

文章编号: 0258-7025(2007)01-0082-07

# 基于干涉原理和图像处理方法的 浓度变化分布测量

袁博宇<sup>1</sup>, 吴晓娟<sup>1</sup>, 陈慎豪<sup>2</sup>, 杨学耕<sup>2</sup>

(山东大学<sup>1</sup> 信息科学与工程学院, <sup>2</sup> 化学与化工学院, 山东 济南 250100)

**摘要** 利用数字全息干涉技术测量了电极过程中电极/溶液界面处溶液的浓度变化分布。以铁电极在 0.5 mol/dm<sup>3</sup> 硫酸溶液中恒电位电流振荡的活化过程为例, 测量了反应初始时刻 1.6 s 内铁电极界面处的溶液浓度变化情况。由于在全息干涉测量中引入载波条纹, 所以能够方便地应用傅里叶分析方法分析计算干涉条纹的动态变化。通过对全息干涉图像序列的分析计算得到了电极反应过程中溶液浓度变化所引起的物光相位变化, 并把相位差分布用来描述浓度变化分布。计算结果显示, 在反应进行到 1.6 s 时, 溶液浓度变化引起的物光峰值相位差为 41.2 rad, 相应的溶液折射率改变量为 0.0021。重建图像比较直观地再现了反应过程中溶液的浓度变化、扩散层厚度等信息, 从而为动态半定量分析和检测浓度变化提供了一种新的方法。

**关键词** 全息; 数字全息载波干涉; 傅里叶变换; 电极过程; 图像处理

**中图分类号** TN 247 **文献标识码** A

## Measurement of Concentration Change Distribution Based on Theory of Interference and Image Processing Methods

YUAN Bo-yu<sup>1</sup>, WU Xiao-juan<sup>1</sup>, CHEN Shen-hao<sup>2</sup>, YANG Xue-geng<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> School of Information Science and Engineering, <sup>2</sup> School of Chemistry and Chemical Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China)

**Abstract** Digital holographic interferometry was used to measure concentration change distribution of the solution at the interface of electrode/solution during electrochemical reactions. In experiment, the first 1.6 s of the activation processes of potentiostatic current oscillation on iron in 0.5 mol/dm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution was studied. With the introduction of carrier fringes in digital holographic interferometry, Fourier analysis method was used to analyze interference patterns and calculate their dynamic changes conveniently. The phase difference of object wave front, which was caused by the change of the solution's concentration during the electrochemical reaction, was calculated from interference patterns to reflect the concentration change distribution. The obtained results have shown that the maximum phase difference caused by the concentration change of the solution was 41.2 rad and the corresponding change of solution's refractive index was 0.0021 while the electrochemical reaction was at 1.6 s. The reconstructed images, which were distribution of the phase difference of object wave front, reflected the changes such as concentration distribution, diffusion layer, etc.. It provided a new method to detect and analyze dynamic concentration changes.

**Key words** holography; digital holographic carrier interferometry; Fourier transform; electrode processes; image processing

收稿日期: 2006-06-19; 收到修改稿日期: 2006-08-22

基金项目: 国家自然科学基金(20373038)和 973 计划(2006CB605004)资助项目。

作者简介: 袁博宇(1982—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学信息处理和图像处理的研究。

E-mail: yuanboyu@mail.sdu.edu.cn

导师简介: 吴晓娟(1944—), 女, 湖南安化人, 教授, 博士生导师, 研究方向为图像处理与模式识别。

E-mail: xiaojwu@sdu.edu.cn

## 1 引言

溶液浓度变化的检测和测量是化学、生物学、材料学等领域十分关注的研究课题<sup>[1~3]</sup>。在生物领域,可以利用测量细胞体内的浓度分布及其变化来分析活体细胞;在晶体生长过程中,晶体表面浓度分布变化的监测是制备高质量晶体的关键技术之一。在电化学领域,当电极发生阳极溶解、阴极沉积等电极过程时,电极/溶液界面溶液浓度发生改变,分析这种随电极反应过程的溶液浓度动态变化和溶液扩散层厚度变化对阐明电极反应机制有重要的意义。

光学测量技术为电极过程中浓度变化的研究提供了简单有效的方法。在以往的研究中,干板全息<sup>[4,5]</sup>、全息干涉<sup>[6]</sup>、数字全息<sup>[7]</sup>等技术被用来检测界面溶液浓度的变化情况。20世纪90年代以来,国内外一些学者在这个新的应用领域做了很多工作,并取得了较大进展,其中能够方便实现实时动态观测的数字全息干涉技术的应用较为广泛<sup>[6~13]</sup>。全息干涉是一种无接触的微距测量技术,由于它的无破坏性和较高的精度而被应用于物体变形测量<sup>[8,9]</sup>、浓度扩散系数测定<sup>[10,11]</sup>、溶液浓度变化检测等<sup>[6,7,12,13]</sup>。物体形变和浓度扩散系数的全息干涉方法测量,目前已经达到了定量水平并且有较高的精度<sup>[8~11]</sup>。然而,电极过程中界面处溶液浓度变化的研究,则一般通过对干涉条纹形状及其变化的观察来作定性分析<sup>[6,7]</sup>。

本文在先前工作的基础上<sup>[7]</sup>把数字全息载波干涉方法应用于电极过程中电极/溶液界面液相侧浓度变化的研究,即在数字全息干涉测量的基础上引入载波条纹,利用二维干涉图像的傅里叶分析方法处理干涉图像,定量计算了电极过程中浓度分布变化所引起的物光波前的相位差变化,并根据浓度变化将引起折射率变化而导致物光波前相位变化的原理,用相位差变化分布来描述溶液浓度变化的大小和快慢,从而实现了浓度变化的半定量分析。

## 2 实验装置

实验池的装置如图1所示,它包含一个三电极系统,工作电极为直径2 mm的纯铁电极,参比电极为饱和甘汞电极(SCE)。实验中铁电极的电极电位均相对于饱和甘汞电极的电位,对电极为铂片电极。

图2所示为全息干涉记录系统,它由一个改进的马赫-曾德尔干涉仪和图像采集系统组成。He-Ne激光器发出波长为632.8 nm的激光束,经分束

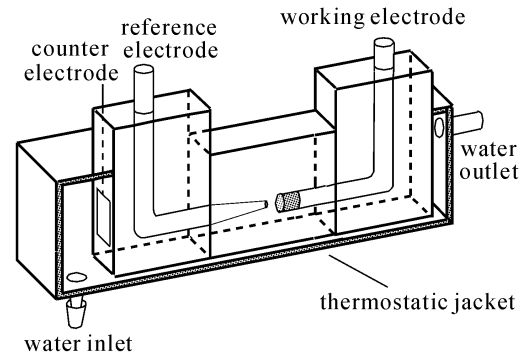


图1 电解槽示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the electrochemical cell

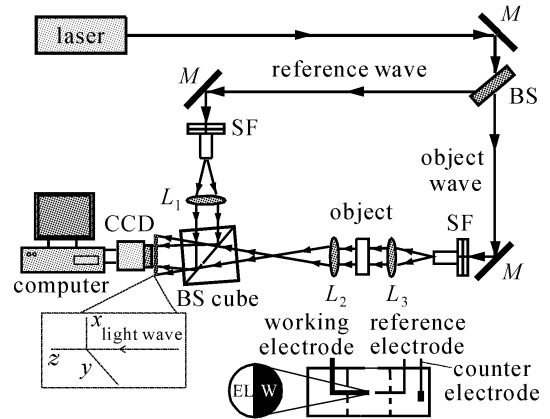


图2 全息干涉记录系统

Fig. 2 Holographic interferometry recording system

器分为两束,一束为参考光,另一束为物光。物光经处理后穿过实验池,与参考光干涉形成干涉条纹实时记录到CCD上。穿过溶液的物光记录了溶液浓度变化所引起的相位变化,而入射到电极的部分则无法通过实验池,在CCD上形成阴暗的不透光区。

## 3 测量原理

### 3.1 干涉图的获取

物光和参考光在CCD面上叠加,得到干涉条纹的光强为

$$I = |O|^2 + |R|^2 + O^*R + OR^*, \quad (1)$$

其中 $O$ 为物光复振幅, $R$ 为参考光复振幅, $*$ 为复共轭。

实验中,物光束经扩束、准直形成平面波,穿过溶液后经正透镜聚焦,再发散为球面波照射在CCD上。反应前溶液浓度均匀,物光的复振幅(略去常数相位因子)为

$$O = \frac{A_0}{r} \exp(ikr) \approx \frac{A_0}{|z|} \exp\left[\frac{ik}{2|z|}(x^2 + y^2)\right], \quad (2)$$

参考光为平面波,略去常数相位因子  $R$  可表示为

$$R = A_r, \quad (3)$$

其中  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  为激光束的波长;  $A_0$  和  $A_r$  分别为物光和参考光的振幅;  $x$  轴和  $y$  轴分别为 CCD 平面上的横轴和纵轴,  $z$  轴垂直于 CCD 平面(如图 2 所示),原点位于 CCD 平面中心。

将(2)和(3)式代入(1)式得

$$I = I_0 + 2B\cos\left\{\frac{k}{2|z|}(x^2 + y^2)\right\}, \quad (4)$$

$$\text{其中 } I_0 = \left(\frac{A_0}{z}\right)^2 + A_r^2, B = \frac{A_0 A_r}{|z|}.$$

反应开始后,溶液浓度发生变化,此时可以认为物光振幅不变,仅在相位因子上产生了一个附加相位,设改变量为  $\phi_{(x,y)}$ ,那么记录在干涉图像中的光强变为

$$I = I_0 + 2B\cos\left[\frac{k}{2|z|}(x^2 + y^2) + \phi_{(x,y)}\right], \quad (5)$$

在干涉图像上表现为浓度变化区域干涉条纹的动态变化,所以此时能通过条纹形状及其变化特点定性分析溶液浓度分布的变化。以往全息干涉技术应用用于电极过程中界面处溶液浓度场分布变化的研究,一般通过观察干涉条纹的状态<sup>[7]</sup>,观测干涉条纹形变发生的区域<sup>[6]</sup>等手段来实现的,其准确性受到限制,而且结果并不直观。

### 3.2 载波条纹的引入

由于浓度变化被“记录”到干涉图像中,所以可以从干涉图像中获得物光波前相位变化分布来描述溶液浓度变化的分布。为了便于应用傅里叶分析方法获取干涉条纹的相位分布<sup>[14~16]</sup>,在实验中引入了载波条纹。如图 3 所示,物镜的轻微平移可方便快捷地获得载波条纹。透镜  $L_2$  的纵轴( $y$  轴)方向的微调  $a$  使干涉光强变为

$$I = I_0 + 2B\cos\left\{\frac{k}{2|z|}[x^2 + (y+a)^2] + \phi_{(x,y)}\right\}. \quad (6)$$

为了后续的滤波处理,应选择合适的  $a$  值。在  $a$  允许取值范围内,如果  $a$  较小,余弦项在频域对应的

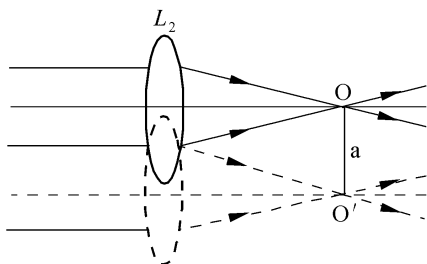


图 3 轻微移动物镜获取载波条纹

Fig. 3 Slight move of lens to obtain carrier fringes

两个旁瓣不能很好分离,将不利于有效地滤波;如果  $a$  值较大,条纹太过细密,不便于记录变化信息。而且  $a$  值的选取与物镜距 CCD 的距离也有很大关系,当距离较远时,将有较大的选择范围,本实验装置中  $a$  的大小约为 2 mm。可见载波条纹的获取方法简单,而且它的引入将使干涉图像间相位差的获取变得容易<sup>[17]</sup>。

### 3.3 干涉图像傅里叶分析

电化学反应过程中,附加相位  $\phi_{(x,y)}$  值发生着变化,设  $t_1$  和  $t_2$  时刻记录的全息图分别为

$$I_1 = I_0 + 2B\cos\left\{\frac{k}{2|z|}[x^2 + (y+a)^2] + \phi_{1(x,y)}\right\}, \quad (7)$$

$$I_2 = I_0 + 2B\cos\left\{\frac{k}{2|z|}[x^2 + (y+a)^2] + \phi_{2(x,y)}\right\}, \quad (8)$$

为了便于分析,将(7)式和(8)式表示为指数形式

$$I_1 = I_0 + B\exp\left\{i\left[\frac{k}{2|z|}[x^2 + (y+a)^2] + \phi_{1(x,y)}\right]\right\} + B\exp(-i)\left\{\frac{k}{2|z|}[x^2 + (y+a)^2] + \phi_{1(x,y)}\right\}, \quad (9)$$

$$I_2 = I_0 + B\exp\left\{i\left[\frac{k}{2|z|}[x^2 + (y+a)^2] + \phi_{2(x,y)}\right]\right\} + B\exp(-i)\left\{\frac{k}{2|z|}[x^2 + (y+a)^2] + \phi_{2(x,y)}\right\}, \quad (10)$$

经过傅里叶变换、带通滤波、傅里叶逆变换,  $I_1$  和  $I_2$  的直流分量被滤掉。由于载波条纹的引入,两指数项在频域分离并在频域可得两个旁瓣的一支,再经傅里叶逆变换可得

$$I_1^{+1} = B\exp\left\{i\left[\frac{k}{2|z|}[x^2 + (y+a)^2] + \phi_{1(x,y)}\right]\right\}, \quad (11)$$

$$I_2^{+1} = B\exp\left\{i\left[\frac{k}{2|z|}[x^2 + (y+a)^2] + \phi_{2(x,y)}\right]\right\}, \quad (12)$$

将(11)式的共轭乘以(12)式可得<sup>[18]</sup>

$$(I_1^{+1})^* I_2^{+1} = B^2 \exp\{i[\phi_{2(x,y)} - \phi_{1(x,y)}]\} = B^2 \exp[i\Delta\phi_{(x,y)}], \quad (13)$$

通过计算(13)式的相位,就可以得到  $t_1$  和  $t_2$  时刻之间的相位差分布  $\Delta\phi_{(x,y)}$ 。  $\Delta\phi_{(x,y)}$  由两幅干涉图的相位相减获得,因此该方法能有效地检测到微弱的相位变化信息,并能比较有效地抑制噪声的影响<sup>[19]</sup>。

### 3.4 浓度变化分布模型

在 CCD 平面上获得的相位差  $\Delta\phi_{(x,y)}$  可表示为

$$\Delta\phi_{(x,y)} = \frac{2\pi}{\lambda} \int [n_{(x,y,z)} - n_0] dz, \quad (14)$$

其中  $n_0$  为反应前溶液的折射率,  $n_{(x,y,z)}$  为反应过程中电解槽液相侧任意一点  $(x, y, z)$  的溶液折射率。

在电极活化溶解过程中, 如果忽略重力的影响, 由电化学反应、化学反应造成的液相侧溶液浓度的变化是垂直电极表面朝着溶液相扩散的, 可以近似认为液相侧发生二维的溶液浓度扩散<sup>[20]</sup>, 即溶液的折射率分布在  $x, y$  截面变化明显, 在  $z$  方向没有变化。于是可将电解槽近似为二维折射率场, 即电解槽  $x, y$  截面的折射率分布  $n_{(x,y)}$ 。则(14)式可简化为

$$\Delta\phi_{(x,y)} = \frac{2\pi}{\lambda} [n_{(x,y)} - n_0] L, \quad (15)$$

其中  $L$  为电解槽纵向长度。于是, 液相侧溶液相应的折射率变化分布  $\Delta n_{(x,y)}$  可由如前所得的相位差分布得到

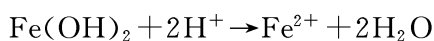
$$\Delta n_{(x,y)} = n_{(x,y)} - n_0 = \frac{\lambda}{2\pi L} \Delta\phi_{(x,y)}, \quad (16)$$

由(15)和(16)式可知, 电解槽截面的折射率分布与物光波前的相位差分布成正比例关系。根据溶液浓度与折射率的对应关系, 可由所得的相位差分布  $\Delta\phi_{(x,y)}$  分析界面处溶液浓度随反应时间的动态变化过程。

## 4 结果与分析

在实验中, 物光穿过溶液后, 可以认为物光的振幅近似不变, 而相位则记录着由于溶液浓度变化所引起的溶液光学性质即折射率的改变。溶液的折射率变大, 那么物光波前的相位将被滞后; 反之则超前。通过计算物光相位变化的分布, 可以直观再现溶液折射率的变化, 从而根据溶液折射率与其浓度的对应关系分析溶液浓度的变化。

在硫酸溶液中, 铁电极阳极极化时, 当铁电极的电位恒定在某一阳极电位时, 电流密度会出现周期性的稳定的电流振荡。实验中, 当电位恒定在 0.26 V 时, 电流随着时间的变化发生周期性的上升和下降, 这种周期性相当稳定, 电流密度变化较大。此时电极分别处于活化和钝化过程, 在电极处于活化阶段时, 电极表面发生  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  膜的溶解<sup>[7]</sup>:



造成电极/溶液界面的液相侧溶液浓度发生变化, 以及扩散层厚度发生变化。

考虑到本文的电化学实验在 0.5 mol/dm<sup>3</sup> 硫酸溶液中进行, 在电极处于活化阶段时, 电极表面发生

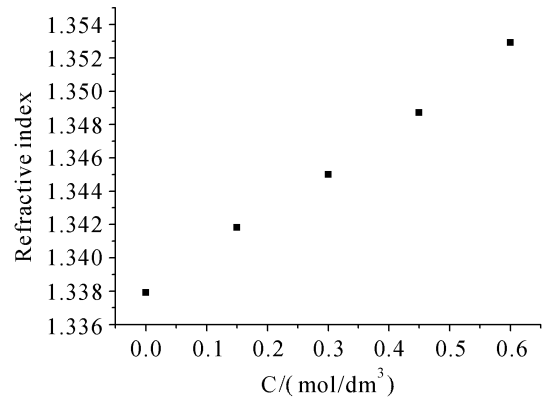


图 4 不同浓度硫酸亚铁与 0.5 mol/dm<sup>3</sup> 硫酸混合溶液所对应的折射率

Fig. 4 Refractive index of the mixed solution with 0.5 mol/dm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and different concentration FeSO<sub>4</sub>

$\text{Fe}(\text{OH})_2$  膜的溶解, 造成电极/溶液界面  $\text{Fe}^{2+}$  浓度的局部升高, 使得电极/溶液界面  $\text{FeSO}_4$  浓度升高。为模拟这个变化所产生的折射率的变化, 采用阿贝折射计(WZS-I型, 精度为小数点后四位)测得了室温下(26 °C ± 0.2 °C)硫酸亚铁和硫酸混合溶液的折射率, 如图 4 所示。硫酸亚铁的浓度分别为 0 mol/dm<sup>3</sup>, 0.15 mol/dm<sup>3</sup>, 0.30 mol/dm<sup>3</sup>, 0.45 mol/dm<sup>3</sup> 和 0.60 mol/dm<sup>3</sup>, 硫酸的浓度为 0.5 mol/dm<sup>3</sup>。可以看出, 混合溶液的折射率随着硫酸亚铁浓度的增加而变大。因此, 在铁电极处于活化阶段时, 物光波前的相位差分布发生显著变化, 是由于电极/溶液界面液相侧折射率增大的结果。这表明该区域溶液中  $\text{Fe}^{2+}$  浓度的增加。

图 5 所示是实验中 Fe 电极处于活化阶段由连续两帧全息干涉图所计算出的相位变化分布, 它是反应进行到 0.32 ~ 0.36 s 之间溶液浓度变化引起的。

图 5 中横轴  $x$  垂直于溶液/电极界面, 纵轴  $y$  平行于电极面,  $z$  轴垂直于 CCD 平面, (a) 中图像左侧大部分区域对应溶液部分, 右侧是不透光的电极。截取了 2 mm 直径柱状铁电极中心的 0.6 mm 区域加以分析观测, 并用 0 ~ 255 级的灰度变化来描述物光相位变化的大小。右侧不透光的电极区域灰度值设为常量, 表示相位差为零的区域。相位差越大, 则图像灰度变化越明显, 所对应区域的浓度变化就越剧烈。由此可以看出, 左侧溶液透光区域物光波前相位几乎不变, 溶液浓度没有变化, 而在界面附近一带区域灰度值变大(图像变白), 表明物光波前相位被滞后, 溶液折射率变大, 溶液中离子浓度变大。所以由图可以直观地看出溶液浓度的扩散区域及变化

强度。图 5(b)和(c)分别为(a)的侧视视角和立体视角图像,由(b)可以看出浓度扩散层的厚度,物光相位变化的峰值,由(c)可以观察整体浓度变化分

布。通过短间隔的相位变化分布图,可以得到溶液浓度在某一瞬态(间隔0.04 s)的变化趋势。

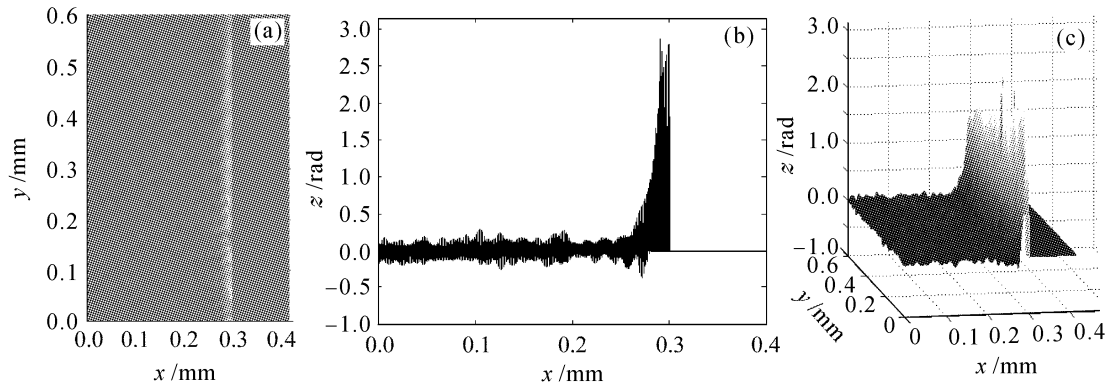


图 5 0.04 s(0.32~0.36 s)间隔的界面溶液浓度变化引起的物光相位变化分布

(a) 相位差分布在 CCD 面上的正视图;(b)  $x$  轴方向的侧视图;(c) 立体视角的相位差分布图像

Fig. 5 Phase difference distribution of object wave caused by the solution's concentration change at the interface between 0.32 s and 0.36 s in reaction

(a) phase difference distribution of CCD plane; (b) side view of (a) from  $x$ -axis; (c) three-dimensional view of (a)

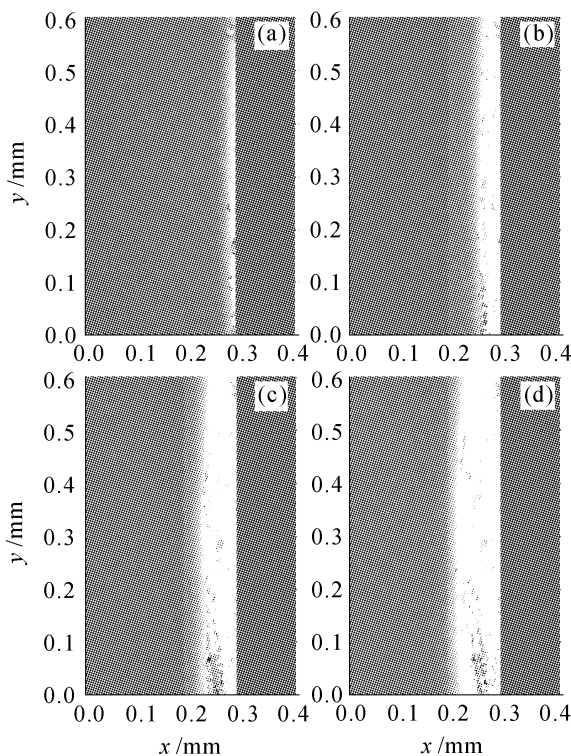


图 6 不同时刻浓度变化(相对初始浓度)引起的物光相位变化分布正视图

Fig. 6 Phase change distribution of CCD plane in different time intervals

(a) 0.4 s; (b) 0.8 s; (c) 1.2 s; (d) 1.6 s

图 6 是反应过程中不同时刻溶液浓度相对于初始时刻浓度分布变化的对比结果。反应进行之前,溶液为浓度均匀的硫酸溶液,在加电后反应进行到 0.4 s 时,溶液浓度的变化如图 6(a)所示,紧贴近界

面处有一带状区域灰度值变大,溶液中离子浓度明显增大,且从上到下分布比较均匀,在溶液侧远离界面方向灰度变化越来越不明显,浓度变化越来越小,在左侧大部分区域,溶液浓度几乎没有变化。在反应进行到 0.8 s 时,浓度变化分布如图 6(b)所示,界面处灰度变化更明显,表明浓度显著增大,并且变化的区域变大,扩散层明显变厚。当反应进行到 1.2 s (图 6(c))和 1.6 s (图 6(d))时,可以看出界面溶液浓度和扩散层厚度有了进一步的增加。然而在界面处溶液浓度变大的过程中,在电极方向( $y$ 轴方向)浓度变化比较均匀。

图 7 是分别对应图 6 的侧视图,从侧视视角可以更清晰地看到溶液浓度扩散层厚度信息,以及溶液侧距离界面各点处物光相位变化的峰值大小。可以看到相位变化超出了  $[-2\pi, 2\pi]$ ,它是连续多帧干涉图像相位差分布叠加的结果。在 0.4 s 时,扩散层厚度大约为 0.03 mm,而在 0.8 s 明显增大,约为 0.06 mm,在 1.2 s 和 1.6 s 时,分别达到 0.1 mm 和 0.12 mm 左右。物光峰值相位差也随着反应的进行不断增大,分别为 14.1 rad, 27.1 rad, 35.3 rad 和 41.2 rad。根据(15)和(16)式,计算得出各时刻相应的最大折射率改变量分别为 0.00071, 0.00136, 0.00178 和 0.00207。反应过程中,溶液内离子浓度始终呈增长趋势。图 8 是图 6 的立体视角图像,从这一视角可以观察到溶液侧界面处浓度的整体变化分布。

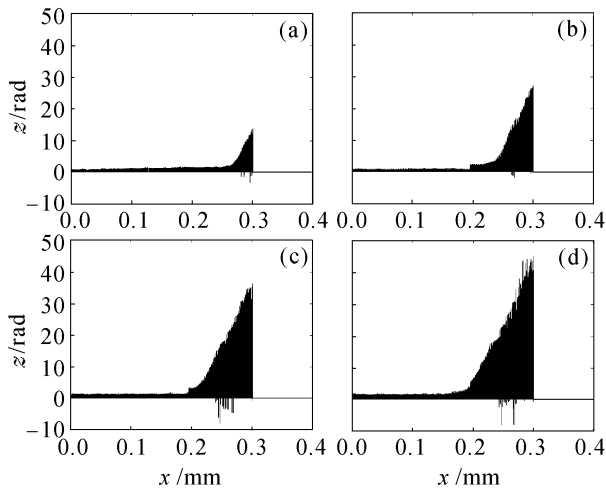


图 7 不同时刻浓度变化(相对初始浓度)引起的物光相位变化分布侧视图

Fig. 7 Side view of Fig. 6

(a) 0.4 s; (b) 0.8 s; (c) 1.2 s; (d) 1.6 s

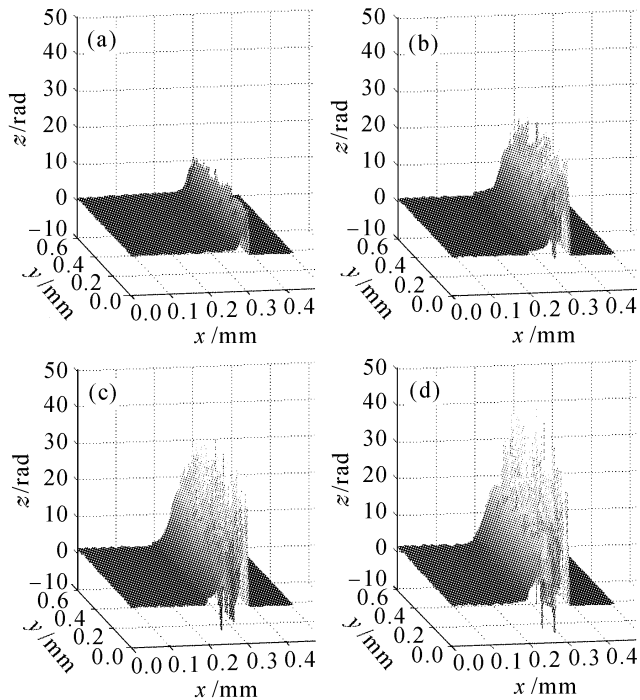


图 8 不同时刻浓度变化(相对初始浓度)引起的物光相位变化分布立体图

Fig. 8 Three-dimensional view of Fig. 6

(a) 0.4 s; (b) 0.8 s; (c) 1.2 s; (d) 1.6 s

由以上分析可知,随着反应的进行,界面处的溶液浓度始终有变大的趋势,浓度的扩散区域也越来越大,相位差的峰值变大表明界面附近的浓度持续增加,这与铁在硫酸溶液中活化阶段浓度变化相一致。通过计算所得的分布图像可以分析不同时刻溶液浓度的整体变化分布状况。

## 5 结 论

将载波条纹引入数字全息干涉测量方法,定量计算了电极过程中溶液浓度变化所引起的物光相位变化,并由相位差的分布来反映溶液浓度的变化分布,包括反应过程中的浓度变化趋势、扩散层的信息等等,多视角的分布图像使得反应中溶液浓度分布变化的信息清晰直观地再现出来。该方法提供了一种分析二维浓度分布变化的有效手段。由于噪声等因素的影响,测量的精度有待进一步提高,另外减少运算量以达到实时观测浓度变化分布将使该方法有更好的应用前景。

## 参 考 文 献

- 1 M. Ota, S. Izuo, K. Nishikawa *et al.*. Measurement of concentration boundary layer thickness development during lithium electrodeposition onto a lithium metal cathode in propylene carbonate [J]. *J. Electroanalytical Chem.*, 2003, **559**:175~183
- 2 Hongyue Sun, Michael A. Player, John Watson *et al.*. The use of digital/electronic holography for biological applications [J]. *J. Opt. A; Pure Appl. Opt.*, 2005, **7**:399~407
- 3 E. Piano, G. A. Dall'Aglio, S. Crivello *et al.*. New optical techniques for crystal growth from fluids [J]. *Mater. Chem. Phys.*, 2000, **66**:266~269
- 4 Chao Wang, Shenhao Chen, Xiling Yu. The nature of the potentiostatic current oscillations at iron/sulfuric acid solution interfaces [J]. *Electrochimica Acta*, 1994, **39**(4):577~580
- 5 Chao Wang, Shenhao Chen. Holographic microphotography study of periodic electrodisolution of iron in a magnetic field [J]. *Electrochimica Acta*, 1998, **43**(14-15):2225~2232
- 6 J. Fernández-Sempere, F. Ruiz-Beviá, R. Salcedo-Díaz. Measurements by holographic interferometry of concentration profiles in dead-end ultrafiltration of polyethylene glycol solutions [J]. *J. Membrane Sci.*, 2004, **229**:187~197
- 7 Xuegeng Yang, Shenhao Chen, Chao Wang *et al.*. In-line digital holography for the study of dynamic processes of electrochemical reaction [J]. *Electrochem. Commun.*, 2004, **6**:643~647
- 8 Feng Ying, Wu Ping, Cai Jing. Measuring direction of mechanical micro-deformation by laser holographic interferometry [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(2):248~252
- 9 冯颖,吴平,蔡静. 利用激光全息干涉法测量微小机械变形方向[J]. *中国激光*, 2006, **33**(2):248~252
- 10 Zhou Canlin, Kang Yilan. Deformation measurement by digital holography [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(2):171~173
- 11 周灿林,亢一澜. 数字全息干涉法用于变形测量[J]. *光子学报*, 2004, **33**(2):171~173
- 12 Arun Anand, Vani K. Chhaniwal, C. S. Narayanamurthy. Diffusivity studies of transparent liquid solutions by use of digital holographic interferometry [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(5):904~909
- 13 Ma Youguang, Zhu Chunying, He Mingxia *et al.*. The experimental study about the diffusivities of amino acids in aqueous solution [J]. *Laser Technology*, 2005, **29**(2):145~147
- 14 马友光,朱春英,何明霞等. 氨基酸在水溶液中扩散系数的实验研究[J]. *激光技术*, 2005, **29**(2):145~147
- 15 K. Habib, K. Muhana. Electrochemical interferometry of a

- carbon steel in 5~20 ppm KGR-134 inhibited seawater [J]. *Electrochem. Commun.*, 2002, **4**:54~61
- 13 J. Richter, A. Leuchter, N. Großer. Digital image holography for diffusion measurements in molten salts and ionic liquids-method and first results [J]. *J. Mol. Liquids*, 2003, **103-104**: 359~370
- 14 William W. Macy, Jr.. Two-dimensional fringe-pattern analysis [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(23):3898~3902
- 15 M. Takeda, H. Ina, S. Kobayashi. Fourier-transform method of fringe pattern analysis for computer-based topography and interferometry [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, **72**(1):156~160
- 16 T. Kreis. Digital holographic interference-phase measurement using the Fourier-transform method [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1986, **3**(6):847~855
- 17 Sun Ping, Li Aihua, Tao Chunxian *et al.*. Carrier modulation for large-shearing electronic speckle patterns interferometry and displacement measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3):447~451
- 孙平, 李爱华, 陶春先等. 大剪切电子散斑干涉的载频调制与位移场测量[J]. *光学学报*, 2006, **26**(3):447~451
- 18 Liu Cheng, Yan Changchun, Gao Shumei. Improved carrier-wave electric speckle interferometry [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2):214~217
- 刘诚, 阎长春, 高淑梅. 一种改进的载波电子散斑干涉处理方法[J]. *光子学报*, 2005, **34**(2):214~217
- 19 Liang Jun, Gao Hongyi, He Hong *et al.*. Measuring weak phase information based on digital holographic phase difference amplification [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4):526~530
- 梁珺, 高鸿奕, 何红等. 基于数字全息相位差放大的弱相位检测方法[J]. *中国激光*, 2006, **33**(4):526~530
- 20 Wu Haoqing, Li Yongfang. *Electrochemical Kinetics* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1998. 67~71
- 吴浩青, 李永舫. *电化学动力学* [M]. 北京: 高等教育出版社, 1998. 67~71