

基于波导-同心环形谐振腔模型的 纳米流体荧光颗粒微位移检测*

李长亮¹⁾²⁾ 陈智辉^{1)2)†} 冯光¹⁾²⁾ 王晓伟¹⁾²⁾ 杨毅彪¹⁾²⁾
费宏明¹⁾²⁾ 孙非¹⁾²⁾ 刘一超¹⁾²⁾

1) (太原理工大学, 新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 太原 030024)

2) (太原理工大学物理与光电工程学院, 太原 030024)

(2022 年 4 月 21 日收到; 2022 年 6 月 14 日收到修改稿)

对微纳流体中纳米粒子的动态跟踪与检测一直是一项具有挑战性和高要求的工作. 本文提出了波导-同心环形谐振腔集成光学模型, 根据波导-同心环形谐振腔耦合结构输出的荧光功率强度变化来实现对微纳流体中纳米颗粒的微位移检测. 由于环形微谐振腔具有高 Q 以及对周围环境响应敏感的特性, 因而极大提高了器件的灵敏度. 使用时域有限差分法对荧光的偏振态, 两个环形谐振腔的间距等参数进行了数值仿真模拟, 利用荧光输出功率双峰值的变化能够对纳米粒子的微位移进行高精度的检测. 基于双峰值变化的同步检测可降低环境噪声影响从而提高了检测精度, 数值模拟结果也证实了此种方法可对纳米流体中纳米颗粒在 0—1000 nm 范围对微位移进行实时动态的测定. 本工作可以为微纳流体领域传感器系统的设计提供新的方向和思路.

关键词: 纳米粒子, 微纳流体, 环形谐振腔, 生物检测

PACS: 47.61.-k, 75.40.Mg, 02.70.Bf

DOI: 10.7498/aps.71.20220771

1 引言

微纳流体芯片是使用微型通道对通道内的生物溶液的流速以及溶液中所含微小颗粒进行检测的器件^[1], 在生物医疗、化学、环境检测等领域^[2–5]有着广泛的应用. 由于微纳流体芯片具有体积小特点, 因此可以处理微米纳米级别的流体, 降低样品损耗, 提高检测精度和响应速率. 在微纳流体芯片中, 对微纳流体中纳米颗粒运动规律及微位移的研究为药物开发、疾病诊断、微尺度生物检测^[6–10]提供了重要的理论基础.

近几十年来, 针对微纳流体中颗粒检测的大多数研究采用了成像法^[11]. 例如, 唐文来等^[12]利用成像法对微流通道内颗粒迁移行为进行研究, 实现了流体内的粒子跟踪. 然而利用成像的方法对粒子跟踪与检测会受到激发光的影响, 对成像系统有着不同程度的干扰, 以及其成像系统具有点扫描的性质造成分辨率低, 加上需要大量的后处理, 所以成像法并不能很好地对纳米颗粒进行实时检测. 此外, 最近几年光学技术和微流控技术的结合出现了一个新的光流体学领域^[13–15]. 基于光学的方法对微流体通道内生物溶液中颗粒的监测变得越来越有吸引力^[16–19]. 光流体学在生物成像^[20]和微小颗

* 国家自然科学基金 (批准号: 62175178, 11674239, 61971300, 61905208, 11904255)、中央引导地方科技发展资金项目 (批准号: YDZJSX2021A013)、山西省青年拔尖人才支持计划和三晋英才支持计划资助的课题.

† 通信作者. E-mail: huixu@126.com

粒检测^[21,22]等领域显示出巨大的潜力. 在这种动力推动下, 人们探索了许多种集成光子器件例如波导^[23]、微环^[24]、光子晶体^[25]、等离子体谐振器^[26]等来检测和捕获微流体通道中的粒子. 其中基于表面等离子体共振效应, 根据透射光谱的偏移能够检测直径显著小于辐射波长的单个微粒^[27]. 此外, 基于光纤布拉格光栅法布里-珀罗法, 可以通过不同微粒的共振波长来实现对微流体中微米级颗粒进行检测^[28]. 而这些方法大多是对微流体中单个纳米颗粒有无的检测或者对纳米颗粒不同尺寸的检测, 很少涉及对纳米颗粒微位移的精准测量.

由于环形谐振腔具有高 Q 值, 对环境变化响应灵敏等特性^[29,30], 被研究者们广泛用来探究对纳米荧光颗粒的监测. 例如, Chien 等^[31]利用氮化硅谐振器结合机电的方法实现了对纳米粒子位置的高灵敏的探测. 随着对微流体中纳米粒子检测的不断深入研究, 研究者们探索了基于谐振腔对微纳流体中荧光颗粒的计数^[32]、流体的动态监测^[33]、单个纳米粒子的检测^[21]、纳米粒子横向位移的变化^[34]、颗粒的被动聚焦^[35]等的研究. 而在微流体的研究中, 流体荧光颗粒的位移检测在微流体领域也变得愈发重要, 然而很少有基于谐振腔对纳米流体中的荧光纳米颗粒微位移检测的研究.

本工作提出了一种微纳光流体集成光学模型, 该模型由波导和两个同心环形谐振腔组成. 通过荧光输出功率强度的变化来对纳流通道内的荧光纳米颗粒进行检测. 由于采用的是荧光输出功率双峰值的变化对微位移进行检测, 可减弱背景噪声带来的影响, 提高检测的精准性. 利用时域有限差分法对纳流通道内的纳米荧光颗粒进行数值模拟计算, 探究荧光量子点的不同偏振方向、同心环形谐振腔的环间距和结构折射率对荧光输出功率强度的影

响. 数值计算结果表明, 该光流体模型可实现对纳米流体中纳米颗粒高精度的微位移检测, 同时也可以为光流体纳米级分子成像、药物筛选提供重要的参考价值.

2 模型与方法

本文提出的波导-同心环形谐振腔耦合结构示意图如图 1 所示, 整个光学模型是由上方波导内的纳流通道、中间两个同心环形谐振腔与上、下波导组成, 上方直波导的宽 W_3 、下方直波导的宽 $W_5 = 200$ nm, 上方波导内的纳流通道宽 $W_4 = 100$ nm, 结构中间位置的双环形谐振腔的外环形谐振腔半径 R_1 、内环形谐振腔半径 R_2 , 内外环形谐振腔宽度均为 200 nm, 两个环形谐振腔的间距为 W_6 . 上方波导和下波导距离环形谐振腔的距离均为 $W_1 = 200$ nm. 黄色的点代表流体中纳米荧光颗粒, W_2 为流体中纳米颗粒运动的长度, 规定在环形谐振腔正上方的纳流通道向左 1000 nm 处为坐标原点 O , 如图 1(b) 中坐标原点已标出. 其中上方波导内的纳米微流通道注入的是待测生物溶液, 初始仿真的待测生物溶液的折射率为 $n = 1.35$. 整体光学模型选择折射率 $n = 2.94$ 的砷化铝材料, 并将其置于空气环境中 ($n = 1$).

本工作在二维尺度上采用时域有限差分法对所提出的同心环形谐振腔-波导耦合结构进行数值模拟计算, 模拟区域为仿真区域为 $[x, y] = [-4500: 4500, -5000: 5000]$ nm, 计算网格精度设置为 $[dx, dy] = [20, 5]$ nm, 采取足够小的网格精度来确保数值仿真计算结果的准确性. 边界条件为完美匹配层 (perfectly matched layers, PML). 使用偶极子光源 (dipole) 模拟纳米流体中的荧光

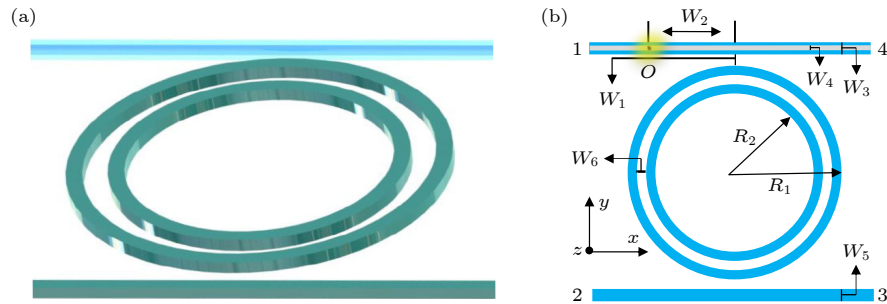


图 1 (a) 波导-同心环形谐振结构模型的三维示意图; (b) 波导-同心环形谐振结构的二维示意图

Fig. 1. (a) 3D schematic diagram of the waveguide-concentric ring resonant structure model; (b) 2D schematic diagram of the waveguide-concentric ring resonant structure.

颗粒, 通过将偶极子光源放在不同的位置来模拟纳米颗粒在纳流体中运动行为. 偶极子光源的波长范围设置为 1250—1350 nm. 采用 Y 方向线监视器对 3 号输出端口进行荧光功率的监测, 在 XY 二维平面上对整个模拟区域用面监视器研究其电场分布, 电场分布与功率曲线结合的方式来证实仿真结果的正确性. 本工作通过在纳米流体中的纳米荧光颗粒, 发出的荧光经过上方波导耦合到中间的同心谐振腔, 光在两个谐振腔中经过相互干涉耦合, 再通过下方波导耦合输出, 通过观察 3 号输出端口的荧光输出功率强度变化, 来表征流体中纳米颗粒的运动状况, 实现对流体中纳米颗粒微位移的实时动态检测.

3 结果和讨论

3.1 量子点偏振方向对荧光输出功率的影响

由于在单一介质中荧光量子点的辐射方向是各向同性的. 在数值模拟过程中, 需要选取具有代表性的偏振方向进行仿真计算. 在本工作选取 X , Y , Z 三个偏振方向的量子点, 研究这 3 个方向的量子点光源与波导-同心环形谐振腔结构的耦合对荧光输出功率的影响. 上下波导距离同心环形谐振

腔的距离为 100 nm, 两个同心环形谐振腔的距离为 100 nm, 两个环形谐振腔的折射率为 2.94. 通过仿真计算得到不同偏振方向的量子点与波导-同心谐振腔耦合结构耦合输出的荧光功率强度曲线如图 2(a) 所示. 从曲线可观察到量子点在 X 偏振状态下, 其荧光输出功率曲线强度较低, 说明此偏振状态下的荧光与结构耦合效果较差. 从 Y 偏振状态下的功率曲线图中, 观察到波长在 1281 nm 和 1335 nm 两处下有明显的荧光输出峰值, 这两处峰值是由于在纳米流体中的荧光颗粒发出的荧光与波导-谐振腔结构耦合产生的. 在 Z 偏振状态下可看到有多处峰值且峰值较高, 这是由于荧光通过波导耦合进环形谐振腔, 光在腔内发生干涉相加和干涉相减的现象, 因而出现多处较高的峰值, 这是由于环形谐振腔本身具有的滤波效应. 图 2(b)—(d) 为不同偏振态下的荧光在波长 1281 nm 处下的电场分布. 从图 2(b) 中的电场分布可以观察到荧光量子点在 X 偏振态下时, 其电场分布较弱, 只有很少一部分的光耦合到微腔之中, 因而荧光输出功率低. 而图 2(c) 中可看到当量子点在 Y 偏振态下时, 电场在同心谐振腔以及下方波导分布较强, 说明荧光很好地耦合到结构中并从下方波导中输出. 而在图 2(d) 中当量子点在 Z 偏振态下时, 可看

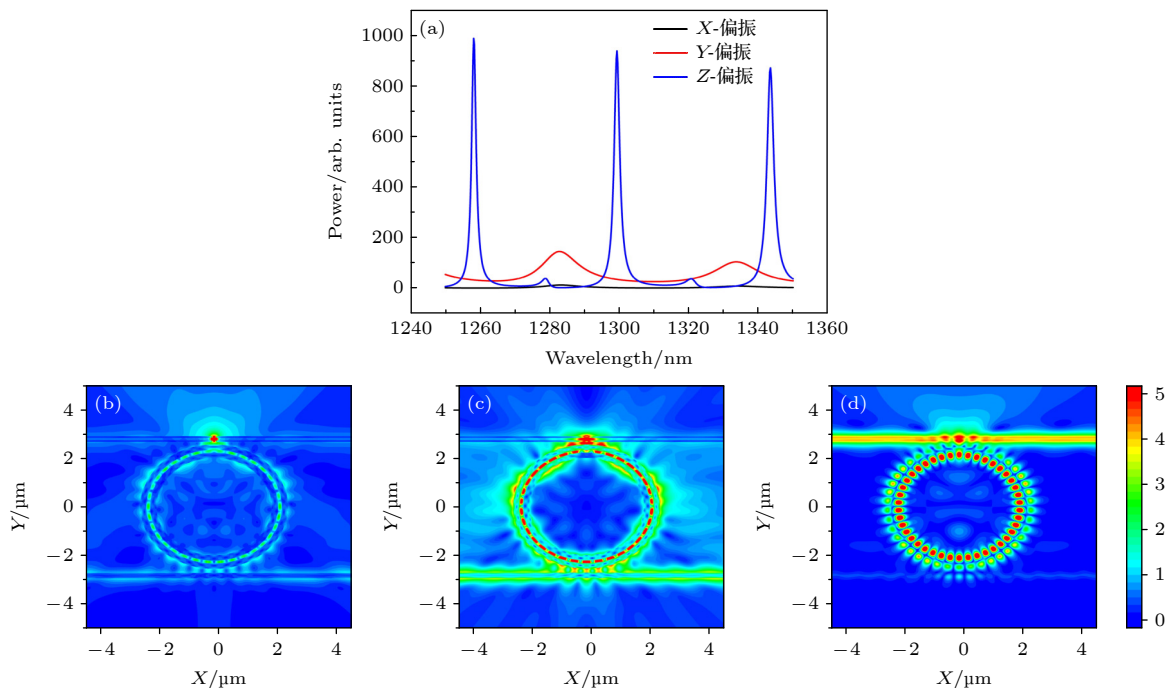


图 2 (a) 不同偏振状态下的功率曲线示意图; (b)—(d) XYZ 三个不同偏振态下的量子点在波长为 1281 nm 处的电场图
Fig. 2. (a) Schematic diagram of the power curves under different polarization states; (b)–(d) the electric field diagrams of the quantum dots at the wavelength of 1281 nm under three different polarization states of XYZ .

到电场在上方波导及同心谐振腔分布较强,说明荧光更多的局域在谐振腔内并没有很好地耦合到下方输出波导. 因而据初步分析, 本文接下来采取 Y 偏振态进行研究.

3.2 不同上方波导宽度对荧光输出功率强度的影响

为了探究荧光的辐射与所提出的波导-同心环形谐振腔的耦合效果, 研究不同上方波导宽度 W_3 对荧光功率输出的影响则变得尤为重要. 图 3 所示为不同上方波导宽度的荧光输出功率曲线. 因为纳流通道的宽度在 100 nm, 所以探索了上方波导宽度在 200—700 nm 范围内的波导宽度对荧光输出的影响.

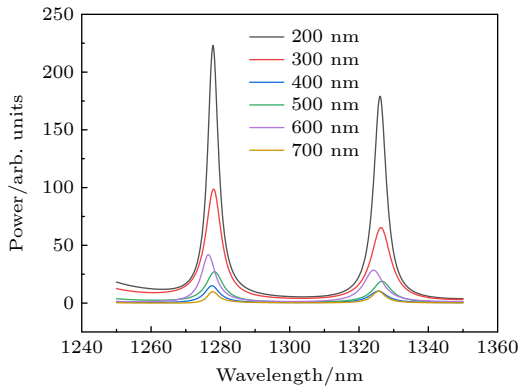


图 3 不同上方波导宽度的荧光输出功率曲线图

Fig. 3. Fluorescence output power curves of different upper waveguide widths.

从图 3 可以明显看出, 波长 1281 nm 和 1325 nm 附近有两处峰值, 这是由于荧光和波导-同心环形谐振腔结构耦合的效果. 此外, 随着上方波导宽度的增加, 荧光输出峰值功率呈下降的趋势. 说明上方波导的宽度越大, 荧光与所设计的结构耦合效果越差; 波导宽度越小耦合效果越好, 荧光输出功率越强. 由于实验上制作窄波导对制备要求比较高, 且纳流通道的宽度在 100 nm, 故在仿真实验中选取 200 nm 宽度的上方波导来进行后续研究.

3.3 不同结构材料折射率对荧光输出强度的影响

对于设计的结构, 考虑到不同材料对荧光与谐振腔耦合的影响. 探究了不同折射率的材料对荧光输出功率强度的影响, 通过时域有限差分的方法对荧光与波导-同心谐振腔的结构进行了数值模拟

计算. 图 4 所示为不同折射率材料的荧光输出功率曲线.

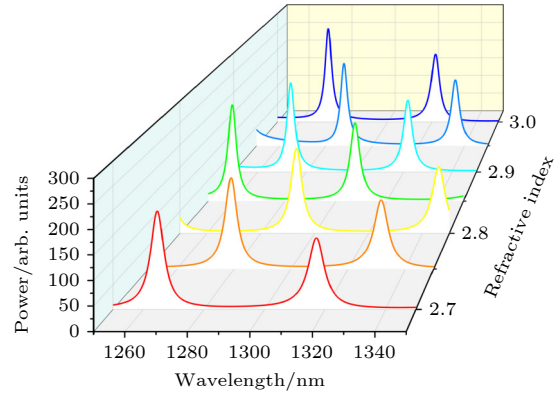


图 4 材料折射率为 2.7—3.0 的荧光输出功率曲线

Fig. 4. The fluorescence output power curve of the material with a refractive index of 2.7–3.0.

从图 4 可以看出, 当整个光学结构的折射率在 2.7—3.0 之间, 仿真波长在 1250—1350 nm 范围内时, 每个折射率下都会出现双峰值现象, 峰值功率没有明显的变化趋势, 只是不同折射率下会出现共振峰偏移. 这极大地方便了结构设计材料选取. 本文接下来的研究采取折射率为 2.94, 加工方便的砷化铝材料.

3.4 同心环形谐振腔的间距对输出荧光强度的影响

由于本工作采取的是波导-同心环形谐振腔耦合结构, 所以探究了同心环形谐振腔之间的距离 W_6 对荧光输出功率强度的影响. 在不改变环形谐振腔宽度的情况下, 对环形谐振腔之间的距离 W_6 在 0—400 nm 变化时进行仿真计算. 图 5 所示为环间距 W_6 在不同距离下的荧光输出功率曲线图.

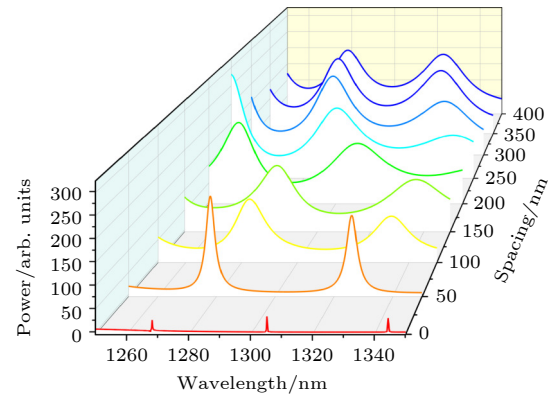


图 5 不同环间距的荧光输出功率曲线图

Fig. 5. Fluorescence output power curves of different ring spacings.

从图 5 可观察出, 当两个环形谐振腔的距离 $W_6 = 0$ 时, 输出荧光功率强度极低, 荧光与环形谐振腔没有达到一个好的荧光耦合. 这是因为两个环形谐振腔距离为零, 相当于一个宽的环形微腔, 荧光与环形微腔的共振波长不一致, 导致耦合效果差, 出现了输出功率极低的现象. 当距离 $W_6 = 50$ nm 时, 可以清楚看到有两处强荧光输出功率峰值. 这是由于两个环形谐振腔的距离近, 耦合到环形谐振腔的荧光会相互耦合、干涉, 故而出现了两处较好的峰值曲线. 当距离 W_6 在 50—250 nm 时, 由于两个环形谐振腔的距离不同所以出现的荧光耦合效果不同, 继而会出现共振波长偏移以及荧光输出功率较弱的现象. 当环形谐振腔的间距 W_6 在 250—400 nm 时可清楚观察到, 荧光功率曲线趋势一致, 几乎没有因为距离不同造就很大的变化. 这是由于两个环形谐振腔的距离超出了相互耦合范围, 荧光主要与外层环形谐振腔耦合, 而里面的环形谐振腔几乎没有荧光, 所以荧光功率曲线没有明

显的变化趋势.

图 6 所示为不同环间距下的电场分布图. 从图 6(a) 可看出电场分布较弱, 荧光与结构耦合性差, 证实了当环间距 $W_6 = 0$ 时, 荧光输出功率强度低的现象. 当环间距 W_6 在 50—250 nm 时, 两个环形谐振腔的荧光会相互耦合. 间距 W_6 在 50—150 nm 时耦合电场强度较强; 随着距离的增加, 两个环形谐振腔的耦合电场减弱. 而环间距 W_6 在 300—400 nm 时, 可观察出在外层环谐振腔有电场分布, 而在内环上几乎没有电场分布, 这是因为环间距距离过远, 超出了耦合范围. 这也与荧光输出功率曲线一致. 基于以上分析选取当环形谐振腔的间距在 $W_6 = 50$ nm 和 $W_6 = 350$ nm 处进行后续研究.

3.5 纳米荧光粒子运动在不同位置对输出荧光强度的影响

基于以上综合研究, 展开了当荧光纳米粒子在纳流通道内移动对荧光输出功率曲线的研究. 基于

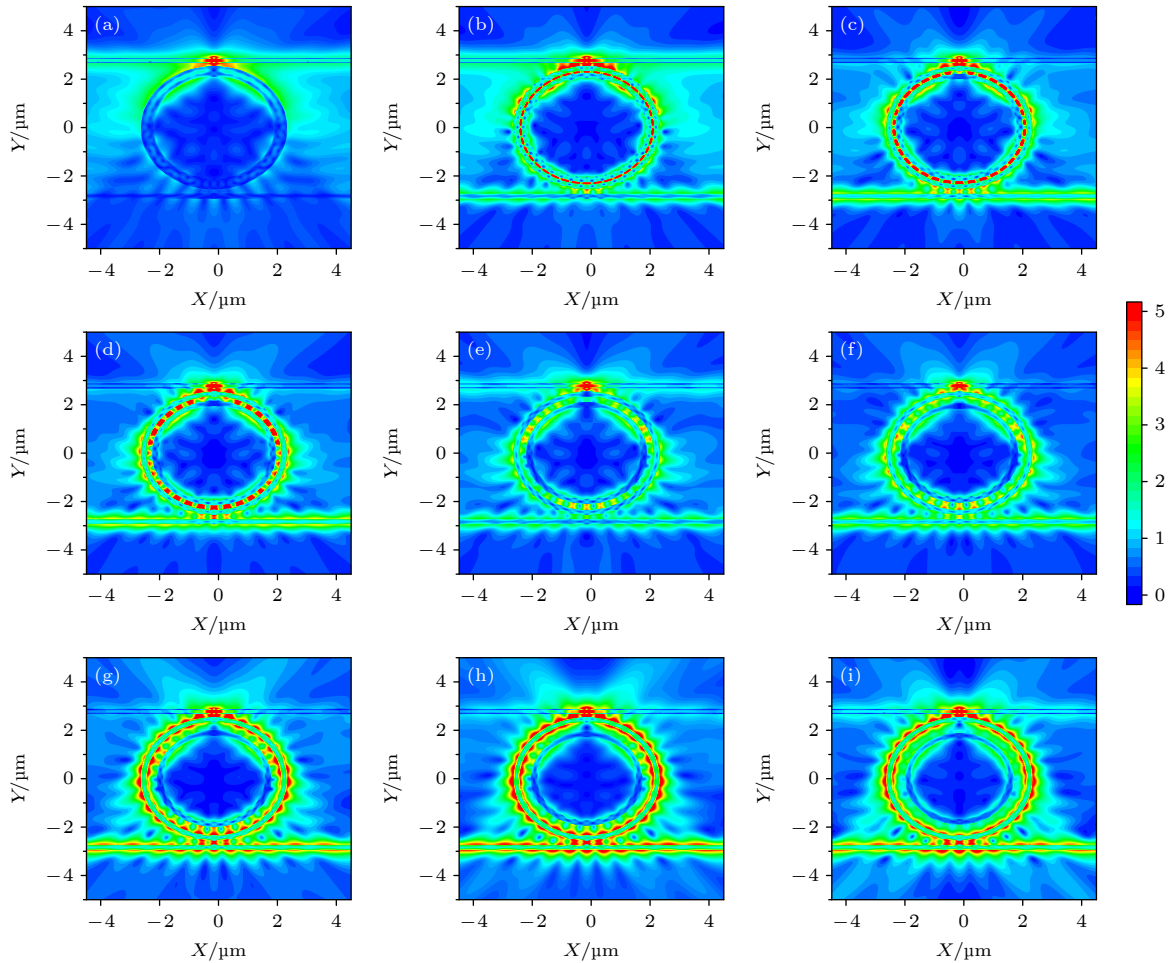


图 6 (a)–(i) 环间距分别为 0, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400 nm 的电场分布图 ($\lambda = 1281$ nm)

Fig. 6. (a)–(i) Electric field distributions with ring spacings of 0, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, and 400 nm ($\lambda = 1281$ nm).

时域有限差分的方法, 当量子点在 0—1000 nm 范围内运动时, 分别数值模拟当环间距在 50 nm 和 350 nm 时的荧光输出功率曲线, 如图 7 所示.

从图 7(a) 可以看出, 当环间距在 350 nm 时, 虽然在波长 1250—1350 nm 范围内出现荧光峰值, 但是随着量子点在 0—1000 nm 中动态变化时, 峰

值变化并没有明显的规律. 因此不选用 350 nm 的环间距去对纳米流体的荧光物质进行微位移的检测. 而在图 7(b) 中可以观察出当环间距在 50 nm 时, 随着荧光纳米粒子在 0—1000 nm 范围内运动时, 两个荧光输出功率峰呈现上升的趋势, 如图 7(c) 所示为波长在 1280 nm 与 1325 nm 附近时荧光输

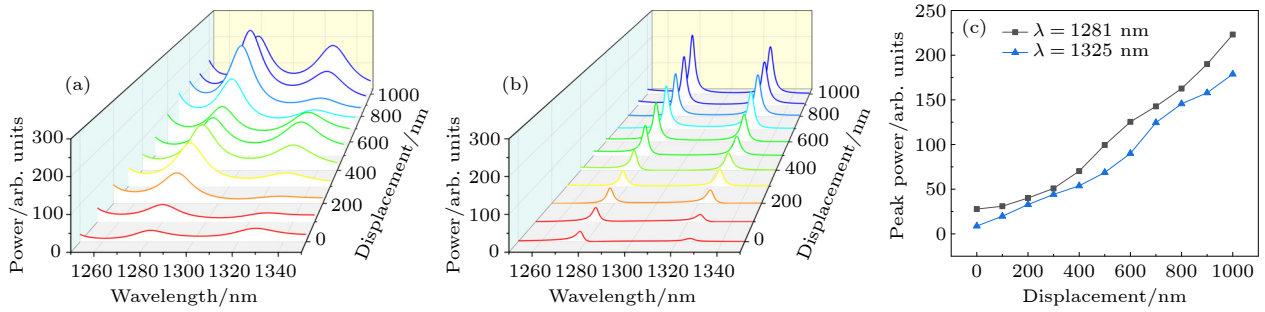


图 7 (a), (b) 环间距在 350 nm 与 50 nm 时, 荧光量子点的运动范围在 0—1000 nm 时的荧光输出示意图; (c) 环间距在 50 nm 时, 波长在 1280 nm 与 1325 nm 附近时, 荧光量子点的运动范围在 0—1000 nm 时的荧光峰值功率曲线图

Fig. 7. (a), (b) Schematic diagrams of the fluorescence output when the ring spacings are 350 nm and 50 nm, and the motion range of the fluorescent quantum dots is 0—1000 nm; (c) when the ring spacing is 50 nm, the wavelengths are 1280 nm and 1325 nm. Fluorescence peak power curve graph when the motion range of fluorescent quantum dots is in the vicinity of 0—1000 nm.

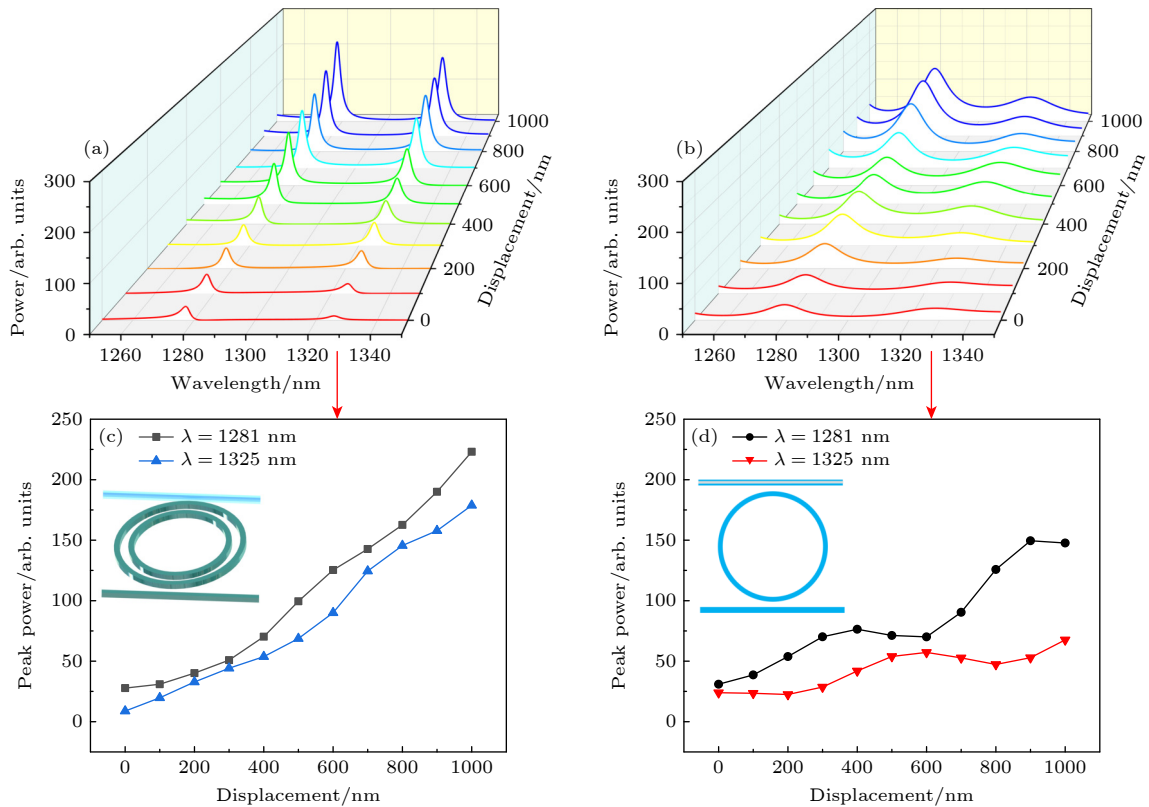


图 8 荧光量子点的运动范围在 0—1000 nm 变化时 (a) 本工作的荧光功率输出示意图, (b) 波导-单谐振腔的荧光功率输出示意图; (c), (d) 波长在 1280 nm 与 1325 nm 附近时, 两个结构的荧光输出功率峰值曲线图

Fig. 8. When the motion range of fluorescent quantum dots varies from 0 to 1000 nm: (a) The schematic diagram of the fluorescence power output of this work; (b) the schematic diagram of the fluorescence power output of the waveguide-single resonator; (c), (d) the fluorescence output power peak curves of the two structures when the wavelength is around 1280 nm and 1325 nm, respectively.

出功率峰值与微位移变化的曲线图.

本文工作与之前的工作对比如图 8 所示. 本课题组^[36]前期提出的波导-单谐振腔结果如图 8(b), (d) 所示, 在 1281 nm 和 1325 nm 两个波长附近功率变化不明显, 检测灵敏度较低; 而本工作结果如图 8(a), (c) 所示, 随着荧光颗粒的移动, 荧光输出功率峰值的变化规律更为明显, 随位移变化的检测灵敏度更高, 且本工作得到的荧光功率峰值也比之前工作强、信噪比高. 利用双峰值曲线保证了对荧光纳米粒子检测的精准度, 验证了荧光纳米粒子随着微位移的变化, 荧光输出功率峰值增加. 因此, 本工作可以基于荧光输出功率峰值的变化对纳米流体中的荧光颗粒进行实时动态的微位移检测.

4 结 论

本工作提出的波导-同心环形谐振腔结构可实现纳米流体中微小颗粒高精度实时动态的微位移测量. 测量原理是基于对纳米流体中的微小颗粒进行荧光标记, 当荧光微粒在上方波导内的纳米通道内移动时, 不同位置的荧光微粒辐射出的荧光与环形谐振腔的耦合效果不同, 我们基于荧光输出功率峰值的变化来对纳米流体中的颗粒实现纳米级的实时动态的微位移测量. 综上所述, 我们提出的模型在生化物质和分子物质的感知以及微流体中纳米微粒的检测发挥关键作用, 为医学和生物分析筛选领域提供了新的契机.

参考文献

- [1] Min L L, Chen S Y, Sheng Z Z, Wang H L, Wu F, Wang M, Hou X 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 178301 (in Chinese) [闵伶俐, 陈松月, 盛智芝, 王宏龙, 吴锋, 王苗, 侯旭 2016 物理学报 **65** 178301]
- [2] Mitchell K R, Esene J E, Woolley A T 2022 *Anal. Bioanal. Chem.* **414** 167
- [3] Rigas E, Hallam J M, Charrett T O H, Ford H D, Tatam R P 2019 *Opt. Express* **27** 23849
- [4] Komatsu T, Tokeshi M, Fan S K 2022 *Biosens. Bioelectron.* **195** 113631
- [5] Wang X, Wang K G, Meng K K, Sun D, Han T Y, Gao A H 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 168202 (in Chinese) [王琰, 王凯歌, 孟康康, 孙聃, 韩全雨, 高爱华 2020 物理学报 **69** 168202]
- [6] Lee T H, Kwon H B, Song W Y, Lee S S, Kim Y J 2021 *Lab Chip* **21** 1503
- [7] Zhu X, Suo Y, Fu Y, Zhang F, Ding N, Pang K, Xie C, Weng X, Tian M, He H, Wei X 2021 *Light Sci. Appl.* **10** 110
- [8] Sreekanth K V, Sreejith S, Alapan Y, Sitti M, Lim C T, Singh R 2019 *Adv. Opt. Mater.* **7** 1801313
- [9] Niculescu A G, Chircov C, Birca A C, Grumezescu A M 2021 *Int. J. Mol. Sci.* **22** 2
- [10] Liu Y, Zhang X 2021 *Micromachines (Basel)* **12** 1
- [11] Gong T, Kong K V, Goh D, Olivo M, Yong K T 2015 *Biomed. Opt. Express* **6** 2076
- [12] Tang W L, Xiang N, Zhang X J, Huang D, Ni Z H 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 184703 (in Chinese) [唐文来, 项楠, 张鑫杰, 黄笛, 倪中华 2015 物理学报 **64** 184703]
- [13] Postigo P A, Alvaro R, Juarros A, Merino S 2016 *Biomed. Opt. Express* **7** 3289
- [14] Guo J, Liu X, Kang K, Ai Y, Wang Z, Kang Y 2015 *J. Lightwave Technol.* **33** 3433
- [15] Liang L, Zhao C, Xie F, Sun L P, Ran Y, Jin L, Guan B O 2020 *Opt. Express* **28** 24408
- [16] Ha B, Kim T J, Moon E, Giaccia A J, Pratz G 2021 *Biosens. Bioelectron.* **194** 113565
- [17] Lipka T, Moldenhauer L, Wahn L, Trieu H K 2017 *JOL* **42** 1084
- [18] Wang Y, Chen Z H 2018 *J. Mater. Sci.* **54** 4970
- [19] Wang Y, Wu N, Chen Z H 2021 *J. Mater. Sci.* **56** 14368
- [20] Chen S, Hao R, Zhang Y, Yang H 2019 *Photon. Res.* **7** 532
- [21] Bag S K, Sinha R K, Wan M, Varshney S K 2021 *J. Phys. D Appl. Phys.* **54** 1601
- [22] Zhou L, Zhou J, Lai W, Yang X, Meng J, Su L, Gu C, Jiang T, Pun E Y B, Shao L, Petti L, Sun X W, Jia Z, Li Q, Han J, Mormile P 2020 *Nat. Commun.* **11** 1785
- [23] Pin C, Jager J B, Tardif M, Picard E, Hadji E, de Fornel F, Cluzel B 2018 *Lab Chip* **18** 1750
- [24] Lin S, Crozier K B 2011 *Lab Chip* **11** 4047
- [25] Wu S H, Huang N, Jaquay E, Povinelli M L 2016 *Nano Lett.* **16** 5261
- [26] Xu Z, Song W, Crozier K B 2018 *ACS Photonics* **5** 4993
- [27] Ma Z, Hanham S M, Arroyo Huidobro P, Gong Y, Hong M, Klein N, Maier S A 2017 *APL Photonics* **2** 116102
- [28] Jiang B, Dai H, Zou Y, Chen X J 2018 *Opt. Express* **26** 12579
- [29] Xiao J B, Luo H, Xu Y, Sun X H 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 194207 (in Chinese) [肖金标, 罗辉, 徐银, 孙小茜 2015 物理学报 **64** 194207]
- [30] Tang S J, Li B B, Xiao Y F 2019 *Physics* **48** 137 (in Chinese) [唐水晶, 李贝贝, 肖云峰 2019 物理 **48** 137]
- [31] Chien M H, Steurer J, Sadeghi P, Cazier N, Schmid S 2020 *ACS Photonics* **7** 2197
- [32] Wang W, Liu S, Gu Z, Wang Y 2020 *Phys. Rev. A* **101** 13833
- [33] Liu Y, Shi L, Xu X, Zhao P, Wang Z, Pu S, Zhang X 2014 *Lab Chip* **14** 3004
- [34] Salafi T, Zhang Y, Zhang Y 2019 *Nanomicro. Lett.* **11** 77
- [35] Jiang B Y, Peng T, Yuan S, Zhou M Y 2021 *Prog. Chem.* **33** 17 (in Chinese) [蒋炳炎, 彭涛, 袁帅, 周明勇 2021 化学进展 **33** 17]
- [36] Li L W, Chen Z H, Yang Y B, Fei H M 2021 *Chin. Opt.* **14** 145 (in Chinese) [李霖伟, 陈智辉, 杨毅彪, 费宏明 2021 中国光学 **14** 145]

Micro-displacement detection of nanofluidic fluorescent particles based on waveguide-concentric ring resonator model*

Li Chang-Liang¹⁾²⁾ Chen Zhi-Hui^{1)2)†} Feng Guang¹⁾²⁾ Wang Xiao-Wei¹⁾²⁾
 Yang Yi-Biao¹⁾²⁾ Fei Hong-Ming¹⁾²⁾ Sun Fei¹⁾²⁾ Liu Yi-Chao¹⁾²⁾

1) (*Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China*)

2) (*Department of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China*)

(Received 21 April 2022; revised manuscript received 14 June 2022)

Abstract

The dynamic tracking and detecting of nanoparticles in micro-nanofluids have always been a challenging and demanding task. In this work, an integrated model of waveguide-concentric ring resonator is proposed based on the waveguide-concentric ring resonator. The change of the fluorescence power intensity outputted by the cavity coupling structure is used to realize the micro-displacement detection of nanoparticles in the micro-nano fluid. Because the ring micro-resonator has the characteristics of high Q and the sensitivity to the surrounding environment, the sensitivity of the device is greatly improved. The finite-difference time domain method is used to study the parameters such as the polarization state of the fluorescence and the distance between the two ring resonators. The double-peak change of the fluorescence output power can be used to detect the displacement of the nanoparticles with high precision. Based on the synchronization of the double-peak changes, the detection can reduce the influence of environmental noise and improve the detection accuracy. The numerical simulation results also confirm that this method can measure the micro-displacement of nanoparticles in nanofluids in a range of 0–1000 nm, providing new directions and ideas.

Keywords: nanoparticles, micro-nanofluidics, ring resonator, biodetection

PACS: 47.61.-k, 75.40.Mg, 02.70.Bf

DOI: 10.7498/aps.71.20220771

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62175178, 11674239, 61971300, 61905208, 11904255), the Central Guidance on Local Science and Technology Development Fund of Shanxi Province, China (Grant No. YDZJSX2021A013), the Program for the Top Young Talents of Shanxi Province, China, and the Program for the Sanjin Outstanding Talents of China.

† Corresponding author. E-mail: huixu@126.com



基于波导-同心环形谐振腔模型的纳米流体荧光颗粒微位移检测

李长亮 陈智辉 冯光 王晓伟 杨毅彪 费宏明 孙非 刘一超

Micro-displacement detection of nanofluidic fluorescent particles based on waveguide-concentric ring resonator model

Li Chang-Liang Chen Zhi-Hui Feng Guang Wang Xiao-Wei Yang Yi-Biao Fei Hong-Ming Sun Fei Liu Yi-Chao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 204702 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20220771

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220771>

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

Ti纳米粒子熔化与凝结的原子尺度模拟

Simulations of Ti nanoparticles upon heating and cooling on an atomic scale

物理学报. 2019, 68(16): 166402 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190228>

光纤环形谐振腔的频率锁定及其特性

Characteristics and control of fiber ring resonator

物理学报. 2019, 68(7): 074204 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182296>

基于十字连通形环形谐振腔金属-介质-金属波导的折射率传感器和滤波器

Refractive index sensor and filter of metal-insulator-metal waveguide based on ring resonator embedded by cross structure

物理学报. 2018, 67(19): 197301 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180758>

基于中红外光参量振荡器光束质量优化的90°像旋转四镜非平面环形谐振腔型设计与分析

Design and analysis of 90° image rotating four-mirror non-planar ring resonator based on mid-infrared optical parametric oscillator beam quality optimization

物理学报. 2019, 68(17): 174201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182001>

浸没于带电纳米粒子溶液中的聚电解质刷: 强拉伸理论

Analytical strong-stretching theory of polyelectrolyte brushes loaded with charged nanoparticles

物理学报. 2020, 69(14): 148201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200432>

基于串联哑铃型微环谐振腔的二维相干光码分多址编解码器

Two-dimensional coherent optical en/decoder based on serially coupled dumbbell microring resonator

物理学报. 2022, 71(1): 014206 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20200057>