

# 日本激光核聚变研究的现状和发展

中国科学院激光核聚变赴日考察组

## 一、概 况

在日本,没有一个统管全国科研工作的机构,研究工作分散在各大大学或公司所属的研究所进行。政府通过拨款的方式支持一些重要的科研项目,激光核聚变的研究作为能源计划的一部分,在日本受到很大的重视。据了解,很多大学和工业部门都想插手这一工作。但是,目前垄断这个学术领域的是大阪大学激光核聚变研究中心。

这个研究中心是1972年正式成立的,在这以前,大阪大学的科研人员以客员教授、助教的名义在名古屋大学等离子体物理研究所工作。1969年建成了 $10^{10}$ 瓦级的钨玻璃激光器,命名为激光-1号(Gekko-I)装置,1971年打出中子,接着在大阪大学成立激光核聚变研究所,并发展成为全国的研究中心。

和美国一样,日本激光核聚变的研究工作目前正处于一个蓬勃发展的时期,激光装置越建越大,工作越做越深,学术思想越来越活跃。

推动日本激光核聚变研究工作的一个总计划是“金刚”(Kongoh)计划,这个计划将最终实现能量的“得失相当”(Break even)。目前实施的是第一期金刚计划,包括钨玻璃激光系统和 $\text{CO}_2$ 激光系统,两部分并列进行,分别命名为“激光”(Gekko)计划和“烈光”(Lekko)计划,就目前的工作来看,“激光”计划处于主要地位。因此我们围绕“激光”计划把日本在钨玻璃激光系统方面的发展以及相

应的物理实验结果作一概略的介绍。

大阪大学激光核聚变研究中心目前的工作人员约50人,这对于庞大的金刚计划来说是远远不够的。然而事实上,大阪大学的工作有强大的产业界作后盾。这个研究中心目前工作的重点转向总体物理实验方面,而激光器的大部分单元技术工作以及元件材料的研究全部由各家大工厂承包。由大阪大学拉线,把这些技术力量组合起来,已经形成一股强大的力量。

在大阪大学以外,参与Gekko计划的单位主要有:

日本保谷玻璃厂(HOYA),负责研究和提供钨玻璃工作物质,法拉第旋光玻璃,软边玻璃光阑以及用于消除寄生振荡的涂边玻璃材料;

日本光学工业(Nikon)承包Gekko-IV的靶场设计制造,这一工作已经完成;

日本电气公司(NEC)除了提供部分氙灯及定型的激光器之外,目前正从事Gekko XII的开发工作;

Canon厂提供大面型高精度的光学加工以及部分反射镜和偏光膜的镀膜技术。

此外,名古屋大学等离子体物理研究所虽以磁约束聚变研究为主,但仍旧保持有激光A、B、C部,重点进行激光等离子体的基础研究以及利用激光在各种形态磁场装置中产生等离子体源。规模较小,但工作很有特色。大阪大学和东京大学都以客员教授的身份在名古屋大学工作。

收稿日期:1979年2月25日。

在大学系统以外，通商产业省工业技术院的电子技术总合研究所(ETL)也从事一些激光等离子体的基础研究工作。

## 二、Gekko 计划的几个总体装置

自从 1972 年成立激光核聚变研究中心以后，相继建成 Gekko-II 和 Gekko-IV Nd 玻璃激光装置，正在开始组建 Gekko-XII 装置。

(1) Gekko-II, 1975 年运转，是二束系统，最初报导在 100 微微秒脉宽下输出 100 焦耳，总功率为 1 兆瓦，由硅酸盐钕玻璃棒组成，全部使用棒状放大器。建造目标是用于激光等离子体相互作用和靶的压缩实验。但后来作了改进，脉宽压缩为 35 微微秒，号称可聚变能量达到每束 20 焦耳。

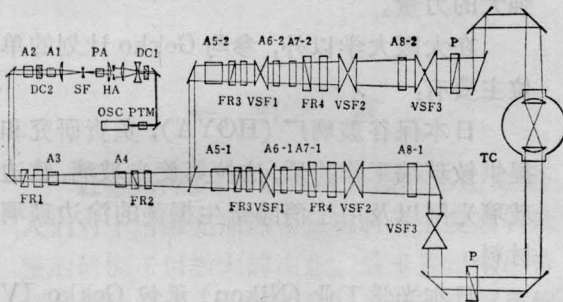


图 1 Gekko-II 光路图

Gekko-II 的振荡器使用 YAG 工作物质，用染料调 Q，同时用 50 兆赫声光调制器锁模，腔长 140 厘米，输出 90~200 微微秒脉宽(用标准具和小孔选纵模与横模)。一项新的技术是将高浓度的可饱和吸收染料放在腔外，使脉宽变窄到 35 微微秒。

放大器系统共有 9 级，终端口径为 80 毫米，三个空间滤波用于消除光强起伏的高频纹波，使用四个法拉第隔离器和两个染料盒，以消除超荧光噪声和阻尼反向激光。总体的反差  $< 10^{-6}$ 。

Gekko-II 最初使用  $f/1$  透镜对打系统，后来改为  $4\pi$  全立体角照射系统。

我们认为 Gekko-II 装置有可取的地方：使用声光调制对振荡器的稳定性和提高信噪比显然有效果，但整个光路中不使用普克尔盒这一点是不合理的。此外，这个装置非常严重的一个问题是负载太大，在这种负载下即使工作物质不破坏也要导致光束的丝状分裂，破坏光束质量。事实上，在最近的报导中，Gekko-II 用于打靶的输出总功率是 0.4 兆瓦，这才是比较合理的值。

在“Gekko-II”装置上，曾进行了较大量的激光压缩充气玻璃壳靶的物理实验，取得了一些结果。典型实验的参数如下： $\phi 70$  微米、充 20 大气压充气玻璃壳靶，体压缩~100 倍，中子数  $\sim 10^5$ ；入射激光能量 20 焦耳(50 微微秒)，分配如下：54% 散射光、7.7% 离子能、0.28% X 光能，总吸收即为 8.0%。实验发现慢离子的空间分布是各向同性的，而 10 千电子伏以上的快离子却主要散射入聚焦锥角内；而且只是在激光功率较高并有压缩时，才有快离子发生。实验中，还采用了时间分辨的  $2\omega_0$  干涉成像法测量了靶冕区的密度分布。结果表明形成所谓“Shelf”的分布，临界密度面附近的密度梯度的特征长度约为 1~2 微米。另外，还研究了预脉冲能量对聚爆效果的影响，结果指出，当预脉冲能量  $> 20$  微焦耳时，针孔 X 光像呈现热斑结构，观察不到中心发光的强区；只有当预脉冲能量  $< 20$  微焦耳(同时，被放大的自发辐射能量 1 毫焦耳)时，热斑才消失并出现 X 光发光的中心强区。

(2) Gekko-IV: 这个装置从 1975 年初开始至 1977 年底完成，共花了三年时间。总输出 4 兆瓦(0.1 毫微秒)，在 1 毫微秒脉宽下可以输出 2 千焦耳。全部使用磷酸盐钕玻璃。末级使用  $\phi 110$  毫米的片状放大器。

Gekko-IV 的振荡器结构和 Gekko-II 类似，改用磷酸盐钕玻璃代替 YAG:Nd，同样使用主动调制器和染料开关。分束后每一路由三个放大器组成，并用空间滤波器和法拉

第隔离器分隔开来, 光束部分地使用象传递。

Gekko IV 目前已经实现的指标为:

- (1) 锁模振荡器能量稳定性 3%;
- (2)  $\phi 60$  毫米棒状放大器增益系数  $\beta = 0.09 \text{ 厘米}^{-1}$ , 不均匀性 15%。
- (3)  $\phi 110$  毫米终端片状放大器由于消除了寄生振荡, 可以获得  $\beta = 0.10 \text{ 厘米}^{-1}$  以上的增益系数;
- (4) 光束的方向性在  $5 \times 10^{-4}$  弧度以内。

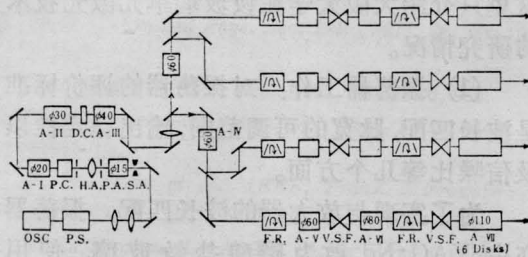


图2 Gekko-IV 光路图

Gekko IV 配备直径 1.1 米的靶室, 由日本光学工业公司 (Nikon) 负责设计和制造。照射方式是正四面体均匀照明。共有 38 个窗口, 所有窗口的离轴量在 0.5 毫米以内。靶镜为  $\phi 130$  毫米、 $f/1.15$  的外球面透镜。靶室加工精度是很高的。但是我们认为有两点不够合理: (1) 容器壁的厚度太薄 (12 毫米), 在真空状态下变形量较大; (2) 靶的支撑方式不合理, 用一根约 600 毫米长的细杆支撑, 对地基震动的灵敏度高。

Gekko IV 安装在一楼防震地基上, 但整个激光系统固定在高度为 1 米的工字钢梁上, 以实现刚性连接, 保持振动的位相一致。

从激光系统的结构和性能看来, Gekko-IV 比 Gekko-II 先进得多, 不仅是因为它使用磷酸盐钕玻璃工作物质, 在器件的参数选择方面也是合理的。由于末级放大器使用片状结构, 并以布氏角安放时, 工作物质内部的负载下降 1.5 倍。在上述输出功率时, 放大器的负载实际上  $\sim 5$  千兆瓦/厘米<sup>2</sup>, 对具有小

的非线性折射系数的磷酸盐玻璃来说是比较合理的。

在隔离系统方面, Gekko-IV 使用了一台普克尔盒电光开关, 显然比 Gekko-II 前进了一步, 但进入电光开关的光束是几个毫弧度张角的发散束, 这将使电光开关的信噪比下降。此外, Gekko-IV 和 Gekko-II 一样选用口径 80 毫米的棒状放大器, 这个口径看来似乎太大了一些, 为了保证光泵的统一性, 工作物质的 Nd 离子浓度下降到 0.4% (重量百分比), 因此增益系数随之下降, 可能是得不偿失。尽管这种尺寸的棒状放大器目前仍在很多激光系统中采用, 但在建造中的日本最大型的 Gekko-XII 装置中已经取消, 由  $\phi 100$  毫米的片状放大器所代替。

利用 Gekko IV 进行物理实验, 是从 1978 年 5 月开始的。目前已取得的聚爆总体结果: 四束激光辐照充气玻璃靶, 体压缩 200 倍, 氩-氩中子  $10^7$  个, 离子温度 6 千电子伏。利用针孔照相 (空间分辨  $\sim 10$  微米) 与条纹相机 (时间分辨  $\sim 20$  微微秒), 拍摄到时空分辨的 X 光图象, 估算聚爆速度  $\sim 3 \times 10^7$  厘米/秒。另外, 还专门拍摄了充气玻璃靶的 X 光光谱。根据氩线谱分析, 估算等离子体压缩芯部的参数如下:  $\rho = 7.6 \times 10^{-2}$  克/厘米<sup>3</sup>,  $\rho R = 1.7 \times 10^{-4}$  克/厘米<sup>2</sup>,  $n_e = 3.9 \times 10^{22}$  厘米<sup>-3</sup> 和  $T_e = 430$  电子伏。并采用一维双温度压缩编码对聚爆过程作了计算机模拟, 数值结果与实验数据相符合。整个 Gekko IV 的激光-靶室系统的控制、操作以及测试数据的处理、显示都由一台型号为 Okitac-50 的计算机完成。山中千代卫先生曾宣称, 通过使用更为复杂结构的靶, 氩-氩反应的中子产额可望提高到  $10^8 \sim 10^{10}$  个, 但并没有提供方案的细节。

(3) Gekko XII: 这是一个万焦耳级的大型钕玻璃激光装置, 目前正处于开发阶段, 它的建造目标是实现显著的热核燃烧, 达到  $n\tau = 10^{14}$  厘米<sup>-3</sup>·秒。值得注意的是, 大阪大

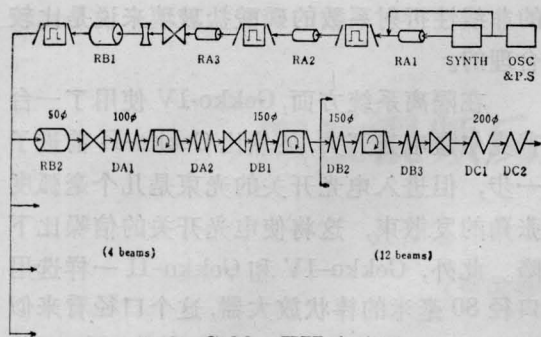


图3 Gekko-XII光路图

学激光核聚变中心早在1976年就把建造Gekko XII的任务交给日本电气公司(NEC), 尽管当时大阪大学的Gekko-II刚刚建成, Gekko-IV还没有运转, 但是Gekko-XII的工作已经开始。

根据大阪大学“金刚”计划的要求, NEC将在1979年初完成Gekko-XII系统12束当中的一束, 1979年底再发展为二束, 相当于美国劳伦茨·里弗莫尔实验室的Argus II装置, 并配备相应的靶室作为一个完整的试验装置。预计在1980年和1981年组建12束, 总功率超过 $10^{13}$ 瓦, 能量为万焦耳级。1982年将开始进行聚爆总体实验。

Gekko-XII的设计更进一步, 它选用的参数和主要部件的性能与美国劳伦茨·利弗莫尔实验室的Shiva装置十分相近, 并且由于Gekko-XII使用磷酸盐和氟磷酸盐钕玻璃, 它每束的性能将可超过Shiva装置初期的水平。Gekko-XII使用的分光方式是逐步分光, 我们过去已经论证过这种分光方案比Shiva的分光方案更为合理。具有能量对称, 激光效率高以及元件数量少的优点。我们对Gekko-XII进行粗略的数值分析表明, 这个装置具有比较大的输出潜力, 因此它成功的希望是很大的。

### 三、大阪大学进行的钕玻璃 激光器单元技术的研究

围绕Gekko计划所开展的钕玻璃激光器

单元技术的研究工作分别在大阪大学、NEC和HOYA玻璃公司进行。大致分工如下: 大阪大学的工作主要是为了建造和发展Gekko-IV装置; NEC着眼于Gekko-XII的开发, 在吸取Gekko-IV的经验基础上开展工作, 由于Gekko-IV的性能基本上良好, 所以NEC的工作着重于更好的光束质量, 大型部件以及自动化准直系统等方面; HOYA的工作目的是改进玻璃, 发展涂边玻璃材料, 制造不同指数的超高斯型软边光阑。此外分散在各个研究所还有新型激光器的开发工作。这里只介绍大阪大学在钕玻璃单元激光技术的研究情况。

(1) 振荡器工作: 对振荡器的评价标准是波长匹配, 脉宽的可调范围, 输出稳定性以及信噪比等几个方面。

为了实现与放大器的波长匹配, 振荡器亦由YAG:Nd改为磷酸盐钕玻璃, 使用HOYA公司的LHG-5玻璃能够使锁模的稳定性提高, 因为这种玻璃的热稳定性很好,  $dn/dT < 0$ , 光程对温度的微分接近于0, 为了评价磷酸盐钕玻璃振荡器, 该研究所对其输出的光谱特性进行了时间分辨研究, 发现锁模脉冲序列的初期谱宽约为5埃, 然后开始加宽, 大多数情况下在峰值时加宽到30埃, 这是自相位调制的结果。

为了提高输出的稳定性, 曾经试验全主动锁模加Q开关的方式, 即由声光调制作主动锁模, 脉冲形成后用Q开关取出, 这样可以得到~1%的再现性。但是由于不使用染料, 脉冲宽度最短只能作到1毫微秒。而当使用染料加声光调制器时能量的再现性只能达到~3%左右, 但此时噪声较低, 并且脉冲宽度可以在几十微微秒至几百微微秒之间调整。

(2) 棒状放大器工作: 大阪大学以 $\phi 60$ 毫米棒状放大器为代表, 着重研究放大器热效应, 寄生振荡和光泵均匀性。

将放大器置于一对正交的偏振器之间,

由 6328 埃的 He-Ne 激光束作探针, 通过干涉条纹的变化研究光泵作用下工作物质的温度变化, 并发现在光泵照射以后最少要 15 分钟放大器才能复原。

使用波长匹配的吸收 1.06 微米的溶液代替冷却水套, 并在其中的一个端面光胶红外吸收玻璃之后, 发现可以使棒状放大器的增益提高 7~8%, 从而证实寄生振荡及自发辐射的放大引起放大器的增益饱和。

除此之外, 用不同的聚光方式对不同浓度的钽玻璃棒进行了增益的测量工作, 并发现磷酸盐钽玻璃的增益系数比硅酸盐钽玻璃高, 但径向不均匀性较差。为了减少这种不均匀性, 使用氙灯数量不宜太多, 在聚光筒的设计上应有更强的聚心照明为好。

(3) 片状放大器: 大阪大学着重研究用于 Gekko-IV 所用的  $\phi 110$  毫米片状放大器, 由于这种放大器的尺寸较小, 因此关于寄生振荡的影响不会太严重, 他们已经获得  $0.10 \text{ 厘米}^{-1}$  的增益系数而不至于饱和, 曾经测定了放大器的增益分布, 比较了硅酸盐和磷酸盐钽玻璃的结果。

小信号增益的测量方式是采用 YAG:Nd 激光探针逐点进行, 已经取得  $\alpha D = 2.2$  的较好结果, 说明在消除寄生振荡方面所采用的涂边材料质量很好。但是在涂边玻璃与基质玻璃之间还存在一些散射的寄生模, 使目前的  $\alpha D$  值比理论值稍差。

#### (4) 真空空间滤波器

日本最初使用空间滤波器是 Gekko-II 装置, 初期只着眼于消除光强分布的高频纹波, 后来发展为兼用于中继成像、扩孔以及减少自发辐射等方面。一个很成功的实验是测定了空间滤波器在不同负载下的透过率, 定量地表明放大器的  $\beta$ -积分超过 5 时光束质量显著下降。在这种情况下, 放大器的功率负载约为 5 千兆瓦/厘米<sup>2</sup>。

#### (5) 法拉第隔离器

Gekko-II 和 Gekko-IV 均使用脉冲磁场工作的法拉第隔离器, 场强 27 千高斯。旋光玻璃是用 HOYA 公司生产的钽玻璃, 它的  $Vn/n_0$  值达到 0.184, 缺点是热双折射严重, 所以他们在线圈与玻璃之间用 N<sub>2</sub> 气流强迫冷却。用连续 YAG 激光测定的结果表明法拉第转子的消光比为 30 分贝。

## 四、激光玻璃

日本保谷 (HOYA) 玻璃公司生产的钽玻璃是目前世界上第一流的, 它的产品不但提供国内的需要, 并且在国外也很有市场。据了解美国劳伦茨·利弗莫尔实验室的 Shiva 装置有 50% 的玻璃向 HOYA 购买, 而发展中的 Nava 以及罗切斯特大学的 Omega 10 等巨型装置所使用的钽玻璃将全部由日本 HOYA 公司提供。这个工厂人员并不多, 但自动化程度以及熔炼玻璃的工艺水平都较高。值得指出的是他们一直使用白金坩埚而不使用瓷坩埚。

该公司生产的钽玻璃中最常用的有下列几种类型:

LSG-91H 是硅酸盐系统的玻璃, 光吸收较小, 荧光谱线宽, 而受激发射截面较小, 这些玻璃最终将由磷酸盐系统所代替。

LHG-5 是专用于锁模激光器的磷酸盐玻璃, 由于它的  $dn/dT$  接近于 0, 所以在锁模振荡器中容易得到单模的输出, 稳定性也高。

LHG-7 是一种低  $n_0$  的磷酸盐玻璃, 其  $n_0$  值为  $0.95 \times 10^{-13}$  静电单位, 它有利于提高放大器的负载而不破坏光束的质量。

LHG-8, 是一种抗热玻璃, 磷酸盐系统, 它的光程随温度的变化不灵敏, 这种玻璃常用于重复率较高的激光系统。

除了钽玻璃外, HOYA 公司生产的法拉第旋光玻璃、消除寄生振荡的涂边玻璃也是有相当水平的。