



应用光学课程设计

学 院	理学院
班 级	物理 2201
学 号	223414020113
学生姓名	窦义康
指导教师	马佳

时间： 2025 年 05 月 12 日至 2025 年 05 月 23 日

摘 要

马赫-曾德干涉实验是基于分振幅法的经典波动光学实验，其核心是通过两个分束镜将一束光分为独立传播的两路光，经反射镜调控后重新干涉，形成可观测的干涉条纹。实验装置主要由激光源、第一分束镜（将入射光分为参考光与测试光）、反射镜系统（调节两束光路径）和第二分束镜（重组两束光产生干涉）构成。通过精确调节反射镜的倾角或位移，可改变两束光的光程差，使干涉条纹呈现周期性明暗变化。该干涉仪因两束光空间分离的特点，广泛应用于光学薄膜参数测量、气体折射率变化检测及量子纠缠态分析等领域。相较于迈克尔逊干涉仪，其优势在于避免回光干扰，适用于复杂光学系统的无损检测，已成为现代精密光学测量和光量子实验的重要基础平台。

本文基于 Zemax 光学设计软件，系统研究了马赫-曾德干涉实验的仿真建模。通过构建包含相干光源、分束器、反射镜及探测器的完整光路模型，实现了干涉仪空间光路的可视化仿真。本研究建立的虚拟实验系统有效克服了传统光学实验的调节困难，为干涉仪参数优化提供了可视化分析手段，在光电专业实验教学中具有显著应用价值。

关键词 马赫曾德干涉实验；光学模拟与设计；Zemax 软件应用

1 背景介绍

马赫-曾德干涉实验是 19 世纪末由物理学家路德维希·马赫(Ludwig Mach)和路德维·曾德(Ludwig Zehnder)提出的经典干涉装置,旨在通过分振幅法研究光的波动性及介质特性。其设计初衷是为了克服早期干涉仪(如迈克尔逊干涉仪)的结构局限性,通过分离两束光路实现更灵活的光程调控,避免回光干扰对光源稳定性的影响。该干涉仪由两对分束镜和反射镜构成对称光路,将入射光束分为两束独立传播的相干光,经路径调整后重新汇合产生干涉条纹。因其两束光完全空间分离的特性,可广泛应用于气体折射率测量、光学元件表面检测、量子态叠加实验等领域。20 世纪激光技术的出现进一步推动了该装置的精密化,使其成为高灵敏度光学测量(如引力波探测)和现代量子光学研究(如光子纠缠调控)的基础平台。当前,马赫-曾德干涉仪不仅是光学实验教学的核心内容,更是工业无损检测与前沿科学研究的关键工具。

传统马赫-曾德实验需精密校准分束镜和反射镜,手动调节耗时长且易受振动干扰,很难观察到干涉条纹。对学生而言,手动调节分束镜和反射镜需耗费大量时间在精密校准,且实验过程中极易破坏光路稳定性,导致干涉条纹频繁模糊甚至消失,学生常因重复校准而陷入挫败感;同时,高精度仪器操作容错率低,稍有不慎可能引发镜片污染或机械损伤,既增加设备维护压力又分散学生对光学原理的深入理解,最终使实验课沦为机械性操作训练,削弱了波动光学本质规律的探究深度。

Zemax 仿真通过参数化界面使学生快速构建马赫-曾德光路,无需手动校准即可实现分束镜倾角等参数的高精度调节,并且可以很容易就看到干涉条纹,大幅压缩传统实验数小时的机械调节时间,使学生能将核心精力集中于波动光学原理与物理机制探究,同时避免因环境干扰或操作失误导致的实验失败风险。

2 预实验

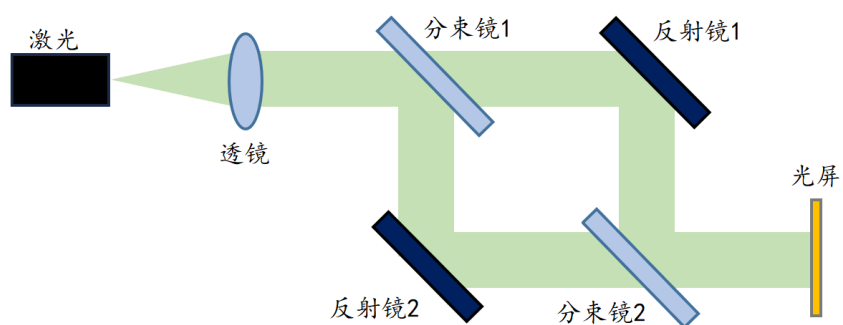


图 1 马赫曾德干涉实验光路图

根据马赫曾德实验光路图中的器件在 Zemax 中进行设计。从图 1 中可以知道，要进行马赫曾德干涉实验的仿真模拟，需要设计出光源，透镜，分束镜，反射镜，探测器。

首先搭建基础光路结构，以光源位置为坐标原点，确定其他仪器的位置坐标。仿照实验光路图设计仪器位置如图 2 所示。

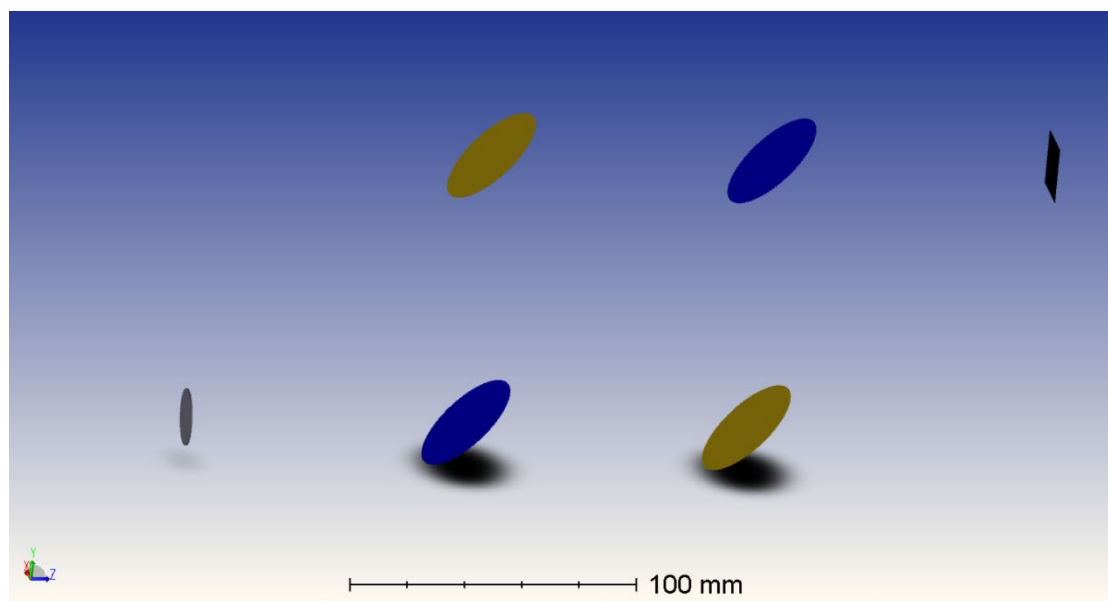


图 2 基础光路仪器结构仿真图

图中蓝色物体为分束镜，褐色物体为反射镜，灰色物体为透镜，黑色物体为探测器，光源未显示。

3 理论分析

马赫-曾德尔干涉仪由一个相干光源、透镜、两个分束镜和两个反射镜组成。

光源发出的光经透镜准直后形成平行光束，入射至分束镜 1。分束镜 1 以 45° 倾角将光分为透射与反射两束：透射光沿原水平方向传播至反射镜 1，反射光偏转 90° 垂直入射至反射镜 2。两反射镜均以 45° 倾角再次偏转光路，使两光束分别经过等长路径后交汇于分束镜 2。

两束光到达分束镜 2 后在水平方向分别产生一束透射光和反射光，不难发现这两束光是频率相同，振动方向相同，且由于镜片存在厚度与折射率而存在恒定相位差。

根据上述分析，可设同一位置的两束光电场

$$E_1 = a_1 \cos(\alpha_1 - \omega t), \quad E_2 = a_2 \cos(\alpha_2 - \omega t)$$

总电场

$$E_{\text{总}} = E_1 + E_2 = a_1 \cos(\alpha_1 - \omega t) + a_2 \cos(\alpha_2 - \omega t)$$

利用两角差的余弦公式

$$\begin{aligned} E_{\text{总}} &= a_1 \cos \omega t \cos \alpha_1 + a_1 \sin \omega t \sin \alpha_1 + a_2 \cos \omega t \cos \alpha_2 + a_2 \sin \omega t \sin \alpha_2 \\ &= (a_1 \cos \alpha_1 + a_2 \cos \alpha_2) \cos \omega t + (a_1 \sin \alpha_1 + a_2 \sin \alpha_2) \sin \omega t \end{aligned}$$

因为 a_1 、 a_2 、 α_1 、 α_2 都是常数，所以可令

$$a_1 \cos \alpha_1 + a_2 \cos \alpha_2 = A \cos \alpha$$

$$a_1 \sin \alpha_1 + a_2 \sin \alpha_2 = A \sin \alpha$$

其中， A 和 α 为待定常数。将上两式平方后相加得

$$A^2(\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha) = a_1^2(\sin^2 \alpha_1 + \cos^2 \alpha_1) + a_2^2(\sin^2 \alpha_2 + \cos^2 \alpha_2) + 2a_1a_2(\cos \alpha_1 \cos \alpha_2 + \sin \alpha_1 \sin \alpha_2)$$

化简得

$$A^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos(\alpha_2 - \alpha_1)$$

将之前两式相除得

$$\tan \alpha = \frac{a_1 \sin \alpha_1 + a_2 \sin \alpha_2}{a_1 \cos \alpha_1 + a_2 \cos \alpha_2}$$

于是总电场可表示为

$$E_{\text{总}} = A \cos \alpha \cos \omega t + A \sin \alpha \sin \omega t = A \cos(\alpha - \omega t)$$

根据光电场的基本形式可知其振幅为 A 。

由于光强度 $I \propto A^2$ ，所以光强度 I 可表示为

$$I = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos(\alpha_2 - \alpha_1)$$

令 $\delta = \alpha_1 - \alpha_2$ ，则

$$I = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos \delta$$

所以某一位置处的光强大小与 δ 有关， δ 即两束光的相位差。光强由于 $\cos \delta$ 项的存在会在最大值与最小值之间产生周期性的变化。因此，可以在光屏上看到明暗相间的干涉图样。

4 实验设计

基础光路结构已经搭建完成，根据马赫曾德干涉仪的原理，对各个器件的参数进行设置。为了产生干涉，需要采用相干光源，分束镜为 50:50 透射反射比的膜层，反射镜为反射率为 100% 的膜层。部分相关参数设计如下图所示。

物体类型	标注	参考物体	在...内部	X位置	Y位置	Z位置	倾斜X	倾斜Y	倾斜Z	材料
1 二极管光源		0	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-
2 标准透镜		0	0	0.000	0.000	100.000	0.000	0.000	0.000	2.00,0.0 M
3 圆柱体	分束镜1	2	0	0.000	0.000	100.000	45.000	0.000	0.000	BK7
4 圆柱体	反射镜1	2	0	0.000	0.000	200.000	45.000	0.000	0.000	BK7
5 圆柱体	反射镜2	2	0	0.000	100.000	100.000	45.000	0.000	0.000	BK7
6 圆柱体	分束镜2	2	0	0.000	100.000	200.000	45.050	0.000	0.000	BK7
7 矩形探测器		2	0	0.000	100.000	300.000	0.000	0.000	0.000	

图 3 参数设计图

根据上述参数得到的仿真光路图如下图所示。

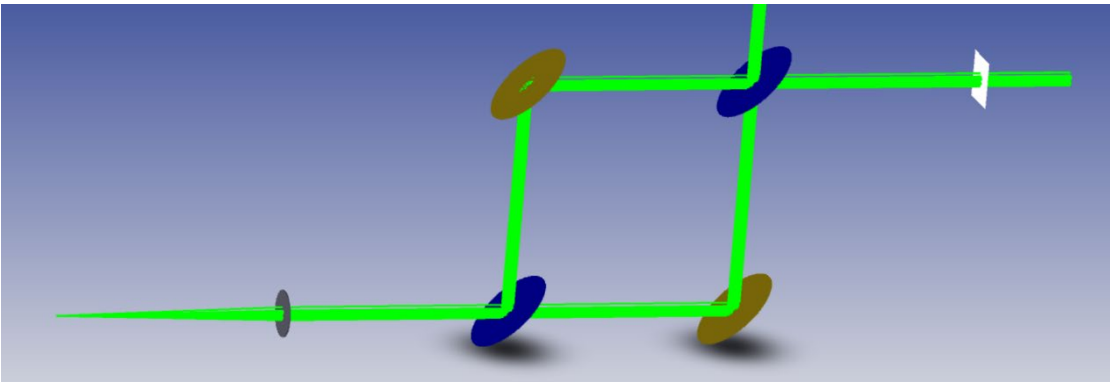


图 4 仿真光路图

为了能够观察到干涉图样，需要进行光线追迹，同时为了获得一个清晰的干涉图样，这里选择将分析光线条数设为 3 千万条。

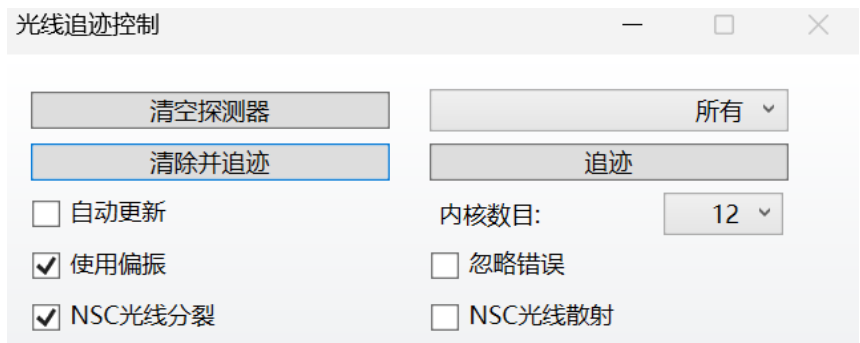


图 5 光线追迹设置

设置光线追迹如图 5 之后进行追迹，打开探测器查看器，选择相干辐照度—灰度显示，如图 6 所示。

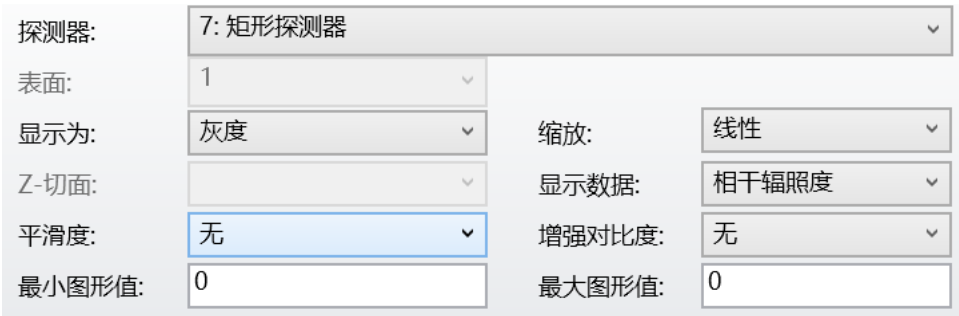


图 6 探测器参数设置

进行上述操作之后便可得到探测器显示的干涉图样，如图 7 所示。

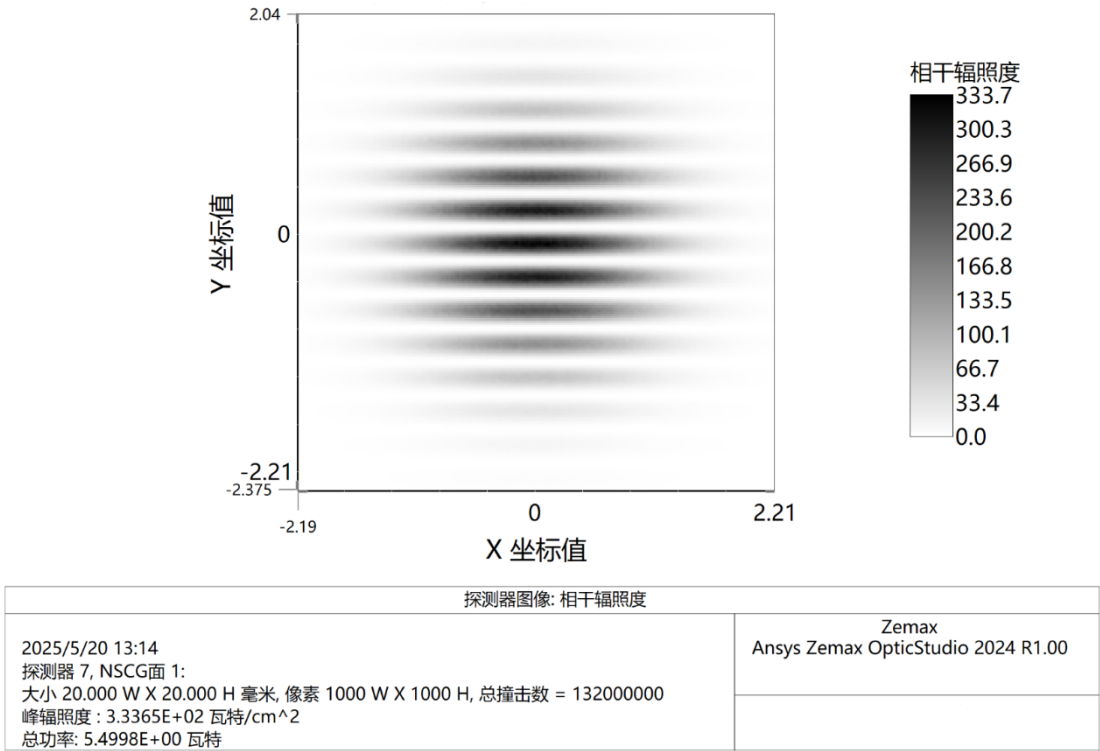


图 7 干涉图样仿真图

使用 Zemax 仿真软件除了可以查看干涉图样外，还可以查看空间纵向与横向光强分布曲线、辐亮度等数据。图 8 就展现了上述干涉图样的纵向光强分布。

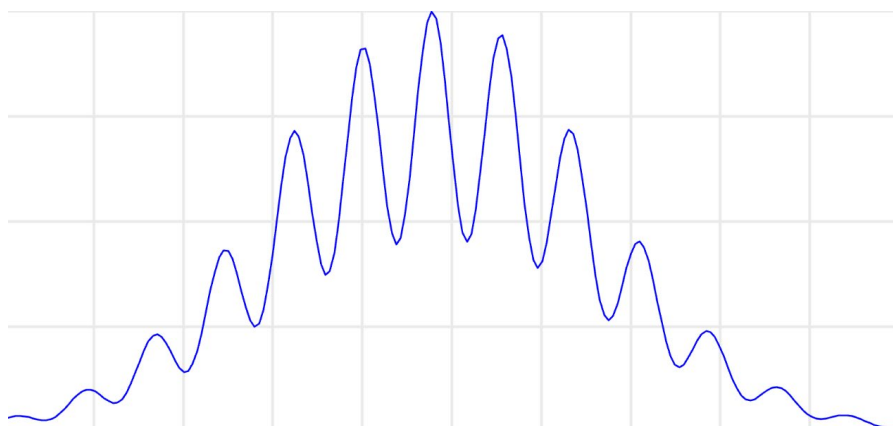


图 8 纵向相对光强分布图

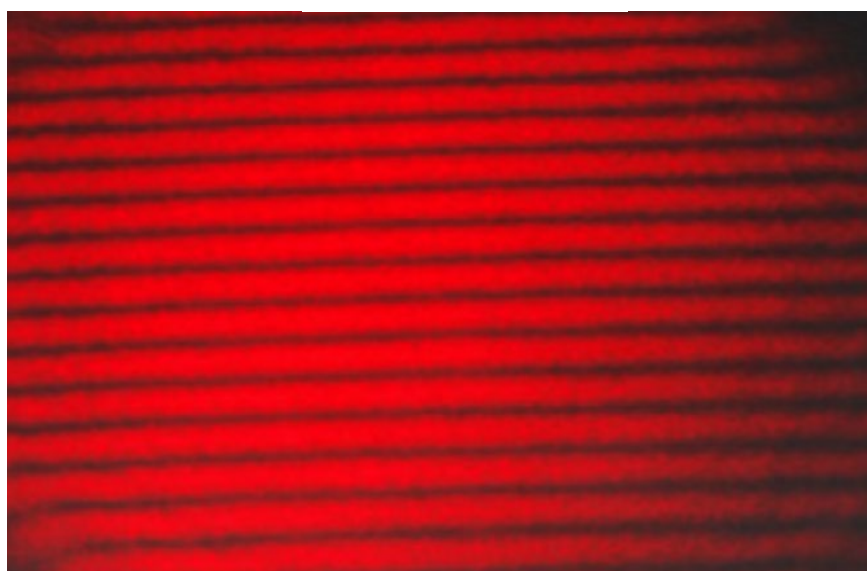


图 9 干涉图样实验图

图 9 是使用曾德马赫干涉仪得到的实际干涉图。将干涉图样仿真图与干涉图样实验图进行对比，如图 10 所示。

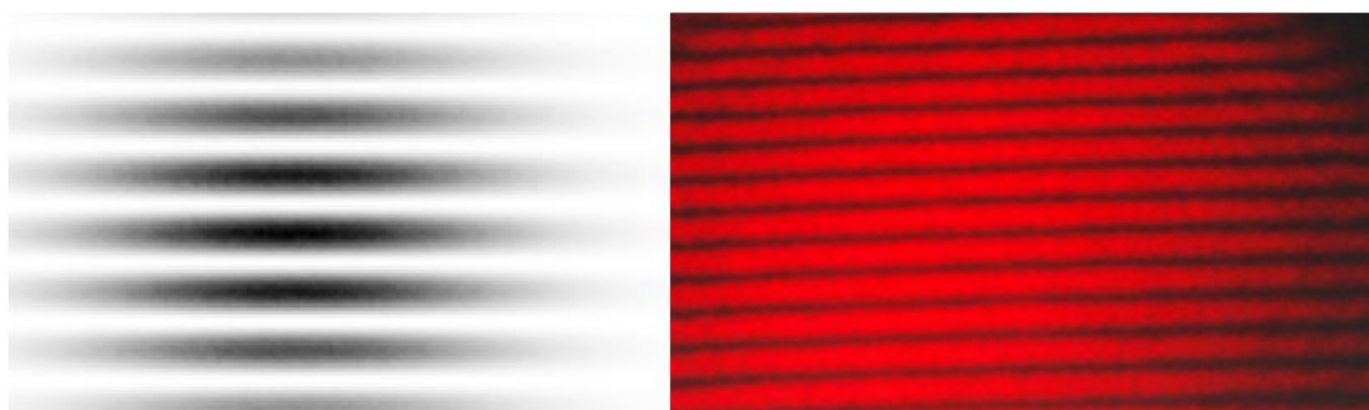


图 10 干涉图样对比图

通过图 10 所示的干涉图样实验对比可知，二者存在高度相似性，并且从清晰度以及分布均匀度等方面看，使用 Zemax 仿真的结果是比较成功的。

5 总结和展望

马赫 - 曾德干涉实验作为经典波动光学实验，通过分振幅法将一束光分为两路独立传播的光，经反射镜和分束镜调控后干涉形成条纹，在多领域应用广泛。但传统实验手动调节困难，易受干扰，影响教学效果与原理探究。

本研究借助 Zemax 软件构建完整光路模型，实现可视化仿真。经理论分析得出干涉光强公式，通过设置相干光源、特定膜层的分束镜和反射镜等参数，进行光线追迹，得到干涉图样。仿真结果与实验图高度相似，表明该方法能有效克服传统实验弊端，为干涉仪参数优化提供手段，在光电教学中价值显著。

在教学方面，可进一步开发基于 Zemax 的马赫 - 曾德干涉实验虚拟实验课程，增加互动环节，如让学生自主改变更多实验参数，实时观察干涉条纹变化，深入理解光学原理。

在科研应用上，利用 Zemax 软件的强大功能，结合新兴的光学技术，对马赫曾德干涉仪进行创新设计。例如，探索其在微纳光学结构检测中的应用，提高检测精度和分辨率；研究其在新型光量子态制备与操控中的潜力，推动量子光学领域的发展。还可以将该仿真方法拓展到其他复杂光学系统的研究中，为光学工程领域的创新提供更多理论支持和技术参考。

6 参考文献

- [1] 李林. 应用光学 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2010
- [2] 袁旭沧. 应用光学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1988.
- [3] 胡玉禧, 安连生. 应用光学 [M]. 安徽: 中国科技大学出版社, 1996.
- [4] 母国光, 战元龄. 光学 [M]. 北京: 人民教育出版社, 1981.
- [5] 袁旭沧. 光学设计 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1988.
- [6] 袁旭沧. 现代光学设计方法 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995.
- [7] 王子余. 几何光学与光学设计 [M]. 浙江: 浙江大学出版社, 1989.
- [8] 安连生, 李林, 李全臣. 应用光学 [M]. 北京: 北京理工大学, 2002
- [9] 梁铨廷. 物理光学 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2012