

综 合 评 述

编者按：去年秋天，我们曾编写了一篇文章，名叫《大功率激光器的发展及其在受控热核聚变及触发氢弹上的应用》，对这一领域的一般情况，作了简略的介绍。限于篇幅及材料，有些重大问题，未能详细叙述。鉴于这一领域最近几年的飞速发展，特别是它在经济建设及国防建设中的极端重要性，有必要引起我们的进一步重视。“知彼知己，百战不殆”。特再组织三篇译文，加以介绍。

供热核研究用的玻璃激光器

产生超高温热核反应所需要的激光功率，在技术上是可以达到的，然而经济上的障碍可能比较严重。目前急需完成的似乎是能在一毫微秒时间内输出一千焦耳能量的激光器。

虽然在 1969 年 9 月份法国科学家已经证实了激光能够触发聚变反应，但是要实现从可控热核反应获得能量估计至少还需要十年的时间。

尽管很艰难，不过欲使玻璃激光器在 100 微微秒脉冲时间内输出 10^6 焦耳甚至更多的能量，以满足点燃超高温热核反应的需要，似乎在技术上并没有障壁。真正的障碍是经济上的，这样一台激光器要求有约 10^4 厘米² 的辐射孔径与一个兆兆焦耳的能源。

许多年以来，可控热核反应在世界上已经引起浓厚的兴趣。正象在星体和氢弹中已经看到的那样，聚变反应是超高热的；因此用电磁的方法约束的聚变等离子体可以提供一种利用这种能量的十分安全的方法。

人类对动力上的永无止境的需求总要求有某种形式的核燃料。与可控裂变方法相比，利用可控聚变来产生功率有以下一些优点：基本的氘燃料可以从水中廉价地提取出

来；聚变反应的副产物要比裂变反应堆的副产物具有更少的危险性，因而也就更容易进行处理；反应无须生产重元素武器级的材料，不需要采取控制武器的措施，因而也就避免了裂变材料落到一些无关的人手中的危险。

因为操作温度提高同时聚变能量又可以直接转换为电能，所以可控热核动力发电的效率也就比较高。在任何时刻，反应堆中只存在微量的燃料^[1,2]，因而就不会出现反应堆爆炸的意外事故。因此，聚变反应可以布局在人口稠密的地区，这样就只需要比较短的输电线，而且可以有效地利用从反应堆中排除出来的热量。

核是带正电的，使它们强烈地互相排斥。为了能发生聚变，就必须使核充分地接近，以至短程吸引核力占优势，使核相互结合。聚变反应能够通过核之间的高速碰撞而实现。这意味着要求产生一个高温等离子体，并且不能存在重元素的搀和物，因为这样的

杂质将迅速地削弱运动着的核的能量。为了确保通过多次碰撞而取得较高的聚变几率，这种等离子体(大约处于 10^8°K 的温度)须能约束足够长的时间。进一步提高温度，这一时间能够缩短。因此，可控热核研究存在着两个方面的问题：产生一个适当的等离子体，并且要将它约束足够长的时间。

由于核的荷电引起静电排斥力，所以要选择电荷最小的核。氢以及它的同位素氘(D)和氚(T)的核只有一个电子电荷。氢是非常丰富的，H-H反应也是星体中的主要反应，不过反应速率太低，地球上无法实际应用。D-T反应和D-D反应都是人们感兴趣的聚变反应，D-T反应要求的温度仅是D-D反应的十分之一。在自然界中，氘是存在于氢中的“杂质”，氘在氢中的含量只占0.017%。而氚是放射性物质，它在自然界十分稀少，必须用人工制造。

用激光产生等离子体

有许多种方法已经被应用来产生和约束等离子体，在1963年就有人建议^[3]用激光器来产生等离子体。利用激光的方法有下面几个优点：能量是以光的形式携入的，所以约束容器就不存在附加的电极等等附属物；等离子体仅仅包含靶的分解生成物；落在靶上的激光能量的时间与空间的特性，可以容许在一个较大的范围内变化，这样就可以选择一个有利于等离子体产生的最佳值；因为光子并不象荷电粒子那样相互排斥，因此光束的自聚焦就不再是一个问题，而且点燃一个超高温热核反应所需要的足够强的激光器现在看来也能制造得出来。

最初是通过周围电子的反韧致过程而将所需要的能量转移给核的。在脉冲的后缘，等离子体对于激光辐射已经变为不透明*了。

激光脉冲应当足够短，以至能量可以在等离子体粒子扩散与等离子体变成不透明之前就被吸收，不过激光脉冲又必须有足够宽度，这样才能使等离子体在其变为不透明的时候，温度可以达到最高值。对于1微米的辐射来说，脉冲宽度大约以100微微秒为最佳，为了将一毫米的固体氘颗粒加温至 10^7°K ，需要 10^5 焦耳的能量^[2]。

D-D反应的产物是氦核、中子、质子和氦核，大部分产生的能量是以中子动能的形式出现的。在这种情况下，大约通过产生 10^{14} 个中子而释放出500焦耳的能量，激光能量的转换效率是0.5%。采用适当的聚变反应堆装置、等离子体约束和燃料注入之后，这样数目的中子产额开始引起人们的兴趣。据估计，为了建立净的正功率平衡，根据约束等离子体的方法，需要 $10^6 \sim 10^9$ 焦耳的能量。较高能量的要求相当于等离子体自由膨胀的情况，而较低的能量要求却对应于惯性护持器的情况，例如利用稠密物质(如：金)来包围靶。

红宝石价格昂贵

要产生高到 10^4 到 10^7 兆瓦的激光功率，就需要采用玻璃激光器。因为足够大的红宝石价格昂贵，而且在短脉冲运转的情况下，红宝石的效率只是玻璃的十分之一，所以就必须有更大的能源，这样就使得一台激光器系统的建造花费浩大。另外，红宝石和玻璃的抗破坏能力差不多是相等的，因此欲获得同样的输出，则需要有近似相等的输出棒直径。迄今报导^[4]的红宝石最大直径是5厘米，而玻璃激光器却可以做成任意大的直径。

* 译注——此段出现的“不透明”一词译者根据物理过程分析怀疑系“透明”之误。

苏修已经采用过 20 焦耳、1 兆瓦的玻璃激光器来辐照氧化锂的颗粒，观察到在时间上与激光脉冲相同步的中子信号，认为产生了基本的聚变反应^[5]。美帝散迪厄公司使用一台迄今公开报导的最强的、输出 50 焦耳、25 兆瓦的激光器，重复了苏修的实

验^[7]。在法国，实验中应用了一台 250 焦耳、5 兆瓦的激光器^[8]。而且一台半强度处全角是 40 微弧度的、输出 90 焦耳、 2×10^{17} 瓦/厘米²·球面度的、受衍射限制的激光器也已经建成^[9]；这台激光器示于图 1，它安装在一张花岗岩桌子上。

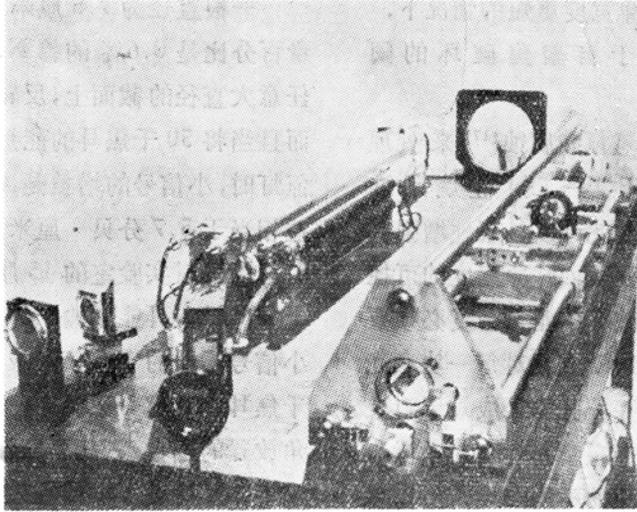


图 1 受衍射限制的高功率玻璃激光器。针孔选模振荡器安装在右边以股钢杆支撑的结构之中。中间是前置放大器，它由一根 13 毫米 × 40 厘米的激光器棒组成。左边是功率放大器，它由一根 38 毫米 × 1 米的棒组成。整个系统安装在一张花岗岩桌子上，器件输出 100 焦耳，在半强度处的全角是 0.04 毫弧度。

迄今为止宣布的最重要的结果也许是一群法国工作者所完成的^[10]。他们使用了一台五级放大玻璃激光器，该器件输出约 70 焦耳，几千兆瓦。在他们进行的 100 多次实验中，当利用这一能量聚焦到氘冰靶上时，每一次都观测到几百个中子。根据中子飞行时间的测量和 X 射线发射诊断，他们推测温度已经达到 3×10^7 K。当同样地轰击氢冰时，正如预计的那样，观测不到更多的中子。温度的测量和中子产额的观察都是为了证实已经发生了聚变反应而必须进行的工作。

激光器设计中的注意点

在设计应用于可控热核研究的大型激光

器系统时，必须考虑下面几个因素：适当形状的脉冲的产生、放大级联的设计、激光引起的激光器元件的破坏、总体效率、脉冲重复率以及系统对靶反馈影响的稳定性。

因为单脉冲的产生^[7]和放大技术^[9,11,14]已为人们较好地掌握，所以本文就不再进行讨论。有下面三种应当考虑的激光所引起的破坏：玻璃中微观不均匀性而引起的破坏、自聚焦以及表面破坏。当脉冲短于一微秒时，对于给定的不均匀性，微观不均匀性所引起的破坏的阈值似乎是一个常数^[11,12]。如果从陶瓷坩埚所熔制的玻璃中选择若干块作为激光玻璃，就可以避免这种类型的破坏，至少也可以将阈值提高到每平方厘米 100 焦耳^[11,12]。

对于标准的硅酸钡激光器玻璃,自聚焦破坏的阈值迅速地减少,一直到脉冲宽度大约是2毫微秒为止,然后破坏阈值取一个常数值17焦耳/厘米²,一直到脉冲宽度为30微微秒或者更窄^[12]。对于脉冲宽度大于2毫微秒的情况,表面破坏的阈值低于自聚焦破坏的阈值,而在脉冲宽度更短的情况下,表面破坏的阈值却高于自聚焦破坏的阈值^[12]。

据报导,如果用氢氟酸腐蚀^[17]来处理玻璃的表面或者用二甲基-二氯硅烷来冲洗^[12],玻璃表面的强度就可以显著地增强。因此,为了使得100微微秒脉冲宽度的可控热核研究激光器免于破坏,能量密度必须要保持低于17焦耳/厘米²,或者对每一块激光玻璃进行表面处理,并将其加工成短于自聚焦长度。由于系统中存在费涅耳衍射,激光束产生了几乎不可避免的不均匀性,所以最高的安全设计点应当是10焦耳/厘米²。如果激光器玻璃制造成短于自聚焦长度,并且表面进行过处理,则安全设计点可以达到大约100焦耳/厘米²。可以利用在饱和通量的范围内工作而改善光束的均匀化程度。但是,这样就需要具有比现在通常能得到的激光器玻璃有更高的特定的增益系数的激光器玻璃。但采用有较高增益系数的玻璃将会使得靶的反馈变得更加严重,因为在能量输出相同的情况下,放大器序列的增益增大了。

棒列阵或圆盘列阵

为了能在100微微秒时间内输出10⁶到10⁹焦耳的能量,就必须要有大的辐射孔径。这一目的可以利用棒^[14]或者圆盘^[55]的列阵来实现。棒的优点是具有较高的效率、比较简单、造价低(虽然玻璃的体积较大,但需要磨制的表面较少也较小),在光束中又只有

极少易被破坏的表面。圆盘的优点是辐射孔径可以做得非常大,而且圆盘的厚度较小,冷却时间仍然可以相当短;替换一块损坏了的圆盘要比替换一根被损坏的棒更廉价,另外,圆盘可以做得比自聚焦长度还要薄,这样就可以提高自聚焦类型破坏的阈值。

一根直径为7.5厘米、长度是1米、重量百分比是0.6%的掺Nd₂O₃激光器棒,在任意大直径的截面上,反转都是非常均匀的,而且当将50千焦耳的能量输入进8根直管氙灯时,小信号的增益是10分贝^[9],这一增益相当于5.7分贝·厘米²/千焦耳。而美帝劳伦斯辐射实验室的15厘米圆盘激光器,对于200千焦耳能量输入的情况,增益表明是小信号增益的1.5倍,或1.1分贝·厘米²/千焦耳。在这一系统中,五块以布儒斯特倾角放置的圆盘,其相互交错的边棱挨得很近,差不多要碰着了。棒在效率上能提高五倍,因此一个更好的办法是用二根或三根大棒排列起来,而避免建造五倍大的能源。

另一方面,也有可能使用比电容器贮能花钱更少的方式,例如超导磁铁感应贮能,或者利用等离子体压缩技术直接转换成光能。一根浸在水中的7.5厘米的棒,其冷却时间大约是半小时,而利用空气冷却的洛伦兹辐射实验室的圆盘,其冷却时间也是差不多的。如果用液体来冷却圆盘的表面,则会大大缩短冷却时间,但可能会更多地降低能获得的增益。

冷却剂提高了效率

另外一种办法是将圆盘之间的空隙做得非常小,并在其间充以液体冷却剂^[14],情况如图2所示。在用重水作为冷却剂^[14]的一台直径是1.8厘米的圆盘激光器中,已经测量到的效率是4.5分贝·厘米²/千焦耳。这种

激光器以每秒钟二个脉冲的方式运转。在一些可控热核研究工作中，例如在一个“putt-

putt”反应堆中，每半个小时能够不止一次地点着激光器是有好处的。

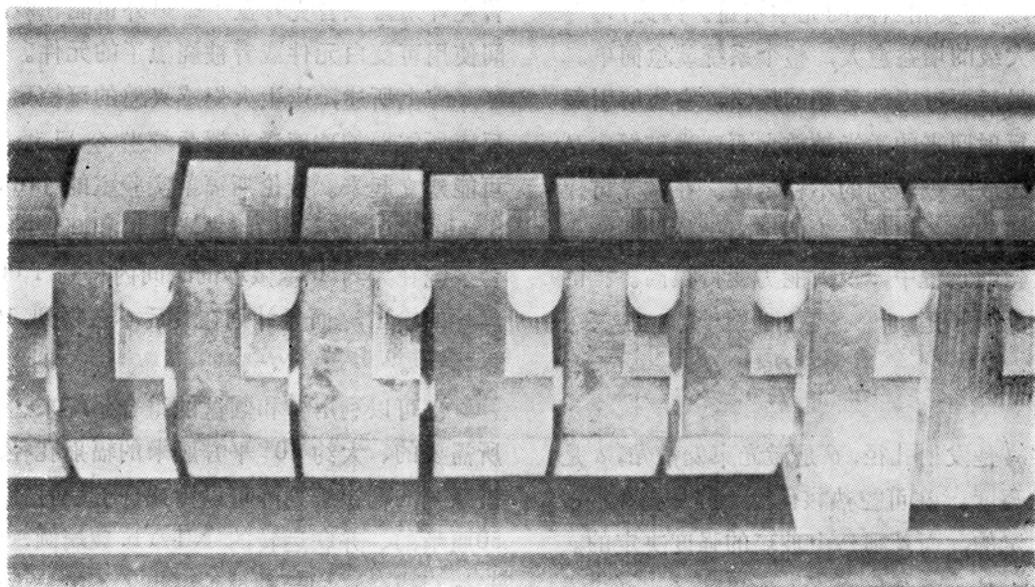


图 2 为了得到高平均输出而设计的圆盘状激光器的截面图。每一块圆盘玻璃的厚度是 1 厘米，有一直径为 18 毫米的激活芯，熔接在 24 毫米的正方形外套内。液体在盘之间以及绕二个对角流动。圆盘之间用聚四氟乙烯球分隔开，整个系统安装在有精确内径的正方形硼硅酸玻璃管内。用四支紧密围绕的水冷闪光灯泵浦 45 厘米的列阵。

激光器效率的限制

激光器的效率受到下面几个因素的影响，即灯的有效通量、超辐射损失、1.06 微米处的损失系数和玻璃的强度。要能够有最大的输入，就需要在激光器的玻璃中有最高的泵浦光通量，所以灯的有效通量是和玻璃的强度相互有关的。这种通量不能超过灯源的有效通量，而灯源的有效通量却又为两种因素所限制，一是谱线发生严重的移动之前所能达到的最大电流密度，另一是在灯发生自吸收之前等离子体达到的最大厚度。因为在工作物质具有最小体积的激光器中泵浦通量才可以达到最大值，所以强度问题就自然被提出来了。

注意光线的杂散反射，处理棒的表面，并在级间使用开关便能控制超辐射损失。如果将掺钐玻璃的吸收外套熔接在钕玻璃激光

器的外层，增益至少就比没有外套的、表面磨毛的棒增加十个分贝。这样的外套能够用机械的方法配到棒芯上去，其折射率比棒芯高千分之一，因此从棒芯就有可能不发生全内反射，而且在交界面上的菲涅耳反射也可以忽略不计。对于大激光器系统，横向超辐射也是一个问题，这可以利用同样的技术解决。如果使用 Nd-Yb 激光器玻璃，超辐射问题可以大大地减轻^[14]。这种玻璃也是在 1.06 微米处发射的，但是每单位增益的贮能却是钕玻璃的 16 倍。后一种配合方式是最好的。

损失系数也是重要的，因为它限制了激光器放大级棒的最大长度，使其不能有效地运转。对于大约 0.5%/厘米的损失，棒的最大长度大约应该是半米，而对于大约 0.2%/厘米的损失，有效长度就是一米。由于单脉

冲、亚毫微秒振荡器一般仅仅输出几个毫焦耳，因此为了得到可控热核研究所需要的大能量，就需要相当高的光学增益。因此，每一个放大级的增益愈大，整个系统就愈简单。

最后要考虑的是靶的反馈，它能够引起由于反射回来的激光被放大而产生破坏，又能引起放大级序列的不稳定性。在激光可控热核研究实验中所产生的等离子体，在激光轰击靶的过程中，反射能力变得很高。靶的有效反射率是

$$R_{\text{有效}} \propto \frac{d^2 \theta^2}{h^2},$$

其中 d 是发射孔径， θ 是激光束发散角， h 是靶的高度。在可控热核研究工作中， h 常常是固定的，而 d 则是由玻璃的强度决定的。这样， $R_{\text{有效}}$ 就正比于 θ^2 ，所以就希望光束发散角能够有最小值。大多数可控热核研究工作所使用的激光器，其光束发散角是衍射极限值的 10 倍。如果使用受衍射限制的系统，靶的反馈就可能减低 100 倍。振荡器的输出反射镜和靶的反馈以及较高的放大器增益就产生了系统稳定性所需要的条件。不过，联合使用 $\frac{1}{4}$ 波片和偏振器至少可以部分地使反射率失去影响。另外，法拉弟旋转光学隔离

器^[16]已在研究之中，目前已经能够使系统可靠地进行运转^[14]。在放大级序列中也可以使用普克耳斯盒或者克耳盒^[10]。另外也能在级之间使用可变白元件或者被烧黑了的元件。

综上所述，产生人们感兴趣的可控聚变反应所需要的玻璃激光器系统当今已经有可能建立起来。劳伦斯辐射实验室的 James Swain 希望在不久的将来能从棒和圆盘的组合系统在大约 1 毫微秒的时间内得到 1,000 焦耳的输出，而且计划在其后不久得到 10^4 焦耳^[17]。

也可以利用棒和圆盘的组合系统来达到所需要的、大约 10^4 平方厘米的辐射孔径。该系统的输出级列阵可以由或许五块直径为 50 厘米的、并联运转的 Nd-Yb 玻璃圆盘激光器组成。这样一种设想引出了不少关于靶面上所有的激光能量在空间和时间上的迭加的问题，因为这要求非常大的激光系统所发射的脉冲的宽度为 100 微微秒，即在空气中仅仅相当于 3 厘米长。

参 考 资 料 (略)

译自 C. G. Young, *Laser Focus*, 1969 (Nov.), 5, № 21, 37~40

激 光 能 触 发 氢 弹 吗?

美帝原子能委员会担心激光脉冲能量在达到现有水平的二倍或三倍时，私营激光器将有点燃聚变的能力。

激光装置如果能够触发聚变，那末一个小国家，也许甚至一个私营公司，就有可能制造氢弹，而无需首先学造原子弹。而应用于这种目的所需的激光器，其短脉冲输出能量至少应是目前激光器输出能量最高水平的

三倍。

近几十年来，原子能委员会一直在设法对付非官方核研究所引起的政策上的麻烦。1968 年 12 月底，我们得知原子能委员会暂时搁置了该委员会关于对作为氢弹和其他核