

基于扫描振镜及数字微镜显示器控制的静态体三维显示系统

韩东成^{1,2,3}, 杨世植^{1,3*}, 赵强^{4**}, 张亮亮⁵, 邓燕⁴¹中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;²中国科技大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230026;³安徽省先进激光技术实验室, 安徽 合肥 230037;⁴安徽建筑大学环境与能源工程学院, 安徽 合肥 230601;⁵安徽省东超科技有限公司, 安徽 合肥 230088

摘要 本文介绍了一种波长宽、响应快的静态体三维显示系统,包括显示介质、控制系统及激光系统三部分。实验中,选取具有双频上转换效应的 $\text{NaYF}_4:\text{Er}/\text{NaGdF}_4:\text{Yb}/\text{NaYF}_4:\text{Er}$ 纳米晶溶液作为显示介质。控制系统选用 1024×768 的数字微镜显示器(DMD)及扫描振镜对红外激光进行投影,使用成像光学软件将立体图像的二维切片转换为DMD/扫描振镜的控制信号。激光系统选用1550 nm和850 nm的红外激光,用适当的光学元件调整光束和光路。最终在纳米晶的环己烷溶液中(1 mmol/mL)以 $30\times 1024\times 768$ 的分辨率实现了绿色(532 nm)三维图像体的快速扫描,图像无闪烁、深度线索自然、可360°观看。该显示系统对材料性能要求不高,搭建方便,显示效果明显,为上转换材料在三维显示领域的初步研究及大尺寸体三维显示技术的探究提供了参考。

关键词 体三维显示; 双步双频上转换; NaYF_4 纳米晶; 数字微镜显示器

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231862

1 引言

随着显示技术的发展,人们对三维(3D)显示技术的需求不断增加,特别是在工业设计、飞行模拟器、医学成像、广告、电影和展览等领域。目前商业化的3D显示器大都是基于利用人眼的“双目视差”原理开发出来的3D图像显示技术^[1-4],在平面二维(2D)显示器上实现3D信息的显示。然而,这种人为制造视差的方式所构造的3D景象缺乏真实的深度线索,成像并不自然,会加重观察者的脑力负担。即使借助强大的3D渲染软件也难以正确有效地提供空间关系或深度信息^[5]。因此,需要能够产生真正3D图像的真三维显示器来克服2D显示器的局限。目前的真三维显示技术可分为全息术及体三维显示技术^[6]。全息术是利用光波的干涉和衍射现象来构建三维图像,能够真实地呈现一个三维世界场景。然而受显示原理的限制,全息术一般只能生成静态的三维场景,并且需要在特定角度下观看,实时成像仍存在巨大的技术挑战^[7-9],刘娟等^[10]研究了实时全息三维显示技术的进展,并指出未

来计算全息三维显示的发展需要软硬并进,在设计更具实时性全息图算法和波前编码方法的同时,也需要开发高性能运算平台和调制器件。

体三维显示技术是通过三维空间的体像素来显示三维物体,呈现的是真实的立体图像,可为人类视觉系统感知三维物体提供生理和心理深度线索,可满足全方位观察的需求,是最有可能实现高空间分辨率、多角度、多人同时观察、实时交互和大尺寸的三维显示技术^[1,5,11]。体三维显示技术按照显示体积的生成方式又可分为静态体三维显示和扫描式体三维显示。扫描式体三维的成像空间由旋转或平移的动态屏幕构成。极高的屏幕周期运动速度会产生一系列的机械问题,如系统的稳定性、使用寿命、轻便性、噪声和振动等。静态体三维的成像空间是由静态的特殊发光材料构成,利用不可见激发光束在成像空间内部交汇或聚焦使物质跃迁(上转换/下转换)形成荧光体素点,这些体素可以在显示介质内的任意位置被选择性地激发^[12-14]。当激光束快速移动时,无数体素点就构成具有真正物理景深的三维立体图像。静态体三维显示图像不抖动,

收稿日期: 2023-11-30; 修回日期: 2023-12-27; 录用日期: 2024-01-29; 网络首发日期: 2024-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(11704003)、安徽省高校协同创新项目(GXXT-2022-085)、安徽省教育厅高校自然科学研究项目(2022AH050233)、安徽省重点研究与开发计划(2020b05050006)

通信作者: *szyang@aiofm.ac.cn; **rommel99@163.com

刷新率高,可以实现高分辨率、高对比度的三维立体显示。

使用两个红外光子的能量将材料泵入一个受激能级,处在受激能级的电子不稳定会跃迁到较低能级并产生可见光的过程被称为双步双频(TSTF)上转换发光(UCL),这是实现静态体三维显示的一种有效途径^[15-18]。TSTF UCL材料在体三维显示技术上的应用最初是由Lewis等^[19]于1971年在巴特尔实验室提出的。随后,Downing等^[1]在1996年利用掺稀土的重金属氟化物玻璃实现的三色固态立体显示,极大地促进了TSTF UCL材料在体三维显示技术上的发展。之后的几十年里,基于上转换介质的体三维显示系统被持续地研究和关注,显示颜色从单色扩展到彩色,显示介质也扩展到了气体^[20]、单晶^[15]、玻璃^[21]以及纳米晶-有机高分子复合材料^[22]等多个类型。TSTF UCL介质材料因其响应迅速、高对比度、高色纯度等特点在体三维显示技术领域具有巨大的应用潜力。

尽管如此,TSTF UCL材料在体三维显示应用方面的报道仍然较少,已经报道的上转换材料由于自身体积和光学性质的限制^[22-23],显示体积较小,通常在体积的每一侧只有几厘米。更大的晶体尺寸可通过光学黏合几个较小的晶体块来实现,这种大尺寸的显示材料制备周期长、工艺复杂、成本过高,同时也会有些功能损失^[1]。此外,部分文献的研究重点放在了材料的性质上如许京军课题组描述了铈酸锂晶体光折变全息存储及显示的原理、研究历史和最新进展,并展望了未来可能的发展方向^[24],但对体三维显示系统的介绍较少。常见的用于生成高分辨率体三维图像的系统是基于数字光学处理技术(DLP)实现的。首先沿系统的两个轴利用激光阵列覆盖聚焦透镜阵列(双DLP模式)^[13],寻址阵列激活显示介质的横截面,然后成像阵列只照射那些需要发光并创建所需图像的横截面部分。通过显示介质的深度进行处理和成像,以构建三维图像,并在足够高的刷新率下重复这个过程。这种方法节省了三维图形的扫描时间,可以显著降低激活每个体素所需的光功率,但由于实际使用的激光阵列的尺寸和密度有限,以及光电带宽的限制,导致其分辨率受到限制。并且在双DLP模式中激发光源提供的功率较低,要求介质材料要有足够高的发光效率。

本文开发了一套基于稀土离子双频上转换发光机制的双光束扫描三维成像系统。同时搭建了一套基于DLP的投影成像光路,以及基于扫描振镜、柱面镜的一字线激光整形方案光路。该显示系统基于使用双红外激光器激发的TSTF UCL技术,利用数字微镜显示器(DMD)和扫描振镜以高分辨率实现图像体积的快速扫描,相比于双DLP成像模式对材料的性能要求更低,且成本低、方法简单。该系统非常适用于对TSTF UCL材料的立体显示效果的初步研究,对其他寻址介质材料的成像方案也提供了一种有效的思

路。此外,显示用的TSTF UCL材料为核壳结构 $\text{NaYF}_4:0.5\%\text{Er}@\text{NaGdF}_4:2\%\text{Yb}@\text{NaYF}_4:1\%\text{Er}$ (简称为 $\text{NYF}@\text{NGF}@\text{NYF}$)纳米晶的环己烷溶液,在实现大尺寸成像上极具潜力。

2 基本原理

在众多用于生成3D图像的方法中^[6,25-28],本文选择基于TSTF UCL技术^[29-31]来激活图像空间内的“体素”,以生成三维图像。该技术的基本思想如图1(a)所示。两个不同波长红外光源发射的光子入射到三价稀土离子 Ln^{3+} 掺杂的光学材料上,并被该材料依次吸收。处于离子基态(E_0)的电子被来自具有波长 λ_0 的第一激发源(可称为寻址源或激光)激发,电子吸收激发光子的能量跃迁到中间能级(E_1),在那里电子可以保持额定寿命 τ_0 。在额定时间 τ_0 内,如果有波长为 λ_1 的光子入射到 Ln^{3+} 离子上,则处于能态 E_1 的电子会从光子中吸收能量,被激发到更高的能态(E_2)。当高能态的电子跃迁回到基态时,会产生一个可见的光子,从而在材料的内部空间产生一个光点即“体素”,如图1(b)所示。通过寻址多个体素来组成图像,通过扩大材料的体积绘制较大的图像。由于从每个体素发出的光在移除寻址源后很快消失,整个图像必须以24 Hz以上的速率刷新,以欺骗眼睛看到一个没有闪烁的单一内聚图像^[1,29]。

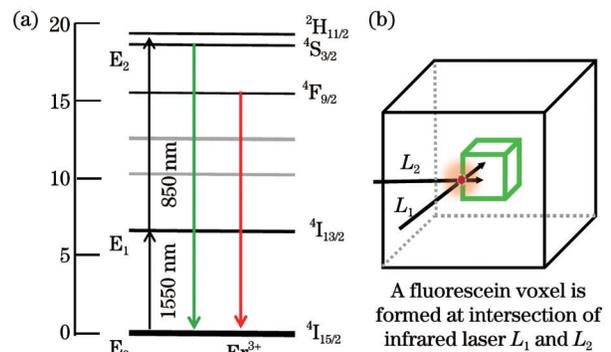


图1 TSTF UCL机理及静态体三维成像原理。(a) Er^{3+} 离子的TSTF UCL过程;(b)静态体3D显示技术的成像原理

Fig. 1 TSTF UCL mechanism and static volumetric 3D imaging principle. (a) TSTF UCL process of Er^{3+} ions; (b) imaging principle of static volumetric 3D display technology

各种体三维显示器存在显著的显示效果差异,影响因素之一是介质材料^[30-33]的选择。具有TSTF UCL性质的晶体或掺杂稀土的重金属氟化物或ZBLAN玻璃^[1,34-35],可与多个成像源一起使用,以产生红色、绿色和蓝色波长的光,有效地创建三色图像,但是材料性质带来的显示尺寸限制不可忽视。一些有机材料如铂(II)八乙基卟啉^[36]、二芳烯^[37]、*n*-苯基螺内酰胺罗丹明B等^[38]的溶液也被开发出来用于体3D显示。虽然溶

液不存在显示体积的限制,但是寻址和成像时间较长^[39],不利于立体图像的快速扫描和快速刷新,且有有机材料的 Stokes 位移一般较小,导致最终立体图像的清晰度和对比度不高。随着纳米材料制备工艺的发展成熟,纳米颗粒具有发光性质稳定、可实现大尺寸显示、透光性好、材料便宜易获取等优点,在体三维显示领域具有重大的应用潜力。因此,本文选用具有 TSTF UCL 性质的核壳结构纳米晶溶液为介质材料,兼顾了晶体/玻璃和有机材料的优点,具有较好的清晰度和对比度,有望实现大体积显示。

体三维显示效果差异性的另一个重要影响因素是图像处理系统的选择。本文选用的寻址方法是扫描振镜和 DLP 相结合的方法(或称作光栅法)。寻址光源通过扫描振镜垂直 X-Z 平面对显示介质扫描,成像光源通过 DLP 系统垂直 Y-Z 平面进行投影。复杂的建模和控制软件很容易用于驱动基于光栅法的系统,且不依赖于系统的最终构造或物理结构^[15]。该方法允许像素平面连续寻址,可大大降低所需的扫描速度,从而延长激发时间并降低所需的泵浦能量。与单光束的寻址模式相比,该材料在实现同等像素图像时需要的像素激发时间更长,泵浦能量更低;与双振镜模式相比,

呈现的图像更生动、扫描时间更短;与双 DLP 模式相比,该寻址模式对材料发光效率的要求更低。需要注意的是,由于体素是图像平面连续寻址的,所以刷新率由寻址光源的刷新频率决定。因此,在实际操作中要增加寻址激光器的功率,以确保所有像素都能获得足够的能量。此外,在激光寻址的 3D 显示系统中,需要在光源传播位置上放置一个特殊涂层的保护板来阻挡来自激光光源的所有剩余红外激光,以保护观察者的安全。

3 实验

3.1 系统综述

体三维显示系统由显示介质、控制系统及激光系统等三部分组成,如图 2 所示。显示立体图像的介质材料是自制 TSTF UCL 纳米晶溶液,盛放在图 2(a)中石英皿(尺寸为 3 cm×3 cm×3 cm)内。处理图像空间并创建三维图像的光电系统位于图像空间的前方和右侧,如图 2 所示,该光电系统和一个用于控制和提供给 DLP 驱动程序数据的计算机共同组成显示系统的控制部分。通过光纤传输的高功率激光系统及光路在图像空间前方,左侧和后方是保护观察者的挡光板。

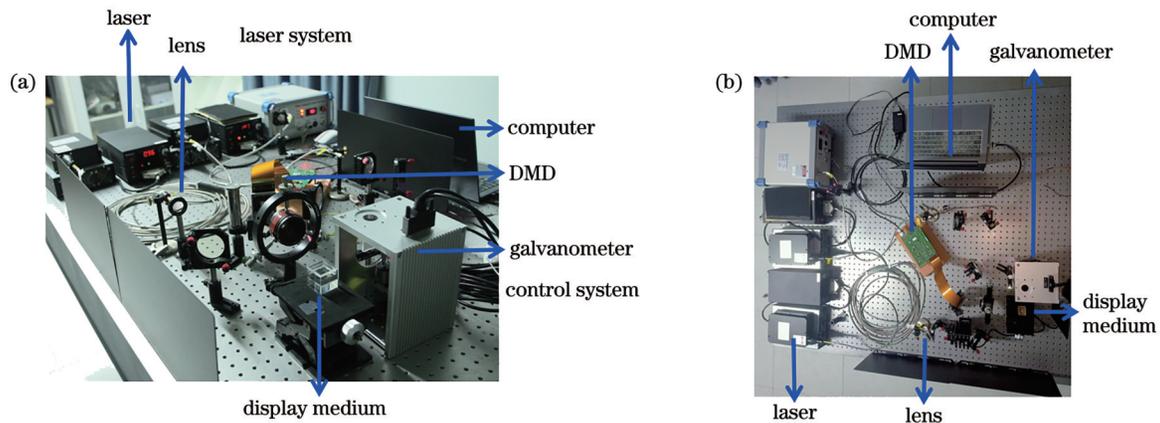


图 2 体三维显示系统实例。(a)静态体三维显示系统的右视图;(b)静态体三维显示系统的俯视图

Fig. 2 Example of volumetric 3D display system. (a) Right view of static volumetric 3D display system; (b) top view of static volumetric 3D display system

3.2 显示介质

显示介质是影响显示器产生大尺寸、高分辨率图像能力的系统关键元素。过去报道的系统中,用于显示的 TSTF UCL 光学材料主要是 Er^{3+} 掺杂的氟化物晶体、玻璃微晶或高分子复合材料,如 AC 材料公司生产的 17 mm×17 mm×60 mm 的 2% Er^{3+} 掺杂的氟化钇锂(YLF)晶体及 19 mm×18 mm×100 mm 的 2% Er^{3+} 掺杂的氟化钇钠(NLF)晶体^[13,40]。本文系统中选用的成像发光材料为核壳结构的 NYF@NGF@NYF 纳米晶溶液,该材料利用 $\lambda_1=1550\text{ nm}$ 和 $\lambda_2=850\text{ nm}$ 的近红外光产生波长为 532 nm 的绿光^[41]。

3.3 扫描器件

本文使用 DMD 投影系统进行成像激光的调制。如图 2 所示,由纤芯直径为 400 μm 的光纤输出的 850 nm 红外激光,经过单透镜整形成直径约 8 mm 的准直激光,再经红外高反镜反射后,沿着 DMD 镜片的对角线以特定角度入射,反射光经投影镜头聚焦到纳米晶溶液中。本系统中使用的 DMD 是由德州仪器生产的 DLP650LNIR 型高损伤阈值超高速近红外数字微镜阵列,具有超过 100 万个微镜的 1280×800 (WXGA) 阵列,微镜尺寸为 10.8 μm ,入射功率高达 40 W,模式切换速率高达 12500 Hz,可高效控制近红外光 800~2000 nm 波段。DMD 上反射镜的“开启”和“关闭”由

DLP 进行控制,通过控制反射镜的“开启”和“关闭”状态,能够将入射到 DMD 上的红外光束的圆形光斑反射成设置的图案。经 DMD 反射后的红外光束再经投影镜头聚焦后,其焦平面在光学介质中,焦深 ≥ 30 mm,覆盖整个显示介质深度,保证系统在整个显示介质的深度方向上有足够的体素体积。该处的焦深 30 mm 是测试结果,用红外探测卡显示 DMD 投影的红外图像,从 0 到 35 mm,图案都是清晰不发散的,由此说明焦深 ≥ 35 m。

扫描振镜是 SCANdre20 光电式位置传感器振镜(哈尔滨汉能光电),使用 LMC FIBER 控制卡进行控制,最大扫描角度为 $\pm 18^\circ$,最大扫描速率为 4000 Hz。

3.4 激光系统

本文使用两个不同波长的半导体激光器分别用于寻址和成像。其中寻址使用中心波长为 1550 nm、带宽为 10 nm、最大功率为 15 W 的红外激光器;成像使用中心波长为 850 nm、带宽为 3 nm、最大功率为 20 W 的红外激光器。由于激光器的功率和线宽会影响在处理图像的每个切片时可被体素吸收的功率量,为了降低温度对激光器功率和线宽的影响,使用商用的热电冷却器来稳定激光器的温度,以保证激光器的长时间稳定输出。两个激光器通过超小型版本 A 同轴连接器(SMA)分别耦合到两个纤芯直径为 400 μm 的光纤中,经过光路调制,用于体三维显示中的寻址和成像。

4 分析与讨论

4.1 纳米晶选择

TSTF UCL 纳米晶溶液的关键参数是上转换效率,它体现了纳米晶将输入的红外能量转换为可见光的有效性。随着上转换效率的提高,获得相同体素亮度所需的光功率越小。在提高图像尺寸和分辨率的背景下,减少对光功率的需求意味着需要更少的时间来提供所需的功率以获得所需的体素亮度,因此可以使用更快的刷新率。本文核壳结构纳米晶的制备选用了发光核/活性壳/发光壳的结构设计理念,核壳包覆结构的形成可有效降低纳米晶的表面缺陷浓度,提高发光效率^[41]。利用活性内壳将内外两侧的发光中心隔开,可减少因发光离子间的交叉弛豫产生的能量损失;同时,活性层的引入也促进了纳米晶对近红外激发光的吸收。此外,纳米晶的环己烷溶液无色透明,溶剂对激发光基本无吸收,这些性质也利于提高纳米晶的双频发光强度。

本文选用了 NYF@NGF@NYF 核壳结构纳米晶的环己烷溶液作为显示介质,其光学性能及结构表征之前已有详细报道^[41]。本文通过固定双频激发波长 λ_1 ,扫描激发波长 λ_2 ,设计实验,探索了最佳激发波长组合方案,探究方法见 4.2 节部分内容。

如图 3(a)所示,首先用固定激发功率的 1550 nm 红外激光($P_{1550\text{nm}}=2\text{ W/cm}^2$)和波长在 700~1300 nm

范围内连续可调的飞秒激光器同时激发纳米晶溶液(1 mmol/mL),对 TSTF UCL 纳米晶的激发波长进行了测量,确定寻址光源的最佳激发波长。考虑到各个波长光源对应的功率及成本情况,确定了最佳的组合波长为 1550 nm 和 850 nm 双波长激发的成像方案。结合图 1 所示的 UCL 过程原理,上转换纳米晶同时被 1550 nm 和 850 nm 双波长光源激发时,处于基态 $^4I_{15/2}$ 的电子会经历两次跃迁,到高能激发态 $^4S_{3/2}$ 。当激发态 $^4S_{3/2}$ 的电子跃迁回基态时,会以光子(532 nm,绿色)的形式释放能量。高能状态寿命小于 200 μs ,满足频繁刷新每个体素的要求。图 3(b)中显示了样品在单束光源及双光源模式激发下的发射光谱,从中可以看出,样品在 850 nm 光源激发下几乎无发射,在 1550 nm 和 850 nm 双波长光源激发下的强度与 1550 nm 光源激发下的强度相比增加了约 75 倍。这种明显的双频发光效应,是实现双光束空间寻址的前提,利用双光束寻址原理可构建出空间体素,进而实现 3D 显示效果。根据图 3(b)也可计算出双光源激发下的绿光和红光的发射强度比约为 20:1,这意味着用于 3D 显示的体素点具有较好的单色性。如图 3(c)所示,纳米晶溶液在双频激发模式下显示出绿色可见光,可作为一种基础颜色为彩色 3D 显示器的构建提供参考。图 3(d)展示了纳米晶的透射电镜(TEM)和高角度环形暗场像(HAADF)图像,从 TEM 图像中可以看出,单分散纳米晶尺寸均一约 25 nm \times 32 nm。HAADF 图像中较亮区域为 Gd 的分布区域,由此可以看出,材料确为包覆结构,这对减少表面缺陷、提高双频发光效率有很大的作用。

4.2 最佳激发波长

本文基于 UCL 原理,搭建了如图 2 所示的系统。为了评估系统的性能,对最佳激发波长进行了研究,探索除了 850 nm 和 1550 nm 组合外,其他的激发波长组合方案。所用连续波长光源为飞秒光参量放大器,此处主要介绍最佳波长测试方案,只采用部分数据进行说明。

首先,固定波长为 1550 nm,在 700~1300 nm 范围内进行波长扫描,测试出两个激发峰分别为 800 nm 和 850 nm。通过分析测试数据,判断出 800 nm 的激发效率至少比 850 nm 的激发效率大约高 1~2 倍。归一化后的激发效率如图 3(a)所示。然后,固定 850 nm,另一束激光波长从 800 nm 到 1970 nm 扫描,有且只有两个激发峰 1000 nm 和 1550 nm,1550 nm 激发效率更高。最后固定 808 nm,从 800 nm 到 1970 nm 进行扫描,只有 1550 nm 一个激发峰。

通过单波长扫描,可以判断出激发效率比较强的组合依次是:(808&1550)>(850&1550)>(850&1000)或(808&1550)。但是 800 nm 单波长高功率激光器市场较少,因此目前实验中最优的双波长组合是 850 nm 和 1550 nm。

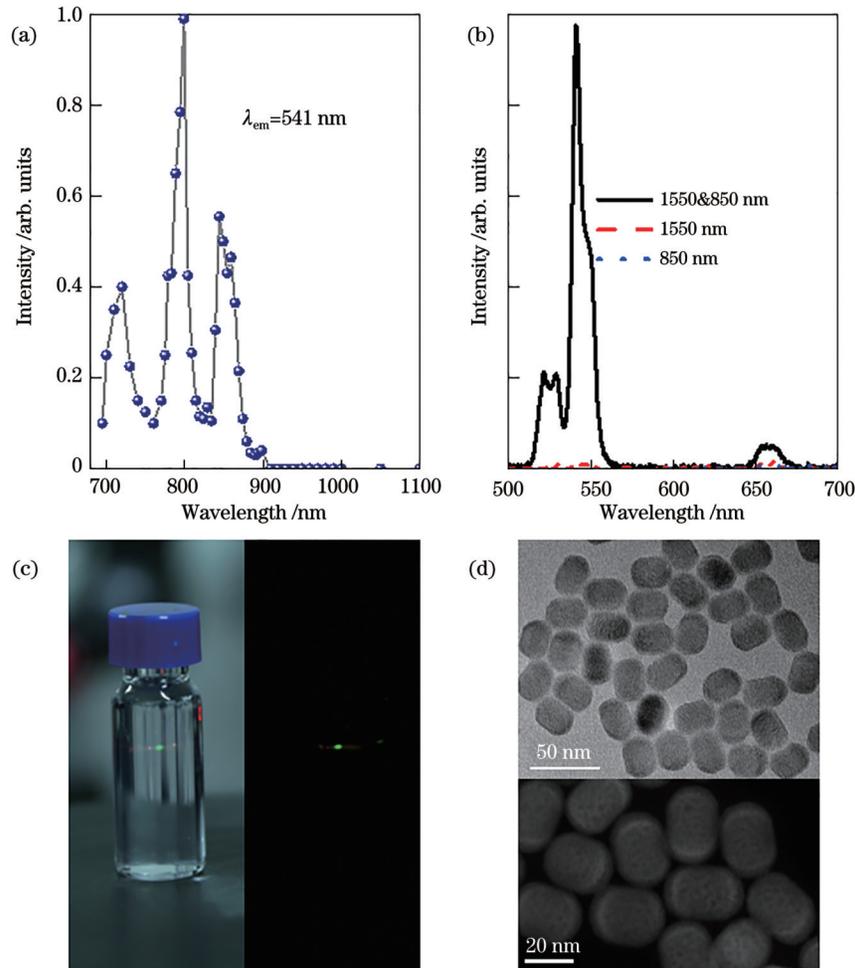


图3 上转换纳米晶的表征。(a) NYF@NGF@NYF 材料的上转换激发谱,监测波长为 541 nm,固定激光光源波长为 1550 nm,连续激发源为飞秒激光;(b) NYF@NGF@NYF 材料的上转换发射谱,激发源为波长在 1550 nm 和 850 nm 的红外激光;(c) NYF@NGF@NYF 的环己烷溶液中的寻址效果;(d) NYF@NGF@NYF 的 TEM 及 HAADF 图像

Fig. 3 Characterization of upconversion nanocrystals. (a) Upconversion excitation spectrum of NYF@NGF@NYF material. Monitoring wavelength is 541 nm, fixed laser source wavelength is 1550 nm, and continuous excitation source is a femtosecond laser; (b) upconversion emission spectrum of NYF@NGF@NYF material. Excitation source is infrared laser with wavelengths at 1550 nm and 850 nm; (c) addressing result in cyclohexane solutions of NYF@NGF@NYF; (d) TEM and HAADF images of NYF@NGF@NYF

4.3 控制系统

体 3D 显示通常有静态和动态显示两种方法,3D 物体的每一层剖切面在空间中按照顺序做周期性运动还原显示 3D 物体,这种方法为动态体 3D 扫描。两束特定功率不同波长的激光在双频上转换材料交汇激发由于能级变化使交汇点发出可见光,此为双频上转换。将上述两方法结合可在双频上转换材料里实现动态体 3D 显示(或可成为 3D 动画)。如图 4 所示,首先将待显示的 3D 物体的模型在软件里面进行 2D 切片,然后将线激光周期移动在发光材料设定层面位置,同时将与之对应的 2D 切片图像投射在发光材料中。2D 切片图像随着发光材料里层面的移动高速切换,从而形成完整的 3D 立体图像。具体方法如下:

控制两束特定波长的激光在 TFTS UCL 材料内部精准交汇,在交汇面激发材料发光,形成一个发光

面。同时控制交汇面在发光材料里周期扫描可形成 3D 发光体,控制成像面的形状就能控制显示 3D 物体的形状。两束激光位置方向固定,其中一束线激光在双频上转换材料一端入射并沿线激光入射方向穿透发光材料在另一端出射,本方案称线激光在发光材料的路径形成的面为剖切寻址面。另一束激光垂直于线激光入射方向并穿过整个发光材料,与线激光的交汇面称为成像面。如图 4 所示,线激光经过振镜的周期偏摆能实现不同 3D 物体不同剖切面层的切换,DLP 将不同剖切面投射在特定层上。振镜和 DMD 之间通过 Trigger 信号进行帧率和位置同步。Trigger 信号由振镜输出,切片二十层时,每层间隔 1.6 ms 左右,一帧在 28 ms 左右。

图 4 中两束激光分为线激光和圆斑激光,寻址面线激光由振镜精确控制其在材料里面层位置,成像面

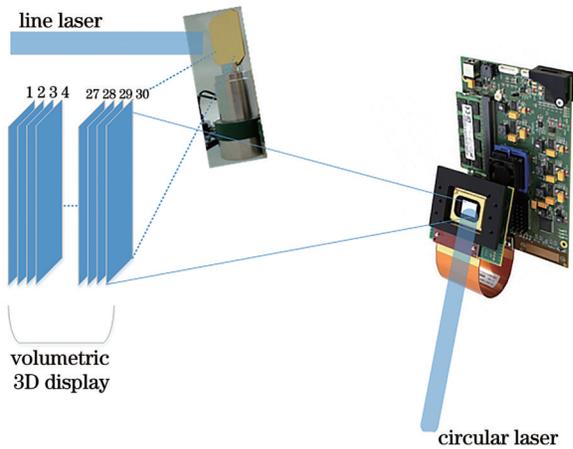


图 4 显示介质中图像生成的基本方案

Fig. 4 Basic scheme for image generation in display media

圆斑激光由 DLP 控制卡根据切片图片控制。首先将待显示的 3D 物体的模型进行 2D 切片,然后寻址线激光周期移动在发光材料设定层面位置,同时将与之对应的 2D 切片图像由 DMD 投射在发光材料上,2D 图像随着发光材料里的层面的移动高速切换,从而形成完整的 3D 立体图案。

上位机软件的控制逻辑如图 5 所示,首先初始化 DLP 控制卡和 LMC FIBER 控制卡,然后在计算机上位机软件里将 3D 模型进行切片或者事先已经切片过的图片整理成图片序列,通过上位机软件将图片序列加载到 DLP 控制卡的存储模块中,同时配置图片序列在 DMD 中的成像时间和成像间隔,并配置播放模式为被动模式,等待同步信号切换播放。在 DLP 控制卡配置完成后,设置 LMC FIBER 控制卡的跳转参数,将偏摆位置对象和同步脉冲对象加载到 LMC FIBER 控制卡中,然后开始标刻,成像面组件和寻址面组件开始工作,切片图片序列随着发光材料里的寻址面的移动高速切换,从而形成完整的 3D 立体图案。最后如果要

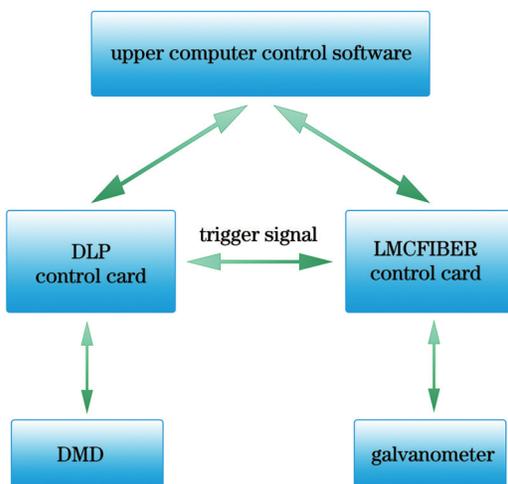


图 5 上位机软件的控制逻辑

Fig. 5 Control logic of upper computer software

结束 3D 成像,上位机软件里退出 LMC FIBER 控制卡标刻,同时 DLP 控制卡释放内存并退出即可。

本文方法所成 3D 像由于人眼视觉暂留的特性,要求一个图片序列最慢要在 33 ms(扫描频率 30 Hz)内顺序播放完成,才不至于让 3D 成像看起来闪烁。控制系统硬件部分包含计算机主机和控制软件、LMC 控制卡和振镜、DLP 控制卡和 DLP。核心部件 DLP650 LNIR(超高速 DMD 数字微镜阵列空间光调制器)性能参数如下:

- 1) 分辨率为 1280×800;
- 2) 1 bit 图片切换速度为 10752 Hz;
- 3) DMD 尺寸为 13.8 mm×8.6 mm;
- 4) 图片存储容量为 8 GB。

4.4 3D 显示扫描

3D 图像的扫描是在激光光路和控制系统的辅助下实现的:

首先,通过设计的光路系统对光源进行调整。本文的寻址激光由平凸柱透镜进行调制。如图 2 所示,由纤芯直径为 400 μm 的光纤输出的 1550 nm 红外激光,经过单透镜整形成直径约 25~30 mm 的准直激光,再经红外高反镜反射和单柱面透镜整形聚焦,由扫描振镜反射到显示介质中。本系统中使用的单柱面透镜可将入射的光斑直径约 25~30 mm 的准直光束整形成长度约 25 mm、宽度约 0.8~1 mm 的一字线光束,光束的焦平面在显示介质内,焦深≥30 mm,覆盖整个显示介质宽度。由单柱面透镜整形的一字线光束经一维扫描振镜反射后,通过控制振镜偏转,可快速扫描整个显示介质,保证系统在整个显示介质的宽度方向上有足够的体素体积。

然后,利用控制系统控制寻址光源和成像光源在显示介质内的交汇点变化,实现 3D 图像的扫描。图 4 所示为本文中使用的静态体 3D 显示原理图,中心波长为 1550 nm、带宽为 10 nm 的寻址激光经单透镜和单柱面透镜整形成一字线光束,再经扫描振镜反射,进入纳米晶溶液,在介质内形成一个切片平面,该平面即为成像“幕布”;中心波长为 850 nm、带宽为 3 nm 的成像激光经单透镜整形和 DMD 反射后,由投影镜头沿着与寻址激光垂直的方向投射到纳米晶溶液中,成像激光的前进方向与寻址激光在溶液内切片平面的法线方向一致。

根据 TSTF 上转换原理,寻址激光和成像激光在溶液中的交汇处会形成一个人类视觉系统可以观测到的可见光亮面,面的形状即为由 DMD 调控的成像激光的光斑形状。平面上的所有像素都是同时寻址,大大减少了寻址时间,提高了显示的扫描速度。图像的每个平面仅需来自寻址激光的一个脉冲和来自成像激光的一个脉冲。当保持寻址激光不变时,使用 DMD 调控成像激光的光斑形状,在溶液中将显示不同的 2D 图案;当保持成像激光不变时,使用扫描振镜进行寻址

激光快速扫描,在溶液中将显示一个 3D 的柱状图案。

4.5 图像生成

当显示一个 3D 物体时,首先对 3D 物体在一个方向上的连续多个切面的图案进行解析,DMD 调控成像激光的光斑依次呈现这些图案,同时扫描振镜控制寻址激光在溶液内快速扫描,两者在溶液内的交汇点即产生可见的 3D 物体的 2D 切片图案,控制成像激光和寻址激光的扫描速度,让两者在溶液内同步快速重复扫描,即可在溶液内形成完整的 3D 物体图案。为了在观察时产生无缝图像的效果,溶液的整体扫描时间必须少于视网膜处理时间。根据人眼视觉暂留特性,当时间小于 41 ms(刷新速率大于 24 Hz)时,人眼感觉不到闪烁。因此整个溶液的扫描必须在 41 ms 内完成。

3D 动态图形的建模和切片移动过程如图 6 所示。以动态 3D 字母“E”的模型为例介绍 3D 图像的生成过程:

1) 首先用建模软件建立有一定厚度外壳的空心模型,建模的结果如图 6 中上图所示;

2) 根据模型大小按照设定切片厚度将模型作切片处理。先将 3D 字母“E”分割成 30 层 2D 图形的切片,30 层切片沿着一定的轨迹运动可实现 3D 图像的整体移动。图 6 中下图显示了 3D 字母“E”的 30 层切片左右往复旋转时的移动轨迹。由于 30 层切片的叠加和运动轨迹的重叠,导致图片看起来不清晰;

3) 将切片的运动轨迹导入控制软件,通过控制扫描振镜和 DMD 实现成像光源和寻址光源交汇位置的变化,实现 3D 动态图像的生成。

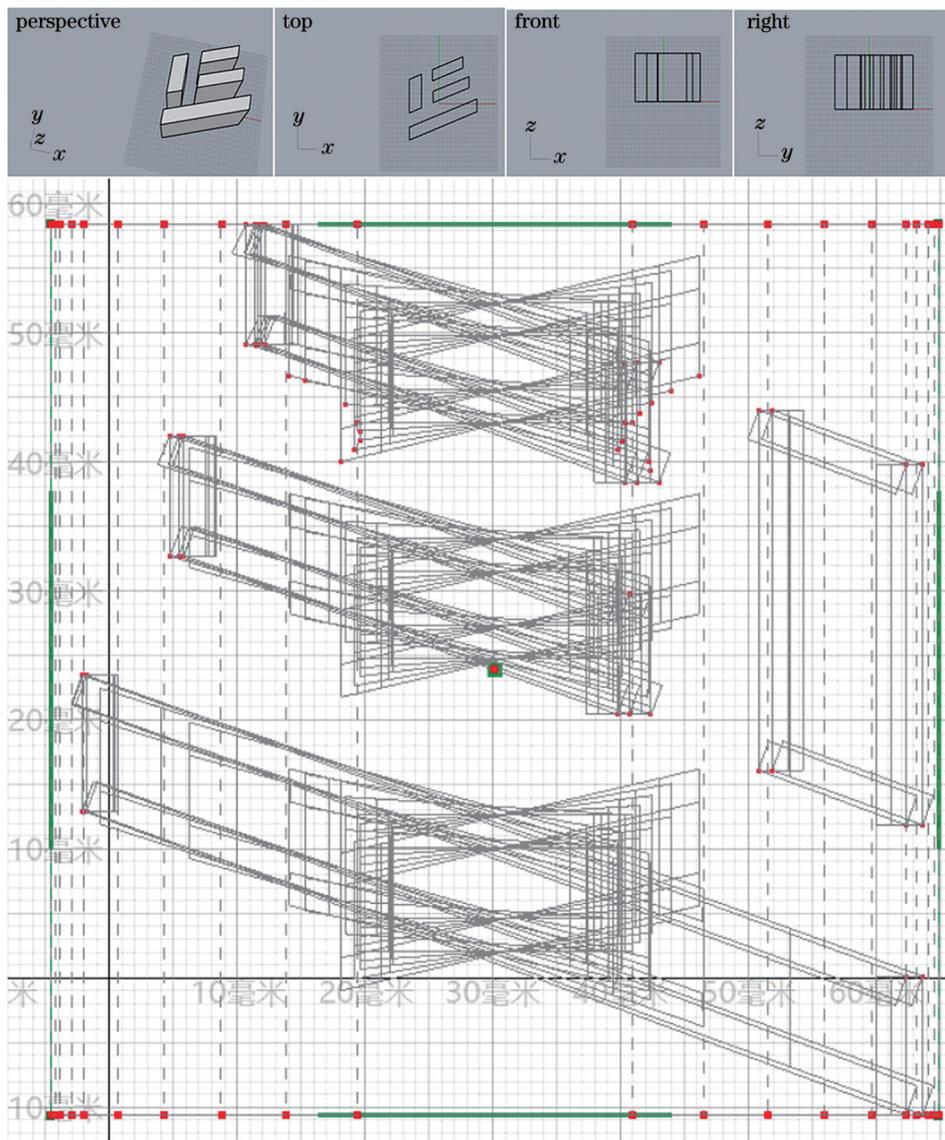


图 6 字母“E”的 3D 建模和切片移动轨迹

Fig. 6 3D modeling and movement trajectory of slices of letter “E”

4.6 3D 显示效果评估参数

基于 TSTF UCL 原理实现体 3D 显示图像的评估

参数包括:双频增强对比度、亮度、体 3D 显示帧频、分辨率。

双频增强对比度指的是双频激发与单光源激发下材料的发光强度之比。该值是对 3D 图像与空间环境对比度的直观表述,对比度越高,图像的空间感和清晰度越高。测试流程如下:

1) 分别用 850 nm 激光(功率 $P_{850} \approx 20$ W)、1550 nm (功率密度 $P_{1550} \approx 10$ W) 激光单独激发样品测得单频上转换发射光谱;

2) 不改变激光功率,用 850 nm 和 1550 nm 激光共同激发样品,测得双频上转换发射光谱,光谱测试结果如图 3(b) 所示;

3) 根据上转换发射光谱,对光谱中可见发射光进行积分(500~700 nm)得到三种激发情况下的上转换发光强度 I 分别为 $I_{1550+850} = 55547$ 、 $I_{850} = 0$ 和 $I_{1550} = 1936$ 。对比度为 $I_{1550+850} / (I_{850} + I_{1550}) = 28.69$ 。

发光亮度由样品的发射功率代为描述,单一发光点的辐射功率由功率计(探测面为直径为 1 cm 的圆形)测得。测试过程如下:

1) 将 850 nm 点激光(功率密度 $P_{850} \approx 20$ W) 和 1550 nm (功率密度 $P_{1550} \approx 10$ W) 点激光直接交汇于上转换纳米晶溶液内部,用功率计测试交点处的发光功率 P_n ;

2) 假设总发射功率为 P ,近似计算探测器接收面与所在的立体角平面面积相同,功率计距离发光点位置为 1.5 cm,已知圆的面积为 $s_1 = \pi r^2$,球的表面

积 $s_2 = 4\pi r^2$, r 为半径。以发光点为圆心,功率计探测面到发光点的距离为半径组成的圆球总表面积 S_1 和探测器面积 S_2 的比值与发射功率 P 和 P_n 的比值相同,经计算, $P = 36P_n$, 测出 P_n 即可估算出发射功率。

实际测试中,功率计探头搜集的发射光 541 nm 功率 $P_n = 14 \mu\text{W}$, 发射光总功率 $P \approx 36 \times 14 \mu\text{W} = 504 \mu\text{W}$ 。

综上,在激发光功率 $P_{1550 \text{ nm}} = 10$ W、 $P_{850 \text{ nm}} = 20$ W 的条件下,在 NYF@NGF@NYF 纳米晶溶液中生成的体素的对比度可达 28.69,单一发光点的辐射功率最高达 0.5 mW。满足人眼可见的 3D 显示要求。

在实验过程中,上转换纳米晶溶液中的 3D 图像是由 30 片 2D 图像叠加组成的,显示效果如图 7 所示。图 7 中的 3D 图像以约 40 Hz 的速度刷新,这比最低要求的 24 Hz 要大,因此产生的空间图像非常稳定,没有闪烁。从图 7(a)~(d) 中可以看到,分别在纳米晶溶液中生成了清晰稳定的圆柱体、球体、立方体及正四面体图像,图像明亮,除了那些被投影系统遮挡的视点外,从所有视点都很容易看到。需要注意的是,在该系统中,选用分辨率为 1024×768 的 DMD 投射 2D 图像,以 30 层 2D 图像切片叠加构建成的 3D 图像,其分辨率的理论最大值可达 $1024 \times 768 \times 30$,近 2300 万个体素。图 7 为了演示 3D 效果,构建的 3D 图像均为空心图像,图像的体素分辨率小于理论值。

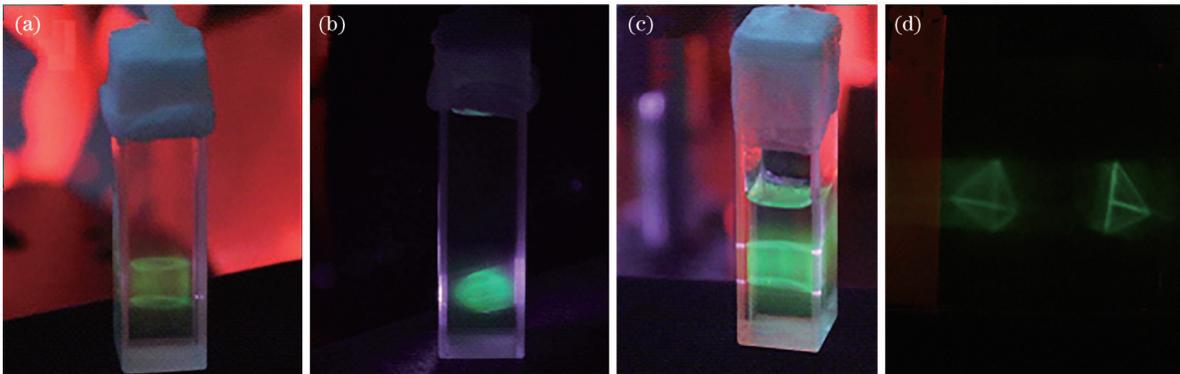


图 7 TSTF UCL 纳米晶溶液中的立体图像显示。(a) 纳米晶溶液中显示的圆柱体模型;(b) 纳米晶溶液中显示的球体模型;(c) 纳米晶溶液中显示的立方体模型;(d) 纳米晶溶液中显示的正四面体模型。所有照片均在黑暗环境下拍摄

Fig. 7 Stereoscopic image display in TSTF UCL nanocrystalline solution. (a) Cylinder model displayed in nanocrystalline solution; (b) spherical model displayed in nanocrystalline solution; (c) cube model displayed in nanocrystalline solutions; (d) regular tetrahedron model displayed in nanocrystalline solutions. All photos are taken in dark

5 结 论

本文报道了一套基于稀土离子 TSTF UCL 机制的双光束扫描 3D 成像系统。系统通过计算机控制光路中的 DLP 和扫描振镜,在液体介质中构建 3D 动态模型。图像稳定分辨率高、观察角度无限制、扫描速度快,最高可产生近 2300 万个体素。提高光功率和 DLP 的速度,该系统有潜力以高扫描频率将图像分辨率提高到近 8000 万个体素,并可扩展到三色图像。系统的各个

部分如光源、光路、显示介质独立性强,可快速更换、灵活调整,以适应不同材料的激发性质。显示用的材料为核壳结构 NYF@NGF@NYF 纳米晶的环己烷溶液,在实现大尺寸成像上极具潜力。该系统对于体 3D 显示器的发展具有一定的参考意义,为双步双频上转换材料等显示介质的 3D 显示能力的初步研究提供支持。

参 考 文 献

- [1] Downing E, Hesselink L, Ralston J, et al. A three-color, solid-

- state, three-dimensional display[J]. *Science*, 1996, 273(5279): 1185-1189.
- [2] Dodgson N A. Autostereoscopic 3D displays[J]. *Computer*, 2005, 38(8): 31-36.
- [3] Favalora G E. Volumetric 3D displays and application infrastructure[J]. *Computer*, 2005, 38(8): 37-44.
- [4] Berg L P, Vance J M. Industry use of virtual reality in product design and manufacturing: a survey[J]. *Virtual Reality*, 2017, 21(1): 1-17.
- [5] Geng J. Three-dimensional display technologies[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2013, 5(4): 456-535.
- [6] Yang L, Dong H W, Alelaiwi A, et al. See in 3D: state of the art of 3D display technologies[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2016, 75(24): 17121-17155.
- [7] Masuda N, Ito T, Tanaka T, et al. Computer generated holography using a graphics processing unit[J]. *Optics Express*, 2006, 14(2): 603-608.
- [8] 刘吉成, 吴汉, 高洪跃, 等. 基于多空间光调制器拼接的空间悬浮全息真三维显示[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(8): 0811021.
- Liu J C, Wu H, Gao H Y, et al. Multi-spatial light modulator splicing-based real 3D display of spatially suspended holography[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(8): 0811021.
- [9] Benton S A, Bove V M, Jr. *Holographic imaging*[M]. Hoboken: Wiley, 2007.
- [10] 刘娟, 皮大普, 王涌天. 实时全息三维显示技术研究进展[J]. *光学学报*, 2023, 43(15): 1509001.
- Liu J, Pi D P, Wang Y T. Research progress of real-time holographic 3D display technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(15): 1509001.
- [11] Mun K R, Kyhm J, Lee J Y, et al. Elemental-migration-assisted full-color-tunable upconversion nanoparticles for video-rate three-dimensional volumetric displays[J]. *Nano Letters*, 2023, 23(7): 3014-3022.
- [12] Han D C, Yang S Z, Zhao Q, et al. Improving the two-step two-frequency upconversion luminescence of Er^{3+} in 70TeO_2 - 20ZnO - 10GeO_2 glass ceramic by doping CaF_2 [J]. *Journal of Luminescence*, 2023, 264: 120142.
- [13] Refai H H. Improving resolution and image space in a static volumetric 3-D display[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2010, 18(12): 1065-1070.
- [14] Gong D W, Wang C Z, Wang X P, et al. Static volumetric three-dimensional display based on an electric-field-controlled two-dimensional optical beam scanner[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(26): 7067-7072.
- [15] Refai H H. Static volumetric three-dimensional display[J]. *Journal of Display Technology*, 2009, 5(10): 391-397.
- [16] Tamura S, Ikeda K, Okamura K, et al. Two-step frequency conversion for connecting distant quantum memories by transmission through an optical fiber[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2018, 57(6): 062801.
- [17] Wang X F, Wang Y, Lu Y Q, et al. Dual-mode infrared photon-excited synergistic effect in Er^{3+} -doped NaYF_4 glass ceramics[J]. *Applied Physics A*, 2018, 124(8): 521.
- [18] Chen Z, Dong G P, Gao H W, et al. Two-/ multi-wavelength light excitation effects in optical materials: from fundamentals to applications[J]. *Progress in Materials Science*, 2019, 105: 100568.
- [19] Lewis J D, Verber C M, McGhee R B. A true three-dimensional display[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1971, 18(9): 724-732.
- [20] Kim I I, Korevaar E J, Hakakha H. Three-dimensional volumetric display in rubidium vapor[J]. *Proceedings of SPIE*, 1996, 2650: 274-284.
- [21] Pan Q W, Yang D D, Dong G P, et al. Nanocrystal-in-glass composite (NGC): a powerful pathway from nanocrystals to advanced optical materials[J]. *Progress in Materials Science*, 2022, 130: 100998.
- [22] Wang F, Han Y, Lim C S, et al. Simultaneous phase and size control of upconversion nanocrystals through lanthanide doping[J]. *Nature*, 2010, 463(7284): 1061-1065.
- [23] Zhang P P, Chen H, Yang Y, et al. 3D up-conversion display of NaYF_4 -PMMA covalent-linking nanocomposites[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 753: 725-730.
- [24] 郑大怀, 王烁琳, 陈俊钊, 等. 铈酸锂晶体: 从全息存储到三维显示[J]. *中国激光*, 2023, 50(18): 1813001.
- Zheng D H, Wang S L, Chen J K, et al. Lithium niobate crystals: from holographic storage to 3D display[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(18): 1813001.
- [25] Hirayama R, Martinez Plasencia D, Masuda N, et al. A volumetric display for visual, tactile and audio presentation using acoustic trapping[J]. *Nature*, 2019, 575(7782): 320-323.
- [26] Tong G D, Xia J. Realizing 3D display through the multidirectional motion of microparticles in air[C]//*Digital Holography and 3-D Imaging 2022*, Cambridge. Washington, DC: Optica Publishing Group, 2022: Tu4A.9.
- [27] Hirayama R, Shiraki A, Naruse M, et al. Optical addressing of multi-colour photochromic material mixture for volumetric display[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 31543.
- [28] Smalley D E, Nygaard E, Squire K, et al. A photophoretic-trap volumetric display[J]. *Nature*, 2018, 553(7689): 486-490.
- [29] Blundell B. *Enhanced visualization: making space for 3-D images*[M]. Hoboken: Wiley-Interscience, 2007.
- [30] 曾伟, 周时风, 徐时清, 等. 基于上转换荧光的三维立体显示[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, 44(3): 69-73.
- Zeng W, Zhou S F, Xu S Q, et al. Three-dimensional display based on upconversion luminescence[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, 44(3): 69-73.
- [31] 李赛辉, 康世亮, 陈智, 等. 双波长泵浦含有 Er^{3+} : NaYF_4 纳米晶氟氧化物微晶玻璃的上转换发光性能[J]. *发光学报*, 2023, 44(8): 1390-1397.
- Li S H, Kang S L, Chen Z, et al. Up-conversion luminescence performance of oxyfluoride glass-ceramic containing Er^{3+} : NaYF_4 nanocrystals under two-wavelength excitation[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2023, 44(8): 1390-1397.
- [32] Cho J H, Bass M, Jenssen H P. Volumetric three-dimensional up-conversion display medium[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2007, 15(12): 1029-1036.
- [33] Zhong H Z, Wang Z W, Lu W G, et al. Luminescent materials for 3D display technology[M]//Liu R S. *Phosphors, up conversion nano particles, quantum dots and their applications*. Singapore: Springer, 2016: 503-523.
- [34] 刘名扬, 张瑞萍. 氟化物玻璃在两束激光作用下的上转换三维立体显示[J]. *中国激光*, 2011, 38(10): 1006003.
- Liu M Y, Zhang R P. Up-conversion three-dimensional volumetric display of fluoride glass under two beams of lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(10): 1006003.
- [35] 陈晓波, 李美仙, 闻鸥, 等. Er :ZBLAN玻璃的一光束上转换立体显示的初步研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2003, 23(3): 431-434.
- Chen X B, Li M X, Wen O, et al. Initial research of one-beam pumping up-conversion 3D volumetric display based on Er :ZBLAN glass[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2003, 23(3): 431-434.
- [36] Wan S G, Zhou H Q, Lin J X, et al. A prototype of a volumetric three-dimensional display based on programmable photo-activated phosphorescence[J]. *Angewandte Chemie (International Ed. in English)*, 2020, 59(22): 8416-8420.
- [37] Tian H, Feng Y L. Next step of photochromic switches?[J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2008, 18(14): 1617-1622.
- [38] Patel S K, Cao J, Lippert A R. A volumetric three-dimensional digital light photoactivatable dye display[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 15239.

- [39] Tamai N, Miyasaka H. Ultrafast dynamics of photochromic systems[J]. *Chemical Reviews*, 2000, 100(5): 1875-1890.
- [40] Knights M G, Wing W F, Baer J W, et al. High-efficiency deep-red laser pumped by doubled Nd:YAG[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1982, 18(2): 163-166.
- [41] Han D C, Yang S Z, Zhao Q, et al. Enhanced two-step two-frequency upconversion luminescence in a core/shell/shell nanostructure[J]. *Materials Advances*, 2023, 4(4): 1188-1195.

Static Volumetric 3D Display System Based on Scanning Galvanometer and Digital Micromirror Display Control

Han Dongcheng^{1,2,3}, Yang Shizhi^{1,3*}, Zhao Qiang^{4**}, Zhang Liangliang⁵, Deng Yan⁴

¹Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China;

²Science Island Branch, Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China;

³Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Hefei 230037, Anhui, China;

⁴School of Environment and Energy Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, Anhui, China;

⁵Anhui Easpeed Technology Co., Ltd., Hefei 230088, Anhui, China

Abstract

Objective The static volumetric 3D display technology displays 3D objects by volume pixels in 3D space, presenting real stereoscopic images. It can provide physiological and psychological depth clues for human visual systems to perceive 3D objects and can meet all-around observation needs. Additionally, it is the most likely 3D display technology to achieve high spatial resolution, multi-angle, and simultaneous observation of multiple people, real-time interaction, and large size. Among them, the static volume 3D display technology based on dual beam addressing has attracted much attention due to its unique advantages such as fine voxel, high spatial resolution, easy realization of full-color display, and meanwhile the image is no shaking and does not require auxiliary equipment (such as glasses) to view. By employing the energy of two infrared photons to pump a material into an excited energy level, the electrons in the excited energy level will transition to a lower energy level and produce visible light, which is an effective way to achieve dual-beam addressing. The material that can implement this luminescence process is also known as the two-step two-frequency (TSTF) up-conversion luminescence (UCL) material, and it can have great potential applications in static volumetric 3D display technology due to its rapid response, high contrast, and high color purity. Despite this, the material has received few reports in volumetric 3D display applications because of its low UCL efficiency and small display volume. Additionally, some literature focuses on the properties of materials, with less introduction of 3D display systems. The above two points greatly limit the application and research interest of the 3D volume display of TSTF UCL materials. Thus, we develop a 3D imaging system based on the TSTF UCL mechanism of rare earth ions, and meanwhile build a projection imaging optical path based on digital optical processing (DLP) and a line laser shaping optical path based on scanning galvanometer and cylindrical mirror. The display system is based on the TSTF UCL technology, which employs a dual infrared laser excitation, and adopts the digital micromirror display (DMD) and scanning galvanometer to achieve rapid scanning of image volume at high resolution. It has lower material performance requirements and cost, and more simple method than dual DLP imaging mode. This system is very suitable for the preliminary study of the stereoscopic display effect of TSTF UCL materials and also provides an effective idea for the imaging schemes of other addressing media materials. Additionally, the TSTF UCL material utilized for the display is a cyclohexane solution of core-shell NaYF₄:0.5%Er@NaGdF₄:2%Yb@NaYF₄:1%Er (NYF@NGF@NYF) nanocrystals, which has great potential for large-scale imaging.

Methods We present a static volumetric 3D display system with wide wavelength and fast response, which includes three parts of display medium, control system, and laser system. In the experiment, nanocrystals NaYF₄:Er@NaGdF₄:Yb@NaYF₄:Er with dual-step dual-frequency up-conversion ability are selected as imaging medium. The control system employs 1024×768 DMD and scanning galvanometer to project the infrared laser. By the appropriate design of imaging optical software, the two-dimensional slice of the stereoscopic image is converted into the control signal of the DMD/scanning galvanometer. The laser system adopts 1550 nm and 850 nm infrared lasers as the addressing and imaging light source and adjusts the beam and optical path with appropriate parameters.

Results and Discussions The upconversion emission spectra of NYF@NGF@NYF are measured [Fig. 3(b)]. After integrating the emission spectrum in the visible range (500–700 nm), it can be concluded that contrast is $I_{1550+850}/(I_{1550}+I_{850})=28.69$, where $I_{1550+850}$, I_{1550} , and I_{850} are the emission intensity under co-excitation of 1550 nm and 850 nm lasers, under excitation of 1550 nm laser, and under excitation of 850 nm laser respectively. With self-made display materials and the self-built static volumetric display system, a variety of 3D images can be demonstrated at a refresh rate of 40 Hz, and the images are clear and bright (Fig. 7). The maximum luminous power of a single point measured by the power meter can reach 0.5 mW, the theoretical maximum resolution can be $30 \times 1024 \times 768$, and the number of voxels is close to 23 million.

Conclusions We report a two-beam scanning 3D imaging system based on the dual-frequency upconversion luminescence mechanism of rare earth ions. The DLP and scanning galvanometer in the optical path are controlled by the computer to build a 3D dynamic model in the liquid medium. The images presented by the system feature stability, high resolution, fast scanning speed, and maximum voxels of 23 million, without observation angle limitations. The various parts of the system such as the light source, the light path, and the display medium are independent and can be quickly replaced and flexibly adjusted to adapt to the excitation properties of different materials. The material adopted for the display is a cyclohexane solution of the core-shell structure NYF@NGF@NYF nanocrystals, which has great potential for large-scale imaging. The system has certain reference significance for the development of volumetric 3D display and provides support for the preliminary research on 3D display capability of display media such as TSTF materials. Meanwhile, this display system is characterized by convenient building and obvious display effect, without the requirement for high material properties. It assists with the preliminary research on up-conversion materials in 3D display and serves as references for exploring large-size 3D volume display technology.

Key words volumetric 3D display; two-step two-frequency upconversion; NaYF₄ nanocrystals; digital micromirror display