

高效率 ArF 准分子激光复合腔技术研究

范元媛^{1,2} 周 翊^{1,2*} 刘广义^{1,2} 宋兴亮^{1,2} 单耀莹^{1,2} 王 倩^{1,2} 赵江山^{1,2}

¹中国科学院光电研究院, 北京 100094

²北京市准分子激光工程技术研究中心, 北京 100094

摘要 短波长、高光子能量的 ArF 准分子激光在集成电路光刻、材料加工、激光医学等领域具有重要的应用。结合线宽压窄技术方案设计了 193 nm ArF 准分子激光器复合腔结构, 理论分析了复合腔结构能量提升的原理。针对准分子激光器的长腔特性, 提出了实现其复合腔窄带激光模式锁定的解决方案, 并进行了实验验证。与通常插入色散元件的单窄带腔相比, 锁定后的准分子激光复合腔在输出线宽基本不变的情况下能量提高了 4.02 倍, 激光效率大幅提升, 能量稳定性也大幅优化。

关键词 激光器; 准分子激光器; 复合腔; 高效率; 窄线宽

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0202001

Compound Cavity ArF Excimer Laser with High Efficiency

Fan Yuanyuan^{1,2} Zhou Yi^{1,2} Liu Guangyi^{1,2} Song Xingliang^{1,2} Shan Yaoying^{1,2}

Wang Qian^{1,2} Zhao Jiangshan^{1,2}

¹Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

²Beijing Excimer Laser Technology and Engineering Center, Beijing 100094, China

Abstract ArF excimer lasers characterized by short wavelength and high photon energy have important applications in the field of integrated circuit lithography, material processing, laser medicine, and so on. Structure of the compound cavity 193 nm ArF excimer laser is designed based on the linewidth narrowing techniques. Principles of the compound cavity laser are theoretically analyzed. Based on the characteristics of long cavity length in excimer laser system, the solutions for achieving effective mode-locking in compound cavity are proposed and experimentally verified. The laser output with nearly the same linewidth as the narrow-band cavity with dispersive elements and 4.02 times large energy is obtained. The laser efficiency and the energy stability are greatly improved as well.

Key words lasers; excimer lasers; compound cavity; high efficiency; narrow line-width

OCIS codes 140.2180; 140.3410; 300.3700; 220.2740

1 引 言

由于准分子激光波长短、光子能量高,且常规材料对位于紫外波段的激光辐射具有较高的吸收率,因此准分子激光在集成电路光刻、精密微细加工及医疗等领域被广泛应用^[1]。自 1970 年 Basov 等^[2-4]利用强流电子束激发液态氙得到 Xe 准分子激光输出以来,深紫外波段准分子激光技术得到了长足发展。

窄线宽、大能量的输出是准分子激光技术发展的重要目标^[5-7]。由于自身跃迁特性,自由振荡的准分子激光器输出激光半峰全宽(FWHM)通常在百皮米量级。单谐振腔准分子激光器可通过在谐振腔内或腔外加

收稿日期: 2015-09-07; 收到修改稿日期: 2015-10-12

基金项目: 国家自然科学基金(61405202)、北京市科技专项(Z141104004414069)

作者简介: 范元媛(1984—),女,博士,助理研究员,主要从事准分子激光及固体激光光谱控制等方面的研究。

E-mail: fyy@aoe.ac.cn

*通信联系人。E-mail: zhouyi@aoe.ac.cn

入选频元件(如棱镜、光栅、标准具等)^[8],增加非被选模的损耗以实现准分子激光线宽的窄化,但由于激光系统引入了较大的插入损耗,造成输出能量和效率大幅降低。为了应对窄线宽、大能量准分子激光的实际应用需求,双腔结构的主振荡-放大技术(如 MOPA、MOPO 等)被引入准分子激光系统^[9]。双腔结构中,线宽和能量的输出需求被分离实现,其中,主振荡腔实现低能量、窄线宽的优质种子光输出,放大腔对种子光进行能量放大。虽然双腔结构克服了单腔结构的局限性,但其设备复杂、体积庞大,且需要采取措施调整振荡腔与放大腔之间的延时,以实现精确的放电同步控制。

复合腔结构在纵模选择、压窄线宽方面具有重要的研究价值,并已成功应用在短腔长的固体激光器、染料激光器等激光系统中^[10-12]。与传统双腔放大结构相比,复合腔系统体积小、结构紧凑,将其引入长腔长(一般为米量级)准分子激光系统是一种新的尝试。长腔长可能会带来单脉冲往返振荡次数有限而模式竞争不充分的问题,需采取有效措施提高模式竞争效率,以获得窄线宽、高效率的激光输出。该技术对准分子激光技术的发展有重要的促进作用。

进行了长腔长准分子激光复合腔的技术路线探索及实验验证。理论分析了准分子激光复合腔能量放大的原理。基于棱镜与光栅组合的传统准分子激光器线宽压窄腔^[13-15],搭建了一个双谐振单放电腔结构的 ArF 准分子激光复合腔,利用单放电腔分别组成窄带谐振腔和宽带谐振腔,通过调节双谐振腔各自的增益、损耗、腔长等参量,提高模式竞争效率,实现窄带激光模式锁定,最终实现窄线宽、高效率的激光输出。

2 理论分析

ArF 准分子激光器复合腔结构示意图如图 1 所示。其中,高反腔镜 M_1 、棱镜 P_1 、气体放电腔、输出耦合镜 M_2 构成宽带谐振腔,反射光栅 G 、棱镜 P_1 、气体放电腔、输出耦合镜 M_2 构成窄带谐振腔。两腔通过棱镜实现分光与合束,腔长不同。设反射光栅 G 距离棱镜 P_1 斜面激光入射点距离为 L_1 ,高反腔镜 M_1 距离棱镜 P_1 斜面激光入射点距离为 L_2 。

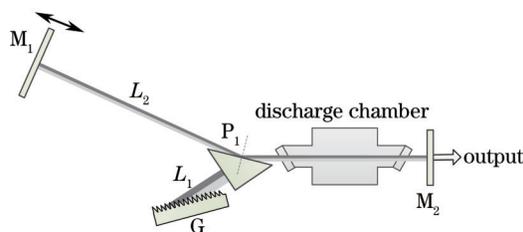


图 1 ArF 准分子激光复合腔结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of compound cavity ArF excimer laser oscillator

由于复合腔在棱镜 P_1 表面光束反射方向加入了高反腔镜 M_1 ,将原本窄带腔反射损失掉的能量重新注入准分子激光腔中,降低了腔内损耗,所以提高了输出能量,其能量放大倍数 N 可由以下讨论得出。

设腔内输出耦合镜 M_2 处的初始光强为 I_0 ,忽略光学元件的衬底吸收,则经过一次往返后,窄带腔中激光光强 I_1 为

$$I_1 = I_0 \exp(2GL)T_1^2 T_2^2 \exp(-2\alpha L_1)\eta R, \quad (1)$$

宽带腔中激光光强 I_2 为

$$I_2 = I_0 \exp(2GL)(1 - T_1)^2 \exp(-2\alpha L_2)R, \quad (2)$$

则复合腔中 M_2 处的光强 I_3 为

$$I_3 = I_1 + I_2. \quad (3)$$

于是,复合腔输出能量与单窄带腔输出能量的比值,即能量放大倍数 N 为

$$N = \frac{\varepsilon I_3}{\varepsilon I_1} = \frac{I_3}{I_1} = 1 + \frac{(1 - T_1)^2}{T_1^2 T_2^2 \exp[2\alpha(L_2 - L_1)]\eta}, \quad (4)$$

式中 R 为 M_2 的反射率, η 为 Littrow 结构下光栅反射率, α 为大气吸收系数, L_1 (单位:m)和 G 分别为增益气体的长度和增益系数, T_1 和 T_2 分别为棱镜斜面和直角面对 p 光的透射率, ε 为 M_2 的输出耦合系数。对于未镀膜的棱镜,可以通过菲涅耳公式计算出 p 光透射率 T_1 和 T_2 ^[16]。

将 $\eta=0.62$, $L_2-L_1=1.4$, 大气吸收系数 $\alpha=0.2 \text{ m}^{-1}$ (500 Hz 重复频率下实验测得), 以及 p 光的透射率公式代入(4)式, 得到能量放大倍数 N 随棱镜斜边入射面入射角的变化情况, 如图 2 所示。 N 随入射角的增加近似呈指数上升。 而通过文献[11]可知, 复合腔输出激光的单色性随能量放大倍数的增大会变差。 因此, 在增大棱镜入射角以获取更大能量放大倍数及输出能量的同时, 需要随时监测激光光谱信息, 以保证输出激光的光谱纯度。

当光束在棱镜斜面入射角取为 87.1° 时, 能量放大倍数 N 随复合腔中两腔长差值(L_2-L_1) 的变化情况如图 3 所示, 可见, 当其余条件不变时, N 强烈依赖于 L_2 与 L_1 的差值。 随着 L_2-L_1 的增加, 能量放大倍数不断减小。 鉴于 L_2-L_1 越小, 则能量放大倍数越大, 而激光单色性越差, 所以, 为了兼顾高效率 and 窄线宽, 需要选择合适的两腔长差值, 后续的实验中将对此进行验证。

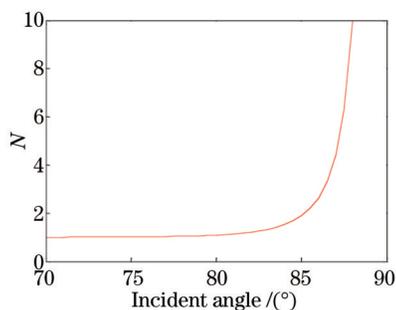


图 2 能量放大倍数随棱镜斜边入射面入射角的变化图

Fig.2 Enhancement ratio N versus incident angle on incident plane of prism

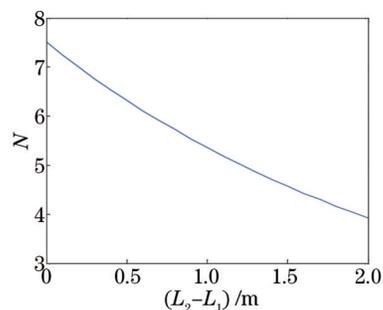


图 3 能量放大倍数 N 随两腔长差值(L_2-L_1) 的变化

Fig.3 Enhancement ratio N versus difference between L_2 and L_1 in theoretical simulation

3 实验装置

兼顾效率和线宽的 ArF 准分子激光复合腔结构实验光路如图 1 所示。棱镜与光栅组合用于窄带激光腔中线宽压窄, 同时利用了棱镜的分光及扩束特性, 不仅将原本被棱镜反射损失的光能重新利用, 提高了系统效率, 而且由于棱镜的扩束作用, 降低了入射到光栅上的能量密度, 并提高了光栅的利用效率。此外, 窄带谐振腔与宽带谐振腔共用同一放电腔, 又经过棱镜和放电腔相互耦合, 各自的腔长、损耗、腔镜反射率等参数可根据需要方便地进行调整。

放电抽运的准分子激光器工作于重复频率 500 Hz 状态下。放电腔内充满工作气体 Ar、F₂, 以及缓冲气体 He、Ne, 放电腔的两端装有布儒斯特窗片, 一方面对腔内气体进行封存, 另一方面用于产生高偏振激光。选用 CaF₂ 材料的等腰直角棱镜来进行分光与扩束, 棱镜表面未镀膜, 棱镜斜面的激光入射角约为 87.1° 。用于色散的中阶梯光栅长度为 250 mm, 光栅以 Littrow 结构放置, 表面入射角约为 80° , 此时, 193 nm 处的衍射效率约为 62%。反射光栅 G 距离棱镜 P₁ 斜边激光入射点距离约为 20 cm, 距离输出耦合镜 M₂ 约为 105 cm。M₂ 对 193 nm 波段激光的反射率为 50%。

4 分析与讨论

4.1 光谱探测方法

准分子激光上能级是电离束缚态的准分子, 其结合时间极短, 典型的激光脉宽通常在十几到几十纳秒量级。但由于放电腔体积的限制, 激光谐振腔腔长一般在米量级, 导致单脉冲在激光腔内的往返振荡次数有限, 从而窄带腔激光与宽带腔激光间的模式竞争不如固体激光器等短腔振荡得充分, 表现在光谱上为输出激光光谱中除窄线宽部分外, 可能存在未被完全抑制的宽带频谱。由于光源 E95 线宽对于光刻等应用至关重要, 因此, 在复合腔激光系统的搭建过程中, 需随时监测光谱情况, 避免激光系统输出能量及效率的提升是以光谱的展宽为代价。

实验选用德国 LTB 公司 ELIAS III 型高分辨率中阶梯光栅光谱仪对输出激光的光谱进行精确测量, 其光谱分辨率可达到 0.06 pm, 探测窗口在 10 pm 量级。由于高光谱分辨率的获得是以灵敏度的损失为代价的, 其高色散和高衰减造成在测量复合腔激光系统的光谱纯度时存在一定的缺陷, 原本可能未被完全抑制的宽

带频谱会被淹没在光谱仪的噪声信号中,造成测量误差。由于自由运转的 ArF 准分子激光线宽约为 500 pm,为全面探测复合腔的光谱纯度,自主研发了大探测窗口的光纤光谱仪,对准分子激光器复合腔结构搭建过程中的输出激光光谱纯度进行实时监测和定性分析,观察复合腔中的宽带基底是否被完全抑制。自研大探测窗口光谱仪借助于传统光栅光谱仪的原理,待测激光经光纤耦合传输至入射狭缝,经离轴抛物面反射镜入射到光栅,光栅对入射到其表面的激光进行色散分光,将不同波长的光谱成分分开,对应闪耀级次的衍射光返回后经离轴抛物面反射镜聚焦在其焦平面上,形成一系列按波长顺序排列的单色狭缝像,CCD 对其进行能量分布探测。综合考虑光栅分辨率和 CCD 灵敏度的需求,选择 Thorlabs 公司的 79 lines/mm、闪耀角为 75°的中阶梯光栅进行色散分光,193 nm 波段焦距为 327 mm 的抛物面反射镜进行聚焦成像。实测自研光谱仪探测窗口大于 600 pm,根据光栅的线色散系数及 CCD 像元尺寸,可计算出其分辨率优于 20 pm。

4.2 结果分析

为同时实现窄线宽、高效率的准分子激光输出,尝试采取措施提高双谐振腔间的模式竞争效率,以在有限的增益条件下实现充分模式竞争,可行的解决方案有两种,下面分别介绍。

提高模式竞争效率的一种方案为控制激光起振次序。迫使窄带腔中的窄带激光模式先起振,并降低宽带腔的激光能量,从而便于窄带激光模式在模式竞争中胜出。具体操作可使得宽带腔中的腔长 L_2 大于窄带腔中的腔长 L_1 。由于短腔的激光模式在增益提取及模式建立时占主导地位,所以其模式会成为系统的种子源,于是短腔长的窄带腔激光模式倾向于成为注入种子源,而长腔长的宽带腔则倾向于成为放大器^[17-18]。同时,长的 L_2 会增大宽带腔的腔内吸收损耗,可进一步降低宽带腔激光能量。

当 L_1 固定为 20 cm 时,分别记录了当 L_2 为 100、120、140、160、180 cm 时,能量放大倍数的变化情况,实验结果如图 4 中星标所示,实验曲线与前文模拟结果趋势基本一致。可见,随着 L_2 的增加,能量放大倍数趋于减小,为了获得尽量大的能量放大倍数,需要在保证光谱纯度的前提下尽量减小 L_2 值。利用自研光谱仪探测了复合腔在不同 L_2 时的输出光谱,如图 5 所示。可见,复合腔的光谱纯度强烈依赖于 L_2 ,光谱最优时 L_2 约为 160 cm。当 L_2 小于 160 cm 时,随着 L_2 的增加,位于窄带激光光谱内的强度不断增大,而分散于其余几百 pm 宽带光谱内的激光强度不断减弱,这意味着光谱纯度随 L_2 的增大而变优。当 L_2 大于 160 cm 时,随着 L_2 的增加,分散于全部光谱范围内的激光强度都在减弱,这意味着总的激光能量在降低。综上可以得出,当 L_2 约为 160 cm 时,基本实现复合腔的窄带激光模式锁定,可以同时兼顾高效率 and 窄线宽输出。

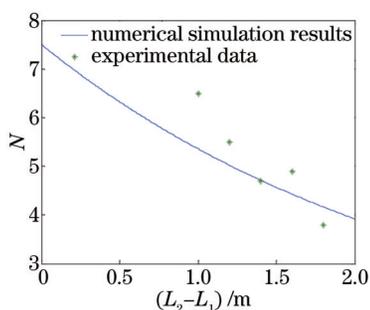


图4 能量放大倍数 N 随两腔长差值 $(L_2 - L_1)$ 的变化(虚线为模拟值,星标为实验值)

Fig.4 Enhancement ratio N versus difference between L_2 and L_1 in theoretical simulation (dashed curve) and experiment (asterisk)

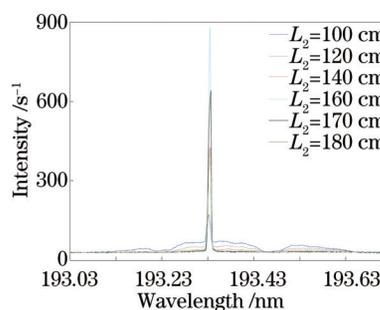


图5 不同 L_2 时 ArF 准分子激光复合腔的宽带光谱图

Fig.5 Broad-band spectra of compound cavity ArF excimer laser oscillator under different L_2

当 $L_1=20$ cm, $L_2=160$ cm 时, ArF 准分子激光器复合腔输出光谱及单窄带腔激光输出光谱如图 6、7 所示。其中,图 6 是 LTB ELIAS III 光谱仪的探测结果,图 7 是自研宽带光谱仪的探测结果。由图 6 精细光谱可见,窄带腔与复合腔的输出激光半峰全宽(FWHM)基本一致,分别为 0.476 pm 和 0.467 pm,输出激光中心波长为 193.338 nm。复合腔输出光谱的强度也远大于窄带激光。由图 7 宽带光谱可见,复合腔中绝大多数宽带光谱已被抑制,绝大多数能量被集中提取到了窄带激光光谱内,只有极少部分能量散布于 193.338 nm 附近其余几百皮米带宽范围内。此时,利用 Ophir PE50-DIF-C 型能量计测试输出激光能量及稳定性,单窄带腔输

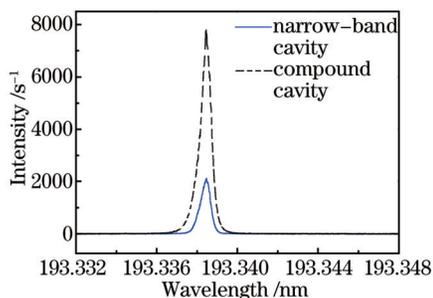


图6 ArF准分子激光器复合腔与单窄带腔输出激光光谱 (LTB ELIAS III)

Fig.6 Spectra of compound cavity ArF excimer laser oscillator along with narrow-band output with LTB ELIAS III

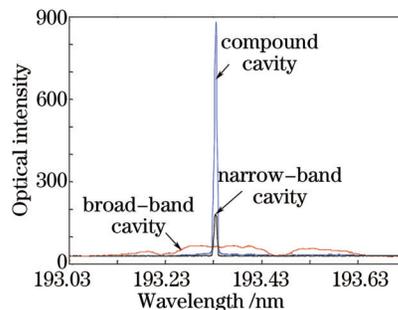


图7 ArF准分子激光器复合腔、单窄带腔及宽带腔输出激光光谱(自研光谱仪)

Fig.7 Broad-band spectra of compound cavity ArF excimer laser oscillator along with narrow-band and broad-band outputs with self-made spectrometer

出激光能量为 $30.3 \mu\text{J}$, 60 s 内能量稳定性(均方根值)为 6.17%; 复合腔输出激光能量为 $148.2 \mu\text{J}$, 60 s 内能量稳定性为 3.39%。可见, 复合腔输出激光能量是单窄带腔的 4.89 倍, 与图 4 中的模拟值 4.71 基本相符, 激光效率得到大幅提升, 能量稳定性也大幅优化。

进一步提高模式竞争效率的方案为调整宽带腔的激光线宽。通过压窄宽带腔激光的自然线宽、减少其纵模数, 从而间接减少窄带腔激光模式的竞争模式数目, 以利于其在模式竞争中占优势。具体操作可在宽带腔中加入合适的法布里-珀罗标准具。标准具的线宽要大于窄带激光线宽并小于自由运转的 ArF 激光线宽, 如此, 宽带腔中振荡模式减少从而更易达成窄带激光模式锁定。

当宽带腔中插入半峰全宽为 25 pm (Genuine Optronics) 的标准具后, 其自由振荡的宽带模式被极大压窄, 复合腔被完全锁定在对应的窄带模式振荡, 锁定后的光谱如图 8 所示。此时, 几乎所有复合腔中的能量都被集中到了窄带激光模式中, 复合腔输出激光能量为 $121.8 \mu\text{J}$, 60 s 内能量稳定性为 3.82%。复合腔输出激光能量是单窄带腔的 4.02 倍, 激光效率和能量稳定性都得到大幅提升, 这对精细加工等应用具有重要意义。此时, 需将标准具的透射率 T 加入(4)式, 当 $T=0.91$, 理论计算能量放大倍数 N 为 4.07。

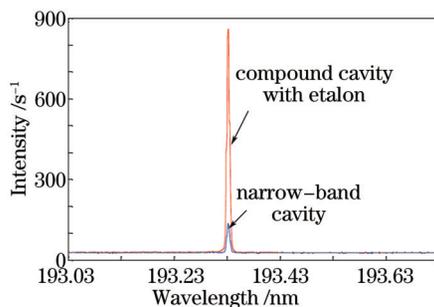


图8 插有标准具的ArF准分子激光光谱图

Fig.8 Broad-band spectra of compound cavity ArF excimer laser oscillator with etalon

5 结 论

基于棱镜和光栅组合的准分子激光线宽压窄腔, 提出了一种同时实现窄线宽、高效率输出的复合腔技术。首先分析了长腔准分子激光器复合腔激光效率提升的原理, 理论分析了影响能量放大倍数的若干因素。然后针对长腔下准分子激光器复合腔模式竞争不充分的问题提出了相应解决方案, 包括控制模式起振次序和调整宽带腔的线宽, 并进行了实验验证, 最终实现了复合腔中窄带激光模式的锁定。实验结果表明: 与单窄带腔相比, 锁定后的复合腔输出激光在基本保证窄线宽的基础上能量提高了 4.02 倍, 激光效率和能量稳定性都大幅提升。该技术极大地提高了准分子激光系统的出光效率和集成度, 对发展具有我国自主知识产权的窄线宽、大能量准分子激光技术具有实际意义。至此进行了技术路线探索与验证, 下一步工作将进行更深入广泛的研究, 提升激光能量等指标, 并结合半经典激光理论, 完善模式耦合等理论研究。

- 1 Liu Jingru, Yi Aiping, Hu Zhiyun, *et al.*. Excimer Laser Technology and Applications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009: 227-229.
刘晶儒, 易爱平, 胡志云, 等. 准分子激光技术及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 227-229.
- 2 N G Basov, V A Danilychev, Yu M Popov, *et al.*. Laser operating in the vacuum region of the spectrum by excitation of liquid xenon with an electron beam[J]. JETP Lett, 1970, 12(10): 329-331.
- 3 Chen Jinxin, Xu Xiangyu, Wang Yu. Electrodes system design and electric field simulation research of ArF excimer laser [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(1): 011402.
陈进新, 徐向宇, 王 宇. ArF 准分子激光光源电极系统设计及电场仿真研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(1): 011402.
- 4 Jia Nana, Deng Chuanlu, Pang Fufei, *et al.*. Research on excimer laser etching technology for achieving optical waveguide end face[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0303012.
贾娜娜, 邓传鲁, 庞拂飞, 等. 光波导端面的准分子激光刻蚀技术研究[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0303012.
- 5 D J Elliott, U K Sengupta. Excimer lasers for deep UV lithography[C]. SPIE, 1991, 1377: 6-17.
- 6 P Lokai, U Rebhan, P Oesterl, *et al.*. High repetition-rate KrF lithography excimer laser with narrow bandwidth below 2 pm[C]. SPIE, 1990, 1264: 496-504.
- 7 T Ito, S Okazaki. Pushing the limits of lithography[J]. Nature, 2000, 406(6799): 1027-1031.
- 8 T J Mckee. Spectral-narrowing techniques for excimer laser oscillators[J]. Can J Phys, 1985, 63(2): 214-219.
- 9 T Ishihara, H Besaucele, C A Maley, *et al.*. Long-term reliable operation of a MOPA-based ArF light source for microlithography[C]. SPIE, 2004, 5377: 1858-1865.
- 10 Xu Zuyan, Pan Shaohua, Deng Daoqun, *et al.*. Tuning of a pulsed dye laser using a compound cavity[J]. Acta Physica Sinica, 1981, 30(6): 820-826.
许祖彦, 潘少华, 邓道群, 等. 脉冲染料激光的复合腔调频[J]. 物理学报, 1981, 30(6): 820-826.
- 11 Y F Kong, Z Y Xu, Y Zhou, *et al.*. The compound cavity optical parametric oscillator: theory and experiment[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1998, 34(3): 439-446.
- 12 Wu Yueting, Fan Yuanyuan, Liu Guangyi, *et al.*. Experimental study on spectral purity detecting in high-energy narrow-linewidth laser system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(7): 073002.
吴月婷, 范元媛, 刘广义, 等. 高能窄带激光系统中光谱纯度检测的实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(7): 073002.
- 13 H B Zhang, Z J Yuan, J Zhou, *et al.*. Effects of prism beam expander and slits on excimer laser linewidth narrowing module [J]. Chin Opt Lett, 2013, 11(4): 041405.
- 14 Zhang Haibo, Lou Qihong, Zhou Jun, *et al.*. ArF excimer laser line narrowing technique[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2009, 46(12): 46-51.
张海波, 楼祺洪, 周 军, 等. ArF 准分子激光器线宽压窄技术[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(12): 46-51.
- 15 Shan Yaoying, Zhao Jiangshan, Li Hui, *et al.*. Application study on fused silica prisms in excimer laser spectrum control[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0402008.
单耀莹, 赵江山, 李 慧, 等. 熔融石英棱镜在准分子激光光谱控制系统中的应用研究[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0402008.
- 16 Yu Daoyin, Tan Hengying. Engineering Optics[M]. 3rd edition, Beijing: China Machine Press, 2011: 306-307.
郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 第3版, 北京: 机械工业出版社, 2011: 306-307.
- 17 A J Merriam, G Y Yin. Efficient self-seeding of a pulsed $Ti^{3+}:Al_2O_3$ laser[J]. Opt Lett, 1998, 23(13): 1034-1036.
- 18 W Koechner. Solid State Laser Engineering[M]. Springer-Verlag Press, 1988.

栏目编辑: 宋梅梅