

面向激光显示应用的红绿蓝掺镨氟化物光纤 激光器研究进展

石君^{1,2} 唐明^{1,2} 付松年^{1,2} 沈平^{1,2} 刘德明^{1,2}

(¹华中科技大学光学与电子信息学院下一代互联网接入系统国家工程实验室, 湖北 武汉 430074)
²华中科技大学武汉光电国家实验室(筹), 湖北 武汉 430074)

摘要 在分析激光投影、激光线扫描和激光点扫描三类显示技术的原理、特点及光源需求的基础上,对几种常见的激光显示用光源进行了性能比较,讨论了其关键技术及存在的问题。重点探讨了掺镨(Pr^{3+})氟化物可见光光纤激光器的研究现状和发展趋势以及其作为激光显示引擎的可行性。由于掺镨氟化物光纤激光器具有宽带可调谐特性,可以通过选择红绿蓝(RGB)三基色的波长使激光显示色域最大化,从而提高激光显示系统的色彩表现力。

关键词 激光器;红绿蓝激光器;掺镨氟化物光纤;激光显示

中图分类号 TN248 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP49.110003

Recent Progress in RGB Laser Oscillation Based on Pr^{3+} -Doped Fluoride Glass Fiber for Laser Display Application

Shi Jun^{1,2} Tang Ming^{1,2} Fu Songnian^{1,2} Shen Ping^{1,2} Liu Deming^{1,2}

(¹National Engineering Laboratory for Next Generation Internet Access System, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China
²Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract The operation principle, characteristics and requirements of laser sources for laser display applications are reviewed, including 2D flat panel spatial light modulator type, scanned linear architecture type and scanned beam type laser projection display. Then, a comprehensive comparison of current light sources for laser display is presented and their key technologies and existing problems is pointed out. Finally, the state of art and future development of Pr^{3+} -doped fluoride glass fiber laser are reviewed, and the potential capability of Pr^{3+} -doped fluoride glass fiber laser as a light source for laser display is discussed. Wideband tunability of Pr^{3+} -doped fluoride glass fiber laser enables optimize the color gamut through careful selection of the RGB wavelenth, hence improves the color reproducibility of the display system.

Key words lasers; RGB laser; Pr^{3+} -doped fluoride glass fiber; laser display

OCIS codes 140.3480; 140.3510; 140.7300; 120.2040

1 引言

自从1960年梅曼发明红宝石激光器之后,人们便意识到可以将这种方向性好、窄线宽和高亮度的光源应用到显示领域,并于1966年首次提出将激光作为显示光源的设想^[1]。该设想利用声光调制器调制光强,并使用逐点扫描技术将图像的像素依次扫描到屏幕上。经过50多年的发展,激光器和激光显示技术进展巨

收稿日期: 2012-07-22; 收到修改稿日期: 2012-08-30; 网络出版日期: 2012-10-24

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(2011TS061)资助课题。

作者简介: 石君(1989—),女,博士研究生,主要从事特种光纤及其光纤激光器等方面的研究。

E-mail: shijun93@163.com

导师简介: 唐明(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤光学、非线性光学、光纤激光和放大器以及太赫兹波科学与技术等方面的研究。E-mail: tangming@mail.hust.edu.cn

大,激光显示不但由设想变成现实,而且突破了普通电视机的限制,使之还可以应用在嵌入式和便携式投影仪、数字影院、头盔显示器等显示领域。激光显示是以红、绿、蓝(RGB)三基色激光为光源的显示技术,可以真实地再现客观世界丰富艳丽的色彩。目前的 CRT 电视、液晶电视和等离子体电视等所反应的色彩仅仅是人类能看到的颜色 30% 左右,远远不能达到人们对亮丽、绚丽世界的追求。目前正在开发中的激光显示方式可覆盖 90% 的颜色,因此激光显示被称为“人类视觉史上的革命”。此外激光显示技术由于其本身的技术特点可以将屏幕和激光引擎分开,满足人们随时随地使用便携式设备获得大尺寸图像的需求。由于激光显示技术的多样性,需要根据具体的应用场合选择合适的技术以及合适的系统光源。本文在分析各种激光显示技术的原理、特点和光源需求基础上,对几种常见的激光显示用光源进行了性能比较,指出了各种光源的关键技术及存在的问题,并探讨了掺镨(Pr^{3+})氟化物可见光光纤激光器作为激光显示引擎的可行性。

2 激光显示技术的分类

激光显示技术可分为激光投影、激光点扫描和激光线扫描三类。

2.1 激光投影显示技术

激光投影显示技术的工作原理如图 1 所示。RGB 三色激光分别经过扩束、匀场、消相干后入射到相应的可寻址的面阵空间光调制器(SLM)上,空间光调制器上加有图像调制信号,经调制后的三色激光由混色合束系统(如 X 棱镜)合色后入射到投影物镜,最后经投影物镜投射到屏幕,得到激光显示的图像。常用的面阵空间光调制器包括数字微反射镜器件(DMD)、液晶(LCD)和硅基液晶(LCoS)等。由于这种投影类型对激光的光束质量要求不高,而且其人眼安全的最大允许光通量远大于点扫描调制类型,所以这种显示技术在大屏幕显示系统比点扫描系统要有明显的优势。但是由于每个像素都对应着一个小的调制器单元,限制了产品的最小尺寸以及分辨率的提高,使用这种技术的投影系统很难集成在移动手持电子产品中。

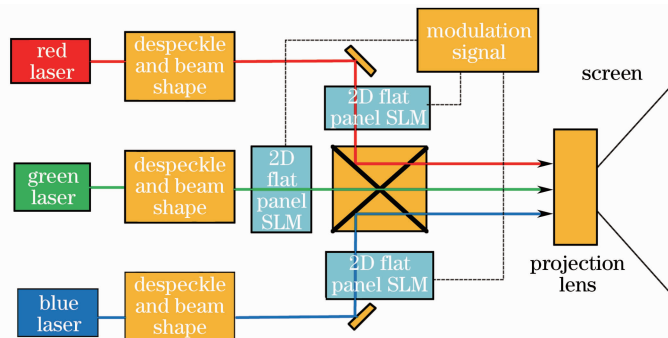


图 1 激光投影显示技术原理图

Fig. 1 Operation principles of laser projection display

2.2 激光点扫描显示技术

激光点扫描显示技术的工作原理如图 2 所示。经调制后(声光、电光或内调制)的 RGB 激光,合束后被扫描镜[转镜、振镜的组合或二维(2D)微机电系统(MEMS)扫描镜]高速扫描到屏幕特定的点上,利用人眼视觉暂留效应形成完整的画面。

世界上第一台激光电视的设想方案所采用的就是激光点扫描显示技术,由于当时存在着一系列技术问题,包括调制和扫描器件体积太大、调制速率难以进一步提高、扫描器件存在噪声和安全性问题以及扫描和调制之间的同步问题等,激光点扫描技术的发展一度非常缓慢。近年来,随着二维 MEMS 扫描镜技术和紧凑型激光光源的发展,激光点扫描显示系统效率高、体积小、无需调焦、分

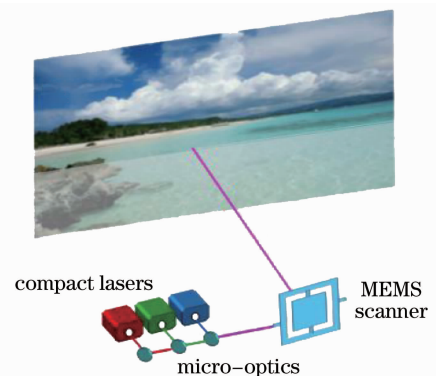


图 2 激光点扫描显示技术原理图

Fig. 2 Schematic diagram of scanned beam type projection module

辨率高和成本低的优点重新点燃了人们对激光点扫描显示技术的研究和产品化的兴趣,并积极推动这种技术应用于微投影显示领域。但是当前这种显示技术的最大缺陷在于人眼安全标准限制使其亮度小于 20 lm^2 ,这种亮度水平通常只适用于小于 A4 纸大小的显示屏幕^[3]。另一方面,基于内调制的激光点扫描显示技术对光源的调制速率以及配套电子系统要求很高。

2.3 激光线扫描显示技术

激光线扫描显示技术原理如图 3 所示。激光线扫描技术是激光投影显示技术和激光点扫描显示技术的综合,它使用一维线阵光调制器对光强进行调制,实现在一维像素阵列方向上图像的显示,然后使用扫描镜在垂直于一维像素阵列方向上快速扫描显示整幅图像。常用的一维线阵空间光调制器包括光栅光阀(GLV),栅电机系统(GEMS),空间光线调制器(SOM)。由于激光线扫描显示系统使用外调制,对激光器的调制带宽没有要求,激光光源选择余地就大大增加;空间光调制器调制单元数目的减少也使得调制器的制造难度降低并且可靠性提高。其体积和效率介于投影显示系统和点扫描系统之间,目前调制器的模块大小和功耗可以实现 $9.2 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 和 60 mW 的水平^[4],所以激光线扫描显示系统完全可以应用在微投影显示领域。

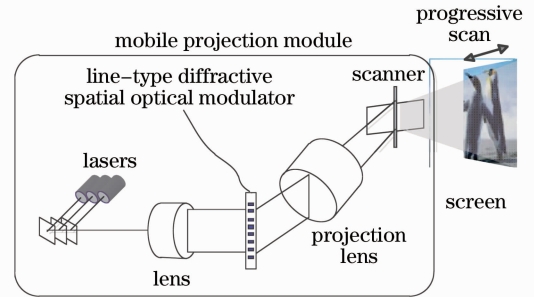


图 3 激光线扫描显示技术原理图

Fig. 3 Schematic diagram of scanned linear architecture type projection module

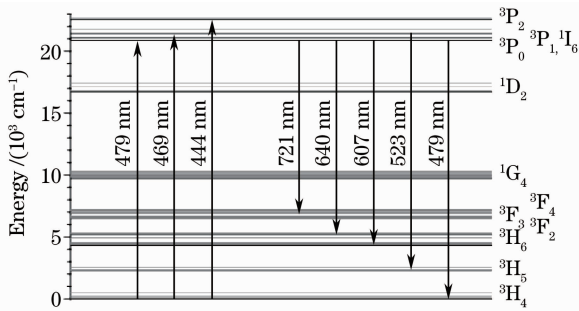
3 激光显示用 RGB 光源

激光显示对光源光束质量和调制带宽的要求取决于所采用的显示技术。使用外调制器的激光投影显示技术对光源的光束质量和调制带宽要求较低。而对于点扫描显示系统,激光器的光束质量和调制带宽决定着图像的分辨率,所以要求激光源的光束质量要接近衍射极限($M^2 < 2$),并且最小的调制频率要达到 10 MHz 量级[例如,扩展图形阵列 XGA 分辨率 $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$ 需要 60 MHz]^[3]。激光显示所需的屏幕亮度等于环境亮度乘以屏幕面积再除以屏幕对比度,所需激光光源白平衡的功率等于所需屏幕亮度除以激光光源的光视效能。对于 A4 纸大小的显示屏幕, 20 lm 便可满足正常的投影需求。在这种情况下单个红绿蓝激光输出功率需要约 50 mW 。对于 40 inch ($1 \text{ inch} = 2.54 \text{ cm}$) 的屏幕至少需要 200 lm 的亮度,此时每种颜色的激光输出功率增加至 500 mW ,对于 10000 lm 的屏幕亮度,每种颜色的激光输出功率约为 25 W 以上^[3]。激光显示系统用光源的波长选择有两个依据,首先是根据人眼对波长的响应度选择人眼敏感的波长使得光视效能较高;其次应尽量扩大光源波长覆盖的色域范围。所以通常使用较短波长的红光和较长波长的蓝光以提高光视效能,并选择合适的绿光来增大色域。其中对于 D65(色温 6500 K 的日光色)的白平衡,选择三基色波长分别为 $620, 532, 446 \text{ nm}$ 时可以实现最大的光视效能为 0.33 lm/W ,此时的国家电视标准委员会(NTSC)色域为 161% ;选择三基色波长分别为 $650, 512, 420 \text{ nm}$ 时可以实现的最大 NTSC 色域为 211% ,此时光视效能为 0.14 lm^2 ^[5,6]。此外,激光显示系统的光源部分体积应越小越好,具体要求根据应用场合决定。对于集成在移动电子产品中的投影系统来说,整个投影系统的大小要小于 10 cm^3 ^[7],而对于整个便携式投影系统来说,整个投影系统的体积小于 100 cm^3 即可。

目前激光显示系统的常用光源主要是可见光半导体激光器(LD)以及通过对全固态激光器进行非线性频率转换技术获得的红绿蓝激光等。半导体激光器的最大的优点就是体积小、可直接调制,但是光束质量较差。目前红光和蓝光半导体激光器发展的比较成熟,但是绿光的获得及其功率、寿命、效率的提升仍比较困难^[8],而且当红光波长降低或蓝光波长增加时,半导体激光器的电光转换效率降低。另一方面,通过全固态激光器非线性频率转换技术获得的 RGB 激光目前已能够完全满足大屏幕及超大屏幕激光显示对激光光源功率的需求,而且使用超小型绿色激光器的体积最小可达到 0.23 cm^3 ^[9],已经可以作为集成在移动电子产品中显示系统的绿光源。但是这类光源需要复杂精密的调整技术和精确的温度控制并且要考虑系统体积和效率的平衡。为了提高倍频效率,全固态激光器通常采用具有较高峰值功率的激光脉冲,增大了系统的安全隐患。而且采用半导体抽运的全固态激光器倍频光源的调制速率仅能达到 2 MHz 的水平^[9]。

除了以上两种方式外,人们还可以利用适当波长的半导体激光器抽运镨、铽、铈等稀土离子的激活介质来直接获得红绿蓝激光。其中三价稀土离子 Pr^{3+} 能同时激射红(约 635 nm)、绿(约 522 nm)、蓝(约 482 nm)三色光,非常适合于激光显示的需要,因而基于掺镨离子的可见光激光器近年来受到了广泛的关注。图 4 是 Pr^{3+} 能级图^[10],由于氧化物基质的声子能量比较大,从能级 $^3\text{P}_1$ 、 $^3\text{P}_0$ 到能级 $^1\text{D}_2$ 的非辐射跃迁很强导致量子效率降低;而氟化物基质的声子能量小,从能级 $^3\text{P}_1$ 、 $^3\text{P}_0$ 到能级 $^1\text{D}_2$ 的非辐射跃迁相对较弱,所以目前掺镨激光材料通常使用氟化物基质。

根据抽运激光器的工作波长,此类激光器可分为频率上转换型和频率下转换型。频率下转换型需要使用较短的波长(例如蓝光)作为抽运源,而频率上转换型使用红外光作为抽运源,通过吸收两个以上的红外光光子以获得一个可见光光子。这种类型的基质通常会共掺镱离子来提高效率和输出功率。图 5 是关于 Pr 离子在 Pr/Yb 共掺 ZrF_4 -BaF₂-LaF₃-AlF₃-NaF(ZBLAN) 光纤中上转换发射过程的能级图。过去由于缺乏足够功率的低成本蓝光抽运源,大部分的掺镨可见光激光器理论模拟和实验研究都围绕着频率上转换方案进行。近年来,随着 GaN 蓝光半导体激光器的飞速发展和逐渐成熟,采用 GaN 半导体激光器作为抽运源实现频率下转换的掺镨可见光全固态激光器正在成为激光显示应用研究的重点。

图 4 Pr^{3+} 能级图Fig. 4 Energy level diagram of Pr^{3+} ion

3.1 频率上转换型

1995 年, Xie^[11] 使用 860 nm 的掺钛蓝宝石激光器抽运 Pr/Yb 共掺 ZBLAN 光纤获得了可调谐的可见光激光器,其 520 nm 绿光的输出功率为 20 mW,抽运功率为 200 mW,斜率效率为 12.4%。

1997 年, Samdrack 等^[12] 使用掺钛蓝宝石激光器(850 nm)抽运 Pr/Yb 共掺 ZBLAN 光纤得到 375 mW 的红光(635 nm)。抽运光功率为 3.37 W,其中约 40% 的入射光耦合到了纤芯中,所以相对于耦合到纤芯中抽运光的斜率效率为 54%。为了获得更高的输出功率,该小组使用 852 nm 和 826 nm 的掺钛蓝宝石激光器合束后抽运 Pr/Yb 共掺 ZBLAN 光纤获得了 1020 mW 的红光,其中抽运光的功率为 5.51 W,相对于入射抽运光的斜率效率为 19%。

1999 年, Zellmer 等^[13] 使用 840 nm 的掺钛蓝宝石激光器抽运 Pr/Yb 共掺 ZBLAN 光纤获得了 165 mW 的蓝光(491 nm),其中抽运光功率为 1.6 W,斜率效率为 12.1%。2002 年,该课题组使用 6.5 W、850 nm 的多模半导体激光器抽运 Pr/Yb 共掺 ZBLAN 光纤获得了 2.06 W 的红光(635 nm),斜率效率为 45%, $M^2 < 10$,均方根(RMS)噪声为 0.27%,峰峰噪声为 1.7%^[14]。运行 100 h 后,功率没有降低。同时也获得了 320 mW 的绿光(520 nm),其中抽运光功率为 4.6 W,斜率效率为 17%。但是在运行几分钟后,绿光的输出功率就开始下降。

3.2 频率下转换型

3.2.1 基质为 ZBLAN 玻璃光纤

2009 年, Okamoto 等^[15], 使用 448 nm 的 GaN LD 抽运掺杂质量分数为 0.3%、纤芯直径和数值孔径分别为 3.8 μm 和 0.22 的掺 Pr^{3+} 的 ZBLAN 光纤 [$\text{ZrF}_4(53.0)$ -BaF₂(22.0)-LaF₃(2.2)-YF₃(2.0)-AlF₃(3.5)-NaF(17.0)-PrF₃(0.3)], 获得了调谐范围超过 100 nm 的可调 RGB 光纤激光(479~497, 515~546, 597~650 nm), 其中在 488, 521 和 635 nm 处的最大输出功率为 42, 43 和 59 mW, 斜率效率为 31%, 33% 和 37%,

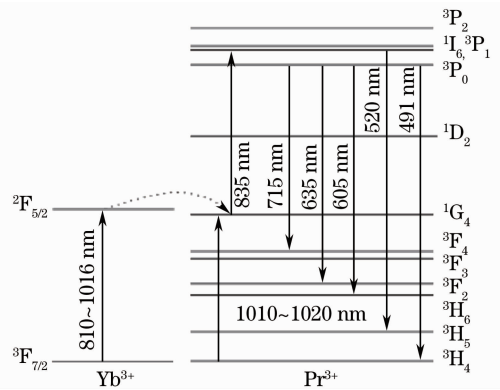


图 5 Pr/Yb 共掺 ZBLAN 的能级图

Fig. 5 Energy level diagram of $\text{Pr}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ -codoped ZBLAN fiber

其原理图如图 6 所示。另外,该研究小组为了在相同抽运条件下获得更大的输出功率,将光纤长度从 9 cm 增加到 19 cm,并优化了掺镨光纤输出端的反射率,从而在 635 nm 处获得了 132 mW 的输出功率,此时斜率效率为 69%。掺镨氟化物光纤的宽带可调谐特性使得可以通过选择红绿蓝三色的波长使激光显示的色域最大化,从而提高激光显示系统的色彩表现力。

目前,大部分报道的氟化物光纤激光器谐振腔结构都是利用镀在光纤端面的薄膜介质作为反射镜,使用棱镜与透镜组合将抽运光耦合到纤芯中。但是这种谐振腔不稳定而且氟化物光纤端面暴露在空气中,会降低其长期的可靠性。2011 年该小组用同种类型的掺镨光纤获得了最大输出功率为 322 mW、波长为 521 nm 的全光纤激光器,如图 7 所示^[16]。其中抽运源为通过偏振分束器(PBS)合束的两个 GaN LD(442、448 nm),入射和耦合到硅基光纤的抽运光功率分别为 1050 mW 和 652 mW,斜率效率为 53%。而且这种紧凑的全光纤激光器结构极大地提高了系统的可靠性。

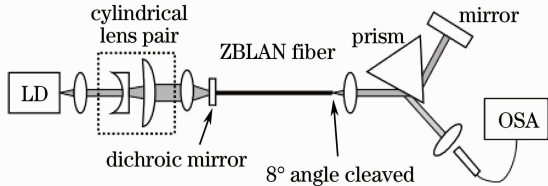


图 6 可调谐光纤激光原理图

Fig. 6 Experimental setup of a tunable visible fiber laser

3.2.2 基质 $\text{AlF}_3\text{-YF}_3\text{-PbF}_2$ 玻璃光纤

2009 年, Fujimoto 等^[17]报道了一种防水的掺镨氟化铝玻璃材料 ($\text{AlF}_3\text{-YF}_3\text{-PbF}_2$)。同年,该团队使用 442.6 nm 的蓝光 LD 抽运该材料拉制成的光纤[掺杂质量分数为 0.3%,纤芯直径为 6 μm ,长度为 4 cm,数值孔径(NA)为 0.28]实现了 482、523、605、637、719 nm 处的激射,其原理图如图 8 所示^[18]。其中红光的输出功率约为 25 mW,斜率效率为 18.1%,绿光和蓝光的输出功率小于 1 mW 且工作不稳定。

2010 年, Nakanishi 等^[19]通过对谐振腔镜的反射率进行优化,将多层介质膜直接镀在有源光纤的两个端面作为谐振腔镜,并且将纤芯/包层直径从 6/200 μm 增加到 8/300 μm ,使 638 nm 红光的输出功率和斜率效率分别增加到 311.4 mW 和 41.6%。2011 年,该课题组又通过对两个 442 nm 的 LD 进行偏振合束后,使抽运光的功率增加到 1.695 W,并将纤芯/包层直径从 8/300 μm 进一步增加到 16/300 μm ,从而使 638 nm 红光的输出功率增加到 645.7 mW,此时斜率效率为 41.9%^[20]。同年,该课题组使用类似装置获得了 598 mW 的绿光(522.2 nm)输出,斜率效率为 43%,其原理图如图 9 所示^[21]。为了进一步提高输出功率,该课题组令 LD 在脉冲下工作,并对其进行过载控制,将 638 nm 红光的输出功率提升到 1.24 W,此时被吸收的 GaN LD 蓝光的峰值功率为 2.91 W,斜率效率为 44.3%^[22]。

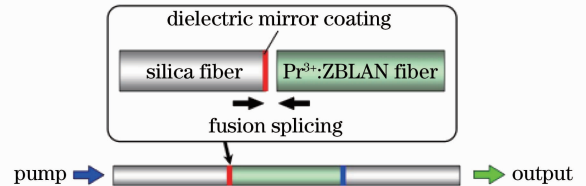


图 7 全光纤可见光激光器

Fig. 7 All-fiber laser resonator of visible fiber laser

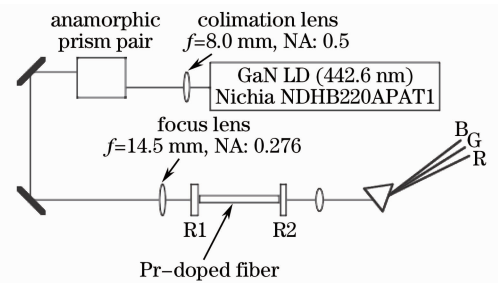


图 8 掺镨氟化铝玻璃光纤的多波长激射原理图

Fig. 8 Multi-wavelength laser oscillation in Pr^{3+} -doped fluoro-aluminate glass fiber

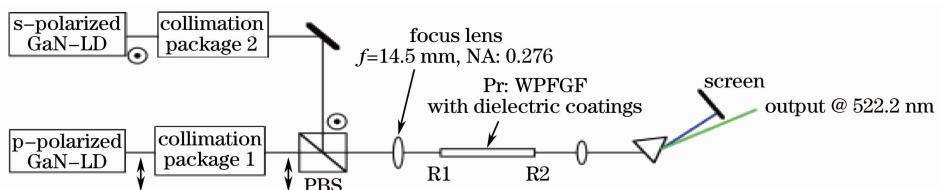


图 9 掺镨氟化铝玻璃光纤 598 mW 绿光激射原理图

Fig. 9 Direct green laser oscillation with 598 mW output in Pr^{3+} -doped waterproof fluoro-aluminate glass fiber (Pr: WPF GF)

3.3 红绿蓝掺镨氟化物光纤激光器存在的问题及发展方向

目前红绿蓝掺镨氟化物光纤激光器的抽运方法多为透镜直接端面耦合方式,使用棱镜与透镜组合将抽

运光耦合到纤芯中。这类腔结构属于有缺陷的腔结构,动力学特性和稳定性不好,很难应用于商用激光器中^[23]。而且采用这种腔结构的激光器受限于合束、准直、整形、耦合系统,体积难以进一步减小,从而使用这种腔结构光纤激光器的激光显示系统很难集成在手持电子产品中。但是目前从实验上已经实现了掺镨氟化物光纤和硅基光纤的熔接,而且半导体激光到光纤的低成本的透镜光纤耦合技术已经非常成熟,且使用梯度折射率透镜光纤的耦合效率已经大于 80%^[24],所以基于透镜光纤的全光纤红绿蓝掺镨氟化物光纤激光是非常可行的,这将大大提高激光体积系统的稳定性和可靠性,同时也可以大幅度降低其封装体积。

虽然目前使用 GaN 激光器抽运掺镨光纤获得的连续红光和绿光的功率已经达到 645.7 mW 和 598 mW 的水平,且这种输出功率已经可以实现 40 inch 以上屏幕的显示,但是这种功率水平使其还远不能应用于影院(屏幕亮度 10000 lm 以上)的激光显示系统中。从国内外掺 Yb 光纤激光器的发展历史来看和目前的发展现状来看^[25~27],在解决抽运功率和抽运耦合效率的提高,低损耗掺镨氟化物光纤(尤其是双包层光纤)的制造工艺三个关键问题后,红绿蓝掺镨氟化物光纤激光器将很有可能应用到影院的激光显示系统的光源上。除了提高 GaN 蓝光抽运的单管输出功率外,还可以通过双向抽运,使用激光二极管阵列,多个小功率 LD 端面耦合抽运等方式提高抽运功率。其中多个小功率 LD 端面耦合抽运是目前在现有单管蓝光抽运功率水平基础上,大幅提高红绿蓝掺镨氟化物光纤激光输出功率的最有效的方法之一。这种方法是把几十根尾纤拧在一起熔融拉锥,然后在锥体的中间切断,再熔接到多模光纤上进行抽运,其耦合效率可以达到 90%以上^[23]。目前红绿蓝掺镨氟化物光纤激光实验中的实际入纤功率仅为抽运光的 60%左右,抽运耦合效率有待进一步提高。除了在单包层光纤基础上改变抽运方式外,更重要的是实现双包层掺镨氟化物光纤实际应用。因为从掺 Yb 光纤激光器的发展历史来看,双包层光纤和包层抽运技术的出现,使得单根光纤的连续输出功率从毫瓦级迅速上升到千瓦级以上。而目前的单包层掺镨氟化物光纤的损耗通常在 0.1~0.3 dB/m 之间,双包层掺镨氟化物光纤内包层在蓝光抽运处的损耗通常要大于 0.3 dB/m。所以低损耗掺镨氟化物光纤的制造工艺,尤其是低损耗双包层掺镨氟化物光纤的制造工艺是目前亟待解决的一个关键问题。

4 结束语

激光显示技术除具有饱和度高、色域大、系统简单及功耗低等优点外,还可以将屏幕和激光引擎分开,满足人们随时随地使用便携式设备分享大尺寸图像的需求。由于激光点扫描和线扫描显示技术具有效率高、体积小、焦深大等优点,非常适合应用于便携式投影系统中。便携式激光显示系统对于能够满足其体积、功率、效率等要求的新型光源,尤其是绿光源,有着强烈的需求。近年来,随着 GaN 蓝光半导体激光器的飞速发展和逐渐成熟,利用 GaN 激光器作为抽运源,实现频率下转换的掺镨可见光全固态激光器正在成为研究的重点。目前使用 GaN 激光器抽运掺镨光纤获得的连续红光和绿光的功率已经达到 645.7 mW 和 598 mW 的水平,这种输出功率已经可以实现 40 inch 以上屏幕的显示,但是对于更大屏幕的激光显示,需要在解决抽运功率和抽运耦合效率提高,掺镨氟化物光纤的低损耗制造工艺 3 个关键问题的基础上进一步提高输出功率。利用 GaN 激光器抽运掺镨氟化物光纤激光器的宽带可调谐特性,可以通过选择合理的三基色的波长使激光显示色域最优,从而提高激光显示系统的色彩表现力成为可能。紧凑的全光纤激光器结构的实现,极大提高了系统的可靠性,并且使封装体积和产业化的成本降低的可能性增大。随着大功率蓝光半导体激光器和掺镨氟化物光纤成本的降低,可以预料 GaN 激光器抽运的掺镨氟化物光纤激光器会在嵌入式和便携式投影系统得到广泛的应用。

参 考 文 献

- 1 A. Korpel, R. Adler, P. Desmares *et al.*. A television display using acoustic deflection and modulation of coherent light [J]. *Appl. Opt.*, 1966, **5**(10): 1667~1675
- 2 E. Buckley. Detailed eye-safety analysis of laser-based scanned-beam projection systems[J]. *J. Display Technol.*, 2012, **8**(3): 166~173
- 3 H. Moench. New markets and new light-sources for projection[C]. *SPIE*, 2008, **6911**: 69110Y
- 4 Hee-Moon Jeong, Yong-Hwa Park, Yong-Chul Cho *et al.*. Slow scanning electromagnetic scanner for laser display[J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS and MOEMS*, 2008, **7**(4): 043003

- 5 E. Buckley. Laser wavelength choices for pico-projector applications[J]. *J. Display Technol.*, 2011, **7**(7): 402~406
- 6 E. Buckley. Corrections to "laser wavelength choices for pico-projector applications"[J]. *J. Display Technol.*, 2012, **8**(2): 117~117
- 7 M. Freeman, M. Champion, S. Madhavan. Scanned laser pico-projectors: seeing the big picture (with a small device)[J]. *Opt. Photon. News*, 2009, **20**(5): 28~34
- 8 C. Vierheilg, C. Eichler, S. Tautz *et al.*. Beyond blue pico laser; development of high power blue and low power direct green[C]. *SPIE*, 2012, **8277**: 82770K
- 9 S. Essaian, J. Khaydarov, S. Slavov *et al.*. Microchip green laser sources: broad range of possibilities[C]. *SPIE*, 2012, **8240**: 82400I
- 10 G. Huber, C. Kränkel, K. Petermann. Solid-state lasers: status and future (Invited)[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2010, **27**(11): B93~B105
- 11 P. Xie, T. R. Gosnell. Room-temperature upconversion fiber laser tunable in the red, orange, green, and blue spectral regions[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(9): 1014~1016
- 12 T. Sandrock, H. Scheife, E. Heumann *et al.*. High-power continuous-wave upconversion fiber laser at room temperature [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(11): 808~810
- 13 H. Zellmer, P. Riedel, A. Tünnermann. Visible upconversion lasers in praseodymium-ytterbium-doped fibers[J]. *Appl. Phys. B: Lasers and Optics*, 1999, **69**(5): 417~421
- 14 H. Zellmer, P. Riedel, M. Kempe *et al.*. High-power diode pumped upconversion fibre laser in red and green spectral range[J]. *Electron. Lett.*, 2002, **38**(21): 1250~1251
- 15 H. Okamoto, K. Kasuga, I. Hara *et al.*. Ultra-wideband tunable RGB fiber laser[C]. Baltimore: Lasers and Electro-Optics, 2009 and 2009 Conference on Quantum Electronics and Laser Science Conference, 2009. CFB7
- 16 H. Okamoto, K. Kasuga, Y. Kubota. Efficient 521 nm all-fiber laser: splicing Pr³⁺-doped ZBLAN fiber to end-coated silica fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(8): 1470~1472
- 17 Y. Fujimoto, M. Yamazaki. Stimulated emission cross sections of Pr doped fluoride glass evaluated by Judd-Ofelt analysis [C]. Munich: CLEO/Europe and EQEC 2009, 2009. CE_P13
- 18 Y. Fujimoto, O. Ishii, M. Yamazaki. Multi-colour laser oscillation in Pr³⁺-doped fluoro-aluminate glass fibre pumped by 442.6 nm GaN-semiconductor laser[J]. *Electron. Lett.*, 2009, **45**(25): 1301~1302
- 19 J. Nakanishi, T. Yamada, Y. Fujimoto *et al.*. High-power red laser oscillation of 311.4 mW in Pr³⁺-doped waterproof fluoro-aluminate glass fibre excited by GaN laser diode[J]. *Electron. Lett.*, 2010, **46**(18): 1285~1286
- 20 J. Nakanishi, T. Yamada, Y. Fujitomo *et al.*. Sub-watt output power at 638 nm in wavelength by direct oscillation with Pr-doped waterproof fluoro-aluminate glass fiber laser[C]. Munich: CLEO/Europe and EQEC 2011, 2011. CJ_P6
- 21 J. Nakanishi, Y. Horiuchi, T. Yamada *et al.*. High-power direct green laser oscillation of 598 mW in Pr³⁺-doped waterproof fluoroaluminate glass fiber excited by two-polarization-combined GaN laser diodes [J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(10): 1836~1838
- 22 J. Nakanishi, T. Yamada, Y. Fujitomo *et al.*. Watt-order output power at 638 nm in wavelength by direct oscillation with Pr-doped fiber laser[C]. San Jose: Science and Innovations (CLEO: S and I), 2012. CM2N.4
- 23 Lou Qihong. High-Power Fiber Laser and Its Applications[M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2010. 62~64
楼祺洪. 高功率光纤激光器及其应用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010. 62~64
- 24 Ouyang Deqin, Ruan Shuangchen, Guo Chunyu *et al.*. Research on all-fiber coupling between a diode laser and single-mode fibers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(12): 1205004
欧阳德钦, 阮双琛, 郭春雨 等. 半导体激光器与单模光纤的全光纤耦合技术研究[J]. 中国激光, 2011, **38**(12): 1205004
- 25 Lou Qihong, Zhou Jun, Zhang Haibo *et al.*. Recent progress of large core fiber lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2235~2237
楼祺洪, 周 军, 张海波 等. 大芯径光纤激光器的新进展[J]. 中国激光, 2010, **37**(9): 2235~2237
- 26 Lou Qihong, He Bin, Xue Yuhao *et al.*. 1.75 kW Yb-doped double cladding fiber laser made in China[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1277
楼祺洪, 何 兵, 薛宇豪 等. 1.75 kW 国产掺 Yb 双包层光纤激光器[J]. 中国激光, 2009, **36**(5): 1277
- 27 Yan Ping, Xiao Qirong, Fu Chen *et al.*. 1.6 kW Yb-doped all-fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(4): 0416001
闫 平, 肖起榕, 付 晨 等. 1.6 kW 全光纤掺镱激光器[J]. 中国激光, 2012, **39**(4): 0416001