

핫엠보싱 공정에서의 미세 패턴 성형에 관한 연구

김 호*·김광순*·김현영**·김병희**

Study of nano patterning rheology in hot embossing process

H. Kim, K.S. Kim, H.Y. Kim and B.H. Kim

Abstract

The hot embossing process has been mentioned as one of major nanoreplication techniques. This is due to its simple process, low cost, high replication fidelity and relatively high throughput. As the initial step of quantitating the embossing process, simple parametric study about embossing time have been carried out using high-resolution masters which patterned by the DRIE process and laser machining. Under the various embossing time, the viscous flow of thin PMMA films into microcavities during compression force has been investigated. Also, a study about simulating the viscous flow during embossing process has planned and continuum scale FDM analysis was applied on this simulation. With currently available test data and condition, simple FDM analysis using FLOW3D was made attempt to match simulation and experiment.

Key Words : Hot embossing(핫엠보싱), Micro/Nano rheology(마이크로/나노 레올로지), PMMA, Throughput(재료처리량)

1. 서론

현재100nm이하의 나노 구조물(nanostructures) 제조방법에는 전자빔(e-beam), 이온빔(ion-beam), SPM, X-ray 리소그래피(lithographies)등이 있다[1]. 그러나 X-ray 나 이온빔 리소그래피와 같은 기술들은 비용이 너무 고가이고, 이러한 결과들은 실험실 단계의 성과로 재료 처리량의 한계가 있기 때문에 산업현장에서 적용하기에는 무리가 있다. 나노 리소그래피(nano lithography)를 산업현장에 적용하기 위해서는 100nm이하의 구조물을 대량 생산할 수 있는 저가이며 높은 재료 처리량을 가지는 적절한 제조 기술이 필요하다[2].

이러한 이유로 기술적으로도 간단하고 경제적인 비광학 리소그래피 기술이 대두 되고 있다[3]. 최근 개발된 이 기술들은 잘 알려진 프린팅(printing)과 엠보싱(embossing)을 바탕으로 한다. 임프린트 리소그래피(imprint lithography)는 ULSI (Ultra Large-Scale Integration)시스템을 제조할 수 있는 유망한 기술 중의 하나이다. ULSI는 두개의 주된 방법으로 분류할 수 있다. Chou의 공동연구자들에 의해 제안된 폴리머 필름의 열적경화 방법과 Colburn의 공동연구자들에 의해 제안된 UV(ultraviolet)경화 방법이다[4,5]. 전자의 공정은, 절연(resist) 폴리머를 유리전이온도(Tg)이상으로 가열하여 몰드 형성 후, 이를 압축하여 폴리머를 변형시키는 것이

* 강원대학교 기계·메카트로닉스공학과 대학원
** 강원대학교 기계·메카트로닉스공학부

고, 반면에 후자는 몰드의 깊숙한 홈으로 액체와 같은 폴리머를 유동시켜 UV노광에 의해 경화시키는 방법이다 [6].

나노 임프린트 리소그래피(NIL, Nano Imprint Lithography)로도 알려진 핫엠보싱 리소그래피(HEL, Hot Embossing Lithography)는 전자에 속한다. 핫엠보싱은 마스터(master)와 열가소성 플라스틱과의 열적·기계적 물성의 차이를 이용한다[7]. 핫엠보싱 공정은 다른 기술들에 비해 몇 가지 장점을 가진다. 광학 리소그래피의 경우는 빛의 회절한계로 인해 대략100nm의 분해능의 한계를 가지고 있지만, 열간 엠보싱은 10nm이하의 분해능을 가질 수 있다. 핫엠보싱은 복제 방법을 사용하므로 제조가 간단하고 재현성이 뛰어나며 재료 처리량도 크고 매우 경제적이다.

그러나 구조물이 점점 작아지고 스텝프 형상도 복잡해지고 있기 때문에, 몰딩(molding)과 디몰딩(demolding)이 이루어지는 동안 불완전 충전(non-fill), 불연속(dis-continuity), 침식(abrasion), 스트레치(stretch)등 많은 문제점들이 나타나게 되었다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안은 아직까지 명확하게 제안되지 않았으며 대부분 시험적인 결과에서 나온 경험을 바탕으로 부분적으로만 제안되었다. 나노 패턴 성형 공정의 문제점을 근본적으로 해결하기 위해서는 성형과정에서 폴리머의 유동 특성을 파악하여 이를 통해 엠보싱 조건과 스텝프 디자인을 최적화 하고, 마이크로·나노 구조물의 제조를 위한 높은 복제 정밀도가 확보될 수 있다.

본 연구는 나노 유동특성 파악의 초기 연구 단계로 핫엠보싱 공정에 대한 기초 시험 결과와 매크로(macro) 스케일의 유한차분법을 이용한 시험적인 유동해석을 수행하였고 핫엠보싱 공정을 사용하여 공정 시간을 변수로 마이크로 단위의 시험을 통해 폴리머의 유동특성을 관찰하였다. 나노 성형 해석에서는 기존의 상용 유동해석 프로그램(FLOW-3D)에 기초적인 경계조건 및 물성치를 사용하여 해석 결과와 실제의 유동특성을 비교 분석하였다.

2. 기초 성형 시험

Schift의 공동연구자들에 의해 검증되어진 모세관 효과(capillary effect)를 관찰하고 충전 과정을 확인하기 위해 다른 공정 변수들은 그대로 유지한 상태에서 엠보싱 시간만을 변화시켜 그 결과를 관찰하였다.

2.1 조건

엠보싱 온도는 130 ℃, 압력은 3bar 로 고정하였고, 10^{-2} Torr의 진공 조건을 사용하였다. 엠보싱 시간은10s, 20s, 30s, 1min, 2min, 3min, 5min 으로 각각 변화시켜 시험하였다.

사용한 엠보싱 머신은 핫엠보싱 전용이 아닌 유리·웨이퍼 본딩기로 그 형태는 핫엠보싱 머신과 거의 유사하다. Fig. 1 에 사용된 웨이퍼 본딩기를 나타내었다. 가열과 냉각 시스템을 갖추고 있고 공압에 의한 압축(press) 시스템, rotary펌프에 의한 저진공 시스템을 갖추고 있다. 그러나 냉각방식이 챔버를 냉각시키는 소극적 냉각 방식이기 때문에 냉각시간이 상당히 소요된다는 단점이 있다.

2.2 마스터 제작

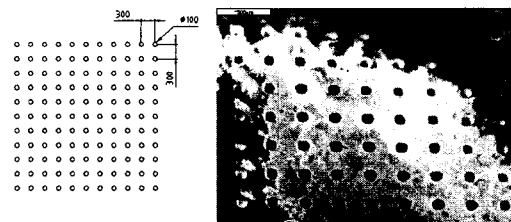
레이저 가공기를 이용하여 1.1mm두께의 내열유리(pyrex)위에 대략100 μ m 크기의 홀을 200 μ m깊이로 300 μ m씩 간격을 두고 10x10 음각 원형 기둥 배열을 배치하였다. Fig.2에 제작된 마스터를 나타내었다. 가공시 레이저 가공기의 전압과 전류는 각각 22.2 kV, 0.028 A를 사용하였다.

2.3 엠보싱 공정

제작된 마스터를 이용하여 엠보싱 시간을 변화시켜가며 시험을 수행하였다. 일반적인 핫엠보싱에서는



Wafer bonding machine Inner chamber
Fig. 1 Shape of bonding machine



draft of stamp fabricated stamp
Fig. 2 Shape of stamp

PMMA를 기판(substrate)에 스핀 코팅(spin coating)하여 사용하였지만 본 시험에서는 판재의 PMMA를 기판 위에 올려 놓고 시험을 수행하였다.

전체적인 시험 공정은 일반적인 핫엠보싱 공정과 동일하게 PMMA 필름을 유리전이온도 이상으로 가열 및 압축시킨 후 일정 시간이 경과하면 온도를 유리전이온도 이하로 냉각시켜 마스터를 디몰드 하는 순서로 수행하였다. Fig. 3에 개략적인 공정을 나타내었다.

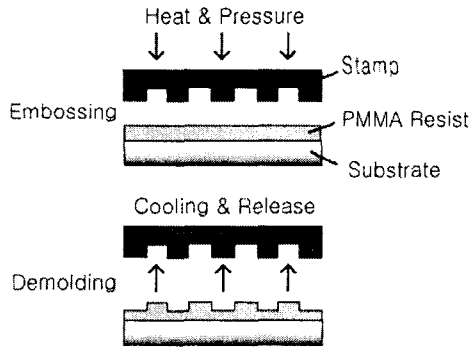


Fig. 3 Schematic representation of Hot embossing

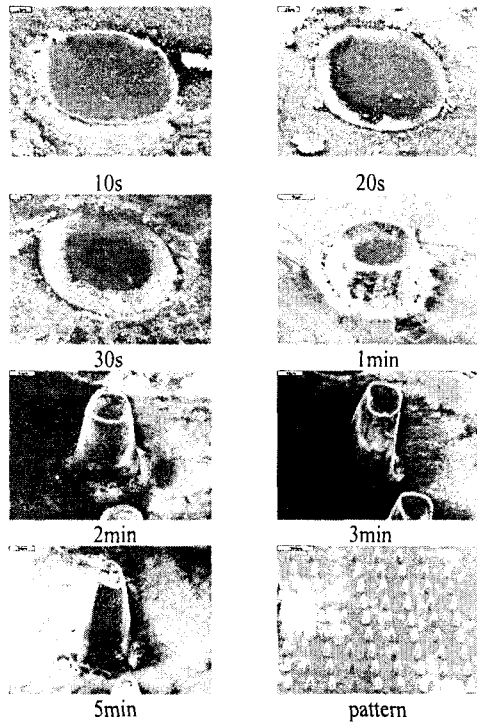


Fig. 4 SEM images of different stages of fill of 100µm circle pillars with 200µm height

2.4 결과 분석

시간에 따른 시험 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 시간에 따른 형상의 변화로부터 미세성형시의 폴리머의 유동이 확인 되었다. 완전하지는 않지만 schift가 증명한 공동의 측벽에서 발생하는 모세관현상도 발견되었다.

나노 단위의 임프린트나 핫엠보싱에서는 고착(sticking), 점착(adhesion) 문제가 심각하기 때문에 반드시 SAM(self assembled monolayer)이나 테프론계통의 필름과 같은 반응착층(anti-adhesion layer)을 증착시키는 것으로 알려져 있으나, 본 시험에서는 마스터의 표면에 어떠한 처리도 하지 않았다.

3. 기초 성형 해석

나노 단위의 성형해석을 수행하기 위한 방법으로는 MD를 이용한 분자 단위의 해석이 최선의 방법으로 대두 되었지만 현 단계의 컴퓨팅 파워와 산업 현장의 현실을 감안하면 수 10년 이후에 도입 가능한 방법으로 여겨지며, 현 단계에서는 기존의 FEM이나 FDM 해석 기술을 이용한 나노 성형 해석 방안을 찾는 것이 하나의 대안으로 떠오르고 있다. 현재까지, 완벽히 검증된 해석 사례는 보고된 바 없어 해석의 정확성을 논의하기가 불가능하다. 나노 패턴 성형 공정의 해석적인 접근을 수행하기 위하여 본 논문에서는 기존의 FDM을 이용한 해석적인 접근을 시도하였다. 소프트웨어는 Flow-3D 유동해석 프로그램을 사용하였다.

3.1 해석 모델 정의

엠보싱 공정의 유로 단면을 형상화한 Fig. 5의 평면변형률 모델을 작성하였다. 스탬프와 PMMA, 기판(substrate)로 이루어져 있으며, 스탬프와 기판은 강체로 처리하였다. 공동(cavity)의 폭과 깊이는 문제의 유형에 따라 중횡비를 0.5 ~ 200 구간에서 변화시켰다. 또한 공동의 개수 및 간격의 변화에 따른 채워짐 형상을 관찰하기 위해 폭 50µm, 두께 20µm의 단면 형상을 이용, 공동의 개수가 2개이며 각기 다른 공동 사이의 간격을 가지는 모델을 작성하였다. PMMA의 두께는 공동 깊이의 1.5배로 설정하였다. 스탬프에 속도를 가해 성형하는 방식을 채택하였으며 성형시간을 실제 공정과 유사하게 29분으로 설정하였다. 성형 온도는 해석에서 고려하지 않고 시험적으로 결정된 각 온도에서의 점성계수를 사용하였다. 점성계수는 190°C에서 230°C사이에서 측정되었으며, PMMA의 추가적인 속성을 부여하기 위해 표면장력(surface tension)과 접촉각(contact angle)을 측정하였다.

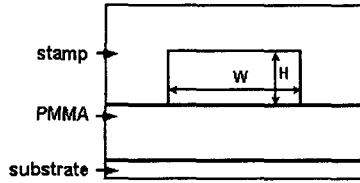


Fig. 5 Cross-sectional shape of flow channel

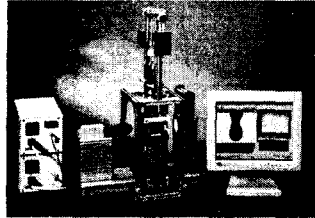


Fig. 6 Surface tension & contact angle tester

Table 1 Boundary condition

Item	Detail
unit	mm/g/sec
flow type	laminar incompressible
viscosity	acquired from test 190 - 230?
scale	width : 50 μ m 50 nm height : 200 μ m 20 nm
embossing time	2 min
density	constant uniform density
surface tension	Acquired from test

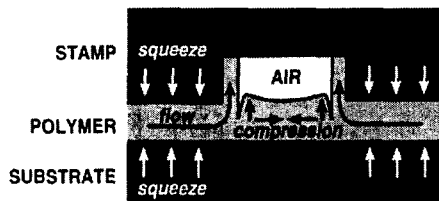


Fig. 7 quoted schematic representation showing filling of a stamp cavity in micro scale (by PSI Schiff et al.)

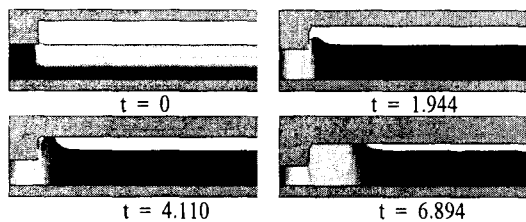


Fig. 8 Simulation result showing filling process of a stamp cavity with PSI Schiff model

Fig. 6에 표면장력에 측정에 사용된 수원대학교 TICEM의 측정 장비를 나타내었다. 유체적인 특성으로는 점성(viscous flow), 비압축성(incompressible flow), 층류(laminar flow) 조건을 사용하였다. 사용단위는mm, g, sec이며 경계 조건을 Table 1에 나타내었다.

3.2 검증 해석

마이크로/나노 단위의 유동 시험에 대한 기존 FDM의 검증적인 차원의 해석을 실시하였다. 비교 자료는 Schiff 등이 발표한 마이크로 단위의 엠보싱 공정에서 나타난 벽면 유동 시험자료를 사용하였다[8]. Schiff논문의 시험 모델을 도식적으로 표시한 그림을 Fig. 7에 나타내었다. 논문의 자료를 토대로 폭 20 μ m, 깊이 175 nm의 공동을 작성하였으며 200 정도의 종횡비를 나타내었다. Fig. 8에 해석 결과를 나타내었다. 본 해석에서 PMMA의 속성으로는 200 $^{\circ}$ C의 점성값만을 적용하였으며 표면장력과 접촉각은 적용하지 않았다.

Schiff의 논문에서 언급된 공동의 벽면을 타고 올라가는 유동형상이 관찰되었으며 해석결과 이러한 유동특성은 PMMA만의 유동특성이 아닌 종횡비가 큰 공동형상의 squeeze flow와 내부 공기압에 따른 유동특성으로 관찰되었다.

3.3 점성의 변화에 따른 유동 특성검증 해석

종횡비 2에서 폭 50 μ m에서 50nm까지 스케일의 변경과 점성계수 값을 변화시켜 유동 양상을 관찰하였다. PMMA의 속성에 표면장력이나 접촉각은 적용하지 않았다. Fig. 9에 각 시간에 따른 50 μ m 폭 형상의 엠보싱 공정 해석 결과를 나타내었다. 해석의 초기에 공동의 벽면을 타고 올라가는 현상이 미약하게 나타났으나 이후의 공정에서는 보이지 않았으며 점성의 영향으로 공동의 외벽 부근의 흐름은 고정되었고 중심부에서 먼저 채워지는 일반적인 층류의 전형적인 흐름 현상을 확인할 수 있었다. 그림에서 화살표는 속도 벡터를 의미하며 유동의 흐름 방향을 나타낸다. 이러한 흐름의 경향은 나노 스케일(50nm)로 변화시켰을 때까지 이어졌다. 점성계수값을 온도를 증가함에 따라 변화시켰을 경우에는 점성계수가 높아질수록 스탬프에 작용하는 압력이 증가하는 경향을 나타내었으며, 점성에 따른 유동 양상의 변화는 확인할 수 없었고 모든 점성계수 범위에서 동일한 유동양상을 나타내었다.

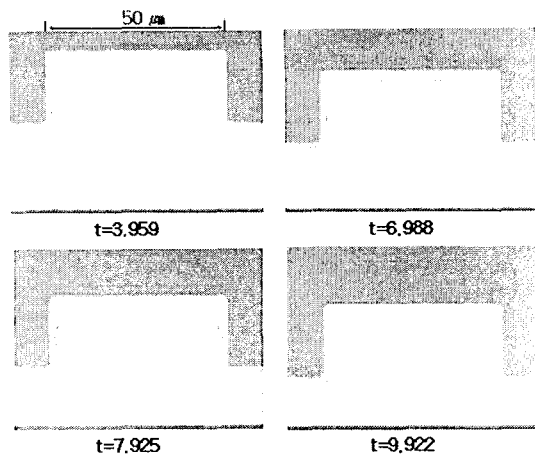


Fig. 9 simulation result of hot embossing process using 50 μm width, 20 μm height, 190 $^{\circ}\text{C}$ temperature, 110000 Pa \cdot s viscosity coefficient

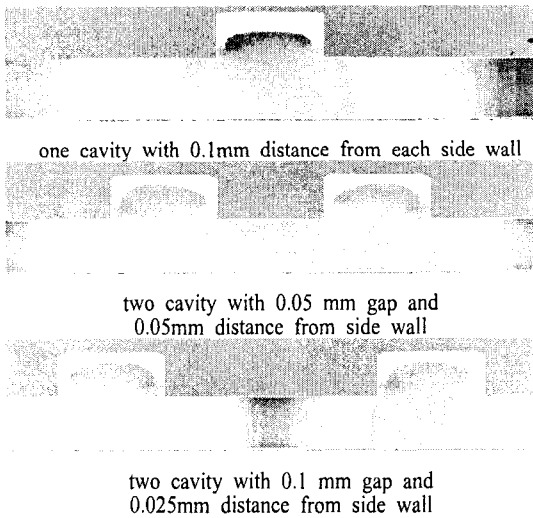


Fig. 10 simulation result by changing the number of cavity and it's gap, distance.

3.4 공동 사이의 간격에 따른 유동 특성

공동과 외벽사이의 거리와 공동과 공동 사이의 간격에 따른 유동 양상도 해석을 통하여 관찰하였다. 0.15mm길이의 스탬프에 폭 50 μm , 높이 20 μm 의 공동 형상을 사용하였으며 1개의 공동만을 사용하였을 경우와 2개의 공동과 공동 사이의 간격을 달리한 경우를 고려하였다. 해석 결과 공동과 스탬프 외벽의 거리가 길어짐에 따라 외벽을 따라 올라가는 현상이, 거리가 짧을 경우보다 많이 관찰 되었으며 공동과 공동 사이의 간격이 작을 경우 고압력이 스탬프 외벽에서 발생하여 공동의 바깥면 방향에서 폴리머가 먼저 채워지는 현상과 공동 사이의 간격이

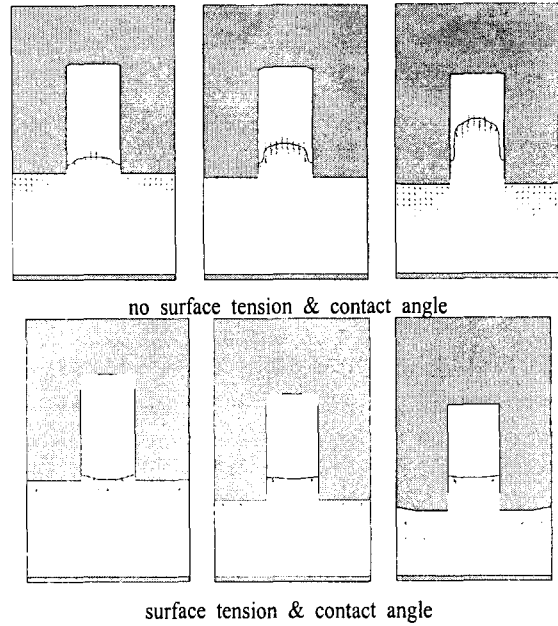


Fig. 11 comparison of simulation result by applying surface tension (73 dyne/cm) and contact angle (45 deg.)

길 경우 고압력은 공동 사이의 간격 중심부에서 발생하여 공동의 안쪽면 방향에서 폴리머가 먼저 채워지는 현상을 확인하였다. Fig. 10에 해석 결과를 나타내었다.

3.5 표면장력의 적용에 따른 유동 특성

측정된 PMMA의 표면장력과 접촉각을 적용하여 적용하지 않았을 때의 해석 결과와 비교하였다. 해석 조건은 상기의 언급된 해석조건과 동일하며 비교 대상으로는 Fig. 4의 핫엠보싱 시험 결과를 사용하였다. Fig. 11에 해석 결과를 나타내었다. 표면 장력이 적용되지 않은 모델의 경우 공동의 중심부가 먼저 채워지는 유동 특성을 보인데 반해 표면장력이 적용된 모델의 경우 벽면의 수위가 중심부보다 높게 흐름이 형성되어 채워지는 양상을 나타내었다. Fig. 4의 시험결과 역시 벽면부터 채워지는 유동을 보여 표면장력이 적용된 해석의 PMMA 유동이 시험과 가까운 결과를 나타내었다.

4. 결 론

본 연구는 나노 유동특성 파악의 초기 연구 단계로 기존에 발표되었던 문헌의 조사를 통한 나노 성형의 현단계 기술과 문제점을 조사하고, 핫엠보싱 공정에 대한 기초 시험 결과와 매크로 스케일의 유한차분법을 이용한 시험 단계의 유동해석을 수행하였다.

개략적인 폴리머의 유동특성을 관찰 할 수 있었으며 완전하지는 않지만 Schiff가 증명한 공동의 측면에서 발생하는 모세관현상도 발견되었다.

나노 패턴 성형공정을 기존의 해석적인 방법으로 접근 하기 위하여 유한차분법을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 기존 시험 결과와의 비교를 위하여 여러 중 형비의 단면 형상을 사용하였으며, 폴리머 유동 현상을 관찰하기 위하여 스케일(scale)과 점성계수를 변경하면서 유동해석을 실시하였다. Schiff논문에서 언급된 벽면을 타고 올라가는 유동 특성은 스텝형의 특성으로 판단되었다. 50 μ m에서 50nm까지 스케일의 변경과 점성계 수 값을 변화시켜 해석한 결과 동일한 유동 양상을 관찰 하였으며, 스케일의 변화와 점성의 변화에 따른 유동 양 상의 변화는 관찰할 수 없었다.

표면장력을 적용한 경우와 적용하지 않은 경우를 구분 하여 해석을 수행하였으며 시험결과와 비교하였다. 공동 의 벽면이 중심부 보다 높게 흐름이 형성되는 특정 공동 형상의 유동 특성은 표면장력을 적용한 해석 모델이 대 체적으로 근사한 결과를 보여주었으나 일반적으로 증명 되지는 못한 상태이다. 추후 표면장력과 접촉각, 점성계 수의 계획적인 시험 적용을 통하여 일반적인 유동해석의 기준을 세울 필요가 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 21C프론티어 사업 중 한국기 계연구원원이 주관하고 있는 나노메카트로닉스 기술개발 사업의 세부과제인 "나노패턴 성형 공정기술"의 위탁과 제 수행결과와 일부로 세부과제 주관기관인 연세대학교 와 ETRI의 도움에 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) L.Piroux, J.M.George, J.F.Despres, C.Leroy, E.Ferain, R.Legras, K.Ounadjela, A.Fert, 1994,

"Giant magnetoresistance in magnetic multilayered nanowires", Applied Physics Letters, vol.65, issue19, 2484-2486

(2) Frank Gottschalch, Thomas Hoffmann,Clivia M. Sotomayor Torres, Hubert Schulz, Hella-Christin Scheer, 1999, "Polymer issues in nanoimprinting technique", Solid-State Electronics, vol.43, 1079-1083

(3) Hongwei Li, Wilhelm T. S. Huck, 2002, "Polymers in nanotechnology", Current Opinion in Solid State and Materials Science, vol.6, 3-8

(4) Stephen Y. Chou, Peter R. Krauss, Preston J. Renstrom, 1995, "Imprint of sub-25nm vias and trenches in polymers", Applied Physics Letters, vol.67, 3114

(5) Colburn M., Johnson S., Stewart M., Damle S., Bailey T., Choi B., Wedlake M., Michaelson T., Sreenivasan S.V., Ekerdt J.,Willson C.G., 1999, "Step and flash imprint lithography: A new approach to high-resolution patterning", Proc. SPIE, vol.3676, 379

(6) Yoshihiko Hirai, Masaki Fujiwara, Takahiro Okuno and Yoshio Tanaka, 2001, "Study of the resist deformation in nanoimprint lithography", Journal of Vacuum Science and Technology B, vol.19, issue6, 2811-2815

(7) H.Schift, R.W.Jaszewski, C.David and J.Gobrecht, 1999, "Nanostructuring of polymers and fabrication of interdigitated electrodes by Hot Embossing Lithography", Microelectronic Engineering, vol.46, 121-124

(8) L.J Heyderman, H. Schift, C. David, J. Gobrecht, T. Schweizer,2000, "Flow behavior of thin polymer films used for hot embossing lithography", Microelectronic Engineering, vol.54, 229-245