

薄膜生长荧光显微图像实时采集与分析系统

鄢志丹^{1,2} 孙立东² 胡春光³ 胡小唐³ Peter Zeppenfeld²

¹ 中国石油大学(华东)信息与控制工程学院, 山东 青岛 266580
² 林茨大学实验物理研究所原子与表面科学系, 奥地利 林茨 A-4040
³ 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072

摘要 设计了一套具有一定实用意义和科学价值的薄膜生长荧光显微图像实时采集与分析系统,可以实现透明衬底上有机荧光分子薄膜生长的实时原位监测。进一步阐明了系统的硬件构筑思路和软件设计架构,并依据薄膜的形貌特征,给出 8 个主要生长信息参数及其求取算法,并利用自行搭建的实验系统,针对联六苯(p-6P)分子在云母衬底上的纳米纤维生长过程,得出了其准一维的线性生长规律。该系统作为重要的薄膜生长成像监测技术,有望在薄膜与衬底表面相互作用和衬底微区结构特性研究等方面起到积极的作用。

关键词 薄膜; 荧光显微术; 成像系统; 图像处理; 薄膜生长参量

中图分类号 TH74 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.0931002

Real-Time Fluorescence Microscopic Image Acquisition and Analysis System for Thin-Film Growth Investigation

Yan Zhidan^{1,2} Sun Lidong² Hu Chunguang³ Hu Xiaotang³ Peter Zeppenfeld²

¹ College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China
² Institute für Experimentalphysik, Johannes Kepler Universität Linz, Linz, A-4040, Austria
³ State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract A real-time imaging acquisition and analysis system is designed to investigate thin film growth on transparent substrates using fluorescence microscopy. And eight growth parameters are proposed based on film growth morphological feature. Besides, using home-made experimental system, we analyze the p-6P nanofiber growth on the mica substrate dynamically, revealing the quasi-one-dimensional growth mode of the para-sexipheny (p-6P) molecules on the mica substrate. As an important imaging technique for monitoring thin film growth, the system is expected to play an active role in understanding micro-structural properties of thin film and the interactions between film and substrate.

Key words thin films; fluorescence microscopy; imaging systems; image processing; thin-film growth parameters

OCIS codes 180.2520; 110.2970; 100.4995

1 引 言

分子束外延生长^[1]的实时原位监测,即在膜的生长过程中或生长完成后能够立即检测其有关特征参数,对于薄膜生长过程和生长机理的研究具有重

要的意义。电子能谱、离子质谱、光学监测和表面成像等技术已广泛应用在薄膜与衬底间粘结的能量、元素组成、表面原子结构、薄膜厚度、光学各项异性、生长速率和生长形貌等监测之中^[2~13]。特别是可

收稿日期: 2012-03-12; 收到修改稿日期: 2012-04-14

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(11104354)、中国奥地利国际合作项目(WTZ-VII. VB. 18, 2008DFA71610)、青岛市科技发展计划项目(12-1-4-7-(5)-jch)和天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室开放课题资助课题。

作者简介: 鄢志丹(1983—),男,博士,讲师,主要从事目标检测与识别、可视化技术和现代测控技术等方面的研究。

E-mail: zhidanyan@upc.edu.cn

可视化动态监测分子薄膜生长过程的表面成像技术, 是开展薄膜生长机理和基础结构研究的重要方法。基于荧光显微术速度快、非接触无损测量、分子选择性强和高分辨率微区观测等特点, 将荧光显微术应用到表面有机分子束外延薄膜生长实时监控之中, 实现薄膜动态生长过程的视觉再现, 有助于理解有机分子薄膜生长机理以及薄膜与衬底表面的相互作用, 在有序有机薄膜电子元器件制备方面也有着积极的作用。

本文从薄膜生长可视化动态监测要求出发, 设计了薄膜生长荧光显微图像实时采集与分析系统总体结构, 深入讨论了薄膜生长图像采集与分析软件设计思路, 重点阐述了荧光图像采集子程序和薄膜生长动态监测各参数算法。同时, 实验研究了联六苯(p-6P)分子在云母衬底上的纳米纤维生长过程, 得出了其准一维的线性生长规律。

2 系统总体设计

图 1 为实验装置的示意图, 系统由 NIKON 90i (Nikon, 日本) 荧光显微镜和超高真空腔体组成, 真空腔内外的光路耦合由位于腔体上的 CF40 的蓝宝石法兰光学观测窗来实现。当光路开关打开时, 从光源发出的光, 通过荧光滤镜组 UV-1A (Nikon, 日本) 的激发滤镜后出射为一定波长范围的激发光、而后由分色镜反射到物镜中, 经聚焦后激发置于真空腔内样品台上的有机分子薄膜, 薄膜产生的荧光被同一物镜采集, 经过分色镜, 发射滤镜后被电子增益 CCD (EMCCD, Andor, 英国) 接收。EMCCD 较之于普通 CCD 增加了一个片上电子增益寄存器, 能使

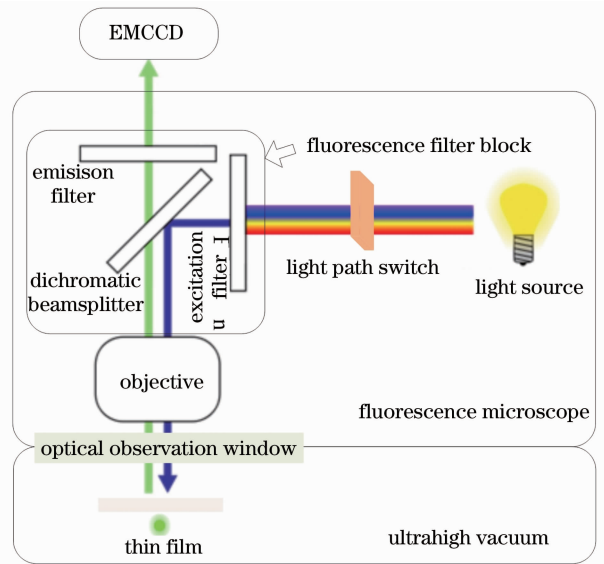


图 1 薄膜生长荧光显微成像监测系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of thin-film growth imaging monitoring system using fluorescence microscopy

电荷增加近千倍, 极大地提高了信噪比。

3 薄膜生长荧光图像采集与分析软件

3.1 软件设计架构

薄膜生长图像采集与分析应用软件基于 LabVIEW 环境开发, 其软件架构如图 2 所示。该软件可分为主体运算和实时控制两大部分, 其中主体运算部分实现各部件(如 EMCCD、荧光显微镜、图像队列等)的初始化、荧光图像采集及薄膜生长监测算法执行和程序结束时必要的关闭和复位, 而实时控制部分包括对 EMCCD、荧光显微镜和薄膜生长监测算法等的参数设置及运行控制。软件中采

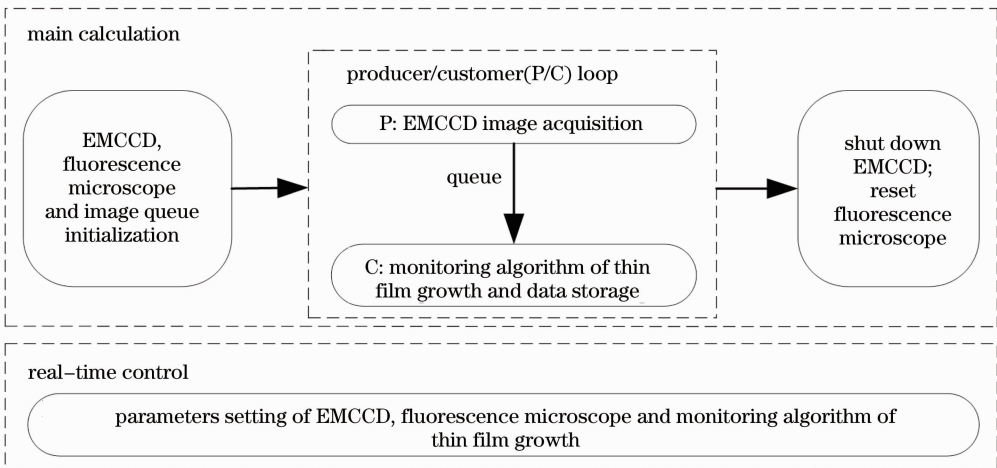


图 2 薄膜生长图像采集与分析应用软件架构

Fig. 2 Architecture of image acquisition and analysis software for monitoring thin-film growth

用 LabVIEW 中生产者/消费者(P/C)结构^[14],将 EMCCD 荧光图像采集放在生产者循环中,而把薄膜生长监测算法放在消费者循环中,并以队列的方式调用荧光图像。这样不仅可以实现图像采集和数据处理的并发执行,而且避免运算过程对图像采集所造成的干扰,有利于提高运行效率,增强实时性。

3.2 EMCCD 荧光图像采集子程

系统采用 Andor 公司的 Luca-604 EMCCD。在 LabVIEW 中,通过调用该 EMCCD 的软件开发工具包(SDK)以达到荧光图像采集与控制的目的。

图 3 为 EMCCD 荧光图像采集子程序流程图,其操作可分为 3 个部分:初始化及采集前参数设置、循环采集过程和关闭处理。初始化函数用于建立与 SDK 的连接。采集前主要完成对制冷器和风扇、电子增益、帧转移、水平和垂直读取速率、全帧采集、激发方式、采集模式、曝光时间和积累时间等一系列设置。一般而言,开启制冷器和风扇是必要的,这是因为冷却 EMCCD 可以有效降低随机暗电流噪声及热像素的活跃程度。

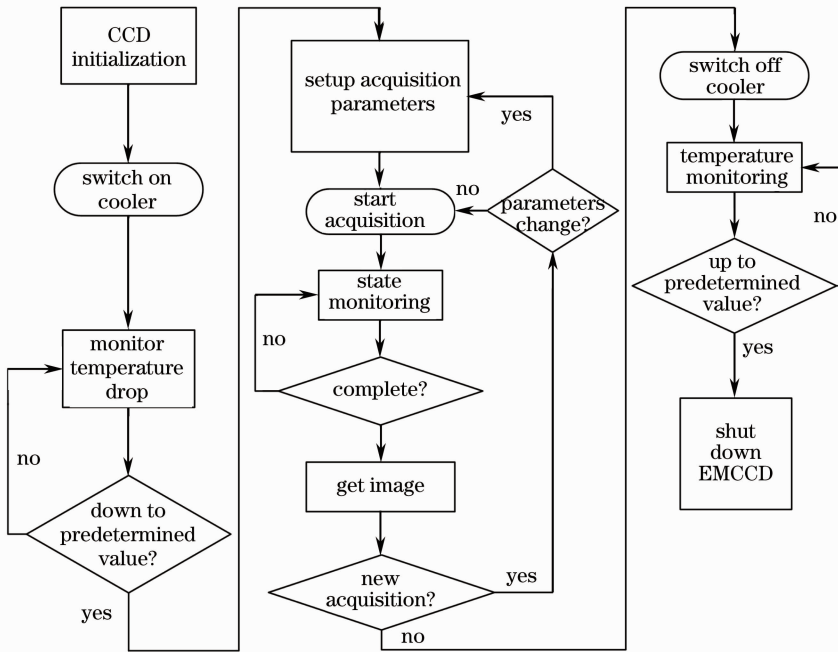


图 3 EMCCD 荧光图像采集子程序流程图

Fig. 3 Flow chart of EMCCD fluorescence image acquisition subprogram

循环采集过程是 EMCCD 工作的中心环节,主要包括开始采集、状态检测和图像信息获取。EMCCD 将依据当前设置的各种参数读取图像,当确定不继续采集图像时,必须停止制冷器和风扇,等待温度回升至设定值后,关闭 EMCCD。特别的,为保证采集过程的顺利进行,错误信息查询和处理显得非常重要。每执行一次函数,都会返回一个状态值,只有当此值等于 20002(成功执行的标志)时,后续的函数才继续执行下去,否则强制退出。

3.3 薄膜生长动态监测算法

薄膜的生长归根到底是一个表面动力学过程,集中地表现为原子在表面上的扩散、粘接、成核、生长以及岛之间的相互作用、兼并、失稳和退化等一系列的过程^[15]。薄膜生长荧光成像监测的主要目的

是探究并理解不同生长条件下薄膜的生长模式和形貌特征,包括分子簇团和岛的形貌、面积大小分布,岛的尺寸以及薄膜厚度、密度等。这时不再过多地关心沉积分子的热运动迁徙扩散特性,而是考虑表面薄膜生长的形状、面积和厚度等参数的变化,反映在荧光图像上,即是膜/岛所含像素个数及其像素值的变化。为此提出了 8 个主要生长参数,如表 1 所示。①②③用于评价薄膜的几何形貌特征;④⑤⑥⑦主要表征薄膜的生长速率;⑧则是反映薄膜生长均匀性的一个指标。通过这些计算数值,可以用来研究有机分子薄膜生长的生长模式以及形貌变化特征,以进一步指导实验,优化生长条件,尽可能地制备所需的有机分子薄膜生长结构。

表 1 生长参数及其表征的薄膜生长特性

Table 1 Growth parameters and corresponding thin film growth characteristics

Index	Growth parameters	Corresponding thin film growth characteristics
①	Island edge	Growth geometric characteristics
②	Island growth area	
③	Island growth size (length and width)	
④	Total fluorescence intensity	Growth velocity
⑤	Average fluorescence intensity per pixel	
⑥	Maximum fluorescence intensity per pixel	
⑦	Minimum fluorescence intensity per pixel	
⑧	Standard deviation of fluorescence intensity	Growth uniformity

该薄膜生长荧光显微系统的研究对象是薄膜生长荧光图像,本小节以云母衬底表面生长的 p-6P 分子纳米纤维岛状结构(如图 4 所示)为例,通过处理所采集的荧光图像区域内像素值数据,可得到多达八种生长信息参数,下面分别对其计算方法进行讨论。

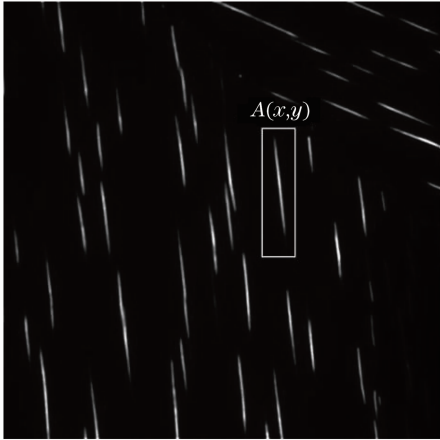


图 4 p-6P 分子纳米纤维岛状结构及某一区域选择

Fig. 4 Structure of p-6P nanofibers island and a region selection

岛的生长边缘提取是获取其他生长参数的基础。对于衬底上外延生长而成的岛状结构而言,封闭性是其生长边缘的重要特征。考虑到分子沉积的连续性以及荧光显微镜本身光学分辨力的限制和有限景深带来的模糊聚焦,区域内生长的岛边缘并不是亮度变化明显的阶梯边缘,而是渐变的模糊边缘,因此应采用合理阈值 T_h 提取出岛边缘轮廓,确定岛的生长范围。

1) 岛边缘轮廓

设某一选定区域的图像数据为 $A(x, y)$,从计算的便利性考虑,该图像区域仅包含一个完整岛状结构,如图 5 所示。为了能有效地去除 CCD 噪声,同时尽可能地保留图像边缘细节,对 $A(x, y)$ 进行中值滤波,得到 $A'(x, y)$,即

$$A'(x, y) = \text{median}(A, w), \quad (1)$$

式中 w 为中值滤波窗口宽度,一般大小为 3×3 。中值滤波是一种非线性的图像平滑算法,它能在抑制随机脉冲干扰噪声的同时有效地保护图像边缘,增强图像对比度。滤波后,利用已选取阈值 T_h ,提取 $A'(x, y)$ 图像中的纳米纤维岛状结构轮廓,如图 5 所示。

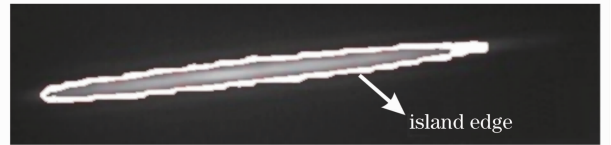


图 5 岛边缘提取

Fig. 5 Island edge extraction

2) 生长面积

令 $A'(x, y)$ 图像中的岛生长面积为 A_{growth} ,则有

$$A_{\text{growth}} = N_T \{A'(x, y) \geq T_h\}. \quad (2)$$

计算结果为区域内高于设定光强阈值的像素个数,依据显微系统的分辨率,可进一步求出其实际面积。

3) 生长尺寸

首先利用已选取阈值 T_h ,对图像 $A'(x, y)$ 进行二值化处理,得到 $B(x, y)$,其中数值为 1(或 255)的像素构成的区域即为岛状结构区。该区域中必然存在一条连接某两点的最长直线段,该直线段长度就是岛的生长长度,记作 L_{growth} ;而与 L_{growth} 垂直方向上的最长直线段为岛的生长宽度,记作 W_{growth} 。

如图 6 所示,为便于计算 L_{growth} ,可将 $B(x, y)$ 旋转使得岛的长度方向与图像 x (横向)或 y 轴(纵向)平行,则 x 或 y 方向的像素坐标差为

$$L_{\text{growth}} = x_{\text{max}} - x_{\text{min}}, \quad (3)$$

式中 x_{max} 、 x_{min} 分别为 x 方向上的最大和最小像素坐标。同样可求出相对应的 W_{growth} 值。其计算结果均

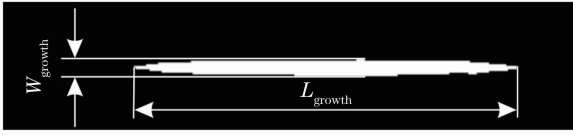


图6 p-6P分子纳米纤维岛状结构尺寸

Fig. 6 Dimension of p-6P nanofiber island structure

为像素横向或纵向尺寸的整数倍,依据显微系统的分辨率,可进一步求出其实际尺寸。

4) 其他生长参数算法

第④~⑧生长参数的计算均基于 A' 区域中像素灰度值变化,分别如下:

分子荧光总强度,记作 I_{total} :

$$I_{total} = \sum A'(x, y). \quad (4)$$

计算结果为区域内所有像素的灰度值之和。

单位像素分子荧光平均强度,记作 \bar{I} :

$$\bar{I} = \overline{A'(x, y)} = I_{total}/A_N. \quad (5)$$

计算结果为区域内所有像素的平均灰度值。

单位像素分子荧光最大强度,记作 I_{max} :

$$I_{max} = \text{Max}\{A'(x, y)\}. \quad (6)$$

计算结果为区域内某一像素的最大灰度值。

单位像素分子荧光最小强度,记作 I_{min} :

$$I_{min} = \text{Min}\{A'(x, y)\}. \quad (7)$$

计算结果为区域内某一像素的最小灰度值。

单位像素的分子荧光强度标准差 I_{Δ} :

$$I_{\Delta} = \left\{ \frac{\sum \{A'(x, y) - I_{ave}\} \cdot 2}{N} \right\}^{1/2}. \quad (8)$$

计算结果为区域内的所有像素灰度值的标准差,(8)式中,“ \cdot ”表示对区域内每个像素的操作。

在软件中,依据衬底表面上不同区域的分子生长情况,结合 NI-Vision 模块的相关功能,可设置多达 8 个感兴趣区监测不同位置的生长数据。

4 薄膜生长荧光成像监测实验

荧光显微镜在衬底/样品内表面上的精确聚焦是采集荧光图像的前提条件。由于在制备云母衬底时,或多或少会在表面留下层间裂痕,也可称之为台阶;一方面这些裂痕使得表面变得不平整,不利于大面积分子生长,另一方面却为正确找到分子的生长表面提供了线索。为了能聚焦到衬底/样品内表面上,首先使用全光谱反射式的光学镜片组对衬底成像,在此位置前后精细聚焦,可找到衬底的上下两个表面,如图 7 所示。确定下表面后,紧固显微镜调焦旋钮,而后可微动 x - y 平台,寻找相对平坦的观察区

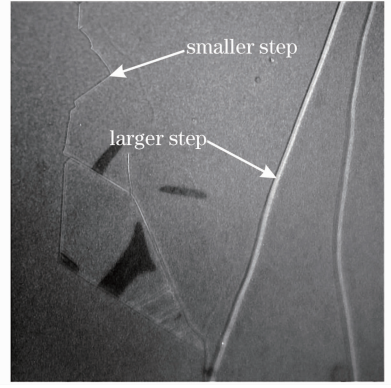


图7 某一云母衬底的形貌图

Fig. 7 Morphological image of a mica substrate

域,选择相应的荧光滤镜组后,即可进行荧光观测。

如图 8 为一次超高真空环境中实时监测云母衬底上 p-6P 分子生长实验的部分形貌图。实验中,设定衬底温度和分子蒸发源温度分别为 450 K 和 503 K,采用 UV-1A 荧光滤镜组,50 \times 物镜(数值孔径为 0.55),蒸发持续时间 125 min,CCD 曝光时间 0.5 s,每幅图像采样间隔 30 s,观测范围 160 m \times 160 m,计算得知系统光学分辨率 465 nm,每个像素所表示的物空间真实值约 160 nm \times 160 nm。

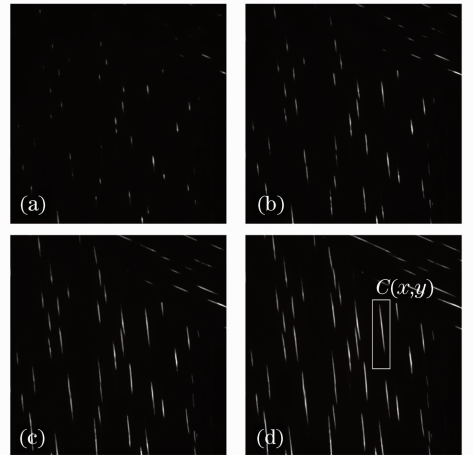


图8 云母衬底上 p-6P 分子的动态生长过程

Fig. 8 Dynamic growth process of p-6P on mica

图 8(a)为实验开始后第 72 min 的采集图像,图 8(a)~(d)间隔时间为 12 min。从图 8 中可以看出, p-6P 分子沿着云母表面特定的晶体构造方向生长成一个细长型的纳米纤维结构,其形成有先有后,这可能与衬底表面形貌结构有关,比如存在较强应力和缺陷的地方,会最先出现。为了详细描述 p-6P 分子纳米纤维的动态生长过程,针对图 8(a)~(d)对应的 $C(x, y)$ 中 p-6P 分子纳米纤维,结合前面提出的八个生长信息参数,计算得出一些生长数据,如表 2 所示。

表 2 图 8(a)~(d)对应的 $C(x,y)$ 中 p-6P 分子纳米纤维生长信息参数Table 2 Growth parameters of p-6P molecular nano-fiber corresponding to $C(x,y)$ area in Figs. 8(a)~(b)

Growth parameter	$C(x,y)$ area			
	Fig.8(a)	Fig.8(b)	Fig.8(c)	Fig.8(d)
Island edge				
Island growth area / μm^2	0.256	2.714	11.11	21.86
Island growth size (length and width) / μm	0.96 and 0.32	4.32 and 0.64	13.6 and 0.96	23.2 and 1.12
Total fluorescence intensity	86511328 pixel value	106061368 pixel value	122472048 pixel value	185733040 pixel value
Average fluorescence intensity per pixel	2569 pixel value	3149 pixel value	3637 pixel value	5516 pixel value
Maximum fluorescence intensity per pixel	8532 pixel value	9809 pixel value	10493 pixel value	13231 pixel value
Minimum fluorescence intensity per pixel	2246 pixel value	2649 pixel value	2991 pixel value	4842 pixel value
Standard deviation of fluorescence intensity	317 pixel value	945 pixel value	1586 pixel value	22179 pixel value

结合图 8 和表 2,初步可以得到了一些有意义的结论:1) 纳米纤维结构为 p-6P 分子高聚集体,对不断飞入的临近 p-6P 分子具有很强的吸附能力和聚合作用;2) 纳米纤维的生长面积、分子荧光总强度、单位像素分子荧光平均强度、单位像素分子荧光最大强度和单位像素分子荧光最小强度在薄膜生长过程中,随生长时间成线性增长,可以有效表征薄膜的生长速率,但不同纳米纤维具有不同的增长斜率;3) 单位像素分子荧光强度标准差能够反映出薄膜生长均匀性特征,其值越大,表明薄膜均匀性越差;4) p-6P 分子纳米纤维的纵向(沿云母晶体构造方向)长度生长速率远大于横向(与纵向相垂直的方向)宽度生长速率,其最终纵向生长长度尺寸远远大于横向生长宽度尺寸,如图 8(d)中的 p-6P 纳米纤维的纵横尺寸比达到 20.7,呈准一维线性生长。

5 结 论

基于荧光图像的分子束外延生长实时原位监测,提供了一种重要的开展薄膜生长模式、生长机理和基础结构实验研究方法。本文设计的薄膜生长荧光显微图像实时采集与分析系统,能够实现薄膜生长荧光显微成像监测,能够分析多达 8 个感兴趣区内的 8 个生长参数数据,有助于进一步探索衬底微区结构特性以及薄膜与衬底表面的相互作用等。同时,作为重要的薄膜生长实时原位荧光监测平台,该系统可无缝集成更多的图像分析理论和生长信息提取算法,以深度提高其薄膜生长实验研究的性能和功能。此外,由于分子荧光的特有发射机理,高灵敏

度和高空间分辨率的特点,该系统使得在低于光学衍射极限范围内进行单分子/微粒的动力学特性研究成为可能^[16]。

参 考 文 献

- 1 A. Borghesi, D. Besana, A. Sassella. Epitaxial growth of quaterthiophene thin films by organic molecular beam deposition [J]. *Vacuum*, 2001, **61**(2): 193~197
- 2 M. Hohage, L. Sun, P. Zeppenfeld. Reflectance difference spectroscopy — a powerful tool to study adsorption and growth [J]. *Appl. Phys. A: Materials Science & Processing*, 2005, **80**(5): 1005~1010
- 3 J. Götzen, D. Käfer, C. Wöll *et al.*. Growth and structure of pentacene films on graphite: weak adhesion as a key for epitaxial film growth [J]. *Phys. Rev. B*, 2010, **81**(8): 085440
- 4 C. Toccafondi, M. Prato, G. Maidecchi *et al.*. Optical properties of yeast cytochrome c monolayer on gold: an in-situ spectroscopic ellipsometry investigation [J]. *J. Colloid and Interface Science*, 2011, **364**(1): 125~132
- 5 S. Tan, Y. Ji, Y. Zhao *et al.*. Molecular oxygen adsorption behaviors on the Rutile $\text{TiO}_2(110)-1\times 1$ surface: an in situ study with low-temperature scanning tunneling microscopy [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2011, **133**(6): 2002~2009
- 6 Q. Simon, V. Bouquet, V. Demange *et al.*. Mg diffusion in $\text{K}(\text{Ta}_{0.65}\text{Nb}_{0.35})\text{O}_3$ thin films grown on MgO evidenced by Auger electron spectroscopy investigation [J]. *Appl. Surface Sci.*, 2011, **257**(22): 9485~9489
- 7 R. Takahashi, H. Handa, S. Abe *et al.*. Low-energy-electron-diffraction and X-ray-photoclectron-spectroscopy studies of graphitization of 3C-SiC (111) thin film on Si (111) substrate [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2011, **50**(7): 070103
- 8 C. Awada, G. Barbillon, F. Charra *et al.*. Experimental study of hot spots in gold/glass nanocomposite films by photoemission electron microscopy [J]. *Phys. Rev. B*, 2012, **85**(4): 045438
- 9 Liu Yunyan, Cheng Chuanfu, Song Hongsheng *et al.*. Morphology analysis of ZnO:Ga thin films deposited by pulsed laser deposition [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0131003
刘云燕, 程传福, 宋洪胜等. 激光溅射沉积制备的 ZnO:Ga 薄膜表面形貌分析[J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 0131003
- 10 Zhang Kui, Geng Yongyou, Wu Yiqun *et al.*. Dependence of

- optical properties on thickness of Sb_2Te_3 film [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(12): 1231001
- 张奎, 耿永友, 吴谊群等. 膜厚对 Sb_2Te_3 薄膜光学性质的影响[J]. 光学学报, 2011, **31**(12): 1231001
- 11 Zhang Rongjun, Lu Weijie, Cai Qingyuan. Study on ellipsometric spectra of silicon nanocrystals [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 1891~1894
- 张荣君, 陆卫杰, 蔡清元等. 硅纳米晶的椭圆偏振光谱研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(7): 1891~1894
- 12 Zhu Jie, Xie Kang, Zhang Hui *et al.*. Influence of deposition temperature on growth orientation of PZT/LSAT thin film [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(9): 1384~1387
- 朱杰, 谢康, 张辉等. 脉冲激光沉积技术沉积温度对 PZT/LSAT 薄膜生长取向的影响[J]. 中国激光, 2008, **35**(9): 1384~1387
- 13 Li Hongjing, Ma Chunyu, Li Shuai *et al.*. Effects of deposition temperature on the growth behavior and optical properties N-doped Cu_2O films [J]. *J. Functional Materials*, 2011, **42**(10): 1881~1885
- 李洪婧, 马春雨, 李帅等. 沉积温度对 N 掺杂 Cu_2O 薄膜生长及光学特性的影响[J]. 功能材料, 2011, **42**(10): 1881~1885
- 14 Yan Zhidan, Sun Lidong, Li Yanning *et al.*. Real-time single particle tracking system based on LabVIEW [J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2010, **31**(6): 1352~1357
- 鄢志丹, 孙立东, 李艳宁等. 基于虚拟仪器的实时单微粒跟踪系统设计[J]. 仪器仪表学报, 2010, **31**(6): 1352~1357
- 15 Wang Enge. Atomic-scale study of kinetics in film growth (I) [J]. *Progress in Physics*, 2003, **23**(1): 1~61
- 王恩哥. 薄膜生长中的表面动力学(I)[J]. 物理学进展, 2003, **23**(1): 1~61
- 16 Yan Zhidan, Sun Lidong, Li Yanning *et al.*. A high-accuracy and fast method for tracking fluorescent single molecules [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 1994~2000
- 鄢志丹, 孙立东, 李艳宁等. 一种荧光单分子高精度快速跟踪方法的研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(7): 1994~2000

栏目编辑：韩峰