

文章编号:1007-2934(2013)01-0040-03

Talbot 效应的简单解释

袁霞,李旺,廖培浪

(深圳大学,广东 深圳 518060)

摘 要: 从双缝干涉的简单理论出发,将光栅分解为许多组双缝,利用人们熟知的干涉条纹间距公式导出 Talbot 成像位置,结论与 Talbot 效应公式一致。并由实验证实,在 $(2m-1)\frac{d^2}{\lambda}$ (m 为正整数) 的位置得到的为横向平移 $d/2$ 的周期像,并非原周期性物的负反差像。

关键词: Talbot 效应;双缝干涉;菲涅尔衍射

中图分类号: O 436.1

文献标志码: A

在实验教学中引入一个研究型实验项目^[1],将 Talbot 效应这个信息光学的验证实验“改装”为理工科二年级学生的探索研究性实验。在实践中发现,学生通过测量数据、总结实验规律,开始查阅资料寻找答案的时候,因为不具备现代光学的基本观念和理论,对实验现象还是很困惑,使实验效果受到影响。

本文从双缝干涉的简单理论^[2]出发,避免了深奥的菲涅尔衍射理论、角谱理论和繁冗的公式、复杂的运算^[3-7],定性解释了 Talbot 效应,导出的结论与由经典理论得到的 Talbot 公式一致,并易于低年级理工科大学学生和只具有普通物理光学知识的人接受。

1 Talbot 效应

1836 年,泰伯(Talbot)发现,用单色平行光垂直照射周期为 d 的光栅时,在光栅后距离为 $2m\frac{d^2}{\lambda}$ 的位置上出现该光栅的清晰像, m 为正整数。这种不用透镜即可对周期性物体成像的现象称为 Talbot 效应或自成像。此外,在 $(2m-1)\frac{d^2}{\lambda}$ 的位置上, m 为正整数,出现沿横向平移 $d/2$ 的光栅像,周期仍为 d 。Talbot 效应可用图 1 表示如下:

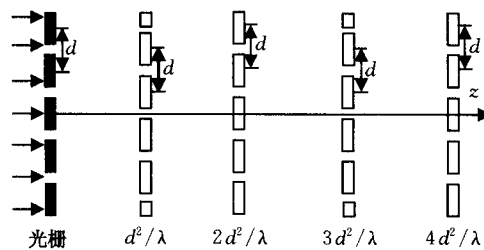


图 1 Talbot 效应

2 用双缝干涉理论解释 Talbot 效应

将周期为 d 的光栅看作一个狭缝屏,有许多条狭缝 $S_1, S_2, S_3, S_4, \dots$, 其中相邻两缝的间距为 d 。如图 2 所示。

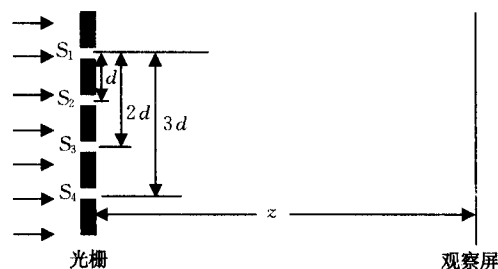


图 2 用双缝干涉理论解释 Talbot 效应

为了推导方便,考虑任意一组双缝(暂不考虑其他狭缝)。按照干涉理论^[8],这组双缝将在距离 Z 处的观察屏上形成明暗相间的直线形干涉条

纹, 条纹间距为 $\Delta y = \frac{z}{a}\lambda$ 。其中, Z 为狭缝屏到观察屏的距离, a 为缝间距。当 $\Delta y = d$ 时, 即得到光栅像。

如果这组双缝为 S_1, S_2 , 则缝间距为 $d, \Delta y = \frac{z}{a}\lambda$, 当 $\Delta y = d$ 时, 即 $z = \frac{d^2}{\lambda}$ 时, 得到光栅像。也就是说, 在距离为 $\frac{d^2}{\lambda}$ 处的观察屏上, 可得到周期为 d 的光栅像。因为该干涉条纹的中央亮条纹对应于 S_1, S_2 的中点, 所以观察屏上形成的光栅像相对于原光栅横向平移 $d/2$ 。

现在开始考虑其他缝间距为 d 的双缝, 如双缝 S_3, S_4 , 并类推到双缝 S_5, S_6 双缝 S_7, S_8 等等, 每组双缝都在观察屏上形成横向平移 $d/2$ 的原光栅像, 这些干涉条纹准确套叠, 提高了像的锐度和对比度。

如果这组双缝为 S_1, S_3 , 则缝间距为 $2d$, $\Delta y = \frac{z}{2d}\lambda$, 当 $\Delta y = d$ 时, 即 $z = 2\frac{d^2}{\lambda}$ 时, 得到光栅像。也就是说, 在距离为 $2\frac{d^2}{\lambda}$ 处的观察屏上, 可得到周期为 d 的光栅像。因为该干涉条纹的中央亮条纹对应于 S_1, S_3 的中点即 S_2 , 所以观察屏上形成的是原光栅像。

现在再考虑其他缝间距为 $2d$ 的双缝, 如双缝 S_2, S_4 , 并类推到双缝 S_3, S_5 双缝 S_4, S_6 等等, 每组双缝都在观察屏上形成原光栅像, 这些干涉条纹准确套叠, 提高了像的锐度和对比度。

类似地, 如果这组双缝间距为 $3d$, 即可在 $3\frac{d^2}{\lambda}$ 处的观察屏上得到横向平移 $d/2$ 的光栅像; 如果这组双缝间距为 $4d$, 即可在 $4\frac{d^2}{\lambda}$ 处的观察屏上得到原光栅像。

归纳可知, 当平行单色光垂直入射周期为 d 的光栅时, 将间隔为 $2md$ 的狭缝组合成双缝, 在光栅后 $2m\frac{d^2}{\lambda}$ 处的观察屏上可得到原光栅的像; 将间隔为 $(2m-1)d$ 的狭缝组合成双缝, 在 $(2m-1)\frac{d^2}{\lambda}$ 处的观察屏上, 可得到沿横向平移

$d/2$ 的光栅像。其中 m 为正整数。结论符合 Talbot 效应。

顺便指出, 在这里, 将 $(2m-1)\frac{d^2}{\lambda}$ 处得到的像称为沿横向平移 $d/2$ 的光栅像比理解为“逆反差的自成像”^[9]、“负的泰伯像”^[10] 更加合理, 因为人的眼睛分辨不出 $d/2$ 的平移量, 在 $(2m-1)\frac{d^2}{\lambda}$ 的位置上观察到的是原物像, 并非原物的负像(衬比度反转), 笔者有实验工作可以证实^[11-12]。

3 实验工作

笔者自制了周期为 0.5 mm 的数字 1 阵列, 用波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光平行照射, 为便于观察, 采用一成像透镜放大自成像, 光路图如图 3 所示。

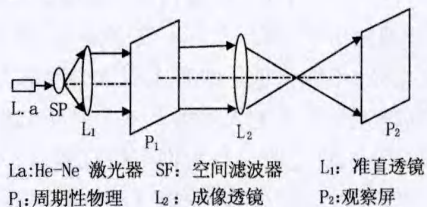


图 3 周期性物的 Talbot 效应实验

将物面 P_1 在透镜 L_1 和 L_2 之间移动, 发现每隔 40 cm 都可在观察屏 P_2 上得到原物的像, 这个距离与 $\frac{d^2}{\lambda}$ 相符合。其中在 $\frac{d^2}{\lambda}, 3\frac{d^2}{\lambda}, \dots$ 这些位置看到的是分辨不出 $d/2$ 的周期平移量的原物像, 并非原物的反差像。实验结果如图 4 所示。

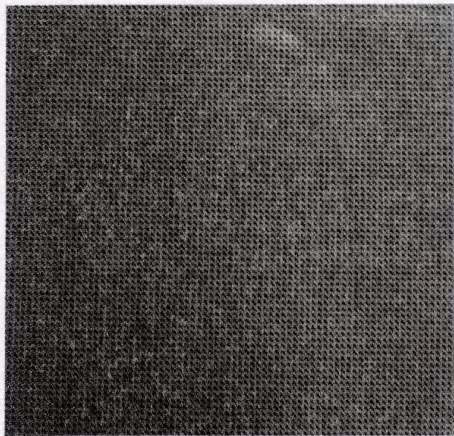


图 4 (a) 周期性物

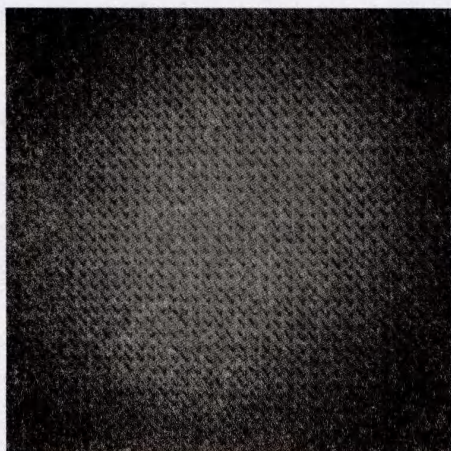


图4 (b)在 $(2m-1)\frac{d^2}{\lambda}$ 处观察到的像

4 结 论

一直以来,人们都是用现代光学的观念,从菲涅尔衍射理论出发推导 Talbot 效应公式,理论深奥,运算繁杂,不能为低年级理工科大学生和只具有普通物理光学知识的人理解。本文基于双缝干涉的简单理论,将光栅分解为许多组双缝,用人们熟知的干涉条纹间距公式,导出 Talbot 效应的成像位置。推导方法新颖,过程简洁明快,易于理解。实践证明,这种简单的解释方法很受学生欢迎,他们在学习信息光学课程之前理解了 Talbot 效应实验现象,大大提高了实验效果。

参考文献:

- [1] 张瑞,林幸笋,何友军,等. 一个研究型物理实验项目-周期性物成像规律实验[J]. 大学物理, 2002, 21(4): 28-30.
- [2] 唐亚陆,胡光,张俊. 从双缝实验看干涉和衍身体质[J]. 大学物理实验, 2011, 37(11): 35-38.
- [3] 羊国光,宋菲君. 高等物理光学[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 1991: 138-142.
- [4] 苏显渝,李继陶. 信息光学[M]. 北京:科学出版社, 1999: 45-46.
- [5] 梁晓,庄松林. Talbot 效应理论及应用[J]. 光学仪器, 1986, 8(1): 1-7.
- [6] 廖江红,顾去吾. 光学系统中的光栅衍射自成像现象:广义的 Talbot 效应[J]. 光学学报, 1985, 5(4): 331-335.
- [7] 冯婕,周仁魁,赵建科. 对 Talbot 自成像和几何成像关系的分析[J]. 光子学报, 2008, 37(11): 2332-2335.
- [8] 姚启钧. 光学教程[M]. 第二版. 北京:高等教育出版社, 1989: 19-25.
- [9] 陈慧平. 一个有趣的关于泰保效应的实验[J]. 量子电子学报, 2003, 20(2): 237-240.
- [10] 周其麟,郭凤歧,刘先钧. 用莫尔技术准直光束和测量透镜焦距的一种新方法[J]. 武汉工业大学学报, 1996, 18(1): 104-106.
- [11] 郭小花. 菲涅尔多缝衍射的数值计算[J]. 大学物理实验, 2011(1): 55-59.
- [12] 王振飞. 菲涅尔透镜霍光时光伏发电效率的实验研究[J]. 大学物理实验, 2011(4): 42-45.

A Simple Explanation of Talbot Effect

YUAN Xia, LI Wang, LIAO Pei-lang

(Shenzhen University, Shenzhen 518060)

Abstract: Based on double-slit interference theory, the grating's Talbot effect was explained by decomposing the grating into many double-slits. The whole process only used the formula of interference fringe spacing and the result is agreed with the Talbot effect. Furthermore, through the experiment, the conclusion can be drawn that the self-image of the periodic object is removed laterally $d/2$ at $(2m-1)\frac{d^2}{\lambda}$ (m is positive integer), downstream the object, not the object of intensity distribution reversal.

Key words: talbot effect; double-slit interference; fresnel diffraction