

微流芯片中消逝波激励的荧光辐射特性研究

储玉飞 张远宪 刘春 普小云

Fluorescence radiation characteristics based on evanescent wave pumping in a microfluidic chip

Chu Yu-Fei Zhang Yuan-Xian Liu Chun Pu Xiao-Yun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 104208 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.104208

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.104208>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I10>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

光纤光热干涉气体检测技术研究进展

Advances in optical fiber photothermal interferometry for gas detection

物理学报.2017, 66(7): 074212 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.074212>

长距离分布式光纤传感技术研究进展

Recent progress in ultra-long distributed fiber-optic sensing

物理学报.2017, 66(7): 074207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.074207>

保偏微纳光纤倏逝场传感器

Polarization-maintaining microfiber-based evanescent-wave sensors

物理学报.2017, 66(7): 074209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.074209>

锥柱型光纤探针在表面增强拉曼散射方面的应用

Application of cone-cylinder combined fiber probe to surface enhanced Raman scattering

物理学报.2017, 66(4): 044208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.044208>

环绕空气孔结构的双模大模场面积多芯光纤的特性分析

Dual-mode large-mode-area multi-core fiber with circularly arranged airhole cores

物理学报.2017, 66(2): 024210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.024210>

微流芯片中消逝波激励的荧光辐射特性研究*

储玉飞 张远宪 刘春 普小云†

(云南大学物理系, 昆明 650091)

(2016年11月21日收到; 2017年3月2日收到修改稿)

将石英裸光纤植入聚二甲基硅氧烷基片的微流道中, 采用沿光纤轴向光抽运、消逝场激励染料分子的方式, 在芯片微流道中获得均匀的荧光辐射. 实验发现, 荧光辐射的强度随光纤轴向距离的增加而衰减, 光纤包层溶液折射率越大, 荧光沿光纤轴向的衰减越突出; 包层溶液中染料浓度越大, 荧光沿光纤轴向的衰减也越突出; 通过选择适当的包层溶液折射率以及染料浓度可以获得沿光纤轴向接近均匀的荧光辐射. 用消逝波激励荧光的辐射理论计算了荧光光强沿光纤轴向的变化, 计算结果与实验符合较好. 在此基础上, 设计并制作了一种具有三个通道的聚二甲基硅氧烷基片, 通过在三个微流道中分别注入染料浓度均为 0.1 mmol 的罗丹明 640、罗丹明 B 及罗丹明 6 G 的乙醇染料溶液, 采用沿光纤轴向消逝波光激励方式, 在一块聚二甲基硅氧烷基片上同时实现了三个不同波段的荧光辐射.

关键词: 微流控芯片, 荧光辐射特性, 消逝波, 三波段荧光光源

PACS: 42.81.-i, 07.05.Fb, 33.50.Dq, 42.68.Ay

DOI: 10.7498/aps.66.104208

1 引言

微流控技术 (Microfluidics)^[1,2] 是一门涉及物理、化学、微电子学、新材料、微纳加工与生物技术等领域的交叉学科和技术. 微流控装置具有微型化、集成化等特点, 通常被称为微流控芯片, 也被称为芯片上的实验室 (Lab on a Chip) 或微全分析系统 (micro-total analytical system, μ -TAS)^[1-3]. 光流控技术 (Optofluidics)^[4-7] 是结合 Microfluidics 和光学、光电子学技术而形成的新颖的交叉前沿学科和技术, 可在微米尺度上通过操控流体达到调节系统的光学或光电子学特性的目的. 由于该类系统具有快速、高效、样品取样少等优点^[8-10], 使得 Optofluidics 成为 μ -TAS 中最活跃的领域和发展前沿. 光学检测是目前 Optofluidics 系统中使用最多的检测方法, 其中激光诱导荧光 (laser induced fluorescence, LIF) 检测法由于具有

较高的灵敏度、良好的选择性和较宽的线性范围, 已经发展为 Optofluidics 系统中最常用的光学检测方法^[11]. 因此, 将荧光光源集成到芯片中, 作为芯片中其他系统的光源, 是芯片实验室走向多功能的关键技术^[12].

为了实现微流芯片内荧光光源的集成, Whitesides 等^[13,14] 用溶入染料分子的乙二醇溶液 (折射率 1.432) 作为液芯, 用低折射率的水 (折射率 1.333) 作为包层, 在聚二甲基硅氧烷 (polydimethylsiloxane, PDMS) 基片的微流道中首次集成了三明治型的 L² (liquid core and liquid-cladding) 液芯波导, 通过选用不同的染料分子可以获得不同波长范围的荧光辐射; Yang 等^[15] 提出基于两相分层流动的 LA (liquid core and air cladding) 型的液芯波导, 这种类型的光波导也是在 PDMS 微流道中用溶入染料分子的高折射率的乙二醇作为液芯, 用低折射率的空气 (折射率 1.000) 作为液芯的包层, 由于液芯介质和空气间较大的折射率差值增强了波导对

* 国家自然科学基金 (批准号: 11404282, 61465014)、中国科学院西部之光人才培养项目和云南大学中青年骨干教师培养项目资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xypu@163.com

传输光的控制. 然而, 上述两种类型的波导或者受强光的横向(垂直于基片平面)直接激励作用^[13,14], 或者由外部光纤将激励光耦合入含有染料分子的液芯内^[15]. 这种激励方式存在两个主要的弊端: 1) 强激光对基片的直接激励会严重损坏基片的寿命, 并且由于基片的不均匀性, 使得激励光在基片内散射损耗严重; 2) 由于染料分子都属于对激励光具有强烈吸收的分子, 其较大的吸收使得激励光在芯区的空间分布是非均匀的, 由此产生的荧光的空间分布也是非均匀的.

本文将单一折射率的石英裸光纤(折射率 1.458) 植入 PDMS(折射率 1.41) 基片的微流道中, 在微流道中注入低折射率的染料溶液作为光纤包层, 采用沿光纤轴向光激励方式, 激励光沿光纤轴向以受抑全反射方式 (frustrated total reflection, FTR) 传播^[16], 其消逝场渗透到包层溶液中, 并在此消逝场区域内激励染料分子产生荧光辐射. 这种激励方式具有如下两个显著特点: 1) 激励光从石英光纤前端面进入后在光纤内传播, 不会损伤光纤外的材料结构; 2) 荧光辐射由激励光的消逝场产生, 激励光的消逝场在光纤周围是均匀的, 荧光辐射在光纤周围也是均匀的. 因此, 采用沿光纤轴向消逝场激励荧光方式在 PDMS 基片中产生微流荧光, 可以同时解决光流控芯片内荧光光源产生方式存在的两个弊端^[13-15]. 在此基础上, 研究了沿光纤轴向包层溶液折射率以及染料浓度对荧光辐射强度的影响. 然后, 设计并制作了一种具有三个微流道的 PDMS 基片, 通过在三个通道中分别注入不同染料的溶液, 采用沿光纤轴向消逝波光激励方式, 在不改变激励波长的条件下, 在一块 PDMS 基片上同时实现了三个不同波段的荧光辐射.

2 实验结果与讨论

2.1 消逝波激励的荧光辐射

首先, 设计并制作了基于 PDMS 的微流道基片, 如图 1 所示. 基片微流道尺寸为 $25\text{ mm} \times 0.3\text{ mm} \times 0.3\text{ mm}$, 由苏州汶颢芯片科技有限公司生产制作. 具体制作过程如下: 首先制作两片完全相同的 PDMS 基片 (尺寸为 $34\text{ mm} \times 15\text{ mm} \times 2.5\text{ mm}$), 基片上光纤通道的尺寸为 $34\text{ mm} \times 0.2\text{ mm} \times 0.1\text{ mm}$. 为保证光纤居于微流道中间, 所以光纤通道中部作为储液池部分的微流道的

尺寸为 $25\text{ mm} \times 0.3\text{ mm} \times 0.15\text{ mm}$; 然后利用黏合夹具把上下两部分黏合, 黏合后的光纤通道尺寸为 $34\text{ mm} \times 0.2\text{ mm} \times 0.2\text{ mm}$, 微流道尺寸为 $25\text{ mm} \times 0.3\text{ mm} \times 0.3\text{ mm}$. 把直径为 $185\text{ }\mu\text{m}$ 的单一折射率的石英裸光纤 (fiber) 植入到加工好的基片中, 利用毛细现象把未固化的 PDMS 吸入光纤微流道区域外光纤通道和 PDMS 之间的缝隙处, 在室温下放置 24 h 后放入烤箱中, 加热至 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 后固化 30 min, 固化后即可保证不发生漏液, 在微流道区域 PDMS 与光纤的缝隙处注入低折射率的染料溶液作为光纤的增益包层.

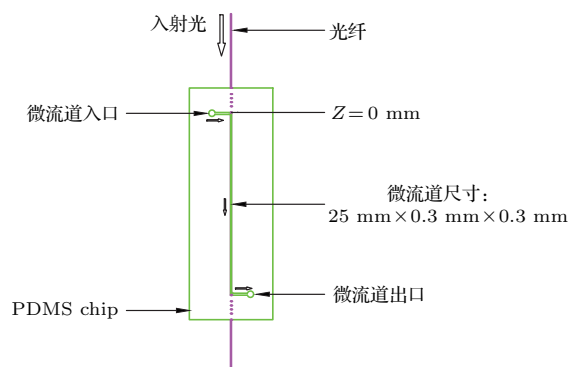


图 1 PDMS 芯片结构图

Fig. 1. Structure diagram of the PDMS chip.

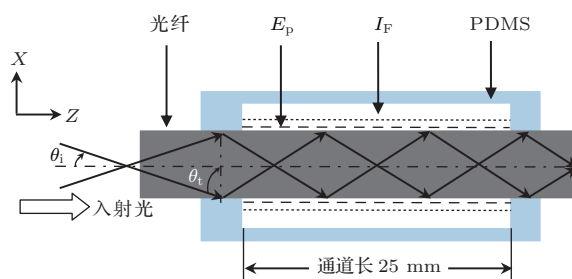


图 2 消逝波激励的荧光辐射原理图 (光纤端面入射角 $\theta_i = 22.3^\circ$; 光纤内表面入射角 $\theta_t = 74.8^\circ$)

Fig. 2. Schematic diagram of the fluorescence emission based on evanescent wave pumping (entrance angle of a beam on the fiber end face $\theta_i = 22.3^\circ$; incidence angle of the beam on the fiber side face $\theta_t = 74.8^\circ$).

以波长为 532 nm 的连续波 (CW) 激光器作为激励光, 采用沿光纤轴向光激励方式 (如图 2 所示), 激励光沿光纤轴向以 FTR 方式传播, 其消逝场 (E_p) 渗透到包层溶液中, 并在此消逝场区域内激励染料分子产生荧光辐射 (I_F), 荧光沿光纤表面辐射出来由导光光纤送入光谱采集系统 (ICCD, PI-MAX; Spectrometer, Spectrapro 500i).

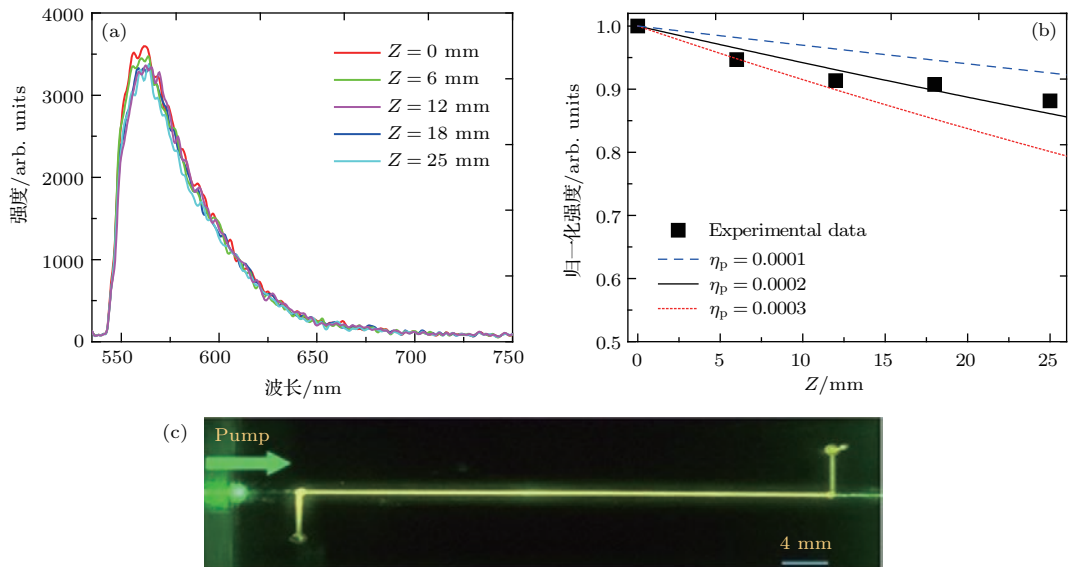


图3 (网刊彩色) (a) 光纤轴向不同位置的荧光光谱; (b) 光纤轴向不同位置的荧光辐射强度分布; (c) 荧光沿光纤轴向辐射实物图

Fig. 3. (color online) (a) Fluorescence spectra from different positions along the fiber axis; (b) fluorescence emission intensity distribution for different positions along the fiber axis; (c) picture of the fluorescence emission along the fiber axis.

图3(a)和图3(b)分别是包层溶液折射率较低(1.361),染料浓度较小(0.1 mmol)的罗丹明6 G(Rhodamine 6 G, Rh6G)沿光纤轴向不同位置(Z)处的荧光辐射光谱图及归一化的荧光辐射强度随 Z 的变化关系,图3(c)为荧光沿光纤轴向辐射实物图.图3(b)中 η_p 为激励光在光纤外以及光纤内外沿径向的积分强度之比^[16],本文后续理论解释部分将对其做进一步说明.由于激励光的消逝场处于吸收介质(包层染料溶液)中,其沿光纤轴向以FTR方式传播,所以激励光的强度沿光纤轴向是不断衰减的,因而其激励的荧光辐射强度也是不断衰减的.由图3(a)可知,荧光辐射强度随 Z 的增加而不断衰减,但衰减幅度不大.图3(b)是荧光辐射的归一化强度随 Z 的变化关系,由图可知,荧光辐射强度沿光纤轴向也是不断衰减的.下面主要讨论沿 Z 轴方向包层溶液折射率及染料浓度对荧光辐射强度的影响.

2.2 影响荧光辐射强度的因素

2.2.1 包层溶液折射率

用折射率为1.361和1.432的无水乙醇和乙二醇分别配置了浓度均为2 mmol的Rh6G染料母液,两种母液按一定比例混合后,得到折射率为1.402(ZWA-J型阿贝折射仪测量值)的混合溶液.

图4是不同溶液折射率的荧光辐射强度沿光纤轴向的变化关系.由图可知,荧光辐射的强度随光纤轴向距离的增加而衰减,光纤包层溶液折射率的值越大,荧光辐射强度沿光纤轴向的衰减越突出;通过减小包层溶液折射率,可以实现荧光辐射强度沿光纤轴向的较小衰减.

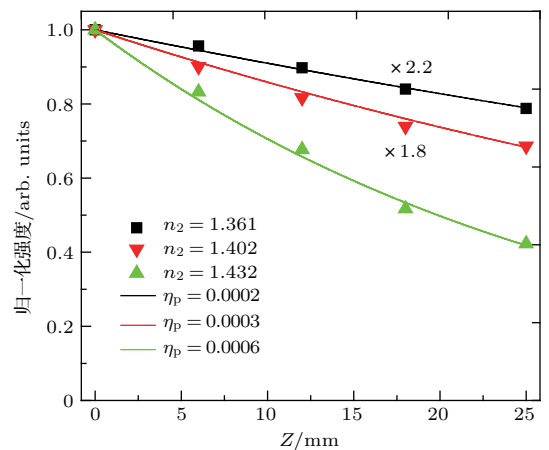


图4 (网刊彩色) 不同折射率的荧光辐射强度随位置的变化

Fig. 4. (color online) Fluorescence emission intensity varied with Z for different refractive indexes.

2.2.2 染料浓度

图5是在溶液折射率为1.361,不同染料浓度(0.1 mmol, 1 mmol, 10 mmol)的Rh6G乙醇溶液的荧光辐射强度沿光纤轴向的变化关系.由图可

知, 荧光辐射的强度也随光纤轴向距离的增加而衰减, 包层溶液中染料的浓度越大, 荧光沿光纤轴向的衰减也越突出; 通过减小包层染料浓度, 可以实现荧光辐射强度沿光纤轴向的较小衰减.

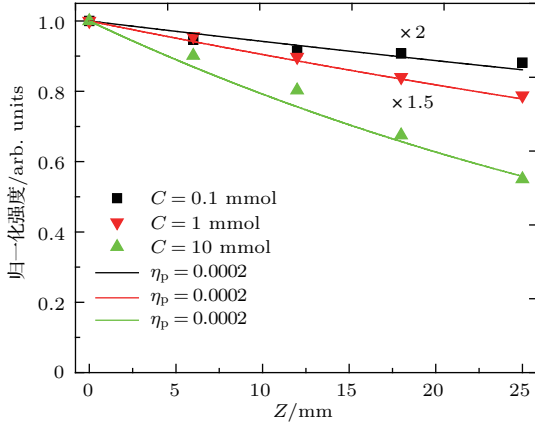


图5 (网刊彩色) 不同染料浓度的荧光辐射强度随位置的变化

Fig. 5. (color online) Fluorescence emission intensity varied with Z for different dye concentrations.

2.2.3 理论解释

消逝波激励的荧光沿光纤径向的积分强度 ($Z = 0$ mm 时截面的荧光总强度) 可以表示为 [17]

$$I_F(Z = 0) = \frac{AC\lambda_p I_{p0}}{4\pi[(n_1^2 \sin^2 \theta_t - n_2^2)^{1/2} + \lambda_p \alpha_{\text{abs,out}}^p]}, \quad (1)$$

其中 n_1 和 n_2 分别是石英光纤和染料溶液的折射率, θ_t 是激励光在光纤界面内的入射角, C 为染料溶液的浓度, λ_p 是激励光在真空中的波长, I_{p0} 为在 $Z = 0$ mm 处的激励光强, $\alpha_{\text{abs,out}}^p$ 是染料溶液对激励光的吸收系数, A 是由激励光的耦合效率及染料分子的荧光量子效率等因素共同确定的常数.

由于激励光在光纤内以 FTR 方式传播, 其强度在光纤内沿光纤轴向是逐渐衰减的. 其衰减规律满足比尔吸收定律 [18],

$$I_p(Z) = I_{p0} \exp[-\alpha_{\text{abs}}^p Z], \quad (2)$$

其中 α_{abs}^p 是激励光的吸收系数, 由激励光在光纤内的吸收系数 $\alpha_{\text{abs,in}}^p$ 和在染料溶液中的吸收系数 $\alpha_{\text{abs,out}}^p$ 两部分组成. 设激励光在光纤外以及光纤内外沿径向的积分强度之比为 η_p , 则有

$$\alpha_{\text{abs}}^p = \eta_p \alpha_{\text{abs,out}}^p + \alpha_{\text{abs,in}}^p (1 - \eta_p). \quad (3)$$

将 (3) 式代入 (2) 式, 并用 $I_F(Z = 0)$ 取代 (2) 式中的 I_{p0} 后得到荧光辐射强度沿光纤轴向的分

布满足

$$I_F(Z) = I_F(Z = 0) \cdot \exp\{-[\eta_p \alpha_{\text{abs,out}}^p + \alpha_{\text{abs,in}}^p (1 - \eta_p)]Z\}. \quad (4)$$

首先用 (4) 式对图 3 (b) 所述实验结果进行数值计算. 对本文所述的实验光学系统, (4) 式中除 η_p 和 A 外, 其余每一个量都是确定的实验值或理论可计算量. 对实验所用的石英光纤, 在可见光范围内每米透光率为 97%—99%, 对应的吸收系数 $\alpha_{\text{abs,in}}^p \approx 0.0002 \text{ cm}^{-1}$, Rh6G 乙醇溶液在 532 nm 波长处的吸收截面 $\sigma_{\text{abs}} = 4.8 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ [16], 对浓度 $C = 2 \text{ mmol}$ 的溶液, 吸收系数 $\alpha_{\text{abs,out}}^p \approx 578 \text{ cm}^{-1}$. η_p 是激励光在光纤外以及光纤内外沿径向的积分强度之比, 对本实验所用的光纤, 目前还不能计算出 η_p 的理论值, 我们采用试探值的方法结合实验数据拟合得到 η_p 的值. 在图 3 (b) 中任取一组实验数据点 ($Z, I_F(Z)$), 和一系列试探值 η_p , 代入 (4) 式, 和实验值符合最好的试探值 η_p , 就是真实的 η_p 值. 在图 3 (b) 中, 当 $\eta_p = 0.0001, 0.0002, 0.0003$ 时, 得到 $I_F(Z)$ 的分布曲线如图中实线所示. 图 3 (b) 的拟合结果表明, $\eta_p = 0.0002$ 就是在增益包层溶液折射率 1.361, Rh6G 浓度为 0.1 mmol 条件下的真实 η_p 值.

在染料浓度一定的情况下, 我们用 (4) 式对图 5 所示实验结果进行拟合. 由图 4 可知, 对折射率分别为 1.361, 1.402 和 1.432 的染料溶液, 其对应的 η_p 值分别为 0.0002, 0.0003 和 0.0006, 即随着溶液折射率的增加, η_p 值逐渐增大, 从而导致了吸收损耗 α_{abs}^p 的增加. 说明较大的包层溶液折射率意味着激励光的消逝场渗透到较深的包层溶液中, 导致更大的 η_p 值, η_p 值越大, 表明处于激励光消逝场内有更多的染料分子受到激发, 吸收损耗 α_{abs}^p 也随之增大, 从而导致光纤包层溶液折射率的值越大, 荧光辐射强度沿光纤轴向的衰减越突出.

在染料溶液折射率一定的情况下, 我们同样用 (4) 式对图 4 所示实验结果进行拟合. 由图 5 可知, 对染料浓度分别为 0.1, 1 和 10 mmol 的溶液, 其对应的 η_p 值均为 0.0002, 即随着染料浓度的增加, η_p 值不变. 但是, 高浓度的包层溶液中含有更多的染料分子, 处于激励光消逝场内有更多的染料分子受到激发, 吸收损耗 α_{abs}^p 随之增大, 从而导致包层溶液中染料的浓度越大, 荧光沿光纤轴向的衰减也越突出.

由图 3(b)、图 4 和图 5 可知, (4) 式的计算曲线与实验结果符合较好, 说明我们对本文所述实验光学系统物理机制的理解是正确的. 至此, 我们用消逝波激励荧光的辐射理论, 对图 4 和图 5 反映出的实验规律做出了很好的解释. 同时, 由上述分析可知, 通过降低包层溶液折射率以及染料浓度可以获得沿光纤轴向一定距离范围内接近均匀的荧光辐射, 如图 3(b) 所示, 当溶液折射较低(1.361), 染料浓度也较小(0.1 mmol) 时, 其荧光辐射强度在 0—25 mm 内衰减较小(<10%), 此时, 可以认为沿光纤轴向荧光辐射强度是接近均匀的.

3 三波段荧光辐射

利用沿光纤轴向消逝波激励的荧光辐射的特点, 我们设计了基于 PDMS 的具有三个通道(channel, Ch) 的微流道基片, 如图 6(a) 所示, 三个微流道尺寸均为 0.3 mm × 0.3 mm × 0.3 mm, PDMS

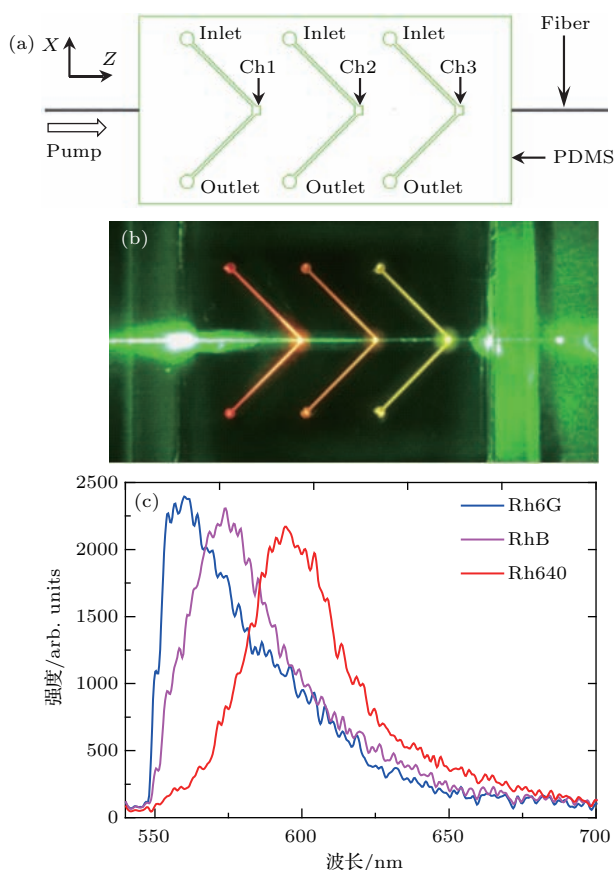


图 6 (网刊彩色) (a) 三通道荧光辐射结构图; (b) 三通道荧光实物图; (c) 三通道荧光光谱图

Fig. 6. (color online) (a) Schematic diagram of tri-channel fluorescence emission; (b) picture of tri-channel fluorescence emission; (c) fluorescence spectra for three different channels.

基片仍由苏州沃颀芯片科技有限公司制作. 实验中所用光纤的直径仍为 185 μm . 由 2.2 节的分析可知, 通过选择较低包层溶液折射率及较小染料浓度的溶液可以实现荧光沿光纤轴向的较小衰减, 综合考虑染料在乙醇溶液中的荧光量子效率, 我们在通道 1(Ch1)、通道 2(Ch2) 及通道 3(Ch3) 中分别注入折射率为 1.361、浓度为 0.1 mmol 的 Rh640, RhB 及 Rh6G 的乙醇染料溶液. 由于 Rh640 的荧光量子效率最低, 所以将其放于光纤轴向的上游(Ch1), 而 Rh6G 的荧光量子效率最高, 将其放于光纤轴向的下游(Ch3). 以波长为 532 nm 的 CW 激光器作为激励光, 采用沿光纤轴向消逝波光激励方式, 在不改变激励波长的情况下, 在同一块 PDMS 基片上同时实现了三个不同波段且接近均匀的荧光辐射, 如图 6(b) 所示. 图 6(c) 是三个通道所对应的荧光光谱, 由于 Rh6G 在乙醇溶液中的荧光量子效率较高^[19], 所以荧光辐射强度相对较强; Rh640 在乙醇溶液中的荧光量子效率较低^[19], 所以荧光辐射强度也相对较弱.

4 结 论

采用沿光纤轴向消逝波光激励方式, 激励光从石英光纤前端面进入后在光纤内传播, 不会损伤光纤外 PDMS 基片的材料结构; 同时, 由于荧光辐射由激励光的消逝场产生, 激励光的消逝场在光纤周围是均匀的, 所以荧光辐射在光纤周围也是均匀的. 研究了光纤包层溶液折射率及染料浓度对荧光辐射强度的影响, 结果表明, 包层溶液折射率越大, 荧光沿光纤轴向的衰减越突出; 包层溶液中染料浓度越大, 荧光沿光纤轴向的衰减也越突出; 通过选择适当的包层溶液折射率以及染料浓度可以获得沿光纤轴向接近均匀的荧光辐射. 用消逝波激励荧光的辐射理论计算了荧光光强沿光纤轴向的变化, 计算结果与实验符合较好. 与传统的多波段光源需要多个激励源相比^[20], 本文设计并制作了一种具有三个通道的 PDMS 基片, 通过在三个通道中分别注入不同染料的溶液, 采用沿光纤轴向消逝波光激励方式, 在不改变激励波长的情况下, 在一块 PDMS 基片上同时实现了三个不同波段的接近均匀的荧光辐射. 本文所述的 PDMS 微流芯片可为“芯片上的实验室”提供一种接近均匀的荧光光源, 对 Optofluidics 系统中开展生物技术^[21,22]、化学分

析等^[23,24]工作具有潜在的应用价值. 三通道微流芯片可以为光流控芯片提供三波段荧光光源, 在生物学领域、蛋白质分析^[25]及抗原抗体特异性结合免疫性分析等^[26]方面具有重要的应用.

参考文献

- [1] Thorsen T, Maerkl S J, Quake S R 2002 *Science* **298** 580
- [2] Liu K K, Wu R G, Chuang Y J, Khoo H S, Huang S H, Tseng F G 2010 *Sensors* **10** 6623
- [3] Manz A, Graber N, Widmer H 1990 *Sensors and Actuators B: Chemical* **1** 244
- [4] Psaltis D, Quake S R, Yang C 2006 *Nature* **442** 27
- [5] Helbo B, Kristensen A, Menon A 2003 *J. Micromech. Microengin.* **13** 2
- [6] Monat C, Domachuk P, Eggleton P B 2007 *Nat. Photon.* **1** 106
- [7] Chen Y C, Chen Q S, Fan X 2016 *Lab on Chip* **16** 2228
- [8] Gilardi G, Beccherelli R 2013 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **46** 105104
- [9] Li M, Zhi M, Zhu H, Wu W Y, Xu Q H, Jhon M H, Chan Y 2015 *Nat. Commun.* **6** 1
- [10] Fan X, Yun S H 2014 *Nat. Methods* **11** 141
- [11] Zhang J, Wang S, Liu K, Wei Y, Wang X, Duan Y 2015 *Anal. Chem.* **87** 2959
- [12] Lim J M, Kim S H, Yang S M 2011 *Microfluid. Nanofluid.* **10** 211
- [13] Wolfe D B, Conroy R S, Garstecki P, Mayers B T, Fischbach M A, Paul M P, Whitesides G M 2004 *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **101** 12434
- [14] Vezenov D V, Mayers B T, Wolfe D B, Whitesides G M 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 041104
- [15] Lim J M, Kim S H, Choi J H, Yang S M 2008 *Lab on Chip* **8** 1580
- [16] Moon H J, Chough Y T, An K 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 15
- [17] Zhang Y X, Pu X Y, Zhu K, Feng L 2011 *J. Opt. Soc. Am. B* **28** 2048
- [18] Zhu K, Zhou L, You H H, Jiang N, Pu X Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 054205 (in Chinese) [祝昆, 周丽, 尤洪海, 江楠, 普小云 2011 物理学报 **60** 054205]
- [19] Ulrich B 1986 *Lambda Chrome Laser Dyes* (Lambda: Lambda Physik GmbH)
- [20] Mayers B T, Vezenov D V, Vullev V I, Whitesides G M 2005 *Anal. Chem.* **77** 1310
- [21] Sun Y, Shopova S I, Wu C S, Arnold S, Fan X D 2010 *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **107** 16039
- [22] Pilgyu K, Perry S, Xavier S, Dakota O D, David E 2015 *Sci. Reports* **5** 12087
- [23] Fan X D, White I M 2011 *Nat. Photon.* **5** 591
- [24] Mellors J S, Jorabchi K, Smith L M, Ramsey M 2010 *Anal. Chem.* **82** 967
- [25] Wu D, Luo Y, Zhou X M, Dai Z P 2005 *Electrophoresis* **26** 1
- [26] Vasdekis A E, Laporte G P J 2013 *Int. J. Mol. Sci.* **12** 8

Fluorescence radiation characteristics based on evanescent wave pumping in a microfluidic chip*

Chu Yu-Fei Zhang Yuan-Xian Liu Chun Pu Xiao-Yun[†]

(Department of Physics, Yunnan University, Kunming 650091, China)

(Received 21 November 2016; revised manuscript received 2 March 2017)

Abstract

A bare quartz optical fiber is implanted in a microfluidic channel of polydimethylsiloxane (PDMS) substrate. Pumping the microfluid by a continuous wave laser with a wavelength of 532 nm along the fiber axis, the fluorescent spectra from the channel filled with lower refractive index (RI) dye solution are obtained. Due to the fact that the evanescent field of the pump beam is homogeneous around fiber, the fluorescent emission from the rim of fiber is uniform. It is found experimentally that the fluorescent emission intensity decreases with the axial distance of fiber, and the intensity is very sensitive to the RI of the dye solution and the dye concentration. For the dye solution with a large RI, the emitted fluorescent intensity attenuates along the fiber axis more obviously than that of the dye solution with a small RI. For the high dye concentration solution, the emitted fluorescent intensity attenuates along the fiber axis also more significantly than that of the low dye concentration solution. Therefore, it is possible to obtain a uniform fluorescence radiation along the fiber axis by selecting a suitably smaller RI and a lower dye concentration solution. The observed experimental phenomena are well explained based on the mechanism of evanescent wave pumping fluorescent radiation. Based on the features of fluorescent emission in the microfluidic chip, a PDMS chip with three micro-channels is designed and fabricated. After injecting ethanol solutions of rhodamine 640, rhodamine B and rhodamine 6 G separately into the three channels and pumping these solutions by evanescent wave along the optical fiber axis, three fluorescence emissions with different wavelength ranges are successfully observed in a single PDMS chip.

Keywords: microfluidic chip, fluorescence radiation characteristics, evanescent wave, tri-band fluorescent light sources

PACS: 42.81.-i, 07.05.Fb, 33.50.Dq, 42.68.Ay

DOI: 10.7498/aps.66.104208

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11404282, 61465014), the Chinese Academy of Sciences "Light of West China" Program, and the Young Backbone Teachers Training Program of Yunnan University, China.

[†] Corresponding author. E-mail: xypu@163.com