

晶体锥光效应和相位测量

刘 立 人

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

本文提出了一种新的以晶体锥光偏光干涉效应为原理的强度空间滤波器的方法以及用于傅里叶滤波准光干涉术进行相位测量的原理。这种方法不需要傅里叶变换透镜以及空间滤波器图案板。讨论了各种具体结构,分析了工作特性,叙述了能产生多种等位线条纹系统并可带有背景条纹。最后给出实验例子。

一、引 言

光学干涉法能以波长量级的高精度测量物体的相位变化,尤其是干涉条纹具有直观性和整场性,因此获得了广泛应用。但是干涉方法一般并不适用于强变化相位物体。我们曾提出过用傅里叶滤波的原理以等位线条纹形式测量相位梯度变化的新的光学方法^[1~3],它的测量灵敏度较低,所以适用于各类强变化相位体,特别有意义的是可以改变滤波图案而取得许多种等位线条纹系统^[4]。当然强滤波系统由傅里叶变换透镜和空间滤波器图案板所组成。

在晶体光学中^[5],因双折射可以取得多种锥光偏光干涉图,它们表示了晶体内部以一定角度传播的光线的透过分布。基于这一点,本文提出用晶体的锥光干涉现象作为强度空间滤波器的方法。其优点是能用晶体材料来替代要求甚高的傅里叶变换光学透镜,系统装置简单并能产生几种十分有用的滤波函数,甚至能基于线性电光效应用电压表控制和改变滤波函数,这些对于某些实际应用都是十分有益的。

二、晶体空间滤波器原理

晶体的偏光锥光干涉图事实上表示光线沿一定方向传播的透过函数。为了解释方便起见,用图1装置观察锥光干涉图。其中 P_1 和 P_2 是正交(或平行)偏光镜对, Q_1 和 Q_2 是快慢轴相对的 $\lambda/4$ 波片,它们的取向与偏光镜成 45° 角。在扩展光源照明下可在观察屏上观察到晶体锥光图。图2表示在正交偏光镜下单轴晶体的几种典型锥光图;(a)是晶体光轴方向通光时的锥光图,这时不用 $\lambda/4$ 波片,(b)也是光轴通光,使用 $\lambda/4$ 波片相应消除了十字形消光线,(c)是晶体沿 x 轴方向通光时的锥光图。

锥光图的出现是由于在晶体内沿不同方向传播的光线的双折射光程差变化和偏振方向变化而导致的。由图1所示出现锥光图的原理可知,光源上任何一点经透镜变换为平行光通过晶体后再成像于观察屏上,因此观察屏上任何一点就代表了晶体内相应角度传播的平

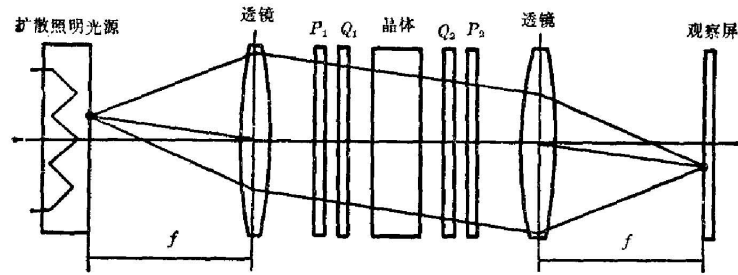


图 1 观察晶体偏光锥光干涉图的装置

Fig. 1 A setup for observing the interference figures from a crystal under the conoscope

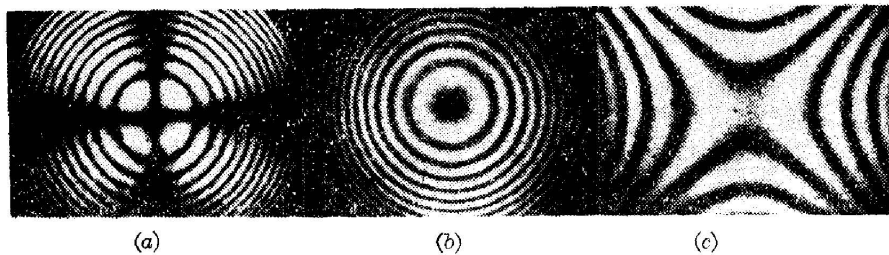


图 2 三种单轴晶体锥光图

Fig. 2 Three kinds of interference figures in the conoscope from a uniaxial crystal

(a) Optics-axis figure; (b) Optics-axis figure without isogyre; (c) Flash figure

行光。换言之，沿某方向在晶体内传播的光线由于偏光干涉而产生的透过强度变化完全对应于锥光图上的强度分布。因而晶体、偏振镜和波片这一组合单元本身就具备了随传播方向而变化的透过率的特性，而这个透过率函数就是锥光图，因此也等效于光学傅里叶变换透镜和强度空间滤波器的组合。这里称晶体、偏振镜和波片的组合为晶体空间滤波器，它的强度滤波函数就是锥光图分布。

上述三种典型的锥光图代表了三种滤波函数，为了说明其滤波特性并使应用时准确起见，下面先给出简单的定量分析。这是以我们的早期工作^[6]为基础的。

对于晶体滤波器，我们有透过光强对入射光强之透过率函数为 $T = \sin^2(\pi r_0/\lambda) \sin^2(2\alpha)$ (正交偏光镜)，或者 $T = 1 - \sin^2(\pi r_0/\lambda) \sin^2(2\alpha)$ (平行偏光镜)。 r_0 为双折射光程差， α 为晶体偏振方向与偏振镜方向的夹角。

对于图 2(a) 和 2(b) 所示的光轴锥光图，令 θ 为晶体内传播光线与光轴之间的夹角。当 θ 较小时有 $r_0 = (n_o - n_e)l \sin^2 \theta$ ，其中 l 为晶体通光长度， n_o 为寻常光折射率， n_e 为异常光折射率。图中暗环(平行偏光镜对为亮环，下同)相应的角分布即为

$$\sin^2 \theta = N\lambda/l(n_o - n_e), \quad (1)$$

其中 N 为可能的整数。

图 2(a) 中的十字形消光线平行于偏振镜方向，在文献[6]中已有详细讨论。

当 x 方向通光时，得到图 2(c) 的晶体锥光图。这时我们给出它们双曲线顶点的角位置^[7]。采用文献[6]中的折射率椭球的坐标变换方法，当光线沿 y 轴方向偏转 θ 角时，显然 $r_0 = (n_o - n_e)l/\cos \theta$ 。所以 y 轴方向上双曲线顶点角位置为

$$\cos \theta = (n_o - n_e)l/N\lambda. \quad (2)$$

当 θ 沿光轴方向偏转时, 在 θ 较小情况下有 $r_0 = (n_o - n_e)l \cos \theta$ 。所以在光轴方向上双曲线顶点角位置为

$$\cos \theta = N\lambda / (n_o - n_e)l. \quad (3)$$

显然, 由(1)式决定的光轴锥光图的环分布类似于菲涅耳波带片分布, 随着 θ 角增加环的间隔减少。作为空间滤波器, 类似于同心等圆环滤波器, 它对于傅里叶谱频率较高的部分产生较密的等位线条纹。而带十字形消光线的光轴锥光图, 则由于十字线中心对应于傅里叶谱的零点直流分量, 因此利用十字消光线可以定出零点位置, 即被测物体的零相位变化点。双曲线锥光图则可比较相位梯度绝对值与其分量之间的和差关系^[4]。

上述讨论中偏角 θ 为光线在晶体内部相对于晶体坐标轴的传播角, 而对应于空气中的偏角应当考虑界面上的双折射。在晶体材料的双折射较小情况下, 可以用均匀介质折射定理来计算。

三、晶体空间滤波器用于傅里叶准光干涉术

图 3 显示一种简化的傅里叶滤波准光干涉装置。单色点光源经透镜 1 准直并照明被测物体, 物体由透镜 2 成像于观察屏上, 物距和像距分别为 l_1 和 l_2 。一般而言, 晶体空间滤波器在傅里叶准光干涉法中有两种用法:

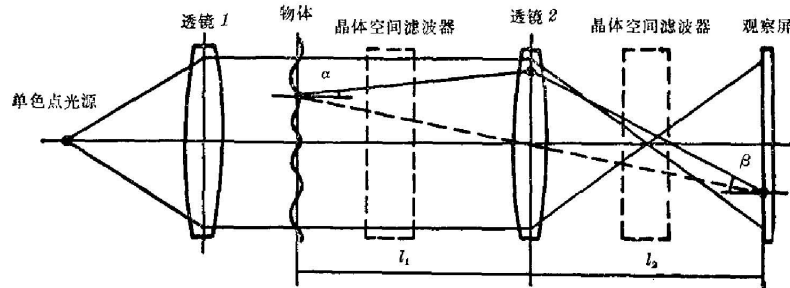


图 3 带有晶体空间滤波器的傅里叶准光干涉仪(虚框表示晶体滤波器二个可能的放置位置)

Fig. 3 Fourier-transform quasi-interferometer with the crystal spatial filter
(dotted block represents the two possible locations of the crystal filter)

1. 无背景条纹法

在图 3 的装置中, 晶体滤波器直接放置于被测物体后面。物体由于相位变化使得射出物体的光线产生折射角 α , 它正比于物体相位梯度变化^[3]。用折射角代表相位梯度, 折射角的不同将受到晶体空间滤波器的锥光图控制, 从而产生物体像上的亮度变化。这种亮度变化也就是由锥光图决定的物体折射角, 即相位梯度的等位线条纹。改变锥光图就改变了等位线系统。

2. 有背景条纹法

晶体滤波器位于透镜 2 后面。当无物体时, 照明光束以锥光形式通过晶体因而产生和锥光图一致的背景条纹。物体的引入将使背景条纹发生变化, 从而反映出物体相位变化的情况。

下面在近光轴近似下推导这种关系。图 4(a) 是垂直于系统光轴的系统坐标平面。设 $M(x, y)$ 为物体上一点，它离系统中心轴位置 O 可用矢量 r 表示，极坐标上模为 $\sqrt{x^2+y^2}$ ，方向角 ϕ_r 。它在子午面中成像于 $M'(x, y)$ 上， $\overrightarrow{M'O} = rf/l_1 - f$ ，其中 $f/l_1 - f$ 为成像放大率。设 M 点上物体折射角为 α ，照明光线折射后经物距 l_1 后偏离 $l_1\alpha$ 而落在成像透镜 2 上，其位置为 $N(x, y)$ 。此光线经成像透镜后仍然落在像点 M' 上。显然它与系统中心光轴夹角为 $\overrightarrow{M'N}/l_2$ 。令其为 β ，经简单运算后有

$$\beta = (r/f) + \alpha[(l_1/f) - 1], \quad (4)$$

图中 ϕ_β 为 β 之方位角。

显然任一物点，它形成的对晶体的入射角由两部分矢量组成：一部分由其本身的位置所决定的偏置入射角 r/f ，另一部分正比于物体的折射角 α ，比例系数 $[(l_1/f) - 1]$ 。改变物距对焦距之比，能控制测量灵敏度。图 4(b) 显示了它们之间的关系。

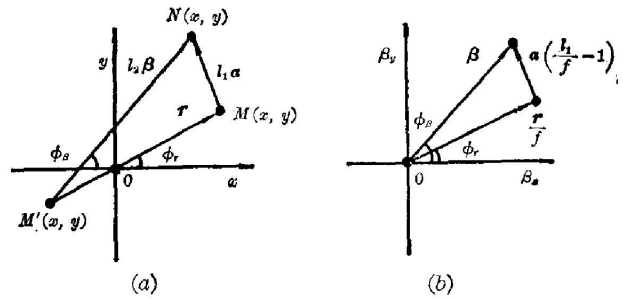


图 4 (a) 表示了物体上折射角 α 产生的成像点上与系统中心轴的夹角；(b) 表示了折射角 α ，位置偏置角 r/f 和光线对晶体入射角 β 之间的关系
Fig. 4 (a) represents the angle between the optical axis of the system and the incident light on the imaging point from the object point caused by α , the refraction of the object, correspondingly; (b) shows the direct relation among the refraction of the object α , the biasing r/f and the resultant angle between the optical axis and the incident light onto the crystal

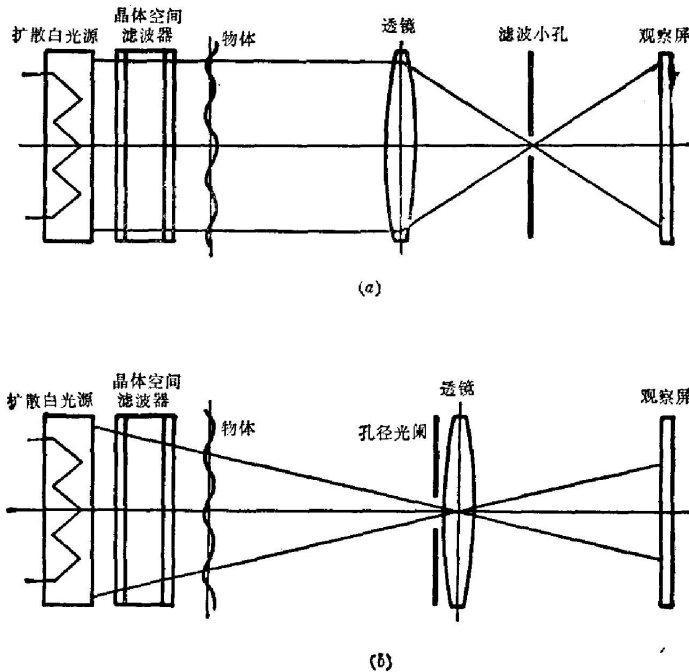


图 5 晶体滤波器用于扩展白光源傅里叶准光干涉系统

Fig. 5 Crystal spatial filter in the quasi-interferometer with an extended white-light source and a pinhole diaphragm (a), or a small aperture (b)

当然也能用白光点光源得到带有彩色的等位线条纹。此外,也能采用扩展的白光源并得到带有彩色的条纹。如图 5(a)所示空间小孔滤波系统类似于上述第一种情况,不产生背景条纹。图 5(b)用有限口径成像,类似于第二种情况并产生锥光图相同的背景条纹。

四、实 验

实验系统如图 1 所示,光源用氩氦激光,系统通光口径 50 mm,成像透镜焦距 200 mm,使用了负单轴 LiNbO_3 晶体,在波长 6328 \AA 下, $n_o=2.286$ 和 $n_e=2.200$,晶体尺寸 $17.5 \times 19 \times 18.5 \text{ mm}(x \times y \times c)$ 。

图 6 中被测物体是锥形玻璃管,这时晶体直接放在被测物体后面。图 6(a)为用带十字形消光线的光轴锥光图,图 6(b)为用无十字形消光线的光轴锥光图。比较两图,并在图 6(a)上可见被测物体上消光十字线没有出现,故不存在零相位梯度点,但是水平方向出现了十字消光线之一部分,说明这个位置上 y 方向梯度为零。

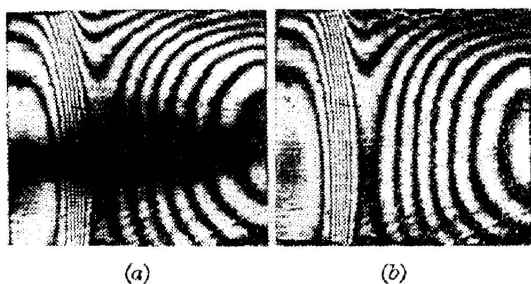


图 6 锥形玻璃管的准干涉图

Fig. 6 Quasi-interferograms from a glass tube of cone shape by use of optics-axis figure (a) and by use of optics-axis figure without isogyre (b)

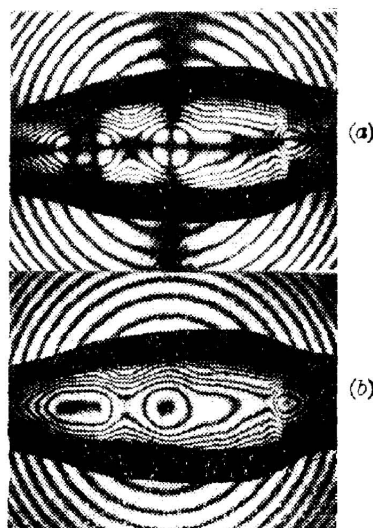


图 7 玻璃滴瓶带有背景条纹的准干涉条纹

Fig. 7 Quasi-interferograms with background fringes from a glass tube by use of optics-axis figure (a) and by use of optics-axis figure without isogyre (b)

图 7 是晶体放在成像透镜后面的情况,被测物为一滴瓶。这时带有背景条纹。在用不带十字消光线光轴锥光图的图 7(b)中可见准干涉条纹三个封闭条纹中心,比较用带消光线光轴锥光图的图 7(a),可见中央的封闭条纹中心有一个零点,而右边那个中心无零点,左边有两个零点。

五、讨 论

我们从实验中可见,使用了晶体空间滤波器后使傅里叶准干涉仪的光学结构十分简化,可不必使用复杂的傅里叶透镜或大视场大口径透镜,并可方便地对相位物体产生几种很有用的滤波函数,尤其是带有十字消光线的光轴锥光图可以确定零点位置,因此具有一定实用

价值。

当采用单轴电光晶体时,随着电压的改变,能线性地改变电感应双折射光程差,因此可以使光轴锥光图从同心圆环变为椭圆甚至更复杂的图形^[5],在某些应用中这是十分有用的。例如,散光眼镜片是日常生活中应用最多的一种镜片,使用圆环形滤波器将得到镜片的椭圆形准干涉条纹,而电光效应产生的椭圆光轴锥光图正可以补偿它直至取得圆形准干涉条纹^[4],由所加电压就可以简单而精确地读出该镜片的散光度,而且十字形消光线也有助于确定镜片的散光轴取向。同样,双光轴晶体或旋光晶体各具有一些特殊的锥光图,亦可用作空间滤波器。偏振镜对的取向对这些晶体的锥光图形状起决定作用,因此可相应产生合适形状的消光线。

在使用上,偏振镜和 $\lambda/4$ 波片可以按其顺序位置排列放置于光学系统中的任何部位。

参 考 文 献

- [1] 刘立人;《光学学报》,1981, **1**, No. 3 (May), 216.
- [2] L. Liu; *Appl. Opt.*, 1982, **21**, No. 15 (Aug), 2817.
- [3] L. Liu; *Appl. Opt.*, 1983, **22**, No. 19 (Oct), 3024.
- [4] L. Liu; *Opt. Comm.*, 1983, **44**, No. 5 (Feb), 301.
- [5] E. E. Wahlstrom; *Optical Crystallography* (5th Edition), (John Wiley and Sons, 1979).
- [6] 中国科学院上海光学精密机械研究所晶体调制组;《激光》,1975, **2**, No. 2 (Jun), 8.
- [7] 同[4], 263.

Application of crystal interference figures in conoscope to phase measurement

LIU LIREN

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 9 December 1983)

Abstract

A new type of intensity spatial filter, based on the polarization interference figure from a crystal under conoscope is developed, and its application to the phase measurement in Fourier-transform quasi-interferometry is presented. This method does not require any Fourier-transforming lenses and masks for spatial filtering. Various configurations are introduced and their performances are analysed. Some contour-fringes systems may be produced and even with background fringes. Several examples of experiments are given.