

用于制作FBG的紧凑型准分子激光器的研究

张 威, 梁 勳, 陶汝华, 方晓东

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘 要: 248 nm 的 KrF 准分子激光器在光刻、科研等领域有重要的应用。研制了一台用于刻写光纤布拉格光栅的准分子激光器, 设计并完善激光器的机械结构, 分析了激光器的均匀放电、预电离等关键技术。通过研究充电电压、工作气体配比和总的工作气体压力对输出激光能量和效率的影响, 优化激光器的性能; 并对光斑均匀性、光束发散角和能量稳定性进行了测试和计算。该准分子激光器的重复频率为 1~50 Hz, 最高输出效率达 2.0%, 单脉冲输出能量最高达 360 mJ, 当工作电压不低于 24 kV 时, 激光输出能量不稳定性小于 1.8%。用该激光器作为光源采用静态相位掩模法在光纤内刻写布拉格光栅, 并对刻写结果进行分析和讨论。

关键词: 准分子激光器; 气体配比; 输出能量; 输出效率; 光纤布拉格光栅

中图分类号: TN248.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0105001

Research of compact excimer laser for producing FBG

Zhang Wei, Liang Xu, Tao Ruhua, Fang Xiaodong

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

Abstract: 248 nm KrF excimer lasers have important applications in many areas such as photoetching and scientific research. The excimer laser for writing Fiber Bragg Grating was developed. The mechanical structure was designed and improved, and the key technologies including uniform discharge and preionization were analyzed. The laser performance was optimized by studying the impact of the charging voltage, the gas mixture and the total gas pressure on output energy and efficiency. The beam profile homogeneity, beam divergence angle and energy stability were measured and calculated. The repetition rate of the excimer laser is 1–50 Hz, and the maximal output efficiency is about 2.0%, and the maximal single pulse output energy is up to 360 mJ. The instability of output energy is less than 1.8% with charge voltage above 24 kV. Writing Bragg Grating in optical fiber core with a static phase-mask by the above laser as light source, of which results were analyzed and discussed.

Key words: excimer laser; gas mixture; output energy; output efficiency; Fiber Bragg Gratings

收稿日期: 2015-05-05; 修订日期: 2015-06-03

作者简介: 张威(1980-), 女, 博士生, 主要从事准分子激光技术方面的研究。Email: jiaxuan@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 方晓东(1963-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事准分子激光器以及功能性薄膜的激光制备等方面的研究。

Email: xdfang@aiofm.ac.cn

0 引言

KrF 准分子激光器以其输出激光波长短、脉冲宽度窄、单脉冲能量高等优点成为制作光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)的有效刻蚀光源。近年来,随着光电子的快速发展,FBG 凭借其高可靠性、低传输损耗和高信噪比的特点,在光纤通信(如:波分复用器、整流器、光纤色散补偿器、光纤放大器等)、光纤传感(如:土木工程、能源建设)等领域被大量应用。对于 FBG 的商业化生产,准分子激光是首选。然而,面对 FBG 如此大的应用市场,其制作 FBG 的光源却大多采用国外进口的准分子激光器。该研究针对 FBG 刻写的要求,研制了一台紧凑型 KrF 准分子激光器。

写入光纤纤芯中的布拉格光栅,其质量和寿命取决于紫外准分子激光器的性能特点。文中对激光器的机械结构进行了设计,通过对整机的性能实验,研究了充电电压、气体配比和气体压力等对激光输出能量和效率的影响,对相关参数进行了优化。并用该激光器作为光源采用静态相位掩模法成功地在光纤内刻写了布拉格光栅。

1 激光器结构设计

1.1 激光头设计

激光头的主要结构如图 1 所示。为在有限的激活区得到大面积的均匀放电,阴、阳极采用相同结构的紧凑型张氏电极^[1]面型,上下对称放置。计算和

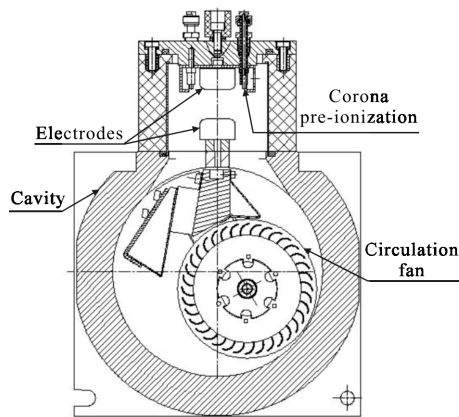


图 1 激光头剖面图

Fig.1 Structure of laser head

优化后的张氏电极参数为:长 515 mm、宽 27 mm、厚 16 mm。为改善准分子激光光束质量,保证均匀稳定辉光放电的形成,本台激光器采用紫外火花预电离^[2]技术,可在激光气体中形成大体积均匀电子密度分布。设计了 55 个紫外预电离针,交错分布于电极两侧,同侧针间距 16 mm,两侧针间距 40 mm。采用陶瓷管进行绝缘。

为了产生相干性和方向性好的激光光束,光学谐振腔设计成以 MgF 镜片作为基底的平-平谐振腔结构,后窗镜镀有 248 nm 高反射膜,前窗镜的反射率约为 8%。镜片直径 76 mm,厚度 10 mm。主放电通道位于聚四氟乙烯绝缘框内,下部与气体储存和循环腔体连接。腔体材料选用铝合金,具有良好的耐氟气腐蚀性能,以减少氟气的消耗和杂质的生成,保证气体工作寿命;并具有足够的机械强度和耐高电压性能。腔体内的横流风机由装在腔体外转速高达 2 600 r/min 的电机通过磁耦合器带动旋转,使激光谐振腔内的工作气体能快速更新。接口处密封选用耐氟的 O 形橡胶圈,在腔内总气压达到 3 300 mbar (1 mbar=100 Pa)时密封良好。

1.2 放电主回路设计

激光头的放电主回路原理图如图 2 所示,其中, C_s 为储能电容; C_d 为放电电容; L_s 为充电电感; L_m 为放电电感。

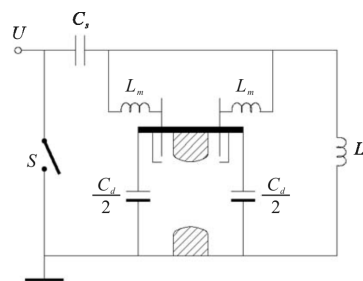


图 2 放电主回路原理图

Fig.2 Schematic diagram of main discharge circuit

当 $C_s=C_d$ 时,两者间的能量转移效率最高,但此时电压增益较小^[3];当 C_s 增大时,两者间的能量转移效率变低,而电压增益会变大。低电压增益,会对激光的输出不利;低效率,由残余能量引起的振荡会损坏部件。综合考虑上述因素并通过优化实验,本台激光器电容量值的设计成:储能电容 $C_s=48$ nF,放电电容 $C_d=36$ nF。

2 实验结果与讨论

准分子激光器的效率和激光激活介质类型、气体配比、气体组分和工作气压等有密切关系^[4]。针对这些影响激光器性能的重要因素开展了相应的实验研究,并对激光器进行优化设计。实验过程中,通过 PMK-14KVAC PHV4-3251 型高压探头采集激光器储能电容两端的电压信号,并传输给 LeCroy WAVESURFER 44Xs-A 型示波器,以获得激光器的充放电波形。在激光器的出光端用 LEP 型紫外功率能量计来测量激光器运转时输出激光的能量或功率。设计的 KrF 准分子激光器的工作气体是由 F₂/He 混合气(F₂ 气体体积占 5%)、Kr 气和缓冲气体 Ne 气组成。

2.1 充电电压对激光输出能量和效率的影响

激光腔内总气压为 3 300 mabr, 气体配比为 F₂=0.1%、Kr=2.96%、He=1.9%、其余为 Ne 气时,研究充电电压与输出能量和效率的关系曲线,如图 3 所示。

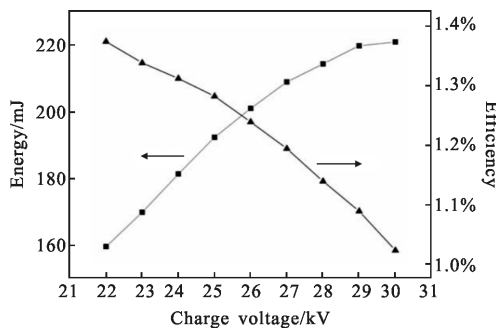


图 3 激光器输出能量、效率-充电电压关系曲线

Fig.3 Laser output energy and efficiency profile as function of charge voltage

由图可知,激光的输出能量随着充电电压的升高而增大,但效率却随着充电电压的升高而减小。这表明,激光输出能量的大小主要与工作气体中沉积的能量有关。充电电压越大,工作气体中沉积的能量就越大,激光的输出能量也越大。当放电电压超过气体击穿阈值后,储能电容器的能量在没有完全转移到放电电容器上时,工作气体就已经放电,随着充电电压的升高,沉积到工作气体中能量的效率就下降。实际应用中,可根据需要的光束输出能量进行充电电压的调节。

2.2 气体比对激光输出能量和效率的影响

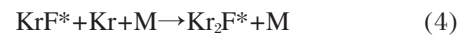
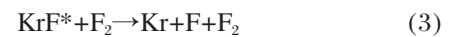
为产生更多的激发态粒子,避免产生过多离子,

准分子激光器中常加入惰性气体 He、Ne 等作为缓冲气体^[5-6]。Fahlen 等人的研究发现,KrF 激光器的工作气体以 Ne 代替 He 或 Ar 作为主要缓冲气体能够获得高效、高压、高脉冲能量^[7-10]。因此,本台 KrF 准分子激光器的缓冲气体以 Ne 气为主,He 气以 F₂/He 混合气的形式添加。此外,由于非常小的速率常数 (<10⁻³² cm⁶/s),由 Ne 引发的三体猝灭不能占主导^[11]。因此,主要考虑 F₂ 和 Kr 的含量对 KrF* 形成和猝灭的影响,忽略缓冲气体 Ne 和 He 的影响。

激发态 KrF* 主要形成动力学过程为:



激发态 KrF* 主要猝灭动力学过程为:



式中:M 为第三方碰撞原子或分子。

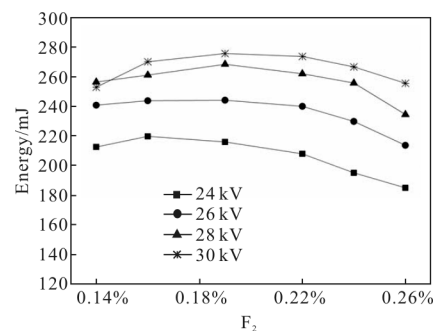
受激辐射的主要吸收过程为^[12-13]:



由公式(1)、(2)可知,如果 F₂ 气和 Kr 气含量太低,则生成受激态 KrF* 就少,那么激光器输出能量就会低;相反,如果 F₂ 气和 Kr 气含量过高,多出来的 F₂ 气和 Kr 气就会通过反应通道(3)和(4)加速受激态 KrF* 的猝灭,这会降低激光能量的提高。而 KrF 激光工作介质对辐射的吸收中,F₂ 是一种最主要的吸收体,吸收反应通道为公式(5)。因此,F₂ 和 Kr 的最佳配比的选取是影响 KrF 激光器的一个重要因素。

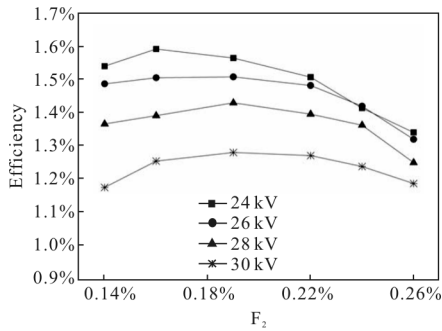
实验过程中,在工作气体总压力为 3 300 mabr 下,分别改变 Kr 和 F₂ 的含量,研究这两种气体含量的变化对激光输出能量和效率的影响,找出本台 KrF 激光器工作气体的最佳配比。

图 4 是在固定 Kr 的含量为 3% 不变时,F₂ 的含



(a) 输出能量-F₂ 含量

(a) Output energy-Fluorine content



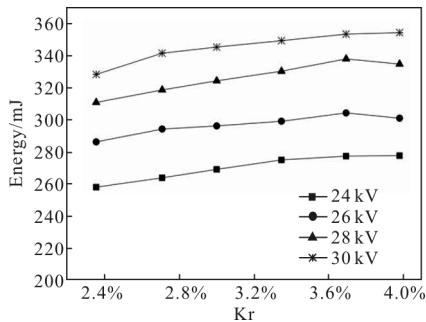
(b) 输出效率-F₂ 含量

(b) Output efficiency-Fluorine content

图 4 Kr 为 3%、不同充电电压条件下输出能量、效率-F₂ 含量的关系曲线

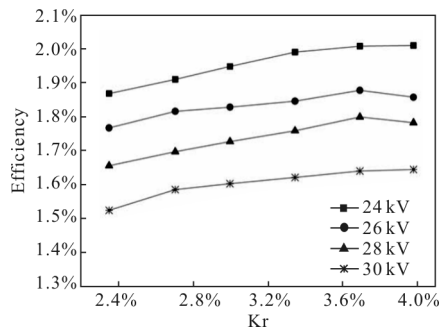
Fig.4 Laser output energy and efficiency profile as function of fluorine content at different charge voltage and the content of Kr is 3%

量与激光输出能量(a)和效率(b)的关系曲线。由图可以看到,在不同充电电压下,F₂ 的含量在 0.2%附近时,输出能量较好。图 5 是在固定 F₂ 的含量为 0.2%



(a) 输出能量-Kr 含量

(a) Output energy-Krypton content



(b) 输出效率-Kr 含量

(b) Output efficiency-Krypton content

图 5 F₂ 为 0.2%、不同充电电压条件下输出能量、效率-Kr 含量的关系曲线

Fig.5 Laser output energy and efficiency profile as function of krypton content at different charge voltage and the content of F₂ is 0.2%

不变时,Kr 的含量与激光输出能量(a)和效率(b)的关系曲线。由图可以看到,在不同充电电压下,Kr 的含量在 3.35%~4%范围内时,输出能量和效率变化不是很大。由此,可以看出,工作气体中 F₂ 的含量的变化对激光器输出能量和效率的影响比同等含量的 Kr 气的影响大得多。

2.3 气体压力对激光输出能量和效率的影响

准分子激光器腔内工作气体压力对激光器输出能量和效率也有很大的影响。在气体配比为 F₂:Kr:He:Ne=0.2%:3.979%:3.8%:88.042%时,研究工作气体压力对激光器输出能量和效率的影响。

图 6 为在充电电压分别为 24 kV 和 28 kV 条件下,输出能量和效率与气体压力的关系曲线。由图可知,低气压条件下激光器的输出能量和效率都偏低,在充电电压为 28 kV 时,工作气体压力在 P=3 100 mbar 处的激光器输出能量和效率最高。

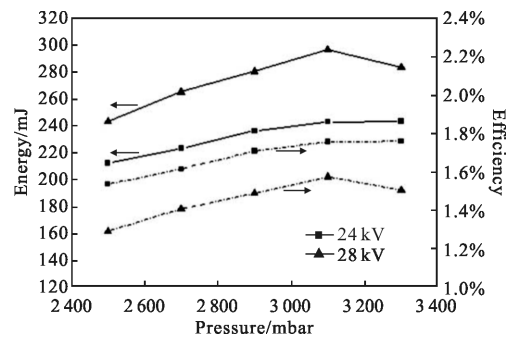


图 6 不同充电电压条件下输出能量和效率-混合气体压力的关系曲线

Fig.6 Laser output energy and efficiency profile as function of mixture pressure at different charge voltage

2.4 光斑均匀性实验

使用热敏纸采集激光束近场光斑图像,当充电电压为 24 kV 时,测得近场光斑尺寸为 8 mm×22 mm。通过美国 Ophir-Spiricon 公司的 Pyrocam III-Camera 光束质量分析仪测量光斑的能量分布情况。由于测量光斑相机的感光面积为 12.4 mm×12.4 mm,光强饱和能量密度为 10 mJ/cm²,因此,输出的激光束需经过聚焦和能量衰减才能进行测量。

准分子激光的光强分布不同于普通的单模高斯光强分布,光斑呈矩形,这与放电间距、电极面型、放电电压有关。测量结果如图 7(a)所示,光斑能量呈现了平顶分布,在长轴和短轴方向的平顶处,光强分布强且较为均匀,平顶周边光强较弱。图 7(b)是 Pyrocam III-Camera 光束质量分析仪测量的激光光斑能量的

3D 分布图,可以更直观的看到,所设计的准分子激光器输出的光束呈现良好的平顶分布,这符合刻写 FBG 对于激光束质量的要求。

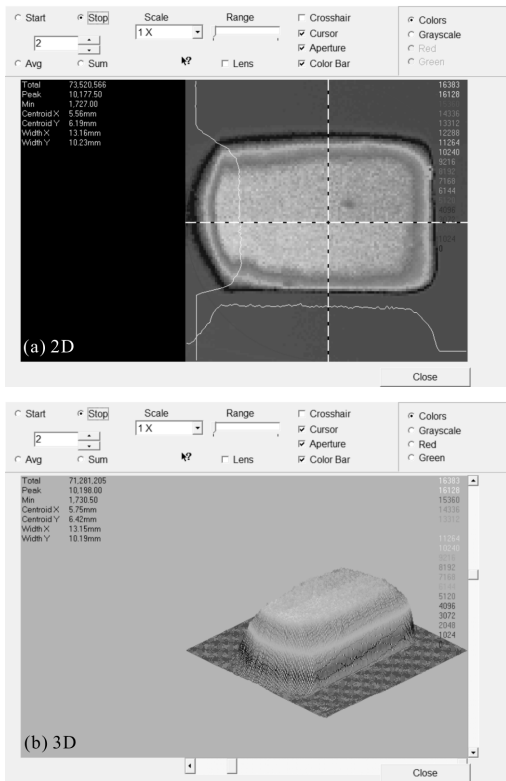


图 7 光斑能量的二维和三维分布图

Fig.7 Spot diagrams of 2D and 3D

激光器的能量不稳定性用能量相对标准差 σ 表征,实验表明,激光能量不稳定性小于 1.8%。经测试计算,激光器输出光束的发散角为 $2\text{mrad}\times 1\text{mrad}$ 。

2.5 光纤布拉格光栅刻写实验

采用相位掩模板制作 FBG 的方法具有工艺简单、可靠性高、成本低、易于批量生产的优点,是一种非常实用、高效的 FBG 制作方法。

利用上述优化后的 248 nm 的 KrF 准分子激光器作为光源,采用静态相位掩模法对光纤进行布拉格光栅刻写实验,实验搭建的光路如图 8 所示,光路系统包括反射镜、柱面透镜、光阑以及相位掩模板。实验过程中,KrF 准分子激光器在电压为 24 kV、重复频率为 20 Hz 运转状态下输出激光光束,依次经过反射镜、柱面透镜和光阑后到达相位掩模板。透过相位掩模板的 0 级衍射光束被抑制, ± 1 级衍射光束发生重叠,产生的干涉条纹刻写入靠近掩模板的光纤内,实现对光纤纤芯折射率的调制。其中,柱面透

镜对激光光束的短轴光进行聚焦,因为短轴光的发散角较小,并具有较高的空间相干性,能够在相位掩模板后面产生对比度高的干涉条纹,提高光栅的性能。光纤采用 Corning 公司的 SMF-28e 型号的单模光纤。为了避免对光纤材料的机械损伤,相位掩模板通常距离光纤纤芯 $100\sim 200\ \mu\text{m}$ 。

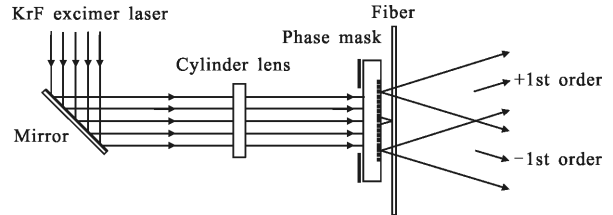


图 8 用准分子激光器进行相位掩模法刻写 FBG 的光路图

Fig.8 Light path for phase mask excimer laser writing of FBGs

在刻写过程中,FBG 的反射特性用一个宽带光源和一台光谱分析仪进行监测。宽带光源经过光纤光栅,满足光纤光栅布拉格条件的波长将产生反射,其余的波长透过光纤光栅继续传输。FBG 刻写完成后,利用光谱分析仪监测到的反射光谱和透射光谱如图 9 所示。

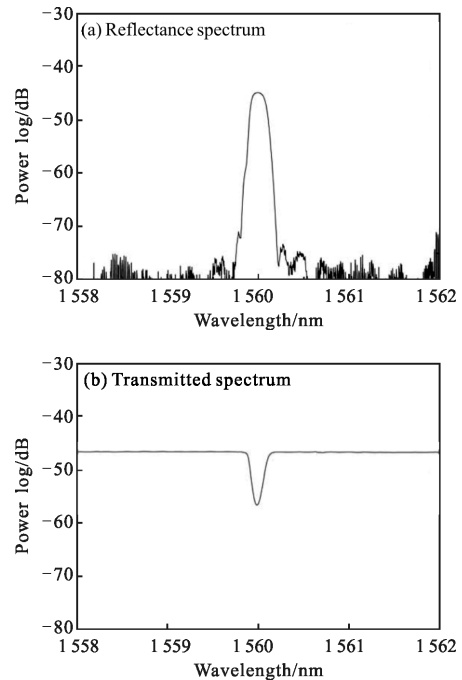


图 9 刻写完成反射和透射光谱图

Fig.9 Reflectance and transmitted spectrum after FBG writing

3 结论

研制了一台用于刻写 FBG 的 KrF 准分子激光

器, 实验研究了充电电压、 F_2 和 Kr 的含量以及工作气体压力对激光器输出能量和效率的影响。工作气体压力在 3 300 mbar, 气体配比为 $F_2=0.2\%$ 、 $Kr=4\%$ 、 $He=3.8\%$, 其余为 Ne 气时, 激光器的输出能量和效率达到最佳状态。该激光器运转在充电电压为 24 kV 状态下的最高效率达 2.0%, 充电电压为 30 kV 状态下单脉冲输出能量高达 360 mJ, 近场光斑尺寸为 $8\text{ mm}\times 22\text{ mm}$, 光斑能量分布均匀, 结果满足刻写 FBG 对激光束的要求。

参考文献:

- [1] Chang T Y. Improved uniform-field electrode profiles for TEA laser and high voltage applications [J]. *Rev Sci Instr*, 1973, 44(4): 405407.
- [2] Anufrik S S, Volodenkov A P, Znosko K F. Influence of the preionization system on the lasing energy of a XeCl laser [J]. *J Opt Technol*, 2000, 67(11): 961967.
- [3] Wang Xiaoshun, Yu Yinshan, Wang Qingsheng, et al. A discharge pumped KrF excimer laser with high efficiency[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(1): 1-5. (in Chinese)
王效顺, 余吟山, 王庆胜, 等. 高效率放电抽运 KrF 准分子激光器[J]. *中国激光*, 2011, 38(1): 1-5.
- [4] Mark J Kushner. Microarcs as a termination mechanism of optical pulses in electric-discharge excited KrF excimer lasers [J]. *IEEE Tran Pias*, 1991, 19: 387-399.
- [5] Toru Mizunami, Keiji Takagi. Buffer gas effect in a discharge-pumped XeBr excimer laser [J]. *J Appl Phys*, 1992, 71(4): 20362038.
- [6] Bagayev S N, Razhev A M, Zhupikovet A A, et al. 1.3 J KrF excimer laser with efficiency 2.5% [C]//SPIE, 2003, 5120:231235.
- [7] Fahlen T. Efficient quarter-joule KrF laser with corona preionization [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1979, 15(5): 311-313.
- [8] Wang C. Performance of XeF/KrF lasers pumped by fast discharges [J]. *Applied Physics Letters*, 1976, 29(2): 103-105.
- [9] Ewing J, Brau C A. Laser action on the $2\Sigma+1/2\rightarrow 2\Sigma+1/2$ bands of KrF and XeCl [J]. *Applied Physics Letters*, 1975, 27(6): 350-352.
- [10] Witteman W, Oomen G. On the performance of an e-beam pumped KrF laser [J]. *Optics Communications*, 1980, 32(3): 467-472.
- [11] Gerber T, Peters P, Bastiaens H, et al. Enhancement of the specific output energy of an electron-beam pumped KrF laser by using Ne as the main buffer gas [J]. *Applied Physics Letters*, 1984, 45(4): 356-357.
- [12] Ch K Rhodes. Excimer Lasers [M]. New York: Springer-Verlag, 1984: 97100.
- [13] Liu Jingru, Yi Aiping, Hu Zhiyun, et al. Excimer Laser Technology and Pplications [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009: 7578. (in Chinese)