

文章编号:1004-4213(2011)11-1677-5

# 掺染料微结构光纤荧光传感器的理论分析

李炳新, 邱慧

(燕山大学 信息科学与技术学院, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要:**针对一般光纤荧光传感器收集荧光能力不足的缺陷,设计了一种在微结构聚合物光纤的空气孔内填充掺有机染料高折射率液体的荧光传感器.使用可调节边界条件傅里叶分解法计算了这种微结构光纤的模场分布,分析了光纤结构参量和液体折射率对荧光捕获分数的影响,结果表明,使用小纤芯半径和高于纤芯折射率的液体可以增强激发光的吸收效率,增大荧光捕获分数,提高光纤荧光传感器的灵敏度.

**关键词:**荧光传感器;荧光捕获分数;微结构光纤;功率分数

**中图分类号:** TN253; TP212

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3788/gzxb20114011.1677

## 0 引言

荧光传感器是通过测量荧光信息来检测荧光材料与被测对象之间的相互作用.荧光传感器具有灵敏度高、选择性强、测量快速等优点<sup>[1]</sup>,在化学、生物等传感领域受到广泛的关注.

微结构光纤(Microstructured Optical Fiber, MOF)又称为光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber, PCF)<sup>[2-4]</sup>,其结构特点是空气孔贯穿整个光纤长度且有规律分布.由于微结构光纤空气孔中允许注入液体或气体<sup>[5-6]</sup>,且其光学特性能够被精确地控制<sup>[7]</sup>,所以基于微结构光纤荧光传感器是一种新型的光纤传感器,在生物化学传感领域中得到广泛的应用<sup>[8]</sup>.近十年来,国内外对微结构荧光传感器进行了许多研究,如使用掺杂纳米粒的光纤,收集荧光<sup>[9]</sup>;采用方向盘式微结构光纤,在消逝波传感中获得较高的模场重叠率<sup>[5,7]</sup>;使用空芯多孔微结构光纤,检测染料浓度与荧光的关系<sup>[10]</sup>;利用多孔微结构聚合物光纤,检测荧光标记的目标抗体<sup>[11]</sup>、DNA和生物细胞<sup>[12]</sup>;使用微结构荧光传感器,检测不同PH值对荧光强度的影响<sup>[13]</sup>等,但是这些光纤在短距离内收集荧光的能力都很弱.

本文设计分析了一种新型的微结构聚合物光纤(Microstructured Polymer Optical Fiber, MPOF),其内部空气孔中注入掺有机染料的液体.通过改变纤芯半径和液体的折射率,可获得较高的荧光捕获率(Fluorescence Capture Fraction, FCF).这种结构的传感器可以在很短的光纤长度内,实现荧光的

高效收集与传输,有效地提高了荧光传感器的灵敏度.

## 1 荧光传感器理论

多数荧光传感器荧光的产生源于激发光的激发,激发光在光纤内传输时,其模式场在传感区域的功率分布决定了激发光的吸收效率和荧光的产生率.通常用传感区域激发光功率分数<sup>[7]</sup>(Power Fraction, PF)来表征激发光的吸收效率

$$PF = \frac{\int_H S_z dS}{\int_{A_\infty} S_z dS} \quad (1)$$

式中  $S_z$  是光模式场的坡印廷矢量  $\mathbf{S}$  在光纤传输方向  $z$  的分量,  $H$  代表传感区域,  $A_\infty$  表示整个光纤横截面.而衡量模式场在光纤纤芯内的分布则用有效面积来表示,其表达式为

$$A_{\text{eff}} = \frac{|\int_{A_\infty} S_z dS|^2}{\int_{A_\infty} |S_z|^2 dS} \quad (2)$$

文献<sup>[14]</sup>提出了荧光传感器的分析方法,指出荧光捕获分数是表征荧光传感器性能的重要指标.荧光捕获分数的定义为

$$FCF = \frac{P_F(L)}{P_E(0)} \times 100\% \quad (3)$$

式中  $P_F(L)$  表示在光纤长度  $z=L$  处荧光功率,  $P_E(0)$  为  $z=0$  处注入的激发光功率.

由于荧光介质的吸收,根据比尔-朗伯定律可知,激发光功率  $P_E(z)$  是指数衰减的,可表示为

$$P_E(z) = |a_E|^2 N_E \exp(-\gamma_E z) \quad (4)$$

式中  $N_E = \frac{1}{2} \text{Re}(\int_{A_\infty} S_z dS)$ ;  $\gamma_E = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0} \frac{|\alpha_E |e_E|^2 dS}{N_E}} +$

基金项目:国家自然科学基金(No. 60907033)和河北省自然科学基金(No. E2009000373)资助

第一作者:李炳新(1968-),男,教授,博士,主要研究方向为聚合物光纤及放大器和光波导的理论研究. Email: xuanyizi@ysu.edu.cn

收稿日期:2011-06-08;修回日期:2011-08-14

$\alpha$ ;  $a_E$  是激发光模式场的展开系数;  $\alpha_E = \epsilon_E c$  是吸收系数;  $\epsilon_E$  是荧光染料的摩尔消光系数;  $c$  是染料摩尔浓度;  $e_E$  是激发光电场强度;  $\alpha$  是光纤的损耗.

根据文献[14]荧光功率  $P_F(z)$  为

$$P_F(z) = \xi \frac{\epsilon_0 |a_E|^2 \alpha_E \lambda_F n_E \delta_E \int_H |e_F|^2 S_z dS}{32\pi n_F N_F (\gamma_E - \gamma_F)} \exp(-\gamma_F L) \{1 - \exp[(\gamma_F - \gamma_E)z]\} \quad (5)$$

式中  $\delta_E = \int_H |e_E|^2 dS / \int_H S_z dS$ ;  $\lambda_F$  是荧光波长;  $\xi$  是荧光转化系数 ( $0 < \xi < 1$ );  $n_E$  是液体在激发光波长的折射率;  $\gamma_F$  荧光衰减因子;  $n_F$  是液体在荧光波长的折射率;  $N_F$  荧光波长模式场传输功率.

将式(4)、(5)代入式(3)得到荧光捕获率

$$FCF = AB \frac{\exp(-\gamma_F L)}{\gamma_E - \gamma_F} \{1 - \exp[(\gamma_F - \gamma_E)L]\} \quad (6)$$

式中  $A = \frac{\xi \alpha_E \lambda_F^2 n_E}{32\pi n_F}$ ;  $B = \frac{\epsilon_0}{\mu_0} \frac{\delta_E}{N_E N_{FH}} \int |e_F|^2 S_z dS$  取决于光纤中荧光的模式场分布与荧光传感区域的重叠积分.

## 2 计算结果分析

### 2.1 荧光传感器的结构

本文设计的微结构聚合物光纤传感器结构如图1, 纤芯由高分子材料聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 构成, 折射率  $n_{\text{host}} = 1.49$ , 纤芯半径为  $r$ . 纤芯外有两层环形孔, 内层孔为传感区域, 孔中注入掺荧光染料的液体, 液体孔层的厚度为  $a$ . 外层为空气孔, 空气孔厚度对计算影响不大, 可忽略不计.

本文选择了两种有机荧光染料, 其中一种是 Rhodamine B, 最佳激发波长  $\lambda_{E_1} = 542.5 \text{ nm}$ , 荧光中心波长  $\lambda_{F_1} = 565 \text{ nm}$ ; 另一种是 5, 10, 15-Triphenylcorrole, 最佳激发波长  $\lambda_{E_2} = 415 \text{ nm}$ , 荧光

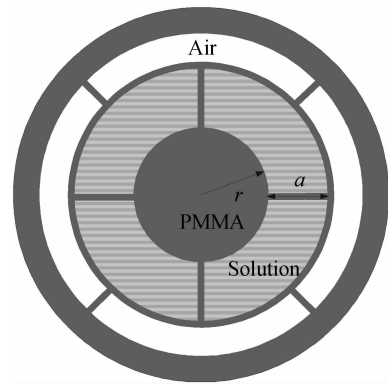


图1 微结构聚合物光纤传感器的结构

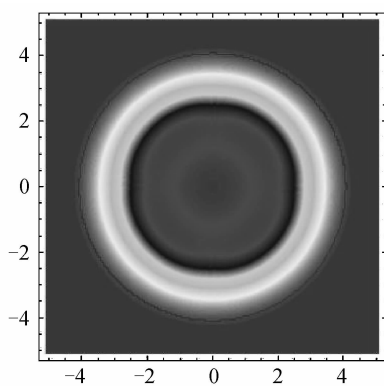
Fig.1 The structure of MPOF fluorescence sensors

中心波长  $\lambda_{F_2} = 671 \text{ nm}$ . 将染料溶解在溶液中, 然后注入光纤的孔隙中, 溶液的折射率是可以调节的.

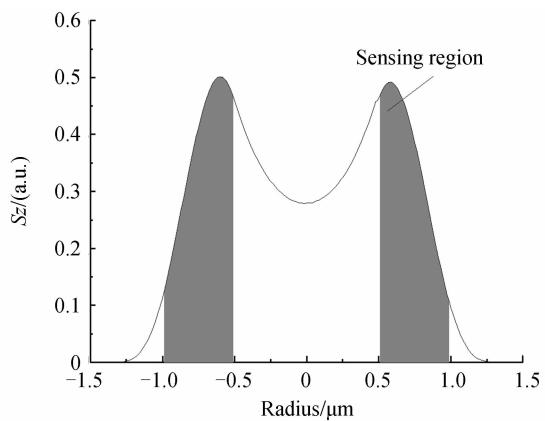
### 2.2 模场分布

为了分析微结构聚合物光纤传感器的荧光性能, 必须求解激发光和荧光在光纤中传输的模式场. 本文使用可调节边界条件傅里叶分解法 (ABC-FDM)<sup>[15]</sup> 来求解微结构聚合物光纤有效折射率和模式场.

图2是这个微结构聚合物光纤基模场传输功率在光纤横截面上的分布, 光纤结构参量为纤芯半径  $r = 0.5 \mu\text{m}$ , 液体层厚度  $a = 0.5 \mu\text{m}$ , 液体折射率  $n_{\text{liq}} = 1.51$ . 图2(a)、(b)分别是波长  $\lambda_{E_2} = 415 \text{ nm}$  和波长  $\lambda_{F_2} = 671 \text{ nm}$  时基模场能流密度  $S_z$  的分布. 截面图中的阴影区是注满液体的传感区域, 从图中可以看出对应激发光  $\lambda_{E_2} = 415 \text{ nm}$  时, 基模场功率大多集中在传感区域, 这可以有效地提高激发光的吸收效率, 而在荧光波长  $\lambda_{F_2} = 671 \text{ nm}$  时, 基模场功率集中在纤芯中, 这表明被激发荧光集中在纤芯区传输, 减小了荧光的吸收损耗, 在接收端可以得到更高荧光功率.



(a) Excitation wavelength  $\lambda = 415 \text{ nm}$



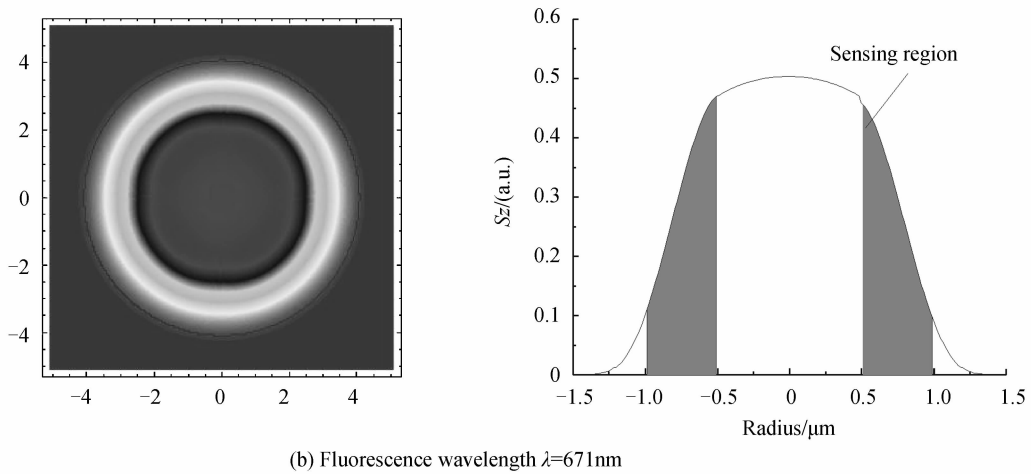


图 2 MPOF 中基模场能流密度( $S_z$ )分布图  
Fig. 2 The energy flux density  $S_z$  of first mode field in MPOF

2.3 荧光传感参量

光纤中传输光的功率分数 PF 与波长的关系如图 3,其中图 3(a)的光纤结构参量  $a=0.5 \mu\text{m}$ ,  $r=0.5 \mu\text{m}$ . 传感区液体的折射率  $n_{\text{liq}}$  对功率分数的变化趋势起决定作用,当  $n_{\text{liq}} > n_{\text{host}}$  时,功率分数随着波长的增加而减小,而当  $n_{\text{liq}} < n_{\text{host}}$  时,随着光波长的增加,功率分数 PF 逐渐增大. 图 3(b)是  $n_{\text{liq}} = 1.51$  时,不同纤芯半径的功率分数,对于  $r=2.5 \mu\text{m}$  的微结构聚合物光纤,其 PF 值变化最明显. 在短波长如  $\lambda_{E_2} = 415 \text{ nm}$  时,  $PF = 65.9\%$ ,这说明激发光大

多在液体中传输,具有较大的吸收系数. 在长波长时,传输光大部分被限制在纤芯中,如波长  $\lambda_{F_2} = 671 \text{ nm}$  时,  $PF = 24.9\%$ ,这表明荧光主要在光纤芯区传输,吸收系数要小于激发光. 对于波长  $\lambda_{E_1}$  和  $\lambda_{F_1}$ ,由于波长相差较小,所以 PF 变化不大.

图 3 表明当传感区域的溶液折射率大于纤芯材料折射率时,激发光的功率分数大于荧光的功率分数,而且这种趋势随着纤芯半径的增加而愈加明显. 这样的设计有利于增加激发光的吸收同时减少荧光的传输损耗.

微结构聚合物光纤的模场面积  $A_{\text{eff}}$  与波长的关系如图 4,小芯径时模场面积几乎与波长无关,随着芯径的增加波长对于模场面积  $A_{\text{eff}}$  影响明显,对于波长而言,  $A_{\text{eff}}$  存在极大值.

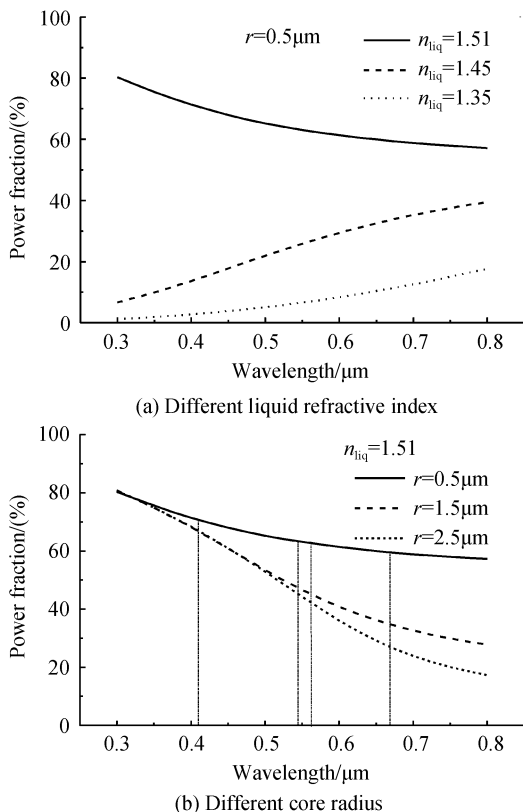


图 3 微结构聚合物光纤中基模场在传感区域的功率分数  
Fig. 3 Power fractions of the first mode in MPOF sensing area

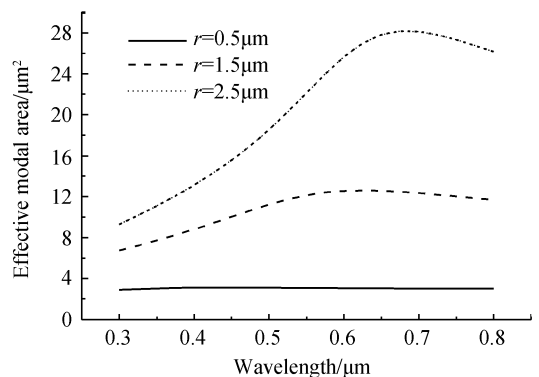


图 4 微结构聚合物光纤中基模场的模场面积  
Fig. 4 Affective modal areas of the first mode in MPOF

在荧光传感器中,荧光捕获分数直接决定微结构聚合物光纤对荧光收集的能力. 使用荧光染料 Rhodamine B,对不同光纤参量的微结构聚合物光纤获得的荧光捕获率进行了比较,如图 5. 图 5(a)为  $r=0.5 \mu\text{m}$ ,  $a=0.5 \mu\text{m}$ ,孔中注入液体折射率  $n_{\text{liq}}$  不同时,荧光捕获率随光纤长度的变化关系. 由式(6)可知,最大荧光捕获率所对应的最佳光纤长度  $L_{\text{opt}} =$

$\ln(\gamma_F/\gamma_E)/(\gamma_F-\gamma_E)$ . 图中显示  $n_{liq}$  大的微结构聚合物光纤能够获得较高的荧光捕获率,  $n_{liq} = 1.51$  时, 最佳长度  $L_{opt} = 0.53$  m 时, 最大的 FCF = 0.054%. 图 5(b) 为  $n_{liq} = 1.51, a = 0.5 \mu\text{m}$ , 纤芯半径  $r$  不同时的荧光捕获率. 从图中可以看到小芯径的光纤具有更强的荧光收集能力.

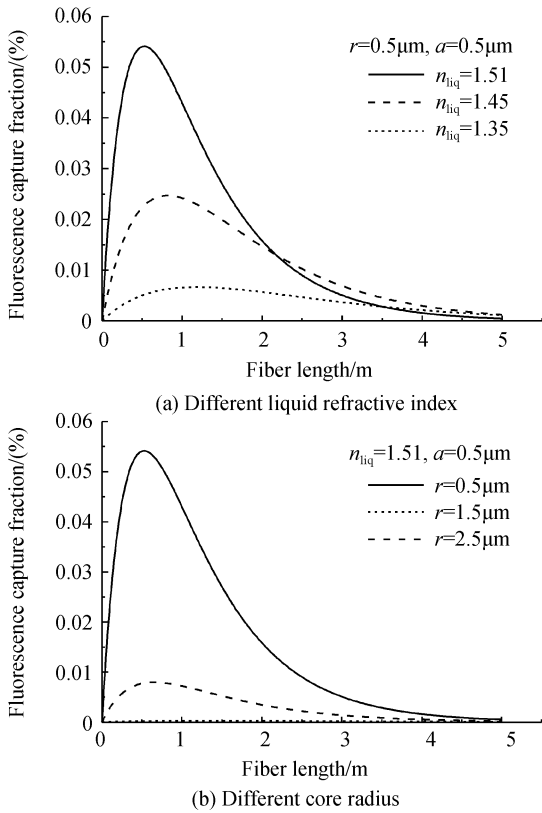
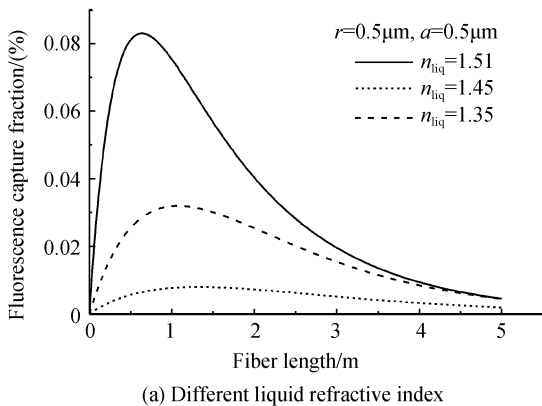
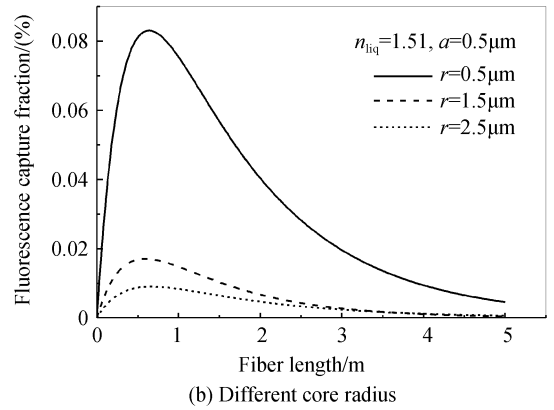


图 5 不同参量微结构聚合物光纤所对应的荧光捕获率  
Fig. 5 FCF of MPOF for different fiber parameters

图 6 为使用荧光染料 5,10,15-Triphenylcorrole, 不同光纤参量的微结构聚合物光纤荧光捕获分数. 图 6(a) 是  $r = 0.5 \mu\text{m}, L_{opt} = 0.673$  m,  $a =$  的微结构聚合物光纤,  $n_{liq} = 1.51$  时, 在光纤最佳长度处,  $FCF_{max} = 0.083\%$ , 约是液体折射率  $n_{liq} = 1.45$  时荧光捕获率最大值 ( $0.03\%$ ) 的 2.5 倍,  $n_{liq} = 1.35$  时 ( $FCF_{max} = 0.008\%$ ) 的 10 倍. 图 6(b) 的参量是  $n_{liq} = 1.51, a = 0.5 \mu\text{m}$ . 在纤芯半径  $r = 0.5 \mu\text{m}$  时, 最大



(a) Different liquid refractive index



(b) Different core radius

图 6 不同参量微结构聚合物光纤所对应的荧光捕获率  
Fig. 6 FCF of MPOF for different fiber parameters  
荧光捕获率是  $0.083\%$ , 约是纤芯半径  $r = 1.5 \mu\text{m}$  时 ( $0.017\%$ ) 的 5 倍, 是  $r = 2.5 \mu\text{m}$  时 ( $0.0089\%$ ) 的 9 倍.

以上不同参量微结构聚合物光纤获得的最大荧光捕获率所对应的光纤最佳长度都很短, 这表明该种结构的微结构聚合物光纤在较短光纤长度里能够实现荧光的高效收集与传输, 增大了荧光传感器的灵敏度.

表 1、表 2 分别列出两种染料不同纤芯半径  $r$  和溶液折射率  $n_{liq}$  的微结构聚合物光纤在最佳长度处获得的  $FCF_{max}$ . 从表中可以看出, 使用  $r = 0.5 \mu\text{m}, n_{liq} = 1.51$  的微结构聚合物光纤得到的  $FCF_{max}$  最大. 这表明小纤芯半径的微结构聚合物光纤, 孔中注入高折射率溶液能够有效地增大捕获荧光的能力.

表 1 不同结构参量微结构聚合物光纤的  $FCF_{max}$   
(染料 Rhodamine B)

Table 1  $FCF_{max}$  of MPOF for different fiber parameters  
(Dye-doped Rhodamine B)

Fiber parameters	$r = 0.5 \mu\text{m}$	$r = 1.5 \mu\text{m}$	$r = 2.5 \mu\text{m}$
$n_{liq} = 1.35$	$6.7 \times 10^{-3}$	$2.0 \times 10^{-6}$	$2.8 \times 10^{-7}$
$n_{liq} = 1.45$	$2.5 \times 10^{-2}$	$1.4 \times 10^{-5}$	$4.3 \times 10^{-6}$
$n_{liq} = 1.51$	$5.4 \times 10^{-2}$	$2.3 \times 10^{-4}$	$7.9 \times 10^{-3}$

表 2 不同结构参量微结构聚合物光纤的  $FCF_{max}$   
(染料 5,10,15-Triphenylcorrole)

Table 2  $FCF_{max}$  of MPOF for different fiber parameters  
(Dye-doped 5,10,15-Triphenylcorrole)

Fiber parameters	$r = 0.5 \mu\text{m}$	$r = 1.5 \mu\text{m}$	$r = 2.5 \mu\text{m}$
$n_{liq} = 1.35,$	$8.0 \times 10^{-3}$	$9.3 \times 10^{-6}$	$2.7 \times 10^{-7}$
$n_{liq} = 1.45$	$3.2 \times 10^{-2}$	$1.1 \times 10^{-5}$	$4.1 \times 10^{-6}$
$n_{liq} = 1.51$	$8.3 \times 10^{-2}$	$1.7 \times 10^{-4}$	$9.0 \times 10^{-3}$

图 7 是染料的摩尔浓度对荧光捕获率的影响. 图中使用的染料是 5,10,15-Triphenylcorrole, 纤芯半径  $r = 0.5 \mu\text{m}$ , 液体折射率  $n_{liq}$  不同时, 摩尔浓度对荧光捕获率的影响. 从图中可以看出, 染料的摩尔浓度对荧光捕获率影响不大. 同样, 摩尔浓度对其他结构微结构聚合物光纤的荧光捕获率影响均不明

显,在此就不讨论了。

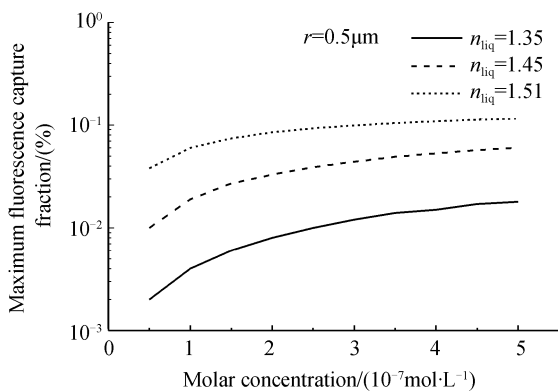


图7 荧光捕获率与染料摩尔浓度的关系

Fig. 7 FCF versus molar concentration of dyes

### 3 结论

理论计算表明,本文设计的新型微结构聚合物光纤荧光传感器在使用较小纤芯直径且孔中液体折射率高于纤芯材料折射率时,具有很高的激发光吸收系数和较强的荧光捕获能力.与常规光纤荧光传感器相比,该新型光纤缩短了光纤使用长度,实现了短距离内对荧光的高效收集与传输,提高了传感器的灵敏度.这种孔状液体填充式微结构聚合物光纤为光纤荧光传感的应用提供了一种新的方法,特别是在生物化学传感领域有着广阔的应用前景.

#### 参考文献

- [1] KUHN H, DEMIDOV V V, COULL J M, *et al.* Hybridization of DNA and PNA molecular beacons to single-stranded and double-stranded DNA targets[J]. *Journal of The American Chemical Society*, 2002, **124**(6): 1097-1103.
- [2] CORDEIRO C M B, FRANCO M A R, CHESINI G, *et al.* Microstructured-core optical fibre for evanescent sensing applications[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(26): 13056-13066.
- [3] RUSSELL P. Photonic crystal fibers[J]. *Science*, 2003, **299**(5605): 358-362.

- [4] LIANG Jian, YUN Mao-jin, KONG Wei-jin, *et al.* A novel highly birefringent photonic crystal fiber [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(1): 39-42.  
梁健,云茂金,孔伟金,等. 新型高双折射光子晶体光纤特性分析[J]. *光子学报*, 2010, **39**(1): 39-42.
- [5] ZHU Y, DU H, BISE R. Design of solid-core microstructured optical fiber with steering-wheel air cladding for optimal evanescent-field sensing[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(8): 3541-3546.
- [6] FINI J M. Microstructure fibres for optical sensing in gases and liquids[J]. *Meas Sci Technol*, 2004, **15**(6): 1120-1128.
- [7] WARREN-SMITH S C, AFSHAR V S, MONRO T M. Theoretical study of liquid-immersed exposed-core microstructured optical fibers for sensing[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(12): 9034-9045.
- [8] MONRO T M, BELARDI W, FURUSAWA K, *et al.* Sensing with microstructured optical fibers [J]. *Meas Sci Technol*, 2001, **12**(7): 854-858.
- [9] YU H C Y, BARBE C, FINNIE K, *et al.* Fluorescence from nano-particle doped optical fibres [J]. *Electronics Letters*, 2006, **42**(11): 620-621.
- [10] SMOLKA S, BARTH M, BENSON O. Highly efficient fluorescence sensing with hollow core photonic crystal fibers [J]. *Optics Express*, 2007, **15**(20): 12783-12791.
- [11] JENSEN J B, HOIBY P E, EMILIYANOV G, *et al.* Selective detection of antibodies in microstructured polymer optical fibers [J]. *Optics Express*, 2005, **13**(15): 5883-5889.
- [12] CHRISTIANSEN M B, LOPACINSKA J M, JAKOBSEN M H, *et al.* Polymer photonic crystal dye lasers as optofluidic cell sensors[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(4): 2722-2730.
- [13] YANG X H, WANG L L. Fluorescence pH probe based on microstructured polymer optical fiber[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(25): 16478-16483.
- [14] AFSHAR S, WARREN-SMITH S C, MONRO T M. Enhancement of fluorescence-based sensing using microstructured optical fibres[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(26): 17891-17901.
- [15] POLADIAN L, ISSA N A, MONRO T M. Fourier decomposition algorithm for leaky modes of fibers with arbitrary geometry[J]. *Optics Express*, 2002, **10**(10): 449-454.

## Theoretical Analysis of Dye-doped Microstructured Optical Fiber Fluorescence Sensor

LI Bing-xin, QIU Hui

(School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

**Abstract:** Aiming at the insufficient capacity for the general optical fiber fluorescence sensors to collect the fluorescence, a novel fluorescence sensor filled with high index solution was designed that doped dyes in the air holes of microstructured optical fiber. Using the adjustable boundary condition fourier decomposition method, the mode field distribution of this microstructured fiber was given, and the fluorescence capture fraction was calculated under the influences of optical fiber structural parameters and the refractive index of solution. The results show that small core radius and higher refractive index of solution than that of core materials can enhance the absorption of the excitation light, and increase the fluorescence capture fraction and the sensitivity of these fluorescence sensors.

**Key words:** Fluorescence sensor; Microstructured optical fiber; Fluorescence capture fraction; Power fraction