

迈克尔逊干涉仪及其干涉中的几个问题

黄绍书^{1,2}

¹毕节市第二实验高中, 贵州 毕节

²安顺学院, 贵州 安顺

收稿日期: 2022年4月3日; 录用日期: 2022年5月3日; 发布日期: 2022年5月11日

摘要

迈克尔逊干涉仪是利用分振幅法获得相干双光束以实现干涉的重要精密光学研究仪器, 自1881年研制发明至今已近140年。但在实践应用中, 对其中的个别元部件作用的认识还存在一些分歧, 对涉及到的光的干涉的一些概念的提法也存在一些争议。本文从最基本的光的干涉原理和概念出发, 根据相关文献资料, 结合杨氏干涉、等倾干涉、等厚干涉以及迈克尔逊干涉进行比对分析, 给出合理的观点, 以期平息尚有的分歧与争议。

关键词

迈克尔逊干涉仪, 补偿板, 迈克尔逊干涉, 杨氏干涉, 等倾干涉, 等厚干涉, 单线光路, 双线光路

Several Problems in Michelson Interferometer and Its Interference

Shaoshu Huang^{1,2}

¹The Second Experimental High School of Bijie City, Bijie Guizhou

²Anshun College, Anshun Guizhou

Received: Apr. 3rd, 2022; accepted: May 3rd, 2022; published: May 11th, 2022

Abstract

The Michelson interferometer is an important precision optical research instrument that uses the split-amplitude method to obtain coherent double beams to achieve interference. It has been invented since 1881 for nearly 140 years. However, in practical applications, there are still some differences in the understanding of the role of individual components, and there are some controversies about the concept of some interference in the light involved. Based on the principle and concept of the most basic light interference, this paper combines Young's interference, equidistant interference, equal-thickness interference and Michelson's interference for comparative analysis based on relevant literature data, and gives a reasonable viewpoint in order to calm down the existing disagreements and disputes.

Keywords

Michelson Interferometer, Compensation Plate, Michelson Interference, Young's Interference, Isotropic Interference, Equal-Thickness Interference, Single-Line Optical Path, Two-Line Optical Path

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

2019年7月24日至27日,由教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会、教育部高等学校物理学类专业教学指导委员会、中国物理学会物理教学委员会主办的“2019年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会”和“2019年全国高等学校物理基础课程青年教师讲课比赛决赛”在云南师范大学呈贡校区隆重举行。根据教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会和教育部高等学校物理学类专业教学指导委员会的活动规划和安排,今年的青年教师讲课比赛的课型为实验课教学的角逐。

在本次活动的讲课比赛环节中,有参赛选手展示的迈克尔逊干涉仪实验课教学(浓缩课)引起了与会人员特别是参赛教师和评委专家组的广泛讨论和争议。其中,最为典型和突出的有三个问题:

- 1) 迈克尔逊干涉是属于杨氏干涉还是属于等倾干涉?
- 2) 迈克尔逊干涉仪中的补偿板是否是必须的?
- 3) 迈克尔逊干涉的实验光路图应该是单线光路还是复线光路?

这些问题反映出长期的教学及实践工作中,对迈克尔逊干涉仪的个别元部件的作用的认识还存在一定的分歧。同时,对光的干涉涉及到的一些概念的提法也还存在观点不甚统一。

本文从光的干涉的基本原理出发,将涵盖迈克尔逊干涉仪及其干涉中的这些问题作比较细致的梳理,仅供参考与进一步讨论。

2. 光的干涉原理

首先说明:本文中所涉及的光的传播介质,在没有特别标定或指出的情况下都均视为真空。

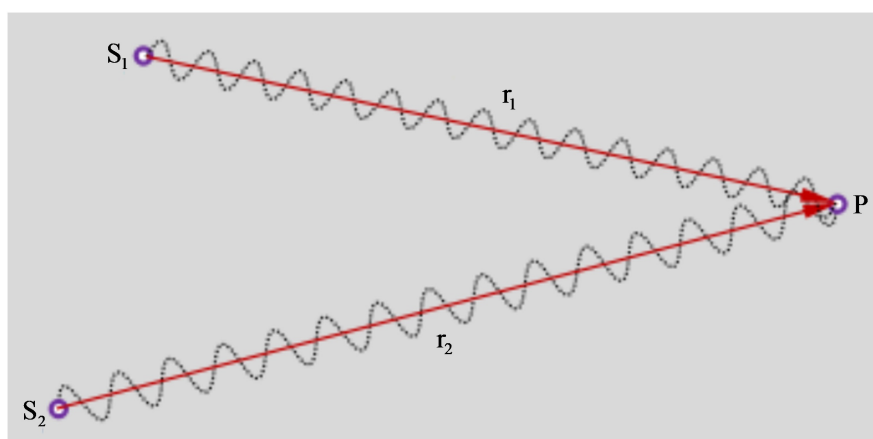


Figure 1. The principle of interference of light

图 1. 光的干涉原理

光的干涉是指满足一定条件(频率相等、相差恒定、光矢量即电场强度矢量振动方向相同) [1]的两列或多列光波在空间相遇时相互叠加,在某些区域始终加强,在另一些区域则始终削弱,形成稳定的强弱分布的现象。设如图 1 所示的两相干光源 S_1 和 S_2 的振动方程分别为:

$$y_{10} = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1) \quad (1)$$

$$y_{20} = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2) \quad (2)$$

那么,它们分别在光场中的某一点 P 引起振动的振动方程分别为:

$$y_1 = A_1 \cos \left[\omega t + \left(\varphi_1 - \frac{2\pi r_1}{\lambda} \right) \right] \quad (3)$$

$$y_2 = A_2 \cos \left[\omega t + \left(\varphi_2 - \frac{2\pi r_2}{\lambda} \right) \right] \quad (4)$$

y_1 与 y_2 的合成的振动方程为:

$$y = y_1 + y_2 = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (5)$$

其中,合成振动的振幅及初相位分别为:

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \left(\varphi_2 - \varphi_1 - 2\pi \frac{r_2 - r_1}{\lambda} \right)} \quad (6)$$

$$\varphi = \arctan \frac{A_1 \sin \left(\varphi_1 - \frac{2\pi r_1}{\lambda} \right) + A_2 \sin \left(\varphi_2 - \frac{2\pi r_2}{\lambda} \right)}{A_1 \cos \left(\varphi_1 - \frac{2\pi r_1}{\lambda} \right) + A_2 \cos \left(\varphi_2 - \frac{2\pi r_2}{\lambda} \right)} \quad (7)$$

由于,两振动 y_1 与 y_2 的相位差为:

$$\Delta\varphi = \left[\omega t + \left(\varphi_2 - \frac{2\pi r_2}{\lambda} \right) \right] - \left[\omega t + \left(\varphi_1 - \frac{2\pi r_1}{\lambda} \right) \right] = \varphi_2 - \varphi_1 - 2\pi \frac{r_2 - r_1}{\lambda} \quad (8)$$

显然,若 P 点给定,则 $\Delta\varphi$ 恒定,即 $\Delta\varphi$ 取决于两光源 S_1 和 S_2 到 P 点的光程差 δ ,从而结合(6)式可知,光场中每一点的合成振动的振幅 A 保持恒定。因此也就说明,两相干光源 S_1 和 S_2 的两振动在光场中激发的两列光波形成稳定强弱分布的干涉现象。

现从最简单的情况 $\varphi_2 = \varphi_1$ 分析,结合图 1 不难看出,这时 $\delta = r_2 - r_1$ 。因此,根据(6)式,当

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{r_2 - r_1}{\lambda} = \pm 2k\pi, \text{ 即 } \delta = r_2 - r_1 = \pm k\lambda \quad (k = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (9)$$

时,合成振动的振幅最大,呈现干涉相长,表现出明条纹。这时

$$A_{\max} = A_1 + A_2 \quad (10)$$

而当

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{r_2 - r_1}{\lambda} = \pm(2k+1)\pi, \text{ 即 } \delta = r_2 - r_1 = \pm(2k+1)\frac{\lambda}{2} \quad (k = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (11)$$

时,合成振动的振幅最小,呈现干涉相消,表现出暗条纹。这时

$$A_{\min} = |A_1 - A_2| \quad (12)$$

在实践实验中,可以采取不同的途径和方法获得相干光源(或相干光束),广泛实现不同环境及不同条

件下的光的干涉，以达到为实验教学和科学研究服务的目的。

3. 两个典型的光的干涉实例

3.1. 杨氏干涉

1801年，英国物理学家托马斯·杨(1773~1829)在实验室里首次成功地观察到了光的干涉。如图2所示是托马斯·杨的实验[2]光路，他采用烛焰作为光源，烛焰、单缝、双缝和光屏等关于轴线SO对称。其中，单缝的作用是获得线光束，双缝的作用是获得振动情况完全相同的相干光束，图中双缝 S_1 与 S_2 之间的距离 d 以及 θ 角在实际实验装置或实验中都是很小的。

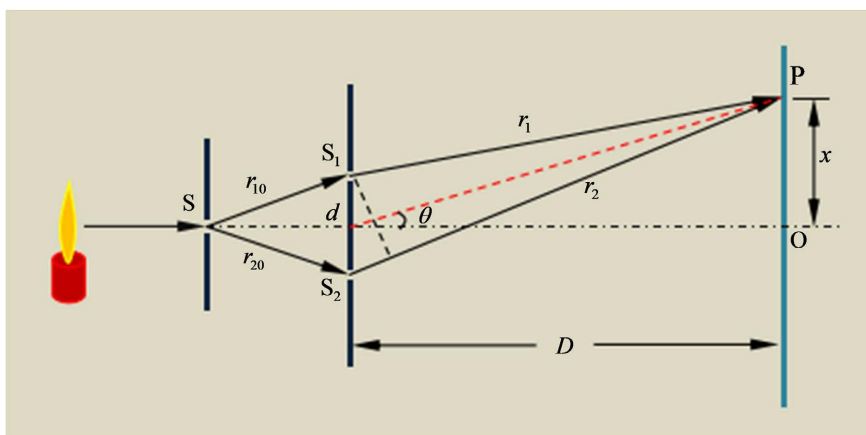


Figure 2. Optical path of Young's interference experiment
图2. 杨氏干涉实验光路

设由光源发出的光先后经过单缝和双缝形成的两束相干光束投射到光屏上的P点，那么这两束光的光程差为：

$$\delta = (r_{02} + r_2) - (r_{01} + r_1) = r_2 - r_1 \approx d \sin \theta \approx d \tan \theta = d \frac{x}{D} \quad (13)$$

根据光的干涉原理，当

$$\delta = d \frac{x}{D} = \begin{cases} \pm k \lambda, & (\text{合振动极大}) \\ \pm (2k+1) \frac{\lambda}{2}, & (\text{合振动极小}) \end{cases} \quad (k = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (14)$$

时，可得相应的明暗条纹位置为：

$$x = \begin{cases} \pm k \frac{D\lambda}{d}, & (\text{明条纹}) \\ \pm (2k+1) \frac{D\lambda}{2d}, & (\text{暗条纹}) \end{cases} \quad (k = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (15)$$

容易得出，相邻两条明条纹或相邻两条暗条纹之间的距离即条纹间距为：

$$\Delta x = x_{k+1} - x_k = \frac{D\lambda}{d} \quad (16)$$

特别说明：托马斯·杨的这一双缝干涉实验简称杨氏双缝干涉实验，它是物理学史上最美丽的十大实验[3][4]之一，其巧妙之处主要就在于用一个普通而简单的双缝就轻松的获得了相干光束，这种获得相

干光束的方法称为分波阵面法。托马斯·杨利用双缝干涉实验首次成功地观察到了光的干涉，为光的波动性奠定了坚实基础和提供了有力证据。

3.2. 薄膜干涉

光源发出的光投射到透明薄膜(厚度在毫米量级以下)的分界面时将分为两部分,一部分光经薄膜外表面反射回与入射光场同侧的反射光场,另一部分光经薄膜外表面折射进入薄膜再经薄膜内表面反射后又再经薄膜外表面折射回反射光场。这时在薄膜外表面附近乃至广阔的空间会产生经薄膜的两个表面反射的两列反射光束的干涉现象,即所谓的薄膜干涉。

关于光的任何形式干涉的计算,最基本的计算都是光程差的计算。而在薄膜干涉中,光程差的计算方法并不唯一[5]-[12],这里仅介绍其中一种。如图3所示,假设一束一定频率的光线 a 投射到厚度为 d 、折射率为 n 的薄膜外表面,经薄膜反射、折射后分割成两束光线 a_1 和 a_2 。由于光由光疏介质投射到光密介质发生反射时将产生半波损失,故光线 a_1 在 A 点产生半波损失。因此,光线 a_1 与光线 a_2 的光程差可表示为:

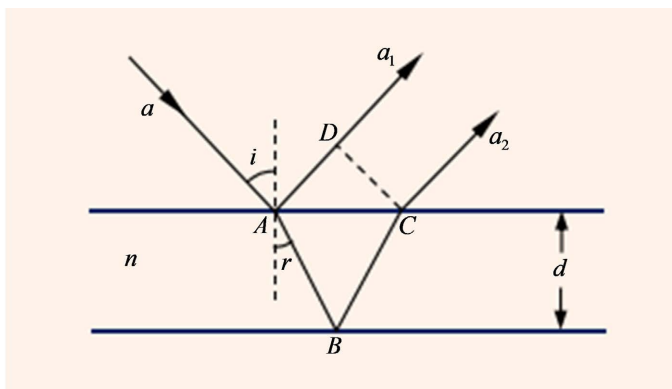


Figure 3. Thin-film interference optical path
图3. 薄膜干涉光路

$$\delta = n(AB + BC) - AD + \frac{\lambda}{2} \quad (17)$$

根据折射定律和几何关系:

$$\begin{cases} \sin i = n \sin r \\ AD = AC \sin i \\ AB = BC = \frac{d}{\cos r} \\ AC = 2d \tan r \end{cases} \quad (18)$$

可将(17)式化为:

$$\delta = 2dn \cos r + \frac{\lambda}{2} \text{ 或 } \delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2} \quad (19)$$

光线 a_1 与光线 a_2 发生干涉的明暗条纹满足的条件:

$$\delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2} = \begin{cases} k\lambda, (k=1,2,3,\dots) \text{ 明条纹} \\ (2k+1)\frac{\lambda}{2}, (k=0,1,2,3,\dots) \text{ 暗条纹} \end{cases} \quad (20)$$

在薄膜干涉中，空间介质结构一定时，光程差 δ 与薄膜厚度 d 和入射光线的入射角 i 有关。当入射角 i 一定(比如 $i=0^\circ$)而薄膜厚度 d 不均匀时，薄膜厚度相同的位置将产生同级干涉条纹，即等厚干涉，如图 4 所示；

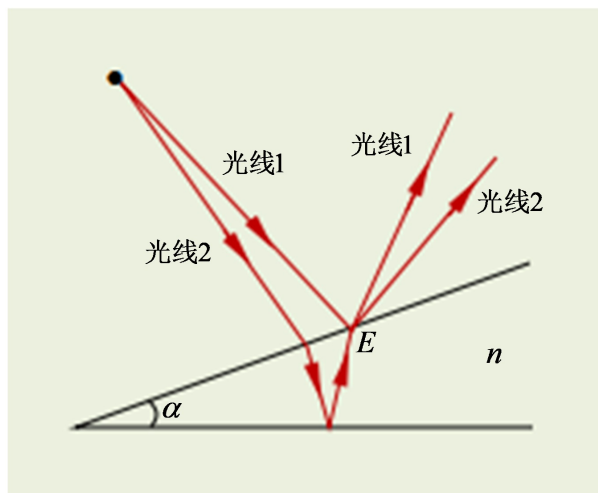


Figure 4. Equal-thickness interference of thin-film surface
图 4. 薄膜表面的等厚干涉

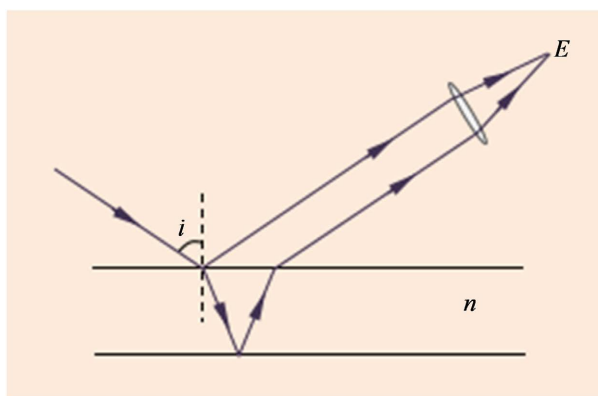


Figure 5. Equiangular interference at infinity
图 5. 无限远处的等倾干涉

当薄膜厚度 d 均匀而有不同入射角 i (或入射光线的倾斜角) 的入射光时，入射角相同的光线将产生同级干涉条纹，即等倾干涉，如图 5 所示。

在科学实践中，等厚干涉和等倾干涉都有着广泛的重要应用[5] [6] [7] [8]。

这里说明一下光的分振幅法。由于光的能量跟光的振幅平方成正比，故将像薄膜干涉中这种分割光束的方法称为分振幅法。因此，薄膜干涉是利用光的分振幅法获得相干光束的。

4. 迈克尔逊干涉仪和迈克尔逊干涉

4.1. 迈克尔逊干涉仪结构

迈克尔逊干涉仪，是 1881 年美国物理学家阿尔伯特·亚伯拉罕·迈克尔逊和莫雷·爱德华·威廉姆斯合作设计制造的精密光学仪器。通过调整该干涉仪，可以产生等厚干涉条纹，也可以产生等倾干涉条纹。

迈克尔逊干涉仪的结构如图 6 所示。其中， M_1 和 M_2 是一对精密的相互垂直的平面镜，可通过它们的调节螺钉调节两者之间的垂直度，且 M_1 可沿导轨前后调动， M_2 固定。 G_1 和 G_2 是厚薄及折射率得均匀程度都很高的相互平行放置的相同玻璃板，且 G_1 的背面镀有一层很薄的银膜，起到分割光束作用，称为分光镜； G_2 起补偿光程作用，称为补偿板。同时， M_1 和 M_2 所在平面分别与 G_1 和 G_2 所在平面之间均成 45° 夹角。



Figure 6. Michelson interferometer
图 6. 迈克尔逊干涉仪

4.2. 迈克尔逊干涉原理

迈克尔逊干涉仪是利用分振幅法产生双光束以实现干涉，即让一束入射光经过分光镜分为两束相干光后各自被对应的平面镜反射后发生干涉。通过调节干涉臂长度或改变介质的折射率可以实现两束相干光的不同光程，同时，通过调节反射镜 M_1 和 M_2 的调节螺钉可以轻微改变它们之间的垂直度，从而能够形成不同的干涉图样。

如图 7 所示是迈克尔逊干涉的光路图，图中 M_2' 是 M_2 在 M_1 中的虚像。光源发出的光束经分束镜 G_1 分成光束 1 和光束 2。其中，光束 1 先后三次通过 G_1 ，而光束 2 通过一次通过 G_1 两次通过补偿板 G_2 ，这样就避免两光束所经过路程不同而引起较大的光程差。

从观察角度看，两相干光束可视为光束 1 和光束 2 分别从 M_1 和 M_2' 的反射光束，迈克尔逊干涉就相当于 M_1 与 M_2' 的“空气薄膜”形成的薄膜干涉。若设“空气薄膜”的厚度为 d ，光束 1 入射“空气薄膜”的入射角为 i ，同时注意到光束 1 与光束 2 分别在 G_1 和 G_2 表面反射产生半波损失引起的额外程差相互抵消。因此，迈克尔逊干涉的光程差为：

$$\delta = 2d\sqrt{1^2 - \sin^2 i} \quad (21)$$

因此，光束 1 与光束 2 发生干涉的明暗条纹满足的条件为：

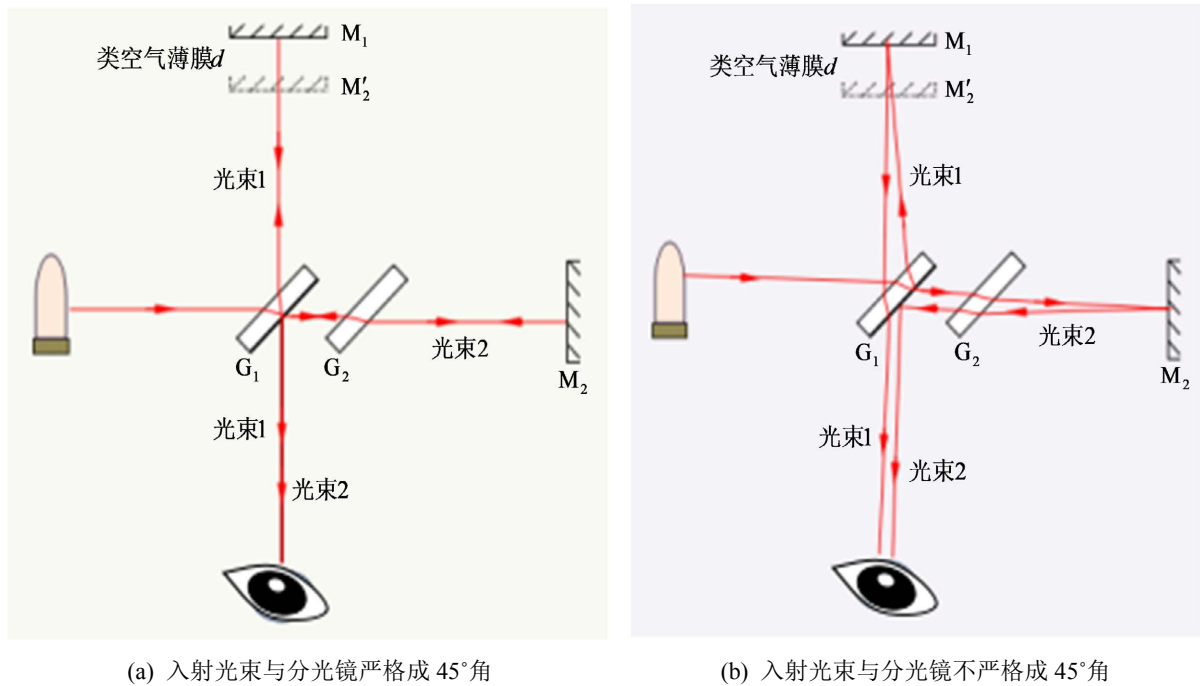


Figure 7. Michelson interference optical path

图 7. 迈克尔逊干涉光路

$$\delta = 2d\sqrt{1^2 - \sin^2 i} = \begin{cases} k\lambda, & (k = 1, 2, 3, \dots) \text{ 明条纹} \\ (2k + 1)\frac{\lambda}{2}, & (k = 0, 1, 2, 3, \dots) \text{ 暗条纹} \end{cases} \quad (22)$$

其中，当 $i = 0^\circ$ 或 $i \neq 0^\circ$ 但 $i \cong 0^\circ$ 时，其光路分别对应图 7 中的(a)和(b)。

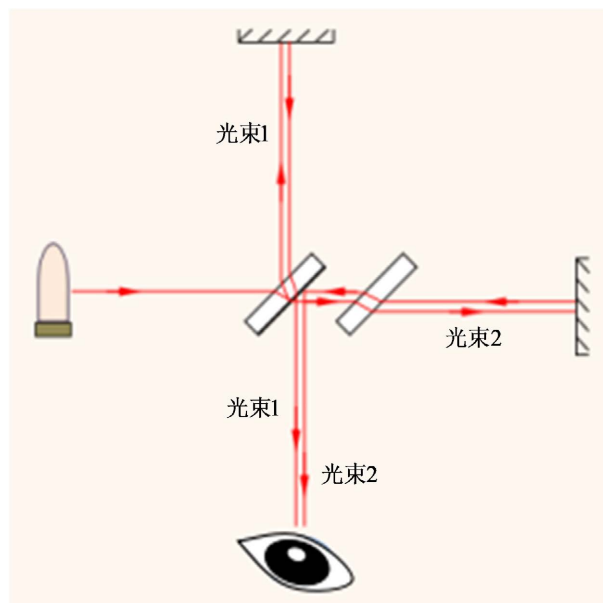


Figure 8. Michelson interference conventional error optical path diagram

图 8. 迈克尔逊干涉惯用错误光路图

这里附带说明一下,目前的一些教材[13]亦或课堂教学过程中,迈克尔逊干涉常出现如图8所示的错误光路图形,容易误导,应予以修正。

理论与实践研究表明,迈克尔逊干涉的类型跟 M_1 与 M_2 之间的垂直度或 M_1 与 M_2' 平行度有关系[14],即

1) 当 M_1 垂直 M_2 或 M_1 平行 M_2' 时,产生等倾干涉,条纹间距随着 M_1 与 M_2' 之间的距离减小而增大。

2) 当 M_1 不严格垂直 M_2 或 M_1 与 M_2' 之间存在微小夹角时,产生等厚干涉,条纹形状跟 M_1 与 M_2' 之间的夹角决定。

5. 结论

通过比较迈克尔逊干涉与杨氏干涉、薄膜干涉获得相干光束的方法和特点,以及对迈克尔逊干涉原理的较深入理解,可以得到以下结论:

1) 迈克尔逊干涉与薄膜干涉都是采用分振幅法获得相干光束,而杨氏干涉是采用分波阵面法获得相干光束。但迈克尔逊干涉与杨氏干涉或薄膜干涉在概念上没有相互兼容性,因此,关于迈克尔逊干涉是否属于杨氏干涉或薄膜干涉的提法是极不妥当的。

2) 迈克尔逊干涉仪具有既能产生等倾干涉也能产生等厚干涉的特点,因此,不能简单地将迈克尔逊干涉定论为等倾干涉或等厚干涉。

3) 迈克尔逊干涉仪实现干涉过程中,补偿板的作用是避免两相干光束之间出现较大的光程差。但在实践实验中,通过调节干涉臂长度也可以实现两相干光束的不同光程,因此,没有补偿板同样也可以达到所要求。

4) 迈克尔逊干涉光路并不唯一,至于是单线光路[比如图7(a)]还是复线光路[比如图7(b)],要根据入射光束跟分束镜等元件之间的位置精密关系的实际情况才能确定,但要避免图8类似的光路。

参考文献

- [1] 陈植. 信息仪中光束提升器改变光矢量振动方向问题研究[J]. 天津纺织工学院学报, 1987, 20(1): 58-61.
- [2] 王高亮, 孟明, 王强. 基于 Mathematica 的杨氏双缝干涉实验仿真[J]. 周口师范学院学报, 2018, 35(5): 42-44.
- [3] 杨庆鑫, 吕天全, 孙敬姝. 托马斯·杨的双缝演示应用于电子干涉实验[J]. 物理通报, 2003(11): 41-43.
- [4] 陈康. “最美丽”的十大物理实验给我们的启示[J]. 物理通报, 2003(12): 43.
- [5] 魏茂金, 曹晓琴. 任意入射角情况额外程差的研究[J]. 湖南工学院学报(自然科学版), 2012, 25(4): 37-42.
- [6] 范希智, 祝零谔, 易迎彦. 分振幅双光束等倾干涉中半波损失的讨论[J]. 光学仪器, 2012, 34(5): 54-60.
- [7] 苏瑞洲, 陈小凡, 汤冬华. 光程的概念与薄膜干涉中光程差的表示方法[J]. 高师理科学刊, 2014, 34(34): 43-45.
- [8] 孙艳, 孙锋, 杨玉孝, 谭玉山. 一种新的膜厚测试技术[J]. 计算技术, 2002(3): 6-9.
- [9] 赵丽娟, 凌洁华. 薄膜干涉滤光片单色性的研究与应用[J]. 光学仪器, 2007, 29(4): 71-74.
- [10] 时凯, 苏俊宏, 齐媛. 基于激光外差干涉技术的薄膜厚度测量方法[J]. 应用光学, 2019, 40(3): 473-477.
- [11] 崔海瑛. 薄膜干涉研究[J]. 大庆师范学院学报, 2018, 38(6): 33-35.
- [12] 杨广武, 刘枝明, 朱飞, 徐建, 张守超. 便携投影式牛顿环干涉演示仪的研制与应用[J]. 物理与工程, 2018, 28(Z1): 76-80.
- [13] 秦先明. 大学物理实验[M]. 北京: 高等教育出版社, 2016(1): 184-188.
- [14] 赵凯华. 新概念物理教程光学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004(1): 130-143.