

准分子激光皮肤治疗仪能量稳定性研究

赵读亮^{1,2}, 李文洁^{1,2}, 梁 勳¹, 方晓东^{1,2}

- (1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;
2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026)

摘要: 为了满足 308 nm 准分子激光皮肤治疗仪对激光输出参数, 特别是激光能量稳定性的要求, 首先建立了激光能量衰减模型, 提出了基于激励电压补偿能量的比例积分(PI)算法, 对 PI 算法进行了理论分析、模拟实现; 其次对准分子激光器进行了实验研究, 设计了高压激励电源和基于快速光电二极管的激光能量无损检测模块, 实验研究了激励电压与输出能量的关系、激光器能量衰减特性以及引入 PI 算法后的激光器能量稳定特性; 结果表明: 激励电源和能量检测模块满足 PI 算法的调节精度和响应速度, 引入 PI 算法后, 准分子激光器输出能量在 1 千万个脉冲内仍能维持目标能量 17.5 mJ 附近, 能量方差从 0.2% 缓慢上升至 3%, 满足准分子激光皮肤治疗仪的使用需求。

关键词: 能量稳定性; 准分子; 激光器; 激励电源; 比例积分算法

中图分类号: TN248.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1206001

Study on energy stability for excimer laser skin therapeutic apparatus

Zhao Duliang^{1,2}, Li Wenjie^{1,2}, Liang Xu¹, Fang Xiaodong^{1,2}

- (1. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: In order to meet output parameters, especially the stability of the laser energy requirements for the 308 nm skin therapeutic apparatus, first of all, the laser energy attenuation model and proportional integral (PI) algorithm based on energy compensation by the excitation voltage were established, its theoretical analysis and simulation were completed. Secondly, the experimental research on excimer laser was carried out which included high voltage excitation power supply and laser energy detection module based on fast nondestructive photoelectric diode. Meanwhile, the experimental research on the relationship between excitation voltage and output power, characteristics of laser energy attenuation and laser energy stability properties with the introduction of PI algorithm was studied. The results show that the power supply and energy detection module meet the PI algorithm control precision and response speed. Meanwhile, the excimer laser output energy can still maintain a target energy within 17.5 mJ and energy variance is slowly rising from 0.2% to 3% in the 10 million pulses after introducing the PI algorithm, which well meets the usage requirements of excimer laser skin therapeutic apparatus.

Key words: energy stability; excimer; laser; excitation power; proportional integral algorithm

收稿日期: 2017-04-10; 修订日期: 2017-05-20

基金项目: 国家自然科学基金(61307112)

作者简介: 赵读亮(1988), 男, 博士生, 主要从事准分子激光技术与应用、控制算法方面的研究。Email: liang_0420@126.com

导师简介: 方晓东(1963-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事准分子激光技术和功能薄膜材料方面的研究。Email: xdfang@aiofm.ac.cn

0 引言

准分子激光因具有短波长、大功率、高光子能量等特点而广泛应用于科研、医疗和工业领域^[1]。在科研方面主要应用于表面科学、材料科学和反应动力学等学科^[2-4]；在工业领域，准分子激光更有其独特的优势，比如半导体光刻、退火和布拉格光栅(FBG)的制作等^[5-7]。

在医疗方面，准分子激光被广泛应用在角膜出光度矫正、动脉血管消融手术中^[8]。而近年来转向治疗皮肤病(白癜风和银屑病等)，引起了广泛的关注^[9]。这个应用的专业治疗设备——308 nm 准分子激光皮肤治疗仪，其技术参数一般根据临床治疗的实际要求给定^[10]，其中激光能量输出稳定性要求小于 3.5%。激光能量稳定性由激励电源稳定性、气体状况、光学镜片和腔体等因素确定。一方面由于准分子激光器在放电过程中，激光混合气体中卤族气体容易和其他物质反应而降低浓度，且某些反应生成物会造成激光淬灭，导致气体劣化和激光输出下降^[11]。另外，反应污染物对镜片的污染等也导致能量下降^[12]。国内外研究学者提出了几种提高输出稳定性的方法，参考文献[13]通过精确控制工作物质的纯度并实时补偿来提高输出稳定性和寿命；参考文献[14]利用激光器激励电压补偿的方法实现，但算法比较粗糙，补偿精度和响应速度不高；而参考文献[15]利用对激光腔体的特殊设计达到高稳定能量输出和长寿命的目的。

文中首先在准分子激光能量衰减模型的基础上采用激励电压调节的比例积分(PI)算法，通过模拟计算获得准分子激光稳定输出；其次在实验上首先获得激光输出特性，在此基础上通过实时地能量检测-数据处理(基于 PI 算法的电压补偿计算)-电压调节-补偿能量的方法实现能量稳定输出。

1 准分子激光能量稳定性理论

XeCl 准分子激光器作为皮肤治疗仪光源使用时，其工作气体寿命和输出能量波动性会受到激光器放电次数、激励电源和激光器硬件性能(光学元件劣化、腔体结构、电极面型以及预电离均匀性)等的影响。对 308 nm 准分子激光器脉冲能量的描述，文

中建立了一个近似模型。考虑放电次数和激励电压对激光器能量稳定性和工作气体寿命的影响，其他因素的影响包含在初始能量方差中。通过引入电压补偿的 PI 算法，可以有效提高激光器输出能量稳定性和气体寿命。

1.1 准分子激光能量衰减和补偿模型

(1) 根据 Lambda PHYSIK 的研究成果^[16]：理想状态下，准分子激光脉冲输出能量波动性符合高斯分布，即 $E_j \sim N(E_1, \sigma_1^2)$ 。其中， j 为单次脉冲数， E_1 为能量平均值， σ_1^2 为能量方差，表达式为：

$$E_1 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n E_j \quad (1)$$

$$\sigma_1^2 = \frac{1}{n-1} \sum (E_j - E_1)^2 \quad (2)$$

(2) 放电次数对激光脉冲能量的影响：随着激光器发射脉冲次数的增加，气体老化加速，放电状况变差，脉冲能量平均值明显降低，能量方差增大。能量平均值 E_2 和能量方差 σ_2^2 与脉冲次数的近似关系表达式为^[17]：

$$E_2 \propto \sqrt{E_0^2 - i^2} / (5 \times 10^5) \quad (3)$$

$$\sigma_2^2 \propto i^{0.2}$$

模型中， $i = j \times 10^3$ ，每增加 1 代表激光器有 1 000 个脉冲输出， E_0 为激光器初始能量。

(3) 激励电压对激光输出能量影响：在激励电压可调范围内，提高激励电压，激光输出能量显著提高，能量波动性下降。能量平均值 E_3 和能量方差 σ_3^2 与激励电压 V 近似表达式为^[18]：

$$E_3 \propto V^{1.65} \quad (4)$$

$$\sigma_3^2 \propto \frac{1}{(V/V_0)^4} \quad (5)$$

式中： V_0 为初始激励电压。

根据以上分析，综合考虑放电次数和激励电压两因素对激光输出能量影响时，308 nm 准分子激光器脉冲输出能量表示为：

$$E_i \sim N(E_2 + \Delta E_3, \frac{\sigma_1^2 \times i^{0.2}}{(V/V_0)^4}) \quad (6)$$

1.2 激励电压调节 PI 算法

为了满足 308 nm 准分子激光器输出能量稳定

在设定的目标值附近的要求,设计了针对激励电压调节的 PI 算法。在对激光能量单个脉冲(或脉冲串)实时检测的同时,通过实时调节激励电压补偿激光脉冲能量的衰减,达到能量稳定的目的。激励电压的实时调节值通过 PI 算法计算。

PI 算法相比其他算法,如平均值算法等,其控制及时,且控制精度较高。算法包括比例项和积分项,比例项是对预设能量值和实际输出能量值差的放大,比例因子越大,输出能量值接近预设能量值的速度越快,调节灵敏度越高,但同时可能会造成输出能量在预设值附近振荡的情形,此时需引入积分项;积分项是对预设能量值和反馈值之间的差值在时间上的累加,可以消除系统余差,提高控制精度^[19]。准分子激光器脉冲输出能量属于离散系统,其积分为单个离散量之和。根据设计,PI 算法表达式为:

$$V(j)=V(j-1)-\frac{\left[k_p \times \text{err}(j-1)+k_i \times \sum_{n=1}^{j-1} \text{err}(n)\right]}{(dE/dV)} \quad (7)$$

式中: $V(j)$ 为激励电源输出电压; $\text{err}(j-1)$ 为单次能量偏差; $\sum_{n=1}^{j-1} \text{err}(n)$ 为能量偏差的积分; k_p 为比例系数; k_i 为积分系数; dE/dV 为激光输出能量对激励电压的导数。

1.3 能量衰减和 PI 模型模拟

1.3.1 能量衰减模拟

利用 MATLAB 对一台重复频率为 100 Hz 的 308 nm 准分子激光器进行模拟运算。选定的激光器参数是: σ_1^2 为 0.2, 激励电压初始值 V_0 为 22 kV 且保持不变, 激光器初始能量为 17.5 mJ, $i=10^3$, 模拟结果如图 1 所示。

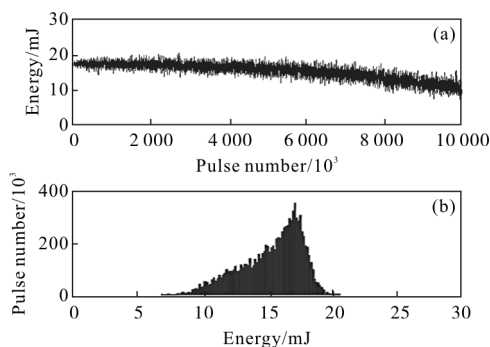


图 1 激光脉冲能量模型

Fig.1 Model of the laser pulse energy

图 1(a)为激励电压恒定下模拟的激光器输出能量随放电次数的变化图,随着放电次数的增加,能量均值逐渐下降,能量波动逐渐变大,激光器千万次发后输出能量从 18 mJ 衰减到 10.3 mJ,能量波动性升高至 5%;图 1(b)为激光器输出能量分布直方图,呈高斯分布。

1.3.2 PI 算法模拟验证

引入 PI 算法后,激光器激励电压将被不断调节,影响输出能量平均值和能量方差。激光器的初始参数设为: σ^2 为 0.2, 初始激励电压为 22 kV, 初始能量和目标能量均为 17.5 mJ, 在 PI 算法控制下输出能量分布满足:

$$E_i \sim N\left(\sqrt{E_0 - i^2 / 5 \times 10^5} + 0.24 \times [V(i) - 22] \times V(i)^{0.65}, \frac{0.2 \times i^{0.2}}{(V_i/V_0)^4}\right) \quad (8)$$

PI 算法中参数 k_p 和 k_i 的大小组合直接影响控制效果,根据 PID 控制原理对参数进行整定^[19],当 k_p 为 0.2, k_i 为 0.02 时,算法调节效果好,响应速度快,能够保证激光器输出能量的稳定性。模拟结果如图 2 所示。

由图 2(a)可知,引入 PI 算法后,激光能量稳定在初始能量 17.5 mJ 附近,能量波动性 σ^2 增加缓慢,激光器千万次发后激光能量几乎不衰减,且能量波动 σ^2 为 1.55%。图 2(b)为激励电压变化波形,直观地反映了在 PI 算法下激励电压呈上升趋势,说明激光器在算法调节下不断通过提高激励电压来弥补气体变差等因素引起的能量衰减。

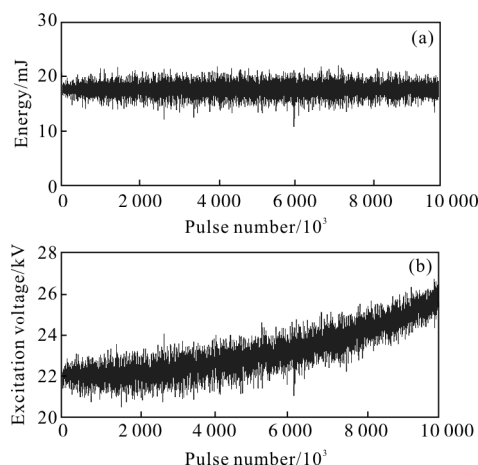


图 2 引入 PI 算法后的仿真结果

Fig.2 Simulation results after introducing the PI algorithm

2 准分子激光皮肤治疗系统设计

2.1 实验平台

文中对一台自主研发的 308 nm 准分子激光皮肤治疗系统中的激光器进行实验研究。

图 3 为治疗系统原理图^[20],主要分为控制模块、卤族补偿模块、换气模块、高压激励电源、激光头和液芯光纤输出模块等。输出模块为直径 5 mm、长度 1 000 mm 的扩展型紫外液芯光纤,实测光纤透射率为 70%;气体补偿和换气模块均采用电磁阀自动控制,控制系统采用 DSP 芯片,实时提取能量信号(S1)并进行能量补偿运算。高压激励电源采用外部光控制,有利于抑制电磁辐射干扰。激光头电极采用张氏电极结构实现有效的均匀体放电以提高光电转换效率;能量探头采用 PIN 光电二极管,型号为 S-1722,结电容和暗电流小,光谱响应范围为 190~1 100 nm,覆盖紫外波段,探头置于激光头全反镜后端,实现激光能量的在线无损检测。

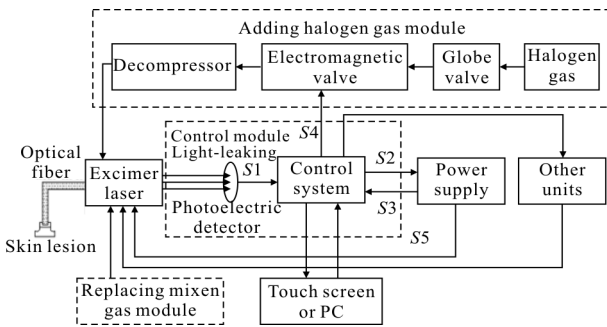


图 3 308 nm 准分子激光皮肤治疗系统原理图

Fig.3 Schematic diagram of 308 nm excimer laser skin treatment system

根据医疗设备的设计要求,这台 308 nm 准分子激光皮肤治疗系统中的激光器指标如表 1 所示。

表 1 激光器参数

Tab.1 Laser parameters

Parameters	Value
Working frequency/Hz	1~200
Pulse energy/mJ	10~30
Energy stability	<3.5%
Pulse width/ns	30
Spot size/cm ²	1.5×15
Gas life/pulse	1.2×10 ⁷

图 4 为准分子激光器主电路结构,主要包括高压激励电源和激光头两部分。

高压激励电源为自主研发的紧凑型开关电源,采用有源低损吸收推挽式拓扑,引入低损吸收和互感设计,相比于传统的推挽结构不存在变压器的偏磁现象^[21];相比于谐振拓扑对负载的依赖性小^[22],具有实用性强,适用负载范围大(10~120 nF),输出恒流等特点,充电精度高达 0.1%。

激光器工作过程为:50 周市电(220 V/50 Hz)通过整流滤波、逆变和高压整流后将激光头储能电容 C_s 充至 20~40 kV, C_s 充电完成后闸流管 SW1 被触发导通,实现 C_s 到 C_d 的能量转移,待 C_d 的电压达到激光器介质的放电阈值时,工作气体被击穿, C_d 上的能量注入到工作气体中实现均匀体放电,受激励的工作气体分子完成受激辐射跃迁输出激光。

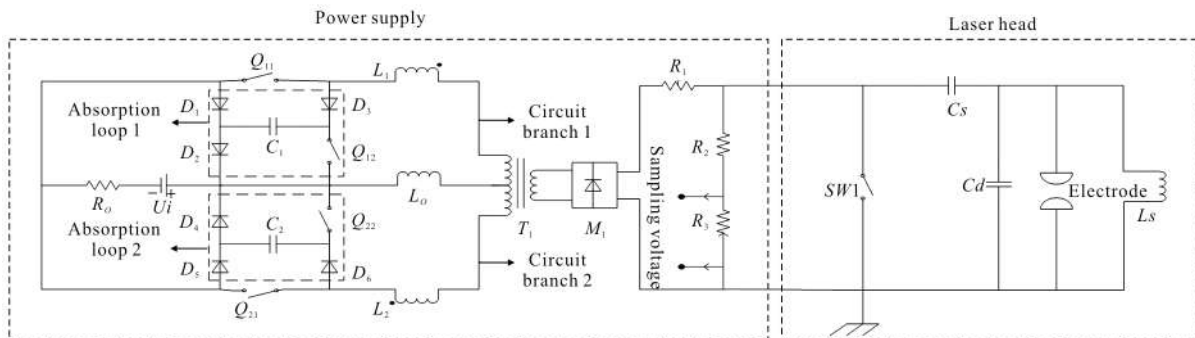


图 4 准分子激光器系统结构

Fig.4 Excimer laser system structure

2.2 控制系统设计

硬件方面,通过设计输出能量在线实时检测-信号处理-反馈-激励电压实时调节电路完成激光能量输出稳定性控制。置于激光器全反镜后端的 PIN 光电二极管输出电信号 S1 通过放大、峰值保持电路处理后,送入 DSP 进行运算,得到脉冲能量对应的精确电压信号;通过引入 PI 算法,DSP 实时调节激励电源的输出电压,对激光器能量实时补偿,形成闭环控制,达到稳定激光器输出能量的目的。

软件方面,如图 5 所示,能量稳定控制存在于整个机器运行期间,首先用户输入需要的治疗能量值,并完成自校准功能(系统认为能量在治疗值上下波动 3.5%是正常的),如果自校准失败,说明工作气体质量较差,需要换气;完成自动校准后,开始进入治疗模式,系统实时检测输出能量并与设定值比较,若能量值大于设定值,则引入 PI 算法对输出能量进行调节;若能量值小于设定值,则判断激励电压是否达到最大调节值,未达到最大值时则进入 PI 算法,否则进入增加卤素气体程序,对气体质量进行改善,或者对整体工作气体进行更换;文中对换气程序进行屏蔽,只研究一次充气的情况。

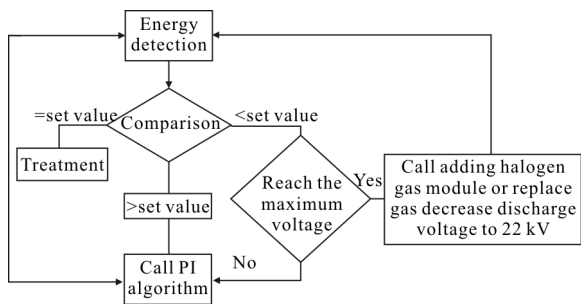


图 5 能量稳定程序流程图

Fig.5 Program flow chart of energy stability

3 实验与讨论

激励电源输出电压受外部光信号脉宽直接控制,输出电压与脉宽成正比例关系,通过调节触发信号脉宽可以实时控制激励电源的输出电压;图 6 为实测激光器运行在 100 Hz,储能电容 Cs 为 23 nF 时光信号脉宽与激励电压的关系,电源在 6 ms 内将储能电容充至 26.5 kV,脉冲宽度与激励电压呈很好的线性关系。

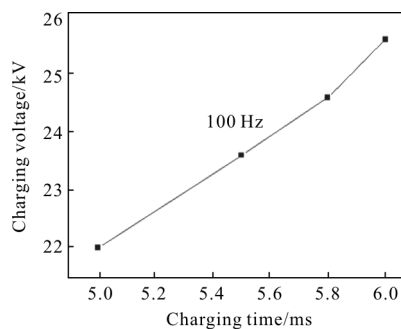


图 6 脉宽与激励电压关系

Fig.6 Relationship between pulse width and charging voltage

图 7 为激光器 100 Hz 运行下单脉冲输出能量与激励电压的关系,激光器输出能量随激励电压的增大而增大。

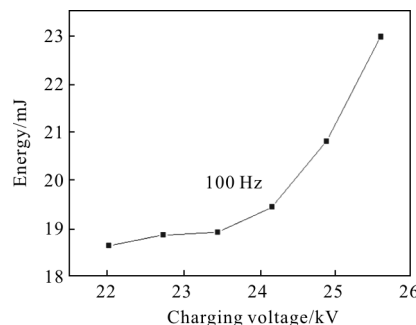


图 7 激励电压与激光输出能量关系

Fig.7 Relationship between charging voltage and laser output energy

图 8 为实测激光器的工作气体寿命数据,激光器输出能量随发射次数的增加而减小,实验验证了能量衰减模型的合理性;激光器输出 1.2 千万个脉冲后输出能量衰减 50%,具有很好的工作状态。结合图 7 可知,通过调节激励电压补偿激光器输出能量的衰减,在一定范围内能够获得稳定输出。

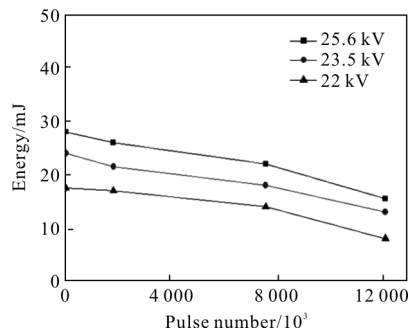


图 8 能量衰减曲线

Fig.8 Energy decay curve

图 9 为激光器 1 千万次发后治疗光斑的能量分布图,测试条件:激光输出窗口处安装波导匀光模块,液芯光纤出口到凸透镜(焦距为 23 mm)的距离为 1.5 mm,凸透镜到光束质量分析仪接收相机的距离为 13 mm。测试结果表明:输出治疗光斑为圆形,尺寸为 $\phi 11\text{ mm}$,1 千万次脉冲后输出光斑均匀性良好,满足皮肤治疗仪的使用要求。

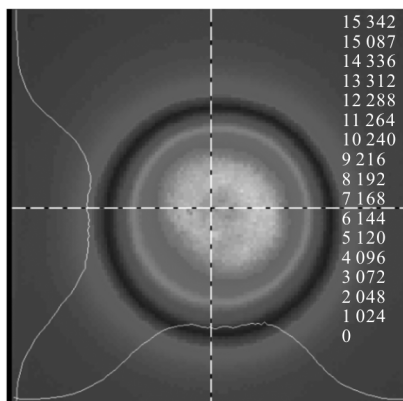


图 9 光斑能量的二维分布图

Fig.9 Spot diagrams of 2D spot energy

图 10 为引入电压 PI 算法后 308 nm 皮肤治疗仪的输出能量数据图,为了图表观察清晰,取激光器每输出 10^5 后实测的 100 个点,数据显示,开始配气时,激光器运行状态最佳,此时稳定性最好 ($\sigma^2=0.5\%$),PI 算法响应速度最快;随着发射次数的增加,工作气体老化,输出能量减小,控制算法需要调节较大的激励电压来弥补能量的不足,响应需要一定的时间,此时能量值在目标能量 17.5 mJ 附近波动,但是波动性逐渐增大($\sigma^2=3\%$)。

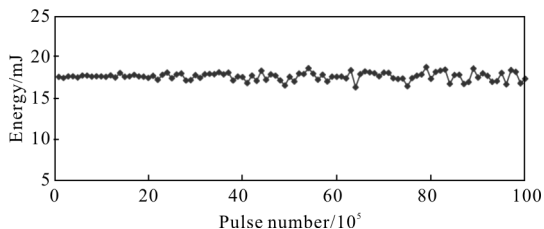


图 10 激光输出稳定性测试曲线

Fig.10 Laser output stability test curve

4 结论

对自主研制的 308 nm 准分子皮肤治疗仪进行了实验研究,针对输出能量稳定性指标建立了基于

激励电压补偿能量稳定计算模型,将反馈补偿控制算法应用于系统实验中实现了 1 千万次较理想稳定激光输出。后续工作还可以从以下两个方面展开,一方面,文中主要就工作气体劣化因素对激光输出能量稳定性进行了研究,其他因素如闸流管、光学镜片劣化时间较长,需结合长期工作时间和实验情况进行深入的研究;另一方面,结合激励电压补偿引入补充卤素气体和更换部分混合气体等算法可进一步提高激光器的工作寿命,降低器件的耗材成本。

参考文献:

- [1] Yu Yinshan, You Libing, Liang Xu, et al. Progress of excimer lasers technology [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(9): 2253-2270. (in Chinese)
余吟山, 游利兵, 梁勳, 等. 准分子激光技术发展[J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2253-2270.
- [2] Gontad F, Conde J C, Chiussi S, et al. 193 nm excimer laser processing of Si/Ge/Si(100) micropatterns [J]. *Applied Surface Science*, 2016, 362: 217-220.
- [3] Zhang Jian, Lin Guangping, Zhang Rui, et al. Fabrication of large grain size p-Si film by phase modulated excimer laser crystallization [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(1): 59-63. (in Chinese)
张健, 林广平, 张睿, 等. 准分子激光相位掩膜法制备大晶粒尺寸多晶硅薄膜[J]. 光学精密工程, 2012, 20(1): 59-63.
- [4] Tian L S, Liu Z, Li L, et al. A comparison of the characteristics of excimer and femtosecond laser ablation of acrylonitrile butadiene styrene (ABS) [J]. *Applied Surface Science*, 2016, 364: 467-476.
- [5] Guo P, Rao Y, Li D, et al. Inscription of Bragg gratings in few-mode optical fibers [J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, 11(2): 18-20.
- [6] Chen Y, Okada T, Noguchi T, et al. Excimer laser annealing for low-voltage power MOSFET [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2016, 55(8): 086503.
- [7] Zhang Wei, Liang Xu, Tao Ruhua, et al. Reasarch of compact excimer laser for producing FBG [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(1): 0105001. (in Chinese)
张威, 梁勳, 陶汝华, 等. 用于制作 FBG 的紧凑型准分子激光器的研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(1): 0105001.
- [8] Plaza-Puche A B, Aswad A E, Arba-Mosquera S, et al. Optical profile following high hyperopia correction with a

- 500-Hz excimer laser system. [J]. *Journal of Refractive Surgery*, 2016, 32(1): 6.
- [9] Shroff A, Malajian D, Czarnowicki T, et al. Use of 308 nm excimer laser for the treatment of chronic hand and foot eczema [J]. *International Journal of Dermatology*, 2016, 55(8): e447-e453.
- [10] Ma Yue, Yang Chunjun, Deng Zanhong, et al. Advances in vitiligo treatment by 308nm excimer laser [J]. *Acta Laser Biology Sinica*, 2012, 21(4): 295-298. (in Chinese)
马跃, 杨春俊, 邓赞红, 等. 308 nm 准分子激光治疗白癜风皮肤病进展[J]. *激光生物学报*, 2012, 21(4): 295-298.
- [11] Fang Xiaodong, Dai Jinghua. Experimental study on gas lifetime of XeCl excimer laser [J]. *Laser Technology*, 1996, 20(1): 50-52. (in Chinese)
方晓东, 戴静华. 实用化 XeCl 准分子激光器气体寿命的实验研究[J]. *激光技术*, 1996, 20(1): 50-52.
- [12] Hu Xuejin, Zhao Zhensheng, Li Zhaolin, et al. Study on the operation lifetime of an excimer laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1985, 5(10): 881-884. (in Chinese)
胡雪金, 赵振声, 李昭林. 等. XeCl 准分子激光器寿命的研究[J]. *光学学报*, 1985, 5(10): 881-884.
- [13] Sumitani A, Andou S, Watanabe T, et al. Output stabilization technology with chemical impurity control on ArF excimer laser[C]//*Microlithography*, International Society for Optics and Photonics, 2000: 1424-1434.
- [14] Liang Xu, You Libing, Yu Yinshan. Excimer laser pulse energy detection under pulse repetition running mode [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2010, 27(3): 281-287. (in Chinese)
梁勛, 游利兵, 余吟山. 重复率激光的单个激光能量检测技术[J]. *量子电子学报*, 2010, 27(3): 281-287.
- [15] Fan Yuanyuan, Zhou Yi, Liu Guangyi, et al. Compound cavity ArF excimer laser with high efficiency [J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(2): 0202001.
范元媛, 周翊, 刘广义, 等. 高效率 ArF 准分子激光复合腔技术研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(2): 0202001.
- [16] Kakizaki K, Sasaki Y, Inoue T. High-repetition-rate(6 kHz) and long-pulse-duration (50 ns) ArF immersion lithography [C]//*Proceedings of SPIE*, 2008, 6924: 2R1-2R10.
- [17] Pflanz T, Huber H. Compact excimer laser light source for optical inspection systems [C]//*Proceedings of SPIE*, 2001, 4349: 180-184.
- [18] Wang Xiaoshun, Liang Xu, You Libing, et al. Study on energy control algorithm for high-repetition-rate ArF excimer lasers[J]. *Laser Technology*, 2012, 36(6): 763-766. (in Chinese)
王效顺, 梁勛, 游利兵, 等. 高重复频率 ArF 准分子激光器能量控制算法研究[J]. *激光技术*, 2012, 36(6): 763-766.
- [19] Zhan Juntong, Fu Qiang, Duan Jin, et al. Stability improvement of DFB laser driving power using digital position PID algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(6): 1758-1761. (in Chinese)
战俊彤, 付强, 段锦, 等. 利用位置式数字 PID 算法提高 DFB 激光器驱动电源稳定性 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(6): 1758-1761.
- [20] Liu Yi, Fang Xiaodong, Liang Xu, et al. 308 nm XeCl excimer laser system used for treatment of vitiligo [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(6): 0602002.
刘毅, 方晓东, 梁勛, 等. 用于白癜风治疗的 308 nm XeCl 准分子激光系统[J]. *中国激光*, 2012, 39(6): 0602002.
- [21] Patil S L, Agarwala A K. Push pull boost converter with low loss switching [C]//*Industrial Technology ICIT International Conference on IEEE*, 2008: 1-6.
- [22] Kim E H, Kwon B H. High step-up resonant push-pull converter with high efficiency [J]. *Power Electronics, IET*, 2009, 2(1): 79-89.