

1. 서론

현재의 정보화 시대에서는 인간의 일상생활 및 경제생활은 컴퓨터, 스마트폰, 대형 TV 와 인터넷에 의해 급속도로 변화하고 있으며, 이는 정보 처리 및 표시 기술에 해당하는 반도체 및 LCD 산업의 발달에 기인한다. 수백만개의 트랜지스터로 이루어진 반도체 칩, 대형 디스플레이 및 모바일 패널은 노광기술에 의해 만들어지고 있다. 노광기술은 마이크로/나노 테크놀로지를 바탕으로 현재 뿐만 아니라 향후에도 기술적 발전을 가능하게 할 핵심 기술이다.

디지털 노광기술은 기존 마스크를 사용하는 투영노광 방식과 다르게, DMD (digital mirror device)를 사용하여 마스크 정보를 구현함으로써 포토마스크 없이 노광공정을 진행할 수 있다. 현재 노광 공정에서 마스크 제작에

상 물질을 나노 스케일로 국소 영역을 세분화하여 설계자가 구성한 공정 프로세스를 영역별로 나누어 공정을 수행할 수 있도록 하는 것이며, 이를 위해서는 높은 공간 분해능이 필수적이다. 또한, 기술의 실용화를 위해서는 고 분해능을 가짐과 동시에 고속 패터닝 (high-throughput patterning)에 대한 전략 제시가 필요하다.

2. 디지털 마이크로 리소그래피

디스플레이 산업에서 노광기는 TFT 공정과 컬러필터 공정에 각각 적용되는 핵심 장비이며 기술적 난이도가 높아 현재 몇몇 선진 업체들에 의해서 과점화 되어있다. 포토마스크 기반의 디스플레이 노광기는 대부분 근접노

특집 ■ 리소그래피

디지털 리소그래피 기술

강동원, 김석, 한재원*

상당한 비용과 시간이 소요되는 것을 고려할 때, 비용절감과 제품개발 기간단축은 매우 큰 장점으로 기존의 투영노광 기술을 대체할 차세대 디스플레이 노광기술로 주목을 받고 있다.

최근 나노 기술 분야의 연구가 활발하게 진행되면서 다양한 분야에서 나노 스케일의 구조물의 수요가 늘어나고 있으며, 이에 따라 사용자 중심의 나노 스케일 제조 공정 확립을 위해 '나노 리소그래피'의 '디지털화'가 필요하다. 이러한 디지털 방식의 나노 리소그래피 공정은 대

광의 mirror scan 노광 방식과 투영 노광의 mirror projection scan 방식 (캐논), projection lens scan 방식 (니콘) 등이 사용된다. 마이크로 스케일 디지털 리소그래피 기술은 크게 TFT-LCD를 중심으로 하는 평판 디스플레이 제조 기술과 3D 프린팅 기술로 나눌 수 있다.

가. 평판 디스플레이 제조 기술

현재 TFT-LCD 패널을 생산할 수 있는 노광기는 일본

* 연세대학교

디지털 리소그래피 기술

니콘과 캐논, 미국 Rudolph Technologies (구 Azores)에서 양산되고 있다. 니콘과 캐논은 기판의 대형화를 위해 step-and-scan 방식의 8세대급 노광기를 생산하고 있고, 생산성을 향상시키기 위해 투영광학계를 두개 이상 장착하고 있다. Step-and-scan 방식은 투영 광학계의 특성이 가장 좋은 일부분만을 사용하므로 광학계의 크기가 증가된다는 단점이 있으나,

해상도를 극대화해야 하는 반도체용 노광기나 대면적 노광 장비에서 적용되고 있다. 이러한 대형 렌즈 제작 관련 비용 및 기술적 난점 및 마스크의 생산, 유지 비용 등으로 인해 디지털 노광기술이 주목을 받고 있으며, 주요 연구 주체는 일본의 Fuji Photo Film, INDEX, DAINIPPON SCREEN, Hitachi via 등과 미국기업인 Texas Instrument Inc., 스웨덴 기업인 Micronic Laser Systems AB, 네덜란드의 ASML 등이 있다 [1].

상용화된 디지털 노광장비로는 Index 사의 MX-1200 시리즈 [2], Dainippon Screen (DNS) 사의 Mercurex [3], Fujifilm사의 INPREX [4], Hitachi via 사의 DE-H 시리즈 [5]가 잘 알려져 있다. 상기 노광장비는 모두 스테이지 스캔 방식으로 노광 패턴을 구현한다.

최근 국내에서는 8세대 기판 대응 디지털 노광 장비원천 기술 개발을 위한 지식경제부 과제가 성공적으로 마무리 되었다. 삼성전자, LG 전자 등 국내 대기업이 참여했으며 업계, 학계뿐만 아니라 국가적으로도 디지털 노광 장비 개발에 대한 관심이 고조 되고 있다. 현재 단일 멀티 헤드를 이용한 디지털 노광 장비 개발이 완성 단계

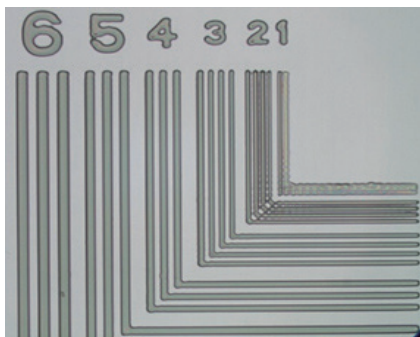


그림 1. 국내에서 개발된 디지털 리소그래피 장비의 분해능

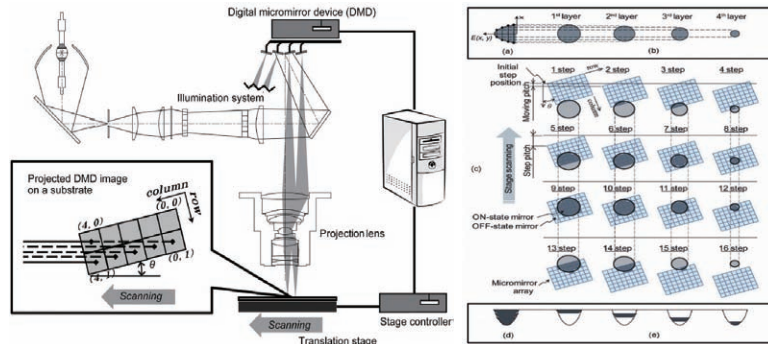


그림 2. (좌) 그레이 스케일 노광 장치 개략도 및 (우) 3차원 패턴 적층 원리 [6]

에 이르렀으며, 이는 기술 자체에 대한 타당성이 입증되었음을 의미하며, 원천기술의 큰 기틀을 마련하게 된 것이다. 그러나 실제 산업 분야에서 요구되는 성능을 충족할 수 있게 되었다. 향후 장비의 노광 속도를 높이고 노광 면적이 증대시키기 위해서 현재 개발된 기술에 정밀도가 더해지고, 광학헤드의 수를 더 증가 시키는 등 추가적인 연구 및 기술 개발이 요구되고 있다.

나. 3D 디지털 프린팅 기술

최근 각광받고 있는 3D 디지털 프린팅 기술은 고정밀도의 제작 수준을 요구하는 마이크로 크기의 광 부품 제작을 위해 개발되고 있는 추세이다. 3D 디지털 프린팅 기술은 크게 그레이 스케일 디지털 노광 [6,7]과 스테레오 디지털 노광 [8,9]으로 나눌 수 있다.

그레이 스케일 노광은 3차원 형상을 제작하기 위한 기술로 감광제가 빛의 세기에 따라서 부분적으로 노광되는 현상을 이용한다 [6, 7]. 이로 인해 노광 후에 남아 있는 감광제의 두께를 조절할 수 있어 원하는 형상을 정밀하게 제작할 수 있게 된다. 하지만 그레이 스케일 노광은 미소 렌즈 어레이, 회절 격자 같이 평면상에 구속되어 있는 물체만을 제작할 수 있는 한계점이 있다.

스테레오 디지털 노광은 3차원 형상의 패턴을 bottom-up 방식으로 적층하여 구현하는 기술이라는 점이 가장 큰 차이점이다. 말 그대로 패턴을 아래부터 위로 적층하여 3차원 패턴을 구현하는 방식으로 rapid proto-typing이 가능한 장점이 있어 활발히 연구가 진행 중이다. [8, 9]

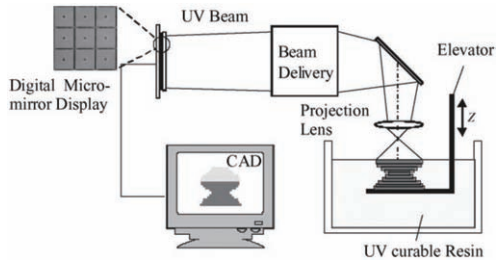


그림 3. 스테레오 노광을 이용한 3차원 패터닝 원리 [8]

3. 디지털 나노 리소그래피

가. 병렬 전자빔 나노리소그래피

주사형전자현미경(SEM) 기술을 기초한 전자빔 리소그래피 기술은 반도체 소자 및, 포토마스크의 제작에 있어 핵심적인 기술로써 이용되고 있으며, 미국, 유럽, 일본을 중심으로 산업화가 가능한 생산성 확보를 위해 병렬 방식을 도입하고 현재 나노스케일 디지털 리소그래피 기술을 개발하고 있다 [10]. 병렬 전자빔 리소그래피 기술은 처리속도에 관한 이슈를 부분적으로 해소하는데 성공하였지만, 대전 입자들간의 반발력, 이차전자생성 및 자계 렌즈의 수차 등의 복합적인 물리적인 문제에 의하여 분해능이 40 나노미터 수준에 머무르고 있다.

나. 병렬 근접장 나노리소그래피

한편, 파장보다 작은 핀 홀을 통해 나오는 근접장을 이용하면 기존의 광원을 통해 회절한계 이하의 고 분해능

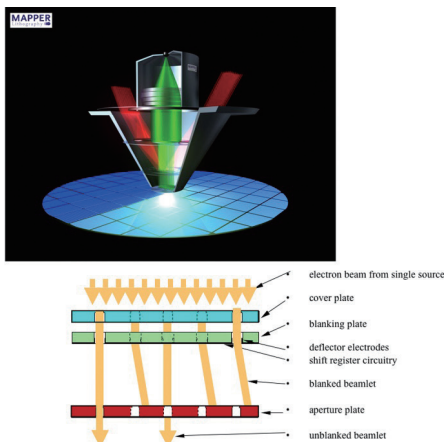


그림 4. 병렬 방식 전자빔 나노리소그래피의 대표적인 예인 Mapper 장비 개념도 [10]

의 빛을 얻을 수가 있는데, 이러한 근접장 광원을 이용하여 나노스케일의 패터닝을 수행하는 것이 근접장 리소그래피이다. 그러나 이때 사용되는 핀 홀의 직경이 작아질수록 통과되는 광의 강도가 급격하게 감소하는 특성으로 인해 패터닝 속도가 저하되는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 근접장 리소그래피에서는 두 가지 접근 방식을 제시하고 있다. 첫 번째는 병렬 방식의 도입을 통해 단위면적당 패턴 면적을 늘리는 것이고, 두 번째는 핀 홀을 통해 나오는 광량의 투과율을 높이기 위하여 표면 플라즈몬을 이용하는 것이다.

Sheffield 대학의 Graham J. Leggett 그룹에서는 근접장 현미경 (scanning near-field optical microscopy) 프로브를 병렬 방식으로 제작하여 패턴을 수행하는 Snomipede를 제시하였다 [11]. 초기 수행 결과로 12 개의 프로브를 이용하여 분해능 70 nm를 보였으나 속도가 0.2 $\mu\text{m}/\text{s}$ 로 느린 것은 극복해야 할 점이다. 이와 더불어 Northwestern 대학의 Chad, A. Mirkin 그룹에서는 빔 펜 리소그래피 (beam pen lithography) 기술을 바탕으로 DMD와의 결합을 통해 나노 스케일의 디지털 리소그래피 기술을 선보였다 [12]. PDMS (polydimethylsiloxane) 라는 유연한 물질을 이용하여 1cm^2 당 15000개의 피라미드 형태의 프로브를 제작하고, 각 프로브에 금속 개구를 형성함으로써 수만 개의 근접장 광원을 제어하여 대면적 패턴을 제작할 수 있음을 보였으나, 프로브의 기계적 특성으로 인해 스캐닝을 통한 라인 패턴 형성이 어려운 점은 실제 공정에 적용되는데 있어 걸림돌이다.

다. 병렬 플라즈모닉 나노리소그래피

앞서 잠깐 언급한 것과 같이, 낮은 광 투과율을 나타내는 단순한 핀 홀의 형태를 발전시켜 나비 모양, C 형의 특성한 형태로 금속 개구 (aperture)를 제작하면 수백 배 향상된 투과율을 보이는 수십 나노 미터 크기의 근접장 광원을 형성할 수 있는데, 이를 이용하는 것이 플라즈모닉 나노리소그래피이다. 금속 표면으로부터 수십 나노 미터 거리 안에 형성된 광원을 이용하기 위해서는 가공된 개구와 감광물질 간의 거리를 수~수십 나노 미터 이하로 유지하는 기술이 필요하다. 이를 위해 복잡한 피드백 장치가 필요하며, 이 때문에 기록 속도도 수 $\mu\text{m}/\text{s}$ 에 머물렀었다.

디지털 리소그래피 기술

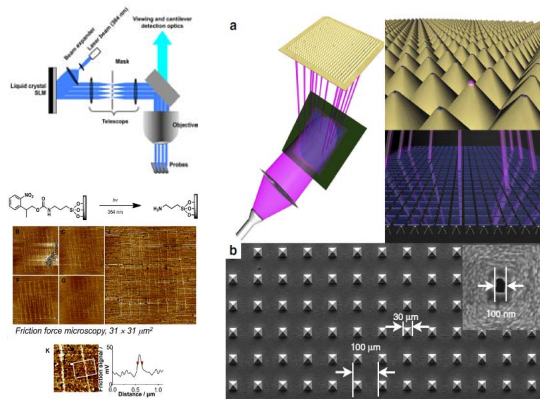


그림 5. Snomipede 기술 [11] (좌)과 Beam Pen Lithography 기술 [12] (우)

하지만, 미국 U.C. Berkeley 의 Xiang Zhang 그룹 (2008년)과 본 연구실(2009년)에서 이러한 점을 극복하는 아이디어를 선보였다. U.C. Berkeley에서는 공기 역학적 구조를 이용하여 하드 디스크 표면 약 20 nm 위에서 일정 거리의 부양 상태를 유지하는 플라잉 플라즈모닉 렌즈를 구현하였고 [13], 초당 4~12 m/s 의 초고속에서 약 80 nm 급의 패턴을 형성하는데 성공하였으나, 병렬 방식 도입의 어려움이 가장 큰 단점으로 지적되고 있다. 본 연구실에서는 자기조립 단분자막(SAM, self-assembled monolayer)과 다이아몬드상 카본 (DLC, Diamond like carbon)을 윤활제와 보호층으로 이용해 기판과 탐침을 접촉 시킴으로써 근접장을 이용한 기록 속도를 기존 대비 수백 배 향상시킨 접촉식 플라즈모닉 나노 리소그래피 기술을 보고하였으며 [14], 이 기술을 통해 패턴 크기를 50 nm 이하로 줄이면서도 패터닝 속도를 최고 10 mm/s까지 향상시킬 수 있었으며, 나아가 병렬 방식 프로브 기술로의 확장 가능성이 크다고 평가 받고 있다.

또한, 최근 플라즈모닉 기술을 이용할 경우 이론적으로 10 나노미터 이하의 분해능을 얻을 수 있고, 실험적으로 22 나노미터 병렬 라인 패턴을 제시한 연구결과가 본 연구진에 의해 발표되었다 [15]. 이와 함께 기존의 회절한계를 넘어서는 고분해능 패턴을 형성 및 병렬 방식 적용을

위한 마이크론 사이즈의 접촉식 광 프로브를 MEMS 공정을 통해 연구실 독자적으로 실제 개발에 성공하였다.

플라즈모닉 나노리소그래피 기술은 하나의 기판에 여러 개의 프로브로 동시에 기록하는 병렬 프로브 기술을 사용하여 더욱 향상된 생산 능력을 확보할 수 있다. 현재 본 연구진은 수십 나노 미터 크기의 빛을 형성하는 나노 개구를 병렬로 수백 ~ 수 만개를 제작하고 이를 DMD와 결합하여 플라즈모닉 근접장 광원을 개별적으로 디지털 방식을 통해 제어하는 병렬형 접촉식 플라즈모닉 나노 리소그래피에 관한 연구를 진행 중이다. 이는 고속 패터닝 (high-throughput patterning)을 달성하기 위한 근접장의 두 가지 접근 방안을 결합한 것으로써 나노 스케일 디지털 리소그래피의 새로운 패러다임을 제시하고 있다.

병렬 플라즈모닉 나노리소그래피 기술은 나노 스케일 디지털 리소그래피의 새로운 대안으로써 고 분해능과 병렬 방식을 통한 높은 생산성을 갖춘 기술로 발전하고 있다. 산업 응용과 새로운 나노 스케일의 고집적 나노 소자 개발을 위하여, 생산성과 분해능을 높이기 위한 다양한

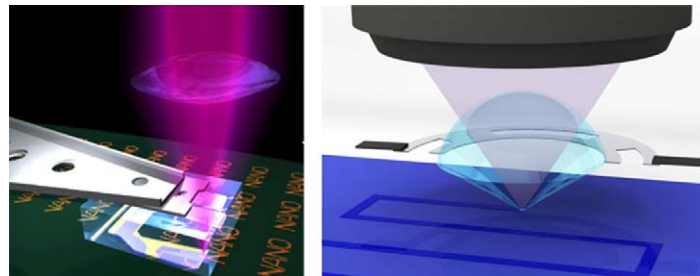


그림 6. 플라잉 플라즈모닉 렌즈 [13] (좌)와 접촉식 플라즈모닉 플라즈모닉 프로브 [14](우)

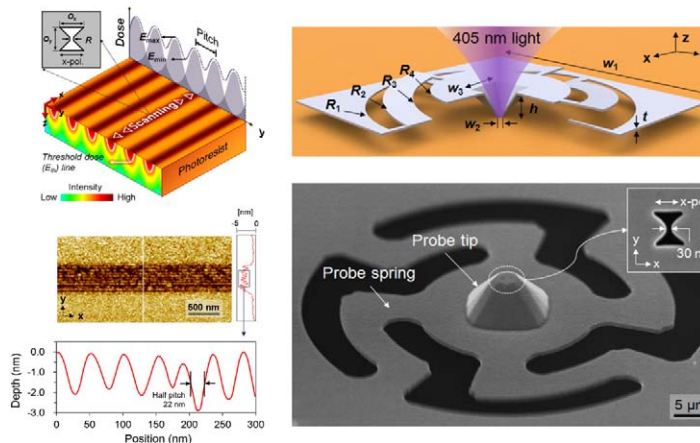


그림 7. 접촉식 플라즈모닉 나노리소그래피를 통한 22 nm의 병렬 라인 패턴 형성 결과(좌)와 MEMS공정을 통해 제작된 접촉식 광 프로브의 결과(우) [15]

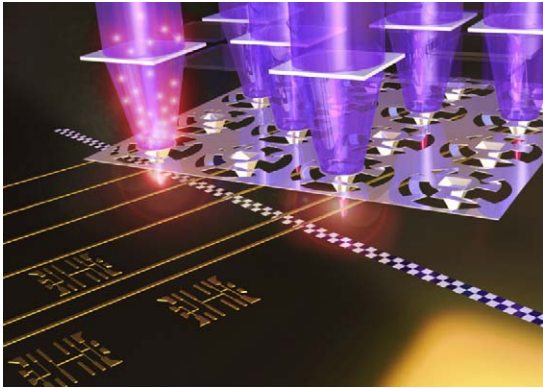
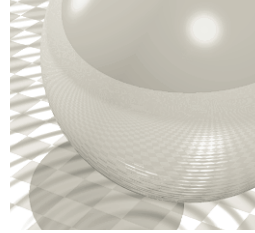


그림 8. 병렬 플라즈모닉 나노리소그래피의 개요도 (그림출처: 미발표자료)

연구가 활발하게 진행되고 있는 상황에서 이 기술은 나노 생산기술로 다양한 나노 소자의 생산 기술로 활용될 가능성이 높으며, 이러한 활용에 따라 마이크로/나노 산업의 핵심 동력이 될 것으로 기대한다.

4. 향후 전망

본 글에서 언급한 마이크로/나노 디지털 리소그래피 기술은 향후 디지털 생산기술의 발전을 주도하게 될 것으로 예상된다. 근래 우리나라가 마이크로 나노 스케일 제품의 세계시장에서 선도그룹으로 부각되고 있다. 이러한 상황에서 우리가 디지털 리소그래피 기술의 새로운 추세를 주도적으로 발전시키고 새로운 패러다임을 만들기 위하여 활발한 연구개발을 이어간다면, 국내 첨단산업을 경쟁력을 획기적으로 향상시키고 세계최고 수준의 산업경쟁력을 오랫동안 지켜갈 수 있을 것이다. 아울러, 국내 연구자들이 마이크로/나노 스케일 분야의 세계 최고 수준의 연구를 주도 할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] 디지털 노광장비 핵심기술 개발 연구기획 보고서
- [2] <http://www.index-tech.co.jp/modules/tinyd1/index.php?id=1&block=1>
- [3] <http://www.screen.co.jp/eng/pcb/products/mercurex/index.html>
- [4] http://fujifilm.jp/business/material/circuit/exposure/inprex_en/index.html
- [5] http://www.hitachi-via.co.jp/seihin/densi_2_e.html#03

- [6] Jun-Gyu Hur, Appl. Opt. 50, 16 (2011).
- [7] Kentaro Totsu, Kenta Fujishiro, Shunji Tanaka, Masayoshi Esashi, Sens. Actuat. A, 130-131 (2006).
- [8] C. Sun, N. Fang, D.M. Wu, X. Zhang, Sens. Actuat. A, 121 (2005).
- [9] Kolin C. Hribar, Pranav Soman, John Warner, Peter Chung, and Shaochen Chen, Lab on a Chip, 14, 268 (2014).
- [10] M.J. Wieland, G. de Boer, G.F. ten Berge, R. Jager, T. van de Peut, J.J.M. Peijster, E. Slot, S.W.H.K. Steenbrink, T.F. Teepen, A.H.V. van Veen, and B.J. Kampherbeek, Proc. of SPIE Vol. 7271 727100-1 (2009).
- [11] Ehtsham ul Haq, Zhuming Liu, Yuan Zhang, Shahrul A. Alang Ahmad, Lu-Shin Wong, Steven P. Armes, Jamie K. Hobbs, Graham J. Leggett, Jason Micklefield, Clive J. Roberts, and John M. R. Weaver, Nano Lett., 10 (11), 4375 (2010).
- [12] Xing Liao, Keith A. Brown, Abrin L. Schmucker, Guoliang Liu, Shu He, Wooyoung Shim, and Chad A. Mirkin, Nature Communications, 4, (2013).
- [13] Weraiyut Srituravanich, Liang Pan1, Yuan Wang, Cheng Sun, David B. Bogy and Xiang Zhang, Nature Nanotechnology 3, 733 (2008).
- [14] Yongwoo Kim, Seok Kim, Howon Jung, Eungman Lee, and Jae W. Hahn, Optics Express, 17 (22), 19476 (2009).
- [15] Seok Kim, Howon Jung, Yongwoo Kim, Jinhee Jang and Jae W. Hahn, Adv. Mater., 24, OP337 (2012).

약력

강동원



- 2007년 3월 - 2014년 8월 연세대학교 기계공학과, 박사 (예정)
- 2001년 3월 - 2007년 2월 연세대학교 기계공학과, 학사

김석



- 2007년 9월 - 2014년 8월 연세대학교 기계공학과, 박사 (예정)
- 2001년 3월 - 2007년 8월 연세대학교 기계공학과, 학사

한재원



- 2002-현재 연세대학교 기계공학과 부교수/교수
- 2008 - 2013 전략기술개발 사업 총괄책임자 - 디지털 노광장비 핵심기술 개발
- 1986 - 2002 한국표준과학연구원 책임연구원/그룹장
- 1987 - 1988, 1996 - 1997 미국국립표준연구소 객원연구원
- 1986 KAIST 박사 (물리학)
- 1981 연세대학교 학사 (물리학)