

# 一种观察溶液浓度轮廓的新方法

李文江, 徐毓娴, 张志利

(清华大学精密仪器系, 北京 100084)

摘要: 提出了一种能够对溶液的浓度轮廓进行观察与测量的新的显微成像测量方法——暗场纹影法。这种方法是在纹影法(Schlieren Method)的基础上加以改进后形成的, 能够用来对溶液的浓度轮廓进行观察。还给出了该方法原理性实验的观察结果, 并与微分干涉显微镜的观察结果进行了对比。

关键词: 纹影法; 梯度折射率; 溶液; 浓度测量

中图分类号: TB933 文献标识码: A

## 1 引言

由于近年来各类晶体及其聚合物在许多领域得到了广泛的应用, 晶体生长的研究随即引起了人们的极大关注。在晶体生长的过程中, 晶体周围溶液的浓度监控是必不可少的。而目前的溶液浓度测量方法虽多, 但多是对单一浓度的溶液进行观测, 而不能对存在不同浓度的溶液进行浓度分布的成像和测量。本文中的暗场纹影法就是在这样的背景下提出的, 该方法具有原纹影法分辨率高, 系统简单, 易于实现等优点, 而且更适合对小尺度的被测样本进行显微观测。

## 2 原理

纹影法(Schlieren Method)<sup>[1]</sup>最早是为了观察以超音速飞行的子弹或喷气式飞机在弹体或机翼周围所形成的冲击波而发展起来的一种光学方法, 该方法可以将透明物质中的折射率变化转换为光强的变化, 从而反映出透明物中的折射率分布状况。该方法已经被引入到晶体领域的观测中<sup>[2]</sup>。但原始的纹影法是不适合进行显微观测的, 因而我们在其基础上提出了以下的改进系统, 其装置简图如图1所示:

狭缝放置在聚光镜的后焦面处, 形成孔径光阑, 挡板放置于狭缝的共轭面处, 也就是与狭缝像重叠的付立叶(Fourier)平面处。由于狭缝很细, 因而整个系统可以看作是相干光照明成像系统。狭缝置于聚光镜的焦平面上, 产生平行光束来照明待测样品。由纹影法原理可知: 光线在经过折射率分布不均匀的样本时, 将会发生折射, 产生一个空间位相角:  $\theta = (x, y)$ 。位相角  $\theta = (x, y)$  是由观测样本的折射率梯度在厚度方向上( $z$ 轴方向)的积分值决定的, 其公式表述如下:

$$\theta(x) = \int_0^d \frac{\partial n(x, y, z)}{\partial x} dz, \theta(y) = \int_0^d \frac{\partial n(x, y, z)}{\partial y} dz \quad (1)$$

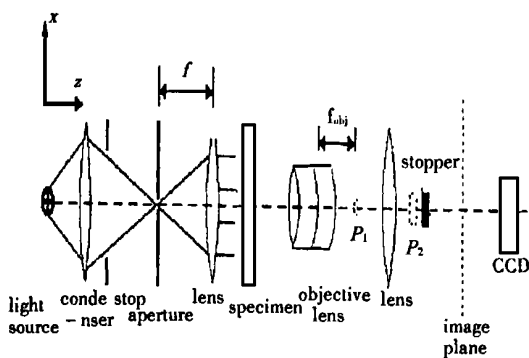


Fig. 1 Simplified system composing figure

光线经过样本后进入显微物镜, 并将光源成像于显微物镜的后焦平面。由于存在折射角, 图

像将产生平移。以沿 X 轴的平移为例,当  $\theta$  角很小时,平移量为  $\delta \cong \theta(x)f_{\text{obj}}$ 。在物镜的后焦平面上,设置一个尺寸与狭缝光源像相同的挡板。当没有衍射发生,即位相角  $\theta$  为零时,光线被完全遮挡,像方呈现暗视场;当  $\theta \neq 0$  时,通过挡板的光强由折射像的平移量  $\delta$  决定:

$$I(x, y) \propto |\delta| \equiv |\theta(x, y)| f_{\text{obj}} \quad (2)$$

由此,在显微物镜的像平面上得到位相物体像的光强即可表示为  $I(x, y) = C|\theta(x, y)|$ , 将位相角的表达式代入上式后得到:

$$I(x, y) = C \left\{ \left| \int_0^d \frac{\partial n(x, y, z)}{\partial x} dz \right|, \left| \int_0^d \frac{\partial n(x, y, z)}{\partial y} dz \right| \right\} \quad (3)$$

上式中,  $x, y$  为垂直于光轴的样品平面坐标,  $I(x, y)$  为像平面上的光强分布式,  $C$  为与观察系统相关的常数,  $z$  为样品在光轴上的厚度。由该式可以得出,像平面上的  $x$  方向与  $y$  方向上的光强分布分别取决于被测样品两个方向上折射率梯度在样品厚度方向上的积分值。

但是由于显微物镜所成的共轭像  $p_1$  很小,对其处理很不方便,所以实际光路中加装了一个放大透镜将其放大。在二次成像  $p_2$  处用大小相同的挡板将其遮挡,如图 1 的装置简图所示。

狭缝像是经过  $L_1, L_2$  系统和透镜  $L_3$  两步成像后形成的。会聚透镜  $L_1$  和显微物镜  $L_2$  形成光路的放大率是由两个透镜的焦距  $f_1$  和  $f_2$  的比值决定的<sup>[4]</sup>。成像光路如图 2 所示。

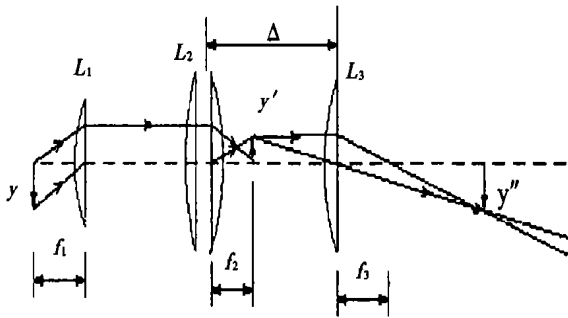


Fig. 2 Imaging principle figure

透镜  $L_3$  的放大率是由其成像的高斯公式决定的,可以通过移动透镜的位置,改变物距来改变其放大率。设透镜  $L_3$  的放大率为  $\beta_1$ , 聚光镜与显微物镜系统放大率为  $\beta_2$ , 则系统总放大倍率为

$$\beta = \beta_1 \beta_2 \quad (5)$$

实验采用的显微物镜为平场消色差物镜 PC10 $\times$ ,

$f = 16.5\text{mm}$ ; 聚光镜为平凸透镜,  $f = 12\text{mm}$ ; 挡板宽度为  $1.5\text{mm}$ 。

### 3 实验现象观察

暗场纹影法的原理性实验是在光具座上进行的,其观察结果如下。

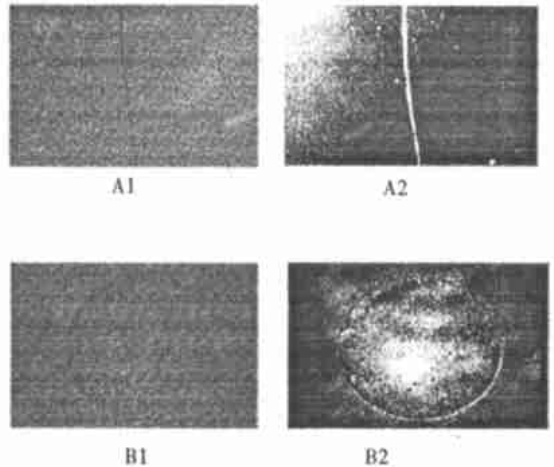


Fig. 3 Comparing figure of the observation

Comments: Graphic A1 and graphic B1 are observed figures taken by the differential interference microscope of sample 1 and sample 2, respectively. Graphic A2 and graphic B2 are observed figures taken by the experimental system of sample 1 and sample 2, respectively.

样本 1(A 组图所示): 折射率由 1.34 和 1.56 两种折射率油的混合液所决定。微分干涉显微镜观察结果表明,微分干涉显微镜的特性决定了其只能看到折射率油与空气的分界线,如图中的深色线条。使用纹影暗场法显微镜观察时,交界线表现为暗视场中的一条清晰的亮线,这是由于折射率油和空气之间的折射率变化梯度引起的。另外,在混合折射率油一侧,还可以看到一系列的亮斑,其成因如下:两种折射率油可以互溶,在两者的交界面上会出现一段浓度逐渐变化的液层,这一液层的折射率也是逐渐变化的,即存在一个折射率的连续变化的梯度信息,这样在视场中就出现了亮斑。

样本 2(B 组图所示): 有机凝胶晶体溶液。由(B)组图中可以看到,采用实验光路观察时,凝胶晶体的边缘呈尖锐亮线,这是由于凝胶晶体与周围溶液的折射率梯度值很大,因而成像的光强值也较其它部分大。晶体周围的溶液也呈现一定亮度的光强分布,这说明凝胶晶体周围溶液的浓度不是均匀的,存在一个浓度梯度。另外,在凝胶晶

体的内部也有光强分布,这说明晶体内部物质的折射率并不唯一,这一现象对晶体内部构造的研究也将起到重要的作用。

## 4 结 论

由实验结果可以看到,暗场纹影法可以在暗场内观察样品中存在折射率梯度的部分成像,于是可以看到样品内不同折射率物质的分布状况。

### 参考文献:

- [1] Jenkins Francis A, Harvey E. White fundamentals of optics[M]. New York: McGraw-Hill, Inc, 1981.
- [2] Jin Weiqing, et al. Development of optical system for high temperature in situ observation of oxide crystal growth[J]. Ferroelectrics, 1993, 142: 13- 18.
- [3] Kleine S, van Enkevort W J P, Derix J. A dark field type Schlieren microscope for quantitative, in situ mapping of solute concentration profiles around growing crystals[J]. J. Crystal Growth, 1997, 179: 240- 248.
- [4] 张以谟. 应用光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.

## Novel measuring method of solution concentration profiles

LI Wen jiang, XU Yu xian, ZHANG Zhi li

(Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** A novel microscopic method (dark field type Schlieren method) for in situ mapping solution concentration profiles is presented in this paper. It was modified and improved by Schlieren method, and can be used to observe the variation of the solution concentration. In addition, the results obtained in the theoretical experiment, and comparisons with the results from a differential interference microscope are also provided.

**Key words:** Schlieren method; graded index; solution; concentration measurement

作者简介: 李文江(1977-), 男, 北京人, 2000年毕业于清华大学精密仪器与机械学系测量控制专业, 现在原单位攻读硕士学位, 从事测试技术研究工作, 负责国家自然科学基金课题“有机晶体”的全信号测量的部分研究工作。

徐毓娴(1941-), 女, 北京人, 清华大学精密仪器与机械学系教授。长期从事教学和科研工作, 主要研究方向为微型尺寸与形貌测量, 微传感器的应用。在各种刊物和学术会议上发表文章 30 余篇, 著作 2 部, 曾获“八五”机电部重大科技成果奖一项, 国家教委科技进步二等奖一项, 北京市科技进步三等奖一项。

由于溶液浓度与折射率之间存在固定关系, 因此观察结果也直接反映了样品内部的浓度分布状况。应用暗场纹影法, 在普通的显微镜的基础上稍作改动, 就可以实现对透明物质内浓度分布的定性观察, 简单方便, 节省费用。此外, 通过定标和数字图像处理技术后, 本方法还有能力对浓度轮廓进行定量测量, 这也是本课题今后要进行的重点工作。