

纳流通道-谐振腔耦合结构测量荧光物质微位移

李霖伟 陈智辉 杨毅彪 费宏明

Nanofluidic channel-resonant cavity structure for measuring micro-displacement of fluorescent substances

LI Lin-wei, CHEN Zhi-hui, YANG Yi-biao, FEI Hong-ming

引用本文:

李霖伟, 陈智辉, 杨毅彪, 费宏明. 纳流通道-谐振腔耦合结构测量荧光物质微位移[J]. *中国光学*, 2021, 14(1): 145-152. doi: 10.37188/CO.2020-0076LI Lin-wei, CHEN Zhi-hui, YANG Yi-biao, FEI Hong-ming. Nanofluidic channel-resonant cavity structure for measuring micro-displacement of fluorescent substances[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(1): 145-152. doi: 10.37188/CO.2020-0076在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2020-0076>**您可能感兴趣的其他文章****Articles you may be interested in****基于量子点的荧光型太阳能聚光器**

Quantum dots based luminescent solar concentrator

中国光学. 2017, 10(5): 555 <https://doi.org/10.3788/CO.20171005.0555>**基于近红外量子点的荧光共振能量转移生物探针构建及应用**

Construction and application of FRET biological probe based on near infrared InP/ZnS quantum dots

中国光学. 2018, 11(1): 74 <https://doi.org/10.3788/CO.20181101.0074>**CdSe/ZnS量子点下转换膜的红、绿、蓝顶发射有机发光器件**

Top-emitting red, green and blue organic light-emitting devices with CdSe/ZnS quantum dots down-conversion films

中国光学. 2019, 12(6): 1431 <https://doi.org/10.3788/CO.20191206.1431>**金属等离子激元调控Fabry-Perot微腔谐振模式研究**

Resonant mode of Fabry-Perot microcavity regulated by metal surface plasmons

中国光学. 2019, 12(3): 649 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0649>**量子点液晶显示背光技术**

Advances and prospects in quantum dots based backlights

中国光学. 2017, 10(5): 666 <https://doi.org/10.3788/CO.20171005.0666>**氧化石墨烯的多色发光及其在荧光成像中的应用**

Multicolor fluorescent emission of graphene oxide and its application in fluorescence imaging

中国光学. 2018, 11(3): 377 <https://doi.org/10.3788/CO.20181103.0377>

文章编号 2095-1531(2021)01-0145-08

纳流通道-谐振腔耦合结构测量荧光物质微位移

李霖伟^{1,2}, 陈智辉^{1,2*}, 杨毅彪^{1,2}, 费宏明²

(1. 太原理工大学 新型传感器与智能控制教育部/山西省重点实验室, 山西 太原 030024;
2. 太原理工大学 物理与光电工程学院, 山西 太原 030024)

摘要:本文提出了一种纳流通道-谐振腔耦合结构,用于实现对荧光物质微位移的检测。在本文中,首先,使用时域有限差分法,研究了量子点偏振态及结构参数对荧光与结构耦合效果的影响,进而对结构进行优化;然后,通过测量耦合结构输出光功率的变化,实现对荧光物质微位移的检测;最后,对影响传感灵敏度的因素进行研究。结果表明,相比传统方法,纳流通道-谐振腔耦合结构的折射率处于2.8~3.3之内时,该结构都可以实现对荧光物质微位移的高精度准确传感,并且通过减小纳流通道与谐振腔的间距可进一步提高传感灵敏度。

关键词:纳流通道;谐振腔;量子点;微位移

中图分类号:TN815 文献标志码:A doi: 10.37188/CO.2020-0076

Nanofluidic channel-resonant cavity structure for measuring micro-displacement of fluorescent substances

LI Lin-wei^{1,2}, CHEN Zhi-hui^{1,2*}, YANG Yi-biao^{1,2}, FEI Hong-ming²

(1. *Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control Systems, Ministry of Education and Shanxi Province, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;*

2. *College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)*

* *Corresponding author, E-mail: huixu@126.com*

Abstract: In order to measure the micro-displacement of a fluorescent substance, we propose a nanofluidic channel-resonant cavity structure. Firstly, by using the Finite-Difference Time-Domain (FDTD) method, the influences of the quantum dot's polarization state and structural parameters on the coupling effect of fluorescence and structure are studied and the structure is optimized. Then, the micro-displacement of the fluorescent substance is detected by measuring the change in the optical power output of the coupled structure. Finally, the factors affecting the sensitivity of the sensors are studied. The results show that, compared with the traditional method, when the refractive index of the nanofluidic channel-resonant cavity coupling structure is in the 2.8~3.3 range, the structure can sense of the micro-displacement of a fluorescent substance with high

收稿日期:2020-04-26; 修订日期:2020-05-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目 (No. 11674239, No. 61575139, No. 61575138); 山西省青年拔尖人才支持计划; 三晋英才支持计划

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 11674239, No. 61575139, No. 61575138); Program for the Top Young Talents of Shanxi Province; Program for the Sanjin Outstanding Talents of China

accuracy. The results also show that the sensing sensitivity can be further improved by reducing the distance between the nanofluidic channel and the resonant cavity.

Key words: nanofluidic channel; resonant cavity; quantum dots; micro-displacement

1 引言

随着社会的进步,人们生活水平的提高,人类对自身健康极为关注,生命科学成为当代科学研究的前沿领域。20 世纪下半叶以来,科学技术日新月异,人们对生命的认识逐步从器官水平深入到细胞、分子水平,其中,荧光标记检测技术因操作便捷以及灵敏度高等优点,被广泛使用。而量子点又因具有传统荧光染料无法比拟的优点,如宽带激发窄带发射、发光强度高、生物相容性好、光稳定性好等优点^[1-5],被广泛应用于荧光标记检测中。量子点可用于微米和纳米尺度物质的实时跟踪,对研究微生物的流动以及微纳流动器件内部的溶液流动行为等具有重要意义^[6]。

荧光物质微位移和移动速度的测量,有多种测量方法,L Cui 等人利用光电结合的方法,通过使用微电极阵列使荧光粒子发生运动,并使用两个嵌入式光纤探测荧光强度变化,从而实现了对荧光物质的监测和移动速度的测量^[7]。这种方法受限于两个嵌入式光纤的间距,没有实现对荧光物质移动速度的实时测量。

粒子图像测速(PIV)是一种常用的测粒子移动和溶液速度场的方法,被广泛使用^[8-10]。Santiago 和 Meinhart 等人使用 100~300 nm 直径荧光标记的聚合物颗粒测量得到粒子位移信息和溶液的速度场信息^[11-12]。该方法使用激光直接激发荧光示踪粒子,受成像系统景深的影响,其观测厚度较大,分辨率受限。然后,Zettner、Jin、Sadr 等人利用光在两种具有不同折射率的介质之间发生全反射产生的倏逝波去激发荧光颗粒^[13-15]。此种方法实现了近壁测量,减少了观测厚度,提高了分辨率。但是此种方法使用的荧光颗粒直径同样为 100~300 nm,和倏逝场一个量级,甚至比倏逝场的范围还大,再加上较大的荧光粒子可能会和流体发生相互作用,影响最后测量结果的精度,不能很好地反映溶液真实的流动特性。Shahram Pouya 等人利用全内反射倏逝波激发小尺寸量子点,再通

过成像系统进行连续成像,最终,把得到的图像进行整合,从而得到粒子的移动轨迹,也可得出粒子的移动速度等信息^[16]。这种方式也实现了对粒子监测和流速的测量,但是对于极小的示踪粒子,由于荧光强度不高且会向各个方向传播,要确保粒子成像的可靠性,需要数毫秒的曝光时间,在相机曝光期间的粒子运动可能导致图像模糊。而且,粒子图像测速的精确度还会受到后期图像处理的影响^[17],另外,这种方法的测量系统较为复杂。因此,提出一种相对简单、可实时准确测量荧光物质微位移和移动速度的方法具有重要意义。

谐振腔结构简单,且其具有高 Q 值、小模式体积和强倏逝场,因此对于周围环境介质的改变十分敏感,广泛应用于传感领域^[18]。很多研究小组利用谐振腔开发出了不同的传感器,如折射率/浓度传感器^[19-21]、温度传感器^[22-23]等,并用于检测微小颗粒有无和颗粒大小^[24-26]。本文基于环形谐振腔优秀的传感特性,提出采用纳流通道-谐振腔耦合结构实现对荧光物质微位移和移动速度的实时准确测量。

本工作首先研究了量子点偏振及纳流通道-谐振腔耦合结构参数对荧光与结构之间耦合效果的影响,得到可实现良好耦合效果的结构参数。然后,量子点在纳流通道一定范围内移动时,下波导耦合输出的光功率会有所变化,利用这一特性,通过对下波导耦合输出的光功率进行实时监测,实现对荧光物质微位移和移动速度的实时准确测量。最后,对影响传感灵敏度的因素进行了探索。

2 模型方法及检测原理

2.1 纳流通道-谐振腔耦合结构模型

图 1(彩图见期刊电子版)为纳流通道-谐振腔耦合结构的二维模型图及其参数。蓝色区域代表纳流通道-谐振腔结构,折射率 $n = 2.915$,材料可选择砷化铝^[27]。其由上纳流通道、下波导和环形谐振腔构成。环形谐振腔内外半径分别是 R_2 、 R_1 ,纳流通道参数为 d_5 和 d_1 ,灰色部分代表生物

溶液, 折射率为 1.33, 下波导宽度 d_6 为 200 nm, 上纳流通道与谐振腔间距是 d_2 , 下波导与谐振腔间距是 d_3 。黄色的点代表量子点, 放置于纳流通道中心, 与结构中心坐标原点 O 的水平间距是 d_4 。为了后续描述方便, 从右上开始按照顺时针方向把 3 个端口分别定义为 1、2、3。

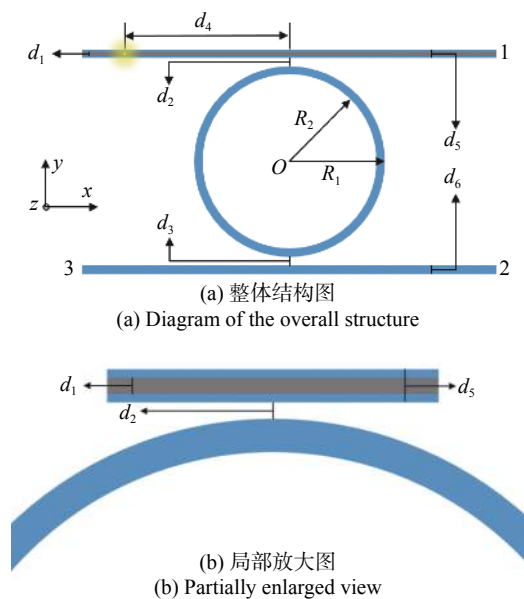


图1 纳流通道-谐振腔耦合结构二维模型图

Fig. 1 Two-dimensional model diagram of a nanofluidic channel-resonant cavity structure

2.2 研究方法

在本章中, 采用时域有限差分法^[28-29], 对提出的纳流通道-谐振腔耦合结构进行了二维尺度上的理论研究。二维模拟区域范围是 $(x, y) = (-4:4, -5:5) \mu\text{m}$, x 方向的网格精度设置为 20 nm, y 方向的网格设置为 5 nm, x, y 方向的边界条件都设置为完美匹配层 (Perfectly Matched Layers, PML)。使用偶极子光源 (dipole) 来模拟量子点, 波长范围设置为 $1.47 \sim 1.63 \mu\text{m}$ 。在端口 2 设置线功率监视器观察光功率变化, 线功率监视器沿 y 方向放置, 宽度与波导宽度相同, 使用 xy 平面上的面电场监视器来研究纳流通道-谐振腔耦合结构中的电场分布, 其分布区域为 $(-4:4, -4.5:4.5) \mu\text{m}$ 。

2.3 荧光物质微位移检测原理

量子点和结构中心水平距离 d_4 较大时, 量子点发出的荧光从纳流通道耦合进入谐振腔, 沿着顺时针方向在谐振腔中传播, 并耦合进入下波导沿端口 3 输出, 如图 2(a) 所示。随着 d_4 不断减

小, 量子点发出的光可以在环形谐振腔中实现反方向耦合, 然后耦合进入下波导, 沿端口 2、3 输出, 如图 2(b) 所示。通过对端口 2 耦合输出的光功率的实时监测, 实现对量子点位置的实时准确测量。

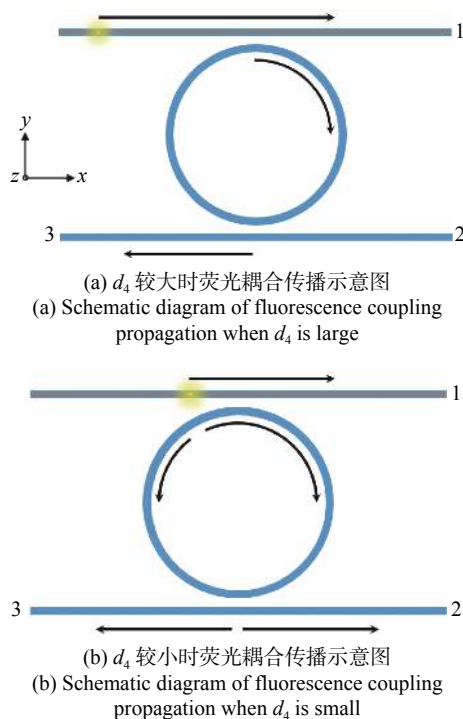


图2 微位移检测原理图

Fig. 2 Schematic diagram of micro-displacement detection

3 结果和讨论

3.1 量子点偏振及结构参数对耦合效果的影响

为了实现更灵敏的荧光物质微位移和速度检测, 需要量子点发出的荧光与结构实现最佳的耦合效果, 因此, 探究了量子点偏振和结构参数变化对耦合效果的影响。本文用端口 2 的功率表征荧光与结构之间的耦合效果。若要实现最佳光耦合效果, 即使端口 2 检测到的光功率最大。

3.1.1 量子点偏振对耦合效果的影响

首先, 研究了不同偏振方向的偶极子光源发光与结构之间的耦合效果, 当结构参数如下: $R_1 = 2.3 \mu\text{m}$, $R_2 = 2.1 \mu\text{m}$, $d_1 = 100 \text{ nm}$, $d_2 = d_3 = 250 \text{ nm}$, $d_4 = 0 \text{ nm}$, $d_5 = 200 \text{ nm}$ 时, 偶极子光源沿 x, y, z 三个方向偏振时荧光与结构耦合效果, 即不同偏振方向时端口 2 的光功率变化情况, 如图 3 (彩图见期刊电子版) 所示。从图中的光功率曲线

可以得出,本文提出的纳流通道-谐振腔耦合结构与沿 z 方向偏振的偶极子光源的发光实现了很好的耦合。图 3 插图从上往下分别是偶极子光源沿 x 、 y 、 z 偏振时的电场图,对应波长是功率曲线中峰值对应的波长,即 $1.577 \mu\text{m}$ 。同样,从电场图可以看出,沿 z 方向偏振的偶极子光源可以有效地与结构进行耦合,这和发光功率曲线得出的结论是一致的。产生这种现象的原因是偶极子光源沿不同的方向偏振会产生不同的辐射分布模式,进而影响了光源与结构的相互作用。选择 z 偏振方向的偶极子光源对结构参数优化进行研究,以期得到能实现最佳耦合效果的结构。

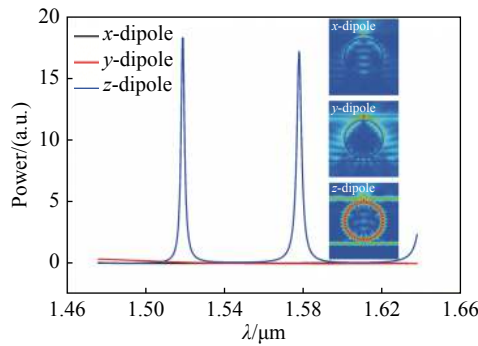


图 3 偶极子光源偏振方向不同时的耦合效果曲线和电场分布图

Fig. 3 Coupling effect curves and electric field distributions of dipole source with different polarization directions

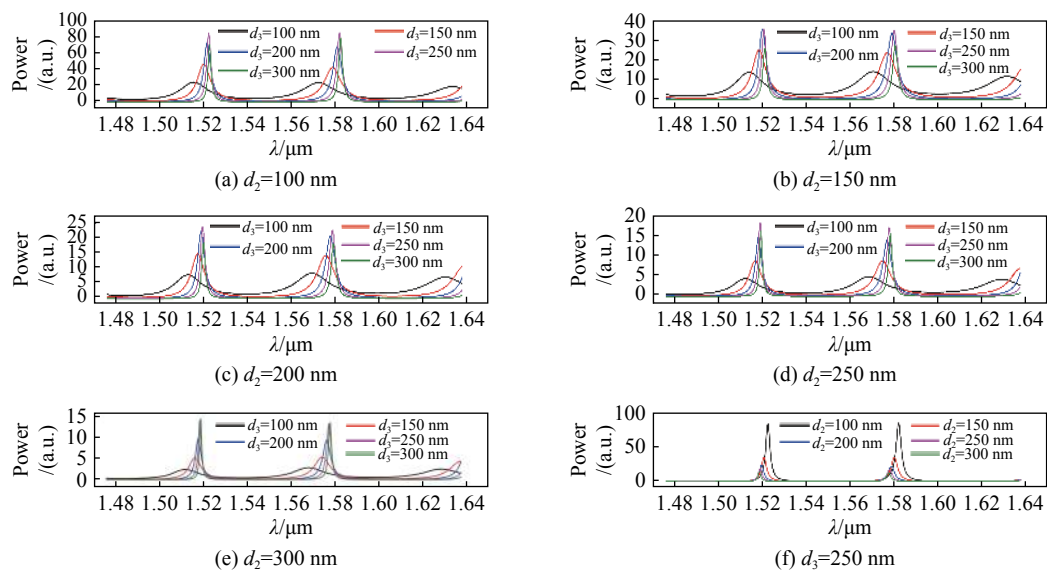


图 4 纳流通道及下波导与谐振腔间距不同时的耦合效果曲线

Fig. 4 Coupling effect curves when the distance between the microfluidic channel, the lower waveguide and the resonant cavity are different

3.1.2 纳流通道及下波导与谐振腔间距对耦合效果的影响

为了选取合适的耦合结构间距以实现荧光与结构之间最佳的耦合效果,本部分研究了纳流通道及下波导与谐振腔间距变化对耦合效果的影响。首先,将纳流通道-谐振腔耦合结构的其余参数分别设置为 $R_1=2.3 \mu\text{m}$, $R_2=2.1 \mu\text{m}$, $d_1=100 \text{ nm}$, $d_4=0 \text{ nm}$, $d_5=200 \text{ nm}$, 研究了纳流通道与谐振腔间距 d_2 分别为 100、150、200、250、300 nm 时,端口 2 的光功率值随波导-谐振腔间距 d_3 的变化规律,如图 4(彩图见期刊电子版)所示。从图 4(a)~4(d) 中可以得出,当纳流通道与谐振腔间距 d_2 分别固定为 100、150、200、250 nm,下波导间距 $d_3=250 \text{ nm}$ 时,端口 2 耦合输出的光功率最大,其耦合效果最好。图 4(e) 中,虽然 d_2 固定为 300 nm, $d_3=300 \text{ nm}$ 的光功率曲线略高于 $d_3=250 \text{ nm}$ 的光功率曲线,但是其光功率最大值明显低于图 4(a)~4(d)。因此,将下波导与谐振腔间距 d_3 固定为 250 nm,分析纳流通道与谐振腔间距不同时的耦合效果,如图 4(f)(彩图见期刊电子版)所示。可以看出,当 d_3 固定为 250 nm 时,纳流通道越靠近谐振腔,耦合效果越明显。接下来,以 $d_2=200 \text{ nm}$, $d_3=250 \text{ nm}$ 为例进行研究。

3.1.3 谐振腔大小对耦合效果的影响

本部分研究了谐振腔大小对荧光与结构之间耦合效果的影响, 固定参数 $d_1=100$ nm, $d_2=200$ nm, $d_3=250$ nm, $d_4=0$ μm , $d_5=200$ nm 时, 研究当 R_2 , R_1 分别为 2.07 μm , 2.27 μm ; 2.08 μm , 2.28 μm ; 2.09 μm , 2.29 μm ; 2.1 μm , 2.3 μm ; 2.11 μm , 2.31 μm ; 2.12 μm , 2.32 μm ; 2.13 μm , 2.33 μm 时端口 2 的光功率值的变化, 如图 5(彩图见期刊电子版)所示。可以看出, 随着谐振腔变大, 峰位向长波长方向移动, 强度未发生明显改变。选择 R_1 、 R_2 分别为 2.3 μm 、2.1 μm 进行接下来的研究。

其峰位移动情况可以由环形谐振腔理论说明, 在环形谐振腔中共振波长可由下式计算:

$$\lambda_m = \frac{n_{\text{eff}}L}{m}, \quad (1)$$

式中, λ_m 是共振波长, n_{eff} 是有效折射率, L 是谐振腔周长, m 是正整数。随着谐振腔周长的变大, 共振波长将向长波长方向移动, 这与图 5 所示规律一致。

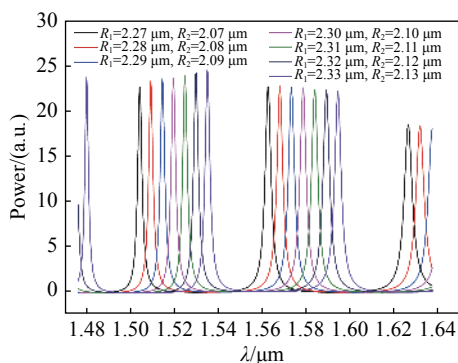


图 5 不同谐振腔大小时的耦合效果曲线

Fig. 5 Coupling effect curves when the cavity size is different

3.1.4 纳流通道宽度对耦合效果的影响

接着, 研究了纳流通道宽度对荧光与结构之间耦合效果的影响, 此时模拟区域变为 $(x, y) = (-4:4, -5:7)$ μm , 电场监视器范围为 $(-4:4, -5:6)$ μm 。固定参数 $R_2=2.3$ μm , $R_1=2.1$ μm , $d_2=200$ nm, $d_3=250$ nm, $d_4=0$ μm , $d_6=200$ nm, 研究当 d_5 , d_1 分别为 0.2 μm , 0.1 μm ; 0.8 μm , 0.5 μm ; 1 μm , 0.5 μm ; 2 μm , 1 μm ; 2 μm , 1.6 μm 时端口 2 的光功率变化。如图 6(彩图见期刊电子版)所示。从图 6 可以看出, d_5 , d_1 分别为 0.2 μm , 0.1 μm 时, 光功率曲线明显高于其他参数下的曲线。说明该参数相比较

于其他参数, 荧光与谐振腔实现了很好的耦合。这是由于纳流通道宽度变大时, 不能很好地局域量子点发出的荧光, 导致荧光向四面八方扩散, 而不是耦合到谐振腔中所致。因此, 本文选择 d_5 , d_1 为 0.2 μm , 0.1 μm 进行研究。

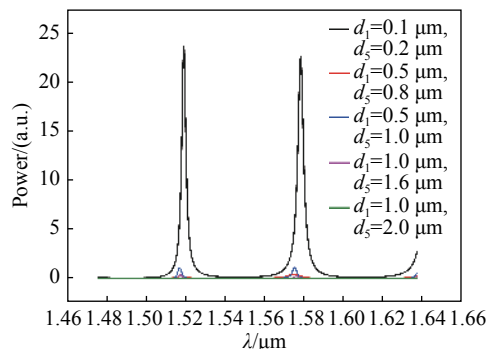


图 6 纳流通道参数不同时的耦合效果曲线

Fig. 6 Coupling effect curves when the microfluidic channel parameters are different

3.2 量子点微位移传感

通过上述量子点偏振及结构参数变化对荧光与结构之间耦合效果影响的研究, 得到了实现良好耦合效果的量子点偏振方向和结构参数, 即, $R_2=2.3$ μm , $R_1=2.1$ μm , $d_1=d_2=d_5=d_6=200$ nm, $d_3=250$ nm, 以此为例, 检测了量子点在通道中移动时, 端口 2 耦合出的光功率变化, 结果如图 7 所示。从图 7 可以看出, 量子点与结构中心水平距离 d_4 从 1 μm 逐渐减小时, 端口 2 的强度不断变大。

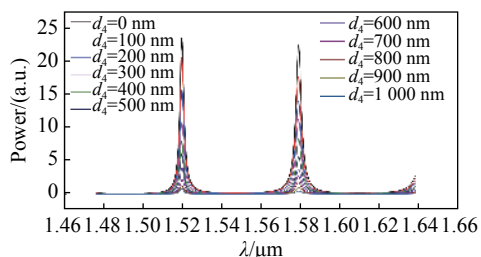


图 7 不同量子点位置时端口 2 的光功率曲线

Fig. 7 Optical power curves at port 2 when the quantum dot position changes

量子点在不同位置时的电场分布如图 8 所示, 对应波长为 1.578 μm , 可以看出 $d_4=2$ μm 和 $d_4=1$ μm 时, 下波导端口 2 处的电场强度没有明显区别, 随着 d_4 从 1 μm 变为 0.5 μm , 再变为 0 μm , 端口 2 电场强度逐渐变强, 与图 7 中光功率曲线的变化情况一致。

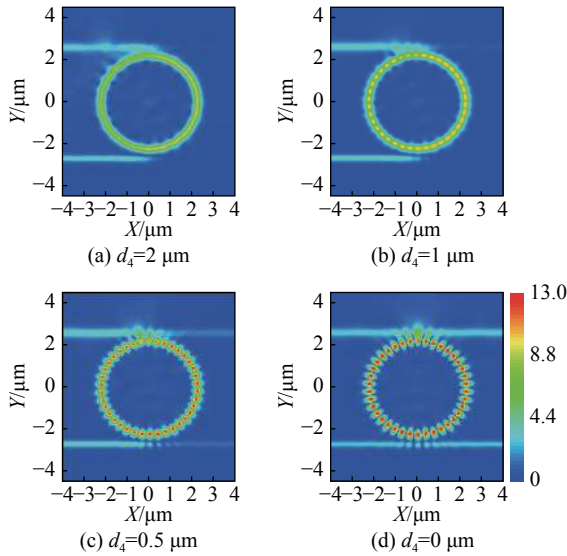
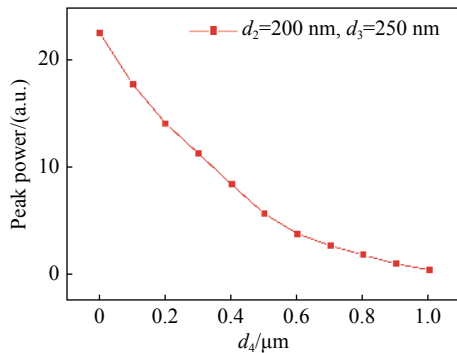


图 8 量子点处于不同位置时的电场分布

Fig. 8 Electric field distributions when quantum dots are in different positions

然后,绘制了图 7 中的峰值功率与量子点和结构中心水平距离 d_4 的关系曲线图,如图 9 所示。可以看出,端口 2 的峰值功率与量子点在纳流通道中的位置可以很好的对应。因此,可以对量子点微位移及移动速度进行实时准确测量。

图 9 量子点与结构中心水平距离 d_4 变化时端口 2 的峰值功率曲线Fig. 9 Peak power curve of port 2 when the horizontal distance d_4 between the quantum dot and the center of the structure changes

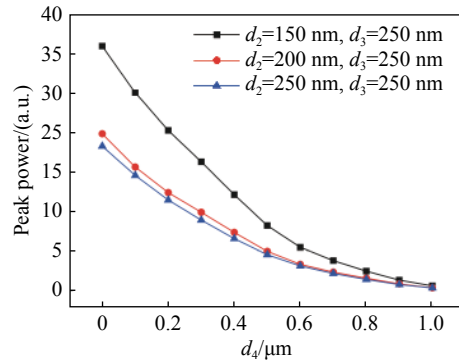
3.3 间距及结构折射率对传感灵敏度的影响

本部分研究了耦合结构间距、折射率变化对传感灵敏度的影响。

3.3.1 间距对传感灵敏度的影响

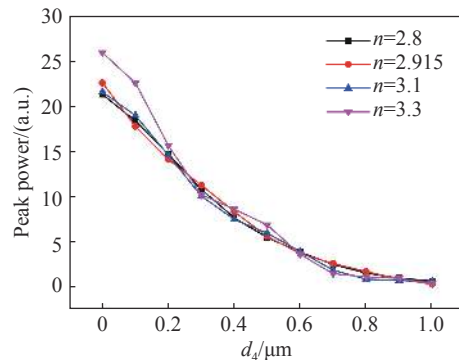
首先,研究参数 $d_2=150$ nm、 $d_3=250$ nm、 $d_2=200$ nm、 $d_3=250$ nm、 $d_2=d_3=250$ nm 时峰值功率与量子点和结构中心水平距离 d_4 的关系,如图 10 所示,可见, $d_2=150$ nm 时曲线高于 $d_2=200$ nm 和

$d_2=250$ nm 时的曲线。前面的研究已得出 d_3 确定时, d_2 越小,耦合效果越好。而陡峭的曲线更利于信号的区分,有更好的传感灵敏度。

图 10 结构间距不同,量子点与结构中心水平距离 d_4 变化时端口 2 的峰值功率曲线Fig. 10 Peak power curves of port 2 varying with d_4 , the horizontal distance between the quantum dot and the center of the structure, at different structure spacing

3.3.2 折射率对传感灵敏度的影响

本部分中,对比了结构整体折射率 n 分别为 2.8、2.915、3.1 和 3.3 时峰值功率与光源和结构中心水平距离 d_4 的关系曲线,如图 11 所示。可以看出,虽然结构折射率变大时,曲线不再平滑,但是几种曲线保持了相同的规律,说明折射率对传感灵敏度的影响不大。这为结构材料选择提供了便利。

图 11 不同结构折射率时,量子点与结构中心水平距离 d_4 变化时端口 2 的峰值功率曲线Fig. 11 Peak power curves of port 2 varying with d_4 , the horizontal distance between the quantum dot and the center of the structure, at different refractive indexes

4 结 论

本工作提出采用纳流通道-谐振腔耦合结构

实现量子点微位移和移动速度的实时准确测量。测量原理是随着纳流通道中量子点在水平方向逐渐靠近结构中心时,会产生反向的耦合光,并且量子点越靠近结构中心,荧光与结构的耦合效果也越好。因此,通过实时检测输出的光功率变化便可实现量子点微位移和移动速度的实时准确测量。研究得出了Z偏振偶极子光源可以实现荧光与结构之间很好的耦合,最优的纳流通道-谐振腔耦合结构参数是纳流通道与谐振腔间距为250 nm,波导与谐振腔间距越小越好。讨论了谐

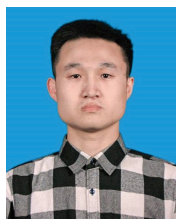
振腔大小和纳流通道宽度对耦合效果的影响,并就纳流通道-谐振腔间距和结构折射率对传感灵敏度的影响进行了探索,当耦合结构折射率为2.8~3.3时,都可以实现对荧光物质微位移的高精度传感,并且通过减小纳流通道与谐振腔的间距可进一步提高传感灵敏度。实现对量子点微位移和移动速度的实时准确测量,有助于在微米和纳米尺度上详细研究其扩散和分散特点,对研究流体在微纳流动器件内部的流动行为、测量生物溶液流速场等方面具有重要意义。

参考文献:

- [1] 陈飘飘, 邢怡晨, 刘洋, 等. 基于DNA QDs@PDA荧光共振能量转移的半胱氨酸传感器[J]. 分析化学, 2020, 48(1): 83-89.
CHEN P P, XING Y CH, LIU Y, *et al.*. DNA Quantum Dots@Polydopamine as a fluorescent sensor for cysteine detection based on fluorescence resonance energy transfer effect[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2020, 48(1): 83-89. (in Chinese)
- [2] MEDINTZ I L, UYEDA H T, GOLDMAN E R, *et al.*. Quantum dot bioconjugates for imaging, labelling and sensing[J]. *Nature Materials*, 2005, 4(6): 435-446.
- [3] 杜方凯, 张慧, 谭学才, 等. 基于氮掺杂石墨烯量子点/硫化镉纳米晶电化学发光传感器检测硫化氢[J]. 分析化学, 2020, 48(2): 240-247.
DU F K, ZHANG H, TAN X C, *et al.*. Detection of hydrogen sulfide based on nitrogen-doped graphene quantum dots/cadmium sulfide nanocrystals electrochemiluminescence sensor[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2020, 48(2): 240-247. (in Chinese)
- [4] 康倩文, 张国, 柴瑞涛, 等. 基于碳纳米点荧光增强检测铝离子[J]. 分析化学, 2019, 47(12): 1901-1908.
KANG Q W, ZHANG G, CHAI R T, *et al.*. Synthesis of carbon nanodots for detection of aluminum ion with fluorescence enhancement[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2019, 47(12): 1901-1908. (in Chinese)
- [5] 陈蜜, 岳仁叶, 李智, 等. 串联的纳米传感器用于癌细胞中miRNA的超灵敏检测[J]. 分析化学, 2020, 48(1): 40-48.
CHEN M, YUE R Y, LI ZH, *et al.*. Cascaded nanosensors for ultrasensitive detection of miRNA in cancer cells[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2020, 48(1): 40-48. (in Chinese)
- [6] GUASTO J S, BREUER K S. High-speed quantum dot tracking and velocimetry using evanescent wave illumination[J]. *Experiments in Fluids*, 2009, 47(6): 1059.
- [7] CUI L, ZHANG T, MORGAN H. Optical particle detection integrated in a dielectrophoretic lab-on-a-chip[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2002, 12(1): 7-12.
- [8] HISHIDA K, SAKAKIBARA J. Combined planar laser-induced fluorescence-particle image velocimetry technique for velocity and temperature fields[J]. *Experiments in Fluids*, 2000, 29(1): S129-S140.
- [9] STRUBEL V, SIMOENS S, VERGNE P, *et al.*. Fluorescence tracking and μ -PIV of individual particles and lubricant flow in and around lubricated point contacts[J]. *Tribology Letters*, 2017, 65(3): 75.
- [10] VARELA S, BALAGUÉ I, SANCHO I, *et al.*. Functionalised alginate flow seeding microparticles for use in Particle Image Velocimetry (PIV)[J]. *Journal of Microencapsulation*, 2016, 33(2): 153-161.
- [11] MEINHART C D, WERELEY S T, SANTIAGO J G. PIV measurements of a microchannel flow[J]. *Experiments in Fluids*, 1999, 27(5): 414-419.
- [12] SANTIAGO J G, WERELEY S T, MEINHART C D, *et al.*. A particle image velocimetry system for microfluidics[J]. *Experiments in Fluids*, 1998, 25(4): 316-319.
- [13] JIN S, HUANG P, PARK J, *et al.*. Near-surface velocimetry using evanescent wave illumination[J]. *Experiments in Fluids*, 2004, 37(6): 825-833.
- [14] SADR R, YODA M, ZHENG Z, *et al.*. An experimental study of electro-osmotic flow in rectangular microchannels[J].

- Journal of Fluid Mechanics*, 2004, 506: 357-367.
- [15] ZETTNER C, YODA M. Particle velocity field measurements in a near-wall flow using evanescent wave illumination[J]. *Experiments in Fluids*, 2003, 34(1): 115-121.
- [16] POUYA S, KOOCHEFAHANI M, SNEE P, *et al.*. Single Quantum Dot (QD) imaging of fluid flow near surfaces[J]. *Experiments in Fluids*, 2005, 39(4): 784-786.
- [17] OKAMOTO K, NISHIO S, SAGA T, *et al.*. Standard images for particle-image velocimetry[J]. *Measurement Science and Technology*, 2000, 11(6): 685-691.
- [18] FOREMAN M R, SWAIM J D, VOLLMER F. Whispering gallery mode sensors[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2015, 7(2): 168-240.
- [19] BUTT M A, KHONINA S N, KAZANSKIY N L. Hybrid plasmonic waveguide-assisted Metal-Insulator-Metal ring resonator for refractive index sensing[J]. *Journal of Modern Optics*, 2018, 65(9): 1135-1140.
- [20] WHITE I M, ZHU H Y, SUTER J D, *et al.*. Refractometric sensors for lab-on-a-chip based on optical ring resonators[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2007, 7(1): 28-35.
- [21] KWON M S, STEIER W H. Microring-resonator-based sensor measuring both the concentration and temperature of a solution[J]. *Optics Express*, 2008, 16(13): 9372-9377.
- [22] LIU ZH H, LIU L, ZHU Z D, *et al.*. Whispering gallery mode temperature sensor of liquid microresonator[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(20): 4649-4652.
- [23] XU H T, HAFEZI M, FAN J, *et al.*. Ultra-sensitive chip-based photonic temperature sensor using ring resonator structures[J]. *Optics Express*, 2014, 22(3): 3098-3104.
- [24] KOCH B, YI Y, ZHANG J Y, *et al.*. Reflection-mode sensing using optical microresonators[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(20): 201111.
- [25] LI B B, CLEMENTS W R, YU X C, *et al.*. Single nanoparticle detection using split-mode microcavity Raman lasers[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(41): 14657-14662.
- [26] ZHI Y Y, YU X CH, GONG Q H, *et al.*. Single nanoparticle detection using optical microcavities[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(12): 1604920.
- [27] FERN R E, ONTON A. Refractive index of AlAs[J]. *Journal of Applied Physics*, 1971, 42(9): 3499-3500.
- [28] YEE K. Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1966, 14(3): 302-307.
- [29] CHEN ZH H, WANG Y, YANG Y B, *et al.*. Enhanced normal-direction excitation and emission of dual-emitting quantum dots on a cascaded photonic crystal surface[J]. *Nanoscale*, 2014, 6(24): 14708-14715.

作者简介:



李霖伟(1994—),男,山西晋中人,硕士研究生,2017年于太原科技大学获得学士学位,现就读于太原理工大学新型传感器与智能控制教育部/山西省重点实验室光学工程专业,主要从事微纳光子学方面的研究。E-mail: 1726393868@qq.com



陈智辉(1984—),男,山西太原人,博士,教授,博士生导师,2006年于北京邮电大学获得学士学位,2012年于瑞典皇家工学院获得博士学位,现任职于太原理工大学新型传感器与智能控制教育部/山西省重点实验室,主要从事微纳光子学方面的研究。E-mail: huixu@126.com