

新型MPI光学偏振测量仪

张雅芃

北京师范大学 物理与天文学院

主要内容

I. 什么是MPI

II. MPI的工作原理

III. 使用MPI进行偏振探测

IV. MPI偏振仪的优势与劣势

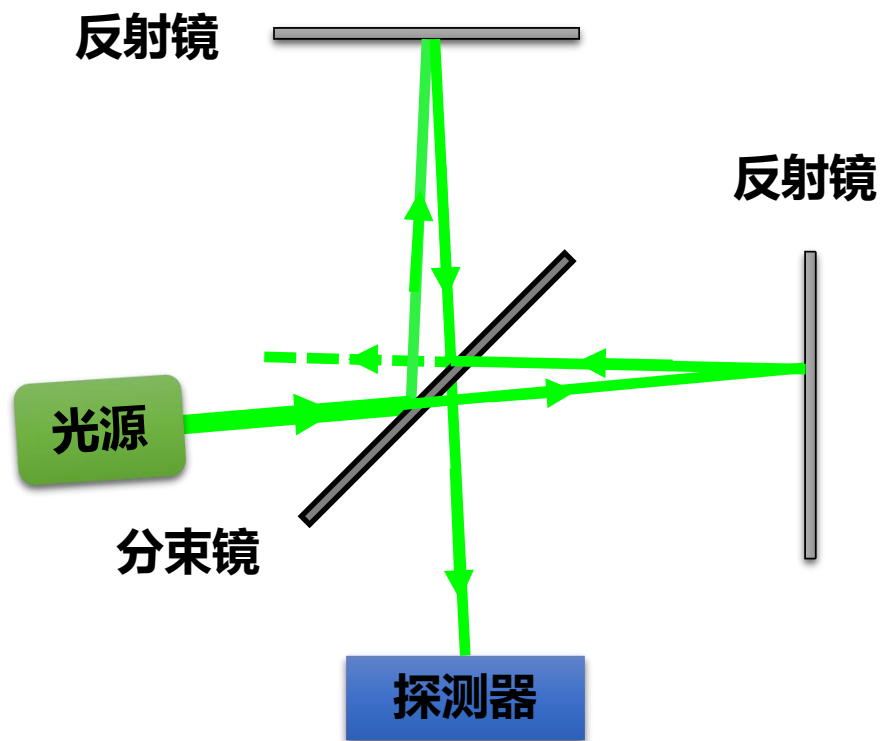
V. 总结

I. 什么是MPI

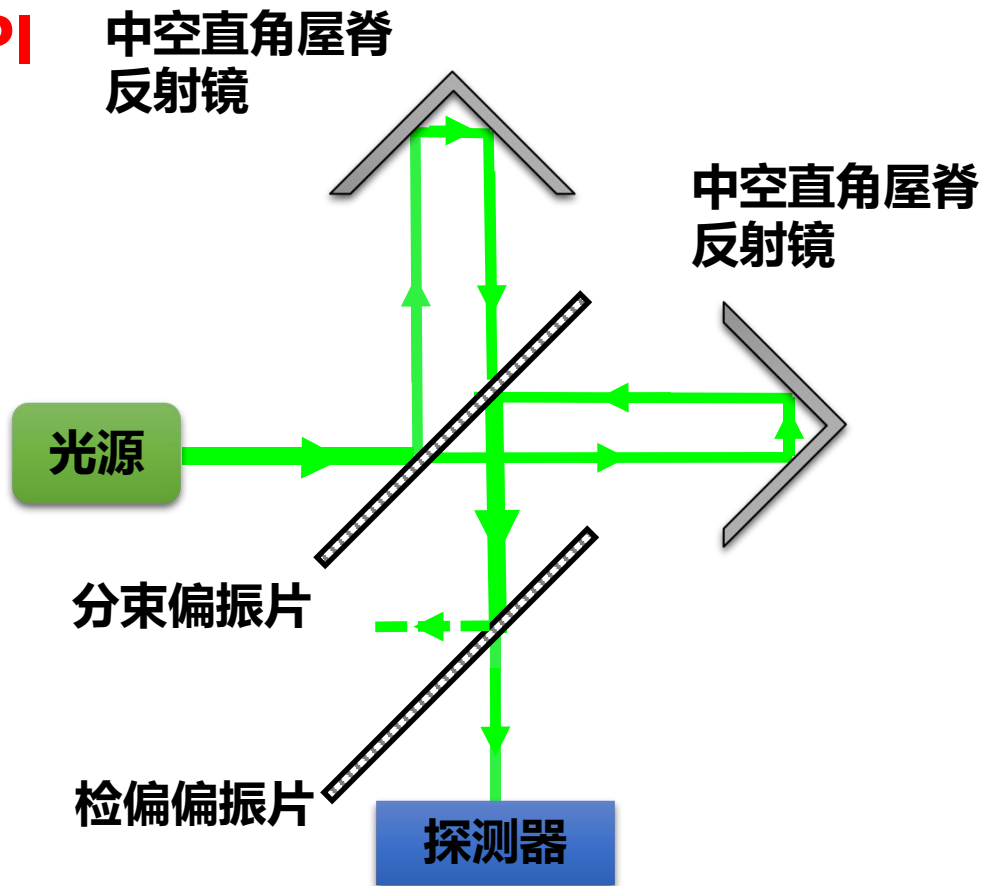
- MPI 是 **M**artin-**P**uplett **I**nterferometer 的缩写。它是一种特别设计的迈克尔逊干涉仪。
- 这种设计最早由 Martin 和 Puplett 在 1969年提出^[1]。
- 不同于迈克尔逊干涉仪，MPI 中使用偏振片来作为分束器，并使用中空屋脊直角反射镜【屋脊镜】来进行反射。
- 由于这种设计，MPI也被称为迈克尔逊偏振干涉仪 (**M**ichelson **P**olarizing **I**nterferometer) ，缩写也是 MPI。

I. 什么是MPI

迈克尔逊干涉仪



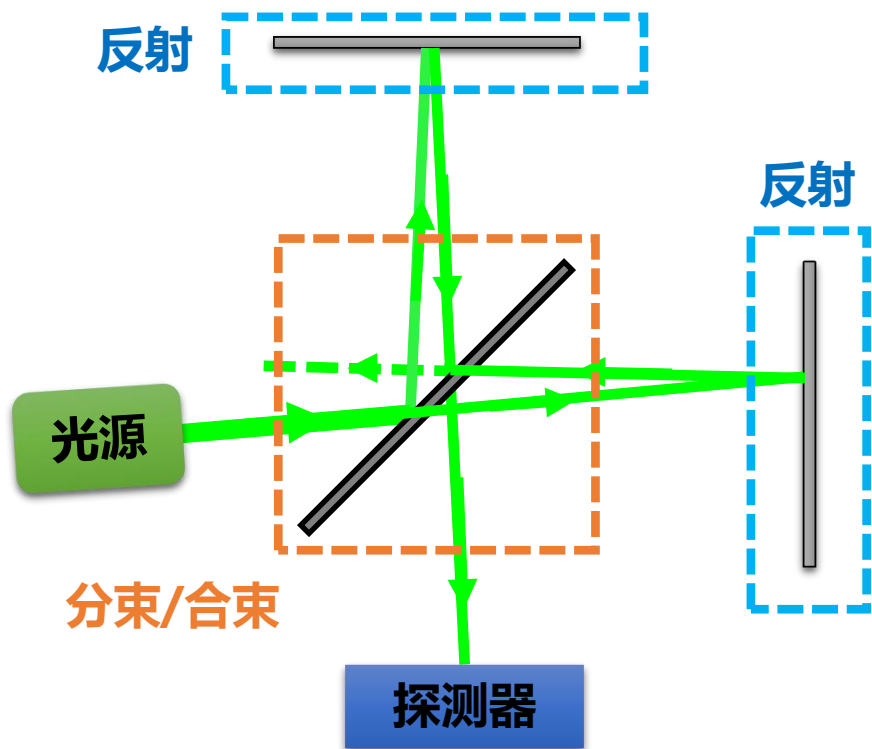
MPI



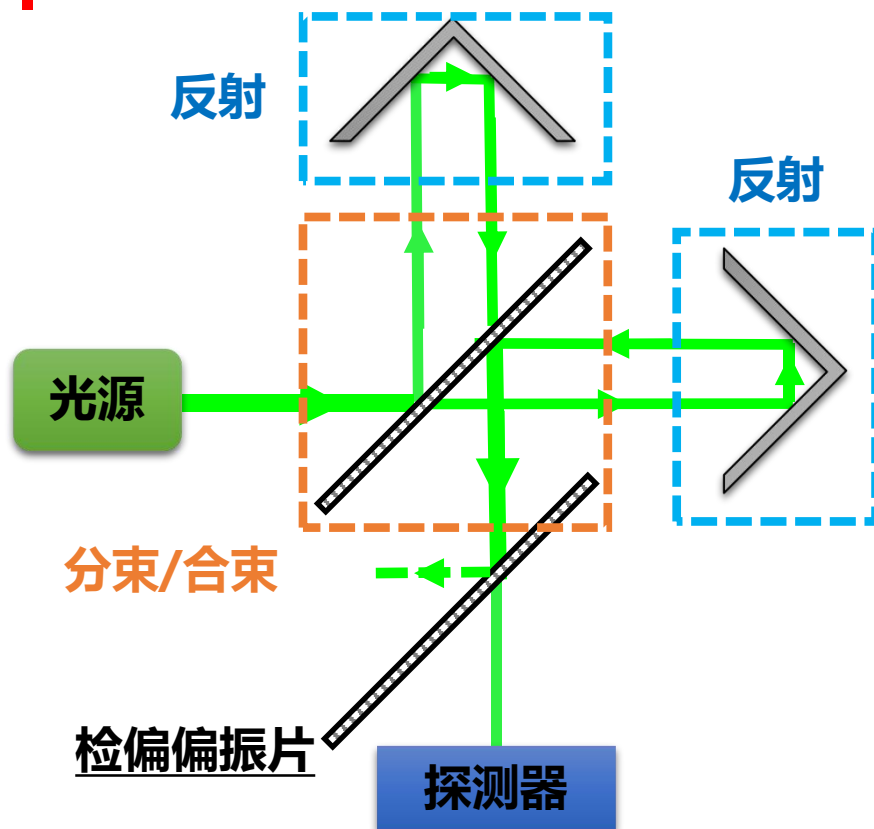
两者结构基本一致：**分束**，**反射**，**再合束**。

I. 什么是MPI

迈克尔逊干涉仪



MPI

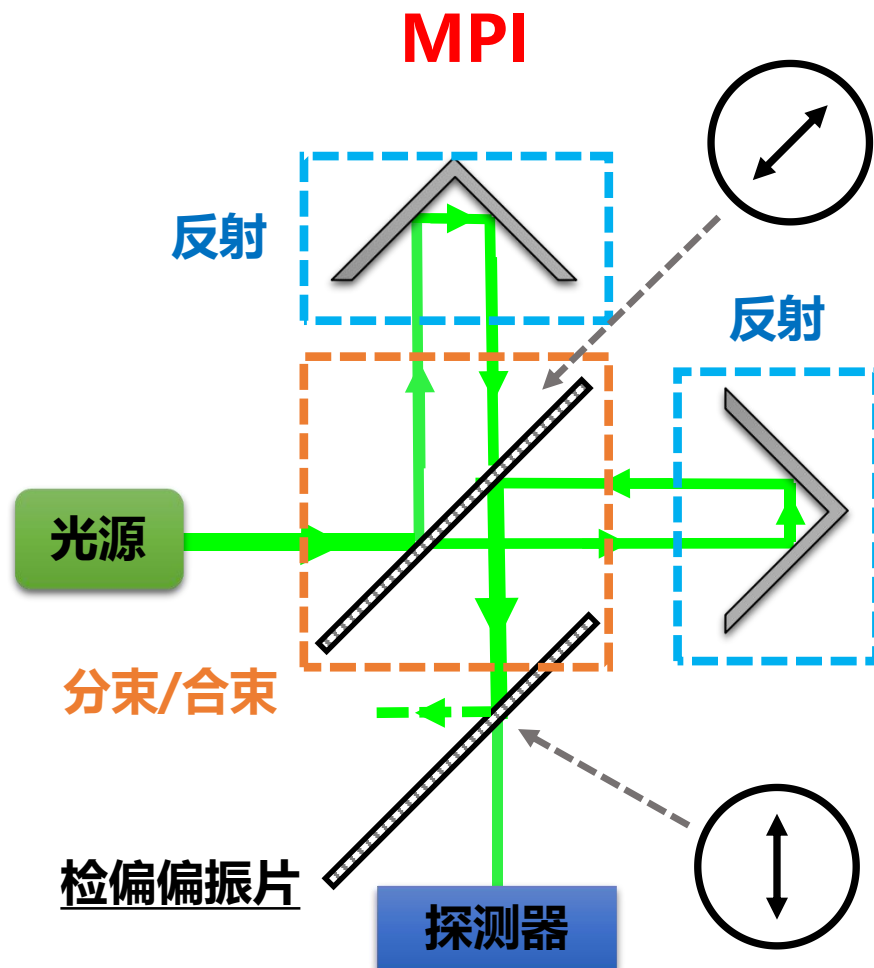


两者结构基本一致：**分束**，**反射**，**再合束**。

II. MPI的工作原理

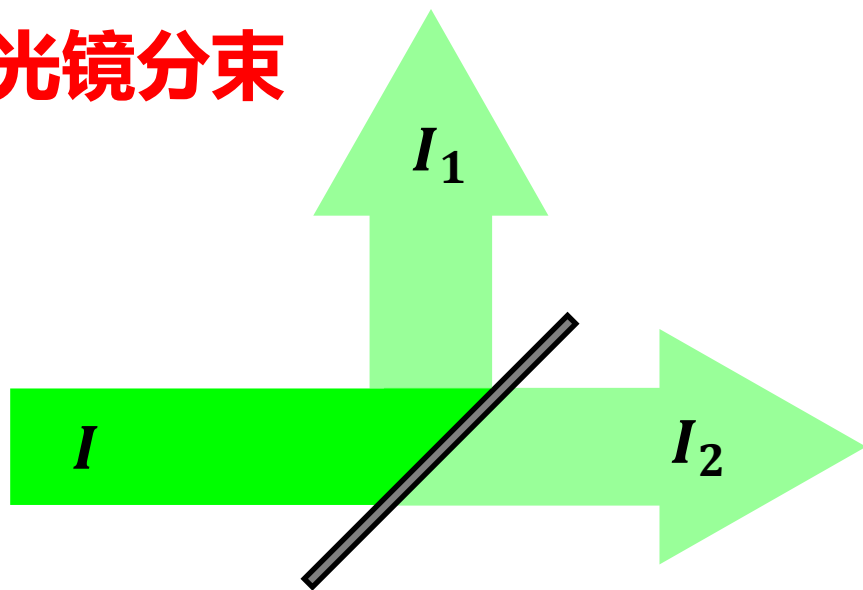
MPI主要由两个**偏振片**和两个**中空直角屋脊反射镜**构成。

- **分束偏振片**与入射光成45度放置。同时，偏振轴与水平面成45度。
- **检偏偏振片**通常倾斜摆放。偏振轴方向水平或垂直，即与分束偏振片成45度。



II. MPI的工作原理

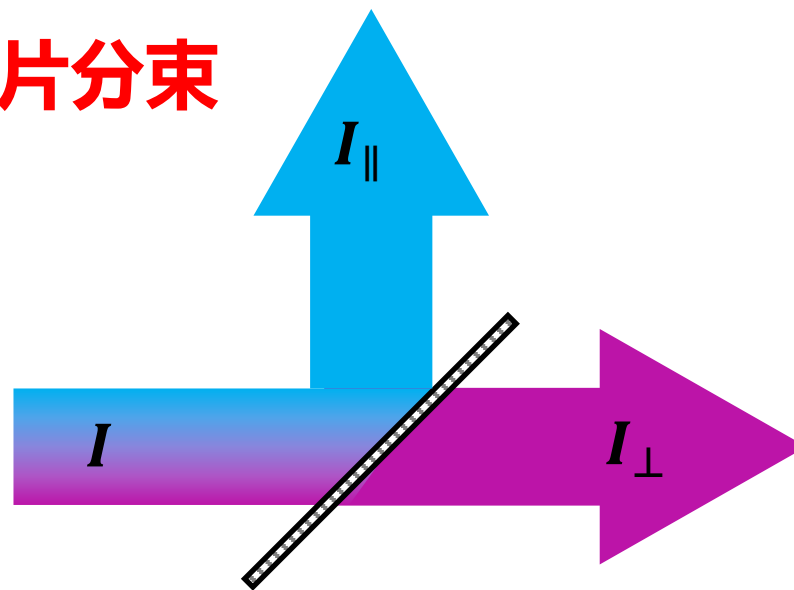
分光镜分束



I_1 与 I_2 比值为分光镜反射透射比

分束后基本自然满足干涉条件

偏振片分束



I_{\parallel} 与 I_{\perp} 比值为对应偏振分量强度比

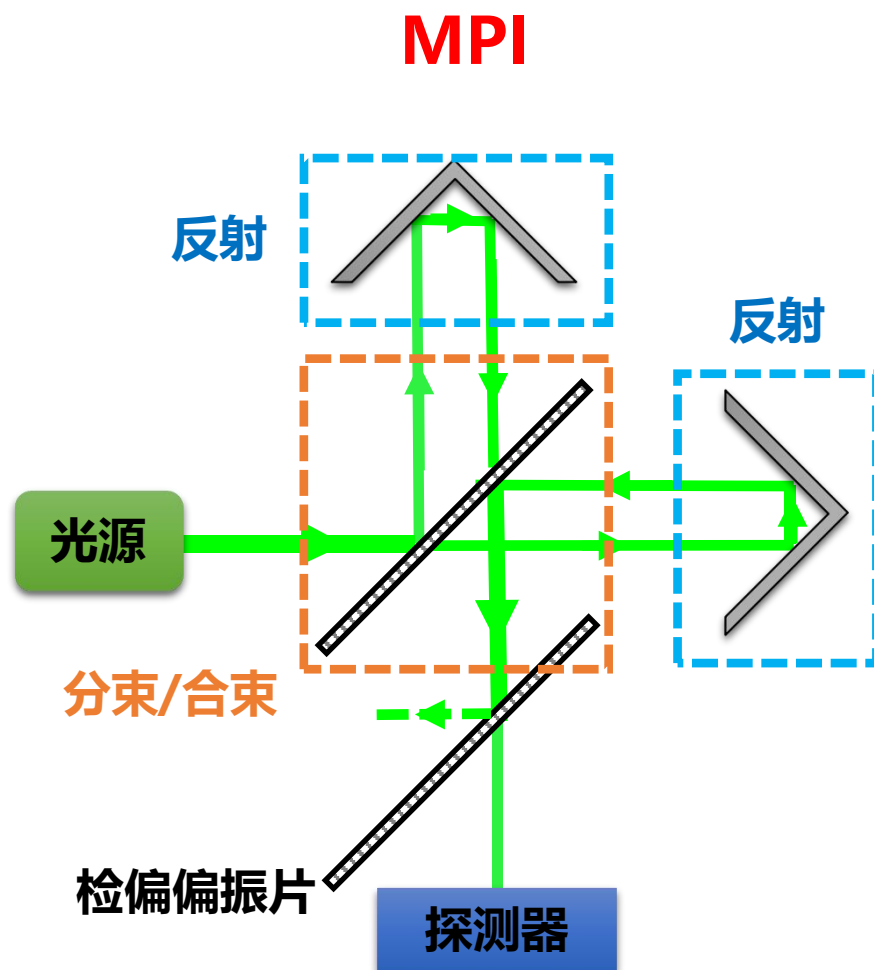
将不同偏振分量分离操作，完成干涉

干涉三要素：频率/波长、光程差、偏振

II. MPI的工作原理

MPI主要由两个**偏振片**和两个**中空直角屋脊反射镜**构成。

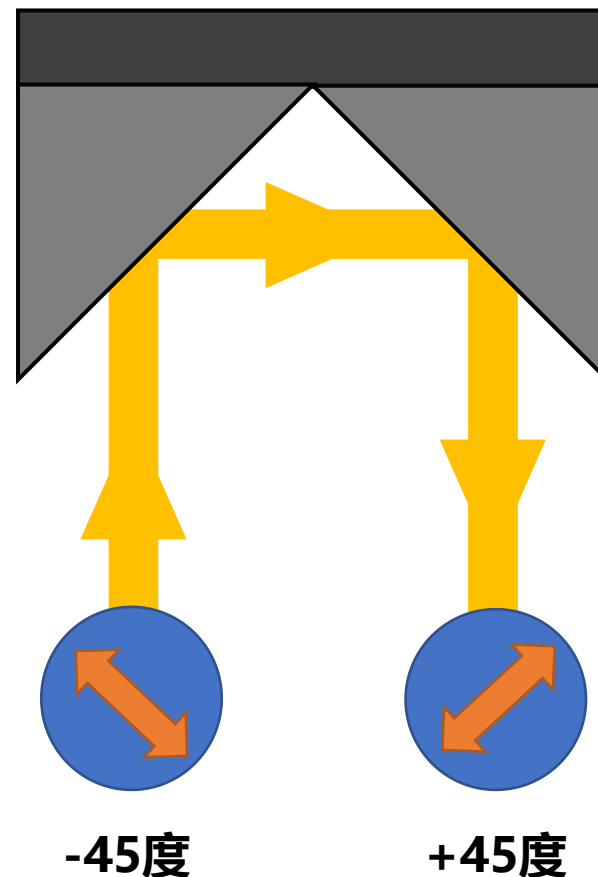
- 两个**屋脊镜**的脊垂直于水平面，朝向分束片一侧放置。
- 控制与分束片的距离产生光程差，通常为半个波长。



II. MPI的工作原理

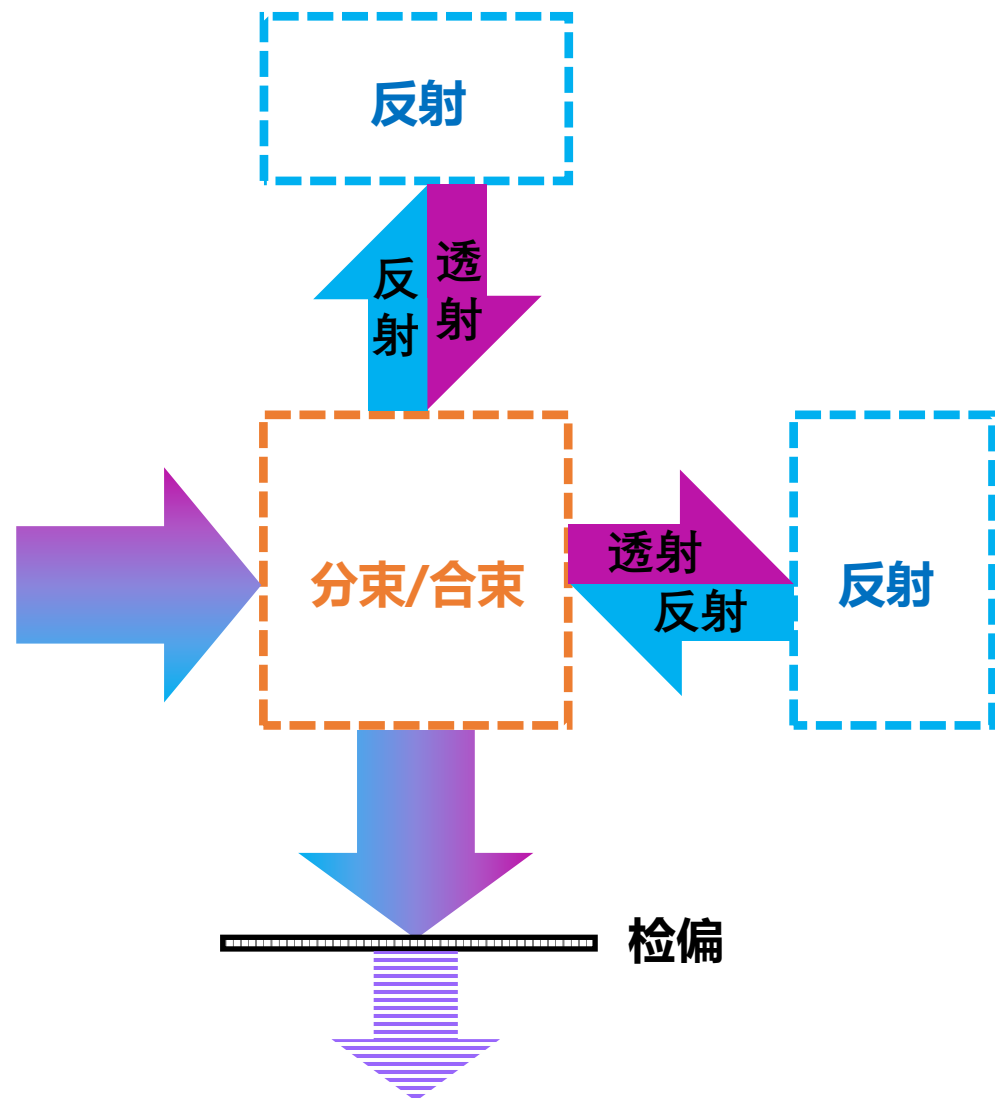
屋脊镜与偏振

- **屋脊镜**通过两次90度反射，使折返后的偏振方向与原方向关于脊对称。
- 光的偏振方向【在三维空间中】和传播方向保持原来的关系不变。
- 对与水平面成45度的入射偏振光，**屋脊镜**使折返的偏振与其垂直。
- 效果类似于1/4波片+平面反射镜



II. MPI的工作原理

- 利用**分束偏振片**使进入两臂的光具有不同的偏振分量。**屋脊镜**反射配合特定输入偏振，使反射后两臂的光完成合束。
- 通过控制两个**屋脊镜**与**分束片**的距离产生光程差。
- **检偏偏振片**筛选出偏振方相同向的光最终实现干涉。



III. 使用MPI进行偏振探测

➤ 假设待测光由非偏振分量 I_0 和偏振分量 I_{lp} 组成。 θ 是 I_{lp} 的偏振方向与水平方向之间的角度。

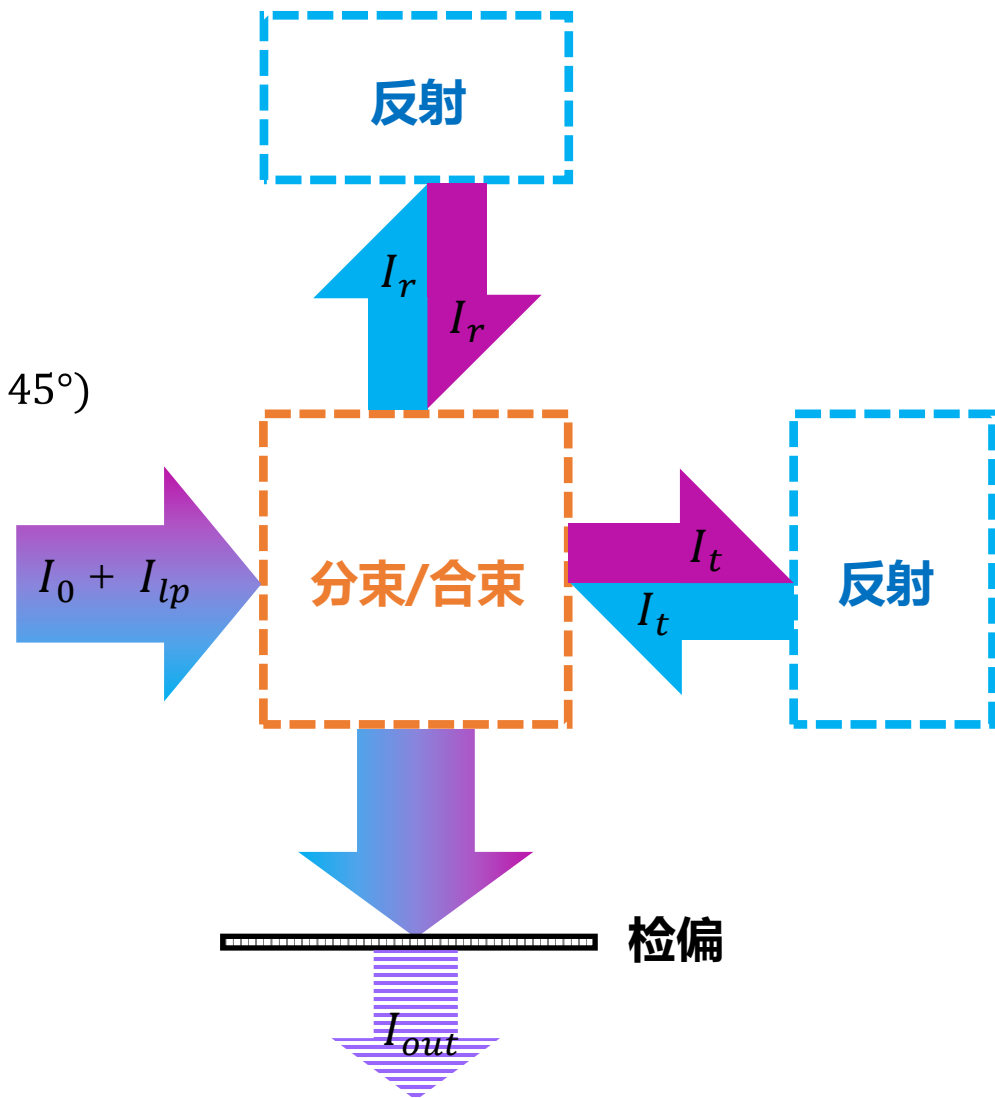
➤ 经过分束，透射分量为： $I_t = \frac{1}{2}I_0 + I_{lp} \cos^2(\theta - 45^\circ)$

➤ 反射分量为： $I_r = \frac{1}{2}I_0 + I_{lp} \sin^2(\theta - 45^\circ)$

➤ 经过相消干涉后，输出与 θ 相关的结果：

$$I_{out} = |I_r - I_t| = I_{lp} |\sin(2\theta)|$$

➤ 通过测量干涉结果获得偏振方向信息。



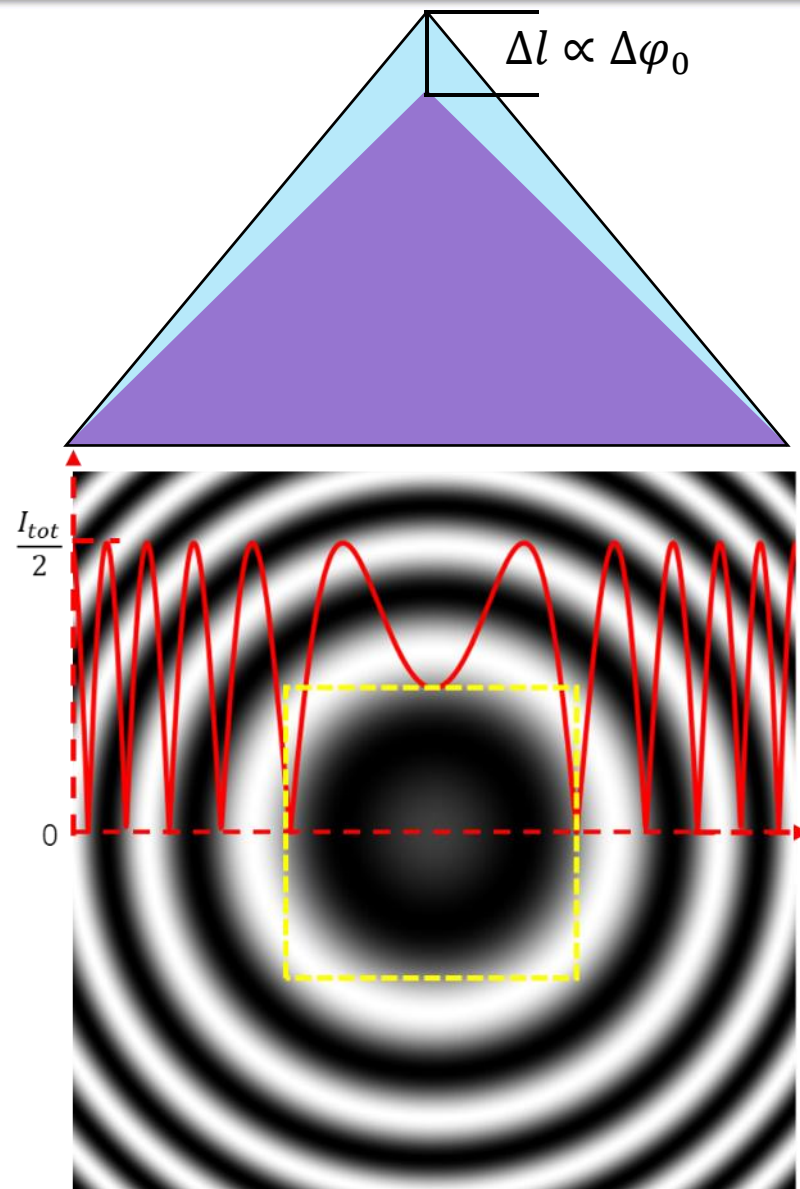
III. 使用MPI进行偏振探测

- 非理想状况下，干涉成像为等倾干涉。
- 在相位差为 $\Delta\varphi$ 时，干涉结果为：

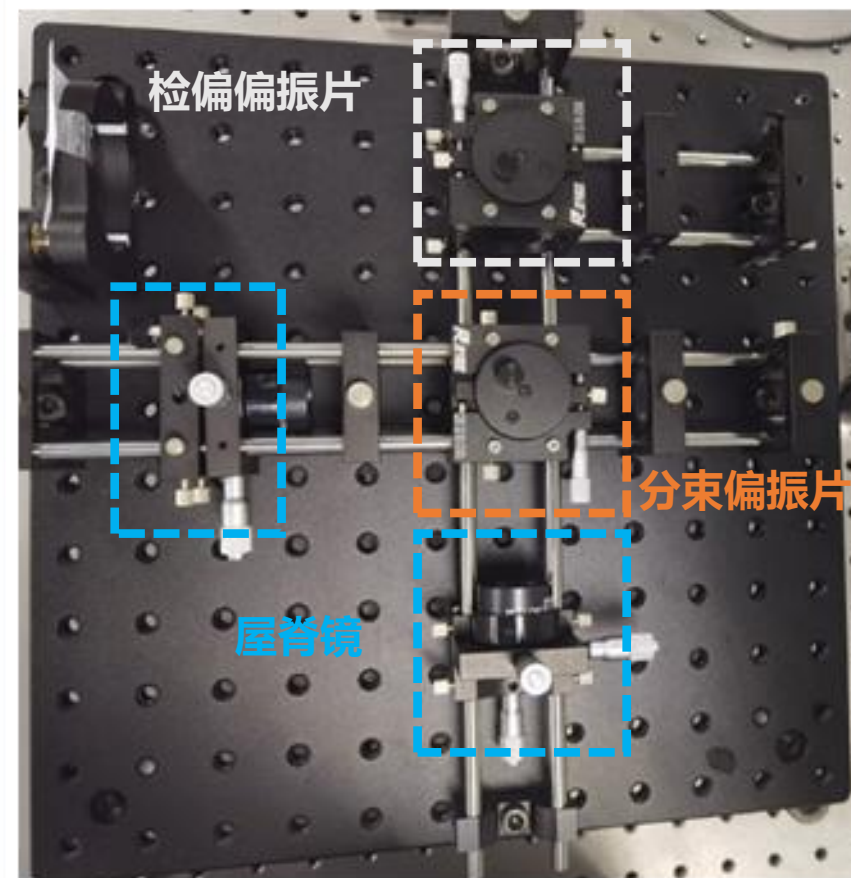
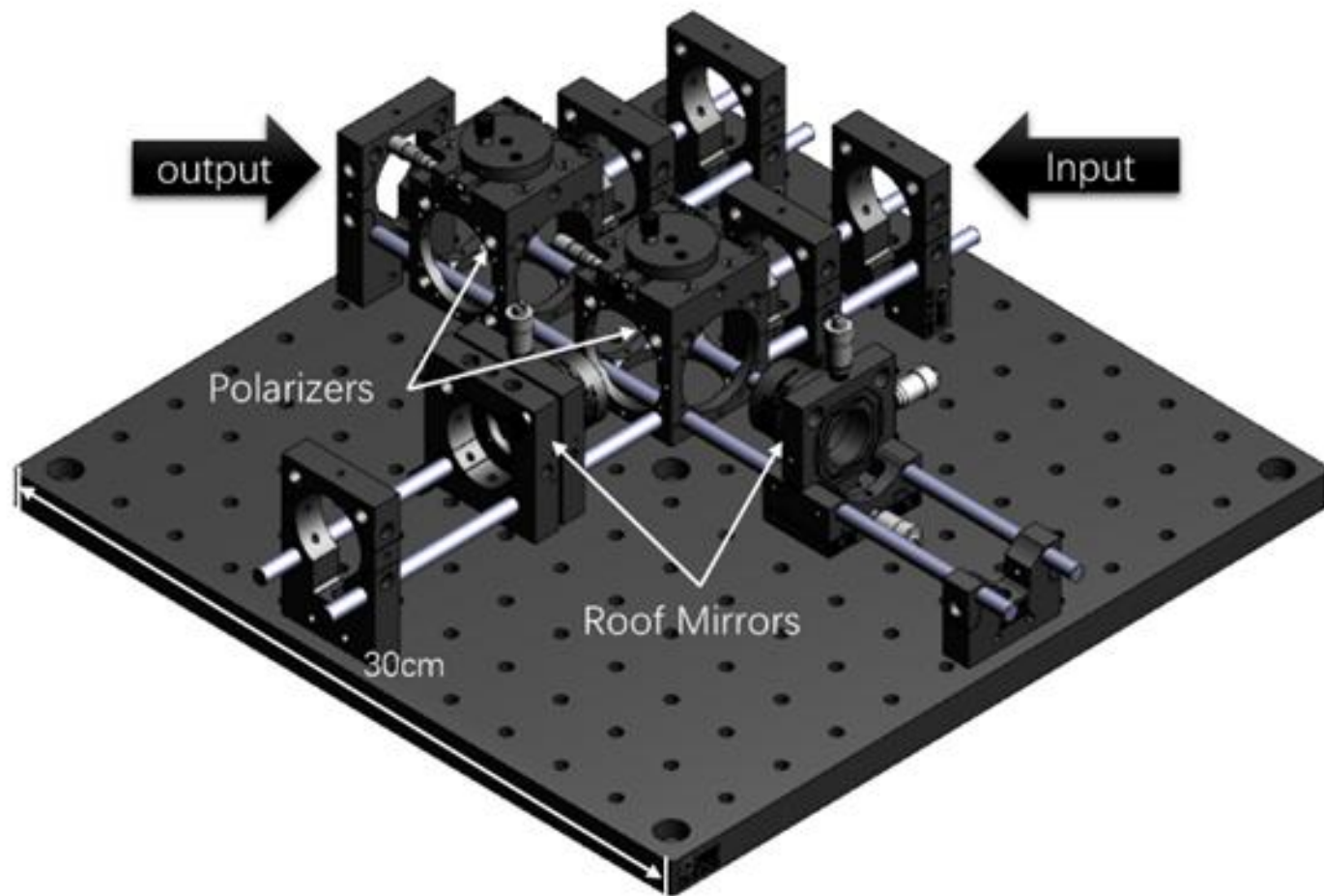
$$\begin{aligned} I_{out} &= I\sin^2(\theta) + I\cos^2(\theta) + 2I\sin(\theta)\cos(\theta)\cos(\Delta\varphi) \\ &= I[1 + 2\sin(\theta)\cos(\theta)\cos(\Delta\varphi)] \end{aligned}$$

- **干涉结果随偏振角度的变化范围与相位差相关，即随干涉条纹变化。**

- (1) 通过光路调试，控制诊断区域。
- (2) 利用条纹变化规律，拟合求解偏振。

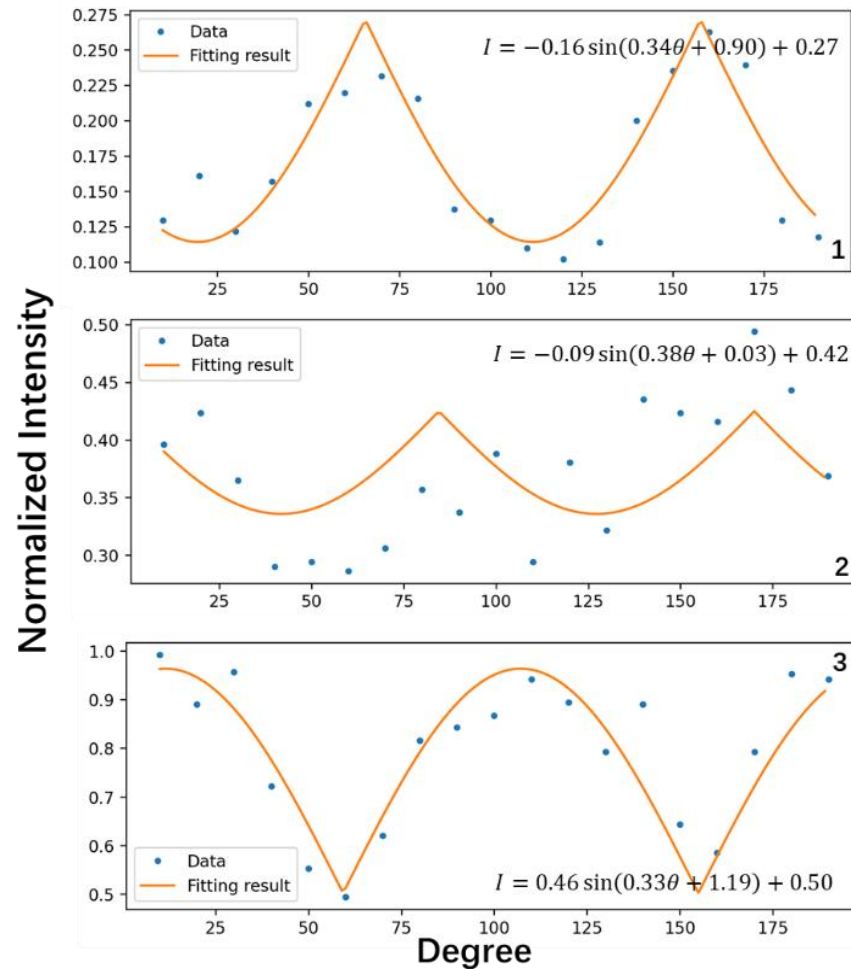
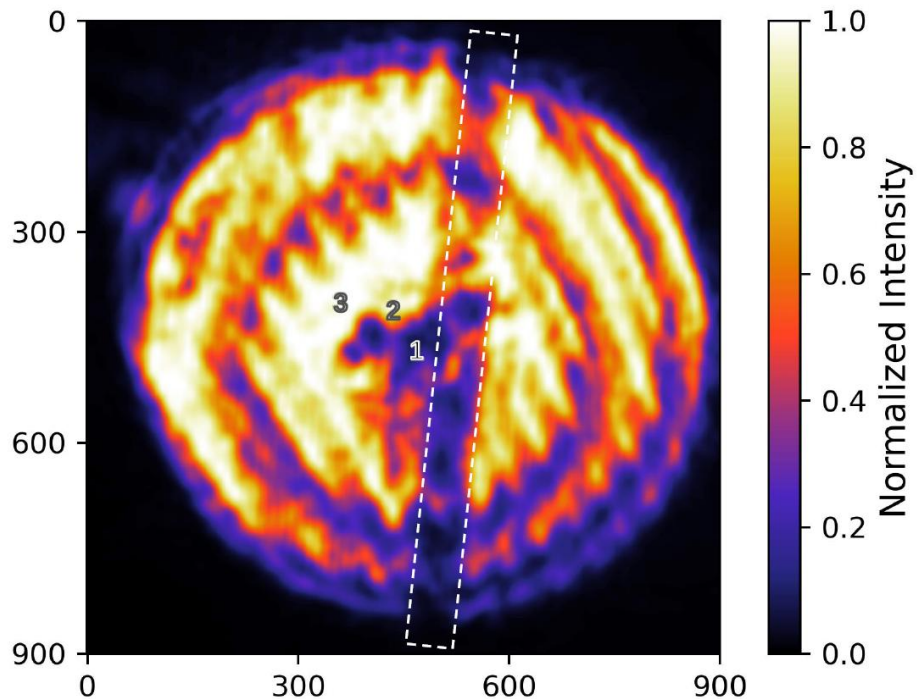
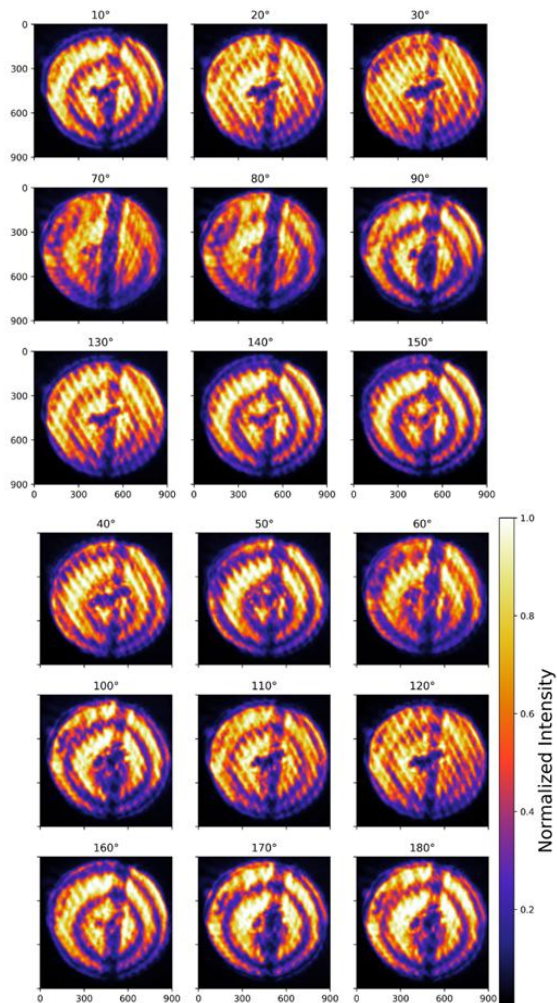


MPI原型机整体工程图和照片



MPI原型机偏振探测和拟合结果

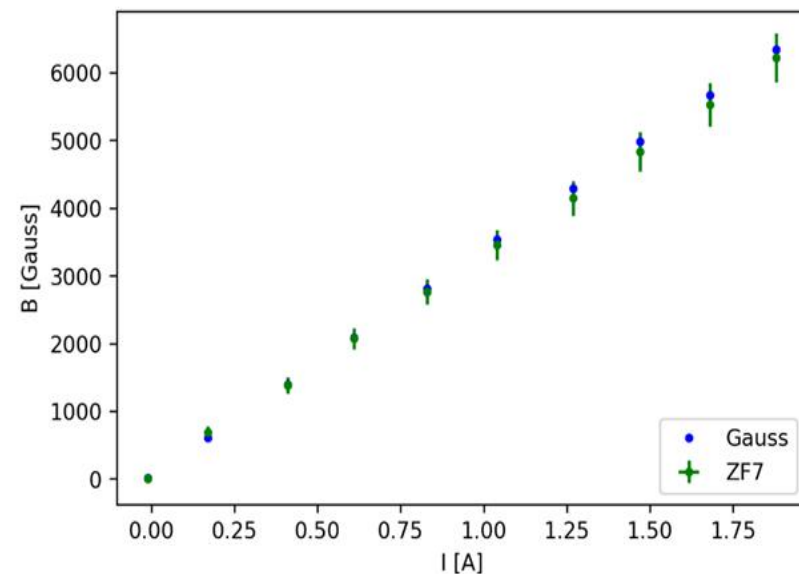
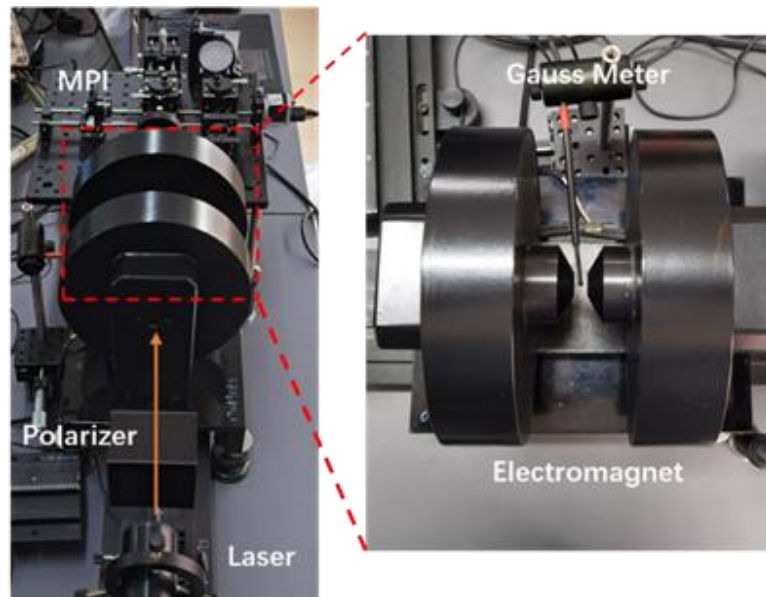
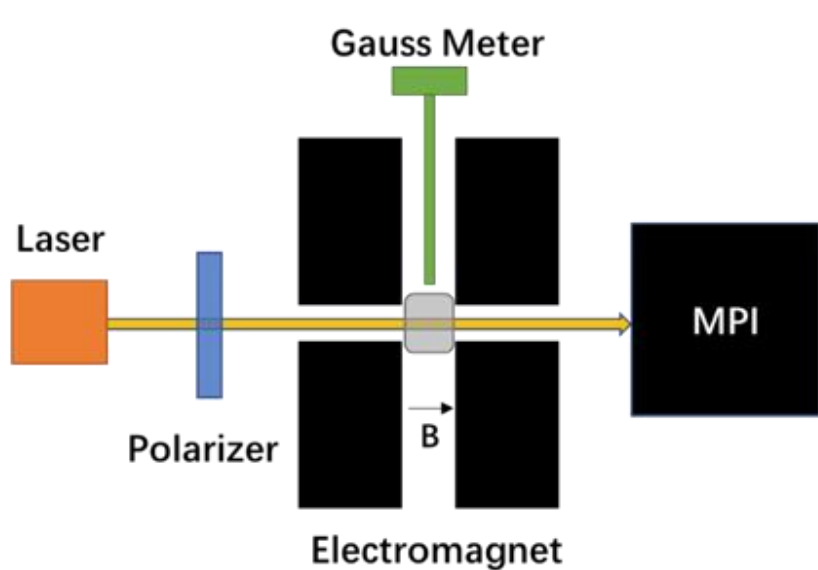
1. 已知偏振信号测试



通过半波片改变输入信号偏振方向，检验MPI偏振测量。

III. 使用MPI进行偏振探测

2. 法拉第实验测试



利用MPI偏振探测进行法拉第磁致旋光实验。
利用高斯计对比MPI偏振仪磁场测量结果。

IV. MPI偏振仪的优势与劣势

劣势一：偏振角度测量范围缩小

- 输出相消干涉，但单次测量无法判断哪一臂信号更强。

劣势二：光路较传统诊断复杂

- 干涉仪比使用检偏器直接测量的光路复杂，搭建和调试耗时更多。
- 所需光学器件更多，造价更高。

劣势三：短脉宽(fs)诊断光调试困难

- 屋脊镜控制光程差，需要在诊断光相干长度内。

IV. MPI偏振仪的优势与劣势

优势一：提高讯噪比

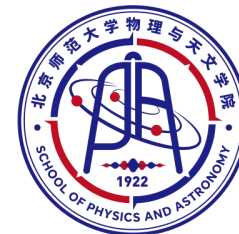
- 使用偏振片分束，能提高光的利用率，降低损耗。
- 通过相消干涉可以削减非偏振分量的影响。

优势二：图像叠合

- 输出结果为两臂光束干涉后的单幅图像。
- 避免不同探测器或不同探测区域之间的响应差异。
- 减少图像叠合处理难度^[3]。

V. 总结

- 在Martin-Puplett干涉仪(MPI)的基础上开发了一种新型的光学偏振测量仪，可以使用它通过法拉第旋转法进行磁场探测。
- 在偏振测量中，MPI偏振仪可以抑制探针光的去偏振问题，避免不同探测器或不同探测区域之间的响应差异。
- 通过实验，验证了MPI偏振仪的偏振检测能力，展现了其在磁场测量中的应用潜力。
- 未来我们将会继续升级和改进MPI偏振仪，并将其运用到更多的领域中。



谢谢!

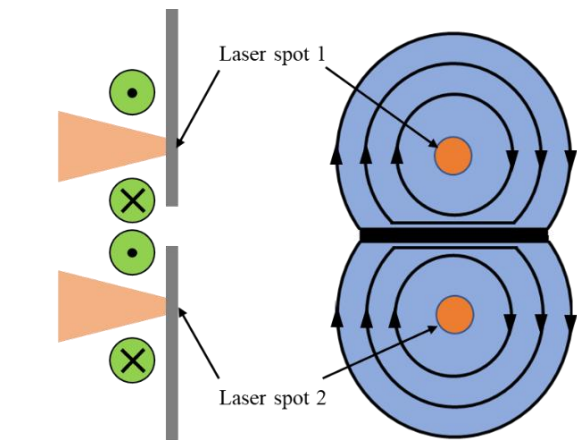
备份PPT

参考文献

- [1] D. H. Martin and E. Pulett. "Polarised interferometric spectrometry for the millimetre and submillimetre spectrum" . In: *Infrared Phys. Technol.* 10 (Jan. 1969), pp. 105–109.
- [2] Y. Zhang, Z. Liu, C. Xing, W. Sun, J. Zhong. "A Martin–Pulett interferometer (MPI) optical polarimeter: Design and laboratory tests" . *Review of Scientific Instruments* 94 (3) 2023
- [3] Y. Zhang, Z. Ma, Z. Liu, J. Yao, and J. Zhong, "Suppressing the false magnetic field in beam-splitting Faraday rotation measurement," *Appl. Opt.* 62, 8945-8950 (2023)
- [4] Y. Zhang, J. Yao, Z. Liu, Z. Ma, and J. Zhong, *Chinese Physics B*, 33 045206 (2024)

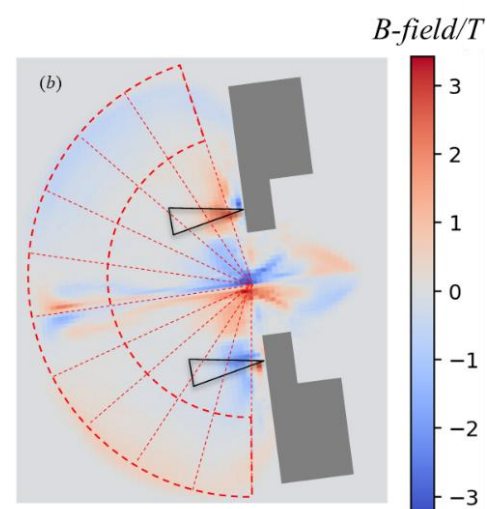
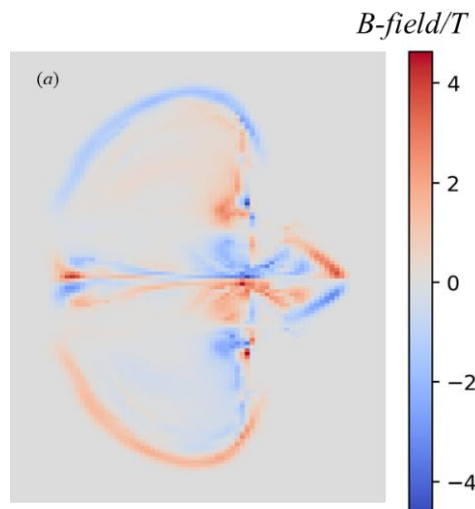
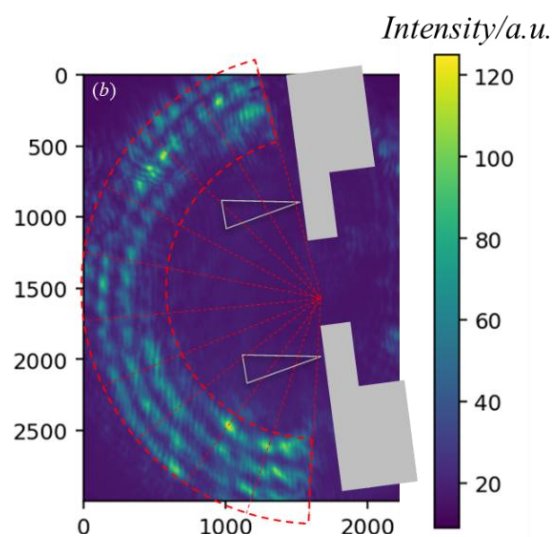
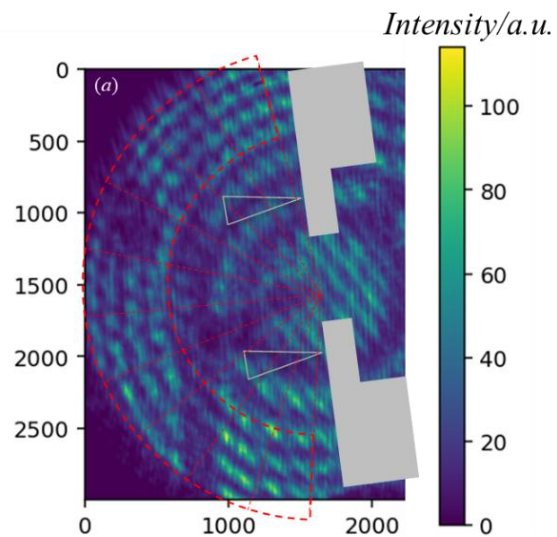
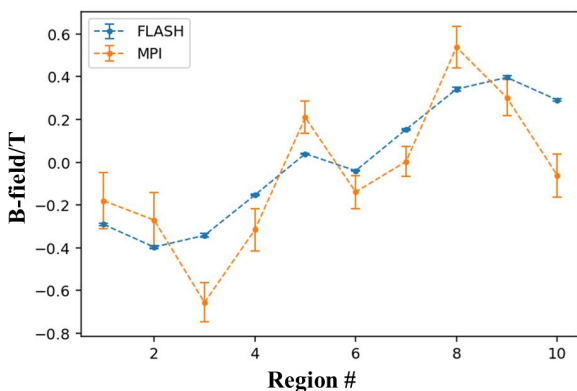
III. 使用MPI进行偏振探测

3. 激光等离子体外围区域磁场



Side-on View

Face-on View

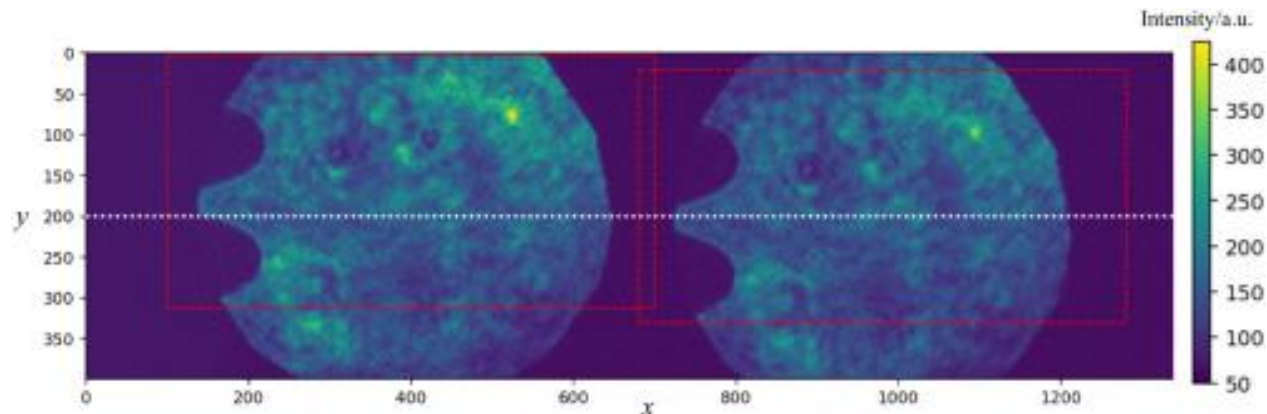
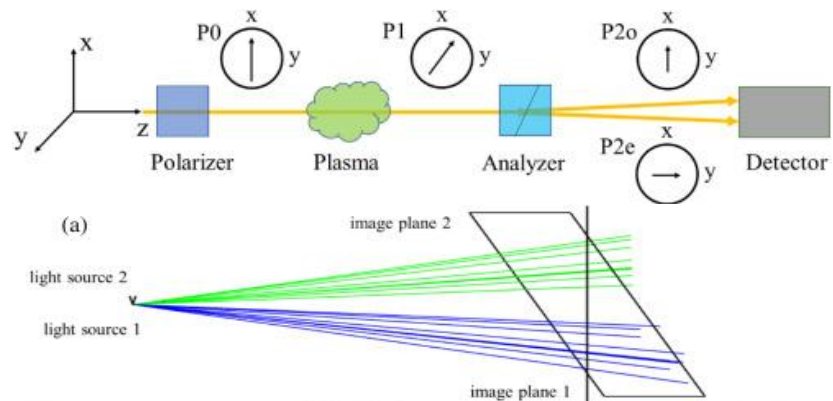


利用条纹变化规律，进行偏振测量。

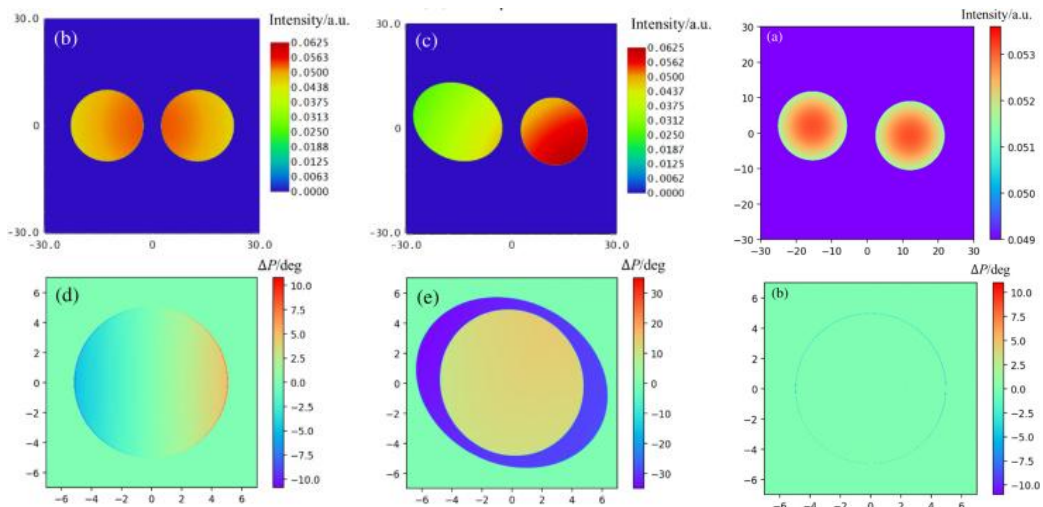
激光等离子体实验和数据分析



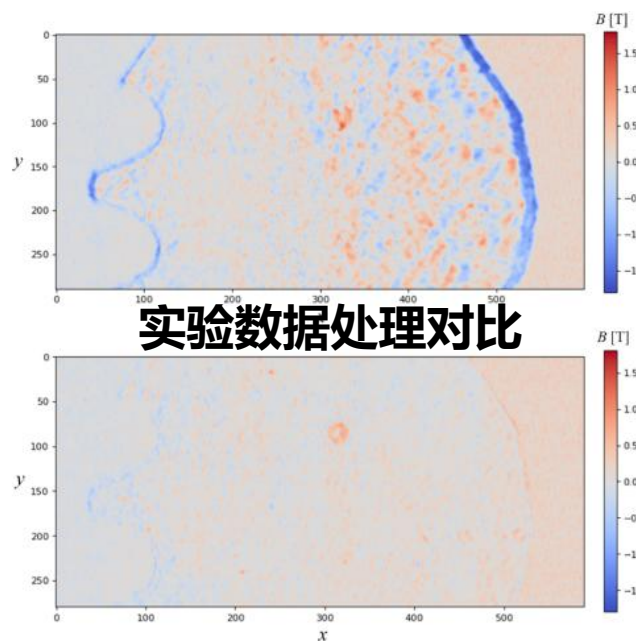
磁场测量数据分析



光学模拟分析



模拟数据处理对比



实验数据处理对比

- 法拉第旋光法分束方法测量等离子体磁场时存在**虚假磁场**。
- 利用光束还原的方法抑制虚假磁场的产生。
- 中心区域削减一半，边缘削减一个数量级以上。

III. 使用MPI进行偏振探测

- 非理想状况下，干涉成像为等倾干涉。
- 在相位差为 $\Delta\varphi$ 时，干涉结果为：

$$\begin{aligned} I_{out} &= I\sin^2(\theta) + I\cos^2(\theta) + 2I\sin(\theta)\cos(\theta)\cos(\Delta\varphi) \\ &= I[1 + 2\sin(\theta)\cos(\theta)\cos(\Delta\varphi)] \end{aligned}$$

- **干涉结果随偏振角度的变化范围与相位差相关，即随干涉条纹变化。**

- (1) 通过光路调试，控制诊断区域。
- (2) 利用条纹变化规律，拟合求解偏振。

