

·综述·

## 国外光纤激光器研究进展

石永山

(海军驻锦州地区军事代表室, 辽宁 锦州 121000)

**摘要:**介绍了典型光纤激光器的工作原理及光纤激光器具有的模式好,体积小,免冷却等一系列其他激光器无法比拟的优势,受到了来自通信、军事技术、工业加工、医疗和光信息等应用领域的高度关注,论述了国外在连续光纤激光器、脉冲光纤激光器等方面研究现状,最后总结了光纤激光器产业化的趋势。

**关键词:**光纤激光器;连续光纤激光器;脉冲光纤激光器

中图分类号:TN248.1

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2013)-06-0001-05

## Development Progress of Foreign Fiber Laser

SHI Yong-shan

(Resident Representative Office of Naval Force in Jinzhou, Jinzhou 121000, China)

**Abstract:** The operation principles of typical fiber lasers are introduced. With the advantages of good mode, small volume and non-cooling comparing with other lasers, they are paid more attention in many application areas such as communication, military technology, industry processing, medicine and optical information technology. The development progresses of foreign fiber lasers such as continuous wave (CW) fiber laser and pulse fiber laser are reviewed. Furthermore, the industrialization trends of fiber lasers are summarized.

**Key words:** fiber laser; continuous wave (CW) fiber laser; pulse fiber laser

光纤激光器是采用光纤作为激光介质的激光器,通过在光纤基质材料中掺杂不同的稀土离子,获得所对应波长的激光输出。掺杂的离子种类有掺铒(Er)、掺钕(Nd)、掺镨(Pr)、掺铥(Ho)、掺镱(Yb)、掺铥(Tm)等。

光纤激光器诞生于20世纪60年代初,已经有五十多年的发展史。随着光纤通信技术、光纤制造工艺以及与激光器技术的日趋成熟而迅猛发展<sup>[1]</sup>,特别是20世纪90年代后期,随着半导体激光器及掺杂光纤制作技术的日益成熟,光纤激光器的研究取得了重大进展,输出功率、波长调谐范围等性能得到了显著提高<sup>[2]</sup>,适用于各种不同应用领域的光纤激光器纷纷面世。

### 1 典型光纤激光器工作原理

典型光纤激光器的基本结构主要由三部分组成:产生光子的增益介质、使光子得到反馈并在增益介质中进行谐振放大的光学谐振腔和激发增益介质的泵浦源。其中,增益介质为掺杂稀土离子的纤芯。

如图1,当泵浦光从反射镜1(或光栅1)入射到掺杂光纤芯中时,会被所掺杂的稀土离子吸收。吸收了光子能量的稀土离子会发生能级跃迁,实现“粒子数反转”,反转后的粒子经弛豫后会以辐射形式再从激发态跃迁回到基态,并释放出能量,从反射镜2(或光栅2)输出,形成激光束输出<sup>[1]</sup>。

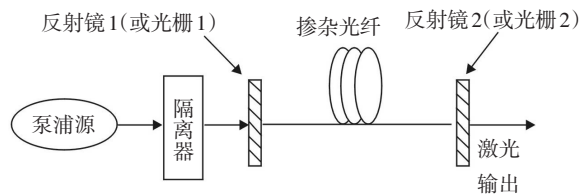


图1 光纤激光器基本结构

### 1.1 光纤激光器的特点

光纤激光器以光纤为增益介质,输出激光的光束质量主要由光纤的纤芯直径和数值孔径决定,由于光纤极大的表面积与体积比值,因此很容易对其在高功率输出时的热效应进行有效地管理。同时,正由于光纤激光器中光纤极大的表面积与体积比值,散热性能也非常好,因此几乎不存在热透镜效应。因此,与传统的固体激光器相比,光纤激光器在高功率输出时可达接近衍射极限的高光束质量。

在电光转换效率方面,光纤激光器的电光转换效率可以高达28%,远高于半导体泵浦的YAG激光器15%的电光转换效率及CO<sub>2</sub>激光器10%的电光转换效率,也高于碟片机用激光器的20%的电光转换效率。

光纤激光器的器件结构简单,体积小,使用灵活方便。双包层光纤激光器由于采用柔软的掺杂光纤本身作为激光介质,泵浦源也是采用体积小易于模块化的高功率半导体激光器,因此稳定性好,体积小,使用灵活方便。

光纤激光器还具有波长可调谐、高可靠性、免于维护、尾纤输出和使用寿命长等优点,是一种新型的优质激光光源,已引起人们的广泛关注<sup>[3]</sup>,已经形成的光纤激光器产品类型包括:连续激光、脉冲激光、单偏振激光、单频激光、超短脉冲激光和白光超连续光源等。其应用覆盖材料处理、医疗、印刷、雷达、通信、激光切割、精密加工、印刷制辊、金属非金属钻孔/切割/焊接、工业造船、大型基础建设、航空航天、军事国防安全等多个领域,市场需求也越来越大。据统计,2010年光纤激光器已约占据整个激光器市场的25%,年销售额近7亿美元。如此庞大的市场需求,光纤激光器的研究已成为目前激光器领域的研究热点<sup>[4]</sup>。

## 2 国外光纤激光器研究进展

### 2.1 连续光纤激光器

在连续光纤激光器方面,随着光子晶体光纤技

术的出现,使光纤技术具有了新的特性和优势,实现了可制备大模场面积的单模纤芯光纤、高的内包层数值孔径、无限单模等特性,从而使光纤激光器取得了飞快的进展。自从1999年光纤激光器的功率达到100 W以来,光纤激光器的输出功率得到迅速提高,德国Jena大学、英国南安普敦大学、美国密西根大学、IPG公司等先后实现了高功率的激光输出<sup>[5]</sup>,到2004年,单模连续激光的输出功率突破1 000 W。连续光纤激光器在高功率方面的功率输出进展情况如图2所示。

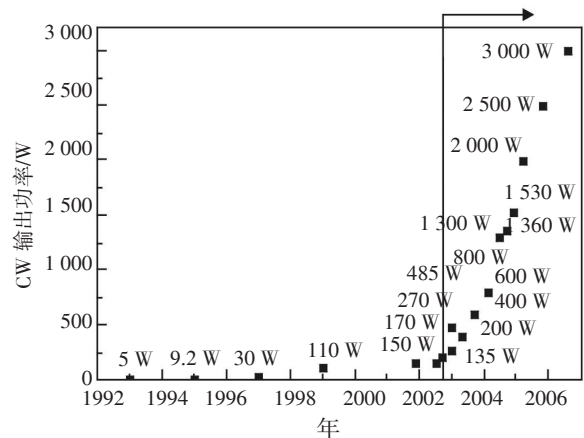


图2 单模输出光纤激光器的研究进展

2005年,德国Jena大学研究人员用掺镱双包层结构的光子晶体光纤实现了1 530 W的功率输出,光光转换效率达75%。其输出功率和斜率效率如图3所示。

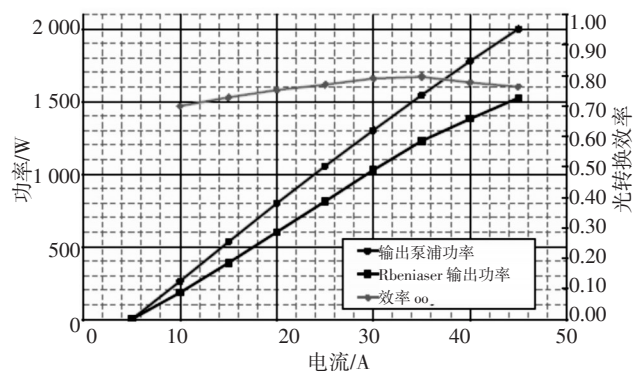


图3 德国Jena大学光子晶体光纤激光器的输出功率

南安普顿大学在利用棒状双包层掺镱光子晶体光纤,实现了功率320 W的连续激光输出(斜率效率78%)。2009年底,南安普敦大学采用975 nm半导体激光器进行双端泵浦,用波长1.1 μm高反射的二向色镜和另一光纤端面的菲涅耳反射为谐振腔,增益双包层掺镱光纤参数为纤芯直径50 μm,纤芯NA为

0.06, 镱离子掺杂浓度 3 700 ppm, 光纤在波长 976 nm 的吸收系数为 1 dB/m, 光纤长 20 m, 光纤被弯曲成 25 cm 直径的圆形。当两端的泵浦功率分别为 2.2 kW 和 1.2 W 时, 获得了激光的波长为 1 090 nm、功率 2.1 kW 的连续激光输出, 其光束质量  $M^2 = 1.2$ 、斜率效率达 74%<sup>[6]</sup>。实验装置如图 4 所示。

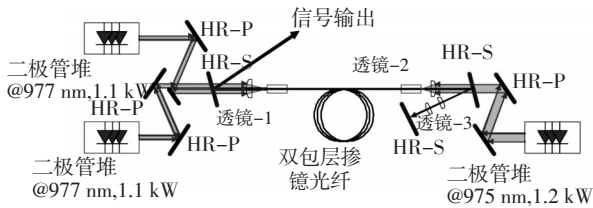


图4 高功率连续激光的实验装置图

IPG公司2010年已经能够提供单纤单模输出功率 10 kW, 多模输出功率 50 kW 的产品, 其中单模激光的电光转换效率超过 25%, 光束质量  $M^2=1.3$ 。在其他波长方面, 利用铒镱共掺的光纤介质, 实现了数百瓦的激光输出, 利用掺铥的光纤介质, 获得了 1 000 W 的功率输出。2011年, 研制出激光输出功率达 50 kW 的多模光纤激光器<sup>[7-8]</sup>。近年来, 连续光纤激光器在高功率输出的三个主要波长的高功率的进展, 如图 5 所示。

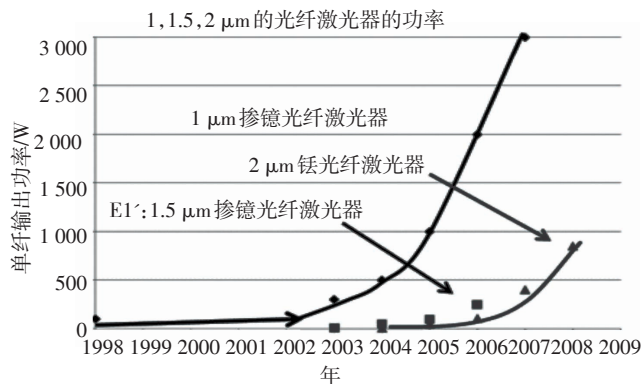


图5 三种波长的光纤激光器的输出功率的进展

## 2.2 脉冲光纤激光器

在脉冲光纤激光器方面, 光纤激光器实现脉冲输出的方式与普通的激光器一样主要采用锁模技术、调Q技术和脉冲种子源放大技术。

调Q光纤激光器是在谐振腔内插入Q开关器件, 通过周期性改变腔损耗, 实现调Q脉冲激光输出。南安普顿大学采用纤芯直径 40 μm、数值孔径 0.06 的大模场面积掺铥光纤调Q, 获得了脉冲能量 1.2 mJ 的窄

脉冲宽度(37 ns)、高光束质量( $M^2 = 1.1$ )脉冲激光输出。由于光纤激光器中较长的增益介质, 很难获得更窄的脉冲宽度激光输出。

为了获得高峰值功率、高能量的脉冲激光输出, 主要是利用主振荡功率放大技术(MOPA)来实现。2005年, 密西根大学采用调制的半导体激光器作为脉冲种子光源, 通过四级光纤放大, 实现 1 064 nm 的巨脉冲能量输出。两级单模光纤预放大后, 激光的单脉冲能量由 10~30 nJ 放大到约 38 μJ。再经过一级功率放大(LD功率 40 W、波长 980 nm 抽运的纤芯直径 50 μm 双包层光纤)和二级功率放大(LD功率 200 W、波长 915 nm 抽运的纤芯直径 200 μm 双包层光纤), 实现了巨脉冲能量的激光输出: 当脉宽 500 ns 时, 得到的单脉冲能量达 82 mJ; 脉宽 50 ns 时的单脉冲能量为 27 mJ; 脉宽 4 ns 时的脉冲峰值功率为 2.4 MW<sup>[9]</sup>。多级结构的种子脉冲光纤放大器的实验装置如图 6 所示。

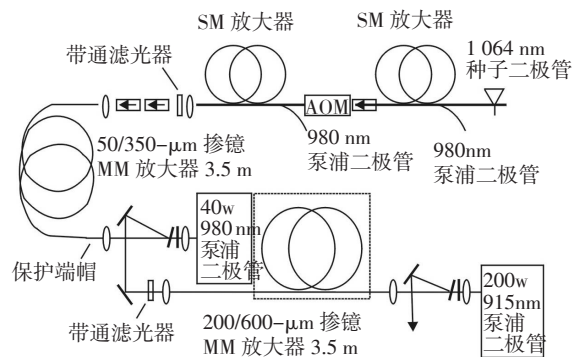


图6 多级结构的种子脉冲光纤放大器的实验装置图

2005年, F D Teodoro 利用双包层掺铥的光子晶体光纤作为脉冲放大的增益光纤, 实现了脉冲宽度 450 ps、脉冲能量 0.7 mJ、峰值功率 1.5 MW、近衍射极限( $M^2 = 1.05$ )的脉冲激光输出。接着, 他们又利用纤芯直径 140 μm 的多模掺铥放大该输出激光, 实现了 4.5 MW 的高能量脉冲激光输出。

2008年, F Di Teodoro 等人利用大芯的掺铥光纤, 在超短的皮秒脉冲范围内, 已经实现了峰值功率 1.2 MW 的脉冲激光输出<sup>[10]</sup>。2005年, 南安普顿大学的研究员, 在纤芯直径 43 μm、数值孔径 0.09 的双包层掺铥光纤实现了脉冲宽度 20 ps、光束质量  $M^2 = 2.4$ 、平均功率 321 W 的脉冲激光输出<sup>[11]</sup>。

2009年 Bülend ortac 等用大模场面积的掺 Yb 光纤制作得到自启动的平均功率 9 W 的飞秒脉冲输出, 重复

频率9.7 MHz,脉冲能量927 nJ,接近微焦量级<sup>[12]</sup>。

2009年 Alexey Andrianov 等通过掺铒光纤放大器和色散降低光纤(DDF)、高非线性单模光纤(HN-SF)和普通单模光纤(SMF-28)对被动锁模的掺铒振荡器输出的230 fs,600 MHz,波长为1.57 μm的脉冲进行放大和压缩,并得到20~25 fs,调谐范围为1.57~2.1 μm的飞秒激光输出<sup>[13]</sup>。

2010年 J. Lhermite 等用掺 Yb 光纤作增益介质,利用非线性偏振技术在全正色散域锁模获得了中心波长在976 nm,重复频率为40.6 MHz,平均功率为480 mW的激光脉冲,经过腔外体光栅压缩后可获得286 fs的超短脉冲输出<sup>[14]</sup>。

2010年 K. Kieu 等用掺 Er 光纤激光器产生脉冲后,经掺铒光纤放大展宽后,再由 SMF28 光纤对脉冲进行压缩进入高非线性光纤(HNLF)后获得超连续谱(1~2 μm)抽运掺 Yb 光纤并放大后获得高能量的超短脉冲输出,经过腔外体光栅压缩后可获得135 fs和11.5 W平均功率的超短脉冲输出<sup>[15]</sup>。

2011年 S.Hädrich 等研究了通过两级放大获得高平均输出功率的掺 Yb 光纤激光器,并用 BBO 晶体对输出飞秒脉冲进行了倍频输出。该系统在中心波长1040 nm时有不同的重复频率,系统经过二级预放和一级主放获得足够能量的脉冲,经光栅对压缩后得到406 fs,平均功率225 W的脉冲输出<sup>[16]</sup>。

2011年 J. Lhermite 等又利用纤芯和包层直径分别为80 μm和200 μm的掺镱棒状光纤作为增益介质产生了中心波长为976 nm,单脉冲能量为500 nJ,脉冲宽度为460 fs,重复频率8.4 MHz,平均功率4.2 W的超短脉冲输出<sup>[17]</sup>。

2011年美国密歇根大学的 Bai Nie 等设计了一种双包层掺镱全正常色散飞秒光纤激光器,该激光器具有一个窄的内腔式滤光器,产生的脉冲能量22 nJ,重复频率42.5 MHz,通过多光子脉间干涉相位扫描技术将脉冲压缩到42 fs,单脉冲能量10 nJ<sup>[18]</sup>。

2011年康奈尔大学的研究人员使用正常色散锁模铥光纤激光器产生0.4 nJ的脉冲能量,输出脉冲经过消除啁啾后为470 fs<sup>[19]</sup>。2012年 Frithjof Haxsen 等使用高非线性光纤和掺 Tm 光纤,并通过非线性偏振演化(NEP)和半导体可饱和吸收镜混合锁模以及小芯径、大数值孔径光纤进行色散补偿,得到单脉冲能量0.7 nJ,波长1927 nm,482 fs的飞秒激光脉冲输出<sup>[20]</sup>。

2012年 A.Chamorovski 等得到中心波长为1160 nm的半导体碟片激光器抽运的被动锁模飞秒光纤激光器。在波长2085 nm处产生了890 fs,功率46 mW的脉冲输出,该波长是目前飞秒光纤激光器最长的输出波长<sup>[21]</sup>。

### 2.3 单偏振光纤激光器

单偏振、单频率的激光,主要用于进行相干合成或光谱合成。

在单偏振光纤激光器方面,美国密西根大学采用双包层结构的偏振保持光纤,实现了单偏振激光输出。其中内包层形状为八角形,纤芯直径20 μm、数值孔径0.06,高双折射 $\Delta n = 3 \times 10^{-4}$ 。利用偏振保持光纤在弯曲状态下,纤芯中快轴、慢轴由于弯曲所致的不同轴向的损耗不同,来抑制一个轴向的传输光,从而实现单偏振的激光输出。并以双包层结构的光纤光栅和光纤端面为谐振腔,实现了输出功率405 W的单偏振,偏振度>19 dB的单横模激光输出,光束质量 $M^2 = 1.1$ ,光谱带宽1.9 nm,斜率效率为65.9%。

2006年,南安普敦大学实现了偏振度16 dB、光束质量 $M^2 = 1.2$ 、功率633 W的连续激光输出。并采用相同光纤,利用主振荡功率放大技术,实现了线宽60 KHz、偏振度16 dB、光束质量 $M^2 = 1.1$ 的单模、单偏振窄线宽的264 W激光输出<sup>[22]</sup>。

南安普顿大学利用掺硼光纤引入双折射效应,实现单偏振激光输出。利用端面泵浦实现了147 W、斜率效率66%的连续激光输出,消光比约16 dB(偏振度95%)。

### 2.4 其他光纤激光器

目前,光纤激光器的发展主要是朝着更高功率、更多样化方向发展。在连续高功率光纤激光器中,进一步提高连续激光的输出功率,实现万瓦级,甚至更高的功率。在脉冲光纤激光输出上,形成单纤、单脉冲能量10 mJ、脉冲峰值功率兆瓦以上的全光纤化激光器产品。

在多品种方面,开发形成单频窄线宽、单偏振态、超短脉冲宽度、不同波长范围(如1.5 μm、2.0 μm的人眼安全波段)的激光器产品。

为了实现高功率的激光输出,除了直接提高单根光纤的输出功率之外,还可以把多个较低功率的

光纤激光器,通过相干合成技术和非相干合成技术,获得所需的高功率激光输出。其中,2009年,德国C Wirth等人利用非相干合成<sup>[23]</sup>,把4个不同波长,输出功率超过500 W的、窄线宽的光子晶体光纤放大器,进行非相干光束合成,获得了2 kW的连续激光输出,光束质量 $M^2 < 2.0$ 。美国Northrop Grumman Aerospace Systems利用光纤放大器的相干合成技术,实现了1.26 kW的激光输出。

### 3 展 望

随着光纤激光器的快速发展,其应用范围越来越高,目前主要的市场应用为工业材料加工领域。IPG公司已经向用户交付首台10 kW的单模输出的光纤激光器,其总体效率超过25%;光纤激光器产品的多模输出功率已经达到数万瓦;超快脉冲激光的峰值功率已经接近1 GW;德国弗劳恩霍夫技术研究所研制出平均400 W的飞秒激光器;英国巴斯大学实现了400~2 400 nm的超连续光谱光源,输出功率大于10 W等,都极大地推动了光纤激光器在应用领域的发展。

近年来,随着光通信网络及相关领域技术的飞速发展,光纤激光器技术正在不断向广度和深度方面推进。相关技术的进步,特别是以光纤光栅、滤波器和光纤技术等为基础的新型光纤器件等的陆续面世,将为光纤激光器的设计提供新的思路和方法。尽管目前多数类型的光纤激光器仍处于实验室研制阶段,但已经在实验室中充分显示出了优越性<sup>[24]</sup>。光纤激光的工业应用,已经从低功率(百瓦级)的打标、雕刻向更高功率(千瓦级到万瓦级)的金属和陶瓷的切割、焊接等方面发展。在汽车和造船等行业中,结构紧凑、使用方便的高功率光纤激光器具有巨大的市场潜力。可以预见,光纤激光器必将在未来的光通信、军事、工业加工、医疗、光信息处理、全色显示和激光印刷等领域中发挥重要作用。

### 参考文献

- [1] 申人升,张玉书,杜国同. 光纤激光器研究进展[J]. 半导体光电,2009,30(1):1-5.
- [2] 武建芬,陈根祥. 激光光纤激光器技术及其研究进展[J]. 光通信技术,2006(8):49-52.
- [3] 楼祺洪,周军,朱健强,等. 高功率光纤激光器研究进展[J]. 红外与激光工程,2006,35(2):135-138.
- [4] 蔡志平,叶陈春,董俊,等. 新型激光技术研究进展[J]. 厦门大学学报(自然科学版),2011,50(2):245-252.
- [5] Y Jeong, J K Sahu, D N Payne, et al. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power[J]. Opt. Express, 2004, 12: 6088-6092.
- [6] Y Jeong, A J Boyland, J K Sahu, et al. Multi-kilowatt single-mode ytterbium doped large-core fiber laser[J]. Journal of the optical society of Korea, 2009, 13(4): 416-422.
- [7] T Ehrenreich, R Leveille, I Majid, et al. 1-kW All-glass Tm-fiber laser[C]//SPIE, 2010, 7580:16.
- [8] 李林,葛向红. 大功率光纤激光器的研究进展[J]. 科技创新导报, 2013(3):24-25.
- [9] CHENG Ming-yuan, CHANG Yu-chung, Almantas Galvanauskas. High-energy and high-peak-power nanosecond pulse generation with beam quality control in 200-mm core highly multimode Yb-doped fiber amplifiers[J]. Optics Letters, 2005, 30(4): 358-360.
- [10] S Desmoulins, F D Teodoro. High-gain Er-doped fiber amplifier generating eye-safe MW peak-power mJ-energy pulses[J]. Optics Express, 2008, 16(4): 2431-2437.
- [11] F D Teodoro, C D Brooks. Multistage Yb-doped fiber amplifier generating megawatt peak-power subnanosecond pulses [J]. Optics Letters, 2005, 30(24): 3299-3301.
- [12] Bülend Ortac, Martin Baumgartl, Jens Limpert, et al. Approaching microjoule-level pulse energy with mode-locked femtosecond fiber lasers[J]. Opt. Lett., 2009, 34(10): 585-1587.
- [13] Alexey Andrianov, Arkady Kim, Sergey Muraviov, et al. Wavelength-tunable few-cycle optical pulses directly from an all-fiber Er-doped laser setup[J]. Opt. Lett., 2009, 34(20): 3193-3195.
- [14] J Lhermite, G Machinet, C Lecaplain, et al. Femtosecond fiber oscillator at 976nm[C]. OSA/CLEO, 2011, CMD4.
- [15] K Kieu, R J Jones, N Peyghambarian. High power femtosecond source near 1 micron based on an all-fiber Er-doped mode-locked laser[J]. Opt. Express, 2010, 18(20): 21350-21355.
- [16] S Hädrich, J Rothhardt, T Eidam, et al. High-average power second harmonic generation of femtosecond fiber lasers [C]//SPIE, 2011:7914.
- [17] J Lhermite, G Machinet, C Lecaplain, et al. 500 nJ mode-locked fiber laser at 976 nm[C]//OSA/CLEO, 2011, CMS1.
- [18] Bai Nie, D Pestov, F W Wise, et al. Generation of 42-fs and 10-nJ pulse from a fiber laser with self-similar evolution in the gain segment[J]. Opt. Express, 2011, 19(13): 12074-12080.

(下转第12页)

如果将现有的理论扩展到一般的视频场景对象,可以极大扩展虚实光照融合技术的应用范围,并对增强现实场景建模,解决虚实结合场景逼真性准确性问题起到促进的作用。

## 参考文献

- [1] 赵沁平. 虚拟现实综述 [J]. 中国科学 F 辑: 信息科学, 2009, 39(1): 2-46.
- [2] 陈小武. 协同式增强现实的一致三维空间模型描述, 华中科技大学学报, 2005(12).
- [3] WEI Zhou, Chandra Kambhmettu. A unified framework for scene illuminant estimation[J]. Image and Vision Computing, 2008, 26(3): 415-429.
- [4] Mikkel Sandberg Andersen, Tommy Jensen, Claus B Madsen. Estimation of dynamic light changes in outdoor scenes without the use of calibration objects. International Conference on Pattern Recognition, 2006.
- [5] Jean-François Lalonde, Srinivasa G Narasimhan, Alexei A Efros. What do the sun and sky tell us about the camera[J]. International Journal of Computer Vision, 2010: 24-51.
- [6] Jean-François Lalonde, Alexei A Efros, Srinivasa G Narasimhan. Estimating natural illumination from a single outdoor image[J]. International Conference on Computer Vision, 2009.
- [7] Jaroslav Krivanek, James A Ferwerda, Kavita Bala. Effects of global illumination approximations on material appearance [J]. ACM Transactions on Graphics (Proceedings of ACM SIGGRAPH 2010), 2010, 29(4).
- [8] Paul Debevec. Image-based lighting. ACM Transactions on Graphics (Proceedings of ACM SIGGRAPH 2006 Courses), 2006.
- [9] Paul E Debevec, Jitendra Malik Zongker. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs[J]. ACM Transactions on Graphics (Proceedings of ACM SIGGRAPH 2008 Classes), 2008.
- [10] Paul Debevec. Rendering synthetic objects into real scenes: bridging traditional and image-based graphics with global illumination[J]. ACM Transactions on Graphics (Proceedings of ACM SIGGRAPH 2008 Classes), 2008.
- [11] Tommy Jensen Mikkell, Sandberg Andersen, Claus, et al. Real-time image based lighting for outdoor augmented reality under dynamically changing illumination conditions[J]. International Conference on Computer Graphics Theory and Applications, 2006: 364-371.
- [12] Claus B Madsen, Rune Laursen. A scalable GPU-based approach to shading and shadowing for shotorealistic real-time augmented reality[J]. International Conference on Graphics Theory and Applications, 2007: 252-261.
- [13] 周雅, 晏磊, 赵虎. 增强现实系统光照模型建立研究[J]. 中国图形图像学报, 2004, 9(8).
- [14] Julien Pilet, Andreas Geiger, Pascal Lagger, et al. An all-in-one solution to geometric and photometric calibration[J]. The 5th International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2006), 2006: 69-78.
- [15] Jean-Francois Lalonde, Alexei A Efros, Srinivasa G Narasimhan. Webcam clip art: appearance and illuminant transfer from time-lapse sequences [J]. ACM Transactions on Graphics (Proceedings of ACM SIGGRAPH Asia 2009), 2009, 28(5).
- [16] LIU Yan-li, QIN Xue-ying, XU Song-hua. Light Source Estimation of Outdoor Scenes for Mixed Reality[J]. The Visual Computer, 2009: 637-646.

(上接第5页)

- [19] H Liu, K Kieu, Lefrancois, et al. Tm fiber laser mode-locked at large normal dispersion CLEO 2011[J]. Laser Science to Photonic Applications, 2011.
- [20] Frithjof Haxsen, Dieter Wandt, Uwe Morgner, et al. Monotonically chirped pulse evolution in an ultra short pulse thulium-doped fiber laser[J]. Opt. Lett., 2012, 37(6): 1014-1016.
- [21] A Chamorovskiy, A V Marakulin, S Ranta, et al. Femtosecond mode-locked holmium fiber pumped by semiconductor disk laser[J]. Opt. Lett., 2012, 37(9): 1448-1550.
- [22] Y Jeong, J Nilsson, J K Sahu. Single-frequency, single-mode, plane-polarized ytterbium-doped fiber master oscillator power amplifier source with 264 W of output power[J]. Optics Letters, 2005, 30(5): 459-461.
- [23] C Wirth, O Schmidt, I Tsybin, et al. 2 kW incoherent beam combining of four narrow-linewidth photonic crystal fiber amplifiers[J]. Optics Express, 2009, 17(3): 1178-1183.
- [24] 乔学光, 杨和钱, 贾振安, 等. 光纤激光器的研究进展与展望[J]. 光机电信息, 2006(9): 45-50.