



中山大學
SUN YAT-SEN UNIVERSITY

磁性超表面的单向光传播

中山大学物理学院



2021级 物理学专业 路尚润

2024年11月11日

目录

CONTENTS

01

课题背景

02

研究基础

03

研究成果

04

未来展望

05

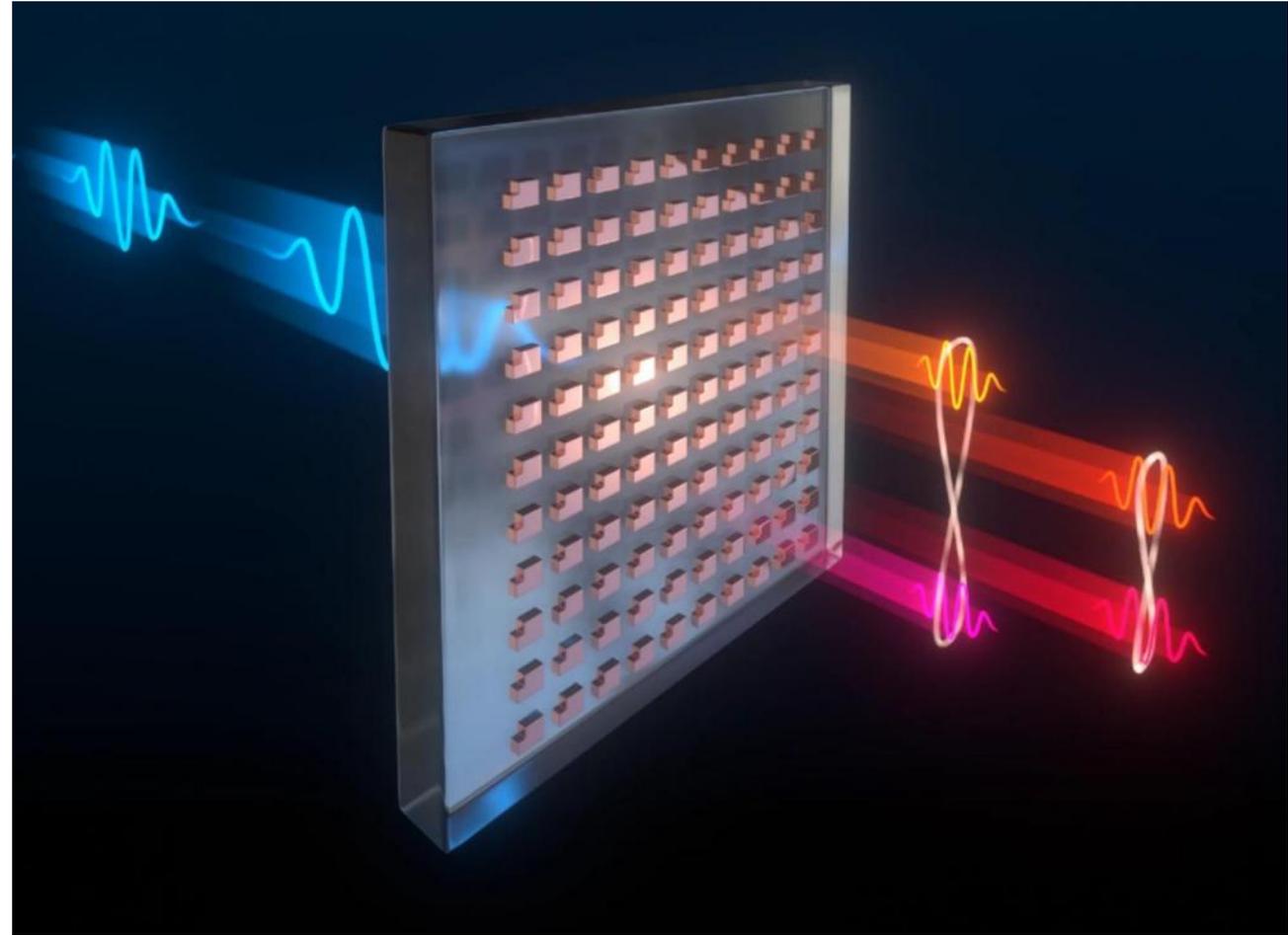
总结

· 超构表面材料表面

超表面是一种由亚波长尺度结构单元（通常称为超原子）组成的二维材料，它们可以对电磁波进行精确调控^[1]。

相比传统三维超材料，超表面由于其低厚度和易制造的特性^[2]，在光学、微波和声学等领域得到了广泛的应用。

通过设计超原子的几何结构、材料特性或排列方式，超表面能够实现对电磁波的相位、振幅、偏振和波前的调控^[3]。根据其功能特性，超表面可分为互易性和非互易性两大类。



超表面光传播示意图

[1] Reports on Progress in Physics, 2016, 79(7): 076401.

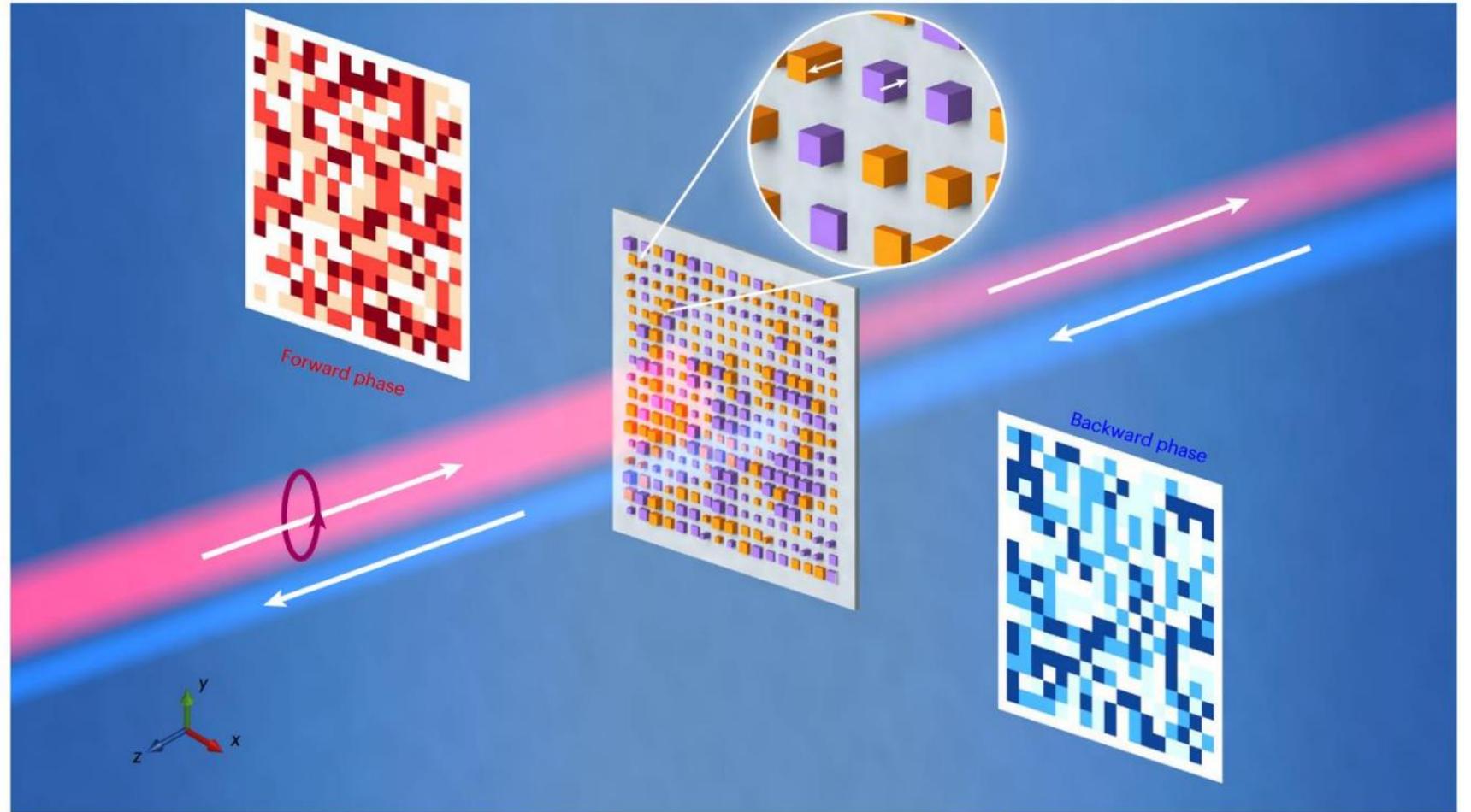
[2] Nature Photonics, 2011, 5: 523-530.

[3] Nature Materials, 2014, 13(2): 139-150.

· 非互易超表面

非互易超表面是一种打破洛伦兹互易性的超表面，能够在不同方向上执行不同的电磁功能^[4]。

传统的互易性材料和器件在不同传播方向上具有相同的响应，而非互易超表面则通过引入非对称介电常数或磁导率张量^[5]、非线性效应^[6]或进行增益^[7]，来实现传播方向相关的调控。



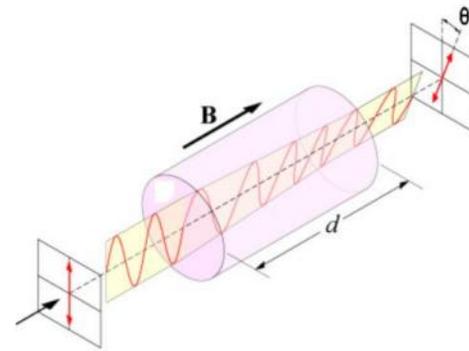
基于磁效应的超表面光传播示意图^[4]

• 基于磁效应的非互易超表面

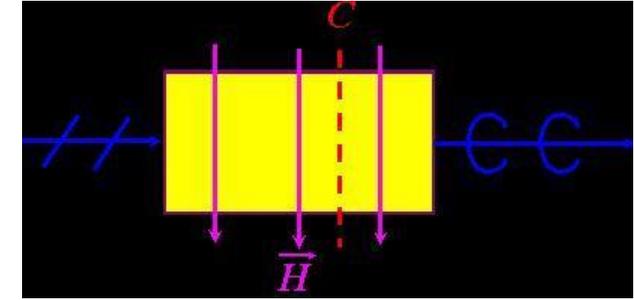
在非互易超表面设计中，磁效应是实现非互易传输的重要机制。磁效应打破了波在传播路径上的对称性，使电磁波在不同传播方向上具有不同的相位或偏振响应。

主要有三种与非互易相位调控密切相关的磁效应：法拉第旋磁效应、磁圆二向色性和磁双折射。

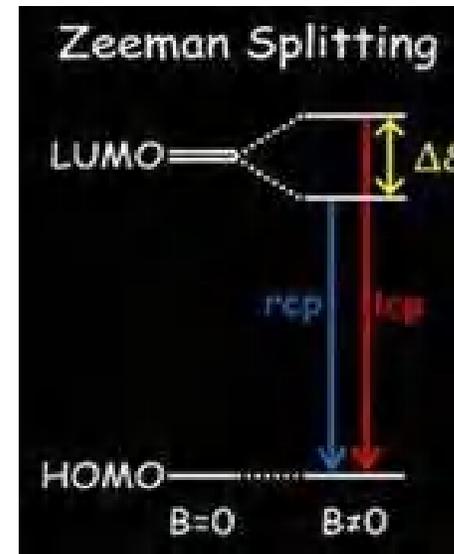
对于线偏振，我们一般不会衡量其相位，反而更多的是衡量电矢量在垂直于波矢面的旋转角度。因此，对于单向传播来讲，使用线偏振并无异议。但对于相位调控来说，为了使相位有意义，此时应当使用圆偏振。因此我们主要基于圆偏振光进行研究。



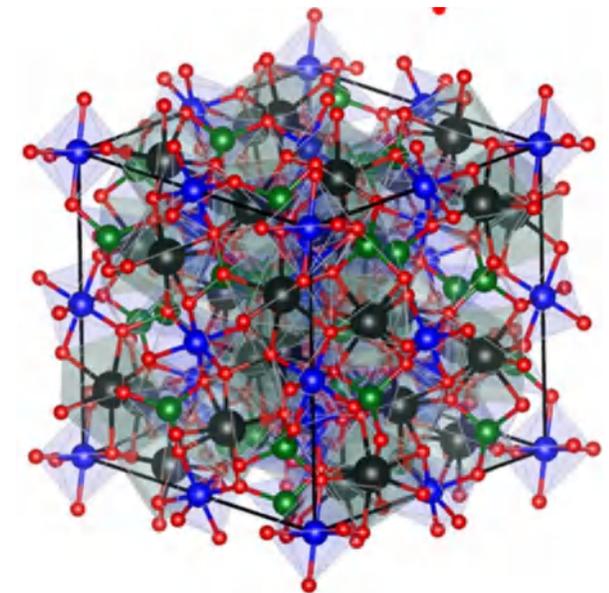
法拉第效应



磁双折射效应



磁圆二向色性^[8]



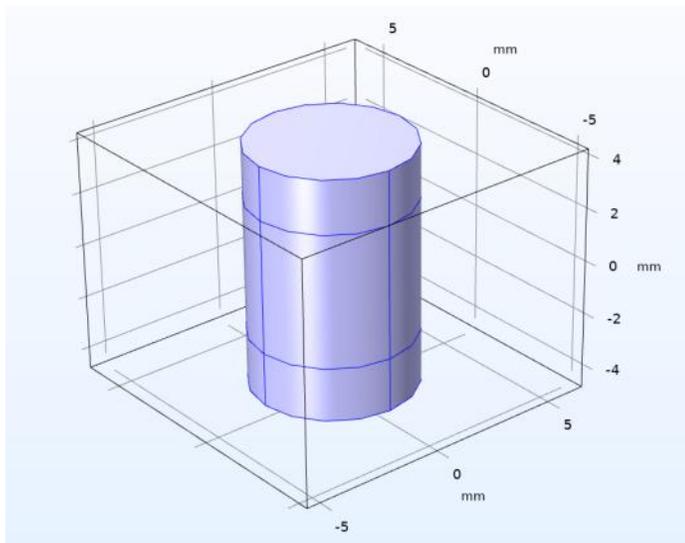
YIG晶体结构^[9]

[8] Chirality, 2024, 36(1): e23625.

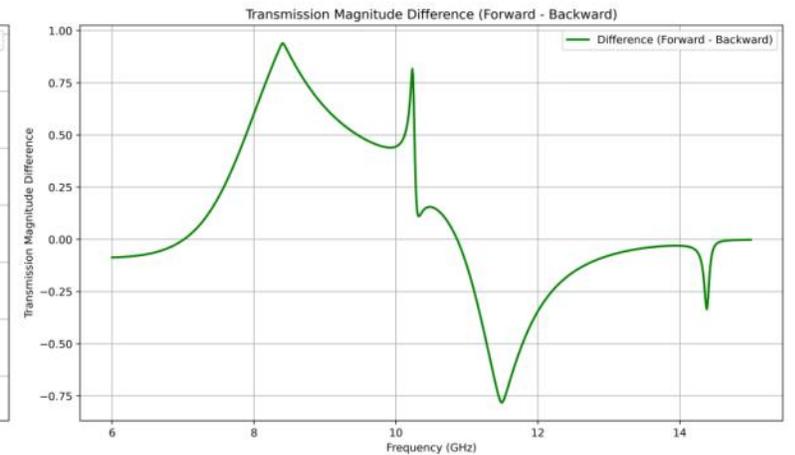
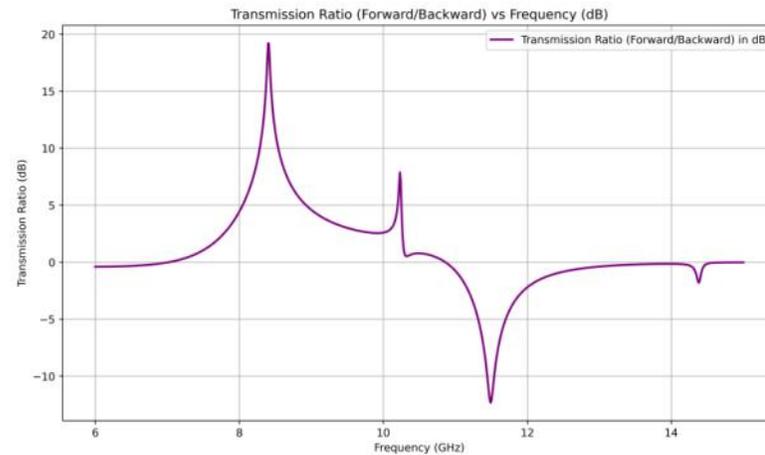
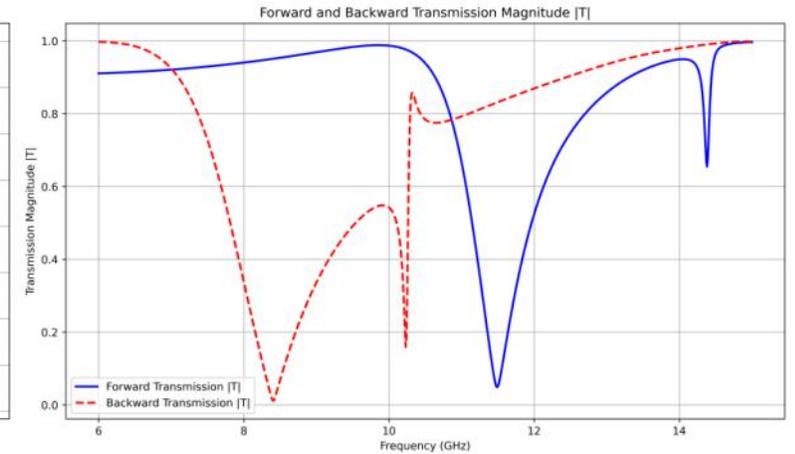
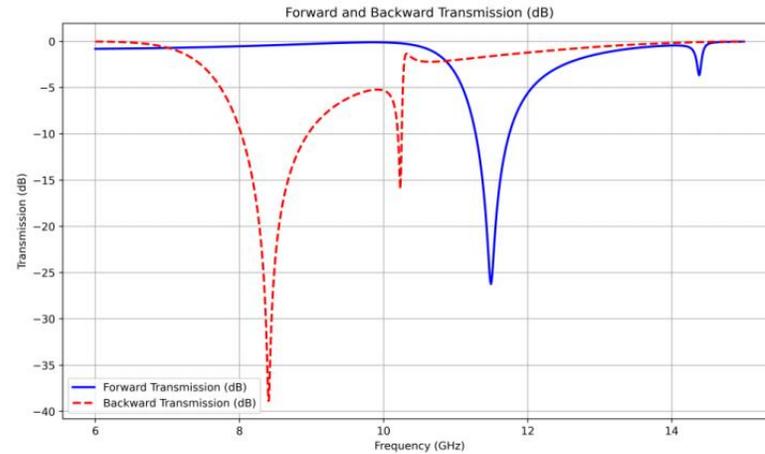
[9] Solid State Physics. 2019.

· 单向传播非互易超表面-单层超原子

首先使用单层超原子构造非互易超表面，模型参数为，超原子半径为3mm，YIG高度为5mm，永磁体高度为2mm，超原子间距12mm。



单层超原子结构

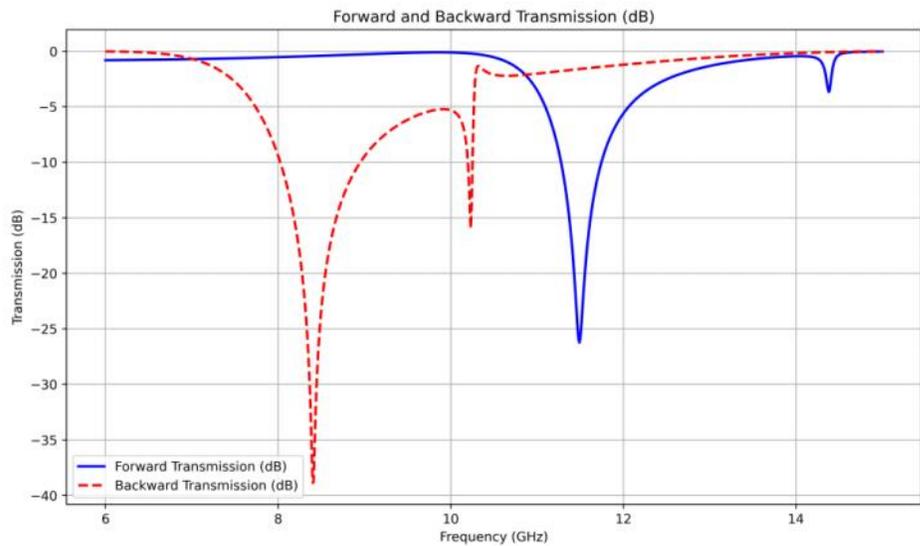


单层超原子透射谱、隔离度和透射率之差

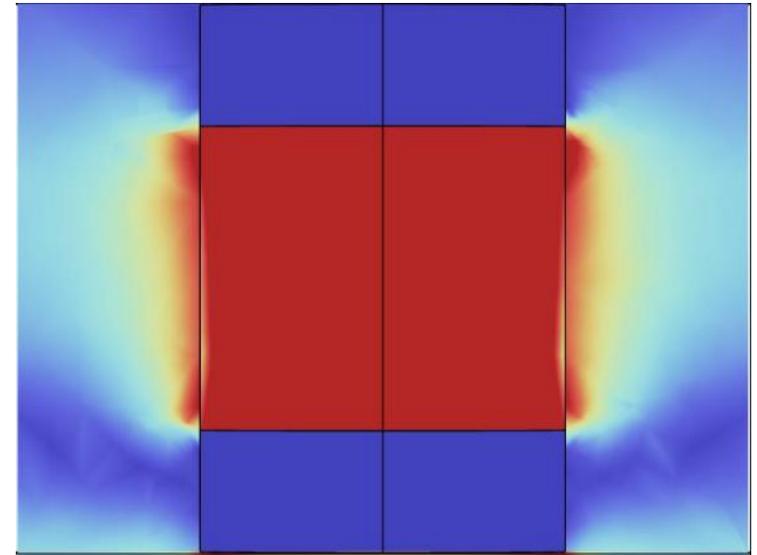
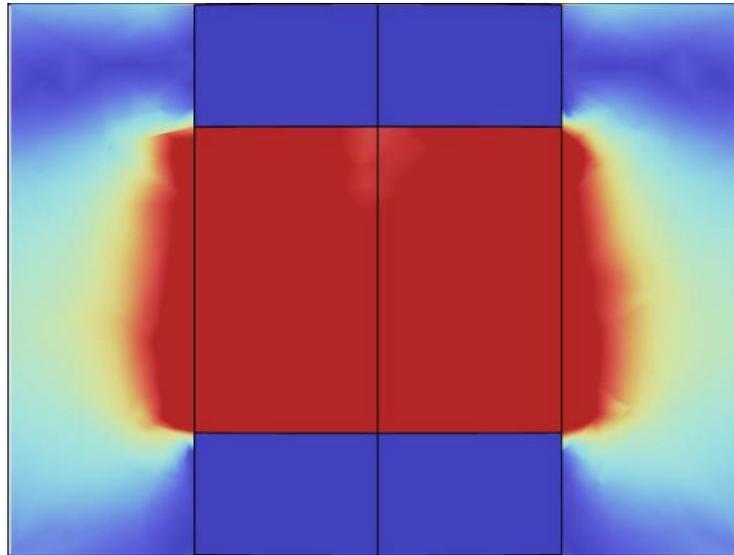
· 单向传播非互易超表面-单层超原子

在隔离度极大值处可以实现右旋光的正向单向传输，而在极小值处可以实现右旋光的反向单向传输。同时，正反向的工作频率相差极大，这保证了其工作性能的稳定性，理论上可以很好地实现电磁波的单向传输。这是因为此时其内部磁场发生了共振响应，将大部分电磁波进行了反射。

极值点	频率/GHz	隔离度/dB
极小值	8.40	19.2110
极大值	11.94	-12.3137



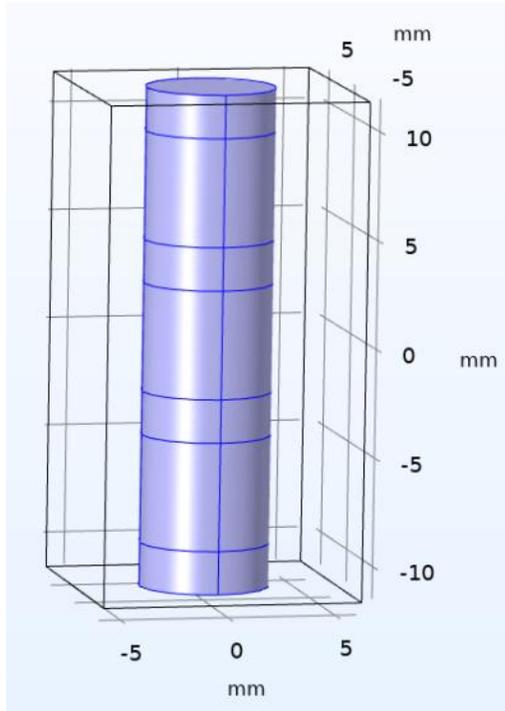
单层超原子透射谱



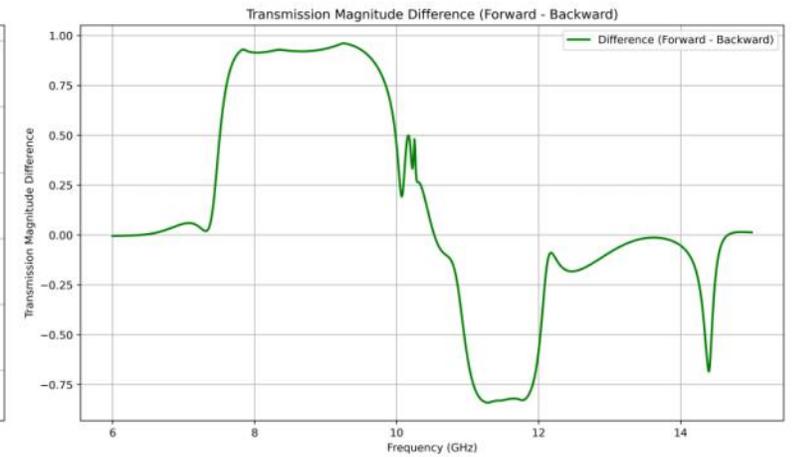
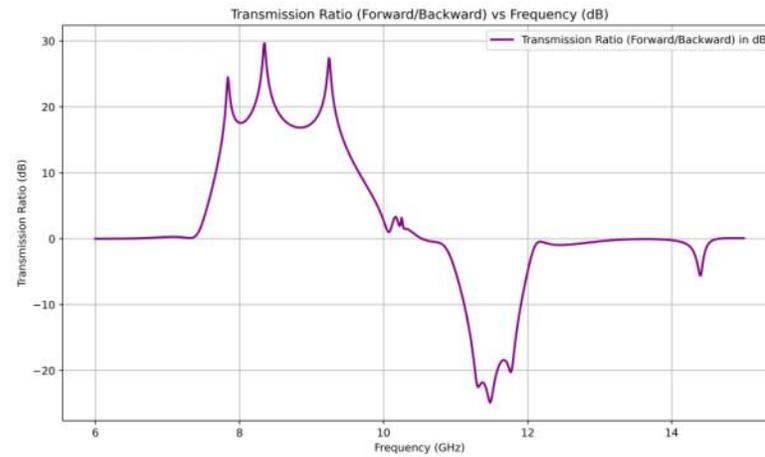
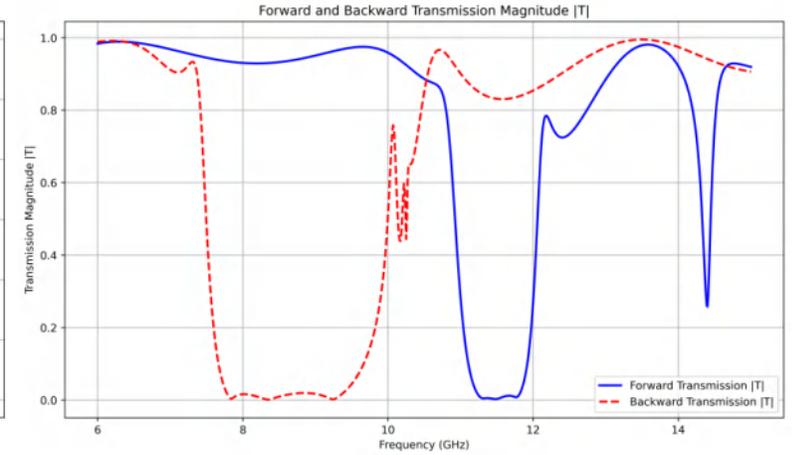
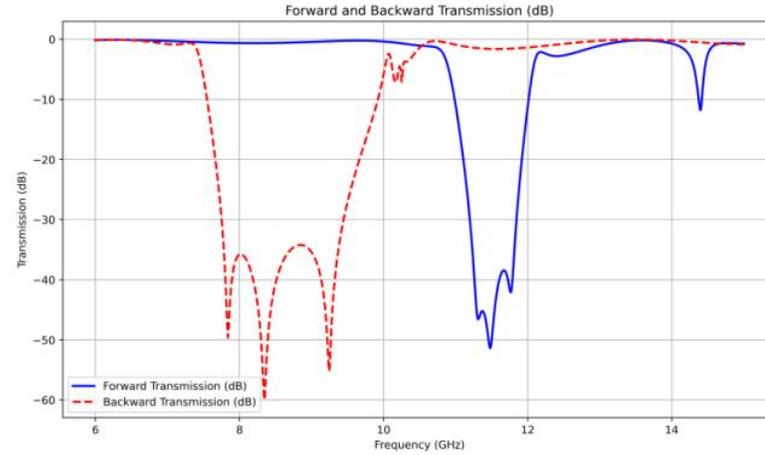
Hx(左)反向8.40GHz(右)正向11.94GHz

单向传播非互易超表面-三层超原子

极值点	频率/GHz	隔离度/dB
极小值	8.35	29.6623
极大值	11.48	-24.8946



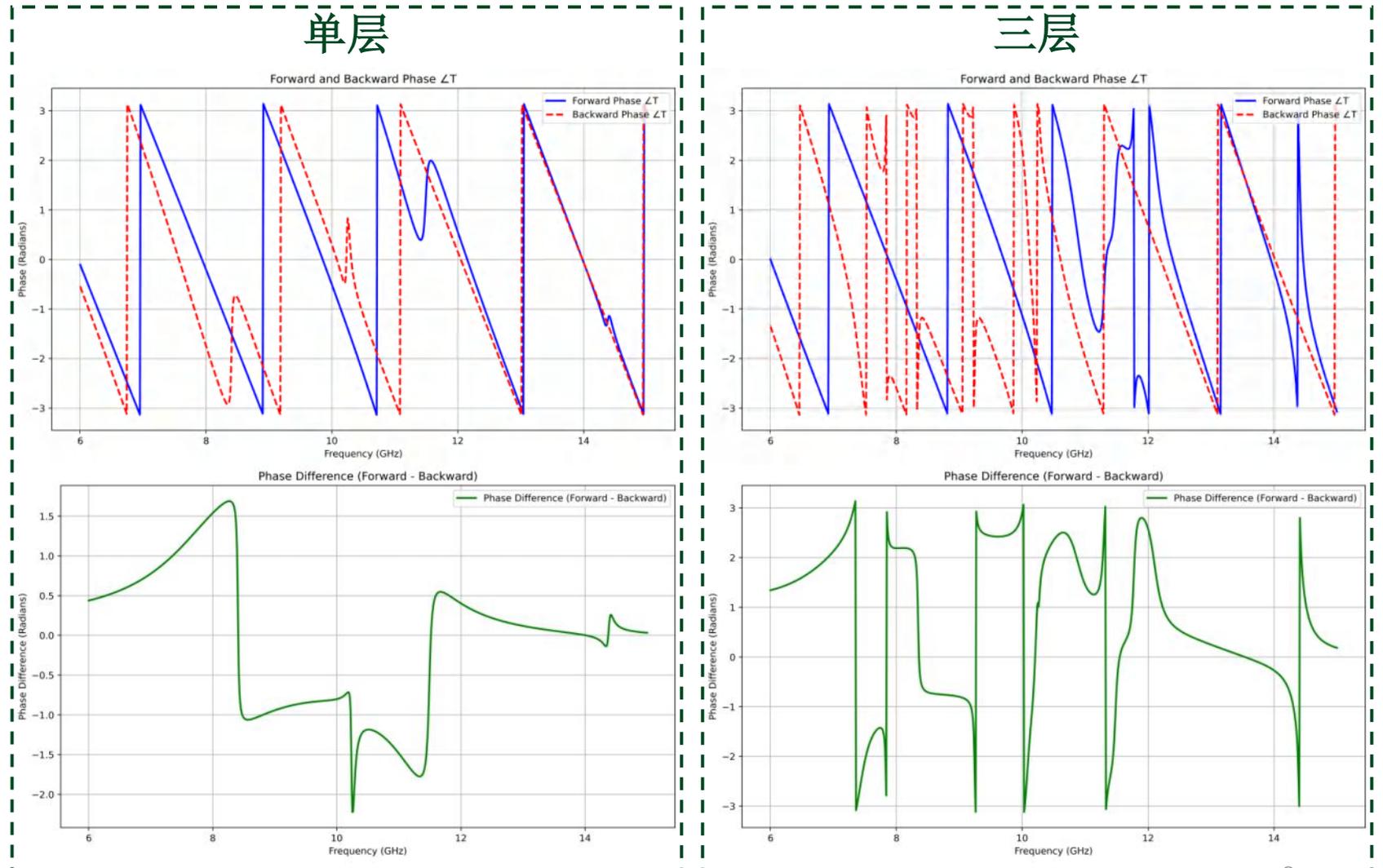
三层超原子结构



三层超原子透射谱、隔离度和透射率之差

· 相位调控-频率响应

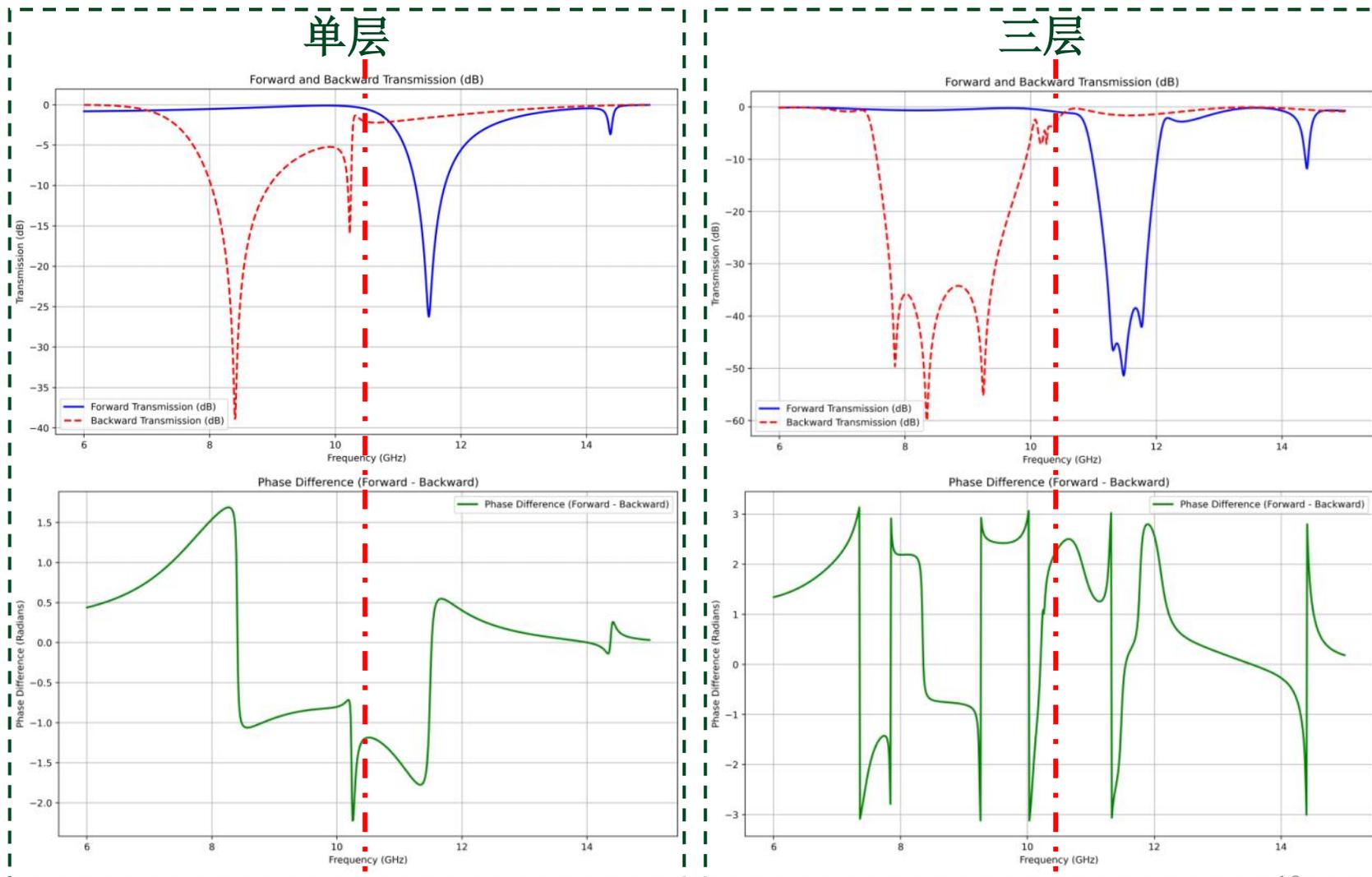
单向传输的非互易超表面只是最基础的非互易器件之一，想要构造更复杂的 NRM 一般都基于相位调控，利用不同尺寸的超原子，实现超表面上点对点的精确相位调控，可以构造非互易光束偏折、非互易超透镜以及非互易全息成像等更加复杂以及应用广泛的非互易超表面，扩展体系的应用价值。



· 相位调控-频率响应

相位调控的自变量应为超原子尺寸，因此工作频率的确定十分重要。倾向于正向和反向传播时有较大的透射率，并有不同的透射相位。

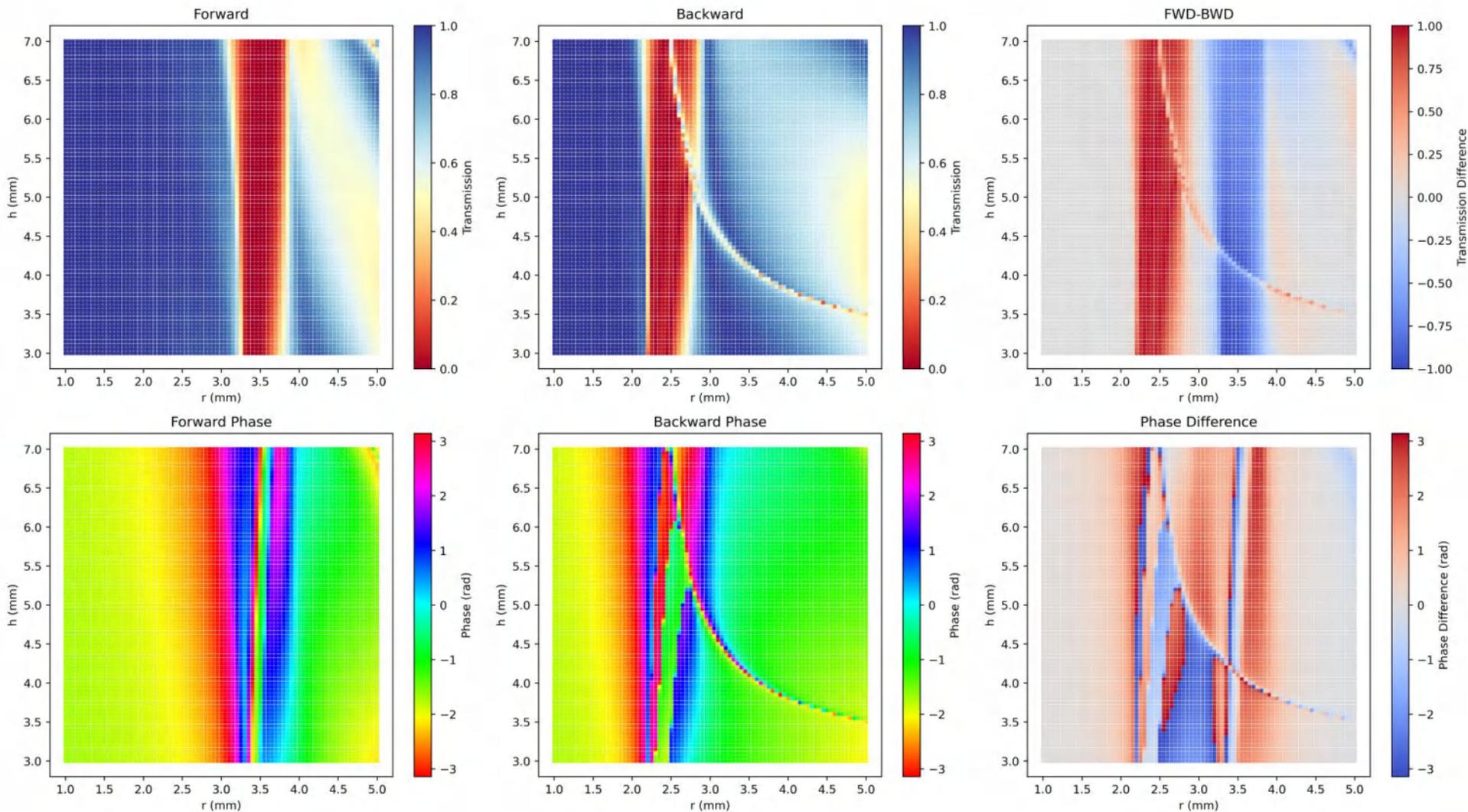
采用 150mm 的仿真空间进行计算，可以看出三层结构的相位响应在频率上更加剧烈、覆盖范围也更宽，因而为进一步优化设计，拟采用三层结构作为研究重点。



· 相位调控-参数响应

透射谱和相位谱的响应非常显著，且相位响应通常出现在透射率较低的区域。这一现象的原因在于，此时磁场发生共振，磁效应变得更加明显。

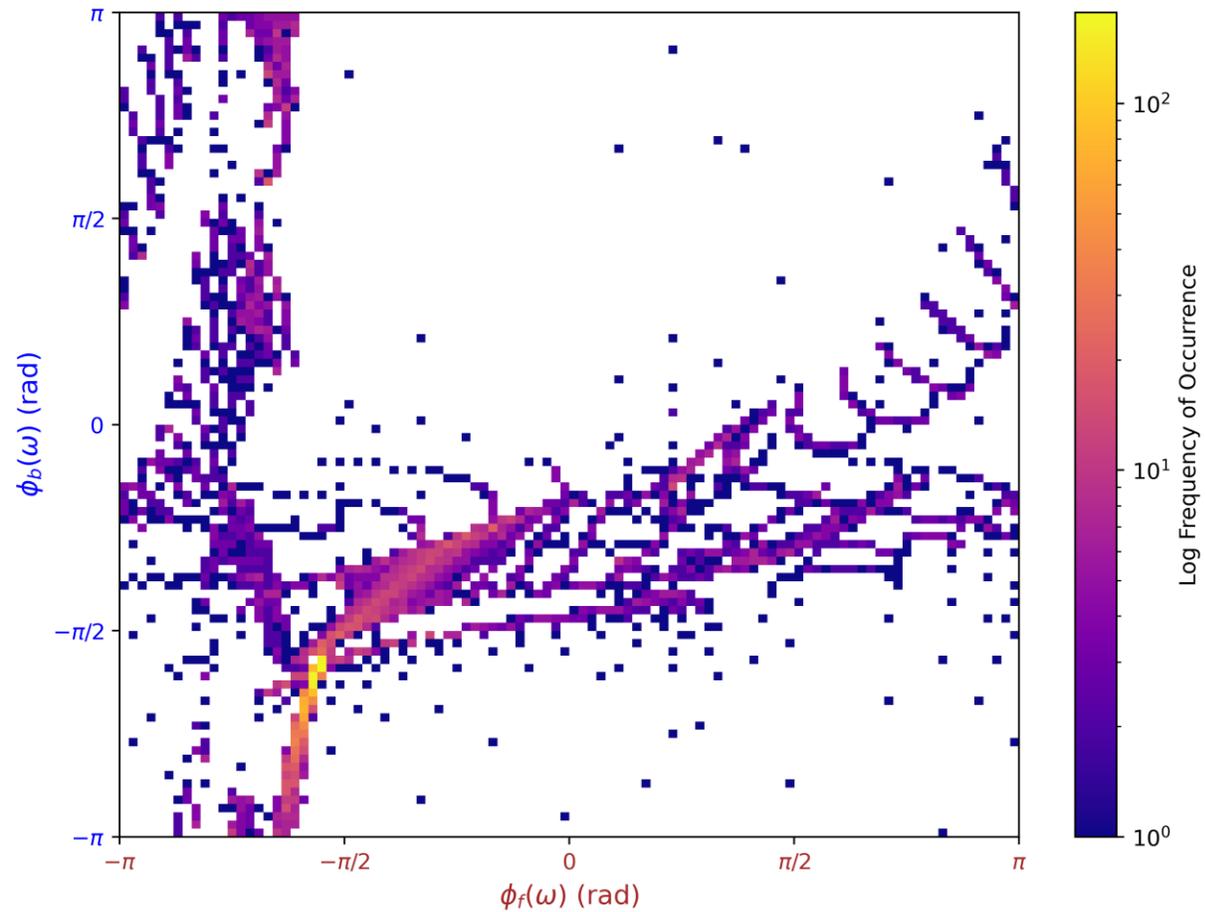
对比发现，反向结果相较于正向多了一个较细的响应区间，我们将其称为“局部响应”。



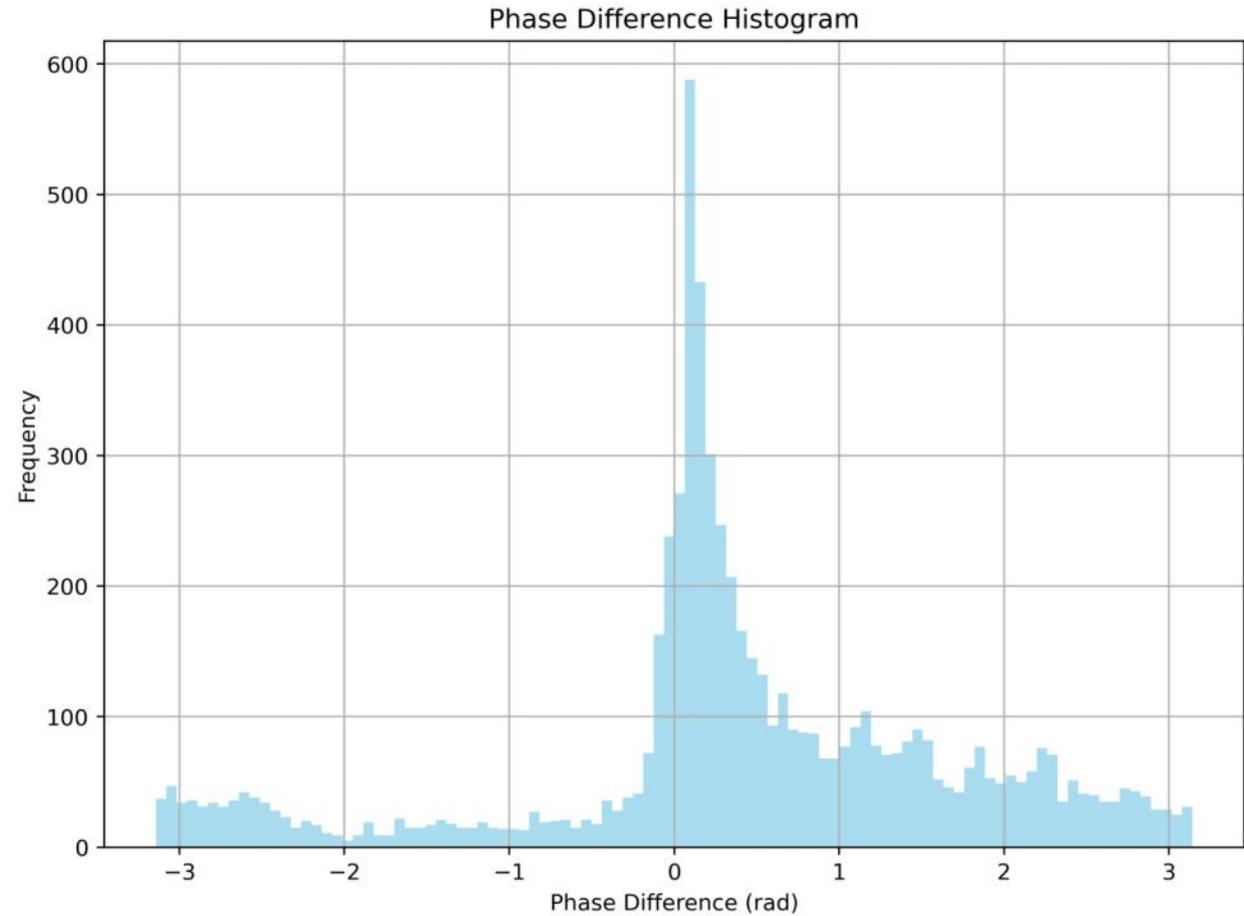
三层超原子参数响应结果

相位调控-参数响应

相位差涵盖了 $(-\pi, \pi)$ 整个区间!



单元相位分布



相位差直方图

· 光束偏折非互易超表面-包含局部响应

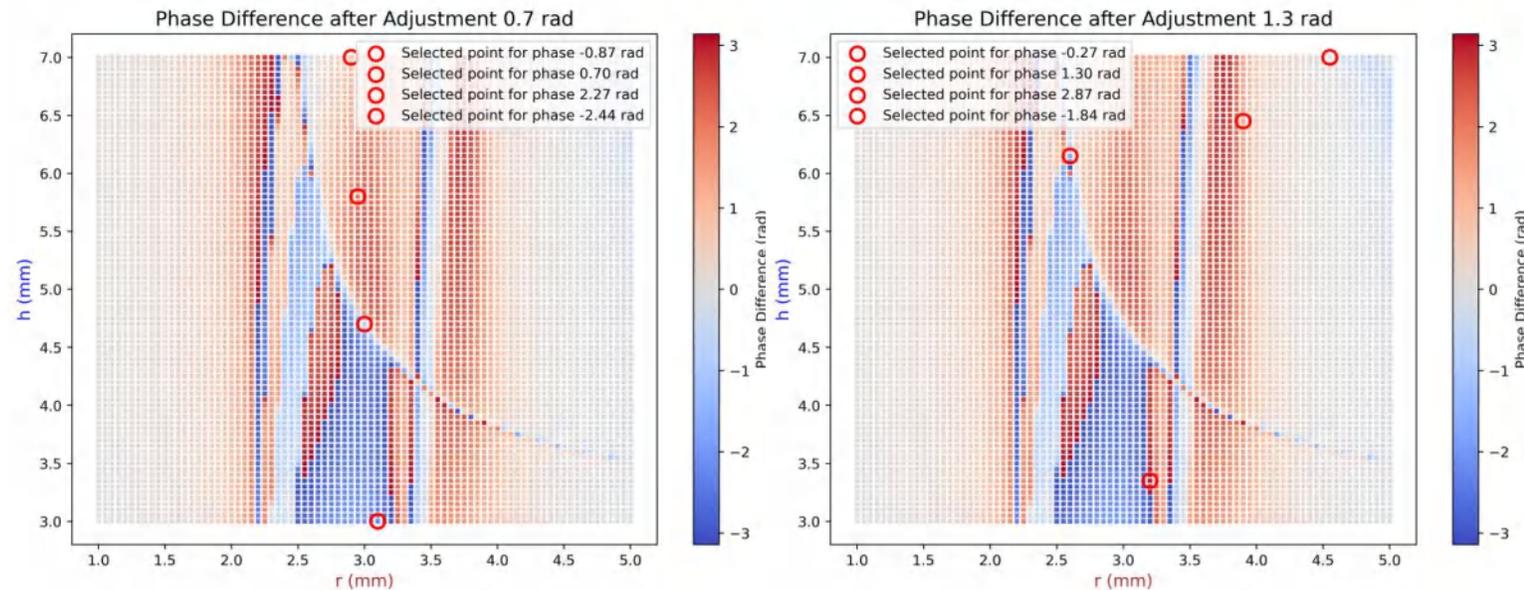
我们假设不区分局部响应，并认为其能够实现有效的调控。为实现光束偏折的非互易超表面，我们希望该超表面能够实现单向透射与单向光束偏折。为达到这一目的，相位调控应满足以下要求：一个方向的透射相位基本保持一致，而另一个方向的透射相位呈现 $(0, \pi/2, \pi, 3\pi/2)$ 的梯度变化，从而导致相位延迟和光束偏折。

采用 FOM 评估方法^[10]，越高效果越好

$$T_{\text{eff},f} = T_f \frac{\sin\left(|\phi_f - \phi_{\text{target},f}|\right)}{|\phi_f - \phi_{\text{target},f}|}$$

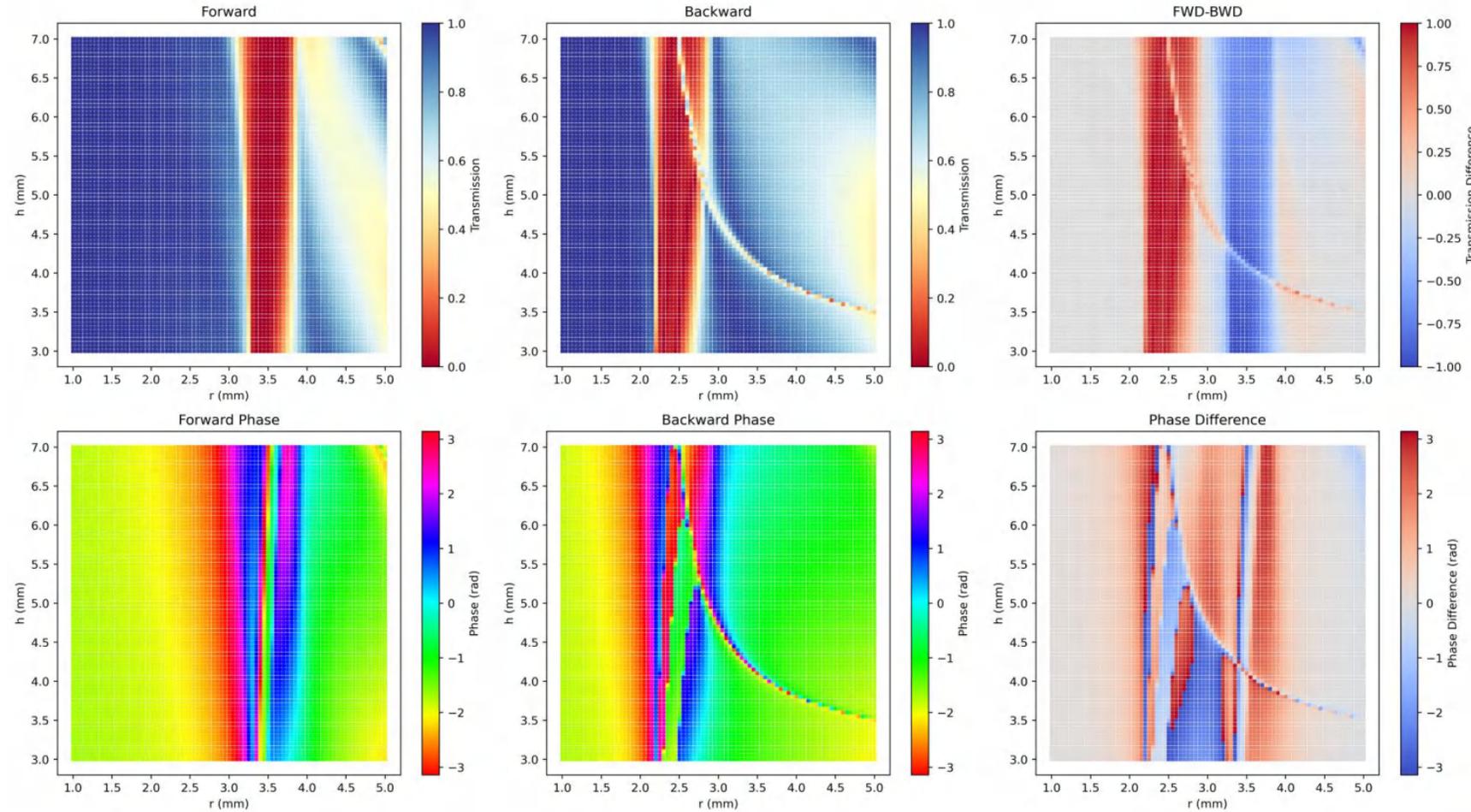
$$T_{\text{eff},b} = T_b \frac{\sin\left(|\phi_b - \phi_{\text{target},b}|\right)}{|\phi_b - \phi_{\text{target},b}|}$$

$$\text{FOM} = T_{\text{eff},f} \cdot T_{\text{eff},b}$$

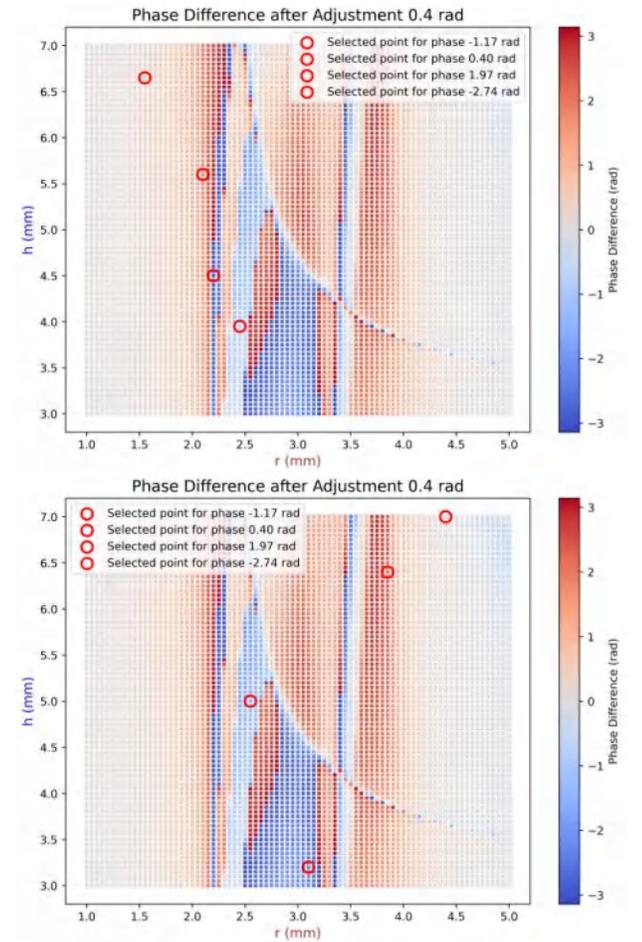


最优单元位置 (左) 正向 (右) 反向

光束偏折非互易超表面-剔除局部响应



剔除局部响应的三层超原子参数响应结果

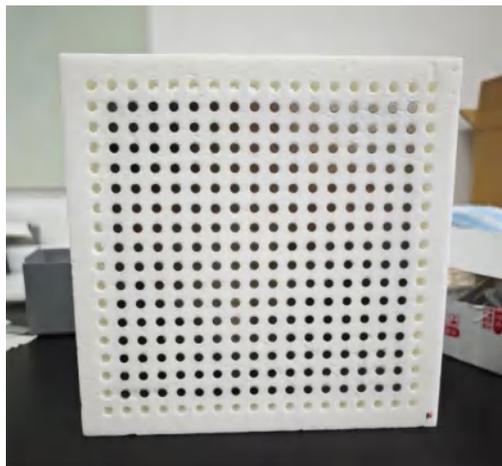


剔除后的最优单元 (左) 正向 (右) 反向

实验验证



超原子结构图



超表面结构图

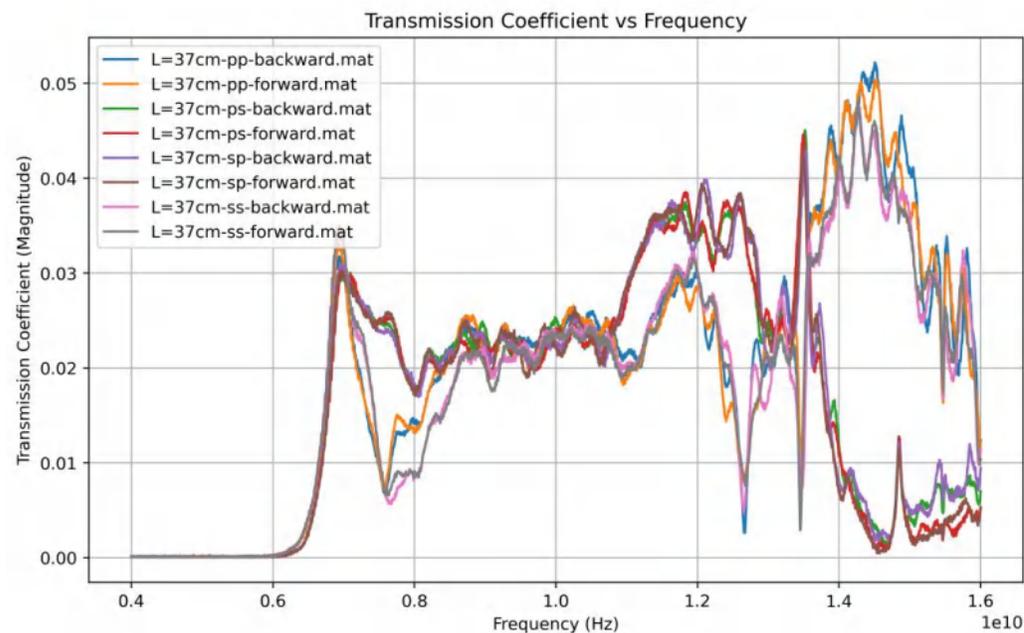


实验测量场景



实验仪器

在实验中无法直接进行圆偏振的测量，需要测量线偏振再进行换算，得到圆偏振的结果。具体实验中，测量区间为 6GHz-16GHz，共测量了 8 组结果，分别对应 ss、sp、ps、pp 波的出射和入射，以及前向和后向。



线偏振实验透射谱

实验验证

利用公式将线偏振转换为圆偏振

$$T_{rr} = (T_{xx} + T_{yy}) + i(T_{xy} - T_{yx}),$$

$$T_{rl} = (T_{xx} - T_{yy}) - i(T_{xy} + T_{yx}),$$

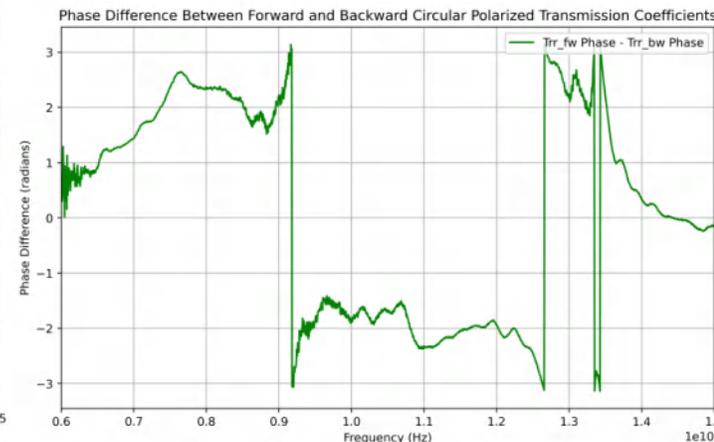
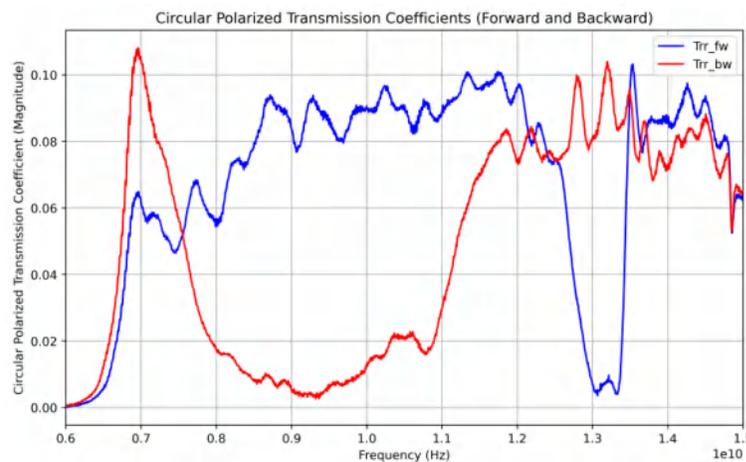
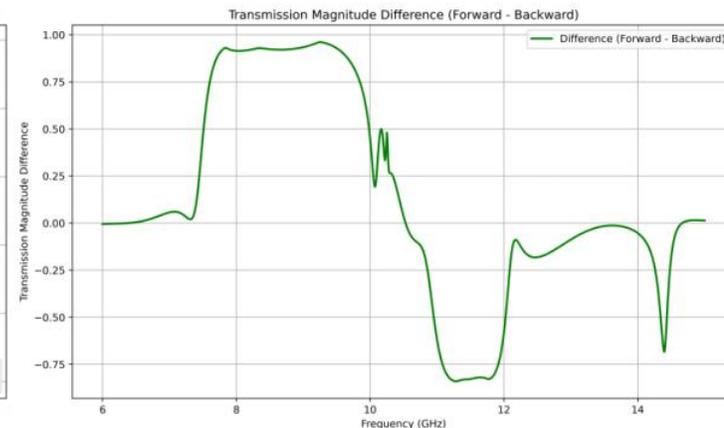
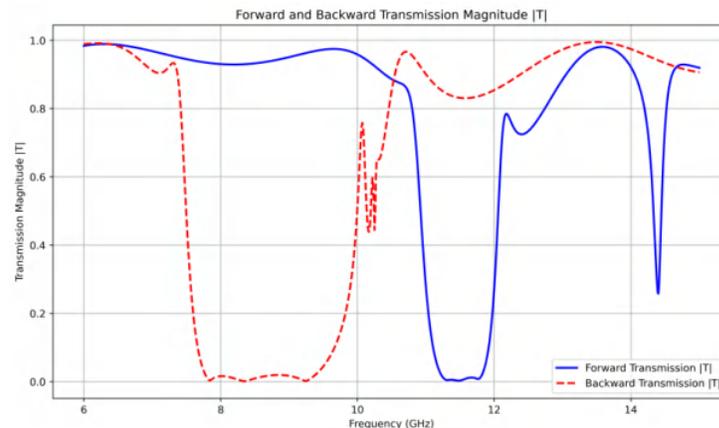
$$T_{lr} = (T_{xx} - T_{yy}) + i(T_{xy} + T_{yx}),$$

$$T_{ll} = (T_{xx} + T_{yy}) - i(T_{xy} - T_{yx}).$$

选择 x 为 p 方向，y 为 s 方向。

在透射谱方面，仿真与实验的曲线趋势大体上是一致的，这表明我们的仿真模型在一定程度上能够准确地预测实验结果。

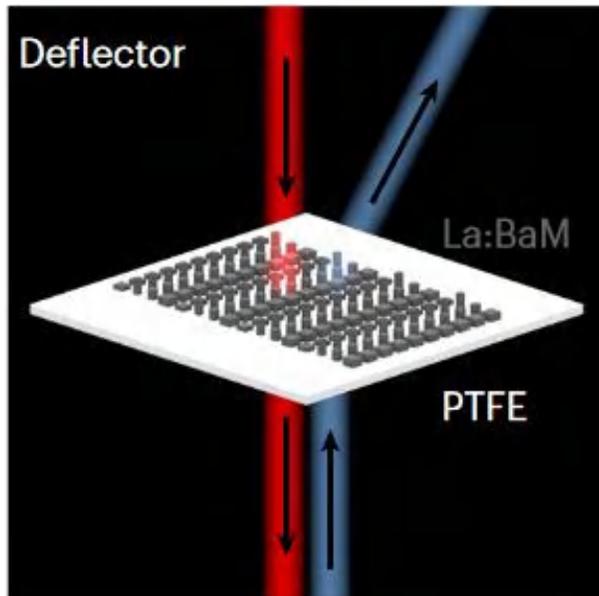
然而，我们也注意到在高频区域出现了频移现象，这可能是由于实验条件与仿真假设之间的差异所导致的。



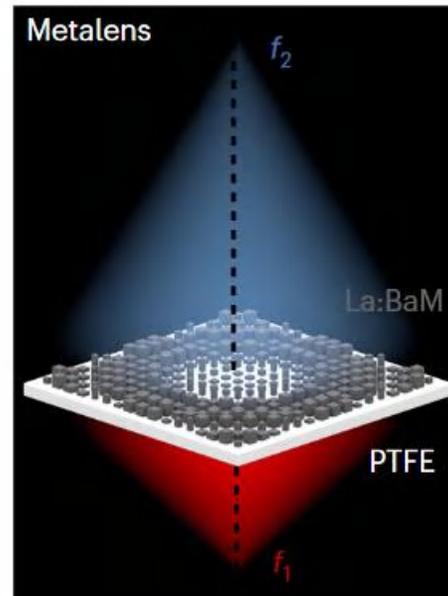
仿真和实验的圆偏振透射谱及前后向相位差

· 未来研究展望

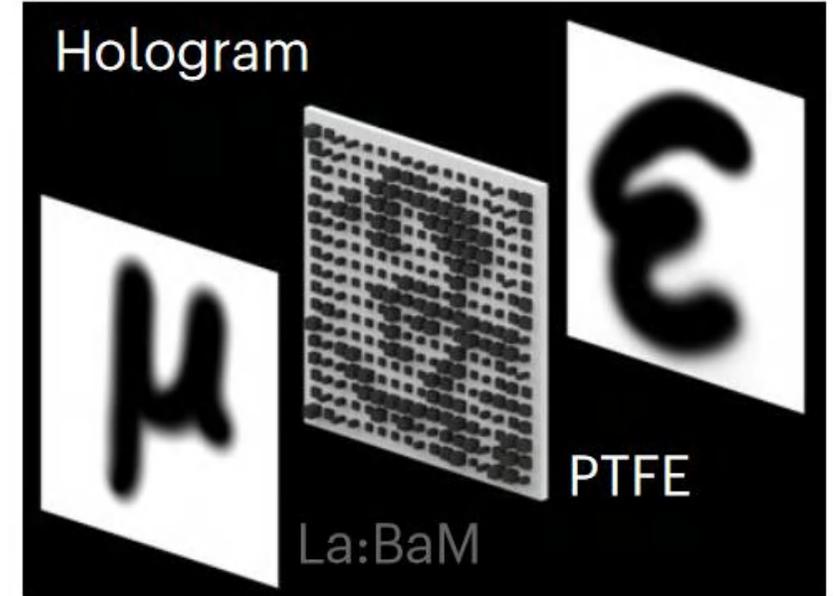
- 1、优化结构，考量单层和三层结构在相位调控中的优缺点，选择合适的结构。
- 2、提升算法，扩展算法功能，提升算法适配性，构建更多、更丰富的非互易超表面。
- 3、扩大参数范围，如实验有效扫参频率、实验样品尺寸以及仿真扫参范围，获取更多有效数据。



非互易光束偏转示意图^[4]



非互易超透镜示意图^[4]



非互易全息术示意图^[4]



· 总结

1

课题背景：研究方向前沿，研究价值高。

2

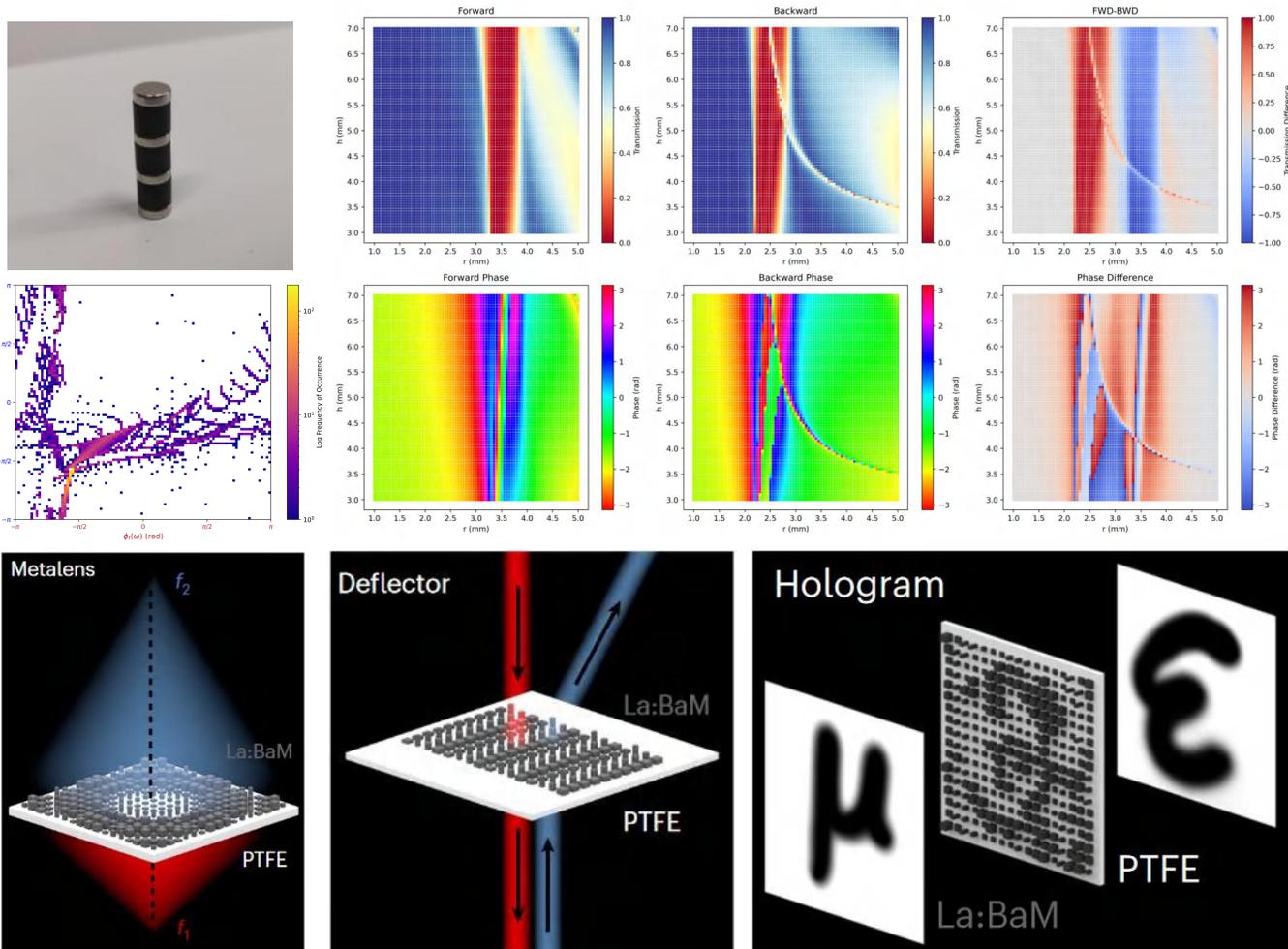
研究基础：研究基础完备，目标选择清晰。

3

研究成果：研究成果丰富，结果十分明显。

4

未来展望：研究前景广泛，提升思路明确。





中山大學
SUN YAT-SEN UNIVERSITY

谢谢老师

中山大学物理学院



2021级 物理学专业 路尚润

2024年11月11日

• References

- [1] Hou-Tong, Chen A, Taylor J N. A review of metasurfaces: physics and applications[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2016, 79(7): 076401.
- [2] Soukoulis C M, Wegener M. Past achievements and future challenges in the development of three-dimensional photonic metamaterials[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5: 523-530.
- [3] Yu N, Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces[J]. *Nature Materials*, 2014, 13(2): 139-150.
- [4] Yang W, Qin J, Long J, Yan W, Yang Y, Li C, Li E, Hu J, Deng L, Du Q, Bi L. A self-biased non-reciprocal magnetic metasurface for bidirectional phase modulation [J]. *Nature Electronics*, 2023, 6: 234-243.
- [5] Pan H, Chen MK, Tsai DP, Wang S. Nonreciprocal Pancharatnam-Berry metasurface for unidirectional wavefront manipulations[J]. *Optics Express*, 2024, 32(25): 25632.
- [6] Jin B, Argyropoulos C. Self-induced passive nonreciprocal transmission by nonlinear bifacial dielectric metasurfaces. *Phys. Rev. Applied*. 2020, 13:054056.
- [7] Ma Q, Chen L, Jing H B, Hong Q R, Cui H Y, Liu Y, Li L L, Cui T J. Controllable and programmable nonreciprocity based on detachable digital coding metasurface [J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7: 1901285.
- [8] Suzuki S, Santria A, Oyama T, Akao KI, Ishikawa N. Electronic structure analysis of phthalocyanine complexes using magnetic circular dichroism and magnetic circularly polarized luminescence spectroscopy. *Chirality*, 2024, 36(1): e23625.
- [9] Bhoi B, Kim S-K. Photon-magnon coupling: Historical perspective, status, and future directions. *Solid State Physics*. 2019.
- [10] Shalaginov, M. Y. et al. Reconfigurable all-dielectric metalens with diffraction-limited performance. *Nat. Commun.* 12, 1225 (2021).



· 光束偏折最优单元参数

正向相位持平最优单元

半径 (r)	高度 (h)	正向透射率	反向透射率	正向相位	反向相位
3.00 mm	4.70 mm	0.89	0.53	3.08 rad	-2.42 rad
2.90 mm	7.00 mm	0.93	0.68	2.97 rad	2.09 rad
2.95 mm	5.80 mm	0.92	0.88	2.84 rad	0.61 rad
3.10 mm	3.00 mm	0.90	0.97	3.11 rad	-0.55 rad

反向相位持平最优单元

半径 (r)	高度 (h)	正向透射率	反向透射率	正向相位	反向相位
4.55 mm	7.00 mm	0.79	0.87	-0.99 rad	-0.92 rad
3.90 mm	6.45 mm	0.63	0.70	0.80 rad	-0.64 rad
3.20 mm	3.35 mm	0.70	0.99	2.13 rad	-0.64 rad
2.60 mm	6.15 mm	0.96	0.71	-2.52 rad	-0.81 rad

正向相位持平最优单元(剔除局部响应)

半径 (r)	高度 (h)	正向透射率	反向透射率	正向相位	反向相位
2.45 mm	3.95 mm	0.98	0.04	-1.95 rad	-0.53 rad
1.55 mm	6.65 mm	1.00	1.00	-1.98 rad	-2.64 rad
2.10 mm	5.60 mm	0.99	0.93	-2.16 rad	1.93 rad
2.20 mm	4.50 mm	0.99	0.41	-2.19 rad	0.70 rad

反向相位持平最优单元(剔除局部响应)

半径 (r)	高度 (h)	正向透射率	反向透射率	正向相位	反向相位
2.55 mm	5.00 mm	0.98	0.04	-2.29 rad	-0.91 rad
4.40 mm	7.00 mm	0.65	0.83	-0.65 rad	-0.80 rad
3.85 mm	6.40 mm	0.41	0.70	1.58 rad	-0.63 rad
3.10 mm	3.20 mm	0.89	0.98	2.52 rad	-0.74 rad

