

MetaOptic Designer: 超透镜设计自动化

逆向设计工具助力实现出色性能

作者

Chenglin Xu
RSoft 产品经理
新思科技

引言

超透镜又薄又平，可以取代厚重的曲面透镜，有望彻底改变光学产品。超透镜是下一代紧凑型成像、传感和显示应用的关键技术^[1]。

为了助力这个全新创新领域的发展，新思科技推出了 **MetaOptic Designer**。这是一款强大的逆向设计工具，让用户可以根据自己指定的标准来生成超透镜/超表面，从而实现出色的系统性能。

为什么超透镜设计独具挑战性？

一个超透镜通常由数以百万计的亚波长结构单元（称为超原子）组成，它们在整个超表面上相干地对光线进行局部调制。每个超原子的形状和/或大小取决于超透镜的整体性能。设计这样一个超透镜，需要考虑数百万个变量，因此是一项独具挑战性的任务。正如 **Federico Capasso** 教授的研究团队在工作报告^[2]中指出的，超透镜设计过去都是手动完成，相关人员不仅需要具备丰富的设计经验，而且还要对基础物理知识有深刻的理解。图 1^[3]展示了超透镜的手动设计流程。

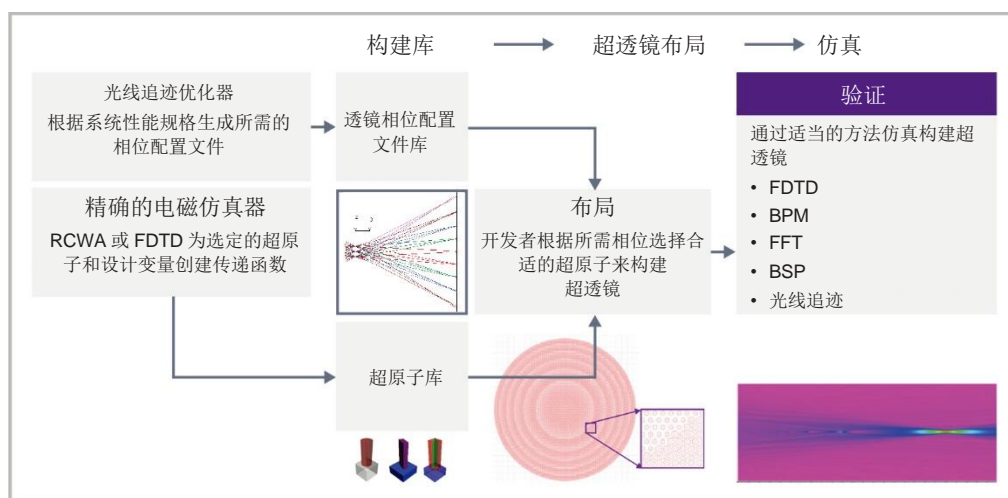


图 1: 超透镜手动设计流程

手动设计方法需要一个预定义的相位轮廓，该轮廓只对固定的入射条件有效，因为波长、入射角和偏振不同，超原子的传递函数也会不同。因此，针对特定入射条件优化的相位轮廓在其他条件下是无效的。所以，很难设计出一个具有多种用途的超透镜，比如适用宽光谱范围的消色差透镜，或支持宽入射角的大视场（FOV）透镜。

MetaOptic Designer: 攻克超透镜设计挑战

为了解决超透镜手动设计方法的局限性，全世界都在努力开发具有逆向设计功能的自动化流程。研究团队纷纷推出自己针对级联超表面^[4]和大型超透镜^[5]应用的逆向设计算法。但学术界开发的算法通常供内部用于具体的应用。因此，当务之急是开发出一款易于使用的工业设计工具来实现超透镜设计自动化，让各种专业水平的开发者都能快速轻松地设计超透镜系统。

为了满足这一需求，新思科技开发了 MetaOptic Designer——首个具有逆向设计功能的全自动超透镜商业设计工具^[6]。其优化算法采用著名的伴随法，可以轻松处理上数百万个设计变量。

MetaOptic Designer 的前向传播采用高效的傅里叶变换法，也称为角谱法，其在均匀介质中非常精确。每个超原子的传递函数都由一个参数化的双向散射分布函数（BSDF）数据库表征，该数据库则由开发者使用新思科技产品 FullWAVE™ FDTD^[7]或 DiffractMOD™ RCWA^[8]通过时域有限差分法（FDTD）或严格耦合波分析法（RCWA）构建而成。对大多数超原子而言，在精度差不多的情况下，RCWA 可以比 FDTD 快 100 倍左右。

如图 2 所示，MetaOptic Designer 会根据预期目标优化超透镜系统，使其达到最佳性能，开发者只需输入少量信息即可。

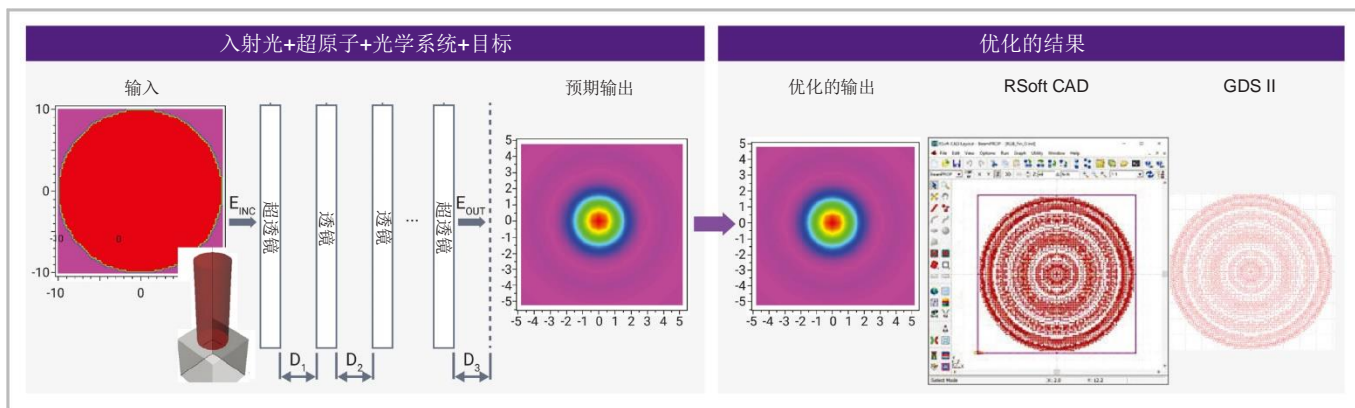


图 2: MetaOptic Designer 工作流程

MetaOptic Designer 需要以下输入：

- 所需超原子的预构建 BSDF 数据库
- 入射场，其中包括所有分布、波长、偏振和入射角
- 基本光学系统信息，包括超表面的数量、每个面的大小、面与面之间的间隔、像平面位置以及内置的折射镜
- 期望目标：聚焦光斑还是预期显示图像

MetaOptic Designer 的输出包括聚焦效率和优化的超透镜设计等各种性能指标，并会以 GDS 文件和 RSoft™ CAD 文件的形式提供，其中前者用于制造过程，后者用于进一步仿真。

MetaOptic Designer 还可以在超透镜系统中集成折射镜。折射镜可以通过非球面系数来指定，也可以从新思科技成像设计工具 CODE V[®]生成的文件中导入。

MetaOptic Designer 还可用来评估现有设计在非优化工作条件下的性能。现有设计可以用作初始条件来做进一步优化。如下列实例所示，MetaOptic Designer 可用于许多应用，比如消色差和大视场成像、偏振转换和分束以及像差校正。

设计实例：消色差超透镜

为成像系统设计消色差超透镜是许多研究人员一直在关注的一项难题。已知的一些设计都是操作相位和色散分布，而这些操作需要开发者具备丰富的设计知识^[9]。MetaOptic Designer 简化了该设计任务，开发者只需指定输入和期望目标即可。MetaOptic Designer 会在指定的公差范围内返回一个优化的解决方案。如图 3 (a) 所示，对于消色差透镜，RGB 三色输入光线会在超表面后汇聚到同一个光斑。图 3 (b) 显示的是输入和期望目标。使用图 3 (c) 所示的预定义（参数化）TiO₂ 超原子，MetaOptic Designer 在 6 核笔记本电脑上只需短短几秒，便可生成图 3 (d) 所示的优化布局。

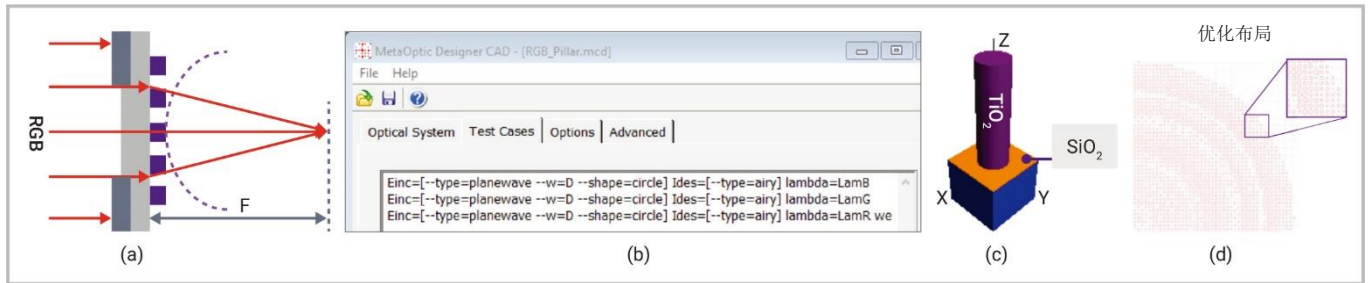


图 3：（a）消色差透镜示意图；（b）指定的设计目标；（c）所用超原子示意图；（d）优化的超透镜布局

图 4 (a) 显示了沿光轴优化的超透镜仿真结果。RGB 输入都大约在同一个焦平面上聚焦。RGB 光线的绝对聚焦效率分别为 35%、28%和 32%，其中绝对聚焦效率是指入射光线被聚焦到艾里斑直径 2 倍的光圈内的能量比例。由于使用了 TiO₂ 超原子，这种超透镜对光线有较强的反射作用，RGB 光线被传递的能量分别只有 66%、58%和 44%。这个透镜很小，直径只有 20 μ m，如果是透镜尺寸更大，聚焦效果应该会有所改善。

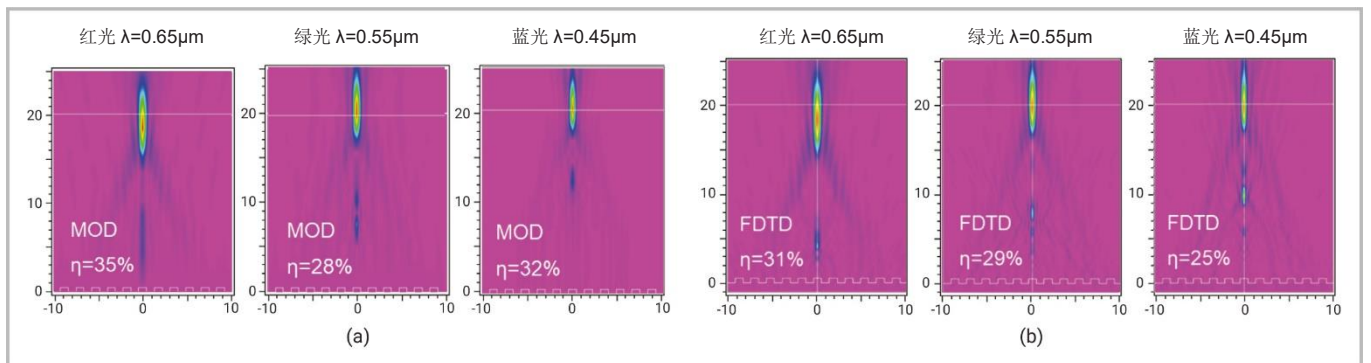


图 4：（a）MetaOptic Designer 的优化结果；（b）FDTD 仿真的验证结果

使用小尺寸透镜旨在确保可以轻松地使用 FDTD 验证 MetaOptic Designer 的结果，因为 FDTD 在 16 核计算机上进行一次仿真大约需要 100G 内存和 4 个小时的时间。如图 4 (a) 和 (b) 所示，在聚焦分布和聚焦效率方面，MetaOptic Designer 给出的结果都与 FDTD 的结果非常接近。

设计实例：大视场超透镜

大视场超透镜是另一个富有挑战性的超透镜设计应用^[10]。开发者需要具备大量的设计专业知识，才能确保超透镜在大视场上发挥作用。MetaOptic Designer 让这个过程变得容易很多。在 6 核笔记本电脑上，开发者指定与入射角相对应的焦点位置后，该工具会在大约 1 分钟内生成优化的布局。

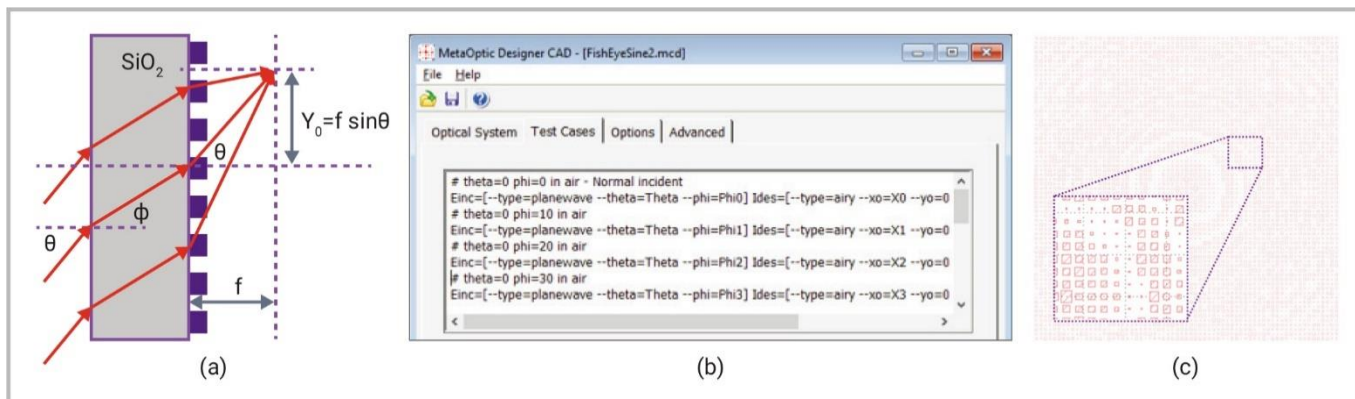


图 5：（a）大视场透镜示意图；（b）指定的设计目标；（c）优化的超透镜布局

如图 6 所示，MetaOptic Designer 的优化结果清楚地表明，超透镜会在宽角度范围将入射光线聚焦到像平面上。该设计包括 9 个离散目标角度，其中间隔为 10°。这里只显示了 0°、40° 和 80° 的结果。

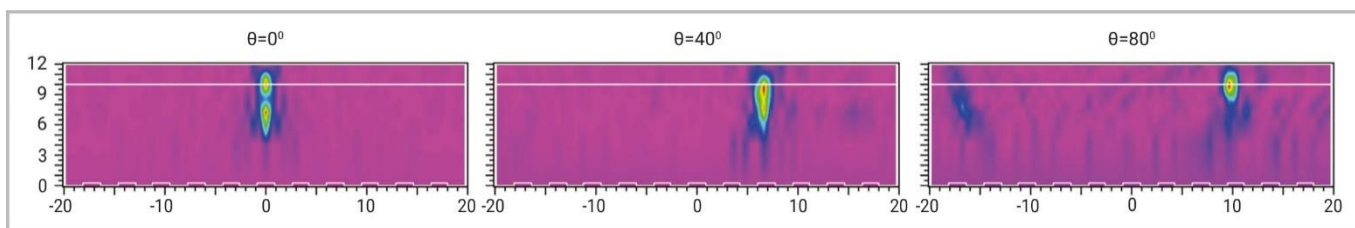


图 6：MetaOptic Designer 的优化结果

我们用了个 40μm x 40μm 的小型超透镜来通过 FDTD 验证结果，在 16 核计算机上，这个仿真每次大约需要 250G 的内存和 13 小时的时间。这里针对所有 9 个入射角对优化后的超透镜进行了仿真，结果如图 7 所示，与图 6 中 MetaOptic Designer 的结果非常接近。

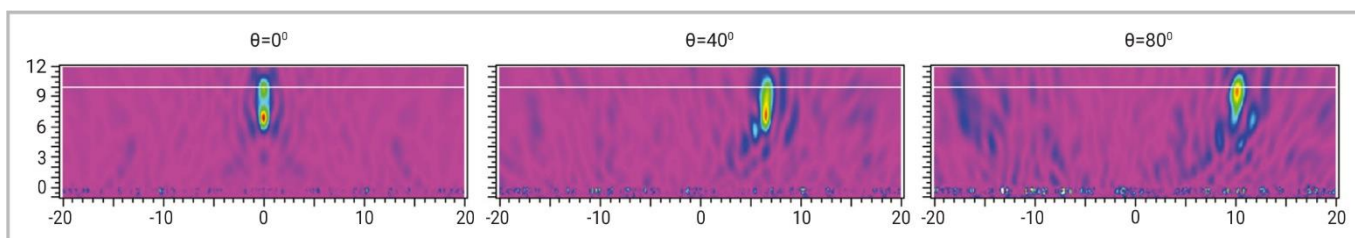


图 7：FDTD 仿真的验证结果

对于成像透镜来说，大视场和消色差都是非常重要的特性。很难用图 5（a）所示的超原子来在单个超透镜中同时实现这两个特性。但是，使用两个超表面的超透镜，可以同时实现大视场和消色差^[11]特性。

多层超透镜的设计在技术上是个难题。MetaOptic Designer 让这个过程变得容易很多。为了展示该工具能够用于设计多层超表面应用，我们选择了一个直径为 $40\mu\text{m}$ 的小型超透镜，如图 8 (b) 所示。这样一来，使用现有的计算机资源就可以进行 FDTD 仿真。两层超表面都由 Si_3N_4 超原子组成，超原子分布在厚度为 $5\mu\text{m}$ 的 SiO_2 基板两面上。

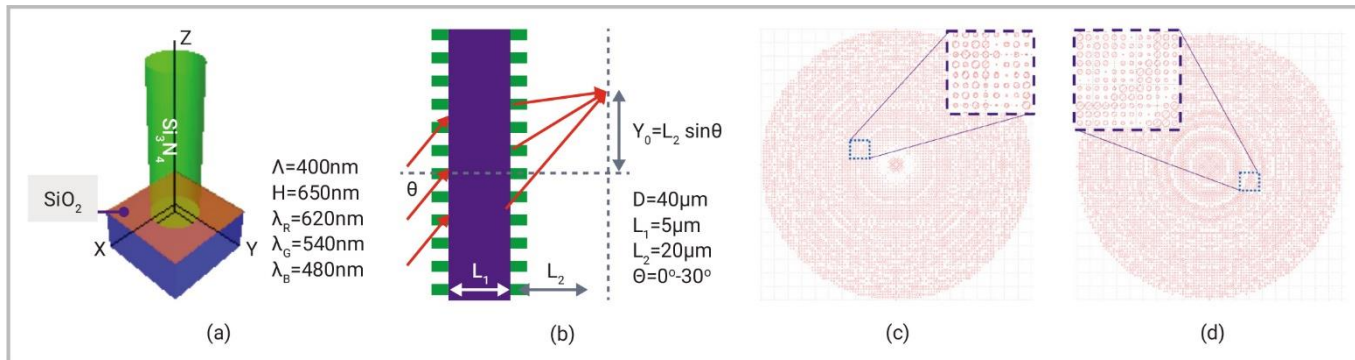


图 8: (a) 超原子与参数; (b) 透镜配置与参数; (c) 第一层优化超表面; (d) 第二层优化超表面

在总共 12 种情况 (3 种波长 \times 4 个入射角: 0° 、 10° 、 20° 和 30°) 下，MetaOptic Designer 在一台 6 核笔记本电脑上用了约 12 分钟，便实现了两层超表面的优化设计和布局，分别如图 8 (c) 和 (d) 所示。图 9 显示了入射角为 0° 和 30° 时的优化结果，在期望焦点位置附近放大后，可以清楚地看到，无论入射光是垂直的还是倾斜的，RGB 输入都聚焦到指定位置上。

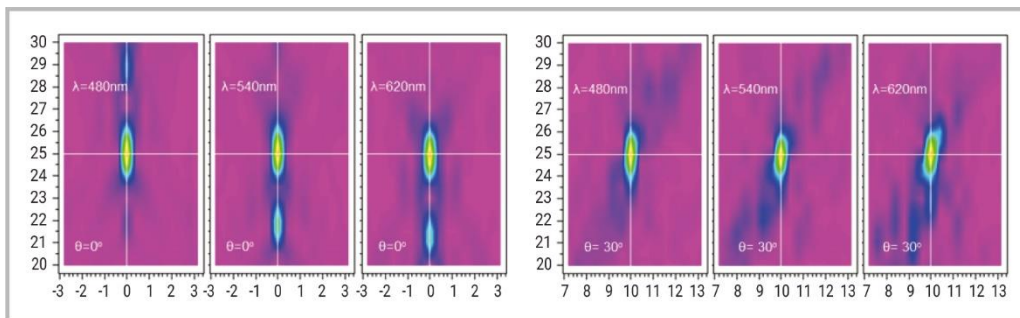


图 9: 入射角为 0° 和 30° 时的优化结果

为了验证 MetaOptic Designer 的多层级联超表面结果，我们针对上述六种情况对优化后的超透镜进行了 FDTD 仿真。仿真结果如图 10 所示，可以清楚地看到，FDTD 仿真结果与 MetaOptic Designer 的结果非常接近。这表明 MetaOptic Designer 可以针对多层超透镜生成可靠的结果。

目前给出的所有超透镜实例都非常小，以便可以进行 FDTD 验证，因为 FDTD 任务需要消耗大量的计算机资源。对于上述多层实例，在一台 16 核计算机上，仅一种情况的仿真就需要大约 500G 的内存和 33 小时的时间，因此在云端网络上运行时，上述六种情况加在一起可能需要两周左右的时间才能完成仿真。

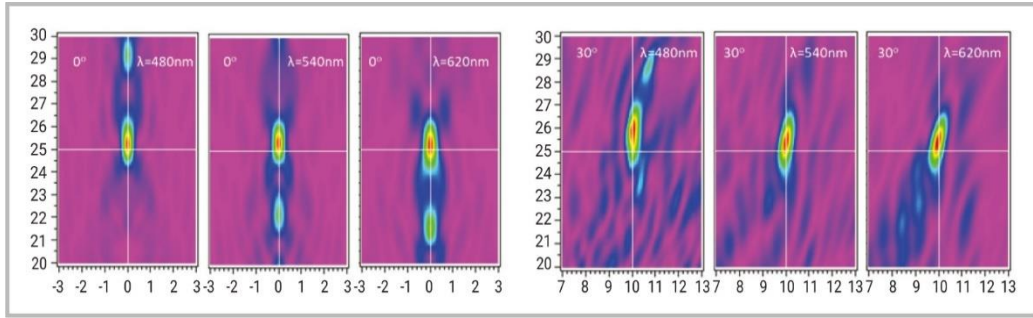


图 10: 入射角为 0° 和 30° 时对优化后超透镜进行 FDTD 仿真的结果

最近的研究表明，借助纳米鳍片宽度和长度这两个设计变量，单个超表面便可实现大视场和消色差性能^[12]。为了展示 MetaOptic Designer 处理多个设计变量的能力，我们使用参考文献^[12]超原子创建了一个超透镜，如图 11 (a) 所示。采用参考文献中相同的设计规格，得到的优化布局如图 11 (b) 所示。优化结果如图 11 (c) - (f) 所示。对于直径为 $240\mu\text{m}$ 的超透镜，2 种波长加上从 0° 到 40° 的 5 个入射角（间隔为 10° ）总共有 10 种设计情况，在一台 6 核笔记本电脑运行这样的仿真大约需要四个小时。

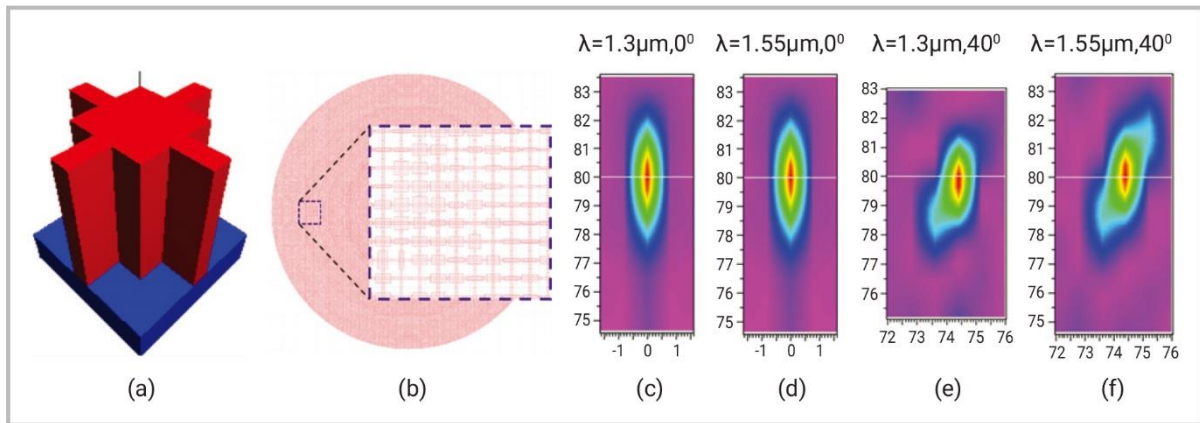


图 11: (a) 带有鳍片的超原子; (b) 优化布局; (c) - (f) 不同波长和入射角下放大的焦点

与所引用研究中观察到的情况类似，这样设计出的超透镜可将两种不同波长的光聚焦到同一点上，即便入射角不同，也能如此。这表明 MetaOptic Designer 也可用于基于多个变量来设计超透镜。

设计实例：偏振分束器

正如前面的例子所示，使用多个设计变量可以提供额外的自由度来实现所需的性能。通过改变纳米鳍片的宽度和长度，除了相位延迟外，超原子还能产生双折射效果。通过优化整个超表面上纳米鳍片的宽度和长度，超透镜可以分出两个正交偏振光，并将它们聚焦在不同的位置，如图 12 所示。箭头的大小和方向分别表示各自所在位置的场强度和偏振方向。

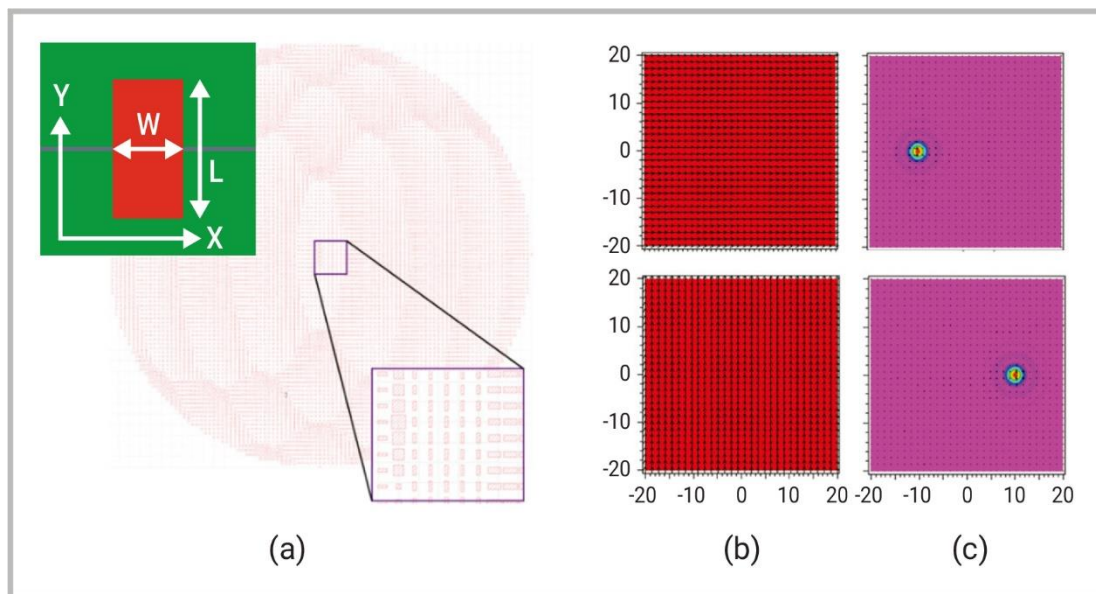


图 12: (a) 采用纳米鳍片型超原子的优化超透镜; (b) 不同偏振的输入; (c) 不同的焦点位置

设计实例：全息显示屏

超透镜可用作全息板来显示图像。要在 MetaOptic Designer 中设计全息板，开发者可以将默认的艾里函数改为指定的图像，如图 13 所示。

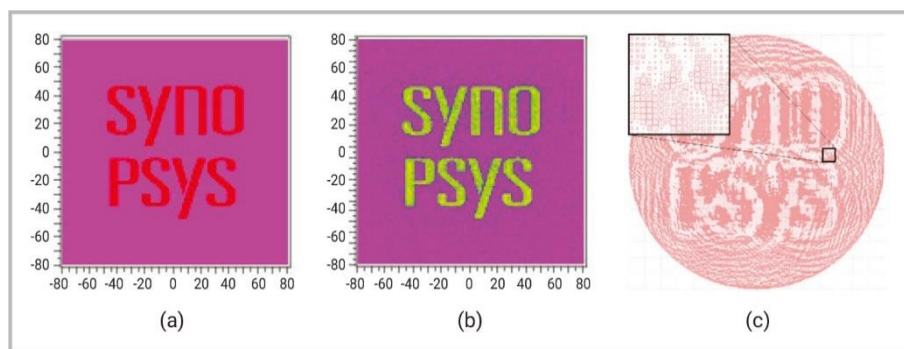


图 13: (a) 指定的图像; (b) 优化结果; (c) 优化布局

全息透镜与成像透镜不同，成像透镜可以具有径向对称性，全息透镜则可能并不具备，因为目标图像通常就没有对称性。

如前所述，纳米鳍片型超原子与偏振相关，两个线性偏振之间的相位差称为 PB 相位（Pancharatnam-Berry 相位）或几何相位。如果相位差保持为 180° ，右旋圆偏振（RCP）入射光可以变成左旋圆偏振（LCP），反之亦然。通过旋转每个超原子的鳍片在整个超表面上获得相应的几何相位分布，超透镜便能针对不同的圆偏振入射光显示不同的图像^[13]。

要为这类应用确定合适的几何相位分布，通常需要开发者具备丰富的设计知识并付出大量的心血。有了 MetaOptic Designer，这种复杂的设计工作变得更加容易，即便是普通人也可以轻松完成^[14]。如图 14 所示，通过优化整个超表面上每个纳米鳍片的旋转角度，开发者可以利用左、右旋圆偏振光来根据需要生成不同的图像。带箭头的圆圈表示偏振状态和方向。此外，还可以根据需要在不同的位置生成这些图像。

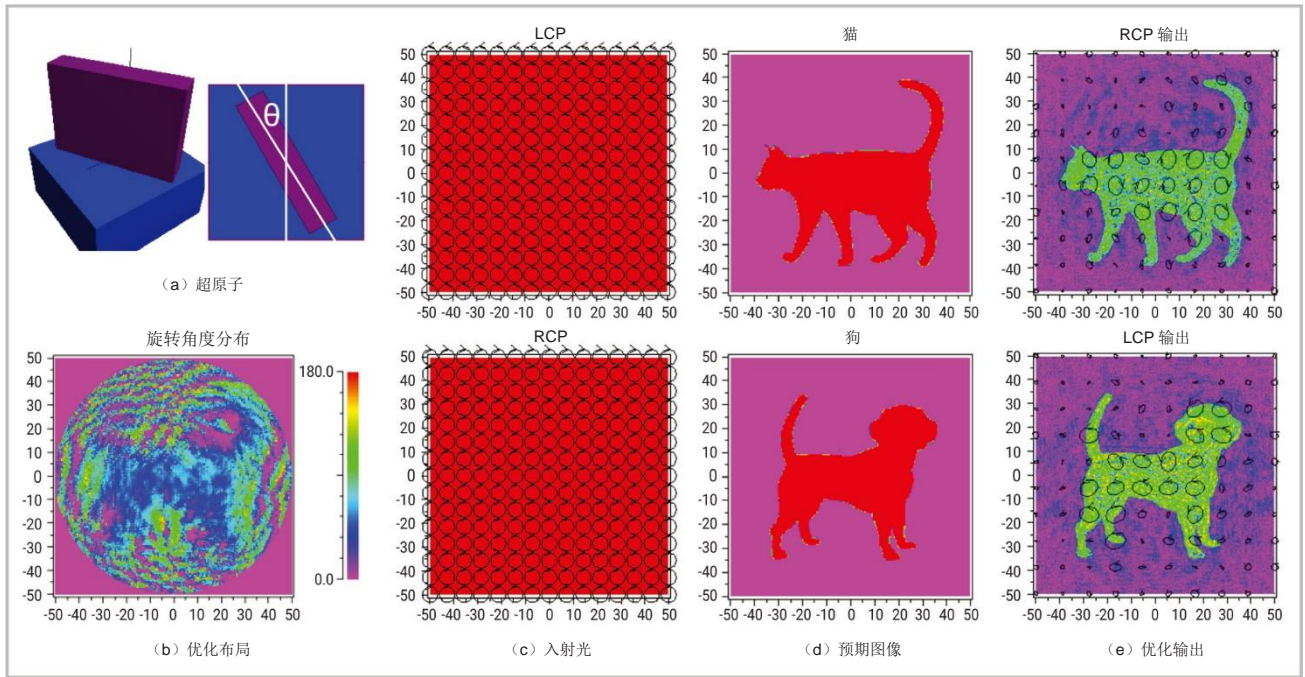


图 14: 手性全息板针对不同的圆偏振光显示不同的图像

设计实例：超透镜与折射镜相结合

目前，很难在光学系统中用超透镜完全取代折射镜。将这两者相结合不失为一个好办法，而且这个设计已经实现，比如在三星公布的手术摄像头镜头^[15]和 LG 公布的自动驾驶汽车摄像头镜头^[16]中。因此，开发者需要一个设计工具来处理同时包含超透镜和折射镜的混合光学系统。开发这样的混合工具非常具有挑战性，因为厚重的折射镜是通过基于几何光学的光线追迹来设计的，而纳米级超透镜是通过基于电磁光学的严格电磁求解器来建模的。

新思科技拥有领先的几何光学和波动光学设计工具，并开发了一项独特的专有技术，该技术可在这两个光学领域之间实现无缝对接，从而助力开发者设计出超透镜与折射镜相结合的光学系统。在 CODE V^[17]中设计的折射镜可以直接加载到 MetaOptic Designer 中，并且开发者可以在混合透镜系统中继续优化超透镜。

图 15 (a) 中的光线追迹结果表明，简单的球面透镜并不能在整个可见光谱上实现良好的聚焦。基于物理光学的 CODE V 光束合成传播 (BSP)^[18]也显示出了消散现象，如图 15 (b) 所示。我们将折射镜加载到 MetaOptic Designer 中并进行了评估，证实了像差的存在，如图 15 (c) 所示。然后，我们将一个称为超校正器的超表面添加到系统中，并使用 MetaOptic Designer 进行了优化。优化的结果显示，光线现在聚焦到了指定位置，如图 15 (d) 所示。

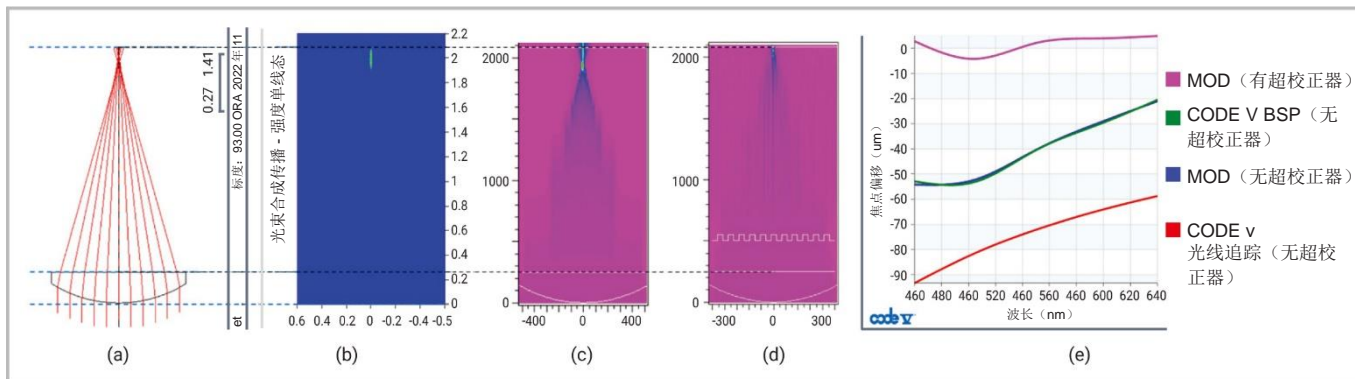


图 15: (a) 利用光线追迹在 CODE V 中设计的折射镜; (b) 折射镜的 CODE V BSP 仿真结果; (c) 折射镜的 MetaOptic Designer 仿真结果; (d) 折射镜与超透镜组合的 MetaOptic Designer 仿真结果; (e) 有无超校正器的仿真结果比较

图 15 (e) 显示了有无超校正器的结果比较。超校正器可以显著减少色度焦点偏移和球面像差。从焦平面周围场的放大图中也可以更直观地看到成像质量的提高, 如图 16 所示。

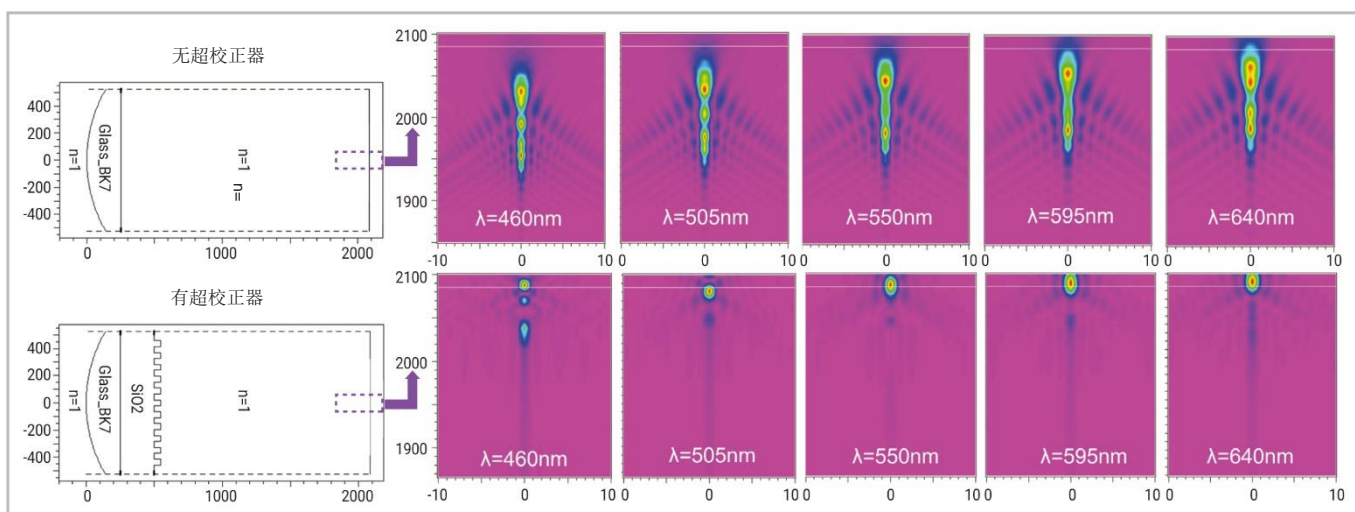


图 16: 有无超校正器的聚焦情况比较

MetaOptic Designer 对折射镜的处理效果已经通过 CODE V 光线追迹和 BSP 技术得到了验证。BSP 是一种基于小波束的物理光学算法, 其精度比光线追迹更高, 特别是对于具有衍射和相干效应的小镜头而言。这三种方法在焦距上都差不多, 而且 BSP 和 MetaOptic Designer 在焦点处强度剖面形状上也非常一致。

结语

MetaOptic Designer 是业界首个具有逆向设计功能的全自动超光学元件设计工具。开发者只需提供一些基本输入和期望的目标分布, MetaOptic Designer 就能生成一个优化设计。MetaOptic Designer 经过严格的 FDTD 验证, 是一款快速、准确的工具, 可以为制造过程生成可靠的 GDS 文件。凭借内置的智能功能, MetaOptic Designer 可以加快并简化超透镜的设计工作, 不仅能够提高生产力, 降低设计成本, 而且还可缩短产品上市时间。

参考文献

1. Chen, M. K., Wu, Y., Feng, L., Fan, Q., Lu, M., Xu, T., & Tsai, D. P. (2021). Principles, functions, and applications of optical meta-lens. *Advanced Optical Materials*, 9(4), 2001414.
2. Chen, Wei Ting, Alexander Y. Zhu, and Federico Capasso. "Flat optics with dispersion-engineered metasurfaces." *Nature Reviews Materials* 5.8 (2020): 604-620.
3. Novak, Matthew J., Bryan D. Stone, and Chenglin Xu. "Combined optimization, modeling and simulation techniques for non-traditional, next generation optics." *Computational Optics* 2021. Vol. 11875. SPIE, 2021.
4. Backer, Adam S. "Computational inverse design for cascaded systems of metasurface optics." *Optics Express* 27.21 (2019): 30308-30331.
5. Li, Z., Pestourie, R., Park, J. S., Huang, Y. W., Johnson, S. G., & Capasso, F. (2022). Inverse design enables large-scale high-performance meta-optics reshaping virtual reality. *Nature Communications*, 13(1), 1-11.
6. Bos, J., Scarmozzino, R., Bahl, M., Heller, E., Xu, C. A Design Automation and Simulation Flow for Lens Systems Containing Multiple Metasurfaces, META, July 2022, Torremolinos Spain.
7. Synopsys. (January 3, 2023). *FullWAVE Product Overview*. Synopsys, Inc. <https://www.synopsys.com/photonic-solutions/rsoft-photonic-device-tools/passive-device-fullwave.html>
8. Synopsys. (January 3, 2023). *DiffRACTMOD Product Overview*. Synopsys, Inc. <https://www.synopsys.com/photonic-solutions/rsoft-photonic-device-tools/passive-device-diffractmod.html>
9. Chen, Wei Ting, Alexander Y. Zhu, Jared Sisler, Yao-Wei Huang, Kerolos MA Yousef, Eric Lee, Cheng-Wei Qiu, and Federico Capasso. "Broadband achromatic metasurface-refractive optics." *Nano Letters* 18, no. 12 (2018): 7801-7808.
10. Liu, Yang, et al. "Silicon-based broadband metalens for wide-angle optical beam steering." *2021 IEEE 17th International Conference on Group IV Photonics (GFP)*. IEEE, 2021.
11. Kim, C., Kim, S. J., and Lee, B. (2020), "Doublet metalens design for high numerical aperture and simultaneous correction of chromatic and monochromatic aberrations," *Optics Express*, 28(12), 18059-18076.
12. Liu, Y., Zhang, J., Le Roux, X., Cassan, E., Marris-Morini, D., Vivien, L., ... & Melati, D. (2022). Broadband behavior of quadratic metalenses with a wide field of view. *Optics Express*, 30(22), 39860-39867.
13. Mueller, J. B., Rubin, N. A., Devlin, R. C., Groever, B., & Capasso, F. (2017). Metasurface polarization optics: independent phase control of arbitrary orthogonal states of polarization. *Physical Review Letters*, 118(11), 113901.
14. Achuthan, N., Bahl, M., Scarmozzino, R., Heller, E., Bos, J., & Xu, C. (2022, October). Automated Design of Optical Systems with Metalenses. In *Frontiers in Optics* (pp. JW5A-51). Optica Publishing Group.
15. Villas-Boas, A. (August 12, 2019). *Samsung just unveiled the first smartphone camera that goes beyond 100 megapixels*. Business Insider. <https://www.businessinsider.com/samsung-xiaomi-annonce-first-smartphone-camera-with-over-100-megapixels-2019-8?op=1>
16. Zlatev, D. (July 6, 2022). *LG developing ultrathin camera metalens for compact and frugal electric vehicle self-driving kits*. NotebookCheck. <https://www.notebookcheck.net/LG-developing-ultrathin-camera-metalens-for-compact-and-frugal-electric-vehicle-self-driving-kits.633472.0.html>
17. Synopsys. (January 3, 2023). *CODE V Optical Design Software*. Synopsys, Inc. <https://www.synopsys.com/optical-solutions/codev.html>
18. Synopsys. (January 3, 2023). *CODE V Feature: Beam Synthesis Propagation*. Synopsys, Inc. <https://www.synopsys.com/optical-solutions/codev/feature-closeup.html>