白皮书

MetaOptic Designer 超构透镜设计自动化

逆向设计工具助力实现出色性能

KEYSIGHT

关注是德科技公众号

引言

超构透镜又薄又平，可以取代厚重的曲面透镜，有望彻底改变光学产品。超构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，是德科技推出了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构透镜/超表面，从而实现出色的系统性能。

为什么超构透镜设计独具挑战性？

一个超构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/或大小取决于超构透镜的整体性能。设计这样一个超构透镜，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，超构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]展示了超构透镜的手动设计流程。

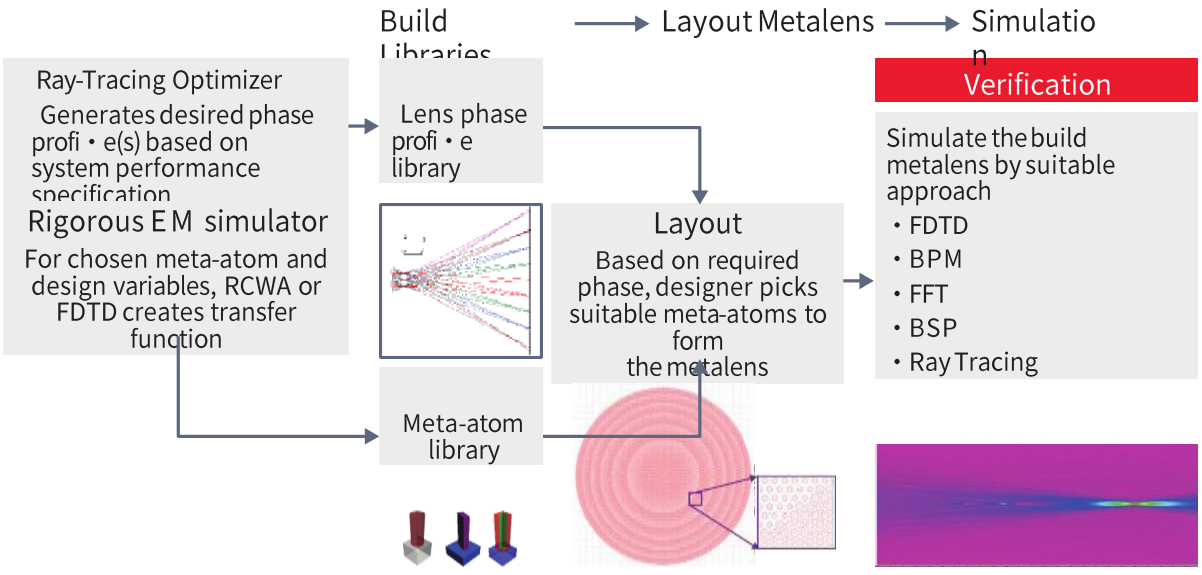


图1：超构透镜手动设计流程

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构透镜，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: 攻克超构透镜设计挑战

为了解决超构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]和大型超构透镜[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构透镜设计自动化，让各种专业水平的开发者都能快速轻松地设计超构透镜系统。

为了满足这一需求，是德科技开发了MetaOptic Designer——首个具有逆向设计功能的全自动超构透镜商业设计工具[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是德科技产品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构透镜系统，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：聚焦光斑还是期望显示图像

MetaOptic Designer的输出包括聚焦效率和优化的超构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还可以在超构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，也可以从是德科技成像设计工具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：消色差超构透镜

为成像系统设计消色差超构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。

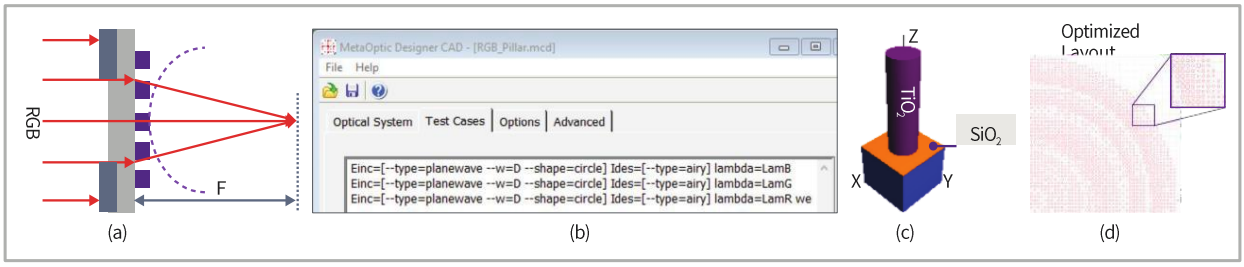


图3：（a）消色差透镜示意图；（b）指定的设计目标；（c）所用超原子示意图；（d）优化的超透镜布局

图4（a）显示了沿光轴优化的超构透镜仿真结果。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，这种超构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20μm，如果是透镜尺寸更大，聚焦效果应该会有所改善。

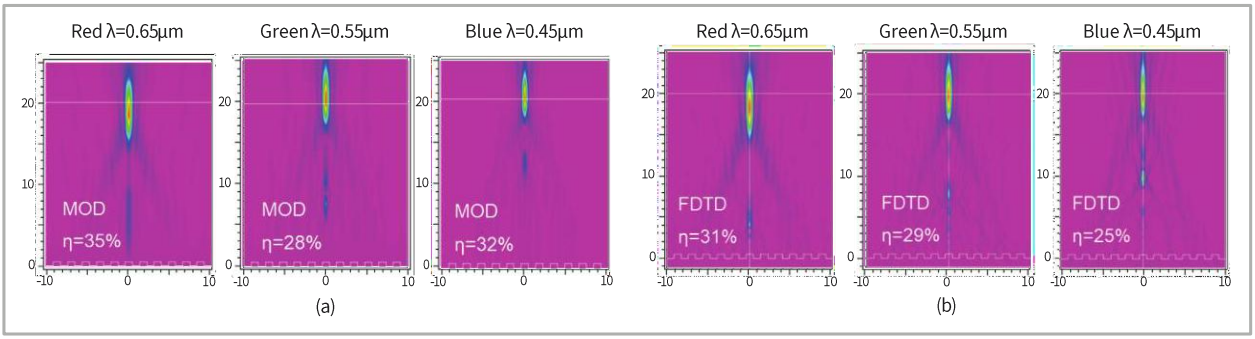


图4：（a）MetaOptic Designer的优化结果；（b）FDTD仿真的验证结果

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：大视场超构透镜

大视场超构透镜是另一个富有挑战性的超构透镜设计应用[10]。开发者需要具备大量的设计专业知识，才能确保超构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。

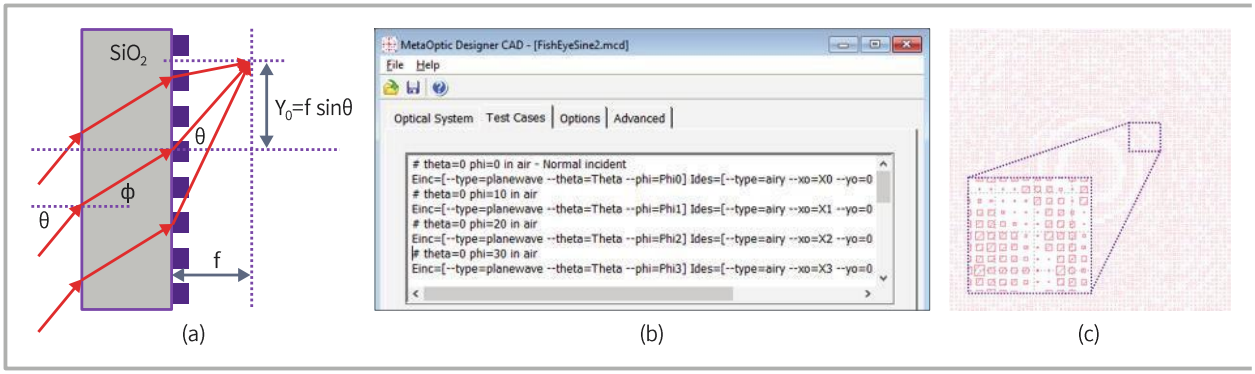


图5：（a）大视场透镜示意图；（b）指定的设计目标；（c）优化的超透镜布局

如图6所示，MetaOptic Designer的优化结果清楚地表明，超构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10o。这里只显示了0o、40o和80o的结果。

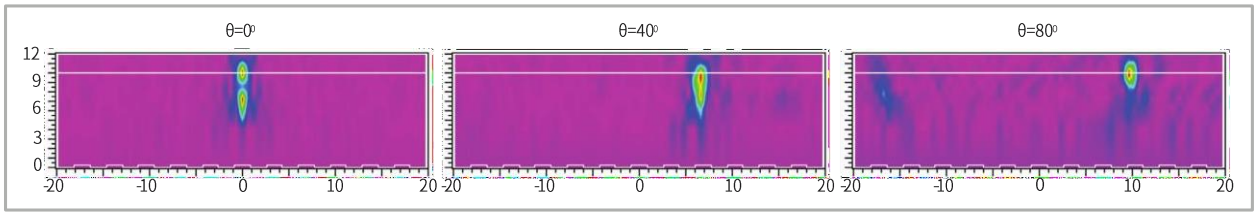


图6：MetaOptic Designer的优化结果

我们用了一个40µm x 40µm的小型超构透镜来通过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构透镜进行了仿真，结果如图7所示，与图6中MetaOptic Designer的结果非常接近。

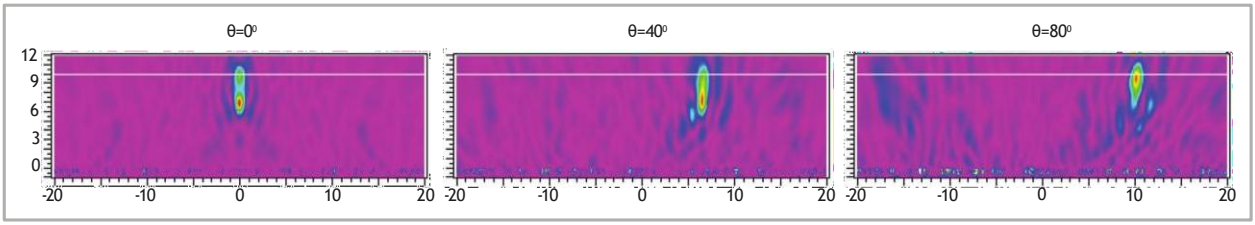


图7：FDTD仿真的验证结果

对于成像镜头来说，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构透镜中同时实现这两个特性。但是，使用两个超表面的超构透镜，可以同时实现大视场和消色差[11]特性。

多层超构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40µm的小型超构透镜，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Si3N4超原子组成，超原子分布在厚度为5µm的SiO2基板两面上。

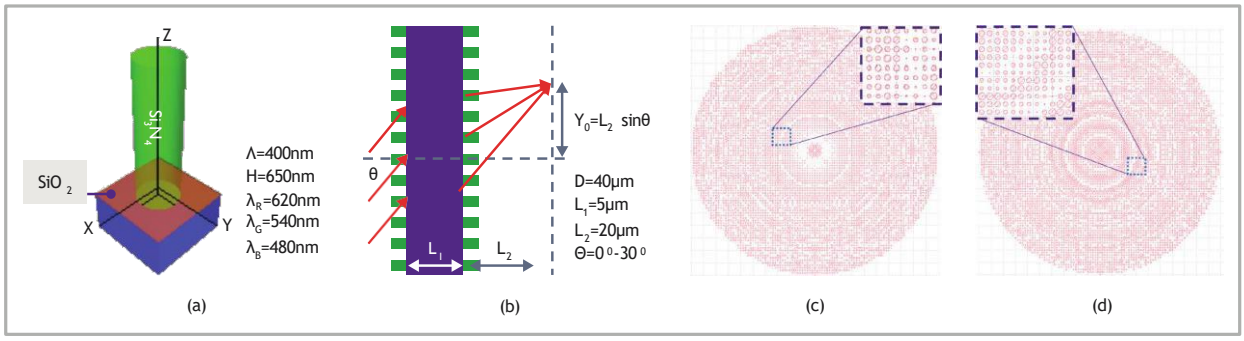


图8：（a）超原子与参数；（b）透镜配置与参数；（c）第一层优化超表面；（d）第二层优化超表面

在总共12种情况（3种波长 X 4个入射角：0o、10o、20o和30o）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0o和30o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。

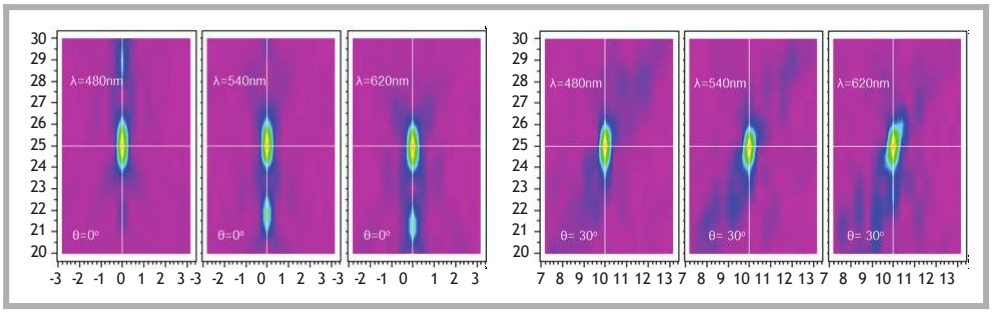


图9：入射角为0o和30o时的优化结果

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构透镜进行了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可以针对多层超构透镜生成可靠的结果。

目前给出的所有超构透镜实例都非常小，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

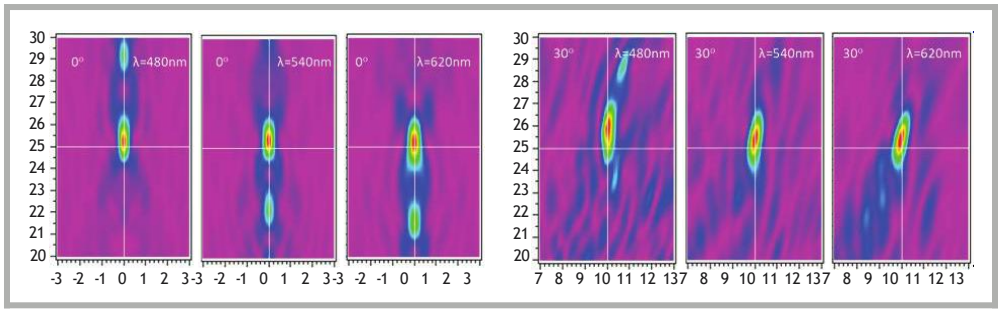


图10：入射角为0o和30o时对优化后超透镜进行FDTD仿真的结果

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构透镜，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240μm的超构透镜，2种波长加上从0o到40o的5个入射角（间隔为10o）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。

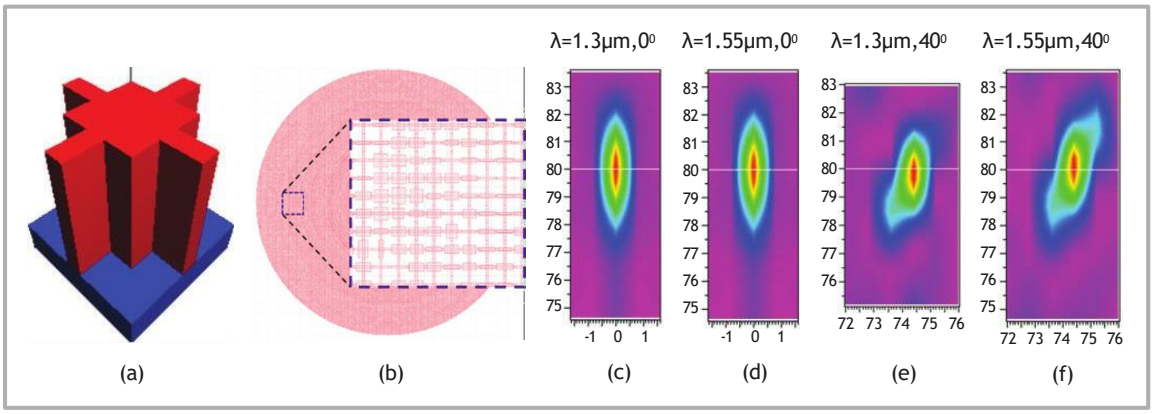


图11：（a）带有鳍片的超原子；（b）优化布局；（c）-（f）不同波长和入射角下放大的焦点

与所引用研究中观察到的情况类似，这样设计出的超构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构透镜。

设计实例：偏振分束器

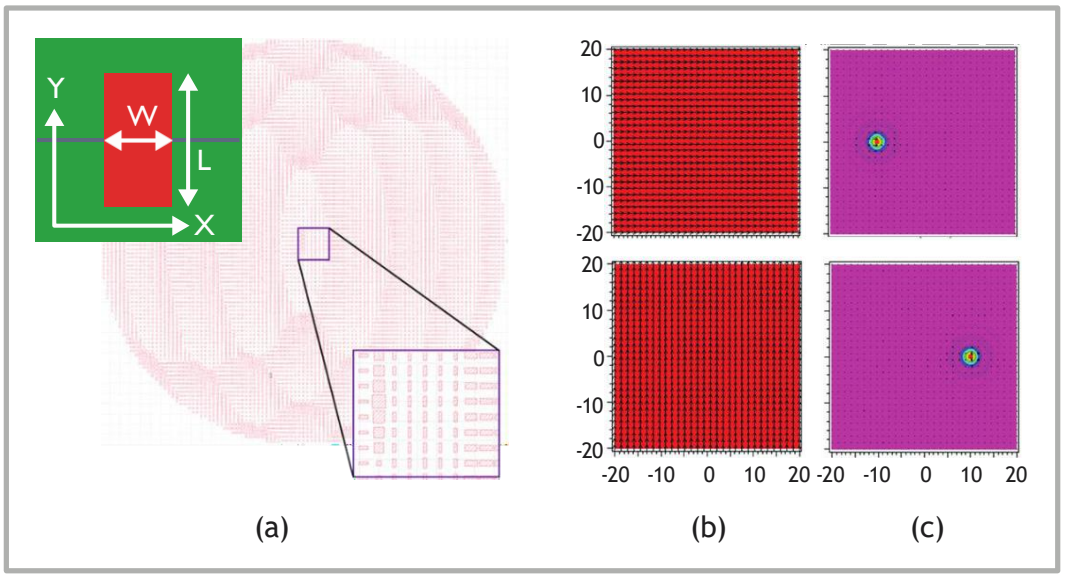


图12：（a）采用纳米鳍片型超原子的优化超透镜；（b）不同偏振的输入；（c）不同的焦点位置

设计实例：全息显示屏

超构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。

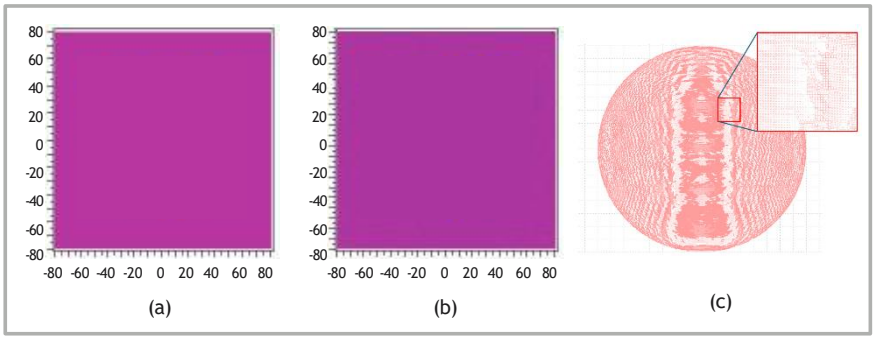


图13：（a）指定的图像；（b）优化结果；（c）优化布局

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180o，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，超构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。

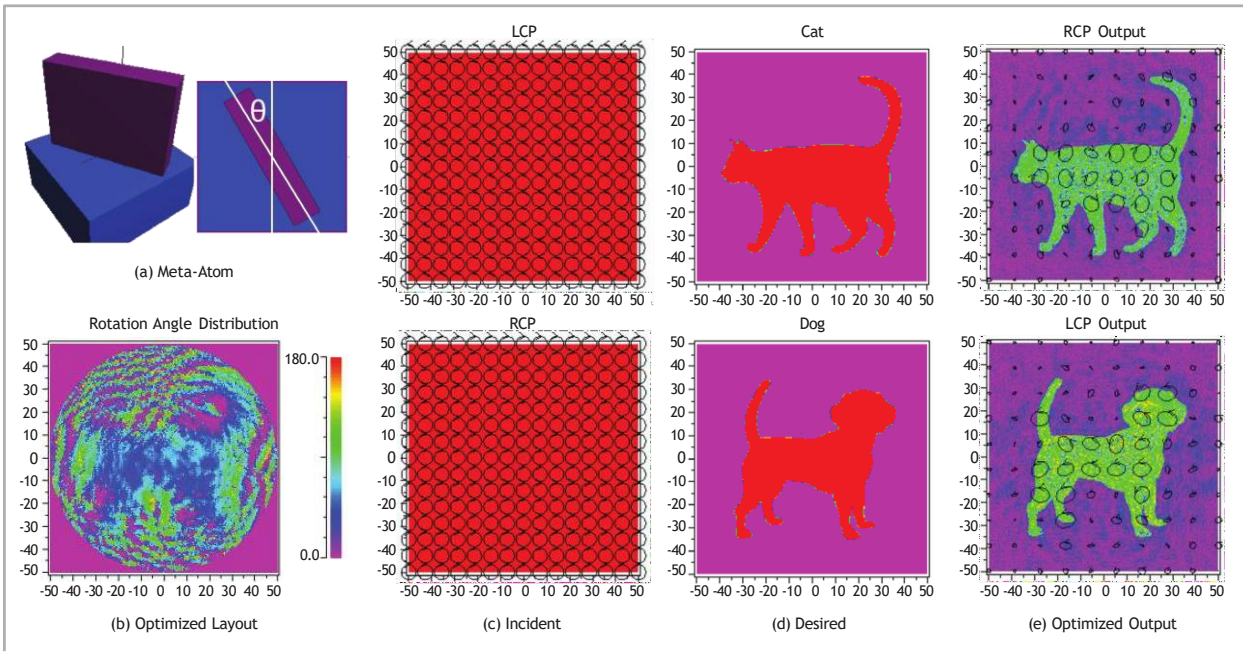


图14：手性全息板针对不同的圆偏振光显示不同的图像

设计实例：超构透镜与折射镜相结合

目前，很难在光学系统中用超构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机摄像头镜头[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构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，而纳米级超构透镜是通过基于电磁光学的严格电磁求解器来建模的。

是德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构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构透镜。

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。

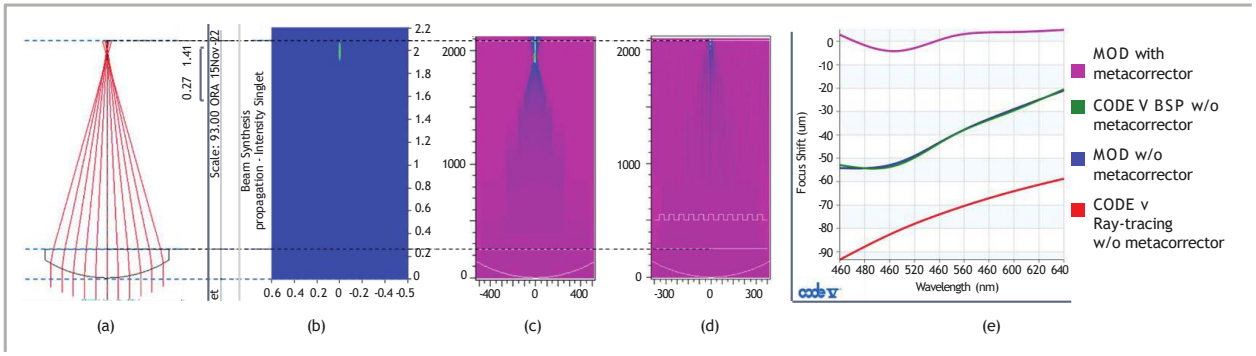


图15：（a）利用光线追迹在CODE V中设计的折射镜；（b）折射镜的CODE V BSP仿真结果；（c）折射镜的MetaOptic Designer仿真结果；（d）折射镜与超构透镜组合的MetaOptic Designer仿真结果；（e）有无超校正器的仿真结果比较

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。

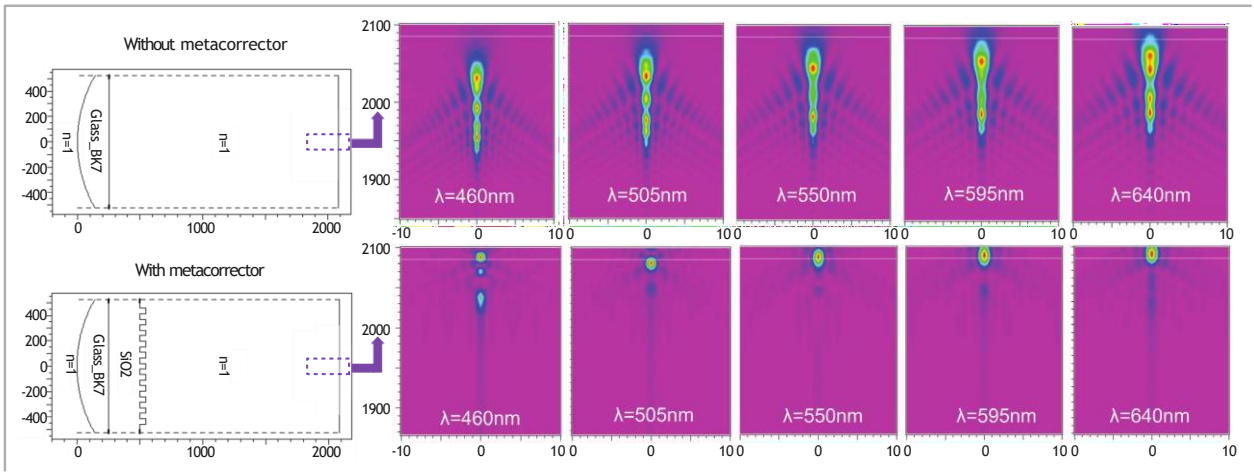


图16：有无超校正器的聚焦情况比较

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，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可以加快并简化超构透镜的设计工作，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。

如有任何疑问，请发送邮件至：des-china.mkt@keysight.com

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

关注是德科技公众号

产品咨询：des-china.mkt@keysight.com

是推动创新者突破工程边界的重要力量，通过快速解决设计、仿真和测试难题，创造卓越的产品体验。立即访问 www.keysight.com.cn 开启您的创新之旅。本信息如有变更，恕不另行通知。© 是德科技公司 出版日期 2025年10月20日，3125-1233.CHCN