

近红外激光测距机安全评价

陈宗礼 徐贵道 钱焕文 王登龙 胡富根

徐碣敏 周淑英 高光煌 张桂素 刘海峰

(北京军事医学科学院放射医学研究所, 北京)

摘要: 本文给出输出能量约110mJ, 用于对空活动目标测距的Nd:YAG激光测距机眼损伤实验数据及安全距离。

Evaluation of the safety of near infrared laser rangefinder

Chen Zongli, Xu Guidao, Qian Huanwen, Wang Denglong

Hu Fugen, Xu Jiemin, Zhou Shuying,

Gao Guanghuang, Zhang Guisu, Liu Haifeng

(Institute of Radiation Medicine, Academy of Military Medical Sciences)

Abstract: The Q-SW Nd:YAG laser rangefinder, with total energy output of 110mJ, was used in the distance measurements of moving targets in the air. The experimental data of ocular damage of the rangefinder and safety distance were given in this paper.

激光技术的广泛应用, 使激光安全问题受到普遍重视。近年来我们先后对不同型号的激光测距机进行了安全测试与评价, 确定测距时瞄准手视觉是否安全, 确定对眼的安全距离, 为科研、生产和使用单位提供了测距机的安全使用依据。本文较详细地叙述输出能量约110mJ, 用于对空活动目标测距的激光测距机安全实验方法、剂量测量、安全距离推算等问题。

一、测距机性能及测量仪器

激光测距机由激光发射、接收、瞄准系统及激光电源等部分组成, 图1为其光路图, 激光器由一级振荡加一级放大构成, 激光工作物质为Nd³⁺:YAG晶体, 发射1.06μm近红外激光, 用铈酸锂电光调Q, 脉冲宽度7ns, 激光束散角经天线压缩后约为2mrad, 器件最大输出能量210mJ(功率30MW), 经反射镜、输出窗等元件衰减后, 实际输出能量约100~160mJ, 光束初始直径1.6cm。

观察瞄准系统由放大倍率分别为1和6倍的望远系统及其有关反射、折射元件组成, 出瞳直径5mm, 出瞳距离22mm。

试验需测剂量范围为0.2~10⁻⁹J, 为此, 分别采用碳斗能量计(灵敏度2mJ/mm), 激光能量计(灵敏度6×10⁻⁸J/mm), 以及激光能量辐射计, 分别配用分辨率为10⁻⁶J、10⁻⁸J、10⁻¹⁰J等探头, 所用仪器均经中国计量科学院进行定标。

二、剂量测量和动物实验

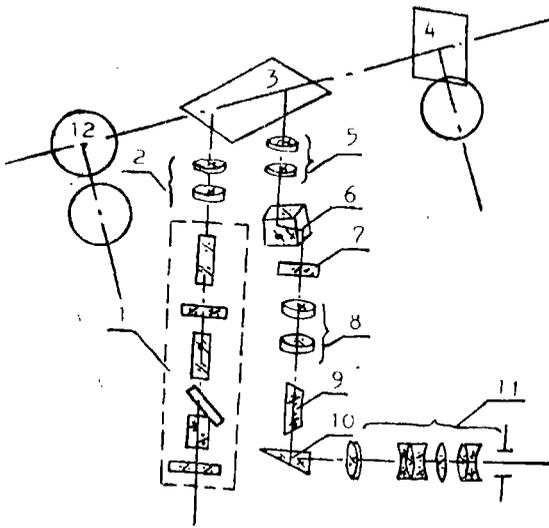


图1 激光测距机光路图

1—Nd:YAG 激光器 2—发射天线 3、4—
反射镜 5~11—瞄准系统 12—接收头

在测距机2.5m处与输出口平面平行放置一块镀锌光亮铁板以及选取距激光出口10m以外白墙为目标，将激光能量计（探头分辨率 10^{-13} J）置于观察瞄准系统出瞳处，测试仪器选取连续触发方式，每输出10个脉冲自动显示一个平均能量值，连续测10次求其平均值，重复率2pps和5pps的测试结果如表1。

表1 激光回波及机内反射激光剂量

重复率 (pps)	模拟目标	输出端与模拟 目标距离(m)	单脉冲辐照量 (J/cm ²)
2	镀锌光亮铁板	2.5	1.22×10^{-8}
2	白色墙壁	≥ 10	1.46×10^{-9}
5	镀锌光亮铁板	3.5	4.26×10^{-9}

为模拟观测人员用测距机跟踪空中目标时接受多次照射条件，动物实验分两组进行，第一组为单眼接受重复率脉冲列2pps照射50s，第二组为5pps照射90s，共用20只兔眼照射5500个脉

冲，实验结果表明无论接受2pps照射50s或5pps照射90s于照后1、24h内检查均未见兔眼底损伤。

3. 不同距离激光辐照量测量及动物实验

将中心标有十字线，上下可调的靶标置于不同距离实验点，用测距机瞄准系统瞄准靶标十字中心，选一适当量仪器于相应位置进行测量，因激光束远距离横断面能量分布很不均匀，激光安全应考虑光束的最强点，即“热点”，所以剂量测量和动物实验均在热点进行，测试时，在测距机2pps和5pps工作情况下，在光束截面内移动探测器，反复进行测量，找出辐照度最强点，以该点剂量为所测距离辐照量，接着使兔眼对准光束最强点位置，使激光束直射兔眼，进行束内照射，实验分三组：第一组在重复率为2pps时，挡单个脉冲进行单脉冲照射，在60~350m六个距离上共照射40只兔440个样点；第二组以5pps重复率脉冲列连续

照射20s进行重复率照射实验，在100~400m六个距离上用40只兔照射130个脉冲列(13000个脉冲)；第三组在1250m以5pps重复率连续扫描照射90s，用20只兔照射40个脉冲列(共18000个脉冲)，见图2。

4.不同距离辐照量测试及动物实验结果

(1) 激光辐照量测试及兔眼损伤发生率 激光平均辐照量随距离增加呈指数衰减，距离增加，照射剂量降低，兔眼损伤发生率减少，对单脉冲和重复率照射的结果如表2、表3，由表可见重复率脉冲列照射比单脉冲照射发生率高，致伤距离远。

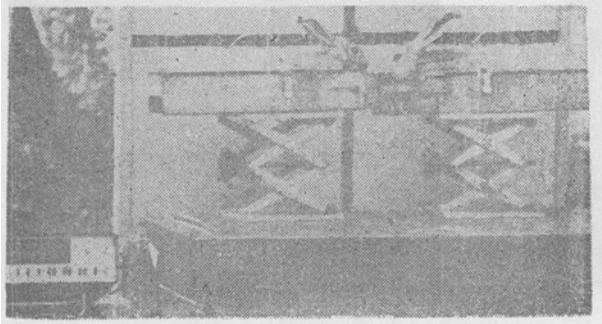


图2 连续扫描照射兔眼

(2) 兔眼损伤类型及病理表现 1.06μm激光照射兔眼后，在视网膜上成象，烧伤视网膜，根据实验兔眼损伤程度大致可分为四类，分别为团状出血和大、中、小圆形或菊花型出血斑以及轻度损伤的灰白凝固斑或色素团，大出血为重损伤，造成视网膜全层崩解、断裂，网膜下有大量积血和渗出液，有部分血球破裂、溶解；眼底中、小形出血斑为中度损伤，视网膜呈丘状隆起局部视网膜脱离，视网膜下有积血和渗出液，视感受器破坏，内外颗粒层崩解，出现核破碎，核固缩等，随损伤程度不同，表现不一。轻型损伤为眼底凝固斑，损伤病灶为网膜轻度隆起，网膜下有少量渗出液及游离色素，部分视感受器崩解。图3~图8为部分视网膜损伤及病理照片。

表2 不同距离单脉冲照射激光辐照量和兔眼损伤发生率

距离 (m)	大气能见度 (km)	平均辐照量 (J/cm ²)	兔眼损伤发生率 (%)
60	7	7.85×10^{-3}	52.5
100	22	4.11×10^{-3}	40.0
150	24	2.46×10^{-3}	22.2
220	23	5.57×10^{-4}	13.3
300	6	1.99×10^{-4}	1.0
350	23	3.80×10^{-5}	0

表3 不同距离重复率照射激光辐照量和兔眼损伤发生率

距离 (m)	大气能见度 (km)	单脉冲平均辐照量 (J/cm ²)	兔眼损伤发生率 5pps×20s(%)
100	22	4.55×10^{-3}	90.9
150	24	2.46×10^{-3}	78.9
220	13	5.40×10^{-4}	55.0
300	6	1.24×10^{-4}	10.0
350	23	9.77×10^{-5}	5.0
400	22	7.19×10^{-5}	0
500	7	5.13×10^{-5}	—
1250	7		0(5pps×90s)

(3) 兔眼损伤发生率与照射剂量的关系 将表2、表3中兔眼损伤发生率转换为机率单位(Y)，照射剂量取对数(x)，经加权迭代回归法进行统计学处理，求得单脉冲照射组回归方程

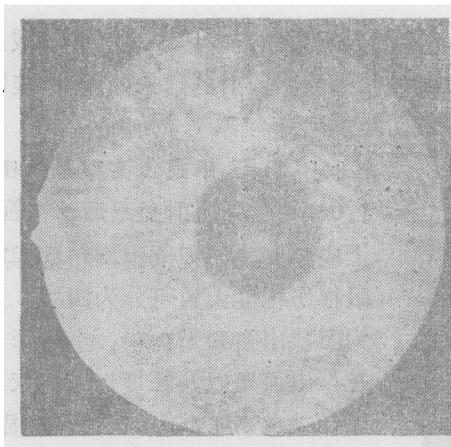
$$Y = 3.896 + 1.258x \quad (1)$$


图3 100m单脉冲照射大圆形出血斑

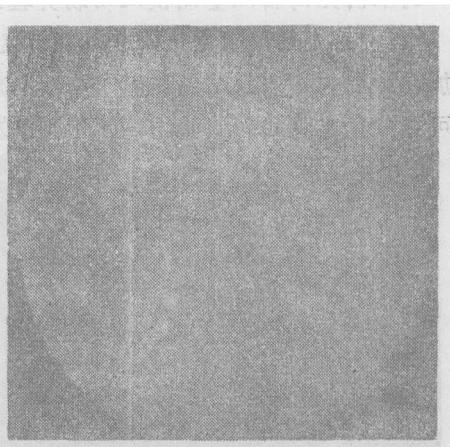


图4 100m重复率照射多个出血斑

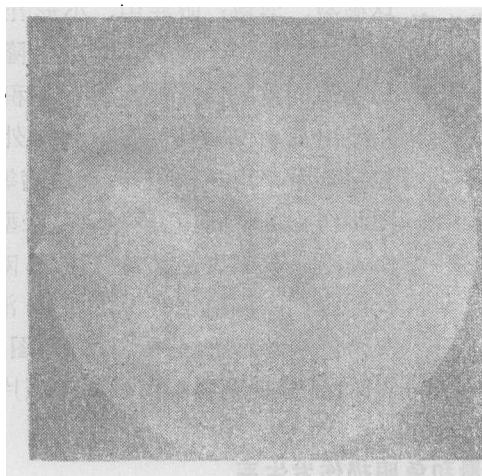


图5 350m重复率照射灰白凝固斑



图6 100m单脉冲照射网膜全层破裂出血

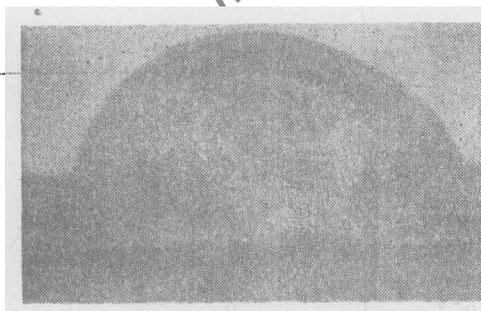


图7 100m重复率照射，网膜下大量积血渗出液和游离色素

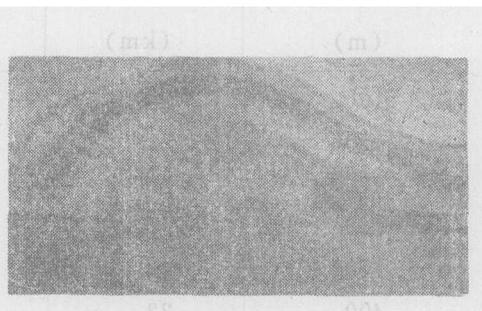


图8 150m单脉冲照射，网膜下局限性出血

损伤发生率为50%剂量 $E_{D50} = 7.538 \times 10^{-3} \text{ J/cm}^2$, 损伤发生率为1%剂量 $E_{D1} = 1.060 \times 10^{-4} \text{ J/cm}^2$ 。

重复率脉冲列照射回归方程为:

$$Y = 5.306 + 1.683x \quad (2)$$

$E_{D50} = 6.58 \times 10^{-4} \text{ J/cm}^2$; $E_{D1} = 2.72 \times 10^{-5} \text{ J/cm}^2$, 结果表明, 无论单脉冲照射还是重复率照射, 剂量对数与兔眼损伤发生率机率单位都呈线性关系, 图9为其列线图。

三、致伤及安全距离推算

1. 海平面不同水平距离及对空倾斜路程的辐照量校正

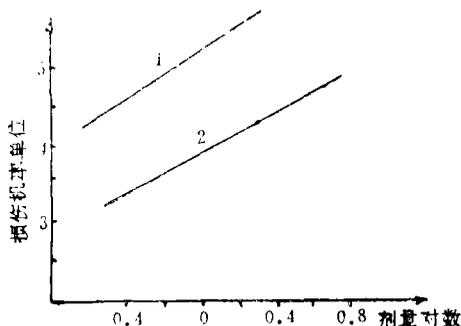


图9 损伤机率与剂量对数列线图

1—5pps $Y = 5.31 + 1.68x$

2—2pps $Y = 3.90 + 1.26x$

表2、表3给出的不同距离辐照量是不同时间、不同能见度情况下的测试结果, 为计算和使用方便, 以海平面标准晴朗天气(能见度23.5km)为准, 将数据进行归一化处理, 对不同距离单脉冲辐照量修正公式为:

$$H = \frac{Ee(\mu_1 - \mu_2)R}{\pi r^2} \quad (3)$$

式中, H 、 $E/\pi r^2$ 分别为修正后和实测辐照量 (J/cm^2), μ_1 、 μ_2 分别为实测时和海平面标准能见度下的大气衰减系数, R 为距离。

在对空中目标测距时, 因地面到空中被测目标斜路程上大气逐渐稀薄, 大气衰减系数随高度不同而变, 因此, 在对空测距时, 为确保空中目标上的人员安全, 相应距离上的辐照量应予校正, 校正公式为:

$$H_{斜} = H_{平} e^{\mu_2(1-k)R} \quad (4)$$

式中, $H_{斜}$ 为不同斜距辐照量, k 为大气衰减因子(斜程与海平面距离衰减系数之比 $k = \mu_{斜}/\mu_2$); 校正后的辐照量如表4、表5所示。

2. 致伤及安全距离推算

若以损伤发生率为1% (损伤剂量 E_{D1}) 的距离定义为致伤边界, 由前述可知2pps单脉冲照射和5pps重复率脉冲列照射1%发生率所对应剂量分别为 $1.06 \times 10^{-4} \text{ J/cm}^2$ 和 $2.72 \times 10^{-5} \text{ J/cm}^2$, 如安全系数定义为一个数量级, 则安全距离上2pps单脉冲和5pps脉冲列照射剂量分别为 $1.06 \times 10^{-5} \text{ J/cm}^2$ 和 $2.72 \times 10^{-6} \text{ J/cm}^2$ 。

将表4、表5中距离与辐照量用微机经自动选择数学模型回归分析2pps单脉冲照射相应于水平和倾斜距离上的拟合方程为:

$$H_{平} = \exp(3.361 - 0.0195R + 1.057 \times 10^{-6} R^2) \quad (5)$$

$$H_{斜} = \exp(3.361 - 0.0195R + 1.064 \times 10^{-6} R^2) \quad (6)$$

5pps重复率脉冲列照射相应于水平、倾斜距离的拟合方程为:

表4 修正后不同水平距离上的辐照量

距离 (m)	2pps单脉冲辐照量 (J/cm ²)	5pps单脉冲辐照量 (J/cm ²)
50	1.27 × 10 ⁻²	1.27 × 10 ⁻²
60	7.99 × 10 ⁻³	—
100	4.11 × 10 ⁻³	4.56 × 10 ⁻³
150	2.46 × 10 ⁻³	2.46 × 10 ⁻³
220	5.59 × 10 ⁻⁴	5.44 × 10 ⁻⁴
300	2.20 × 10 ⁻⁴	1.40 × 10 ⁻⁴
350	3.80 × 10 ⁻⁵	9.79 × 10 ⁻⁵
400	6.31 × 10 ⁻⁵	7.23 × 10 ⁻⁵
500	—	5.17 × 10 ⁻⁵

表5 相应水平距离斜程上的激光辐照量

水平距离 (m)	校正因子 (k)	斜程辐照量 (J/cm ²)	
		2pps	5pps
60	0.98	7.99 × 10 ⁻³	—
100	0.96	4.11 × 10 ⁻³	4.56 × 10 ⁻³
150	0.93	2.46 × 10 ⁻³	2.46 × 10 ⁻³
220	0.90	5.60 × 10 ⁻⁴	5.45 × 10 ⁻⁴
300	0.88	2.21 × 10 ⁻⁴	1.41 × 10 ⁻⁴
350	0.84	3.82 × 10 ⁻⁵	9.84 × 10 ⁻⁵
400	0.83	6.36 × 10 ⁻⁵	7.29 × 10 ⁻⁵
500	0.79	—	5.24 × 10 ⁻⁵

$$H_{\text{平}} = 5.951 / (1 + 5.210 \times 10^{-9} R^{3.918}) \quad (7)$$

$$H_{\text{斜}} = 5.951 / (1 + 5.415 \times 10^{-9} R^{3.918}) \quad (8)$$

由以上拟合方程推算出的致伤和安全距离如表6、表7所示。

表6 2pps单脉冲照射致伤和安全距离

致伤和安全边界辐照量 (J/cm ²)	致伤边界	降低一个量级	安全标准最大允许辐照量
	1.06 × 10 ⁻⁴	1.06 × 10 ⁻⁵	5 × 10 ⁻⁶ (J/cm ²)
水平距离 (m)	355	598	737
倾斜距离 (m)	356	601	746

表7 5pps重复率脉冲列照射的致伤边界和安全距离

致伤及安全边界辐照量 (J/cm ²)	致伤边界	降低一个量级	安全标准最大允许辐照量
	2.72 × 10 ⁻⁵	2.72 × 10 ⁻⁶	2.25 × 10 ⁻⁶ (J/cm ²)
水平距离 (m)	517	928	973
倾斜距离 (m)	518	932	977

3. 测距机不同输出能量不同发散角的倾斜安全距离推算

根据测距机的战术技术指标，可由安全距离拟合方程导出公式 (9)

$$Q = \frac{H (a + \varphi R)^2}{Ae^{-\mu_2 R}} \quad (9)$$

式中，Q为测距机单脉冲输出总能量，H为安全辐照量，a为初始光束直径，φ为束散角，A是拟合方程常数，由此计算出在重复率为5pps时，不同输出能量及将束散角降低1mrad时对应的斜程安全距离如表8。

表8 不同输出能量与不同束散角斜程安全距离

输出能量 (mJ)	降低一个量级($2.72 \times 10^{-6} \text{J/cm}^2$)		安全标准最大允许辐照量 ($2.25 \times 10^{-6} \text{J/cm}^2$)	
	ϕ	$\phi - 1\text{mrad}$	ϕ	$\phi - 1\text{mrad}$
90	847	1619	888	1711
110	932	1775	977	1856
130	1010	1917	1057	2000
150	1080	2044	1132	2135
170	1146	2160	1200	2258
190	1208	2273	1265	2372

四、讨 论

发射波长 $1.06\mu\text{m}$ 的Nd:YAG激光测距机,主要损伤眼的网膜,但随着照射剂量的增大亦可伤及角膜和晶状体。

本实验用测距机观察系统在激光回波及机内反射测量时,于发射天线 2.5m 处放置镀锌铁板测试条件比对空测距时严格,在测距机输出 110mJ 时测得 2pps 、 5pps 平均辐照量分别为 $\sim 1.22 \times 10^{-6} \text{J/cm}^2$ 和 $4.26 \times 10^{-6} \text{J/cm}^2$,此值低于有关安全标准 $1.06\mu\text{m}$ 波长最大允许辐照量,用20只兔眼共接受5500次脉冲照射,单眼总入射量超过单次照射为数十倍至两个量级,眼底未见损伤,表明在测距时人眼是安全的。

激光辐照量随距离增加而降低、眼损伤发生率随之减少,损伤程度亦随距离增加而减轻,本实验照射青紫兰灰兔80只,轻度损伤为视网膜凝固斑,重度损伤为团状、大圆形或菊花形出血斑,大出血使网膜全层崩解,形成持久性视觉障碍,实验损伤皆发生在 350m 以内,在 $400\sim 1250\text{m}$ 重复率脉冲列照射,照射未见损伤。

激光对眼的损伤与激光能量、波长、脉宽、束散角以及眼的受照部位,屈光状态等许多因素有关,在野外又受大气条件、作用距离以及激光横截面能量分布等因素影响,实验以1%损伤发生率的距离定为致伤边界,由损伤发生率和剂量关系推算出边界处的激光辐照量,并由此给出一个量级的安全系数,按所测辐照量与距离的关系曲线推算出致伤和安全边界,在测距机输出总能量约为 110mJ 时,推得单脉冲照射安全辐照量为 $1.06 \times 10^{-6} \text{J/cm}^2$,斜程安全距离 601m , 5pps 重复率脉冲照射安全辐照量为 $2.72 \times 10^{-6} \text{J/cm}^2$,斜程安全距离 932m ,按有关安全标准单脉冲最大允许辐照量为 $5 \times 10^{-6} \text{J/cm}^2$,对 5pps 重复率脉冲列照射乘以 0.45 的修正系数($2.25 \times 10^{-6} \text{J/cm}^2$),这样用最大允许辐照量按动物实验结果推出斜程安全距离分别为 746m , 977m ,这和降低一个量级所推出的结果基本一致,认为实验可靠。但因动物实验点和测量数据有限,影响因素较多,特别是目前对如何划定致伤和安全边界尚无统一规定,所以本文提供数据仅供参考。

五、小 结

本实验所用YAG激光测距机,在输出总能量约为 110mJ 时,在观察瞄准系统出瞳处测得重复率 2pps 和 5pps 时的激光回波和机内反射平均辐照量为 $\sim 1.28 \times 10^{-6} \text{J/cm}^2$ 和 $4.66 \times$

10^{-6}J/cm^2 , 此值低于有关激光安全标准 $1.06 \mu\text{m} \text{Q}$ -开关激光最大允许辐照量, 实验用 5500 个脉冲照射青紫兰灰兔眼, 眼底未见损伤, 认为用该测距机对空测距时, 观察瞄准人员的视觉是安全的。在远距离照射青紫兰灰兔 80 只, 共 3 万余次脉冲, 在 350m 以内兔眼网膜出现凝固和出血性损伤, 在 400~1250m 重复率照射未见损伤。

根据损伤发生率和照射量的关系, 以及辐照量随距离呈指数衰减的拟合方程推算并考虑野外实验精度, 给出单脉冲对空照射斜程安全距离为 ~750m, 在 750m 外为安全区, 5pps 重复率照射斜程安全距离为 ~1000m, 在 1000m 以外为安全区。

参 考 文 献

- [1] American National Standard for the Safe Use of Laser, Z1361-1980
- [2] Griess G A et al., Ocular damage from multiple pulse laser exposures, Health Phys., 1980
- [3] 美国无线电公司编, 史斯等译校, 电光手册。
- [4] 周淑英, 曹维群, 徐贵道 et al., 激光与红外, 1983; (4): 34
- [5] 徐贵道, 王登龙, 兵器激光, 1985; (6): 30

收稿日期: 1990年2月5日。

· 简 讯 ·

LF-11激光装置通过技术鉴定

1990年7月11~13日, 由中国科学院和中国工程物理研究院联合主持, 在四川省成都市召开 LF-11 激光装置技术鉴定会。由中科院上海光机所和中物院核物理与化学研究所共同研制成功的 LF-11 激光装置是继我国中科院上海光机所“神光”装置之后, 又一成功运转已逾 5 年的大功率 (输出激光功率 10^{11}W 量级) 脉冲激光装置。LF-11 激光装置虽在总体规模和输出功率方面没有“神光”装置大, 但就相同口径的规模上相比, 其技术难度和某些技术指标都超过“神光”装置及国内其它大功率固体激光装置。

经过 5 年的实际运行, 表明该装置具有先进的综合性能指标、良好的运行可靠性和稳定性, 是我国开展强激光技术研究的重要实用设备。该装置在许多单元器件中采用了一系列先进技术, 例如准连续全主动锁模-调 Q 振荡器、多级同步工作的全电型电光开关、多灯均匀泵浦的高增益棒状放大器、全像递空间滤波器系列、高精度恒流充电机、高精度光电自动调焦、高质量非球面打靶透镜和 1/10 波长平面加工工艺、硅光电导开关测量信噪比等等, 使该装置的主要技术指标先进, 运行稳定可靠。其主要性能指标为: 激光波长 $1.06 \mu\text{m}$ 时, 激光能量 $50 \text{J}/0.8 \text{ns}$, 脉宽 $0.2 \sim 0.8 \text{ns}$, 可聚焦率 $\leq 0.3 \text{mrad}$, 信噪比 $> 10^6$, 放大自发辐射 $< 0.4 \text{mJ}$, 末级激光角漂移 $\leq \pm 8''$, 靶室真空度 10^{-6}Torr , 靶调焦精度 $\leq 10 \mu\text{m}$, 定位精度 $< \pm 10 \mu\text{m}$; 激光波长 $0.53 \mu\text{m}$ 时, 激光能量 $20 \text{J}/0.9 \text{ns}$ ($\eta_{\text{SH}} > 50\%$), 脉冲宽度 $0.2 \sim 0.8 \text{ns}$, 可聚焦率 $\sim 0.3 \text{mrad}$ (是我国第一套可用于实验打靶的高效率倍频系统)。5 年间, 利用该装置先后成功地进行激光惯性约束聚变、X 射线激光和强激光长距离传输中 N_2 的受激转动喇曼散射等实验。有些实验属我国首次, 如倍频激光打 Au 平面靶, 俄歇效应泵浦 108.9nm 的激光增益实验, 利用倍频激光进行类锂铝 (或硫) X 光激光的增益实验, 以及 SRRS 实验等。

(乙 民 供稿)