

基于二维光子晶体射频带通滤波器的研究

司 阳¹, 陈 希^{1,2}, 陈鹤鸣^{1*}

(1. 南京邮电大学 电子与光学工程学院, 南京 210023; 2. 江苏城市职业学院, 南京 210036)

摘要: 为了提高无线通信系统的传输质量, 提出了一种新型基于二维光子晶体射频带通滤波器, 滤波器的结构由线缺陷波导和 Aubry-André-Harper (AAH) 谐振腔组成。通过改变 AAH 谐振腔与输出波导间介质柱的半径, 增加它们之间的耦合系数, 从而实现在 1666.64 μm 处射频波段的滤波。仿真结果表明: 该射频滤波器性能优良, 通带中心波长为 1666 μm , 透射率为 0.99, 通带插入损耗为 0.06 dB, 品质因数 Q 值为 1×10^4 , 器件尺寸小, 结构简单, 易于大规模集成。

关键词: 光子晶体; 滤波器; AAH 模型; 时域有限差分法; 耦合模理论

中图分类号: TN814 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2020)11-0031-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.11.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on radio frequency bandpass filter based on two-dimensional photonic crystal

SI Yang¹, CHEN Xi^{1,2}, CHEN Heming^{1*}

(1. College of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China; 2. The City Vocational College of Jiangsu, Nanjing 210036, China)

Abstract: In order to further improve the transmission quality of the wireless communication system, a new type of radio frequency bandpass filter based on two-dimensional photonic crystal is proposed. The filter is composed of a line defect waveguide and an Aubry-André-Harper (AAH) resonator. By changing the radius of the dielectric column between the AAH resonator and the output waveguide, the coupling coefficient between them is increased, realizing the filtering of the radio frequency band at 1666 μm . The simulation results show that the radio frequency filter has excellent performance, the center wavelength of the passband is 1666.64 μm , the transmittance is 0.99, the passband insertion loss is 0.06 dB, and the quality factor Q value is 1×10^4 . The device is small in size, simple in structure.

Key words: photonic crystals; filter; Aubry-André-Harper model; finite difference time-domain method; coupled mode theory

0 引言

随着无线通信应用的不断发展, 频谱资源日益紧张, 信息容量的需求呈现爆炸式的增长趋势, 对射频器件中滤波器的性能提出了更高的要求^[1-4]。带通滤波

器在无线通信、雷达系统和测试等射频领域中有着重要的应用。带通滤波器^[5]常常用于让指定频段的宽带信号通过并滤除掉无用的宽带信号。因此, 设计新型的射频滤波器具有很重要的研究意义。光子晶体器件在处理高频信号上具有电子器件难以比拟的优势^[6-9]。如果将光子晶体与射频技术结合起来设计新型带通滤波器, 则能发挥其允许特定频段、特定方向电磁波传播的特点, 实现抑制寄生通带的目的。该器件可以直接利用印制电路板(PCB)工艺制作, 从工艺角度来讲, 既方便又不增加电路尺寸。

因此, 本文提出一种基于新型二维光子晶体射频带通滤波器。

收稿日期: 2020-04-07。

基金项目: 国家自然科学基金(61077084, 61571237)资助; 江苏省高等学校自然科学研究(16KJB510005)资助; 江苏省自然科学基金(BK20151509)资助; 江苏省研究生科研创新计划(KYCX18_0843)资助。

作者简介: 司阳(1995—), 男, 江苏盐城人, 硕士研究生, 现就读于南京邮电大学光学工程专业, 主要研究方向为基于光子晶体的射频滤波器技术, 参与国家自然科学基金项目“高速光纤波分-模分混合复用传输系统滤波器研究”。

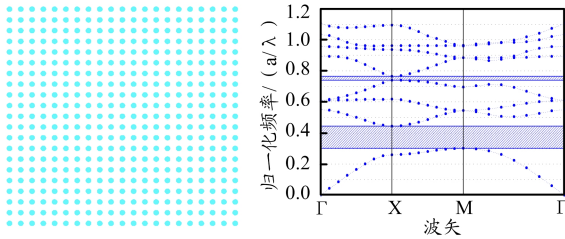
* 通信作者: 陈鹤鸣(E-mail: chhm@njupt.edu.cn)。



1 二维光子晶体结构设计和原理分析

1.1 结构设计

二维光子晶体结构图和带隙图如图1所示。二维光子晶体由圆形介质柱在空气中呈正方晶格周期性排列而成。其中,晶格常数 $a=600\text{ }\mu\text{m}$,圆柱为硅介质柱,半径 $r=108\text{ }\mu\text{m}$,折射率 $n=3.41$,背景空气折射率 $n=1$ 。利用平面波展开法可以计算出它的带隙图,横坐标上的参数表示布里渊区的几个高对称点。带隙的禁带范围为 $0.304\sim 0.443$,对应的波长范围是 $1354\sim 1974\text{ }\mu\text{m}$ 。



(a) 二维光子晶体结构图

(b) 二维光子晶体带隙图

图1 二维光子晶体结构图和带隙图

本文所提出的二维光子晶体射频带通滤波器的结构如图2所示。基底为空气,在基底中圆柱形介质柱以 20×20 阵列周期性排列。本文在完整结构的中心处沿着水平方向移除8个介质柱,形成线缺陷波导作为它的

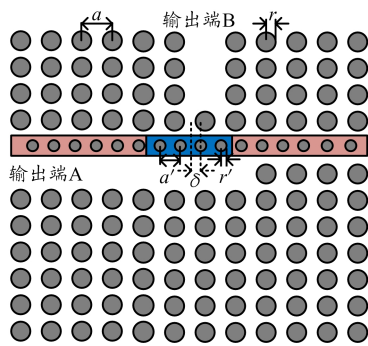


图2 二维光子晶体射频滤波器结构图

的输入波导,左侧为输入端A。在主波导上方第2排介质柱处移除一排介质柱,利用 Aubry-André-Harper (AAH) 谐振腔模型理论在此通道中引入 N 个圆形介质柱形成 AAH 谐振腔(图中蓝色区域),在 AAH 谐振腔中心上方沿着垂直方向移除一系列介质柱作为输出波导,上侧为输出端B。为了保持谐振腔结构的对称性 AAH 谐振腔中间的2个介质柱相对于点缺陷中心位置向两边各偏移了 $\delta=0.4a$, a 为谐振腔的振幅。AAH 谐振腔晶格常数为 a' , 介质柱半径为 r' , AAH 谐振腔中介质柱的个数 N 与晶格失配参数 β 之间应满足 $\beta=N/(N+1)$ 。本结构中 AAH 谐振腔介质柱数取 $N=4$,则可以确定其余参数 $\beta=0.8$, $a'=a\beta=480\text{ }\mu\text{m}$, AAH 谐振腔半径 $r'=80\text{ }\mu\text{m}$ 。

1.2 原理分析

二维光子晶体射频带通滤波器结构中的 AAH 谐

振腔模型基于光子晶体波导中有效双色电势,它是指光在经过时具有2种不同晶格周期的结构,由于不同周期的势场叠加,从而引起光子局域现象。这一现象可由 Harper 和 Aubry-André^[10-12]理论模型给出解释,因此人们又将这一现象称为 AAH 局域。这种光子局域现象是在线缺陷波导处引入晶格常数及半径(晶格常数和介质柱半径分别为 a', r')不同于原参数(晶格常数和介质柱半径分别为 a, r)的个数为 N 的介质柱,并且晶格常数比 (a'/a) 不是整数,使得结构形成晶格常数失配,失配参数用 $\beta=a'/a$ 定义,从而引入的 N 个介质柱形成一个谐振腔(AAH 谐振腔)。麦克斯韦方程可写为:

$$\nabla \times \left[\left(\frac{1}{\epsilon(r)} \right) \nabla \times H(r) \right] = \left(\frac{\omega^2}{c^2} \right) H(r) \quad (1)$$

其中, $\epsilon(r)$ 表示材料的介电常数, ω 表示扰动晶格的频率, c 表示对应沃尼埃函数的展开系数, $H(r)$ 表示光波在光子晶体中传输时的电磁场。

用 $y(y=0, \pm 1, \pm 2, \dots)$ 表示在位置 y 处的介质柱相对于中心位置的位移,所以在位置 y 处的电磁波频率为 $\omega_y = \omega(ya')$,可以得到:

$$\left[\omega_0^2 + \Delta \cos(2\pi\beta y) \right] c_y - J[c_{y-1} + c_{y+1}] = \omega^2 c_y \quad (2)$$

其中, ω_0 表示未扰动晶格的频率, c_y 表示位置 y 处对应沃尼埃函数的展开系数, J 为相邻间隙位置处由基函数重叠引起的隧道耦合效率。

本文提出的二维光子晶体射频带通滤波器的结构是基于反射壁下载型模型所设计的,其结构图如图3所示。假设微腔与波导间的幅值衰减系数满足模型简化条件,那么可以等效为本征

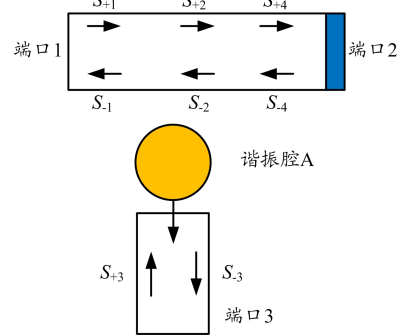


图3 反射壁下载型结构图

损耗模型。该结构的时域耦合模方程如下:

$$\frac{da}{dt} = i\omega_0 a - (\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3) a + \sqrt{2\gamma_1} S_{41} +$$

$$\sqrt{2\gamma_2} S_{42} + \sqrt{2\gamma_4} S_{43} \quad (3)$$

$$S_{41} = S_{41} - \sqrt{2\gamma_2} a \quad (4)$$

$$S_{43} = -S_{43} - \sqrt{2\gamma_3} a \quad (5)$$

$$S_{44} = -S_{44} \quad (6)$$

$$S_{42} = S_{42} \cdot e^{j\varphi_1} \quad (7)$$

$$S_{44}=S_{-1} \cdot e^{j\varphi_1} \quad (8)$$

其中, ω_0 为谐振腔的谐振频率, γ_1 、 γ_2 和 γ_3 分别为谐振模式到 3 个波导的幅值衰减系数, S_{+1} 、 S_{+2} 、 S_{+3} 和 S_{+4} 分为端口 1、端口 2、端口 3 和端口 4 的输入波, S_{-1} 、 S_{-2} 、 S_{-3} 和 S_{-4} 分别为端口 1、端口 2、端口 3 和端口 4 的输出波, $\varphi_1=m\pi$ 。

令 $\gamma_1=\gamma_2=\gamma_{\text{wav}}$, $S_{+3}=0$, 可求得端口 3 的下载效率为:

$$D(\omega)=\left|\frac{S_{-3}}{S_{+1}}\right|^2=\frac{4\gamma_{\text{wav}}\gamma_3(1+e^{j2\varphi_1})^2}{(\omega-\omega_0)^2+(2\gamma_{\text{wav}}+2\gamma_{\text{wav}}e^{j2\varphi_1}+\gamma_3)^2} \quad (9)$$

根据能量守恒定律, 可得其在端口 1 的反射谱为:

$$R(\omega)=1-D(\omega)=\frac{(\omega-\omega_0)^2}{(\omega-\omega_0)^2+64\gamma_{\text{wav}}^2} \quad (10)$$

2 结构参数对器件性能的影响

本文设计的二维光子晶体射频带通滤波器是基于 AAH 原理和耦合模原理实现的。AAH 谐振腔的结构参数对透射谱的影响很大, 包括 AAH 腔内部介质柱个数及其半径, AAH 谐振腔与输出波导间介质柱的半径。

2.1 AAH 谐振腔内部介质柱个数 N 的优化

当谐振腔介质柱个数 $N=4$ 、6 和 8 时, 利用 FDTD 仿真软件得出该滤波器的透射谱图如图 4 所示。当 $N=4$ 时, 滤波器的中心波长为 $1667.31 \mu\text{m}$, 透射率为 0.56; 当 $N=6$ 时, 滤波器的中心波长为 $1719.66 \mu\text{m}$, 透射率为 0.071; 当 $N=8$ 时, 滤波器的中心波长为 $1677.18 \mu\text{m}$, 透射率为 0.32。由此得出, 当谐振腔介质柱个数 $N=4$ 、6 和 8 时, 滤波器的透过率都不高。

因此, 本文对滤波器的性能进行优化。其结构图如图 5 所示。通过改变谐振腔与输出波导间介质柱的半径 r'' , 来改变谐振腔与输出波导间耦合区域的耦合强度。下面分析当 $N=4$ 、6 和 8 这 3 种情况时, AAH 谐振腔与输出波导间介质柱的半径 r'' 与器件透过率的关系。

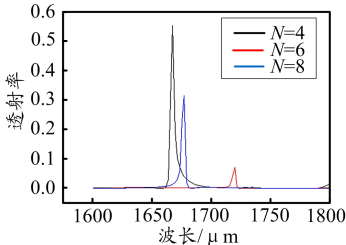


图 4 $N=4$ 、6 和 8 时滤波器透射谱图

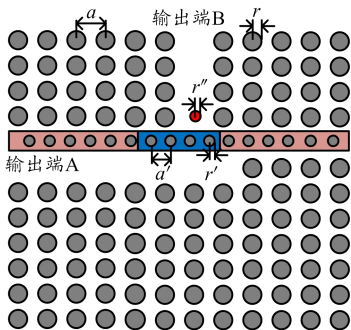


图 5 优化后的滤波器结构图

①当 AAH 谐振腔介质柱个数 $N=4$ 时, 保持其它参数不变, 仅改变 AAH 谐振腔和出射波导间的介质柱半径 r'' 的大小, 以 $5 \mu\text{m}$ 为步长间隔, AAH 谐振腔介质柱半径从 $65 \mu\text{m}$ 变化至 $90 \mu\text{m}$, 其透射谱如图 6 所示。可以看出, 当 AAH 谐振腔介质柱个数 $N=4$, AAH 谐振腔和出射波导间的介质柱半径 r'' 越大, 则器件的透射率越小, 在 $r''=65 \mu\text{m}$ 时, 中心波长为 $1665.96 \mu\text{m}$, 透过率达到最大为 0.99。

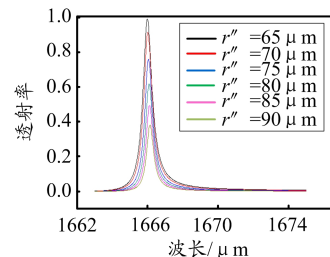


图 6 $N=4$ 时 r'' 不同情况下的透射谱

②当 AAH 谐振腔介质柱个数 $N=6$ 时, 保持其它参数不变, 仅改变 AAH 腔输出波导间的介质柱半径 r'' 的大小, 以 $10 \mu\text{m}$ 为步长间隔, AAH 谐振腔介质柱半径从 $100 \mu\text{m}$ 变化至 $150 \mu\text{m}$, 其透射谱如图 7 所示。在 $r''=120 \mu\text{m}$ 时, 中心波长为 $1718.75 \mu\text{m}$, 透过率达到最大为 0.4, 相比与 $N=4$ 时, 效果大大下降。

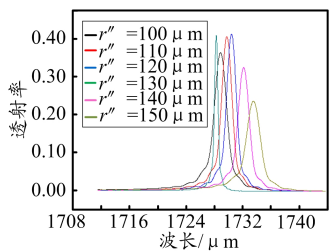


图 7 $N=6$ 时 r'' 不同情况下的透射谱

③当谐振腔介质柱个数 $N=8$ 时, 其它参数保持不变, 仅改变 AAH 谐振腔与输出波导间的介质柱半径 r'' , 取 $5 \mu\text{m}$ 为步长间隔, AAH 谐振腔介质柱半径大小由从 $80 \mu\text{m}$ 变化至 $120 \mu\text{m}$, 其透射谱如图 8 所示。可以看出, 随着 AAH 谐振腔和出射波导间的介质柱半径 r'' 逐渐增大, 器件的透射率逐渐变小, 在 $r''=80 \mu\text{m}$ 时, 中心波长为 $1756.12 \mu\text{m}$, 透过率达到最大为 0.97。

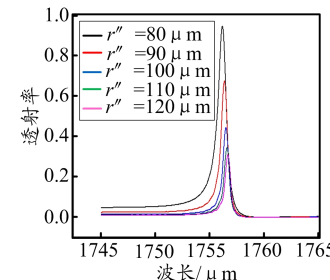
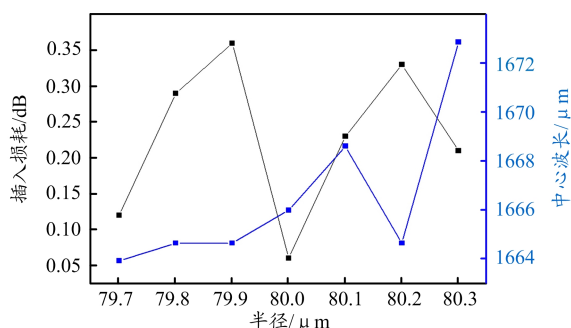


图 8 $N=8$ 时 r'' 不同情况下的透射谱

2.2 AAH 谐振腔内部介质柱半径 r' 的优化

在讨论 AAH 谐振腔半径 r' 对器件性能的影响时, 保持其它参数不变, 仅改变 r' 的大小, 取 $0.1 \mu\text{m}$ 为步长间隔, 变化范围为 $79.7 \sim 80.3 \mu\text{m}$, 改变 AAH 谐振腔半径 r' 时, 滤波器插入损耗和中心波长随谐振腔半径的变化关系如图 9 所示。可以看出, 器件的中心波长随着 r' 的增大呈现出增大趋势, 在 $r'=80 \mu\text{m}$ 时, 插入损耗最小为 0.06 dB。

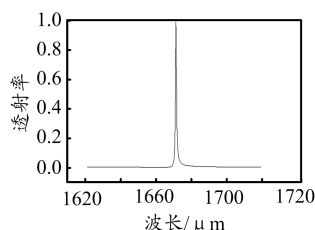
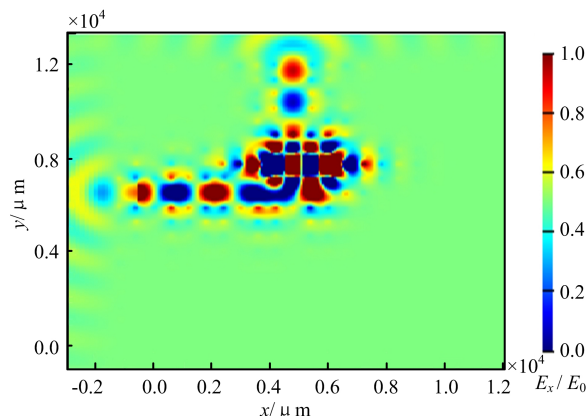
图9 插入损耗和中心波长随 r 的变化

3 二维光子晶体射频带通滤波器的性能分析

当输入信号功率为1 W, 波长范围为1620~1720 μm 的连续信号时,使用FDTD Solution 仿真软件得出该光子晶体滤波器透射率谱图如图10所示。

仿真结果表明:该器件谐振腔中心波长为1666.64 μm ,3 dB 带宽为0.01 μm ,透射率为0.99,插入损耗为0.06 dB, Q 值为 1×10^4 ,器件尺寸为12 mm $\times$ 12 mm。

仿真所得中心波长为1666.64 μm 时电场稳态图如图11所示。其中,横坐标和纵坐标分别表示滤波器在 x 和 y 方向的位置, E_x 为电场分量, E_0 为电场强度的最大值。当输入波长为1668.3 μm 时,光信号从左侧输入端口输入,此时入射波与谐振腔的频率相等,能量几乎被全部耦合进谐振腔内,从上侧输出端口输出,即其具有带通特性,以达到使特定的宽带信号无衰减通过的目的。

图10 $r=81\mu\text{m}$ 时滤波器的透射谱图11 中心波长为1666.64 μm 时的电场稳态图

4 结束语

本文提出了一种新型基于二维光子晶体的射频带通滤波器,在完整光子晶体正方晶格结构中引入线缺陷和AAH谐振腔,可以让1666.64 μm 的光波实现高效滤波。仿真结果表明:该器件性能优良,插入损耗低,品质因数高,器件尺寸小,仅为12 mm $\times$ 12 mm,结构简单。基于该原理的光子晶体射频滤波器设计方法,对设计大规模集成光子晶体射频带通滤波器具有一定的参考价值,在超宽带通信中有巨大的应用潜力。

参考文献:

- [1] KO M B, KIM S M, JIANG H D, et al. A study on RF cavity filter miniaturization ceramic resonator [J]. Journal of Advanced Research in Dynamical & Control Systems, 2018, 10(1): 208–213.
- [2] BELYAEV B A, TYURNEV V V. Multilayer bandpass filter-polarizer with stopband extension far beyond twofold center frequency [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2018, 60(3): 630–634.
- [3] MA Pengyu, WEI Bin, HONG Jiasheng, et al. A design method of multimode multiband bandpass filters [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018(99): 1–9.
- [4] PANDIT N, PATHAK N P. Multistub multimode resonating structure for microwave multiband band - pass filtering applications [J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2018, 60(6): 1353–1360.
- [5] NELIN E A, ZINHER YA L, POPSUI V I. Low-pass filters based on crystal-like inhomogeneities [J]. Radioelectronics & Communications Systems, 2018, 61(5): 214–221.
- [6] HAN Xiuyou, XU Enming, YAO Jianping. Tunable single bandpass microwave photonic filter with an improved dynamic range [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(1): 11–14.
- [7] FAN S, VILLENEUVE P, JOANNOPOULOS J, et al. Channel drop filters in photonic crystals [J]. Optics Express, 1998, 3(1): 4–11.
- [8] LI C, FAN Q, LU Y, et al. A high quality factor photonic crystal channel-drop filter with a linear gradient microcavity [J]. Optoelectronics Letters, 2015, 11(3): 174–178.
- [9] ZHONG Y H, CHENG J B, LI D. Design of a low profile H-shaped slot antenna backed by substrate integrated waveguide cavity [J]. Video engineering, 2019, 43(2): 98–100.
- [10] HARPER P G, O'DWYER J J. Theory of a dielectric loss in long chain polar compounds [J]. Proceedings of the Physical Society, 1955, 68(12): 1184–1190.
- [11] ALPEGGIANI F, ANDREANI L C, GERACE D. Effective bichromatic potential for ultra-high Q-factor photonic crystal slab cavities [J]. Applied Physics Letters, 2015, 107(26): 134–138.
- [12] AKAHANE Y, ASANO T, SONG B, et al. High-Q photonic nanocavity in a two-dimensional photonic crystal [J]. Nature, 2003, 425(6961): 944–947.