

聚二甲基硅氧烷微流道中光流控荧光共振能量转移激光

李东阳 张远宪 欧永雄 普小云

Optofluidic fluorescence resonance energy transfer lasing in a polydimethylsiloxane microfluidic channel

Li Dong-Yang Zhang Yuan-Xian Ou Yong-Xiong Pu Xiao-Yun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 054203 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20181696

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181696>

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

CdTe量子点-铜酞菁复合体系荧光共振能量转移的研究

Fluorescence resonance energy transfer between CdTe quantum dots and copper phthalocyanine

物理学报. 2015, 64(4): 46802 <https://doi.org/10.7498/aps.64.046802>

微流芯片中消逝波激励的荧光辐射特性研究

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

物理学报. 2017, 66(10): 104208 <https://doi.org/10.7498/aps.66.104208>

CdTe量子点与罗丹明B水溶液体系下的双光子激发荧光共振能量转移

Fluorescence resonance energy transfer in a aqueous system of CdTe quantum dots and Rhodamine B with two-photon excitation

物理学报. 2015, 64(10): 108201 <https://doi.org/10.7498/aps.64.108201>

单分子荧光共振能量转移数据处理的优化算法

An optimization algorithm for single-molecule fluorescence resonance (smFRET) data processing

物理学报. 2017, 66(11): 118701 <https://doi.org/10.7498/aps.66.118701>

共轭聚合物单分子构象和能量转移特性研究

The role of chain conformation in energy transfer properties of single conjugated polymer molecule

物理学报. 2017, 66(24): 248201 <https://doi.org/10.7498/aps.66.248201>

仿生微流控的发展与应用

Development and application of bio-inspired and biomimetic microfluidics

物理学报. 2016, 65(17): 178301 <https://doi.org/10.7498/aps.65.178301>

聚二甲基硅氧烷微流道中光流控荧光共振能量转移激光*

李东阳 张远宪 欧永雄 普小云†

(云南大学物理系, 昆明 650091)

(2018年9月11日收到; 2018年11月11日收到修改稿)

将单一折射率的石英裸光纤植入由聚二甲基硅氧烷构成的基片微流道中, 以低折射率的罗丹明 B (RhB) 和吡啶 821 (LDS821) 乙醇溶液构成的供体和受体对作为激光增益介质. 采用沿光纤轴向消逝波抽运方式, 首先以波长为 532 nm 的连续波激光器作为激励光, 对荧光共振能量转移特性参数进行了研究. 然后以波长为 532 nm 的脉冲激光器作为抽运光, 通过直接激励供体分子 RhB, 并将其能量转移给临近的受体分子 LDS821, 在不改变抽运光波长的条件下, 实现了较低阈值 ($1.26 \mu\text{J}/\text{mm}^2$) 的受体 LDS821 激光辐射.

关键词: 光流控激光器, 荧光共振能量转移, 消逝波

PACS: 42.55.Sa, 42.55.Mv, 42.60.Da, 42.60.Lh

DOI: 10.7498/aps.68.20181696

1 引言

光流控 (optofluidic) 激光器^[1,2] 是近年发展起来的一种具有广阔前景的技术, 其将光学微腔及液体增益介质集成到微流道循环系统或芯片中. 由于其能够放大由溶液浓度、折射率或生物分子构象等变化引起的样品信号光强度的微小变化, 所以, Optofluidic 激光器在高灵敏度的生物技术和化学检测方面具有极大的应用前景^[3-6]. 通常情况下, Optofluidic 激光器均采用抽运光直接激励增益介质 (荧光染料) 产生激光^[7-9], 受抽运光波长及染料对抽运光吸收的限制, 需要改变抽运光的波长与特定的染料吸收带相匹配, 才能获得可调谐的不同波长范围的激光辐射. 在不改变抽运光波长的情况下, 要获得波长可调谐的激光辐射, 一种比较有效而新颖的方法就是借助荧光共振能量转移 (fluorescence resonance energy transfer, FRET)

机制^[10-12]. 在 FRET 机制中, 非辐射的 Förster 转移是其中一种最重要的转移机制^[11], 即当供体 (donor, *D*) 分子被抽运光激发时, 可通过偶极-偶极耦合作用将其一部分或全部能量以非辐射方式直接传递给与其比较接近 (1—10 nm) 的受体 (acceptor, *A*) 分子而自身不发射任何光子, 从而实现受体分子的受激辐射. 而且由于 FRET 激光器中供体的吸收带与受体的辐射光谱之间的距离相隔较远, 因此供体分子对受体分子辐射能量的吸收作用可以忽略不计, 从而能有效降低受体分子的激光阈值.

1992 年, Armstrong 等^[13] 首次观察到了悬浮于 F548 (激光辐射范围: 559—589 nm) 乙醇溶液中的荧光溶胶小液滴在 609—654 nm 范围的激光辐射. Maslov^[14] 以 LD1 作为能量供体, LD703 作为能量受体, 实现了从黄光到近红外光的可调谐激光辐射. Fan 研究组^[15] 利用 FRET 效应, 在光流控环形谐振腔 (optofluidic ring resonator, OFRR)

* 国家自然科学基金 (批准号: 11864045, 11404282, 61465014, 61465015)、云南省中青年学术和技术带头人 (后备人才) (批准号: 2018HB029) 和国家留学基金资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xyptu@163.com

中实现了以罗丹明 6G 染料作为能量供体, LDS722 染料作为能量受体在黄光到近红外波长范围的激光辐射. Sun 等^[16]利用标记 DNA 分子和染料分子间的 FRET 效应, 在 OFRR 中探测到了微摩尔浓度量级的 DNA 分子的激光振荡. 虽然 FRET 在波长可调谐的激光辐射以及保持较低受体激光阈值方面取得了较大进展, 但其采用的垂直于毛细管轴向的侧向光抽运方式仍存在如下三个突出不足: 1) 抽运光直接穿过 OFRR 系统中的样品, 这种强光的长时间照射易造成染料分子的漂白, 从而影响激光器的稳定性; 2) 侧向光抽运属于一种非均匀抽运, 染料分子对抽运光有强烈吸收作用, 其较大的吸收使得侧向抽运光在 OFRR 内的空间分布是非均匀的, 由此产生的激光也是非均匀的, 此外染料分子的增益由抽运光直接激励产生, 不利于抽运光和信号光的分离; 以上两方面的不足都会引起较强的背景噪声, 从而降低探测的信噪比; 3) FRET 能量转移效率与供受体分子的间距 (供受体浓度比) 密切相关, 需要手动更换 OFRR 系统中的样品溶液才能获得 FRET 能量转移效率, 极大地影响系统的稳定性.

为了解决以上不足, 本文设计并制作了一种基于聚二甲基硅氧烷 (polydimethylsiloxane, PDMS, 折射率 1.410) 的微流芯片. 首先将单一折射率的石英裸光纤 (折射率 1.458) 植入 PDMS 基片微通道中, 然后在微通道中注入低折射率的染料溶液作为激光增益介质. 采用沿光纤轴向光抽运方式, 进入光纤端面的抽运光以全反射 (total internal reflection, TIR) 方式沿光纤轴向传播, 其消逝场延伸到包层溶液中, 并在此消逝场区域内激励染料分子形成激光增益. 垂直于石英光纤轴向的任一截面都构成一个 OFRR, 此圆形微腔中回音壁模式 (whispering gallery mode, WGM) 的消逝场和抽运光的消逝场在增益区域内高度重合, 受激辐射光在微腔 WGM 的支持下形成激光振荡^[17]. 由于 WGM 激光增益由抽运光的消逝场激励产生, 从而实现了抽运光和信号光的分离; 而且, 由于抽运光的消逝场在光纤周围是均匀的, 因此, WGM 激光辐射在光纤周围也是均匀的. 所以, 采用沿光纤轴向消逝波激励方式, 能够有效地降低背景噪声的影响, 从而提高探测的信噪比和灵敏度. 同时, PDMS 微流芯片上的流体入口和出口分别与微型蠕动泵相连接, 从而实现了微通道中溶液的循环流动以及

自动更换, 解决了染料溶液易漂白以及由于手动更换溶液而导致系统的稳定性降低的问题. 在此基础上, 以低折射率的罗丹明 B (RhB) 和吡啶 821 (LDS821) 的乙醇混合溶液构成的供体和受体对作为激光增益介质. 采用沿光纤轴向消逝波光激励方式, 首先以波长为 532 nm 的连续波 (continue wave, CW) 激光器作为激励光, 对 FRET 特性参数进行了研究; 在此基础上, 以波长为 532 nm 的脉冲激光器作为抽运光, 在不改变抽运光波长的条件下, 利用染料分子间的 FRET 机制, 实现了较低阈值的受体 LDS821 激光辐射.

2 实验安排

2.1 PDMS 芯片的设计与制作

如图 1 所示, PDMS 基片采用铸模法制作而成, 其尺寸为 34 mm × 15 mm (长 × 宽). PDMS 基片中光纤通道的尺寸为 34 mm × 0.2 mm × 0.2 mm (长 × 宽 × 高), 尺寸为 20 mm × 0.3 mm × 0.3 mm 的微通道包含于光纤通道中. 基片由苏州沃颀微流控有限公司生产制作.

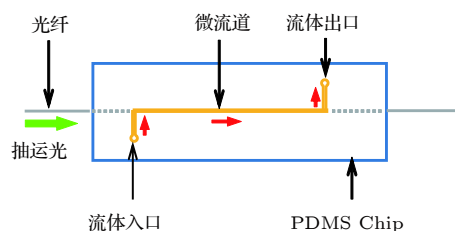


图 1 PDMS 芯片结构示意图

Fig. 1. Structure diagram of the PDMS chip.

为方便微通道中液体的循环流动, 需对微通道外的光纤通道与光纤的缝隙处进行封堵, 如图 1 虚线所示. 封堵过程如下: 首先, 一段长度约为 50 mm 的光纤 (直径约为 190 μm , 折射率为 1.458) 插入到光纤通道中, 然后在光纤通道的左右两侧分别滴入一滴 PDMS 预聚物, PDMS 预聚物通过毛细现象引入到光纤通道中, 当预聚物流动到如图 1 所示的光纤通道和微通道的交界处时, 用一块 PDMS 膜片盖住 PDMS 基片表面上的入口和出口, 从而能有效阻止 PDMS 预聚物的流动, 在 PDMS 基片烘烤之前, PDMS 基片两端多余的预聚物通过吸附方式擦除掉; 接着, 将入口和出口处的 PDMS 膜片撕下后将 PDMS 基片置于烤箱中烘烤 45 min,

烤箱温度为 70 °C, 由于 PDMS 预聚物较强的表面张力和黏稠性, 使得在烘烤过程中介于光纤通道和微流道界面处的 PDMS 预聚物界面是稳定的. PDMS 基片上流体入口和出口是两个圆柱形的小孔 (半径 0.15 mm, 高 0.4 mm), 由微型蠕动泵 BT100-2J 进行连接, 微流道的清洗、溶液的更换及溶液的循环流动均通过 BT100-2J 完成. 在微流道中注入低于光纤折射率的增益包层介质溶液后, 就形成了光流控 FRET 激光 PDMS 芯片.

2.2 实验装置

实验装置如图 2 所示, 以波长为 532 nm 的 YAG 激光器 (北京镭宝公司生产, 脉宽为 7 ns) 作为抽运光. 抽运光依次经过分束镜 BS, 以便由激光能量计 PM (MELLES GRIOT, 13PEM001) 测出即时抽运能量. 然后经过由透镜 L_1 和 L_2 构成的光学缩束系统后再经一块焦距为 75 mm 的透镜 L_3 汇聚于光纤前端面, 焦点距石英光纤前端面约为 2 mm, 抽运光在光纤内沿光纤轴向以 TIR 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激光辐射, WGM 激光沿光纤表面切向辐射出来, 由导光光纤送至光谱采集系统 (ICCD: PI-MAX; spectrometer: Spectrapro 500i) 的进光狭缝口. 增益介质溶液经微型蠕动泵 BT100-2J 上的导管与 PDMS 上的流体入口和出口相连, 其流速为 1.0 mL/min.

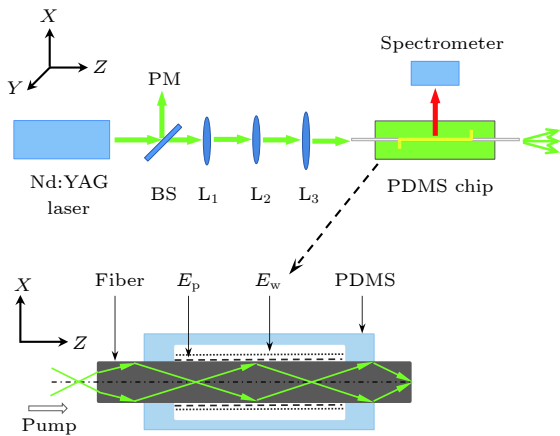


图 2 实验装置图 BS, 分束镜; PM, 激光能量计; L_1 , L_2 , L_3 表示透镜; 插图为激光产生的原理图, E_p 表示抽运光的消逝场, E_w 表示 WGM 的消逝场
Fig. 2. Illustration of the experimental setup. BS, beam splitter; PM, power meter; L_1 , L_2 , L_3 , lens. Inset: the schematic diagram of laser: E_p , evanescent field of pump light; E_w , evanescent field of WGM.

3 实验结果与分析

3.1 FRET 能量供体浓度的选取

实验中选用 RhB 和 LDS821 分别作为 FRET 的能量供体和能量受体. 首先测量了不同浓度的 RhB (0.05, 0.10, 0.30, 0.50, 0.70, 1.00 mM, 1 M = 1 mol/L) 的激光阈值. 如图 3 所示, 随着 RhB 浓度增加, 激光阈值呈现出先减小后增加的趋势, 当 $c = 0.5$ mM 时, 激光阈值达到最低. 因此, 为了实现低供体阈值、低供体浓度条件下高效率的基于 FRET 机制的激光辐射, 本文中我们选用 $c = 0.5$ mM 的 RhB 作为能量供体.

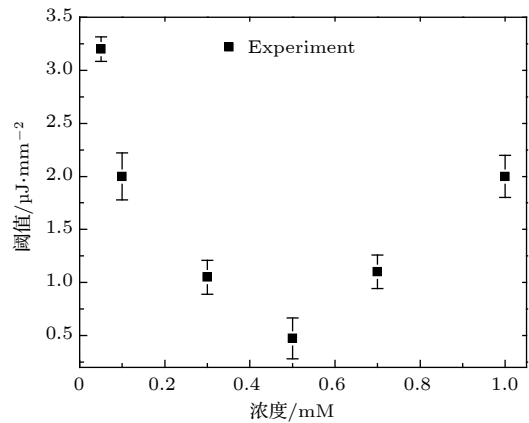


图 3 不同 RhB 浓度对应的激光阈值, 误差线是三次测量的平均值
Fig. 3. Lasing threshold of RhB as a function of the dye concentration. Error bars are obtained with three measurements.

3.2 FRET 特性参数实验

图 4 是浓度均为 0.5 mM 的 RhB 和 LDS821 的乙醇溶液 (折射率 1.361) 的吸收和辐射光谱. 由图可知, RhB 和 LDS821 在 542 nm 和 590 nm 处具有它们各自的吸收峰, 在 580 nm 和 800 nm 处具有各自的辐射峰; 同时, RhB 的辐射光谱和 LDS821 的吸收光谱为 FRET 提供了良好的光谱重叠^[18], 且选用 532 nm 的绿色抽运光非常有利于激发供体 RhB.

为了系统地表征能量转移效率及测定供受体对之间的 Förster 距离 (R_0) 等 FRET 特性参数, 我们用微泵 BT100-2J 将 RhB 和 LDS821 的乙醇混合溶液通入 PDMS 芯片的微流道中, 以波长为 532 nm 的低功率 (5 mW) CW 激光器作为激励

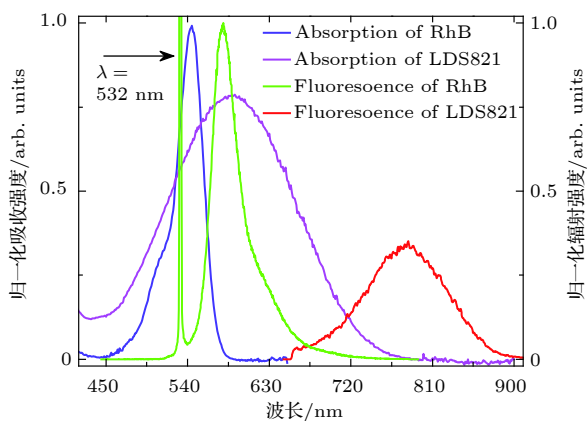


图4 归一化吸收和辐射光谱 蓝色和紫色实线分别表示 RhB 和 LDS821 的吸收光谱; 绿色和红色实线分别表示 RhB 和 LDS821 的辐射光谱

Fig. 4. Normalized absorption (blue, RhB; purple, LDS821) and emission (green, RhB; red, LDS821) spectra.

光, 获得如图 5(a) 所示的供-受体 (A/D) 对荧光辐射光谱. 如图中蓝色实线所示, 在没有供体 RhB 时, 由于激励光远离受体 LDS821 (浓度 $c = 1.0$ mM) 的吸收峰且自身的荧光量子效率较低^[19], 导致 LDS821 对激励光的吸收较弱, 从而使得 LDS821 荧光辐射强度也较弱. 相反, 在没有受体 LDS821 的情况下, 由于没有发生 FRET, 供体 RhB ($c = 0.5$ mM) 对激励光有较强的吸收且自身的荧光量子效率较高^[19], 所以在 $\lambda = 580$ nm 附近的荧光辐射强度达到最强. 保持供体 RhB 浓度不变 (0.5 mM), 随着受体浓度的逐渐增加, 由于 FRET 机制, 使得受体在 $\lambda = 800$ nm 附近的荧光辐射峰强度不断增强, 而供体 RhB 的荧光辐射峰强度逐渐减弱. 图 5(b) 是 FRET 效率 η 随受体与供体对比值 (A/D) 的变化关系, 由图可知, 随着 A/D 值的增加, η 不断增大. 且由于受供体浓度 (0.5 mM) 和受体溶解度的限制, 实验中, 当 $A/D = 8.0/0.5$ mM 时, 我们认为 η 到达最大 (约为 69.8%).

3.3 理论解释

当供体分子 (RhB) 吸收抽运光的能量后被激发到更高的电子能态, 在该电子回到基态前, 通过偶极子间的相互作用将其能量以非辐射方式传递给其邻近的受体分子 (LDS821). 由图 5(a) 可知, FRET 的直观表现就是, 当存在受体时, 供体的荧光辐射强度较其单独存在时要低得多, 而受体荧光辐射强度却大大增强.

不同比例的供受体对间的能量转移效率 η 满足

$\eta = 1 - I_D/I_{D0}$ ^[18], 其中 I_D 和 I_{D0} 分别表示有受体时供体的荧光辐射强度和没有受体时供体的荧光辐射强度. 对实验所用的不同的 A/D 值, 供体的荧光辐射强度可通过计算图 5(a) 所示的波长在 545—710 nm 范围内的荧光辐射光谱的积分强度获得, 如图 5(b) 红色三角形所示. 由文献 [11] 可知, η 还可用受体溶液浓度 c 表示为

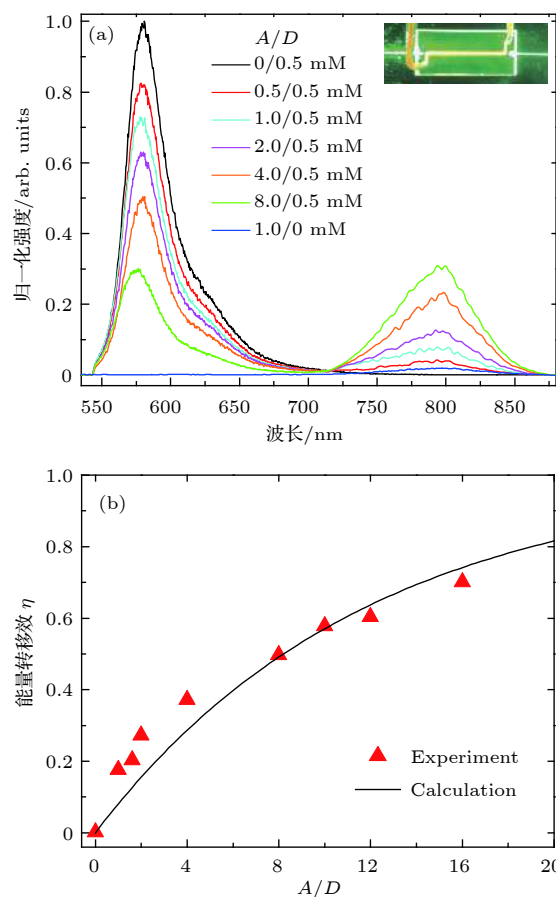


图5 (a) 以 RhB 和 LDS821 分别作为能量供体和能量受体的归一化荧光辐射光谱, A/D 为受体与供体浓度比值, 图中“ $A/D = 1.0/0$ mM”表示没有供体时受体的辐射光谱, 其他值表示固定供体浓度为 0.5 mM, 不同受体浓度所对应的 FRET 光谱, 插图为微流道中荧光辐射的实物图; (b) 红色三角形是根据图 5(a) 计算得到的能量转移效率 η 随 A/D 变化关系的实验值, 实线是根据 (1) 式得到的理论值

Fig. 5. (a) Normalized fluorescence spectra of RhB (donor) and LDS821 (acceptor); A/D , acceptor to donor ratio, $A/D = 1.0/0$ mM was collected for 1.0 mM acceptor in the absence of donor and the other spectra were collected for a constant donor concentration of 0.5 mM and the acceptor concentration changing from 0 to 8 mM; inset, the picture of fluorescent radiation generated in the PDMS microfluidic channel; (b) the red triangle is the experimental value of the energy transfer efficiency η as a function of A/D calculated from Fig. 5(a), and the solid line is the theoretical value calculated by formula (1).

$$\eta = 1 - \exp(-1.42c/c_0), \quad (1)$$

式中 c_0 表示供体强度下降到 50% 时受体分子的临界浓度, Förster 距离 R_0 表示能量转移效率 $\eta = 50\%$ 时的供受体对间的临界距离. 其中 c_0 和 R_0 满足^[11]

$$c_0 = \frac{3000}{4\pi N R_0^3}, \quad (2)$$

式中 N 为阿伏伽德罗常数. 由 (1) 式对图 5(b) 所示的实验数据进行拟合可得 $c_0 = 8.2$ mM, 对应的受体浓度为 3.9 mM, $A/D = 7.8$, 即此时供受体对之间实现了较高效率 (50%) 的能量转移. 将 c_0 代入 (2) 式可得 $R_0 = 3.6$ nm. 对于大多数供受体对, R_0 的范围为 1—10 nm^[20], 对应的溶液浓度范围为 μM —mM, 这是 optofluidic 染料激光器的常用浓度^[21,22]. 由此可知, 本文借助于 FRET 机制非常有利于实现受体分子的 WGM 激光辐射. 通过对 η 及 R_0 等 FRET 特性参数的表征, 对理解下文所述的 FRET 激光是至关重要的.

3.4 FRET 激光实验及讨论

通过表征 FRET 特性参数以后, 我们利用 RhB 和 LDS821 分别作为能量供体和能量受体的 FRET 激光实验. 实验中, 以波长为 532 nm 的 YAG 脉冲激光器作为抽运光, PDMS 基片微流道中流体的流速仍为 1.0 mL/min. 保持抽运光的能量密度不变 (约为 $1.45 \mu\text{J}/\text{mm}^2$), 得到图 6(a) 所示的不同 A/D 值所对应的激光光谱. 如图所示, 在没有受体 LDS821 时, RhB ($c = 0.5$ mM) 在 $\lambda = 585$ nm 附近具有较强的激光辐射峰. 随着受体 LDS821 的加入 ($A/D = 0.5/0.5$ mM), 供体激光辐射强度降低, 同时, 在波长较长的一侧出现了较为突出的受体辐射峰 (797, 822, 828 nm), 表明在这些波长处首先达到了受体的激光阈值. 然而, 由于实验中采用的是密度 $g = 150$ g/mm 的低分辨率光栅, 导致激光辐射峰不能完全被分辨. 图 7 是采用中等分辨率 ($g = 1200$ g/mm) 的光栅所采集的不同 A/D 值对应的 RhB 在 578—592 nm 波长范围以及 LDS821 在 810—838 nm 波长范围的激光光谱. 由图可知, 随着 A/D 值的进一步增加, 由于 FRET 效应, 供体激光从逐渐减弱到完全淬灭 ($A/D = 8/0.5$ mM), 而受体激光辐射强度从逐渐增强到最强.

图 6(b) 是在没有受体时 RhB ($c = 0.5$ mM) 在 $\lambda = 585$ nm 处的激光阈值及供体激光辐射完全淬灭 ($A/D = 8/0.5$ mM) 时受体 LDS821 在 $\lambda = 822$ nm 处的激光阈值. 由图可知 RhB 和 LDS821 的激光阈值分别为 $0.48 \mu\text{J}/\text{mm}^2$ 和 $1.26 \mu\text{J}/\text{mm}^2$. 可见, 由于 RhB 较高的荧光量子效率以及对 532 nm 抽运光较大的吸收, 使得 RhB 即使在较低的溶液浓度条件下同样表现出较低的激光阈值. 作为对比, 我们测量了在没有供体 RhB 时, 浓度为 8 mM 的受体 LDS821 在 $\lambda = 822$ nm 处的激光阈

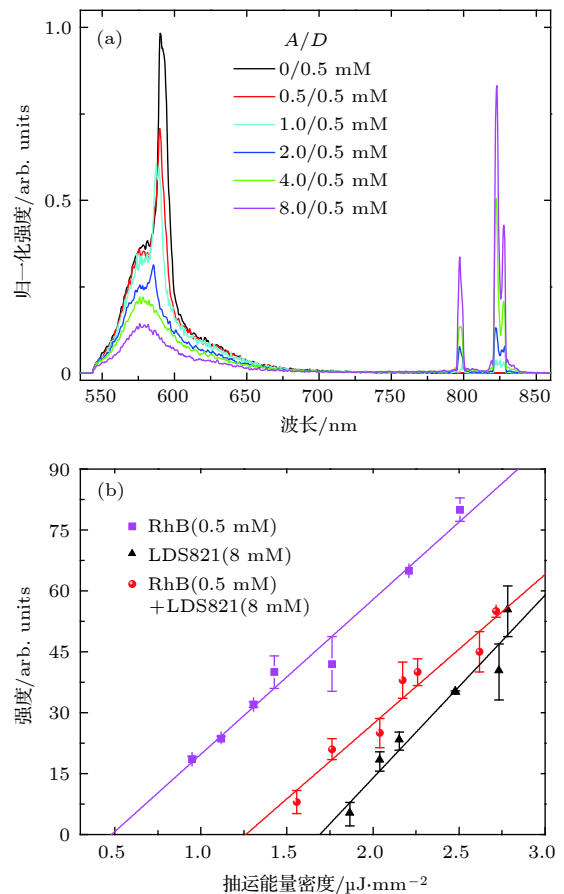


图 6 (a) 不同 A/D 值对应的低分辨率 (光栅密度 $g = 150$ g/mm) 的 FRET 激光光谱, 供体浓度保持 0.5 mM 不变; (b) 激光辐射峰强度随抽运光能量密度的变化关系; 供体峰值为 585 nm, 阈值约为 $0.48 \mu\text{J}/\text{mm}^2$; $A/D = 8/0.5$ mM 和 $A/D = 8/0$ mM 的 LDS821 的峰值均为 822 nm, 其阈值分别为 $1.26 \mu\text{J}/\text{mm}^2$ 和 $1.69 \mu\text{J}/\text{mm}^2$

Fig. 6. (a) Low resolution (grating density = 150 g/mm) FRET lasing spectra for various A/D values, the donor concentration is fixed at 0.5 mM; (b) lasing peak intensity vs. pump energy density. The donor peak is at 585 nm and its lasing threshold is approximately $0.48 \mu\text{J}/\text{mm}^2$. The peaks of LDS821 for $A/D = 8/0.5$ mM and $A/D = 8/0$ mM are at 822 nm and their lasing threshold is approximately $1.26 \mu\text{J}/\text{mm}^2$ and $1.69 \mu\text{J}/\text{mm}^2$, respectively.

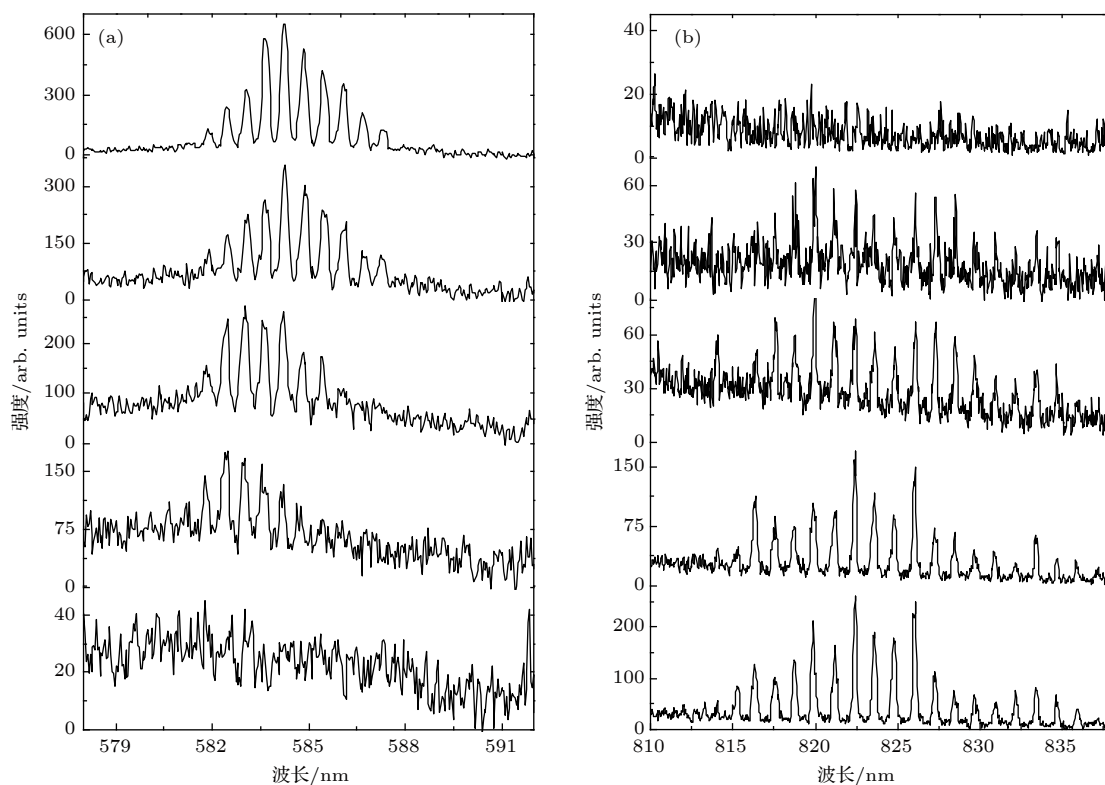


图 7 不同 A/D 值对应的中等分辨率 (光栅密度 $g = 1200 \text{ g/mm}$) 的激光光谱. 光谱图从上到下分别对应 $A/D = 0/0.5, 0.5/0.5, 1/0.5, 4/0.5, 8/0.5 \text{ mM}$; (a) RhB(供体) 的激光光谱; (b) LDS821(受体) 的激光光谱

Fig. 7. Medium resolution (grating density = 1200 g/mm) lasing spectra for various A/D values. The spectra correspond to $A/D = 0/0.5, 0.5/0.5, 1/0.5, 4/0.5, 8/0.5 \text{ mM}$ from top to bottom: (a) Lasing spectra of RhB (donor); (b) lasing spectra of LDS821 (acceptor).

值, 由图 6(b) 可得激光阈值为 $1.69 \mu\text{J}/\text{mm}^2$, 远大于 $A/D = 8/0.5 \text{ mM}$ 时 LDS821 的激光阈值 $1.26 \mu\text{J}/\text{mm}^2$. 说明由于 LDS821 较低的荧光量子效率以及对 532 nm 抽运光较弱的吸收, 即使在较高的溶液浓度条件下激光阈值仍然较高. 因此, 我们利用 RhB 较低的激光阈值特性以及 RhB 的辐射光谱和 LDS821 的吸收光谱的良好重叠特性, 借助于两种分子间的 FRET 机制, 实现了较低阈值的受体 LDS821 的激光辐射.

4 结 论

本文设计并制作了一种基于 PDMS 的微流芯片. 利用该芯片实现了微流道中溶液的循环流动以及自动更换, 解决了染料溶液易漂白以及由于手动更换溶液而导致系统的稳定性降低的问题. 在此基础上, 采用沿光纤轴向消逝波光抽运方式, 利用 RhB 较低的激光阈值以及 RhB 的辐射光谱和 LDS821 的吸收光谱的良好重叠特性, 在不改变抽运光波长的条件下, 借助于两种分子间的 FRET

机制, 实现了较低阈值的受体 LDS821 的激光辐射. 本文所述的光流控 FRET 激光可为芯片上的实验室提供一种波长可调谐的低阈值激光光源, 在生物技术^[23]及化学分析^[24]等领域具有潜在的应用价值.

参考文献

- [1] Li Z, Psaltis D 2008 *Microfluid. Nanofluid.* **4** 145
- [2] Holger S, Aaron R H 2011 *Nat. Photon.* **5** 598
- [3] Chen Q, Zhang X, Sun Y, Ritt M, Sivaramakrishnan S, Fan X 2013 *Lab on a Chip* **13** 2679
- [4] Wang C S, Chang T Y, Lin T Y, Chen Y F 2014 *Sci. Reports* **4** 6736
- [5] Li J, Li M M, Sun L P, Fan P C, Ran Y, Jin L, Guan B O 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 074209 (in Chinese) [李杰, 李蒙蒙, 孙立朋, 范鹏程, 冉洋, 金龙, 关柏鸥 2017 *物理学报* **66** 074209]
- [6] Mellors J S, Jorabchi K, Smith L M, Ramsey M 2010 *Anal. Chem.* **82** 967
- [7] Vahala K J 2003 *Nature* **424** 839
- [8] Humar M, Yun S H 2015 *Nat. Photon.* **27** 572
- [9] Zhang Y X, Meng W D, Yang H Y, Pu X Y 2015 *Opt. Lett.* **40** 5101
- [10] Cerdán L, Enciso E, Martín V 2012 *Nat. Photon.* **6** 621
- [11] Förster T 1959 *Discuss Faraday Soc.* **27** 7
- [12] Ozcelci E, Aas M, Jonas A, Kiraz A 2014 *Laser Phys. Lett.* **11**

- 045802
- [13] Armstrong R L, Xie J G, Ruekgauer T E 1992 *Opt. Lett.* **17** 943
- [14] Maslov V V 2008 *4th International Conference on Advance Optoelectronics & Lasers* Alushta, Crimea, Ukraine, September 29–October 4, 2008 p366
- [15] Shopova S I, Cupps J M, Zhang P, Henderson E P, Lacey S, Fan X D 2008 *Opt. Express* **15** 12735
- [16] Sun Y, Shopova S I, Wu C S 2010 *Proc. Natl. Sci. Acad. USA* **107** 16039
- [17] Zhang Y X, Pu X Y, Zhu K, Feng L 2011 *J. Opt. Soc. Am. B* **28** 2048
- [18] Sahoo H 2011 *J. Photochem. Photobiol. C: Photochem. Rev.* **12** 20
- [19] Brackmann U 2000 *Goettingen Lambda Physik GmbH* 1
- [20] Stryer L, Haugland R P 1967 *Proc. Natl. Sci. Acad. USA* **58** 719
- [21] Li Z, Psaltis D 2007 *J. Sel. Top. Quantum Electron.* **13** 185
- [22] Zhang Y X, Pu X Y, Feng L, Han D Y, Ren Y T 2013 *Opt. Express* **21** 12617
- [23] Bene L, Ungvári T, Fedor R, Damjanovich L 2014 *Biochim. Biophys. Acta* **1843** 3047
- [24] Du J, Zhu T, Ma W, Cao W, Gu Q, Fan J, Peng X 2017 *Ind. Eng. Chem. Res.* **56** 10591

Optofluidic fluorescence resonance energy transfer lasing in a polydimethylsiloxane microfluidic channel*

Li Dong-Yang Zhang Yuan-Xian Ou Yong-Xiong Pu Xiao-Yun[†]

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

(Received 11 September 2018; revised manuscript received 11 November 2018)

Abstract

A bare quartz fiber with single refractive index is implanted into a polydimethylsiloxane (PDMS) microfluidic channel. The lasing gain medium consists of fluorescence resonance energy transfer (FRET) donor-acceptor dye pair Rhodamine B (RhB)-LDS821 mixture solution, which has a lower refractive index than that of the optical fiber and flows in the PDMS microfluidic channel. The circular cross section of the optical fiber forms a ring resonator and hosts high-quality (Q) whispering gallery modes (WGMs). Pumping along the optical fiber axis, the FRET characteristic parameters, i.e., the FRET efficiency η and the Förster distance R_0 of donor-acceptor dye pair, are firstly studied by using a continuous wave laser as a pump light source with a wavelength of 532 nm. The excited states are then created in the donor (RhB) by using a pulse laser with a wavelength of 532 nm and whose energy is transferred into the adjacent acceptor (LDS821) through the non-radiative FRET mechanism. Finally, the emission of LDS821 is coupled into the WGM of the ring resonator to lase. Due to the high energy transfer efficiency and high Q -factor, the acceptor shows a lasing threshold as low as 1.26 $\mu\text{J}/\text{mm}^2$.

Keywords: optofluidic laser, fluorescence resonance energy transfer, evanescent wave

PACS: 42.55.Sa, 42.55.Mv, 42.60.Da, 42.60.Lh

DOI: 10.7498/aps.68.20181696

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11864045, 11404282, 61465014, 61465015), the Young and Middle-aged Academic and Technical Leaders (Reserve Talent) in Yunnan Province, China (Grant No. 2018HB029), and the China Scholarship Council (CSC) Foundation.

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