

新型高频硅基超声雾化器的结构仿真及制作

张 轲^{1,2}, 苗 斌^{2,3}, 丁祥桢^{2,5}, 顾智琦^{2,6}, 潘天龙⁷, 李加东^{2,3,4}, 吴东岷^{2,3}, 张秋菊¹

(1. 山东师范大学 物理与电子科学学院, 山东 济南 250014; 2. 中国科学院 苏州纳米技术与纳米仿生研究所国际实验室, 江苏 苏州 215123; 3. 中国科学院 苏州纳米技术与纳米仿生研究所纳米器件与应用重点实验室, 江苏 苏州 215123; 4. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033; 5. 中国科学院大学 材料科学与光电技术学院, 北京 100049; 6. 中国科学技术大学 纳米技术与纳米仿生学院, 江苏 苏州 215123; 7. 厦门大学 航空航天学院, 福建 厦门 361000)

摘 要:设计并制作了一种液路自对准的高频硅基超声雾化器,利用有限元分析软件对器件的特性进行了系统的仿真分析,得到施加 30 V 的激励电压后器件的阻抗特性,相应谐振频率下的位移、应力分布及变幅杆各部分振动位移随时间的瞬态变化图。结果表明,仿真分析与理论设计相符。最后,通过微机电系统(MEMS)工艺制备了谐振频率为 1 MHz 的硅基超声雾化器,为后期实验测试打好基础。

关键词:高频硅基超声雾化器;有限元分析;谐振频率;变幅杆;微机电系统

中图分类号:TN384;O426

文献标识码:A

Simulation and Fabrication of High-Frequency, Silicon-based Ultrasonic Nebulizer

ZHANG Ke^{1,2}, MIAO Bin^{2,3}, DING Xiangzhen^{2,5}, GU Zhiqi^{2,6}, PAN Tianlong⁷, LI Jiadong^{2,3,4},
WU Dongmin^{2,3}, ZHANG Qiuju¹

(1. School of Physics and Electronics, Shandong Normal University, Jinan 250014, China; 2. International Lab. for Adaptive Bio-nanotechnology, Suzhou Institute of Nano-tech and Nano-bionics, Chinese Academy of Science, Suzhou 215123, China; 3. Key Lab. of Nanodevices and Applications, Suzhou Institute of Nano-tech and Nano-bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215123, China; 4. State Key Lab. of Applied Optics, Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China; 5. University of Chinese Academy of Sciences College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, Beijing 100049, China; 6. School of Nano Technology and Nano Bionics, University of Science and Technology of China, Suzhou, 215123, China; 7. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361000, China)

Abstract: This paper presents the design and fabrication of high-frequency, silicon-based ultrasonic atomizer which has the self-aligned fluid path. With the aid of finite element analysis software, we simulated and analyzed the characteristics of the device systematically. The characteristics of impedance, displacement and stress distributions at a certain resonant frequency, and displacement of the amplitude transformer of each part changing with the time are also obtained after the voltage of 30 V is applied to the device. The results show that the simulation agrees with the design. Finally, we fabricate a silicon-based ultrasonic atomizer with the resonant frequency of 1 MHz using MEMS technology. All these works have paved the way for the further testing.

Key words: high-frequency silicon-based ultrasonic atomizer; finite element analysis; resonant frequency; amplitude transformer; microelectromechanical systems (MEMS)

0 引言

当下大气污染严重,下呼吸道疾病患者增加,传统的吃药打针方式已不能满足大众的健康需求。吸入治疗法是一种非常重要的非注射给药途径,是治

疗呼吸道疾病较盛行的医疗方法^[1]。医用雾化器是吸入给药的核心装置,主要有超声雾化器、空气压缩式雾化器和网式雾化器。传统的超声雾化器利用超声原理将药物液化,使用时几乎无噪音,但产生的雾

收稿日期:2016-10-11

基金项目:江苏省科技支撑计划工业部分基金资助项目(BE2013056);自然科学基金资助项目(61573346,61104226);中国科学院青年促进人才基金资助项目(2014278);应用光学国家重点实验室资助项目;江苏省自然科学基金资助项目(BK20130363)

作者简介:张轲(1991-),男,山东泰安人,硕士,主要从事硅基超声雾化器的研究。E-mail:zhangke2015@sinano.ac.cn。通信作者:李加东(1980-),男,山东临沂人,研究员,主要从事生化信息检测及传感器技术及微纳机电系统(MEMS/NMMS)方向的研究。E-mail:jdlj2009@sinano.ac.cn。

粒较大,很多雾粒不能到达下呼吸道;空气压缩式雾化器(也叫射流式雾化)根据文丘里喷射原理,通过压缩空气实现雾化,得到的粒径较小,但粒径分布较广泛,不能准确地将药物投递到下呼吸道,且需要压缩机,噪声较大;网式雾化器具超声雾化器和压缩雾化器的特点,喷雾方式是利用微小的超声波振动和网式喷雾头构造喷雾,如Pari eFlow, Philips I-net等品牌,产生的粒径较小,几乎无噪音,但仍存在粒径分布广泛的问题(有高几何标准偏差(GSD)),小于 $\varnothing 5 \mu\text{m}$ 的雾粒约占70%,且网结构的使用易产生堵塞网孔问题^[1-4]。因此,Tsai等^[4-5]基于微机电系统(MEMS)技术研究了一种新结构的高频硅基超声雾化器,得到质量中位直径(MMD)为 $\varnothing 2.5 \mu\text{m}$,雾滴基本小于 $\varnothing 5 \mu\text{m}$,较好地解决了现在流行商用雾化器粒径分布广泛问题,且具有无噪音,体积小,无需网结构的优点。但该雾化器的结构在使用时存在液体进入端因输液软管的存在而易引入外力,引起器件性能不稳定的问题,同时在高频硅基超声雾化器的理论设计过程中,Tsai等基于有限元分析软件主要进行了相关的模态分析,并未针对器件进行相应的应变及应力分布分析,也未详细研究器件的起振过程。因此,本文提出了一种具有液路自对准功能的高频硅基超声雾化器,同时利用多物理场仿真软件对其施加交流信号后的位移,应力分布情况及起振情况进行了系统的仿真分析,与理论设计相互验证,并利用MEMS工艺进行了制备。相关工作作为雾化器的后期实验测试奠定了基础。

1 雾化器结构设计

超声雾化器是由换能器驱动部分和硅谐振部分组成,还有供液体流动的中央通道。驱动部分包括1对压电换能器(PZT)和矩形硅,谐振部分是由3个傅里叶变幅杆串联组成。在压电换能器上施加交流激励,利用压电效应将电能转化成机械能,机械能在谐振部分沿纵向得到放大,在尖端产生最大纵向振幅的驻波。当液体从雾化器尖端流出时,液体表面毛细波形成。液体沿着纵向流动,振幅超过阈值振幅时,不稳定的毛细波最终破碎成直径反比于超声频率的雾滴^[5]。阈值振幅 h_c 为

$$h_c = \frac{2\mu}{\rho} \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \sigma}} \quad (1)$$

式中: μ 为动态粘滞度; ρ 为液体的密度; f 为雾化频

率; σ 为表面张力^[6]。1 MHz工作频率下,水的阈值振幅为 $0.34 \mu\text{m}$ 。

图1为傅里叶变幅杆轮廓设计和仿真的矩形整体坐标系。 x 方向为平行于液体流动的中央通道的方向,是 $\langle 110 \rangle$ 方向,即硅片的主平面方向; z 方向垂直于晶面,是PZT的极化方向(即电场方向)。一维模型下傅里叶变幅杆纵向粒子位移(即振幅) u_x 与变化的横截面积 $A(x)$ 之间的关系为

$$A(x) \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = v_a^2 \frac{\partial}{\partial x} \left(A(x) \frac{\partial u_x}{\partial x} \right) \quad (2)$$

式中 $v_a = \sqrt{\frac{Y}{\rho}}$ 为声速, Y 为杨氏模量, ρ' 为硅的密度。

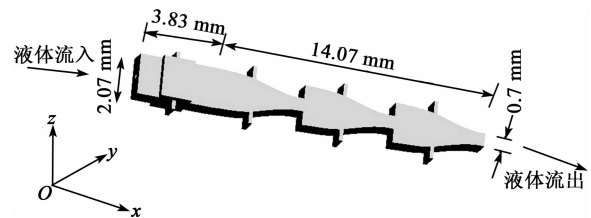


图1 雾化器结构图

式(2)可表示成无量纲的形式:

$$U''(X) + U'(X) \frac{d}{dX} (\ln A(X)) + \Omega^2 U(X) = 0 \quad (3)$$

式中: $U = \frac{u_x}{l}$; $X = \frac{x}{l}$, x 表示坐标, l 为傅里叶变幅杆的长度; X 表示 x 归一化后的坐标; $\Omega = \frac{2\pi l}{\lambda}$; $\lambda = \frac{v_a}{f}$, λ 为声波波长, f 为工作频率。设计的基本方程为

$$\frac{d}{dX} (\ln A(X)) = - \frac{U''(X) + \Omega^2 U(X)}{U'(X)} \quad (4)$$

我们需要寻找一个函数 $U(X)$ 满足能表达傅里叶变幅杆特性的边界条件,边界条件^[7]为

1) 变幅杆两端无应力,所以无应变,因此, $U'(0) = 0, U'(1) = 0$ 。

2) 变幅杆两端振幅比是 $-M$,符号表示反向,因此, $U(0) = U_0, U(1) = -MU(0)$ 。

3) 侧面的梯度应处处有限且连续。从式(3)可看出, $U' \rightarrow 0, (U'' + \Omega^2 U) \rightarrow 0$ 也应尽快得到满足,除 $X=0$ 和 $X=1$ 处的必要一阶零点, $U'(X)$ 在 $0 \leq X \leq 1$ 范围内无零点,因此,2个必要条件为 $U''(0) = -\Omega^2 U_0, U''(1) = M\Omega^2 U_0$ 。

4) 低振幅端的表面坡度设为0,即 $X \rightarrow 0$ 时,

$\frac{d}{dX}(\ln A) \rightarrow 0$, 因此, $U'''(0) = 0$, 为了对称, $U'''(0)$ 也为 0。

我们选择归一化的粒子位移函数 $U(X)$ 形式为

$$U(X) = \sum_{k=0}^4 \alpha_k \cos(k\pi X) \quad (5)$$

一旦 $U(X)$ 及其派生物确定, 那么横截面积 $A(X)$ 就可通过式(4)确定。因为硅片的厚度确定, 因此变幅杆的轮廓就能确定。一旦 M 和 Ω (或变幅杆长度 l) 确定, $\cos(4\pi X)$ 的系数 α_4 就成为四阶傅里叶变幅杆的唯一参数, 定义 $\alpha = \left[\frac{32}{M-1} \right] \left(\frac{\alpha_4}{U_0} \right)$, $\gamma = \frac{\Omega}{\pi}$ 。为了得到相对纯粹的纵向振动, 最大横截面积的尺寸必须小于波长 λ , 即小于 $\lambda/4$, $l \approx \lambda/2$ 。令 $M=2$, 当 $\gamma=1.10$, $\alpha=-0.19$ 时, 能得到最好的变幅杆形状, 此时, 单个傅里叶变幅杆将振幅放大 2 倍, 超声雾化器的谐振部分(包含 3 个串级的傅里叶变幅杆)将振幅放大 8 倍^[5]。为了解决液体进入端易引入外力的问题, 同时使器件拥有液体自对准的功能, 在液体进入端增加支持结构, 如图 2 所示。

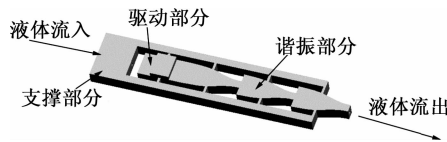


图 2 新型雾化器三维示意图

2 仿真分析

2.1 仿真建模

利用有限元分析软件, 对雾化器的谐振频率、位移、应力分布及起振过程等方面进行系统研究。根据理论计算出相应的尺寸, 为确保仿真和实际更符合, 建立了三维模型。压电换能器采用 PZT-5H, 由文献[8-9]得到的硅和 PZT-5H 材料参数如表 1、2 所示。

表 1 硅的材料参数

	$X < 110 >$	$Y < \bar{1}10 >$	$Z < 110 >$
密度/(kg/m ³)	2 329		
杨氏模量 $Y/(10^{10} \text{ N/m}^2)$	$Y_{11}=16.91$	$Y_{22}=16.91$	$Y_{33}=13.013$
泊松比 ν	$\nu_{12}=0.062\ 2$	$\nu_{23}=0.361\ 7$	$\nu_{31}=0.278\ 3$
切变系数 $G/(10^{10} \text{ N/m}^2)$	$G_{12}=5.09$	$G_{23}=7.96$	$G_{31}=7.96$

表 2 PZT-5H 的材料参数

	X_-	Y_-	Z_-
密度/(kg/m ³)	7 500		
介电常数 $\epsilon/$ [$10^{-8} \text{ C}^2/(\text{J} \cdot \text{m})$]	1.505	1.505	1.302
弹性劲度系数/ (10^{10} N/m^2)	$c_{11}=12.6$	$c_{12}=7.95$	$c_{13}=8.41$
	$c_{22}=12.6$	$c_{23}=8.41$	$c_{33}=11.7$
	$c_{44}=2.3$	$c_{55}=2.3$	$c_{66}=2.35$
压电应变系数/ (10^{-10} C/N)	$d_{13}=-2.74$	$d_{23}=-2.74$	$d_{33}=5.93$
	$d_{42}=7.41$	$d_{51}=7.41$	
杨氏模量 $Y/$ (10^{10} N/m^2)	$Y_{11}=5.988$	$Y_{22}=5.988$	$Y_{33}=4.808$
泊松比 ν	$\nu_{12}=0.287$	$\nu_{23}=0.509$	$\nu_{31}=0.409$
剪切系数 $G/$ (10^{10} N/m^2)	$G_{12}=2.347$	$G_{23}=2.299$	$G_{31}=2.299$

模型边界条件设定。压电片与硅片交界处接地, 非交界处接正弦交流信号, 支撑处固定。硅材料设为弹性材料, PZT-5H 设为压电材料。完成边界条件设定后, 将模型进行网格化, 以便对其微分方程进行求解。

2.2 仿真结果与分析

在压电片 PZT-5H 上施加 30 V 的交流电压, 进行阻抗分析(见图 3), 谐振频率为 0.991 2 MHz。此时得到位移分布如图 4 所示。由图 4(a)可看出, 雾化器沿纵向振动, 且此时振幅最大, 雾化器达到谐振状态。在上述结果中建立一维绘图组, 使用线绘图, 可得到雾化器整体的位移分布情况。由图可看出, 雾化器在支撑处的振幅为 0, 位移沿纵向分布, 位移在 3 个串级的变幅杆的尖端处得到逐级放大。最大位移在最后一节变幅杆的尖端处, 且最大位移为 $1.59 \mu\text{m}$, 远大于阈值振幅($0.34 \mu\text{m}$), 理论上可实现雾化。进行应力分析(见图 5)可看出, 应力最大在最前面一节变幅杆中部, 最大应力约 140 MPa, 远小于硅材料的许用应力。因此, 设计符合我们的要求, 结构合理。

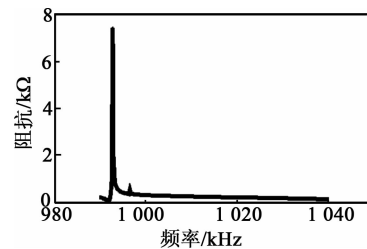


图 3 阻抗图

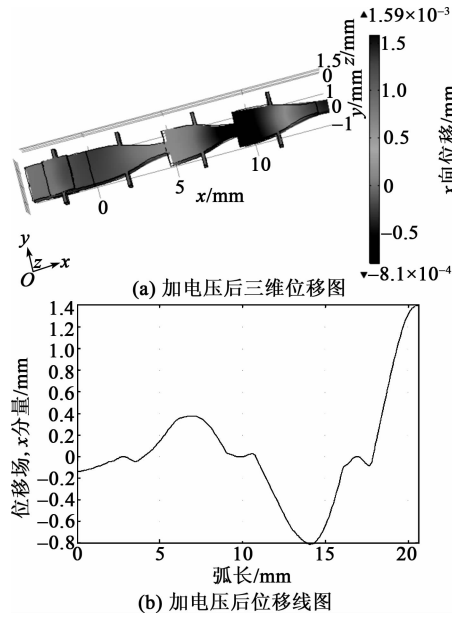
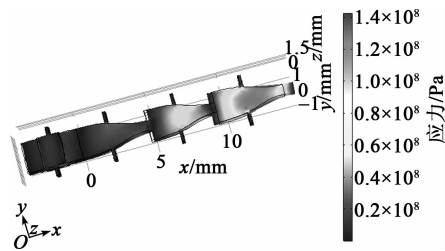
图4 加电压后 x 方向的位移分布

图5 应力分布图

图6为雾化器性能与边界条件电压的关系。由图可看出,最大位移和应力都随着电压增加而线性增加。因此,要选择合适的电压,既要保证器件的最大振幅超过阈值振幅,又要保证最大应力要在器件允许的应力范围内。

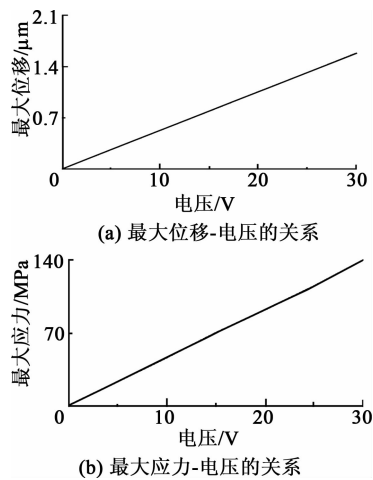


图6 最大位移、应力随电压变化图

研究了30 V电压下雾化器的稳态分布,接着研究雾化器的瞬态变化。选取第一阶变幅杆的尾端、

尖端,第二阶变幅杆的尖端,第三阶变幅杆的尖端共4个点,分别记作点1、点2、点3、点4,作位移随时间变化的点图(见图7)。图8为雾化器起振的过程。4个点的位移都随时间增加,且最大位移呈现1、2、4、8倍放大。与前面的理论分析、稳态分析结果一致。

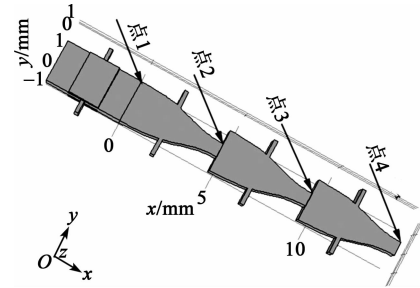


图7 不同点的选取示意图

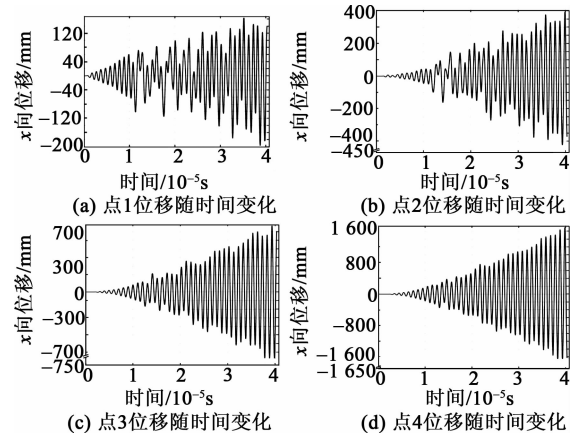


图8 雾化器起振过程

3 制备工艺

图9为超声雾化器的工艺流程图。工艺流程主要包括两次光刻和深硅刻蚀的过程,具体步骤:首先

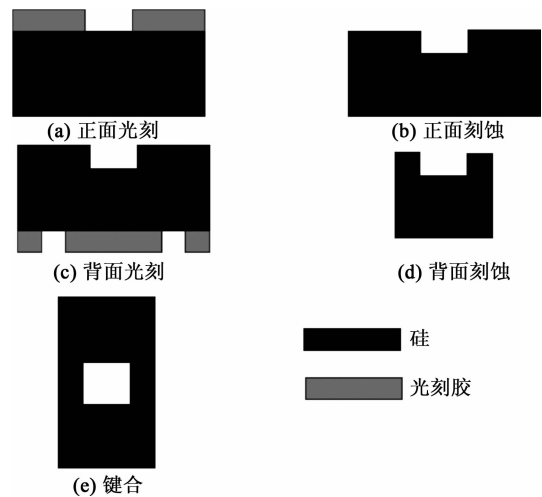


图9 工艺流程图

正面光刻出中通道凹槽,深硅刻蚀出中通道凹槽,然后背部光刻出雾化器形貌,背部深硅刻蚀,得到雾化器器件,将器件键合起来,将压电陶瓷用导电银浆粘在驱动块上,得到的实物图如图 10 所示。

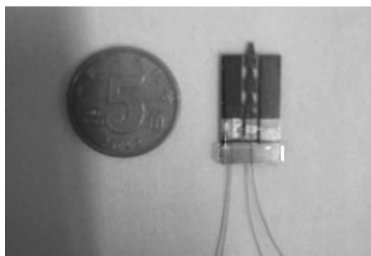


图 10 雾化器实物图

4 结束语

本文设计并制备了具有液路自对准功能的高频硅基超声雾化器,并作了系统的仿真分析,得到了器件谐振频率,应变、应力分布。仿真结果表明,谐振频率与设计值相比只有 0.8% 的误差,施加 30 V 电压后,最大位移为 $1.59 \mu\text{m}$,远大于阈值位移 $0.34 \mu\text{m}$,可以保证器件实现雾化,产生的最大应力为 140 MPa,在材料承受范围内,器件应变、应力都和电压呈线性关系,仿真结果和设计符合较好。

参考文献:

- [1] 沈苏静,汤黎明,凌刚. 空气压缩雾化器取代超声雾化器将成为必然趋势[J]. 中国医疗设备, 2002, 17(12):21-22.
- [2] LASS J S, SANT A, KNOCH M. New advances in aerosolised drug delivery: vibrating membrane nebuliser technology. [J]. Expert Opinion on Drug Delivery, 2006, 3(5):693-702.
- [3] 朱寅. 新型压电致动网孔式雾化器设计[D]. 南京:东南大学, 2006.
- [4] TSAI C S, MAO R W, LIN S K, et al. Faraday instability-based micro droplet ejection for inhalation drug delivery[J]. Technology, 2014, 2(1):75.
- [5] TSAI S C, SONG Y L, TSENG T K, et al. High-frequency, silicon-based ultrasonic nozzles using multiple Fourier horns[J]. IEEE Transactions on Ultrasonic Ferroelectrics & Frequency Control, 2004, 51(3):277-285.
- [6] TSAI S C, TSAI C S. Linear theory on temporal instability of megahertz faraday waves for monodisperse microdroplet ejection[J]. IEEE Transactions on Ultrasonic Ferroelectrics & Frequency Control, 2013, 60(8):1746-1755.
- [7] EISNER E. Design of sonic amplitude transformers for high magnification[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1963, 35(9):1367-1377.
- [8] WORTMAN J J, EVANS R A. Young's modulus, shear modulus, and poisson's ratio in silicon and germanium[J]. J Appl Phys, 1965, 36(1):153-156.
- [9] AULD B A. Acoustic fields and waves in solids[M]. US:Wiley, 1973.
- [10] YU L G, ZHANG G M, LI S Q, et al. Fabrication of arrays of zinc oxide nanorods and nanotubes in aqueous solution under an external voltage[J]. Journal of Crystal Growth, 2007, 299(1):184-188.
- [11] 华素坤,仲维卓. 热液条件下 ZnO 晶体的形成机理[J]. 人工晶体学报, 1994, 23(3):177-180.
HUA S K, ZHONG W Z. Mechanism of forming ZnO crystal under hydrothermal condition [J]. Journal of Synthetic Crystals, 1994, 23(3):177-180.
- [12] 李汶军,施尔畏,仲维卓,等. 负离子配位多面体生长基元的理论模型与晶粒形貌[J]. 人工晶体学报, 1999, 28(2):117-125.
LI Wenjun, SHI Erwei, ZHONG Weizhuo, et al. Anion coordination polyhedron growth unit theory mode and crystal morphology [J]. Journal of Synthetic Crystals, 1999, 28(2):117-125.
- [13] 刘小娣,陈书阳,闫家伟,等. 复合溶剂热法可控合成 ZnO 半导体纳米材料[J]. 南阳师范学院学报, 2010, 9(9):31-34.
LIU Xiaodi, CHEN Shuyang, YAN Jiawei, et al. Controllable complex-solvothermal synthesis of ZnO semiconductor nanomaterials[J]. Journal of Nanyang Normal University, 2010, 9(9):31-34.
- [14] CHENG J P, ZHANG X B, LUO Z Q. Oriented growth of ZnO nanostructures on Si and Al substrates[J]. Surf Coat Technol, 2008, 202(19):4681-4686.
- [15] ZHONG W Z, HUA S K. Mechanism of forming ZnO crystal under hydrothermal condition[J]. Synth Cryst, 1994, 23(3):177-180.