

DMD를 이용한 마스크리스 리소그래피 시스템의 고해상도 구현을 위한 다중 빔 에너지 분석에 관한 연구

김중수¹, 신봉철^{1*}, 조용규¹, 조명우², 이수진³
¹인하대학교 기계공학과, ²인하대학교 기계공학부, ³(주) 프로텍

A Study on the Analysis of Multi-beam Energy for High Resolution with Maskless Lithography System Using DMD

Jong-Su Kim^{1*}, Bong-Cheol Shin¹, Yong-Kyu Cho¹, Myeong-Woo Cho²
and Soo-Jin Lee³

¹Department of Mechanical Engineering, Inha University

²Division of Mechanical Engineering, Inha University

³Protec corporation

요약 고 집적 회로의 제작에 있어서 노광 공정은 가장 중요한 기술로 주로 마스크 방식의 노광 방법을 사용하지
만 다품종 소량 생산 및 주기적인 제품 변화에 있어서 효율적이지 못하기 때문에 마스크리스 리소그래피 기술이 노
광공정에서 각광받고 있다. 본 연구에서는 DMD를 이용한 마스크리스 리소그래피에 있어 다중 레이저 빔의 에너지와
중첩도와의 연관성을 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 시뮬레이션을 통해 최적의 스캔 라인 간격을 제시하였고, LDI
시스템을 이용한 노광 실험을 통해 미세 패턴의 정밀도를 향상시킬 수 있었다.

Abstract Exposure process is the most important technology to fabricate highly integrated circuit. Up to now,
mask type lithography process has been generally used. However, it is not efficient for small quantity and/or
frequently changing products. Therefore, maskless lithography technology is raised in exposure process. In this
study, relations between multi-beam energy and overlay were analyzed. Exposure experiment of generating
pattern was performed. It was from presented scan line by multi- beam simulation. As a result, optimal scan
line distance was proposed by simulation, and micro pattern accuracy could be improved by exposure
experiment using laser direct imaging system.

Key Words : Maskless lithography, DMD(Digital Micromirror Device), Multi beam simulation

1. 서론

정보화 시대의 도래로 전자 제품의 소형화가 요구되고
있고 이에 따라 전자 부품의 고밀도 집적화에 대한 연구
가 활발히 이루어지고 있다. 전자 부품의 고밀도 집적화
에 있어서 가장 중요한 기술은 노광 공정으로 그 종류에
는 접촉 노광, 근접 노광, 프로젝션 노광 방식으로 구분된
다. 접촉 노광과 근접 노광은 회로 패턴이 새겨진 글래스

마스크를 사용하는 방법으로 현재 가장 많이 이용되고
있다[1]. 글래스 마스크를 사용하는 노광 방식의 문제점
은 마스크 제작비용의 발생, 마스크 제조 후 유지 및 관
리 비용 발생, 마스크 불량에 의한 수율 저하, 마스크 설
계와 제작 시간의 과다 소요에 따른 생산 일정 지연 등으
로 다품종 소량 생산에 있어서 적합하지 않다. 이러한 문
제점을 개선하기 위한 방법으로 등장한 마스크리스 리소
그래피(Maskless lithography) 기술은 마스크 사용 시의

본 연구는 지식경제부와 한국산업기술진흥원의 전략기술인력양성사업으로 수행된 결과입니다.

*교신저자 : 신봉철(@)

접수일 10년 10월 19일

수정일 11년 02월 01일

게재확정일 11년 02월 10일

문제점과 시장의 요구에 대응하도록 기존 노광 공정에 사용되던 마스크를 배제하고, 사용자가 노광용 회로패턴 데이터 파일을 입력하여 미세 패턴을 직접 노광하는 기술이다.[2] 이러한 마스크리스 리소그래피 노광 방법은 여러 가지 종류가 있는데 그중 DMD(Digital Micromirror Device)를 이용하는 방법이 많이 부각되고 있다. 하지만 이러한 방법은 노광용 마스크 이미지를 노광패턴 조건에 최적화 시켜 DMD에 픽셀형태의 래스터 이미지(Raster Image)를 전송시키고, 미러(Mirror) 피치(Pitch)간격의 공간을 채워 최적의 노광패턴을 구현할 수 있는 방법이 필요하다[3,4]. 또한 노광패턴을 위한 방법을 적용하여도, 최적의 노광패턴을 구현하기 위해서는 레이저 빔의 중첩도 및 노광용 DFR (Dry Film Resist)특성 등의 다양한 변수를 고려해야 한다.

따라서 본 논문에서는 DMD를 이용한 노광 장비를 이용하여 정밀 패턴 생성을 위하여 노광 알고리즘과 레이저 빔의 에너지 중첩도와와의 상호 관계를 통해 최적의 노광 라인 거칠기(LER : Line Edge Roughness)를 도출하였다. 이를 위해 이론적 시뮬레이션 결과를 토대로 노광 실험을 실시하여 실험 결과와 이론적 내용의 일치성을 검증하였다.

2. 레이저 다중 빔 시뮬레이션

DMD를 이용한 마스크리스 리소그래피에서 스폿 사이에는 간격이 존재하고 이로 인해 불연속적인 패턴이 생성된다. 이러한 간격을 없애기 위해 DMD를 회전을 시킨 후 노광을 수행하여 패턴을 중첩시키면 연속적인 패턴을 생성할 수 있다[5,6]. 그러나 이미지 중첩에 있어서 알고리즘을 통한 기하학적인 이미지 처리 방법만으로는 정확한 패턴 형상을 구현할 수 없기 때문에 레이저 에너지 특성, 사용하는 DFR 특성 등의 다양한 공정 변수를 고려해야 한다. 본 논문에서는 중첩되는 패턴 이미지의 레이저 에너지 특성을 광학 시뮬레이션을 통해 분석하고 이미지 중첩 실험을 실시하여 패턴 이미지를 분석함으로써 연구를 진행하고자 한다.

빔 시뮬레이션 진행 조건은 광학 설계용 디자인/시뮬레이션 소프트웨어인 ASAP을 적용하여 시뮬레이션 테스트를 표 1의 조건으로 수행하였다.

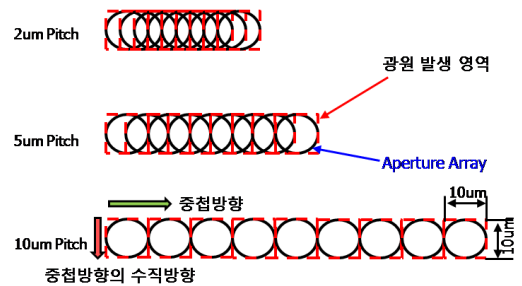
스캔라인 간격은 레이저 빔 스폿 사이의 피치 간격을 의미하며, 이 간격이 짧을수록 노광 라인 거칠기의 형태가 선형에 근접하는 효과가 있다. 스캔라인 간격에 따른 에너지 밀도를 분석하기 위해 그림 1과 같이 일정 간격별 스캔라인을 정의하여 시뮬레이션을 진행하였다.

[표 1] 시뮬레이션 조건

| 설정 변수 | 조건 설정 |
|-----------|--|
| 광원 조건 | 가우시안 분포 |
| 광 분포 영역 | 가로, 세로 12.68 μ m사각형 |
| 광선 주사량 | 1.000.000 |
| 광량 | 0.00000127W |
| 광선 방사 방향 | 축 중심 기준 X,Y축으로 반각 4° |
| 출력 에너지 | DMD상에 1W 조사 |
| 픽셀당 반사량 | 1.27 $\times 10^6$ |
| 디텍터 축 파워 | 0.3275971 $\times 10^6$ |
| 디텍터 축 조사량 | 0.4362717 $\times 10^2$ (W/cm ²) |
| 에너지 밀도 | 0.4362717(W/cm ²) |

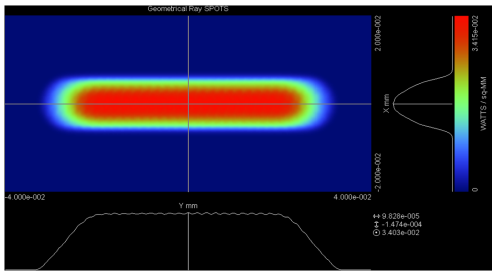
[표 2] 폭과 광량에 따른 시뮬레이션 결과

| | 중심에서의 거리(μ m) | 광량(mW/cm ²) |
|------------|--------------------|-------------------------|
| 2 μ m | 7.125 | 98.19 |
| | 7.813 | 9.391 |
| 5 μ m | 7.094 | 33.8 |
| | 7.980 | 3.771 |
| 10 μ m | 6.283 | 93.06 |
| | 7.016 | 17.89 |



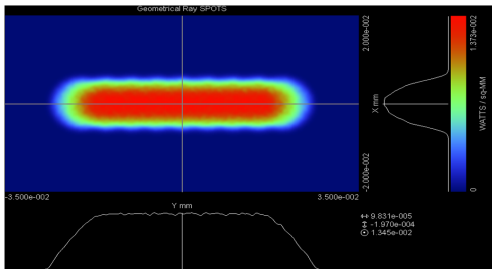
[그림 1] 중첩 시뮬레이션 방법

표 2에서 20mJ/cm²의 DFR을 사용할 경우 광량이 20mW/cm² 이상이 되어야 하고 이 지점을 라인의 선폭으로 지정하였다. 시뮬레이션 결과 스캔 라인 간격 2 μ m인 경우 스폿 중심의 평균 광량은 3403mW/cm²으로 중첩부분의 광량은 단일 빔 스폿의(434.3mW/cm²) 7.83배의 광량 분포도를 파악할 수 있었다.[그림 2] 이는 중첩 방향의 수직 방향으로 노광을 진행하여도 문제가 없었으며 또한 노광 라인 거칠기의 형태가 라인에 근접한 경향을 나타내고 있다. 따라서 스캔라인 간격 2 μ m인 경우 노광 선폭은 중심거리의 2배인 14.25 μ m가 되는 결과를 확인할 수 있었다.

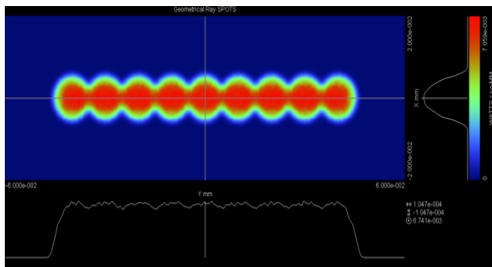


[그림 2] 2 μ m 시뮬레이션 결과

스캔라인 간격 5 μ m인 경우에는 스폿 중심의 평균 광량은 1345mW/cm²으로 중첩부분의 광량은 단일 빔 스폿의 3배의 광량 분포도를 파악할 수 있었다.[그림 3] 스캔라인 간격 2 μ m보다는 광량 분포도가 낮으나 수직 방향으로 노광을 진행하여도 문제가 없음을 확인할 수 있었다. 또한 노광 라인 거칠기의 형태가 일부 단일 빔 스폿의 형태를 나타내고는 있으나 라인에 근접한 경향을 나타냈었고, 노광 선폭은 중심거리의 2배인 14.199 μ m의 결과를 확인할 수 있었다.



[그림 3] 5 μ m 시뮬레이션 결과



[그림 4] 10 μ m 시뮬레이션 결과

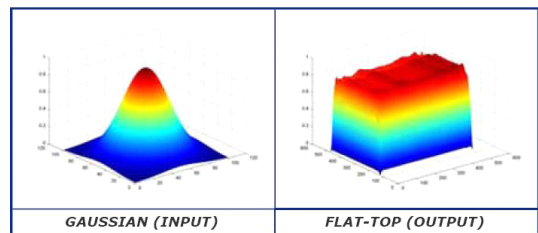
그림 4는 10 μ m의 시뮬레이션 결과로 스폿 중심의 평균 광량은 674mW/cm²으로 중첩부분의 광량은 단일 빔 스폿의 1.55배의 광량 분포도를 파악할 수 있었다. 노광 선폭은 중심거리의 2배인 12.566 μ m으로 점차 줄어들었고 노광 라인 거칠기의 경우에는 단일 빔 스폿의 형태로 연결 고리 모양의 경향이 나타나는 문제점이 있었다.

따라서 10 μ m에 비해 5 μ m 이하에서 노광 에너지 분포가 선형적으로 유지하는 것을 확인할 수 있었고 이 결과를 실험에 적용하였다.

3. 마스크리스 리소그래피 장치 구성

DMD 기반 마스크리스 리소그래피 노광 시스템은 다음과 같이 작동된다. LED 드라이버에서 조사된 UV 레이저 소스는 광 조사 광학계를 통과하여 빔 에너지가 균일화되고 균일화 된 빔은 DMD 미러에 조사되는데, DMD 컨트롤러에서 1024×768개의 DMD 미러를 제어하여 레이저 빔을 원하는 형상대로 선택적으로 프로젝션 광학계로 반사시켜 패턴 이미지의 왜곡을 보정한 후 노광을 수행하게 된다. 시스템의 각 구성은 다음과 같다.

본 시스템에서 사용된 UV 레이저 소스는 조사강도가 7500mw/cm²이고 파장대가 365 \pm 5nm인 UV-LED를 사용하였다. 광 조사 광학계는 일반적인 레이저 빔의 가우시안 분포를 균일하게 하기 위해 Fly-eye lens로 빔의 손실률을 최소화 시키고, 에너지 밀도를 Flat-Top형태로 균일하게 제작하였다.[그림 5]

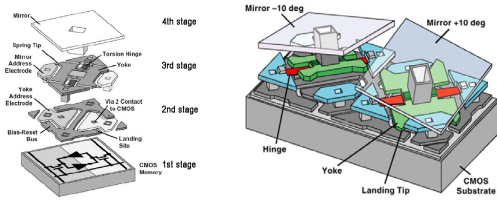


[그림 5] 레이저 빔 에너지 형태

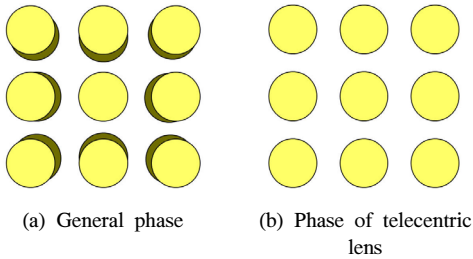
DMD는 마스크리스 노광 시스템의 핵심이 되는 부품으로 하나의 피치 간격이 13.68 μ m인 미러가 1024×768개로 배열되어 있는 텍사스 인스트루먼트(Texas Instrument)사의 제품을 사용하였다.[7] 이러한 DMD는 2개의 토션 힌지를 통해 미러가 움직이도록 구성되어 있으며, DMD 컨트롤러에 의해 이진법의 전기적인 신호로 On/Off가 제어되어 $\pm 12^\circ$ 로 작동되고 DMD로 입사된 빛을 선택적으로 반사시켜 노광 패턴을 형성시킨다.[그림 6]

마지막으로 프로젝션 광학계는 DMD에서 반사된 이미지 패턴을 갖는 분할된 미세한 광원이 직진광이 되어 노광면에 조사 될 수 있도록 광원의 왜곡을 방지하기 위해 텔레센트릭(Telecentric) 구조로 설계되어 있고, 여러 개의 렌즈를 사용하여 각 렌즈의 수차 특성을 서로 상쇄

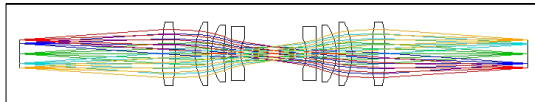
시켜 원하는 형태의 상을 만들도록 하였다.[그림 7,8]



[그림 6] 마이크로 미러의 구조

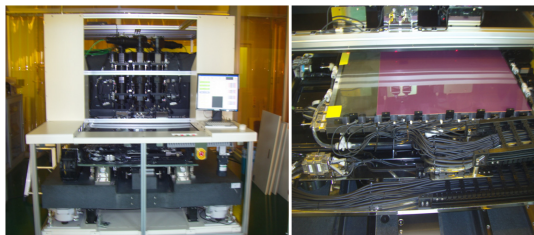


[그림 7] 상의 왜곡 보정



[그림 8] 프로젝션 광학계 광학 설계

시편의 정밀 이송을 위해 Newport사의 리니어 스테이지(IMS series)를 사용하였으며, 광학계의 초점거리 도출을 위한 스테이지 이송거리 측정은 National Instruments사의 Motion controller(UMI-7764)를 사용하였다. 제작된 시스템은 그림 9와 같다.

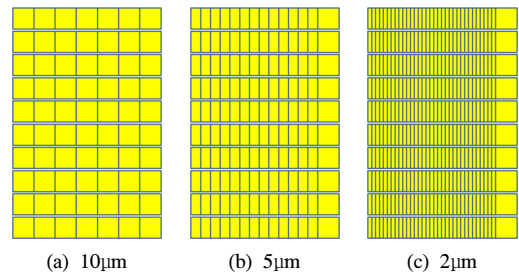


[그림 9] 마스크리스 리소그래피 시스템

4. 노광 실험 및 결과

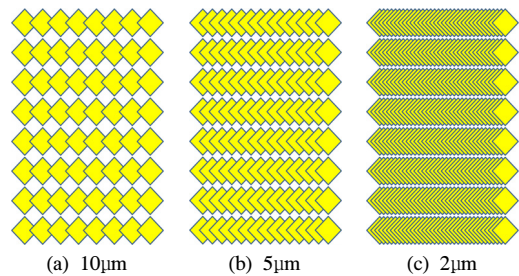
노광에 사용된 시편은 Hitachi사의 Dry film photoresist SL-1200 series로 355nm파장대에서 14~23mJ/cm²의 에너지

밀도의 빔이 조사될 때 반응하여 패턴을 형성한다. 현재 구성된 시스템에서는 시뮬레이션과 같은 원형이 아닌 DMD 미러와 같은 사각 형태로 스폿 패턴이 형성된다. 따라서 증첩 실험은 직교방향 패턴과 대각 방향 패턴 이미지를 2μm, 5μm, 10μm 간격으로 증첩을 반복하여 노광을 진행하였다. 그림 10, 11과 같이 증첩시킨 이유는 단일 스폿을 증첩시켜 패턴을 생성할 경우 현상 과정과 세척 과정에서 패턴이 탈락하는 현상이 발생하여 라인 패턴을 가로 방향으로 증첩시켜 패턴을 형성한 후 패턴의 모서리 영역을 분석하였다. 노광 후에는 1%wt의 Na₂CO₃ 용액에서 7분 동안 현상을 진행하였다.



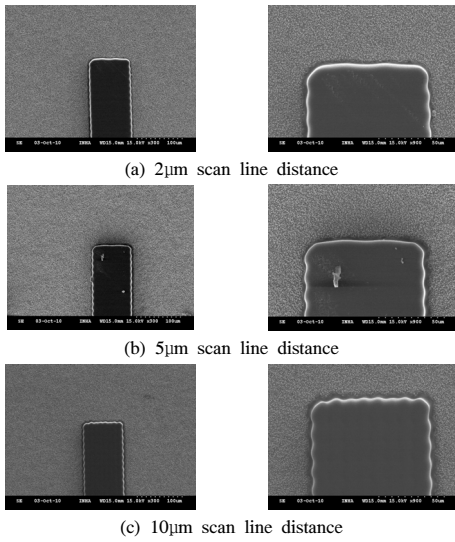
[그림 10] 직교방향 증첩 패턴

실험 결과 노광 패턴이 스캔라인 간격과 증첩 형태에 따라 다르게 형성됨을 알 수 있다. 2μm에서 직교방향 및 대각방향 패턴의 경우 패턴 형상의 모서리 부분이 둥글게 형성되었는데 이는 증첩 영역에서 받는 빔 에너지의 과다 노출에 기인한 것이다.



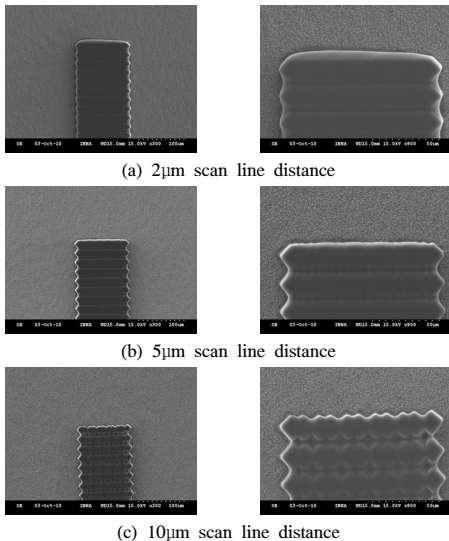
[그림 11] 대각방향 증첩 패턴

5μm에서 2μm과 비슷한 라인의 모서리를 얻을 수 있지만 2μm의 경우 같은 길이의 패턴을 형성하기 위해 더 많은 스폿을 증첩시켜야 한다. 10μm에서는 작은 증첩 영역으로 인해 미러 사이에 간격 흔적이 남아있었다. [그림 12,13]



[그림 12] 직교방향 패턴 실험 결과

직교 방향의 패턴의 경우 스캔라인 간격에 따른 패턴의 노광 라인 거칠기의 차이가 큰 차이를 보이지 않았으나 대각 방향의 패턴의 경우 $10\mu\text{m}$ 에서 좋지 않은 노광 라인 거칠기를 보였다. 이는 중첩 노광을 실시할 때 스캔라인 간격을 감소시키면 노광 라인 거칠기를 좋게 만들 수 있지만 에너지의 과다 노출로 인해 둥근 모서리 윤곽을 형성함을 알 수 있다. 따라서 스캔라인 간격을 감소시키면 고해상도의 패턴을 얻을 수 있지만 같은 길이의 패턴을 형성시키기 위해 중첩시켜야할 패턴의 스폿 수가 현저하게 증가하였고, 일정 간격 이하에서는 패턴 정밀도의 향상이 크지 않음을 알 수 있었다.



[그림 13] 대각방향 패턴 실험 결과

5. 결론

본 연구에서는 DMD를 이용한 마스크리스 리소그래피 시스템에서 고해상도 구현을 위한 다중 빔 시뮬레이션을 통해 에너지 분포를 분석하였고 실험을 통해 패턴 형상의 분석을 실시하였다. 실험 결과는 다음과 같다.

- (1) DMD를 이용한 마스크리스 리소그래피에서 미러 사이의 갭이 존재함에 따라 DMD 미러를 회전시켜 노광 작업을 수행하게 되는데 회전 각도에 의한 중첩도 변화를 통해서 스캔라인 간격과 해상도가 결정된다.
- (2) 레이저 빔 에너지 분석을 위하여 ASAP 프로그램을 이용하여 스캔라인 간격별로 중첩 시뮬레이션을 실시하여 에너지 분포를 확인하였고, 스캔라인 간격에 따른 노광 라인 거칠기를 확인하였다.
- (3) 시뮬레이션을 바탕으로 광 조사 광학계, DMD 미러와 컨트롤러, 프로젝션 광학계로 이루어진 시스템을 구축하였다.
- (4) 실험 결과 스캔라인 간격에 따라 중첩 패턴 형상이 시뮬레이션에서의 노광 라인 거칠기의 형태와 근접한 결과를 확인하였고 에너지 분석과 실험을 통해 최적의 중첩도로 $5\mu\text{m}$ 간격을 선정하였다. 시뮬레이션 및 실험을 통해 패턴 간의 간격을 조절하여 해상도를 증가시킴으로 미세 형상의 정밀도를 향상시킬 수 있었다.

참고문헌

- [1] 홍진수, 김창교, “나노미터 크기의 임의 형상을 제작하기 위한 새로운 리소그래피 기술”, 한국산화기술학 회논문지, Vol.5, No.3, PP.197-203
- [2] 조명우, 김동우, “PCB 노광을 위한 DMD를 이용한 마스크리스 리소그래피 기술”, 기계저널, Vol.50, No.6, pp.43-47
- [3] M. S. Seo and H. Y. Kim, "Lithography upon micro mirrors", Computer-Aided Design, 39, 202-217, 2007
- [4] 서만승, 김혜령, “마스크리스 리소그래피를 위한 점유면적기반 패턴 생성방법”, 대한민국특허청, No. 10-2005-0114003, 2005
- [5] Wehnhui Mei, "POINT ARRAY MASKLESS LITHOGRAPHY", US. Patent, No.6473237 B2, 2002
- [6] Takashi Kanatake, "HIGH RESOLUTION POINT ARRAY", US. Patent, No.0004699 A1, 2004
- [7] <http://www.ti.com>

김 종 수(Jong-Su Kim)

[정회원]



- 1993년 2월 : 안양과학대학교 제어계측과 (전문학사)
- 2004년 2월 : 한국방송통신대학교 컴퓨터과학과 (이학사)
- 2010년 2월 : 인하대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2010년 2월 ~ 현재 : 인하대학교 기계공학과 대학원 박사과정, (주)에이원마이크로 연구소장

<관심분야>

Maskless Lithography, 마이크로 생산 시스템

조 명 우(Myeong-Woo Cho)

[정회원]



- 1983년 2월 : 서울대학교 기계설계과 (공학사)
- 1985년 2월 : 서울대학교 기계설계과 대학원 (공학석사)
- 1985년 ~ 1989년 : 한국생산성본부 자동화 사업부 전문위원
- 1992년 2월 : University of Illinois (공학박사)
- 1993년 ~ 1997년 : 대우전자 시스템 사업부 부장
- 1997년 2월 ~ 현재 : 인하대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

CAD/CAM/CAI, 마이크로 생산 시스템, 머신 비전

신 봉 철(Bong-Cheol Shin)

[정회원]



- 2000년 2월 : 호서대학교 기계공학과 (공학사)
- 2004년 2월 : 인하대학교 기계공학과 대학원 (공학석사)
- 2010년 2월 : 인하대학교 기계공학과 대학원 (공학박사)
- 2010년 3월 ~ 현재 : 인하대학교 기계공학과 박사 후 연구원

<관심분야>

마이크로 절삭 모니터링, 마이크로 EDM, 미세 측정

이 수 진(Soo-Jin Lee)

[정회원]



- 1990년 2월 : 한양대학교 기계공학과 (공학사)
- 1992년 2월 : 한양대학교 기계설계학과 대학원 (공학석사)
- 2010년 2월 : 인하대학교 기계공학과 대학원 (공학박사)
- 2002년 9월 ~ 현재 : (주)프로텍 수석연구원

<관심분야>

Maskless Lithography, LED Package

조 용 규(Yong-Kyu Cho)

[준회원]



- 2010년 2월 : 인하대학교 기계공학과 (공학사)
- 2010년 3월 ~ 현재 : 인하대학교 기계공학과 대학원 석사과정

<관심분야>

Maskless Lithography