

新 型 装 置

大孔径玻璃圆盘激光系统

提要：本文叙述了能产生极高功率和亮度、准备用以产生强冲击波和高温等离子体的玻璃激光器的设计研究情况。设计采用了倾斜、面泵浦掺钕玻璃圆盘。考虑了这种激光器的四种使用方案的优缺点。为了检验这种圆盘概念，建造了一台由五块直径12.5厘米、厚1.25厘米的圆盘构成的激光器。文中叙述了对于设计的考虑以及从这台实验系统得到的一些测量结果。这种五圆盘系统的单程增益系数的测量值为0.054/厘米，这表明能量贮量为0.68焦耳/厘米³，或每圆盘100焦耳。

导 言

关于用激光器产生强冲击波和高温等离子体这一动人问题的研究情况最近有所报导。这些研究的结果指出，欲用激光器作这些应用，必须在十分之几毫微秒的时间内输出出好几百焦耳的能量，而且激光束必须有很高的亮度（ $\approx 10^{16}$ 瓦/厘米²·球面度）。

能产生高功率和极高亮度的激光系统是有的，但即使这些激光器有足够的亮度，它们的能量输出还是不够要求，必须发展产生较高功率的光束的激光器。

本文的目的在于：（1）研究高功率、高亮度激光器的设计问题；（2）采用倾斜的、面泵浦的钕玻璃圆盘，以便解决设计问题；（3）12.5厘米孔径的试验系统的测量结果。

设计考虑

高功率、高亮度激光器的运转存在着三个主要问题：（1）材料的高强度光学损坏；（2）泵浦辐射的大的光学吸收横截面以及（3）激光材料的热畸变。

高强度光束能使一般透明材料严重损

坏。高强度光学损坏现象说明一个光学元件在损坏以前所能承受的强度有一限制。表面和块状材料的损坏阈值是不同的，前者小2~10倍。这个问题对于设计高功率、高亮度激光器的影响是限制了能够串联使用而不发生损坏的相同的放大器的数目。这就要求高功率、高亮度激光器有很大的辐射孔径。这可在大量的小孔径系统和小量的大孔径系统之间选择。

大孔径的要求引入了第二个主要问题。激光器中避免光学损坏问题的普通方法是增大棒直径，同时光束的放大倍数也提高了。然而，大直径的棒的“掺杂”必须降低，因为高掺杂激光材料对泵浦光有高的光学吸收系数，这会阻碍均匀的粒子数反转。为了得到满意的均匀性，吸收系数和棒直径的乘积必须保持如同小直径棒一样的值。在棒直径上如果粒子数反转不均匀，那棒所产生或放大的激光束的散度就会比受衍射限制的光束大，因而其亮度将受到限制。所要求的亮度为 10^{16} 瓦/厘米²·球面度的数量级，也就是说光束的散度只能是这儿的12.5厘米孔径的衍射极限的100倍。因此不需要完全均匀

的粒子数反转。但当试图产生 100 倍衍射极限的光束时，就不能不顾及粒子数反转的均匀性。另外，为了使孔径上的破坏阈均匀，也需要这种均匀性。

当掺杂降低时，又遇到其他问题：单位长度的增益和棒中贮存的能量都减少。因此，为了产生所要求的增益和能量贮存的数值，就必须增大激光棒的长度。由于棒有一最佳棒直径，但可能很大，可以得出结论：高功率、高亮度激光器将不用棒作末级放大器。只要所需的能量、功率和亮度低于最佳尺寸棒所获得的值，就可以使用棒系统。

在考虑能克服这种大的光学吸收系数的激光器设计之前，必须考虑第三个主要问题，也就是热畸变问题。

由于激光材料中存在热畸变，高亮度激光束很难获得。这些畸变需要光学的修正和掺杂的改变。直径越大，棒就越长，光泵也越困难，畸变越大，所要求的修正就越麻烦。因此又需要一种最佳的棒。但在这种情况下，棒直径能够增大仅仅减少回波。

在设计能克服棒所固有的全部问题和限制的激光器时理解到，这些问题的根源是由于光泵作用通过了圆柱体的表面。这立刻使人考虑到用面泵浦玻璃圆盘作激光工作物质(图 1)。这些圆盘可以认为是由大直径、低掺杂(玻璃中单位体积内的激活离子数很少)的棒切出来的。

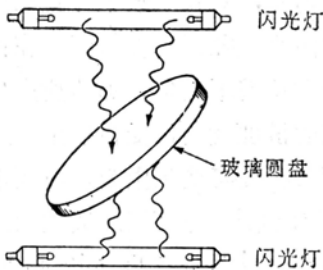


图 1 倾斜面泵浦圆盘激光器。

通过圆盘面而不通过它的柱面进行泵浦，大的光学吸收系数就变成一种优点，因为强吸收意味着大的能量存贮。泵浦的均匀性(在圆盘表面上的)为下列几种因素所限：闪光灯接近的程度，圆盘的大小有限，圆盘的支架产生了夹接应力(见图 2)。在圆盘直径很大的情况下，可能仅有的畸变将是由于闪光灯接近程度的差别而引起的，但这通常很小。

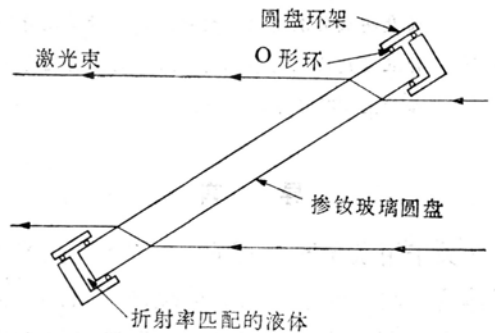


图 2 玻璃圆盘激光器的横截面。

要得到光学质量极佳的圆盘，就必须用玻璃做，采用四能级掺杂物，避免了材料未接受泵浦的可能问题(特别是在圆盘内部)。能满足这些要求的最容易得到的材料是掺钎玻璃。

采用圆盘后，甚至内部的光学损坏问题也可大大减轻。若损坏是由自聚焦引起的，于是就存在一个临界自聚焦距离，其值取决于自聚焦阈值和激光束在该阈之上的距离。调整激光束的功率，使这临界距离大于盘的厚度，则圆盘激光器的功率就能高于棒激光器的。当用圆盘代替棒时，由于包含了大量的表面，表面损坏的问题当然就更严重。

圆盘相对于激光束取布儒斯特角的方向。这种取向可减小反射损失，且泵浦效率高于任何小角度取向。

经研究发现的可能限制圆盘直径的唯一

效应是假振荡，特别是在圆盘直径上作为全内反射光束传播的那种。计算指出，6%（重量）的钷玻璃的直径限制接近 30 厘米。

可以肯定，倾斜、面泵浦钷玻璃圆盘为高功率、高亮度激光器提供了一种有希望的途径。这种圆盘系统的大部分详细性能只有通过实验测定。

实验系统

首先，需要在使用玻璃圆盘的激光系统中进行试验，看看这种想法是否正确。首先考虑的是圆盘本身。为了建立一个有意义的系统，选了一块 14 厘米直径的圆盘，加上支架后，得到一个 12.5 厘米的透明孔径。这就为这种圆盘概念提供了一个有效的试验。圆盘的厚度任意决定为 1.25 厘米，同时掺杂高到符合于长的荧光寿命（A. O. 1720 和 Schott LG-55）。

圆盘的数目根据“内”盘多于“端”盘这一原则来确定，但又不能多到闪光灯和电源无法满足要求的地步。估计五个圆盘将是适当的。圆盘的安置方式（都取布儒斯特角）如图 2 所示。

其次考虑闪光灯和电源的组合。闪光灯的数目（14）是根据在圆盘周围尽可能安装得多这一原则来决定的。闪光灯的长度是由五圆盘组合体的长度决定的，即 60 厘米。闪光灯直径、管壁厚度、充气压力等由电学特性决定，所用的闪光灯内径为 19 毫米，壁厚为 3 毫米，氟气气压为 30 厘米汞柱。每一支闪光灯的输入能量和放电时间由下述要求确定：电学元件有长寿命（触发约 500 次），每一灯提供 18 千焦耳。闪光灯光的反射器由镀金的黄铜做成并紧密地与灯耦合。据估计，安置在圆盘的上面和下面，或与圆盘激光器的水平轴有一定距离的闪光灯，其

效率会低于其他的灯。因此，闪光灯聚集在水平轴附近，情况如图 3 所示（发现闪光灯的再吸收不是什么严重的问题）。

第三个考虑是过滤辐射的问题。以前用液体滤光片存在问题，后来决定使用 Schott GG-14 滤光玻璃。滤光玻璃安插在闪光灯和圆盘之间（见图 3）。

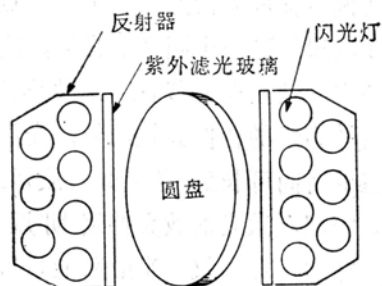


图 3 玻璃圆盘激光器的结构。

第四个考虑是使用圆盘激光器的方式。现在正在研究四种使用圆盘激光器的方式：（1）振荡器，（2）功率放大器，（3）非共振多程放大器和（4）受激振荡器。其中前两种是普通装置，是棒状激光器所采用的一般方式。

非共振多程放大器概念

非共振多程放大器方式的引出，是因为估计到圆盘激光器的增益很低。这种特殊方式多次使用少量圆盘，以便尽可能有效地从圆盘中取出最大能量。

当多次通过一个系统（必须使用部分反射镜）时，如果相继的过程，不是沿不同的角度发生，就会出现损耗。但当大直径光束通过圆盘激光器时，那怕角度很小，圆盘框的孔径也会遮去光束而引起损耗。因此，光束面积损耗很小（ $<10\%$ ），任何两次通过之间的角度也必然很小。光束直径很大时，旋转反射镜（或棱镜）必须与圆盘激光器相距很

远。简单的计算得出面积损失的比 $\Delta A/A$ ，它可用圆盘框的长度 l 和圆盘激光器到转镜的距离 $L/2$ 来表示(光束充满它自己的直径)：

$$\Delta A/A = (2l/L)。$$

对 60 厘米激光头和 0.1 面积损耗，旋转镜之间的距离是 12 米。

非共振多程放大器方法的主要优点是经济。多次通过同一个圆盘激光器，这在结构和设备方面是很大的节省。这种节省之一部分出自铍离子的特性。铍的低激光能级弛豫到基态的时间可长到 60 毫微秒或短于 10 毫微秒。若圆盘激光器放大持续期短于 60 毫微秒的脉冲，那末仅一半贮藏能量可以利用，而持续期小于 60 毫微秒是实际上能做到的。然而，采用长程多次通过这类激光器结构时，在各次通过之间有充分的时间使低激光能级空竭。因此，脉冲短于 60 毫微秒时，几乎全部贮能都可以利用。另外一个优点是多次通过(打算 9 次)圆盘激光器的孔径将迫使光束接近衍射极限。主要的缺点在于所要求的设备太长，以及由此而出现的调整问题。

受激振荡器概念

受激振荡器类似于非共振多程放大器，这是因为多次通过了圆盘激光器而且要求长程。不同之处有：(1)此系统靠附加的输入和输出反射镜实现共振；(2)振荡是通过一种适当的 Q 开关装置(一种被动吸收体)控制的以及(3)待放大的激光束射到振荡器中。注入的脉冲的强度必须高到足以克服腔的噪声(计算一面旋转镜上的通量并高估各项，很容易估计出腔的噪声。照这样计算出的腔噪声功率低于 2 千瓦，这一功率很小，不足以损坏 Q 开关振荡器)。一旦脉冲被注入

腔内，它就多次通过圆盘组合体，然后再到达输出反射镜。因而这系统有高增益，这样由弱输入信号就能引出大的能量。

受激振荡器的另一优点是：可以不经中间步骤从一个小振荡器跳到很大的高功率光束。还有一个缺点是使用了被动吸收体，它会大大地降低光束的质量。

测量和结果

至今仅测量了这种圆盘系统作为振荡器时的性能和增益。为了测量增益，使用了探测光束(≈ 0.02 焦耳， 0.2 厘米²)和光电探测器，情况如图 4 所示。为了使透射损失极

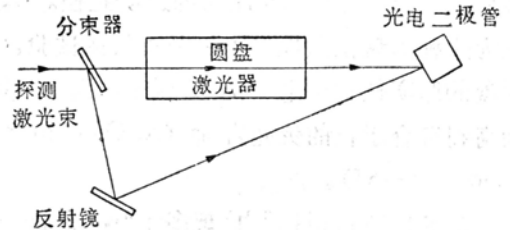


图 4 测量玻璃圆盘激光器增益的布局。

小(A. O. 1720~1%; Schott LG-55~4%)，圆盘放在激光头中。校准系统的原则是调整输入探测光束分出部分的强度，使它和直射光束的强度相等。然后圆盘激光器点火，直接光束的增加被测出来。一幅典型的示波图如图 5 所示。

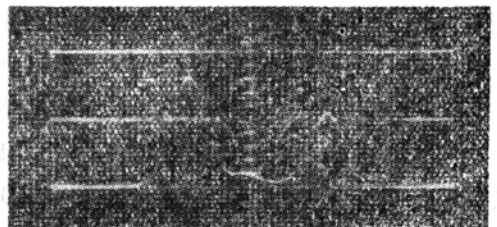


图 5 典型的增益测量示波图(5 毫微秒/厘米)。

增益与电容器电压和玻璃类型的函数关系如图 6 所示。Schott LG-55 的假振荡效

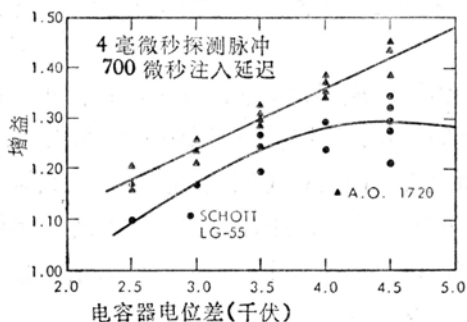


图 6 增益和玻璃种类的关系。

应能在图 7 中看到(A. O. 1720 并不表现这种效应, 因为圆柱面打磨得较粗)。图 8 给出了增益与探测光束的插入时间的函数关系。

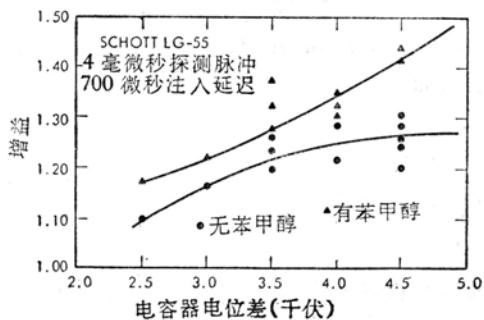


图 7 圆柱边缘浸入液体时的影响。

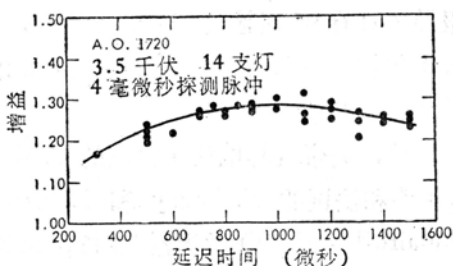


图 8 增益和探测光束延迟时间的关系。

这些图表中说明的重要情况是获得了最大增益。对于 A. O. 1720, $G_{A.O.} = 1.5$; 对于 Schott LG-55, $G_S = 1.45$ (对 4% 的透射损失作校正后, $G_S = 1.4$)。通过玻璃圆盘的路程是约为 7.5 厘米, 此增益系数是

0.08/厘米·焦耳/厘米³。由于每一圆盘具有有用体积 148 厘米³, 每圆盘的总贮存能量为 $E_{A.O.} = 100$ 焦耳, $E_S = 88$ 焦耳 (分别为 0.68 焦耳/厘米³, 和 0.60 焦耳/厘米³)。

作为振荡器, 圆盘激光器以弛豫振荡方式很好的工作。至今还不能对这种振荡器进行 Q 调制, 但却成功地获得了一次强的“自由激光作用”(见图 9)。把圆盘激光器(有 5

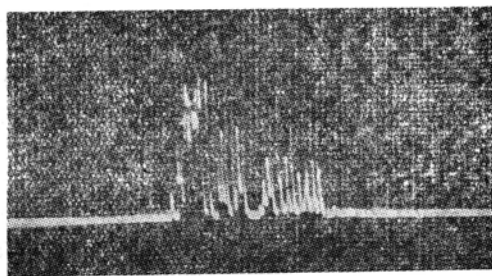


图 9 圆盘激光器的弛豫振荡(200 微秒/厘米)。

个 A. O. 1720 圆盘) 作为自由振荡器运转, 测得它的运转阈值 (99.8% 和 72% 反射镜) 为每一闪光灯 2.5 千伏, 使用了 14 支闪光灯 (输入 63 千焦耳)。可用这种运转方式检验上述的增益测量。

$$R_1 R_2 A G_{2.5}^2 = 1,$$

这里 R_1 和 R_2 是反射镜的反射率, A 是对准效率*, 而 $G_{2.5}$ 是在阈值处的单程增益。这样

$$G_{2.5} = 1 / [(R_1 R_2 A)^{1/2}],$$

这里 $R_1 = 1$ 和 $R_2 = 0.72$,

$$G_{2.5} = 1.17 / (A^{1/2}).$$

因为 $A < 1$, 故 $G_{2.5} > 1.17$ 。在 2.5 千伏下从 A. O. 1720 圆盘测得的增益为 1.18 ± 0.03 (图 6)。

* 对准效率可认为由两个项组成, 第一项是衍射损失, 第二项是对不准所引起的损失。第一项通常很小。

结 论

当圆盘激光器表现出如下几个特点时，这种概念可认为是成功的：

1. 在圆盘中能贮存大量的能量；
2. 能取得足够的增益；
3. 能忽略热和其他光学畸变；
4. 圆盘激光器能够在高功率和高亮度下运转。

每立方厘米有 0.60~0.68 焦耳时，贮存的能量是足够的。将圆盘激光器用作非共振多程放大器或用作受激振荡器时，其增益是足够的。如上所述，这些使用方法在研究之中。至今，对圆盘的热畸变以及这些畸变对激光束的影响仅作了最基本的研究。观察不到通过被泵浦的圆盘的探测光束的横模图样

有什么变化。然而，在这方面有大量工作需要做。

为了完成圆盘概念的研究，目前正在做以下的工作：（1）建立马赫-陈德尔干涉仪以研究光学畸变；（2）装配一台 15 只圆盘（12.5 厘米的孔径）的激光器以提供足够的功率；以及（3）为 15 只圆盘的装置建造一台程长 90 米的设备。

在确定圆盘激光器能否在所要求的功率和 10^{16} 瓦/厘米²·球面度的亮度下产生强冲击波和高温等离子体之前，还需作更精确的测量。

参考资料(略)

取自 J. E. Swain *et al.*, *J. Appl. Phys.*, 1969 (Sept.), 40, №10, 3973~3977

高 功 率 CO 激 光 器

这种高效率的激光器开辟了利用群集在 5 微米附近的大气窗的前景，以及利用比 CO₂ 激光波长的接收器更灵敏的接收器的前景。一些困难是存在的，但似乎能够克服。

直接激发 CO 系统，有可能产生波长为 5~6 微米的高功率高效率受激发射。但是，这种高功率的 CO 激光器工作时需要低温冷却，由于各振动带发生重迭，因而不能从单一波长上获得总能量。

直到最近，在波长 1.06~10.6 微米之间运转的激光器的功率不高，效率也不高。发射波长在上述范围内的最常见的激光器是工作波长为 3.5 和 2.02 微米的 He-Xe 激光器和波长在 1.15 和 3.39 微米的 He-Ne 激光器。但它们的典型输出功率为几十毫瓦的数量级，效率是千分之几。

1969 年 5 月在激光工程和应用会议^[1]

上报导了具有 95 瓦输出的 CO 激光器。有一台工作物质体积为 313 立方厘米的激光器的效率大于 20%。

以前，美帝贝耳电话实验室的 C. K. N. Patel^[2,3]和法国的 F. Legay 和 N. Legay-Sominaire^[4,5]对 CO 激光器(波长在 5.2 微米到 6.0 微米)已经作过相当多的实验。1968 年初，Legay 报导由 360 厘米³的激光管得到了效率为 0.25%、功率为 500 毫瓦的最佳输出。以后，他和他的同事们又从另一台预激励 CO 激光器得到 2 瓦的输出，并于 5 月在美帝圣路易召开的分子激光器会议上报导了这一进展。