

频率分裂与模竞争系统

频率分裂与模竞争系统是通过扫描干涉仪观察激光器输出的纵模模式,可以实现:(1)激光纵模模式偏振态的观察(2)石英晶体频差-转角曲线的测量(3)应力双折射元件频差-应力曲线的测量(4)模竞争现象的观察(5)出光带宽的测量。这些与激光纵模模式相关的观察和测量通过采集卡采集和 Labview 编程实现。

2.1 原理

激光纵模是指沿谐振腔轴向的稳定光波振荡模式,光学谐振腔内沿腔的轴线方向形成驻波要满足谐振腔长是激光半波长的整数倍。用公式表示为:

$$L = \frac{1}{2} \lambda q \quad q = 1, 2, 3, \dots, \infty \quad (2.1)$$

则谐振频率为:

$$\nu_q = \frac{c}{2L} q \quad (2.2)$$

其中 L 是激光器的腔长, λ 是光波长, c 是光速, q 是驻波的波节数,通常将由整数 q 所表征的腔内纵向场分布称为腔的纵模。

当往谐振腔内插入具有双折射效应的光学元件,如石英晶体或应力双折射片后,一束光通过晶体会分解成偏振态互相垂直的 o 光和 e 光,两光有不同的折射率 n' 和 n'' 。折射率不同会使 o 光和 e 光在谐振腔内有不同的物理腔长,从而使他们有不同的出射频率,即发生频率分裂。

不考虑纵模序数 q , 对(2.2)式两边微分得:

$$d\nu = \frac{-c}{2L^2} dL \quad (2.3)$$

即

$$d\nu = -\nu \frac{dL}{L} \quad (2.4)$$

其中, $dL = L_e - L_o$ 是双折射晶体引起的 o 光和 e 光的光程差, $d\nu$ 则是由光程差引起的频差。频差绝对值可以表示为:

$$\Delta\nu = \frac{\nu}{L} \Delta L \quad (2.5)$$

由上式可见,频差的大小随光程差的大小而变。因此往腔内插入石英晶体后,旋转石英晶体, o 光和 e 光在晶体内的光程差改变,激光器输出的频差大小随之

改变。若腔内插入应力双折射元件，则激光器输出频差随着应力片径向所受压力大小的变化而改变。本实验系统采用半外腔 He-Ne 激光器，在激光增益管和外腔镜之间插入石英晶体或应力片，可产生从 40MHz 到上百兆赫兹连续可调的频差输出，用扫描干涉仪可进行观察和后续实验。

当频差小于 100MHz 时，分裂的两个频率在增益线上的烧孔有重叠部分，则会争夺反转粒子数，从而产生模竞争现象。且频差越小，烧孔重叠面积越大，模竞争就越激烈。对于我们所用的中心波长 632.8nm 的 He-Ne 激光器，当频差小于 40MHz 时，强烈的模竞争会使其中一个频率因为获得的增益很小而熄灭。而频差太大时，两模式烧孔几乎没有重叠，模竞争又不明显。因此，要观察到模竞争，两个频率的间距（频差）要合适。因此可以基于频率分裂技术将频差调整到合适值以观察模竞争。

2.2 频率分裂与模竞争系统相关实验

2.2.1 整体实验装置

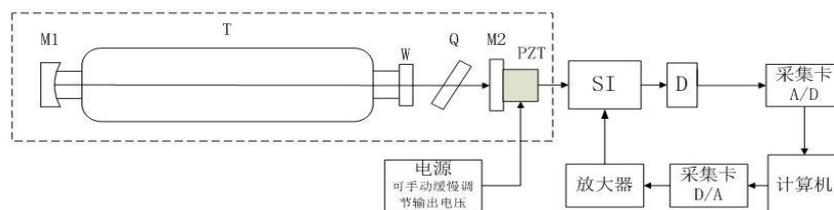


图 2.1 频率分裂与模竞争实验系统框图

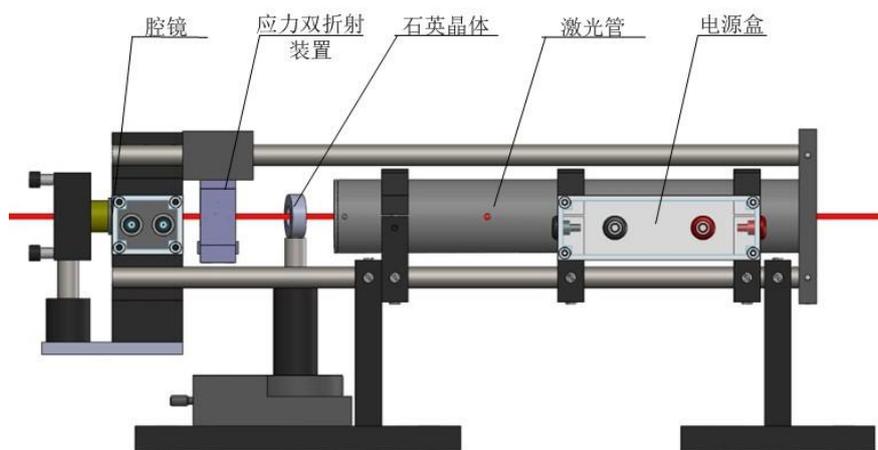


图 2.2 频率分裂与模竞争系统机械结构图

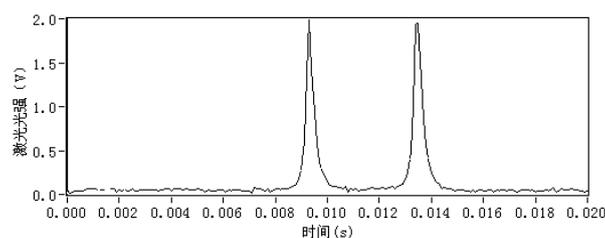
频率分裂与模竞争实验系统的结构框图如图 2.9 所示，虚线框部分与图 2.2 的机械结构相对应。其中 M1 和 M2 为腔镜，T 为激光增益管，W 为增透窗片，

Q 为石英晶体。腔镜 M2 与压电陶瓷 PZT 相连，加在 PZT 上的电压由外接电源控制，可手动调节，从而缓慢调谐腔长。

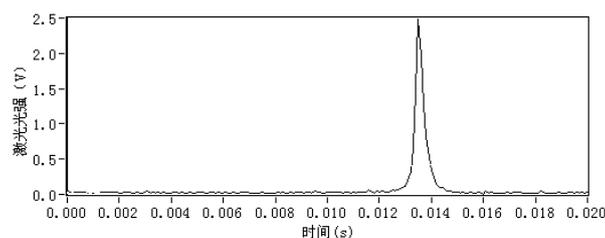
在系统的全部零件组装好后，先用叉丝法调节激光器出光，将光强调到最大。随后，计算机控制采集卡 D/A 输出连续周期变化的三角波电压，经放大后驱动扫描干涉仪 SI 的 F-P 腔前后移动。调节扫描干涉仪，令激光器输出的光束经扫描干涉仪后形成两个闪烁的两点，再微调扫描干涉仪的俯仰使亮点最亮，用光电探测器 D 接收。探测到的光强信号经电路转换为电压信号后再用采集卡 A/D 转换采集到计算机中显示出来，从而可以观察到各个激光模式，读出峰值大小和频差。

2.2.2 激光模式偏振态的观察

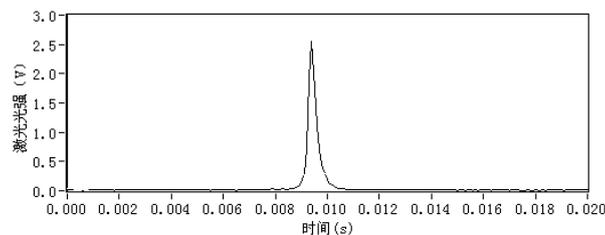
令石英晶体的晶轴与光轴的夹角为 0，即没有频率分裂。激光器输出双纵模，实测纵模间隔 $\Delta = 425.5\text{MHz}$ 。在输出镜 M2 和扫描干涉仪 SI 之间插入偏振片，旋转偏振片使两个纵模光强相等，如图 2.3(a)所示。



(a) 偏振片 60°



(b) 偏振片 15°



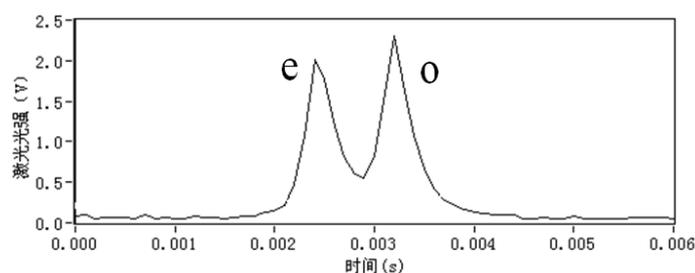
(c) 偏振片 105°

图 2.3 激光纵模偏振态的观察

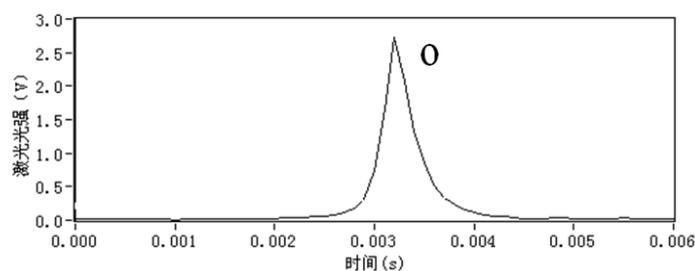
随后，缓慢旋转偏振片，右边纵模的光强逐渐增大，左边纵模的光强逐渐减

小，当偏振片转到 15 度时，只有右边的纵模通过偏振片由扫描干涉仪输出，且光强达到最大，如图 2.3(b)所示。再继续旋转偏振片，左边的纵模光强逐渐增强到最大，同时右边纵模光强减小到 0，如图 2.3(c)所示，记下此时偏振片读数为 105 度。两个纵模分别消失时对应的偏振片正好转过 90 度，因此可以得出结论，激光的纵模模式为线偏振光，且相邻纵模偏振态互相垂直。

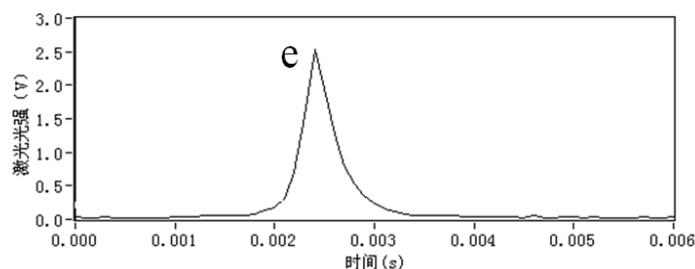
同理，对于频率分裂产生的 o 光和 e 光，也可验证它们偏振态的关系。旋转石英晶体使激光纵模发生频率分裂，如图 2.4(a)所示。在旋转偏振片的过程中，频率分裂产生的 o 光和 e 光依次消失，且 o 光消失和 e 光消失时相应的偏振片读数也差 90 度，如图 2.4(b)和 2.4(c)所示。说明频率分裂产生的两个模式偏振态互相垂直。



(a) 偏振片 60°



(b) 偏振片 15°



(c) 偏振片 105°

图 2.4 频率分裂模式偏振态的观察

2.2.3 频差-转角曲线的测量

先令石英晶体的晶轴与光轴夹角为 0，即没有频率分裂，记此时石英的位置为 0 度。随后旋转石英晶体，每旋转 0.5 度，测量一次频差的大小。从 0 度旋转

到 28 度，测得的频差—转角曲线如图 2.5 所示。

由曲线可知，频差的大小与石英晶体的转角成非线性的关系，且具有周期性。具体而言，当转角小于 4 度时，由于强模竞争的存在，频差处于闭锁区，没有频率分裂现象。频差为 4 度时，开始产生频率分裂，原本的一个纵模上出现两个距离很近的尖峰，测得频差为 59.5MHz。继续增大转角，频差也逐渐增大， $\theta = 10^\circ$ 时出现第一个尖峰，频差为 292.9MHz。接着，频差开始减小。在 $\theta = 14^\circ$ 的位置减小到 53MHz，随后观察不到频率分裂现象。当转角增大到 15 度，频率分裂又开始出现。在 $\theta = 18^\circ$ 时出现第二个频差极大值，为 342MHz。随后又开始减小，从 20.5 度开始再次进入频差闭锁区。如此反复。随着 θ 增大，频差变化的周期越来越小，这是因为随着 θ 的增大石英晶体的双折射效应增大的越快。

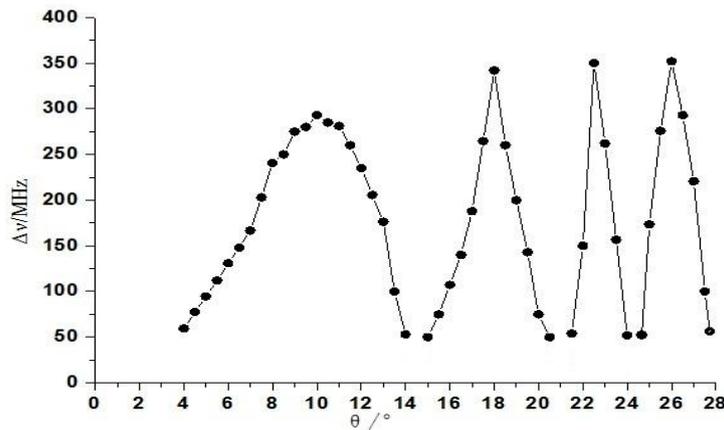


图 2.5 石英晶体频差—转角曲线

在 28 度之前，共有四个频差极大值，相应石英晶体的转角分别为 10 度、18 度、22.5 度和 26 度，对应的频差大小为 292.9MHz、342MHz、350MHz 和 352MHz。最大频差与实测纵模间隔 425.5MHz 还差大约 70MHz，这是由于频差较大时，q 级纵模的 o 光与 q+1 级纵模的 e 光竞争所致。此外，还共有四个区域处于频差闭锁区，分别是 0~4 度、14~15 度、20.5~21.5 度和 24~24.5 度。

由理论分析 2.1.1.3 节，相对频率分裂量的大小与腔长无关，仅与光程差和波长有关。因此通过测得的频差—转角曲线，将频差值除以纵模间隔，得到相对频率分裂量，在一定角度范围内，即可得到相对频率分裂量-角度的对应关系。据此，可作为高灵敏度、高精度的测角原理。

2.2.4 频差-应力曲线的测量

将石英旋转装置换为应力装置，即可测量由应力双折射效应引起的频差大

小。用大口径螺纹付通过应力加载装置给应力片沿径向加力，通过应力传感器可以得到施加应力大小，同时可以通过示波器读取频率裂频差的大小。应力传感器工作时需要供电电压 Q （一般为 $5V < Q < 12V$ DC），其满量程 M （N）和输出灵敏度 S （mV/V）为出厂时提供，当应力传感器感受到未知压力 F （N）后，其输出电压值 a （mV）可通过万用表测量得到，当应力传感器测量满量程时，其电压输出值为 QS （mV）。

由于压力 F 与电压值 a 是线性关系，具体公式如下：

$$\frac{a}{QS} = \frac{F}{M}$$

$$F = \frac{M * a}{QS}$$

例如压力传感器的量程为 20kg（196N），输入电压 A 为 5V，其输出灵敏度 S 为 2.5mV/V，则其满量程时的输出电压为 12.5mV，假如万用表测量得到的电压值为 10mV，则对应的压力 F 为 $196 * 10 / (5 * 2.5) = 156.8N$ 。

实际使用时，用万用表测量输出电压的大小，同时在示波器上观察、测量频差的大小。样机测得的频差—应力曲线如图 2.6 所示。

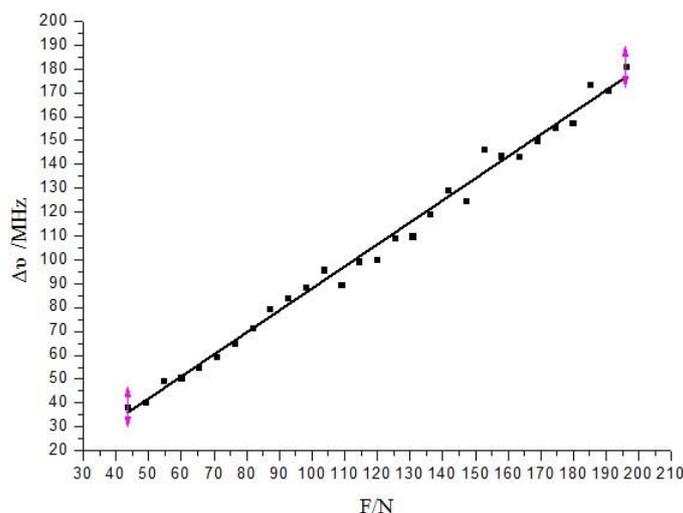


图 2.6 应力双折射元件的频差—应力曲线

由图 2.6 可知，应力双折射元件产生的频差大小与径向所受压力成线性关系，与理论分析式(2.10)相符。拟合成的直线斜率为 $K = 1MHz / N$ 。还可注意到，当应力值小于 43.56N（压力传感器输出电压小于 4mV）时观察不到频率分裂现象，

这也是由于频差在闭锁区时强烈的模竞争所致。

2.2.5 模竞争现象的观察

模竞争现象的观察通过调谐腔长来实现。将频率分裂装置换为石英晶体，初始时两模式的光强状态如图 2.7(a)，由于石英晶体是正晶体， $n_o < n_e$ ，则 o 光的物理腔长小于 e 光， $L_o < L_e$ ，因此 o 光的谐振频率大于 e 光。图中右边的模式表示 o 光，左边是 e 光。

用高压电源控制腔镜 M2 的压电陶瓷，可手动旋转电源上的调节旋钮，使 PZT 缓慢伸长，则腔长缓慢减小。可以观察到，两模式都沿频率轴右移，且在移动的过程中，o 光光强逐渐减小，同时 e 光光强逐渐增大，直到图 2.7(f)中 o 光完全消失，两分裂模呈现了此消彼长的过程。两光光强互相抑制的原因，是由于它们争夺同一部分增益粒子（反转集居数），这就是激光的模式竞争。

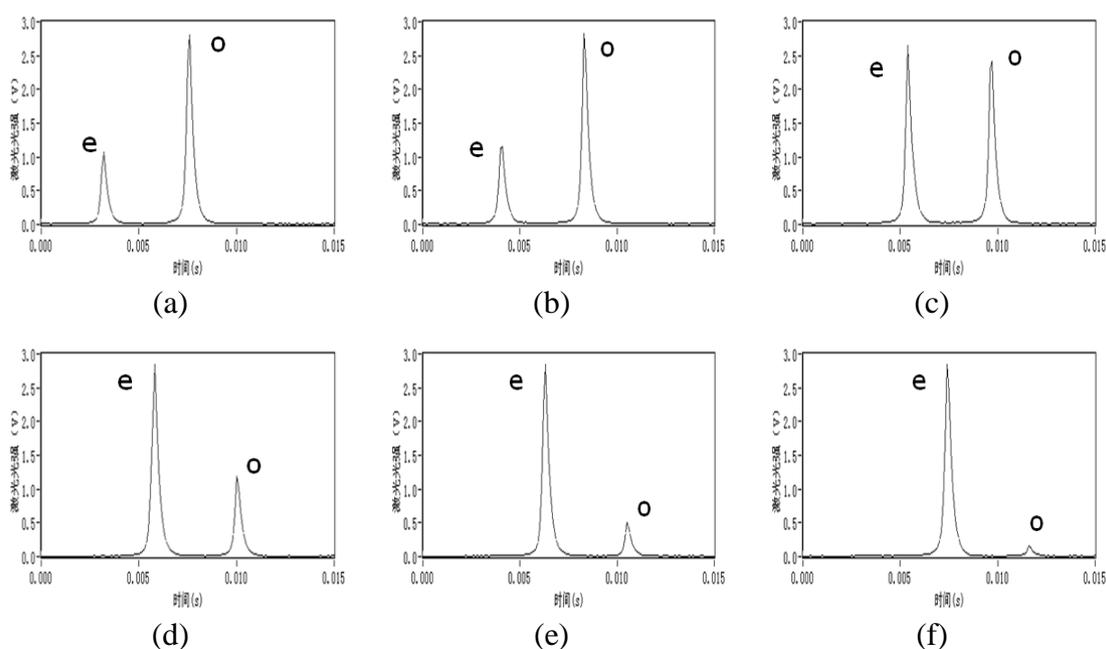


图 2.7 模竞争现象的观察

2.2.6 出光带宽的测量

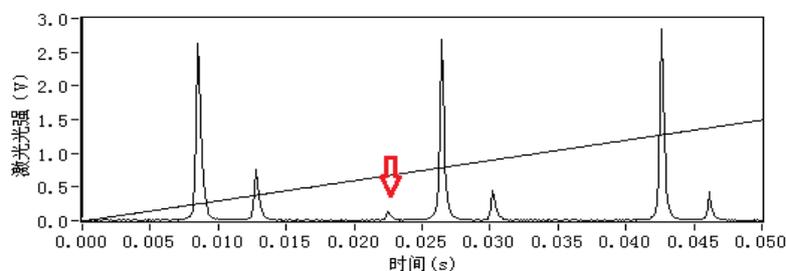
在调谐腔长的过程中，不仅可以观察到模竞争现象，还可测量激光出光带宽的大小。调整石英晶体光轴与光线夹角为 0，即没有频率分裂，某时刻激光器输出模式为三纵模。关注箭头所指的模式，如图 2.8(a)所示，此时它刚刚出现，即刚进入出光带宽，记下它在时间轴（频率轴）上对应的位置是 0.0225s，在减小腔长的过程中，该模式逐渐扫过出光带宽。由于在出光带宽的中心处增益最大，因此它的光强也先增大，光强最大时如图 2.8(b)所示，对应时间轴的位置是

0.0267s。继续减小腔长，该模式光强又逐渐减小，到 0.031s 时即将移出出光带宽，如图 2.8(c) 所示。从刚进入出光带宽到即将移出对应的时差为 $0.031s - 0.0025s = 0.0085s$ 。同时，图中扫描干涉仪一个自由光谱区对应的时间差为 0.0182s。

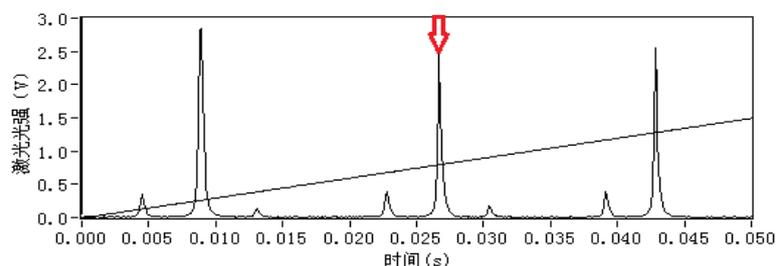
由于扫描干涉仪的作用相当于使激光模式(频率)在时间轴上线性排列输出，因此出光带宽的大小为：

$$\Delta W_b = 1.8G \times \frac{0.0085}{0.0182} = 840.67\text{MHz}$$

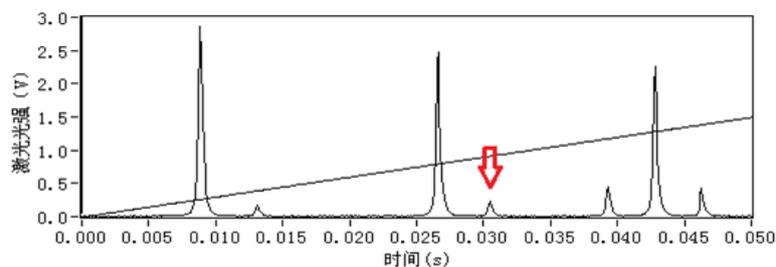
还可注意到，该模式光强(增益)最大时对应的位置为 0.0267s，几乎为出光带宽的中心位置，因此可以判断增益线是关于谱线中心对称的。



(a) 刚进入出光带宽



(b) 移到出光带宽中心



(c) 即将移出出光带宽

图 2.8 出光带宽的测量

2.3 仪器尺寸

长度：50cm

宽度：19cm

高度：19cm

2.4 附件

与仪器相关的配件有：

- (1) 激光电源
- (2) 压电陶瓷驱动电源
- (3) 微机电源
- (4) 扫描干涉仪
- (5) 光电转换装置
- (6) 偏振片

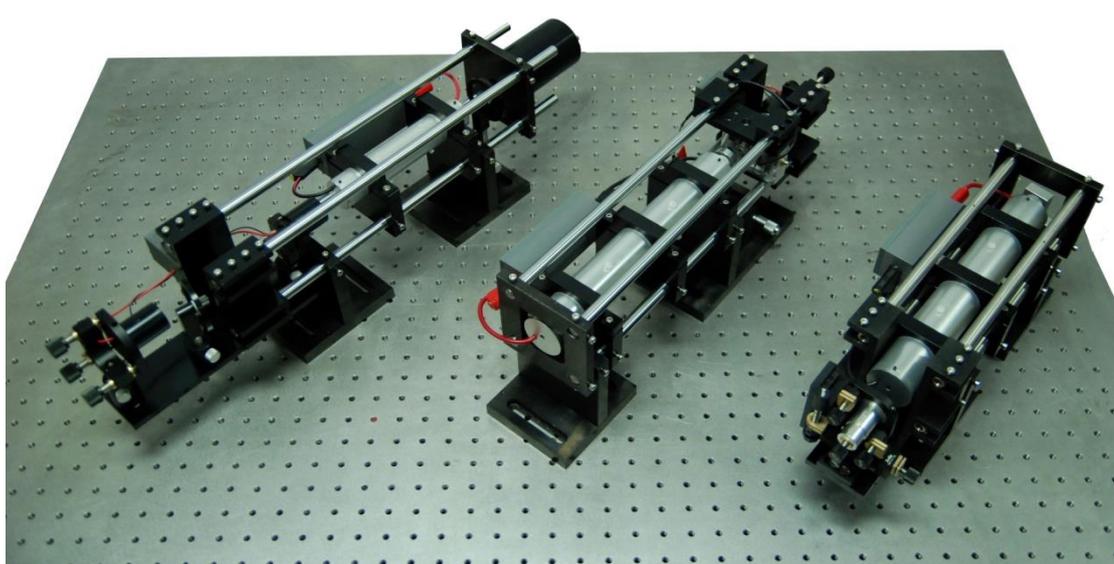


图 2.9 教学仪器整体照片

从左至右依次为：腔长调谐和激光回馈系统、频率分裂与模竞争系统、横模演示系统