

浅谈固体锁模激光器的设计、搭建和调整

马杰 南洋理工大学

感谢《中国激光》季编辑的邀请，其实挺心虚，在固体锁模激光器这块魏志义老师研究组是公认的 No.1，组里高手如云，经验丰富。好在文章定位是学生之间的分享交流，就简单说一下这几年在固体锁模激光器搭建和调整方面自己的一点经验和体会，抛砖引玉，希望能够对初入这个领域的同学有些许帮助。

首要问题：安全！“首先是自己和他人的人身安全，其次是实验仪器设备的安全”，这是自己当年初入实验室时老板们经常叮嘱的话。激光实验相比大多数实验危险性还是挺高的，尤其是涉及到自由空间中的光路传输时。激光本身引起的致盲、烧伤、测试仪器设备的损坏、以及在激光器搭建调整过程中疏忽和操作不当引起的晶体损坏，LD 击穿，烧穿纸张、衣服、显示卡、仪器外壳，甚至漏水，触电等各种问题相信很多人都有耳闻或者亲历过，所以安全问题应该是激光实验过程中最重要的问题，需要时刻谨记，不能抱任何侥幸心理，否则胆子越来越大，很可能害人害己~

一、固体锁模激光器的设计

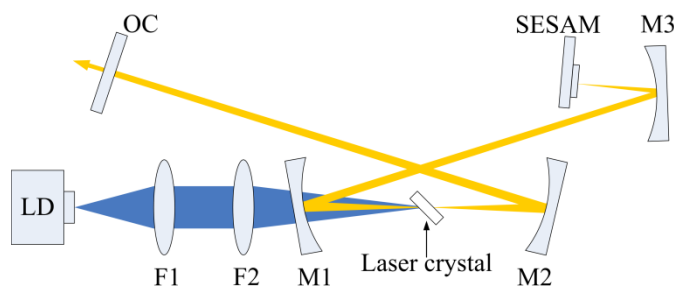


图 1. 典型的 X 型腔 LD 泵浦 SESAM 锁模激光器光路图。

对于大多数人来说，我们设计锁模激光器的目的都很单纯——无非是首先能够实现激光锁模输出，在此基础上获得想要的激光输出参数以供应用；另外从实验角度讲肯定希望得到比较牛的数据，例如非常短的脉宽，非常高的平均功率或者单脉冲能量等，如果能观察到一些新奇的物理现象就更好了，利于发 paper。锁模腔型的选择和使用多种多样，但最经典和常用的依然是 X 型和 Z 型腔以及它们的变形，图 1 给出了一个典型的 X 型腔 SESAM 锁模激光器示意图，相信很多人都非常熟悉。X 型和 Z 型腔基本的设计原则就是如果要想获得短脉冲就让激光介质中的模式小一些，增强自相位调制效应来展宽光谱，例如经典的钛宝石激光器；若要获得高的平均功率输出就增大模式，比较极端的例子就是薄片激光器。基本方法是根据实际需求或实验条件初步确定腔型和腔长的条件下，利用 ABCD 传输矩阵计算晶体和饱和吸收体位置的束腰半径/直径，选择确定合适曲率的腔镜，从而进一步确定稳区的位置和大小来指导实验，通常实际中会根据实验现象不断迭代优化，最终得到想要的结果。常用工具——Matlab、Mathematica 或者 Mathcad，这些年也有了一些专门的软件，能够提供非常多的功能和参数，有兴趣或者懒得自己码公式的同学可以研究一下。

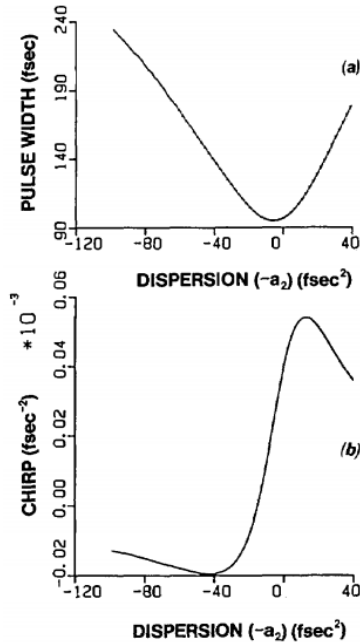


图 2. 在腔内弱自相位调制效应下锁模脉宽和啁啾量 (chirp) 与腔内二阶色散的关系[1]。

腔的参数确定了之后, 就要考虑腔镜镀膜和腔内色散补偿控制的问题。根据傅里叶变换极限, 越窄的脉宽就需要越宽的光谱来支持, 所以一般飞秒激光器腔镜镀膜都比较宽, 不过越宽的膜系价格越高, 如果进一步想要控制镜子色散的话价格就更高了, 最终镀膜宽度选择一般根据自己的应用需求和预算, 合适就好。这些年用过国内国外不少公司镀过的镜子, 自己感觉类似常用的一微米波段镜片只要镀膜够宽基本都能够支持四五十飞秒甚至更短的一些的脉冲, 除非追求周期量级输出, 否则没有必要花大价钱去控制(镜子)色散, 当然土豪可以无视。另外, 要实现飞秒锁模脉冲输出, 就必然涉及到腔内色散补偿控制的问题, O. E. Martinez 等人在 1984 年从理论上首先指出了利用腔内自相位调制和色散的平衡可以实现非常短的锁模脉冲输出[1], 而且当谐振腔内的自相位调制效应一定、二阶总色散量为负并且接近零色散时, 能够得到最短、但是稍微带点啁啾(chirp)的锁模脉冲, 如图 2 所示。目前常用的谐振腔内色散补偿元件: 棱镜对、啁啾镜和 GTI 镜。其中棱镜对属于优缺点都十分鲜明的一种元件, 优点是能够实现腔内色散的“在线”调整, 也就是可以在保持激光器锁模运行条件下变化腔内色散, 真的是懒人福音, 十分方便; 但是在激光器搭建的时候相对其它两种对光路有些麻烦, 而且一般不可避免引入损耗——输出降三分之一甚至一半是常有的事, 同时如果输出镜位置在棱镜之后还会引入空间啁啾, 若锁模脉宽非常短, 也就是光谱非常宽的话通常需要在输出镜之后再对称加入一对棱镜来补偿一下。相对而言, 利用啁啾镜和 GTI 镜作为色散补偿元件光路简单很多, 同时可以避免棱镜对引入的功率损耗和空间啁啾问题, 虽然无法“在线”控制色散, 但改变反射次数可以方便的实现对腔内色散量的调整, 近年来在锁模激光器中的应用越来越广泛。

最后就是输出镜的选择, 通常开始为了实现连续锁模输出会选择输出小一些的输出镜, 保证腔内单脉冲能量能够达到连续锁模的阈值, 但最终输出镜透过率的确定还是看追求什么,

追求超短脉冲就尽量选用小输出的输出镜，通过增强自相位调制效应来展宽光谱，这时平均输出功率会降得比较低；追求高平均输出功率就适当调高输出镜的透过率，此时脉宽就很难做短——鱼与熊掌不可兼得。同样，在设计和实验的过程中也能够发现其实任何一个锁模参数的追求都是有成本的，例如追求小的激光光斑相应的瑞利长度就会变短，这就有点失去追求小光斑的意义了，对应稳区范围也会变小甚至非常敏感，给谐振腔的调整带来困难；镜子带宽和色散补偿元件的选择也存在类似的问题，所以最终激光器各个参数的确定往往是根据实际情况和需求做出取舍后一个平衡的结果。

二、谐振腔的搭建和调整

谐振腔设计好后，接下来的事情就是如何利用一堆镜片、调整架、支杆、平移台等搭建出一个完整的锁模激光器。当年刚开始面对光秃秃的光学平台和一堆零散的元件真的挺茫然，完全无从下手的感觉，后来做的比较多了之后发现其实每个组甚至每个人在谐振腔的搭建方面都有自己的风格，例如腔型的选择、光路的高度、移动和固定元件的确定等等，但是总的原则和出发点都基本相同——既要安全、又要便于调整，还要尽可能有利于后续不同监测和测量仪器设备的放置和调试。举个栗子，例如 X 型腔光路一般不要离光学平台边缘太远，否则折叠之后两个端镜可能距离平台边缘很远，调整光路经常需要绕着光学平台两边跑，非常不方便；但离平台太近也可能有问题——有些平移台的可能会伸出平台外边缘，不小心的话容易碰到，从而破坏整个谐振腔，前功尽弃。

搭好后调节激光器的第一步——出光，这是有无问题，保证出光才可能进一步优化功率、尝试锁模。以 Yb 晶体五镜腔锁模为例，我们习惯是首先搭一个两臂等长的四镜腔，这样两个稳定区之间没有间隔/分裂，稳定区范围相对很大，用尺子大概量一下两个凹面镜之间的距离，在计算的稳定区范围中心附近或者稍大两于凹面镜焦距之和几个毫米就可以，晶体位置同样放在稳区中心附近，这样只要光路能够对准，一般可以保证出光。出光之后就可以对谐振腔进行功率优化，以尽量减少不确定量，然后利用 SESAM 臂漏出的光对 SESAM 进行俯仰和倾斜对准，如果不出光就尝试移动一下凹面镜 M2，移到稳区范围内五镜腔基本就可以对好了。常见的 Nd, Yb 掺杂晶体发射截面比较高，对于光路对准要求不太高，实验做得多有了经验后分分钟可以调出来；两微米波段的 Tm 掺杂晶体相比起来对准要求就苛刻很多，一般需要些耐心和手感才行。

那么问题来了：谐振腔搭建过程中如何对光路进行对准？这个貌似大家所用的方法五花八门，我们在实验室常用的方法是利用泵浦光进行校准。对于端面泵浦的锁模激光器来说，由于腔内基本不存在折射型光学元件（晶体除外），不同波长的泵浦光和激光在腔内的路径基本可以认为是一样的，所以可以利用泵浦光来辅助进行光路对准。有同学可能会想：“泵浦光通过激光介质后不应该去全部从 M2 透射出去了吗？那怎么利用泵浦光对准？”理论上 M1 和 M2 的确对泵浦光高透，但高透≠全透，实际镀膜中也很难做到，我们一般要求透过率>95%就可以，所以总会有少量泵浦光留在腔内可以用来做光路对准用。由于泵浦光大部分仍然是不可见光，这时候就需要用红外观察卡/上转换片来进行观察，对于常用的 800-1000nm 波段，这些观察卡一般都非常灵敏，很容易找到光斑的位置。如果你镀膜实在太好，泵浦很弱，那就关灯+加大泵浦，要说还看不见，反正我是不太信~

具体操作我们还以等臂长的四镜腔为例，一般首先调节泵浦光出射端凹面镜（如图 1 中的 M2）对应的那一臂，这一臂经由凹面镜反射的泵浦光相对很强，很容易调节端镜/输出镜使反射光与入射光重合，也就是沿原路反射回去；调节好后再调节光比较弱的另外一臂，这一臂大多数情况下光斑也比较好找，同样调节端镜使反射光斑尽可能与入射光重合，运气好的话三下五除二就可以出光，人品没那么好就尽量先定准高度的一维，然后通过转镜子慢慢扫左右的那维，盯着输出镜后的红外观察卡或者功率计，耐心点总是可以调出来的。要真的大半天都调不出光，就要从头开始检查确认一下腔有没有问题，包括各个元件之间的距离、镜片的镀膜和曲率、聚焦的好坏、泵浦的功率以及晶体的冷却等等，确认没有问题之后再仔细调一段时间，还不出光话的也就别调了，运气背了调到怀疑人生都不会有效果，最好的方法就是出去攒攒人品，隔半天或一天再回来接着做——有时候人品，或者说运气和手感真的很重要。

除了用泵浦光对准，也有不少人用荧光辅助调节，包括直接用红外观察卡看以及利用光谱仪看，红外观察卡观察荧光对准的方法和上边提到的用泵浦光对准方法基本是一样的，实际应用中有时会两者结合起来；光谱仪看荧光的方法有点危险，就是粗略调好谐振腔后直接把光谱仪放到输出镜后端，首先调节另外一端镜看荧光强度的变化，调到最强后固定，接着再调节输出镜一端，在接近出光的位置荧光强度会发生剧烈变化，这时候赶快移走光谱仪，泵浦功率也最好不要太强，否则很可能把光谱仪搞挂了。不过荧光辅助调节的方法目前只适合近红外波段，对两微米及以上中红外波段完全无能为力，主要是没有足够灵敏的观察卡片，另外光谱仪要么同样不够灵敏、反应慢，要么太贵，万一打坏了实在得不偿失。

“看见有光，心中不慌”，出光了就离锁模近了好多步，至少是有了希望。一般出光后首先优化各个元件使输出功率最大，有时候在优化过程中直接就能看到锁模信号，但大部分情况下还是需要一点一点的慢慢调整。通常可以先大范围的调整一遍谐振腔，使心中对稳定区范围有一个大致的了解，如果饱和吸收体的启动能力足够强，调整过程中应该比较容易看到调制甚至锁模信号，这时候要做的工作就是根据探测器和示波器的监测信号调整优化各个元件的位置以及腔镜的对准，另外还有泵浦强度和聚焦等，直至实现稳定的连续锁模输出。但实际情况一般不会那么美好，经常会遇到锁模很难启动的现象，有时甚至连调制信号都没有，这时可以有意将谐振腔调整到稳区的边缘，调整过程中不时加一些扰动，观察输出信号的变化，在锁模信号相对最强的位置进行优化并最终实现锁模输出。另外，调整过程中尽可能保证激光器处于基模运行状态，只有基模运行时饱和吸收体才更容易达到饱和阈值，从而实现启动和维持锁模的目的。

总的来说，固体锁模激光器的搭建和调整相对于连续和调 Q 激光器还是有一定的门槛，另外很多时候实现了锁模可能只是万里长征的第一步，尤其在孤子锁模区，在腔内的非线性和色散、增益和损耗、以及增益带宽等因素共同作用下激光器可能收敛到各种不同的锁模状态，想要得到期望的锁模参数往往要经过一个非常系统化的优化过程，这就需要对实验中观察到的各种物理现象和细节有比较深刻的认识和理解，能够快速找到不同问题的可能

原因和解决方法。因此只有多看（文献）、多做（实验）、多想，不断地学习和思考，提高自己的认识和实验水平，才能不断地对激光器进行优化，最终得到期望的实验结果。

参考文献：

[1]. O. E. Martinez, R. L. Fork, and J. P. Gordon, "Theory of passively mode-locked lasers including self-phase modulation and group-velocity dispersion," Opt. Lett. 9(5), 156–158 (1984)