

리플로우 현상을 이용한 고 개구수를 갖는 비구면 렌즈 어레이의 제작에 관한 연구

김완진*(연세대학교 정보저장공학과), 이명복(삼성종합기술원),
손진승(연세대학교 정보저장공학과), 박노철(연세대학교 정보저장공학과),
박영필(연세대학교 기계공학과)

Study on Manufacturing Aspheric Lens Array with High NA using Reflow Phenomenon

W. C. Kim(CISD. YSU), M.B.Lee(Storage. Lab. SAIT),
J. S. Sohn(CISD. YSU), N. C. Park(CISD. YSU), Y. P. Park(Mechanical. Eng. Dept. YSU)

ABSTRACT

Resulting from reproducibility and possibility of mass production, many researches to fabricate micro lens array using lithography have been developed. However, it still remains the level of fabricating compensation lens. Therefore, to realize the fabrication of lens having high numerical aperture can be the key technology of ultra slim optical system. Reflow phenomenon have been researched to make lens having high refractive power. And through those researches, the possibility to fabrication of high refractive power lens has been investigated. In this paper, we analyze the effect of many parameters in reflow process to get an aspheric shape with high repeatability. And we make possible to estimate shape error, through we give direct information about decrease in volume of photoresist.

Key Words : Reflow (리플로우), High Numerical Aperture(고 개구수), Micro lens Array(미세 렌즈 어레이),
Aspheric lens(비구면 렌즈), Sag Height(렌즈의 높이), Lithography(리소그래피)

1. 서론

리소그래피를 이용한 미세렌즈의 제작은 리소그래피가 갖는 복제성 및 대량 생산성에 기인하여, 많은 연구를 거듭해 왔으며, 이와 같은 연구에는 리플로우 렌즈를 식각하여 형상을 기판에 그대로 전사하는 방법, 리플로우 현상을 이용하여 모울드를 제작하는 방법과 그레이스케일 포토마스크를 이용하여 비구면 또는 회절렌즈 어레이를 제작하는 등의 연구가 있다. 리플로우 현상을 그대로 식각하는 방법은 단일 웨이퍼로 모든 공정이 진행되므로 그간 많은 연구가 진행되어 왔으나, 식각 시 선택비의 문제 등이 상존하여, 원하는 비구면을 얻어내는 것은 매우 어렵다. 또한 그레이스케일 포토마스크를 이용한 비구면 렌즈의 제작사례가 늘고 있으나, 정해진 식각의 패턴에 만들 수 있는 그레이 레벨의 한계로 수십 μm 의 고 개구수를 갖는 비

구면 렌즈를 제작하는 방법은 거의 불가능하다. 고 개구수를 갖는 렌즈는 단면만으로는 색수차와 파면수차 등의 광학적 성능을 만족 할 수 없으므로, 열적 리플로우 방식으로 제작한 면에 추가적인 비구면 또는 회절면을 사용하여 최종적인 렌즈를 제작하게 된다.

리플로우 이론에 따르면 리플로우 현상을 이용하여 구면을 얻을 수 있다고 알려져 있으나, 노광 시 사용되는 UV 빛이 마스크 모서리에서 회절하여 일정한 각을 갖고 퍼지게 되므로, 현상 후 마스크의 패턴을 그대로 전사할 수 없게 되므로 리플로우 공정 후 구면의 형상을 얻는 것은 매우 어렵다. 이러한 근거를 토대로, 사진공정 시 여러 인자의 변화를 주어 원하는 비구면을 형상화 할 수 있다. 본 연구에서는 하나의 비구면 면만을 사용하여 0.45 이상의 고 개구수를 갖는 비구면 형상에 대한 제작가능성을 살펴보고자 하므로, 리플로우 공정 후 이 형

상을 모울드로 제작하는 방법을 선택하였다. 이 때 변화시킬 수 있는 여러 인자로는 접착력 향상을 위해 감광제의 도포 전에 도포하는 물질, 베이킹 시간, 노광량, 리플로우 시간과 온도 등이 있다. 본 연구는 고 개구수의 비구면 렌즈 가공을 위해 렌즈 형상에 대한 리플로우 인자들의 영향을 분석 하였다.

2. 렌즈 형상 결정

2.1 미세 렌즈 제작 기본 방정식

리플로우 현상을 이용하여 렌즈의 형상을 예측하는 데 있어서 가장 먼저 고려해야 할 사항은 일정한 마스크 패턴의 크기와 이에 따른 렌즈의 높이를 대략적으로 예측해 보는 것이다. 리플로우 이론에 따르면, 공정 후의 이상적인 렌즈의 형상이 구면이므로, 구면을 가정하여 패턴의 직경에 따른 감광제의 두께와 렌즈 높이의 관계를 유추한 식을 얻을 수 있다.

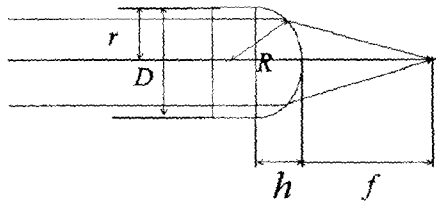


Fig. 1 Parameters in single surface lens Design

T_{sph} 초점거리 f 는 Fig. 1에서 나타난 기하학적 변수들과 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$T_{sph} = \frac{h}{6} \left(3 + \frac{h^2}{r^2} \right) \quad (1)$$

$$f = \frac{h^2 + r^2}{2h(n-1)} \quad (2)$$

여기서, n 은 렌즈의 굴절율

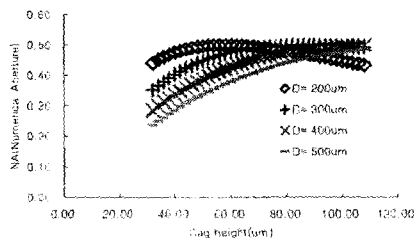


Fig. 2 Estimated Relation between Sag height and NA.

Fig. 2는 렌즈의 높이가 변함에 따라 개구수가 변화하는 양상을 나타내었다. 무한 광학계를 사용하는 경우 리소그래피에 사용되는 마스크 패턴의 크기는 그대로 입사동 크기가 되므로, (1)을 통해, 원형 패턴의 크기가 r 인 마스크를 사용한 경우 감광제의 도포 두께와 렌즈 높이와의 관계를 유추해 낼 수 있으므로, 원하는 렌즈의 개구수와 입사동의 크기를 정하면, 도포해야 하는 감광제의 두께를 유추해 낼 수 있다.

그러나 위의 식은 이상적인 경우, 즉 리플로우 현상이 구면일 경우를 가정했을 경우의 설계 변수들에 대한 해석이므로, 실제의 리소그래피 공정에서 얻게 되는 관계와는 동일하지 않다. 그러나, 리소그래피 공정을 통하여 생기게 되는 형상오차가 설계 치에 비해 미소하다는 가정 하에 위의 해석을 통한 값을 렌즈 설계에 적용하였다. 또한 리소그래피 공정을 통하여 생기게 되는 형상오차에 대한 인자를 공정을 통하여 분석하고, 이를 이용하여 렌즈 형상 오차를 측정하였다.

2.2 렌즈 설계

미세렌즈 제작 기본 방정식을 토대로 얻은 감광제의 도포두께와 패턴의 직경을 렌즈 설계의 제한 변수로 사용하여, 광학 설계 소프트웨어인 Code-V를 이용하여 렌즈를 설계 하였다. 설계한 렌즈는 비구면 단면 렌즈로 설계하였으며, 이는 구면 단면으로는 좋은 광학적 성능을 얻기 어렵기 때문이다. 제한 설계 변수로는 위의 미세 렌즈 방정식 해석을 통해 얻은 렌즈의 높이 70um와 입사동 직경 200um을 사용하였으며, 광학적 허용오차를 고려하지 않고, 비구면 계수는 14 차 까지 사용하여, 개구수는 0.49, 과면수차는 0.03 이하로 설계하였다.

3. 리소그래피

3.1 공정 변수의 영향

미세렌즈 어레이를 제작하기 위한 공정도를 Fig. 3에 나타내었다. 4" fused silica 웨이퍼 위에 후막을 도포할 수 있는 감광제인 AZ PLP 100을 사용하였고, 감광제의 연화점 이하에서 천천히 소프트 베이킹을 진행하였다. 자외선 노광은 EV-620 장비를 사용하여 80sec~150sec로 진행하였으며, 이때 사용한 마스크 패턴은 직경 200um와 400um의 원형 패턴을 갖는 두 종류의 마스크를 사용하였다. 현상시에는 AZ 340을 사용하여 3분~5분 동안 현상 시간을 변화 시켜보았다.

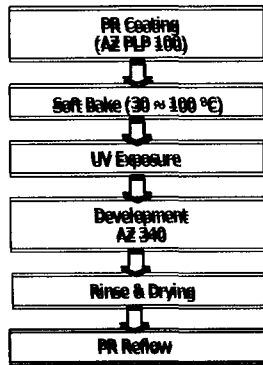


Fig. 3 Fabrication Process for Micro lens Array

렌즈의 높이가 70um 이므로, (1)로부터 현상공정 후 41um 의 두께를 갖는 패턴을 얻어야 함을 알 수 있다. 감광제의 두께와 관련된 주요인자로는 감광제 코팅시의 최종 속도와 시간이므로, 이 두 인자를 변화 시키며 현상 후의 패턴의 두께를 측정하였다. Table 1 에 감광제의 도포와 소프트 베이킹의 공정순서를 나타내었다.

Table. 1 Procedure of PR Spread and Soft Bake

Step	Condition	Time	Operation
1	500rpm	10sec	N2 Blow-Off
2	1000rpm	20sec	HMDS Spread
3	500rpm	10sec	Spread Cycle
4	1000~1500rpm	30sec	Final Speed
5	30 ~100° C	13min	1 st Soft Bake
6	20° C	15min	Solvent Evaporation
7	800rpm	20sec	Edge Remove
8	50 ~ 100° C	17min	2 nd Soft Bake

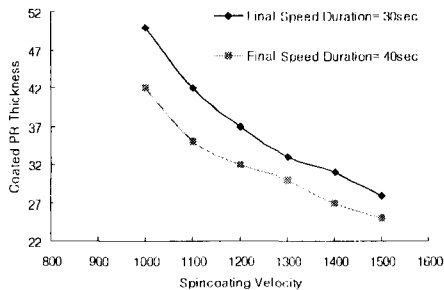


Fig. 4 Variation in Thickness depends on Time and Rotation Speed.

1000 rpm/ 40sec, 1100rpm /30sec 의 조건으로 디자인 한 두께, 41um 를 얻을 수 있었다. 그러나, 4" 웨

이퍼 상의 두께 편차를 고려해 볼 때 3%이내의 두께 편차를 갖는 1100rpm/30sec 의 조건을 이용하여 반복실험을 진행하였다. 반복실험을 통해 3%이내의 재현성 있는 두께편차를 확인하였다.

Soft Bake 공정은 Hot Plate 위에서 진행이 되었으며, 급작스러운 고온 베이킹 공정에서 생기는 감광제 내부 용제의 터짐 현상을 방지하기 위하여, 30° 부터 서서히 가열하였다. 1차 베이킹과 2차 베이킹 사이에 여기된 감광제 내부의 용제가 승화 할 수 있는 시간을 주었다. 이러한 Bake 공정을 통하여, 감광제의 터짐 현상을 크게 저감할 수 있었으며, 두께 균일성을 향상시켰다.

노광 시에 발생하는 노광량의 불균일로 인하여 원하는 원기둥 형상의 패턴을 만들지 못하게 한다. 이에 따라 패턴의 윗부분은 과노광되고 바닥부분은 미노광되는 문제가 발생하여, 실제적인 패턴은 바닥으로 갈수록 넓어지는 기둥형상을 만들게 된다. 결국 이러한 형상의 오차는 리플로우 공정을 거친 후 나타나게 되는 렌즈 높이 축소의 주된 요인으로 작용한다. 노광 시 사용한 EV-620 은 13mW/cm²/sec 의 노광 강도를 지닌 장비 이므로, 100sec 의 노광 시간을 기준으로 노광 시간을 변화시켜 보았다. 이 결과, 100sec 보다 노광 시간이 길어질 경우, 감광제의 도포 두께에는 차이가 거의 없었으나, 패턴의 윗부분과 바닥의 직경이 줄어드는 경향을 띠게 되었다. 또한 웨이퍼와 마스크의 접촉상태도 패턴의 두께와 직경에 영향을 미치게 되는데, 소프트 콘택의 경우, 동일한 공정 조건에서 평균 48um 의 도포 두께를 갖게 되었고, 패턴의 윗부분 직경과 바닥의 직경이 더욱 줄어들게 되는 경향을 확인 할 수 있었다. Table 2 에 노광 시간에 따른 패턴의 반경 변화를 나타내었다.

Table. 2 Change in Diameter by Exposure Time

Exposure Time	100 sec	110 sec	120 sec
Top(um)	187±2.5	180±2.0	172±2.0
Bottom(um)	270±4.0	259±3.0	247±3.5
Slope	1.0	1.05	1.107

3.2 리플로우 결과

리플로우 원리는 직사각 형상의 패턴을 감광제의 연화점이상에서 열을 가하면 표면장력에 의해 반구형상으로 끌어당겨지게 되는 것이다. 그렇기 때문에, 이상적인 구형을 구현하기위해 중요한 것은 현상 후의 패턴이 균일한 직사각 형상에 가까워야 하며, 일정한 체적을 유지해야, 감광제의 도포에서부터 제어가 가능하다. 그러나 위에서 살펴본 공

정 변수들에 따른 패턴의 형상 변화는 결국 리플로우 하는 감광제의 체적과 형상에 영향을 미치게 된다. 이에 따라, 감광제를 도포 할 때의 두께부터 리플로우 공정 후의 렌즈 높이와 직경을 예측하는 것은 무척 어렵게 된다. 따라서, 현상 후의 패턴의 균일도와 재현성을 증가시키게 되면, 체적 변화요인을 리플로우 공정 시 날아가게 되는 물질의 증발량으로만 가정하는 것이 가능하게 된다. 물론 여러 공정변수들로 인한 패턴 형상의 변화로 비구면 형상을 갖게 된다.

리플로우 공정은 감광제의 연화점보다 높은 150°C의 고정된 온도에서 설계 모델인 200um의 직경을 갖는 마스크로 얻은 패턴과 400um의 직경을 갖는 패턴을 비교하였으며, 리플로우 공정 시간에 따른 변화를 관찰하였다. Fig. 5 과 Fig. 6 은 200um의 마스크를 사용한 패턴의 리플로우 형상이고, Fig. 7 과 Fig. 8 는 400um의 마스크를 사용한 패턴의 리플로우 형상이다.

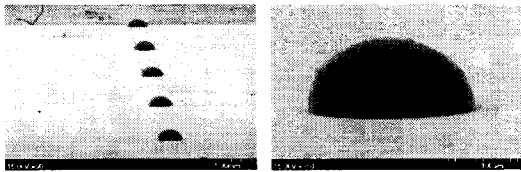


Fig. 5~6 Shape of lenses having 195um in Diameter

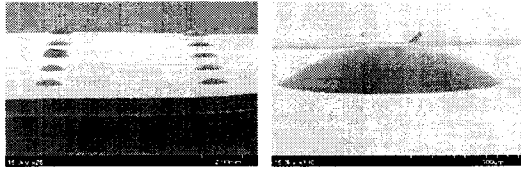


Fig. 7~8 Shape of lenses having 403um in Diameter

41.5um의 두께를 갖는 패턴을 리플로우한 경우에 70um의 렌즈 높이를 예측한 것과 비교할 때, 실제 리플로우 공정이 끝난 후 측정된 렌즈의 높이는 62.5um로 10.5%의 형상오차를 가졌다. 이러한 렌즈의 높이와 직경의 차이는 고온에서 이루어지는 리플로우 공정에 따른 감광 물질의 증발 현상과 리플로우 공정 전의 형상차이가 주요한 원인이다. Table. 3에 각 패턴의 리플로우 시간에 따른 높이 변화를 나타내었다.

Table. 3 Change in Sag Height by Reflow Duration

min	2	5	8	10
D= 200um	66.5um	63.8um	63.2um	63.0um
D= 400um	68.2um	65.5um	64.9um	64.8um

여기서, D는 마스크 패턴의 크기

4. 결론

리플로우 공정을 통하여 재현성있는 비구면 형상을 얻기 위한 공정변수들의 영향을 분석하였고 후막의 생성에서 발생할 수 있는 감광제 도포의 불균일 문제와 용제의 내부 터짐 현상 등을 완화할 수 있는 방안을 마련하였다.

기준 모델을 설계하여 설계된 모델의 형상과 리플로우 공정을 통하여 제작된 렌즈 형상의 오차를 측정해 보았다. 이는 리플로우 공정으로 인한 감광제의 체적 감소에 대한 직접적인 정보를 제공해 줌으로써, 설계한 렌즈와 제작한 렌즈의 형상 오차를 예측할 수 있다. 이러한 예측을 토대로 설계한 렌즈 형상에 가까운 비구면을 제작할 수 있다.

비록 리플로우 공정을 통하여 구면을 형상화하는 것은 어렵지만 비구면의 동일한 높이를 갖는 렌즈를 제작할 수 있으므로, 설계한 구면 또는 비구면과의 미소한 형상오차를 그레이스케일 리소그래피 등으로 보상함으로써 설계한 렌즈를 보다 더 정밀하게 제작할 수 있을 것이라 생각한다.

후 기

본 연구는 삼성종합기술원, 한국과학재단지정 정보저장기기연구센터의 지원(과제번호 : R11-1997-006203-0)으로 이루어 졌습니다.

참고문헌

1. D.J. Daly, "Microlens Arrays", Taylor & Francis, 40-129, 2001
2. F. Cullmann, B. Loechel, A. Maciossek, M. Rothe, "Advanced Resist Processing for Thick Photoresist Applications", Microelectronic Engineering, 30, pp. 551-554, 1996
3. K. Mercereau, C.R. Nijander, W.P. Townsend, R.J. Crisci, A.Y. Feldblum, D.J. Daly, "Design, fabrication and testing of refractive microlens arrays", European Optical Society Topical Meeting Digest Series: Volume 2, Microlens Arrays, pp. 60-64, 1993
4. D.J. Daly, R.F. Stevens, M.C. Hutely, N. Davies, "The manufacture of microlenses by melting photoresist", Measurement Science Technology, pp. 759-766, 1990