

# W 型色散光纤带通滤波特性的研究

宋 鹏<sup>1,2</sup> 季敏宁<sup>1,2</sup> 余 燕<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 上海大学电子物理研究所, 201800  
<sup>2</sup> 上海大学特种光纤与光接入网省部共建重点实验室, 上海 200072

**摘要** 结合色散光纤在线滤波和 W 型光纤的长波长截止性能, 研究了 W 型色散光纤的带通滤波特性。选取 SiO<sub>2</sub> 作为纤芯, 一定掺杂浓度的 SiO<sub>2</sub>-F 和 SiO<sub>2</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 分别作为内外包层, 经过设计, 实现了带通滤波功能。通过有限元法仿真及数值计算, 得出了基模的能量损耗谱及通带内外各个波长处的横截面能量分布图, 其截止波长和带宽可以通过控制掺杂浓度和结构参数来调整。此外还进一步分析了纤芯半径大小及中心空气孔凹陷的存在对滤波特性的影响, 结果表明, 减小纤芯半径和增大空气孔能减小带宽和增大通带边缘的陡度。

**关键词** 光纤光学; 带通滤波; 有限元法; W 型色散光纤

**中图分类号** TN252 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201131.0106005

## Study of Band-Pass Filtering Characteristics of W-Type Dispersive Fibers

Song Peng<sup>1,2</sup> Ji Minning<sup>1,2</sup> Yu Yan<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Electronic Physics, Shanghai University, Shanghai 201800, China  
<sup>2</sup> Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072, China

**Abstract** Band-pass filtering characteristics of W-type dispersive fiber are studied by combining online filtering dispersive optical fiber with W-type fiber which is long wavelength cutoff. A band-pass filter can be achieved by appropriate structure composed of SiO<sub>2</sub> core, SiO<sub>2</sub>-F inner cladding and SiO<sub>2</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> outer cladding respectively. According to finite element method simulation and numerical calculation, energy loss of fundamental mode and energy distributions at some wavelength of the stopped band or passband can be obtained, and the cutoff wavelength and bandwidth can be adjusted by controlling the dopant concentration and structure parameters. The influence of the core radius and the central air hole on the filtering performance is analyzed. The results show that decreasing the core radius or enlarging the air hole will reduce bandwidth and increase the passing band edge steepness.

**Key words** fiber optics; band-pass filter; finite element method; W-type dispersive fiber

**OCIS codes** 060.2310; 060.2270; 230.2285

## 1 引 言

光纤通信随着波分复用(WDM)技术的发展, 取得了令人瞩目的成就。光滤波器是光纤通信及光网络中最基础的也是最重要的元器件之一, 应用范围十分广泛, 它的技术水平、产量大小以及价格将对

光网络的发展产生直接影响。按照选频特性, 光滤波器可以分为<sup>[1]</sup>带通滤波器(BPF)、带阻滤波器(BRF)、低通滤波器(LBF)、高通滤波器(HBF)和梳状(Interleave)滤波器。光纤滤波器可以很好地避免昂贵的光电和电光转换, 还可以提供高的数据传

**收稿日期:** 2010-05-10; **收到修改稿日期:** 2010-08-10

**基金项目:** 上海市教委创新基金(09YZ31)、国家自然科学基金(60777031)和上海市重点学科和科委重点实验室项目(S30108, 08DZ2231100)资助课题。

**作者简介:** 宋 鹏(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤和光纤器件等方面的研究。

E-mail: songpeng7510321@163.com

**导师简介:** 季敏宁(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事特种光纤和光纤偏振光学特性等方面的研究。

E-mail: jmn2001@staff.shu.edu.cn

输速率和容量,因而受到了极大关注。根据光的干涉、衍射原理和光纤的不同特性,实现光纤滤波的方法很多,其中光纤布拉格光栅和长周期光栅技术最为成熟,它的光谱响应可以通过调节光栅结构来控制,但受到相位匹配条件的限制。

K. Morishita 等<sup>[2,3]</sup>使用多组分玻璃(MCG)作为纤芯和包层,利用它们不同的色散特性来实现滤波。通过合理的设计,纤芯和包层的折射率曲线在某个波长处相交,可以得到结构简单的高通和低通滤波器。但是由于 MCG 色散光纤的熔点与传统的单模光纤不同而不能熔接且散射损耗很大,从而导致不能在光纤通信和传感领域中实际应用。K. Oh 等<sup>[4~6]</sup>提出了掺杂  $B_2O_3$  和 F 元素的高硅石英色散光纤解决了 MCG 色散光纤不能实际应用的问题。选择合适掺杂浓度的  $B_2O_3$  与 F 元素作为纤芯和包层(或相反),可以设计成为高通(或低通)的在线光纤滤波器。

K. Oh 等提出的在线滤波器虽然解决了以往在线光纤滤波器不能实际应用的问题,但要实现带通滤波功能需要分别使用一个高通和低通滤波器的串接,这样无疑会增加其制作成本和连接损耗。W 型光纤作为一种双包层光纤,是由 S. Kawakami 等<sup>[7]</sup>在 1974 年提出的。与一般阶跃光纤相比,它在单模工作时可以有相对较大的纤芯,基模能更好地束缚在纤芯中,且在通信波长范围内具有低色散的优点。除此之外,通过合适参数的设计,当 W 型光纤内包层折射率和厚度满足一定的条件时,会出现长波长截止的特性<sup>[7]</sup>,这种特性可以用来制作各种光纤器件,如高通滤波器、放大器<sup>[8]</sup>等。本文结合色散光纤和 W 型光纤的性质,通过有限元法仿真及数值计算对 W 型色散光纤的带通在线滤波特性进行了研究。

## 2 工作原理

在传统的光纤中,纤芯和包层的材料具有相似的色散特性,它们的折射率差在整个波段内几乎为常数,且纤芯的折射率始终大于包层,光在传播过程中可以束缚在纤芯中。但是,如果选择折射率随波长变化快慢不同的材料分别作为纤芯和包层(或相反),从而可以实现滤波功能。如图 1 所示,AB 两种材料的折射率色散变化快慢不同,相交于  $\lambda_c$  处。在  $\lambda_c$  之前,A 的折射率比 B 的折射率大,在  $\lambda_c$  之后则恰好相反。

当用 A 作为纤芯而 B 作为包层时,在从短波长

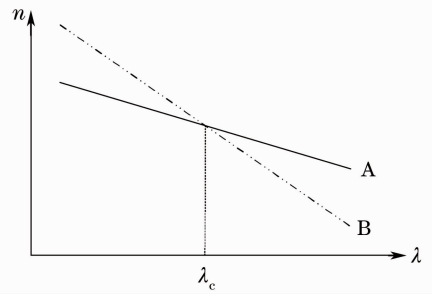


图 1 两种折射率色散曲线相交的材料  
Fig. 1 Two materials whose dispersion curves cross each other

到长波长的变化过程中,其折射率分布变化如图 2(a)所示,实现了低通滤波。当 B 作为纤芯而 A 作为包层时,在从短波长到长波长的变化过程中,其折射率变化如图 2(b)所示,可实现高通滤波。

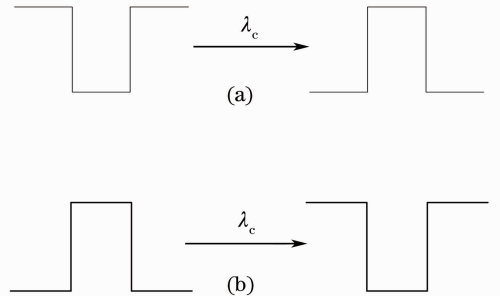


图 2 色散光纤的滤波原理

Fig. 2 Principle of dispersive fiber filters

W 型光纤是一种双包层光纤,其截面折射率基本结构如图 3 所示, $a, b$  分别为纤芯和内包层的半径, $n_1, n_2, n_3$  分别是纤芯、内包层、外包层的折射率,其中  $n_1$  最大, $n_2$  最小。

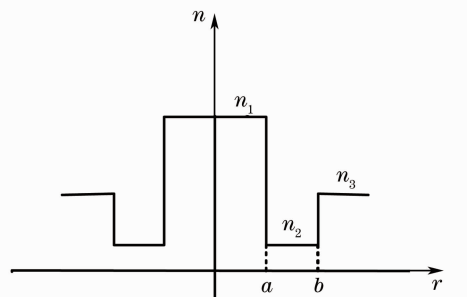


图 3 W 型光纤折射率分布图

Fig. 3 Refractive-index profile of W-type fiber  
当光纤结构参数满足以下条件时<sup>[9]</sup>,

$$\frac{b}{a} > \left[ \frac{(n_3^2 + n_2^2)(n_1^2 - n_2^2)}{(n_3^2 - n_2^2)(n_1^2 + n_2^2)} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

随着波长的增大,由于较低折射率层  $n_2$  的存在,会出现一个截止波长,大于此截止波长的光损耗会越来越大,是一个天然的高通滤波器。

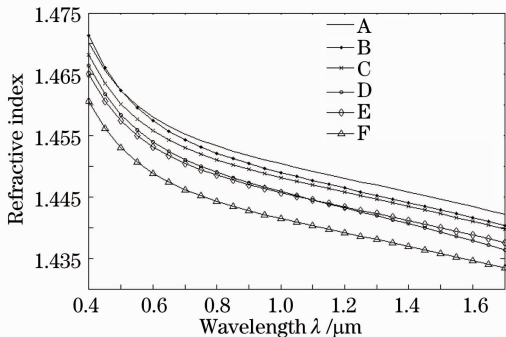
因此,首先选择合适的色散材料实现低通滤波,再加入一个内包层形成 W 型光纤的高通滤波,这样结合色散光纤以及 W 型光纤的性质,就可以实现 W 型色散光纤带通在线滤波的功能,其带宽由短波截止波长和长波截止波长决定。具体来说,短波截止波长主要由两种材料色散曲线的交点决定,但同时因为在折射率大小刚刚交换后纤芯和外包层折射率差很小,光还不能很好地束缚在纤芯中,所以其实际截止波长比交点波长值大;而长波截止波长主要是由 W 型结构决定,在满足(1)式的基础上,通过光场的电磁边界连续条件建立解析模型得到特征方程,基模截止时传播常数  $\beta = n_3 k_0 [k_0 = (2\pi)/\lambda, \lambda$  为自由空间波长], 通过求解特征方程可以得到截止波长,这样就可以决定出带宽的范围,再通过计算仿真得到其实际有效带宽。

表 1 掺杂  $B_2O_3$  和 F 的石英玻璃的 Sellmeier 系数Table 1 Sellmeier coefficients of silica glass doped with  $B_2O_3$  or F

	$a_1$	$b_1$	$a_2$	$b_2$	$a_3$	$b_3$
A	0.6961663	0.004679148	0.4079426	0.01351206	0.8974994	97.9340023
B	0.6935408	0.005141195	0.4052977	0.01578530	0.9111432	97.93387
C	0.6929642	0.003658351	0.4047468	0.01536631	0.9154064	97.93383
D	0.690618	0.00383161	0.401996	0.01529229	0.898817	82.79107308
E	0.69325	0.004521218	0.39720	0.01372178	0.86008	95.57213121
F	0.67744	0.003763823	0.40101	0.01447209	0.87193	97.14664969

A:  $n(\text{SiO}_2) = 100$ , B:  $n(\text{B}_2\text{O}_3 : \text{SiO}_2) = 3:97$ , C:  $n(\text{B}_2\text{O}_3 : \text{SiO}_2) = 3.5:96.5$ , D:  $n(\text{B}_2\text{O}_3 : \text{SiO}_2) = 13.3:96.9$ , E:  $n(\text{F} : \text{SiO}_2) = 3.1:96.9$ , F:  $n(\text{F} : \text{SiO}_2) = 6.1:93.9$ . unit: mole fraction / %

把表 1 的数据带入 Sellmeier 公式得到折射率随波长  $\lambda$  变化的色散曲线,如图 4 所示。从图中可以看到,纯  $\text{SiO}_2$  和掺杂摩尔分数 3%  $\text{B}_2\text{O}_3$  的石英玻璃在  $0.5 \mu\text{m}$  附近有交点,而掺杂摩尔分数 3.1% F 和 13.3%  $\text{B}_2\text{O}_3$  的石英玻璃在  $1.1 \mu\text{m}$  附近有交点。对于不同掺杂摩尔分数的 Sellmeier 系数,可以通过插值的方法计算,文献[6]做了详细的研究,从而可以通过调整掺杂摩尔分数来得到不同的截止波长。

图 4 掺杂  $B_2O_3$  和 F 石英玻璃的色散曲线Fig. 4 Dispersion curves of silica glass doped with  $B_2O_3$  or F

### 3 计算及结果分析

本文采用 J. W. Yu 等<sup>[6]</sup>提出的  $B_2O_3$  掺杂和 F 掺杂高硅石英光纤,这种光纤不仅具有在线滤波所需要的良好折射率色散特性,而且大大减小了光纤损耗以及与标准单模光纤(SMF)的连接损耗,并可通过传统的改进化学汽相沉积法(MCVD)制作。对应不同掺杂元素及浓度,其折射率  $n$  随波长变化的关系可用 Sellmeier 公式<sup>[10]</sup>计算,它表示为

$$n^2(\lambda) = 1 + \sum_{j=1}^N \frac{a_j \lambda^2}{\lambda^2 - b_j^2}, \quad (2)$$

式中含有一系列谐振波长,它们因材料不同而异,通常取 3 个即可。对于掺杂不同摩尔分数的  $B_2O_3$  和 F 的塞耳迈耶(Sellmeier)系数在  $0.4 \sim 1.7 \mu\text{m}$  范围内如表 1 所示<sup>[6,10]</sup>。

#### 3.1 W 型色散光纤带通滤波器

从图 4 中可以看到,纯  $\text{SiO}_2$  与掺杂  $B_2O_3$  的石英玻璃在色散曲线相交后折射率差较掺杂合适摩尔分数  $B_2O_3$  与 F 元素的石英玻璃大,对光的束缚更好,同时还要考虑 W 型结构的长波长损耗,故选择纯  $\text{SiO}_2$  和掺杂  $B_2O_3$  的石英玻璃分别作为纤芯和外包层。要实现短波截止波长变大,使色散曲线交点右移,则必须使用低于 3% 的  $B_2O_3$  掺杂,但从图 5 可以看到,降低掺杂摩尔分数,交点右移很小,但其纤芯和外包层的折射率差却减小很快,从而不能把光很好的束缚在纤芯中,不能在  $1310 \sim 1550 \text{ nm}$  波段形成有效通带。若要在长波长通信窗口实现带通滤波,需采用其他新型色散材料。

选择纯  $\text{SiO}_2$  作为纤芯  $n_1$ ,掺杂摩尔分数 6.1% F 的石英玻璃作为内包层  $n_2$ ,掺杂摩尔分数 2.8%  $B_2O_3$  的石英玻璃作为外包层  $n_3$ ,根据 Sellmeier 公式得到的色散曲线如图 6 所示,其中纯  $\text{SiO}_2$  与掺杂摩尔分数 2.8%  $B_2O_3$  的石英玻璃的交点  $\lambda_c$  为  $0.508 \mu\text{m}$ ,可实现低通滤波器的功能,而掺杂摩尔分数 6.1% F 的石

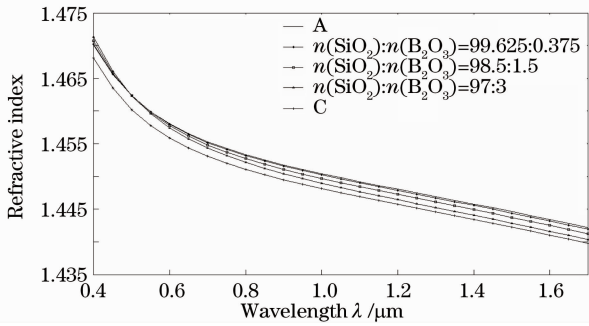


图 5 掺杂不同摩尔分数的 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 与纯 SiO<sub>2</sub> 色散曲线

Fig. 5 Dispersion curves of pure SiO<sub>2</sub> and doped borosilicate with different dopant mole fraction

英玻璃的内包层可实现 W 型光纤的高通滤波功能。小于和大于交点波长  $\lambda_c$  时的折射率分布图如图 7 所示,其中纤芯半径  $a=5 \mu\text{m}$ ,内包层半径  $b=8 \mu\text{m}$ ,内包层厚度为  $3 \mu\text{m}$ 。

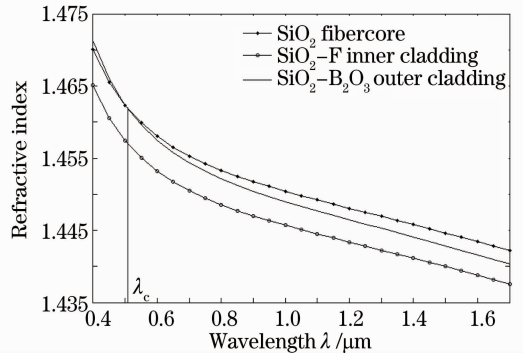


图 6 纯 SiO<sub>2</sub>, 掺杂摩尔分数 2.8% B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 以及 6.1%F 的色散曲线

Fig. 6 Dispersion curves of pure SiO<sub>2</sub>, doped borosilicate and fluorosilicate glasses. Dopant mole fraction 2.8% of B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and 6.1% of fluorine in SiO<sub>2</sub>

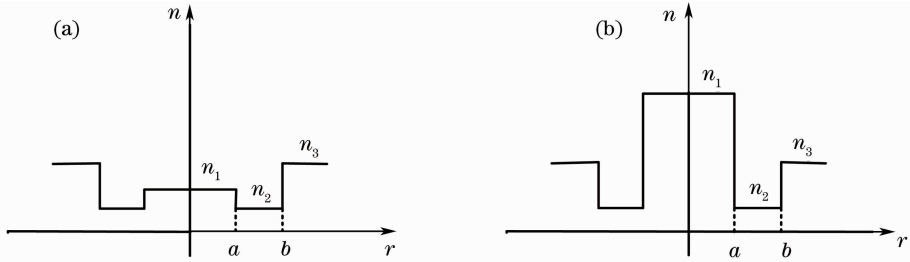


图 7 W 型色散光纤折射率分布图。(a) 小于  $\lambda_c$ , (b) 大于  $\lambda_c$

Fig. 7 Refractive-index profile of W-type dispersive fiber. (a) less than  $\lambda_c$ , (b) more than  $\lambda_c$

通过计算,其基模的能量损耗随波长  $\lambda$  的变化关系如图 8 所示,在  $0.67 \sim 0.9 \mu\text{m}$  的波长范围内实现了带通滤波的功能。其中实际短波截止波长为  $0.67 \mu\text{m}$ ,比纤芯和外包层色散曲线的交点波长  $\lambda_c$  ( $0.508 \mu\text{m}$ ) 大,这是因为在色散曲线交点处两种材料的折射率差较小,光不能被很好的束缚在纤芯中,只有在更大波长处具有足够大的折射率差时才能将光有效地束缚在纤芯中,实现带通滤波。

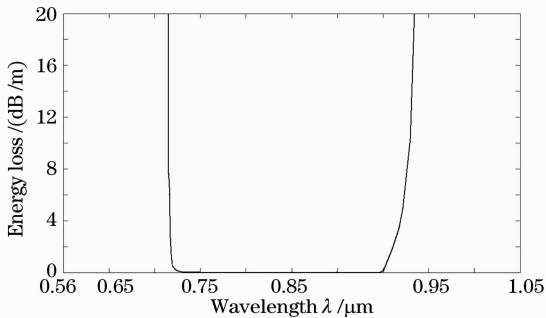


图 8 W 型色散光纤的损耗与波长的关系

Fig. 8 Relationship between energy loss of W-type dispersive fiber and wavelength

图 9 为上面所设计的 W 型色散光纤在通带内外不同波长处的能量分布,所选取的波长分别为  $0.5 \mu\text{m}$  (小于短波截止波长),  $0.8 \mu\text{m}$  (通带内的中

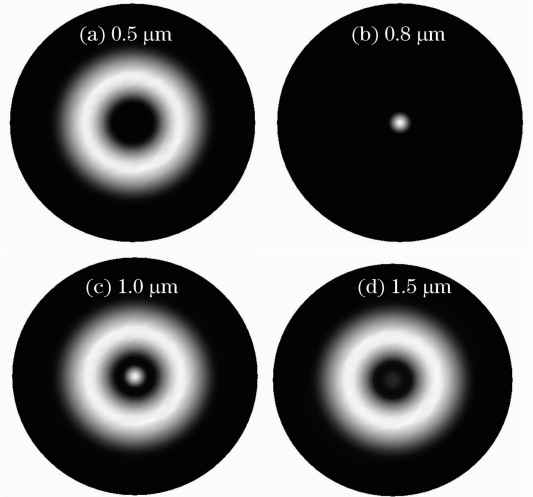


图 9 W 型色散光纤不同波长处的能量分布

Fig. 9 Energy distributions of the W-type dispersive fiber at different wavelengths

心波长),  $1 \mu\text{m}$  (大于长波截止波长),  $1.5 \mu\text{m}$  (远远大于长波截止波长)。从图 9(a) 中可以看出, 由于工作波长小于短波长处的截止波长, 能量不能束缚在纤芯而辐射到包层中; 随着波长的增大, 纤芯的折射率比包层折射率大得多, 模场能很好的束缚在纤芯中传播, 如图 9(b) 所示; 随着波长继续增大, 在长波截止点附近, 基模的有效折射率接近外包层, 光纤的泄露损耗开始增加, 能量不能很好地束缚在纤芯中传播, 一部分将辐射到外包层中去, 如图 9(c) 所示; 在工作波长远远大于长波截止点时, 图 9(d) 中所示, 能量几乎全部辐射到外包层中, 损耗迅速增大。图 9 能量分布的变化趋势与图 8 中的损耗谱完全一致。

### 3.2 纤芯半径对 W 型色散光纤滤波特性的影响

为研究方便选择了纯  $\text{SiO}_2$  作为纤芯  $n_1$ , 掺杂摩尔分数 6.1% F 的石英玻璃作为内包层  $n_2$ , 掺杂摩尔分数 3%  $\text{B}_2\text{O}_3$  的石英玻璃作为外包层  $n_3$ , 其中纤芯折射率  $n_1$  与外包层折射率  $n_3$  在波长  $0.499 \mu\text{m}$  处相交; 内包层半径  $b=8 \mu\text{m}$ , 分别取纤芯半径  $a$  为 6, 5 和  $4.5 \mu\text{m}$ , 计算其基模损耗谱。随着纤芯半径的减小, 纤芯对光的束缚减弱, 损耗变大, 要想很好地束缚光, 必须要有足够大的纤芯和外包层的折射率差, 从图 4 的色散曲线可以看到, 在交点波长  $\lambda_c$  之后, 随着波长增大, 纯  $\text{SiO}_2$  (纤芯) 和掺杂摩尔分数 3%  $\text{B}_2\text{O}_3$  的  $\text{SiO}_2$  (外包层) 的折射率差变大, 这样就能够重新束缚住光, 故其通带向长波方向移动, 从而短波截止波长变大; 另一方面, 随着纤芯半径的减小, W 型光纤对长波长光的束缚能力进一步减弱, 其通带向短波方向移动, 从而长波截止波长减小, 而且通过数值计算进行

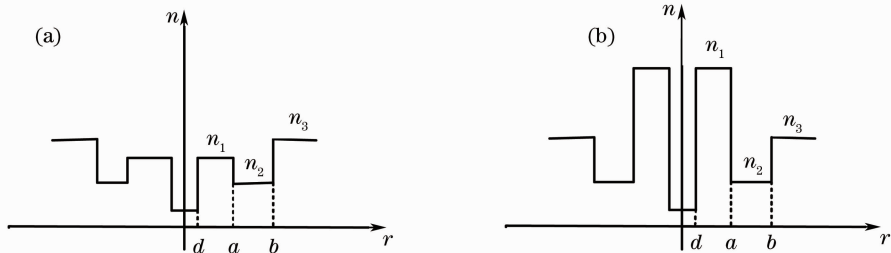


图 11  $\lambda_c$  前(a)和  $\lambda_c$  后(b)中心凹陷 W 型色散光纤折射率分布图

Fig. 11 Refractive-index profile of W-type dispersive fiber with a central index dip. (a) before  $\lambda_c$  and (b) after  $\lambda_c$

图 12 是分别取  $d$  为 0 (即没有中心凹陷), 0.3 和  $0.5 \mu\text{m}$  的损耗谱。从图中可以看出, 其 3 dB 通带带宽分别为 0.84, 0.36 和  $0.18 \mu\text{m}$ , 随着中心凹陷从无到有、由小到大, 通带带宽越来越小。这是因

详细的研究<sup>[11,12]</sup>, 可以看到, 长波截止波长的变化随着内包层半径与纤芯半径比值( $b/a$ )变化, 纤芯半径增大时, 内包层半径与纤芯半径的比值( $b/a$ )减小, 长波截止波长减小。综上所述, 短波截止波长变大, 而长波截止波长变小, 因此其通带带宽减小。正如图 10 所示, 纤芯半径为 6, 5 和  $4.5 \mu\text{m}$  时, 其 3 dB 带宽分别为 0.85, 0.47 和  $0.22 \mu\text{m}$ 。

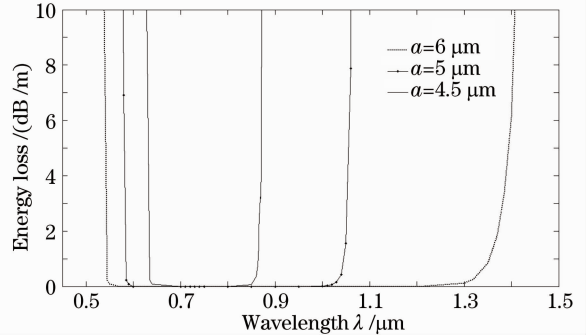


图 10 不同纤芯半径 W 型色散光纤的损耗与波长的关系  
Fig. 10 Relationship between energy loss of W-type dispersive fiber with different core radii and wavelengths

### 3.3 中心空气孔凹陷对 W 型色散光纤滤波特性的影响

在光纤 MCVD 制作工艺和拉丝过程中, 容易在纤芯处形成一个微小空气孔的中心凹陷, 而中心凹陷的 W 型光纤在有效面积、色散、弯曲损耗等方面有着良好的性能<sup>[12,13]</sup>。下面研究不同大小中心空气孔凹陷对 W 型色散光纤滤波特性的影响, 其基本参数与 3.2 节中的一样, 但在纤芯中加一个半径为  $d$  的小空气孔, 其在交点波长  $\lambda_c$  ( $0.499 \mu\text{m}$ ) 前后的折射率分布如图 11(a), (b) 所示。

为, 中心凹陷增大, 光被逐渐排斥到纤芯外, 光束束缚在纤芯中的能力减弱, 损耗增大, 其效果等同于纤芯半径减小, 故短波截止波长增大; 从文献<sup>[14]</sup>中可以得到, 对于 W 型结构的光纤, 中心凹陷会减小其截

止波长,且凹陷的越大,其截止波长减小的越多。由于短波截止波长和长波截止波长的变化趋势,其带宽随着中心空气孔凹陷的增大而减小。另外,随着凹陷出现,功率分布向纤芯外扩展,其损耗随着凹陷深度的增加而迅速增加,能量衰减得更快,故通带边缘的损耗增加得越来越快。图 13 是中心凹陷为  $0.5 \mu\text{m}$  时,波长分别取  $0.6 \mu\text{m}$  (小于短波截止波长),  $0.75 \mu\text{m}$  (通带内的中心波长),  $0.95 \mu\text{m}$  (大于长波截止波长),  $1.2 \mu\text{m}$  (远远大于长波截止波长) 时的能量分布图,其变化趋势与没有中心凹陷的普通 W 型色散光纤基本相同,所不同的是由于在纤芯中存在一个小的空气孔,在这个空气孔中几乎没有

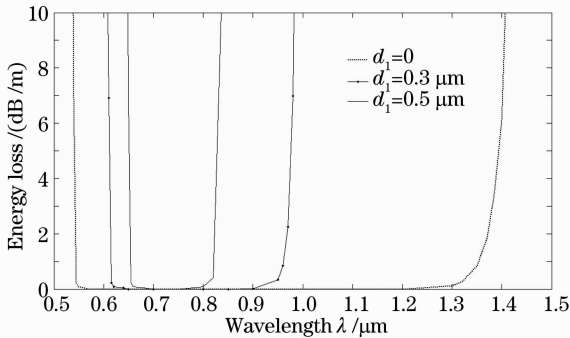


图 12 不同中心凹陷大小 W 型色散光纤的损耗与波长的关系

Fig. 12 Relationship between energy loss of W-type dispersive fiber with different width of central air hole and wavelength

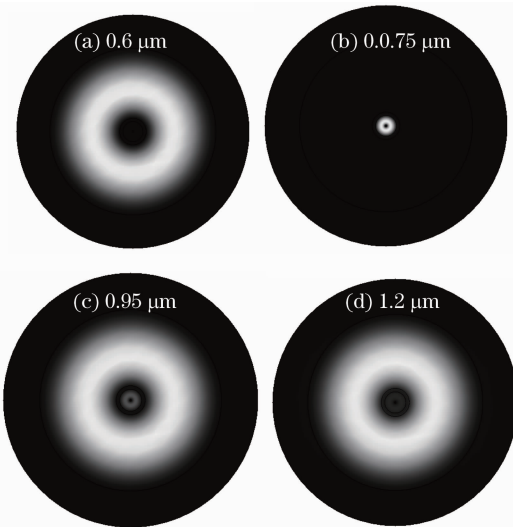


图 13 不同凹陷大小 W 型色散光纤在不同波长处的能量分布

Fig. 13 Energy distributions of the W-type dispersive fiber with different widths of central air hole at different wavelengths

能量传播,因而图中的中心处是暗点(用小黑点表示)。文献[15,16]分别对中心凹陷阶跃和 W 型光纤归一化模场分布做了研究,从中可以得出,本文中心空气孔凹陷处的分布模场分布为零,没有能量传播,而且也没有形成光子带隙型光子晶体结构<sup>[17]</sup>,所以中心空气孔凹陷处的传输功率几乎为零。

## 4 结 论

利用色散光纤实现低通滤波,结合 W 型光纤长波截止的高通滤波特性,研究了 W 型色散光纤的带通在线滤波特性。选取  $\text{SiO}_2$  纤芯,  $\text{SiO}_2$ -F 内包层,  $\text{SiO}_2$ - $\text{B}_2\text{O}_3$  外包层,经过合适的结构参数设计,通过有限元法仿真及数值计算,得出了基模的损耗谱和通带内外各个波长处的能量分布图,实现了带通滤波的功能,其截止波长和带宽可以通过控制掺杂摩尔分数和结构参数来调节。在此基础上,进一步研究了纤芯半径和中心空气孔凹陷的存在对 W 型色散光纤滤波特性的影响。结果表明,随着纤芯半径的减小,其短波截止波长变大,而长波截止波长变小,因此其通带带宽减小。随着中心凹陷的从无到有、由小到大,其通带带宽越来越小,通带边缘的损耗增加越来越快,同时在中心空气孔凹陷处几乎没有能量传播。

## 参 考 文 献

- Chen Yue, Xie Yirong, Sun Jin. Theory of optical filter [J]. *Network Equipment and Technology*, 2005, **12**(4): 58~60  
陈悦, 解奕榕, 孙金. 光滤波器的理论 [J]. *网络设备与技术*, 2005, **12**(4): 58~60
- K. Morishita, M. S. Yataki, W. A. Gambling. In-line optical fiber filters using dispersive materials [J]. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(7): 534~535
- J. Nishimura, K. Morishita. Control of spectral characteristics of dispersive optical fibers by annealing [J]. *Lightwave Technol.*, 1997, **15**(2): 294~298
- K. Oh, J. W. Yu, H. S. Seo *et al.*. High silica dispersive optical fiber and its application as an in-line short-pass fiber filter [C]. Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO'99), 1999, pp. 386~387
- J. W. Yu, K. Oh, U. C. Paek. A new in-line long-wavelength-pass filter using a high silica dispersive fiber [C]. Optoelectronics and Communications Conference (OECC'99), 1999, pp. 1603~1605
- J. W. Yu, K. Oh. New in-line fiber band pass filters using high silica dispersive optical fibers [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **204**(1-6): 111~118
- S. Kawakami, S. Nishida. Characteristics of a doubly clad optical fiber with a low-index inner cladding [J]. *Quantum Electron.*, 1974, **10**(12): 879~887
- Seongwoo Yoo, Yongmin Jung, Junki Kim *et al.*. W-type fiber design for application in U- and S-band amplifiers by controlling the  $\text{LP}_{01}$  mode long wavelength cut-off [J]. *Optical Fiber Technology*, 2005, **11**(4): 332~345

- 9 Safaai-Jazi A, Gar Lam Yip. Cutoff conditions in three-layer cylindrical dielectric waveguides[J]. *IEEE Microwave Theory and Techniques Society*, 1978, **26**(11): 898~903
  - 10 J. W. Fleming. Material dispersion in lightguide glasses[J]. *Electron. Lett.*, 1978, **14**: 326~328
  - 11 Michel Monerie. Propagation in doubly clad single-mode fibers[J]. *Quantum Electron.*, 1982, **189**(4): 535~542
  - 12 Xianqing Tian, Xiaoping Zhang. Dispersion-flattened designs of the large effective-area single-mode fibers with ring index profiles[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **230**(1-3): 105~113
  - 13 H. T. Hattori, A. Safaai-Jazi. Fiber designs with significantly reduced nonlinearity for very long distance transmission[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(15): 3190~3197
  - 14 Jiang Mingjun, Lin Zhiyuan. Effects of central dip in refractive index on propagation characteristics of W-type single-mode fibers[J]. *Acta Optical Sinica*, 1985, **5**(1): 49~55
  - 15 Chujun Zhao, Runwu Peng, Zhixiang Tang. Modal fields and bending loss analyses of three-layer large flattened mode fibers[J]. *Opt. Commun.*, 2006, **266**(1): 175~180
  - 16 Somayeh Makouei, Morteza Savadi Oskouei, Ali Rostami. Study of bending loss and mode field diameter in depressed inner core triple-clad single-mode optical fibers[J]. *Opt. Commun.*, 2007, **280**(1): 58~67
  - 17 Song Xuepeng, Huang Yongqing, Ren Xiaomin. Photonic bandgap fiber[J]. *Study on Optical Communications*, 2005, (4): 57~60
- 宋学鹏, 黄永清, 任晓敏. 光子带隙型光子晶体光纤[J]. *光通信研究*, 2005, (4): 57~60