

高功率皮秒紫外激光器新进展

毛小洁^{1,2}

(1. 固体激光技术重点实验室, 北京 100015; 2. 华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘要:高功率皮秒紫外激光器在高精密加工、激光医疗、光电对抗和光伏产业等领域有重要应用,近年来成为固体激光新光源研究热点。本文对国内外基于和频技术的高功率皮秒紫外激光器研究新进展进行了归纳和总结。首先,阐述了和频工作原理,介绍了和频产生皮秒紫外激光的非线性晶体;然后,介绍了国内外高功率皮秒紫外激光器的新进展,包括:高功率皮秒紫外激光器、高峰值功率皮秒紫外激光器、高功率和高峰值功率皮秒紫外激光器。最后,展望了高功率皮秒紫外激光器的进一步发展及应用。归纳和总结表明:高功率皮秒紫外激光器在国外较成熟,国内在该领域的研究刚刚起步。光子晶体光纤和碟片激光器输出基频光的皮秒紫外激光器有突出的优势,已成为皮秒紫外激光产业的主力军。

关键词:激光器;皮秒激光器;和频技术;再生放大技术;紫外激光

中图分类号:TN248 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20150802.0182

New progress in high-power picosecond ultraviolet laser

MAO Xiao-jie^{1,2}

(1. *Science and Technology on Solid-State Laser Laboratory, Beijing 100015, China* ;

2. *North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China*)

* *Corresponding author, E-mail: maoxiaojie991220@163.com*

Abstract: High-power picosecond ultraviolet lasers have attracted considerable interests as novel laser source, due to their wide applications in high precision product, laser medical system, optoelectronic countermeasure and structuring of silicon. The research and development on high-power picosecond ultraviolet laser based on technology of sum frequency are classified and summarized. First, the mechanism of sum frequency and picosecond ultraviolet crystal are discussed. Then the high-power picosecond ultraviolet laser, the high-peak-power picosecond ultraviolet laser, and the high-power and high-peak-power picosecond ultraviolet lasers are discussed. Finally, the prospect of further development and applications of high-power picosecond ultraviolet laser sources is put forward. According to the latest development, it is indicated that the high power picosecond ultraviolet lasers developed in abroad is in maturity stage but just in starting stage at. The high-power picosecond ultraviolet lasers based on photonic crystal fiber laser and thin disk laser have some merits, which play important roles in laser industry.

Key words: lasers; picoseconds laser; sum frequency; regenerative amplifier technology; ultraviolet laser

1 引言

与纳秒激光器相比,皮秒激光器的脉冲宽度更短,特别是小于 10 ps 的激光脉冲,不会对加工材料造成热破坏,被称为“冷加工”,在精密加工领域得到广泛的应用。皮秒紫外^[1](UV)激光的波长更短,光子能量更高,聚焦光斑更小,同时高能量的 UV 光子直接破坏材料的分子键^[2],不会形成红外激光的“热熔”过程,使得加工的尺寸可以更小,加工的精度得到进一步提高。

皮秒 UV 激光的产生有三倍频(THG)和四倍频(FHG),THG 输出的 UV 激光功率更高,从基频光到 UV 激光的转换效率更高,适合需要高功率精密加工领域,有功率稳定性高、光束质量好和价格低等实用化的优点,使得 THG 皮秒 UV 激光器的研究发展迅速。高功率皮秒激光由主振荡功率放大器(MOPA)产生,皮秒种子光一般由半导体可饱吸收镜(SESAM)锁模产生,种子光经再生放大过程或直接功率放大过程产生高功率皮秒基频光,基频光经 UV 非线性晶体产生 UV 激光。特别是性能优良的 UV 非线性晶体和镀膜技术的提高,损伤阈值进一步提高,已经能够满足高功率皮秒激光 THG 的要求,特别是以 355 和 343 nm 为代表的高功率皮秒激光器在高精密加工、激光医疗、光电对抗^[3]和光伏产业等领域^[4]有重要应用。本文重点介绍了高功率皮秒紫外激光器,高峰值功率皮秒紫外激光器,高功率和高峰值功率皮秒紫外激光器的新进展,此外,本文阐述了和频工作原理,介绍了和频产生皮秒紫外激光的非线性晶体,指出了光子晶体光纤和碟片激光器输出高光束质量基频光的皮秒紫外激光器的突出优势。最后,对高功率皮秒紫外皮秒激光器的进一步发展及应用给予了展望。

2 和频技术

2.1 和频工作原理

皮秒紫外^[5-6]激光的产生,需要倍频(SHG)过程和和频过程(除紫外二极管),和频又称为三

倍频,其工作原理如图 1 所示。

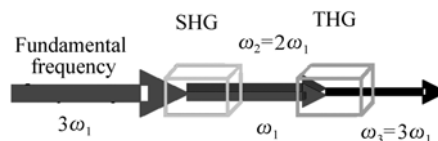


图 1 和频过程原理图

Fig. 1 Schematic diagram for principle of THG

在平面波近似和小信号近似下,由基频光与倍频光和频作用产生的三倍频 UV 光的强度可表示为^[7]:

$$P_3 = \frac{2^3 \pi^2 d_{\text{eff}}^2 L^2 P_1 P_2}{\epsilon_0 c n_1 n_2 n_3 \lambda_3^2 A} \text{sinc}^2(|\Delta k| L/2), \quad (1)$$

式中, d_{eff} 是晶体的有效非线性系数, L 是三倍频晶体的长度, $P_1 P_2$ 是基频光与倍频光的功率, A 是三倍频晶体上的光斑面积, $\text{sinc}^2(|\Delta k| L/2)$ 是三倍频晶体的相位匹配因子。晶体的相位匹配分为角度相位匹配和温度相位匹配。通常情况下,参与三倍频的三个光波的频率是一定的,实现相位匹配的方法,就是利用三倍频光学晶体的双折射特性和色散特性,来改变三波折射率的相对大小,使之满足相位匹配。对于单轴晶体,光波有 o 光和 e 光之分,其中 e 光折射率随波矢与光轴间的夹角 θ 变化,改变光波的 θ 角,使 e 光折射率变化,当 θ 角变化到某一角度时,e 光折射率正好使相位匹配关系成立,这种改变晶体入射角度来实现匹配的方法称为角度相位匹配或临界相位匹配,使相位匹配条件成立时的角度 θ_m 称为角度相位匹配角。对于负单轴晶体,o + o \rightarrow e 称为 I 类相位匹配,o + e \rightarrow e 称为 II 类相位匹配。角度相位匹配时,三倍频 e 光和基频光 o 光光束在空间中会产生分离,称为“走离效应”^[8]。为消除走离效应的影响,通常相位匹配角 θ_m 取 90°。利用晶体折射率对温度的敏感性来实现相位匹配,称为温度相位匹配,又叫非临界相位匹配(NCPM)。

由式(1)可以看出,要提高三倍频 UV 光功率,就要提高基频光和倍频光的功率,选用较高有效非线性系数的晶体和合适的非线性晶体长度^[9],合适的非线性晶体长度对提高皮秒 UV 激

光的转换效率尤其重要。一般说来,皮秒量级的基频光功率密度较高,应选用较短的倍频晶体和三倍频晶体,但皮秒激光的线宽较宽,要得到高的转换效率,就应该选用较长的非线性晶体。总之,应根据基频光的具体参数,选用合适长度的非线性晶体才能得到最佳的三倍频 UV 光转换效率。

2.2 和频产生 UV 激光非线性晶体

光电功能晶体是光电子技术领域的重要基础材料。利用光电功能晶体能对光波进行频率、偏振、幅度等调控,被称为“光学半导体”。随着“光学半导体”的快速发展,UV 激光非线性晶体也得到了快速发展,新型的 UV 激光非线性晶体不断涌现。我国材料科学家在 UV 激光非线性晶体的研究方面取得了丰硕的成果,尤其是以陈创天院士为代表的研究团队研制的 UV 激光非线性晶体 BBO 和 LBO,由于 BBO、LBO 晶体首先由中国科学家发现,而且性能优异,具有很好的应用前景,因此国际上被誉为“中国牌晶体”。BBO、LBO 晶体是最主要的高功率皮秒 UV 晶体。

1979 年,基于“非线性光学效应的阴离子基团理论”^[10],在研究组的共同努力下,陈创天研制成功了用于 UV 波段的优异非线性晶体低温相偏硼酸钡(β -BaB₂O₄,简称 BBO)。

BBO 是一种负单轴晶体,三方晶系,空间群 R3c;单胞参数 $a = b = 1.253\ 2\ \text{nm}$, $c = 1.271\ 7\ \text{nm}$, $Z = 7$;相位匹配输出波长 189 ~ 1 750 nm。355 nm 三倍频时,有效非线性系数 1.21 pm/V,接收角 0.6 mrad·cm,走离角 4.1°。由于 BBO 具有较小的接收角和较大的走离角,因此获得理想的转换效率的关键是使用较好质量的基频光(具有小的发散角,较好的模式条件等);而且该晶体会产生微潮解,需要镀膜来解决。但 BBO 晶体在 Nd:YAG 激光二、三、四倍频上的性能优异,是 213 nm 光五倍频的最佳选择。目前工业应用高重复频率皮秒 UV 激光器倍频、三倍频和四倍频(266 nm)常采用该晶体。

1987 年,陈创天研究团队发现并生长出第二块“中国牌”非线性光学晶体 LBO^[11]。LBO 属负双轴晶体,与 BBO 相比,LBO 紫外截止波长紫移到 150 nm,有适当的硬度和良好的机械加工性能,潮解性能良好,已经能够长出大尺寸、高质量

的单晶。LBO 是一种点群 mm²的斜方晶体,晶格参数 $a = 0.844\ 73\ \text{nm}$, $b = 0.737\ 88\ \text{nm}$, $c = 0.513\ 95\ \text{nm}$, $Z = 2$ 。由连续的网状 B₃O₇ 分子群组成,并有锂离子填充在分子间隙,B₃O₇ 分子群紧凑的结构使得 LBO 晶体难以包含任何杂质,可透光波段范围宽(150 ~ 2 600 nm)。LBO 可用于 Nd:YAG 和 Nd:YLF 激光二、三倍频的相位匹配(I类、II类匹配皆可),LBO 晶体的非临界相位匹配具有无离散、接收角宽、有效非线性系数大的特点,很快就获得了国际激光科技界和工业界的认可,并被广泛应用在激光工业界。

3 皮秒紫外激光器研究新进展

获得皮秒的方法有短腔法和锁模法,短腔法获得的脉冲宽度在百皮秒到几百皮秒,要想获得更短的脉冲宽度,需要采用锁模法。采用半导体可饱和吸收镜(SESAM)锁模输出的脉冲宽度在几皮秒到几十皮秒之间,特别是小于 10 ps 的脉冲激光,非常适合于“冷加工”,若是脉冲宽度小于 10 ps 的高功率皮秒紫外激光,由于波长短,很适合高精度的“冷加工”,在航空、航天和精密仪器制造中发挥了不可替代的作用,成为各大科研院所和各大激光加工集团研究的热点。本文重点介绍脉冲宽度 10 ps 左右的皮秒紫外激光器的研究进展。

3.1 高功率皮秒紫外激光器

2012 年,SANGLA D 等人^[12]报道了重复频率

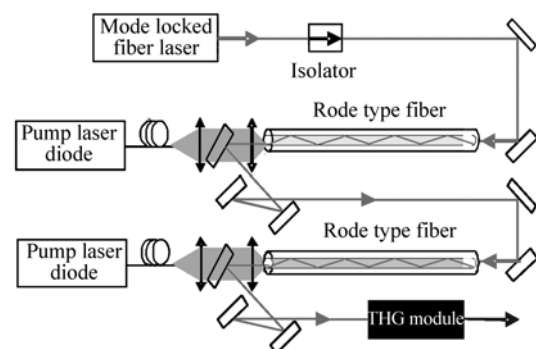


图2 343 nm 皮秒 UV 激光器($P=63\ \text{W}$)实验装置图
Fig. 2 Overall laser setup of 343 nm UV ps lasers($P = 63\ \text{W}$)

80 MHz 时输出 343 nm UV 激光达 63 W 的皮秒 UV 激光器,是目前为止最高的皮秒 UV 激光输出记录,实验装置图如图 2 所示。

该激光器系统采用 MOPA 全光纤结构,种子光脉冲宽度为 40 ps,最大输出功率为 3 W,光谱宽度为 0.3 nm。功率放大系统采用 NKT photonics 公司生产的光子晶体光纤棒,当 976 nm 泵浦光 180 W 时,通过芯径 50 μm 的第一级光子晶体光纤棒放大 1 030 nm 激光到 90 W,进入到芯径 70 μm 的第二级光子晶体光纤棒,当 976 nm 泵浦光 400 W 时,1 030 nm 功率放大到 291 W,光束质量因子小于 1.2。倍频及和频晶体都采用临界相位匹配 LBO,长度分别为 15 和 20 mm,当 1 030 nm 激光功率为 250 W 时,输出 343 nm 皮秒 UV 激光功率为 63 W,从红外到紫外的光光转换效率为 25%。并且指出是为了不损坏器件,延长使用寿命,没有将和频晶体中的 1 030 和 515 nm 激光聚焦到最高和频效率光斑,否则光光转换效率会更高,该技术的特点是棒状光纤散热效果好,模场极大。

2011 年,PIERROT S 等人^[13]报道了重复频率为 2 MHz 时,输出 1 030 nm、激光功率为 10 W 的 MOPA 放大器,通过 NCPM LBO 倍频和临界相位匹配 LBO 晶体三倍频,输出 M^2 小于 1.2 的 5 W 皮秒 UV 激光,从红外到紫外的转换效率达到 50%,实验装置如图 3 所示。

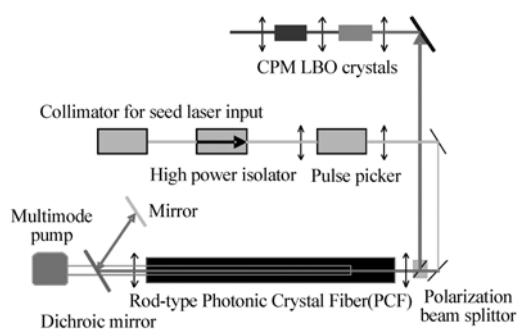


图 3 343 nm 皮秒 UV 激光器 ($P=5$ W) 实验装置图
Fig. 3 Experimental set-up of 343 nm UV ps lasers ($P=5$ W)

皮秒种子源经准直和隔离后进入光子晶体光纤(PCF)棒放大,光子晶体光纤棒^[14]长 70 cm,芯径 80 μm 。由于皮秒种子源^[15]采用重复频率

50 MHz、脉冲宽度 30 ps 和 1 030 nm 激光功率为 5 W、接近衍射极限的被动锁模光纤激光器,进入光子晶体光纤棒前通过声光选单器选择需要的脉冲频率,选单后的皮秒种子光通过光子晶体光纤棒双程放大后进入长度为 20 mm 的 LBO,通过倍频和三倍频后输出 UV 激光,为了不损害光子晶体光纤棒,实验中放大后的单脉冲能量限制在 25 μJ ,只要提高光子晶体光纤棒的损伤阈值,可以输出更高的皮秒 UV 激光,该装置的特点是结构简单、紧凑。

2014 年,中国科学院半导体研究所的 ZHANG L 等人^[16]采用高功率 Nd:YAG 皮秒激光,通过新型 I 类非线性晶体 $\text{La}_2\text{CaB}_{10}\text{O}_{19}$ (LCB) 三倍频后得到 7.8 W、355 nm 紫外激光,从 1 064 nm 到 355 nm 的光光转换效率达到 22%,实验装置如图 4 所示。

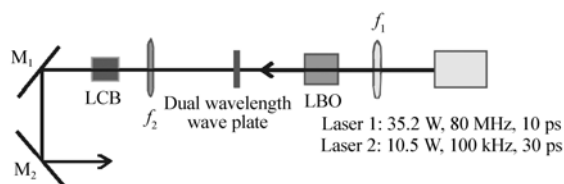


图 4 利用 LCB 作为非线性晶体的 355 nm 皮秒 UV 激光器实验装置图

Fig. 4 Experimental setup of 355 nm UV ps laser using LCB as a nonlinear optical crystal

Nd:YAG 皮秒激光通过聚焦镜 f_1 后进入 I 类 NCPM 晶体 LBO, LBO 晶体尺寸为 3 mm \times 3 mm \times 30 mm,双端镀 1 064 和 532 nm 增透膜,匹配角 $\theta = 90^\circ$, $\phi = 0^\circ$ 。倍频光 532 nm 和基频光 1 064 nm 经 f_2 一起进入和频晶体 LCB, LCB 也是 I 类 NCPM 晶体,晶体尺寸为 4 mm \times 4 mm \times 17.6 mm,双端镀 1 064 nm、532 nm 及 355 nm 增透膜,匹配角 $\theta = 49.4^\circ$, $\phi = 0^\circ$ 。精确控制 LBO 和 LCB 的温度,当温度分别是 155.3 $^\circ\text{C}$ 和 79 $^\circ\text{C}$ 时,达到最高转换效率。该方案对 LCB 晶体进行紫外实验,扩大了紫外晶体的选择范围,但采用聚焦镜会增大 UV 激光的发散角。有些应用环境需要高功率的皮秒 UV 激光,有些应用环境也需要高峰值功率的皮秒 UV 激光,如皮秒激光与物质的相互作用^[17]。

3.2 高峰值功率皮秒紫外激光器

2012 年,北京工业大学激光工程研究院的李港课题组^[18]报道了利用激光二极管端面抽运 Nd:YVO₄激光晶体皮秒三倍频 355 nm 全固态紫外激光器,实验装置如图 5 所示。采用半导体可饱和吸收镜(SESAM)锁模技术及皮秒再生放大技术,对 1 064 nm 基波采用 I 类相位匹配 LBO 晶体二倍频和 II 类相位匹配 LBO 晶体三倍频,获得了稳定性好、倍频效率较高的 355 nm UV 激光输出。当二极管泵浦功率为 5 W 时,获得了脉宽为 17 ps、重复频率为 1 Hz、单脉冲能量为 129.6 μJ 的稳定三倍频 UV 激光输出,峰值功率达到 7.6 MW。基频光到二倍频光和三倍频光的转换效率分别达到 60.3% 和 16.6%,3 h 输出单脉冲能量的抖动在 0.58% 以下。采用再生放大技术是获得 mJ 量级皮秒激光的首要选择。

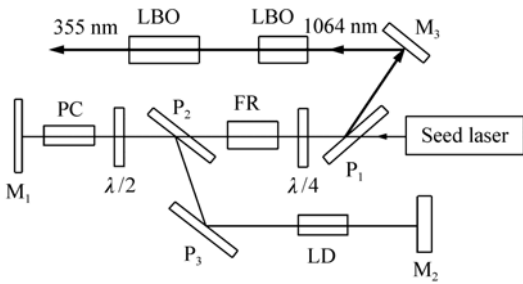


图 5 再生放大器和和频结构示意图

Fig.5 Schematic diagram of regenerative amplifier and sum frequency

2014 年,中国电子科技集团公司第十一研究所的姜志兴等人^[19]报道了单脉冲能量达 35 mJ 的 355 nm 皮秒 UV 激光输出。皮秒种子源重复频率^[20]为 100 MHz,采用新型无独立单选模块再生放大技术进行选单和再生放大,重复频率降为 10 Hz,光路示意图如图 6 所示。

再生放大输出单脉冲能量为 0.8 mJ,采用灯泵浦双棒串接和双程放大的方式,并应用了高功率密度下大能量激光放大系统的抗损伤激光技术,在重复频率 10 Hz 时,实现 1 064 nm 输出单脉冲能量 239.8 mJ,从种子源 nJ 开始,放大倍数达到 10⁸倍,峰值功率密度达 40 GW/cm²以上。灯泵浦双程放大光路示意图如图 7 所示。

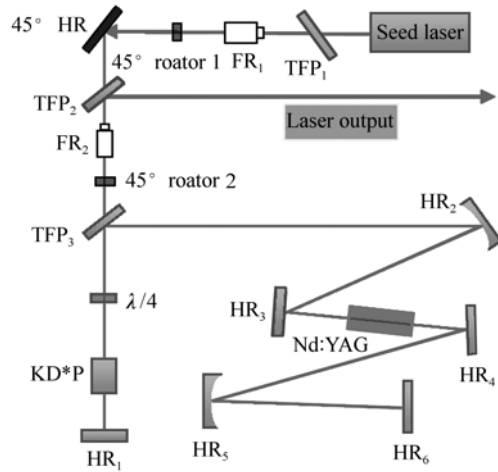


图 6 再生放大器光路示意图

Fig.6 Schematic diagram of regenerative amplifier

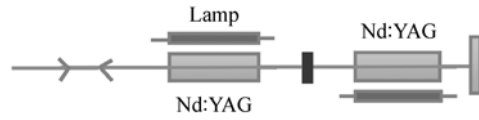


图 7 双程功率放大示意图

Fig.7 Schematic diagram of double amplifier

放大输出脉冲宽度为 15 ps,以最合理的倍频、和频及四倍频匹配方式和匹配参数进行设计和研究,使该激光器的倍频效率在 50% 以上。倍频、和频及四倍频光路示意图如图 8 所示,和频输出 355 nm 单脉冲能量达 35 mJ,峰值功率^[21]更是高达 2.3 GW。

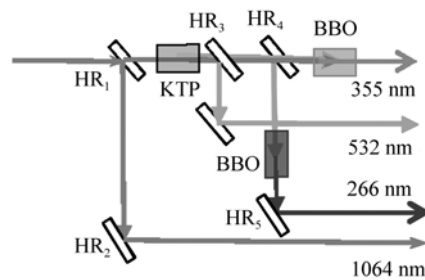


图 8 倍频、和频及四倍频光路示意图

Fig.8 Diagram of double frequency, third harmonic generation and fourth harmonic generation

由于输出基频光达到了百 mJ 量级,不需要聚焦也能达到较高紫外转换效率,所以输出紫外光发散角小于 0.8 mrad。

3.3 高功率和高峰值功率皮秒紫外激光器

2012 年, HECKL H O^[22] 等人报道了通快公司生产的 TruMicro 5000 系列激光器, 脉冲宽度 10 ps 时, 输出最大 343 nm 皮秒 UV 激光 15 W。该激光器通过再生放大系统控制出光频率, 如图 9 所示。出光频率控制在 400 ~ 800 kHz^[23] 之间, 输出最大 343 nm 单脉冲能量 37.5 μJ, 对应的脉冲峰值功率为 3.75 MW。该公司是世界上著名的工业激光公司, 这款产品也是真正的工业激光产品, 重复频率高, 加工速度快, 几乎能满足当前精密加工的所有要求。

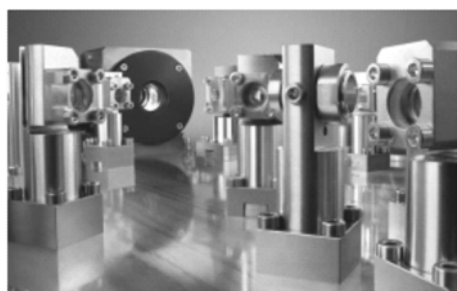


图 9 通快再生放大器照片

Fig. 9 Photo of TRUMPF regenerative amplifier

2012 年, BAUER D 等人^[24] 报道了重复频率 3.5 MHz 时输出功率达 34.4 W 的 343 nm 皮秒 UV 激光器, 对应峰值功率为 8.9 MW。该激光器通过碟片激光头作为增益物质和 SESAM 被动锁模输出脉冲宽度 1.1 ps 的 1 030 nm 激光器, 实验装置示意图如图 10 所示。当泵浦功率为 570 W 时, 输出 1 030 nm 激光 145 W, 通过 4 mm 长临界相位 BBO 倍频和 2.5 mm 长 BBO 三倍频输出 34.4 W 343 nm UV 光, 从红外到 UV 的转换效率

为 23.7%。该激光器直接锁模输出高功率和高峰值功率皮秒激光, 省去了再生放大或者功率放大, 但该实验须放入真空装置。碟片激光器有良好的散热结构和高掺杂浓度的 Yb:YAG 及高光束质量输出, 但碟片激光头泵浦系统较复杂。

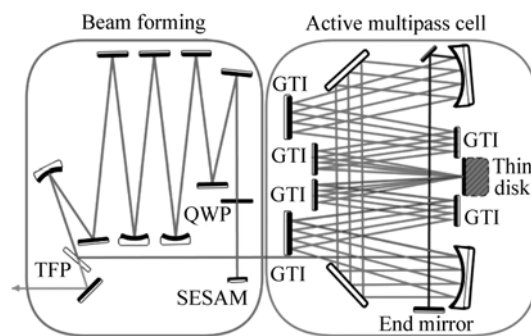


图 10 343 nm 皮秒 UV 激光器 ($P = 34.4$ W) 实验装置示意图

Fig. 10 Schematic of laser setup of 343 nm UV ps lasers ($P = 34.4$ W)

2013 年, ZHU P 等人^[25] 报道了基于 INNOSALB 放大技术的高光束质量、高功率皮秒激光光源, 通过设计紧凑的 LBO 倍频及 LBO 和频高效方案, 在重复频率 1 MHz 时最大输出 355 nm 激光 39.1 μJ。这是目前为止获得的最高 UV 皮秒脉冲能量全固态激光器, 从红外到 UV 的总转换效率达 46%, 355 nm 光束质量因子小于 1.1。高的紫外转换效率得益于高光束质量基频光, 基于 INNOSALB 放大技术可同时保持高功率和高峰值功率的高效放大, 放大过程中峰值功率密度保持不变。

综上所述, 来自研究机构有关皮秒 UV 激光

表 1 来自研究机有关构皮秒 UV 激光报道和激光公司皮秒 UV 产品

Tab. 1 Picosecond UV laser reports from research institution and picosecond UV products from laser companies

机构名称	波长/nm	功率/W	脉宽/ps	重频/Hz	和频	红外到 UV 效率/%
EOLITE Systems	343	63	40	80×10^6	LBO	25
EOLITE Systems	343	5	30	2×10^6	LBO	50
中科院半导体所	355	7.8	10	80×10^6	LCB	22
北京工业大学	355	129.6×10^{-6}	17	1	LBO	16.6
中电十一所	355	350×10^{-3}	15	10	BBO	14.5
通快公司	343	15	10	800×10^3	LBO	15
Konstanz university	343	34.4	1.1	3.5×10^6	BBO	23.7
Edgewave	355	39.1	10	1×10^6	LBO	46

报道和激光公司皮秒 UV 产品如表 1 所示。

5 结束语

随着工业界和医疗界对于高功率皮秒 UV 激光需求的增加,许多激光科研院所和激光工业加工领域巨头都投入大量资金和人力物力研究皮秒 UV 激光器,如通快公司还为此成立了专门的超短脉冲研究机构(TRUMPF Scientific Lasers GmbH + Co. KG)。同时也由于高光束质量和高功率皮秒基频光激光器的发展,使得高功率皮秒 UV 激光已经达到了 50 W 量级的水平,而且这一输出记录也还在不断被打破。新型非线性晶体性能的不断提高,对高功率皮秒 UV 激光的稳定性和使用寿命也做出了很大贡献。但高功率皮秒 UV 激

光技术工业化和产品化还面临许多问题:(1)高功率皮秒激光的线宽较宽,不利于窄线宽皮秒 UV 激光的实现,解决这一问题的方法有在皮秒锁模种子源谐振腔中加入光栅^[26]限制输出激光线宽;(2)皮秒 UV 激光效率有待提高。这需要精确设计 UV 非线性晶体的长度,提高基频光的光束质量和降低线宽;(3)非线性光学晶体的损伤问题。随着皮秒 UV 激光功率和峰值功率的提高,非线性晶体的光学损伤问题也越来越严重,一方面可以使用不镀膜的晶体,另一方面让皮秒激光展宽后三倍频,然后压缩脉宽。总之,随着高功率皮秒 UV 激光技术的进一步成熟,高功率皮秒 UV 激光也将逐步走出实验室,实现商品化和实用化,用于需要更高精密度的应用领域。

参考文献:

- [1] 王志俊,李阳平,周潇逸,等. 紫外压印长波红外亚波长结构的涂胶工艺研究[J]. 光学精密工程,2014,22(8):2180-2187.
WANG ZH J,LI Y P,ZHOU X Y,*et al.*. Spin coating of UV-curable resist for imprinting long-wave infrared subwavelength structures[J]. *Opt. Precision Eng.*,2014,22(8):2180-2187. (in Chinese)
- [2] 王珣,金春水,匡尚奇,等. 极紫外光学器件辐照污染检测技术[J]. 中国光学,2014,7(1):79-88.
WANG X,JIN CH SH,KUANG SH Q,*et al.*. Techniques of radiation contamination monitoring for extreme ultraviolet devices[J]. *Chinese Optics*,2014,7(1):79-88. (in Chinese)
- [3] 于国权,郭劲,李岩,等. 激光角度欺骗干扰内场仿真系统精度分析[J]. 光学精密工程,2013,21(10):2610-2616.
YU G Q,GUO J,LI Y,*et al.*. Precision analysis of indoor simulation system for laser angle deception jam[J]. *Opt. Precision Eng.*,2013,21(10):2610-2616. (in Chinese)
- [4] 马宁,李晓毅,陆鸢,等. 紫外光通信调制方式的对比研究[J]. 光学与光电技术,2014,12(3):79-84.
MA N,LI X Y,LU Y,*et al.*. Research on modulation contrast of ultraviolet communication[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*,2014,12(3):79-84. (in Chinese)
- [5] 沈雷军,李波,王忠志,等. YVO₄:Tm³⁺ 的真空紫外发光性能[J]. 发光学报,2014,35(9):1034-1039.
SHEN L J,LI B,WANG ZH ZH,*et al.*. Vacuum ultraviolet spectra of YVO₄:Tm³⁺ [J]. *Chinese J. Luminescence*,2014,35(9):1034-1039. (in Chinese)
- [6] 蔡钧安,秦志新. 纳米压印制备的光子晶体结构对 AlGa_N 基材料深紫外出光效率的提高[J]. 发光学报,2014,35(8):998-1003.
CAI J A,QIN ZH X. Enhancement of deep-UV light extraction efficiency from bulk AlGa_N with photonic crystals fabricated by nanoimprint lithography[J]. *Chinese J. Luminescence*,2014,35(8):998-1003. (in Chinese)
- [7] DMITRIEV V G,GGURZADYAN G,NIKOGOSYAN D N. *Handbook of Nonlinear Optical Crystals* [M]. New York: Springer,1999.
- [8] MAKER P D,TERHUNE R W,NISENOFF M,*et al.*. Effects of dispersion and focusing on the production of optical harmonics[J]. *Physics Review Letters*,1962,8(1):21-22.
- [9] 李港,郝海林. 晶体长度对倍频效率的影响[J]. 北京工业大学学报,1992,18(1):73-76.
LI G,HAO H L. The influence of crystal length for the efficiency of second harmonic[J]. *J. Beijing Polytechnic University*

- ty,1992,18(1):73-76. (in Chinese)
- [10] 陈创天,叶宁,林蛟,等. 运用晶体非线性光学效应的阴离子基团理论探索新型紫外非线性光学材料[J]. 自然科学进展,2000,10(8):673-683.
CHEN CH T, YE L, LIN X, *et al.*. Using the nonlinear optical crystal effect of the anionic group theory to explore new uv nonlinear optical materials[J]. *Progress in Natural Science*, 2000, 10(8):673-683. (in Chinese)
- [11] CHEN CH T, WU Y C, JIANG A, *et al.*. New nonlinear optical crystal: LiB_3O_5 [J]. *J. the Optics Society of America B*, 1989, 6(4):616-621.
- [12] SANGLA D, SABY J, COCQUELIN B, *et al.*. High power picosecond fiber laser emitting 50 W at 343 nm at 80 MHz [J]. *SPIE*, 2012, 8237:82370N.
- [13] PIERROT S, SABY J, COCQUELIN B, *et al.*. High-power all fiber picosecond sources from IR to UV[J]. *SPIE*, 2011, 7914:79140Q.
- [14] SABY J, COCQUELIN B, MEUNIER A, *et al.*. High average and peak power pulsed fiber lasers at 1030 nm, 515 nm, and 343 nm[J]. *SPIE*, 2010, 7580:75800I.
- [15] PIERROT S, SABY J, BERTRAND A, *et al.*. All fiber high energy, high power picosecond laser[C]//CLEO, 2010: CFD3.
- [16] ZHANG L, LI K, XU D G, *et al.*. A 7.81W 355 nm ultraviolet picosecond laser using $\text{La}_2\text{CaB}_{10}\text{O}_{19}$ as a nonlinear optical crystal[J]. *Optics Express*, 2014, 22(14):17187-17192.
- [17] POLLEHN H K. Performance and reliability of third-generation image intensifiers[J]. *Advances in Electronics and Electron Physics*, 1985, 64:61-69.
- [18] 白振岿,白振旭,陈檬,等. LD泵浦全固态355 nm紫外皮秒脉冲激光器[J]. 应用光学, 2012, 33(4):804-807.
BAI ZH A, BAI ZH X, CHEN M, *et al.*. LD-pumped all-solid-state 355 nm ultraviolet picosecond pulse laser[J]. *J. Applied Optics*, 2012, 33(4):804-807. (in Chinese)
- [19] 姜志兴,毛小洁,庞庆生,等. 大能量多波段皮秒激光技术研究[J]. 激光与红外, 2014, 44(9):994-997.
JIANG ZH X, MAO X J, PANG Q SH, *et al.*. Key technology of large energy multi-band picosecond laser[J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(9):994-997. (in Chinese)
- [20] 毛小洁,秘国江,庞庆生,等. 20 MHz紧凑型高功率被动锁模Nd:YVO₄激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(10):1002004.
MAO X J, BI G, PANG Q SH, *et al.*. K20MHz compact high power passively mode-locked Nd:YVO₄ laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2013, 40(10):1002004. (in Chinese)
- [21] 田金荣,宋晏蓉,王丽. 常用激光峰值功率公式误差分析[J]. 中国光学, 2014, 7(2):253-259.
TIAN J R, SONG Y R, WANG L. Error analysis of peak power formula in pulsed lasers[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(2):253-259. (in Chinese)
- [22] OLIVER H. HECKL, DIRK SUTTER. Perfect precision in industrial micro machining[J]. *Laser Technik J.*, 2012, 9(2):42-47.
- [23] FENG G, FENG G B, SHAO B B, *et al.*. Energy measurement of high-repetition-rate pulsed laser[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(2):196-200.
- [24] BAUER D, ZAWISCHA I, H. SUTTER D, *et al.*. Mode-locked Yb:YAG thin-disk oscillator with 41 J pulse energy at 145 W average infrared power and high power frequency conversion[J]. *Optics Express*, 2012, 20(9):9698-9704.
- [25] ZHU P, LI D J, LIU Q Y, *et al.*. 39.1 μJ picosecond ultraviolet pulses at 355 nm with 1 MHz repeat rate perfect precision in industrial micro machining[J]. *Optic Letters*, 2013, 38(22):4716-4718.
- [26] 吴金,吴晗平,黄俊斌,等. 极紫外光学器件辐照污染检测技术光纤光栅传感信号解调技术研究进展[J]. 中国光学, 2014, 7(4):519-531.
WU J, WU H P, HUANG J B, *et al.*. Research progress in signal demodulation technology of fiber Bragg grating sensors [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(4):519-531. (in Chinese)

作者简介:



毛小洁(1981—),男,四川内江人,硕士,高级工程师,2007年于电子科技大学获得硕士学位,主要从事高功率皮秒放大技术及高功率非线性频率变换技术方面的研究。E-mail:maoxiaojie991220@163.com

《中国光学》征稿启事

《中国光学》为双月刊,A4开本;刊号:ISSN 2095-1531/CN 22-1400/04;国内外公开发行,邮发代号:国内12-140,国外BM6782。

- | | |
|-----------------|----------------|
| ★ 荷兰 Scopus 数据库 | ★ 中国精品科技期刊 |
| ★ 美国《乌利希国际期刊指南》 | ★ 中国科技核心期刊 |
| ★ 美国《化学文献》 | ★ 中国光学学会会刊 |
| ★ 波兰《哥白尼索引》 | ★ 中国科技论文与引文数据库 |
| ★ 俄罗斯《文摘杂志》 | ★ 中国期刊全文数据库 |
| | ★ 万方数字化期刊全文数据库 |
| | ★ 中国科技期刊数据库 |
| | ★ 中国光学期刊网数据库 |

主要栏目:微纳光学、信息光学、集成光电子、光谱学和光谱仪器、激光技术与应用、光学功能材料、光学设计与工艺、大气与空间光学、光学仪器与测试、综述、前沿动态、产业资讯、科普教学、实验室介绍、自然科学基金项目进展、前沿热点访谈、热点论文等。

发稿类型:学术价值显著、实验数据完整的原创性论文;研究前景广阔,具有实用、推广价值的技术报告;有创新意识,能够反映当前先进水平的阶段性研究简报;对当前学科领域的研究热点和前沿问题的专题报告;以及综合评述国内外光学技术研究现状、发展动态和未来发展趋势的综述性论文。

欢迎投稿、荐稿。

主管单位:中国科学院

主办单位:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

协办单位:激光与物质相互作用国家重点实验室

编辑出版:《中国光学》编辑部

投稿网址:<http://chineseoptics.net.cn>

邮件地址:chineseoptics@ciomp.ac.cn; zgxcn@126.com

联系电话:0431-86176852; 0431-84627061 传 真:0431-84627061

编辑部地址:长春市东南湖大路3888号(130033)