

目录

2020年4月24日

[Insights](#)

[光机](#)

[成像](#)

[光学器件](#)

[光纤](#)

[光源](#)

[分析](#)

[生产制造](#)

[培训与演示](#)

Insights

2020年4月23日

集思广益，乐享资源

光子学是研究光及其应用的学科。

光子学的常见应用包括测量距离(激光雷达)、发送/接收信息(电信)、对仅凭肉眼无法看到的图像成像(显微镜/内窥镜/管道镜)，以及制造传感器，比如探测血液中的氧气含量(脉搏血氧仪)和我们周围的空气质量(颗粒物大小和痕量气体检测)。

- [实验经验](#)
- [设计](#)
- [光纤](#)
- [积分球](#)
- [激光器](#)
- [OAP反射镜](#)
- [光电二极管](#)
- [偏振](#)

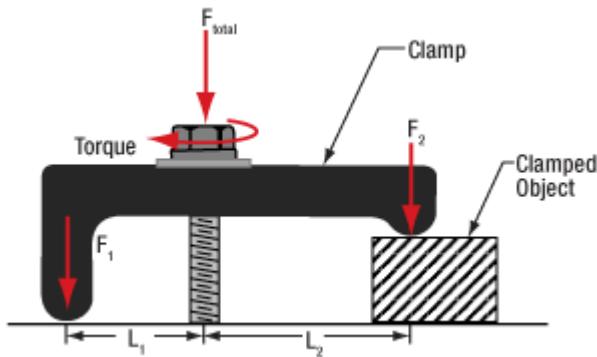
实验经验

- [叉式压块：使压力最大的技巧](#)
- [光学平台：叉式压块及平台表面的形变](#)
- [垫圈：配合光机械件使用](#)
- [电信号：AC耦合vs.DC耦合](#)
- [光纤准直器：配合转接件使用的技巧](#)

叉式压块：使压力最大的技巧

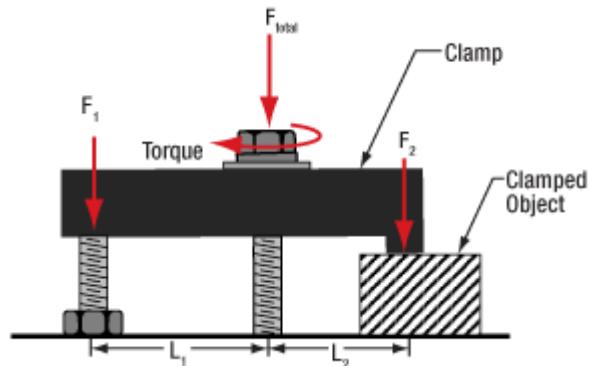
压块槽中被拧动的螺丝距离物体太远时，受压的物体比较容易移动。正确放置螺丝有助于防止受压的物体滑动。

为了实现最大压力，应该将螺丝尽可能地靠近物体。



[Click to Enlarge](#)

图1：小于总作用力(FTotal)一半的力压紧物体，因为L1 < L2。上面的压块是CL5A。



[Click to Enlarge](#)

图2：大于总作用力(FTotal)一半的力压紧物体，因为L1 > L2。CL2压块左侧的高度是可以调节的，以补偿物体的高度，这样可以保持压块的上表面与安装表面平行。**

为了实现最大压力，应该将螺丝尽可能地靠近物体。**

这样做是因为诸如CL5A和CL2(分别对应图1和图2)等压块会将螺丝的作用力(FTotal)分布在两个作用点。

压力F2施加在物体上。F2的值是FTotal的百分比，且取决于L1和L2，如下所述。总作用力中的另一个力(F1)施加在压块的另一端。

使用下面的等式计算两个作用力。

施加给物体的力：	$F_2 = \frac{L_1}{L_1 + L_2} F_{Total}$	施加给另一个接触点的力：	$F_1 = \frac{L_2}{L_1 + L_2} F_{Total}$
----------	---	--------------	---

从上面的等式可以看出，物体上的作用力随着物体与螺丝之间距离的减小而增大。L1与L2相等时，螺丝施加的力被F1与F2均分。

**注意，如要获得最大压力，还需要压块的上表面以及压块接触物体的区域都与安装表面平行，如图1和2所示。

如果压块和物体之间界面处的切线不平行于安装表面，则施加在物体上的力会分解成将物体压入和推出安装表面的力。而沿安装表面的力也许能够，或者不足以移动物体。

为了适应不同的物体高度，诸如CL2这样的压块具有一个带螺纹且可调长度的支脚，如图2左侧所示。可以调整压块和安装表面之间的螺纹数量，以补偿物体的高度，并保持压块的上表面与平台齐平。

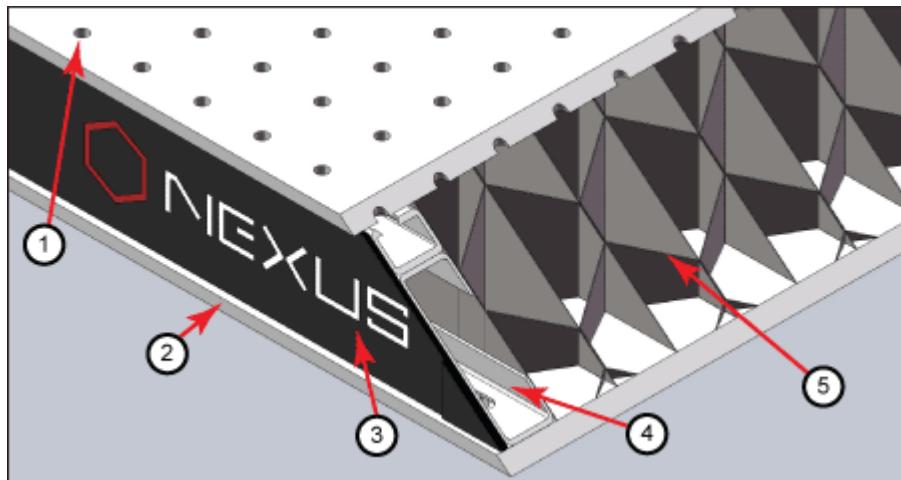
光学平台：叉式压块及平台表面的形变

叉式压块的刚度比复合光学平台安装表面的刚度大。一般看来，随着扭矩增大，叉式压块会在螺丝的作用力下弯曲。但实际上，螺丝会在叉式压块发生形变之前往上提拉平台的上表面。因此，将元件固定到光学平台时，应小心使用叉式压块。夹块与叉式压块类似，但比较不容易使平台的安装表面发生形变，这一点在下面详细讨论。

光学平台结构

采用复合结构的光学平台和面包板(图3)不仅是刚性的，而且还能减振。5 mm厚的不锈钢顶板是平坦的，但局部作用力会使它变形。如果顶板变形，光学组件会放不平，并且光学系统的对准和性能也会受到负面影响。

叉式压块

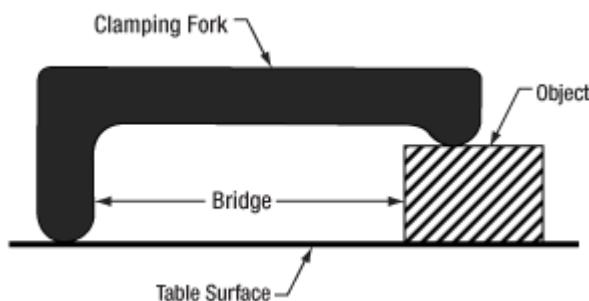


[Click to Enlarge](#)

图 3：Nexus 平台/面包板的结构包含(1)顶板、(2)底板、(3)侧面饰边、(4)侧板和(5)蜂窝芯。不锈钢顶板和底板厚度5 mm。

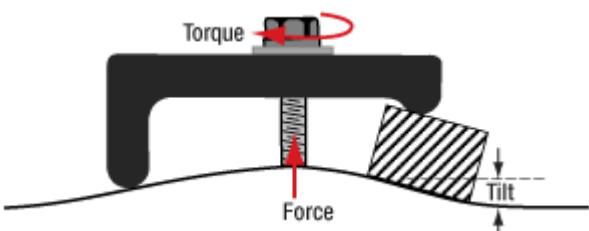
安装标准的叉式压块时，一端放在平台表面上，另一端放在物体上(图4)。这样两端之间，也就是压块下表面和平台表面之间就有了空隙，使用一个螺丝就可以将压块固定在平台上，同时给物体施加作用力。

拧紧螺丝固定压块时，螺丝会往上提拉平台的上表面(图5)。



[Click to Enlarge](#)

图4：CL5A等标准叉式压块仅一端接触平台。另一端接触要固定的物体。这样两者之间就会形成一个“桥”。施加压力的螺丝未显示。



[Click to Enlarge](#)

图5: 拧紧螺丝会产生一个向上拉平台上表面的力。拉动的上表面使安装表面倾斜，并可能引起物体的角度偏移。上图中放大了此效果，以便说明。

随着螺丝扭矩的增大，平台的上表面被拉高。拉高平台表面不仅会永久性损伤平台，而且还会破坏压块固定的光学元件的对准。提拉平台表面后，被压物体下方的安装表面发生倾斜。

夹块

如图6所示，POLARIS-CA1/M等夹块用于固定接杆，同时可以最大程度地减少安装表面变形。

图6中的夹块与叉式压块有两个不同之处。首先是接触光学平台的表面区域不同，图中已用红色高亮显示；其次是固定接杆的方式不同。



[Click to Enlarge](#)

图6: [POLARIS-CA1/M](#)夹块的槽可以安装螺丝，另一个单独的螺丝给安装的接杆施加夹持力，夹块的上下表面完全相同。由于沿夹块表面几乎连续的回路与安装表面接触，因此夹块造成的桥接作用可忽略不计。

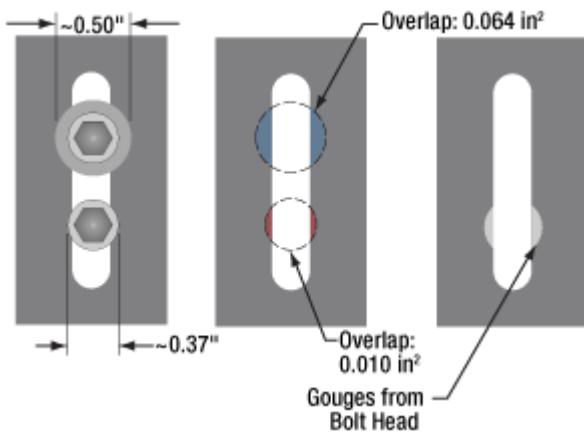
与光学平台接触的区域是一个沿夹块底部几乎连续的回路。安装夹块后，接触区域是平坦的，且与平台齐平。回路中唯一的中断处是钳口位置用于夹紧接杆的窄槽。

这种设计要使用两个螺丝，而叉式压块使用的是一个螺丝。夹块的一个螺丝(未显示)将夹块固定到平台，另一个螺丝(如图)拧紧之后可以固定接杆。所以一个螺丝不需要具备两个功能，这样，这类夹块在夹持的物体和光学平台之间就无需形成“桥”。

虽然接触区域是个回路，但并不是坚固的表面，所以在安装表面产生的变形也可以忽略。具体而言，这是因为接触表面的开口区域较窄，且周围是夹块侧面，可以抵消向上拉动平台的力。

垫圈：配合光机械件使用

标准带帽螺丝的头部直径并不会比螺纹的外径大很多(图7)。例如， $\frac{1}{4}$ -20螺丝的头部直径在0.365英寸和0.375英寸之间，而螺纹的通孔直径为0.264英寸。



[Click to Enlarge](#)

图7：垫圈的直径比螺丝头的直径大35%，这样，与BA2底座的槽的重叠区域增加了6倍以上。垫圈将螺丝的作用力分布在更大的接触区域，有助于防止孔槽擦伤。

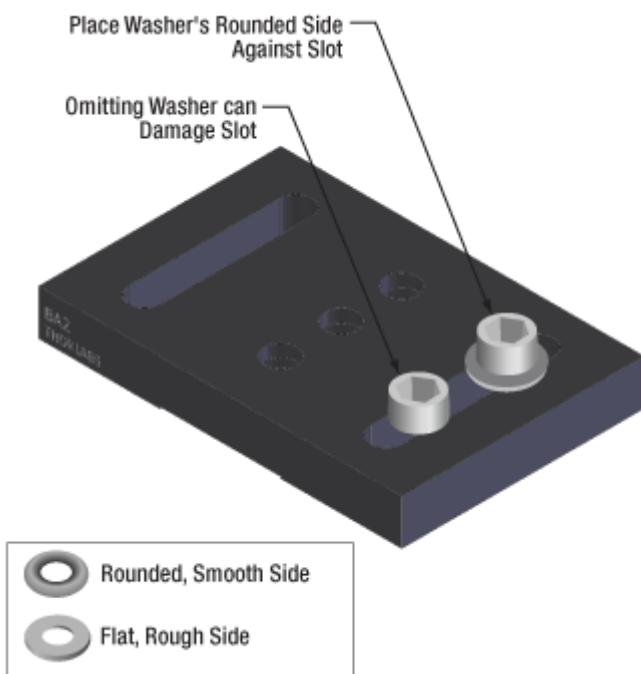
如果直接把螺丝放在通孔中拧紧来固定器件，力则作用于通孔边缘，通常会擦伤器件表面(图7)。

表面产生永久性形变后，螺丝头会掉入凹槽中，这样，在尝试微调器件时，器件又会重新回到这个位置。

带圆形通孔的器件一般不会绕着螺纹移动，因此形变不是大问题。

但是，孔槽理应能够在使用期内沿着整个长度的任意位置固定器件。使用垫圈可以减轻槽边缘的压力，从而降低孔槽的形变风险，并延长器件的使用寿命。图7展现了垫圈可以产生的作用。BA2底座的槽与0.27英寸直径带帽螺丝之间的接触区域为0.010平方英寸。使用0.5英寸直径的垫圈后，接触区域变成0.064平方英寸，是原来的六倍多。

Thorlabs的垫圈有两个不同的面(图8)。一面是粗糙的平面，另一面是光滑的曲面。光滑的曲面应该紧贴仪器经过阳极氧化处理的表面。



[Click to Enlarge](#)

图8：插入螺丝之前安装垫圈，以防止孔槽受损。垫圈光滑的曲面应该紧贴孔槽，而粗糙的平面应该与螺丝头接触。光面易于在阳极氧化表面移动，且不造成损伤。图中所示为BA2底座。

拧紧螺丝，螺丝头会迫使垫圈旋转，从而紧贴阳极氧化涂层。

如果将平面向下紧贴阳极氧化涂层，则平面的粗糙产生的摩擦力可能会划伤阳极氧化铝层。而如果曲面朝下，曲面光滑摩擦力较小，从而可以减少擦伤，维护器件的外观形态。

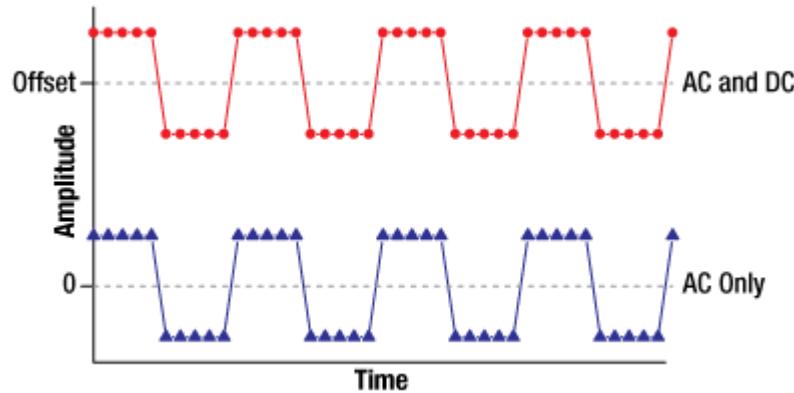
电信号：AC耦合vs. DC耦合

面对AC耦合和DC耦合输入电信号时，人们往往选择DC耦合作为调制输入信号的连接方式。

AC耦合和DC耦合

AC耦合和DC耦合是指输入信号与仪器电路其他部分的连接。

DC耦合，即直流耦合，就是导线直接连接到信号输入端。这种导电耦合传输信号中的所有频率分量，包括DC信号和AC信号。图9中的红色曲线展现了DC分量非零。



[Click to Enlarge](#)

图9：信号的DC偏移是指的平均值。由于蓝色曲线(仅AC)的平均幅度为零，因此DC偏移为零。红色信号(AC和DC)与蓝色信号完全相同，除了红色信号的AC偏移非零。DC耦合将使红色信号保持不变。而AC耦合将隔去DC偏移并衰减信号的低频成分。

而AC耦合的关键特征是通过电容串联信号输入端。电容用作高通滤波器，有时也称为阻塞电容。AC耦合显著衰减DC和低频信号分量。此电容耦合用于过滤输入信号中的DC分量，从而仅传递AC分量。图9中的蓝色曲线仅包含AC频率分量。

尽可能使用DC耦合输入

选择DC耦合输入的理由有很多。首先，它的低频响应非常好，其次，可以同时监测信号的DC分量和AC分量，且不会引起信号失真，因为它不会影响信号的频率内容。

除非DC偏移很大或需要AC耦合输入提供滤波，否则，建议使用DC耦合输入。DC偏移大的问题是它会将仪器的分辨率降低到无法接受的低水平。在极端情况下，DC偏移会造成削波和饱和效应。

请注意，使用DC耦合输入不能保证信号没有失真。可能存在其他原因导致失真，例如设备带宽不足或终端处的阻抗不匹配。

使用AC耦合输入的理由

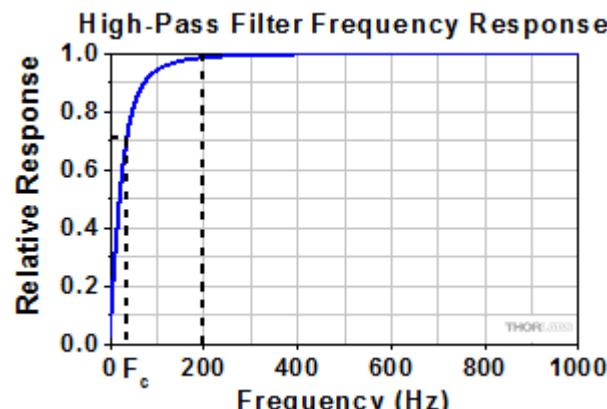
AC耦合通过抑制信号的DC分量，可以减小信号的总幅度，从而提高仪器提供的测量分辨率，

克服饱和和削波的问题。信息由高频信号分量携带，且低频分量不重要时，AC耦合效果更佳。此外，如果应用不能接受DC频率信号分量(例如某些电信应用)，则AC耦合也可能成为首选。

使用AC耦合输入时

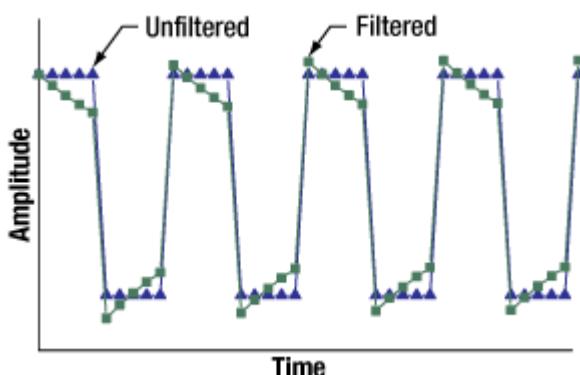
如果使用AC耦合，请务必牢记，这种耦合相当于高通滤波器，能够影响信号的频率成分。

如图10所示，这种耦合不仅可以隔去DC偏移，还可以衰减可能感兴趣的低频分量。因此，AC耦合会导致信号失真。为了说明高通滤波的效果，图11绘制了一个重复频率为200 Hz的二进制信号经过35 Hz截止频率(F_c)的高通滤波器前后的效果。



[Click to Enlarge](#)

图10：上面绘制的频率响应幅度模拟了基于电容的高通滤波器。它的截止频率(F_c)为35 Hz，用于过滤图11中绘制的信号。此信号的重复频率为200 Hz。



[Click to Enlarge](#)

图11：有些调制信号(包括上面绘制的蓝色曲线)没有DC分量，但确实有不可忽略的低频分量。通过AC耦合，即对此信号进行高通滤波后，信号失真。绿色曲线就是一个例子。

AC耦合的数字通讯信号通过确保信号是DC平衡的，从而避免了DC偏移，缓解了此问题。如果信号不是DC平衡的，则一系列信号可能会造成持续的高信号电平，从而引入非零DC电平，导致信号受到电容滤波的影响。然后由于错误地将高状态读取为低状态而产生位错误。

光纤准直器：配合转接件使用的技巧

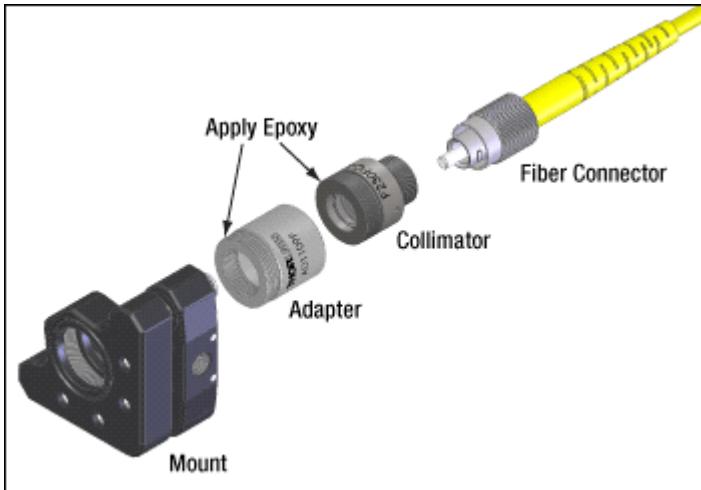
光纤准直器通常用于将光纤耦合光源的光引入光学装置中。Thorlabs提供多种光纤准直器，有些只带光滑的套管(比如[三合透镜准直器](#))，而有些在套管的末端还有公制螺纹(比如[非球面透镜准直器](#))。

对于这两种准直器，Thorlabs一般都建议搭配使用带尼龙顶丝的转接件，通过双线接触固定套管。

我们也提供用于外螺纹元件的转接件([AD1109E](#))，可以将光纤准直器拧入安装座。

但是，使用这些转接件会堆砌螺纹接口(螺纹光纤接头、螺纹准直器和螺纹转接件)。结果，旋松光纤接头可能会无意间弄松另一个螺纹接口，从而在搭建过程中产生未知的不稳定源。

因此，Thorlabs建议，如果确定使用这种安装配置，可以通过环氧树脂将带螺纹的光纤准直器粘在螺纹安装座中。



[Click to Enlarge](#)

图12：上面显示的元件通过螺纹接口接合。由于旋松光纤接头可能会无意间弄松其他元件之间的连接，因此Thorlabs建议把环氧树脂涂在另外两个接口上，将其固定。

光纤耦合

什么情况下能用NA准确估算光纤接收角？

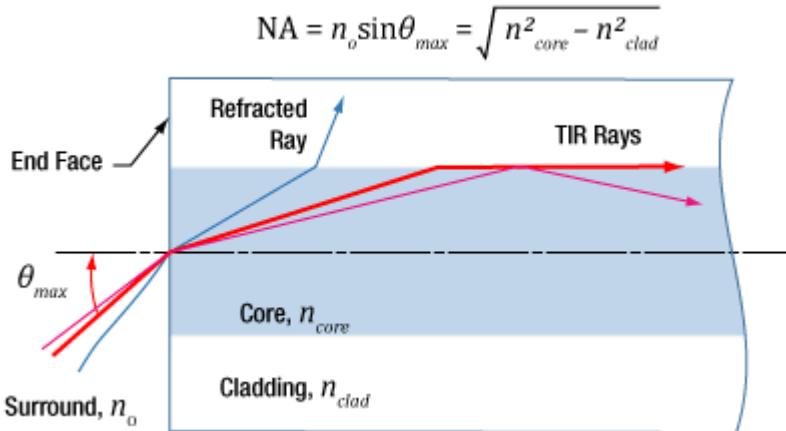
数值孔径(NA)能够用于准确估算大部分多模光纤的最大接收角，如图1所示。但是这种关系[不能用于单模光纤](#)。

NA和接收角

处理NA和最大接收角(θ_{max})的关系时可把入射光看做一条条射线，而最大接收角表示光纤收集离轴光线的能力。使用图1上方的公式可以确定某条光线是否能被耦合到光纤纤芯中。

入射角 $\leq \theta_{max}$ 的光线在纤芯和包层的界面上发生全内反射(TIR)。这些光线沿光纤向前传播，一直被约束在纤芯中。

入射角大于 θ_{max} 的光线在纤芯和包层的界面上发生折射，这些光最终从光纤中损耗。



[Click to Enlarge](#)

图1：入射角 $\leq\theta_{max}$ 的光线能被耦合到多模光纤的纤芯中，因为这些光线在纤芯和包层的界面上发生全内发射。

使用几何光学确定关系

通过图2中的几何光路图可以确定NA、 θ_{max} 以及纤芯和包层折射率(n_{core} 和 n_{clad})的关系。此图描绘的是纤芯和包层界面上发生TIR的临界条件。

图2上方的公式根据斯内尔定律导出，描述光线在两个界面上的走向。请注意，公式根据 $\sin(90^\circ) = 1$ 进行了简化。 θ_{max} 的数值只取决于纤芯和包层的折射率。

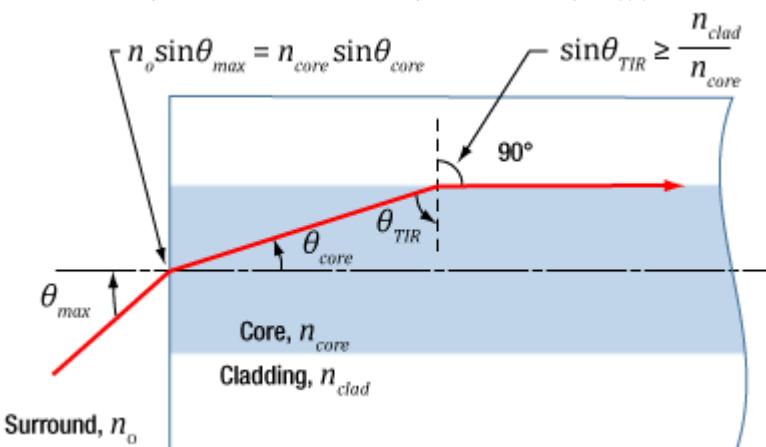
入射角和光纤模式

入射角 $\leq\theta_{max}$ 时的光线能被耦合到多模光纤某个导模中。一般而言，入射角越小，被激发的光纤模式越低。大部分光强集中在靠近纤芯中心的较低阶模式。正入射在端面上的光线激发最低阶模式。

单模光纤不一样

对于单模光纤，图2中的几何光学模型不适用，计算的NA(接收角)不等于最大入射角，无法表征光纤的光收集能力。

单模光纤中只存在由 0° 入射光激发的最低阶导模。但是，计算NA会得到非零值。几何光学模型不能准确预估单模光纤输出光的发散角。此时光束因为衍射而发散，几何光学不考虑这种效应，所以需要使用波动光学描述。使用[高斯光束传播理论](#)能够准确计算光束发散角。



[Click to Enlarge](#)

图2：光线在纤芯和包层界面上的走向取决于两者的折射率，以此确定端面上的入射光线能否被耦合到纤芯中。通过几何关系和图片上方的两个公式可以导出NA计算公式。

为什么MFD是单模光纤耦合的重要参数?

光沿单模光纤向前传播时，光束横截面轮廓接近高斯形。强度轮廓的宽度用模场直径(MFD)表示。入射光束越接近高斯强度轮廓，光纤耦合效率越高。如果入射光为高斯光，并且束腰直径等于MFD，那么可以取得很高的耦合效率。

在[高斯光束公式](#)中用MFD代入束腰直径，不仅能很准确地计算入射光束参数，还可以知道输出光束的发散角。

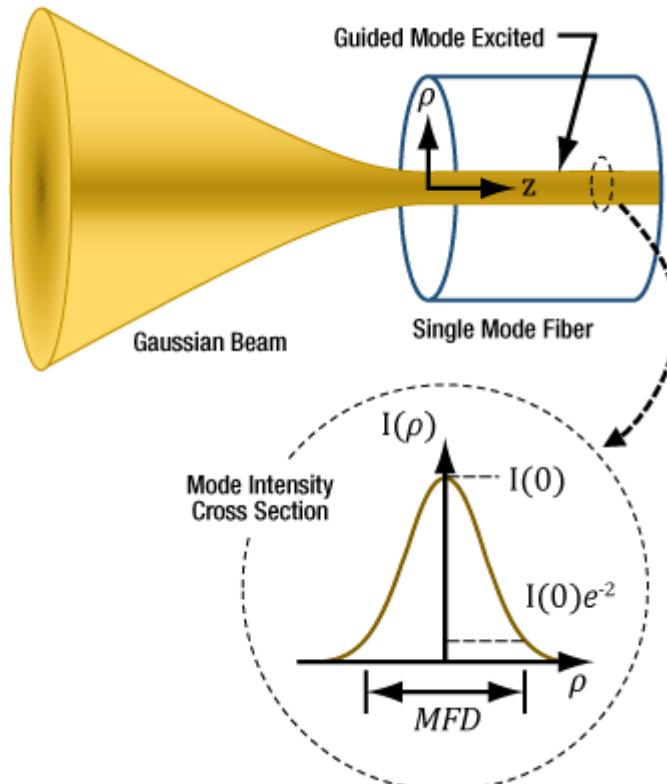
确定耦合要求

光纤的优势之一是沿光纤导模传播的光不会从径向发散出去，而且传播中的衰减很小。如需将光耦合到光纤导模中，入射光特征参数必须匹配导模的特征参数。未被耦合到导模中的光将从光纤径向发散而被损耗。也就是说，这些光从光纤泄露了。

单模光纤只有一种导模，根据波动光学分析，这个模式可用贝塞尔函数描述。高斯和贝塞尔函数的幅度轮廓非常相似[1]，所以改用高斯函数可以简化光纤模式，并且提供准确的结果。

单模光纤的模式强度截面如图3所示，入射光只有匹配这种强度轮廓才能被耦合到导模中。强度(I)和径向距离(ρ)的关系可用高斯函数近似表示。光纤全部长度上的MFD是恒定的，等于强度降低到峰值强度的 $1/e^2$ 时所跨的宽度。MFD范围内的功率约占光束总功率的86%。

因为只发射最低阶横模的激光提供高斯光束，所以这种激光可以高效耦合到单模光纤中。



[Click to Enlarge](#)

图3：要使单模光纤耦合效率达到最高，入射光应为轴向高斯光，其束腰必须位于光纤端面并且束腰直径等于MFD。光纤也将输出具有这些特征的高斯光束。对于单模光纤，几何光学和NA无法准确计算耦合条件。模式强度(I)和径向距离(ρ)的关系曲线也包含在图中。

单模光纤耦合

如果光要高效耦合到单模光纤的纤芯中，入射高斯光束的束腰应位于光纤端面。束腰的强度轮

廓必须和模式强度截面重合并且匹配。要求的入射光束参数可以使用光纤MFD和高斯光束传播公式计算。

如果束腰直径不等于MFD、光束截面轮廓变形或偏离端面处的模式光斑，又或是光没有沿光纤轴向入射，那么这些情况都将导致[耦合效率降低](#)。

NA能否准确估算单模光纤的发散角？

使用数值孔径(NA)估算单模光纤的输出发散角或耦合接收角都将导致较大误差。更好的估算方法是使用高斯光束传播理论计算发散角。这种方法能够根据最适合应用的任意光斑尺寸计算发散角。

由于单模光纤的[模场直径\(MFD\)](#)范围内包含约86%的光束功率，因此在准直单模光纤的输出光或者将光聚焦到单模光纤中时，这种光斑尺寸的定义通常是适用的。在此情况下，初步估计远场测量的发散角：

$$\theta_{SM} = \frac{\lambda}{\pi(MFD/2)} \approx \frac{0.64 * \lambda}{MFD} \quad (1)$$

θ_{SM} 是以弧度为单位的发散角或接收角。这是光束全角范围的一半，和波长(λ)有关，且束腰直径设为与光纤MFD相等[1]。

高斯光束方法

虽然从单模光纤端面输出的也是发散的光锥，但这种光不能看成与光纤轴向呈不同角度传播的多条光线。

而是要将这种光[看作单高斯光束](#)。单模光纤输出光的传播方式与高斯光束相似，因为光的传输导模接近高斯特征。

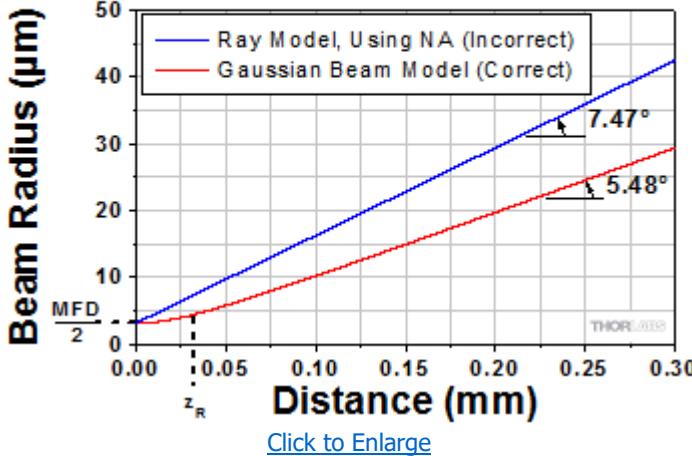
高斯光束的发射角与使用几何光学计算的角度有较大偏差。使用几何光学，发散角等于 $\sin^{-1}(NA)$ 。但是，NA和发散角的这个关系只适用于具有很多模式的多模光纤。

从图4可以看出，使用NA估算发散角会导致很大误差。这种情况下，需要从包含86%光束功率的圆周上的某点计算发散角。此圆周上每个点的强度为峰值强度的 $1/e^2$ 。

图4右边的公式可用于准确模拟单模光纤端面输出光束的发散角。用于计算的参数包括光纤MFD、NA和工作波长，它们的数值列在曲线下方。距离 $z < zR$ 时光束发散率不是线性的，而在远场($z >> zR$)可看成近似线性。

图中标注的角度值根据各自曲线的斜率计算。使用远场近似公式(1)计算的发散角为0.098弧度(5.61°)。

Single Mode Fiber Output Beam Divergence



瑞利距离

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

距离 z 处的光束半径:

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

图4：对比两条曲线可以看到使用NA计算单模光纤输出发散角(θ_{SM})的误差。

使用高斯光束传播理论可以避免明显的光斑直径误差。

曲线使用[SM980-5.8-125](#)的输出光束模拟。NA和MFD分别等于0.13和6.4 μm。

工作波长为980 nm，瑞利距离为32.8 μm。

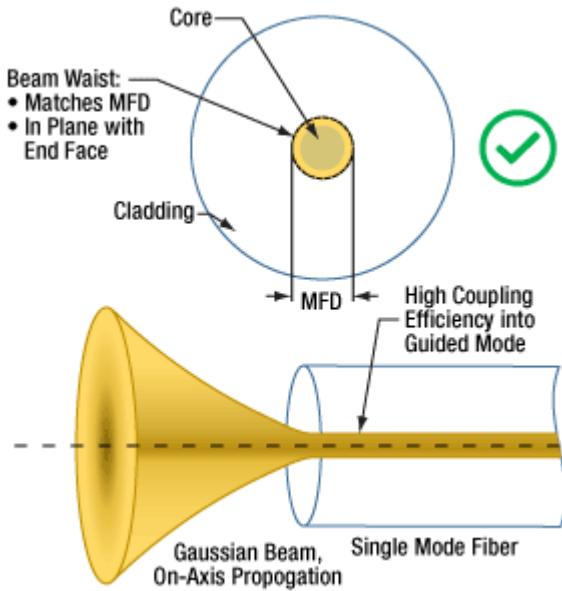
影响单模光纤耦合效率的因素有哪些？

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和光纤轴垂直，满足以下条件的光束(图5所示)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
- 束腰直径等于光纤模场直径(MFD)

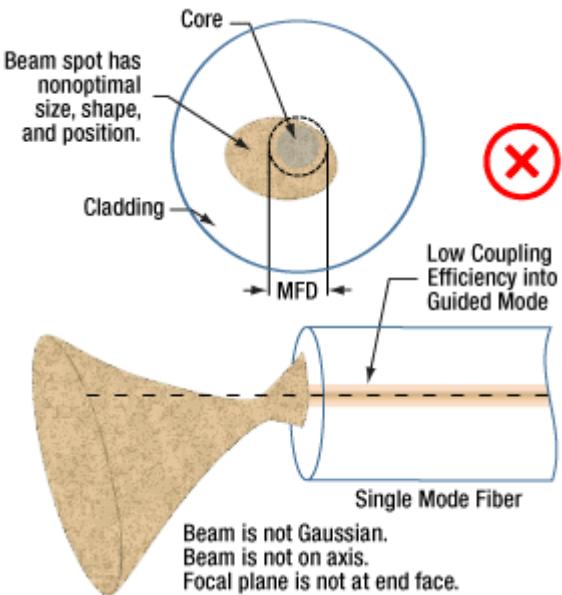
偏离理想耦合条件的情况如图6所示。

这些光束性质是根据[单模光纤导模](#)的波动光学分析得出的[1]。



[Click to Enlarge](#)

图5：要使单模光纤耦合效率达到最高，入射光必须是轴向传播的高斯光束，而且束腰位于光纤端面、束腰直径等于MFD。



[Click to Enlarge](#)

图6：如果某个因素会使入射光束性质偏离光纤导模的光学性质，那么它就会导致单模光纤耦合效率降低。

光源可能限制耦合效率

只发射最低阶横模的激光器提供具有近似高斯轮廓的光束，可以高效地耦合到单模光纤中。

将多模激光器或宽带光源的输出光耦合到单模光纤的导模中时，耦合效率很低，即使光聚焦到端面的纤芯区域。大部分光都将从光纤泄漏。

低耦合效率是因为多模光源中只有一小部分光匹配单模光纤导模的特征。对这种光源进行[空间滤波](#)，可以估计有多少光可以耦合到纤芯中。最好情况是单模光纤只能耦合从滤波器输出的高斯光束。

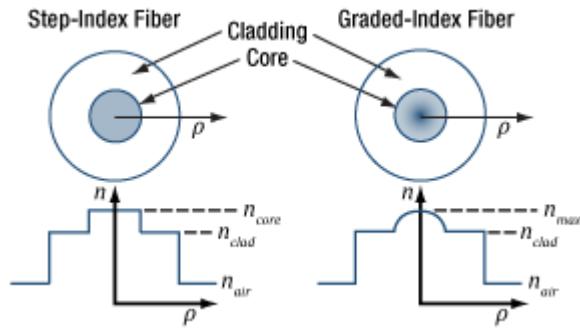
如果用多模光纤代替单模光纤，可以提高多模光源和光纤纤芯的耦合效率。

多模光纤整个纤芯上的最大接收角是否恒定？

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恒定的。但是，渐变折射率多模光纤只有纤芯中心具有最大范围的入射角。距离中心越远，最大接收角越小，靠近包层界面的最大接收角趋近于 0° 。

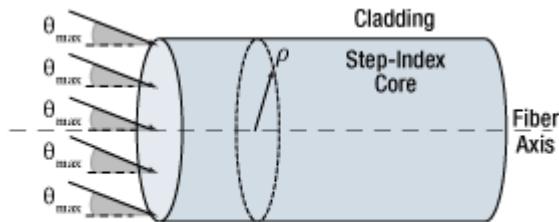
阶跃折射率多模光纤

阶跃折射率多模光纤纤芯的折射率曲线为平顶形，如图7左侧所示。当光耦合进光纤的平坦端面时，纤芯每个点上的最大接收角(θ_{max})都是相同的(图8)。这是因为整个纤芯的折射率是恒定值，而接收角与包层折射率的相关性很高。



[Click to Enlarge](#)

图7：阶跃折射率多模光纤的折射率(n)在整个纤芯上都是恒定的。渐变折射率多模光纤的折射率随纤芯位置不同而不同。一般地，最大折射率位于中心。



$$NA = \sin \theta_{max} = \sqrt{n_{core}^2 - n_{clad}^2}$$

[Click to Enlarge](#)

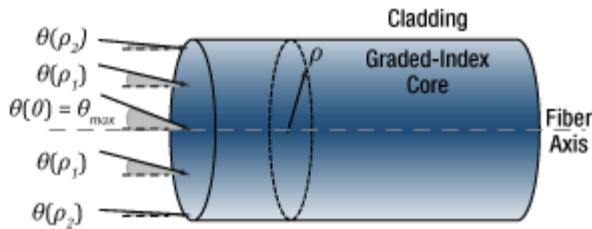
图8：如果光在纤芯上的入射角 $\leq |\theta_{max}|$ ，那么阶跃折射率多模光纤能以高耦合效率收集这些光。纤芯径向(ρ)上每个点的最大接收角都是一样的。假设光纤处于空气中。

不管光线从纤芯的中心还是边缘入射，只要光线与光纤轴向的角度处于 $\pm \theta_{max}$ 范围之内，都能将被耦合到阶跃折射率多模光纤中。

渐变折射率多模光纤

典型渐变折射率多模光纤的纤芯如图7右侧所示，其折射率在纤芯中心处最大，随径向距离(ρ)增大而减小。根据图9下方的公式可知，由于纤芯折射率与径向距离有关，所以最大接收角和数值孔径(NA)也和径向距离有关。这个公式假设光纤位于空气中，光纤端面为平面并且垂直于光纤轴。

从图9可以看出，光线的角度范围受纤芯的折射率轮廓限制。入射光线的最大角度范围($\pm \theta_{max}$)发生在光纤轴上($\rho = 0$)。径向距离增加，角度范围变小。



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

[Click to Enlarge](#)

图9：渐变折射率多模光纤的接收角随径向距离(ρ)变化，因为纤芯折射率随径向距离变化。最大接收角一般在中心附近，趋近于0°的最小接收角在包层边界附近($0 < \rho_1 < \rho_2$)。假设光纤处于空气中。

阶跃折射率还是渐变折射率？

阶跃折射率多模光纤比渐变折射率多模光纤能够收集更多的光。这是因为阶跃折射率纤芯的NA恒定，而渐变折射率纤芯的NA随径向距离增加而减小。

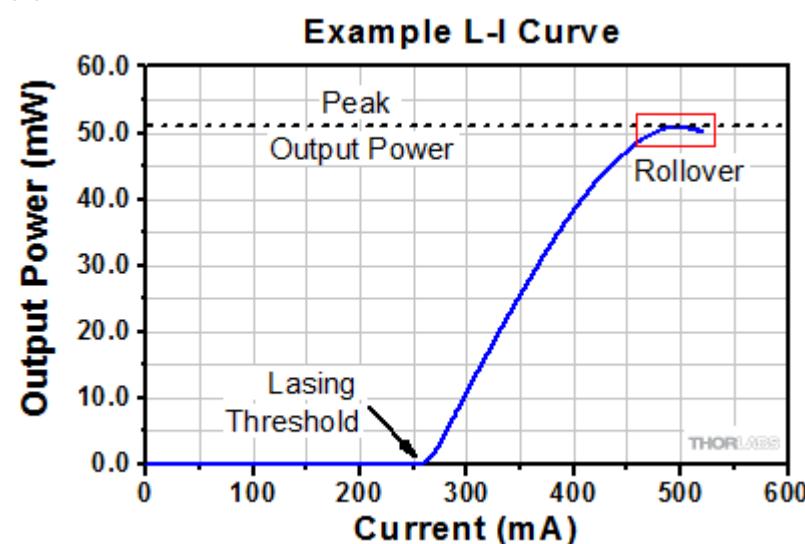
但是，渐变折射率可使所有导模具有相似的传播速度，从而降低光束沿光纤传播时产生的模式色散。

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。

激光器使用经验

QCL和ICL：工作极限和热致翻转

如图1中的红框所示，量子级联激光器和带间级联激光器(QCL和ICL)的光和驱动电流(L-I)测量曲线包含一个翻转区域。



[Click to Enlarge](#)

图1：这个QCL L-I示例曲线描绘QCL和ICL的典型非线性斜率和翻转区域。工作参数决定激发区域承载的热量，而热负载影响峰值输出功率。激光器安装在设为25 °C的温控安装座中。

翻转区域包含激光器的峰值输出功率，此例中对应于略低于500 mA驱动电流。施加更高的驱动电流可能损坏激光器。

激光工作原理

这些激光器的工作通过半导体层级结构和施加的偏压形成一系列受控的能级，并迫使电子逐级向下。驱动电流提供电子。

每个电子必须释放一部分能量才能落到更低的能级中。当电子下降一个激光能级，电子以光子形式损失能量。但是，电子也可能以热量将能量传递到半导体材料中，而不是释放一个光子。

热量堆积

激光器无法以100%的效率迫使电子以光子形式释放能量。电子以热能损失的能量将使激发区域的温度升高。

反过来，激发区域中的热能可能被电子吸收。这样增强的能量会使电子偏离激光能级下降路径。接着，散射电子一般都通过热能而不是光子损耗能量。

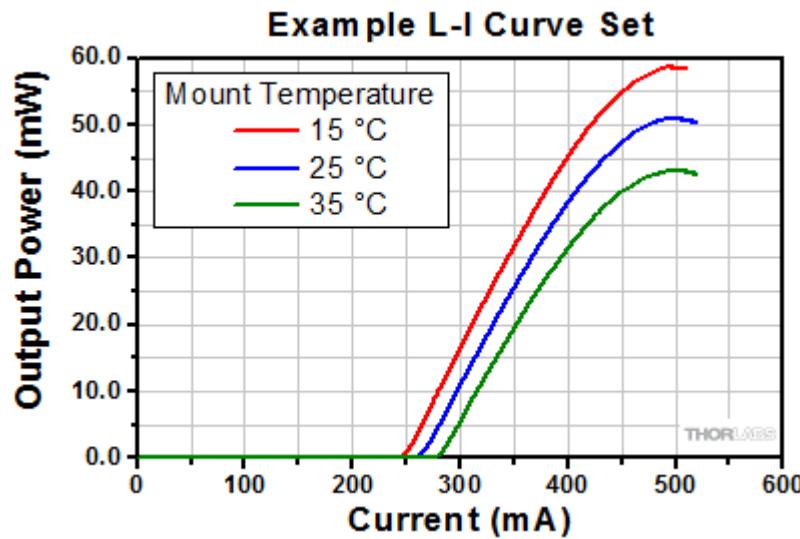
随着激发区域的温度升高，更多电子被散射，较少的电子将产生光子不产生热能。升高的温度也会改变激光能级，使得电子更难发射光子。这些过程都将升高激发区域的温度，降低激光器的电光转换效率。

工作极限由热负载决定

理想地，L-I曲线斜率在阈值电流以上将是线性的，图1中阈值电流约为270 mA。但是，斜率随驱动电流升高而降低，这是由于激发区域温度升高影响。当激光器不能将额外电流转换成激光时，曲线出现翻转。这时额外的驱动只产生热量。当电流足够高，激光区域局部堆积的高热能将使激光器失效。

一般使用温控安装座帮助管理激发区域的温度。但是，由于半导体材料的热导不高，热量仍能堆积在激发区域中。如图2所示，安装座温度影响峰值光输出功率，但是不能防止翻转。

QCL和ICL的最大驱动电流和最大光输出功率取决于工作条件，因为这些条件决定激发区域的热负载。



[Click to Enlarge](#)

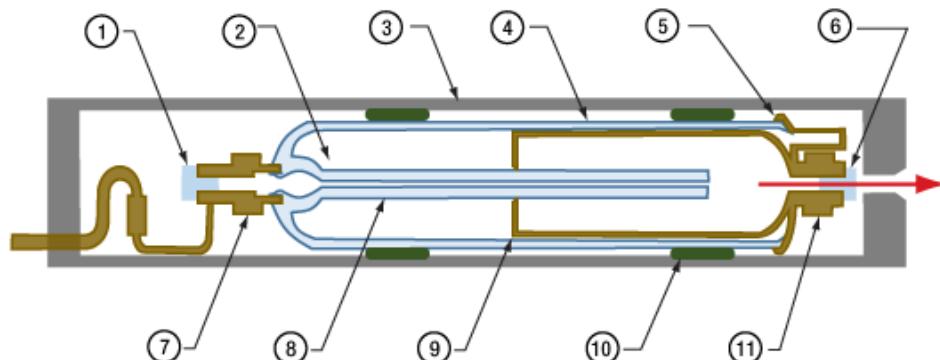
图2：QCL的这组L-I曲线说明安装座温度可影响峰值工作温度，但是，即使使用温控安装座，施加的驱动电流仍可能大到超过翻转点，存在损坏激光器的风险。

氦氖激光器：操作和安装指南

为了防止损坏，氦氖激光器必须仔细拿取和安装。

绝不要对激光器外壳施加弯折力。激光器外壳受应力可能偏移或损坏激光腔内的组件。这可能：

- 影响光束质量。
- 降低输出功率。
- 影响光束指向。
- 引起多模效应。



[Click to Enlarge](#)

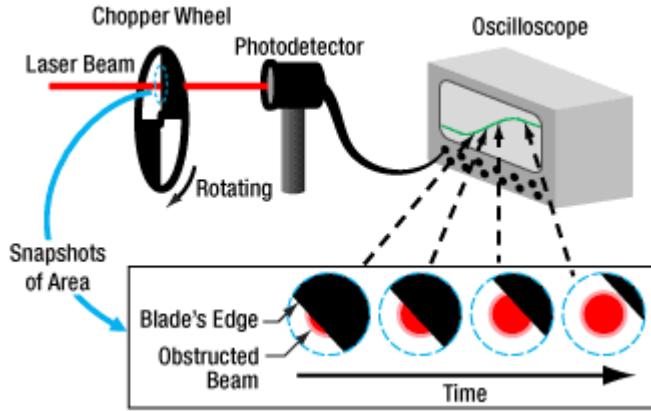
图3：氦氖激光器的外壳与激光腔的组件机械耦合。在外壳上施加应力可能使激光腔组件降低对准度和分裂，降低输出激光光束(红色箭头)的质量和功率，或者导致激光器失效。

1.	高反镜	7.	阳极
2.	气体容器	8.	玻璃激光管
3.	外壳	9.	对准和稳定激光管的金属弹簧
4.	玻璃	10.	灌注胶
5.	玻璃-金属密封	11.	阴极
6.	输出耦合镜		

使用斩波轮测量光束尺寸

相机和扫描狭缝轮廓仪能够表征光束大小和形状，但是，如果光斑太小或者波长不在工作范围之内，这些仪器不能提供准确测量结果。

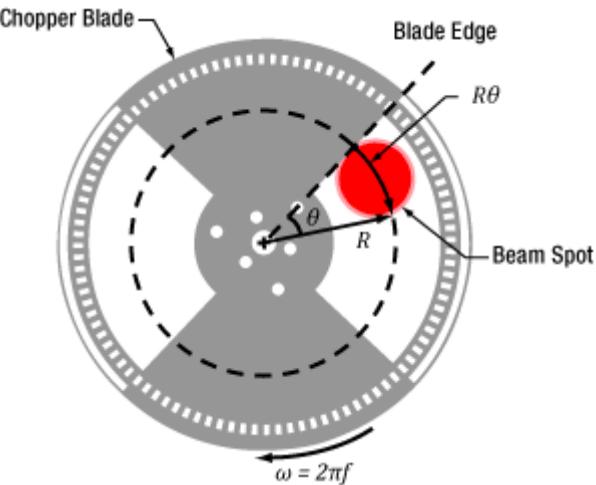
这种光束尺寸可以使用斩波转轮、光电探测器和示波器能够近似测量(图4)。随着斩波转轮的叶片通过光束，示波器上显示S形追迹曲线。



[Click to Enlarge](#)

图4：使用上图装置能够近似测量光束尺寸。随着斩波轮叶片扫过光束，示波器上形成S形追迹曲线。

当叶片扫过 θ 角时，S形曲线的上升或下降时间与沿叶片运动方向的光束尺寸成正比(图5)。叶片上距离轮心为 R 的某点扫过的弧长为 $R\theta$ ，约等于沿这个方向的光束尺寸。



[Click to Enlarge](#)

图5：叶片通过光束中心扫过的弧长为 $R\theta$ ，角度旋转速度为 $2\pi f$ 。图中所用的斩波轮是[MC1F2](#)。

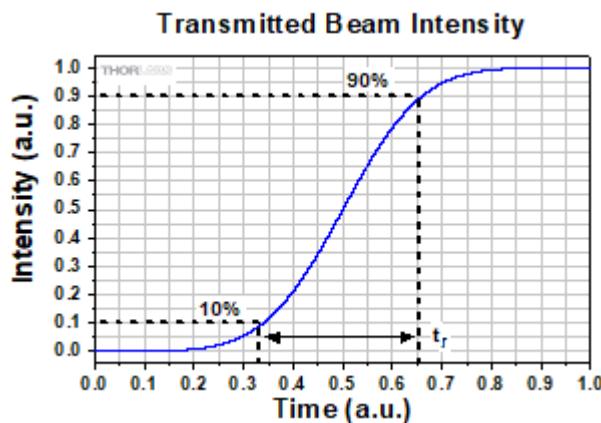
为了用这种方法测量光束尺寸，探测器和示波器的组合响应速度必须远高于信号变化率。

实例：通过S形曲线上升沿测量

光束的展开角度($\theta=2\pi ft_r$)取决于信号上升沿(图6)以及和转轮旋转速率(f)，转速以Hz或转/秒为单位表示。根据这个角度计算弧长($R\theta = R * 2\pi ft_r$)。对于小尺寸高斯光束， $1/e^2$ 光束直径(D)约等于

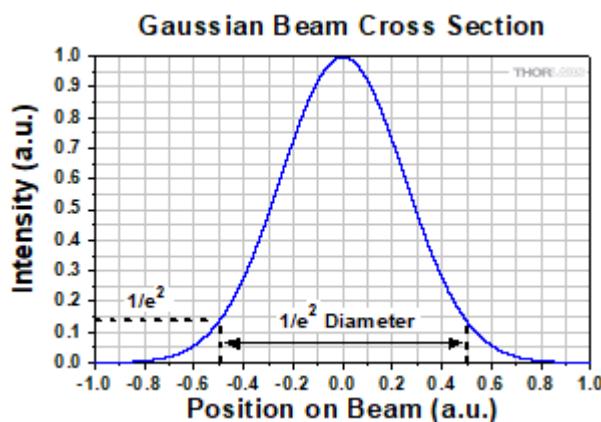
$$D \cong 0.64(2\pi ft_r)R$$

系数0.64表示在10%和90%强度之间测量的上升时间。



[Click to Enlarge](#)

图6：强度信号的上升时间(t_r)一般在曲线10%到90%之间测量。



[Click to Enlarge](#)

图7：高斯光束直径一般以 $1/e^2$ 水平线的整个宽度表示。

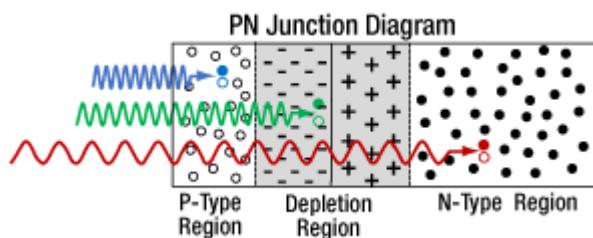
光电二极管

波长如何影响上升时间？

当光入射到光电二极管上时，由于菲涅耳反射，光子将在空气/半导体界面反射，而未反射的光子将通过半导体材料。

光子将继续移动，直到被吸收或到达顶端。当光子被吸收时，将产生电荷载流子对。

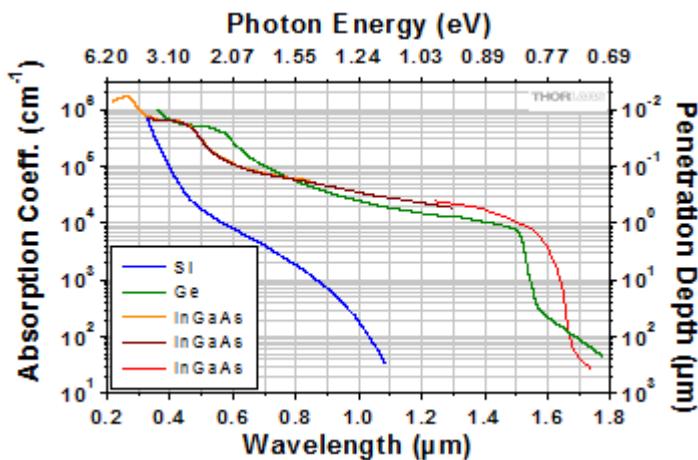
在耗尽区内产生的电荷载流子几乎可以立即产生光电流。而在耗尽区外产生的载流子必须通过额外的步骤移动到耗尽区。此行程的持续时间即扩散时间。在图1中，蓝色和红色光子分别在P区和N区生成载流子。这些载流子必须扩散到耗尽区。



[Click to Enlarge](#)

图1：不同波长的光在基于PN结的探测器中具有不同的平均穿透深度。穿透深度与和波长相关的吸收系数相关(图2)。

光子一旦进入半导体，其会被吸收的概率取决于吸收系数。各种探测器材料的与波长相关的吸收系数和穿透深度如图2所示。

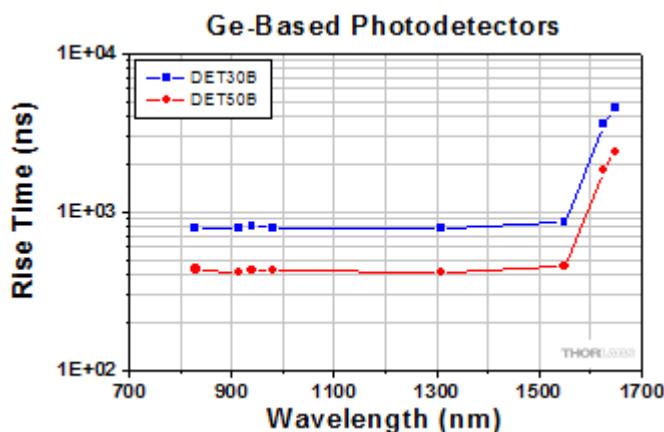


[Click to Enlarge](#)

图2：图为硅、锗和铟镓砷(In0.53Ga0.47As)的典型吸收系数和穿透深度。穿透深度为吸收系数的倒数。

随着入射波长的增加，吸收系数减小。这意味着具有更长波长的光子在被吸收并产生电荷载流子对之前，可在半导体内移动更长的平均距离。电荷载流子到达耗尽区所需的距离越大，上升时间就越长。

图3至图5展示了所选的硅、铟镓砷和锗光电二极管测量的上升时间。在硅图中，对于< 800 nm的波长，曲线的斜率几乎是平坦的。这表明在表面附近被吸收光子的扩散时间可以忽略不计。800 nm之后，上升时间呈指数增长。由于硅在800 nm处的穿透深度为9 μm(图2)，这表明从探头顶部到耗尽区底部的距离小于9 μm。



[Click to Enlarge](#)

图5：锗探测器的上升时间

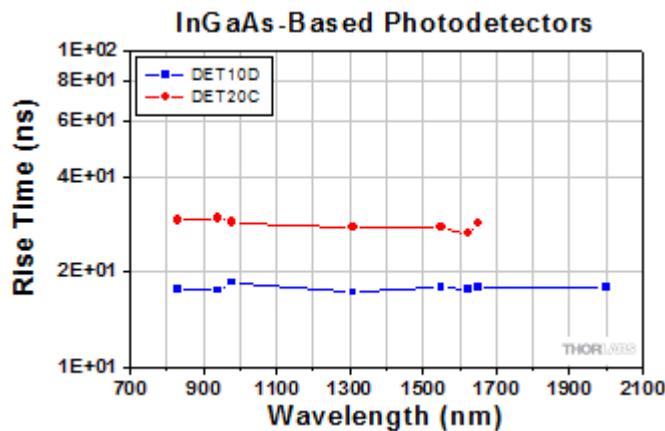


图4：铟镓砷探测器的上升时间

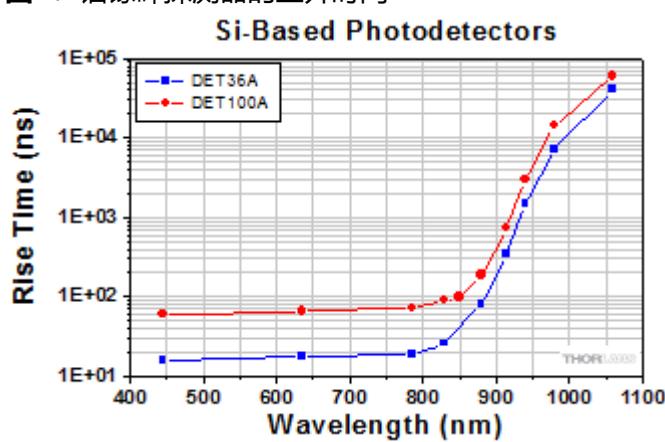


图3：硅探测器的上升时间

[【top】](#)

光机

2020年4月23日

光学平台

英制与公制螺纹

实验室常用工具

光机械制造能力

1、光机械设计

- SolidWorks的3D建模
- 有限元分析 (FEA) 评估材料应力

我们的机械学设计人员由工程师和绘图人员一起生产最先进的光机组件。在介绍一个原始构想后，我们通过合作开始设计；我们团队在设计评审会议中讨论这个构想，在开始任何设计工作之前就确定了关键目标规格和特性。我们的目标是确保所有的设计要求和潜在问题都尽早传达确保新产品尽早发送到客户手上。然后再进行具体构思并使用Solidworks建模细化。有限元分析 (FEA) 软件用来评估设计上可能导致部件失效的材料应力。

2、光机械原型制造

- 3D打印速率原型
- 带四轴能力的CNC机床
- CNC车削中心
- 原型和初始生产运行的三周交付时间

作为原型工序中的初始步骤，我们经常使用3D打印机生产组件的精确塑料模型。打印机可以生产全功能的产品，所以无需生产机械原型的时间和成本就能评估螺纹和其它功能。

3、光机械测试

- 使用测力计、刻度盘指示器测量性能规格
- Optek视觉系统精密测量
- Dorsey光学比较仪测量分析工具标记
- Espec腔测试极端温度和湿度下的性能
- 光学台上的专门实验装置

4、生产机械车间

- 立式机床：数个定制旋转台钳增加容量
- 横式机床：两台带托盘的机器可进行六小时机加工

- 车削中心
 - 棒式进料器可装载更多材料以增加加工时间并减少装载时间
 - 负主轴允许更少地夹持部件
 - 实时工具调整允许车削中心用作机床
- 精密螺丝机器
- 激光刻印
- 手动工具室
- 滚磨机中心完成加工好的组件

5、最后的产品组装和精细制造

- 精细生产
- 交叉培训、技术和组织节省时间提高质量

成像

2020年4月23日

光学相干层析教程

光学相干层析(OCT)是一种无创伤的光学成像方法，能够提供实时的一维深度、二维横截面和三维形体图像，分辨率具有微米量级，成像深度具有毫米量级。基于样品内不同材料层上反射的光信号，OCT图像包含了样品结构信息。它能够进行实时成像，并且通过对该技术进行选择性扩展，可以用双折射对比或功能性血液流动成像对其进行改良。

OCT是超声技术的光学模拟，它在较低成像深度和较高分辨率之间进行了权衡(见图1)。由于OCT技术能够在15 mm的深度范围内成像并且轴向分辨率高于5微米，它填补了超声波和共焦显微之间的缺口。

除了高分辨率和更好的成像深度的特点，OCT技术的非接触、无创伤优势使其非常适合对生物组织、小动物和材料进行成像。OCT技术的最新发展衍生出一类新技术，即傅里叶域OCT，该技术能够以大于700,000线每秒的速度进行高速成像。

傅里叶域光学相干层析(FD-OCT)基于低相干干涉技术，即使用光源的相干特性来测量样品的光程长度延迟。在OCT中，获得微米量级分辨率的横截面图像，需要用干涉仪测量从样品反射的光束和参考光束的光程差。

FD-OCT系统有两种类型，根据光源和探测类型进行分类：谱域OCT(SD-OCT)和扫频光源OCT(SS-OCT)。在这两种系统中，光被干涉仪装置分为采样光束臂和参考光束臂，如图2所示。SS-OCT采用相干窄带光源，而SD-OCT系统采用宽带低相干性光源。反射回来的散射光是由于样品内不同折射率而产生的，它会被耦合到采样臂光纤中，然后与沿着参考臂传播一段固定光程的光束结合。最后的干涉图样将通过干涉仪的探测臂进行测量。

用传感器测得的干涉图频率与样品中反射部位的深度位置有关。这样一来，通过对探测的干涉图进行傅里叶变换就可以得到一个深度反射率分布(A-扫描)。二维横截面图像(B-扫描)是通过OCT采样光束对样品进行扫描而获得的。由于采样臂光束会横扫样品进行扫描，所以一系列A-扫描的结果结合在一起就能产生二维图像。

类似地，当OCT光束沿着另一个方向扫描时，一系列的二维图像就可以结合产生三维立体数据组。通过FD-OCT系统，二维图像的获取需要几毫秒，而三维图像目前可以在不到1秒的时间内获取。

谱域OCT与扫频光源OCT的对比

谱域和扫频光源OCT系统的基本原理相同，但是它们分别结合了不同的技术方法来产生OCT干涉图。SD-OCT系统不含可移动的组件，这样它就具有高机械稳定性和低位相噪声。SD-OCT系统还可以通过采用各种线阵相机来实现各种成像速度和敏感度。

SS-OCT系统采用一个扫频光源和光电探测器来快速生成与SD-OCT系统相同的干涉图。由于扫频激光源的高速扫频，位于每个分立波长的高峰值功率可以用于对样品照明，从而产生更高的敏感度，这几乎不会产生光学损伤的风险。

FD-OCT信号处理

在傅里叶域OCT中，干涉图是以光学频率函数的形式进行探测的。通过参考臂中一个固定的

光学延迟，样品中不同深度反射回的光会与不同频率分量产生干涉图样。再通过傅里叶变换就可以解出不同深度的反射情况，从而可以产生样品的一个深度分布(A-扫描)。

相机基础知识

传感器特性

量子效率和光谱灵敏度

诸如CCD或CMOS之类的相机传感器可将入射光转变为电信号进行处理。这个处理过程并不完善；因为撞击传感器的每个光子不一定都会让传感器产生对应的电子。量子效率(QE)即光子产生电子的平均概率，用转换百分数表示。与具有低量子效率成像器的相机相比，具有高量子效率成像器的相机产生信号所需的光子较少。

量子效率与成像器构成材料(例如，硅)的性能有关。由于硅的波长响应不均匀，QE便也是一个与波长相关的函数。通过下面的曲线图，可以在特定应用的波长范围内比较不同相机的响应率。注意，科研级相机内的行间转移CCD通常印有微透镜阵列，在空间上与像素阵列相匹配。这样，落在光敏像素之外的光子就被重新引导至像素，使传感器获得最大填充因数。

红外截止滤光片

可以使用多种技术，限制或加强在不同的波长范围时的灵敏度。硅探测器的响应扩展到了近红外(NIR)区域；相机的响应要尽量接近人眼响应，这一点在大多数应用中都显得十分重要。因此，硅探测器前面特地安装了一种红外截止滤光片，可以阻隔700 nm以上的信号；

相机噪声和传感器温度

在强光下，选择量子效率足够高的相机就可，然后再考虑其他因素，比如传感器格式、帧率和接口。在低光下，需要考虑量子效率，以及读出噪声和暗电流，见下所述。

噪声源

在相同照明条件下，对相同的物体拍摄几张图片，每个像素记录的信号仍会有所差异。假设照明强度恒定、均匀，相机拍摄图像中的“噪声”是测量信号中空间和时间振动的总和。噪声中含有几部分分量：

- **暗电流散粒噪声 (σ_D)**：即使在没有光子入射到相机上，也会存在暗电流。它是由硅片中自发产生电荷而引起的热现象(价电子经过热激发至导带中)。在曝光过程中，暗电子数量的变化即为暗电流散粒噪声。它与信号高低水平无关，但与传感器的温度有关。随着温度降低，暗电流会减少，因此，冷却相机可以减少相关的暗电流散粒噪声。
- **读出噪声 (σ_R)**：产生电子信号时，就会生成读出噪声，主要是在读出放大器处测量电子的误差造成，这一般由传感器的设计引起，但也会受到相机电路的设计影响。它与信号高低水平和传感器温度无关，大于较快的CCD像素时钟速率。
- **光子散粒噪声 (σ_S)**：该噪声是与落在像素上的光子相关的统计噪声。由于光子的测量结果符合泊松统计结果，光子散粒噪声便与测量信号高低水平有关。它与传感器温度无关。如果光子散粒噪声明显高于暗电流散粒噪声，那么，冷却相机对噪声的改善作用就可忽略不计。
- **固定图形噪声 (σ_F)**：该噪声是由像素效率的空间不均匀性引起的，与信号高低水平和传感器温度无关。注意，在下方的讨论中，固定图形噪声可以忽略不计；对于我们科研级

CCD相机而言，这是一种有效假设，但对于其它非科研级的传感器而言，可能需要考虑该噪声。

图像质量(由信噪比[SNR]表示)是一个比值，即：

- 信号电子的数量，其估算为以下项的乘积：
 - 亮度级，用光子/秒表示的光子通量表示
 - 曝光持续时间(秒)
 - 和量子效率(QE)
- 比，噪声电子的数量，其估算为以下项的正交和：
 - 光子散粒噪声
 - 读出噪声
 - 和暗电流散粒噪声

由光子产生的信号电子，与图像生成、读出和数字化期间产生的噪声电子无法区分。SNR是一种方便的“优值”，以评估在特定条件下，信号电子如何良好地克服系统中的噪声电子。它提供了一种定量比较图像的方法，因为SNR较高通常意味着图像质量有着明显的提高。有关计算SNR的详情，请看[相机噪声教程](#)。

强光成像

强光条件被认为“散粒噪声有限”，意味着光子散粒噪声是噪声的主要来源，而暗电流可以忽略不计。鉴于此，SNR与信号的平方根成比例，这在[完整的教程](#)中有提到。因此，增加曝光时间并不会对图像质量有很大影响。这样，就可以使用QE足够高的任意传感器了。其他考虑，比如成像器尺寸、包装尺寸、成本、接口、快门、触发、配件和软件，可能对选择过程更为重要。通常不要求TE冷却，因为曝光时间很短，暗电流散粒噪声很少。

低光成像

低光条件被认为“读出噪声有限”，意味着光子产生的电子必须克服传感器中的读出噪声，而其他传感器噪声源在这种条件下可以忽略不计。这种情况下，信噪比与曝光持续时间具有线性关系，因此，曝光较长时间拍摄低光图像时，效果明显要好。但是，并不是所有应用都能忍受长时间曝光；例如，视场中强度或运动快速变化的情况。对于低光图像，具有一个读出噪声低、QE高、暗电流慢的成像器有助于成像。正因如此，我们推荐在低光应用中使用我们的科研级CCD或sCMOS相机。曝光持续时间超过大概3到5秒时，TE冷却比较有益。

其他考虑

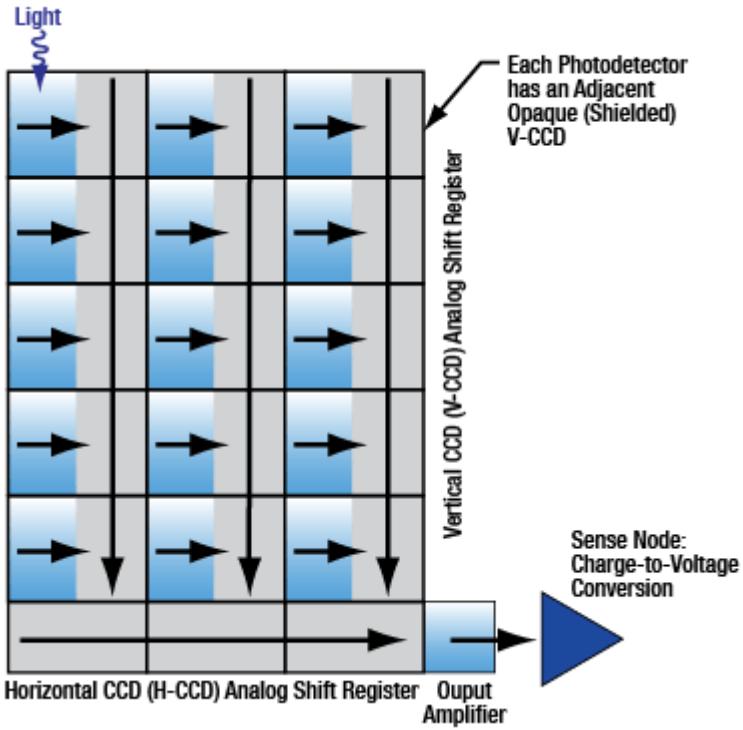
即使暗电流散粒噪声不是总噪声的主要来源，曝光时间长也应该考虑到热电冷却器，因为冷却有助于减少热像素效应。热像素在长时间曝光后会出现“星场”图形。在无光、高增益和长曝光时间下拍摄的样品图像可以在[教程](#)中看到。

相机读出

我们的科研级CCD相机基于行间CCD传感器。该传感器的结构和读出如图 6和右下方视频所示。行间CCD可被视为一种在水平和竖直(H x V)像素阵列上产生二维电荷矩阵的装置。每个像素累积的电荷与曝光期间入射光子的数量成比例。曝光后，电荷矩阵的每个电荷横向移动到相邻的遮光元件中。储存的电荷逐行垂直地移入或移动到水平移位寄存器中。一行电荷被加载到水平移位寄存器之后，电荷会连续移出装置，并转变成电压，用于产生模拟和/或数字显示。这种结构的优势在于，一旦电荷转移到遮光列中，下次曝光便可立即在光敏像素上开始。

读出时钟速率

图 6 中展示了 3×5 网格的简化版 CCD 像素阵列。而简化版的水平读出寄存器为 1×5 。水平移位寄存器末端的三角形代表“传感节点”，电荷在此处转变为电压，然后利用模拟-数字转换器将其数字化。装置的物理特性限制了相机读出图像帧的速率。

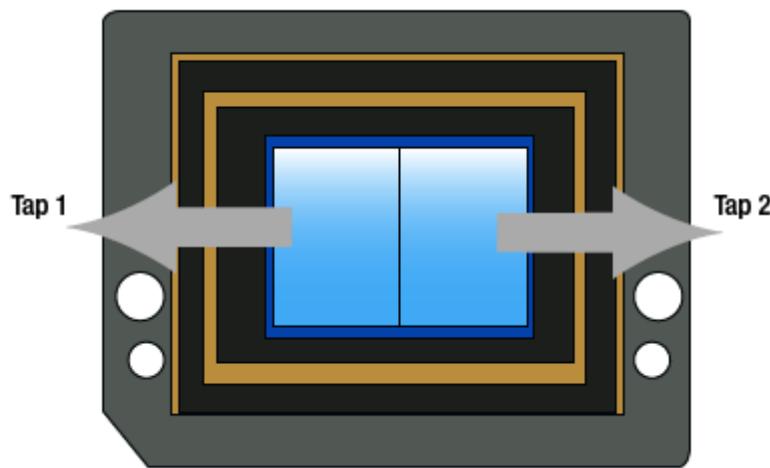


[Click to Enlarge](#)

图 6：示意图显示了行间CCD的电荷转移与读出过程。

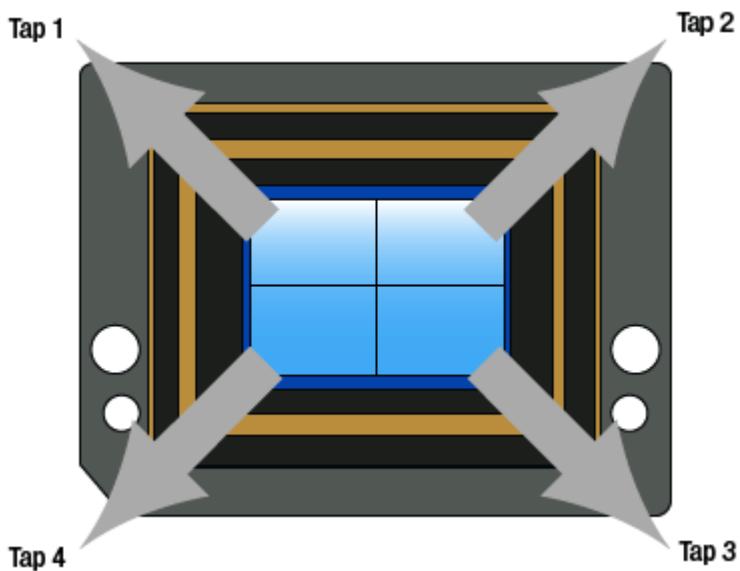
多通道工作

有一种方法可以进一步提高帧率，即将 CCD 分成几个部分，每个部分有自己的输出通道。这些通道可以单独且同时被读出，减少读出像素所需的总时间，从而提高总帧率。我们相机中使用的许多芯片都可以单通道(如视频所示)、双通道(如图 7 所示)或四通道(如图 8 所示)工作。



[Click to Enlarge](#)

图 7：双通道相机图示



[Click to Enlarge](#)

图 8：四通道相机图示

感兴趣区域(ROI)

在子区域读出中，也就是感兴趣区域(ROI)模式中，相机只读出用户选择行的子电荷，并实现较高的有效帧率。在ThorCam应用软件中，通过在显示窗口上绘制任意的矩形区域来选择该区域。ROI上方和下方不需要的行被快速扫描，且不会输出，而所需的行会正常输出。在软件中可以修整不需要的行。这样虽然减小了视场，但图像的空间分辨率得以维持。由于改变ROI会影响读出的行数(不是列数)，因此，只有垂直的ROI尺寸会影响帧率；改变水平的ROI尺寸对帧率没有影响。所得到的帧率并不是ROI尺寸的线性函数，因为额外需要一些时间来扫描不需要的行，以及读出所需的ROI。

像素合并

在像素合并模式中，CCD上用户选择的相邻水平和垂直像素能作为单个像素有效读出。增加合并会降低空间分辨率，但能提高灵敏度和相机帧率，以及所得图像的信噪比。虽然图像的空间分辨率会降低，但速度、灵敏度和SNR得到了改善。

光学系统

成像器尺寸和视场

下面的讨论，我们主要集中于给显微镜物镜搭建的成像系统计算视场；有关使用机器视觉相机镜头时的视场信息，请看我们的[相机镜头教程](#)。

在显微镜系统中，需要知道相机传感器的大小会如何影响能够在给定时间内成像的样品区域。这也就是所谓的成像系统的视场。它的计算方法是用以毫米为单位的传感器尺寸除以成像系统的放大倍率。例如，我们800万像素的传感器具有18.13 mm x 13.60 mm的阵列；放大倍率为

40X时，对应样品平面内 $457\text{ }\mu\text{m} \times 340\text{ }\mu\text{m}$ 的总区域。

选择成像器的尺寸时，还必须与传感器的其他参数相平衡。一般而言，增大传感器的尺寸，会减小最大帧率。

相机传感器的大小一般以“格式”表示。格式指定以分数英寸表示，代表视频管的外直径，视频管的成像对角线最接近数字传感器芯片的对角线。这些尺寸并不十分标准，因此，不同制造商的相同格式，在具体尺寸中，有时甚至是高宽比，都会存在有些差异。图 9以35 mm胶片帧为比例，展示了几种格式的传感器近似尺寸。

下面的总结表列出了我们所有科研级相机的格式和传感器尺寸，分别以像素和毫米为单位。

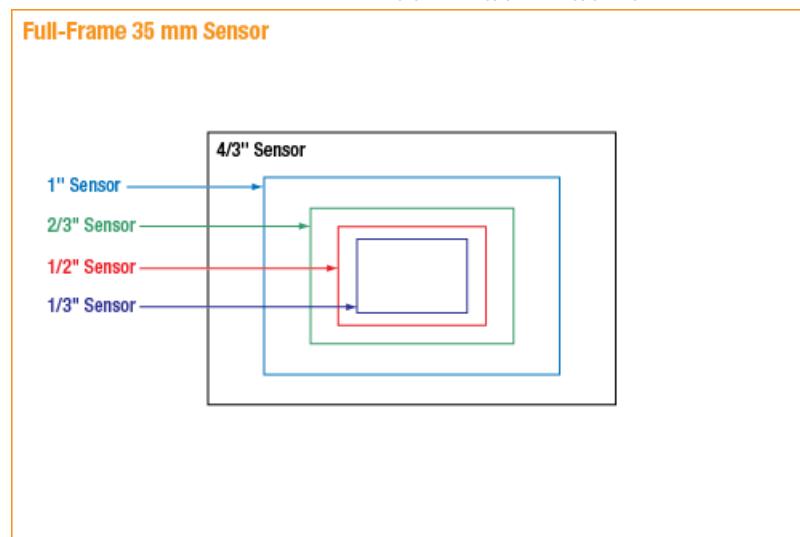


图 9：不同相机格式大小的图示，参考35 mm的全帧幅。请注意，显示的大小和高宽比为近似值，其因特定传感器而异。

Camera Family	Format (Diagonal)	Resolutio n	Pixel Size	Size
Fast VGA CCD	1/3" (5.92 mm)	640 x 480	7.4 $\mu\text{m} \times 7.4\text{ }\mu\text{m}$	4.74 mm x 3.55 mm
1.4 MP CCD	2/3" (11 mm)	1392 x 1040	6.45 $\mu\text{m} \times 6.45\text{ }\mu\text{m}$	8.98 mm x 6.71 mm
Quantalux® 2.1 MP sCMOS	2/3" (11 mm)	1920 x 1080	5.04 $\mu\text{m} \times 5.04\text{ }\mu\text{m}$	9.68 mm x 5.44 mm
Kiralux™ 5 MP CMOS	2/3" (11 mm)	2448 x 2048	3.45 $\mu\text{m} \times 3.45\text{ }\mu\text{m}$	8.45 mm x 7.07 mm
Kiralux™ 5 MP Polarization CMOS	1/1.2" (13.4 mm)	1920 x 1200	5.86 $\mu\text{m} \times 5.86\text{ }\mu\text{m}$	11.25 mm x 7.03 mm
Kiralux™ 2.3 MP CMOS	1/1.2" (13.4 mm)	1920 x 1200	5.86 $\mu\text{m} \times 5.86\text{ }\mu\text{m}$	11.25 mm x 7.03 mm
Kiralux™ 8.9 MP CMOS	1" (16 mm)	4096 x 2160	3.45 $\mu\text{m} \times 3.45\text{ }\mu\text{m}$	14.13 mm x 7.45 mm
4 MP CCD	4/3" (21.4 mm)	2048 x 2048	7.4 $\mu\text{m} \times 7.4\text{ }\mu\text{m}$	15.16 mm x 15.16 mm
8 MP CCD	4/3" (22 mm)	3296 x 2472	5.5 $\mu\text{m} \times 5.5\text{ }\mu\text{m}$	18.13 mm x 13.60 mm

分辨率

人们常将像素数($H \times V$)误解为相机的分辨率。但准确地来说，分辨率是光学分辨率：分辨微小特性的能力。我们下面的讨论将主要集中在使用显微镜物镜的成像系统；有关使用机器视觉相机镜头搭建系统的信息，请看我们的[相机镜头教程](#)。

计算成像系统的分辨率

在成像系统中，分辨率是有极限的。在设计用来限制像差的成像系统中，比如高质量显微镜中，对分辨率的唯一限制来自于衍射。在焦平面处的图像可以被认为是物体每个点独立而重叠的衍射图案的集合。当一个衍射斑或艾瑞斑中心的最大值在另一个衍射斑或艾瑞斑的第一极小值的位置时，两个相邻的点刚好可以被分辨出来。这种情况就是所谓的瑞利准则，可以表示为：

$$R=1.22\lambda/(2NA),$$

此处， R 为两个艾里斑之间的距离， λ 为光的波长， NA 为显微镜物镜的数值孔径。例如，数值孔径为0.75的物镜，分辨率为 $(1.22*550 \text{ nm})/(2*0.75) = 0.45 \mu\text{m}$ 。

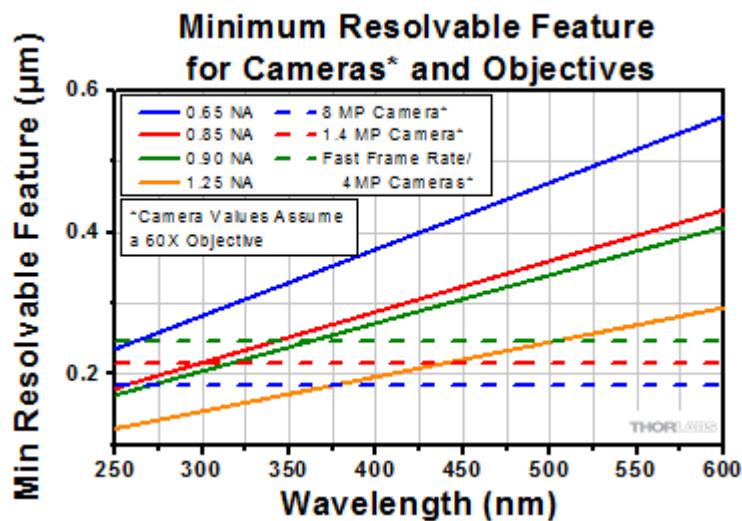
确定所需的相机像素大小

显微镜的物镜也具有放大倍率；该值表示样品在图像平面的放大量。例如，2倍物镜生成的图像尺寸为原物体的两倍。因此，如果使用数值孔径为0.75、放大倍率为40倍的物镜，在550 nm的光下，样品的分辨率极限为 $0.45 \mu\text{m}$ 。样品中长度为 $0.45\mu\text{m}$ 的特征将在图像中放大40倍，使得该特征在图像平面处长为 $17.9 \mu\text{m}$ 。

为了精确地表示CCD或CMOS相机离散成像阵列上的图像，需要运用奈奎斯特准则，即图像可分辨的最小特征需要传感器以两倍该速率采样；也就是说，需要(至少)两个像素捕获每个光学可分辨特征。在上面数值孔径为0.75、放大倍率为40倍的物镜例子中，这就意味着像素大小需要小于或等于 $8.9 \mu\text{m}$ ，因此，至少需要两个像素才能准确地呈现最小可分辨特征的图像。最后一个例子中，成像的光学元件是成像系统分辨率的限制因素；但是，有些物镜(尤其是放大倍率值较低的物镜)可分辨的最小特征可能太小，以致无法通过相机成像。例如，数值孔径为0.13、放大倍率为4倍的物镜，在550 nm的光下，可分辨的最小特征长为 $2.58 \mu\text{m}$ ，这就要求相机像素大小为 $5.2 \mu\text{m}$ 。由于我们相机的最小像素尺寸为 $5.5 \mu\text{m}$ ，相机就成为了该成像系统中的限制因素；而可以成像的最小样品特征为 $3.7 \mu\text{m}$ 。

分辨率与波长

分辨率与波长成比例关系，因此，需要考虑成像波长对分辨率的影响，因为它与特定的成像系统有关。图 10为几种数值孔径的物镜(实线)投影图像尺寸与波长关系的曲线图。图中还给出了假设都使用60倍物镜时，每种相机类型可分辨的最小特征(图 10中的虚线)。



[Click to Enlarge](#)

图10：该曲线图显示了几种数值孔径的物镜(实线)可分辨的最小样品特征与波长的函数关系。还给出了我们每种相机可分辨的最小样品特征曲线图(虚线)，都以放大倍率60倍为例绘制。

图 10 呈现了成像系统中分辨率的一个重要细节。波长越短，越接近紫外波段，物镜可以成像的最小尺寸越小。但是，给这些较小的特征成像也要求较小的相机像素。实线位于虚线下方处的特征无法通过相机成像(相机成为了该成像系统的限制因素)；与此相反，实线位于虚线上方处的特征能够通过相机成像(物镜成为了该成像系统中的限制因素)。

其他考虑

该分析表明，具有较小像素的相机将总是优于具有较大像素的传感器。但是，光子通量相同时，较小的像素通常收集的光子也较少，因此，量子效率值通常较低。由于收集的光子较少，收集的信号便也较低，信噪比就不佳。因此，需要平衡像素大小与实验噪声的要求。

套筒透镜的影响

现代显微镜物镜为无限远矫正物镜，因此需要套筒透镜。通过假设特定的套筒透镜焦距，计算物镜的指定放大倍率。每个显微镜制造商都采用不同的套筒透镜焦距，如右表所示。因此，组合不同制造商的光学元件，或在自定义成像系统中使用不同焦距的透镜时，需要计算物镜的有效放大倍率，然后再用其计算系统的放大倍率。

物镜的有效放大倍率可以用以下式子表示：

$$\text{Effective Objective Magnification} = \text{Design Magnification} \times \frac{f_{\text{Tube Lens in Microscope}} \text{ (mm)}}{f_{\text{Design Tube Lens of Objective}}} \text{ (mm)}$$

此处，Design Magnification为印在物镜上的放大倍率， $f_{\text{Tube Lens in Microscope}}$ 为所使用显微镜中套筒透镜的焦距， $f_{\text{Design Tube Lens of Objective}}$ 为物镜制造商用于计算Design Magnification的套筒透镜焦距。

渐晕

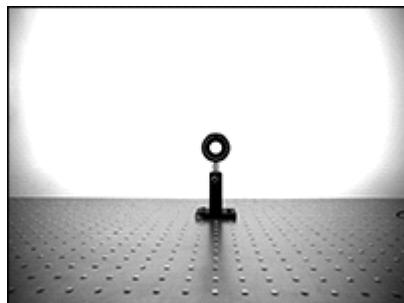
相机焦平面处形成的光学图像小于相机格式时，就会发生渐晕效应。在这种情况下，传感器区域并未完全曝光，使得图像边缘出现暗环。渐晕效应如图 11 所示，两张图片都使用相同的 4/3 英寸相机([8051M-GE](#))拍摄所得。更多有关将机器视觉透镜集成到成像系统中的信息，请看我

们的相机镜头教程。

显微镜中也有同样的渐晕效应，通过简单的计算，就可以知道物镜和套筒透镜生成的图像(通常为圆形)能不能填满矩形成像器。为了估算相机焦平面的图像大小(用mm表示)，可以利用物镜的视场数(FN)。在给定物镜的情况下，它表示图像平面(即相机传感器)视场的直径(用mm表示)。如果该尺寸大于成像器的对角线，那么渐晕就不会成为问题。请注意，该计算并不包含物镜透镜设计的影响；例如，可能存在图11中所示的像差或轻微渐晕。

如果整个显微镜的放大倍率与物镜标明的放大倍率不同，可能是由不同焦距的套筒透镜或放大型相机套筒造成，那么，相机传感器产生的视场数也会有所不同。视场数可根据下式计算：

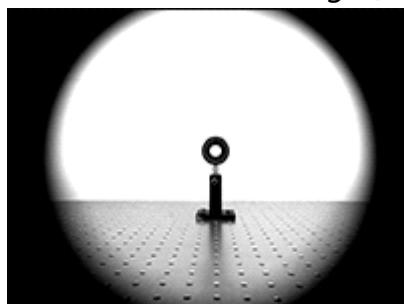
$$\text{Effective FN} = \text{Design FN} \times (\text{System Magnification} / \text{Design Objective Magnification}).$$



[Click to Enlarge](#)

a: 4/3" Format Lens, FL = 12 mm

Click [Here](#) for Raw Image (3296 x 2472)



[Click to Enlarge](#)

b: 2/3" Format Lens, FL = 12 mm

Click [Here](#) for Raw Image (3296 x 2472)

图 11：渐晕效应在上面的两张图片中有所体现。两张图片都使用相同的4/3英寸相机拍摄所得。**a:** 使用焦距为12 mm的4/3英寸透镜产生的完整图像，边缘稍稍变暗。这种轻微的渐晕效应源于透镜设计，即在透镜的边缘处降低了透射率。**b:** 使用焦距相同的2/3英寸透镜，图片边缘产生了明显的暗环。

系统集成

相机接口

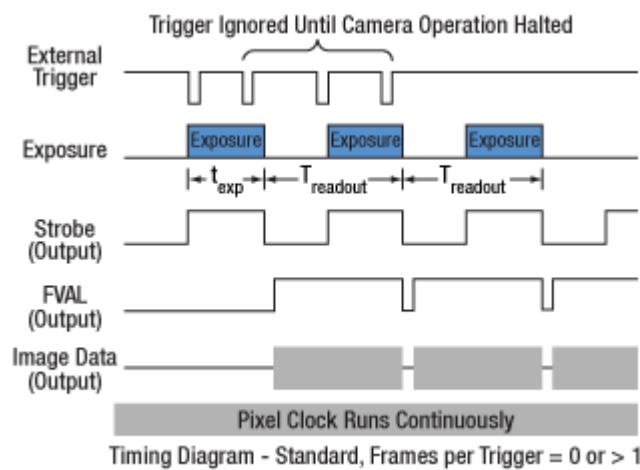
提供三种接口选项：USB 3.0、Gigabit Ethernet (GigE)和Camera Link。确定了诸如视场和帧率等相机的其他参数之后，需要为我们多种多样的相机类型选择一种接口。重要的是，确保计算机系统满足或超过了右边列出的推荐要求；否则，可能会导致丢失帧数，尤其有可能发生在相机图像直接传输到存储媒体期间。

定义

- **相机帧率**: 相机每秒生成的图像数量，与相机型号和用户选择的设置有关。
- **有效帧率**: 主机的相机软件每秒接收的图像数量，其取决于所选接口硬件(芯片组)的限制、CPU性能以及争夺主机资源的其他装置和软件。
- **最大带宽**: 数据通过接口从相机传到主机PC的最大速率(用bits/秒或bytes/秒表示)。假设主机PC能够以此速率接收和处理数据，最大带宽即为接口的指定性能基准。接口的最大带宽较高，通常也会支持较高的相机帧率，但接口的选择本身并不会提高相机的帧率。

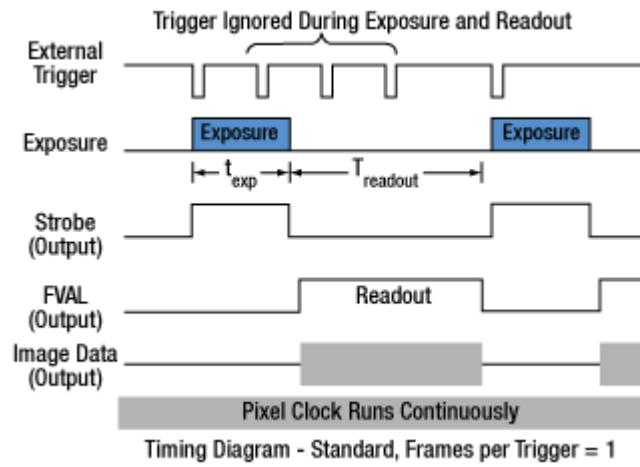
触发相机工作

我们的科研级相机具有三个外部触发工作模式：流式重复曝光、异步触发采集和B门曝光，由外部产生的触发脉冲驱动。这些触发模式的操作与读出设置(例如，20或40 MHz；像素合并)无关，也与增益和偏移无关。图 12至图 14为这些触发模式的时序图，前提假设触发信号是有效低电平外部TTL触发。



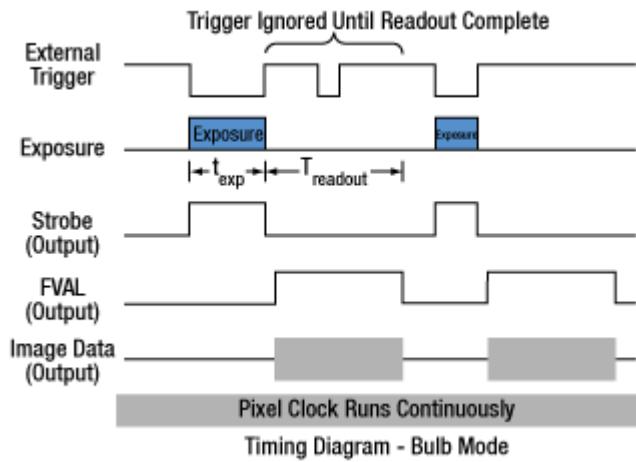
[Click to Enlarge](#)

图 12: 流式重复曝光模式。当外部触发变低时，曝光开始，并在软件上选择的曝光时间内持续曝光，然后再读出。该序列再以设定的时间间隔重复。忽略后续外部触发，直到相机工作暂停为止。



[Click to Enlarge](#)

图 13: 异步触发采集模式。当外部触发信号变低时，开始预设时间的曝光，再从相机读取该曝光。在读出过程中，忽略外部触发。一旦完成单次读出，相机仅会在外部触发信号变低时开始下一次曝光。



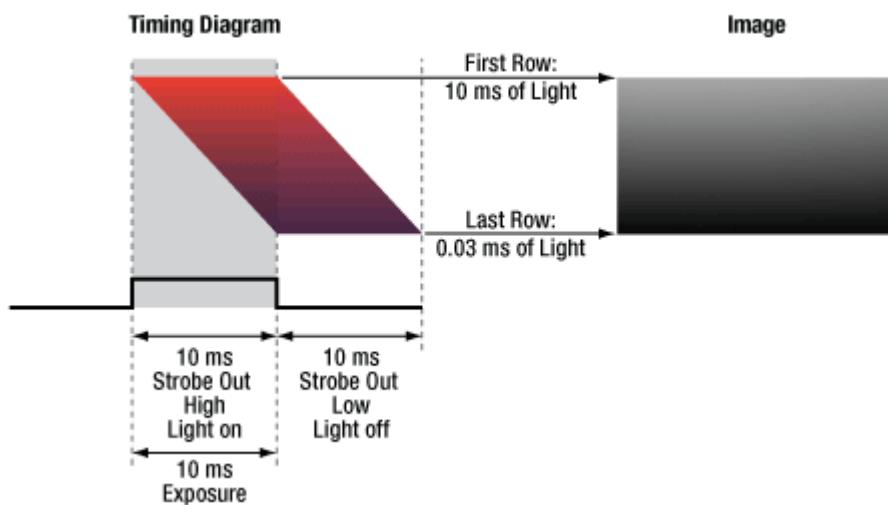
[Click to Enlarge](#)

图14：B门曝光模式。当外部触发信号变低时，曝光开始，当外部触发变高时，曝光终止。忽略相机读出过程中的触发信号。

等效曝光脉冲(EEP)模式

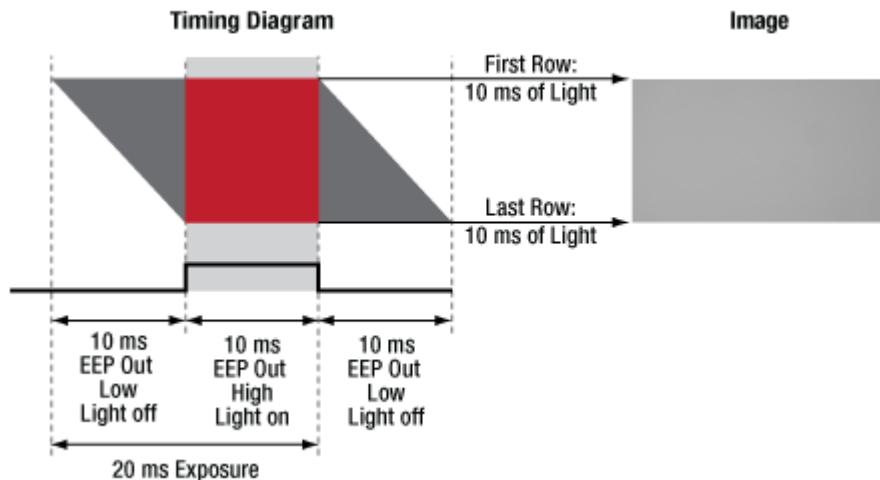
CMOS传感器通常具有卷帘快门，这意味着每行开始依次获取电荷，这点与CCD传感器的全局快门不同，后者是同时采集电荷。如果触发启用外部光源，产生一段曝光时间，由于不同行被照明的时间长度不同，会在图像上形成梯度。等效曝光脉冲(EEP)是通过Quantalux相机的I/O接头输出的信号。在ThorCam设置对话框中选择该模式，只有在CMOS传感器的滚动复位功能完成之后，STROBE_OUT信号的重新配置才有效。该信号会保持有效状态，直到传感器的滚动读出功能启用。这就意味着，信号只有在所有传感器像素都被复位并在有效积分的时间段内才有效。所产生的图像不会显示滚动复位传感器典型的曝光梯度。图5给出了选通驱动曝光的实例，其中使用STROBE_OUT触发外部光源；所得到的图像显示出梯度，因为并不是所有的传感器行在光源打开时的相同时间长度上积分电荷。图6给出了EEP曝光的实例：曝光时间延长，触发输出信号移动到所有行都积分电荷的时间，从而产生在整个帧上具有相等照明度的图像。

请注意，EEP对持续照明的图像没有影响。使用EEP模式必须满足几个条件；这些条件在[用户指南](#)中有详细说明。



[Click to Enlarge](#)

图5：使用STROBE_OUT在曝光时间内触发外部光源的时间实例。由于传感器行在与光源启用时间长度相同的时间段内不积分电荷，因此在图像上形成梯度。



[Click to Enlarge](#)

图6：使用EEP曝光的时间实例。该图像没有梯度，因为EEP信号仅在所有传感器行都积分电荷时触发光源。

相机噪声和温度

介绍

相机镜头教程

光圈

镜头的光圈可以控制镜头的采光量；镜头采光越多，画面越明亮。因此，光圈的大小影响着曝光时间，进而影响着相机的速度。在下表中，Thorlabs用光圈值表示每个透镜的最大孔径尺寸，符号为f/(比如f/1.4)。光圈值越大，光圈的开口越小，镜头采光越少。

具体来说，光圈值表示为：

$$f/\# = \frac{f}{d}$$

其中，f/#为光圈值，f为焦距，d为入瞳直径。

采光量很大(即低光圈值)的相机镜头称之为快速镜头，因为它们可以使用较短的曝光时间，非常适合亮度较弱的情况。例如，焦距为50 mm、光圈值为f/1.4的镜头，光圈较大，因此，其速度比同焦距下光圈值为f/2.5的镜头要快。尽管使用较大光圈可以增加采光量，但会降低在轴线上图像可聚焦的范围，也就是景深。为了直观地表示不同光圈尺寸的效果，下表中展示了用相同镜头(DCU224C 1/2英寸相机上的MVL12M43镜头)、增加光圈值拍摄的一系列图像。由于拍摄照片的曝光时间恒定，每增加(以~1.4的系数增加)一次光圈值，采光量就减半。

Aperture Size	Effects (Click Photos to Enlarge)						
f/2	f/2.8	f/4	f/5.6	f/8	f/11	f/16	f/22



焦距

焦距(FL)大致是指从主平面到焦平面的距离。对于相机镜头来说，焦距决定了相机系统的视场；焦距越长，视场越小。一般而言，焦距为50 mm的镜头与 35 mm的相机组合基本会形成与人眼(对角线的视角~53°)相同的视场。下表列出了对于不同传感器规格，达到与人眼相同的视场所需的焦距。

根据图像视场可将镜头分为三个基本类型。焦距接近传感器规格的对角线长的镜头，可在接近人眼视场的范围内形成图像，因而被视为用于这种传感器规格的“标准”镜头。焦距比标准镜头短的镜头为广角镜头，可以产生更大的视场，但在图像边缘容易产生桶形畸变效应。还有一种镜头的焦距比标准镜头的长，称之为长焦镜头，其视场较小，可以以更大倍率放大图像中的物体。

结合不同规格的相机传感器与镜头

相机传感器规格指定现代相机使用CCD或CMOS传感器，同样，特定相机规格也指定了相应镜头，以产生最佳成像效果。这种规格指定(例如，1/2英寸、2/3英寸、4/3英寸)自使用阴极射线管记录视频时早已约定俗成，是指给定图像尺寸所需显像管的外直径。右图体现了几种标准相机规格之间的尺寸差异。在理想的成像系统中，会将相机和镜头设计为同样的规格，其实，实际过程中也有可能使用不同规格的相机/镜头组合。但这样做会产生渐晕或裁切效应。

渐晕

当镜头规格小于相机规格时就会产生渐晕。这种现象发生时，传感器区域没有完全曝光，使图像边界附近出现暗环。下面两张使用同款4/3英寸相机拍摄的图像，展现了渐晕效应。左图中，使用焦距为12 mm、规格为4/3英寸的镜头拍摄的全图，边缘附近微微变暗。此例渐晕效应的产生归因于镜头的设计，其在镜头边缘的透射率较低。第二张图中使用了相同的焦距，但规格为2/3英寸的镜头，拍摄的图片边缘附近产生了一个很突出的暗环，效果非常明显，因此，我们建议，不要使用规格小于相机传感器的镜头成像。

裁切

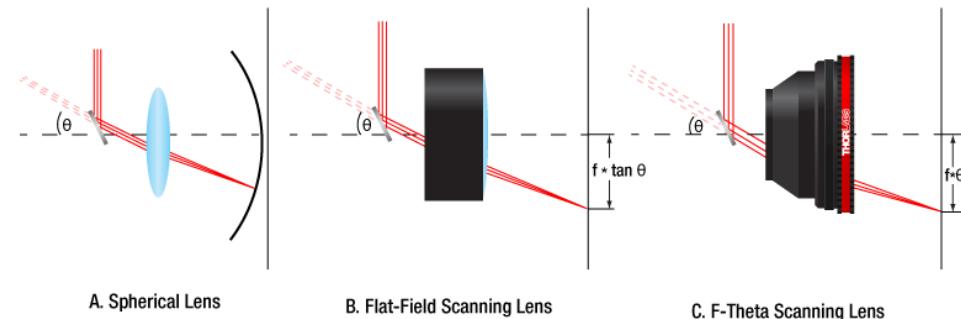
当镜头规格大于相机规格时，拍摄的图像上会产生裁切画面效应。在这种情况下，产生的全图尺寸比较小(也就是被裁切了)，因为传感器只捕捉到完整图像的一部分。裁切系数或焦距倍数可以量化裁切量，被定义为镜头设计规格的对角线长度与传感器规格的对角线长度的比值。右表中给出了所有尺寸为1/3英寸、1/2英寸、1/1.8英寸、2/3英寸、1英寸和4/3英寸镜头/传感器组合的裁切系数。

Crop Factors for Different Sensor/Lens Combinations							
Sensor Format	Lens Design Format						
	1/3"	1/2"	1/1.8"	2/3"	1/1.2"	1"	4/3"
1/3" (6 mm Diagonal)	1	1.33	1.50	1.83	2.22	2.67	3.83

1/2" (8 mm Diagonal)	-	1	1.13	1.38	1.66	2.00	2.88
1/1.8" (9 mm Diagonal)	-	-	1	1.22	1.48	1.78	2.56
2/3" (11 mm Diagonal)	-	-	-	1	1.21	1.45	2.09
1/1.2" (13.3 mm Diagonal)	-	-	-	-	1	1.2	1.73
1" (16 mm Diagonal)	-	-	-	-	-	1	1.44
4/3" (23 mm Diagonal)	-	-	-	-	-	-	1

远心透镜教程

F-Theta透镜



[Click to Enlarge](#)

图 1 - 扫描透镜

远心透镜类型

为了完成远心透镜的设计，所有的主光线(从轴外点发出且通过孔径光阑中心的光线)都必须在像空间或(和)物空间中与光轴平行。对于物空间远心透镜，主光线在透镜物方所在边(物空间)将平行于光轴。要做到这一点，必须使孔径光阑位于透镜前焦平面，于是入射光瞳处于无穷远。由于主光线指向入射光瞳中心，透镜物方所在边的主光线将与光轴平行。图1为物空间远心透镜的一个实例。

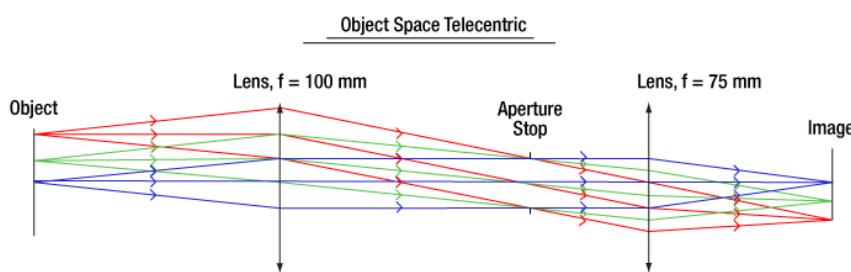


图 1：光通过理想物空间远心透镜系统。注意，主光线(每种颜色组的中心线)在物空间平行于光轴，但是在像空间主光线与光轴有一夹角。

对于像空间远心透镜，主光线在透镜像方所在的一边(像空间)将与光轴平行。要做到这一点，必须使孔径光阑位于透镜后焦平面，于是出射光瞳处于无穷远。由于主光线必须通过出射光瞳的中心，主光线在透镜像方所在的一边必须与光轴平行。对于双远心透镜，前后焦平面互相重叠，使得孔径光阑位于入射光瞳和出射光瞳都在无穷远的地方。对于双远心透镜，物体和图像所在位置都不会影响放大率。Thorlabs的远心透镜都是双远心透镜。图2为光通过远心透镜的

实例说明，它描述了主光线通过系统的方式。

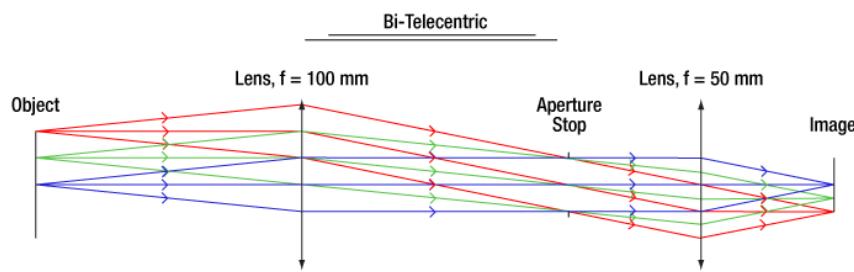


图2：光通过理想双远心透镜系统。注意，主光线(每种颜色组的中心线)在物空间和像空间都与光轴平行，这意味着不管物距大小放大率都将保持恒定。

传统透镜

对于传统透镜，入射光瞳和出射光瞳都不在无穷远，所以主光线都不与光轴平行。这样，放大率将取决于物体与透镜的距离以及物体在视场中的位置。图3为光通过传统透镜的实例说明；可以看到主光线在物空间和像空间都与光轴成一夹角。注意，图2和图3使用了相同的透镜设计；唯一的区别在于，孔径光阑的位置改变使透镜从远心系统变成非远心系统。

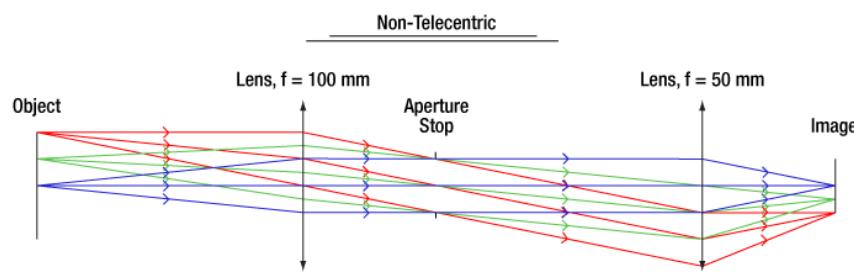


图3：光通过理想的传统相机透镜系统。注意，主光线(每种颜色组的中心线)在物空间和像空间都不与光轴平行，这意味着放大率都将随物距变化而变化。

成像实例

图4和图5分别为远心透镜和标准相机透镜拍摄的照片。对于远心成像系统(图4)，即使各自的物平面沿着光轴分开约45 mm，两个螺丝的高度看起来相同。对于传统成像系统(图5)，两个螺丝高度看起来不同，因此基于传统成像透镜的机器视觉系统将导致尺寸测量误差。

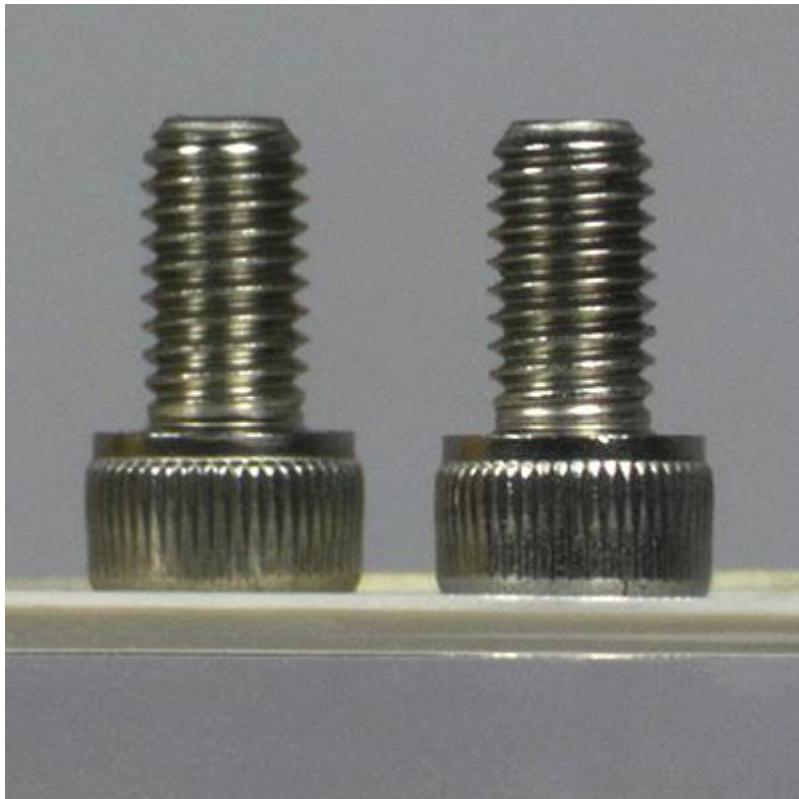


图 4：使用上一代MVT23013 0.128X远心透镜的两个相同8-32带帽螺丝的成像图片。虽然螺丝看起来尺寸相同且位于同一物平面，但实际上它们沿光轴分开约45 mm。

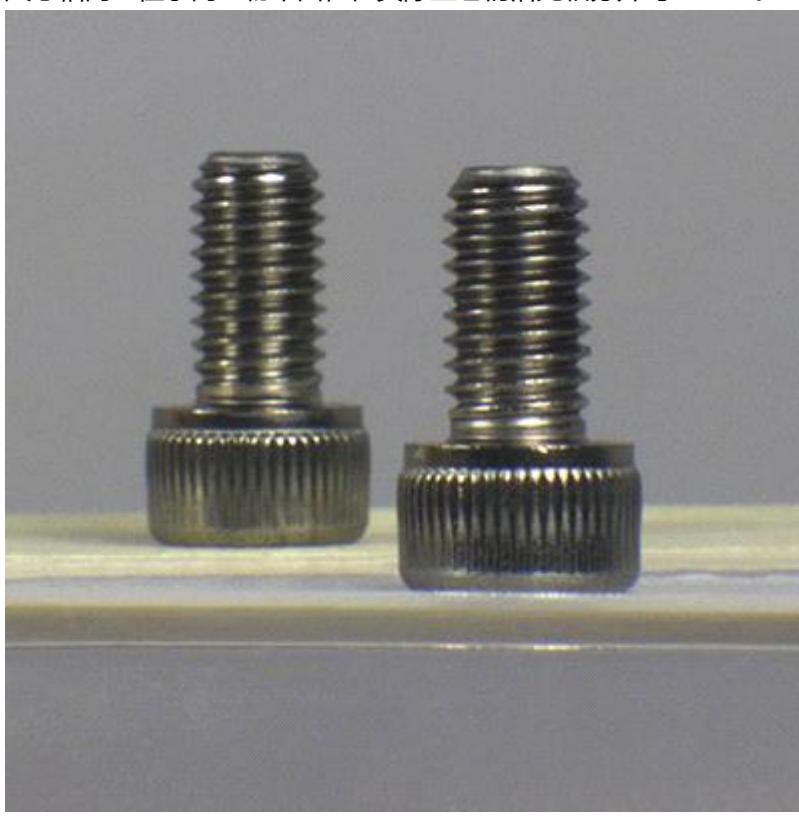


图 5：使用[MVL7000](#)传统变焦透镜成像的两个相同螺丝的图片。此图中，由于两螺丝分开而产生的视觉误差将导致高度测量错误。

物镜类型

干、油浸和水浸物镜

这些名称涉及到物镜前方和显微镜盖玻片之间存在的介质。干物镜是指物镜和样品之间为空气时效果最佳的物镜，而油浸物镜则要求在物镜前方和载波片之间使用一滴油(例如MOIL-30)，且这滴油与物镜和盖玻片都需要物理接触。为了达到大于1.0的数值孔径，需要使用油浸物镜。水浸法(盖玻片)物镜指物镜和载玻片之间使用一滴水时，效果最佳，而水浸物镜要求直接与载玻片接触。注意，如果浸入式物镜使用时没有浸入介质，图像质量会非常低。

平场消色差和复消色差物镜

“平场”是指这类物镜在视场中能产生一个平面的像。“消色差”是指在物镜镜头的设计上整合了色差校正的特性。这类物镜针对两种波长进行了色差校正，且对一种波长提供球差校正。平场消色差物镜在绿光下具有最佳成像效果。该页面上的复消色差透镜对三种波长进行了色差校正，对两种或四种波长进行了球差校正。在白光下，平场消色差物镜能够产生良好的彩色显微摄影图像，但效果比不上矫正性能更佳的物镜，比如复消色差物镜或下面的平场萤石物镜。

平场萤石物镜

平场萤石物镜，也称为平场半复消色差物镜、平场荧光物镜或平场氟石物镜，它也能在视场中产生一个平面的像。平场萤石物镜针对两到四种波长进行了色差校正，针对三到四种波长进行了球差校正。与平场消色差物镜相比，平场萤石物镜不仅能对更多波长进行校正，还能在设计波长之间实现更小的像差。平场萤石物镜也能产生非常好的彩色显微摄像图像。

超消色差物镜

Thorlabs的超消色差物镜在可见光波段具有轴向色差矫正性能。它们在宽视场范围内提供衍射极限轴向消色差功能，且在整个视场不会有渐晕效果。超消色差物镜的数值孔径高，非常适用于宽场成像和低光环境。

放大倍率

物镜的放大倍率是指套筒透镜的焦距(L)对物镜焦距(F)的比值：

$$M = L / F.$$

系统的总放大倍率为物镜放大倍率与目镜或相机套筒放大倍率的乘积。只要物镜与套筒透镜的焦距兼容，显微物镜外壳上指明的放大率就是准确的。

数值孔径(NA)

数值孔径用来衡量物镜接收角的范围，它是一个无量纲量。通常表示为

$$NA = ni \times \sin \theta_a$$

其中 θ_a 是物镜最大接收角的1/2， n 是浸渍介质的折射率。这个介质通常是空气，但也可以是水、油或其它物质。

齐焦长度

也称为齐焦距离，是指物镜顶部(安装螺纹的底部)到盖玻片底部(或不使用盖玻片时到样本顶部)的距离。不同制造商，甚至同一制造商规定的齐焦长度都可能不同。例如Thorlabs所造物镜的齐焦长度有60 mm和95 mm，许多Olympus和Zeiss物镜的齐焦长度为45 mm，Nikon和Leica物镜的标准齐焦长度为60 mm。而且，有些制造商也提供齐焦长度为75 mm的超大型物镜。在必须使用具有不同齐焦长度的物镜时，就需要[齐焦延长器](#)。

工作距离

这是指物镜前表面到盖玻片或样本之间的距离，取决于物镜的设计。盖玻片厚度的标识刻在物镜上，指明是否需要使用盖玻片。

视场数

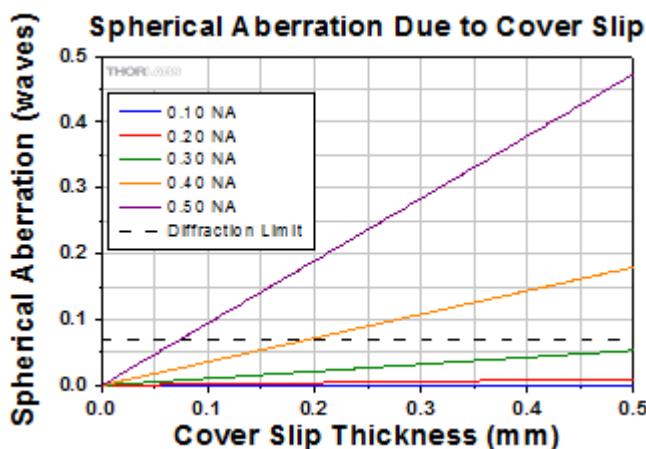
视场数等于视场的大小(mm)与物镜放大倍率的乘积。

$$FN = \text{视场直径} \times \text{放大倍率}$$

盖玻片校正和校正圈(环)

一般盖玻片的厚度为0.17 mm，但由于制造过程存在差异，其实际厚度可能不尽相同。有些物镜上的校正环通过调节内部光学组件的相对位置，可对盖玻片的不同厚度进行补偿。需要注意的是，许多物镜没有可变的盖玻片校正(例如，将物镜设计为仅与厚度为0.17 mm的标准盖玻片一起使用)，在这种情况下，物镜没有校正环。

右图展现了在632.8 nm时，球面像差的大小与所使用盖玻片厚度的关系。盖玻片厚度为典型值0.17 mm时，由盖玻片引起的球面像差不超过数值孔径最大为0.40的物镜的衍射极限像差。



该曲线图显示了在632.8 nm时，盖玻片对成像质量的影响

例 1: 相机放大率

相机成像时，图像的放大倍率为物镜放大率与相机套筒放大率的乘积。例如，如果使用20X的尼康物镜和0.75X的尼康相机套筒，那么，该相机成像的放大率为 $20X \times 0.75X = 15X$ 。

例 2: 三目镜放大率

三目镜成像时，图像的放大倍率为物镜放大率与三目镜的目镜放大率的乘积。例如，如果使用20X的尼康物镜和带10X目镜的尼康三目镜，那么目镜处的成像放大倍率为 $20X \times 10X = 200X$ 。请注意，该图像并不会通过相机套筒成像。

物镜的有效放大率可根据Equation 1计算：

$$\text{Effective Objective Magnification} = \text{Design Magnification} \times \frac{f_{\text{Tube Lens in Microscope}} \text{ (mm)}}{f_{\text{Design Tube Lens of Objective}} \text{ (mm)}} \quad (\text{Eq. 1})$$

此处，设计放大率(Design Magnification)为印在物镜上的放大率， $f_{\text{Tube Lens in Microscope}}$ 为你在显微镜中所使用的透镜套筒的焦距， $f_{\text{Design Tube Lens of Objective}}$ 为物镜制造商用来计算设计放大率所使用的透镜套管的焦距。右表中给出了这些焦距。

请注意，Leica、Mitutoyo、Nikon和Thorlabs使用的套筒镜头焦距相同；组合其中任意一家制造商生产的元件，无需进行该计算转换。算出有效物镜放大率之后，就可参照之前所述计算系统的放大率了。

例 3: 三目镜放大率(不同制造商)

三目镜成像时，图像放大率为物镜放大率与三目镜的目镜放大率的乘积。此例中使用了20X的奥林巴斯物镜和带10X目镜的尼康三目镜。

根据Equation 1和右表，可以计算出尼康显微镜中奥林巴斯物镜的有效放大率：

$$\text{Effective Objective Magnification} = 20X \times \frac{200 \text{ mm}}{180 \text{ mm}} = 22.2X$$

奥林巴斯物镜的有效放大率为22.2X，三目镜的目镜放大率为10X，因此目镜处的成像放大率为 $22.2X \times 10X = 222X$ 。

相机成像的样品区域

样品在相机上成像时，样品区域的尺寸取决于相机传感器的尺寸和系统放大率，如Equation 2所示。

$$\text{Sample Area (mm} \times \text{mm}) = \frac{\text{Camera Sensor Width (mm)}}{\text{System Magnification}} \times \frac{\text{Camera Sensor Height (mm)}}{\text{System Magnification}} \quad (\text{Eq. 2})$$

相机传感器的尺寸可由制造商给出，而系统放大率为物镜放大率与相机套筒放大率的乘积(见例1)。如有需要，可调整物镜的放大率，请见例3。

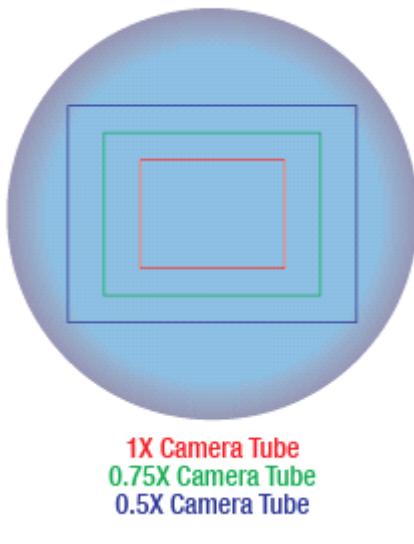
放大倍率增大，分辨率提高，但视场会变小，如右图所示。

例 4：样品区域

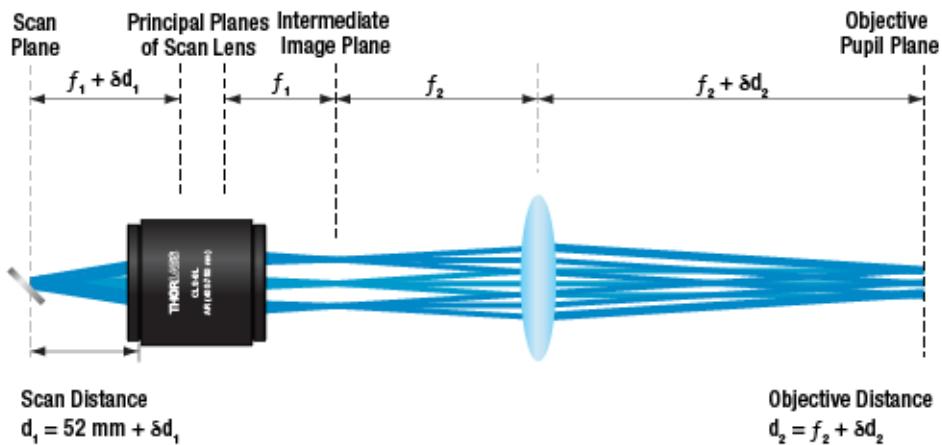
Thorlabs [1501M-USB](#)科研级相机里面的传感器尺寸为8.98 mm x 6.71 mm。如果该相机使用例1中的尼康物镜和尼康三目镜，系统的放大率就为15X，图像区域为：

$$\text{Sample Area (mm} \times \text{mm}) = \frac{8.98 \text{ mm}}{15X} \times \frac{6.71 \text{ mm}}{15X} = 599 \mu\text{m} \times 447 \mu\text{m}$$

Sample Area When Imaged on a Camera



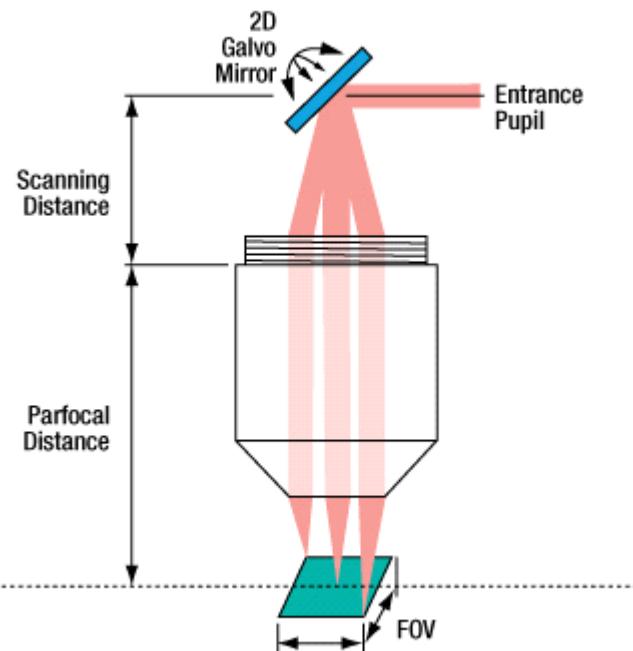
下方的图显示了扫描距离与物镜距离之间的关系。在理想的4f光学系统中(以CLS-SL为例)， $d_1 = 52 \text{ mm}$ (最短扫描距离)和 $d_2 = f_2$ 。但是，许多实际应用中的系统会稍微偏离这种理想的对准效果。例如，许多商用显微镜的物镜距离(d_2)与焦距(f_2)不一样，因此需要调整距离。右下图显示了扫描距离与物镜距离分别稍稍移动 δ_1 和 δ_2 时，两值之间的关系为 $\delta d_1 = -\delta d_2 * (f_1/f_2)$ 。



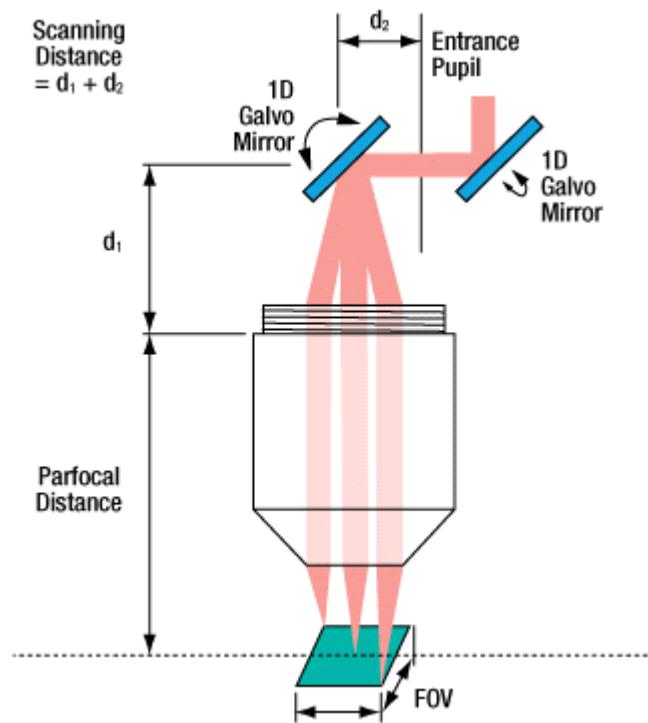
[Click to Enlarge](#)

上图显示了常用激光扫描系统中透镜的放置。

如果成像系统使用了两个振镜反射镜(一个在X方向扫描，另一个在Y方向扫描)，入射光瞳就位于两个振镜反射镜之间，如右下图所示。扫描距离即为透镜安装表面到最靠近透镜的反射镜轴心点的距离(d1)，加上从该反射镜轴心点到入射光瞳的距离(d2)。值得注意的是，需要最大程度地减少两个振镜反射镜之间的距离，因为当入射光瞳与光束轴心点不重合时，图像的质量会降低。这主要归因于光束扫描样品时的光程差异。下面为包含单个和两个振镜反射镜的成像系统示意图。



使用单个振镜反射镜时，入射光瞳位于反射镜的轴心点。



使用两个振镜反射镜时，入射光瞳位于两个反射镜之间。

激光扫描显微镜(LSM)

任何显微镜的目的都是为了生成高对比度、高分辨率的图像。望远镜可以让科学家分辨出宇宙最精细的细节，与此相同，显微镜可以让我们以纳米的尺度观察生物机能。现代激光扫描显微镜能够生成多维数据(X、Y、Z、τ、λ)，超高分辨率的成像能力促进了人们对基础生物学过程的理解。

在传统的宽场显微镜(图1)中，只有使用较薄的样品(一般只有一层或两层细胞的厚度)时才能获得高质量的图像。然而，很多应用都要求对较厚的样品进行成像，并要求获得特定焦平面附近的体数据集或选择区域数据。传统的宽场显微镜是不能满足这些要求的。

LSM，特别是[共聚焦激光扫描显微](#)(CLSM)和[多光子激光扫描显微](#)(MPLSM)，能够观察厚块状样品中的薄平面，该技术被称为光学层析。在共聚焦LSM中，焦平面以外样品产生的信号被光阑挡住，防止被探测。多光子LSM，正如我们之后将讨论的，它不会生成任何焦平面以外的可探测信号。通过将光学层析和焦平面的递增变化相结合(图2)，激光扫描显微技术能够产生厚样品的三维形貌。

图 1 宽场Epi-荧光

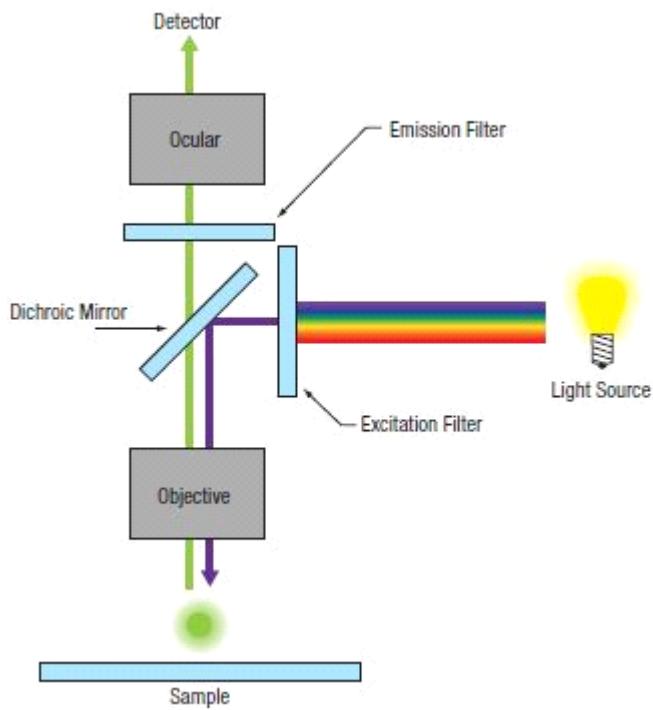
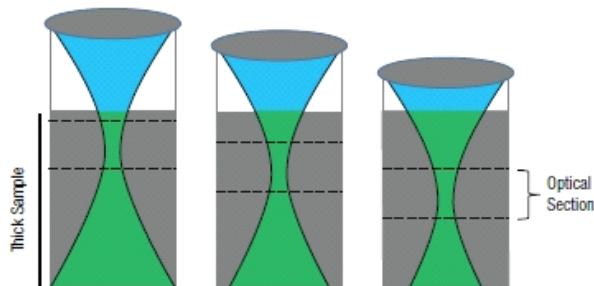
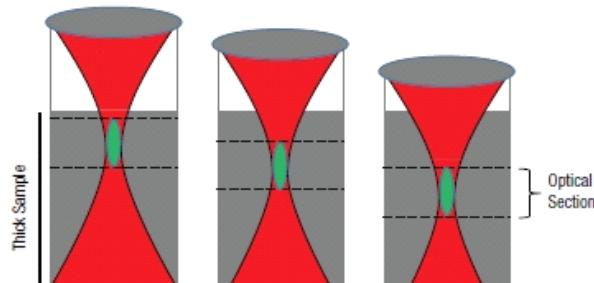


图 2 光学层析(厚块状样品中薄平面的可视化)

共聚焦中的光学层析



多光子中的光学层析



样品产生的信号为绿色所示。光学层析是通过直接测量特定焦平面上产生的信号而生成的。在共聚焦LSM中，离焦光信号被针孔光阑遮挡，这样就可以得到更高的分辨率。相对地，在多光子显微技术中，只有焦平面位置的样品才会产生信号。每个光学层析的光信号都可以重新结合构成一幅三维图像。

LSM的对比度机制

生物样品往往没有良好的对比度，导致很难区分相邻结构之间的界线。改善激光扫描显微镜对比度的常用方法是使用荧光。

在荧光照明中，使用发光分子将感兴趣的部分与背景或相邻结构区分开来。这种发光分子可以预先存在于样品中(内源性或自体荧光)，外涂并附加到样品成分上(化学构成或通过抗体结合)，或转染(荧光蛋白)到细胞之中。

为了使分子发光(荧光)，分子必须先吸收适当能量的光(光子)，从而使分子从基态变为激发

态，如图3A所示。当分子返回基态时，就会发出荧光。荧光的强度与入射激光的光强(I)成比例，因此，共聚焦LSM通常被认为是一种线性成像技术。这个弛豫过程中具有自然损耗，因此发射光子的能量较低，即，发射光子的波长比吸收光子长。

分子的多光子激发(下方图3B)在两个或更多光子同时到达并且能量总和满足跃迁能量时才会发生。因此，到达的两个光子的能量将低于发射荧光光子的能量。

多光子LSM技术还利用非吸收过程实现对比机制，如倍频及合频生成。在允许谐波产生的情况下，多个入射光子将同时湮灭并产生一个新的光子，能量是之前所有光子的能量总和，如下图3C所示。

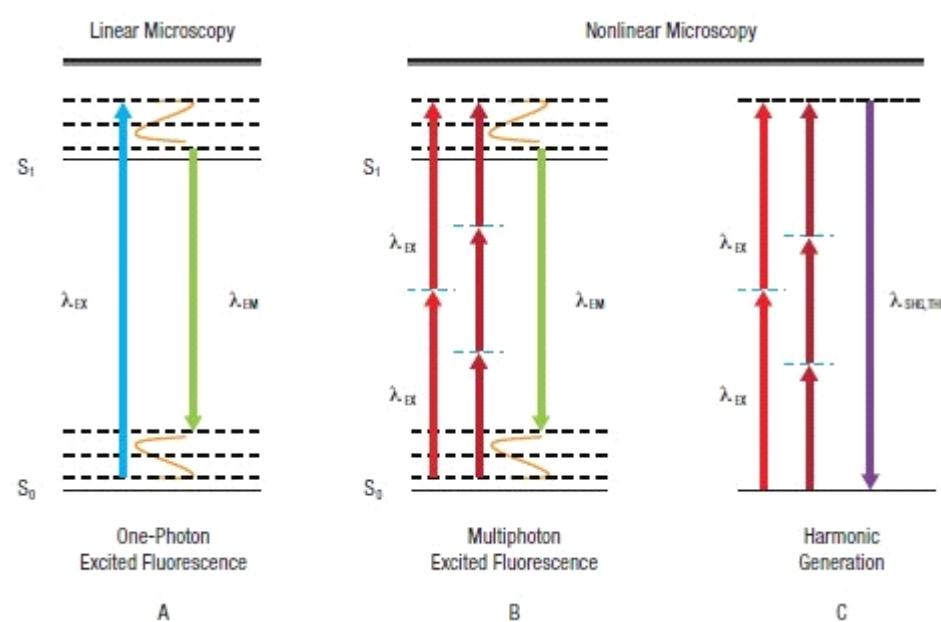
通过观察谐波产生的物理顺序，我们可以进一步分辨样品成分。在二次谐波产生(SHG)过程中，信号只在高度有序、缺乏反对称性的成分中产生。三次谐波(THG)只有在折射率变化的边界界面才能观察到。双光子激发和SHG都是非线性过程，信号的产生取决于光强的平方(I^2)。多光子显微技术中信号产生的非线性特性要求光子的密度要比较高，这样才能进一步观察SHG和THG。为了达到这一点，并且保持样品上的平均功率相对较低，锁模飞秒脉冲激光器，特别是钛蓝宝石激光器，成为了标准的激发光源。

非线性显微技术中还需要考虑的一个问题是某个特定荧光团对应的激发波长。有人可能认为，理想的激发波长是单光子吸收峰值波长的两倍。然而对于大多数荧光团而言，单光子和双光子吸收对应的激发态选择规则是不同的。

这样就导致双光子吸收光谱与对应单光子的情形大不一样。双光子吸收光谱一般会非常宽(大概 $>100\text{ nm}$)，并且不会平滑地遵循半高斯曲线。许多荧光团的宽双光子吸收光谱通过单个激光器促进了一些荧光分子的激发，这样就可以同时观察样品中的多个成分。

所有激活的荧光团不必具有相同的激发峰，但它们的激发光谱之间应互相交叠，并拥有相同的激发范围。多荧光团激发通常通过选择一个能够以可接受的效率激活所有荧光团的折中波长来实现

图 3 激光扫描显微技术中的信号产生



吸收过程(A, B):

单个或多个激发光子(λ_{EX})的吸收可以将分子从基态(S0)跃迁到激发态(S1)。当分子回到基态时，分子就会发出荧光(λ_{EM})。

非吸收过程(C):

多个激发光子(λ_{EX})同时转化为单个光子($\lambda_{SHG, THG}$)，能量等于之前所有光子的总和并且波长是之前光子的一半(SHG)或三分之一(THG)



图像形成

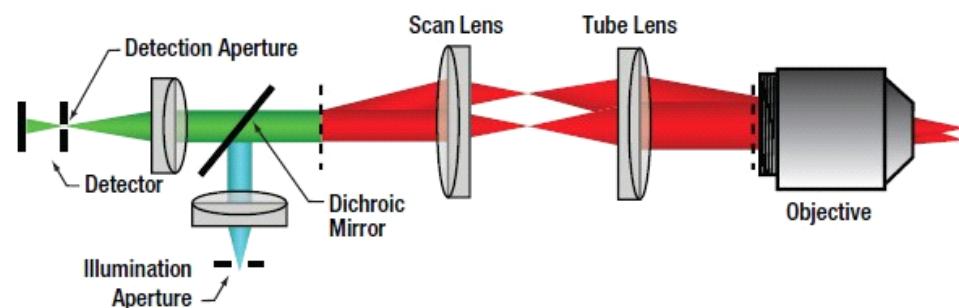
在点扫描LSM中，单幅平面图像是通过点光源对样品上一个个衍射极限点成像然后再成像到一个点探测器上而产生的。在样品上逐点扫描衍射极限点构成线，然后将这些扫描的线结果按顺序排列就构成了一幅二维图像。

被照明的部分发出信号，然后成像到单个基元探测器上。这种最常见的单个基元探测器是一个光电倍增管(PMT)，然而，在某些情况下可以采用雪崩二极管(APD)。尽管CCD相机可用于多焦距(即旋转盘共聚焦)应用，但它通常不用于点扫描显微镜。

探测器采集到的信号将传递到一台计算机上，通过计算机可以生产一幅由样品上各个扫描点光强阵列构成的二维图像。由于没有生成实像，LSM被认为是一种数字图像技术。单点扫描和单点探测技术的一个显著优势是显示的图像分辨率、光学分辨率和扫描场都可以通过设置来匹配特定的实验要求，而不会被系统的成像光学器件预先确定。

共聚焦激光扫描显微镜

图 4 共聚焦光路



在共焦LSM技术中，点照明是实现光学层析的关键特性，通常是单模光纤耦合的CW激光，单模光纤纤芯发出的光被准直后，被用作扫描照明光束。扫描系统将入射光斑成像到物镜的后焦平面上，随后聚焦到待测样品上形成一个衍射极限的光斑。聚焦光束产生的信号通过物镜沿原光路反向传输到扫描系统中。

随着扫描系统信号将通过分色镜从照明光束分离出来，并被聚焦。共焦针孔就位于这个焦点上。在这种结构中，焦平面以上或以下的信号在穿过针孔时会被挡住，这样就生成了一幅光学层析图像(请参看图2)。探测器位于共焦针孔之后，如图4所示。可以推断出，针孔的尺寸会直接影响共焦显微镜的成像能力(特别是对比度、分辨率和光学层析厚度)。

共焦显微镜的横向分辨率定义为系统在样品上生成衍射极限点的能力。衍射极限点的构成取决于激光光束的质量和扫描光学元件、物镜的质量。

光束质量一般可以通过使用一个单模光纤传递激发激光来保证，这样的单模光纤就构成了一个

高斯点光源，然后将该点光源准直为一束衍射极限光束。在一个用最高质量的光学元件构成的无像差的成像系统中，假设均匀照明，聚焦光斑的尺寸是激发波长和物镜数值孔径(NA)的函数，如公式1所示。

$$\text{Spot Size} = \frac{1.22\lambda_{EX}}{\text{NA}}$$

公式 1 光斑尺寸

事实上，光束并没有真正被聚焦为一个点，而是呈现一系列同心环，被称之为艾里斑。光斑的尺寸是艾里斑第一零级之间的距离(围绕同心环中心的第一个亮环的中心直径)，并被称为一个艾里单位(AU)。这在之后我们讨论针孔尺寸时很重要。

成像系统的横向分辨率是由将两个点分辨为两个不同个体所需的最小距离决定的。在共聚焦(和多光子)激光扫描显微镜中，根据每个点观察到的半峰全宽(FWHM)来定义横向分辨率是常见的，且便于实验。

根据半峰全宽的定义，在共聚焦激光扫描显微镜中，横向分辨率($R_{\text{lateral,confocal}}$)为：

$$R_{\text{lateral,confocal}} = \frac{0.51\lambda_{EX}}{\text{NA}}$$

公式 2 横向分辨率，共聚焦LSM

且纵向分辨率($R_{\text{axial,confocal}}$)为：

$$R_{\text{axial,confocal}} = \frac{0.88\lambda_{EX}}{n - \sqrt{n^2 - (\text{NA})^2}}$$

公式 3 纵向分辨率，共聚焦LSM

其中， n 为浸没介质的折射率。

有趣的是，在一个共焦显微镜中，横向分辨率只由激发波长决定。这与宽场显微技术是相反的，宽场显微技术的横向分辨率只由发射决定。

为了确定共焦针孔的合适尺寸，我们必须将激发光斑尺寸乘以显微镜的总放大率：

$$D_{\text{pinhole}} = M_{\text{objective}} \times M_{\text{scan head}} \times \text{Spot Size}$$

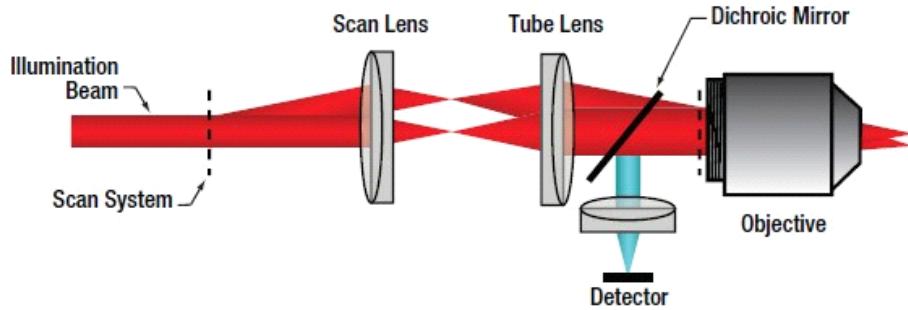
公式 4 针孔直径

例如，一个 $\text{NA} = 1.0$ 的60X物镜，采用 $\lambda_{EX} = 488 \text{ nm}$ (Thorlabs共聚焦扫描头 $M_{\text{scanhead}} = 1.07$)，合适的针孔尺寸为 $38.2 \mu\text{m}$ ，可计为1 AU直径的针孔。如果我们使用同样的物镜参数，但将其放大倍率改为40X，则合适的针孔尺寸变为 $25.5 \mu\text{m}$ ，这同样也是1 AU直径的针孔。因此，以AU计量针孔直径是将针孔直径归一化的方法，不过需要为两种不同的物镜改变针孔选项。

理论上，共焦显微镜的总分辨率是激发照明点光源尺寸和探测针孔尺寸的函数。这表示光学系统的分辨率可以通过减小针孔的尺寸来提高。实际上，当我们限制针孔的直径时我们可以改善分辨率和共焦特定，但是，我们将减小探测器接收到的信号强度。1AU的针孔能够很好地平衡信号强度、分辨率和共焦特性。

多光子LSM

图 5 多光子光路



在多光子LSM技术中，短脉冲自由空间激光提供了穿过扫描系统的准直照明光束，并通过物镜聚焦。由于信号取决于入射光功率的 I^2 ，多光子吸收发生的几率低，这样就确保有效信号限制在物镜的焦平面上。因此，焦平面上下的区域几乎不会产生信号。这样就有效地消除了离焦信号，不需要共聚焦针孔就可以具有光学层析的能力(请看上图2)。对于这种配置，采集的信号不必再返回到扫描系统，这样，探测器可以尽可能地靠近物镜，从而将信号采集效率最大化，如右图5所示。在信号回到扫描系统之前收集信号的探测器被称为非退扫描探测器。

再根据FWHM的定义，在多光子LSM中，横向分辨率(Rlateral,multiphoton)为：

$$R_{\text{lateral,multiphoton}, \text{NA} > 0.7} = \frac{0.383\lambda_{EX}}{(\text{NA})^{0.91}}$$

公式 5 横向分辨率，多光子LSM

纵向分辨率 (Raxial,multiphoton)为：

$$R_{\text{axial,multiphoton}, \text{NA} > 0.7} = \frac{0.626\lambda_{EX}}{n - \sqrt{n^2 - (\text{NA})^2}}$$

公式 6 纵向分辨率，多光子LSM

这些公式中假设物镜 $\text{NA} > 0.7$ ，这是几乎所有多光子物镜的真实值。

多光子激发的波长越长，将导致(参考公式5)在多光子激光扫描显微镜(和共聚焦激光扫描显微镜相比)中的分辨率将以两倍的因子减小。对于一个理想的点物体(即亚分辨率尺寸的荧光微球)而言，信号对 I^2 依赖性减小了有效焦距，不只是补偿聚焦照明光斑尺寸增大的 $2X$ 。

我们应该注意的是，横向分辨率和轴向分辨率都与光强相关。激光功率越高，在衍射极限焦平面内产生信号的几率就越大。实际上，多光子显微镜的横向分辨率受到照明光最终能聚焦成的光斑尺寸的限制，并且在中等光强下可以通过公式5进行较准确的估算。轴向分辨率会随着激发光功率的增加而持续减小。

成像显示

为了如实地显示光学系统能够分辨的最精细的细节，我们必须适当地匹配分辨率(采集分辨率和横向分辨率)和扫描场。因此，我们的采集分辨率必须适当地对光学分辨率进行取样。

在LSM中，我们一般采用奈奎斯特采样定理，即像素尺寸应该等于横向分辨率除以2.3。也就是说，如果我们采用先前的60X物镜，并且横向分辨率为249 nm(公式2)，显示图像的像素尺寸应约为108 nm。因此，对于1024 x 1024像素的拍摄分辨率，样品上的扫描场约为 $111 \mu\text{m} \times 111 \mu\text{m}$ 。应该注意的是，我们之前例子中的40X物镜在样品中会有相同的扫描场(两种物镜具有相同的NA)。而两种物镜获得的图像之间唯一的区别是我们获取图像时扫描头倾斜的角度不同。

在渲染图像时，并不会总是要求这么高的分辨率。我们总是可以在图像分辨率、扫描场和采集分辨率之间找到一个折中的方案，实现信号、样品寿命和图像分辨率之间的平衡。

活体细胞成像中需要考虑的问题

LSM技术最引人注目的一个特性就是能够对活体细胞和组织进行成像。不过，有些荧光的副产品可能有毒性。正因为如此，产生高质量的图像和保持细胞活性之间有一种微妙的平衡。

荧光团饱和度是一个需要重点考虑的问题。当增大激光功率而荧光信号并不按预期同步增强时，会发生荧光团饱和。只剩10%的荧光团在激发态时会发生这种情况。

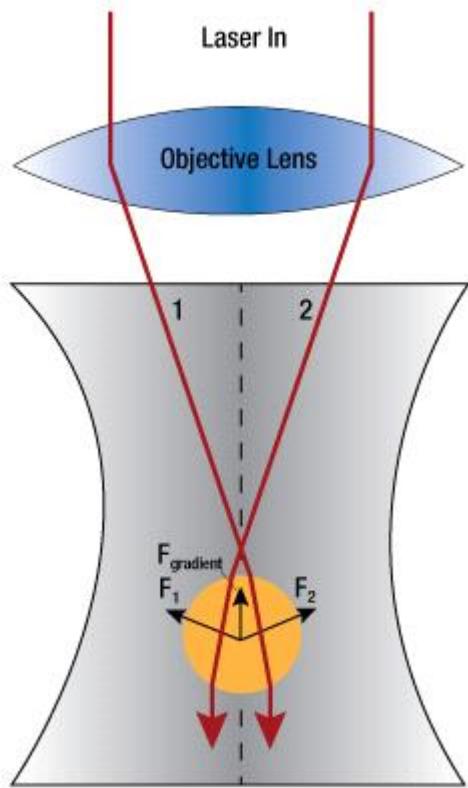
发生饱和是因为荧光团在被激发后回到基态需要一定的时间。而荧光通路相对较快(几百皮秒到几纳秒)，这代表一次弛豫机制的时间。三重态转换和非辐射式衰变则需要明显更长的弛豫时间。此外，如果在荧光团经过弛豫恢复到基态之前再次进行激发，会导致荧光团受到不可逆的漂白。如果激发产生较慢，细胞有自身的内部机制来处理与荧光相关的细胞毒性。

减少光漂白和相关细胞毒性的一种方法是采用快速扫描的方式。若减少激光停留在图像上每个点的时间，探测信号的强度也会减小，而且，在激光再次扫描之前，让荧光团通过完全弛豫返回基态，可以减少漂白机制。如果最快的速度不是关键问题，也可以平均几线或整帧图像来弥补积分时间短造成的信号损失。

多光子LSM较长的激发波长和非退扫描探测能力可以对生物组织中更深的位置进行成像。波长较长，不易被样品散射，因为散射光强和波长的四次方成反比(I-4)。多光子LSM典型的穿透深度为250 - 500 μm ，但是，对于共焦聚LSM技术而言，文献中报道的成像深度最深可达1 mm。

光镊

光学镊子（通常称为陷阱）是通过使用高数值孔径的物镜将激光束紧密聚焦而创建的，从而创建了一个斑点，尺寸为微米级的粒子将受到作用力由于来自光子散射的动量转移。



示意图，显示聚焦的激光束中粒子（大于光的波长）上的净梯度力。

自适应光学 (AO)

通常，AO系统由3部分组成：(1) 波前传感器，用于测量波前偏移，(2) 可变形镜片，可改变形状以校正高度畸变的波前，及(3) 实时控制软件，用波前传感器收集到的信息计算可变形镜片应该采用的合适的形状，以抵消畸变的波前。这三个组件以闭环的方式操作。这意味着由AO系统导致的任何变化都可以由该系统检测。原则上，这种闭环系统基本上是简单的；它测量相位，相位与研究中的光学波前位置呈函数关系，确定其像差，计算校正，对可变形反射镜重新塑形，观察校正结果，然后如果相位像差随时间变化，那么按需要一次又一次重复这个过程。通过这个过程，AO系统能够从被成像的光的波前消除像差，改善图像的光学分辨率。

[波前传感器、可变形反射镜](#)

光学器件

2020年4月23日

- [光学元件](#)
- [偏振光学元件](#)
- [光隔离器](#)

光学元件

[光学透镜教程](#)

[光学基底](#)

[光学镀膜教程](#)

[光学元件夹取和保护](#)

[衍射光栅](#)

[工程漫射体](#)

[光束圆度整形](#)

[中性密度楔形滤光片实验分析](#)

[带通滤光片](#)

[荧光滤光片](#)

[分束器实验观测](#)

[空间滤波器](#)

[后向反射器实验观测](#)

[道威棱镜实验观测](#)

[圆形楔形棱镜](#)

偏振光学元件

石英楔消偏器

为了探测光束的空间周期性，应在DPU消偏振镜的出射光束后面放置一个线性起偏器（检偏器）。如下图的伪彩色图所示，强度变化变成带状的。这是由于偏振态旋转到的角度与厚楔片的斜面垂直的任意直线方向一致。下面讨论了几个不同入射及消偏振角度情况下的例子。

图例

- ↔ Polarization Axis of Incident Light
- ↔ Fast Axis of Thick Wedge
- ↔ Fast Axis of Thin Wedge

实例1：

在第一个例子中，采用波长为635纳米、束腰直径为20毫米的线偏振光作为光源。光束入射到消偏振镜的较厚的楔片上，且光束的传播方向与该楔片垂直。光束的偏振态与较厚楔片的光（快）轴方向一致。薄楔片的光轴与入射光的偏振态及厚楔片的光轴均成45度角。这种情况下，楔片的斜面也与入射光的偏振态平行。

图1给出了入射光的偏振态方向，以及厚、薄楔片的光轴方向。红色表示入射光的偏振方向，蓝色表示厚楔片的光轴方向，绿色表示薄楔片的光轴方向。消偏振镜的上表面（蓝色实线）与厚楔片的光轴垂直。消偏振镜的侧表面（蓝色点画线）与薄楔片的光轴垂直。

图2所示的是空间相关的偏振角度的理论曲线。该伪彩色图显示的DPU消偏振镜出射光的偏振角度，入射光具有上面描述的特性。

伪彩色图中的带状代表了从完全水平轴方向（与入射光的偏振态垂直）到完全竖直轴方向（与入射光的偏振态平行）中不同区域偏振态的变化。在这种情况下，两种偏振态的分离大约为2毫米。带状的方向总是与厚楔片的光轴垂直，同时也与入射光的偏振态垂直。

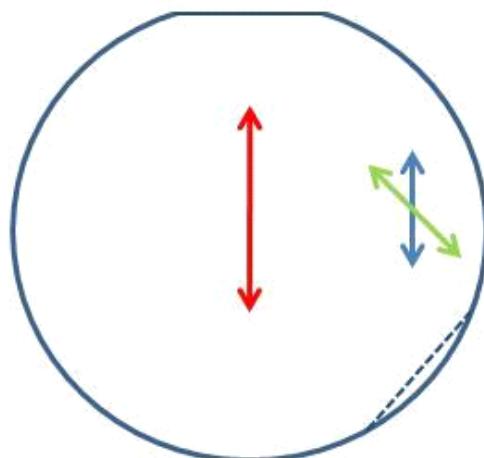
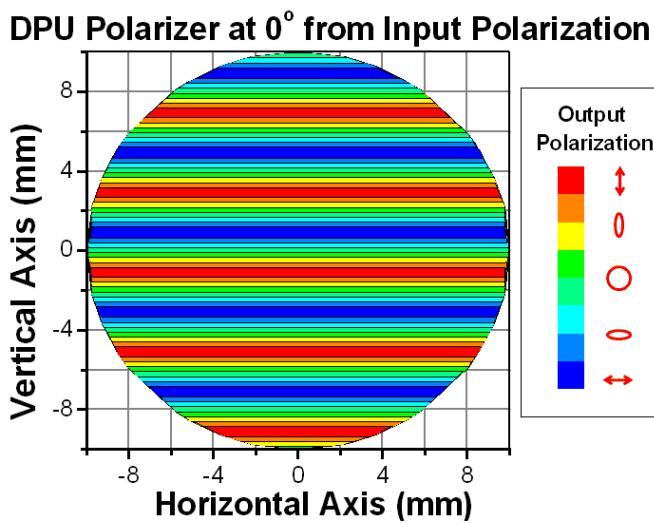


图1. 入射光的偏振态与厚楔片的光轴平行。



[Click to Enlarge](#)

图2. 与厚楔片光轴平行的线偏振光透过消偏振镜后的伪彩色图计算结果。

实例2：

在这个例子中，应用同样的线偏振光作为光源，只是光束偏振态的方向平行于薄楔片的光轴，即与厚楔片的光轴成45度角。入射光的偏振态方向，以及厚、薄楔片的光轴方向如图1所示。红色表示入射光的偏振方向，蓝色表示厚楔片的光轴方向，绿色表示薄楔片子的光轴方向。消偏振镜的上表面（蓝色实线）与厚楔片的光轴垂直。消偏振镜的侧表面（蓝色点画线）与薄楔片的光轴垂直。

图4显示了光束通过DPU消偏振镜后的偏振方向计算结果。如图2所示，伪彩色图中的带状代表了空间相关的偏振状态。注意带状的方向与厚楔片的光轴方向（楔片的斜面方向）垂直。入射光的偏振方向对带状方向不起作用。

旋转入射光的偏振方向只会影响带状的具体偏振，比较图2与图4中竖轴上0毫米处的带很容易就能得到这个结论。图2中，0毫米处为45度，图4中，0毫米处为90度。

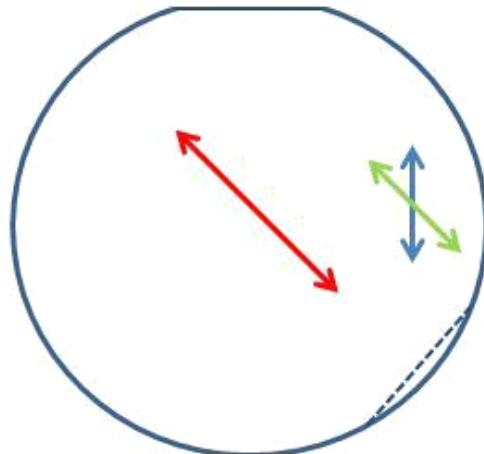
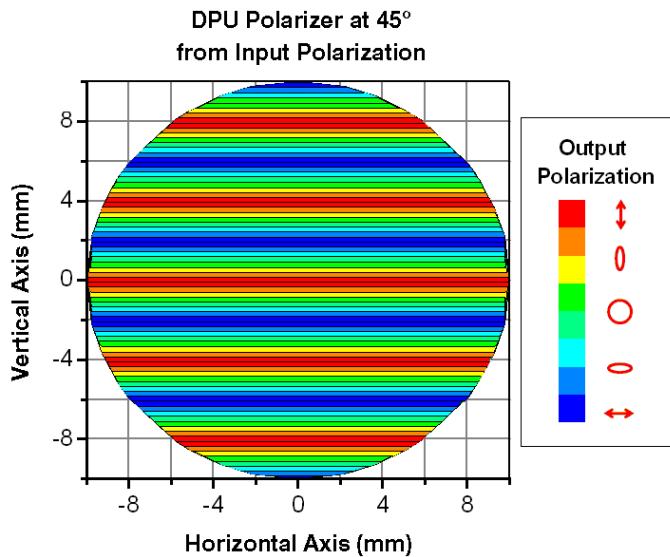


图3. 入射光的偏振态与薄楔片的光轴平行。



[Click to Enlarge](#)

图4. 与薄楔片光轴平行的线偏振光透过消偏振镜后的伪彩色图计算结果。

实例3：

在最后的例子中，入射光的特性与例1中相同。旋转DPU消偏振镜45度，得到的入射光偏振方向与薄楔片的光轴方向平行，如图5所示。入射偏振（红色箭头）仍然入射到厚楔片上；但是它与薄楔片的平面垂直。

伪彩色图6所示的是上述入射光通过DPU消偏振镜片后的计算结果。图2与图4中的带状方向明显不同。45度的倾斜是因为带状恰好垂直于厚楔片的光轴与斜面。

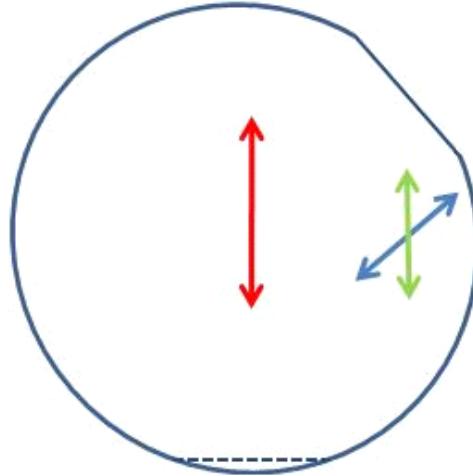
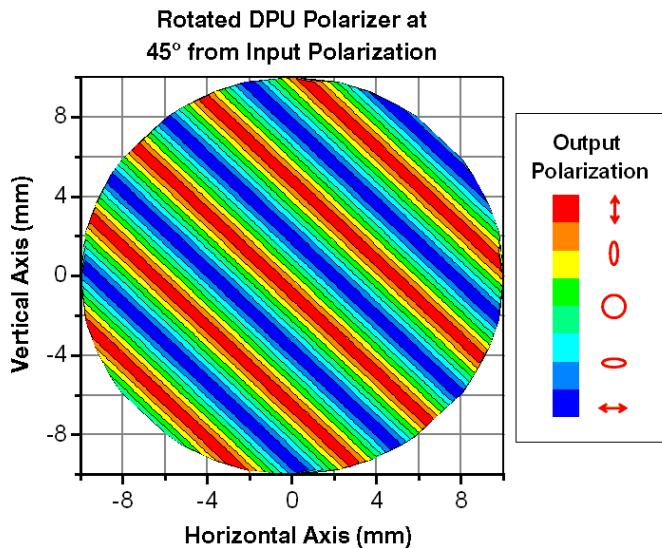


图5. 入射光的偏振态与薄楔片的光轴平行与楔平面成45度。



[Click to Enlarge](#)

图6. 与薄楔片光轴平行的线偏振光45度角透过楔平面后的伪彩色图计算结果。

波片

波片工作原理

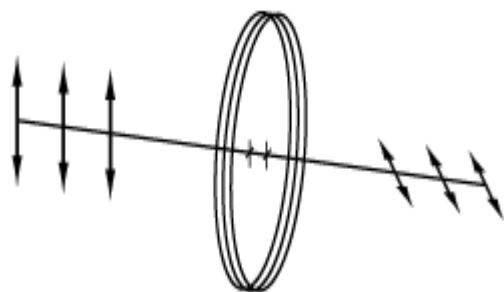
光学波片的工作原理基于双折射现象。双折射材料在快慢两个正交主轴的折射率不同，使得沿波片两轴传播的光速也不同。波片快轴方向的折射率较低，从而导致光速更快，而慢轴的折射率更高，光速较慢。当光通过波片时，速度差将使两个正交偏振分量之间产生相位差。实际产生的相位差是由材料特性、波片厚度和信号波长决定的，可以描述为：

$$\Delta\phi = \frac{2\pi d(n_1 - n_2)}{\lambda}$$

其中 n_1 为慢轴折射率， n_2 为正交的快轴折射率， d 为波片厚度， λ 为信号波长。

波片的使用

波片有 $\lambda/4$ 或 $\lambda/2$ 两种典型延迟，分别代表引入 $1/4$ 波长和 $1/2$ 波长的相位差。



半波片

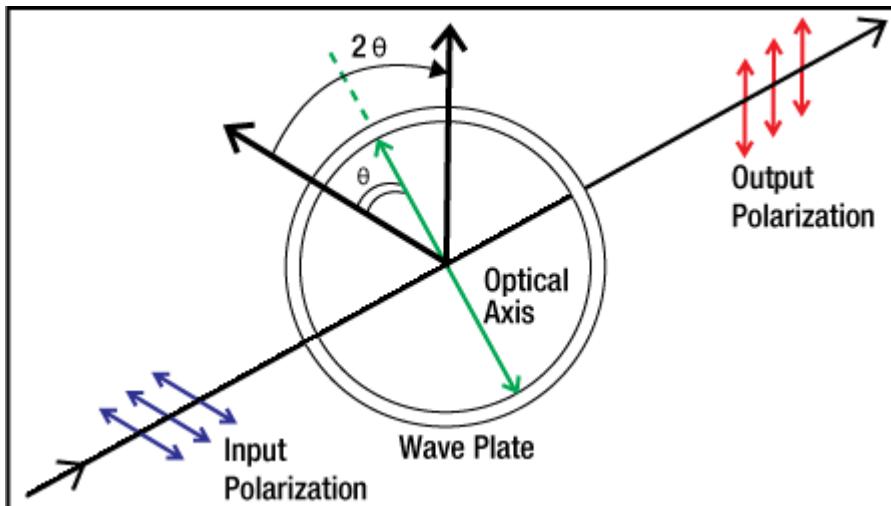
如上所述，一个波片具有两个主轴：快轴和慢轴。两轴上的折射率不同，因此光速也不同。当线偏振光入射于半波片，并且偏振方向不与快轴或慢轴重合时，出射光仍是线偏振光，但偏振面相对于入射光发生了旋转(见右图)。当圆偏振光入射时，顺时针(逆时针)圆偏振光将会转化为逆时针(顺时针)圆偏振光。

半波($\lambda/2$)片通常用于旋转偏振方向。当安装到[旋转安装座](#)上时，一个 $\lambda/2$ 波片可作为连续调整

的偏振旋转器，如下图所示。此外，当和[偏振分束器](#)配合使用时，可以用作可变比例的分束器。

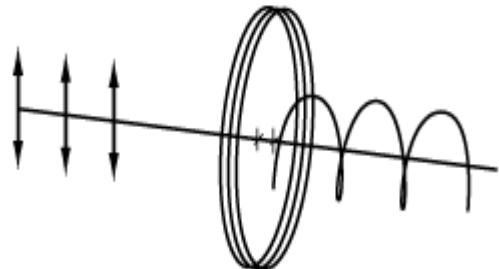
出射光和入射光的偏振方向的夹角变为入射光的偏振方向与波片主轴夹角的两倍(见右下图)。

当入射光的偏振方向与快轴或慢轴重合时，偏振方向保持不变。



四分之一波片

四分之一波片使得快轴和慢轴之间产生四分之一波长($\lambda/4$)的相位差。当偏振面与波片的主平面成45度的线偏振光入射时，出射光将变成圆偏振光(见右图)。如果线偏振光的偏振面与主平面的夹角不是45°时，则输出椭圆偏振光。反过来，圆偏振光通过 $\lambda/4$ 波片将变成线偏振光。 $\lambda/4$ 波片常用于[光隔离器](#)、光学泵浦和[电光调制器](#)。



光隔离器

光隔离器教程

光隔离器是一种只允许光以单一方向传输的无源磁光器件。光隔离器用于防止光源受到由背反射或信号产生的不良影响。背反射可能损坏激光器或者使之产生跳模、振幅变化或频移。在高功率应用中，背反射还能引起不稳定性和功率尖峰。

隔离器的工作原理基于法拉第效应。1842年法拉第发现偏振光在穿过磁场中的玻璃（或其他材料）时其偏振面会发生旋转。旋转方向取决于磁场方向而不是光传播方向。因此，旋转是非互易性的。旋转因子Q等于 $V \times L \times H$ ，其中V、L和H定义如下。

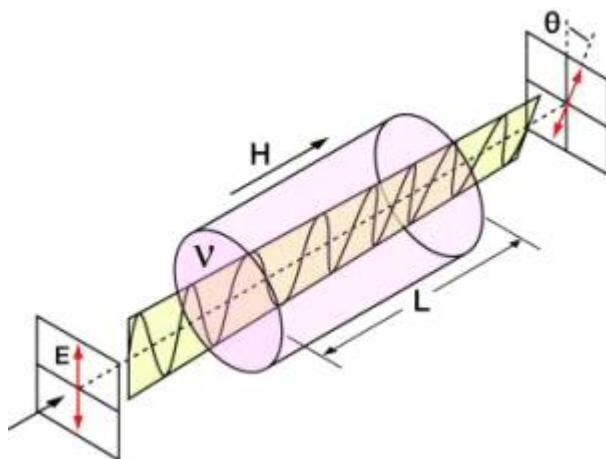


图 1. 法拉第旋转器对于线偏振光的效果

法拉第旋转

$$Q = V \times L \times H$$

V: 费尔德常数，光学材料的一种属性，单位是分钟/奥斯特-厘米。

L: 通过光学材料的光程，单位是cm。

H: 磁场强度，单位是奥斯特。

光隔离器由入射偏振片、法拉第旋转器和出射偏振片组成。入射偏振片作为滤光片只允许线偏振光进入法拉第旋转器。法拉第旋转器使得线偏振光旋转45°，然后该光线通过出射线偏振片。此时输出光的偏振方向相对入射光旋转了45°。在反向光路中，法拉第旋转器继续旋转光的偏振，旋转方向与正向光路中相同，所以此时光的偏振相对入射光旋转了90°。此时光的偏振与入射偏振片的传播轴垂直，所以根据偏振片类型的不同，能量会被反射或被吸收。

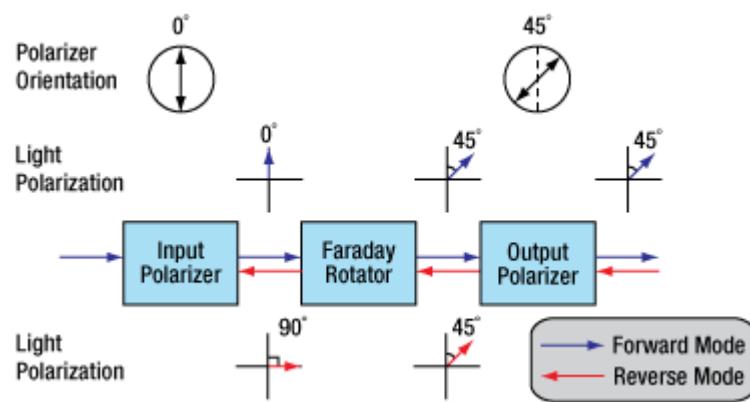


图 2. 偏振相关隔离器。反向传输光被入射偏振片阻挡。

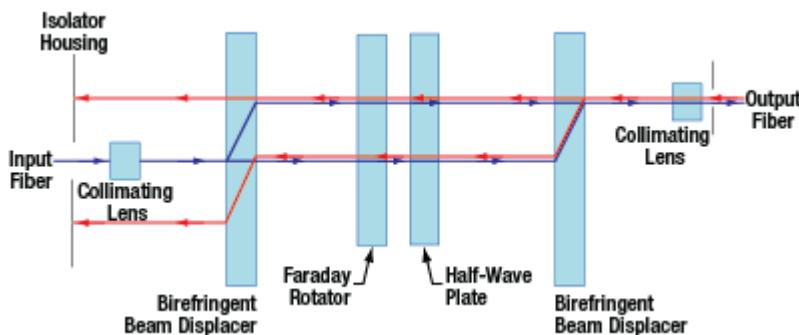
偏振相关隔离器

正向模式

在这个例子里，假定入射偏振片轴向是垂直的（图2中用0°标示）。无论是偏振光还是非偏振光在经过入射偏振片后都变成垂直偏振光。法拉第旋转器使得偏振面（POP）以正向旋转45°。最后，光通过轴向为45°的输出偏振片。因此，光通过隔离器时的偏振面为45°。

反向模式

反向通过隔离器的光首先进入通过输出偏振片，使光的偏振方向相对入射偏振片为45°。然后进入法拉第旋转器，偏振面继续以正向旋转45°角。此时相对入射偏振片旋转了90°，所以偏振面与入射偏振片的传播轴垂直。所以，光将被反射或者吸收。



[点击获取详情](#)

图 3. 偏振无关的光隔离器。光从输入路径偏移，并被外壳挡住。

偏振无关光纤隔离器

正向模式

对于偏振无关光纤隔离器，入射光被双折射晶体分成两束光（如图3所示），法拉第旋转器和半波片使得两束光的偏振方向连续旋转45度，随后两束光通过第二个双折射晶体后再次合并。

反向模式

背反射光通过第二个双折射晶体后分成两束光，此时偏振与正向模式光偏振相同。由于法拉第旋转器是一种非互易性的偏振旋转器，所以它将抵消反向模式光由半波片产生的偏振旋转。当这两束光通过第一个双折射晶体后，将偏离准直透镜，并入射在外壳壁上被吸收，从而防止反向模式进入入射光纤中。

基本信息

损伤阈值

Thorlabs具有25年光隔离器研发和生产经验以及5项美国专利，所以我们的隔离器相比行业内其它光隔离器具有更高的透过率和隔离度，对于同等孔径的隔离器，我们产品尺寸也更小。对于可见光到YAG激光隔离器，Thorlabs采用铽-镓-石榴石 (TGG) 作为法拉第旋转器晶体，这种材料具有优异的光学质量、费尔德常数和耐高激光功率性能。经测试，Thorlabs的隔离器的TGG晶体棒对于脉冲宽度为15 ns的1064 nm激光的损伤阈值高达22.5 J/cm² (1.5 GW/cm²)，对于连续光损伤阈值高达20 kW/cm²。但是，Thorlabs不对由激光中热点造成的激光功率损伤承担责任。

磁体

磁体是决定隔离器尺寸和性能的主要因素。磁体的尺寸不仅仅取决于磁场强度，还受到机械设计的影响。Thorlabs不采用单一磁体而是通过复杂组装的。Thorlabs建模系统对影响尺寸、光程、旋转量和磁场均匀性的许多参数都进行了最优化模拟。Thorlabs的美国专利4,856,878详细描述了一种优化设计，用于YAG激光器的多种较大孔径的隔离器都采用了这种设计。由于隔离器周边具有很强的磁场，因此请不要将铁或磁性物体放在隔离器5 cm以内的范围。

温度

磁体和法拉第旋转器都与温度息息相关。磁场强度和费尔德常数随着温度的升高而降低。

脉冲色散

激光脉冲通过折射率大于1的材料都会产生脉冲展宽。脉冲宽度越小，色散越大，因此对于超快激光器，色散可能变得非常明显。

T：通过隔离器之前的脉冲宽度

$\tau(z)$: 通过隔离器之后的脉冲宽度

实例:

$\tau = 197 \text{ fs}$ 时, $\tau(z) = 306 \text{ fs}$ (图4所示)

$\tau = 120 \text{ fs}$ 时, $\tau(z) = 186 \text{ fs}$

Dispersion Measurement of Isolator IO-5-780-HP

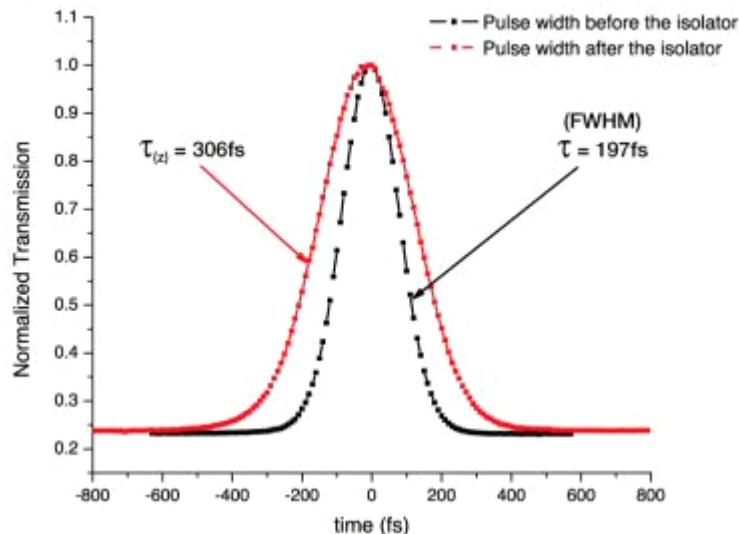
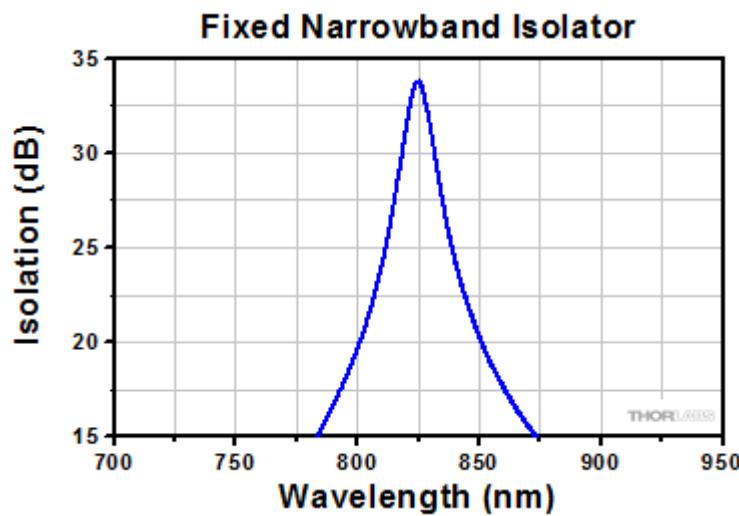


图 4. IO-5-780-HP 隔离器之前和之后的脉冲色散测量

隔离器类型



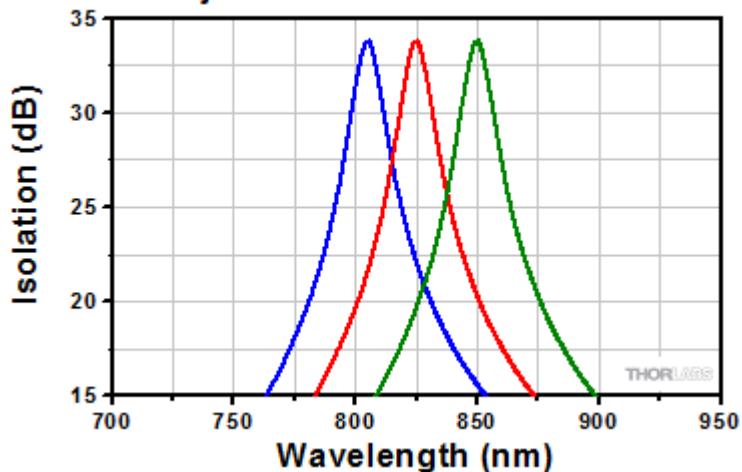
固定窄带隔离器

该隔离器设置成在设计波长下旋转45°。偏振器不可调节，并且设置成在设计波长下提供最大隔离度。

随着波长变化，隔离度会下降；随着波长变化，隔离度会下降；曲线显示一个代表性的隔离度。

- 固定旋转器元件，固定偏振器
- 偏振相关
- 最小和最廉价的隔离器类型
- 无调谐

Adjustable Narrowband Isolator

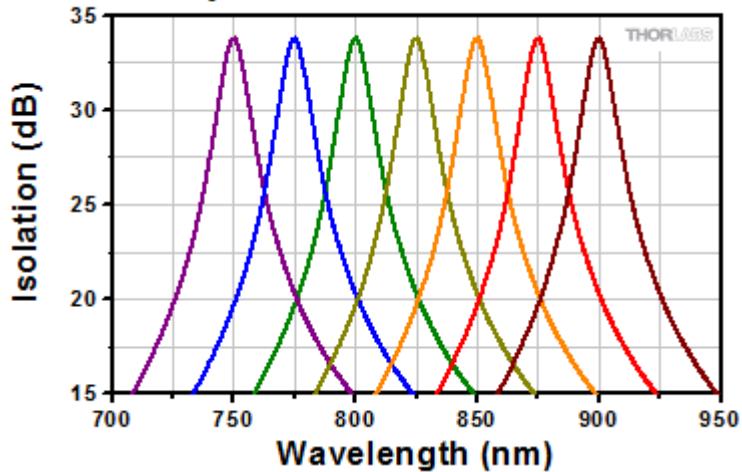


可调节窄带隔离器

该隔离器设置成在设计波长下旋转45°。如果使用波长变化，法拉第旋转也会变化，从而降低隔离度。为了重新获得最大隔离度，输出偏振器可被旋转，使隔离度曲线“重新定心”。这种旋转导致正向方向上具有透射损失，它随着所用波长和设计波长之间的差异增大而增大。

- 固定旋转器元件，可调偏振器
- 偏振相关
- 通用隔离器

Adjustable Broadband Isolator

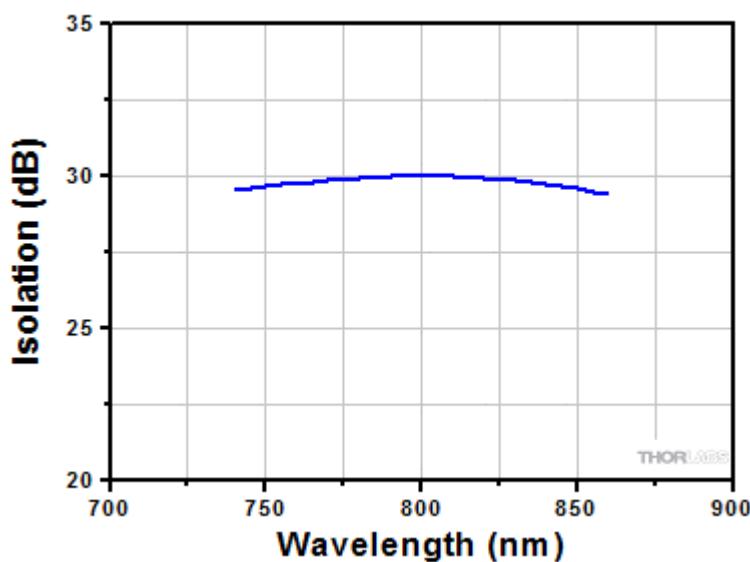


可调节宽带隔离器

该隔离器设置成在设计波长下旋转45°。隔离器上有一个调节环，可调节内部磁体中的法拉第旋转器材料的插入量。随着您的使用波长变化，法拉第旋转也会变化，从而降低隔离度。为了重新获得最大隔离度，调节调节环以产生最大隔离度所需的45°旋转。

- 可调旋转器元件，固定偏振器
- 偏振相关
- 调谐过程简单
- 比可调窄带隔离器更宽的调节范围

Fixed Broadband Isolator

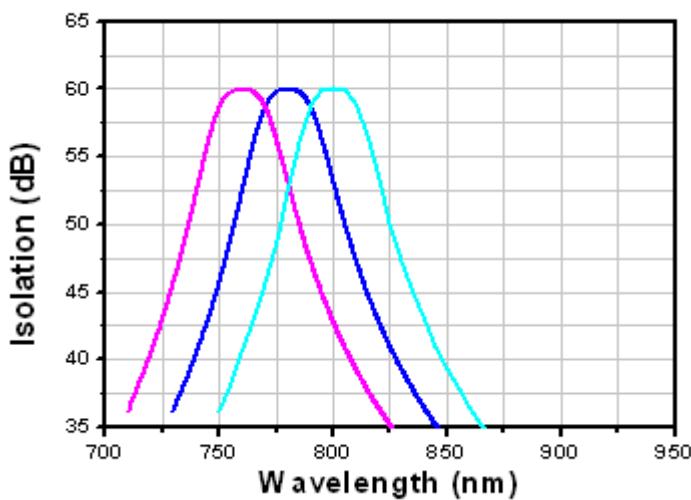


固定宽带隔离器

一个45°法拉第旋转器与一个45°石英晶体旋转器耦合，在输出上产生总共90°的旋转。两个旋转器材料的波长相关性一起产生一个顶部平坦的隔离度分布轮廓。该隔离器不需要任何调节就可在指定设计带宽内操作。

- 固定旋转器元件，固定偏振器
- 偏振相关
- 最大隔离度带宽
- 无需调谐

Tandem Isolators



串联隔离器

串联隔离器由两个法拉第旋转器串联组成，它们共享一个中央偏振器。由于两个隔离器彼此抵消，输出处的净旋转为0°。我们的串联设计产生可固定或可调节的窄带隔离器。

- 最大60 dB的隔离度
- 偏振相关
- 最高隔离度
- 固定或可调

光纤隔离器实验观测

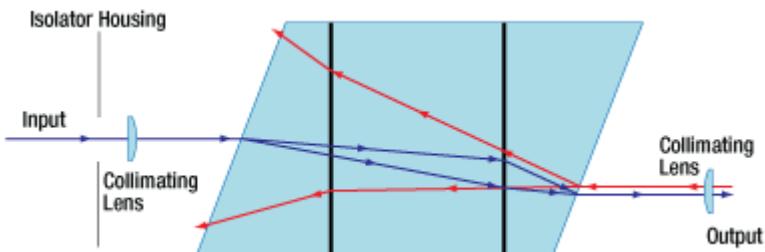
Thorlabs实验观测: IO-F和IO-H光纤隔离器的隔离和透射属性

在此给出IO-H和IO-F系列的光纤耦合光隔离器的隔离和透射属性的实验室测量结果。

一般而言，一个隔离器在两个光束位移偏振片之间使用一个法拉第光旋转器和一个半波片，以隔离背反射。虽然这两个系列的光隔离器对光反馈的隔离度都非常好，但它们是通过不同的几何结构来提供隔离的。因而，两者提供不同的优化性能规格。

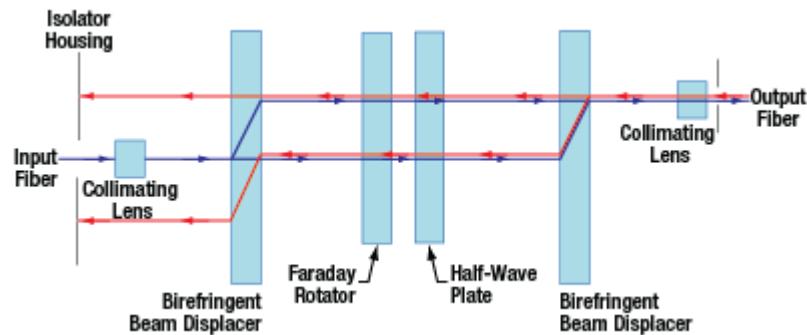
IO-H系列（见图1）针对某一特定波长下（比如，IO-H-1550APC为1550 nm）的性能进行优化。但是IO-F系列（见图2）设计用作更通用的平台，而且提供多种波段上的定制性能。这些波段由所选择的半波片和准直透镜界定。

[该实验](#)采用的激光光源是Thorlabs的TLK-L1550R可调谐激光器套件，它的扫频范围为1505 - 1593 nm。光纤耦合的激光光束通过一个99:1光纤耦合器输入，使TLK激光器的1%的功率被传送到OSA203[光谱分析仪](#)，以监测并记录TLK在每个数据点上的中心波长。剩余的功率通过一个50:50光纤耦合器分成50:50的两部分，创造两条光路。一条光路用作参考光路，直接输入[积分球](#)中；另一条光路用作测试光路。将隔离器置于测试光路中，再连接到积分球。该实验测试的是IO-H-1550APC和IO-F-1550APC隔离器。测量的是透过率（隔离器正向集成到测试光路）或隔离度（隔离器反向集成到光路）。因为参考光路和测试光路的数据是同时采集的，因此可从OSA提取出准确的透过率或隔离度，以及峰值波长数据。



[Click for Details](#)

图1：IO-H系列与偏振无关的隔离器图示



[Click for Details](#)

图2：IO-F系列与偏振无关的隔离器图示

光纤

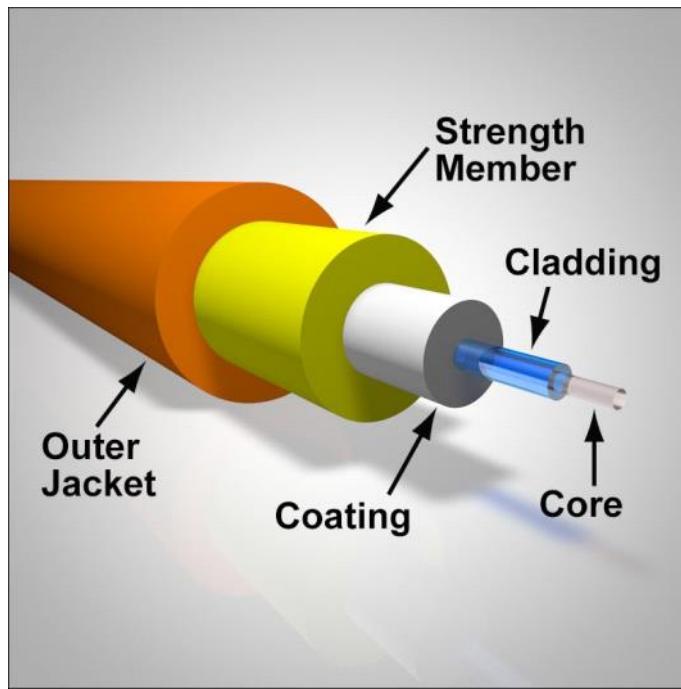
2020年4月23日

光纤和光纤跳线

光纤介绍

一根光纤由三个主要部分组成，如图中所示。其中，纤芯由玻璃或塑料制成，为光束传播提供路径。尺寸较大的纤芯可以让更大的光量或是更大直径的光束进入光纤。纤芯的数值孔径(NA)决定了光纤能够接受的入射角范围，只有在规定的入射角范围内才符合对应的性能参数。包层可以防止光从纤芯中出射或是被跳线的其余部分吸收。涂覆层，或称为缓冲层，可以保护纤芯与包层，并增加强度。

光纤制成跳线时，涂覆层的外面是一种材料层，如Kevlar，能够增加跳线的强度，并防止光纤因应力受到损伤。然后，整根跳线会被封装到一个护套中。该外层护套是跳线最外层的保护层，同样可以增加跳线的强度。护套一般通过颜色来帮助用户区分跳线中的光纤类型。



Fiber_Cable_Structure...

四种主要的光纤类型：单模(SM)、多模(MM)、保偏(PM)和掺杂光纤。

单模(SM)光纤

单模光纤的纤芯直径很小，只能让一个模式或一种光线经过光纤进行传播。所谓模式，即光在自由空间中传播的方式。在该单模光纤中，光沿着光纤轴进行传播(如右图所示)。在单模光纤中，光波都具有相同的模式，但其频率可能不同。这种光纤适用于需要在长距离传输过程中保

证入射光脉冲完整性的应用。SM光纤具有高带宽和低模式色散。可以点击[这里](#)查看我们单模光纤的完整产品系列。

光敏单模光纤

光敏单模光纤用于为紫外光提供高光灵敏性。这些光纤具有比标准SM光纤更低的熔接损耗，适合多种应用。更多有关这些光纤的信息，请点击[这里](#)。



Fiber_Singl
e_Mode_...

单模光纤中的光传播

多模(MM)光纤

多模(MM)光纤的大纤芯直径可以让多个模式的光波传播。多模光纤中的光不仅会像SM光纤中沿着光轴传播，还会离开光轴向包层传播(如右边的视频所示)。纤芯-包层界面上发生的全内反射可以让光束发生反射，再次向光轴传播。MM光纤通常具有比SM光纤更高的数值孔径和更大的纤芯直径，使其能够在更广的入射角范围内收集更多光。它的带宽比SM光纤小，并且容易受到模式色散的影响。

模式色散是指入射光脉冲由于不同模式传播速度不同造成的变形。由于模式在光纤中以“Z”字形路径传播，则路径更加曲折的模式到达终点时所经过的路程会比路径更加平直的模式更长。当所有模式，包括传播较快和较慢的模式，在光纤另一端结合时，最后的光脉冲就被展宽了。多模光纤主要有两种类型：阶跃折射率光纤和梯度折射率光纤。阶跃折射率光纤中的纤芯具有均匀的折射率。在纤芯-包层界面上折射率会突然降低，即包层折射率小于纤芯折射率。这样就导致光纤中模式会以锯齿状的路径传播(如右边的视频所示)。阶跃折射率光纤一般会在光纤中掺杂另外一种材料。

而在梯度折射率光纤中，纤芯的折射率会随着与纤芯中心距离的增大而减小。这样就导致纤芯-包层界面上的折射率变化较小。而这样的折射率变化会使光波传播更加平滑，不同的模式在光纤中会以正弦曲线路径传播(请参看右边的视频)。梯度折射率光纤具有比阶跃折射率光纤低得多的模式色散。模式的抛物波形轮廓可以连续地重新聚焦光线。那些沿着光纤中心传播的光线会比沿着正弦曲线传播的光纤的速度更慢，这是因为光纤中心的折射率更大。最后出射的脉冲并不会展宽太多，并且其分布与入射时的脉冲很接近。

更多有关Thorlabs多模光纤系列产品的选项，请点击[这里](#)查看。

耐紫外多模光纤

耐紫外多模光纤在紫外到近红外(180到1150 nm)波段具有出色的性能和透射率。与标准光纤相比，这些多模光纤具有极强的抗紫外线特性，极其适用于污染分析和化学加工的光谱测量、紫外光刻和医学诊断等应用。光纤上的聚酰亚胺缓冲层可以让光纤用于最高300 °C的温度下。如需了解关于这些光纤的更多信息，请点击[这里](#)。



Fiber_Step
_Index_72...



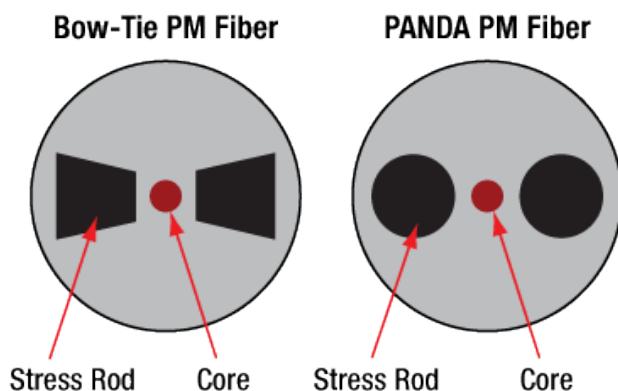
Fiber_Grad
ed_Index...

保偏(PM)光纤

在保偏(PM)光纤中传播时，入射光的偏振方向会保持不变。PM光纤有许多类型，但它们都具有相同的工作原理：通过包层中的应力棒向纤芯引入应力。该应力将光纤和光与特定的偏振对齐。Thorlabs提供两种PM光纤：熊猫型和蝴蝶结型。这两种类型是根据光纤中采用的应力棒外形来命名的(请参看右图)。PM光纤常用于光纤传感、干涉和量子密码学等应用中。它还常用于通信应用，以连接激光光源和调制器。PM光纤具有比SM和MM光纤更高的衰减。

需要重点强调的是，PM光纤不会改变偏振光的偏振方向；与此相反，它只是保持入射光的偏振方向与应力棒对齐。在制造过程中，光纤插销就已经经过对准，从而保证高质量输出，这可以通过偏振消光比(PER)来说明。高PER可以使光纤中光束的偏振方向与入射时更加一致。

更多有关我们PM光纤的信息，请点击[这里](#)。



掺杂光纤

掺铒SM光纤

我们各种高度掺铒的光纤适用于工作波长范围从1530到1610 nm的光纤激光器和放大器。这些光纤被用于各种应用，从通信放大器(EDFA)到高功率PON/CATV射频放大器，以及仪器、工业应用和医学应用中采用的超短脉冲放大器。如需了解关于这些光纤的更多信息，请点击[这里](#)。

掺镱MM光纤

Thorlabs提供最高水平的掺镱光纤，用于光学放大器、ASE光源以及高功率脉冲和连续波光纤激光器应用。这些光纤采用了最新的掺杂光纤生产技术制造。如需了解关于这些光纤的更多信息，请点击[这里](#)。

掺镱PM光纤

Thorlabs公司的掺镱PM光纤采用了最新的生产技术制造。这些光纤具有高双折射、低非线性效应和低光暗化效应等特点。如需了解关于这些光纤的更多信息，请点击[这里](#)。

无源双包层光纤

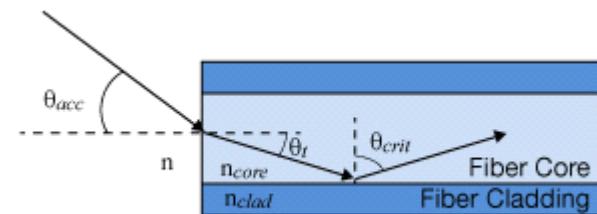
Thorlabs的无源大模场面积(LMA)光纤的纤芯直径和数值孔径都可以与其有源版本的光纤相匹

配，从而在光纤激光器或放大器系统中保持出色的光束质量。其外包层直径设计成可以"包围"有源光纤，从而让无源到有源光纤实现低泵浦耦合损耗。无源光纤镀有一层低折射率的含氟丙烯酸酯，可以让有源光纤通过该层进行泵浦。如需了解关于这些光纤的更多信息，请点击[这里](#)。

多模光纤

在光纤中引导光

光纤属于光波导，光波导是一种更为广泛的光学元件，可以利用全内反射(TIR)在固体或液体结构中限制并引导光。光纤通常可以在众多应用中使用；常见的例子包括通信、光谱学、照明和传感器。



光纤的全内反射

比较常见的玻璃(石英)纤维使用一种称之为阶跃折射率光纤的结构，如右图所示。这种光纤的纤芯由一种折射率比外面包层高的材料构成。在光纤中以临界角入射时，光会在纤芯/包层界面产生全反射，而不会折射到周围的介质中。为了达到TIR的条件，发射到光纤中入射光的角度必须小于某个角度，即接收角， θ_{acc} 。根据斯涅耳定律可以计算出这个角：

$$\sin \theta_{crit} = \frac{n_{clad}}{n_{core}} = \cos \theta_t$$

$$n \sin \theta_{acc} = n_{core} \sqrt{1 - \cos^2 \theta_t} = \sqrt{n_{core}^2 - n_{clad}^2}$$

其中， n_{core} 为纤芯的折射率， n_{clad} 为光纤包层的折射率， n 为外部介质的折射率， θ_{crit} 为临界角， θ_{acc} 为光纤的接收半角。数值孔径(NA)是一个无量纲量，由光纤制造商用来确定光纤的接收角，表示为：

$$NA = n \sin \theta_{acc} = \sqrt{n_{core}^2 - n_{clad}^2}$$

对于芯径(多模)较大的阶跃折射率光纤，使用这个等式可以直接计算出NA。NA也可以由实验确定，通过追踪远场光束分布并测量光束中心与光强为最大光强5%的点之间的角度即可；但是，直接计算NA得出的值更为准确。

光纤中的模式数量

光在光纤中传播的每种可能路径即为光纤的导模。根据纤芯/包层区域的尺寸、折射率和波长，单光纤内可支持从一种到数千种模式。而其中最常使用两种为单模(支持单导模)和多模(支持多种导模)。在多模光纤中，低阶模倾向于在空间上将光限制在纤芯内；而高阶模倾向于在空间上将光限制在纤芯/包层界面的附近。

使用一些简单的计算就可以估算出光纤支持的模(单模或多模)的数量。归一化频率，也就是常说的V值，是一个无量纲的数，与自由空间频率成比例，但被归为光纤的引导属性。V值表示为：

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} NA$$

其中V为归一化频率(V值)，a为纤芯半径， λ 为自由空间波长。多模光纤的V值非常大；例如，芯径为 $\varnothing 50 \mu\text{m}$ 、数值孔径为0.39的多模光纤，在波长为 $1.5 \mu\text{m}$ 时，V值为40.8。

对于具有较大V值的多模光纤，可以使用下式近似计算其支持的模式数量：

$$M \approx \frac{V^2}{2}$$

上面例子中，芯径为 $\varnothing 50 \mu\text{m}$ 、NA为0.39的多模光纤支持大约832种不同的导模，这些模可以同时穿过光纤。

单模光纤V值必须小于截止频率2.405，这表示在这个时候，光只耦合到光纤的基模中。为了满足这个条件，单模光纤的纤芯尺寸和NA要远小于同波长下的多模光纤。例如SMF-28超单模光纤的标称NA为0.14，芯径为 $\varnothing 8.2 \mu\text{m}$ ，在波长为1550 nm时，V值为2.404。

衰减来源

光纤损耗，也称之为衰减，是光纤的特性，可以通过量化来预测光纤装置内的总透射功率损耗。这些损耗来源一般与波长相关，因光纤的使用材料或光纤的弯曲等而有所差异。常见衰减来源的详情如下：

吸收

标准光纤中的光通过固体材料引导，因此，光在光纤中传播会因吸收而产生损耗。标准光纤使用熔融石英制造，经优化可在波长1300 nm-1550 nm的范围内传播。波长更长(>2000 nm)时，熔融石英内的多声子相互作用造成大量吸收。使用氟化锆、氟化锢等氟氧物玻璃制造[中红外光纤](#)，主要是因为它们处于这些波长范围时损耗较低。氟化锆、氟化锢的多声子边分别为~3.6 μm 和~4.6 μm 。

光纤内的污染物也会造成吸收损耗。其中一种污染物就是困在玻璃纤维中的水分子，可以吸收波长在1300 nm和2.94 μm 的光。由于通信信号和某些激光器也是在这个区域里工作，光纤中的任意水分子都会明显地衰减信号。

玻璃纤维中离子的浓度通常由制造商控制，以便调节光纤的传播/衰减属性。例如，石英中本来就存在羟基(OH-)，可以吸收近红外到红外光谱的光。因此，羟基浓度较低的光纤更适合在通信波长下传播。而羟基浓度较高的光纤在紫外波长范围时有助于传播，因此，更适合对荧光或UV-VIS光谱学等应用感兴趣的用户。

散射

对于大多数光纤应用来说，光散射也是损耗的来源，通常在光遇到介质的折射率发生变化时产生。这些变化可以是由杂质、微粒或气泡引起的外在变化；也可以是由玻璃密度的波动、成分或相位态引起的内在变化。散射与光的波长呈负相关关系，因此，在光谱中的紫外或蓝光区域等波长较短时，散射损耗会比较大。使用恰当的[光纤清洁](#)、操作和存储步骤可以尽可能地减少光纤尖端的杂质，避免产生较大的散射损耗。

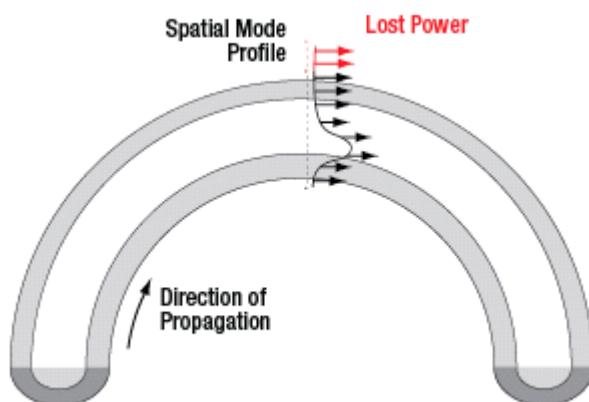
弯曲损耗

因光纤的外部和内部几何发生变化而产生的损耗称之为弯曲损耗。通常包含两大类：宏弯损耗

和微弯损耗。

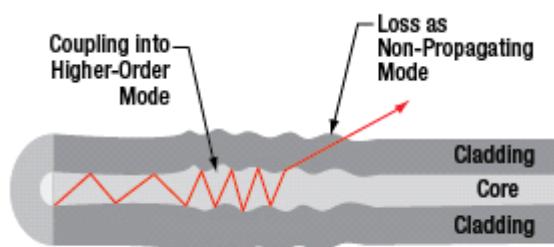
宏弯损耗一般与光纤的物理弯曲相关；例如，将其卷成圈。如右图所示，引导的光在空间上分布在光纤的纤芯和包层区域。以某半径弯曲光纤时，在弯曲外半径的光不能在不超过光速时维持相同的空间模分布。相反，由于辐射能量会损耗到周边环境中。弯曲半径较大时，与弯曲相关的损耗会比较小；但弯曲半径小于光纤的推荐弯曲半径时，弯曲损耗会非常大。光纤可以在弯曲半径较小时进行短时间工作；但如果要长期储存，弯曲半径应该大于推荐值。使用恰当的储存条件(温度和弯曲半径)可以降低对光纤造成永久性损伤的几率；[FSR1](#)光纤缠绕盘设计用来最大程度地减少高弯曲损耗。

微弯损耗由光纤的内部几何，尤其是纤芯和包层发生变化而产生。光纤结构中的这些随机变化(即凸起)会破坏全内反射所需的条件，使得传播的光耦合到非传播模中，造成泄露(详情请看右图)。与由弯曲半径控制的宏弯损耗不同，微弯损耗是由制造光纤时在光纤内造成的永久性缺陷而产生。



[Click to Enlarge](#)

宏弯损耗造成的衰减



[Click to Enlarge](#)

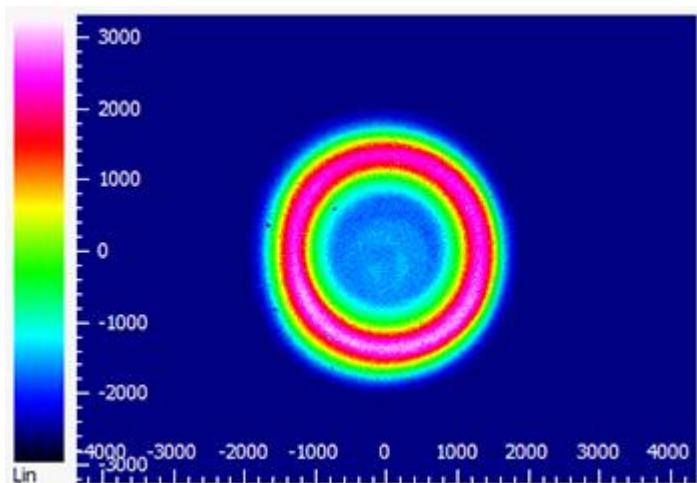
微弯损耗造成的衰减

包层模

虽然多模光纤中的大多数光通过纤芯内的TIR引导，但是由于TIR发生在包层与涂覆层/保护层的界面，在纤芯和包层内引导光的高阶模也可能存在。这样就产生了我们所熟知的包层模。这样的例子可在右边的光束分布测量中看到，其中体现了包层模包层中的光强比纤芯中要高。这些模可以不传播(即它们不满足TIR的条件)，也可以在一段很长的光纤中传播。由于包层模一般为高阶模，在光纤弯曲和出现微弯缺陷时，它们就是损耗的来源。通过接头连接两个光纤时包层模会消失，因为它们不能在光纤之间轻松耦合。

由于包层模对光束空间轮廓的影响，有些应用(比如发射到自由空间中)中可能不需要包层模。光纤较长时，这些模会自然衰减。对于长度小于10 m的光纤，消除包层模的一种办法就是将

光纤缠绕在半径合适的芯轴上，这样能保留需要的传播模式。



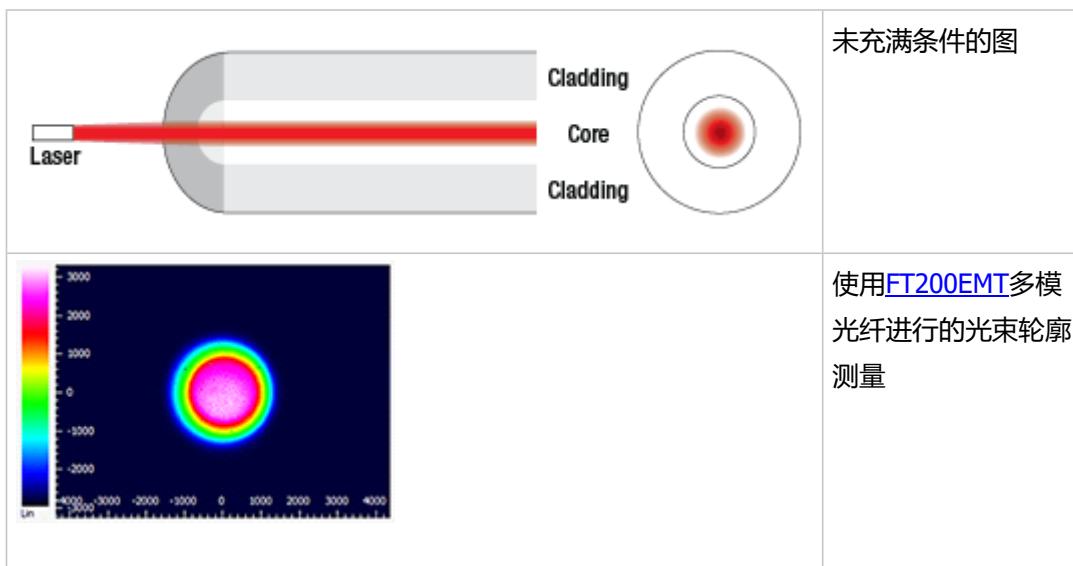
[Click to Enlarge](#)

在[FT200EMT](#)多模光纤与[M565F1](#) LED的光束轮廓中，展现了包层而不是纤芯引导的光。

入纤方式

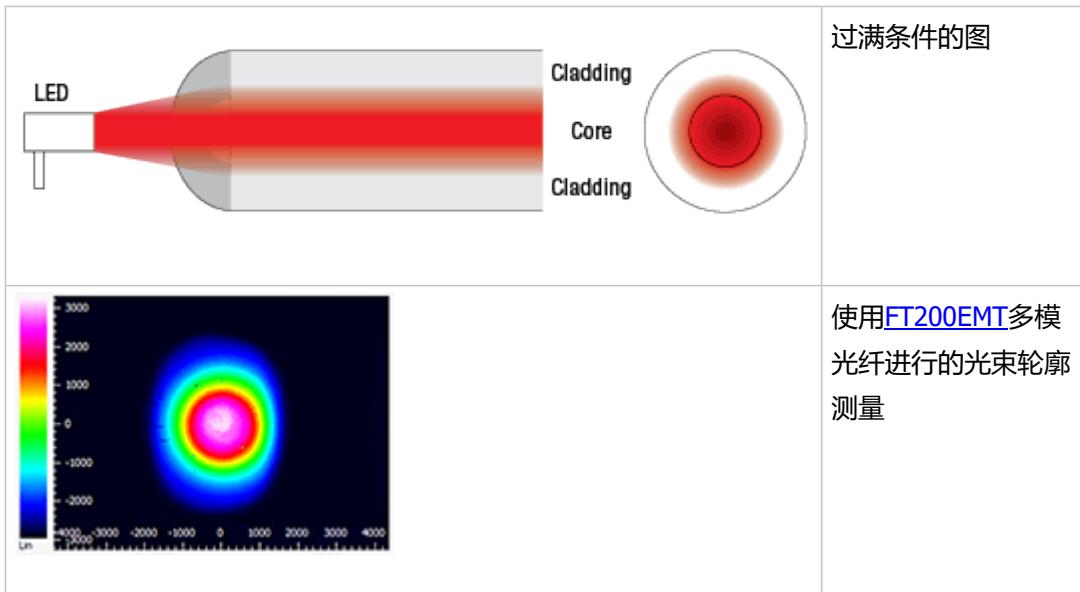
多模光纤未充满条件

对于在NA较大时接收光的多模光纤来说，光耦合到光纤的条件(光源类型、光束直径、NA)对性能有着极大影响。在耦合界面，光的光束直径和NA小于光纤的芯径和NA时，就出现了未充满的入纤条件。这种情况的常见例子就是将[激光光源](#)发射到较大的多模光纤。从下面的图和光束轮廓测量可以看出，未充满时会使光在空间上集中到光纤的中心，优先充满低阶模，而非高阶模。因此，它们对宏弯损耗不太敏感，也没有包层模。这种条件下，所测的插入损耗也会小于典型值，光纤纤芯处有着较高的功率密度。



多模光纤过满条件

在耦合界面，光束直径和NA大于光纤的芯径和NA时就出现了过满的情况。实现这种条件的一个方法就是将[LED光源](#)的光发射到较小的多模光纤中。过满时会将整个纤芯和部分包层裸露在光中，均匀充满低阶模和高阶模(请看下图)，增加耦合到光纤包层模的可能性。高阶模比例的增加意味着过满光纤对弯曲损耗会更为敏感。在这种条件下，所测的插入损耗会大于典型值，与未充满光纤条件相比，会产生较高的总输出功率。



多模光纤未充满或过满条件各有优劣，这取决于特定应用的要求。如需测量多模光纤的基准性能，Thorlabs建议使用光束直径为光纤芯径70-80%的入纤条件。过满条件在短距离时输出功率更大；而长距离(>10 - 20 m)时，对衰减较为敏感的高阶模会消失。

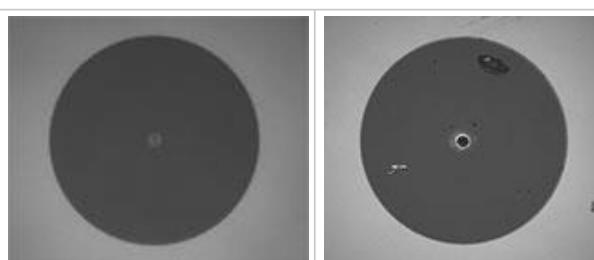
激光诱导的光纤损伤

以下教程详述了无终端(裸露的)、有终端光纤以及其他基于激光光源的光纤元件的损伤机制，包括空气-玻璃界面(自由空间耦合或使用接头时)的损伤机制和光纤玻璃内的损伤机制。诸如裸纤、光纤跳线或熔接耦合器等光纤元件可能受到多种潜在的损伤(比如，接头、光纤端面和装置本身)。光纤适用的最大功率始终受到这些损伤机制的最小值的限制。

虽然可以使用比例关系和一般规则估算损伤阈值，但是，光纤的绝对损伤阈值在很大程度上取决于应用和特定用户。用户可以以此教程为指南，估算最大程度降低损伤风险的安全功率水平。如果遵守了所有恰当的制备和适用性指导，用户应该能够在指定的最大功率水平以下操作光纤元件；如果有元件并未指定最大功率，用户应该遵守下面描述的"实际安全水平"该，以安全操作相关元件。可能降低功率适用能力并给光纤元件造成损伤的因素包括，但不限于，光纤耦合时未对准、光纤端面受到污染或光纤本身有瑕疵。

空气-玻璃界面的损伤

空气/玻璃界面有几种潜在的损伤机制。自由空间耦合或使用光学接头匹配两根光纤时，光会入射到这个界面。如果光的强度很高，就会降低功率的适用性，并给光纤造成永久性损伤。而对于使用环氧树脂将接头与光纤固定的终端光纤而言，高强度的光产生的热量会使环氧树脂熔化，进而在光路中的光纤表面留下残留物。



裸纤端面的损伤机制

光纤端面的损伤机制可以建模为大光学元件，紫外熔融石英基底的工业标准损伤阈值适用于基于石英的光纤(参考右表)。但是与大光学元件不同，与光纤空气/玻璃界面相关的表面积和光束直径都非常小，耦合单模(SM)光纤时尤其如此，因此，对于给定的功率密度，入射到光束直径较小的光纤的功率需要比较低。

右表列出了两种光功率密度阈值：一种理论损伤阈值，一种"实际安全水平"。一般而言，理论损伤阈值代表在光纤端面和耦合条件非常好的情况下，可以入射到光纤端面且没有损伤风险的最大功率密度估算值。而"实际安全水平"功率密度代表光纤损伤的最低风险。超过实际安全水平操作光纤或元件也是有可以的，但用户必须遵守恰当的适用性说明，并在使用前在低功率下验证性能。

Estimated Optical Power Densities on Air / Glass Interfacea		
Type	Theoretical Damage Thresholdb	Practical Safe Levelc
CW (Average Power)	~1 MW/cm ²	~250 kW/cm ²
10 ns Pulsed (Peak Power)	~5 GW/cm ²	~1 GW/cm ²

- 所有值针对无终端(裸露)的石英光纤，适用于自由空间耦合到洁净的光纤端面。
- 这是可以入射到光纤端面且没有损伤风险的最大功率密度估算值。用户在高功率下工作前，必须验证系统中光纤元件的性能与可靠性，因其与系统有着紧密的关系。
- 这是在大多数工作条件下，入射到光纤端面且不会损伤光纤的安全功率密度估算值。

计算单模光纤和多模光纤的有效面积

单模光纤的有效面积是通过模场直径(MFD)定义的，它是光通过光纤的横截面积，包括纤芯以及部分包层。耦合到单模光纤时，入射光束的直径必须匹配光纤的MFD，才能达到良好的耦合效率。

例如，SM400单模光纤在400 nm下工作的模场直径(MFD)大约是 $\varnothing 3 \mu\text{m}$ ，而SMF-28 Ultra单模光纤在1550 nm下工作的MFD为 $\varnothing 10.5 \mu\text{m}$ 。则两种光纤的有效面积可以根据下面来计算：

SM400 Fiber: Area = $\pi \times (\text{MFD}/2)^2 = \pi \times (1.5 \mu\text{m})^2 = 7.07 \mu\text{m}^2 = 7.07 \times 10^{-8} \text{ cm}^2$

SMF-28 Ultra Fiber: Area = $\pi \times (\text{MFD}/2)^2 = \pi \times (5.25 \mu\text{m})^2 = 86.6 \mu\text{m}^2 = 8.66 \times 10^{-7} \text{ cm}^2$

为了估算光纤端面适用的功率水平，将功率密度乘以有效面积。请注意，该计算假设的是光束具有均匀的强度分布，但其实，单模光纤中的大多数激光束都是高斯形状，使得光束中心的密度比边缘处更高，因此，这些计算值将略高于损伤阈值或实际安全水平对应的功率。假设使用连续光源，通过估算的功率密度，就可以确定对应的功率水平：

SM400 Fiber: $7.07 \times 10^{-8} \text{ cm}^2 \times 1 \text{ MW/cm}^2 = 7.1 \times 10^{-8} \text{ MW} = 71 \text{ mW}$ (理论损伤阈值)

$$7.07 \times 10^{-8} \text{ cm}^2 \times 250 \text{ kW/cm}^2 = 1.8 \times 10^{-5} \text{ kW} = 18 \text{ mW (实际安全水平)}$$

SMF-28 Ultra Fiber: $8.66 \times 10^{-7} \text{ cm}^2 \times 1 \text{ MW/cm}^2 = 8.7 \times 10^{-7} \text{ MW} = 870 \text{ mW (理论损伤阈值)}$

$$8.66 \times 10^{-7} \text{ cm}^2 \times 250 \text{ kW/cm}^2 = 2.1 \times 10^{-4} \text{ kW} = 210 \text{ mW (实际安全水平)}$$

多模(MM)光纤的有效面积由纤芯直径确定，一般要远大于SM光纤的MFD值。如要获得最佳耦合效果，Thorlabs建议光束的光斑大小聚焦到纤芯直径的70 - 80%。由于多模光纤的有效面积较大，降低了光纤端面的功率密度，因此，较高的光功率(一般上千瓦的数量级)可以无损伤地耦合到多模光纤中。

插芯/接头终端相关的损伤机制

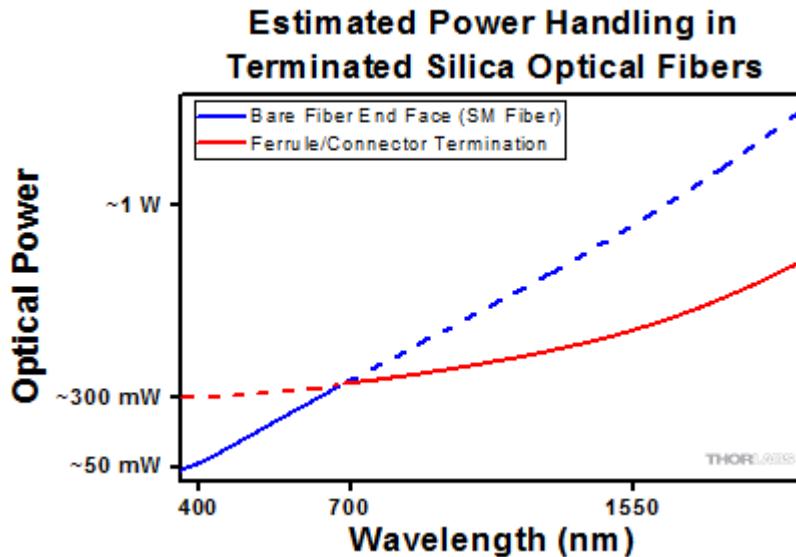
有终端接头的光纤要考虑更多的功率适用条件。光纤一般通过环氧树脂粘合到陶瓷或不锈钢插芯中。光通过接头耦合到光纤时，没有进入纤芯并在光纤中传播的光会散射到光纤的外层，再进入插芯中，而环氧树脂用来将光纤固定在插芯中。如果光足够强，就可以熔化环氧树脂，使其气化，并在接头表面留下残渣。这样，光纤端面就出现了局部吸收点，造成耦合效率降低，散射增加，进而出现损伤。

与环氧树脂相关的损伤取决于波长，出于以下几个原因。一般而言，短波长的光比长波长的光散射更强。由于短波长单模光纤的MFD较小，且产生更多的散射光，则耦合时的偏移也更大。为了最大程度地减小熔化环氧树脂的风险，可以在光纤端面附近的光纤与插芯之间构建无环氧树脂的气隙光纤接头。我们的[高功率多模光纤跳线](#)就使用了这种设计特点的接头。

确定具有多种损伤机制的功率适用性

光纤跳线或组件可能受到多种途径的损伤(比如，光纤跳线)，而光纤适用的最大功率始终受到与该光纤组件相关的最低损伤阈值的限制。

例如，右边曲线图展现了由于光纤端面损伤和光学接头造成的损伤而导致单模光纤跳线功率适用性受到限制的估算值。有终端的光纤在给定波长下适用的总功率受到在任一给定波长下，两种限制之中的较小值限制(由实线表示)。在488 nm左右工作的单模光纤主要受到光纤端面损伤的限制(蓝色实线)，而在1550 nm下工作的光纤受到接头造成的损伤的限制(红色实线)。



曲线图展现了带终端的单模石英光纤的大概功率适用水平。每条线展示了考虑具体损伤机制估算的功率水平。最大功率适用性受到所有相关损伤机制的最低功率水平限制(由实线表示)。

对于多模光纤，有效模场由纤芯直径确定，一般要远大于SM光纤的有效模场。因此，其光纤端面上的功率密度更低，较高的光功率(一般上千瓦的数量级)可以无损伤地耦合到光纤中(图中未显示)。而插芯/接头终端的损伤限制保持不变，这样，多模光纤的最大适用功率就会受到插芯和接头终端的限制。

请注意，曲线上的值只是在合理的操作和对准步骤几乎不可能造成损伤的情况下粗略估算的功率水平值。值得注意的是，光纤经常在超过上述功率水平的条件下使用。不过，这样的应用一般需要专业用户，并在使用之前以较低的功率进行测试，尽量降低损伤风险。但即使如此，如果在较高的功率水平下使用，则这些光纤元件应该被看作实验室消耗品。

光纤内的损伤阈值

除了空气玻璃界面的损伤机制外，光纤本身的损伤机制也会限制光纤使用的功率水平。这些限制会影响所有的光纤组件，因为它们存在于光纤本身。光纤内的两种损伤包括弯曲损耗和光暗化损伤。

弯曲损耗

光在纤芯内传播入射到纤芯包层界面的角度大于临界角会使光无法全反射，光在某个区域就会射出光纤，这时候就会产生弯曲损耗。射出光纤的光一般功率密度较高，会烧坏光纤涂覆层和周围的松套管。

有一种叫做双包层的特种光纤，允许光纤包层(第二层)也和纤芯一样用作波导，从而降低弯折损伤的风险。通过使包层/涂覆层界面的临界角高于纤芯/包层界面的临界角，射出纤芯的光就会被限制在包层内。这些光会在几厘米或者几米的距离而不是光纤内的某个局部点漏出，从而最大限度地降低损伤。Thorlabs生产并销售[0.22 NA双包层多模光纤](#)，它们能将适用功率提升百万瓦的范围。

光暗化

光纤内的第二种损伤机制称为光暗化或负感现象，一般发生在紫外或短波长可见光，尤其是掺锗纤芯的光纤。在这些波长下工作的光纤随着曝光时间增加，衰减也会增加。引起光暗化的原因大部分未知，但可以采取一些措施来缓解。例如，研究发现，羟基离子(OH)含量非常低的光纤可以抵抗光暗化，其它掺杂物比如氟，也能减少光暗化。

即使采取了上述措施，所有光纤在用于紫外光或短波长光时还是会有光暗化产生，因此用于这些波长下的光纤应该被看成消耗品。

制备和处理光纤

通用清洁和操作指南

建议将这些通用清洁和操作指南用于所有的光纤产品。而对于具体的产品，用户还是应该根据辅助文献或手册中给出的具体指南操作。只有遵守了所有恰当的清洁和操作步骤，损伤阈值的计算才会适用。

1. 安装或集成光纤(有终端的光纤或裸纤)前应该关掉所有光源，以避免聚焦的光束入射在接头或光纤的脆弱部分而造成损伤。
2. 光纤适用的功率直接与光纤/接头端面的质量相关。将光纤连接到光学系统前，一定要检查光纤的末端。端面应该是干净的，没有污垢和其它可能导致耦合光散射的污染物。另外，如果是裸纤，使用前应该剪切，用户应该检查光纤末端，确保切面质量良好。
3. 如果将光纤熔接到光学系统，用户首先应该在低功率下验证熔接的质量良好，然后在高功率

下使用。熔接质量差，会增加光在熔接界面的散射，从而成为光纤损伤的来源。

4. 对准系统和优化耦合时，用户应该使用低功率；这样可以最大程度地减少光纤其他部分(非纤芯)的曝光。如果高功率光束聚焦在包层、涂覆层或接头，有可能产生散射光造成的损伤。

高功率下使用光纤的注意事项

一般而言，光纤和光纤元件应该要在安全功率水平限制之内工作，但在理想的条件下(极佳的光学对准和非常干净的光纤端面)，光纤元件适用的功率可能会增大。用户首先必须在他们的系统内验证光纤的性能和稳定性，然后再提高输入或输出功率，遵守所有所需的安全和操作指导。以下事项是一些有用的建议，有助于考虑在光纤或组件中增大光学功率。

要防止光纤损伤光耦合进光纤的对准步骤也是重要的。在对准过程中，在取得最佳耦合前，光很容易就聚焦到光纤某部位而不是纤芯。如果高功率光束聚焦在包层或光纤其它部位时，会发生散射引起损伤

1. 使用[光纤熔接机](#)将光纤组件熔接到系统中，可以增大适用的功率，因为它可以最大程度地减少空气/光纤界面损伤的可能性。用户应该遵守所有恰当的指导来制备，并进行高质量的光纤熔接。熔接质量差可能导致散射，或在熔接界面局部形成高热区域，从而损伤光纤。
2. 连接光纤或组件之后，应该在低功率下使用光源测试并对准系统。然后将系统功率缓慢增加到所希望的输出功率，同时周期性地验证所有组件对准良好，耦合效率相对光学耦合功率没有变化。
3. 由于剧烈弯曲光纤造成的弯曲损耗可能使光从受到应力的区域漏出。在高功率下工作时，大量的光从很小的区域(受到应力的区域)逃出，从而在局部形成产生高热量，进而损伤光纤。请在操作过程中不要破坏或突然弯曲光纤，以尽可能地减少弯曲损耗。
4. 用户应该针对给定的应用选择合适的光纤。例如，大模场光纤可以良好地代替标准的单模光纤在高功率应用中使用，因为前者可以提供更佳的光束质量，更大的MFD，且可以降低空气/光纤界面的功率密度。
5. 阶跃折射率石英单模光纤一般不用于紫外光或高峰值功率脉冲应用，因为这些应用与高空间功率密度相关。

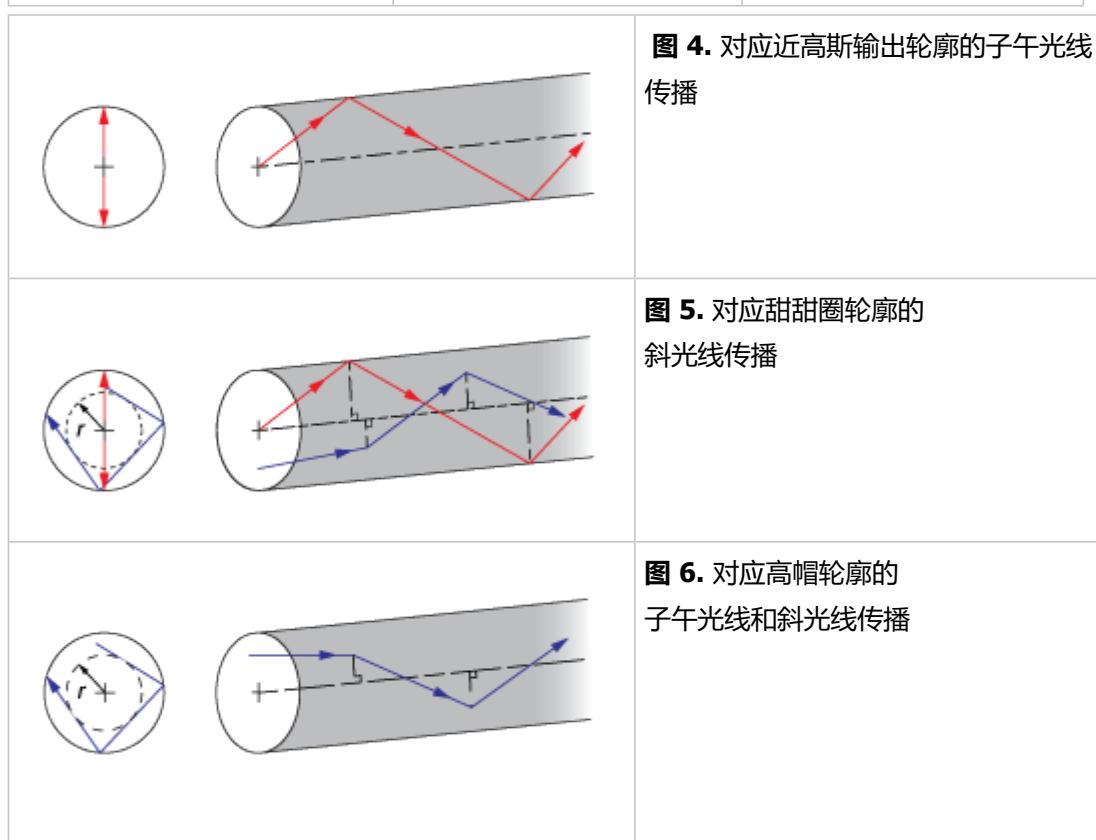
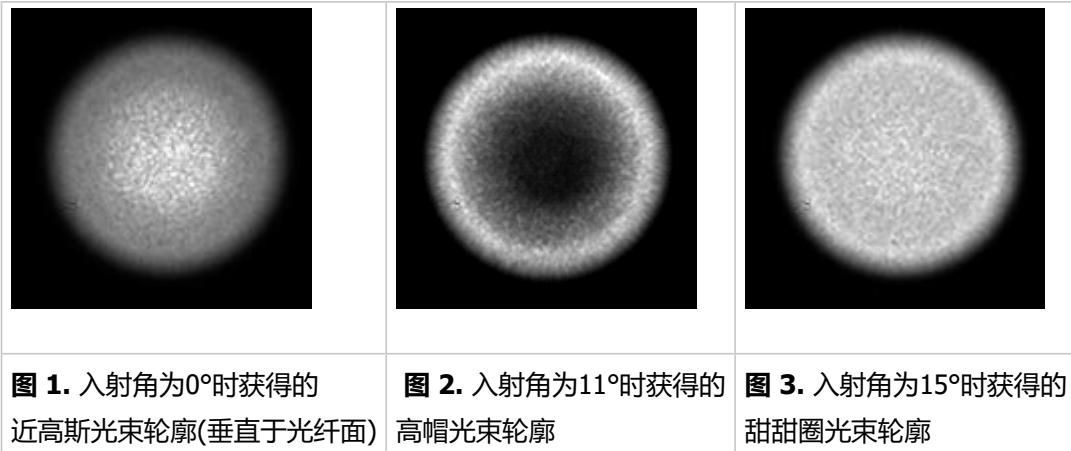
利用多模光纤修改光束轮廓

在此给出探索多模光纤输出光束轮廓如何受到光束入射角影响的实验测量结果。有些应用中可能需要其他诸如高帽或甜甜圈等轮廓的光束分布，而不需要一般光学元件提供的固有高斯分布。这里，我们探索了改变聚焦激光束进入多模光纤跳线时的入射角所产生的影响。将光垂直聚焦于光纤面，会产生近高斯输出光束轮廓(图1)，增大入射角则会产生高帽(图2)和甜甜圈(图3)形状的光束轮廓。这些结果展现了利用多模光纤改变光束轮廓的方法。

实验中，我们使用一根[M38L01](#)纤芯 $200\text{ }\mu\text{m}$ 、数值孔径0.39的阶跃折射率光纤跳线(裸纤型号[FT200EMT](#))作为聚焦光束耦合的待测光纤。将输入光以 0° 、 11° 和 15° 入射到多模光纤的入射面，分别产生初始轮廓、高帽轮廓和甜甜圈轮廓。每次改变角度时，都要优化输入光纤的对准，同时用功率计监测输出功率，确保实现最大的耦合。然后，在9秒的曝光时间下采集图像，并评估光束轮廓的形状。注意，曝光过程中，会在耦合光学元件之间(待测光纤之前)手动旋转1500 grit的散射片，以减少空间相干，形成干净的输出光束轮廓。

假设一种光线追迹模型，存在两种沿着多模光纤传播的常见光线：(a)子午光线，每次反射之

后都通过光纤的中心轴，和(b)斜光线，不通过光纤的中心轴。下面的图片展现了实验过程中观察到的三种基本光线传播情况。图4和图6分别绘制出了子午光线和斜光线通过多模光纤的传播，以及在光纤输出端的相关理论光束分布。如图6所示，斜光线沿着光纤以与半径 r 为圆的内部焦散线相切的螺旋路径传播。图5描绘了子午光线和斜光线的光束传播和光束分布。我们通过改变光耦合到多模光纤的入射角，修改子午光线与斜光线的传播，使输出光束从近高斯分布(主要是子午光线，请看图1)变成高帽分布(子午光线和斜光线混合，请看图2)，再变成甜甜圈分布(主要是斜光线，请看图3)。图4到图6显示的光束轮廓都在离光纤端面5 mm处获得。这些结果体现了利用标准的多模光纤跳线以一种相对低成本的方法将入射高斯轮廓修改成高帽和甜甜圈轮廓，且损耗极微。有关使用的实验装置和总结结果详情，请[点击这里](#)。



PZ光纤概述

偏振(PZ)光纤(也就是Zing™光纤)是只允许一个偏振方向的光通过的特种光纤。这种单偏振传

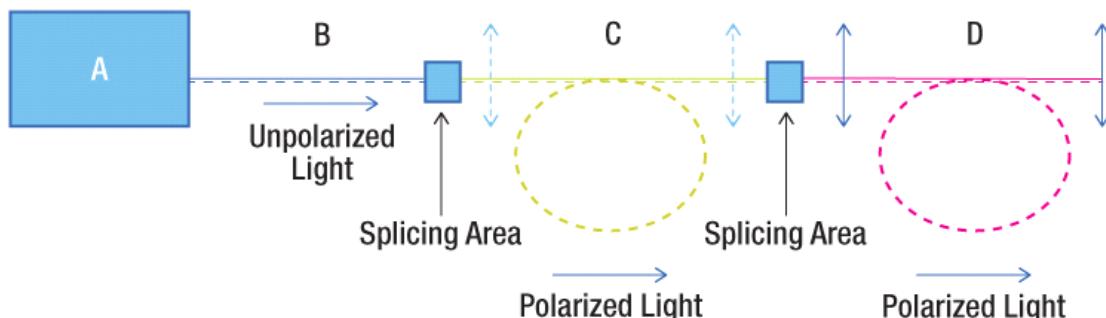
播模式相比单模(SM)光纤和保偏(PM)光纤有几种优势。保偏光纤保持与双折射轴对准的偏振方向不变，但它可以让任何偏振方向的光透过，因此会产生偏振串扰。SM光纤可通过应力产生双折射(查看[手动光纤偏振控制](#))，使光纤的作用更接近波片。在这种情况下，虽然偏振轴可控，但SM光纤不使光发生偏振。

相比之下，PZ光纤只传导一个偏振方向，其他方向的偏振光都不能通过。因此，PZ光纤使通过的光发生偏振，显著抑制了不能通过的光。共轴偏振器对不必要的偏振方向可以产生20至30dB的抑制，而PZ光纤可在设计波长范围内实现≥30dB的抑制。此外，用户对光纤施加应力，手动调节偏振窗口可实现超过35dB的抑制。由于应力可以改变PZ光纤的运作，因此"部署"成为光纤的重要性能。部署是指光纤的摆放方式，是拉直、卷曲还是任意堆放。

PZ光纤应用

值得注意的是，部署是光纤的重要性能。我们的PZ光纤具有很宽的偏振窗口，偏振窗口的宽度和中心波长取决于光纤的摆放方式。PZ光纤的标称使用波长接近设计波长，任何摆放部署都可偏振。然而，对于其他应用，用户应确保部署对偏振窗口的偏移可与光源波长重叠。这个方法最适用于诸如激光等窄线宽的光源。对于宽带光源，PZ光纤需要适当的盘绕，使偏振窗口的宽度和中心波长与光源重叠。

在PZ光纤输入端添加消偏器很有益处，因为它可以确保入射光均匀偏振，避免各种偏振器引起的功率变化。消偏器可由两段SM光纤以45度熔接制成(长度取决于光源)。对于这样的系统，PZ光纤一般以45度角耦合消偏器的输出，达到最佳消偏效果(注意：如果用跳线，应通过抵消45°时任一光纤中的键，将一个终端相对于消偏光纤与PZ光纤接触处的另一个终端旋转45度)。当PZ光纤的输入光消偏后，入射到PZ光纤快轴和慢轴的光相等，产生一致的3dB抑制和稳定的输出功率。下图为用我们保偏光纤和非偏振光源搭建的示例系统。图下面的表格列出了系统中的元件。



将PZ光纤卷到更小的直径会产生窄偏振窗口和中心波长的蓝移。虽然卷曲PZ光纤会产生更高的损耗，但也会得到更好的偏振消光比。如果损耗太高，意味着光纤卷曲得太紧；相反，如果偏振消光比太低，说明卷曲得不够紧。例如，HB1060Z PZ光纤想要实现35dB的消光比，需将2米长的光纤卷曲成5厘米的圆环。上图显示了这种方法。非偏振光入射到卷曲的PZ光纤达到预期效果。再将PZ光纤熔接到我们的保偏光纤，随后导出系统。为实现更稳定的性能，建议使用长为3-5米的HB1060Z光纤，或长为4-10米的HB830Z和HB1550Z光纤。但是，由于PZ光纤高双折射率，偏振窗口仍会很宽，这样可以让用户有多种封装和部署选择。

光纤到自由空间反射损耗比较

在光纤到自由空间和自由空间到光纤应用中，由于折射率的不同，在玻璃-空气界面一般都要发生菲涅尔反射。此反射率就是反射损耗，或者说信号反射回激光源而不是激励光纤中。对于

一个标准的未镀膜的光纤，反射率(或者用百分数表示的反射损耗)可以通过下面的公式计算(假设法线入射):

R 是反射率， n_0 表示空气折射率(~ 1)， n_s 是纤芯折射率(~ 1.5)。采用这些典型数值，未镀膜光纤通常约有4%的反射率。增透膜跳线可以在光纤接头处减少背反射，因此减小反射损耗增加透射率。

实验装置

测试镀增透膜和标准保偏跳线从光纤到自由空间应用的反射损耗。首先，激光源连接到一个 2×2 50:50 的单模耦合器上，耦合器另一端的管脚连接功率计和终端负载(图1)。在这个配置中功率计测量和它相连耦合器管脚中的光功率。然后未镀膜跳线接头连接到耦合器上，而镀膜接头置于空气中未连接。功率计接到激光源所在端的耦合器管脚并测量反射光功率，如图2所示。采用这些数据并考虑耦合器的插入损耗，用分贝表示的反射损耗计算如下：

$$RL(dB) = 10 \log_{10} \frac{P_r}{P_i} - IL_c(dB)$$

RL 表示用百分数或者dB表示的反射损耗， P_i 是图1所示的入射光功率， P_r 是图1所示反射光功率， IL_c 表示耦合器插入损耗。百分比表示反射损耗(反射比)也可以计算如下：

$$\text{Reflectance} = 10^{-RL(dB)/10} \times 100\%$$

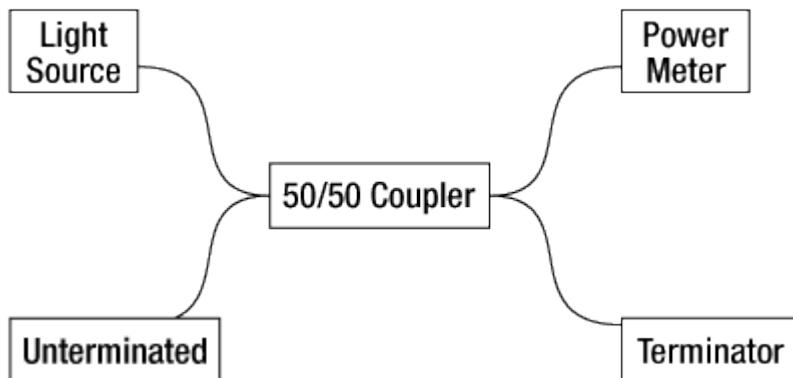


图1：测量入射光功率

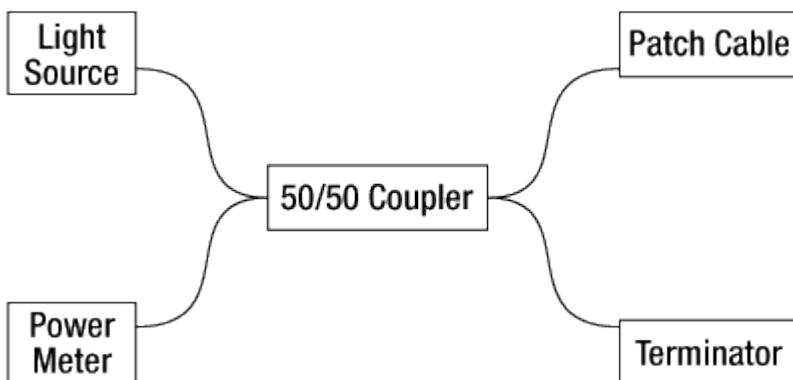


图2：测量反射光功率

实验结果

镀增透膜和未镀膜的跳线都在相同实验条件下测量，测量结果如下表所示。增透膜跳线的反射损耗明显降低。

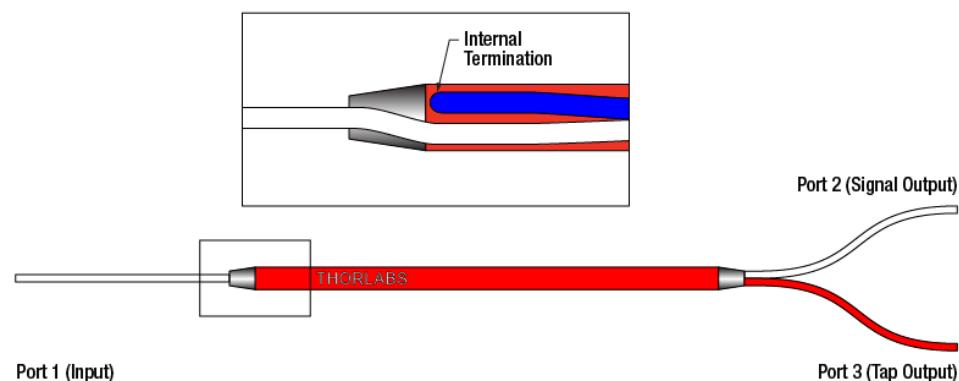
光纤元件

- [光纤隔离器](#)
- [光纤耦合器](#)

光纤耦合器教程

1x2熔融光纤耦合器规格的定义

1x2耦合器的制造程序与我们的2x2光纤耦合器相同，只是第二个输入端口用可最小化背反射的专门方法在内部制作终端。对于不同波长光的合束应用，Thorlabs提供了一系列[波分复用器\(WDM\)](#)。我们1x2耦合器端口配置示意图如下。



额外损耗

额外损耗(dB)为总输入功率和总输出功率的比值：

$$\text{Excess Loss(dB)} = 10 \log \frac{P_{\text{port1}}(\text{mW})}{P_{\text{port2}}(\text{mW}) + P_{\text{port3}}(\text{mW})}$$

P_{port1}是1端口的输入功率，P_{port2}+P_{port3}是2和3端口的总输出功率。所有的功率都用mW表示。

光学回波损耗(ORL)/方向性

方向性指将端口1用作输入时，一部分输入光在耦合器内部光纤终端处损失。它可用下式以dB为单位计算：

$$\text{Directivity(dB)} = 10 \log \frac{P_{\text{port1b}}(\text{mW})}{P_{\text{port1}}(\text{mW})}$$

其中P_{port1}和P_{port1b}分别为端口1和内部终端光纤的光功率(mW)。这个输出是耦合器分支相接之处的背反射的结果，它表示了端口2和3的总光输出的损耗。对于50:50的耦合器。方向性等于光学回波损耗(ORL, optical return loss)。

插入损耗

插入损耗定义为耦合器的一个输出分支(信号输出或低功率输出)处输入功率与输出功率的比值。插入损耗总是以分贝(dB)为单位。它一般定义为：

$$\text{Insertion Loss}(dB) = 10 \log \frac{P_{in}(\text{mW})}{P_{out}(\text{mW})}$$

其中Pin和Pout是输入功率和输出功率(mW)。对于我们的1x2耦合器，信号输出和低功率输出都提供了插入损耗规格；我们的规格总是先列出信号输出的插入损耗。如要定义特定输出(端口2或端口3)的插入损耗，方程式可重写为：

$$\text{Insertion Loss}_{port1 \rightarrow port2}(dB) = 10 \log \frac{P_{port1}(\text{mW})}{P_{port2}(\text{mW})}$$

$$\text{Insertion Loss}_{port1 \rightarrow port3}(dB) = 10 \log \frac{P_{port1}(\text{mW})}{P_{port3}(\text{mW})}$$

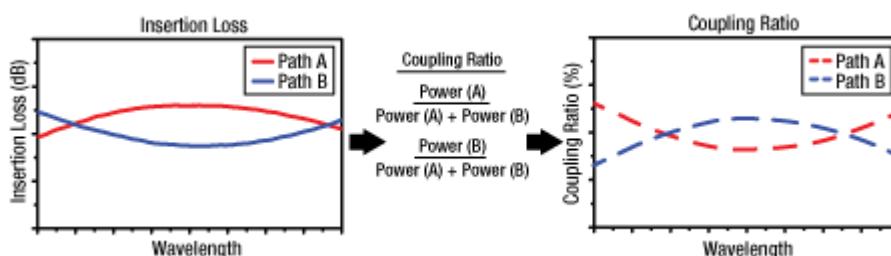
插入损耗其实包含耦合(例如，传播到另一输出分支的光)和额外损耗(例如，从耦合器损失的光)的影响。每个输出、信号和低功率输出所允许的最大插入损耗都是已明确给出。由于每个输出的插入损耗与耦合到另一输出的光相关，耦合器的两个输出不会同时具有最大插入损耗。
计算插入损耗，以dBm为单位

插入损耗也可以用功率计算，以dBm为单位。下面方程式为以mW与dBm为单位表达的功率之间的关系：

$$P(\text{dBm}) = 10 \log P(\text{mW})$$

然后，插入损耗可以dB为单位按下式计算：

$$\text{Insertion Loss}(dB) = P_{in}(\text{dBm}) - P_{out}(\text{dBm})$$

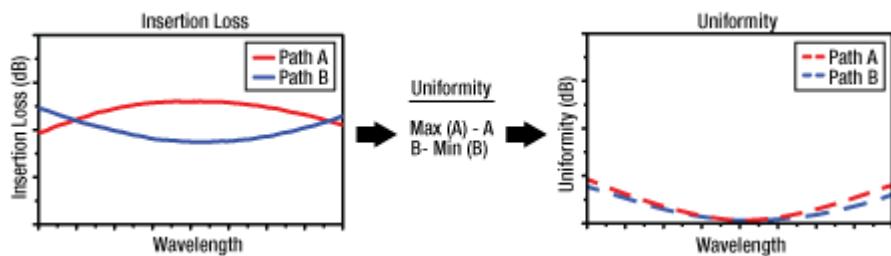


[Click to Enlarge](#)

耦合比计算的图形表示。

耦合比

插入损耗(dB)是输入功率与耦合器每个分支的输出功率的比值，波长是它的函数变量。它同时能得出耦合比和额外损耗两个参数。耦合比可从测量的插入损耗计算出。耦合比(%)是来自每个输出端口(2和3)的光功率与两个输出端口的总光功率之和的比值，波长是它的函数变量。路径A(Path A)表示光从端口1传播到端口2，而路径B(Path B)表示光从端口1传播到端口3。它不会受到光谱特性(比如水吸收区域)影响，因为两个输出分支受到影响的程度相同。点击下方蓝色信息图标可查看显示了我们的宽带耦合器的耦合比的持续性曲线图。



[Click to Enlarge](#)

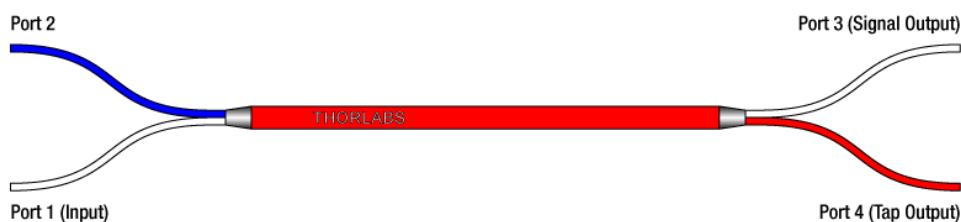
均匀度计算的图形表示

均匀度

均匀度也可以从测量的插入损耗计算。均匀度是插入损耗在带宽范围上的变化(dB为单位)。它是插入损耗在光谱范围上如何均匀分布的度量。路径A的均匀度是最高插入损耗值与红色实线插入损耗曲线之差(在上面的插入损耗曲线图中)。路径B的均匀度是蓝色实线插入损耗曲线与最低插入损耗值之差。点击下方蓝色信息图标可查看显示了我们的宽带耦合器的均匀度的持续性曲线图。

2x2熔融光纤耦合器规格的定义

本标签页简单解释了我们如何确定2x2耦合器的若干关键规格。耦合器的端口在下方示意图中有定义。在下文中，光输入到端口1。对于我们的宽带耦合器，端口3和端口4分别为信号输出和低功率输出。



额外损耗

额外损耗(dB)为总输入功率与总输出功率的比值：

$$\text{Excess Loss(dB)} = 10 \log \frac{P_{\text{port1}}(\text{mW})}{P_{\text{port3}}(\text{mW}) + P_{\text{port4}}(\text{mW})}$$

P_{port1}是1端口的输入功率，P_{port3}+P_{port4}是3和4端口的总输出功率，假设2端口没有输入功率。所有的功率都用mW表示。

光学回波损耗(ORL)/方向性

方向性指一部分输入光通过一个输入端口从耦合器出射(即，光在端口2出射)，而不是从预期输出端口出射。它可以用下面的方程式，以dB为单位计算：

$$\text{Directivity(dB)} = 10 \log \frac{P_{\text{port1}}(\text{mW})}{P_{\text{port2}}(\text{mW})}$$

其中P_{port1}和P_{port2}分别为端口1和端口2的光功率(mW)。这个输出是耦合器分支相接之处的背向反射的结果，它表示了端口3和4的总光输出的损耗。对于50:50的耦合器。方向性等于光学回波损耗(ORL, optical return loss)。

插入损耗

插入损耗定义为耦合器的一个输出分支(信号输出或低功率输出)处输入功率与输出功率的比值。插入损耗总是以分贝(dB)为单位。它一般用下式定义：

$$\text{Insertion Loss (dB)} = 10 \log \frac{P_{in} (\text{mW})}{P_{out} (\text{mW})}$$

其中Pin和Pout是输入功率和输出功率(mW)。对于我们的2x2耦合器，信号输出和低功率输出都提供了插入损耗规格；我们的规格总是先列出信号输出的插入损耗。如要定义特定输出(端口3或端口4)的插入损耗，方程式可重写为：

$$\text{Insertion Loss}_{\text{port1} \rightarrow \text{port3}} (\text{dB}) = 10 \log \frac{P_{\text{port1}} (\text{mW})}{P_{\text{port3}} (\text{mW})}$$

$$\text{Insertion Loss}_{\text{port1} \rightarrow \text{port4}} (\text{dB}) = 10 \log \frac{P_{\text{port1}} (\text{mW})}{P_{\text{port4}} (\text{mW})}$$

一个类似的方程式可用于定义端口1处输入，端口2输出的插入损耗。然而，如上文所述，它已经被定义为耦合器的方向性了。

插入损耗其实包含耦合(例如，传播到另一输出分支的光)和额外损耗(例如，从耦合器损失的光)的影响。每个输出、信号和低功率输出所允许的最大插入损耗都是已明确给出。由于每个输出的插入损耗与耦合到另一输出的光相关，耦合器的两个输出不会同时具有最大插入损耗。

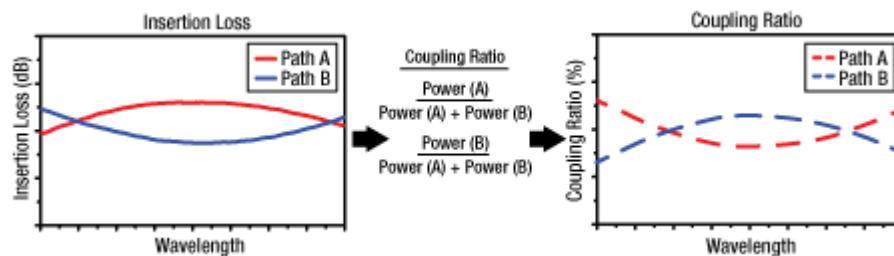
计算插入损耗，以dBm为单位

插入损耗也可以用功率计算，以dBm为单位。下方方程式为以mW与dBm为单位表达的功率之间的关系：

$$P(\text{dBm}) = 10 \log P(\text{mW})$$

然后，插入损耗可以dB为单位按下式计算：

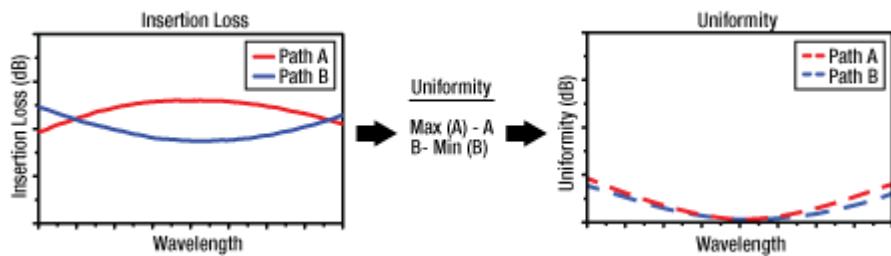
$$\text{Insertion Loss (dB)} = P_{in} (\text{dBm}) - P_{out} (\text{dBm})$$



耦合比计算的图形表示。

耦合比

插入损耗(dB)是耦合器每个分支输入功率与输出功率的比值，波长是它的函数变量。它同时能得出耦合比和额外损耗两个参数。耦合比可从测量的插入损耗计算出。耦合比(%)是来自每个输出端口(A和B)的光功率与两个输出端口的总光功率之和的比值，波长是它的函数变量。它不会受到光谱特性(比如水吸收区域)影响，因为两个输出分支受到影响的程度相同。点击下方蓝色信息图标可查看显示了我们的宽带耦合器的耦合比的持续性曲线图。



[Click to Enlarge](#)

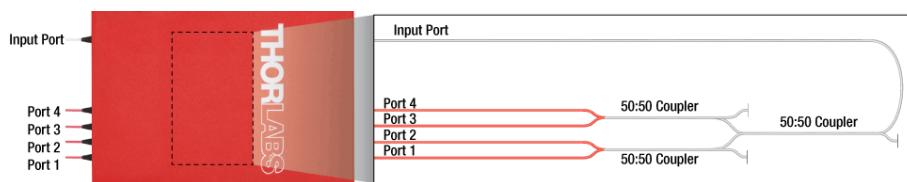
均匀度计算的图形表示。

均匀度

均匀度也可以从测量的插入损耗计算。均匀度是插入损耗在带宽范围上的变化(dB为单位)。它是插入损耗在光谱范围内如何均匀分布的度量。路径A的均匀度是最高插入损耗值与红色实线插入损耗曲线之差(在上面的插入损耗曲线图中)。路径B的均匀度是蓝色实线插入损耗曲线与最低插入损耗值之差。点击下方蓝色信息图标可查看显示了我们的宽带耦合器的均匀度的持续性曲线图。

1x4熔融光纤耦合器规格的定义

此选项卡简要说明了我们如何确定1x4耦合器的几个关键规格。1x4耦合器是在内部使用三个50:50耦合器制造的，以在四个输出之间平均分配输入信号(如下图所示)。所有未使用的端口均采用专有方法终止，以减少背向反射。不建议将1x4耦合器用于光组合应用，而应仅用于分离光。为了组合不同波长的光，Thorlabs提供了一系列[波分复用器\(WDM\)](#)。1x4耦合器上的端口配置如下图所示。



超额损失

以dB为单位的过量损耗由总输入功率与总输出功率之比确定：

$$\text{Excess Loss}(dB) = 10 \log \frac{P_{\text{input}}(mW)}{P_{\text{port1}}(mW) + P_{\text{port2}}(mW) + P_{\text{port3}}(mW) + P_{\text{port4}}(mW)}$$

P_{input}是输入功率和P_{PORT1} + P_{端口2} + P_{PORT3} + P_{接口4}是总的输出功率。所有功率均以mW表示。

光学回波损耗(ORL)/方向性

方向性是指在耦合器外壳内内部端接的光纤末端损失的一部分输入光。可以使用以下公式以dB为单位计算：

$$\text{Directivity}(dB) = 10 \log \frac{P_{t1}(mW) + P_{t2}(mW) + P_{t3}(mW)}{P_{\text{input}}(mW)}$$

其中P_{t1}、P_{t2}和P_{t3}是上图中所示的内部端接光纤末端的光功率(以mW为单位)。这是在

每个耦合器结点处发生背反射的结果，并表示在输出端口输出的总光量有所损失。对于均分的1x4耦合器，方向性等于光学回波损耗（ORL）。

插入损耗

插入损耗定义为耦合器输出支路之一处输入功率与输出功率之比。插入损耗始终以分贝(dB)为单位指定。通常使用以下公式定义：

$$\text{Insertion Loss}(dB) = 10 \log \frac{P_{in}(mW)}{P_{out}(mW)}$$

其中 P_{in} 和 P_{out} 是输入和输出功率（以mW为单位）。对于我们的1x4耦合器，为每个输出端口提供了插入损耗规范。为了定义特定输出（例如，端口1或端口2）的插入损耗，将等式重写为：

$$\text{Insertion Loss}_{input \rightarrow port1}(dB) = 10 \log \frac{P_{input}(mW)}{P_{port1}(mW)}$$

$$\text{Insertion Loss}_{input \rightarrow port2}(dB) = 10 \log \frac{P_{input}(mW)}{P_{port2}(mW)}$$

插入损耗本质上既包括耦合效应（例如，传输到另一个输出支路的光），也包括过度损耗（例如，从耦合器中丢失的光）的影响。指定了每个输出的最大允许插入损耗。因为每个输出中的插入损耗与耦合到其他输出的光相关，所以没有耦合器会同时在所有输出中具有最大的插入损耗。

使用以dBm

为单位表示的功率来计算插入损耗插入损耗也可以通过以dBm为单位表示的功率来轻松计算。

以下等式显示了以mW和dBm表示的功率之间的关系：

$$P(dBm) = 10 \log P(mW)$$

然后，以dB为单位的插入损耗可以计算如下：

$$\text{Insertion Loss}(dB) = P_{in}(dBm) - P_{out}(dBm)$$

耦合比

插入损耗（以dB为单位）是输入功率与耦合器各分支的输出功率之比与波长的关系。它既捕获了耦合比又捕获了额外的损耗。耦合比由测得的插入损耗计算得出。耦合率（%）是每个输出端口的光功率与所有输出端口的总功率之和与波长之比。它不受光谱特征（例如吸水区域）的影响，因为所有输出分支均受到相同的影响。

均匀度

均匀度也由测得的插入损耗来计算。均匀度是带宽上插入损耗随波长的变化（以dB为单位）。它是插入损耗在频谱范围内分布均匀程度的一种度量。均匀性定义为给定波长下一个输出分支中的插入损耗与同一输出分支中指定波长范围内插入损耗的最大值或最小值之差。

一般耦合实例

2x2熔融光纤耦合器可以最小损耗并且以指定耦合比在两根光纤之间分光或混光。Thorlabs库存提供的耦合器可选择四种耦合比之一：50:50、75:25、90:10或99:1。我们所有熔融光纤耦

合器都是双向的，意味着所有端口都可以用作输入。右边的视频为几个简单的耦合实例。术语"信号输出"和"输出较少的端口"分别指更高功率输出和更低功率输出。举例说明，如果光输入到TW1064R1A2A耦合器的白色端口(99:1耦合比)，99%的透射光耦合到耦合器另一侧的白色端口，而剩下的1%耦合到红色端口。在这个实例中，第二个白色端口称为信号输出端口，且红色端口称为输出较少的端口。对于一个50:50的耦合器，信号输出和低功率输出具有相同的功率输出。

在我们的宽带耦合器中，信号总是从蓝色传输到红色，或白色传输到白色，而输出较少的路径总是从蓝色传输到白色，或者白色到红色；下面的图应该从左边读到右边。对于我们的窄带耦合器，请参看耦合器附带的数据表，以确定信号传输路径和输出较少的路径。

耦合比	插入损耗 (信号)	插入损耗 (分接)
90:10	0.6分贝	10.1分贝
50:50	3.2分贝	3.2分贝

特定耦合实例

在下面的实例中，两个2x2 1300 nm宽带光纤耦合器(50:50和90:10的耦合比)使用输入信号A和B。右表列出了每个耦合器的插入损耗规格(信号输出和低功率输出)。如要计算任何给定输出处的功率，从输入功率减去信号输出和低功率输出的插入损耗(以dBm为单位)。

实例1：从信号输出分光

对于这个实例，耦合器用于从单根输入分光，分出的光进入信号输出和低功率输出端口，如下图中所示。在下表中，输出端口用绿色显示。

港口	90:10耦合比		50:50耦合比	
	信号A	信号B	信号A	信号B
1 (输入)	10 dBm (10毫瓦)	-	10 dBm (10毫瓦)	-
2 (未使用)	-	-	-	-
3 (信号输出)	9.4 dBm (8.7毫瓦)	-	6.8 dBm (4.8毫瓦)	-
4 (分接输出)	-0.1 dBm (0.1毫瓦)	-	6.8 dBm (4.8毫瓦)	-

实例2：从两个输出混合两个信号

在该实例中，耦合器用于混合两个输入(指示为信号A和信号B)的光。输出光是一个混合信号，它包含信号A和信号B，两者的比例取决于耦合比。下表中标明了所有端口。在下表中，输出端口用绿色显示。

港口	90:10耦合比		50:50耦合比	
	信号A	信号B	信号A	信号B
1 (输入A)	5 dBm (3.2毫瓦)	-	5 dBm (3.2毫瓦)	-
2 (输入B)	-	8 dBm (6.3毫瓦)	-	8 dBm (6.3毫瓦)
3 (输出)	4.4 dBm (2.8毫瓦)	-2.1 dBm (0.6毫瓦)	1.6 dBm (1.4毫瓦)	4.8 dBm (3.0毫瓦)
4 (输出)	-5.1 dBm (0.3毫瓦)	7.4 dBm (5.5毫瓦)	1.6 dBm (1.4毫瓦)	4.8 dBm (3.0毫瓦)

实例3：耦合一个返回的信号，其中端口4上具有反射体

在此，耦合器用于从单根输入分光，但是在这个实例中，端口4上具有一个100%的反射体，

如下表中所示。结果，光再次被反射回到耦合器中，且再次分光。下图中标明了端口。在下表中，初始路径的输出端口用绿色显示。

端口	90:10耦合比		50:50耦合比	
	信号A	反射信号A	信号A	反射信号A
1 (输入)	6 dBm (4.0毫瓦)	-14.2 dBm (0.04毫瓦)	6 dBm (4.0毫瓦)	-0.4 dBm (0.9毫瓦)
2 (无输入)	-	-4.7 dBm (0.34毫瓦)	-	-0.4 dBm (0.9毫瓦)
3 (信号输出)	5.4 dBm (3.5毫瓦)	-	2.8 dBm (1.9毫瓦)	-
4 (反射输出)	反射-4.1 dBm (0.39 mW)	-	反射的2.8 dBm (1.9 mW)	-
单击 每个端口上的配电图				

光源

2020年4月23日

激光二极管

半导体激光器

半导体激光器包含元素周期表 $III-V$ 族两种元素、三种元素和四种元素的各种组合。半导体激光器通过 II 和 V 族元素或 IV 和 VI 族元素的组合能够具有从蓝光(400 nm左右)到IR的发射范围。由于发射范围宽，而且器件外形小、工作电流低、工作成本低、效率高，因此半导体激光器是目前最重要、使用最广泛的激光器类型之一。

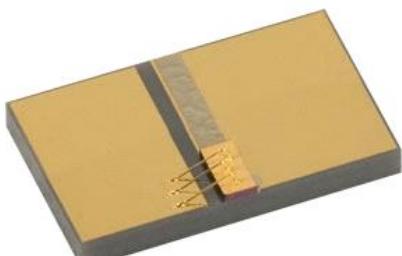
法布里-珀罗激光二极管

半导体激光器最简单的类型是法布里-珀罗(FP)激光二极管。对于FP激光二极管，沿晶体轴向切出半导体的两个平行端面，相当于反射镜构成的法布里-珀罗激光腔，以半导体作为增益介质。反射镜端面通过镀光学膜优化输出功率，激光从低反射率前端面发射，后端面具有高反射率，能够降低整体的反射损耗。半导体介质的增益谱很宽，支持FP腔很多纵模的发射。因此，FP激光二极管通常以多纵模工作。

如果FP激光二极管把光约束在单横模(也叫“单空间模式”，但一般简称“单模”)光波导中，那么纵模间距 $\Delta v = c/2nL$ ，其中c是光速，L是激光二极管芯片长度，n是半导体波导的群折射率。用波长($\Delta\lambda = \lambda^2 / 2nL$)表示模式间距一般更方便，因为这是光谱分析仪直接测量的结果。

比如，对于典型群折射率n = 3.5，腔长L = 1 mm的情况，在635 nm处纵模间距 $\Delta\lambda = 0.05$ nm，在1550 nm处纵模间距 $\Delta\lambda = 0.3$ nm。激发纵模数和不同模式的功率比[通过边模抑制比(SMSR)表征]很大程度上取决于半导体增益材料(AlGaAs、InGaAsP和AlGaInP等等)以及偏置电流和温度。对于GaAs FP激光器，经常可以通过调节偏置电流/温度，以在有限的电流/温度范围内获得SMSR为5-10 dB的单纵模工作。如果要获得稳定的单纵模工作，并且具有高SMSR(>30 dB)和窄线宽(< 10 MHz)，可以使用其它激光二极管类型，比如分布反馈(DFB)、分布布拉格反射镜(DBR)和垂直腔面发射激光器(VCSEL)。这些半导体激光器类型将在下方讨论。

一般地，通过改变温度和/或电流可以调节激光二极管的输出功率和波长。对于红外激光二极管这尤其明显，因为微弱的温度变化都可能明显影响小带隙。因此，几乎所有的激光二极管都会可通过温度调谐，不过通常调谐范围很窄(几十纳米量级)。激光二极管也能通过电流调节一定的功率。增加输入电流，受激辐射增加到某个具体值；但是超过后自发辐射将与受激辐射竞争。因此，建议将每个激光二极管的输入电流保持在特定范围内。



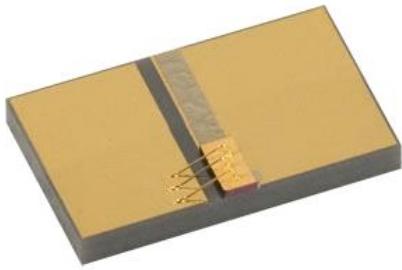


图1. Submount FP激光二极管芯片

受激辐射的偏振平行于结平面，而自发辐射随机偏振。如需高偏振比(大于或等于50:1)，建议输入电流不要超过特定的范围。

最早的FP激光二极管使用一种半导体材料(多为GaAs)构成单pn结二极管。这种器件后来叫做同质结激光二极管1-4。尽管这些早期的FP激光器证明了激光二极管基本原理，但是由于这些器件固有的高电流密度阈值($J_{th} \approx 105 \text{ A/cm}^2$)，因此连续工作需要超低温才能避免损坏。后来出现的异质结激光二极管降低了高阈值电流密度，并以此开发了一系列室温FP激光二极管。

图1为Submount FP激光二极管芯片。芯片上有两个焊金接触点，用于连接n和p半导体层。这个是[FPL2000C](#)芯片，用于形成FP激光腔，在2000 nm输出30 mW连续光。这个FP激光腔产生的光谱带宽约为15 nm(标称值)。这个二极管具有量子阱结构，介绍详见下文。

异质结激光二极管

异质结促进了室温连续激光二极管的广泛发展。最先是单异质结(SH)，很快就出现了双异质结(DH)激光二极管。DH激光二极管是现在最常用的激光二极管之一。总体而言，DH激光二极管的特性包括低阈值电流密度、室温工作和高效率。

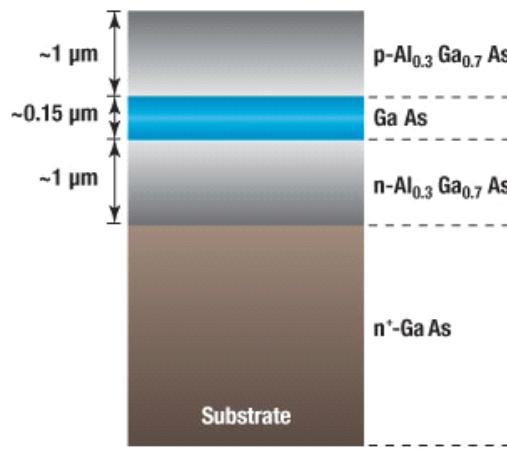


图2. DH激光二极管结构

双异质结激光二极管包含很薄的有源层(100 - 200 nm)，夹在更厚的(1 - 2 μm)两包层中间，互相形成pn结。DH激光二极管的典型结构如图2所示。在此图中，GaAs有源层厚0.15 μm ， p -Al0.3Ga0.7As和n-Al0.3Ga0.7As包层都是1 μm 厚度。这个结构安装在一层GaAs厚基底上。相比单结激光二极管，这种配置能够降低电流密度阈值($J_{th} \approx 1 - 3 \text{ kA/cm}^2$)并提高效率，原因如下：

1. 因为GaAs折射率($n = 3.6$)想比p和n包层折射率($n = 3.4$)更大，所以光子被约束在GaAs

有源层内。

2. 因为GaAs带隙($E_g \approx 1.5$ eV)相比p和n包层带隙($E_g \approx 1.8$ eV)更小，所以载流子被约束在GaAs有源层内。
3. 由于有源层和包层的带隙不同，被吸收的光子减少。只有能量等于或大于包层带隙的光子才能被吸收。所以发射谱的短波段只有很小的吸收。

DH激光二极管在波长范围和器件性能上也有些局限性。DH激光器二极管最大的缺点是严格的晶格匹配条件。晶格失配超过0.1%就可能在有源层和包层之间产生界面应变，导致非辐射电子空穴复合。由于晶格匹配限制，有源层和包层可用的元素减少，所以可用波长范围减小， J_{th} 增加。

量子阱激光二极管

量子阱(QW)激光二极管是有源层厚度D接近德布罗意波长的特殊DH激光二极管。

$$D = \lambda_{deBroglie} \approx h/p \quad (1)$$

QW结构相比DH或块体结构具有很多优势。这里只讨论最重要的结果。读者可以参考文献5了解QW结构和块体结构的光学性质对比。QW结构比标准块体DH结构具有更大的微分增益。另外，这种增益受温度变化的影响比块体结构更小。

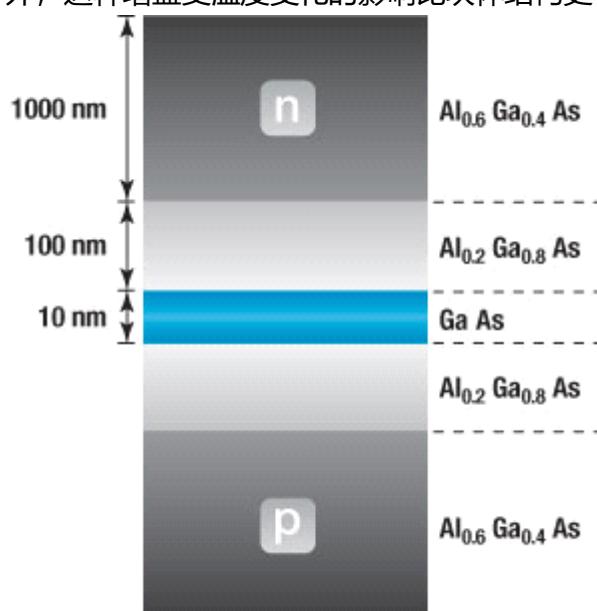


图3. QW激光二极管结构

QW结构示例如图3所示。这种QW结构包含10 nm厚的GaAs有源层，夹在厚度为100 nm的两约束层中间。约束层则被夹在厚度为1 μm的高带隙、低折射率材料Al0.6Ga0.4As中间。

这种配置的阈值电流密度比DH异质结的阈值电流密度($J_{th} \approx 100 - 300$ A/cm²)小4到5倍。因为使用特殊的外部包层/约束层结构，所以能够减小厚度，增强光子约束。另外，QW结构由于增益更大所以比块体结构的器件性能更好。

量子阱结构的晶格匹配参数也没有DH结构严格。对于极薄的QW结构，晶格的不匹配率为1 - 3%。界面晶格差异更大的QW激光器在工作时没有DH激光二极管常见的边界不匹配问题，即非辐射电子空穴复合。这种类型的QW一般称为应变QW(SQW)，它们能提供新的波长范围，这是以前DH激光二极管无法达到的。SQW相比非应变QW改善了光子吸收特征、效率和阈值电流密度。SQW详细介绍请见参考文献5。

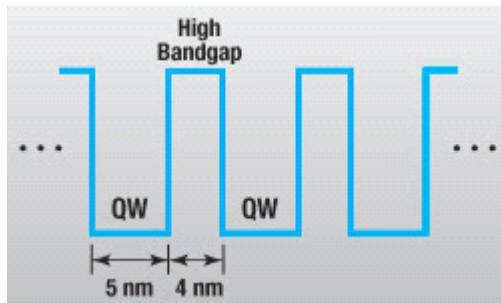


图4. MQW能量图

QW结构既可以单个夹在两高带隙材料中间，也可以是QW(窄带隙)和势垒层(高带隙)交替的序列排布。后者叫做多量子阱(MQW)结构。MQW结构如图4所示。对于这种结构，交替重复的5 nm低带隙层和4 nm高带隙层沉积在 p/n 结中间。

改变QW或势垒层的材料成分、势垒层厚度或QW层数(比如如多层[ML725B8F](#))可以改变MQW发射特征6。MQW排布的惟一限制是高带隙材料(厚度和带隙)必须足以消除可能显著降低器件效率的电子隧穿效应。

分布反馈激光二极管

分布反馈(DFB)激光二极管在DH激光二极管有源层外围的一个包层上集成光栅。由于蚀刻或沉积的衍射光栅，DFB比DH激光二极管激光线宽更窄、温度稳定性更高。因为衍射光栅能够选择增益介质中的波长，所以DFB激光二极管端面的反射不是必须的。

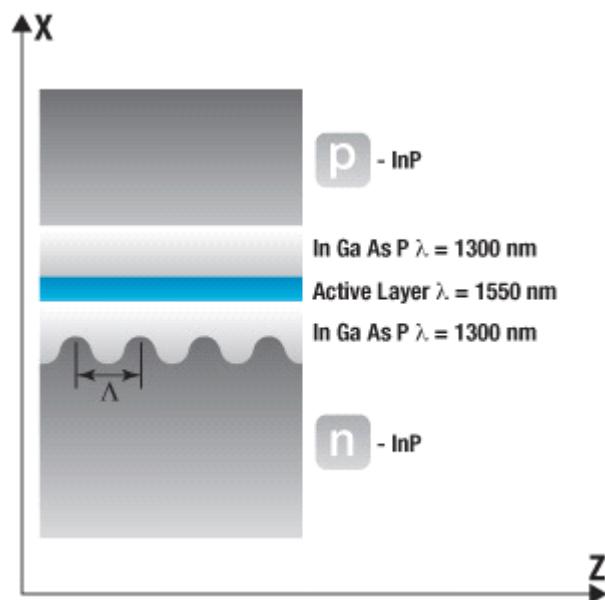


图5. DFB激光二极管结构

DFB激光二极管结构如图5所示。InGaAsP有源层的带隙对应 $\lambda = 1550$ nm发射波长，有源层外围是一层InGaAsP包层，它的带隙略大于 $\lambda = 1300$ nm发射波长对应的带隙。一个包层厚度以周期 Λ 变化。每个包层的外围是高带隙、低折射率材料(p -InP或 n -InP)。

包层厚度差异沿z轴产生折射率 n_{eff} ，取决于z轴位置：

$$n_{eff}(z) = \langle n(x, z) \rangle_x \quad (2)$$

括号表示垂直于纵轴的x方向上的平均值。沿x轴的横向光束轮廓很窄，几乎完全包含在有源层和包层内。我们可以沿z轴设定折射率的周期：

$$n_{eff}(z) = n_0 + n_1 \sin[(2\pi z/\Lambda) + \varphi] \quad (3)$$

其中 n_0 和 n_1 分别为包层和基底的折射率， Λ 为界面折射率周期变化的间隔， φ 为相位因子。利用光栅或其它周期元件的布拉格方程，前向和后向传播的光束发生耦合的条件是：

$$\lambda = \lambda B = 2 <neff> \Lambda \quad (4)$$

其中 $<neff>$ 为z轴上的平均折射率。

根据这种简化分析，对于给定的间隔 Λ ，只有一个波长存在。参考文献7和8中有详细的分析过程。

垂直腔面发射激光二极管

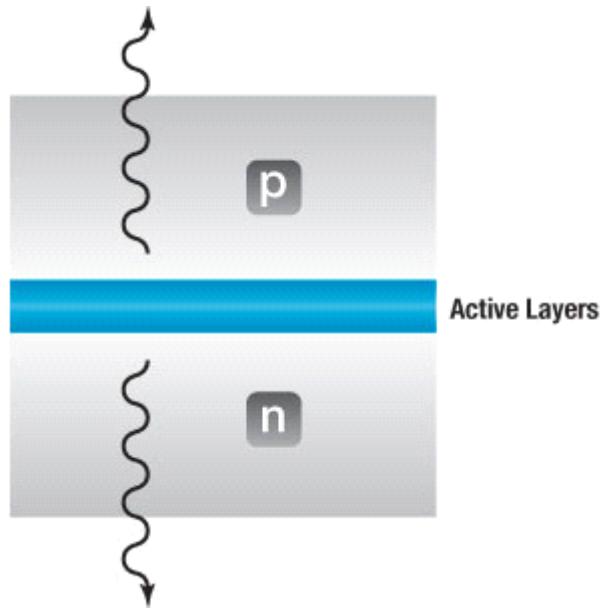


图6. VCSEL能量图

垂直腔面发射激光(VCSEL)二极管是一种特殊的激光二极管，其发射方向与有源层/结平面垂直。而前文介绍的激光二极管的光传播/放大方向与结平面平行。如果要求低阈值电流密度($J_{th} \approx 3 - 5 \text{ kA/cm}^2$)和高发射密度通常采用VCSEL。由于有源层非常薄，VCSEL的实际阈值电流(几毫安量级)远低于FP激光二极管。

超薄的有源层/增益介质能够限制散射和吸收，从而提高效率。由于有源层薄，因此VCSEL一般能以TEM00模式工作，即使使用比阈值水平高很多的高电流。因为VCSEL垂直发射并且有源层很薄，所以增益长度有限，因此不建议用于高功率应用。

VCSEL共振腔如图6所示。因为这种激光二极管的发射方向垂直于结平面，所以能在很小的区域内构造高密度发射器。另外，这种器件还能用于极高封装密度应用，相比典型的FP激光二极管这种发射器可以更紧密的排布。

VCSEL有源层包含多个厚度约为5到10 nm的应变QW层，量子阱中间是4到6 nm厚的高带隙材料。图7a展示了形成VCSEL有源层的应变QW结构。

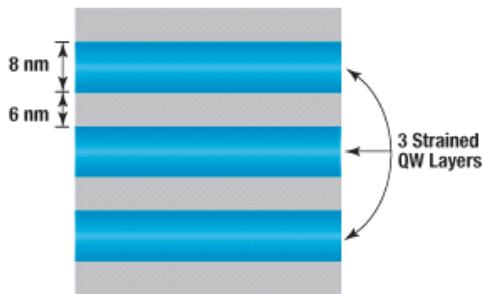


图7a. VCSEL有源层

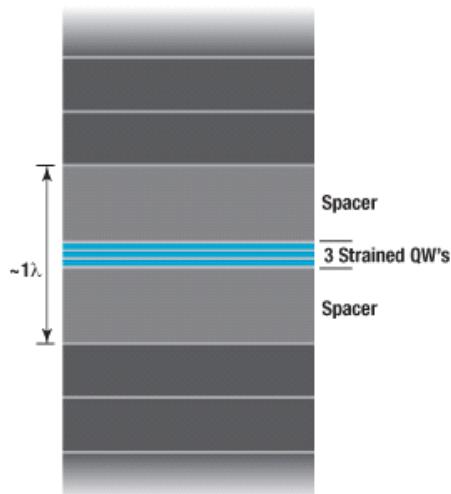


图7b. VCSEL激光共振腔

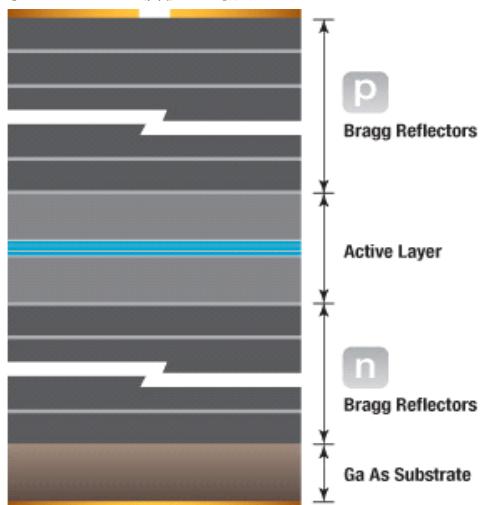


图7c. VCSEL垂直结构

激光二极管能在很长的工作寿命内提供稳定的频率和功率，但搭建一个能够稳定工作的系统也是很复杂的。二极管很容易损坏，过热运行降低寿命，各种环境影响也会对二极管造成毁灭性的失效。本教程将介绍在搭建激光二极管系统时拿取和控制激光二极管一定要注意的基本事项。

主要内容如下：损坏机制、规格、二极管封装、安装座和驱动器以及关于可能导致二极管不稳定或损坏的实验室环境的一般建议。

第1部分：损坏机制

使用激光二极管必须了解容易导致其损坏的各种方式。操作和使用二极管时必须非常小心，才能确保持续、可靠和长寿命工作。激光二极管特别容易受到电子损坏、热致损坏和功率损坏。以下我们讨论激光二极管工作中常见的损坏机制。

电子机制

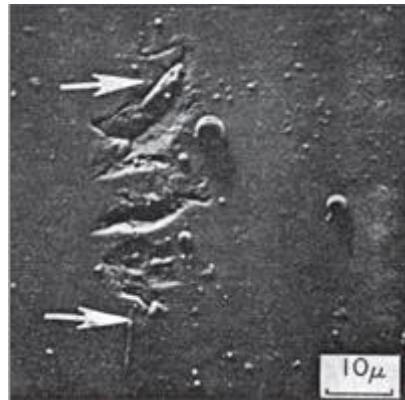
电子损坏机制是激光二极管致命失效的首要原因，其中最多的原因又是静电。人员在实验室走动或接触设备时可能累积少量电荷。如果防护不当，这可能对二极管产生静电放电，使之工作失效。因此，激光二极管工作时保持接地非常重要。

激光二极管也很容易因电流尖峰和瞬变损坏。一次快速过载就可能毁坏激光二极管。这些电气问题的原因很多，而且有时无法预料。线路中的浪涌、雷击等环境影响和功率损耗只是一小部分可能对激光二极管造成致命损坏的电气问题。使用[电流控制器](#)能够预防这些问题。

激光二极管直接从通电电流源中插入或拔出的热插拔方式也会导致电尖峰，这都是应该避免的。另外，突然的功率损耗(比如，实验室功率降低或者关闭电流源未先将电流降到零)也会导致电尖峰。一般能避免电尖峰的好办法是先将电流源设为零，然后接入或拔出激光二极管。

使用激光二极管专用[电流源](#)给激光二极管供电也是一个好方法。其它电压源或电流源的噪声可能较高，可能使性能不稳定，但更重要的是它们在开关时会产生高电流尖峰。

热和功率机制



图中显示了前端面损毁的激光二极管，裂纹和颗粒清晰可见。箭头指向pn结的位置[1]。

很多激光二极管对温度效应极其灵敏。受二极管温度严重影响的性能规格很多，比如二极管寿命、阈值电流、激发波长、激发功率、跳模和线宽。比如，根据经验，温度增加 10°C ，二极管寿命减短一半。环境温度波动也会导致二极管温度波动。如果没有正确的热调节，二极管工作就会使之发热。推荐使用合理的[温度控制](#)，并且工作温度要远小于最高额定值。

虽然一般发现功率损伤时已经太晚了，但是时刻注意功率对激光二极管的影响也很重要。这样建议的部分原因是热效应，因为增加电流(增加功率)会使激光芯片承受更大热量；如果热调节不足，热效应可能导致损坏。可能不怎么明显的原因是进入激光芯片的背反射效应。对于背反射较强的系统，高功率运行可能损伤激光器芯片的前表面。因此用户需要知道系统中的反射，并且确定反射功率是否大于二极管损伤阈值。对于背反射很强的系统，使用[光隔离器](#)可以降低反馈。

损坏信号

如何判断一个激光二极管是否损毁了呢？损坏的二极管激光器仍会发射激光但展现出非常严重的性能问题，偏离标称。输出功率严重降低、阈值电流明显增加、或者可观察到的空间剖面变化，这些都可能是二极管激光器损坏的标志。激光器芯片受损也会对激光聚焦和准直造成不良影响。光束很快分散，或者不能聚焦得到和以前一样致密的光斑。如果激光器受损到一定程

度，它将无法发射激光，能观测到自发辐射但不能观测到光线。可能能够修理损毁或者损坏的激光二极管；但是识别导致二极管失效的机制有助于避免将来的破坏事件发生。

第2部分：激光二极管规格

Absolute Maximum Ratings ($T_c = 25^\circ\text{C}$)

Specification	Symbol	Value
Optical Output Power	P_o	100 mW
LD Reverse Voltage	$V_{r(\text{LD})}$	2 V
PD Reverse Voltage	$V_{r(\text{PD})}$	30 V
Storage Temperature	T_s	-40 to 85 °C
Operating Case Temperature	T_c	-10 to 70 °C

[Click to Enlarge](#)

L785P090激光二极管的最大定额图表。

Item #	Info	Wavelength (nm)	Power (mW)
HL40023MG		404	400
LP405-SF10		405	10
LP405-SF30		405	30

[Click for Details](#)

每一个二极管都有一组规格，即特定温度时的“绝对最大定额”（如上图所示）。绝对不能超过连续波输出功率、反转电压以及工作和存储温度的最大定额值。

最大功率输出

应该注意的是绝对定额是指输出功率，而不是驱动电流。虽然有工作电流规格参数，此规格参数给出合适电流范围指导，但是不同二极管之间的性能总是存在细微偏差。最大电流规格参数是指要求达到特定输出功率时的最大电流，而不是可施加在激光二极管上的最大电流。一个好的建议是，一旦创建好二极管系统就测量功率对电流的曲线（包含温度调制）。

如上述功率损坏机制章节讨论的，反射是需专注的一点，尤其是如果用户以绝对最大输出功率或者其附近运行的时候。对于有显著反馈进激光器的系统，绝对输出功率可能低于规格表单中的参数。这是因为有更大的光子通量入射在二极管芯片前表面，可能导致二极管损坏。在绝对最大输出功率或其附近工作必须非常谨慎，以免激光二极管损坏。

最大温度范围

绝对温度定额是另一个需要注意的规格参数。上述的损坏机制章节中，我们讨论了激光二极管的温度效应。激光二极管高温运行将显著降低寿命。绝对温度定额的上限是可工作的温度，但一般不要到达上限。不仅因为过热运行二极管降低寿命，而且也容易使用户影响瞬态或者其它可能引起热调制暂时失效的事件，从而使二极管温度形成超过最大定额的尖峰。

规格表单经常列出一个电气/光学特点的温度参数，经常是处于20-25摄氏度的时间。所列出的温度值是指测量激光二极管的规格参数时的调制温度。温度对这些等级的影响显著。比如，温度升高则阈值电流升高；过热运行将使二极管的实际阈值电流超过电气/光学部分中的特定值。出于寿命和功率方面的考虑，标准热调制一般选在20-25摄氏度之间。但是，由用户来决定调制激光二极管的理想温度。

第3部分额：二极管封装

选择何种激光二极管最重要的因素是波长。另一个重要因素是二极管封装。有多种封装形式，每一种都有各自的优缺点。一般来说，封装可分为TO（包括尾纤TO），蝴蝶型/双列直插型，以及小型安装座/C型安装座封装（如下图所示）。选择正确的封装取决于使用目的和实验室要求，用户应该仔细研究封装选项以最好地匹配对二极管的需求。

TO封装/尾纤TO封装

TO封装是最流行的激光二极管封装选项的一种。TO封装是简单的圆柱形封装紧密密封。Thorlabs供应5种尺寸的TO封装，Ø3.8 mm, Ø5.6 mm, Ø9 mm, Ø9.5 mm和TO-46。TO封装的组成包括一个激光器芯片、一个用于探测后表面功率的光电二极管、以及一个散热器。因其标准尺寸，TO封装可以互换（特别注意引脚配置）。另外，TO封装有很多种波长且相对便宜。这类二极管要求用户方做一些设置。比如，建立一个外部反馈腔可允许客户控制二极管波长。和所有二极管一样，它们要求用户自己提供热调制器。

TO封装也有尾纤形式的，尾纤包括单模、偏振模或多模光纤。

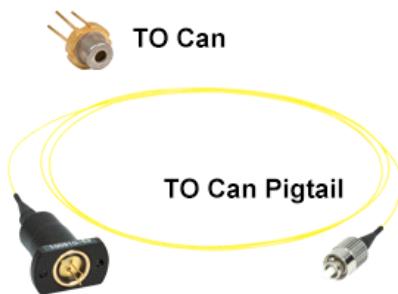
蝴蝶型/DIL

蝴蝶型和双列直插封装使用和TO封装一样的芯片。不同于TO的是，这种封装内部包括很多组件。这个特点使蝴蝶型和双列直插型更易“即插即用”。这类封装包括激光器芯片和TO封装一样的探测光电二极管，但是另外还有一个集成TEC和热敏电阻。因为封装中集成了温度元件，使用一个合适的PID温度控制器可以更精确地测量芯片温度，更好地进行热调制。这种封装带有耦合SM或PM光纤的光纤，适用于很多流行的远程通信波段。

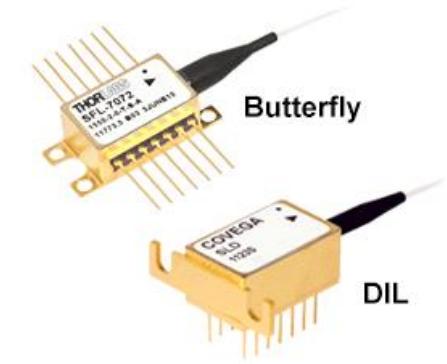
虽然蝴蝶型和双列直插型的功能差异很小，但是蝴蝶型安装是现在数量最多的。

C型安装座/小型安装座

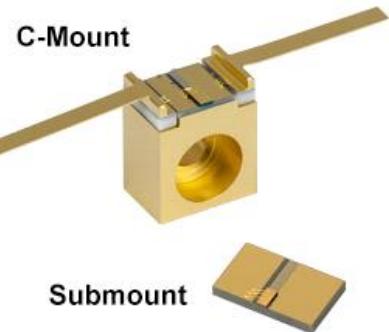
C型安装座和小型安装座激光二极管是特殊封装类型，一般用于更高功率二极管或中红外光源。C型安装座和小型安装座封装的激光器芯片和封装的接触面更大，能更有效地进行温度调制。目前我们所有的中红外激光二极管光源都是双翼片C型安装座。和TO一样，这类封装也要求用户额外进行设置。它不带探测光电二极管，用户必须谨慎避免过载。所有的温度调制器都需用户自己提供（不含集成TEC和热敏电阻）。C型安装座和小型安装座是OEM和中红外应用的理想选择。



[Click to Enlarge](#)



[Click to Enlarge](#)



第4部分：选择安装座和驱动器

一旦选择好激光二极管，您必须选择安装座和驱动器。一般地，安装座和驱动器的选择要符合激光二极管和应用要求。比如，如果要求温度调制（大多数应用都是必须的）带集成TEC的安装座会更受欢迎，符合激光器电流和TEC要求的驱动器系统也是必要的。下面是为激光二极管选择安装座和驱动器需要考虑的基本点。

激光二极管安装座

TO封装的激光二极管的安装选项很多，包括非调制和调制温度安装座。即使不是必要的，许多应用也推荐温度调制。因此非调制安装座用在不要求温度调制的应用，或者可以加进用户提供的温度调制的系统。如果不进行温度调制，仍要注意非热调制激光二极管长期工作也将显著降低寿命。非调制安装座包括激光二极管准直管、兼容笼式系统准直封装和二极管安装座。

- **准直管**是TO封装型激光二极管最常见的安装座；它们包含用于准直的非球面透镜，且一般安装在带温度调制的系统中。
- **兼容笼式系统准直套件**运行用户将05.6毫米、09毫米和T03型封装激光器集成到30毫米笼式共轴系统中。该套件包括用于准直激光二极管的所有安装硬件，但是用户更具应用需要选择合适的非球面透镜。
- **二极管安装座**是最简单的安装方案。选项可用于05.6毫米和09毫米TO封装型激光器，以及尾纤TO封装型激光器。

驱动器

大多数应用都要求电流源和温度控制器。激光二极管属于电流装置，因此它们要求一个电流源和一个电压源。电压源无法控制它的电流，使得电流变化很快并使激光二极管有损坏的危险。然而，不是所有的电流源都是一样的，选择驱动器有一些需要仔细考虑的问题。短路输出（即激光不工作的时候输出端保持相同的电位）是激光二极管电流驱动器的一个很好的特点，它可

以避免ESD损坏。在输出端结合的时候，缓慢的启动特点允许电流缓慢地上升。这可以避免产生瞬态电流和电流过载。为避免用户端导致的电流过载，需要一个可调限流器。另外电流限制需要一个调制夹，如果用户调制电流接近限制，可以断开电路以免超过硬限制。确保所设置的电流限制适合您的激光二极管。其它有益的特点包括过压保护和电源线瞬态抑制。选择最大电流接近您的激光二极管的最大工作电流的电流源。这不仅增加避免过载的安全性，而且某些参数（比如瞬态抑制）将与电流源的最大电流限额一致。

普通的激光二极管冷却技术都是以[热电冷却仪](#)（TEC）为中心。提供TEC控制电流，可以很好地以预先设定值为中心进行温度调制。由于稳定性和寿命和温度有极大关联，几乎所有激光二极管都要进行温度调制。温度控制器需要用来给冷却系统供给必要的电流，并且应该带有电流限制。设定限制值低于TEC最大限值以避免损坏。如果创建自己的冷却系统，要求温度控制器带有一个可调PID电路，这样您可以调谐电路性能使之满足系统的温度要求。一般地，PID环路控制用于合适的温度伺服。

合理的设计和激光二极管系统控制能确保超过100000小时的稳定可靠工作。这值得花时间和精力来保证您创建的系统将提高安全和二极管保护环境。选择激光二极管时，务必仔细阅读规格表单，记录最大定额等级使之匹配合适的驱动器。一定要遵照操作技法，比如戴手套和防静电护腕。任何接触激光二极管的设备（如含烙铁）和工作区域都应该合理地接地。如果设计您自己的热调制系统，要确保它不仅适合您的激光二极管而且要适合实验室环境。如何散热？吸收激光二极管的热量并散入环境中的热质量是否足够大（太小的热质量如果散热不够快反而会提升热逸散）？

尽管在选择激光二极管、安装座和驱动器时，所有的预防措施都能够考虑到，但是创建激光二极管时还是会有需要考虑的环境因素。其中一些很容易且相当明显；其它的可能并不能察觉出来。确保所有的连接都紧密，任何焊接点都牢固，因为松弛的连接会对激光二极管的良好状态造成严重威胁。将电线固定在光学平台以免碰撞和拖带。长线对应该尽量避免。长电引线和电线形成天线作用，将从外部环境接收噪声。如果必须使用长电缆，试着将绕城卷状减少可能引发电感的低频噪声。甚至已屏蔽的电缆也会接收高频噪声，这可能需要一个额外的外部屏蔽装置。屏蔽的两端必须连接在低电感接地上。

地回电路、电快速瞬变和辐射瞬变都是激光二极管噪声和性能问题的主要来源。这些都很难追踪到但是在诊断性能问题时也应该注意到。各个设备之间的空间要足够大以避免拾波问题；像高电流开关电流源之类的设备可能产生感应电压，这会影响激光二极管性能甚至损坏它。合理接地和实验室规划可以保证长期健康的二极管寿命。

安装

如何将激光二极管安装到一个系统中是最被忽视的问题之一。这不仅仅是指连接激光二极管进行准直和使用的物理机制，而且还指的是如何安装激光二极管。电线应该多长？是否已屏蔽？安装座是否和大地或者光学平台绝缘？附近有什么设备？它会如何影响性能？所有这些都是值得考虑的问题。

第一部分：二极管安装座

选择合适的二极管安装座要求考虑它的封装和应用。比如低功率的TO封装二极管仅用于对准，它不要求热调制；因此一个标准的二极管安装座就能满足要求。另一方面，对于要求波长和功率稳定性的高功率的蝴蝶型封装则要求能够提供稳定电流和稳定控制的安装座，比如

[CLD1015](#)。

大多数激光二极管应用中，温度稳定性是必须的。如果将激光二极管安装到一个已有的温度伺服系统中时，一个便于装入装置中的非调制安装座是不错的选择，比如我们的[准直套管](#)。

非温度调制安装座

非温度调制安装座用于可以加入自带温度调制的低功率或者短时工作周期应用或系统中。比如，一个低输出功率的对准激光器，如果不连续使用则不用温度调制，因为无需考虑波长和功率稳定性且激光器经常处于关闭状态。无需温度调制仍要注意的是，非热调制的激光二极管长期使用会大大降低寿命。因为非调制安装座仅用来放置二极管，有时还放置准直透镜，彼此之间都没有电气连接。Thorlabs为那些要将二极管连上电子装置的客户提供[插座](#)。另外我们也供应用于TO封装激光器的[ESD保护和消应力电缆](#)。这些电缆在一端有用于激光二极管的插头；另一端是裸线或者是兼容我们的电流控制器的D89接头。在选择这类电缆的时候，请确保它们符合您二极管的引脚类型。

用于自由空间二极管的调制安装座

Thorlabs也为TO封装激光器提供多种温度控制安装选项。这些安装座支持多种引脚配置，但在采购之前要确保安装座符合您的二极管引脚类型。另外，确保激光二极管的安装与它的引脚类型方向一致，并且做好了任何可能的兼容性修改或设置。温度调制安装座带有插座可直接连接所装的二极管，所以无需额外的电缆或插座。选择集成冷却系统的安装座时，请确保安装座能为激光二极管处理必要的电流，且能提供足够的散热。

用于耦合光纤的二极管的调制安装座

Thorlabs为我们的TO封装激光二极管提供一种特殊的热调制安装座，也为蝴蝶型封装二极管提供一系列安装座。因为蝴蝶型封装有集成的TEC，所以它的安装座实际已经具备调制功能，只需要一个合适的温度控制器来实现该功能。

第2部分：实验室环境中的安装

计划实验室环境也许不是您优先考虑的问题，但是它能显著降低由瞬变带来的潜在噪声拾音和激光二极管损坏。一些比如接地设备的东西如果合理计划，也会让人非常头疼。比如，激光二极管与光学平台电绝缘有助于降低由地回环路引起的不良效应。和许多调制安装座都是硬接地一样，实验室许多电气设备（比如示波器）也是如此。这会导致很大的地回环路，很的地回环路意味着很大的电感噪声。在安装座下放上[Kapton](#)胶带可以隔离安装座和平台之间的电气接触，提供来自地回环路影响的保护。

您所在的环境可能显著地影响瞬态变化的灵敏度。虽然不可能完全消除所有瞬变噪声和损坏，但是只需一点好的计划就能极大地减少这些影响。以下是现代实验室中特别需要考虑的两种瞬变来源：电快速瞬变（EFT）和电磁干扰（EMI）。EFT是非常快速的高频电棘波。EFT的常见来源包括带动大功率电力线冲击电流的设备比如马达或电烙铁，以及带开关电源的任何设备比如电力转换盒和电脑。一次EFT的快速冲击就足以毁坏一个激光二极管。许多实验室的瞬变来源是EMI。EMI来源在激光二极管产生电感电压而毁坏或毁灭激光二极管的程度取决于与EMI源的接近程度。常见的EMI来源包括荧光灯和用于气体或准分子激光器的高压电压源。

另一个需要注意的因素是与热源的接近程度。合理安全的激光二极管操作一般包括温度稳定性，这要求采用合适的调制将热量散发到环境当中（一般通过散热器或者像大型铝块的热载荷）。如果二极管周围温度升高，将热量从二极管散发到环境中去的效率就会受到影响，还可能造成热击穿。不进行合理的温度，很可能导致二极管的热毁坏。比如，一个100瓦的二氧化

碳激光器头可能是热污染的客观来源。

将二极管安装到实验室平台上的时候，评估设备之间能否紧密相邻有助于识别潜在的EFT和EMI辐射来源，以及热源。一般来说，希望使得激光二极管尽可能远离这些辐射源和热源。比如不会将激光二极管直接装在高压电压源或者高功率二氧化碳气体激光器头的旁边。连接二极管的电缆应该和其它电缆隔离，因为这有助于减小来自其它仪器的噪声。

准直

由于激光二极管的输出是高度发散的，故需要准直光学元件。由于[非球面透镜](#)具有校正球面像差的出色能力，在所需准直光束腰介于1毫米与5毫米之间时，它们是最常用的校正光学元件。选择适当的非球面透镜来对激光二极管进行准直是非常关键的，因为所需光束尺寸和透射范围取决于所用的透镜。要计算激光二极管的光束尺寸，我们首先需要知道它的发散度。边缘发射激光二极管的输出也具有较强像散；光束发散在平行和垂直方向上不同，导致光束呈椭圆形。光束准直之后插入[变形棱镜对或柱形棱镜](#)，可以消除这种椭圆度。

激光二极管的发散通常对于芯片的两轴指定为“光束发散(FWHM)-平行”和“光束发散(FWHM)-垂直”。对于不同的激光二极管而言，发散会有所变化，但是对大多数应用使用典型发散值已足够。我们用一个简单的例子来说明为给定应用选择正确的光学元件时需考虑的关键规格。

实例：785 nm, 25 mW激光二极管, [L785P25](#), 03 mm期望准直

[链接](#)

激光二极管驱动器基础知识

理想的激光二极管控制器是线性、无噪声且精确的恒流源。激光二极管本质上是电流装置，因此，对于精确的二极管操作而言，直接和精确的电流控制非常必要。

短路输出

当二极管连接到电流源时，短路输出特性提供保护，以防静电放电 (ESD) 损坏。当电流源的输出关闭时，短路输出将输出引线的电位保持相同。通常，短路输出可以通过中继器或场效应晶体管 (FET) 来实行。值得注意的区别是，即使电流源本身已经关闭了，继电器还是会维持短路保护，而FET只能在电流源开启时维持保护。

慢启动

慢启动特征在启用电流源输出时帮助提供保护，防止瞬变。在慢启动期间，到激光二极管的电流输出过度抑制，这确保了输出电流逐渐增大。一旦瞬变被抑制，电流源将输出它的满电流。大约100 ms的慢启动时间足以确保启用输出所致的瞬变受到抑制。

过压保护

过压保护能保护通过电路阻抗变化所产生的电流不受到波动。高阻抗负载可导致电流控制电路饱和，阻碍它达到设定电流。反之，如果阻抗快速减小，电流控制将被迫到达其短路限制。在任一种情况中，激光器都可能过度驱动，导致损坏。如果控制回路饱和，过压保护则会切断控制器的电流输出。

电源线瞬变抑制

本特性提供保护，防止交流线路瞬变，高压电涌和电子快速瞬变 (EFT)。电容性滤波器和适当防护的变压器帮助防止了到达电流控制器的电源输入的瞬变进入激光二极管。这种瞬变抑制只能保护激光二极管免受控制器电源线上的瞬变。应注意，电源线瞬变抑制无法抑制直接进入激光器或驱动线缆中的瞬变（比如EFT污染）。

电流限制

电流限制通过意外调节、模拟调制或恒定功率操作来防止过量的驱动电流。该电流限制为控制器电路的电流输出设定了硬性限制。这个特性不仅防止了意外将电流设定成对于激光二极管过高，而且还在调制会产生过流的情况下限制电流输出（见图1）。大多数现代激光二极管电流控制器具有电流限制；然而，在不同模拟调制下性能可能有所不同。最佳的电流控制器可以讲电流精确限制在电流限制值，在所有情况中防止驱动电流超过电流限制。

恒定功率模式

二极管驱动器的一些模型将具有恒定功率操作模式。为了利用这个特性，激光二极管要集成一个光电二极管。一定要注意该光电二极管是阳极接地还是阴极接地，并确保驱动器上选择了正确的模式。较好的做法是将功率限制设定在低于二极管的绝对最大功率额定值，因为恒定功率操作没有恒定电流操作那么精确，这是因为恒定功率模式依赖于光电二极管的耦合效率和其响应的线性度。

激光二极管驱动器调制

一般而言，调制激光二极管时必须遵循三个参数：调制系数、输入阻抗和调制带宽，它们都在下文讨论。这些值取决于电流控制器，并会在控制器的规格中列出。此外，一些驱动器将有低带宽(CW)和高带宽输出模式。对于这种驱动器，低带宽设定设计用于连续波输出，并且可能不适用于超过低频的调制、小信号调制。高带宽输出模式用于调制的目的，并具有较高的调制带宽。

调制系数

调制系数有时称为传递函数，它只是从调制电压到电流输出的转变（通常是mA/V为单位的）。例如，[LDC202C](#)的调制系数（恒流模式中）为20 mA/V。一个+1 VDC 调制信号将输出电流提高到超过设定点20 mA（所以如果将控制器设定为100 mA，添加这个直流调制信号会使输出增大到120 mA）。反之，一个-1 VDC信号会使输出减小20 mA。

还可以通过波形实现调制；如果我们使用200 kHz的正弦波，并且峰值到峰值电压为2 V，以0 V为中心，那么电流输出将在200 kHz下在80 mA与120 mA之间驱动（设定点是100 mA）。大部分电流源将允许使用任意波形进行调制，但应注意，使用除了正弦波之外的波形时，调制带宽将减小。

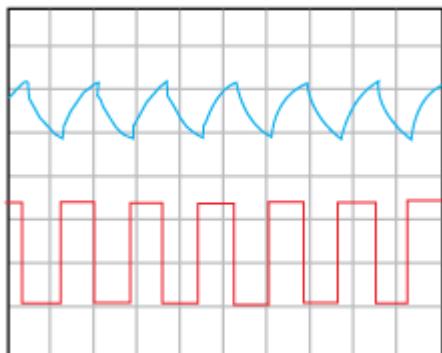
输入阻抗

输入阻抗是集成到电流控制器中的调制电路的阻抗。它们的标称范围是50 Ω到10 kΩ（例如LDC202C的输入阻抗为10 kΩ）。函数发生器区域具有约50 Ω的输出阻抗。这意味着如果电流控制器的输入阻抗较低，函数发生器将相当显著地向下加载，在输出波函数中导致失真。如果发生这种情况，一个简单的技巧是用连到电流源的函数发生来设置调制，但是电流输出停用。这样做使您可以查看调制信号而不会危害激光二极管本身。一旦调制水平和频率被设为所需输出后，可启用电流输出。

调制带宽

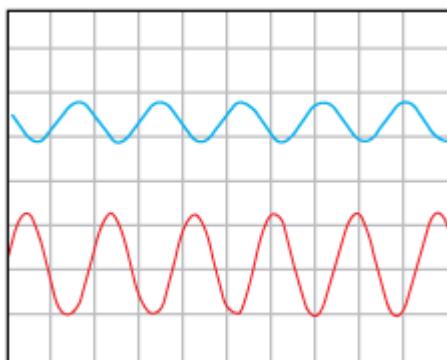
调制带宽（通常由3 dB点设定）是在输出电流信号上没有显著失真的情况下可使用的调制频率范围。LDC202C具有DC到250 kHz的小信号带宽，意味着电流可用最多250 kHz的正弦波进行小信号调制，而输出电流上没有显著失真。这又意味着使用除正弦波以外的波形将减小函数调制带宽。例如，方波将带宽减小约10倍。

过度驱动调制将导致激光二极管输出上的失真和削波效应(见图3)。此外，以高频调制将在调制波形与激光二极管的输出强度之间引起一个大约 n 的相移(虽然如果在电流源的带宽内，输出将不会明显失真，见图4)。当用方波以高频调制时，应注意，输出将会有振铃(这是由于多个较高的频率)，如图5中所示。这种振铃甚至在具有高精度电流钳的控制器中也可以暂时超过电流限制。



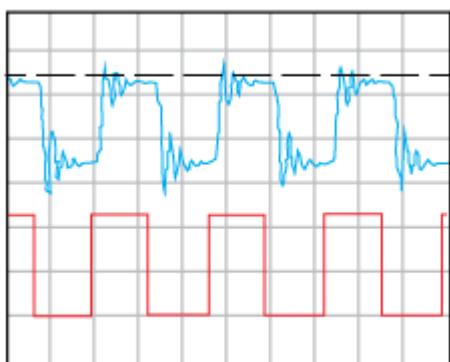
[Click to Enlarge](#)

图3：当电流源用方波严重过驱时(红色曲线)，输出(蓝色曲线)变得显著失真且无法达到设定电流限制。



[Click to Enlarge](#)

图4：当电流源以高频调制时(但仍然在控制器的适当带宽内)，输入调制 (红色曲线) 与输出电流 (蓝色曲线) 之间具有一个大约 n 的相移。

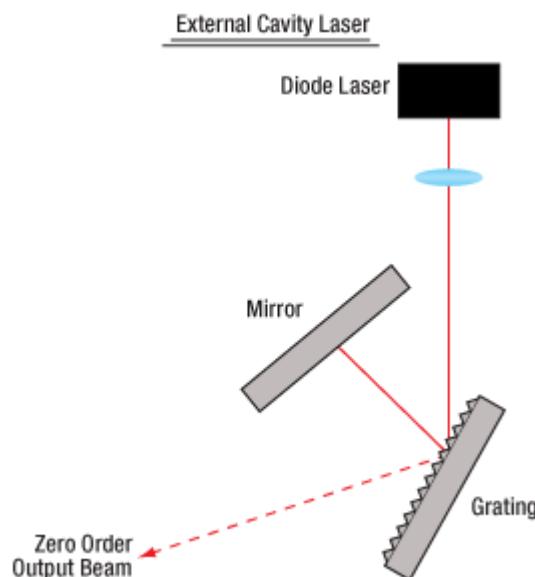


[Click to Enlarge](#)

图5：用方波以高频调制可产生超过电流限制设定点的振铃。

单频激光器教程

ECL、DFB、VHG稳定型、DBR和混合型单频激光器



[Click to Enlarge](#)

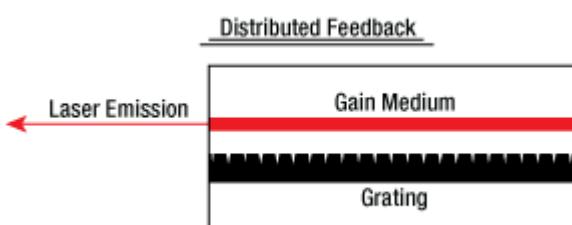
图1：ECL激光器的增益芯片外有一个光栅

很多应用要求激光系统可调谐单频工作。在二极管激光器的世界里，目前主要有四种配置可以获得单频输出：**外腔式(ECL)**、**分布反馈式(DBR)**、**体全息光栅(VHG)**和**分布式布拉格反射器(DFB)**。这四种配置都通过光栅反馈提供单频输出，而光纤布拉格光栅(FBG)和外腔激光器的组合能形成混合型激光器。不过，每种激光器使用的光栅反馈配置不同，这也影响性能特征，比如输出功率、调谐范围和边模抑制比(SMSR)。下面我们将讨论这几种单频二极管激光器的主要区别。

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可根据内部激光二极管增益介质用于多种波长。透镜准直二极管的输出，然后入射到光栅上(见图1)。光栅提供光学反馈，用于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)的单频激光输出。

ECL的主要优势之一是使用较长的腔提供极窄线宽(< 1 MHz)。此外，因为可以集成多种激光器二极管，它仍然是能够在蓝光或者红光波长提供窄线宽发射的极少数配置之一。ECL可以提供很宽的调谐范围(>100 nm)，但是容易发生跳模，这与其机械设计以及激光二极管的增透(AR)膜质量极其相关。



[Click to Enlarge](#)

图2：DFB激光器在整个有源增益介质上有一个布拉格反射器

分布反馈式激光器

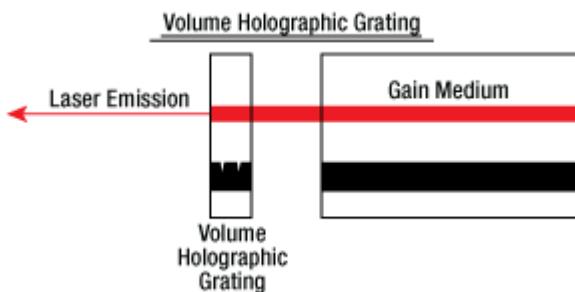
分布反馈式(DFB)激光器(提供**NIR**和**MIR**选项)的光栅集成在激光二极管结构内部(见图2)。这种波纹周期结构紧临有源区域，作用相当于布拉格反射器，选择一种单纵模作为激发模式。如果有源区域在布拉格频率附近的增益足够大，则不需要端面反射镜，所有的光学反馈和模式选

择只靠布拉格反射器。由于这种“内置”选择，DFB可以在较宽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相位变化区域。DFB的激发波长约等于布拉格波长：

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

其中 λ 是波长、 n_{eff} 是有效折射率、 Λ 是光栅周期。通过改变有效折射率能调谐激发波长。这通过调谐DFB激光器的温度和电流来完成。

DFB调谐范围较窄，在850 nm时大约2 nm，在1550 nm时大约4 nm，在中红外(4.00 - 11.00 μm)波段时大于1 cm⁻¹。但是在调谐范围内DFB都能够单频工作，说明这是无跳模的连续调谐。由于这个特性，DFB已经成为通信和传感等实际应用中一种常见的主流选择。因为DFB腔长很短，线宽一般在1 MHz到10 MHz之间。另外，由于光栅结构和有源区域紧密耦合，所以最大输出功率比ECL和DBR激光器更低。

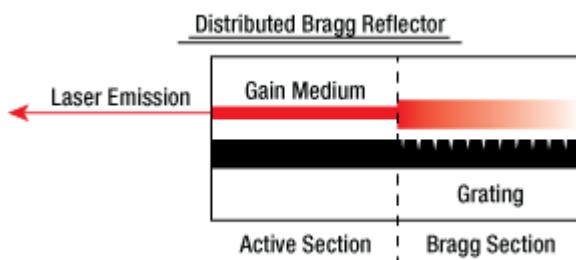


[Click to Enlarge](#)

图3：VHG激光器在有源增益介质外有一个体全息光栅

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器，但是在激光二极管输出端的前面有一个透射光栅(见图3)。因为此光栅不属于激光二极管结构的一部分，因此和激光二极管热隔离，从而改善了器件的波长稳定性。光栅一般是一片光折变材料(通常是玻璃)，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，这样可以得到一个发射波长极其稳定的激光器。VHG稳定型激光器可以产生的输出功率比DFB激光器更高，但是线宽差不多，可以在较宽的电流和温度范围内锁定波长。



[Click to Enlarge](#)

图4：DBR激光器的布拉格反射器在有源增益介质的外面

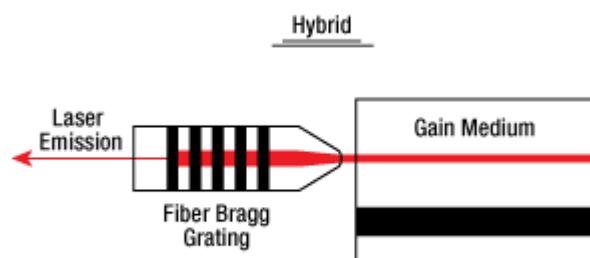
分布式布拉格反射激光器

类似于DFB，分布式布拉格反射(DBR)激光器内部集成了一个光栅结构。不同的是，DFB激光器的光栅结构持续穿过整个有源区域(增益区域)，而DBR激光器的光栅结构在有源区域之外(如图4)。一般而言，DBR能够集成多个区域，这是DFB通常所没有的，前者从而得到更好的控制力和更大的调谐范围。比如，多电极DBR激光器可以包含一个控制相位的区域，用户可以独立于光栅周期和激光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。比如高端采样光栅DBR激光器的调谐范围可达30-40 nm。不同于DFB的是，DBR的输出并不是无跳模的；因此要仔细控制所有输入并维持温度。

与多电极DBR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，不过牺牲了调谐范围。对于这种结构类型，调谐范围和DFB激光器类似，但有电流和温度引起的跳模。尽管有跳模的缺点，单电极DBR在一些方面比DFB有优势，即，因为光栅不是持续穿过整个器件长度，所以具有更高的输出功率。DBR和DFB具有相似的激光线宽。

混合型激光器

Thorlabs超低噪声(ULN)混合型激光器使用的是与超长光纤布拉格光栅(FBG)耦合的单角面(SAF)增益芯片。它们通过整根光纤长度，构建和ECL类似的激光腔。这种腔体设计能使ULN混合型激光器产生100 Hz量级的极窄线宽，以及-165 dBc/Hz(典型值)的较低的相对强度噪声。FBG反射来自增益介质的一部分光，同时又与其保持热隔离。光栅周期可以通过向光纤引入热应力来改变，所以用户可以通过温度调谐激光输出，同时并不影响增益介质的温度。由于激光器的配置可提供出色的低噪声性能，因此在低噪声水平时，激光器可能不会成为限制因素。监测激光器环境以限制外部噪声的影响(如声振动和地面振动)，以及使用低噪声电流源驱动激光器，这两点至关重要。



[Click to Enlarge](#)

图5：Thorlabs混合型激光器有一个与有源增益介质耦合的光纤布拉格光栅

结论

ECL、DFB、VHG、DBR和混合型激光二极管都在各自的设计调谐范围提供单频工作。ECL由于自身设计，相比DFB或DBR的波长选择范围更大。尽管容易跳模，但它线宽窄(< 1 MHz)。在合理设计的仪器中，ECL能提供很宽的调谐范围(>100 nm)。

DFB激光器是最稳定的单频可调谐激光器。它能在整个调谐范围(< 5 nm)提供无跳模性能，使之成为大部分行业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激光器在一定温度和电流范围内提供最稳定的波长，功率一般也比DFB激光器高。高稳定性使之成为OEM应用的极佳选择。

单电极DBR激光器与DFB有类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跳模。

混合型激光器可用于实现极低噪声信号。为了利用此优势，必须隔离激光器与有害的噪声源，例如，声振动、地面振动以及驱动电流噪声。

外腔激光器教程

激光器工作需要两个要素：(1) 有源增益介质，它能放大光信号，和(2) 反馈机制，以提供持续的激光振荡。在法布里-珀罗(Fabry-Perot)激光器中，反射率分别为 r_1 和 r_2 (强度反射率 $R_1 = r_{12}$, $R_2 = r_{22}$)的两个反射镜提供光场反馈，如图1所示。

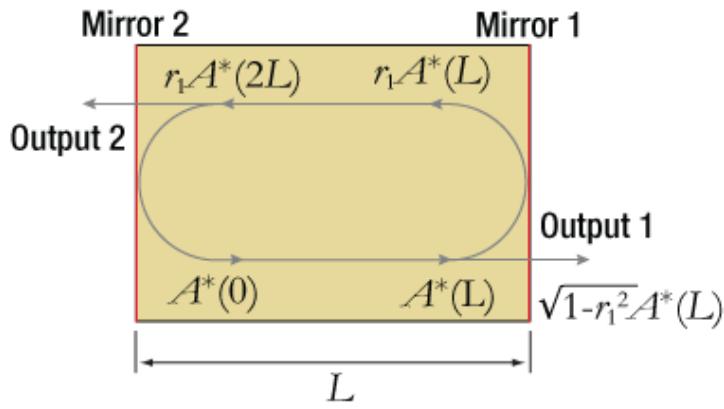


图1：Fabry-Perot激光器结构

腔长为L的谐振腔内的光场往返增益可以表示为：

$$\sqrt{G_{RT}} = r_1 r_2 e^{(g - \alpha_i)L} e^{-j \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda} 2L}$$

公式1：光场往返增益

其中g和 α_i 分别是增益系数和内部损耗系数， λ 是真空波长， n_{eff} 是有效折射率， L 是谐振腔长度。统一求解得到阈值振幅和相位条件：

$$g_{th} = \alpha_i + \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right) = \alpha_i + \alpha_m$$

公式2：振幅条件

$$\lambda_N = \frac{2n_{eff}L}{N}$$

公式3：相位条件

其中 α_m 代表反射镜的损耗，N代表模式数，是一个变化的整数。

在半导体激光器中，增益介质是被注入正向偏置二极管结区的电流所激发的。半导体激光器的量子阱结区中的电子和空穴高度聚集，实现粒子数反转，从而获得光学增益。

当增益介质是半导体材料时，芯片两端的解理面之间的菲涅耳反射就形成了法布里-珀罗谐振腔。结区实际上是从一端延伸到另一端面的波导。其中一端垂直于波导的未镀膜的解理面的反射率R大约为30%。然而，器件的最大输出功率可以通过端面镀膜，改变端面的反射率来进行优化。法布里-珀罗腔半导体激光器的最大功率通常是通过在其后端面镀高反射（HR）膜，在前端面镀低反射（LR）膜得到。

法布里-珀罗腔半导体激光器的发射光谱取决于注入电流的大小。当偏置小于阈值 $g > \alpha_i$ 时，发射光谱是包含一系列的峰值的宽光谱，这些峰对应着由相位公式定义的法布里-珀罗腔的纵模数。随着注入电流的增加，直到满足 $g = \alpha_i + \alpha_m$ ，才会产生激光。激射波长由第一个满足阈值条件的纵模所决定。输出光谱并不总是单一的激射波长，也可以是由一些纵模组成的窄带光谱。

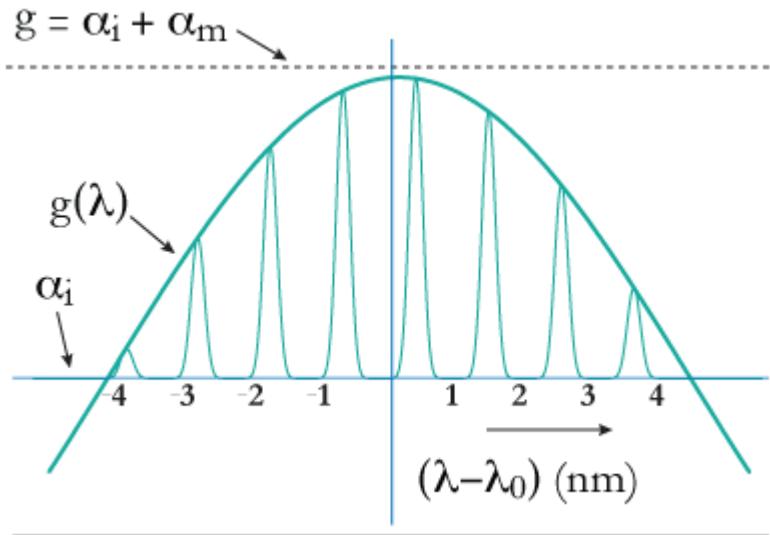


图2：法布里-珀罗激光器增益曲线

这种情况尤其会发生在磷化铟衬底的法布里-珀罗激光器中，其光谱带宽一般为5纳米到10纳米。根据波长和输出功率的不同，砷化镓衬底的器件可以工作在单纵模模式下。其输出光谱带宽一般小于2纳米。

典型的850纳米半导体激光器的腔长在300微米左右，群折射率在4左右，其纵模间隔将为0.3纳米，这与腔长为1毫米的1550纳米半导体激光器相近。改变谐振腔的长度或者折射率，比如通过对激光二极管加热或制冷，将会移动整个模式梳，也就相应地改变了输出波长。

激光器线宽

半导体激光器的单纵模线宽 (FWHM) 由修正的Schawlow和Townes公式定义，公式中加入了Henry线宽增强因子 α_H :[1]

$$\Delta\nu = \frac{hv v_g^2 (\alpha_i + \alpha_m) \alpha_m n_{sp}}{8\pi P_{out}} (1 + \alpha_H^2)$$

公式4：Schawlow-Townes-Henry激光器线宽

其中 hv 是光子能量， v_g 是群速度， n_{sp} 是粒子数反转因子， P_{out} 是单端面的输出功率。这个公式描述了相位和振幅波动引起的激光线宽的光谱展宽，光谱展宽是由不可避免的自发辐射光子对相干激射模式的影响造成的。这种叫做量子噪声的波动定义了激光线宽的下限，而这种微小的波动可能会被机械/声音变化或者热变化引起的更大的波动所掩盖。

增加谐振腔的长度将会减小 α_m （见公式2），从而减小线宽。这可以通过量子噪声极限线宽来理解（见公式4），量子噪声极限线宽与发射模式中的自发辐射光子数成正比。增加谐振腔的长度既减少了自发辐射光子数（通过减少每个纵模的“冷腔”光谱宽度），又增加了对应一定输出功率的谐振腔中的总光子数。这就是为何Schawlow-Townes公式中谐振腔长度项出现两次的原因。

腔长为0.3毫米的单频分布反馈 (DFB) 式半导体激光器一般有1到10 MHz量级的发射线宽。如果将腔长增加到3厘米，将会使发射线宽变窄100倍以上。这在文献[2]中有介绍，当半导体激光器的腔长增加时其发射线宽将减小到1 kHz以下。

单波长工作原理和调谐方法

在许多应用中，我们希望能得到单纵模（单个频率）激光，或者能够调节激射波长，或者同时都能做到。为了满足这种需求，我们在半导体激光器芯片的外部加入波长选择反馈元件，用来

选择激射波长。为了使这种外腔式激光器（ECL）能正常工作，需要抑制半导体芯片法布里-珀罗腔产生的本征光学反馈，使其不会影响外部反馈。一般通过在芯片的一个端面镀光学增透膜（AR），可以有效地减少增益芯片的法布里-珀罗腔效应。

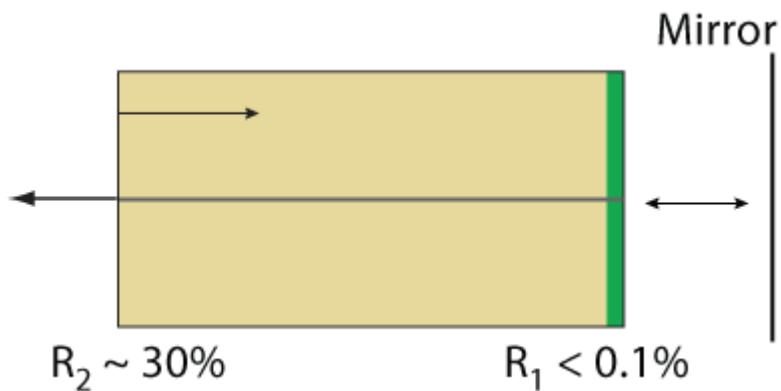


图3：基于增益芯片的外腔工作原理

在最小值时，芯片端面反射 (R_1) 应该比外部反馈 (R_{ext}) 小20 dB；也就是说 $R_1 < 10^{-2} \times R_{ext}$ 。[3]即使镀了增透膜，法布里-珀罗增益芯片端面的残余反射也常常限制了ECL的稳定性、输出功率和光谱质量，特别是当激光器可调谐时。为了进一步减少芯片端面的反射，可以结合使用带角度的波导和增透膜，来有效地消除大多数来自内部芯片法布里-珀罗腔的反馈 [4]。该单角端面 (SAF) 增益芯片为ECL (特别是宽带可调谐ECL) 提供了优越的结构性能。

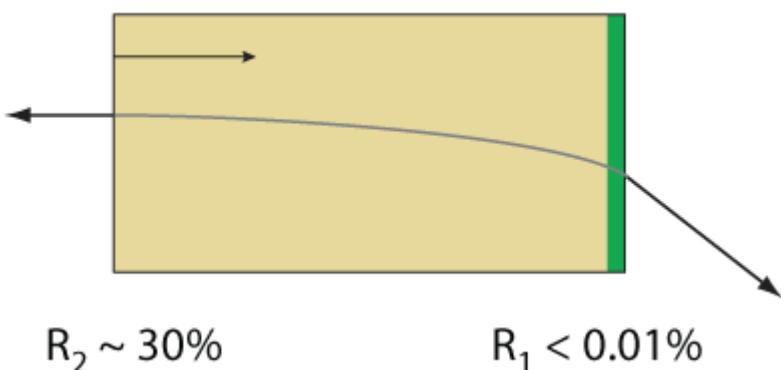


图4：单角端面增益芯片

外腔式激光器设计

实现外腔半导体激光器的方法很多。[3]对于大多数方法，首先考虑的是选择一个合适的波长选择反馈元件。最常用的反馈元件之一是衍射光栅，可用作单频和宽带可调谐外腔激光器的反馈元件。

当增益芯片的准直输出光以相对于光栅表面法线 θ 角入射到衍射光栅上，并垂直于光栅刻线时，衍射光束的出射角 θ' 由光栅公式决定：

$$n\lambda = d(\sin\theta + \sin\theta')$$

公式5：光栅公式

这里 n 是衍射级数， λ 是衍射波长， d 是光栅常数（槽之间的距离）。对 $n > 0$ 级衍射级，衍射光栅将会把同一年级衍射光中的不同波长成分在空间上分离开，因为衍射角 θ' 与波长有关。一旦增益芯片的光谱成分在空间上分离，可以通过很多方法来选择特定的波长，并将其反射回增益介质。

Littrow谐振腔ECL结构

最简单的一种方法就是使用Littrow结构，此时衍射光栅的朝向是固定的，所以一级衍射沿入

射光方向原路返回到增益芯片中（即上述的公式（5）中 $\theta = \theta'$ ）：

$$n\lambda = 2d(\sin\theta)$$

公式6：光栅公式，Littrow结构

激光器的输出功率可以从光栅的零级反射中得到，这种方法经常被采用，因为用这种方法构建ECL时所需的光学元件最少（只需要一个准直透镜和一个衍射光栅）。

波长的调谐是通过旋转衍射光栅来实现的，旋转光栅可以改变反射回波导的光波波长。当选定衍射光栅（光栅常数）、准直透镜和腔长后，在波导的接收角范围内只有一个纵模能被反射回增益芯片，这样外腔激光器就会得到单频激光光谱。请注意，准直透镜的选择非常重要，因为准直透镜会影响照射到光栅上的面积，也会影响耦合进半导体增益芯片的聚焦点尺寸。这种结构的一个缺点是零级输出光的角度随波长的变化而变化。但是如果ECL输出是从SAF增益芯片的垂直面出射，就可以避免这个问题的产生。在这个结构中，SAF垂直面的反射率R通常会减少到10%左右，需要选择合适的光栅使衍射光进入所需衍射级，从而使ECL的输出功率最大。由于Thorlabs的SAF增益芯片在其常规表面具有10%或20%的反射率，它们不适合用于在本结构中。

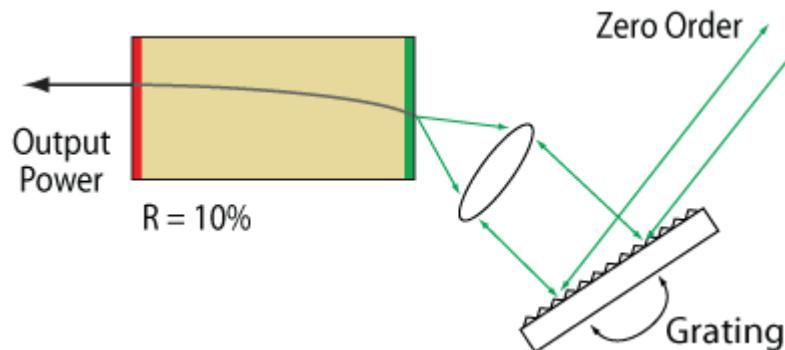


图5：Littrow结构外腔激光器

Littman-Metcalf的ECL结构

另一种常用的ECL实现方法是Littman-Metcalf结构，该结构使用额外的可调节反射镜来选择反馈波长。^[5]相比前一种结构，Littman-Metcalf结构中入射角增加，并在光栅上发生两次衍射，从而使外腔具有更好的波长选择性。正因如此，Littman-Metcalf结构的ECL的输出光束的线宽通常比类似的Littrow结构的线宽更窄。在Littman-Metcalf结构中，激光的输出光束通常是衍射光栅的零级反射，这是因为当波长调谐时，传输方向保持不变。在这种情况下，为了使ECL内的损耗最小，在SAF的垂直面上镀上高反（HR）膜，一般大于90%，使输出功率最大化。

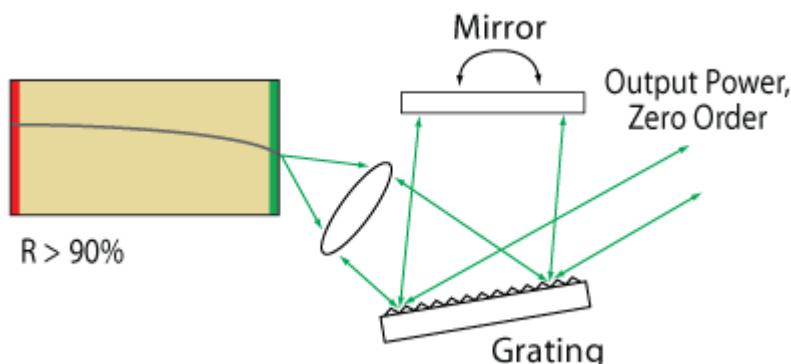


图6：Littman-Metcalf外腔式激光器

对于一些应用可能还是会希望使用SAF芯片的垂直面作为激光器的耦合输出面。对于这些应用，

需要在SAF芯片垂直面镀低反射率膜，使激光器的输出功率最大化。

Littman-Metcalf设计的一个缺点是其内部损耗要高于Littrow结构，所以通常这种激光器的输出功率也较低。其内部损耗增加的主要原因是调谐反射镜反射的零级光束的损耗，和大角度反射时光栅衍射效率的降低。

创新ECL设计

SAF芯片的创新性设计非常适合用于外腔激光器，因为它几乎消除了来自增益芯片腔内端面的有害反馈。

- 1) C. H. Henry, "Theory of the Linewidth of Semiconductor Lasers" IEEE J. of Quantum electron, QE-18, 259 (1982).
- 2) R. Wyatt, K. H. Cameron and M. R. Matthews, "Tunable Narrow Line External Cavity Lasers for Coherent Optical Communication Systems", Br. Telecom. Technol. J. 3, 5 (1985).
- 3) P. Zorabedian, "Tunable External Cavity Semiconductor Lasers." Tunable Lasers Handbood, Ed. F. J. Duarte. New York, Academic, 1995. Chapter 8.
- 4) P. J. S. Heim, Z. F. Fan, S. -H. Cho, K. Nam, M. Dagenais, F. G. Johnson and R. Leavitt, "Single-angled-facet Laser Diode for Widely Tunable External Cavity Semiconductor Lasers with High Spectral Purity", Electron. Lett., 33, 1387 (1997).
- 5) M. G. Littman and H. J. Metcalf, "Spectrally narrow pulsed dye laser without beam expander," App. Opt. 17, 2224 (1978).

椭圆光束整形实验观测

由于具有矩形出射孔径横截面，边发射激光二极管会发出椭圆光束。孔径尺寸较窄处的光束分量比正交光束分量具有更大的发散角。由于一个分量的发散速度快于另一个分量，因此光束的形状呈椭圆形，而非圆形。

椭圆的光束形状有时并不符合需要，因为这样聚焦的光斑尺寸大于圆形光束的光斑尺寸，所以辐照度(单位面积的功率)较低。下面我们利用基于柱面透镜、变形棱镜或空间滤波器几种不同方法，来将椭圆光束变成圆形，并比较这三种方法的效果。然后测量M2、波前和透射功率，以便评价变圆光束的特征。

我们发现，每种整形技术不仅都能改善椭圆入射光束的圆形度，还都展现了各自在圆形度、光束质量和透射功率方面不同的平衡程度。本实验观测标签中描述的结果表明，应用的具体要求将决定最适合的圆化技术。

实验设计和装置

实验装置如图1所示。温度稳定的670 nm激光二极管发射椭圆形的准直光束，入射到每个整形系统中(图2到图4)。经过准直的光束是一种低发散的光束，但并不影响光束形状。每个系统基于以下选项：

- [LJ1874L2-A](#)和[LJ1638L1-A](#)平凸柱面透镜(图2)
- [PS873-A](#)未安装的变形棱镜(图3)
- [KT310](#)空间滤波系统，带[P5S](#) 05 μm针孔(图4)

如右图所示，每次将一个光束整形系统放置在装置中用黄色矩形高亮显示出来的空白位置。这种设计可以在相同的实验条件下评估每种整形技术，并直接比较它们的效果。该实验约束要求是使用非最佳紧凑型夹具，以及使用未安装的变形棱镜对，而不是方便安装和预对准的变形棱镜对。

使用功率计、波前传感器和M2系统测量并评价光束经过不同整形系统之后的特征。在实验装置图中，所有系统都在平台右侧，以便描述；每次使用一个系统。功率计用来确定光束整形系统衰减入射激光强度的程度。波前传感器用来测量输出光束的畸变。M2系统测量描述输出光束与高斯光束的相似程度。理想情况下，整形系统不会使激光光束衰减和畸变，且会输出完美

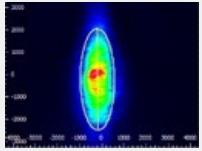
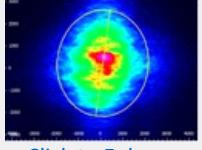
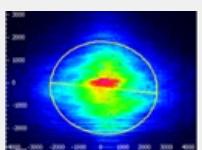
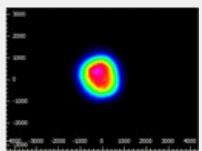
的高斯光束。

边发射激光二极管还会发射像散光束，可使正交光束分量的位移焦点重叠。实验探讨的三种整形技术中，只有柱面透镜对可以补偿散光。正交光束分量焦斑之间的位移通过每种整形技术测量。在柱面透镜对的情况下，它们的配置经过调节以最大程度地减少激光束中的像散。像散以归一化数量显示。

实验结果

下表总结了实验结果，其中，绿色栏表示每种分类中的最佳结果。每种整形技术都有各自的优势。对于一个应用来说，最佳整形技术由系统对光束质量、透射光功率和装置局限的要求决定。

空间滤波器显著改善了光束的圆形度和质量，但是光束的透射功率低。柱面透镜对产生的圆形度较好的光束，且平衡了圆形度、光束质量与透射功率。此外，柱面透镜对还补偿了很多散光。变形棱镜对处理的光束圆形度与柱面透镜对不相上下，但输出光束的M2值和波前误差都要优于柱面透镜，不过它的透射功率比较低。

Method	Beam Intensity Profile	Circularity a	M2 Value s	RMS Wavefront	Transmitted Power	Normalized Astigmatism mb
Collimated Source Output (No Circularization Technique)	 Click to Enlarge Scale in Microns	0.36	X Axis: 1.28 Y Axis: 1.63	0.17	Not Applicable	0.67
Cylindrical Lens Pair	 Click to Enlarge Scale in Microns	0.84	X Axis: 1.90 Y Axis: 1.93	0.30	91%	0.06
Anamorphic Prism Pair	 Click to Enlarge Scale in Microns	0.82	X Axis: 1.60 Y Axis: 1.46	0.16	80%	1.25
Spatial Filter	 Click to Enlarge Scale in Microns	0.93	X Axis: 1.05 Y Axis: 1.10	0.10	34%	0.36

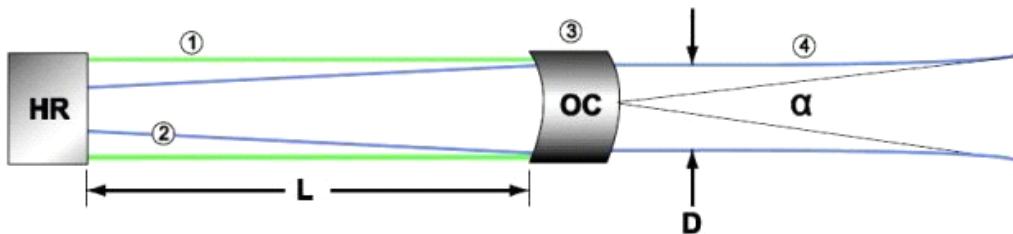
- 圆形度=dminor/dmajor，此处，dminor和dmajor分别为椭圆的小直径和大直径(1/e强度)，圆形度=1表示完美的圆形光束。
- 归一化散光计算是光束的两个正交分量的束腰位置之差，除以具有较小束腰的光束分量的瑞利长度。

实验组件经过精心挑选，使得每种整形系统在实验中都能使用相同的装置。这样就可以直接比较不同整形技术的效果；但是，优化整形技术的装置会改善其性能。用于准直透镜和变形棱镜

对的安装座便于操作和集成到实验系统中。使用更小的安装座可能改善实验效果，因为可以将它们相对彼此更加精确地定位。此外，使用定制柱面透镜和自定义焦距也可能改善柱面透镜对整形系统的效果。所有结果可能受到使用光束轮廓仪软件算法来确定圆形度计算中使用的光束半径的影响。

氦氖激光器

氦氖激光器的增益介质是以低压密封在玻璃管中的氦氖混合气体，混合比例从5:1到20:1。氦氖激光器的激发源是玻璃管两端的阳极和阴极的高压放电。如下图所示，激光腔的一端是一个平面高反镜，另一端是一个透过率约为1%的凹面输出耦合镜。氦氖激光器一般比较小，腔长范围约从15 cm到0.5 m。



光学谐振腔

(1)激光管, (2)腔内光束, (3)输出耦合镜, (4)输出光束

Typical HeNe Parameters

Beam Diameter	1 mm
Full Angle Beam Divergence (α)	1.5 mrad
Cavity Length (L)	0.15 m (0.5 mW) to 1 m (35 mW)
Reflectivity at High Reflector (HR)	>99.99%
Transmission at Output Coupler (OC)	~1%

氦氖偏振

非偏振(随机偏振)光束

非偏振氦氖激光器输出的是快速波动的线偏振光，偏振方向变化只需要纳秒级时间。非偏振激光器是光路中没有偏振元件时的理想选择。随着使用时间变长，激光功率可能有大的波动。

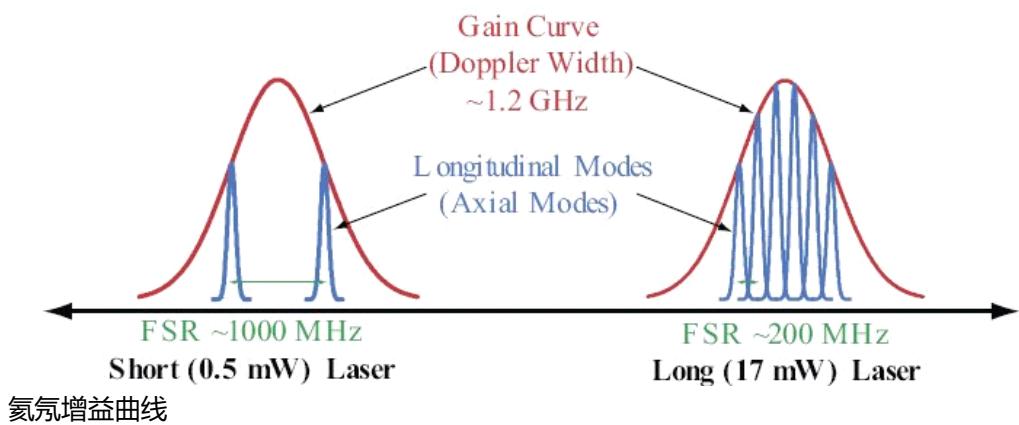
偏振光束

偏振氦氖激光器输出稳定的线偏振光，所以非常适合偏振灵敏应用。

氦氖线宽

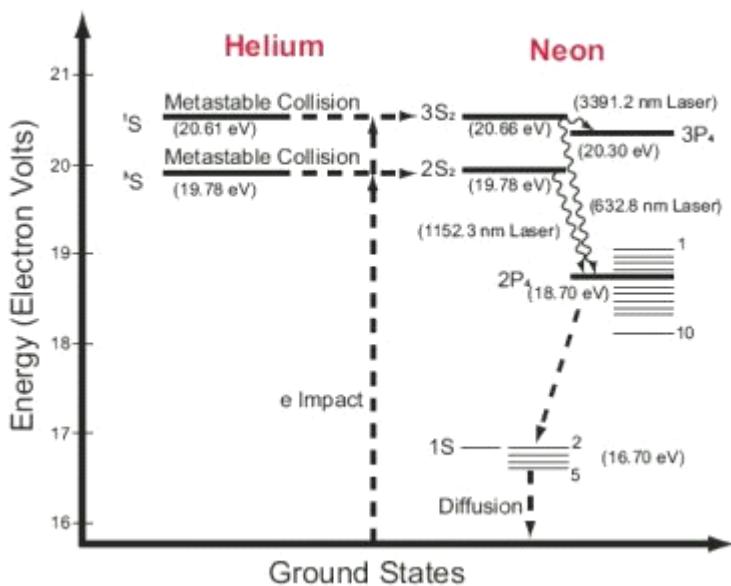
红光氦氖激光器在空气中的输出波长是632.816 nm，但是一般说632 nm或633 nm。波长增益曲线实际上包含因激光腔热膨胀和其它外部因素产生振荡的多个纵模。

氦氖激光器的线宽与应用有关。氦氖激光器轴向模式结构的表征参数包括模式数量、自由光谱范围(FSR)和多普勒宽度，请见下图。单个轴向模式的线宽通常很小(~kHz)，其决定因素主要是外部因素和测量时间尺度，而不是由基本激光参数。在大多数干涉应用中，最重要的参数是相干长度，它是由相距最远的轴向模式决定的。红光氦氖激光器的相干长度约为30 cm。



氦氖能级

氦氖激光器中的激发过程开始于放电电子与氦原子的碰撞。这样将把氦原子从基态激发到长寿命的亚稳态。然后，处于激发态的氦原子通过碰撞将氖原子从基态变成激发态。被激发的氖原子数量不断累积直至产生粒子数反转。不同能级之间的同步受激辐射产生632.82 nm和其它发射波长，请见右图所示。电子从这些激发态迅速衰减到基态。氦氖激光器的输出功率是受限的，因为氖原子的高能级会随电流变大而饱和，而低能级和电流呈线性关系。



使用合适的反射镜和腔长设计激光腔可以增强其它发射波长。红外跃迁包括3.39 μm 和1.15 μm 波长，可见光跃迁包括绿光(543.365 nm)、黄光(593.932 nm)、黄橙光(604.613 nm)和橙光(611.802 nm)波长。相比1.15 μm 和3.39 μm 等波长，氦氖激光器常用的632.8 nm波长输出的增益要低很多。

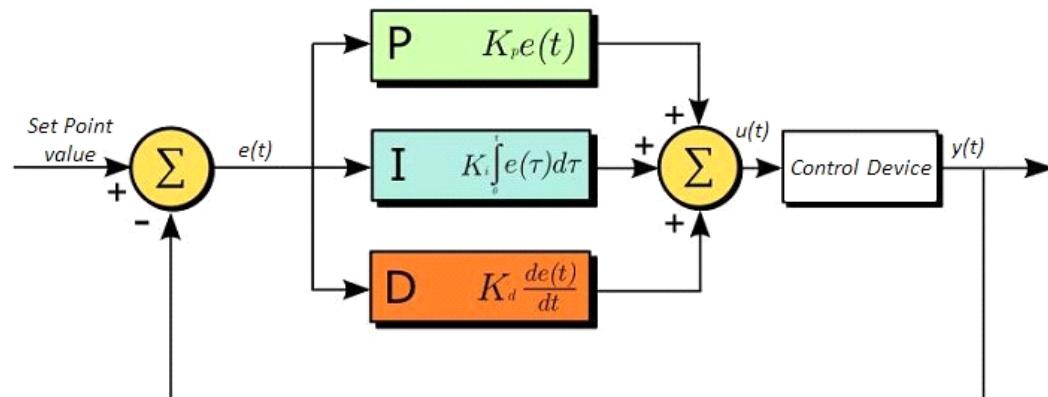
- [自由空间电光调制](#)
- [光纤耦合电光调制](#)

PID基础

PID电路常被用作为控制回路反馈控制器，并且常用于各种形式的伺服电路。缩写PID中的每个字母分别代表比例(P)、积分(I)和微分(D)，表示一个PID电路的三种控制设置。任何伺服电

路的目的都是将系统长时间控制在一个预先确定的数值(设定值)上。PID电路可以主动控制系统，以便于在当前值与设定值发生差异时产生一个错误信号，从而将系统控制在设定值上。其三种控制设置对应与时间相关的错误信号；简而言之，可这样认为：比例控制依赖于当前错误，积分控制依赖于之前错误的累加，微分控制则是对未发生错误的预测。每种控制设置的结果都会进行加权，然后加权值会对电路 $u(t)$ 的输出进行调整。此输出会反馈至一个控制器，其数值会反馈回电路中，此过程可以主动稳定电路的输出从而达到并稳定在设定值。

下面的框图说明了PID电路的简单原理。一个伺服电路中可以采用一个或更多的控制，这取决于系统的需要(即P、I、PI、PD或PID)。



在一个PID电路中，如果合理安排控制设置，就可以在最小过冲(超过设定值)和振荡(在设定值附近摆动)下实现相对快速的响应。

以温度伺服电路为例，如激光二极管的温度稳定。PID电路将会最终控制流入半导体制冷片(TEC)的电流(通常通过控制施加在FET上的栅压来实现)。在此例子中，电流可以看作操作变量(MV)。我们用一个热敏电阻来监测激光二极管的温度，热敏电阻上的电压用作过程变量(PV)。设定值(SP)电压设定在对应所需温度的数值上。错误信号 $e(t)$ ，就只是SP和PV之间的差值。PID控制器将会产生此错误信号，然后改变MV从而达到所需的结果。例如，如果 $e(t)$ 表明激光二极管过热，电路将会让更多电流通过TEC(比例控制)。由于比例控制是与 $e(t)$ 成比例的，它不能足够快速地将激光二极管冷却下来。这样一来，电路将会根据之前的错误信号来调节输出电流，进一步增大流入TEC的电流量(积分控制)，从而达到预先设定的温度值。当达到SP时[$e(t)$ 达到0]，电路将会减小通过TEC的电流，从而有望达到SP(微分控制)。

请注意，PID电路并不会保证优化控制。不当的PID控制设置会引起电路的剧烈振荡，从而导致控制不稳定。PID增益是根据用户需求进行调节的，这样能够保证最佳性能。

PID理论

PID控制电路的输出 $u(t)$ 可以写为

$$u(t) = MV(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t)$$

其中

K_p = 比例增益

K_i = 积分增益

K_d = 微分增益

$e(t) = SP - PV(t)$

从这里我们可以通过它们的数学定义式来定义控制单元，并分别讨论更多细节。比例控制与错

误信号成比例；这样一来，它可以直接与电路产生的错误信号相关：

$$P = K_p e(t)$$

更大的比例增益导致对错误信号更大的响应变化，这样就会影响控制器对系统变化而响应的速度。较高的比例增益可以使电路响应更加平滑，但数值太高的话会使电路在SP附近振荡。若数值太低，电路将不能有效地对系统变化进行响应。

积分控制比起比例增益具有更进一步的作用，这是因为它不仅仅与与错误信号的大小成比例关系，它还和错误持续的时间成比例关系。

$$I = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau$$

积分控制能够高度有效地增加电路的响应时间，同时可以消除纯比例控制而引起的稳态误差。本质上，积分控制只是将之前未矫正的错误信号进行叠加，然后乘以Ki来产生集成响应。这样，即使是很小的持续错误，也可以引起很大的合成集成响应。但是，由于积分控制的快速响应特点，高增益值会引起SP值的过度过冲，从而导致电路振荡和不稳定。若增益太低，电路在系统发生改变时响应将十分缓慢。

微分控制旨在减少比例和积分控制中可能的过冲和振荡。它能决定电路随时间变化的速度(通过对错误信号进行微分)，将此速度乘以Kd就可以产生微分响应。

$$D = K_d \frac{d}{dt} e(t)$$

与比例控制和积分控制不同，微分控制将会降低电路的响应速度。这样一来，它就可以部分地补偿过冲以及减弱积分和比例控制所引起的任何振荡。高增益值会使电路响应速度非常缓慢，并使电路对噪声和高频振荡非常敏感(这是由于电路不能快速响应)。如果增益太低，电路则很有可能会发生SP值的过冲。但是，在一些情况下，必须避免任何程度的SP值过冲，因此应该采用更高的微分增益(同时采用更低的比例增益)。下表解释了单独增大任一参数的增益值的效果。

Parameter Increased	Rise Time	Overshoot	Settling Time	Steady-State Error	Stability
Kp	Decrease	Increase	Small Change	Decrease	Degrade
Ki	Decrease	Increase	Increase	Decrease Significantly	Degrade
Kd	Minor Decrease	Minor Decrease	Minor Decrease	No Effect	Improve (for small Kd)

调谐

一般而言，用户需要对P、I和D的增益进行调节，从而更好地对系统进行控制。对于任何特定系统而言，都不存在一套固定的增益设置法则，下面我们将介绍一些通用的调节过程，可以帮助用户调节电路来匹配其系统和使用环境。一般，PID电路通常都会过冲SP值，然后快速减振回到SP值。

增益设置的手动调节是设置PID控制的最简单方法。但是，此过程需要主动进行(启动PID控制器并与系统合理连接)，并且需要一定的经验才能实现完全积分。如需手动调节PID控制器，首先应将积分和微分增益设置为零。然后增大比例增益直到观察到输出信号出现振荡。接着将比例增益值减小至目前数值的一半左右。在设置好比例增益后，增大积分增益值，直到任何漂移

都根据用户系统所适用的时间标度进行校正。如果把此增益调节过大，将会观察到SP值的严重过冲和电路发生不稳定现象。一旦积分增益设定好后，就可以开始增大微分增益。微分增益可以减小过冲，并阻碍系统振荡，使其快速稳定到SP值。如果把微分增益调节过大，会观察到大幅度的过冲(这是因为电路响应太缓慢)。通过进行增益设定，可以使您的PID电路达到最佳的工作状态，使电路对系统的变化进行快速响应，并有效地抑制SP值附近的振荡。

手动调节可以非常有效地对您的特定系统进行PID电路设置，但这需要有一定的经验并能够理解PID电路和响应。用于PID调节的Ziegler-Nichols方法可以一定程度地作为结构指南来设定PID值。此外，需要把积分和微分增益设置为0。增大比例增益，直到电路开始出现振荡，我们将这时的增益级称为K_u，此振荡的周期为P_u。不同控制电路的增益可以参看下表。

Control Type	K _p	K _i	K _d
P	0.50 K _u	-	-
PI	0.45 K _u	1.2 K _p /P _u	-
PID	0.60 K _u	2 K _p /P _u	K _p P _u /8

分析

2020年4月23日

光电二极管和光电导探测器

光电二极管教程

工作原理

结光电二极管是一种基本器件，功能类似于普通的信号二极管，但在结半导体的耗尽区吸收光时，会产生光电流。光电二极管是一种快速、高线性度的器件，在应用中具有高量子效率，适合多种应用。

根据入射光确定期望的输出电流水平和响应度是有必要的。图1描绘了一个结光电二极管模型，它由基本的独立元件组成，这样便于直观地了解光电二极管的主要性质，更好地掌握Thorlabs光电二极管的工作过程。

$$I_{OUT} = I_{DARK} + I_{PD}$$

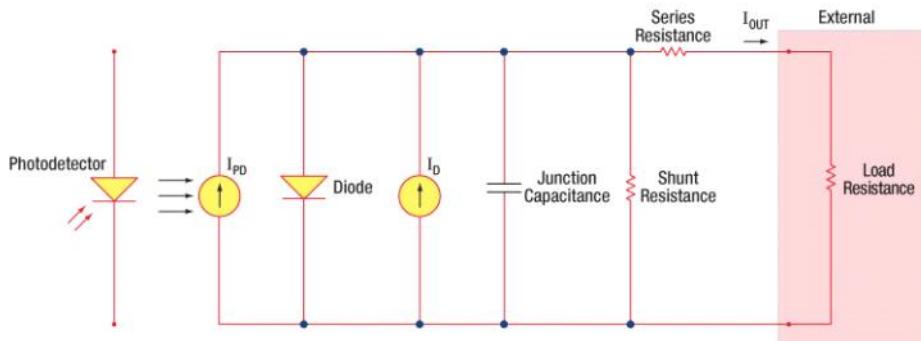


图1：光电二极管模型

光电二极管相关术语

响应度

光电二极管的响应度可以定义为给定波长下，产生的光电流(IPD)和入射光功率(P)之比：

$$R(\lambda) = \frac{I_{PD}}{P}$$

工作模式(光导模式和光伏模式)

光电二极管有两种工作模式：光导模式(反向偏置)或光伏模式(零偏置)。工作模式的选择根据应用中速度和可接受暗电流大小(漏电流)而定。

光导模式

处于光导模式时，有一个外加的偏压，这是我们DET系列探测器的基础。电路中测得的电流代表器件接受到的光照；测量的输出电流与输入光功率成正比。外加偏压使得耗尽区的宽度增大，响应度增大，结电容变小，响应度趋向直线。在这些条件下工作容易产生较大的暗电

流，但可以选择光电二极管的材料以限制其大小。(注：我们的DET器件都是反向偏置的，不能在正向偏压下工作。)

光伏模式

光伏模式下，光电二极管是零偏置的。器件的电流流动受到限制，形成一个电压。这种工作模式利用了光伏效应，它是太阳能电池的基础。当在光伏模式工作时，暗电流最小。

暗电流

暗电流是光电二极管有偏压时的漏电流。在光导模式工作时，容易出现更高的暗电流，并与温度直接相关。温度每增加 10 °C，暗电流几乎增加一倍，温度每增加 6 °C，分流电阻增大一倍。显然，应用更大的偏压会降低结电容，但也会增加当前暗电流的大小。

当前的暗电流也受光电二极管材料和有源区尺寸的影响。锗器件暗电流很大，硅器件的暗电流通常比锗器件的小。

结电容

结电容(C_j)是光电二极管的一个重要性质，对光电二极管的带宽和响应有很大影响。需要注意的是，结区面积大的二极管结体积也越大，也拥有较大的充电电容。在反向偏压应用中，结的耗尽区宽度增加，会有效地减小结电容，增大响应速度。

带宽和响应

负载电阻和光电二极管的电容共同限制带宽。要得到最佳的频率响应，一个50 Ω的终端需要使用一条50 Ω的同轴电缆。带宽(f_{BW})和上升时间响应(t_r)可以近似用结电容(C_j)和负载电阻(R_{LOAD})表示：

$$f_{BW} = 1 / (2 * \pi * R_{LOAD} * C_j)$$
$$t_r = 0.35 / f_{BW}$$

噪声等效功率

噪声等效功率(NEP)是信噪比等于1时产生的RMS信号电压。它是非常有用的参数，因为NEP决定了探测器探测弱光的能力。一般而言，NEP随着探测器的有源区而增大，且可以用下式表示：

$$NEP = \frac{Incident Energy * Area}{\frac{S}{N} * \sqrt{\Delta f}}$$

在这里， S/N 是信噪比， Δf 是噪声带宽，入射能量的单位是W/cm²。更多关于NEP的信息，请看Thorlabs的[噪声等效功率白皮书](#)。

终端电阻

使用负载电阻将光电流转换为电压(V_{OUT})以便在示波器上显示：

$$V_{OUT} = I_{OUT} * R_{LOAD}$$

根据光电二极管的类型，负载电阻影响其响应速度。为达到最大带宽，我们建议在同轴电缆的另一端使用50欧姆的终端电阻。其与电缆的本征阻抗相匹配，将会最小化谐振。如果带宽不重要，您可以增大负载电阻(R_{LOAD})，从而增大给定光功率下的光电压。终端不匹配时，电缆的长度对响应影响很大，所以我们建议使电缆越短越好。

分流电阻

分流电阻代表零偏压下光电二极管的结电阻。理想的光电二极管分流电阻无限大，但实际值可

能从十欧姆到几千兆欧不等，与其材料有关。例如，InGaAs探测器分流电阻在10兆欧姆量级，而Ge探测器的分流电阻在千欧量级。这会显著影响光电二极管的噪声电流。然而，在大部分应用中，大电阻几乎不产生效应，因而可以忽略。

串联电阻

串联电阻是半导体材料的电阻，这个小电阻通常可以忽略。串联电阻来自于光电二极管的触点和线接头，通常用来确定二极管在零偏压下的线性度。

通用工作电路

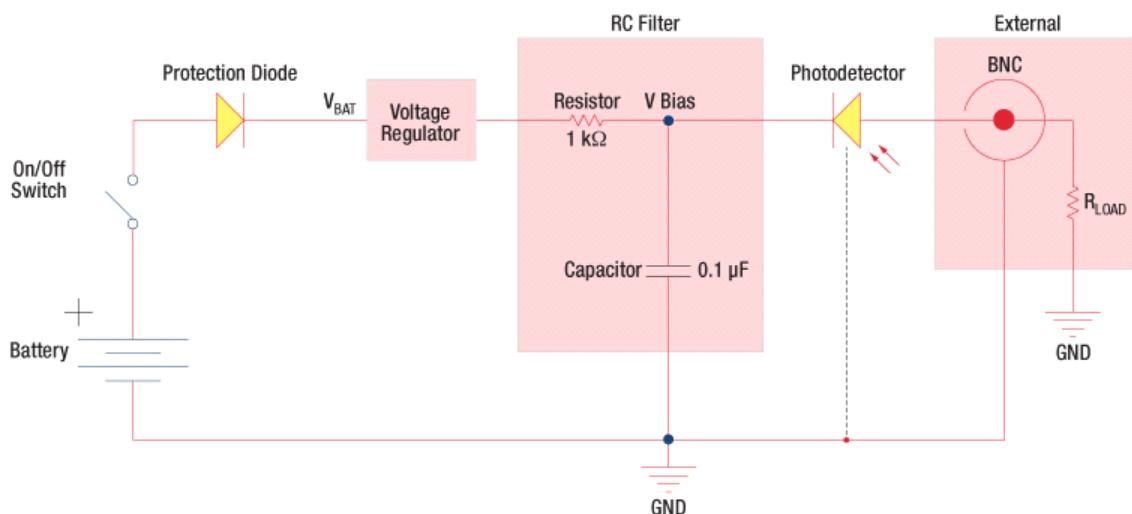


图2：反向偏压电路(DET系列探测器)

DET系列探测器有上面所示的模块化电路。探测器反向偏置对输入光产生线性响应。光电流的大小与入射光大小以及波长有关，输出端加一个负载电阻就可以在示波器上显示。RC滤波电路的作用是滤掉输入电源的高频噪声，这些噪声会影响输出端的噪声。

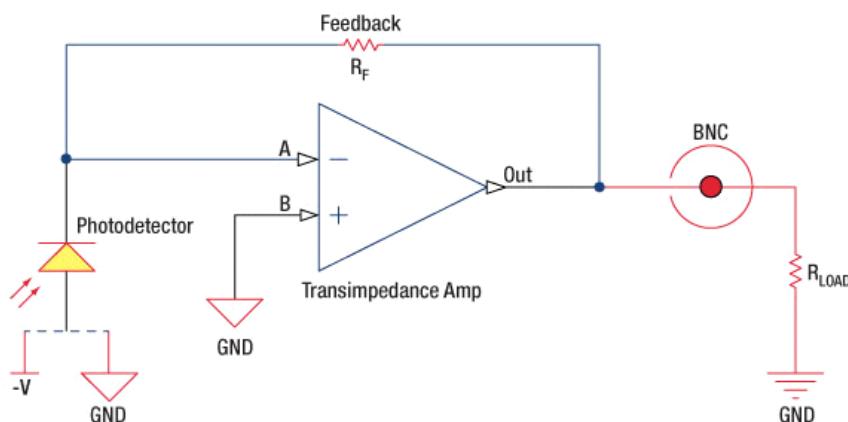


图3：放大探测器电路

也可以用光电探测器加放大器来实现所需要的高增益。用户可以选择工作在光导模式和光伏模式。使用这个有源电路有几个优势：

- 光伏模式：由于运算放大器A点电势和B点电势相等，因而光电二极管两端的电势差为零伏。这样最小化了暗电流的可能。
- 光导模式：二极管反向偏置，于是增大了带宽降低了结电容。探测器的增益与反馈元件(R_f)有关。探测器的带宽可用下面的式子计算：

$$f_l(-3dR) = \boxed{\frac{GBP}{}}$$

$$f(-3dB) = \sqrt{\frac{GBP}{4\pi * R_f * C_D}}$$

其中GBP是放大器增益带宽积，CD是结电容和放大器电容之和。

斩波频率的影响

光导体信号将保持不变，直到时间常数响应极限为止。许多探测器(包括PbS、PbSe、HgCdTe(MCT)和InAsSb探测器)具有1/f的典型噪声频谱(即，噪声随着斩波频率增大而减小)，这会对低频时的时间常数具有较大影响。

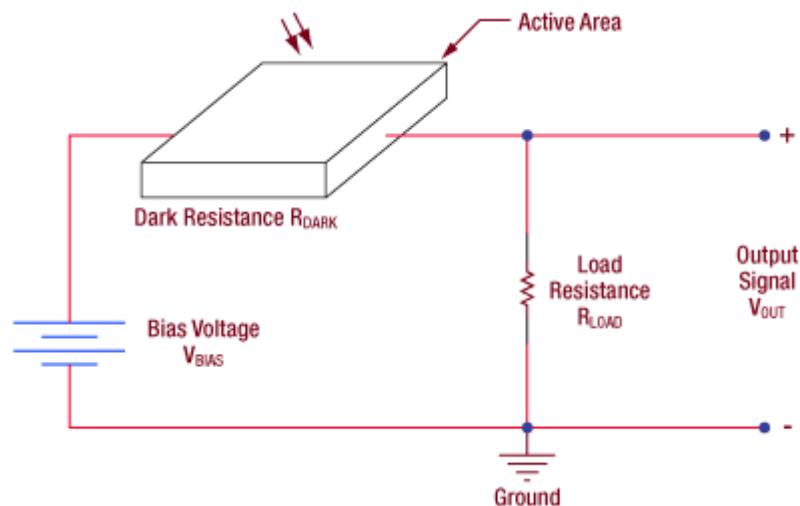
探测器在低斩波频率下会表现出较低响应度。频率响应和探测率对于下式最大化

$$f_c = \frac{1}{2\pi\tau_r}$$

PbS和PbSe光电导探测器

硫化铅 (PbS) 和硒化铅 (PbSe) 光电导探测器广泛用于1000到4800纳米范围的红外辐射探测。与标准光电二极管的工作机制不同，标准光电二极管在光照射下会产生电流，而光电导材料的电阻在光照射下会减小。尽管PbS和PbSe探测器可以在室温条件下使用，但温度的浮动会影响暗电阻、灵敏度和响应速度 (请参看下面的温度考虑部分)。

光电导体基本模型



[点击放大](#)

工作原理

对于光电导材料，入射光会引起有源区载流子的数量增大，这样一来就减小了探测器的电阻。这种电阻的改变导致了测量电压的变化，因此，光灵敏度可以用伏特/瓦为单位表示。右图例举了一个工作电路的例子。请注意，我们不推荐在实际应用中使用图中的电路，因为该电路为产生低频噪声。

探测机制是基于有源区薄膜的导电特性。在没有入射光照射时探测器的输出信号可以由下式定义：

$$V_{OUT} = \frac{R_{LOAD}}{R_{DARK} + R_{LOAD}} * V_{BIAS}$$

当入射光照射在有源区时，探测器电阻值的变化 ΔR_{DARK} 会导致电压的变化 ΔV_{OUT} :

$$\Delta V_{OUT} = -\frac{R_{LOAD} V_{BIAS}}{(R_{DARK} + R_{LOAD})^2} * \Delta R_{DARK}$$

频率响应

光电导体必须与一个脉冲信号一起使用才能获得AC信号。因此，这些探测器在探测CW光时应该使用一个[光学斩波器](#)。当使用一个斩波器时，探测器的响应 (R_f) 可以用下式计算：

$$R_f = \frac{R_0}{\sqrt{1 + 4\pi^2 f_c^2 \tau_r^2}}$$

其中， f_c 为斩波频率， R_0 为0Hz时的响应， τ_r 为探测器的上升时间。

斩波频率的影响

由于时间常数响应的限制，光电导体信号将保持恒定。 PbS 和 $PbSe$ 探测器具有一个典型的1/f噪声谱（即，噪声随着斩波频率的增大而减小），在低频时对时间常数具有重大影响。

这些探测器在低斩波频率时具有较低的响应。频率响应和探测率可以由以下条件最大化

$$f_c = \frac{1}{2\pi\tau_r}$$

每个探测器的信号与斩波频率关系的特性曲线可以在操作手册的第四章中查询。

温度考虑

这些探测器中包含一块玻璃基底，上面有一层薄膜。根据工作条件的不同，光电导表面的有效面形有源区域会有所不同，这样一来，对其进行改变就能使性能特性发生变化。特别地，探测器的响应会根据工作温度的变化而变化。

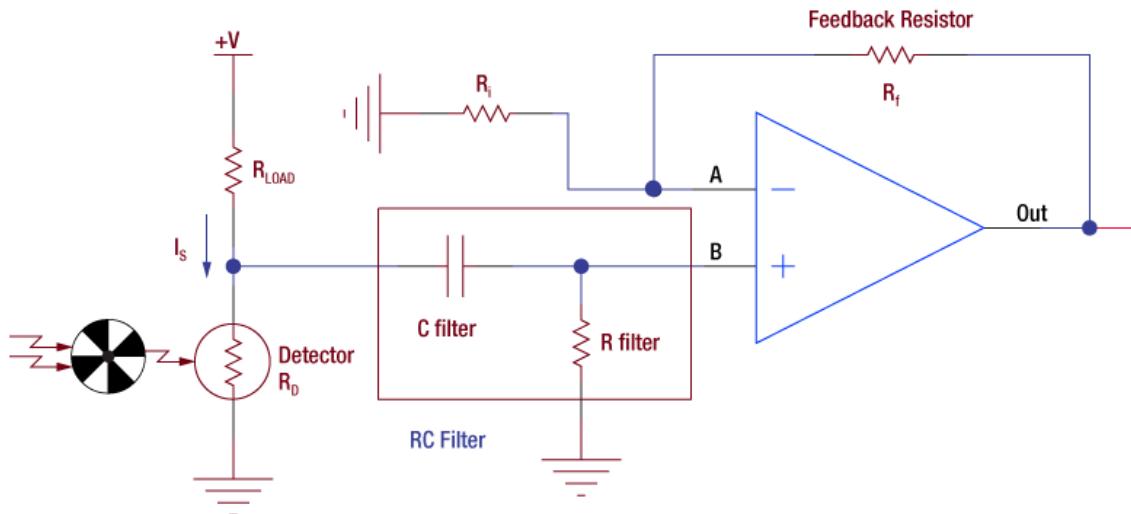
PbS 和 $PbSe$ 带隙的温度特性具有负系数，因此冷却探测器会将其光谱响应范围向低波长方向转移。为了获得最好的结果，在开在一个稳定控制的环境中操作这些光电二极管。请参看操作手册了解特定探测器的温度与灵敏度的特征曲线。

典型光电导放大器电路

由于光电导体的噪声特性，它适合交流耦合操作。施加偏压造成的直流噪声在高偏压时将会变得非常严重，这样就会限制探测器的适用性。基于该原因，红外探测器通常采用交流耦合来限制噪声。预放大器可以帮助保持稳定性，并为生成的电流信号提供一个较大的增益。

根据下面的示意图，其中的运算放大器将会试图通过使用反馈来将A点保持在输入的B点上。这两个输入电压之间的差异经过放大后进行输出。还需要注意的是，交流耦合放大器输入的高通滤波器将会阻断任何直流信号。此外，负载电阻 (R_{LOAD}) 的阻值应该与探测器的暗电阻相等，这样才能保证可以获得最大信号。供给的电压 (+V) 应该处于使SNR能够接受并接近统一的水平。一些应用需要更高的电压值，这样一来，噪声将会增大。如操作手册中第四章所述，SNR与供给电压关系的特征曲线确定了最佳的操作条件。输出电压可以由下式得到：

$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right) * I_s R_D$$



放大器模型

信噪比

由于探测器的噪声与斩波频率成反比，在低频条件下噪声会变得很大。探测器的输出信号随着偏压的增大而线性增大，但噪声在低偏压条件下与电压值基本没有关系。在达到设定的电压值时，探测器的噪声将会随着施加的电压的增大而线性增大。在高电压水平时，噪声倾向于指数增长，这样一来就进一步降低了信噪比（SNR）。为了达到最佳的SNR值，应该将斩波频率和偏压值调整到可以接受的水平。操作手册第四章中提供了每个特定探测器SNR与斩波频率关系以及SNR与供给电压关系的特征曲线。

噪声等效功率

噪声等效功率（NEP）是在信噪比等于1时生成的RMS信号电压。该参数非常实用，因为NEP确定了探测器探测低强度光信号的能力。一般而言，NEP会随着探测器有源区的增大而增大，可以通过下式计算：

$$NEP = \frac{\text{Incident Energy} * \text{Area}}{\frac{S}{N} * \sqrt{\Delta f}}$$

其中， S/N 为信噪比， Δf 为噪声带宽，并且入射能量的单位为W/cm²。更多关于NEP的信息，请看Thorlabs的[噪声等效功率白皮书](#)。

暗电阻

暗电阻是探测器在无光照时电阻的阻值。需要注意的是，暗电阻会随着温度变化而增大或减小。冷却探测器将会增大暗电阻。操作手册中第四章给出了每个特定探测器的暗电阻与温度关系的特性曲线。

探测率 (D) 和 比探测率 (D*)

探测率 (D) 是评估光电探测器性能的另一个标准。探测率表征了灵敏度，是NEP的倒数。

$$D = \frac{1}{NEP}$$

更高的探测率表示更高的灵敏度，可以使探测器更适合探测低强度的光信号。探测率随着入射光子的波长变化而变化。

探测器的有源区决定了探测器的NEP，同时还从本质上影响探测率。这样一来，要从本质上比较两个探测器是非常困难的。为了消除这种差异，我们使用比探测率 (D*) 来评估光电探测器的性能，它与探测器区域无关。

$$D^* = \frac{\sqrt{A \cdot \Delta f}}{NEP}$$

偏光探测器的实验情况

未安装光电二极管的实验观测

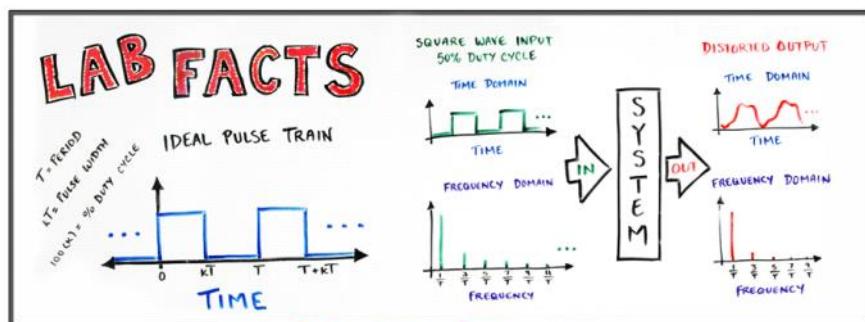
光束特性分析

法布里-珀罗干涉仪

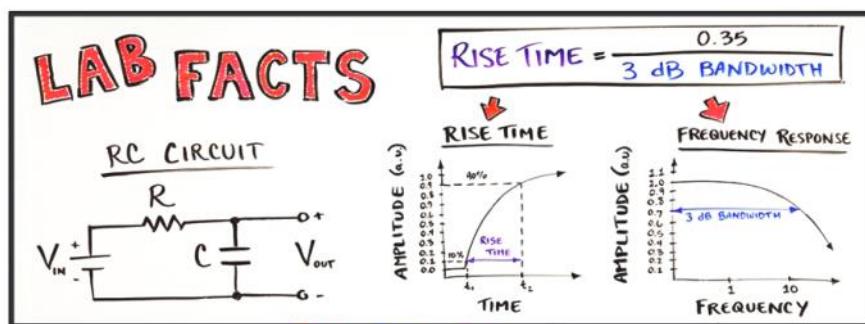
自由光谱范围 (FSR)、锐度和分辨率、光谱分辨本领和光展量

光谱分析仪

脉冲失真



上升时间和3 dB带宽



生产制造

2020年4月24日

- [光学加工](#)
- [光纤制造](#)
- [光纤元件制造](#)
- [半导体制造](#)

光学加工

光学元件生产

1. 制造平面光学元件

平面磨床

- 金刚石砂轮机
- 将玻璃片打磨成均匀厚度

Bridgeport®和Haas®岩芯钻机

- 在库存玻璃上打磨出圆圈生产圆形光学元件

Kulicke & Soffa®切割机

- 切割最厚为5 mm的平板玻璃
- 用在抛光和未抛光板上

内径锯

- 切割方解石原材料生产偏振光学元件

Speedfam®研磨机和抛光机

- 同时研磨或抛光元件的两个面
- 每次可放置300个Ø1英寸圆形光学元件或80个2英寸x2英寸方形光学元件

Strasbaugh抛光轴

- 使用氧化铈之类的抛光化合物使平面光学元件达到特定的表面质量

[平面光学元件制造过程的概况](#)

成型

我们有多种内径锯和岩心钻机使玻璃粗略成形。利用这些机器，我们可以把方解石、N-BK7、熔融石英、SF11以及NG系列Schott等其他材料(如需查看完整的基底列表，请看我们的[光学基底教程](#))制成平面光学元件。我们能够制造各种形状和各种尺寸(圆形最大直径10英寸或方形最大7英寸 x 7英寸)的平面光学元件。大多数圆形光学元件通过自动磨边机产生倒角，从而快速而准确地产生保护边，防止裂隙碎屑进入光学元件。对于形状不规则的光学元件，技术纯熟的光学元件工人会利用抛光轮手动制造倒角。

抛光

成型之后，使用传统的上盘与抛光技术一次抛光光学元件的一个表面。在这个过程中，先利用蜡、树脂或在需要高平行度的情况下通过光学接触法手工将部件临时粘附或者上盘到参考板。这些方法可以保护光学元件的后表面，同时确保它们在抛光过程中不会移动。然后，利用Strasbaugh抛光轴研磨上盘的元件，抛光轴由我们的技术人员通过干涉仪在线测量不断进行监测和调整。通过这种方法，经验丰富的技术员一般能够实现低于 $\lambda/10$ 的波前误差和3到5 Å的表面粗糙度。特定的上盘-抛光机研磨工作非常缓慢，非常精确，能够让某些光学元件达到接近 $\lambda/40$ 的平整度和低至1 Å的表面粗糙度；通常，这些机器用来重新处理该过程早期使用过的参考板表面。

许多经过双面抛光的部件保持塑形，然后继续通过Speedfam抛光机。这些抛光机将数百个零件夹在专门的研磨垫和抛光液之间。研磨垫需要精心设计，以便将抛光混合物与碎屑移入和移出光学元件的表面，且不会刮伤或不均匀地抛光元件。这些机器还可以在光学元件的两面实现3至5 Å的表面粗糙度，同时保持低至5 arcsec的平行度。

质量控制

完成抛光过程之后，就可以从参考板上卸下光学元件，将它们洗净之后，再送入质量控制部检查。表面质量公差会因产品的不同而有差异，但可以根据客户要求为定制严格或宽松控制公差。最后，满足所需规格的光学元件会被送到不同的目的地。对于某些平面光学元件而言，这已经是最后一步了，它们经过包装之后会以成品出售，

2. 透镜生产

生产球面和非球面光学元件

Satisloh®研磨抛光机

- 生产球面和非球面光学元件
- 能够制造Ø10 mm和Ø140 mm之间的透镜

QED Technologies®磁流变抛光(MRF)机

- 使用悬浮在磁流体条带中的抛光剂
- 分辨 $< \lambda/40$ 的表面不规则性
- 在非球面透镜中产生衍射极限性能

Nanotech® 450UPL金刚石刻刀转机

- 制造离轴抛物面反射镜基底
- 尺寸从1/2英寸到3英寸

Zygo Verifire非球面干涉仪

- 与抛光机进行在线计量测试和验证光学性能
- 表面平整度、曲率半径和透镜光焦度

[**透镜生产的概况**](#)

球面和非球面透镜

球面和非球面光学元件都可以由内部制造的平面圆坯(前面在**制造平面光学元件**标签中有描述)

研磨而成。CNC Satisloh机器研磨抛光玻璃圆坯成型，使透镜直径在10 mm(0.39英寸)和140 mm(5.5英寸)之间。这些机器具有集成在我们Zygo计量机中的软件，能够简便准确地对透镜进行调节。这些过程由光学技术员细心监控，确保生产的部件符合我们的标准。

透镜有了正确的曲率之后，就可以开始定心工艺了。我们使用Satisloh中心定位机确保轴中心降到5角秒，适用于我们大部分光学元件小于3弧分的规格。虽然这些中心定位机器主要用于研磨光学元件的边缘，以达到我们的直径和中心规格，但我们也用其为客户和其他组织生产定制形状的光学元件。

衍射极限非球面透镜

为了制造衍射极限非球面透镜，我们使用了QED Technologies磁流变抛光(MRF)机。这些机器取代了Satisloh机器中使用的固体钻头和磁盘，通过让注入抛光剂的磁流体沿透镜流动，使Satisloh机器进行的抛光过程更加精细。这个动态的过程根据被抛光的材料可以使镜片的表面准确度在55 nm之内。将制造缺陷降低到这个程度可以实现非常低的波前误差。与我们其他的抛光机一样，这台MRF抛光机与我们的计量工具通信，以快速准确地进行调整。

金属基底

我们的金刚石刻刀转机能够切割和研磨由Satisloh机器难以处理的材料制成的曲面光学元件，比如我们的离轴抛物面反射镜、圆锥镜和用于中到深红外波段的透镜。粗略成型的透镜基底或反射镜毛坯安装在转速高达10,000 rpm的圆形工具上。该工具旋转时，金刚石切割工具紧压毛坯刮去多余的材料，形成所需的形状和表面质量。

3. 镀膜实验室

光学镀膜沉积

技术员和工程师

- 使用诸如OptiLayer和TFCalc等设计软件

采用多种沉积技术的真空室

- 带离子辅助沉积(IAD)的Tecport光学元件室
- 带离子束溅射的Veeco®和Techne室
- 专用于金属的特殊室

镀膜

- 请看我们的[光学镀膜教程](#)了解详情。

严格清洁

- 佳洁士自动超声波清洗机
- ISO Class 10,000和1,000洁净室
- 手动检查光学元件

生产中的质量控制

- 用分光光度计表征光学特性确定性能

[光学镀膜](#)

该过程首先通过使用诸如Optilayer和TFCalc等软件包给满足标准规格或之前与客户讨论的公差的涂层建模。然后严格控制测试过程，以确保生产过程稳定一致。当设计和测试产生可重复的过程时，就可以开始生产了。

未镀膜光学元件的清洁度和表面质量对于确保性能尤为重要，在高功率激光应用中尤其如此。将需要镀膜的光学元件从制造车间送到保持ISO Class 10,000洁净室状态的镀膜实验室。然后，让光学元件通过四浴超声波清洗机。这个过程使用洗涤剂和微空化清除光学元件表面的污染物。接着，检查每个光学元件，并手动去除斑点。最后，将通过检查的部件装入镀膜室。镀膜实验室每个腔室使用不同的沉积技术对应相应的镀膜过程。沉积技术包括电阻热蒸发、带离子辅助沉积的电子束蒸发和离子束溅射。我们的真空室可以控制、监控和记录工艺参数，但技术人员也可以手动控制这些程序，以便实时调整工艺流程。

沉积之后，已镀膜的光学元件要经过另一轮的人工检查，并且用Varian分光光度计对见证取样试样进行光学轮廓分析。这一步中采取的措施是为了确保光学性能符合规格。在进行最终检查之前，许多光学元件都会经过第二轮镀膜，即背面镀增透膜(请看[最终检查标签](#))。

4. 最终检查

物理参数测量	光学性能测量	环境强度测试	其他服务
• 直径	• 波前误差	• 激光损伤阈值	• 元件序列化
• 中心厚度	• 透射与反射	• 温度循环	• 激光刻印
• 表面平整度	• 焦距	• 湿度循环	• 定制安装
• 平行度	• 曲率半径	• 薄膜涂层附着力	• 显微检查
• 共轴性	• 功率		• OEM罩壳
• 表面质量 - MIL-PRF-13830B			• 带外性能
			• 散装和真空封装
			• 合规性报告

我们光学元件的最终检查通常包括测量光学元件的物理性质、光学性能和环境强度。正如[设计和工程标签](#)所述，如果客户要求进行特殊测量、标准测量记录或其他服务，这是实现这些服务过程中的一个步骤。

测试的物理参数包括直径、中心厚度、表面平整度、平行度和表面质量。表面质量按照MIL-PRF-13830B规格说明进行测量。这种美国军事标准要求用40 W的灯泡在黑色背景下进行目测检查；在某些情况下，我们通过使用高功率光纤光源超过了这个检测标准。

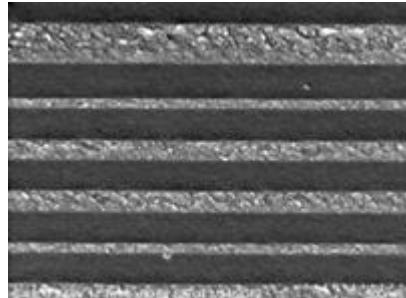
评估光学性能，包括波前误差、焦距和镀膜性能。可以分辨亚埃级的波前误差。可以获得200 nm到55.5 μm之间的透射率和反射率数据。

环境测试可以包括光学元件的激光损伤阈值、热循环、湿度循环和镀膜耐久性/粘附性。

光学元件通过所有的检测点之后会有两种使用方法：一种是直接封装成单独的产品出售，另一种是集成组件出售。我们的包装通过跌落测试，有助于防止包装中的光学元件因不当处理受到损坏。此外，光学元件也可以真空封装，以防运输过程中受到环境污染。我们的组装可以像安装光学元件一样简单，便于集成到实验装置中，也可以像多元望远镜、准直器或显微镜物镜一样复杂。Thorlabs的垂直整合结构使我们能够利用自己的机器定制安装光学元件，并为OEM应用搭建合适的组件。

光学镀膜

镀膜设计



层叠的镀膜

光学薄膜的光谱性能和其它关键特征是由膜层结构、膜层数、使用材料的折射率、基底的光学性质决定的。

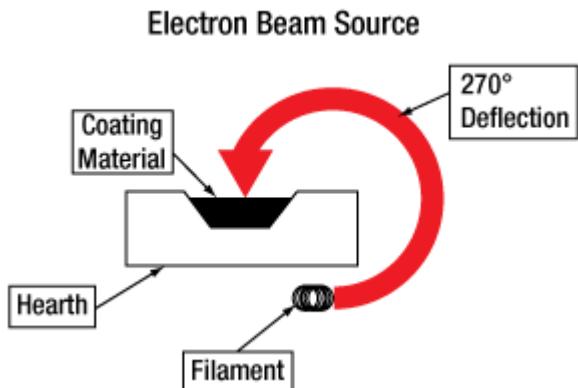
大部分膜层结构都是一系列离散的高折射率和低折射率材料交替叠加而成。不同的叠加结构会生成不同的镀膜类型(比如带通膜、边通膜、BBAR膜)。精确调整膜层厚度和折射率，可以优化具体工作波长范围内的性能特征。Thorlabs还有一系列薄膜建模工具，可以设计、表征并优化薄膜性能的各项参数。

清洁

我们生产过程中的第一步，也是最关键的一步，就是使用自动超声波清洁产品清洁未镀膜的基底。清洁过程中会使用一系列超声溶剂和洗涤剂，清洁过程的每一步都会去除基底表面上不同类型的污染物，从而确保表面污染物不会干扰给基底镀膜的过程。

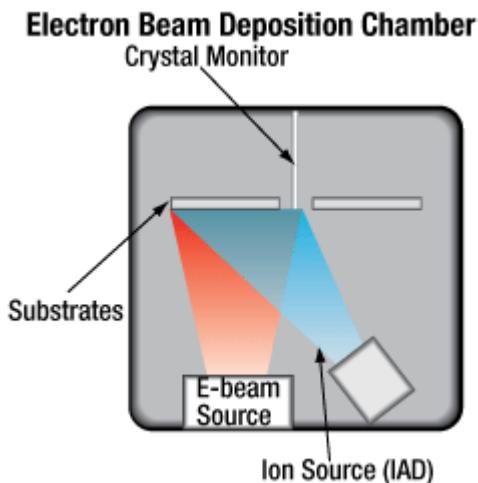
电子束沉积

Thorlabs目前的镀膜设备包括四台全自动的电子束(E-Beam)沉积系统。这些系统利用电子束源蒸发一些特定的材料，比如过渡金属氧化物(诸如TiO₂、Ta₂O₅、HfO₂、Nb₂O₅、ZrO₂)、金属卤化物(MgF₂、YF₃)或SiO₂。这个过程必须在高温(200 - 250°C)下完成，才能使膜层很好地附着在基底上，并使最终镀膜拥有良好的材料特性。



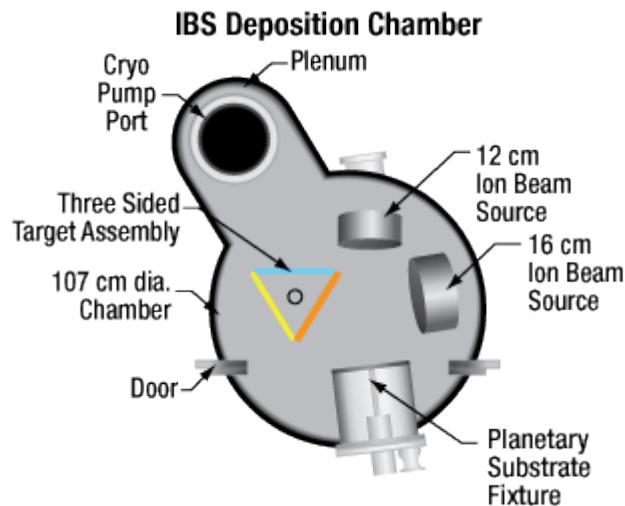
离子辅助电子束沉积

离子辅助沉积(IAD)采用相同的电子束方法蒸发镀膜材料，但还增添了离子源，以促进材料在较低温度(20 - 100°C)下的成核和生长。离子源可以给温度敏感的基底镀膜。采用此方法得到的薄膜密度更高，并且在潮湿和干燥的环境条件下都对光谱漂移不太敏感。



IBS沉积

我们的离子束溅射(IBS)沉积室是新增的镀膜系列设备。这个过程利用高能量的射频等离子体源来溅射镀膜材料，并将其沉积在基底上，同时另一个射频离子源(辅助源)则在沉积过程中起IAD作用。溅射机制可以理解为离子源发出的电离气体分子和目标材料原子之间的动量转移，类似于一个母球撞击用台球架排好的台球，只是在分子水平而言，且有若干个原子参与。



IBS的优势

- 过程控制更好
- 镀膜设计的选择更广
- 表面质量更高，散射更少
- 光谱漂移更少
- 单个周期的镀膜更厚

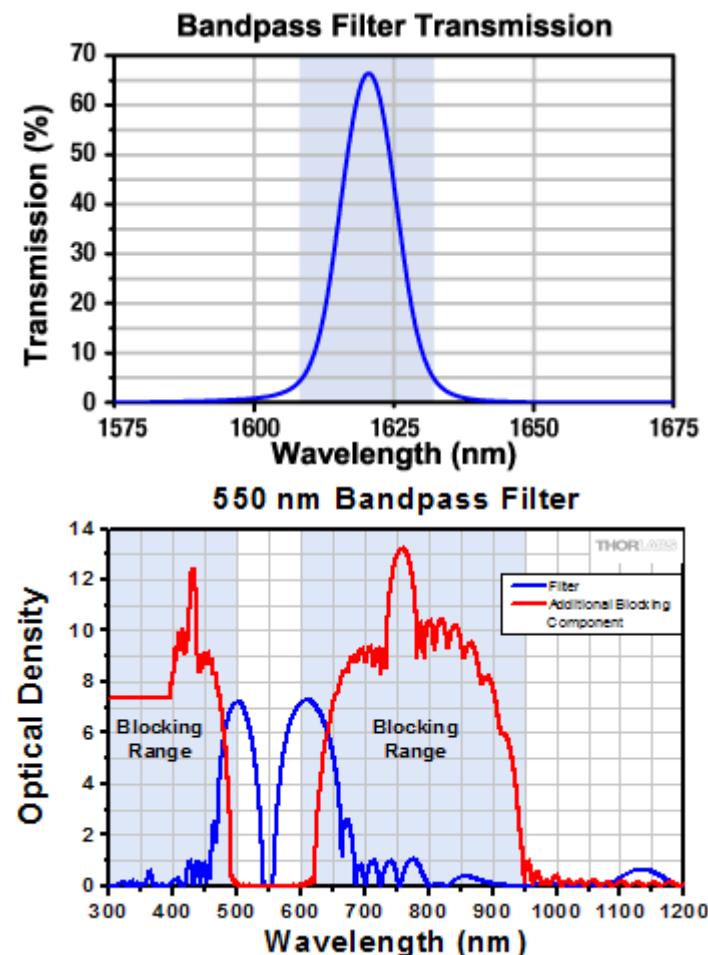
计量

Thorlabs采用一系列科研级别的光谱仪来表征紫外到远红外波段内的薄膜性能。利用Varian Cary 5000和PE Lambda 950光谱仪表征我们的镀膜在UV-VIS-NIR范围内的光谱性能，并用Olis PE 983红外光谱仪确定红外薄膜(2 - 55.5 μm)的光谱性能。除了光谱仪以外，我们还会用各种各样的激光器和激光二极管、功率计、探测器以及偏振测量仪检测我们光学元件的性能。

我们搭建自定义装置来测试标准产品和OEM部件，确保我们提供的每一个光学元件都能在规定的光谱范围内性能良好。我们所有的计量仪器都会根据ISO 9001:2015标准定期校准。

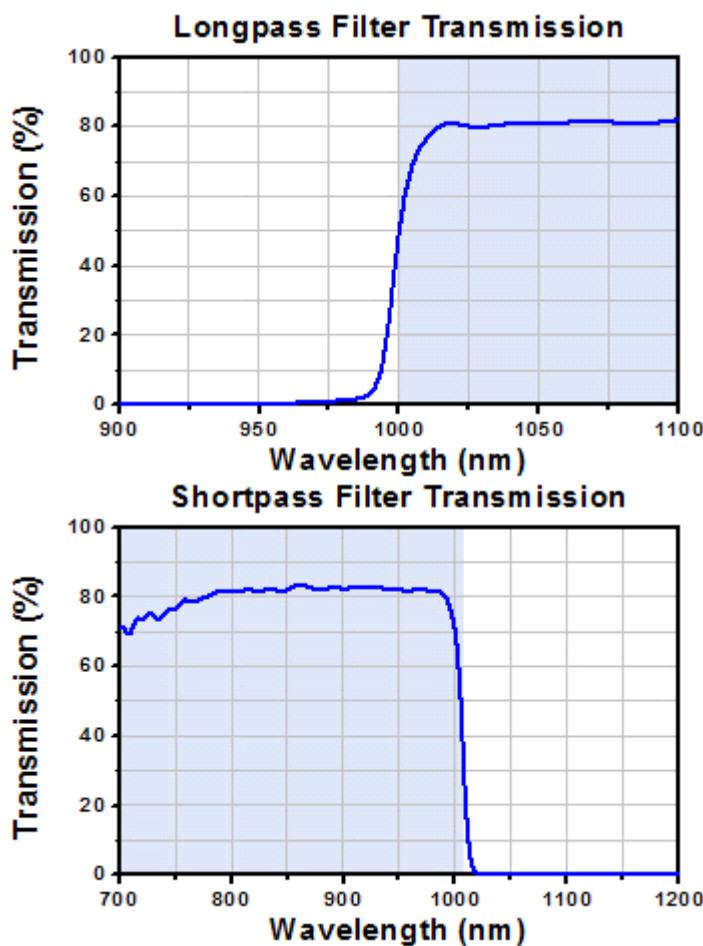
光谱薄膜

激光线/带通滤光片



激光线/带通滤光片可以透射特定的窄光谱范围，同时阻挡其它不需要的光。这种滤光片在带通区域的透射率高，但对带通区域两侧的光谱范围阻挡有限。为了弥补这种缺陷，可以增添屏蔽组件。根据对滤光片的不同要求，这个组件可以是全介质或金属-介质的部件。虽然增加的屏蔽组件消除了一些通带区域之外不必要的光，但同时也降低了滤光片的整个透射通量。这些膜层采用真空沉积镀膜技术制备而成，包含两层反射堆叠膜，由偶次间隔层分离。反射堆叠膜由高低折射率材料交替叠加构成，反射率超过99.99%。通过改变间隔层的厚度和/或反射层的数量，可以改变滤光片的中心波长和带宽。

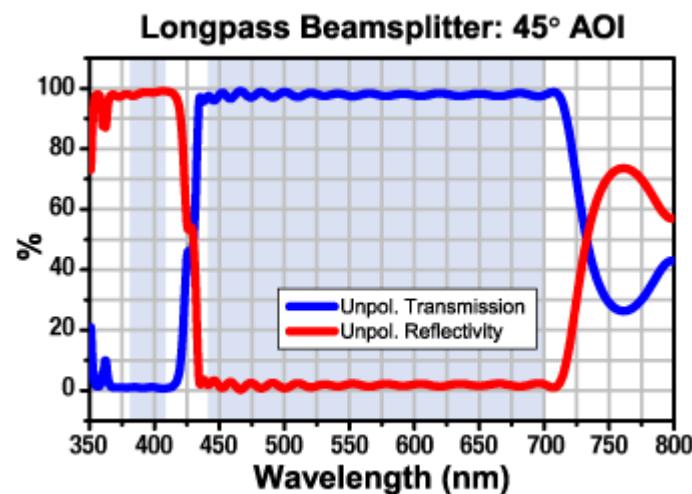
边通滤光片

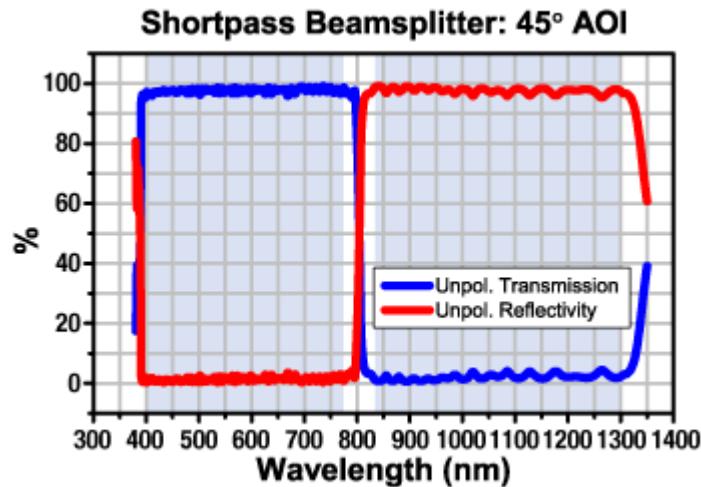


边通滤光片用于隔离特定的光谱波段。长波通滤光片可以透射长于截止波长的波段，同时阻隔短于截止波长的波段。而短波通滤光片则阻隔长于截止波长的波段，并透射短于截止波长的波段。

Thorlabs的边通滤光片镀有经久耐用的介质膜，可以正常清洁，并用任何高质量的光学器件拿取。它们的薄膜结构实际上就是改良的四分之一波片，采用干涉原理，而不是吸收来阻隔相应的光谱波段。

二向色分束镜

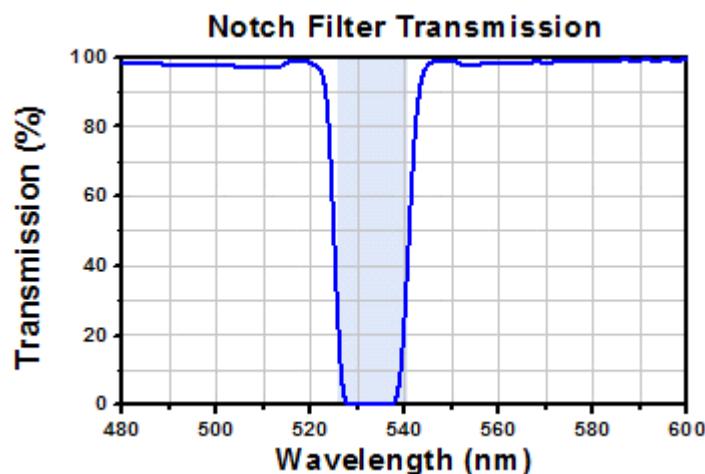




二向色分束镜通常在45°位置用作光束导向器，一般为长波通或短波通。长波通分束镜可以反射>90%的设计波长以下的入射光，并透射>90%的设计波长以上的入射光。而短波通分束镜则透射设计波长以下的入射光，并反射设计波长以上的入射光。二向色分束镜应用广泛，最常用于荧光显微术中。

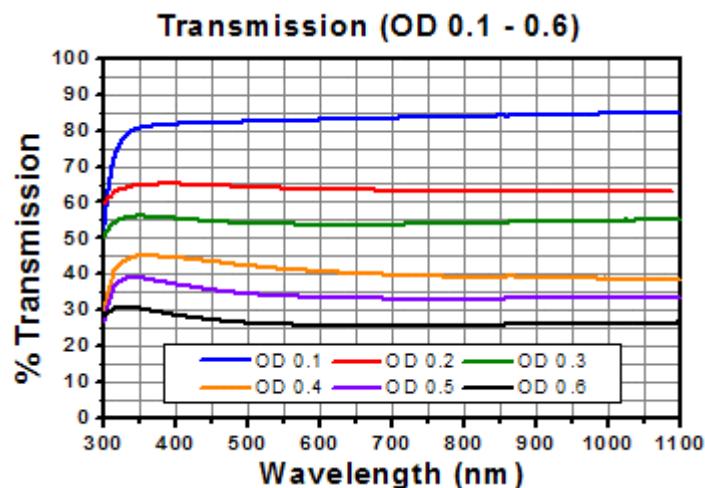
二向色分束镜上的介质膜决定了它的功能特性。薄膜中的交替层会让透射波长干涉相长，同时让反射波长干涉相消。膜层的厚度和膜层中材料的折射率决定了给定分束镜的设计波长。

陷波滤光片



陷波滤光片，通常被称为带止或带阻滤光片，用于透射大部分波长，但也会将特定波长范围(止带)内的光衰减到很低的水平。它们与带通滤光片的功能正好相反，但制备方法相同。

中性密度滤光片



中性密度(ND)滤光片会以特定的系数衰减某个范围内所有波长的光，防止入射光损坏探测设

备。固定ND滤光片可以将入射光衰减固定量。可变ND滤光片在离散的位置上具有阶梯排布的薄膜，可以根据应用实现不同程度的衰减。连续ND滤光片在整个滤光片上都有渐变薄膜分布，可以实现连续衰减。Thorlabs还提供长条形和圆形的可变和连续ND滤光片。

增透膜

增透(AR)膜是一种难熔氧化硬膜，镀在光学元件表面时，能够最大程度地减少特定波长范围内的表面反射。如果没有增透膜，每个光学表面会因反射而产生4%的光能损耗。例如，如果串联使用3个未镀膜的透镜，那么六个表面中的每个表面都会发生4%的光能损耗，因此，光通过3个透镜后总共损耗21.7%。而如果使用的是三个镀"B"膜的透镜(每个表面 $R_{avg} < 0.5\%$)，那么入射光因表面反射的总损耗< 3%。这个实例中，使用镀增透膜的光学元件可以将透过率从78.3%提高到大于97%。请注意，未镀膜光学元件表面4%的损耗是一个大概值，会因材料及入射角(AOI)不同而有很大差异。请注意，透镜颜色与透镜规格无关。每种AR膜的颜色可能因为批次而不同，但这不是性能指标。

宽带增透(BBAR)膜具有多层结构，高低折射率材料交替堆叠。增透膜层通过电子束沉积技术沉积在基底上。膜层厚度通过建模软件优化，让反射波干涉相消，透射波干涉相长，这样，光学元件在特定波长范围内的性能得到提高，且元件内部反射(重影)很少。Thorlabs的BBAR膜在0°到30°的入射角、数值孔径(NA)为0.5时性能良好。Thorlabs目前提供的BBAR膜针对8种不同的波长范围优化了性能。

V膜是一种多层的AR介质薄膜，能够最大程度地减少窄波长范围内的反射率。V膜表面反射率在最小值的两侧上升很快，因此反射率曲线呈"V"形。与宽带增透膜相比，当光束处于指定的AOI范围时，V膜在窄带宽范围上的反射率更低。

高反膜

介质HR膜是一种难熔氧化硬膜，具有宽带或窄带设计，能够在特定波长范围和入射角内使表面反射率最大。这种薄膜由高、低折射率材料交替堆叠而成。膜层厚度通过计算机建模优化，让反射波长干涉相长，其它波长干涉相消。光学元件镀上HR膜之后，表面的反射率显著提高；但是，它的性能取决于入射角(AOI)的大小。如果AOI较大，反射波带会漂移到更短的波长范围，并且S和P偏振光对应的性能也存在差异。

- [宽带高反膜](#)
- [窄带激光线高反膜](#)
- [晶体高反膜](#)

激光诱导损伤阈值

在选择光学元件时，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。连续波(CW)激光一般通过热效应(镀膜或基底的吸收)引起损伤。脉冲激光通常在引起热损伤之前就会夺去光学元件晶格结构中的电子。请注意，这里提供的指南是以室温工作和全新光学元件为前提的(即，符合划痕麻点规格、表面无污染等)。由于光学元件表面上的灰尘或其它微粒会使损伤阈值降低，我们建议保持表面清洁，且

没有杂质污染。

根据ISO/DIS 11254和ISO 21254标准测试LIDT

首先，我们将一束低功率/能量光束入射待测光学元件。光学元件的10个位置在激光光束下曝光一段时间(连续激光)或曝光若干个脉冲(特定的脉冲重频)。曝光后，用显微镜(放大率~100X)检测是否存在可见的损伤。记录损伤位置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，在光学元件的10个新位置进行曝光。重复以上过程，直到观察到损伤为止。这样，损伤阈值就是光学元件在没有损伤时能够承受的最高功率/能量。下面的直方图为一个BB1-E02反射镜的测试结果。



上图为带保护层的铝膜反射镜的LIDT测试结果。在此测试中反射镜的损伤阈值为0.43 J/cm² (1064 nm, 10 ns脉冲, 10 Hz重频, Ø1.000 mm)。

连续波和长脉冲激光

当光学元件被连续波(CW)激光损伤时，通常是由于吸收激光能量造成表面融化或者光学镀膜(增透膜)损伤[1]。分析LIDT时，脉宽大于1 μs的脉冲可以看作连续激光。

对于脉宽在1 ns和1 μs之间时，可能由于吸收或介电击穿产生激光诱导损伤，因此用户必须同时分析连续和脉冲LIDT。吸收可能是由光学元件的固有属性或表面不规则引起的；所有LIDT值只有满足或超过制造商提供的表面质量规格的光学元件才有效。尽管很多光学元件能够承受高功率连续波激光，但胶合(如消色差双合透镜)或高吸收(如中性密度滤光片)等光学元件的连续波损伤阈值则较低，这是因为胶合层或金属膜的吸收或散射会降低损伤阈值。

高脉冲重复频率(PRF)的脉冲激光和连续光束相似。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PRF激光是否会由于热效应损伤光学元件。对于高PRF的光束，其平均功率和峰值功率都必须与同等CW功率比较。此外，对于高度透明的材料，在PRF增加时，LIDT几乎没有或完全没有下降。

为了使用光学元件规定的连续波损伤阈值，有必要了解以下信息：

1. 您的激光波长
2. 光束直径(1/e²)
3. 光束的近似强度轮廓(比如高斯分布)
4. 光束的线性功率密度(总功率除以1/e²光束直径)

Thorlabs使用W/cm表达CW激光的LIDT值。这样，以线性功率密度给出的LIDT可用于任何光束直径；无需因为光斑大小改变而重新计算，请见右图所示。使用下面的公式计算平均线性功率密度。

以上计算公式假设是均匀的光束强度轮廓。现在，您必须考虑光束中的热点或其它非均匀强度轮廓，并粗略计算最大的功率密度。例如，高斯光的最大功率密度通常是均匀光束的两倍(如右下图)。

现在，将最大功率密度与光学元件规定的LIDT比较。如果光学元件的测试波长不等于您的工作波长，损伤阈值必须要适当缩放。根据经验，损伤阈值和波长具有线性关系。所以，当波长减小时，损伤阈值也会减小(比如，LIDT在1310 nm时的损伤阈值为10 W/cm，655 nm时则减小为5 W/cm)：

$$\text{Adjusted LIDT} = \text{LIDT Power} \left(\frac{\text{Your Wavelength}}{\text{LIDT Wavelength}} \right)$$

这个经验法则只提供大体的趋势，它不是LIDT和波长的定量分析。比如，对于连续光应用，损伤阈值与镀膜和基底的吸收成良好的比例关系，而上述吸收不一定与波长成比例。

脉冲激光

如上所述，脉冲激光一般会对光学元件引入与连续波激光不同类型的损伤。脉冲激光通常不会通过热效应使光学元件产生损伤；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坏。遗憾的是，要将光学元件的LIDT规格与您使用的激光作比较是十分困难的。脉冲激光损坏光学元件有多种机制，并且损坏程度取决于激光脉宽。下表中的高亮部分概括了我们规定的LIDT值对应的脉宽。

小于10⁻⁹ s的脉冲与我们规定的LIDT值对比时缺乏可靠性。在这种超短脉冲范围，有各种机制会占主导的损伤机制[2]，比如多光子雪崩电离。相反，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。这意味着连续和脉冲激光的损伤阈值都必须与激光光束进行比较，从而确定光学元件是否适用于您的应用。

Pulse Duration	$t < 10^{-9}$ s	$10^{-9} < t < 10^{-7}$ s	$10^{-7} < t < 10^{-4}$ s	$t > 10^{-4}$ s
Damage Mechanism	Avalanche Ionization	Dielectric Breakdown	Dielectric Breakdown or Thermal	Thermal
Relevant Damage Specification	N/A	Pulsed	Pulsed and CW	CW

比较特定脉冲激光下给定的LIDT与您使用的激光作对比时，需要了解以下信息：

1. 您的激光波长
2. 您的光束能量密度(总能量除以1/e2面积)
3. 您的激光脉宽
4. 您的激光脉冲重复频率(prf)
5. 您的激光的光束直径(1/e2)
6. 光束的大致强度分布(如高斯分布)

您的光束能量密度需要以J/cm²计算。右图表明了为何能量密度是短脉冲光源表达LIDT的最佳量度。在这些条件下，以能量密度给出的LIDT与光斑尺寸无关；因此不需要因为光斑大小变

化而重新调整LIDT值。计算过程假定光强分布是均匀的。您必须调整该能量密度来应对光束中的热点或其他非均匀强度分布，并且粗略计算最大能量密度。例如，高斯光的最大能量密度通常是 $1/e^2$ 光束的两倍。

现在将最大能量密度与光学元件给定的LIDT作比较。如果光学元件测试波长不等于您的工作波长，损伤阈值必须适当缩放[3]。根据经验，损伤阈值和波长比的平方根成比例。所以，当波长减小时，损伤阈值也会减小(比如，在1064 nm时的损伤阈值为1 J/m²，532 nm时则减小为0.7 J/cm²)：

$$\text{Adjusted LIDT} = \text{LIDT Energy} \sqrt{\frac{\text{Your Wavelength}}{\text{LIDT Wavelength}}}$$

现在您得到了根据波长调整的能量密度，您可以在接下来的步骤中使用该能量密度。

光束直径在比较损伤阈值时也是很重要的。虽然LIDT在以J/cm²表达时与光斑大小无关；但是大光束可能照亮更多的缺陷，这可能会导致更大的激光损伤阈值的变化[4]。对于这里的数据，使用小于1 mm的光束测量LIDT。当光束尺寸大于5 mm时，LIDT(J/cm²)也将和光束直径有关，因为尺寸较大光束容易暴露更多的缺陷。

现在，必须对脉宽进行补偿。脉宽越长，光学元件能承受越多的能量。对于1 ns至100 ns的脉宽，其关系可以近似为：

$$\text{Adjusted LIDT} = \text{LIDT Energy} \sqrt{\frac{\text{Your Pulse Length}}{\text{LIDT Pulse Length}}}$$

使用该公式可以根据您的脉宽计算调整LIDT。如果所使用激光的最大能量密度小于调整后的LIDT最大能量密度，光学元件就适用于您的应用。请注意，该计算仅适用于10⁻⁹ s和10⁻⁷ s之间的脉冲激光。对于10⁻⁷ s和10⁻⁴ s之间的脉冲激光，您同时还需要考察是否满足连续波LIDT。



LIDT_Calculator

损伤阈值计算

CW激光实例

假设一个CW激光系统在1319 nm时输出 $1/e^2$ 直径为10 mm的0.5 W高斯光束。直接用总功率除以光束直径得到光束的平均线性功率密度为0.5 W/cm：

$$\text{Linear Power Density} = \frac{\text{Power}}{\text{Beam Diameter}}$$

然而，高斯光束的最大功率密度约为均匀光束的最大功率密度的两倍，如右图所示。因此，系统更准确的最大线性功率密度是1 W/cm。

[AC127-030-C](#)消色差双合透镜规定的CW LIDT为350 W/cm，在1550 nm测得。CW损伤阈值通常与激光源的波长直接成比例，因此得出调整的LIDT值：

$$\text{Adjusted LIDT} = \text{LIDT Power} \left(\frac{\text{Your Wavelength}}{\text{LIDT Wavelength}} \right)$$

调整的350 W/cm x (1319 nm / 1550 nm) = 298 W/cm的LIDT值显著高于激光系统的最大线

性功率密度，因此系统使用这个双合透镜是安全的。

脉冲纳秒激光实例：不同脉宽的缩放

假设某脉冲Nd:YAG激光系统的三倍频输出355 nm、10 Hz、2 ns脉冲，单脉冲能量为1 J，并且输出为1.9 cm光束直径(1/e2)的高斯光束。脉冲能量除以光束面积得到每个脉冲的平均能量密度：

$$\text{Energy Density} = \frac{\text{Pulse Energy}}{\text{Beam Area}}$$

如上所述，高斯光束的最大能量密度约为平均能量密度的两倍。因此，光束的最大能量密度为~0.7 J/cm²。

将这个光束能量密度分别对比[BB1-E01](#)宽带介质膜反射镜规定的LIDT值1 J/cm²和[NB1-K08](#) Nd:YAG激光线反射镜的LIDT值3.5 J/cm²。这两个LIDT值都在355 nm下测量，使用脉宽10 ns、重频10 Hz的脉冲激光确定。因此，需要对系统的更短脉宽进行调整。如上一个标签中的描述，纳秒脉冲的LIDT值与激光脉宽的平方根成比例：

$$\text{Adjusted LIDT} = \text{LIDT Energy} \sqrt{\frac{\text{Your Pulse Length}}{\text{LIDT Pulse Length}}}$$

使用这个调节因子，BB1-E01宽带反射镜的LIDT值变为0.45 J/cm²，Nd:YAG激光线反射镜的LIDT值变为1.6 J/cm²，将它们直接和光束的0.7 J/cm²最大能量密度比较。宽带反射镜很可能受到激光损伤，但是特殊的激光线反射镜能够用于激光系统。

脉冲纳秒激光实例：不同波长的缩放

假设某脉冲激光系统以2.5 Hz发射10 ns脉冲，每个脉冲在1064 nm的能量为100 mJ，1/e2光束直径为16 mm，我们现在需要用中性密度滤光片进行衰减。对于高斯输出，使用这些规格计算最大能量密度为0.1 J/cm²。

对于355 nm的10 ns脉冲，[NDUV10A](#) Ø25 mm、OD 1.0的反射型中性密度滤光片的损伤阈值是0.05 J/cm²，而对于532 nm的10 ns脉冲，类似的[NE10A](#)吸收型滤光片的损伤阈值是10 J/cm²。根据上一个标签中的描述，对于纳秒脉冲，光学元件的LIDT值与波长的平方根成比例：

$$\text{Adjusted LIDT} = \text{LIDT Energy} \sqrt{\frac{\text{Your Wavelength}}{\text{LIDT Wavelength}}}$$

根据这个比例，反射型滤光片调整后的LIDT值为0.08 J/cm²，吸收型滤光片为14 J/cm²。在这种情况下，为了防止光学损伤，吸收型滤光片是最佳选择。

脉冲微秒激光实例

考虑产生1 μs脉冲的激光系统，单脉冲能量为150 μJ，重频为50 kHz，这将导致5%相对高的占空比。系统处于CW与脉冲激光诱导损伤之间，可能通过任何一种机制引起光学元件损伤。因此，CW和脉冲LIDT值必须同时和激光系统的性质进行对比，以确保安全工作。

如果这个较长脉冲激光器发射980 nm、1/e2直径为12.7 mm的高斯光束，那么激光输出的线性功率密度为5.9 W/cm，单脉冲能量密度为1.2 × 10⁻⁴ J/cm²。将这个值与[WPO10E-980](#)聚合物零级四分之一波片的LIDT值对比，对于810 nm连续波为5 W/cm，对于810 nm的10 ns脉冲为5 J/cm²。与前面一样，光学元件的CW LIDT与激光波长呈线性比例，所以在980 nm时经过调整的CW值为6 W/cm。另一方面，脉冲LIDT与激光波长平方根和脉宽平方根成比例，所以对于1 μs脉冲在980 nm下经过调整的值为55 J/cm²。光学元件的脉冲LIDT显著大于激光脉

冲的能量密度，因此单脉冲不会损伤波片。然而，激光系统的平均线性功率密度较高，和高功率CW光束相似，可能会对光学元件造成热损伤。

光学元件基底

晶体膜反射镜

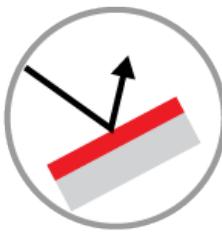
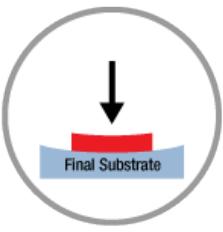
简介

生产和镀膜技术

分子束外延(MBE)是一种历经时间验证的真空沉积技术，传统上用于制备半导体结构。这种工艺提供单分子膜级别的沉积，并在整个基底上均匀分布。我们利用精密准确的MBE技术能够沉积高纯单晶GaAs/AlGaAs多层膜，缺陷密度低，形成光学干涉膜。经过质检后，这些膜层可以从牺牲晶片上分离，然后键合到多种基底上。

晶体膜的关键在于GaAs和AlGaAs在宽温度范围内具有非常相似的晶格常数。使用GaAs晶片作为基底，它是整个膜层的晶体模板。这样制备的单晶相比非晶固体在分子水平具有更高的结构刚性。匹配的晶格消除层间应力，并且降低频率相关的噪声功率谱密度(NPSD)。NPSD与材料系统的损耗角直接成正比，损耗角以杨氏模量的复数形式表达。这种关系在Cole, GD *et al.*, 2013文章中有详细介绍；详见文献标签。

利用MBE的精密和这些材料的独特性质，我们制备的反射镜膜层在近红外波段具有99.99%以上的反射率，以及低于5 ppm的总散射和吸收损耗。

1. 镀膜	2. 测试	3. 分离	4. 键合
			
GaAs/AlGaAs多层膜沉积在牺牲型GaAs晶片上，GaAs晶片作为直接键合的前体，能为晶格生长提供几乎完美的模板。传统的薄膜成膜技术与此不同，将非晶膜直接沉积在最终基底上。	通过在牺牲晶片上生长晶体膜，在键合到最终基底之前，每层都能独立确保光学性能和表面质量。相比其它技术，这种工艺能够防止基底由于膜层缺陷产生的刮伤。	确定膜层满足所需规格后，使用光刻和刻蚀技术精密定义其几何形状。然后将膜层从GaAs晶片上分离开来。我们目前的镀膜尺寸最小 $\varnothing 20\text{ }\mu\text{m}$ ，最大 $\varnothing 200\text{ mm}$ ，可准备成任意几何形状。	独有的直接键合工艺能够实现不同材料的永久性接合，没有胶水或焊料等中间层。我们已使用直接键合实现晶体反射镜和熔融石英、硅、砷化镓、蓝宝石、碳化硅、金刚石、YAG、YVO ₄ 以及钛宝石基底的光学接触。

多变量光学元件

多变量光学元件(MOE)是一种宽带光谱滤光片，能够采样比离散带通滤光片更多的光谱波长。它们与传统光学带通滤光片的制造方法相同，但经过优化设计，改变膜层厚度，以实现所需的透过率或反射响应。这些特殊的光谱特性能够提供更高的灵敏度和特异性，以便实时进行分析物(比如粉末、液体和气体)的化学检测，适合从250 nm到14 μm 的透射信号。

图案转移纳米制备(PTNM)

图案转移纳米制备(PTNM)技术为传统的纳米光刻技术提供了一种低成本、高效的替代方案。PTNM建立在硬盘驱动器技术研发超过50年的基础上，制备了具有数十纳米尺度的光刻掩模。该工艺非常适合生产用于紫外至红外光谱范围的定制衍射光学元件。图案刻写可以用于许多基底材料，例如聚合物、硅晶片、熔融石英和光纤尖端。

光纤制造

生产能力

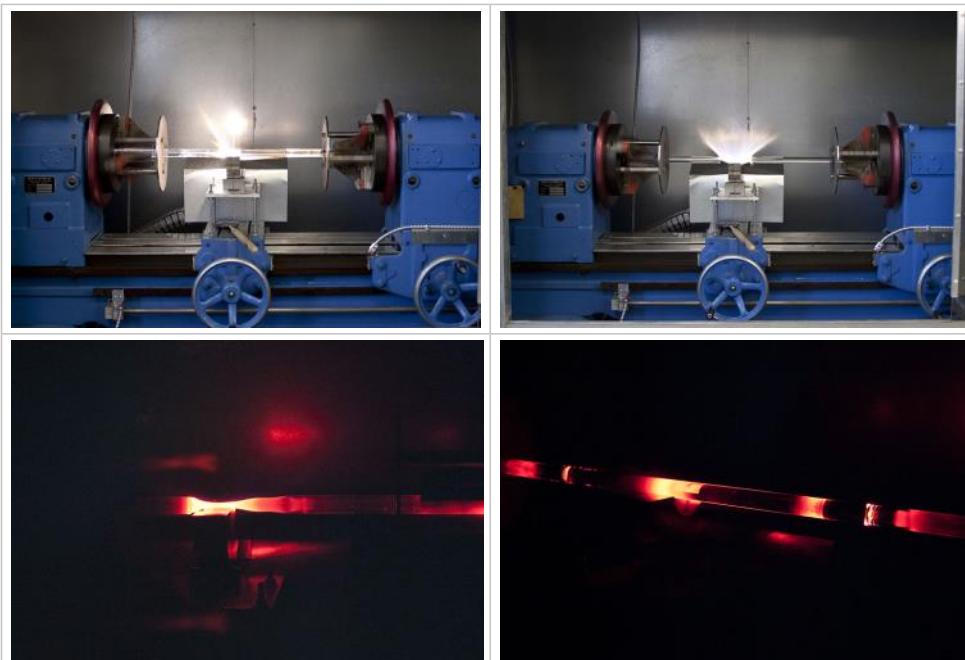
- 专注于二氧化硅和氟化物玻璃(根据要求也能选择其它材料)
- 透射波长从紫外到中红外：200 nm到5.5 μm
- 数值孔径：0.10到0.48
- 纤芯尺寸范围从2 μm ([单模](#))到1500 μm ([多模](#))
 - 定制单模和多模氟化物光纤
 - 定制多模石英光纤
- 主动氟化物光纤有多种不同的纤芯包层几何形状和铒、铥和钬等掺杂物
- 紫外涂覆可以采用包括丙烯酸酯、聚酰亚胺和光学聚合物等材料
- 四氟乙烯和尼龙缓冲材料的压制成型
- 灵活的生产设置和时间安排能够进行样品生产和批量生产
- 所有的光纤种类都通过抗拉强度、保证试验和动态疲劳测试
- 计量实验室完成衰减、光谱衰减、弯曲损坏和数值孔径测试
- 纵向集成布线操作可提供全面服务的方案

预制准备

光纤生产的第一步是玻璃预成型。要生产高质量光纤，预成型表面绝不能有污质。我们先在预成型件上连一个把手，使得技术员无需接触就能移动预成型件。使用氢氧焊接灯在预成型件每端焊接一个把手。玻璃把手的热膨胀系数必须与预成型玻璃相匹配，以防止温度变化时脱离。把手能够重复使用。

将把手卡在车床中，将预成型件悬挂在氢氧喷灯上。在喷灯逐渐减弱时旋转预成型件以除去所有的表面污质。该工艺称为火焰抛光。火焰抛光能够去除玻璃最外层并留下一个洁净的表面。洁净表面能够确保光纤有最高的强度。

完成火焰抛光后，取下一个把手得到一个有直线的“掉落”端。将预成型件放入炉子中，达到足够高的温度时从掉落端退出并准备拉丝。保留的把手则用来将预成型件支持在立式塔上。



预成型



[点击放大](#)

光纤生产从预成型件开始。拉丝时预成型件的纤芯/包层比例要维持不变。最后的光纤与此纤芯/包层比例一样。

Thorlabs的二氧化硅光纤生产设备使用柱状二氧化硅预成型件。一般用二氧化硅制造光纤是因为它在很长的波长范围内有良好的透射性能和低吸收和散射损耗（约0.2分贝每千米）。二氧化硅同样有很高的耐机械和光学损伤性能。它能承受拉伸、弯折以及放大的激光脉冲。

Thorlabs使用两种方法生产光纤：拉制含有玻璃纤芯和玻璃包层的预成型件、或者拉制纯净二氧化硅柱并在成型光纤上涂覆光学聚合物作为包层。

在玻璃工作车床上准备预成型件来进行拉丝。请见[预成型准备标签](#)获取关于玻璃处理和火焰抛光的更多信息。把手端卡在位于立式塔顶部的顶喂装置中。

炉子



[点击放大](#)

顶部单元将预成型件放低进入炉子里，开始加热工序。该立式串联炉有石墨元件围绕但不接触预成型件。石墨使热量均匀分布在玻璃立柱上。高纯无氧氩气循环通过炉中以在高温下保护石墨元件。

炉子缓慢加热预成型件。温度升高时，预成型件会开始发光。亮橙色光是由炉子热量引起的，它会在把手和预成型件之间的焊接散射。预成型件透射光与从它制造的光纤类似。

炉子温度达到大约2000摄氏度时，预成型件的掉落端由于重力开始下落并通过位于炉子底部的孔。掉落端是火焰抛光后石英把手移除后留下的一端。

由技术员从玻璃流切下掉落端，并将新拉制的光纤拉出炉子。技术员在玻璃端系上一点小重量，然后沿着塔长方向将它穿过设备并进入绞盘。该工序可以在下面的图片库中看到。

直径测量



[点击放大](#)

光纤从炉子到绞盘的移动距离是36英尺。拉光纤的速度与所要生产的光纤直径成反比：直径越大，速度越慢。光纤通过3个线径侦察器：一个在通过炉子后测量裸径，一个在加包层后，一个添加缓冲护套后。这些直径真擦器连接在塔控制系统上。裸纤直径控制绞盘速度和维持所要生产光纤外径。

冷却腔



[点击放大](#)

光纤从炉子出来后通过冷却腔。冷冻水和氦气循环通过150厘米长的筒柱体，使它保持12摄氏度的内部温度。光纤通过冷却腔后达到室温。光纤需要在室温完成适合的镀膜应用。

镀包层



[点击放大](#)

光纤足够细后，技术员切去不能用的光纤底部，然后使它通过涂布杯。Thorlabs对光纤涂各种涂层，包括TECS、聚丙酸盐和聚酰亚胺。TECS是一种行业领先的硬质光学聚合物包层材料，它由3M™开发，现在由Thorlabs独家提供。通过涂布杯后，光纤就镀上了一层包层。通过镀膜杯中的碳化钙模具的内径控制涂布的厚度。

刚镀好的包层是湿的，它在位于涂布杯下的紫外固化装置中硬化。镀好的包层能够保护光纤表面，维持它的本征强度。

最后的步骤



[点击放大](#)

位于光纤塔底部的绞盘能够从预成型件拉制形成光纤。从绞盘出来后，从挤压机中涂加四氟乙烯或尼龙、缓冲物然后拉出。从左图可以看到压制缓冲物的应用。多种缓冲层颜色可供选择。

拉丝工艺

1.开始拉丝之前，先在炉中加热瓶胚

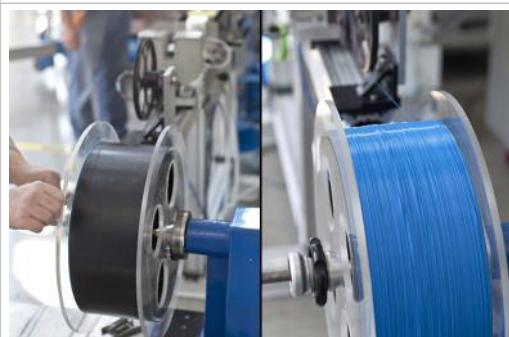


2.炉将预成型坯加热到~2000°C



3.初始下降

4.将新的光纤穿过冷却室

	
5.当纤维达到指定直径时，将TECS涂层倒入涂层杯中，然后在UV烤箱中固化。	6.技术人员将涂覆的纤维喂入烤箱，激光千分尺可实时监控拉出的光纤直径。
	
7.蓝色的tefzel缓冲区被挤出光纤以进行机械保护	8.纤维在绕线之前先通过水浴
	
9.最终直径计可确保正确使用缓冲液	10.新抽出的光纤从塔筒中取出时，将其绕线
	
11.从挤出机到线轴的路径	12.计算机与直径计进行交互以主动更改拉伸速度，从而使光纤的尺寸保持在规格范围内。



13.为了确保强度，对所有光纤都进行了四轴抗力测试。



中红外光纤

生产能力

- 氟化锆(ZrF₄) 和氟化铟(InF₃) 光纤
- 在高达5.5 μm的中红外波段透光
- 灵活的生产设备和时间，可生产原型和产品目录中的产品
- 定制光纤选项：
 - 不同横截面形状，比如六角形、正方形和D形
 - 单模光纤，纤芯直径<20 μm
 - 多模光纤，纤芯直径>20 μm
 - NA范围从0.10到0.35

氟化物光纤是在中红外波段透光的理想选择。中红外波段的低衰减度由极低羟基(OH)含量辅助实现。对比于其它在中红外范围内透光的光纤，氟化物光纤还具有更低折射率和更低的色散。Thorlabs的氟化物光纤非常适合用于包含中红外光谱、光纤传感器、成像和光纤激光的应用。

制备之后，将预成型件装入光纤塔顶部的向下馈送单元当中，拉丝成光纤。氟化物玻璃光纤利用与石英光纤相似的预成型技术进行拉丝。该技术已经非常成熟，并且被证实在控制光纤参数方面非常有效，比如光纤直径、同心度和折射率。氟化物玻璃的拉丝温度范围低于石英，显著缩短了冷却时间。

1.氟化物玻璃制造厂

2.必须在干净的环境中仔细混合粉末，以确保获得高质量的玻璃。



3.玻璃制造过程

4.手套箱专用于玻璃制造过程的每个步骤。



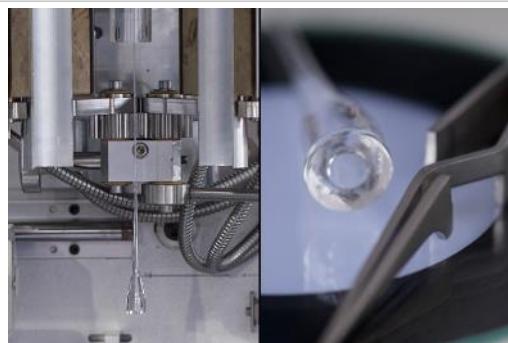
5.将玻璃加热并倒入手套箱内的预成型模具中，以保持纯度。

6.每次拉伸之前，光纤塔均经过仔细配置，以确保高质量的光纤。



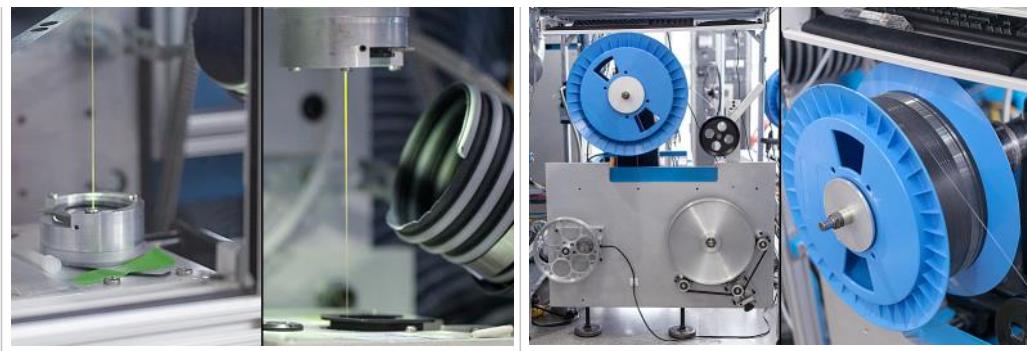
7.初始放置（左）。试管第一次掉落时的横截面（右）

8.在拉伸纤维时监视其直径。



9.将涂层涂覆到纤维上，然后固化。

10.新抽出的光纤从塔筒中取出时，将其绕线。



光纤元件制造

用SolidWorks对机械组件或设计创造一个3D模型，并用Zemax进行评估。操作光纤塔和ThorShop（我们的现场机械加工车间）。

特种光纤制造

- 专注于石英和氟化物玻璃(根据要求也能选择其它材料)
- 透射波长从紫外到中红外: 200 nm到5. 5 μm
- 数值孔径: 0. 10到0. 48
- 纤芯尺寸范围从 $2 \mu\text{m}$ (单模)到 $1500 \mu\text{m}$ (多模)
- 主动氟化物光纤有多种不同的纤芯包层几何形状和铒、铥和钬等掺杂物
- 紫外镀膜能力，用于丙烯酸和光学聚合物等材料
- 四氟乙烯和尼龙缓冲材料的压制成型
- 灵活的生产设置和时间安排能够进行样品生产和批量生产
- 所有的光纤种类都通过抗拉强度、保证试验、静态疲劳和动态疲劳测试
- 计量实验室完成衰减、光谱衰减、弯曲损坏和数值孔径测试
- 纵向集成布线操作可提供全面服务的方案

光纤跳线和光纤束

- 专注于石英和氟化物玻璃(根据要求也能选择其它材料)
- 自动抛光机，无论什么接头类型都能提供重复的高品质抛光
- 利用JDSU Vision Scope对所有跳线进行质检，使其达到IEC-61300-3-35标准
- 400X，针对纤芯尺寸 $\leq \varnothing 200 \mu\text{m}$ 的所有跳线
- 80X，针对纤芯尺寸 $\leq \varnothing 400 \mu\text{m}$ 的所有跳线
- 干涉仪验证抛光程序，确认端面几何
- Centroc光纤调谐器，测量插芯中纤芯的中心度
- Centroc和干涉仪，一起用于生产光纤跳线
- 保偏(PM)光纤跳线在其工作波长范围内光学对准
- 用于生产针头的自动切割刀能确保重复高品质切割
- 离心机，去除环氧树脂中的气泡

1. 测量并切割单模光纤，以准备将其熔接
为大功率场多模光纤，以用于高功率应用。

2. 拼接前检查已切割的光纤。



3.将保持偏振的跳线光学对准慢轴。

4.对齐后，将连接器粘在适当的位置，以确保电缆的消光比符合规格。



5.在将多模光纤插入自动切割器之前，需要对其进行检查。

6.该计算机驱动的设备用于精确地切割我们的套管中用于光遗传学应用的光纤。



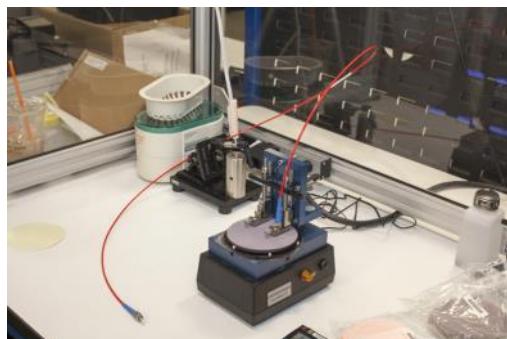
7.使用此纳米抛光机确保对我们所有的跳线进行高质量抛光。

8.这台Domallie抛光机允许一个人在手工抛光一个人的时间内抛光10个SMA连接器。



9.精密抛光

10.氟化物光纤被剥离并清洗以准备衰减测试



11.氟化物跳线安装

12.FTIR测试氟化光纤的衰减



13.光纤Y束中的每根光纤都是手工映射的，以确保每端的照明均匀。

14.该线束无需使用环氧树脂即可端接，用于大功率应用。



光纤耦合器和波分复用器

[视频](#)

光纤组件

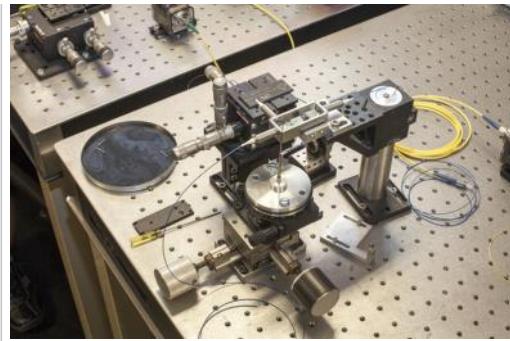
- 显微镜与掩膜版用哦来测量表面质量
- 光束质量分析仪用于对准和测试光束质量
- 用功率计监测输出功率，确保随时间流逝的稳定性
- 将偏振器与光纤隔离器与它们的工作波长范围进行光学对准
- 制造区域的小型加工车间拥有定制能力
- 全方位操作ThorShop (Thorlabs的加工车间)

1.调整FiberPort的对齐方式。

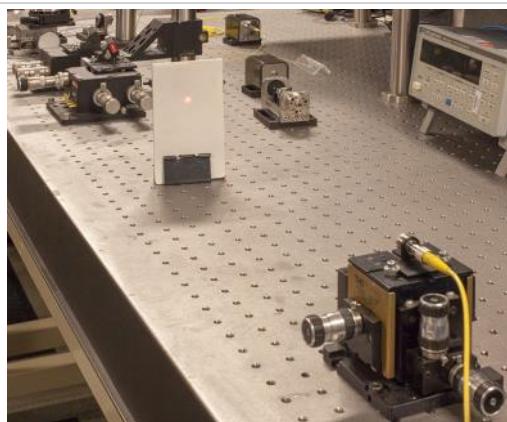
2.光纤循环器在内部组装包装



3.零件制成的装置来对准该准直仪



4.SMA连接器，以容纳大芯光纤。



半导体制造

[概述](#)

材料 / 产品

- III-V族光学半导体器件
 - 激光二极管
 - 光学放大器(半导体和助推光学放大器)
 - 增益芯片
 - 超发光二极管
 - 单频激光器(外腔、分布式反馈和分布式布拉格反射体)
- VCSEL(垂直腔面发射激光器)
- 中红外激光器(量子级联激光器和带间级联激光器)
- LiNbO₃ 光调制器

设计

- 波导模型: BPM-CAD (Optiwave) 、 BEAM-Prop (RSoft) 和Fimmprop (Photon Design)
- 激光模拟: PICS3D (Crosslight) 和公司自有的软件
- 广泛的外延晶圆设计、机械设计 (Solidworks) 、光学设计 (Zemax) 、温度模型 (Comsol) 和电子设计 (Altium)

使用BeamPROP和FILMPROP软件的光学波导设计、分析和模拟

用于外延晶圆设计的COMSOL Multiphysics

使用COSMOS和COMSOL Multiphysics的温度模型、使用Zemax的光学设计、使用Sonnet的射频设计和使用Altium的电子设计/布局

晶圆制造

外延晶圆生长、晶圆键合、光刻、薄膜沉积、干/湿刻蚀、金属沉积和光学面镀膜等晶圆生产工序都是在环境控制的100/1000级净化室中完成。

外延晶圆生长

- 分子束外延 (MBE)
- 原子层精密厚度和成分控制

固态分子束外延 (MBE) 用于III-V族外延晶圆生长。MBE能生长复杂的多量子阱外延结构，并且精密地控制界面激发和掺杂级别。通过本公司的专业技能我们可以生长大多数由 Ga、As、In、P、Al和Sb元素组成的III-V族外延结构。



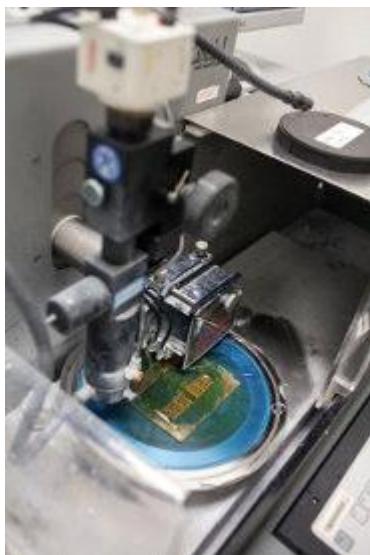
分子束外延 (MBE) 设备

器件生产

- 亚微米光刻
- 薄膜沉积：PECVD、电子束蒸发、射频溅射沉积
- 干刻蚀：RIE和ICP
- 金属沉积：电子束蒸发和镀膜
- 热处理：扩散、快速退火和硬化
- 划片和切割
- 光学面镀膜：增透 (AR) 和高反 (HR) 膜
- 用于MEMS的深度刻蚀和释放

晶圆制造工序包括一系列由光刻工序决定是沉积还是去除材料的步骤。在光刻期间，在器件的某个区域覆盖一层保护性“掩模”以免受刻蚀或者沉积。刻蚀是将晶圆暴露在等离子或者化学物质中除去材料来完成。沉积技术包括等离子加强的化学蒸发沉积 (PECVD) 、射频溅射沉积、电子束沉积镀膜。制造工序中还包括各种用于扩散、退化、整平以及晶圆键合和氧化的炉子。

划片/切割/自动处理



光学面镀膜

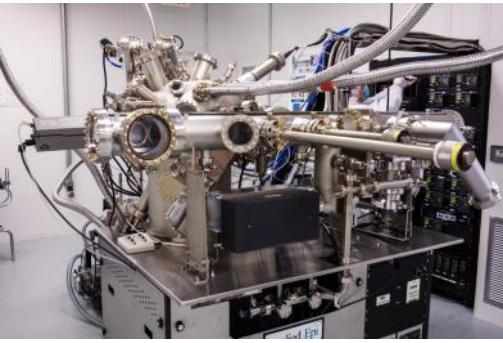
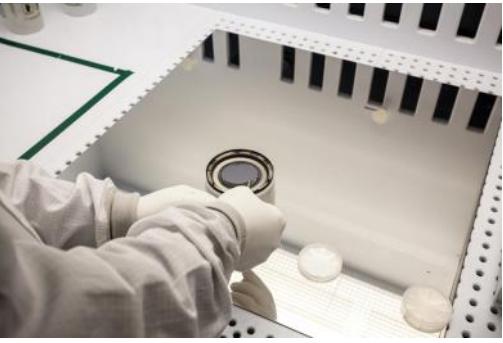
- 使用原地光学监视完成精密增透 (AR) 和高反 (HR) 镀膜
- 符合远程通信的1250 - 1650纳米波段
- 波长范围能够扩展到0.7 - 12微米
- 用于镀膜分析的多波长椭圆测量术

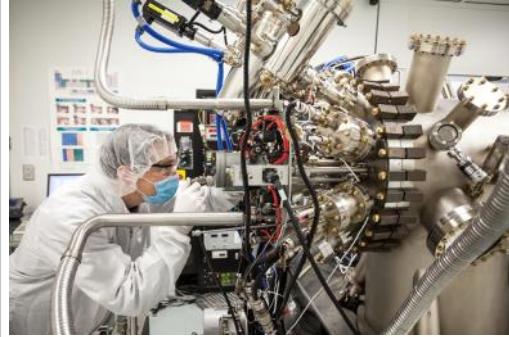
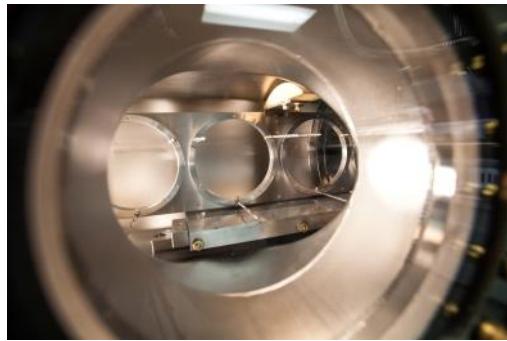
半导体光学器件一般都有一个或多个光学面，这些光学面通过工程加工能够将光反射回增益媒介（以构成激光腔）或者无反射地将光透射出增益媒介（比如在光学放大器中）。光学镀膜由直接沉积在器件小表面以加强或减小光学反射的电介质材料构成。我们公司的光学监测下镀好的精密增透膜在C远程通信波段（1530-1565纳米）反射率低于0.03%。我们使用多波长椭圆计描绘光学镀膜，能够精确地决定每一层的厚度和折射率。

计量学

- 外延晶圆特性：X射线衍射、光致发光、电化学C-V掺杂外形和霍尔效应迁移测量
- 晶圆制造设备：扫描电子显微镜、表面光度仪、薄膜反射计和椭圆计

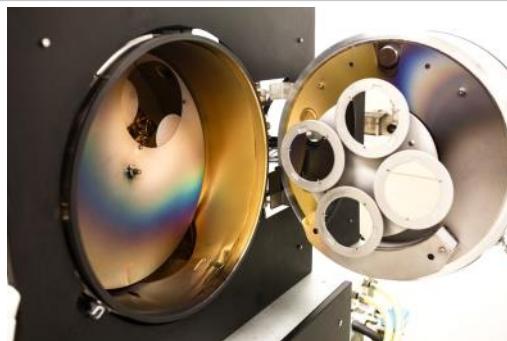
半导体器件生产的一个重要特点是所有工序步骤的可重复性。要求以合适的测量持续监控来保证工序处在标准规格之内。外延晶圆生长要求非常专业的设备和技术通过X射线衍射、光致发光强度和电化学的电容-电压掺杂成形来描绘晶体生长质量。晶圆制造工序使用的计量工具包括扫描电子显微镜 (SEM) 、表面光度仪、临界尺寸 (CD) 光学显微镜、反射计和椭圆计。

分子束外延 (MBE) 真空室	加载晶圆以进行MBE沉积
	
MBE真空室中的晶圆支架	通过观察口观察MBE真空室中的晶片



溅射沉积工具中的晶圆腔

电子束蒸发器



旋涂晶圆

光刻期间用于曝光芯片的步进器



检查光刻掩模

桌面干蚀刻



其他

封装

封装在10000级组装区域（如右图所示）完成。小型安装座芯片（CoS）或如小型安装座或TO头的散热器槽是最简单的封装类型。它们能够直接进入激光器表面。带气密封窗盖和探测

光电二极管的TO封装是另一种流行的封装形式。标准14引脚蝴蝶型和铌酸锂调制器封装以及6引脚半蝴蝶型和尾纤TO封装在内的多种不同类型光纤耦合产品。

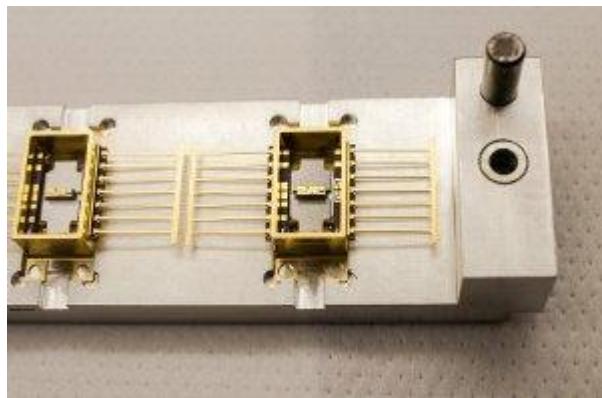
模具键合与引线键合

- 模具键合：精确位移和芯片焊接
- 引线键合：手动滚珠和线头焊接

封装工艺从模具键合开始，它是将半导体芯片连接在一块小型陶瓷安装座上。小型安装座利于散热且热扩散因子（CTE）和半导体材料匹配。我们的自动和手动模具键合在上侧面在上和上侧面在下的结构都能进行精确的键合。

模具键合后，从芯片顶端向位于小型安装座上的焊点连接金线完成芯片的电气连接。金线的尺寸和数量取决于器件类型、工作电流和工作频率。

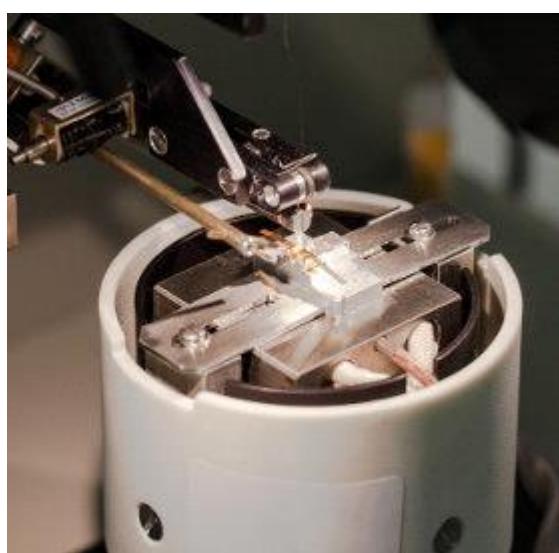
小型安装座芯片（CoS）级器件无需更多封装就能进行所有测试和老化测试。



激光器焊接

- 半导体封装中进行光学元件的精确对准和焊接

用于包括单端器件（即SLD和FP激光器）和双端器件（即SOA和BOA）和半蝴蝶型器件（增益芯片）在内的所有的蝴蝶封装产品。



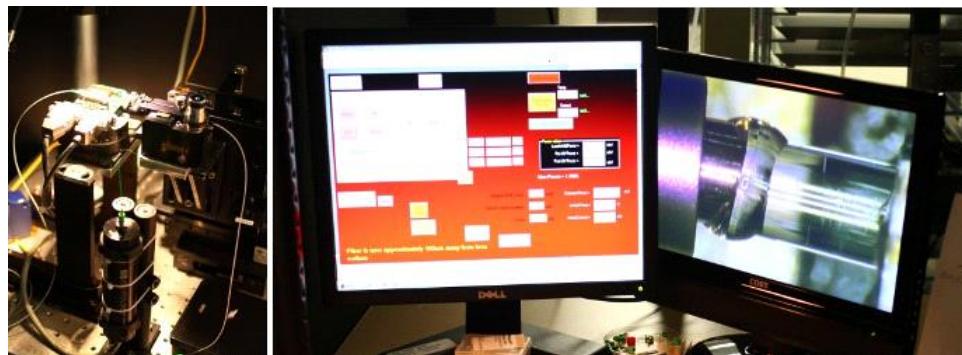
量子级联激光器在C安装座做引线结合

尾纤光纤

- 手动的和自动的尾纤光纤台

我们的蝴蝶型封装采用一种转换透镜设计以有效地将半导体芯片发出的光耦合到光纤中。这种

方式可以在蝴蝶封装中加入光学隔离器和/或其它组件。我们的铌酸锂调制器采用直接式尾部耦合设计，光纤能直接连上调制器芯片。

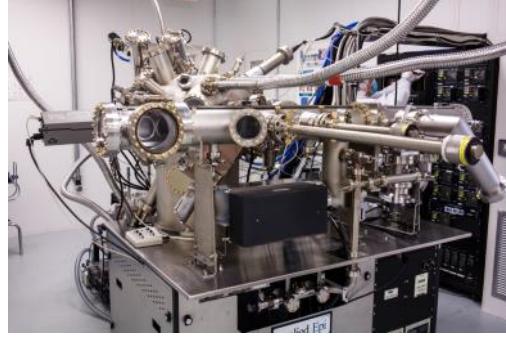
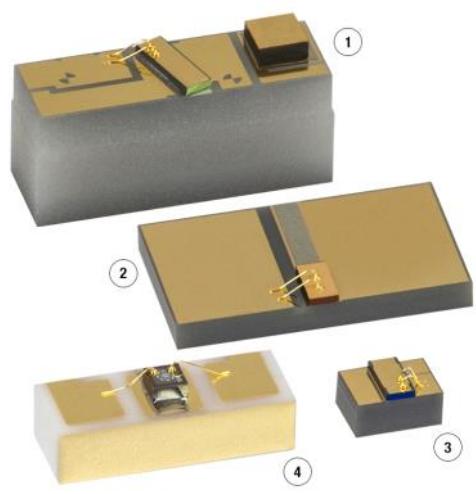
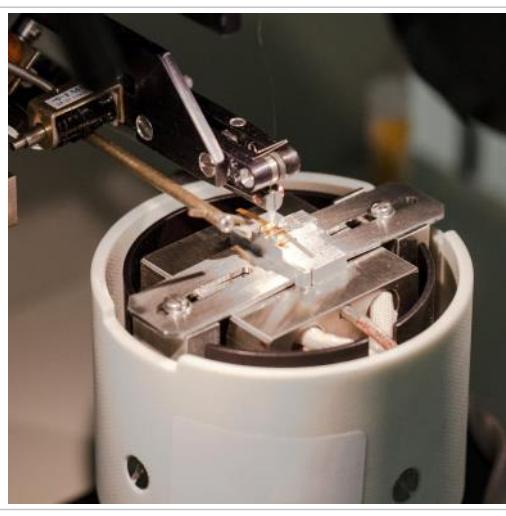
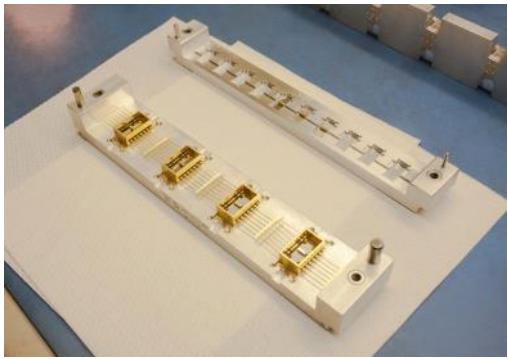


尾纤设备（左）和对准探测器（右）

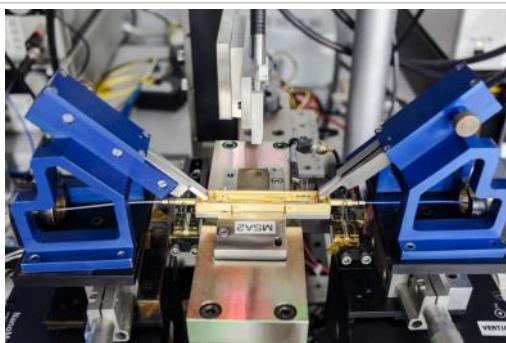
气密封

- 在变化的环境条件下提供可靠性

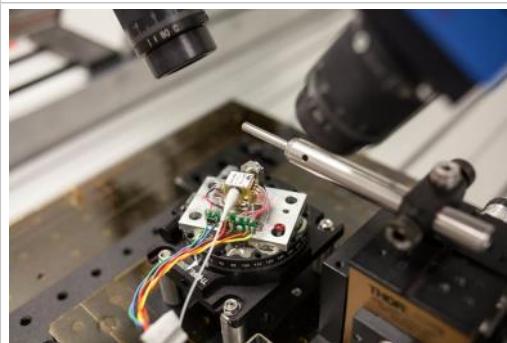
半导体和铌酸锂器件对湿度和环境变化非常灵敏。气密封性能对于长期稳定和可靠性非常重要。蝴蝶型封装、TO封装和铌酸锂光纤耦合调制器都是在干燥氮气中完成气密封，为主动芯片组件提供良好的环境。用电阻焊接在封装框架上连上盖罩，从而完成气密封。

手动模切机	光放大器1、法布里-珀罗激光器2、单角度小面增益芯片3和VCSEL激光器4
	
引线键合C型激光器	蝴蝶包装，内部安装有底座上的芯片
	

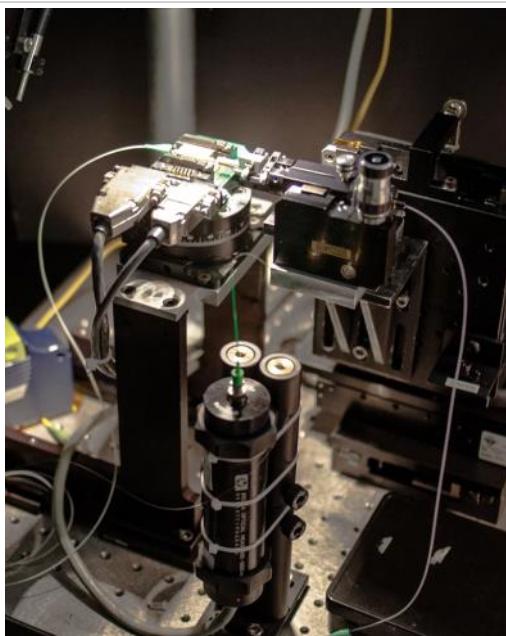
锂调制器调制器尾纤对准



带有半蝶形增益芯片的激光焊接



在光放大器上对齐尾纤



测试和质量

- 性能测试和器件特征分析
 - CW连续波和脉冲输出功率
 - 光谱特征：波长、光学带宽、光谱波动、边模抑制比(SMSR)
 - CW和脉冲远场
 - 外腔激光器参数
 - RIN和线宽
 - 到40 GHz的频率响应
 - 误码率(BER) 和啁啾
- 老化测试
- 可靠性测试
- 环境测试

培训与演示

2020年4月23日

简介

光学/激光/光电子实验室基础技能

- 光学实验搭建基础 (光路搭建、光机械/光学元件的选取、实验技巧等)
- 光纤耦合
- 光学元件清洁
- 激光安全
- 光学元件损伤阈值
- 光学元件公制和英制 的区别
- 激光二极管输出光束的准直

光功率计和光电探测器原理简介和应用

- 光功率探头的分类
- 三种光功率探头的工作原理简介
- 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简介
- 光电探测器的等效电路
- 几种常用光电探测器工作原理简介
- 光源功率输出稳定性的测量应用
- 利用液晶噪声衰减器稳定激光振幅的应用

透镜选择简介

- 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
- 其他透镜简介
- 选择合适的透镜实现光纤耦合、光准直、光扩束等
- 透镜应用实验：利用透镜组实现轴向隐身光路

光纤处理

- 光纤的常用处理
- LDC401光纤切割机的演示和操作
- 光纤切割质量的判定和切割参数的优化

- PTR303B手动光纤涂覆机的演示和操作
- 光纤涂覆样品的制作
- GPX3800大芯径光纤熔接和拉锥处理系统的介绍和演示
- GPX4000LZ CO2大芯径光纤处理系统的介绍和演示
- FFS2000WS一体式光纤制备、熔接和拉力测试工作站的介绍和演示