

文章编号 1004-924X(2018)12-2888-06

## 内置标准具光栅腔 XeF(C-A)准分子 激光器的线宽压缩

朱 峰\*, 于 力, 易爱平, 沈炎龙, 黄 超

(西北核技术研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024)

**摘要:** 为了避免阳光背景干扰, 针对 XeF(C-A) 蓝绿激光水下应用需求开展了激光线宽压缩实验以提高信噪比。采用内置标准具的光栅谐振腔开展相关实验。利用光栅腔实现亚纳米级的激光线宽输出, 然后在此基础上, 通过插入标准具进行更精细的激光线宽压缩实验。利用光栅腔, 采用 1 200 线/mm 光栅并提高光栅辐照面积可以实现 0.14 nm 的激光线宽输出。腔内插入反射率为 50% 的标准具, 可以进一步将激光线宽压缩至 39 pm, 激光单脉冲能量约为 65 mJ, 脉冲宽度为 1  $\mu$ s。实验结果表明: 尽管 XeF(C-A) 蓝绿激光器的增益系数较低, 但是通过优化光栅和标准具的工作参数, 对谐振腔光学损耗进行合理的控制, 激光器可以实现 10 pm 量级的激光线宽输出。

**关键词:** 激光技术; XeF 激光; 低增益系数; 线宽压缩

**中图分类号:** TN242 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182612.2888

## Spectral compression of XeF(C-A) excimer laser using grating resonator with an intra-cavity etalon

ZHU Feng\*, YU Li, YI Ai-ping, SHEN Yan-long, HUANG Chao

(State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter,  
Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

\* Corresponding author, E-mail: zhufeng@nint.ac.cn

**Abstract:** In order to improve the signal-to-noise ratio for laser applications underwater, a grating resonator with an intra-cavity etalon was designed to compress the spectrum of XeF blue-green laser. First, a grating resonator was used to obtain a sub-nanometer laser linewidth, and then, a further spectral compression was performed by inserting an etalon into the grating resonator. The experimental results show that a linewidth of 0.14 nm can be obtained by using a 1 200 line/mm grating, and the linewidth can be further compressed to 39 pm by inserting an etalon, with a reflectivity of 50%, in the grating resonator. The final laser pulse energy is about 65 mJ and the pulse duration is 1  $\mu$ s. Although the gain coefficient of the XeF (C-A) laser is low, the optical loss of the resonator can be reasonably controlled by optimizing the working parameters of the grating and the etalon, thereby a 10

收稿日期: 2018-05-03; 修订日期: 2018-07-20.

基金项目: 激光与物质相互作用国家重点实验室基金资助项目 (No. SKLLIM1309)

pm-level laser linewidth can be realized.

**Key words:** laser technology; XeF laser; low gain coefficient; spectral compression

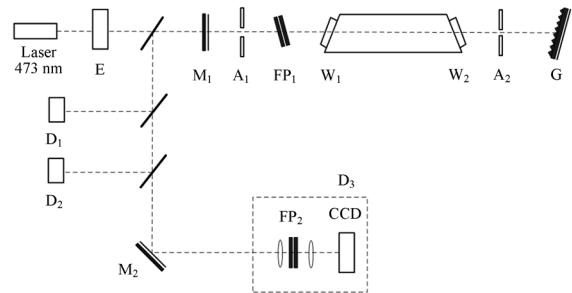
## 1 引 言

1963年,Duntley和Gilbert等人在研究光波在海洋中的传播特性时发现了 $0.47\sim 0.58\ \mu\text{m}$ 波段的海水透光窗口,这一发现使人们能够利用蓝绿光波段的激光研制出基于光学的水下目标探测、通信等新型设备<sup>[1]</sup>。目前,获得蓝绿激光输出和实现窄线宽激光的技术途径有很多<sup>[2-7]</sup>。XeF(C-A)准分子激光器是其中一种蓝绿激光光源,由于其能级结构特殊,XeF分子可从C态跃迁到A态,从而实现宽带蓝绿光输出。研究表明,XeF(C-A)准分子激光器可以实现宽谱( $460\sim 500\ \text{nm}$ )、可调谐激光输出<sup>[8-10]</sup>,并具有大脉冲能量、高峰值功率等优点<sup>[11-12]</sup>,在蓝绿激光海洋目标探测及通信等方面有着潜在的应用价值和前景<sup>[1,13]</sup>。实际应用中,为了避免阳光背景干扰,一般需要压缩激光线宽以提高信噪比。本项目组前期采用棱镜进行了nm量级的激光线宽压缩实验,并获得了线宽约为 $0.7\ \text{nm}$ 、最大脉冲能量为 $2.9\ \text{J}$ 的窄线宽输出<sup>[14-15]</sup>,但是此类激光器的增益系数较低,若要获得更窄的激光线宽,需要合理控制谐振腔的光学损耗,具有一定难度。本文采用内置标准具的光栅腔开展针对XeF(C-A)蓝绿激光器的pm量级激光线宽压缩实验,并成功获得了更窄线宽的激光输出。

## 2 实验装置

谐振腔由Littrow自准直光栅和输出镜组成,如图1所示。光栅常数分别为 $600\ \text{线/mm}$ 和 $1\ 200\ \text{线/mm}$ ,闪耀波长为 $500\ \text{nm}$ 。输出镜为石英平行平面玻璃,镀有 $450\sim 500\ \text{nm}$ 的高反膜,膜层透过率为 $10\%$ ,用于激光输出。激光器谐振腔腔长约为 $2\ \text{m}$ 。激光器两侧采用布儒斯特窗设计以降低窗口的反射损耗(窗口为 $\text{CaF}_2$ 玻璃,玻璃表面法线与谐振腔轴线成 $55^\circ$ 角),在谐振腔中插入狭缝限制激光发散角和光束宽度,狭缝宽度在 $0\sim 3\ \text{cm}$ 可调。腔内插入标准具对激光光谱做精细压缩,标准具为固体标准具,材料为石英玻

璃,两侧镀有反射膜。压缩后的激光线宽超出普通光谱仪的测量精度,激光线宽采用干涉法测量,用分析标准具测量激光线宽,用CCD测量标准具的干涉图样。通过对干涉图样的分析计算得到实际输出的激光线宽。



E: Energy meter;  $M_1$ : Output mirror;  $A_1, A_2$ : Slit;  $M_2$ : Mirror;  $W_1, W_2$ : Brewster window; G: Grating;  $FP_1, FP_2$ : Etalon;  $D_1$ : Photoelectrical prob;  $D_2$ : Spectrometer;  $D_3$ : Interference measuring apparatus

图1 XeF蓝绿激光线宽压缩的光学布局

Fig. 1 Layout of spectral compression of XeF blue-green laser

## 3 实验结果和讨论

### 3.1 自由运转光谱

实验用XeF(C-A)准分子激光器利用表面放电产生的紫外光对 $\text{XeF}_2$ 进行解离,生成激光工作介质XeF。激发态XeF分子由C态跃迁至A态,可以形成蓝绿激光辐射。首先利用普通的平凹腔,获得自由运转条件下的激光光谱。凹面镜在蓝绿波段(主要在 $450\sim 500\ \text{nm}$ )镀全反射膜,平面镜在蓝绿波段的透过率约为 $10\%$ ,利用海洋光学公司Maya2000型光谱仪测量得到激光光谱(见图2)。从图2可以看出,激光器自由运转条件下激光能量集中在 $470\sim 500\ \text{nm}$ ,光谱峰值处于 $486\ \text{nm}$ 。由准分子的能级结构可知,光谱应该是一个连续谱带,而在光谱测量结果中出现的多个凹陷则是由Xe原子的吸收产生的。

### 3.2 线宽压缩实验结果和分析

光栅可以实现对输出激光波长的精确控制,广泛应用在激光选线和光谱压缩过程。激光器的

线宽压缩效率与光栅的色散能力有关。实验首先采用 600 线/mm 的光栅进行激光线宽压缩,调节光栅辐照面积( $x$  方向 20 mm 宽度不变,调节  $y$  方向的光栅辐照宽度),使得光栅辐照面积为 80, 160, 240, 320  $\text{mm}^2$ , 测量得到不同光栅辐照面积对应的激光光谱,见图 3。为了减小激光线宽的测量误差,采用 Gauss 拟合法对测量激光线宽进行曲线拟合。Gauss 线型的一般表达式为:

$$y = y_0 + Ae^{-(x-x_c)^2/2\omega^2}, \quad (1)$$

其中:  $y_0$  为基线,  $A$  为曲线相对于基线的幅值,  $\omega_1$  为曲线半高宽,  $\omega_1$  满足  $\tau_{\omega_1} = 2\omega(\ln 4)^{0.5}$ 。利用曲线拟合得到的  $\omega$ , 计算获得激光线宽  $\omega_1$ 。从图 3 中可以看出,随着光栅辐照面积的增大激光线宽明显减小。经拟合得到:光栅辐照面积为 80  $\text{mm}^2$  的情况下激光线宽为 0.55 nm, 160  $\text{mm}^2$  情况下为 0.3 nm, 当光栅辐照面积提高到 320  $\text{mm}^2$  情况下线宽缩小为 0.2 nm。激光线宽起初变化明

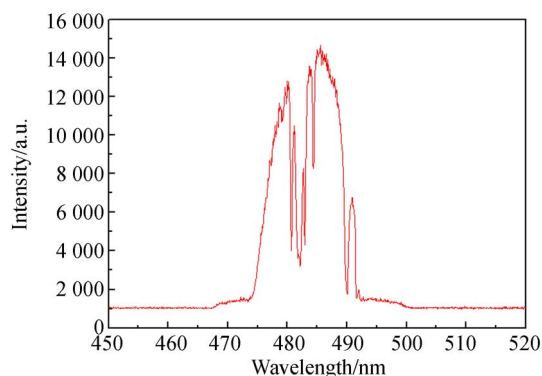
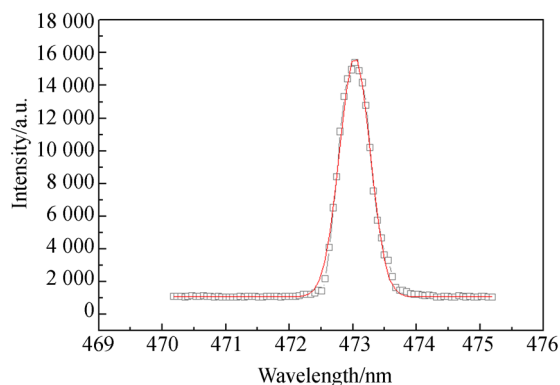
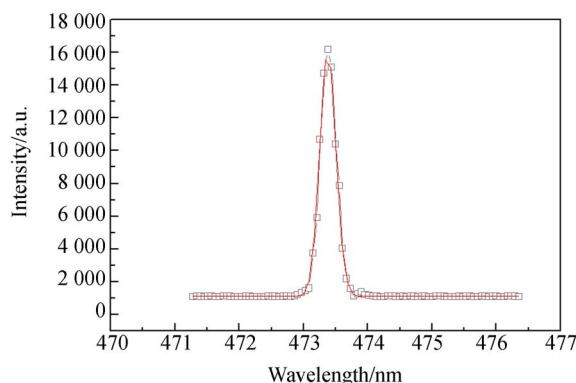


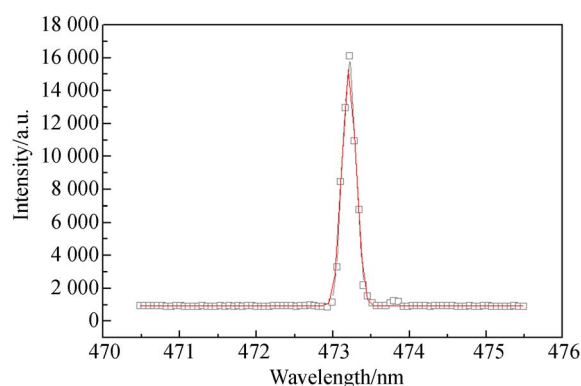
图 2 XeF 分子 C 态到 A 态跃迁激光自由运转光谱  
Fig. 2 Spectrum of laser radiation for XeF molecule transition from state C to state A



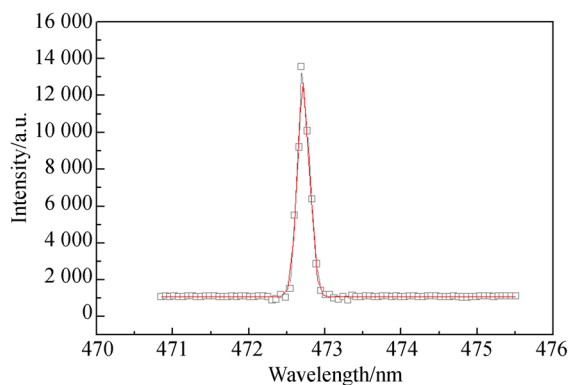
(a) 80  $\text{mm}^2$



(b) 160  $\text{mm}^2$



(c) 240  $\text{mm}^2$



(d) 320  $\text{mm}^2$

图 3 光栅不同辐照面积条件下的激光光谱 Gauss 拟合曲线

Fig. 3 Gauss fitting curves of laser spectra under different irradiated areas on grating

显,随着辐照面积的增大,线宽压缩量缩小,线宽变化变缓。

图 4 给出了拟合得到的光栅不同辐照面积下对应的激光线宽变化趋势。从图中可以看出,激光线宽随着光栅辐照面积的增加而减小。在辐照

宽面积较小的情况下,激光线宽较宽,最大约为 0.55 nm,随着光栅辐照面积的增加,激光线宽逐渐缩小,最小约为 0.2 nm,且辐照面积和激光线宽近似为反比关系。采用较宽的光栅辐照面积,可以获得较窄的激光线宽。

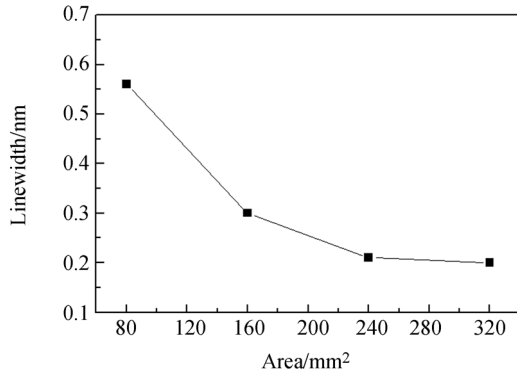


图 4 光栅辐照面积和激光线宽的关系

Fig. 4 Linewidth vs. grating irradiated area

为了进一步直观分析激光线宽与光栅辐射面积之间的关系,计算分析了光栅不同光栅辐照面积条件下对单色光分辨能力的影响(刻线密度为 600 线/mm),计算结果见图 5。从图 5 可以看到随着光栅辐照面积的增加,光谱角半宽逐渐减小,光栅角的分辨能力逐渐增强,说明提高光栅辐照面积,可以提高光栅对特定波长激光的分辨能力,这将有利于激光线宽压缩,同时当光栅用于激光谐振腔时,提高光栅辐照面积,也有利于延长光栅使用寿命。在较窄的辐照面积下,辐照面积变化对光栅分辨的影响较大,角半宽差值的绝对值变化较大,角半宽缩减明显。随着辐照面积的增加,角半宽缩小,缩减幅值减小,这与实验观察到的激光线宽变化规律是一致的。

当实验采用 1 200 线/mm 的光栅进行实验时,激光线宽可以压缩至 0.14 nm,利用光谱仪测量得到的激光光谱见图 6。由激光光谱曲线可以看出,光谱仪在中心波长附近仅仅只有 6 个采样点,已经接近实验用光谱仪的分辨极限。

在获得亚纳米激光输出的基础上,利用标准具对光谱做了更为精细的压缩实验。标准具是一种多光束干涉元件,有着极高的光谱分辨率,一般用于光谱的精细压缩,作为一种精细的波长选择元件使用。在合理选择标准具光学参数的情况下,适合用于 pm 量级的激光线宽压缩实验。根据标准具基本理论,标准具的自由光谱区由标准

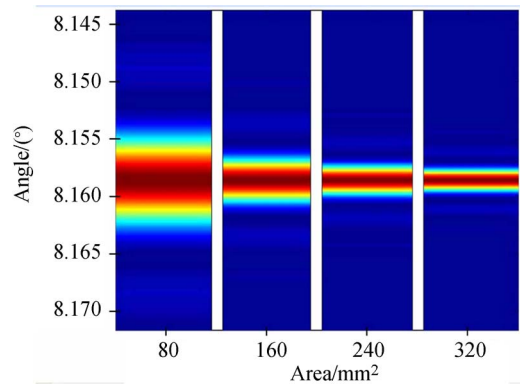


图 5 不同辐照面积下光栅角分辨变化

Fig. 5 Angle resolution of grating under different irradiated areas

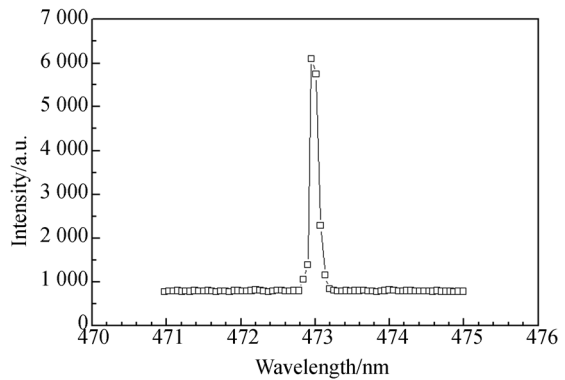


图 6 光栅腔激光光谱

Fig. 6 Spectral output of grating cavity

具的厚度决定,而透射光强由下式给出:

$$I = \frac{T}{(1-R)^2 + 4R\sin^2(\delta/2)} I_{in}, \quad (2)$$

其中: $\delta = 2nh\cos\theta/\lambda$ ,  $n$  为标准具折射率,  $h$  为标准具厚度,  $\theta$  为入射角度,  $I_{in}$  为入射光强,  $I$  为出射光强,  $R$  为膜层反射率,  $T$  为膜层透射率。

通过在谐振腔内插入一个厚度为 0.5 mm 的 FP 标准具开展了光谱精细压缩实验,标准具膜层反射率分别为 90% 和 70%。实验结果表明,插入反射率为 90% 的标准具,激光无法起振;插入反射率为 70% 的标准具,激光输出能量很小。说明插入高反射率的标准具,谐振腔的光学损耗较大,激光起振困难。分析认为,在理想情况下,虽然利用高反射率标准具,有利于获得更为精细的激光谱线,但是由于实际膜层和基片不可避免有少量吸收,使得高反射率 FP 标准具的峰值透过率降低。实验用 XeF(C-A) 蓝绿激光器的增益系数约为  $0.003\text{ cm}^{-1}$ ,为了保证激光器正常出光,需要

对谐振腔光学损耗进行合理的计算分析,选择合适的反射率参数。图 7 给出了标准具不同反射率条件下谐振腔的光学损耗情况(图中实线),从图中可以看出,采用反射率为 90% 的标准具,谐振腔损耗远远大于增益,激光无法起振。采用反射率为 70% 的标准具,激光器处于临界起振状态。与实验现象一致,因此,要保证激光器正常出光,需要进一步降低标准具的膜层反射率。采用反射率为 50% 的标准具可以满足激光起振条件,依据标准具设计参数,可以估计此情况下激光线宽约在 30 pm。

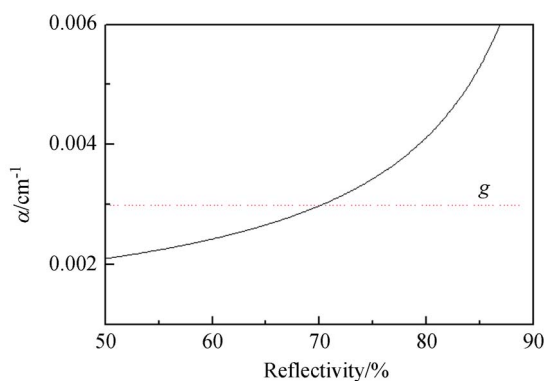


图 7 谐振腔损耗系数和标准具反射率之间的关系  
Fig. 7 Relationship between cavity loss coefficient and etalon reflectivity

将标准具的反射率降低为 50% 并插入光栅腔,实验最终获得单脉冲能量为 65 mJ、脉冲宽度约为 1  $\mu$ s 的激光输出。激光线宽已经超出普通光谱仪的分辨极限,利用搭建的干涉法测量实验平台,测量获得了激光干涉图样(见图 8),通过对

测量的环状条纹进行计算分析,得到激光线宽约为 39 pm,这与理论分析所得的激光线宽相当。

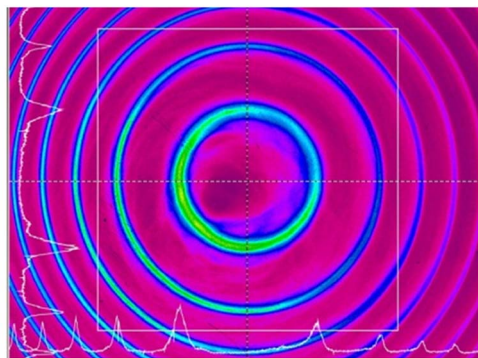


图 8 激光线宽的干涉图样  
Fig. 8 Interference pattern of laser linewidth

## 4 结 论

本文采用内置标准具的光栅谐振腔对 XeF (C-A) 蓝绿激光器进行了线宽压缩,通过优化光栅和标准具的工作参数,实现了窄线宽的激光输出。实验结果表明:利用光栅谐振腔,通过优化光栅辐照面积和光栅常数(采用 1 200 线/mm 光栅)可以获得 0.14 nm 的激光线宽输出。在此基础上,利用内置标准具进行了更精细的线宽压缩实验。在分析腔内损耗的基础上,通过对损耗的合理控制,采用反射率为 50% 的标准具,可以实现 39 pm 的激光线宽输出,激光单脉冲能量约为 65 mJ,脉冲宽度为 1  $\mu$ s。

## 参考文献:

- [1] DUNTLEY S Q. Light in the Sea[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1963, 53(2):214-233.
- [2] BOSOV N G. Room-temperature laser cathode-ray tube based on an ZnCdSe/ZnSe superlattice [J]. *Quantum Electronics*, 1995, 25(8):756-758.
- [3] CHILLA J L A, BUTTERWORTH S D, ZEITSCHEL A, *et al.*. High power optically pumped semiconductor lasers[J]. *SPIE*, 2004, 5332:143-150.
- [4] DEYRA L, MARTIAL I, DIDIERJEAN J, *et al.*. 3W, 300 $\mu$ J, 25ns pulsed 473nm blue laser based on actively Q-switched Nd:YAG single-crystal fiber oscillator at 946 nm[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(16):3013-3015.
- [5] ZHENG Q, YAO Y, LI B, *et al.*. 13.2 W laser-diode-pumped Nd:YVO<sub>4</sub>/LBO blue laser at 457 nm [J]. *Opt. Soc. Am. B*, 2009, 26(6):1238-1242.
- [6] RONG S K, ZHU X L, CHEN W B. All-solid-state narrow-linewidth 455 nm blue laser based on Ti:sapphire crystal [J]. *Chinese Optics Letters*, 2009, 7(1):43-45.
- [7] 鲁远甫,谢仕永,刘艳,等. 高功率窄线宽微秒脉冲 1064 nm 环形腔激光[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(10s):35-40.
- LU Y P, XIE SH Y, LIU Y, *et al.*. High-power narrow linewidth microsecond pulse 1064 nm ring

- lase[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(10s):35-40. (in Chinese)
- [8] SENTIS M L, TCHEREMISKINE V I, DELAPORTE P C. XeF(C-A) laser pumped by formed-ferrite open discharge radiation[J]. *Applied Physics Letters*, 1997, 70(10):1198-1200.
- [9] YU L, ZHU F, SHEN Y L, *et al.*. A narrow line-width and tunable XeF(C-A) laser [J]. *Laser Physics*, 2013, 23(085006):1-4.
- [10] KNECHT B A, FRASER R D, WHEELER D J, *et al.*. Compact XeF(C-A) and iodine laser optically pumped by a surface discharge[J]. *Optics Letters*, 1995, 20(9):1011-1013.
- [11] YU L, MA L Y, YI A P, *et al.*. An optically pumped XeF(C-A) laser with repetitive rate of 10 Hz[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83(013107):1-4.
- [12] YU L, LIU J R, MA L Y, *et al.*. 10 J energy-level optically pumped XeF(C-A) laser with repetition mode[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(9):1087-1089.
- [13] 赵长明,黄杰. 未来激光探潜和对潜通信技术的发展[J]. *光学技术*, 2001, 27(1):53-56.  
ZHAO CH M, HUANG J. Development of laser-submarine communication and detection technology in the future[J]. *Optical Technology*, 2001, 27(1):53-56. (in Chinese)
- [14] 朱峰,沈炎龙,于力,等. 棱镜色散腔 XeF(C-A)蓝绿激光线宽压缩实验[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(2):1-4.  
ZHU F, SHEN Y L, YU L, *et al.*. Spectral-narrowing of XeF(C-A) blue-green lasers using prism dispersive resonator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(2):1-4. (in Chinese)
- [15] 于力,朱峰,安晓霞,等. XeF 激光光谱研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(3):808-812.  
YU L, ZHU F, AN X X, *et al.*. Study on the spectrum of XeF laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(3):808-812. (in Chinese)

#### 作者简介:



朱 峰(1983—),男,湖北襄阳人,助理研究员,2005 年于武汉大学获得学士学位,2008 年于西北核技术研究所获得硕士学位,现主要从事高功率激光器件技术与应用方面的研究。E-mail: zhufeng@nint. ac. cn



于 力(1969—),男,陕西西安人,研究员,1991 年于陕西师范大学获得学士学位,1998 年和 2007 年于西北核技术研究所分别获得硕士和博士学位,现主要从事激光技术及应用方面的研究。E-mail: yuli@nint. ac. cn