

doi:10.3788/gzxb20174602.0223002

基于 Fibonacci 序列准周期结构的小角度低通空间滤波器

陈敏, 周宏敏, 罗朝明, 万婷, 高明盛

(湖南理工学院 信息与通信工程学院, 湖南 岳阳 414000)

摘要:利用常规材料构造了 Fibonacci 序列准周期结构, 运用传输矩阵法研究了该结构的空域传输特性, 并基于该结构优良的空域传输特性设计了小角度低通空间滤波器. 数值模拟结果表明, 该小角度空间滤波器的角域带宽可通过改变序列的结构类型和序列数来调谐, 其调谐规律为: 随着 Fibonacci 序列 $F(m, 1)$ 中 m 值的增加, 对应空间滤波器的角域带宽减小; 随着序列数的增大, 对应角域带宽也减小. 在调谐的基础上, 还可通过改变构成准周期结构的介质折射率参量来精确调节其角域带宽. 相比于基于超材料的小角度空间滤波器而言, 基于 Fibonacci 序列的小角度空间滤波器制备更简单, 且有望应用于新一代的高功率激光系统中.

关键词:信息光学; 空间滤波器; 传输矩阵法; Fibonacci 序列; 准周期结构; 小角域带宽; 透射谱

中图分类号: O431; O436

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)02-0223002-8

Low-pass Spatial Filters with Small Angle-domain Bandwidth Based on Fibonacci Quasi-periodic Structures

CHEN Min, ZHOU Hong-min, LUO Zhao-ming, WAN Ting, GAO Ming-sheng

(College of Information and Communication Engineering, Hunan Institute of Science and Technology, Yueyang, Hunan 414006, China)

Abstract: The quasi-periodic structures of Fibonacci sequence composed of conventional materials were proposed, and their spatial transmittance properties were investigated by using the transfer matrix method. The corresponding low-pass spatial filters with a small angle-domain bandwidth were designed based on these good spatial transmittance properties. The numerical simulation results show that, the angle-domain bandwidth can be tuned by changing the structure types and sequence numbers, and the angle-domain bandwidth of the filters becomes smaller and smaller with the increase of the sequence number or m value of Fibonacci sequence $F(m, 1)$. On the basis of the above regulation, the accurate adjustment can be made by changing the refractive-index parameter of the quasi-periodic structures. Compared to the former Metamaterial spatial filters with a small angle-domain bandwidth, the spatial filters based on Fibonacci quasi-periodic structures are more simple to be made and more likely to be applied to a new generation of high-power laser system.

Key words: Information optics; Spatial filter; Transfer matrix method; Fibonacci sequence; Quasi-periodic structure; Small angle-domain bandwidth; Transmittance spectra

OCIS Codes: 230.4170; 070.6110; 160.5298; 160.4760

基金项目:国家自然科学基金(No. 61205126)、湖南省教育厅科学研究优秀青年项目(2017)、湖南省科技计划项目(No. 2016TP1021)和湖南省大学生实验项目(湘教通[2016]283号)资助

第一作者:陈敏(1991-),女,硕士研究生,主要研究方向为光束传输. Email:798863378@qq.com

导师(通讯作者):罗朝明(1978-),男,副教授,博士,主要研究方向为微结构光子学及其器件. Email:zhaomingluo@hnu.edu.cn

收稿日期:2016-08-26; **录用日期:**2016-11-14

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

低通空间滤波器被广泛应用于信息处理和图像增强等领域,尤其是在高功率激光系统中^[1-3].传统的空间滤波器是由两个正透镜和一个滤波小孔的 $4f$ (f 表示焦距)系统组成,可通过调节小孔的大小来调节其角域带宽^[4-5],但 $4f$ 系统整个装置体积大,同时需要高准确度的调节装置和真空条件^[3,6-7].随着光子晶体以及包括单负和双负在内的超材料的独特电磁特性和潜在应用被发现,基于光子晶体和超材料的新型即插即用的非聚焦型空间滤波器也被提出并得到实现^[3,6-17].美国加利福尼亚大学 Schurig 等研究了利用具有各向异性介质的材料实现空间滤波^[3];德国汉堡大学 Serebryannikov 等基于二维光子晶体实现了空间滤波器^[9-10];西班牙 Staliunas 等利用啁啾光子晶体实现了低通空间滤波器^[6,11].此外,国内上海光机所、湖南大学、国防科大等团队基于光子晶体和光栅结构也实现了空间滤波^[12-14].本课题组设计了 Rugate 薄膜型空间滤波器,并解决了空间滤波器的偏振无关以及在波导模式中的应用等问题^[7,15-17].这种新型空间滤波器在光束平滑中的应用已经被证明,但相对于激光科学的要求而言,这种空间滤波器的角域带宽非常大,从而需要设计小角度的新型空间滤波器^[4-5].本研究小组发现超材料的引入有利于实现小角度低通空间滤波器,其角域带宽能达到 10° 以内^[18].但是这种超材料在自然界中是不存在的,它们制备较为复杂且材料损耗大,因此探索利用常规材料来设计小角度的新型空间滤波器是很有意义的.

近年来,与光子晶体研究对应的准周期结构的研究引起研究人员广泛的关注^[19-21].由于准周期结构介于有序和无序系统之间,它打破了传统光子晶体的周期性规律,从而有着许多不同于光子晶体的独特性质. Fibonacci 序列是一种准周期结构,这种结构被成功制备^[22-24].同时将 Fibonacci 序列准周期结构引入到一维光子晶体、声子晶体等结构中,能够有效地拓宽其带隙以及改善晶体的相关特性^[24-29].基于石墨烯的 Fibonacci 序列准周期结构的光子晶体也被提出,通过石墨烯的引入能够灵活地调控光子带隙^[30-31].

本文提出了基于常规材料的 Fibonacci 序列准周期结构的良好的空间特性的小角度空间滤波器.首先利用传输矩阵法研究了几种 Fibonacci 序列准周期结构的传输特性,并设计了小角度的空间滤波器;然后通过选择不同的 Fibonacci 序列类型以及改变相应的序列数来对该滤波器角域带宽进行调节;最后,通过调节介质的结构参量来进一步调节空间滤波器的角域带宽.

1 结构模型与理论

本文研究的一维 Fibonacci 序列准周期结构 $F(m,1)$ 序列是按照迭代规则 $B \rightarrow A, A \rightarrow A^m B$ (m 为正整数)生成的^[21,29].若将 B 作为第 0 代元素即 $S_0 = B$,则依次有

$$\begin{cases} S_1 = A \\ S_2 = A^m B = S_1^m S_0 \\ S_3 = (A^m B)^m A = S_2^m S_1 \\ \dots \\ S_j = (S_{j-1})^m S_{j-2} \quad (j \geq 2) \end{cases} \quad (1)$$

式中, S_j 表示第 j 代元素, j 称为序列数.这种 Fibonacci 序列准周期结构已被许多科学家成功制备^[22-24],并探索研究了其在光吸收、聚焦成像以及电光可调谐的滤波等方面的应用^[21,24-26].本文着重研究了该序列 $F(m,1)$ 中的 $[F(1,1)]^N, [F(2,1)]^N, [F(3,1)]^N$ 三种准周期结构在空间滤波器设计方面的应用,其中 N 表示所选取的周期数.当序列数 $j=3$,周期数 $N=2$ 时,这三种结构由前面的迭代规律可分别表示为: $(ABA)^2$ 、

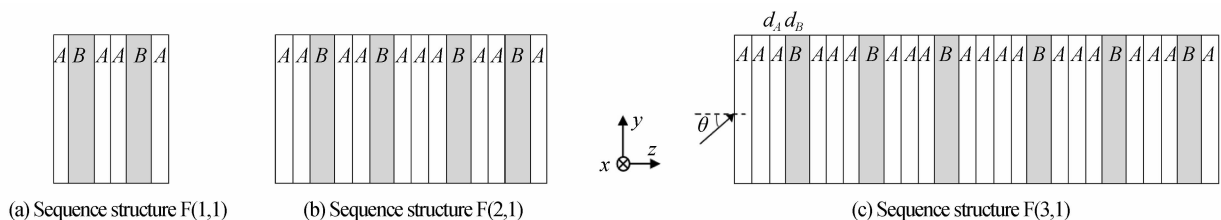


图 1 序列数 $j=3$, 周期数 $N=2$ 的三种准周期结构示意图

Fig. 1 Schematic of three quasi-periodic structures with sequence number $j=3$ and period number $N=2$

$(AABAABA)^2$ 和 $(AAABAAABAAABA)^2$, 具体的结构示意图如图 1. 组成这三种准周期结构的介质 A、B 对应的折射率、介电常量和磁导率分别为 n_A 、 n_B 、 ϵ_A 、 ϵ_B 和 μ_A 、 μ_B ; 对应的物理厚度分别为 d_A 、 d_B . 需要说明的是, 由于 Fibonacci 序列中周期数 N 主要影响的是透射峰的分裂数目^[32], 而本文侧重研究利用某一透射峰的空间特性来设计空间滤波器, 因此在这里未考虑周期数变化带来的影响, 且在后面的仿真计算中周期数都设为 $N=2$.

本文将运用传输矩阵法来研究 Fibonacci 序列的传输特性, 探索小角度空间滤波器的设计. 假设光束从空气中沿 z 轴正方向以 θ 角入射到这些准周期结构中, 由传输矩阵法可知, 第 q 层的电场分量和磁场分量可以表示^[16-18] 为

$$M_q = \begin{bmatrix} \cos \beta_q & -\frac{i}{p_q} \cos \beta_q \\ -ip_q \cos \beta_q & \cos \beta_q \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $\beta_q = (2\pi/\lambda)n_q d_q$, λ 表示入射波的波长, n_q 和 d_q 分别表示第 q 层介质的折射率和物理厚度; p_q 与偏振有关, TE 偏振时 $p_q = \sqrt{\epsilon_q/\mu_q} \cos \theta_q$, 而 TM 偏振时 $p_q = \sqrt{\mu_q/\epsilon_q} \cos \theta_q$; 其中 $\cos \theta_q = \sqrt{1 - (\sin \theta/n_q)^2}$, ϵ_q 和 μ_q 分别表示第 q 层对应的介电常量和磁导率, θ_q 表示光束射到第 q 层的入射角.

整个结构的传输矩阵为

$$\mathbf{M} = \prod M_q = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} \\ x_{21} & x_{22} \end{bmatrix} \quad (3)$$

因而整个结构的反射率和透射率^[16-18] 分别为

$$R = \left| \frac{(x_{11} + x_{12} p_s) p_0 - (x_{21} + x_{22} p_s)}{(x_{11} + x_{12} p_s) p_0 + (x_{21} + x_{22} p_s)} \right|^2 \quad (4)$$

$$T = \left| \frac{2p_0}{(x_{11} + x_{12} p_s) p_0 + (x_{21} + x_{22} p_s)} \right|^2 \quad (5)$$

式中, p_0 表示该结构左侧边界以外介质环境的结构参量, p_s 为该结构右侧边界以外介质环境的结构参量. 由于本文结构两侧都是空气 ($\epsilon_0 = \mu_0 = 1$), 从而 $p_0 = p_s = \sqrt{1 - \sin^2 \theta / (\epsilon_0 \mu_0)} = \cos \theta$.

2 数值模拟与分析

本文将通过研究 Fibonacci 序列中的 F(1,1)、F(2,1)、F(3,1) 三种准周期结构的空传输特性, 探索利用它们的良好空间特性来设计空间滤波器. 组成这些准周期结构介质 A、B 的结构参量分别为^[33-35]: 折射率 $n_A = 2.4$, $n_B = 1$; 磁导率 $\mu_A = \mu_B = 1$; 每层的光学厚度都设为 d_0 . 根据光子晶体等结构的尺寸变换原理^[7], 可

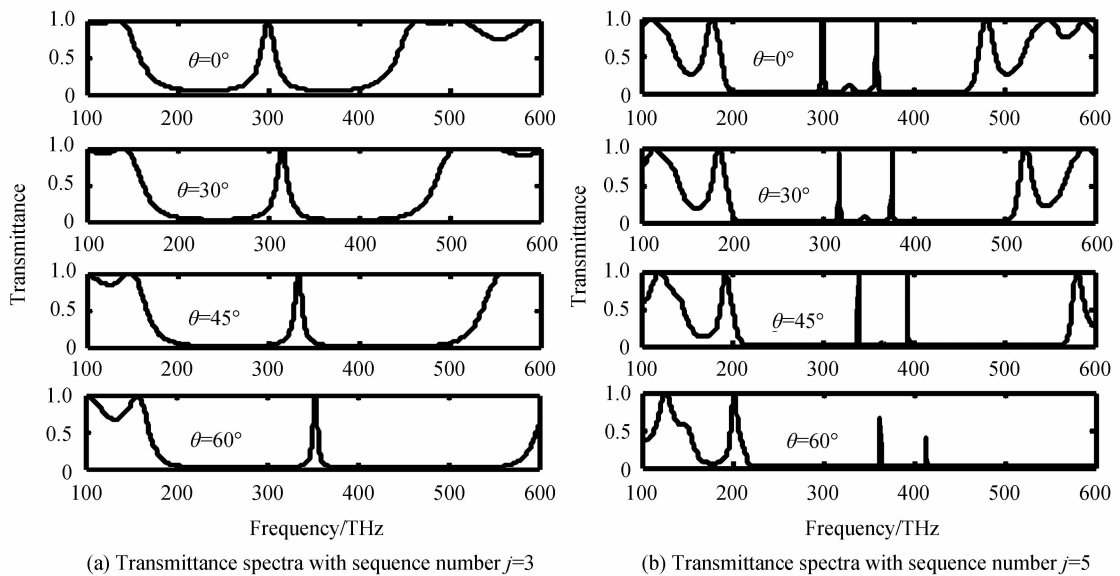


图 2 不同序列数的序列 F(1,1) 准周期结构的传输谱

Fig. 2 Transmittance spectra of the quasi-periodic structure of sequence F(1,1) with different sequence numbers

以通过调节每层的光学厚度 d_0 来保证本文中所设计的空间滤波器的中心波长为 $\lambda_0 = 1 \mu\text{m}$ (对应的中心频率 $f_0 = 300 \text{ THz}$)。同时需要注意的是,本文只考虑 TE 偏振的情形。

首先,利用传输矩阵法来研究序列 F(1,1) 准周期结构的空问传输特性,探索通过改变序列数对其空问特性的影响,并根据该空问特性来设计空问滤波器。选取序列 F(1,1) 的结构参量为序列数 $j = 3$,每层光学厚度 $d_0 = 0.250 0 \mu\text{m}$,该准周期结构 $(ABA)^2$ 的传输谱如图 2(a)。从该图中可以看出,在频率 $f_0 = 300 \text{ THz}$ 处出现了一个透射峰,且随着入射角 θ 的增加,该透射峰及光子禁带整体右移(向着高频方向移动)。为了研究序列数 j 变化对滤波器的影响,本文选取 $j = 5$,同时为保证所设计的空问滤波器中心波长为 $\lambda_0 = 1 \mu\text{m}$,将每层的光学厚度调整为 $d_0 = 0.227 4 \mu\text{m}$,该结构 $(ABAABABA)^2$ 的传输谱如图 2(b)。从图中可以看出,在禁带出现了三个透射峰,其中第一个透射峰在频率 $f_0 = 300 \text{ THz}$ 处,并与禁带整体随着角度 θ 的增加而右移。相比于图 2(a) 中在频率 300 THz 处的透射峰而言,图 2(b) 处的透射峰的频率带宽明显变窄,对角度也更为敏感。通常情况下空问滤波器的中心频率为单频或是一个很窄的频率带宽,在这里都选取空问滤波器的中心频率为 $f_0 = 300 \text{ THz}$ 。

根据前面两个 300 THz 处透射峰的空问特性,本文设计了空问滤波器,其透射率随入射角变化的关系如图 3。图中实线对应为序列数 $j = 3$,短横虚线对应为 $j = 5$ 时该结构空问滤波器的传输情形。为了总结出角域带宽随序列数的变化规律,采用上面同样的方式,仿真分析了 $j = 4$ 时序列 F(1,1) 准周期结构构成的空问滤波器的透射率随入射角的变化关系,如图 3 中点虚线所示。从而可以得出,所设计的空问滤波器的角域带宽随 j 的增加而减小,由图 3 可以看出当序列数 j 分别为 3, 4, 5 时对应的角域带宽 $\Delta\theta$ (3 dB 带宽) 为 18° , 12° 和 6° 。

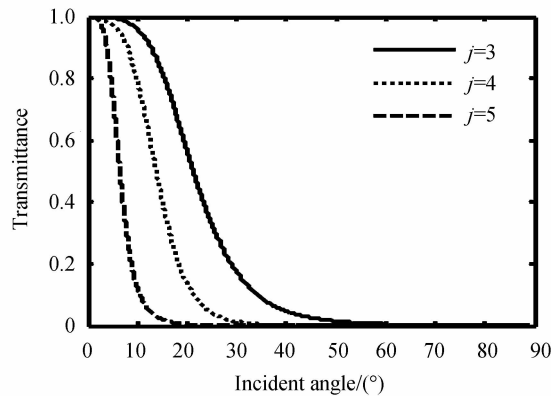


图 3 不同序列数的序列 F(1,1) 准周期结构构成的空问滤波器的透射率随入射角变化的关系

Fig. 3 Transmittance as a function of the incident angle for the low-pass spatial filter composed of quasi-periodic structure F(1,1) with different sequence numbers

接着,选取序列 F(2,1) 准周期结构来设计空问滤波器,并探索序列数对其角域带宽的影响。选择序列数 $j = 3$,每层光学厚度调整为 $d_0 = 0.177 4 \mu\text{m}$,利用传输矩阵法分析得到了准周期结构 $(AABAABA)^2$ 的不同入射角度的传输谱如图 4(a)。从图中可看出,其禁带中心 $f_0 = 300 \text{ THz}$ 处的透射峰及光子禁带随着角度 θ 的增加,整体右移。调节该准周期结构的序列数为 $j = 4$,并将每层光学厚度调整为 $d_0 = 0.228 2 \mu\text{m}$,其对应准周期结构 $(AABAABAAABAABAAB)^2$ 的传输谱如图 4(b)。同图 4(a) 一样,在禁带中心 $f_0 = 300 \text{ THz}$ 处也存在一个透射峰,且该透射峰和光子禁带都随着入射角 θ 的增加,整体右移。根据图 4(a) 和 (b) 中 $f_0 = 300 \text{ THz}$ 处的透射峰对应的空问特性设计了中心频率为 300 THz 的空问滤波器。

图 5 为对应空问滤波器的透射率随入射角变化的关系图,实线和点虚线分别表示 $j = 3$ 和 4 时准周期结构所设计的空问滤波器的传输情形,它们的角域带宽分别为 9° 和 5° 。采用同样的方法画出了 $j = 5$ 时准周期结构所设计的空问滤波器的透射率随入射角变化的关系如图 5 中短横虚线所示,其角域带宽为 3° 。结合图 3 和图 5 分析总结得出:对于同一个 Fibonacci 序列 [F(1,1) 或 F(2,1)] 所设计的空问滤波器对应的角域带宽都随序列数 j 的增加而减小。

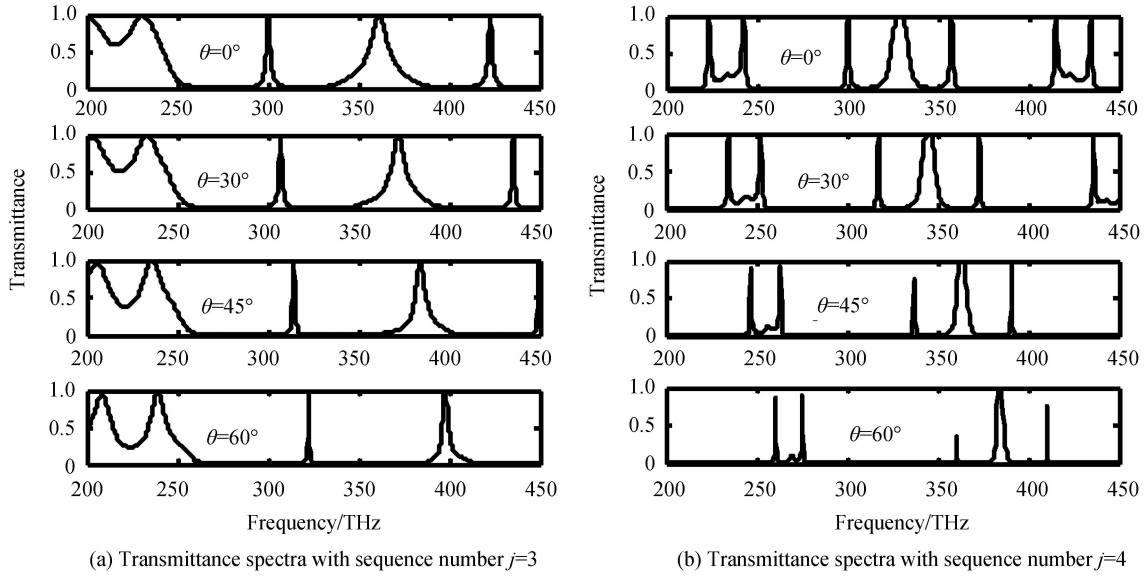


图 4 不同序列数的序列 F(2,1)准周期结构的传输谱

Fig. 4 Transmittance spectra of the quasi-periodic structure of sequence F(2,1) with different sequence numbers

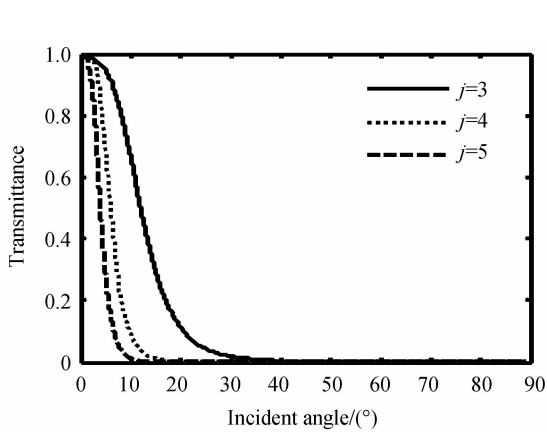


图 5 不同序列数的序列 F(2,1)准周期结构构成的空间滤波器的透射率随入射角变化的关系

Fig. 5 Transmittance as a function of the incident angle for the low-pass spatial filter composed of quasi-periodic structure F(2,1) with different sequence numbers

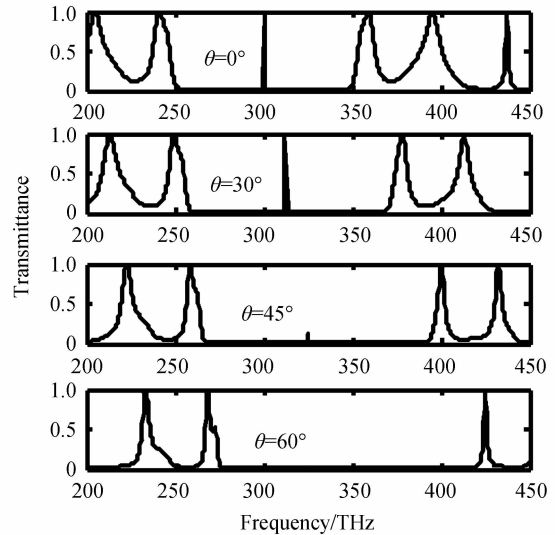


图 6 序列 F(3,1)准周期结构在序列数 j=3 时的传输谱
Fig. 6 Transmission spectra of the quasi-periodic structure sequence F(3,1) with the sequence number j=3

然后,本文引入另外一种序列 F(3,1),结合前面的序列 F(1,1)和 F(2,1)来研究 Fibonacci 序列的结构类型对所构成的空间滤波器角域带宽的影响.选取序列数 $j=3$,每层光学厚度调整为 $d_0=0.2500 \mu\text{m}$ 时准周期结构 $(AAABAAABAAABA)^2$ 的不同入射角的传输谱如图 6.从图中可以看出,随入射角 θ 的增加,中心频率 $f_0=300 \text{ THz}$ 处的透射峰和光子禁带都向高频方向移动.

根据该透射峰的良好空间特性设计了中心频率为 300 THz 的空间滤波器,相应的透射率随入射角变化的关系如图 7 中的短横虚线所示.同时在图 7 中又重画了序列数 $j=3$ 时序列 F(1,1)和 F(2,1)所设计的空间滤波器的透射率随入射角变化的关系图,分别为实线和点虚线.对比图 7 中的三条曲线可以看出,随着 F(m,1)模型中 m 值的增加,低通空间滤波器的角域带宽依次减小,分别为 18° 、 9° 和 3° .

最后,本文研究了组成准周期结构的介质结构参量如折射率对低通空间滤波器角域带宽的影响.调节 A 介质层的折射率为 $n_A=2.2, 2.6, 3$ 和 3.8 ,其余参量与图 6 一致,通过传输矩阵法分析得到了中心频率为 300 THz 的空间滤波器的透过率随入射角变化的关系如图 8.从图中可以看出,随着 A 介质层折射率的增大(也就是 A、B 两介质之间的折射率差 Δn 的增加),低通空间滤波器的角域带宽能进一步被调谐.当介质 A

折射率调节为 3.8 时,所设计的空间滤波器对应的角域带宽甚至可达到 1° 左右. 相比于前面利用序列数和结构类型的调节方式,这种方式的调节范围是很小的,故称其为“微调”,前面的两种调节为“粗调”. 结合“粗调”和“微调”,可以实现对基于 Fibonacci 序列准周期结构的空间滤波器的角域带宽的精确调控.

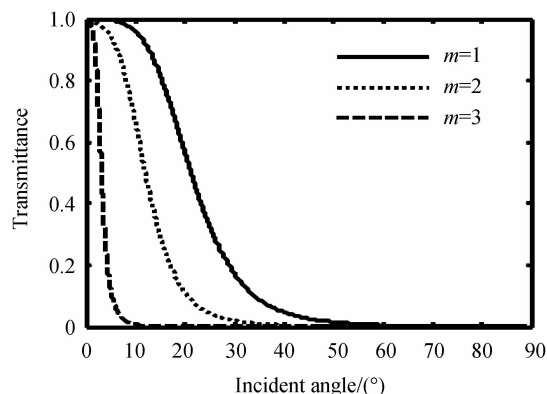


图 7 不同 m 值时,序列 $F(m,1)$ 准周期结构构成的低通空间滤波器的透射率随入射角变化的关系

Fig. 7 Transmittance as a function of the incident angle for the low-pass spatial filter composed of quasi-periodic structure $F(m,1)$ with different m value

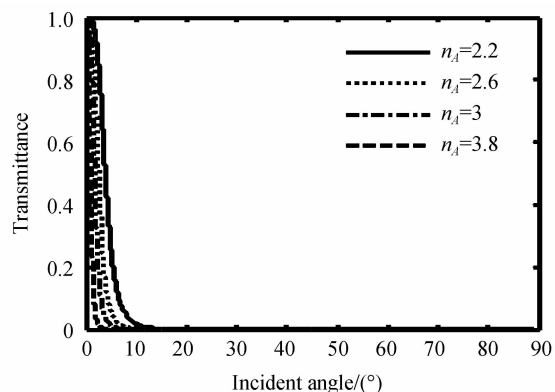


图 8 不同折射率下,序列 $F(3,1)$ 准周期结构构成的低通空间滤波器的透射率随入射角变化的关系

Fig. 8 Transmittance as a function of the incident angle for the low-pass spatial filter composed of quasi-periodic structure $F(3,1)$ with different refractive indices

3 结论

本文基于 Fibonacci 序列准周期结构设计出了小角度低通空间滤波器. 首先,利用传输矩阵法研究了 Fibonacci 序列中序列 $F(1,1)$ 、 $F(2,1)$ 准周期结构在选取不同序列数情况下的空间传输特性,并设计出空间滤波器. 进一步研究得出,基于同一种序列准周期结构设计的低通空间滤波器的角域带宽随着其序列数 j 的增加,角域带宽依次减小. 接着比较分析了序列数 $j=3$ 时的序列 $F(1,1)$ 、 $F(2,1)$ 和 $F(3,1)$ 三种准周期结构所设计的空间滤波器的透射率随入射角变化的曲线. 结果表明随着序列 $F(m,1)$ 中 m 值的增加,构成的低通空间滤波器的角域带宽依次减小,基于上述三种准周期结构设计的空间滤波器的角域带宽分别为 18° 、 9° 和 3° . 最后以序列 $F(3,1)$ 准周期结构空间滤波器为例,探讨了只改变结构中 A 介质的折射率来进一步对该滤波器的角域带宽进行精确调控. 研究发现,随着折射率的增加,该空间滤波器的角域带宽进一步减小,很好地实现了小角度的低通空间滤波器. 该空间滤波器相比于以往的基于超材料的小角度空间滤波器而言,制备更为简单,且有可能应用于新一代的高功率激光系统中.

参考文献

- [1] GOODMAN J W. Introduction to Fourier optics[M]. McGraw-Hill, New York, 1988: 217-290.
- [2] ALMEIDA S P, INDEBETOUW G. Applications of optical Fourier transforms[M]. Academic Press, San Diego, 1982: 41-87.
- [3] SCHURING D, SMITH D R. Spatial filtering using media with indefinite permittivity and permeability tensors[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, **82**(14): 2215-2217.
- [4] ZHANG Xin, LIU Hong-jie, ZHAO Jun-pu, et al. Pinhole design of spatial filter in high energy solid-state laser system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(11): 111402.
张鑫, 刘红婕, 赵军普, 等. 高功率固体激光系统空间滤波小孔尺寸设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(11): 111402.
- [5] WANG Gui-ying, ZHAO Jiu-yuan, ZHANG Ming-ke, et al. Basic study on spatial filter used in Nd-glass high power laser system[J]. *Acta Physica Sinica*, 1985, **34**(2): 171-181.
王桂英, 赵九源, 张明科, 等. 钕玻璃高功率激光系统中的空间滤波器的基本研究[J]. *物理学报*, 1985, **34**(2): 171-181.
- [6] STALIUNAS K, SÁNCHEZ-MORCILLO V J. Spatial filtering of light by chirped photonic crystals[J]. *Physical Review A*, 2009, **79**(5): 053807.
- [7] LUO Z, WEN S, TANG Z, et al. Low-pass Rugate spatial filters for beam smoothing[J]. *Optics Communications*, 2010, **283**(13): 2665-2668.
- [8] MORENO I, ARAIZA J J, AVENDANO-ALEJO M. Thin-film spatial filters[J]. *Optics Letters*, 2005, **30**(8): 914-

- [9] SEREBRYANNIKOV A E, MAGATH T. Transmission through photonic crystals with multiple line defects at oblique incidence[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2008, **25**(3): 286-296.
- [10] SEREBRYANNIKOV A E, LALANNE P, PETROV A Y, *et al.* Wide-angle reflection-mode spatial filtering and splitting with photonic crystal gratings and single-layer rod gratings[J]. *Optics Letters*, 2014, **39**(21): 6193-6196.
- [11] MAIGYTE L, STALIUNAS K. Spatial filtering with photonic crystals[J]. *Applied Physics Reviews*, 2015, **2**(1): 011102.
- [12] TANG Z, FAN D, WEN S, *et al.* Low-pass spatial filtering using a two-dimensional self-collimating photonic crystal [J]. *Chinese Optics Letters*, 2007, **5**(101): S211-S213.
- [13] FANG Y T. Direction and frequency filter basing on an ultra-compact structure consisting of dielectric films[J]. *Optics & Laser Technology*, 2010, **42**(5): 850-853.
- [14] ZHENG G, SHEN B, TAN J, *et al.* Experimental research on spatial filtering of deformed laser beam by transmitting volume Bragg grating[J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, **9**(3): 030501.
- [15] ZHENG Guang-wei, CHU Xing-chun, ZHENG Qiu-rong. Development of non-focusing low-pass spatial filtering for laser beams[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, **53**(5): 050002.
郑光威, 楚兴春, 郑秋容. 非聚焦型光束空间低通滤波技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, **53**(5):050002.
- [16] LUO Z, TANG Z, XIANG Y, *et al.* Polarization-independent low-pass spatial filters based on one-dimensional photonic crystals containing negative-index materials[J]. *Applied Physics B*, 2009, **94**(4): 641-646.
- [17] LUO Z, CHEN M, LIU J, *et al.* An approach of waveguide mode selection based on the thin-film spatial filters[J]. *Optics Communications*, 2016, **365**: 120-124.
- [18] LUO Z, CHEN M, DENG J, *et al.* Low-pass spatial filters with small angle-domain bandwidth based on one-dimensional metamaterial photonic crystals[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2016, **127**(1): 259-262.
- [19] KANG Yong-qiang, GAO Peng, LIU Hong-mei, *et al.* Reflection band gap in thue-morse quasicrystal containing anisotropic left handed material[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(3): 0319004.
康永强, 高鹏, 刘红梅, 等. 含各向异性左手材料的一维 Thue-Mores 准周期结构的反射带隙[J]. *光子学报*, 2015, **44**(3):0319004.
- [20] MAURIZ P W, VASCONCELOS M S, ALBUQUERQUE E L. Optical transmission spectra in symmetrical Fibonacci photonic multilayers[J]. *Physics Letters A*, 2009, **373**(4): 496-500.
- [21] LIU X, ZHOU J, ZHU B Q, *et al.* Electro-optical tunable filter with symmetric generalized Fibonacci photonic crystal [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(11): 1723-1727.
- [22] MERLIN R, BAJEMA K, CLARKE R, *et al.* Quasiperiodic gaas-alas heterostructures[J]. *Physical Review Letters*, 1985, **55**(17): 1768-1770.
- [23] ZHANG Jian, ZHENG Jie, ZHANG Yu-Shu. Fibonacci quasi-periodic superstructure fiber Bragg gratings[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(8): 2050-2054.
张健, 郑杰, 张玉书. 菲波纳契准周期超结构光纤光栅[J]. *光子学报*, 2009, **38**(8):2050-2054.
- [24] PASSIAS V, VALAPPIL N V, SHI Z, *et al.* Luminescence properties of a Fibonacci photonic quasicrystal[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(8): 6636-6642.
- [25] DONG Ze-dong, LIU You-wen. Optical absorption properties of quasi-periodic microstructures arranged by Fibonacci sequence[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016 **36**(6): 0605001.
董泽东, 刘友文. 斐波纳契数列准周期微结构光吸收特性[J]. *光学学报*, 2016, **36**(6):0605001.
- [26] KE Jie, Zhang Jun-yong. Focusing and imaging properties of fibonacci photon sieve[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(9):0923001.
柯杰, 张军勇. 斐波那契光子筛的聚焦成像特性[J]. *光学学报*, 2015, **35**(9):0923001.
- [27] LUSK D, ABDULHALIM I, PLACIDO F. Omnidirectional reflection from Fibonacci quasi-periodic one-dimensional photonic crystal[J]. *Optics Communications*, 2001, **198**(4): 273-279.
- [28] TANG Bing-shu. Study on the transmission properties of fibonacci one-dimensional photonic crystal nanometer films in visible region[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(8): 1426-1430.
汤炳书. 光学波段菲波纳契序列一维光子晶体纳米膜传输特性研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(8):1426-1430.
- [29] CAO Yong-jun, YANG Xu. Transmission properties of the generalized Fibonacci quasi-periodical phononic crystal[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(6): 3620-3624.
曹永军, 杨旭. 广义 Fibonacci 准周期结构声学晶体透射性质的研究[J]. *物理学报*, 2008, **57**(6):3620-3624.
- [30] ZHANG Y, WU Z, CAO Y, *et al.* Optical properties of one-dimensional Fibonacci quasi-periodic graphene photonic crystal[J]. *Optics Communications*, 2015, **338**: 168-173.
- [31] NING R, LIU S, ZhANG H, *et al.* Wideband absorption in Fibonacci quasi-periodic graphene-based hyperbolic metamaterials[J]. *Journal of Optics*, 2014, **16**(12): 125108.

- [32] LIU Xiao. Analysis on the optical properties of one-dimensional generalized Fibonacci photonic crystal[D]. Ningbo: Ningbo University, 2011:25-27.
刘晓. 一维广义 Fibonacci 序列光子晶体结构的光学传输特性研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2011:25-27.
- [33] HAUSMANN B J M, SHIELDS B J, QUAN Q, *et al.* Coupling of NV centers to photonic crystal nanobeams in diamond[J]. *Nano Letters*, 2013, **13**(12): 5791-5796.
- [34] LIU Jie, TIE Sheng-nian, LU Hui-dong. Multi-channel drop filter based on two-dimensional photonic crystal[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, **24**(5): 1021-1027.
刘杰, 铁生年, 卢辉东. 多信道二维光子晶体滤波器[J]. 光学精密工程, 2016, **24**(5): 1021-1027.
- [35] RIEDRICH-MÖLLER J, KIPFSTUHL L, HEPP C, *et al.* One-and two-dimensional photonic crystal microcavities in single crystal diamond[J]. *Nature Nanotechnology*, 2012, **7**(1):69-74.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (No. 61205126), the Scientific Research Program of Education Bureau of Hunan Province, China (2017), the Science and Technology Program of Hunan Province, China (No. 2016TP1021), and the Experimental Project of College Students in Hunan Province, China