

高功率激光领域的新进展

——“神光”装置及其物理实验成果

范 滇 元

(上海光学精密机械研究所)

近 30 年来,高功率激光伴随着激光聚变研究的兴起而迅速发展,在其发展过程中又不断开拓出新的物理应用。目前最活跃的领域有:惯性约束聚变、X 光激光和强场物理等。

早在 1965 年,上海光机所就开始了高功率激光及其物理应用的研究。经过 25 年持续不断的工作,取得了重要进展。特别是近年来以“神光”装置的建成和成功运行为标志,高功率激光研究进入了一个新阶段,产生了一系列国际先进水平的科研成果。

“神光”装置是我国规模最大的高功率钕玻璃激光装置,在国际上也为数不多。它由激光器系统、靶场系统、测量诊断系统和实验室环境工程系统组成。输出激光总功率达 10^{12} 瓦量级。光束发散角、脉冲信噪比、ASE (放大的自发辐射) 及稳定性等质量指标都很先进。高精度靶场系统能适应 0.1 毫米量级的微球靶、黑洞靶、台阶靶、各类 X 光激光靶等多种靶型的实验需要,并具有单束、双束及两路并束激光打靶的功能。1987 年国家科委组织进行国家鉴定时,专家们一致确认:“装置的综合总体技术性能达到了国际同类装置的先进水平”,“标志着我国已成为在高功率激光领域中具有这种综合研制能力的少数几个国家之一”。

“神光”装置中采用了磷酸盐钕玻璃、大口径片状激光放大器、像传递多级空间滤波器、1/10 波长大口径平面加工工艺等 10 多项国内首次采用的单元技术和特种工艺,并有若干创新成果。下面摘要列举几项带有独创性的新技术。

1. 自适应光学波前校正系统

以 19 单元可变形反射镜为校正器,插入总体光路的中部,它的表面形状受终端波前传感器的信号反馈控制,以补偿光路中光学元件材料和表面面形不完善造成的光束波像差,显著地改善了激光束的质量。这无论在系统的单元技术上,还是在总体布局方案上都具有独创性,是迄今为止国际上同类装置中首先成功使用并发挥作用的唯一系统。最近,我们还将把这一系统进一步推广应用于补偿氙灯泵浦引起的热畸变。

2. 靶面均匀照明技术

靶面光束聚焦点处光强的均匀分布对许多物理实验均有重要意义,是国际上许多先进实验室追求的目标。邓锡铭教授提出的列阵透镜方法,能获得无旁瓣的光强均匀的焦斑,在实际应用中可产生极为平坦的高压冲击波阵面。这一方法,在物理概念上和透镜的制造工艺上是独特的,提出的时间也最早,是目前国际上公认的几大方法之一,被称为“上海方法”或“LA 法”。

3. 产生均匀线状等离子体技术

在X光激光研究中,用高功率激光产生的均匀线状等离子体是关键技术之一。我们研制的多单元组合柱面镜系统成功地解决了这一问题。它不仅能在长达20—30毫米的焦线上产生十分均匀的光强(不均匀度小于5%),而且光能利用率接近100%,已在X光激光实验中得到证实,并发挥了重要作用。这一技术在国际上属首创,并已申请专利。

4. 黑洞靶瞄准、定位、监测三合一系统

在间接驱动聚变研究中,最为关键的前提是聚焦后的强激光束必须能准确地穿过微型靶壳上的百微米量级针孔注入靶内。我们研制成功的这一系统,能同时实现对靶的精确瞄准、定位和监测,在结构和原理上都有独到之处。在三维方向上的精度均可达到5—10微米,与目前国际上最先进水平相当。

5. 脉冲激光的波面“冻结”及测量技术

利用我们提出的环路径向剪切原理,无需另加参考光束,即能全息地记录脉冲激光束的瞬态波面,精度可达焦深极限。我们利用这一原理制成实用测量设备,比美国最先发表的同一技术要早3年。

6. LC 恒流充电系统

充电系统是大型激光装置的重要组成部分,国际上有多种技术方案。我们根据新颖的原理,研制出完整的LC恒流充电系统。这一系统在同类装置中是独特的,具有不怕短路、运行安全、重复精度高(0.05—0.1%)、功率因素大等先进性能。此外,还根据储能电容器以单次、脉冲方式工作的特点,大胆突破传统的设计常规,独立研制成高场强工作的高比能电容器,比传统电容器的比能提高3倍,达到国际同类技术的先进水平。

7. 脉冲预激光式单纵模振荡器

固体激光器的单纵模振荡是国际上的一项技术难题。我们采用新的脉冲预激光工作方式获得了与国外准连续方式相同的高质量振荡,而且激光功率显著提高,还可以降低对元件材料的苛刻要求,更适合我国实际。

8. 光电导开关的应用

除用作“零同步”开关外,把它推广应用于脉冲信噪比测量,量程可拓宽到 10^8 量级;用来作脉宽调节器,可在0.8—1.3纳秒范围内连续改变激光脉宽等等。

“神光”装置正式投入使用后,运行良好。在使用过程中经过研究,还不断有所发展,不仅超过了原设计要求,而且鉴定时指标又有了大幅度的提高。在“神光”装置上已做出一批国际一流水平的物理实验成果,主要有以下几方面:

1. 性约束聚变实验研究

初期,作为对装置性能的综合考核,进行了直接驱动聚变实验。两束100皮秒的强激光相

向辐照处于共焦点的 100 微米玻壳球靶(靶内充有 10 气压氙氟气体),获得 4.5×10^6 中子。近年来,主要进行辐射驱动的基础研究。两束 500—600 焦耳、0.8—1.0 纳秒的强激光聚焦后分别穿过黑洞靶上两个百微米级针孔,注入靶内产生 X 光辐射场,已获得 130eV 的高辐射温度,为辐射驱动出中子这一具有里程碑意义的目标奠定了基础。这类实验难度极高,技术综合,每发打靶需诊断的物理探测道达 120 多个。

2. 材料在极高压下的状态方程

强激光通过列阵透镜后形成 400 微米左右的光强均匀的焦斑,辐照铜铝阻抗匹配台阶靶,获得十分平直的冲击波阵面,从而测出冲击波速度和压力。在铜中,激光驱动的冲击波压力已达到 800 万大气压,这是用化爆方法达到的最高压力的 3—4 倍;得到了铜在 0.4—0.8TPa 压力范围内的冲击绝热线,其低压区数据和化爆得到的结果相当接近。这一成果优于国外已报道的同类工作,测量精度是最好的。

3. 复合泵软 X 光激光实验

在复合泵类锂离子软 X 光激光实验中,在国际上首次观察到 $5f-3d(88.9 \text{ \AA})$ 和 $5d-3p(87.3 \text{ \AA})$ 跃迁的明显增益;并发现新的能级对: $6f-3d$ 和 $6d-3p$, 在 75.8 \AA 和 74.6 \AA 的 X 光放大。这一成果受到国际同行的关注,有可能为 X 光激光向“水窗”波段推进提供一条新的途径。

4. 碰撞激发高增益 X 光激光实验

继 1989 年类氟锆 X 光激光实验获得 5 条 $3p-5s$ 谱线显著增益后,1990 年上半年采用我们独创的双靶串接对打方案,又获得类氟锆 232 \AA 和 236 \AA 高增益 X 光激光,实现了两个靶中 X 光激光的串接放大,其增益长度乘积 GL 值分别达 13.4 和 13.6 的高水平。这是当时世界上第二大 GL 值,仅次于美国在 NOVA 装置(比我们的“神光”大 100 倍)上做出的类氟硒 GL 为 16 的结果。这一成果及其新颖的实验方案,对于深入理解 X 光激光产生的物理细节和促进 X 光激光应用具有重要价值。

“神光”装置及其物理实验成果,得到了国内外科学家的高度评价,先后获得首届陈嘉庚技术科学奖、中国科学院 1989 年科技进步奖特等奖和 1990 年国家科技进步奖一等奖。“神光”装置从预研、建造、鉴定、运行到开始出成果,前后整 10 年。它是广大科技人员发扬献身事业、锲而不舍精神所取得的科研硕果,对高功率激光领域今后的发展有深远意义。