

用于白癜风治疗的 308 nm XeCl 准分子激光系统

刘毅¹ 方晓东^{1,3} 梁勛¹ 高健² 余吟山¹ 王效顺¹ 罗乐²

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031
²合肥工业大学电子科学与应用物理学院, 安徽 合肥 230009
³中国科学技术大学, 安徽 合肥 230029

摘要 研制了一台用于白癜风治疗的 308 nm XeCl 准分子激光系统。根据准分子激光器脉冲式放电的特点, 设计了推挽式脉冲开关电源。实验研究了激光器脉冲重复频率、工作电压、气体寿命对激光输出能量的影响, 并检测了激光输出脉冲能量的稳定性。通过自动反馈控制系统调整激光头放电工作电压实现输出激光能量的稳定。激光采用扩展型紫外液芯光纤传导, 得到均匀性良好的治疗光斑, 液芯光纤对 308 nm 激光的传输效率约为 70%。激光器脉冲重复频率 1~200 Hz, 工作电压 18~25 kV, 输出能量不稳定性小于 4%。经光纤输出用于治疗的有效光斑直径 22 mm, 脉冲能量密度 2~3 mJ/cm²。

关键词 激光器; 准分子激光器; 白癜风治疗; 推挽式脉冲开关电源; 液芯光纤

中图分类号 TN248.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0602002

308 nm XeCl Excimer Laser System Used for Treatment of Vitiligo

Liu Yi¹ Fang Xiaodong^{1,3} Liang Xu¹ Gao Jian² Yu Yinshan¹ Wang Xiaoshun¹ Luo Le²

¹Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China
²School of Electronic Science & Applied Physics, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China
³University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230029, China

Abstract A XeCl excimer laser system used for treatment of vitiligo is developed. A push-pull pulsed switching power supply is designed for pulsed discharge of excimer lasers. The dependence of laser output energy on repetition rate, discharge voltage and gas lifetime is studied. The pulse-to-pulse stability is measured. Based on a feed-back control system, the discharge voltage is adjusted automatically to achieve laser operation at a preset energy level. The laser beam is transmitted through a liquid-core optical fiber to achieve a homogeneity of laser spot for treatment. The transmissivity of the 308 nm excimer laser in liquid-core optical fiber is about 70%. The repetition rate of the laser is 1~200 Hz. The discharge voltage can be adjusted from 18~25 kV. The pulse to pulse energy stability is less than 4%. The diameter of effective spot is 22 mm while the pulse output energy density is 2~3 mJ/cm².

Key words lasers; excimer laser; treatment of vitiligo; push-pull pulsed switching power; liquid-core optical fiber

OCIS codes 140.2180; 140.3460; 140.3510

1 引 言

白癜风是常见的皮肤病, 其治疗方法包括激素治疗、免疫调节剂治疗、外科手术治疗和中医药治疗等, 其中光疗法是最有效的治疗方法之一^[1,2]。经过临床治疗研究发现: 在补骨脂素光化学疗法(PUVA)、窄谱中波紫外线疗法(NB-UVB)、308 nm

准分子激光疗法等光疗方法中, 治疗机理基于免疫调节机制^[3,4]的 308 nm 准分子激光疗法具有见效快、效果持久、安全及可选择性作用于病变皮损等特点。目前用于白癜风临床治疗的准分子激光系统典型产品是美国 PhotoMedex 公司的 Xtrac 准分子激光皮肤治疗系统, 其最高脉冲重复频率 250 Hz, 脉冲能

收稿日期: 2012-02-04; 收到修改稿日期: 2012-02-28

作者简介: 刘毅(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事准分子激光器及其应用技术等方面的研究。

E-mail: yxjchly@126.com

导师简介: 方晓东(1963—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事半导体薄膜材料和器件以及准分子激光技术及应用等方面的研究。E-mail: xdfang@aiofm.ac.cn

量密度 $2\sim 3\text{ mJ/cm}^2$, 光斑为 $2\text{ cm}\times 2\text{ cm}$ 。虽然用于白癜风治疗的准分子激光系统已经应用于临床治疗, 但国内对此系统的研制尚未见报道。

本文研制了一种用于白癜风治疗的准分子激光系统。在临床研究结果和目前国际上最先进的 Xtrac 治疗仪参数的基础上, 对本系统提出如下指标: 激光波长 308 nm , 脉冲重复率频率 $1\sim 200\text{ Hz}$, 输出能量不稳定性小于 4% , 脉冲能量密度 $2\sim 3\text{ mJ/cm}^2$, 光斑直径为 22 mm 。

2 激光器系统设计及实验

2.1 系统原理

图 1 是 308 nm XeCl 准分子激光系统原理图。激光头部分经过优化设计, 采用张氏电极^[5]以实现均匀有效的辉光放电, 储能电容 C_s 为 26 nF 、放电电容 C_d 为 25.2 nF , C_s 与 C_d 之比 β 等于 1.03 , 实现 C_s 与 C_d 之间极高的能量转移效率, 避免残余能量

振荡对元部件造成损坏。电源设计为推挽式脉冲开关电源, 电源中引入无损吸收电路对开关管进行保护, 以适应医用准分子激光器稳定性、可靠性的要求。控制系统完成能量稳定控制、治疗剂量控制、提供操作界面等功能, 控制着激光器的工作状态。治疗前, 将光纤输出端插入校准口进行自校准, 如图 1(a) 所示。校准完毕, 通过控制界面输入治疗剂量, 把光纤头从校准口取出, 放到病人的病变部位, 如图 1(b) 所示。系统接到医生的指令后开始治疗, 治疗剂量达到后系统自动停止, 并在界面上提示本次治疗完成, 等待下一次治疗。换气系统在控制系统的作用下完成自动配气。激光采用液芯光纤传输, 满足输出光斑均匀性和能量传输效率的要求。

激光器脉冲重复频率 $1\sim 200\text{ Hz}$, 典型工作频率 100 Hz , 激光头放电工作电压 $18\sim 25\text{ kV}$, 输出能量不稳定性小于 4% 。经光纤输出用于治疗的有效光斑直径为 22 mm , 脉冲能量密度 $2\sim 3\text{ mJ/cm}^2$ 。

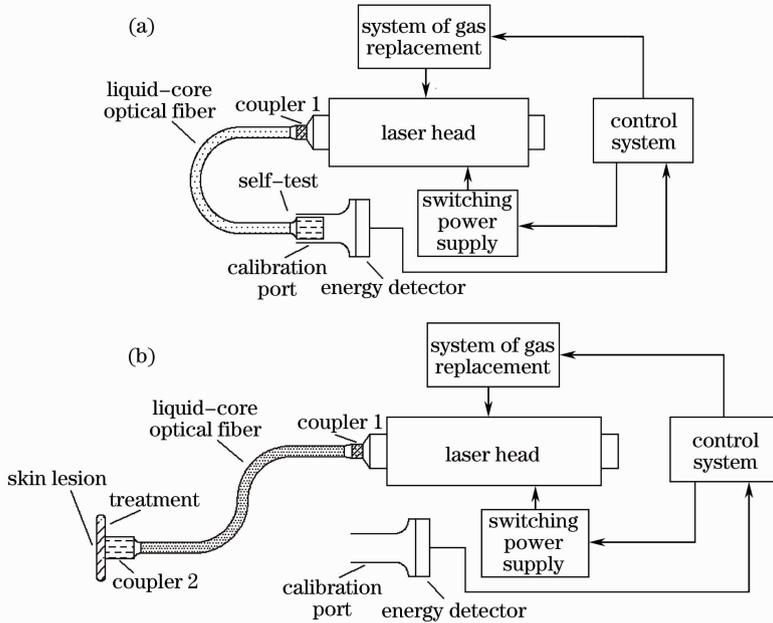


图 1 308 nm XeCl 准分子激光系统原理图。(a)自校准; (b)治疗

Fig. 1 Schematic diagram of 308 nm XeCl excimer laser system. (a) Self-test; (b) treatment

2.2 电 源

图 2 是电源原理图。电源控制器选用 SG3525; 主回路由工频整流、推挽式逆变、升压整流三部分构成。根据准分子激光器脉冲式放电的特点, 电源设计为脉冲式开关电源。开关电源式激光器工作在“即充即放”模式^[6], 高压元件承受高压的时间很短, 可以有效延长元器件的寿命, 实现激光器系统长期稳定运行。

推挽式结构适合中小功率电源, 其优点是驱动

简单、通态损耗小; 缺点是断态时, 主开关管承受的电压是输入电压的 2 倍, 在输入电压不高的条件下, 通过对主开关管的合适选型克服这一缺点。

开关稳压电源的启动过程设置为软启动^[7], 在启动过程中主开关管的导通时间逐步增加, 以抑制冲击电流。选用 SG3525 控制器的开关稳压电源, 软启动时间由外接的软启动电容决定, 一般为几百毫秒到几秒。但这种软启动方式在脉冲电源中并不适用。为使每次充电启动时主开关管导通时间的占

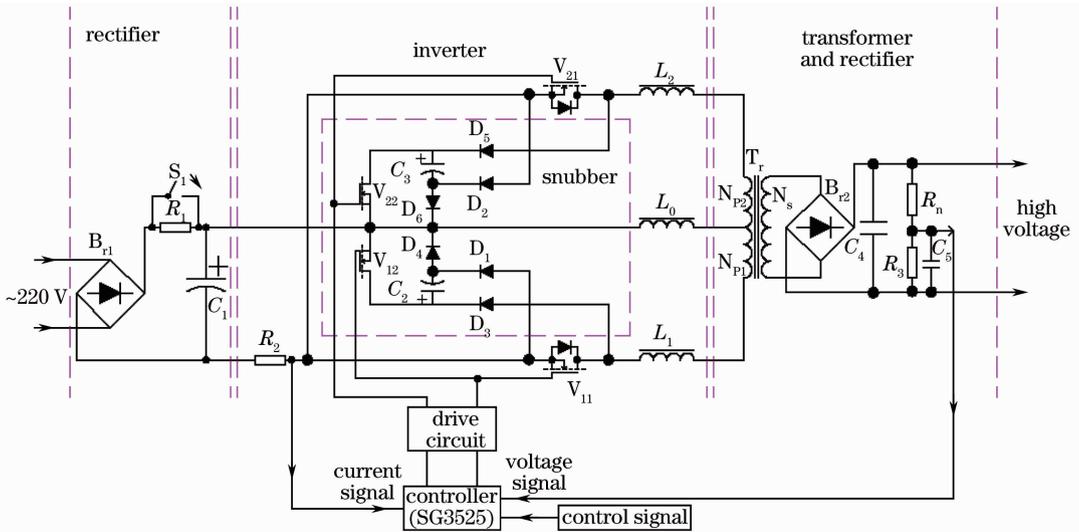


图 2 电源原理图

Fig. 2 Schematic diagram of power supply

空比就能达到 49%，同时抑制充电过程中的冲击电流，在高频高压变压器 T_r 一次绕组的中间抽头和两端分别引入电感 L_0, L_1, L_2 。充电过程中，主开关管 V_{11} 和 V_{21} 交替导通， L_0 上电流 i_{L_0} 波动不大，近似为电流源， L_1, L_2 上电流 i_{L_1}, i_{L_2} 交替变化。变压器一次绕组电压 u_{Np} 逐步上升， u_{Np} 能达到的最大值为 u_{C_1} (u_{C_1} 为滤波电容 C_1 上电压)，充电时间不同，达到的电压不同，实现了通过调整充电时间来调整充电电压的目的。

由于电感 L_1, L_2 的引入，在主开关管 V_{11}, V_{21} 关断时，会产生很大的电压尖峰，为了给 L_1, L_2 提供续流回路，吸收主开关管关断时的电压尖峰，保护主开关管，设计了有源无损吸收电路。 V_{12}, V_{21} 是无损吸收回路开关管，如图 2 所示。 V_{11}, V_{12} (V_1 组开关管)同时通断； V_{21}, V_{22} (V_2 组开关管)同时通断。由于电路的对称性，分析一组即可。 V_{11}, V_{12} 关断时，吸收电容 C_2 为 L_1 提供续流回路，吸收电压尖峰； V_{11}, V_{12} 导通时， C_2 再把吸收的能量馈送给负

载，实现无损吸收。

图 3 为充电过程中开关管驱动信号波形 (ch1) 和变压器一次绕组上电压 u_{Np} 波形 (ch2)。随着充电的进行，一次绕组 N_{p1} 上的电压 u_{Np} 逐步上升。

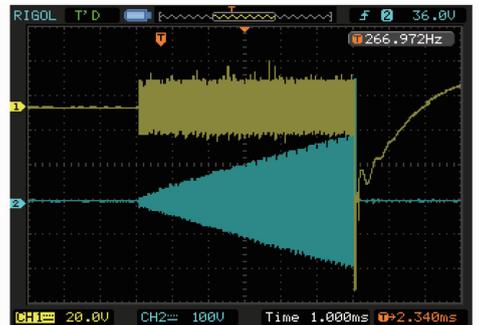


图 3 开关管驱动信号波形 (ch1) 及 u_{Np} 波形 (ch2)

Fig. 3 Waveforms of driving signals of switching tubes (ch1) and u_{Np} (ch2)

图 4 对比了吸收电路的吸收效果。图 4(a) 为无吸收电路，输入电压为 40 V；图 4(b) 为有吸收电路，输入电压为 300 V。由波形可见，无吸收电路

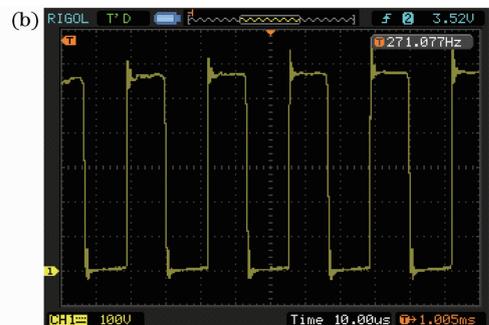
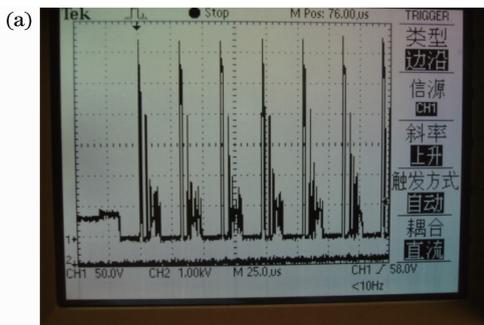


图 4 开关管漏-源极电压波形。(a) 无吸收电路；(b) 有吸收电路

Fig. 4 Voltage waveforms of drain-to-source of switching tube. (a) Without snubber; (b) with snubber

时,漏-源极有输入 8 倍左右的电压尖峰;有吸收电路时,几乎没有电压尖峰。吸收电路起到了吸收尖峰,保护开关管的作用。

2.3 控制系统设计

控制系统的功能包括能量稳定控制、治疗剂量控制、提供操作界面等。

能量稳定控制^[8]在自校准过程中完成,图 5 是自校准过程流程图。自校准时,将光纤输出端插入校准口,激光器工作,控制系统根据能量检测器检测到的能量值做出判断。若能量值等于基准值,则校准完成,进入治疗流程;若能量值高于基准值,则降低工作电压,重新检测能量并做出判断;若能量值低于基准值,判断工作电压是否达到 25 kV,工作电压未达到 25 kV 则提高工作电压,重新检测能量并做出判断,工作电压达到 25 kV 则更换工作气体,并把工作电压调至 18 kV,重新检测能量并做出判断。调整工作电压通过调节充电时间来实现。换气系统主要由气瓶、电磁阀、真空泵、气压传感器等组成,更换工作气体由控制系统根据气压传感器测得的气压值控制不同的电磁阀动作完成。

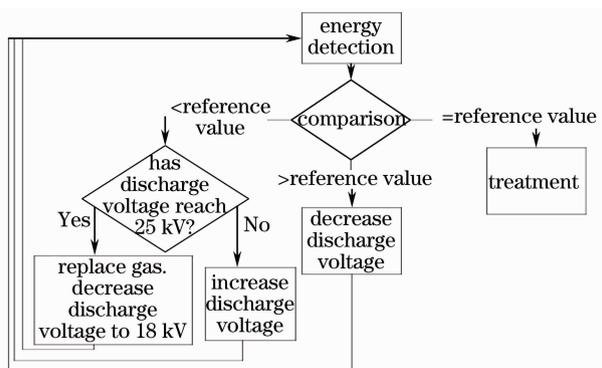


图 5 控制系统中自校准过程流程图

Fig. 5 Diagram of self-test flow in control system

治疗剂量由治疗时间控制。进入治疗流程,操作界面提示医生输入治疗剂量,控制系统根据治疗剂量和能量基准值计算出治疗时间。系统接到医生的指令后开始治疗,治疗时间达到后系统自动停止,等待下一次治疗。

2.4 激光器实验

激光器的输出能量受到脉冲重复频率、激光头放电工作电压、工作气体状态的影响。通过实验研究了最佳气体配比^[9]条件下,脉冲重复频率、工作电压、气体寿命对能量的影响,为控制系统提供数据支持。

图 6 为开关电源充电时间 5.5 ms 条件下输出功率随脉冲重复频率变化的关系曲线。重复频率为

100 Hz 时,输出功率达到 2950 mW。

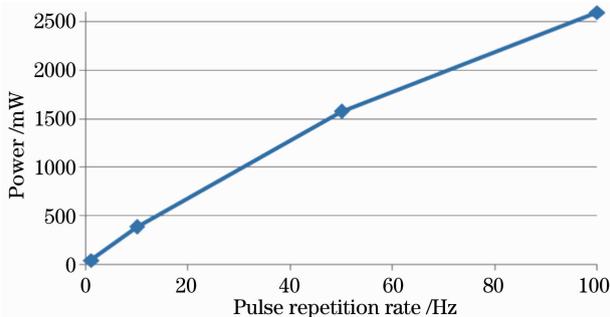


图 6 输出功率-脉冲重复频率关系曲线

Fig. 6 Dependence of output power on pulse repetition rate

在一定范围内,输出激光的脉冲能量随工作电压的提高而升高,有 ΔE 的变化量。图 7 是 100 Hz 重复频率下,单脉冲能量随工作电压从 20 kV 上升到 25 kV 的关系曲线,电压从 20 kV 上升到 25 kV,单脉冲能量变化量 ΔE 为 9.87 mJ。

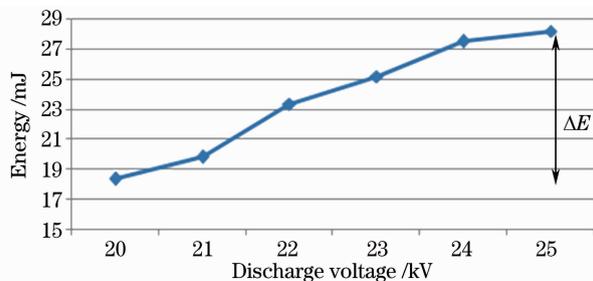


图 7 100 Hz 条件下单脉冲能量-工作电压关系曲线

Fig. 7 Dependence of pulsed output energy on discharge voltage at 100 Hz repetition rate

图 8 是工作气体寿命实验曲线。激光器换气后,在 100 Hz 重复频率,不同工作电压条件下测量激光器单脉冲输出能量,测量点以外的时间激光器没有工作,处于放置状态。图中黑色直线表示治疗时需要激光器输出的能量,实验表明,随着工作气体的劣化,同一工作电压条件下输出能量逐渐降低,为

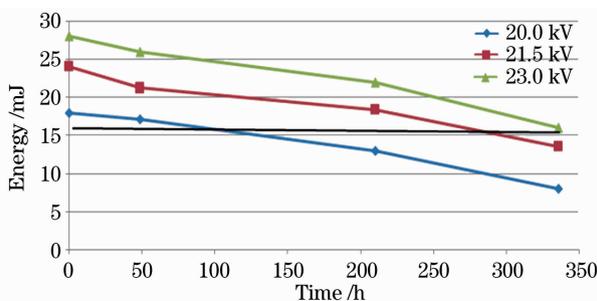


图 8 不同工作电压条件下气体寿命曲线

Fig. 8 Gas lifetime curves with different discharge voltages

保证输出能量稳定,需逐步提高工作电压。

较好的脉冲能量稳定性是治疗安全有效的要求,脉冲能量稳定性用脉冲能量的相对标准差来衡

量。图 9 为工作电压 25 kV,重复频率 1 Hz 条件下 150 个脉冲的能量变化曲线,其平均值 23.09 mJ,标准差 0.92 mJ,相对标准差 3.98%,小于 4%。

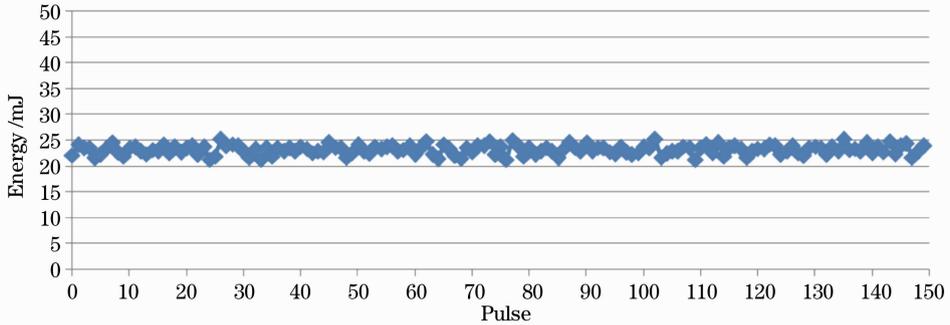


图 9 输出能量随脉冲数的变化

Fig. 9 Variation of output energy depend on numbers of pulse

2.5 光纤实验

采用光纤将激光器输出的光束传导至病变部位。相比于传统的固体光纤,液芯光纤在光导热性、光强分布均匀性、可挠性等方面性能良好^[10],因此选用液芯光纤。光纤为直径 5 mm、长度(l)1000 mm 的扩展型紫外液芯光纤。

为研究该型号液芯光纤对 308 nm 激光的传输特性,对光纤的透射率进行实验。

表 1 是液芯光纤在不同脉冲重复频率下的透射率,透射率未随重复频率的提高而发生明显变化,均在 70%左右。

表 1 液芯光纤在不同重复频率下的透射率

Table 1 Transmissivity of liquid-core optical fiber at different repetition rates

Pulse repetition rate /Hz	1	10	50	100
Transmissivity /%	69.23	69.61	68.97	70.27

图 10 为液芯光纤透射率随工作时间的关系曲线。实验时,重复频率 100 Hz,累计工作 1 h,为模拟实际使用场景,激光器间歇性工作。图中曲线间断处表示间歇期,激光器未工作。光纤透射率均在 70%左右。

实验结果表明该型号液芯光纤对 308 nm 激光透射率均在 70%左右,满足系统稳定性要求。

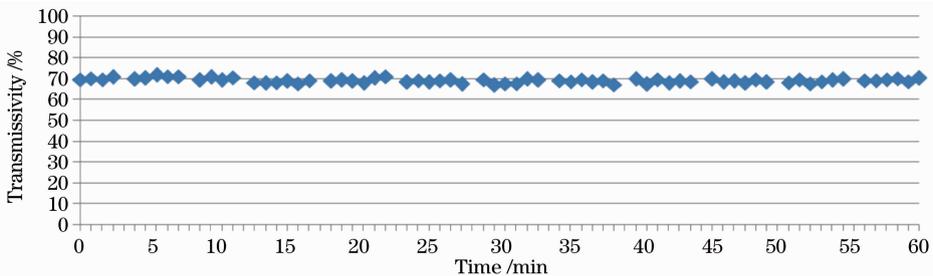


图 10 液芯光纤透射率-工作时间关系曲线

Fig. 10 Transmissivity of liquid-core optical fiber depend on working time

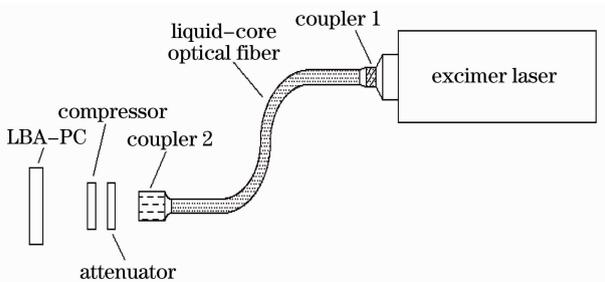


图 11 光束均匀性测量示意图

Fig. 11 Schematic diagram of measuring beam uniformity

为测试经光纤输出的光斑均匀性^[11,12],采用美国 Spiricon 公司的 LBA-PC 激光波面分析仪检测和处理信号,如图 11 所示。

图 12(a)为实验中测得的光斑图像,图 12(b)为经光纤输出的原始光斑重建效果图。效果图圆形光斑即为用于治疗的有效光斑,光斑直径等于 22 mm。良好的光斑均匀性避免了治疗时出现皮肤局部灼伤现象。

3 结 论

研制了一台用于白癜风治疗的 308 nm XeCl 准

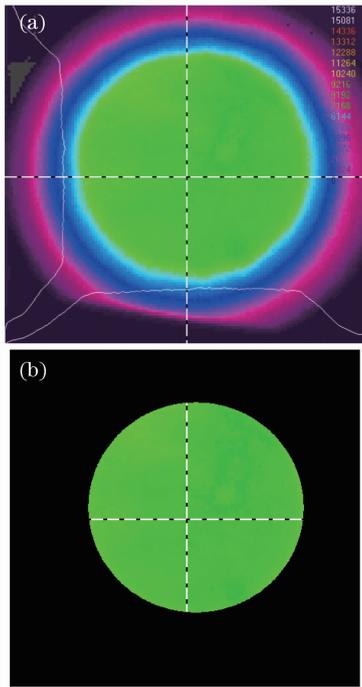


图 12 实验光斑图像(a)及重建效果图(b)
Fig. 12 Spot images of experiment (a) and reconstruction maps (b)

分子激光系统。电源设计为推挽式脉冲开关电源。控制系统实现能量稳定控制、治疗剂量控制、提供操作界面等功能。实验研究了激光器脉冲重复频率、工作电压、气体寿命对输出能量的影响和脉冲能量稳定性；激光采用液芯光纤传输，对光纤的透射率、输出光斑的均匀性进行了研究。激光器脉冲重复频率 1~200 Hz,工作电压 18~25 kV,输出能量不稳定性度小于 4%。液芯光纤对 308 nm 激光的传输效率约为 70%，经光纤输出用于治疗的有效光斑均匀性良好，光斑直径 22 mm。准分子激光系统的技术指标满足设计要求，适合应用于生物学病理研究和临床治疗。

参 考 文 献

1 Li Hongxin, Gao Tianwen. Application of 308 nm excimer laser in the treatment of vitiligo[J]. *Chinese J. Derm. Venereol.*, 2006, **20**(8): 507~509

李泓馨, 高天文. 308 nm 准分子激光治疗白癜风进展[J]. *中国皮肤性病学杂志*, 2006, **20**(8): 507~509

2 Yang Huilan, Liu Zhongrong, Li Xuemei *et al.*. Treatment of vitiligo with the 308-nm excimer laser: a clinical study [J]. *Chinese J. Dermatol.*, 2006, **39**(1): 35~37

杨慧兰, 刘仲荣, 李雪梅 等. 308 nm 准分子激光治疗白癜风临床研究[J]. *中华皮肤科杂志*, 2006, **39**(1): 35~37

3 K. Ongenae, G. N. Van, J. M. Naeyaert. Evidence for an autoimmune pathogenesis of vitiligo [J]. *Pigment Cell Res.*, 2003, **16**: 90~100

4 J. Cui, L. Y. Shen, G. C. Wang. Role of hair follicles in the repigmentation of vitiligo [J]. *J. Invest Dermatol.*, 1991, **97**: 410~416

5 T. Y. Chang. Improved uniform-field electrode profiles for TEA laser and high voltage applications[J]. *Rev. Scient. Instrum.*, 1973, **44**(4): 405~407

6 Yu Yinshan, You Libing, Fang Xiaodong *et al.*. Progress of excimer lasers technology[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2253~2270

余吟山, 游利兵, 方晓东 等. 准分子激光技术发展[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2253~2270

7 Zhang Zhansong, Cai Xuansan. *The Principle and Design Design of Switching Power Supply* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004. 291~310

张占松, 蔡宣三. *开关电源的原理与设计* [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004. 291~310

8 Liang Xu, You Libing, Yu Yinshan *et al.*. Excimer pulse energy stabilization realized by charging voltage realtime adjusting[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 374~378

梁 勳, 游利兵, 余吟山 等. 实时调节工作电压实现稳定准分子脉冲能量[J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 374~378

9 Wang Xiaoshun, Yu Yinshan, Fang Xiaodong *et al.*. A discharge-pumped KrF excimer laser with high efficiency [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1): 0102001

王效顺, 余吟山, 方晓东 等. 高效率放电抽运 KrF 准分子激光器[J]. *中国激光*, 2011, **38**(1): 0102001

10 Fu Jiayou, Dong Weiwei, Fang Xiaodong *et al.*. Experimental study on the transmission characteristics of excimer laser in liquid-core optical fiber [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2011, **28**(2): 163~167

付加友, 董伟伟, 方晓东 等. 准分子激光在液芯光纤中传输特性的实验研究[J]. *量子电子学报*, 2011, **28**(2): 163~167

11 Gao Hongyi, Lou Qihong, Dong Jingxing *et al.*. Beam homogenizer for XeCl excimer laser and its applications [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(10): 1379~1382

高鸿奕, 楼祺洪, 董景星 等. XeCl 准分子激光光束均匀器及其应用[J]. *光学学报*, 1996, **16**(10): 1379~1382

12 Li Hongxia, Lou Qihong, Ye Zhenhuan *et al.*. Research on evaluating norm of excimer laser beam uniformity [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(6): 729~732

李红霞, 楼祺洪, 叶震寰 等. 准分子激光光束均匀性的评价指标研究[J]. *强激光与粒子束*, 2004, **16**(6): 729~732

栏目编辑: 宋梅梅