

成绩: _____ 《仪器光学设计》课程报告

布儒斯特角显微镜系统

学 院 精密仪器与光电子工程学院
专 业 测控技术与仪器
年 级 2022 级
班 级 4 班
姓 名 卢雨萌
学 号 3022202283

2024 年 12 月 19 日

一、 题目解析

1. 任务分析

本次作业的具体任务包括：

- (1) 调研布儒斯特角显微镜的组成部件、组件功能和基本工作原理；
- (2) 建立成像系统的数学模型；
- (3) 设计合适的系统组件并选择合适的部件；
- (4) 分析、模拟、仿真光路及系统的搭建过程；
- (5) 基于仿真结果分析反射光强的影响因素，及其对测量结果的影响。

2. 基础知识

(1) 物理光学&应用光学

- I. 光的偏振：**理解不同的偏振状态，如线偏振光、圆偏振光、椭圆偏振光等，了解如何利用半波片 HWP 和格兰激光偏振片 GL 调节光的偏振方向。
- II. 布儒斯特角的相关定律：**理解布儒斯特角定义及其在不同材料间的反射光特性。其中对于 p 偏振光，当入射角为布儒斯特角时，反射率为 0。
- III. 菲涅尔定律：**理解折射定律、反射定律及其在薄膜界面（折射率突变处）的应用，能够在不同波长的光下进行反射率分析，会计算反射和透射光强。
- IV. 色差：**理解色差产生的原因，并了解校正色差的方法。
- V. 琼斯矩阵：**理解琼斯矩阵对光的偏振态及在光学元件上偏振变化的描述。
- VI. 光学显微镜基本原理：**如何通过光学透镜、物镜等组件聚焦光线，形成图像。

(2) Zemax

会使用 Zemax 进行光学系统的建模和仿真，了解光源、偏振、透镜、样品和检测器的光路设计。

(3) 实验设计与仿真能力

- I. 设计样品台、光源、探测器等组件的规格/参数。
- II. 设置合适的入射角和偏振状态，确定如何通过实验验证仿真结果，选定仿真结果对系统的评价指标。

3. 部件组成与基本工作原理

(1) 部件组成及功能

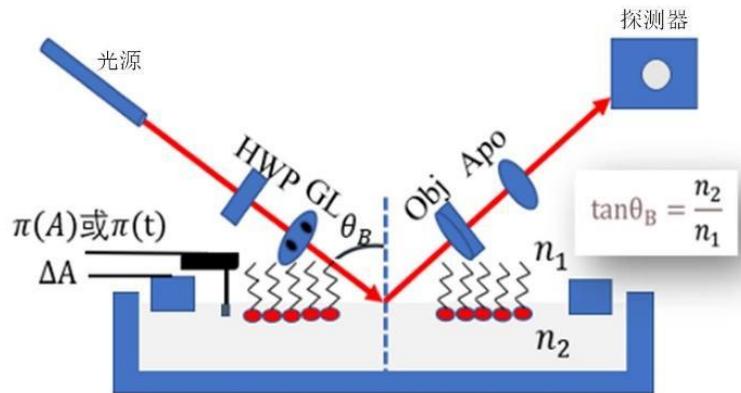


图 1 布儒斯特角显微镜组成

器件	功能
光源	提供入射光
HWP (半波片)	旋转入射光的偏振方向，以获得想要的方向的偏振光（如 p 偏振光、s 偏振光）
GL (格兰激光偏振片)	生成线偏振光，确保光源的偏振质量
OBJ (物镜)	汇聚入射光
APO (消色差透镜)	修正不同波长的光学色差
样品表面 (单分子膜)	提供不同折射率的分界面，影响反射光的强度和偏振状态
探测器	用于检测反射光的强度和偏振特性

(2) 基本工作原理

布儒斯特角显微镜（后用 BAM）的基本工作原理是基于**布儒斯特角原理与偏振光学成像**，主要用于观测薄膜表面特性和微观结构，适用于单分子膜、液晶、聚合物等样品表面的研究。

I. 布儒斯特角原理

当光线从介质 n_1 以特定角度入射到另一种介质 n_2 时，入射角若等于布儒斯

特角 θ_B , 反射光中不包含 p 偏振光（电场振动方向平行于入射面），只有 s 偏振光（电场振动方向垂直于入射面）。

布儒斯特角的数学表达式为：

$$\tan \theta_B = \frac{n_2}{n_1}$$

θ_B : 布儒斯特角

n_1 : 入射介质的折射率（如空气 $n_1 \approx 1$ ）

n_2 : 样品介质的折射率

II. 基本工作原理

① 光源发射偏振光

- 光源通过 HWP 和 GL 后产生 p 偏振光。

② 光以布儒斯特角入射到样品表面

- 光束以布儒斯特角 θ_B 入射到样品表面。
- 对于理想光滑表面，p 偏振光几乎完全透射，反射光中仅含有的 s 偏振光（且光强有所衰减），导致反射光强度非常低。
- 如果样品表面存在缺陷、粗糙度或厚度变化，会引起：
 - 光的局部散射；
 - p 偏振光的部分反射；
 - 光的强度与偏振状态发生变化。

③ 光学成像系统捕捉反射光

- OBJ 和 APO 将反射光聚焦到探测器上。
- 探测器记录反射光强度分布，形成图像。

④ 图像形成与表面分析

- 表面光滑区域：p 偏振光几乎不反射，图像呈暗区域。
- 表面非均匀区域（缺陷、粗糙度等）：p 偏振光被部分反射，图像中出现亮斑或对比度变化。

通过对图像的强度分布进行分析，可以获得样品表面的：

- 均匀性（平滑区域 vs 缺陷区域）；

- 缺陷或粗糙度的位置和尺寸;
- 薄膜厚度变化（表面粗糙度）引起的反射光强度差异。

4. 成像系统的数学模型

BAM 的成像系统数学模型主要涉及：菲涅尔反射定律（光的反射特性）、光学成像原理和偏振光。下述是基于布儒斯特角条件和光学成像理论对系统数学模型的建立。

(1) 反射模型

通过 Fresnel 方程可以定量描述反射光和透射光的比例，对于 s 光和 p 光，反射率 R_s 和 R_p 分别为：

$$R_s = \left| \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \right|, \quad R_p = \left| \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t} \right|$$

θ_i : 入射角

θ_t : 折射角，通过斯涅耳定律 $n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t$ 确定。

当入射角 $\theta_i = \theta_B$ 时， $R_p=0$ ，即没有 p 偏振光被反射，只有 s 偏振光。

(2) 光学分辨率与传输模型

I. 分辨率

BAM 的分辨率受光学系统的衍射极限和 NA 影响，根据阿贝公式，系统的最小可分辨结构尺寸为：

$$d = \frac{\lambda}{2 \cdot NA}$$

d : 系统的可分辨最小距离，即分辨率

λ : 入射光波长

$NA = n \cdot \sin \theta$: 数值孔径

II. 样品表面反射光的调制

BAM 利用样品表面特性导致反射光出现微小变化。反射光强 I_r 可表示为：

$$I_r = I_0 \cdot R_p$$

I_0 : 入射光强度

R_p : p 偏振光反射率（受样品表面微结构的影响）

在布儒斯特角条件下，理想光滑表面会导致 $R_p=0$ ，但若表面存在缺陷或粗糙度，反射光中会出现 p 偏振分量，导致 $R_p>0$ 。

(3) 偏振光的调控模型

BAM 中，HWP 和 GL 用来调节光源的偏振状态：

- **HWP**: 旋转偏振光的方向，通过调节半波片角度 θ ，实现偏振光调控。
- **GL**: 输出纯净的 p 偏振光，确保入射光满足布儒斯特角条件。

入射光的偏振方向通过 Jones 矩阵或偏振光矢量模型表示。

对于半波片的琼斯矩阵：

$$J = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta - \sin^2 \theta & 2 \cos \theta \sin \theta \\ 2 \cos \theta \sin \theta & \sin^2 \theta - \cos^2 \theta \end{bmatrix}$$

(4) 图像成像模型

通过探测器接收反射光的强度分布，可以获得样品表面的信息，图像亮度和对比度与反射光强 I_r 直接相关。

- **光滑表面**: 在布儒斯特角条件下，反射光 $I_r \approx 0$ ，图像中对应区域为黑暗。
- **非光滑表面（粗糙度、缺陷）**: 引起反射光的散射和偏振改变，导致 $I_r > 0$ ，出现亮度变化。

二、 调研内容

1. BAM 实现流程图



图 2 BAM 的实现流程图

2. BAM 系统结构图

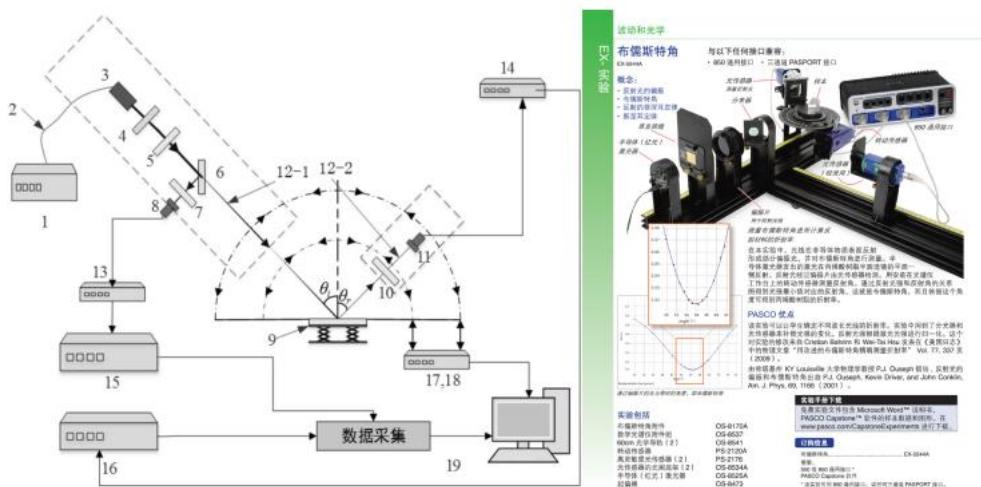


图 3 BAM 的系统结构图 (图源网络)

3. 调研 BAM 的技术指标

调研仪器选择百欧林科技的 Micro BAM (KSV NIMA 小型布鲁斯特角显微镜)

指标	参数
光源波长	659nm
光源功率	50mW
入射角度	53°（固定）
图像分辨率	12（水平图像方向）

视野范围	3600x4000 (μ m)
起偏器、分析器	固定
分辨率	640x480
帧速	30

三、仿真实现过程

1. 设计 BAM 的技术指标

(1) 光源波长

光源波长范围决定成像效果，选用可见光（400nm~700nm）中的常用波长，如：532nm 绿光、633nm 红光。

经仿真，最终决定选用波长为 532nm 的光源，因其光学器件可选性强，且分辨率与系统误差易于控制。为方便优化环节，在 **532nm** 光源作为主波长的基础上，同时采用 Zemax 的 F, d, C 可见光源，以方便 APO 的色差校正。

(2) 入射角度

BAM 的关键之一就是入射角的精准控制，其决定反射光的强弱与观测效果。在调研到的仪器中，入射角精度一般为 $\pm 0.01^\circ \sim \pm 0.05^\circ$ ，可使用高精度电动旋转台或手动微调台进行调节。而入射角的基准值，对于典型的单分子薄膜表面，布儒斯特角一般为 $53^\circ \sim 57^\circ$ 。

经仿真，最终设计 3 个视场角度： 0° ， 0.01° ， 0.05° ，样品折射率为 1.333，由布儒斯特角计算公式可得其为 53.123° 。

(3) 数值孔径

分辨率决定了 BAM 对样品表面微观结构的细节解析能力。在前面给出的数学模型中，依据阿贝公式可知分辨率与光源、数值孔径有关。

经仿真，选定物镜的数值孔径 NA 为经典值 0.3，此时由于入射光主波长为 532nm，可以求得系统的横向分辨率约为 886nm，即 $0.9 \mu m$ 。

(4) 信噪比

垂直分辨率（即表面微观起伏）与反射光强的微小变化有关，这由探测器的信噪比和动态范围确定。

经调研，探测器的 SNR 典型值为 5~10nm，选定探测器为 CCD 相机，其像素分辨率为 1280x1024，单像素尺寸为 $5.2 \mu m \times 5.2 \mu m$ ，通过 10x 的物镜，可将系统分辨率提升至 500nm~1 μm 级别。

指标	参数
光源	主波长为 532nm，其余波长为 F (486nm)， d (588nm)， C (656nm)
视场角	0° , 0.01° , 0.05°
入射角度（布儒斯特角）	53.123°
数值孔径	0.3
横向分辨率	$0.9 \mu m$
垂直分辨率	500nm~1 μm
探测器 (CCD) 分辨率	1280x1024，像素为 $5.2 \mu m$

2. Zemax

(1) 简单介绍

Zemax

Zemax 是一款专业的光学设计和分析软件，被广泛应用于光学工程、物理学以及相关领域。它为用户提供了功能强大的工具，用于设计、优化和分析各种光学系统，如镜头、望远镜、激光系统以及成像设备等。

Zemax 主要包括两种工作模式：序列模式和非序列模式。

- **序列模式** 适用于分析光线按照特定顺序通过各光学元件的情况，常用于成像系统设计（如相机镜头）。

- **非序列模式** 则更灵活，允许光线在任意方向传播，适合模拟复杂的散射、反射和折射现象，如光学仪器内部的光线散射分析。

Zemax 的核心功能包括：

1. 光线追迹：精确模拟光线传播路径。
2. 优化设计：通过算法调整参数，以获得性能最佳的光学系统。
3. 公差分析：评估制造误差对光学性能的影响。
4. 波前分析：支持复杂的干涉和衍射计算。

(2) 操作步骤及说明

① 设置基本参数，主要包括系统孔径、波长等



图 4 Zemax 设置孔径、波长的操作界面

② 设置视场

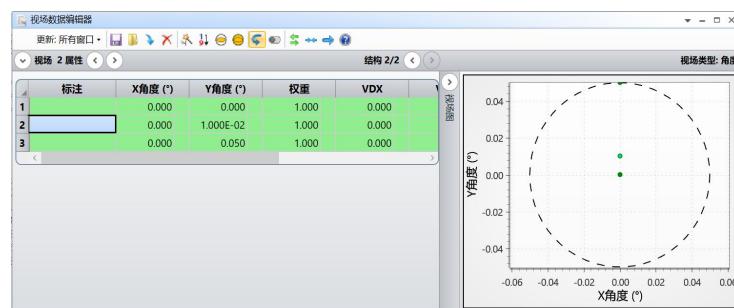


图 5 Zemax 设置视场的操作界面

③ 设计相关镜头数据



图 6 Zemax 镜头数据的操作界面

④ 设计多重结构 (如有需要)



图 7 Zemax 多重结构的操作界面

⑤ 分析（如点列图、偏振光瞳、光程差、干涉图等等）

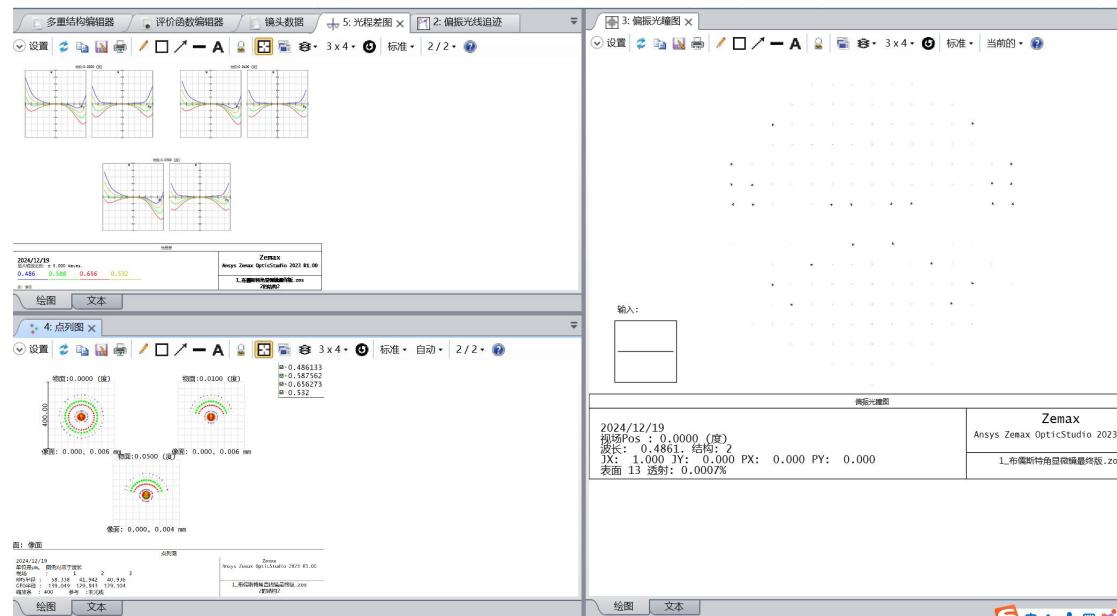


图 8 Zemax 分析相关指标

⑥ 优化（根据需求设置变量、优化函数进行优化，使用评价函数评价系统性能）

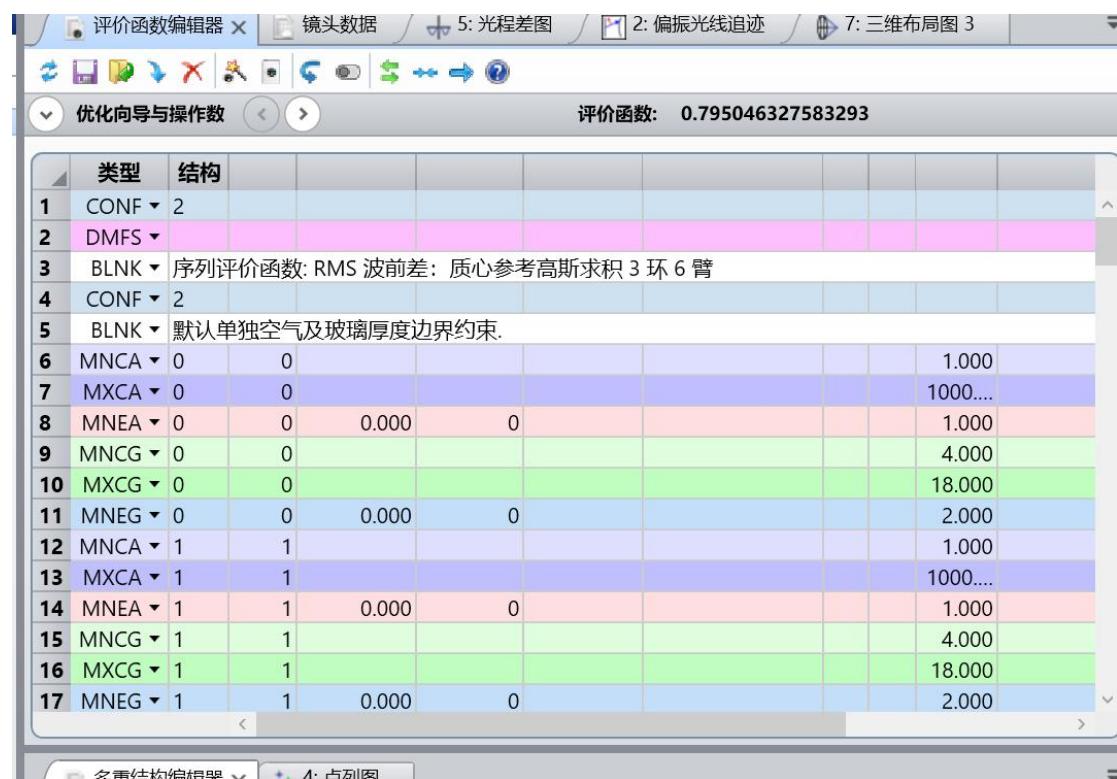


图 9 Zemax 优化界面

3. BAM 各部件的实现/仿真方法

为实现更准确、更高精度的仿真，并没有采用 GL 作为起偏器，而是使 Zemax 的入射光源直接为想要的偏振态（四、1.（2）中会具体解释原因）。基于此，入射光源将依次通过：扩束镜、半波片、待测膜层、物镜、消色差透镜。

（1）扩束镜

根据设计指标，入射光源为主波长 532nm，数值孔径 0.3 的点光源，首先使用一透镜对其进行扩束，扩充成净口径为 2 的光源。应计算的参数有：平面厚度 x ，曲面曲率及材料。

$$\begin{cases} NA = n \cdot \sin \theta \\ x = \frac{2}{\tan \theta} \end{cases}$$

由 MATLAB 求得： $\theta = 17.457603^\circ$ ， $x = 6.359595$

曲面材料选用 BK7 玻璃，镀膜 AR 以减小无用的反射，曲率半径设置为变量，在评价函数中设定像面的入射角度为 z 方向（RANG 操作数） 0° ，进行优化求解，优化后的评价函数达 10^{-10} 量级，求解的曲率为： -3.987。

（2）HWP

半波片由“琼斯矩阵”表面类型进行仿真设计，为实现 $\frac{\lambda}{2}$ 的偏振态偏转（即 90° ），设置 $A=D=0$ ； $Re\{B\}=Re\{C\}=1$ ； $Im\{B\}=Im\{C\}=0$ ，曲率半径为双侧平面（即 Inf）。

（3）待测膜层

因选定的样品折射率为 1.333，由布儒斯特角计算公式可得： $\theta_i = \theta_B = 53.123^\circ$ 。因水的折射率为 1.333，所以假定膜层为水膜。同时增设多重结构，结构 1 为经过样品后折射光线路径；结构 2 为经过样品后反射光线路径。在多重结构操作数中设置结构 1 材质（操作数 GLSS）为 WATER，结构 2 材质为 MIRROR。为达到理想的仿真效果，结构 1 的材质 WATER 设定透射率为 0.7，结构 2 的 MIRROR 表面镀水膜（自定义）一层，厚度为 0.25nm。



图 10 透射率设置为 0.7

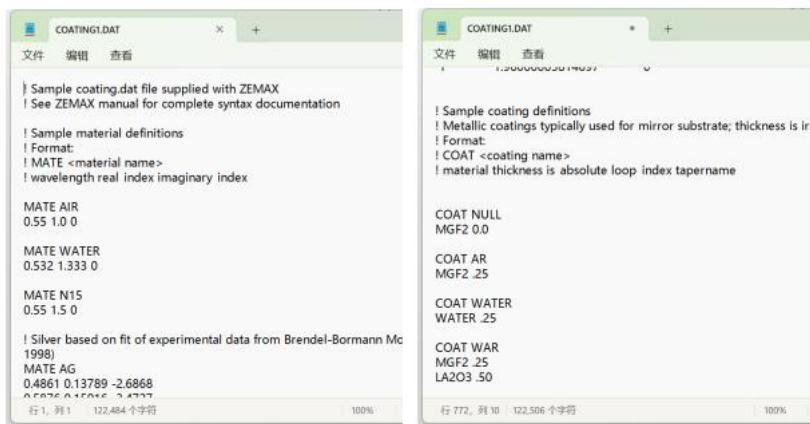


图 11 增设一自定义水膜，折射率 1.333，厚度 0.25nm

为实现入射角度，在标准面前后各放置一坐标间断。由 Zemax 的坐标系（右手系）定义，将结构 1（折射光路）的前向坐标间断 x 倾斜设置为 53.123° ，后向坐标间断应保持已有倾斜不变，即 x 倾斜设置为 0；将结构 2（反射光路）的前向坐标间断 x 倾斜设置为 53.123° ，而后向坐标间断因光线发生反射，坐标系也应发生相应角度旋转，所以同步设置 x 倾斜 53.123° 。

注意：结构 1、2 因为后向坐标间断面的参数不同，所以应使用多重结构设置（操作数 PRAM7/3）。

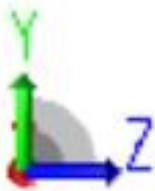


图 12 Zemax 坐标系

(4) OBJ

此物镜为单胶合会聚物镜，先大致设置曲率为-20 的 BK7 玻璃，厚度为 1，再设置平面（曲率为 Inf），两个面的具体参数应后续根据分析情况进行优化。

(5) APO

消色差双胶合透镜旨在减小不同波长的光在像面产生的光斑（这也是在主波长的基础上我增设三色光的原因）。因口径需要，将其前向面（即 OBJ 的后平面）设置为光阑，APO 的表面类型选择消色差透镜的经典表面二元面 2，（相较于其他二元面，其衍射级别为偶阶次）。初始材料设置为 BK7 和 F2（低色散和高色散），厚度、曲率半径先大致给出（如-0.1,0.1/-0.5, -1），后续根据分析情况进行优化。

注意：在待测膜层之后，因为折射光路是无用的，一切分析都应在反射光路上进行，所以厚度、曲率、二元面 x 阶项等数值都应在多重结构编辑器内完成！

(6) 优化

优化主要分为 APO 色差校正，聚焦校正，材料校正三部分。色差校正将 OBJ 后向面的厚度，APO 的各参数，以及 APO 后过渡标准面的厚度设为变量，优化函数由优化向导中选中“玻璃”，“空气”根据需要修改数值给出；聚焦校正我采用了两种，一是设置曲率为变量，评价函数由优化向导中 RAS 质心优化给出。二是采用快速聚焦，同样勾选质心选项进行快速优化；材料校正主要是 APO 两个面的材料优化，将二者设置为“替代”类型，采用锤形优化进行材料优化。

综合上述，总体镜头数据应如下：

	表面类型	标注	曲率半径	厚度	材料	膜层	净口径
0	物面	标准面 ▾	无限	6.360			2.818E-03
1		标准面 ▾	无限	0.000			2.000 U
2	(孔径)	标准面 ▾	无限	1.000	BK7	AR	2.000 U
3		标准面 ▾	-3.987	10.000			2.091
4	琼斯矩阵	矩阵	HWP	10.000			2.118
5		坐标间断	▼	0.000	-		0.000
6		标准面 ▾	无限	0.100	MIRROR	WATER	3.595
7		坐标间断	▼	-10.000	-		0.000
8		标准面 ▾	OBJ	-20.000	-1.000	BK7	2.272
9	光阑	标准面 ▾	无限	-16.955			2.241
10	二元面2	▼ APO	-2.925	-0.993	N-BK10 S		1.292
11	二元面2	▼ APO	2.174	-0.645	POLYCARB S		1.232
12		标准面 ▾	无限	-5.082			1.087
13	像面	标准面 ▾	无限	-			0.140

图 13 镜头数据

	活动: 2/2	结构 1	结构 2*
1	GLSS ▾	6	WATER
2	THIC ▾	7	15.000
3	THIC ▾	8	0.000
4	CRVT ▾	8	0.000
5	GLSS ▾	8	BK7
6	THIC ▾	9	0.000
7	GLSS ▾	10	N-BK10 S
8	THIC ▾	10	0.000
9	CRVT ▾	10	0.000
10	GLSS ▾	11	POLYCARB S
11	CRVT ▾	11	0.000
12	THIC ▾	11	0.000
13	THIC ▾	12	0.000
14	PRAM ▾	7/3	0.000
			53.123

图 14 多重结构数据

四、 仿真结果及分析

1. 偏振光状态分析

在 Zemax 的系统选项卡，进行如图 15 的入射光偏振态设置，可分以下几种典型情况：

序号	J_x	J_y	X 相位/°	Y 相位/°	偏振态
1	1	0	0	0	s 光
2	0	1	0	0	p 光
3	0.707	0.707	0	0	先偏光
4	0.707	0.707	90	0	右旋圆偏
5	0.707	0.707	0	90	左旋圆偏
6	0.707	0.707	(0, 90)	(0, 90)	椭圆偏振



图 15 入射光偏振态设置

下面以 BAM 系统所需 p 偏振光到达样品进行菲涅尔反射情况为例，对偏振态进行分析：

(1) 入射光为 s 光 ((2) 中会解释原因)

根据上面总结的表格设置入射光为 s 光，由图 16 左下角和全区域的图像对比可以看出在出射是偏振态始终为 x 向（即垂直光路传播平面）振动；出射率（即入

射光强) 为 100%。

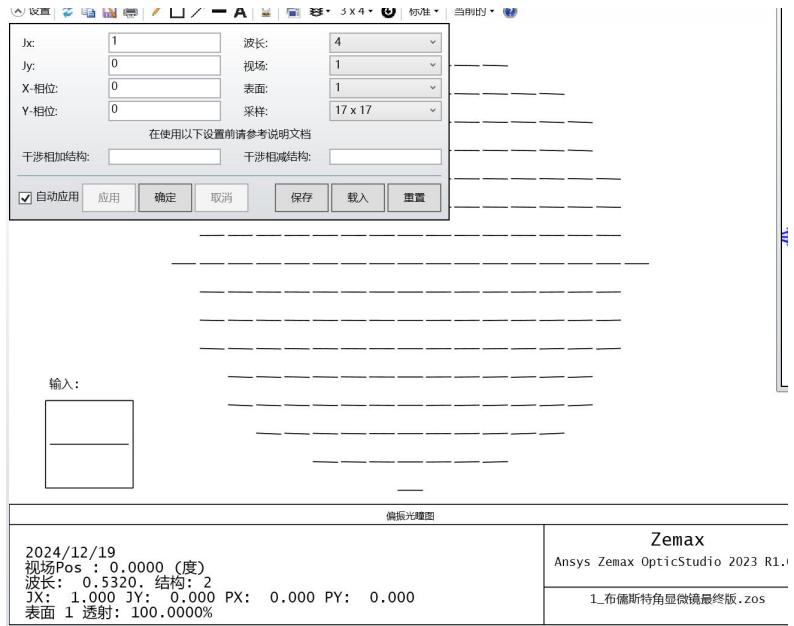


图 16 入射光偏振态 (s 光)

(2) 经过 HWP 后的偏振态

由图 17 可以发现经过 HWP 后, 偏振态发生了 90° 的旋转(即从 x 向转为 y 向), 这是由于 HWP 对 s 光的两个正交的偏正方向进行了延迟(HWP 引入相位差 π), 导致偏振光方向发生旋转。而对于前面提到的使用 Zemax 设置光源初始偏振态取代 GL 是因为制造了一种特殊情况, 即 HWP 快轴与 s 光夹角为 45 度, 这种情况下可以使 s 光经过 HWP 后完全转换为 p 光; 经过 HWP 后的 p 光才是对样品来说的入射光, 这也是 (1) 中提到的初始光源应为 s 光而不是 p 光的原因。

之所以 BAM 系统要设置的如此复杂, 而非去掉扩束镜、HWP 是基于实际情况的考虑: 实际 BAM 系统的入射光源通常为非偏振光(如自然光), 需要使用 GL 先对自然光起偏, 再用 HWP 选择所需要的 p 光。因此出于实际考虑, 在仿真中我并没有去掉扩束镜和 HWP。

从图 17 也可以看出经过 HWP 后反射率由 100% 降至 94.4606%, 可见 HWP 对入射光有一定的吸收作用。

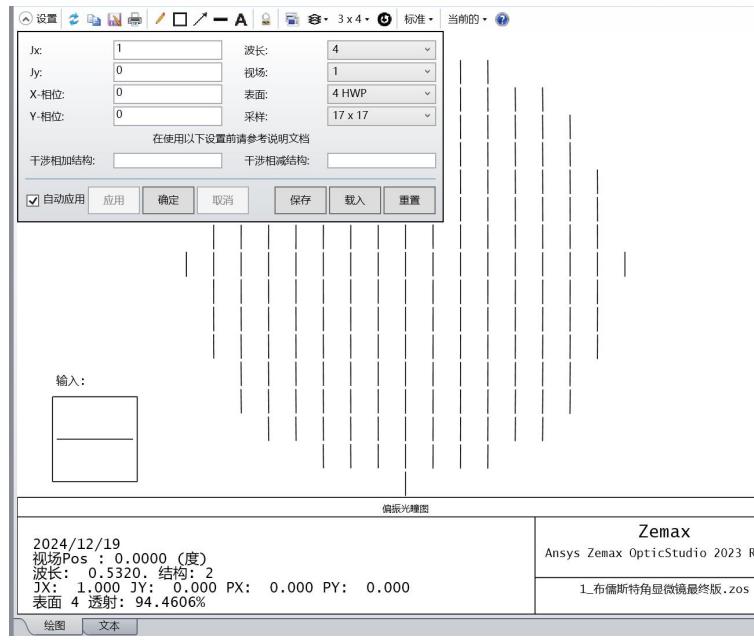


图 17 经过 HWP 后的偏振态（p 光）

(3) 经过样品后的偏振态

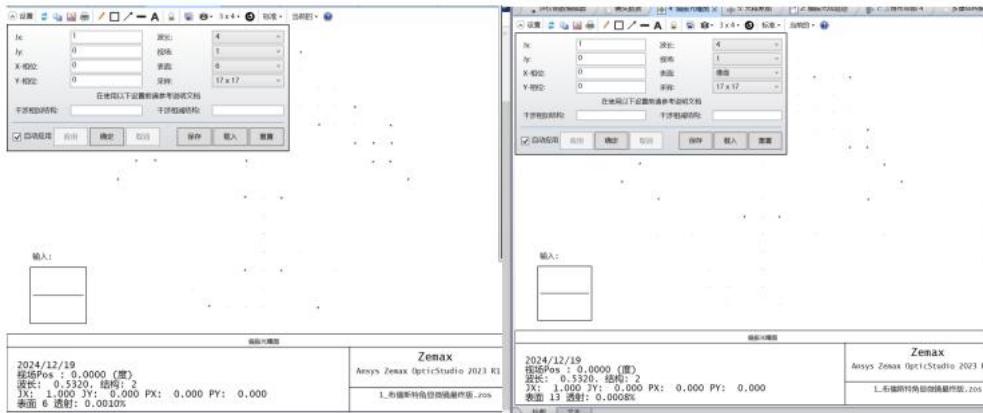


图 18 经过样品后的偏振态

（左图为经过样品后的立即偏振态，右图为经过 OBK、APO 到达像面的偏振态）

仿真的样品为厚度 0.25nm, 折射率 1.333 的水膜, 入射角为布儒斯特角 53.123° , 样品表面平滑。此种情况下, 在误差允许的范围内, 经过样品后 p 偏振光被完全吸收, 因此反射光只有微弱的 s 光, 而折射光应除去吸收的光外, 既有 p 光又有 s 光。

图 18 仿真的状态是入射光为完全 p 光，因此反射光在误差允许范围内应为 0（即实际情况视野内为全黑），由左图可以看出反射率为 0.0010%；而右图后面又经过 OBJ、APO 的吸收，以及光路传播中的自然损失等，到达像面时反射率降为 0.0008%。

在误差允许的范围内，这一结果与预期的结果反射光强为 0 完全相符！

(4) 入射光为 p 光时的像面偏振态

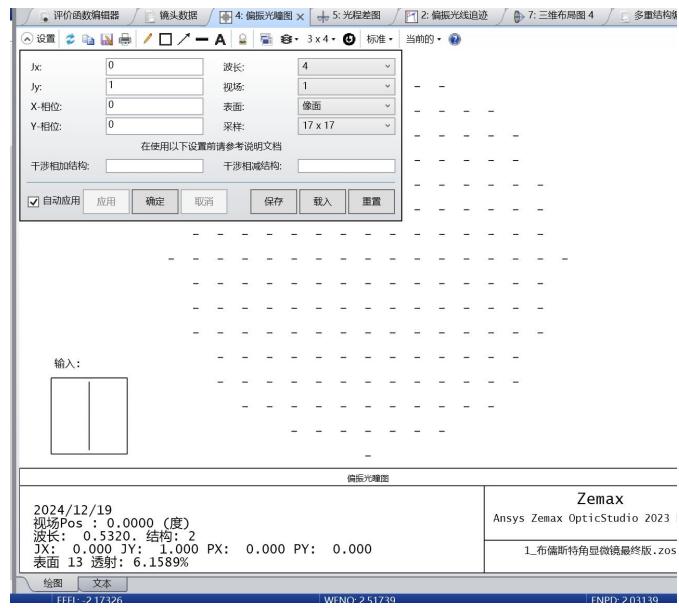


图 19 入射光为 p 光时像面的偏振态

经由上述分析，入射光 p 光时，到达样品的光应为 s 光，经过样品后应有微弱的 s 光反射至探测器。如图 19，经过 OBJ、APO 的吸收，以及光路传播中的自然损失等，到达像面时反射率为 6.1589%。

在误差允许的范围内，这一结果与预期的结果，即反射光强仅有微弱的 s 光完全相符！

(5) 入射光为圆偏光时的像面偏振态

与 (4) 相类似，入射光为圆偏光时，到达像面应只有微弱的 s 光，完全没有 p 光。如图 20，入射右旋圆偏光，像面为反射率 3.0799% 的 s 光。

在误差允许的范围内，这一结果与预期的结果，即反射光强仅有微弱的 s 光完全

相符！

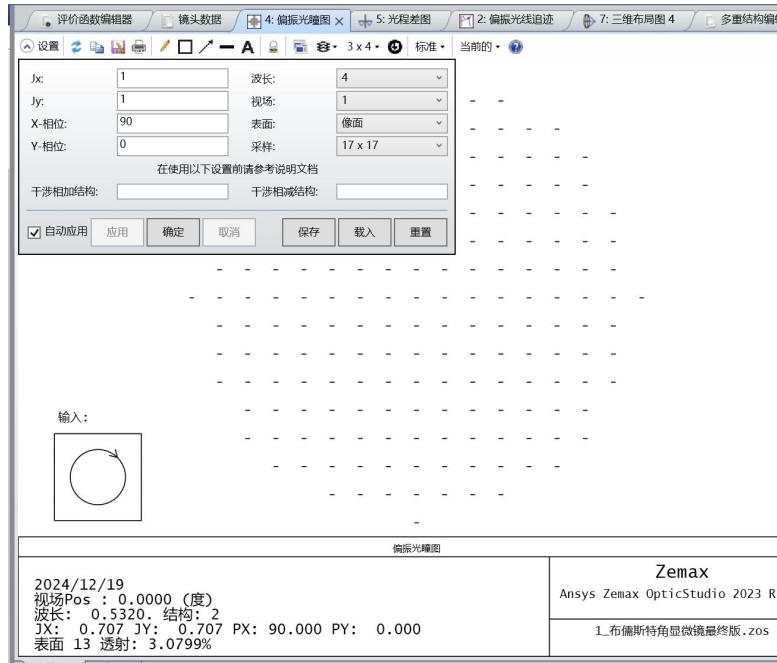


图 20 入射光为圆偏光时像面的偏振态

(6) 光都去哪了？—— 折射光路的偏振态分析

BAM 的工作原理中，在反射光路存在微弱的 s 光，但大部分的光还是经由折射进入介质中。如图 21、22 是对结构 1（折射光路）的偏振态分析，可以发现无论入射是哪种偏振态，透射率均达到 87%以上，且偏振态除经过 HWP 发生一次改变，再无变化（圆偏光变形椭圆光是由于介质的吸收导致的 J_x 、 J_y 不再相等）。

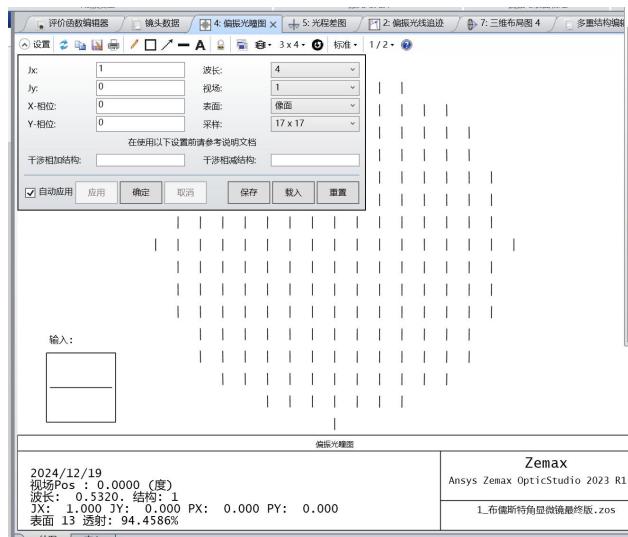


图 21 入射光为 s 时折射光路像面的偏振态

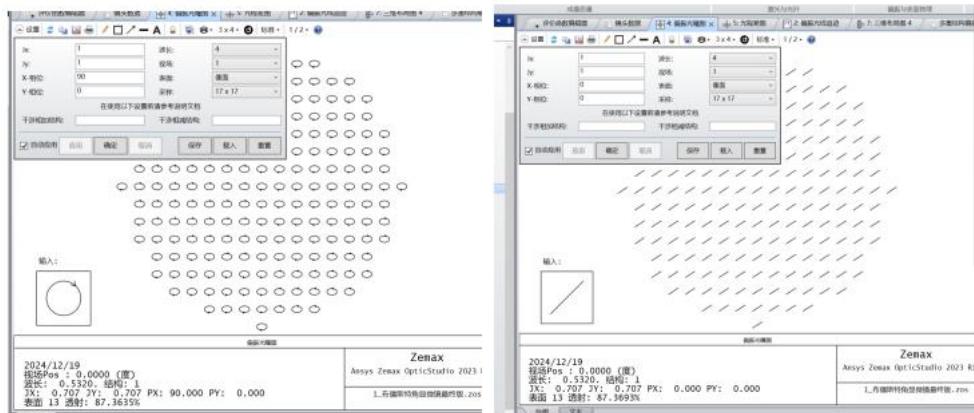


图 22 折射光路像面的偏振态

(左图右旋圆偏光, 右图 45° 线偏光)

2. 影响反射光强的因素（除样品外）及（附加）对仿真结果的影响

(1) 偏振状态

由 1 中分析可以发现反射光强的影响因素与入射光的偏振状态息息相关，因上面已附图，下面我只进行一下总结，不再赘述。

入射偏振态	反射率
p 光	0.0008%
s 光	6.1589%
45° 线偏光	3.0801%
左旋圆偏光	3.0799%
右旋圆偏光	3.0799%
随便弄了个椭偏光	3.0800%

(2) 入射角度

当且仅当布儒斯特角入射时为理想 BAM 工作条件，但如果现实中因为人为操作导致的角度的微小变化，也会对反射光强造成一定影响。

通过修改前向坐标间断的参数 3 (x 倾斜)，即多重结构中的后向坐标间断参数 3 (x 倾斜)，可以实现入射角度微小变化的仿真情况。

下面对修改入射角度进行仿真分析（仅展示 s 光入射时反射光路像面的偏振态，即正确 BAM 工作条件）。如图 23-27 所示，总结表见下。

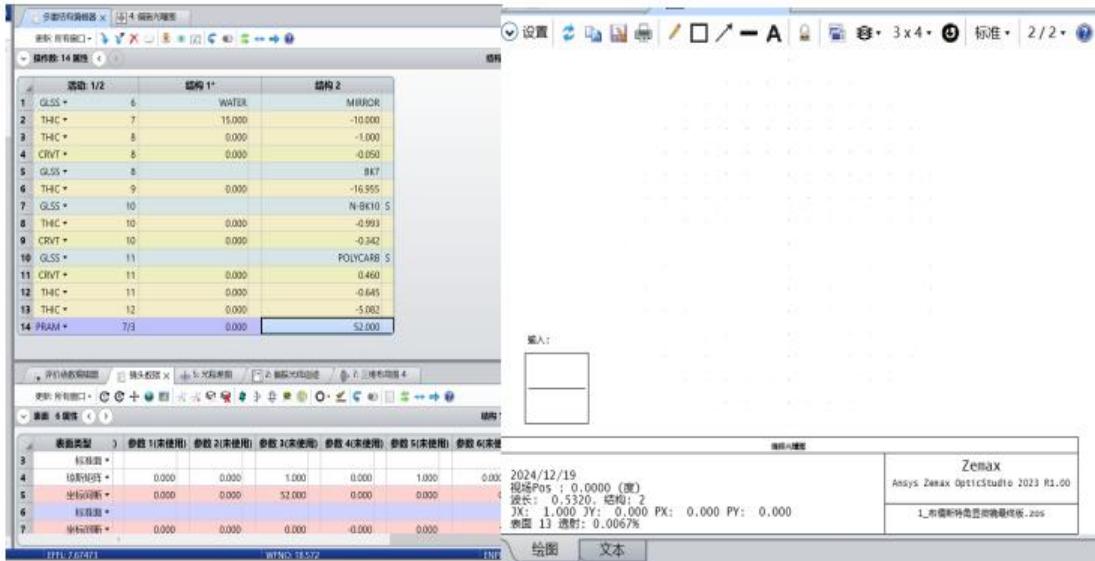


图 23 入射角 52° 时的像面的偏振态

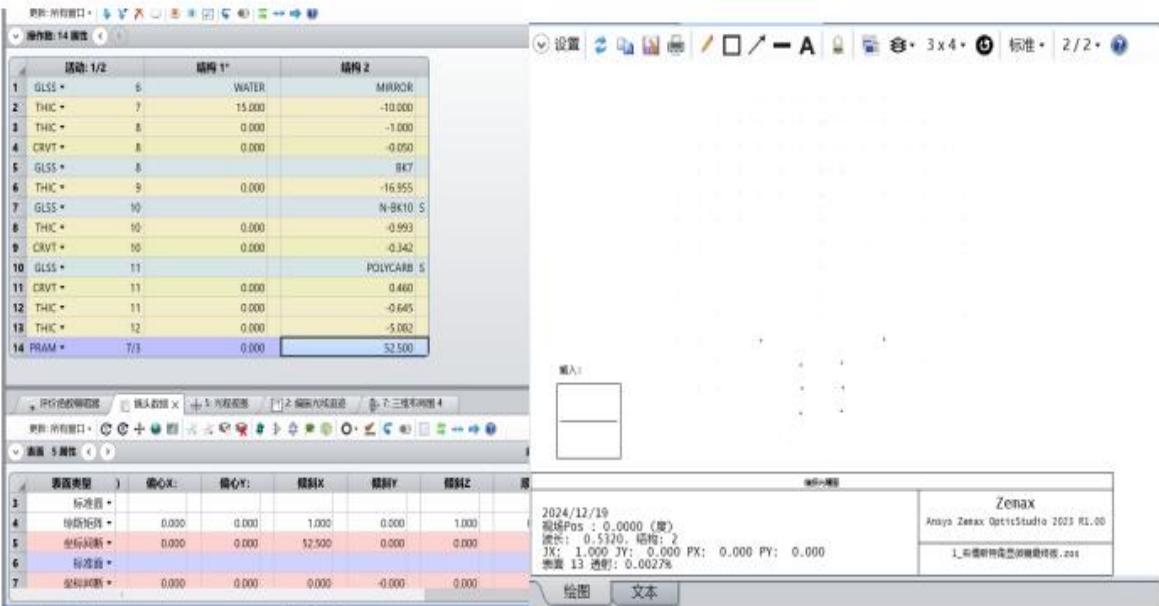


图 24 入射角 52.5° 时的像面的偏振态

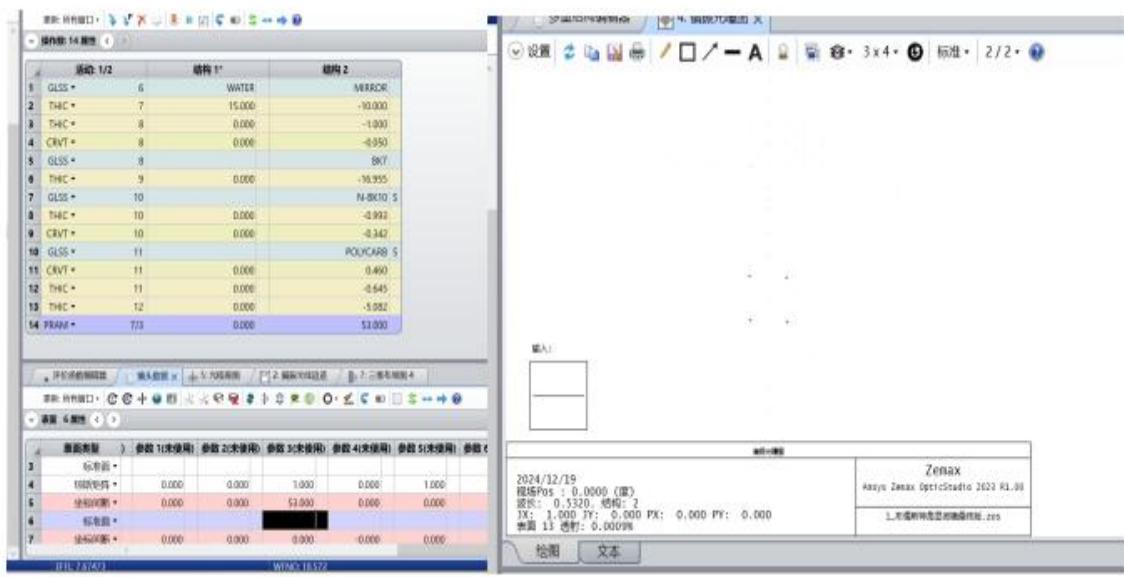


图 25 入射角 53° 时的像面的偏振态

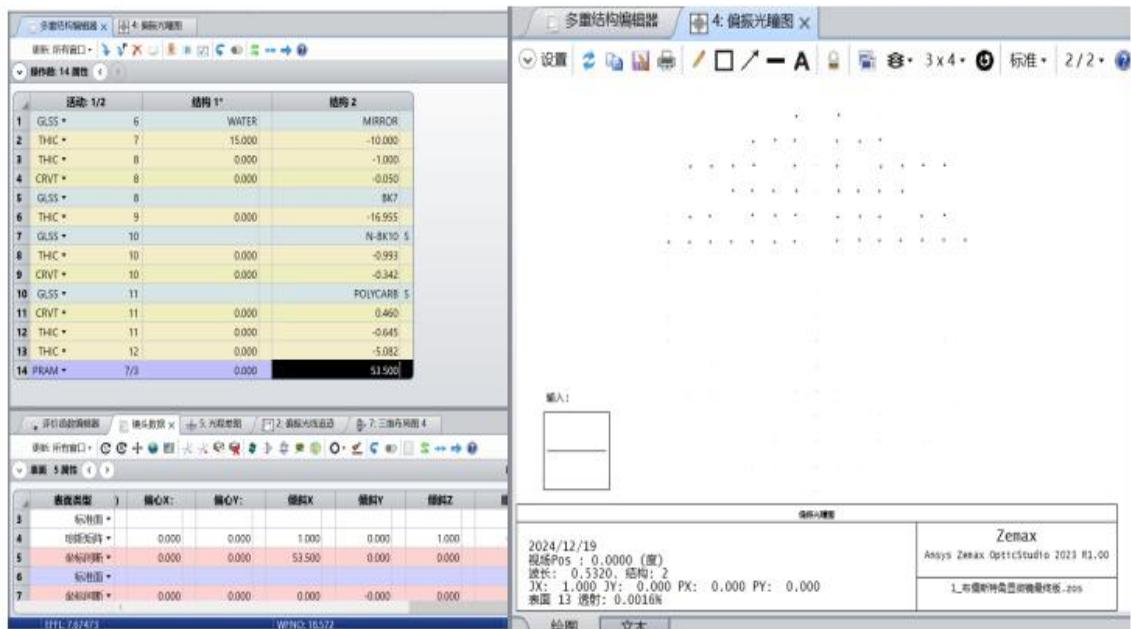


图 26 入射角 53.5° 时的像面的偏振态

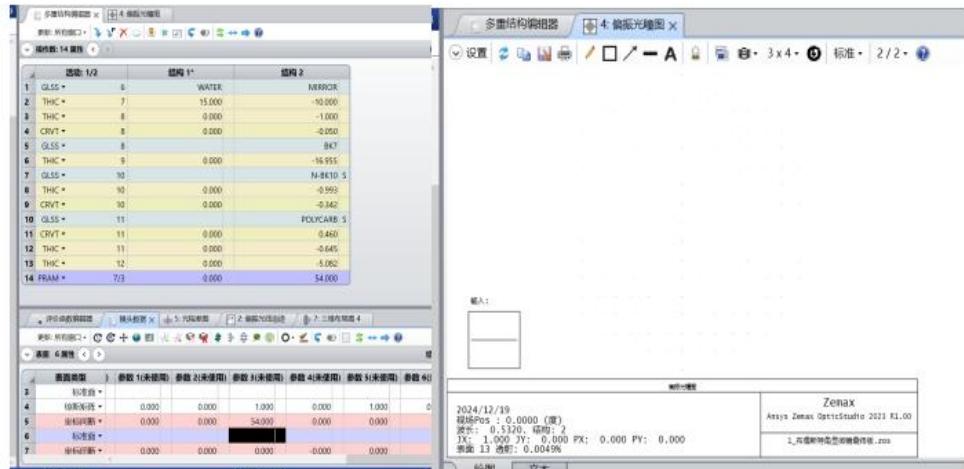


图 27 入射角 54° 时的像面的偏振态

入射角度/ $^\circ$	反射率
52	0.0067%
52.5	0.0027%
53	0.0009%
53.123 (标准)	0.0008%
53.5	0.0016%
54	0.0049%

由图像和表格可以看出，当且仅当入射角为布儒斯特角是反射最小。基于菲涅尔方程，用 MATLAB 绘制 s 光，p 光入射角度与反射率的关系如图 28 所示。

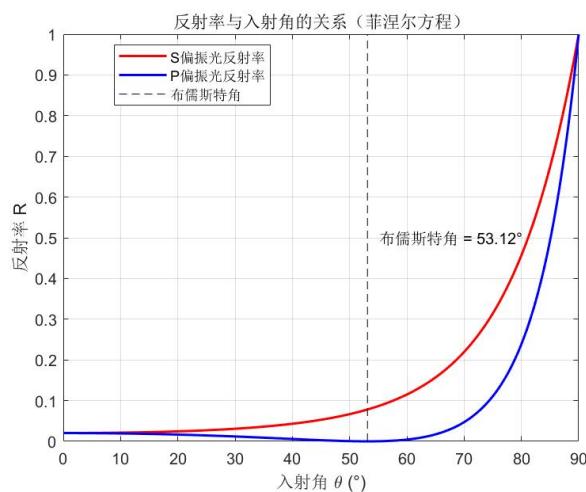


图 28 反射率与入射角的关系（菲涅尔方程）

(3) 光源波长

使用 486nm, 588nm, 656nm, 532nm 光源入射，反射率得到如图 29 所示，综述见下表。

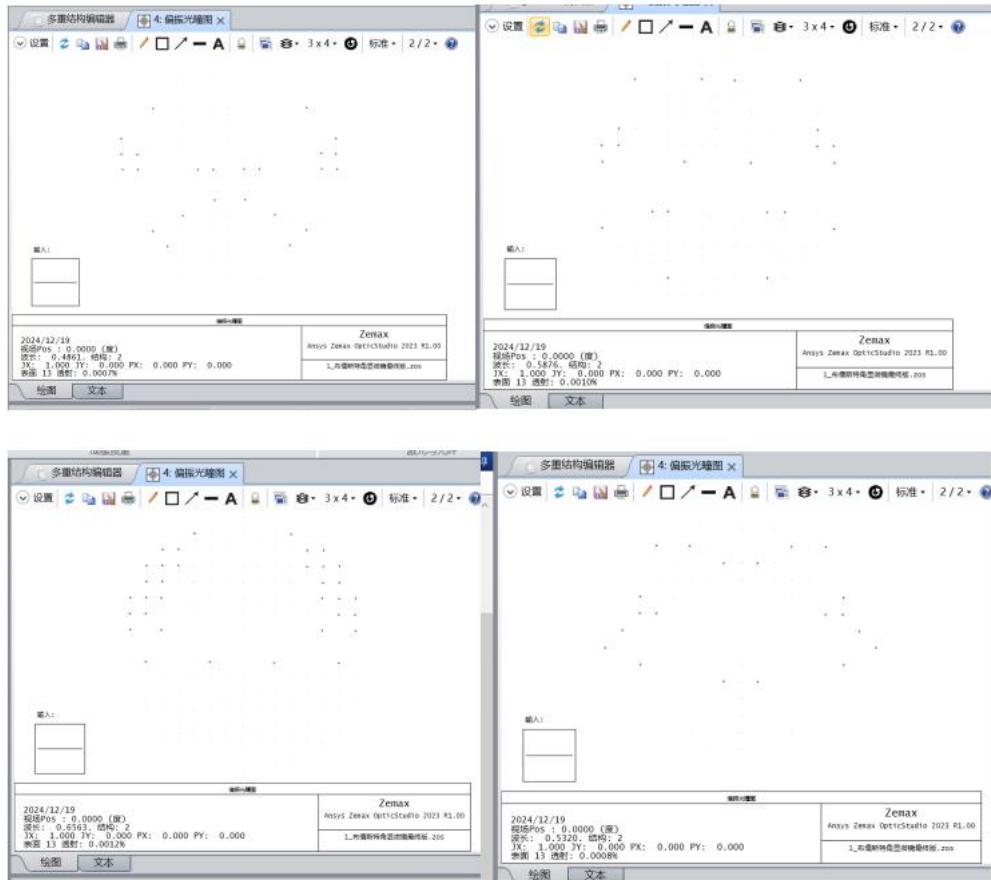


图 29 反射率与入射波长的关系

入射波长/nm	反射率
486	0.0007%
588	0.0010%
656	0.0012%
532	0.0008%

(4) 介质的折射率

由布儒斯特角反射定律可知，当介质折射率发生变化时，布儒斯特角也会相应发生变化，这也对反射光强会产生一定的影响。

增加自定义膜层 TEST_14，其折射率为 1.4，布儒斯特角为 54.462322° ，修改 Zemax 中相应的参数，如图 30，可得反射率如图 31；使用 MATLAB 绘制介质折射率与反射光强的关系如图 32。

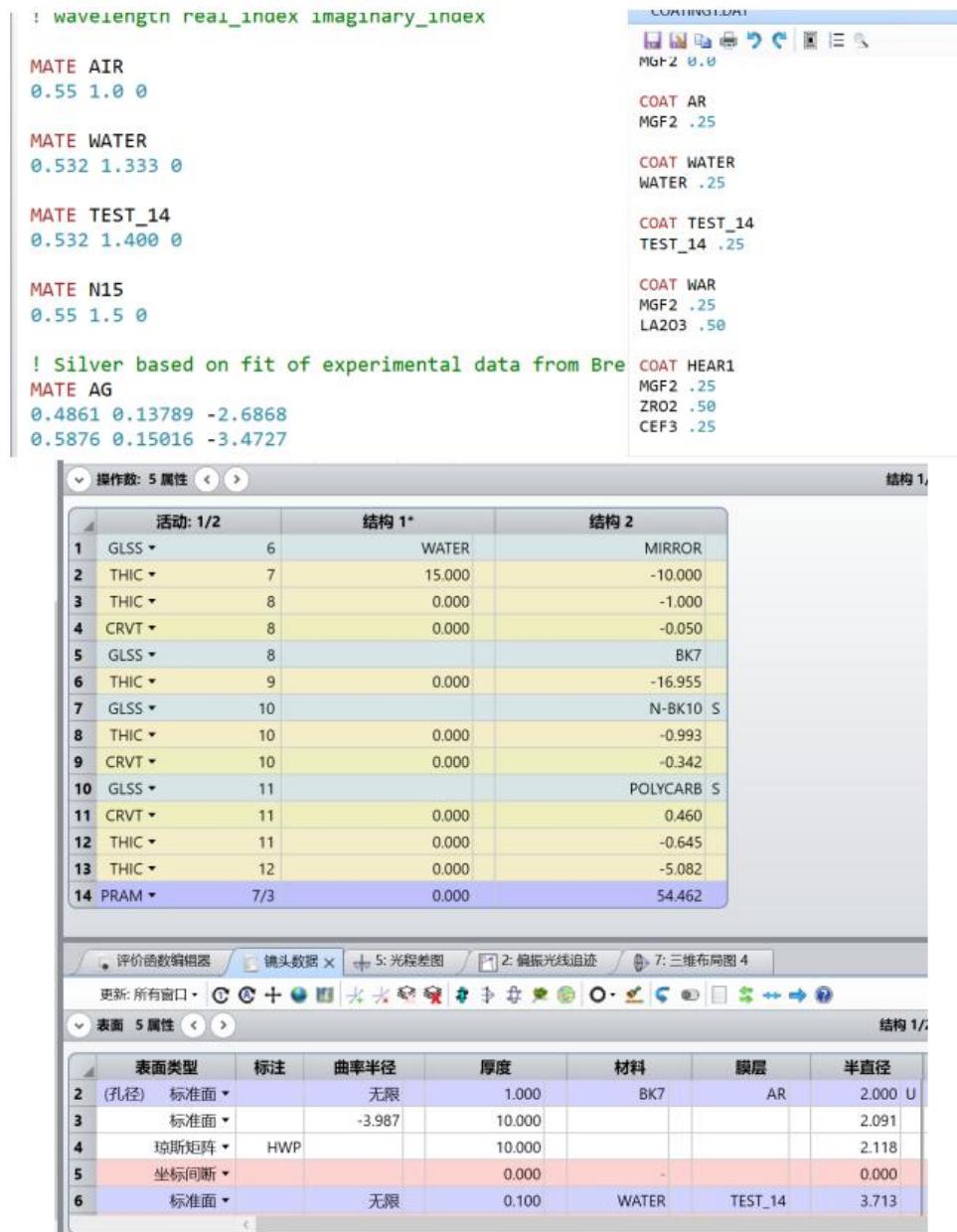


图 30 Zemax 参数修改

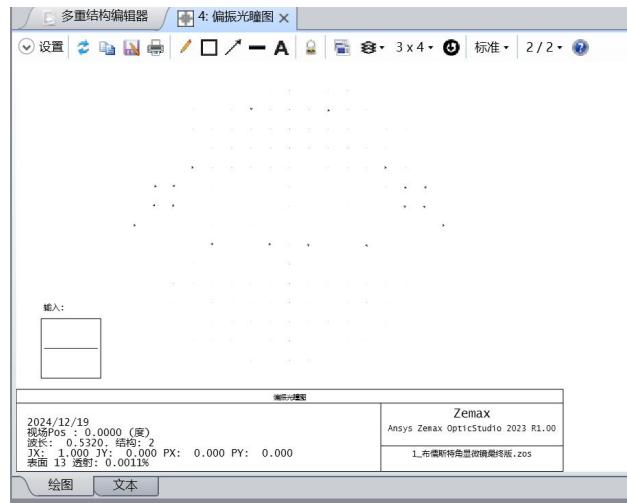


图 31 介质折射率为 1.4 时的反射光强

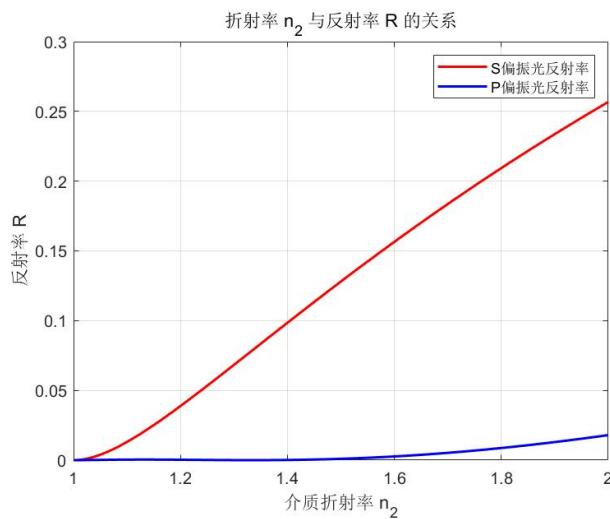


图 32 介质折射率与反射率的关系

3. BAM 搭建过程中的问题

(1) 光路对准

光路对准指的是确保光线沿着预定路径正确传播，以保证光学系统的准确性。在 BAM 系统中，光源、样品台、偏振器、反射镜和探测器之间的相对位置对成像质量有重要影响。以下是几个关键点：

光源与偏振器对准：布儒斯特角显微镜依赖于特定的偏振光入射，因此，首先需要确保光源发出的光与偏振器对准。通过在 Zemax 中模拟光源发射光的方向并调整偏振器的位置来保证其处于正确的偏振状态。

样品台与入射光对准: 在 BAM 系统中，样品台需要被精确对准，以确保入射光在布儒斯特角下与样品表面相交。Zemax 允许调节样品台的位置和角度，并通过调节光束路径和样品角度来模拟这一过程。

反射镜对准: 反射镜用于引导和聚焦反射光。在 Zemax 中，可以通过设置反射镜的角度和位置来确保光束反射到探测器上。反射镜的角度需要非常精确，以确保反射光强度最大化。

(2) 图像对焦

图像对焦问题主要是确保成像系统能够清晰地聚焦在样品表面。BAM 显微镜的成像系统通常采用显微镜镜头或其他高分辨率的光学元件，因此对焦非常关键。以下是几个关键点：

焦距选择: Zemax 可以用来模拟不同焦距的透镜系统，以确定最佳焦距和镜头配置。通过调整光学组件的焦距，可以模拟样品表面的清晰图像。

光束形状与聚焦: 除了焦距外，光束的形状（如光束直径）和聚焦状态也对图像质量有影响。通过模拟不同类型光束（如平行光束或聚焦光束），可以调整聚焦参数，确保光束在样品表面形成一个清晰的图像。

样品表面的高度调整: Zemax 允许对样品表面的位置进行精确调整，以确保光线能够在样品表面形成最佳的聚焦点。通过调整样品台的高度，确保光束在样品的不同区域能够精确聚焦。

4. 仿真结果分析

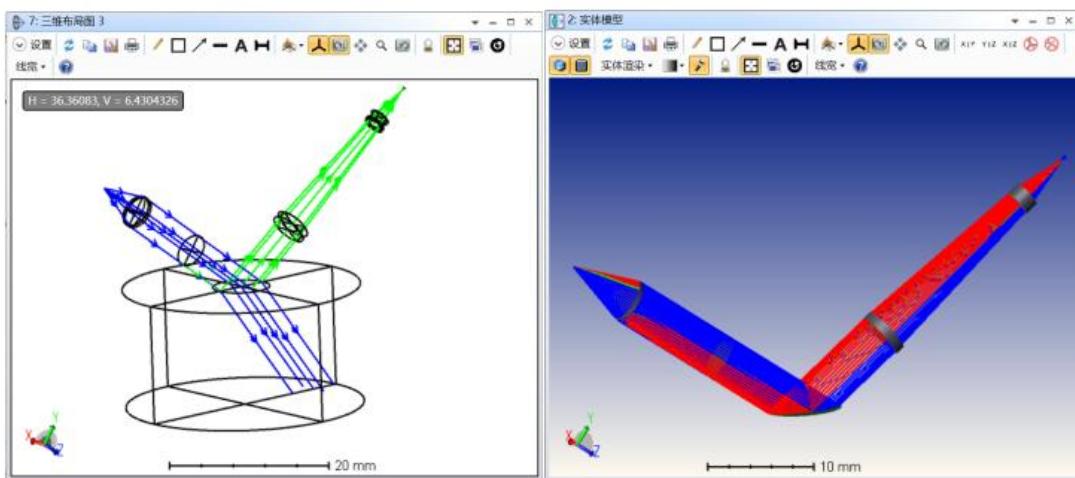


图 33 左为三维布局图，右为实体模型

如上图 33 所示，为 BAM 系统的仿真三维布局图和实体模型；

如下图 34 所示为优化后的点列图和光程差图，将色差导致的光斑直径由 500 倍波长优化至 5 倍波长（约 $250 \mu\text{m}$ 量级-> $2.5 \mu\text{m}$ 量级）。

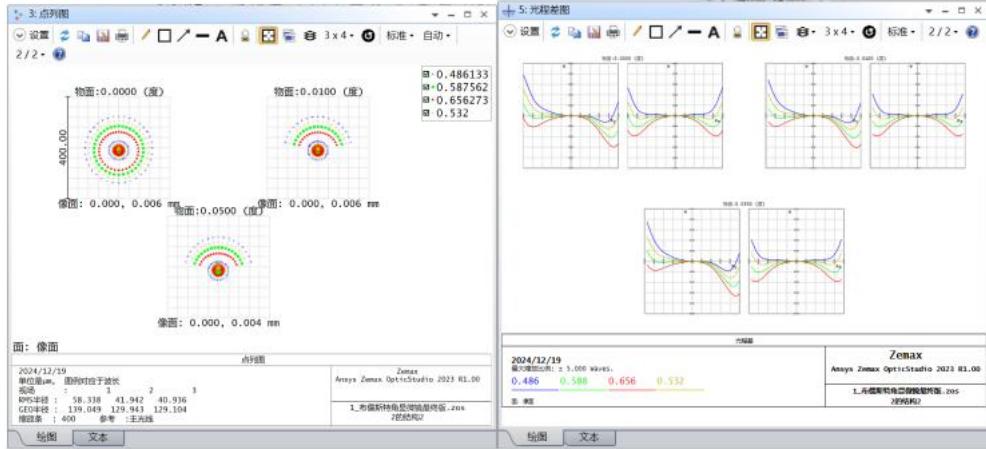


图 34 色差校正

(左图点列图, 右图光程差图)

如下图 35 所示，为偏振光迹追踪。

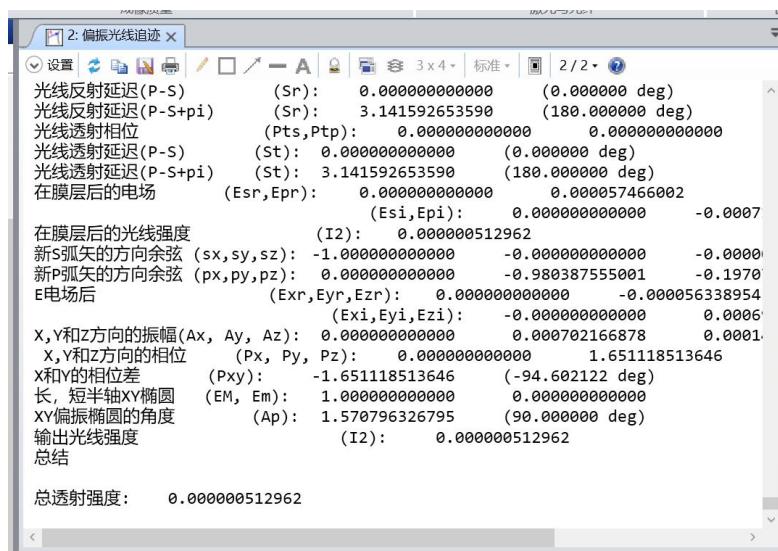


图 35 偏振光迹追踪

如下图 36 所示，为系统的 MTF 曲线。

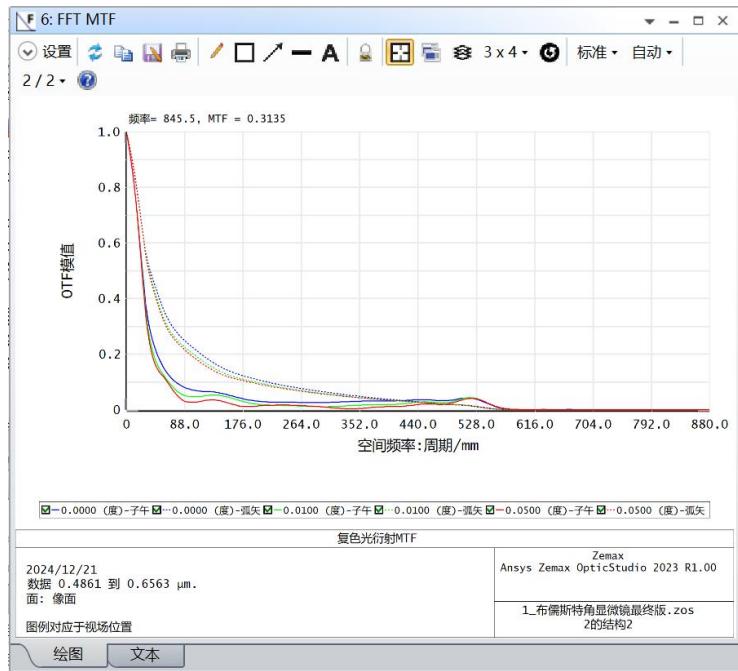


图 36 MTF 曲线

如下图 37 所示，为偏振透过率指标，可以发现 p 光经过样品后透射率变为 0，与菲涅尔反射定律相符。

视场 Pos : 0.0000 (度)
波长 4: 0.532 μm

表面	总透过率	相对透过率
1	1.000000	1.000000
2	0.987491	0.987491
3	0.945360	0.957335
4	0.945360	1.000000
6	0.000000	0.000000
8	0.000000	0.957489
9	0.000000	0.957335
10	0.000000	0.959972
11	0.000000	0.998819
12	0.000000	0.947848
13	0.000000	1.000000

图 37 偏振透过率

偏振光瞳图在前面分析中多次给出，再此不做赘述。

五、实验总结与心得

最开始我选用 Zemax 的序列模式进行画图，发现在镀膜时，无法构成合适的反射光路。解决方法是我先尝试了非序列模式，然而并没有什么用，还会出现同样的问题（像图 38 这样），在经过多方查找资料之后，我将膜层转用自定义，材料透射率设置为 0.7 后解决了这一问题。

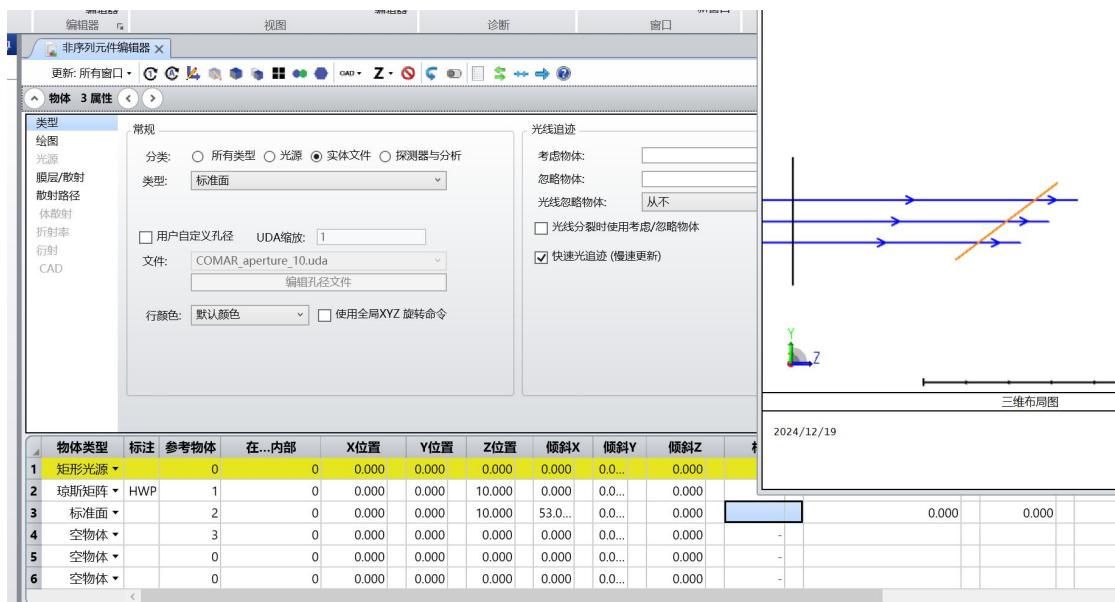


图 38 非序列模式下的 Zemax

在设计布儒斯特角显微镜的过程中，我对之前工程光学没有学习到的色差有了更详细的了解，对 Zemax 的使用、设计、优化，乃至针对错误设计的修改都有了进一步的提升。同时结合 MATLAB 可以对理想情况下的变化规律进行画图，并与 Zemax 的仿真结果进行对照验证。

同时，实验的过程中我也发现了一些需要提高的问题：

1. 优化仍需要进一步学习，快速聚焦与色差的校正在现阶段我无法对二者进行很好的平衡，上述实验报告是我挑选出的一套最完备的测试结果。
2. 对色差的进一步理解，以及像差、球差等的概念。这些在实际设计中会非常有用（因为要消除），需要更深入的学习与了解，而不是总是基于理想情况考虑。
3. 是否有方法可以使用计算机软件对探测器监察到的结果进行进一步解析，甚至 3D 重新建模？这对于探测膜层表面的变化/缺陷至关重要！

附录（MATLAB 代码）：

```
%% 角度
n1 = 1; % n1
n2 = 1.333; % n2
theta = linspace(0, 90, 1000);
theta_rad = deg2rad(theta); % deg2rad

% Reflect ratio of S
Rs = ((n1 * cos(theta_rad) - n2 * sqrt(1 - (n1/n2 * sin(theta_rad)).^2)) ./ ...
(n1 * cos(theta_rad) + n2 * sqrt(1 - (n1/n2 * sin(theta_rad)).^2))).^2;

% Reflect ratio of P
Rp = ((n2 * cos(theta_rad) - n1 * sqrt(1 - (n1/n2 * sin(theta_rad)).^2)) ./ ...
(n2 * cos(theta_rad) + n1 * sqrt(1 - (n1/n2 * sin(theta_rad)).^2))).^2;

figure;
plot(theta, Rs, 'r', 'LineWidth', 1.5); hold on;
plot(theta, Rp, 'b', 'LineWidth', 1.5);
grid on;

% Brewster's angle
theta_brewster = atand(n2 / n1); % degree
line([theta_brewster theta_brewster], [0 1], 'Color', 'k', 'LineStyle', '--');

legend('S 偏振光反射率', 'P 偏振光反射率', '布儒斯特角', 'Location', 'Best');
xlabel('入射角 \theta (°)');
ylabel('反射率 R');
title('反射率与入射角的关系（菲涅尔方程）');

text(theta_brewster + 2, 0.5, ['布儒斯特角 = ', num2str(theta_brewster, '%.2f'), '°'], 'Color', 'k');

%% 介质折射率
n1 = 1; % n1
n2_range = linspace(1, 2, 500); % 介质折射率范围
theta_B = atan(n2 / n1);

Rs = ((n1 .* cos(theta_B) - n2_range .* sqrt(1 - (n1 ./ n2_range .* ...
sin(theta_B)).^2)) ./ ...
(n1 .* cos(theta_B) + n2_range .* sqrt(1 - (n1 ./ n2_range .* ...
sin(theta_B)).^2))).^2;
```

```

Rp = ((n2_range .* cos(theta_B) - n1 .* sqrt(1 - (n1 ./ n2_range .*  

sin(theta_B)).^2)) ./ ...  

(n2_range .* cos(theta_B) + n1 .* sqrt(1 - (n1 ./ n2_range .*  

sin(theta_B)).^2))).^2;

figure;
plot(n2_range, Rs, 'r', 'LineWidth', 1.5); hold on;
plot(n2_range, Rp, 'b', 'LineWidth', 1.5);
grid on;
xlabel('介质折射率 n_2');
ylabel('反射率 R');
legend('S 偏振光反射率', 'P 偏振光反射率');
title('折射率 n_2 与反射率 R 的关系');
hold off;

```