



应用说明

实现高分辨率光学相干断层扫描的快速聚焦



新特光电是 Optotune 在中国的授权合作伙伴，一站式提供其全系列可调光学元件（液态可调焦镜头、精密&快速光束控制反射振镜、光束位移器、激光散斑衰减器及控制器）的选型匹配、应用方案设计及系统集成与工程落地全生命周期的技术支持。通过可调光学技术，实现焦距动态调节、光束精准偏转与高质量成像优化，广泛应用于激光加工、机器视觉检测、3D成像及高端科研系统等场景。

液态可调焦镜头：<https://www.sintecclaser.com/optical/liquid-lens.html>

精密&快速光束控制反射振镜：<https://www.sintecclaser.com/optical/beam-steering.html>

光束位移器：<https://www.sintecclaser.com/optical/beam-shifting-devices.html>

激光散斑衰减器：<https://www.sintecclaser.com/optical/laser-speckle-reducers.html>

我们还可提供不同通光孔径、调焦范围、光束偏转角度及涂层波长（UV-IR）的定制化可调光学解决方案，满足从科研到工业量产的多样化需求。获取最新方案及报价，请联系：

手机|微信：罗经理：18162698939，夏经理：13697356016

1. 引言

光学相干断层扫描（OCT）是一种光学信号获取与处理方法，可从光学散射介质（如生物组织）内部捕获微米级分辨率的三维图像。图像的获取依赖干涉技术，通常使用近红外光。采用相对较长波长的光能够穿透散射介质数毫米。例如，OCT 可用于生成眼部的详细横截面图像和三维图像。商业化的 OCT 系统已应用于多个领域，包括艺术品保护与医学诊断。

最早的 OCT 方法基于时域 OCT（TD-OCT）的原理（见图 1）。低相干光源被分配到参考臂和样品臂。参考臂中的光通过可移动镜子反射，样品臂中的光部分被样品反射。返回光的干涉在探测器上被记录。干涉图案包含两臂光程差的信息，从而反映样品的轴向位置。只有当光程差位于光源的相干长度范围内时，干涉才可被观测到。通过移动镜子并结合横向扫描，可重建样品的三维图像，但轴向视场非常有限，如上所述。由于镜子的移动相对缓慢，可捕获的数据量也受到限制。

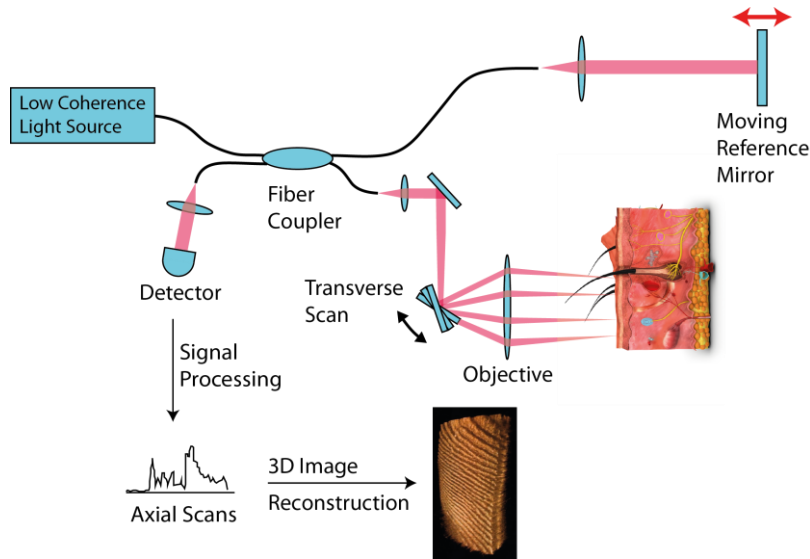


图 1: 通用时域 (TD-) OCT 架构, 该系统需要一个可移动的参考镜以实现轴向扫描 (A 扫描), 并需要一个横向扫描器以生成顶视扫描 (C 扫描)。图像采集速度相对较慢。

OCT 的一大革命出现在傅里叶域或光谱域技术 (SD-OCT) 的引入。SD-OCT 不需要移动参考镜, 使得图像采集速度比 TD-OCT 快约 100 倍。在傅里叶域 OCT 中, 通过光谱分离的探测器获取宽带干涉信号。根据 维纳-欣钦定理描述的傅里叶关系, 深度扫描可通过对采集到的光谱进行傅里叶变换计算得到, 而参考臂的镜子无需移动。另一种光谱域技术——扫频光源 OCT (SS-OCT) 则使用快速且精确的可调光源, 在波长范围内扫频, 并配合简单探测器。如今, OCT 市场主要由 SD-OCT 和 SS-OCT 主导。

尽管进展迅速, 最先进的 OCT 系统设计者仍需在“较大的轴向视场配合较低的横向分辨率” (见图 2a) 与“较高的横向分辨率配合较小的轴向视场” (见图 2b) 之间做出选择。这主要是因为 SD-OCT 和 TD-OCT 中, 获得可接受的分辨率仅可能依赖于小焦斑。小焦斑仅能通过高数值孔径 (NA) 物镜实现。然而, 高 NA 的代价是焦深减小, 从而导致轴向视场受限。

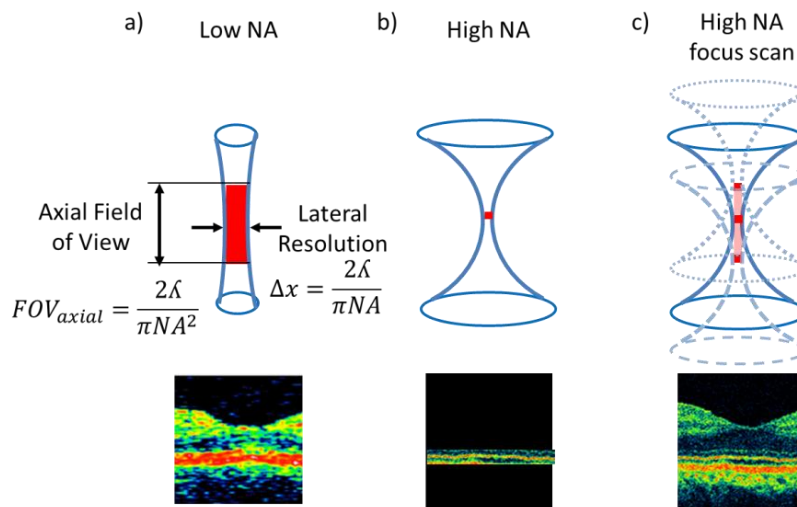


图 2: 横向分辨率与轴向视场的权衡
a) 低数值孔径 (NA) 聚焦光学系统, b) 高 NA 聚焦光学系统, c) 使用 EL-10-30-C 实现轴向焦点扫描, 从而扩展轴向视场的样品聚焦光学系统

这与图 2c 所示的扩展型 OCT 形成对比，在该方案中，既实现了扩展的轴向视场，又保持了高横向分辨率。通过使用可调焦透镜执行轴向焦点扫描，可以突破分辨率受限的权衡。无需任何可移动机械结构，EL-10-30 或 EL-6-18 透镜即可在数毫秒内完成对 2 mm 厚样品的单次扫描。

图 3 中将该扩展型 OCT 与不同成像技术在分辨率和穿透深度方面进行了比较。

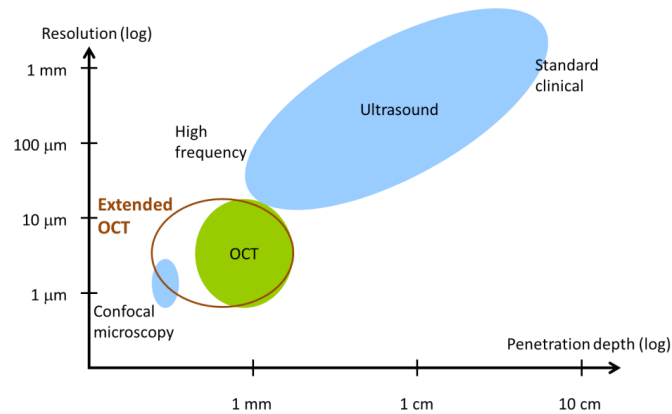


图 3：扩展型 OCT 与标准成像技术的比较

EL-10-30-C 透镜的 C 接口版本兼容标准工业物镜，可轻松与高 NA 样品聚焦透镜组合使用。此外，可在 EL-10-30-C 中集成偏置透镜，以将焦距范围调节至所需值。通过使用负偏置透镜，焦距范围可包含无穷远，从而使 EL-10-30-C 可置于现有光学系统之前，作为高光学分辨率 OCT 系统的近摄透镜使用。

下文将介绍 Optotune 产品在 OCT 系统中的不同应用实现。

2. 应用领域

2.1. 皮肤 OCT —— 扩展型光学相干断层扫描

在传统 OCT 系统中，设计者必须在横向分辨率与可实现的视场之间做出权衡。EL-10-30-C 或 EL-6-18 透镜可以实现焦斑在样品中的快速轴向扫描，同时保持高 NA，从而保持高横向分辨率。当与样品的 x-y 机械扫描或扫描振镜结合使用时，可实现高分辨率三维 OCT。

扩展扫描范围对于皮肤 OCT 尤为重要，因为与眼部 OCT 不同，皮肤 OCT 对物镜的数值孔径没有限制。图 4 展示了一个扩展型 SD-OCT 系统。来自低相干光源的光被引入一个 2x2 光纤耦合器，实现标准迈克尔逊干涉仪。耦合器将入射光功率分配到样品臂和参考臂。参考光纤输出的光照射到参考镜上，并被重定向回同一光纤。样品光纤输出的光照射到横向扫描镜机制上，用于将光束聚焦到样品上，并沿一个或两个横向方向扫描焦斑。

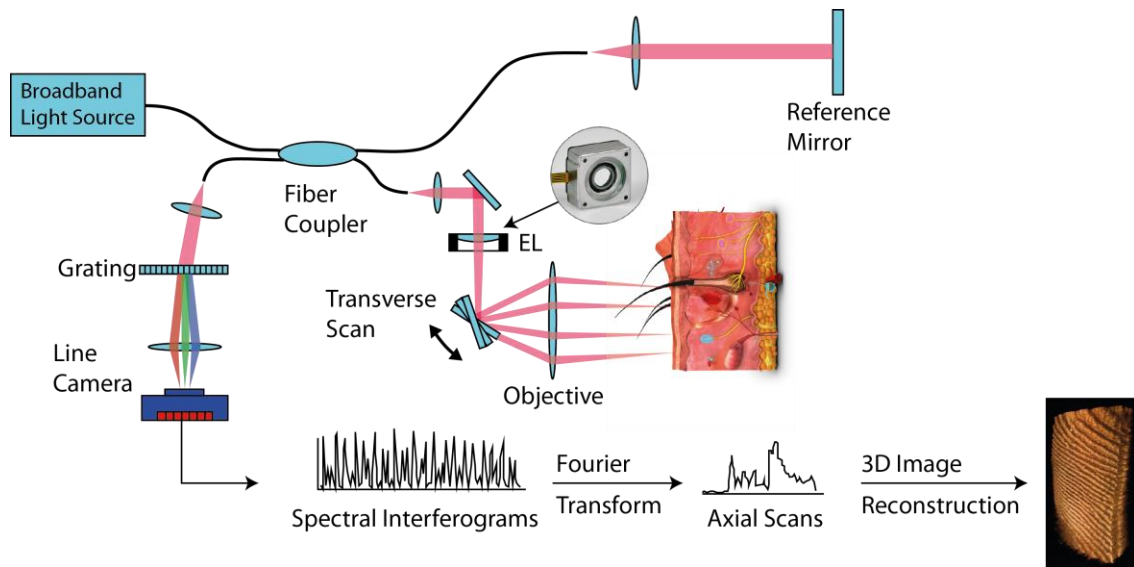


图 4: 扩展型光谱域 SD-OCT 的示意图, 用于组织 (如人体皮肤) 的研究。置于扫描镜前的电可调透镜可在延长轴向扫描范围的同时保持尽可能高的横向分辨率。图中示例展示了高速电动液态透镜 EL-6-18。

从样品反射回来的光通过相同的光学扫描系统重新导入光纤, 并与来自参考臂的返回光混合。混合光通过光栅实现光谱分离, 并在高速 CCD 或 CMOS 线阵相机的表面产生干涉。随后对测得的光谱干涉图进行傅里叶变换, 并由所得的轴向扫描重建三维图像。将可调焦液态透镜 (EL 系列) 置于扫描镜之前, 可改变轴向扫描 (A 扫描) 的起始位置。不同深度的 A 扫描随后被拼接在一起 (见图 5)。

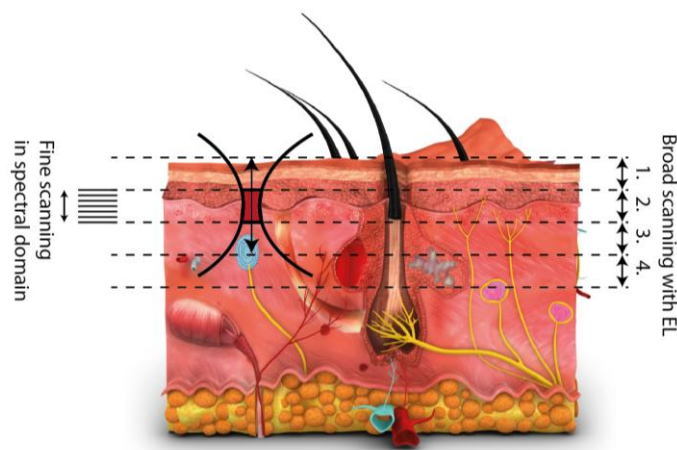


图 5: 沿轴向扫描方向拼接多个轴向 (A) 扫描的示意图, 以获得更大的扫描深度, 同时保持良好的横向分辨率。

图 6 展示了将扩展轴向扫描范围应用于扫频光源 (SS-OCT) 系统的原理, 其原理与在横向扫描单元前置可调焦液态透镜的 SD-OCT 类似。在扫频光源 OCT 扫描中, 光源波长快速扫频, 光谱干涉图在单个探测器上随时间检测。随时间获得的光谱干涉图经过反傅里叶变换后生成 A 扫描图像。更高的扫描速度可实现更密集的采样和更精确的配准。虽然可调光源相对昂贵, 但探测系统变得非常简单。

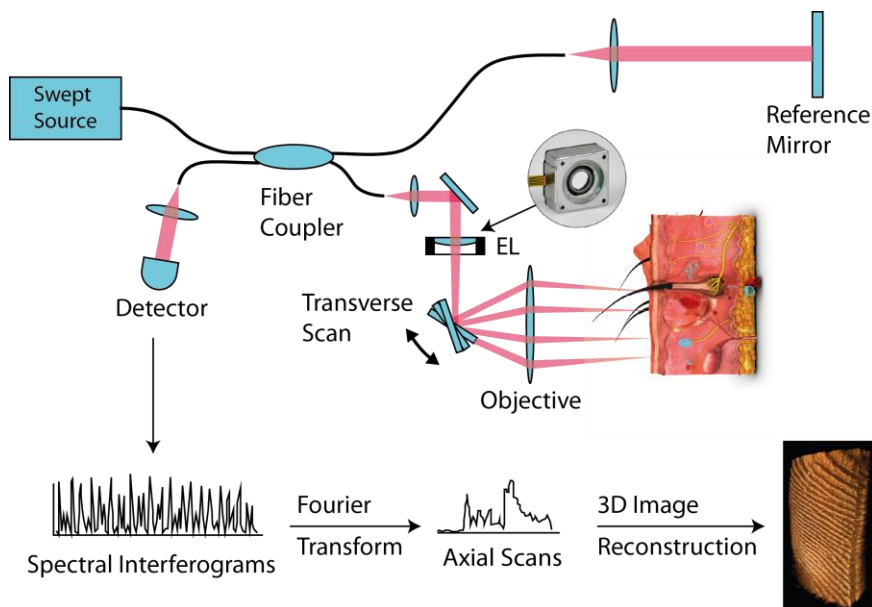


图 6: 扫频光源 (SS-) OCT 的示意图, 用于组织 (如人体皮肤) 的研究
置于扫描镜前的电动可调焦液态透镜可在延长轴向扫描范围的同时保持尽可能高的横向分辨率。图中示例展示了高速电动液态透镜 EL-6-18。

2.2. 眼部 OCT

随着青光眼、视网膜及角膜疾病的增加, 光学相干断层扫描 (OCT) 在眼科临床中的应用日益广泛。通过 OCT, 可清晰观察视网膜的各个特征层, 使眼科医生能够绘制和测量其厚度。这些测量有助于早期发现、诊断及指导治疗多种视网膜疾病和病症, 包括年龄相关性黄斑变性和糖尿病性眼病等。

电动可调焦液态透镜使 OCT 系统能够聚焦于眼内不同的焦平面, 同时对角膜和视网膜进行成像 (见图 7)。这些透镜兼容光谱域 (SD-OCT)、扫频光源 (SS-OCT) 和时域 (TD-OCT) 系统。高速调焦能力允许实时跟踪眼球, 从而获得更可靠的结果。由于无需平移机械结构, 整个光学系统紧凑且稳固。

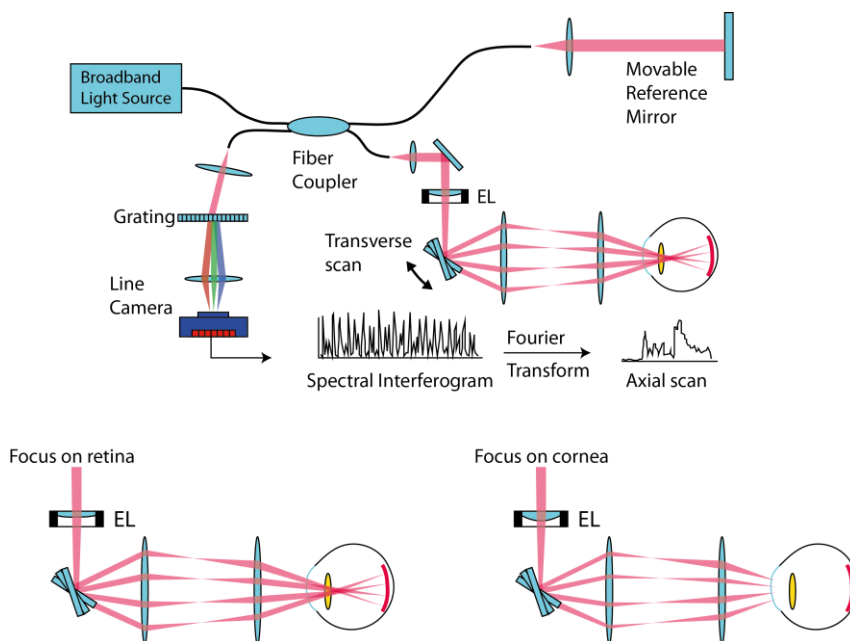


图 7: 用于眼部检查的典型 SD-OCT 仪器示意图
将电动可调焦液态透镜置于扫描镜前, 可实现视网膜与角膜成像之间的切换。

3. 配置

3.1. 近摄配置：EL-10-30-C 与定焦透镜组合

EL-10-30-C 配备集成的平凹偏置透镜，可与定焦透镜组合使用，作为近摄透镜，实现高光学质量的电子可控聚焦单元。

图 8 展示了传统聚焦方案与包含可变焦透镜组合方案的比较。采用仅定焦透镜的传统方法时，需通过机械平移一个或多个透镜以实现样品的聚焦。相比之下，使用定焦透镜与可调透镜组合时，定焦透镜的所有光学元件保持固定位置，仅通过改变可调透镜的曲率，从而调整焦距，实现样品的深度扫描。这使系统速度更快且可靠性更高。

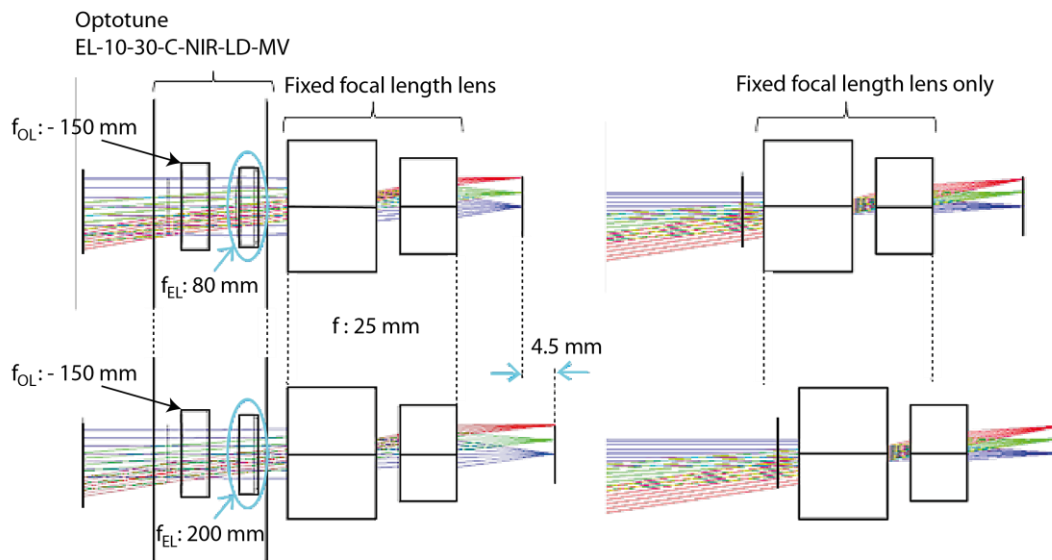


图 8：使用可调透镜时，通过电动控制改变可调焦液态透镜的焦距即可实现不同工作距离（WD）的重新聚焦，无需任何平移运动

可在 EL-10-30-C 的透镜外壳内集成一枚 -150 mm 平凹定焦偏置透镜，平面面朝向可调透镜。根据定焦透镜的滤镜螺纹规格，可能需要在带 C 接口螺纹的 EL-10-30-C 与定焦透镜之间安装适配器。

3.2. 标准产品

EL-10-30 和 EL-6-18 产品系列均适用于 OCT 应用。表 1 提供了可用于 OCT 应用的部分选定产品概览。

标准产品	通光孔径	调焦范围 ¹	折射率	盖板镀膜	波前误差 RMS ²	集成偏置透镜	温度传感器
EL-10-30-VIS-LD	10 mm	+8 to +22 dpt	1.30	400 – 700 nm	<0.50 λ	No	No
EL-10-30-NIR-LD	10 mm	+8 to +22 dpt	1.30	700 – 1100 nm	<0.50 λ	No	No
EL-10-30-C-VIS-LD	10 mm	+5 to +12.5 dpt	1.30	400 – 700 nm	<0.25 λ	No	Yes
EL-10-30-C-NIR-LD	10 mm	+5 to +12.5 dpt	1.30	700 – 1100 nm	<0.25 λ	No	Yes
EL-10-30-C-VIS-LD-MV	10 mm	-1.5 to +6 dpt	1.30	400 – 700 nm	<0.25 λ	Yes (-150 mm)	Yes
EL-10-30-C-NIR-LD-MV	10 mm	-1.5 to +6 dpt	1.30	700 – 1100 nm	<0.25 λ	Yes (-150 mm)	Yes
EL-10-30-C-1064-LD-LP	10 mm	-1.5 to +2.5 dpt	1.30	1064 nm	<0.12 λ	Yes (-150 mm)	Yes
EL-6-18-VIS-LD	6 mm	-2 to 20 dpt	1.30	400 – 700 nm	<0.1 λ	Yes (-50 mm)	Yes
EL-6-18-VIS-NIR	6 mm	-2 to 20 dpt	1.30	700 – 1100 nm	<0.1 λ	Yes (-50 mm)	Yes

表 1: 适用于 OCT 应用的标准产品概览

4. 透镜特性

4.1. 响应时间

对于 EL-10-30，在电流阶跃下的上升时间约为 2.5 ms。然而，透镜完全稳定则需约 15 ms。详细信息及 EL-10-30 对电流阶跃的光学响应曲线，请参见 EL-10-30-C 数据手册。若需更快响应，可考虑较小的电动液态透镜 EL-6-18，其响应速度约快 50%。

4.2. 镀膜选项

可调焦透镜的柔性膜无法采用标准镀膜工艺处理，因为其需要保持柔性。这意味着在空气/膜界面处大约会有 3–4% 的反射。盖板玻璃则可以进行适当的镀膜处理。EL-10-30-C 提供两种标准宽带镀膜选项，分别适用于可见光 (VIS) 和近红外 (NIR)，同时也可提供窄带镀膜（例如 355 nm 或 1064 nm，详细透射曲线请参见 EL-10-30-C 数据手册）。如果透镜安装在无尘环境中，也可以不使用盖板玻璃，以避免在 OCT 中常见的寄生反射问题。

4.3. 焦距范围与透镜朝向对波前质量的影响

原则上，可调焦透镜呈球形形状（标准参数可在 ZEMAX 软件包中查看）。由于透镜由弹性材料制成，其形状会受到重力影响。当透镜水平放置（光学轴垂直）时，EL-10-30-C-VIS-LD 和 EL-6-18 系列透镜的 RMS 波前误差约为 0.1 λ （在 525 nm 测量）。当透镜竖直放置（光学轴水平）时，需要加入 Y-像差项。此外，如图 9 所示，透镜在较小曲率（对应较长焦距）时的波前误差更小。因此，建议将定焦透镜的位置设置为可调透镜在长焦距范围内工作，对应低电流值。

¹ 可根据需求提供不同的焦距调节范围。

² 波前误差以 RMS λ 表示，在 525 nm 波长、0 mA 电流、光学轴水平放置时为最差情况。

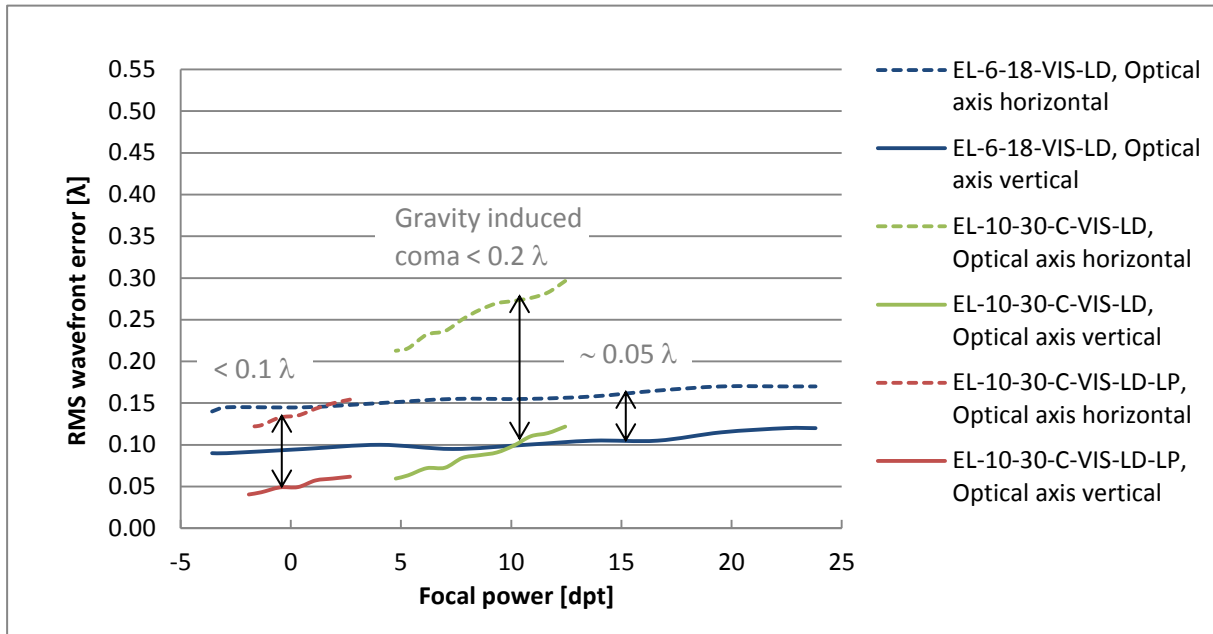


图 9: 最适用于 OCT 应用的可调透镜波前测量 (525 nm 波长, 透光孔径的 80%, 不含散焦、倾斜及球面像差)

由重力引起的 Y-像差项取决于透镜尺寸、液体密度以及膜的机械特性。对于孔径小于 5 mm 的透镜, 该项可忽略不计; 而对于 EL-10-30-C-VIS-LD-LP 和 EL-10-30-C-VIS-LD, 分别约为 0.1λ 和 0.2λ 。可使用更坚固的膜以减小 Y-像差, 但代价是焦距调节范围减小。我们正在开发改进材料和透镜设计, 以降低透镜对重力的依赖。

4.4. EL-10-30-C 的控制

EL-10-30-C 通过电流控制 (0-300 mA)。有关可用驱动器的建议, 请参见 EL-10-30 使用说明书。与压电系统不同, EL-10-30 无滞后现象。线圈中的电流会产生力, 直接传递至弹性膜, 系统中不存在摩擦。这意味着在恒温条件下, 在不同电流水平间切换, 总能获得相同的焦距。对于简单的聚焦应用, 通过查表法进行校准即可实现良好的重复性。如果透镜发热显著, 建议使用内置温度传感器来计算更精确的查表值。

对于 EL-10-30-Ci 型透镜, Lens Driver 4 提供焦距模式, 利用存储在透镜 EEPROM 中的校准数据。在 $10-50^{\circ}\text{C}$ 的工作温度范围内, 通常可实现约 0.1 屈光度的绝对重复精度。有关焦距模式的更多细节, 请参见 Lens Driver 使用手册。

5. 使用 LSR-3000 构建低成本、相干长度可调激光源

除了透镜之外, 激光散斑衰减器 (LSR) 可用于构建低成本、窄带、低相干的激光源, 适用于时域 OCT 系统。可将低成本近红外激光二极管照射到 LSR 的圆周移动漫射器上 (见图 10)。漫射器可降低激光光的相干长度, 然后将其耦合入光纤分束器。该系统的主要优点是结构简单、成本低。此外, 通过改变漫射器的驱动频率, 还可以实现相干长度可调的光源。

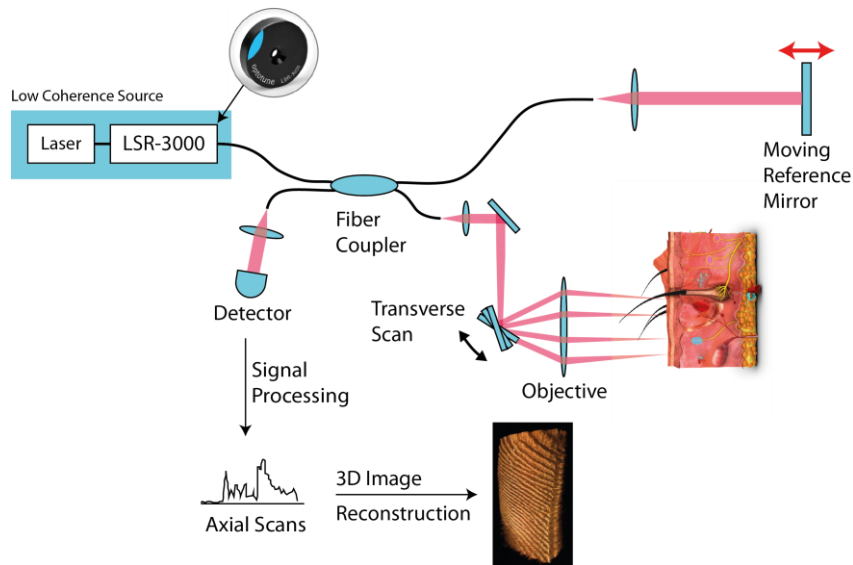


图 10：使用低成本激光源结合 LSR-3000 构建的时域 OCT 低相干激光源

6. 利用 LSR-3000 在探测器端减少散斑

此外，激光散斑衰减器 LSR-3000 可置于 SD-OCT 或 TD-OCT 系统的探测器前，用于去除图像中的散斑噪声，从而提升系统的信噪比。