

# 索雷博

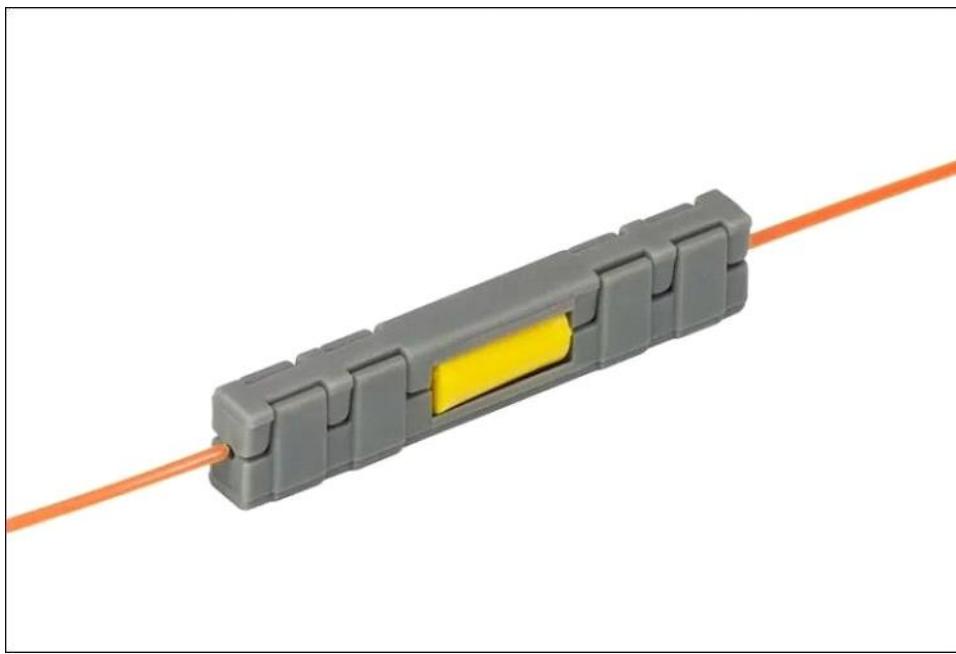
2020年4月14日

## 光纤使用的几个小知识

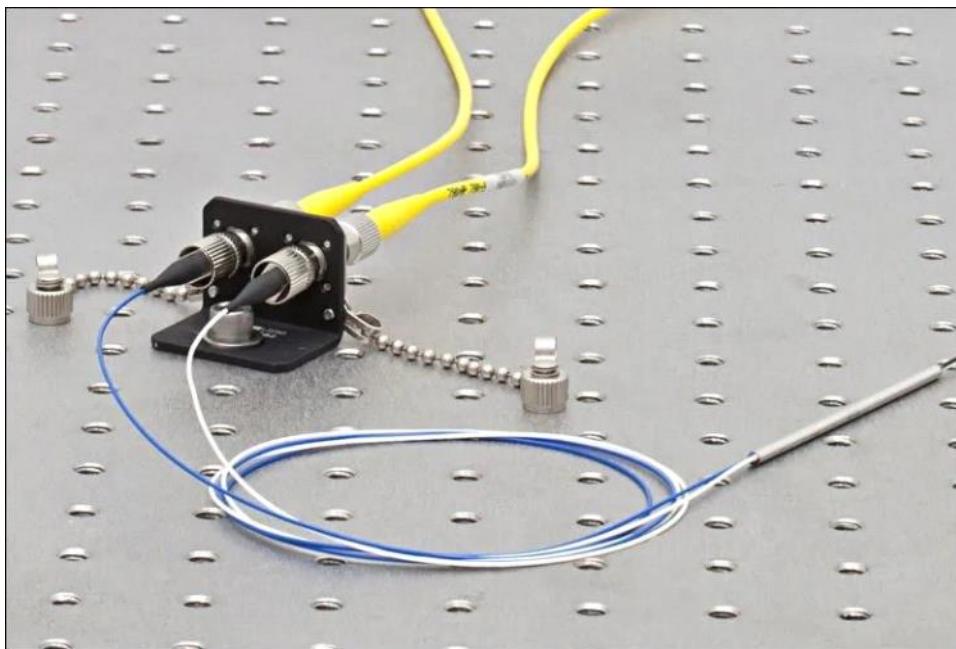
1. 低损耗光纤连接问题
2. 单模光纤耦合效率计算
3. 光纤端面制备
4. 光纤熔接简介

### 1、低损耗光纤连接

两根光纤经常需要对接传输光。为此，光纤端面必须非常接近，纤芯必须对得很准，而且光纤末端固定才能维持对准。机械连接器相当于稳定的光纤夹具，可以临时或永久性地连接光纤；带接头的光纤跳线通过匹配套管非常方便连接和拆卸；熔接则是最稳定而且损耗最低的连接方式，比如标准玻璃光纤的熔接损耗可低至0.02 dB。

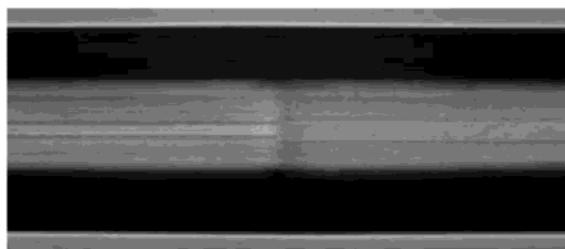


机械连接器



接头匹配套管

Before Splicing



After Splicing



光纤熔接前后

尽管损耗很大程度上取决于光纤连接的方式和质量，但是光纤类型也是重要因素。**多模光纤**：低损耗连接要求接收光纤比输出光纤具有相等或更大的纤芯和数值孔径。如果两根光纤的规格不同，那么损耗和光传播方向有关。因为多模光纤的纤芯较大，所以一般不难对准。

**单模光纤**：低损耗连接要求两根光纤的模式重合，所以有效模场和强度轮廓应尽可能相同。纤芯位置也要对得很准，小模场的光纤相对难对。光纤模式具有平坦相位，所以如果没有角度偏差，相位就自动匹配。模场越大，角度偏差影响越大。损耗和传播方向无关。

模式半径 $\omega_1$

模式半径 $\omega_2$

横向偏移 $\Delta x$

如果两根模场不同的单模光纤连接时的横向偏移为 $\Delta x$ , 那么耦合效率可用下式计算:

$$\eta = \frac{4\omega_1^2\omega_2^2}{(\omega_1^2 + \omega_2^2)^2} \exp \left[ -\frac{2(\Delta x)^2}{\omega_1^2 + \omega_2^2} \right]$$

如果两光纤模式半径相同, 而且连接处没有空气和横向偏移, 那么耦合效率与入射角度偏差 $\Delta\theta$ 的关系如下:

$$\eta = \exp \left[ -\left( \frac{\pi \Delta\theta \omega}{\lambda/n} \right)^2 \right]$$

光纤熔接前切割方向不准可能导致角度偏差, 从而降低传输效率。**角度偏差对大模场光纤的耦合效率影响更大。**为了方便计算和形象对比, 我们根据上式写了一个Excel计算器说明大模场光纤受角度偏差影响之大:

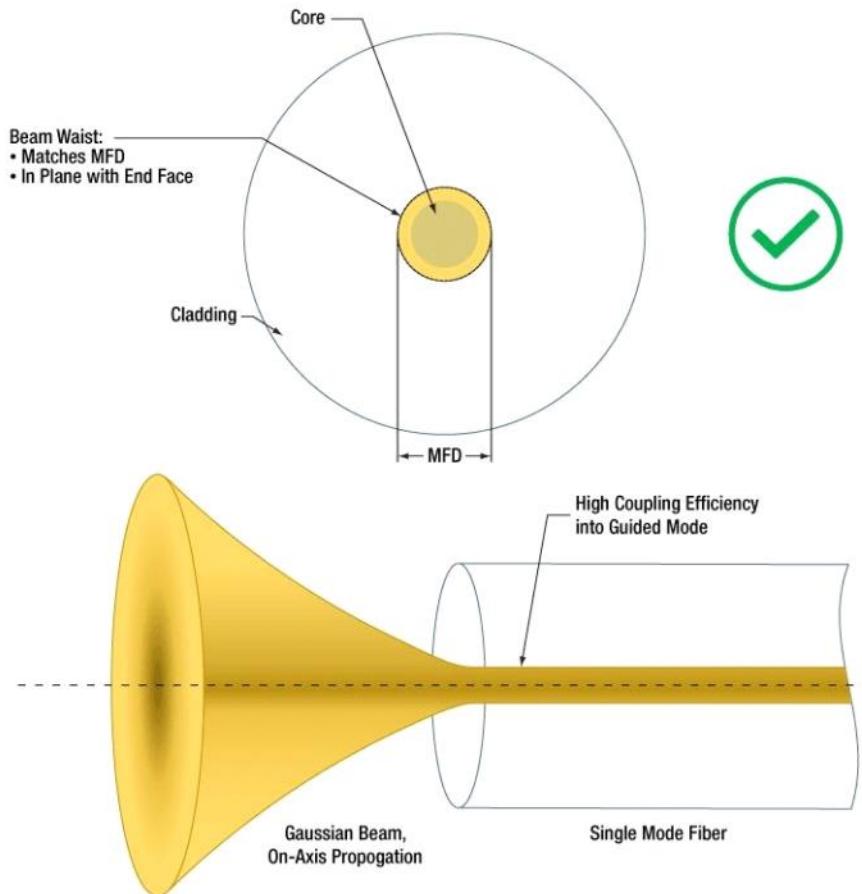
ALL EARS		Coupling Efficiency Calculator	
Input Parameters	Values	Input Parameters	Values
Mode Radius ( $\omega, \mu\text{m}$ )	10.0	Mode Radius ( $\omega, \mu\text{m}$ )	10.0
Angle Offset ( $\Delta\theta, \text{degree}$ )	1.0	Angle Offset ( $\Delta\theta, \text{degree}$ )	2.0
Wavelength ( $\lambda, \text{nm}$ )	1500.0	Wavelength ( $\lambda, \text{nm}$ )	1500.0
Refractive Index	1.5	Refractive Index	1.5
Efficiency (%)	74.1%	Efficiency (%)	30.1%

在您连接任何光纤时, 光纤端面之间的空气隙应尽可能小才能避免较大的菲涅尔反射损耗。空气隙宽度应远小于四分之一波长, 通过相消干涉抵消两端面的菲涅尔反射。当然, 只要光束发散角可忽略, 更宽的空气隙(半波长的整数倍)也能消除, 但是长距离更难稳定, 而且透过率将受波长影响。另外, 使用机械连接器时可用折射率匹配凝胶减小反射损耗。

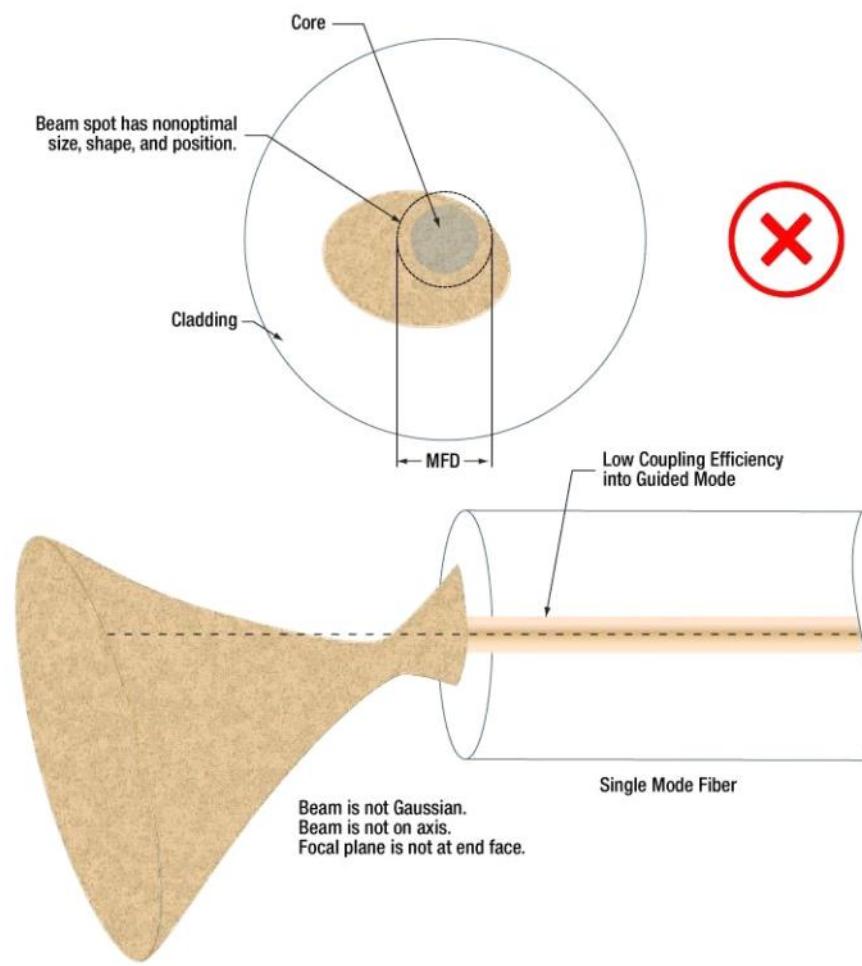
## 2、单模光纤耦合效率计算

将自由空间光束耦合到单模光纤中时, 需要满足以下条件才能到达最高耦合效率:

- 高斯强度轮廓
- 从光纤端面正入射
- 束腰位于光纤端面
- 束腰中心对准纤芯中心
- 束腰直径等于光纤模场直径



✓耦合方式



✗耦合方式

假设不满足后面两个条件，即入射光的束腰半径( $\omega_0$ )不等于光纤模式半径( $\omega_f$ )，而且入射光束和纤芯存在横向偏移 $\Delta x$ ，那么可用下式计算实际耦合效率：

$$\eta = \frac{4\omega_0^2\omega_f^2}{(\omega_0^2 + \omega_f^2)^2} \exp\left[-\frac{2(\Delta x)^2}{\omega_0^2 + \omega_f^2}\right] \left[1 - \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2\right]$$

$n$ 为纤芯折射率，最后一项考虑了光纤端面无增透膜时的菲涅反射损耗，并且入射光没有角度偏差。假设存在角度偏差 $\Delta\theta$ 但不考虑其它误差，那么耦合效率可用下式估算：

$$\eta = \exp\left[-\left(\frac{\pi \Delta\theta \omega}{\lambda/n}\right)^2\right] \left[1 - \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2\right]$$

这两个公式其实只是前文中两个公式的变形。可以看出，**光纤模场越大，横向偏移的影响越小，但是角度偏差的影响越大。**

### 产品应用：基本光纤耦合系统



单模光纤耦合

MBT612D

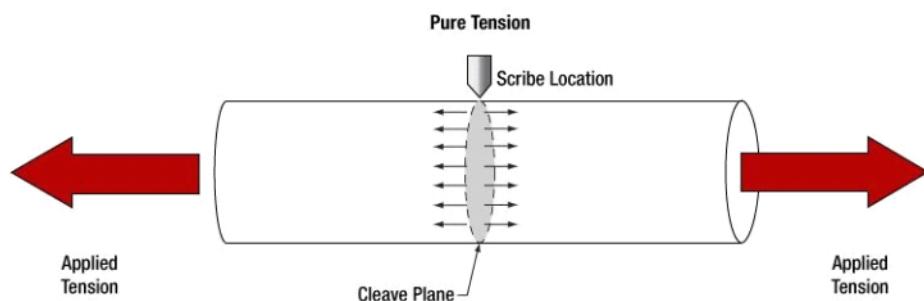


保偏光纤耦合

MBT621D

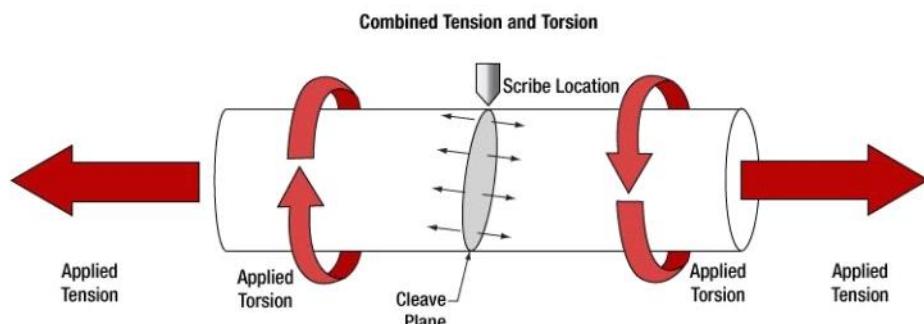
### 3、光纤端面制备

光纤剥掉涂覆层后可以切割成干净的裸光纤端面。涂覆层一般用机械法剥除，也有些使用溶液。简单的切割工具包括陶瓷和红宝石刀片。先进的切割设备则可以精确夹持光纤，施加可调拉力或扭力，可平切或斜切，可切普通光纤也可切光子晶体光纤和毛细管。下面是基于拉伸和擦划技术的平切和斜切示意图，可点击放大查看细节。



平切

施加拉力



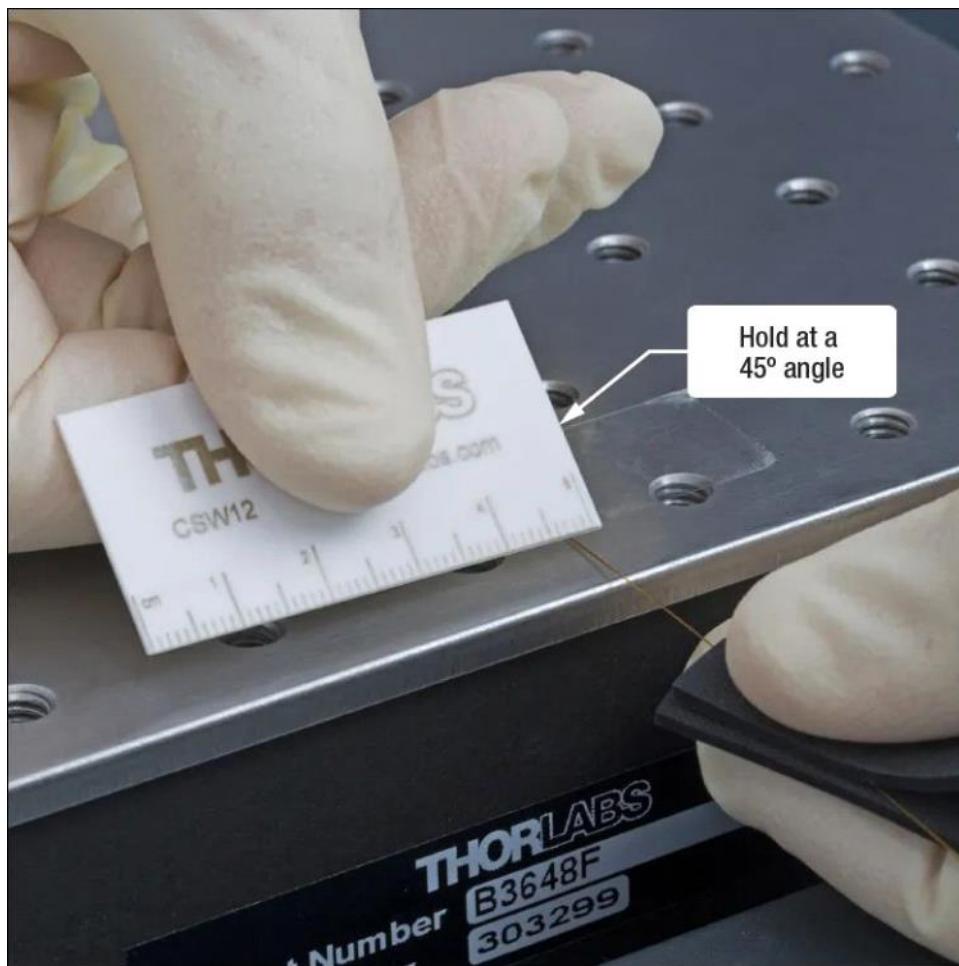
斜切

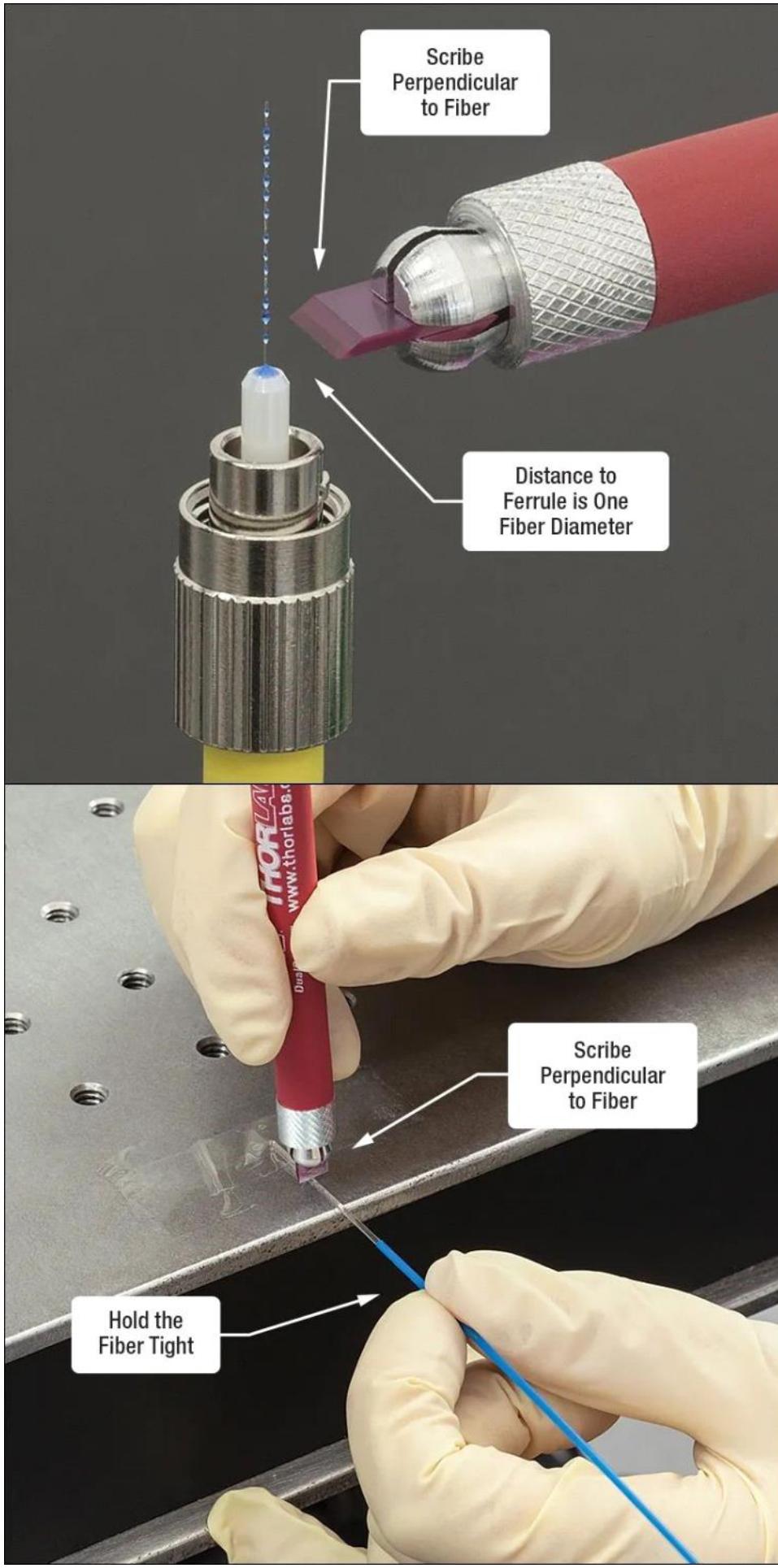
拉力和扭力

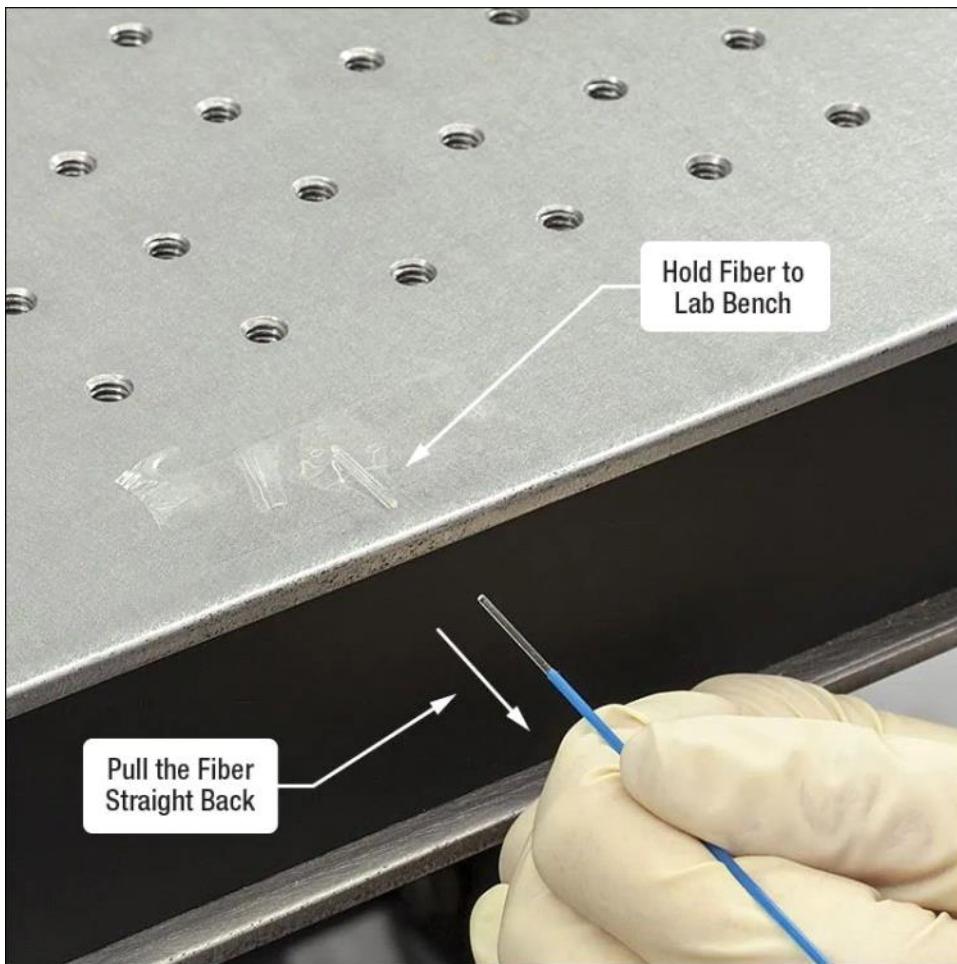
如果要求高质量切割，需要使用显微镜检测端面，不满足条件必须重新切割。这对于特殊的光纤材料、直径和类型尤为重要。

光纤端面有时需要抛光，比如应用要求端面非常平坦或者倾斜。光纤端面还可镀提高性能的各种介质膜，比如增透膜或高反膜。

### 产品应用：陶瓷和红宝石光纤刻划刀





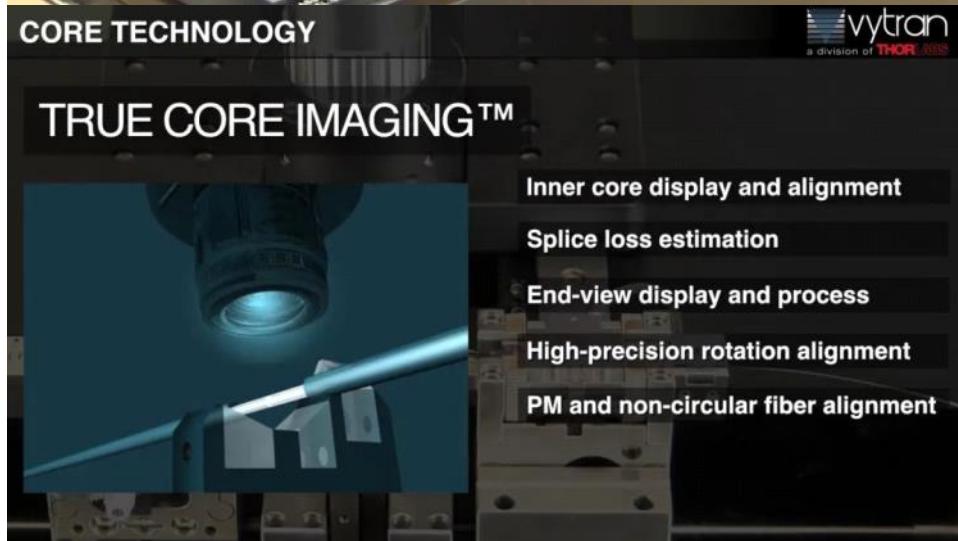
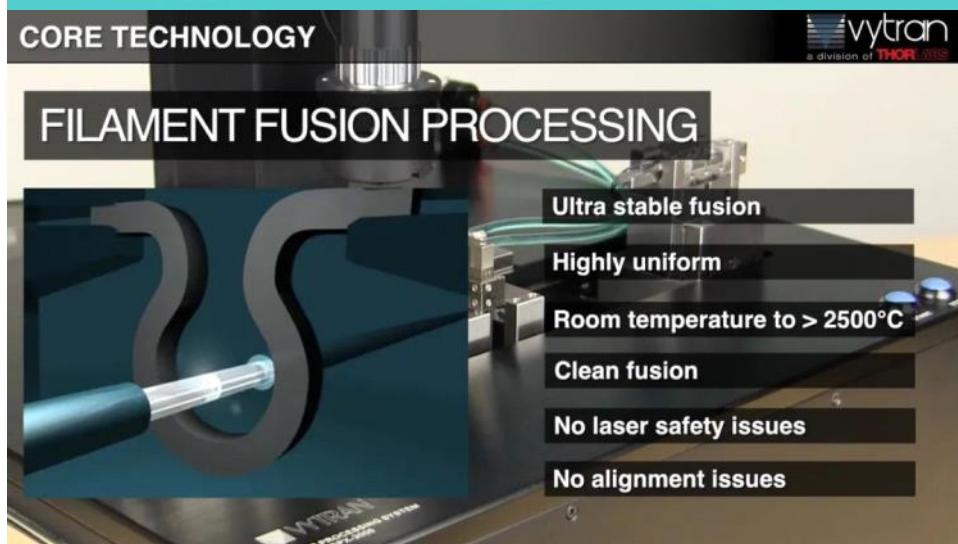
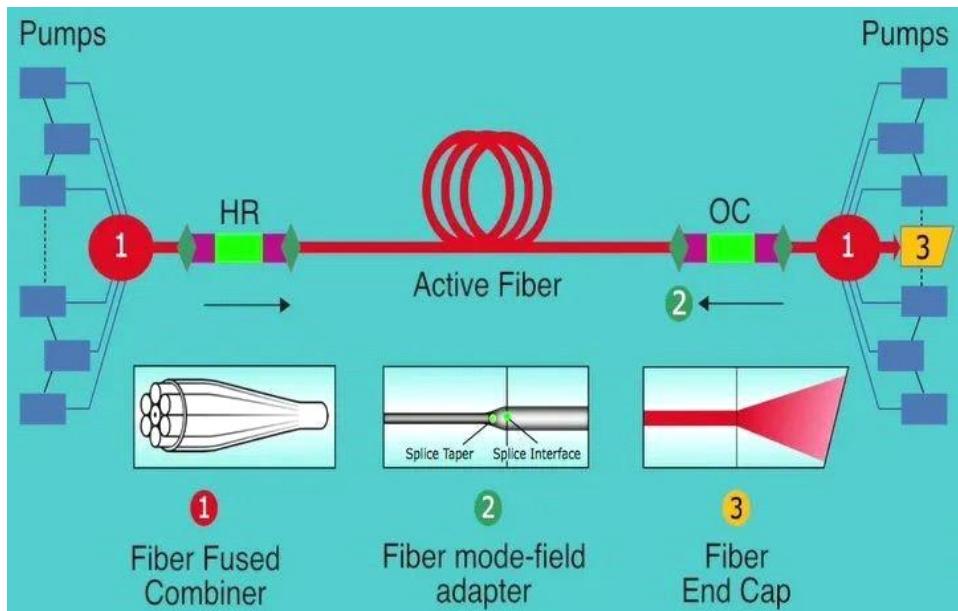


#### 4、光纤熔接简介

熔接是连接光纤最稳定、最低损耗的方法。除了光纤熔接机，用户还需要各种其它设备用于剥除、切割、清洁、重新涂覆和检测。光纤熔接的主要步骤：

1. 剥除光纤涂覆层。
2. 切割和清洗光纤末端。
3. 在显微镜下精密对准要熔接的光纤两端，只留一点空隙；有时可要用光源和功率计监测光通量。
4. 加热并推动光纤进行熔接。
5. 检查和验证熔接质量。
6. 使用热缩套管等保护熔接点。

**产品应用：光纤激光器组件加工和核心技术**



Vytran设备请洽余工

[vytran-cn@thorlabs.com](mailto:vytran-cn@thorlabs.com)

每周一图本文主要参考资料

SPIE Field Guide to

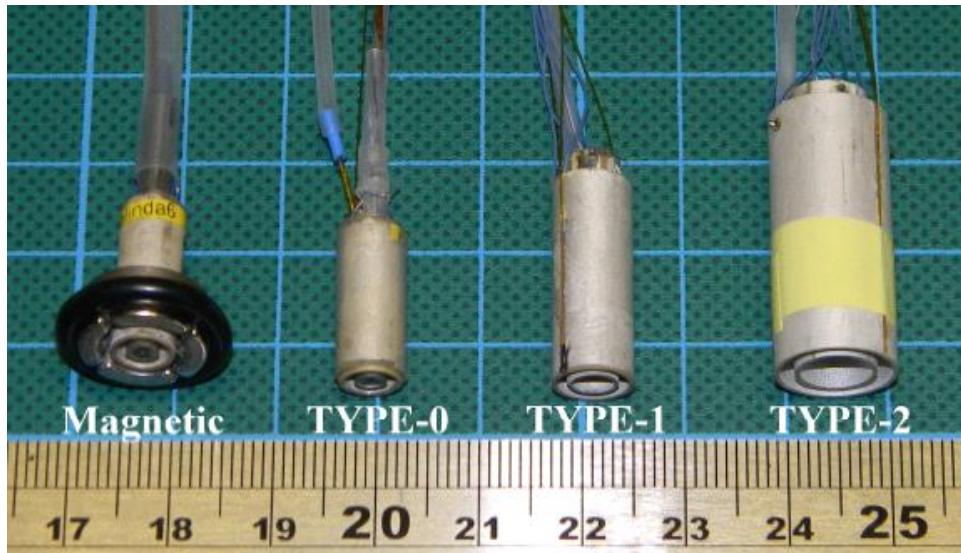
Optical Fiber Technology

# 九种压电应用

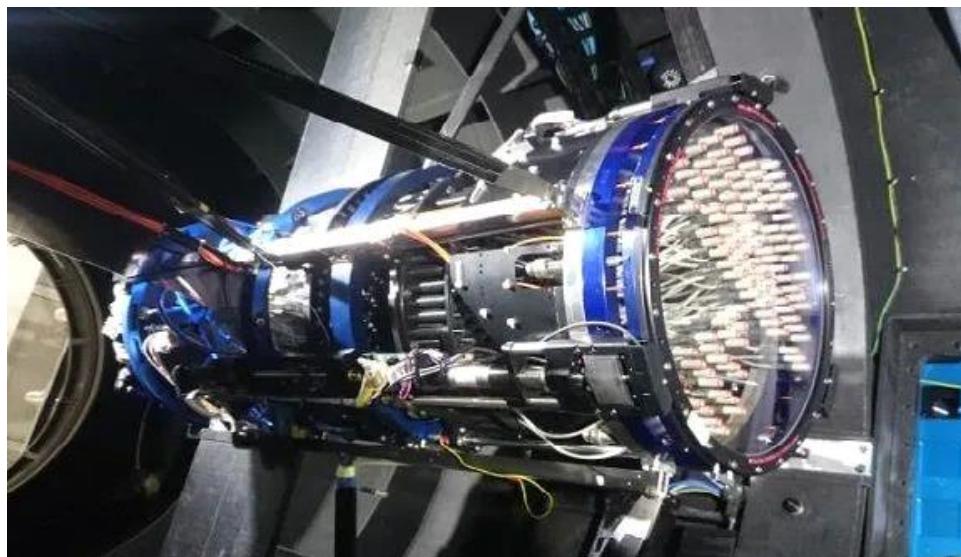
## Starbugs

Starbugs是澳大利亚天文台发明的压电机器人。这些『观星小虫』由两个同轴压电陶瓷管构成，光纤固定在管中。由于使用压电材料制备，在施加电压时，陶瓷管能够伸缩或弯曲，以此控制光纤探头在望远镜焦平面的移动和旋转，同时收集多个恒星或星系的光谱。

Starbugs通过真空吸附在玻璃板上施加电压时能在透明玻璃板上行走



Starbugs由两个同轴压电陶瓷管构成



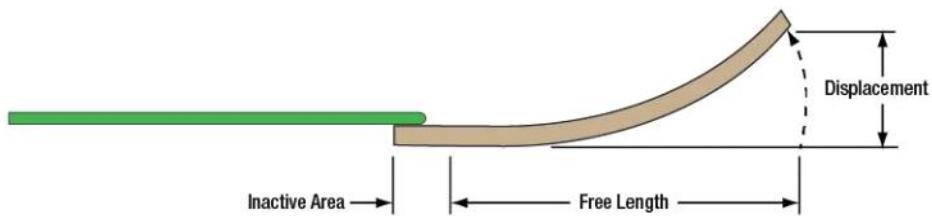
The Taipan Galaxy Survey

Starbugs终极目标是用在下一代超大口径望远镜中，比如建造中的巨型麦哲伦望远镜超过25米，在其焦平面将使用500个starbugs捕捉遥远的星光。

**Ref1:** Starbugs: all-singing, all-dancing fibre positioning robots <https://doi.org/10.1111/12.924502>

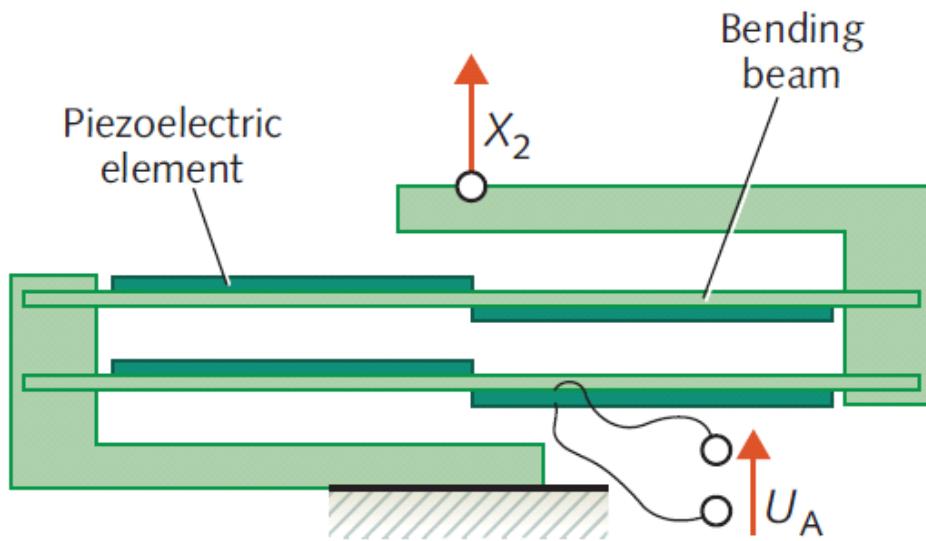
## 主动隔振系统

很多主动隔振系统是纯机械结构，使用独立的致动和传感装置。但是，压电陶瓷集致动和传感功能于一体，可以设计更紧凑的主动隔振系统。



压电双晶片可上下弯曲运动

压电双晶片就是这样一种器件。作为一种多层共烧压电陶瓷构造，当底层和顶层的伸长量不同时双晶片将向上或向下弯曲，由于兼具致动和传感功能，方便为灵敏设备设计更简洁的主动隔振系统，比如下图所示。



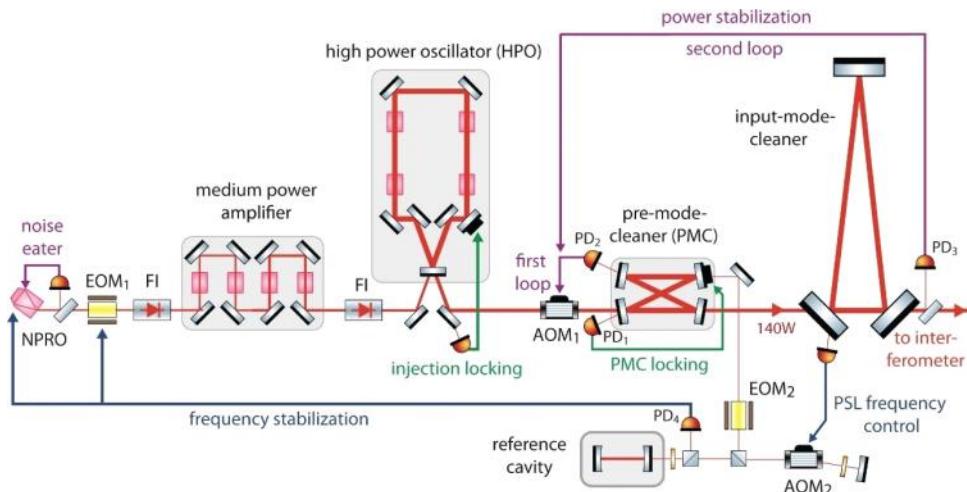
施加电压使自由端运动( $X_2$ )

双晶片(上图深绿色元件)在施加电压后产生弯曲力矩，导致自由端开始运动。由于使用平行运动，连接点处几乎没有角度偏差，所以硬件配置也更为简单和紧凑，并且性价比更高。

**Ref2:** Vibration control piezoelectric bimorph beams consolidate vibration control functions  
<http://t.cn/A6ZkYCMQ>

### 引力波探测激光

激光干涉引力波天文台(LIGO)基本原理很简单，甚至使用Thorlabs迈克尔逊教学套件都能模拟。但是实际执行却异常严格，其精密程度相当于测量地月距离精确到头发丝的千万分之一。所以，LIGO需要超级稳定的激光系统，模式稳定、频率稳定、功率稳定。

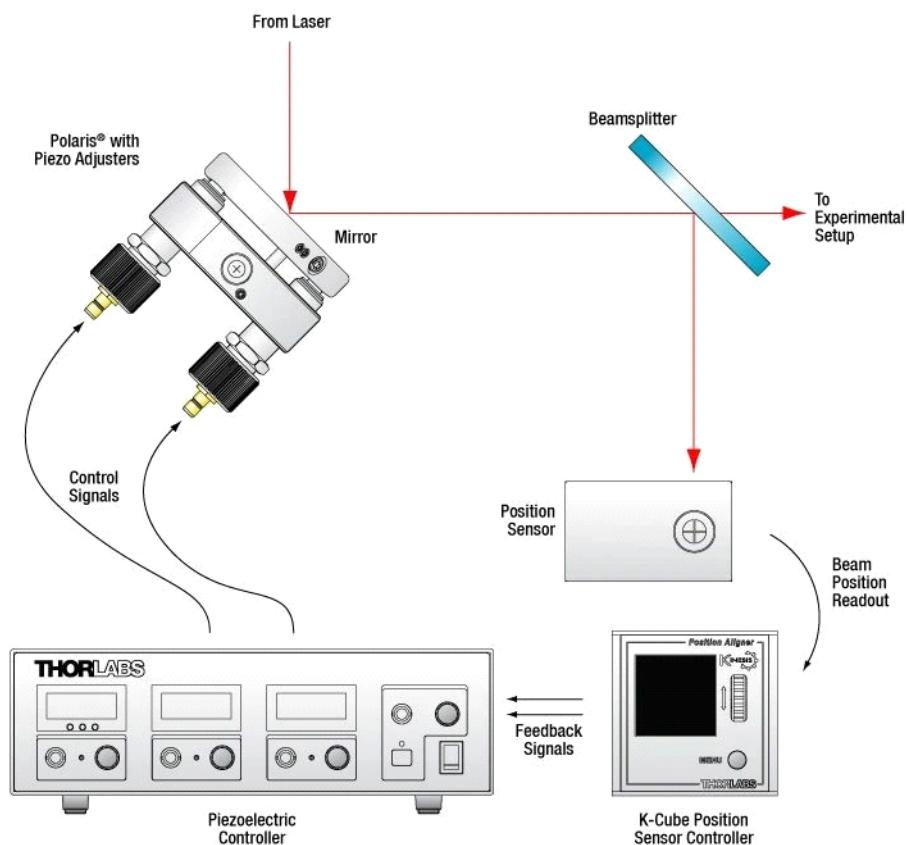


先进LIGO的稳定激光系统

之所以引用如此复杂的激光系统，只是为了说明压电技术对于光学定位的重要性。首先，非平面环形振荡腔(NPRO)和两级功率放大器都需要主动稳定，而通过NPRO晶体的压电挤压可控制振荡频率。其次，在激光系统的开发阶段，NPRO输出锁定在具有压电反馈输入的PDH锁频参考腔上。最后，**PMC Locking**环形腔中同样使用压电元件控制往返长度，以此调节共振频率和稳定激光模式。

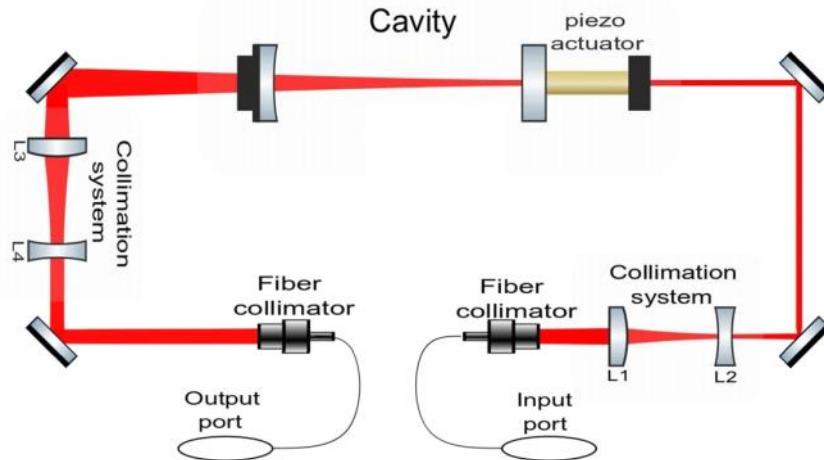
**Ref3:** Stabilized high-power laser system for the gravitational wave detector advanced LIGO  
<https://doi.org/10.1364/OE.20.010617>

### 压电应用/光路图速览



## 光路主动稳定系统 Polaris 压电调整架根据位置传感器反馈信号调整光路

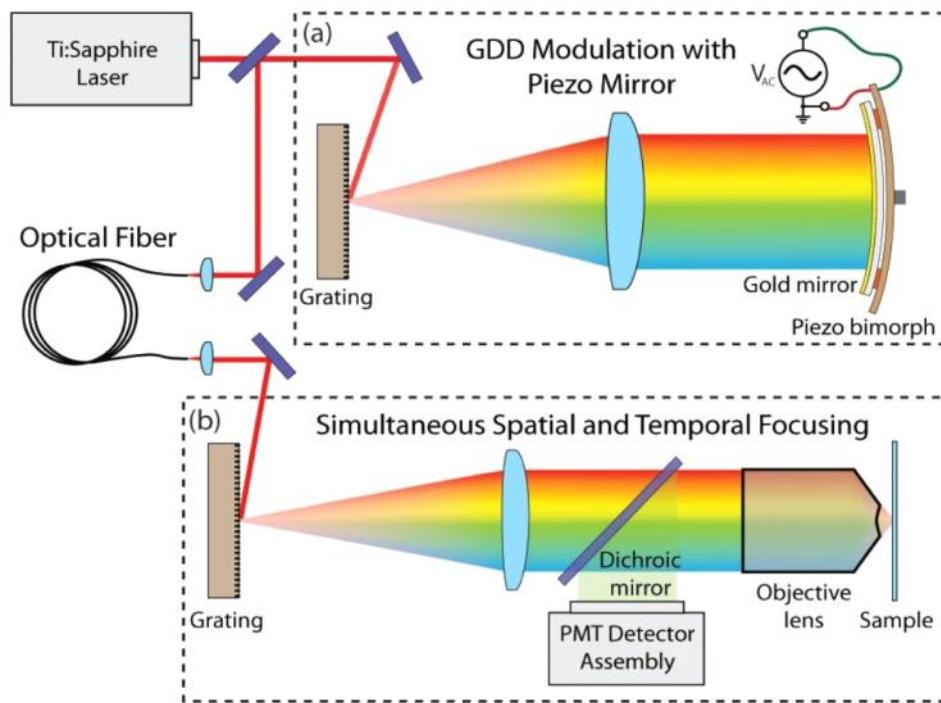
ref4: [https://www.thorlabschina.cn/newgroupage9.cfm?objectgroup\\_id=5035](https://www.thorlabschina.cn/newgroupage9.cfm?objectgroup_id=5035)



## 使用低噪声FP干涉仪探测超声波

使用压电器件控制FP腔长和准直系统

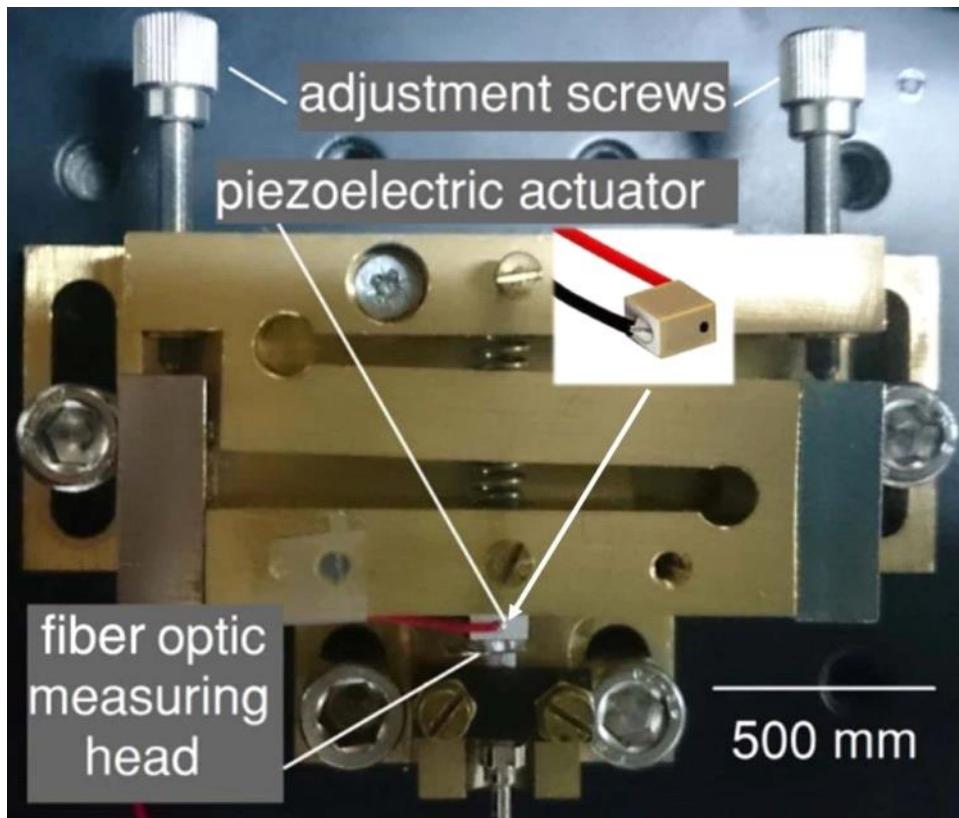
Ref5: <https://doi.org/10.1364/OE.26.022405>



## 飞秒激光高速扫描

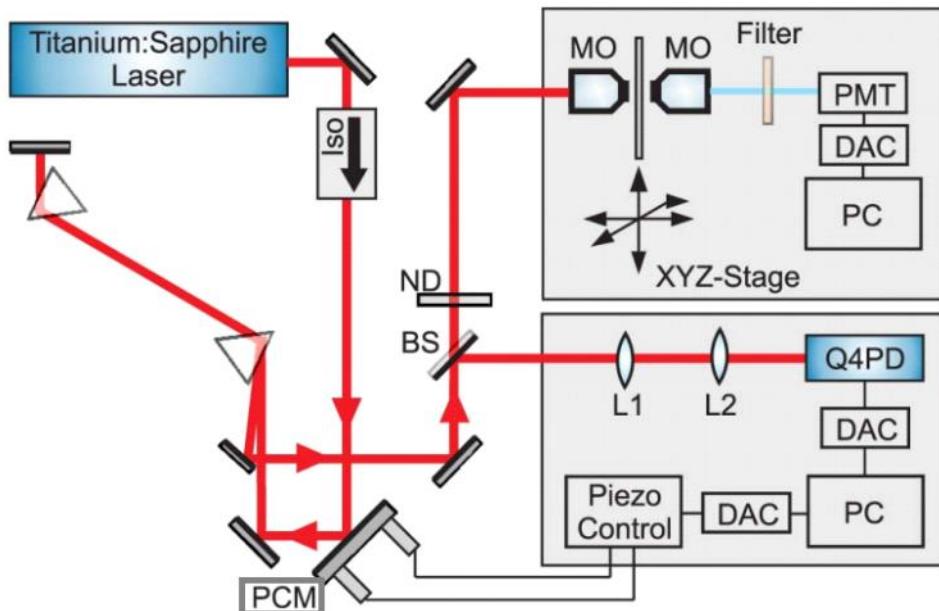
使用压电双晶片(bimorph)精密控制反射镜，从而调制飞秒激光的群延迟色散

Ref6: <https://doi.org/10.1364/BOE.2.000080>



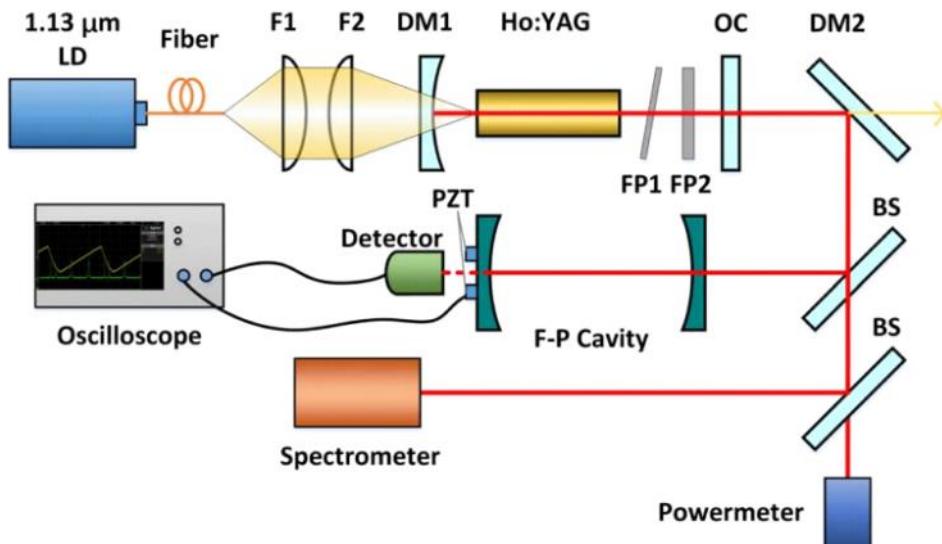
高分辨宽带光纤位移传感器

Ref7: <https://doi.org/10.1364/AO.55.005960>



共焦多光子显微镜光路配置 使用压电反射镜(PCM)维持光束指向稳定性

Ref8: <https://doi.org/10.1364/AO.50.005361>



### 可调谐单纵模Ho:YAG激光器

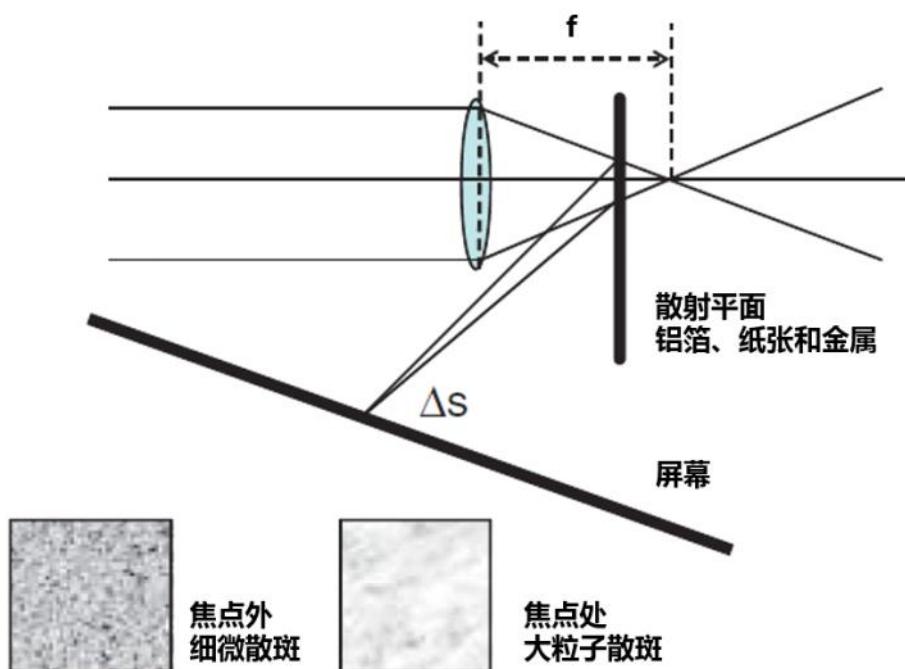
Ref9: <https://doi.org/10.1364/AO.56.009809>

## 调光路的几个实用技巧

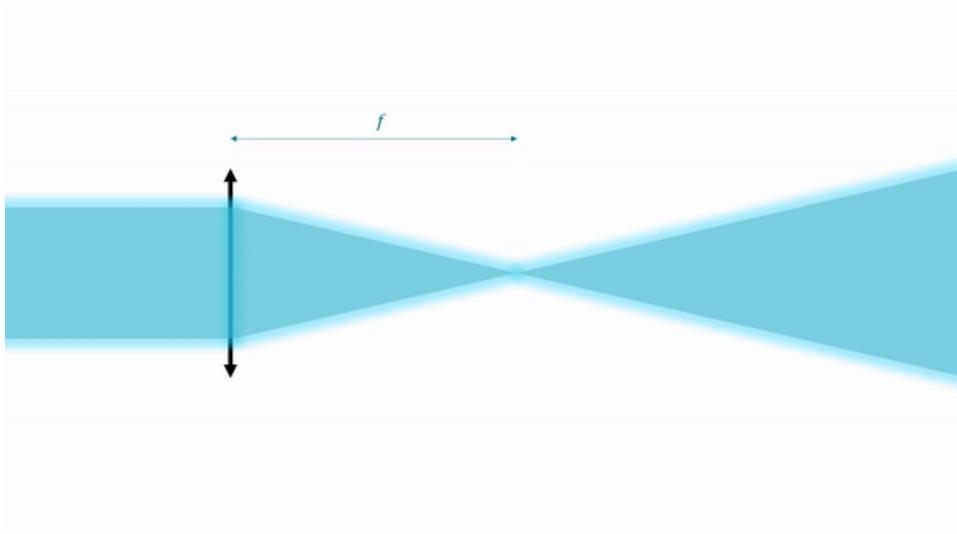
1. 通过散斑寻找透镜焦平面
2. 激光的扩束及准直验证
3. 通过反射镜对准光路

### 1、通过散斑寻找透镜焦平面

激光散斑法确定透镜焦平面位置的原理图和操作方法如下所示。这种方法操作简单，尤其适合焦距很短成像较小的透镜或者复杂的透镜系统。



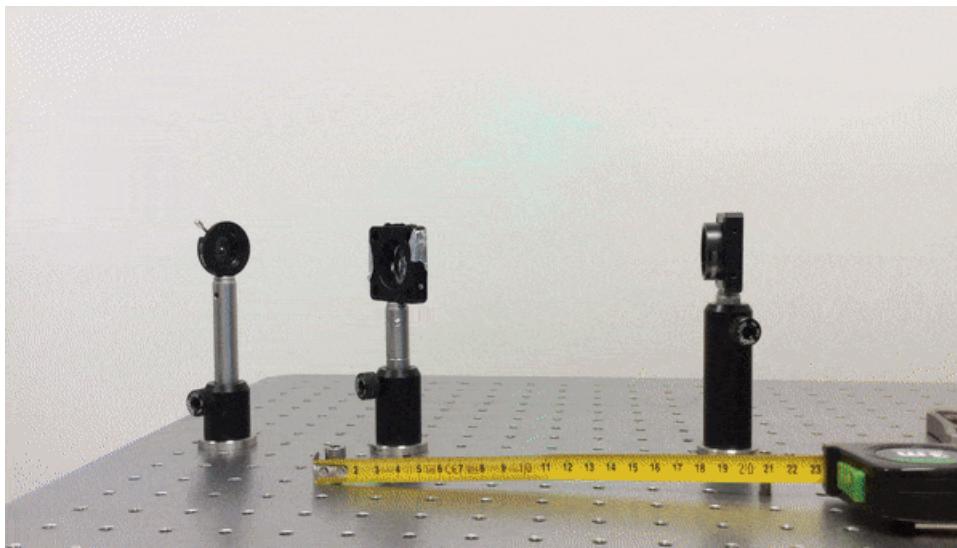
激光散斑法找焦平面的原理图



## 演示

操作示意图，焦点处的反射光形成强散斑

沿光路来回移动铝箔(也可以是其它散射物体)，如果铝箔位于焦平面外，被照射的铝箔面较大，反射光将在屏上形成细微的散斑；如果铝箔刚好处于焦平面，被照射的铝箔面很小，反射光将形成很强的散斑图案。下面是实际操作的动态图示。**操作中务必注意激光安全事项。**

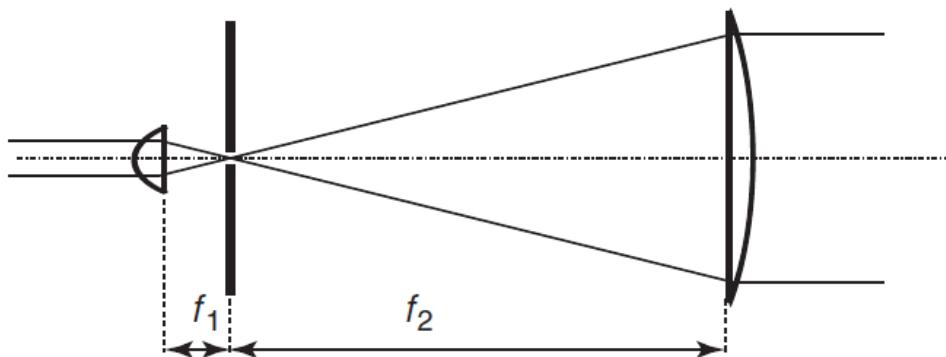


## 演示

当然，确定透镜焦点位置的最简单方法是对很远的物体成像，此时相当于将无穷远的物体成像在焦点处；这种方法在我们的傅里叶光学套件手册的搭建和调节章节中有详细介绍。

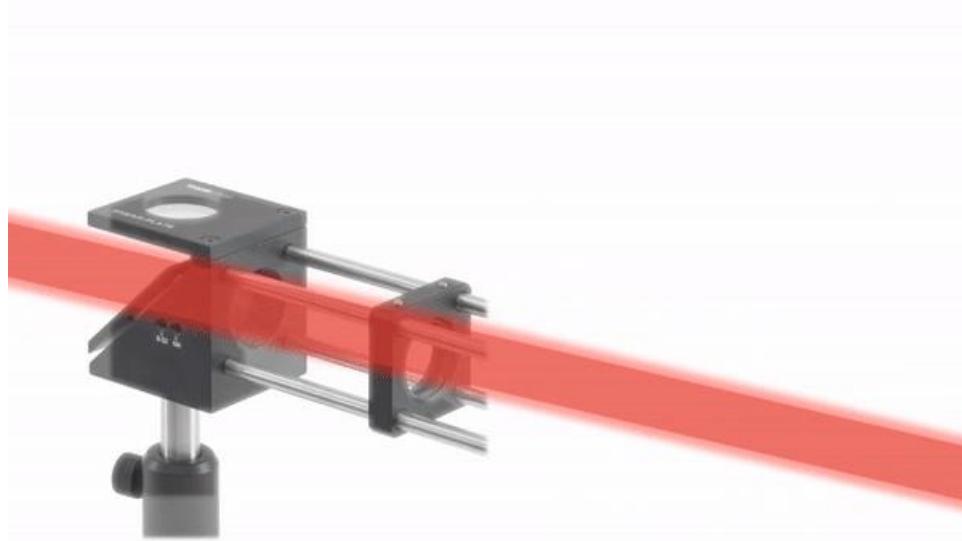
## 2、激光的扩束及准直验证

因为激光器的输出光束直径一般较小，使用前有时需要先扩束，这时可以通过望远镜光路实现，扩束比就是两透镜焦距的比值。此时在焦点附近加一个针孔可消除光束的强度噪声，得到更干净的输出光。为了达到最佳性能应使用平凸透镜，并且将平面一侧朝向焦点，如下图所示。



扩束光路简图，针孔滤波消除强度噪声

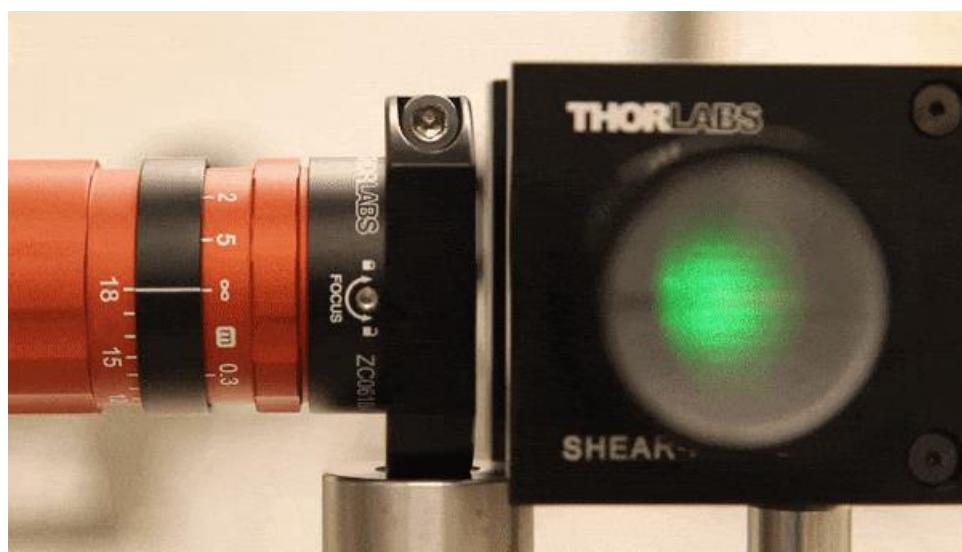
输出光束的准直度可以使用剪切干涉仪验证。激光输入剪切干涉仪后在45度光学平板的前后表面形成菲涅尔反射，两反射光束的干涉条纹通过刻有参考线的顶部散射片观察。如果干涉条纹和参考线平行则说明入射光束是准直的，否则是发散或汇聚的。



## 演示

剪切干涉仪的工作原理

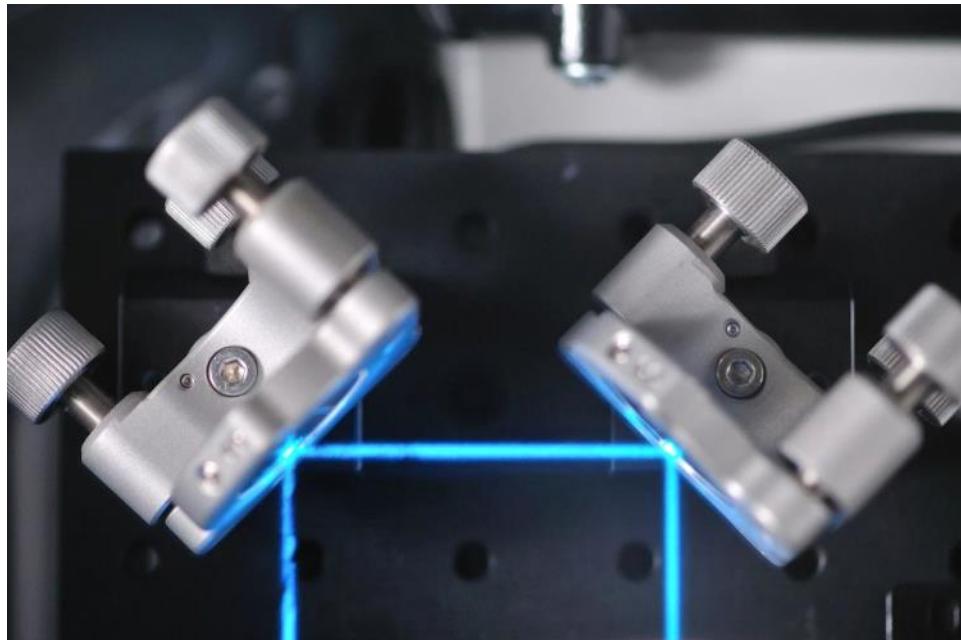
前后表面的反射光束形成干涉



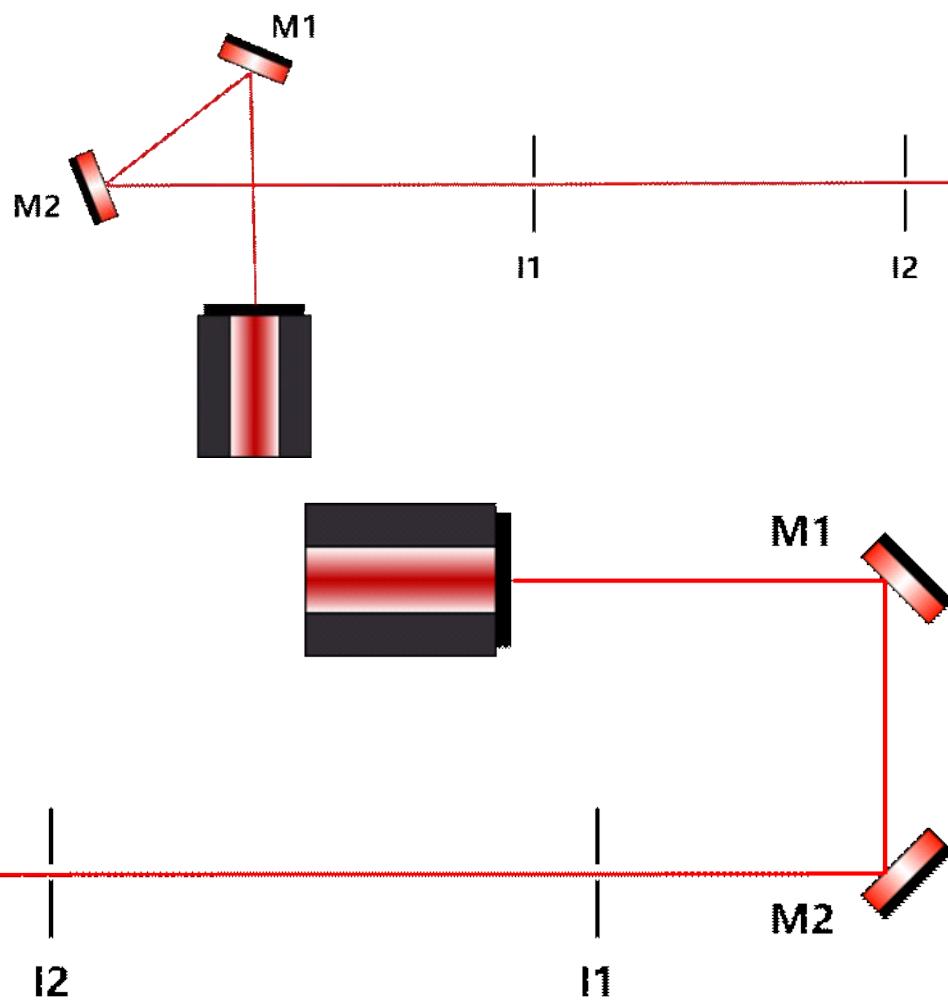
## 演示

通过剪切干涉仪验证准直器性能：干涉条纹一直与参考线平行，说明调节焦距时不会影响光束的准直。

### 3、通过反射镜对准光路



搭建或调节自由空间光路时经常使用两个反射镜和两个光阑或小孔进行光轴对准，反射镜安装在光学调整架中具有两个调节自由度，下面是两种典型配置。



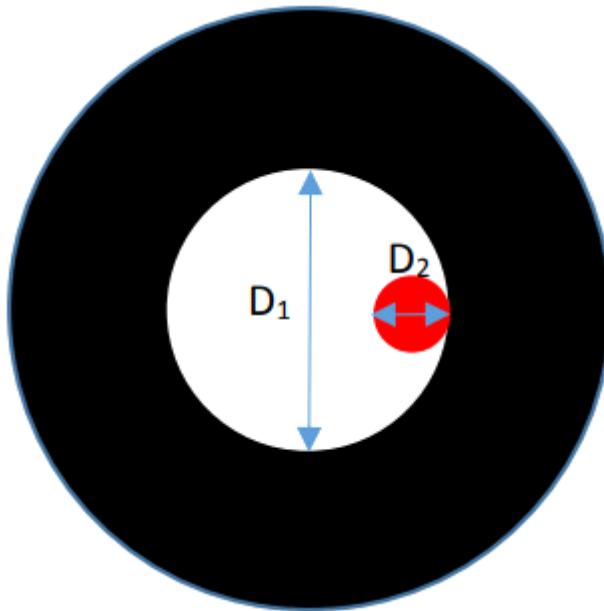
对准时可以采用以下步骤：粗略对准两个反射镜，使光束不要太偏离理想位置。调节反射镜M1使光束通过光阑I1，此时光束可能被光阑I2阻挡。调节反射镜M2使光束通过I2，如果光束被I1阻挡

可以将其打开。反复操作以上两个步骤，直到光束同时通过两个光阑的中心。

请注意，使用第一个反射镜M1使光束对准第一个光阑l1，使用M2对准l2，顺序不能弄反，否则光路很快就偏了。

### 误差分析

通过 $(D_1 - D_2)/\Delta z$ 可以估算这种调节方法的最大角度误差。如下图所示， $D_1$ 是光阑直径， $D_2$ 是光束直径，而 $\Delta z$ 是两个光阑的间距。显然，在光束直径一定的情况下，**加大光阑间距或减小光阑孔径都可以降低对准误差。**



降低对准误差：

1. 增加光束直径
2. 减小光阑孔径
3. 增加光阑间距

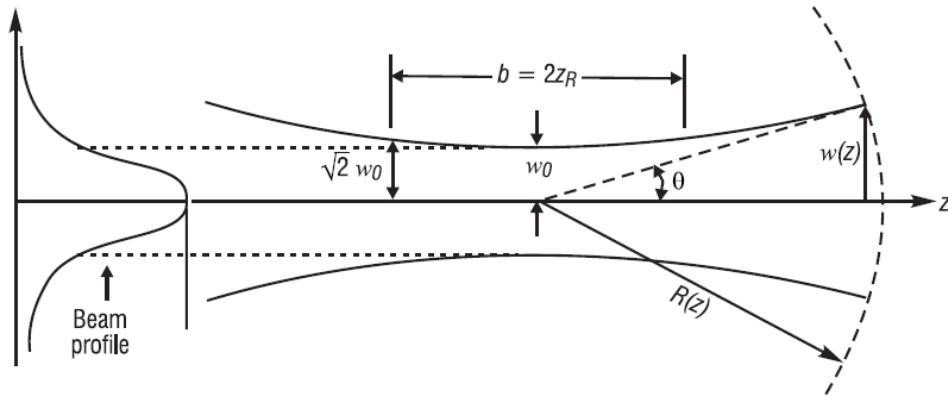
本文主要参考资料为这本书的附录 [Practical Guide to Optical Alignment](#)

## 高斯光束：基本公式和应用

主要内容如下：

1. 高斯光束公式概览和视频教程
2. 高斯光束通过圆形孔径的透过率
3. 高斯光束不同半径的换算关系
4. 单模光纤准直参数的理论计算

### 1、高斯光束基本公式概览和视频教程



横向光强分布

$$I(z, r) = \frac{2P}{\pi\omega(z)^2} \exp\left(\frac{-2r^2}{\omega(z)^2}\right)$$

$1/e^2$  光束半径

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi\omega_0^2}\right)^2}$$

波前曲率半径

$$R(z) = z \left[ 1 + \left(\frac{\pi\omega_0^2}{\lambda z}\right)^2 \right]$$

远场发散角

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi\omega_0}$$

瑞利距离

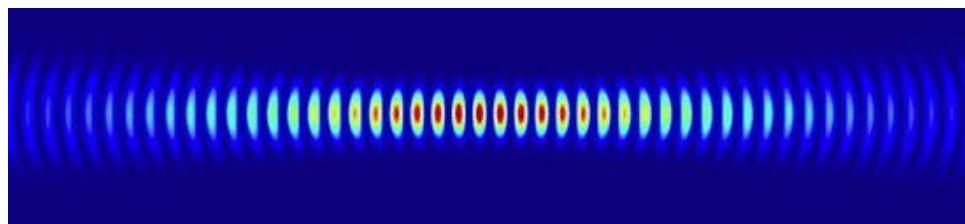
$$z_R = \frac{\pi\omega_0^2}{\lambda}$$

为了方便您更直观地理解高斯光束性质，下面分享一个很赞的高斯光束基础教程视频，讲解人为德国夫琅禾费激光技术研究所的Reinhart Poprawe教授。

### 视频

大小52M，时长20分钟

## 2、高斯光束通过圆形孔径的透过率



假设高斯光束在传播过程中遇到一个圆形孔径，那么光束通过圆孔的功率比为：

$$1 - \exp\left(\frac{-2a^2}{\omega^2}\right)$$

$a$  = 圆孔半径

=  $1/e^2$  光束半径，即光强降为中心光强 $1/e^2$  处的光束直径

**问题分析** 因为高斯光束的横向光强分布为：

$$I(r) = I_0 \exp\left(\frac{-2r^2}{\omega^2}\right)$$

=  $1/e^2$  光束半径

$r$  = 光束中某点与中心轴的距离 通过在整个圆形孔径上积分，我们可算出高斯光束通过圆孔的功率比：

$$\frac{P(a)}{P} = \int_0^a I(r) \frac{2\pi r dr}{P} = 1 - \exp\left(\frac{-2a^2}{\omega^2}\right)$$

$P$  为光束总功率， $P(a)$  为从圆孔透过的功率。根据上述公式，如果圆孔半径刚好为 $\omega$ ，那么透过率为 $1-1/e^2$ ，即 86.5%。如果圆孔半径为 $0.5\omega$ ，那么透过率为 39%；如果圆孔半径达到 $2\omega$ ，那么透过率接近百分之百。

根据以上分析，在激光应用中一定注意光学元件的通光孔径。对于理想的高斯光束，假设要求损耗低于 1%，那么光学元件的通光孔径应大于入射光束 $1/e^2$  半径的 1.5 倍，或者大于 FWHM 半径的 2.6 倍。下面将介绍高斯光束不同半径标准之间的换算关系。

### 3、高斯光束不同半径的换算关系

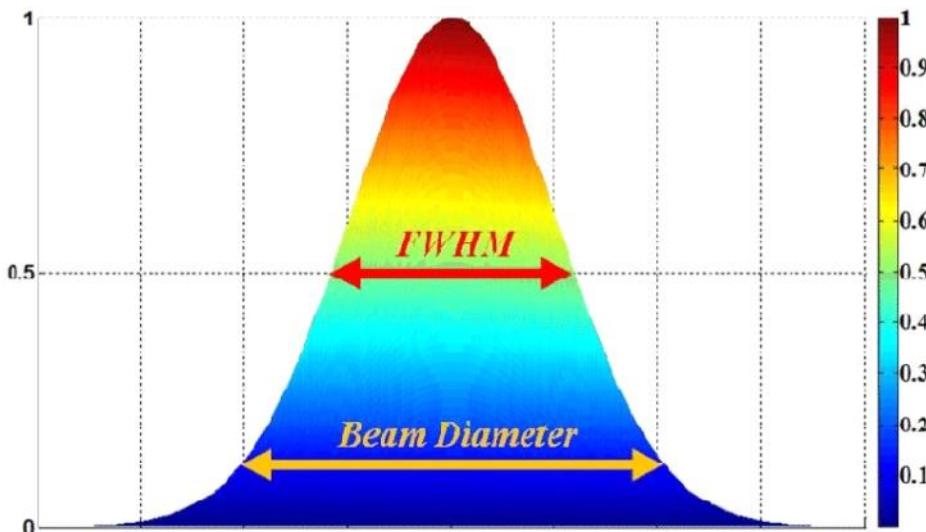
高斯光束具有很多不同的半径定义：

$r(86.5\%) =$

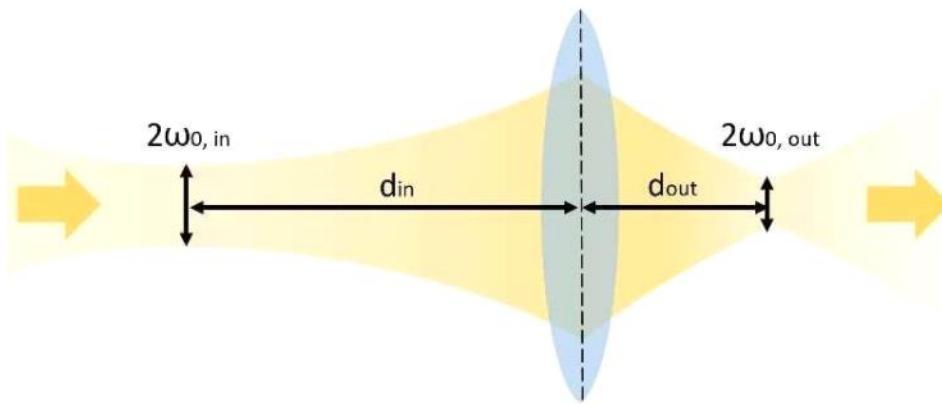
$r(99\%) = 1.5 \cdot$

$r(50\%) = 0.6 \cdot$

为了统一，以上使用  $r(x\%)$  表示包含光束总功率  $x\%$  的半径，这些换算关系很容易通过前文中的公式导出。 $r(86.5\%)$  就是常说的  $1/e^2$  光束半径，此半径范围内的光束功率为  $1-1/e^2$ ，即 86.5%，而  $r(50\%)$  也叫做 3 dB 半径或者 FWHM 半径。



#### 4、单模光纤准直参数的理论计算



如上图所示，假设高斯光束通过理想的薄透镜传播，我们可根据以下公式计算透射光束的参数：

$$\frac{1}{\omega_{0,out}^2} = \frac{1}{\omega_{0,in}^2} \left( 1 - \frac{d_{in}}{f} \right)^2 + \frac{1}{f^2} \left( \frac{\pi \omega_{0,in}}{\lambda} \right)^2$$

$$d_{out} = f + \frac{f^2(d_{in} - f)}{(d_{in} - f)^2 + \left( \frac{\pi \omega_{0,in}}{\lambda} \right)^2}$$

因为单模光纤的输出接近高斯光束，所以单模光纤准直的本质就是高斯光束通过透镜传播的特殊情况，此时满足以下条件：

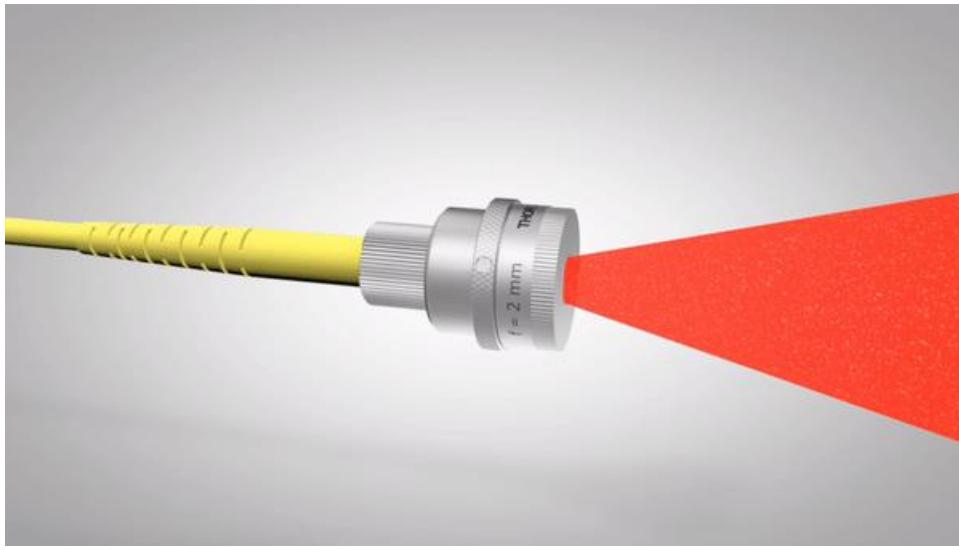
$$d_{in} = f; \omega_{0,in} = \frac{MFD}{2}; \omega_{0,out} = \frac{D}{2}$$

MFD为光纤模场直径，D为准直输出光束直径， $\Theta$ 为准直输出光束的全发散角，化简上面的公式可得单模光纤准直的主要参数：

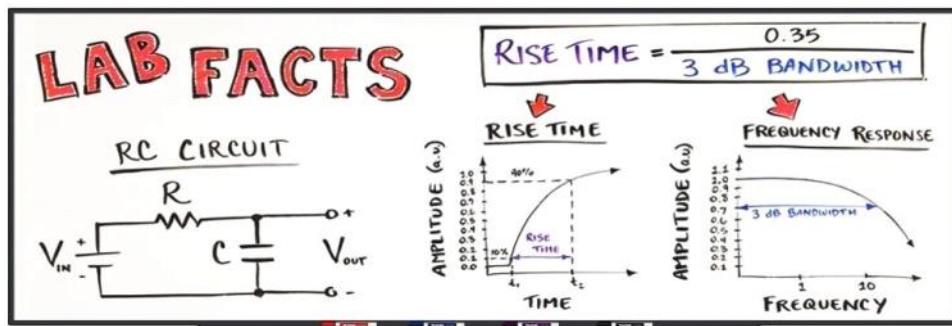
$$D = \frac{4f\lambda}{\pi MFD} \quad d_{out} = f \quad \Theta = \frac{MFD}{f}$$

通过准直透镜输出后，光束能够保持准直的范围是透镜焦距f加上输出光束的瑞利距离。

下图是Thorlabs可调光纤准直器使用的动态图，调节透镜和光纤端面的距离可以调节输出光束的准直度，可谓增一分则太肥、减一分则太瘦。



上升时间和3 dB带宽的关系推导



上升时间和3 dB带宽是表征系统响应速度的两个重要参量。如果系统的响应行为类似于RC低通电子滤波器，那么两者的乘积约为0.35。

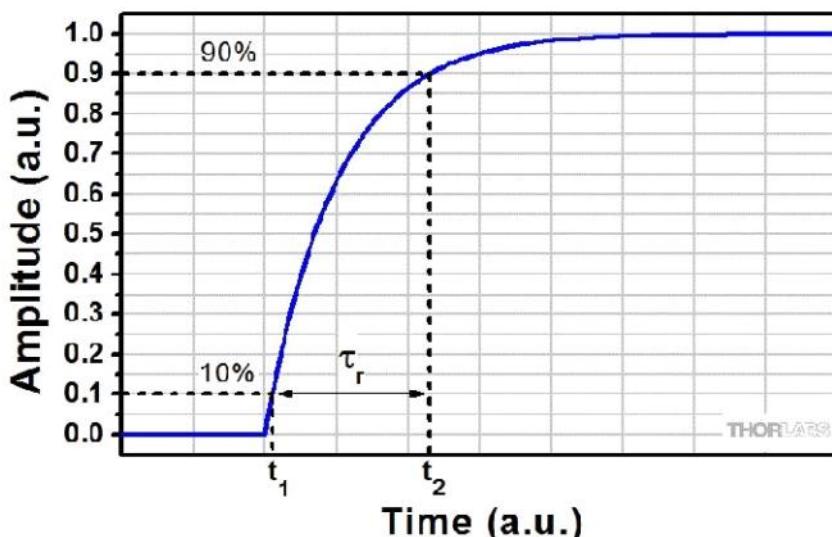
$$\tau_r \cong \frac{0.35}{f_{3dB}}$$

这个公式以一种简单的方式将时域和频域联系起来，适用于很多基于光电二极管的系统和其它一阶电光系统。今天，让我们回到基础电子学，介绍如何使用理想的RC低通滤波电路模型推导这个公式，并通过两个实验说明它在光电探测中的用途。

### 1、上升时间和3 dB带宽的概念

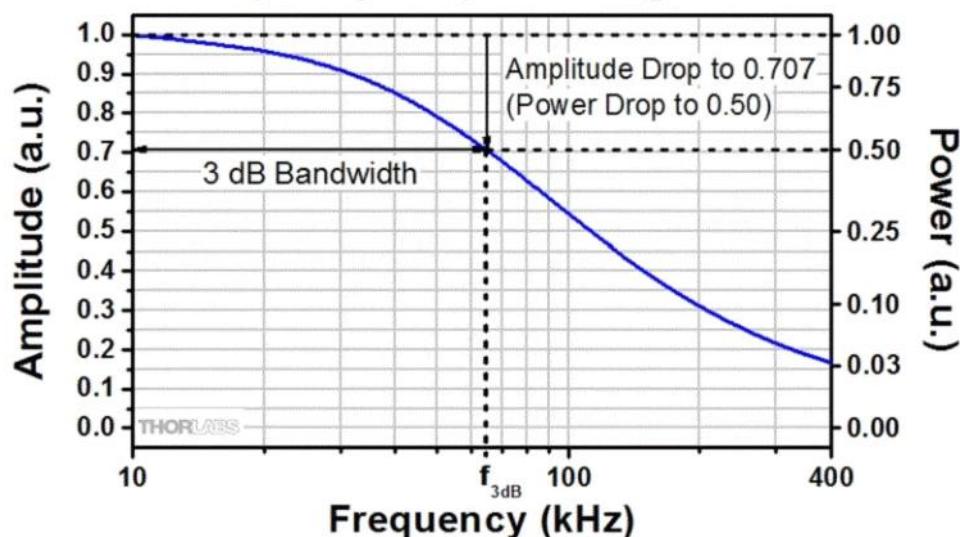
上升时间( $\square\square$ )通常定义为信号从最大稳态值的10%上升到90%的过渡时间。3 dB带宽( $f_{3dB}$ )表示系统支持的电频率范围，如果输入信号的频率处于这个范围，那么通过系统后的输出信号衰减很小，而3 dB带宽范围之外的信号将被严重衰减。

### Rise Time Definition



上升时间曲线

### Frequency Response Magnitude



3 dB带宽曲线

简单解释一下右上图中各个数字的含义。具体而言，3 dB带宽是指相对参考值的电压比例系数 $\geq 0.707$ 的频率范围(Amplitude坐标)，等同于功率比例系数 $\geq 0.5$ 的频率范围(Power坐标)，而0.5对应的是-3 dB，但是我们一般略去负号只说3 dB带宽。这段话以数学语言表达就是：

$$\frac{p}{p_0} = \frac{v^2}{v_0^2} = 0.707^2 = 0.5$$

$$10 \log_{10} 0.5 = -3 \text{ dB}$$

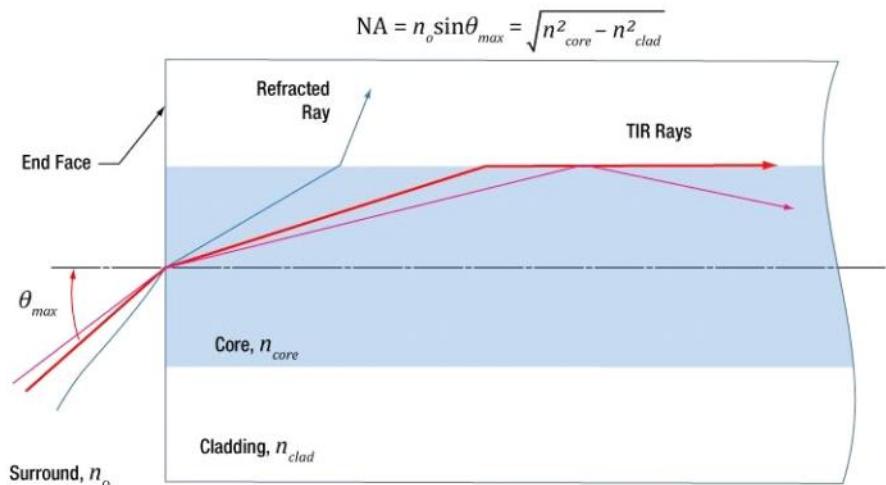
【<https://mp.weixin.qq.com/s/MYdRBUI87whPSCjnBszkrQ>】

关于光纤耦合

## 1、什么情况下能用NA准确估算光纤接收角？

多模光纤的最大接收角一般可用数值孔径(NA)较为准确地估算，但是这种关系对单模光纤不适用。

NA和最大接收角( $\theta_{max}$ )的关系可通过几何光学计算得到，公式请见下图。如果把入射光看成一条条射线， $\theta_{max}$ 就表示光纤收集离轴光线的能力：入射角小于等于 $\theta_{max}$ 的光线(红色和粉色)在纤芯和包层界面发生全内反射(TIR)，将被约束在纤芯中向前传播；入射角大于 $\theta_{max}$ 的光线(蓝色)由于折射最终被损耗。



### 入射角和光纤模式

入射角 $\leq \theta_{max}$ 的光线将被耦合到多模光纤某个导模中。一般而言，入射角越小，被激发的光纤模式阶数越低。大部分能量集中在中心附近的低阶模式中，正入射光线激发最低阶模式。下面是两种多模光纤传播示意图。

#### 渐变折射率多模光纤

#### 阶跃折射率多模光纤

#### **单模光纤不一样**

使用上述公式计算的NA不是单模光纤的最大入射角，故无法表征单模光纤的光接收能力。

单模光纤中只存在由0度入射光激发的最低阶导模，传播示意图如下。

#### 演示

使用NA估算单模光纤输出的发散角很不准确。此时光束因衍射而发散，几何光学不考虑这种效应，所以需要波动光学。如何使用高斯光束传播理论计算单模光纤发散角请看第3部分。

## 2、为什么MFD是单模光纤耦合的重要参数？

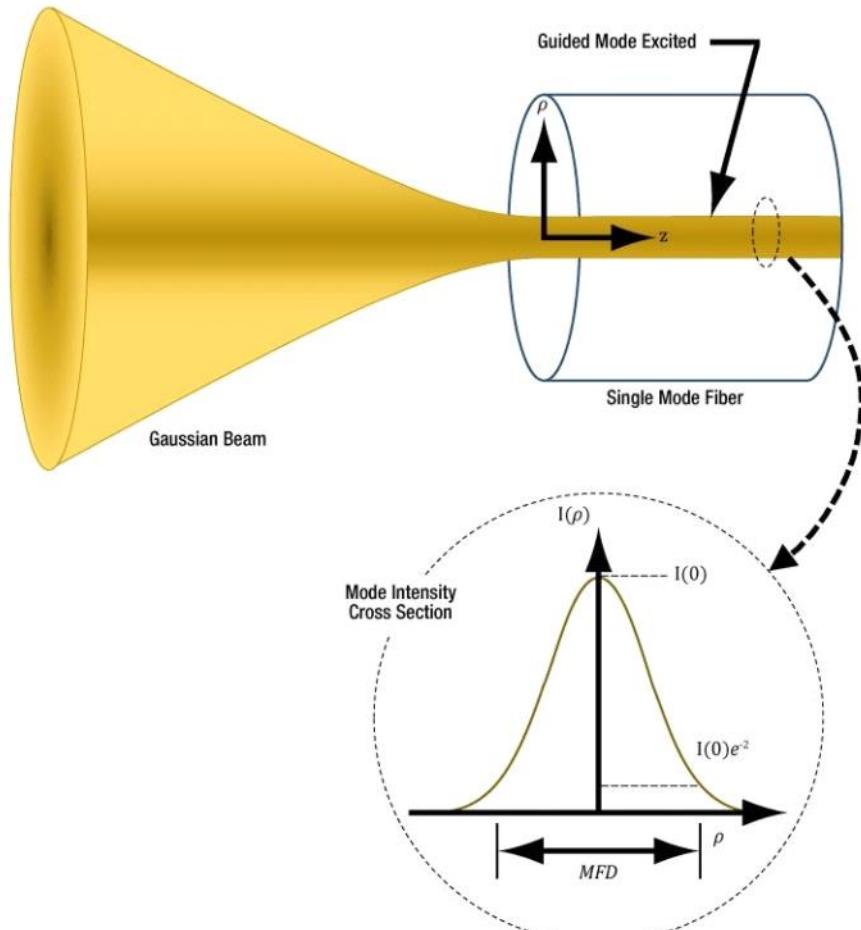
光束沿单模光纤传播时维持接近高斯形的强度轮廓，可用模场直径(MFD)表征轮廓宽度，即强度降到峰值的 $1/e^2$ 时所跨的宽度。经验法则：MFD约为纤芯直径的1.15倍。

入射光越接近高斯光，耦合效率越高。如果入射光为高斯光，并且束腰等于光纤MFD，那么可以达到很高的耦合效率。在高斯光束公式中用MFD代入束腰直径可以准确计算单模光纤的耦合参数和发散角。

#### **确定耦合参数**

单模光纤只有一种导模，可用贝塞尔函数描述。由于形状相似，使用高斯函数可以简化光纤模式，同时提供准确结果。下图中展示了单模光纤的模式强度轮廓，入射光只有与之匹配才

能被耦合到导模中。



### 单模光纤耦合

提高单模光纤耦合效率要求入射高斯光束的束腰位于光纤端面，且束腰强度和模式强度匹配重合。如果束腰直径不等于MFD、光束强度轮廓变化或者偏离，又或者没有沿光纤轴向入射，这些情况都会降低耦合效率。详细介绍请见第4部分。

### 3、NA能否准确估算单模光纤输出的发散角？

使用NA估算单模光纤的发散角存在较大误差，更准确的方法是使用高斯光束传播理论。单模光纤的远场发散角的近似计算公式如下，其结果是以弧度为单位的发散角或接收角。

$$\theta_{SM} = \frac{\lambda}{\pi(MFD/2)} \approx \frac{0.64 * \lambda}{MFD}$$

单模光纤的输出类似高斯光，如用几何光学计算发散角有较大偏差。几何光学计算的发散角等于 $\arcsin(NA)$ ，只适用于一般的多模光纤。

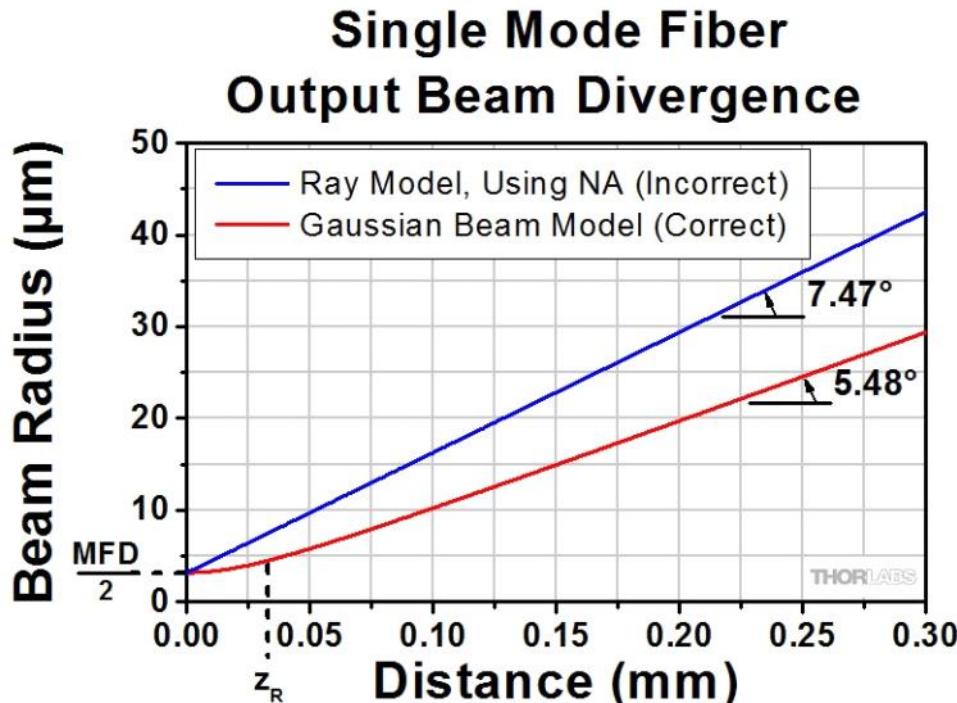
单模光纤输出高斯光束，瑞利距离和z点处的光束半径分别用下面两个公式计算。

$$z_R = \frac{\pi}{\lambda} \left( \frac{MFD}{2} \right)^2$$

$$w(z) = \frac{MFD}{z} \sqrt{1 + \left( \frac{z}{z_R} \right)^2}$$

据此可以准确模拟单模光纤输出光束的发散角，如下图所示。显然，根据几何光学理论使用NA计算发散角存在很大误差。此例中NA和MFD分别等于0.13和6.4  $\mu\text{m}$ 。工作波长为980

nm, 瑞利距离为 $32.8 \mu\text{m}$ 。

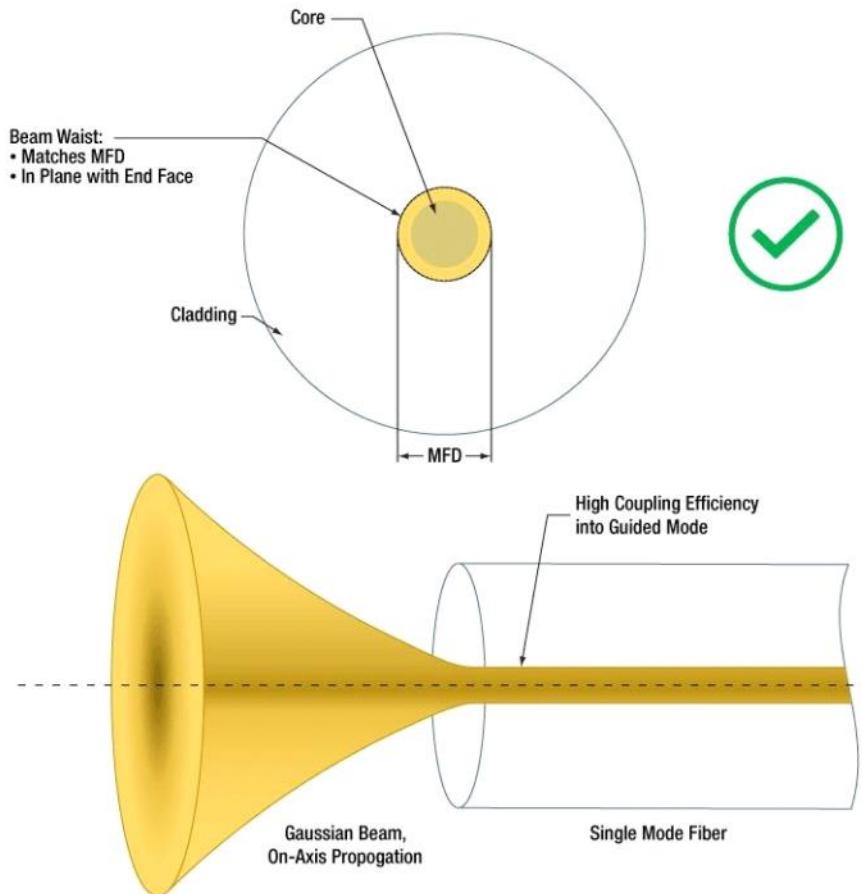


从图中可看出，在瑞利距离以内时，光束发散率不是线性的，而在远场可看成近似线性。图中标注的两个角度值根据各自曲线的斜率计算。如果使用上面的远场近似公式计算，结果转换成角度为 $5.61^\circ$ ，误差较小。

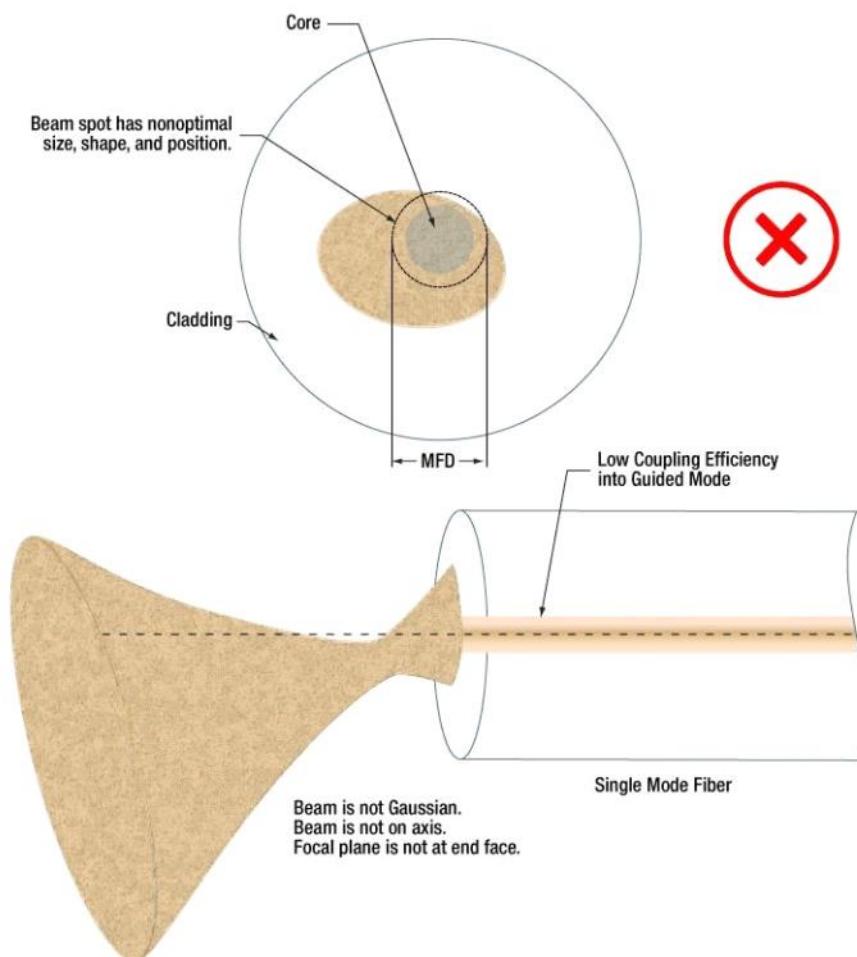
#### 4、影响单模光纤耦合效率的因素有哪些？

调节入射光束的角度、位置和强度轮廓可以提高单模光纤的耦合效率。假设光纤端面为平面并与轴向垂直，满足以下条件的光束可以到达最高耦合效率：

- 高斯强度轮廓
- 从光纤端面正入射
- 束腰位于光纤端面
- 束腰中心对准纤芯中心
- 束腰直径等于光纤MFD



### ✓ 搭合方式



## X耦合方式

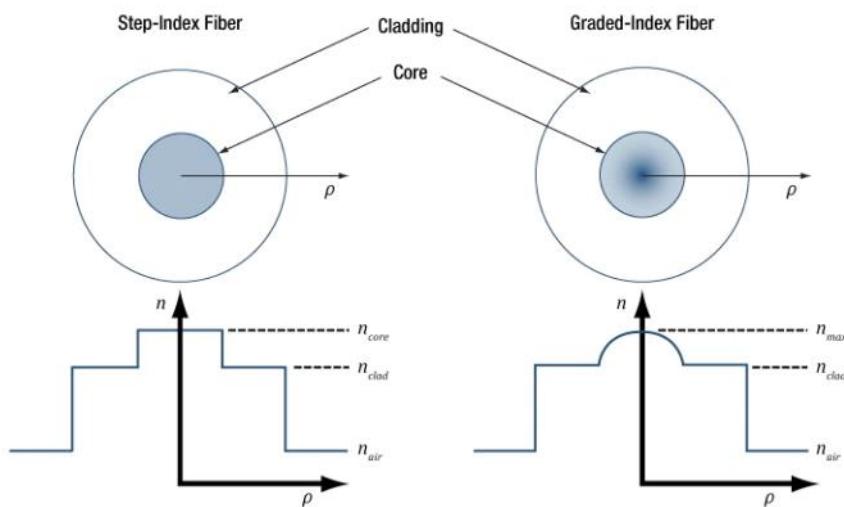
### 光源可能限制耦合效率

如果激光器只发射最低阶横模，那么输出近似高斯光束，可以高效耦合到单模光纤中。但是多模激光或宽带光源和单模光纤的耦合效率很低，即使聚焦到纤芯区域，大部分光会被泄露。这是因为多模光源只有一部分光匹配单模光纤导模特征，所以多模光源可以用多模光纤提供更高的耦合效率。

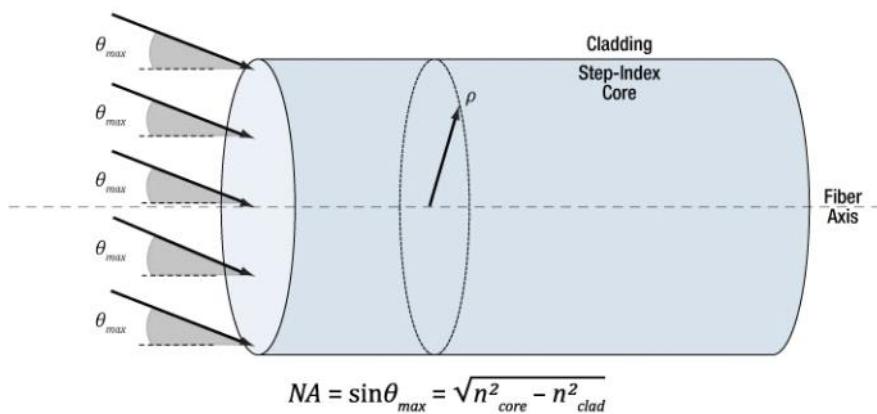
## 5、多模光纤的最大接收角是不是固定的？

这个问题取决于光纤类型。对于阶跃折射率多模光纤，纤芯上每个点的最大接收角都是一样的。但是，渐变折射率多模光纤只有纤芯中心处才能提供最大的入射角。距离中心越远，最大接收角越小，在包层界面附近的最大接收角趋近于0。

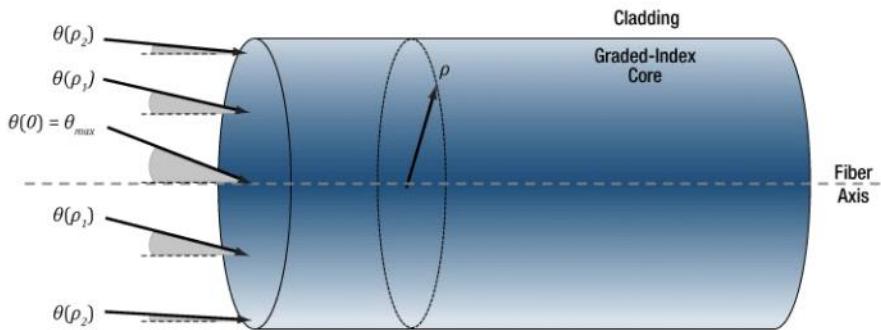
下图中比较了两种多模光纤的不同：左边为阶跃折射率多模光纤，折射率在整个纤芯上都是恒定的。右边为渐变折射率多模光纤，折射率随纤芯位置不同，最大折射率一般在中心位置。



对于阶跃折射率多模光纤，如果入射光线角度小于等于 $|\theta_{\max}|$ ，就能被阶跃折射率多模光纤高效耦合。纤芯径向上每个点的最大接收角都是一样的，详见下图。



对于渐变折射率多模光纤，因为纤芯折射率随径向距离变化，所以接收角也随径向距离变化。纤芯中心处的接收角最大，而包层边界附近的接收角趋近于零，详见下图。



$$NA(\rho) = \sin[\theta(\rho)] = \sqrt{n_{core}^2(\rho) - n_{clad}^2}$$

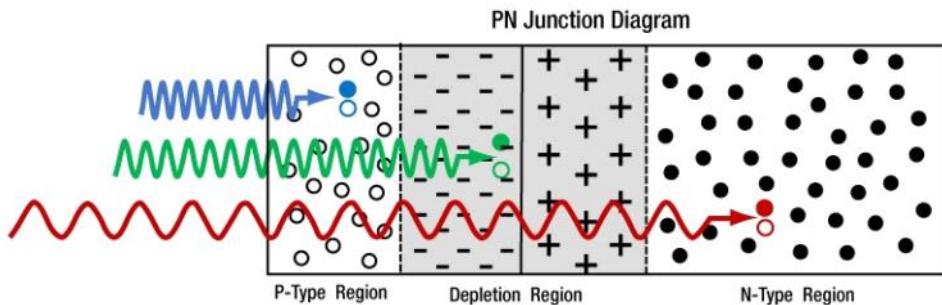
### 阶跃折射率还是渐变折射率？

阶跃折射率多模光纤能接收更多的光。渐变折射率多模光纤中所有导模具有相似的传播速度，可以降低光束传播过程中的模式色散。  
如果应用中要求在多模光纤中耦合尽可能多的光，并且受模式色散影响较小，阶跃折射率多模光纤可能是更好的选择。反之应该考虑渐变折射率多模光纤。

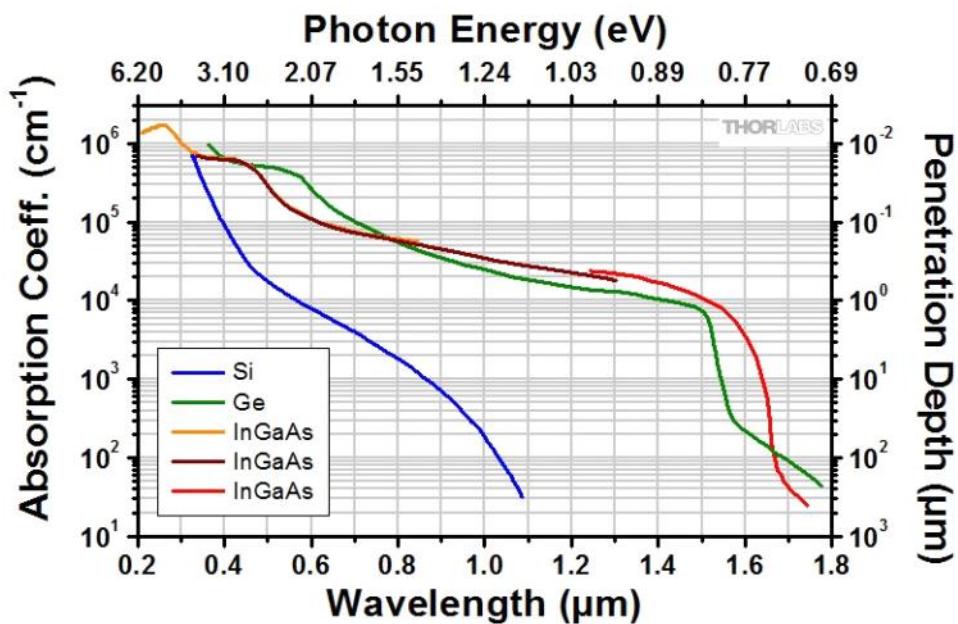
## 实用光学经验

### 1、波长如何影响光电二极管的上升时间？

光子入射光电二极管时，如果没有被菲涅尔反射将进入半导体继续传播，然后被吸收或到达末端。吸收一个光子产生一对电荷载流子。耗尽区内产生的载流子几乎瞬间形成光电流，但耗尽区外的载流子需要多一步才能进入耗尽区，所用的时间叫做扩散时间。在下图中，蓝色和红色光子分别在P区和N区产生载流子，这些载流子必须扩散到耗尽区内。



光波长不同，穿透深度不同

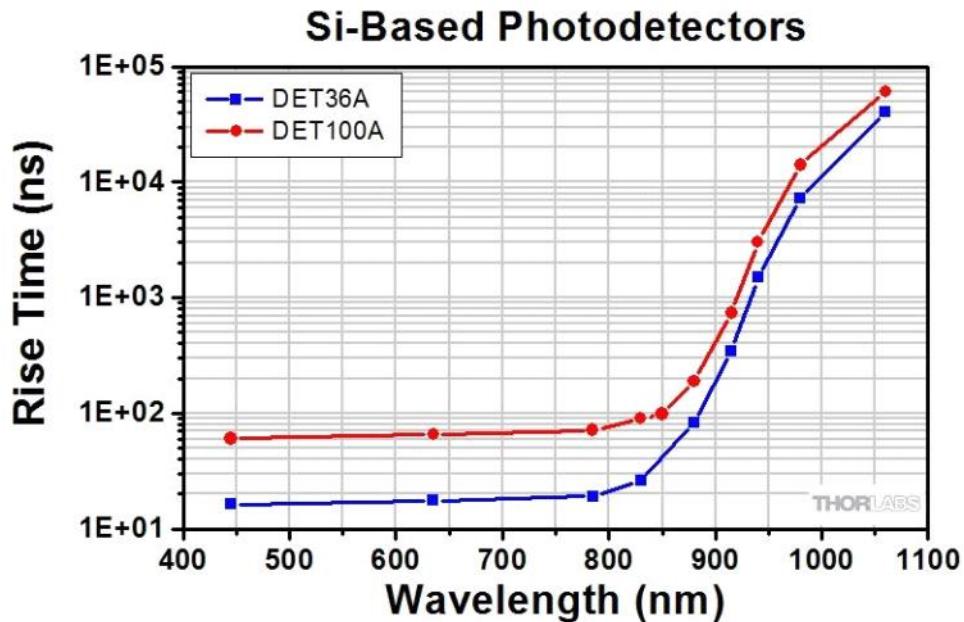


Si, Ge和InGaAs的吸收系数和穿透深度

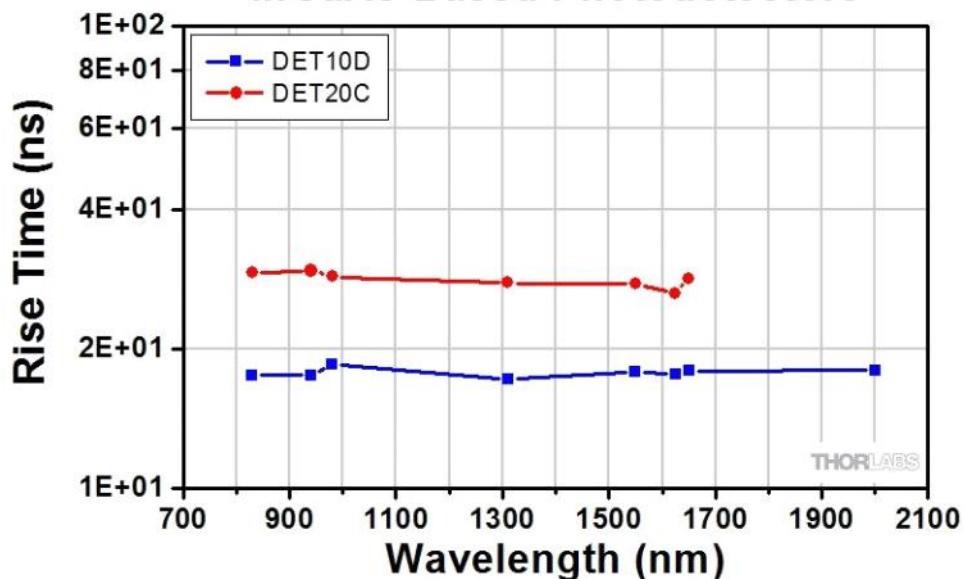
光子波长越长，吸收越小，穿透越深

上图展示了各种探测器材料与波长相关的吸收系数和穿透深度。波长越长，吸收系数越小，因此长波光子需要传播更长的平均距离才会被吸收并产生载流子。距离耗尽区越远，上升时间越长。

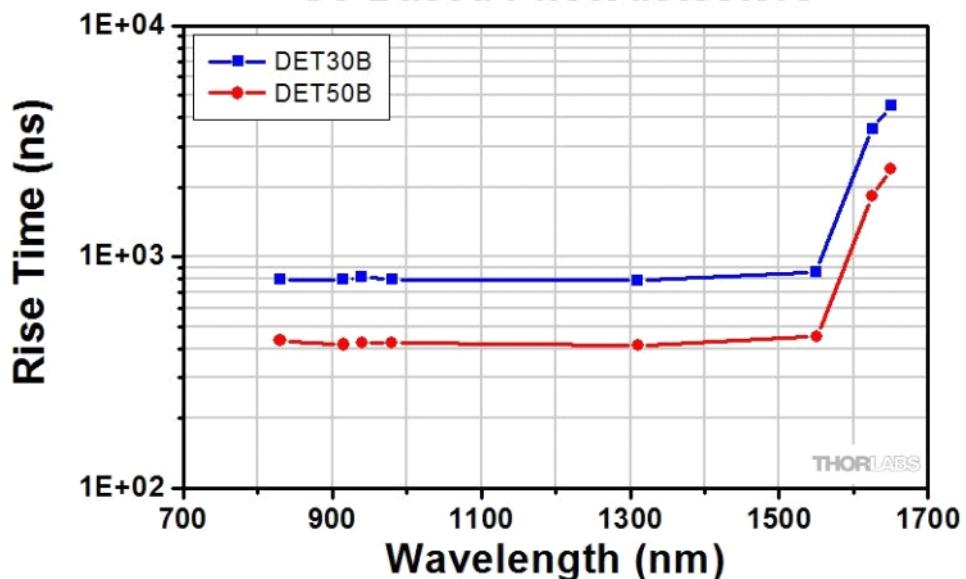
下面三图分别展示了Si, InGaAs和Ge光电二极管的测量上升时间。以Si为例，波长小于800 nm时曲线斜率几乎平坦，说明如果光子在表面附近被吸收，那么扩散时间可忽略不计。波长大于800 nm后上升时间呈指数增长。由于Si在800 nm的穿透深度为9 μm，这说明从二极管顶部到耗尽区底部的距离小于9 μm。



## InGaAs-Based Photodetectors

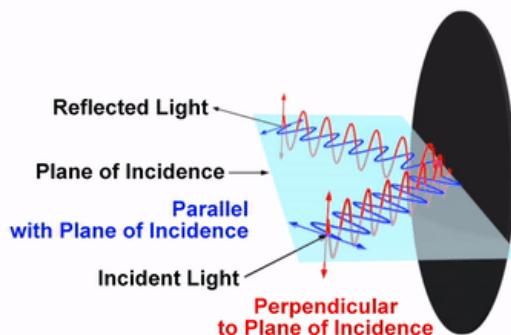


## Ge-Based Photodetectors



### 2、同一对偏振CP为何有不同的名字？

这对CP当然是指两个正交偏振分量。偏振光入射在某个表面上时，通常分解成垂直分量和平行分量，这两个分量加上光束传播方向两两正交，如下面的动态图所示。平行分量的振荡电场与入射平面平行，垂直分量的振荡电场与入射平面垂直。



可能由于不同的语言和应用场合，偏振分量有多种不同的标记符号，有时可能让人不好判断哪个是哪个，下表中总结了五组不同的表示方法。

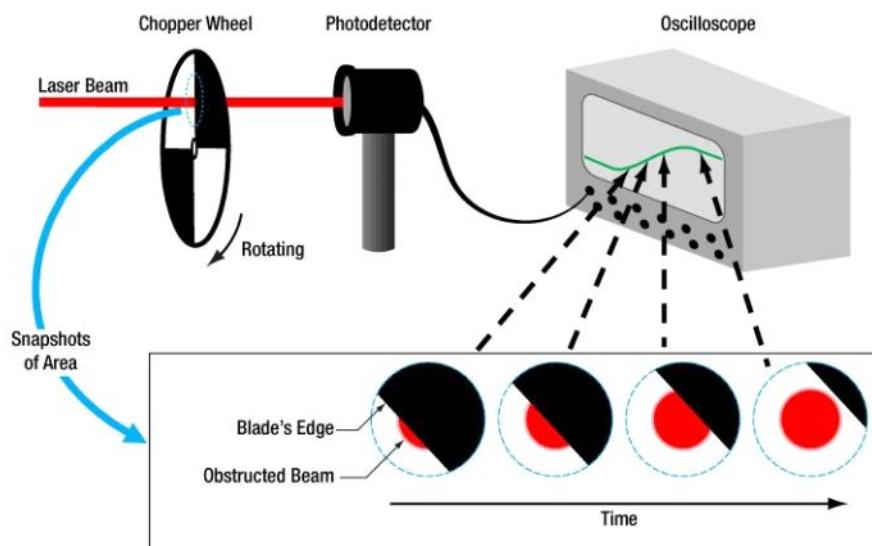
垂直分量	平行分量
s	p
TE	TM
⊥	//
σ	π
Sagittal	Tangential

s表示垂直因为它是德语senkrecht的首字母，p为parallel的首字母；TE和TM分别是横电场和横磁场。垂直和平行分量都是相对入射平面(由入射光线和反射光线确定)而言：垂直分量与入射平面垂直，平行分量与入射平面平行。

正入射：由于正入射时无法定义入射平面，所以无法明确定义垂直和平行分量。不过此时所有分量的反射率相同，所以一般不用区分。

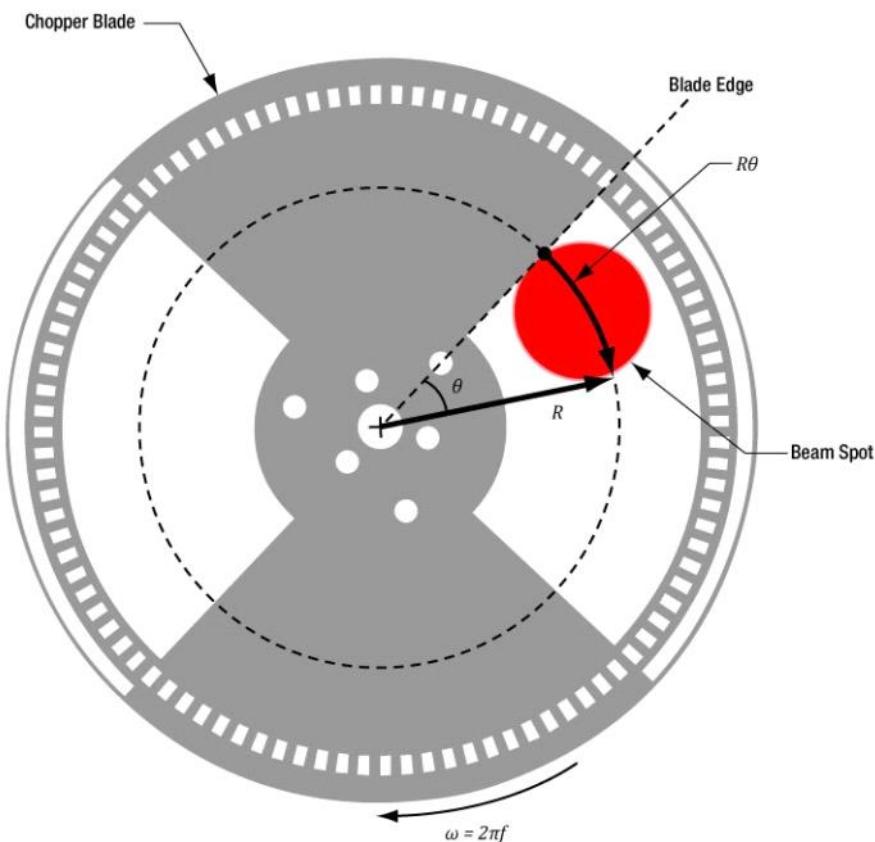
### 3、如何使用斩波器测量光斑？

如果光斑太小或者波长范围不对时，相机和扫描狭缝光束轮廓仪无法准确测量光斑，这种情况可以使用斩波器、光电探测器和示波器近似测量，原理图如下所示。这种方法要求探测器和示波器的组合响应速度远高于信号变化率。



斩波器测量光斑的原理图

叶片边缘扫过光束时，示波器上将显示S形追迹曲线，其上升或下降时间与叶片运动方向上的光斑大小成正比。叶片扫描光束如下图所示，假设距离中心为R的某点扫过光束的角度为  $\theta$ ，那么弧长为  $R\theta$ ，约等于这个方向的光斑直径。



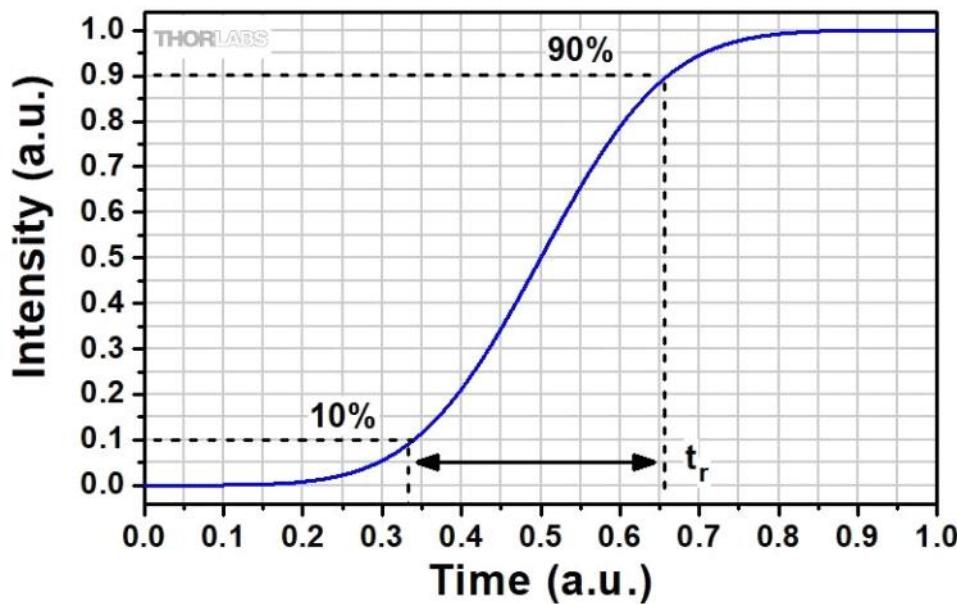
### 测量实例

光斑相对中心的角度  $\theta = 2\pi f t_r$ , 其中  $f$  是以Hz为单位的转速,  $t_r$  是上升时间, 因此通过光斑的弧长  $R\theta = R \cdot 2\pi f t_r$ 。因此, 较小高斯光斑的 $1/e^2$  直径( $D$ )可用下式计算:

$$D \cong 0.64(2\pi f t_r)R$$

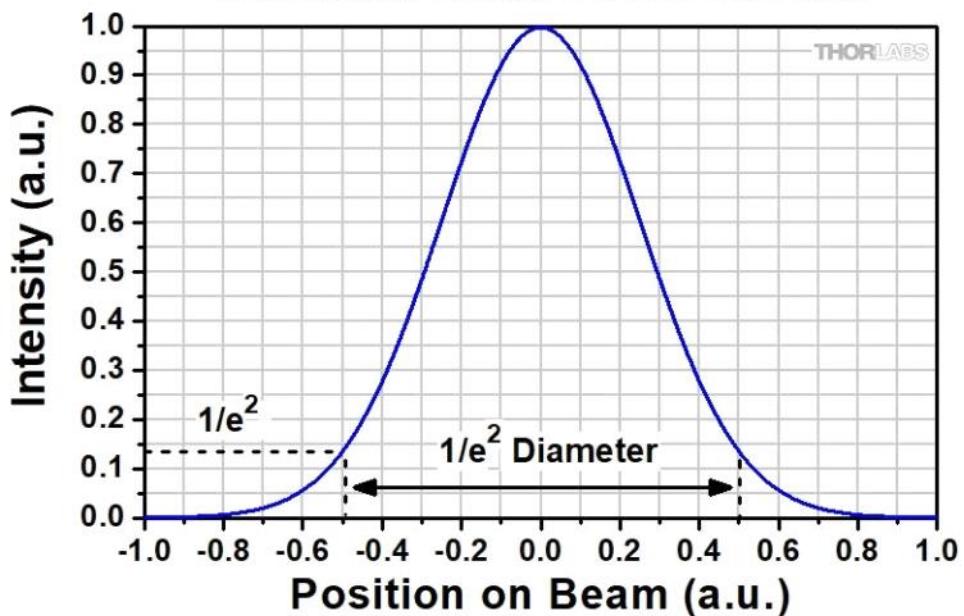
0.64表示强度从10%到90%的上升时间系数。下面两图分别是强度信号的上升时间曲线和高斯光束的 $1/e^2$  直径。

### Transmitted Beam Intensity



强度信号的上升时间

## Gaussian Beam Cross Section

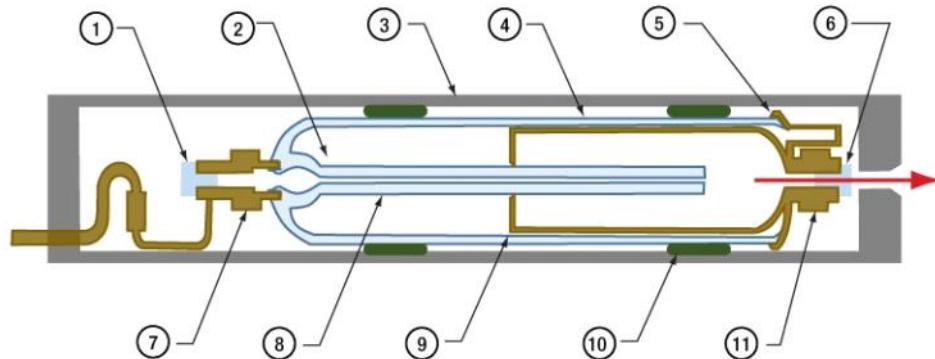


高斯光束的 $1/e^2$ 直径

### 4、使用氦氖激光器需要注意什么？

使用氦氖激光器必须轻拿轻放。绝不能对激光器外壳施加弯折力，因为应力可能偏移或损坏激光腔内的组件，产生不良效果：

- 降低光束质量
- 降低输出功率
- 影响光束指向
- 引起多模效应



氦氖激光器构造

1. 高反镜
2. 气体容器
3. 外壳
4. 玻璃
5. 密封件
6. 输出耦合镜
7. 阳极
8. 玻璃内孔
9. 金属弹簧
10. 灌注胶
11. 阴极

工厂包装可防止氦氖激光器在运输过程中受到冲击和振动，但是最终用户将直接通过外壳拿取，这更容易使激光器被危险的应力损坏。所以，损坏氦氖激光器的主要原因是收到激光器后不小心的拿取和操作。在极端情况下，冲击和振动可使内部玻璃组件破碎或开裂。

为了维持您氦氖激光器的最佳性能，绝不能强迫用力插入固定装置，使用笼式组件或环形配件固定(比如以下三种方法)，小心安装，小心搬运，小心存放。轻拿轻放时，氦氖激光器能够维持很长的使用寿命，并且提供最佳性能。



**HCM2**  
HeNe Laser  
Mounted in the  
HCM2 Cage  
System Adapter  
Plate



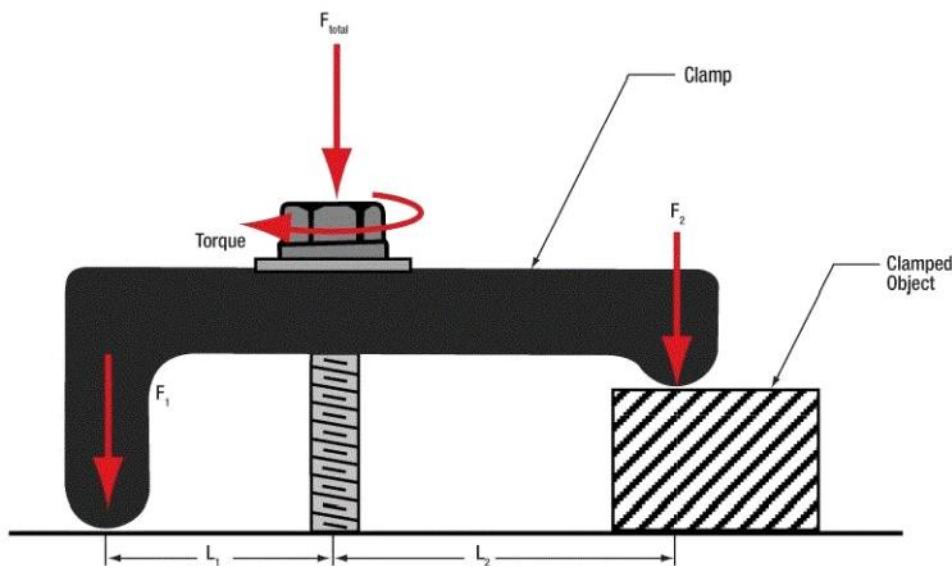
**C1513**  
HeNe Laser Mounted in  
the C1513 V-Clamp



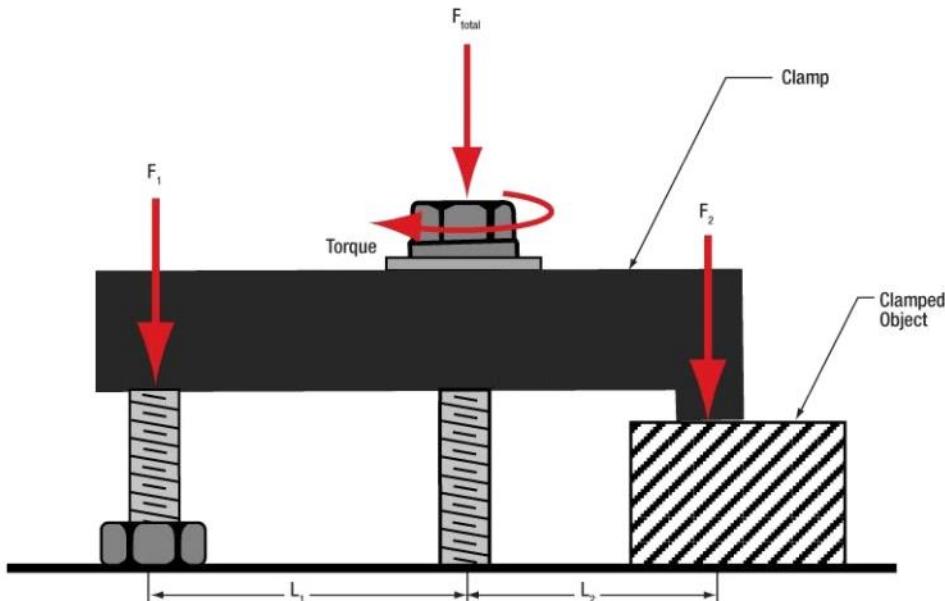
**C174TC**  
HeNe Mounted in the C174TC Tube Clamp

## 5、如何提高压块的夹持力？

下面是两种压块的常见用法。如果螺丝距离被压物体太远可能压得不牢，**为了实现最大压力，螺丝应尽可能靠近被压物体。**



CL5A压块使用图示



CL2压块使用图示

根据杠杆原理：

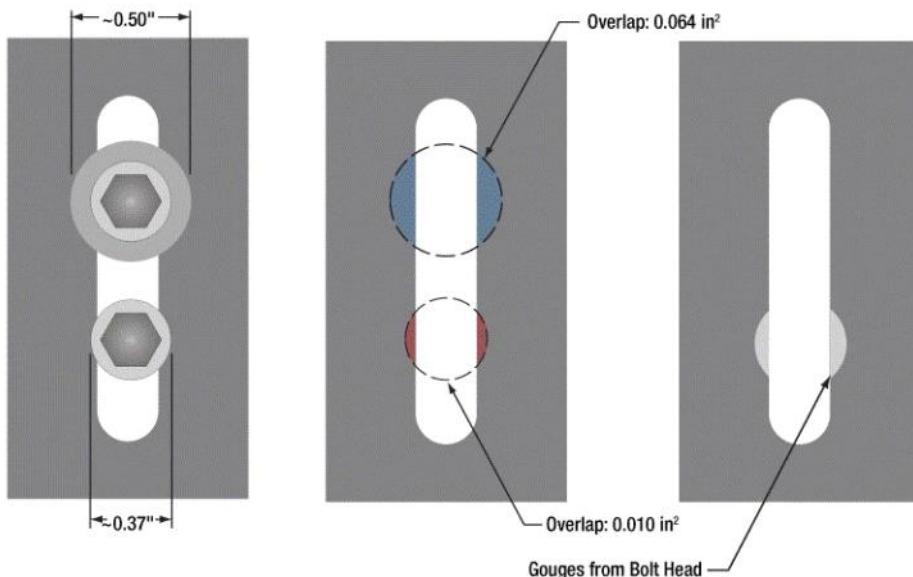
$$F_2 = \frac{L_1}{L_1 + L_2} F_{\text{total}} \quad F_1 = \frac{L_2}{L_1 + L_2} F_{\text{total}}$$

因此，螺丝距离物体越近， $L_1$ 越大，作用于被压物体的力 $F_2$ 越大。 $L_1$ 等于 $L_2$ 时， $F_1$ 和 $F_2$ 都等于总作用力的一半。

注意，压块上表面和它与物体的接触面都必须平行于安装表面，才能获得最大压力。如果不平行，作用力将被分解成与安装表面平行和垂直的两个分力，平行方向的力太大可能使物体滑动。为了适应不同的物体高度，可以像右上图一样使用CL2等压块，通过调节螺丝使压块上表面与台面平行。

## 6、小垫圈如何实现大用途？

对于标准带帽螺丝，螺丝头只比螺杆略粗。如果直接从通孔中拧紧螺丝，由于力作用在通孔边缘，经常压坏材料。材料永久变形后，螺丝头还可能卡入槽内产生漂移。



上方是使用垫圈增大受力面积的示意图，以1/4英寸螺丝为例，螺丝头外径约为0.37英寸，而垫圈外径约为0.5英寸，所以加上垫圈可使狭槽的受力面积增加六倍多，压强相应减小六倍多，大大减小使材料变形的风险。

Thorlabs垫圈的两面不同，一面平坦粗糙，一面光滑弯曲。如下图所示，**光滑曲面应朝向底座的阳极氧化表面，粗糙平面朝向螺丝头**，注意方向不要装反了。



拧螺丝时会使垫圈紧压底座的阳极氧化表面转动。如果用粗糙平面压住阳极氧化表面，由于摩擦会刮坏阳极氧化铝。如果曲面朝下，光滑面的摩擦小，所以不易刮伤，长久保持原始外观。

## 滤光片选择指南

1. 介质膜滤光片：带通、陷波和边通
2. 中性密度滤光片：吸收型和反射型
3. 彩色玻璃滤光片：带通和长波通

## 1、介质膜滤光片

介质膜滤光片通过在基底上镀多层干涉介质膜透过特定波长范围的光，按照透过率曲线形状可分为带通/激光线、陷波和边通(长波通或短波通)

### 带通/激光线滤光片

带通/激光线滤光片光谱范围覆盖紫外/可见光、近红外和中红外。为了方便使用，这些滤光片都安装在外壳中，上面刻有产品型号、中心波长(CWL)、通带范围(FWHM)以及透射方向。安装外径大部分为1英寸，不过也有1/2英寸以及25 mm和12.5 mm版本。

相比标准带通滤光片，优质硬膜带通滤光片具有更高透过率、更陡的起始和截止斜率、更高光学密度的阻带，而且更耐用。

### 陷波滤光片

陷波滤光片也叫带阻滤光片，功能刚好与带通相反。陷波滤光片一般用于隔离激光，比如为了增强拉曼信噪比，可以在探测通道中用陷波滤光片隔离泵浦激光，否则微弱的拉曼信号可能被淹没。另外，陷波滤光片还常用于基于激光的荧光仪器和生物激光系统。

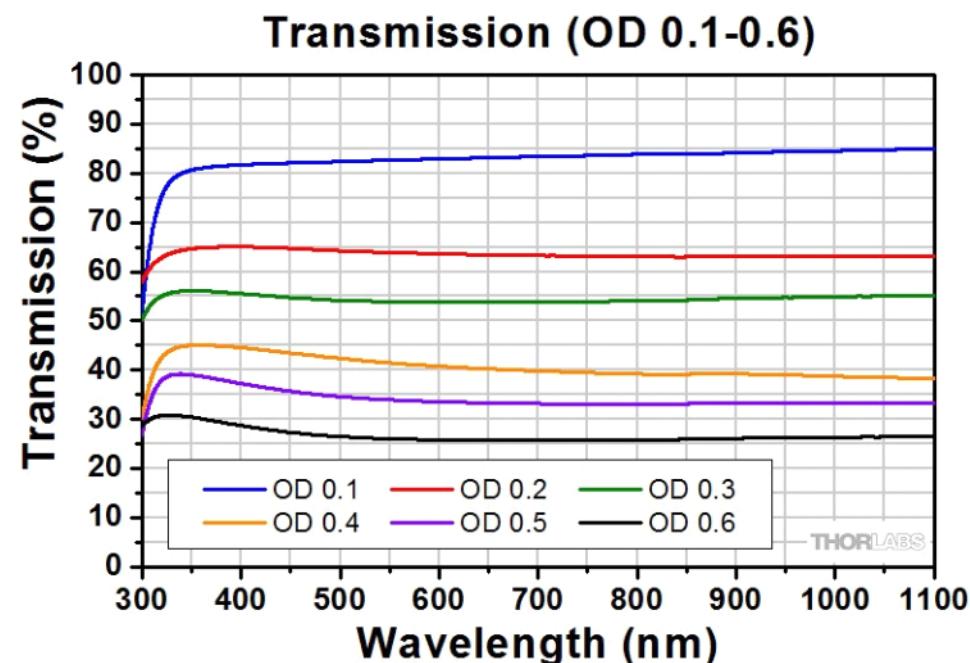
### 边通滤光片

边通滤光片包括长波通和短波通，组合使用可以定制带通滤光片。和带通一样，边通滤光片也提供标准和优质版本以及10个装套件。长波通滤光片起始波长从400到1500 nm，短波通截止波长从450到100 nm。

## 2、中性密度(ND)滤光片

中性密度(ND)滤光片在特定波长范围内具有相对恒定的透过率，如下面的透过率曲线所示。ND滤光片的透过率根据下式计算，其中 $T$ 表示透过率， $OD$ 表示光学密度。

$$OD = \log_{10}(\frac{1}{T}) \quad T = 10^{-OD}$$



### 3、彩色玻璃滤光片

彩色玻璃滤光片使用肖特不同的彩色玻璃制造，包括带通或长波通版本，覆盖紫外、可见光或近红外波段。它们是干涉介质膜滤光片的经济型替代品。

### 4、滤光片安装图示





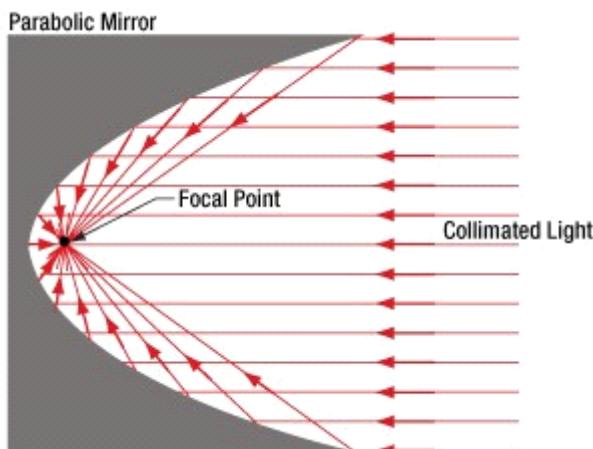


## 认识离轴抛物面反射镜

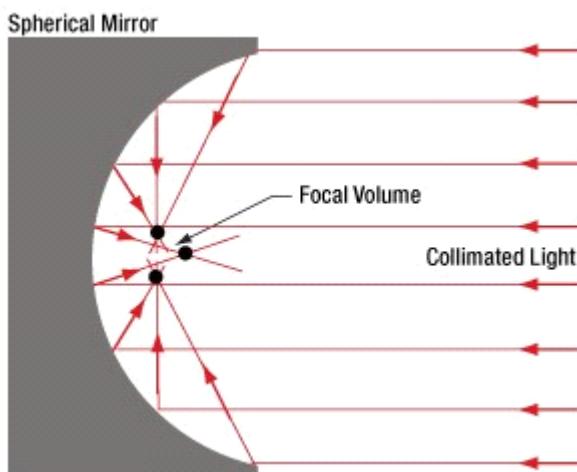
### 1、为何选用抛物面反射镜而不是球面反射镜

**聚焦准直光：**抛物面反射镜将入射准直光束中的所有光线聚焦到衍射极限点。而凹球面反射镜将入射准直光聚集到大于衍射极限光斑的体积内。

**准直来自点光源的光：**当高度发散的光源置于抛物面反射镜的焦点处时，输出光束将高度准直。当点源置于球面反射镜的焦距内时，输出光束的准直度不如抛物面反射镜。来自点光源的不同光线经过球面反射镜反射后并不是完全平行。



► 抛物面反射镜为准直光束中的所有光线提供单一焦点。

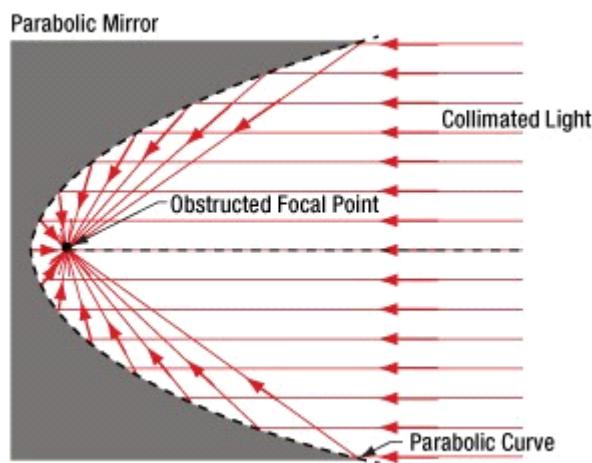


► 球面反射镜无法反射准直光束中的所有光线，使其通过单一点。

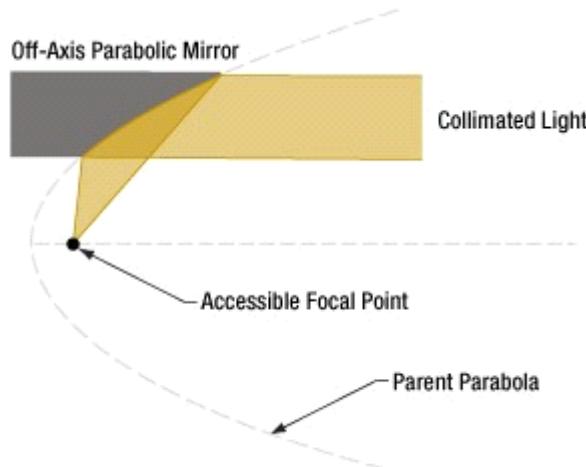
当然，抛物面反射镜并非总是更好的选择。光束直径、成本、空间限制和应用性能要求都会影响选择。

## 2、离轴抛物面反射镜的优点

传统的抛物面反射镜绕焦点对称，存在两方面缺点。一是反射镜的侧面常会阻碍对焦点的利用。另一个是准直发散的光源时，光源的外壳会阻挡一部分准直光束。尤其是相对反射镜光轴以小角度发射的光通常会被阻挡。OAP反射镜则是解决此问题的一种方法。OAP反射镜的反射面是母抛物面的截面，此截面不在母抛物面光轴中心。OAP反射镜的焦点与母抛物面的焦点重合，光轴与母抛物面的光轴平行，但与之偏离。



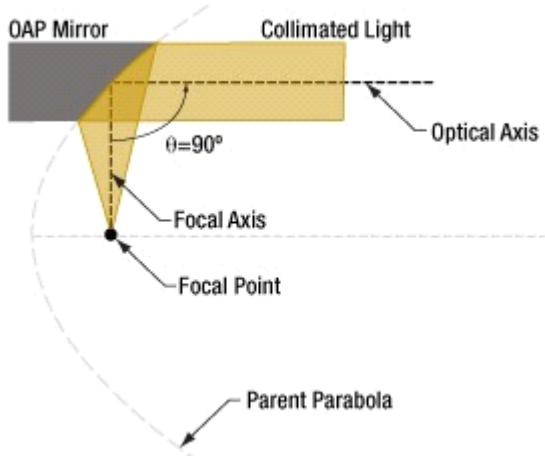
“ 轴上抛物面反射镜的焦点靠近反射表面，且常被反射表面包围，使光束焦点很难被利用。



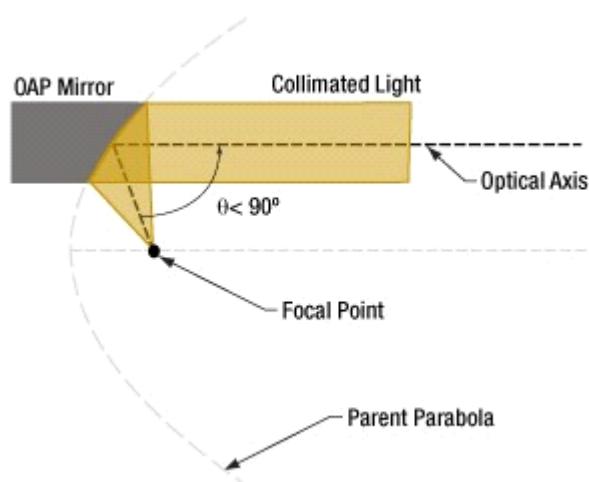
“ OAP反射镜可看作母抛物面的一段。两者具有相同的焦点，但是使用OAP反射镜时更容易利用焦点。

## 3、离轴角

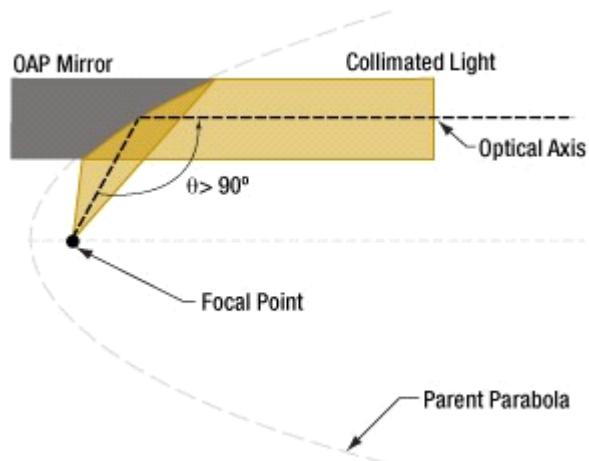
离轴角取决于母抛物面截面的选取以及母抛物面的宽度。



▶ 选取适当母抛物面的 截面可提供 90°离轴角。



▶ 对比上图，选取更接近抛物面轴的截面会产生较小的离轴角。

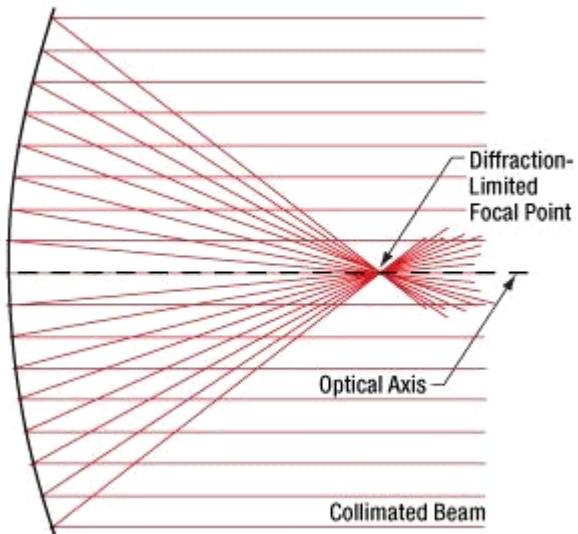


▶ 对比上图，减小抛物面的宽度会增加离轴角。

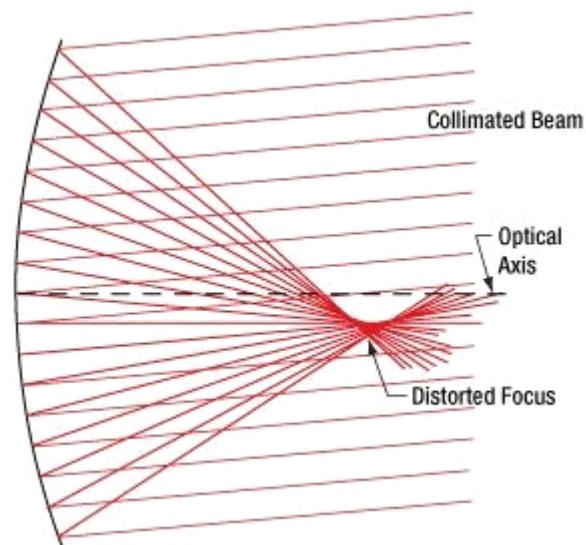
选取截面的位置还可控制焦距：选择离焦点更近的抛物面截面会使反射镜中心和焦点之间的距离更短。母抛物面的宽度也影响焦距：抛物面越宽，焦距越长。

#### 4、聚焦准直光/准直来自点光源的光

## 聚焦/准直

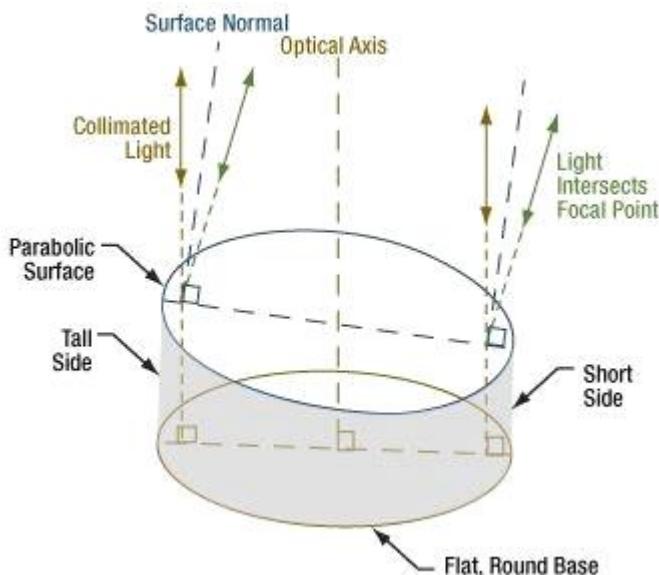


当准直光束平行于抛物面或OAP反射镜的光轴时，光束将聚焦到衍射极限焦点。



当准直光束不平行于反射镜的光轴时，不会产生极限衍射点，且聚焦区域将散开。

## 5、确定OAP的光轴和焦轴



反射镜基底具有平坦的圆形底座。光轴的方向垂直于此平面底座。因此，准直光应垂直于底座表面。

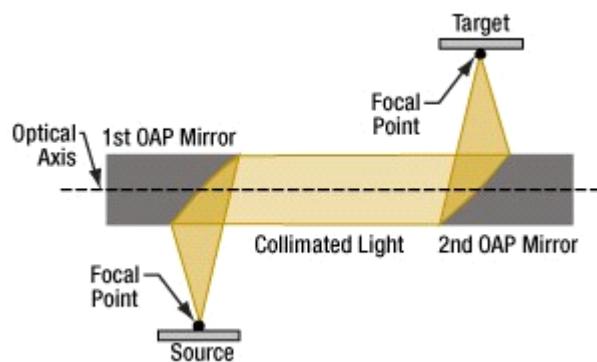
基底具有长边和短边，且反射表面倾斜。可目视检查以粗略估计反射镜上不同点的表面法线。

平行于光轴的准直光，经过反射镜表面反射后，可由反射光线来估计焦点的位置。入射光线绕表面法线对称反射。反射光线将通过焦点。通过靠近反射镜长边和短边的位置来分别追踪两条光线，可以估计焦点的位置。

## 6、成对使用OAP反射镜的好处

**旋转光束成像：**当两个光束都不准直时，不建议在有限共轭成像应用中使用单个OAP反射镜，但成对OAP反射镜非常适合此应用。

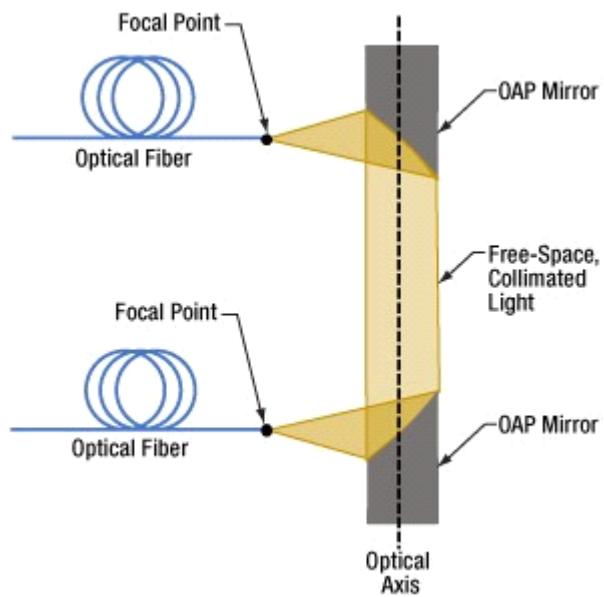
成对OAP配置有助于调整反射镜之间的距离。准直的光路分支还便于在光束中插入滤光片和其他光学元件。而且，通过调节两个反射镜之间的距离，可使焦点在源平面和/或目标平面上移动，而不会影响系统的光路对准。



一对OAP反射镜可用于成像应用，和/或在一定距离内转向光束。

**对光纤网络中光束的使用：**成对OAP反射镜可用于在光纤系统中创建自由空间光路分支，这是利用光束的一种方法。当需要将滤光片或其他大体积光学元件插入光路时，此配置非常

有用。可以调整自由空间分支的长度，且不会影响光路对准。

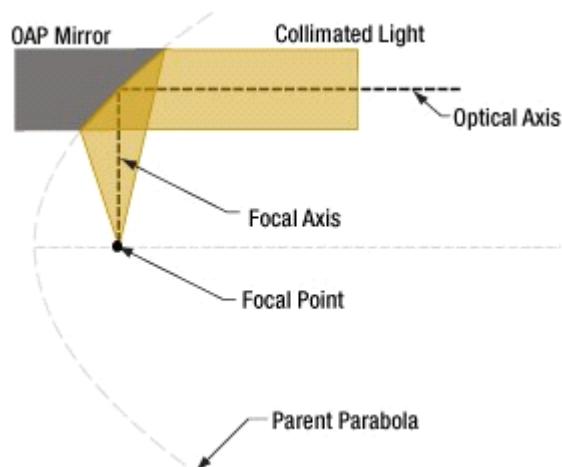


一对OAP反射镜可用于将光从一根光纤耦合到另一根光纤。纤芯尺寸较小，因此从光纤端面发出的光类似于点光源。

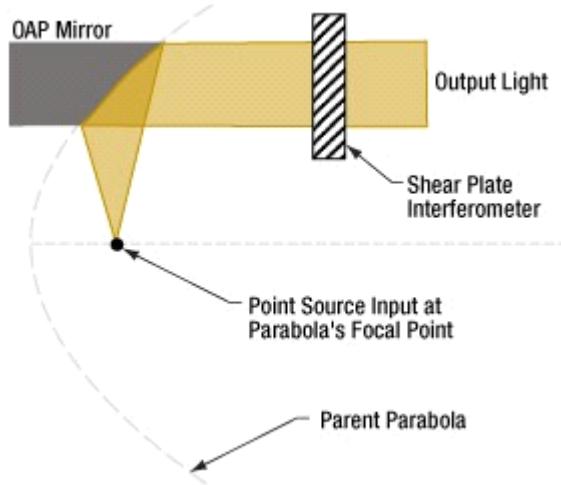
## 7、安装和对准OAP反射镜

OAP反射镜不是旋转对称的。这是因为它们的反射面取自远离焦点的母抛物面上的一段截面。因此当OAP反射镜旋转时，其焦点的位置也会旋转。这可能会对光学系统的性能产生负面影响，因此应固定反射镜，使反射面不能绕其光轴旋转。

### 安装/对准



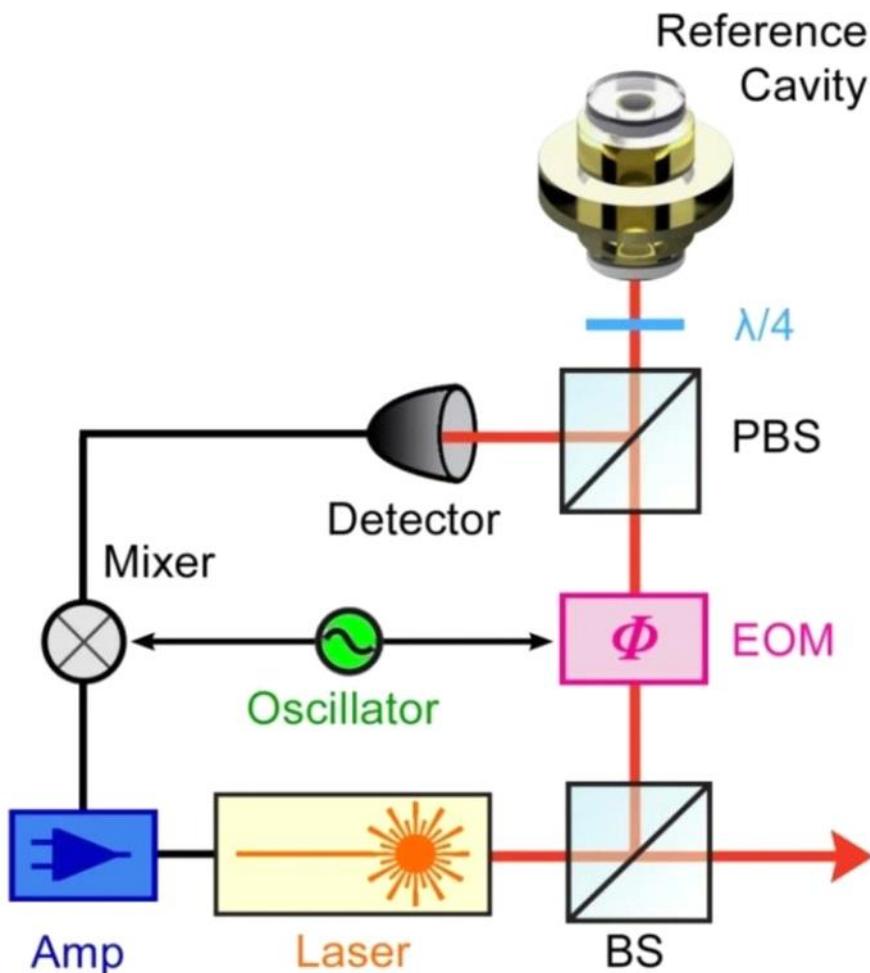
反射镜的反射轮廓是母抛物面上的一部分，但不针对焦点对称。因此，OAP的反射表面不是旋转对称的。所以，安装使用过程中请不要旋转。



使用OAP反射镜准直点光源时，放置在输出光束中的剪切干涉仪可简化对准过程。

### PDH激光稳频技术

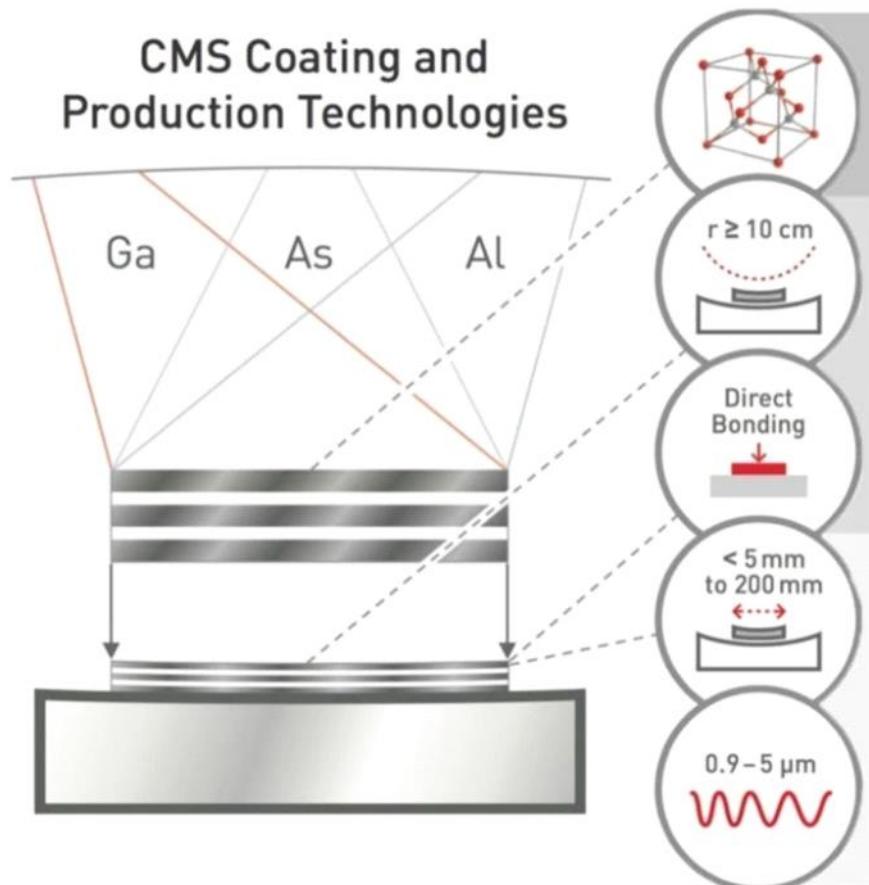
Pound–Drever–Hall锁频是利用光腔作为频率参考中最具代表性的激光稳频技术，因此光学参考腔是超窄线宽激光的核心组件，而高反射率、低损耗腔镜又是研制光腔的关键之一。这就是晶体反射镜的用武之地，为各种前沿应用突破激光线宽和腔噪声性能极限。下图是PDH稳频原理图，基于晶体反射镜的参考腔位于右上方。



值得一提的是，Menlo Systems超稳、超窄线宽激光器使用晶体反射镜提供的稳定性将比其它腔镜提高4倍左右(ORS-Cubic高性能版本)。

## - 晶体反射镜：重新定义激光光学元件 -

晶体反射镜的制造主要分三步：通过分子束外延在GaAs晶片上生长单晶GaAs/AlGaAs异质结构；使用半导体加工技术将多层干涉膜从原始晶片上分离开来；通过直接键合使单晶干涉膜与最终的光学基底接合。下图展示了晶体反射镜的主要生产步骤和规格。



单晶反射膜相比最先进的IBS介质膜有三大关键优势：显著提高热噪声性能，突破腔稳定激光系统的线宽极限；更低的中红外吸收，提高中红外痕量气体探测分辨率；大幅提高热导率，满足高功率激光生产商的热耗散要求。

## 衍射光栅基础教程

衍射光栅通过自身的重复结构分离不同波长的光，根据工作方式可分为透射和反射两种类型。在入射角  $\theta_i = 0^\circ$  时，所有衍射光栅满足以下光栅方程：

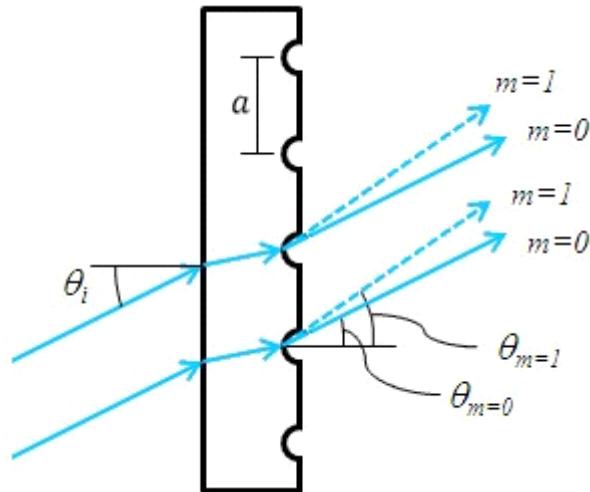
$$a \sin \theta_m = m\lambda$$

$a$  表示光栅的刻槽间距，也叫光栅常数， $\lambda$  是波长， $\theta_m$  是相对光栅表面法线的  $m$  级衍射角。根据光栅方程，对于给定的衍射级次，不同波长的光具有不同的衍射角，所以白光将形成与角度相关的连续光谱。

准直的超连续激光通过光栅衍射，从中可以看到不同的衍射级次(来源OSA)

### 1、透射式光栅

透射式光栅的结构和方程如下所示：



$$\alpha(\sin \theta_m - \sin \theta_i) = m\lambda$$

如果入射光和衍射光在光栅法线两侧，那么 $\theta$ 和 $\theta_m$ 都为正；如果在光栅法线同侧， $\theta_m$ 必须看作负值。

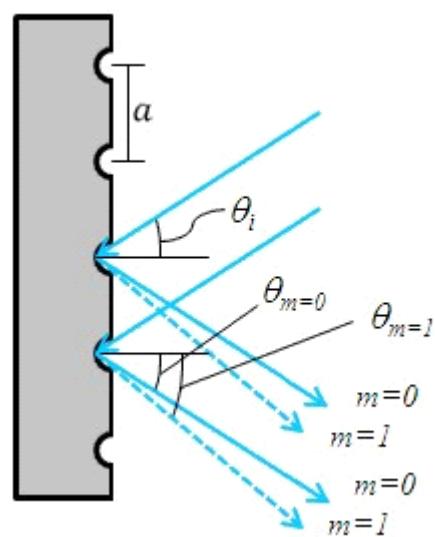
例：532 nm绿色激光以20°入射在500刻线/毫米的透射光栅上，计算能够观察到的最高衍射级次。衍射级次m计算公式：

$$m \leq \frac{\alpha(\sin \theta_m - \sin \theta_i)}{\lambda} < \frac{\alpha(1 - \sin \theta_i)}{\lambda} \approx \frac{1 - \sin \theta_i}{\lambda}$$

代入数值计算可得 $m \leq 2.47$ ，所以能够观察到的最高衍射级次为2.

## 2、反射式光栅

反射式光栅的结构和方程如下所示：



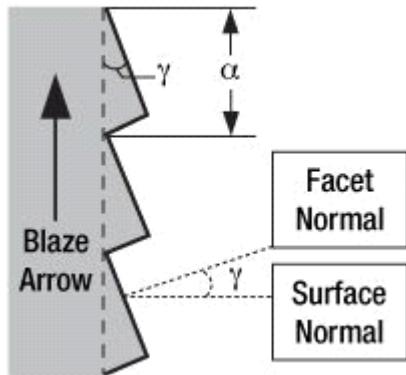
$$\alpha(\sin \theta_m + \sin \theta_i) = m\lambda$$

如果入射光和衍射光在光栅法线两侧，那么 $\theta$ 为正， $\theta_m$ 为负；如果在光栅法线同侧，两个角度都为正。

不管是透射还是反射光栅，零级模式都没有衍射图案，相当于直接透射或反射。根据光栅方程可知，零级衍射和波长和光栅常数都无关。也就是说，在零级上无法获取波长相关的信息，因为光直接以透射或反射浪费掉了。解决这个问题的方法是使用闪耀(刻划)光栅。

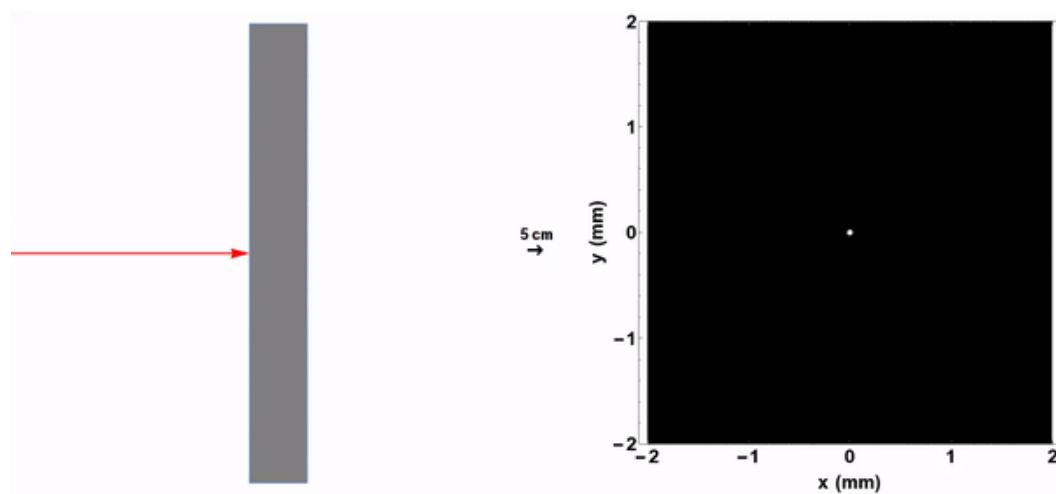
### 3、闪耀(刻划)光栅

闪耀光栅也称为小阶梯光栅，属于特殊的反射或透射光栅，能在特定衍射级次提供最高效率，使得在设计级次上具有大部分光功率，而其它级次尤其是零级功率最低。由于这种设计，闪耀光栅以特定的闪耀波长工作。



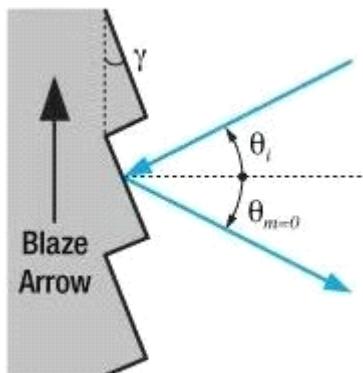
闪耀光栅结构

闪耀光栅的三个重要特征参数是闪耀波长、光栅常数和闪耀角 $\gamma$ 。 $\gamma$ 为刻槽面和光栅表面的夹角，也等于两面法线的夹角，详见上图所示。闪耀光栅由于阶梯(锯齿)结构将有一个取决于闪耀角的镜面反射，可以通过改变闪耀角改变衍射效率，先看一个闪耀角变化的仿真。



模拟单色光衍射级次随闪耀角的变化 来源：Bertolotti, 爱克塞特大学

下图展示闪耀光栅的零级反射，以 $\theta_i$ 入射，以 $\theta_m$ 反射。根据反射光栅方程，零级条件下的唯一解是 $\theta_i = -\theta_m$ ，这类似于平面镜反射。



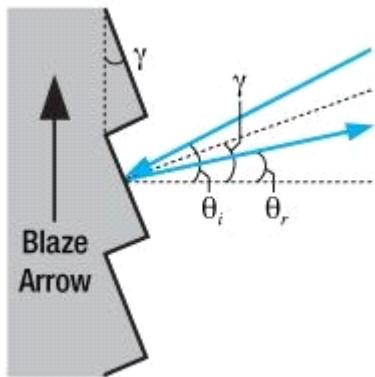
闪耀光栅零级反射

但闪耀光栅在阶梯形刻槽面的反射不同于零级反射，如左下图所示。假设在刻槽面的反射角相对光栅法线为 $\theta_r$ ，如果 $\theta_i$ 和 $\theta_r$ 在光栅法线同侧取负值。通过简单的几何变换可得：

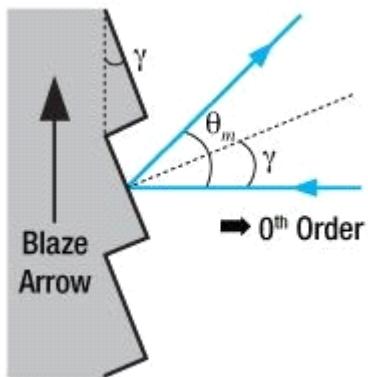
$$\theta_i - \theta_r = 2\gamma$$

右下图为 $\theta_i = 0^\circ$ 的特殊情况，此时零级反射也处于 $0^\circ$ 。我们可以推出两倍闪耀角处的光栅方程(右下图)：

$$\alpha \sin(-2\gamma) = m\lambda$$



从阶梯刻槽面的反射

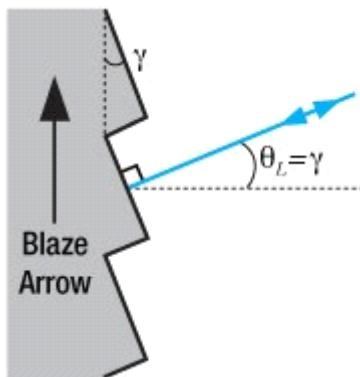


从光栅表面正入射

#### 4、Littrow配置

Littrow配置角度( $\theta_l$ )是指光栅效率最高时的入射角，这个角度在单色仪和光谱仪中非常重要。在此配置中，入射角等于衍射角且 $m$ 大于0，所以：

$$2\alpha \sin \theta_L = m\lambda_D$$



Littrow配置:  $\theta_L = \gamma$

$\theta_L$ 取决于最强级次( $m = 1$ )、设计波长 $\lambda_D$ 和光栅常数 $\alpha$ ，可以看到在设计波长处Littrow角等于闪耀角 $\gamma$ 。Thorlabs所有闪耀光栅都提供Littrow/闪耀角规格。

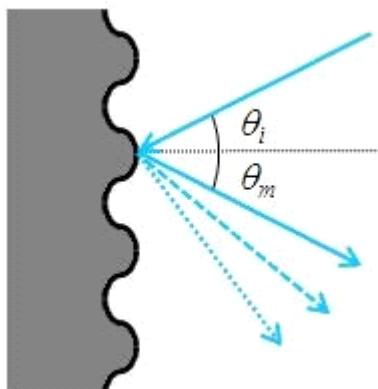
在正入射条件下，随着衍射级次变高，与波长相关的角度距离变大。使用高级次衍射图案相比低级次有两个缺点：衍射效率更低、自由光谱范围更小。

低衍射效率问题可以通过使用中阶梯光栅解决，这种光栅具有极大闪耀角和较低的刻槽密度。大闪耀角将能量集中到较高级次衍射中。解决第二个问题的办法是在中阶梯光栅后面加一个光学元件控制波长/级次，比如光栅、色散棱镜或其它色散元件。

## 5、全息表面光栅

虽然闪耀光栅在设计波长下具有很高的效率，但其缺点是周期误差较大、散射较高，这将降低测量灵敏度。全息光栅能够降低或消除周期误差，不过效率相比闪耀光栅更低。

全息光栅也是从母光栅复制，过程和刻划光栅相似。制备母全息光栅一般是使用两束干涉激光在光敏材料进行光刻。干涉图案在表面上刻出周期图案，通过物理或化学处理产生正弦表面结构。下图展示了这样一种全息光栅结构。



正弦表面结构全息光栅

## 6、选择指南

选择光栅需要考虑多种因素，比如：

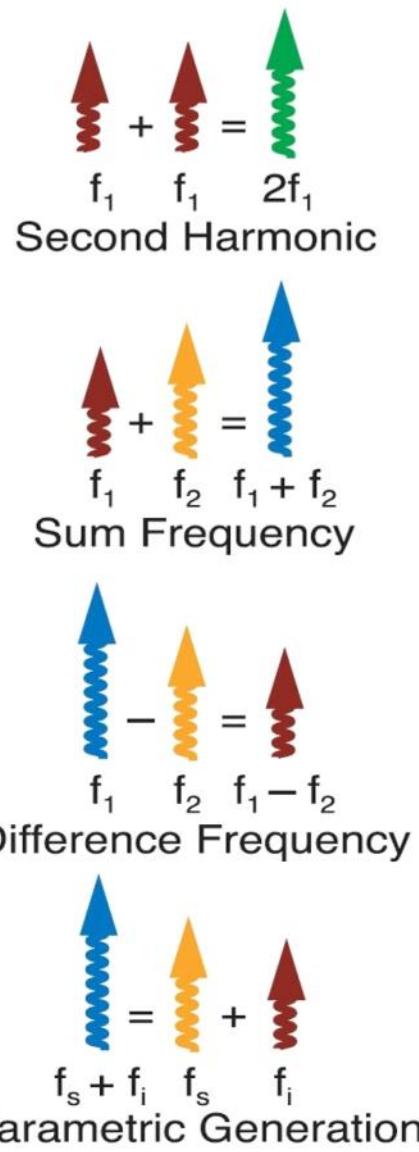
- 效率：刻划光栅一般比全息光栅效率更高。全息光栅效率相对更低，但波长范围更宽。可能需要高效率刻划光栅的应用包括荧光激发和其它光诱导反应等。
- 闪耀波长：刻划光栅具有锯齿形结构，所以在闪耀波长附近提供高峰值效率。全息光栅闪耀更难，一般具有正弦表面结构，所以在设计波长附近形成强度较弱的峰。
- 杂散光：全息光栅比刻划光栅杂散光更少。刻划光栅的周期误差更多，全息光栅几乎没有误差，所以杂散光更少。对于要求高信噪比的应用，比如拉曼光谱，适合使用全息光栅。
- 分辨力：光栅分辨力衡量其分离两个波长的能力，通过 $R = \lambda/\Delta\lambda = m*N$ 定义，其中 $\Delta\lambda$ 是可分辨波长差， $m$ 是衍射级次， $N$ 是被照刻槽数。中阶梯光栅由于密度低因此分辨更高。

### 注意事项

衍射光栅表面容易因指纹、气溶胶、湿气或者与任何粗糙材料的轻微接触受损。只在必要时操作光栅，只能从边缘拿。佩戴乳胶手套防止手指油渍污染光栅表面。溶液很可能损伤光栅表面。清洁光栅只能使用清洁的干燥空气或氮气吹扫灰尘。光栅表面的刮痕或其它微小的瑕疵一般不会影响性能，并不视为缺陷。

## 应用非线性光学

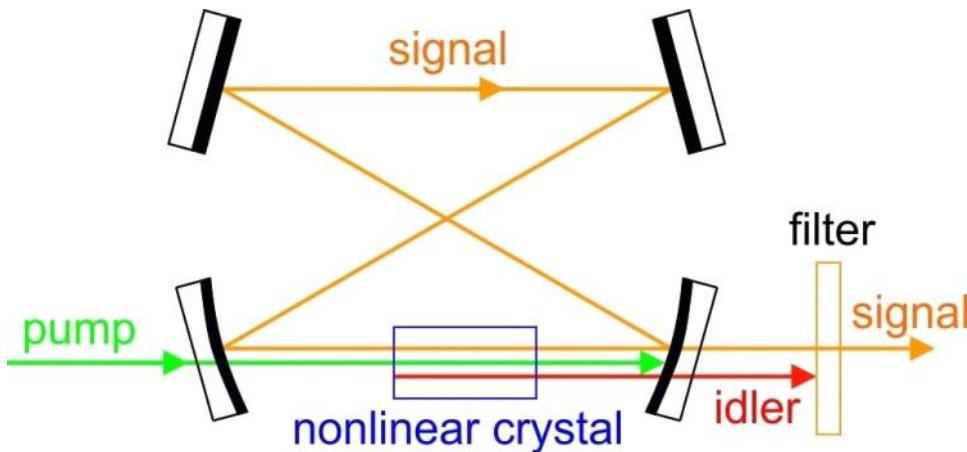
### [神奇的相位匹配](#)



#### 常见非线性效应

- 二次谐波
- 和频
- 差频
- 参量产生

用于产生宽带相干光的一个重要非线性过程是光参量产生。这本质上是和频的相反过程(请参考上图):以高频泵浦光驱动两低频光——信号光和闲频光。两种光都从噪声中形成,频率由相位匹配条件确定,无需通过种子光定义。光参量放大器则是一种通过种子固定频率的光学器件,而把非线性晶体放在腔内就可能得到转换效率很高的光参量振荡器(OPO)。

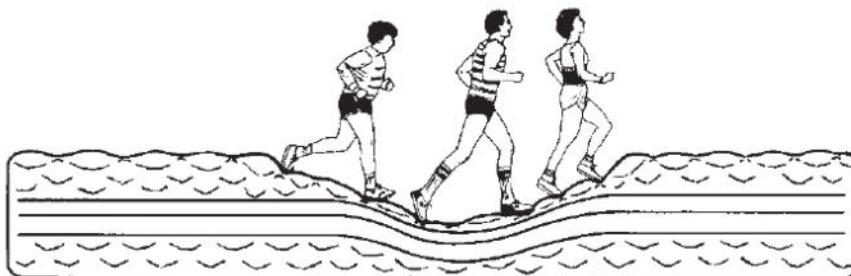


光参量振荡器(OPO)简图

现在提到的非线性都是二阶过程，也就是包含三个波的相互作用。三阶能够产生四波效应，包括三次谐波产生、自相位调制、光学相位共轭和光学双稳态等等。它们也是很多非线性光谱学和量子光学效应的基础。

很多重要应用都基于非线性折射。它和衍射是形成光孤子的基本要素，它和群速度色散是控制时间脉冲轮廓的关键。1970和80年代见证了光脉冲传播理论和非线性脉冲压缩技术的快速发展。尽管70年代初就已认识到光纤能为孤子提供理想环境，但是直到1980年在贝尔实验室才首次观测到光孤子在光纤中的传播。1988年，Mollenauer成功在400多千米光纤中传输55皮秒脉冲。尽管1990年代很多人研究光孤子在光通信领域的应用前景，不过鲜有商业成功案例。但是，光孤子研究对非线性光学和激光技术具有重要影响。

**SOLITONS:** The bunching of high-intensity light. The light pulse creates a moving “valley” (of higher dielectric constant material).



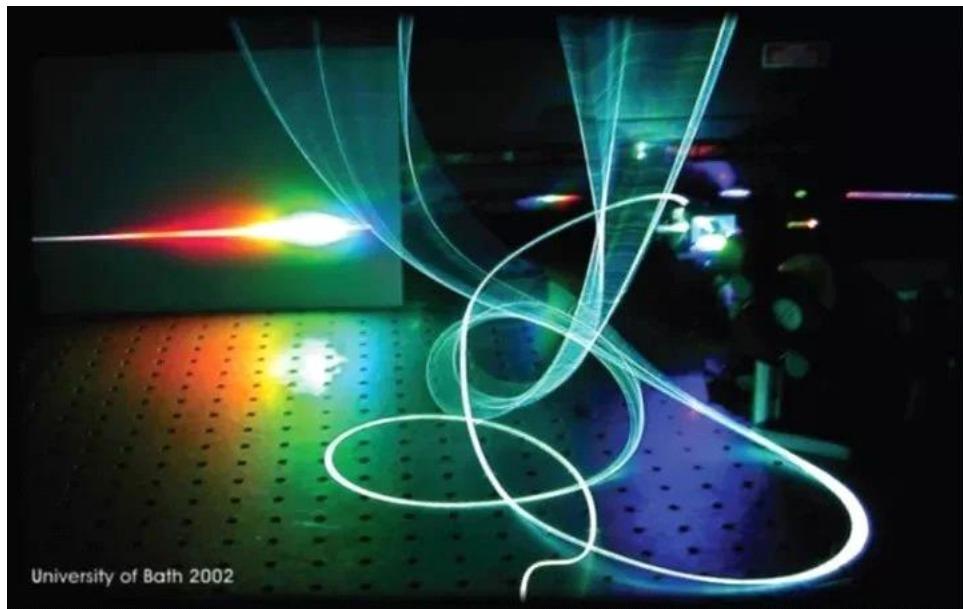
**RUNNING ON A MATTRESS:** The moving valley pulls along slower runners and retards the faster ones.

上图形象地描绘光孤子就像床垫上的跑者，运动中的波谷拉快慢跑者(相当于光脉冲中的低频)，拖慢快跑者(相当于光脉冲中的高频)，以此使他们同步并维持波形。

自从激光发明以来，追逐更短脉冲的竞赛就从未停止，而每一次突破总是非线性光学和激光技术协同的结果。一方面，超短脉冲的高峰值功率能够增强非线性效应，而激光系统又利用非线性过程产生更短的脉冲。非线性脉冲压缩基本原理与自相位调制(SPM)和负群速度色散(GVD)有关，首先通过SPM展宽脉冲光谱，达到能够支持更短脉冲的带宽，然后使用色散延迟线进行压缩，比如常用的Z字形衍射光栅对。

光纤是引入SPM的理想环境。光纤光栅压缩器最早出现在1981年，随后破纪录的超短脉冲实验接踵而至。1984年Johnson、Stolen和Simpson实现80倍压缩，从33皮秒压缩到410飞秒。Fork、Shank和Ippen等人著名的6飞秒诞生于1987年，这个最短光脉冲记录保持了多年。

光纤中具有很多非常重要的非线性效应。在合适的条件下，SPM和受激拉曼散射(SRS)能够产生跨度大于一个倍频程的信号，超连续就是这样一种宽带信号。



光子晶体光纤的超连续白光

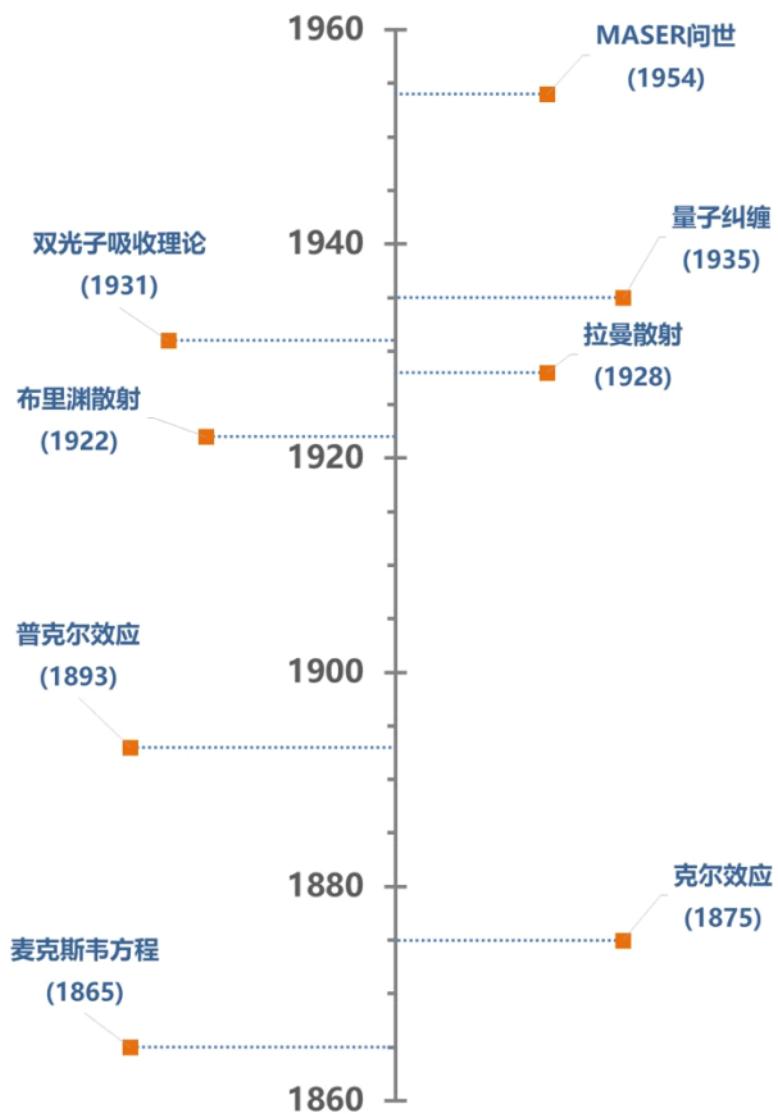
1960年代的非线性光学大多使用固体介质，特别是晶体，偶尔也有液体光学克尔效应实验。但是70年代和80年代见证了气相原子和分子非线性光学研究的开始，到1990年代和2000年代结出了丰硕的成果，比如高次谐波产生、阿秒脉冲产生、电磁诱导透明和慢光。

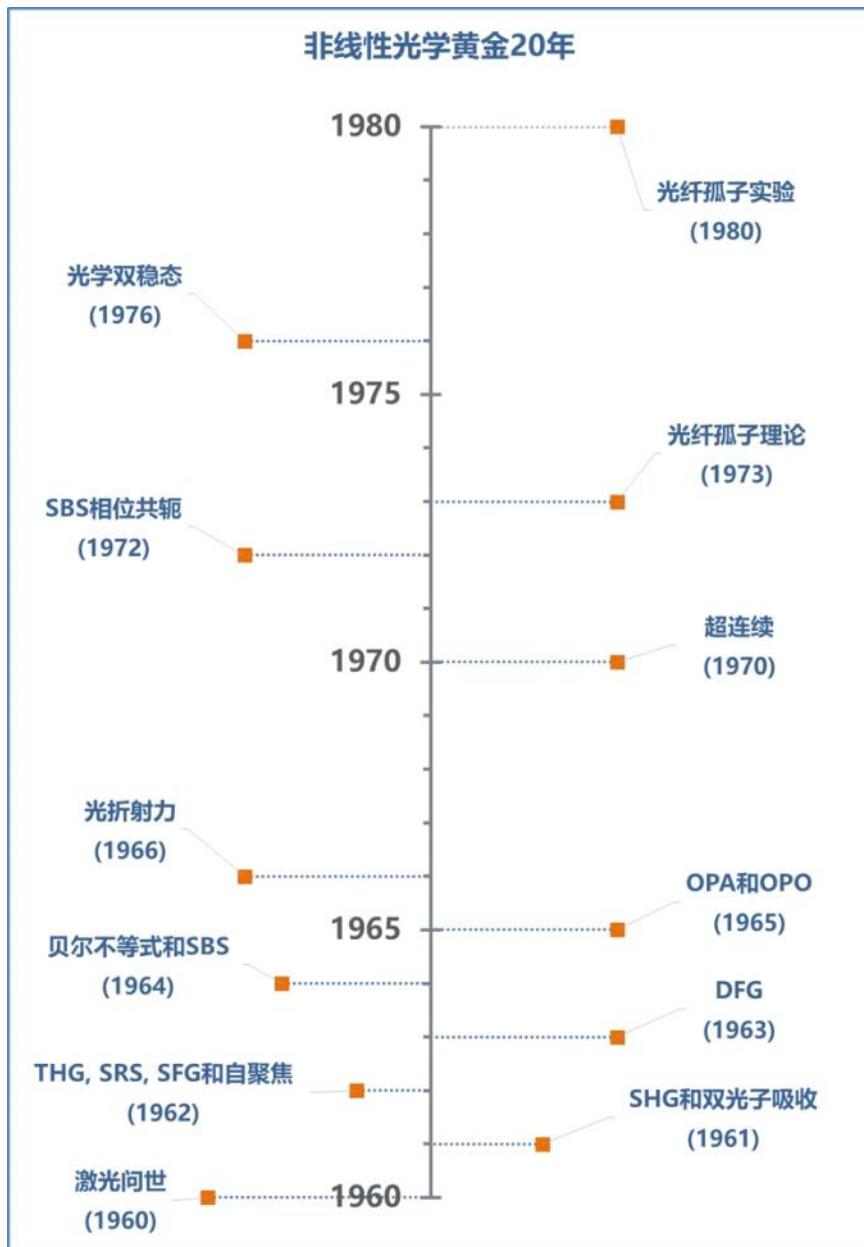
早期的低次谐波产生都呈现弱场特征，更高阶次的转换效率急剧下降。但是1980年代后期打开了高次谐波的大门。此时， $100 \text{ TW/cm}^2$  甚至更高的激光强度逐渐成为可能，出现在惰性气体中的一些重要效应标志着新强场时代的来临。对于较低次谐波，转换效率还是降低很快，但是更高次的转换基本保持恒定，直到特定的高频极限。这些实验为后续十年的研究奠定了基础，以此产生几百次甚至几千次谐波。

1980年代中后期，无反转激发(LWI)产生了不小的影响，很可能是它违背了一般公认的激光原理，即载流子反转是产生激光的基本前提之一。Harris于1989年提出了一种涉及三个能级的Λ形方案，其中一个臂耦合强场，在一定共振条件下使吸收为零，达到所谓的电磁诱导透明，实现无反转激发。其研究意义是开发极短波长激光器的可能，因为它们很难维持载流子反转，不过目前实用前景还不明朗。

以上主要介绍了非线性光学从1975年到1990年的发展历程，最后分享两张非线性光学里程碑年表。以1960年为分界点，第一图是非线性光学史前年代，第二图是激光出现后非线性光学迅速发展的20年。

## 非线性光学史前年代

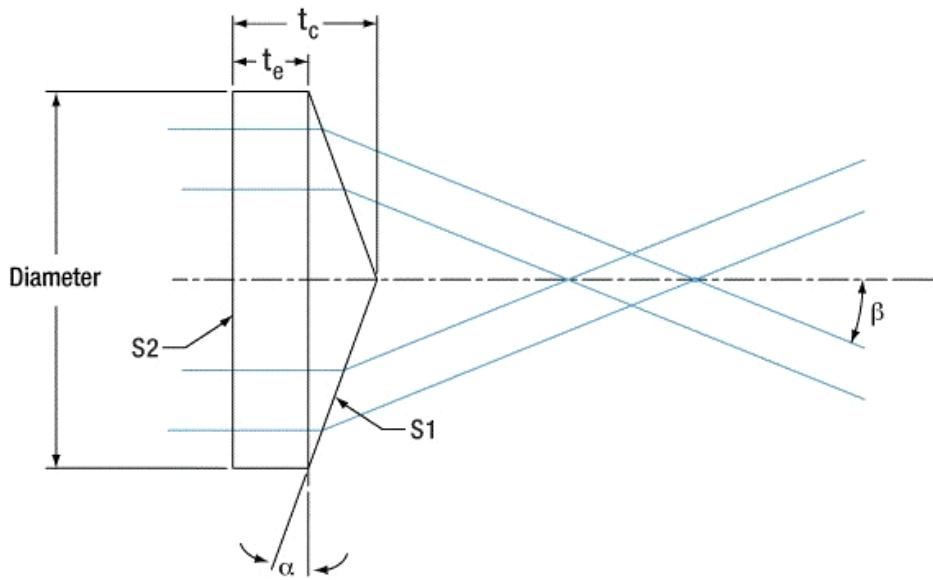




SHG、THG和DFG分别表示二次谐波、三次谐波和差频产生；SBS和SRS分别表示受激布里渊和受激拉曼散射；OPA和OPO分别表示光参量放大和振荡。

参考：Fundamentals of Nonlinear Optics 第二版，CRC Press，2017年

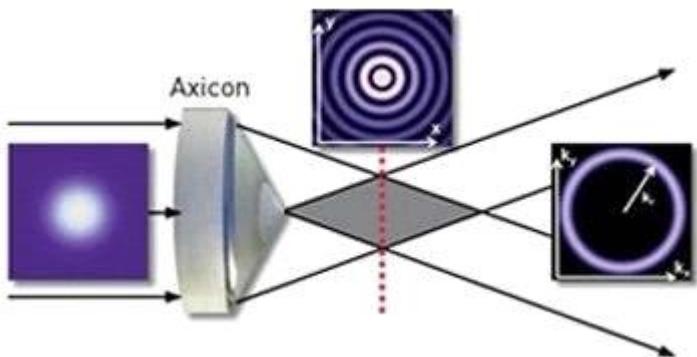
## 锥透镜



锥透镜的光线追迹如上图所示，包含一个锥面S1和一个平面S2，光通过锥透镜时遵循斯内尔定律，据此可以计算出偏转角。假设 $\alpha$ 为底角， $\beta$ 为偏转角， $n$ 为锥透镜折射率； $\alpha$ 越小，聚焦长度(焦深)越大。

$$n \sin \alpha = \sin(\alpha + \beta)$$

锥透镜可用于产生贝塞尔光束或锥形无发散光束。当透射光束在远场投影时将得到一个光环，由于光束不发散，所以环的粗细保持恒定，大小为入射光束直径的一半。



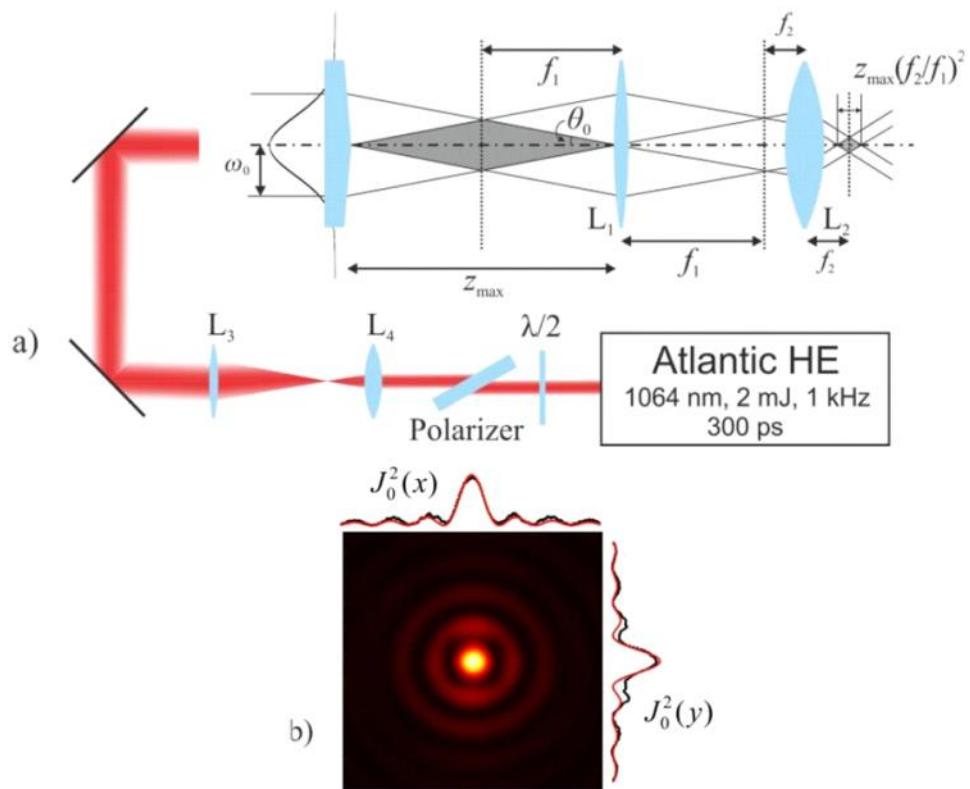
高斯光束通过锥透镜后在近场变成贝塞尔光束，在远场变成环形光

文献: *Unravel Bessel Beams*, OSA-OPEN



投影装置和清晰的光环

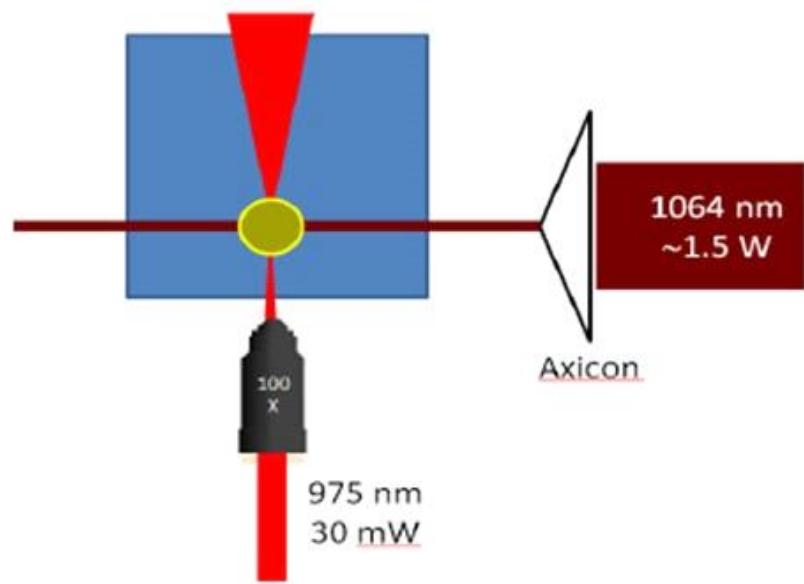
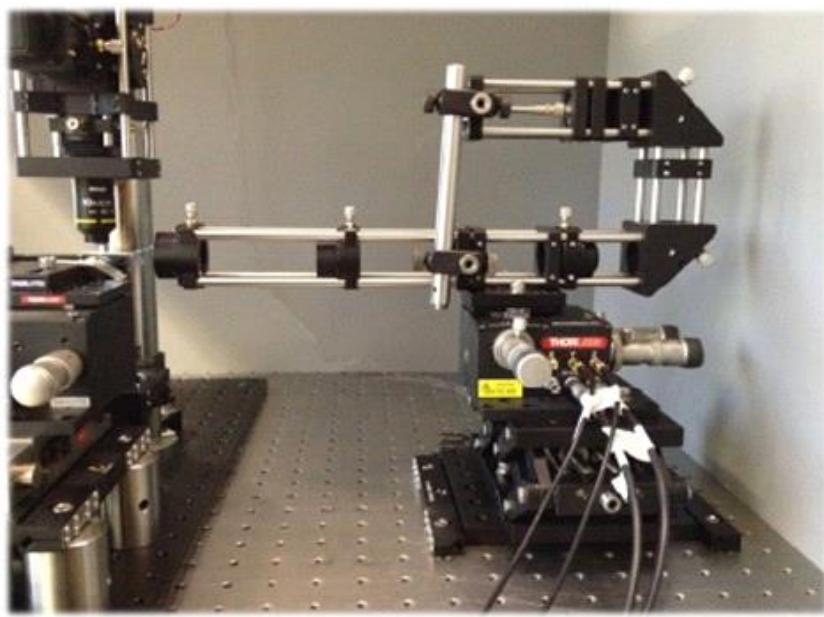
由于锥透镜独特的成像特性，它们常用于激光钻孔、光镊、光学相干层析(OCT)、角膜手术和望远镜等应用中，可谓不胜枚举。下面通过几篇论文中的应用实例具体说明。



激光加工装置实验原理图

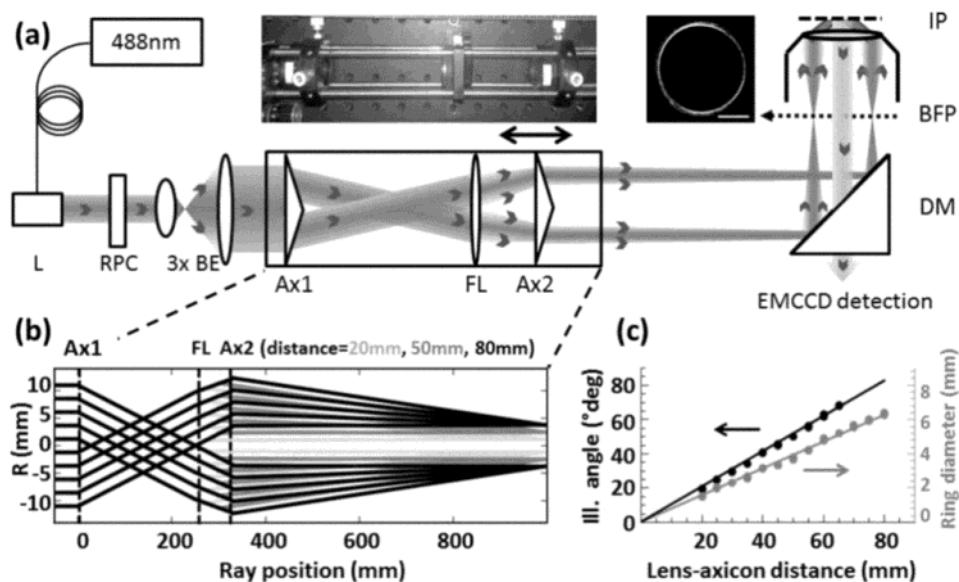
a) 通过锥透镜(Thorlabs AX255-C)和4F缩束光学系统产生贝塞尔高斯光束。b) XY平面的光束强度轮廓。

文献: *Modification of glass using an axicon generated non-symmetrical Bessel-Gaussian beam, SPIE*



贝塞尔光镊实物图和基本光路

文献: *The Bessel-beam random access trap, SPIE*



基于锥透镜的全内反射荧光显微镜

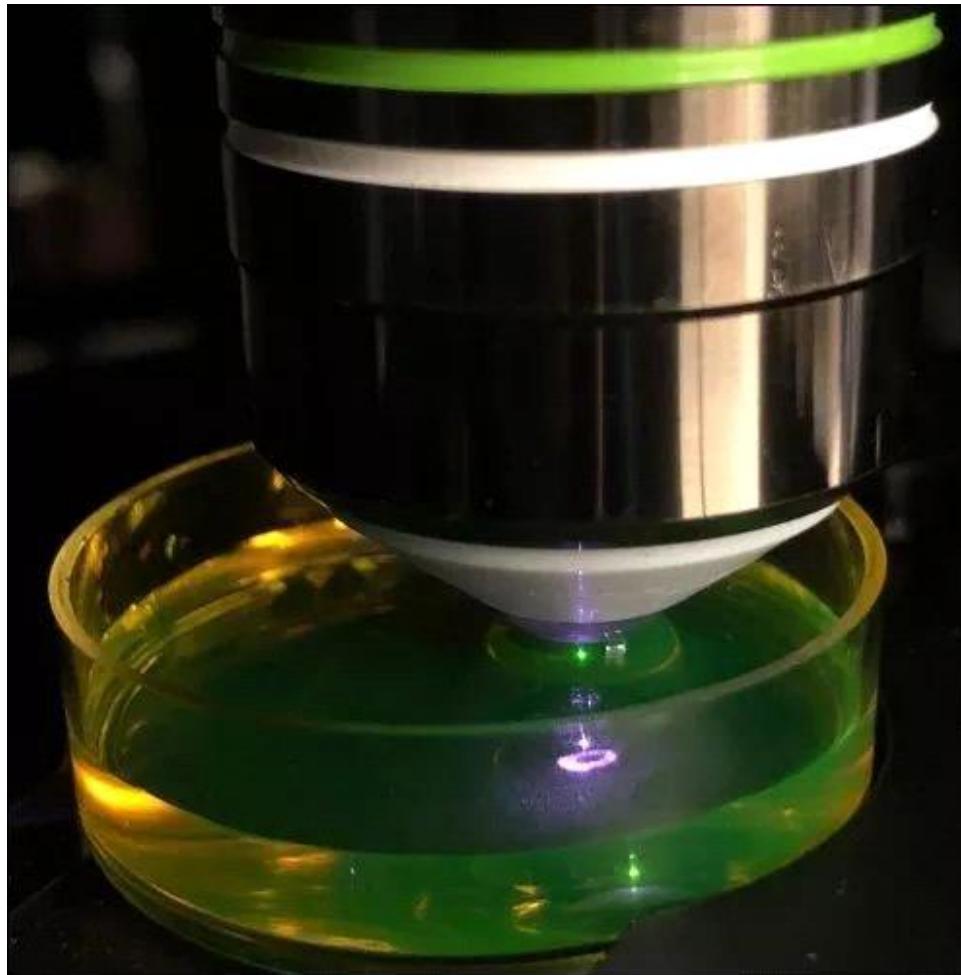
通过两个锥透镜(Thorlabs AX255-A)和一个普通聚焦透镜产生和控制环形焦斑。

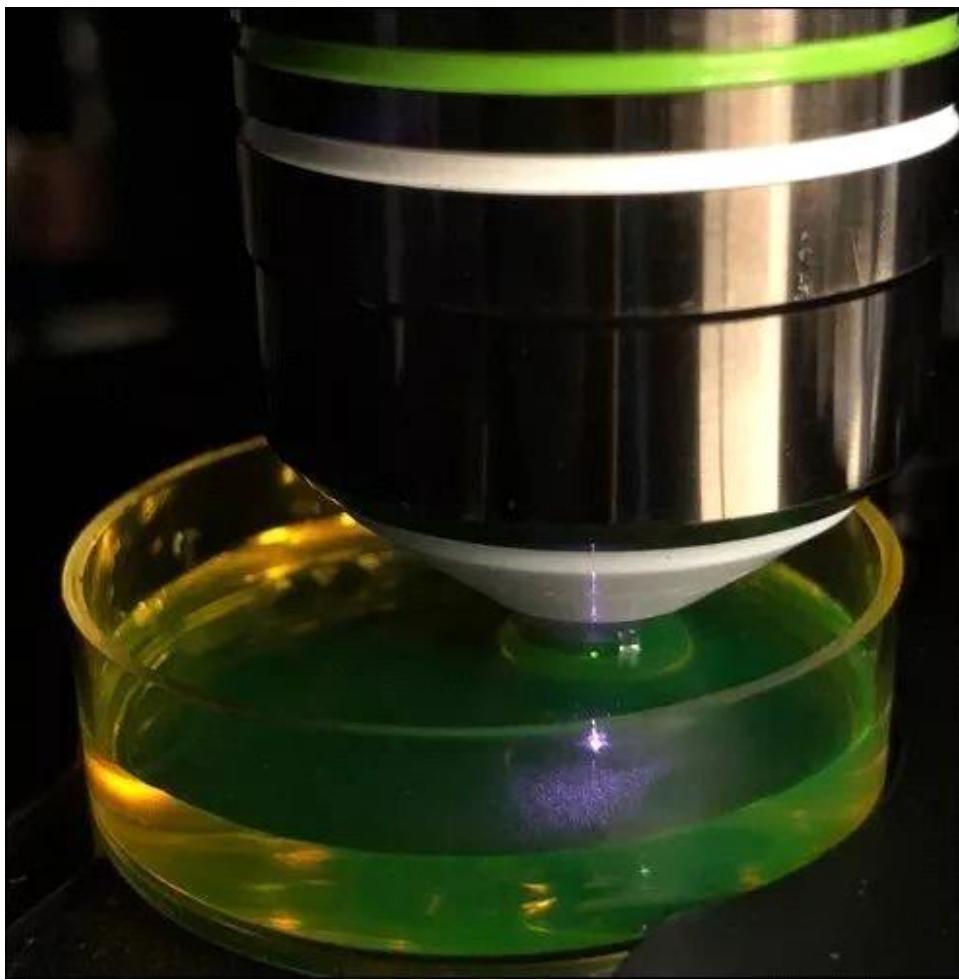
文献: *Axicon-based Bessel beams for flat-field illumination in total internal reflection fluorescence microscopy, OSA-OL*

由于贝塞尔光束的强大功能, 锥透镜作为能够产生和操控贝塞尔光束的一种简单方法也有着无数的应用。

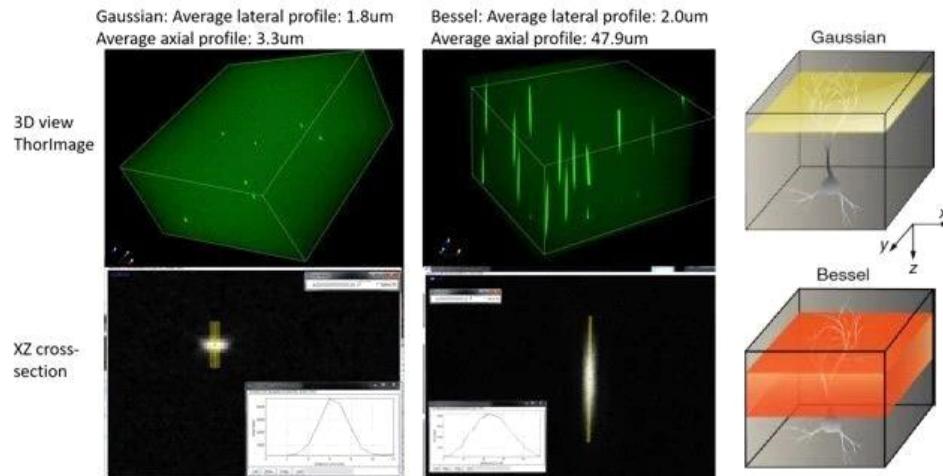
### 什么是贝塞尔光束?

贝塞尔光束是典型的无衍射光束, 在传播方向上不发散, 在传播过程中遇到障碍物后能够自愈, 因此能够维持极小的光斑, 甚至在穿过组织时进行改造。它能通过光学系统形成轴向狭长的光焦, 增加视场深度进行大体积扫描, 从而将2D帧率变成视频级3D帧率, 适用于活体动物神经系统的高速功能体成像。





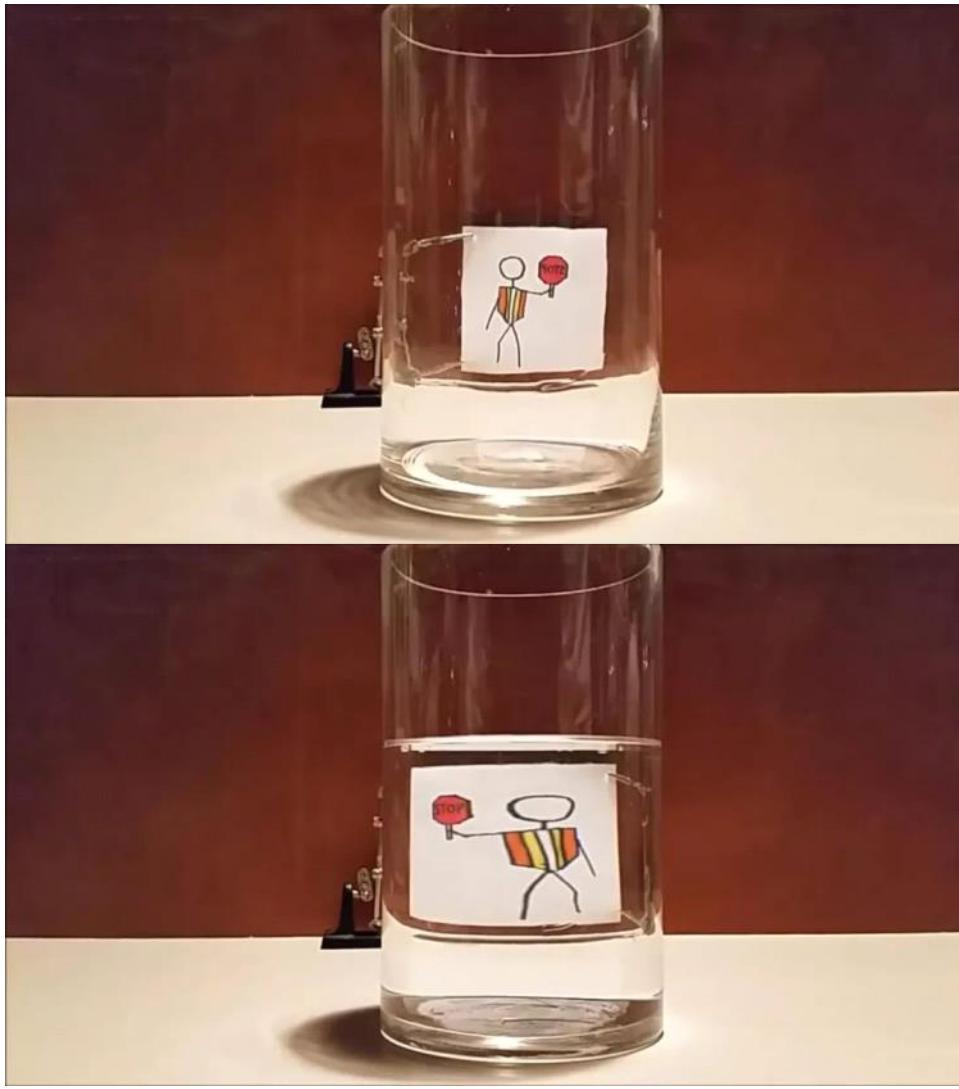
上图分别展现了贝塞尔光束(左)和高斯光束(右)。从图中可以看出，高斯光束有一个焦点，且从中心处发散而逐渐变弱，而贝塞尔光束有一个维持焦点的光束环。



高斯vs贝塞尔光束扫描深度对比

## 水杯变柱面镜

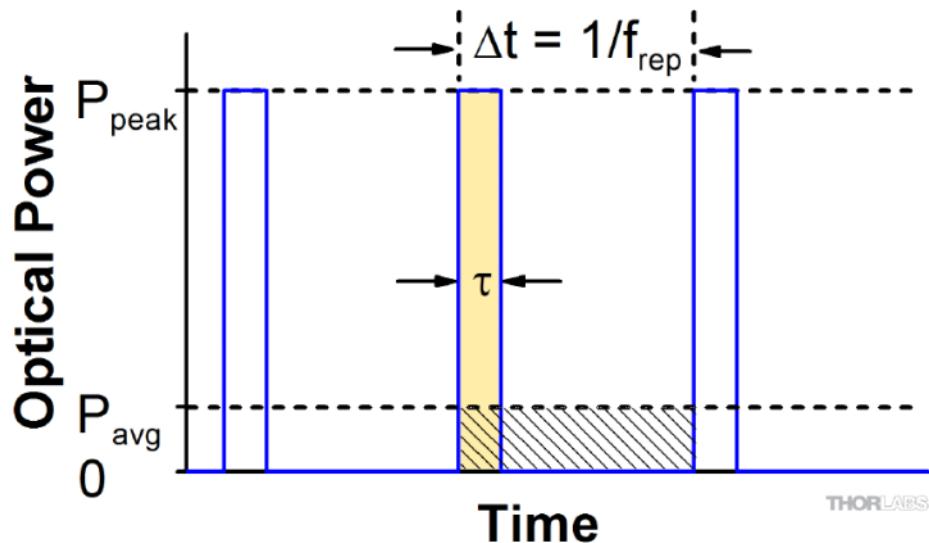
柱面透镜可用于光源的一维整形。



由于一维整形功能，柱面透镜可用于生成线形激光、准直和圆形化激光二极管的输出、生成光片(Light Sheet)等等。

### 脉冲激光：功率和能量计算

在使用脉冲激光器时可能经常需要计算峰值功率、平均功率、脉冲能量等参数，以此确定是否满足实验和应用要求，比如防止生物样品损伤、测量脉冲激光时防止探测器损伤、激发荧光或非线性效应。



激光脉冲参数

$\Delta t$	脉冲周期
$E$	脉冲能量
$f_{rep}$	重复频率
$P_{avg}$	平均功率
$P_{peak}$	峰值功率
$\tau$	脉冲宽度

- 周期和重频互为倒数:

- $$\Delta t = \frac{1}{f_{rep}} \quad f_{rep} = \frac{1}{\Delta t}$$

- 根据平均功率计算脉冲能量:

- $$E = \frac{P_{avg}}{f_{rep}} = P_{avg} \cdot \Delta t$$

- 根据脉冲能量计算平均功率:

- $$P_{avg} = \frac{E}{\Delta t} = E \cdot f_{rep}$$

- 根据脉冲能量计算峰值功率:

- $$P_{peak} \approx \frac{E}{\tau}$$

- 峰值功率和平均功率的关系：

$$P_{peak} = \frac{P_{avg}}{f_{rep} \cdot \tau} = \frac{P_{avg} \cdot \Delta t}{\tau}$$

$$\bullet \quad P_{avg} = P_{peak} \cdot f_{rep} \cdot \tau = \frac{P_{peak} \cdot \tau}{\Delta t}$$

- 平均功率、峰值功率和占空比：

$$P_{peak} = \frac{P_{avg}}{\tau / \Delta t} = \frac{P_{avg}}{duty\ cycle}$$

### 计算实例

探测器最大峰值输入功率为75 mW，用它测量以下脉冲激光是否安全？

- 激光规格**

平均功率：1 mW

重频：85 MHz

脉宽：10 fs

- 脉冲能量**

$$E = \frac{P_{avg}}{f_{rep}} = \frac{1 \text{ mW}}{85 \text{ MHz}} = \frac{1 \times 10^{-3} \text{ W}}{85 \times 10^6 \text{ Hz}} = 1.18 \times 10^{-14} \text{ J} = 11.8 \text{ pJ}$$

...似乎非常小，但是...

- 峰值功率**

$$P_{peak} = \frac{P_{avg}}{f_{rep} \cdot \tau} = \frac{1 \text{ mW}}{85 \text{ MHz} \cdot 10 \text{ fs}} = 1.18 \times 10^5 \text{ W} = 1.18 \text{ kW}$$

超过探测器最高峰值输入功率

5个数量级，所以是**不安全的**

“将功率相当于1000个胡佛水坝(50个三峡?)的激光聚焦到细胞核大小，可在1飞秒内将电子加速接近到光速。Gérard Mourou在科普极端光时如是说。

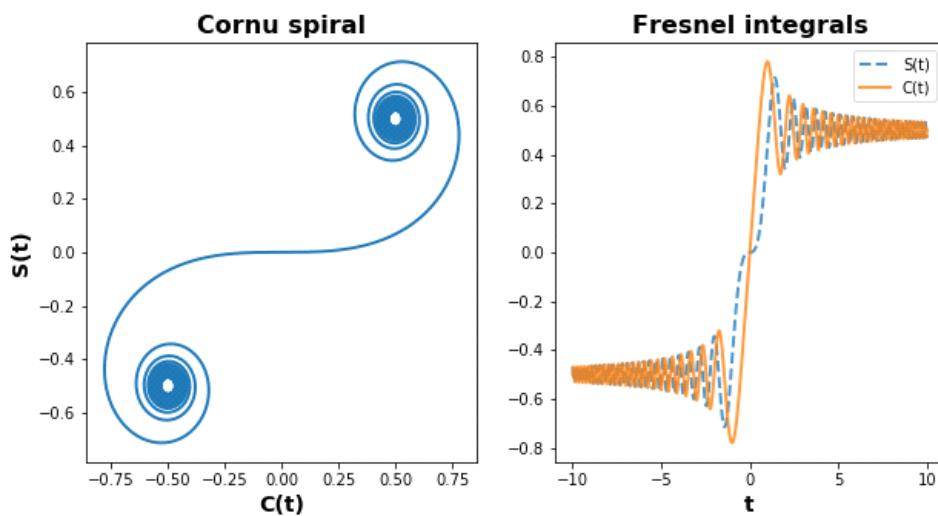
*Extreme Light, 科学美国人, 2002年5月刊*

Python光学仿真集锦



```
# Thorlabs Weekly #36
# Draw a heart with Python
import pylab
import scipy
x = scipy.linspace(-2,2,1500)
y1 = scipy.sqrt(1-(abs(x)-1)**2)
y2 = -3*scipy.sqrt(1-(abs(x)/2)**0.5)
pylab.fill_between(x, y1, color='red')
pylab.fill_between(x, y2, color='red')
pylab.xlim([-2.5, 2.5])
pylab.text(0, -0.4, 'I love Thorlabs',
           fontsize=30, fontweight='bold',
           color='blue',
           horizontalalignment='center')
```

先来画条漂亮的羊角螺线和菲涅尔积分：



### 菲涅尔积分代码

```
# -*- coding: utf-8 -*-
from scipy.special import fresnel
from scipy import linspace
import matplotlib.pyplot as plt
t = linspace(-10, 10, 1000)
FS, FC = fresnel(t)
fig1 = plt.figure(figsize=(10, 5))
ax1 = plt.subplot(1, 2, 1)
ax1.plot(FC, FS, linewidth=2)
ax1.set_xlabel("C(t)", fontsize=14, weight='bold')
```

```

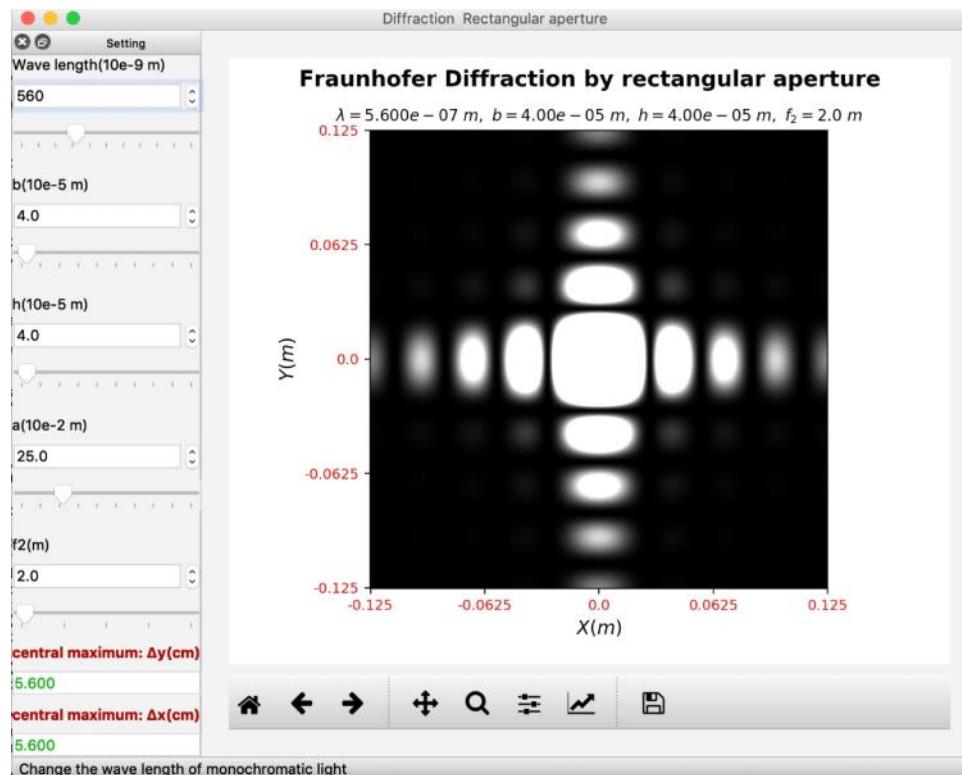
ax1.set_ylabel("S(t)", fontsize=14, weight='bold')
ax1.set_title("Cornu spiral", fontsize=16, weight='bold')

ax2 = plt.subplot(1, 2, 2)
ax2.plot(t, FS, ls='--', linewidth=2, label="S(t)", alpha=.8)
ax2.plot(t, FC, ls='-', linewidth=2, label="C(t)", alpha=.8)
ax2.set_xlabel("t", fontsize=14, weight='bold')
ax2.set_title("Fresnel integrals", fontsize=16, weight='bold')
plt.legend()
plt.show()

```

注：由于后续程序逐渐复杂，行数越来越多，因此只提供运行结果而不再给出代码，如果需要可在文末参考书中找到。

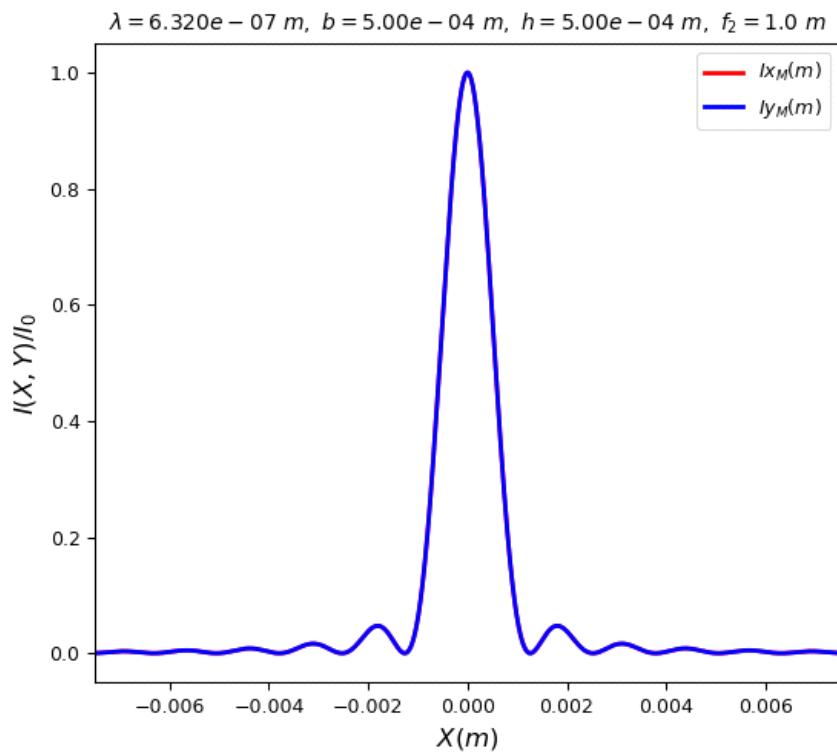
接下来看看Python模拟衍射有多酷：



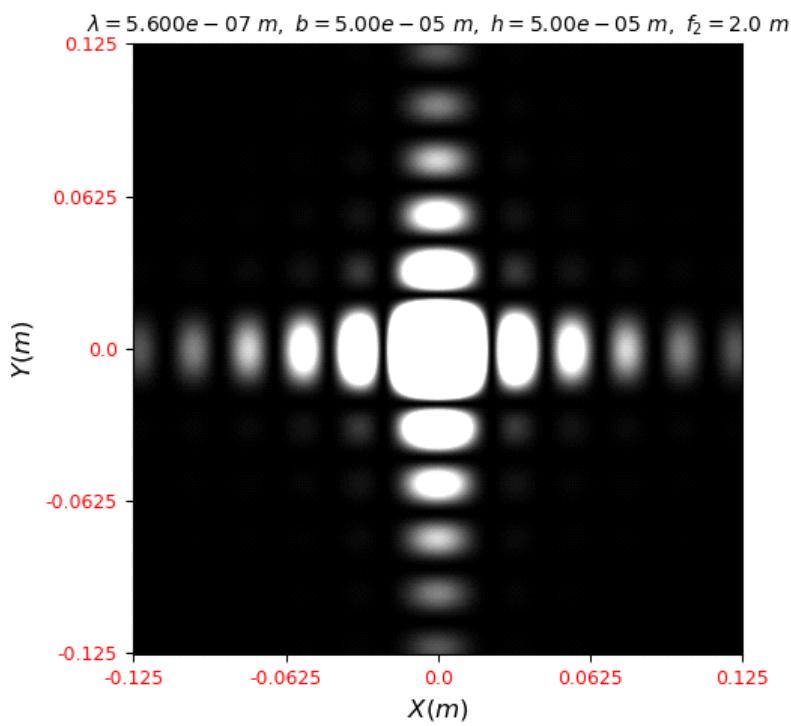
矩形孔夫琅禾费衍射GUI完整截图

通过左侧文本框或滚动条改变波长、矩形长宽、屏幕边长和焦距，可直观地看到衍射与这些参数的关系

### Fraunhofer Diffraction by rectangular aperture

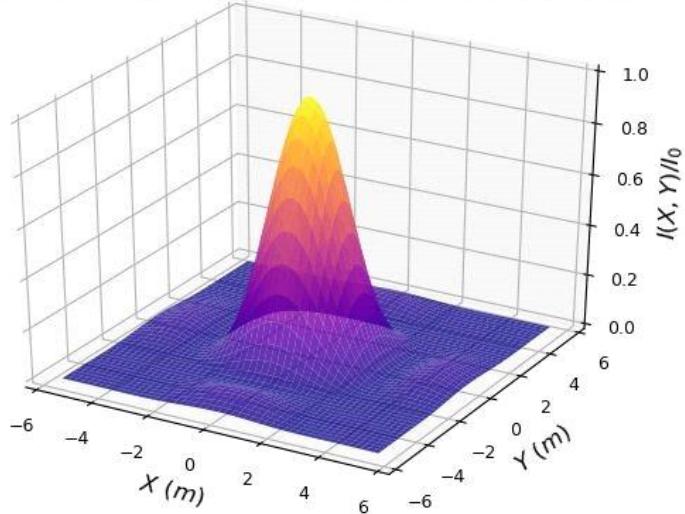


### Fraunhofer Diffraction by rectangular aperture



## Fraunhofer Diffraction of rectangular aperture

$\lambda = 5.600e - 07 \text{ m}$ ,  $b = 5.00e - 05 \text{ m}$ ,  $h = 5.00e - 05 \text{ m}$ ,  $f_2 = 2.0 \text{ m}$

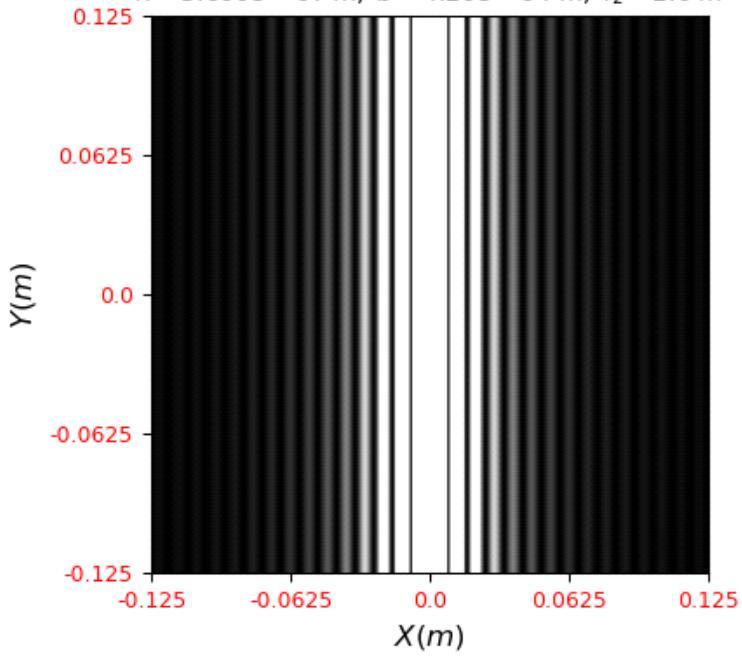


矩形孔衍射：1D、2D和3D (可点击放大)

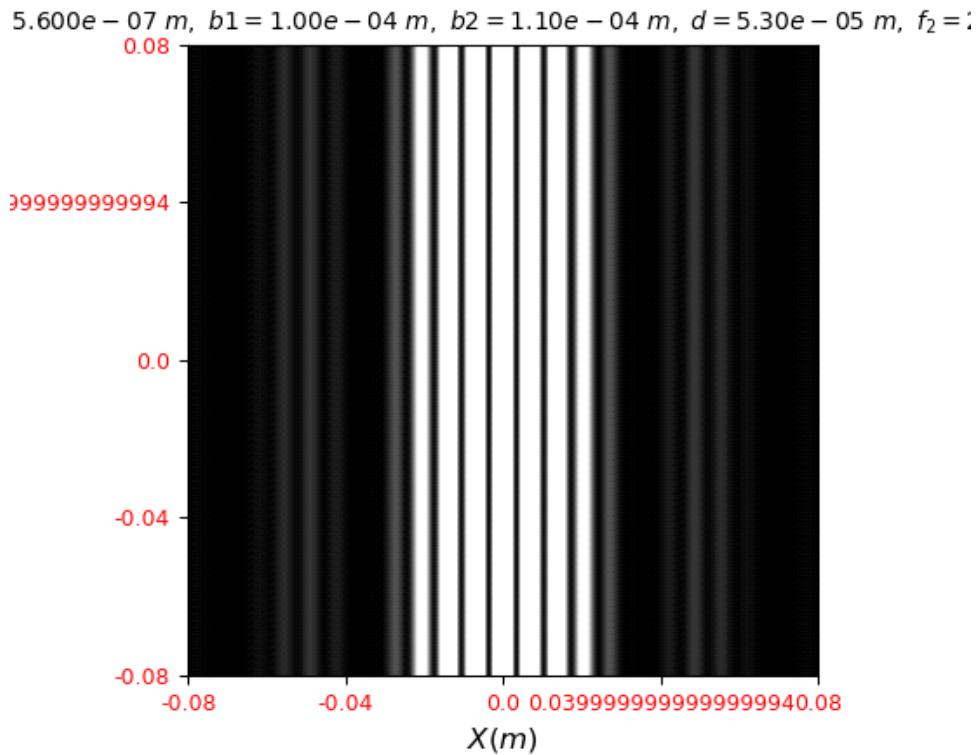
此处未截取修改衍射参数的工具栏

## Fraunhofer Diffraction of rectangular aperture

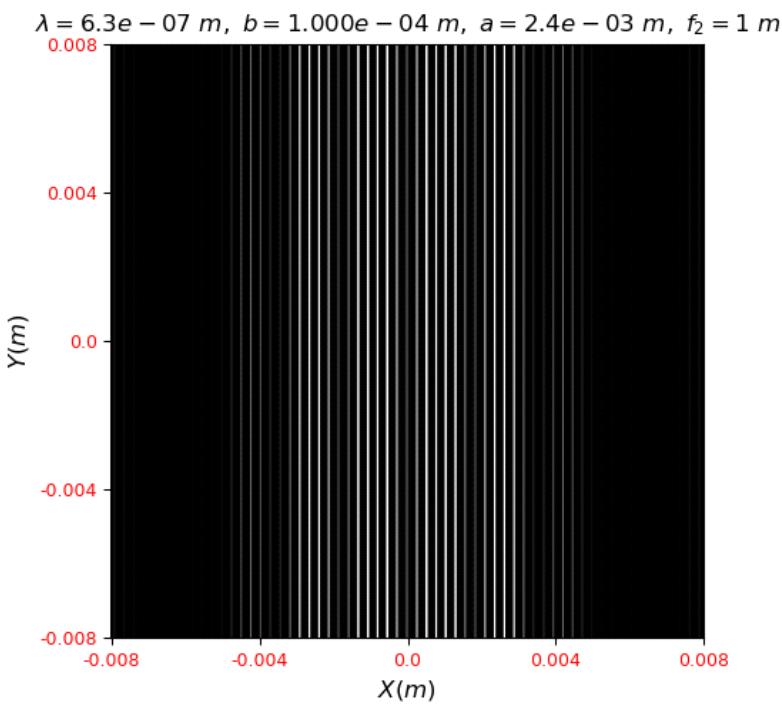
$\lambda = 5.600e - 07 \text{ m}$ ,  $b = 4.20e - 04 \text{ m}$ ,  $f_2 = 2.0 \text{ m}$



### Fraunhofer Diffraction of double slits

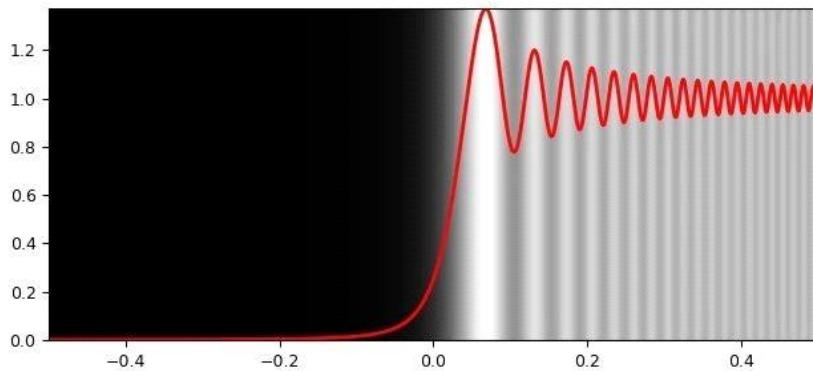


### Fraunhofer Diffraction by 20 slits

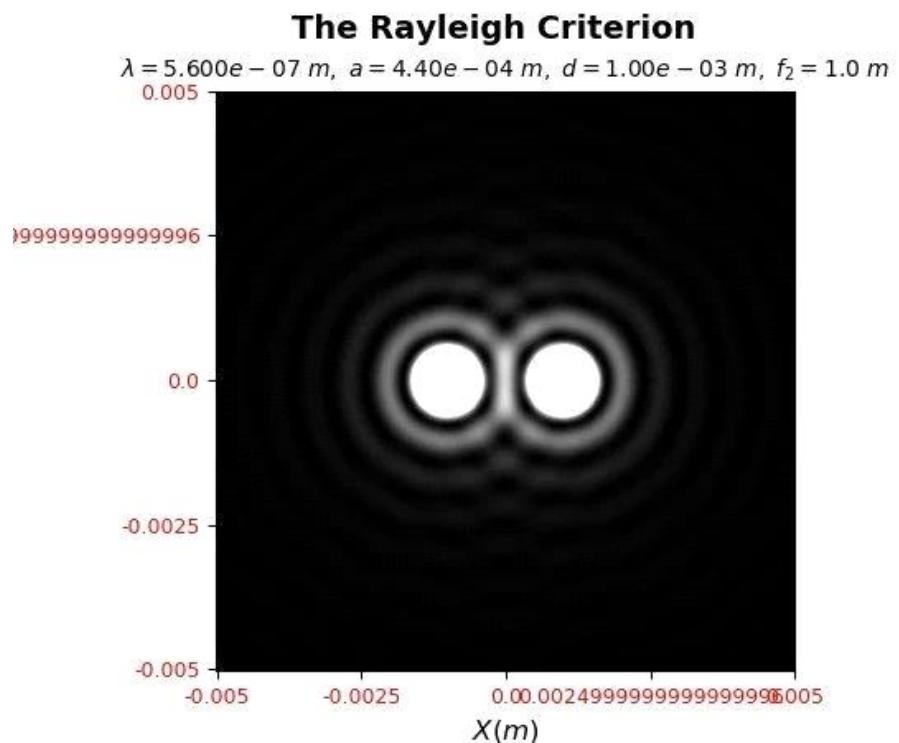


夫琅禾费衍射：单缝、双缝、20缝

可点击放大查看细节

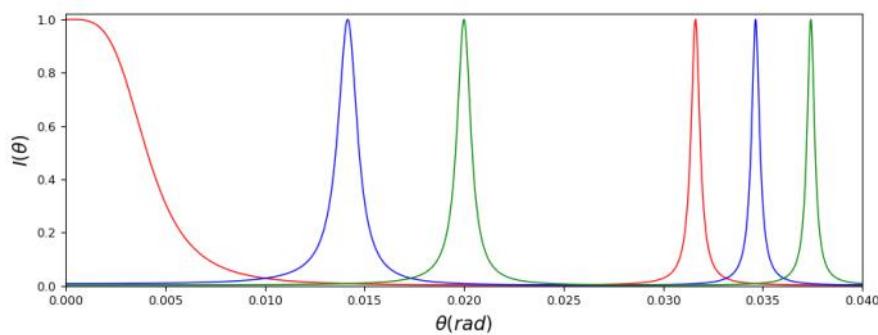


菲涅尔边缘衍射

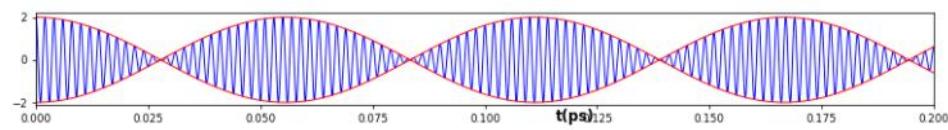


瑞利判据：分辨率的故事

各种干涉现象也有各自不同的影响因素，此处仅以法布里-珀罗干涉为例：

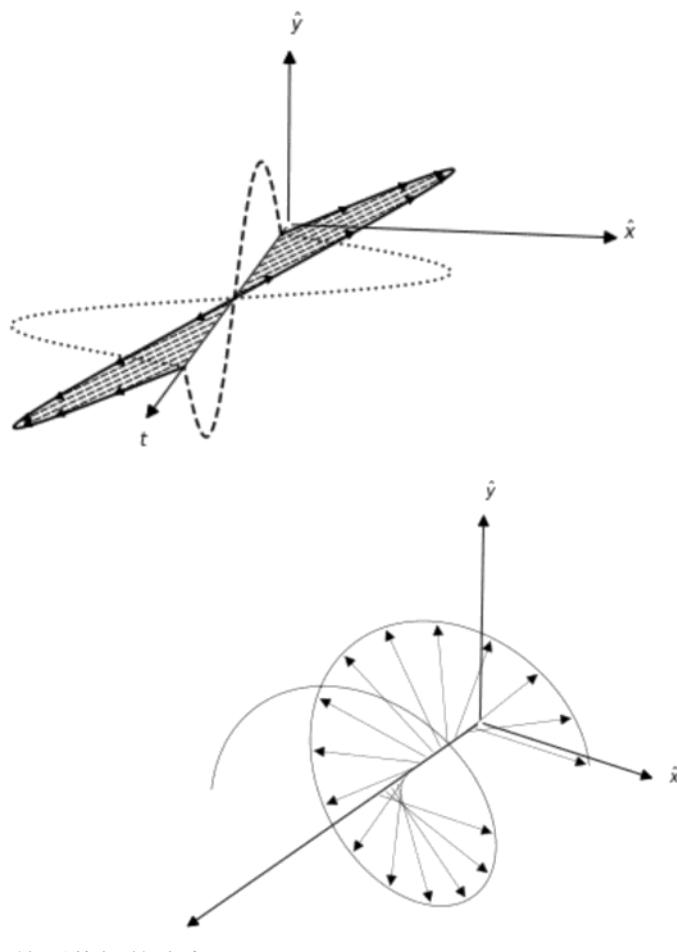


FP干涉：分辨非常接近的波长

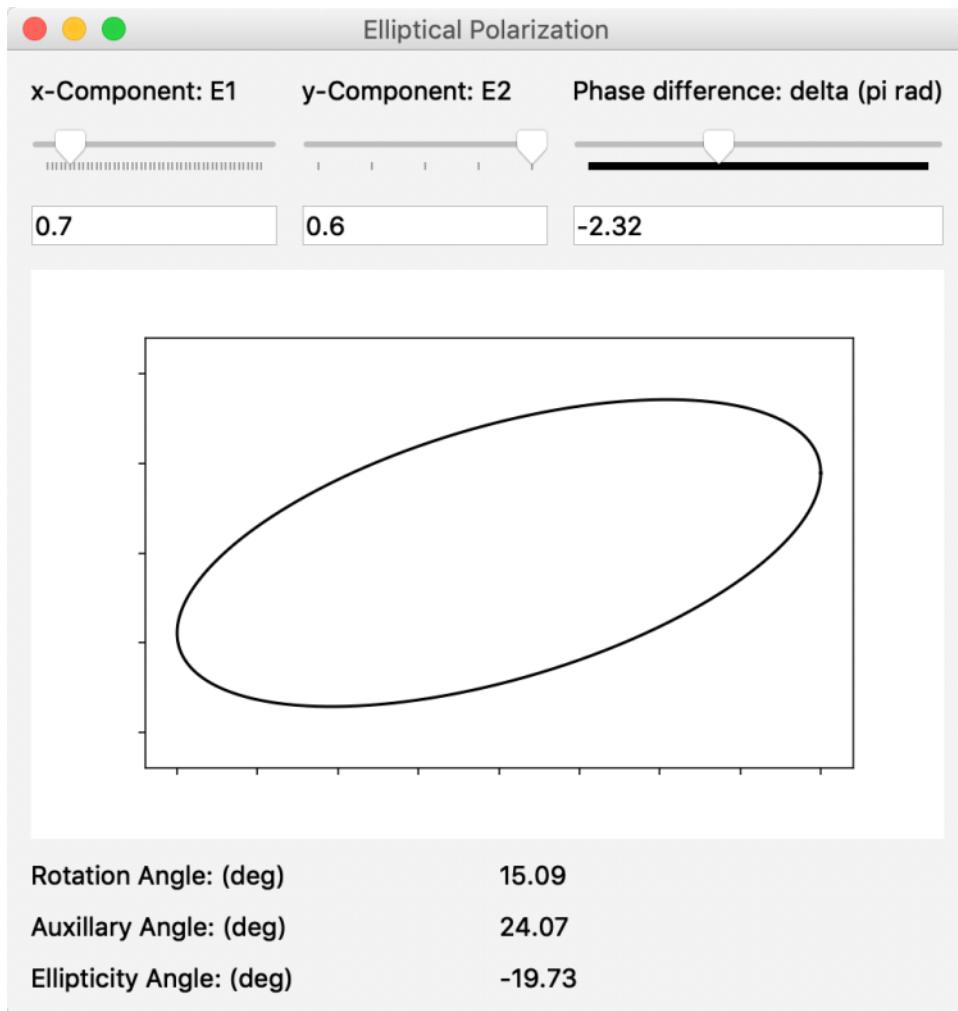


the beat goes on

初学偏振是否觉得有点抽象？如何沿x和y方向分解？圆偏振如何演变？椭圆偏振如何表征？这些问题都可以通过Python仿真形象说明：



偏振分解和左旋圆偏振的演变



椭圆偏振分解

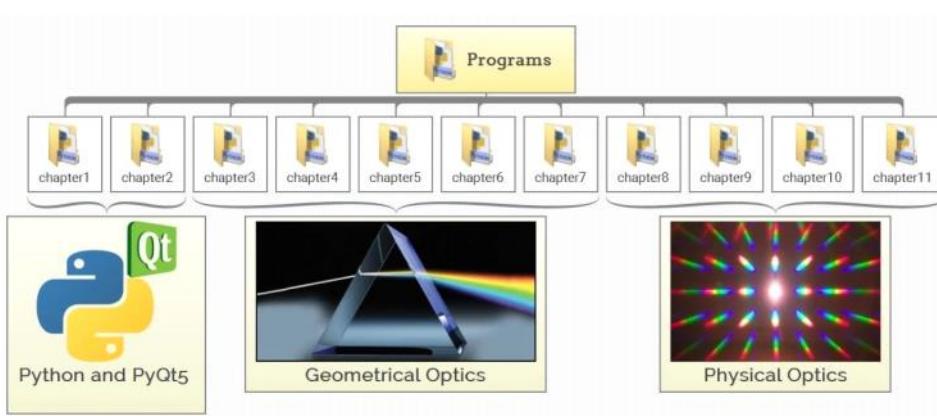
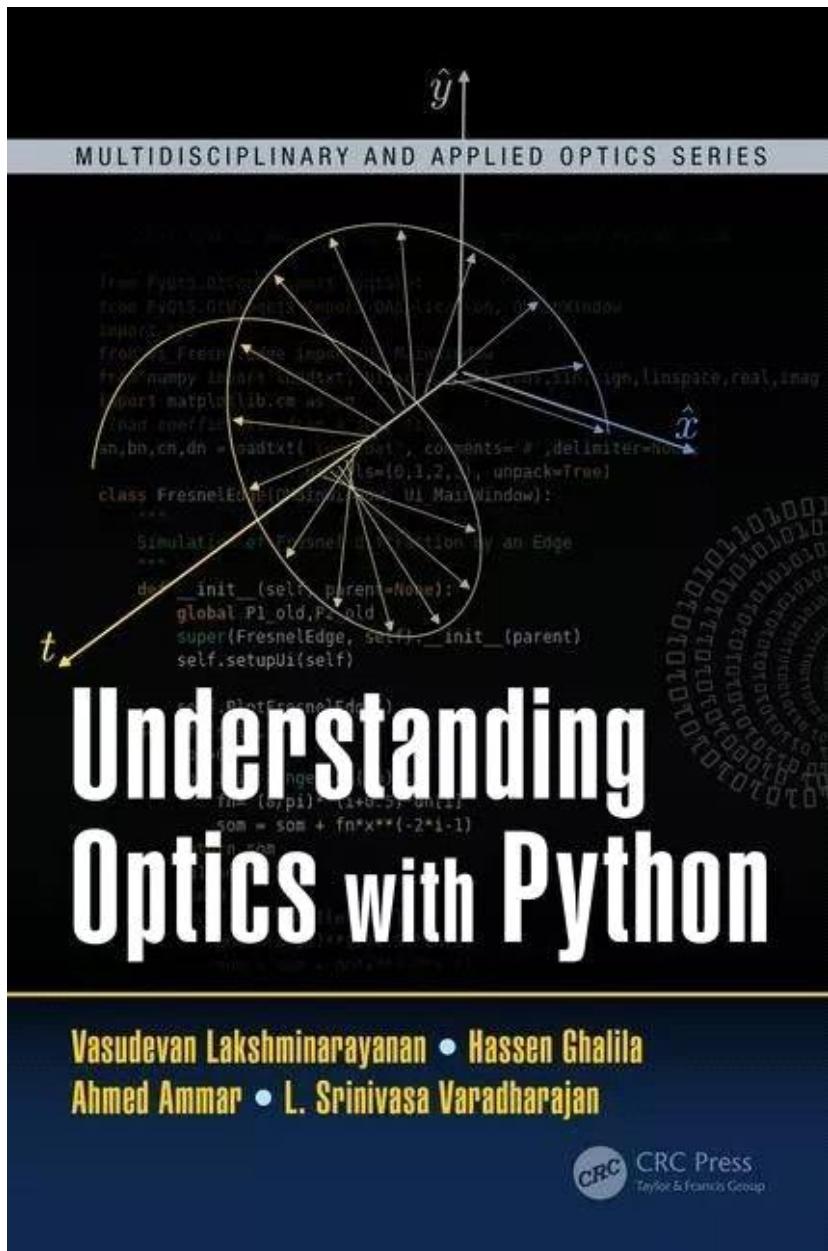
可以通过Understanding Optics with Python这本书系统学习，其出版社官网提供所有源程序的下载。

参考书

CRC Press

2018年2月, 359页

ISBN: 9781498755047



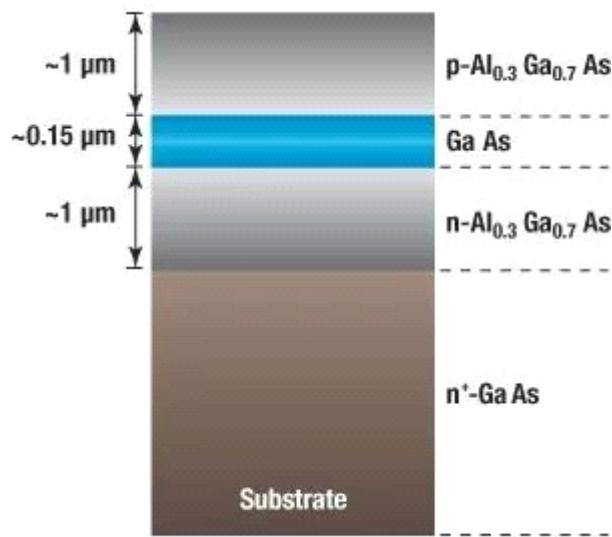
## 半导体激光器

### 半导体激光概要

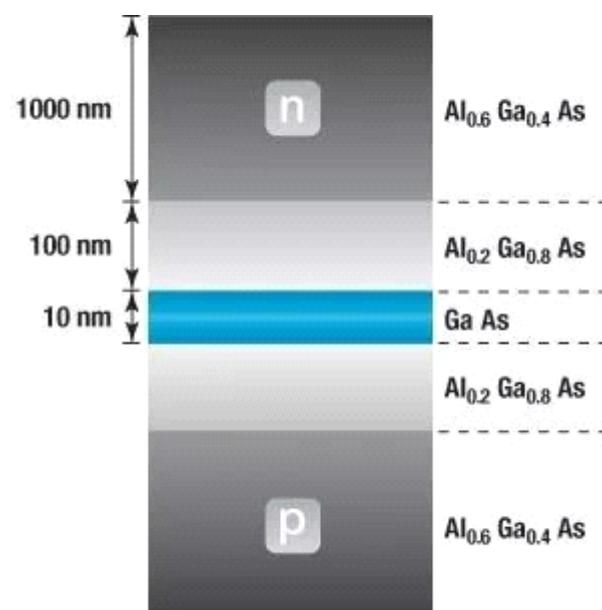
- 半导体二极管激光器通过正向偏置PN结中电子和空穴的复合产生激光。只有直接带隙半导体

材料适合制备二极管激光器。最重要的半导体化合物中包含等量的IIIA和VA族元素。

- 半导体激光器根据材料结构可分为同质结和异质结激光器、量子阱激光器、分布反馈(DFB)激光器、垂直腔面发射激光器(VCSEL)、垂直外腔面发射激光器(VECSEL)、外腔二极管激光器、光泵半导体激光器、量子级联激光器(QCL)和铅盐激光器。
- 同质结激光器中所有层使用相同的材料，比如GaAs/GaAs激光器，不过这种简单的结构效率很低。对于异质结激光器，有源层与相邻的一层或两层为不同材料。如果一层不同为单异质结；如果两层不同为双异质结。2000年一半的诺贝尔物理学奖授予了开发半导体异质结的两位科学家。
- 量子阱二极管激光器为特殊的双异质结，量子阱层位于PN结中，这种结构有助于提高效率和降低激发阈值。量子阱层和更厚的外层使用不同折射率的材料制备，可将发射光子限制在窄小区域，提高器件性能。



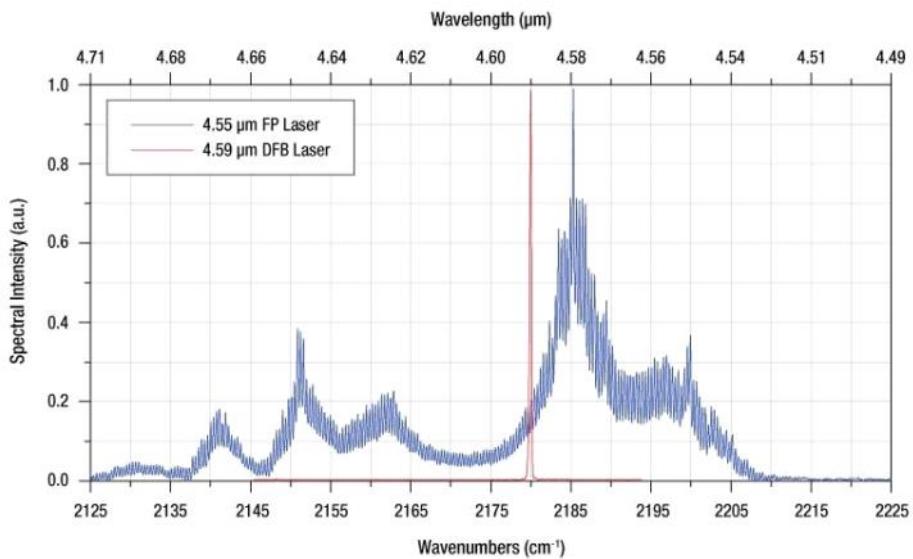
双异质结



量子阱

- 在多量子阱激光器中，量子阱和限制层交替叠加，能够产生更高的输出功率。从量子阱概念延伸出量子线和量子点结构。量子阱在一维方向限制电子，而量子线和量子点分别在二维和三维限制，进一步提高激光效率。
- 量子级联激光器(QCL)为特殊的半导体激光器，激光跃迁发生在半导体子带间，一般发射中红外光。QCL器件使用的共振腔有法布里-珀罗(FP)、分布反馈(DFB)和外腔。高功率、可调

谐和室温工作使QCL非常适合各种应用。



FP提供宽带输出(蓝线)

DFB提供窄线宽输出(红线)

- 垂直腔面发射激光器(VCSEL)从晶圆表面发射。两反射镜可以通过外延生长制备，作为二极管结构的一部分，也可以单独制备然后粘在芯片上。VECSEL是VCSEL的变体，将一个反射镜放在二极管结构外部，因此在共振腔中形成自由空间区域。
- 铅盐半导体激光器产生中红外可调谐脉冲和CW输出，特别适合高分辨吸收光谱技术，以高灵敏度和特异性检测痕量气体。铅盐半导体激光材料包括PbTe、PbSe和PbS单晶，也可以是以上材料的合金或者与SnSe、SnTe和CdS等材料的合金。铅盐激光器发射带在3 – 30  $\mu\text{m}$ ，具有大发散角和像散，这对收集光学元件的要求很高，典型CW功率水平从0.1到0.5 mW。
- 二极管激光器的重要参数包括L-I-V曲线(阈值电流、斜率效率和激光工作线性度)和输出光束特性(发散角、线宽和偏振)。很多参数都对温度变化敏感。阈值电流随温度增加而增加，斜率效率随温度增加而降低。二极管激光器光谱轮廓受温度变化影响也很大。温度增加，增益曲线向长波长方向移动。
- 二极管激光器对静电放电和短时瞬态(电流尖峰、超过限制的注入电流和超过击穿限制的反向电压)都特别灵敏，使用时需要特别注意。

## 选择题

1. 下面能够用于稳定半导体激光器输出波长的参数为：

- A. 驱动电流
- B. 二极管温度
- C. A和B都是
- D. 以上都不是

2. 二极管激光器中最常用的三元化合物的表达式为：

- A.  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$
- B.  $\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$
- C.  $\text{Ga}_{1-x}\text{AlAs}_x$
- D.  $\text{Ga}_x\text{AlAs}_{1-x}$

3. 对于二极管激光器：

- A. 斜率效率随温度增加而增加
- B. 增益曲线随温度增加向短波长移动
- C. 斜率效率随温度增加而降低
- D. 阈值电流随温度升高而升高
- E. C和D都对

4. 制备激光二极管的三元和四元化合物：  
A. IIIA族元素的总量多于VA族元素的总量  
B. IIIA族元素的总量少于VA族元素的总量  
C. IIIA族元素的总量等于VA族元素的总量  
D. 以上皆不是
5. 激光二极管斜率效率以那个单位表达：  
A. A/V   B. V/A   C. W/A或mW/mA
6. 靠近有源层刻蚀衍射光栅的二极管激光器类型为：  
A. 量子阱激光器  
B. 垂直腔面发射激光器  
C. 分布反馈激光器  
D. 可调谐二极管激光器
7. 双异质结半导体激光器比同质结半导体激光器具有更高效率的原因是：  
A. 前者阈值电流更低  
B. 后者自发辐射水平更高  
C. 前者将受激辐射更好地限制在有源层  
D. 前者将电流限制在有源层
8. 以下发射单纵模的半导体激光器类型为：  
A. 分布反馈激光器  
B. 同质结二极管激光器  
C. 异质结二极管激光器  
D. 垂直腔面发射激光器
9. 下面哪种激光二极管输出红光：  
A. GaAlAs   B. AlGaInPC. InGaAsP   D. 都不是
10. 下面描述错误的选项为：  
A. 只有直接带隙半导体材料适合制备激光二极管  
B. 分布反馈激光器产生窄带宽输出  
C. InGaAsP是一种四元III-V族半导体  
D. InGaAsP激光器的波长从750到870 nm

参考答案：CAECC | CCABD

### 简述题

1. 简述二极管激光器的工作原理。定义激发阈值、斜率效率和光束发散角。
2. 在拿取和使用二极管激光器时需要采取什么预防措施？二极管激光器性能退化的主要原因有哪些？
3. 温度如何影响二极管激光器的以下参数：  
A. 斜率效率   B. 阈值电流   C. 增益带宽曲线   D. 不同的纵模
4. 说出下面每种激光器的两个主要特征：  
A. 分布反馈(DFB)激光器  
B. 垂直腔面发射激光器(VCSEL)  
C. 异质结激光器
5. 对下面每种应用起关键作用的是激光器的哪种性质？试给出一到两个原因。  
A. 生物医学诊断  
B. 光谱学

C. 激光干涉计量学

D. 全息

E. 激光打标

F. 激光指向

G. 光纤通信

## 计算题

1. 分布反馈(DFB)激光器需要输出1200 nm波长。如果半导体在该波长的折射率为3，计算一阶衍射光栅的缝距(pitch)。[200 nm]
2. 某种InGaAsP激光芯片的温度增加25 K，如果该激光器的特征温度值为75 K，计算阈值电流相比温度变化前的变化率。[39.6%]
3. 对于某个激光二极管，50 mA驱动电流产生5 mW输出功率。当驱动电流增加20%，输出功率增加100%。计算斜率效率。[0.5 mW/mA]

## 油镜之谜

我曾经搭了一套密集的光学装置，其中有一台小二氧化碳激光器、一些铜反射镜和分束镜等光学元件。当激光器工作一段时间后，用液晶卡观察不可见激光时，发现光束有点发散，不再是原本清晰紧密的光斑。激光器本身没有变化，但是光束质量已经明显降低。

最后，我注意到控制光束的铜反射镜有点模糊，于是拆下几个放在显微镜下观察。*Lo and Behold!*激光器后的两个镜子表面附着了细微的不明液滴。因为这些镜子的温度非常恒定，所以不应该是冷凝。而且，液体全然没有挥发。只能想象这是某种不会挥发的油。

但是油从哪来的呢？这才是真正的迷。光学装置处于洁净间内，真空泵等任何污染油源都不存在。墙壁经过特殊涂刷，能够吸附室内灰尘。进门之前当然也有粘灰垫除去鞋底灰尘。尽管并不是高级别的洁净间，但是我们有足够的预防措施避免不明液体的污染。

更令人迷惑的是，液滴并不是均匀分布在镜面上。光束越强的地方，液滴越多越大。就像激光以TEM<sub>00</sub>模工作一样，液滴大小和数量竟然也满足高斯分布！所以，我们有了两个不解之谜：油从哪来？为何这样分布？

这两种现象必然存在关联，最初我觉得是红外激光加热反射镜，镜面出汗使油从微孔溢出。我把这个猜测告诉同事，他说有些铜反射镜会在橄榄油中抛光。听起来奇怪但也有可信之处，于是我就此展开调查，但没有发现任何假想的微孔，而且这些镜子也没有用油抛光。

再次回到迷之原点。如果不是激光加热，什么还可能产生液滴呢？什么东西可能和光束轮廓相关呢？忽然灵感闪过我的脑海：光学浮力。

很多年前我在科学美国人读过一篇关于光学浮力的文章(Arthur Ashkin, 1972年)。你可以用一束向上的激光抵消重力将微玻璃珠悬浮起来，就像用水柱将球推起来。不同于水柱的是，激光能够提供稳定的支撑。如果微粒偏离光束中心，会被拉向中心光轴，而水柱会使得球更加偏离。当然，光学力是非常小的，玻璃珠只有20微米左右。

这种力既能使微粒稳定在光轴上，也能将随机漂浮的电介质微粒拉向光轴。将一束强激光打在细微粒子云时，你就像有了一把光学扫帚，将这些粒子扫向光轴方向。细微的油滴形成球

体，因为表面张力使表面积最小，它们能在空气中悬浮很长时间。

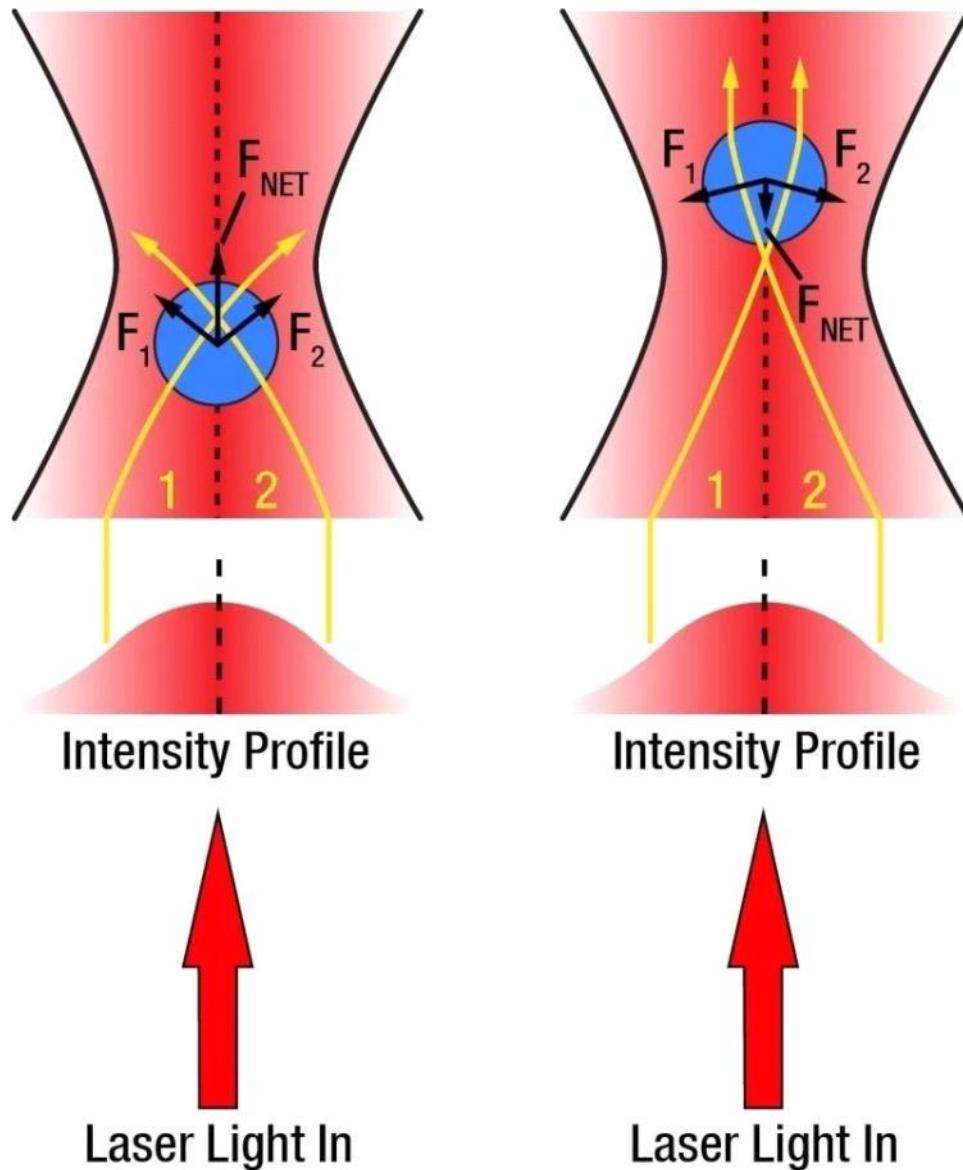
这看起来是镜面积油的合理解释——二氧化碳激光通过细微的油滴，抓住油滴推向光轴，最终使之附着在铜镜上，而且位置接近光轴。第二个镜子上也有油，当第一个镜子上的油太多使光束发散太大，就不能将油滴推向第二个镜子。所以你肯定想到第一个镜子会有更多的油，事实确实如此。Bingo！

但是油从哪里来的呢？实验室为洁净间，不应该有渗油的东西。没有泵。不用润滑剂（甚至光学调整架也不用）。没有气雾剂。我们所有的是光学平台、光学组件及其安装座。我们在操作光学元件时会在激光器前加一个光挡（Beam Block），不过它是由惰性材料制造的。

光挡！它可能是惰性材料，但是我了解到，为了减少微粒产生，切割时会使用油！油可能渗入其中或者附在表面，即使看似清洁并且摸上去是干燥的。光挡被红外激光加热，油挥发在空气中冷却形成油滴。

解决方法：更换一个从未触油的光挡。结果：油滴消失。结案。

### 关于光学力



光线1和2分别施加 $F_1$ 和 $F_2$ ，焦点前的粒子受到合力向上(左图)，而焦点后的粒子受到的合力向下(右图)，所以都会被拉向焦点。左右偏离焦点的粒子也可能被拉向焦点。由于2018年诺贝尔物理学奖，更多人因此得知了这种光学现象。

1. A. Ashkin, "The Pressure of Laser Light," *Scientific American* (February 1972).
2. A. Ashkin, "Acceleration and Trapping of Particles by Radiation Pressure," *Phys. Rev. Lett.* 24: 156ff. (1970).
3. A. Ashkin and J. M. Dziedzic, "Optical Levitation by Radiation Pressure," *Appl. Phys. Lett.* 19 : 283ff. (1971).
- [4. A. Ashkin: 微小粒子的光学捕获和操纵](#)
- [5. Arthur Ashkin的贝尔实验室工作记忆](#)

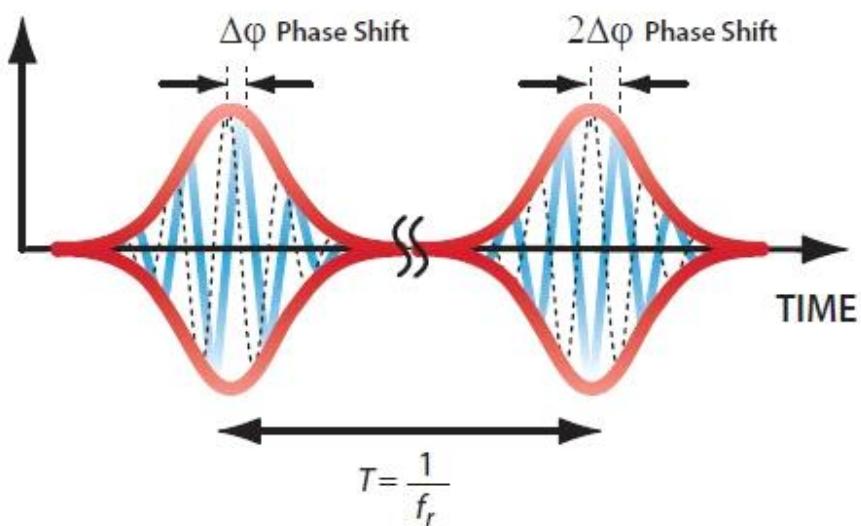
## 光学频率梳

### 光梳基础

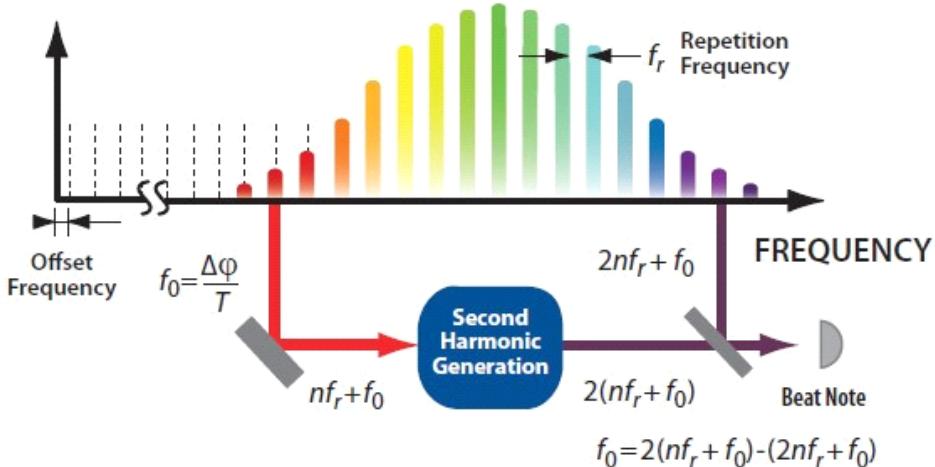
光学频率梳(OFC)由相同间距的超短激光脉冲串构成，其傅里叶变换频谱看起来就像一根根梳齿，当然根数远多于普通的梳子。以跨可见光波段的光梳而言，如果间距是1 GHz，那么它将有40万根梳齿！

虽然梳齿(模式)间距等于脉冲重频，但是每根梳齿的位置并不完全等于重频的整数倍，而是有所偏移；光梳的关键就是测量这个偏移频率，从基本概念到钛宝石飞秒激光再到微结构光纤，科学家为此付出了几十年的努力。当光梳频率范围大于一个倍频程时，就特别容易测量偏移频率，就是所谓的自参考技术。以下是光梳的基本原理图和相关公式。

### TIME DOMAIN - FEMTOSECOND PULSE TRAIN



## FREQUENCY DOMAIN - FREQUENCY COMB



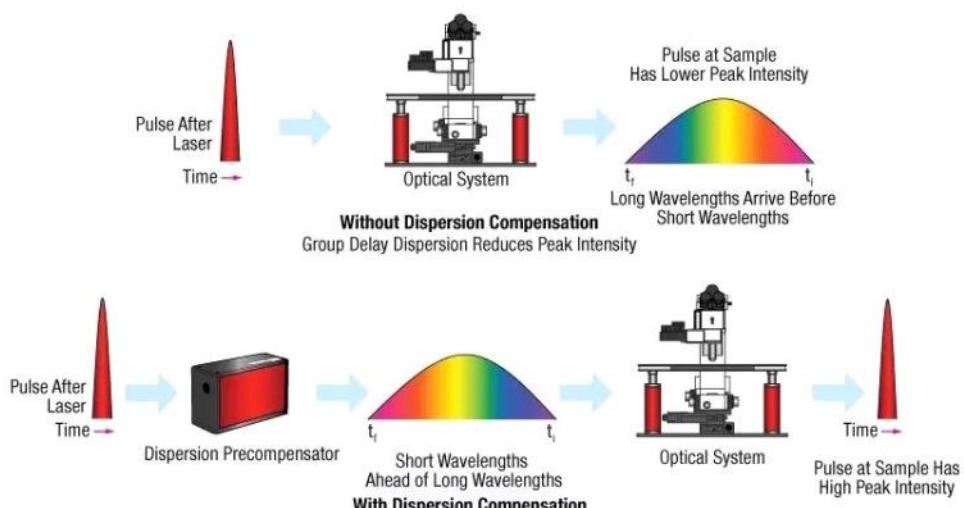
speed of light in vacuum $c = 299,792,458 \frac{m}{s}$	light velocity $c = f \cdot \lambda$	bandwidth conversion $\Delta f = \frac{c}{\lambda^2} \cdot \Delta\lambda$ e.g. at 633 nm $\Delta\lambda = 1 \text{ nm}$ corresponds to $\Delta f = 748 \text{ GHz}$
pulse period $T = \frac{1}{f_r}$	offset frequency $f_0 = \frac{\Delta\phi}{T}$	frequency comb equation $f_{cw} = n \cdot f_{rep} \pm f_0 \pm f_{beat}$

[Menlo最新发布的光梳海报](#)

## 超快光学元件

### 1、色散补偿光学元件

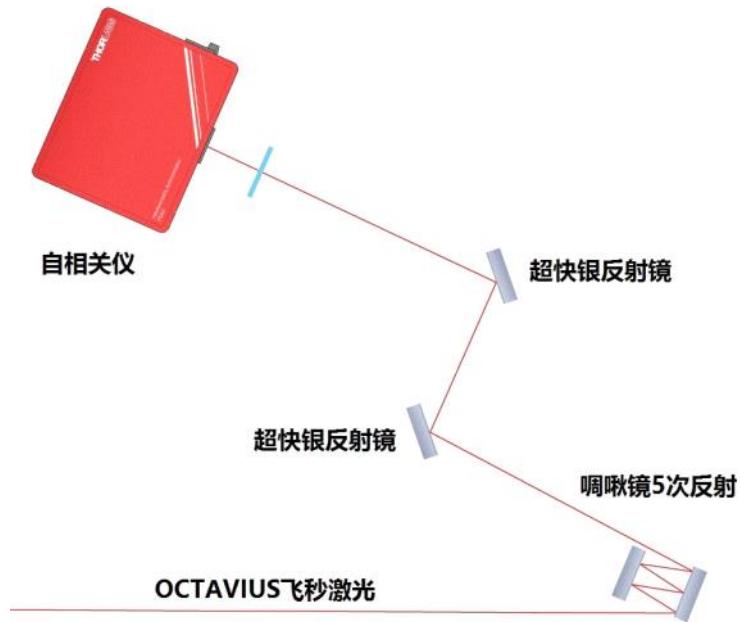
色散补偿光学元件用于校正超短脉冲通过光学系统时产生的脉冲展宽。由于超快激光脉冲具有宽带波长范围，在通过光学系统时由于折射率的波长相关性会产生时间展宽，但是通过色散补偿可以压缩脉冲，请参考下图中的色散补偿示例。



上：长波在前短波在后，脉冲展宽；下：先经过负色散补偿，使短波长在前，长波长在后，然后通过正色散光学系

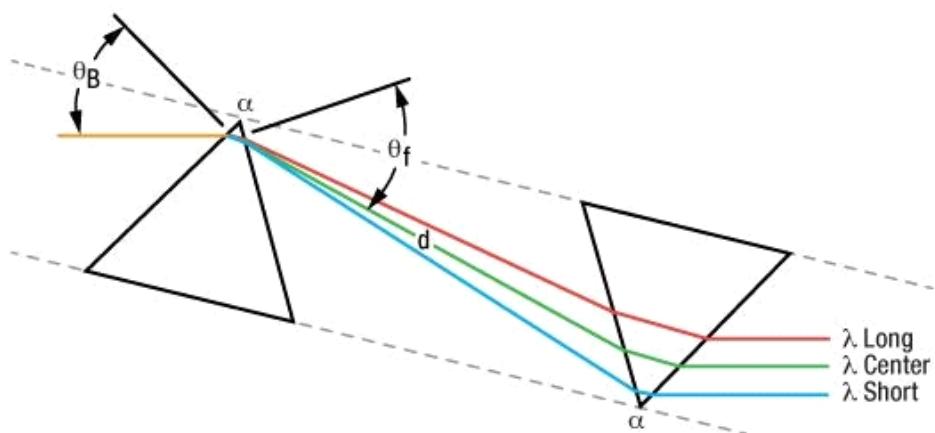
统再次压缩。请点击放大查看细节。

**啁啾反射镜**可选圆形和矩形两种版本，UMCx-15FS圆形啁啾镜用于补偿熔融石英产生的群延迟色散；DCMP175矩形啁啾镜对用于补偿高NA显微物镜等复杂光学系统的群延迟色散。由于小入射角设计，可通过多次反射提供更大补偿，比如下图中通过啁啾镜的五次反射预补偿飞秒自相关仪中的色散，以此测量15 fs激光脉宽。



飞秒自相关测量中使用啁啾镜提供预补偿

**色散棱镜对**是一种简单、可调谐、低损耗的色散补偿方法。为了达到规定的群速度色散(GVD)和最高透过率，光要以布儒斯特角入射，第一个棱镜用于分开不同波长的光，第二个棱镜使折射光彼此平行。如果再增加一对棱镜(总共4个)，可使所有光线最终共线传播，这个特性在已有光学系统中安装色散补偿器时特别有用。



色散补偿棱镜对工作示意图

## 2、低GDD介质膜反射镜

Thorlabs提供多种低群延迟色散(GDD)介质膜反射镜，波长范围覆盖多种激光。

## 3、金属膜超快反射镜

**超快增强镀银反射镜**设计用于飞秒钛宝石激光器。这些反射镜表面镀有介质膜，在750到1000 nm波长范围内提供98.5%以上反射率，而且极大地保持金属膜固有的低群延迟色散(GDD)特性。

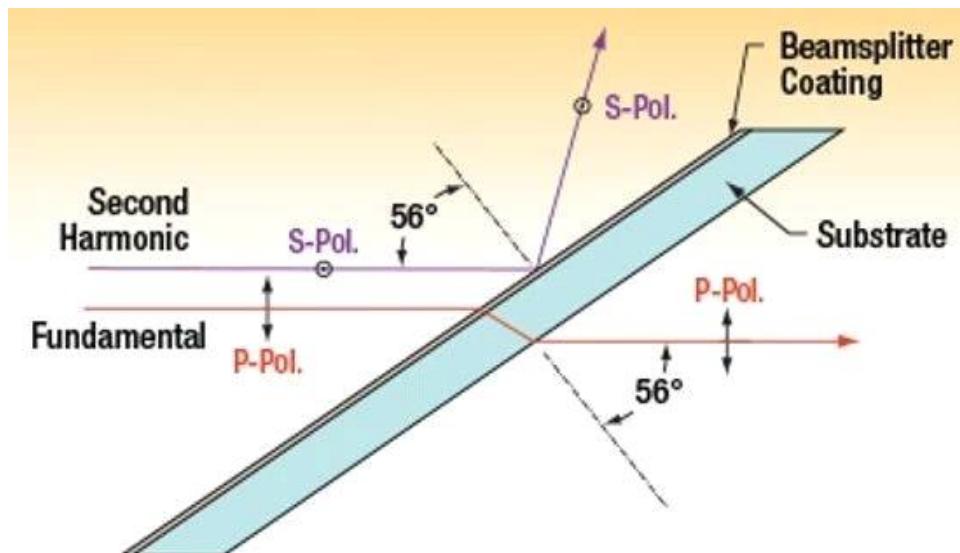
**带保护层的镀银反射镜**在450 nm到2 μm超快范围内提供97.5%以上反射率，适合用于飞秒脉冲激光。

**裸金膜反射镜**(0.8-20 μm)也能用于超快应用。

## 4、超快分束镜

### 低GDD谐波分束镜

- 分离倍频超快钛宝石激光



超快谐波分光示意图

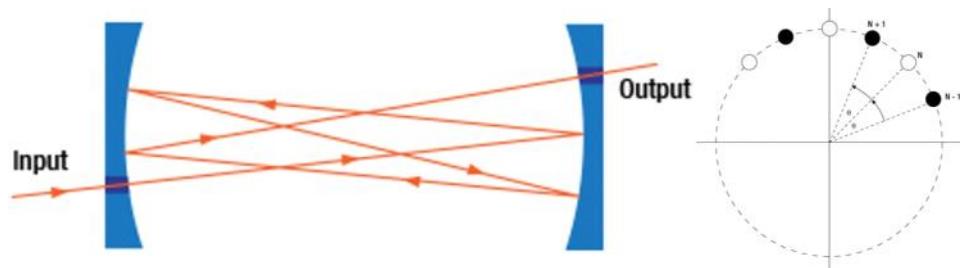
### 超快宽带分束镜

## 赫里奥特气体池

赫里奥特池一般由两个凹球面反射镜构成，反射镜上开有一个孔。光束从孔中倾斜入射，然后在两个反射镜之间不断反射，最后从孔中输出，这些反射点将在每个反射镜上形成一个圆（也可能是椭圆或直线）。如果两次连续反射的角度是 $\theta$ （弧度单位），那么反射点一次往返后在每个镜面上旋转 $2\theta$ ，所以赫里奥特池的折返条件需要满足：

$$N\theta = 2\pi \cdot M$$

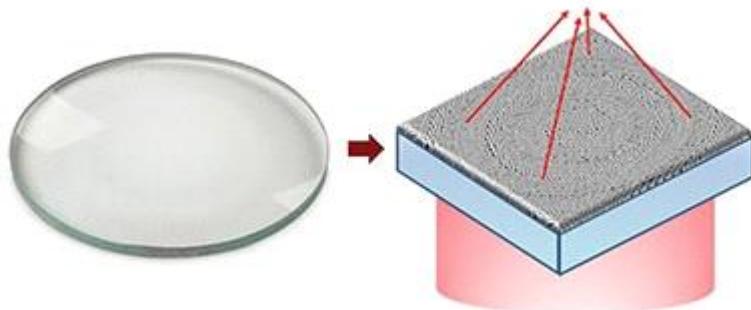
其中N为光束通过气体池的偶数次数，M为整数。上式说明光束总反射次数乘以反射角必须为 $2\pi$ 的整数倍才能从气体池中输出。



赫里奥特池反射示意图  
反射点一次往返角度旋转 $2\theta$

## 新兴超材料

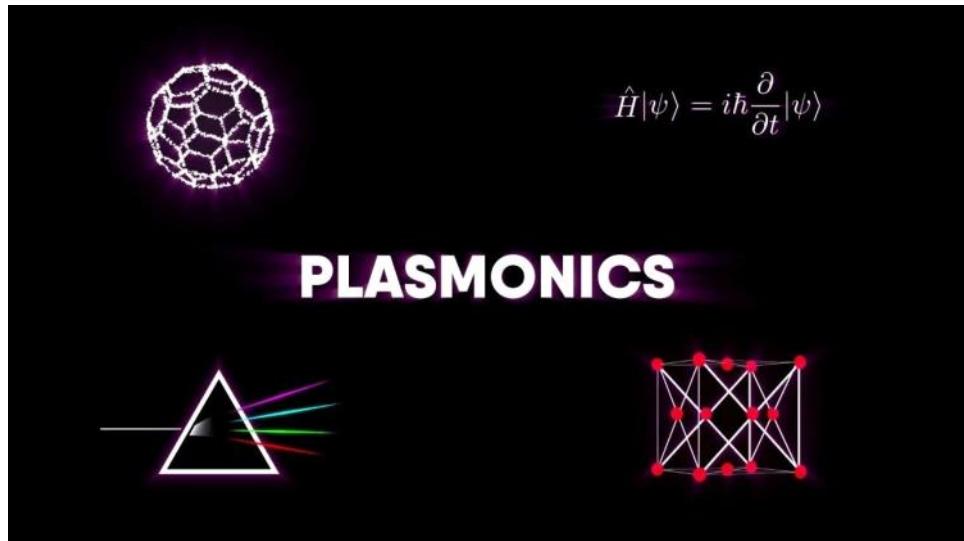
可调谐、各向同性负折射率超材料的目标之一是能够同时控制光的相位和振幅，为实现隐形斗篷、全息显示和量子悬浮提供基础。



### 超表面

超表面是二维超材料，通过半导体或金属薄膜的纳米图案成形制备，我们可以超表面上粒子的尺寸、形状、周期和排布，以低于衍射极限的尺度精密操控波前。超表面光学元件不仅能和传统元件一样聚焦、分光、衍射或者结构化光，而且功能更多、尺寸更小。

超表面利用等离激元现象控制光和整形波前，等离激元是指等离子体中集体振荡的电子。电子的操控叫做电子学；光子的操控叫做光子学，同样就有了plasmonics：操控表面等离激元，即金属纳米结构中的电子激发。



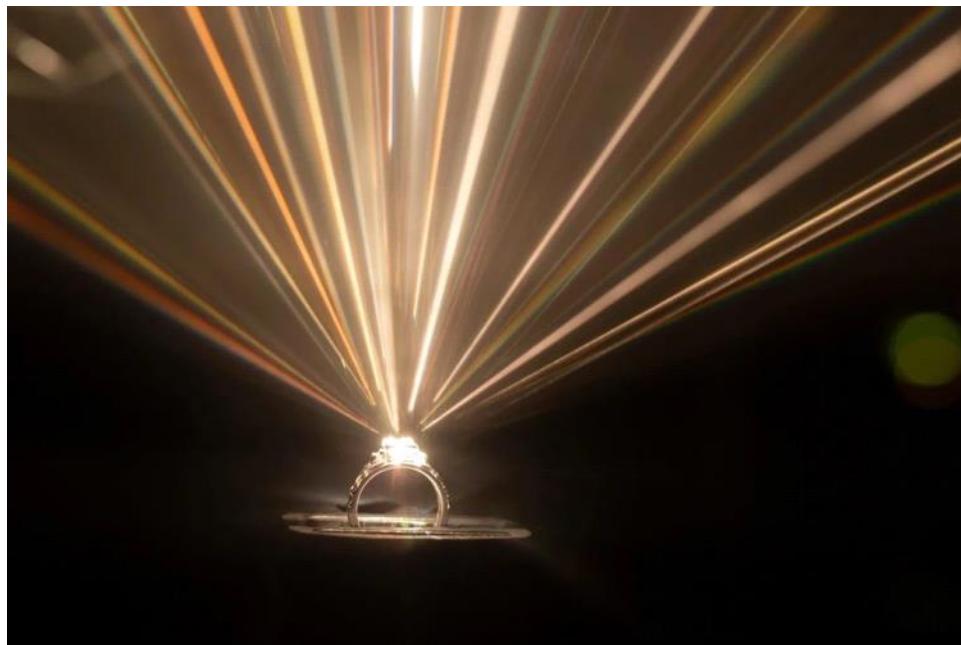
## 激光实验室生活：安全注意事项

### 工作开始之前

**沟通交流.** 激光实验室中最重要的莫过于沟通。记录实验日志，要让后来者知道系统变化，也要让所有人知道你将要采取何种行动以及他们需要的预防措施。这可能包括安全眼镜需求、抽真空、使用制冷等等。

**摘掉首饰.** 手表、耳环、手镯、戒指和卡牌等都是很强的反射源。当然，如果您有一套白光超连续激光

器，也许能别出心裁地来一场炫彩的钻戒表演；您难道不想在激光领域大展身手？



超连续激光的钻戒反射

**反射源.** 塑封海报、柜子门框等等都可能将激光反射到完全意想不到的地方。将光束封闭在光学平台范围是解决杂散反射的好办法。

**工作区域.** 防止杂散光进入。

**激光眼镜.** 固定存放位置，比如门边，因为总是有人不小心乱放的。



工作区域和激光眼镜存放点示例

## 成为激光大师

- 记录激光工作日志，包括实验室环境、用户和主要性能等。
- 限制2人最多3人负责对准和故障排查；**据统计，60%以上激光事故都发生在对准。**
- 在光学平台上放置激光器时总是确保方便后续维护。
- 基于面包板的激光器和光学平台存在热性质不匹配问题，注意避免长期热漂移。
- 为负责人员配备一套专用维护工具和仪器，而且某套激光设备专用。
- 建议实验室温度稳定在正负1到2度，湿度小于40%；不要低估多人同时工作的散热。
- 放置供电设备的平台和支架必须接地。

- 避免传递工具时阻断光束。

## 激光安全配件

**激光观察卡.** 通过荧光或液晶变色用于观察紫外、可见或红外光。使用时让卡片向下倾斜，避免反射指向自己或周围的人；尤其是塑封卡片更可能因为表面不平产生杂散反射。另外还要注意防止烧坏甚至是火灾，**绝不要**没人时用卡片长期挡光。

**红外观察仪.** 两点注意：首先，和激光防护眼镜一起用时可能很难观察，让你不小心摘掉眼镜。其次，误以为观察仪具有激光防护功能而直视激光，带来安全风险。一个相对麻烦但更有效的方法是用红外相机查看。

**光挡(Beam Block).** 从一张纸卡片到塑料或金属罩壳都可以看成光挡。如果用纸挡光，选择合适的颜色，避免激光吸收带来烧坏和/或变热的问题，而且卡片还可能释气并污染光学元件，如果清洁不当最终会损伤光学元件。

纸张或卡片很容易松脱或损坏，这时可以用金属板固定在光学平台上，多片还能围成小隔间。另外透光的聚碳酸酯塑料适合紫外或CO<sub>2</sub>激光波长。

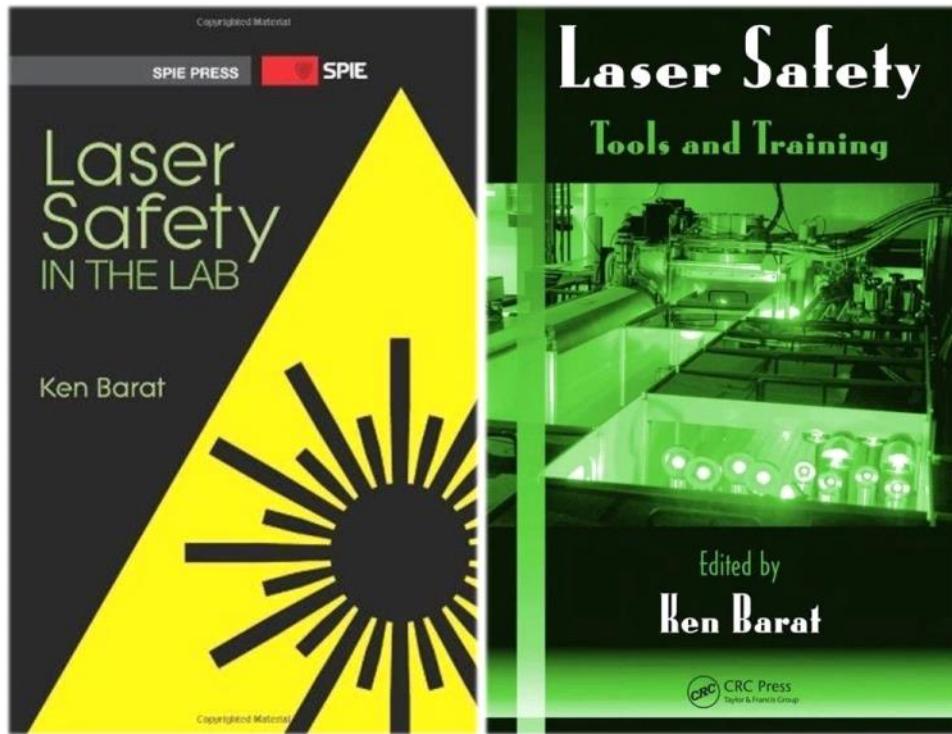
**激光帘幕.** 一般可用于将实验室分隔成是否需要佩戴激光安全眼镜的区域。选择多种多样，安装方式也各不同。



经过认证的帘幕系统

激光实验中还要理解所使用的光学元件。比如激光偏振棱镜需要特别注意溢出光端口，**这类光学元件的旋转是造成眼睛损伤最多的。**而背向反射和重影也是经常被忽略的问题。光学元件必须保持清洁，激光工程师必须掌握正确的清洁方法。

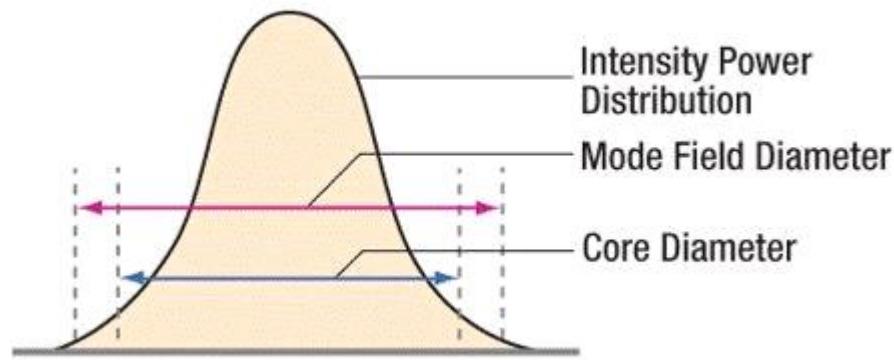
安全无小事，而激光安全防护眼镜应该是你的最后一道防线。决不能以为经验丰富而大意。**2001年美国阿尔贡国家实验室一位具有15年激光经验的科学家被钛宝石激光击中致盲。**遇见违反安全规定的行为也要及时制止，只有共同努力才能打造安全的激光实验环境。



## 光子学经验

### 光纤

1. 单模光纤模场直径比纤芯直径大约15%.



2. 使用下式估算单模光纤的纤芯直径d、数值孔径NA和截止波长λc的关系:

$$d = 0.767 * \lambda_c / NA$$

### 探测器

1. 每降低10 °C可以减小PIN硅光电二极管30%噪声。
2. 每降低9 °C可以减小CCD一半暗电流。
3. 示波器带宽与其可测量的最快上升时间的关系如下。比如，100 MHz示波器可测量2.2 ns最快

上升时间。

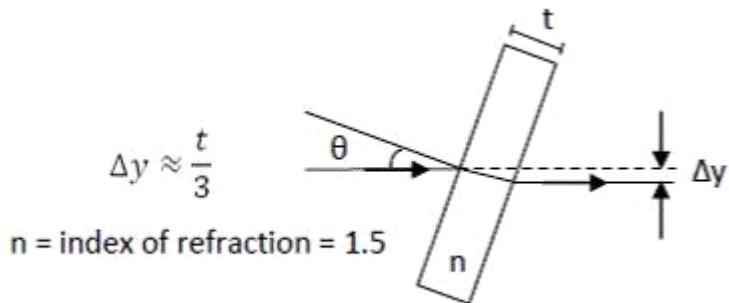
$$\text{rise time} = 0.22/\text{bandwidth}.$$

3. 光学探测器的响应度(A/W)约等于其量子效率除以1.24.

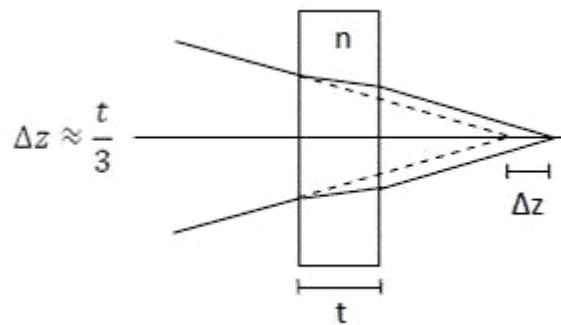
4. 在荧光寿命测量中，激发脉宽与荧光时间的比值应该在1:5到1:10范围。

### 光学元件

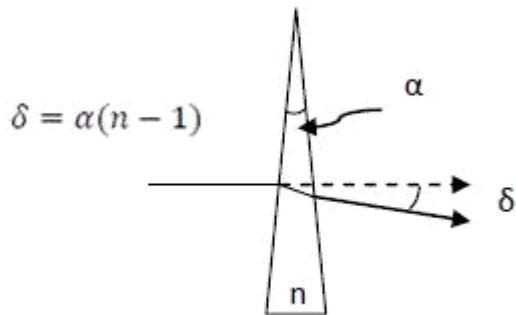
1. 玻璃平板倾斜 $45^\circ$ 引起成像的水平变化( $\Delta y$ )约为厚度的三分之一。



2. 在一束汇聚光中插入一块玻璃板引起的焦点偏移( $\Delta z$ )约为厚度的三分之一。



3. 估算小角度入射光楔时引起的光线偏折角，其中角度都是弧度单位。

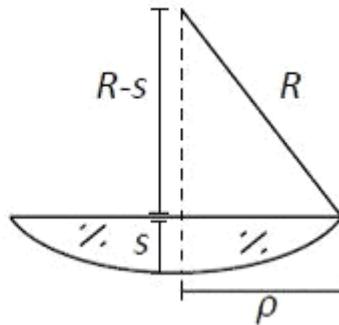


4. 矢高(sag)计算：

$$s \cong \frac{\rho^2}{2R}$$

$s$  = sag

$\rho$  = radius (size) of optic  
 $R$  = radius of curvature



#### 5. 不同角度单位的换算:

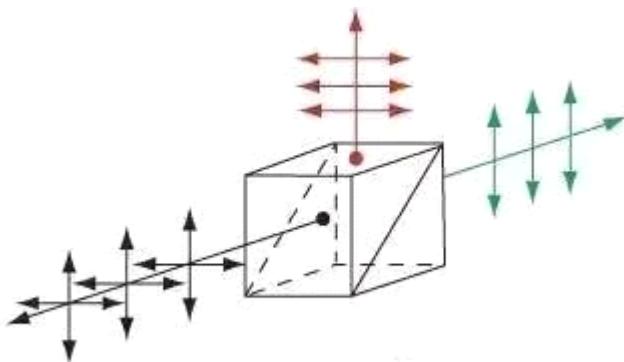
- $1^\circ = 60 \text{ arcmin} = 3600 \text{ arcsec}$
- $1^\circ \approx 1/60 \text{ rad}$
- $1 \text{ arcsec} \approx 5 \mu\text{rad}$

6. 光学镀膜入射角从 $0^\circ$ 变成 $45^\circ$ 时，波长变短10%。比如 $0^\circ$ 入射为1064 nm, 那么 $45^\circ$ 入射为958 nm.

#### 7. 对于塑料光学元件:

- 由于塑料转变温度低且热膨胀系数高，因此应用温度应低于 $100^\circ \text{ C}$ 左右。
- 使用细长塑料光学组件时需要考虑纵横比和重力，因为经过一段时间两者都会引起变形。
- 光学表面需大于通光孔径，因为光学插件边缘的热性能存在差异。
- 光学表面外围应该安装均匀，防止不均匀收缩。

8. 偏振分束膜一般反射s光，透射p光。



9. 对于均匀照明的光学系统，最小聚焦光斑尺寸为：

$$\text{spot diameter} = 2/\pi \times \lambda/\text{NA}$$

因此，增加NA可减小光斑尺寸并改善分辨率；但是，还要考虑焦深变化的影响。

10. 对于以有限共轭比成像的薄透镜，物像距离是 $(2 - M - 1/M)$ 乘以焦距。对于倒立像M为负。

## 激光器

1. 半导体激光器的发射波长可根据下式估算。E为有源层的材料带隙(eV)。

$$\lambda (\mu\text{m}) \cong 1.24/E$$

2. 估算光源的相干长度(单位：米)。c是m/s光速， $\Delta\nu$ 是Hz线宽。

$$L_c = c/\Delta\nu$$

3. 在激光加工中，激光通量增加10倍一般只能使整体刻蚀率增加3倍。

4. 激光光束的聚焦光斑。D<sub>0</sub>是透镜焦点处的光束直径，λ是波长，M<sup>2</sup>是光束质量因子，θ为发散角。

$$D_0 = 4\lambda M^2 / \theta \pi$$

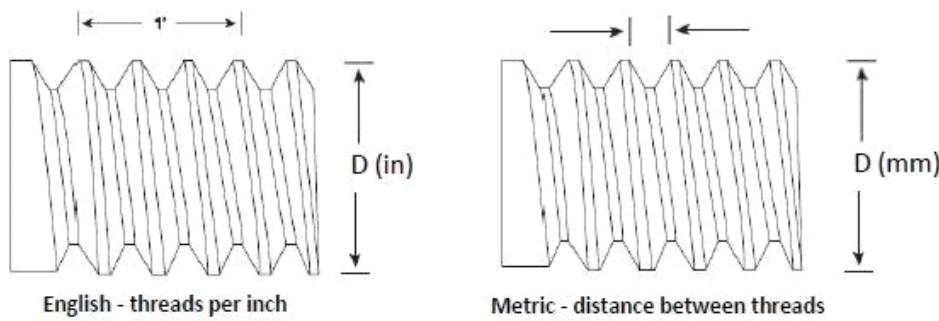
## 其它

1. 人类裸眼可观测的最小线宽约为0.076到0.127 mm。

2. 相机分辨率选择：被研究的细节应该覆盖最少两个像素。

3. 英制和公制螺纹格式比较

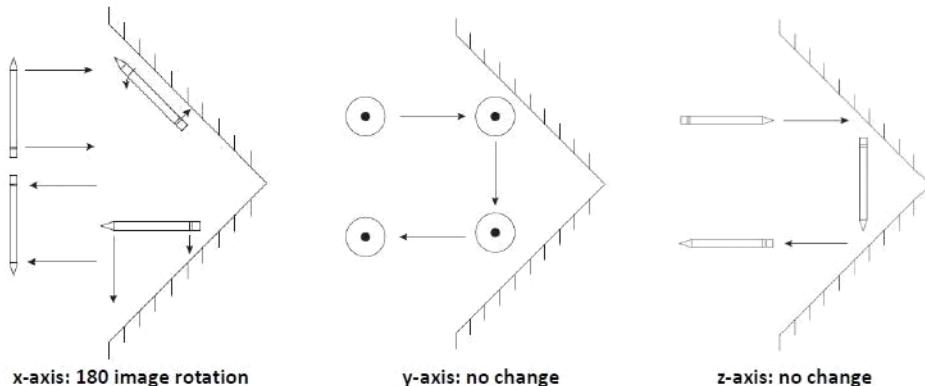
- 英制螺纹1/4" - 20 x 1  
直径(英寸) - 每英寸螺纹数 x 长度
- 公制螺纹M8 x 1 x 25  
直径(mm) - 螺距 x 长度



英制和公制螺纹示意图

[如何根据外表识别Thorlabs公英制螺纹？](#)

4. 使用铅笔技巧快速确定物体经过反射系统后的成像方位。



更多参考：

[光子学经验法则](#)

几何光学模拟器

<https://ricktu288.github.io/ray-optics/>

光电子实验室基础培训	时间
课程1: 光学/激光/光电子实验基础技能	2 h
课程2: 光学偏振原理简介和应用	1 h
课程3: 光功率计和探测器原理和应用	0.5 h
课程4: 透镜选择简介教程	0.5 h

### 课程1: 基础技能

- 光学实验搭建基础
- 光路搭建
- 光机械/元件的选取
- 实验技巧等
- 光纤耦合实验
- 光学元件清洁
- 激光安全
- 光学损伤阈值
- 公英制的区别
- 激光二极管输出准直

### 课程2: 偏振原理和应用

- 光偏振的原理
- 光偏振的应用实例介绍
- 斯托克斯参数原理
- 斯托克斯参数的测量方法
- 半导体激光器偏振特性简介
- 光学涡旋简介
- 实验装置和演示装置
- 介绍偏振测量仪的使用

### 课程3: 光功率计和探测器

- 光功率探头的分类和工作原理
- 探头的常用规格参数
- 探头的选择和使用注意事项
- 光电探测器的基本原理
- 光电探测器的等效电路
- 测量光源输出功率的稳定性
- 演示液晶噪声衰减器稳定激光振幅

### 课程4: 透镜选择指南

本课程介绍几种常见的透镜(平凸/平凹、双凸/双凹、最佳外形和非球面透镜等)和光学像差，以及如何针对像差选择透镜。我们还会介绍柱面透镜、锥面镜、梯度折射率透镜和微透镜阵列等不常见类型。

实验中使用光纤耦合和光束准直装置，但是侧重从透镜选择角度介绍。另一个有趣的应用是利用透镜组实现轴向光路的隐身效果。

- 常见透镜种类、参数
- 透镜像差简介
- 透镜球差和色差的消除

- 透镜的基质材料和镀膜
- 其他透镜类型简介
- 光纤耦合、准直、扩束怎么选透镜
- 透镜实验：实现轴向光路隐身效果

课程5: 中红外光学培训	1-2 h
课程6: THz技术原理与应用	1 h
课程7: 自适应性光学	1 h
课程8: 空间光调制器的原理与使用	1 h
课程9: 傅里叶变换在光学中的应用	1 h
课程10: OCT原理与应用简介	1 h

### 课程5: 中红外光学培训

- 中红外光谱测量简介
- 中红外量子级联激光器简介和应用
- 中红外氟化物光纤特性和应用简介

第一部分是中红外光谱测量，介绍其原理、特点和常见测量类型。

第二部分是中红外激光光源，介绍量子级联激光器的原理、分类和有关应用。

第三部分是氟化物中红外光纤特性和应用。氟化物光纤透过范围从紫外、可见光、近红外光一直到5微米波段，已经被用于传输中红外光信号。掺杂的氟化物光纤也已经被使用在中红外光纤激光器等各类应用中。

### 课程6: Thz原理和应用

太赫兹(THz)波处于电磁波谱的远红外与微波毫米波之间。太赫兹技术在科研、工业和安检应用中发展迅猛，可用于物质特征谱分析、无损探伤、质量控制、违禁品检查等，有着广阔的研究和应用前景。

- 太赫兹源
- 太赫兹探测技术和方法
- 太赫兹技术中常用器件
- 太赫兹时域光谱技术
- 太赫兹领域的一些典型应用

### 课程7: AO原理和变形镜

自适应光学(AO)概念的提出最早是在天文望远镜成像领域：通过可主动控制形变的反射镜抵消大气湍流对遥远天体信号波前产生的畸变，获得清晰的天文图像。

近年来AO技术已开始在更广泛的军事与民用领域里发挥更强大的作用，比如飞秒脉冲整形、激光通信，尤其是显微镜、视力矫正以及视网膜成像等领域取得许多突破，AO应用已经离人们的生活越来越近。

- 自适应性光学的背景和原理
- 夏克哈特曼波前传感器的使用
- 基于MEMS技术的可变形镜
- AO在天文观测中的应用

- AO在生物成像中的应用
- Thorlabs AO套件的像差校正演示

## 课程8: SLM原理和应用

空间光调制器(SLM)可以逐像素调制入射光的相位，越来越多地被使用在各种光学实验：多粒子光镊捕获、光束控制与整形、飞秒脉冲整形、自适应光学、成像与投影应用、全息成像与数字处理等。尤其近年来使用空间光调制器产生涡旋光束是光通信领域研究的热点。

在该课程里，我们简要介绍硅基液晶(LCoS)空间光调制器的基本原理，现场演示EXULUS空间光调制器的多种应用。

- 空间光调制器的原理简介
- 演示多粒子光镊捕获(全息光镊)
- 空间光调制器产生涡旋光束
- 空间光调制器的投影与全息成像

## 课程9: 傅里叶变换的光学应用

傅里叶变换是信号分析中最基本的概念之一。在光学和光子学中也经常处理时域与频域的信息，所以傅里叶变换的应用也是无所不在。本课程将介绍傅里叶变换的概念及光学应用实例。

1. 傅里叶变换光谱仪的原理简介：如何通过傅里叶变换把测量的光信号干涉谱变成光谱；
2. 太赫兹时域光谱系统：如何把测量的宽谱太赫兹脉冲时域信号傅里叶转换成太赫兹频域光谱信息；
3. 傅里叶光学的应用：基于二维傅里叶变换使用空间光调制器让激光产生任意图案；
4. 目前主流的光学相干层析技术都使用傅里叶变换提取样品深度信息。

## 课程10: OCT成像原理和应用

光学相干层析(OCT)成像技术是一种无损光学断层成像技术，它利用光学干涉提取被探测物的深度信息。OCT能够快速实时地展现物体的二维横截面和三维形体图像，其应用从眼科学、心血管病诊断等医学应用到工业产品的质量和缺陷检测，甚至是文物保护。

Thorlabs上海备有OCT设备，本课程详细介绍了OCT基本原理，并演示如何测量样品。

- OCT的背景和应用概述
- OCT原理：时域、频域和扫频源
- Thorlabs OCT产品线简介
- OCT技术的应用简介

# 光学显微镜快速指南

## 介绍

# 使用多模光纤改变光束轮廓

## 实验背景

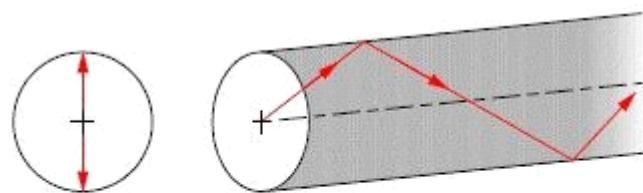
某些应用要求平顶(Top Hat)或甜甜圈(Donut)等形状的光场分布，而不是一般的高斯分布。用于改变光斑的很多技术要么功率损耗较大，要么使用较昂贵的特殊光学元件。

本实验中，我们使用标准多模光纤跳线将高斯光束变成平顶或甜甜圈光束，价格便宜而且损耗小。假设光都被约束在纤芯中以全内反射传播，其中包含两种光线：

子午光线每次反射都通过中心轴；斜光线不通过中心轴，以螺旋路径传播。改变入射角时，我们能改变子午光线和斜光线的通量，逐步将高斯分布变成平顶或甜甜圈分布。

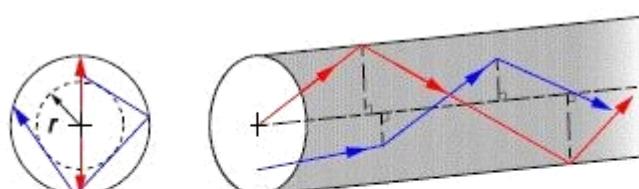
子午光线

高斯分布



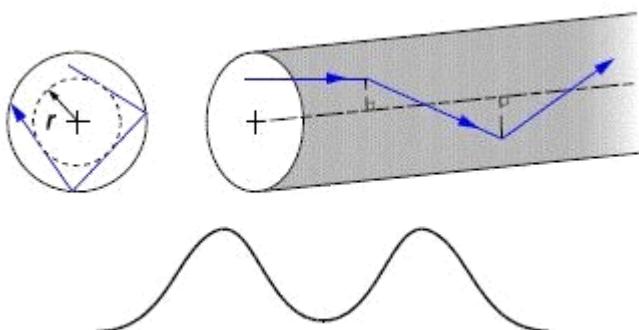
子午和斜光线

平顶分布

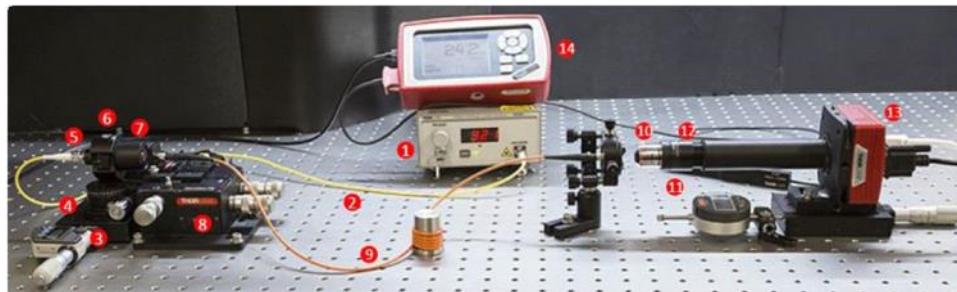


斜光线

甜甜圈分布



## 实验设计

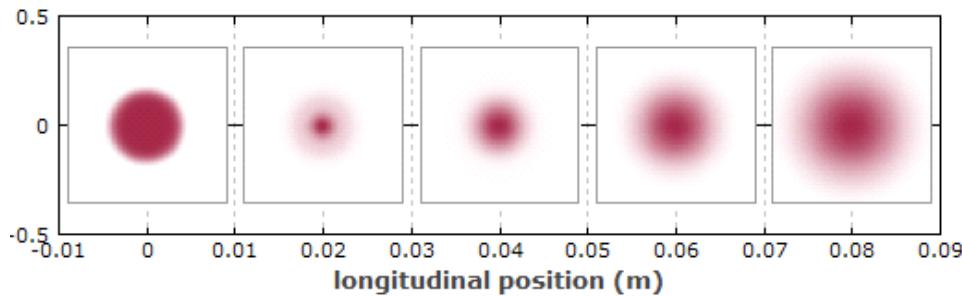


上面为实验装置和原理图：激光通过单模光纤输出，通过准直-散射-聚焦光学元件组耦合到多模光纤中。多模光纤在Ø1英寸接杆上卷绕五圈消除包层模。物镜和套筒透镜将多模光纤端面后5 mm的光束轮廓成像在CCD相机上。

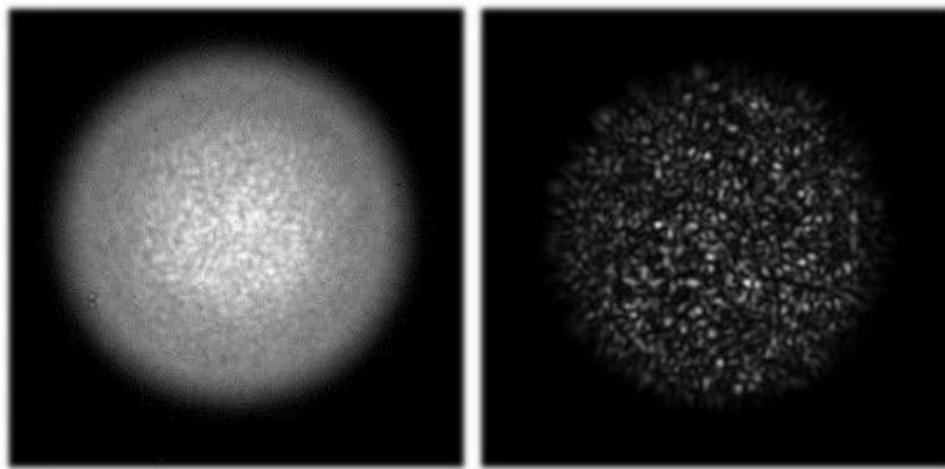
入射角设置成0度、11度和15度时，分别形成高斯、平顶和甜甜圈的强度分布。每次改变入射角后重新对准入射光纤，使用功率计测量以确保最佳耦合。采集图像时手动旋转散射片，以此消除空间相干而形成清晰光斑。

### 注意点

1. 本实验为光纤端面后5 mm的光斑图像。平顶光束在自由空间传播时，强度轮廓会不断变化，下图模拟其变化过程。

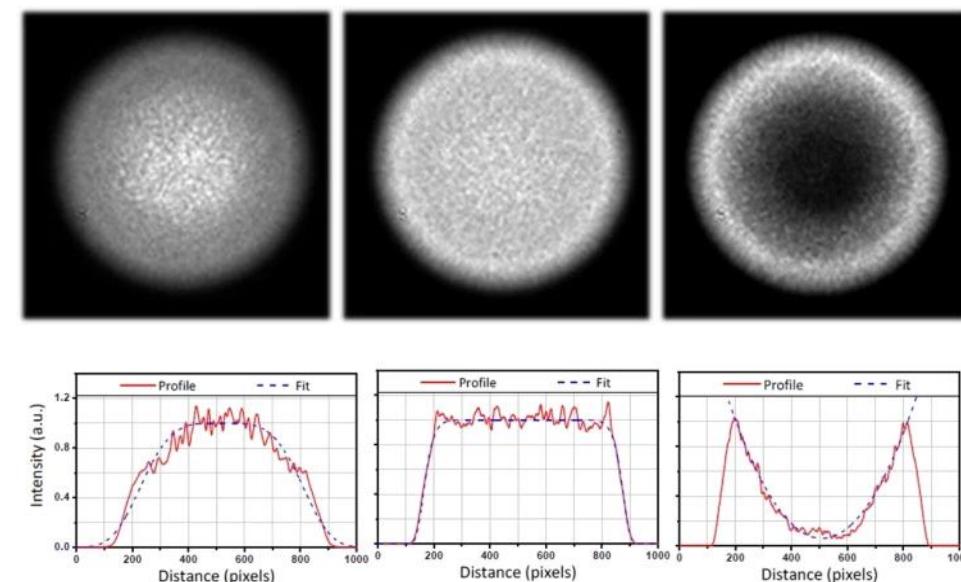


2. 旋转散射片能消除空间相干性。如果不加散射片或者不旋转，不同模式间的干涉会在整体轮廓中产生散斑，对比如下。



## 实验结果

三个入射角下的输出光斑如下图所示。随着入射角增大，斜光线增加，11度角时平顶光的输出功率为初始值的91%。继续增加入射角，直到光束中心几乎没有光，15度入射角时甜甜圈光束的输出功率为初始值的64%。三种光斑都具有较一致的曲线拟合度：



左：初始光束，低阶超高斯曲线拟合

中：平顶光束，高阶超高斯曲线拟合

右：甜甜圈光束，中心凹处的抛物线拟合

实验表明，使用多模光纤将高斯光束变成平顶和甜甜圈光束是有效的，这种方法相对便宜而且功率损耗小。



MM\_Fiber\_  
Lab

## 热敏功率探头的工作原理

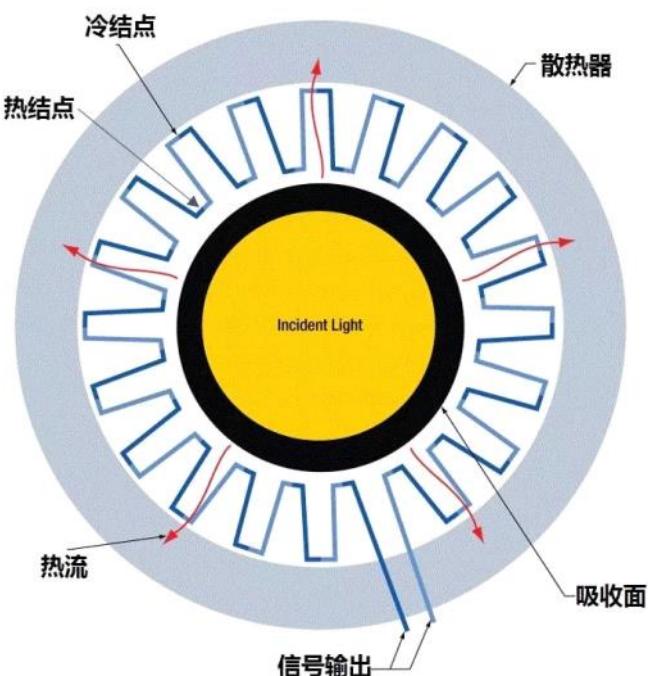
### 工作原理

## 热敏探头

热敏功率传感元件包含吸光材料、串联的多个热电偶和散热器。吸光材料将光能转化为热能，热流经过热电偶流向散热器并消散。每个热电偶以两不同金属连接，接触点称为结点。所有结点依次与吸光材料和散热器相邻，分别形成热结点和冷结点。由于热电效应，相邻冷热结点的温差将按比例产生电压差，多个串联的热电偶增加电压，以此确定光功率。

### 径向排布热电偶

径向配置将吸光材料置于中心，依次被热电偶和散热器同心环绕。热流径向通过热电偶到达散热器，如下图所示。散热环必须和热电偶外环结点接触良好，不能与吸光材料和热电偶内环结点产生热接触。吸收面背部区域不能和任何物体接触使热量偏离径向传输。

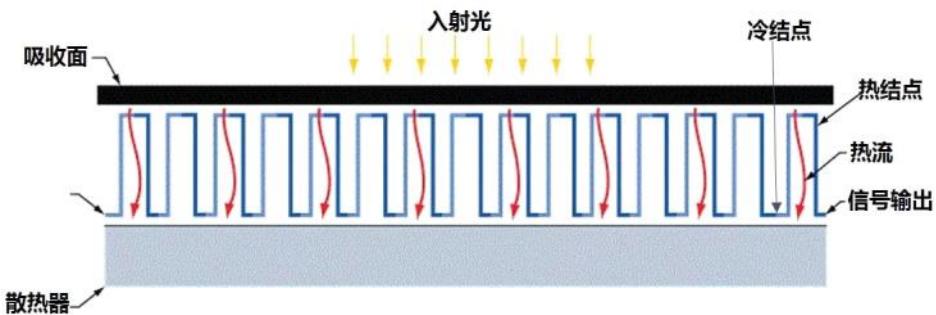


径向配置的优点是功率可高达几千瓦，增加传感片厚度或者让热电偶偏离一点吸收面都可以增加功率上限。缺点是使用特殊设计的散热器，探头外形较大，没有轴向热敏探头灵敏。下表列出了Thorlabs部分径向热敏探头的主要规格。

型号	S310C	S314C	S350C	S322C
波长范围	190 nm - 25 μm	250 nm - 11 μm	190 nm - 1.1 μm 10.6 μm	250 nm - 11 μm
功率范围	10 mW - 10 W	10 mW - 40 W	10 mW - 40 W	100 mW - 200 W
探测面积	Ø20 mm	Ø25 mm	Ø40 mm	Ø25 mm
分辨率	200 μW	1 mW	1 mW	5 mW
响应时间	2.7 s	4 s	9 s	5 s

响应时间为0到95%的典型时间，表头能在1 s内提供预估结果。

### 轴向排布热电偶



轴向配置如上图所示，上面为吸光层，下面为散热层。由于热流直接从前表面流向背面，这些探头外形可以做得更紧凑。Thorlabs的新一代轴向热敏探头提供微瓦级高分辨率和快速响应时间。由于吸光材料的厚度更薄，因此最高测量功率相比径向配置更低。

Thorlabs轴向探头中的传感元件使用电化学沉积技术，只有不到1 mm的厚度。

对于轴向热电堆，散热器的形状和尺寸的设计也更灵活，比如用户可以拆除并更换散热器，升级成风扇或水冷散热，或者将探头集成在自定义装置内。

## 应用说明

以高分辨率探头S401C为例，它具有1.1 s响应时间和1  $\mu\text{W}$ 分辨率，功率范围从10  $\mu\text{W}$ 到3 W，光谱范围覆盖深紫外到中远红外。所以，S401C的一个明显优势是测量QCL中红外激光功率。一位用户说：“我们有些中红外激发阈值低于100  $\mu\text{W}$ ，有了S401C，我们能够测量 $\mu\text{W}$ 级功率并提供可靠的校准。”

## 体吸收材料

体吸收是相对表面吸收而言的，能够承受纳秒高能脉冲，因为它能够将热量分布于整个吸收体内，然后同样通过热电堆流向散热器。Thorlabs的体吸收热敏探头包括S370C和S470C，非常适合Nd:YAG激光等测量。

它们也属于轴向探头，不过用的是肖特玻璃体吸收，而不是上述轴向探头中用的表面吸收，所以响应时间更慢。不过，S470C使用更小的吸收体并改进设计，速度明显快于S370C，约与径向热电堆相当。

型号	S370C	S470C
波长范围	400 nm - 5.2 $\mu\text{m}$	250 nm - 10.6 $\mu\text{m}$
功率范围	10 mW - 10 W (Pulsed and CW)	100 $\mu\text{W}$ - 5 W
输入孔径	$\varnothing 25$ mm	$\varnothing 15$ mm
最高功率密度	35 W/cm <sup>2</sup> (Avg.) 100 GW/cm <sup>2</sup> (Peak)	
分辨率	250 $\mu\text{W}$	10 $\mu\text{W}$
响应时间	45 s	6.5 s

响应时间为0到95%的典型时间，表头能在2到3秒预估测量结果。

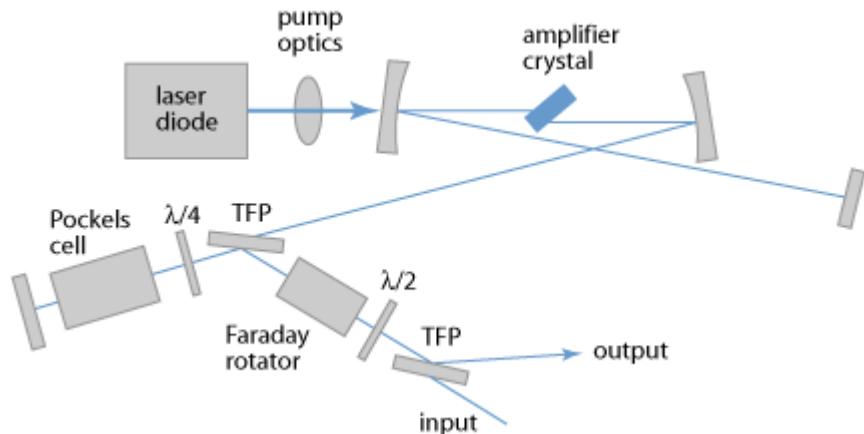
## 四种超快放大器的简介

超快放大器是用于超短脉冲的光学放大器。1996年，美国劳伦斯利物莫国家实验室首次得到了峰

值功率超过1帕瓦(PW,  $10^{15}$  W)的激光脉冲，而这么高的功率得益于啁啾脉冲放大技术。本文简要介绍四种常见的超快放大器及其优缺点。

## 再生放大器

再生放大器是最早的激光放大器类型，常用于皮秒或飞秒光脉冲，基本结构如下图所示。增益介质(基本都是固体介质)位于共振腔中，普克尔盒加偏振片构成的光开关能够使光束多次通过增益介质，使种子脉冲放大到最大能量后输出，放大倍数因此能达到很高。



再生放大器结构

普克尔盒、波片和薄膜偏振片(TFP)构成光开关

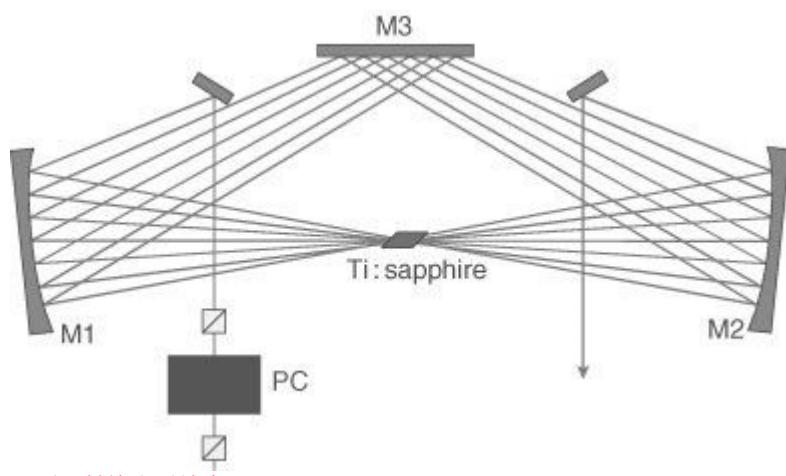
再生放大器的工作过程：首先，泵浦增益介质使之积累能量；然后，使用电光开关打开端口很短时间，将种子脉冲注入共振腔中，在共振腔中往返多次得到放大；最后，使用光开关释放高能脉冲。

过去几十年中，超快再生放大器催生了大量科研和工业应用。比如，泵浦探测多维光谱学研究化学反应动态就是因为再生放大器产生高峰值功率脉冲才成为可能。在工业应用中，再生放大器为微纳加工提供了一种新的方法。

不过，再生放大器也受到一些限制。非线性效应可能限制脉冲能量和增益，但是可以通过啁啾脉冲放大(CPA)缓解，即在放大前先展宽脉冲，使峰值功率不足以触发非线性效应，待增益介质中存储很多能量后再次压缩。另一个重要问题是脉宽变宽，使用CPA的再生放大和压缩的脉宽极限一般在40 fs左右。其它可能的问题还有与高重频相关的波动。

## 多通放大器

尽管再生放大器也基于多通设计，但是一般说的多通放大器实际上采用更简单的配置。多通放大器一般基于激光晶体，能够获得超高的峰值功率。比如，脉冲压缩至20 fs后，峰值功率可能达到几十太瓦(TW,  $10^{12}$  W)，而更先进的系统甚至达到帕瓦级。



凹面反射镜多通放大器

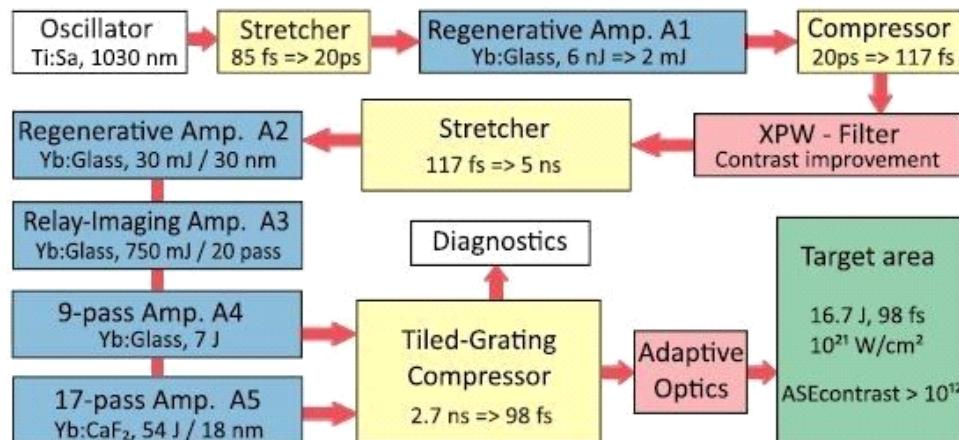
多通配置的主要优势是宽带宽，能够使用相对薄的增益晶体，从而接受更宽的入射角并确保光束在晶体中重合。另一个优势是它们的非线性色散有限，能压缩出非常短的脉宽，经常在25 fs以

内。

多通放大器的主要挑战在于配置复杂的光学元件。典型的多通放大器一般都有多个反射镜控制多通光束方向。因为每条光束都需保持分离，细微的角度调节和对准是一项难题。

### 再生VS多通

一般地，脉冲要求不太窄(20 fs以上)时再生放大器有很大优势，而脉冲小于20 fs时，多通放大器更常用。在脉冲能量要求很高时，往往两者混用。比如，耶拿大学的POLARIS激光系统是世界上最强的全二极管泵浦激光系统，它首次产生了超过50 J的脉冲能量，下图为POLARIS的结构示意图，包括再生和多通的五级放大(A1到A5)。



上：Polaris激光系统示意图

左下：第四级多通放大器内部

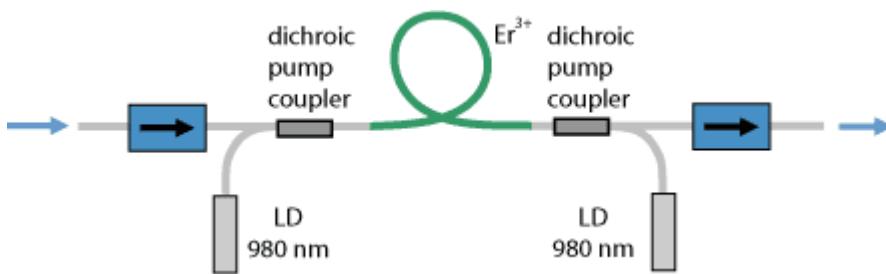
右下：再生放大器测试一角

Polaris激光实验中使用Thorlabs Polaris调整架 :)



### 光纤放大器

大多数光纤放大器使用掺稀土离子的玻璃光纤作为增益介质，其工作方式和光纤激光器相似，只是没有激光腔。光纤放大器最初主要设计用于光纤通信，保证有效的长距离传输。如今，随着相关技术日益成熟，高功率光纤放大器具有几千瓦输出，在材料加工领域引领新的潮流。



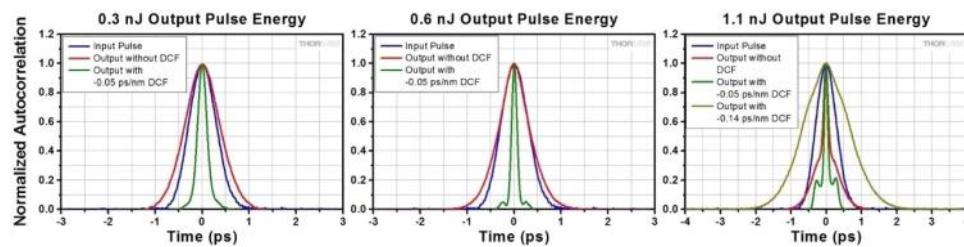
简易掺铒光纤放大器(EDFA)

光纤放大器有很多吸引人的优点。首先是非常紧凑，因为光纤具有很好的延展性。由于小模场和长光纤，光纤放大器的增益也可能达到几十分贝，而且较宽的增益带宽使之非常适合放大超短脉冲。表面体积比高和单模工作能够获得高光束质量。

但是，非线性畸变可能严重降低光纤放大器的性能，尤其对于飞秒脉冲。脉冲质量也可能受色散影响。即使CPA可以很好地抑制非线性效应，但装置将需要加入自由空间光学元件，这也必然减弱光纤系统的优势。

下面为Thorlabs掺铒光纤放大器(EDFA)放大430 fs, 22 pJ脉冲的实验结果。我们调节泵浦电流将脉冲放大到三个强度水平，如下图所示，蓝色曲线表示输入脉冲，红色表示没有色散补偿的输出

脉冲，绿色表示带色散补偿的输出脉冲。



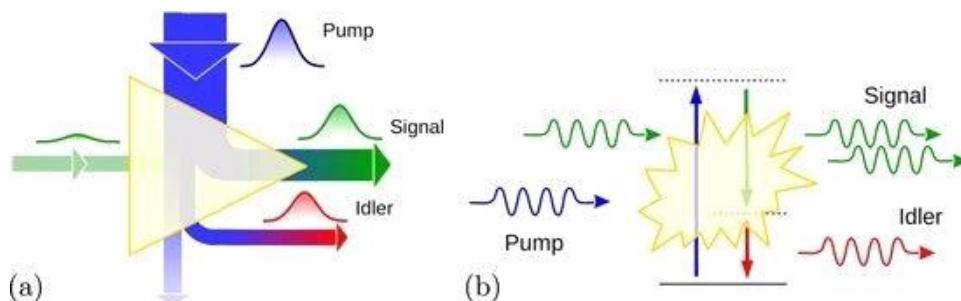
### 0.3, 0.6和1.1 nJ输出的测试结果

实验结果表明，输出脉冲的峰值功率不高于1 kW时，输出脉冲时间轮廓的非线性效应很小，如左边二图。但是，超过1 kW时开始产生畸变，即第三图。仔细控制初始啁啾、放大器色散和脉冲能量达到平衡时，可以产生低畸变的压缩脉冲，比如上面的0.6 nJ输出结果，带色散补偿时产生了峰值功率6 kW的88 fs脉冲。

Thorlabs提供掺铒和掺镱光纤放大器以及半导体光学放大器，如需了解详情欢迎您点击下方的[阅读原文](#)。

## 光参量放大器

这种放大器常用于超快光谱学中，不仅因为能够提供高达80 dB的增益，而且因为具有宽带宽，能够产生只有几个周期的超短脉冲，从而探测快速动态过程。光参量放大器(OPA)利用晶体材料的非线性效应得到光参量放大。在此过程中，高强度高频率泵浦光将能量传递到低强度低频率信号光，并同时产生一束闲频光。信号光不仅能放大几个量级，而且还具有宽调谐范围。



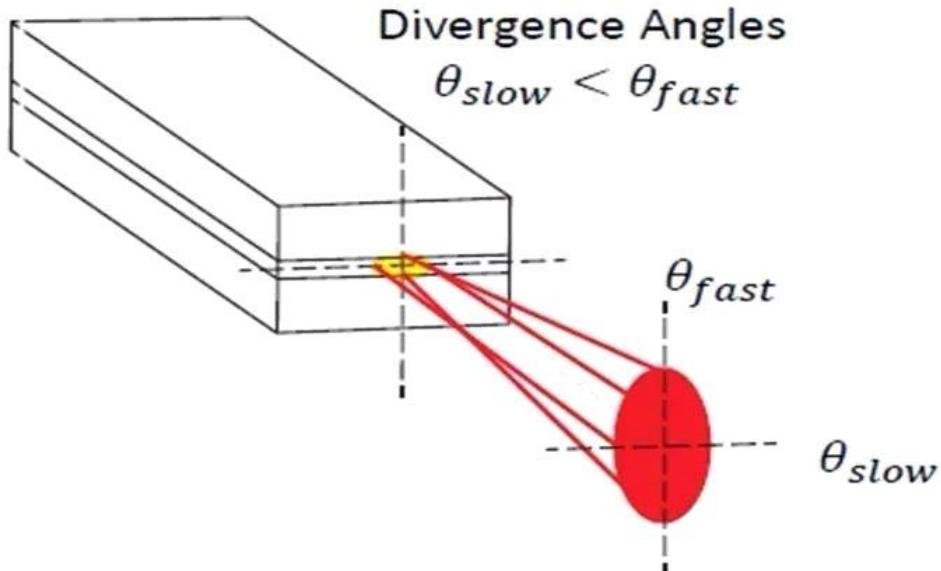
### OPA工作方式

- 能量从强泵浦光传递到微弱信号光
- 泵浦光子激发使信号光子受激辐射

OPA非常适合放大锁模激光器的超短脉冲。OPA只在泵浦脉冲通道提供增益，脉冲周围的放大自发辐射(ASE)要远小于其它超快放大器。另外，因为泵浦能量能够完全传递到信号光和闲频光，晶体的热效应极低。

当然，OPA的脉冲放大也有各种问题。比如，虽然OPA具有极低的热效应，但是很少的局部发热也是有害的，因为它会影响相位匹配。另外，对于要求大模场的高功率器件，增益波导效应将减弱信号光，因此不能充分利用泵浦能量。

## 激光二极管的准直和像散校正



激光二极管椭圆光束示意图

由于激光二极管的输出光是高度发散的，因此需要用准直光学元件。非球面透镜可很好地校正球差。由于光束尺寸和透过率都取决于所用的透镜，因此选择合适的非球面透镜对于准直激光二极管是最基本的要求。

大部分激光二极管的输出光还是高度像散的，即发散角在平行和垂直方向上不同，形成椭圆光。在准直后插入变形棱镜对或柱面镜做一维放大，就可以消除这种椭圆度。

下面我们通过一个实例说明选择光学元件时需考虑的主要规格：将L785P025输出变成Φ3 mm圆形光。

### 准直过程

要计算激光二极管的准直光束尺寸，我们首先需要知道它的发散角。L785P025激光二极管的垂直和平行发散角分别为 $30^\circ$ 和 $10^\circ$ 。图1所示为长轴发散角，图2所示为短轴发散角。两轴的像散或称不对称性使光束发散时形成椭圆光。为了在准直过程中收集尽可能多的光，在计算中应使用较大的发散角，本例为 $30^\circ$ 。

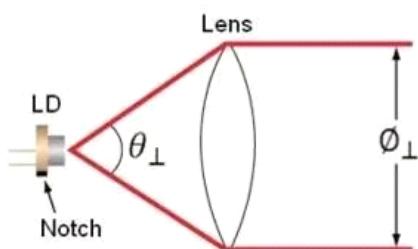


图1. 长轴发散角

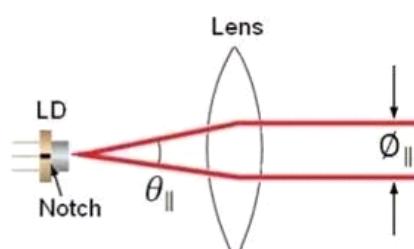


图2. 短轴发散角

在上面两图中，LD表示激光二极管， $\Phi_{\parallel}$ 和 $\Phi_{\perp}$ 分别是平行和垂直方向的光束直径， $\theta_{\parallel}$ 和 $\theta_{\perp}$ 分别是平行和垂直方向的发散角。将 $\Phi_{\perp}$ 和 $\theta_{\perp}$ 代入式(1)计算，要得到Φ3 mm准直光所需要的焦距为 $f' = 5.6 \text{ mm}$ .

$$f' = \frac{\Phi_{\perp}/2}{\tan(\theta_{\perp}/2)} \quad (1)$$

根据计算值选择焦距最接近的非球面透镜。请注意，透镜的直径必须大于您所需的长轴光束直径。在该例中我们可使用焦距为6.16 mm的已安装C170TME-B或未安装352170-B非球

面透镜，它们都镀有600到1050 nm增透膜。

接着，确定二极管NA是否小于透镜NA，以保证激光二极管发射的光不被透镜截断：

$$0.3 = \text{NA}_{\text{Lens}} > \text{NA}_{\text{Diode}} \sim \sin(15^\circ) = 0.26$$

将实际选择的透镜焦距和长轴发散角代入式(1)计算得最终实际的长轴直径 $\varnothing_{\perp} = 3.3 \text{ mm}$ .

### 像散校正

为了将椭圆光束变成圆形光束，在准直之后可以用变形棱镜对或柱面镜来放大短轴。比如图3所示为一对变形棱镜将椭圆光束的短轴放大，以产生所需的对称光束。要确定短轴需要放大多少倍来产生圆形光束，根据式(1)可知：

所以短轴需要放大3倍，Thorlabs的PS879-B已安装变形棱镜对可满足要求。

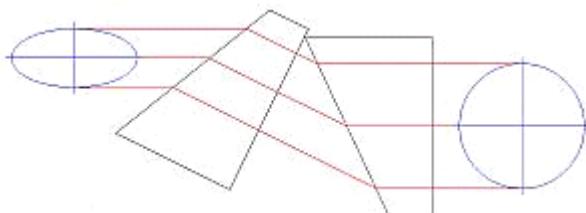


图3：变形棱镜对的光线追迹图

## 为激光二极管选择合适的准直和像散校正光学元件

由于激光二极管的输出光是高度发散的，因此需要用准直光学元件。非球面透镜可很好地校正球差，是将入射光准直为1-5 mm束腰最常用的光学元件。由于光束尺寸和透过率都取决于所用的透镜，因此选择合适的非球面透镜对于准直激光二极管是最基本的要求。

大部分激光二极管的输出光还是高度像散的，即发散角在平行和垂直方向上不同，形成椭圆光。在准直后插入变形棱镜对或柱面镜做一维放大，就可以消除这种椭圆度。

下面我们通过一个实例说明选择光学元件时需考虑的主要规格。

### 将L785P025输出变成 $\varnothing 3 \text{ mm}$ 圆形光

#### 准直激光

要计算激光二极管的准直光束尺寸，我们首先需要知道它的发散角。L785P025激光二极管 (785 nm, 25 mW, 05.6 mm T0封装) 的垂直和平行发散角分别为 $30^\circ$ 和 $10^\circ$ (FWHM)。图1所示为长轴(垂直轴)发散角，图2所示为短轴(平行轴)发散角。两轴的像散或称不对称性使光束发散时形成椭圆光。为了在准直过程中收集尽可能多的光，在计算中应使用较大的发散角，本例为 $30^\circ$ 。

注：平行和垂直标记是相对于激光二极管的结平面规定的。

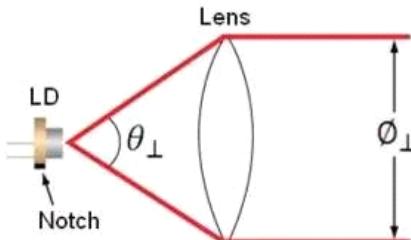


图1. 长轴发散角

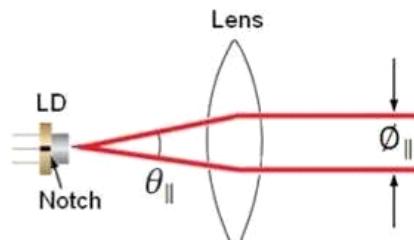


图2. 短轴发散角

在上面两图中，LD表示激光二极管， $\theta_{||}$ 和 $\theta_{\perp}$ 分别是平行和垂直方向的光束直径， $\theta_{||}$ 和 $\theta_{\perp}$ 分别是平行和垂直方向的发散角。将 $\theta_{\perp}$ 和 $\theta_{\perp}$ 代入式(1)计算知，要得到3 mm准直光所需要的焦距为 $f' = 5.6 \text{ mm}$ 。

$$f' = \frac{\theta_{\perp}/2}{\tan(\theta_{\perp}/2)} \quad (1)$$

根据计算值选择焦距最接近的非球面透镜。请注意，透镜的直径必须大于您所需的长轴光束直径。在该例中我们可使用Thorlabs的焦距为6.16 mm的已安装C170TME-B或未安装352170-B非球面透镜，它们都镀有600到1050 nm增透膜。

接着，确定二极管NA是否小于透镜NA，以保证激光二极管发射的光不被透镜截断：

$$0.3 = \text{NA}_{\text{Lens}} > \text{NA}_{\text{Diode}} \sim \sin(15^\circ) = 0.26$$

将实际选择的透镜焦距和长轴发散角代回式(1)计算得最终实际的长轴直径 $\theta_{\perp} = 3.3 \text{ mm}$ 。

### 校正像散

为了将椭圆光束变成圆形光束，在准直之后可以用变形棱镜对或柱面镜来放大短轴。比如图3所示为一对变形棱镜将椭圆光束的短轴放大，以产生所需的对称光束。

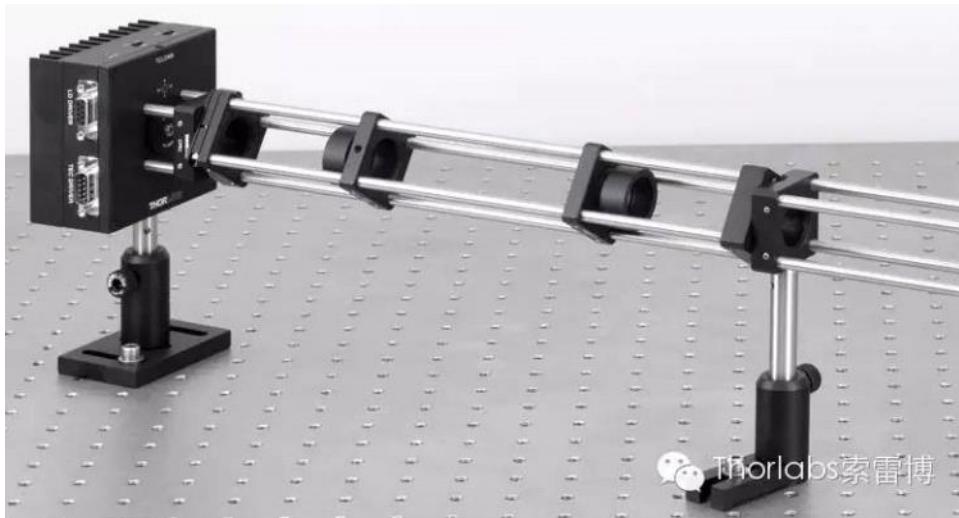
要确定短轴需要放大多少倍来产生圆形光束，根据式(1)可知：

$$\frac{\theta_{\perp}}{\theta_{||}} = \frac{\tan(\theta_{\perp}/2)}{\tan(\theta_{||}/2)} = \frac{\tan 15^\circ}{\tan 5^\circ} \sim 3$$

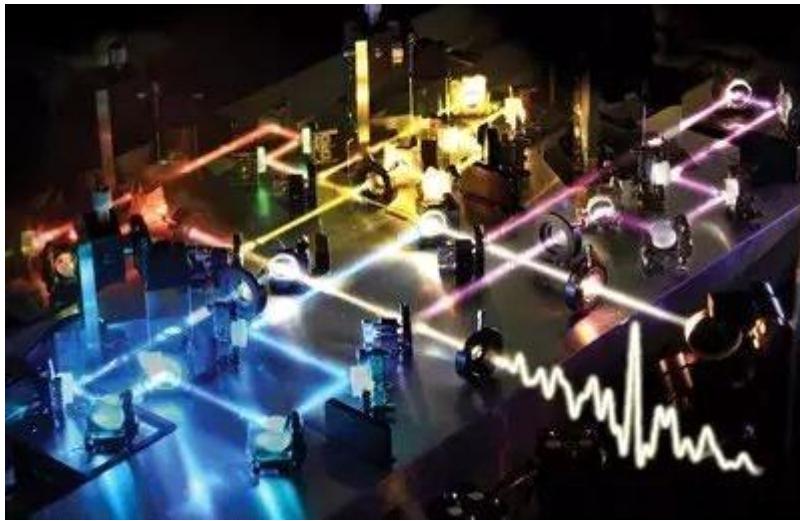
所以短轴需要放大3倍，Thorlabs的PS879-B已安装变形棱镜对可满足要求。

### 3. 安装选项

Thorlabs为激光二极管安装和准直提供各种选项。下图所示为使用非球面透镜和一对正负柱面镜的笼式准直系统。中间两个可调透镜套管可单独旋转其中安装的柱面镜，当两个柱面镜位置对准后可通过两端的旋转笼板同时旋转，最终得到所需的安装角度。



## 超短脉冲的相干合成

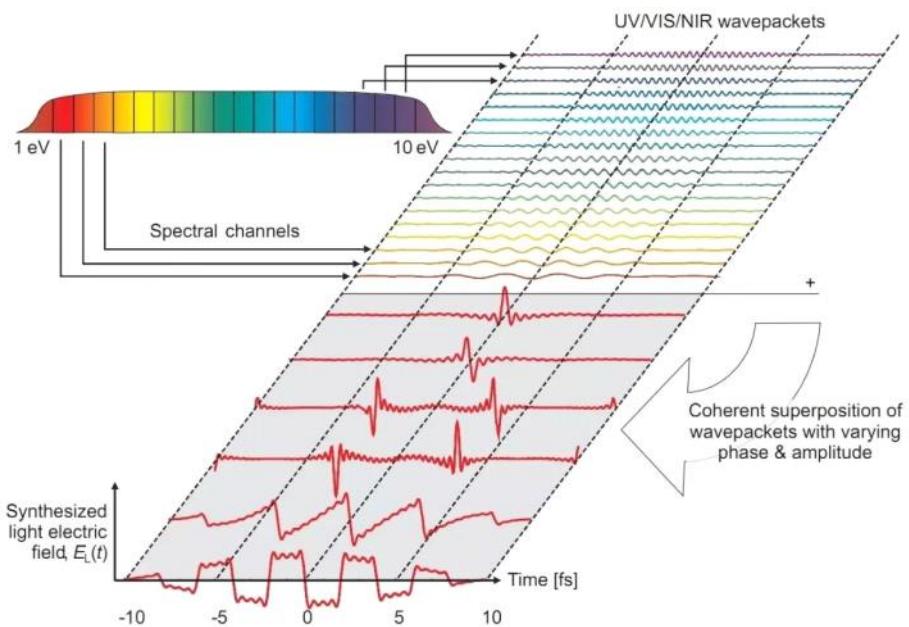


本文转载自中科院物理所L07组  
何鹏的知乎文章，略有删减。

在超快激光领域，人们对更短脉冲的追求是贪得无厌的，有了皮秒想飞秒，有了飞秒想阿秒。目前中弗罗里达大学的常增虎教授课题组，通过OPCPA的 $1.8 \mu\text{m}$ 驱动光源，实现了覆盖 $200\sim500 \text{ eV}$ 波段的高次谐波产生，有望突破他们自己的 $67 \text{ as}$ 世界纪录。

然而，高次谐波波长处于极紫外到软X射线波段，该波段对空气不透明，只能在真空中传输。另外，由于高次谐波转化效率十分感人……难以得到高通量的阿秒光源。

根据傅里叶变换极限： $\Delta v \cdot \Delta t \geq const$ ，我们无需将中心波长移至极紫外区，而是可以通过一个非常宽的光谱，压缩出亚周期量级的可见激光脉冲。所谓亚周期量级，就是说在脉冲持续时间内，电场不必完成一个类 $\cos$ 函数的光学周期的振荡，可以只有上半个、下半个周期，甚至可以搞出任意的电场波形。



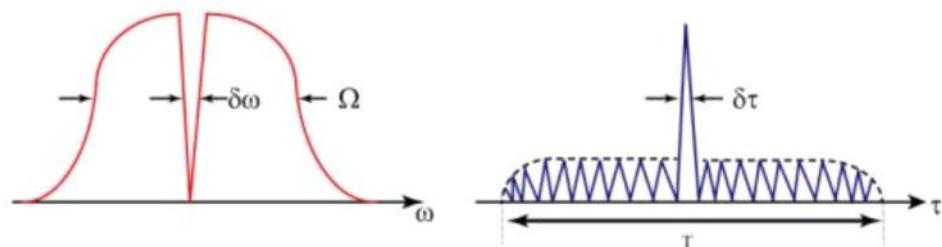
亚周期量级的激光意义还在于，如果只有半个周期，就直接打出单阿秒而不是阿秒脉冲串了，通过非共线直接将XUV光和IR光分开，省去了金属膜、硅片反射滤波的能量损失。

光场相干合成的出发点，在于覆盖几个倍频程的光很难产生，或产生后很难压缩，于是人们想出了精确控制几路不同波长范围的激光延时和相位，合成出亚周期量级光场的方法。

## 相干合成基本原理

基本思路是：针对产生和压缩的困难，我们将一个具有较宽光谱范围的目标超连续谱，分为若干个通道进行振幅和相位的独立调制；最后将几路通道的光电场相干叠加在一起，合成预期波形的光场。

下图代表了超宽带光谱光电场的频域和时域分布。频域的调制分辨率  $\delta\omega$  决定了该调制项在时域上可以覆盖的时间窗口范围；而调制带宽  $\Omega$  则决定了时域上光场的调控可以达到的时间分辨率  $\delta\tau$ 。当调制的带宽小于载波频率即  $\Omega < \omega_0$  时，分辨率  $\delta\tau > 2\pi/\Omega$ ，表明调制能力在脉冲时域包络的量级，可以获得周期量级的脉宽；当调制的带宽大于载波频率  $\Omega \geq \omega_0$  时，时域上的调制分辨率  $\delta\tau < 2\pi/\Omega = T_0$ ，也就具备了在一个振荡周期内控制光电场波形的能力。



因此，为实现对于光波场形貌的调控，一个相干合成系统应由以下三要素组成：

- 具有至少覆盖一个倍频程的相干光源， $\Omega \geq \omega_0$
- 单独调节各通道的光谱振幅、相位，控制各通道光程
- 对合成后光场进行准确的波形诊断

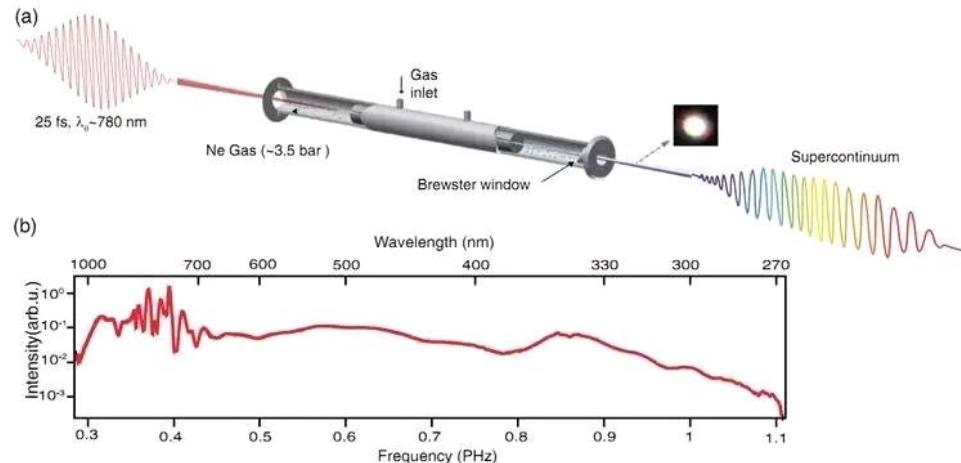
根据这三个要素，我们简单介绍下超连续相干光源、各光谱成分的相干控制、脉冲波形诊断三个方面的常见技术和进展。

## 超连续谱产生

现在有些商用振荡器也能做到倍频程了，又或者经过光子晶体光纤、周期极化铌酸锂展宽得到倍频程光谱，不过都是nJ量级。

### 空心光纤

uJ、mJ量级超连续光源，通常采用放大器输出的fs激光，入射充有惰性气体的空心光纤进行展宽。一般为了较好的展宽量，多用氖气进行光谱展宽，氦气非线性太低，氩气太容易电离。然而乌克兰战乱，国外氖气从9万涨到了30万一瓶，真后悔没趁机发点财……



马普所Goulielmakis小组利用静态充气的空心光纤，将中心波长780 nm、脉宽25 fs的激光展宽到超过一个倍频程的超连续谱。光谱成分覆盖了从270 nm到1100 nm的区域。（丧心病狂，我们顶多打到400~1000 nm。用的技术都差不多，人和人的差距就这么大吗。）

### OPA和OPCPA

但是空心光纤毕竟是波导，有个能量的钳制效应，为了得到更大能量的超连续谱，OPA似乎是个不错的选择。其闲频光是CEP自稳定的，且放大过程中还有光谱的展宽效应，更有潜力作为大能量的相干合成光源。

2013年方少波等人利用OPCPA混合OPA的方案，得到覆盖870 nm至 $2.15 \mu\text{m}$ 的超宽带相干光谱，最后经啁啾镜压缩各路脉冲并将三路光相干合成，得到脉宽1.9 fs、200  $\mu\text{J}$ 的近红外超短脉冲输出。

### 受激拉曼散射

此外，美国斯坦福大学的S. E. Harris利用受激拉曼散射(SRS)，得到了波长分别为1.56  $\mu\text{m}$ 、1.064  $\mu\text{m}$ 、807  $\mu\text{m}$ 、650  $\mu\text{m}$ 、544  $\mu\text{m}$ 、468  $\mu\text{m}$ 和410  $\mu\text{m}$ 的拉曼边带，然后利用液晶光调制器(LCM)调整拉曼边带的相位，就可以实现相干合成单周期的光脉冲。

### 固体薄片阵列

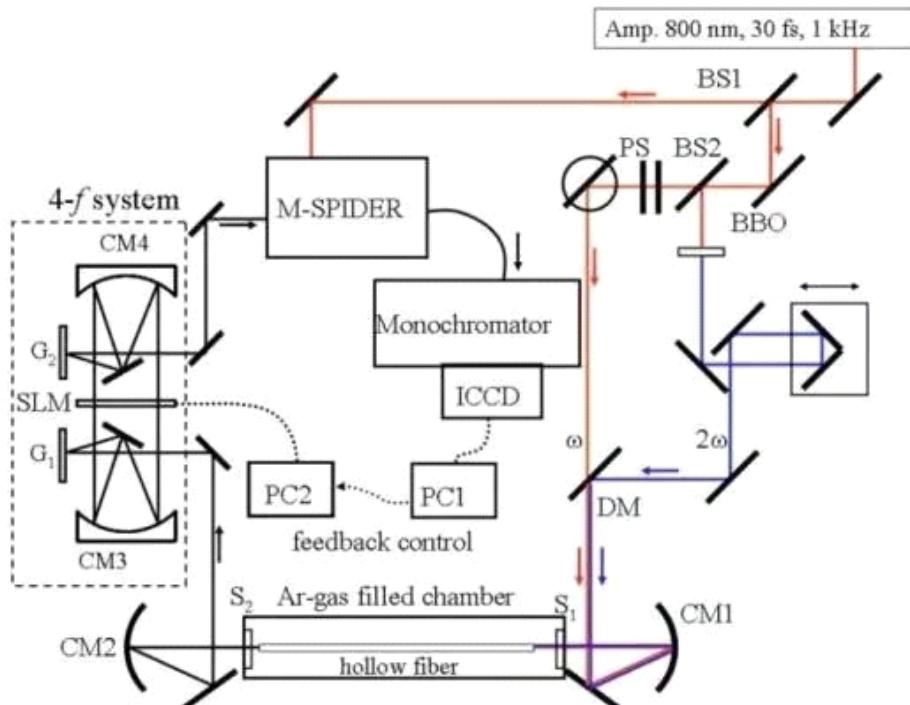
由于空心光纤系统复杂，不适合大能量，台湾国立清华的孔庆昌老师课题组，率先使用熔融石英薄片组合，成功获得了450~980 nm的超连续，能量约76uJ。由于薄片不存在光纤波导的能量钳制，也不需要太高的光束指向稳定性，这为大能量的超连续产生开辟了一个崭新思路。另外，就是上面说的氖气太贵买不起了，固体超连续给了一个新的出路。

## 相干合成装置

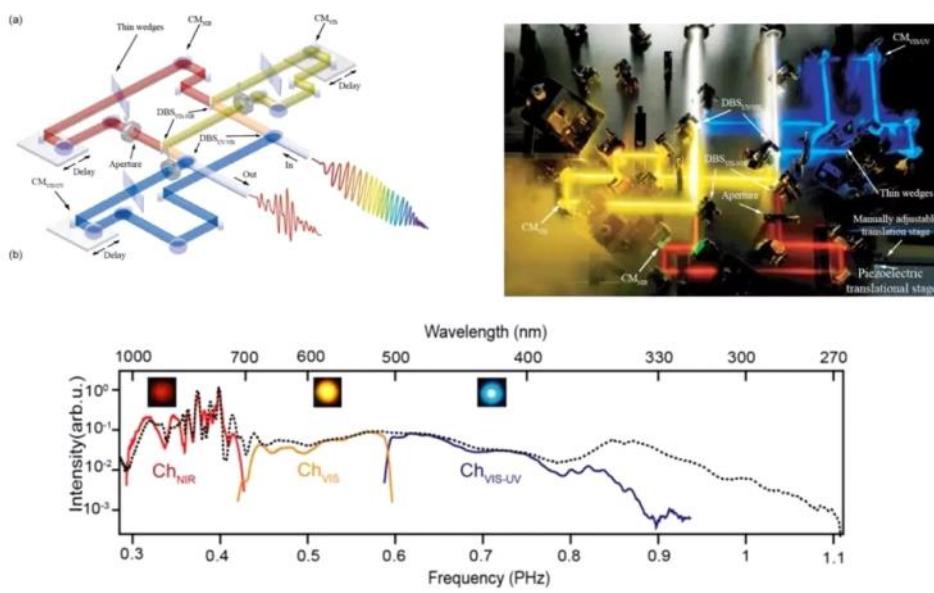
合成时就是将整个光谱成分按分为多个通道分别进行压缩，再将几个压缩后的短脉冲压缩为一个更短的脉冲。由于各路脉宽在fs量级，所以各个通道的时间同步精度要在as量级。如果相位差不大的话可采用液晶空间调制器SLM调节；相位差较大延迟光路的光程，则多通过大负载的PZT通过反馈电路驱动调节。

## 空间光调制器

2003年U. Keller研究组利用级联的空芯光纤展宽激光光谱，然后利用空间光调制器(SLM)调节各个光谱的相位，实现了3.8 fs 的近周期量级激光脉冲。随后这一记录被逐个打破，3.4 fs、2.8 fs…2007年，北海道大学山下幹雄等人报导了利用更加复杂的方法得到了2.6 fs的激光脉冲，它只包含1.3个光学周期，已经非常接近可见-近红外光谱区的脉冲宽度极限。据说台湾清华的3 fs也是用SLM压缩的。

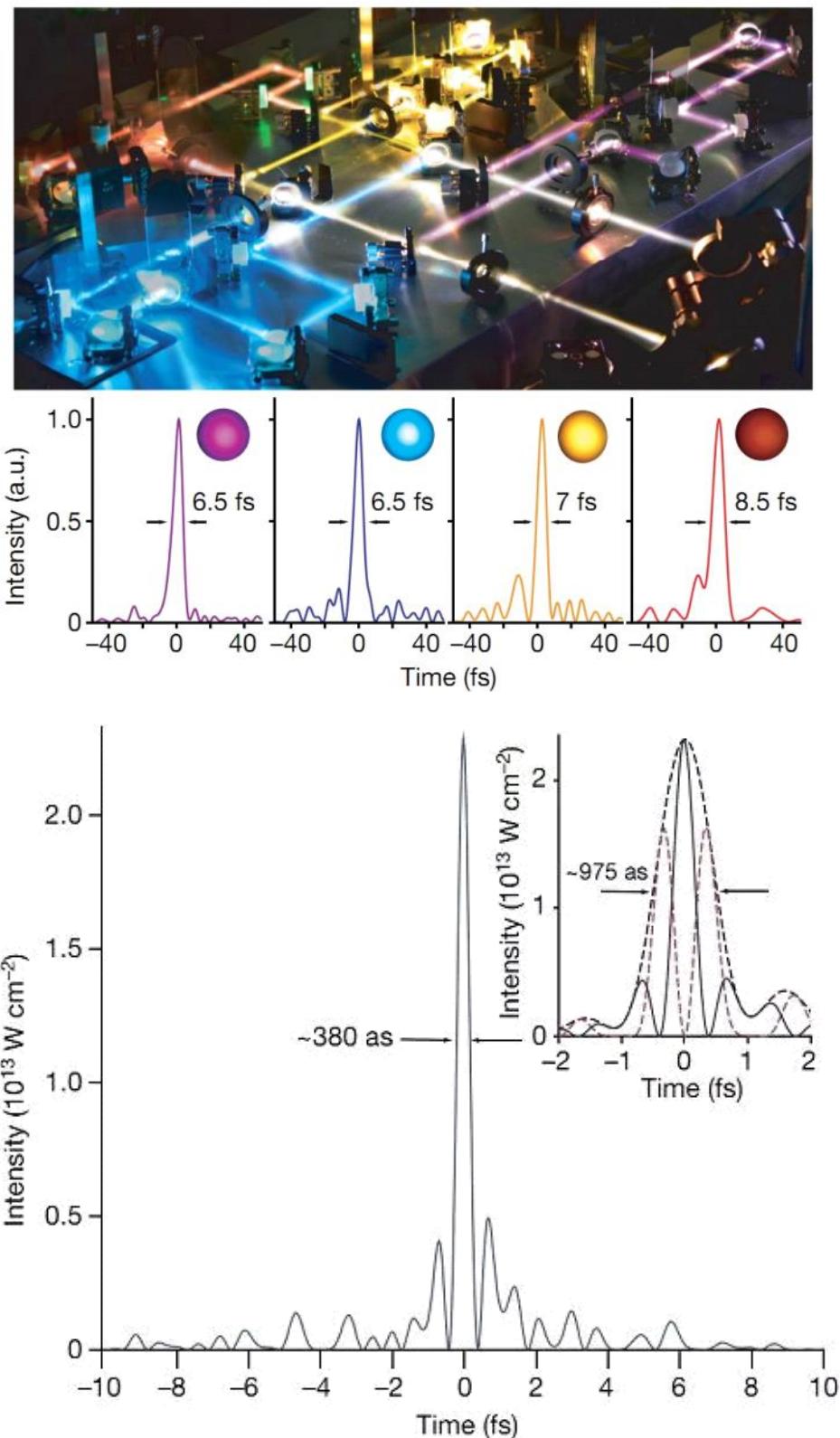


不过像SLM这样的相位调制元件虽然可调性高，补偿精确，但是透射率低，且难以承受大能量的入射光。因此更大能量的相干合成往往采用波长分束片进行合束。如下图：



德国马普所F. Krausz组的A. Wirth与Goulielmakis将空心光纤展宽后的超连续光谱分成三部分，分别为700~1100 nm，500~700 nm，350~500nm，延迟线单元由一对直角镜，一个压电陶瓷平台以及一个手动平台组成。手动平台的精度为10 μm，提供延时粗调；压电陶瓷提供25nm 的精调分辨

率，同时根据相邻通道的光谱干涉条纹进行延迟线的锁定。经各路啁啾镜压缩后脉宽分别为6.8 fs、5 fs、4.5 fs，相干合成得到了710 nm中心波长处2.1 fs、0.88个周期的超短飞秒脉冲。2013年，他们又将其分成四束，进一步合成了636 nm处1.7 fs、0.8个周期的超短脉冲脉冲，现在四路合成已经达到<350 as了，不知道有没有更新的纪录。



当然，如果不按光电场振荡半高宽，而是按包络的半高宽来算，脉宽会长些。如上图是2016年Hassan报道的四路相干合成结果，合成后的载波包络半高宽为975 as，已经是亚飞秒量级了。如果按光电场算则是380 as。

**问：为什么他们有这么宽的超连续谱，却要分束后分别压缩再合成？**

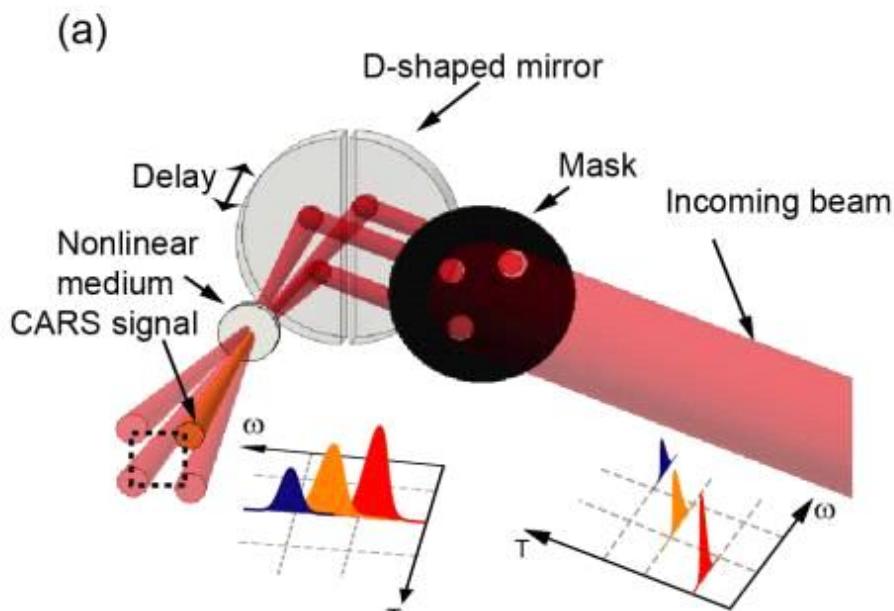
答：因为目前做不出来这么宽、色散这么平坦的啁啾镜，尤其是紫外的。

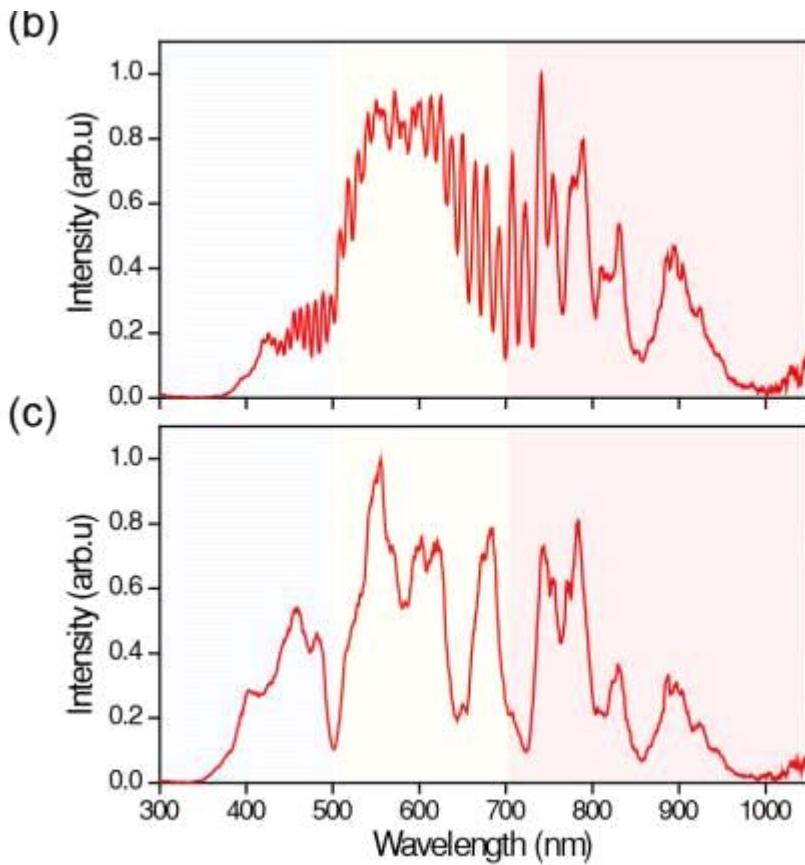
相干合成的光路，在设计中需要注意几点：

- 波长越短的光谱成分在介质中传播所引入的色散越大，因此短波的分束片加工难度更大，应首先将短波部分反射出来。
- 覆盖倍频程的光谱成分在分束时，应注意各光谱成分的比例，各部分之间的强度不宜相差太大，比如中心波长一般很强，需要衰减一些，最好在30 dB以内，以确保最弱的光谱成分在合成中能对于光场调控有所贡献。
- 对于中心波长710 nm、亚周期量级的光场合成而言，相对延时的锁定精度应小于0.2 fs，对应空间上60 nm的光程差，因此光路应采取被动、主动稳定相结合的措施，即对底板采取一体化设计并通水保持恒温，并利用光谱干涉法等主动稳定措施对于光路的相对延时进行反馈锁定。

## 波形诊断

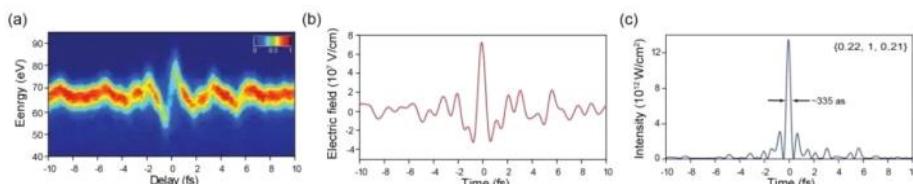
马普的诊断方法，是用一个TG-FROG先测出分束后各个通道的光谱相位，根据色散量自己设计啁啾镜。啁啾镜做好并压缩之后用FROG测一下各个通道压缩效果。



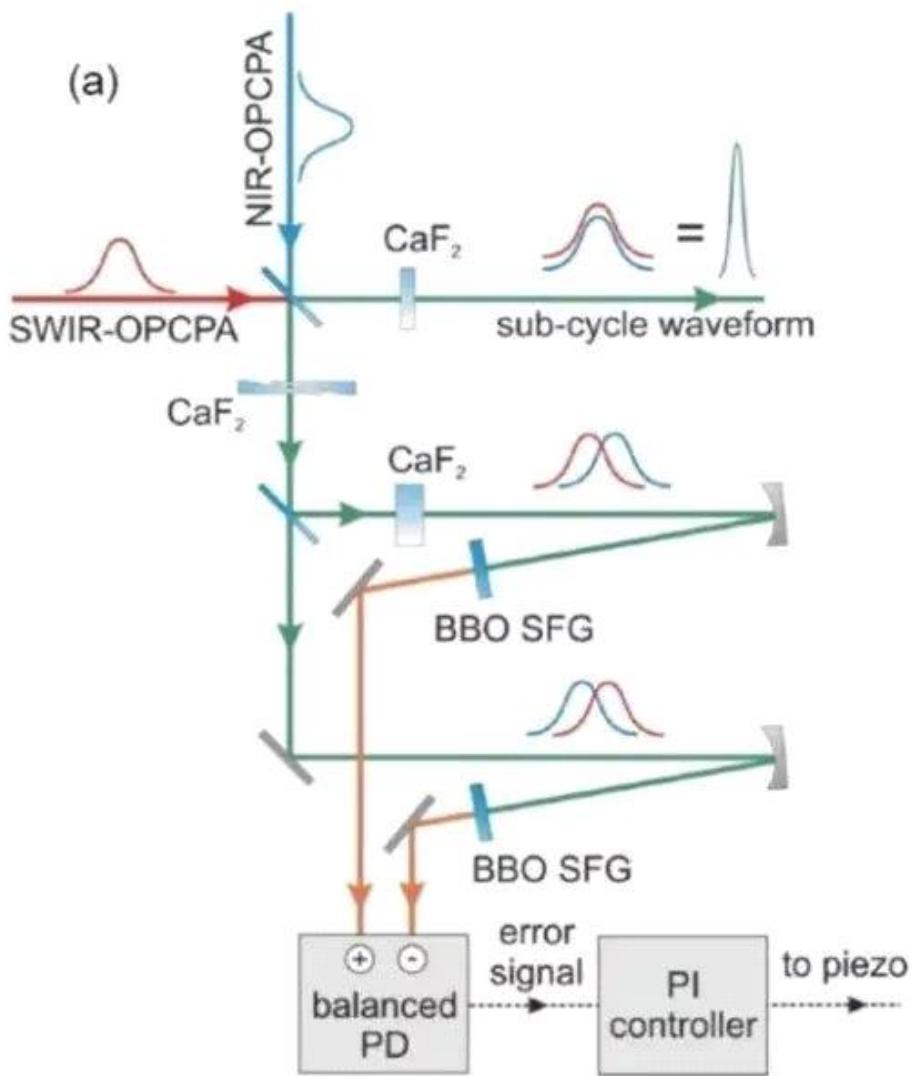


测量装置：相干合成后的入射脉冲经带三个小孔的掩模版后，经延迟可调的D形镜反射后聚焦在一片100um厚的融石英薄片上。由于三阶非线性效应，其形成的瞬态光栅会产生第四束光，其各部分的光谱会相较入射光谱有所展宽，在光谱交叠处产生干涉条纹。当延迟差太多的时候是看不到边带的干涉条纹的，当延迟较小时可看到明显光谱干涉条纹。当完全相干时， $\Delta t=0$ ，干涉消失，此时各通道相对延迟为零。但这种方法难以直接准确测量脉冲。

为了诊断合成后的光电场波形，他们利用Streaking Camera，探测XUV和IR和互相关并反演飞秒脉冲波形。优点是这种方法只需通过一段很短的惰性气体，对于IR光的色散可以忽略；缺点是扫描一段条纹需要较长时间，无法做到单发测量。



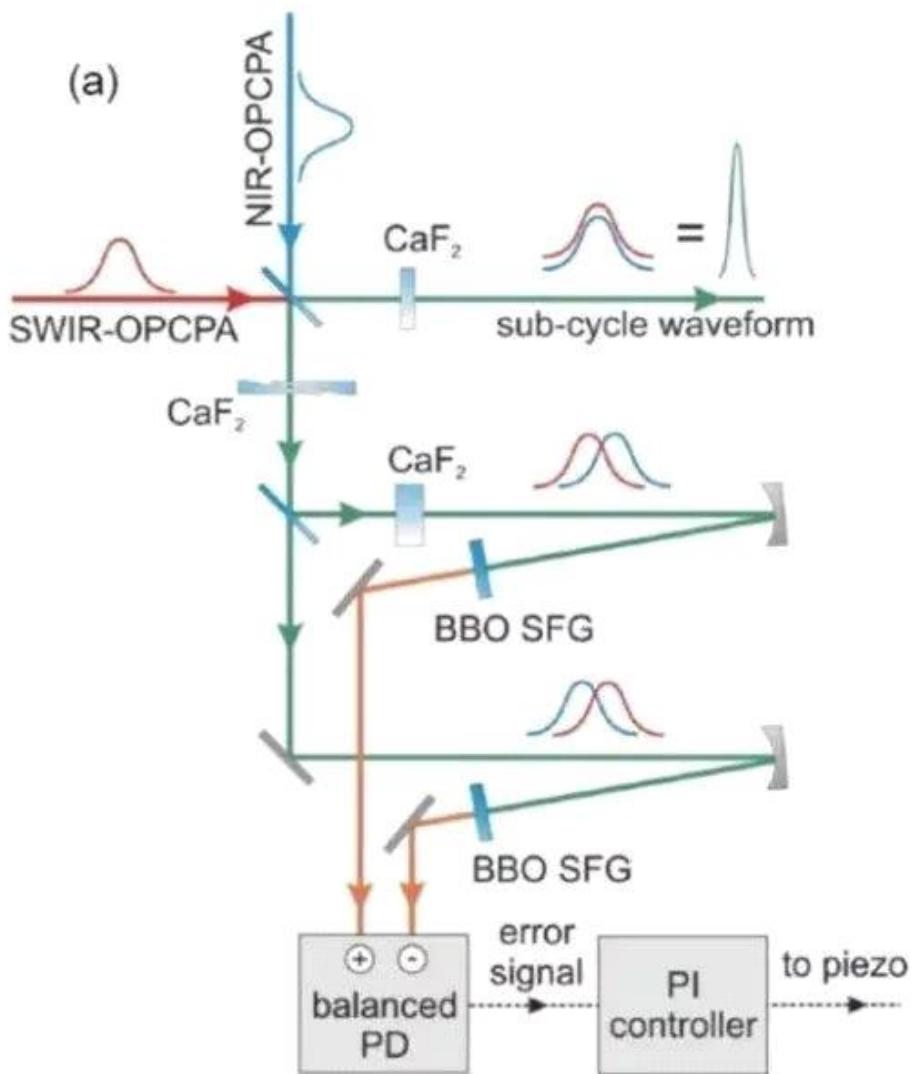
还有一种诊断方法是光学平衡互相关器 (BOC) 来进行反馈锁定。在各光路相对延时锁定方面，德国自由电子激光器中心的Shu-Wei Huang等人利用了光学平衡互相关器(BOC)来进行反馈锁定，其延时锁定的时间抖动的均方根小于30as。光路示意如下：



BOC光电探头是可以比较两路脉冲强弱之差的。两路光入射被部分分光，通过一个2 mm厚的CaF<sub>2</sub>，一路经过4 mm CaF<sub>2</sub>并通过BBO和频；另一路直接和频。当相位相同时和频信号一样强，若相位不同，则两路测量信号必然一个脉冲重合好、和频高，另一路和频脉冲分开程度大，信号低，通过平衡互相关探头BOC可以探测到脉冲幅值差，从而诊断脉冲时间合成精度。

11

**结语：**通过相干合成得到亚飞秒量级的超短超强激光脉冲，标志着人们对于激光光场的控制已由振幅的调制，进阶到了对于光电场波形的控制程度。这样的亚周期量级脉冲激光，不仅有望直接产生阿秒量级激光，还能作为阿秒激光的驱动光源，由于有更高的峰值功率及对比度，还可以获得更宽更强的截止区连续谱、更短的阿秒脉冲。



## 单频激光二极管基础

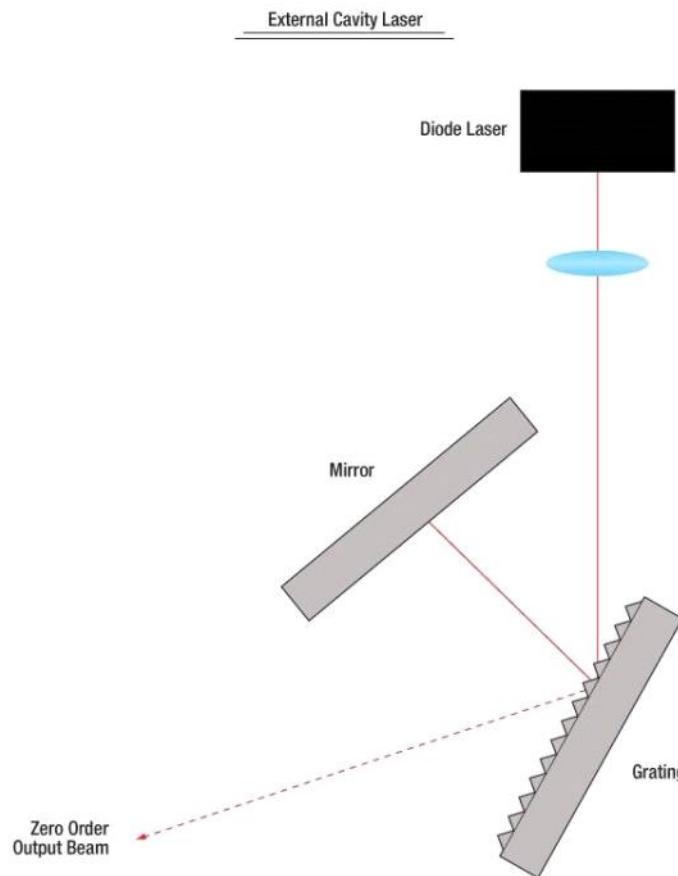
许多种应用需要激光系统的可调谐单频工作。在所有二极管激光器中，目前主要有四种配置可获得单频输出：外腔激光器(ECL)、分布反馈(DFB)、体全息光栅(VHG)和分布式布拉格反射镜(DBR)。这四种配置都可以通过光栅反馈提供单频输出。但是由于光栅反馈配置不同，诸如输出功率、调谐范围和边模抑制比(SMSR)等性能也会不同。下面我们将讨论这四种单频二极管激光器的一些主要差异，并在文末给出一个简要的**总结**。

- ECL: External Cavity Laser
- DFB: Distributed FeedBack
- VHG: Volume Holographic Grating
- DBR: Distributed Bragg Reflector

### 外腔激光器

外腔激光器(ECL)是一种兼容大多数标准自由空间二极管激光器的多功能配置。这意味着ECL

可根据内部二极管增益介质用于多种不同的波长。如图1所示，使用一个透镜准直二极管的输出光，然后入射到光栅上。光栅提供光学反馈并选择稳定的输出波长。通过合理的光学设计，外腔只能激发一个单纵模，从而得到具有高边模抑制比(SMSR > 45 dB)的单频输出。

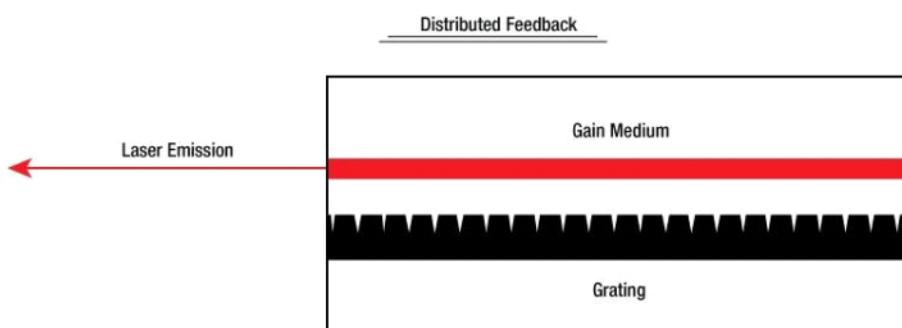


▲ 图1：ECL基本结构

ECL的主要优势之一是使用较长的激光腔提供极窄线宽(<1 MHz)。另外，因为可以集成多种激光器二极管，所以ECL还是为蓝光或红光提供窄线宽发射的极少几种配置之一。ECL可以提供很宽的调谐范围(>100 nm)，但是由于机械设计以及激光二极管的增透膜质量，ECL也容易发生跳模。

### 分布反馈激光器

分布反馈(DFB)激光器将光栅集成在激光二极管结构内部，如图2所示。这种波纹周期结构紧临有源层，相当于用作布拉格反射镜，选择一个单纵模作为激发模式。如果有源层在布拉格频率附近的增益足够大，则不需要端面反射镜。所有的光学反馈和模式选择只依赖于布拉格反射镜。由于这种“内置”的选择，DFB可以在较宽的温度和电流范围内提供单频工作。为了辅助模式选择和改善制造成品率，DFB激光器的二极管结构中常有一相位变化层。



▲ 图2：DFB基本结构

DFB的激发波长约等于布拉格波长：

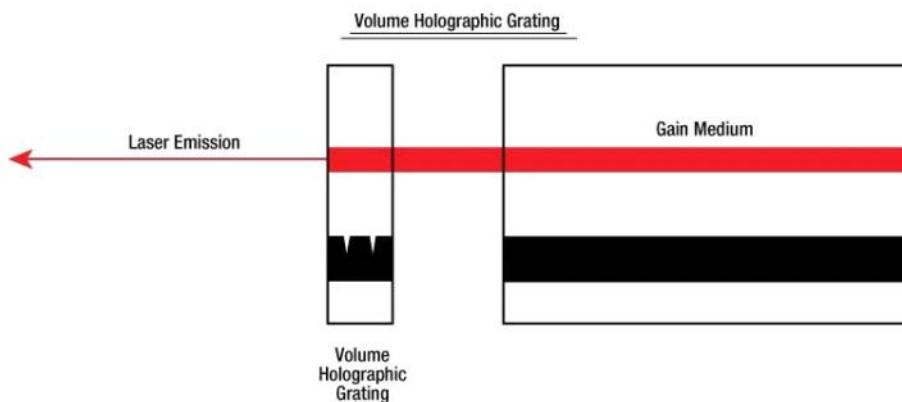
$$\lambda = 2n_{eff}\Lambda$$

其中  $\lambda$  是波长、 $n_{eff}$  是有效折射率、 $\Lambda$  是光栅周期。通过改变有效折射率，可以调谐激发波长。这是通过调谐DFB的温度和电流来完成的。

DFB的调谐范围较窄：2 nm @ 850 nm、4 nm @ 1550 nm、> 2 cm<sup>-1</sup> @ MIR (4.54 – 9.60 μm)。但在整个调谐范围内DFB都能单频工作，这意味着无跳模的连续调谐。所以DFB是实际应用中的常用选择，比如电信和传感。因为DFB的腔长相当短，因此线宽一般在1 MHz到10 MHz之间。另外，光栅结构和有源层的紧密耦合导致最大输出功率比ECL和DBR激光器更低。

## 体全息光栅稳定型激光器

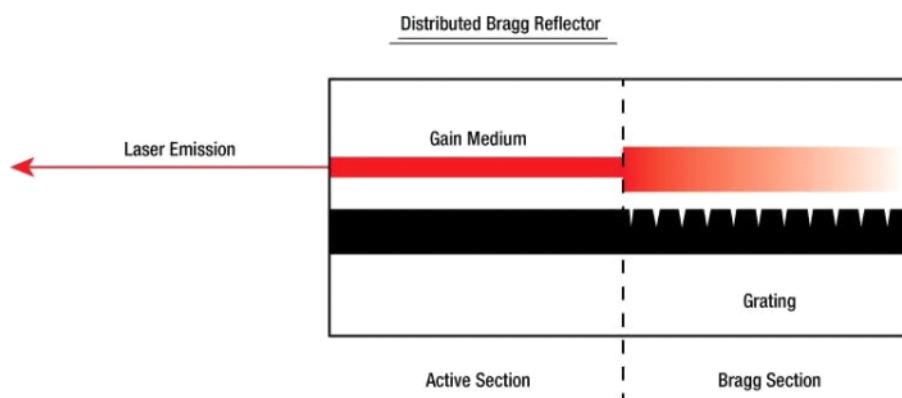
体全息光栅(VHG)稳定型激光器也使用布拉格反射镜，但是在激光二极管输出端前面有一个透射光栅，如图3所示。因为该光栅不是激光二极管结构的一部分，因此和激光二极管没有热传递，能改善器件的波长稳定性。光栅通常是一块光折变材料，其折射率呈周期变化。只有满足布拉格条件的光波长才能反射回激光腔内，从而得到一个发射波长极其稳定的激光器。VHG稳定型激光器相比DFB功率更高，但是线宽差不多，也能在较宽的电流和温度范围内锁定波长。



▲ 图3: VHG基本结构

## 分布式布拉格反射镜激光器

类似于DFB，分布式布拉格反射镜(DBR)激光器内部集成了一个光栅结构。不同的是，DBR的光栅结构位于有源层外，如图4所示。一般而言，DBR能够加入DFB中一般没有的各种层级，得到更大的控制和调谐范围。例如，一个多电极DBR激光器可包括一个相位控制层，从而独立于光栅周期和二极管电流来调谐相位。一起使用时，DBR能在宽调谐范围内提供单频工作。例如，高端的采样光栅DBR激光器的调谐范围可达30 – 40 nm。不同于DFB的是，DBR的输出不是无跳模的；因此必须一直仔细控制所有输入和温度。



▲ 图4: DBR基本结构

与多电极的复杂结构相比，DBR还有单电极简化版。这种结构没有复杂的光栅和相位控制，但是减小了调谐范围。简化DBR的调谐范围和DFB差不多，但有电流和温度引起的跳模。尽管有跳模的缺点，单电极DBR在某些方面比DFB有优势，比如更高的输出功率。DBR和DFB激光器的线宽差不多。目前Thorlabs仅提供单电极DBR激光器。

## 结论

ECL、DFB、VHG和DBR激光二极管都能在各自的设计调谐范围内提供单频工作。ECL比DFB或DBR的波长选择范围更大。尽管容易跳模，但ECL是三种类型中线宽最窄的(<1 MHz)。在合理设计的仪器中，ECL还能提供相当宽的调谐范围(>100 nm)。

DFB激光器是四种类型中最稳定的单频可调谐激光器。它在整个调谐范围(<5 nm)内提供无跳模性能，所以是行业内最常见的单频激光器之一。由于连续光栅反馈结构的固有属性，它的输出功率最低。

VHG激光器在某一温度和电流范围内提供最稳定的波长性能，而且功率一般比DFB激光器更高。稳定性使之成为OEM应用的理想选择。

单电极DBR与DFB激光器具有相似的线宽和调谐范围(<5 nm)。但是，单电极DBR在调谐曲线上会产生周期性的跳模。

## 单透镜质量检测

### 主要质量控制设备

TriOptics OptiSpheric

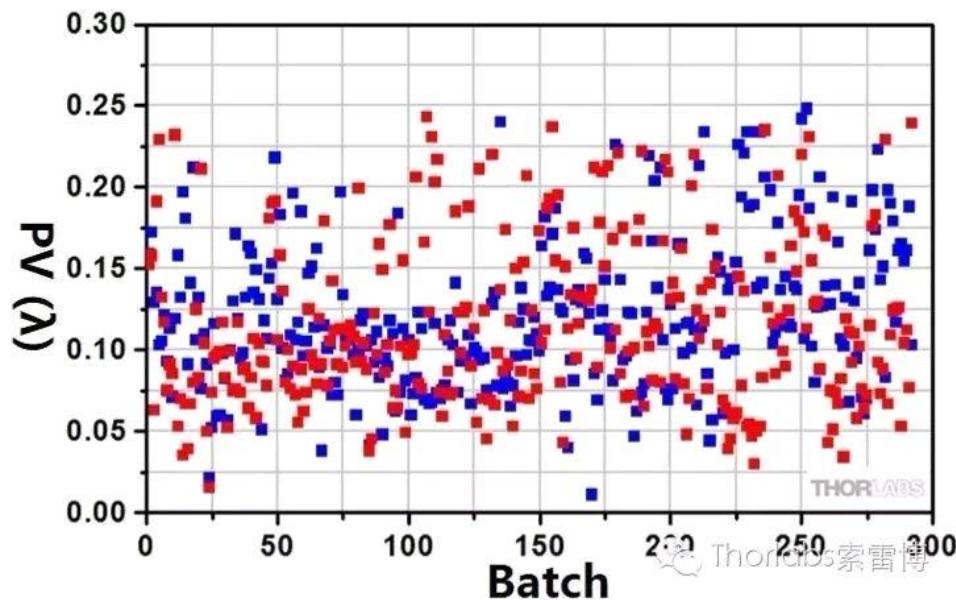
Zygo GPI-XP/D

PerkinElmer Lambda 1050

Agilent Cary 5000

### 单透镜质量检测

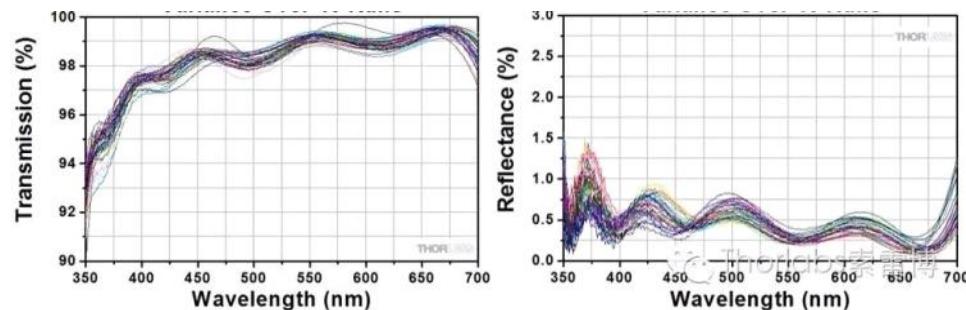
单透镜成形后便进行性能检测。根据MIL-PRF-13830B中给出的抽样计划第六级，检测焦距、表面局部光圈数和光圈数(surface irregularity和surface power)。这三个规格是合理成像的必要条件。波长为633 nm时，元件的表面局部光圈数保持在 $\lambda/4$ 或 $\lambda/2$ 以下，这取决于单透镜的材料。下面是200多批单透镜前后表面局部光圈数的测试结果。



▲局部光圈数(irregularity)测量结果

蓝点和红点表示两个表面的测量结果，都保持在  $\lambda / 4$  以下

这时，有些未镀膜的单透镜将进入最终检测阶段，而其他未镀膜的透镜将会镀上增透膜。光学镀膜流程也有其过程检测。为了确保所镀增透膜的性能，我们用分光光度计扫描透镜陪镀片，这些厚度为 2 mm 的陪镀片材料，与同一批次其他元件一致，用于验证其反射与透射性能。对于反射率的验证，我们每个镀膜批次至少使用一个陪镀片。透射光学元件双面镀膜，因此，对于透射率的验证，我们使用一个两面镀膜的陪镀片。数量较大的批次则使用多个陪镀片进行检测，以确保整个镀膜室的均匀度。通过检测每个批次镀膜的性能，监控不同批次之间的差异。下图所示为 A 型增透膜的反射率和透过率曲线。



▲不同批次镀膜的透过率(左)和反射率(右)

注：此处显示已镀膜的透射数据均指 N-BK7 或同等玻璃制成的 2 mm 厚的陪镀片，所有数据都为典型值。性能数据可能会因批次不同而有所差异。

未镀膜和镀有增透膜的单透镜所需经历的检测包括直径与厚度的批次检测，以及 100% 的目视检测，确保其表面质量、倒角和通光孔径符合我们公布的规格要求。表面质量包括元件表面、划痕、麻点和其它杂质，当元件与高功率光源一起使用时，表面质量不佳，会增加损伤单透镜的几率。这些检测都根据 MIL-PRF-13830B 的照明要求，在洁净室的暗室中完成。在暗室中，在单光源的照明下检测玻璃内部的缺陷，可以避免受到其他强光或漫反射的影响。

#### 关于MIL-PRF-13830B

MIL-PRF-13830B 标准是由美国陆军装备研究所开发工程中心 (ARDEC) 制订的，内容涉及光学成品元件制造、组装和检测过程中的规格要求。其主要用于让军方决定如何将使用的产品集成到装备中时，许多光学元件制造商就采用了这些标准。

MIL-PRF-13830B 文档下载：

<http://t.cn/Rf8cX8j>

# 空间光调制器的原理与使用

空间光调制器(Spatial Light Modulator, 简称SLM)作为一种可灵活编程控制的装置，能够在空间上逐像素对入射光的相位进行调制和修改，适用于光镊、光束控制、脉冲整形、自适应光学、全息成像与数字处理等应用。尤其近年来，SLM被用来产生涡旋光束，这种带有轨道角动量的光束可以扩大光通信系统的容量，是目前光通信领域研究的热点。

在Thorlabs Demo Lab关于SLM的介绍性课程里，我们介绍了基于硅基液晶(LCoS)技术的SLM的基本原理，并结合Thorlabs的Exulus-HD1准备了多个应用的现场演示。培训目录具体如下：

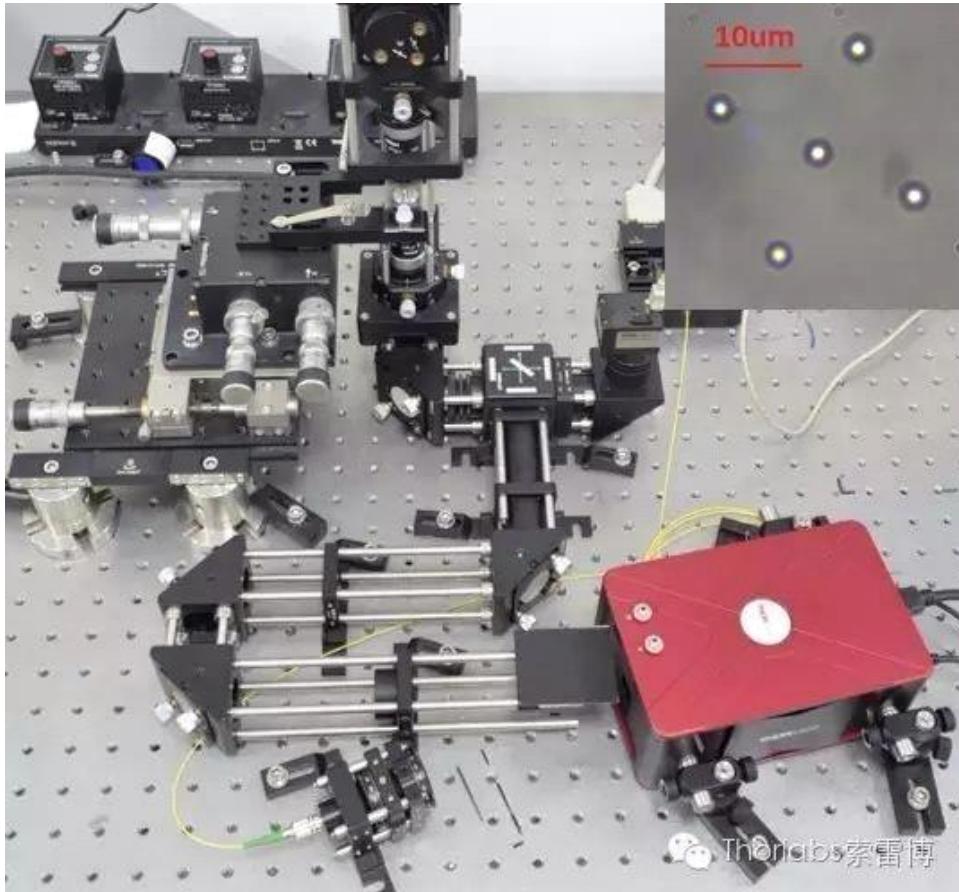
- SLM原理简介
- SLM实现多粒子光镊捕获(全息光镊)
- SLM产生涡旋光束
- SLM投影与全息成像

## 全息光镊

光镊的基本工作机制是激光和被捕获微粒之间的动量交换，即微粒被拉进最高激光强度的区域中。全息光镊(Holographic Optical Tweezer, 简称HOT)是光镊的一种，它允许自由设置任意的三维捕获模式。许多HOT应用中配备了SLM和强大的计算机，用于生成贝塞尔光束或其它模式的光束。

HOT具有越来越多的应用，比如在细胞工程领域中用于细胞的三维阵列排布；它还能强化成像技术，比如螺旋相衬法成像和荧光三维全息显微镜。

在本课程中，我们提供HOT的一种应用演示，即使用SLM实现多粒子捕获。

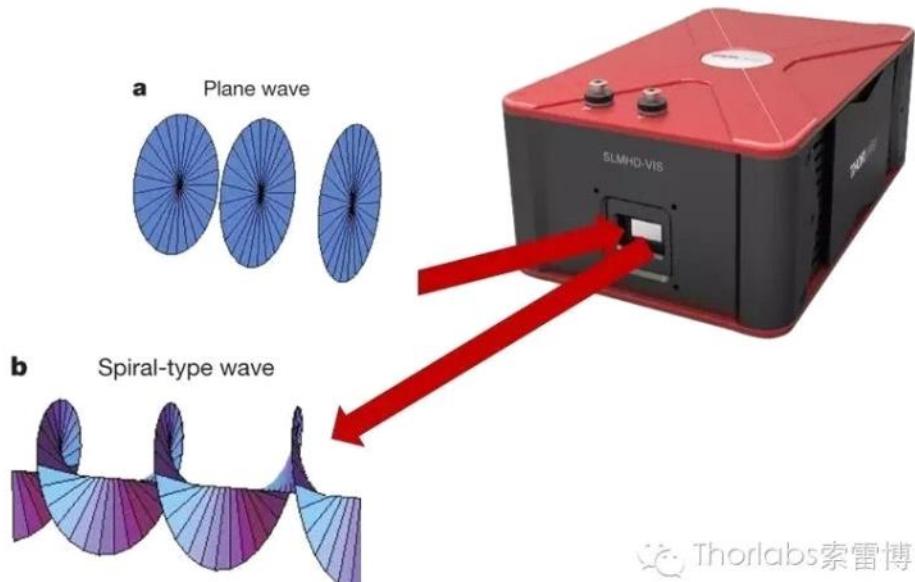


▲全息光镊装置(右上角为捕获的微粒)

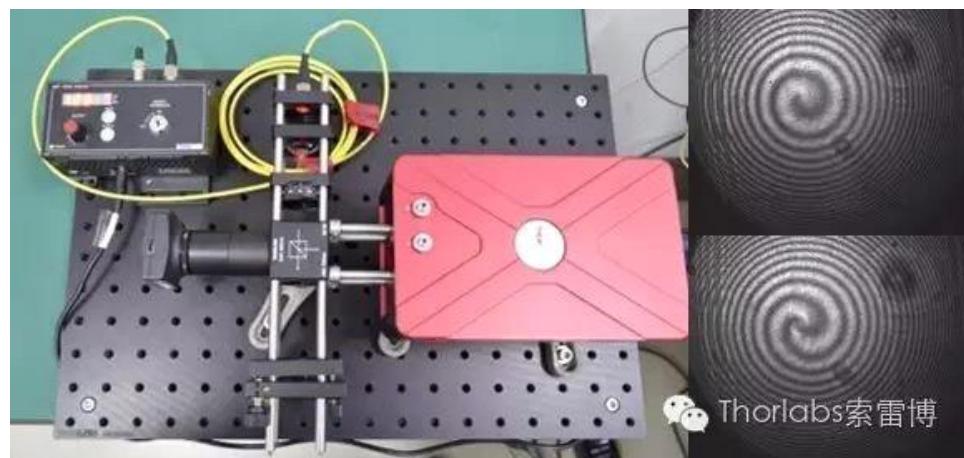
## 产生涡旋光束

产生涡旋光束，或者轨道角动量(Orbital Angular Momentum, 简称OAM)光束，是SLM的另一个重要应用。OAM光束是一种螺旋相位光束，相位表达式中包含 $\exp(iI\phi)$ ，每个光子的OAM是 $I\hbar$ ，其中 $I$ 是拓扑荷数， $\phi$ 是方位角。

2004年Gibson等人把计算机控制的相位全息图加载到空间光调制器上，以便对光束的轨道角动量进行编码调制。利用这种方法，他在实验中成功实现了信息的传输。近年来基于OAM的光通信系统中，广泛使用SLM生成不同的OAM来增加通信容量和频谱效率。



▲SLM用作螺旋相位片，将平面波变成螺旋波



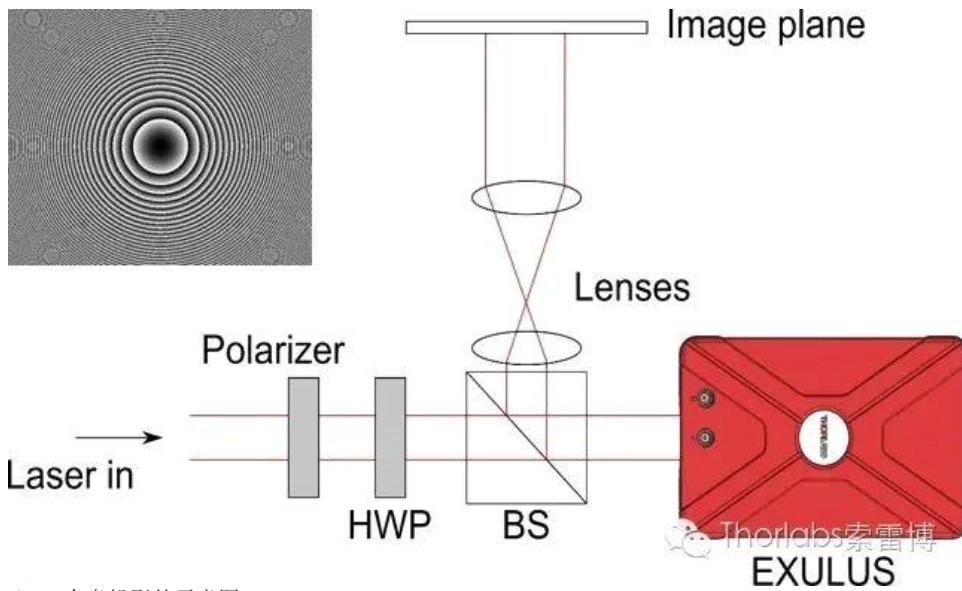
▲使用迈克尔逊干涉仪观察  
涡旋光和平面波的干涉图  
右上  $I=1$ , 右下  $I=2$

OAM通信参考文献

Bozinovic, N. et al. Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers. *Science* **340**, 1545 - 1548 (2013).

## 全息投影

全息投影的示意图如下所示。首先用户导入需要投影的图像，然后转换成计算机生成的全息图(Computer Generated Holography, 简称CGH)，并投影到屏幕上。软件会在全息图像上叠加一个聚焦效应，通过调节该聚焦效能够改善全息投影效果。



▲SLM全息投影的示意图

左上为叠加在全息图上的100 mm菲涅尔透镜聚焦效应

## Vytran光纤熔接和处理设备

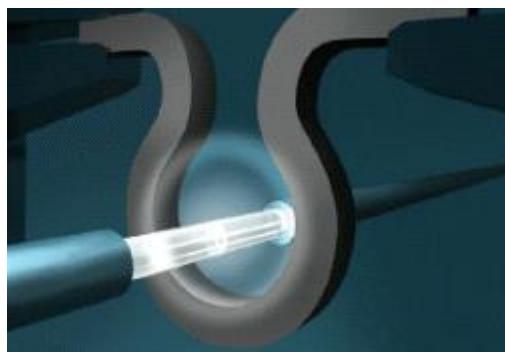
LDC400A大芯径光纤切割机、PTR203B手动光纤涂覆机和GPX3800大芯径光纤熔接和拉锥处理系统，欢迎您预约参观或送样测试。

### 培训和演示目录

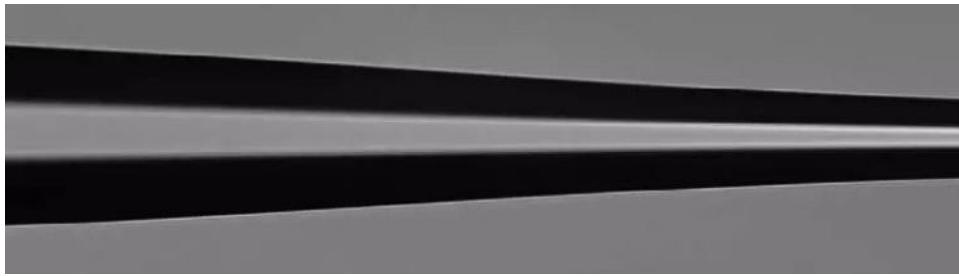
1. 光纤的常用处理
2. LDC400A光纤切割刀的演示和操作(平切和斜切)
3. 切割质量的判定和切割参数的优化
4. PTR203B手动光纤涂覆机的演示和操作
5. 涂覆样品的制作
6. GPX3800大芯径光纤熔接和拉锥处理系统的介绍和演示

### 设备工作简介

**GPX**光纤熔接和拉锥处理系统采用石墨细丝熔接技术，可处理单模、多模、保偏、光子晶体、软玻璃光纤和各种特种光纤。和电弧放电等熔接技术相比，可在加工光纤的过程中提供更均匀稳定的高温热源，更好地控制光纤掺杂成分扩散，更易实现低背向反射和高强度连接。典型应用包括光纤拉锥和拉丝，模场适配器、光纤终端、耦合器和合束器的制作。



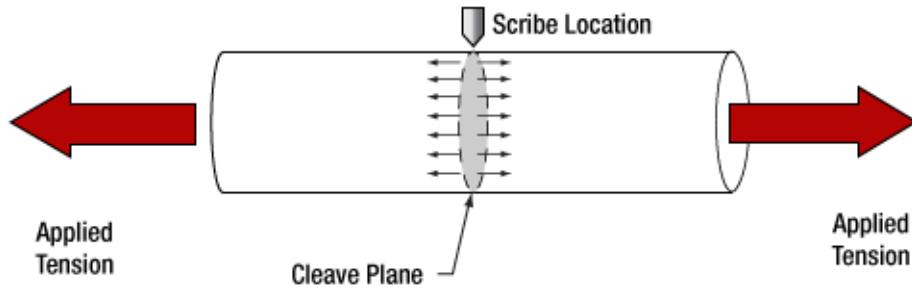
石墨细丝熔接(Filament Fusion)技术



光纤拉锥

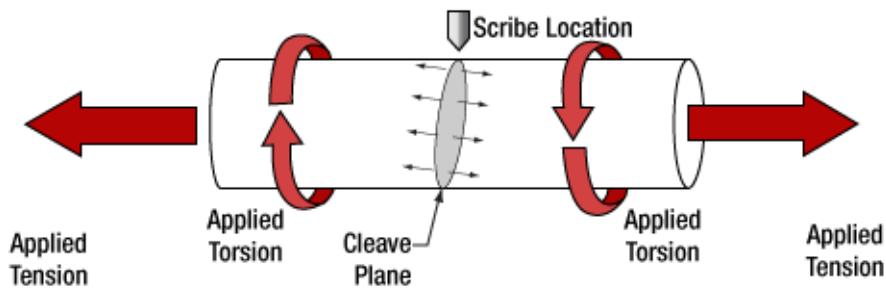
LDC切割机的平切使用“拉伸和擦划”切割程序，其中沿着光纤的长度施加拉力，再用钻石刀进行自动擦划程序。在刀片对光纤擦划之后，维持拉力，使划痕在光纤的宽度上传播，最后完成切割。斜切在切割机开始“拉伸和擦划”程序之前通过旋转台对光纤施加扭力。切割平面将垂直于施加到光纤的拉力和扭力结合产生的最大合成应力。

Pure Tension



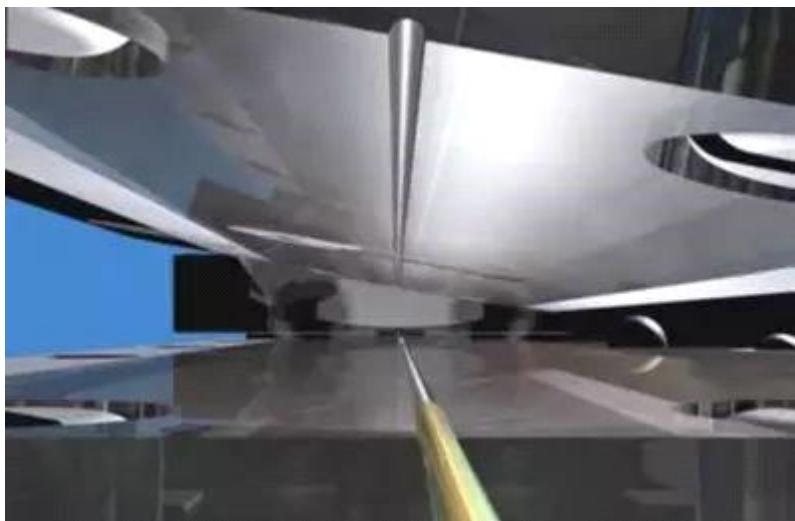
平切图示

Combined Tension and Torsion



斜切图示

PTR光纤涂覆机用于恢复熔接光纤的涂覆层，使其具有光纤原有的柔軟性。与标准热缩保护套管不同的是，经过再涂覆的光纤可以与原光纤操作和卷绕，而同时能保证光纤的特性。



光纤在石英模具腔中

## 激光诱导损伤阈值

### 介绍

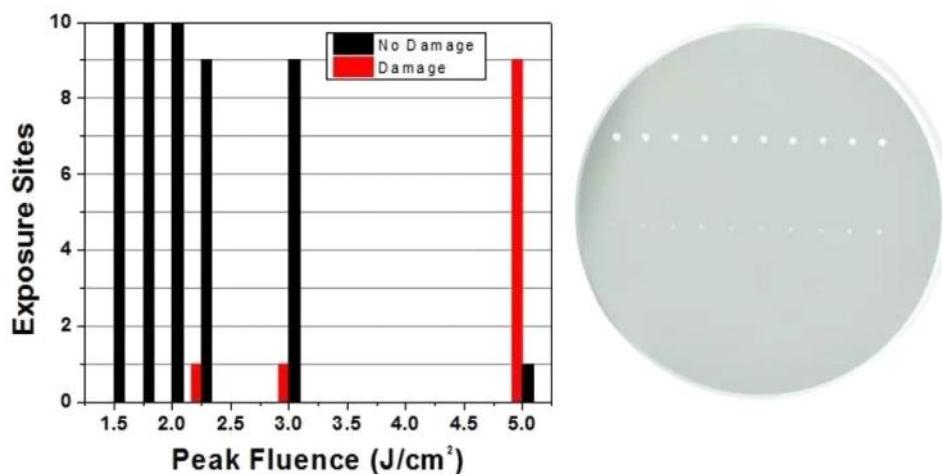
激光诱导损伤阈值是指光学元件在没有损伤时能够承受的最高功率/能量。低强度光束不会对光学元件产生可观察的影响。随着光强增加，可能产生一些可逆变化，比如温度升高、膨胀、畸变、非线性透射和吸收、电光效应、二次谐波发生、光参量振荡和自聚焦等。随着光强进一步增加，可能产生一些不可逆变化，比如表面融化、材料软化和弯曲、破裂等。

选择光学元件时，理解光学元件的激光诱导损伤阈值(LIDT)是很重要的。光学元件的LIDT很大程度上取决于您所使用的激光类型。连续(CW)激光一般通过热效应(镀膜或基底的吸收)引起损伤；而脉冲激光通常在引起热损伤之前会从光学元件的晶格结构中夺取电子。

这里提供的参考假设是以室温工作和新光学元件，即符合划痕/麻点规格、表面无污渍等。

### 测试方法

Thorlabs的LIDT测试符合ISO/DIS11254标准。采用标准的1对1方法测试损伤阈值。首先将光学元件上的10个测试区域逐个暴露在一束低功率或能量的激光光束中，每个测试点持续一定的时间(CW)或脉冲数(特定的脉冲重频)。然后，使用显微镜检测是否存在任何损伤。记录损伤区域的个数以及对应的功率/能量。接下来增大或者降低入射光的功率/能量，重新测试10个新的位置。重复以上过程，直到观察到损伤为止。



左图为测量数据的直方图，可知LIDT=2.0  $\text{J}/\text{cm}^2$

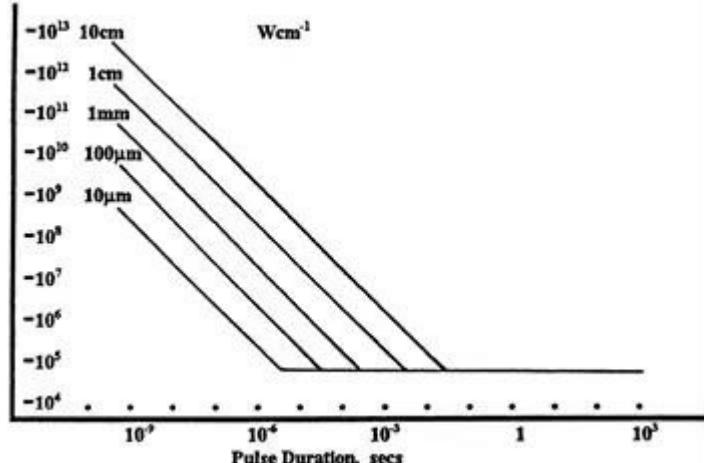
右图为测试后的反射镜实物图

## 连续和长脉冲激光

连续激光损伤光学元件通常是由表面吸收能量而融化或镀膜损伤。脉宽大于1 μs的脉冲激光器可看作连续激光。当脉宽在1 ns和1 μs之间时，可能由吸收或介电击穿引起损伤，所以必须同时对比连续激光损伤阈值和脉冲激光损伤阈值。

尽管很多光学元件能够承受高功率连续激光，但胶合或高吸收光学元件则具有较低的连续光损伤阈值，因为胶合层或金属膜中的吸收或散射会降低损伤阈值。

高重频脉冲激光的热损伤与连续激光类似。但是这很大程度上取决于吸收和热扩散等因素，因此没有可靠的方法确定高重频激光是否会由于热效应损伤光学元件。对于高重频激光光束，平均功率和峰值功率都必须与等量的CW功率比较。



线性功率密度 (W/cm<sup>2</sup>) 为长脉冲和CW激光提供最佳量度。对于长脉冲到连续激光，无论光斑大小，线性功率密度是恒定的。

根据经验可使用下式计算损伤阈值，其中下标1表示光学元件规格中的LIDT值，下标2表示其它波长处的LIDT值。当波长减小时，损伤阈值也会减小。比如1310 nm处的LIDT为10 W/cm，那么在655 nm处则减小为5 W/cm。

$$LIDT_2 = LIDT_1 \times \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$$

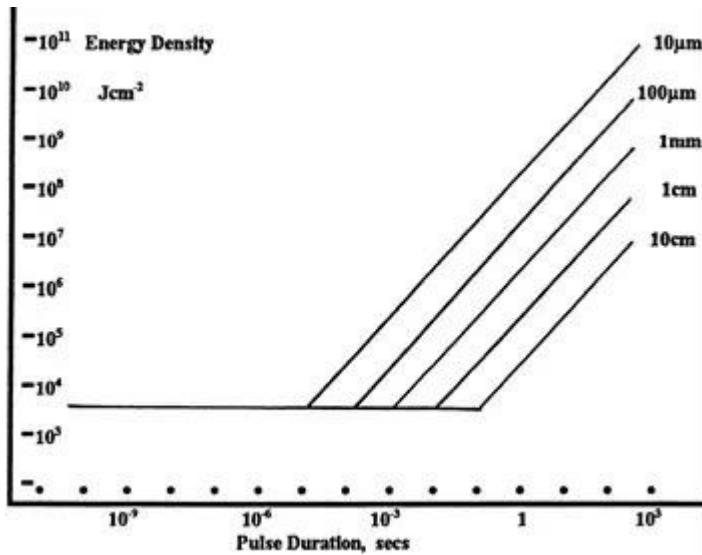
这只是一个大体的趋势，并不是关于LIDT和波长的定量分析。比如，在连续激光应用中，损伤受镀膜和基底的吸收的影响更大，而吸收并不完全与波长成正比。

## 脉冲激光

脉冲激光通常不会通过热效应损伤光学元件；而是通过产生能在材料中诱导介电击穿的强电场对其造成损伤。脉冲激光损坏光学元件有多种机制，并且损伤程度取决于激光脉宽。下表中的蓝色背景部分表示我们测定的LIDT值对应的脉宽。

脉宽	$t < 10^{-9}$ s	$10^{-9} < t < 10^{-7}$ s	$10^{-7} < t < 10^{-4}$ s	$t > 10^{-4}$ s
损伤机制	雪崩电离	电介质击穿	电介质击穿 或热效应	热效应
损伤规格	N/A	脉冲	脉冲和连续	连续

小于 $10^{-9}$  s的脉冲与我们规定的LIDT值对比时缺乏可靠性，因为超短脉冲具有不同的占主导的损伤机制，比如多光子雪崩电离。 $10^{-7}$  s到 $10^{-4}$  s之间的脉冲对光学元件的损伤是由介电击穿或热效应引起的。这意味着需要同时比较连续和脉冲激光损伤阈值，从而确定光学元件是否适用于您所需的应用。



能量密度 ( $J/cm^2$ ) 为短脉冲激光提供最佳量度。对于短脉冲激光，无论光斑大小，能量密度是恒定的。

根据经验可使用下式计算损伤阈值，下标1表示光学元件规格中的LIDT值，下标2表示其它波长处的LIDT值， $\tau$  表示脉宽。

$$LIDT_2 = LIDT_1 \times \sqrt{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}} \times \sqrt{\frac{\tau_2}{\tau_1}}$$

虽然LIDT用 $J/cm^2$ 单位表示时光斑尺寸无关；但是大光束可能辐照更多的缺陷，这可能会导致更大的激光损伤阈值的差异。

## 光纤接头选项

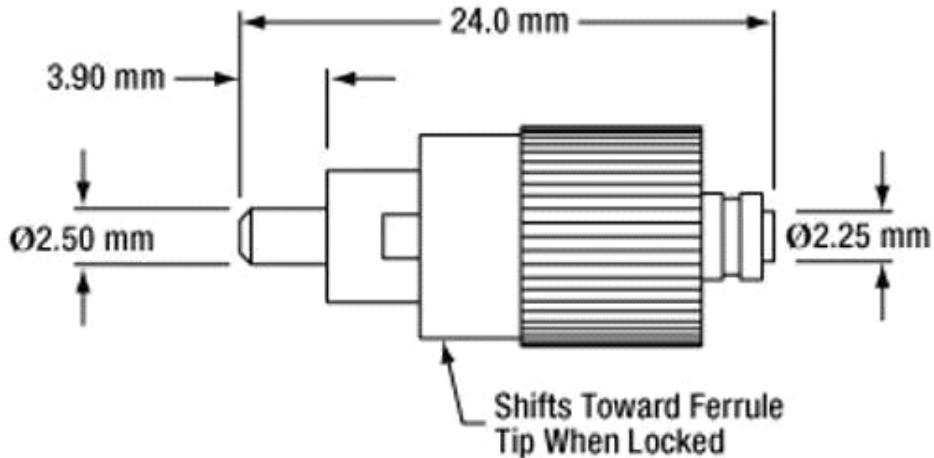
光纤接头实现了光纤之间快速简单的连接和断开。Thorlabs提供6种光纤接头，分别是FC/PC、FC/APC、SMA、ST、SC和LC接头。使用合适的接头可以降低损耗和成本，还能解决光纤端接的其它问题。

### FC/PC接头

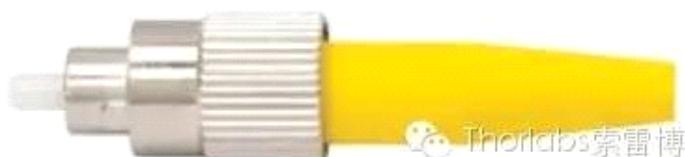
FC/PC接头设计用于高振动环境，使用螺纹固定，是最常见的单模光纤接头之一。PC表示Physical Contact，通过这种接头可使光纤端面直接接触。Thorlabs的FC/PC接头使用陶瓷或不锈钢插芯，背向反射最小为-40到-45dB。

### 单模FC/PC接头

Thorlabs的单模FC/PC接头具有一个倒圆角 (R20 mm) 陶瓷插芯可减小背向反射。

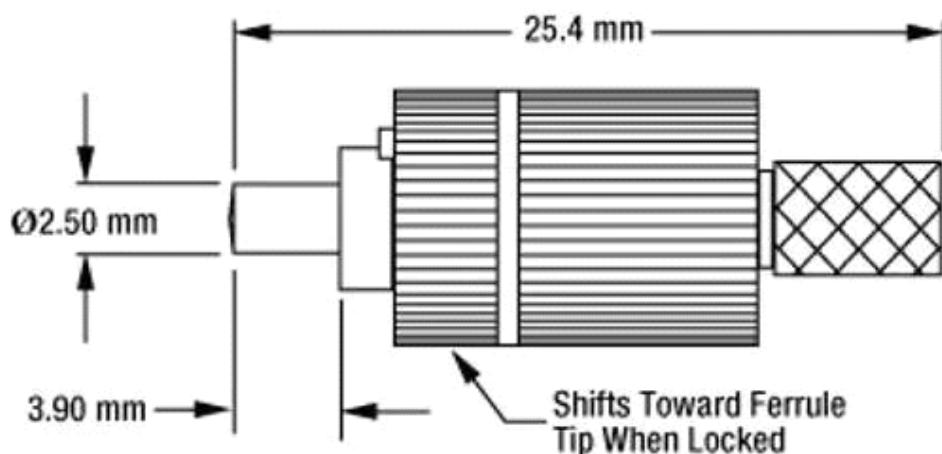


**SM FC/PC**



### 多模FC/PC接头

Thorlabs的多模FC/PC接头有一个匹配光纤直径的精密小孔，同心度最大为 $3 \mu\text{m}$ 。

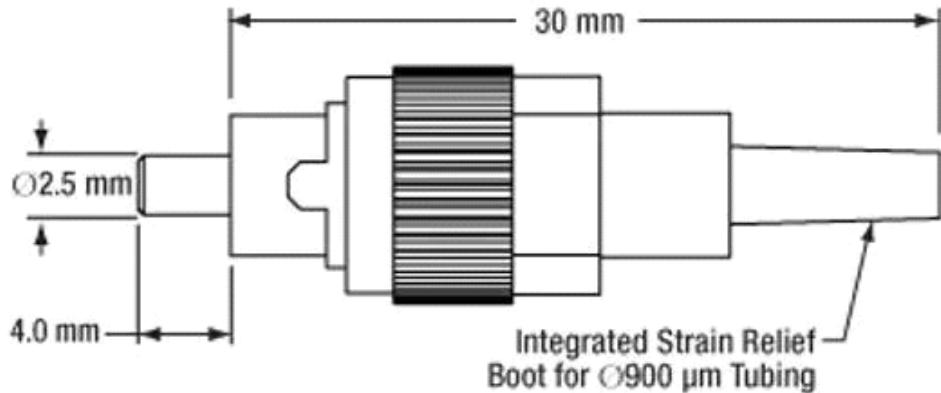


**MM FC/PC**



### 保偏FC/PC接头

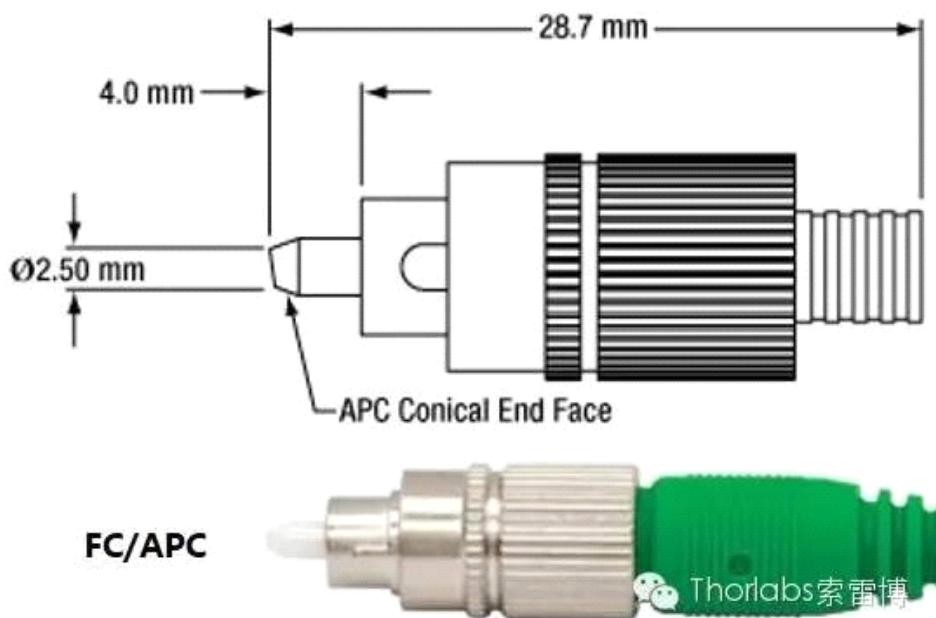
对于保偏光纤，我们提供的是带连续可调插销的FC接头，旋转接头后部来对准光纤的慢轴或快轴。当接头对准后，可以用强力胶将其固定。



### FC/APC接头

FC/APC接头的基本设计与FC/PC相同，但是光纤端面有一个倾角。APC表示 Angled Physical Contact。FC/APC接头只能与FC/APC接头良好连接，与任何其它接头连接插入损耗会很高。FC/APC接头的背向反射比FC/PC接头更小，但是插入损耗更大。

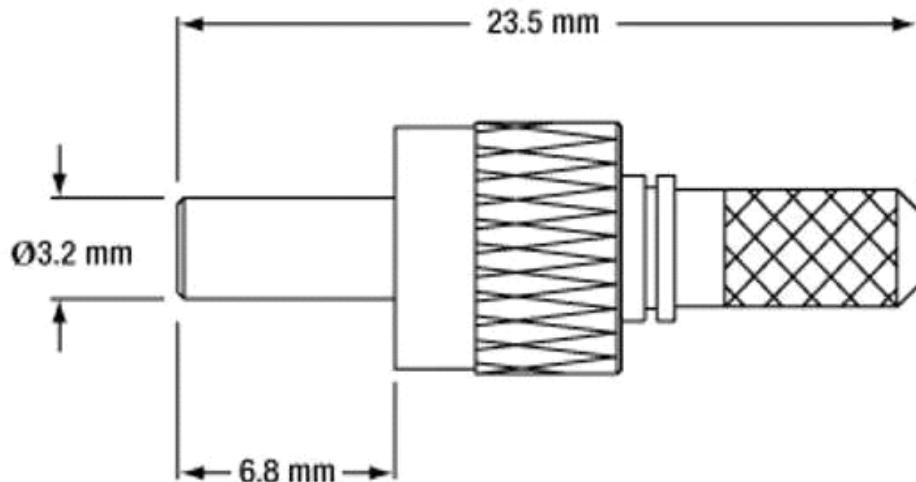
Thorlabs的所有FC/APC接头的背向反射最少为-65dB，并使用便于识别的绿色消应力护套。



### FC/APC

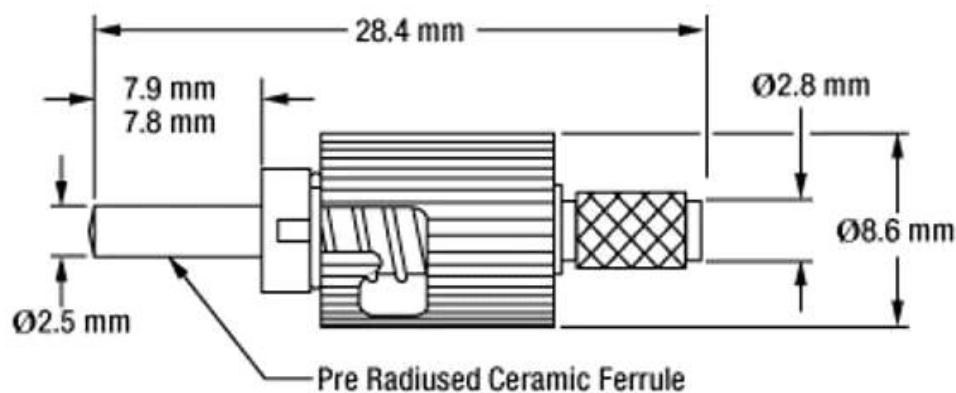
### SMA接头

Thorlabs的SMA (SubMiniature version A)接头用于大纤芯多模光纤，使用螺纹固定。库存SMA接头用于包层直径为125到1580 μm的光纤。



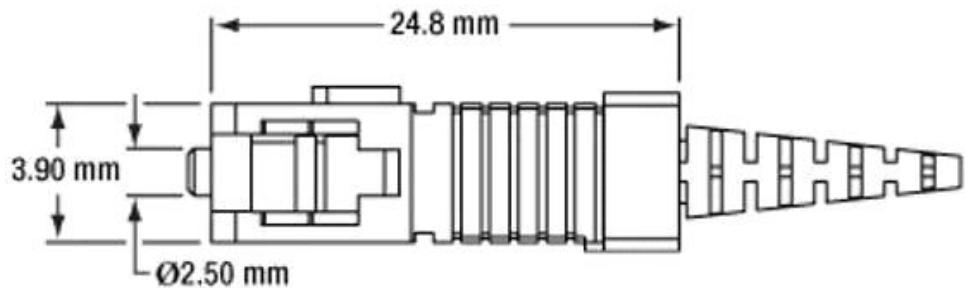
### ST接头

ST(Straight Tip)接头具有一个卡口式(Bayonet)安装头，可以快速连接或断开光纤，但连接光纤没有其它接头好。Thorlabs的单模ST接头具有倒圆角尖端(R20mm)的陶瓷插芯。Thorlabs也为多模应用设计ST接头。



### SC接头

SC(Subscriber Connector)接头是一种卡扣式(Snap-In)接头，连接简单快速。Thorlabs的SC接头的小孔尺寸为125 μm，使用倒圆角(R20mm)的陶瓷插芯。

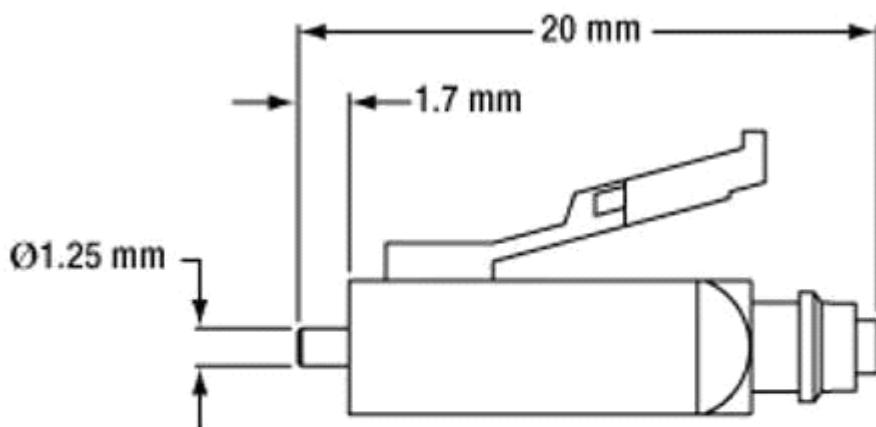


SC



### LC接头

LC接头(Lucent Connector)与SC接头类似，但插芯尺寸只有SC接头插芯的一半。我们库存中的LC接头用于单模光纤。如有需求，我们也提供多模LC接头。



LC

