

## 基于光子晶体缺陷耦合的日盲紫外带通滤波器

侯好强<sup>1,2</sup>, 杨毅彪<sup>1,2\*</sup>, 武敏<sup>1,2</sup>, 费宏明<sup>1,2</sup>, 赵晓丹<sup>1,2</sup><sup>1</sup>太原理工大学物理与光电工程学院, 山西 太原 030024;<sup>2</sup>太原理工大学新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 山西 太原 030024

**摘要** 提出基于光子晶体多缺陷耦合实现紫外波段高透射带通滤波的方案,采用传输矩阵法分析日盲紫外带通滤波器的光学传输特性。通过减弱光子局域和多个缺陷耦合效应,实现光子晶体通带的拓宽和边沿截止陡度的调整,可在 239~280 nm 日盲紫外波段实现平均透过率为 90.71% 的高透射,且在 239 nm 以下和 290~360 nm 的阻带波段实现高抑制。研究表明,弱化光子局域和不同缺陷峰耦合作用可以有效拓宽通带范围,提升通带透过率,同时该结构对光源小角度( $<15^\circ$ )入射不敏感。该滤光器设计方案可应用于日盲紫外探测和紫外通信系统。

**关键词** 光学器件; 光子晶体; 缺陷耦合; 带通滤波器; 日盲紫外探测; 光子局域

**中图分类号** O433 **文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/AOS221815

## 1 引言

太阳光是包含多个波长的复色光,当它穿过大气层进入地球时,其中日盲紫外波段(200~280 nm)的光线会被臭氧层吸收,因此地表不存在来自太阳的日盲紫外光<sup>[1-2]</sup>。由于没有太阳这个最大的日盲紫外源的干扰,日盲紫外探测<sup>[3-15]</sup>具有背景干扰小、虚警率低、分辨率高等优势。日盲紫外探测可广泛应用于紫外通信<sup>[7-9]</sup>、高压放电检测<sup>[10-11]</sup>、导弹预警<sup>[12]</sup>、搜索救援<sup>[13]</sup>、导航定位<sup>[14]</sup>等方面。日盲紫外滤光片是紫外探测系统的重要组件,优异的日盲紫外滤光片能够显著提高日盲紫外探测系统的采集性能,因此高质量日盲紫外滤光片的设计是目前国内外研究者关注的热点。

带通滤光片的性能指标主要取决于其通带透过率和阻带抑制率,在 200~280 nm 范围内具有高透过率的同时,在其他波段保持深截止。目前,日盲紫外滤光片主要有吸收型滤光片和干涉型滤光片两种<sup>[15-16]</sup>。吸收型滤光片对目标光区域透明,但对其他特定波段具有吸收作用,通过材料的吸收作用实现对背景光的高抑制,单纯的吸收型滤光片只在透射峰中心位置处有高透过率,偏离中心后透过率逐渐下降;干涉型滤光片通过多层薄膜的干涉反射,对某些波段形成具有一定宽度的禁带,而在另外一些波长范围形成透射区域,光子晶体<sup>[16-19]</sup>具有光子禁带<sup>[20-22]</sup>和光子局域特性<sup>[23-24]</sup>,可作为一种干涉型滤光片,实现对电磁波的调控。2016

年,颜士飞等<sup>[25]</sup>设计了一款带宽为 20 nm 左右、峰值透过率为 25%、峰值位置可在 250~280 nm 范围内动态调节的吸收型滤光片,但是这种吸收型滤光片的带宽较窄且透过率较低。2017 年,付秀华等<sup>[26]</sup>选择 Al、AlF<sub>3</sub> 两种材料组成 F-P 结构,结合 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、AlF<sub>3</sub> 组成的匹配结构,设计了在 200~270 nm 波段内平均透过率为 54.15% 的滤波膜系结构。2019 年, Yuan 等<sup>[27]</sup>将 NH<sub>3</sub> 作为 SiN<sub>x</sub> 前驱体在双抛光蓝宝石上设计制造了一款 SiO<sub>2</sub>/SiN<sub>x</sub> 滤光片,在日盲区透过率达 80%,在 285~345 nm 范围内透过率低于 10%。2021 年, Tan 等<sup>[28]</sup>将一维 SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 滤波器集成在光电探测器背面,提高了 AlGaIn 光电探测器对日盲紫外线的进出抑制比。2021 年, Li 等<sup>[29]</sup>在宽带紫外滤光片中镀制了峰值位置在 254 nm 处的 SiO<sub>2</sub> 和 HfO<sub>2</sub> 介质膜,结合光谱转换和像增强器实现光谱成像。虽然以上多种光学介质结构可用于制备日盲波段的通带以及其两侧的阻带,但在日盲紫外波段形成的通带透过率仍不够高,且在通带均匀性方面表现较差,峰值透过率和平均透过率相差较大,通带两侧的截止度不高,滤波效果并不理想。

为了有效提高日盲紫外滤光片的透过率,并使其在禁带与通带之间有更高的截止陡度,本文提出一种通过减弱光子局域和多个缺陷耦合的方式来实现带通滤波的方法,对光子晶体的缺陷峰进行放大拓宽和形状调整,将放大和调整后的缺陷峰作为日盲紫外带通

收稿日期: 2022-10-12; 修回日期: 2022-11-09; 录用日期: 2022-12-05; 网络首发日期: 2023-01-04

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(11904255)、山西省重点研发计划(国际科技合作)(201903D421052)、山西省应用基础研究计划(青年基金)(201901D211070)

通信作者: \*yangyibiao\_tyut@sohu.com

滤波的通带,实现日盲紫外波段带通滤波。通常情况下由光子局域作用形成的缺陷峰较窄,适用于窄带滤波。本文首先通过优化 $\left[ (H/L)^{N_1} A (H/L)^{N_1} \right]^{N_2}$  (其中 H 代表高折射率材料, L 代表低折射率材料, A 代表缺陷层,  $N_1$  表示缺陷层 A 两侧(H/L)的周期数,  $N_2$  表示  $(H/L)^{N_1} A (H/L)^{N_1}$  的周期数)缺陷层两侧的周期数  $N_1$ , 增加缺陷层在光子晶体结构中的占比, 减弱光子局域作用, 对缺陷峰带宽进行放大处理; 然后, 通过调整外层周期数  $N_2$  对单缺陷结构进行周期重复, 对多个缺陷模式进行耦合, 改变通带形状, 改善通带至禁带处的

截止陡度并提高在日盲区域的透过率; 最后, 在考虑色散和吸收的情况下, 研究介质厚度对透射谱的影响, 调整光子晶体厚度参数, 实现宽带宽深截止的日盲紫外带通滤波。

## 2 模型设计

根据光子晶体结构的光子局域特性并基于多个缺陷模耦合原理, 设计可在 240~280 nm 实现高透射、在通带两侧具有良好阻带性能的带通滤波器结构, 该结构可表示为  $\left[ (H/L)^{N_1} A (H/L)^{N_1} \right]^{N_2}$ , 如图 1 所示。

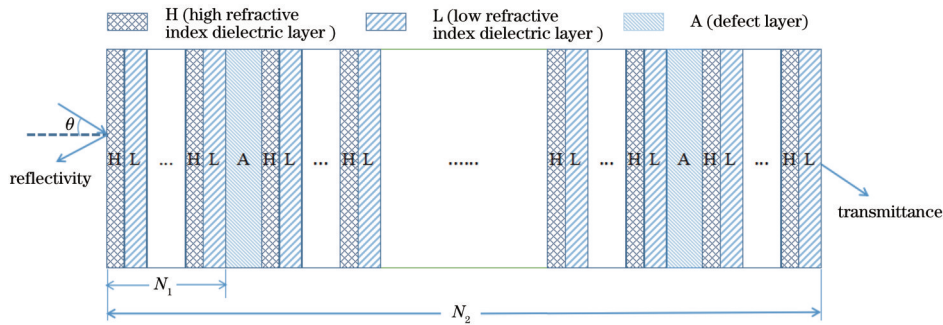


图 1 光子晶体结构  $\left[ (H/L)^{N_1} A (H/L)^{N_1} \right]^{N_2}$  示意图

Fig. 1 Schematic of photonic crystal structure  $\left[ (H/L)^{N_1} A (H/L)^{N_1} \right]^{N_2}$

选用  $\text{Si}_3\text{N}_4$  和  $\text{SiO}_2$  分别作为高、低折射率材料, 空气作为缺陷层, 材料  $\text{Si}_3\text{N}_4$  和  $\text{SiO}_2$  的参数如图 2 所示,  $n$  和  $\kappa$  分别为材料的折射率和消光系数。从图 2 可以看

出:  $\text{Si}_3\text{N}_4$  在短波处具有明显的色散和吸收, 在长波处吸收减弱且折射率趋于稳定;  $\text{SiO}_2$  在短波处有色散。因此, 计算中考虑了  $\text{Si}_3\text{N}_4$  和  $\text{SiO}_2$  的色散和吸收<sup>[30]</sup>。

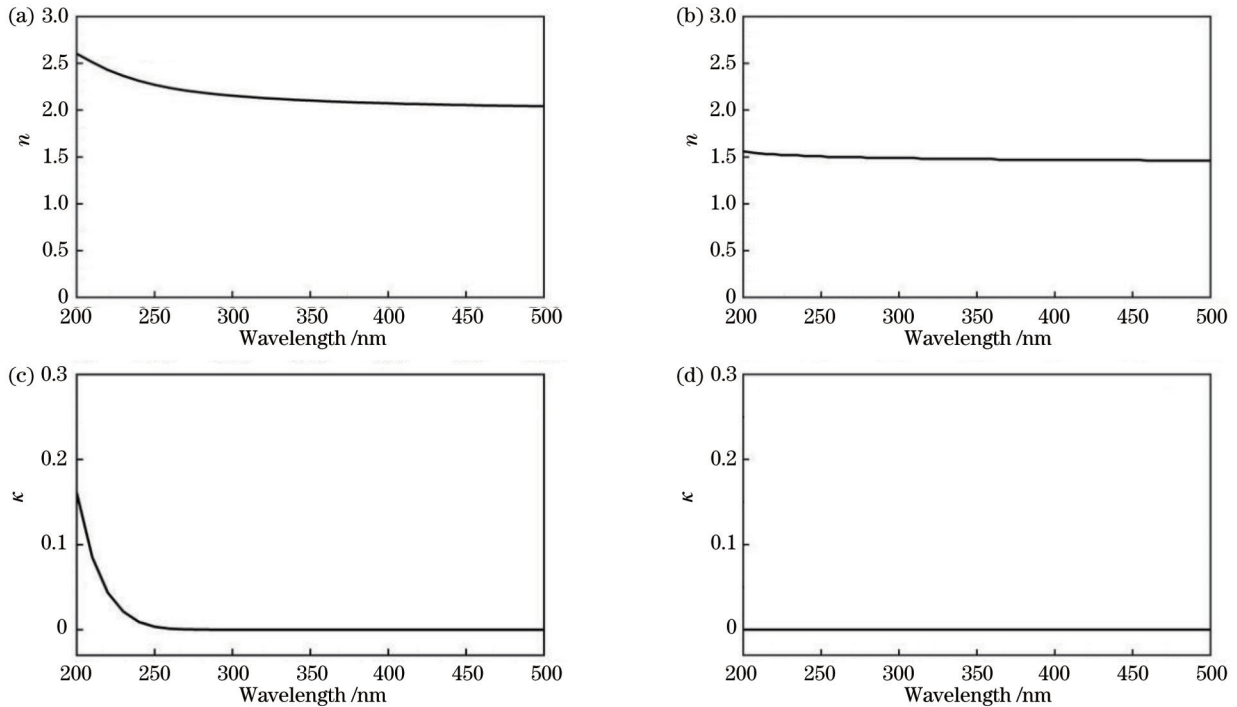


图 2  $\text{Si}_3\text{N}_4$  和  $\text{SiO}_2$  的折射率  $n$  和消光系数  $\kappa$  的分布。(a)  $n_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ ; (b)  $n_{\text{SiO}_2}$ ; (c)  $\kappa_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ ; (d)  $\kappa_{\text{SiO}_2}$

Fig. 2 Distribution of refractive index  $n$  and extinction coefficient  $\kappa$  for  $\text{Si}_3\text{N}_4$  and  $\text{SiO}_2$ . (a)  $n_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ ; (b)  $n_{\text{SiO}_2}$ ; (c)  $\kappa_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ ; (d)  $\kappa_{\text{SiO}_2}$

所设计的光子晶体结构为  $\left[ (\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2)^{N_1} \text{Air} (\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2)^{N_1} \right]^{N_2}$ 。本文采用传输矩阵法<sup>[31-33]</sup>分析缺陷层两侧周期数  $N_1$ 、缺陷模式数量  $N_2$  和介质厚度对缺陷叠加的光子晶体滤波性能的影响,通过弱化光子局域作用以拓宽通带带宽,改变缺陷耦合以提升通带透过率,改善截止陡度,实现日盲紫外波段的高透射滤波。在 TE 和 TM 模式下,分析光线以不同角度入射时的通带蓝移程度和光子晶体的滤波性能。

利用传输矩阵法将麦克斯韦方程组进行离散化,用矩阵表示相邻层面之间电磁场的关系。光在第  $j$  层材料介质传播时的传输矩阵可以表示为

$$M_j = \begin{bmatrix} \cos \delta_j & -\frac{i}{\eta_j} \sin \delta_j \\ -i\eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中:  $\delta_j = k\tilde{n}_j d_j \cos \theta_j$ , 为光在第  $j$  层介质中传播时左右两个界面处发生的相位变化,其中  $k$  为真空中的波数,  $\tilde{n}_j = n_j + i\kappa_j$  为第  $j$  层介质的复折射率,由折射率  $n_j$  和消光系数  $\kappa_j$  组成;  $d_j = \lambda/(4n_j)$ , 表示第  $j$  层介质的厚度,其中  $\lambda$  为设定的中心波长;  $\eta$  为光学导纳, TE 模式下  $\eta = \sqrt{\epsilon/\mu} \cos \theta$ , TM 模式下  $\eta = \sqrt{\mu/\epsilon} \cos \theta$ 。所设计结构的总层数  $N = (4N_1 + 1) \times N_2$ , 光在层数为  $N$  的介质中传播时的矩阵为

$$M = \prod_{j=1}^N M_j = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}. \quad (2)$$

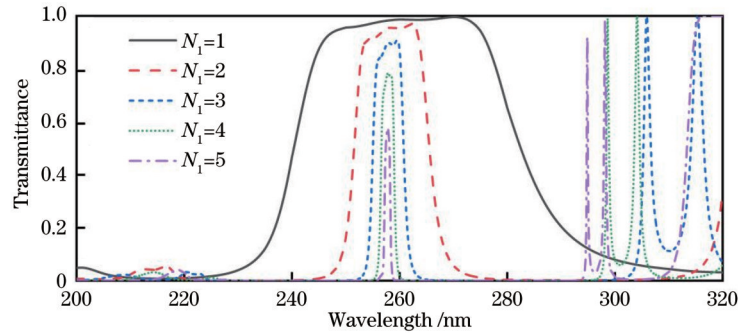


图 3  $\left[ (\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2)^{N_1} \text{Air} (\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2)^{N_1} \right]^{N_2}$  光子晶体的透射谱

Fig. 3 Transmission spectra of photonic crystal  $\left[ (\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2)^{N_1} \text{Air} (\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2)^{N_1} \right]^{N_2}$

从图 3 和表 1 可以看出,当  $N_2=3$  时,随着  $N_1$  的增大,光子晶体透射谱缺陷峰的位置没有变化,一直处于 260 nm 处,但通带的宽度逐渐减小,通带宽度从 42.2 nm 减小至 1.7 nm,通带顶部由较为平缓变得不规则和尖锐,且通带平均透过率逐渐下降,从 89.99% 减小至 49.68%。透射谱变得不规则是因为当光子晶体周期和层数增加时,干涉和反射的情况变得更加复杂,透射谱呈现出更多的波动。通带带宽减小和通带平均透过率下降,是因为缺陷层两侧周期数较大时,缺

透射系数  $t$  为

$$t = \frac{E_{t,N+1}}{E_{i1}} = \frac{2\eta_0}{(a + b\eta_{N+1})\eta_0 + (c + d\eta_{N+1})}, \quad (3)$$

反射系数  $r$  为

$$r = \frac{E_{r1}}{E_{i1}} = \frac{(a + b\eta_{N+1})\eta_0 - (c + d\eta_{N+1})}{(a + b\eta_{N+1})\eta_0 + (c + d\eta_{N+1})}, \quad (4)$$

$T$  表示透过率,光在经过简单光子晶体后的透过率为

$$T = \frac{\eta_{N+1}}{\eta_0} |t|^2, \quad (5)$$

反射率  $R$  为

$$R = |r|^2, \quad (6)$$

式中:  $\eta_0$  为入射介质的光学导纳;  $E_{t,N+1}$  为出射介质的透射电场;  $E_r$  为反射电场;  $E_i$  为入射电场; 上标\*表示共轭。

## 3 结果和讨论

### 3.1 $N_1$ 对透射谱的影响

在入射角  $\theta=0^\circ$  (入射光垂直光子晶体结构入射) 的条件下,高折射率介质  $\text{Si}_3\text{N}_4$  的厚度和低折射率介质  $\text{SiO}_2$  的厚度分别设为  $d_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 28.3 \text{ nm}$ 、 $d_{\text{SiO}_2} = 43.3 \text{ nm}$ , 缺陷层空气厚度设为  $d_{\text{Air}} = 65 \text{ nm}$ , 固定  $N_2$  的值为 3, 研究  $N_1$  对光子晶体透射谱的影响。考虑材料的色散和吸收,在  $N_1$  分别为 1、2、3、4、5 时用传输矩阵法计算得到的光子晶体透射谱如图 3 所示,透射谱数据如表 1 所示。

陷对周期性的破坏作用减弱,使得光子局域作用增强。在缺陷层两侧放置较多的高低折射率周期层,会得到一个缺陷隧穿峰,其可用于窄带滤波。若要用这个缺陷隧穿峰实现一个带通滤波,就需要进行相反的操作,即减少缺陷层两侧的周期数  $N_1$ ,降低缺陷层两侧的约束,增加缺陷层在光子晶体中的占比,增强缺陷层对光子晶体禁带的破坏作用,减弱光子局域效应。当  $N_1$  为最小值 1 时,缺陷层的约束最小,通带具有最大带宽 42.2 nm,且通带上边缘较为平缓,所以暂将  $N_1$  的值

表 1 光子晶体  $\left[ \left( \text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2 \right)^{N_1} \text{Air} \left( \text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2 \right)^{N_1} \right]^{N_2}$  的透射谱数据

Table 1 Transmission spectrum data of photonic crystal  $\left[ \left( \text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2 \right)^{N_1} \text{Air} \left( \text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2 \right)^{N_1} \right]^{N_2}$

$N_1$	Left edge position / nm	Right edge position / nm	Bandwidth / nm	Transmittance / %
1	240.3	282.5	42.2	89.99
2	251.5	265.6	14.1	88.00
3	254.9	260.8	5.9	82.00
4	256.5	259.0	2.5	70.43
5	257.2	258.3	1.1	49.68

定为 1。

### 3.2 $N_2$ 对透射谱的影响

为了得到一个在日盲紫外区域透过率高,在日盲区域两侧有较好禁带,且由通带至禁带处截止陡度高的通带,必须对上述缺陷峰的形状进行调整,并进一步降低禁带处的透过率。将  $N_1$  定为 1 之后,光子晶体的结构式为  $\left[ \left( \text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2 \right)^1 \text{Air} \left( \text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2 \right)^1 \right]^{N_2}$ , 现在将  $N_2$  的值分别设置为 1、2、3、4、5, 研究  $N_2$  对透射谱的影响。当  $N_2$  为 1、2、3、4、5 时,在垂直入射条件下用传输矩阵法计算得到的光子晶体透射谱如图 4 所示,透射谱数据如表 2 所示。

在多缺陷光子晶体中,若缺陷层之间的距离较近,则缺陷层的局域场之间会发生交叠,缺陷模之间的耦合作用变强;若缺陷层之间的相对距离较远,耦合作用变弱,缺陷能级发生简并,透射谱中的缺陷峰位置也归于一处。多缺陷模耦合作用减弱但并没有消除,多个缺陷峰归于同一位置时,缺陷峰之间会相互影响,共同形成一个新的通带,缺陷模数量不同时,通带的形状也会不同。从图 4 可以看出,随着  $N_2$  的增大,通带的中心位置没有移动,但光子晶体透射峰的形状不断改变。当  $N_2$  从 1 增大到 5 时,透射峰两侧从倾斜逐渐变成竖直,通带形状由拱形向矩形方向转变,光子晶体通带的

表 2 光子晶体  $\left[ \left( \text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2 \right)^1 \text{Air} \left( \text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2 \right)^1 \right]^{N_2}$  的透射谱数据

Table 2 Transmission spectrum data of photonic crystal  $\left[ \left( \text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2 \right)^1 \text{Air} \left( \text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2 \right)^1 \right]^{N_2}$

$N_2$	Left edge position / nm	Right edge position / nm	Bandwidth / nm	Transmittance / %
1	227.7	322.7	95.0	78.07
2	238.8	286.5	47.7	85.04
3	240.2	282.4	42.2	90.04
4	240.1	282.2	42.1	91.01
5	239.8	282.8	43.0	90.07

截止陡度越来越大。从表 2 可以看到,通带透过率随周期数的增加先增大后减小,这是因为在统计带宽与平均透过率时,以左右两侧 50% 峰值透过率点为准:当  $N_2$  较小时,通带呈拱形状态,除了通带中心位置处的透过率较高之外,中心位置两侧的透过率逐渐下降;随着  $N_2$  增大,通带的顶部出现了一些下凹,但整体位置更高且波动较小;当  $N_2$  继续增大时,偏离中心位置处的通带下凹更加明显,并影响了通带的平均透过率。综合考虑截止陡度与透过率等因素,当  $N_2=4$  时,通带的平均透过率具有最大值(91.01%),且透射谱通带与禁带之间的截止陡度也相对较大,因此确定光子晶体周期数  $N_2=4$ ,光子晶体结构为  $\left[ \left( \text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2 \right)^1 \text{Air} \left( \text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2 \right)^1 \right]^4$ 。

### 3.3 介质厚度对透射谱的影响

基于结构  $\left[ \left( \text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2 \right)^1 \text{Air} \left( \text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2 \right)^1 \right]^4$  研究垂直入射条件下介质厚度变化时透射谱的变化情况。分别改变介质  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 、 $\text{SiO}_2$  和 Air 的厚度,使用传输矩阵法计算得到不同厚度下光子晶体的透射谱。首先,固定  $d_{\text{SiO}_2}=43.3 \text{ nm}$  与  $d_{\text{Air}}=65 \text{ nm}$  不变,改变  $\text{Si}_3\text{N}_4$  的厚度,  $d_{\text{Si}_3\text{N}_4}$  为 22.3、25.3、28.3、31.3、34.3 nm 时光子晶体的透射谱如图 5(a) 所示;其次,固定

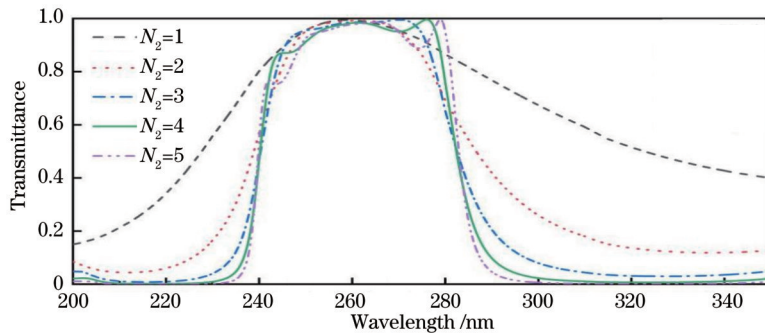


图 4 光子晶体  $\left[ \left( \text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2 \right)^1 \text{Air} \left( \text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2 \right)^1 \right]^{N_2}$  的透射谱

Fig. 4 Transmission spectra of photonic crystal  $\left[ \left( \text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2 \right)^1 \text{Air} \left( \text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2 \right)^1 \right]^{N_2}$

$d_{\text{Si}_3\text{N}_4}=28.3\text{ nm}$  与  $d_{\text{Air}}=65\text{ nm}$  不变, 改变介质  $\text{SiO}_2$  的厚度,  $d_{\text{SiO}_2}$  为 37.3、40.3、43.3、46.3、49.3 nm 时光子晶体的透射谱如图 5(b) 所示; 最后, 保持  $d_{\text{Si}_3\text{N}_4}=28.3\text{ nm}$  与

$d_{\text{SiO}_2}=43.3\text{ nm}$  不变, 改变介质 Air 的厚度,  $d_{\text{Air}}$  为 59、62、65、68、71 nm 时光子晶体的透射谱如图 5(c) 所示。

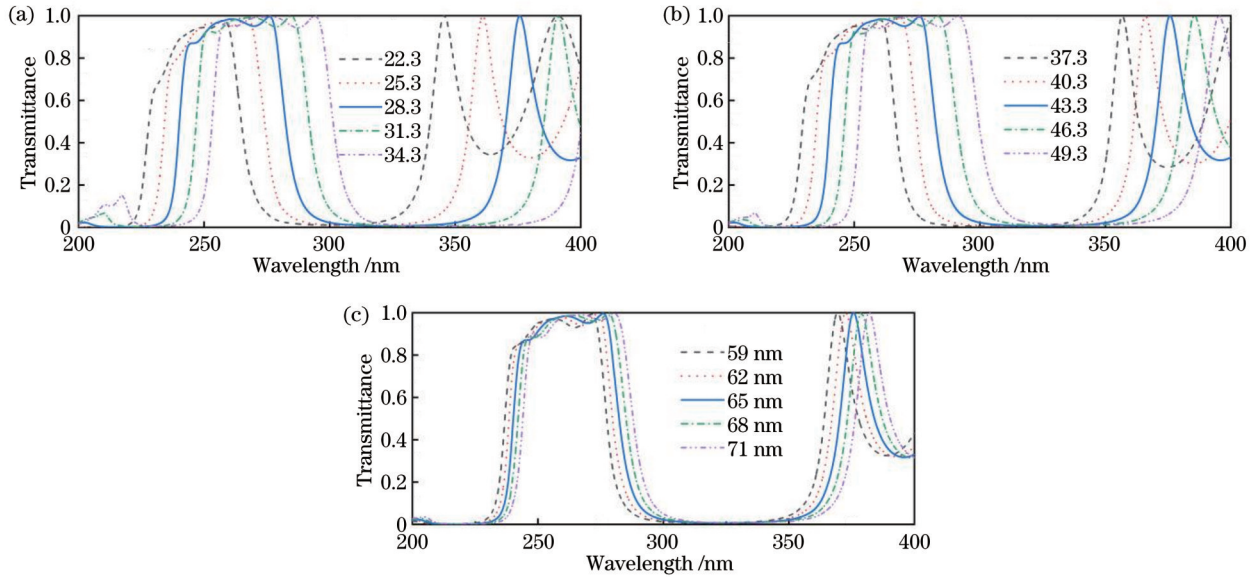


图 5 介质厚度变化时光子晶体透射谱。(a)  $d_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ ; (b)  $d_{\text{SiO}_2}$ ; (c)  $d_{\text{Air}}$

Fig. 5 Transmission spectra of photonic crystal with different medium thicknesses. (a)  $d_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ ; (b)  $d_{\text{SiO}_2}$ ; (c)  $d_{\text{Air}}$

从图 5 可以看到, 随着介质层厚度的增加, 光子晶体的通带向长波方向移动。增加相同厚度时, 对于高折射率介质来说, 通带移动范围更大, 低折射率介质次之, 缺陷层所受影响最小。这是因为介质层增加相同的厚度时, 折射率越大, 所改变的光程差越大。另外, 由于缺陷层 A 在每个单元中只有一层, 而介质  $\text{Si}_3\text{N}_4$  和  $\text{SiO}_2$  都是两层, 当缺陷层 A 的厚度每增加 3 nm 时, 同个周期单元中介质  $\text{Si}_3\text{N}_4$  和介质  $\text{SiO}_2$  的厚度增加了 6 nm, 可见改变介质  $\text{Si}_3\text{N}_4$  和  $\text{SiO}_2$  的厚度对透射谱的影响明显大于改变缺陷层 A 厚度对透射谱的影响。当增加相同的介质厚度时, 通带整体向长波方向移动, 通带右侧的位移程度大于左侧, 通带带宽增大。因为日盲紫外光的波长小于 280 nm, 调整与优化 3 种介质的厚度, 使通带右侧位于 280 nm 左右, 当高、低折射率介质层和空气层的厚度分别为 30、40、67 nm 时, 得到的光子晶体透射谱如图 6 所示。可见, 光子晶体的通带范围为 238.8~280.3 nm, 带宽为 41.5 nm, 通带平均透过率为 90.71%, 在 290~360 nm 阻带范围内平均透过率为 1.47%。

### 3.4 角度对透射谱的影响

光的入射角度对光子晶体的透射谱有一定的影响, 本实验研究了入射角为  $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$  时 TE 和 TM 偏振下光子晶体的透射谱变化情况, 使用传输矩阵法计算得到的透射谱变化如图 7 所示, 其通带数据如表 3 所示。同时, 研究了入射角从  $0^\circ$  变化到  $45^\circ$  时 TE 和 TM 偏振下光子晶体的透射谱, 利用传输矩阵法计算得到的透射谱如图 8 所示。从图 7 和图 8 可以看

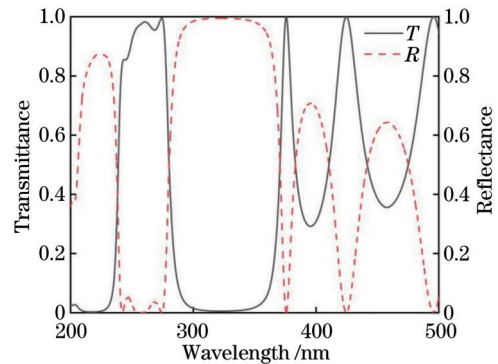


图 6  $d_{\text{Si}_3\text{N}_4}=30\text{ nm}$ 、 $d_{\text{SiO}_2}=40\text{ nm}$ 、 $d_{\text{Air}}=67\text{ nm}$  时光子晶体的透射谱

Fig. 6 Transmission spectra of photonic crystal when  $d_{\text{Si}_3\text{N}_4}=30\text{ nm}$ ,  $d_{\text{SiO}_2}=40\text{ nm}$ , and  $d_{\text{Air}}=67\text{ nm}$

到, 随着角度增大, 光子晶体的透射谱整体向短波方向移动, 这是因为当角度变大时, 电磁波在光子晶体中的传播相位减小, 根据布拉格条件, 电磁波频率增大, 波长减小, 透射谱发生蓝移。从表 3 可以看出: TE 模式下, 当入射角从  $0^\circ$  增大到  $45^\circ$  时, 通带带宽由 41.5 nm 减小至 22.5 nm, 通带平均透过率由 90.71% 降低至 69.38%; TM 模式下, 当入射角从  $0^\circ$  增大到  $45^\circ$  时, 通带带宽由 41.5 nm 减小至 28.9 nm, 通带平均透过率由 90.71% 降低至 73.65%。可见, 通带带宽和透过率均显著降低。当入射角在  $15^\circ$  以内时, 无论是 TE 模式还是 TM 模式, 仍有一个 40 nm 左右的通带带宽和接近 90% 的通带平均透过率, 透射谱的偏移程度、通带带

宽和通带透过率均没有明显变化。从图 7 和图 8 还可以看到,随着入射角的增大,TE 模和 TM 模透射谱在蓝移的同时发生了分离,在通带位置处,TM 模把 TE 模包裹起来,TM 模在通带方面表现得更好,而 TE 模则对禁带更有利。

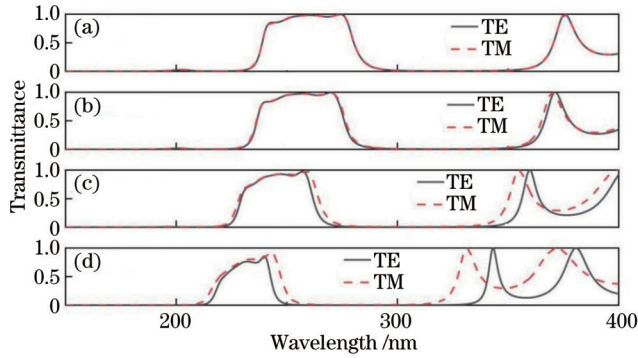


图 7 入射角为 0°、15°、30°、45° 时光子晶体透射谱。(a) 0°; (b) 15°; (c) 30°; (d) 45°

Fig. 7 Transmission spectra of photonic crystal at incident angles of 0°, 15°, 30°, and 45°. (a) 0°; (b) 15°; (c) 30°; (d) 45°

## 4 结 论

基于缺陷耦合原理设计了在 239~280 nm 日盲紫

外波段高透射、通带两侧深截止的一维光子晶体带通滤波器。首先,提出一个结构为  $[(H/L)^{N_1}A(H/L)^{N_2}]^{N_3}$  的多缺陷光子晶体模型,通过改变缺陷层两侧的光子晶体周期数  $N_1$  对通带带宽进行调整,减少缺陷层两侧介质层数,弱化外侧光子晶体对缺陷模的局域作用,对透射峰进行拓宽,当  $N_1=1$  时,通带具有最大带宽;其次,改变周期数  $N_2$ ,通过不同数量的缺陷耦合来调整光子晶体通带形状,改善截止陡度,提高通带平均透过率,发现  $N_2=4$  时,通带透过率最高且截止陡度表现较好;然后,研究不同介质厚度对通带位置的影响,并调整优化结构的厚度参数,使通带位置处于 240~280 nm;最后,研究了不同入射角下透射谱的蓝移程度,并对结构的角敏感性进行了分析,发现当入射角小于 15° 时,通带偏移并不明显,仍可以达到想要的滤波效果。所得到的结构为  $[(Si_3N_4/SiO_2)^1 Air(Si_3N_4/SiO_2)^1]^4$ , 介质层厚度  $d_{Si_3N_4}=30$  nm、 $d_{SiO_2}=40$  nm、 $d_{Air}=67$  nm 的日盲紫外带通滤波器,通带 (239~280 nm) 平均透过率为 90.71%,阻带 (290~360 nm) 平均透过率为 1.47%,能够实现日盲紫外区域高透射和阻带深截止。所采用的弱化光子局域和缺陷峰耦合拓宽通带透射区域以及调整带边缘形状的方法,可为高透射带通滤波的设计提供新思路。

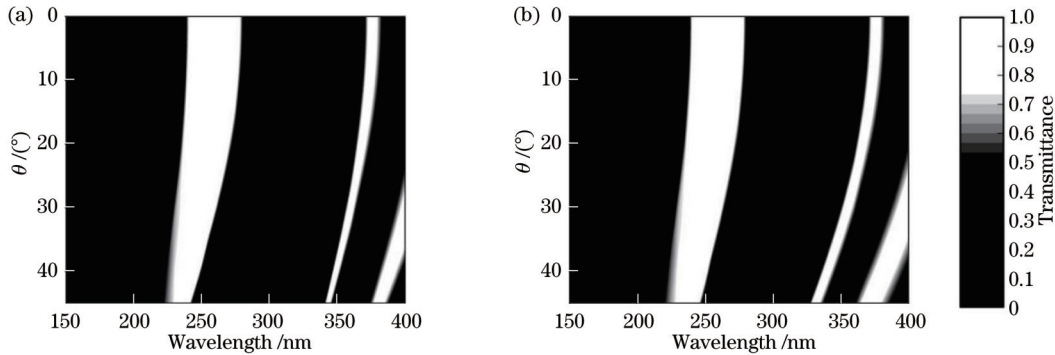


图 8 TE 和 TM 模式下入射角为 0°~45° 时光子晶体的透射谱。(a) TE 模; (b) TM 模

Fig. 8 Photonic crystal transmission spectra when the incident angle varies from 0° to 45° for TE and TM modes. (a) TE mode; (b) TM mode

表 3 TE 和 TM 模式下入射角分别为 0°、15°、30°、45° 时光子晶体的透射谱数据

Table 3 Transmission spectrum data of photonic crystal at incident angles of 0°, 15°, 30°, and 45° for TE and TM modes

Incident angle / (°)	TE mode				TM mode			
	Left edge position / nm	Right edge position / nm	Bandwidth / nm	Transmittance / %	Left edge position / nm	Right edge position / nm	Bandwidth / nm	Transmittance / %
0	238.8	280.3	41.5	90.71	238.8	280.3	41.5	90.71
15	236.5	276.0	39.5	89.59	236.2	276.5	40.3	89.71
30	229.3	261.9	32.6	84.22	228.4	264.4	36.0	84.86
45	220.4	242.9	22.5	69.38	218.7	247.6	28.9	73.65

## 参 考 文 献

[1] Zhang M, Li Z J, Zhao Y F, et al. Solar-blind photodetector

based on NaTaO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> composite film with enhanced photoelectric performance[J]. Coatings, 2021, 11(10): 1178.

[2] Cai Q, You H F, Guo H, et al. Progress on AlGaIn-based solar-blind ultraviolet photodetectors and focal plane arrays[J]. Light-

- Science & Applications, 2021, 10: 94.
- [3] 高飞, 黄波, 石冬晨, 等. 全天时大气温度探测的纯转动拉曼激光雷达系统设计及仿真[J]. 光学学报, 2019, 39(3): 0301004. Gao F, Huang B, Shi D C, et al. Design and simulation of pure rotational Raman lidar system for daytime detection of atmospheric temperature[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(3): 0301004.
- [4] Zhou S R, Peng X, Liu H W, et al. High-performance  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based solar-blind photodetector with ultralow dark current and fast photoresponse for deep-ultraviolet communication[J]. Optical Materials Express, 2022, 12(1): 327-337.
- [5] 李召辉, 申光跃, 庞程凯, 等. 日盲紫外单光子成像[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(10): 1011023. Li Z H, Shen G Y, Pang C K, et al. Solar-blind ultraviolet single-photon imaging[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(10): 1011023.
- [6] 李佳伟, 陈洪耀, 张黎明, 等. 基于日盲型滤光片辐射计的 232~400 nm 波段辐射标准传递研究[J]. 光学学报, 2022, 42(10): 1012002. Li J W, Chen H Y, Zhang L M, et al. Radiation standard transfer in 232~400 nm band based on solar blind filter radiometer [J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(10): 1012002.
- [7] Cao F, Li C, Xu Z Y. Research on the coverage of ultraviolet communication network in the arbitrary polygon area[J]. Photonics, 2021, 8(7): 240.
- [8] Bhatia V, Jain S, Garg K, et al. Performance analysis of RKHS based detectors for nonlinear NLOS ultraviolet communications [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(4): 3625-3639.
- [9] 赵太飞, 冯艳玲, 柯熙政, 等. “日盲”紫外光通信网络中节点覆盖范围研究[J]. 光学学报, 2010, 30(8): 2229-2235. Zhao T F, Feng Y L, Ke X Z, et al. Research on the coverage area of communication in the solar-blind UV communication network[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(8): 2229-2235.
- [10] Wang Y, Qian Y S, Kong X Y. Photon counting based on solar-blind ultraviolet intensified complementary metal-oxide-semiconductor (ICMOS) for corona detection[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(6): 7000919.
- [11] Liu H W, Zhou S R, Zhang H, et al. Ultrasensitive fully transparent amorphous Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> solar-blind deep-ultraviolet photodetector for corona discharge detection[J]. Journal of Physics D, 2022, 55(30): 305104.
- [12] 王江, 罗林保. 基于氧化镓日盲紫外光电探测器的研究进展[J]. 中国激光, 2021, 48(11): 1100001. Wang J, Luo L B. Advances in Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based solar-blind ultraviolet photodetectors[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(11): 1100001.
- [13] 鲜勇, 赖水清. 日盲紫外探测技术的军事应用[J]. 直升机技术, 2016(2): 67-72. Xian Y, Lai S Q. Military applications of the blind ultraviolet detection technology[J]. Helicopter Technique, 2016(2): 67-72.
- [14] Zhao T F, Yu X X, Liu P, et al. Ultraviolet anti-collision and localization algorithm in UAV formation network[J]. Optik, 2019, 192: 162919.
- [15] 宋亚军, 韩放. “日盲”紫外成像技术分析及应用展望[J]. 航天电子对抗, 2019, 35(1): 53-60. Song Y J, Han F. Analysis and application of solar blind ultraviolet imaging technology[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2019, 35(1): 53-60.
- [16] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. Physical Review Letters, 1987, 58(23): 2486-2489.
- [17] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. Physical Review Letters, 1987, 58(20): 2059-2062.
- [18] Xu X S, Zhang D Z. The research and progress of micro-fabrication technologies of two-dimensional photonic crystal[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(7): 865-876.
- [19] Ryu S H, Gim M J, Lee W, et al. Switchable photonic crystals using one-dimensional confined liquid crystals for photonic device application[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(3): 3186-3191.
- [20] Yang Y B, Bai Y T, Zhao X D, et al. Design of a solar-blind ultraviolet band-pass filter based on frequency domain superposition[J]. Superlattices and Microstructures, 2018, 122: 486-491.
- [21] 李乾利, 温廷敦, 许丽萍, 等. 单轴应力对一维镜像光子晶体光子局域态透射峰的影响[J]. 物理学报, 2013, 62(18): 184212. Li Q L, Wen T D, Xu L P, et al. Effect of uniaxial stress on photon localization of one-dimensional photonic crystal with a mirror symmetry[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(18): 184212.
- [22] Smolyaninov I I. Nonlinear optics of photonic hyper-crystals: optical limiting and hyper-computing[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2019, 36(6): 1629-1636.
- [23] 周铭杰, 谭海云, 周岩, 等. 一种基于束缚态的可调等离子体光子晶体窄带滤波器[J]. 物理学报, 2021, 70(17): 175201. Zhou M J, Tan H Y, Zhou Y, et al. A tunable narrow-band plasma photonic crystal filter based on bound state[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(17): 175201.
- [24] 张若羽, 李培丽. 基于一维耦合腔光子晶体的声光可调谐平顶滤波器的研究[J]. 物理学报, 2021, 70(5): 054208. Zhang R Y, Li P L. Acousto-optic tunable flat top filter based on one-dimensional coupled-cavity photonic crystals[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(5): 054208.
- [25] 颜士飞, 王葵, 赵文锦, 等. 特种日盲紫外滤光片的性能分析[J]. 光电子技术, 2016, 36(4): 260-264. Yan S F, Wang K, Zhao W J, et al. Performance analysis of ultraviolet filter for solar blind detection[J]. Optoelectronic Technology, 2016, 36(4): 260-264.
- [26] 付秀华, 郭凯, 熊仕富, 等. 日盲探测宽波段低噪声滤波器器件的研制[J]. 中国激光, 2017, 44(6): 0603002. Fu X H, Guo K, Xiong S F, et al. Development of wide-band low-noise filter for solar blind detection system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(6): 0603002.
- [27] Yuan R Y, You H F, Cai Q, et al. A high-performance SiO<sub>2</sub>/SiN<sub>x</sub> 1-D photonic crystal UV filter used for solar-blind photodetectors[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(4): 2201007.
- [28] Tan R N, Cai Q, Wang J, et al. Highly solar-blind ultraviolet selective metal-semiconductor-metal photodetector based on back-illuminated AlGaN heterostructure with integrated photonic crystal filter[J]. Applied Physics Letters, 2021, 118(14): 142105.
- [29] Li W, Lin Q Y, Wang K Q, et al. Machine vision-based network monitoring system for solar-blind ultraviolet signal[J]. Computer Communications, 2021, 171: 157-162.
- [30] Malitson I H. Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica[J]. Journal of the Optical Society of America, 1965, 55(10): 1205-1208.
- [31] Prasad S, Singh V, Singh A K. Study on the reflection spectra of one dimensional plasma photonic crystals having exponentially graded materials[J]. Plasma Science and Technology, 2013, 15(5): 443-447.
- [32] Entezar S R. Photonic crystal wedge as a tunable multichannel filter[J]. Superlattices and Microstructures, 2015, 82: 33-39.
- [33] Yang O, Wang Y, Wang H, et al. Effect of stress-induced anisotropy on localized mode of one-dimensional photonic crystal with mirror symmetry[J]. Optik, 2015, 126(24): 5583-5586.

# Solar-Blind Ultraviolet Band-Pass Filter Based on Coupling of Photonic Crystal Defects

Hou Haoqiang<sup>1,2</sup>, Yang Yibiao<sup>1,2\*</sup>, Wu Min<sup>1,2</sup>, Fei Hongming<sup>1,2</sup>, Zhao Xiaodan<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>College of Physics and Optoelectronic Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China

## Abstract

**Objective** When sunlight enters the earth through the atmosphere, the light in the solar-blind ultraviolet (UV) band (200–280 nm) will be absorbed by the ozone layer. As a result, solar-blind UV detection has the advantages of little background interference, low false alarm rate, and high resolution. Solar-blind UV detection can be widely used in UV communication, high-voltage discharge detection, missile warning, search, rescue, navigation, and positioning. The solar-blind UV filter is an important component of a UV detection system. The solar-blind band-pass filter should achieve high transmittance in the range of 200–280 nm while maintaining deep cut-off in other bands. There are two kinds of solar-blind UV filters: absorption filter and interference filter. At present, although band-pass in the solar-blind band can be realized by a variety of existing optical medium structures, some problems remain to be solved. For example, the transmittance of the solar-blind UV band and the cut-off steepness on both sides of the band-pass are not high, and the uniformity of the band-pass is poor. In this paper, a band-pass filtering method is proposed by weakening photon localization and multi-defect coupling effect. The defect peak of the photonic crystal is amplified, and its shape is adjusted. The amplified and adjusted defect peak can effectively improve the transmittance of the solar-blind UV filter and have better cut-off steepness.

**Methods** This paper proposes a high-transmittance band-pass filtering scheme based on the coupling of multiple photonic crystal defects. The optical transmission characteristics of a solar-blind UV band-pass filter are studied by the transmission matrix method. Firstly, by reducing the photonic crystal periods on both sides of the defect layer and weakening photon localization effect, the defect peak can be widened in the transmission spectrum. Secondly, by adjusting defect coupling, the paper studies the influence of the number of defect modes on the transmission spectrum shape, the average transmittance of the band-pass, and the cut-off steepness. Then, it investigates the influence of medium thickness on the position of the transmission spectrum and optimizes the structural thickness parameters. Finally, this paper analyzes the degree of band-pass blue shift and the filtering performance of photonic crystal at different incident angles in TE and TM modes and studies the sensitivity of the structure to incident angles.

**Results and Discussions** By adjusting the structure of the defect layer, photon localization effect can be weakened, and the bandwidth of the band-pass can be effectively widened. When  $N_1$  is equal to 1, the band-pass has the maximum bandwidth (Fig. 3). By analyzing the defect peak characteristics formed by multi-defect coupling, it is found that with the increase in  $N_2$ , the central position of the band-pass does not move, but the shape of the photonic crystal transmission peak keeps changing (Fig. 4). The cut-off steepness of the photonic crystal band-pass is getting better and better. The band-pass transmittance first increases and then decreases with the increase in the number of defects. When  $N_2$  is 4, the average transmittance of the band-pass has a maximum value of 91.01%. As the thickness of the dielectric layer increases, the band-pass of the photonic crystal shifts in the long wavelength direction (Fig. 5). The optimization of the thickness parameters of three media yields the band-pass range of 238.8–280.3 nm for the photonic crystal, the bandwidth of 41.5 nm, and the average band-pass transmittance of 90.71%. The average transmittance of the band-stop in the range of 290–360 nm is 1.47% (Fig. 6). With the increase in angle, the transmission spectra of the TE mode and the TM mode are separated at the same time as blue shift (Fig. 7). When the incident angle is less than 15°, the band-pass bandwidth is still about 40 nm, and average transmittance is close to 90% in both the TE mode and the TM mode (Table 3 and Fig. 8).

**Conclusions** In light of the defect coupling principle, this paper designs a one-dimensional photonic crystal band-pass filter with high transmission at 239–280 nm and deep cut-off on both sides of the band-pass. Firstly, a multi-defect photonic crystal model with structure  $[(H/L)^{N_1}A(H/L)^{N_1}]^{N_2}$  is proposed. By weakening photon localization effect, the transmission peak is widened. When  $N_1=1$ , the band-pass reaches a maximum bandwidth of 42.2 nm. Secondly, the band-pass shape of the photonic crystal is adjusted by coupling different numbers of defects to improve the cut-off steepness



and increase the average band-pass transmittance. It is found that when  $N_2=4$ , the band-pass transmittance is the highest, and the cut-off steepness is better. Then, the influence of medium thickness on the location of the band-pass is analyzed, and the thickness parameters of the structure are optimized. Finally, the blue shift of the transmission spectra under different incident angles is studied. The filtering effect is still ideal when the incident angle is less than  $15^\circ$ . A solar-blind UV band-pass filter is obtained with the structure of  $[(\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2)^1\text{Air}(\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2)^1]^4$  and a medium thickness of  $d_{\text{Si}_3\text{N}_4}=30$  nm,  $d_{\text{SiO}_2}=40$  nm, and  $d_{\text{Air}}=67$  nm. The average transmittance of the filter band-pass (239–280 nm) is 90.71%, which can achieve high transmittance in the solar-blind UV region. The average transmittance of the band-stop (290–360 nm) is 1.47%, which can achieve deep cut-off. This paper employs the method of widening the transmission region of the band-pass and adjusting the shape of the band by weakening photon localization and multi-defect coupling, which can provide a new idea for the design of high-transmission band-pass filters.

**Key words** optical devices; photonic crystal; defect coupling; band-pass filter; solar-blind ultraviolet detection; photon localization