

# 传感器覆盖

## Steam®VR Tracking

### 简介

覆盖传感器是光电-机械设计的一个重要方面，应将其视为产品化定位对象的必要条件。覆盖物可防止因传感器与手指或其他对象接触而导致的感应噪声和故障。覆盖物还可保护传感器免受物理事件的影响，例如撞击、灰尘进入、水分进入和静电放电。最后，它可通过遮盖传感器和其他电子器件来改善工业设计。

本文将通过首先介绍单独传感器如何接收定位器信号，来探讨传感器覆盖物这一主题。我们会推导出一个用于从不同的入射角度来计算传感器表观形心的公式。然后使用实验建模探讨覆盖物的配置对于系统稳定地确定传感器形心的能力会产生何种影响。所得出结果将引出对架构、几何形状和材料最佳实践的讨论。

### 理论

SteamVR™ Tracking 要在虚拟现实定位对象，需要用到定位器、定位对象和计算机。定位对象上的一系列光学传感器会接收来自定位器的红外激光扫描。激光对于传感器的可见时间取决于相隔距离、相对方位、激光扫描速度以及传感器在定位对象上的位置。系统会为每个传感器生成一个有关激光何时开始命中以及命中持续时间的时间戳。这些时间会被发送到计算机并用于计算传感器形心的估计值。计算机将估计的形心位置与定位对象的实际位置相匹配。然后即可确定建立此匹配所需的平移和旋转值。可在[系统概述](#)文档中找到更全面的 SteamVR Tracking 工作机制说明。

可使用射线跟踪和简单的三角函数来分析定位器与传感器之间的光学交互。光线可近似看做一条射线，即一条沿光线路径方向的假想线。射线可从定位器延伸到传感器的任一端，以表示激光第一次和最后一次命中传感器的时间。见下面的图 1。

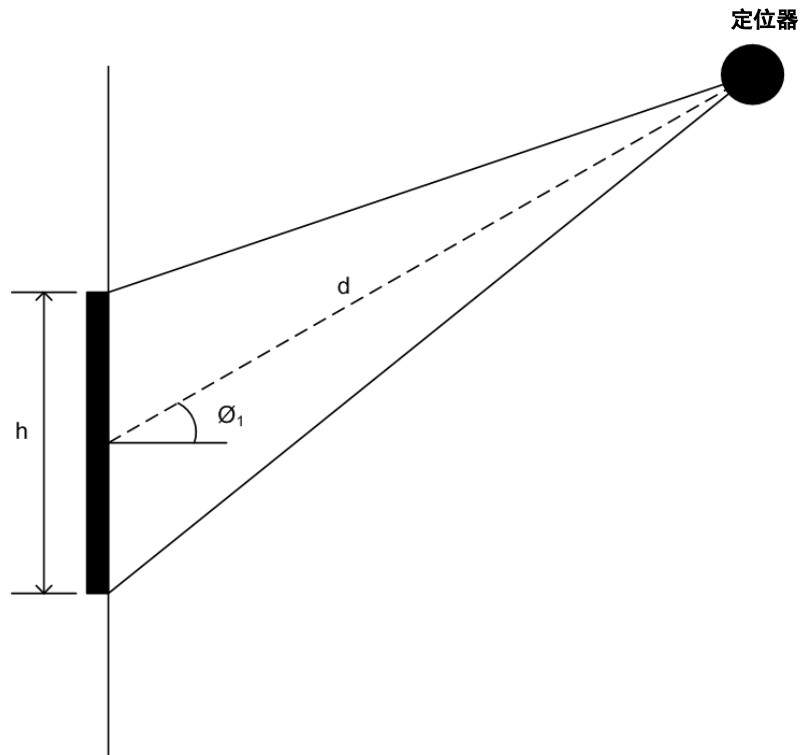


图 1

传感器的高度用  $h$  表示。如果传感器没有覆盖物， $h$  就是感光区域的高度。如果传感器有覆盖物， $h$  就是覆盖物外表面的直径。定位器与传感器之间的距离和角度分别为  $d$  和  $\varnothing_1$ 。在 SteamVR Tracking 中，这两个值都是未知的，直至估算的传感器形心被匹配到实际传感器位置。这是计算从定位器的视角来看位于哪些角度的传感器可见时所需的所有信息。



$$\theta_{lead} = \tan^{-1} \frac{a'}{d + b'} = \tan^{-1} \frac{\left(\frac{h * \cos \theta_1}{2}\right)}{\left(d + \frac{h * \sin \theta_1}{2}\right)} \quad (5)$$

式 4 和 5 计算得出的角度较小，且难以解读。将这些角度除以定位器转子转速，可得出激光扫描整个角度所需的时间。此时间乘以计算机时钟速度，可得出该时间间隔的时钟“滴答”数。SteamVR Tracking 系统时钟速度为 48 MHz，而定位器激光器以 60 Hz 的频率旋转。

$$t [ticks] = \frac{\theta * f_{counter}}{\omega_{motor}} \quad (6)$$

$$f_{counter} = \frac{48 \times 10^6 \text{ ticks}}{1 \text{ s}} \quad (7)$$

$$\omega_{motor} = \frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ cycle}} \times \frac{60 \text{ cycles}}{1 \text{ s}} = \frac{120\pi \text{ rad}}{1 \text{ s}} \quad (8)$$

将式 4、5、7 和 8 代入 6，得出两个等式，并将角度转换为“滴答数”。添加一个负号到  $t_{trail}$  以在绘图时易于实现可视化。

$$t_{trail} = \tan^{-1} \frac{\left(-\frac{h * \cos \theta_1}{2}\right)}{\left(d - \frac{h * \sin \theta_1}{2}\right)} * \left(\frac{48 \times 10^6}{120\pi}\right) \quad (9)$$

$$t_{lead} = \tan^{-1} \frac{\left(\frac{h * \cos \theta_1}{2}\right)}{\left(d + \frac{h * \sin \theta_1}{2}\right)} * \left(\frac{48 \times 10^6}{120\pi}\right) \quad (10)$$

式 9 和 10 是根据图 3 中的 -90 到 90 度绘制的。Y 轴上方的蓝线代表激光的前沿，而 y 轴下方的绿线代表后沿。这些测量值均是在定位器与传感器之间距离 1 到 5 米时测量得到的。这些值对应于 SteamVR 系统的目标工作范围。

观察曲线形状，可得出一些结论。首先，图中的最大滴答数出现在 0 度角度且相距 1 米处。定位器与传感器之间的距离与滴答数呈负相关。这是因为激光扫描速度的角速度恒定不变，但切向速度会依传感器与定位器的距离而变化。此距离越大，切向速度越高，因此激光扫描整个传感器的速度越快，传感器记录的滴答数越少。第二，传感器在 +/- 90 度时不记录滴答数。当传感器与定位器之间的角度接近 90 度时，定位器可见的传感器投影区域减少。在 90 度时，投影区域为零，没有信号到达传感器。

# 无遮盖的传感器的滴答数与角度

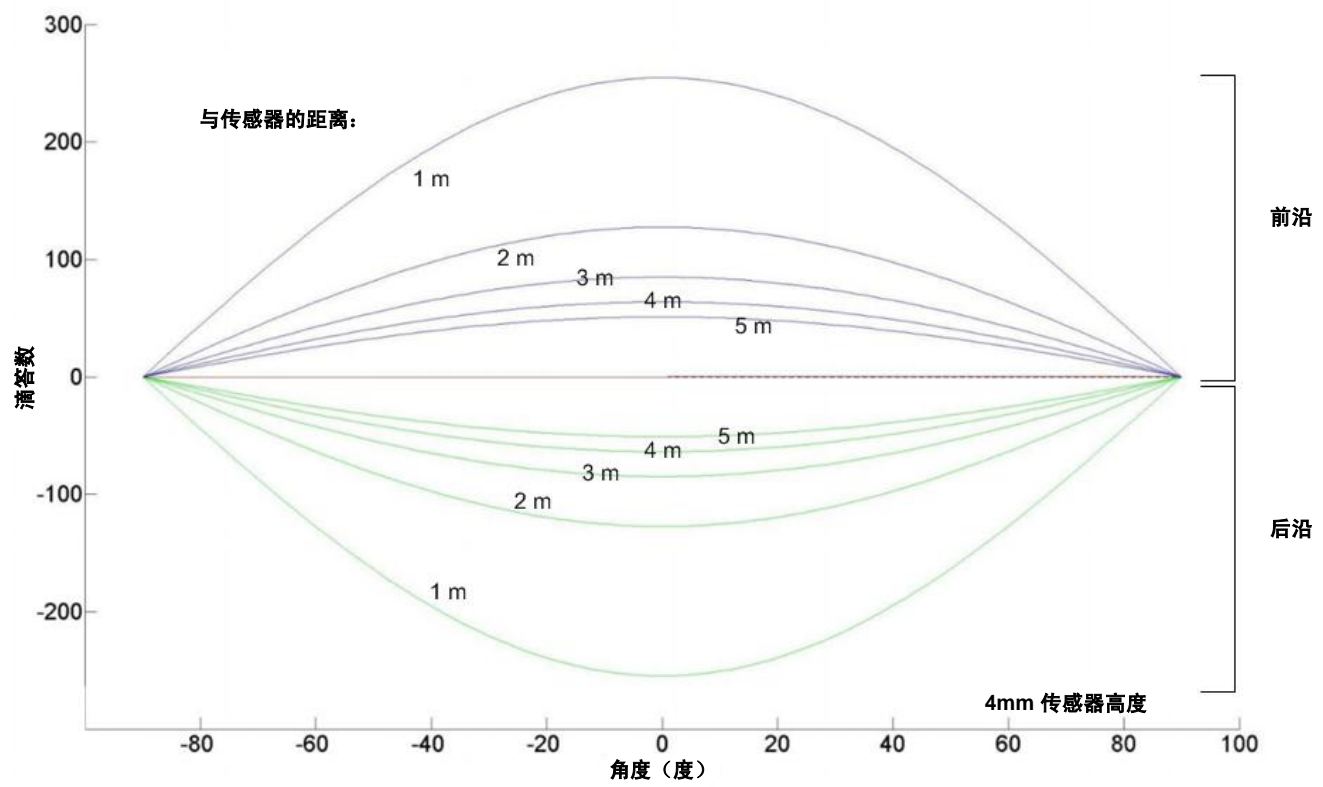


图 3

## 实验结果

我们执行了数次实验以通过各种覆盖场景来表征传感器性能的特性。目标是确定一组对系统性能影响最小的传感器覆盖物参数。

## 设定

我们创建了一个测试夹具以生成各种物理零件和覆盖物的滴答数与角度图。定位器与传感器之间的距离保持不变。传感器面朝定位器激光器的输出并与其对齐。使用高精度旋转平台改变传感器角度，以生成从 -90 到 +90 度的滴答数。图 4 所示为试验设置图解。图 5 所示为该夹具的实物实施图。

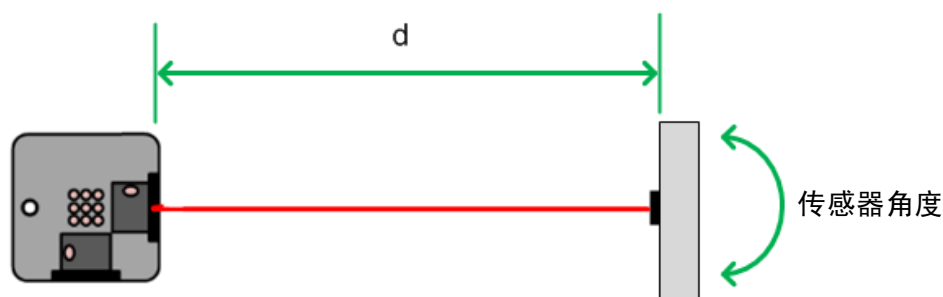


图 4



图 5

由于激光器转子转速的变化、光电二极管的电气特性和其他微小效应的影响，系统中会有噪声。如果光电二极管未与夹具的旋转轴精确对齐，对齐所产生的效应将远大于要测量的效应。可通过计算  $-90$  与  $+90$  度之间的传感器形心来校准夹具对齐。此设置假设传感器是一个围绕轴旋转的点。计算出的传感器形心将有一个特定的曲线形状，具体取决于它与中心的距离。可使用夹具上的 x-y 平台调整传感器位置，直至计算出的形心在整个记录角度范围内呈平直状。图 6 所示为当传感器位置在沿图中任意轴的方向上发生偏移时，计算出的形心曲线形状。正中间图中所示的水平线为正确校准的测试夹具的曲线图。

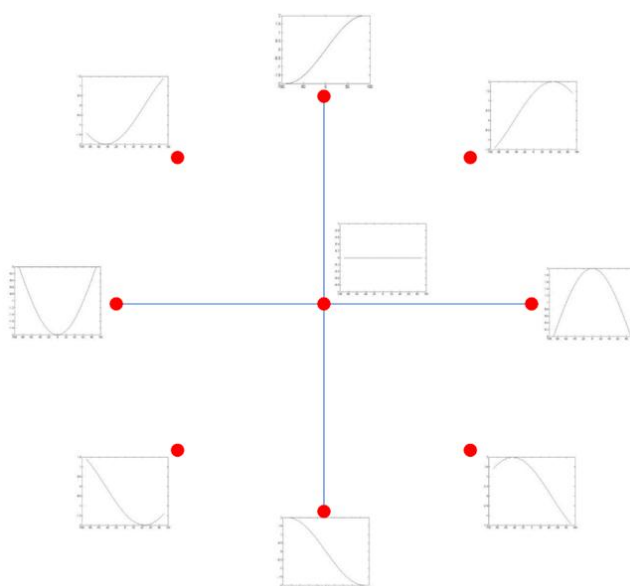


图 6

制作一系列覆盖物以放置在图所示的夹具中。覆盖物用于测试不同间距、材料厚度和材料光学属性对传感器形心测量值一致性的影响。我们采用了红色激光器以约 650 nm 的频率执行测试，以便于获取所需设备和易于故障排除。尽管生产定位器是以 830 nm 的频率发出其红外激光，但只要光学属性在该更高频率下仍然不变，则实验结果将是相同的。例如，在实验中使用透明材料意味着该材料在 650 nm 时是透明的。要将结果扩展至生产定位器激光器，材料必须在 830 nm 时是透明的。

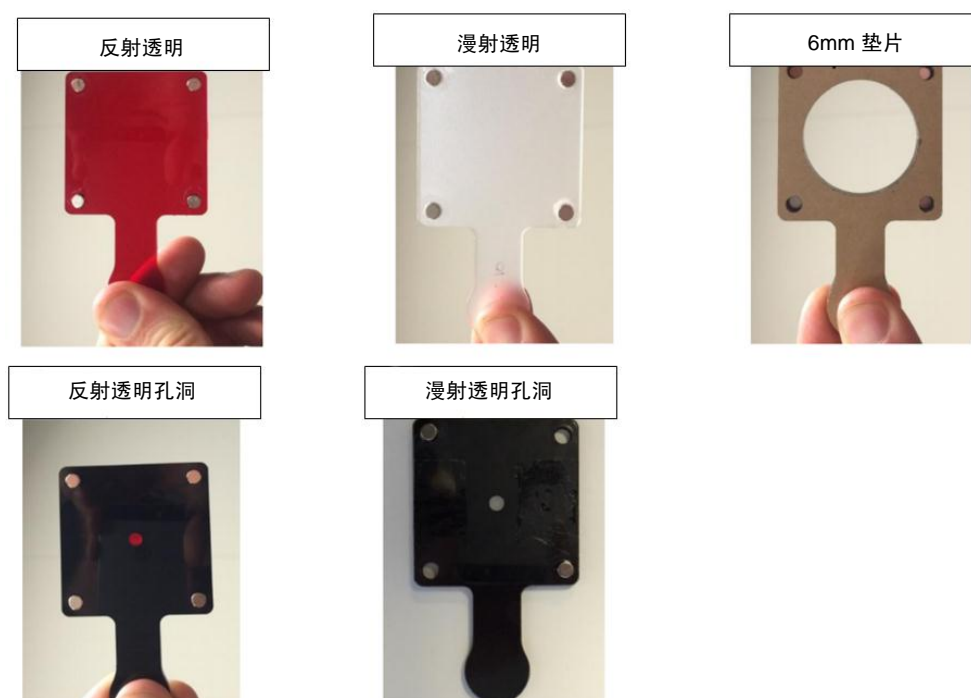


图 7

我们测试了三种不同类型的材料：反射透明、漫射透明和不透明。透明表示大部分目标光线波长可通过材料。不透明材料是指光线无法通过材料。反射透明材料是指光线通过该材料时不会发生散射。漫射透明材料是指光线通过该材料时会在很多不同的方向上发生散射。图 8 所示为光线会怎样穿过实验中所用到的各种材料。

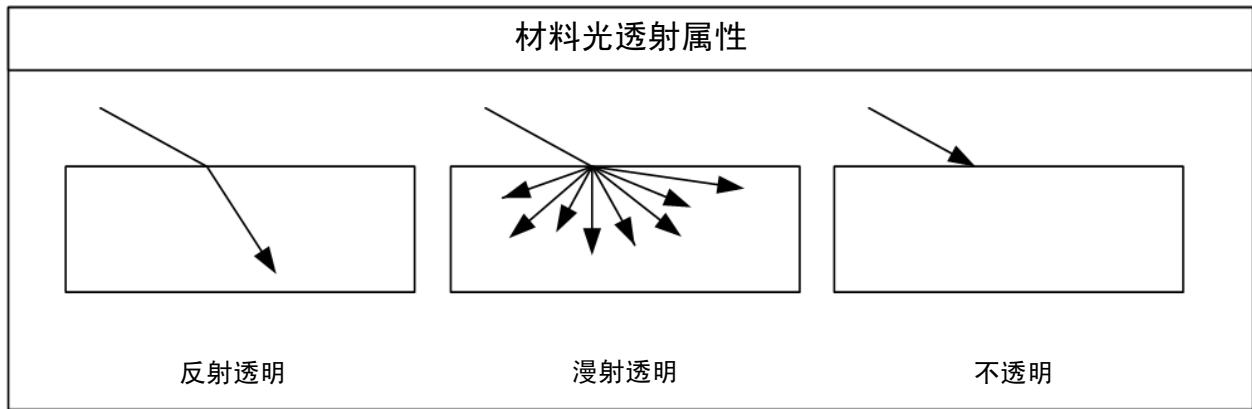


图 8

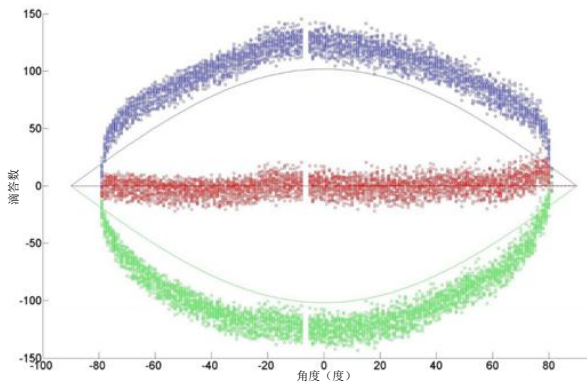
除了材料，还使用了垫片让光电二极管直接靠在覆盖物上，或是距离覆盖物 6 mm。另外，通过将使用透明材料制作的 4mm 圆柱形塞子置于不透明材料中，以评估带孔洞的架构。图 7 所示为各测试案例的图像。

结果

覆盖物以多种不同的配置置于传感器上。在定位器与传感器相距 2500mm 的情况下，使用图 4 和 5 中所示的测试夹具执行了实验。按照 1 度的递增量进行了测量，且每次递增都会花 0.5 秒时间。计算了各个设置的传感器形心，并与理论模型进行了对比。结果显示在图 9 中的曲线图中。蓝点表示前沿的滴答，绿点表示后沿的滴答，红点表示计算出的传感器形心。点下方的灰色曲线表示理论模型。

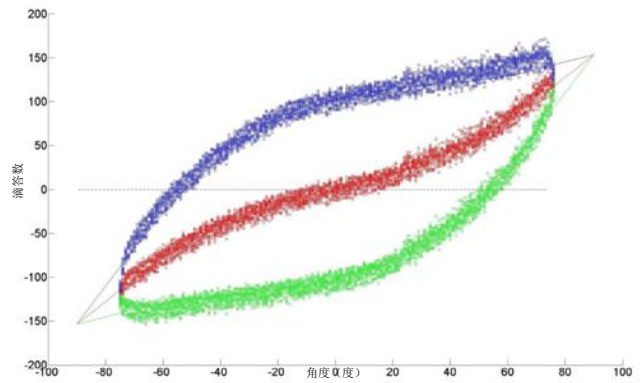


**案例 #1: 无覆盖物**



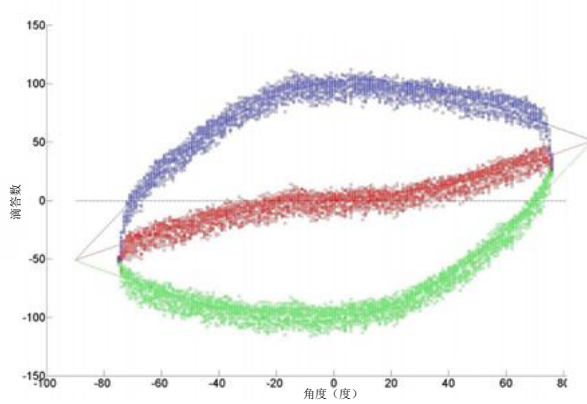
覆盖材料: 无  
孔洞直径: 无穷大  
覆盖厚度: 0 mm  
间隙距离: 0 mm

**案例 #2: 反射透明**



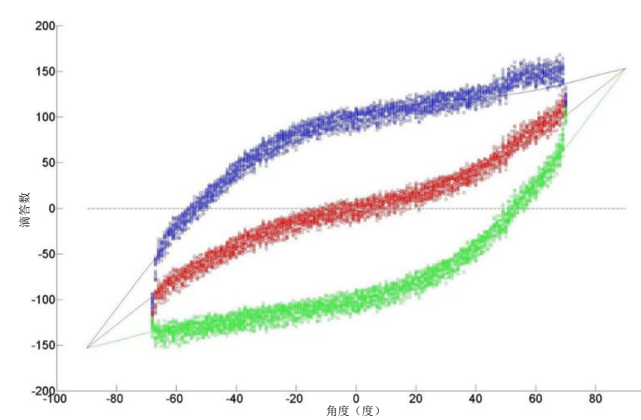
覆盖材料: 反射透明  
孔洞直径: 无穷大  
覆盖厚度: 3 mm  
间隙距离: 0 mm

**案例 #3: 反射透明**



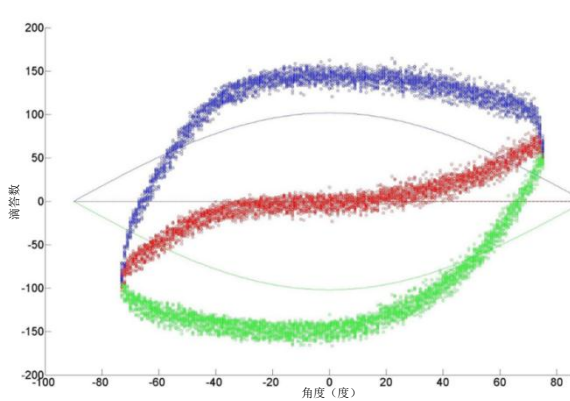
覆盖材料: 反射透明  
孔洞直径: 无穷大  
覆盖厚度: 1 mm  
间隙距离: 0 mm

**案例 #4: 反射透明 + 间隙**



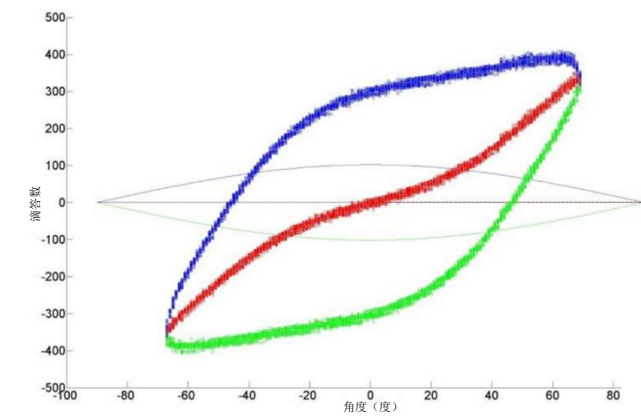
覆盖材料: 反射透明  
孔洞直径: 无穷大  
覆盖厚度: 3 mm  
间隙距离: 6 mm

**案例 #5: 漫射透明**



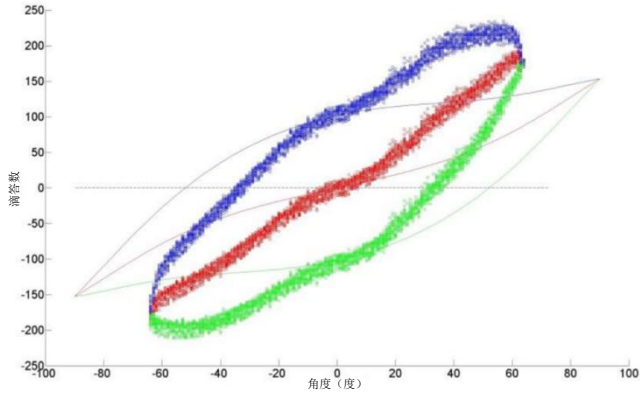
覆盖材料: 漫射透明  
孔洞直径: 无穷大  
覆盖厚度: 1.5 mm  
间隙距离: 0 mm

**案例 #6: 漫射透明 + 间隙**



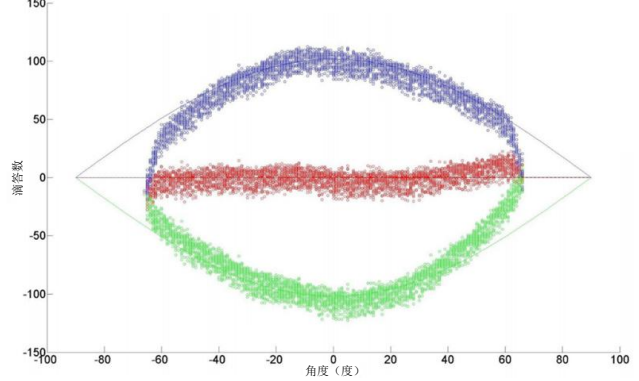
覆盖材料: 漫射透明  
孔洞直径: 无穷大  
覆盖厚度: 1.5 mm  
间隙距离: 6 mm

案例 #7: 反射透明孔洞



覆盖材料: 反射透明  
孔洞直径: 4 mm  
覆盖厚度: 1.5 mm  
间隙距离: 0 mm

案例 #8: 漫射透明孔洞



覆盖材料: 漫射透明  
孔洞直径: 4 mm  
覆盖厚度: 1.5 mm  
间隙距离: 0 mm

图 9

## 讨论

案例 1 测试了无覆盖物的传感器。前沿和后沿滴答数与代表理论曲线的灰色线条吻合。但是，传感器形心的计算值是最重要的值。理想情况下，在任意角度绘制的传感器形心都应测量到零值，并形成一条平直的线。案例 1 在这点上做的很好，但超过  $\pm 80$  度后就没有值了。

大部分其他案例中，入射角较大时也很明显地出现结果截断现象。这一部分是由于光从传感器上被反射了，但主要原因是没有足够的光线进入传感器将其激活。入射角越大，定位器可见的传感器投影区域越小。图 10 中的 OSRAM BPW 34 S 光电二极管的方向特性图就表现了这一点。尽管我们通常假设光电二极管的可用视角为  $-60$  到  $60$  度，但实际上其从  $-90$  到  $90$  度都有灵敏度。当传感器与光源对齐时，预期灵敏度为 100%，当偏离轴  $60$  度时，预期灵敏度为 50%，当偏离轴  $80$  度时，预期灵敏度为 20%。在案例 1 的偏离轴约  $80$  度的实验设置中，灵敏度过低，无法激活传感器。

## 方向特性

$S_{rel} = f(\phi)$

1) 第 12 页

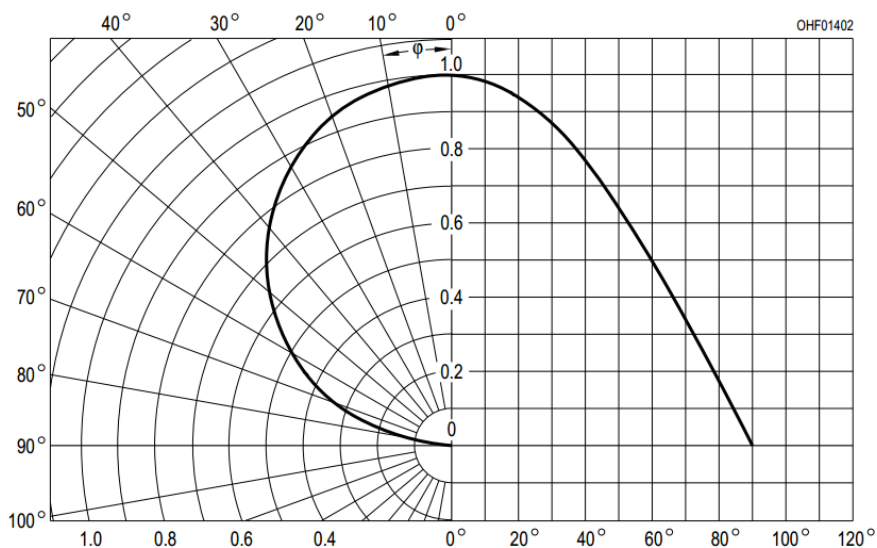


图 10

观察到的另一个效果是绘制前沿和后沿滴答数的值会形成一条数据点粗线。形成此粗线的部分原因可能是电机抖动，主要原因是激光器调制。激光器以 1.8 Mhz 的频率进行了调制，以便滤掉非调制光。传感器则以快得多的 48 Mhz 时钟速度采样。图 11 所示为最不利情况，即激光器在扫过传感器之前就关闭了调制并开始测量。激光器继续扫描传感器表面，直至它在 27 时钟滴答数后进行调制。此时，将进行另一次传感器测量，并记录激光命中。其中隐含的意义是，各个传感器测量值都可能有多达 27 滴答数的误差。这在图中就表现为一条数据点粗线。尽管看上去有很多误差，但已获取了足够的测量值，并能够对实际值进行较准确的估计。

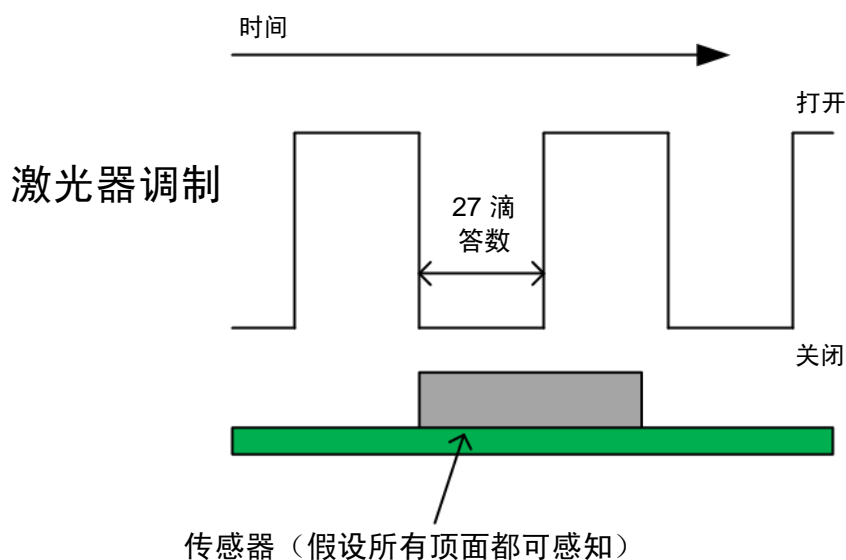


图 11

案例 1 的最后一个效应是 -10 度左右有一个因数据缺失而导致的缺口。原因是传感器在测试中过于超前，缺失了一部分测量值。

案例 2 假设将反射透明材料直接放在传感器顶部。前沿和后沿滴答数与代表理论曲线的灰色线条相互吻合，但与案例 1 相比，结果是倾斜的。当入射角偏离零度时，计算出的形心逐渐远离实际传感器形心。原因是光从一种介质传到另一种介质时的折射方式。斯涅尔定律描述了此关系，此定律将光线传入和传出的入射角与各自介质的折射率关联起来。

$$\sin\theta_1 * n_1 = \sin\theta_2 * n_2 \quad (11)$$

$\theta_1$  是传入的入射角， $n_1$  是第一种介质的折射率。 $\theta_2$  是传出的入射角， $n_2$  是第二种材料的折射率。在实验时，激光穿过空气，直至命中聚碳酸酯覆盖物。然后折射并通过覆盖物材料。空气的折射率为 1.00，而聚碳酸酯的折射率为 1.60。如果假设入射角为 60 度，光线将折射为 32.8 度。如下方图 12 中所示。

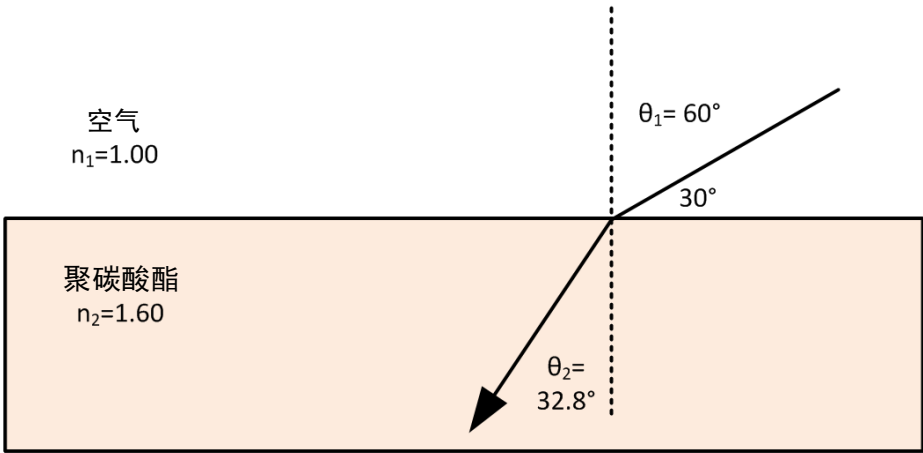


图 12

因此，激光在覆盖材料中的折射量与入射角紧密关联。角度较小时，折射量较小，而角度较大时，折射量较大。此概念适用于图 13 中所示的案例 2 的设置。

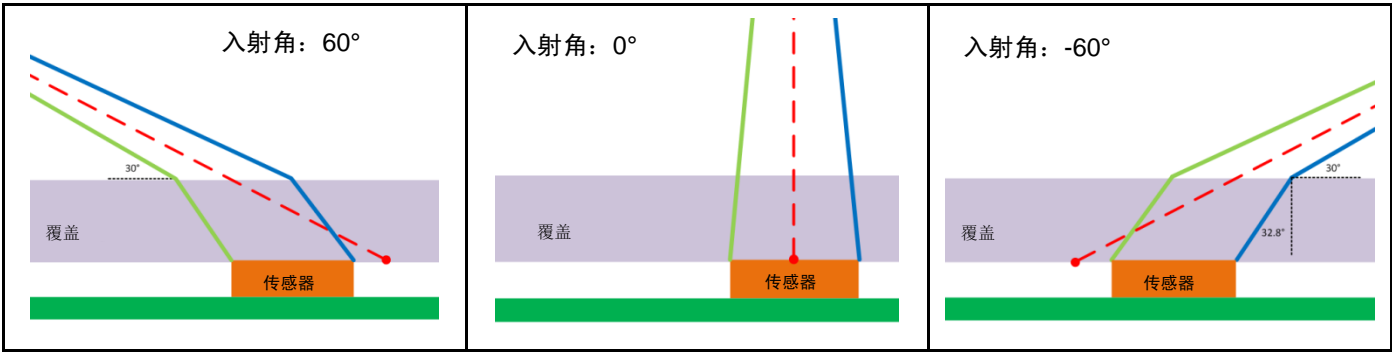


图 13

蓝线表示激光器命中传感器前沿的光线轨迹，而绿线对应于传感器后沿。红色虚线代表从光源到计算出的传感器形心位置的投影线。当传感器表面完全面向激光器时，计算出的传感器形心与实际传感器形心吻合。但是，当传感器入射角旋转到 60 或 -60 度时，折射会导致计算出现误差。当方向变化时，计算出的传感器形心将有效穿过传感器的表面，从而得出在案例 2 结果中观察到的形状。由于误差在入射角范围内并不是恒定不变的，因此很难对整个系统进行校准。

案例 3 类似于案例 2，但覆盖材料的厚度从 3mm 减少至 1mm。入射角较大时，激光器中发出的光线仍将折射，但由于它通过的材料较少，折射效应变得不那么明显。结果类似于案例 2，但倾斜地较少，入射角较大时的误差较小。如果覆盖材料厚度保持最小，案例 3 看上去是入射角较小时的一个良好覆盖策略。

案例 4 类似于案例 2，但传感器与覆盖材料的间距为 6mm。如图 14 中所示，激光器中的光线在离开空气并穿过聚碳酸酯材料时会发生类似的折射。当光线离开覆盖材料并穿过与传感器之间的空气间隔时，它再次折射回原始的入射角。当没有孔洞（即无限孔洞）时，射线轨迹表明计算出的传感器形心非常类似于图 13 中案例 2 的图示。

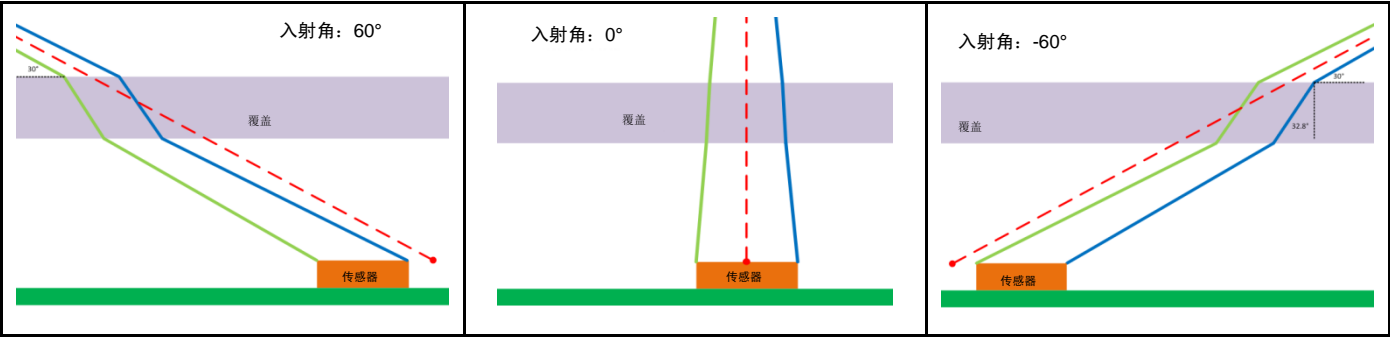


图 14

当传感器完全面向激光时，计算出的传感器形心与实际传感器形心吻合。当传感器旋转角度增大时，折射会导致传感器形心的计算出现误差。案例 4 的绘制数据与案例 2 几乎完全相同。

案例 5 假设将漫射透明材料直接放在传感器顶部。如图 8 和 15 中所示，当激光命中漫射材料时，它将在很多不同的方向发生散射。

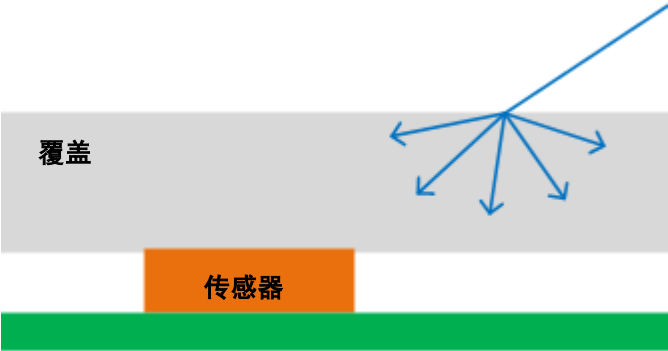


图 15

由于没有定义的孔洞，光线可能会漫射通过远离传感器的材料。这导致传感器在激光直接与传感器对齐之前和之后被激活。结果，在入射角较大时，计算传感器形心时会产生误差。

案例 6 类似于案例 5，但传感器与覆盖材料的间距为 6mm。与案例 5 的另一个相似之处是，传感器在激光直接与传感器对齐之前和之后被激活。增大传感器与覆盖物之间的间距时，此效应会进一步加剧。在案例 5 中，当传感器直接连接到覆盖物时，仅照亮覆盖物正上方的部分才能完成激活。案例 6 中，传感器未连接到覆盖物，并可通过照亮覆盖物的邻接部分来激活传感器。

在任意使用漫射材料的案例中，要注意的一点是，在执行此测试时，描述漫射材料的光线折射的模型是不完整的。这意味着案例 5、6 和 8 的灰色理论曲线是不正确的，应被忽略。

案例 7 假设使用不透明材料以及一个用反射透明材料制成的 4 mm 直径的圆柱形塞子。激光的射线轨迹类似于案例 2，不同之处是孔洞被不透明材料所包围，光线无法射入。就像案例 2 中那样，当传感器正对激光时，计算出的传感器形心与实际传感器形心吻合。随着入射角增大，折射会导致传感器形心计算出现误差。透明塞子周围的不透明材料阻隔了光线，并消除了入射角较大时出现的部分结果偏斜。

定义孔径是一个大小调整练习。当孔径过大时，就相当于没有孔径，即案例 2。如果孔径过小，大入射角的结果将被截断。4mm 直径的开洞就会发生这种情况，因为仅有 -65 到 65 度的结果。

孔洞的物理几何形状可能会导致理论和实际结果之间的误差。理论模型假设仅有折射。圆柱形塞子几何形状就像个光管，当光到达其平滑的管壁时，部分光会发生折射。

案例 8 使用不透明材料以及一个用漫射透明材料制成的 4 mm 直径的圆柱形塞子进行评估。激光以案例 5 中所述相同的方式进行漫射。差别是，漫射材料仅局限于传感器的正上方。如图 16 中所示，当激光命中漫射材料的任意外表面时，光线将穿过整个空间并触发传感器。漫射孔洞接收信号的时间和传感器激活的时间之间有一个直接的关系。漫射材料有效地将传感器位置移至孔洞外表面的中心。

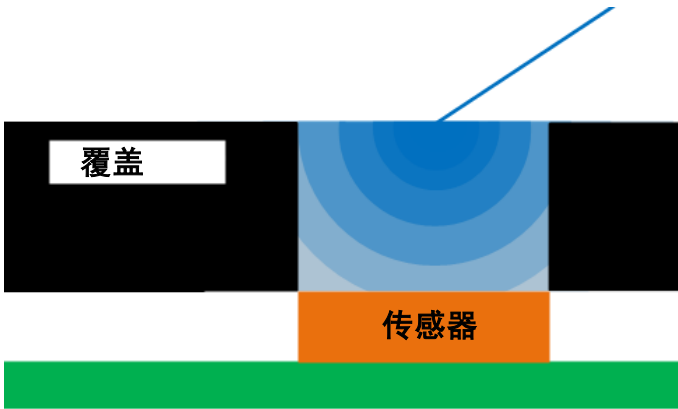


图 16

案例 8 绘图看起来比任何其他覆盖架构都要好。在 -65 到 65 度之间，传感器形心都在精确追踪理论值。孔径可能过小，因为结果在较大的入射角处被截断。



# 最佳覆盖实践

以下章节囊括并概述了上文所述实验的结果。

## 架构

最成功的架构是传感器直接位于红外透明材料形成的孔洞下方。应使用红外不透明材料将孔洞材料围绕起来。可根据图 17 中所示的两个主要方法精简此架构，用于实际用途。

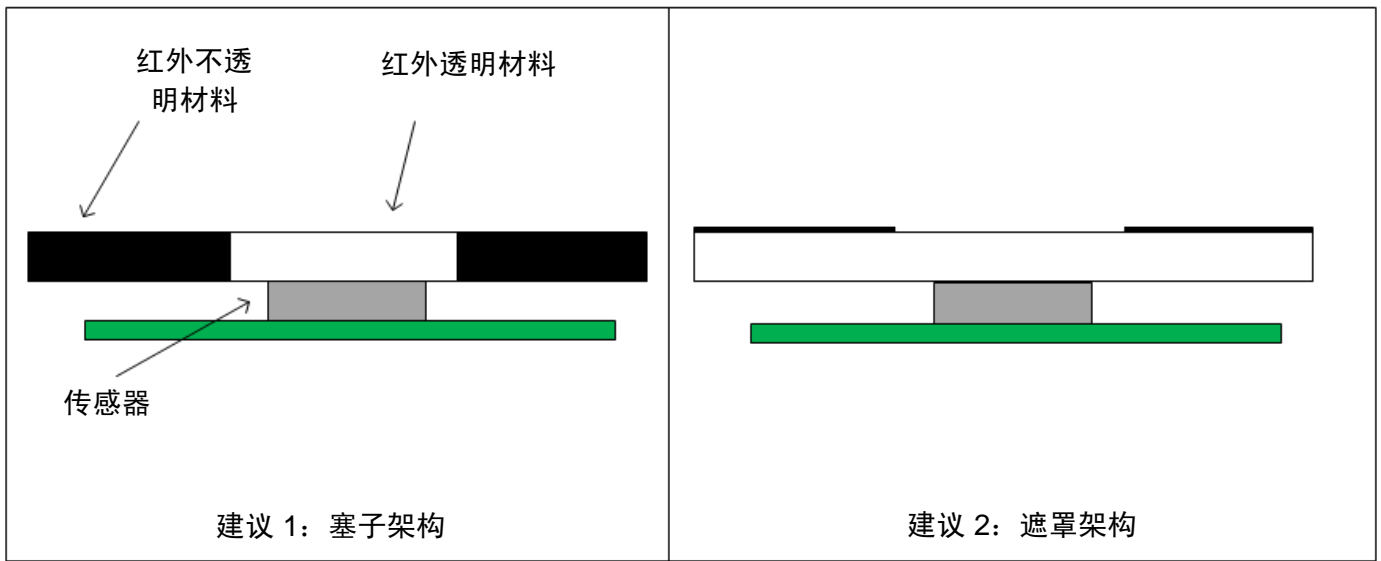


图 17

塞子架构所描述的是一种红外不透明材料，其带有充当孔洞的红外透光材料塞子。可使用多种方法精简此概念，用于实际用途。该部件可采用双料注射工艺，通过具有所需的光学属性的塑料材料注塑加工而成。首先注塑红外透明材料，接着再在该材料上注塑红外不透明材料。然后，可通过在待定区域让第一种材料露出的方式形成孔洞。这是设计参考定位对象时所采用的方法。第二个方法是使用红外不透明材料制作一个外壳，并在传感器位置留有实际孔洞。然后红外透明窗口作为第二个部件进行加工，并固定到这些孔洞上。此方法的装配成本更高且更耗时，但注塑工具成本会更低，并允许覆盖参数迭代。

遮罩架构是一种替代方法，其中，红外不透明遮罩位于红外透明材料上方。可使用多种方法精简此概念，以用于实际用途。一种可选方法是采用一种红外透明材料来注塑加工外壳。然后再在外壳上喷涂或以其他方式涂装红外不透明材料。在执行所续的喷涂或激光蚀刻之前，可先将孔洞遮盖起来。另一个可选方法是在注塑过程中使用模内贴标 (IML) 作为遮罩层。IML 会限制最终设计的几何形状，但成本低于双料注塑方法。

还有很多不建议使用的次优架构。图 9 中所示的实验结果表明，没有孔洞的架构难以在入射角较大时精确地评估传感器形心。这种情况的另一个变种是在红外透明材料与传感器之间放上一个遮罩。这种遮罩上的开口无法防止大入射角光线使计算出的传感器形心位置发生偏斜，如图 13 中所示。

无论选择哪种架构，都应尽早在设计流程中选定。太晚选择会增加完成设计所需的时间。它还可能改变制造方法，导致成本更高，交付周期更长。

## 孔洞属性

两种建议架构都要求孔洞的外表面平行于传感器顶部。外表面的曲率通常会改变视野范围，并导致入射角较大时，所估计的传感器形心看起来位于不同位置。应避免像尖角那样的高曲率孔洞。微小的曲率应能产生可接受的结果。这可能需要孔洞材料上实现空间或表面散射方可正常工作。在敲定设计之前，应评估和测试任何有曲率的孔洞几何形状。

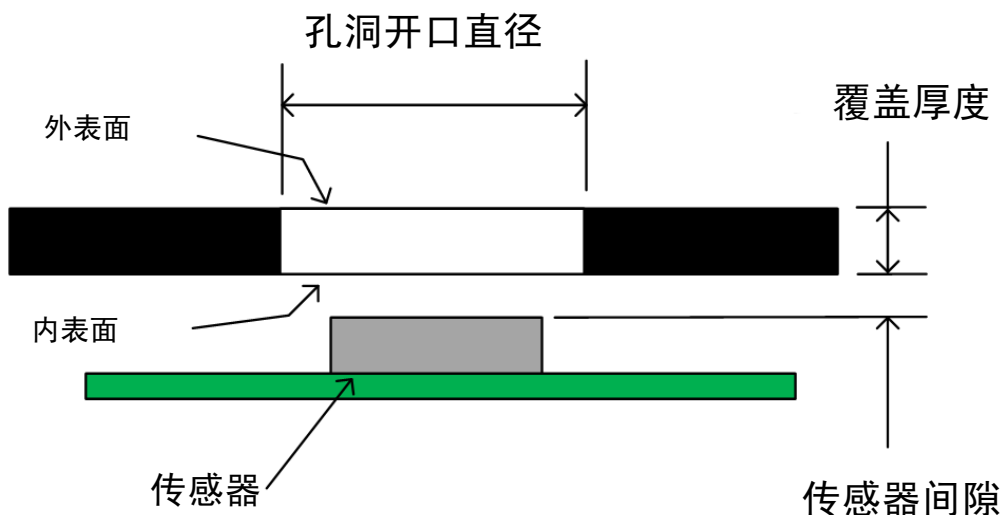


图 18

孔洞开口大小尤为重要。如果开口太小，入射角较大时，没有足够能量能够到达传感器。如果开口太大，就会像完全没有孔洞一样，出现类似于图 9 中案例 2 和 5 的图形。需要达成一种平衡，以找到正确的大小。一开始可以选用 6mm 直径的开口。可以使用更大的窗口，但需要增加孔洞漫射量。但是，漫射增加得越多，衰减水平就越高。结果是激光扫描中可能没有足够能量来激活传感器。方形开口是一种尚未测试的一个几何形状。它理论上可以正常工作，但需要验证。

覆盖物的厚度应尽可能薄。小于 1.0mm 就行。要使覆盖物变薄，很可能受制造方法的限制。

我们需要覆盖材料的漫射效果，并可通过两种不同的方法实现此漫射效果。最困难的方法是将漫射元件添加到材料内。可在注塑流程中向树脂中添加添加剂。遗憾的是，大部分漫射添加剂针对的是可见光，对红外频率无效。在所需频率有效的添加剂都属于实验室级添加剂，成本高昂，可用数量很少。要增加漫射，一种更经济方法是在孔洞外表面上添加一种纹理。大部分磨砂纹理都可能有效，并要能产生等同于空间散射的效果。无论选择了哪种表面纹理，总之不可让表面光亮。SteamVR 可以有效防止镜子或窗户的反光，但传感器附近发生的反射会使实际信号模糊。没有任何表面或空间散射的覆盖物也可使用，但需要尽可能地薄，以精确估计传感器形心。查看图 9 中结果案例 2 和 3，获取进一步的说明。漫射率良好的覆盖物也可超过建议厚度，但增加厚度会增加信号衰减。没有足够信号能量意味着传感器无法正常激活。最稳健的架构是使用薄覆盖物，且外表面采用磨砂纹理。

孔洞内表面上的表面处理没有特定要求。最起码，应清除机械加工痕迹，以最大程度减小光线通过时的噪声。对于孔洞侧壁应采用何种具体的表面处理，这里不再建议。光亮的侧壁可增加光线反射而不是吸收，更像是在光管里。这使定位对象可在距离定位器更远的范围内发挥作用，但当靠近定位器时，传感器可能会更易于出现光饱和度。



## 传感器定位

传感器与孔洞内表面之间的间距应保持尽可能小。大间距可能会导致光线入射角高，从而错过传感器的有效区域。

传感器有效区域的中心应位于孔洞开口的中心。在大多数架构中，略微偏移不超过 0.5mm 仍然有效，但在高入射角时会导致性能降低。如图 19 中的结构尺寸所示，参考设计传感器的有效区域的中心偏离传感器封装中心 0.48mm。因此，当传感器以孔洞开口为中心时，架构的有效区域将偏离孔洞 0.48mm。

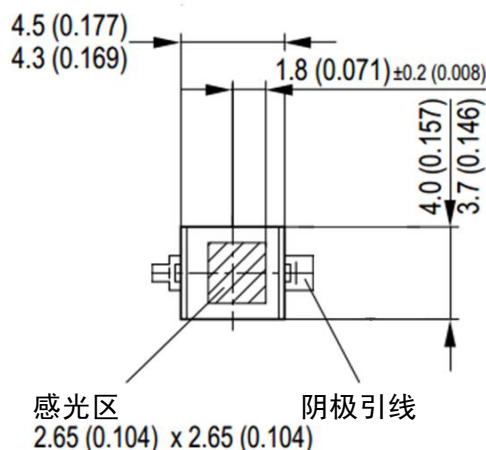


图 19

应注意传感器之间的距离，但这方面尚未发现太大问题。对于参考设计首要关心的是，激光器发出的信号将通过连接的红外透明材料的路径进入一个孔洞并触发多个传感器。在这种情况下并未发现过串扰现象，应在传感器之间的距离非常小时才会发生这种现象。传感器相距 10mm，在这种距离下不可能出现这种问题。

如果必须移动传感器使其远离定位对象的外表面，应小心操作，确保在高入射角时红外不透明材料不会遮挡传感器。如图 10 所示，传感器在 60 度时的灵敏度是其在 0 度时的一半。60 度适合作为研究如何避免遮挡时所使用的最小视角。从传感器有效区域的边沿投射一条 60 度角的直线，可以指导我们计算出要有多大面积的区域保持无遮挡以及该区域的形状。图 20 显示了几种几何图形约束因素。

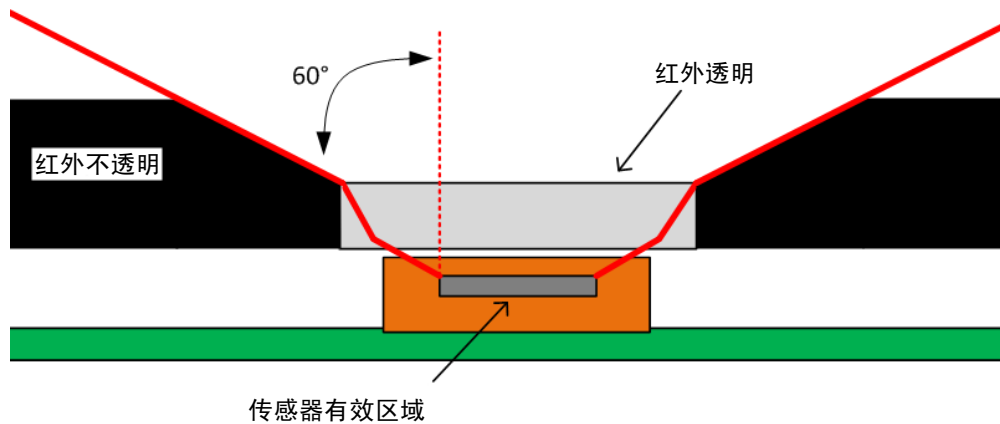


图 20

评估时应考虑到出现最糟糕公差时的几何图形。在设计过程早期，可能没有此信息，评估 70 度或更高角度时的遮挡情况更为安全。

这种样式的几何形状的缺点是在其靠近传感器的位置做了一些新表面，以便让光线反射开来。如果这些光进入传感器，SteamVR 将难以拒绝。这些新表面应做成哑光表面以最大程度减少反射。

## 材料

孔洞材料必须是红外线透明材料。聚碳酸酯 (PC) 和 PMMA (丙烯酸) 是可满足此要求的良好基材选择。确实，大多数明显透明的材料都可用于原型设计。然而，仅仅这些用于最终产品还是不够的。

传感器可对多种波谱的光线作出响应，但 SteamVR 的工作范围在 830 与 850 nm 之间。测试表明，可见光的高强度闪烁会使传感器达到饱和状态，影响 SteamVR 中对象的跟踪。因此，使用覆盖材料作为滤光器且仅允许目标波频的光线通过，这一点很重要。能够拒绝用不到的光频可使系统更加稳定，并可减轻电气系统和软件系统部分负载。理想情况下，材料将仅允许目标光频通过，但这种解决方案会花费高昂。现在已有很多材料既可阻止可见光，又可允许任何更高波频（例如红外）的光线通过。

可通过在注塑成型期间加入含有 PC 或 PMMA 的添加剂，创造具有这些特性的材料。添加剂所应达到的结果是阻止大多数可见光频 (400 - 700nm)，同时允许大部分处于目标频率的光线通过。在标称入射角下，推荐的透射率值分别为 10% 和 90%。然而，这些数值并非强制性要求，因为目标频率下透射率值更低的材料，其使用效果仍在可接受范围之内。大多数添加剂会使基材的颜色变深，通常变为黑色。此时，不可能出现浅灰色和白色。

对红外不透明材料的限制较少，因为此类材料应阻止大部分处于可见频率和目标频率的光线。建议此类材料的透光率低于 1%，但这并非强制性要求，因为该值偏高一些也可使用。大多数明显不透明的材料已经做到了这一点。通常会令它们的颜色与红外透明材料相称。如果不透明材料要被包塑至红外透明材料上，材料熔化温度需要有约 15 摄氏度的温差。

我们对织物的研究不多，但如果可以做得较薄应该也能使用。它们的结果很可能与具有无限孔洞的漫射材料的结果相匹配（图 9 中的案例 5）。如果需要更好的结果，可能需要构思某种多材料遮罩解决方案。结果还高度依赖于编织工艺、厚度和材料规格。任何使用织物的传感器覆盖解决方案都需要进行广泛的验证。

在红外透明孔洞和周围的不透明材料上放置薄膜或薄涂层是隐藏不必要的可见界面的有效方法。薄膜应保持最小厚度，理想上应低于 0.25mm。薄膜的外表层应具有减少反射的哑光纹理。

作为一种明智的做法，可为每种使用的材料生成透射率与波长曲线。材料透射可见光的方式可能与其透射红外光的方式相同，但并不总是相同。应使用测试进行确认，并且测试可作为一个潜在调试工具。

SABIC 分享了多个红外不透明和透射 LEXAN 树脂的透射曲线。征得其同意后，我们在下文图 21 和附录 A 中转载了这些图表。请注意该公司的免责声明，即“每位用户需完全自己负责对 SABIC Innovative Plastics 的材料、产品、推荐或建议对其特定用途的适用性做出自行判断。每位用户必须确认并执行所有必要的测试和分析，确保其包括 SABIC-IP 材料或产品的成品零部件安全并且适用于最终使用条件。”在多个树脂等级中，有多种颜色，每种颜色与其所在的等级组别相关联。ColorXPress 搜索工具 (<https://www.sabic-ip.com/cxp/ColorXPress>) 可用于查找所需颜色的级别。

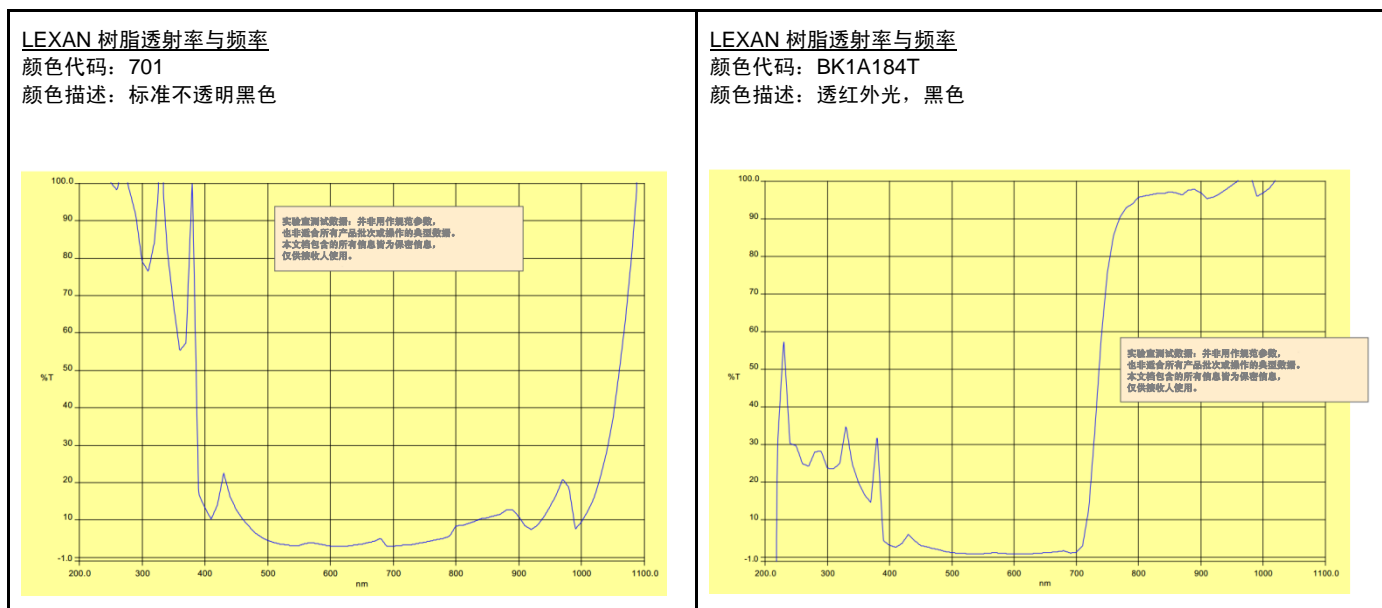


图 21

图 21 显示了参考对象中所用到的红外不透明和透明材料的透射率图表。701 是红外不透明材料使用的颜色代码。请注意，在可见光谱 (400 - 700nm) 和目标频率 (830 - 850nm) 范围内，其透射率通常小于 10%。BK1A184T 是红外透明材料使用的颜色代码。在可见光谱范围内，其透射率通常小于 5%，在目标频率范围内，其透射率大于 90%。

Covestro 是另一家可考虑的材料供应商。该公司在其“用于非成像光学的 Makrolon 和 Apec 的光学特性 (Optical properties of Makrolon and Apec for non-imaging optics)”(<http://www.plastics.covestro.com/Products/~media/B6555362438341FF9804F21A253E5B23.ashx?la=en>) 文档中提供了多种红外透明材料的图表。该公司的销售代表可以提供材料选择指导和样品。无论选择哪家供应商，联系材料供应商以获得最新信息和进一步讨论应用情况都是不错的做法。用于特定 VR 应用的树脂的准确级别非常依赖于零部件的功能和几何形状，应进行测试以确保合适。

## 参考设计的传感器覆盖

我们为 SteamVR 打造了一种定位对象的参考设计。传感器均按照上一章节所述的最佳实践进行了覆盖。下面给出了各种覆盖属性的汇总表。可在图 18 和 20 中找到相关定义。参考设计的值均为标称值，不包括公差。

	定位对象参考设计参数
红外透明覆盖物厚度	1.0 mm
孔洞开口直径	6.0 mm
传感器间隙	0.23 mm
无阻挡的视角	62 度
红外透明材料	SABIC LEXAN FXE1414T - BK1A184T
红外不透明材料	SABIC LEXAN HFD1711 - 701
孔洞外表面纹理	MT-11020
传感器形心之间的最小距离	约 15 mm

图 22

## 总结

我们讨论了光学-机械理论，以帮助您理解不同覆盖方法对 SteamVR 中定位性能的影响。搭建了一个实验装置，并用于在现实约束下确定实际效果。根据理论模型和实验模型制定了多种最佳实践。针对架构、孔洞属性、传感器定位和材料提供了相关指导。一个好的覆盖策略是对象在 SteamVR 中实现稳定跟踪的重要因素。由于这是设计不可缺少的一部分，应尽早予以考虑。

## 附录 A：材料透射率与频率数据

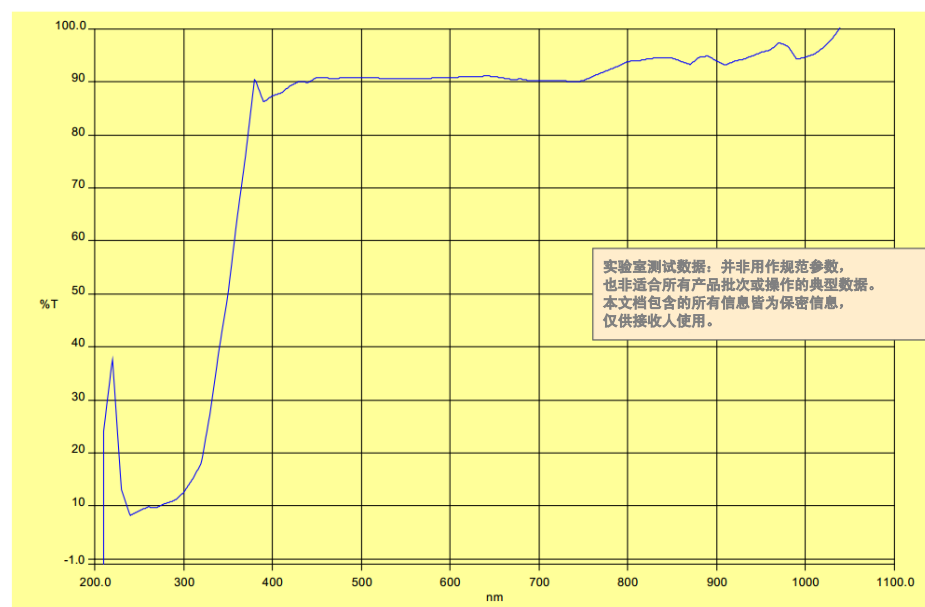


### LEXAN 树脂透射率与频率

颜色代码：111

颜色描述：标准天然色

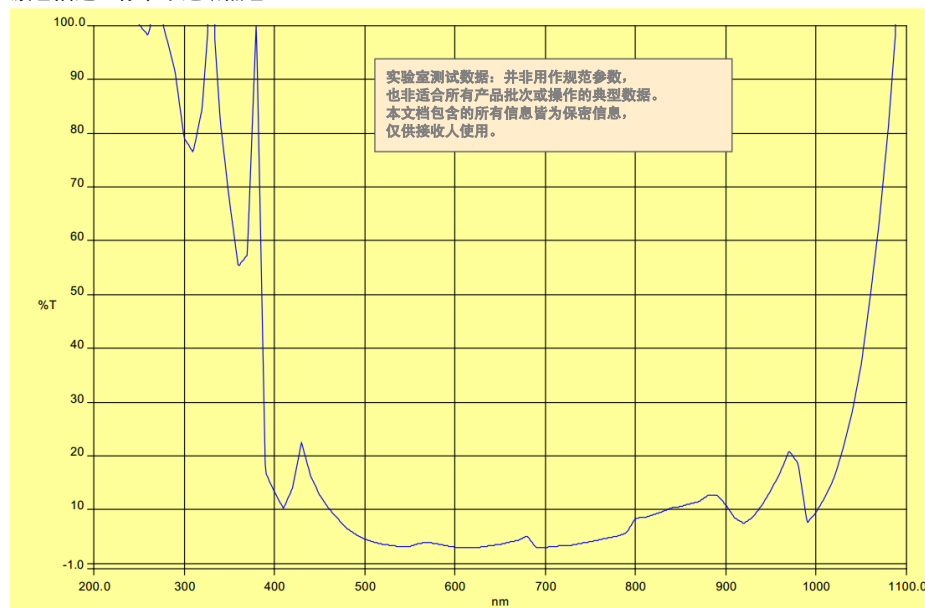
注意：对可见光和红外光都具有高透射率



LEXAN 树脂透射率与频率

颜色代码: 701

颜色描述: 标准不透明黑色

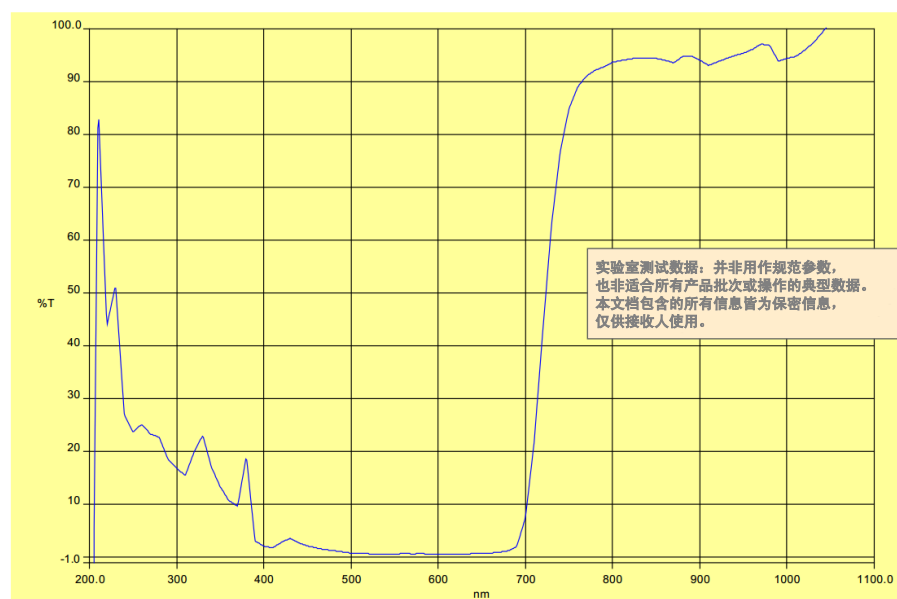


LEXAN 树脂透射率与频率

颜色代码: 7H1D505T

颜色描述: 透红外光，黑色

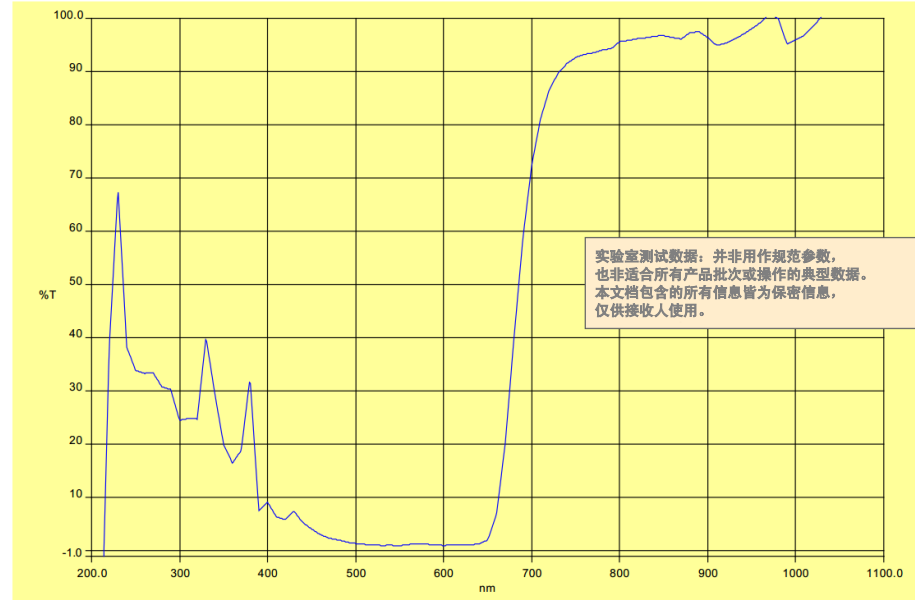
注意: 医疗



LEXAN 树脂透射率与频率

颜色代码: 21051

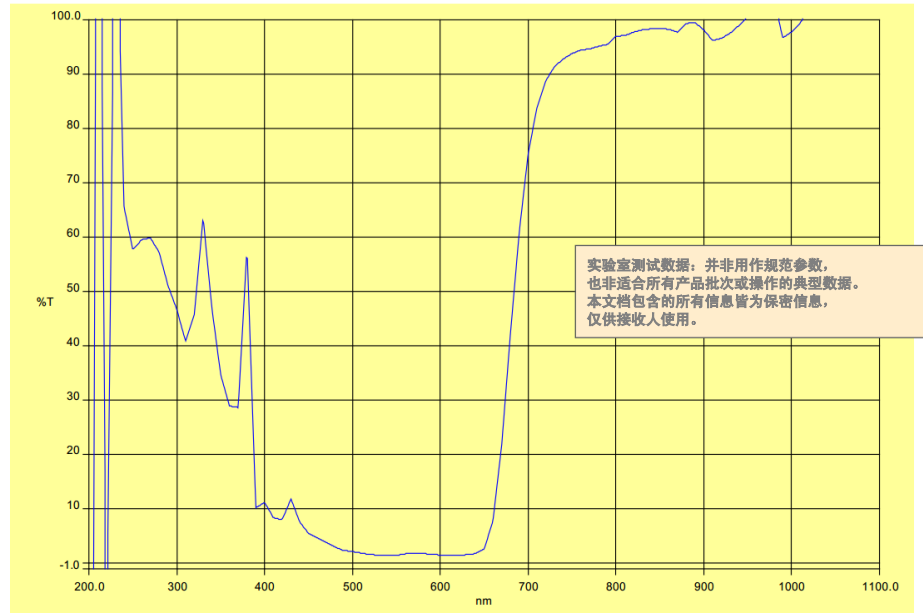
颜色描述: 透红外光, 深蓝色



LEXAN 树脂透射率与频率

颜色代码: 21064

颜色描述: 透红外光, 深蓝色

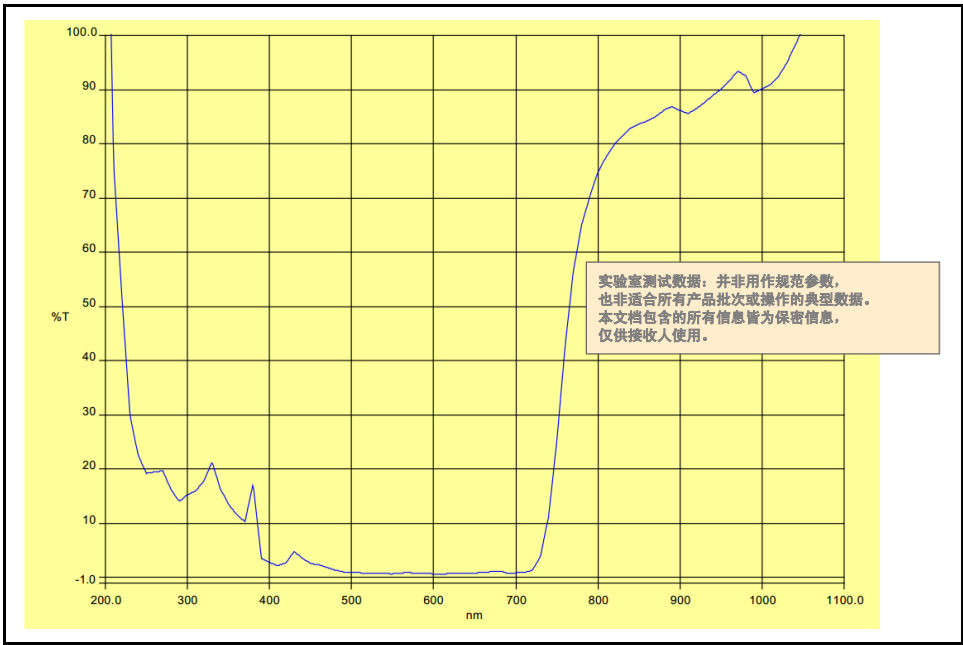


LEXAN 树脂透射率与频率

颜色代码: 21092

颜色描述: 透红外光, 深蓝色

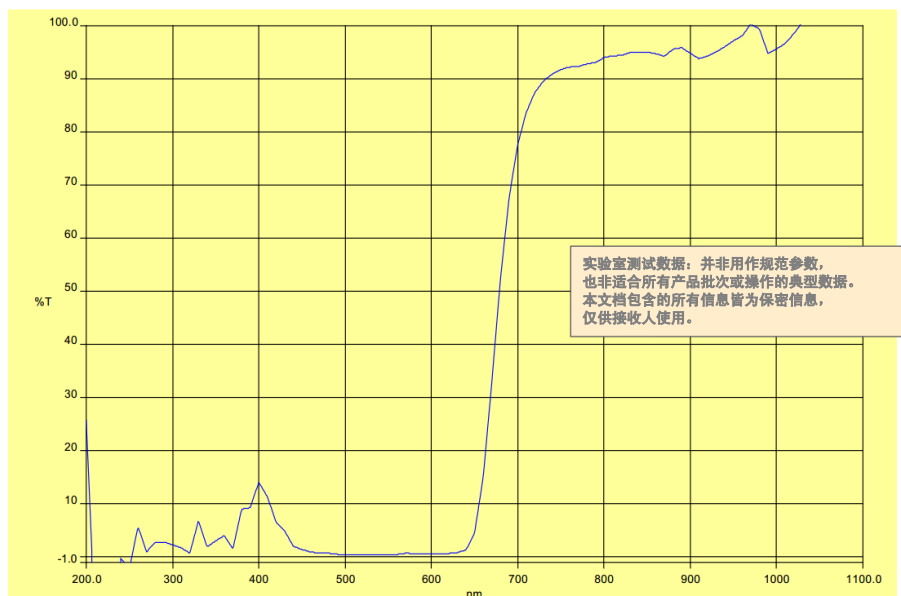




LEXAN 树脂透射率与频率

颜色代码: 21125

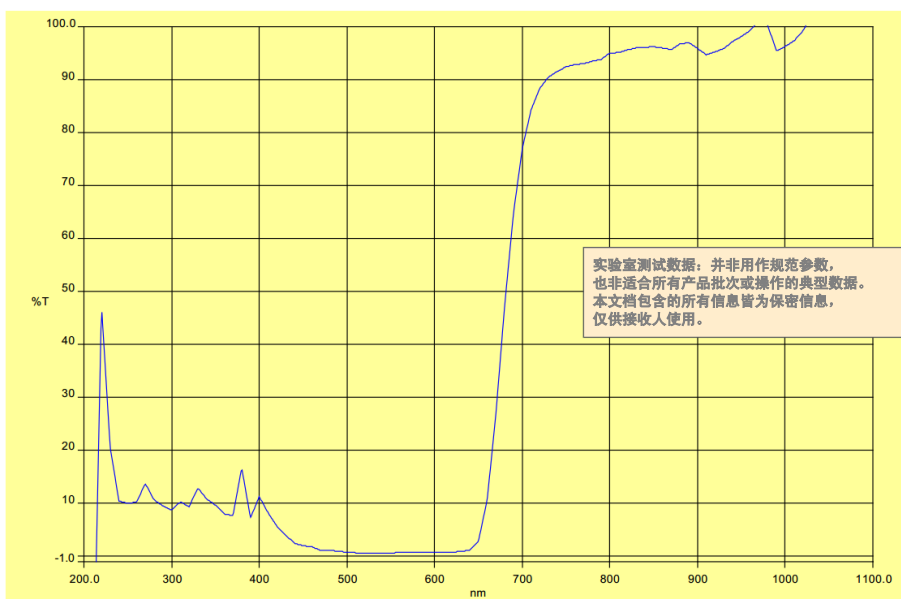
颜色描述: 透红外光, 深蓝色



LEXAN 树脂透射率与频率

颜色代码: 21127

颜色描述: 透红外光, 深蓝色

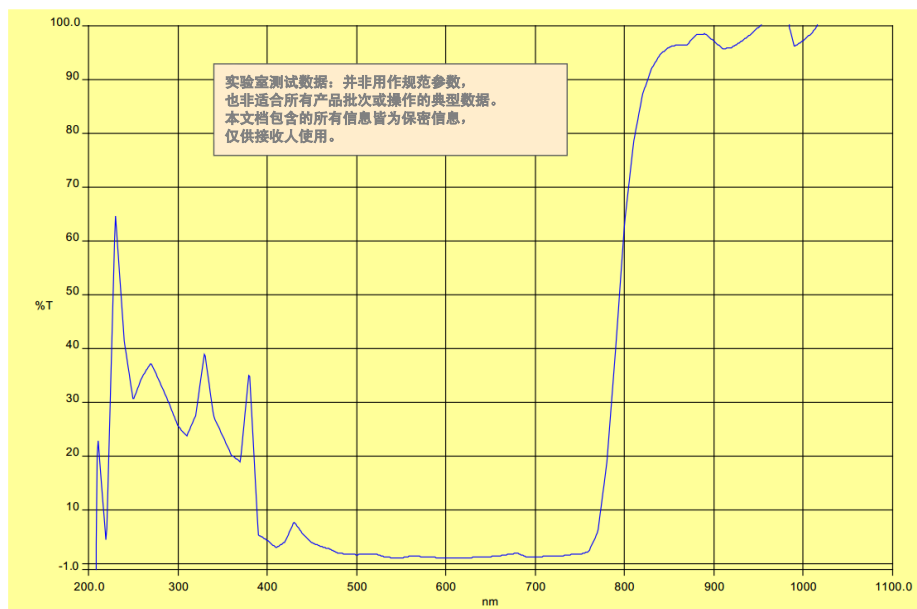




# LEXAN 树脂透射率与频率

颜色代码: 31142

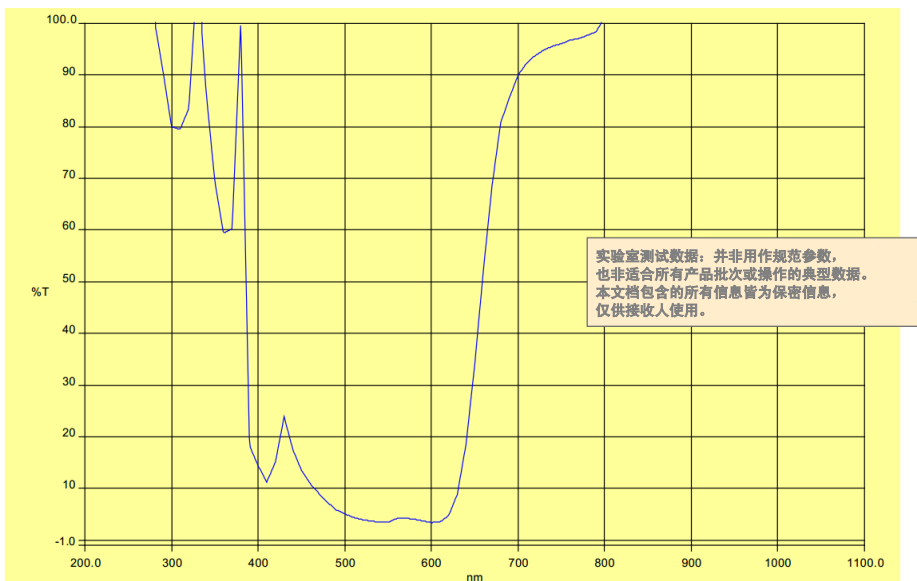
颜色描述: 透红外光, 深绿色



# LEXAN 树脂透射率与频率

颜色代码: 61028

颜色描述: 透红外光, 深红色

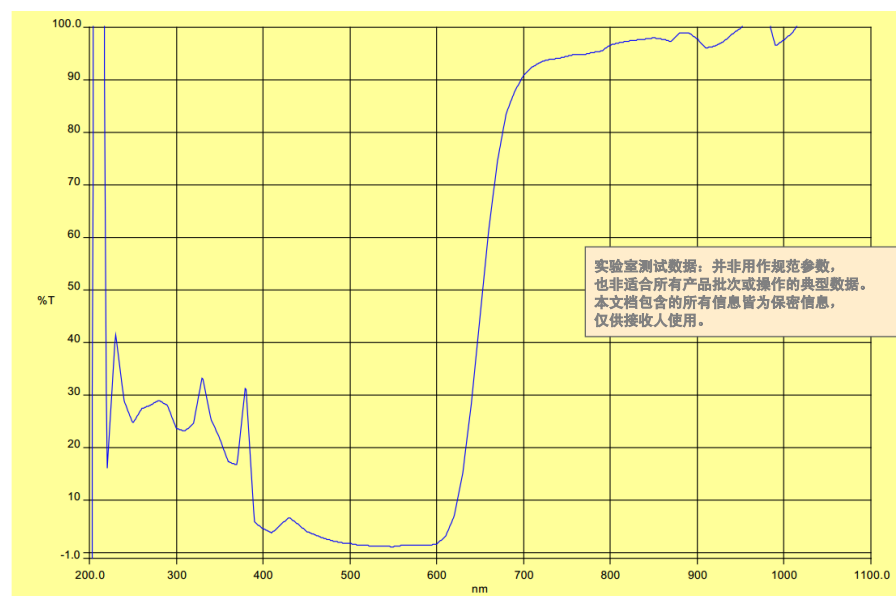




# LEXAN 树脂透射率与频率

颜色代码: 61036

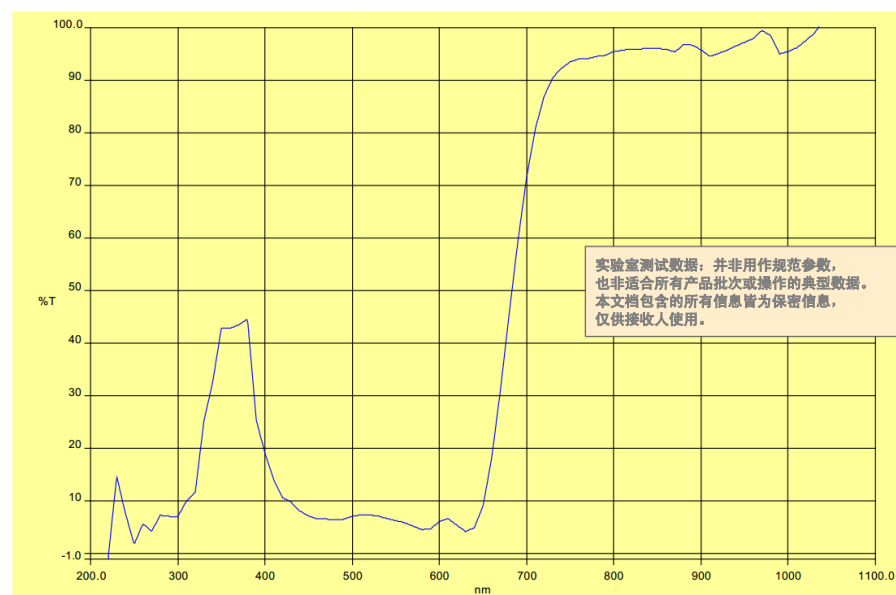
颜色描述: 透红外光, 深红色



# LEXAN 树脂透射率与频率

颜色代码: 71509

颜色描述: 透红外光, 黑色

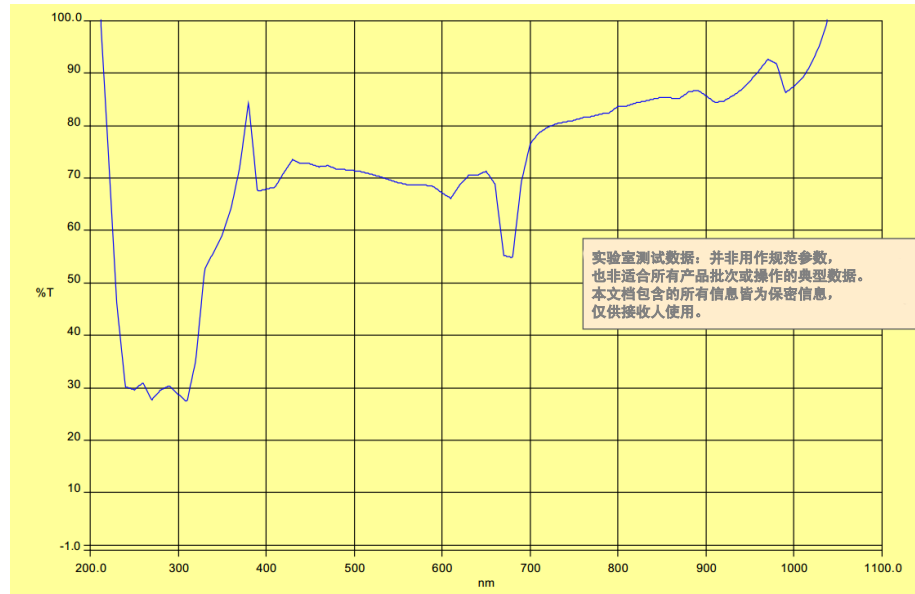




LEXAN 树脂透射率与频率

颜色代码: 71563

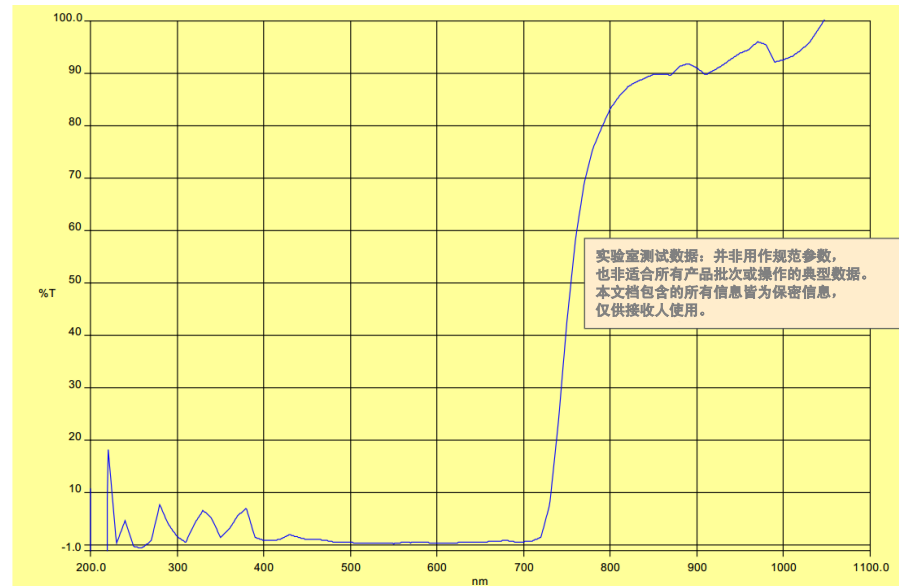
颜色描述: 透红外光, 黑色



LEXAN 树脂透射率与频率

颜色代码: BK1091T

颜色描述: 透红外光, 黑色



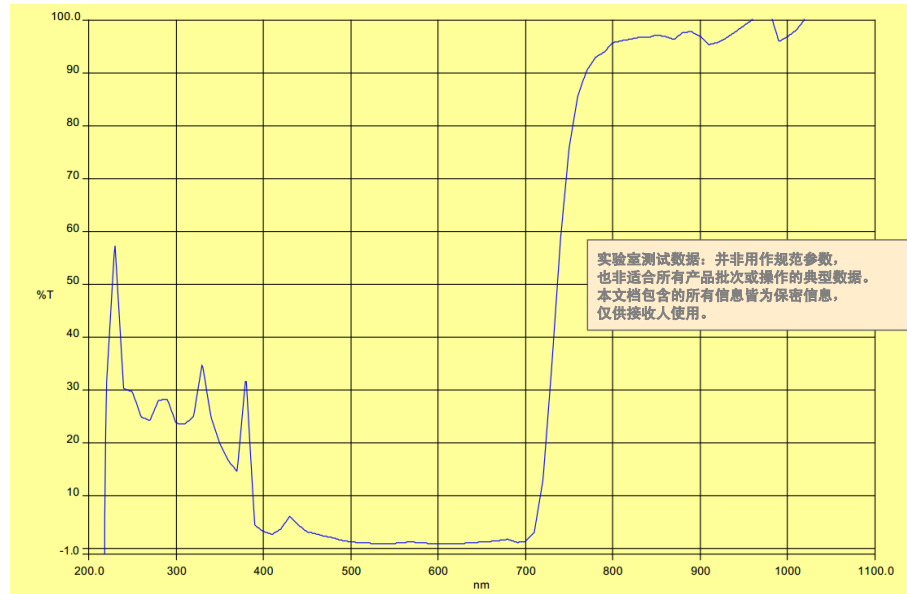




LEXAN 树脂透射率与频率

颜色代码: BK1A184T

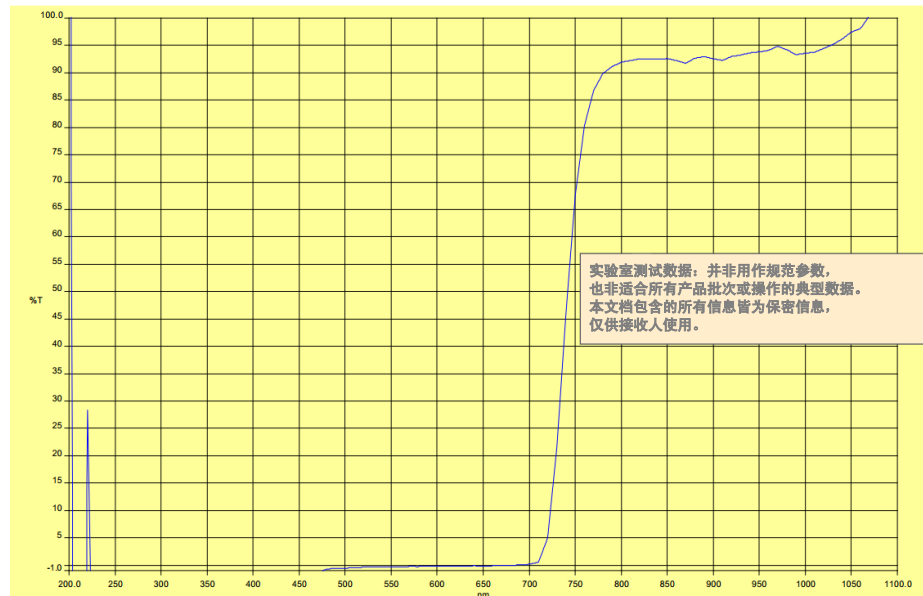
颜色描述: 透红外光, 黑色



LEXAN 树脂透射率与频率

颜色代码: BK1E008T

颜色描述: 透红外光, 黑色

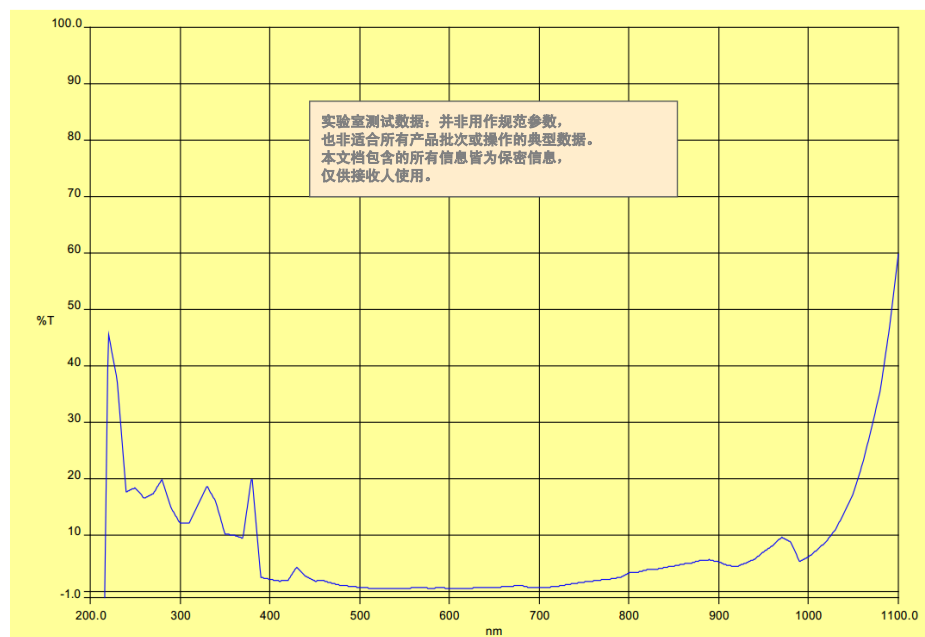




# LEXAN 树脂透射率与频率

颜色代码: BK1E092T

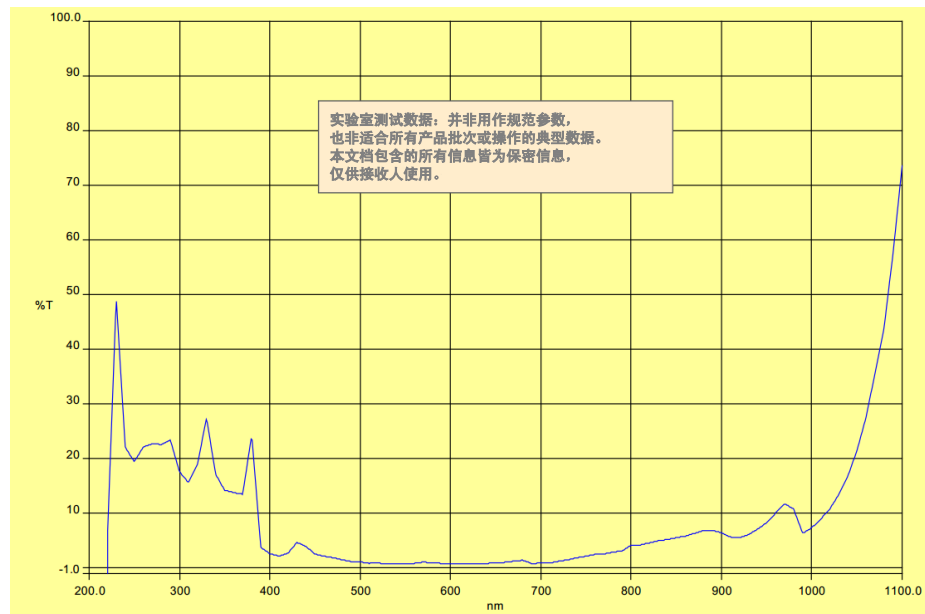
颜色描述: 透红外光, 黑色



LEXAN 树脂透射率与频率

颜色代码: BK1E117T

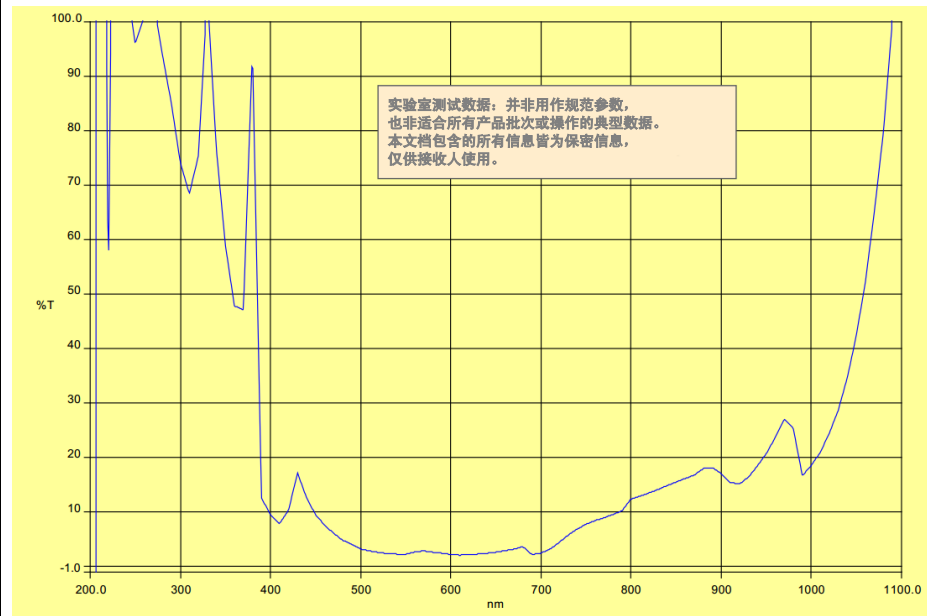
颜色描述: 透红外光, 黑色



LEXAN 树脂透射率与频率

颜色代码: BK1E118T

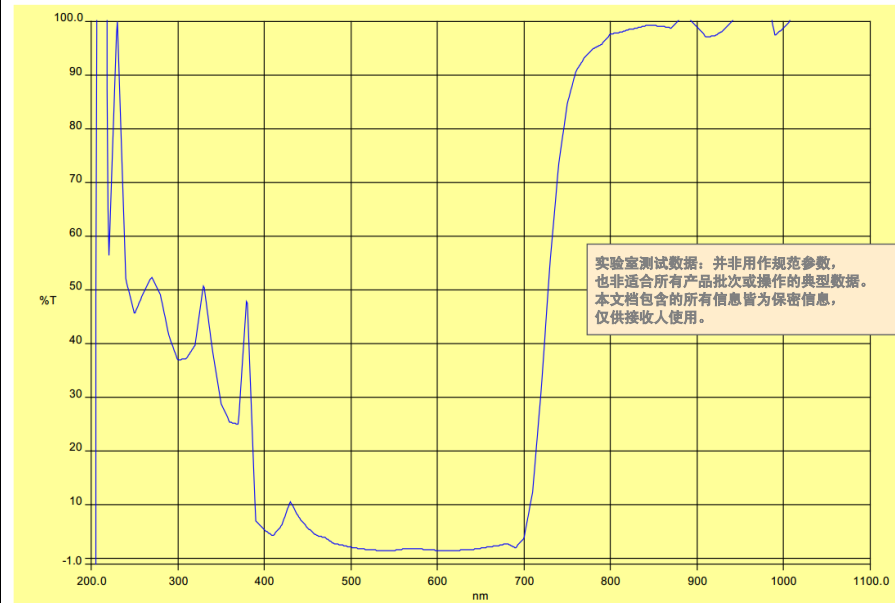
颜色描述: 透红外光, 黑色



LEXAN 树脂透射率与频率

颜色代码: GY1D740T

颜色描述: 透红外光, 深灰色



LEXAN 树脂透射率与频率

颜色代码: GY4E343T

颜色描述: 透红外光, 灰色

