

반응표면분석을 통한 SU-8 포토레지스트의 특성 및 최적화

문세영 · 김광범 · 소대화 · 홍상진*

명지대학교 전자공학과

Statistical Characterization and Optimization of SU-8 Photoresist Processing by Response Surface Methodology

Sei-young Mun · Gwang-beom Kim · Dae-wha Soh · Sang-jeen Hong*

Department of Electric Engineering, Myongji University

E-mail: samhong@mju.ac.kr

요 약

SU-8은 부드러운 벽면을 가지는 두꺼운 패턴을 제작하는 데 사용되는 음성 감광제(negative photoresist)이다. 이것은 처리 후에 강성이 높고 화학적으로 강인한 장점을 가지고 있으며 최근 MEMS 디바이스의 구조체로 쓰이고 있다. 그러나 SU-8은 공정 처리요소들에 대하여 매우 민감하고 사용하기 어려운 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 공정 처리요소로 exposure energy, post exposure bake (PEB) temperature, PEB time을 조절하여 실험을 하였다. Response Surface Methodology (RSM)를 이용해 각 인자가 delamination에 미치는 영향에 대해 분석하였고 이를 바탕으로 SU-8의 delamination을 최소화하기 위한 처리요소들의 최적화 방안을 제시하였다.

키워드

SU-8, Post Exposure Bake (PEB), Response Surface Methodology (RSM)

1. 서 론

SU-8은 부드러운 벽면을 가지는 두꺼운 패턴을 제작하는데 사용되는 음성 감광제(negative photoresist)이다. 이것은 에폭시(epoxy) 기반으로 처리 후에 강성이 높고 화학적으로 강인하다고 알려져 있다. 이 감광제는 쉽게 제거되지 않으며, 이를 유용하게 사용할 수 있다. 주된 강점은 디바이스에 남겨져서 도파관(wave guide)으로 사용되거나 심지어는 MEMS 디바이스에서의 구조물로 사용될 수 있다는 점이다 [1].

SU-8은 또한 매우 두꺼운 구조물로 만들어지고 서로 접착될 수 있기 때문에 마이크로 유체학에서 큰 스케일의 패턴에 사용되기도 한다. 버섯 모양의 기둥을 만드는 T-토폭(T-topping) 문제는 이 감광제의 단점이 될 수 있지만 이 효과를 이용하여 디바이스의 제작에 사용되기도 한다. SU-8은 대부분 50마이크로미터 이상의 상대적으로 큰 규모의 패턴에 사용되지만 일부는 높은 종횡비(aspect ratio)를 가진 미세 패턴에 사용되기도 한다 [1].

이러한 기계적 안정성, 생체 적합성, 그리고 높

은 종횡비(aspect ratio)등의 장점들을 통하여 MEMS 디바이스들의 개발 및 제조에 널리 사용되고 있다. 하지만 SU-8의 이점들에도 불구하고 여러 연구를 통해 SU-8 초소형 구조체에서 delamination이 발생됨이 보고되고 있다 [2]. MEMS 약물전달 디바이스의 구조가 얇은 조각으로 갈라지는 delamination이 관찰되었으며 높은 종횡비를 갖는 구조들을 제작하는 동안 SU-8이 delamination되는 것을 발견할 수 있었다 [3, 4]. 특히 두꺼운 패턴에서 얇은 패턴에서보다 패턴에 가해지는 스트레스가 증가하며 delamination이 발생하기 쉬운 것으로 알려져 있다 [5]. 최근연구에 따르면 다층구조 MEMS의 공정에서의 delamination은 SU-8 공정상의 스트레스에 의해 발생됨이 보고되었으며 SU-8 공정상에 스트레스를 줄 수 있는 요인을 제거하거나 공정상의 처리요소의 범위를 조절하는 등의 여러 시행착오를 거치면서 delamination을 감소시킬 수 있다.

그러나 다양한 공정 환경에서 생산적인 공정작업을 위해 delamination을 최소화 할 수 있는 요소들의 상관관계 및 적합한 범위를 모델링할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 delamination을

최소화 하는 것의 근본적인 목표를 가지고 통계적인 방법을 통해 SU-8의 처리요소들을 조절하여 delamination을 측정하고 반응표면분석 (Response Surface Methodology)을 통하여 처리 요소들을 분석하여 최적화를 모색하였다.

반응표면이 곡면으로 표현될 것이라고 믿어진다면, 2차 회귀모형(second order regression model)을 사용하는 것이 바람직하고, 그 표면은 다음과 같이 표현된다[10].

$$\eta = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i \leq j}^k \beta_{ij} x_i x_j$$

II. 실험

영향을 줄 수 있는 모든 인자들을 다른 인자들은 고정된 후 하나의 인자의 가능한 범위까지 증가시키며 최대한 많은 실험 데이터를 얻어 분석하는 것이 전통적인 방법이지만 본 연구에서는 통계적인 실험 계획을 함으로서 상대적으로 작은 수의 데이터를 가지고 체계적이고 능률적으로 실험을 수행 하였다 [8].

실험은 3개의 인자를 3 수준으로 계획하였으며 인자는 exposure energy, post exposure baking (PEB) 온도 및 시간을 고려하였다. 그러나 expose 공정을 통해 cross-linking 되어 SU-8의 특성이 바뀌므로 인자에서 soft-baking의 온도 및 시간은 고려하지 않았다[9]. PEB후의 develop하는 시간은 표면접착력에 매우 중요하게 작용한다. 과도하게 develop 하는 시간을 늘리면 표면과의 접착력이 감소되어 delamination이 증가될 수 있으며 불충분하게 develop을 하게 되면 패턴의 해상도에 영향을 주게 된다. 본 실험에서는 매우 복잡한 특성화를 피하기 위해 최적의 패턴 해상도를 갖게 하는 적절한 develop 시간으로 고정하였다.

반응표면방법 (RSM)은 여러 개의 설명변수 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$ 가 복합적인 작용을 함으로써 어떤 반응변수 η 에 영향을 주고 있을 때, 이러한 반응의 변화가 이루는 반응표면에 대한 통계적인 분석방법을 말한다. 여기서 설명변수는 반응에 영향을 주는 독립변수 또는 인자를 말하고 반응변수는 설명변수의 영향을 받아서 어떤 반응을 나타내는 종속변수를 말한다. 독립변수 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$ 와 종속변수 η 간의 미지의 함수를 f 로 나타내면 $\eta=f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k)$ 가 된다. 독립변수 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$ 를 다음과 같이 선형변화시킨다.

$$x_i = \frac{\xi_i - \xi_{0i}}{c_i}$$

선형변환 시킴으로 생기는 새로운 독립변수 $x = (x_1, x_2, \dots, x_k) = (0, 0, \dots, 0)$ 이 실험자가 생각하는 흥미영역(region of interest)의 한 가운데 위치한다고 하자. ξ_{0i} 는 보통 ξ_i 의 측정된 값들의 평균치로 하고, c_i 는 x_i 의 값을 간단하게 해주기 위한 상수이다. 대체로 x_i 의 값이 -1에서 +1 사이에서 위치하도록 c_i 를 잡아준다. 만약, x_i 들의 흥미영역에서 η 와 x_1, x_2, \dots, x_k 간에 어떤 함수관계 $\eta = g(x_1, x_2, \dots, x_k)$ 가 있고 함수 g 의

표 1. Delamination의 측정 데이터

NO	Energy	PEB 온도	PEB 시간	% Delamination
1	580	70	30	41.79
2	720	70	20	9.2
3	580	80	20	83.94
4	720	60	30	3.53
5	440	70	40	0
6	580	70	30	41.79
7	440	70	20	30.1
8	580	80	40	49.09
9	720	80	30	18.59
10	440	80	30	82.92
11	580	60	20	17.91
12	580	60	40	70.36
13	440	60	30	0
14	720	70	40	0
15	580	70	30	41.79

실험계획은 데이터가 3인자 3수준이므로 Box-Behnken법을 사용하여 15회 실험을 설계하였다. Box-Behnken법은 1차, 2차항을 효율적으로 추정하고자 할 때, 모든 요인들이 동시에 낮은 수준 혹은 높은 수준이 아니라는 확실할 때, 모든 실험이 안정된 공정 영역에서 이루어진다고 확실할 때 활용 한다 [11]. 또한 실험횟수가 적어서 실험 비용이 저렴하다. 설계 후 실험결과는 표 1과 같다.

SU-8을 4인치 웨이퍼에 100 μ m의 두께로 spin coating 하였으며 70 $^{\circ}$ C에서 soft bake 시켰다. 계획된 실험에 바탕을 두어 3가지 인자의 조합을 이용하여 실험을 하였으며 일정하게 develop하는 시간을 유지시켜 delamination이 측정되었다. delamination의 일어나는 정도는 다음과 같이 정의 되었다.

$$Delamination = \left[\frac{(L-l)}{L} \right] \times 100(\%)$$

그림1에서 알 수 있듯이 L은 원하는 패턴의 길이이고 l은 delamination이 나타나지 않은 패턴의 길이이다. 측정오차를 최소화 하기위해 그림 2에서와 같이 8개 이상의 일정한 패턴을 형성하여 측정하였으며 여기서 측정된 l값을 평균하였다.

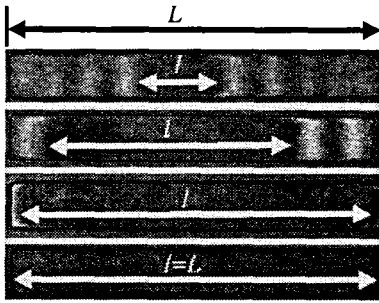


그림 1. Delamination의 측정

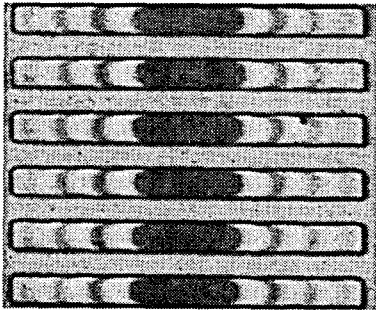


그림 2. 에러의 최소화를 위해 측정된 패턴

III. 결과 및 고찰

잔차란 각각의 관측값이 자료의 주경향(main trend)으로부터 얼마나 벗어났는지를 말해준다. 쉽게 말하면 관측값과 회귀직선간의 거리 즉, {관측값 - 예측값}으로 정의 된다. 잔차는 평균이 "0"이고, 분산은 일정해야 하고 정규분포를 따라야 하며, 독립적이어야 한다. 잔차 분석은 모형의 적합성을 따지는데 중요한 역할을 하기 때문에 잔차 분석을 통하여 모형의 적합성을 반드시 확인해야 한다 [11].

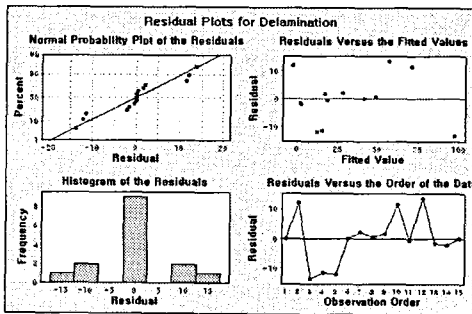


그림 3. Residual plots for delamination

그림 3에서 잔차의 정규분포 그래프에서 점들이 일직선에 일치하는 것은 아니지만 직선과 유

사하게 분포하고 있기 때문에 실험의 데이터가 정규분포임을 확인할 수 있고, 잔차 대 적합지 그래프에서는 특별한 형태를 보이지 않고 점들이 랜덤하게 위치하고 있으므로 오차는 랜덤하다는 사실을 확인할 수 있다. 잔차 대 데이터의 순서 그래프에서 점들이 어떠한 일정한 성향을 보이지 않고 특별한 형태 없이 랜덤하게 위치하고 있으므로 잔차가 다른 인자에 영향을 받지 않고 독립적인 것을 확인할 수 있다.

실험결과를 가지고 3인자가 delamination에 각각 미치는 영향을 contour plot을 통해 알아볼 수 있다.

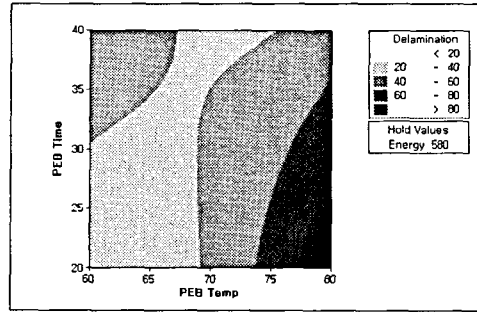


그림 4. Contour plot (Energy 580mJ/cm²)

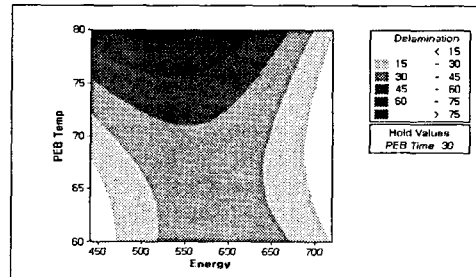


그림 5. Contour plot (PEB time of 30min)

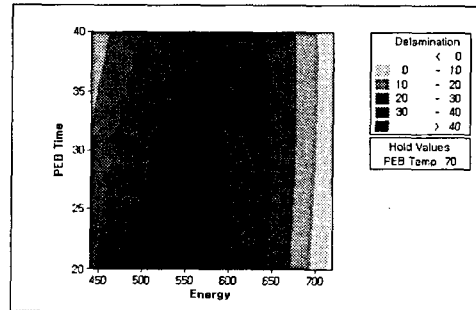


그림 6. Contour plot (PEB temp of 70°C)

그림 4는 Energy를 중간 값 580mJ/cm²로 고정 한 상태에서 PEB 시간과 PEB 온도가 낮을수록 작

은 delamination을 가짐을 나타낸다. 그림 5는 PEB 시간을 중간 값 30min로 고정한 상태에서 Energy 450mj/cm²이하 혹은 700mj/cm²이상에서, PEB 온도는 낮을수록 작은 delamination을 가짐을 나타낸다. 그림 6은 PEB 온도를 중간 값 70℃로 고정한 상태에서 PEB 시간의 변화에 대해 거의 변화가 없고, Energy가 700mj/cm²이상에서 작은 delamination을 가짐을 나타낸다.

Minitab을 사용하여 데이터를 반응표면실험분석을 한 결과 R-square 값이 92.1% 로 상당히 높게 나왔다. 즉, 샘플의 분석 값이 이 모집단 데이터를 완벽하게 설명하는데 있어서 92.1%정도가 정확하다고 95%의 신뢰도를 가지고 말할 수 있다.

IV. 결 론

Contour plot은 인자의 조합에 대한 반응치 곡선을 나타내는 것으로 등고선의 모든 지점에서의 반응치 값은 동일하다. 위의 세 가지 Contour plot을 종합해서 해석해보면 PEB 시간은 낮을수록, PEB 온도 역시 낮을수록 그리고 Energy는 700mj/cm²이상을 가했을 때 가장 낮은 delamination을 가진다고 말할 수 있다. 3수준 기준으로 해석하자면 PEB 온도 60℃, PEB 시간 20min 그리고 Energy 720mj/cm² 일때의 공정조건이 95%의 신뢰도를 가지고 가장 작은 delamination 가진다고 말할 수 있다.

이번 연구를 통해 3인자 3수준 내에서 SU-8의 delamination을 작게 만들 수 있는 공정 조건을 알 수 있었다. 하지만 공정에는 아직도 delamination에 적지 않은 영향을 미치는 많은 인자들이 존재한다. 인자 하나하나가 끼치는 영향은 작지만 여러 개가 모여서 커다란 영향을 끼치는 경우도 있다. 남아있는 다른 인자들을 가지고 많은 실험과 분석을 함으로서 delamination의 최소화 공정조건에 대한 지속적인 연구개발이 요구된다.

참고문헌

- [1] Neil Shirtcliffe, Sanaa Aqil, Carl Evans, Glen McHale, Michael Newton, Carole C Perry and Paul Roach, "The use of high aspect ratio photoresist (SU-8) for super-hydrophobic pattern prototyping.", *J. Micromech. Microeng.*, vol. 14, pp. 1384-1389, 2004.
- [2] H. Khoo, K. Liu, and F. Tseng, "Mechanical strength and interfacial failure analysis of cantilevered SU-8 microposts," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 13, pp. 822-831, 2003.
- [3] G. Voskerician, M. Shive, R. Shawgo, H. Recum, J. Anderson, M. Cima, and R. Langer, "Biocompatibility and biofouling of MEMS drug delivery devices," *Biomaterials*, vol. 24, pp. 1959-1967, 2003.
- [4] M. Despont, H. Lorenz, N. Fahrni, J. Brugger, P. Renaud, and P. Vettiger, "High-aspect ratio ultrathick, negative tone near-UV photoresist for MSMS applications," in *Proc. IEEE, Tenth Annual International Workshop in Micro Electro Mechanical Systems*, Nagoya, Japan, Jan. 1997, pp. 518-522.
- [5] M. Brunet, T. O'Donnell, J. O'Brien, P. McCloskey, and S. Mathuna, "Thick photoresist development for the fabrication of high aspect ratio magnetic coils," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 12, pp. 444-449, 2002.
- [6] J. Zhang, K.L. Tan, and H.Q. Gong, "Characterization of the polymerization of SU-8 photoresist and its applications in micro-electro-mechanical systems," *Polymer Testing*, 20, pp. 693-701, 2001.
- [7] B. Eyre, J. Blois, D. Wiberg, "Taguchi optimization for the processing of Epon SU-8 resist," in *Proc. IEEE, The eleventh Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems*, Jan. 1998, pp. 25-29.
- [8] G. Box, W. Hunter, and J. Hunter, *Statistics for Experimenters*, New York: Wiley, 1978.
- [9] A. Wong, D. Linton, "Application of SU-8 in flip chip bump micromachining for millimeter wave applications," in *Proceedings of 3rd Electronics Packaging Technology Conference (EPTC 2000)*, Dec. 2000, pp. 204-209.
- [10] 박성현, "현대실험계획법", 민영사, 2004.
- [11] 이상복, "예제 중심의 실험계획법", ERETEC INC., 2005.
- [12] 이레테크 미니텡사업팀, "새 Minitab 실무완성", 이레테크, 2004.