



# 拓扑多谐振腔级联耦合系统: 时域耦合模式理论解析

董建文\*

中山大学物理学院, 光电材料与技术国家重点实验室, 广州 510275

\*联系人, E-mail: [dongjwen@mail.sysu.edu.cn](mailto:dongjwen@mail.sysu.edu.cn)

收稿日期: 2021-12-09; 接受日期: 2021-12-13; 网络出版日期: 2021-12-16

**摘要** 近年来, 人们发现拓扑光子学可以保护多种光学器件的光学行为不受缺陷和其他微扰的影响. 因此, 拓扑光子学与滤波器设计的结合正被提上日程. 最近的研究结合时域耦合模式理论, 导出了四端子的多谐振腔级联耦合系统中的传输效率方程, 并基于此设计了一种通用型高阶非互易性上/下载滤波器结构, 获得了与理论预测相匹配的仿真结果.

**关键词** 时域耦合模式理论, 拓扑光子学, 多谐振腔级联耦合系统

**PACS:** 42.79.Gn, 78.67.Pt, 03.65.Vf, 42.25.Bs

随着微纳光刻技术的发展, 在亚波长量级内进行器件加工的愿景早已达成, 许多新型的光学器件也在这一过程中纷纷涌现出来. 目前很多重要光学器件的设计都离不开光谐振器, 如耦合谐振器型光波导和耦合谐振腔型滤波器等. 同时, 在集成光路设计中, 如何让光子在有限的空间里灵活有序而又互不影响地传输是十分重要的. 目前, 基于时域耦合模式理论, 已经导出了在两根平行光波导中间放置弱耦合的单个谐振腔的架构相当于一种信道下载滤波器<sup>[1]</sup>. 这种滤波器原理上能将特定频率的光信号近乎无损地从一根波导耦合到另一根波导上, 这在集成光路设计中是十分有用的(只要在集成光路中适当地放置谐振腔).

利用光子晶体设计这类单腔滤波器已经有了许多有益的尝试, 不可否认它们大多性能优异: 高传输效

率、高品质因子和无辐射损耗等, 但是其对缺陷和波导谐振腔间耦合相移敏感的问题始终困扰着人们. 这些问题随着拓扑光子学的引入得到了很好的解决. 例如, 研究者通过利用能谷陈数非零的光子晶体平板, 设计并实现了支持急弯抗散射传输模式的新型光子晶体波导<sup>[2]</sup>. 又如, 研究者利用拓扑非平庸的光波导和谐振腔来构成单腔滤波器. 但是我们知道: 相较于单腔滤波器, 多腔级联的滤波器有着独特的优势, 如高带外抑制比、平顶带宽可调节和多重滤波<sup>[3,4]</sup>. 因此, 可以预见, 将拓扑引入到多腔级联的滤波器中的研究是有必要的.

最近, 湖南大学文双春团队<sup>[5]</sup>的刘建军等人基于时域耦合模式理论建立了四端子的多谐振腔级联耦合系统, 即CCC (Cascaded Coupled Cavities)系统的理论

**引用格式:** 董建文. 拓扑多谐振腔级联耦合系统: 时域耦合模式理论解析. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2022, 52: 244231  
Dong J-W. Topological cascaded coupled cavities system: Neo-analysis of temporal coupled-mode theory (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2022, 52: 244231, doi: [10.1360/SSPMA-2021-0346](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2021-0346)

模型, 并导出了具有普遍适用性的传输效率方程, 并将级联谐振腔与拓扑光波导复合, 提出了通用型高阶非互易性上/下载滤波器设计方案.

研究人员通过计算传输效率方程, 得出了以下3点主要结论: (1) 谐振腔间相互作用因子 $\mu \neq 0$ 时谐振峰的数目为谐振腔数目 $N$ ,  $\mu = 0$ 时则简并为1个谐振峰; (2) 当辐射时间 $\tau_0 = 0$ 且 $\tau_1 = \tau_2 = \tau_3$ 时才能实现100%滤波; (3) 品质因子 $Q$ 整体上随着谐振腔数 $N$ 的增大而增大, 但是不能无限增长. 为了保证谐振腔的 $Q$ 值足够大, 研究人员采用了十重彭罗斯型光子准晶所内禀的谐振腔构型, 并且可以根据所需 $\mu$ 值大小在光子准晶中自由地选取基本单元来作谐振腔级联. 而在构造拓扑光波导时, 研究人员则通过在二维正方晶格的旋磁光子晶体上施加磁场来打破时间反演对称性. 值得注意的是,

所设计的通用型滤波器并非完全拓扑的, 即谐振腔是不受拓扑保护的, 为此想要获得接近100%的滤波性能, 高 $Q$ 谐振腔是不可或缺的(抑制谐振腔背向散射). 最后, 通过仿真计算发现, (1) 所设计的大 $\mu$ 值 $N$ 阶谐振腔级联耦合的滤波器的确能实现 $N$ 重100%滤波; (2) 随着 $N$ 值的增大,  $N$ 个退简并的谐振峰各自的 $Q$ 值都有所提高; (3) 远离中心频率 $f_0$ 两侧的谐振峰 $Q$ 值会更高, 这可以通过查看级联谐振腔中的电场分布来解释; (4) 在光波导中引入各类缺陷后, 滤波性能几乎不受影响.

总而言之, 研究人员在讨论了谐振腔级联耦合系统的时域耦合模式理论, 依托于理论指导设计了滤波器结构. 数值仿真结果反过来验证理论的合理性, 该理论的普适性对后续拓扑光波导与其他光子器件的耦合研究具有丰富的指导意义.

## 参考文献

- 1 Joannopoulos J D, Johnson S G, Winn J N, et al. Photonic Crystals: Molding the Flow of Light. New Jersey: Princeton University Press, 2008. 198–220
- 2 He X T, Liang E T, Yuan J J, et al. A silicon-on-insulator slab for topological valley transport. *Nat Commun*, 2019, 10: 872, arXiv: 1805.10962
- 3 Bogaerts W, De Heyn P, Van Vaerenbergh T, et al. Silicon microring resonators. *Laser Photon Rev*, 2012, 6: 47–73
- 4 Li A, Van Vaerenbergh T, De Heyn P, et al. Backscattering in silicon microring resonators: A quantitative analysis. *Laser Photon Rev*, 2016, 10: 420–431
- 5 Li H, Ge R, Peng Y C, et al. High-order nonreciprocal add-drop filter. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2021, 64: 124211, arXiv: 2008.08745

# Topological cascaded coupled cavities system: Neo-analysis of temporal coupled-mode theory

DONG Jian-Wen<sup>\*</sup>

*School of Physics & State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, Sun Yat-sen University,  
Guangzhou 510275, China*

In recent years, it has been discovered that topological photonics can ensure the robust optical behaviors of multiple optical devices, which eases the impact of defects and other perturbations on the device performance. Therefore, the combination of topological photonics and filter design is on demand. Recently, the transmission efficiency equation in a four-terminal cascaded coupled cavities system was derived based on the temporal coupled-mode theory. And general high-order nonreciprocals add/drop filter structure was designed. The simulation results are in good agreement with the theoretical prediction.

**temporal coupled-mode theory, topological photonics, cascaded coupled cavities system**

**PACS:** 42.79.Gn, 78.67.Pt, 03.65.Vf, 42.25.Bs

**doi:** [10.1360/SSPMA-2021-0346](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2021-0346)