

文章编号: 0258-7025(2009)07-1810-05

LD 抽运 355-nm 准连续紫外激光器

胡爱兰 郭 强 吴 边 王首长 张少飞

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要 报道了激光二极管(LD)侧面抽运 Nd:YAG 激光晶体腔内三倍频 355 nm 紫外激光器。实验中采用声光调 Q 技术,选用结构简单、紧凑的三镜折叠、平-凹腔设计,在腔内对 1064 nm 基波采用 I 类相位匹配 LiB₃O₅ (LBO) 晶体二倍频、II 类相位匹配 LBO 晶体实现三倍频,获得了较好光束质量的准连续紫外激光输出。在激光二极管抽运功率为 155 W, 声光调 Q 的调制频率为 5.40 kHz 的工作条件下,获得脉宽为 45 ns, 最高平均输出功率为 2.14 W, 光场均匀分布的 355 nm 准连续紫外激光, 808 nm 抽运光到 355 nm 紫外激光的光-光转换效率达到 1.38%, 1 h 内输出稳定性为 3.30%。此外,对影响腔内三倍频转换效率的因素进行了相应的分析研究。

关键词 激光技术; 准连续紫外激光; 三倍频; 激光二极管侧面抽运; LBO 晶体

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093607.1810

LD Pumped 355-nm Quasi-CW Ultraviolet Laser

Hu Ailan Guo Qiang Wu Bian Wang Shouzhong Zhang Shaofei

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract A LD side-pumped Nd:YAG all-solid-state ultraviolet laser is demonstrated under acousto-optic Q-switched operation, by using a simple and compact three-mirror folded and flat-concave cavity resonator, with type I phase-matched LiB₃O₅ (LBO) as second harmonic generation crystal and type II phase-matched LBO as third harmonic generation crystal. The output power of 355-nm UV laser reaches to 2.14 W at the incident pump power of 155 W and repetition rate of 5.40 kHz with pulse width of 45 ns. The light-light conversion efficiency is about 1.38%, and the power stability is 3.30% in 1 h operation accordingly. The influence factor on the triple frequency conversion efficiency is studied.

Key words laser technique; quasi-CW ultraviolet laser; third harmonic generation; laser diode-side-pumped; LBO crystal

1 引 言

紫外激光由于具有波长短、聚焦性能好、光子能量高和冷处理等特点,还能激发特定的光化学反应,使紫外激光器成为一种崭新的发展方向,在工业、医疗、基础科学研究、高分辨光谱学、大气探测和空间光通信领域有着广泛的应用^[1~4]。全固态紫外激光器具有光束质量好、功率稳定性好、可靠性高、使用方便、结构紧凑、体积小、工作安全、环境适应度宽等诸多优点^[5,6]。近年来利用非线性频率变换技术获得高功率紫外激光输出的研究已成为激光技术领域

的一个研究热点^[5~11]。目前,对掺 Nd³⁺ 固体激光近红外波进行腔内或腔外频率转换是获得全固态紫外激光最直接、最成熟的方法,腔内倍频较腔外倍频实现紫外输出的研究报道较少,尤其对采用 L 型折叠腔、双 LiB₃O₅ (LBO) 晶体腔内倍频实现紫外输出的研究更是少有报道^[5~13]。本实验采用激光二极管(LD)侧面抽运 Nd:YAG 激光晶体, L 型折叠腔内插入声光调 Q 器件,实现高功率准连续 1064 nm 基频激光输出。腔内分别采用 I 类相位匹配 LBO 作为倍频和 II 类相位匹配的 LBO 作为三倍

收稿日期: 2008-08-25; 收到修改稿日期: 2008-10-23

作者简介: 胡爱兰(1980—),女,博士研究生,主要从事全固态激光器件及非线性频率变换技术的研究。

E-mail: ailanhu@ustc.edu

导师简介: 郭 强(1963—),男,研究员,硕士生导师,主要从事宽调谐与多波长激光技术、激光工业和激光医疗等方面的研究。E-mail: qguo@aiofm.ac.cn

频晶体,最终实现了高功率、高效率的准连续 355 nm 紫外激光输出,脉宽为 45 ns,最高平均输出功率达 2.14 W。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示,腔镜 M_1, M_2, M_3 构成 L 型谐振腔,光束被双程倍频、和频输出。抽运源为北京国科世纪激光公司生产的 GK 系列抽运模块(GKPM-60)。三列相互呈 120° 对称放置的激光二极管阵列(LD Bar)对中心处的 Nd:YAG 晶体棒连续侧面抽运。每列激光二极管阵列最大输出为 60 W,输出激光中心波长为 808 nm,与 Nd:YAG 晶体的吸收峰相匹配。Nd:YAG 激光晶体中 Nd^{3+} 的掺杂原子数分数为 0.6%,晶体尺寸为 $\Phi 3 \text{ mm} \times 65 \text{ mm}$,晶体的两个通光面均镀 1064 nm 增透膜。使用外部的闭路温控循环水对半导体模块及 YAG 棒进行冷却,保证模块在工作温度范围内稳定运行,同时降低棒的热透镜效应。声光(A-O)Q 开关型号为 QS275SB,射频功率为 50 W 的声光驱动电源驱动,重复频率在 0.2 ~ 50 kHz 范围内连续可调。

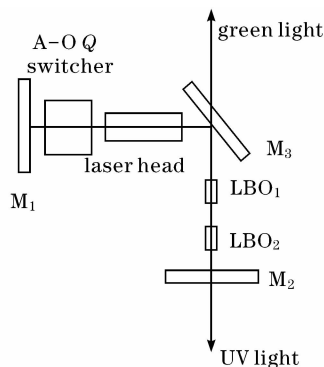


图 1 LD 抽运 355 nm 紫外激光器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the LD pumped UV laser experimental setup

当抽运光入射到 Nd:YAG 中以后,一部分光功率未能转换成跃迁辐射,以热的形式存在于 Nd:YAG 中,导致热透镜效应的存在。采用稳定性更好的平-凹腔。腔镜 M_1 为曲率半径 500 mm 的凹面镜,镀有对波长 1064 nm 全反膜。腔镜 M_3 为一片平面三色镜,对基波与 355 nm 和频光 45° 反射,对 532 nm 倍频光 45° 双面增透,输出镜 M_2 镀有 1064 nm 和 532 nm 全反膜和 355 nm 高透膜。考虑到紫外激光单光子能量大、腔内功率密度高、激光准连续输出等因素,选用具有性能稳定、光学损伤阈值高、紫外透光性好、非线性光学系数适中、较宽的允许角和小的走离角等优点

的 LBO 晶体^[14]作为非线性频率变换晶体。采用 I 类相位匹配 LBO 晶体为倍频晶体,而不采用通常的 KTP 晶体。如果利用 KTP 晶体二倍频,只能是 II 类临界相位匹配。基波 1064 nm 一部分作为 o 光偏振,另一部分作为 e 光偏振传播,由于走离效应通过非线性晶体后两束光在空间产生分离,出来的光束为椭圆偏振光,且存在相速和群速失配。这些因素都不利于后边的三倍频。KTP 晶体不仅有“灰线”现象易导致永久性损伤,而且晶体的波片功能亦会影响剩余基波的偏振方向^[7]。采用 II 类相位匹配切割 LBO 晶体作为和频晶体,两块 LBO 晶体尺寸均为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,端面均镀有 1064 nm,532 nm 和 355 nm 的三色增透膜。分别用铝箔包裹置于用循环水冷却的紫铜块内。晶体在腔内放置满足图 2 所示偏振匹配条件,用 LBO(I 类)作为二倍频晶体^[13],LBO 晶体 I 类相位匹配所产生的二次谐波没有走离角。它产生的二次谐波与基波具有相互垂直的偏振态,恰好能满足 LBO(II 类)三倍频的相位匹配条件,偏振损耗较小。第二块 LBO 晶体对第一块 LBO 晶体产生的倍频光和剩余的基波进行和频,实现三倍频 355 nm 紫外激光输出。

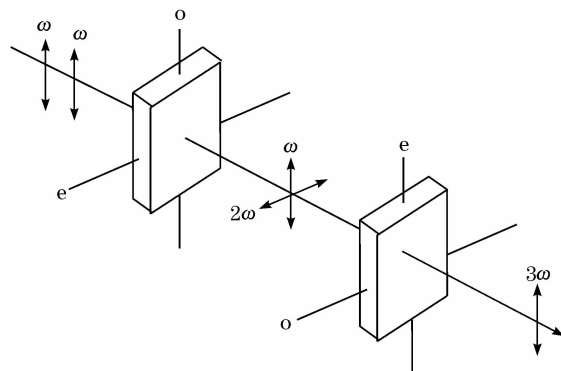


图 2 LBO 晶体中倍频(I 类)、三倍频(II 类)光束的偏振匹配情况

Fig. 2 Second harmonic generation (type I) and third harmonic generation (type II) light polarizing matched LBO crystal

3 实验结果和讨论

三次谐波的产生分为两个部分,在第一块晶体中,部分 1064 nm 基波辐射转换为 532 nm 二次谐波;在第二块晶体中,未转换的基波辐射与二次谐波和频产生 355 nm 三次谐波。有效的三倍频取决于从第一块晶体发出的基波强度(P_{IR})与二次谐波光子强度(P_{Green})为 1:1 的比例^[15],在基频光注入功率一定的

前提下, 若想得到高转换效率、高功率的 355 nm 激光, 就要尽可能地提高二次谐波转换效率, 使 $P_{Green} : P_{IR}$ 接近 $1 : 1$ ^[16]。输出镜片镀有 1064 nm 全反膜, 可

以使得尽可能多的 1064 nm 基波反复通过倍频晶体转换为二次谐波, 从而实现高转换效率、高功率的 355 nm 紫外激光输出。

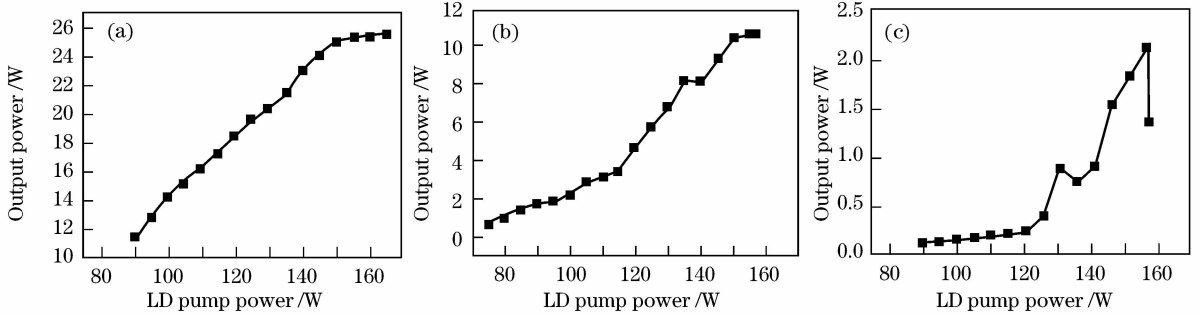


图 3 1064-nm(a), 532-nm(b), 355-nm(c) 激光输出功率随激光二极管抽运功率的变化曲线

Fig. 3 1064-nm(a), 532-nm(b), and 355-nm(c) laser output power as function of LD pump power

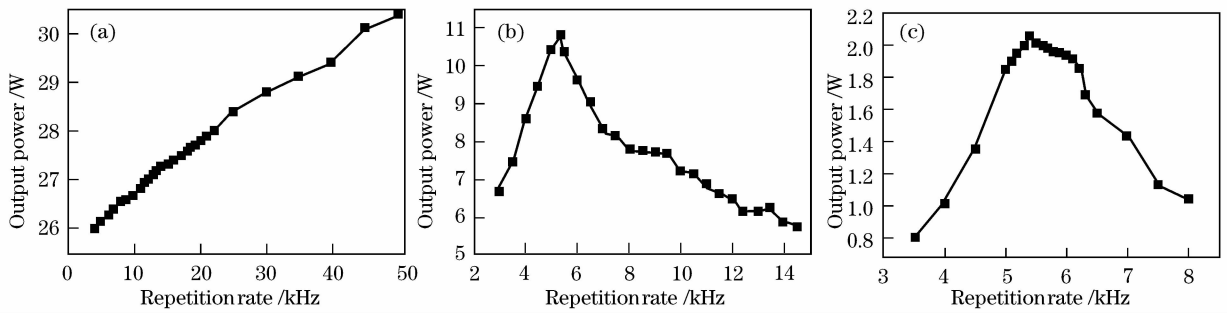


图 4 1064-nm(a), 532-nm(b), 355-nm(c) 激光输出功率随调制频率的变化曲线

Fig. 4 1064-nm(a), 532-nm(b), and 355-nm(c) laser output power as function of repetition rate

声光调 Q 激光器的重复频率设置为 5.40 kHz, 在不同的抽运功率下分别测试了基频光、倍频光、和频光的平均输出功率如图 3 所示。基频光输出功率均随抽运功率增加而呈现增加趋势, 并且增加的幅度逐渐减小。而倍频光、和频光随抽运功率的增加呈先增加后减小的趋势, 并且和频光的下降趋势极为明显。原因是高功率抽运下, 虽然基频光和二倍频光的功率增大了, 但其光束质量急剧恶化, 导致三倍频晶体中的和频效率下降使紫外光输出功率降低。抽运功率恒定为 150 W 时, 基频光、倍频光、和频光输出功率随重复频率的变化如图 4 所示。基频光输出功率随重复频率增加逐渐增加, 倍频光与和频光输出功率变化曲线不同于基频光, 二者随着重复频率增加先增加后减小。一方面随重复频率的增加脉冲宽度会持续增加; 另一方面随重复频率增加基波平均功率虽持续增加, 而基波峰值功率密度却会减小。这都将导致非线性转换效率下降, 倍频光输出功率会减小, 进而和频光功率也会随之减小。实验证明在抽运功率为 155 W, 重复频率为 5.40 kHz 时, 355 nm 紫外光平均输出功率达到最大为 2.14 W, 脉宽为 45 ns, 在相纸上形成的光斑如图 5 所示。光场分布均匀, 相应的抽运

光到紫外激光的光-光转换效率可以达到 1.38%。

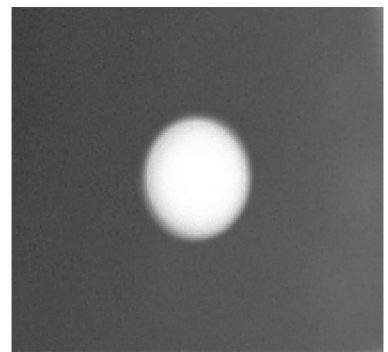


图 5 拍摄到的紫外激光远场光斑

Fig. 5 Far field UV laser spots

为了研究紫外激光器的长期稳定性, 测试了激光器在 1.80 W 左右输出连续 1 h 的稳定性, 测试时每隔 10 min 记录一次数据。7 个测试数据为 1.80 W, 1.76 W, 1.65 W, 1.82 W, 1.70 W, 1.72 W 和 1.69 W, 求均方根误差得稳定性为 3.30%。

由于两个非线性过程, 二次谐波和三次谐波发生在同一个腔臂内, 腔内的运转有些复杂。很多因素像基波与二次谐波在和频晶体内的功率及其平衡、偏振匹配、基波与二次谐波的空间交叠都会影响

三次谐波的效率。一般三次谐波的输出功率可表示为^[17],

$$P_3 = \frac{\omega_3^2 d_{\text{eff}}^2 l^2}{\epsilon_0 c^3 n_1 n_2 n_3} \left(\frac{P_1 P_2}{\pi \omega_0^2} \right),$$

其中 ω_3 为 355 nm 光频率, ϵ_0 为真空介电常数, d_{eff} 为有效非线性光学系数, ω_0 为束腰半径, 下标 1, 2, 3 分别指 1064 nm, 532 nm 和 355 nm 光。可以看出三次谐波的功率与基波、二次谐波的功率成正比。内腔三倍频的基本理论是不同于外腔三倍频的, 通常高效的三倍频取决于基波与二次谐波光子在强度上为 1:1 的比例。但是实际上对于内腔三倍频基波要比二次谐波强得多, 一般的比例在 (3:1)~(10:1) 的范围内。这就要尽可能地提高二次谐波的转换效率, 输出镜片镀有 532 nm 和 1064 nm 全反膜。可以使得尽可能多的 1064 nm 基波反复通过倍频晶体转换为二次谐波, 并将倍频晶体放在束腰位置以获得高转换效率。

非线性晶体插入激光腔内, 尤其是在有两块非线性晶体的内腔三次倍频激光腔内, 会产生腔内基波光束的偏振问题。通常, 当这些非线性晶体引入腔内时, 会造成偏振激光退偏或改变非偏振激光腔内 o 光和 e 光的比例。I 类, II 类相位匹配二次倍频晶体有不同的退偏效应并需要不同的共振腔偏振, 相应地对三次谐波特性也会产生不同的影响。如果采用 II 类相位匹配实现腔内二次谐波, o 光和 e 光在晶体内必须相互交叠, 而这两个基波正交分量的存在是双折射干涉现象的根源。虽然有些解决这类问题的技术, 但是在三倍频应用中未能得到充分解决。这一现象造成的周期变化使得很难排列谐振腔, 甚至在二倍频和三倍频晶体的匹配角度内, 个别干涉峰的出现使得最终的调谐更复杂和困难。对于二倍频和三倍频间的偏振匹配, 二次倍频后, 有 o 光和 e 光强度近乎相等的基波分量和 e 光二次谐波分量, 会使得三次谐波很难充分利用基波的两个分量, 这是因为基波两分量的相位存在空间任意性并且有稍微的分离。无论是采用 I 类还是 II 类相位匹配的三次倍频, 基波分量都不能完全利用。如果采用 I 类相位匹配实现腔内二次倍频, 只需要基波的 o 光分量, 穿过二倍频晶体振荡光束只有 o 光, 由于没有 e 光, 因此在 II 类匹配二次倍频中存在的所有退偏问题就不存在了, 而且更多的三次倍频晶体可供选择, I 类, II 类相位匹配方法均可以用来实现三次倍频, 而且更容易优化二倍频和三倍频的偏振匹配。而 II 类相位匹配三倍频晶体恰好匹配 I 类相位匹配

三倍频晶体输出的偏振状态, 因此选择了 I 类相位匹配实现二倍频, II 类相位匹配实现三倍频。为了增大激光束的功率密度以实现高的转换效率需要使光束尺寸尽可能小, 平-凹腔凹面反射镜恰好可以对光束进行一定的聚焦以缩小光束尺寸。另外选用的 LBO 晶体具有 10 倍于 BaB₂O₄ (BBO) 的宽接收角, 可以获得更对称、高质量的紫外激光。

镀膜工艺技术的高低也会影响三次谐波的效率, 由于条件限制选择的镜片 M₃ 镀有 532 nm 的增透膜导致有很大一部分绿光由镜片 M₃ 辐射出去, 降低了三次谐波效率。同时由于非线性晶体和输出镜片的膜层有所损伤, 在很大程度上阻碍了三次谐波效率的提高。相信通过实验条件的优化, 内腔三次谐波的效率会有显著的提高。

4 结 论

采用北京国科世纪激光公司生产的 GK 系列抽运模块侧面抽运 Nd:YAG 激光晶体, 采用声光调 Q 技术, 在腔内采用 LBO I 类相位匹配和 LBO II 类相位匹配技术, 在激光二极管抽运功率为 155 W, 声光调 Q 激光器的重复频率为 5.40 kHz 的工作条件下, 获得光场均匀分布的 355 nm 准连续紫外激光。输出功率达到最大为 2.14 W, 脉宽为 45 ns。808 nm 抽运光到 355 nm 紫外激光的光-光转换效率可以达到 1.38%, 1 h 内输出稳定性可达 3.30%。该方案系统结构紧凑简单、稳定高效, 相信进一步优化实验条件、提高抽运功率可以获得更高功率 355 nm 激光输出。证明激光二极管侧面抽运 Nd:YAG 晶体 L 型腔内三倍频实验方案是获得准连续高功率 355 nm 紫外激光有效的技术路线。

参 考 文 献

- 1 Mark Gitin. UV Lasers; state of the art is all-solid-state[J]. *Morden Scientific Instruments*, 1999, 4: 39~41
Mark Gitin. 半导体抽运固态紫外激光器[J]. *现代科学仪器*, 1999, 4: 39~41
- 2 Liu Wenqing, Cui Zhicheng, Dong Fengzhong. Optical and spectroscopic techniques for environmental pollution monitoring [J]. *Optoelectronic Technology & Information*, 2002, 15(5): 1~12
刘文清, 崔志成, 董风忠. 环境污染监测的光学和光谱学技术[J]. *光电子技术与信息*, 2002, 15(5): 1~12
- 3 Zhang Yangde, Wang Yi, Wei Xin *et al.*. Development and application of multiple-wavelength medical laser [J]. *China Medical Engineering*, 2004, 12(4): 57~59
张阳德, 王毅, 魏辛等. 医用多波段激光器的研制及应用[J]. *中国医学工程*, 2004, 12(4): 57~59
- 4 Su Yanli, He Jingliang, Jiang Qichang *et al.*. Efficient 213 nm radiation fifth harmonic generation of a laser diode-pumped Nd:

- YVO₄ laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(12): 1590~1592
苏艳丽,何京良,姜其畅等. 激光二极管抽运 Nd:YVO₄ 晶体五倍频 213 nm 深紫外激光器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(12): 1590~1592
- 5 Bi Xiangjun, Li Gang, Chen Meng *et al.*. LD-pumped all-solid ultraviolet laser[J]. *Laser Journal*, 2007, **28**(1): 10~11
毕向军,李 港,陈 檬等. 半导体泵浦全固态紫外激光器[J]. *激光杂志*, 2007, **28**(1): 10~11
- 6 Shi Zhaohui, Fan Zhongwei, Zhang Ying *et al.*. High efficiency and high power all-solid-state ultraviolet laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 29~32
石朝辉,樊仲维,张 瑛等. 高效率高功率全固态紫外激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 29~32
- 7 Fuqiang Jia, Quan Zheng, Qinghua Xue *et al.*. High-power high-repetition-rate UV light at 355 nm generated by a diode-end-pumped passively Q-switched Nd:YAG laser[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(15): 2975~2979
- 8 Zhang Shaojun, Dong Shengming, Li Fuqi *et al.*. Efficient third-harmonic-generation of 1064 nm laser with BiB₃O₆ crystal[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(12): 1087~1089
张少军,董圣明,李福奇等. 新型 BiB₃O₆ 晶体高效和频产生 355 nm 紫外激光[J]. *中国激光*, 2003, **30**(12): 1087~1089
- 9 Yong Bi, Yan Feng, Huarong Gong *et al.*. High-average power THG of a diode-pumped Nd:YAG laser at 355 nm generated by LiB₃O₅ crystal [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(2): 91~92
- 10 Wu Yicheng, Chang Feng, Fu Peizhen *et al.*. High-average-power third harmonic generation at 355 nm with CsB₃O₅ crystal [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2005, **22**(26): 1426~1428
- 11 H. Kitano, T. Matsui, K. Sato *et al.*. Efficient 355-nm generation in CsB₃O₅ crystal[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(4): 263~265
- 12 Zhang Jing, Fan Zhongwei, Qi Yan *et al.*. Efficient intracavity dispersion Q CW Nd:YAG UV laser[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2006, **17**(12): 1474~1476
张 晶,樊仲维,齐 岩等. 高效腔内色散调 Q Nd:YAG 紫外激光器[J]. *光电子·激光*, 2006, **17**(12): 1474~1476
- 13 Wang Yun, Fan Xiuwei, Peng Qianqian *et al.*. LD pumped Nd:GdVO₄ crystal ultraviolet laser with LBO frequency tripling [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2005, **16**(5): 550~553
王 云,范秀伟,彭倩倩等. LD 抽运 Nd:GdVO₄ 晶体 LBO 三倍频紫外激光器[J]. *光电子·激光*, 2005, **16**(5): 550~553
- 14 Tan Tianya, Huang Jianbing, Zhan Meiqiong *et al.*. Design of 1064 nm, 532 nm, 355 nm frequency-tripled antireflection coating for LBO[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1327~1332
谭天亚,黄建兵,占美琼等. 三硼酸锂晶体上 1064 nm, 532 nm, 355 nm 三倍频增透膜的设计[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7): 1327~1332
- 15 W. Koechner. *Solid-State Laser Engineering*[M]. First Edition, Beijing: Science Press, 2002. 534~536
W. 克希耐尔. *固体激光工程*[M]. 第一版,北京:科学出版社, 2002. 534~536
- 16 Yushi Kaneda, Shigeo Kubota. Theoretical treatment, simulation, and experiments of doubly resonant sum-frequency mixing in an external resonator [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(30): 7766~7775
- 17 W. P. Risk, W. Lentz. Diode laser pumped blue-light source based on intracavity sum frequency generation[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, **54**(9): 789~791