

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2016.40.8.731>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

하이브리드 자외선 노광법을 이용한 3차원 고종횡비 미소구조물 제작[§]

박성민* · 남경목* · 김종훈* · 윤상희*
* 인하대학교 기계공학과

Hybrid UV Lithography for 3D High-Aspect-Ratio Microstructures

Sungmin Park*, Gyungmok Nam*, Jonghun Kim* and Sang-Hee Yoon*
* Dept. of Mechanical Engineering, Inha Univ.

(Received March 4, 2016 ; Revised June 15, 2016 ; Accepted June 23, 2016)

Key Words: Hybrid UV Lithography(하이브리드 자외선 노광법), Inclined Exposure(경사 노광), Rotational Exposure(회전 노광), Reverse-side Exposure(역노광), UV Reflection(자외선 반사), High Aspect Ratio(고종횡비), Microstructure(미소구조물)

초록: 본 연구에서는 의용생체공학에 널리 사용되는 미소바늘과 같은 3차원 고종횡비 미소구조물을 용이하게 제작할 수 있는 하이브리드 자외선 노광법에 대해 기술한다. 하이브리드 자외선 노광법은 기존에 사용되고 있는 경사노광, 회전노광 및 역노광을 혼합한 방법으로, 경사 및 회전노광은 경사진 축대칭 형상을 가지는 3차원 미소구조물의 제작이 가능하도록 하고 역노광은 자외선 노광공정 중 필연적으로 발생하는 하부기판에서의 자외선 반사를 최소화 시킨다. 자체 개발한 자외선 노광시스템과 SU-8 음성감광제를 이용하여 하이브리드 자외선 노광법의 다양한 공정조건이 최종 제작된 3차원 고종횡비 미소구조물 형상(종횡비, 선단의 곡률반경 등)에 미치는 효과를 확인한다. 또한 SU-8의 소프트 베이킹(soft baking) 조건과 미소구조물 선단 형상 사이의 관계에 대해서도 논의한다.

Abstract: Three-dimensional (3D) high-aspect-ratio (HAR) microstructures for biomedical applications (e.g., microneedle, microadhesive, etc.) are microfabricated using the hybrid ultraviolet (UV) lithography in which inclined, rotational, and reverse-side UV exposure processes are combined together. The inclined and rotational UV exposure processes are intended to fabricate tapered axisymmetric HAR microstructures; the reverse-side UV exposure process is designed to sharpen the end tip of the microstructures by suppressing the UV reflection on a bottom substrate which is inevitable in conventional UV lithography. Hybrid UV lithography involves fabricating 3D HAR microstructures with an epoxy-based negative photoresist, SU-8, using our customized UV exposure system. The effects of hybrid UV lithography parameters on the geometry of the 3D HAR microstructures (aspect ratio, radius of curvature of the end tip, etc.) are measured. The dependence of the end-tip shape on SU-8 soft-baking condition is also discussed.

1. 서론

자외선 노광법은 X선 또는 레이저 노광법에 비해 상대적으로 저가의 장비를 이용하고 마스크(mask) 제작이 용이하기 때문에 3차원 미소기전

복합시스템(microelectromechanical systems, MEMS) 제작에 널리 사용되고 있다.^(1,2) 기존 자외선 노광법은 제작기관의 수직 상방에 위치한 자외선 광원으로 노광하는 방식이었기 때문에 제작기관에 수직인 단면형상을 가지는 2차원 미소구조물만 제작할 수 있었다.⁽³⁾ 지금까지 기존 자외선 노광법의 한계를 극복하기 위해 다양한 형태의 자외선 노광방법(경사노광, 회전노광, 역노광 등)이 개발되어 왔다.^(4,5) 그러나 경사노광의 경우에는 3차

§ 이 논문은 대한기계학회 창립 70주년 기념 학술대회 (2015. 11. 10.-14., ICC제주) 발표논문임.

† Corresponding Author, shyoon@inha.ac.kr

© 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

원 고종횡비 미소구조물을 제작하기 위해 최소 2번 이상의 노광공정이 요구되고 감광제 최상단면의 낮은 평탄도로 인해 진공접촉모드를 사용하더라도 마스크와의 밀착이 어려워 미소구조물 형상의 정확도가 떨어지는 문제점이 있었다. 회전노광의 경우에는 필요한 노광공정의 횟수를 줄일 수 있지만 이 방법 역시 감광제와 마스크 사이의 접촉문제를 가지고 있는 것으로 알려져 있다.⁽⁶⁾ 마지막으로 역노광 기반 미소공정은 감광제와 마스크 사이에 접촉을 견고하게 할 수 있지만 정적수직방향 노광방식이므로 단면형상이 직사각형 모양을 가지는 미소구조물만 제작할 수 있었다.⁽⁷⁾ 본 연구에서는 기존 자외선 노광방법들이 가지는 공정 중 기술적 한계를 극복하기 위하여 경사노광, 회전노광 및 역노광을 혼합한 하이브리드 자외선 노광법을 개발한다. 하이브리드 자외선 노광법에서는 3차원 고종횡비 미소구조물을 제작하기 위하여 필름 마스크 위에 감광제를 스핀 코팅 (spin coating)한 후 필요에 따라 추가적으로 제작기판을 적층한다(역노광). 이를 회전 스테이지 (rotation stage) 위에 체결한 후 회전 스테이지를 일정속도로 회전시키면서(회전노광) 자외선 광원을 일정 조사각도를 가지도록 조절한 후 상기 적층물에 조사한다(경사노광). 이때 하부 제작기판에서의 자외선 반사를 최소화하기 위해 제작기판과 필름 마스크/감광제를 이격시키거나 혹은 제작기판을 산화흑연 미소입자로 코팅하며 또한 감광제의 소프트 베이킹 조건을 최적화한다. 음성 감광제인 SU-8에 하이브리드 자외선 노광법을 적용하여 미소구조물을 제작한 후 구조물의 기하학적 형상을 분석함으로써, 하이브리드 자외선 노광법의 핵심 공정인자가 3차원 고종횡비 미소구조물 제작에 미치는 효과를 확인한다.

2. 재료 및 방법

2.1 실험 재료

Fig. 1은 3차원 고종횡비 미소구조물을 제작할 수 있는 하이브리드 자외선 노광 목적의 실험 장치를 보여주고 있다. 먼저, 상기 실험 장치를 이용하여 미소구조물을 제작하기 위해 200 μm (지름) 크기의 원형 패턴(pattern)으로 구성된 필름 마스크와 SU-8 음성감광제(2150, Microchem)를 이용하였다. 필름 마스크 / SU-8, 아크릴 홀더(acrylic holder) 및 제작기판을 일정한 속도로 회전시키기 위해 회전

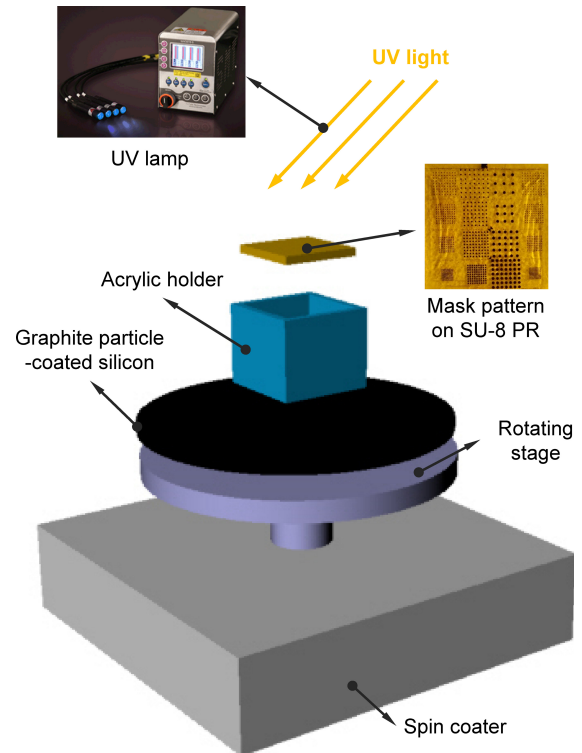


Fig. 1 An apparatus for fabricating 3D HAR microstructures. The apparatus is composed of a spin coater, a glass wafer coated with graphite microparticles, an acrylic holder for a mask on spincoated SU-8 photoresist, and a UV lamp

스테이지로 스핀 코터(Spin-1200D, Midas System)를 사용하였고, 365 nm 파장을 가지는 자외선 노광기(SUV-S, UVSMT)를 사용하여 SU-8에 자외선을 조사하였다. 이때 자체 제작한 도구를 이용하여 자외선 노광기의 자외선 조사각도를 조절하였다. Polydimethylsiloxane (PDMS, Sylgard 184, Dow corning)를 사용하여 더블 캐스팅(double casting)함으로써 SU-8으로 만들어진 3차원 고종횡비 미소구조물을 제작하였다.

2.2 하이브리드 자외선 노광법

하이브리드 자외선 노광법을 이용하여 3차원 고종횡비 미소구조물을 제작하는 과정은 Fig. 2와 같다. 먼저 필름 마스크에 SU-8을 500 rpm으로 30초간 스핀 코팅하여 필름 마스크와 SU-8을 물리적으로 견고하게 접촉시켰다[Fig. 2(a)]. 필름 마스크/SU-8 적층물은 핫플레이트(hot plate)를 이용하여 65°C에서 10분, 95°C에서 2시간 혹은 24시간동안 소프트 베이킹을 실시하였다. 이후 아크릴 홀더에 고정시킨 후, 200 rpm으로 회전시키면서 5초

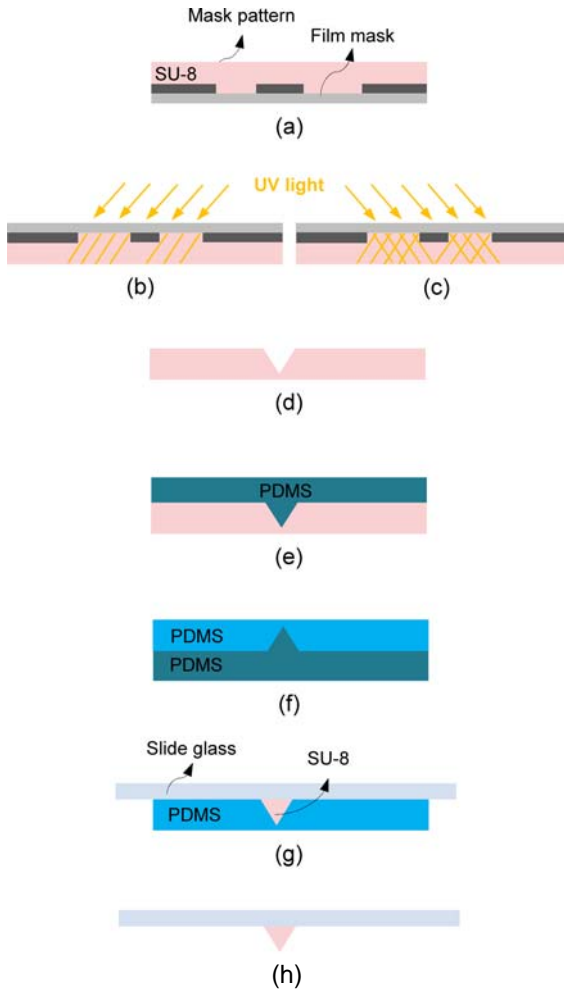


Fig. 2 Fabrication process. (a) Spin coating of SU-8 on a film mask, followed by soft baking, (b-c) (Rotational and inclined) UV exposure and post exposure baking, (d) SU-8 development and hard baking, (e-f) PDMS double casting, (g) SU-8 replication, (h) Removal of the PDMS mold

간 자외선을 조사하였다(Figs. 2(b-c)). 이 때 아크릴 홀더 밑에 실리콘 기판 혹은 365 nm 자외선에 대해 낮은 반사율을 보이는 팽창 후 파쇄된 산화흑연 미소입자가 코팅된 실리콘 기판을 놓았다.⁽⁸⁾ 여기서 후자(산화흑연 미소입자로 코팅된 실리콘 기판)은 공정 중 조사된 자외선의 하부 기판에서의 반사를 최소화하기 위하여 적용되었다. 이때 실리콘 기판과 자외선 노광기의 거리는 노광기의 권장 조사거리, 회전 및 각도 조절 시 주변 치공구와의 간섭 방지를 고려하여 4.5 cm로 설정하였으며, 자외선 노광기의 조사각도는 65, 70 및 75도로 유지하였다. 자외선 노광 후 필름 마스크/SU-8 적층물은 현상액(SU-8 developer)에 넣어 3시간 동

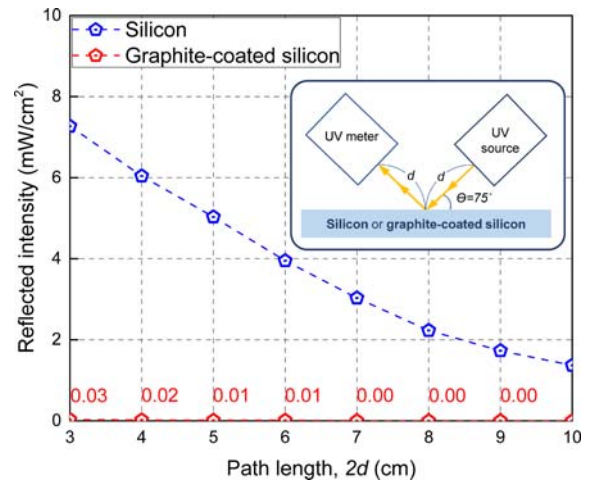


Fig. 3 Intensity of 365 nm UV light reflected on silicon wafer or graphite microparticle-coated silicon wafer as a function of path length, $2d$, when an incidence intensity of the UV light is 10 mW/cm^2 . The inset shows the measurement configuration

안 현상시킨 후[Fig. 2(d)] 하드 베이킹(hard baking)을 실시하였다. 이를 통해 생성된 1차 몰드(mold)를 이용하여 PDMS 더블 캐스팅을 수행하여 마스터 몰드(master mold)를 제작하였다(Figs. 2(e-f)). 마스터 몰드에 SU-8을 채운 뒤[Fig. 2(g)], 유리 기판을 붙이고 자외선 경화 및 마스터 몰드 제거를 통해 3차원 고종횡비 미소구조물을 제작하였다[Fig. 2(h)]. 제작된 미소구조물의 형상은 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM)을 통하여 확인하였다. 또한 자외선 측정기(ST-510, SENTRY)를 이용하여 자외선 노광 시 하부 제작기판(실리콘 기판 혹은 산화흑연 미소입자로 코팅된 실리콘 기판)에서 반사되는 자외선 양을 확인하였다(Fig. 3).

2.3 소프트 베이킹 공정 조건

3차원 고종횡비 미소구조물의 제작에 있어 마스터 몰드로 사용되는 SU-8 음성감광제는 미소가공 후 최종두께가 최소 1 mm 이상인 것이 바람직하다. SU-8의 두께는 소프트 베이킹 공정 중에 솔벤트의 양이 감소됨에 따라 최초 두께 60-70% 수준으로 그 두께가 줄어든다. 따라서 3차원 고종횡비 미소구조물 제작용 SU-8의 최초 적층두께는 이를 고려해야 한다. 본 연구에서는 약 3정도의 공정상 안전계수를 고려하여 2 mm 두께의 SU-8 2150을 이용하였다. SU-8 음성감광제 내의 솔벤트는 하부 기판에서부터 가해지는 열에 제거

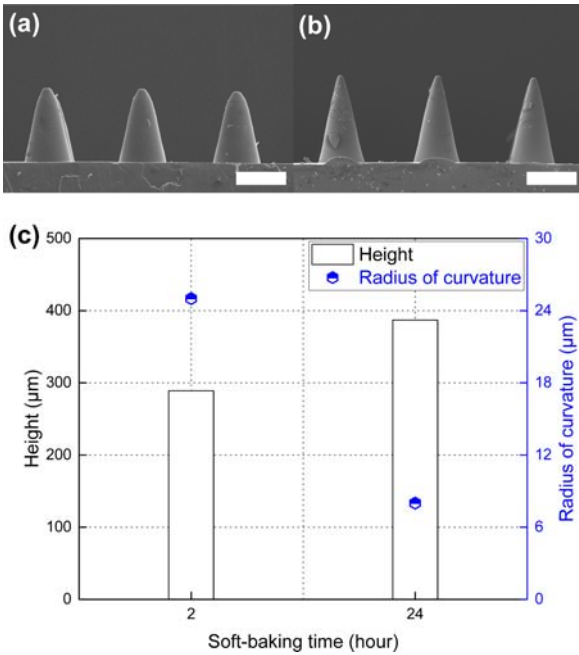


Fig. 4 Effect of SU-8 soft-baking time on the geometry (i.e., height and radius of curvature of the microstructure tip) of 3D HAR microstructures. (a-b) SEM images of the microstructures fabricated with 2-hour soft baking (a) and 24-hour soft baking (b). (c) Height and radius of curvature of the microstructures as a function of soft-baking time. Bars of (a-b) are 200 μm

되기 때문에 SU-8의 적층두께가 두꺼워질수록 최적의 솔벤트 함량에 도달하기 위해서는 상당히 오랜 시간이 걸리게 된다.⁽⁹⁾ 만약 소프트 베이킹이 충분하지 않아 SU-8 내 솔벤트 함량이 10% 이상이면, 공정 중 기계적인 수축 혹은 수축 응력이 발생하여 양질의 미소구조물 제작을 방해한다.⁽¹⁰⁾ 본 연구에 있어, 최초 2 mm 두께의 SU-8 2150에 대해 솔벤트 함량이 9%가 되는 최적의 소프트 베이킹 시간을 결정하기 위해 솔벤트 함량 기반의 열무게 분석 방법(thermo-gravimetric analysis, TGA)을 사용하였다. 이 때 SU-8 2015 음성감광제는 23.25%의 솔벤트를 포함하고 있기 때문에 상기 음성감광제 내 솔벤트 함량은 다음과 같은 수식을 통해 계산하였다.^(11,12)

$$\text{솔벤트 함량(\%)} = \left(1 - \frac{0.7675 W_i}{W_f}\right) \times 100 \quad (1)$$

여기서 W_i 는 SU-8의 소프트 베이킹 전 최초 무게이고, W_f 는 소프트 베이킹 후 무게이다. 식 (1)을

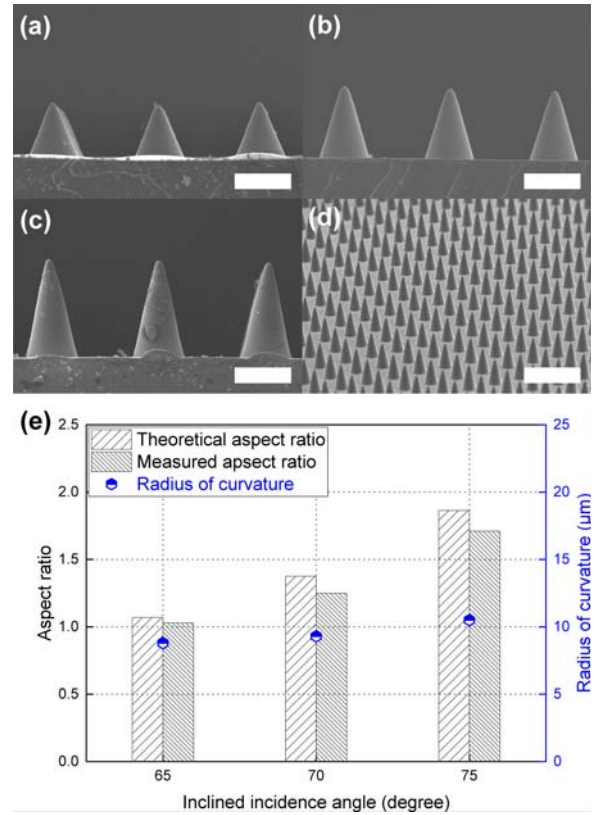


Fig. 5 Effect of the inclined incidence angle of UV light on the geometry of 3D HAR microstructures. (a-d) SEM images of the microstructures fabricated with an inclined incidence angle of 65° (a), 70° (b) and 75° (c-d). (e) Aspect ratio and radius of curvature of the microstructures as a function of inclined incidence angle. Bars of (a-c) are 200 μm, and that of (d) is 500 μm.

이용하여 2 mm 두께의 SU-8($W_i = 0.9904$ g)의 솔벤트 함량이 9%가 되는 최적의 소프트 베이킹 시간은 24시간($W_f = 0.8353$ g)임을 확인하였다.

3. 실험결과

3.1 SU-8 소프트 베이킹 시간

먼저, SU-8의 소프트 베이킹 시간에 따른 3차원 고중형비 미소구조물의 형상 변화에 대해 살펴해보았다. 2 mm 두께의 SU-8 음성감광제에 대해 2시간[Fig. 4(a)] 혹은 24시간[Fig. 4(b)] 동안 소프트 베이킹을 진행한 후 동일조건에서 제작된 미소구조물의 형상을 확인하였다. 24시간 동안 소프트 베이킹을 진행하여 적정 솔벤트 함양(9% 수준)을 맞추어 제작한 미소구조물은 최적화되지 않은 실험조건(2시간 소프트 베이킹, 솔벤트 함량

19.11 %)에서 제작된 미소구조물에 비해 높이는 34 % 증가하였고, 선단의 곡률반경은 90 % 이상 개선되었다[Fig. 4(c)]. 따라서 본 연구에서는 65 °C에서 10분, 95 °C에서 24시간 동안 소프트 베이킹을 하는 조건을 이용하여 3차원 고종횡비 미소구조물을 제작하였고 이를 통해 소프트 베이킹 시간외 다른 공정조건이 최종 제작된 3차원 고종횡비 미소구조물의 형상에 미치는 효과를 확인하였다.

3.2 자외선 조사각도

Figs. 5(a-d)는 하이브리드 자외선 노광법을 이용하여 3차원 고종횡비 미소구조물을 제작함에 있어 자외선의 조사각도를 65, 70, 및 75 °로 조사함으로써 제작된 미소구조물 및 그 어레이(array)의 모습이다. 먼저, 자외선 조사각도별로 최종 제작된 미소구조물의 형상(종횡비, 선단의 곡률 등)을 측정하였다[Fig. 5(e)]. 그 결과 실제 종횡비는 조사각도에 따른 이론적인 종횡비에 비해 대략 93 % 수준이었고, 자외선의 조사각도가 증가함에 따라 종횡비가 1.03에서 1.71로 증가하였다. 더불어 자외선의 조사각도가 증가함에 따라 미소구조물 선단부의 곡률반경이 8.8 μm 에서 10.5 μm 로 소폭 증가됨을 확인하였다. 이는 자외선의 조사각도가 커질수록 미소구조물 끝단이 날카로워져야 한다는 일반적인 통념과 반대되는 현상이다. 이 현상의 원인을 파악하기 위해 추가 실험을 해 본 결과, 자외선 노광 후 현상과정에서 미소구조물 선단부에 해당하는 곳에 위치한 SU-8을 충분히 제거하지 않아 발생한 것으로 판단된다.

추가적으로 역노광에 있어 산화흑연 미소입자가 없는 순수 실리콘 기판을 사용할 경우, SU-8의 적층 두께가 1 mm 수준이면 Fig. 3과 같이 조사된 자외선의 하부기판에서 반사에 의해 미소구조물의 형상이 영향을 받는 것도 실험적으로 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 미소바늘과 같은 3차원 고종횡비 미소구조물을 용이하게 제작할 수 있는 하이브리드 자외선 노광법을 개발하였다. 이를 기초로 자체 개발한 자외선 노광시스템과 SU-8 2150 음성감광제를 이용하여 3차원 고종횡비 미소구조물을 제작함으로써 관련 공정조건(하부기판 조건,

SU-8 소프트 베이킹 시간, 자외선 조사각도 등)이 최종 제작된 미소구조물 형상(종횡비, 선단의 곡률반경 등)에 미치는 영향을 확인하였다. 먼저, 역노광에 있어 하부기판에서의 자외선 반사는 그 하부기판에 산화흑연 미소입자를 코팅하여 최소화시킴으로써 미소구조물 제작의 완성도 및 반복도를 높일 수 있었다. 또한 소프트 베이킹 시간은 솔벤트 함량 기반의 열무게 분석 방법으로 최적화함으로써, 최적화되지 않은 조건 대비 미소구조물의 높이와 선단의 곡률반경을 각각 34%와 90% 개선하였다. 마지막으로 자외선의 조사각도를 조절하여 미소구조물의 종횡비뿐만 아니라 선단의 곡률반경도 조절할 수 있음을 확인하였다. 본 연구에서 개발한 하이브리드 자외선 노광법은 추후 미소약물전달장치, 의료용 미소접착제 등의 개발에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구임(No. 2014R1A1A1006402).

참고문헌 (References)

- (1) Barber, R. L., Ghantasala, M. K., Divan, R., Vora, K. D., Harvey, E. C. and Mancini, D. C., 2005, "Optimisation of SU-8 Processing Parameters for Deep X-ray Lithography," *Microsys. Technol.*, Vol. 11, pp. 303~310.
- (2) Park, J. H., Allen, M. G. and Prausnitz, M. R., 2005, "Biodegradable Polymer Microneedles: Fabrication, Mechanics and Transdermal Drug Delivery," *J. Control. Release*, Vol. 104, pp. 51~66.
- (3) Behrmann, G. P. and Duignan, M. T., 1997, "Excimer Laser Micromachining for Rapid Fabrication of Diffractive Optical Elements," *Appl. Opt.*, Vol. 36, pp. 4666~4676.
- (4) Yoon, Y. K., Park, J. H. and Allen, M. G., 2006, "Multidirectional UV Lithography for Complex 3-D MEMS Structures," *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 15, pp. 1121~1130.
- (5) Park, J. H. and Prausnitz, M. R., 2010, "Analysis of Mechanical Failure of Polymer Microneedles by Axial Force," *J. Korean Phys. Soc.*, Vol. 56, No. 4,

- pp. 1223~1227.
- (6) Dill, F. H., Hornberger, W. P., Hauge, P. S. and Shaw, J. M., 1975, "Characterization of Positive Photoresist," *IEEE Trans. on Electron Devices*, Vol. ED-22, No. 7, pp. 445~452.
- (7) William, J. D. and Wang, W., 2004, "Study on the Postbaking Process and the Effects on UV Lithography of High Aspect Ratio SU-8 Microstructures," *J. Microlithogr. Microfabr. Microsyst.*, Vol. 3, No. 4, pp. 563~568.
- (8) Lin, C.-H., Yeh, W.-T., Chan, C.-H. and Lin, C.-C., 2012, "Influence of Graphene Oxide on Metal-insulator Semiconductor Tunneling Diodes," *Nanoscale Res. Lett.*, Vol. 7, No. 1, p. 343.
- (9) Campo, A. D. and Greiner, C., 2007, "SU-8: a Photoresist for High-aspect-ratio and 3D Submicron Lithography," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 17, pp. R81~R95.
- (10) Liu, G., Tian, Y. and Kan, Y., 2005, "Fabrication of High-aspect-ratio Microstructures Using SU-8 Photoresist," *Microsys. Technol.*, Vol. 11, pp. 343~346.
- (11) Becnel, C., Desta, Y. and Kelly, K., 2005, "Ultra-deep X-ray Lithography of Densely Packed SU-8 Features: I. An SU-8 Casting Procedure to Obtain Uniform Solvent Content with Accompanying Experimental Results," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 15, pp. 1242~1248.
- (12) <https://www.microchem.com>