

关于光波的半波损失的教学讨论*

黄峰^{1†}, 黄萍²

(1. 广州大学物理与电子工程学院, 广东 广州, 510006;

2. 广州市第八十六中学, 广东 广州, 510700)

摘要: 半波损失是大学物理薄膜干涉教学中的重点和难点。通过菲涅尔公式对半波损失的形成及条件进行了深入的分析与讨论。介绍了两个可以直观形象展示半波损失现象的实验。讨论在光的干涉应用中如何处理与半波损失相关的问题。

关键词: 半波损失; 菲涅尔公式; 薄膜干涉

中图分类号: TP79

文献标识码: A

文章编号: 1003-7551(2017)04-0048-04

1 引言

光学是大学物理教学的一个重要内容。在光学的教学中, 很多概念由于同学没有接触过, 也看不到现象, 总是觉得很抽象, 难于理解。“半波损失”这个概念就是在讲光的干涉时, 教学中的难点。很多光学教材往往对这个内容一笔带过, 但这这一概念确实是同学们在课堂上最疑惑, 讨论得最多的内容。本文将对“半波损失”进行详尽的介绍, 多角度的讨论, 以及在光的干涉中如何处理与半波损失相关的问题。

2 半波损失的物理解释

半波损失的概念: 当光由光疏介质射向光密介质反射时, 有时光波的相位会出现反相, 相当于光在介质中多走或者少走了半个波长, 我们把这种现象称之为“半波损失”。

光波是电磁波, 电场起到了主要的感光作用, 所以光振动矢量一般用电场强度 E 来表示。当一束单色平面波射向折射率不同的两个介质的分界面时, 会发生反射和折射现象。如图 1 所示, 两个介质 1 和 2 的折射率分别为 n_1, n_2 , 其中 i, γ 分别表示入射角和折射角。 s 表示振动与入射平面垂直的电场分量, p 表示与振动与入射平面平行的电场分量。根据菲涅尔公式^[1], s 光与 p 光分别有不同的反射系数 r 和透射系数 t :

$$r_s = \frac{E'_{1s}}{E_{1s}} = -\frac{\sin(i - \gamma)}{\sin(i + \gamma)} \quad (1)$$

$$r_p = \frac{E'_{1p}}{E_{1p}} = \frac{\tan(i - \gamma)}{\tan(i + \gamma)} \quad (2)$$

$$t_s = \frac{E'_{2s}}{E_{1s}} = \frac{2 \sin \gamma \cos i}{\sin(i + \gamma)} \quad (3)$$

$$t_p = \frac{E'_{2p}}{E_{1p}} = \frac{2 \sin \gamma \cos i}{\sin(i + \gamma) \cos(i - \gamma)} \quad (4)$$

菲涅尔公式

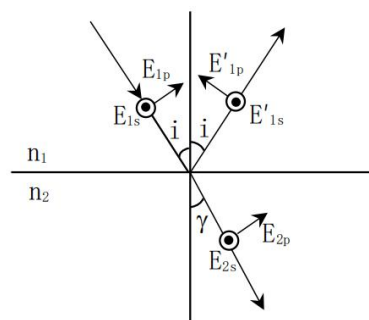


图 1 光发生反射和折射的电矢量分布

由公式 (1) (2) 可知, 在正入射或入射角很小时, $i \approx \gamma \approx 0$, 反射光菲涅尔公式可以简化为:

$$r_s = \frac{E'_{1s}}{E_{1s}} = -\frac{i - \gamma}{i + \gamma}, \quad r_p = \frac{E'_{1p}}{E_{1p}} = \frac{i - \gamma}{i + \gamma}, \quad \text{当 } n_2 > n_1 \text{ 时, } i > \gamma, \text{ 可知反射光的 } s \text{ 分量反向, 虽然 } r_p > 0, \text{ 但由图}$$

收稿日期: 2017-12-05

† 通讯作者: huangfeng@gzhu.edu.cn

2 (a) 可看出, p 分量亦反向, 并且 s 光与 p 光的反射率相同, 因此最终反射光的振动方向与入射光完全相反, 有半波损失。

在掠入射时, 即 $i \approx 90^\circ$, 此时根据三角关系, 反射光的菲涅尔公式可以简化为: $r_s = \frac{E'_{1s}}{E_{1s}} \approx -\frac{\sin \gamma}{\sin \gamma} = -1$,

$r_p = \frac{E'_{1p}}{E_{1p}} \approx \frac{\tan \gamma}{-\tan \gamma} = -1$, 当 $n_2 > n_1$ 时 (否则发生全反射, 没有折射角), 可知反射光的 s 分量和 p 分量均反向, 如图 2 (b) 所示, 并且 s 光与 p 光的反射率相同, 因此最终两个分量合成的反射光的振动方向与入射光相反, 有半波损失。

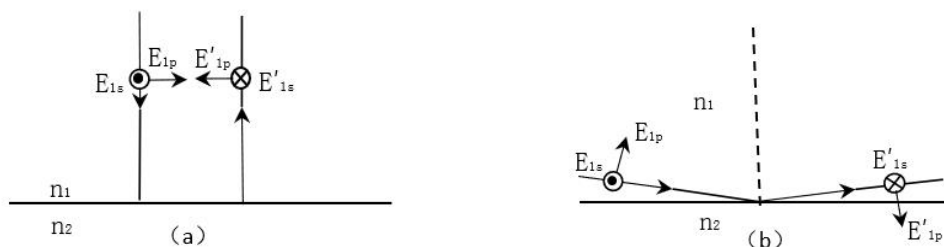


图 2 正入射 (a) 和掠入射 (b) 的电矢量分布

根据菲涅尔公式 (1) ~ (4), 当由其它角度入射, 若 $n_2 > n_1$, 只有在 s 光和 p 光满足特定条件下反射光才会发生半波损失。而折射光始终不会出现与入射光反相的现象。

可得到如下结论: 当光的入射角接近 0° 或者 90° , 由光疏介质射向光密介质发生反射时, 会发生反射光振动与入射光振动正好相反的现象, 即“半波损失”。

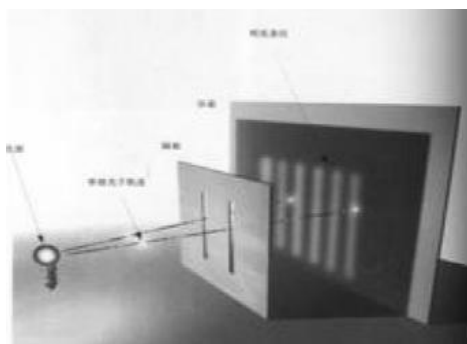
3 现象

在介绍半波损失的时候, 这种物理现象因为平时观察不到, 学生会觉得很抽象, 而理论解释更是让学生一头雾水。我们可以间接通过一些实验现象——干涉花样, 来直观地展现半波损失。

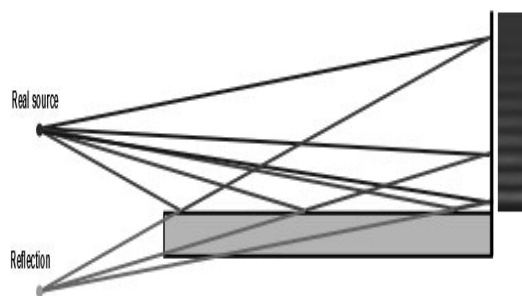
3.1 洛埃棱镜的双缝干涉实验^[2]

1834 年, 洛埃利用单面镜得到了与著名的杨氏杨氏双缝干涉实验类似的结果 (称洛埃镜实验)。

如图 3 (a) 所示杨氏双缝干涉实验, 当光对称照在两个距离很近的狭缝上时, 我们可以在观察屏上看到明暗相间的干涉条纹。这是因为光通过两缝传递到观察屏上的光程差引起的。当光程差为波长的整数倍时, 观察屏上看到干涉的明条纹, 当光程差为半波长的奇数倍时, 观察屏上看到干涉的暗条纹。在光屏上两缝的对称位置 (两缝的垂直平分线上), 光程差为零, 波长的整数倍, 看到中央明条纹。



(a) 杨式双缝干涉实验



(b) 洛埃棱镜的双缝干涉实验

图 3 双缝干涉实验

如图 3 (b) 所示洛埃镜实验中, 经过单缝的条形光源直接射到观察屏上及经过平面镜反射在观察屏上相遇, 也可以看到类似双缝干涉的明暗相间的条纹。可以认为实际光源和平面镜对光源所成的像就相当于杨氏实验中的双缝发出的光, 光程差的计算也类似。不同的是, 在洛埃镜实验中, 如果平面镜与观察屏接触, 在接触处出现暗条纹, 而此处相当于杨氏实验中观察屏的中央明条纹位置。这说明光从光疏介质 (空气, $n_1=1.0$)

射到光密介质（水银膜， $n_2=1.6$ ）界面反射时，有位相的突变，即有半波损失。

3.2 半波损失现象的大幅面显示^[3]

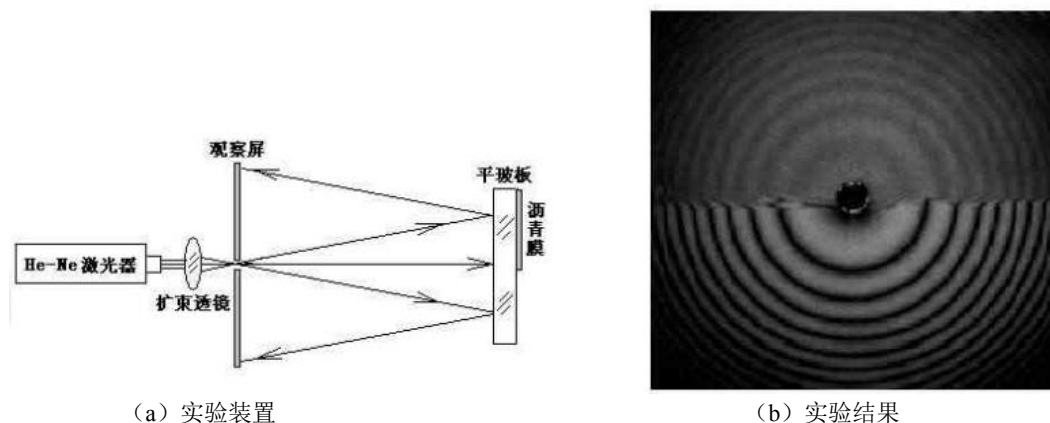


图4 半波损失现象的大幅面显示实验

如图4所示，半波损失的大幅面显示实验在较大的光场空间展示了半波损失的干涉条纹。实验装置如图4(a)所示，实验选取He-Ne激光提供单色点光源，照射在平行平板玻璃（ $n_2=1.516$ ）上，根据菲涅尔公式的分析可知，上表面反射（ $n_1=1 < n_2$ ）产生半波损失，下表面反射（ $n_2 > n_3=1$ ）没有半波损失，因此由上下表面反射的光在空间中相遇时，其光程除了需要计算由于倾角有微小差异引起的光程差，还要加上半波损失，最终形成圆形的干涉条纹^[4]。但这样，我们并不能看出半波损失的作用。于是实验将平行玻璃板后表面的一半涂抹了沥青（使 $n_3=1.635$ ），由菲涅尔公式可得，上下表面的反射都将有半波损失，因此两束反射光相遇的光程差无需加入半波损失。

由图4(b)可看到有沥青膜（图上半部分）和没有沥青膜（图下半部分）干涉条纹的对比结果。根据对称性，光在相同半径圆环处相遇，由于光传播所走路径形成的光程差是相等的，但是我们看到上下半圆的明暗条纹发生了反转，相同半径处，上半部分是明（暗）条纹的地方，下半部分出现的是暗（明）条纹，根据前面的分析可知，造成这种现象的原因正是“半波损失”。

4 应用及常见问题

因为半波损失在满足一定条件的反射时产生，所以在分振幅干涉（特别是薄膜干涉）现象中，不可避免得要讨论它的影响。

例如在劈尖干涉中^[5]，如图5所示，在两块平板玻璃的一段夹一根细丝，中间就形成了很薄的空气劈尖，当正入射计算光程差时，要不要加入半波损失呢？

将两块玻璃的上下表面分别标注为界面1、2、3、4，由于玻璃的折射率大于空气，结合前面的菲涅尔公式讨论，在界面2上的反射光由光密介质（玻璃）到光疏介质（空气），没有半波损失；而在界面3上的反射光由光疏介质（空气）到光密介质（玻璃），有半波损失。当两界面上的反射光相遇时，综合2和3表面的反射，是有半波损失的。

学生此时会有这样的疑问，明明有4个界面可以反射，为何只讨论2、3表面的反射情况？

这和光的相关长度有关。在干涉现象中，光的相干条件是比较苛刻的。由于光的非单色性的影响，各组不同波长条纹之间的非相干叠加，会导致条纹的可见度下降^[6]。例如普通钠灯的谱线宽度约为0.5nm，要求劈尖的最大厚度不能超过0.35mm，否则将看不见干涉条纹。所以足够薄的“薄膜”才会产生干涉条纹，讨论半波损失时只需讨论“薄膜”上下表面的反射。但如果薄膜薄到厚度可以忽略不计，则需另行讨论^[7]。

在目前应用较广的镀膜技术中，也要考虑光的半波损失。如图6所示，在玻璃表面镀上一层薄薄的折射率为 n_1 的膜，控制膜的厚度，可以使出射光增强，这层膜称为增透膜。

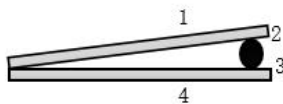


图5 空心玻璃劈尖

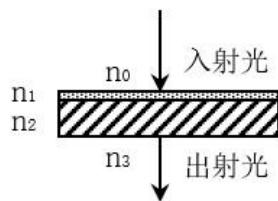


图6 增透膜

由于玻璃衬底较厚，超过了能产生干涉条纹的厚度，所以计算薄膜干涉时只需要计算折射率为 n_1 薄膜上下表面反射的光程差。以照相机镜头为例，在折射率 $n_2=1.50$ 的照相机玻璃镜头表面涂一层 MgF_2 ($n_1=1.38$)，照相镜头应增强光的透过率，此为增透膜。薄膜上表面反射的光由光疏介质（空气）到光密介质（ MgF_2 ），有半波损失；薄膜下表面反射的光由光疏介质（ MgF_2 ）到光密介质（玻璃），有半波损失，综合 MgF_2 膜上下表面的反射，没有半波损失。可得到两束反射光总的光程差为：

$$\delta=2n_1h$$

其中 δ 表示光程差， n_1 为薄膜的折射率， h 表示光入射处薄膜的垂直厚度， λ 为入射光的波长。当光程差为光波半波长的奇数倍时，即 $\delta=(2j-1)\lambda/2$ ，我们得到 $h=(2j-1)\lambda/4n_1$ ($j=1,2,\dots$) 处将出现反射光干涉暗条纹。根据能量守恒，入射光能量等于反射光加上透射光能量，反射光出现暗条纹（减弱），即意味着透射光增强，此膜为增透膜。增透膜常用于照相机镜头，太阳能电池等的表面。同理，当光程差为光波半波长的偶数倍时，将出现反射光干涉明条纹（反射增强），此膜为增反膜。增反膜常用于珠宝表面和激光谐振腔。

镀膜时，需要计算所镀膜厚度，同时讨论是否有半波损失，若有半波损失时不计入 $\lambda/2$ 的光程差，会使膜厚 h 计算不准，将增透膜镀成增反膜。

5 结论

根据菲涅尔公式，详细介绍了当光正入射或掠入射，由光疏介质射向光密介质发生反射时，会发生反射光振动与入射光振动正好相反的现象，即“半波损失”。

通过介绍两个干涉实验，可以将复杂抽象的半波损失直观地通过实验结果呈现出来。

在讨论薄膜干涉的光程差时，应该如何判断半波损失。首先要确定哪个是“薄膜”，膜要足够薄，不能超过光的相干长度决定的厚度，反射干涉条纹是由“薄膜”的上下表面反射形成的。确定薄膜后，再根据菲涅尔公式分析有没有半波损失。若分析失误，会导致膜厚计算错误，增透膜镀成增反膜。

参 考 文 献

- [1] 梁铨廷.物理光学[M].电子工业出版社, 2011:24-27.
- [2] 百度百科,<http://baike.baidu.com/link?url=yCDloJNLKg7vXrxSeQq-pxOQnzjYNam2nEo1r3gdvGmZ0PEPwWDP58xtH1DSodz moh69AHnlgHtyGBFZRqB7Ra>, 2015.
- [3] 郭军. 半波损失现象的大幅面显示[J].大学物理实验, 2010,23(4): 50-53.
- [4] 母国光, 占元龄. 光学[M].人民教育出版社, 1981:222.
- [5] 黄峰, 张江水. 薄膜干涉教学中的几个问题的探讨[J].大学物理教育专刊, 2011, 23(3): 49-51.
- [6] 姚启钧.光学教程[M].高等教育出版社, 2003:37-38.
- [7] 张登玉. 光干涉中光程差及半波损失[J]. 广西物理, 2000,24(4):21-23.