

文章编号:1007-2780(2023)01-0032-08

## 基于液晶调制光偏振的荧光量子点显示模式

汪思涵<sup>1#</sup>, 王骁乾<sup>1#\*</sup>, 薛文彬<sup>1</sup>, 李瀚璘<sup>1</sup>, 王翔乾<sup>1</sup>, 彭增辉<sup>2</sup>, 沈冬<sup>1</sup>, 郑致刚<sup>1</sup>

(1. 华东理工大学物理学院, 上海 200237;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:**传统的显示器由于滤色器的存在,有较大的功耗且能量利用率不高。本文提出了一种利用液晶调制紫外光偏振态以实现受到局域表面等离子体共振影响的荧光量子点光强调制的方法,所设想的显示设备由用于产生局域表面等离子体共振的金属纳米结构、附着于金属纳米结构电场热区的荧光量子点和基于液晶结构的光偏振调制模块组成。对单个像素的情况进行了理论模拟和原理分析,计算了若干金属纳米结构对不同偏振态的紫外光的响应。理论验证了特定金属纳米结构的表面等离子体光强放大效应,通过电子束刻蚀和半导体沉积等技术手段可在光强放大的电场热区植入荧光量子点,受到紫外光偏振态调制的金属表面等离子体产生可控的光强增强或减弱,进而激发或者抑制相应颜色的量子点发出不同颜色的光,使其可以用于显示。提出了一种新颖的显示模式,不同于传统显示,其具有较高的能量利用率和较大的色域,虽然其存在色彩对比度较低、分辨率不够高等问题,但提议确实为人们日常的信息显示提供了一种新的思路和一种潜在可能,相信随着技术的进步和设计结构的优化,这种光偏振态调制受表面等离子体激励的荧光量子点的方法可以在显示以及非显示领域获得应用。

**关键词:**等离子体共振;荧光量子点;液晶;光的偏振态;光强增强

**中图分类号:**O472<sup>+</sup>.2;O482.31 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/CJLCD.2022-0306

## Fluorescent quantum dot display mode based on light polarization modulation via liquid crystal

WANG Si-han<sup>1#</sup>, WANG Xiao-qian<sup>1#\*</sup>, XUE Wen-bin<sup>1</sup>, LI Han-lin<sup>1</sup>, WANG Xiang-qian<sup>1</sup>,  
PENG Zeng-hui<sup>2</sup>, SHEN Dong<sup>1</sup>, ZHENG Zhi-gang<sup>1</sup>

(1. College of Physics, East of China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,  
Changchun 130033, China)

**Abstract:** Due to the existence of color filter, the traditional displays have large power consumption but relatively low efficiency. In this article, we propose a method to utilize the polarization of an ultraviolet light, which is modulated by liquid crystal, to influence the light intensity distribution of a designed

**收稿日期:**2022-09-13; **修订日期:**2022-10-18.

**基金项目:**国家自然科学基金(No.62035008, No.51873060, No.61822504, No.11874026);应用光学国家重点实验室(No.SKLAO2020001A07)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.62035008, No.51873060, No.61822504, No.11874026); State Key Laboratory of Applied Optics (No.SKLAO2020001A07)

<sup>#</sup>共同第一作者

\*通信联系人, E-mail: xqwang@ecust.edu.cn

nanostructure in order to tune the stimulated fluorescent light of the quantum dots deposited in the corner of the metallic nanostructure. The concept is fundamentally based on the polarization-influenced local surface plasmon resonance and the proposed device comprises of the metallic nanostructure, quantum dots and liquid-crystal-based light polarization modulator. We simulate the electric field distribution for a single pixel case, and calculate the light intensity distributions for several metallic nanostructures under different polarization states of light. Thus, we theoretically verify the light intensity enhancement via local surface plasmon resonance arising from the specific metallic nanostructure. Through the technologies of E-beam etching and semiconductor deposition, the quantum dots with different sizes for corresponding colors can be implanted in specific “hot” areas, i. e., the corner of the metallic nanostructure, whose stimulated emitting fluorescent light intensity can be controlled via light polarization modulation through liquid crystal module. Thus, we propose a novel display mode, which possesses relatively high efficiency and large color gamut. Although it currently encounters some unexpected issues such as relatively low contrast ratio and low resolution, our proposed device does provide a potential way for the information display in people’s daily life. We believe that with the development of the technology and the optimization of the device, the proposed device is promising in the field of display or beyond.

**Key words:** plasma resonance; fluorescent quantum dot; liquid crystal; polarization states of light; light intensity enhancement

## 1 引 言

量子点(QDs)是半导体的一种,它的激发性电子被限制在三维空间中,发出光的波长取决于量子点的大小,通常在2~10 nm之间。目前,量子点以其精确的窄光谱带宽、高的发光效率和波长可调的优良光学特性受到越来越多的关注。

众所周知,一个液晶显示器(LCD)被分割成数百万个像素。每个像素是由3个子像素RGB(红绿蓝)组成的微小显示单元。每个亚像素都有一个对应的彩色滤光片。当白色背光(红+绿+蓝)到达这些子像素时,滤色器只允许特定波长的光通过,例如,红色滤色器会阻挡绿光和蓝光,只让红光通过。这意味着功耗会非常高。此外,彩色显示的性能在LCD上也不是完美的,而有机发光二极管(OLED)也存在类似的问题,因为这种显示器仍在使用滤色器<sup>[1-2]</sup>。对于需要优异的彩色显示性能,同时又具有更低功耗的显示器使用者来说,量子点发光二极管显示器(QLED)提供了革命性的解决方案。有很多著名的公司在开发QLED显示器,包括LG、三星、QD vision(MIT)、Nanosys等。其中关于量子点的一些重要研究已经被报道<sup>[3-5]</sup>。QLED的结构与OLED非常相似。对于一个QLED来说,在每

个亚像素中,滤色器已经不存在了,如果需要红色,只要给红色量子点供电并刺激它即可<sup>[6]</sup>。根据2013年3月的研究和市场报告,QLED市场价值在2012年大约有1.5亿美元,到2019年达到数十亿美元。现在QLED最大的问题是寿命。对于低亮度设备,寿命为10 000 h,而对于高亮度设备,寿命仅为1 000 h。研究人员目前正在致力于解决这一问题。

量子点既可以是光致发光也可以是电致发光,上述QLED属于后一种。本文提出一种利用光刺激量子点产生颜色的新方法,基本原理包括局域表面等离子体共振(LSPR)、量子点光刺激和基于液晶结构的光偏振调制。

LSPRs是金属纳米颗粒在光激发下的集体电子电荷振荡,在共振波长表现出增强的近场振幅。共振条件需要光子频率与在正核恢复力作用下的表面电子的固有频率相匹配。尽管粒子的远场散射也因共振而增强,但所产生的场在纳米粒子处高度局域化,并从纳米粒子/电介质表面到电介质内部时迅速衰减。光强增强是LSPR的一个重要特点,并且局域化意味着LSPR具有很高的空间分辨率(亚波长),仅受纳米颗粒大小的限制。由于场振幅得到增强,依赖于振幅的效应(如磁光效应)也被LSPRs增强<sup>[7-8]</sup>。LSPR是

许多测量材料在二维金属(通常是金和银)表面或金属纳米颗粒表面吸附的标准工具的基础。这是许多生物传感器和芯片实验室所用的传感器背后的基本原理。

量子点是一种半导体(如CdSe和CdTe),作为电激发材料的性质已得到广泛研究<sup>[9-11]</sup>;同时它也可以作为一种光致发光材料,当光源提供的光子能量大于带隙能量,量子点将会受到激发。入射光激发的偏振可以用半导体布洛赫方程表征<sup>[12-13]</sup>。一旦光子被吸收,在导带和价带中会分别形成具有有限动量*K*的电子和空穴。然后,激发产生能量和动量弛豫直至带隙最小。其中典型的机制是库仑散射和声子相互作用。最后,电子将在光子发射的作用下与空穴重新结合。

基于液晶结构的偏振调制器已经被研究多年,现在的技术已经相当成熟,其中一些技术(如偏振旋转器)已经被商业化。线性偏振入射光束经过几个液晶盒,通过对偏振旋转器<sup>[14]</sup>稍作修改,如在一个电控液晶层和一个1/4波片之间再插入若干电控液晶层,即可以增加光调制的自由度,将光的偏振态转换成任意偏振态的输出光。

## 2 量子点显示原理

如图 1 所示,特定尺寸的半导体量子点(CdSe)可以被不可见的紫外光(UV)(340 nm)激发并发出蓝光(420 nm)。UV 光的光强 *I* 与电场强度的平方  $|E|^2$  成正比。因此,越强的电场将有助于产生更多的激发光子。

为了在特定位置增强入射光的光场强度,我

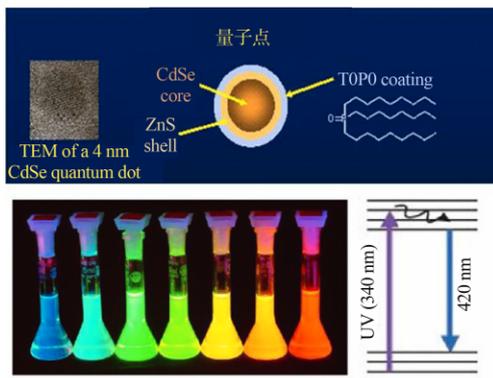


图 1 量子点和光激发

Fig. 1 Quantum dots and photo excitation

们采用了 LSPR 技术。当具有一定偏振的入射光照射在具有尖锐尖端(例如角、顶点、边缘)的金属纳米结构上时,光分布将很大程度上受到局域表面等离子体共振的影响,并且在与尖端接近的区域内可能出现极强的光强。对于单个像素,紫外入射光通过一个电控液晶结构来实现对出射光偏振态的调制。例如,一种可以调制线偏振入射光的偏振面的电控液晶结构如图 2 所示,对该结构中间的液晶层施加电压,相位延迟量会随电压变化。在经过后面那层 1/4 波片之后,偏振面也会随电压改变。值得注意的是,中间液晶层所需的取向层可以是单一方向的摩擦取向层,也可以是稳定化的光取向层,以防止紫外线对取向层的破坏。

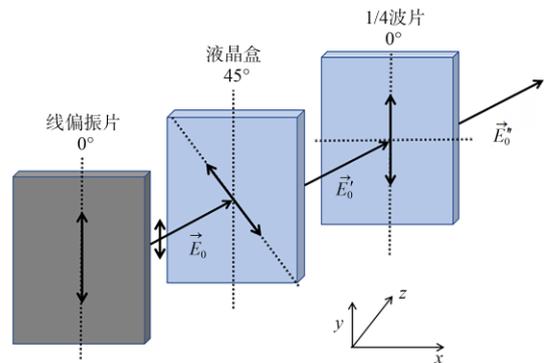


图 2 电控旋转偏振面的液晶器件结构图

Fig. 2 Schematic of the liquid crystal device for electrically rotating the polarization plane

简单的理论推导如下,通过第一块偏振片出射的光为线偏振光:

$$\vec{E}_0 = E_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

而后通过液晶盒以及 1/4 波片后的出射光有:

$$\vec{E}_0'' = \begin{pmatrix} i & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \frac{-\pi}{4} & -\sin \frac{-\pi}{4} \\ \sin \frac{-\pi}{4} & \cos \frac{-\pi}{4} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} e^{i \frac{2\pi \Delta n_{\text{eff}} d}{\lambda}} & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \frac{-\pi}{4} & \sin \frac{-\pi}{4} \\ -\sin \frac{-\pi}{4} & \cos \frac{-\pi}{4} \end{pmatrix} \cdot E_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

其中  $\Delta n = n_e - n_o$ ,

$$\Delta n_{\text{eff}} = \frac{n_e n_o}{\sqrt{n_e^2 \sin^2 \beta + n_o^2 \cos^2 \beta}} - n_o, \quad (3)$$

$\beta$ 为液晶指向矢与 $x$ - $y$ 平面的夹角。

令  $\alpha = \frac{2\pi\Delta n_{\text{eff}}d}{\lambda}$ , 可计算得出最终出射光表达式为:

$$\vec{E}_0'' = \begin{pmatrix} \cos \alpha/2 \\ -\sin \alpha/2 \end{pmatrix} \cdot ie^{i\pi} \cdot E_0. \quad (4)$$

可以得到出射光也为线偏转光,且偏转角与电压有关,因此可以实现通过液晶结构电控入射光的偏振态。以上是对单一像素单元情况的讨论,对于像素阵列的情况,可参考 TFT-LCD 的驱动电路对每个像素单元的驱动电压独立调制。另外,通过在液晶结构中再添加一片电控液晶层,可以增加一个调谐自由度,使偏振态的调制不再局限于线偏振面的旋转,甚至可以在椭圆偏振、圆偏振和线偏振之间转变,调制范围更广。

基于光强增强效应,我们提出一个如图3所示的生成有色光的结构。光照射到金属纳米结构层之后会形成光强热点区域,进而激发附着在热点区域的荧光量子点,产生相应颜色的荧光。

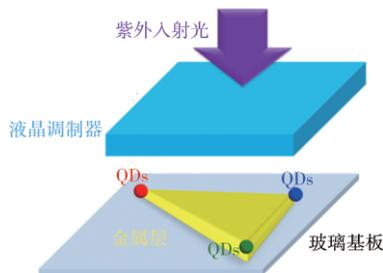


图3 提出的生成有色光结构

Fig. 3 Proposed structure for generating color

三种量子点(红、绿、蓝)沉积固定在透明玻璃基板上的三角形金属纳米结构的顶点上。液晶调制器由多个液晶盒组成,以调制入射紫外光的偏振,使某些特定区域内的QDs被强烈地激发。此后,激发的有色光将穿过玻璃基板并被人眼感知。入射光的光强分布会随着偏振态的变化而改变,从而使出射光呈现出不同的颜色。同时,玻璃基板可阻挡紫外线以保护人体健康。

### 3 FDTD 模拟

利用时域有限差分法(FDTD)模拟了一些特殊结构的电场分布。

如图4所示,具有一定线性偏振的光将在三

角形的顶点处产生热点。假设入射光(790 nm)的振幅  $|E|=1$ , 在热点处  $|E| > 1500$ , 是入射光的电场强度的1500倍,而光强正比于电场强度的平方,因此量子点的激发会大幅增强。

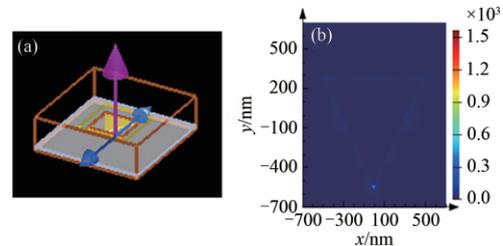


图4 (a)三角金属结构受光照的FDTD建模;(b)模拟得到的电场分布图。

Fig. 4 (a) FDTD modelling for the triangular metallic structure under light irradiation; (b) Electric field distribution obtained by simulation.

为了找到在特定偏振态下只有在一个顶点具有强电场而在其他顶点只具有微弱电场的结构,我们对一些情况进行了模拟计算。在模拟中(见图5),金属层由铝制成,具有三角形形状,层厚度为100 nm。基板由  $\text{Al}_2\text{O}_3$  制成,正常入射光源的波长为325 nm。其中热点已用红色圆圈圈出。我们发现,当光的偏振方向沿金属三角形中垂线时,偏振方向所指的那个顶点电场放大了20多倍,另外两个顶点也略有电场放大的区域,但热点范围比较小,与我们预先一个点强两个点弱的设想比较接近;当偏振方向沿金属三角形某一条边时,偏振方向所指的两个顶点电场放大了100倍以上,而另外一个顶点的电场没有被放大,呈现弱光状态。这与我们预先的设想正好相反,但这种特性可以在补色光(CMY)体系中

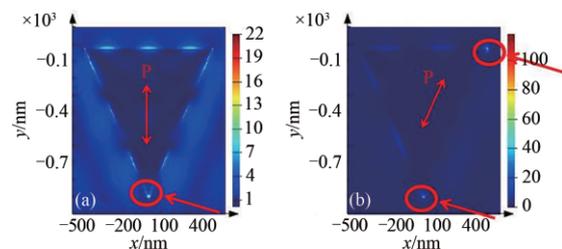


图5 不同偏振入射光下的电场分布。(a)偏振方向沿中垂线;(b)偏振方向沿三角形的一条边。

Fig. 5 Electric field distribution under incident light with different polarizations. (a) Polarization perpendicular to one side of the triangle; (b) Polarization along one side of the triangle.

得到很好的应用。

由于顶点热区影响的范围通常较小,而我们期望更多的量子点能够得到光激发,所以我们还研究了一些凹槽结构。设置槽深为 100 nm,宽度为 50 nm,以供容纳相应的量子点。图 6(a)和(b)显示了不同偏振的入射光下三角形凹槽中电场的热区,沿边偏振的光在另两条凹槽的中间区域形成电场放大,沿中垂线偏振的光在一条凹槽的中间区域形成电场放大,放大倍数均接近 20。由于矩形结构具有易加工的特点,因此我们也对矩形结构做了模拟。但不同于三角形可以在 3 个顶点或者 3 条边上放置不同的量子点,矩形的图

形对称性使其只能在相对的顶点或者相对的边上放置相同的量子点,所以每一个矩形可以放置两种不同的量子点。图 6(c)、(d)和(e)显示了矩形凹槽结构在不同方向线偏振光照射下的电场分布,沿边偏振的光在矩形两条垂直偏振方向的凹槽的中间区域形成电场放大,放大倍数约为 16,沿 45°角方向偏振的光在矩形 4 条凹槽的中间区域形成电场放大,放大倍数接近 10。凹槽围成三角形的效果明显要好于其围成矩形的效果,但是从加工难易度、精度以及与分辨率、对比度相关的堆积密度角度出发,矩形可能是比较合适的形状。

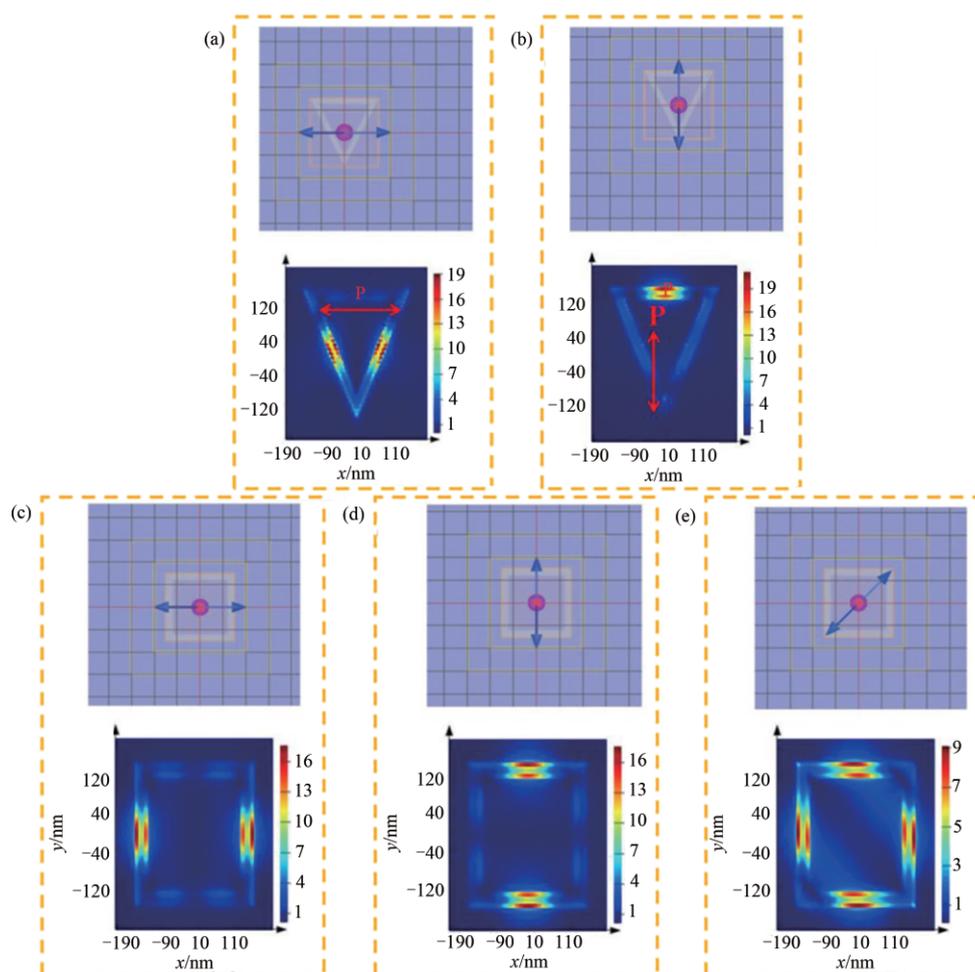


图 6 不同沟槽结构的电场分布。三角形沟槽结构:(a)入射光偏振方向沿三角形一条边,(b)入射光偏振方向沿中垂线;矩形沟槽结构:(c)入射光偏振方向沿水平方向,(d)入射光偏振方向沿垂直方向,(e)入射光偏振方向沿对角线。

Fig. 6 Electric field distributions for different groove structures. Triangular groove structure: (a) polarization of the incident light along one side of the triangle, (b) polarization perpendicular to one side of the triangle; Rectangular groove structure: (c) polarization along the horizontal direction, (d) polarization along the vertical direction, (e) polarization along the diagonal of the rectangle.

我们在对矩形凹槽的边场放大效应做了研究之后,同样对矩形金属顶点的场放大效应做了研究。如图 7 所示,研究了矩形金属(铝)层(100 nm 厚)上的电场分布。其中热点已用红色圆圈圈出,电场放大倍数约为 40。可以看到位

于两个对角顶点处的热点,同时,在另外两个对角顶点处的电场非常弱。将量子点放置在矩形顶点位置的效果与前述几种结构的效果相比,在对比度方面的优势比较明显,且加工难度较低。

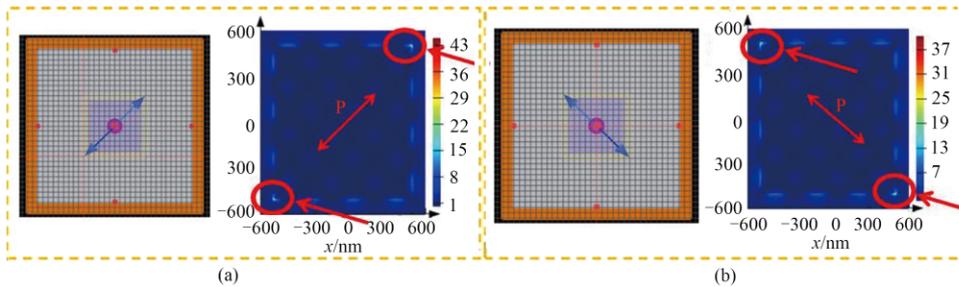


图 7 矩形结构顶点的场放大效应。(a)偏振方向沿 45°时的电场分布;(b)偏振方向沿 -45°时的电场分布。

Fig. 7 Electric field enhancement at the corner of the rectangular structure. (a) Electric field distribution for the polarization along 45°; (b) Electric field distribution for the polarization along -45°.

#### 4 量子点显示模式的实验方案设计

为了将量子点连接到如图 8 中所示的矩形金属纳米结构中,提出了如图 9 所示的过程方法,即

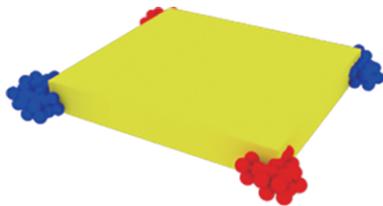


图 8 量子点与金属结构连结预期的结构

Fig. 8 Expected structure with QDs connecting to metal structure

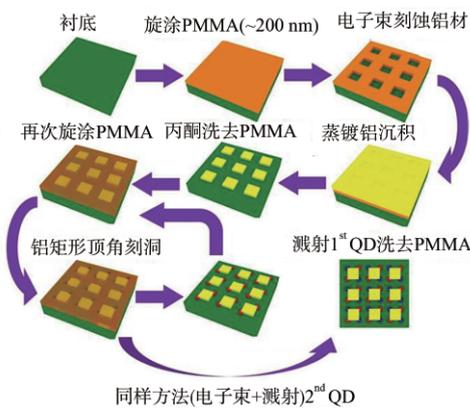


图 9 提出的结构的制造过程

Fig. 9 Fabrication procedures of the proposed structure

首先在基板上旋涂一层约 200 nm 的 PMMA,然后使用电子束刻蚀矩形网格,接着通过蒸镀沉积铝膜,再利用丙酮洗去 PMMA 层留下矩形铝格,接下来再旋涂一层 PMMA,利用电子束在矩形铝格角落位置刻蚀小洞,再喷溅第一种量子点溶液并洗去 PMMA,最后利用相同的方法(电子束刻蚀小洞+喷溅)植入第二种量子点。角处小孔的半径应小于 25 nm,否则显现的颜色将会变弱。除了红和蓝量子点的组合外,可以用同样的方法获得其他两种组合(红和绿,绿和蓝)。然后将这些元素放入一个矩阵中形成显示屏上的像素。

#### 5 讨论

不同偏振态的紫外光照射金属纳米结构会导致不同的光强分布,利用主动式液晶的多层结构可以通过电控的方式实现各种光的偏振态<sup>[14-19]</sup>。由于对称性的缘故,利用圆偏振光照射由红绿蓝 3 种颜色量子点分别放置在 3 个顶点的金属三角形,会产生红绿蓝组合色,也就是白色,如图 10 所示。此外,利用椭圆偏振光,由于各顶点位置光强分布不均,还可以得到其他的组合色,如图 11 所示。正因为不同偏振态的 UV 光入射所产生的颜色不同这一特性,这种结构还可以

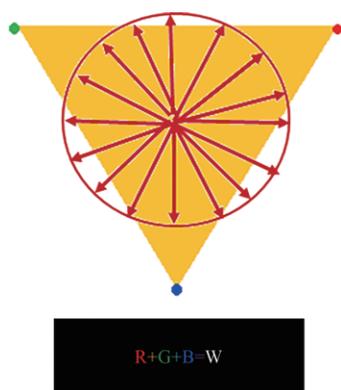


图 10 用圆偏振光产生白色

Fig. 10 Generating white color under circularly polarized light

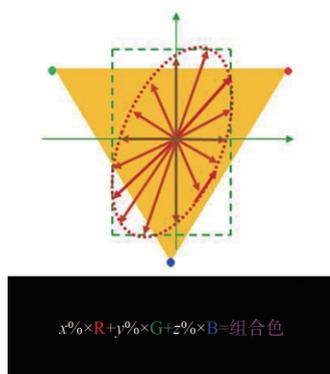


图 11 用椭圆偏振光产生混合色

Fig. 11 Generating mixed color under elliptically polarized light

反过来作为用于检测 UV 光偏振态的一种手段。

这个工作是在理论计算的基础上进行的,由于我们实验室制备仪器的限制,没有取得突破性的实验结果,最困难的部分是如何在角落精确地钻出小孔。若这一问题得到解决,所提出的方法可以很容易地取得成功。如果量子点能够通过一些自组装的方法与金属纳米结构的顶点相连接将会有更好的效果。

## 6 结 论

本文提出了一种基于液晶调制光偏振的荧光量子点显示模式,这种新颖的显示模式有别于传统显示,其具有较高的能量利用率和较大的色域,为人们日常的信息显示提供了一种新的思路 and 一种潜在可能。当然,这种显示模式仍然存在一些限制,比如分辨率、色彩对比度略低等,这些都需要做更多的优化处理,比如对矩形金属的大小、长宽比进行优化,或者对金属结构的图形进行优化(选用尖角较多的分形结构),以达到尽可能增大量子点受电场热区作用的区域范围的目的。相信随着技术的进步和设计结构的优化,这种光偏振态调制受表面等离子体激励的荧光量子点的方法可以在显示以及非显示领域获得应用。

## 参 考 文 献:

- [1] HUANG Y, HSIANG E L, DENG M Y, *et al.* Mini-LED, Micro-LED and OLED displays: present status and future perspectives [J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9: 105.
- [2] CHEN H W, LEE J H, LIN B Y, *et al.* Liquid crystal display and organic light-emitting diode display: present status and future perspectives [J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7: 17168.
- [3] CHEN Y, MUNECHEKA K, PLANTE I J L, *et al.* Excitation enhancement of CdSe quantum dots by single metal nanoparticles [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(5): 053106.
- [4] POMPA P P, MARTIRADONNA L, TORRE A D, *et al.* Metal-enhanced fluorescence of colloidal nanocrystals with nanoscale control [J]. *Nature Nanotechnology*, 2006, 1(2): 126-130.
- [5] KIM T H, CHO K S, LEE E K, *et al.* Full-colour quantum dot displays fabricated by transfer printing [J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(3): 176-182.
- [6] 李继军, 聂晓梦, 甄威, 等. 显示技术比较及新进展[J]. *液晶与显示*, 2018, 33(1): 74-84.  
LI J J, NIE X M, ZHEN W, *et al.* New developments and comparisons in display technology [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2018, 33(1): 74-84. (in Chinese)
- [7] GONZÁLEZ-DÍAZ J B, GARCÍA-MARTÍN A, GARCÍA-MARTÍN J M, *et al.* Plasmonic Au/Co/Au nanosandwiches with enhanced magneto-optical activity [J]. *Small*, 2008, 4(2): 202-205.
- [8] DU G X, MORI T, SUZUKI M, *et al.* Evidence of localized surface Plasmon enhanced magneto-optical effect in nanodisk array [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(8): 081915.

- [9] BANG S Y, SUH Y H, FAN X B, *et al.* Technology progress on quantum dot light-emitting diodes for next-generation displays [J]. *Nanoscale Horizons*, 2021, 6: 68-77.
- [10] 关小雅,王洪哲,申怀彬,等. 面向显示应用的量子点发光器件研究进展[J]. 液晶与显示,2021,36(1):176-186.  
GUAN X Y, WANG H Z, SHEN H B, *et al.* Research progress of quantum dot light-emitting devices for display application [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(1): 176-186. (in Chinese)
- [11] DAI X L, DENG Y Z, PENG X G, *et al.* Quantum-dot light-emitting diodes for large-area displays: towards the dawn of commercialization [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29: 1607022.
- [12] KIRA M, KOCH S W. *Semiconductor Quantum Optics* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2011: 388-404.
- [13] HAUG H, KOCH S W. *Quantum Theory of the Optical and Electronic Properties of Semiconductors* [M]. 5th ed. Munich: World Scientific Publishing Company, 2009.
- [14] MURAVSKY A, MURAUSKI A, CHIGRINOV V, *et al.* Light printing of grayscale pixel images on optical rewritable electronic paper [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2008, 47(8R): 6347-6353.
- [15] 余丽红,沈冬,郑致刚. 基于SLM投影拼接技术的液晶光学元件制备[J]. 液晶与显示,2022,37(9):1132-1139.  
YU L H, SHEN D, ZHENG Z G. Fabrication of liquid crystal optical elements based on SLM projection splicing technology [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2022, 37(9): 1132-1139. (in Chinese).
- [16] 杨艳灵,张弛,郭玉强,等. 消色差偏振旋转器[J]. 液晶与显示,2019,34(11):1061-1066.  
YANG Y L, ZHANG C, GUO Y Q, *et al.* Achromatic polarization rotator [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2019, 34(11): 1061-1066. (in Chinese).
- [17] ZHUANG Z, SUH S W, PATEL J S. Polarization controller using nematic liquid crystals [J]. *Optics Letters*, 1999, 24(10): 694-696.
- [18] FAN X Y, MA W Y, ZHANG Y M, *et al.* Broadband spatial polarization processing of light via a photopatterned dichroic medium [J]. *Applied Physics Letters*, 2022, 120(4): 041103.
- [19] CHEN P, JI W, WEI B Y, *et al.* Generation of arbitrary vector beams with liquid crystal polarization converters and vector-photoaligned q-plates [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(24): 241102.

## 作者简介:



汪思涵(2001—),男,上海人,华东理工大学学生,主要从事光电子学方面的研究。E-mail:19002392@ecust.edu.cn



王晓乾(1984—),男,上海人,博士,讲师,2014年于香港科技大学获得博士学位,主要从事液晶微纳结构及光子器件方面的研究。E-mail:xqwang@ecust.edu.cn