

基于零折射率介质的超窄带光学滤波器*

周晓霞¹⁾ 陈英¹⁾ 蔡力^{2)†}¹⁾ (长沙学院电子信息与电气工程学院, 长沙 410000)²⁾ (国防科技大学, 智能科学学院装备综合保障技术重点实验室, 长沙 410073)

(2023 年 3 月 16 日收到; 2023 年 6 月 21 日收到修改稿)

本文提出一种基于零折射率介质的超窄带光学滤波器. 在线缺陷光学滤波器中引入具有类狄拉克点的光学超构材料, 利用其零折射效应来实现滤波带宽的压缩. 基于 COMSOL Multiphysics 软件的传输特性分析表明, 当超构材料的类狄拉克点频率与缺陷态的谐振频率相符合时, 光学滤波器的透射峰能够显著压缩; 电场分布及等效介质分析表明, 零折射率介质的零相位延迟效应与强色散特性能够增强缺陷态透射电磁响应随频率变化的灵敏度, 提高滤波器的品质因子, 并能在压缩滤波带宽的同时保持高的峰值透射率, 实现高耦合、超窄带的滤波设计. 该结果为基于光学超构材料的波分复用系统设计与应用提供了新的技术思路.

关键词: 光学超构材料, 窄带滤波器, 零折射率, 类狄拉克点**PACS:** 42.70.Qs, 42.25.Bs, 42.50.Pq**DOI:** 10.7498/aps.72.20230394

1 引言

窄带光学滤波器在密集波分复用 (DWDM)^[1]、激光雷达^[2] 等光通信与光信息处理系统及荧光显微镜、流式细胞仪、DNA 测序等精密激光仪器设备^[3] 中具有广泛的应用前景. 利用光学超构材料 (photonic metamaterials, PMs) 的带隙特性^[4,5] 和缺陷态光子局域特性^[6], 开发在相对较宽的光子禁带中具有高透过率和狭窄传输频段的光滤波器, 是超构材料应用探索研究广为关注的问题^[7-9]. 这些滤波器通常都采用微腔 (谐振腔) 结构, 其品质因子取决于谐振腔的结构设计. 研究者发展了环型腔^[10,11]、多谐振腔^[12]、谐振腔+反射壁^[13]、相移波导光栅结构^[14] 等多种超构材料滤波器模型, 滤波带宽能够实现 20 nm 的信道间隔, 达到粗波分复用系统的要求. 但随着 5G、6G、物联网、社区智能化等技术对大容量、高密度信息传输需求的迅速增长, 需要

DWDM 系统的复用信道数量进一步增加以提高对光纤的利用率, 使得信道间隔变得越来越窄. 作为提高信噪比、保证光通信质量的关键器件, 超窄带滤波器 (半功率带宽 <0.05 nm) 的研究引起越来越多的重视^[15]. 同时, 它对激光雷达、流式细胞仪等精密光学设备抑制背景干扰, 提高分辨率和探测距离也具有重要意义. 目前的光学超构材料滤波器还难以同时满足高透过率、超窄带宽的要求.

作为光学超构材料的一个重要分支, 零折射率超构材料 (zero-index media, ZIM) 由于具有高传播相速度、零相位延迟及高透过率等特性, 成为近年来研究的热点^[16-21]. 基于这些特性, ZIM 能够产生能量隧穿^[22,23]、高指向性辐射^[24,25]、无反射弯曲波导^[26,27] 等独特的电磁波操控效应, 为新型光学器件设计提供了新颖的思路. 由于 ZIM 的等效折射率通常在狭窄的频段内出现零折射率特性, 并在邻近频率范围剧烈变化, 表现出强色散特性^[28,29]. 这一特性有利于实现狭窄频段的波调控, 基于此本

* 国家自然科学基金 (批准号: 51975575) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: cailiyunnan@163.com

文设想将 ZIM 引入超窄带滤波器设计中, 在含缺陷态的超构材料设计模型中嵌入具有狄拉克锥光子能带特性的 ZIM, 通过调节尺寸和材料参数使得 ZIM 的狄拉克点频率位于光子禁带中, 且与缺陷态的谐振频率相吻合. COMSOL 仿真结果表明, 提出的设计模型在光子禁带中产生半峰高宽远小于仅仅利用缺陷态局域效应实现的窄带透射峰, 本文进而研究了 ZIM 对光学滤波器品质因子及峰值透射率的调节规律和机理, 结果表明滤波器能够在压缩滤波带宽的同时保持高的峰值透过率. 本研究工作为光学超构材料的超窄带光滤波器设计提供了一种新的思路.

2 理论模型

设想将基于类狄拉克点的零折射超构材料与基于缺陷态能量局域效应的光学超构材料滤波器设计相结合. 图 1(a) 为二维光学超构材料滤波器原理模型, 超构材料 PMs1 由介电圆柱按正方晶格周期性排列于空气中构成, 通过调节圆柱半径和晶格常数在需要的滤波频段产生光子禁带^[10]. 将其内部第 n 列和 $n+1$ 列单元的间距拉开 L_1 引入缺陷模式, 当缺陷态的特征频率 ω_0 位于禁带中时, 能够将光场局域在缺陷区域内形成光学谐振腔, 产生窄带滤波效果^[30]. 提高品质因子, 实现极窄带宽和峰值高透射率是滤波器应用于光通讯、传感等工程领域的发展方向. 本文设想在上述滤波器模型中引

入 ZIM, 在缺陷中嵌入厚度为 L_2 的 ZIM, 如图 1(b) 所示. ZIM 也由正方晶格周期性排列于空气中的介电圆柱阵列构成, 设计中保持晶格常数 a 为圆柱半径 R 的 5 倍, 即 $a = 5R$. 对于 TM 波 (横磁极化波, 电场沿着柱子的轴向方向) 极化, 这时该超构材料在 Bloch 波矢 $k = 0$ 处的 Γ 点位置存在一个由单极子模式和偶极子模式偶然简并形成的三重简并态^[17,31,32], 该模式附近的光子能带曲线具有线性特性并在 Γ 点相交^[33], 形成狄拉克锥形能带结构, Γ 点为类狄拉克点.

电磁波在该模型谐振腔中传播的相位延迟包括在背景介质中传播 L_1 的相位延迟 $\Delta\delta_1$ 和 ZIM 中传播 L_2 的相位延迟 $\Delta\delta_2$ 两部分. 在类狄拉克点频率 ZIM 可等效为介电常数和磁导率均为零的均匀介质, 其中的电磁波传播具有零相位延迟特性. 基于此, 考虑通过能带结构分析, 设计 ZIM 的类狄拉克点频率 ω_d 与滤波器的谐振频率 ω_0 相等, 即 $\omega_0 = \omega_d$. 则滤波器在 ω_0 谐振时, 电磁波在 ZIM 中传播 L_2 的相位延迟 $\Delta\delta_2 \approx 0$, ZIM 将左侧的电磁波场直接传递到右侧. 这时滤波器整体的谐振特性与宽度为 L_1 的线缺陷滤波器类似. 当频率偏离 ω_0 时, 谐振腔中的相位延迟偏离谐振条件使得透射响应迅速降低. 不含有 ZIM 时, 滤波器中只有 L_1 部分的相位延迟 $\Delta\delta_1$ 随频率发生变化; 而对含 ZIM 的滤波器, ZIM 部分的相位延迟 $\Delta\delta_2$ 由近似为零转为一个非零的有限值, 滤波器的响应延迟为 $\Delta\delta_1 + \Delta\delta_2$. 狄拉克锥陡峭的色散曲线意味着 ZIM 的等效相速度 ($v_p = c/n = c/\sqrt{\epsilon(\omega)\mu(\omega)}$) 在偏离 ω_0 时迅速减小, 相位延迟 $\Delta\delta_2$ 则迅速增大, 因而利用 ZIM 在类狄拉克点附加的电场响应特性能够提高滤波器对频率变化的敏感度, 从而使得透射峰带宽被有效压缩.

3 特性仿真与机理分析

选取 ZIM 的晶格常数 a 为 838 nm, 圆柱半径 R 为 167.6 nm, 圆柱体选用 GaAs, 相对介电常数和磁导率分布为 12.5 和 1, 背景介质为空气, 基于 COMSOL 的光子能带计算结果如图 2(a) 所示, 在 193.4 THz (波长 1552 nm) 出现三重简并的 Γ 点. 两侧 PMs1 的晶格常数为 700 nm, 圆柱半径为 60 nm, 材料参数与 ZIM 相同, 能带计算结果表明在 150—236 THz 之间出现第一光子禁带. 利用 COMSOL

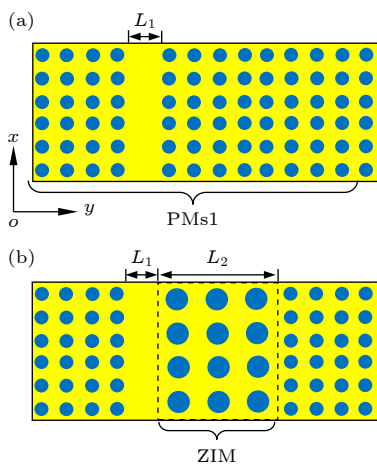


图 1 滤波器结构示意图 (a) 线缺陷滤波器; (b) 线缺陷+零折射超构材料滤波器

Fig. 1. Schematic diagram of the filter: (a) Structure of the filter with line defect; (b) structure of the filter with line defect and zero index metamaterial.

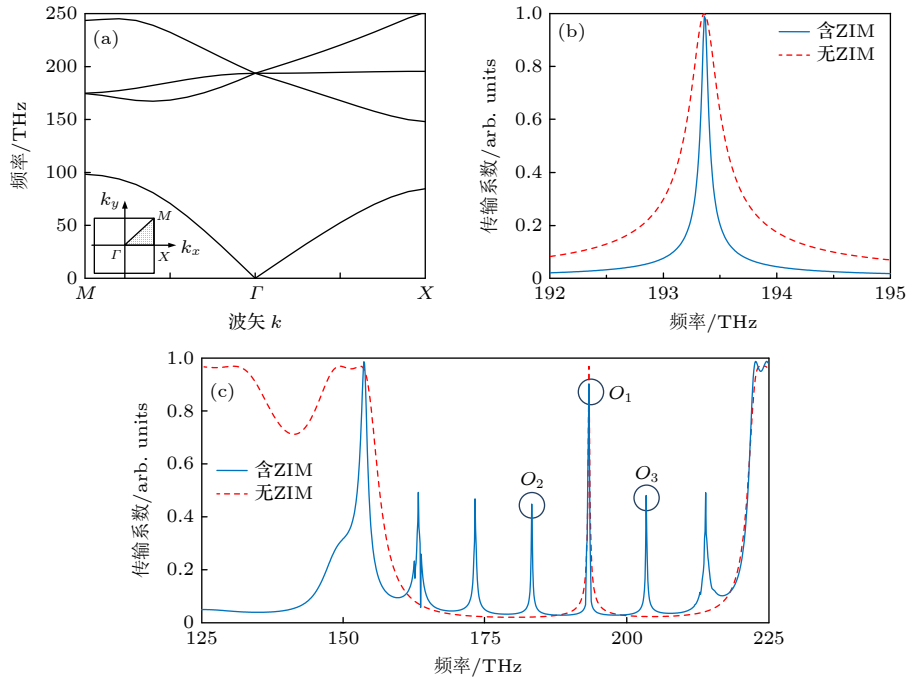


图 2 (a) 零折射超构材料的光子能带结构; (b), (c) 含零折射超构材料滤波器的传输特性

Fig. 2. (a) The band structure of a metamaterial with zero refractive index; (b), (c) transmission characteristics of filter with zero index metamaterials.

软件的波动光学模块分布建立图 1(a) 和图 1(b) 结构的仿真模型, 计算区域的左右两端采用散射边界条件, 在左端用 1 V/m 的振幅表征平面 TM 模电磁波从左向右的入射, 上下两端则采用周期性边界, 各区域均采用自由三角形网格, 单元最大尺寸小于计算频段最小波长的 1/10.

仿真结果表明, 对 $2n$ 列散射体 ($n = 6$) 构成的 PMs1, 在 ZIM 厚度 L_2 为 $4a$, 间隙 L_1 为 300 nm 时, 在 193.4 THz 产生窄带的透射峰 O_1 , 如图 2(c) 实线所示. 作为对比, 分析了图 1(a) 所示仅由 PMs1 构成的线缺陷滤波器特性, 分析中圆柱半径、晶格常数、材料参数和散射体列数均保持不变. 结果表明在 $L_1 = 288$ nm 时能够同样在 193.4 THz 形成透射峰, 如图 2(c) 虚线所示. 图 2(b) 为图 2(c) 中透射峰频段的局部放大图, 可以看到, 含 ZIM 滤波器的半峰高宽为 70 GHz, 不含 ZIM 滤波器的半峰高宽为 400 GHz. 在两侧 PMs1 的材料参数、厚度和结构参数不变时, 引入 ZIM 能够显著压缩滤波器的透射带宽.

进一步, 分析了 ZIM 厚度 L_2 变化时该集成结构滤波特性的变化. 分别取 L_2 为 $2a$, $4a$, $8a$, $12a$, 两侧 PMs1 保持不变, 调节 L_1 使得滤波器的透射峰保持在类狄拉克频率 193.4 THz 处. 透射系数仿

真结果如图 3(a) 所示. 可以看到, 随 ZIM 厚度增大, 滤波器的透射半峰高宽由 147 GHz 减小至 37 GHz, 品质因子明显提高, ZIM 厚度能够有效提高滤波器的窄带滤波特性. 图 3(b) 是在上述分析中, 间隙 L_1 随 ZIM 厚度的变化. 在 ZIM 的厚度从 $2a$ 增大到 $12a$ 的过程中, L_1 的变化小于 10%. 说明在类狄拉克频率处 ZIM 的厚度对滤波器谐振特性的影响很小. 图 4(a) 和图 4(b) 分别为 ZIM 厚度 $L_2 = 4a$ 和 $L_2 = 12a$ 时, 峰值频率处含 ZIM 滤波器中的波场分布仿真结果, 可以很明显地看到, 透射峰频率处滤波器中产生零阶谐振模式, 在 ZIM 内部, 电场强度的分布几乎是均匀的, ZIM 出射界面相位与入射界面相同, 波传播过程中相位几乎不发生任何变化, 即相位延迟 $\Delta\delta_2 = 0$. 进一步, 利用等效介质理论计算类狄拉克频率附近 ZIM 超构材料的等效参数^[34–36], 结果如图 4(c) 所示, 超构材料的等效介电常数和磁导率在透射峰值处均为零, 这与图 4(a) 和图 4(b) 的波场分布相符合. 正是超构材料在类狄拉克点的零折射特性, 使得滤波峰值频率受 ZIM 厚度的影响很小, 这时滤波器与宽度为 L_1 的不含 ZIM 的线缺陷滤波器类似. 为保持透射峰频率不变, L_2 大幅增大时需 L_1 略微增大的现象则说明在周期规模比较小时, 介质的折射特性与

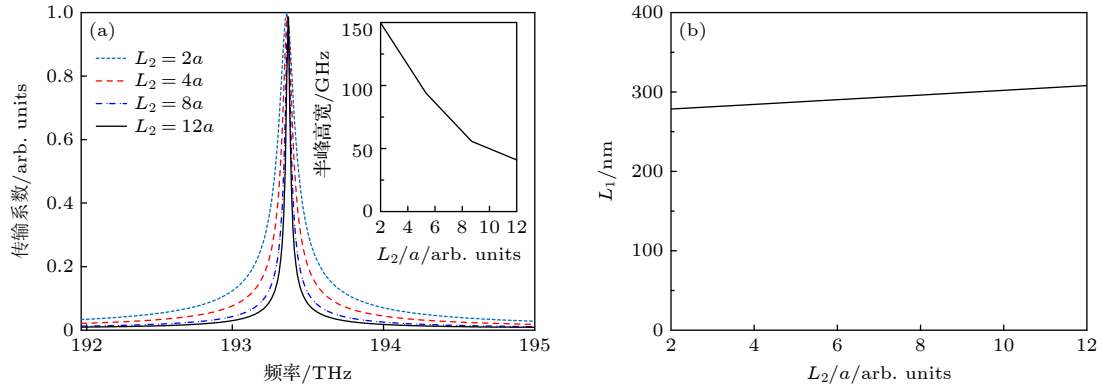

 图 3 (a) 传输谱和 (b) 缺陷间隙 L_1 随零折射超构材料厚度的变化

Fig. 3. The variations of (a) the transmission spectrum and (b) the width of the defect with the thickness of the zero index metamaterials.

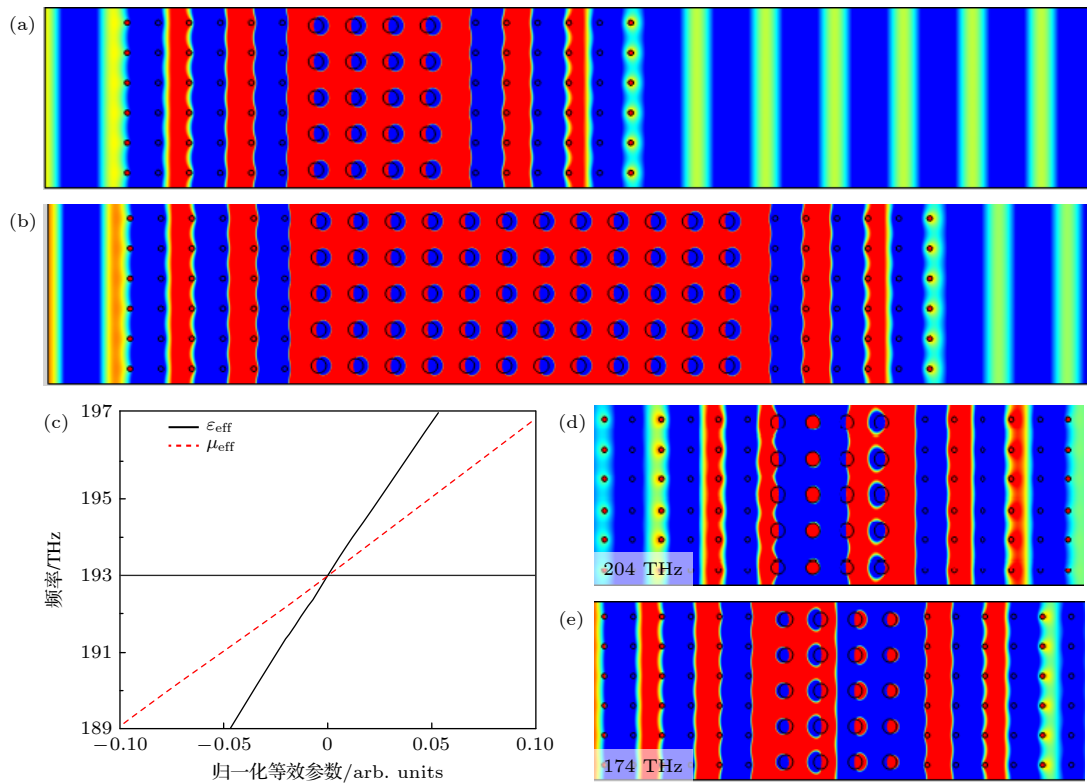


图 4 (a), (b) 类狄拉克点频率处滤波器中的波场分布; (c) 类狄拉克点附近 ZIM 的等效参数; (d), (e) 滤波器非零折射率透射峰 O_2 , O_3 的波场分布

Fig. 4. (a), (b) The field distribution in the filter near the Dirac-like point; (c) the effective permittivity and permeability of the ZIM as a function of frequency near the Dirac-like point; (d), (e) the field distribution in the filter at transmission peak O_2 and O_3 with nonzero refractive index.

理想周期结构的零折射特性有所偏离, 导致了微弱的相位延迟. 而随 L_2 的增大, 有限结构介质更趋近于理想零折射特性, 相位延迟进一步减小, 所以需要略微增大 L_1 来保持总的相位延迟不变.

当频率偏离 ω_0 时, 滤波器中相位延迟偏离谐振响应条件, 使得透射系数下降. 对不含 ZIM 的滤波器, 只有间隙 L_1 导致的相位延迟 $\Delta\delta_1$ 发生变化;

而对含 ZIM 的滤波器, 图 4(c) 中狄拉克锥陡峭的色散曲线意味着 ZIM 的等效相速度在偏离 ω_0 时由趋于无穷大转为迅速减小, 相位延迟 $\Delta\delta_2$ 则由近似为零转为迅速增大, 滤波器的相位延迟 $\Delta\delta_1 + \Delta\delta_2$ 远大于 $\Delta\delta_1$, 即利用 ZIM 在类狄拉克点附加的强色散效应能够提高滤波器频率响应的敏感度, 使得透射峰带宽被有效压缩, 且 $\Delta\delta_2$ 的变化随 ZIM 厚

度的增大而增大, 因此透射带宽随 ZIM 厚度的增大而减小. 同时, 在频率偏离狄拉克点频率时, ε_{eff} 和 μ_{eff} 的不同的变化趋势会使得 ZIM 的阻抗迅速变化, 与空腔中空气层间产生阻抗失配, 会使部分光在空腔中产生多次反射及相位延迟, 也能提高透射峰对频率变化的敏感度.

含 ZIM 滤波器中相位延迟 $\Delta\delta_1 + \Delta\delta_2$ 远大于 $\Delta\delta_1$ 还导致在光子禁带中产生更多的高阶透射峰. 对图 2(c) 中含 ZIM 滤波器在 O_2 (181.2 THz) 和 O_3 (205.5 THz) 透射峰处的波场分布分析表明, 这两个透射峰都是由滤波器的一阶谐振模式导致的, 如图 4(d) 和图 4(e) 所示, 同样的分析还表明更多的透射峰是由更高阶的谐振模式导致的. 通常谐振腔的一阶模式出现在远高于零阶谐振频率的位置, ZIM 的零折射和强色散特性使得滤波器在零阶谐振两侧都产生更高阶的谐振模式.

性能良好的滤波器需要在实现超窄带滤波的同时保持高耦合效率. 对图 1(a) 所示的不含 ZIM 的超构材料滤波器, 增大缺陷两侧超构材料 PMs1 的厚度将使得滤波器趋于理想缺陷态, 因而能够有

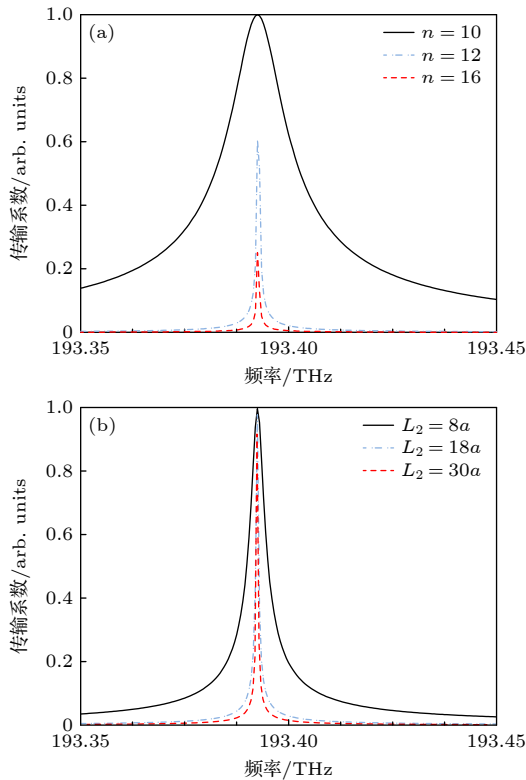


图 5 (a) 不含 ZIM 滤波器的传输谱随超构材料厚度的变化; (b) 含 ZIM 滤波器的传输谱随 ZIM 厚度的变化

Fig. 5. The variations of the transmission spectrum (a) with the thickness of PMs1 for the filter without ZIM and (b) with the thickness of ZIM for the filter with ZIM.

效压缩透射峰带宽. 分析表明, 当缺陷两侧 PMs1 的 $2n$ 列散射体从 n 为 10 增大到 16 时, 滤波带宽可由 30 GHz 压缩到 3 GHz 以下, 如图 5(a) 所示. 但两侧结构厚度的增大会使得谐振腔的耦合效率降低, 因而峰值透过率降低至 0.3. 图 5(b) 为含 ZIM 滤波器的带宽压缩结果, 在两侧 PMs1 的散射体保持 n 为 10 时, 将 ZIM 的厚度从 $L_2 = 8a$ 增大到 $L_2 = 30a$, 能够将透射带宽由 12 GHz 压缩到 3 GHz 以下, 同时峰值透过率能够保持在 0.9 以上. 零相位延迟特性使得 ZIM 在厚度大幅增大时也能与电磁场保持高的耦合效率, 而增大 ZIM 的厚度能显著压缩滤波带宽, 因而在超构材料滤波器中引入 ZIM 能够为兼顾超窄带宽和高峰值透过率设计提供思路.

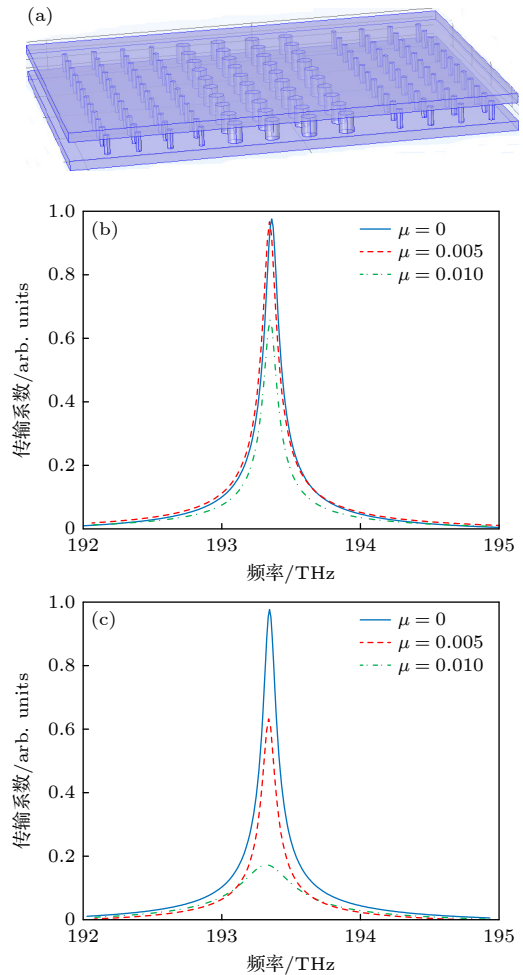


图 6 (a) 有限厚度的线缺陷+零折射超构材料滤波器示意图; (b) 考虑 PMs1 中介质柱损耗的滤波器传输谱; (c) 考虑 ZIM 中材料损耗的滤波器传输谱

Fig. 6. (a) Schematic diagram of the finite thickness filter with line defect and zero index metamaterial; (b), (c) transmission spectrum considering different material losses of dielectric columns in defects and in ZIM.

对上述含有复杂结构的光学器件, 边界辐射、材料损耗等都是影响其光学性能的重要因素. 为此, 进一步将图 1 中的二维模型拓展为有限长度圆柱阵列的三维模型, 如图 6(a) 所示. 图中结构尺寸与图 1 相同, 厚度为 200 nm, 上下表面设置为良导体 (Ag). 研究表明, 当上下边界设置完为完美导体边界时, 可以实现与二维模型类似的窄带滤波效果. 但将上下边界层设置为实际良导体时, 透射峰减小, 表明对含 ZIM 的器件, 边界的辐射损耗对滤波器透射效果的影响更为明显. 同时, 考虑分别在缺陷两侧 PMS1 中和 ZIM 中的 GaAs 介质柱中引入介电损耗. 不同损耗因子下, 滤波器透射系数随频率的变化如图 6(b) 和图 6(c) 所示. 可以看到, 同样的损耗因子, ZIM 介质中材料损耗导致的透射峰降低要远大于两侧的 PMS1. 显然, ZIM 中狄拉克点的电磁场模式为特殊的自旋模式, 由于这样的模式更利于电磁场能量的转化吸收, 使得滤波器对材料损耗更为敏感. 因此, 对含 ZIM 材料的器件, 其材料损耗和结构辐射是设计时需要重视的问题.

4 结 论

本文提出一种基于零折射超构材料的高耦合超窄带光学滤波器设计思路. 研究表明, 在缺陷态滤波器中嵌入具有类狄拉克锥光子能带特性的超构材料, 通过调节尺寸和材料参数使得狄拉克点频率与缺陷态的谐振频率重合时, 零折射材料的零相位延迟和强色散特性能够使滤波器在保持高峰值透过率的同时有效压缩滤波带宽, 实现高耦合超窄带设计. 该结果为光学超构材料在波分复用等光集成系统的应用提供了新的技术途径, 也为零折射率超构材料的应用探索提供了新的思路.

参考文献

- [1] Chen H M, Meng Q 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 014202 (in Chinese) [陈鹤鸣, 孟晴 2011 物理学报 **60** 014202]
- [2] Mao J D, Li J, Zhou C Y, Zhao H, Sheng H J 2013 *Laser Phys.* **23** 026003
- [3] Meng X J, Li J S, Guo Y, Du H J, Liu Y D, Li S G, Guo H T, Bi W H 2021 *J. Opt. Soc. Am. B.* **38** 1525
- [4] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059
- [5] Wang F, Cheng Y Z, Wang X, Qi D, Luo H, Gong R Z 2018

- Opt. Mater.* **75** 373
- [6] John S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2486
- [7] Fan S H, Villeneuve P R, Joannopoulos J D, Haus H A 1998 *Opt. Express* **3** 4
- [8] Luo Y X, Cheng Y Z, Chen F, Luo H, Li X C 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 044101 (in Chinese) [罗宇轩, 程用志, 陈浮, 罗辉, 李享成 2023 物理学报 **72** 044101]
- [9] Chen L, Liao D G, Guo X G, Zhao J Y, Zhu Y M, Zhuang S L 2019 *Front. Inform. Technol. Elect. Eng.* **20** 591
- [10] Yang C Y, Xu X M, Ye T, Miu L P 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 017807 (in Chinese) [杨春云, 徐旭明, 叶涛, 缪路平 2011 物理学报 **60** 017807]
- [11] Chen Y, Wang W Y, Yu N 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 034205 (in Chinese) [陈颖, 王文跃, 于娜 2014 物理学报 **63** 034205]
- [12] Yu J L, Shen H J, Ye S, Hong Q S 2012 *Acta Opt. Sin.* **32** 1106003 (in Chinese) [余建立, 沈宏君, 叶松, 洪求三 2012 光学学报 **32** 1106003]
- [13] Dai Z X, Wang J L, Heng Y 2011 *Opt. Express* **19** 3667
- [14] Chen C, Li X C, Li H H, Xu K, Wu J, Lin J T 2007 *Opt. Express* **15** 11278
- [15] Zhuang Y Y, Zhou W, Ji K, Chen H M 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 224202 (in Chinese) [庄煜阳, 周雯, 季珂, 陈鹤鸣 2015 物理学报 **64** 224202]
- [16] Edwards B, Alù A, Young M, Silveirinha M, Engheta N 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 033903
- [17] Huang X Q, Lai Y, Hang Z H, Zheng H H, Chan C T 2011 *Nat. Mater.* **10** 582
- [18] Cheng Q, Jiang W X, Cui T J 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 213903
- [19] Vulis D I, Reshef O, Camayd-Munoz P, Mazur E 2019 *Rep. Prog. Phys.* **82** 012001
- [20] Li Y, Chan C T, Mazur E 2021 *Light-Sci. Appl.* **10** 203
- [21] Luo J, Lai Y 2022 *Front. Phys.* **10** 845624
- [22] Silveirinha M G, Engheta N 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 157403
- [23] Silveirinha M G, Engheta N 2007 *Phys. Rev. B* **76** 245109
- [24] Enoch S, Tayeb G, Sabouroux P, Guerin N, Vincent P 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 213902
- [25] Ma Y G, Wang P, Chen X, Ong C K 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 044107
- [26] Edwards B, Alù, Silveirinha M G, Engheta N 2009 *J. Appl. Phys.* **105** 044905
- [27] Luo J, Xu P, Chen H Y, Hou B, Gao L, Lai Y 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 221903
- [28] Alù A, Silveirinha M G, Salandrino A, Engheta N 2007 *Phys. Rev. B* **75** 155410
- [29] Nguyen V C, Chen L, Halterman K 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 233908
- [30] Xu J M, Chen L, Zang X F, Cai B, Peng Y, Zhu Y M 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 161116
- [31] Chan C T, Huang X, Liu F, Hang Z H 2012 *PIER B* **44** 163
- [32] Huang X Q, Chan C T 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 0184208 (in Chinese) [黄学勤, 陈子亭 2015 物理学报 **64** 184208]
- [33] Wang L G, Wang Z G, Zhang J X, Zhu S Y 2009 *Opt. Lett.* **34** 1510
- [34] Wu Y, Li J, Zhang Z Q, Chan C T 2006 *Phys. Rev. B* **74** 085111
- [35] Jin J F, Liu S Y, Lin Z F, Chui S T 2011 *Phys. Rev. B* **84** 115101
- [36] Moitra P, Yang Y, Anderson Z, Kravchenko I I, Briggs D P, Valentine J 2013 *Nat. Photon.* **7** 791

An ultra-narrow-band optical filter based on zero refractive index metamaterial*

Zhou Xiao-Xia¹⁾ Chen Ying¹⁾ Cai Li^{2)†}

1) (*School of Electronic Information and Electrical Engineering, Changsha University, Changsha 410000, China*)

2) (*Laboratory of Science and Technology on Integrated Logistics Support, College of Intelligence Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*)

(Received 16 March 2023; revised manuscript received 21 June 2023)

Abstract

Owing to the photonic band gap effect and defect state effect, photonic metamaterials have received much attention in the design of narrow bandpass filters, which are the key devices of optical communication equipment such as wavelength division multiplexing devices. In this work, based on zero-index metamaterial (ZIM), a compact filter with both high peak transmission coefficient and ultra-narrow bandwidth is proposed. The photonic metamaterial with conical dispersion and Dirac-like point is achieved by optimizing the structure and material component parameters of dielectric rods with square lattice in air. It is demonstrated that a triply degenerate state can be realized at the Dirac-like point, which relates this metamaterial to a zero-index medium with effective permittivity and permeability equal to zero simultaneously. Electromagnetic (EM) wave can propagate without any phase delay at this frequency, and strong dispersion occurs in the adjacent frequency cone, leading to dramatic changes in optical properties. We introduce a ZIM into photonic metamaterial defect filter to compress the bandwidth to the realization of ultra-narrow bandpass filter. The ZIM is embedded into the resonant cavity of line defect filter, which is also composed of dielectric rods with square lattice in air. In order to increase the sensitivity of the phase change with frequency, the Dirac-like frequency is adjusted to match the resonant frequency of the filter. We study the transmission spectrum of the structure through the COMSOL Multiphysics simulation software, and find that the peak width at half-maximum of the filter decreases as the thickness of ZIM increases, and the peak transmittance is still high when bandwidth is greatly compressed. The zero phase delay inside the slab can be observed. Through field distribution analysis, the zero-phase delay and strong coupling characteristics of electromagnetic field are observed at peak frequency. The comparison with conventional photonic metamaterials filter is discussed. We believe that this work is helpful in investigating the realization of ultra-narrow bandpass filters.

Keywords: photonic metamaterials, narrow-band filter, zero-index, Dirac-like point

PACS: 42.70.Qs, 42.25.Bs, 42.50.Pq

DOI: [10.7498/aps.72.20230394](https://doi.org/10.7498/aps.72.20230394)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51975575).

† Corresponding author. E-mail: cailiyunnan@163.com

基于零折射率介质的超窄带光学滤波器

周晓霞 陈英 蔡力

An ultra-narrow-band optical filter based on zero refractive index metamaterial

Zhou Xiao-Xia Chen Ying Cai Li

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 174205 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230394

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230394>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

二维近零折射率声学材料的负向Schoch位移

Negative Schoch displacement of two-dimensional acoustic metamaterials with near-zero refractive index

物理学报. 2021, 70(12): 124601 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202108>

等效零折射率材料微腔中均匀化腔场作用下的简正模劈裂现象

Normal-mode splitting induced by homogeneous electromagnetic fields in cavities filled with effective zero-index metamaterials

物理学报. 2018, 67(2): 024210 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171880>

一种基于束缚态的可调等离子体光子晶体窄带滤波器

A tunable narrow-band plasma photonic crystal filter based on bound state

物理学报. 2021, 70(17): 175201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210241>

基于十字连通形环形谐振腔金属-介质-金属波导的折射率传感器和滤波器

Refractive index sensor and filter of metal-insulator-metal waveguide based on ring resonator embedded by cross structure

物理学报. 2018, 67(19): 197301 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180758>

太赫兹波段电磁超材料吸波器折射率传感特性

Refractive index sensing characteristics of electromagnetic metamaterial absorber in terahertz band

物理学报. 2021, 70(3): 038102 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201054>

光学超构材料芯片上类比引力的研究进展

Research progress of analogical gravitation on optical metamaterial chips

物理学报. 2020, 69(15): 157802 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200183>