

# 平面传播宽光谱 - 窄带通滤波片的优化设计与研究

李杰, 张永琪, 王雪萍, 于淼, 王晓华\*, 孙德贵

长春理工大学物理学院, 吉林 长春

收稿日期: 2025年1月9日; 录用日期: 2025年2月5日; 发布日期: 2025年2月14日

## 摘要

光通信领域中随着光芯片研究与应用的迅猛发展, 光学窄带滤波在其中愈发重要。传统的干涉滤波片是通过高低折射率材料层的对称性交替结构形成, 通过逐层镀膜来实现, 而其操作方式是: 被滤波的光波垂直穿过滤波片平面。然而, 对于平面内传播的导波而言, 多层干涉滤波片需要垂直插入波导通道中, 从而各层的 $1/4$ 波长光学厚度给设计与加工都带来更大难度。对此, 本文针对红外光区域设计了氮化硅为芯和氧化硅为包层的单模波导结构, 并分别作为高低折射率层设计了截止型干涉滤光片, 进而设定了截止点方向相反的两个截止滤光片, 最后还将其与多层干涉滤波片结构复合在一起形成复合型窄带滤光片。研究中, 利用传输矩阵法对窄带滤波片的带通性能进行了系统性数值模拟, 对带通信号半高宽、自由光谱区域和透射率性能进行分析, 并利用TFCalc软件对器件性能进行了优化。结果表明: 优化的窄带滤波片较传统结构有着更加优越的滤波性能; 复合型干涉滤光片有着更加出色的滤波和截止性能, 实现了 $\leq 1.0$  nm半高宽带通峰值和 $\geq 150$  nm单侧自由光谱区; 单侧截止斜度达到 $\leq 0.01$  nm, 达到了实际通信系统的要求。

## 关键词

干涉滤光片, 窄带滤波, 截止滤波, 复合型

# Optimal Design and Investigation for the Traveling-in-Plane Filters Having Both Wide-Spectrum Region and Narrow-Band Passing

Jie Li, Yongqi Zhang, Xueping Wang, Miao Yu, Xiaohua Wang\*, Degui Sun

School of Physics, Changchun University of Science & Technology, Changchun Jilin

\*通讯作者。

文章引用: 李杰, 张永琪, 王雪萍, 于淼, 王晓华, 孙德贵. 平面传播宽光谱-窄带通滤波片的优化设计与研究[J]. 应用物理, 2025, 15(2): 82-90. DOI: 10.12677/app.2025.152009

## Abstract

In the field of optical communications, with the booming development and applications of integrated photonic circuits, the optical narrow band-passing filtering function is paramount important. The traditional narrow-band filter is formed by symmetric alternating high-/low-index layers and its operating form is that the filtered beam normally passes through the filter plate. Nevertheless, for a guided-wave traveling in a plane film, the multiple high-/low-index layers need to be vertically inserted a waveguide channel, so the  $\lambda/4$  optical thickness of each layer leads to the bigger difficulty in fabrication. To overcome such a problem, in the infrared (IR) area this work designs a  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -core/ $\text{SiO}_2$  clad single-mode SiN waveguide, then uses  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -layer  $\text{SiO}_2$ -layer as high-(H) and Low-index (L) layers, respectively, to form two cutoff filters having the inverse cutoff-points, and finally combines with multilayer interference structure to create a hybrid narrow-band filter. In study, with transfer matrix model, the band-passing performance of filter is systematically numerical simulated, and then the full width at half-maximum (FWHM), free spectral region (FSR) and transmittance are analyzed, and are further optimized by TFCalc software. Results: the optimal narrow-band filter has better filtering property than the traditional ones; the hybrid filter has the excellent performance in both filtering and cut-off, illustratively, a  $\leq 1.0$  nm FWHM and a  $\geq 150$  nm FSR, and  $\leq 0.01$  nm single-side slope are implemented, so meeting the requirements of industrial systems.

## Keywords

Interference Filter, Narrow-Band Filtering, Cut-Off Filtering, Hybrid

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着科学技术的发展,现代通信系统对于信号的传输质量有了更高的要求,这就要采用高性能的小型化带通滤波器以确保数据传输过程中的稳定性和可靠性。此外,还要尽可能减小体积以便于集成到各种便携式设备当中。

其中,光纤布拉格光栅(FBG) [1]作为一种无源光纤器件,拥有十分优良的滤波效果,半高宽带通峰值最小可以达到 30 pm,但是通常需要与其它组件如耦合器或环路器配合使用,增加了系统的复杂度。原子共振光学滤波器[2]利用原子或者分子的共振特性能够得到皮米级(pm)的半高宽,不过由于涉及到量子力学原理的应用,这类光学滤波器设计和制造过程较为复杂,成本也相对较高。法布里-珀罗干涉仪(Fabry-Pérot Interferometer, FPI) [3]作为一种经典的窄带滤波器,可以通过改变腔体长度来调整工作波长范围,适应不同工作内容,可是由于对环境太过敏感,温度变化、机械振动等因素都可能引起腔长变动,从而影响仪器性能,所以也有着一定的局限性。另外,利用 SOI 波导构成硅基混合集成器件的硅基微环耦合级联马赫德耳干涉仪结构[4],体积较小,结构却较为复杂,制备流程也充满难度,所能达到的自由光谱区一般在 10 nm 以内,无法满足应用系统的要求。相比于这些窄带滤波器结构,传统的多层膜干涉滤波片[5]结构较为简单、耐用性强,有着进一步优化的潜力。



$$T_B = \frac{16\eta_0\eta_g}{(\eta_H/\eta_L)^{2N} \left\{ (\eta_0 + \eta_g)^2 + [(\eta_0 + \eta_g/\eta_H) - \eta_H]^2 \right\}} \quad (5)$$

从方程(4)和(5)可以看出,随着周期数  $N$  和折射率差的增加,可以使截止波长的透射率减小,过渡特性变陡,而且令截止区域的波长透射率降低。需要说明的是公式中  $T_A$  表示截止波长  $\lambda_0$  处的透射率,  $T_B$  表示截止带中心波长  $\lambda_{B0}$  处的透射率。 $\eta_0$  表示入射介质光纳,  $\eta_g$  表示基底光纳,  $\eta_H$  表示高折射率层光纳,  $\eta_L$  表示低折射率层光纳。

### 3. 模拟仿真

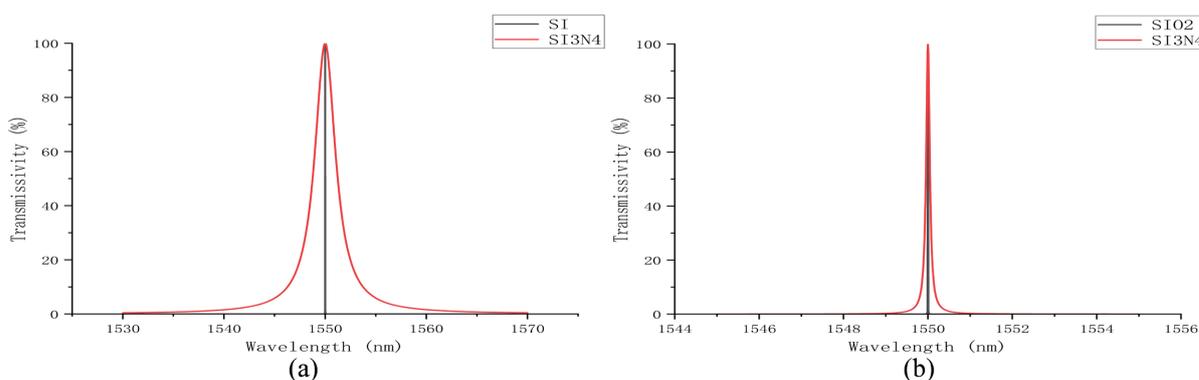
以下分析中选用的入射光是 TM 和 TE 的复合光,红外光是光通信系统常用的通信波段,因此在接下来的研究中,中心波长  $\lambda_0$  设置为 1550 nm。

#### 3.1. 多层膜反射带通滤波器的仿真模拟

根据光学薄膜理论,每层薄膜的光学厚度为四分之一波长( $d = \lambda_0/4$ )。为了更直观地观察窄带滤波片的滤波效果,本文用半高宽来描述窄带宽度。于是,带通滤波片的半高宽可以利用方程(1)~(3)模拟获得。用自由光谱区表示中心波长形成的峰与两侧未滤掉波的峰值距离。

##### 3.1.1. 不同材料对带通滤波片滤波性能的影响

为了分析不同折射率材料对带通滤波片滤波性能的影响,本文选取  $HL^6HH^6LH^6$  排布的带通滤波片进行研究。低折射率材料选择二氧化硅( $n$  取 1.445),高折射率材料分别选择硅( $n = 3.46$ )和氮化硅( $n = 1.99$ ),折射率对滤波性能的影响如图 2(a)所示。高折射率材料选择硅( $n = 3.46$ ),低折射率材料分别选择氮化硅( $n = 1.99$ )和二氧化硅( $n = 1.445$ ),其它参数不变的情况下进行计算,折射率对滤波性能的影响如图 2(b)所示。



(a) 低折射率材料为二氧化硅; (b) 高折射率材料为硅。

**Figure 2.** The influence curve of material refractive index on filtering performance

**图 2.** 材料折射率对滤波性能的影响曲线

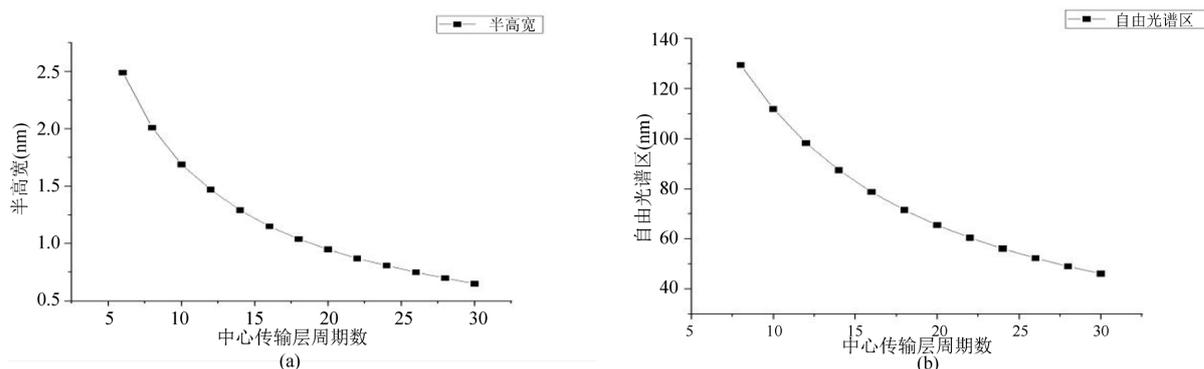
可以看出,固定低折射率材料为二氧化硅( $n = 1.445$ ),选取高折射率材料为硅( $n$  取 3.46)时中心波长的半高宽更窄,选取高折射率材料为氮化硅( $n = 1.99$ )时中心波长的半高宽较宽。反之,固定高折射率材料为硅( $n = 3.46$ ),选取低折射率材料为二氧化硅( $n = 1.445$ )时中心波长半高宽更窄,选取低折射率材料为氮化硅( $n = 1.99$ )时中心波长半高宽更宽。综合两种情况对比,发现高折射率层和低折射率层的折射率差越大,所得到的半高宽越小,滤波性能越显著。

### 3.1.2. 中心通道层对带通滤波片的影响[8]

#### (1) 中心传输层周期数对自由光谱区和半高宽的影响

选取高折射层材料为氮化硅( $n = 1.99$ ), 低折射率层材料为二氧化硅( $n = 1.445$ ), 滤波层周期数为 6, 改变中心传输层的周期数探究与半高宽的关系, 如图 3(a)所示。改变中心传输层的周期数探究与自由光谱区的关系, 如图 3(b)所示。

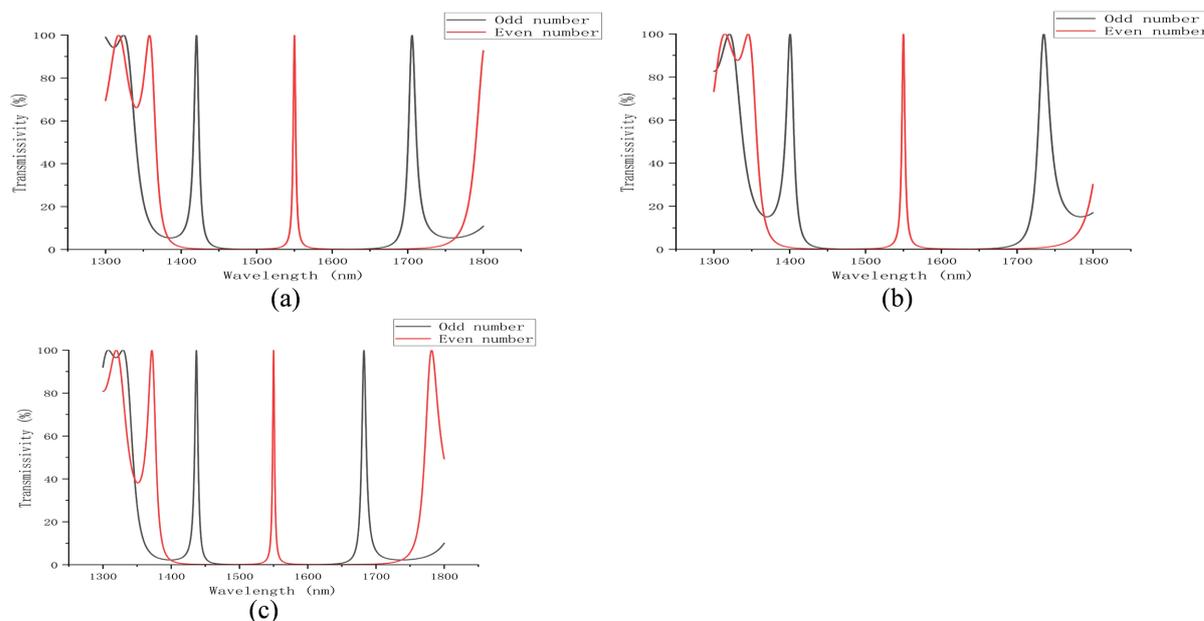
由图 3(a)和图 3(b)可以看出, 在由高折射率材料为  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ( $n = 1.99$ ), 低折射率为  $\text{SiO}_2$  ( $n = 1.445$ )所构成的干涉模型中, 保持滤波层周期数为 6 不变, 中心层周期数从 6 增加到 30, 可以使半高宽从 2.49 nm 降低到 0.65 nm, 自由光谱区从 120.43 nm 降低到 46.11 nm。这个过程中半高宽变窄, 自由光谱区降低幅度较大。



(a) 中心传输层周期数对半高宽的影响; (b) 中心传输层周期数对自由光谱区的影响。

Figure 3. The influence curve of the number of periods in the central transport layer on the half width and free spectral region  
图 3. 中心传输层周期数对半高宽和自由光谱区的影响曲线

#### (2) 中心层层数为奇数和偶数时对波形的影响[9]



(a)  $HL^6H^3LH^6$  和  $HL^6HH^2LH^6$  结构; (b)  $HL^6H^5LH^6$  和  $HL^6HH^3LH^6$  结构; (c)  $HL^6H^7LH^6$  和  $HL^6HH^4LH^6$  结构。

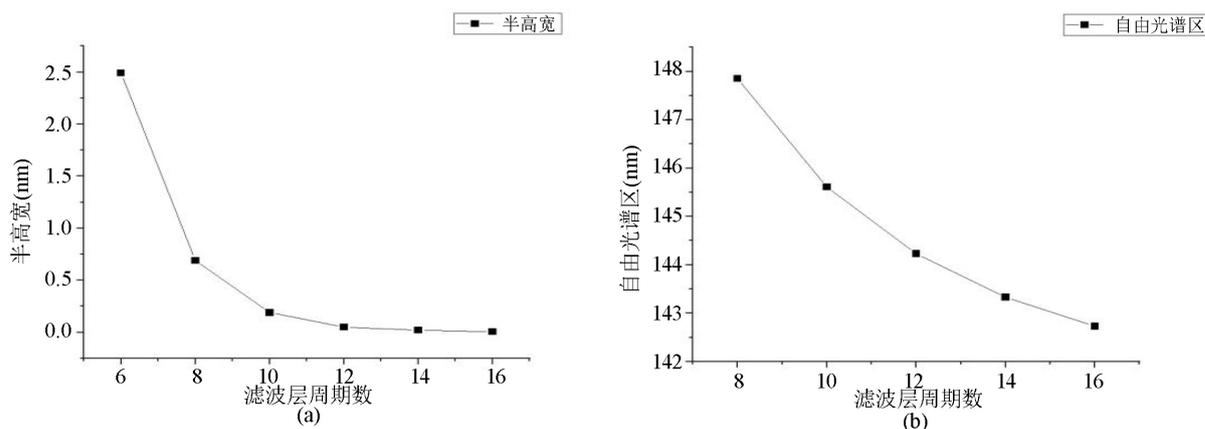
Figure 4. Diagram of the influence of parity of the central transmission layer on waveform  
图 4. 中心传输层数奇偶性对波形影响图

以  $HL^6H^3LH^6$  和  $HL^6HH^2LH^6$ 、 $HL^6H^5LH^6$  和  $HL^6HH^3LH^6$ 、 $HL^6H^7LH^6$  和  $HL^6HH^4LH^6$  的结构为例, 结果分别如图 4(a)、图 4(b)和图 4(c)所示。

可以看出, 当中心层数是 3、5、7 这样的奇数时, 在各自的波长分布中都会形成两个波峰。当中心层数是 4、6、8 这样的偶数时, 在各自波长分布中只会形成一个波峰。这是由于中心传输层数为奇数时, 入射光经过相同材料构成的中心传输层, 在中心传输层最后一层反射的光将经历一次额外的 180 度相位反转。这意味着相对于最初的入射光, 返回的光将带有  $\pi$  相移。导致奇数个反射路径, 破坏了原来干涉滤波结构的光程差, 使得除中心波长外其它波长的光能够相长干涉而得到加强, 而对于中心波长则形成相消干涉从而被抑制。相反的在中心传输层层数为偶数时, 没有额外的 180 度相位反转, 光程差没有被破坏保持原始相位关系, 在中心波长处干涉加强。因此, 在优化带通滤波片时应设定中心层数为偶数, 确保只有目标波长处光透过率最高。

### 3.1.3. 滤波层周期数对带通滤波片的影响[10]

选取 H 层的材料为氮化硅( $n = 1.99$ ), L 层的材料为二氧化硅( $n = 1.445$ ), 中心传输层周期数为 6, 改变滤波层的周期数探究与半高宽的关系, 结果如图 5(a)所示。改变滤波层的周期数探究与自由光谱区的关系, 结果如图 5(b)所示。



(a) 滤波层周期数对半高宽的影响; (b) 滤波层周期数对自由光谱区的影响。

Figure 5. The influence curve of the number of filter layer periods on bandpass filters

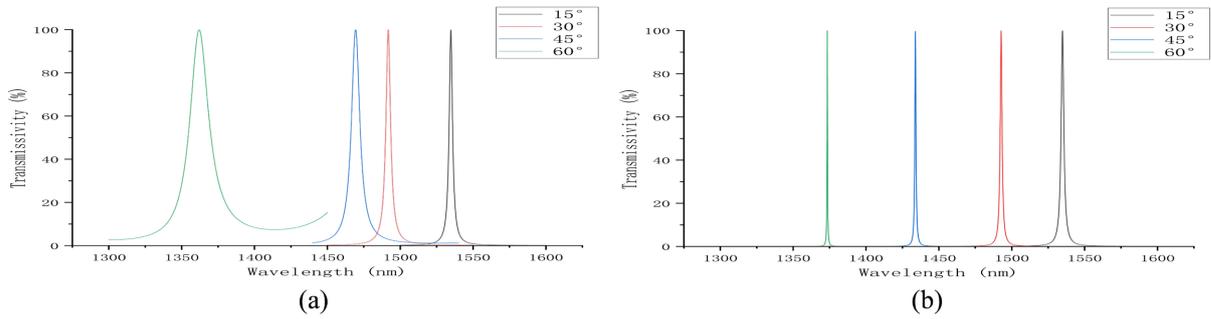
图 5. 滤波层周期数对带通滤波器的影响曲线

由图 5(a)和图 5(b)中可以看出, 在由高折射率材料为氮化硅( $n = 1.99$ ), 低折射率为二氧化硅( $n = 1.445$ )所构成的干涉模型中, 保持中心层周期数为 6 不变, 滤波层周期数从 6 增加到 16, 可以使半高宽从 2.49 nm 降低到 0.005 nm, 自由光谱区从 147.85 nm 降低到 142.73 nm。这个过程中半高宽变窄幅度较大, 自由光谱区降低幅度较小。综合上述结果, 在优化带通滤波片时改变滤波层数可以更有效地改变中心波长的半高宽; 改变中心层数可以更有效地改变自由光谱区。

### 3.1.4. 不同角度入射光对带通滤波片的影响[11]

选取高折射层的材料为氮化硅( $n = 1.99$ ), 低折射率层的材料为二氧化硅( $n = 1.445$ ), 中心传输层周期数为 6, 滤波层周期数为 6 的结构, 探究 TM 和 TE 光入射角度分别为 15°、30°、45°、60°时的透射谱, 结果如图 6(a)和图 6(b)所示。

可以看出, 随着入射角度的增大, TE 光和 TM 光的中心波长偏移量[12]均增大。对于 TM 光而言, 随着入射角度增大, 半高宽变宽; 对于 TE 光而言, 随着入射角度增大, 半高宽变窄。



(a) 入射光为 TM 模式; (b) 入射光为 TE 模式。

**Figure 6.** Influence curve of incident angle on bandpass filter plate

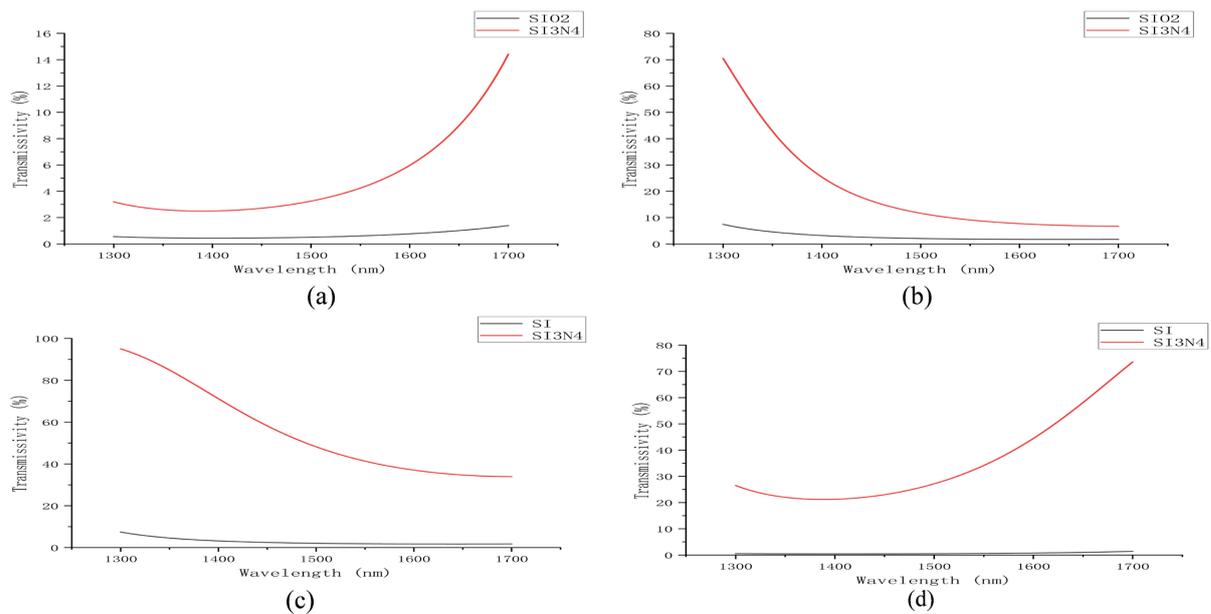
**图 6.** 入射角度对带通滤波片的影响曲线

### 3.2. 截止滤光片的仿真模拟

由两个截止滤波片构成的半高宽由方程(4)和(5)模拟并根据公式  $\Delta\lambda = \lambda_B - \lambda_A$  计算获得, 其中  $\lambda_A$ 、 $\lambda_B$  为透射率最高点的值一半时对应的两个波长, 半高宽的值越小, 滤波性能越好。

#### 3.2.1. 不同材料对截止滤光片的影响[13]

选择 H 层材料为硅( $n = 3.46$ ), L 层材料分别选择氮化硅( $n = 1.99$ )和二氧化硅( $n = 1.445$ ), 取周期数为  $N = 3$ , 对  $(0.5HL0.5H)^N$  和  $(0.5LH0.5L)^N$  两种截止方向的截止滤光片截止效果进行研究, 结果如图 7(a)和图 7(b)所示。选择 L 层材料为二氧化硅( $n = 1.445$ ), H 层材料分别选择氮化硅( $n = 1.99$ )和硅( $n = 3.46$ ), 取周期数为  $N = 3$ , 对  $(0.5HL0.5H)^N$  和  $(0.5LH0.5L)^N$  两种截止方向的截止滤光片截止效果进行研究, 结果如图 7(c)和图 7(d)所示。



(a) 截止滤光片  $(0.5HL0.5H)^N$ , H 层为硅; (b) 截止滤光片  $(0.5LH0.5L)^N$ , H 层为硅; (c) 截止滤光片  $(0.5HL0.5H)^N$ , L 层为二氧化硅; (d) 截止滤光片  $(0.5LH0.5L)^N$ , L 层为二氧化硅。

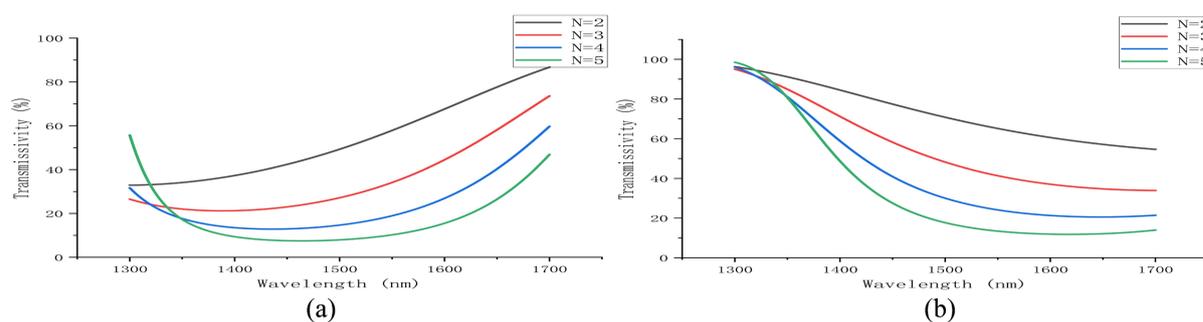
**Figure 7.** The influence curve of material refractive index on cut off filter

**图 7.** 材料折射率对截止滤光片的影响曲线

可以看出, 当选择 H 层为硅( $n = 3.46$ ), L 层分别选择氮化硅( $n = 1.99$ )和二氧化硅( $n = 1.445$ )时, 无论哪个方向上都是二氧化硅为 L 层材料的截止效果更好。同理, 选择 L 层为二氧化硅( $n = 1.445$ ), H 层分别选用氮化硅( $n = 1.99$ )和硅氮化硅( $n = 3.46$ )时, 无论哪个方向上都是硅为 H 层材料的截止效果更好。综上所述, 高低折射率差越大, 所获得的截止性能越好。本文最终选择高折射率层为氮化硅, 低折射率层为二氧化硅是因为这两种材料不仅没毒性, 而且对红外光的吸光系数特别小。

### 3.2.2. 不同周期数对截止滤光片的影响

选取氮化硅( $n = 1.99$ )材料为 H 层, 二氧化硅( $n = 1.445$ )材料为 L 层, 周期数分别为  $N = 2, 3, 4, 5$ , 对  $(0.5HL0.5H)^N$  和  $(0.5LH0.5L)^N$  两种截止方向的截止滤光片截止效果进行研究, 结果如图 8 所示。



(a)  $(0.5HL0.5H)^N$ ; (b)  $(0.5LH0.5L)^N$ 。

**Figure 8.** The influence curve of the number of cycles on the cut-off filter

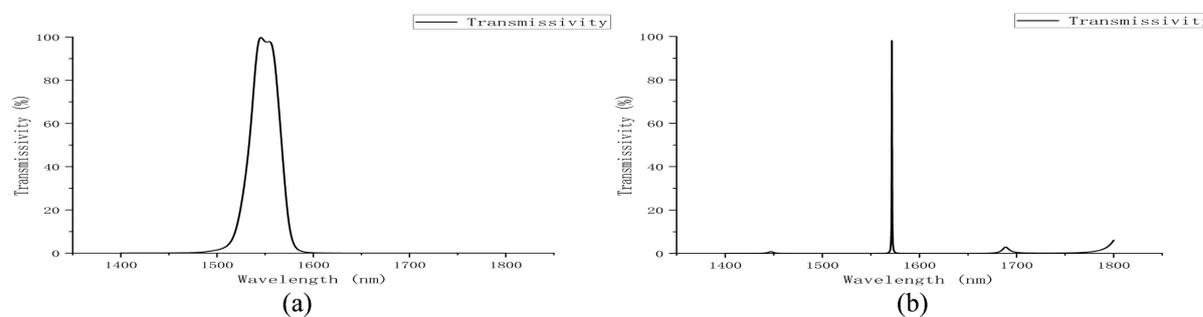
**图 8.** 周期数对截止滤光片的影响曲线

可以看出, 随着截止滤光片的周期数从 2 增加到 5, 两个方向上的截止滤光片的截止效果越来越好。因此, 当截止滤光片的 H 层和 L 层固定后, 随着周期排布的层数增多, 截止效果更好。

### 3.3. 干涉滤光片的复合型

(1) 将两个方向的截止滤光片进行复合[14]: 根据厚度对截止点影响的探究, 通过优化截止滤光片每一层膜的厚度[15], 然后让优化好的两个截止滤光片进行复合, 得到图 9(a)所示的效果。

(2) 将带通滤光片和两个截止滤光片进行复合[16], 根据对两个方向的截止滤光片进行复合得到的良好效果, 我们可以进一步优化: 将带通滤光片和两个相反方向的截止滤光片复合在一起, 并对各个膜层的厚度进行优化最后得到如图 9(b)所示的滤波效果。



(a) 两个截止滤光片的复合; (b) 带通滤光片与两个相反方向截止滤光片的复合。

**Figure 9.** Effect image of interference filter composite

**图 9.** 干涉滤光片复合后的效果图

由图 9(a)可以看出,两个方向不同的截止滤光片复合在一起,通过优化它们的厚度,可以使 1500 至 1600 纳米范围的光通过,而其他波段的光皆被反射掉,这对只允许一定范围内的光通过有着很大的用途。

由图 9(b)可以看出,通过优化两个方向相反截止滤光片的厚度让它只在一定波长范围内透光,然后根据这个波长范围设计带通滤光片,最后将带通滤光片和截止滤光片复合在一起,可以制作出更好滤波效果(更大的自由光谱区域)的窄带滤波器。

#### 4. 总结与展望

本文针对带通滤波片和截止滤波片进行了设计和优化,并对优化后的滤波片进行了复合,然后分别进行了数值模拟。结果表明:对于带通滤波片,高低折射率差越大,中心传输层和滤波层周期数越多,滤波效果越明显,可以实现 $\leq 1.0$  nm 半高宽带通峰值;当入射角度的增加,中心波长的偏移量增大, TM 模式光半高宽变宽, TE 模式光半高宽变窄;此外要注意中心传输层层数为偶数时在中心波长附近才会有透射峰。对于截止滤波片,高低折射率差越大,截止层周期数越多,截止效果越显著,单侧截止斜度可以达到 $\leq 0.01$  nm。对于复合型干涉滤光片而言,两个相反方向的截止滤光片复合可以使 1500 nm 到 1600 nm 波段的光透过,而 1300 nm 到 1500 nm 和 1600 nm 到 1800 nm 波段的光不透过;带通滤波片和两个方向相反的截止滤波片复合,可以达到 $\leq 1.0$  nm 半高宽带通峰值和 $\geq 150$  nm 单侧自由光谱区。优化后的滤波片达到实际通信系统的要求。

#### 参考文献

- [1] 查逸涵. 新型相移光纤布拉格光栅及其应用研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 暨南大学, 2019.
- [2] 薛朝, 杨保东, 臧珂茹, 等. 铯原子 852nm 共振型超窄带宽非线性光学滤波器[J]. 光学学报, 2024, 44(16): 1-9.
- [3] 张素恒, 王春生. 利用光学无源腔理论分析法布里-珀罗干涉仪的透射谱[J]. 大学物理, 2015, 34(6): 36-37+43.
- [4] 刘冕. 基于马赫-曾德尔干涉仪耦合微环结构的硅基集成光子器件研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- [5] 刘海山, 欧阳征标, 李景镇, 王启明. 用于波分复用的光子晶体滤波器[J]. 光电子·激光, 2002, 13(2): 145-149.
- [6] 张翔, 张薇. 基于 4.0-4.8 微米红外增透截止滤光片的研制[J]. 光电技术应用, 2024, 39(2): 21-26.
- [7] 杨广, 梁瑞生, 罗仁华, 刘颂豪. 一种具有放大功能的多通道窄带滤波器设计[J]. 中国激光, 2009, 36(5): 1105-1110.
- [8] 张兰, 戚子昂, 马会中. 两种不同结构的一维光子晶体窄带滤波器[J]. 光电子·激光, 2022, 33(4): 356-363.
- [9] 张玉萍, 张会云, 郑义, 王鹏, 等. 超窄带和多通道窄带光子晶体滤波器[J]. 量子光学学报, 2004, 10(4): 173-175.
- [10] 罗仁华, 梁瑞生, 韦中超, 杨广, 等. 对称型正负交替一维光子晶体超窄带滤波器[J]. 激光与红外, 2008, 38(10): 1015-1018.
- [11] 顾佩芸, 张娟, 周益. 基于各向异性介质的多通道平顶偏振滤波器的设计[J]. 光电子·激光, 2012, 23(6): 1043-1050.
- [12] 顾培夫, 陈卫斌, 刘旭. 薄膜截止滤光片的消偏振设计[J]. 光学学报, 2005, 25(2): 274-278.
- [13] 李小奇, 孙德贵. 平面波导窄带干涉滤波方法的研究[J]. 光学精密工程, 2007, 15(4): 467-472.
- [14] 齐健, 苏宙平, 胡立发, 朱华新, 等. 双截止透可见带通滤光片研制[J]. 激光与红外, 2019(12): 1472-1477.
- [15] Kim, D., Kim, K.M., Han, H., Lee, J., Ko, D., Park, K.R., et al. (2022) Ti/TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> Multilayer Thin Films with Enhanced Spectral Selectivity for Optical Narrow Bandpass Filters. *Scientific Reports*, 12, Article No. 32. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03935-z>
- [16] Triolo, P.A.M. (2024) Implementation of the Diagnostic Capabilities of the CMOS Sensor in the NIR Environment, Using 1070 Nm Interference Filter and a Conventional IR-Pass Filters Set. *Journal of Cultural Heritage*, 70, 54-63. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2024.08.007>