

两路高功率钕玻璃激光系统*

孟绍贤 管富义 唐贤忠 王笑琴 林尊琪

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 建立了脉宽 1~ 2 ns、能量 80 J 的两路钕玻璃激光系统, 介绍了激光装置中的一些技术问题。

关键词 毫微秒脉冲, 高功率激光。

1 引 言

高功率激光器的建立是一个大型的系统工程, 它将光、机、电融为一体。随着激光核聚变和强光场物理学的发展, 各国先后建成了一系列高功率激光系统, 解决了高功率激光传输中所遇到的一些理论和技术问题。本文作者基于对大型工程的整体和局部、重点和一般、系统和单元的关系的认识, 逐一解决了一系列技术问题, 建成了两路高功率激光系统, 并完全达到了预期指标。

在激光系统的建立过程中, 先后解决了如下各种技术问题: 振荡器和前置放大器之间的耦合问题; 振荡器和削波开关的同步问题; 反向激光对前置级的破坏问题; 低增益硅酸盐玻璃多程放大问题; 软边光栏和空间滤波器的波面匹配问题; 偏振光传输和两路平衡问题; 电磁干扰及抑制问题; 光路调整问题。本文将分别讨论建立两路激光系统的总体思路、所解决的问题和装置的性能。

2 总体考虑和描述

从热力学观点, 可以把输出激光束看作温度为 T 的“光子气”^[1],

$$T = \frac{E}{N} \quad (1)$$

这里 E 为激光输出能量, N 为激光输出模式数。在理想单模极限情况下, 当不考虑损耗时, $T = E$, 当能量 $E = 1 \text{ J}$ 时, 对应的温度为 10^{19} eV (即 10^{23} K^0)。因此激光加温等离子体将引起过热, 出现大量高速粒子。

然而, 实际激光输出不可能是理想单模, 激光器的总模数^[2]

$$N = \frac{8\pi V v^2 \Delta v}{c^3} \left(\frac{ab}{2\pi l^2} \right) \quad (2)$$

* 国家科委 863 高科技资助课题。

收稿日期: 1997-03-20; 收到修改稿日期: 1997-05-29

其中, a 、 b 为一个封闭腔的横向尺寸, l 为腔的纵向长度, $V = abl$ 为腔的体积, 而 $ab/2\pi l^2$ 为光束发散度, ν 为激光振荡的中心频率, $\Delta\nu$ 为增益谱线的频宽。

在惯性约束核聚变研究中, 激光辐射强度不能超过 10^{15} W/cm^2 , 否则将出现影响稳定的非线性过程^[3]。为此需增加激光的总模数 N , 这也就是发展宽频带紫外光加温等离子体的基本原因, 也是采用无规位相板、发展间接驱动聚变的原因。(1) 式和(2) 式可看作为纳秒高功率激光设计的基本公式。

作为一台应用于激光核聚变和光学材料破坏阈值测量所要求的激光器, 它的输出应该有光滑的纳秒脉冲波形, 而在空间分布有最小的调制度, 并有好的偏振特性, 没有放大自发辐射和自振形成的预脉冲, 以及有高的信噪比, 且达到所要求的输出能量。根据上述基本原则, 本文作者采用单纵模、单横模 Nd·YAG 激光器作为振荡器, 双普克尔盒削波隔离开关用于脉冲削波和提高激光输出脉冲的信噪比, 软边光栏和空间滤波器对激光脉冲进行空间整形, 使输出空间光滑的脉冲。空间滤波器亦起到隔离放大自发辐射和放大器之间形成的自振的作用。法拉第隔离器用于隔离反向激光。

在两路高功率激光系统研究中遇到的两个主要问题是空间滤波器的波面匹配问题和电磁干扰问题。而作者通过激光输出波面的实际测量, 重新设计空间滤波器的输入透镜从而成功地解决了波面匹配问题。关于电磁干扰问题, 从电磁场理论可以知道, 闭合电路不能发射电磁波, 只有开放电路才能将电磁波发射出去。振荡电偶极子发射电磁波的平均辐射强度为

$$\bar{s} = \frac{\mu_0 p_0^2 \omega^4 \sin^2 \theta}{32\pi^2 r^2 c} \quad (3)$$

这里 μ_0 是真空磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$, c 为光速, P_0 为偶极子电矩的振幅, $P_0 = q_0 l$ 。 ω 是振荡偶极子的圆频率。 r 为空间某处到偶极子中心的距离。 θ 就是矢径与电偶极子轴线之间所夹的角。从(3) 式不难看出减少电磁干扰是一个很简单的问题, 它的关键就是减少各种可能的高压打火, 避免形成开路。虽然氙灯触发是属于开路放电过程, 但沿氙灯放电不会形成干扰, 因聚光筒形成一个很好的电磁屏蔽, 只有外部打火才会形成干扰, 根据上述分析, 作者采用相应措施, 完全解决了电磁干扰问题, 使激光装置得到稳定运转。

建成的两路激光系统总体光路排布如图 1 所示。由 Nd·YAG 单纵模振荡器输出脉宽约 30 ns, 能量为 100 μJ 左右的激光, 经过 Nd·YAG 前置放大器放大。振荡器和前置放大器可以 1 次/秒重复率运转, 并用它进行整个激光系统的调整。前置放大器出来的脉冲, 经过双普克尔盒开关 DPC 进行削波和隔离, 使信噪比达到 $10^6 \cdot 1$, 这样的脉冲经过一级 Nd·YAG 的预放大, 通过 3 倍望远镜 T 扩束成 $\phi 15 \text{ mm}$ 左右的光束, 再经过钕玻璃激光器进行三程放大, 它的目的是减少放大器级数, 并提高增益。放大后的脉冲经过楔形软边光栏 A 进行空间整形形成超高斯型。再经过 $\phi 20 \times 450 \text{ mm}$ 的钕玻璃激光器放大, 第一台空间滤波器 SF₁ 滤波和扩束, $\phi 35 \times 500 \text{ mm}$ 激光器放大, 法拉第隔离器的隔离, $\phi 45 \times 500 \text{ mm}$ 激光器放大, $\lambda/4$ 旋光片使光束变为垂直偏振光传输, 这样光束经全反射镜, 反射率高, 退偏小。然后经过分束板分成两路。

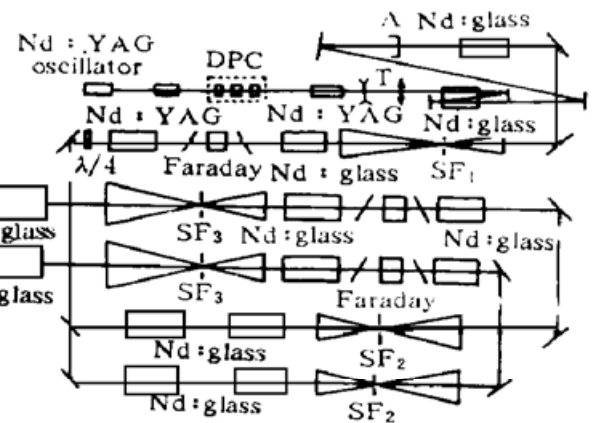


Fig. 1 Two beam nanosecond laser system

每路都先后经过两级 $\phi 45 \times 500 \text{ mm}$ 钨玻璃棒放大, 空间滤波器 SF_2 滤波和扩束, 再经过 $\phi 50 \times 500 \text{ mm}$ 钨玻璃棒放大, 法拉第隔离器的隔离, $\phi 50 \times 500 \text{ mm}$ 钨玻璃棒进一步放大, 空间滤波器 SF_3 滤波和扩束, $\phi 70 \times 500 \text{ mm}$ 钨玻璃棒放大。最后输出光束用于光学材料破坏研究和激光产生等离子体的研究。

3 单元性能和技术

3.1 振荡器与前置放大

在选用振荡器时, 要求单纵模和单横模运转, 以便有光滑的脉冲波形和光滑空间波形, 并能以重复率运转。重复率运转使它可以作为整个系统的调整光源, 以免如采用另外调整光源所带来的光同轴问题, 这样也使整个光学系统调整大为简化和方便。据此, 作者采用 $\text{LiF} \cdot \text{F}_2^+$ 色心调 Q 的单纵模、单横模激光器。

其装置结果如图 2 所示。色心调 Q 原理相似于染料调 Q , 色心形成的能级对激光波长 $1.064 \mu\text{m}$ 有很强的吸收, 结果晶体漂白, 输出调 Q 脉冲, 它的光谱较窄。为获得单纵模脉冲, 可采用双折射晶体滤光片。它的基本原理比较简单, 线偏振光通过一个光轴在晶体表面、厚度为 d 的双折射晶体时, 在快、慢轴方向之间有一个

相位延迟 $\varphi = 2\pi\Delta nd/\lambda$, 从而使光的偏振状态发生改变; 由于激光腔内相邻纵模之间存在微小的波长差, 因此, 产生不同的相位延迟角, 经过选偏元件就会带来不同的损耗。从而可产生单一纵模振荡, 纵模间隔 $\Delta\lambda = \lambda^2/2L$, L 为腔长。两个相邻纵模位相延迟 $\delta\varphi = 2\pi\Delta nd\Delta\lambda/\lambda^2 = \pi\Delta nd/L$, 它取决于双折射晶体 $\Delta n = n_o - n_e$ 和腔长及晶体厚度。损耗调制深度为 $\cos^2 \delta\varphi$ 。如把冰洲石晶体做成晶轴在表面、布儒斯特角放置的双折射滤光片, 则无须另加布儒斯特角放置的玻璃片。为获稳定的单横模、在腔内加一个 $\phi 1 \text{ mm}$ 的小孔。由于单纵模、单横模输出光强较弱, 必须进行前置放大。前置放大采用增益较高的 $\text{Nd} \cdot \text{YAG}$ 棒, 它很容易产生自振, 进而破坏振荡器的工作状态。本文作者研制的恒定磁场法拉第隔离器可以消除两者之间的耦合, 但又引起损耗^[4]。故作者将 $\text{Nd} \cdot \text{YAG}$ 前置放大器棒磨斜, 消除了这种耦合。

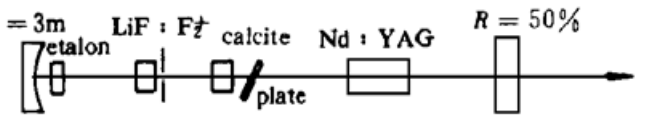


Fig. 2 Single mode Q -switch $\text{Nd} \cdot \text{YAG}$ oscillator

3.2 双普克尔盒电光开关系统

电光开关是整个激光系统的关键部件, 它包括分开的两台正交偏振器与 $\text{KD}^* \text{P}$ 晶体构成的削波开关系统, 前者主要起削波作用, 后者主要起着光隔离作用。它的结构如图 3 所示, 采用中国科学院上海光学精密机械研究所研制的雪崩晶体管高压脉冲电路。整个削波、隔离开关电路, 包括振荡器输出激光触发的 PIN 二极管, 同步触发电路, 雪崩管高压脉冲发生器和高精度直流高压稳压源。

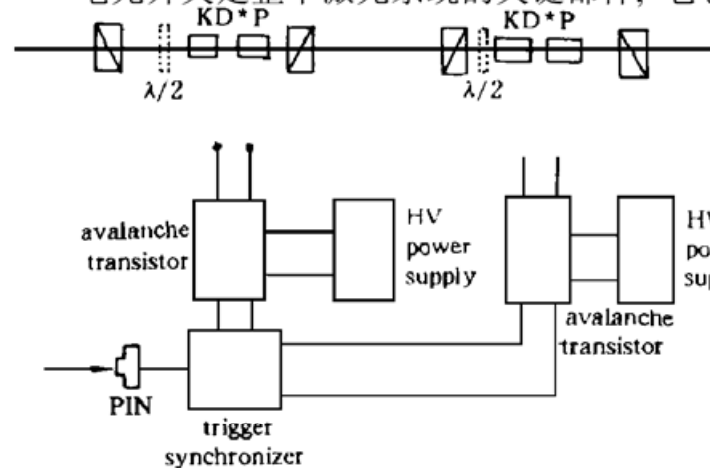


Fig. 3 Double pockels switch chopper

PIN 二极管输出信号触发同步电路, 由同步电路给出四个脉冲, 输入两个触发削波开关的两串雪崩晶体管堆和两个触发

隔离开关的两串雪崩管堆。普克尔盒为两个 KD^*P 晶体串联, 所加电压为 $\lambda/4$ 电压, 即满足于开关半波电压要求。开始时 KD^*P 上两端电压相等, 均为 $\lambda/4$ 电压。当第一串雪崩管导通时, KD^*P 晶体一端电压降到零, 另一端为 $\lambda/4$ 波电压, 此时光通过两个 KD^*P 晶体, 光偏振面旋转 90° , 由正交偏振镜输出, 当第二串雪崩晶体管导通时, KD^*P 晶体两端电压降到零, 此时光脉冲被偏出, 因此正交偏振器输出的光脉冲宽度由两串雪崩堆开关导通时间差决定, 这也是普克尔盒打开时间, 这个时间可由调整同步电路到雪崩堆开关联接电缆的长度来改变。隔离开关与削波开关原理相同, 只是要求稍微宽松些。

这个电光开关系统调整要十分小心。由于一个普克尔盒由两块同样性质的 KD^*P 晶体串联, 它要求两晶体管 X 、 Y 、 Z 轴彼此一致, 并调整两个正交偏振镜完全正交, 放入普克尔盒时, 可观测到对称的四瓣干涉花样, 这样才能保证开关系统信噪比达到 $10^6 \cdot 1$ 。用示波器测得普克尔盒开关上升时间为 1.3 ns 。削出脉冲宽度约 2 ns , 如图 4 所示。



Fig. 4 Oscillograph of pulse chopped by chopper

3.3 软边光栏和空间滤波

由振荡器输出的是单模高斯光束, 在传输过程中, 对工作物质的填充因素很小, 不能有效地提取能量。为此, 首先让振荡器输出激光自然扩束, 然后再用望远镜扩束, 最后用软边光栏进行空间整形。所谓软边光栏就是一个按超高斯形状镀膜的玻璃平板, 也可做成超高斯形状的锯齿光栏, 但由于后者加工难度较大^[5], 故暂时还是利用镀膜楔形软边光栏。

对于硬边光栏, 衍射图样用空间频率表示时为

$$U(v) = b \frac{\sin(vb/2)}{(vb/2)} \quad (4)$$

软边化新的衍射图样由下式给出

$$U(v) = \cos\left(\frac{vb}{2}\right) \left(\frac{1}{v - \pi/b} - \frac{1}{v + \pi/b}\right) \quad (5)$$

这里 b 是光栏直径, v 为空间频率。显然软边化抑制了较高的空间频率。

在激光束传播过程中, 由于高强度激光下材料的非线性效应及衍射的影响, 将出现高的空间频率, 引起小尺寸自聚焦, 从而造成光学材料的破坏。通过低通空间滤波器可以将高频滤掉。

空间滤波器由一对共焦的正透镜和焦面上滤波小孔组成。根据傅里叶变换, 在焦面处空间频率分开, 选用不同尺寸小孔, 就可以按需要滤掉不同的高频。

在系统中, 共采用五台空间滤波器。第一台空间滤波器用机械泵抽至 10 Pa 。其它四台空间滤波器用机械泵、分子泵及离子泵抽至 10^{-5} Pa , 并保持其真空状态。

在空间滤波器使用过程中, 必须把真空管道擦干净, 否则会在透镜表面形成细小的油污点, 形成新的衍射源。

空间滤波器输入透镜设计中, 必须考虑激光传输的实际波面。作者用哈特曼板对波面的实际测量来修正空间滤波器输入透镜, 以获得最佳滤波效果。

当入射光为非准直光束时, 滤波器透镜的等效焦距为 f_R , 它与透镜的焦距 f 和入射波面的曲率半径 R 的关系为 $f_R = fR/(R - f)$, 而滤波小孔的截止频率 $V_F = \pi D/(\lambda f_R)$, 式中 D 为滤波小孔直径。据此来选择透镜焦距 f ,

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right] - \frac{(n - 1)^2 t}{nr_1 r_2} \quad (6)$$

式中 t 为透镜厚度, 如果凸面朝着光线的传播方向, 则 r 取负号, 如果凹面向着光线的传播方向, 则 r 取正号。为了使球差最小, r_1 和 r_2 还应满足条件

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{n + 4 - 2n^2}{n + 2n^2} \quad (7)$$

空间滤波器小孔应三维可调, 以达最佳滤波效果。最后选用如表 1 所列的空间滤波器透镜参数。其中 f 为透镜焦距, t 为透镜厚度, ϕ 为透镜口径。

Table 1. Parameter of spatial filter

	SF101	SF102	SF201	SF202	SF301	SF302
r_1/mm	1280	2400	1762	2200	1705	2000
r_2/mm	7300	9772	11830	8000	10706	∞
f/mm	2049	3807	3031	3411	2908	3953
t/mm	4.8	5.5	6	7	7	7.8
ϕ/mm	32	47	60	65	69	82
D/mm	(0.4、0.8、1.0、1.2、1.5)	(0.8、1.0、1.2、1.5、2.0)	(2.4、2.9、3.5、3.8、4.2)			

3.4 多级放大器同步和反向激光隔离

装置采用钽硅酸盐玻璃系统, 由于它的增益系数较低, 必须采用多级放大, 这就使得整个系统的空间尺寸加大。为减小尺寸, 研制了三程放大装置。结果表明这个措施是有效的。

为了有效地提取能量, 多级放大器系统中各级之间的同步十分重要。为此, 作者实际测量了各级放大器的放电波形, 找出发射激光的最佳位置。

在氙灯供电中采用 LC 供电线路, 利用电感的限流作用, 减小了氙灯之间电磁力相互作用, 从而保证氙灯工作的正常。作者研制了圆盘电感, 并计算了电感及传输电缆的降压影响。

为了避免放电之间干扰, 在保证氙灯触发条件下, 尽量降低触发信号强度, 以解决电磁干扰问题。

在多级放大过程中, 某些反向传播的激光影响是十分大的。因为传播过程光束尺寸逐渐变小, 强度尖锐增加, 它曾经将前置放大器 Nd·YAG 棒打坏。后采取隔离措施时完全避免了这个问题。

在反向激光隔离上, 除了前级电光开关隔离器外, 还安排了三台法拉第隔离器, 利用法拉第效应实现隔离。当把旋光介质置于磁场中, 并使一束线偏振光沿着磁场的方向通过旋光介质, 就可发现出射光的偏振面产生旋转, 旋转角度为

$$\theta = VBZ \quad (8)$$

其中 B 为磁感应强度, Z 为光在介质中传播的长度, V 是比例常数, 称为维尔德常数。对 1064 nm 波长, 旋光玻璃 ZF-6, 其维尔德常数 $V = 5.86 \times 10^{-4}$ deg/A, 非线性折射系数 $n_2 = 6.9 \times 10^{-13}$ esu。而对 TG-20 玻璃, $V = 1.57 \times 10^{-3}$ deg/A, $n_2 = 2.45 \times 10^{-13}$ esu。显然 TG-

20 玻璃性能比 ZF-6 玻璃好, 但价格昂贵。因此, 第一级法拉第隔离器采用 TG-20 玻璃, 另外两台法拉第隔离器采用 ZF-6 玻璃。法拉第隔离器的正向透过中, 受调整影响很大。起偏和检偏的偏振膜板要与光束精确地成布儒斯特角, 彼此间的法线方向要精确成 45° 。

另外, 光束传播过程中的退偏, 也严重影响法拉第隔离器的透过率。为减小退偏, 在第一级法拉第隔离器后加入 $\lambda/4$ 的旋光片, 使传输光为垂直偏振, 这样经过反射镜时, 反射率高, 退偏小。

还可调整充电电压来控制两路激光系统之间的平衡, 目前两路之间的不平衡程度小于 10%。

4 总体运行结果

经过几个月的运行, 该装置达到了预期指标。用示波器测量输出激光脉宽为 $1\sim 2\text{ ns}$ 。用能量计测量两路激光能量, 最大值达 82.6 J 。超过原来预期的 45 J 。用列阵相机测出激光输出方向性为 0.2 mrad , 为 5 倍的衍射极限, 如图 5 所示。输出光束近场调制度为 20%。在运行过程中稳定性好, 能量稳定性好于 20%, 两路不平衡程度小于 10%。并进行了 KDP、钕玻璃、平板、增透膜及全反射膜的破坏实验, 结果表明该装置运转稳定, 能量可调, 完全满足了使用要求。



Fig. 5 Photography of array camera

单模激光器由陈绍和提供, 电光开关电源由莽燕萍提供并参与调整, 充电电源由韩爱妹提供, 徐世祥、徐松庆参与空间滤波器设计加工, 王志娟参与圆盘电感研制, 本组高奇、薛志铃参加整个装置调整过程, 在此一并感谢。

参 考 文 献

- [1] Н. В. Афанасьев, Н. Г. Басов, Е. Т. Гамалий. Физические явления в поле лазерного луча. Природа 1982, (6) : 4~ 16
- [2] 固体激光导论编写组, 固体激光导论, 上海人民出版社, 1975 : 110~ 114
- [3] B. Luther-Davies, E. G. Gamali, Y. Wang *et al.*, Matter in ultrastrong laser field. *Sov. J. Quantum Electron.*, 1992, 22(4) : 289~ 325
- [4] X. H. Shen, S. X. Meng, L. Tian *et al.*, Faraday isolator using permanent magnets. *Chin. J. Lasers (B)*, 1994, 3(5) : 435~ 439
- [5] 姚裕贵, 徐世祥, 孟绍贤等, 利用锯齿光栏获得超高斯光束. 光学学报, 1995, 15(7) : 931~ 934

A Two-Beam High Power Nd Glass Laser System

Meng Shaoxian Guan Fuyi Tang Xianzhong Wang Xiaoqin Lin Zunqi
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 20 March 1997; revised 29 May 1997)

Abstract A two-beam laser system with a pulse duration of $1\sim 2\text{ ns}$ and a pulse energy of 80 J is constructed. A variety of technical problems of the laser facility is discussed.

Key words nanosecond pulse, high power laser.