

Yb:KGW 飞秒激光器研究进展

李 丽^{1,2,3} 樊仲维^{1,3} 余 锦¹ 牛 岗³ 滕崧寒^{1,2,3} 唐熊忻^{1,2,3}

}	¹ 中国科学院光电研究院, 北京 100094
	² 中国科学院大学, 北京 100049
	³ 北京国科世纪激光技术有限公司, 北京 100192

摘要 飞秒激光在强场激光物理、超快化学动力学、微结构材料科学和生命科学等不同领域有着广泛应用。Yb:KGW 晶体以其优异的综合性能适于作为飞秒激光器的增益介质,因此研究 Yb:KGW 飞秒激光器具有重要意义。自 2000 年瑞士研制出世界第一台被动锁模 Yb:KGW 飞秒激光器以来,国内外多家机构开展了 Yb:KGW 飞秒激光器的研究。主要报道了国内外 Yb:KGW 飞秒激光器的最新进展。目前能实现的最短脉冲宽度是 100 fs,与理论值的 47 fs 还有一定的差距。

关键词 激光器;飞秒激光器;Yb:KGW 晶体;孤子锁模;色散补偿

中图分类号 TN248.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.110004

Research Progress of Yb:KGW Femtosecond Laser

Li Li^{1,2,3} Fan Zhongwei^{1,3} Yu Jin¹ Niu Gang³ Teng Songhan^{1,2,3} Tang Xiongxin^{1,2,3}

}	¹ Academy of Opto-Electronic, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China
	² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
	³ Beijing Guoke Laser Technology Co. Ltd., Beijing 100192, China

Abstract Femtosecond laser has many applications in different areas, such as the strong-field laser physics, ultrafast chemical kinetics, the microstructure of materials science, and life science. The Yb:KGW crystal with its excellent performance is so suitable to be femtosecond laser gain media that the research of Yb:KGW femtosecond laser is of great significance. Since Switzerland-developed the world's first passively mode-locked Yb:KGW femtosecond laser in 2000, there have been a number of domestic and foreign institutions dedicating to the research of Yb:KGW femtosecond laser. The latest progress of the Yb:KGW femtosecond laser at home and abroad is reported. The shortest pulse width is 100 fs. There's still a big gap between experimental value and the theoretical value of 47 fs.

Key words lasers; femtosecond laser; Yb:KGW crystal; soliton mode-lock; dispersion compensation

OCIS codes 140.5680; 160.3220; 250.5530; 230.2035

1 引 言

飞秒激光具有极短的脉冲宽度、极高的峰值功率和极宽的光谱范围,在强场激光物理、超快化学动力学、微结构材料科学和生命科学等不同领域有着广泛应用。利用飞秒激光的高峰值功率开展的受控核聚变“快点火”与“超快点火”,可能是解决能源危机、开辟清洁新能源的有效途径^[1]。飞秒激光的超快特性在时间分辨光谱学和超快抽运-探测实验中提供了飞秒量级的分辨率,能够全面准确地记录化学反应的动力学过程等瞬态现象^[2]。飞秒激光微加工加工精度高、热效应小、损伤阈值低并且能够实现真正的三维微结构加工^[3],因此飞秒激光可实现三维光存储器和光子晶体结构透明介质的微加工^[4]。在生物学方面,科学家们正在利用飞秒激光技术进行纳米手术、活细胞操纵、基因转染和染色体切割等^[5,6]。

收稿日期: 2012-07-12; **收到修改稿日期**: 2012-08-14; **网络出版日期**: 2012-10-18

基金项目: 中国科学院科研装备研制项目(Y2010008)和中国科学院光电研究院创新基金(AOE2009-002、Y12413A01Y)资助课题。

作者简介: 李 丽(1987—),女,硕士研究生,主要从事全固态激光器、超快激光等方面的研究。E-mail: milly@aoe.ac.cn

导师简介: 樊仲维(1965—),男,研究员,主要从事衍射光学理论与器件、光学仪器设计与研制等方面的研究。

E-mail: fanzw002@163.com

1981年,美国的 Fork 等^[7]在染料激光器中采用碰撞锁模方式获得了脉冲宽度小于 100 fs 的激光脉冲,标志着飞秒激光时代的来临。染料激光器采用碰撞锁模方法,管理复杂,非专业人员使用有一定困难。随后,新的宽增益带宽工作物质和非线性被动锁模技术的出现,加速了锁模固体激光器的发展。英国圣安德鲁大学的 Spence 等^[8]于 1991 年实现了钛宝石自锁模激光运转,标志着飞秒激光器进入固体化阶段。飞秒光脉冲不仅输出功率提高了近两个数量级,而且在可调谐范围和脉冲宽度方面也有新的突破。尽管钛宝石飞秒激光器依然是目前技术最成熟、应用领域最广泛的飞秒激光器,但其吸收带在蓝绿波段,对抽运光源要求苛刻,只能用 Ar⁺激光或掺 Nd³⁺的固体激光倍频绿光来抽运,不能用激光二极管(LD)直接抽运,结构庞大,维护费用高,限制了其应用和发展。

而掺杂 Nd^[9]、Yb^[10]、Er^[11]、Tm^[12]、Ho^[13]等稀土元素的固体激光材料,由于增益离子能级结构的特点,可以被 LD 直接抽运,转化效率高,系统成本低。其中掺杂 Yb³⁺的激光晶体可产生小于 100 fs 的激光脉冲,有着显著的优点。近年来,基于此类介质的超快激光光源研究成为激光领域研究的热点之一,并取得了许多重要的进展。本文将针对其中发展迅速、应用广泛的 Yb:KGW 飞秒激光器展开研究。

2 Yb:KGW 晶体特性

Yb:KGW,即掺铽钨酸钪钾[Yb:KGd(WO₄)₂],是由 Yb³⁺取代部分的 Gd³⁺在 KGW 晶体中的位置,可实现高浓度掺杂。

KGW 晶体属单斜晶系,空间群为 C2/c,单胞晶格参数为: $a=10.652\text{\AA}$, $b=10.374\text{\AA}$, $c=7.582\text{\AA}$, $\beta=130.80^\circ$ ($V=634.2\text{\AA}^3$), $1\text{\AA}=0.1\text{ nm}$,其线性光学性质由 2/m 点群描述,为双轴晶体^[14]。

Yb³⁺是能级结构最简单的稀土激活离子,其结构能级图如图 1 所示^[15],可看出其仅有一个基态²F_{7/2}和一个激发态²F_{5/2},可以避免激发态吸收、上转换和弛豫振荡等激光能量损耗,因此光转换效率高,荧光寿命长。在晶格场作用下,能级发生分裂,激光跃迁最有可能发生在上能级²F_{5/2}最低的斯塔克能级和下能级²F_{7/2}的子能级之间,形成准三能级的激光运行机制。Yb³⁺吸收带在 0.9~1.1 μm 内能与 InGaAs LD 抽运源有效耦合,且吸收线宽较宽;抽运波长与激光输出波长非常接近,量子效率高;可实现高浓度 Yb³⁺离子的掺杂并且不会出现浓度猝灭现象,增益介质可做成微片;由于抽运能级接近上层能级,由无辐射弛豫引起的材料中的热负荷比较低;荧光寿命长,有利于储能。

根据国内外最新研究报道结果,常见掺 Yb³⁺激光晶体的主要特性如表 1^[16]所列,可以看出在掺 Yb³⁺激光晶体中 Yb:KGW 的综合性能较为优异,适于用作固态飞秒激光器的增益介质。

表 1 常见掺 Yb³⁺激光晶体的主要特性

Table 1 Main characteristics of the common Yb³⁺-doped laser crystal

Host crystal	YAG	YCOB	KYW	KGW	YAB	GdCOB	BOYS
Emission bandwidth /nm	9	44	24	25	20	44	60
Radiation cross-section /(10^{-20} cm^2)	2.2	0.33	3	2.8	0.8	0.35	0.2
Absorption bandwidth /nm	18/3	3	3.5	3.5	22	3	6
Pump wavelength /nm	941/968	976	981	981	976	976	975
Fluorescence lifetime /ms	0.95	2.28	0.7	0.75	0.68	2.6	1.1
Thermal conductivity /[W/(m·K)]	11	2.1	3.3	3.3	3	2.1	1.8
Theoretical pulse duration /fs	118	—	50	47	—	27	19
Experimental pulse duration /fs	100	35	65	100	87	90	69
Ref.	17	18	19	20	21	22	23

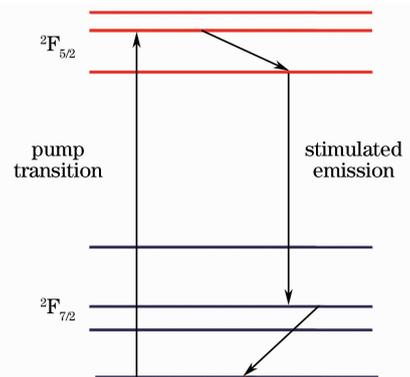


图 1 Yb³⁺准三能级结构示意图

Fig. 1 Quasi-three-level structure diagram of Yb³⁺

Yb:KGW(掺 Yb³⁺ 的原子数分数为 5%)的吸收和发射光谱如图 2 所示^[24]。Yb:KGW 晶体主要吸收峰位于 981 nm,在 940 nm 处有一个相对较小的增益峰。目前国际上对于 Yb:KGW 激光器的研究主要采用 981 nm 波长抽运,并取得了令人瞩目的进展。Yb:KGW 晶体发射光谱中有一个与吸收峰 981 nm 重合的强发射峰,另外在 1002 nm 和 1025 nm 附近还有发射峰,位于 1025 nm 附近的发射峰有很宽的带宽,适合飞秒激光脉冲的产生。

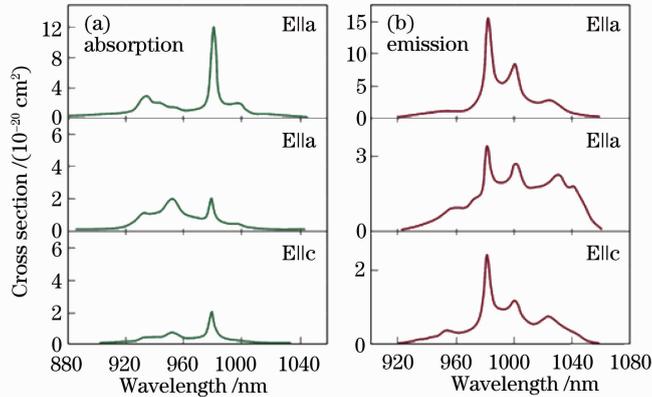


图 2 Yb:KGW 晶体沿折射率主轴方向的偏振(a)吸收谱和(b)发射谱

Fig. 2 Polarized (a) absorption spectra and (b) emission spectra along the refractive-index principal axis of Yb:KGW crystal

3 Yb:KGW 飞秒激光器研究现状

Yb:KGW 飞秒激光器多采用半导体可饱和吸收镜(SESAM)或可饱和布拉格反射镜(SBR)启动的孤子锁模机制。半导体器件仅仅是触发了锁模机制,随后增益介质中的自相位调制效应(SPM)与腔内负群延迟色散(GDD)的平衡迅速产生孤子,形成孤子锁模。飞秒激光产生的另一关键技术是色散补偿技术。常用的色散补偿元件有棱镜对、啁啾镜和 Gires-Tournois 反射镜(GTI)。目前 Yb:KGW 飞秒激光器的研究中普遍采用的是棱镜对或 GTI 镜。

2000 年,瑞士的 Brunner 等^[25]报道了世界上第一台被动锁模 Yb:KGW 飞秒激光器,在中心波长 1037 nm 处获得了脉冲宽度 176 fs、平均功率 1.1 W、峰值功率高达 64 kW 的飞秒脉冲。该激光器采用两个输出功率 3 W、中心波长 981 nm 的 LD 双端抽运;SESAM 启动孤子锁模机制;一对 SF10 棱镜进行色散补偿。采用棱镜对进行色散补偿具有构成简单、使用灵活、损耗小、色散可调节等优点,但棱镜对占用空间大,增益介质和棱镜材料本身的高阶色散未得到充分补偿,无法使脉冲进一步压缩。该激光器采用标准的“ Δ 型”腔,如图 3 所示。采用这一结构实现的最小脉冲宽度为 112 fs。

随后,国际上兴起 Yb:KGW 飞秒激光器研究的热潮。

2002 年,法国的 Courjaud 等^[26]搭建的 Yb:KGW 飞秒激光器实现了脉冲宽度 150 fs、平均功率 1.2 W、峰值功率 120 kW 的激光输出。与 Brunner 等^[25]不同的是,采用“Z 型”腔型,色散补偿元件为 GTI 镜对。如前所述棱镜对存在固有的缺点,与之相比 GTI 镜对能够有效补偿二阶色散,不会引入更高阶色散,且使腔型设计更加灵活紧凑,成为飞秒激光器的首选色散补偿器件。但棱镜对色散精确可调的优点是其无法比拟的,因此很多飞秒激光器仍然选用棱镜对进行色散补偿。

2004 年,德国的 Paunescu 等^[20]研制出脉冲宽度 100 fs 的 Yb:KGW 飞秒激光器,是迄今为止 Yb:KGW

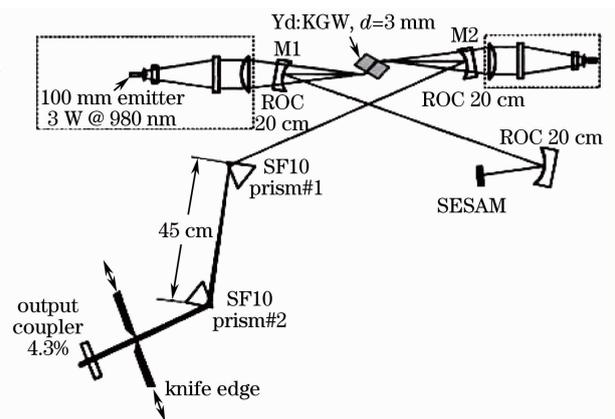


图 3 世界首台被动锁模 Yb:KGW 飞秒激光器的实验装置

Fig. 3 Experimental device of the world's first passively mode-locked Yb:KGW femtosecond laser

飞秒激光器实现的最小脉冲宽度,但该激光器平均功率仅有 126 mW,未能实现综合性能的优化输出。

到 2006 年,瑞典、美国、加拿大等国有多家单位投入到 Yb:KGW 飞秒激光器的研发中。瑞典的皇家技术中心物理部采用 50 W 高功率二极管巴条对 3 mm×3 mm×3 mm 掺 Yb³⁺ 的原子数分数为 5% 的 Yb:KGW 激光晶体抽运,获得了 12.4 W 的连续输出^[27],虽然他们并未进行锁模运转的研究,但其对于有无光纤耦合的抽运方式的对比研究以及激光器输出功率的限制因素的研究具有重要意义。加拿大光学中心的 Major 等^[28,29]先后发表了两篇有关 Yb:KGW 飞秒激光器的文章:分别获得了脉冲宽度 200 fs、平均功率 150 mW 和脉冲宽度 296 fs、平均功率 3.7 W 的飞秒激光脉冲。美国环境分子科学实验室的 Holtom^[30]首次采用偏振耦合二极管纵向抽运方式对 10 mm×10 mm×1.4 mm 掺 Yb³⁺ 的原子数分数为 1.5% 的 Yb:KGW 激光晶体进行抽运,获得了平均功率高达 10 W 的 296 fs 激光脉冲,是迄今为止被动锁模 Yb:KGW 飞秒激光器获得的最大平均功率输出。

2008 年,美国的 Berger 等^[31]在对抽运源的设计时引进热透镜耦合技术以补偿象散,采用非偏振耦合的 LD 抽运 3 mm×3 mm×10 mm 的 Yb:KGW 激光晶体,获得平均功率 3.5 W 的 250 fs 脉冲。当脉冲宽度为 347 fs 时,平均功率可达 5 W。该激光器系统采用“Z 型”腔设计,SBR 启动的孤子锁模机制,并用一对曲率半径为 500 mm 的聚焦增益镜进行色散补偿。

2009 年,德国的 Hoos 等^[32]用 20 W 大模场 LD 抽运 Yb:KGW 晶体获得了脉冲宽度 161 fs,平均功率 5 W 的飞秒激光,是目前综合脉冲宽度、平均功率、光-光转换效率等因素的最优化输出。

2010 年,瑞士和德国共同进行了吉赫兹高重复频率的 Yb:KGW 飞秒激光器研究^[33]。采用布拉格分布反馈式激光二极管(DBR TDL)抽运 Yb:KGW 晶体,选用“Z 型”腔,SESAM 锁模机制,曲率半径为 50 mm 单

表 2 Yb:KGW 飞秒激光器研究现状一览表

Table 2 Status list of Yb:KGW femtosecond lasers

Year	Author and country	Cavity	Clamping mechanism	Pulse width / fs	Average power / W	Peak power / kW	Repetition rate / MHz	Central wavelength / nm	Dispersion compensation	Ref.
2000	F. Brunner Switzerland	Δ	SESAM	176	1.1	62	86.4	1037	SF10	25
2002	Antoine Courjaud France	Z	SESAM	150	1.2	120	47	1032	GTI	26
2004	G. Paunescu Germany	Δ	SESAM	100	0.126	11.7	108	1037.4	SF10	20
2006	Arkady Major			200	0.150	50	15	1040	SF10	28
	Canada	Δ	SESAM	296	3.7	205	61	1031	GTI	29
	Gary R. Holtom America	Δ	SESAM	290	10	689	45	1039	Dichroic mirror	30
2008	Joel A. Berger America	Z	SBR	250	3.5	220	63	1046	A pair of ROC; 500 mm lenses	31
2009	F. Hoos Germany	Z	SESAM	161	5	705	44	1025	GTI	32
2010	Selina Pekarek Switzerland & Germany	Z	SESAM	281	1.1	3.9	1000	1041	A single dispersive mirror (ROC; 50 mm)	33
2011	Li Jinfeng China	Z	SESAM	350	2.4	129	53	1040	GTI or SF10	34

分散镜进行色散补偿。最终获得了重复频率高达 1 GHz、脉冲宽度 281 fs、平均功率 1.1 W 的输出。通过谐波锁模重复频率可提高到 4 GHz,此时脉冲宽度 290 fs、平均功率 900 mW。

直到 2011 年,我国才有 Yb:KGW 飞秒激光器的相关报道。Li 等^[34]采用 12.5 W 的 LD(中心波长 978 nm)对 3 mm 长掺 Yb³⁺的原子数分数为 5%的 Yb:KGW 晶体进行抽运,采用“Z 型”腔结构,SESAM 锁模机制,分别研究了 SF10 棱镜对和 GTI 镜对两种色散补偿方式,最终获得脉冲宽度 350 fs、平均功率 2.4 W 的激光输出。

上述国内外发展现状相关文献如表 2 所示。

4 结 论

飞秒激光器对现代科学技术的发展具有重要意义,Yb:KGW 晶体优异的综合性能使其非常适合作为飞秒激光器的增益介质,通过分析自 2000 年瑞士研制出世界首台被动锁模 Yb:KGW 飞秒激光器至今国内外 Yb:KGW 飞秒激光器的研究进展情况,得到如下结论:

1) 目前主要有瑞士、德国、法国、加拿大、美国及中国在进行 Yb:KGW 激光器的研究,多采用中心波长 980 nm 左右的 LD 抽运,腔型以“Z 型”、“ Δ 型”为主,锁模机制主要为半导体器件启动的孤子锁模,色散补偿装置多采用棱镜对或 GTI 镜对。

2) 从 2000 年至今国内外对 Yb:KGW 飞秒激光器的研究获得了很多成果,但目前能实现的最短脉冲宽度是 100 fs 与理论值的 47 fs 还有一定的差距,且平均功率有待提高。

参 考 文 献

- Bai Guang. The application of femtosecond laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2002, **39**(3): 41~44
白光. 飞秒激光的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2002, **39**(3): 41~44
- Hiomichi Niikura, F. Légaré, R. Hasbani *et al.*. Sub-laser-cycle electron pulses for probing molecular dynamics[J]. *Nature*, 2002, **417**(6892): 917~922
- He Fei, Cheng Ya. Femtosecond laser micromachining: frontier in laser precision micromachining[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5): 595~622
何飞,程亚. 飞秒激光微加工:激光精密加工领域的新前沿[J]. *中国激光*, 2007, **34**(5): 595~622
- S. Juodkakis, S. Matsuo, H. Misawa *et al.*. Application of femtosecond laser pulses for microfabrication of transparent media[J]. *Applied Surface Science*, 2002, **197-198**: 705~709
- Wang Li, Qiu Jianrong. Applications of femtosecond laser in biology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(1): 011701
王丽,邱建荣. 飞秒激光在生物学领域的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(1): 011701
- Di Jianke, Zhou Ming, Yang Haifeng *et al.*. Principles and applications of femtosecond laser in the cell nanosurgery[J]. *Acta Laser Biology Sinica*, 2008, **17**(2): 270~277
狄建科,周明,杨海峰等. 飞秒激光与生物细胞作用机理及应用[J]. *激光生物学报*, 2008, **17**(2): 270~277
- R. L. Fork, B. I. Greene, C. V. Shank. Generation of optical pulses shorter than 0.1 ps by colliding pulse mode locking [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1981, **38**(9): 671~672
- D. E. Spence, P. N. Kean, W. Sibbett. 60-fsec pulse generation from a self-mode-locked Ti:sapphire laser[J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(1): 42~44
- T. Y. Fan, R. L. Byer. Modeling and CW operation of a quasi-three-level 946 nm Nd:YAG laser[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1987, **QE-23**: 605~612
- S. V. Marchese, C. R. Baer, A. G. Engqvist *et al.*. Femtosecond thin disk laser oscillator with pulse energy beyond the 10-microjoule level[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(9): 6397~6407
- P. A. Burns, J. M. Dawes, P. Dekker *et al.*. Optimization of Er, Yb:YCOB for CW laser operation[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2004, **40**(11): 1575~1582
- R. C. Stoneman, L. Esterowitz. Efficient, broadly tunable, laser-pumped Tm:YAG and Tm:YSGG CW lasers[J]. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(9): 486~488
- P. A. Budni, L. A. Pomeranz, M. L. Lemons *et al.*. Efficient mid-infrared laser using 1.9- μ m-pumped Ho:YAG and ZnGeP₂ optical parametric oscillators[J]. *JOSA B*, 2000, **17**(5): 723~728

- 14 M. C. Pujol, M. Rico, R. Solé *et al.*. Crystalline structure and optical spectroscopy of Er^{3+} -doped $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ single crystals[J]. *Appl. Phys. B*, 1999, **68**(2): 187~197
- 15 F. D. Patel, E. C. Honea, J. Speth *et al.*. Laser demonstration of $\text{Yb}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (YbAG) and materials properties of highly doped Yb:YAG[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2001, **37**(1): 135~144
- 16 Lu Xinchao, Chai Lu, Zhang Weili *et al.*. New Yb^{3+} -doped laser crystal to produce femtosecond laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2003, **40**(3): 11~15
路鑫超, 柴路, 张伟力等. 用于产生飞秒激光的新型掺 Yb^{3+} 激光晶体[J]. *激光与光电子学进展*, 2003, **40**(3): 11~15
- 17 S. Uemura, K. Torizuka. Kerr-Lens mode-locked diode-pumped Yb:YAG laser with the transverse mode passively stabilized[J]. *Appl. Phys. Express*, 2008. 012007
- 18 A. Yoshida, A. Schmidt, V. Petrov *et al.*. Diode-pumped mode-locked Yb:YCOB laser generating 35 fs pulses[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(22): 4425~4427
- 19 A. Schmidt, S. Rivier, V. Petrov *et al.*. 65 fs Diode-pumped diffusion-bonded Yb:KY(WO₄)₂/KY(WO₄)₂ laser[J]. *Electron. Lett.*, 2010, **46**(9): 641~643
- 20 G. Paunescu, J. Hen, R. Sauerbrey. 100 fs Diode-pumped Yb:KGW mode-locked laser[J]. *Appl. Phys. B*, 2004, **79**(5): 555~558
- 21 V. Petrov, X. Mateos, A. Schmidt *et al.*. Passive mode-locking of acentric Yb-doped borate crystals[J]. *Laser Physics*, 2010, **20**(5): 1085~1090
- 22 F. Druon, F. Balembois, P. Georges *et al.*. Generation of 90-fs pulses from a mode-locked diode-pumped Yb^{3+} :Ca GdO(BO₃)₃ laser[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(6): 423~425
- 23 F. Druon, S. Chénais, P. Raybaut *et al.*. Diode-pumped Yb:Sr₃Y(BO₃)₃ femtosecond laser[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(3): 197~199
- 24 S. Biswal, S. P. O' Connor, S. R. Bowman. Thermo-optical parameters measured in ytterbium-doped potassium gadolinium tungstate[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(15): 3093~3097
- 25 F. Brunner, G. J. Spühler, J. Aus der Au *et al.*. Diode-pumped femtosecond Yb:KGd(WO₄)₂ laser with 1.1-W average power[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(15): 1119~1121
- 26 A. Courjaud, N. Deguil, F. Salin. High-power diode pumped Yb:KGW ultrafast laser[C]. CLEO, 2002. 501~502
- 27 J. E. Hellstrom, S. Bjurshagen, V. Pasiskevicius *et al.*. Efficient Yb:KGW lasers end-pumped by high-power diode bars[J]. *Appl. Phys. B*, 2006, **83**(2): 235~239
- 28 A. Major, V. Barzda. An extended cavity diode-pumped femtosecond Yb:KGW laser for applications in optical DNA sensor technology based on fluorescence lifetime measurements[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(12): 5285~5294
- 29 A. Major, R. Cisek, Virginijus Barzda. Femtosecond YbKGd(WO₄)₂ laser oscillator pumped by a high power fiber-coupled diode laser module[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(25): 12163~12168
- 30 G. R. Holtom. Mode-locked YbKGW laser longitudinally pumped by polarization-coupled diode bars[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(18): 2719~2721
- 31 J. A. Berger, M. J. Greco, W. A. Schroeder. High-power femtosecond thermal-lens-shaped Yb:KGW oscillator[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(12): 8629~8640
- 32 F. Hoos, T. P. Meyrath, S. Li *et al.*. Femtosecond 5-W Yb:KGW slab laser oscillator pumped by a single broad-area diode and its application[J]. *Appl. Phys. B*, 2009, **96**(1): 5~10
- 33 S. Pekarek, C. Fiebig, Max Christoph Stumpf *et al.*. Diode-pumped gigahertz femtosecond Yb:KGW laser with a peak power of 3.9 kW[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(26): 16320~16326
- 34 Li Jinfeng, Liang Xiaoyan, He Jinping *et al.*. Stable efficient diode-pumped femtosecond Yb:KGW laser through optimization of energy density on SESAM[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2011, **9**(7): 071406