

文章编号: 2095-4980(2021)01-0096-05

基于二维光子晶体高 Q 值微波带阻滤波器

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, 江苏 南京 210023; 2.江苏城市职业学院 信息工程学院, 江苏 南京 210036)

摘要: 为提高无线通信系统的传输质量, 提出一种新型的基于二维光子晶体的微波带阻滤波器, 该滤波器由线缺陷波导和 AAH 谐振腔组成。通过改变 AAH 谐振腔与主波导的距离, 增加它们之间的耦合系数, 从而实现 1 668.3 μm 处微波波段的滤波; 基于时域有限差分法(FDTD)原理, 应用 Lumerical 软件进行仿真计算, 仿真结果表明: 该滤波器性能优良, 阻带中心波长为 1 668.3 μm , 阻带衰减为 25.2 dB, 通带插入损耗为 0.2 dB, 品质因数 Q 值为 1.5×10^4 , 器件尺寸小, 结构简单, 易于大规模集成, 对于超宽带通信具有重要的应用前景。

关键词: 光子晶体; 滤波器; AAH 谐振腔

中图分类号: TN814

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019520

High Q -factor microwave bandstop 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 Jiangsu 210023, China; 2.College of Information Science & Engineering, City Vocational College of Jiangsu, Nanjing Jiangsu 210036, China)

Abstract: A new microwave band-stop filter based on two-dimensional photonic crystal is proposed in order to improve the transmission quality of the wireless communication system. The filter consists of a line defect waveguide and Aubry-Andr-Harper(AAH) resonator. By changing the distance between the AAH resonator and the main waveguide, the coupling coefficient between them is increased, and the filtering of the microwave band at 1 668.3 μm is achieved. Based on the Finite Difference Time-Domain(FDTD) principle, simulation is performed in Lumerical platform. The results show that the filter has excellent performance: the center wavelength of the stop band is 1 668.3 μm , the stop band attenuation is 25.2 dB, the pass band insertion loss is 0.2 dB, and the quality factor Q value is 1.5×10^4 . The device is of small size and simple structure, and it is easy to be integrated on a large scale. It has important application prospects for Ultra Wideband(UWB) communication.

Keywords: photonic crystals; filter; AAH resonator

随着宽带和超宽带通信系统的发展, 由于带阻滤波器可以有效抑制不需要的宽带信号, 高性能的微波带阻滤波器研究显得十分重要^[1-4]。在无线通信、雷达系统、测试等微波领域, 带阻滤波器常用于滤除混杂在有用信号中的干扰成分。相对于带通滤波器, 带阻滤波器具有承受功率大、插入损耗低等优势, 除了可以用于指定频段中窄带信号需要高衰减的地方, 还可以在电磁兼容系统测试等方面发挥作用。传统的带阻滤波器^[5]设计, 常采用带状线或波导结构来实现, 但不管哪种结构设计的带阻滤波器, 其阻带衰减、品质因数等参数都难以达到高性能要求。为了实现高性能的微波滤波器, 利用了光子晶体的能带特性来实现微波滤波器^[6-8]。如果将光子晶体与微带结构相结合设计新型阻带滤波器, 不仅能发挥其阻止特定频段、特定方向电磁波传播的特点, 达到抑制寄生通带的目的, 而且该结构可以直接利用 PCB 板工艺制作, 既方便又不增加电路尺寸。

收稿日期: 2019-12-20; 修回日期: 2020-05-26

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

作者简介: 司 阳(1995-), 男, 硕士, 主要从事光子晶体滤波器的研究。email:2855540303@qq.com

*通信作者: 陈鹤鸣 email:chhm@njupt.edu.cn

本文提出的微波带阻滤波器，在二维光子晶体线缺陷处引入 AAH 谐振腔^[9-10]，通过改变 AAH 腔与主波导之间的距离来提高它们之间的耦合系数。应用 Lumerical 仿真软件进行性能分析，仿真结果表明，该器件性能优良，与目前大多数滤波器相比，尺寸小，易于集成，结构简单。

1 结构设计和原理分析

1.1 结构设计

采用完整正方晶格的光子晶体结构，晶格常数 $a=600\ \mu\text{m}$ ，介质柱材料为硅，其半径 $r=108\ \mu\text{m}$ ，折射率 $n=3.41$ ，背景空气折射率 $n=1$ 。对应的带隙图如图 1 所示，带隙的禁带范围为 $0.304\sim 0.443$ ，禁带波长范围为 $1\ 354\sim 1\ 974\ \mu\text{m}$ 。

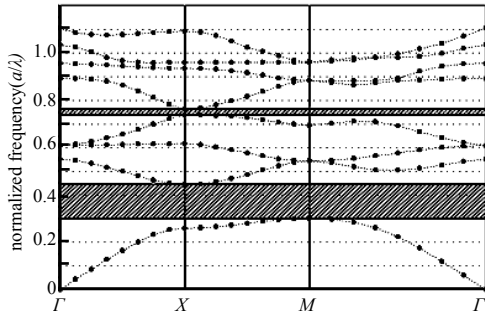


Fig.1 Bandgap diagram of square lattice photonic crystal
图 1 正方晶格光子晶体带隙图

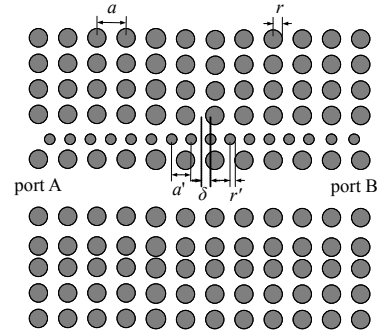


Fig.2 Filter structure diagram of square lattice structure
图 2 正方晶格结构的滤波器结构图

设计的光子晶体滤波器结构如图 2 所示。空气基底中排列 20×20 正方晶格的圆柱形介质柱。在完整二维正方晶格的光子晶体中心沿横轴方向去掉一排介质柱，形成一个直波导作为输入波导和输出波导，左侧为输入端口 A，右侧为输出端口 B。在主波导上方第 2 排介质柱处移除一排介质柱，利用晶格失配原理在此通道中引入 N 个介质柱形成光子晶体 AAH 腔，如图 2 所示，其中中心的 2 个介质柱相对于点缺陷中心位置向两边各偏移 $\delta=0.4a$ ，为了保证谐振腔中心与线缺陷波导中心重合， N 必须取偶数。谐振腔晶格常数为 a' ，介质柱半径为 r' ，其中谐振腔晶格常数满足 AAH 模型中的晶格失配常数 $\beta=N/(N+1)=a'/a$ 。由于该谐振腔的谐振频率具有周期性，为了破坏其周期性，在谐振腔两端添加原介质柱，形成反射式封闭腔。本结构中 AAH 谐振腔介质柱数取 $N=4$ ，则可以确定其余参数： $\beta=0.8$ ， $a'=a\beta=480\ \mu\text{m}$ ，谐振腔半径 $r'=80\ \mu\text{m}$ 。

1.2 原理分析

该结构中 AAH 谐振腔模型基于光子晶体波导中有效双色电势，即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 N 个介质柱，并且晶格常数比 (a'/a) 不是整数，使结构形成晶格常数失配，引入的 N 个介质柱形成一个谐振腔，即 AAH 腔。根据平面波展开法，在光子晶体中麦克斯韦方程为：

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

式中： ω 为扰动晶格的频率； c 为对应沃尼埃函数的展开系数； ∇ 为调制电位的振幅； $\mathbf{H}(r)$ 为光波在光子晶体中传播的电磁场； $\epsilon(r)$ 为介电函数。

以 j ($j=0,\pm 1,\pm 2,\dots$) 表示 AAH 谐振腔介质柱位置坐标， $j=0$ 对应于 AAH 谐振腔的中心，将磁矢量写作 $\mathbf{H} = \sum c_j \mathbf{h}_j$ ，则式(1)可简化为：

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

式中： β 为晶格失配参数； ω_0 为未扰动晶格的频率； Δ 为变化的增量； J 为相邻间隙位置处由基函数重叠引起的隧道耦合效率：

$$J = -c^2 \int \mathbf{dr} \frac{1}{\epsilon} (\nabla \times \mathbf{H}_{j+1}^*) (\nabla \times \mathbf{H}_j) \quad (3)$$

式中 ϵ 为材料的介电常数。

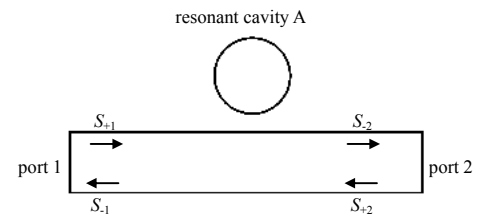


Fig.3 Single cavity filter with side coupling method
图 3 侧耦合方式的单谐振腔滤波器

由光子晶体波导和谐振腔组成的侧边耦合方式的单谐振腔二维光子晶体滤波器如图 3 所示。谐振腔中的谐振模振幅 A 的时域变化为:

$$\frac{dA}{dt} = \left(j\omega_0 - \frac{1}{\tau_0} - \frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_2} \right) A + \sqrt{2/\tau_1} S_{+2} \quad (4)$$

式中: ω_0 为谐振频率; $\frac{1}{\tau_0}$ 为谐振腔内部损耗的幅值衰减率; 端口 1 和端口 2 与谐振腔 A 耦合产生损耗时的幅值衰减率分别为 $\frac{1}{\tau_1}$ 和 $\frac{1}{\tau_2}$; 端口 1 和端口 2 的输入波分别为 S_{+1} 和 S_{+2} 。

当光波仅从端口 1 入射, 即 $S_{+1}=1(S_{+2}=0)$ 时, 传输系数 T 和反射系数 R 可表示为:

$$T = \frac{|S_{-2}|^2}{|S_{+1}|^2} = 1 - \frac{4/\tau_1\tau_2}{(\omega-\omega_0)^2 + 1/\tau^2} \quad (5)$$

$$R = \frac{|S_{-1}|^2}{|S_{+1}|^2} = \frac{4/\tau_1\tau_2}{(\omega-\omega_0)^2 + 1/\tau^2} \quad (6)$$

式中 $\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} + \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2}$ 。

仿真中输入波长范围为 1 663~1 675 μm 的 TM 模式波, 当输入波从左侧端口 1 输入时, 根据式(5), 侧边耦合系统的响应为洛伦兹线型。输入波长为 1 668.3 μm 时, 入射波与谐振腔的频率相等, 即 $\frac{1}{\tau}=0$, 其反射效率为 100%, 能量被全部反射回来。AAH 腔内部损耗无限小, 近似为零。

2 仿真计算与性能分析

2.1 性能分析

阻带衰减、插入损耗和品质因数是滤波器的重要性能指标。阻带衰减定义为:

$$L = -10(I'_{\text{out}} / I'_{\text{in}}) \quad (7)$$

式中: I'_{in} 为中心频率的输入光强; I'_{out} 为中心频率的输出光强。

插入损耗定义为:

$$\gamma = 10\lg(I_{\text{in}} / I_{\text{out}}) \quad (8)$$

式中: I_{in} 为输入光强; I_{out} 为传输信道的输出光强。

品质因数定义为:

$$Q = f_{\text{Res}} / f_{3\text{dB}} \quad (9)$$

式中: f_{Res} 为谐振腔中心频率; $f_{3\text{dB}}$ 为 3 dB 带宽。

利用 Lumerical 仿真软件对所设计的光子晶体滤波器进行仿真, 分析该滤波器的性能。仿真计算时, 光子晶体滤波器四周设有完美匹配层(Perfectly Matched Layer, PML)。下面主要考虑选取合适的谐振腔与主波导之间的耦合距离 L , 使器件的阻带衰减提高, 品质因数 Q 值提高。

经过仿真软件模拟计算得到滤波器透射谱如图 4 所示, 当谐振腔与主波导之间的耦合距离 $L=3a$ 时, 透射峰位于图中波长 1 665.93 μm 处。利用式(7)计算得到阻带衰减为 0.8 dB, 利用式(8)计算得到插入损耗为 0.2 dB。但此时的阻带衰减太低。

器件的阻带衰减高低取决于 AAH 谐振腔与主波导之间的耦合区域的耦合效率。为了增强 AAH 谐振腔与

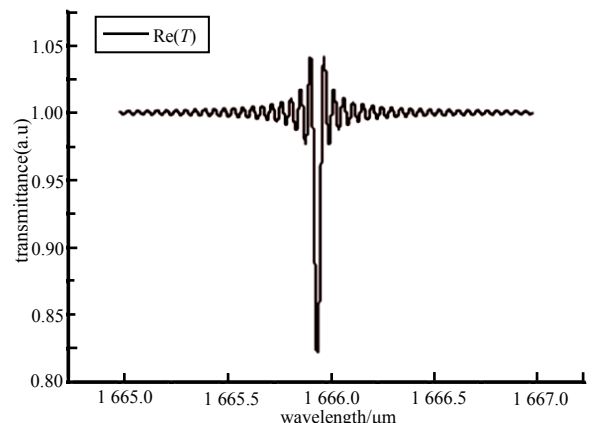


Fig.4 Filter transmission spectrum at $L=3a$
图 4 $L=3a$ 时的滤波器透射谱图

主波导之间的耦合区域的耦合效率,可以通过改变 AAH 腔和主波导的距离 L 来增加耦合系数。如图 5 所示:当 AAH 腔和主波导的距离取 $L=2a$ 时,随着谐振腔与主波导的距离 L 逐渐变小,阻带衰减明显提高。这时滤波器的阻带衰减为 7.7 dB,插入损耗为 0.24 dB,品质因数 $Q=1.67 \times 10^5$ 。

为进一步增强 AAH 谐振腔与主波导之间的耦合区域的耦合效率,仿真分析了 AAH 腔和主波导不同距离时的透射谱,图 6(a)~(c)分别为 AAH 谐振腔与主波导之间距离 $L=0.8a$ 、 $L=a$ 和 $L=1.2a$ 时的透射谱。从图 6(a)中可以看出,当 AAH 腔和主波导的距离 $L=0.8a$ 时,阻带衰减达到 11.9 dB,插入损耗为 0.22 dB,品质因数 $Q=1.5 \times 10^4$;从图 6(b)中可以看出,当 AAH 腔和主波导

的距离 $L=a$ 时,阻带衰减达到 25.24 dB,插入损耗为 0.2 dB,品质因数 $Q=1.5 \times 10^4$;从图 6(c)中可以看出,当 AAH 腔和主波导距离 $L=1.2a$ 时,阻带衰减达到 13.8 dB,插入损耗为 0.25 dB,品质因数 $Q=1.5 \times 10^4$ 。

根据以上分析,在不改变 AAH 谐振腔半径 r' 时,AAH 谐振腔与主波导之间的耦合区域的耦合效率可以通过改变 AAH 谐振腔与主波导之间的距离来优化。当 AAH 腔和主波导的距离 $L=a$ 时,滤波器的性能达到最优。

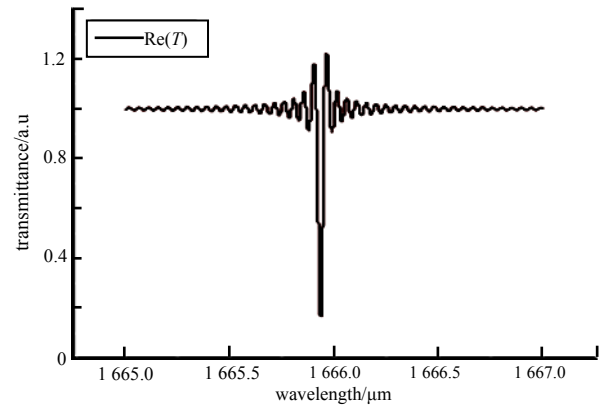


Fig.5 Filter transmission spectrum at $L=2a$
图 5 $L=2a$ 时的滤波器透射谱图

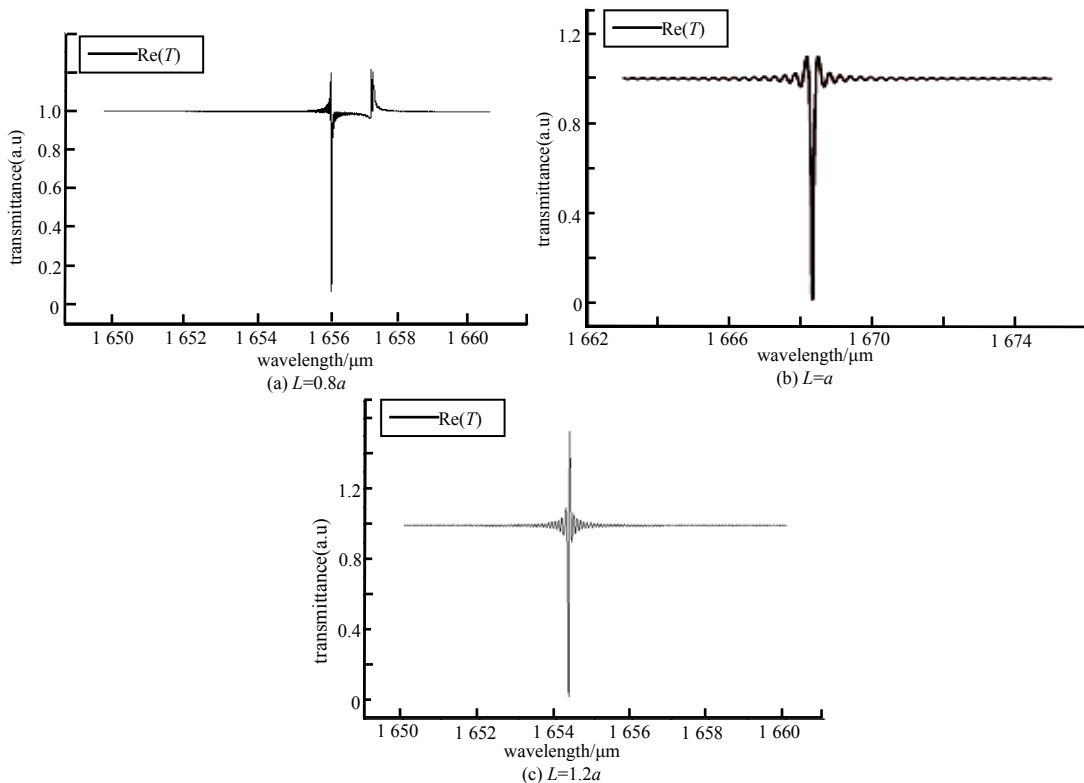


Fig.6 Filter transmission spectrum at $L=0.8a, a, 1.2a$
图 6 $L=0.8a, a, 1.2a$ 时的滤波器透射谱图

2.2 AAH 谐振腔半径变化对器件性能的影响

所设计的基于二维光子晶体的微波带阻滤波器采用 AAH 谐振腔结构进行滤波。图 7 为改变 AAH 谐振腔半径 r' 时,滤波器插入损耗和中心波长的变化。由图 7 可以看出,随着 AAH 腔半径 r' 的增大,滤波器的中心波长随 r' 的增大而增大,插入损耗随半径 r' 的增大呈先增大后减小的趋势,在 $r'=79.6 \mu\text{m}$ 时,达到最小值 0.18 dB。

图 8 为改变 AAH 谐振腔半径 r' 时,滤波器阻带衰减和中心波长的变化。由图 8 可以看出,随着 AAH 腔半径 r' 的增大,滤波器的中心波长随 r' 的增大而增大,阻带衰减随着半径的增大呈上升趋势,在 $r'=80.1 \mu\text{m}$ 时,达到最大值 25.7 dB。

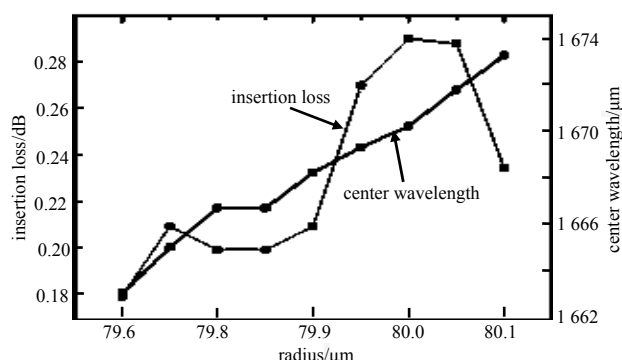


Fig. 7 Relationship between filter insertion loss and center wavelength with AAH cavity radius

图 7 滤波器的插入损耗和中心波长随 AAH 腔半径变化的关系

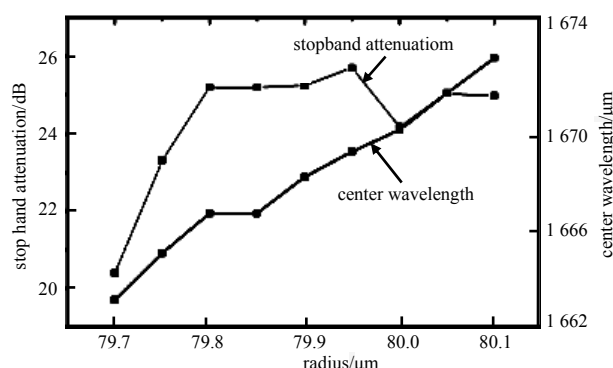


Fig. 8 Relationship between the stopband attenuation and the center wavelength of the filter as the AAH cavity radius

图 8 滤波器的阻带衰减和中心波长随 AAH 腔半径变化的关系

3 结论

本文提出了一种新型基于二维光子晶体的微波带阻滤波器，在完整正方晶格光子晶体结构中引入线缺陷和 AAH 谐振腔。通过 Lumerical 仿真软件进行仿真分析，仿真结果表明：该器件谐振腔中心波长为 $1668.3\mu\text{m}$ ，3 dB 带宽为 $0.01\mu\text{m}$ ，阻带衰减为 25.2 dB，插入损耗为 0.2 dB， Q 值为 1.5×10^4 ，器件尺寸为 $12\text{mm} \times 12\text{mm}$ 。该器件与其他滤波器相比，尺寸小，易于集成，结构简单，在无线通信技术中有巨大的应用潜力。

参考文献：

- [1] CIMOLI B,JOHANSEN T K,OLMOS J J V. Microstrip linear phase low pass filter based on defected ground structures for partial response modulation[J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2018,60(1):18–25.
- [2] GONG J W,LI X J,TAN Q G,et al. Bandwidth-reconfigurable single-passband microwave photonic filter based on stimulated Brillouin scattering[J]. Optoelectronics Letters, 2019,15(1):11–15.
- [3] 李世峰. 基于 GaAs 变容二极管的电调滤波器芯片设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020,18(2):330–333. (LI Shifeng. Design of ESC filter chip based on GaAs varactor diode[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020,18(2):330–333.)
- [4] FAN M,SONG K,ZHU Y,et al. Compact bandpass-to-bandstop reconfigurable filter with wide tuning range[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2019,29(3):198–200.
- [5] LI Runshuo,CHEN Fuchang. A tunable bandpass-to-bandstop filter with controllable bandwidth and high rejection level[J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2017,59(1):110–113.
- [6] HE Z,YANG Y,XI Z,et al. Miniaturized resonator and bandpass filter for silicon-based monolithic microwave and millimeter-wave integrated circuits[J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems I Regular Papers, 2018(99):1–10.
- [7] FAN S,VILLENEUVE P,JOANNOPOULOS J,et al. Channel drop filters in photonic crystals[J]. Optics Express, 1998,3(1):4–11.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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):096501.