

文章编号: 0258-7025(2010)05-1245-08

利用光镊系统制作微型器件

彭飞^{1,2} 姚保利¹ 雷铭¹ 严绍辉¹ 赵卫¹

(¹ 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119)

² 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 光镊作为操纵微小物体的有力工具,通常用来捕获微小物体并控制其运动。利用光镊激光焦点处高度集中的热能量以及光镊的搬作用,可以精确控制溶液中析出晶体的形状及控制沉淀反应中沉淀颗粒的排列方式,以此可作为制作微型器件的一种手段。分别采用激光诱导快速结晶法和激光辅助沉淀法,制作了以硫酸铜和碳酸钙为基质材料的微型器件。研究了影响晶体析出速度的不同因素,探讨了适于辅助沉淀法生长器件的沉淀反应的类型。相比之下,结晶法生长器件效率高,而沉淀法制作的器件稳定性高。所建立的实验装置和方法拓宽了光镊的应用领域,提供了精细制作微型器件的一种新方法。

关键词 光学制造;微型器件;光镊;结晶;沉淀

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL20103705.1245

Fabrication of Micro Devices by Use of Optical Tweezers

Peng Fei^{1,2} Yao Baoli¹ Lei Ming¹ Yan Shaohui¹ Zhao Wei¹

¹ State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China

² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Optical tweezers, as a powerful tool of manipulation of micro-objects, is commonly used for trapping micro-objects and controlling their movement. Making use of the highly focused heat energy at the laser focus and the transportation ability of the optical tweezers, the process of crystallization, the shape of crystal separating out from solution, and the arrangement mode of the deposition from precipitation reaction can be controlled precisely, which may be used as a means of making micro devices. The laser-induced crystallization method and the laser-assisted precipitation method are used to make micro devices with the copper sulfate and the calcium carbonate as the based materials, respectively. Different factors influencing grow speed of crystals are investigated. The condition of precipitation reaction fitting to the laser-assisted precipitation method is discussed. By comparing, the method of laser-induced crystallization works more efficiently, while the method of laser-assisted precipitation can produce more stable devices. The experimental equipment and the proposed methods not only spread the application domain of optical tweezers but also provide a new way for fabrication of micro devices.

Key words optical fabrication; micro device; optical tweezers; crystallization; precipitation

1 引言

光镊是基于光与物质间相互传递动量的力学效应发展起来的一种对微尺度材料进行操作的新技术。自从 1986 诞生以来^[1],光镊已在生物、物理和

化学等众多领域被广泛应用。在对微米和亚微米量级粒子的操作上,光镊技术有着传统微操纵技术无可比拟的优点:对粒子无机械接触式损伤及污染、三维精确定位、可测量施加力的大小、不干扰粒子周围

收稿日期: 2009-08-12; 收到修改稿日期: 2009-09-30

基金项目: 国家自然科学基金(10874240)资助课题。

作者简介: 彭飞(1983—),男,博士研究生,主要从事光学微操纵方面的研究。E-mail: pengfei@opt.ac.cn

导师简介: 姚保利(1968—),男,博士,研究员,主要从事光学微操纵、全息和光存储等方面的研究。

E-mail: yaobl@opt.ac.cn(通信联系人)

环境等^[2]。近年来,随着光镊技术的蓬勃发展,光镊的应用方向日益多样化。作为操纵微小物体的有利工具,光镊通常用来捕获单个活细胞,在细胞内操纵细胞器、微粒分选^[3,4]、染色体转染^[5]、细胞微手术^[6]、探测细胞及分子电动机的动力学特性^[7]、观测蛋白质的步进和折叠^[8,9]、对微粒进行旋转^[10~12]和研究分散体系等^[13,14]。光镊的应用范围多限于对事先制作好的微粒进行操纵,很少用在制作微粒这个环节上。光镊无接触地操纵微粒是依靠激光与物质进行动量的交换,光与物质同时进行能量的传递通常被忽略掉。光镊焦点处剧烈变化的光强分布梯度除了提供对介质微粒的梯度力,还有可能使溶液介质因局部高度受热而析出溶质。这为制作微粒提供了重要的方法。本文利用光镊焦点对溶液的局部热效应,设计了一套利用光镊系统制作微型器件的方法。根据光镊捕获搬运的能力,还设计了另外一种制备微型器件的方案,利用光镊捕获并排列微小颗粒,使其堆砌成所需要器件的形状,然后把把这些小颗粒融合在一起。实验在沉淀反应的环境中进行,堆砌所需要的微小颗粒由沉淀反应中产生的沉淀颗粒提供,相互紧挨的沉淀颗粒在沉淀反应中不断长大而相互融合在一起。

2 实验原理

激光快速诱导结晶法利用激光焦点的热效应,对样品溶液进行局部加热,导致焦点处溶液快速结晶产生固态器件。激光束进入光镊装置,扩束后经过物镜强烈地会聚在溶液中。焦点处的区域对激光能量充分吸收,把光能转化成自身的内能,迅速产生大量的热量,无法及时地传出去,导致焦点处温度迅速上升,水分大量蒸发,周围水分又不能及时补充,溶液浓度增加,达到饱和,析出晶体。如果整个过程进行得很快,水分迅速蒸发析出晶体,那么可以近似地把研究对象看成是以焦点为中心体积为 V 的一个溶液球体,这个焦点球与外界交换热量和质量。假设焦点球的水分蒸发速度为 v_1 ,周围水分由于浓度差向焦点球的扩散速度为 v_2 ,那么焦点球的浓度随时间的变化可以表示为

$$M(t) = \frac{V\rho_0 M_0}{V\rho_0 - m(t)}, \quad (1)$$

式中 M_0 和 ρ_0 分别为溶液的初始浓度和密度, $m(t)$ 为焦点球水分减少的质量,可表示为

$$m(t) = \int_0^t (v_1 - v_2) d\tau. \quad (2)$$

可以看出焦点球的浓度随着时间而增加。令 $M(t_s) = M_c$, 其中 M_c 为临界饱和浓度,那么可以根据

$$\int_0^{t_s} (v_1 - v_2) d\tau = V\rho_0 \left(1 - \frac{M_0}{M_c}\right) \quad (3)$$

解出 t_s 。 t_s 即是从激光开始照射到晶体开始析出所需要的时间,定义为预热时间。由(3)式可以看出, t_s 与焦点球的水分蒸发速度 v_1 和周围水分向焦点球的扩散速度 v_2 有关。其中 v_1 与激光照射功率、焦点球对激光的吸收系数、与周围环境热交换的速度、温度以及影响蒸发通畅的空间几何结构等因素有关, v_2 与焦点球及周围溶液的浓度差、温度以及影响扩散供水速度的空间几何结构等因素有关。

激光辅助沉淀法利用光镊对沉淀颗粒的搬作用,把沉淀颗粒按照器件的结构排列起来,在沉淀反应中稳定生长在一起。沉淀反应中沉淀颗粒从溶液中各个地方产生,并且从小到大不断生长。沉淀颗粒可以被激光光镊捕获,并搬运到合适的位置,按照设计的形状紧密地排列在一起。随着沉淀反应的进行,溶液中的沉淀分子不断地附着在沉淀颗粒表面,沉淀颗粒继续长大,紧挨的沉淀颗粒就会逐渐相互融合起来,牢牢地固定在一起。

本文利用上述两种原理,分别用激光诱导快速结晶以及激光辅助沉淀生长两种方法,在同一套激光光镊系统下实现了微型器件的制作。

3 实验与结果

3.1 实验装置

图1是利用激光诱导快速结晶及激光辅助沉淀生长这两种方法进行微型器件制作的光镊系统结构

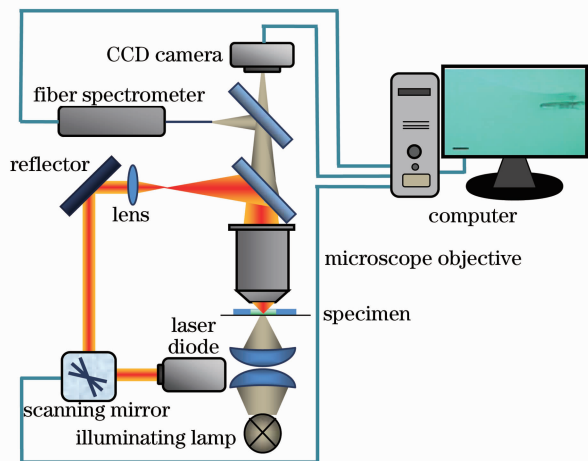


图1 制备微型器件的光镊系统结构示意图
Fig. 1 Optical tweezers setup for making micro devices

示意图。激光从半导体激光器中发出后,经过扫描振镜反射和扩束镜的扩束,通过单波长反射镜耦合进显微镜。由于制作的微型器件需要一个稳定的基底来固定,所以实验中采用正置显微镜搭建的光镊,这种光镊可以把微粒捕获并按压在溶液底面,当撤去激光的时候微粒也会因为重力作用而稳定在基底上。光镊光源是波长为 650 nm 的半导体激光器,输出功率为 80 mW。激光经过扫描振镜 X 轴和 Y 轴反射镜的两次反射,然后通过凸透镜发散,耦合进正置显微镜。在激光辅助沉淀生长的实验中,需要在加入反应溶液的时候对溶液进行实时观察,所以在物镜和样品溶液之间要留有一定的工作空间进行样品溶液的添加,不能选用 100× 的油浸物镜。实验中用到的显微物镜倍数和数值孔径分别为:10×/NA=0.25,25×/NA=0.40,40×/NA=0.65,这几种不同倍率物镜的工作距离既可以满足实验要求,也可以制作不同尺度范围的微型器件。样品经照明光照射后通过物镜成像到 CCD 光敏面上,经视频采集卡在计算机上显示和记录。光纤光谱仪可以用来测量激光作用微区域的吸收光谱。

3.2 激光诱导快速结晶法

结晶法采用不同浓度的硫酸铜溶液作为器件生长的基质材料。实验前把硫酸铜晶体用纯净水按一定的比例充分溶解,静置一段时间后,用注射器吸取几滴溶液缓慢滴入载波片上,使其充分延展,在载波片上摊开成薄薄一层。薄液层的四周和上表面一般

不采取遮盖,与空气直接接触,保持水分蒸发顺畅。样品配置完成后立即放置到显微镜载物台上进行实验,防止时间久了水分自然蒸发导致样品溶液的浓度失真。实验时,调节整载物台 XY 位置,通过 CCD 实时观察,定位到样品合适的位置,然后打开激光器,把激光会聚在样品溶液中。实验中采用两种方法使激光焦点与样品产生相对位移:一种是激光不动,移动载物台;另一种是载物台不动,利用扫描振镜移动激光束。

激光刚开始照射在样品溶液中时,溶液没有明显的反应,几秒钟后激光焦点处开始产生小气泡向外翻腾,气泡随着时间越来越多,达到一定程度时焦点处开始析出晶体,如图 2(a)所示。从开始照射到开始析出晶体这段时间就是预热时间。经过预热时间后,移动载物台让激光焦点以 $27.5 \mu\text{m/s}$ 的速度开始水平向右移动,晶体沿着激光焦点运动的方向源源不断地生长出来,在焦点运动的轨迹上长出一个晶条。实验中发现晶体的析出对于方向并没有明显的选择性,只是跟随激光移动的方向生长,如图 2(b)所示。因此可以通过控制激光焦点的运动路径来间接控制晶体的生长方向,生长出一些复杂的微型器件。图 3 给出了利用这种方法制作的几种微型器件:“中”字形,“F”形,五边形以及相互嵌套的三个五边形。这些微型器件有可能作为光传输的微型波导,或搭建更为复杂器件的构件,或作为微纳技术的工具。

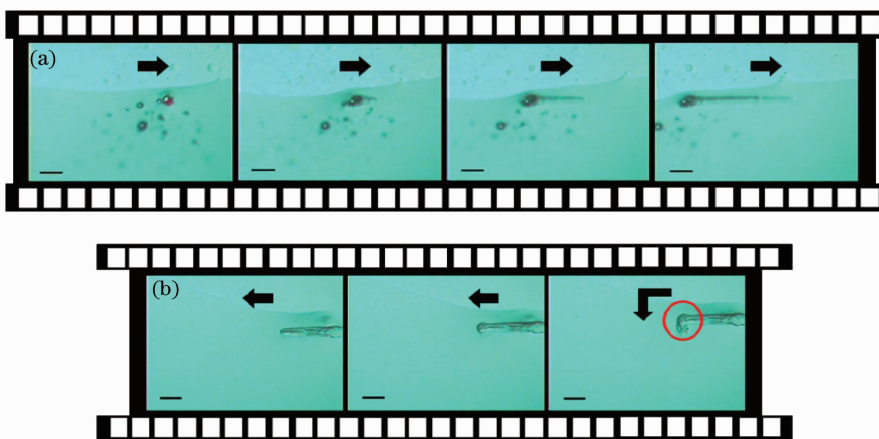


图 2 利用光镊系统生长出来的硫酸铜晶体。(a) 析出棒状晶体,照片时间间隔为 3 s;

(b) 棒状晶体向左拐弯,照片时间间隔为 2 s。刻度尺为 $50 \mu\text{m}$,物镜倍率 10×

Fig. 2 Copper sulfate crystal grown by optical tweezers. (a) bar-shape crystal being generated with frame interval of 3 s; (b) bending left of bar-shape crystal with frame interval of 2 s. Scale bars represent $50 \mu\text{m}$ imaged by 10× objective

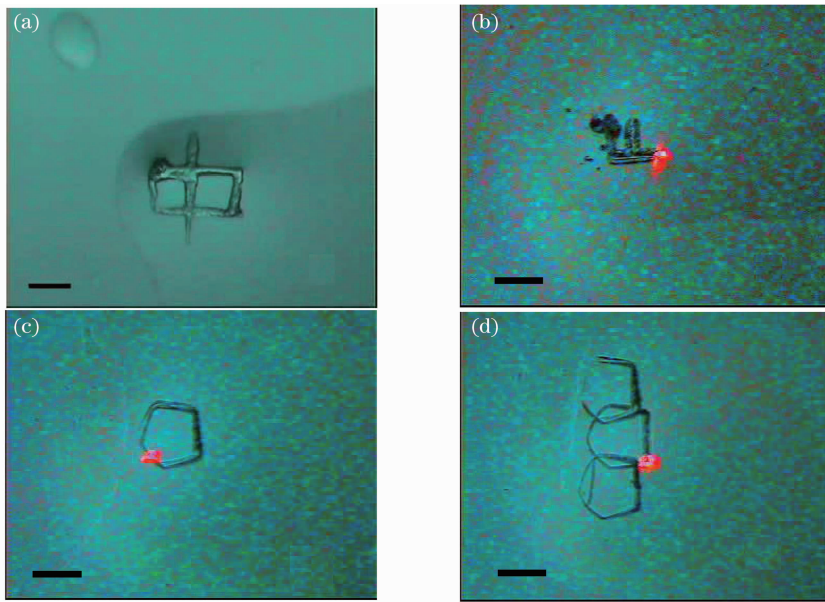


图3 利用光镊系统生长出来的硫酸铜晶体。(a)采用移动载物台法生长出来的“中”字;(b~d)采用扫描振镜控制晶体生长路径,分别生长“F”形,五边形和三个互相嵌套的五边形。刻度尺为 $20\ \mu\text{m}$,物镜倍率 $25\times$

Fig. 3 Copper sulfate crystal grown by optical tweezers. (a) device with shape like “中” generated by moving the sample stage; (b~d) devices with shape like “F”, pentagon and three connected pentagons generated by controlling the scanning mirror. Scale bars represent $20\ \mu\text{m}$ imaged by $25\times$ objective

晶体开始析出之前所需要的预热时间是影响器件生产效率的重要因素。根据理论分析,预热时间 t_s 由焦点球内的水分蒸发速度 v_1 与周围水分向焦点球的扩散速度 v_2 决定,而这两个速度与激光照射功率、焦点球的吸收系数、与周围环境热交换的速度、蒸发所需空间的通畅性、浓度差、温度等因素有关。有必要从实验方面去研究这些关系。

首先研究吸收系数与预热时间的关系。控制硫酸铜晶体与纯净水的比例,配置质量分数分别为6%,7%和8%的样品溶液,并测量了它们的吸收光谱,如图4(a)所示。从图中可以看出浓度越高的样品对650 nm的激光吸收效率越高。实验测定了这3种不同浓度样品的预热时间,结果如图5所示。横坐标

表示在同一个样品中进行的第1,2,3,4和5次测量,每次测量间隔时间为1 s,纵坐标是预热时间。对于同一个样品,进行测量的次数越多,预热时间就越短。这是因为样品溶液在空气中暴露得越久,进行激光照射的时间越长,水分不断蒸发,溶液浓度逐渐增加,导致预热时间减少。对于不同样品的同一次测量,浓度高的样品所需的预热时间短。因此,样品对激光吸收率越高,所需要的预热时间越短。另外,实验中还配置了相同浓度硫酸铜溶液和氯化铁溶液,它们的吸收光谱见图4(b),氯化铁的吸收波段远离650 nm,吸收系数远远低于硫酸铜溶液。实验中对氯化铁溶液照射了30 min,没有任何晶体析出,在相同的照射情况下,硫酸铜溶液在1 min内析出晶体。

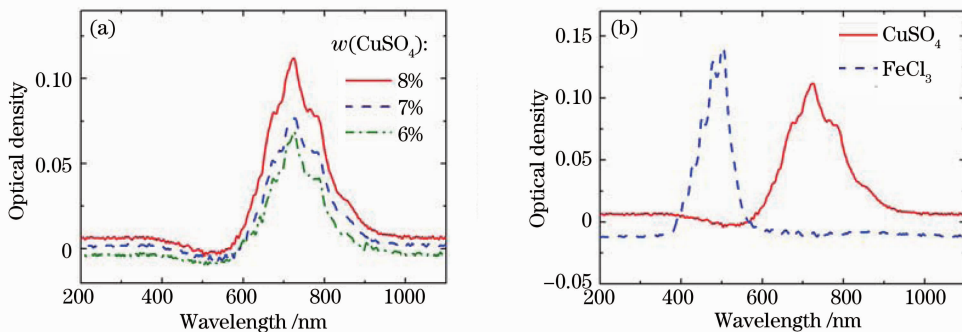


图4 样品溶液的吸收光谱。(a)不同浓度硫酸铜溶液的对比吸收图;(b)硫酸铜溶液与氯化铁溶液的对比吸收图

Fig. 4 Absorption spectra of the sample solutions. (a) absorption spectra of copper sulfate solution with different concentrations; (b) absorption spectra of copper sulfate solution and iron chloride solution

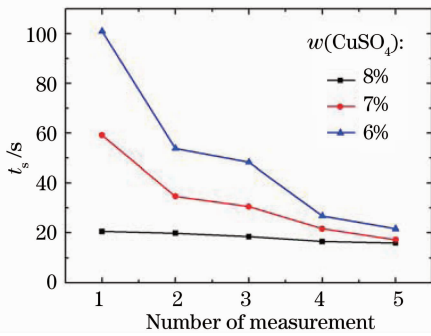


图5 不同浓度硫酸铜溶液样品的预热时间

Fig. 5 Warm-up time of copper sulfate solution with different concentrations

其次,研究样品的空间几何结构与预热时间的关系。在前面的实验中,配置的样品溶液都是暴露于空气中的开放性薄液层。现在配置与空气隔绝的气密性样品溶液进行实验。配置时采用表面有凹坑的载玻片,在凹坑内注入样品溶液,然后用一块盖玻片盖在凹坑上。盖玻片与载玻片相接触的地方用样品溶液浸润,产生气密的效果。分别制作了两组这

样的气密性样品进行对比,一组用样品溶液注满凹坑,另一组只注满凹坑的一半,另一半为空气,如图6所示。在相同的激光照射条件下,第一组样品经过30 min后,溶液没有明显变化,没有气泡出现,也没有晶体析出。刚开始照射第二组样品时,也没有晶体立刻析出,但盖玻片的下表面上布满了水蒸气,样品室内一片模糊,如图6(b)所示。经过10 s左右,盖玻片下表面的微小水滴开始汇合成大水滴,样品室开始逐渐恢复清晰。调节显微镜观察盖玻片的下表面,可以发现下表面上附着的水滴,刚才影响观察的水蒸气已经聚集成成了水滴,如图6(c)所示。继续照射样品溶液,几分钟后开始有晶体从激光焦点处析出,结晶速度很慢。此时盖玻片上表面聚集了大量的水滴,凹坑内样品溶液中的水分大量转移到了盖玻片的下表面上,样品溶液也由于水分蒸发出现液面线后退现象。气密性样品的空间几何结构降低了水分的蒸发速度 v_1 ,从而延长了预热时间。对于充满溶液的第一组样品,水分的蒸发速度几乎为零,预热时间也近于无限长。

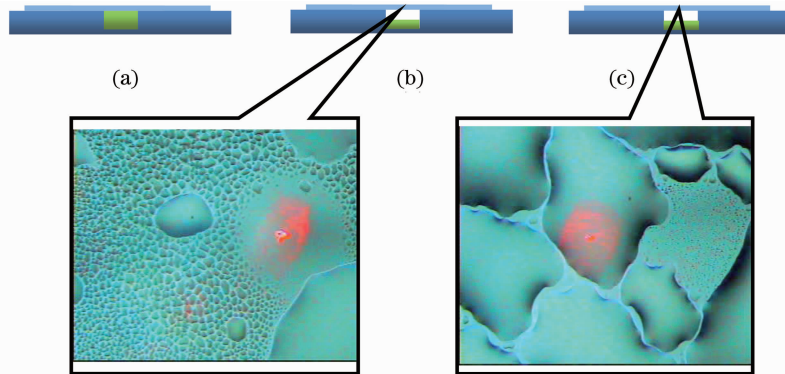


图6 两种气密性样品的对比实验。第一组样品(a),第二组样品(b)照射5 s后,(c)照射15 s后

Fig. 6 Comparison experiment of two groups of air-enclosed samples. (a) first group; (b) second group after 5 s of laser illumination; (c) second group after 15 s of laser illumination

另外,在实验中发现,在开放性样品溶液的边缘处所需的预热时间小于样品中心的时间。这是因为样品边缘受到几何结构的限制,边缘处水分向焦点球的扩散速度 v_2 小于在中心处的扩散速度。晶体析出所需预热时间与激光功率也有关系。激光功率越大,所需的预热时间越短。但是当激光功率减弱到一定程度时,激光诱导快速结晶就不会发生。

从图2(a)中可以发现,在经过预热时间开始析出晶体后,把激光焦点位置移动,晶体也能随之迅速生长出来,似乎不再受限于初始的预热时间。可能是因为焦点球中存在固态的情况下,对激光的吸收系数明显增加,与周围环境热交换以及水分扩散的

速度也因为固态而明显降低,这些因素导致水分蒸发速度 v_1 大幅增加,水分扩散速度 v_2 明显降低,因而此时的预热时间比纯液态焦点球的情况下大大降低,可以实现实时地连续析出晶体。而且在存在固体的情况下,溶液中的晶体分子很容易把已产生的晶体当成附着物而迅速从溶液中析出。如果在扫描振镜控制焦点匀速移动生长晶体的过程中,用遮光板迅速地遮一下激光束并拿开,遮光时间为0.5 s。从CCD中可以发现,一直跟随焦点生长的晶体在遮光的同时停止生长,遮光结束后仍然没有晶体继续析出。从图7中可以观察到在遮光结束后焦点已经移动到下一个位置,没有照射在晶体上,焦点球

中又变成了液态溶液,在焦点匀速移动的情况下远远达不到液态焦点球所需要的预热时间,所以就不再有晶体析出。如果把焦点重新移回到晶体上,然后继续匀速平移,晶体就会重新跟随焦点生长出来。

晶体刚从溶液中生长出来之后并不稳定,因为只是局部溶液达到饱和,溶液的总浓度并未饱和,由于浓度不均,周围水分向晶体扩散的速度 v_2 依然存在,如果激光焦点移至别处,那么由于得不到足够的热量,晶体及其附近的水分蒸发速度 v_1 几乎为 0,

周围的水分很快就会把晶体重新溶解掉。因此制作微型器件的重要一步就是把器件固定下来。实验中采用下列步骤:1)在样品边缘生长出需要的微型器件;2)利用激光的热效应在器件的周围均匀加热溶液,使周围的水分慢慢蒸发,液面后退,逐渐把晶体从溶液中分离出来;3)利用光镊系统的精细加工能力,对生长出来的晶体进一步精细加工成型。图 8 就是利用光镊系统独立制作完成一个微型三角形器件的流程。

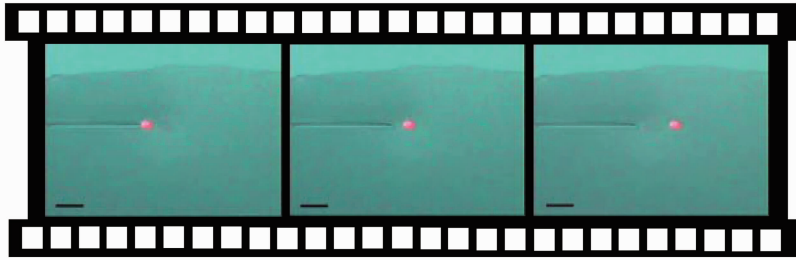


图 7 激光被短暂遮挡后,晶体生长停止。刻度尺为 $20\ \mu\text{m}$, $25\times$ 物镜

Fig. 7 Crystallization stops after laser is cut off instantaneously. Scale bars represent $20\ \mu\text{m}$ imaged by $25\times$ objective

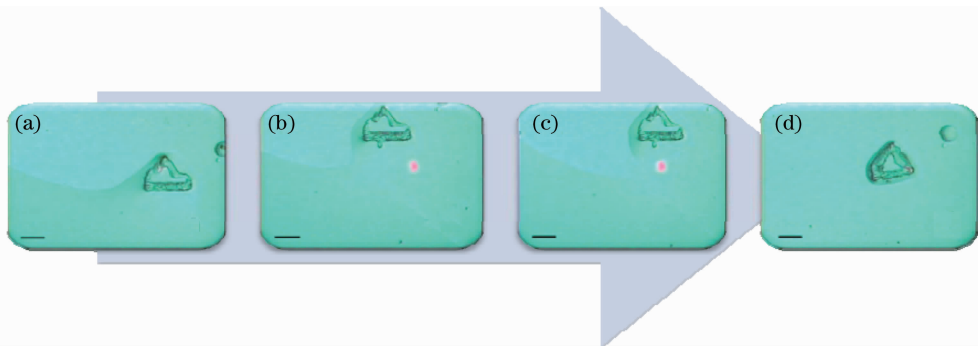


图 8 利用光镊系统在溶液中生长制作微型器件并从溶液中分离开来的流程图。(a)在溶液的边缘生长出三角形器件; (b),(c)三角形器件与溶液分离;(d)对三角形器件进行精细加工。刻度尺为 $50\ \mu\text{m}$,物镜倍率 $10\times$

Fig. 8 Flow chart of making micro device and separating it from solution by use of optical tweezers. (a)generate triangular device in the edge of solution; (b), (c) separate device from solution; (d) process device precisely. Scale bars represent $50\ \mu\text{m}$ imaged by $10\times$ objective

3.3 激光辅助沉淀法

沉淀法与结晶法不同,需要两种不同的溶液在一起反应生成沉淀。实验前分别配置好氯化钙(CaCl_2)和碳酸钠(Na_2CO_3)溶液。吸取几滴碳酸钠溶液缓慢滴入载玻片上,充分延展,在载玻片上摊开成薄薄一层。把滴有碳酸钠溶液的载玻片放在显微镜下,移动载物台定位到合适的位置,小心滴入一滴氯化钙溶液,沉淀反应开始,此时打开激光。

在沉淀反应过程中,沉淀颗粒从溶液的各个地方产生,并且不断生长增大。体积增大到一定程度时,沉淀颗粒在重力的作用下开始下降,慢慢坠入溶液底层。打开激光,在激光焦点附近的沉淀颗粒由于受到指向激光焦点的光阱力而向焦点聚集。通过

调整物镜升降,让激光会聚在溶液的底面附近,即载玻片的上表面。聚集在焦点的沉淀颗粒就会稳定在焦点处的载玻片上,不会因为重力下降而离开焦点。光镊在此制作过程中的作用就是捕获并移动沉淀小颗粒,使沉淀颗粒按照事先设计好的图形生长在一起。操作时采用了两种方法实现光镊的这个作用。第一种是用扫描振镜控制光阱运动,让光阱在溶液底层按照给定的路径来回扫描,从沉淀反应开始到器件成型,扫描贯穿整个过程。靠近光阱扫描范围的沉淀颗粒会被光镊吸引,自动落入光阱范围之内,按照扫描路径排列成形,随着沉淀反应的进行慢慢生长在一起,成为一个整体。第二种是沉淀反应开始时不打开激光,在沉淀颗粒生长到 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 的时

候,打开激光,移动载物台,用光镊捕捉正在下降的沉淀颗粒,把它们挨个放置在需要的位置上,排列成需要的器件形状。随着沉淀反应的进行,相邻的沉淀颗粒渐渐相互融合在一起。图 9(a)和(b)分别给

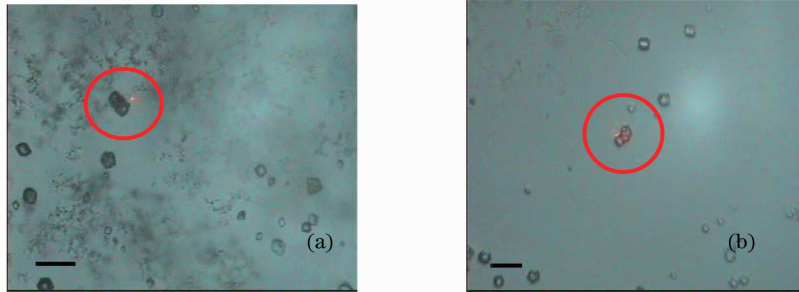


图 9 激光辅助沉淀法生长出来的碳酸钙晶体。(a)采用连续扫描的方法,刻度尺 $20\ \mu\text{m}$,物镜倍率 $25\times$;
(b)采用逐个搬运的方法,刻度尺 $10\ \mu\text{m}$,物镜倍率 $40\times$

Fig. 9 Calcium carbonate crystal generated by laser-assisted precipitation. (a) through the way of continuously scanning the laser beam. Scale bar $20\ \mu\text{m}$, imaged by $25\times$ objective; (b) through the way of arraying micro-particles with the optical tweezers one by one. Scale bar $10\ \mu\text{m}$, imaged by $40\times$ objective

实验中发现,并不是所有的沉淀反应都适合制作微型器件,用于沉淀法的沉淀反应应尽量满足下面 3 个条件:1)沉淀透明,且折射率大于周围液体介质(捕获条件);2)沉淀对激光的吸收不强烈(稳定条件);3)沉淀析出速度足够慢(时间条件)。捕获条件保证激光对沉淀的作用力为指向光阱中心的捕获力,这样就使得激光束捕获移动排列沉淀小颗粒成为可能。稳定条件则限制了激光对沉淀颗粒的热效应,保证沉淀颗粒在激光的作用下能稳定存在,而不是受热分解。在实验中发现,当碳酸钙沉淀颗粒生长到足够大时(约大于 $2\ \mu\text{m}$ 时),用激光捕获和移动它们就比较困难,所以只有在沉淀颗粒还比较小的时候用激光排列堆砌它们。时间条件就是确保沉淀析出速度足够慢,以便于沉淀颗粒在长大到激光无法捕获之前,激光有足够的时间去捕获住沉淀小颗粒,并按照设计好的图形排列沉淀小颗粒。

4 结 论

提出采用光镊系统制作微型器件的方法,为制作微型器件提供了一种新途径。实验中分别采用激光快速诱导结晶和激光辅助沉淀法,利用自建的光镊系统完成了微型器件的制作。影响激光快速诱导结晶法制作效率的预热时间,由焦点球内的水分蒸发速度与周围水分向焦点球的扩散速度决定。实验表明,这两个速度与激光照射功率、焦点球的吸收系数、与周围环境热交换的速度、蒸发所需空间的通畅性、浓度差、温度等一系列因素有关。适用于激光辅

助沉淀法的沉淀反应应尽量满足捕获、稳定以及时间这 3 个基本条件。通过对这两种方法进行比较发现,激光快速诱导结晶法效率高,可以制作出较复杂的微型器件,但是生长出的器件必须及时从溶液中分离出来,否则会重新被溶解。实验中给出了利用结晶法制作微型器件并从溶液中分离稳定下来的流程。而激光辅助沉淀法生长器件的速度比激光快速诱导结晶法慢,但其优点是制作出来的微型器件不溶于水,无需及时从溶液中分离出来,稳定性好,只要找到更合适的沉淀样品,就可以进一步提高沉淀法制作微型器件的效率和精度。

参 考 文 献

- 1 A. Ashkin, J. M. Dziedzic, J. E. Bjorkholm *et al.*. Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles [J]. *Opt. Lett.*, 1986, **11**(5): 288~290
- 2 Yao Baoli, Lei Ming. Multi-purpose optical micro-manipulation platform and applications[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(6): 15~26
姚保利, 雷 铭. 多功能光学微操纵平台及应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, **44**(6): 15~26
- 3 M. P. MacDonald, G. C. Spalding, K. Dholakia. Microfluidic sorting in an optical lattice [J]. *Nature*, 2003, **426** (6965): 421~424
- 4 Y. Hayashi, S. Ashihara, T. Shimura *et al.*. Particle sorting using optically induced asymmetric double-well potential [J]. *J. Opt. Commun.*, 2008, **281**(14): 3792~3798
- 5 U. K. Tirlapur, K. Konig. Targeted transfection by femtosecond laser[J]. *Nature*, 2002, **418**(6895): 290~291
- 6 K. Konig, I. Riemann, P. Fischer *et al.*. Intracellular nanosurgery with near infrared femtosecond laser pulses [J]. *Cell. Mol. Biol.*, 1999, **45**(2): 192~201
- 7 M. J. Schnitzer, S. M. Block. Kinesin hydrolyses one ATP per 8-nm step[J]. *Nature*, 1997, **388**(6640): 386~390

- 8 K. Svoboda, C. F. Schmidt, B. J. Schnapp *et al.*. Direct observation of kinesin stepping by optical trapping interferometry [J]. *Nature*, 1993, **365**(6448): 721~727
- 9 C. Cecconi, E. A. Shank, C. Bustamante *et al.*. Direct observation of the three-state folding of a single protein molecule [J]. *Science*, 2005, **309**(5743): 2057~2060
- 10 N. B. Simpson, K. Dholakia, L. Allen *et al.*. Mechanical equivalence of spin and orbital angular momentum of light: an optical spanner[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(1): 52~54
- 11 Lei Ming, Yao Baoli. Experimental and theoretical studies of optically driven rotation of calcium carbonate particles[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(5): 816~819
雷 铭, 姚保利. 碳酸钙微粒光致旋转的实验和理论研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(5): 816~819
- 12 Sun Yufen, Li Yinmei, Lou Liren. Optical rotation of crystal CaCO₃ micro-particle in optical tweezers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(3): 315~318
孙玉芬, 李银妹, 楼立人. 光阱中的 CaCO₃ 晶体微粒的光致旋转 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(3): 315~318
- 13 Ren Hongliang, Zhuang Lihui, Li Yinmei. Measurement of interaction potential between colloidal particles using dual optical tweezers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 151~155
任洪亮, 庄礼辉, 李银妹. 双光镊测量胶体微粒间相互作用势 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(1): 151~155
- 14 Zhang Wenjing, Li Yinmei, Lou Liren *et al.*. New method of measuring temperature of liquid micro-area by using technology of optical tweezers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5): 663~666
张文静, 李银妹, 楼立人 等. 应用光镊技术测量液相微区温度 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(5): 663~666