文章编号 1004-924X(2017)03-0663-09

静电场辅助的微压印光刻技术

刘民哲[1,2],王泰升[1],李和福[1],刘震宇[1],陈佐龙[3],鱼卫星[4*]
(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学,北京 100049;
3. 中国人民解放军 63861 部队,吉林 白城 137001;
4. 中国科学院 西安光学精密机械研究所,陕西 西安 710119)

摘要:介绍了一种静电场辅助的新型微压印光刻技术,并对其工艺过程进行了深入的理论研究。首先,采用数值仿真软件 COMSOL™ Multiphysics,建立了静电场辅助的压印光刻瞬态仿真分析模型,讨论了不同时域微结构的演化过程。然后,详细分析了微结构的成型与仿真实验参数的定性关系,发现:适当地减小极板间距、模板凸起结构周期,同时增加模板的凸起高度、初始聚合物薄膜厚度和电压有助于微纳结构的成型。最后,通过仿真实验参数优化,得到了带有 31 μm 中空结构的球冠微结构。与传统压印方法相比,静电场辅助的微压印技术工艺过程简单且成本较低,能够广泛应用于微电子机械系统、光子学、遗传学和组织系统等。

关 键 词:静电场;压印;微纳结构;两相流
中图分类号:O359+.1;O442 **文献标识码**:A **doi**:10.3788/OPE.20172503.0663

Electrostatic field assisted micro imprint lithography technology

LIU Min-zhe[1,2], WANG Tai-sheng[1], LI He-fu[1], LIU Zhen-yu[1], CHEN Zuo-long[3], YU Wei-xing[4*]

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics & Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *University of the Chinese Academy of Science, Beijing*, 100049, *China*;
3. *People's Liberation Army of China*, 63861 *Troops, Baicheng*, 137001, *China*;
4. *Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an* 710119)
* *Corresponding author, E-mail: yuwx@opt.ac.cn*

Abstract: In this paper, a new type of micro imprint lithography assisted by electrostatic field was introduced, and an in-depth theoretical research was conducted on its technological process. First, numerical simulation software (COMSOL™ Multiphysics) was adopted to establish a transient simulation model for electrostatic filed assisted imprint lithography and discussed the evolution process of micro structure in different time domains. Then a detailed analysis was conducted on the qualitative relationship between the micro structure formation and simulation experiment parameters, during which it was found that properly reducing the polar plate spacing, template bulging period and

收稿日期:2016-09-20;**修订日期**:2016-10-27.
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61475156, No. 61361166004, No. 51275504);吉林省基金资助项目(No. 20140519002JH, No. 20140519007JH);深圳市科创委基金资助项目(No. KQCX2015032416183981)

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

increasing the bulging height, initial polymer film thickness and voltage were beneficial to formation of the micro-nano structure. Finally, a spherical cap micro structure with 31 μm hollow structure was obtained through optimization of the simulation experiment parameters. Compared with traditional imprint method, the electrostatic field assisted micro imprint, which is characterized by simple process and lower cost, can be widely applied to the micro electronic and mechanical system, photonics, genetics and tissue system etc.

Key words: electrostatic field; imprint; micro-nanostructures; two-phase flow

1 引 言

随着科技的进步和信息化水平的提高,微纳加工技术得到了快速发展。从晶体管到集成电路,从微电子到微机械系统,系统微型化已经成为了现代工业发展的必然趋势。微纳加工技术在工业生产中越来越重要,已经被广泛应用于微纳机电系统、传感器、微电子器件、生物医用界面、光学材料、微/纳流控器件等领域[1-4],已成为国家科技水平发展程度的重要标志之一,目前世界各国均加大投入对该技术进行研究与开发。

微纳加工技术的研究始于20世纪60年代,经历了传统紫外光刻技术[5]、X射线光刻技术(XRL)[6]、LIGA制造技术[7]、离子束光刻技术(IPL)[8]、电子束光刻技术(EPL)[9]、扫描隧道显微镜(STM)加工技术[10]等。随着微电子技术和产业的发展,这些光刻技术仍需不断更新,从而进一步提高生产效率、降低设备成本、简化加工过程等,因此新的图案复制技术亟待不断研发。1995年,Stephen Y. Chou等首次提出了纳米压印光刻技术[11-13],该技术具有高分辨、低成本、可批量化生产等优点。由于纳米压印光刻广阔的应用前景及强大的市场竞争力,随后研究人员进行了更加深入地研究。Krauss等利用纳米压印技术成功地制备了数据存储器[14];B. Vratzov等人在绝缘体上制备了具有较长沟道的晶体管[15];S. Landis等采用纳米压印技术,在Si-c和Si-mc基片上制备了倒立金字塔结构,用于提高硅太阳电池的效率[16]。

尽管微纳压印已经成为微复制的核心技术之一,但仍然存在着许多技术难点,如模板的使用寿命需进一步延长、使模板和压印胶之间的分离更加容易等。为了解决这些问题,提出静电诱导图案化方法并被深入研究[17-21],其优势在于初始时模板与压印胶是非接触的,在静电场作用下,压印胶可以自组装形成微纳结构,过程简单且能够延长模板寿命等。本文介绍了一种新型微压印光刻方法,将静电诱导图案化方法与微压印光刻相结合,并对制备微结构的工艺过程进行了具体研究。首先建立了静电场辅助的压印光刻瞬态仿真分析模型,讨论了不同时域微结构的演化。然后,详细分析了微结构的出现与仿真实验参数的关系。最后,得到带有31 μm中空结构的球冠微结构,证明可以进一步制备多级中空微纳结构。进一步拓展了微压印的应用,同时为微纳结构的制备提供了理论指导。

2 建模及理论

图1所示为静电场辅助的压印技术制备微结构原理图,聚合物被空气介质包围并且位于平板基底上,受到各向异性电场的作用。红色部分表示带有周期性结构的导电模板(彩图见期刊电子版),其中微结构为多级结构,柱形结构的底部为内凹的曲面,模板凸起的高度、宽度以及微结构周期、内凹高度分别用 p、w、l、h 表示。上下极板之间施加的电压为 U,间距为 d,且聚合物薄膜初始厚度为 H。图中A、B和C用来标注特殊的位置以表征聚合物中压强的跃变,分别对应模板上微结构的中心、边缘以及微结构之间的中心点位置。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

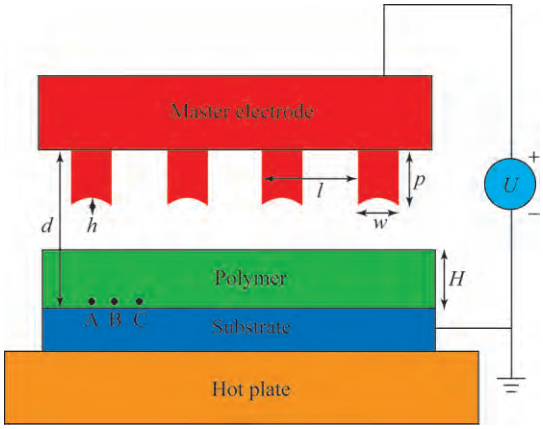

图 1　静电场辅助的微压印技术原理图

Fig. 1　Schematic diagrams of electrostatic field assisted micro imprint lithography

为实现静电场作用下液-气两相流的相界面追踪的动态模拟，应用 Lever-Set 方法[22]，在 COMSOL™ Multiphysics 软件中建立多物理场仿真模型。通过水平集函数的对流方程来捕获运动的交界面：

$$\frac{\partial\varphi}{\partial t}+\boldsymbol{V}\cdot\nabla\varphi=\gamma\nabla\cdot\left(\varepsilon\nabla\varphi-\varphi(1-\varphi)\frac{\nabla\varphi}{|\nabla\varphi|}\right),\tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{V}$ 为速度矢量，φ 为 Lever-Set 函数，ε 决定界面厚度，典型值 $\varepsilon=h_c/2$，其中 h_c 表示界面域网格的特征尺寸。参数 γ 决定重新初始化的量，取值为模型中的最大流速。

流体的流动规律由流场控制方程来描述，包括 Navier-Stokes 方程和连续性方程：

$$\rho\frac{\partial\boldsymbol{V}}{\partial t}+\rho(\boldsymbol{V}\cdot\nabla)\boldsymbol{V}=-\nabla p+\nabla\cdot(\mu\nabla u)+F,\tag{2}$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho\boldsymbol{V})=0,\tag{3}$$

式中：ρ 表示聚合物密度，$\boldsymbol{V}$ 为速度矢量，μ 为聚合物黏度系数，F 表示体积力。体积力大小由 3 个参数决定，分别为大气压强 p_0，表面张力 $F_{st}=\sigma\kappa\delta\boldsymbol{n}$ 以及静电力 p_{el}。其中，σ 为表面张力系数，δ 为交界面的 delta 函数，$\boldsymbol{n}$ 为单位法向量，κ 为交界面曲率：

$$\delta=|\nabla\varphi||\varphi(1-\varphi)|,\tag{4}$$

$$\boldsymbol{n}=\frac{\nabla\varphi}{|\nabla\varphi|},\tag{5}$$

$$\kappa=-\nabla\cdot\left(\frac{\nabla\varphi}{|\nabla\varphi|}\right).\tag{6}$$

静电力 p_{el} 可以表示为：

$$P_{el}=-0.5\varepsilon_0\varepsilon_r(\varepsilon_r-1)E_p^2,\tag{7}$$

$$E_p=\frac{U}{\varepsilon_r d-(\varepsilon_r-1)h},\tag{8}$$

式中：E_p 表示聚合物的电场强度，ε_0 为真空中的介电常数，ε_r 为聚合物薄膜的相对介电常数，U 为电压，d 为极板间距。因此，可以得到体积力：

$$F=(p_0+\sigma\kappa+p_{el})\delta\boldsymbol{n}.\tag{9}$$

为了更好地描述图 1 中的静电场辅助压印制备微结构的过程，选取 4 个周期的模板图案结构进行研究，图 2 给出了模板的几何结构、网格分化及边界条件等。对于导电的图案化电极，边界 1 接地，边界 4，5，6…18，19，20 施加电压，边界 2，3，21，22 为零电势。两相流流动以保守集的方式，流体边界条件为：润湿壁边界位于 4，5，6，…，18，19，20，周期性边界位于 2，3，21 和 22，初始液膜边界为 23。模拟过程中使用聚合材料的属性如表 1 所示。

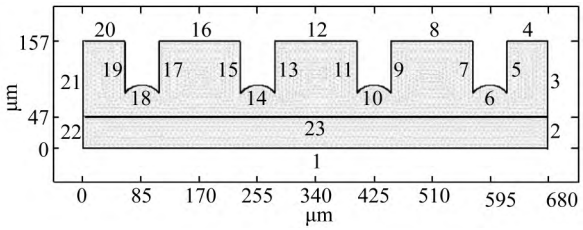

图 2　二维几何模型及其网格划分示意图

Fig. 2　Schematic diagram introducing the geometry, boundary condition mesh of two-dimension model

表 1　仿真模拟中聚合物材料属性

Tab. 1　Properties of polymer used in the numerical simulations

Surface tension /(N·m^{-1})	Simulated dynamic viscosity/(Pa·S)	Dielectric constant	Density /(kg/m^3)
0.038	0.1	2.7	1200

3　分析与讨论

3.1　静电场辅助的压印技术过程研究

图 3 所示为模拟得到的二维周期性微结构的

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

时空演化过程。其中，模板凸起高度 75 μm，宽度 50 μm，微结构周期为 170 μm。上下极板的间距为 157 μm，初始膜厚为 47 μm，施加的电压为 1 500 V。制备过程包含了两个阶段，即静电诱导过程和微压印过程。图 3(a)，(b)，(c)展示了静电诱导过程，即在静电场的作用下聚合物向上生长的过程，图 3(d)，(e)，(f)分别展示了聚合物与模板接触后的微压印过程。

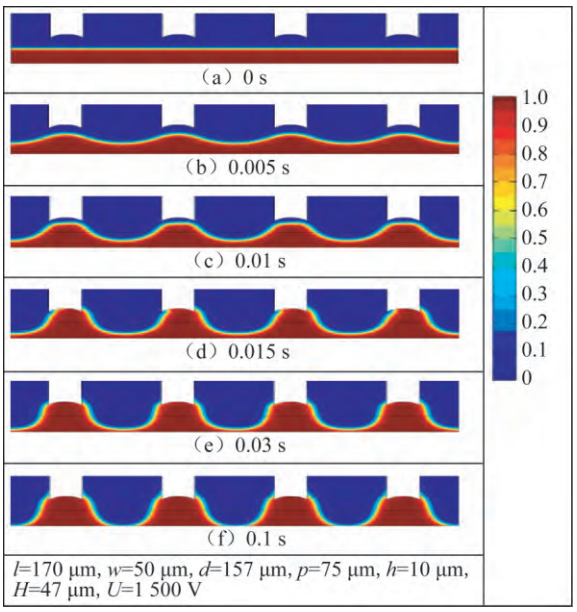

图 3 微结构的时空演化过程

Fig. 3 Spatiotemporal evolution of microstructuers

第一阶段，给模板施加电压，由于模板上的周期结构，使得在空气与聚合物薄膜交界面所受的静电场强度分布不均匀，对应模板凸起部分，聚合物所受场强较大，下凹部分场强较小，因此电场力会驱动聚合物迅速的向模板移动。初始时刻液膜平坦，如图 3(a)所示，由于电场的不均匀性，聚合物液体首先在极板凸起的下方开始向上生长，如图 3(b)所示。因为聚合物凸起结构的边界处存在较大的静电压强差，从图 3(c)可以看到，边界处的聚合物迅速耗尽，聚合物继续向上生长，形成周期性的柱状结构。之后聚合物触碰到模板边缘，工艺进入第二个阶段。图 3(d)，(e)展示了在体积力的作用下，聚合物向上生长的同时，沿润湿壁由一侧向另一侧流动，并逐渐将柱状结构底端内凹部分填满。与传统微接触压印所不同，制备过程不需要施加压，而是通过液体薄膜向上生长实现与模板的自然接触和对其上微结构的精确复制。图 3(f)展示了随着演化继续进行，得到了对称性较好且均匀性较高的周期性球冠微结构。

图 3 所示的流动过程机理来源于液膜表面不均匀的压强分布，图 4 展示了工艺过程中不同时刻压强的分布以及流速的变化，颜色代表压强，黑色箭头表示速度。对于静电场辅助压印技术的第一阶段，初始状态如图 4(a)所示，A 点和 C 点之间存在 1.14×10^4 Pa 的压强差，导致液膜的横向流动。随后在液膜向上生长的过程中，A 点和 C 点之间的压强差增大到 9.44×10^4 Pa，且由 A 点到 C 点压强逐渐递减，如图 4(b)所示。此时 A 点与 B 点的压强差为 8.57×10^4 Pa，而 B 点与 C 点之间的压强差仅为 0.87×10^4 Pa。图 4(c)展示了 A 点和 C 点之间的压强差继续增大，聚合物继续向上生长，同时工艺进入第二阶段。A 点和 B 点的压强梯度导致更多的聚合物流向拐角处，同时 B 点和 C 点之间的聚合物迅速消耗殆尽，如图 4(d)，(e)所示，并最终形成如图 4(f)所示的周期性球冠结构。

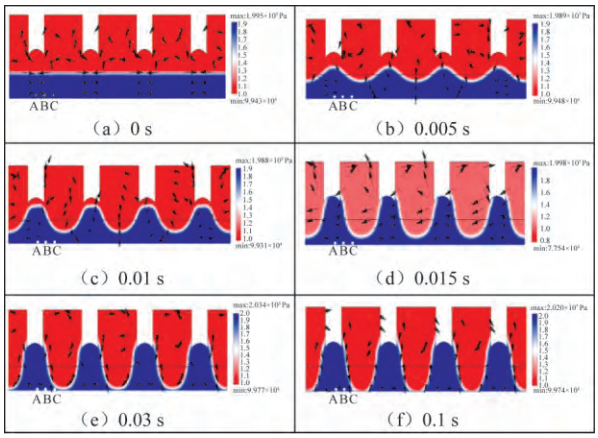

图 4 与图 3 对应的不同时刻压强分布及流速变化

Fig. 4 Variations of pressure(color) and velocity (black arrows) at various time steps for the case of Fig. 3

图 5 所示为初始阶段聚合物表面的电场强度分布，电场分布呈正弦曲线，其中在极板凸起部分对应的电场强度较大，其中 A 点对应最大场强为 9.832×10^6 V/m，表明较大的电场力作用于聚合物薄膜表面，因此该处的内部压强小于周边区域。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

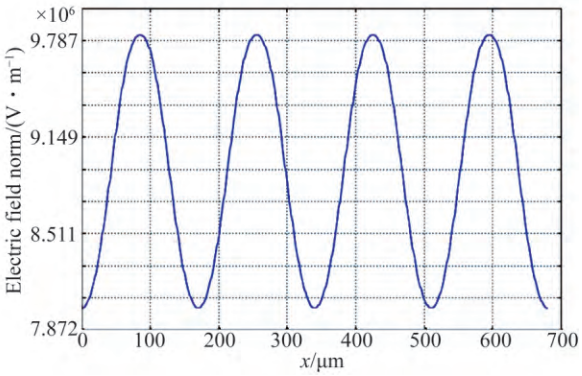

图 5　初始阶段聚合物薄膜表面的电场强度分布

Fig. 5　Initial electric field strength located at the surface of polymer film

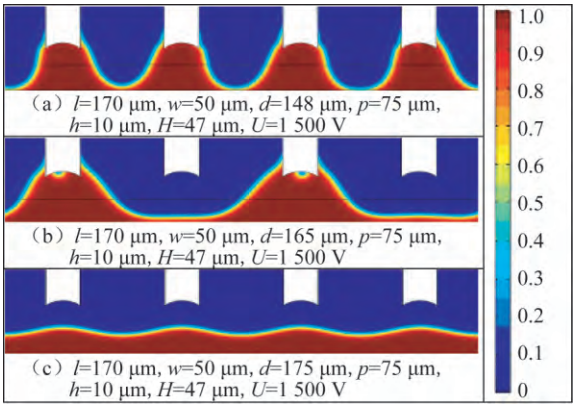

图 6　不同极板间距下静电场辅助压印微结构的变化趋势

Fig. 6　Changing trend of electrostatic field assisted micro imprint lithography with different electrode spacing

3.2　影响微结构成型的主要因素分析

为了对实际加工提供更多的理论指导，提高制备微结构的成功率，对多项工艺参数的影响进行研究，包括极板间距、微结构内凹高度、周期，以及模板凸起高度、电压、初始薄膜厚度等。

3.2.1　极板间距

图 6 所示为 3 组不同参数对应的静电场辅助压印制备微结构的仿真结果，对应不同的极板间距分别为 148，165 和 175 μm，其它参数与图 3 相同(图案化模板凸起高度 75 μm、宽度 50 μm、微结构周期 170 μm、内凹高度 10 μm、初始膜厚 47 μm，电压 1 500 V)，其中红色部分代表聚合物薄膜，蓝色部分为空气。图 6(a)展示了聚合物薄膜首先在静电诱导的作用下，形成了柱状结构，之后经历了微压印过程，在柱状结构顶部形成了微透镜结构；当极板间距增大时，聚合物薄膜在静电诱导作用下，向上生长的位置发生了偏移，对应两个周期的聚合物薄膜开始发生汇聚。之后经过微压印过程，仅得到两个周期的球冠结构，如图 6(b) 所示；极板间距继续增加，对于静电诱导过程，薄膜仅有微小的凸起，无法持续向上生长，工艺不能进入微压印阶段，因此无法得到球冠微结构，如图 6(c)所示。综上，极板间距会对静电诱导过程产生巨大的影响，适当的减小极板间距有利于微结构的成型。

3.2.2　内凹高度

图 7 所示为 3 组不同的参数对应的静电场辅助压印制备微结构的仿真结果，对应不同的微结构内凹高度分别为 5，16 和 25 μm。图 7(a)所示为聚合物经历了静电诱导和微压印过程，在柱状微结构的顶部，形成了曲率半径为 65 μm 的凸透镜。随着内凹高度的增加，如图 7(b)所示，同样可以得到理想的球冠结构，且对应凸透镜的曲率半径为 28 μm。当微结构内凹高度进一步增大，微压印过程会在模板的拐角处发生变化，尽管可以形成曲率半径为 25 μm 的凸透镜结构，然而在其内部会出现约 7 μm 的气泡结构，如图 7(c)所示。综上，适当减小模板微结构的内凹高度利于微结构的成型。

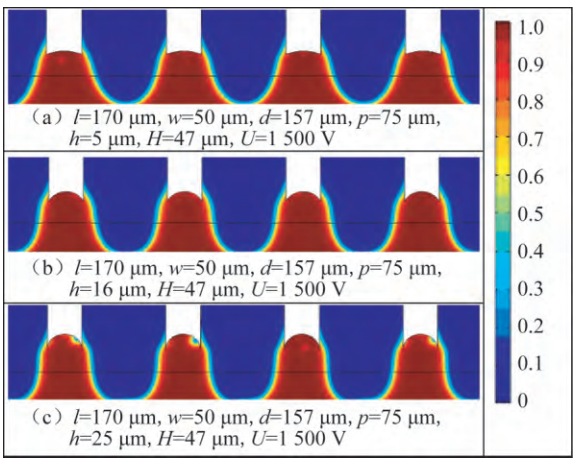

图 7　不同内凹高度下静电场辅助压印微结构的变化趋势

Fig. 7　Changing trend of electrostatic field assisted micro imprint lithography with the different concave height

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3.2.3 微结构周期

图 8 所示为 3 组不同的参数对应的静电场辅助压印制备微结构的仿真结果，对应不同的周期分别为 150，200 和 220 μm。从图 8(a) 中可以看出，当周期取较小值时，在柱状结构的顶部成功制备了曲率半径为 36.25 μm 的凸透镜；随着周期的增大，微压印的过程开始发生变化，仿真结果发现聚合物内部开始出现小气泡，球冠结构也变得不完整，如图 8(b)所示；图 8(c)显示了当微结构周期继续增大时，更多的气泡结构开始出现，导致了球冠结构的制备失败。综上，微结构的周期会影响微压印过程，适当的减小周期利于微结构的成型。

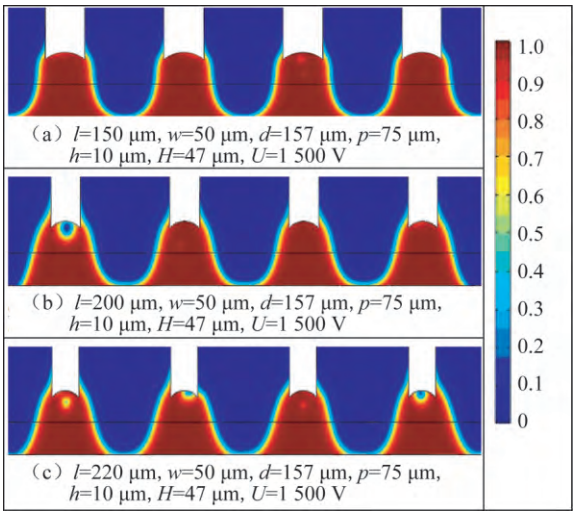

图 8 不同周期下静电场辅助压印微结构的变化趋势

Fig. 8 Changing trend of electrostatic field assisted micro imprint lithography with the different periods

3.2.4 模板凸起高度

图 9 所示为 3 组不同的参数对应的静电场辅助压印制备微结构的仿真结果，对应模板凸起高度分别为 25，50 和 90 μm。从 9(a)可以看到，当凸起高度较小时，聚合物在静电诱导作用下迅速向上生长形成柱状结构，之后与模板接触开始进入微压印阶段，当形成微透镜结构后沿着模板凸起的外沿继续向上生长。微压印过程的改变，导致球冠微结构的面形变差，同时给模板的分离造成了困难；随着极板凸起高度的减小，如图 9(b)所示，球冠微结构面形得到了改善，同时聚合物薄膜在微压印阶段不再沿着模板外沿向上生长；图 9(c)说明，当模板凸起高度进一步减小，可以得到理想的球冠微结构。综上，模板凸起高度会影响微压印的过程，适当的增加模板凸起高度能够促进微结构的成型。

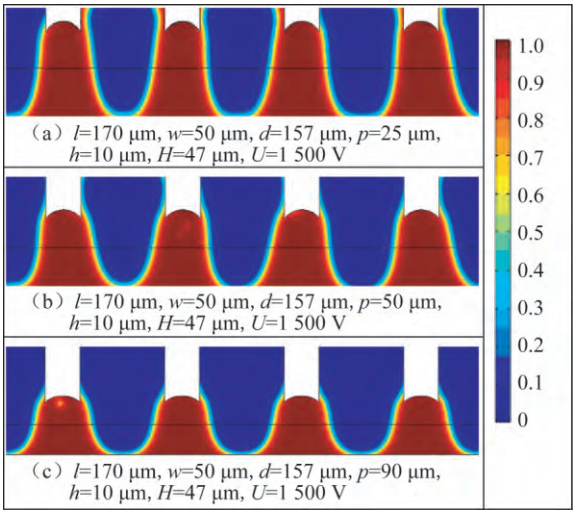

图 9 不同模板凸起高度下静电场辅助压印微结构的变化趋势

Fig. 9 Changing trend of electrostatic field assisted micro imprint lithography with different height of protrusions

3.2.5 电压

图 10 所示为 3 组不同的参数对应的静电场辅助压印制备微结构的仿真结果，对应不同的电压分别为 1 000，1 300 和 2 000 V。当电压仅为 1 000 V 时，在静电诱导作用下，聚合物表面仅有微小的凸起，不能持续向上生长，无法进入微压印阶段，如图 10(a)所示；随着电压的增大，聚合物薄膜可以触碰到模板，进行微压印从而形成规整的球冠结构，如图 10(b)所示。图 10(c)展示了电压继续增大，仍然可以得到理想的球冠结构。综上，电压主要影响了静电诱导的过程，较高的电压利于微结构的最终成型。

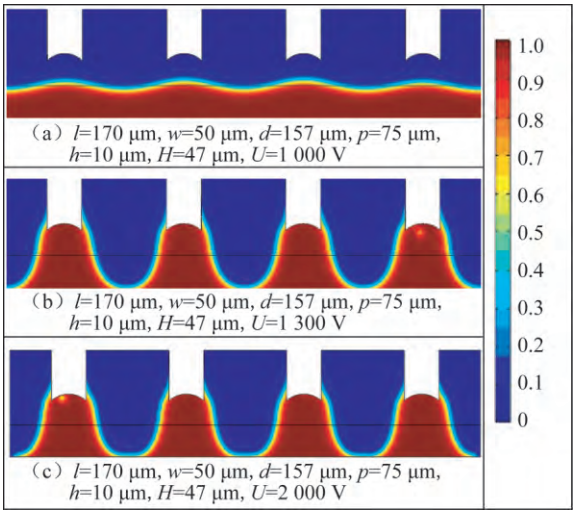

图 10 不同电压下静电场辅助压印微结构的变化趋势

Fig. 10 Changing trend of electrostatic field assisted micro imprint lithography with different voltage

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3.2.6　初始聚合物薄膜厚度

图 11 所示为 3 组不同的参数对应的静电场辅助压印制备微结构的仿真结果，对应不同的初始薄膜厚度分别为 35，40 和 53 μm。图 11(a)显示了当膜厚较小时，微压印产生的凸透镜的面形较好，可以最终得到理想的球冠微结构。当聚合物薄膜厚度继续增加，在静电诱导过程中，聚合物向上生长并不再按照对称的方式进行，导致了形成的柱状结构不对称。当聚合物薄膜与模板接触后，仍然可以进入微压印阶段，最终形成如图 11(b)，(c)所示的球冠结构，与图 11(a)相比，面形不理想。综上，初始聚合物薄膜厚度会对静电诱导过程产生影响，适当的减小厚度有利于微结构的成型。

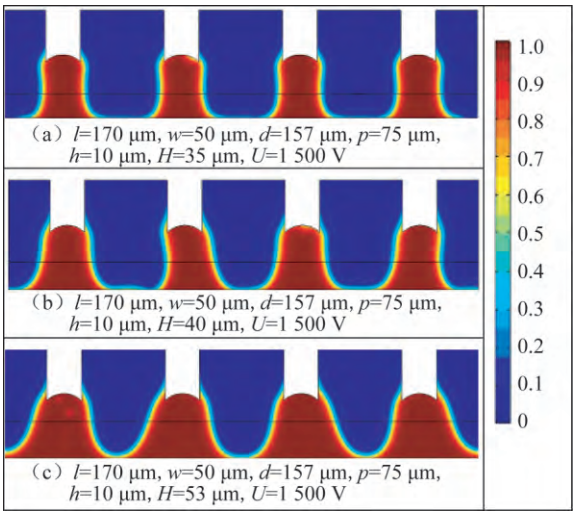

图 11　不同膜厚下静电场辅助压印微结构的变化趋势

Fig. 11　Changing trend of electrostatic field assisted micro imprint lithography with different film thickness

4　多级中空微结构的仿真

在生产过程中，空心的微纳结构在医疗、生物及能源等领域具有广阔的发展前景，其制备方法被深入研究，多采用生物和化学的手段。根据上节多个工艺参数对微结构成形影响的讨论，发现改变和优化工艺参数可以制备中空的微/纳米结构。图 12 所示为静电场辅助压印技术制备中空微结构的薄膜演化过程。其中，极板凸起高度为 75 μm、宽度为 50 μm、微结构周期 170 μm、内凹高度 10 μm，曲率半径为 36.25 μm。上下极板的间距为 157 μm，初始聚合物薄膜厚度为 63 μm，且电压设定为 1 700 V。

工艺过程同样包含了静电诱导和微压印两个阶段：(1)静电诱导下聚合物向上生长过程。图 12(a)展示了初始时刻，聚合物表面平坦。之后由于在模板凸起拐角处存在较大的电场力差，液膜迅速向上移动，且在聚合物的表面出现凹面结构，如图 12(b)所示；(2)聚合物与模板接触后的微压印过程。随着液膜上升，触碰到模板，与图 3 中所展示的演化过程不同，聚合物首先触碰到模板凸起下端拐角处，由两侧沿内凹曲面向中部流动，如图 12(c)所示；之后在结构的顶部聚合物闭合汇聚，同时形成一个中空的结构，如图 12(d)所示；图 12(e)显示在体积力作用下，聚合物继续流动，且中空结构的位置下移；最终形成理想的中空多级结构，其中中空结构的口径为 31 μm，如图 12(f)所示。

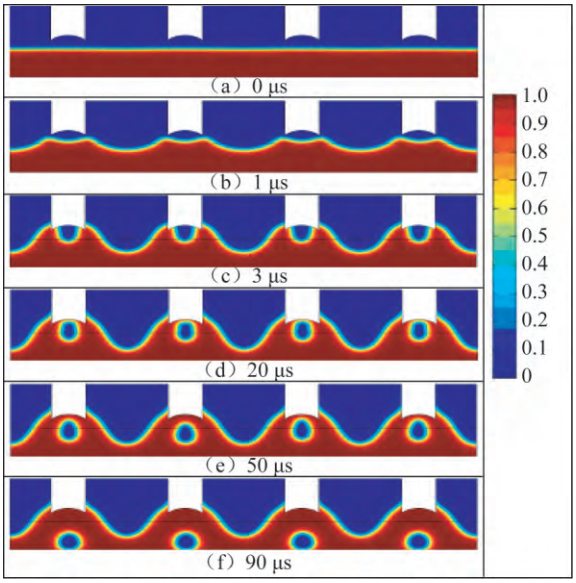

图 12　初始膜厚为 63 μm 时的中空结构时空演化过程

Fig. 12　Spatiotemporal evolution of hollow structures for 63 μm initial film thickness

为了解释中空微结构的成型机理，给出了不同时刻液体内部的压强分布及速度变化趋势，如图 13 所示。对于第一阶段，图 13(a)显示了初始时刻拐角下方液膜存在 4.13×10^4 Pa 的压强差，压强差是由各向异性电场所引起的。图 13(b) 展示了模板凸起拐角处对应的压强比周围区域大，与图 12(b)一致。之后进入工艺的第二阶段，微结构成型过程中中空结构内部的压强比周围的液体压强大且在中空结构的下段压强差最大，因此中空结构一直向下移动，如图 13(c)，(d)，(e)所示。最终，中

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

空微结构达到稳态，如图 13(f)所示。

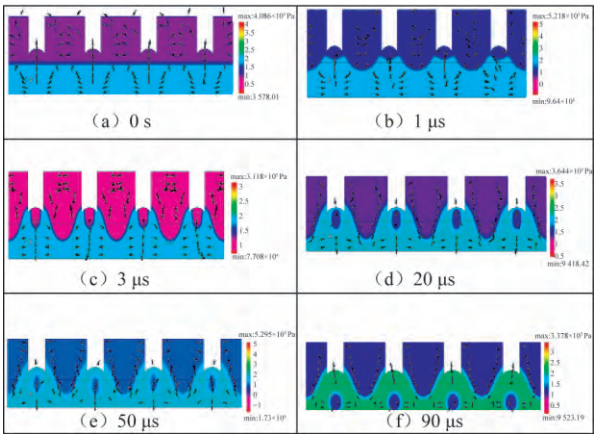

图 13 不同时刻的压强分布(颜色)和流速变化(黑色箭头)

Fig. 13 Evolution of the pressure (color) and velocity (black arrows) at various time steps

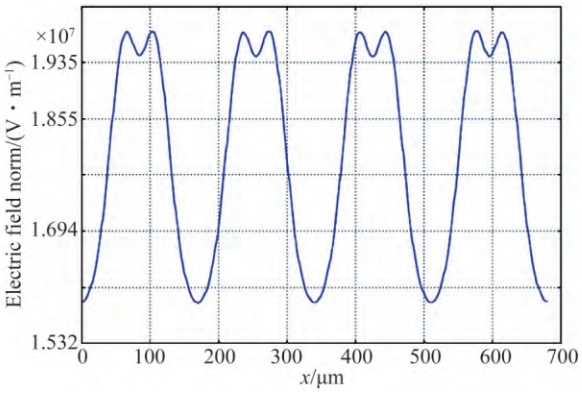

图 14 初始阶段聚合物薄膜表面的电场强度分布

Fig. 14 Initial electric field strength located at the surface of polymer film

图 14 所示为初始时刻聚合物薄膜表面的电场分布，发现在凸起拐角的下方电场强度最大为 1.976×10^7 V/m，对应较大的电场力，而凹面中部对应下方的电场强度最小为 1.942×10^7 V/m，液膜的不稳定性促使聚合物薄膜的向上生长，之后与模板接触进行了微压印，最终形成中空的微结构。

5 结 论

本文介绍了一种新型微压印光刻方法，将静电诱导图案化方法与微压印光刻相结合，与传统压印方法相比，工艺过程简单且成本较低。首先建立了静电场辅助的压印光刻瞬态仿真分析模型，讨论了不同时域微结构的演化过程及成型机理。然后，详细分析了微结构的出现与仿真实验参数的定性关系，结果表明：适当减小上下极板间距和微结构的周期有利于电场诱导形成多级结构，同时，增加模板的凸起高度、初始聚合物薄膜厚度和电压也有助于微纳结构的成型。最后，提出了中空多级结构的制备方法及工艺参数，得到带有 31 μm 中空结构的球冠微结构，证明多级中空微纳结构可以被一步制备。研究成果可以为静电场辅助压印光刻制备微纳结构提供理论指导，能够广泛应用于微电子机械系统、光子学、遗传学和组织系统等。

参考文献：

[1] WHITESIDES G M. The origins and the future of microfluidics [J]. *Nature*, 2006, 442(442): 368-373.

[2] 张运海，杨皓旻，孔晨晖. 激光扫描共聚焦光谱成像系统[J]. 光学 精密工程，2014，22(6)：1446-1453.
ZHANG Y H, YANG H M, KONG CH H. Spectral imaging system on laser scanning confocal microscopy [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(6): 1446-1453. (in chinese)

[3] 朱京涛，岳帅鹏，涂昱淳，等. 氮气反应溅射制备软 X 射线 Co/Ti 多层膜[J]. 光学 精密工程，2015，23(1)：10-14.
ZHU J T, YUE SH P, TU Y CH, *et al.*. Preparation of Co/Ti multilayer in soft X-ray region by nitrogen reactive sputtering [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(1): 10-14. (in chinese)

[4] 叶鑫，倪锐芳，黄进，等. 自组装法制备的亚波长纳米多孔二氧化硅薄膜[J]. 光学 精密工程，2015，23(5)：1233-1239.
YE X, NI R F, HUANG J, *et al.*. Sub-wavelength nano-porous silica anti-reflection coatings fabricated by dip coating method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(5): 1233-1239. (in chinese)

[5] TOBEY A C. Wafer stepper steps up yield and resolution in IC lithography [J]. *Electronics*, 1979, 52(17): 109-112.

[6] HUBRE H, SCHEUNEMANN U. Application of X-ray step-persusing optical alignment for synchrotron based X-ray lithography [J]. *Microelectronic Engineering*, 1989, 9(1-4): 151-154.

[7] EHRFLD, MUNCHMEYE D. Three-dimensional

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

micro-fabrication using synchrotron radiation [J]. *Nulear Instruments and Methods in Physic Research*, 1991, 303(3): 523-526.

[8] LEE Y, GOUGH R A, KING T J, *et al*.. Mcgill. Maskless ion beam lithography system [J]. *Microelectronic Engineering*, 1999, 46(1-4): 469-472.

[9] KIM H S, KIM Y C, KIM D W, *et al*.. Low energy electron beam microcolumn lithography [J]. *Microelectronic Engineering*, 2006, 83 (4-9): 962-967.

[10] ACEVSKA J, STEFKOV G, PETKOVSKA R, *et al*.. Step and flash imprint lithography template fabrication for emerging market applications [C]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 808(12): 1624-1630.

[11] CHOU S Y, KRAUSS P R, RENSTROM P J. Imprint of sub-25nm vias and trenches in polymers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, 67(67): 3114-3116.

[12] CHOU S Y, KRAUSS P R, RENSTROM P J. Imprint lithography with 25-nanometer resolution [J]. *Sci.*, 1996, 272(272): 85-87.

[13] CHOU S Y, KRAUSS P R, RENSTROM P J. Nanoimprint lithography [J]. *J. Vac. Sci. Technol. B.*, 1996, 14(6): 4129-4133.

[14] KRAUSS P R, CHOU S Y. Nano-compact disks with 400 Gbit/in2 storage density fabricated using nanoimprint lithography and read with proximal probeAppl [J]. *Phys. Lett.*, 1997, 71 (21): 3174-3176.

[15] VRATZOV B, FUCHS A, LEMME M, *et al*.. Large scale ultraviolet-based nanoimprint lithography [J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2003, 21(6): 2760-2764.

[16] LANDIS S, PIROT M, LEE R, *et al*.. Silicon solar cells efficiency improvement with Nano Imprint Lithography technology [J]. *Microelectronic Engineering*, 2013, 111(11): 224-228.

[17] SCHAFFER E, THURN-ALBRECHT T, RUSSELL T P, *et al*.. Electrically induced structure formation and pattern transfer [J]. *Nature*, 2000, 403(403): 874-877.

[18] RUHI V, ASHUTOSH S, KAJARI K, *et al*.. Electric field induced instability and pattern formation in thin liquid films [J]. *Langmuir*, 2005, 21 (8): 3710-3721.

[19] LEE S H, JEONG H E, PARK M C, *et al*.. Fabrication of hollow polymeric microstructures for shear-protecting cell containers [J]. *Adv. Mater.*, 2008, 20(4): 788-792.

[20] LI H, YU W, ZHANG L, *et al*.. Simulation and modelling of sub-30 nm polymeric channels fabricated by electrostatic induced lithography [J]. *RSC Adv.*, 2013, 3(29): 11839-11845.

[21] LIU G, YU W, LI H, *et al*.. Microstructure formation in a thick polymer by electrostatic-induced lithography [J]. *J. Micrmesh. Microeng.*, 2013, 23(3): 35018-35025.

[22] SETHIAN J A. *Level Set Methods and Fast Marching Methods* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.

作者简介：

刘民哲(1988－)，**男，山东莱芜人，博士研究生，**2011 **年于内蒙古大学获得学士学位，主要从事微纳加工工艺及微纳器件制作方面的研究工作。**E-mail: liuminzhe_ciomp@126.com

导师简介：

鱼卫星(1975－)，**男，陕西临潼人，研究员，**1998 **年于西北工业大学获得学士学位，**2001 **年于中科院长春光机所获得硕士学位，**2004 **年于新加坡南洋理工大学获得博士学位，主要从事亚波长光学、微纳光学、表面等离子体光学、微细加工技术、三维微纳加工技术等方面的研究。**E-mail: yuwx@opt.ac.cn

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net