

《光学教程》 学习指导

宣桂鑫 王 尉 编



中国计量出版社

《光学教程》学习指导

宣桂鑫 王 尉 编

中国计量出版社

内 容 提 要

本书为高等学校全国统编教材《光学教程》(姚启钧原著)的学习指导书。全书共分六章。前五章包括原著光的干涉、光的衍射、几何光学的基本原理、光学仪器的基本原理及光的偏振等各章的学习指导。各章的内容分目的要求、内容分析、例题示范和内容提要等四个层次。“目的要求”是根据《光学教程》教学大纲的要求,阐述各章需要切实掌握的基本概念和基本理论;“内容分析”是对教学中的重点、难点作分析和讨论;“例题示范”中的例题具有典型性,有一定的难度;“内容提要”是对一章的内容作提纲挈领的总结,着重指出各基本概念之间的联系。第六章为光学教学评估,其中包括双向细目表和标准化考试样卷,便于读者自我检测学习成果,提高考试透明度。

本书可作为师范院校、电视、函授、业余大学师生和自学人员的普通物理《光学教程》配套教材,也可作为综合大学、高等工科院校光学课程教学参考书,还可供中学教师参考。

《光学教程》学习指导

宣桂鑫 王 尉 编

责任编辑 陈小林

—*

中国计量出版社出版

北京和平里11区1号

中国计量出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

—*

开本 850×1168/32

印张 6.875 字数 178 千字

1989年7月第1版

1989年7月第1次印刷

印数 1—7 000

ISBN 7-6026-0229-1/TB·197

定价 3.00 元

前 言

高等教育出版社出版的《光学教程》(姚启钧原著, 高等学校试用教材)自出版以来, 已印刷 8 次, 发行 20 万余册。在试用过程中, 许多读者感到迫切需要一本与其相配套的学习指导书, 本书即为满足这一要求而编写, 目的在于辅导学生更好地学习普通物理光学课程。考虑到原著的重点、难点在前五章, 即光的干涉、光的衍射、几何光学的基本原理、光学仪器的基本原理及光的偏振, 本书包括了这五章的内容。为使书的篇幅不致太大, 《光学教程》中后面部分相应的内容未编入。

各章的内容分目的要求、内容分析、例题示范和内容提要四个层次。首先阐述各章的基本要求, 随后对教学中的重点、难点作分析和讨论, 以利读者切实掌握基本概念和基本理论; 接着举出一定数量的例题, 所选例题具有典型性, 有一定的难度, 对读者独立解答光学习题有启发诱导作用; 最后对一章内容作提纲挈领的总结, 着重指出各基本概念之间的联系。

为使读者便于自我检测学习成果, 提高考试的透明度, 编写了光学教学评估一章。编者相信这是一种有益的尝试。所选题目力求新颖全面。难度适中, 并给出参考解答, 这样与例题一样, 也起到示范作用。

编 者

1988 年 5 月

目 录

第一章 光的干涉

一、目的要求	(1)
二、内容分析	(1)
三、例题示范	(7)
四、内容提要	(42)

第二章 光的衍射

一、目的要求	(45)
二、内容分析	(45)
三、例题示范	(50)
四、内容提要	(74)

第三章 几何光学的基本原理

一、目的要求	(77)
二、内容分析	(77)
三、例题示范	(89)
四、内容提要	(117)

第四章 光学仪器的基本原理

一、目的要求	(121)
二、内容分析	(122)
三、例题示范	(134)
四、内容提要	(157)

第五章 光的偏振

一、目的要求.....	(162)
二、内容分析.....	(162)
三、例题示范.....	(169)
四、内容提要.....	(192)

第六章 光学教学评估

一、标准化考试概述.....	(195)
二、双向细目表.....	(198)
三、标准化考试样卷.....	(199)
四、标准化考试样卷参考答案.....	(207)

第一章 光的干涉

光的干涉现象及其实验事实揭示了光的波动性。光波不是机械波而是电磁波，其中引起光效应的主要是电场强度而不是磁感应强度。本章着重讨论光的干涉定义、相干条件以及分波面和分振幅干涉装置的干涉光强分布规律，最后讨论迈克耳孙干涉仪和法布里-珀罗干涉仪的基本原理和应用。

一、目的要求

1. 理解相干迭加和不相干迭加的区别和联系。
2. 理解光的相干条件和光的干涉定义。
3. 了解干涉条纹的可见度以及空间相干性和时间相干性对干涉可见度的影响。
4. 掌握位相差和光程差之间的关系。
5. 掌握分波面干涉装置的干涉光强分布的基本规律，即干涉条纹的间距和条纹的形状等。
6. 掌握分振幅等倾干涉的条纹特征和光强分布及其应用。
7. 掌握分振幅等厚干涉的条纹特征和光强分布及其应用。
8. 掌握迈克耳孙干涉仪和法布里-珀罗干涉仪的基本原理及其应用。

二、内容分析

本章可分为三个单元。第一单元关于光的波动本质的一些重要实验证据及其解释（§ 1-1 到 § 1-5）*；第二单元薄膜干涉，

* 本书提到的章、节号，均指《光学教程》第二版的章、节号。

包括等倾干涉和等厚干涉 (§ 1-6 和 § 1-7); 第三单元干涉仪的基本原理以及干涉现象的一些应用 (§ 1-8 到 § 1-10)。

1. 光是电磁波

§ 1-1 主要是复习电磁学最后部分的电磁波。这里只需了解若干结论: 诸如, 光是电磁波; 透明介质的折射率 $n=c/v$; 光场的光矢量指的是电场强度 E ; 可见光的波长范围为 $400\text{ nm}\sim 780\text{ nm}$; 实用中所指的光强 I , 即辐照度, 其定义为能流密度在测量时间间隔内的平均值, 其值正比于 nA^2 (其中, n 为折射率; A 为振幅, 单位是瓦/米²)。

2. 相干与非相干迭加

§ 1-2 是复习力学中沿着同一直线上、同频率的两个简谐振动的迭加。要注意这是以两振动各自独立的条件下的迭加为限, 而迭加总是以同一瞬时的两个振动矢量的相加。由于只讨论振动沿同一直线, 故不需要用矢量加法, 仅用代数加法就可以了。值得指出的是, 由两振动的位相差是否始终维持不变来区分两种不同的情况: 第一, 两振动的位相差维持不变的, 合振动强度可能不等于分强度之和, 这是相干迭加; 第二, 位相差时刻变化的, 合振动等于分振动之和, 这是非相干迭加。严格地讲, 应由干涉项 $2A_1A_2\langle\cos\Delta\varphi\rangle$, 是否为零来区分非相干迭加和相干迭加。 $\langle\cos\Delta\varphi\rangle$, 表示 $\cos\Delta\varphi$ 在测量时间间隔 τ 内的平均值。

在力学现象中, 振动通常持续相当长的时间, 所以在观察时间内, 迭加一般是相干的。但是在光学现象中, 光源所发出的光, 情况要复杂得多, 所以应特别注意相干问题。由于每次发光时间特别短暂, 而通常的光接收器的响应时间相比之下又特别长, 这就决定了一般观察的光学现象都是时间的平均效应。因此两束光的相干条件中最关键的一条就是在光的迭加区域内, 各点具有各自的、不跟随时间而变的位相差。这就决定了通常的相干光源必须采用形形色色的分光装置来获得。即把一准单色光源发出的一点光, 通过某一措施人工地分成两束, 随后使这两束光经不同的光程后交迭而实现。这一措施通常成分波面、分振幅和分振

动面三种形式,其中偏振光的干涉就是分振动的实例。

3. 位相差与光程差的关系

符合相干条件的两束光波在相遇区域迭加,是相长还是相消,取决于位相差,而两振动的位相差是由如下两个因素所决定的。

第一,是相干光源本身所带来的初位相差 $\varphi_{02} - \varphi_{01}$ 。

实际的光源中含有无数的发光原子,即使可以使它们发出同一频率的单色光,但我们却无法控制它们所发光波的初位相值。故 $\langle \cos \Delta\varphi \rangle_t = 0$, 即干涉项为零。因此,实际的点光源中不同原子所发的光波,因它们之间无固定的初位相差 $\varphi_{02} - \varphi_{01}$, 从统计观点看,是不相干的。

在多数情况下,相干光源本身的位相可以认为是相同的,所以在计算时,该因素可不必考虑,只要确知它们之间的位相差始终维持不变就可以了。

第二,是从两相干光源到同一观察点的光程差。

由于相干光源本身的位相可认为是相同的,故计算两波同时到达观察点时的位相差,主要从光程差着手。光程差和位相差的关系为

$$\begin{aligned}\Delta\varphi &= \frac{2\pi}{\lambda}\delta \\ &= k\delta\end{aligned}$$

该式表明光程每差一个波长 λ , 位相就差 2π 。任意光程差 δ 与 λ 之比, 应该等于相应的位相差 $\Delta\varphi$ 与 2π 之比。

综上所述,干涉强度分布决定于位相差,位相差决定于光程差,所以光程差公式是讨论干涉的出发点。它是波动光学的主题歌。因此,这关系式应熟知。

值得指出的是相消干涉不是能量的消灭,因为与此同时必伴随着相长干涉,不过出现在不同的地方。干涉现象仅是波所到达空间各点能量的重新分布。

4. 分波面双光束干涉

§ 1-4 中应注意分波面双光束干涉以下的三个具有重要意义的实验。

(1) 杨氏实验是个典型的例子，它的规律具有普遍意义。

(2) 洛埃镜实验表明：光从光密介质表面反射，入射角近于 $\pi/2$ 时发生半波损失。

(3) 维纳驻波实验表明：入射角为零度时也发生半波损失，而在介质表面形成驻波的波节，这相当于电场强度矢量。而不是磁感应强度，进一步证明光矢量是电场强度矢量。

5. 干涉条纹的可见度以及空间相干性和时间相干性

干涉条纹的可见度是描述干涉场中干涉现象显著程度的物理量。干涉条纹的可见度的大小与两相干光波的强度、光源的大小和光源的单色性有关。

空间相干性指的是光场中同一时刻两个不同位置光振动的关联程度，即横向相干性；时间相干性指的是光场中同一位置不同时刻光振动关联程度，即纵向相干性。其实，空间相干性和时间相干性的问题是不能截然分开的，我们之所以区分它们，纯系为了说明问题的方便。

6. 菲涅耳公式

四个菲涅耳公式是从电磁波边界条件推导出来的。用菲涅耳公式不但可以计算反射光和透射光的振幅 A_1 和 A_2 ，而且还可以从振幅反射比和振幅透射比的正负确定反射光和透射光的电矢量在某一时刻的振动指向。

对菲涅耳公式不必去细究如何推导，这里主要应用菲涅耳公式解释半波损失，从理论上去阐述光的电磁本性。

7. 分振幅薄膜干涉

由斯托克斯定理对反射和透射比的讨论可知薄膜反射多光束干涉可以等效为最先两束反射光的干涉。

§ 1-6 和 § 1-7 所涉及的薄膜干涉中，最重要的公式是

(1-35)*, 在所讨论的条件下, 对等倾干涉和等厚干涉都是成立的。应该弄清的是式中 n_1 、 n_2 、 h 、 i_1 和 i_2 的涵义, 特别是 i_2 不是由已知条件给出的, 还要经折射定律换算。

关于等倾干涉和等厚干涉这两个物理术语, 容易因望文生义而混淆。等厚干涉条纹, 决不要认为薄膜是等厚的。等厚干涉条纹指的是相同的倾角, 薄膜上厚度相同的各点对应着同样的光程差, 在同一级条纹上。所以, 只有厚度不同的薄膜才有可能形成一组等厚条纹, 条纹的形状正反映等厚点的轨迹。而等倾干涉指的是厚度相等的薄膜, 由入射光的倾角改变而形成的一组干涉条纹。同一级条纹, 对应着同一倾角, 不同级条纹, 对应着不同的倾角。由公式 (1-35) 可知, 当 n_1 和 n_2 给定以后, h 一定, 光程差随 i_1 变化, 即得等倾条纹; 由公式 (1-37) 可知, 当 i_1 一定, 光程差随 h 变化, 即等厚条纹。这就是为什么要把完全一样的公式 (1-35) 和 (1-37) 写成不同形式的缘由。

在讨论薄膜干涉问题时, 关键的内容是正确计算两振动的位相差, 实际上就是计算两振动迭加时的方向关系。首先应明确是哪两个光振动参与迭加。在薄膜干涉现象中, 入射光根本没有介入迭加, 它的振动不必考虑, 所以不涉及半波损失, 因它是反射光与入射光之间的振动方向关系。其次, 应明确单独考虑振动的一个分量方向相反与否, 还不能完全解决问题, 必须同时考虑两分量的合矢量的方向关系。关于一分量方向的正负, 仅指的是该方向与规定正方向的相同还是相反。因此, 必须区分下列三种不同意义, 即各分量方向的正负, 入射光与反射光之间的半波损失, 在不同条件下反射的两束光之间的额外程差。

综上所述, 薄膜干涉中, 薄膜上下表面反射的两束平行光的光程差为

$$\delta = 2 n_2 h \cos i_2$$

这是式 (1-35) 和 (1-37) 的出发点。随后考察上下表面反

* 本书提到的公式号, 均指《光学教程》第二版的公式号。

射过程中是否有额外程差，进一步矫正。当 $n_1 < n_2 > n_3$ 或 $n_1 > n_2 < n_3$ 时有额外程差 $\lambda/2$ ；当 $n_1 > n_2 > n_3$ 或 $n_1 < n_2 < n_3$ 时，无额外程差。最后由光程差和位相差之间的关系，进一步确定相长或相消干涉的条件。

值得指出的是有无额外程差的差别仅仅在于干涉条纹的级数差半级，即暗亮条纹互换，并不影响诸如条纹的形状、间隔和对比度诸特征。

8. 迈克耳孙干涉仪的基本原理及应用

迈克耳孙干涉仪的原理是以薄膜干涉现象为基础的。除了弄清每一元件的功能外，就是分析由 M_1 和 M_2 所构成的特殊薄膜的干涉问题，公式 (1-35) 仍旧适用。但是这种薄膜具有以下特点：首先，它是空气膜，所以 $n_1 = n_2 = 1$ ， $i_1 = i_2$ ；其次，通过改变 M_1 和 M_2 的方位，实现等厚薄膜或尖劈薄膜；再次，它是分振幅双光束干涉装置，两束相干光是在两个互相垂直的方向传播。由于两光路分得很开，所以可以根据需要改变其中一条光路，便于我们在测量时放置各种待测部件，提供了测量的方便。因此，迈克耳孙干涉仪在光学测量中得到了广泛的应用。其中常用到下述原理：干涉仪中的动镜每移动 $\lambda/2$ 的距离，从视场中冒出或缩进一个条纹，这就和精密测量紧密联系起来。

9. 法布里-珀罗干涉仪的原理

多光束干涉形成的条纹比两光束干涉所形成的条纹锐度高，故利用多光束干涉的干涉仪具有很高的分辨本领。因此，这种干涉仪常用于高分辨光谱学中。

利用多光束干涉的原理的最重要的干涉仪是法布里-珀罗干涉仪。重要的是它的强度分布，关于这一点，除了第二章分析光栅时要用到其性质外，在分析激光谐振腔的原理时也要涉及到它。

10. 牛顿圈

牛顿圈是不同厚度的等厚点轨迹，是以接触点为圆心的一簇同心圆。由于额外程差，中心点为暗的。其 j 级条纹的半径为

$$r_j = \sqrt{j} \sqrt{R\lambda/n}$$

$$\propto \sqrt{j}$$

式中, $n=1$, 故牛顿圈等厚圆条纹和厚度相等的薄膜的等倾圆条纹在光强分布和 r_j 上有相同的分布规律。

三、例 题 示 范

1. 分波面干涉

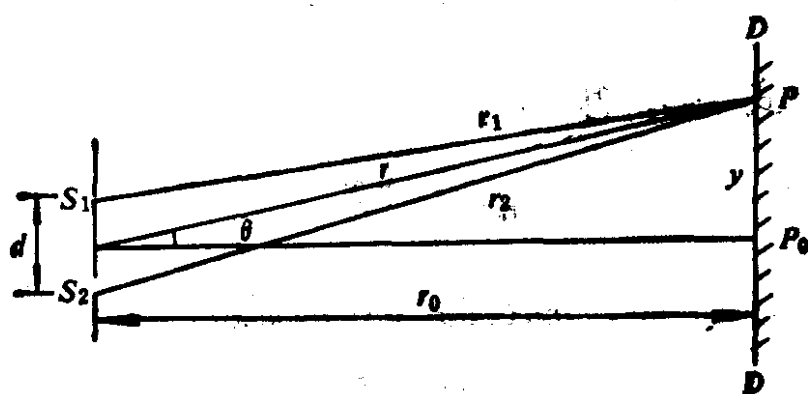
1-1-1 (1) 杨氏装置中, 若已知波长为 589 nm 在远处的光屏上将形成角宽度为 0.02° 的暗纹, 试求双缝的间距。

(2) 若将整个装置浸入折射率为 1.33 的液体中, 试求条纹的角宽度。

解 (1) 由相长干涉条件可知, 干涉级为 j 、 $j+1$ 级的暗条纹的位置分别为

$$y = \frac{r_0}{d} (2j+1) \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

$$y' = \frac{r_0}{d} [2(j+1)+1] \frac{\lambda}{2} \quad (2)$$



题 1-1-1 图

由题 1-1-1 图中的几何关系, 得

$$\tan \theta = \frac{y}{r_0}$$

故
$$\operatorname{tg} \theta = \frac{y}{r_0} = \frac{1}{d} (2j+1) \frac{\lambda}{2} \quad (3)$$

$$\operatorname{tg} \theta' = \frac{y'}{r_0} = \frac{1}{d} (2j+3) \frac{\lambda}{2} \quad (4)$$

式 (4) - 式 (3), 得

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \theta' - \operatorname{tg} \theta &\approx \theta' - \theta \\ &= \Delta\theta = \frac{\lambda}{d} \end{aligned}$$

故

$$\begin{aligned} d &= \frac{\lambda}{\Delta\theta} \\ &= \frac{589 \times 10^{-9}}{0.02^\circ \times (\pi/180^\circ)} \\ &= 1.687 \text{ mm} \end{aligned}$$

(2) 若将该装置浸入折射率为 1.33 的液体中, 则 j 级和 $j+1$ 级暗条纹所对应的光程差分别为

$$n(r_2 - r_1) = n \frac{d}{r_0} y = (2j+1) \frac{\lambda}{2} \quad (5)$$

$$n \frac{d}{r_0} y' = [2(j+1) + 1] \frac{\lambda}{2} \quad (6)$$

式 (6) - 式 (5), 得

$$nd \frac{y' - y}{r_0} = \lambda$$

即
或

$$\begin{aligned} nd(\operatorname{tg} \theta' - \operatorname{tg} \theta) &= \lambda \\ nd \Delta\theta &= \lambda \end{aligned}$$

故

$$\begin{aligned} \Delta\theta &= \frac{\lambda}{nd} \\ &= \frac{5890 \times 10^{-7}}{1.33 \times 1.687} \end{aligned}$$

$$= 2.625 \times 10^{-4} \text{ rad}$$

$$= 0.015^\circ$$

$$= 54''$$

1-1-2 将具有间距为 0.5 mm 的 竖 直双狭缝的不透明屏置于分光计的平台 上。以波长为 $\lambda = 600 \text{ nm}$ 的 单 色平行光照射，其中一个缝通过的能量为另一个的 4 倍，置于焦距为 200 mm 的透镜焦平面上的光屏上形成干涉花样。试求：

(1) 干涉花样条纹间距；

(2) 干涉花样可见度。

解 (1) 条纹间距为

$$\Delta y = \frac{r_0}{d} \lambda$$

将 $r_0 = 200 \text{ mm}$ ， $d = 0.5 \text{ mm}$ 和 $\lambda = 600 \times 10^{-9} \text{ mm}$ 代入上式，得

$$\begin{aligned} \Delta y &= \frac{200}{0.5} \times 600 \times 10^{-9} \\ &= 0.24 \text{ mm} \end{aligned}$$

(2) 由缝中能量分布可知

$$I_1 : I_2 = 4 : 1$$

$$A_1 : A_2 = 2 : 1$$

则
故

$$A_1 = 2 A_2$$

$$A_{\min} = A_1 - A_2 = A_2$$

$$A_{\max} = A_1 + A_2 = 3 A_2$$

$$I_{\min} = A_2^2$$

$$I_{\max} = 9 A_2^2$$

则干涉条纹的可见度为

$$\begin{aligned} V &= \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \\ &= \frac{9 - 1}{9 + 1} \end{aligned}$$

$$= 0.8$$

1-1-3 平行单色光垂直投射到间距 $d = 0.1 \text{ mm}$ 的双缝上，在屏上某点 P 观察到第 8 级亮条纹，屏离开双缝的距离 $r_0 = 1 \text{ m}$ ， P 点离开中央亮条纹的距离为 $y = 4 \text{ cm}$ （参见题 1-1-1 图）。若把双缝的间距缩小为 d' ，则 P 点为第 4 级亮条纹。试求：

(1) $d' : d$;

(2) 单色光的波长。

解 (1) 由相长干涉的条件，得

$$d \sin \theta = j\lambda$$

故

$$d' : d = j' : j$$

$$= 4 : 8$$

$$= 1 : 2$$

(2) 单色光的波长为

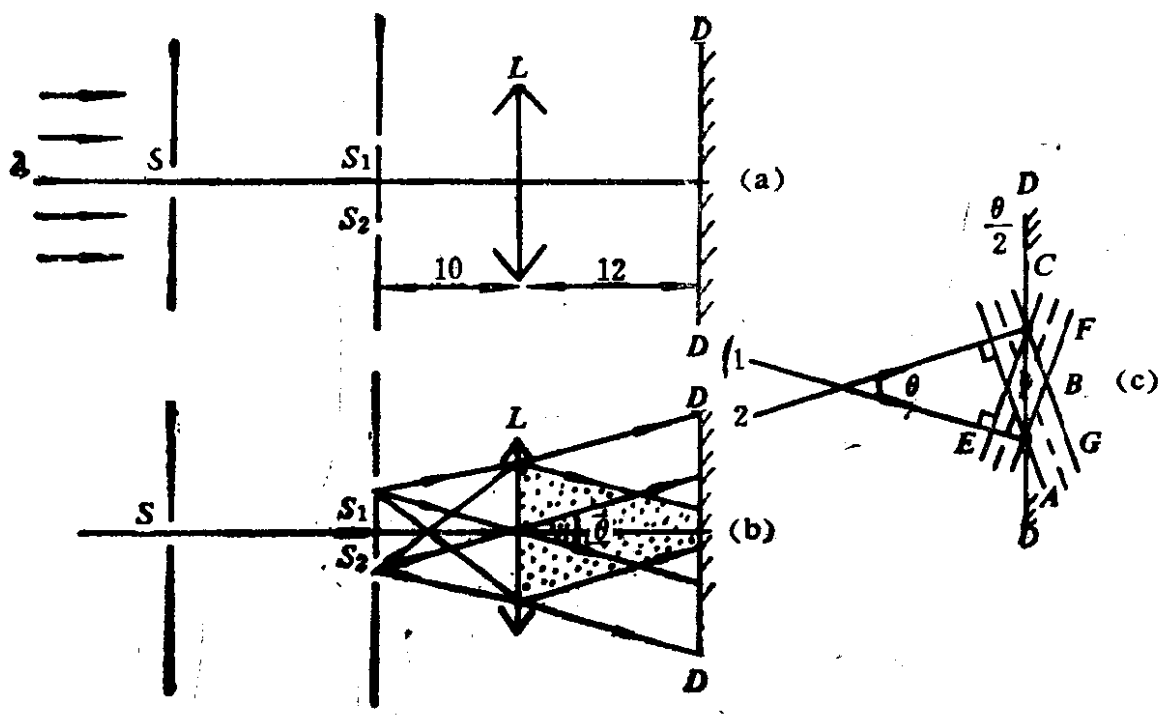
$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{d \sin \theta}{j} \\ &= \frac{d}{j} \frac{y}{r_0} \\ &= \frac{0.1}{8} \frac{40}{1000} \\ &= 500 \text{ nm} \end{aligned}$$

1-1-4 如图 (a) 所示。在杨氏干涉装置中，双缝的间距 $d = 0.1 \text{ mm}$ ，离双缝右侧 10 cm 处有一共轴的焦距 $f' = 10 \text{ cm}$ 的理想会聚透镜 L ， L 的右侧 12 cm 处置一垂直于轴的干板 DD 。若缝 S 以波长 $\lambda = 400 \text{ nm}$ 单色光垂直照明。试求：

(1) 干板上有无干涉条纹？

(2) 若有直干涉条纹，则条纹间距是多少？

解 (1) 由于 S_1 和 S_2 是由同一波面分出的两个次波源，因此它们是相干的。而相干光源 S_1 和 S_2 都处于透镜 L 的物方焦平面上，经透镜 L 折射成夹角为 θ 的两束平行光，如图 (b) 所示，



题 1-1-4 图

交迭而构成干涉场。在干涉域中置一与光轴正交的干板 DD 即可得与纸面垂直的等间隔的明暗相间的直干涉条纹。

(2) 干板上所形成的直条纹的间距公式推导如下。

如图 (c) 所示, 绘出的是经透镜 L 折射后所获得的两族相干的平行光束 1 和 2 的波阵面图, 其中与光线正交的实线表示某时刻振动处在波峰的等相面, 虚线却是波谷的等相面。而干板 DD 恰好置于两平面波面夹角的平分线上。即 $\angle ACE = \theta/2$ 。

相干光束 1 和 2 的波长都是 λ , 故 $AE = \lambda$ 。干板面上 A 和 C 点为两波峰相遇, B 点为两波谷相遇, 故 A 、 B 和 C 点为相长干涉, 显然, F 、 G 两点是相消干涉。在波的传播过程中, 在 θ 维持不变的条件下, A 、 B 和 C 点总是同位相, F 、 G 却是反位相的。所以, AC 的长度为条纹间距的两倍, 即

$$AC = 2 \Delta y$$

在图 (c) 所示的 $\triangle ACE$ 中