

文章编号: 0258-7025(2009)07-1826-05

深紫外固体激光系统

林 彦 霍玉晶 何淑芳

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘要 报道了一种利用非线性光学频率变换技术生成深紫外激光的固体激光系统。此系统采用基于 CLBO 晶体和频的频率变换方案,参与和频过程的两路激光分别是一台全固态声光调 Q Nd:YVO₄ 激光器输出的 1064 nm 近红外激光和一台灯抽运电光调 Q 倍频 Nd:YAG 激光器抽运的钛宝石激光器输出的三倍频 238.7 nm 紫外激光。对系统中的调 Q 倍频 Nd:YAG 激光器、钛宝石激光器、BBO 三倍频模块、调 Q Nd:YVO₄ 激光器以及 CLBO 和频模块进行了详细描述。最后,在实验中获得了最大功率 217 μW,重复频率 10 Hz 的 195 nm 深紫外激光输出。

关键词 激光器;深紫外激光;固体激光器;CLBO 晶体;和频

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093607.1826

Deep Ultraviolet Solid-State Laser System

Lin Yan Huo Yujing He Shufang

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract A deep ultraviolet solid-state laser system using nonlinear optical frequency conversion technique, which is based on sum-frequency generation in a CLBO crystal is reported. The two beams involved in the sum-frequency generation are 1064 nm from an all-solid-state acoustic-optic Q-switched Nd:YVO₄ laser and 238.7 nm from a third-harmonic generation of a Ti:sapphire laser pumped by a lamp-pumped electronic-optic Q-switched frequency-doubled Nd:YAG laser. The Q-switched frequency-doubled Nd:YAG laser, Ti:sapphire laser, BBO third-harmonic generator, Q-switched Nd:YVO₄ laser and CLBO sum-frequency generator in the system are described in detail. Stable 195 nm deep ultraviolet laser with maximum output power of 217 μW at 10 Hz is achieved in experiment.

Key words lasers; deep ultraviolet laser; solid-state laser; CLBO crystal; sum-frequency generation

1 引 言

深紫外相干光源在激光精密加工、信息技术、激光医疗、集成电路制造、科学研究等领域都有重要的应用^[1,2]。目前主流的深紫外相干光源主要是准分子激光器^[3,4]。准分子激光器输出的光束质量差、线宽大、波长不可调,而且设备庞大、操作不便,最大的缺点是工作介质是有毒气体,不利于安全和环保^[5],这些缺点使其应用受到很大限制。与准分子激光器相比,固体激光器具有重复频率高、光束质量好、相干性好、结构紧凑、操作方便、寿命长等优点。

以高功率可见/近红外固体激光器为基础,利用深紫外非线性光学晶体进行光学频率变换是获得深紫外相干光源的另一种有效途径。发展固体深紫外相干光源是国际激光领域近期研究的一个热点^[6]。

通过光学频率变换获得深紫外激光,最关键的是深紫外非线性光学晶体。CLBO 晶体^[7,8]透光波长下限低,双折射可以满足深紫外波段和频相位匹配的要求,非线性系数大,抗损伤阈值高,容易生长出大尺寸晶体,是目前可以实用的性能最优的深紫外非线性光学晶体^[9~15]。本文介绍了一种基于

收稿日期: 2009-04-03; 收到修改稿日期: 2009-04-22

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50132010)资助课题。

作者简介: 林彦(1981—),女,博士研究生,主要从事固体激光器方面的研究。E-mail: linyan01@eyou.com

导师简介: 霍玉晶(1946—),男,教授,博士生导师,主要从事固体激光与光电子技术等方面的研究。

E-mail: hyj-dee@tsinghua.edu.cn

CLBO 晶体和频技术的深紫外固体激光系统,对系统中涉及的近红外固体激光器和多级光学频率变换模块进行了详细说明,并给出了系统的实验结果。

2 深紫外固体激光系统的构成

深紫外固体激光系统由倍频 Nd:YAG 激光器、可调谐钛宝石激光器、三倍频模块、近红外激光器以及和频模块构成,如图 1 所示。

2.1 倍频 Nd:YAG 激光器

用调 Q 倍频 Nd:YAG 激光器抽运钛宝石激光器可以获得很高的增益。系统中的倍频 Nd:YAG 激光器结构如图 2 所示。这台激光器采用脉冲氙灯侧面抽运,由振荡和放大两级构成。两级均采用了中国科学院安徽光学精密机械研究所提供的抽运组件。包括脉冲氙灯和 Nd:YAG 晶体棒两部分,封装在由合肥星月夜光技术应用研究所研制的 F4 型固体激光抽运腔内。整个抽运组件由流动的冷却水提供冷却,以保证激光器工作的稳定性。振荡级 Nd:YAG 尺寸为 $\phi 6 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$,放大级 Nd:YAG 尺寸为 $\phi 7 \text{ mm} \times 107 \text{ mm}$ 。两根 Nd:YAG 晶体棒的通光端面都镀有对 1064 nm 的增透膜。反射镜 M1 和 M2 组成激光谐振腔。其中,为了补偿热透镜效应,M1 选用的是曲率半径为 3 m 的凸面镜,对 1064 nm 基频光全反射;M2 是平面镜,对 1064 nm 基频光的反射率为 20%。这种腔型设计可以使腔内振荡模体积大,抽运效率高。谐振腔内除工作介质 Nd:YAG 晶体棒外,还有一个布儒斯特片和一个 KD*P 电光 Q 开关。KD*P 晶体作为电光 Q 开关的材料,具有开关速度快、温度稳定性好、抗损伤阈值高等优点。为了防止高压电场长时间加在 KD*P 晶体上会破坏晶体的性能,Q 开关采用加压工作方式,即:KD*P 上不加高压时,晶体的自然双折射形成光预偏置,线偏振光往返通过 KD*P 后偏振方向旋转 90°,由于布儒斯特片的检偏作用,腔内损耗很大,无法形成激光振荡;KD*P 上加高压时,电光效应产生了 $\pi/2$ 的附加相位延迟,线偏振光往返通过 KD*P 后偏振方向保持不变,能以很小的损耗通过布儒斯特片,从而在腔内形成激光振荡。为了有效利用空间,谐振腔内产生的 1064 nm 基频光由 M2 输出后经两个直角等腰转光棱镜(P1,P2)反射送入放大级,放大后通过一块 $7 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的 KTP 晶体倍频生成 532 nm 绿光。由于采用的是腔外倍频的形式,倍频效率低于 60%,输出光中还残留很多基频光。在 KTP 晶体后用一块滤光片滤除残余

的基频光,以免对后级产生不良影响。振荡级氙灯工作电压 600 V,放大级氙灯工作电压 650 V,调 Q 频率 10 Hz 时,倍频 Nd:YAG 激光器输出平均功率

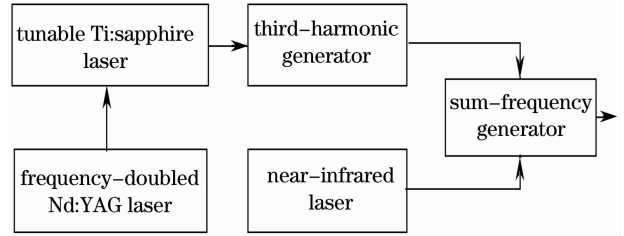


图 1 深紫外固体激光系统的构成框图

Fig. 1 Schematic diagram of deep ultraviolet solid-state laser system

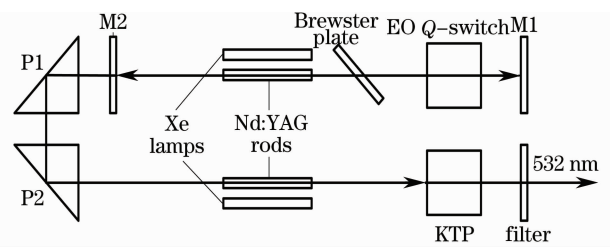


图 2 倍频 Nd:YAG 激光器的结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of frequency-doubled Nd:YAG laser

1 W(单脉冲能量 100 mJ)、脉宽 10 ns 的绿激光。

2.2 可调谐钛宝石激光器

可调谐钛宝石激光器的结构如图 3 所示。调 Q 倍频 Nd:YAG 激光器输出的 532 nm 抽运光经一个倒装望远镜系统(L1)缩束后,由两个直角等腰转光棱镜(P3,P4)反射到激光工作介质钛宝石晶体上。钛宝石晶体尺寸为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,品质因数(FOM)为 100,通光端面镀有对 532 nm 和 716 nm 的增透膜。用组合透镜缩束而不是简单地聚焦,是为了降低入射到钛宝石表面的抽运光的峰值功率密度,以免对钛宝石表面造成损伤,同时增加有效抽运体积。为了避免抽运光直接损伤后端腔镜(M3),采用近轴抽运方式。平面反射镜 M3,M4 组成谐振腔,其中 M3 对 716 nm 光全反射,M4 对 700~800 nm 光反射率为 50%。钛宝石有很宽的荧光发射谱,两个布儒斯特角入射的 ZF6 色散棱镜(DP1,DP2)组成的棱镜对和装在步进马达上的 M3 配合就可以进行波长调谐。在重复频率 10 Hz,单脉冲能量 100 mJ 的绿光抽运作用下,用激光功率计 LP-3A(北京物科光电技术公司)测得输出 716 nm 光的平均功率为 18 mW。

2.3 三倍频模块

图 4 是三倍频模块的结构示意图,其中倍频和

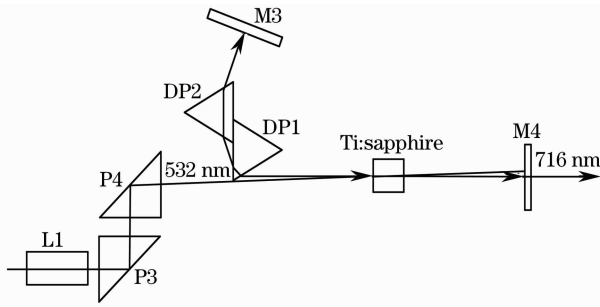


图 3 可调谐钛宝石激光器结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of tunable Ti:sapphire laser

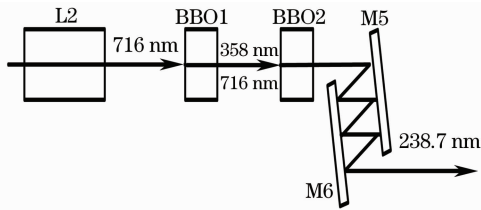


图 4 三倍频模块结构示意图

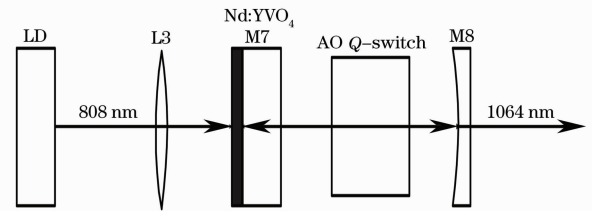
Fig. 4 Schematic diagram of third-harmonic generator

三倍频晶体选用的都是 BBO 晶体。可调谐钛宝石激光器输出的 716 nm 光经透镜组(L2) 聚焦到第一块 BBO 晶体(BBO1, 6 mm×6 mm×6 mm)内进行倍频,满足 II 类相位匹配条件。生成的 358 nm 倍频光和余下的 716 nm 基频光在第二块 BBO 晶体(BBO2, 4 mm×4 mm×7 mm)中和频,得到 238.7 nm 三倍频光,满足 I 类相位匹配条件。为了滤除输出光中残留的 716 nm 基频光和 358 nm 倍频光,采用了平行平面反射镜对(M5, M6)多次反射滤光的方法。M5 和 M6 对 238.7 nm 三倍频光的反射率为 92%,对 716 nm 基频光和 358 nm 倍频光的反射率低于 5%。经过这两个反射镜 4~6 次反射后,输出的 716 nm 基频光和 358 nm 倍频光只剩下不到 6×10^{-6} , 238.7 nm 三倍频光还剩余 60% 以上。在重复频率 10 Hz,单脉冲能量 100 mJ 的绿光抽运作用下,输出的 238.7 nm 激光用激光功率计 LP-3A 测得的平均功率是 0.4 mW。

2.4 近红外激光器

和三倍频模块输出的 238.7 nm 紫外光进行和频的近红外光可以由两种途径得到。第一种途径是直接利用倍频 Nd:YAG 激光器输出光中残留的基频光,经过光延迟线后送入和频模块。这种方法可以实现输入和频模块的两路光脉冲的自动同步。另一种途径是利用另外一台近红外固体激光器(连续/脉冲)的输出。如果用的是脉冲激光器,就需要同步触发电路来实现输入和频模块的两路光脉冲的同

步。这种方法的优点是可以根据需要自由选择用于和频的近红外激光波长。实验中用的是本课题组研制的全固态声光调 Q Nd:YVO₄ 激光器^[16],其结构如图 5 所示。抽运 LD 输出 808 nm 光,经焦距为 3 mm 的非球面透镜 L3 聚焦到激光晶体 Nd:YVO₄ 内。Nd:YVO₄ 的入射端面镀有对 808 nm 高透射、对 1064 nm 全反射的膜层,作为谐振腔的后端镜(M7)。前端腔镜 M8 是凹面镜,对 1064 nm 的透射率为 5%。声光 Q 开关置于激光晶体和 M8 之间。抽运 LD 连续输出最大功率为 3 W,调 Q 工作频率 0~100 kHz 连续可调。实验中,此激光器工作于 30 kHz,输出平均功率 1 W,脉冲宽度 10 ns。用一个同步触发控制电路生成两路调 Q 触发信号,分别控制电光调 Q 倍频 Nd:YAG 激光器和声光调 Q Nd:YVO₄ 激光器输出脉冲的产生时刻。这两路调 Q 触发信号都来源于同一个 555 定时器输出的脉冲串,从而实现了两路光脉冲的同步。

图 5 声光调 Q Nd:YVO₄ 激光器结构示意图Fig. 5 Schematic diagram of acoustic-optic Q-switched Nd:YVO₄ laser

2.5 和频模块

图 6 是和频模块的结构示意图。三倍频模块输出的 238.7 nm 紫外光被平面反射镜 M10, M9 反射后与全固态声光调 Q Nd:YVO₄ 激光器输出的 1064 nm 近红外光合为一束光,再由焦距为 10 cm

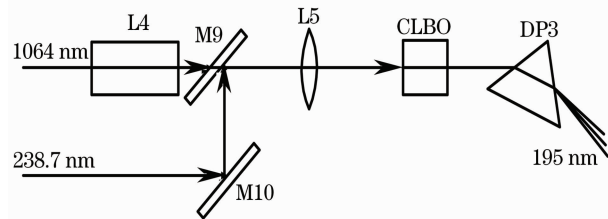


图 6 和频模块结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of sum-frequency generator 的透镜 L5 聚焦到和频晶体 CLBO 内进行和频。M9, M10 都镀有对 238.7 nm 光高反射、对 1064 nm 光高透射的膜。为了减小紫外光的损耗,聚焦透镜 L5 的材料选用紫外级的熔融石英。合光前 1064 nm 光需经透镜组(L4)进行适当的光束变换,使得

1064 nm光和 238.7 nm 光在 CLBO 晶体内能够充分交迭,提高和频转换效率。CLBO 晶体按照理论计算得到相位匹配角 88.3° 切割,尺寸为 $4\text{ mm}\times 4\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ 。CLBO 晶体后用一个色散棱镜 DP3 将和频生成的 195 nm 深紫外光和残余的 238.7 nm 紫外光,1064 nm 近红外光分离。色散棱镜 DP3 用透光波段 $170\sim 7800\text{ nm}$ 的 CaF_2 作为材料,顶角 66.7° 。光束以 195 nm 的布儒斯特角 56.7° 入射,出射的 195 nm 光和 238.7 nm 光的分光角度约 4.4° 。

3 实验结果

用光谱仪(HR2000CG-UV-NIR, Ocean Optics Inc.)对系统中的 716 nm,358 nm,238.7 nm 和 195 nm激光进行测量,得到的光谱图如图 7 所示。

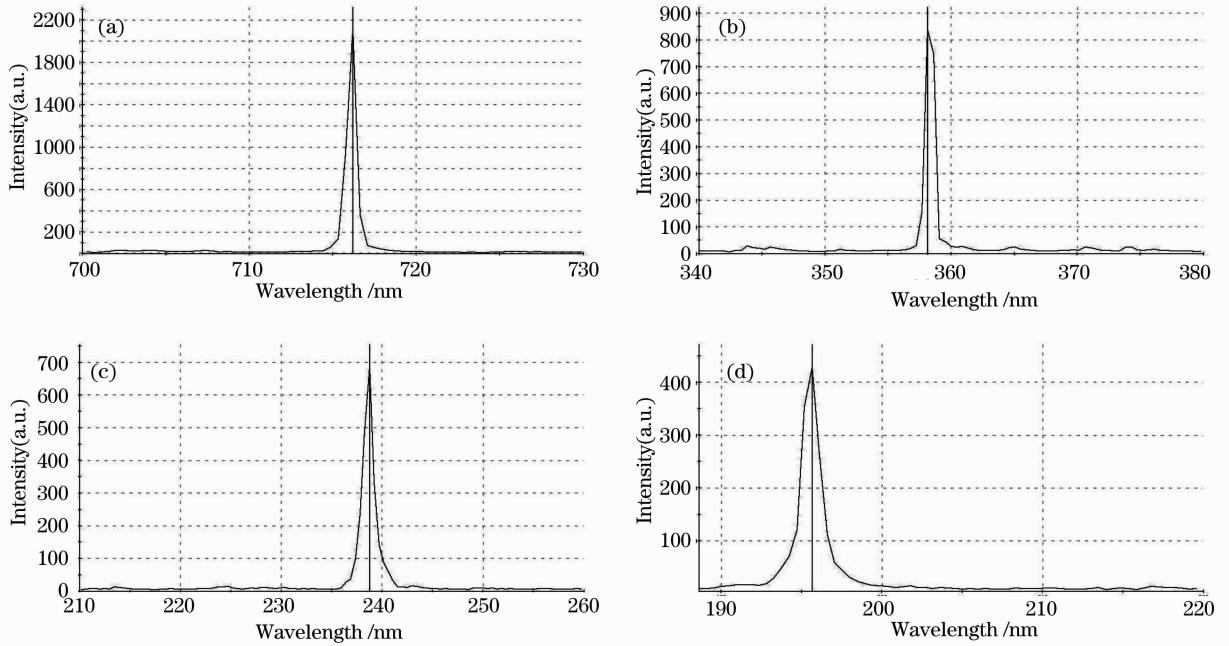


图 7 光谱图。(a) 716 nm; (b) 358 nm; (c) 238.7 nm; (d) 195 nm
Fig.7 Spectra. (a) 716 nm; (b) 358 nm; (c) 238.7 nm; (d) 195 nm

实验中,固定声光调 Q Nd:YVO₄ 激光器工作在 30 kHz,输出平均功率 1 W,改变倍频 Nd:YAG 激光器(调 Q 频率 10 Hz)的输出功率,用激光功率计 LP-3A 测得 195 nm 输出功率曲线如图 8 所示。在 532 nm 抽运功率 1 W 时获得最高输出功率 217 μW 。固定倍频 Nd:YAG 激光器工作在 10 Hz,输出平均功率 1 W,改变声光调 Q Nd:YVO₄ 激光器(调 Q 频率 30 kHz)的输出功率,测得 195 nm 输出功率曲线如图 9 所示。当 1064 nm 光平均功率超过 1 W 时,195 nm 光输出功率反而下降。这是由于 1064 nm 光的光子数比 238.7 nm 光的光子数多,当 1064 nm 光功率超过最佳值后,光能量会通过 1064 nm 和 195 nm 的差频过程流向 238.7 nm,使得输出 195 nm 光功率下降。

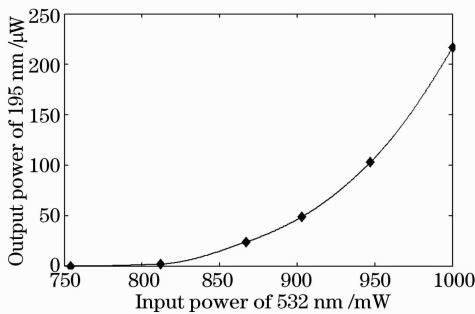


图 8 195 nm 输出功率与 532 nm 抽运功率的关系
Fig.8 Dependence of 195 nm output power on 532 nm input power

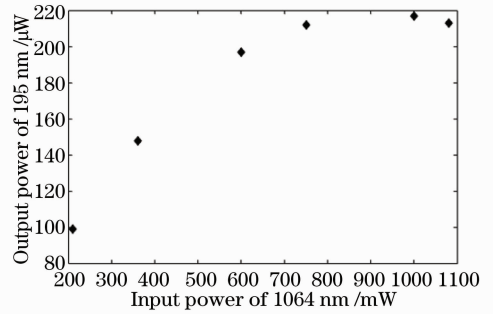


图 9 195 nm 输出功率与 1064 nm 输入功率的关系
Fig.9 Dependence of 195 nm output power on 1064 nm input power

4 结 论

室温下,通过脉冲三倍频钛宝石激光器输出的 238.7 nm 紫外光和全固态声光调 Q Nd:YVO₄ 激光器输出的 1064 nm 近红外光在非线性晶体 CLBO 中进行和频,实现了 195 nm 深紫外激光的稳定输出,获得平均功率 217 μW、重复频率 10 Hz 的 195 nm 深紫外激光。实验中,195 nm 激光的输出功率主要受限于灯抽运电光调 Q 倍频 Nd:YAG 激光器输出的 532 nm 抽运光能量。提高调 Q 倍频 Nd:YAG 激光器的重复频率和单脉冲能量,195 nm 激光的输出功率和转换效率将大幅度提高。

参 考 文 献

- Chen Chuangtian, Liu Lijuan. Deep ultraviolet nonlinear optical crystals and their applications [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2007, **35**(S1): 1~9
陈创天, 刘丽娟. 深紫外非线性光学晶体及其应用[J]. *硅酸盐学报*, 2007, **35**(S1): 1~9
- Chen Chuangtian, Lin Zheshuai. Recent development for UV and deep-UV nonlinear optical crystals[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2004, **33**(4): 455~464
- Wang Guangwei. Review of excimer laser photolithography technique and its progress[J]. *Journal of Tianjin University of Technology and Education*, 2008, **18**(1): 1~5
王光伟. 准分子激光光刻技术及进展综述[J]. *天津工程师范学院学报*, 2008, **18**(1): 1~5
- Shangguan Cheng, Yuan Cailai, Ye Chao *et al.*. An ArF excimer laser at 193 nm[J]. *Chinese J. Lasers*, 1982, **9**(8): 520~526
上官诚, 袁才来, 叶超等. 193 nm ArF 准分子激光器[J]. *中国激光*, 1982, **9**(8): 520~526
- Mark Gitin. Applications of diode-pumped solid-state UV lasers in processing [J]. *Electronic Engineering & Product World*, 1999, (8): 67~68
Mark Gitin. 半导体泵浦固体紫外激光器在加工中的应用[J]. *电子产品世界*, 1999, (8): 67~68
- Chen Chuangtian, Lin Zheshuai, Wang Zhizhong. New research developments of ultraviolet and deep-ultraviolet nonlinear optical crystals[J]. *Functional Materials Information*, 2005, **2**(3): 3~11
陈创天, 林哲帅, 王志中. 紫外、深紫外非线性光学晶体的最新研究进展[J]. *功能材料信息*, 2005, **2**(3): 3~11
- Yusuke Mori, Ikuo Kuroda, Satoshi Nakajima *et al.*. New nonlinear optical crystal: Cesium lithium borate[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67**(13): 1818~1820
- Takatomo Sasaki, Yusuke Mori. Nonlinear optical crystal CsLiB₆O₁₀ for UV generation[C]. *SPIE*, 1998, **3244**: 88~95
- Zhang Xiurong, Zhang Shunxing, Chai Yao. Harmonic generation in a new nonlinear crystal-CsLiB₆O₁₀ [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(7): 669~672
张秀荣, 张顺兴, 柴耀. 新型非线性晶体——CsLiB₆O₁₀ 的倍频效应[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(7): 669~672
- Zhou Cheng. Frequency conversion of generating 193 nm laser by deep ultraviolet sum-frequency crystal CLBO [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(10): 1489~1492
周城. 深紫外和频晶体 CLBO 产生 193 nm 激光的频率变换 [J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(10): 1489~1492
- N. Umemura, K. Yoshida, T. Kamimura *et al.*. New data on the phase-matching properties of CsLiB₆O₁₀ [J]. *OSA Trends in Optics and Photonics*, 1999, **26**: 715~719
- Wang Li, Chen Shaohua. Theoretical simulation of effective coefficient and permitted parameters of sum-frequency in CsLiB₆O₁₀ [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(12): 1493~1496
王丽, 陈少华. 紫外晶体 CsLiB₆O₁₀ 混频允许参量范围的数值分析[J]. *光学学报*, 2002, **22**(12): 1493~1496
- Jun Sakuma, Kyoichi Deki, Andrew Finch *et al.*. All-solid-state, high-power, deep-UV laser system based on cascaded sum-frequency mixing in CsLiB₆O₁₀ crystals [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(30): 5505~5511
- S. B. Mirov, V. V. Fedorov, B. Boczar *et al.*. All-solid-state laser system tunable in deep ultraviolet based on sum-frequency generation in CLBO [J]. *Opt. Commun.*, 2001, **198**(4~6): 403~406
- Shen Dezhong, Zhang Fan, Wang Xiaoqing *et al.*. Research development of new ultraviolet frequency conversion crystal CLBO [J]. *Laser and Infrared*, 2006, **36**(supp): 766~770
沈德忠, 张帆, 王晓青等. 新型紫外变频晶体 CLBO 的研究进展 [J]. *激光与红外*, 2006, **36**(增刊): 766~770
- Xiong Ke, Yang Chengwei, Huo Yujing. Synchronous pumped A-O Q-switched all solid pulse laser [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2003, **20**(2): 152~156
熊轲, 杨成伟, 霍玉晶. 同步泵浦声光调 Q 全固态脉冲激光器 [J]. *量子电子学报*, 2003, **20**(2): 152~156