

수정된 DXRL 공정에 의한 미세구조 제작

김진태[†] · 한상필^{*} · 정명영^{**} · 정석원^{***}

(2003년 2월 4일 접수, 2003년 7월 5일 심사완료)

Fabrication of a Micro-Structure by Modified DXRL Process

Jin Tae Kim, Sang-Pil Han, Myung Yung Jeong and Suk Won Jung

Key Words : LIGA(리가), Deep X-Ray Lithography(깊은 X선 사진식각), Synchrotron(싱크로트론), Micro-Structure(미세 구조물)

Abstract

Deep X-ray lithography (DXRL), a fabrication method for the production of microstructures with a high aspect ratio, plays an important role in the subsequent electroplating process. However, secondary radiation is generated during X-ray exposure and damages the resist adhesion to the metal layer. To solve adhesion problems, we modified the conventional DXRL process, changing the sequence of polymer adhesion in DXRL process. With optimized X-ray exposure and development conditions based on a calculated and modified X-ray power spectrum, we fabricated various polymer microstructures and achieved a maximum aspect ratio of 40.

1. 서 론

노광 공정 (Lithographie), 도금(Galvanformung), 성형(Abformung)의 3단계 공정으로 구성되는 LIGA 공정⁽¹⁾은 표면조도가 우수하고 높은 종횡비(aspect ratio)를 갖는 미세구조물을 저가격으로 용이하게 대량 생산할 수 있는 기술로 최근 많은 각광을 받고 있으며, 광부품, 의료, 생화학, 기계 공학 등 다양한 학문에 적용되고 있다.^(2,3)

방사광 가속기에서 방사되는 X-선을 이용한 Deep X-Ray Lithography (DXRL) 공정은 LIGA 공정의 첫번째 단계로 최종 미세구조물의 정밀도를 결정하는 중요 공정이다. 일반적인 DXRL 공정은 도금 기저시판으로 사용되는 금속 또는 금속 박막 위에 고분자 레지스트를 부착하고,⁽⁴⁾ 가속기의 방사광을 이용하여 X-선 마스크의 흡광체 패턴을

전사한 후, 현상 공정을 통해 구조물을 구현하는 순서로 이루어진다.⁽⁵⁾ 이때 금속과 고분자 레지스트 간의 접착력 증대를 위해 접착제(adhesion promoter)를 사용하기도 하며,⁽⁶⁾ 가속기 X-선에 의해 노광되는 고분자 레지스터는 사슬절단 반응(chain scission reaction)에 의해 분자량이 현저히 줄어들어 현상액에 용해된다.^(6,7)

DXRL 공정을 통해 구현된 레지스트 구조물은 이후 도금을 통해 형성되는 최종 금속 미세구조물의 형태와 정밀도를 결정하기 때문에 형성된 레지스트 구조물의 화학적 안정성과 금속 박막과의 접착력이 무엇보다 중요하다.⁽¹⁻³⁾ 최근, LIGA 공정의 응용범위 확대에 따라 높은 종횡비의 미세구조물 제작에 대한 수요는 점차 증가하고 있으나, 높은 종횡비의 고분자 미세구조물 제작을 위한 장시간의 X-선 노광은 금속 박막과 구현된 레지스트 구조물 간의 접착력을 약화시키는 주 요인으로 작용하고 있다.⁽⁸⁾

X-선 노광 중 금속 박막에서 발생하는 이차방사(secondary radiation)는 임의의 방향으로 진행하고, X-선에 조사되지 않아야 하는 레지스트-금속 박막 접착부분의 일부를 노광시킨다. 이차방사에 영향을 받은 레지스트 접착부분은 현상공정에서 일부

[†] 책임저자, 회원, 한국전자통신연구원 광집속모듈팀

E-mail : myjinny@etri.re.kr

TEL : (042)860-6005 FAX : (042)860-6248

^{*} 한국전자통신연구원 광집속모듈팀

^{**} 회원, 한국전자통신연구원 광집속모듈팀

^{***} 전자부품연구원 나노메카트로닉스연구센터

본이 현상되어 레지스트 미세구조물의 일부 또는 전체가 급속 박막으로부터 떨어져 나가는 결과를 초래한다. 이차방사 현상의 단점을 극복하기 위하여 X-선 노광에 사용되는 X-선 마스크의 금(Au) 패턴의 두께를 변화시키거나,⁽⁸⁾ 도금을 위해 사용되는 급속 박막을 이차방사 발생이 현저히 낮은 흑연과 같은 전도성 물질로 대체하거나,⁽⁹⁾ 가속기에서 방사되는 X-선의 중앙부에 얇고 불투명한 beam-stop을 장치하여 고에너지 X-선의 세기를 조절하여 노광하는 방법⁽¹⁰⁾과 같은 다양한 연구들이 진행되어 왔다. 그러나 위와 같은 선행 연구 결과는 레지스트를 급속에 부착하고 X-선 노광을 수행하는 전통적인 DXRL 공정을 이용함으로써 X-선 노광 중 발생하는 이차방사 현상을 완전히 극복하지는 못하였다.

본 연구에서는 전통적인 DXRL 공정을 수정하여 이차방사에 무관한 DXRL 공정을 수행하고 이를 통해 레지스트-급속 간 접착력이 강화된 높은 종횡비의 레지스트 미세구조물을 제작할 수 있는 방법을 제안하고자 한다.

2. 전통적 DXRL 공정의 문제점 및 개선 공정 개념

2.1 전통적인 DXRL 공정 및 문제점

전통적인 DXRL 공정은 가속기에서 방사되는 X-선을 이용하여 도금공정을 위해 급속 시편 위에 부착된 감광막에 원하는 패턴이 형성된 X-선 마스크를 통하여 감광막의 일부를 노광(irradiation)시키는 공정이다. X-선 노광 중 마스크에 의해 가려지지 않는 부분의 감광막은 사슬절단(chain scission)에 의해 분자량이 줄어들고 이후 현상 과정에서 녹아 없어져 원하는 레지스트 구조물을 형성하게 된다.

수십 마이크로 이상의 두꺼운 레지스트에 고른 X-선 노광을 위해 필요한 조사량 D 의 계산은 다음 식 (1)로부터 구할 수 있다.⁽¹¹⁾

$$D = t_{\text{exp}} I_{\text{syn}} \int \alpha(y)_{\text{res}} T(y)_{\text{mask}} T(y)_{\text{abs}} T(y)_{\text{res}} P(y) dy \quad (1)$$

여기서, t_{exp} 는 노광 시간, I_{syn} 는 가속기 전류, $\alpha(y)_{\text{res}}$ 는 감광막의 X-선 흡수계수, $P(y)$ 는 방사광 가속기에서 방사되는 광자 에너지의 일률(radiation power)로 자세한 유도과정은 다양한 참고 문헌에 잘 나타나 있다.⁽¹¹⁾ $T(y)_{\text{mask}}$, $T(y)_{\text{abs}}$,

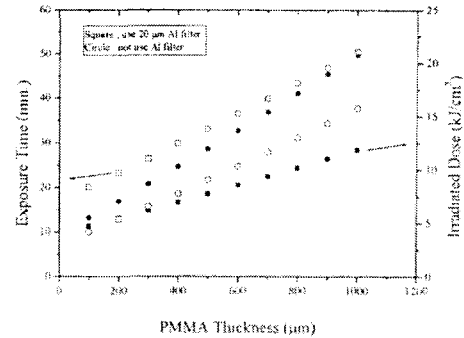


Fig. 1 X-ray exposure time and top dose (D_{Top}) variation according to the thickness of PMMA ($D_{\text{Bottom}} = 4 \text{ kJ/cm}^2$, beam current=150mA, scan length = 5cm). Square ; used 20 µm Al filter, Circle ; not used

$T(y)_{\text{res}}$ 은 각각 마스크, 흡광체, 감광막의 X-선 투과율이다. 여기서 $y = hv$ 로 h 는 플랑크 상수, v 는 광자의 진동수이다. 일반적으로 물질의 X-선 투과율 $T(y)$ 은 $T(hv) = e^{-\alpha(hv)z}$ 이며, 여기서 $\alpha(hv)$ 는 X-선 에너지에 따른 감쇠계수, z 는 물질의 두께이다.

LIGA 공정에서 널리 사용되는 레지스트인 poly(methyl methacrylate) (PMMA)에 대한 최소 조사량(dose)은 2 kJ/cm^2 이며, 현상 속도의 신속성과 좁은 영역의 패턴이 부분적으로 현상되는 것을 방지하기 위해서는 바닥면에 조사되는 조사량이 4 kJ/cm^2 이하여야 한다. 이때 PMMA 표면의 조사량은 20 kJ/cm^2 이하가 되도록 하고, 현상되지 않는 PMMA 영역은 100 J/cm^2 이하가 되도록 해야 한다.⁽⁵⁾

높은 종횡비(aspect ratio)의 PMMA 구조물 제작을 위해서는 LIGA 공정에 사용되는 PMMA의 두께 증가를 요구한다. PMMA의 효율적인 현상공정 수행을 위해서는 PMMA의 두께와 관계없이 바닥면에 조사되는 X-선 조사량이 4 kJ/cm^2 이 만족되어야 한다. 그러나 PMMA의 바닥에 도달하는 X-선 에너지는 PMMA의 X-선 흡수계수로 인해 PMMA 두께와 비례하는 노광 시간을 요구하며, 이는 동시에 PMMA 표면의 급격한 조사량 증가를 유도한다. PMMA의 두께 증가에 따른 노광 시간 및 PMMA 표면의 X-선 조사량을 식 (1)을 통해 계산한 결과를 Fig. 1에 나타내었다. PMMA 두께 증가에 따른 표면 조사량의 증가는 노광 중 PMMA 표면의 온도 상승을 유도하고 노광면에 거품(bubble) 형태의 결점(defect)을 발생시키며, 비 노광면에서는 크랙(crack)이 발생한다. 이는 현상 공정에서

구현되는 미세구조물의 모양과 치수 정밀도를 저하시키는 원인으로 작용한다.

이와 같은 현상을 방지하기 위해서는 PMMA 두께 증가에 관계없이 표면에 조사되는 X-선 조사량을 조절해야 한다. X-선 조사량을 조절하는 방법으로는 알루미늄 필름, 폴리이미드(polyimide), Be, 등을 이용하여 X-선 스펙트럼의 임계파장을 변화시켜 파장분포가 고에너지 스펙트럼 분포로 변화시켜 PMMA의 표면과 바닥면의 조사량 차를 줄이는 것이다. Fig. 1에 20 μm 알루미늄(Al) 필름을 이용하여 X-선 에너지 스펙트럼을 변화시켰을 때, PMMA 두께 증가에 따른 노광 시간 및 표면 조사량을 나타내었다. 알루미늄 필터를 사용하여 노광하는 경우 그렇지 않은 경우보다 약 50% 정도의 표면조사량 감소 효과를 얻을 수 있다. 그러나 고에너지 X-선의 높은 투과성으로 PMMA의 조사량 4 kJ/cm^2 를 만족하기 위해서는 보다 많은 노광 시간이 소요되는 단점이 있다.

임계파장의 변화에 의해 PMMA 두께 증가에 따른 표면조사량의 급격한 증가는 방지할 수 있지만, 그로 인한 고에너지 X-선 스펙트럼은 급속의 이차방사 발생 가능성을 증대시킨다. 이차 방사의 주는 형광방사(fluorescence radiation)로써, X-선의 파장에 대해 λ^2 으로 비례하고 짧은 파장의 X-선은 더 긴 노광 시간을 요구함으로써, 노광 중 더 많은 이차방사를 발생시킨다. 이차방사는 임의의 방향성으로 진행하여 PMMA-금속 접착 부분의 일부를 노광시키고, 노광된 PMMA-금속 간 접착부분은 현상 시 현상되어 구현되는 구조물의 접착력을 저하시킨다.⁽⁸⁾

Fig. 2는 마이크로 기어 제작을 위한 PMMA 미세구조물로 고에너지 X-선에 의한 PMMA와 금속 간의 접착력 약화의 실험적 결과를 보여주고 있다. (a)와 (b) 모두 동일한 100 μm 두께의 PMMA에 X-선 임계파장을 각각 1.8 \AA , 1.3 \AA 로 변환하여 바닥 조사량이 4 kJ/cm^2 이 되도록 X-선을 조사하고 현상한 결과이다. 임계파장이 짧은 (b)의 경우 현상 과정에서 미세구조물의 일부가 떨어지는 현상을 관찰할 수 있다.

Fig. 3은 7 \times 7 μm^2 의 직선형 미세패턴 제작을 위해 도금을 수행한 결과로, 노광 중 금속 박막에서 발생된 이차방사가 PMMA와 금속의 접착력을 감소시켜 도금 이후 직선형 패턴 주위에 불필요한 구조물이 형성된 결과를 보여주고 있다.

이와 같은 DXRL 노광 공정 중의 이차방사 영향은 PMMA의 두께 증가에 따라 사용되는 X-선 임계파장이 감소할수록 더욱더 현저하게 나타난다. 따라서 높은 중형비를 갖는 PMMA 미세구조물 제

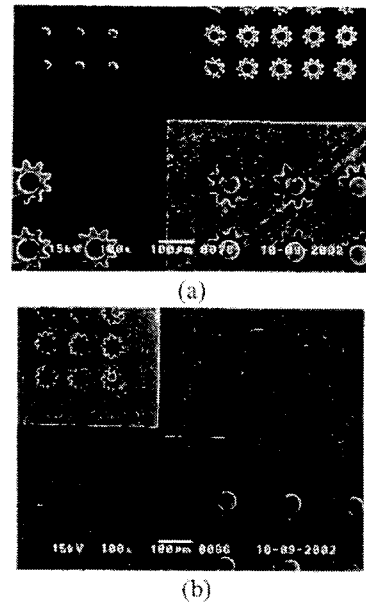


Fig. 2 SEM Pictures of the developed PMMA resist structure with different critical wavelength of x-ray spectrum. (a) 1.8 \AA , (b) 1.3 \AA

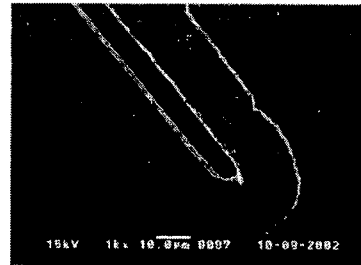


Fig. 3 Parasitic micro-structure was generated after electroplating because of decreased resist adhesion caused by the second radiation (SEM image)

작을 위해서는 이차방사의 영향에 무관한 DXRL 공정 개선이 필요하다.

2.2 수정된 DXRL 공정

노광 중 발생하는 이차방사의 영향으로부터 PMMA의 접착력을 보호하기 위한 기존의 연구들은 X-선 마스크 뒷면에 선흡수체(pre-absorber)를 위치시켜 X-선 마스크로부터의 이차방사 효과를 감소시키거나,⁽⁸⁾ 도금을 위해 사용되는 PMMA 하단부의 전도층 물질을 흑연과 같은 비금속 물질로 대체하거나,⁽⁹⁾ X-선 중앙부에 얇고 불투명한 beam-stop을 장치하여 고에너지 X-선의 세기(intensity)를 감소시키는 등의 방법을 고안하였다.⁽¹⁰⁾ 그러나 이러한 방법은 근본적으로 PMMA를 금속 박막에 부착하고 X-선에 노광하는 방법으로 이차방사의 영향을 완전히 줄일 수는 없었다.

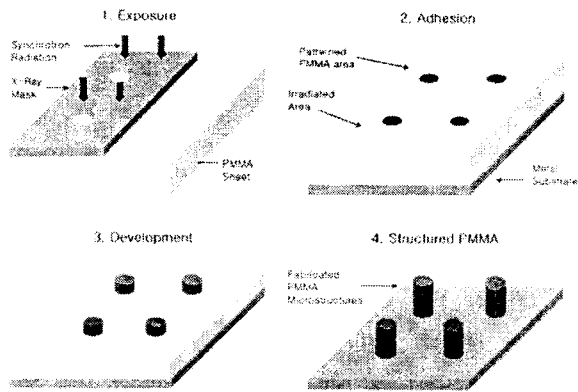


Fig. 4 Modified deep x-ray lithography process

노광 중 발생하는 이차방사로부터 PMMA를 보호하기 위하여 Fig. 4와 같이 수정된 DXRL 공정을 제안하였다. 우선, PMMA 시편을 금속 박막에 접촉한 후 X-선 노광 공정을 수행하는 전통적인 방법 대신, PMMA를 금속에 접촉하지 않고 PMMA 시료 자체를 X-선에 노광시킨다. X-선 마스크와 PMMA 시료를 통과한 고에너지의 X-선은 금속 박막에 흡수되고 X-선에 노출된 금속은 이차방사를 생성시킨다. 이 이차방사는 임의의 방향으로 진행함으로 X-선 마스크에 의해 직접적으로 X-선에 노출되지 않는 PMMA 패턴의 바닥면 즉, 금속과 접촉되는 부분에 일정량의 X-선 노광 효과를 가하므로 현상 공정 중 미세구조물의 가장자리 일부를 현상시킨다. 이러한 현상(phenomena)에 의해 구조물의 접촉면적이 상대적으로 적은 경우에는 현상 후 금속과 접촉한 미세구조물의 면적이 줄어 들고 동시에 접착력이 약화됨으로 금속 박막으로부터 완전히 분리되는 결과를 초래한다. 따라서 수정된 DXRL 공정에서는 이와 같은 금속의 이차방사로부터 PMMA 시편을 보호하기 위해 PMMA 시료를 금속 박막에 접촉하지 않고 노광한다.

X-선에 노광된 PMMA 시료는 전통적인 PMMA-금속 접촉 방법⁽⁴⁾에 의해 금속에 부착할 수 있다. 이때 X-선에 직접적으로 노출된 PMMA 시료의 면이 금속과 부착되지 않도록 주의해야 한다. X-선에 직접적으로 노출된 PMMA 면은 반대면에 비하여 상대적으로 많은 양의 X-선에 노출되어 부착 공정 중 부서지기(fragile) 쉬우며, X-선 마스크에 의해 가려진 패턴 부분은 금(Au) 흡광체를 통과한 고에너지 X-선에 의해 일부분이 조사됨으로 분자량이 변화하여 금속과의 접착이 용이하지 않기 때문이다.

금속 박막에 부착된 PMMA 시료는 소위 GG 현상액⁽⁷⁾에 의해 현상된다. 이때 현상 속도 증가를

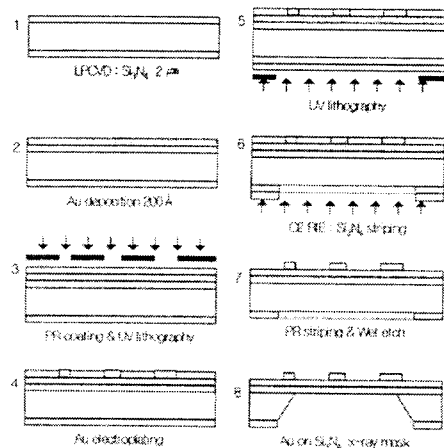


Fig. 5 Sequence of steps in the fabrication of Au-on-Si₃N₄ x-ray mask

위해 현상액의 온도를 증가시키는 경우에는 금속과 PMMA 시료의 열팽창계수 차에 의해 구조물이 분리될 수 있으므로 주의해야 한다.

3. 실험

3.1 X-선 마스크 제작

X-선 마스크는 Au-on-Si₃N₄ 마스크를 이용하였다. Fig. 5에 보는 바와 같이 Si 기판 위에 LPCVD 공정을 통해 기판 양면에 2 μm 두께의 Si₃N₄막을 형성한다. Si 기판 한쪽 면에 Au를 0.02 μm로 증착하고, PR을 도포한 후 일반적인 UV-lithography를 이용하여 패턴링 한다.

패터닝된 Si 웨이퍼에 Au를 8 μm 두께로 도금한다. Au가 증착되지 않은 면에 PR을 도포하고 앞서와 같이 UV-lithography를 통해 PR을 패턴링 한다. 이때 PR 패턴은 앞서 도금한 Au 패턴을 모두 포함하도록 하는데, Au-on-Si₃N₄ X-선 마스크 제작을 위해 Au 패턴의 하단 Si를 식각하기 위한 것이다. Si 식각을 위해 O₂ RIE를 통해 노출된 Si₃N₄막을 제거한다. Si 웨이퍼 양쪽에 남아있는 PR을 제거하면 한쪽 면은 Au 도금된 패턴이, 반대 면은 Si₃N₄막이 일부 제거된 Si 웨이퍼를 얻는다. 이를 KOH로 실리콘을 식각시키면 Au-on-Si₃N₄ X-선 마스크를 얻는다.

Fig. 6은 실험에 사용된 미세 패턴을 보여주고 있다. (a)는 다양한 반지름의 원기둥으로 모서리에 서 중앙으로 각각 12.5, 25, 37.5, 50, 100, 150, 200, 250 μm 이다. (b)는 평균 너비 20 μm 알파벳과 숫자를 양각 및 음각으로 구현할 수 있는 패턴이고, (c)와 (d)는 마이크로 기어 및 테스트 패턴으로 최소 선폭은 5 μm이다.

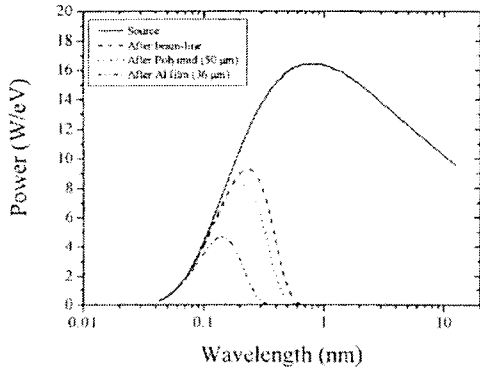


Fig. 9 Calculated X-ray power spectrum for PLS

광용 지그의 50 μm 폴리이미드 필름을 통과한 경우, 그리고 이후 36 μm Al 필터를 통과한 경우에 대한 X-선의 일률을 나타내었다. Al 필터를 사용하지 않고 노광하는 경우 이론적 계산에 의한 X-선의 임계파장은 2.0 Å이며, Al 필터를 사용한 경우에는 임계파장은 1.5 Å으로 변화하였다. PMMA의 바닥 조사량을 5.0 kJ/cm²로 고정하고 식 (1)을 통해 계산된 PMMA 표면 조사량은 10.2 kJ/cm²이다.

전통적인 DXRL 공정을 통해 제작된 PMMA 미세구조물을 Fig. 10에 나타내었다. 대부분의 원기둥 미세구조물이 현상 후 금속 박막으로부터 분리되어 세척 과정에서 완전히 제거되거나, 금속 박막에 일부 접착되어 있는 비교적 큰 구조물에 붙어 있다. 알파벳 문자의 경우에도 일부 접착 면적이 큰 문자와 문자 사이를 구분하는 칸막이 구조물만이 형성되었다. 여기서 중요한 점은 일부 구조물이 현상액에 의해 용해되기 보다는 X-선 노광 공정 중 노광되지 않는 미세구조물 패턴과 금속 박막 간의 접착면이 금속 박막에서 발생하는 이차방사에 의해 일부 노광되고 현상 공정에서 현상됨으로써, 금속과의 접착 면적이 줄어들고 접착력이 약화되어 금속 박막으로부터 떨어져 나가는 것이다.

Fig. 11은 PMMA를 단독으로 X-선에 노광시키고 금속막에 접착한 후 현상한 다양한 지름의 원기둥을 보여주고 있다. 본 실험에서 제안한 수정된 DXRL 공정에 의해 1.2 mm 두께의 PMMA를 X-선에 노광시키고, 현상한 결과로 전통적인 DXRL 방법에 의한 결과와 달리 모든 원기둥이 금속과 양호한 접착을 유지하고 있다. 가장 바깥쪽에 위치한 반지름 12.5 μm의 원기둥은 이웃한 원기둥과 접촉된 결과를 나타내는데, 이는 현상 중 용액에 발생한 정전기력이 기둥의 지지력 보다 강하여 나타난 결과이거나 현상액을 세척하고 건

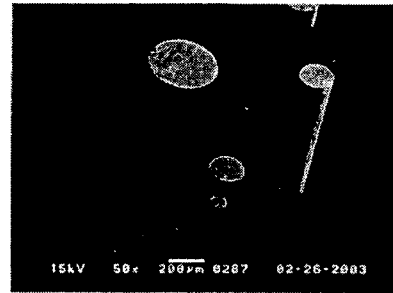


Fig. 10 Picture of the developed PMMA resist structures fabricated by a traditional DXRL process. Most structures were detached from the metal layer and moved to each others

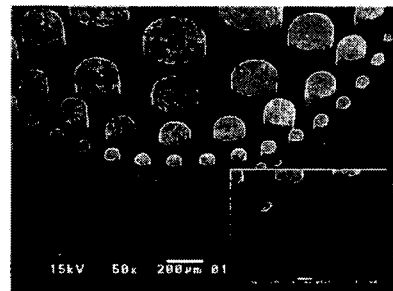


Fig. 11 SEM image of the PMMA micro cylinder structures fabricated by modified DXRL process

조시키는 과정에서 발생한 수용액의 표면장력에 의해 기울어진 것으로 판단된다.

X-선 노광 공정을 통한 미세구조물 제작은 프레셀 회절(Fresnel diffraction)과 X-선 마스크의 열탄성 변형(thermoelastic deformation)에 의해 500 μm 두께의 PMMA 경우 각각 동일한 0.2 μm 수준의 정밀도를 나타내는 것으로 보고되고 있다.^(6, 13) 본 실험에서 수행한 수정된 DXRL 공정을 통해 구현된 미세구조물의 정밀도는 ± 0.5 μm 수준으로 기존의 DXRL 공정에서 구현되는 정밀도를 만족하였다. 또한 최대 중형비는 40 수준이다.

Fig. 12는 양각 및 음각 알파벳과 미세기어 그리고 몇 가지 시험 패턴에 대한 SEM 사진이다. 알파벳 문자의 경우 그림에서와 같이 중형비 38의 미세구조물이 구현되었다. 최소 선폭을 갖는 'n' 기호의 경우 40의 중형비를 갖는 구조물 구현이 가능하였고 음각 또한 양각이 갖는 높이 만큼 현상되었다. 미세기어의 경우 최소 선폭 20 μm의 기어 구조물 구현이 가능하였다. (c)의 시험 패턴의 경우에도 최소 선폭 5 μm의 1.2 mm 높이 미세구조물 제작이 가능하였고 도금을 통해 금형으로 제작되는 경우 다양한 모양의 고분자 패턴을 구현할 수 있을 것으로 판단된다.

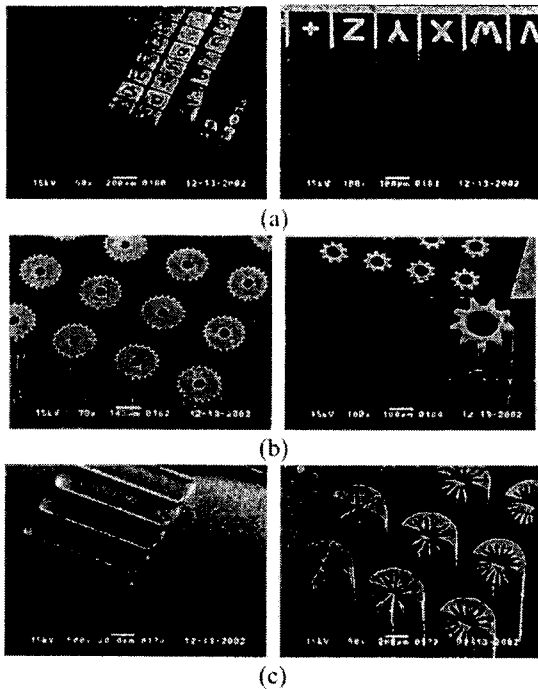


Fig. 12 SEM images of various PMMA micro-structures fabricated by modified DXRL process. (a) raised carving and intaglio alphabets, (b) micro gears, (c) test patterns

5. 결론

전통적인 DXRL 공정이 갖는 PMMA와 금속 박막의 접착력 저하 문제를 개선하기 위하여, 금속에 PMMA를 부착하고 X-선 노광 공정을 수행하는 대신 PMMA를 단독으로 X-선 노광을 수행한 후 금속 박막에 접착한 후 현상하는 수정된 DXRL 공정 제안하였다. X-선 노광에 사용되는 가속기 빔라인의 이론적 특성 분석을 기반으로 PMMA 표면과 바닥에 노광되는 X-선 조사량 차 및 프레넬 회절 효과를 최소화할 수 있는 최적 노광 조건을 선정하였고, 수정된 DXRL 공정을 통해 최고 종횡비 40 이상의 다양한 PMMA 미세구조물 구현이 가능하였다.

후 기

본 연구는 국가지정연구실사업 (과제번호 2000-N-NL-01-C-272)의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

포항방사광가속기에서의 실험은 과학기술부와 포항제철의 지원을 받았음.

참고문헌

- (1) Becker, E. W., Ehrfeld, W., Hagmann, P., Maner, A. and Munchmeyer, D., 1986, "Fabrication of Microstructures with High Aspect Ratios and Great Structural Heights by Synchrotron Radiation Lithography, Galvanoforming, and Plastic Moulding (LIGA process)." *Microelectronic Engineering*, Vol. 4, pp. 35~56.
- (2) Guckel, H., 1998, "High-Aspect-Ratio Micro-Machining via Deep X-Ray Lithography," *P. IEEE*, Vol. 86, pp. 1586~1593.
- (3) Kupka, R. K., Bouamrane, F., Cremers, C. and Megtert, S., 2000, "Microfabrication: LIGA-X and Applications," *Applied Surface Science*, Vol. 164, pp. 97~110.
- (4) Henry, A. C., McCarley, R. L., Das, S. S. and Malek, G. K., 1999, "Characteristics of Commercial PMMA Sheets Used in the Fabrication of Extreme High Aspect Ratio Microstructures," *J. Electrochem. Soc.* Vol. 146, pp. 2631~2636.
- (5) Ehrfeld, W. and Lehr, H., 1995, "Deep X-Ray Lithography for the Production of Three-Dimensional Microstructures from Metals, Polymers and Ceramics," *Radiat. Phys. Chem.* Vol. 45, pp. 349~365.
- (6) Choi, J. O., Moore, J. A., Corelli, J. C., Silverman, J. P. and Bakhru, H., 1988, "Degradation of Poly(methylmethacrylate) by Deep Ultraviolet, X-Ray, Electron Beam and Proton Beam Irradiations," *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 6, pp. 2286~2289.
- (7) Tang, M. X., Bankert, M. A., Griffiths, S. U., Ting, A., Boehme, D. R., Wilson, S. and Balsler, L. M., 1998, "PMMA Development Studies Using Various Synchrotron Sources and Exposure Conditions," *SPIE*, Vol. 3512, pp. 262~270.
- (8) Pantenburg, F. J. and Mohr, J., 1995, "Influence of Secondary Effects on the Structure Quality in Deep X-Ray Lithography," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, Vol. 97, pp. 551~556.
- (9) El-Kholi, A., Bade, K., Mohr, J., Pantenburg, F. J. and Tang, X.-M., 2000, "Alternative Resist Adhesion and Electroplating Layer for LIGA Process." *Microsystem Technologies*, Vol. 6, pp. 161~164.
- (10) Perennes, F. and Pantenburg, F. J., 2001, "Adhesion Improvement in the Deep X-Ray Lithography Process Using a Central Beam-Stop," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, Vol. 174, pp. 317~323.
- (11) Cheng, Y., Kuo, N.-Y. and Su, C. H., 1997, "Dose Distribution of Synchrotron X-Ray Penetrating Materials of Low Atomic Numbers," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 68, pp. 2163~2166.
- (12) Mohr, J., Ehrfeld, W. and Munchmeyer, D., 1988, "Requirements on Resist Layers in Deep-Etch Synchrotron Radiation Lithography," *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 6, pp. 2264~2267.
- (13) Feiertag, G., Schmidt, M. and Schmidt, A., 1995, "Thermoelastic Deformations of Masks for Deep X-Ray Lithography," *Microelectronic engineering*, Vol. 27, pp. 513~516.