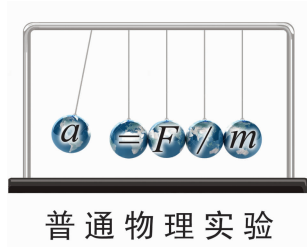


文章编号:1005-4642(2022)12-0017-05



迈克耳孙干涉仪实验常见教学问题的探讨

樊代和^{a,b},魏云^{a,b},沈军峰^{a,b},刘其军^{a,b},贾欣燕^{a,b}

(西南交通大学 a. 物理国家级实验教学示范中心;

b. 物理科学与技术学院,四川 成都 611756)

摘 要:在迈克耳孙干涉仪实验中,当干涉仪出现的光点数量和亮度不同,分束镜的透射率与反射率比值不同,以及观察屏(护目板或毛玻璃)不同时,均会导致观察到的实验现象不同. 通过理论分析和数值模拟,解释了不同实验现象出现的原因,并给出了相应的解决方案. 另外,还分析了利用白光干涉测量透明介质厚度时导致误差的原因,并给出了减小误差的具体方案.

关键词:迈克耳孙干涉;光点亮度;透射率;反射率;白光干涉

中图分类号:O436.1

文献标识码:A

DOI:10.19655/j.cnki.1005-4642.2022.12.003

19 世纪,物理学界上空漂浮着 2 朵著名的“乌云”,其中之一为光传播时所需的介质,即“以太”^[1]. 为了能够验证“以太”的存在,1879 年麦克斯韦提出了利用地球公转测量“以太风”的理论方案. 为了验证该理论,1880 年迈克耳孙开始尝试设计实验装置,经过对实验装置测量精度和抗干扰度的不断改进,最终迈克耳孙和莫雷于 1887 年制作出了精度可达 $\frac{1}{4 \times 10^8}$ m 的测长仪器,即迈克耳孙干涉仪^[2]. 利用该实验仪器得出的实验结果否定了“以太风”的存在^[3],为后续物理学中电磁理论的发展奠定了基础. 结合光谱学以及干涉计量技术,越来越多的物理测量方案通过迈克耳孙干涉仪而实现,这也使得迈克耳孙获得了 1907 年的诺贝尔物理学奖,用以表彰迈克耳孙在精密光学仪器和光学度量研究工作中的卓越贡献.

尽管迈克耳孙干涉仪在 1887 年就问世了,但其物理思想、实验技术方法及相关应用等仍在近代物理学的发展中发挥着重要作用. 例如,2016 年美国物理学家雷纳·韦斯(Rainer Weiss)、巴里·巴里什(Barry Clark Barish)和基普·索恩(Kip Stephen Thorne)通过激光干涉仪首次探测

到引力波^[4],并因此获得了 2017 年的诺贝尔物理学奖. 由于迈克耳孙干涉仪是典型的分振幅干涉装置,利用该装置可以完成很多物理量的测量,从而也使得迈克耳孙干涉仪实验成为国内理工科高校均开设的大学物理实验项目之一.

随着大学物理实验教学工作的开展,迈克耳孙干涉仪实验中的系列问题也相继被国内教师进行了详细研究. 例如,如何产生非定域干涉(等相位面为双曲旋转面)^[5],产生等倾、等厚干涉的条件^[6],干涉仪调节的改进方法^[7],以及迈克耳孙干涉仪中补偿板的作用^[8],等等. 另外,迈克耳孙干涉仪在测量领域中也有广泛应用,例如,测量高压汞灯双黄线波长差^[9]、透明介质厚度、折射率、液体质量分数^[10]、固体杨氏弹性模量^[11]、金属材料的线膨胀系数^[12]等. 然而,在迈克耳孙干涉仪调整和使用的教学过程中发现,仍存在一些未被全面和准确阐述的问题. 例如,干涉仪出现的光点数量和亮度、分束镜的透射率与反射率的比值和观察屏对实验现象的影响,以及测量透明介质厚度时的误差来源,等等. 基于此,本文分析了出现以上问题的原因,并给出了相应的解决方案.

收稿日期:2022-04-18;**修改日期:**2022-09-20

基金项目:教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会 2020 年高等学校教学研究项目(No. DJZW202036xn);西南交通大学本科教育教学研究与改革项目(No. 20201036-02, No. 2103135);四川省高等教育人才培养质量和教学改革项目(No. JG2021-246)

作者简介:樊代和(1981—),男,山西河曲人,西南交通大学物理科学与技术学院副教授,博士,研究方向为量子光学及大学物理实验教学. E-mail:dhfan@swjtu.edu.cn

1 迈克耳孙干涉仪实验教学内容简介

迈克耳孙干涉仪实验在大学物理实验课程中的典型教学内容为:分振幅干涉与点光源非定域干涉的原理讲解,干涉仪的调节和读数方法,激光波长的测量,利用白光干涉测量薄透明介质折射率或厚度^[13-15].其光路如图 1 所示,光源发出的激光经扩束镜 F 入射到分束镜 BS 上,经 BS 反射和透射的光线分别经平面反射镜 M_1 (动镜) 和 M_2 (定镜) 反射后,在观察屏 P 上相遇并干涉.其中,在 BS 和 M_2 之间的补偿板 G (与分束镜 BS 具有相同的材料和厚度) 具有色散补偿功能.

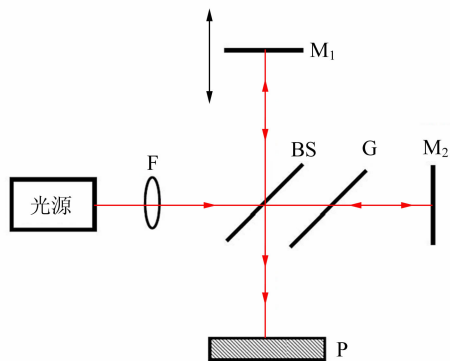


图 1 迈克耳孙干涉仪的光路图

在干涉仪的光路调节过程中,由于激光不能被直视,因此实验前需将可降低激光强度的光学元件(护目板)放置于观察屏 P 位置,以观察经 M_1 和 M_2 反射回来的光点.调节 M_2 的俯仰和倾斜旋钮,使观察到的 2 个最亮光点完全重合.此时,将护目板替换为毛玻璃,就可以观察到点光源的非定域干涉同心圆环,如图 2 所示.

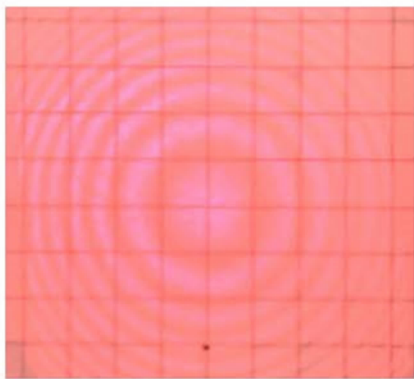


图 2 迈克耳孙等倾干涉图样

通过调节动镜 M_1 的位置,观察并记录干涉圆环“缩进”或“冒出”个数,即可测量得到入射激光的波长.而在观察白光的等厚干涉时,首先利用激光光源产生等倾干涉,调节动镜 M_1 使干涉圆环“缩进”到极值;然后将激光换为扩展白光光源,同时微调 M_2 ,即可在 P 位置直接观察到白光的等厚干涉图样.部分高校在观察白光干涉的基础上,还开展了透明薄玻璃片厚度的测量^[15]等实验内容.

2 光点数量及亮度问题

2.1 光点数量问题

在迈克耳孙干涉仪的实验过程中,经常会出现多个光点的问题,如图 3 所示.为解释该现象,分别分析了入射光经动镜 M_1 和定镜 M_2 反射出的光线并最终到达护目板的光路图,如图 4 所示.

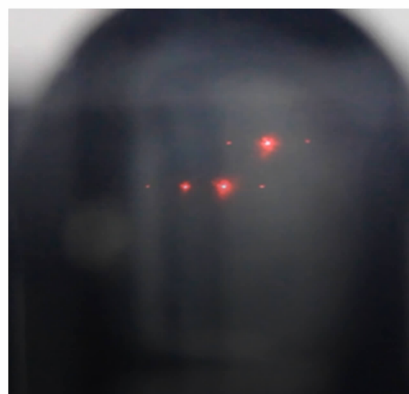
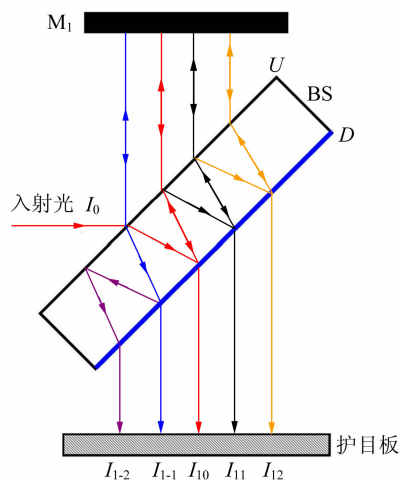
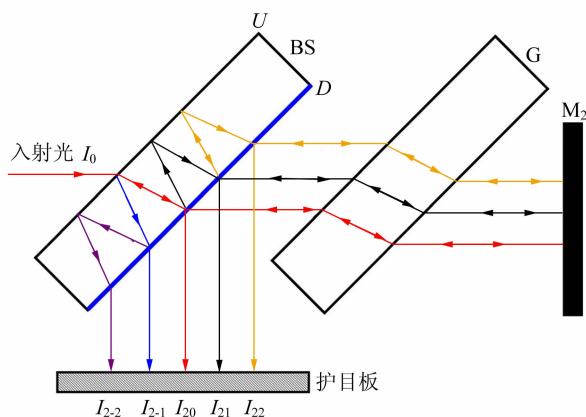


图 3 多个光点的实验现象



(a) 经 M_1 反射



(b) 经 M₂ 反射

图 4 经动镜 M₁ 和定镜 M₂ 反射出的光线并最终到达护目板的光路图

设 BS 的前表面为 U,后表面镀膜面为 D. 需要说明的是,图 4 仅给出了最大光强的光路示意图,即忽略强度相对较弱的其他光线的贡献. 从图 4 可以看出:由于分束镜 BS 有一定厚度,入射光线经 BS 的前后表面反射后,再经平面镜 M₁ 和 M₂ 反射,最后在观察屏处形成多个光点^[13];当 M₁ 和 M₂ 不严格垂直时,观察到反射回来的光点不能完全重合,进而不能形成干涉,且光点之间的距离与分束镜的厚度和折射率有关(根据菲涅耳公式,入射光线在 BS 中的传播路径与 BS 的折射率和厚度有关).

2.2 亮度问题

如图 4 所示,假设入射光的光强为 I₀,BS 前后表面的强度透射率分别为 t_U 和 t_D(不考虑损耗的情况下,强度反射率为 r_U=1-t_U,r_D=1-t_D),补偿板前后表面的透射率与 BS 前表面 U 的透射率相同. 经计算,可得出经 M₁ 和 M₂ 反射的部分光点强度,如表 1 所示.

1)经 M₁ 反射:I₁₀ 表示中央光点强度,I₁₋₁ 和 I₁₋₂ 分别表示中央左侧第 1 个光点和第 2 个光点的强度,I₁₁ 和 I₁₂ 分别表示中央右侧第 1 个光点和第 2 个光点的强度.

2)经 M₂ 反射:I₂₀ 表示中央光点强度,I₂₋₁ 和 I₂₋₂ 分别表示中央左侧第 1 个光点和第 2 个光点的强度,I₂₁ 和 I₂₂ 分别表示中央右侧第 1 个光点和第 2 个光点的强度.

表 1 经 M₁ 和 M₂ 反射的部分光点强度

反射镜	强度表达式	I _{计算} /a. u.
M ₁	$I_{1-2} = I_0 t_U t_D (1-t_U)^2 (1-t_D)$	0.38
	$I_{1-1} = I_0 t_U t_D (1-t_U)$	19.20
	$I_{10} = I_0 t_U^3 t_D (1-t_D)$	221.18
	$I_{11} = I_0 t_U^3 t_D (1-t_U) (1-t_D)^2$	4.42
	$I_{12} = I_0 t_U^3 t_D (1-t_U)^2 (1-t_D)^3$	0.09
	$I_{2-2} = I_0 t_U^5 t_D^3 (1-t_U)^2 (1-t_D)$	0.08
M ₂	$I_{2-1} = I_0 t_U^5 t_D^3 (1-t_U)$	4.08
	$I_{20} = I_0 t_U^5 t_D (1-t_D)$	203.84
	$I_{21} = I_0 t_U^5 t_D (1-t_U) (1-t_D)^2$	4.08
	$I_{22} = I_0 t_U^5 t_D (1-t_U)^2 (1-t_D)^3$	0.08

为了能够清楚地反映表 1 中光点亮度的相对值,假设入射光光强为 I₀=1 000 a. u., BS 前后表面的强度透射率分别为 t_U=0.96,t_D=0.5,代入表 1 中的各项表达式,可计算得到光线强度值. 从表 1 中可以看出光点强度具有以下特点:

- 1)经 M₁ 反射产生的中央光点亮度大于经 M₂ 反射产生的中央光点亮度.
- 2)经 M₁ 和 M₂ 反射产生的光点,均呈现中央最亮,左右亮度逐渐降低的现象.
- 3)经 M₁ 反射产生的中央左侧第 1 个光点亮度,大于经 M₂ 反射产生的中央左右两侧第 1 个光点亮度.
- 4)经 M₁ 反射产生的中央右侧第 1 个光点亮度,和经 M₂ 反射产生的中央左右两侧第 1 个光点的亮度几乎相同.

通过上述光点的亮度特点,可以直接判断图像中哪些光点是经 M₁ 产生的,哪些光点是经 M₂ 产生的. 实际实验中观察到的实验现象(图 3)和上述理论分析的特点基本一致.

3 分束镜透射率与反射率比值的影响

迈克耳孙干涉仪中,定义分束镜 BS 的透射率与反射率比值为 $\gamma = t_D / (1-t_D)$. 当 t_D=0.5 时,γ=1. 有些学生认为只有 γ=1 时,才会使经平面镜 M₁ 和 M₂ 反射的光线强度相同,进而使干涉图样的可见度 V=1. 但根据表 1 中的表达

式可知:当 $t_U=1$ 时, $I_{10}=I_{20}=I_0 t_D(1-t_D)$,即在入射光光强相同的情况下,不论 t_D 取何值,经平面镜 M_1 和 M_2 反射的光线强度均相同,即理论上干涉图样的可见度均为1,这与学生的固有认知不同.实际上, t_D 的取值将会影响反射光线的相对强度值,如图5所示.只有当 $t_D=0.5$ 时,才会使得参与干涉的光束强度值达到最大,即在该情况下,观察屏上干涉亮纹的强度可达到最大,从而更加便于实验测量.

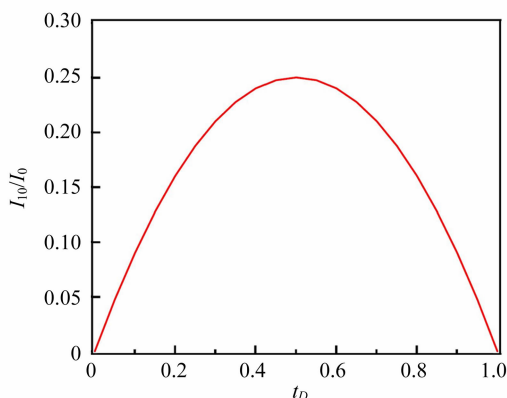


图5 I_{10}/I_0 随 t_D 的变化

4 观察屏对实验现象的影响

使用激光经过扩束镜后的光作为光源,当迈克耳孙干涉仪调节好后,如在图1所示的P位置放置毛玻璃,可观察到图2所示的等倾干涉条纹;如在P位置放置护目板,则只能观察到图3所示的光点.这是由于当使用毛玻璃时,根据非定域干涉原理,相当于在P位置放置了成像平面,且光线的传播也在到达毛玻璃后被终止,因此透过毛玻璃,观察到的是点光源在成像平面上形成的等倾干涉圆环.而当在P位置放置护目板时,护目板所起的作用为衰减激光光强(即光线传播并未终止),因此当透过护目板观察光线时,眼睛将自动对焦于光强最大值的位置,此位置为点光源经 M_1 (M_2 经 M_1 对称化处理)反射后的等效位置,因此观察到的是光点而非干涉图样.

5 利用白光干涉测量透明介质厚度时的误差来源

利用迈克耳孙干涉仪产生的白光等厚干涉测量玻璃厚度(已知玻璃折射率)的实验过程中,经常会出现以下问题:当观察白光干涉时,由于白光

光源具有一定的相干长度,使得在调节动镜 M_1 的微调手轮(位置变化读数的最小分度为 0.0001 mm)时, M_1 会在一定范围内移动,且在移动范围内均能观察到白光干涉条纹(图6),从而导致动镜 M_1 的位置读数不准确,进而引入玻璃厚度测量误差.该问题是由于未能准确理解白光等厚干涉的原理导致.如图6所示,在未插入待测玻璃时,迈克耳孙干涉仪的白光等厚干涉应调整为图6(b)所示的干涉图样,这是由于白光的0级干涉应处于视场的正中央,其他级次的彩色干涉条纹应对称地分布于0级干涉条纹的两侧,记录此时 M_1 的初始位置.当插入待测玻璃后,由于其中1支光路的光程发生改变,从而使得白光干涉图样消失.此时应根据玻璃片插入的具体位置,正确调节动镜 M_1 的方向,直至视场中再次出现图6(b)所示的干涉图样.通过以上操作,可减小 M_1 准确位置的测量范围,进而将玻璃厚度的测量误差降到最低.

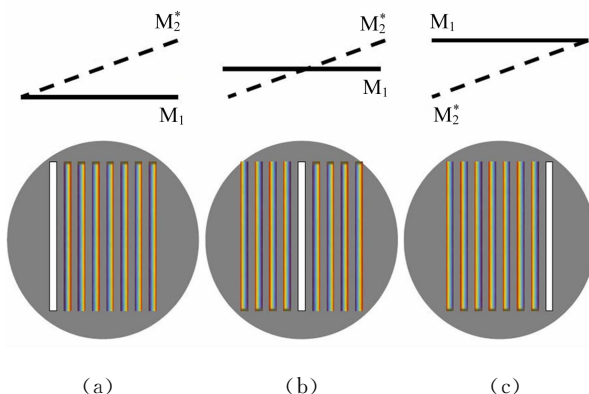


图6 白光等厚干涉的干涉图样(M_2^* 为等效定镜)

6 结束语

由于迈克耳孙干涉仪具有丰富的物理思想且应用范围较广,使得与迈克耳孙干涉仪相关的调整和使用实验成为了国内各理工高校均开设的实验项目之一.经过近几年对该实验项目的教学实践发现,仍存在问题未被全面解释.本文结合光路图分析和数值计算,对其中的4个问题进行了详细的分析和研究,并且给出了相应的解决方案.通过4个问题的分析过程和解决方案,一方面可以帮助学生正确理解干涉相关的基础知识,另一方面也为国内高校教师的教学工作提供一定参考.

参考文献:

- [1] 季柏青. 物理学史[M]. 沈阳:辽宁大学出版社, 1990:291.
- [2] 仲扣庄. 物理学史[M]. 南京:南京师范大学出版社, 2007:251.
- [3] Michelson A A, Morley E W. On the relative motion of the earth and the luminiferous ether [J]. American Journal of Science, 1887,34(203):333-345.
- [4] Abbott B P, Abbott R J, Abbott T D, et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger [J]. Physics Review Letter, 2016,116(6):061102.
- [5] 陈怀琳. 迈克尔逊干涉仪所产生的非定域干涉条纹[J]. 物理实验, 1983,3(5):200-203.
- [6] 陈怀琳. 迈克尔逊干涉仪中实现等倾等厚干涉的条件[J]. 物理实验, 1985,5(6):216-218.
- [7] 李丽霞. 迈克尔孙干涉仪调节方法的改进[J]. 物理实验, 1997,17(2):81.
- [8] 邓小燕, 乔躄, 潘永华, 等. 迈克尔逊干涉仪中补偿板与干涉条纹[J]. 物理与工程, 2006,16(2):29-32.
- [9] 张毓英, 陈怀琳, 让庆澜. 用迈克尔逊干涉仪测定高压汞灯黄双线的波长差及黄线线型与线宽[J]. 大学物理, 1984,3(10):19-21,39.
- [10] 廖怡, 秦珠, 冯列峰, 等. 基础实验试题 C: 迈克尔孙干涉仪及其应用[J]. 物理实验, 2021,41(11):20-24,31.
- [11] 徐勋义, 张祖豪, 刘子健, 等. 基于迈克尔孙干涉的金属丝杨氏模量测量[J]. 物理实验, 2016,36(9):19-22.
- [12] 程文德, 杨文艳, 孙宝光, 等. 用迈克尔孙干涉法测量固体线膨胀系数[J]. 实验技术与管理, 2016,33(5):32-33,36.
- [13] 樊代和. 大学物理实验数字化教程[M]. 北京:机械工业出版社, 2020:168-172.
- [14] 张映辉. 大学物理实验[M]. 2版. 北京:机械工业出版社, 2017:186-190.
- [15] 隋成华. 大学物理实验[M]. 北京:高等教育出版社, 2016:313-320.

Discussion on the common teaching problems of Michelson interferometer

FAN Dai-he^{a,b}, WEI Yun^{a,b}, SHEN Jun-feng^{a,b}, LIU Qi-jun^{a,b}, JIA Xin-yan^{a,b}

(a. National Demonstration Center for Experimental Physics Education;

b. School of Physical Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: In the Michelson interferometer experiment, when the number and brightness of light spots appeared were different, the ratio of transmissivity to reflectivity of the beam splitter was different, and the observation screen (eye shield or ground glass) was different, the observed experimental phenomena could be different. Through theoretical analysis and numerical simulation, the different experimental phenomena was explained, and the corresponding solutions were given. In addition, the reasons for the errors in measuring the thickness of transparent medium by white light interferometry were analyzed, as well the methods for reducing the errors were given.

Key words: Michelson interference; light spots brightness; transmissivity; reflectivity; white light interference

[责任编辑:郭伟]