

基于一维光子晶体的 1064 nm 激光窄带滤光膜的设计

林伟丽¹, 邱桂花², 韩建龙², 于名讯^{1,2}, 张瑞蓉², 牛玉超¹

(1. 山东建筑大学 材料科学与工程学院, 山东 济南 250101; 2. 中国兵器工业集团第五三研究所, 山东 济南 250031)

摘要: 为了获取具有宽截止带的 1064 nm 激光窄带滤光膜, 本文以含缺陷的一维光子晶体为基础设计了两种不同的结构。模拟分析了缺陷层引入方式、缺陷层光学厚度、缺陷层材料折射率、光子晶体周期数和缺陷层位置等因素对窄通带位置、宽度和强度的影响, 明确了其影响规律。通过优化光子晶体的结构参数优化滤光膜窄通带、拓宽截止带, 设计了截止范围在 200~1500 nm、1064 nm 透过率大于 90% 的多层结构滤光膜。

关键词: 一维光子晶体; 滤光膜; 1064 nm 激光; 窄通带

中图分类号: O484 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2019)03-0220-07

Design of 1064 nm Laser Narrowband Filter Film Based on the One-dimensional Photonic Crystal

LIN Weili¹, QIU Guihua², HAN Jianlong², YU Mingxun^{1,2}, ZHANG Ruihong², NIU Yuchao¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;

2. China North Industries Group Corporation Institute 53, Jinan 250031, China)

Abstract: In order to obtain a 1064 nm laser narrowband filter with a wide cut-off band, two different structures were designed based on one-dimensional photonic crystals with defects. The effects of the defect layer introduction method, optical thickness, refractive index of the defect layer, number of photonic crystal cycles, and optical position of the defect layer on the position, width, and intensity of the narrow band were analyzed, and the influence rule was clarified. By optimizing the structural parameters of the photonic crystal, the narrow band of the filter film was optimized, and the cut-off band was broadened. A multilayer structure filter film with a cutoff range of 200-1500 nm and a 1064 nm transmittance of more than 90% was designed.

Key words: one-dimensional photonic crystals, filter film, 1064 nm laser, narrow band

0 引言

随着光电技术的发展, 激光通信凭借其保密性好、抗干扰能力强等优异的性能在民用甚至军事领域应用越来越广泛。1064 nm 激光窄带滤光膜能够除去杂散光对光信号的干扰, 使信噪比提高, 在激光通信、激光测距中扮演着重要的角色^[1-6]。1064 nm 激光窄带滤光膜要求在可见光、近红外波段高度截止, 1064 nm 处高透过。

常规的窄带滤光膜主要是采用 F-P 结构^[7-8], 以高、低折射率交替的每层光学厚度为 $\lambda_0/4$ 的多层介质高反膜作为反射层中间夹一介质间隔层^[9]。滤光膜窄通带的透过率可以满足大于 90% 的要求, 截止带宽不

是很理想, 拓宽其截止带宽通常比较复杂。随着光学薄膜的发展, 含有缺陷的一维光子晶体的出现为窄带滤光膜的设计提供了新的思路。一维光子晶体是一种由两种折射率不同的介质材料在空间某一方向上交替排列组成的多层膜结构^[10], 其显著的优势是它的性质具有内在的完全可调性, 即可人为地设计光子晶体的结构来改变其对光的控制^[11]。在光子晶体结构中引入缺陷层后禁带中会形成缺陷模, 该缺陷模具有较高的透过率和较窄的带宽, 在滤光膜中称为窄通带。本文通过对缺陷层引入方式、缺陷层光学厚度、缺陷层材料折射率、光子晶体周期数以及缺陷层位置变化对窄通带性能的影响进行分析, 设计出理想的 1064 nm 激光窄带滤光膜。

收稿日期: 2018-07-12; 修订日期: 2018-01-09.

作者简介: 林伟丽 (1992-), 女, 硕士研究生, 主要从事光学薄膜技术的研究。E-mail: shanqiulwl@163.com.

通信作者: 于名讯 (1964-), 男, 博士, 研究员, 主要从事隐身材料和技术的研究, E-mail: tooqiu@163.com.

基金项目: 兵器基金项目。

1 基本理论

为了解释含缺陷一维光子晶体缺陷模产生的原因,刘启能^[12]构建了 $(AB)_N C (BA)_N$ 结构,其中A层折射率为 n_1 、厚度为 d_1 ,B层折射率为 n_2 、厚度为 d_2 ,中间是缺陷层C其折射率为 n_3 、厚度为 d_3 。图1为光进入缺陷层C时的情况,当光进入C层后,光会在C层两个平行界面间不断地来回反射,光线1、2、3...为不同光束的透射光线,在透射空间中,无限多条光线将发生相干干涉,含缺陷一维光子晶体的缺陷模就是由相干干涉产生的透射峰形成的。由多光束干涉理论^[13]可得,在透射空间中,无限多条光线发生相干干涉的透射率为:

$$T = \frac{1}{1 + \left[2\gamma / (1 - \gamma^2) \right]^2 \sin^2(\delta/2)} \quad (1)$$

式中: γ 为B、C两层临界面的反射系数; δ 为相邻两条透射光光的相位差:

$$\delta = 4\pi d_3 \cos \theta_3 / \lambda_3 \quad (2)$$

式中: θ_3 、 λ_3 分别为C层中光的折射角和波长。要使式(1)出现极大值必须满足下列条件:

$$\delta/2 = 2\pi d_3 \cos \theta_3 / \lambda_3 = j\pi \quad j=1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

式(3)就是出现含缺陷一维光子晶体缺陷模透射峰的条件。

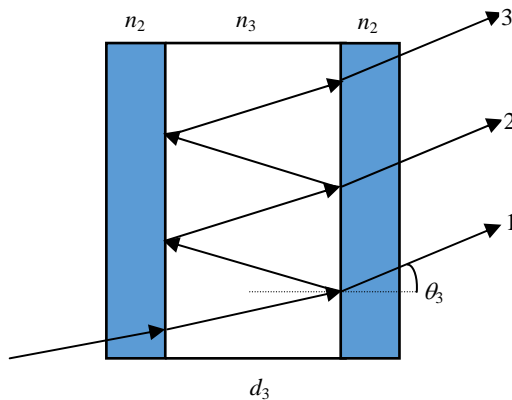


图1 缺陷层C处多光束干涉示意图

Fig.1 Schematic diagram of multi-beam interference at defect layer C

2 窄通带影响因素的分析

传输矩阵法(Transfer Matrix Method, TMM)是研究周期介质结构光学透射率、反射率等的一种基本方法^[14]。本文主要利用传输矩阵法来研究含缺陷一维光子晶体的透射光谱特性。设计夹杂式结构 1 Air/

$(AB)_N C (AB)_N / \text{Glass}$ 和 替换式结构 2 Air/(BA)_NC(AB)_N/Glass 两种多层膜结构,其中N为光子晶体单侧周期数,其初始值设为 $N=3$ 。由于Si和SiO₂在近红外波段吸收小、损耗低可分别作为光子晶体的高折射率材料A和低折射率材料B,因此材料A(Si)、材料B(SiO₂)的折射率分别为 $n_A=3.55$, $n_B=1.45$ 。A、B两种介质的光学厚度设为 $\lambda_0/4$,即 $n_A d_A = n_B d_B = \lambda_0/4$,其中 λ_0 为常用激光器中心波长1064 nm。C为缺陷层,其光学厚度和折射率均为变量,设缺陷层C的光学厚度 $n_C d_C = H \times (\lambda_0/4)$,H为缺陷层光学厚度变量。缺陷层C的折射率由选择的材料决定,初始时结构中缺陷层材料选择MgF₂($n=1.38$)。

2.1 缺陷层光学厚度的影响

研究缺陷层光学厚度变化对窄通带位置、宽度和峰值的影响,主要是通过改变缺陷层光学厚度变量H的取值,分析H变化对窄通带的影响。

当H分别取0.5、1、1.5、2时,结构1和结构2的透射率光谱如图2所示,可以看出,结构1和结构2窄通带在禁带中出现的位置有很大不同。当 $H=0.5$ 时,结构1中窄通带出现在中心波长的左侧,结构2中窄通带则出现在中心波长的右侧。当 $H=1$ 时,结构1中窄通带位于中心波长处,而结构2禁带中出现两个窄通带,通过相对频率 $g = \omega_0/\omega = \lambda_0/\lambda$ 转换后两个窄通带对称的分布在中心波长两侧,如图3(b)所示。当 $H=1.5$ 时,结构1中窄通带位于中心波长的右侧,而结构2中窄通带位于中心波长的左侧。当 $H=2$ 时,结构1禁带中出现两个窄通带,通过相对频率 $g = \omega_0/\omega = \lambda_0/\lambda$ 转换后两个窄通带对称的分布在中心波长两侧,如图3(a)所示,而结构2中的窄通带则位于中心波长处。这说明了缺陷层光学厚度的变化影响禁带中窄通带的位置和个数,而且随着缺陷层光学厚度的增加窄通带有规律地产生与消失。

由于结构1在 $H=1$,结构2在 $H=2$ 时窄通带位于中心波长处,接下来分析结构1和结构2在中心波长附近窄通带随着缺陷层光学厚度变量H变化的情况,如表1和表2所示。从表中数据可以看出,在一定范围内随缺陷层光学厚度变量H的增大,结构1中窄通带向着长波段移动,窄通带越靠近中心波长处,其半峰宽越小,在中心波长1064 nm处取到最小值1.47 nm。窄通带的透射峰值却随着H值的增大而增大;结构2中窄通带同样向着长波段移动,窄通带的半峰宽在中心波长处取到最小值2.13 nm,其峰值同样随着H值的增大逐渐增大。

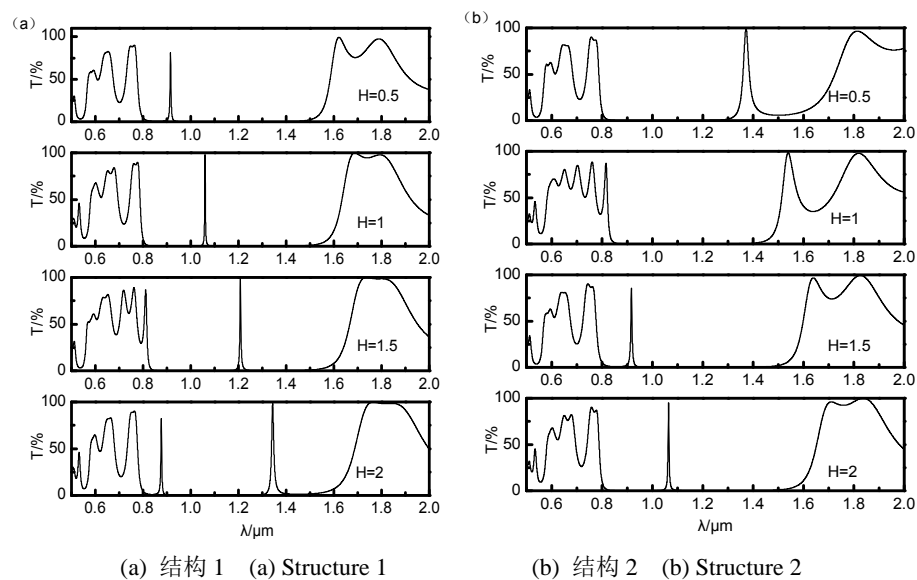


图 2 缺陷层光学厚度变量 H 变化时的透射光谱

Fig.2 The transmittance spectrum with changing of optical thickness variable H of defect layer

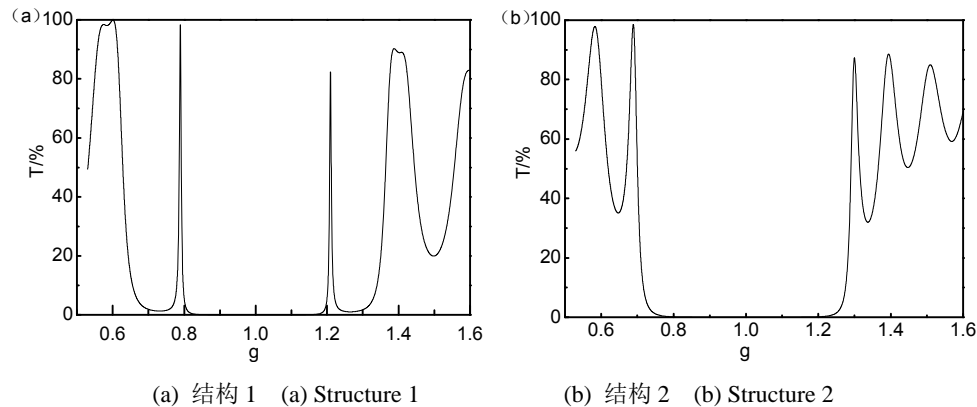


图 3 相对频率转换后的透射光谱 Fig.3 The transmittance spectrum after relative frequency conversion

表 1 结构 1 窄通带参数与缺陷层光学厚度变量 H 之间的变化关系

Table 1 The relation between the narrow band parameters of structure 1 and the optical thickness variable H			
Optical thickness variable of defect layer H	Narrow pass position /nm	Half peak width of narrow passband /nm	Peak value of narrow passband /%
0.5	918.60	4.28	81.51
0.8	1004.25	2.98	88.07
1.0	1064.00	2.94	97.72
1.3	1153.94	3.74	98.32
1.5	1212.58	4.84	98.49

2.2 缺陷层材料折射率的影响

在 2.1 节结果的基础上，进一步分析结构 1 中 $H=1$ 和结构 2 中 $H=2$ 时缺陷层材料折射率对窄通带位置、宽度和峰值的影响。令缺陷层 C 分别为 MgF_2 ($n=1.38$)、 SiO_2 ($n=1.45$)、 Ta_2O_5 ($n=2.14$)、 Si ($n=3.55$) 4 种不同折射率的材料，材料的折射率依次增大，其透射光谱如图 4 所示。表 3 和表 4 分别

为窄通带随缺陷层材料折射率变化情况。

表 2 结构 2 窄通带参数与缺陷层光学厚度变量 H 之间的变化关系

Table 2 The relation between the narrow band parameters of structure 2 and the optical thickness variable H			
Optical thickness variable of defect layer H	Narrow pass position /nm	Half peak width of narrow passband /nm	Peak value of narrow passband /%
1.5	913.22	5.62	85.45
1.8	1001.77	4.28	88.88
2.0	1064.00	4.26	95.31
2.3	1157.56	5.34	96.91
2.5	1218.30	6.70	98.10

从图 4 可以看出，结构 1 和结构 2 的窄通带均位于中心波长处，结合表 3 和表 4 中数据发现，随着缺陷层材料折射率的增大两种结构中窄通带的半峰宽均逐渐增大；结构 1 中窄通带的峰值呈明显减小的趋势；而结构 2 中窄通带的峰值不受缺陷层材料折射率大小的影响。

基于上述结果，结构1中缺陷层材料应选择折射率最小的 MgF_2 。结构2在选择缺陷层材料时可以优先考虑从介质材料 Si 和 SiO_2 中选择，这将使制备工艺变得简单。此外与 Si 相比， SiO_2 介质作为缺陷层时截止带宽相对较宽，同时不影响窄通带的峰值，因此 SiO_2 更适合。

2.3 周期数的影响

一维光子晶体是不同介质材料在一个方向上呈周期性排列的结构，其周期数不仅影响截止带的形成^[15]，对窄通带也有影响，研究光子晶体周期数变化对窄通带位置、宽度和峰值的影响，主要变量是单侧周期数 N 。保持介质材料A、B参数不变，结构1中缺陷层为 MgF_2 ，其光学厚度 $n_{\text{CD}}=1\times(\lambda_0/4)$ ，结构2中缺陷层为 SiO_2 ，其光学厚度 $n_{\text{CD}}=2\times(\lambda_0/4)$ 。

图5为单侧周期数 N 分别取2、3、4时的透射光谱图，表5和表6分别为结构1和结构2窄通带随单侧周期数 N 变化的情况。结合图、表可以看出，随着单侧周期数 N 的增加，两种结构中窄通带的位置没有发生变化，始终位于中心波长1064 nm处，而窄通带的峰值逐渐降低，峰宽度逐渐变窄。在满足需求的前提下，考虑到制备工艺的简易操作性，选择 $N=3$ 。

2.4 缺陷层位置的影响

2.3节的分析结果单侧周期数 N 的合理取值为3，所以光子晶体总的周期为6，缺陷层位于第 N' 周期后， N' 可以从1取到5。计算分析发现当缺陷层靠近光子晶体结构的边缘时透射峰很小，可以忽略，在此只对 $N'=2、3、4$ 的透射光谱进行分析，结果如图6所示。表7和表8分别为结构1和结构2窄通带随 N' 变化的情况。

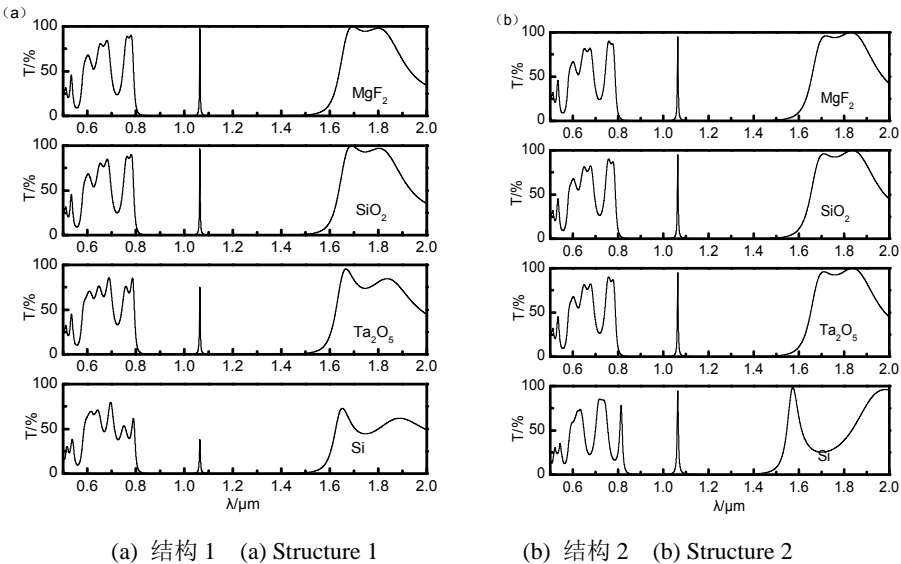


图4 缺陷层折射率不同时的透射光谱 Fig.4 The transmittance spectrum with difference refractive index of defect layer

表3 结构1窄通带参数与缺陷层折射率之间的变化关系

Table 3 The relation between the narrow band parameters of structure 1 and the refractive index of defect layer

Different defect layer materials	Refractive index of defective layer n_{C}	Narrow pass position /nm	Half peak width of narrow passband /nm	Peak value of narrow passband /%
MgF_2	1.38	1064.00	2.94	97.72
SiO_2	1.45	1064.00	2.98	96.39
Ta_2O_5	2.14	1064.00	3.62	75.26
Si	3.55	1064.00	4.62	37.56

表4 结构2窄通带参数与缺陷层折射率之间的变化关系

Table 4 The relation between the narrow band parameters of structure 2 and the refractive index of defect layer

Different defect layer materials	Refractive index of defective layer n_{C}	Narrow pass position /nm	Half peak width of narrow passband /nm	Peak value of narrow passband /%
MgF_2	1.38	1064.00	4.26	95.31
SiO_2	1.45	1064.00	4.36	95.31
Ta_2O_5	2.14	1064.00	5.34	95.31
Si	3.55	1064.00	6.48	94.80

结合图、表可以看出，缺陷层在光子晶体结构中的位置对窄通带出现的位置没有影响，对窄通带的峰值影响较大，当缺陷层处于光子晶体结构的两侧时，窄通带透射峰值明显很小，而当缺陷层处于光子晶体结构的中间时，窄通带峰值达到最大。表 7、8 中数据显示窄通带的半峰宽在缺陷层处于光子晶体结构的中间时取到最小。

3 窄通带滤光膜系的设计

通过对窄通带各影响因素的分析可知，当缺陷引入方式为夹杂式，膜层结构最合理的参数是单侧周期数 $N=3$ ，Si、SiO₂ 的光学厚度 $n_A d_A = n_B d_B = \lambda_0/4$ ，缺陷层 C 选择 MgF₂，其光学厚度 $n_C d_C = 1 \times (\lambda_0/4)$ ，缺陷层位于光子晶体结构的中间。膜结构为 Air/(Si/SiO₂)₃MgF₂(Si/SiO₂)₃/Glass，其中 Si 和 SiO₂ 的厚度分别为 74.86 nm 和 183.49 nm，缺陷层的厚度为

192.71 nm，窄带滤光膜的理论透射光谱如图 7 所示，在 1064 nm 处透射峰的峰值为 97.72%，半峰宽为 1.47 nm。

当缺陷引入方式为替换式，膜层结构最合理的参数是单侧周期数 $N=3$ ，Si、SiO₂ 的光学厚度 $n_A d_A = n_B d_B = \lambda_0/4$ ，缺陷层 C 选择 SiO₂，其光学厚度 $n_C d_C = 2 \times (\lambda_0/4)$ ，缺陷层位于光子晶体结构的中间。膜结构为 Air/(SiO₂/Si)₃SiO₂(Si/SiO₂)₃/Glass，其中 Si 和 SiO₂ 的厚度分别为 74.86 nm 和 183.49 nm 缺陷层的厚度为 366.99 nm，窄带滤光膜的理论透射光谱如图 8 所示，1064 nm 处透射峰的峰值为 95.31%，半峰宽为 2.13 nm。

从图 7 和图 8 可以看出，两种膜系形成的窄通带以及截止带宽相差不大，但从制备工艺方面考虑，结构 2 由两种介质材料，组成相对于结构 1 在制备工艺方面要简单。

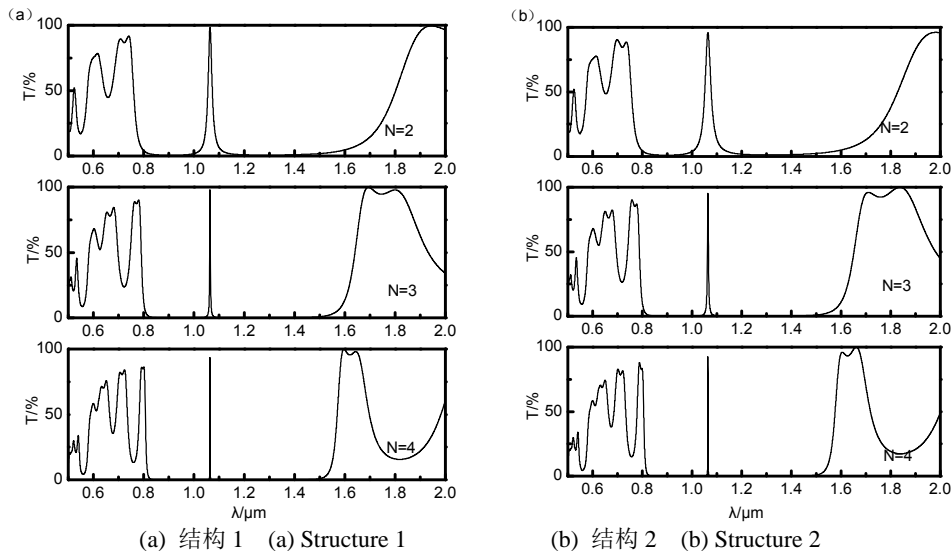


图 5 单侧周期数 N 变化时的透射光谱
Fig.5 The transmittance spectrum with the changing of single-side cycle number N

表 5 结构 1 窄通带参数与单侧周期数 N 之间的变化关系

Table 5 The relation between the narrow band parameter of structure 1 and the single-side cycle number N

Number of one-sided cycles N	Narrow pass position /nm	Half peak width of narrow passband /nm	Peak value of narrow passband /%
2	1064.00	17.96	98.48
3	1064.00	2.94	97.72
4	1064.00	0.50	93.32

表 6 结构 2 窄通带参数与单侧周期数 N 之间的变化关系

Table 6 The relation between the narrow band parameter of structure 2 and the single-side cycle number N

Number of one-sided Cycles N	Narrow pass position /nm	Half peak width of narrow passband /nm	Peak value of narrow passband /%
2	1064.00	26.46	95.81
3	1064.00	4.26	95.31
4	1064.00	0.72	92.35

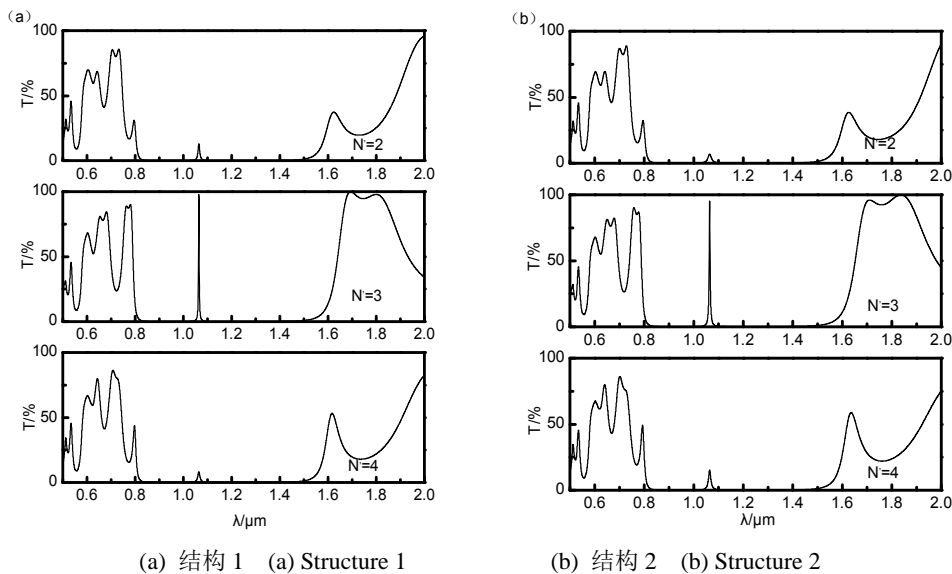


图6 缺陷层位置变化时的透射光谱

Fig.6 The transmittance spectrum with changing of defect layer location

表7 结构1窄通带参数与缺陷层位置 N' 之间的变化关系
Table 7 The relation between the narrow band parameter of structure 1 and the location of defect layer N'

Defect layer position N'	Narrow pass position /nm	Half peak width of narrow passband /nm	Peak value of narrow passband /%
2	1064.00	8.10	13.04
3	1064.00	2.94	97.72
4	1064.00	10.10	8.37

表8 结构2窄通带参数与缺陷层位置 N' 之间的变化关系
Table 8 The relation between the narrow band parameter of structure 2 and the location of defect layer N'

Defect layer position N'	Narrow pass position /nm	Half peak width of narrow passband /nm	Peak value of narrow passband /%
2	1064.00	16.40	7.08
3	1064.00	4.26	95.31
4	1064.00	11.10	15.35

从图7和图8透射光谱可以看出，滤光膜的截止带较窄，达不到实际要求，需要进一步拓宽。拓宽截止带的方法有很多，本文采用两种方法拓宽截止带：一种是构建异质结构光子晶体，即将两个或多个光子晶体组合到一起，来获得较宽的截止带，该方法会导致结构的层数增加，整个膜的总厚度增大。设计在200~800 nm高截止的结构3(Si/iO₂)₆Si，其中Si和SiO₂的厚度分别为38 nm和102.88 nm。将结构3与结构2组合后膜结构为Air/(Si/SiO₂)₆Si + (SiO₂/Si)₃SiO₂(Si/SiO₂)₃/Glass，组合后的结构在中心波长处的透射峰值为91.89%，半峰宽为1.35 nm，截

止带的范围在200~1500 nm，其透射光谱如图9所示。

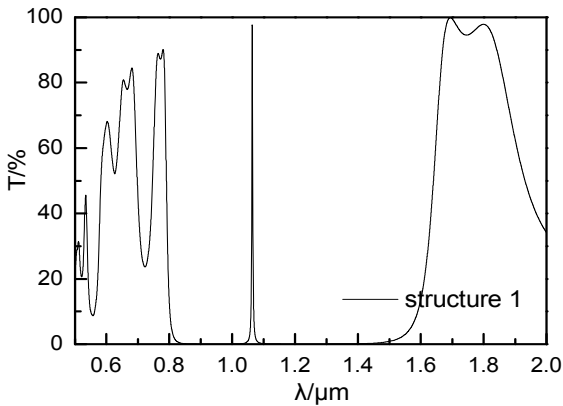


图7 结构1的理想透射光谱

Fig.7 The ideal transmittance spectrum of structure 1

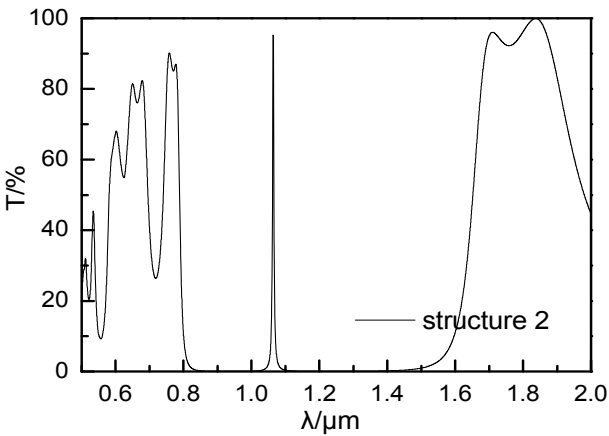


图8 结构2的理想透射光谱

Fig.8 The ideal transmittance spectrum of structure 2

另一种更简便的方法是选用短波截止光学玻璃作为基底对短波段光谱进行截止，在此可以选择型号HB850光学玻璃截止817 nm以下的光谱。图10是以

HB850 光学玻璃为基底时,结构2的理论透射光谱图,在不考虑基底对峰值透过率影响的前提下,1064 nm 处透射峰值可以达到 95.31%,半峰宽为 2.13 nm,截止带可以拓宽到 200~1500 nm。但实际上 HB850 光学玻璃的透过率达不到 100%,实测的透过率最高值为 87.7%,将会限制膜系结构窄通带的峰值。

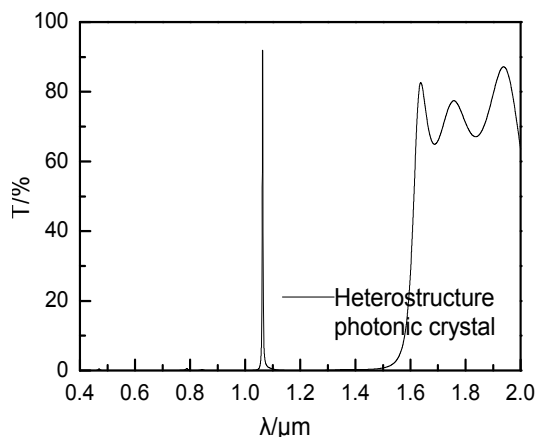


图9 异质结构光子晶体的透射光谱

Fig.9 The transmittance spectrum of hetero structure photonic crystal

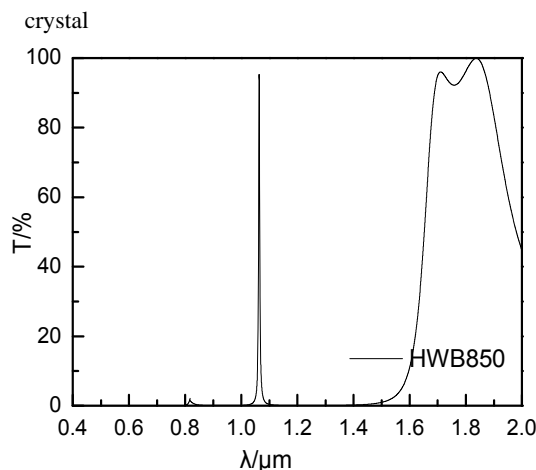


图10 HB850 光学玻璃作为基底时的透射光谱

Fig.10 The transmittance spectrum with a HB850 substrate

4 总结

设计了一维光子晶体的 1064 nm 激光窄带滤光膜,用传输矩阵法模拟了含缺陷一维光子晶体结构的透射特性。研究了缺陷层不同引入方式时,缺陷层光学厚度、缺陷层材料折射率、光子晶体周期数以及缺陷层位置对窄通带性能的影响情况。发现窄通带的位置只受缺陷层光学厚度的影响,而窄通带的半峰宽、峰值都随着缺陷层光学厚度、缺陷层材料折射率、基本层周期数及缺陷层位置的变化有不同的变化情况。确定了理想的滤光膜结构 1 $\text{Air}/(\text{Si}/\text{SiO}_2)_3$ $\text{MgF}_2(\text{Si}/\text{SiO}_2)_3/\text{Glass}$ 和结构 2 $\text{Air}/(\text{SiO}_2/\text{Si})_3$ $\text{SiO}_2(\text{Si}/\text{SiO}_2)_3/\text{Glass}$ 。通过构建异质结构光子晶体和

选择光学玻璃 HB850 作基底的方法拓宽截止带,设计出在可见光、近红外高截止 1064 nm 高透过的窄通带滤光膜,该滤光膜理论上截止范围在 200~1500 nm 内,1064 nm 透过率高达 90% 以上。

参考文献:

- [1] Ghosh R, Ghosh K K, Chakraborty R. Narrow band filter using 1D periodic structure with defects for DWDM systems[J]. *Optics Communications*, 2013, **289**(4): 75-80.
- [2] 张静, 付秀华, 潘永刚. 卫星激光通信滤光膜的研制[J]. *光子学报*, 2012, **41**(3): 303-306.
ZHANG Jing, FU Xiuhua, PAN Yonggang. Design and Fabrication of Satellite Laser Communication Filter Coating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(3): 303-306.
- [3] 岳威, 洪冬梅, 刘国喜, 等. 用于激光测距的 1572 nm 窄带滤光膜[J]. *强激光与粒子束*, 2010, **22**(8): 1819-1822.
YUE Wei, HONG Dongmei, LIU Guoxi, et al. 1572 nm narrow-band filter in laser telemeter[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(8): 1819-1822.
- [4] 庄秋慧, 付秀华, 刘国军. 用于空间激光通信系统的近红外分色片设计与研制[J]. *光学学报*, 2014, **34**(8): 333-336.
ZHUANG Qiuhui, FU Xiuhua, LIU Guojun. Design and Fabrication of a Near-Infrared Dichroic Beam Splitter Used for Space Laser Communication System[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(8): 333-336.
- [5] 付秀华, 莫朝燕, 黄金龙, 等. 临近空间激光通信链路光学系统中滤光膜的研制[J]. *中国激光*, 2013, **40**(9): 162-166.
FU Xiuhua, MO Zhaoyan, HUANG Jinlong, et al. Design and Fabrication of Near Space Laser Communication Link Optical System Filter Film[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, **40**(9): 162-166.
- [6] 潘永强, 陈佳. 微结构窄带滤光片设计及制备工艺研究[J]. *应用光学*, 2017, **38**(1): 78-82.
PAN Yongqiang, CHEN Jia. Design and fabrication of microstructure narrow band filter[J]. *Journal of Applied Optics*, 2017, **38**(1): 78-82.
- [7] 吴晓鸣, 李辛, 王一坚, 等. 大尺寸 1064 nm 波段 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 高损伤阈值窄带滤光片的研制[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, **53**(4): 206-212.
WU Xiaoming, LI Xin, WANG Yijian, et al. Fabrication of Large Size 1064 nm $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ Narrow-Band Filters with High Laser Damage Threshold[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, **53**(4): 206-212.
- [8] 唐晋发, 顾培夫, 刘旭, 等. 现代光学薄膜技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006: 144.
TANG Jinfa, GU Peifu, LIU Xu, et al. *Modern Optical Thin Film Technology*[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006: 144.
- [9] John D J, Steven G J, Joshua N W, et al. *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light 2nd*[M]. Beijing: Beijing World Publishing Corporation, 2013: 44-45.
- [10] 陆晓东. 光子晶体材料在集成光学和光伏中的应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2014: 2-3.
LU Xiaodong. *Application of Photonic Crystal Materials in Integrated Optics and Photovoltaic*[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2014: 2-3.
- [11] 马锡英. 光子晶体原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 35-37.
MA Xiying. *Principle and Application of Photonic Crystal*[M]. Beijing: Science press, 2010: 35-37.
- [12] 张会云, 张玉萍, 苏希玉, 等. 传输矩阵法分析有限周期光子晶体的反射谱特征[J]. *量子光学学报*, 2004, **10**(1): 38-41.
ZHANG Huiyun, ZHANG Yuping, SU Xiyu, et al. Transmission Matrix Method to Analyze the Spectral Characteristics of Finite Periodic Photonic Crystals[J]. *Journal of Quantum Optics*, 2004, **10**(1): 38-41.