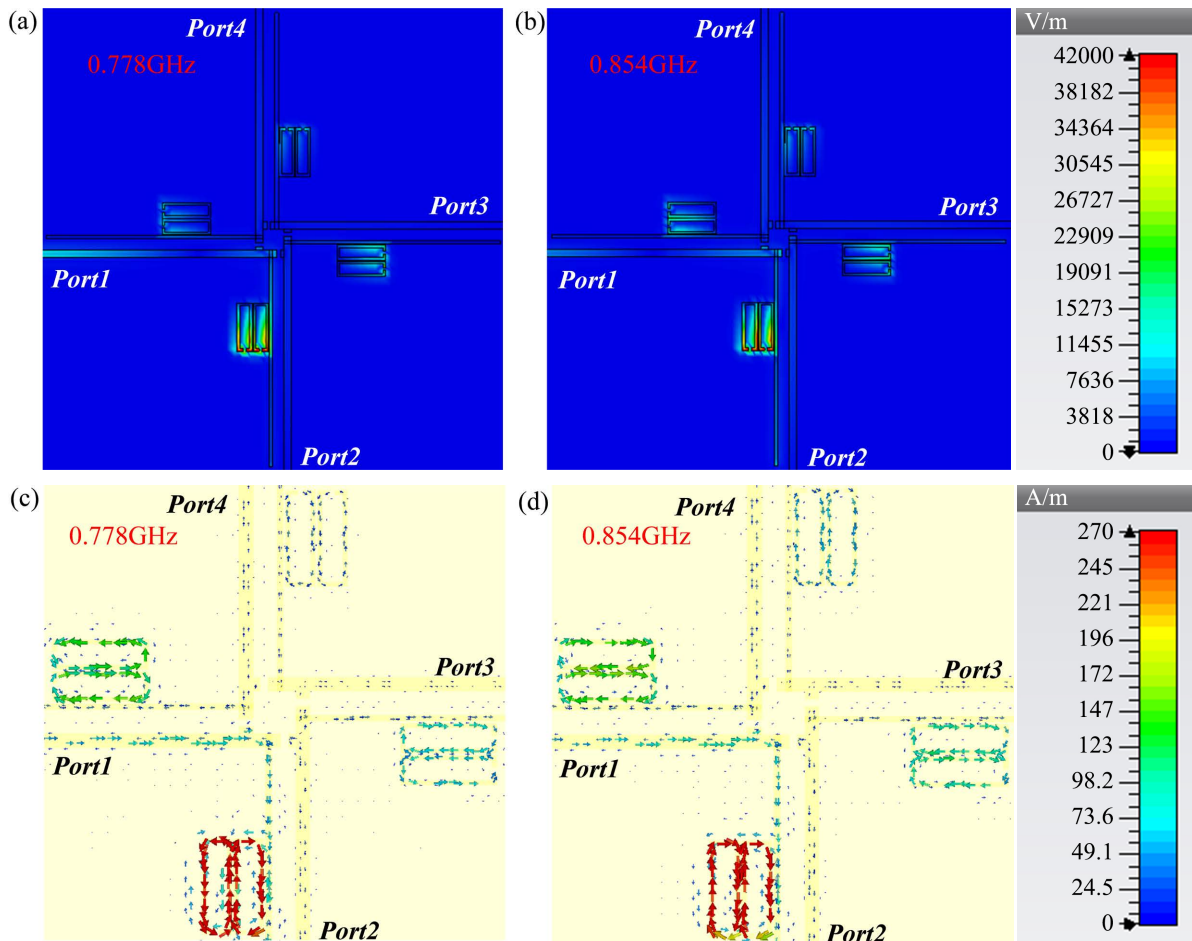


Figure 6. (a) Plot of field strength distribution at a frequency of 0.778 GHz; (b) Plot of field strength distribution at a frequency of 0.854 GHz; (c) Plot of current distribution at a frequency of 0.778 GHz; (d) Plot of current distribution at a frequency of 0.854 GHz

图 6. (a)频率为 0.778 GHz 的场强分布图谱; (b) 频率为 0.854 GHz 的场强分布图谱; (c) 频率为 0.778GHz 的电流分布图谱; (d) 频率为 0.854 GHz 的电流分布图谱

继续对此结构进行计算和分析, 得到了两个波峰频率的场强分布图谱和电流分布图谱, 如图 6 所示的结果。由于四个环路中两两相邻端口的透射情况完全相同, 所以图 6 所示的图谱均以能量从端口一入射, 分析传输到相邻的端口二和端口四为例。通过颜色便可以判断出结构中各处的场局域大小。如图 6(a)所示, 当波峰频率为 0.778 GHz 时的场强分布, 能量从 port1 入射, 能量几乎都集中在与 port2 相连的电路中两个 SRR 开口处, 也就是能量几乎全部传输到 port2 处而非传输到相邻的另一端口 port4 处。说明能量在每个环路中都是进行单向传输。传输的能量几乎都集中在两个开口谐振环的开口处, 这便代表着在 SRR 处的能量最高, 说明此处存在很强的场局域性, 如图 6(b)所示的另一个波峰频率 0.854 GHz 亦是如此。由于环路完全相同, 那么当能量从 port2 输入将几乎都传输到 port3 而不是 port1, 当能量从 port3

和 port4 输入, 将分别对应传输到 port4 和 port1。此现象是因为每个环路的一侧中都加载了作为能量吸收器的电阻元件所导致的。如图 6(c)和图 6(d)所示的两个波峰频率处的电流分布图谱, 电流是以环绕谐振环分布的, 这说明两个开口谐振环都是磁共振模式。结合图 5(b)的透射曲线分析, 图 5(a)的结构透射传输谱线的两个波峰频率处可导通环路中的两个 SRR 都存在着较强的场局域性并且共振方式为磁共振, 那么说明两个波峰频率处两个 SRR 开口处存在着很强的非线性效应。如果在此处加载着非线性元件, 如变容二极管等, 那么在两个波峰频率处将出现非线性非互易现象, 所以两个透射曲线波峰的频率都是非互易双环环形器的工作频率, 并且此结构中每个环路是能够在两个工作频率处进行单向传输, 说明入射波是能够在系统中进行定向逆时针传输, 即电磁波传输单方向是 port1 → port2 → port3 → port4 → port1, 这便得到了一个基于电磁诱导透明原理的非互易环形器。

4. 结论

本文基于电磁透明原理, 通过 CST 电磁仿真模拟软件计算得到了一个非互易环形器, 与隔离器不同的是此器件可以多个端口同时工作, 而并非仅限于两个端口的能量单向传导, 而且此环形器在可以多个工作频率下同时处理信息, 此设计可以广泛应用于信号处理领域。除此之外, 此结果可以提供一个思路: 即当加载多个暗态结构, 那么便会得到多个透射传输曲线峰值, 所以会在环形器器件中得到更多的工作频率, 也就是可以随意调换工作频率的频率与数量, 使器件具有更实用性, 这进一步扩展了非互易器件的研究范围。

参考文献

- [1] Jalas, D., Petrov, A., Eich, M., *et al.* (2013) What Is—and What Is not—An Optical Isolator. *Nature Photonics*, **7**, 579-582. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2013.185>
- [2] Fan, L., Varghese, L.T., Wang, J., *et al.* (2013) Silicon Optical Diode with 40 dB Nonreciprocal Transmission. *Optics Letters*, **38**, 1259-1261. <https://doi.org/10.1364/OL.38.001259>
- [3] Pintus, P., Huang, D., Zhang, C., *et al.* (2017) Microring-Based Optical Isolator and Circulator with Integrated Electromagnet for Silicon Photonics. *Journal of Lightwave Technology*, **35**, 1429-1437. <https://doi.org/10.1109/JLT.2016.2644626>
- [4] Feng, L., Ayache, M., Huang, J., *et al.* (2011) Nonreciprocal Light Propagation in A Silicon Photonic Circuit. *Science*, **333**, 729-733. <https://doi.org/10.1126/science.1206038>
- [5] Fang, K., Luo, J., Metelmann, A., *et al.* (2017) Generalized Non-Reciprocity in an Optomechanical Circuit via Synthetic Magnetism and Reservoir Engineering. *Nature Physics*, **13**, 465-471. <https://doi.org/10.1038/nphys4009>
- [6] Peng, B., Özdemir, K., Lei, F., *et al.* (2014) Parity-Time-Symmetric Whispering-Gallery Microcavities. *Nature Physics*, **10**, 394-398. <https://doi.org/10.1038/nphys2927>
- [7] Kang, M.S., Butsch, A. and Russell, P.S.J. (2011) Reconfigurable Light-Driven Opto-Acoustic Isolators in Photonic Crystal Fibre. *Nature Photonics*, **5**, 549-553. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2011.180>
- [8] Fan, L., Wang, J., Varghese, L.T., *et al.* (2012) An All-Silicon Passive Optical Diode. *Science*, **335**, 447-450. <https://doi.org/10.1126/science.1214383>
- [9] Shi, Y., Yu, Z. and Fan, S. (2015) Limitations of Nonlinear Optical Isolators Due to Dynamic Reciprocity. *Nature Photonics*, **9**, 388-392. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2015.79>
- [10] Estep, N.A., Sounas, D.L., Soric, J., *et al.* (2014) Magnetic-Free Non-Reciprocity and Isolation Based on Parametrically Modulated Coupled-Resonator Loops. *Nature Physics*, **10**, 923-927. <https://doi.org/10.1038/nphys3134>
- [11] Sun, X.Y., Du, Q., Goto, T., *et al.* (2015) Single-Step Deposition of Cerium-Substituted Yttrium Iron Garnet for Monolithic On-Chip Optical Isolation. *ACS Photonics*, **2**, 856-863. <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.5b00026>
- [12] Del Bino, L., Silver, J.M., Woodley, M.T.M., *et al.* (2018) Microresonator Isolators and Circulators Based on the Intrinsic Nonreciprocity of the Kerr Effect. *OPTICA*, **5**, 279-282. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.5.000279>
- [13] Li, B., Huang, R., Xu, X., *et al.* (2019) Nonreciprocal Unconventional Photon Blockade in A Spinning Optomechanical System. *Photonics Research*, **7**, 630-641. <https://doi.org/10.1364/PRJ.7.000630>

-
- [14] Ruesink, F., Miri, M.A., Alu, A., *et al.* (2016) Nonreciprocity and Magnetic-Free Isolation Based on Optomechanical Interactions. *Nature Communications*, **7**, Article No. 13662. <https://doi.org/10.1038/ncomms13662>
 - [15] Yang, K.Y., Skarda, J., Cotrufo, M., *et al.* (2020) Inverse-Designed Non-Reciprocal Pulse Router for Chip-Based Lidar. *Nature Photonics*, **14**, 369-374. <https://doi.org/10.1038/s41566-020-0606-0>
 - [16] Bernier, N.R., Toth, L.D., Koottandavida, A., *et al.* (2017) Nonreciprocal Reconfigurable Microwave Optomechanical Circuit. *Nature Communications*, **8**, Article No. 604. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00447-1>