

**基于高折射率液体填充的花瓣形微结构光纤可调滤模特性**

戴震飞 姜文帆 王玲 陈明阳 高永锋 任乃飞

**Tunable mode-selective characteristics of a mode-filter petal-fiber with liquid rods**

Dai Zhen-Fei Jiang Wen-Fan Wang Ling Chen Ming-Yang Gao Yong-Feng Ren Nai-Fei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 084206 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20181890

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181890>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

**您可能感兴趣的其他文章**

**Articles you may be interested in**

具有四模式的低串扰及大群时延多芯微结构光纤的设计

Analysis of a novel four-mode micro-structured fiber with low-level crosstalk and high mode differential group delay

物理学报. 2015, 64(23): 234206 <https://doi.org/10.7498/aps.64.234206>

基于酒精与磁流体填充的单模-空芯-单模光纤结构温度磁场双参数传感器

A modal interferometer based on single mode fiber-hollow core fiber-single mode fiber structure filled with alcohol and magnetic fluid for simultaneously measuring magnetic field and temperature

物理学报. 2017, 66(7): 070601 <https://doi.org/10.7498/aps.66.070601>

微结构阵列对近壁面层液体运动规律的影响

Effect of micro-structure array on the liquid flow behaviors of near-surface layer

物理学报. 2017, 66(4): 044703 <https://doi.org/10.7498/aps.66.044703>

新型高双折射微结构纤芯光子晶体光纤的可调谐超连续谱的特性研究

Experimental and numerical study of tuneable supercontinuum generation in new kind of highly birefringent photonic crystal fiber

物理学报. 2017, 66(9): 094204 <https://doi.org/10.7498/aps.66.094204>

基于表面等离子体共振和定向耦合的D形光子晶体光纤折射率和温度传感器

D-shaped photonic crystal fiber refractive index and temperature sensor based on surface plasmon resonance and directional coupling

物理学报. 2015, 64(22): 224221 <https://doi.org/10.7498/aps.64.224221>

基于少模光纤的全光纤熔融模式选择耦合器的设计及实验研究

Design and experimental study of mode selective all-fiber fused mode coupler based on few mode fiber

物理学报. 2015, 64(20): 204207 <https://doi.org/10.7498/aps.64.204207>

# 基于高折射率液体填充的花瓣形微结构 光纤可调滤模特性\*

戴震飞<sup>1)</sup> 姜文帆<sup>1)</sup> 王玲<sup>1)2)</sup> 陈明阳<sup>1)2)</sup>† 高永锋<sup>1)</sup> 任乃飞<sup>1)</sup>

1) (江苏大学光电子与通信技术研究院, 镇江 212013)

2) (江苏天兴光电科技有限公司, 镇江 212132)

(2018年10月23日收到; 2019年1月23日收到修改稿)

提出一种新型的可调滤模光纤结构, 利用纤芯模式与微结构包层形成的超模群之间的耦合实现选择性滤模, 采用花瓣形包层结构使包层中传输的模式更容易产生高的泄漏损耗; 提出以液体填充包层介质柱, 使包层形成的超模群有效折射率区间可以通过环境温度来调节, 从而达到可调选择性滤模目的. 利用液体柱的 $LP_{11}$ 模所形成的超模群, 有效增大了其工作带宽和温度调谐范围. 数值模拟结果表明, 采用长度仅为71.4 mm的滤模光纤, 可以使特定的抑制模式损耗达到20 dB以上, 而其他模式损耗均在1 dB以下. 提出的光纤可以在少模光纤传输系统中作为滤模器使用, 以降低模式转换器、复用器/解复用器以及光开关和光路由等的模式串扰.

**关键词:** 微结构光纤, 超模, 液体填充, 模式滤除, 损耗

**PACS:** 42.79.Ci, 42.79.Sz, 42.81.-i, 42.81.Qb

**DOI:** 10.7498/aps.68.20181890

## 1 引言

单模光纤的信息容量通过时分复用、波分复用、偏振复用等技术获得了极大的提高, 已经接近于极限. 近年来, 采用多芯光纤<sup>[1]</sup>、少模光纤<sup>[2]</sup>, 以不同的模式传输不同的信息的方法, 即所谓的模分复用技术<sup>[3]</sup>, 可以成倍地提高光纤的传输容量<sup>[4]</sup>. 而波分复用中密集波分复用已成为长途光信号传输的关键技术<sup>[5]</sup>. 波长可调的滤波器, 利用连续改变谐振腔腔长的方法实现波长的选择和分配成为了重要配置<sup>[6]</sup>. 同样, 在模分复用系统中也应该存在可调模式的滤模器作为重要配置.

滤模器主要工作方式有: 模式转换滤除和直接滤除. 模式转换主要是利用波导结构使模式之间进

行转换<sup>[7-9]</sup>, 但是结构相对复杂并且模式间依然存在串扰. 直接滤模的方法近几年有着更多的关注和研究. 利用低阶模的弯曲损耗较小, 而高阶模的弯曲损耗较大的特点, 通过弯曲的方法, 可以使光纤中的某个或某些高阶模产生大的损耗, 从而实现滤模. 但如果想要滤除基模或低阶模而保留高阶模, 则难以用这种方法实现. 基于以上原因利用多芯光纤<sup>[10,11]</sup>、双光纤耦合<sup>[12-14]</sup>和带隙光纤<sup>[15]</sup>来实现不同模式的滤除, 成了滤模的重要结构. 近年来, 基于上述结构又有了新的发展. 基于单模光纤与少模光纤耦合, 级联组成的双芯级联光纤可以实现多模式分离<sup>[16]</sup>, 但需要传输的高阶模损耗过大. 新型多芯光子灯笼可实现多种模式分离与复用<sup>[17-19]</sup>, 但模场形变严重. 基于以上问题, 利用带隙光纤 (photonic bandgap fibers, PBF) 进行滤模成了新

\* 镇江市重点研发计划 (产业前瞻与共性关键技术)(批准号: GY2015033) 和江苏大学镇江市先进感知材料与器件高技术研究重点实验室 (批准号: SS2018001) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [miniyoung@163.com](mailto:miniyoung@163.com)

的结构选择, 但普通带隙一般较窄, 导致其对高阶模的束缚能力较弱, 因而高阶模的泄漏损耗也往往很大<sup>[15]</sup>. 2016年Chen和Chiang<sup>[20]</sup>提出新型固体带隙光纤滤膜结构, 可以有效滤除基模保留高阶模, 但滤膜损耗不够大并且无法在线调控更改滤膜对象.

近年来, 基于液体填充的微结构光纤 (microstructures optical fiber, MOF) 获得了广泛的关注<sup>[21]</sup>, 通过改变外界物理场, 如温度、电场、磁场<sup>[22]</sup>等方法, 可以对填充液体的导光特性 (如折射率等) 进行控制, 从而实现可调谐的光纤光子器件, 其应用包括传感、光开关、光路由等. 2016年液芯高折射率光纤光栅的提出<sup>[23]</sup>, 实现了利用液芯调控实现在线热编程, 但是液芯传输损耗过大.

本文提出一种基于PBF结构的可调滤模器, 改变包层结构, 增大了滤模效率, 并通过在微结构介质柱中填充液体, 利用温度作为外界物理场, 使液体折射率发生改变, 从而实现对光纤中传导模式的选择.

## 2 光纤的结构以及工作原理

图1为提出的花瓣形带隙结构光纤. 其中, 纤芯折射率高于其周围的背景材料折射率. 周围为微结构包层, 其中周期性地排列着三层介质柱, 柱中填充液体材料, 其折射率高于纤芯折射率. 液体柱之间模式的耦合形成超模群. 微结构包层外侧为外包层, 其折射率高于液体介质柱中模式的有效折射率, 从而破坏超模群的传输, 形成强泄漏模式. 若纤芯中特定模式的有效折射率与超模群相近, 则其

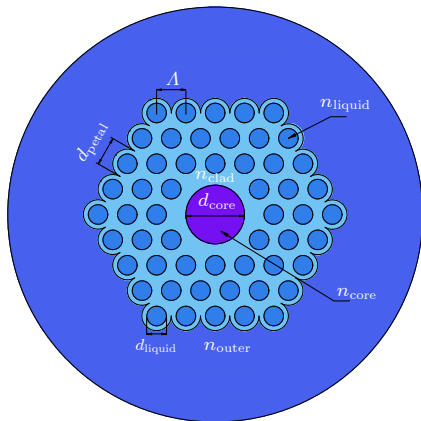


图1 花瓣形 MOF 结构

Fig. 1. Petal-shape structure of MOF.

将与超模群发生耦合, 进而形成强的泄漏损耗, 从而实现滤模的目的<sup>[24–26]</sup>. 通过调节液体的折射率, 可改变超模群的有效折射率区间, 从而达到选择性滤模的目的<sup>[27]</sup>.

图1中结构参数选择如下: 纤芯折射率  $n_{\text{core}} = 1.464$ , 纤芯直径  $d_{\text{core}} = 14 \mu\text{m}$ , 纤芯周围的背景材料折射率  $n_{\text{clad}} = 1.45$ , 处于  $1450\text{--}1650 \text{ nm}$  波长时, 其可以支持  $\text{LP}_{01}$ ,  $\text{LP}_{11}$ ,  $\text{LP}_{21}$ ,  $\text{LP}_{02}$  四种模式的传输. 液体柱的周期  $\Lambda = 7.75 \mu\text{m}$ , 直径  $d_{\text{liquid}} = 4.65 \mu\text{m}$ , 其折射率初始值设为  $n_{\text{liquid}} = 1.4927$ ,  $\delta = 7.75 \mu\text{m}$ . 为增强液体模式的泄漏损耗, 外包层应尽量与液体柱接近. 为此, 这里将包围最外层液体柱的背景材料层的宽度设置为  $(\delta - d_{\text{liquid}})/2$ , 即有  $d_{\text{petal}} = \delta$ , 形成类似于花瓣形结构. 设入射波长  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ . 外包层折射率设为  $n_{\text{outer}} = 1.49$ , 以保证其折射率高于液体柱中模式的有效折射率.

这里主要通过耦合来实现模式的滤除, 下面简单阐述下耦合的原理.

两根平行光纤中平行传播 a 模式和 b 模式<sup>[28]</sup>. 定义振幅的  $|A(z)|^2$ ,  $|B(z)|^2$  和 a, b 两种模式能量值相同. 根据能量守恒定律:

$$\frac{d}{dz} (|A|^2 + |B|^2) = 0, \quad (1)$$

边界条件:

$$b(0) = B_0, \quad a(0) = 0, \quad (2)$$

证明<sup>[29]</sup> 耦合系数  $K_{ab}$  和  $K_{ba}$  关系:

$$K_{ab} = -K_{ba}. \quad (3)$$

根据本征模式公式和 (1)–(3) 式可得:

$$A(z) = B_0 \frac{2K_{ab}}{(4K^2 + \Delta^2)^{1/2}} e^{-i\Delta z/2} \times \sin \left[ 0.5(4K^2 + \Delta^2)^{1/2} z \right], \quad (4)$$

$$B(z) = B_0 e^{-i\Delta z/2} \left\{ \cos \left[ 0.5(4K^2 + \Delta^2)^{1/2} z \right] - i \frac{2K_{ab}}{(4K^2 + \Delta^2)^{1/2}} \sin \left[ 0.5(4K^2 + \Delta^2)^{1/2} z \right] \right\}, \quad (5)$$

$K^2 = |K_{ab}|^2$  在相位匹配条件  $\Delta = 0$  时, 模式 a, b 完整能量交换发生在  $\pi/(2K)$  周期.

(4) 式、(5) 式简化为

$$a(z, t) = B_0 \frac{K_{ab}}{K} e^{i(\omega_a t - \beta \alpha)} \sin(Kz),$$

$$b(z, t) = B_0 e^{i(\omega_b t - \beta \alpha z)} \cos(Kz). \quad (6)$$

相位不匹配时, 模式功率交换忽略不计, 相位匹配时, 进一步考虑模式之间功率交换比率. 实际应用中, 模式折射率接近或相等, 产生模式匹配, 耦合发生.

这里采用有限元法分析光纤的模式传输特性. 图 2 给出了纤芯模式的有效折射率和微结构包层的超模群区间. 超模群区间为超模群中最低阶模式的有效折射率的和最高阶模式的有效折射率形成的区间. 由于单个液体柱本身可支持 LP<sub>01</sub>, LP<sub>11</sub> 模的传输, 其超模群也因此分为两个区间, 折射率较高的区间是液体柱中为 LP<sub>01</sub> 模时, 耦合形成的超模群区间. 而折射率较低的区间是柱中为 LP<sub>11</sub> 模时, 耦合形成的超模群区间. 在所示波长区间, LP<sub>11</sub> 模所形成的超模群区间内, 模式数量超过 50 个模式. 因而, 若纤芯中某个模式的有效折射率落入此区间, 则其将与某个或多个超模发生耦合, 从而发生模式泄漏. 由图 2 可知, 根据前述结构参数, 在 1535—1605 nm 波长处, 纤芯的 LP<sub>01</sub> 模处于 LP<sub>11</sub> 超模群区间时, 将与包层超模发生耦合.

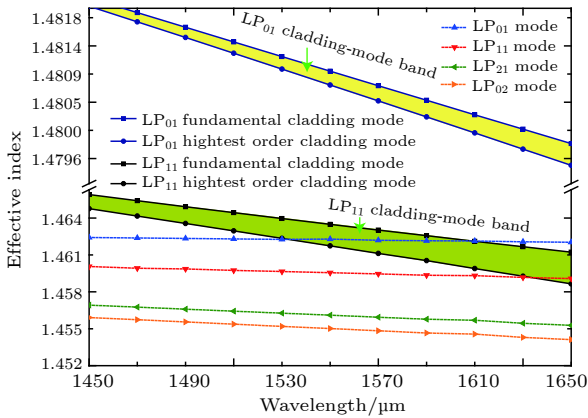


图 2  $n_{\text{core}} = 1.464$  时, 图 1 中 MOF 的纤芯 4 种模式和 2 个包层超模群区间的色散特性

Fig. 2. Dispersion characteristics of the two cladding super-mode band and the four core modes for the MOF shown in Fig.1, when  $n_{\text{core}} = 1.464$ .

图 3 为入射波长  $\lambda = 1550 \text{ nm}$  时, 纤芯中 LP<sub>01</sub>, LP<sub>11</sub>, LP<sub>21</sub> 和 LP<sub>02</sub> 模的模场分布图. 由图 3 可见, 此时, 纤芯 LP<sub>01</sub> 模与 LP<sub>11</sub> 超模群发生耦合. 利用 LP<sub>11</sub> 模的模场在包层扩展更显著的特点, 超模群与纤芯 LP<sub>01</sub> 模的耦合更加强烈, 从而增大其泄漏

损耗. 由于有效折射率与超模群折射率不匹配, 其他纤芯模式仍保持在纤芯中传输, 其模场分布形式与常规 PBF 相似. 计算得到四个模式的泄漏损耗分别为 488.9, 0.015, 0.00743 dB/m 和 0.0168 dB/m, 可见, 此结构可有效滤除 LP<sub>01</sub> 模.

这里通过改变液体折射率的方法, 来实现滤除纤芯其他模式. 设液体为甲苯, 光纤基质材料为二氧化硅. 利用室温 (20 °C) 情况下的塞耳迈耶尔方程 [30,31], 得到甲苯折射率 ( $n_t$ ) 和二氧化硅折射率 ( $n_s$ ):

$$n_t = 1.474775 + \frac{0.0699031\lambda^2 + 2.1776 \times 10^{-4}}{\lambda^4}, \quad (7)$$

$$n_s = 1 + \frac{0.6961663\lambda^2}{\lambda^2 - (0.0684043)^2} + \frac{0.4079426\lambda^2}{\lambda^2 - (0.1162414)^2} + \frac{0.8974794\lambda^2}{\lambda^2 - (9.896161)^2}, \quad (8)$$

在宽波段 1450—1650 nm 时, 可以得出甲苯折射率变化在 0.003 以内, 二氧化硅折射率变化在 0.0002 以内. 相比于二氧化硅, 甲苯的折射率随波长变化更为显著. 为了得到外界温度场变化条件下的光纤模式传输特性, 我们需要了解两种材料的折射率与温度的变化关系, 由文献 [32] 可得:

甲苯折射率与温度关系

$$n_t = \left[ n_t|_{T=20^\circ\text{C}} + \frac{dn_t}{dT} \times (T - 20) \right], \quad (9)$$

甲苯热光系数

$$dn_t/dT = -5.273 \times 10^{-4}, \quad (10)$$

二氧化硅折射率与温度关系

$$n_s = n_s|_{T=20^\circ\text{C}} + \frac{dn_s}{dT} \times (T - 20), \quad (11)$$

二氧化硅热光系数

$$dn_s/dT \approx -4 \times 10^{-6}. \quad (12)$$

由 (9)—(12) 式可知, 温度对二氧化硅折射率的热光系数要比甲苯的低两个数量级. 利用上述方程, 得到两种材料的折射率随温度变化. 在 20—65 °C 范围内, 溶液折射率可以实现从 1.505 线性减小到 1.4805. 因而, 改变温度即可以在纤芯模式有效折射率基本不变的情况下, 使包层超模群区间移动, 进而实现对不同模式的滤除.

由图 4 可见, 液体柱折射率改变后, 其超模群区间也发生改变, 选择不同的液体折射率, 即使

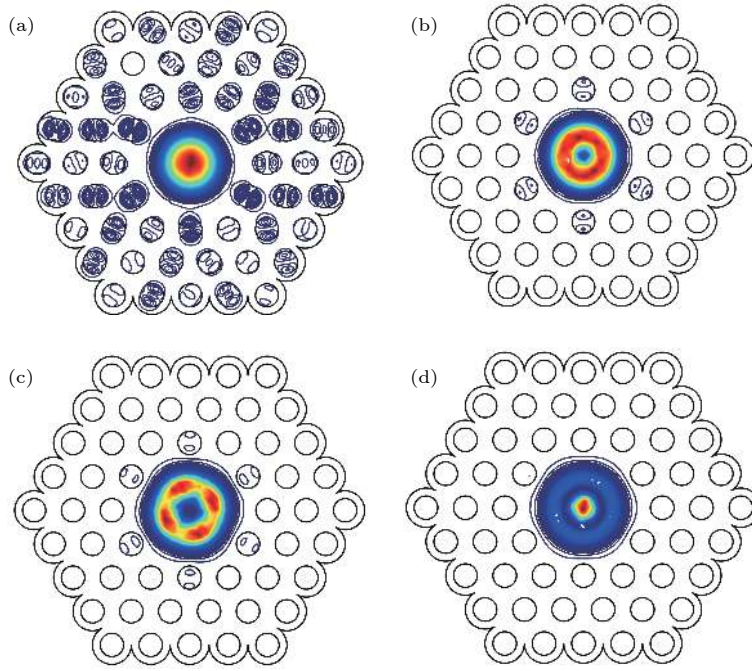


图 3 波长  $\lambda = 1550 \text{ nm}$  时, 纤芯模式的模场分布图 (a)  $\text{LP}_{01}$  模; (b)  $\text{LP}_{11}$  模; (c)  $\text{LP}_{21}$  模; (d)  $\text{LP}_{02}$  模

Fig. 3. Field distributions of the core-mode at the wavelength  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ : (a) The  $\text{LP}_{01}$  mode; (b) the  $\text{LP}_{11}$  mode; (c) the  $\text{LP}_{21}$  mode; (d) the  $\text{LP}_{02}$  mode.

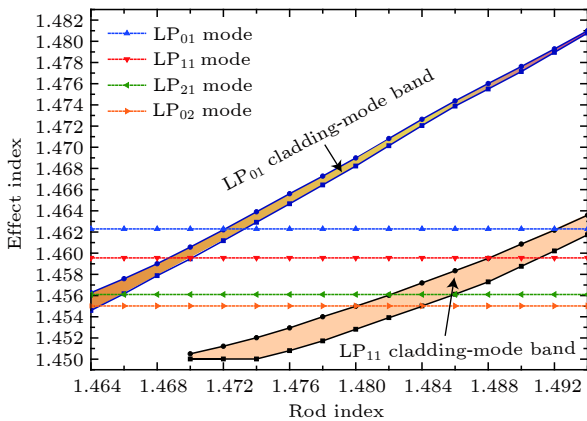


图 4 波长 1550 nm 时, 超模群区间随液体介质柱折射率 (温度) 变化曲线

Fig. 4. Variation of super-mode band with liquid-rod index change at the wavelength 1550 nm.

不同的纤芯模式落入超模群区间. 图 4 所对应的折射率区间为甲苯在 20—65 °C 范围内的折射率变化范围, 因此调整温度即可实现对不同模式的滤除.

考虑到液体吸收的影响, 通过透光率公式<sup>[33]</sup>

$$\alpha = 10 \lg(1 - T), \quad (13)$$

可以计算出液体介质柱的吸收损耗. 图 5 分别给出入射波长  $\lambda = 1550 \text{ nm}$  时, 考虑和不考虑液体吸收损耗时纤芯  $\text{LP}_{01}$  模式和  $\text{LP}_{11}$  的损耗曲线. 可见液体吸收损耗对高损耗的模式影响较小, 而对低损耗

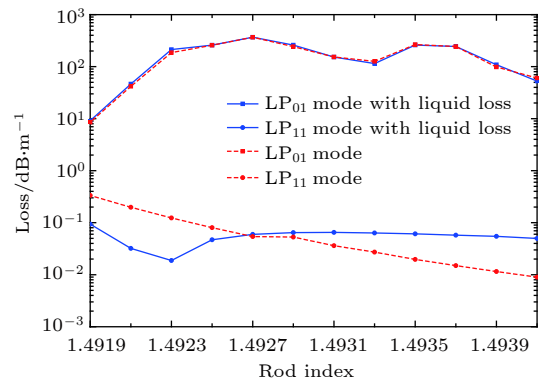


图 5 考虑和不考虑液体吸收损耗两种情况下的纤芯  $\text{LP}_{01}$  模和  $\text{LP}_{11}$  模损耗曲线

Fig. 5. Variation of the core-mode  $\text{LP}_{01}$  mode and  $\text{LP}_{11}$  mode loss with and without liquid absorption loss.

的模式影响较大. 为此, 在后面的模式损耗分析中, 均包含液体吸收损耗.

### 3 性能分析

#### 3.1 可调谐滤模的性能分析

以上已经阐述了滤模光纤的结构和选择性滤模的原理, 下面我们分析其传输性能. 根据图 4 结果, 可以得到纤芯四种模式单独处于超模群区间时, 液体柱折射率范围. 其对应的损耗曲线如图 6

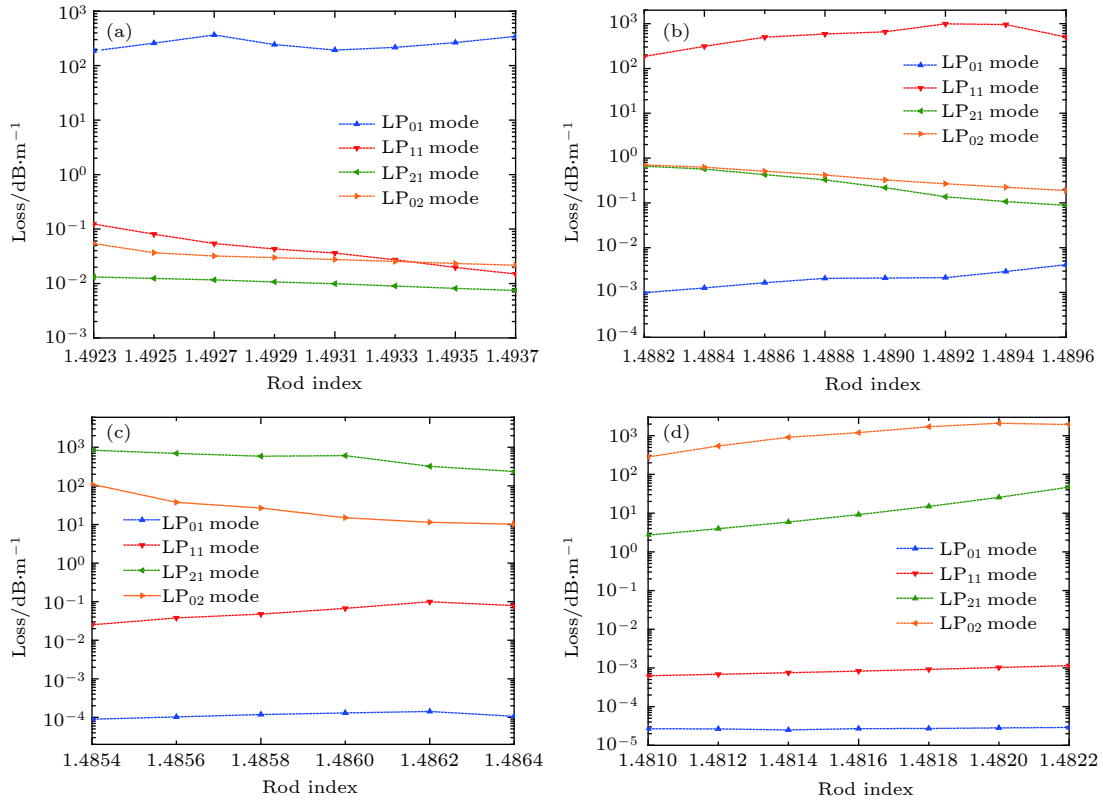

 图 6 纤芯四种模式单独处于超模群区间时损耗曲线 (a)  $LP_{01}$  模; (b)  $LP_{11}$  模; (c)  $LP_{21}$  模; (d)  $LP_{02}$  模

Fig. 6. The loss of single core-mode on the super-mode band: (a) The  $LP_{01}$  mode; (b) the  $LP_{11}$  mode; (c) the  $LP_{21}$  mode; (d) the  $LP_{02}$  mode.

所示. 当  $LP_{01}$ ,  $LP_{11}$  模分别处于超模群区间时, 其损耗可达 300 dB/m 以上, 而其他模式损耗低于 1 dB/m, 因而可实现有效滤模. 而  $LP_{21}$  和  $LP_{02}$  模虽然在分别处于超模群区间时, 损耗更大, 可达 380 dB/m 以上, 但是由于两种模式的有效折射率比较接近, 因而在滤除一个模式的同时, 也会使另一模式发生一定的损耗. 例如, 当液体折射率为 1.4860—1.4864 时,  $LP_{02}$  模损耗小于 14 dB/m, 而当液体折射率为 1.4810—1.4816 时,  $LP_{21}$  模损耗小于 9 dB/m. 根据图 4 和图 6, 我们可以得出四种模式抑制区间的温度改变量都在 4 K 左右, 滤模器的工作温度范围比较大, 因而有较大的容差, 利于实际操作.

为了得到工作带宽, 我们分别选取液体折射率为 1.4927, 1.4892, 1.486 和 1.4812 从而分别滤除  $LP_{01}$  模、 $LP_{11}$  模、 $LP_{21}$  模和  $LP_{02}$  模. 这里液体折射率的选择兼顾了抑制模式的损耗须足够大、其他模式损耗又比较低的要求. 四种纤芯模式的损耗曲线如图 7 所示. 为了实现有效滤模, 要求抑制模式的损耗应不小于 20 dB, 而其他模式的损耗均小于

1 dB. 可以得出, 在工作波长为 1540—1555 nm 时, 抑制模式的损耗都可以达到 280 dB/m 以上, 同时其他模式的损耗都低于 14 dB/m. 因此, 滤模光纤的长度可以做到仅为 71.4 mm, 便于制备和集成.

级联所提出的结构, 就可实现 3 种模式滤除, 保留单一需要传输的模式.

### 3.2 两种包层结构和性能对比

本文提出花瓣形包层结构, 以增大纤芯模式损耗, 减小光纤长度. 为此, 我们对比了介质柱折射率  $n_{rod} = 1.4937$  时, Chen 和 Chiang<sup>[20]</sup> 提出的圆形外包层结构光纤与本文提出的花瓣结构光纤的损耗情况. 为了便于对比, 除外包层形状外, 其他结构参数均相同. 图 8(a) 为圆形外包层结构的  $LP_{01}$  模场分布, 图 8(b) 为花瓣结构光纤的  $LP_{01}$  模场分布.

四种模式损耗的对比如图 9 所示. 从图 9(a) 中可以看出, 花瓣结构的损耗明显更大. 特别地, 其  $LP_{01}$  模的损耗在波长为 1550 nm 时比圆形结构大 100 倍, 达到了 488 dB/m. 在 1550 nm 波长

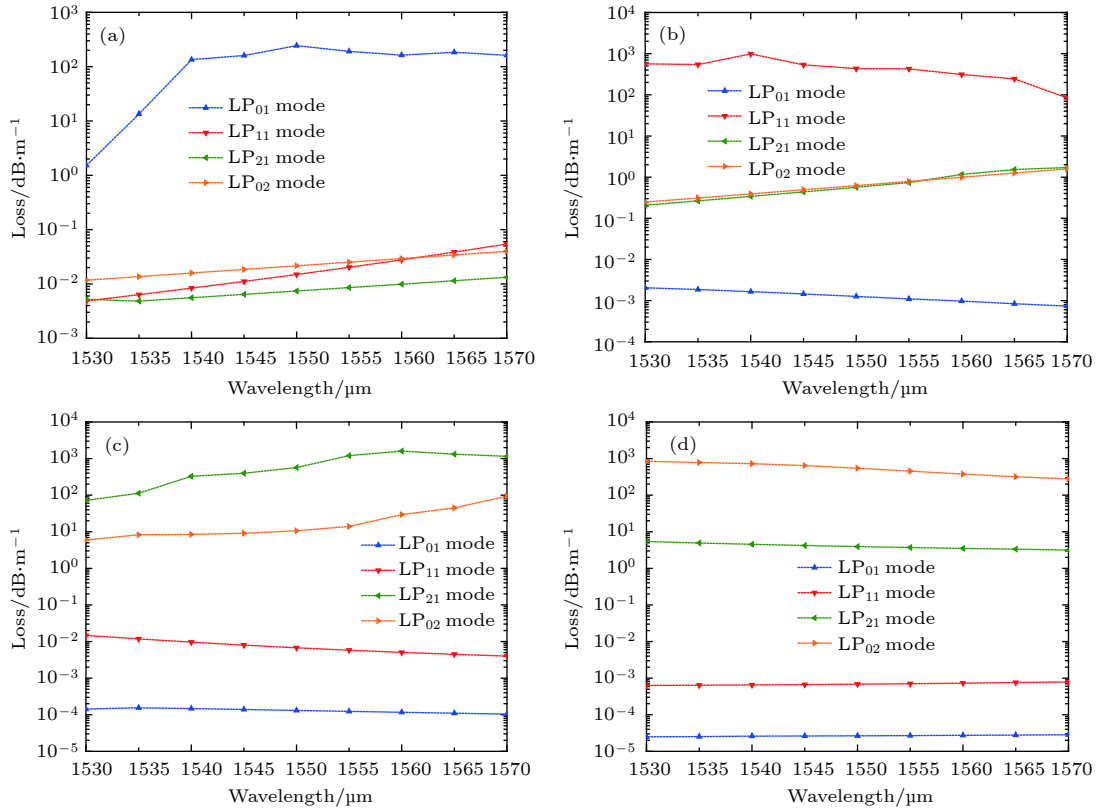


图 7 不同液体折射率时, 四种纤芯模式的损耗曲线 (a)  $n_{\text{liquid}} = 1.4937$ ; (b)  $n_{\text{liquid}} = 1.4892$ ; (c)  $n_{\text{liquid}} = 1.486$ ; (d)  $n_{\text{liquid}} = 1.4812$

Fig. 7. The loss of four core-mode with various liquid index: (a)  $n_{\text{liquid}} = 1.4937$ ; (b)  $n_{\text{liquid}} = 1.4892$ ; (c)  $n_{\text{liquid}} = 1.486$ ; (d)  $n_{\text{liquid}} = 1.4812$ .

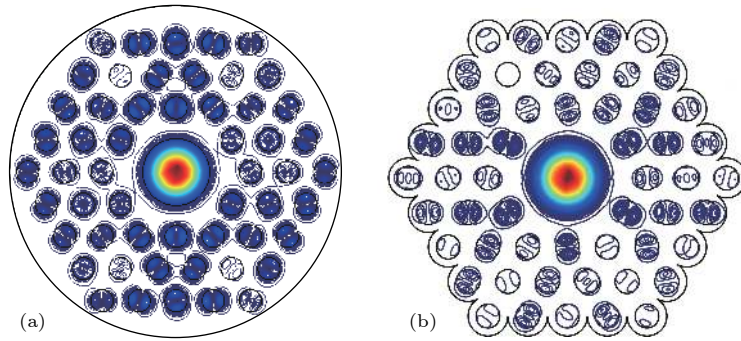


图 8 不同结构光纤的  $LP_{01}$  模的模场分布 (a) 圆形结构; (b) 花瓣结构

Fig. 8. Field distributions of  $LP_{01}$  mode with various circle structures: (a) Circle structure; (b) petal-shape structure.

处,  $LP_{01}$  模的损耗最大, 而  $LP_{21}$  模的损耗最小, 对于花瓣结构和圆形结构光纤, 两者的损耗比分别为 65066:1, 60003:1. 可见, 采用花瓣结构可以在保证抑制模式和其他模式保持足够大的损耗差情况下, 有效减小光纤的长度, 有利于液体介质的填充和温度控制.

### 3.3 两种包层超模群性能对比

本文以液体柱的  $LP_{11}$  模所形成的超模群作为

耦合区间. 下面分析其与  $LP_{01}$  模所形成超模群区间的不同之处.

如图 4 所示,  $LP_{11}$  模所形成的超模群区间更宽, 同时其超模的斜率曲线更小. 以纤芯  $LP_{01}$  模传输为例, 使其分别处于两种超模群区间, 对比损耗.  $LP_{01}$  超模群区间设置  $n_{\text{liquid}} = 1.472$ ,  $LP_{11}$  超模群区间设置  $n_{\text{liquid}} = 1.492$ , Loss-band 为当取光纤长度为 71.4 mm 时, 抑制模式损耗达到 20 dB 时

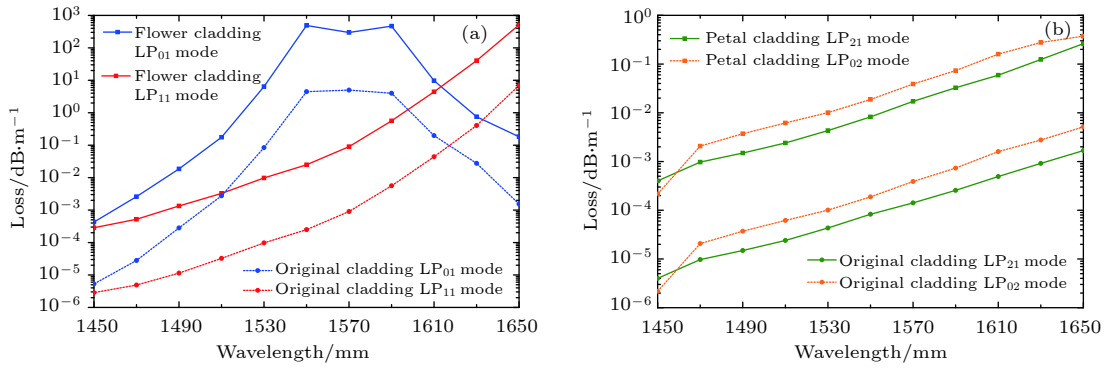


图9 两种MOF的模式损耗对比 (a)  $LP_{01}$ 模和 $LP_{11}$ 模损耗曲线; (b)  $LP_{21}$ 模和 $LP_{02}$ 模曲线

Fig. 9. Loss of two MOF: (a) Loss band of the  $LP_{01}$  mode and  $LP_{11}$  mode; (b) loss band of the  $LP_{21}$  mode and  $LP_{02}$  mode.

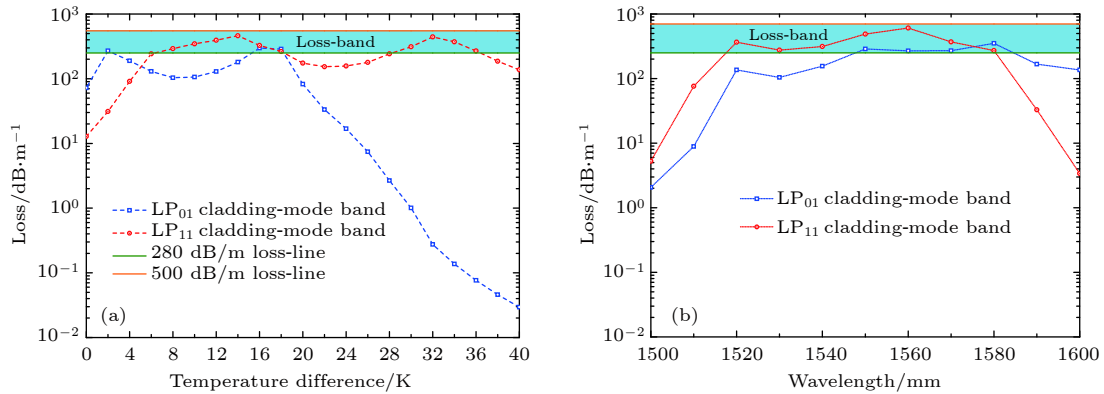


图10 纤芯  $LP_{01}$ 模式在双超模群时的两种超模群区间  $LP_{01}$ 模损耗 (a) 波长为1550 nm, 温度改变量相同; (b) 温度相同, 波长改变

Fig. 10. Dependence of the loss of the core  $LP_{01}$  mode locating in different two super-mode region: (a) With same temperature variation at wavelength 1550 nm; (b) with various wavelength at the same temperature.

所对应的工作区间. 如图10所示, 相比于介质柱  $LP_{01}$ 模所形成的超模群区间, 介质柱  $LP_{11}$ 模所形成的超模群区间可以在更宽的温度和波长范围内实现对纤芯  $LP_{01}$ 模式的滤除. 其主要原因是,  $LP_{11}$ 模的能量耦合进包层中更多, 因而更容易与相邻介质柱的模式发生耦合.

#### 4 总结

我们提出一种新型的可调滤模MOF, 利用纤芯模式与微结构包层模式之间的耦合实现选择性滤模, 采用花瓣形包层, 使包层中传输的模式更易产生高的泄漏损耗. 以液体填充包层介质柱, 使包层形成的超模群有效折射率区间可以通过改变环境温度来调节. 利用液体柱的  $LP_{11}$ 模所形成的超模群有效增大了其工作带宽和温度调节范围. 提出的光纤可以在少模光纤传输系统中作为滤模器, 以解决模式转换器、复用器/解复用器以及光开关和

光路由等的模式串扰问题, 并可实现在线可调滤除模式, 进而实现特定模式信号的下载与上传.

#### 参考文献

- [1] Turukhin A, Sinkin O V, Batshon H G, Zhang H, Sun Y, Mazurczyk M, Davidson C R, Cai J X, Bolshtyansky M A, Foursa D G, Pilipetskii A 2016 *Proceedings of Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC 2016)* Anaheim, California, USA. March 20–24, 2016
- [2] Hong X, Zeng X, Li Y, Mo Q, Tian Y, Li W, Liu Z, Wu J 2016 *Appl. Opt.* **55** 9360
- [3] Yao X C, Zhang M M, Tang M, Sheng P, Liu D M 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 144215 (in Chinese) [姚殊畅, 张敏明, 唐明, 沈平, 刘德明 2013 *物理学报* **62** 144215]
- [4] Koebele C, Salsi M, Sperti D, Tran P, Brindel P, Mardoyan H, Bigo S, Boutin A, Verluise F, Sillard P, Astruc M, Provost L, Cerou F, Charlet G 2011 *Opt. Express* **19** 16593
- [5] Sarmiento S, Altabas J A, Izquierdo D, Garcés I, Spadaro S, Lazaro J A 2017 *J. Opt. Commun. Netw.* **9** 1116
- [6] Ramachandran S, Fini J M, Mermelstein M, Nicholson J W, Ghalimi S, Yan M F 2008 *Laser Photon. Rev.* **2** 429
- [7] Driscoll J B, Grote R R, Southan B, Dadap J I, Lu M, Osgood R M 2013 *Opt. Lett.* **38** 1854



- [8] Nobutomo H, Kuimasa S, Taiji S, Takashi M, Kyoza T, Masanori K, Fumihiko 2013 *Opt. Express* **21** 25752
- [9] Riesen N, Love J D 2012 *Appl. Opt.* **51** 2778
- [10] Saitoh F, Saitoh K, Koshiba M 2010 *Opt. Express* **18** 4709
- [11] Yu C P, Liou J H, Chiu Y J, Taga 2011 *Opt. Express* **19** 12673
- [12] Tsekrekos C P, Syvridis, 2012 *IEEE Photonic Tech. L.* **24** 1638
- [13] Chang S H, Chung H S, Ryf R, Fontaine N K, Han C, Park K J, Kim K, Lee J C, Lee J H, Kim B Y, Kim Y K 2015 *Opt. Express* **23** 7164
- [14] Chang S H, Moon S R, Chen H, Fontaine N K, Park K J, Kim K, Lee J K 2017 *Opt. Express* **25** 5734
- [15] Pureur V, Knight J C, Kuhlmeier B T 2010 *Opt. Express* **18** 8906
- [16] Park K J, Song K Y, Kim Y K, Lee J H, Kim B Y 2016 *Opt. Express* **24** 3543
- [17] Yerolatsitis S, Harrington K, Thomson R R, Birks T A 2017 *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC 2017)* Los Angeles, California, USA. March 19–23
- [18] Velazquez-Benitez A M, Alvarado J C, Lopez-Galmiche G, Antonio-Lopez J E, Hernandez-Cordero J, Sanchez-Mondragon J, Sillard P, Okonkwo C M, Amezcua-Correa R 2015 *Opt. Lett.* **40** 1663
- [19] Sai X, Li Y, Yang C, Li W, Qiu J, Hong X, Zuo Y, Guo H, Tong W, Wu J 2017 *Opt. Lett.* **42** 4355
- [20] Chen M Y, Chiang K S 2016 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **22** 4900307
- [21] Yao J Q, Wang R, Miao Y P, Lu Y, Zhao X L, Jin L 2013 *Chinese J. Lasers* **40** 0101002 (in Chinese) [姚建铨, 王然, 苗银萍, 陆颖, 赵晓蕾, 景磊 2013 中国激光 **40** 0101002]
- [22] Wu Q, Guo X C, Shi W H 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 184212 (in Chinese) [吴倩, 郭晓晨, 施伟华 2018 物理学报 **67** 184212]
- [23] Qi T, Jung Y, Xiao L, Wang J, Xiao S, Lu C, Tam H Y, Peacock A C 2016 *Opt. Lett.* **41** 4763
- [24] Cheng L, Luo X, Wei H F, Li H Q, Peng J G, Dai N L, Li J Y 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 074210 (in Chinese) [程兰, 罗兴, 韦会峰, 李海清, 彭景刚, 戴能利, 李进延 2014 物理学报 **63** 074210]
- [25] Stone J M, Pearce G J, Luan F, Birks T A, Knight J C, George A K, Bird D M 2006 *Opt. Express* **14** 6291
- [26] Argyros A, Birks T A, Leon-Saval S G, Cordeiro C M B, Russell P S 2005 *Opt. Express* **13** 2503
- [27] Park J, Kang D E, Paulson B, Nazari T, Oh K 2014 *Opt. Express* **22** 17320
- [28] Dimitropoulos D, Houshmand B, Claps R, Jalali B 2003 *Opt. Lett.* **28** 1954
- [29] Poon J, Istrate E, Allard M, Sargent E H 2003 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **39** 778
- [30] Samoc A 2003 *J. Appl. Phys.* **94** 6167
- [31] Zhang R, Teipel J, Giessen H 2006 *Opt. Express* **14** 6800
- [32] Couris S, Renard M, Faucher O, Lavorel B, Chaux R, Koudoumas E, Michaut X 2003 *Chem. Phys. Lett.* **369** 318
- [33] Liu Y Q, Guo Z Y, Zhang Y, Chiang K S, Dong X Y 2000 *Electron. Lett.* **36** 56

# Tunable mode-selective characteristics of a mode-filter petal-fiber with liquid rods<sup>\*</sup>

Dai Zhen-Fei<sup>1)</sup> Jiang Wen-Fan<sup>1)</sup> Wang Ling<sup>1)2)</sup> Chen Ming-Yang<sup>1)2)†</sup>  
Gao Yong-Feng<sup>1)</sup> Ren Nai-Fei<sup>1)</sup>

1) (*Institute of Opt-Electronics and Communication Technologies, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China*)

2) (*Jiangsu Tian Xing Optoelectronics Technology Co. Ltd., Zhenjiang 212132, China*)

( Received 23 October 2018; revised manuscript received 23 January 2019 )

## Abstract

In this paper, a novel tunable mode-filter optical fiber consisting of a high-index core and petal-shaped cladding surrounded by a high-index outer ring is proposed. The cladding of the fiber is formed with periodically arranged liquid rods that support cladding modes with effective indexes. These cladding modes form a two-super-mode group. The mode-selection is realized by the coupling between the core mode and the super-mode group. With the petal-shaped cladding, cladding mode can be transmitted at high loss. With the liquid rods, the index-band of super-mode group can be adjusted by external temperature field, thereby achieving the purpose of tunable mode-selective. The super-mode group formed by the  $LP_{11}$  mode of the liquid rods effectively increases its operating bandwidth and temperature tuning range. The numerical simulation results show that the mode-filter fiber with a length of only 71.4 mm can achieve a particular mode loss more than 20 dB, while other modes' losses are below 1 dB. This special fiber can be used as a mode-filter in the few-mode fiber transmission system to reduce mode crosstalk of converters, multiplexer/demultiplexer, optical switch and optical routing.

**Keywords:** micro-structure optical fiber, super-mode, liquid rods, mode-filter, loss

**PACS:** 42.79.Ci, 42.79.Sz, 42.81.-i, 42.81.Qb

**DOI:** 10.7498/aps.68.20181890

---

<sup>\*</sup> Project supported by the Key Research and Development Projects (Industry Foresight and Common Key Technologies) of Zhenjiang, China (Grant No. GY2015033) and the Zhenjiang Key Laboratory of Advanced Sensing Materials and Devices, Jiangsu University, China (Grant No. SS2018001).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [miniyoung@163.com](mailto:miniyoung@163.com)