

# Maskless 노광공정을 위한 LDI(Laser Direct Imaging) 시스템 개발 및 단일 레이저 빔 에너지 분포 분석

이수진<sup>+</sup>, 김종수<sup>+</sup>, 신봉철\*, 김동우<sup>++</sup>, 조명우<sup>+++</sup>  
(논문접수일 2010. 09. 15, 심사완료일 2010. 10. 19)

## Development of a LDI System for the Maskless Exposure Process and Energy Intensity Analysis of Single Laser Beam

Soo Jin Lee<sup>+</sup>, Jong Su Kim<sup>+</sup>, Bong Cheol Shin\*, Dong Woo Kim<sup>++</sup>, Meyong Woo Cho<sup>+++</sup>

### Abstract

Photo lithography process is very important technology to fabricate highly integrated micro patterns with high precision for semiconductor and display industries. Up to now, mask type lithography process has been generally used for this purpose; however, it is not efficient for small quantity and/or frequently changing products. Therefore, in order to obtain higher productivity and lower manufacturing cost, the mask type lithography process should be replaced. In this study, a maskless lithography system using the DMD(Digital Micromirror Device) is developed, and the exposure condition and optical properties are analyzed and simulated for a single beam case. From the proposed experimental conditions, required exposure experiments were preformed, and the results were investigated. As a results, 10 $\mu$ m spots can be generated at optimal focal length.

**Key Words :** Maskless lithography(마스크리스 리소그래피), Digital Micromirror Device(디지털 마이크로미러 디바이스), Single beam simulation(단일 빔 시뮬레이션)

+ 인하대학교 기계공학과  
++ University of Waterloo  
+++ 인하대학교 기계공학부  
\* 교신저자, 인하대학교 기계공학과 (kenny77b@empal.com)  
주소: 인천광역시 남구 용현 4동 253 인하대학교 기계공학과 2북 265C

## 1. 서론

최근 IT 및 MEMS 기술의 발전으로 반도체 및 디스플레이 산업 등에서 제품의 성능 향상과 고집적화를 위해 고밀도 회로 형성 기술에 대한 수요가 증가하고 있다. 기존 회로의 미세 패턴 생성을 위해 리소그래피 제작공정을 거치게 되는데 이 중 주요 제작공정으로는 미세 패턴이 새겨진 마스크 제작, 감광성 물질 도포, 노광, 현상, 식각공정 등이 있고, 이들 공정을 거쳐 최종 제품이 완성된다<sup>(1)</sup>. 여기서 고집적화와 초소형화를 위한 미세 패턴 형성을 위해 레이저 플로터를 이용하여 미세 패턴이 새겨진 마스크를 특정한 파장 영역에 반응하는 감광성 물질이 도포된 기판에 증착하여 UV(Ultra Violet) 파장대의 광원으로 노광을 하게 된다<sup>(2)</sup>. 하지만 이와 같이 마스크를 이용한 노광 방식은 마스크 상에 이물질이 있을 경우 노광 후 불량을 일으키고 사용자가 원하는 형태의 패턴을 생성하기 위해 마스크 제작비용이 발생하며 마스크를 제조하기 위한 장비 설치가 요구된다. 또한 장기간 하나의 마스크를 사용할 경우 이물질의 세척을 위한 유지 관리 비용의 발생하게 되고 마스크 제조 단가의 상승 등의 문제점이 발생하게 된다.

따라서 최근 마스크 방식의 문제점들을 개선하고 소비자

의 요구에 맞추기 위한 보다 정밀하며 미세공정에 적용 가능한 마스크리스 방식의 LDI(Laser Direct Imaging) 노광법이 요구되고 있다<sup>(3,4)</sup>. 이를 통해 노광 장치의 저 분해능에서 고 분해능으로의 이행에 따른 기술의 혁신은 물론이고 다품종 소량생산 및 대량생산 체제에도 유연하게 대응할 뿐만 아니라 노광 공정의 비약적 단축과 생산성 향상을 가져올 수 있다. 이를 구현하기 위한 가장 대표적인 마스크리스 포토 리소그래피(Maskless photo lithography) 기술은 Fig. 1 과 같이 DMD(Digital Micromirror Device)를 이용한 방식으로 노광 방법으로 UV 레이저 광원을 광 조사 광학계(Illumination optics)를 통해 빔의 에너지를 균일화 시키고 균일화 된 빔은 DMD를 이용해 이미지 형상을 반사하여 프로젝션 광학계(Projection optics)로 보내져서 이미지 왜곡을 보정하여 원하는 형상을 노광시킨다<sup>(5)</sup>. 여기서 최적의 노광 라인 에지 거칠기(Line edge roughness:LER)구현 및 생산성 향상을 위해서는 레이저 에너지 조건, 광학적 특성, 노광 필름(Dry Film Resist:DFR), 노광 알고리즘, 마스크 이미지 생성 조건 등 많은 부분의 최적화가 필요하다 다양한 공정인자들의 복합적인 영향으로 인하여 최적의 노광 조건을 설정하는데 어려움을 주고 있다. 또한 DMD에 반사되는 개별 레이저 빔과 DFR과의 관계는 다양한 방법에 따라 서로 상이한 결과를 도출할 수 있어 이에 대한 특성을 파악할 필요가 있다<sup>(6-8)</sup>.

본 논문은 DMD를 이용한 마스크리스 방식의 LDI 장비 개발을 위해 핵심 부품인 광학계(광 조사 광학계, 프로젝션 광학계)등의 설계 및 제작을 실시하고, 레이저 빔과 광학적 특성 분석을 위해 레이저 빔의 분포도, 광원의 주사수, 광량, 광축 등을 정의하여 단일 빔 시뮬레이션을 통한 가공조건 모델을 선정하고 노광 실험을 통해 이론적 검증 후 시스템 개발을 수행하였으며 본 시스템의 산업계 활용이 기대된다.

## 2. 광학계 설계

### 2.1 광 조사 광학계의 구성 및 분석

일반적인 레이저 빔 프로파일은 가우시안(Gaussian) 분포의 균일하지 않은 에너지 밀도를 가지기 때문에 광축 방향에서의 빛의 강도는 강하고, 광축에서 멀어질수록 빛의 강도는 점점 약해지므로 DFR 상에 조사 시 노광면의 위치에 따라 상이한 패턴을 형성하게 되기 때문에 Fig. 2와 같이 플랫폼(Flat-Top) 형상으로 빔을 DMD 조사면의 크기와 일치시켜 주기 위해 빔의 크기를 확대시켜 에너지 밀도를 90%이상

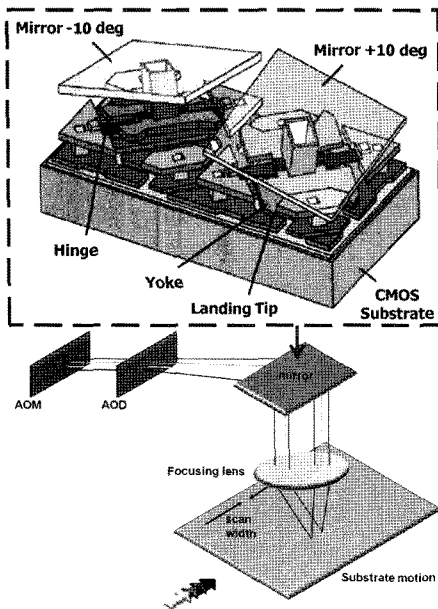


Fig. 1 An illustration of the maskless lithography system

균일하게 유지시킬 필요가 있다. 여기에서 X,Y축은 빔의 위치, Z축은 빔 에너지 크기를 의미한다.

균일도를 증가 시켜주는 방법으로는 플라이아이(fly-eye) 렌즈와 IR(Integrated Rod), DOE(Diffractive Optical Element)가 있으나 IR의 경우 광선의 발산 각도가 큰 시스템에 적합하나 구조가 복잡하며 DOE는 설계와 제작이 어렵다는 단점이 있다. 따라서 본 시스템에서는 플라이아이 렌즈를 사용하여 레이저 광원의 빔을 사각형의 형태로 에너지 밀도가 일정한 빔으로 변화하여 주도록 플라이아이 렌즈와 bi-convex 렌즈를 구성하여 설계 및 제작하였다. 조명 광학계의 설계는 CODE V, Oslo 등의 프로젝션 렌즈 설계 툴을 사용하며, 결과 분석은 ASAP(Advanced System Analysis Program), Light Tools 등의 조명 광학계 설계/분석 툴을 사용하였다.

시뮬레이션을 위한 조건으로 광원의 세기는 5.8W, 빔의 직경은 21mm, 파장은 405nm이며, 가우시안 프로파일을 갖는 광원을 조사하여 플라이아이 렌즈를 통과한 후에 플랫폼 형태를 가지도록 하였다. 마이크로 미러의 크기는 약 14mm×10.5mm로서 조명영역의 편측으로 2mm 여유를 포함하여 18mm×14.5mm로 설계하였다. 광 조사 광학계는 DMD면에서의 에너지 밀도가 80±5%의 균일도를 갖도록 목표치를 설정하였으며, 조명 설계 프로그램인 Light-Tools를 이용하여 Fig. 3과 같이 측정위치에서의 광세기 분포를 확인하였다.

측정위치의 범위는 Z축을 기준으로 -10.1mm~35mm까지 시뮬레이션을 진행하여 최적의 플라이아이 렌즈 위치 분

석에 의해 거리에 따라 변화하는 광세기 분포를 분석하였으며, 상면에서의 광세기 균일도도 확인할 수 있었다.(Fig. 4~6)

이러한 설계 데이터를 기반으로 하여 광 조사 광학계를 제작하여 측정된 결과 약 81.76%의 빔 에너지 밀도의 균일도가 측정되었다. 광 조사 광학계의 빔 에너지 밀도의 균일도 목표치는 80±5%였으나 평가치는 약 81.76%가 나왔고

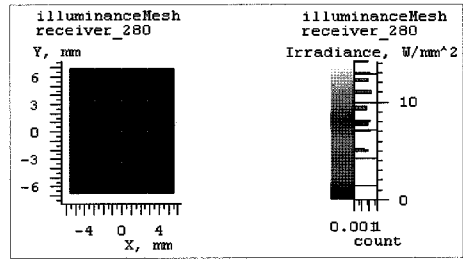


Fig. 4 Optimal focus location analysis of the fly-eye lens(3:20mm)

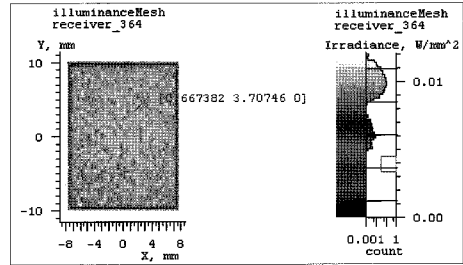


Fig. 5 Calculated energy uniformity on the imagine plane(9:318mm)

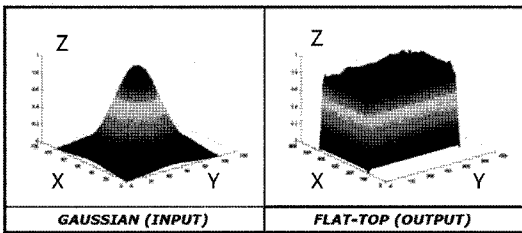


Fig. 2 Calculated laser beam energy distribution

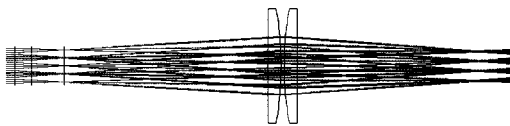


Fig. 3 Designed energy distributions in the illumination optics

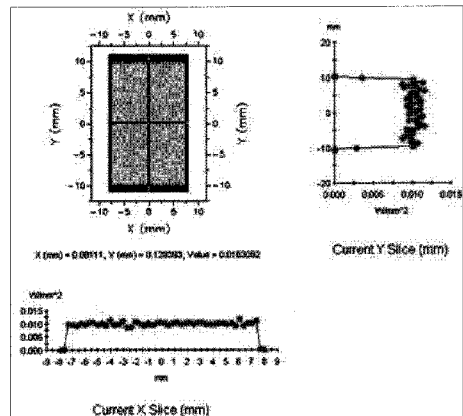


Fig. 6 Analysis of the beam energy distribution in the illumination optics

또한 결상 면의 조명 균일도의 목표치는  $80\pm 5\%$ 로 나왔다. 따라서 평가치는 각 위치 별로 약  $90\%$ 로 목표치에 만족하였다.

### 2.2 광 프로젝션 광학계의 구성 및 분석

프로젝션 광학계는 DMD에서 반사된 이미지 패턴을 갖는 분할된 미세한 광원이 노광 면에 조사될 때 광원의 왜곡을 방지하기 위하여 직진성을 구현하는 기능을 담당한다. (Fig. 7) 마스크리스 리소그래피 시스템의 광 모듈은 최적의 상을 결상하기 위해서 단일 렌즈에 의한 설계가 아닌, 여러 개의 렌즈를 사용하여 각 렌즈의 수차 특성을 서로 상쇄시켜 원하는 형태의 상을 만들게 되는 구조로 구현이 되어야한다.

본 연구에서 설계된 프로젝션 광학계는 광학계를 구성하고 있는 렌즈들이 Fig. 8의 광학 시뮬레이션과 같이 가운데 조리개를 기준으로 좌우 대칭인 광학계가 되도록 설계하였으며, 왼쪽의 렌즈 세트와 오른쪽의 렌즈 세트는 각각 제2 초점과 제1 초점이 같은 지점에 놓여 있게 하였다.

프로젝션 광학계가 물체면 및 상면 텔레센트릭(telecentric) 광학계로 구성하여 광학계에 입사되는 주광선과 광학계에서 출사되는 주광선 모두 광축과 평행하게 설계되어 따라서 물체면 및 상면에서 횡 초점이동이 발생 하더라도 배율 변화가 없게 된다.

따라서 조리개를 중심으로 양면의 광학계의 총 길이는 서로 대칭이므로, 광학계의 배율은 1이다. 이에 의하여 상기 프로젝션 광학계의 물체 면에 놓이게 되는 DMD의 상을 상면에 1:1 크기로 결상한다. 광학계의 근축광선 추적을 광학 설계 프로그램인 Code-V를 통해 수행한 결과 첫면(EP)과 상면(IMG)에 입사하는 주광선(UCY)의 입사각이  $-0.000755$

[rad]로 거의 0에 근사한 값이므로(즉, 평행광) 텔레센트릭 광학계임을 알 수 있다.

### 3. DMD를 이용한 Maskless Lithography System 구성

마스크리스 리소그래피 시스템의 핵심 구성으로 DMD, 광 조사 광학계, 프로젝션 광학계가 필요하다. 노광 방법은 UV 레이저 소스를 광 조사 광학계를 통해 빔의 에너지를 균일화 시키고 균일화 된 빔은 DMD를 이용해 이미지 형상을 반사하여 프로젝션 광학계로 보내져서 이미지 왜곡을 보정하여 원하는 형상을 노광시킨다.

본 시스템에서는 조사강도가  $7,500\text{mW}/\text{cm}^2$ 이고 파장대가  $405\pm 5\text{nm}$ 인 UV-LED 레이저를 광원으로 사용하였으며, 광학계는 전술한 설계 데이터를 이용해 제작하였다. 광 조사 광학계는 플라이아이 렌즈 2매와 relay 렌즈를 사용하였고, 프로젝션 광학계는 평행광을 생성하는 1차 프로젝션 광학계와 4각형 미리 형태의 빔을 원형으로 만들어 주기 위한 Aperture array와 이에 회절된 빔을 다시 평행광으로 만들어 주는 2차 프로젝션 광학계 구조로 구성하여 제작하였다.

DMD는  $13.68\mu\text{m}\times 13.68\mu\text{m}$ 의 크기에  $1024\times 768$ 개의 마이크로 미러로 구성된 Texas Instrument 사의 DLP(Digital Light Processing) 칩을 사용하였다. DLP 칩은 원하는 이미지 데이터에 따라 전기적 신호를 인가하면 DLP 칩 내부 마이크로 미러는 on/off 형태로 이미지를 구현을 하여 UV 빔을 제어한다. 또한 시편의 정밀 이송을 위해 X, Y 이송을 위해 및 광학계 이송을 위해 Newport 사의 리니어 스테이지

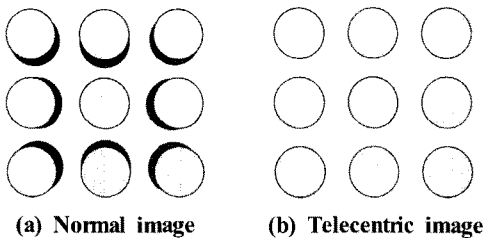


Fig. 7. Normal and telecentric images

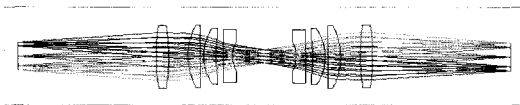


Fig. 8 Illustration of the designed projection optics

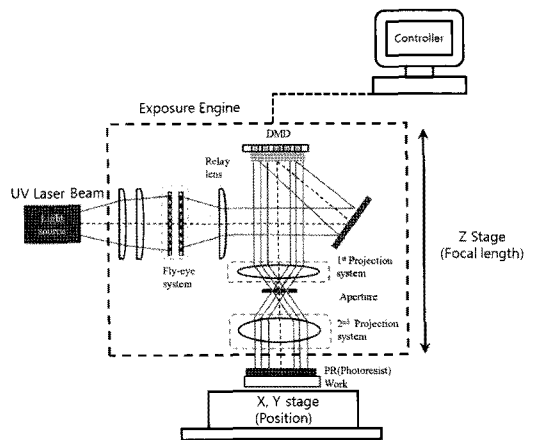


Fig. 9 An illustration of the developed maskless lithography system

(IMS series)를 사용하였으며, 광학계의 초점거리 도출을 위한 스테이지 이송거리 측정을 위해 National Instruments사의 모션 컨트롤러(UMI-7764)를 사용하였다. 제작된 시스템 개략도는 Fig. 9와 같다.

#### 4. Beam Energy 분포 Simulation

노광 에너지 분포 방법에 따라서 노광면의 스폿크기, 노광 면적, 노광시간 등이 결정된다. 따라서 본 논문에서는 DMD에서 반사되는 1024×768 개의 픽셀 빔 중에서 노광조건에 해당하는 단일 빔 시뮬레이션을 통한 초기 설정 파라메타 데이터를 정의하였다. 단일 빔 시뮬레이션을 위하여 광학 설계용 디자인/시뮬레이션 소프트웨어인 ASAP을 사용하였으며, 시스템 제작에 사용한 광학계 조건인 배율이 1:1 광학계를 기준으로 1차 프로젝션 광학계, 2차 프로젝션 광학계로 구성하여 테스트 시뮬레이션 파라메타를 설정하여 수행하였다. 또한 레이저 빔의 경로는 입력 빔을 기준으로 DMD에 반사된 부분과 1차 프로젝션 광학계 통과부분, Aperture Array 통과 부분, 2차 프로젝션 광학계 통과 후, 최종 노광면에 빔이 도착하는 것을 기준으로 조건을 수립하였다. 단일 빔 시뮬레이션은 최종 노광면에 디텍터를 설치하여 측정하는 것을 기준으로 테스트 파라메타를 정의하였다. 위에 언급된 내용을 기준으로 단일 빔 테스트 시뮬레이션을 위한 파라메타를 Table 1과 같이 설정하였다.

위의 설정 조건을 이용해 단일 빔 스폿에 대한 소프트웨어 시뮬레이션을 통하여 특성을 분석하였다. 시뮬레이션 결과

소요시간은 11.46분이 소요 되었고, 디텍터 부분에서의 광선 상태만을 분석하였다. 총 1,000,000개의 광선을 방사하여 중간에 산란되는 빔을 제외하고 디텍터에 도달한 광선의 수는 260,999광선이 도달하였다. 또한 0.00000127W의 광량을 방사하여, 디텍터에 도달한 광량은 0.327597E-06으로 감소되어 도달하였다. 스폿의 데이터 값은 3회의 평균화 작업을 진행하여 시뮬레이션을 진행하였다.

스폿 중심부분의 평균 광량은 Fig. 10에서처럼 434.3 mW/cm<sup>2</sup>의 시뮬레이션 결과를 보였으며, Table 2와 같이 중심부에서 Y축 거리에 따른 단계별 광량분포를 분석할 수 있다.

단일 빔 시뮬레이션 결과 Y축 거리에 따른 광량분포를 이용하여 레이저 빔 출력과 빔 스폿 중심으로부터의 거리와의 관계를 이용하여 Fig. 11과 같이 나타냈으며, DFR 노광에

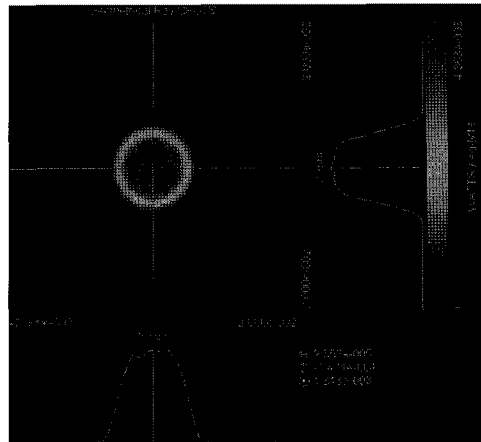


Fig. 10 Power density plot at central region

Table 1 Simulation parameters

Parameter	Condition
Light source profile	Gaussian profile
Light region	12.68μm square
Quantity of light scan	1,000,000
Intensity of radiation	0.00000127W
Light direction	4° tilt at X,Y axis
Output energy	1W at DMD
Reflection of 1pixel	1.27 × 10 <sup>-6</sup>
Power of detector	0.3275971 × 10 <sup>-6</sup>
Illumination at detector	0.4362717 × 10 <sup>-2</sup> (W/cm <sup>2</sup> )
Measurement unit	Power Density (W/cm <sup>2</sup> )
Energy intensity	0.4362717 (W/cm <sup>2</sup> )

Table 2 Power density variations along Y-axis

No.	Distance [μm]	Power density [mW/cm <sup>2</sup> ]
1	3.350	362.9
2	3.941	324.7
3	4.433	260.2
4	4.828	205.8
5	5.222	149.3
6	5.616	96.54
7	6.207	39.82
8	6.798	9.443
9	7.488	1.978

필요한 에너지 밀도를 피팅 함수를 이용하여 다음과 같은 수식으로 정의하게 되었다.

분석된 피팅 함수를 이용하여 DFR의 요구 노광에너지에 맞추어 Y값(파워 밀도)에 필요한 노광 시간을 연산할 수 있으며, 연속 노광일 경우 스폿 직경을 기준하여 속도를 조절해서 노광 시간을 정의할 수 있는 단일 빔 초기 조건의 내용을 Fig. 12와 같이 파악할 수 있다.

Power Density :

$$Y = A + (B_1 * X) + (B_2 * X^2) + (B_3 * X^3) + (B_4 * X^4)$$

$$A = -2293.94302$$

$$B_1 = 2163.16403$$

$$B_2 = -606.97941$$

$$B_3 = 68.13808$$

$$B_4 = -2.69615$$

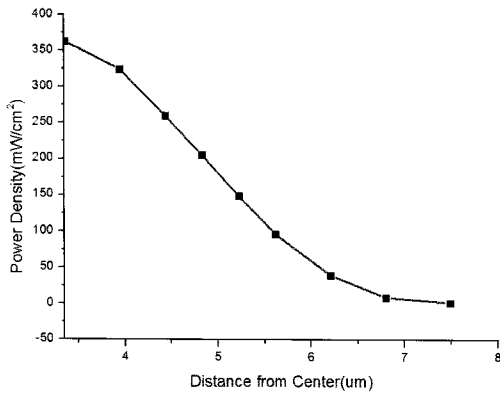


Fig. 11 Power density variations according to the distance from center

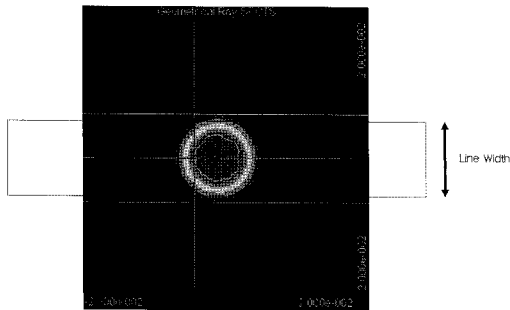


Fig. 12 Simulation result of a single beam

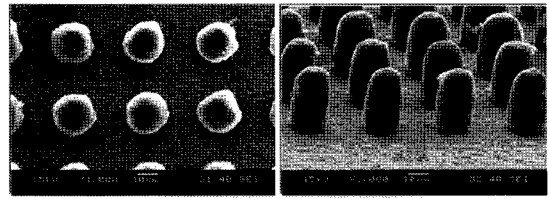
이 실험에서 시뮬레이션한 단일 빔은 노광 스폿이 원형이므로, 어느 방향으로 진행하여도 중첩 광량은 일정하며, DMD 미러의 회전각도와 선평의 연계성은 없었다.

### 5. 실험 결과

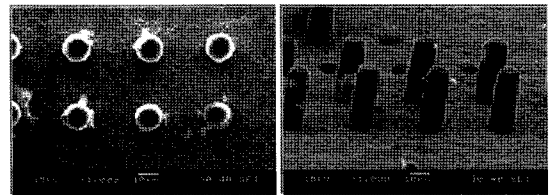
개발된 LDI 시스템과 단일 빔 시뮬레이션 결과를 검증하기 위해 노광 실험을 진행하였다. 시뮬레이션 상으로 10µm의 스폿 생성이 가능하였는데 이를 검증하기 위해 광학계의 초점거리에서의 노광 스폿 크기를 측정하는 실험을 실시하였다.

Table 3 Applied exposure condition for the experiment

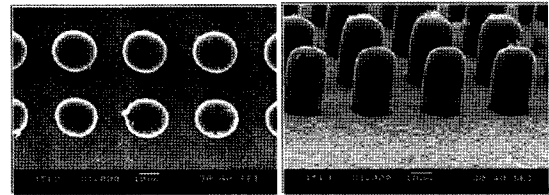
Power density	Exposure time	Z-axis range	Exposure interval
18mJ/cm <sup>2</sup>	20sec	5.55 ~ 9.05mm	0.1mm



(a) 8.45mm



(b) 8.55mm



(c) 8.65mm

Fig. 13 Experimental results according to focal length variations (×1000)

개발된 노광 시스템 엔진의 초점 거리는 제작 시에 각 프로젝션 광학계에 따라 미세한 오차가 발생하기 때문에 정확한 노광 엔진의 초점거리를 이론적으로 계산하여 설정하는 것이 불가능하다. 따라서 초점거리와 노광량에 따른 DFR의 패턴 형상을 실험을 통하여 그 결과를 분석하였다.

실험에 사용한 DFR은 405nm 파장대에서 반응하는 두께 30 $\mu\text{m}$ 인 Hitachi사의 SL-1229를 사용하였다. 초점거리에 따른 노광실험은 에너지 밀도를 18mJ/cm<sup>2</sup>으로 고정하고 노광 엔진의 Z축을 100 $\mu\text{m}$ 씩 이송시키면서 실험을 수행하였으며 조건은 Table 3과 같다. 노광 결과는 SEM으로 관찰하여 측정하였으며 실험 결과를 토대로 노광처리 조건을 분석하였다.

결과를 보면 Fig. 13(b) DFR의 스폿 직경이 10 $\mu\text{m}$ 로 조사 시킨 이미지 직경과 동일함을 알 수 있어 이 조건의 Z축 위치가 초점 위치가 된다. Fig. 13(a)와 Fig. 13(c) 조건에서는 Fig. 13(b) 조건에 비해 Z축이  $\pm 100\mu\text{m}$  벗어난 지점으로, 이곳의 DFR 스폿 직경은 약 15 $\mu\text{m}$ 이므로 초점 영역을 이탈하는 것을 알 수 있다.

## 6. 결론

본 연구는 마이크로 패턴 제작을 위하여 DMD를 이용한 마스크리스 리소그래피 시스템을 개발하고, 단일 빔의 에너지 분포 시뮬레이션 및 실험을 통한 결과검증에 대하여 수행되었다. 핵심 부품으로는 DMD를 사용하여 미세 패턴 이미지를 형성하도록 하였고 플라이아이 렌즈를 사용하는 광 조사 광학계를 설계한 후 시뮬레이션을 통해 광세기 분포를 분석하여 빔 에너지의 균일도를 확인하였다. 프로젝션 광학계는 텔레센트릭 구조로 설계하여 근축광선 추적을 통해 광원의 직진성에 대한 검증을 실시하였다. 개발된 시스템의 노광 면에 조사되는 레이저 빔의 광학적 특성을 분석하기 위해 단일 빔 시뮬레이션을 실시하였고 빔의 에너지 밀도 값과 형태, 에너지 밀도에 대한 수식을 정의하였다. 시뮬레이션을 토대로 실험을 실시한 결과 초점거리를 벗어난 영역에서 선폭이 증가됨을 알 수 있었고 최적의 초점거리에서 약 10 $\mu\text{m}$  크기의 노광 스폿이 형성되어 시뮬레이션 값에 근접한 결과를 보였으며 노광 스폿의 중첩을 통해 10 $\mu\text{m}$  선폭을 가지는 미세 패턴의 제작 가능성을 보였다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부와 한국산업기술평진원의 전략기술 인력양성사업으로 수행되었음.

## 참 고 문 헌

- (1) Oh, S. K., Kim, S. J., and Kim, D. H., 2009, "Pattern Shape Modulation by Scanning Methods in E-Beam Lithography," *J. of KSMTE*, Vol. 18, No. 6, pp.558~564.
- (2) Na, S. Y., 2008, "Optical Technology related EUV Lithography," *OPTICAL SCIENCE AND TECHNOLOGY*, Vol. 12, No. 1, pp. 11~16.
- (3) Seo, M. S. and Kim H., 2005, Occupancy based pattern generation method for maskless lithography. Patent pending in Korea, Application Pub No. 10-2005-0114003.
- (4) Seo, M. S. and Kim, H. Y., 2007, "Lithography upon micro mirrors," *Computer-Aided Design*, Vol. 39, pp. 202~217.
- (5) Texas Instruments n.d., viewed 20 January 2007 <<http://www.ti.com>>
- (6) Choi, J. W., Ha, Y. M., and Lee, S. H., 2007, "Fabrication of Microstructure Array using the Projection Microstereo lithography System," *J. of KSPE*. Vol. 24, No. 8, pp. 138~143.
- (7) Sun, C., Fang, N., Wu, D. M., and Zhang, X., 2005, "Projection micro-stereolithography using digital micro-mirror dynamic mask," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 121, No. 1, pp. 113~120.
- (8) Joo, J. Y., Kim, S. H., Byun, H. S., Lee, K. H., and Jeong, S. H., 2006, "Microstereolithography using a Digital Micromirror Device as the Dynamic Pattern Generator," *J. of KSPE*, Vol. 23, No. 7, pp. 146~151.