

光学知识丛书

干涉与衍射

赵成美 丁兰英 编著

科学出版社

1999年1月

内 容 简 介

干涉与衍射是物理光学中的两个重要内容,在科研、工业生产中有
着很多重要的用途。本书用比较浅显易懂的语言向读者介绍了干涉与
衍射的传统和现代的理论、应用以及它们的发展。

本书内容充实,叙述深入浅出,文字也颇具特色。在阐明理论时,
避免使用繁复的数学运算,而力求只用简明的数学公式和图来说明物
理概念,增加了本书的可读性。

本书可供高等院校非物理专业师生、有关的科技人员阅读和参考。

光学知识丛书

干 涉 与 衍 射

赵成美 丁兰英 编著

责任编辑 姚平录

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1991年3月第一版 开本:787×1092 1/32

1991年3月第一次印刷 印张:10 1/4

印数:0001—1 100 字数:234 000

ISBN 7-03-002035-9/O 386

定价:10.30 元

前 言

现代光学的发展,使光学这门古老的学科以崭新的面貌及其在科技领域中的广泛应用前景展现在广大科学工作者面前。为适应这种飞速发展,各种光学方面的专著和新的教材也不断涌现。对于一般不是从事光学(或物理)专业的科技工作者,或是希望了解一些新的光学知识的青年读者,专著和教材中用到的比较系统和高深的数学,常使物理概念和光学现象显得深奥和不易理解从而使读者丧失兴趣。我们编写本书的目的,取材、和文字表达形式,正是为了将物理光学中的许多重要内容、近年来的新发展和应用前景,比较系统地介绍给大学物理专业师生以外的更大范围的青年读者和科技工作者,使之开阔视野,并对其工作、学习有所裨益,从而对我国的四化建设有所贡献。

干涉和衍射是物理光学中两个内容极为丰富,发展又十分迅速的部分。在这部篇幅不大的小书中,要想全面详尽地介绍干涉和衍射是很难做到的。我们不能撇开物理基础和传统的光学理论来专门介绍新知识,又力求将这一领域内的现代新成就和发展前景多介绍些给读者,真有力不从心之感。为了避免多而杂,在内容取舍上,以围绕本书的主要论题——干涉和衍射为主。如在介绍傅里叶变换光学时,着重介绍用变换光学的观点来处理衍射,以及光学信息处理等。而对傅里叶光学的另一重要内容——象质评价及传递函数,就干脆舍弃不予介绍。

为了使本书的内容尽可能充实些,在介绍某一课题时避

免“蜻蜓点水”式的叙述,对每节的内容处理尽量细致一些,并保持一定的独立完整性.如对光栅的介绍、对光场相干性的描述等都比较详尽;在双光束干涉仪、测星干涉术等章节中,从早期的发明到近代的发展,都系统地作了介绍.这样编写是为了便于读者有目的地选择某些章节来阅读,同时也增加了每个小课题的知识性和趣味性.

为了使读者对干涉和衍射的认识不局限在光波,本书对其它电磁波段(如伦琴射线)及机械波等的干涉和衍射也作了介绍.

本书虽不是教材,为说清物理概念,在少用数学工具的要求下仍运用了一定的数学推导,但读者只需具备初等微积分的数学基础和高中物理基础,就可以读懂本书并对这一领域有所了解.在文字表达上,力求通俗易懂和深入浅出,使抽象的物理概念不致于太枯燥乏味.

本书在编写过程中得到山东大学光学系很多同志的支持.王应素教授对全书作了细致的审阅并提出许多修改意见,李静和郭予瑾同志担任了全书抄写,宫垂琳同志绘制了全部插图,汤娟和李静同志制作了照片.编著者谨在此一并致谢.

编著者

目 录

前言

第一章 光波的干涉	1
§ 1.1 波的干涉现象	1
§ 1.2 光波干涉的相干条件	6
§ 1.3 杨氏双缝干涉实验	10
§ 1.4 干涉条纹的对比度	18
§ 1.5 薄膜干涉	26
§ 1.6 迈克耳逊干涉仪	38
第二章 干涉的应用和干涉仪	50
§ 2.1 干涉计量在工厂实验室的几种应用	52
§ 2.2 干涉计量在光学车间的应用	57
§ 2.3 两种典型的双光束干涉仪	68
§ 2.4 波面剪切干涉术	81
§ 2.5 通过检测干涉级次变化量来测量(或比较)物理量	89
§ 2.6 散斑干涉术	100
§ 2.7 测星干涉术	108
§ 2.8 多光束干涉及其应用	118
§ 2.9 增透膜、高反射膜和干涉滤光片	140
第三章 光波的衍射	147
§ 3.1 波的衍射现象	147
§ 3.2 惠更斯-菲涅耳原理及基尔霍夫衍射积分	154
§ 3.3 圆孔和圆屏的菲涅耳衍射	158
§ 3.4 单缝、矩孔和圆孔的夫琅和费衍射	168
§ 3.5 超声波和微观粒子的衍射现象	184

第四章 衍射的应用	192
§ 4.1 圆孔衍射的应用	192
§ 4.2 衍射光栅	199
§ 4.3 正弦光栅	214
§ 4.4 晶体的X射线衍射	221
§ 4.5 计量光栅,莫阿条纹及其应用	226
第五章 全息照相术及其应用	232
§ 5.1 什么是全息照相	232
§ 5.2 全息照相原理的数学描述	241
§ 5.3 全息透镜和全息光栅	244
§ 5.4 全息照相术的若干应用	248
§ 5.5 彩虹全息术和超声全息术	259
第六章 变换光学及其应用	265
§ 6.1 傅里叶变换	266
§ 6.2 用傅里叶变换处理衍射问题	280
§ 6.3 傅里叶变换光谱仪	293
§ 6.4 阿贝成像原理和阿贝-波特实验	302
§ 6.5 空间滤波和光信息处理	305
附录	311
A. 光波的数学表示式——三角函数表示式和复数表示式	311
B. 波的叠加原理	314
C. 惠更斯原理	318
D. 波前概念及平面波波前函数	320

第一章 光波的干涉

§ 1.1 波的干涉现象

波的干涉这一物理现象,对于一般读者,可能不如光波的反射、折射、无线电波在空中传播……这样一些现象为人们所熟知。但是,通过留心观察周围的景物或者做一二个有趣的小实验,那么,波的干涉现象还是容易观察到的。

我们大概看到过这样的现象:把两块小石子同时扔进平静的湖面,在石子落水处将各自产生一个向周围传播的圆形水波。如果两个落水点相距不太远,那么,从两个中心传出去的水波,将会在相当大的水面上发生交叠。在水波交叠的区域内,有些地方的扰动比单独一个波所产生的大得多,而另一些地方的扰动几乎等于零。在水面上形成一种特殊花样的水纹如图 1-1 所示。这种现象我们称为水面波的干涉。

“拍”的现象最能直观地说明声波的干涉。两支频率相近的音叉同时发声时,人耳就能明显地听到“嗡……,嗡……”那样的忽而响忽而轻的声音起伏,每一次起伏叫做一个“拍”。“拍”是两列有微小频率差的声波叠加(也就是干涉)的结果。单位时间内发生“拍”的次数叫拍频。当两支频率分别为 241 赫(Hz)和 243 赫的音叉发声时,我们能听出每秒钟内有两个拍,这说明拍频就是两个声源频率的差。人耳能听出的拍频在 10 赫以下,超出这个限度就分辨不清了。

利用“拍”的现象,可以用标准音叉去校验未知的声频,如校验钢琴声频的准确性。

在自然界也不难看到光波的干涉现象,例如,在阳光

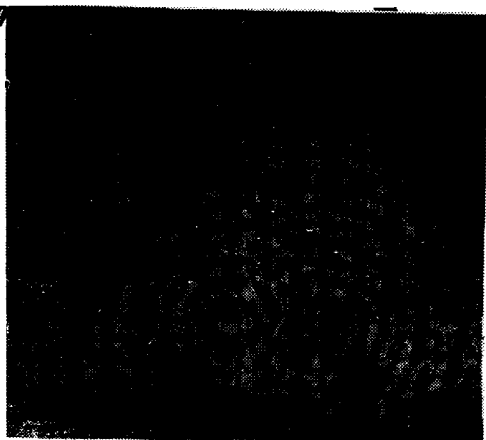


图 1-1 两个点源在水池内产生的水波干涉照片

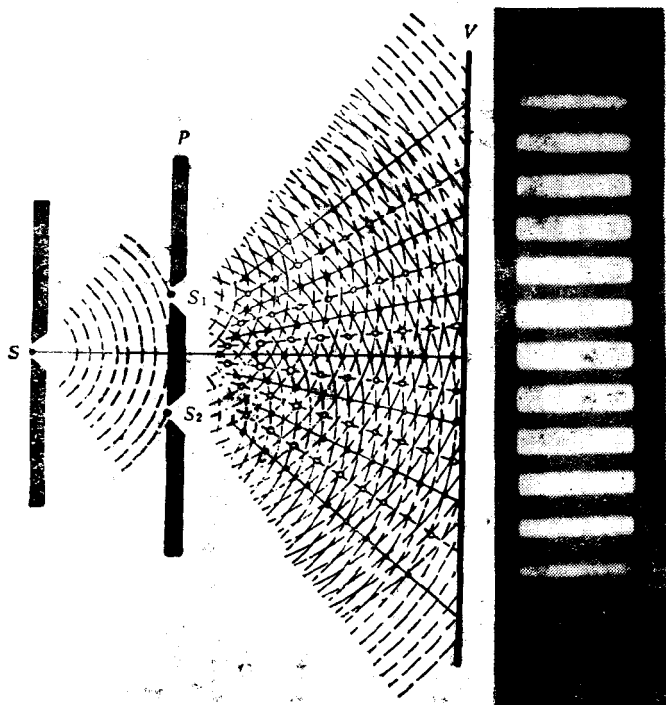
下,潮湿的柏油路面或飘浮于水面上的油膜会现出某些彩色;在阳光下观看吹起的肥皂泡,能看到五彩缤纷的颜色,色彩还会随着泡的变大而变换;一些昆虫翼翅上闪现出来的彩色……等等。这些都是光波的干涉现象。

可以在家中做个小实验:用刮脸刀片在曝光过的黑色照相底片上,划两条相距不超过半毫米的平行刻道。通过它来观看发光的灯丝时,就可以看到一组明暗相间的彩色条纹。这便是光的双缝干涉现象。

在实验室里,观察双缝干涉现象,最早是由英国物理学家托马斯·杨¹⁾所建立的杨氏干涉实验装置来实现的。

1) 托马斯·杨(1773—1829),英国物理学家。6岁开始研究拉丁文,13岁掌握希腊语、希伯来语、意大利语和法语。19岁在医学院学习时,就正确地解释了眼睛调节原理,因此被选为英国皇家学会会员。1796年,他从法国哥廷根医科大学毕业。5年之后,就成为英国皇家学院自然哲学(物理)教授。1801年他读了几篇与牛顿观点相反的关于光的波动理论的文章。第二年(1802)就发表了题为“光与颜色的理论”的文章。1804年他又发表了与物理光学有关的实验结果和计算工作。除了对光的干涉实验和理论贡献之外,他在物理学的许多方面都有重要的贡献。

图 1-2 (a)所示就是这一著名实验装置的简单示意图.图中, S 是单色点光源, 它发出的光波是球面波. S_1 、 S_2 是在一块不透光屏 P 上所开的两个十分靠近的小孔, 后来改成两平行的狭缝, 它们与 S 的距离是相等的. 光波通过 S_1 、 S_2 后, 就好象是从 S_1 、 S_2 各自发出的两列光波. 在屏 P 后面的两列光波的重叠区域内, 放一个观察屏 V , 在屏 V 上就可以观察到明暗相间的条纹, 如图 1-2 (b)所示. 如果 S 采用白光作光源, 条纹呈彩色.



(a) 两列光波的交叠与干涉

(b) 干涉条纹照片

图 1-2 杨氏双缝干涉实验

更复杂一些的光的干涉图样如图 1-3 和图 1-4 所示。这两个照片都是用单色光照明并拍摄的。图 1-3 所拍摄的是停在水面上的一只小虫子。背景上的干涉图样是由于小虫子本



图 1-3 停在水面上的小虫由于其重量所引起的干涉效应的照片



图 1-4 显微镜用的盖玻片上呈现的干涉图样

身的重量在水表面上引起微小的变化而产生的。这种肉眼觉察不到的微小变化,可以用光的干涉现象显示出来。图 1-4 所示是应用光的干涉现象来检查显微镜用的盖玻片的质量时,所得到的干涉图样。盖玻片上、下表面的不平行度和盖玻片内部的不均匀性都可以在干涉条纹中反映出来。

除了上面介绍的水波、声波、光波等波动的干涉现象外,其他的机械波(如超声波)、电磁波(如微波),也都有干涉现象。波的干涉是各种波动所具有的共同属性,是波动现象的重要特征。在波的传播过程中出现的干涉现象,可以作为物质的波动本质的一种反映。在光学发展史上,光波的干涉现象,就曾作为光的波动本质的一个重要佐证。在这本小书中,我们将主要介绍光波的干涉(以下简称光的干涉)。

从上面列举的几个例子中,我们可以看到,几种光的干涉现象的一个共同特点是有可以看得见的干涉图样(干涉条纹)。此外,从图 1-2 的例子中说明只有在两列波交叠的区域,才有可能产生干涉条纹。现在,我们有了一些关于光的干涉的具体的印象,可以对光的干涉作一个定性的描述。什么是光的干涉呢?光的干涉就是在一定的条件下,两列(或两列以上)光波在传播过程中相遇时,在其重叠的区域内,光强分布不均匀,有的地方加强,有的地方减弱。其结果,就形成干涉条纹。这样的现象叫做光的干涉现象。

下面将要进一步探讨,产生光的干涉现象所必须满足的条件——光的相干条件,还要详细分析杨氏干涉实验,介绍薄膜干涉。最后,还要介绍一种重要而基本的干涉仪器——迈克耳逊干涉仪。

§ 1.2 光波干涉的相干条件

光的干涉虽不难实现，但并非任意两光波相遇都能产生干涉现象。两支蜡烛发出的光波即使相遇，无论如何都不能产生干涉。两个人同时唱歌也决不会产生声的干涉。为产生光的干涉，相遇的光波必须满足某些条件，我们称这些条件为相干条件，满足相干条件的光称为相干光。

一、光波干涉的三个必要的相干条件

对于实际的光源，只有满足下列各条件才能产生干涉。

(一) 两列光波的频率必须相同。这一条件的必要性是显而易见的。两列不同频率的波不可能叠加为简谐振动。

(二) 两列光波频率相同，在相遇点的振动方向必须相同，或者有振动方向相同的分量。若两光波在相遇点的振动不在同一方向，即使频率相同，该点的合成振动也不是附录中式(B. 12)¹⁾表示的简谐振动，因而还是不能产生干涉现象。

(三) 两列光波在相遇的区域内，必须保持稳定的位相差。

要产生光的干涉现象，这三个条件缺一不可。不过，其中条件(一)、(二)比较容易满足，而条件(三)是比较关键的。要使两列光波在相遇的区域内保持稳定的位相差，往往并不是那么容易。下面我们引用一点简单的数学，着重来说明这三个条件。

二、为什么需要保持稳定的位相差

我们用正弦函数或余弦函数的形式来表示光波²⁾

1) 关于波的叠加请参考附录 B.

2) 关于光波的数学表示式请参考附录 A.

$$y = A \sin(\omega t + \phi) \quad (1.1)$$

或者 $y = A \cos(\omega t + \phi) \quad (1.2)$

式(1.1)和式(1.2)中的 ω 是光波振动的圆频率, ϕ 是光波振动的位相, A 是振幅, y 是垂直于光波传播方向的光波振动的位移。

假设有两列光波,它们的频率 ω 相同,振动方向相同,位相分别为 ϕ_1 和 ϕ_2 ,振幅分别为 A_1 和 A_2 。我们用正弦函数来表示光波 1, 2, 就可以分别写出 y_1 和 y_2 的表示式:

$$y_1 = A_1 \sin(\omega t + \phi_1) \quad (1.3)$$

$$y_2 = A_2 \sin(\omega t + \phi_2) \quad (1.4)$$

光波 1, 2 的光强可以分别用它们振幅的平方值来表示:

$$I_1 = A_1^2 \quad (1.5)$$

$$I_2 = A_2^2 \quad (1.6)$$

光波 1, 2 在空间传播,在它们相遇的重叠区域内,两列光波的合成光波按光波的叠加原理(附录 B), 应当有

$$\begin{aligned} y &= y_1 + y_2 \\ &= A_1 \sin(\omega t + \phi_1) + A_2 \sin(\omega t + \phi_2) \end{aligned} \quad (1.7)$$

合成光波的光强,应当有¹⁾

$$I = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\phi_1 - \phi_2) \quad (1.8)$$

记 $\delta = \phi_1 - \phi_2$

把 δ 叫做光波 1, 2 的位相差,用光波 1, 2 的光强和位相差表示式(1.8),可得到

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2}\cos\delta \quad (1.9)$$

式(1.9)是讨论光波干涉的一个十分重要的关系式。此式说明: 两列频率和振动方向相同的光波,在空间相遇叠加

1) 推导过程请参考附录 B。

时,合成光波的光强 I 有可能不等于光波 1, 2 的光强 I_1 与 I_2 之和, 即

$$I \neq I_1 + I_2$$

在 I_1, I_2 确定的情况下, 式(1.9)中, 只有 $\cos \delta$ 的数值是可能发生变化的, 下面我们讨论合成光强 I 随 $\cos \delta$ 的变化情况。

当光波 1, 2 的位相差 δ 取某些值, 使得 $\cos \delta > 0$ 时, 因为 $2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta > 0$, 结果使合成光强大于两光强之和, 即

$$I > I_1 + I_2$$

在 $\cos \delta > 0$ 的那些光波叠加区域, 合成光波的光强 I 比光波 1, 2 光强的代数和 $(I_1 + I_2)$ 要大; 而在 $\cos \delta < 0$ 的区域, 因为 $2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta < 0$, 则有

$$I < I_1 + I_2$$

合成光波的光强 I 比光波 1, 2 的光强的代数和 $(I_1 + I_2)$ 要小。也就是说, 在这两种情况下, 由于光波的叠加, 引起了光强在空间的重新分布, 有的地方是加强的, 最强的地方表现为亮条纹; 有的地方是减弱的, 最弱的地方是暗条纹; 明暗相间形成了由于光强分布不同而造成的干涉条纹。

式(1.9)中的 $2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta$ 叫做干涉项。如果干涉项在空间各处都为零, 那么在空间各处, 合成光波的光强 I 总是等于两光波光强之和, 即在空间各处

$$I = I_1 + I_2$$

这表示光强在各处分布均匀, 没有干涉条纹, 也就不产生光的干涉现象。通过以上分析, 可以清楚地看到, 两列光波在它们的振动频率 ω 相同, 振动方向相同的前提下, 要产生干涉还必须保证 $\cos \delta \neq 0$ 。说得严格一点, 必须保证 $\cos \delta$ 对时间的平均值不等于零, 也就是要保持有稳定的位相差。我们把 $\cos \delta$ 的时间平均值用 $\overline{\cos \delta}$ 来表示, 即要求

$$\overline{\cos \delta} \approx 0$$

三、光的相干性初议

这里为什么要提出 $\cos \delta$ 的时间平均值呢？因为普通光源（如太阳光、白炽灯）的发光，是由于原子（或分子）的辐射而产生的，各个原子的辐射是在不同瞬间发生的。每一次发光的持续时间十分短，一般小于百分之一微秒，而且辐射是随机的、不规则的。这个随机变化的时间比起我们用以测量光强的探测器的响应 τ 要短得多；比起我们进行测量时记取读数的时间也要短得多。因此，我们观察和测量到的光强，实际上是该处光强的时间平均值。因为原子发光的持续时间极短，加上同一个原子（或分子）在不同时间发射的光波之间，以及不同原子发射的光波之间，没有什么必然的联系。所以一般情况下，从两个光源发出的两列光波，或同一光源的不同部分发出的两列光波，它们之间的位相差 δ 随时间的变化是完全混乱的，所以，即使在相当短的时间范围内， $\cos \delta$ 的平均值 $\overline{\cos \delta}$ 为零。而合成光波的光强 I 应为两列光波的光强之和，即

$$I = I_1 + I_2$$

在这种情况下，我们说：这两列光波是非相干光。非相干光叠加后，在任一点的光强都是原来两列光波单独传播时的光强之和，这种叠加出现在整个叠加区域内。例如：室内点了两盏灯，则灯光所到各处的光强都是两灯光强之和。

如果通过一定的实验装置，创造一定的条件，能够保证两束光之间的 $\overline{\cos \delta}$ 不为零，而且在空间明暗条纹有稳定的分布，要保证以上条件，从物理意义上来说，就是要保证两列光波之间有稳定的位相差分布。这样在空间就可以形成稳定的光强分布，从而有可能得到清晰可见的光的干涉条纹。

讨论到这里，我们可以看到，如果我们设法将一个点光源

分解成两列光波来做实验,那么前面提到的光的相干条件中,前两个条件即:频率相同,振动方向相同,一般就可以满足。现在主要的问题是如何采取措施,保证两列光波之间有稳定的位相差,从而得到光的干涉,并产生清晰可见的干涉条纹。

§ 1.3 杨氏双缝干涉实验

一、杨氏双缝实验的构思

在 1.1 节及图 1-2 中介绍的杨氏实验装置中, S 是点光源, S_1, S_2 是两个针孔,由此得到两列光波,并在屏幕 V 上观察到了干涉条纹。后来,为了提高干涉条纹的亮度,杨氏用两个平行的狭缝 S_1 和 S_2 代替针孔。图 1-5 所示是杨氏双缝干涉的光路图。图中,从 S 发出的光波,其波面传到 S_1, S_2 以后形成两列频率相同,振动方向相同的光波,对空间某一点 p ,从 S_1, S_2 到 p 点的距离是一定的(或者说光程),光程差也是一定的,那么从 S_1, S_2 发出的两束光波到达 p 点时,在该点的产生的位相差也是一定的。对空间的其它点,也有类似的情况。因此,在两列光波相遇的区域内可以得到稳定的位相差

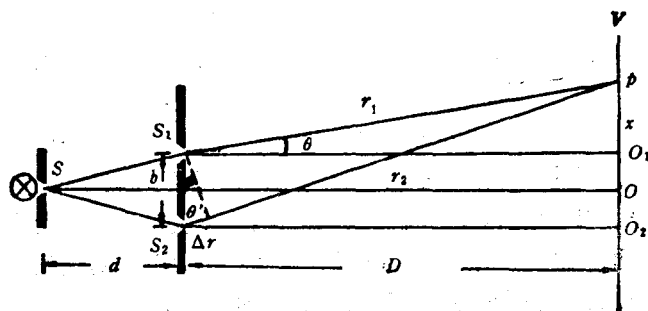


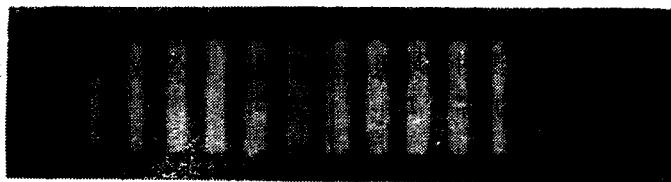
图 1-5 杨氏双缝干涉实验光路图

分布,这就满足了光的相干条件中至关重要的第三个条件,也是这个古老实验的构思巧妙之处。

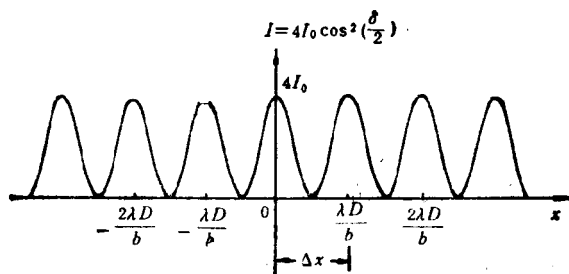
图 1-6 中, S_1 , S_2 两平行狭缝间的距离是 b , S_1 和 S_2 所在的平面到光源 S 的垂直距离为 d , 到观察屏 V 的垂直距离为 D 。从 S_1 和 S_2 发出的光向右边空间传播,由于对空间不同的点来说,光波从 S_1 和 S_2 分别到达该点时,光程差不同,因而产生的位相差 δ 不同,而由式(1.9)可知, δ 不同则光强 I 不同,所以叠加的结果就引起光强的重新分布。

二、杨氏双缝干涉条纹的特点和计算

杨氏干涉实验中所得到的杨氏干涉条纹如图 1-6 (a) 所



(a) 杨氏干涉条纹的照片



(b) 合成光强度 I 随 x 的变化

图 1-6 杨氏干涉条纹及相应的光强度分布曲线