

How to Design and Simulate Metalenses Quickly and Easily

MetaOptic Designer: A Fully Automated Tool with Inverse Design Capability

September 2022



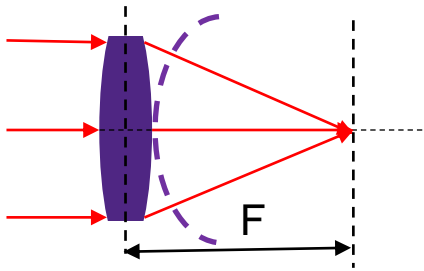
Outline

- Benefits of Metalenses
- Design Approaches
- MetaOptic Designer Overview
- Examples
 1. RGB Achromatic Metalens
 2. Fisheye Metalens
 3. Large FOV and Achromatic Metalens
 4. Logo Display
 5. Polarization Conversion
- Tips and Tricks
- Summary

Benefits of Metalenses

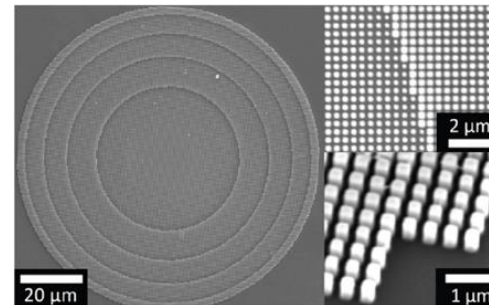
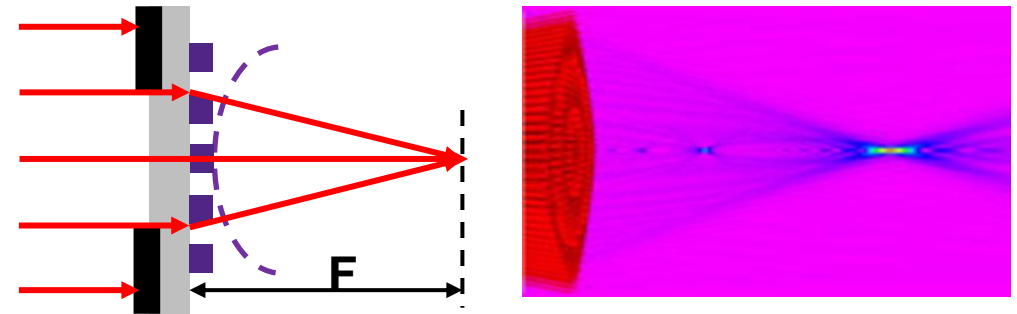
• Classic Optical Lens

- 빛을 꺾는 위상 프로파일을 생성하는 곡면 유리 표면
- 다양한 수차를 보정하려면 일반적으로 여러 개의 렌즈가 필요
- 부피가 큰 렌즈 스택은 많은 공간을 차지하므로 휴대폰 카메라 및 AR/VR 시스템과 같은 일부 응용분야에서는 제한



• Metalens

- 파장 이하의 나노 원자는 빛의 위상을 지연
- 적절한 설계의 나노 원자 배열은 기존 렌즈와 동일한 위상 프로파일을 생성 가능
- 얇고 평평한 표면으로 공간 절약
- 리소그래피 기술로 패턴 레이아웃을 대량 생산 가능



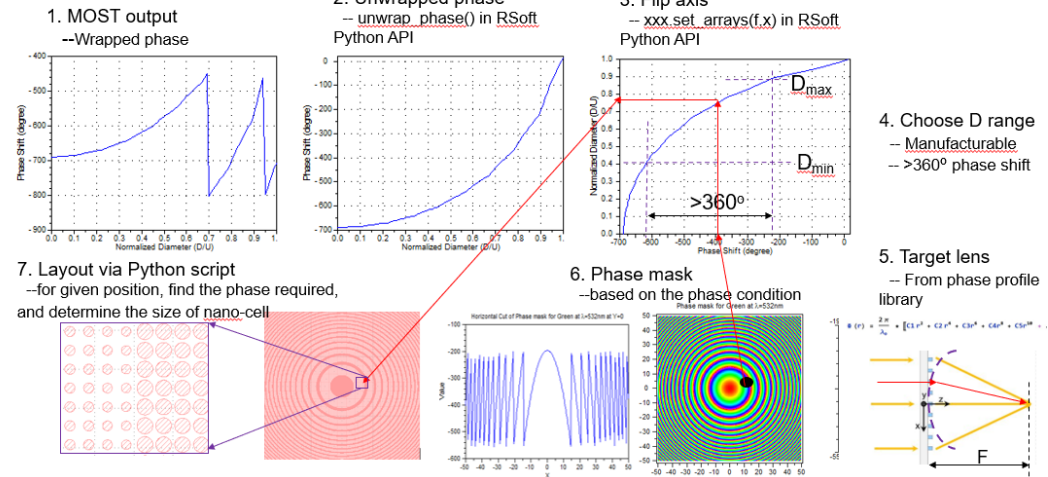
Ref: Aiello, Maxwell D., et al.
"Achromatic varifocal
metalens for the visible
spectrum." ACS
Photonics 6.10 (2019): 2432-
2440.

Existing Metalens Design Approaches

- 기존 수동 설계 접근 방식

- 깊은 물리학 배경과 많은 설계 경험 필요

Design Procedure

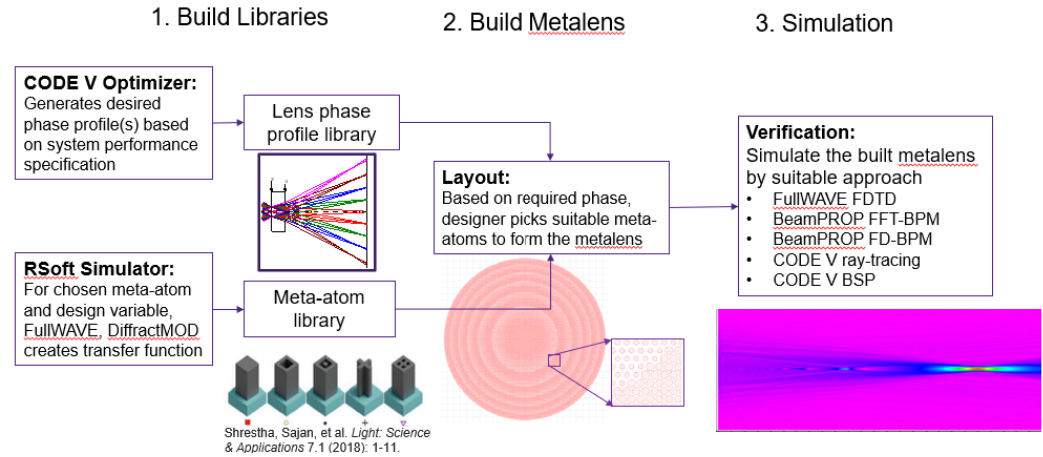


C. Xu, M. Novak, D. Herrmann, L-C. Hu, E. Heller, and M. Bahl, "Effective Approach for Design and Simulation of Metalens Structures", META'2019
 Chen, W. T., Zhu, A. Y., & Capasso, F. (2020). Flat optics with dispersion-engineered metasurfaces. *Nature Reviews Materials*, 5(8), 604-620.

- Semi-automatic multi-domain 접근 방식

- metalens를 배치하기 위해 많은 수작업 필요

Synopsys general design flow



M. Novak, B. Stone, and C. Xu "Combined optimization, modeling and simulation techniques for non-traditional, next generation optics," Proc. SPIE 11875, Computational Optics 2021

A New Metalens Design Approach

MetaOptic Designer



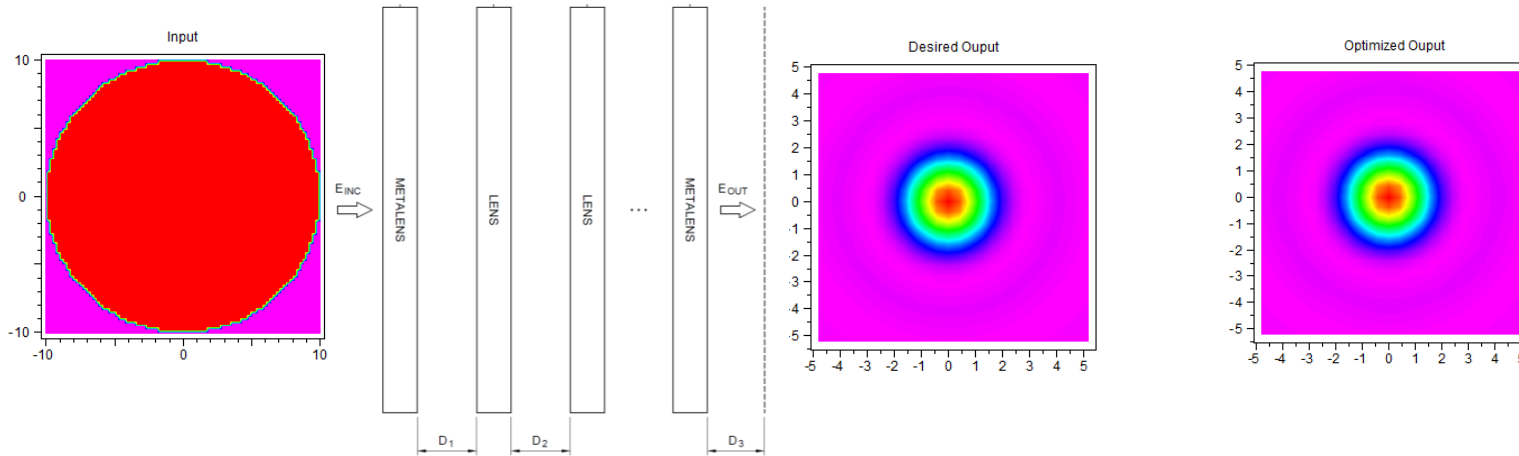
Fully automated tool with inverse design capability

전문성 수준에 관계 없이 모든 설계자는
새로운 metalens를 빠르고 쉽게 생성 가능

설계 시간 단축 및 비용 절감

MetaOptic Designer Overview

MetaOptic Designer는 metalens/metasurface layout (시뮬레이션을 위한 RSoft CAD 파일, 제조를 위한 GDS 파일) 을 자동으로 생성



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.**

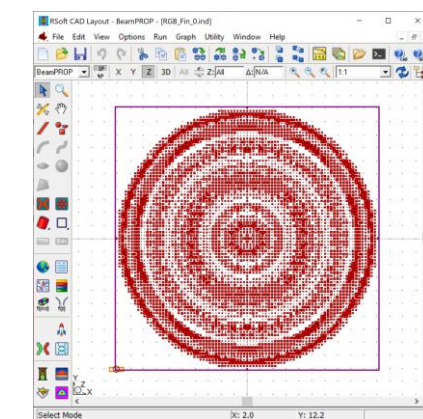
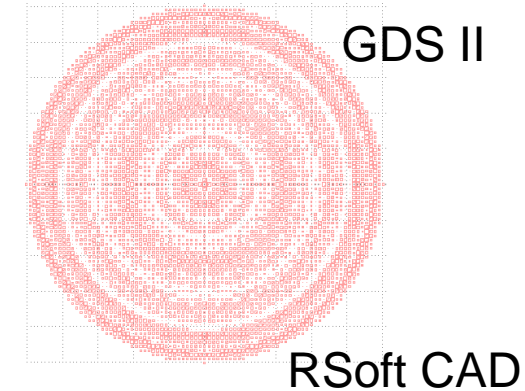
Features:

- 역설계
- 정확성 - FDTD에 의해 검증됨
- 효율성

Benefits:

- 사용자에게 필요한 지식 및 전문성 감소
- 설계 시간 및 비용 절감
- 부피가 큰 곡면 렌즈를 평평한 표면으로 교체하여 공간 절약

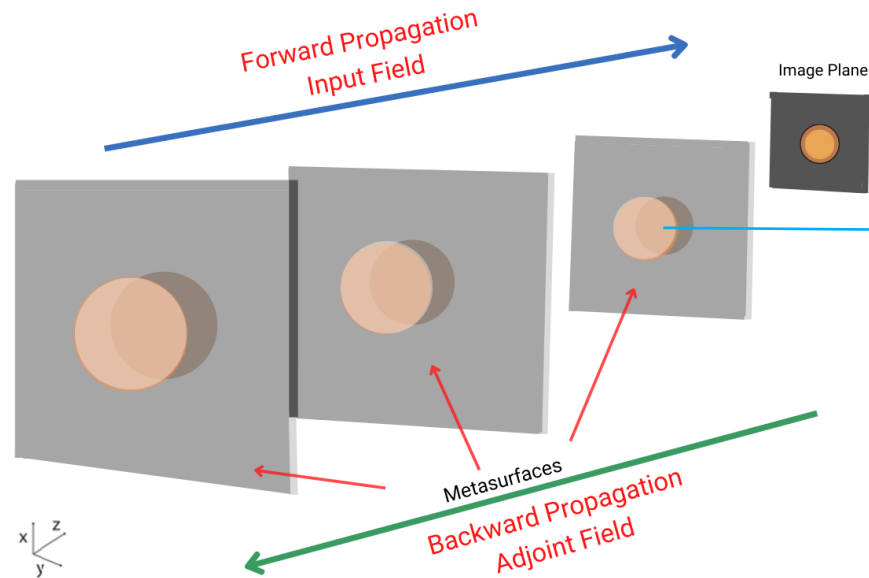
Optimized results



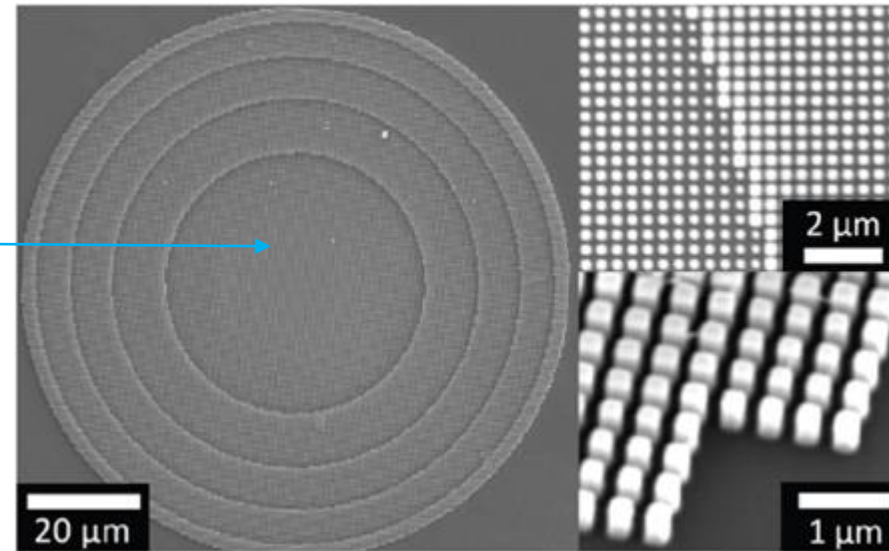
MetaOptic Designer Overview

Optimization Algorithm

Optical system containing metalenses



Single metalens



양면에 metasurface가 있는 유리 기판들이 계단식으로 배열되어 광학 시스템을 형성.

이 시스템에는 기존의 얇은 렌즈도 포함될 수 있음

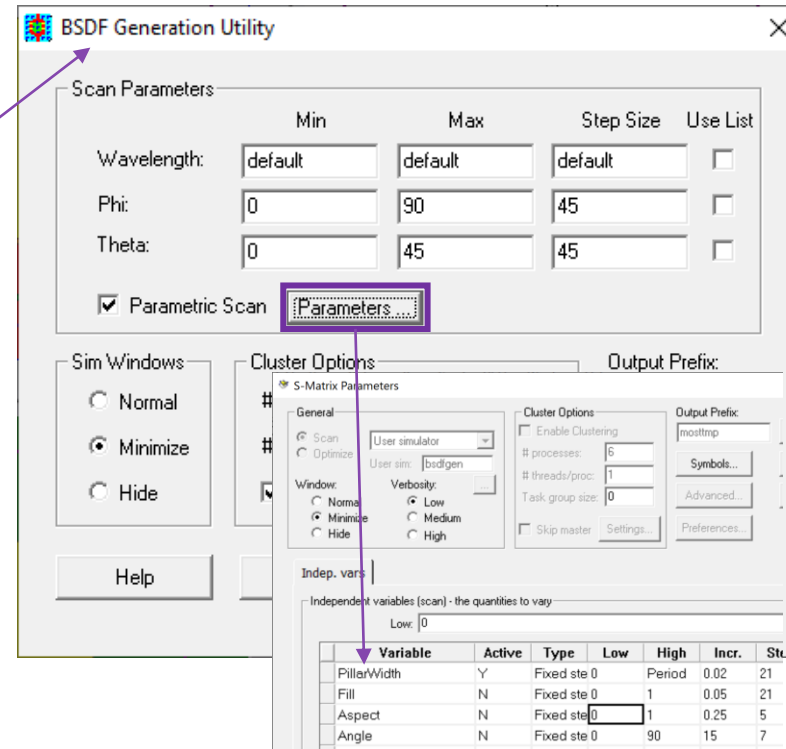
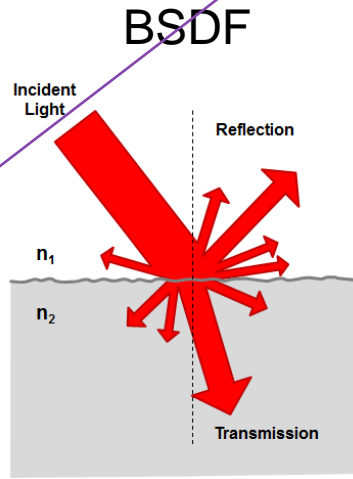
역설계를 통해 특정 초점 요구 사항을 만족하도록 최적화할 수 있는 파장 이하의 패턴 기판

Ref: Aiello, Maxwell D., et al. "Achromatic varifocal metalens for the visible spectrum." *ACS Photonics* 6.10 (2019): 2432-2440.

MetaOptic Designer Overview

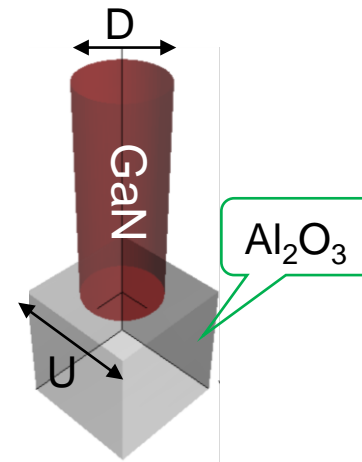
Metasurface Characterization

metasurface에 대한 투과는 RCWA 또는 FDTD로 생성된 BSDF (Bidirectional Scattering Distribution Function) 를 통해 정밀하게 특성화 가능. 시뮬레이션은 **BSDF Generation Utility**를 통해 수행

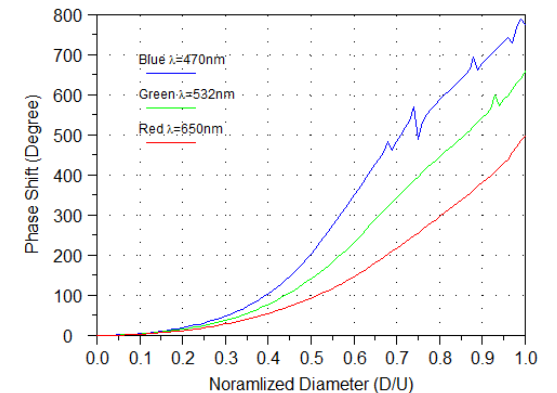


BSDF가 단일 주기에 대한 형상을 정의하는 데 필요한 매개변수 공간에 대해 매개변수적이라면, 이러한 매개변수는 metasurface 전체에서 최적화되어 원하는 초점 성능을 달성 가능

Geometry (1 Period)



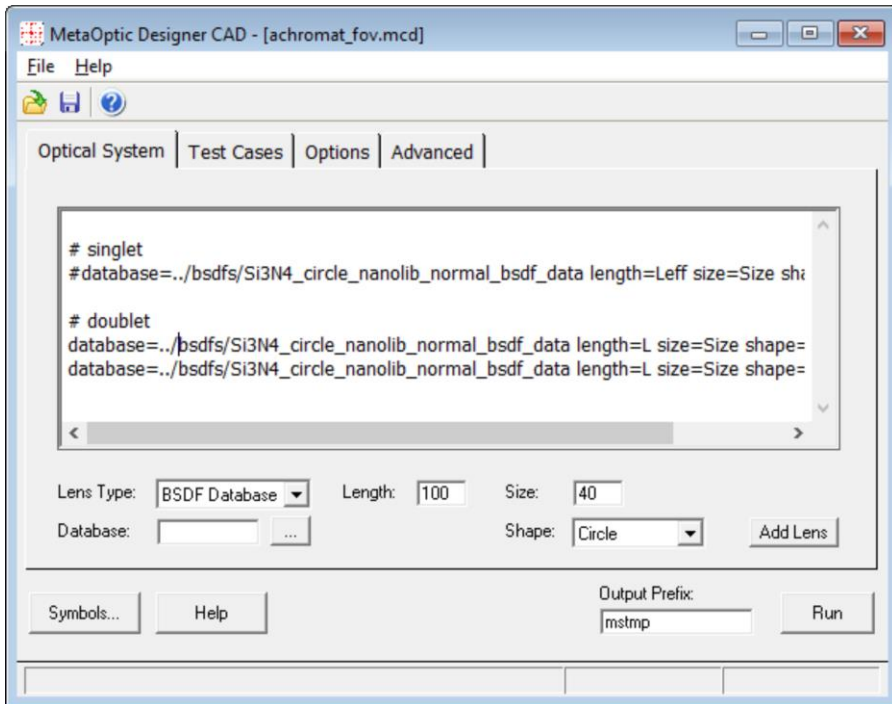
Phase (vs Width)



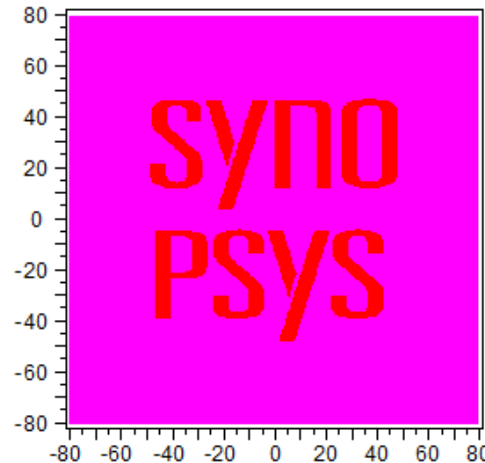
MetaOptic Designer Overview

Inputs and Outputs

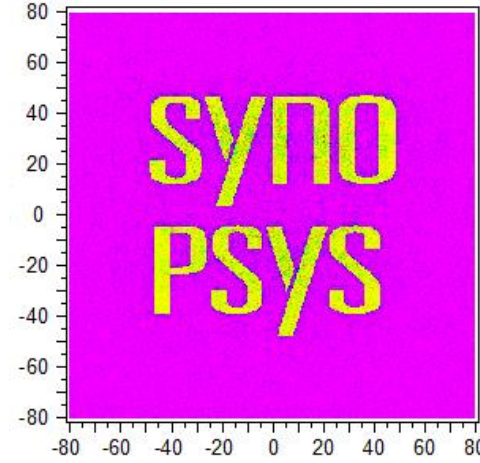
- 사용자는 광학 시스템의 렌즈 세트와 각 렌즈에 대한 BSDF 데이터베이스를 지정
- 사용자가 원하는 타겟 패턴과 초점 거리를 지정
- MetaOptic Designer 는 각 metasurface의 설계 매개변수를 결정하고 GDS 및 최적화 결과 생성



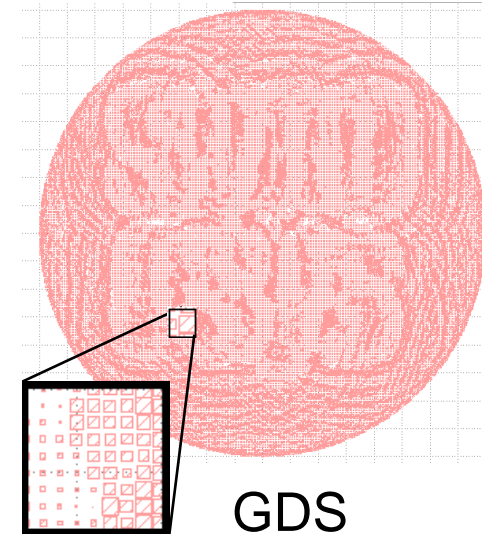
Target Pattern



Optimized Pattern



Optimized Layout

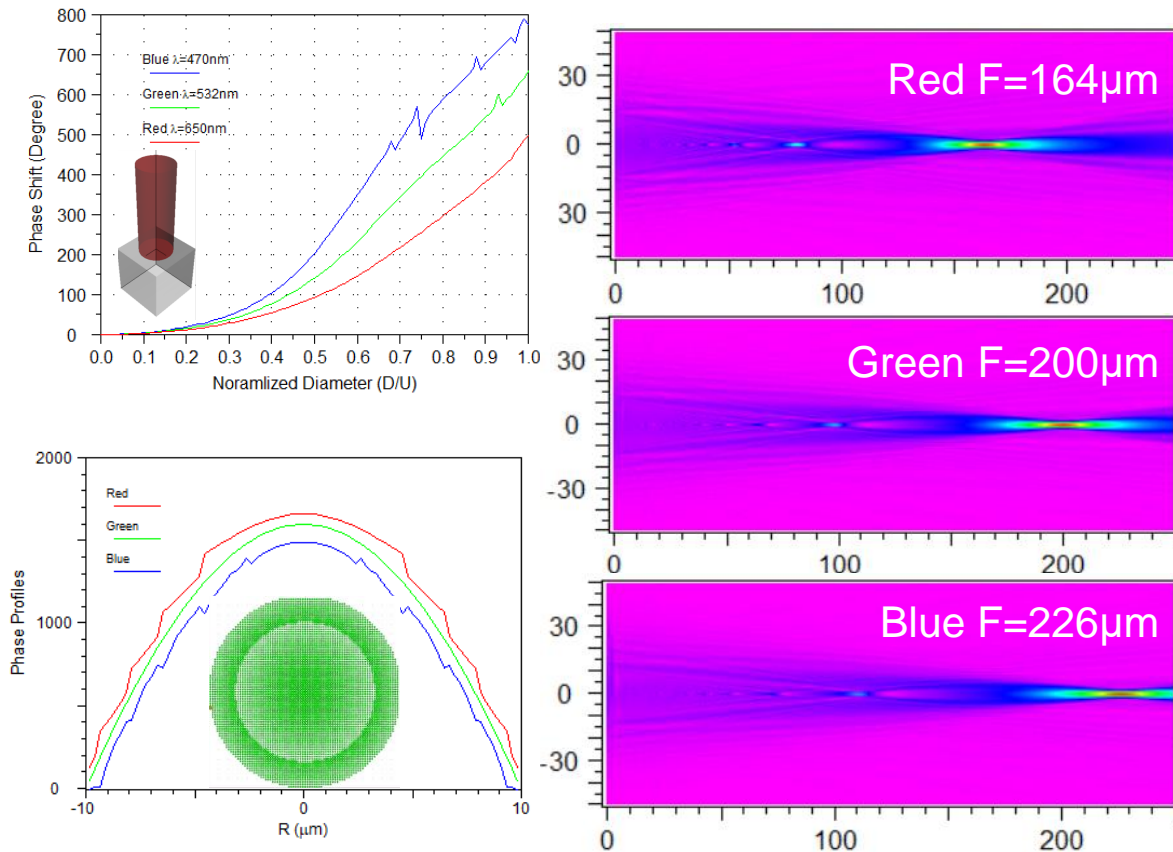


GDS

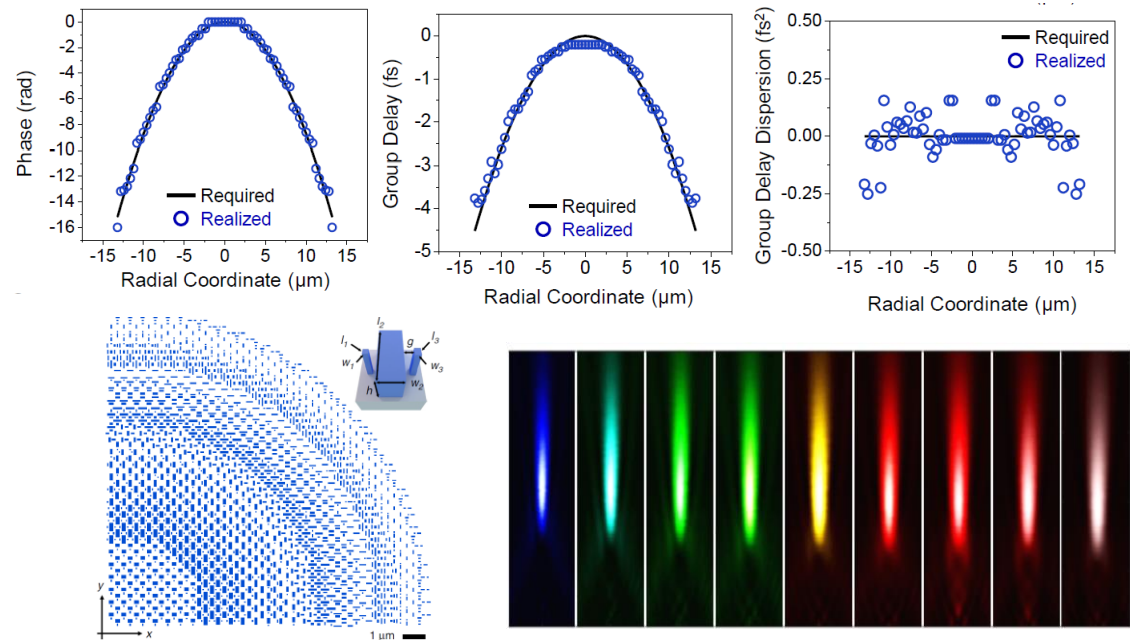
Design Example 1: Achromatic Metalens

Problem description

- meta-atom의 위상 지연은 빛을 분산
- meta-atom으로 구성된 metalens도 빛을 분산



- 무색수차 metalens는 적절하게 설계된 위상 및 분산 프로파일이 모두 필요
- 깊은 지식과 전문성 필요

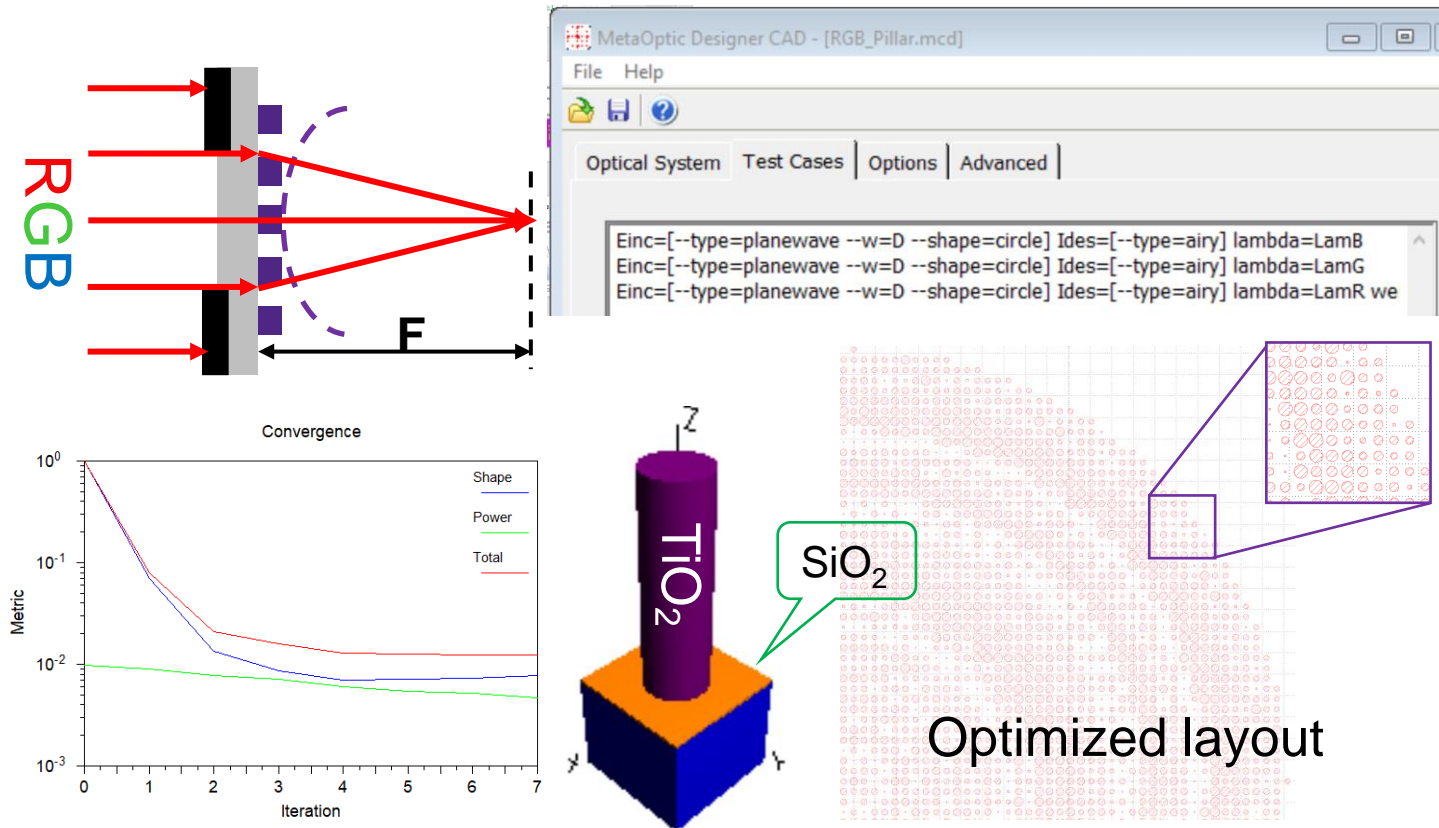


Chen, W. T., Zhu, A. Y., Sisler, J., Bharwani, Z., & Capasso, F. (2019). A broadband achromatic polarization-insensitive metalens consisting of anisotropic nanostructures. *Nature communications*, 10(1), 1-7.

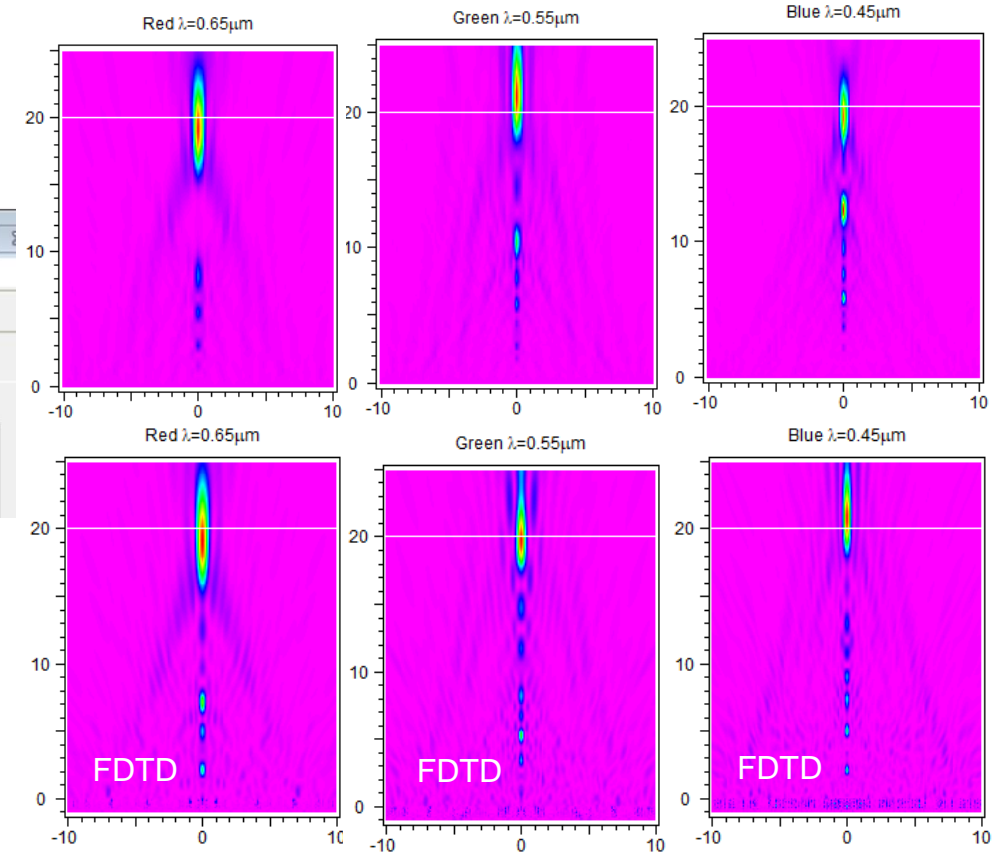
Design Example 1: Achromatic Metalens

Automated inverse design

- 사용자의 최소한의 입력으로 MetaOptic Designer 는 몇 초만에 최적화 설계를 생성



Simulation Results



MetaOptic Designer는 정밀한 FDTD와 유사한 결과를 제공

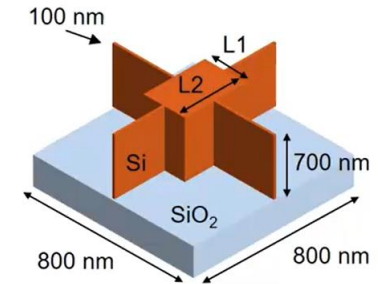
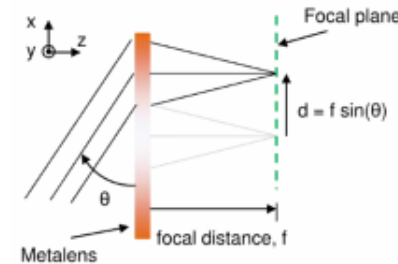
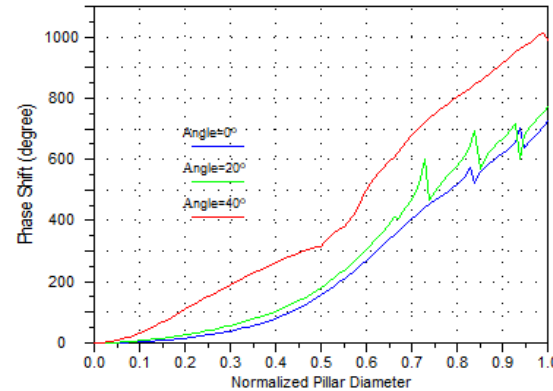
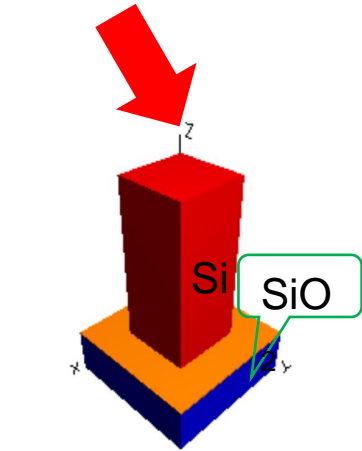
- 각 FDTD 시뮬레이션은 약 4시간 소요 (~100G RAM, 16-core computer)

Design Example 2: Fisheye Metalens

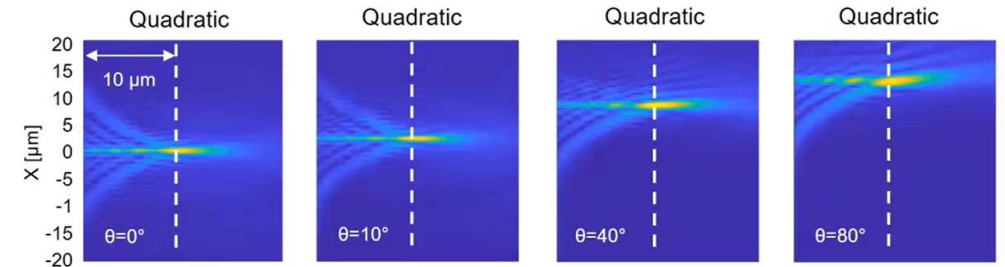
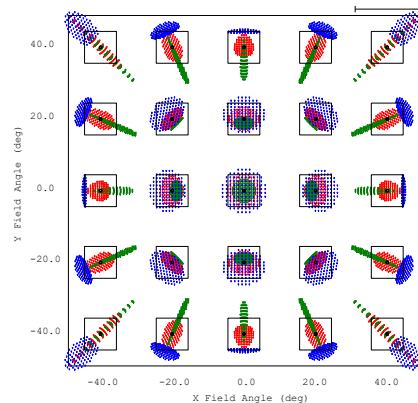
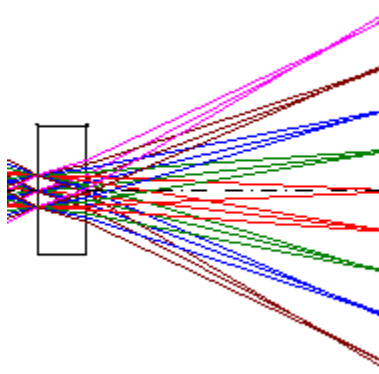
Problem description

- meta-atom의 위상 지연은 각도에 따라 다름
- metalens는 수차를 동반

- 수차가 없는 metalens는 특별한 위상 프로파일과 엄선된 meta-atom가 필요
- 많은 지식 및 경험 필요



$$\varphi(r) = -\frac{k_0}{2f} n \left[(x + f \sin(\theta))^2 + y^2 \right] + \varphi_0$$

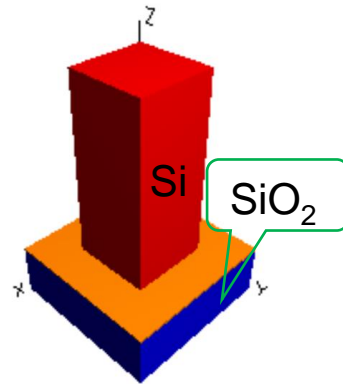
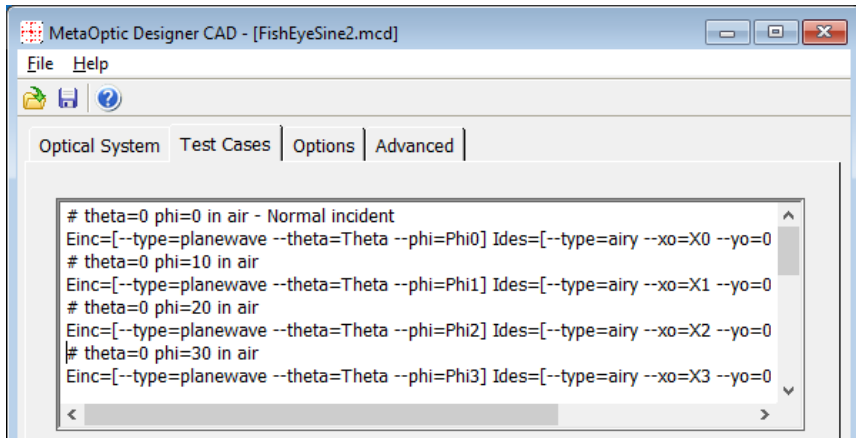


Liu, Yang, et al. "Silicon-based broadband metalens for wide-angle optical beam steering." *2021 IEEE 17th International Conference on Group IV Photonics (GFP)*. IEEE, 2021.

Design Example 2: Fisheye Metalens

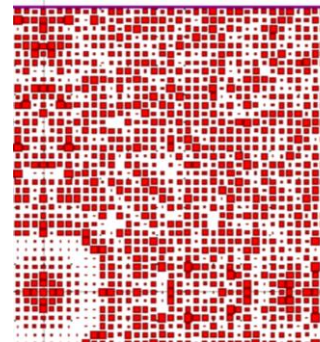
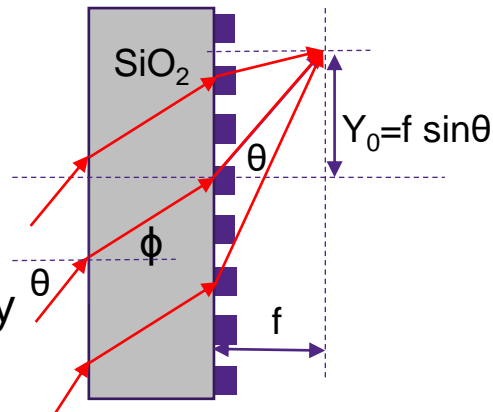
Automated inverse design

- 9 case (0° - 80° @ 10°)의 경우, MetaOptic Designer는 노트북에서 1분 만에 최적의 디자인을 제공

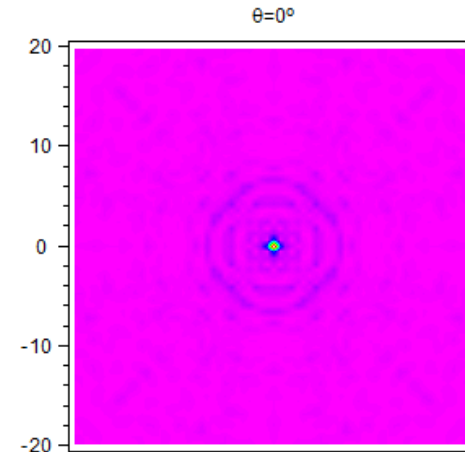


Lens configuration

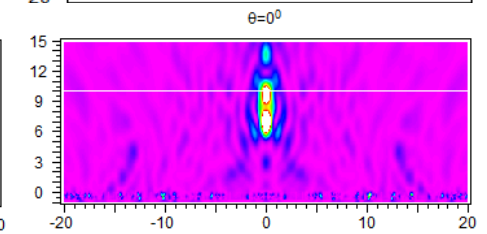
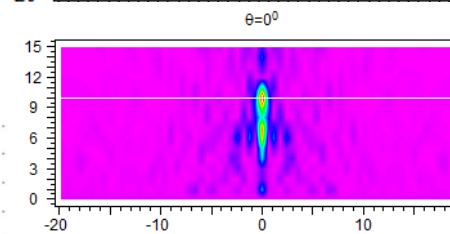
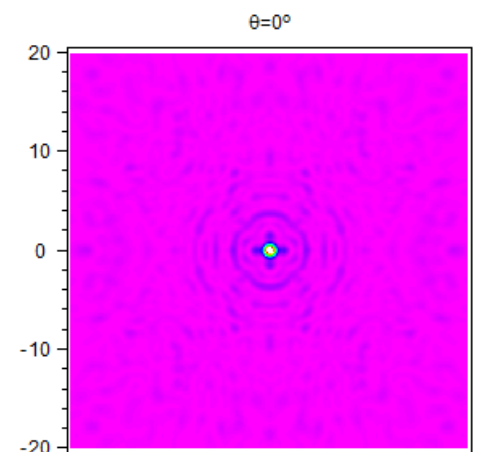
- $D=40\mu\text{m}$
- $f=10\mu\text{m}$
- $\Theta=0^\circ$ - 80°
- Circular symmetry



Optimized results



FDTD validation



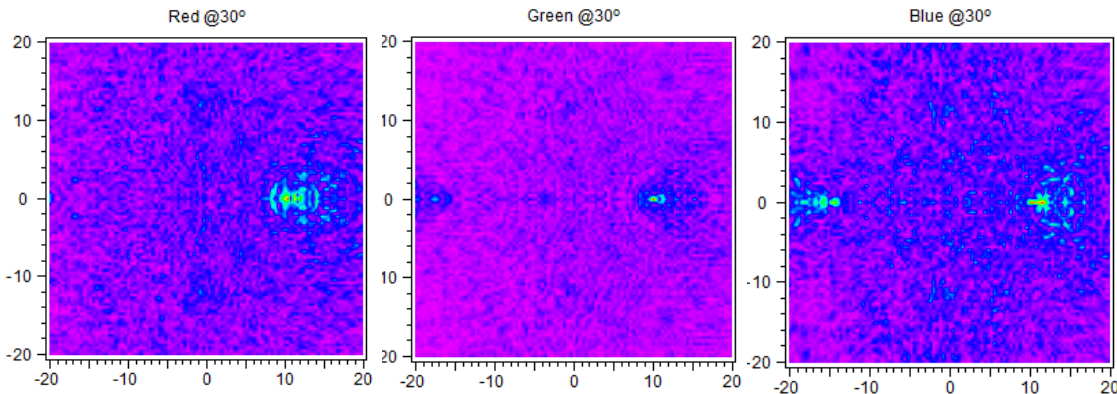
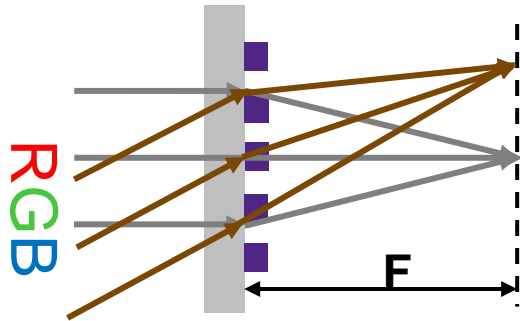
MetaOptic Designer는 정밀한 FDTD와 유사한 결과를 제공

- 각 FDTD 시뮬레이션은 약 0.5시간 소요 (~250G RAM, 16-core computer)

Design Example 3: Large FOV and Achromatic Metalens

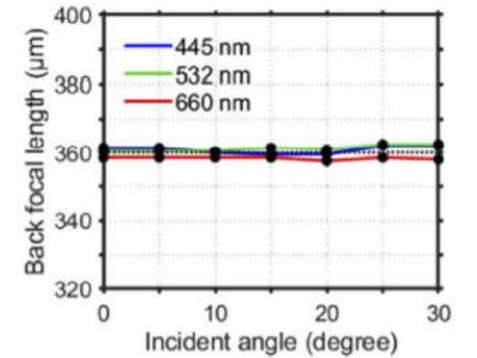
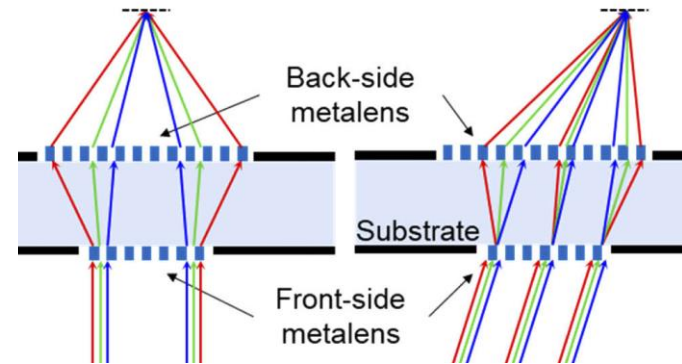
Problem description

- 결상렌즈는 무색수차 및 큰 화각이 모두 필요



- 단일 metasurface으로 무색수차와 큰 화각을 모두 만족하기 어려움

- 일반적으로 다중 metasurface 사용



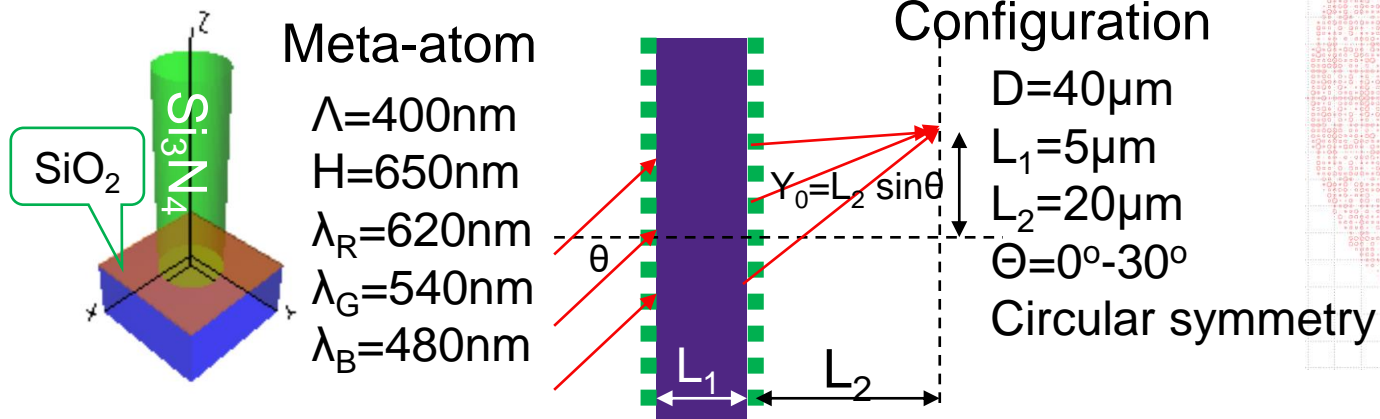
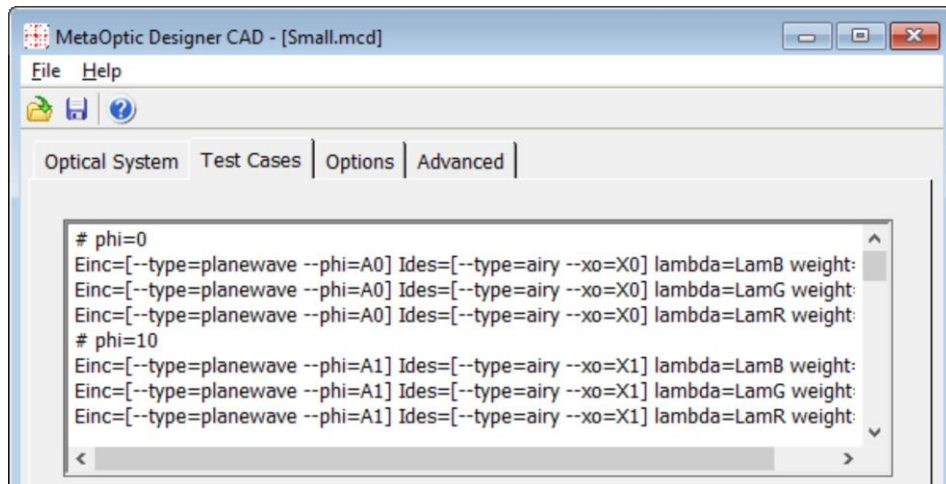
Kim, C., Kim, S. J., & Lee, B. (2020). Doublet metalens design for high numerical aperture and simultaneous correction of chromatic and monochromatic aberrations. *Optics Express*, 28(12), 18059-18076.

- 두 metasurface에 대한 위상 프로파일을 수동으로 결정하려면 광범위한 지식과 설계 경험, 세심한 엔지니어링 작업 필요

Design Example 3: Large FOV and Achromatic Metalens

Automated inverse design

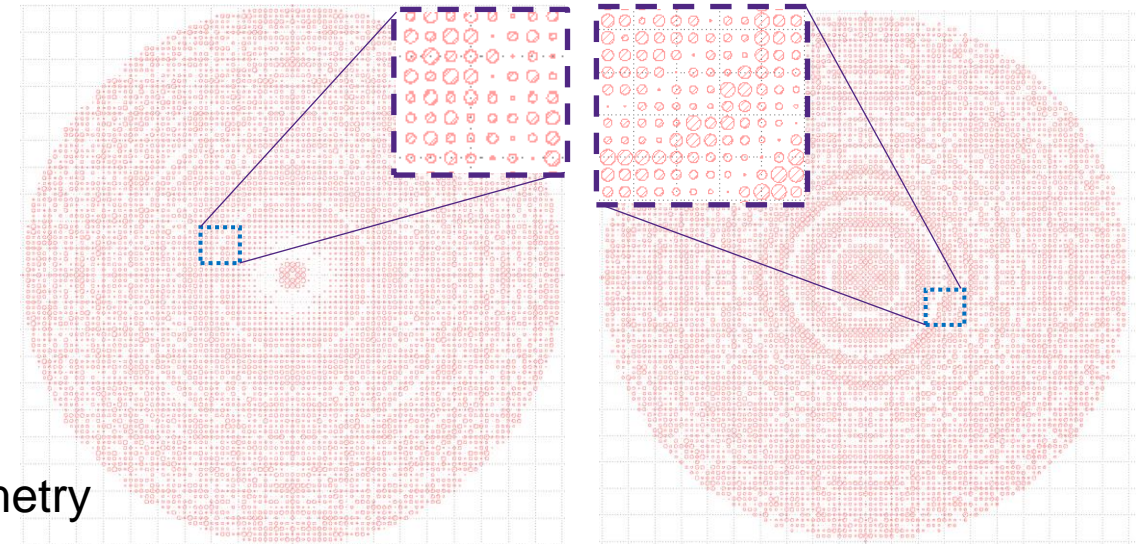
- 동일한 meta-atom 라이브러리를 사용하는 2개의 metasurface로 MetaOptic Designer 는 6-core 노트북에서 총 12개의 case (3개의 파장 및 4개의 입사각)에 대해 약 12분 내로 최적화된 결과를 생성



Optimized design

1st Surface

2nd Surface

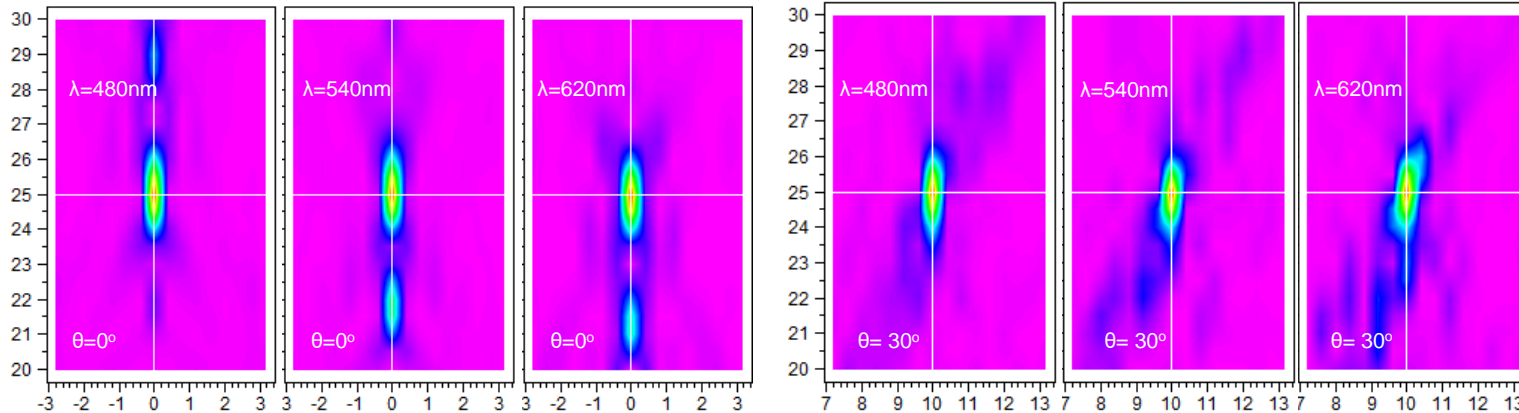


Design Example 3: Large FOV and Achromatic Metalens

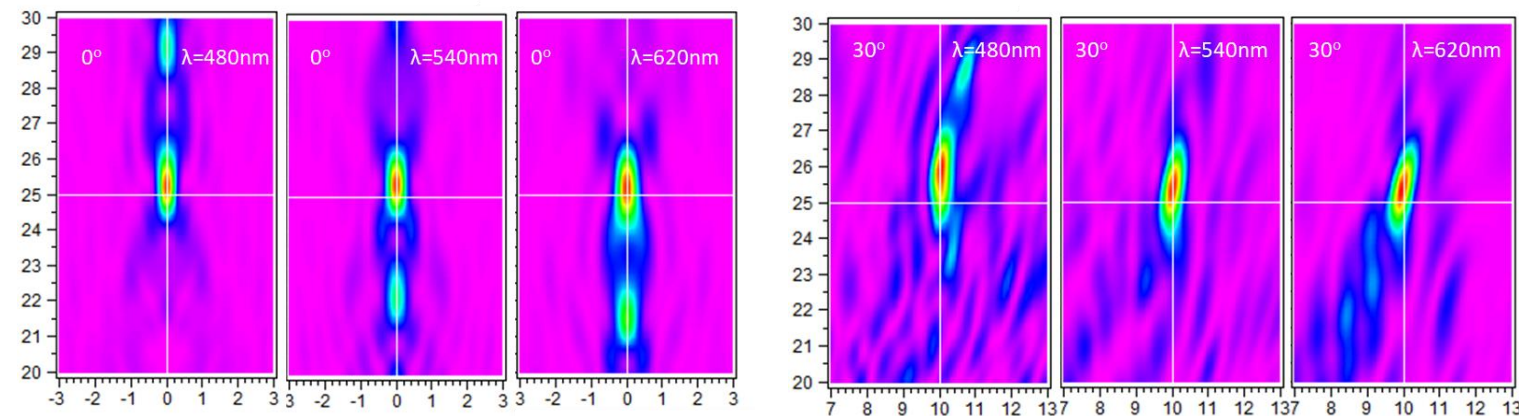
Optimization results and FullWAVE FDTD validation

- 3x4=12 cases: 3 wavelengths (RGB) and 4 different angles (0°, 10°, 20°, 30°)
- High order at 40°

Optimization Results



FDTD Results



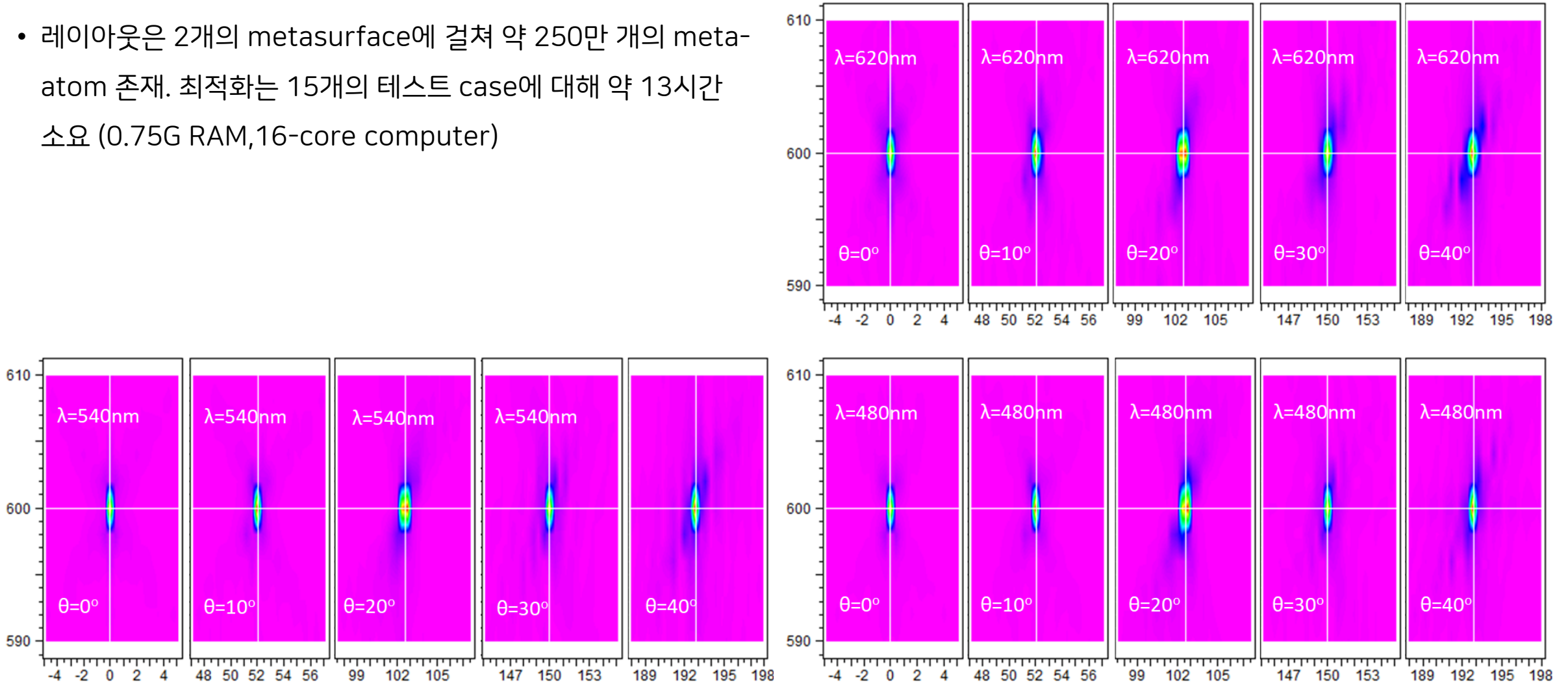
MetaOptic Designer는
정밀한 FDTD와 유사한 결과를
제공

- 각 FDTD 시뮬레이션은 약 33.5 시간 소요 (~500G RAM, 16-core computer)

Design Example 3: Large FOV and Achromatic Metalens

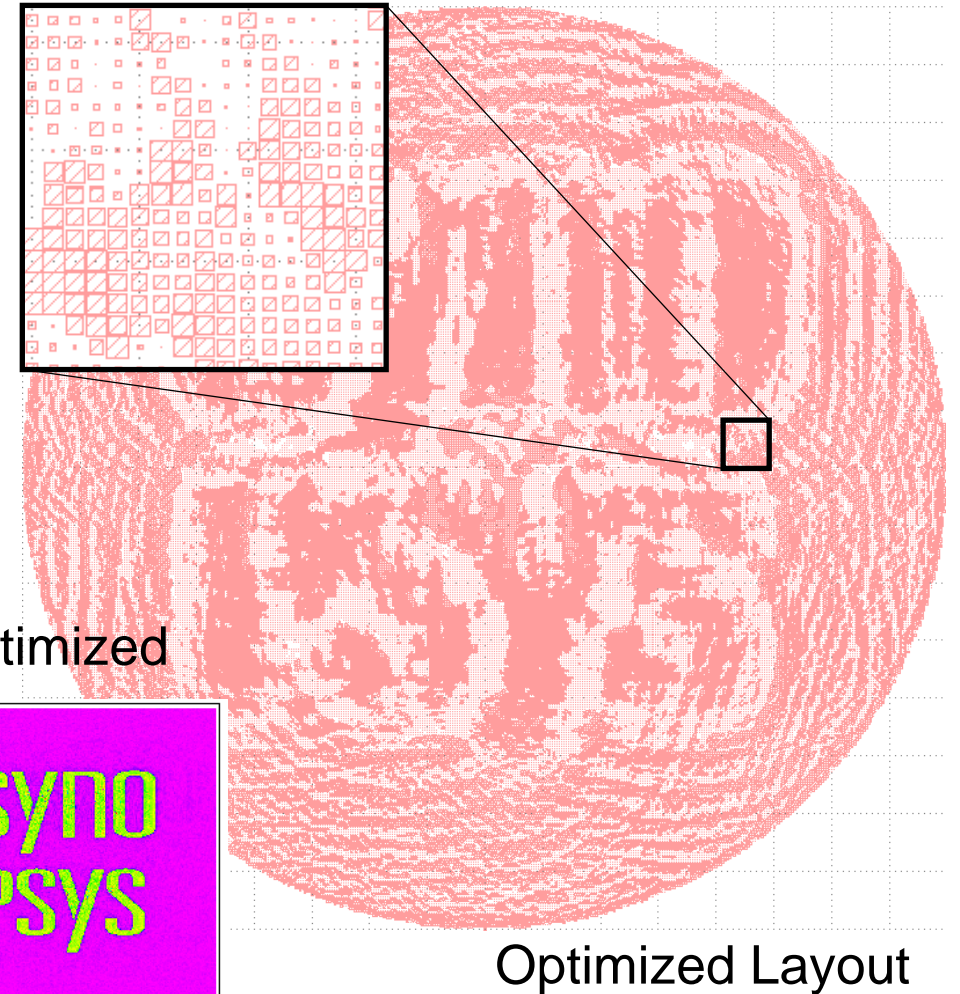
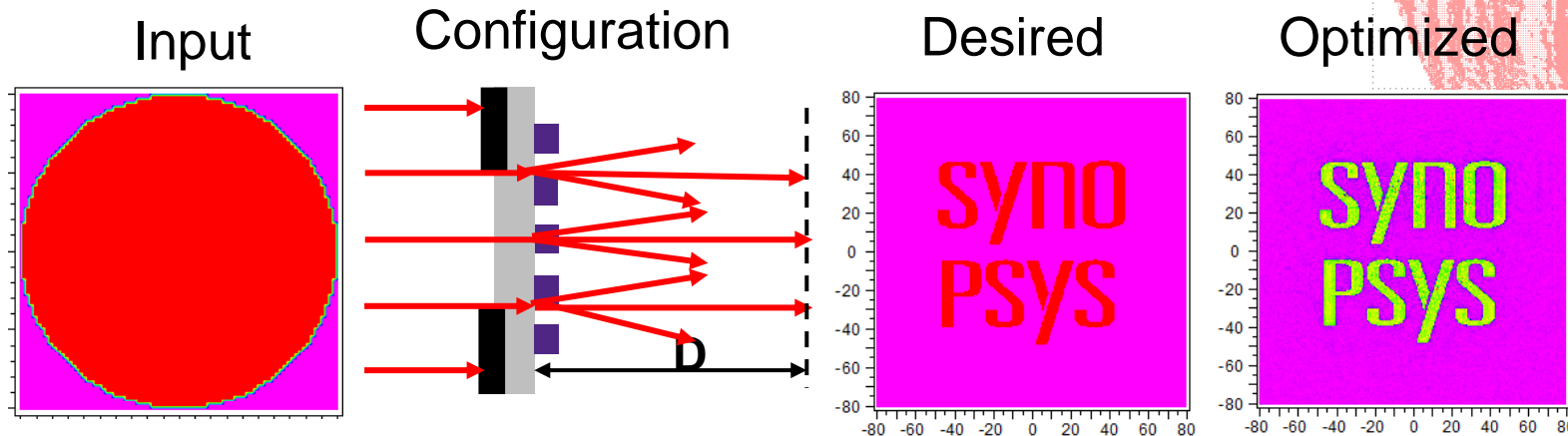
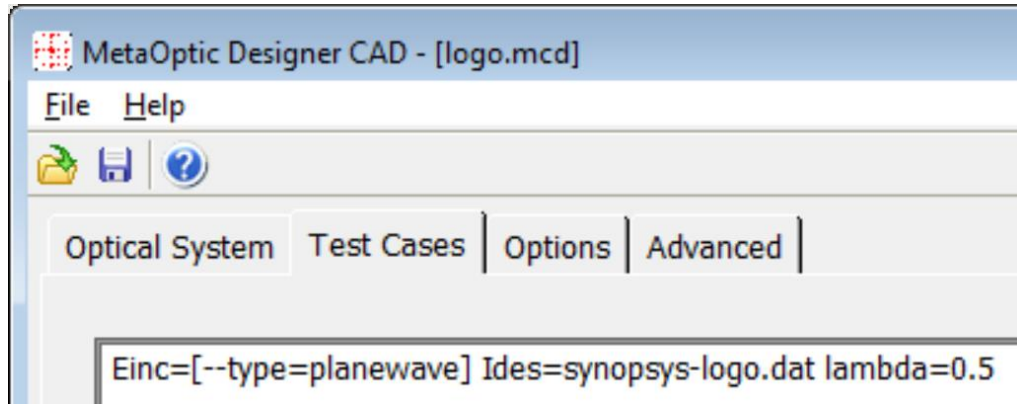
0.5mm x 0.5mm doublets with 0.3mm separation

- 레이아웃은 2개의 metasurface에 걸쳐 약 250만 개의 meta-atom 존재. 최적화는 15개의 테스트 case에 대해 약 13시간 소요 (0.75G RAM, 16-core computer)



Design Example 4: Logo Display

- 포커싱 외에도 MetaOptic Designer는 metasurface를 최적화하여 지정된 이미지를 표시 가능

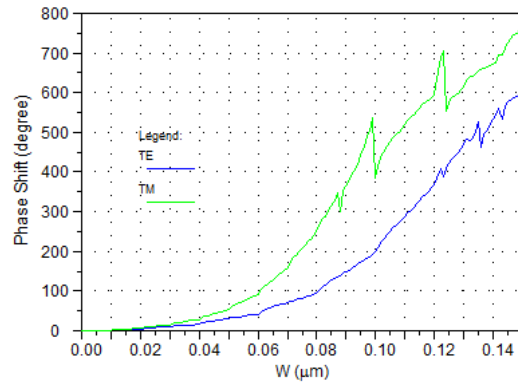
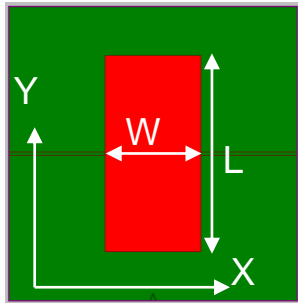


Optimized Layout

Design Example 5: Polarization Conversion (I)

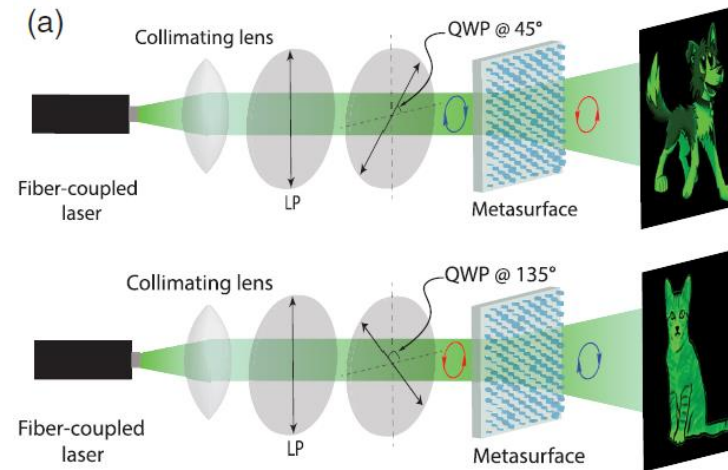
Background

- A nano-fin is polarization dependent
 - X 및 Y 편광 빛은 서로 다른 위상 지연 발생
 - 두 선형 편광된 빛 사이의 복굴절 또는 위상차를 geometric (Pancharatnam-Berry) phase라 함



- 위상차가 $\pi/2$ 인 두 개의 선형 편광으로 구성된 원형 편광 빛은 nano-fin으로 구성된 메타표면을 통과한 후 편광 상태를 변경
- geometric phase가 π 이면 좌원 편광(LCP)이 우원 편광(RCP)으로 변경

- 각 meta-atom의 회전 각도를 조정하면 원형 편광 빛을 다른 방향으로 유도하여 다른 위치에 초점을 맞추거나 다른 이미지 형성 가능

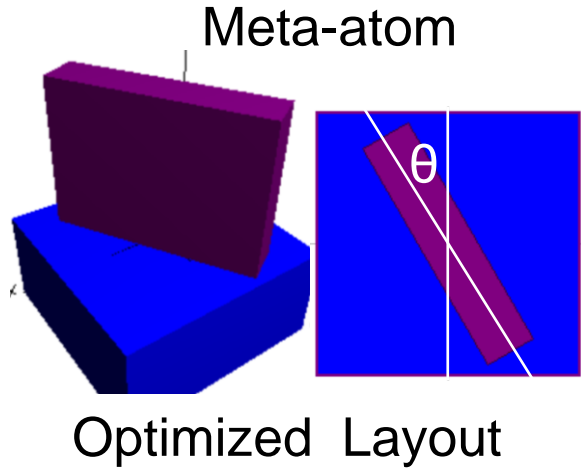


Mueller, J. B., Rubin, N. A., Devlin, R. C., Groever, B., & Capasso, F. (2017). *Physical review letters*, 118(11), 113901.

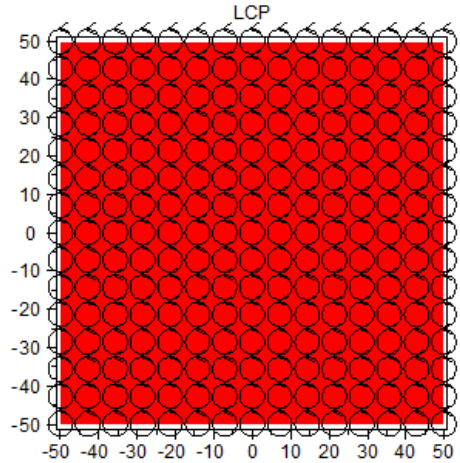
- metalens를 설계하려면 많은 지식과 경험 필요

Design Example 5: Polarization Conversion (II)

Display different images (I) – Automated inverse design by MetaOptic Designer

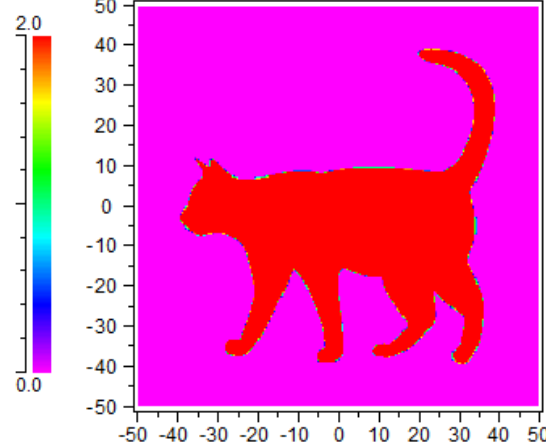


Input



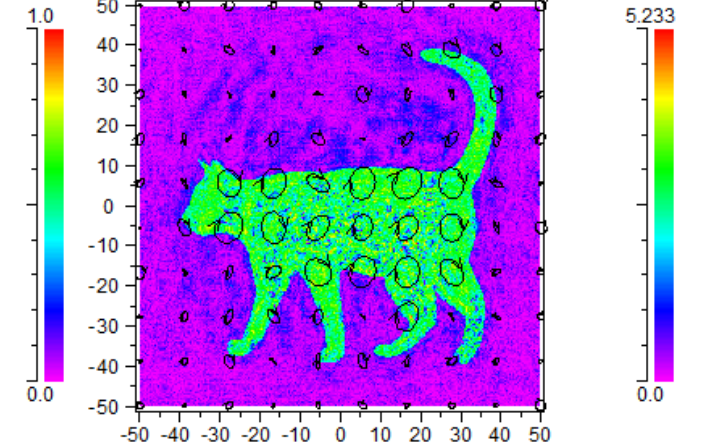
Desired

Cat



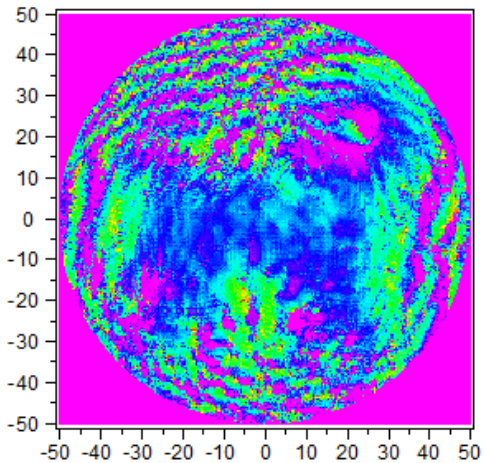
Optimized Output

RCP Output

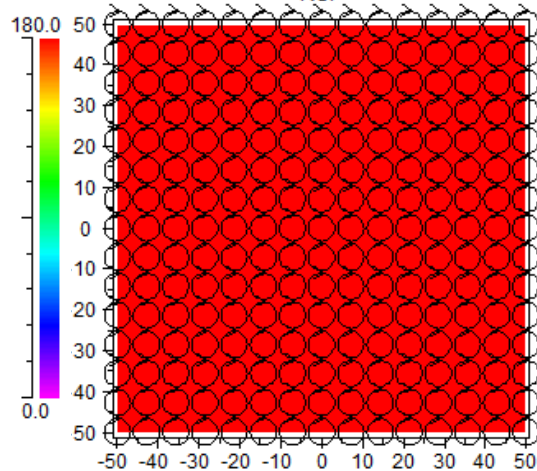


Optimized Layout

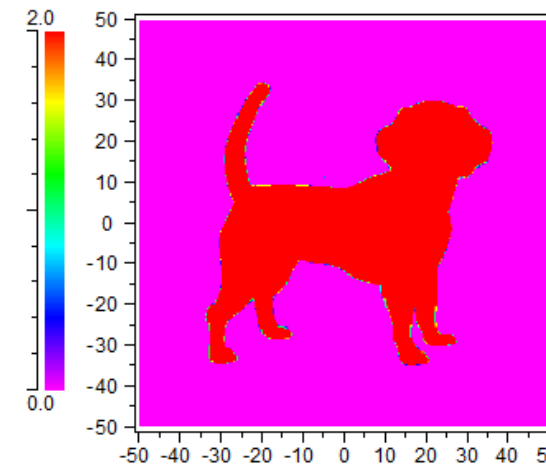
Rotation Angle Distribution



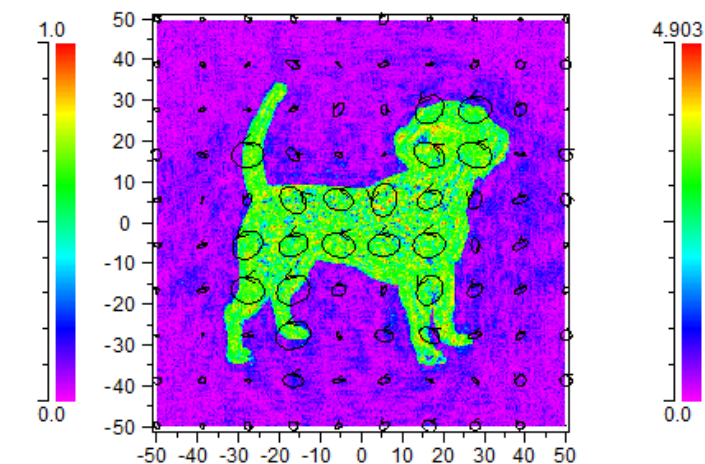
RCP



Dog

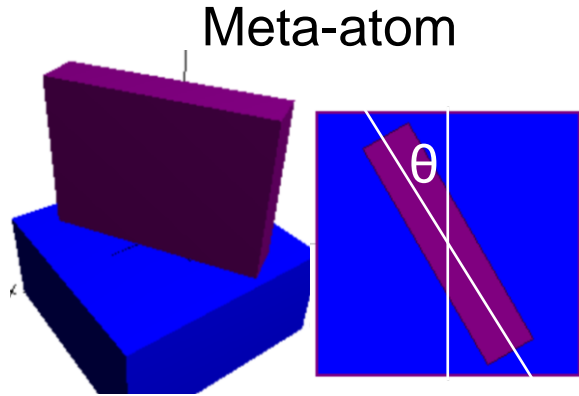


LCP Output

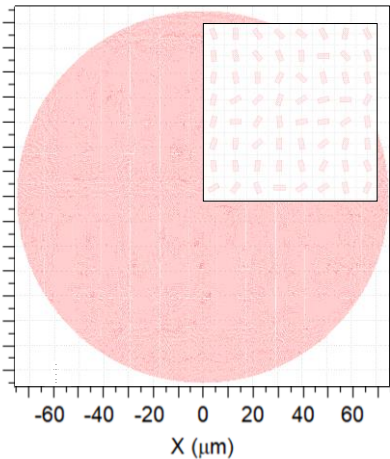


Design Example 5: Polarization Conversion (II)

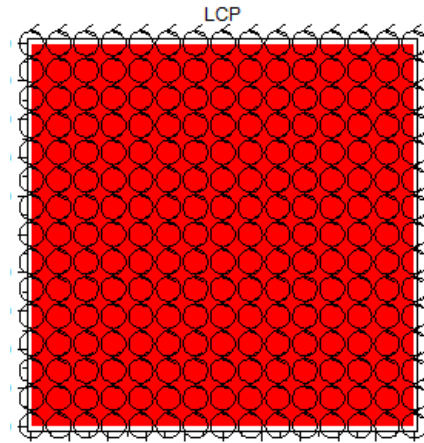
Display different images (II) – Automated inverse design by MetaOptic Designer



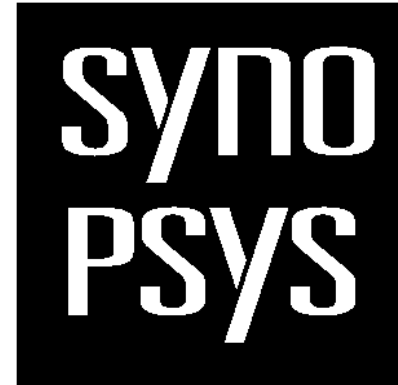
Optimized Layout



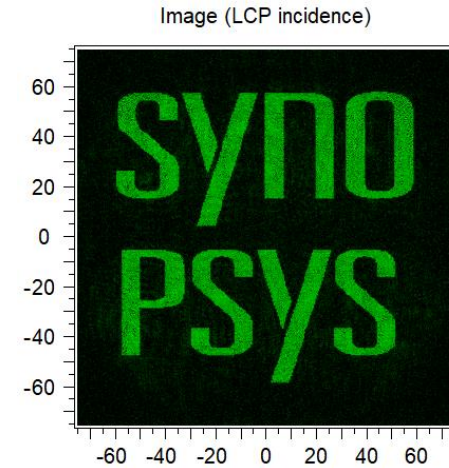
Input



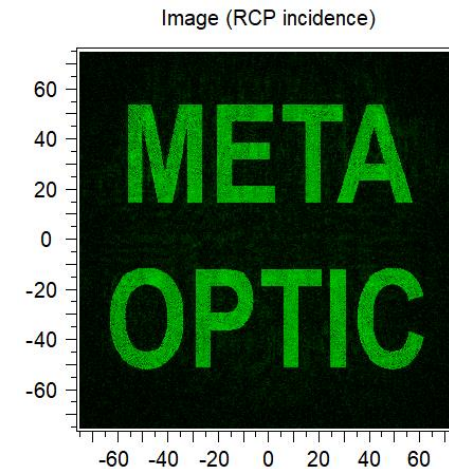
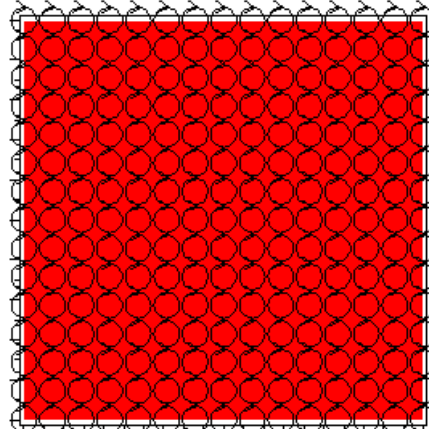
Desired



Optimized Output

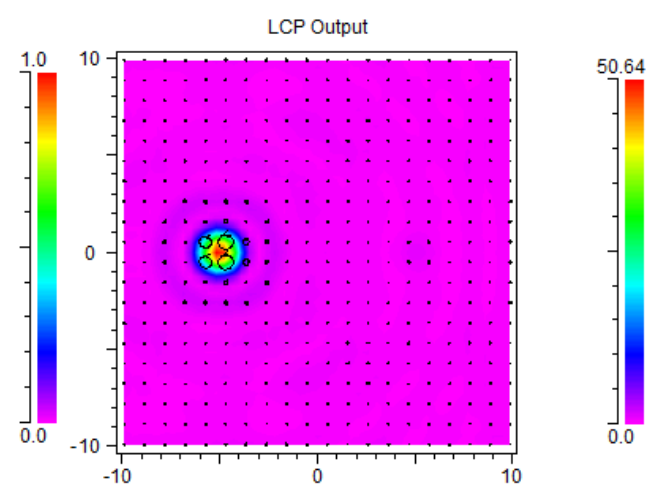
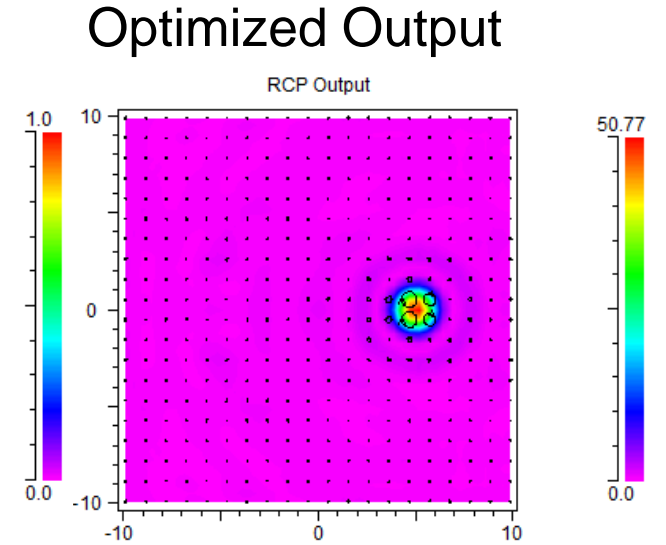
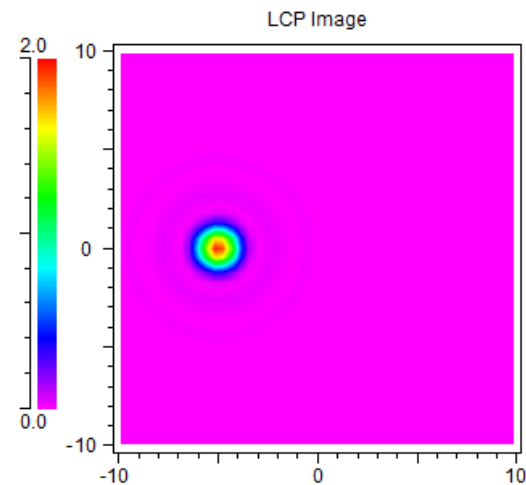
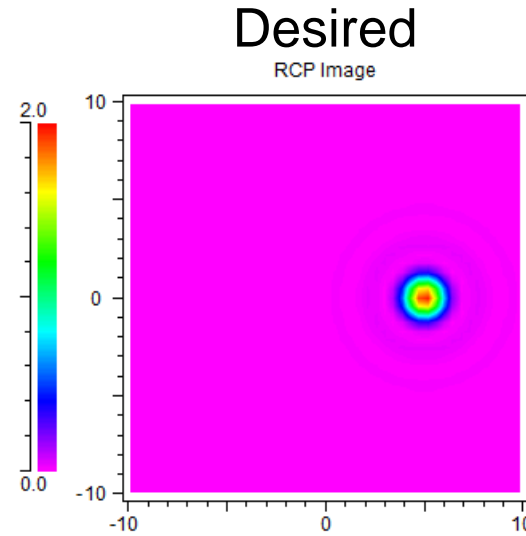
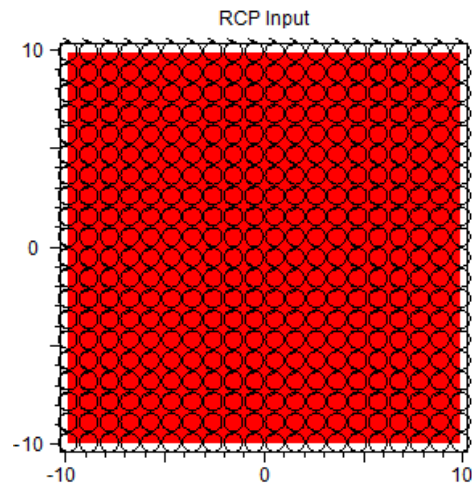
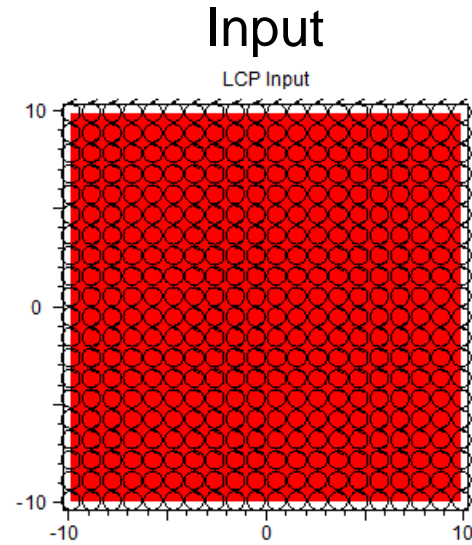
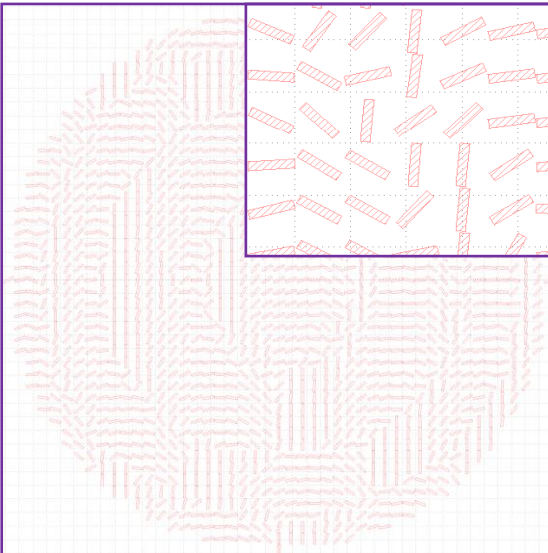
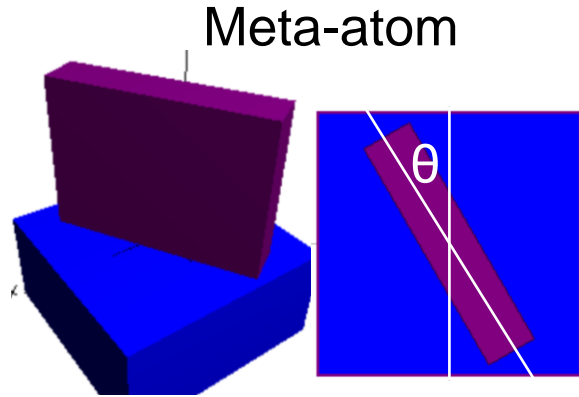


RCP



Design Example 5: Polarization Conversion (III)

Focus on different positions – automated inverse design

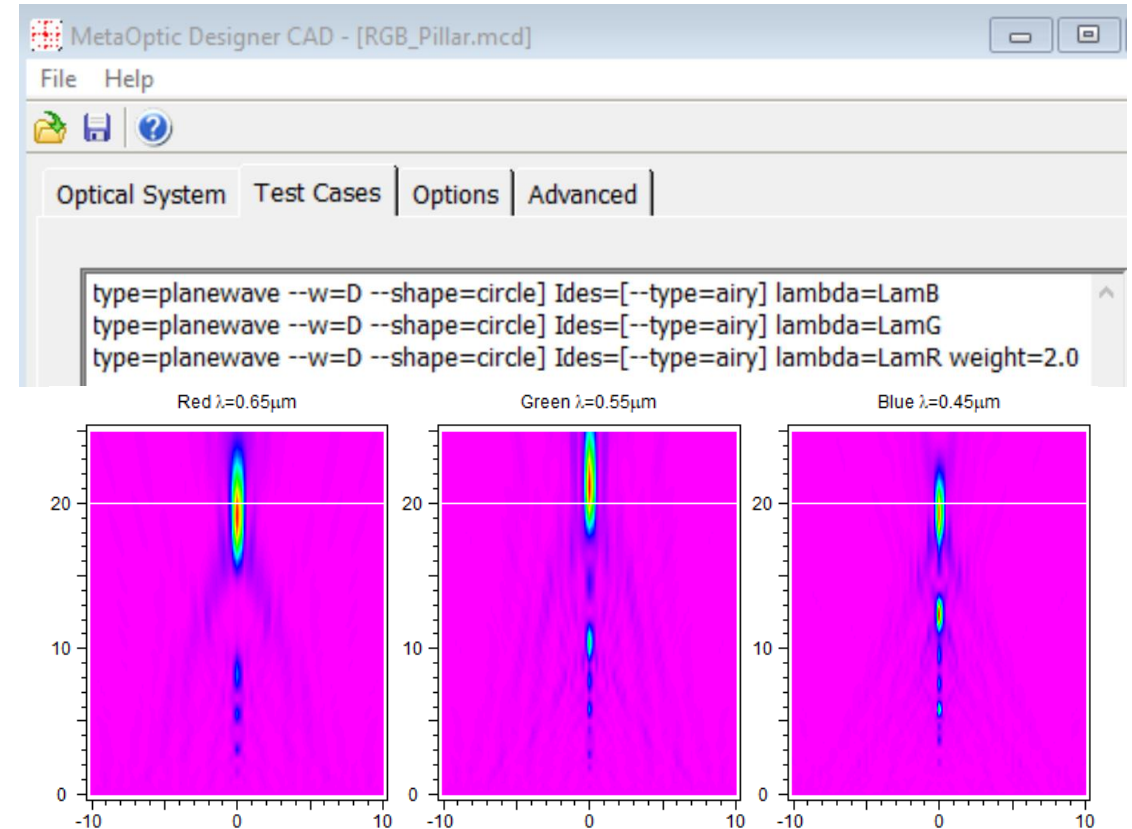


MetaOptic Designer Tips and Tricks

Weight

- 각 파장에 대한 작업은 다르며 특정 파장에 대해 더 어려울 수 있음. 동일한 기본 가중치 (=1)를 사용하면 좋지 않은 결과를 얻을 수 있음

- 어려운 작업에 더 많은 가중치를 부여하면 더 균일한 결과를 생성 가능



MetaOptic Designer Summary



역설계 알고리즘을 사용하여 metalens 및 metasurface를 설계하는 유일한 완전 자동화 툴



설계 작업량을 크게 간소화하고 속도 향상



최소한의 입력만으로 전문성 수준에 관계없이 설계자가 빠르고 쉽게 새로운 metalens를 생성 가능



빠르고 정밀한 FDTD 검증을 통해 정확한 최적화 결과 보장

Thank You

To request a free evaluation, please contact:
optics@synopsys.com

