

## 实验简介

利用激光脉冲产生亚毫米电磁波脉冲式近年来十分活跃的研究领域。许多种不同的光子和光电子技术被用来激发自由空间的太赫兹宽频带电磁波辐射。常见的光致电磁辐射有两种：光生电流效应和脉冲激光光整流效应。光生电流效应是指介质中的光生载流子（电子~空穴对）在内部或外加电场下作变速运动而辐射电磁波的过程。光生载流子的激发时间和入射激光脉冲的宽度相同,而其寿命则决定于介质的衰减机制。脉冲激光光整流效应则是一种非线性光学效应,是指光和非线性介质的相互作用而产生低频电极化场的过程。这种随时间变化的电极化场辐射电磁波,其辐射电磁波的振幅强度和频率分布决定于脉冲激光的特征和介质的非线性性质。

## 实验原理

本虚拟仿真实验主要包含了电光采用技术及光路优化调节、光的偏振检测及实验结果的模拟与分析三大模块。在电光采用技术及光路调节中,需要进行操作交互,使光路系统达到最优。在光的偏振检测中,需要结合光的偏正特性,选择合适的检测方案并进行参数调整,获得需要的实验结果,帮助学生理解和掌握光偏振检测原理。最后在实验结果与分析模块中,根据不同的材料和激光特性产生仿真的实验结果,让学生做结果处理和总结讨论。下图是实验原理图。

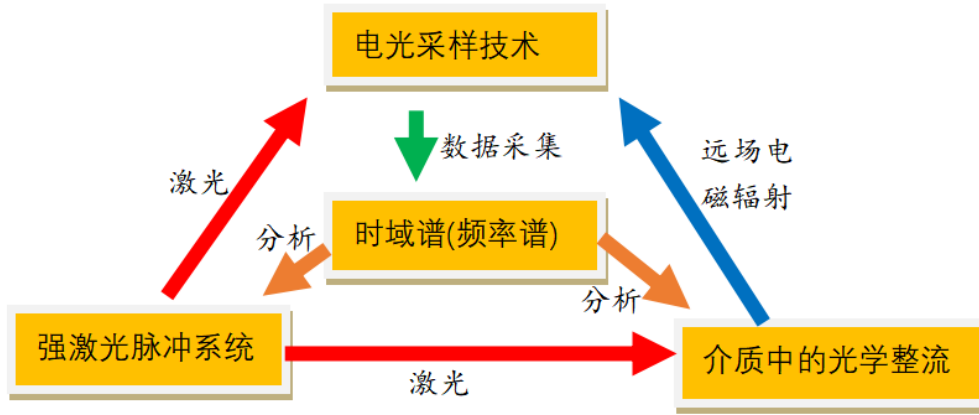


图 1 实验原理

### 1. 光学整流效应原理

在光致极化的二阶项中，假设两束电磁波  $E_1(t) = A_1(t)\cos(\omega_1 t)$  和  $E_2(t) = A_2(t)\cos(\omega_2 t)$  垂直入射到一块介质的表面， $A_{1,2}(t)$  为振幅， $\omega_{1,2}$  为角频率。那么它们的二阶非线性极化强度可表示为

$$\begin{aligned} P^{(2)}(\omega = \omega_1 \pm \omega_2) &= \chi_{ijk}^{(2)}(\omega) A_1(t) A_2(t) \cos(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t) \\ &= \frac{1}{2} \chi_{ijk}^{(2)}(\omega) A_1(t) A_2(t) [\cos[(\omega_1 - \omega_2)t] + \cos[(\omega_1 + \omega_2)t]] \\ &= P_{\Delta}^{(2)}(\omega) + P_{\Sigma}^{(2)}(\omega) \end{aligned}$$

当入射的两束波是绝对相同的，即  $A_1 = A_2$ ， $\omega_1 = \omega_2$ 。则上述等式变为

$$P^{(2)}(2\omega = \omega + \omega) = \frac{1}{2} \chi_{ijk}^{(2)}(2\omega) A^2(t) + \frac{1}{2} \chi_{ijk}^{(2)}(2\omega) A^2(t) \cos(2\omega t) = P_{\Delta}^{(2)}(0) + P_{\Sigma}^{(2)}(2\omega)$$

这个结果中包含有两个与入射波的振幅相关的非零项。其中， $P_{\Delta}^{(2)}(\omega)$  与入射波频率大小无关，所表征的即为光学整流效应。

对于脉冲电磁波情况， $P_{\Delta}^{(2)}(\omega)$  将会与脉冲时间相关，它会在远场激发一个振幅随时间变化的电磁辐射。利用这种机制可以产生太赫兹波。通过对太赫兹波的检测可以分析光学整流效应的产生机制。图 2 显示了太赫兹波与光学整流效应的关系。

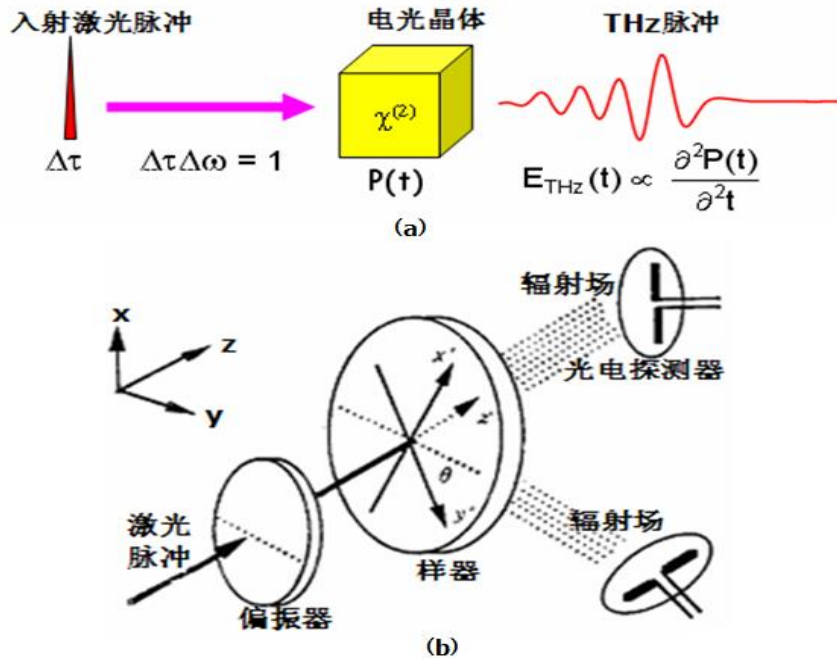


图2 (a) 利用光整流产生太赫兹, (b) 太赫兹光整流效应的原理

## 2. 线性电光效应

电光晶体在没有外加电场时, 晶体的折射率在  $x_0$ 、 $y_0$ 、 $z_0$  三个方向上是相等的。当存在外加电场时, 且电场方向平行于  $z_0$  坐标轴, 那么此时晶体的折射率椭球就可以表示为

$$\frac{x^2}{n_0^2} + \frac{y^2}{n_0^2} + \frac{z^2}{n_0^2} + 2r_{41}E_0xy = 1$$

外加电场最终使得折射率在  $z$  轴方向上没有变化, 但是却使  $x, y$  轴上有一个绕  $z$  轴的  $45^\circ$  旋转。在新坐标轴下, 折射率为

$$\begin{aligned} n_x &\approx n_0 + \frac{1}{2}n_0^3r_{41}E_0 \\ n_y &\approx n_0 - \frac{1}{2}n_0^3r_{41}E_0 \\ n_z &= n_0 \end{aligned}$$

这是在电光晶体表面正入射一束平面波, 其偏振方向与  $z$  轴成  $45^\circ$ 。因为电磁波的偏振在  $y$  轴没有分量, 所以只会对折射率

在  $x$  轴和  $z$  轴分量有影响,而  $x$  轴与  $z$  轴分量的变化互相之间没有联系。由于电磁波在  $x$  轴和  $z$  轴方向上传播的相速不同,那么入射电磁波在经过晶体后两分量之间会形成一个相位差。

$$\Delta\phi = \frac{\omega(n_x - n_z)d}{c} = \frac{1}{2} \frac{\omega n_0^3 r_{41} E_0 d}{c}$$

其中,  $\omega$  为入射电磁波的角频率。由上式,我们可以看到,在经过非线性晶体后,入射电磁波所获得的相位延迟与晶体上所加电场的振幅成正比,那么对晶体外加电场振幅的测量就可以转化为对入射电磁波分量间相位延迟的测量。

### 3. 自由空间电光采样技术

根据非线性晶体的一阶效应即普克尔效应,加在晶体上的电磁辐射脉冲的电场会在其内部形成一个双折射。那么,一束线偏光在经过上述晶体后,就会获得一个小的椭圆偏振。根据最初的估算,椭圆度的增加将正比于晶体所加的电磁辐射的电场。当电磁辐射的周期远大于光波探针的周期,那么在探测中我们就可以将电磁辐射的电场近似的看做直流电场。只需不断变化光波探针与电磁辐射脉冲(如太赫兹脉冲)之间的相位时间差,那么这个脉冲的整个时域剖面就被绘制下来,如图3所示。

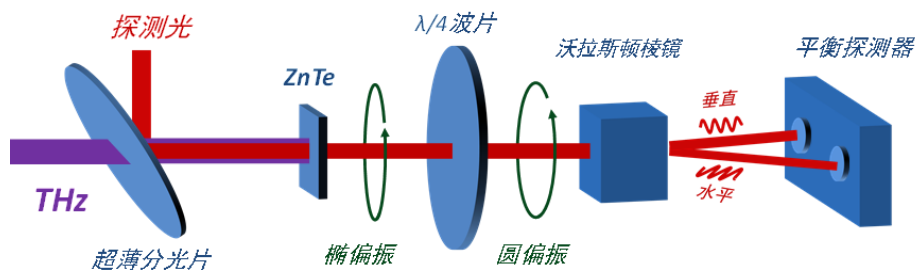


图3 自由空间电光采样示意图

### 4. 时间延迟的实现

实现皮秒级时间分辨测量的原理，需要将两束脉冲光之间设定一定的光程差，这样两束光到达样品的时间就会有先后，从而使这两个脉冲光之间产生时间延迟。如果需要两束光之间产生皮秒级的时间延迟，只需要将这两束光之间的光程差设为毫米级即可。

## 实验内容

进入实验开始思政内容学习，学习完毕后进入预习自测部分。

操作目的：帮助学生巩固学生预习的内容，以便顺利完成后期实验操作。

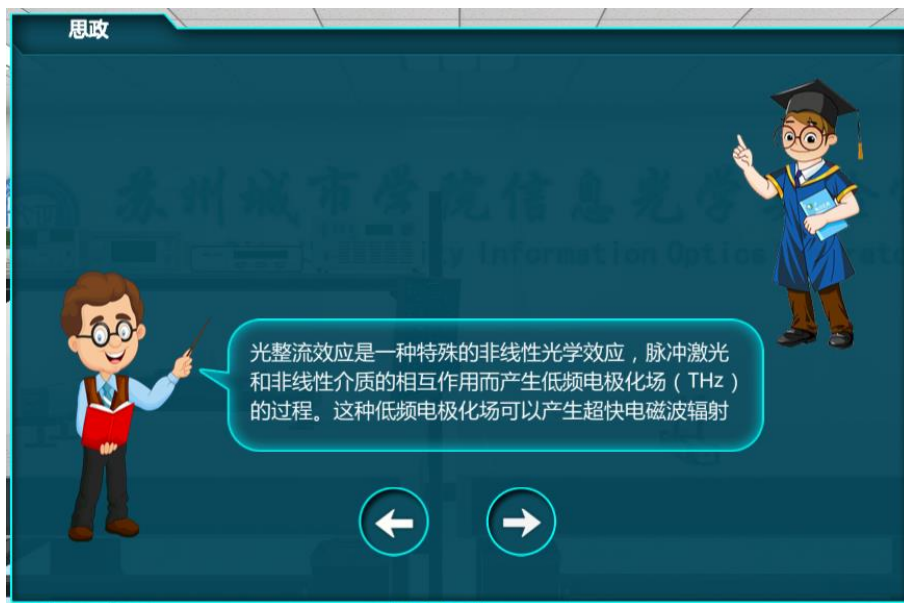


图 4 预习讲解

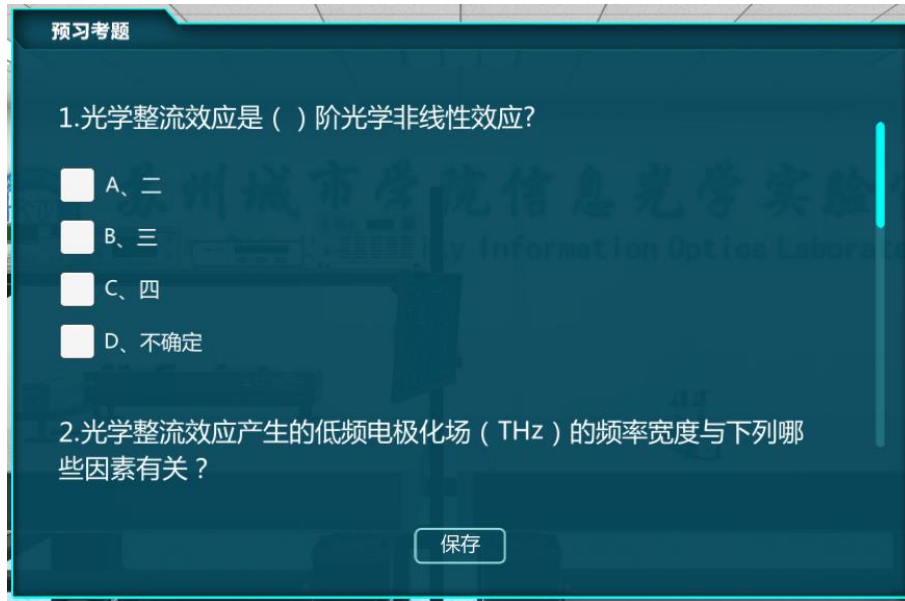


图 5 预习考题

## 1. 项目一：光路搭建

### 1) 调节激光扩束准直

**操作目的：**进行扩束和准直可以为后面的电光采样提高系统测量灵敏度。

**操作过程：**根据现有光束直径算出需要的扩束镜参数，然后利用白屏调节光束准直性。

### 2) 分束镜分束

**操作目的：**选择合适的分束镜将激光分束，使得探测光与泵浦光分光比约等于 1：9。

**操作过程：**在界面中选择分束镜，设置参数，通过能量计确定参数的准确性。

### 3) 泵浦光光路搭建

**操作目的：**通过光学整流效应，产生太赫兹辐射。

**操作过程：**泵浦光束会聚入射进光学非线性晶体并用抛物

面反射镜收集太赫兹辐射后会聚于电光晶体上。晶体放置位置一定要在泵浦光束的焦点上。实际操作中要使用红外夜视仪看到太赫兹辐射，然后才能用抛物面反射镜进行收集和会聚。

#### 4) 探测光光路搭建

**操作目的：**调整探测光的延迟光路，到达电光晶体的光程与泵浦光的光路中光程基本一致。

**操作过程：**移动平移台处于移动范围的中心时对两路光的光程差进行测量，尽量使这个光程差接近零。

#### 5) 遮挡泵浦光

**操作目的：**产生太赫兹辐射中不能在混入泵浦光，不然会影响电光晶体中的探测结果。

**操作过程：**在反射镜之间的光束准直部分放入遮光板，这个遮光板的选择需要能透过太赫兹辐射。

#### 6) 探测光偏振方向调整

**操作目的：**最大化探测光在经过晶体后在两个方向上的分量之间会形成一个相位差。

**操作过程：**调整探测光偏振方向和电光晶体光轴方向，通过观测探测光经过电光晶体的偏振状态来确定方向的调整是否合理。

#### 7) 共线调整

**操作目的：**探测光需要准确透过电光效应发生的区域才能探测到信号，所以探测光与太赫兹辐射场入射到电光晶体

的同一区域。

**操作过程：**因为太赫兹辐射不能直接用肉眼观察，需要通过红外夜视仪来确定太赫兹辐射照射在电光晶体上的位置。在通过光斑位置的初步重合后，可以根据平衡探测器的信号来判断是否准确共线。

#### 8) 平衡探测

**操作目的：**电光晶体没有附加相位差时平衡探测器上得到的信号应该最小，平衡探测器上信号表面了电光晶体附加的相位差大小。

**操作过程：**通过调整  $1/4$  波片的方向把探测光的线偏振光变成圆偏振光，这样在透过沃拉斯顿棱镜后 o 光和 e 光的强度相同，平衡探测器上得到的信号最小。

#### 9) 干燥箱放置

**操作目的：**太赫兹光易受到空气湿度的影响，通过将降低太赫兹环境的湿度，提高太赫兹信号测量准确性。

**操作过程：**将太赫兹产生和电光晶体之间的光路至于干燥箱中，打开氮气阀门，观察干燥箱中温湿度计，湿度低于 20% 即可进行下一步骤。

## 2. 光学整流效应测量

### 1) 太赫兹时域谱预测量

**操作目的：**确定正确的延时光路中平移台移动范围和太赫兹电场最大时的平移台位置。



**操作过程：**设定平移台起始位置：-50 mm，终止位置：50mm，步长：0.03mm，测出时域谱。根据时域谱，确定正确的延时光路中平移台移动范围和太赫兹电场最大时的平移台位置。

#### 2) ZnTe 晶轴方向与太赫兹辐射强度测量

**操作目的：**在确定入射光偏振方向的基础上，调整 ZnTe 晶体的晶轴方向来观察光学整流效应的强弱。

**操作过程：**在保证入射角的情况下，调整晶体的晶轴方向，观察介质内的光学整流效应发生情况。

#### 3) ZnSe 晶轴方向与太赫兹辐射强度测量

**操作目的：**观察不同晶体中光学整流效应的不同。

**操作过程：**更换 ZnSe 晶体的不同晶向样品和不同晶体材料样品重复测试。通过分析测得的数据，计算获得晶体的非线性系数。

#### 4) 测量太赫兹信号时域和频域谱

**操作目的：**测得太赫兹信号频域谱。

**操作过程：**先利用电光采样测得太赫兹信号时域，再通过傅立叶变换得到频域谱。

#### 5) 测量样品透射率

**操作目的：**测量不同样品透射率。

**操作过程：**先在没有样品的情况下测得干燥空气的频率谱，放入样品，使得太赫兹辐射穿透样品，然后测量频率谱，通过比较这两个频率谱得到透射谱。

### 3.实验拓展

#### 1) 测量样品反射率

**操作目的：**重新设计太赫兹辐射光路，测量样品的反射率。

**操作过程：**通过平面反射太赫兹辐射后再探测太赫兹辐射，然后把平面反射镜用样品代替的德方法来测量样品的反射率。

## 实验仪器

### 1. 飞秒激光器

飞秒是一种时间单位，1 飞秒只有 1 秒的一千万亿分之一，在 1 飞秒之内，光只能走  $0.3 \mu\text{m}$ ，这只是不到一根头发丝的百分之一。



## 2. 凹透镜

凹透镜亦称为负球透镜，镜片的中间薄，边缘厚，呈凹形，所以又叫凹透镜。凹透镜对光有发散作用。与凸透镜组成扩束镜。



## 3. 凸透镜

凸透镜是中央较厚，边缘较薄的透镜。凸透镜有会聚光线的作用故又称会聚透镜，较厚的凸透镜则有望远、会聚等作用。与凹透镜组成扩束镜。



#### 4. 平面反射镜

凸透镜是中央较厚，边缘较薄的透镜。凸透镜有会聚光线的作用故又称会聚透镜，较厚的凸透镜则有望远、会聚等作用。与凹透镜组成扩束镜。



## 5. 小孔光阑

可调节大小的小孔光阑。



## 6. 1/2 波片

一定厚度的双折射晶体，当法向入射的光透过时，寻常光(o光)和非常光(e光)之间的位相差等于 $\pi$ 或其奇数倍，这样的晶片称为二分之一波片，简称半波片。



## 7. 1/4 波片

四分之一波片又称“四分之一推迟板”。一定波长的光垂直入射通过时，出射的寻常光和异常光之间相位差  $1/4$  波长。在光路中它常用来使线偏振光变为圆偏振光或椭圆偏振光；或者相反。这种波片通常采用双折射材料沿平行于光轴方向切割制成平行平板，其厚度应精确地为双折射材料两个主轴折射率差和给定波长  $1/4$  的乘积的奇数倍。用旋光材料制成的能使入射光偏振面旋转  $\pi/2$  的奇数倍的波片也称为四分之一波片。



## 8. 偏振器（格兰棱镜）

光束入射于格兰-汤普逊棱镜的平面与对应平行的平面称为“通光面”，方解石晶体的光轴垂直于反射平面（称为“光轴面”），两块直角棱镜之间是“胶合剂界面”。在第一块方解石，双折射会将入射光束分开为两束，各自感受不同的折射率沿着同样路径传播。在胶合剂界面，寻常光（o光）会被全反射，只剩下非常光（e光）被透射，因此，格兰-汤普逊棱镜可以用为偏光分束器。



## 9. 光屏

光屏就是一面可以接收光的屏幕，光屏的作用一个用来接收光，虚像不能用光屏承接到，因为没有实际光线射到光屏。





## 10. 分束镜

在光学玻璃上镀制半反射膜，改变入射光束原来的透射和反射的比例的种光学元件。



## 11. 半透半反镜

透过太赫兹光，反射激光。



## 12. 能量计（光功率计）

用于测量不同光源的 UV 能量。



## 13. 非线性晶体

非线性光学晶体是对于激光强电场显示二次以上非线性光学效应的晶体。非线性光学晶体是一种功能材料，其中的倍频（或称“变频”）晶体可用来对激光波长进行变频，从而扩展激光器的可调谐范围，在激光技术领域具有重要应用价值。



## 14. 电光晶体

非线性光学晶体是对于激光强电场显示二次以上非线性光学效应的晶体。非线性光学晶体是一种功能材料，其中的倍频（或称“变频”）晶体可用来对激光波长进行变频，从而扩展激光器的可调谐范围，在激光技术领域具有重要应用价值。



## 15. 抛物面反射镜

反射面为一抛物面的镜。



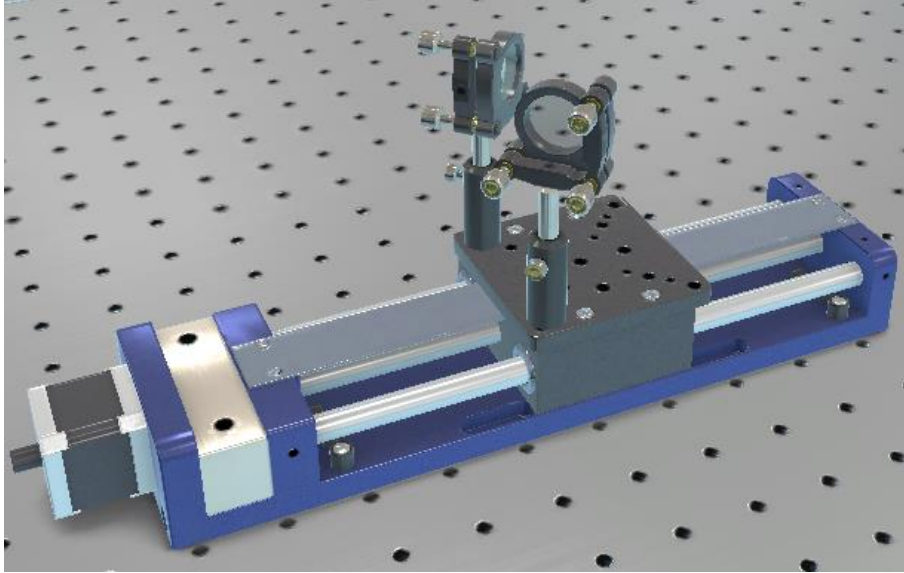
## 16. 挡光板

不透明塑料材质，阻挡激光，透过太赫兹光。



## 17. 精密位移台+2\*反射镜

精确移动仪器的平台，平台上放置两个反射镜。



## 18. 沃拉斯顿棱镜

一种光学器件，能产生两束彼此分开的、振动方向互相垂直的线偏振光。它是由两个直角棱镜组成的，中间用甘油或蓖麻油粘合。



## 19. 平衡探测器

用于记录脉冲太赫兹（THZ）辐射。它的特点是可以直接集成光学和内置锁定放大器。



## 20. 样品



## 21. 红外夜视仪

实验使用的飞秒激光波长为 780nm，通过红外夜视仪，观察激光更加清楚。



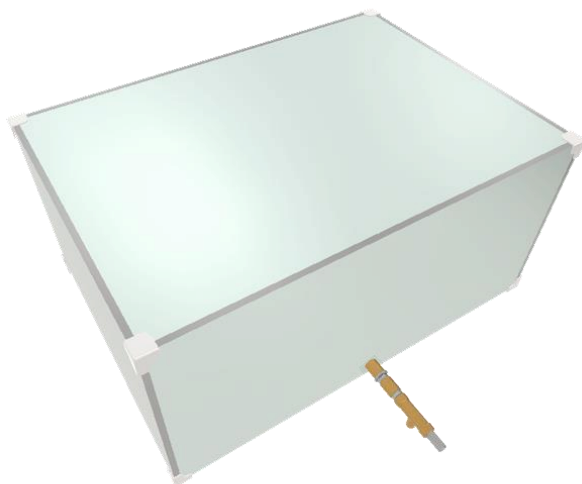
## 22. 斩波器

将连续光调制成为有固定频率的光，同时输出调制频率。通常是与锁相放大器配合使用。



## 23. 干燥箱

空气中水汽会吸收太赫兹波长的电磁波，用玻璃罩保护。



## 实验指导

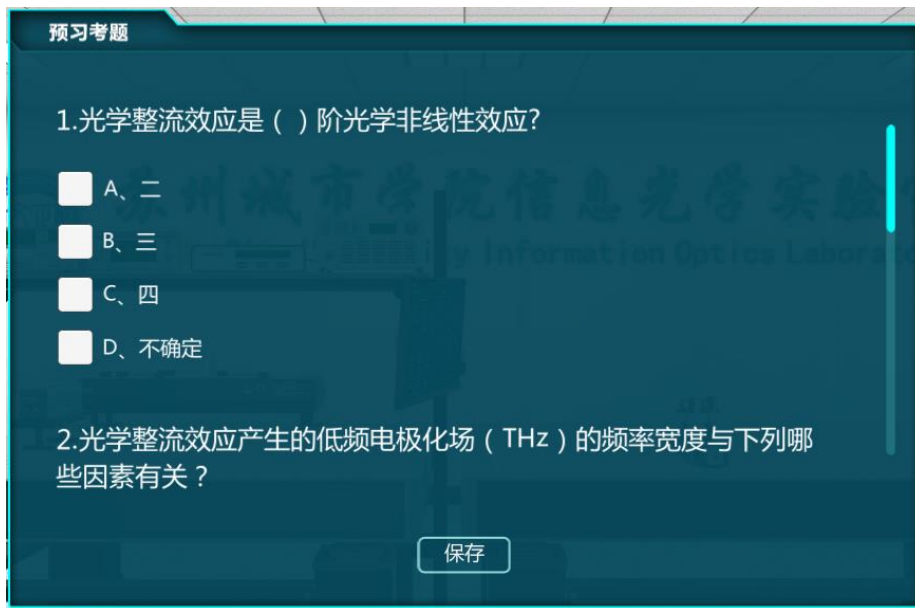
**思政：**

打开程序，首先进入“思政”部分介绍背景、理论知识。





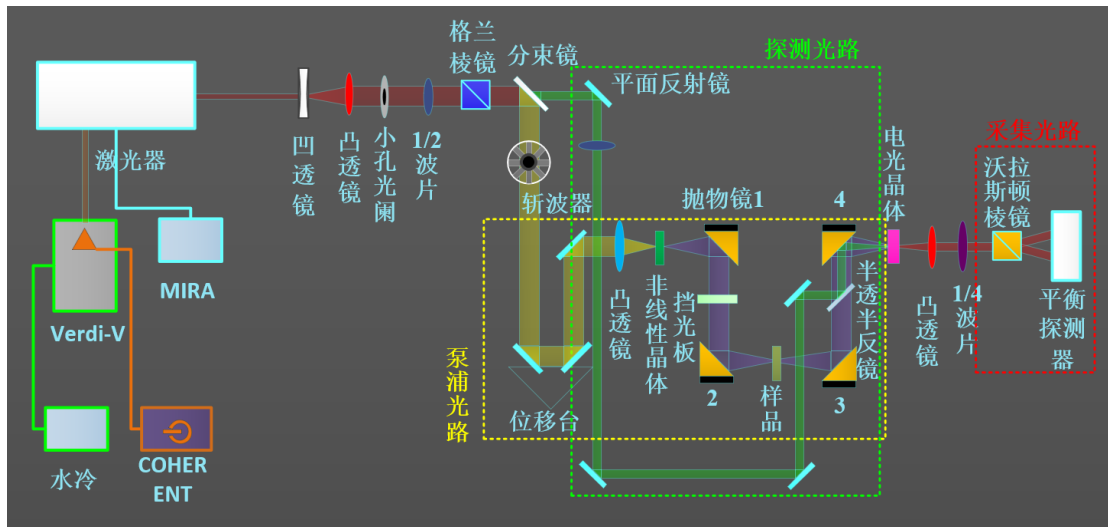
预习结束后进入“预习自测”部分。



结束预习自测后，进入实验操作部分，默认进入学习模式。

## 5.1 光路搭建

光路预搭建项目，实验人员根据光路图搭建光路系统。该部分进行步骤考核。

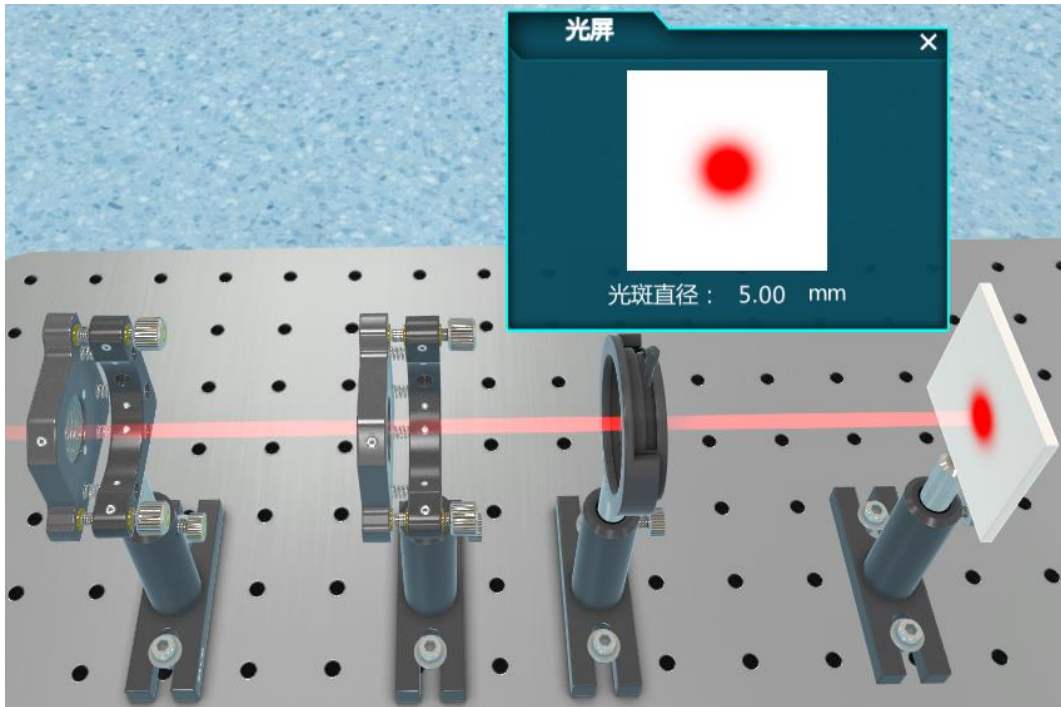


### 1. 调节激光扩束准直

(1) 按照顺序打开激光器（开启水冷→Verdi 电源打开→MIRA 打开）；

(2) 仪器栏中拖出凹透镜（ $f=-5\text{cm}$ ）、凸透镜（ $f=10\text{cm}$ ）、小孔光阑（ $d=5\text{mm}$ ）和光屏；

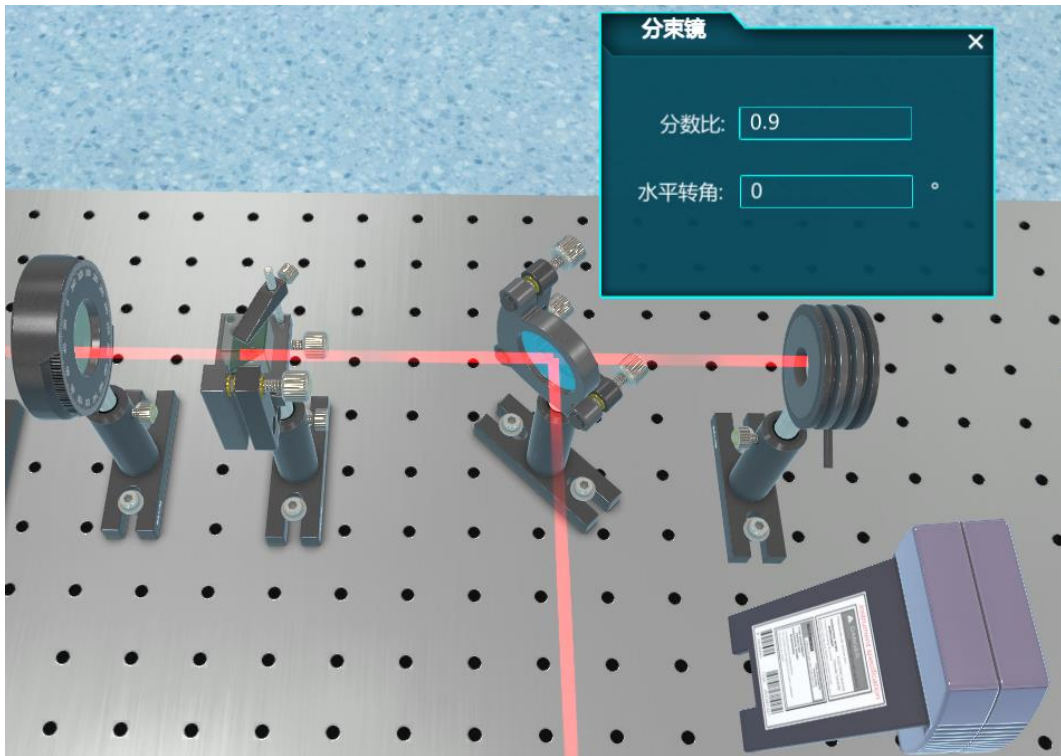
(3) 点击光路图，根据提示摆放仪器，调节凹透镜和凸透镜距离使焦点重合，光屏在任意位置光斑都为  $5\text{mm}$ ，则扩束准直调节完成；



## 2. 分束镜分束

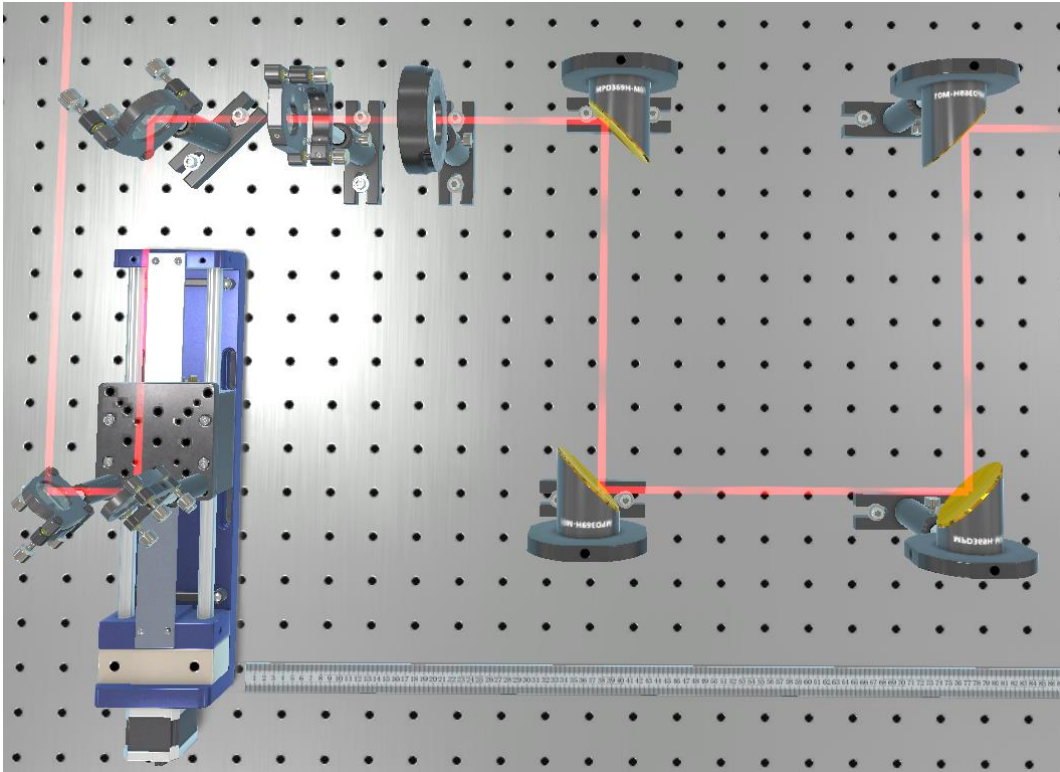
(1) 按光路图放置  $1/2$  波片、格兰棱镜、分束镜，使激光通过镜片中心；

(2) 调节分束镜参数，光功率计检测探测光：泵浦光=1：9，则分束镜分束完成；



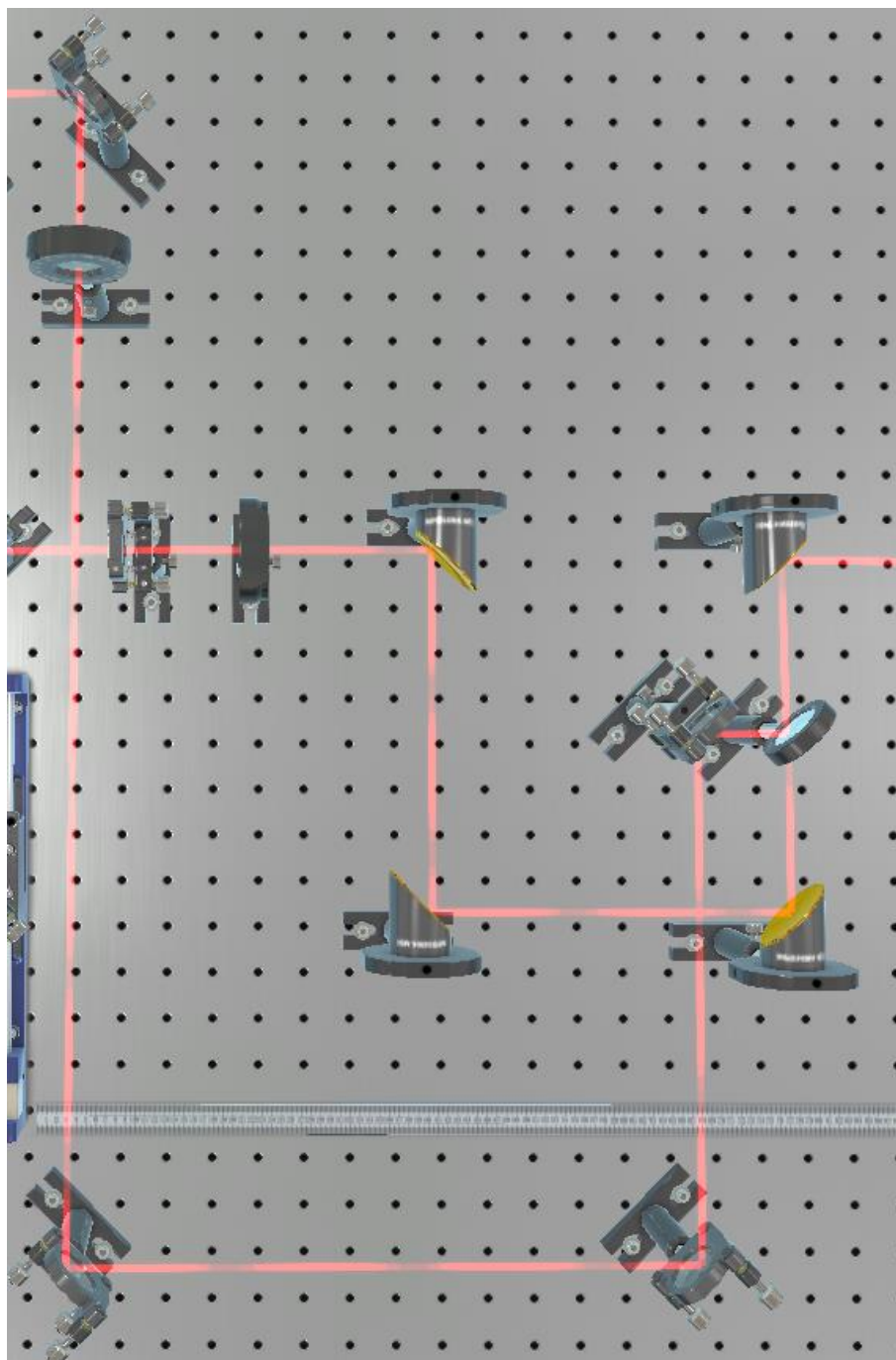
### 3. 泵浦光路搭建

- (1) 根据光路图搭建泵浦光路（使用 10cm 焦距抛物面反射镜）；
- (2) 调节非线性晶体位置，使得泵浦光汇聚于非线性晶体；
- (3) 调节 4 个抛物面反射镜，使得反射镜收集和会聚点准确；



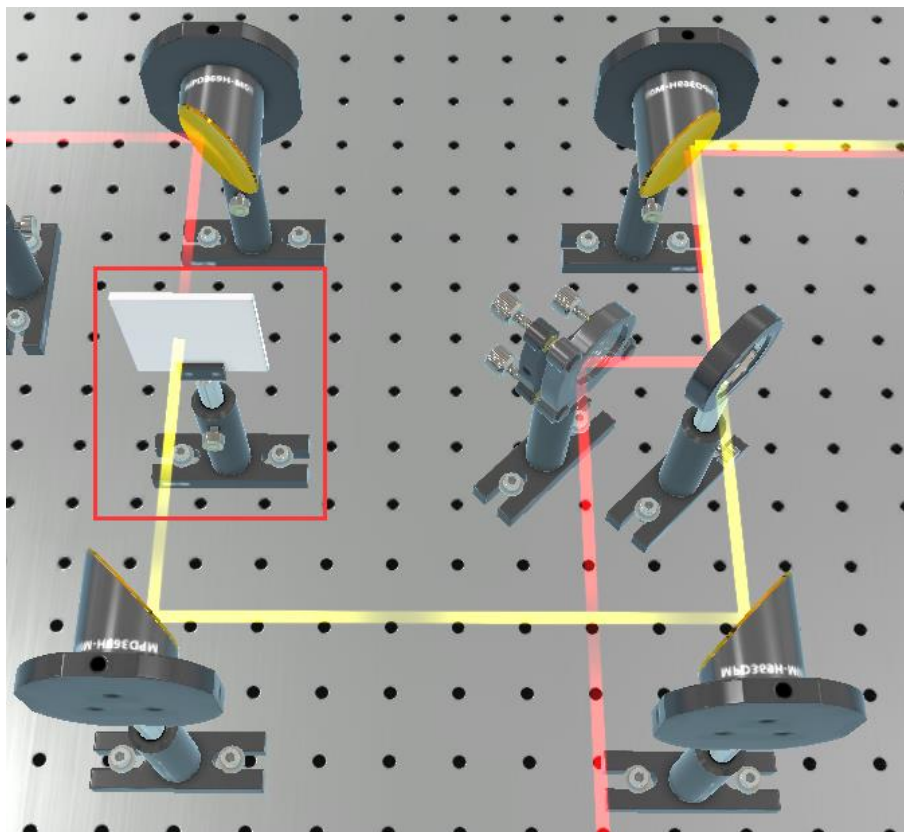
#### 4. 探测光路搭建

- (1) 根据光路图搭建探测光路，调节探测光的延迟光路；
- (2) 拖动尺子测量探测光和泵浦光到达半透半反镜的光程，若相等则探测光路搭建完成；



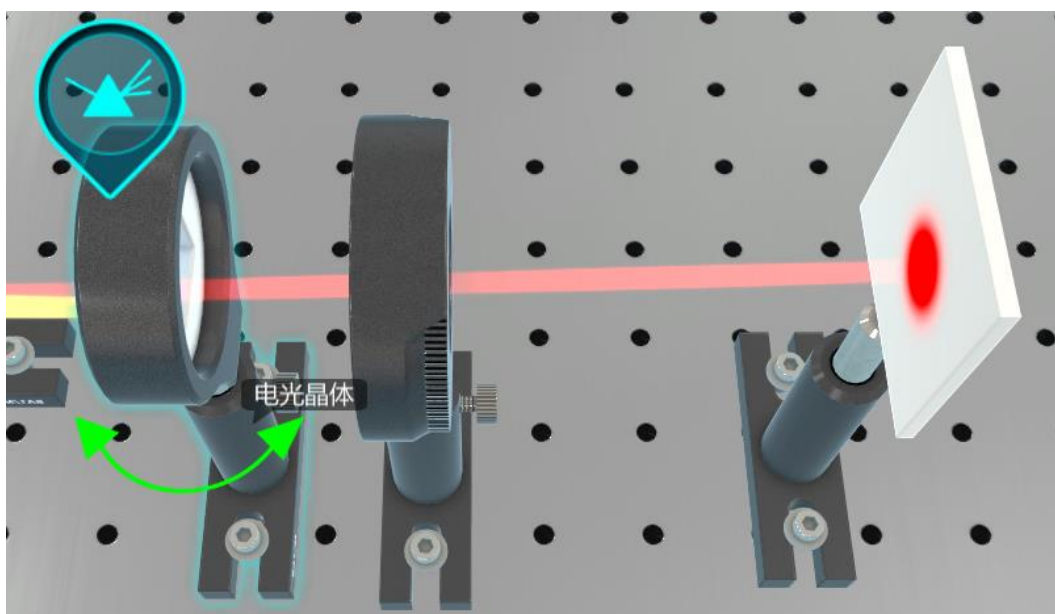
## 5. 遮挡泵浦光

(1) 拖动遮光板置于反射镜之间的光束准直部分，遮挡泵浦光；

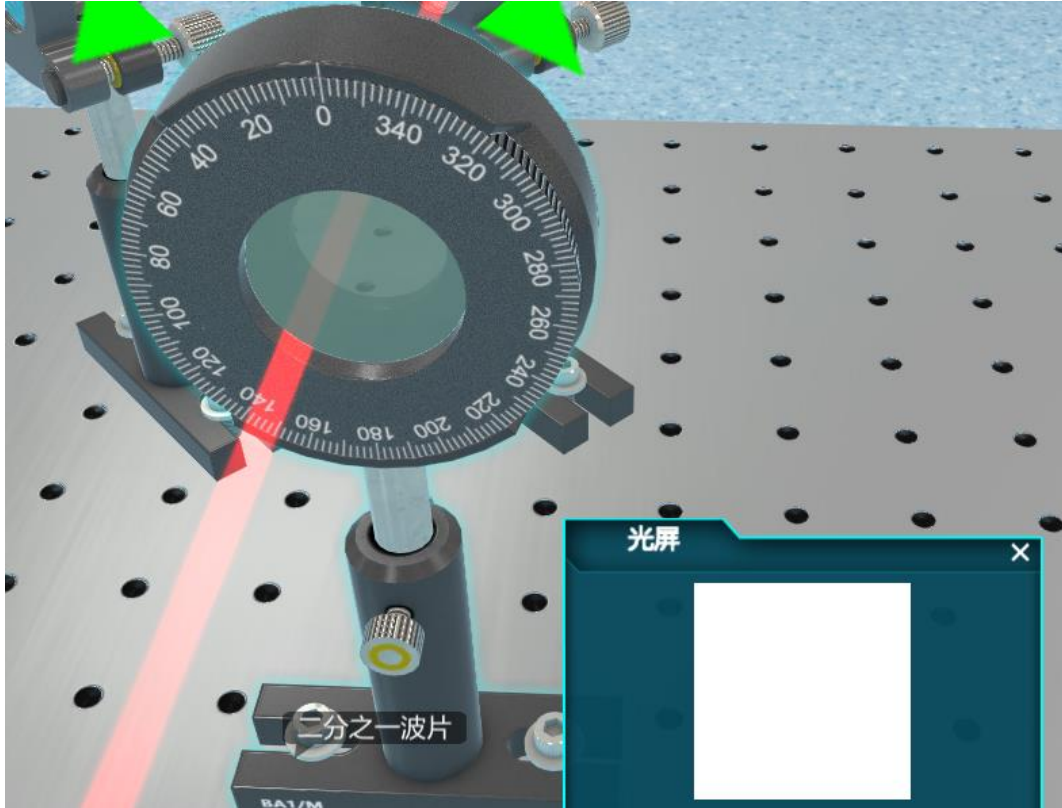


## 6. 探测光偏振方向调整

(1) 根据光路图放置电光晶体，电光晶体后放置偏振片，偏振片后放置光屏；

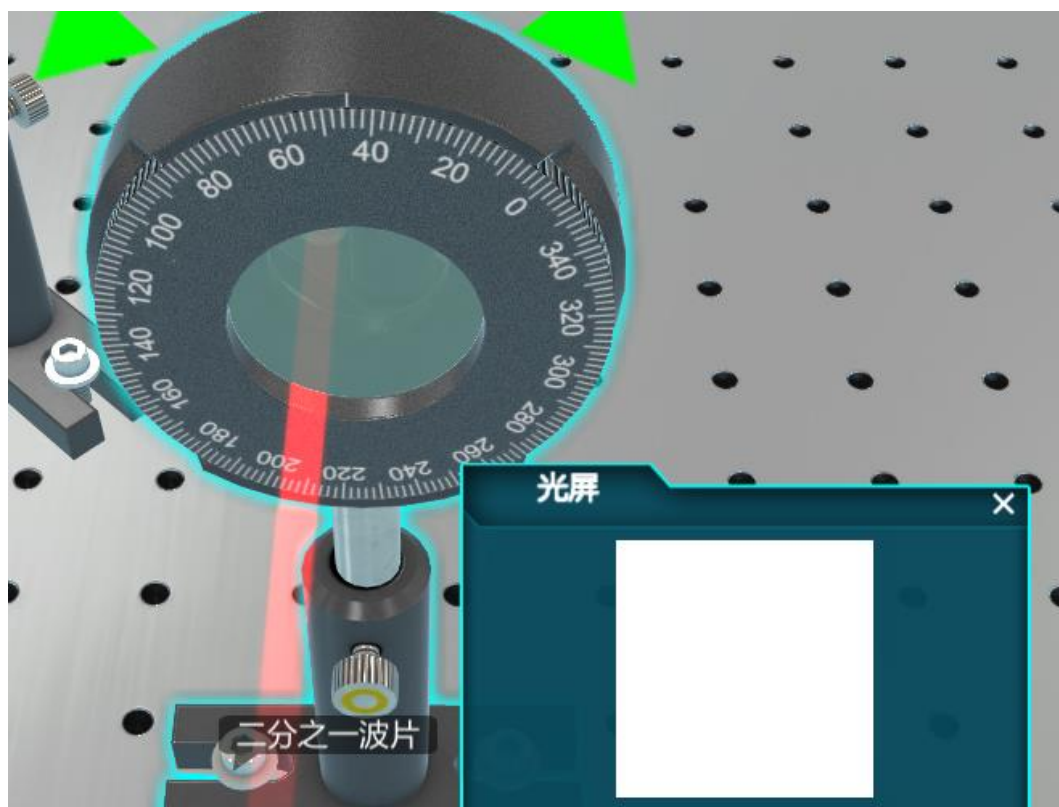


(2) 偏振片设置  $90^\circ$  ，调节探测光路  $1/2$  波片快轴角度  $0^\circ$  附近，当光屏上没有光斑时，记录  $1/2$  波片角度；

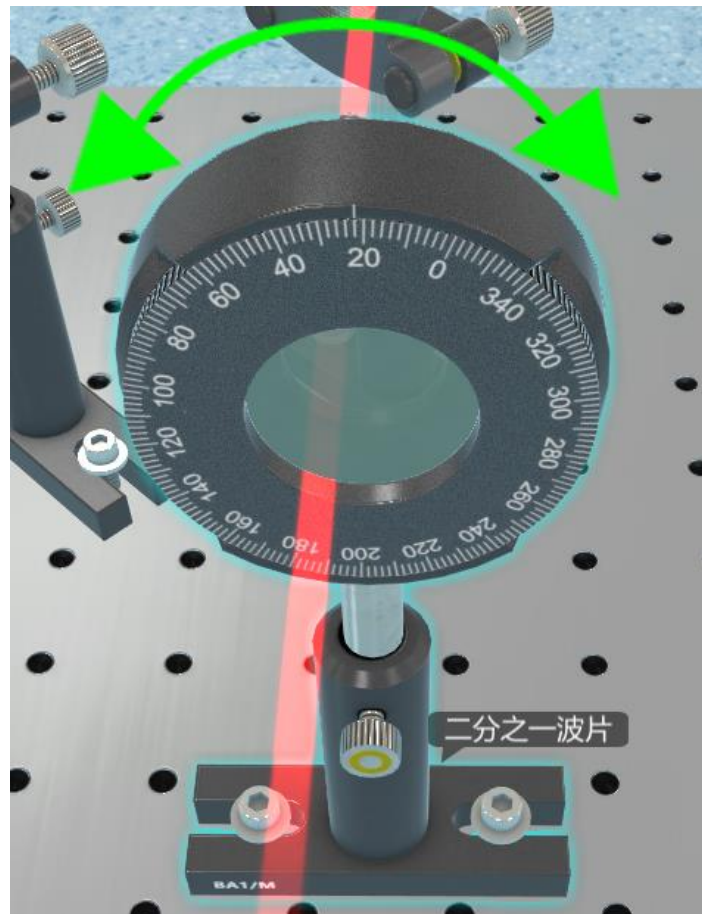


(3) 偏振片设置  $0^\circ$  ，调节探测光路  $1/2$  波片  $45^\circ$  快轴角度附近，当光屏上没有光斑时，记录  $1/2$  波片角度；



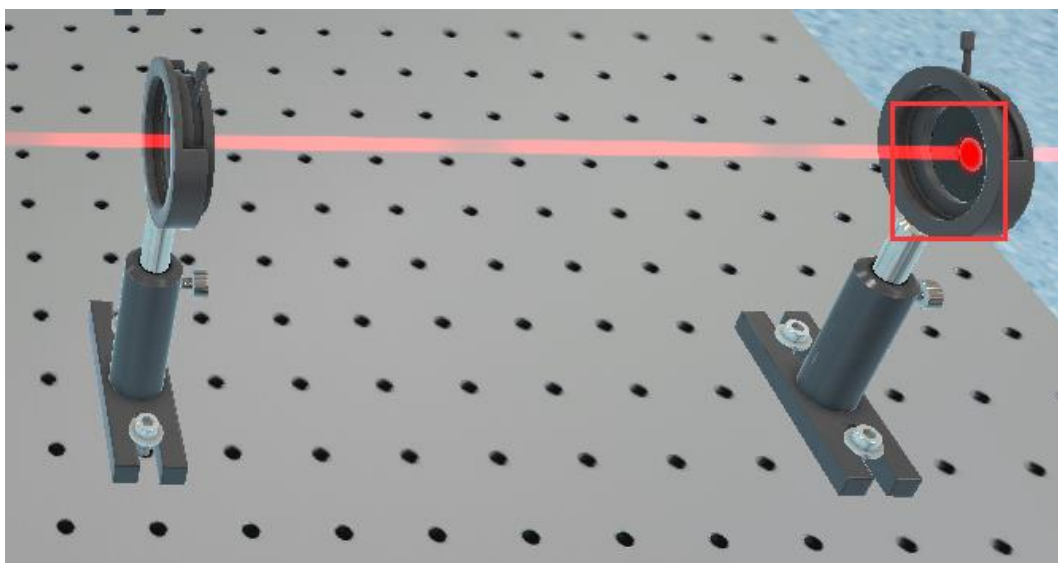


(4)将探测光路中  $1/2$  波片快轴调节到两次消光角度的中间值，探测光偏振方向调整完成；

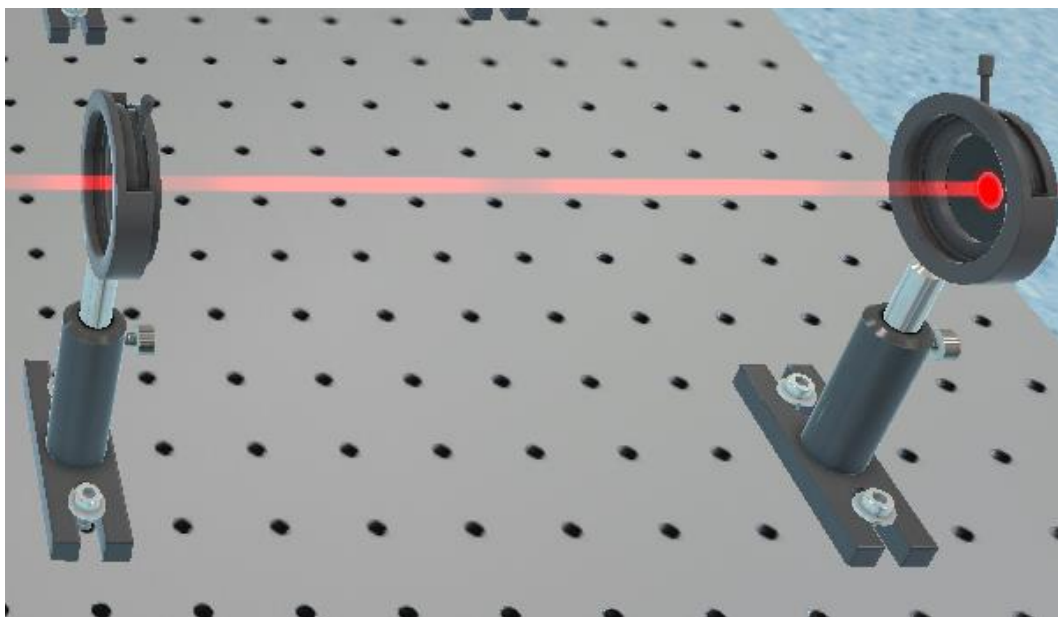


## 7. 共线调整

- (1) 遮挡探测光，移开电光晶体、偏振片、光屏；
- (2) 取光阑 A 放置到抛物镜 4 后，调节到孔径最小，使孔在光斑中心；
- (3) 取光阑 B 放在 A 后，调节 A 孔径，在 B 上看到衍射光斑，调节 B 的位置和孔径，使得艾里斑恰好与 B 光阑孔重合；

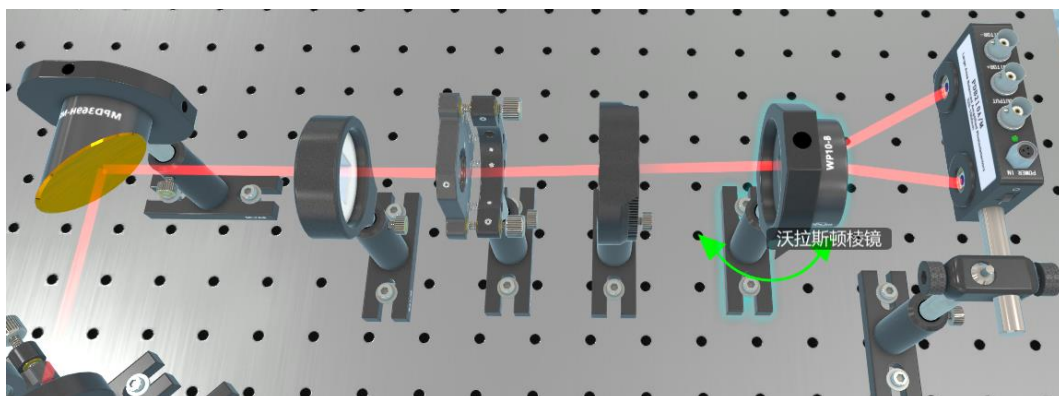


(4) 固定 A、B 位置，遮挡泵浦光，调节探测光，让探测光通过 A、B，艾里斑恰好也与 B 光阑孔重合；

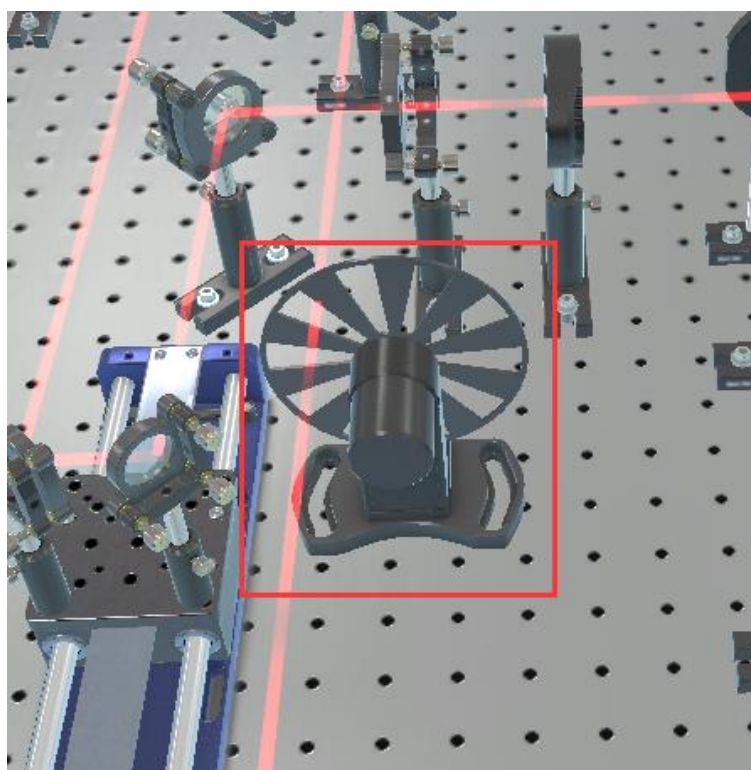


## 8. 平衡探测

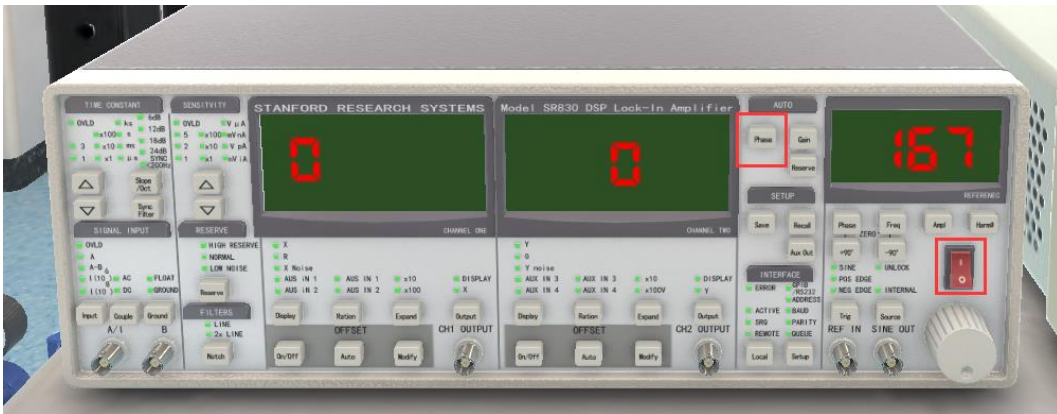
(1) 按光路图放置电光晶体、凸透镜、1/4 波片、沃拉斯顿棱镜、平衡探测器；



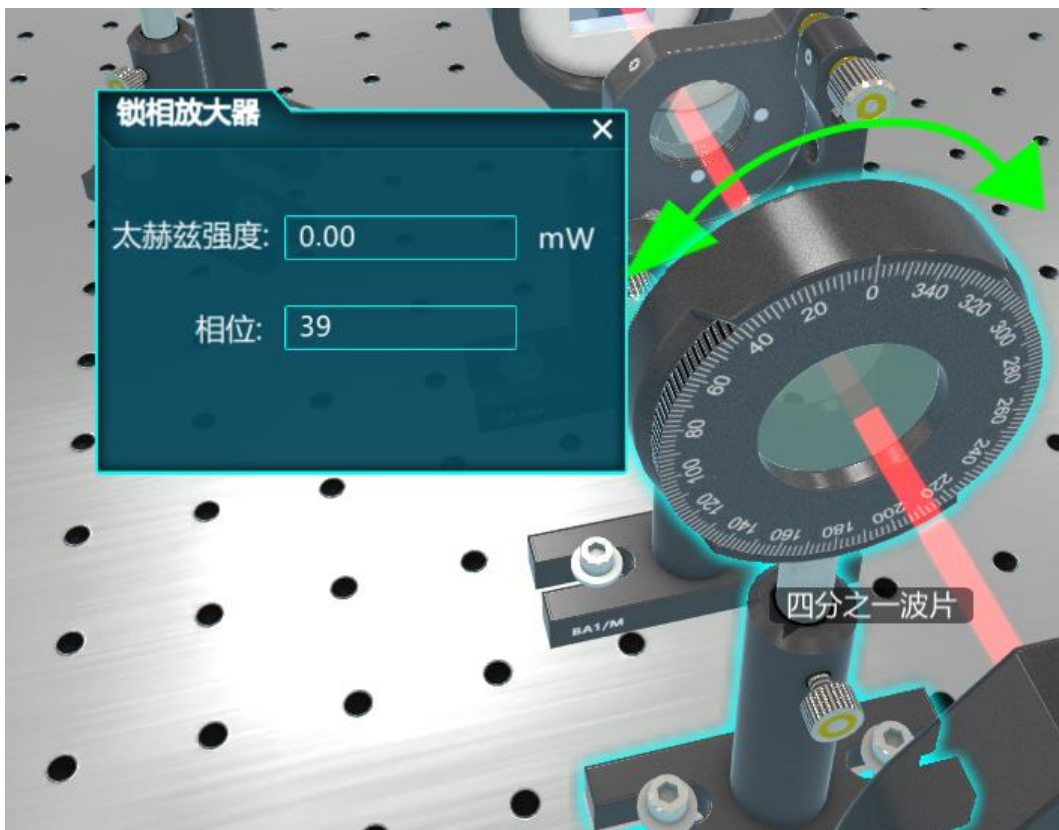
(2) 将斩波器放置到探测光路中，打开控制器；



(3) 打开锁相放大器开关，点击 Phase 按钮；



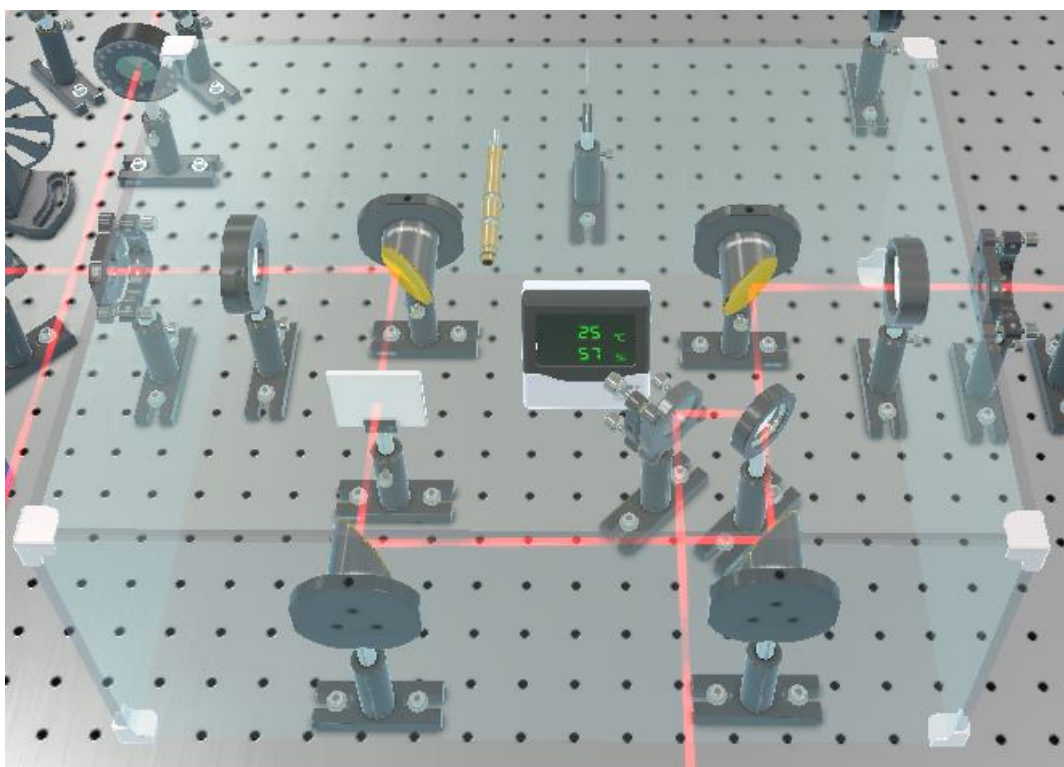
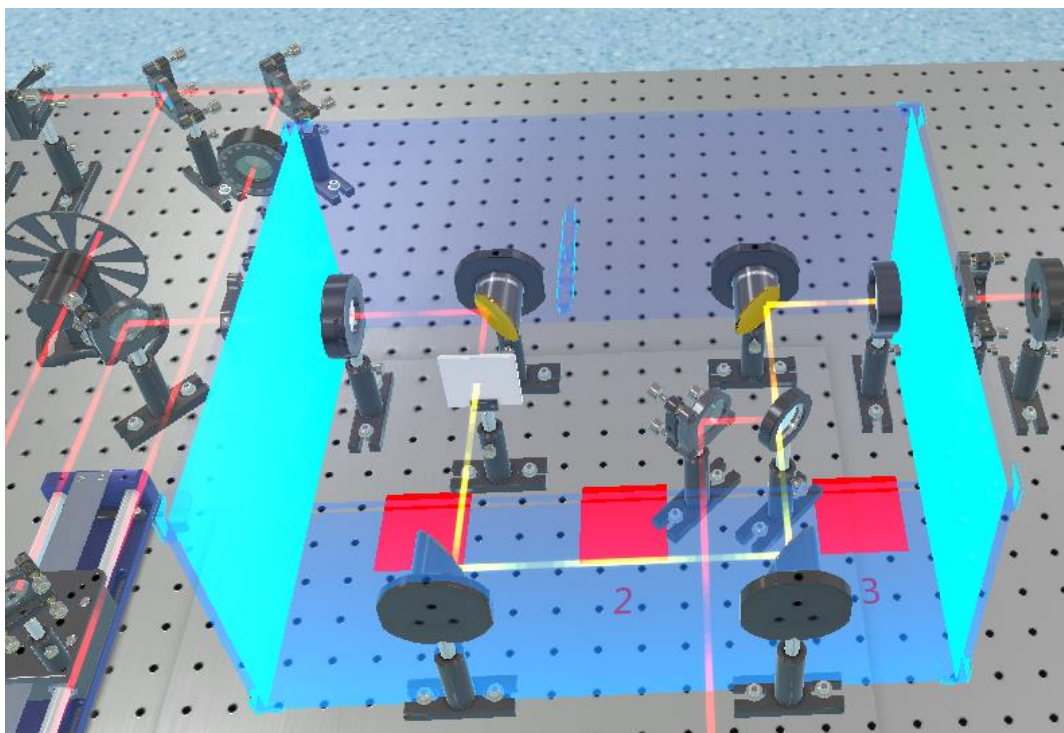
(4) 调节 1/4 波片快轴角度，观察锁相放大器上信号，当信号为最小值 0 时，平衡探测调节完成；



## 9. 干燥箱放置

(1) 仪器栏中选择干燥箱，在光学防震台上 3 个位置中选择合适的位置放置。

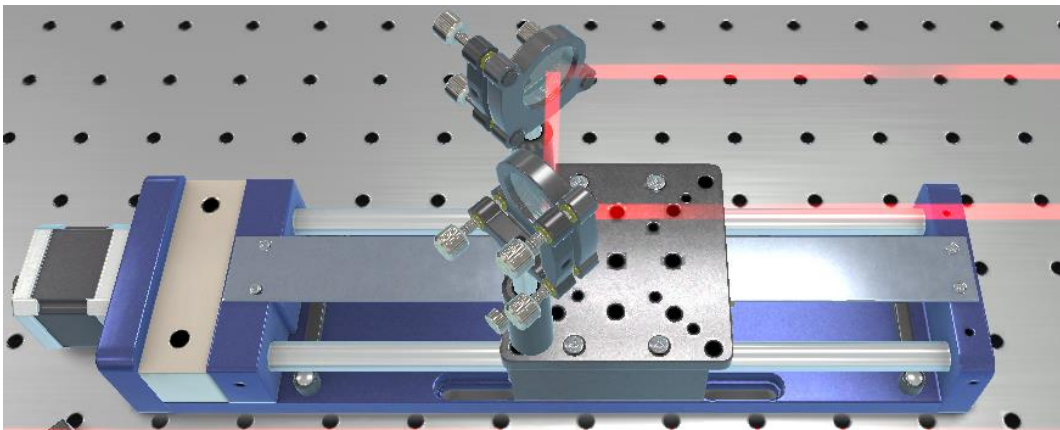
非线性光学中的光学整流效应



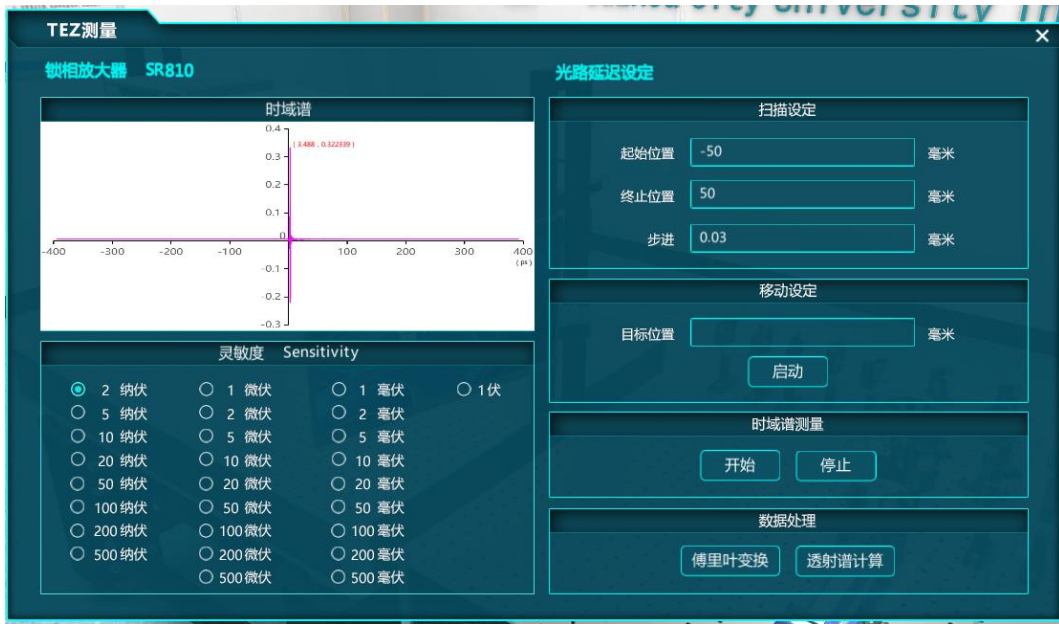
## 5.2 光学整流效应测量

### 1. 时域谱预测量

(1) 设定平移台起始位置：-50mm，终止位置：50mm，步长：0.03mm，测量时域谱；

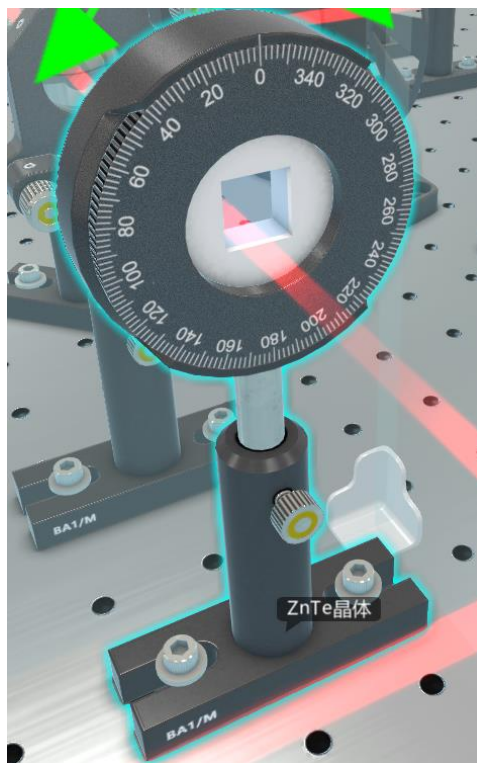


(2) 根据时域谱，确定正确的延时光路中平移台移动范围和太赫兹电场最大时的平移台位置，输入目标位置，点击启动，平移台移动至目标位置；



## 2. 光学整流效应与入射光偏振方向的关系

(1) 根据光路图，将 ZnTe 晶体放入光路中；



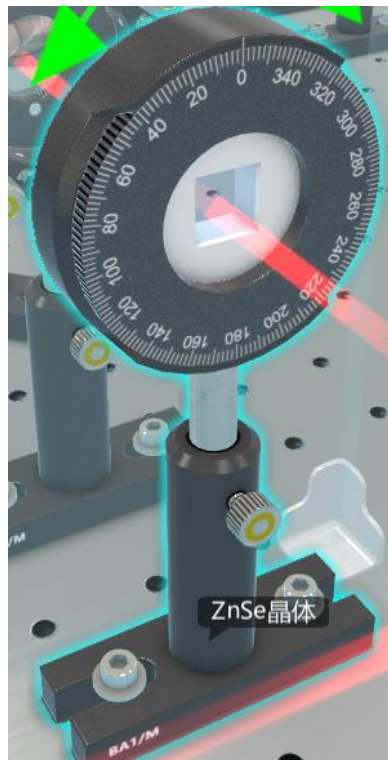
(2) 转动 ZnTe 晶体，改变入射光与晶轴角度，查看锁相放大器示数，记录太赫兹强度；





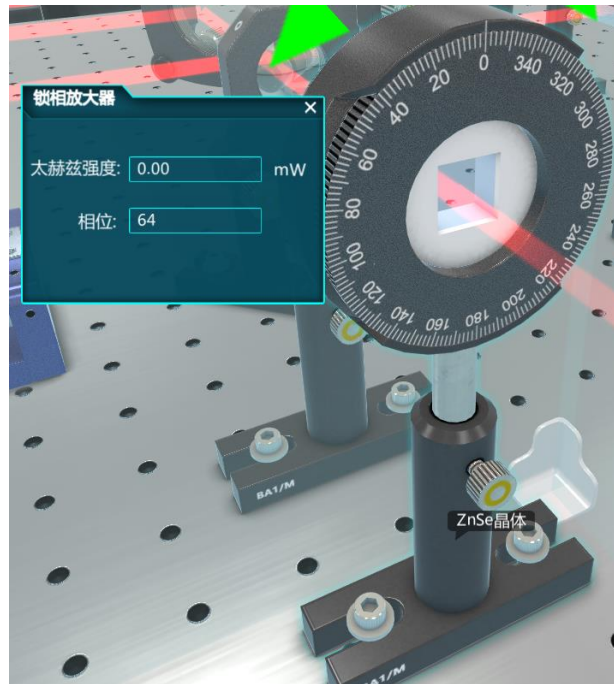
### 3. 更换非线性光学晶体，重复步骤 1

(1) 根据光路图，将 ZnSe 晶体放入光路中；



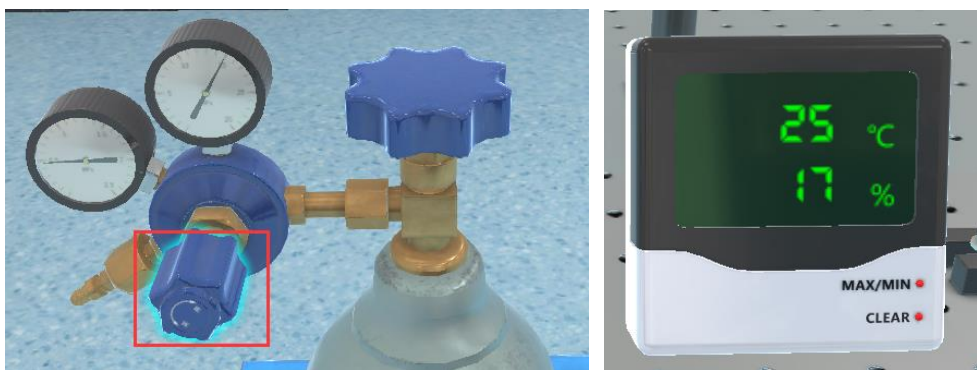
(2) 转动 ZnSe 晶体，改变入射光与晶轴角度，查看锁相放

大器示数，记录太赫兹强度；

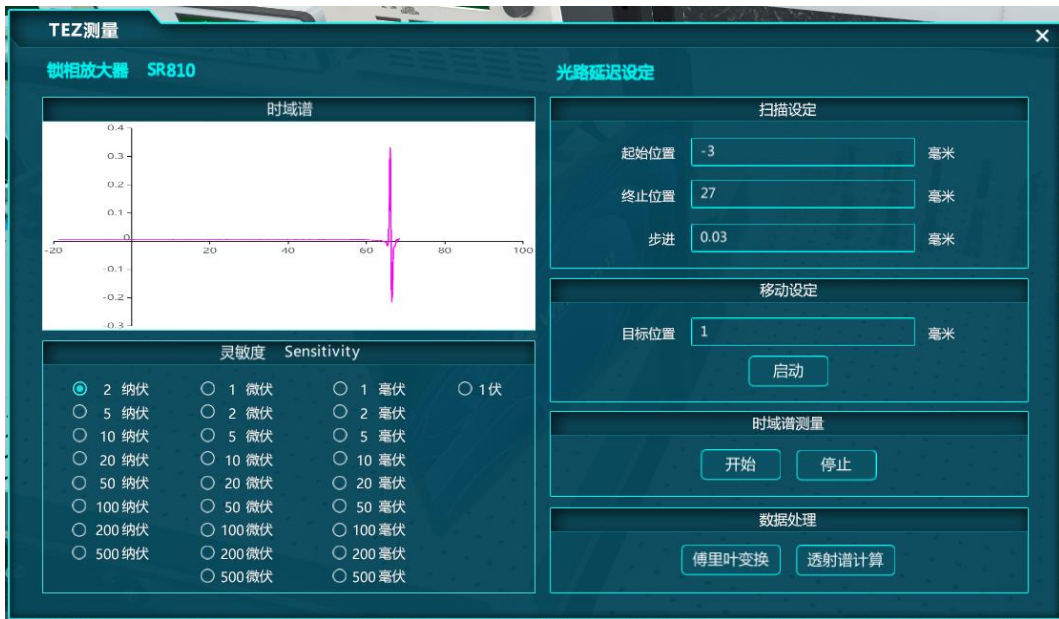


#### 4. 测量干燥空气太赫兹信号时域和频域谱

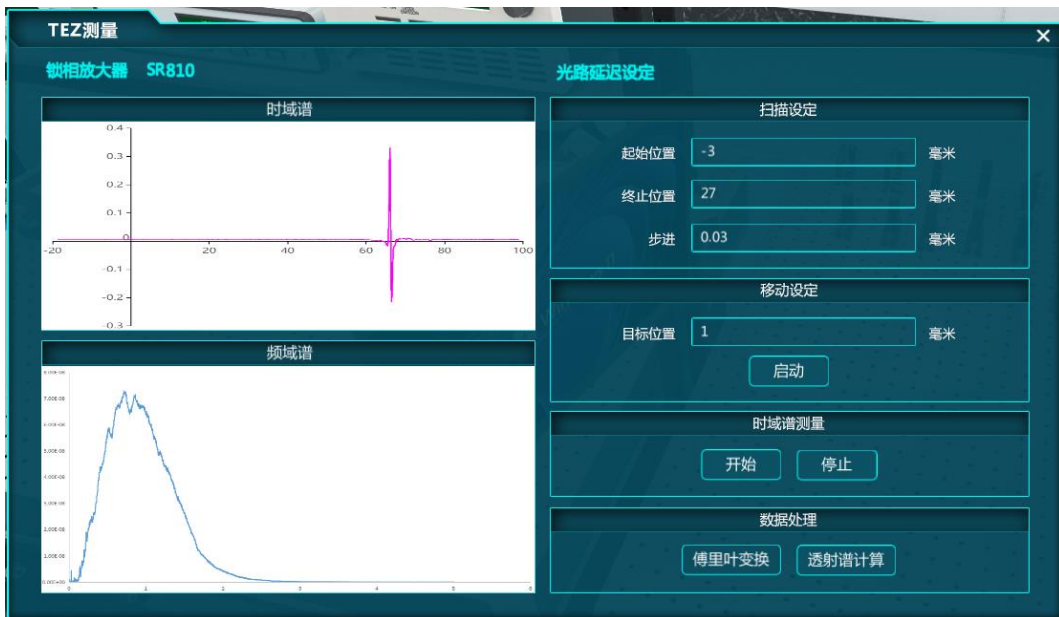
(1) 打开氮气阀门，干燥箱种通入氮气，使太赫兹光路环境湿度降低到 20%以下；



(2) 设定平移台起始位置：-3mm，终止位置：27mm，步长：0.03mm，测量时域谱；



(3) 点击傅里叶变换按钮，得到频域谱；



## 5、测量样品透射率

(1) 将样品放置于光路中，设定平移台起始位置：-3mm，终止位置：27mm，步长：0.03mm，测量样品时域谱；

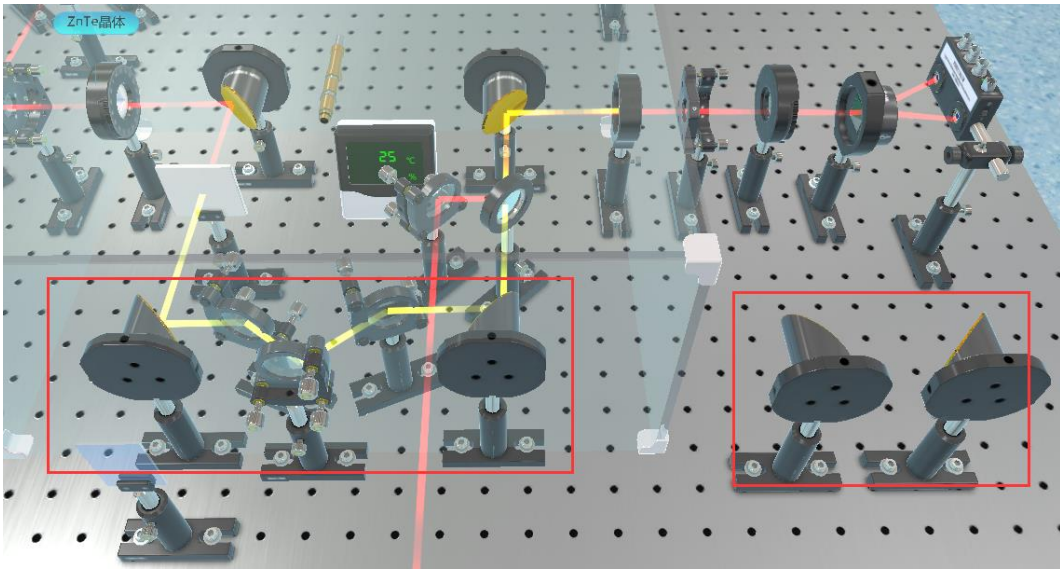
(2) 点击傅里叶变换按钮，得到样品频域谱；

(3) 点击透射谱计算按钮，得到样品透射谱；

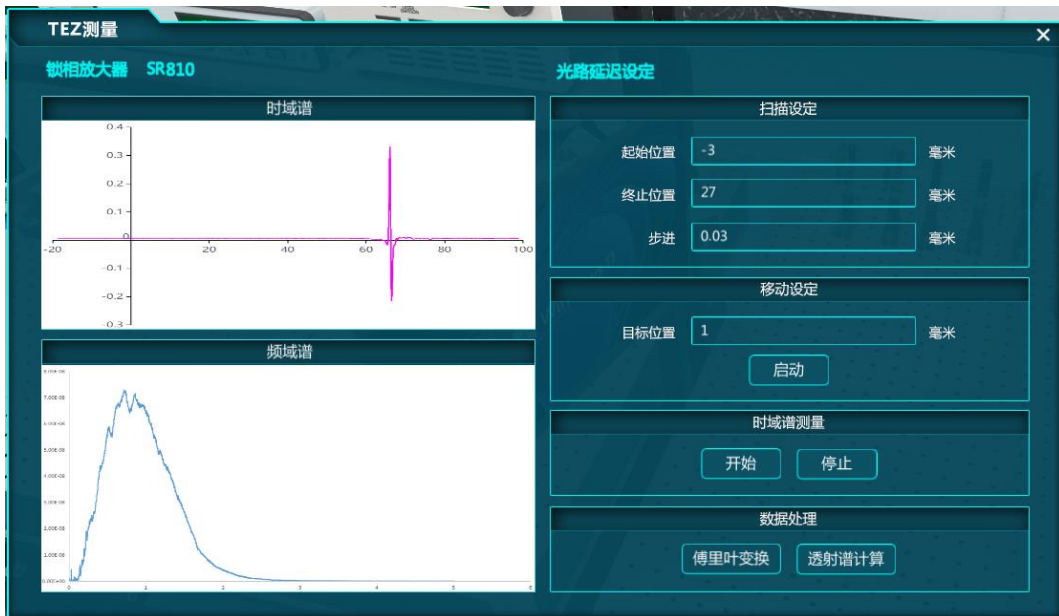


### 5.3 实验拓展

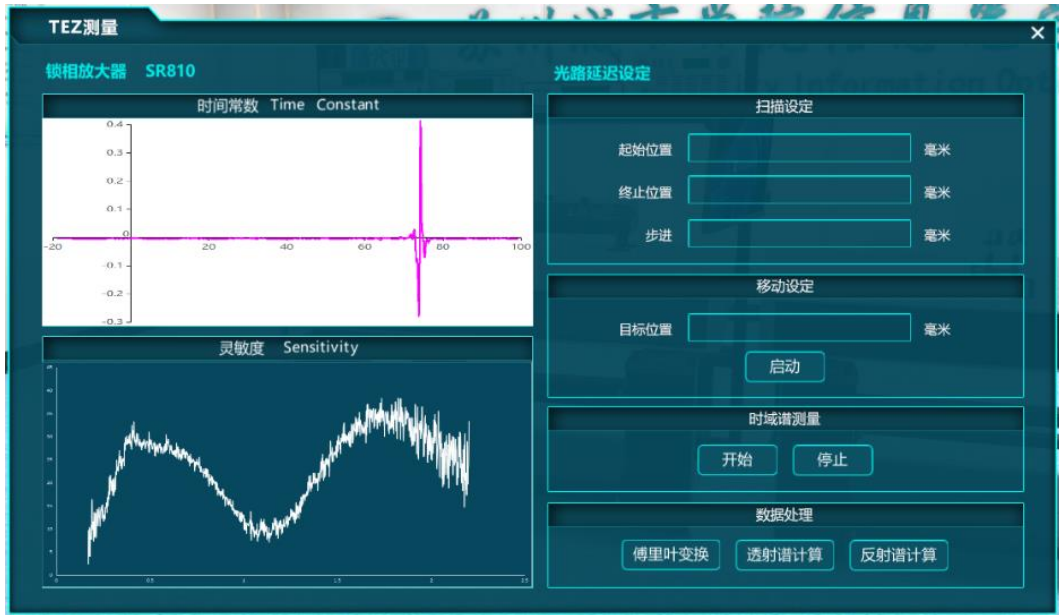
- (1) 将抛物面镜 2、3 更换为焦距 20cm 的抛物面镜；
- (2) 按光路图在抛物面镜 2、3 之间加入两个平面反射镜和样品；
- (3) 调整光路使反射光束恰好被抛物面镜 3 收集（调节光路时样品可用反射镜暂时代替）；



- (4) 调节探测光泵浦光路共线；
- (5) 设定平移台起始位置：-3mm，终止位置：27mm，步长：0.03mm，测量反射时域谱；
- (6) 点击傅里叶变换按钮，得到样品反射频域谱；



- (7) 点击反射谱计算按钮，计算反射谱；



## 思考题

1. 太赫兹产生有几种方法？
2. 整流效应的原理是什么？
3. 简述电光晶体测量太赫兹的过程？
4. 实验中为什么使用干燥箱？

## 参考资料

1. 方亮，翁雨燕等，《近现代物理实验》，高等教育出版社，2020
2. 李德华，戚晓东，刘盛纲，光整流法产生 THz 辐射转化率的理论分析，中国科学，2009.