

文章编号: 0258-7025(2010)09-2289-10

高功率全固态紫外激光器研究新进展

柳 强 闫兴鹏 陈海龙 黄 磊 巩马理

(清华大学精密仪器系摩擦学国家重点实验室光子与电子技术研究中心, 北京 100084)

摘要 介绍了高功率紫外(UV)激光器的应用,回顾了产生紫外激光的非线性光学原理以及用于产生高功率紫外激光的非线性光学晶体,给出了近年来在应用最为广泛的高功率 355 nm 和 266 nm 全固态紫外激光器方面的国内外研究进展,展望了高功率全固态紫外激光器的发展需要解决的问题及可能的技术途径。

关键词 激光器;紫外激光;非线性光学;频率转换;相位匹配

中图分类号 TN248.1;O437 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103709.2289

New Progress in High-Power All-Solid-State Ultraviolet Laser

Liu Qiang Yan Xingpeng Chen Hailong Huang Lei Gong Mali

(State Key Laboratory of Tribology, Center for Photonics and Electronics, Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing, 100084, China)

Abstract The applications for high-power ultraviolet (UV) lasers are introduced. The principle for the generation of ultraviolet lasers and the performances of nonlinear optical crystals used for high-power ultraviolet lasers are reviewed. The research progress on the high-power all-solid-state 355 nm and 266 nm ultraviolet lasers at home and broad are given. The problems and probable techniques for the development of the high-power all-solid-state ultraviolet lasers are previewed.

Key words lasers; ultraviolet laser; nonlinear optics; frequency conversion; phase matching

1 引 言

紫外(UV)激光器在工业微加工领域具有广泛应用,如工业零部件的打标、钻孔、划片、焊接、切割以及医疗器械的微加工、电子元件封装、微型部件立体成型等。此外,在微电子学、光谱分析、光数据存储、光盘控制、大气探测、光化学、光生物学、空间光通信、激光诱发的物质原子荧光和 UV 吸收(如 Si 原子的荧光诱发、冷冻和控制)及医疗等领域也有着广泛的应用前景^[1~3]。特别是在工业加工领域,由于 UV 激光的短波长和高光子能量特点,其聚焦光斑可以更小,同时高能量 UV 光子直接破坏材料的分子键,相对于红外激光的“热熔”过程,UV 激光加工时是“冷蚀”效应,这使得加工的尺寸可以更小,加工的精度得到提高^[4]。

激光二极管(LD)抽运的全固态 UV 激光器和其他类型的 UV 激光器相比,具有效率高、重复频率高、性能可靠、重量轻、结构简单紧凑、输出光束质量好,功率稳定性较高和价格低等实用化的优点,使得 LD 抽运的 UV 光固体激光器的研究发展迅速。特别是性能优良的 UV 非线性光学晶体和镀膜技术的提高,以及在改善激光器的光学模式和使抽运光耦合到激光晶体方面的设计优化的重大成就,使得全固态 UV 具有高功率、高效率、高光束质量、长期稳定性以及长寿命等特点。特别是以 355 nm 和 266 nm 为代表的全固态 UV 激光在工业加工领域已经得到了广泛应用。本文重点介绍高功率 355 nm 和 266 nm 全固态 UV 激光器的国内外研究进展以及本研究小组在这两类全固态 UV 激光器

收稿日期: 2010-04-12; 收到修改稿日期: 2010-05-06

基金项目: 国家 863 计划(2007AA030113)和国家自然科学基金(60778014)资助课题。

作者简介: 柳 强(1971—),男,博士,副研究员,博士生导师,主要从事全固态激光及频率变换技术等方面的研究。

E-mail: qiangliu@mail. tsinghua. edu. cn

方面的最新研究成果。最后展望了高功率全固态 UV 激光发展所面临的问题以及解决的技术途径。

2 全固态 UV 激光的产生

全固态 UV 激光器的基本原理是以非线性光学中的光学混频为基础。1961 年, Franken 等^[5]首次利用 694.3 nm 的红宝石激光器经过石英晶体产生了 347.15 nm 的二次谐波(即倍频光),这是标志非线性光学诞生的第一个实验。1962 年, Bass 等^[6]在硫酸三甘氨酸晶体中观察到了光学和频现象。同年, Giordmaine 等^[7], Maker 等^[8]分别提出的相位匹配技术,使光倍频和光混频有可能达到较高的转换效率。此后,非线性光学技术和非线性光学晶体材料获得了快速发展。

倍频(SHG)、三倍频(THG)是非线性光学中最为重要也是研究最为透彻的内容,它们均为三波的相互作用,其中倍频为两基频光产生二倍频光,三倍频为基频光和二倍频光和频产生三倍频光,基本原理如图 1 所示。从本质上说,倍频过程是和频过程的一个特例,此时 $\omega_2 = \omega_1$ 。以最常用的 355 nm 和 266 nm 全固态 UV 激光为例,前者通常由 1064 nm 红外基频光通过一次倍频,部分红外光转换成 532 nm 倍频绿光,剩余 1064 nm 基频光与 532 nm 倍频光通过和频得到 355 nm 三倍频 UV 激光;而后者是将 1064 nm 红外基频光通过一次倍频,基频光转换成 532 nm 倍频绿光,然后将 532 nm 倍频光再经过一次倍频,得到 266 nm 四倍频(FOHG)UV 激光。

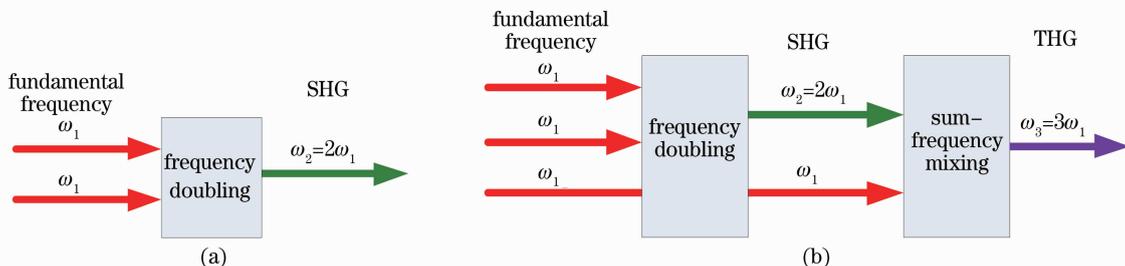


图 1 二倍频(a)和三倍频(b)原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram for principle of SHG (a) and THG (b)

上述 SHG 与 THG, FOHG 的物理本质是光学混频。对于一般的负单轴非线性晶体,其折射率依赖于偏振方向以及光在晶体中的传播方向,一般可以通过旋转偏振方向和选择晶体切割角度,亦即选择特定光传播方向来满足相位匹配条件,这种方法称为角度相位匹配。当入射的基波取单一的线偏振光(o 光),产生的谐波取另一种状态的线偏振光(e 光),这种相位匹配方式称之为“I 类相位匹配”(o+o→e)。而当基波取两种偏振态(o 光和 e 光),谐波取单一偏振态(e 光),这种相位匹配方式称之为“II 类相位匹配”(o+e→e)。

角度相位匹配一般存在走离效应,如果可以选择晶体使得在垂直于晶体光轴($\theta_m = 90^\circ$)的方向上实现相位匹配,则光束走离效应的限制可以消除。为了实现这种 90° 匹配角的相位匹配,可以利用有些晶体的折射率的双折射与色散是温度敏感函数的特点,即 n_e 随温度的改变量比 n_o 随温度的改变量大得多。通过适当调节晶体温度,可实现 $\theta_m = 90^\circ$ 的相位匹配,这种通过调节晶体温度实现相位匹配的方式称之为温度相位匹配。由于温度相位匹配对于

角度的偏离不是特别敏感,又叫作非临界相位匹配(NCPM)。

晶体中的 SHG, THG(和频)的过程可以由三波耦合方程来描述。在平面波近似,小信号近似及无走离效应的情况下,可以得到转换效率为^[9]

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

从(1)式可以看出影响转换效率的因素有: $d_{\text{eff}}^2/(n_1 n_2 n_3)$ (晶体及选定方向), L (晶体长度), P_2/A (基频光功率密度); $\text{sinc}^2(|\Delta k|L/2)$ (相位匹配因子)。因此在相位匹配条件下($\Delta k = 0$),选用具有较高有效非线性系数的晶体、提高基频光的功率密度、选用合适的晶体长度才可以获得较高的倍频效率。详细的非线性光学理论及相关分析已有相当多的论著可供参考^[9~12],这里不再赘述。

3 UV 激光非线性晶体

随着材料科学的发展,近年来非线性晶体发展很快,不断涌现出新型非线性 UV 晶体,我国科学家在非线性 UV 晶体的研究上也取得了丰硕成果。

20 世纪 80 年代末,中国科学院陈创天院士研究团队在相继发明 BBO 晶体(偏硼酸钡)和 LBO 晶体(三硼酸锂)可见/UV 非线性光学晶体之后,又根据对硼酸盐体系材料结构与性能关系的多年研究,发明了 KBBF(氟代硼铍酸钾)晶体,这些晶体连同 CBO(三硼酸铯)和 CLBO(铯-锂-硼酸盐)等晶体,构成了主要的常用高功率 UV 非线性晶体。

3.1 LBO 晶体

LBO(LiB_3O_5)晶体是由中科院福建物质结构研究所研制的新型非线性光学晶体^[13]。正交晶系, $\text{mm}2(C_{2v})$ 点群, 负双轴晶体, 单晶胞参数 $a = 0.8447(3) \text{ nm}$, $b = 0.7378(8) \text{ nm}$, $c = 0.5139(5) \text{ nm}$, $z = 2$ 。该晶体不潮解, 透明波段范围为 $0.165 \sim 3.2 \mu\text{m}$, 晶体光学均匀性高, 接收角度宽, 离散角小, 激光损伤阈值高, 可以实现非临界相位匹配, 同时可以通过角度或者温度调谐实现相位匹配, 因此被广泛应用在 Nd:YAG, Nd:YVO₄, Nd:YAP 等激光器的 SHG, THG, FOHG 及其和频、差频等领域。目前工业应用高重复频率 UV 激光器倍频(532 nm)和三混频(355 nm)晶体常采用该晶体。

3.2 BBO 晶体

BBO($\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$)晶体也是由中国科学院福建物质结构研究所研制成功的可用于 UV 波段的优异激光晶体。该晶体为三角晶系, $3(C_3)$ 点群, 负单轴晶体, 单晶胞参数 $a = b = 1.2532 \text{ nm}$, $c = 1.2717 \text{ nm}$, $z = 6$ 。微潮解, 透明波段范围为 $0.19 \sim 3.3 \mu\text{m}$ 。该晶体具有大的双折射和低的色散, 损伤阈值高, 相位匹配范围较宽, 温度稳定性好, 不能实现温度相位匹配, 但是其接收角较小, 离散角大, 微潮解的特性使得其需要镀膜保护。该晶体可以广泛应用在 Nd:YAG, Nd:YVO₄ 激光器的 SHG, THG, FOHG 以及五次谐波的产生(FHG)。目前工业应用高重复频率 UV 激光器倍频、三混频和四倍频(266 nm)常采用该晶体。

3.3 CLBO 晶体

CLBO($\text{CsLiB}_6\text{O}_{10}$)晶体是由日本大阪大学发明的一种性能优良的 UV 非线性晶体^[14]。该晶体为 I32D 空间群, 四方晶系, 负单轴晶体, 晶格参数 $a = b = 1.0494 \text{ nm}$, $c = 0.8939 \text{ nm}$, 透明波段范围为 $0.18 \sim 2.75 \mu\text{m}$, 可以实现 FOHG 和 FHG 输出。相对于 LBO 和 BBO, 该晶体的生长比较容易, 可以得到大尺寸和高质量的晶体。但是该晶体很容易潮

解, 为了避免潮解需要密封使用或者长期保存在 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右, 所以还没有在商业激光器上得到应用。

3.4 CBO 晶体

CBO(CsB_3O_5)晶体是由中国科学院福建物质结构研究所研制成功的一种 UV 非线性晶体^[15]。该晶体为正交晶系 P222 空间群, 晶胞参数为 $a = 0.6213(1) \text{ nm}$, $b = 0.8521(1) \text{ nm}$, $c = 0.9170(1) \text{ nm}$, $z = 4$, 只有一个非零的非线性光学系数 $d_{14} = 0.863 \text{ pm/V}$, 其 UV 透光范围为 $0.17 \sim 3 \mu\text{m}$ 。该晶体抗激光损伤阈值高, 在 UV 波段透过能力较高, 具有较大的非线性光学系数和较小的离散角, 这使得其在实现激光的 TGH 转换领域有重要的应用前景, 但是还没有在商业 UV 全固态激光器上广泛应用。

3.5 KBBF 晶体

KBBF($\text{KBe}_2\text{BO}_3\text{F}_2$)晶体是由中国科学院福建物质结构研究所研制成功的一种性能优异的 UV, 深 UV 非线性晶体^[16]。该晶体为 R32 空间群(32 点群), 负单轴晶体, 晶胞参数为 $a = b = 0.4427(4) \text{ nm}$, $c = 1.8744(9) \text{ nm}$, $z = 3$ 。其 UV 透光范围为 $0.155 \sim 3.5 \mu\text{m}$ 。该晶体深 UV 性能优异, 可以输出六倍频 177.3 nm 深 UV 激光, 这使得其在实现深 UV 激光输出领域有重要的应用前景。

3.6 BABF 晶体

BABF($\text{BaAlBO}_3\text{F}_2$, 氟代硼铝酸钡)晶体是由日本大阪大学发明的一种新型 UV 非线性晶体^[17]。该晶体为 $\bar{P}6$ 空间群, 负单轴晶体, 晶胞参数为 $a = b = 0.48879(6) \text{ nm}$, $c = 0.9403(1) \text{ nm}$, $z = 2$ 。该晶体有效非线性系数较大, 损伤阈值相对较高, 化学稳定性和机械性能好, 容易生长, 不潮解。该晶体 UV 吸收截止波长为 $0.165 \mu\text{m}$, 由于晶体中 Al^{3+} 的存在, 其在 232 nm 处存在一个 UV 吸收峰。

通常用于产生高功率 355 nm 和 266 nm 的晶体及其光学物理特性汇总于表 1^[13,15,18~24]。

另外, 近年来不断报道了许多新型 UV 非线性晶体, 例如 SBBO ($\text{Sr}_2\text{Be}_2\text{B}_2\text{O}_7$)^[25], GdCOB [$\text{GdCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$]^[26], YCOB [$\text{YCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$]^[27], KAB($\text{K}_2\text{Al}_2\text{B}_2\text{O}_7$)^[28] 等。这些晶体目前尚处于研究当中, 由于晶体生长、光损伤、双折射率低或者非线性光学系数较低等问题, 还未大量应用在高功率 UV 激光器中, 故此处不再展开介绍。

表 1 用于产生高功率 355 nm 与 266 nm 的非线性晶体特性

Table 1 Nonlinear optical characteristics for 355 nm and 266 nm generation in borate crystals

Crystal		LBO	CBO	BABF	CLBO	BBO	KBBF
Nonlinear coefficient	355 nm	0.66	1.15	0.30	0.93	1.21	0.34
$d_{\text{eff}} / (\text{pm}/\text{V})$	266 nm	—	—	—	0.79	1.75	0.39
Acceptance angle \times length / (mrad \cdot cm)	355 nm	5.0	2.7	1.4	1.2	0.6	0.75
	266 nm	—	—	—	32.96	85.3	52.88
Walk-off angle /mrad	355 nm	9.3	37.3	23.6	37.3	76.4	52.9
	266 nm	—	—	—	0.48	0.16	0.42
Phase-matching angle /($^{\circ}$)	355 nm	$\theta=48,$ $\varphi=90$	$\theta=90,$ $\varphi=40.3$	$\theta=61.8$	$\theta=48.8$	$\theta=38.8$	$\theta=32.3$
	266 nm	—	—	—	$\theta=61.9$	$\theta=47.5$	$\theta=36.4$
Optical damage threshold /(GW/cm^2)		25	26	>2.5	26	25	>2.5
UV cut-off wavelength /nm		160	170	170	180	190	160
Hygroscopicity		Non	Non	Non	High	Slight	Non

4 高功率全固态 355 nm 和 266 nm 激光器研究进展

一般产生全固态 UV 激光谱线的方法有两种,一是直接采用对近红外全固体激光进行腔内或腔外 THG 或 FOGH 来取得 UV 激光谱线,另一种方法是先利用 SHG 技术得到二次谐波然后再利用和频技术得到 UV 激光谱线。前一种方法有效非线性系数小,转换效率低,后一种方法由于利用的是二次非线性极化率,转换效率比前一种高许多。目前报道的高功率全固态 UV 激光器主要采用第二种方式,而且激光波长主要为 1064 nm 激光的三次谐波(355 nm)和四次

谐波(266 nm),本文重点介绍高功率全固态 355 nm 和 266 nm UV 激光器的研究进展。

4.1 355 nm 高功率全固态 UV 激光器

2001 年,美国 Spectra-physics 公司采用如图 2 所示的结构,利用 LD 双端面抽运、腔内 Nd:YVO₄ 双棒串接的声光调 Q 结构作为基频源,采用 I 类和 II 类相位匹配的 LBO 作为 SHG 与和频晶体^[29]。在抽运功率 104 W 条件下,在重复频率 20~60 kHz 范围内获得了 12 W,355 nm UV 输出,脉宽为 25~75 ns,光束发散角(半角)约 0.25 mrad,光束质量 $M^2 < 1.2$ 。

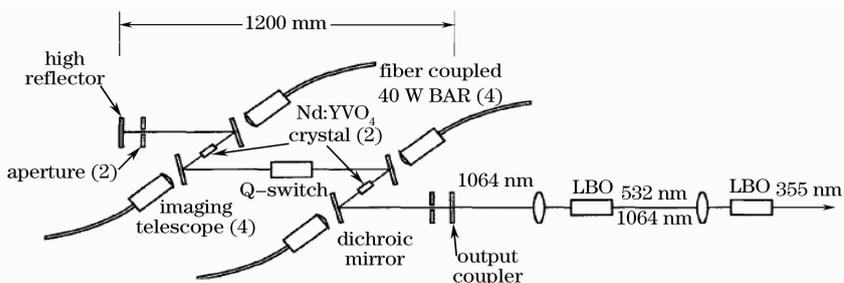


图 2 12 W 355 nm UV 激光器装置

Fig. 2 Schematic diagram for the 12 W 355 nm UV laser

2005 年,中国科学院理化技术研究所和物理研究所合作,采用如图 3 所示的外腔频率变换结构,利用 LBO 为倍频晶体,CBO 晶体为 THG 晶体^[30],CBO 晶体采用 II 类相位匹配, $\theta=90^{\circ}$, $\varphi=42.4^{\circ}$,通

过 140 W,7 kHz,70 ns 基波的 SHG 与和频,获得了最高输出 17 W 的 355 nm UV 激光,好于同尺寸 LBO 晶体,但光-光转换效率还较低,约为 13%。

2006 年,Coherent 公司采用如图 4 所示的端面

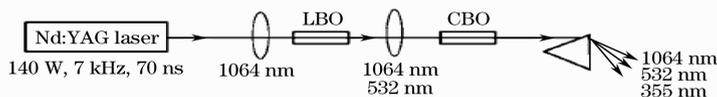


图 3 17 W 355 nm UV 激光器结构示意图

Fig. 3 Experimental setup for 17 W 355 nm UV laser

抽运 Nd:YVO₄ 结构, 波长为 1064 nm 的基频激光通过掺钕钒酸钪晶体放大后输出, 通过整形聚焦, 利用 I 类相位匹配 LBO SHG 产生波长为 532 nm 的倍频光, 该倍频光和剩余的基频光共同整形聚焦后, 经 II 类相位匹配 LBO 和频得到波长为 355 nm 的三倍频光输出。在 100 kHz 重复频率条件下, 获得 36 W 355 nm 输出, 脉宽约为 31 ns, 光-光转换效率

达到了 44%^[2]。UV 输出随重复频率变化如图 5(a) 所示。由于长时间工作后和频晶体会产生光学损伤, 该公司将和频晶体装载于一个二维步进电机上, 当晶体上产生坏点后通过控制电机, 让晶体平移至新的位置, 从而延长其使用寿命, 其测试结果如图 5(b) 所示。

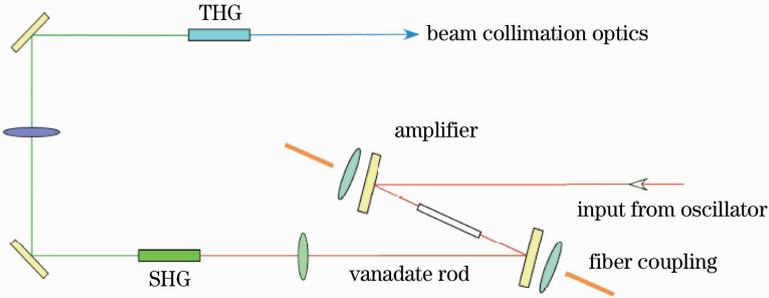


图 4 36 W 355 nm UV 激光装置

Fig. 4 Experimental setup for 36 W 355 nm UV laser

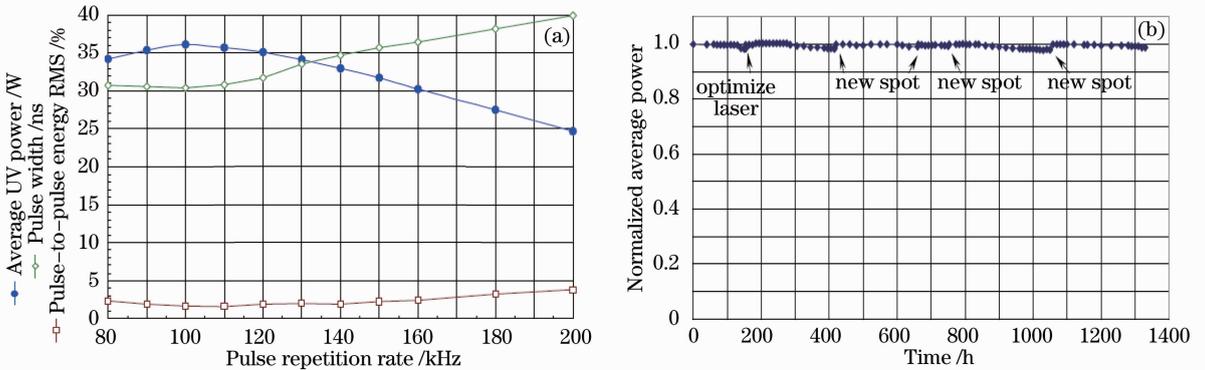


图 5 36 W 355 nm UV 激光器输出特性。(a) 输出特性随重复频率的变化曲线, (b) 输出功率随时间的变化曲线

Fig. 5 Output performance for 36 W 355 nm UV laser. (a) average power, pulsewidth, and pulse-to-pulse energy stability, (a) normalized degradation rates at different THG crystal spots

该公司还采用如图 6 所示的侧面抽运 Nd:YAG 主振荡功率放大器 (MOPA) 结构, 采用声光调 Q 的侧抽运双棒串接 Nd:YAG 激光器作为种子

源, 信号光通过扩束, 利用侧抽运 Nd:YAG 模块进行预放大, 然后再通过两个侧抽运 Nd:YAG 模块进行主放大, 两个模块之间采用石英旋转器进行双折

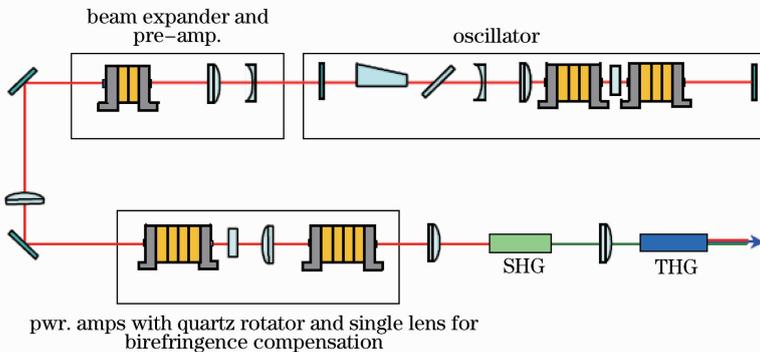


图 6 64 W 355 nm UV 激光器实验装置

Fig. 6 Experimental setup for the 64 W 355 nm UV laser

射补偿。利用 I 类相位匹配 LBO 倍频,利用 II 类相位匹配 LBO 和频得到波长为 355 nm 的三倍频光输出。在重复频率 40 ~ 45 kHz 条件下,获得了 64 W 输出,脉冲宽度 140 ns,但光-光转换效率较低,还不到 10%^[2]。

2008 年,日本大阪大学研究人员报道了大于 100 W 的 355 nm UV 激光输出^[31]。通过利用

MOPA 结构的调 Q Nd:YAG 激光器,得到 300 W 基模输出激光。I 类相位匹配的 LBO 倍频,II 类相位匹配的 CBO 和频,在 20 kHz 下得到了 103 W 355 nm UV 激光,脉冲宽度为 58 ns,对应的光-光转换效率为 34.9%,激光器的结构见图 7(a),对应的输出特性曲线见图 7(b)。

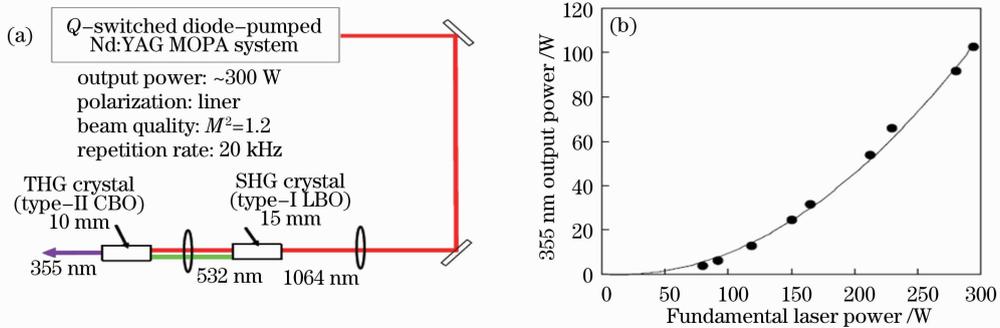


图 7 103 W 355 nm UV 激光器。(a)实验装置;(b)输出功率特性

Fig. 7 103 W 355 nm UV laser. (a) experimental setup; (b) output performance

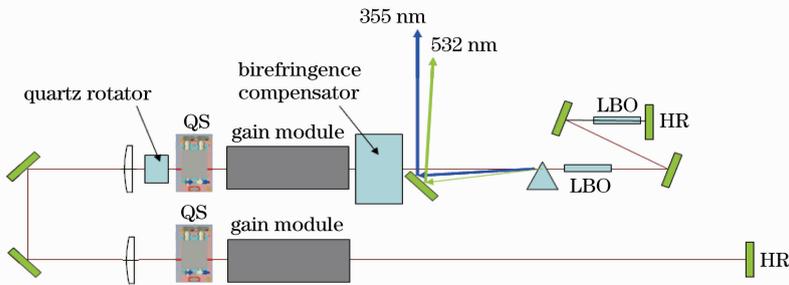


图 8 160 W 355 nm UV 激光器实验装置

Fig. 8 Experimental setup for 160 W 355 nm UV laser

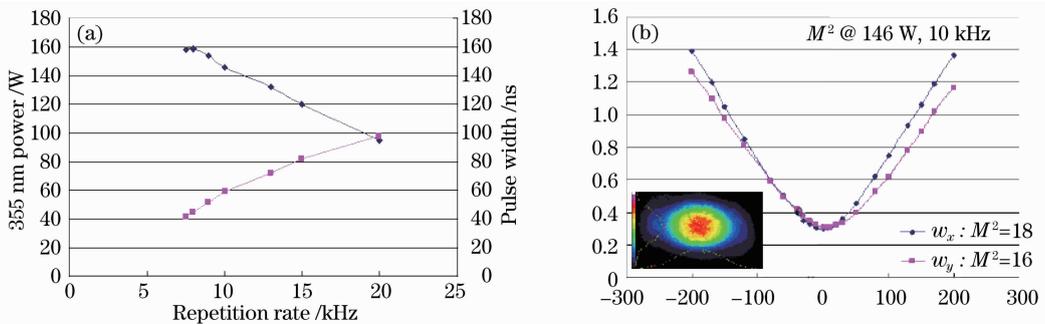


图 9 160 W 355 nm UV 激光输出特性。(a)实验装置,(b)146 W 重复频率为 10 kHz 时的光束质量测量结果

Fig. 9 Output performance of 160 W 355 nm UV laser. (a) experimental setup, (b) beam quality measurement result at 146 W with repetition rate of 10 kHz

利用内腔方式获得高效率 355 nm UV 激光输出,由于具有体积小,结构紧凑等优点,国内外开展的研究也比较多^[32,33]。2009 年,Coherent 公司报道了一款平均功率达到 160 W 的 355 nm UV 激光输出^[33]。激光器的结构如图 8 所示。该激光器为内腔频率变换结构,谐振腔内含有两组侧抽运的 Nd:

YAG 模块构成双棒串接结构,两个增益模块之间插入 90°石英旋转器以及双折射补偿器,实现像传递和双折射补偿,同时腔内插入两个 Q 开关(QS)实现高功率下的调 Q 关断。采用 20 mm 长的 I 类非临界相位匹配 LBO 进行倍频,采用 20 mm 长的 II 类相位匹配 LBO 进行和频,采用布儒斯特角切割的棱

镜进行分光。实验在 2.7 kW 抽运下,在 8 kHz 时得到了 160 W 平均功率的 355 nm UV 激光输出,其输出特性曲线见图 9(a)。在 10 kHz 时测量输出的椭圆 UV 激光光束质量,在两个正交方向上的光束质量测量结果为 $M_x^2=18$ 和 $M_y^2=16$,测量结果见图 9(b)。

4.2 266 nm 高功率全固态 UV 激光器

2000 年,日本三菱公司和大阪大学合作,报道了 20 W 的 266 nm UV 激光器^[34]。该激光器结构如图 10 所示,采用高亮度高功率 532 nm 绿光激光器作为基频光,其质量因子 M^2 为 10,在 10 kHz 时的功率约为 100 W,脉宽为 80 ns。采用 15 mm 长的 I 类相位匹配 CLBO 晶体倍频。在 10 kHz 下,105.8 W 绿光通过 CLBO 倍频得到 20.5 W,266 nm UV 激光输出,绿光到 UV 的转换效率为 19.4%,UV 激光光束质量 M^2 约为 10。2003 年,该小组利用相同的结构,将 266 nm UV 激光输出功

率提高到 23 W^[35]。此后,该小组又利用 200 W 绿光作为基频光,绿光光束质量为 10,重复频率为 7 kHz,对应的脉宽为 80 ns。采用 15 mm 长的 I 类相位匹配 CLBO 作为 FOHG 晶体对绿光倍频,得到了 40 W 的输出功率,266 nm UV 激光输出,对应的绿光到 UV 的转换效率为 20%^[36]。2007 年,该小组利用 CLBO 作为 FOHG 与 FHG 晶体,在 10 kHz 重复频率下得到了 27.9 W,266 nm UV 激光和 10.2 W,213 nm 深 UV 激光^[37]。

2006 年,中国科学院物理研究所报道了 28.4 W,266 nm UV 激光输出^[38]。激光器结构和输出特性如图 11 所示。采用工作在 10 kHz 的 120 W 绿光激光器进行倍频,绿光脉冲宽度为 80 ns。40 mm 长的 I 类相位匹配 CLBO 晶体对绿光倍频,得到 28.4 W,266 nm UV 激光输出,从绿光到 UV 的转换效率高达 24.7%。

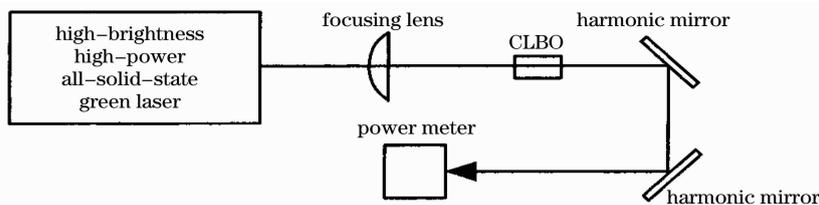


图 10 20.5 W,266 nm UV 激光器实验装置

Fig. 10 Experimental setup for 20.5 W 266 nm UV laser

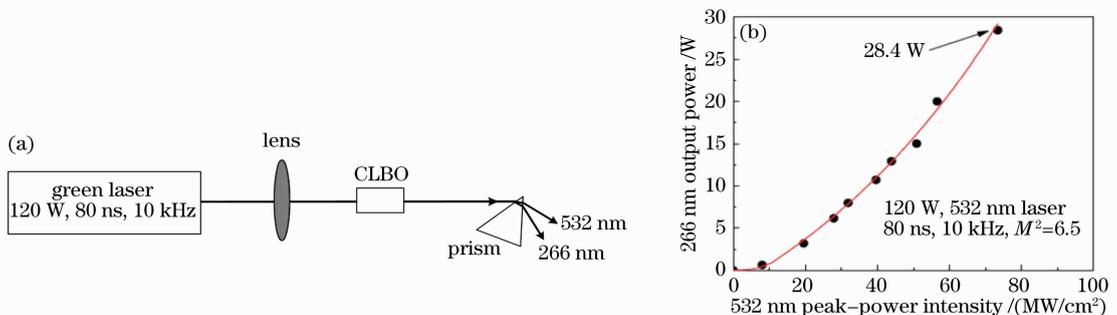


图 11 28.4 W,266 nm UV 激光器。(a)实验装置,(b)功率输出特性

Fig. 11 28.4 W, 266 nm UV laser. (a) experimental setup, (b) output power performance

5 本小组全固态 355 nm 和 266 nm 激光器方面的研究工作

近年来,本研究小组在全固态 UV 激光器方面开展了系列研究工作,主要集中在高功率、高效率、高光束质量、高重复频率以及长寿命等方面。

在高功率和高重复频率方面,本小组报道了 43 W 高重复频率高光束质量的 355 nm UV 激光输出^[39]。激光器结构如图 12 所示。基频光为 Nd:

YVO₄ MOPA 激光器,其种子源为声光调 Q(AOQ) 双端面抽运 Nd:YVO₄ 激光器,种子光通过多级放大以后,进入频率转换模块。25 mm 长的 I 类非临界相位匹配 LBO($\theta=90^\circ, \varphi=0^\circ$)用作 SHG 转换,20 mm 长的 II 类相位匹配 LBO($\theta=44.6^\circ, \varphi=90^\circ$)用作和频转换,通过单块透镜聚焦,实现紧凑的 SHG 和频转换。实验中,当采用两级放大的时候,在 65 kHz 下,101 W,1064 nm TEM₀₀ 输出激光通

过倍频得到 60 W 绿光输出, 红外(IR)激光和绿光再经过和频, 得到了 30.2 W UV 激光输出, UV 激光脉宽 14 ns, 单脉冲能量 0.456 mJ, 峰值功率为 33 kW。1064 nm 到 355 nm 的效率达到 30%。通过增加两级放大器, 在种子光通过四级功率放大以后, 在 60 kHz 下得到了 154 W TEM₀₀ ($M_x^2=1.28$ 和 $M_y^2=1.21$) 1064 nm 红外激光^[40], 脉宽为 16.4 ns。利用相同的频率变换结构, 通过倍频, 得到了

103 W, 532 nm 的 TEM₀₀ 模输出^[41]; 通过 SHG 得到 43 W, 355 nm UV 激光输出, 脉冲宽度为 10.7 ns, 峰值功率和单脉冲能量高达 67 kW 和 0.716 mJ, 测量的 UV 激光光束质量 $M^2 < 1.5$ 。该激光器的输出曲线和光束质量测量结果见图 13(a) 和 (b)。当激光重复频率提高到 300 kHz 时, 得到了 10 W 355 nm 高重复频率 UV 输出。

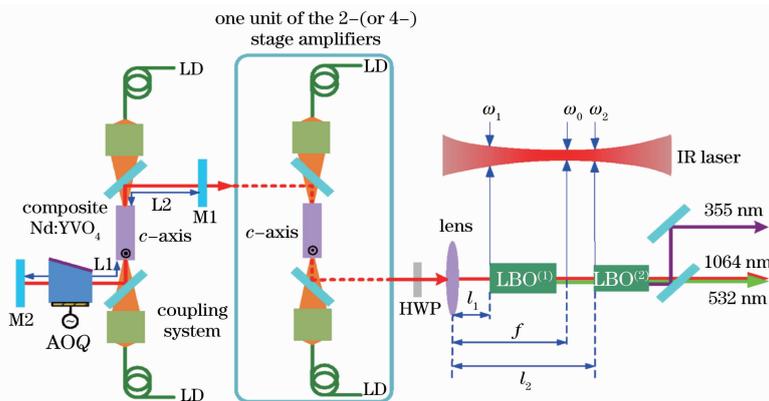


图 12 43 W, 355 nm UV 激光器实验光路

Fig. 12 Experimental setup for 43 W 355 nm UV laser

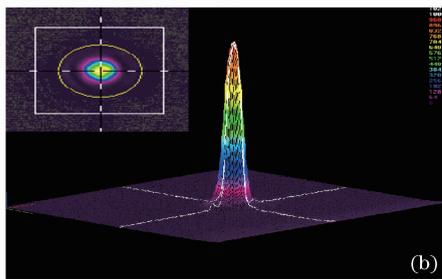
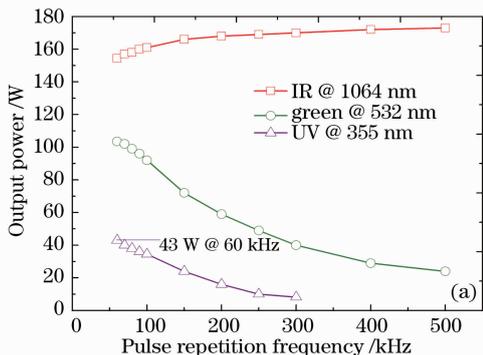


图 13 43W, 355nm 激光输出特性。(a) 输出功率随脉冲重复频率 (PRF) 的变化, (b) UV 激光光斑分布

Fig. 13 Output performance for 43 W, 355 nm UV laser. (a) average output power versus PRF, (b) spatial form of UV laser on far field

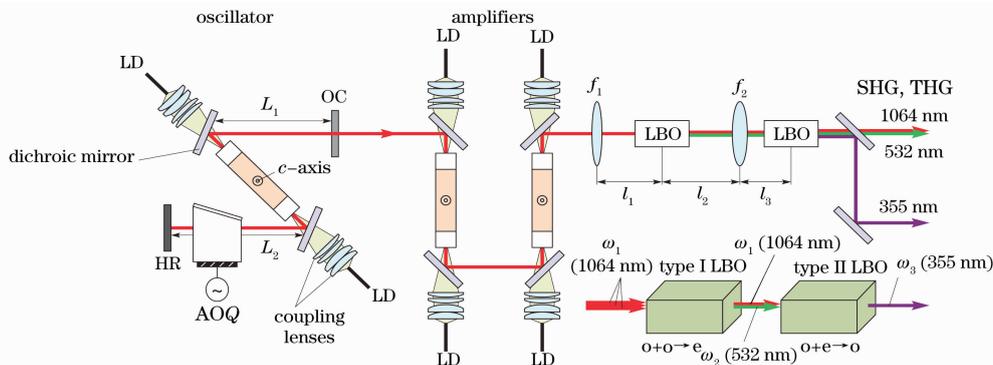


图 14 光-光转换效率 35% 的 355 nm UV 激光实验装置图

Fig. 14 Experimental setup for 35% optical-optical efficiency 355 nm UV laser

在高效率研究方面,本小组通过优化设计频率转换模块,得到了 35.1 W 的 355 nm UV 激光输出^[42],红外到 UV 转换效率提高到 35.8%。激光器结构如图 14 所示。采用“z”构型的紧凑声光调 Q 双端面抽运 Nd:YVO₄激光器作为种子源,通过两级放大,得到近 100 W,1064 nm 基模输出($M_x^2=1.12$ 和 $M_y^2=1.11$)。基频光通过 $f_1=150$ mm 透镜聚焦倍频,再通过 $f_2=75$ mm 透镜,将基频光和倍频光再次聚焦进行和频。SHG 采用 25 mm 长的 I 类非临界相位匹配 LBO ($\theta=90^\circ, \varphi=0^\circ$),和频采用 17 mm 长的 II 类相位匹配 LBO ($\theta=42^\circ, \varphi=90^\circ$)。在 70 kHz 时得到了最高 35.1 W,355 nm UV 激光输出,脉宽为 15.7 ns。在不增加基频光峰值功率密度条件下,1064 nm 到 355 nm 的转换效率提高到了 35.8%。当重复频率降低到 65 kHz 时,UV 输出功率为 34.9 W,脉冲峰值功率和单脉冲能量分别为 35.8 kW 和 0.54 mJ。

在 266 nm UV 激光研究方面,本小组报道了 14.8 W 的高重复频率(100 kHz)266 nm UV 激光输出^[43]。激光器结构类似于图 12,但是将和频晶体换为 7 mm 长的 I 类相位匹配的 BBO 晶体 ($\theta=47.6^\circ, \varphi=0^\circ$)。相对于常用的 CLBO 晶体来说,不需要加热,更适合于工业使用。实验中,在 100 kHz 时得到了 14.8 W 266 nm UV 激光输出,脉冲宽度为 10 ns,对应的峰值功为 14.8 kW,从绿光到 UV 转换效率为 18.3%。提高重复频率至 150 kHz,得到了 11.5 W UV 激光,输出特性曲线如图 15 所示。

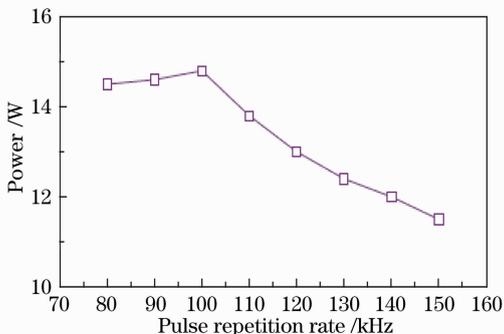


图 15 266 nm UV 激光器输出功率随重复频率的变化
Fig. 15 Power output of 266 nm UV laser versus PRF

6 总结与展望

随着工业界对于高功率全固态 UV 激光需求的增加,同时也由于新型非线性材料的不断出现和材料性能的不断提高,高功率全固态 UV 激光的输出功率已经达到了百瓦量级的水平,而且这一输出

功率的记录将被不断打破。虽然高功率 UV 激光的输出功率获得了很快的提高,但是高功率 UV 激光的发展还存在一些问题需要解决,这是将来高功率 UV 激光技术工业化和产品化所面临的主要问题:

1)非线性光学晶体的抗损伤问题。随着 UV 激光功率的提高,非线性晶体的光学损伤问题也越来越突出。要解决这一问题,一方面要通过材料本身性能的改善、晶体加工和镀膜技术的提高;另一方面,需要通过研究新型光学抗损伤技术,例如在非线性晶体输出端利用布儒斯特角切割,既实现分光,又可以不用镀膜,提高晶体的抗损伤能力。

2)UV 激光的效率提高。这涉及到激光器的总体结构设计,为了得到高效率全固态 UV 激光,不但需要合理设计基频源的结构,得到高的电光效率,也需要在频率变换部分提高频率转换效率,这是当前面对的主要问题。由于频率转换效率与光功率密度成正比,所以需要提高光功率密度以提高转换效率,但这与晶体的光学损伤构成一对矛盾,需要综合与折中的考虑;此外,非线性晶体存在的光学走离效应是影响非线性转换效率提高的重要因素。

3)UV 激光的光束质量提高。当前报道的高功率全固态 UV 激光器都存在光束质量不佳的问题,这一方面是由于高光束质量高功率基频光的设计存在一定困难,另一方面,由于非线性转换过程中的走离效应和非线性晶体的光学质量问题,也严重退化 UV 激光的光束质量,可以通过适当设计频率变换结构或者晶体结构来补偿走离效应。

4)UV 光学晶体的寿命问题。目前提高晶体使用寿命的办法是采用 Coherence 公司的专利技术,通过移动晶体改变晶体中的光斑位置,这样一个点可以工作 500 h,可以通过 $M \times N$ (如 8×9) 个点来增加寿命,但是增加了结构的复杂程度,另外晶体移动过程中的定位精度需要保证,可能还要探索更有效的提高晶体使用寿命的方法。

参 考 文 献

- 1 T. Sasaki, Y. Mori, M. Yoshimura *et al.*. Recent development of nonlinear optical borate crystals: key materials for generation of visible and UV light[J]. *Mater. Sci. Eng. Rep.*, 2000, **30**(1-2): 1~54
- 2 C. X. Wang, G. Y. Wang, A. V. Hicks *et al.*. High-power Q-switched TEM₀₀ mode diode-pumped solid state lasers with >30 W output power at 355 nm[C]. *SPIE*, 2006, **6100**: 610019
- 3 N. Hodgson, M. Li, A. Held *et al.*. Diode-pumped TEM₀₀ mode solid state lasers and their micromachining applications[C]. *SPIE*, 2003, **4977**: 281~294

- 4 Zhang Fei, Duan Jun, Zeng Xiaoyan *et al.*. Study on blind holes drilling on flexible circuit board using 355nm UV laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(12): 3143~3148
张菲, 段军, 曾晓雁等. 355 nm 紫外激光加工柔性线路板盲孔的研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(12): 3143~3148
- 5 P. A. Franken, A. E. Hill, C. W. Peters *et al.*. Generation of optical harmonics[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1961, **7**(4): 118~119
- 6 M. Bass, P. A. Franken, A. E. Hill *et al.*. Optical mixing[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1962, **8**(1): 18~18
- 7 J. A. Giordmaine. Mixing of light beams in crystals[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1962, **8**(1): 19~20
- 8 P. D. Maker, R. W. Terhune, M. Nisenoff *et al.*. Effects of dispersion and focusing on the production of optical harmonics [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1962, **8**(1): 21~22
- 9 V. G. Dmitriev, G. Ggurzadyan, D. N. Nikogosyan. Handbook of Nonlinear Optical Crystals [M]. New York: Springer, 1999
- 10 Yao Jianquan. Nonlinear Optical Frequency Conversion and Laser Tuning Technique[M]. Beijing: Science Press, 1995
姚建铨. 非线性光学频率变换及激光调谐技术[M]. 北京: 科学出版社, 1995
- 11 Shi Shunxiang, Chen Guofu, Zhao Wei *et al.*. Nonlinear Optics [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2003
石顺祥, 陈国夫, 赵卫等. 非线性光学[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003
- 12 Li Gang. The Conversion and Scaling for Lasers Frequency: The Practical Nonlinear Optics Technology [M]. Beijing: Science Press, 2005
李港. 激光频率的变换与扩展——实用非线性光学技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005
- 13 C. Chen, X. Wu, A. Jiang *et al.*. New nonlinear-optical crystal: LiB₃O₅ [J]. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 1989, **6**(4): 616~621
- 14 Y. Mori, I. Kuroda, S. Nakajima *et al.*. New nonlinear optical crystal: cesium lithium borate [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67**(13): 1818~1820
- 15 Y. Wu, T. Sasaki, S. Nakai *et al.*. CsB₃O₅: a new nonlinear optical crystal [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **62** (21): 2614~2615
- 16 C. T. Chen, J. H. Lu, G. L. Wang *et al.*. Deep ultraviolet harmonic generation with KBe₂BO₃F₂ crystal [J]. *Chinese Phys. Lett.*, 2001, **18**(8): 1081~1081
- 17 Z. G. Hu, M. Yoshimura, K. Muramatsu *et al.*. A new nonlinear optical crystal-BaAlBO₃F₂ (BABF) [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2002, **41**(10B): L1131~L1133
- 18 C. Chen. Chinese lab grows new nonlinear optical borate crystals [J]. *Laser Focus World*, 1989, **25**(11): 129~130
- 19 L. Wang, S. Chen, J. Xue *et al.*. Optical properties of the second harmonic generation for nonlinear crystal CLBO [C]. *SPIE*, 2001, **4453**: 106~111
- 20 D. A. Roberts. Simplified characterization of uniaxial and biaxial nonlinear optical crystals: A plea for standardization of nomenclature and conventions [J]. *IEEE. J. Quantum. Electron.*, 1992, **28**(10): 2057~2074
- 21 H. Kitano, K. Sato, N. Ushiyama *et al.*. Efficient 355-nm generation in CsB₃O₅ crystal [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28** (4): 263~265
- 22 Y. Zhou, Y. Yue, J. Wang *et al.*. Nonlinear optical properties of BaAlBO₃F₂ crystal [J]. *Opt. Express*, 2009, **17** (22): 20033~20038
- 23 Y. Zhou, G. Wang, Y. Yue *et al.*. High-efficiency 355 nm generation in barium aluminum borate difluoride (BaAlBO₃F₂) [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(6): 746~748
- 24 G. Ryu, C. S. Yoon, T. P. J. Han *et al.*. Growth and characterisation of CsLiB₅O₁₀ (CLBO) crystals [J]. *J. Cryst. Growth*, 1998, **191**(3): 492~500
- 25 C. Chen, Y. Wang, B. Wu *et al.*. Design and synthesis of an ultraviolet-transparent nonlinear optical crystal Sr₂Be₂B₂O₇ [J]. *Nature*, 1995, **373**(6512): 322~324
- 26 G. Aka, A. Kahn-Harari, D. Vivien *et al.*. A new non-linear and neodymium laser self-frequency doubling crystal with congruent melting: Ca₄GdO(BO₃)₃ (GdCOB) [J]. *European Journal of Solid State and Inorganic Chemistry*, 1996, **33**(8): 727~736
- 27 Z. Jie, C. Dafu, L. Huibin *et al.*. Structural behavior of thin BaTiO₃ film grown at different conditions by pulsed laser deposition [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1997, **36**(1A): 276~283
- 28 H. Zhang-Gui, T. Higashiyama, M. Yoshimura *et al.*. A new nonlinear optical borate crystal K₂Al₂B₂O₇ (KAB) [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1998, **37**(10A): 1093~1094
- 29 N. Hodgson, D. Dudley, L. Gruber *et al.*. Diode end-pumped, TEM₀₀ Nd:YVO₄ laser with output power greater than 12 W at 355 nm [C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, Washington, 2001, 389~390
- 30 Y. C. Wu, F. Chang, P. Z. Fu *et al.*. High-average-power third harmonic generation at 355 nm with CsB₃O₅ crystal [J]. *Chinese Phys. Lett.*, 2005, **22**(6): 1426~1428
- 31 D. Rajesh, M. Yoshimura, T. Eiro *et al.*. UV laser-induced damage tolerance measurements of CsB₃O₅ crystals and its application for UV light generation [J]. *Opt. Mater.*, 2008, **31**(2): 461~463
- 32 Hu Ailan, Guo Qiang, Wu Bian *et al.*. LD pumped 355-nm quasi-CW ultraviolet laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1810~1814
胡爱兰, 郭强, 吴边等. LD抽运 355-nm 准连续紫外激光器 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1810~1814
- 33 D. R. Dudley, O. Mehl, G. Y. Wang *et al.*. Q-switched diode pumped Nd:YAG rod laser with output power of 420 W at 532 nm and 160 W at 355 nm [C]. *SPIE*, 2009, **7193**: 71930Z
- 34 T. Kojima, S. Konno, S. Fujikawa *et al.*. 20 W ultraviolet-beam generation by fourth-harmonic generation of an all-solid-state laser [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(1): 58~60
- 35 T. Sasaki, Y. Mori, M. Yoshimura. Progress in the growth of a CsLiB₅O₁₀ crystal and its application to ultraviolet light generation [J]. *Opt. Mater.*, 2003, **23**(1~2): 343~351
- 36 M. Nishioka, S. Fukumoto, F. Kawamura *et al.*. Improvement of laser-induced damage tolerance in CsLiB₅O₁₀ for high-power UV laser source [C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, Baltimore, 2003, CTuF2
- 37 T. Katsura, T. Kojima, M. Kurosawa *et al.*. High-power, high-repetition UV beam generation with an all-solid-state laser [C]. *CLEO/Europe and IQEC 2007 Conference Digest*, Munich, 2007, CA5_3
- 38 G. Wang, A. Geng, Y. Bo *et al.*. 28.4 W 266 nm ultraviolet-beam generation by fourth-harmonic generation of an all-solid-state laser [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **259**(2): 820~822
- 39 X. Ya, Q. Liu, M. Gong *et al.*. High-repetition-rate high-beam-quality 43 W ultraviolet laser with extra-cavity third harmonic generation [J]. *Appl. Phys. B: Lasers Opt.*, 2009, **95** (2): 323~328
- 40 Q. Liu, X. Yan, X. Fu *et al.*. 183 W TEM₀₀ mode acoustic-optic Q-switched MOPA laser at 850 kHz [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(7): 5636~5644
- 41 Q. Liu, X. Yan, M. Gong *et al.*. 103 W high beam quality green laser with an extra-cavity second harmonic generation [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(19): 14335~14340
- 42 X. Yan, Q. Liu, H. Chen *et al.*. 35.1 W all-solid-state 355 nm ultraviolet laser [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2010, **7**(8): 563~568
- 43 Q. Liu, X. P. Yan, X. Fu *et al.*. High power all-solid-state fourth harmonic generation of 266 nm at the pulse repetition rate of 100 kHz [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2009, **6**(3): 203~206