

# 一种基于角锥棱镜的上转换荧光检测系统

吴 悦<sup>1</sup> 胡继辉<sup>1</sup> 梅青松<sup>2</sup> 李炳南<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(合肥工业大学仪器科学与光电工程学院 合肥 230009)

<sup>2</sup>(合肥工业大学生物与医学工程学院 合肥 230009)

**摘 要** 上转换荧光材料在很多领域都具有新颖的应用潜力, 然而其较低的发光效率给定量检测带来了难度。文章针对上转换荧光材料发光效率较低的特点, 利用角锥棱镜的光学特性, 设计了一套新型的上转换荧光检测光路。该装置将传统单工荧光检测光路扩展为双工系统, 利用同轴多芯光纤从角锥棱镜两端同时接收荧光, 提高了检测系统对微弱荧光的采集效率。在本研究中, 设计了一系列实验来检验双工荧光收集光路的可行性, 量化了荧光检测系统的线性度, 从而证明了基于角锥棱镜上转换荧光检测系统的可行性。

**关键词** 上转换荧光材料; 荧光检测; 角锥棱镜; 精密光学系统  
**中图分类号** TN 216 **文献标志码** A

## An Upconversion Fluorescence Detection System Using Cube-Corner Retroreflector

WU Yue<sup>1</sup> HU Jihui<sup>1</sup> MEI Qingsong<sup>2</sup> LI Bingnan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(School of Instrument Science and Optoelectronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

<sup>2</sup>(School of Biological and Medical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract** Upconversion fluorescence materials receive more and more attentions, but their applications suffer from the low conversional efficiency of fluorescence. In other words, it makes precise quantification difficult. In this study, a cube-corner retroreflector was introduced to collect more fluorescence from upconversion materials. A prototyping upconversion fluorescence detection system was developed with a dual optic path containing a cube-corner retroreflector and a coaxial multicore fiber for accepting fluorescence from both sides of the cube-corner retroreflector. A series of experiments were carried out to calibrate this prototyping system. It is found that the dual optic path can collect more fluorescence, and thus it improves the detection efficiency of weak fluorescence. The results confirm the feasibility of the upconversion fluorescence detection system with cube-corner retroreflector.

**Keywords** upconversion fluorescence; fluorescence detection; cube-corner retroreflector; precise optical system

收稿日期: 2016-03-28 修回日期: 2016-06-16

基金项目: 国家自然科学基金(21305143、31328009、61271123); 安徽省国际科技合作计划(1503062015); 安徽省杰出青年科学基金(1608085J04)

作者简介: 吴悦, 硕士研究生, 研究方向为生物医学仪器; 胡继辉, 硕士研究生, 研究方向为生物电子学与医学信息技术; 梅青松, 副教授, 研究方向为新型纳米材料设计及其生物医学应用; 李炳南, 教授, 研究方向为生物电子学与医学信息技术、磁共振成像与计算, E-mail: bingoon@ieee.org。

## 1 引言

近年来,光子上转换纳米材料领域经历显著发展,已成为在纳米科学界最活跃的研究领域之一。上转换材料可以在近红外光的激发下发出紫外/可见光/近红外光(反斯托克斯发光)<sup>[1]</sup>,具有灵敏度高、稳定性好、不易漂白等诸多优点<sup>[2]</sup>,在很多领域得到了广泛应用。例如,上转换材料可以作为生物成像的荧光标记探针,用于激光诱导荧光检测系统来进行各种生物成像。尤其上转换材料的毒性低、稳定性好,十分适合对生物活体进行成像<sup>[3,4]</sup>。上转换材料还常用于生物检测,通过和离子的相互作用,利用可见光信号将免疫反应表现出来,从而被精密仪器检测到<sup>[5]</sup>。除了生物成像和生物检测外,上转换材料在药物性能筛查、生物分子的定量分析等领域也有较为广泛的应用<sup>[6-8]</sup>。

上转换荧光材料的生物医学应用离不开对荧光强度的定量检测。目前,在检测上转换荧光时,常使用传统的光学检测设备,主要有荧光光谱仪、共聚焦显微镜和免疫分析仪。

### (1) 荧光光谱仪

荧光光谱仪本质上是一种实现荧光激发和荧光检测的仪器,一般由激发光源、激发单色器、样品室、荧光单色器、光电倍增管等检测器件组成<sup>[9]</sup>。现有的荧光光谱仪可以对荧光物质进行定量分析,但是其价格昂贵、体积庞大,而且需要对部分功能进行专门的改装和升级才能应用于上转换材料,给使用带来不便。

### (2) 共聚焦显微镜

得益于自身的特点,上转换荧光材料尤其适用于活体生物成像。在设计生物荧光成像应用时,常使用激光共聚焦显微镜来进行观察,优点在于对单点荧光的精确激发与测量。其共聚焦光路能够有效降低杂散光的干扰,从而能进行高分辨率成像<sup>[10-12]</sup>。共聚焦显微镜在成像方面有很广

泛的应用,但操作繁琐、对环境要求较高,不适用于成像以外的检测。

### (3) 免疫分析仪

免疫分析仪是转化应用上转换荧光材料的常用仪器之一,目标检测物与发光颗粒结合后形成被检物,在层析过程中通过免疫反应被固定在载体上,被近红外光激发发射出可见光。通过对可见光的定量检测与分析,可推算得出生物样品中目标检测物的浓度<sup>[13-15]</sup>。值得注意的是,目前免疫分析仪主要使用试纸条来进行取样和免疫反应,在应用的通用性和检测精准度上尚面临着诸多限制。

可以看到,目前的各类荧光检测设备各有优点,也各有不足。在进行上转换荧光检测的设计时,一方面有必要针对上转换荧光材料的特性,设计专门的、高效的检测设备;同时也有必要针对即时检测领域,研发反应灵敏、使用方便、轻巧便携、质优价廉的上转换荧光检测设备<sup>[16]</sup>。

## 2 上转换荧光检测系统的结构

本系统基于光学调制和光电转换原理而开发,用于激发上转换探针并检测其荧光强度,从而量化被测量的生物样品浓度。光电检测系统一般由光路、光电转换和电路部分组成。其中,光路部分将激发光引导至样品上,生成的荧光被引导至光电转换部分进行模拟放大、滤波和模数转换,最后由电路部分进行数字信号处理<sup>[17]</sup>。

### 2.1 光路设计的基本原则

上转换材料与其他荧光材料相比,发光效率较低。而微弱的荧光给定量检测带来很大难度。根据上转换发光的这一特点,在设计光路的时候主要遵循以下原则和思路:

(1) 系统能效比:让近红外激光照射到被检测样品上时,需要使激光能量尽可能地高,从而提高上转换荧光材料的发光强度。在满足荧光检

测要求的同时,减少激光器的输出功率,减小系统的功率,有效提高系统的能效比。

(2)光子采集率:将诱导生成的荧光尽可能地聚集至光电检测器。因为被诱导生成的上转换荧光向四周发散,所以现有的检测系统难以完全采集有效光子。在设计光电检测系统时,要尽量提高荧光光子的收集率,从而提高对微弱荧光的检测能力。

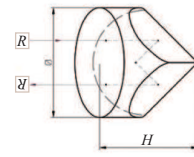
(3)检测信噪比:在上转换荧光检测的光路系统中,除了背景光以外,未被上转换荧光材料吸收的近红外激发光也会和被诱导生成的荧光一起被光电检测器检测到,干扰光电检测结果的准确性。所以,需要特殊的光学调制器件并专门设计调制光路,尽量将目标荧光以外的干扰光子滤除,从而提高上转换荧光检测的信噪比。

## 2.2 荧光检测光路

上转换荧光材料的能量转换效率较低,诱导生成的荧光一般比较微弱,使定量检测难度加大。在设计检测光路的时候,希望能够尽可能地提高对目标荧光的收集率。因此,本研究充分利用了角锥棱镜的光学性质,设计出一种能够提高上转换荧光光子采集率的光路。

角锥棱镜也称作角反射镜,是一种三面直角的棱镜。棱镜内设计有三个全反射面,可以将射入其中的光线进行几次全反射后偏转 $180^\circ$ ,从入射面中心对称的位置射出。如图1所示,理想的角锥棱镜的入射光和出射光是平行且反向的,所以也被称为逆向反射器<sup>[18]</sup>。

上转换荧光材料被近红外激光激发,诱导生成的荧光可近似看做点光源,其光线向四周散射。传统检测仪器的光路,传感器位于荧光的某一侧,只能检测到某一方向上的荧光。而这部分荧光只是上转换材料所产生荧光的一小部分,即使利用了扫描方式进行检测,在某一时间上也只能检测到特定位置的荧光。如果能更多地接收到荧光,则可以增加光电传感器输出的信号。在本



(a)原理图



(b)实物图

图1 角锥棱镜

Fig. 1 Cube-corner retroreflector

研究中,设计了一种新型的双工荧光检测系统:向上发射的部分荧光沿通常光路向上被接收;而向下发射的部分荧光经过角锥棱镜被反射后,改为向上传播,被光电检测器接收到。得益于单工到双工光电检测系统的升级,增加了荧光光子的采集率,从而提高了系统的检测效率。

实际的双工上转换荧光检测系统组成如图2所示。

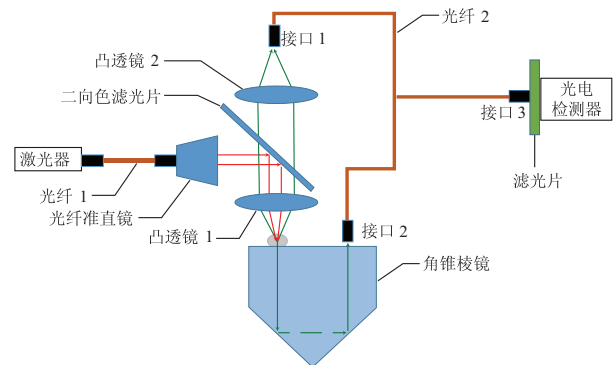


图2 检测系统使用的光路(红色箭头代表激发光路,绿色箭头代表接收光路)

Fig. 2 The optical path of detection system (red arrows represent excitation light path, green arrows represent receive light path)

### 2.2.1 激发光路

激发光路和常规系统相似,选用近红外激光

器作为系统的光源, 为整个上转换检测系统提供激发光。激光器通过光纤 1 将生成的近红外激光引入检测系统。

从光纤 1 出射的激光通过和光纤配套的光纤准直镜转换成平行光, 平行光照射到二向色滤光镜上。二向色滤光镜对于包括激发光波长在内的一段波长范围的光起到反射作用, 对包括荧光波长在内的另一波长范围的光起到透射作用。二向色滤光镜将照射在其上的平行激发光向下反射, 照射在凸透镜 1 的中心。

经过凸透镜 1 的平行激发光聚焦在凸透镜的焦点处, 将位于凸透镜焦点的上转换材料样品点亮。

### 2.2.2 接收光路

上转换荧光材料的发光效率较低, 尤其当被设计用于检测低浓度的生物医学样品时, 诱导生成的荧光强度非常微弱。为了尽可能地检测到低强度的荧光, 本文特别设计了一种双工接收光路。在普通的聚焦光路的基础上, 利用角锥棱镜的光学特性, 增加了对上转换材料生成的荧光的收集率。

根据角锥棱镜在接收光路中的作用, 将接收光路分为两部分, 发射部分和反射部分。

#### (1) 发射部分

发射部分指的是上转换材料被激发后向上发射的部分荧光经过的光路。上转换材料被聚焦后的近红外激光激发产生荧光, 荧光向四周各个方向发射, 部分荧光向上发射, 经过凸透镜 1 后被转换为平行光向上发射, 透过二向色滤光片到达凸透镜 2, 被凸透镜 2 聚焦后被光纤 2 的接口 1 接收。

#### (2) 反射部分

角锥棱镜有着独特的光学性质, 可以使从其表面上某点入射的光, 在角锥棱镜内部经过全反射, 从和入射点中心对称的位置、按照旋转  $180^\circ$  的方向射出。根据角锥棱镜的这一性质,

位于角锥棱镜表面的上转换荧光材料被激光激发后, 生成的荧光一部分向上发射, 一部分向下入射到角锥棱镜内, 经过角锥棱镜内的全反射, 从对称点发射出来, 被光纤的接口 2 接收。

### 2.2.3 传输光路

光路中通过光纤 2 来同时收集发射部分和反射部分的荧光信号。光纤 2 是一种被称为同轴多芯光纤的特殊光纤。这种光纤有三个接口, 接口 1 固定 1 根光纤, 接口 2 固定 6 根光纤, 接口 3 同时固定了这 7 根光纤。其中, 接口 1 的光纤在正中间, 接口 2 的 6 根光纤均匀分布在中心光纤的周围。由于它的这种特殊设计, 使得接口 1 和接口 2 接收到的光都会从接口 3 射出。

角锥棱镜两端的荧光通过发射部分和反射部分分别被光纤 2 的接口 1 和接口 2 接收, 通过接口 3 发射出来。光从接口 3 出来后, 经过一片滤光片滤除多余杂光, 最终被光电检测器接收。

将选定的光学元件按照光路的设计搭建成型, 整体系统如图 3 所示。在搭建好光学系统后, 将其整体封闭起来, 避免外界光的干扰。

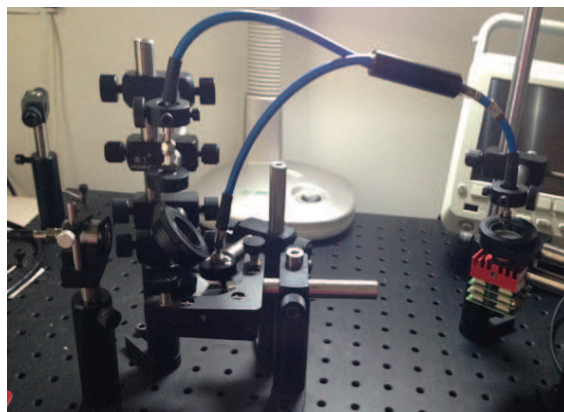


图 3 检测系统的光路

Fig. 3 Optic path of the detection system

## 2.3 电路部分

用于检测荧光信号的电路系统由光电传感器、滤波模块和放大模块组成。本研究中所使用的光电传感器为 MiniSM (SensL Technologies)<sup>[19]</sup>。MiniSM 是一个高性能的即插即用传感器模块,

由硅光电倍增管传感器、半导体热电制冷器、前置放大、温度控制和电源供电模块组成。连接电源后,即可由标准 SMA 接口直接输出电压信号,使用非常方便。

MiniSM 的光谱响应曲线见图 4,其中,纵坐标是 MiniSM 的光子检测率。从图中曲线可以看出,MiniSM 对于波长为 400~600 nm 的可见光反应比较灵敏,而对于其他波长的光子响应相对较弱。本研究使用的上转换荧光样品所诱导生成的荧光波长在 548 nm 左右,从响应曲线可知,MiniSM 非常符合本检测系统对于光电传感器的需求。

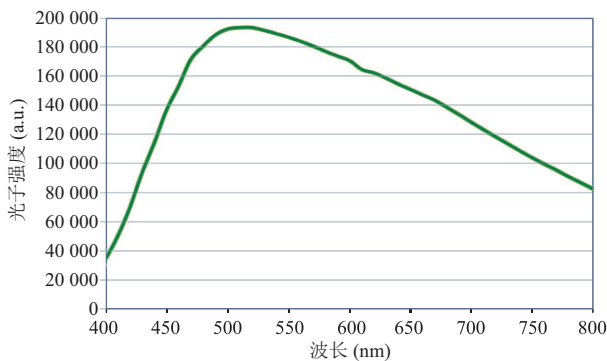


图 4 MiniSM 的光谱响应曲线

Fig. 4 Spectrum of MiniSM

电路系统中使用的滤波模块为基于有源滤波器 UAF42 的二阶巴特沃斯低通滤波器,截止频率为 20 Hz<sup>[20]</sup>,而放大模块基于 AD620 开发<sup>[21]</sup>。从 MiniSM 中输出的电压信号,经过滤波和放大后,便转换为稳定易读的直流电压信号。

### 3 实验及结果

在本研究中,搭建的样机系统如图 3 所示。采用 980 nm 近红外激光器 MDL-III-980-1W(长春新产业光电技术有限公司)作为激发光源,使用直径为 0.9 mm 的点样毛细管对上转换溶液进行取样检测,同时使用 DPO2000B 示波器(泰克公司)来读取系统输出的电压值。

#### 3.1 双工荧光检测

本研究的主要特色在于使用角锥棱镜增加荧光的收集率。所以,在用该双工光路进行检测前,先对其可行性进行量化和分析。

检验光路使用美国海洋光学公司生产的 USB4000 光纤光谱仪来对最终输出的信号进行检测,由于该光纤光谱仪可以将复合光按照各个波长分别进行检测,所以在使用光纤光谱仪的时候可以不用滤光,以此来精简光路结构。该光纤光谱仪可以通过 SMA905 直接与光纤连接,且不需要其他辅助电路。

检测时将同轴多芯光纤的检测端(接口 3)直接与光纤光谱仪连接,鉴于光纤光谱仪的检测精度,使用可以发出较强荧光的测光片代替毛细管样品进行检测。

在连接好光路之后,打开激光器,激发光经过激发光路将测光片点亮,在同轴多芯光纤两个接收端都打开的情况下,记录下光纤光谱仪接收到的数值。之后,将同轴多芯光纤用于测量反射光路的一端(接口 2)关闭,使这一端无法接收荧光,记录下此时的数值。将两组数值按波长对应进行相减,以波长为横坐标、对应光强的差值为纵坐标作图,结果如图 5 所示。

从图 5 的曲线可以看出,在波长 548 nm 左右的位置有一个明显的波峰,而其他波长则表现为普通的噪音。值得注意的是,本研究使用的上转换荧光材料诱导所生成的正是 548 nm 的绿色荧光。和其他波长的光子强度相比较,检测系统两次对于这一波长范围的光子的接收效率有明显的提高,从而验证了使用角锥棱镜来增强荧光光子的收集率是可行的。

#### 3.2 系统线性度检验

实验中使用的检测样品有 NaYF<sub>4</sub>:Yb,Er、FEI-NaYF<sub>4</sub>:Yb,Er、PAA-UCNPs 上转换荧光材料。这三种荧光材料拥有相近的发光性质,当被 980 nm 近红外激光激发时,能够诱导生成 548 nm

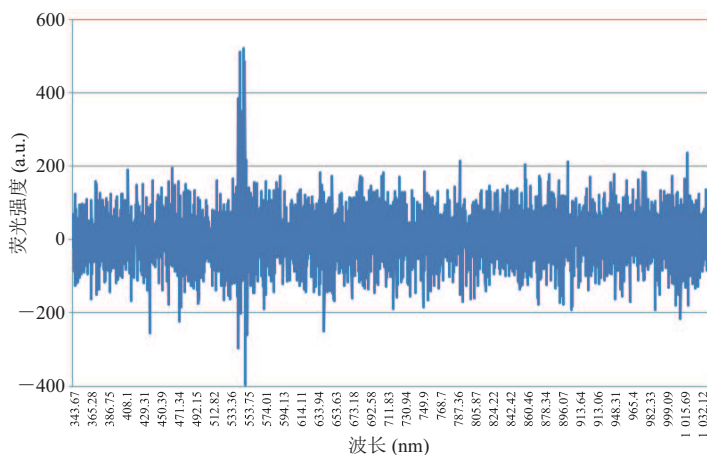


图5 单路与双路接收之间的差值

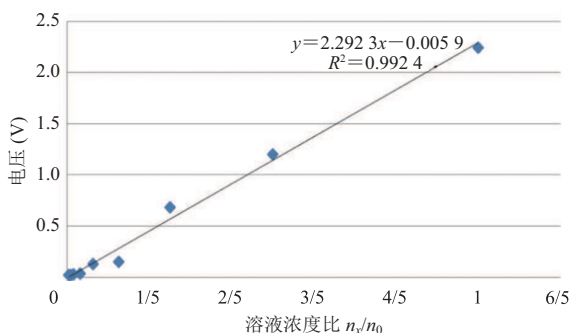
Fig. 5 Difference between dual and single channel receiver

左右的绿色荧光<sup>[22]</sup>。

实验时取 1 mL 浓度为  $n_0$  的上转换荧光材料原液, 然后逐次添加定量去离子水配置成浓度与原始溶液的浓度比分别为 1/2、1/4、1/8、1/16、1/32、1/64、1/128、1/256 的稀释溶液, 从而用于检测系统的线性度。

#### (1) NaYF<sub>4</sub>:Yb,Er 溶液

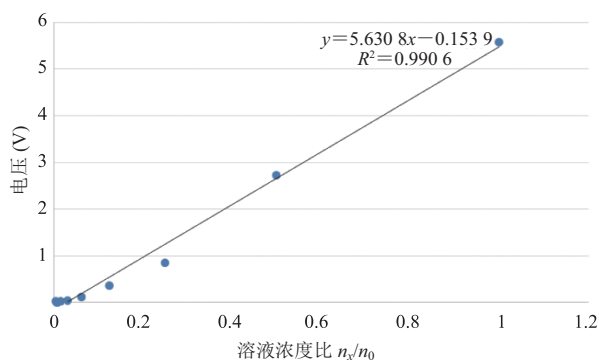
使用搭建好的系统对不同浓度的 NaYF<sub>4</sub>:Yb,Er 上转换材料溶液分别进行检测, 实验结果如图 6 所示。图中横坐标为检测溶液浓度与原始溶液的浓度比, 纵坐标为检测系统输出的电压值。检测结果显示, 系统的输出电压与上转换溶液的浓度

图6 对不同浓度 NaYF<sub>4</sub>:Yb,Er 上转换溶液的检测结果Fig. 6 Test results of different concentrations of NaYF<sub>4</sub>:Yb,Er upconversion solution

呈线性关系, 并且电压值与浓度值之间具有良好的相关性。

#### (2) FEI-NaYF<sub>4</sub>:Yb,Er 溶液

按照相同的方法, 对不同浓度的 FEI-NaYF<sub>4</sub>:Yb,Er 溶液进行检测, 实验结果如图 7 所示。从结果看, 系统对于 FEI-NaYF<sub>4</sub>:Yb,Er 溶液浓度的检测也有良好的线性度。

图7 对不同浓度 FEI-NaYF<sub>4</sub>:Yb,Er 溶液的检测结果Fig. 7 Test results of different concentrations of FEI-NaYF<sub>4</sub>:Yb,Er solution

#### (3) PAA-UCNPs 溶液

按照相同的方法, 对不同浓度的 PAA-UCNPs 溶液进行检测, 检测到的结果如图 8 所示。值得注意的是, 相对于前两种溶液, 检测系统对于不同浓度的 PAA-UCNPs 溶液的检测结果

不太理想, 输出电压和溶液浓度之间的相关性相对较低。

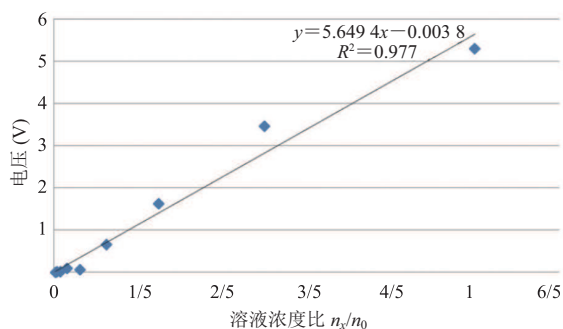


图8 对不同浓度 PAA-UCNPs 溶液的检测结果

Fig. 8 The test results of different concentrations of PAA-UCNPs solution

为了分析原因, 对该溶液再次检测。取 5 种不同浓度的溶液, 用点样毛细管取样, 溶液在毛细管中的液柱长度在 2 cm 左右。对每份样品, 在毛细管的 3 个不同位置进行检测, 并记录系统输出值, 具体结果如表 1 所示。

表 1 对毛细管不同位置的检测值

Table 1 The test results of different point of the capillary

溶液浓度比	电压值 (V)		
	点 1	点 2	点 3
1	5.277 06	5.835 79	5.517 06
1/2	3.494 101	4.237 06	3.437 06
1/4	1.597 06	1.116 474	0.637 06
1/8	1.115 256	0.517 113	0.477 06
1/32	-0.002 95	0.457 232	0.037 068

### 3.3 讨论

近年来, 上转换荧光检测技术得到了快速发展。例如, 2009 年上海光学精密机械研究所的课题组设计了一种新的免疫层析试纸条, 并搭建了一种扫描型上转换荧光检测平台<sup>[23]</sup>。与本文系统类似, 该平台同样采用光电倍增管作为光电转换和检测器件, 但检测结果建立在检测条和参照条的比值基础之上。随后, 该课题组又升级了该系统, 于 2012 年建立了一套新的多参数上转换荧光检测平台, 在投射荧光的基础上增加了散射荧光的检测,

从而增强了检测结果的稳定性和可靠性<sup>[24]</sup>。该系统是通过两套光电倍增管系统来分别检测投射和散射荧光。与此不同, 本文借助角锥棱镜设计了一种新的双工检测系统, 只要一套光电倍增管就能有效增强上转换荧光检测的稳定性和可靠性。

从实验结果看, 新的双工上转换荧光检测系统的输出电压值与被检测溶液浓度之间呈线性相关, 符合上转换溶液浓度与荧光强度之间的关系。并且, 在上转换材料溶解度较好的情况下, 电压值与溶液浓度之间有良好的线性度。但是, 在上转换材料溶解度较差的情况下, 由于上转换粒子在毛细管中的不均匀分布, 导致同一份溶液、同一次取样, 在毛细管的不同位置, 结果波动较大。侧面说明在液柱中, 不同位置的上转换粒子数量有差异, 从而造成荧光强度不同。所以, 在相同的激发条件下, 在毛细管的不同位置得到的电压值不同。在被检测溶液的样品含量较低的情况下, 这种差异尤其明显。

经过初步分析, 造成 PAA-UCNPs 溶液中荧光光子分布不均匀的主要原因可能在于样品溶解度较差。当样品被毛细管取样后, 会在短时间内析出, 无规律地附着于管壁之上。如图 9 所示, 可以很明显看到不均匀地附着在毛细管壁上的上转换发光颗粒, 这样就导致不同位置产生的荧光强度不同, 使得检测结果不够准确。此外, 本文系统在进行检测时, 仅对焦点处的上转换材料进行激发, 导致得到的结果仅为某一点的荧光数值。而当上转换粒子分布不均时, 单点的采样值无法代表被检测溶液的浓度。因此, 在下一步的改进中, 可以采取平均值法或扫描法, 对溶液整体进行检测, 使检测系统适用于溶解度较差的材料, 以扩大检测系统的应用范围。

## 4 结论

准确检测和量化被诱导的微弱荧光是应用上



图 9 取样后的点样毛细管

Fig. 9 Capillary with samples

转换荧光材料的核心关键步骤之一。本文根据上转换荧光材料独特的发光性质, 利用角锥棱镜设计了一种提高荧光收集率的双工检测光路, 并搭建了基于硅光电倍增管的检测电路, 用来检测上转换荧光材料被近红外光激发生成的荧光强度。通过具体的实验验证了双工荧光收集光路的可行性和系统的线性度, 证明了在样品溶解度较好的情况下, 该系统对不同浓度的上转换溶液生成的荧光的检测有较好的线性度。但是, 对溶解度较差的上转换荧光材料, 还需要进一步设计来提高系统检测的准确性。本文的研究工作对于推广上转换荧光材料的应用具有一定的实际意义和应用价值。

### 参 考 文 献

- [1] Haase M, Schäfer H. Upconverting nanoparticles [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2011, 50(26): 5808-5829.
- [2] Milton AF. Upconversion-a systems view [J]. *Applied Optics*, 1972, 11(10): 2311-2330.
- [3] Xiong LQ, Chen ZG, Tian QW, et al. High contrast upconversion luminescence targeted imaging in vivo using peptide-labeled nanophosphors [J]. *Analytical Chemistry*, 2009, 81(21): 8687-8694.
- [4] Hilderbrand SA, Shao F, Salthouse C, et al. Upconverting luminescent nanomaterials: application to in vivo bioimaging [J]. *Chemical Communications*, 2009, 28(28): 4188-4190.
- [5] 唐玄之, 封国林, 邵耀椿. 激光及激光生物学发展概况 [J]. *激光生物学报*, 1999, 8(2): 157-160.
- [6] Mei QS, Li Y, Li BN, et al. Oxidative cleavage-based upconversional nanosensor for visual evaluation of antioxidant activity of drugs [J]. *Biosensors & Bioelectronics*, 2015, 64: 88-93.
- [7] Mei QS, Deng W, Yisibashaer W, et al. Zinc-Dithizone complex engineered upconverting nanosensors for the detection of hypochlorite in living cells [J]. *Small*, 2015, 11(35): 4568-4575.
- [8] Mei QS, Jing HR, Li Y, et al. Smartphone based visual and quantitative assays on upconversional paper sensor [J]. *Biosensors & Bioelectronics*, 2015, 75: 427-432.
- [9] 刘康. 微型光谱仪关键技术及其应用研究 [D]. 浙江: 浙江大学, 2013.
- [10] Resau JH. Handbook of biological confocal microscopy [J]. *Applied Optics*, 1995, 25(3): 2766.
- [11] Kalkbrenner T. Confocal microscope with freely adjustable sample scanning: PCT/EP2013/070207 [P]. 2014-10-04 [2016-03-25].
- [12] 陈小梅. 自动控制共聚焦显微荧光仪: 中国, CN204807457U [P]. 2015-11-25 [2016-03-25].
- [13] 黄立华, 胡卓非, 凌丽青, 等. 上转换发光免疫层析检测装置和检测方法: 中国, CN10509836A [P]. 2015-11-25 [2016-03-25].
- [14] 李炳南, 李游, 梅青松, 等. 一种利用手机检测上



- 转换发光的方法及装置: 中国, CN104807798A [P]. 2015-07-29 [2016-03-25].
- [15] 赵忠龙, 杨志伟, 王海, 等. 便携扫描式荧光仪的研发 [J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2016, 55(1): 121-125.
- [16] Kuo PS, Slattery O, Kim YS, et al. Spectral response of an upconversion detector and spectrometer [J]. *Optics Express*, 2013, 21(19): 22523-22531.
- [17] Ovsianikov A, Torgersen J, Li Z, et al. Laser photofabrication of cell-containing hydrogel constructs [J]. *Langmuir*, 2013, 30(13): 3787-3794.
- [18] 匡萃方, 冯其波, 刘欣. 用矢量方法分析角锥棱镜的反射特性 [J]. *应用光学*, 2004, 25(2): 25-27.
- [19] SensL Technologies Ltd.. MiniSM Silicon Photomultiplier Modules [EB/OL]. [2013-07-03]. <http://sensl.com/products/application-specific-evaluation-systems/minism/>.
- [20] 罗春林. 滤波器组理论和设计及其在通信中的应用 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2005.
- [21] 曹茂永, 王霞, 孙农亮. 仪用放大器 AD620 及其应用 [J]. *电测与仪表*, 2000, 37(10): 49-52.
- [22] 李杰. 稀土掺杂 NaYF<sub>4</sub> 纳米晶上转换发光强度的调节 [D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- [23] Huang LH, Zhou L, Zhang YB, et al. A simple optical reader for upconverting phosphor particles captured on lateral flow strip [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2009, 9(10): 1185-1191.
- [24] Feng CX, Huang LH, Wang JB, et al. Development of multi-parameter measurement apparatus for up-conversion phosphor particles [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12(6): 2150-2156.