



# THEME 01

# 플라즈모닉 레이저 광 나노리소그래피 기술

한 재 원 | 연세대학교 기계공학부, 교수 | e-mail : Jaewhahn@yonsei.ac.kr

정 호 원 | 연세대학교 기계공학부, 박사과정 | e-mail : jhwhahaha@yonsei.ac.kr

플라즈모닉 레이저 광 나노리소그래피 기술은 플라즈몬 현상을 이용하여 레이저 광이 집속된 수십 나노 크기의 작은 빛을 이용하는 차세대 나노리소그래피 기술을 의미하며, 이 글에서는 현재 개발되고 있는 레이저 응용 플라즈모닉 리소그래피 기술을 정리하고, 앞으로의 발전 방향을 소개하고자 한다.

현대는 고도로 정보화된 사회로서 우리의 일상생활은 인터넷, 컴퓨터, 이메일 등 전자 장비와 기술로 이루어지고 있으며, 장비의 성능과 편의성은 날로 향상되고 있다. 장치의 크기는 작아지고 있으나 저장 용량과 속도는 더욱 향상되고 있으며, 이는 반도체 산업을 통한 회로의 집적화 능력 향상에 기인한다. 수백만 개의 트랜지스터로 이루어지는 반도체 칩 생산 기술은 첨단 기술이 집약된 기술로서 우리나라가 세계를 리

드하고 있는 분야이기도 하다.

레이저 광 리소그래피 기술은 MEMS, 바이오 칩, 광 센서 등 마이크로/나노 스케일의 소자를 고속으로 제조하는 초미세 가공의 핵심 생산기술이며, 투사 광학계(projection optics)를 이용하여 나노 스케일의 마스크 패턴을 포토레지스트에 고속 복사함으로써 높은 생산성, 낮은 생산원가를 실현한다. 또한, 리소그래피 기술의 분해능이 반도체 소자의 집적도를 결정하며

## Lithography technology

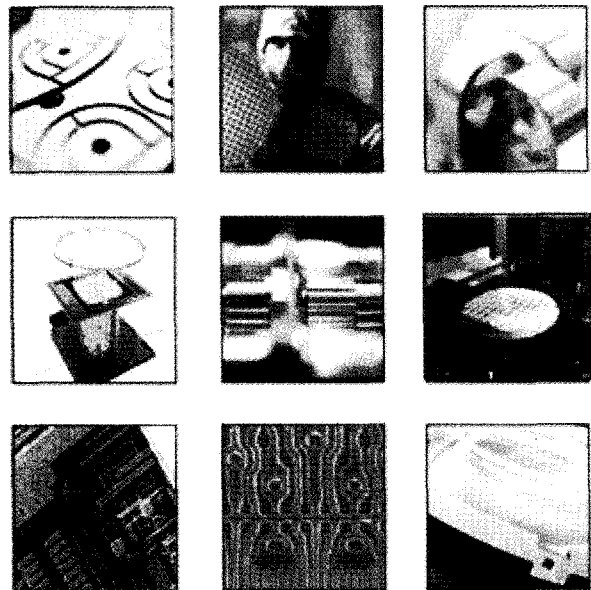
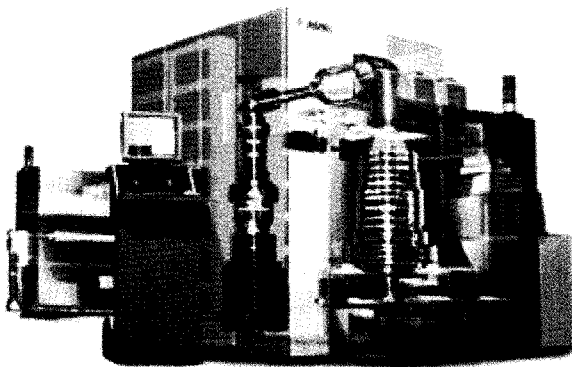


그림 1 레이저 광 리소그래피 기술

현재 광 리소그래피 기술 분해능은 40~50nm(half pitch)를 실현하고 있다.

반도체 생산 공정은 수백 가지의 공정을 거치며, 이중 레이저 광을 이용하는 광 리소그래피 기술은 전체 생산 공정에서 약 60%의 시간이 소요되는 매우 중요한 공정으로서 우리나라 산업계에서 반도체 업체가 차지하는 비중을 고려할 때 그 중요성은 매우 크다 할 수 있다.

### 레이저 광 리소그래피

레이저 광 리소그래피(laser optical lithography)란 반도체 소자를 만드는 공정의 하나로 자외선 레이저 광을 포토마스크에 조사시키고, 포토마스크의 패턴을 고 정밀 투사 렌즈를 이용하여 빛에 반응하는 물질인 포토레지스트에 결상시켜서 고속으로 패턴을 만드는 것을 말한다. 반도체 산업에서 주로 사용하는 광 리소그래피 형태는 광학 투사 리소그래피(optical projection lithography)로서 마스크에 패턴을 목표 사이즈의 4배 크기로 형성한 후에, 정밀하게 구성된 투사 광학부(projection optic)를 거친 레이저 빛을 이용하여 포토레지스트가 도포된 실리콘 웨이퍼 위에 축소시켜 투사시킨다. 반도체 산업에서의 중요 이슈는 이

러한 기술을 이용하여 얼마나 작고 빠르게 칩을 생산하는가이다. 현재 반도체 생산 공정에서는 193nm 파장의 광원(레이저)을 이용하여, 시간당 100장 이상의 실리콘 웨이퍼에 50nm 이하 사이즈를 가진 패턴을 형성해내고 있다.(그림 1 참고)

마스크리스 리소그래피(maskless lithography) 기술은 마스크를 사용하지 않고 렌즈를 통해 집속된 작은 빛을 이용하여 원하는 형태의 임의의 패턴을 포토레지스트가 도포된 실리콘 웨이퍼 위에 직접 제작하는 방법이다. 제작 시 고비용이 필요한 마스크를 사용하지 않는 경제적인 방법이며, 제작 가능한 패턴의 자유도가 높아 다품종 소량 생산 구조에 맞는 기술이지만 약 500nm의 분해능 한계를 나타내고 있다. 이를 빛의 회절한계라 하며 광원의 파장, 렌즈의 개구수(numerical aperture)에 의해 빛의 분해능이 결정됨을 의미한다.

회절한계에 의한 패턴 분해능의 한계를 극복하기 위해 연구되는 분야로 EUV(Extreme Ultraviolet) 리소그래피, 나노 임프린트, 플라즈모닉 레이저 광 나노리소그래피 등이 있으며, 이 글에서는 플라즈모닉 레이저 광 나노리소그래피 기술의 소개와 연구 현황 및 향후 개발 방향에 대해서 서술하고자 한다.

### 플라즈몬의 개념

플라즈몬은 금속 내부에 있는 자유 전자가 입사하는 레이저와의 상호작용에 의해 발생하는 전자들의 집단 진동현상을 의미한다. 도체인 금속의 내부에는 수많은 자유전자들이 존재하며 특히 나노미터 크기 이하의 금속표면에 레이저 광을 조사시키면, 이러한 자유전자의 거동에 의해 표면 플라즈몬 공명(surface plasmon resonance)현상을 발생시킬 수 있다. 표면 플라즈몬 현상은 금속과 물, 공기 등의 유전체 사이 경계에 빛이 입사될 때 빛이 가진 고유 파동의 전자 에너지

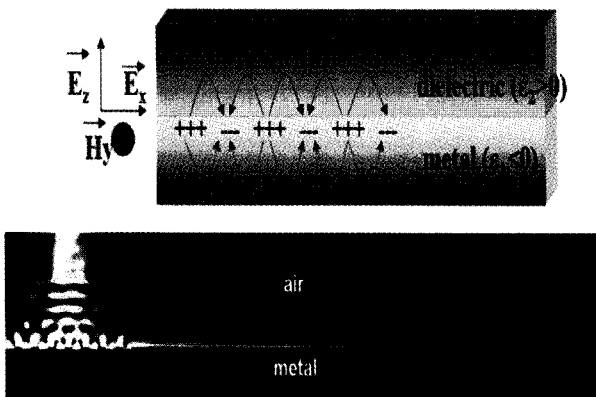


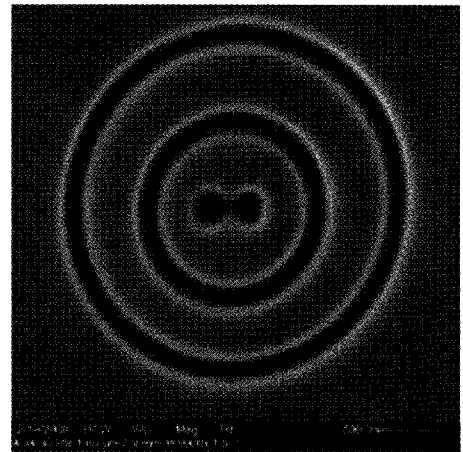
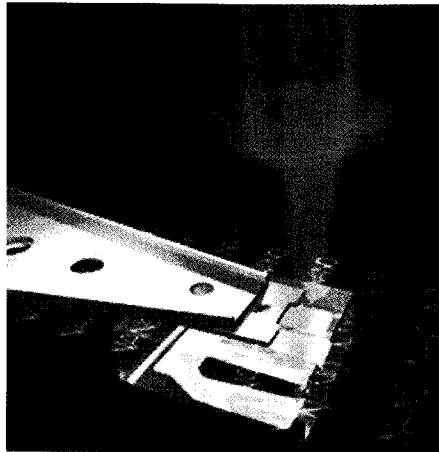
그림 2 레이저 광에 의해 여기되는 플라즈몬 현상

지와의 공명에 의해 금속 표면의 자유전자가 집단으로 진동하는 현상이며, 경계면을 따라 진행되는 표면 전자기파이다.(그림 2 참고)

플라즈몬은 고유의 광학적 특성으로 LED(Light Emitting Diode), 정보 저장기기, 광학 센서, 리소그래피 등의 다양한 분야에서 연구되고 있으며, 플라즈모닉 레이저 광 나노리소그래피 분야에서는 빛의 크기를 더 작게, 더 효율적으로 집속하는 기술로서 활용된다.

### 플라즈모닉 레이저 광 나노리소그래피

플라즈모닉 레이저 광 나노리소그래피는 이미징 광학계의 회절 한계를 극복한 공간 분해능을 구현하기 위해 탐침을 사용하는 마스크리스 리소그래피 기술의 하나이며, 이 방식은 금속에 작은 구멍을 뚫어 빛을 투과시키는 것에서부터 시작하였다. 집속 이온 빔(focused ion beam)과 같은 장비를 이용하여 수십 나노미터 크기의 개구를 가공하고 빛을 투과시키면 개구 크기 정도의 작은 빛이 금속 표면에서 수십 나노미터 거리 내에서 발생하게 된다. 이를 이용하여 회절 한계보다 작은 수십 나노 크기의 빛을 형성할 수 있고, 이때 나노 개구의 낮은 투과율을 높이기 위해 표면 플라즈몬 현상을 이용한다. 낮은 투과율을 나타내는 원형, 사각형의 단순한 개구의 형태를 발전시켜 나비 모양, C형 개구를 제작하면 수백 배 향상된 투과율을 보이는 수십 나노미터 크기의 작은 빛을 금속 표면에 집속시킬 수 있으며, 이를 이용하여 나노리소그래피를

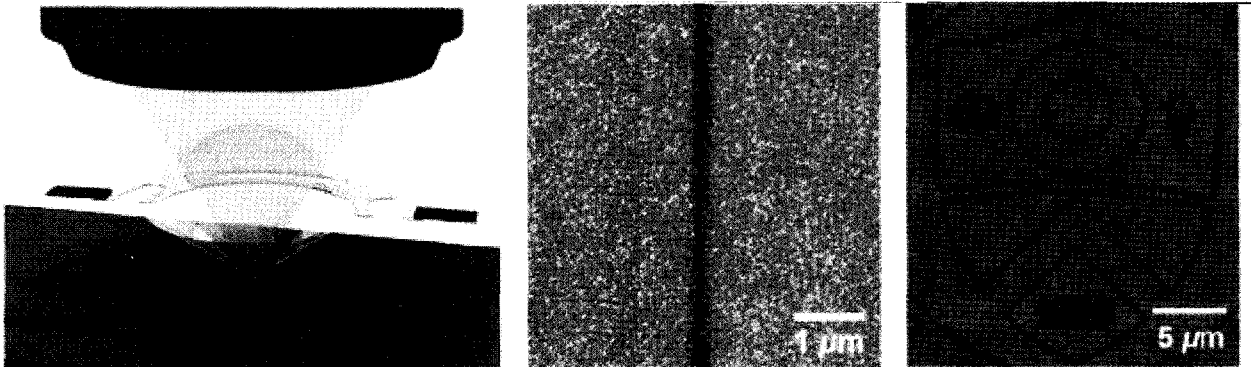


Flying Plasmonic Lens를 이용한 하드 디스크 드라이브 개발 연구

수행하는 것이 플라즈모닉 나노리소그래피이다. 금속 표면으로부터 수십 나노미터 거리 안에 형성되는 빛을 근접장이라고 하며 이를 이용하기 위해서는 개구가 가공된 탐침과 포토레지스트 간의 거리를 수십 나노미터 이하로 유지하는 기술이 필요하다. 이를 위해 복잡한 피드백 장치가 필요하며, 기록 속도도 수  $\mu\text{m/s}$ 에 머물러 한계로 지적되었다.

근접장 광을 이용한 플라즈모닉 나노리소그래피 기술의 낮은 기록 속도를 향상시키기 위해, 2008년 미국 U. C. Berkeley의 Xiang Zhang 그룹은 공기 역학적 구조를 이용하여 하드 디스크 표면 약 20nm 위에서 일정 거리의 부양 상태를 유지하는 플라잉 플라즈모닉 렌즈를 구현하였고, 초당 4~12m/s의 고속에서 약 80nm 급의 패턴을 형성하는 데 성공했다(Werayut Srituravanich 등, Nature Nanotechnology 2008, (3) 733-737 논문에서 인용). 하드 디스크 드라이브의 고속 회전에 의해 생기는 공기 역학적 현상을 이용하는 에어 베어링 구조를 제작하고, 그 위에 나노개구를 가공하여 수십 나노미터의 간극 유지와 고 분해능의 패턴을 형성할 수 있었다.(그림 3 참고)

접촉식 플라즈모닉 나노리소그래피는 본 연구실에서 수행되는 연구로 기존의 노광장비를 대체하는 기



접촉식 플라즈모닉 나노리소그래피 기술 개요와 패턴 결과

술로서 주목 받고 있다. 접촉식플라즈모닉나노리소그래피는 자기조립 단분자막(SAM: Self-Assembled Monolayer)을 윤활제로 이용해 기관과 탐침을 접촉시킴으로써 근접장을 이용한 기록 속도를 기존 대비 수백 배 향상시킨 기술이다. 복잡한 피드백 장치를 윤활막이 대체함으로써 기록 속도를 향상시키고 안정적인 균일한 패턴을 형성할 수 있게 된다. 이 기술을 통해 패턴 크기를 50nm 이하로 줄이면서도 패터닝 속도를 최고 10mm/s까지 향상시킬 수 있었으며 (Yongwoo Kim 등, OPTICS EXPRESS 2009, (17) 19476-19485, Nature Photonics의 Technology Focus 2010, 4 (1), Research Highlights), 이를 하나의 기관에 여러 개의 탐침으로 동시에 기록할 수 있는 병렬 프로브 기술과 합침으로써 속도를 더 향상시킬 수 있다. 이 연구는 반도체 소자 생산의 핵심기술인 차세대 반도체 노광 장비의 원천기술로 적용될 수 있어 첨단 반도체 생산 장비산업의 국내 자립도를 향상시킬 수 있으며, 한 대에 수백억 원씩 하는 노광 장비의 비용을 수억 원 정도로 크게 낮출 수 있게 된다. 또한 간단한 구조의 단일 광 프로브 장치를 개발함으로써 바이오 칩, 나노 소자, 나노 구조 물질 등을 연구 개발하는 국내외 수많은 나노 기술 응용 연구실에서도 본 기술의 활용이 가능하다.(그림 4 참고)

### 병렬형 개구를 이용한 플라즈모닉 레이저 광 나노리소그래피

플라즈모닉 나노리소그래피 기술은 하나의 기관에 여러 개의 탐침으로 동시에 기록하는 병렬 프로브 기술을 사용하여 더욱 향상된 생산 능력을 확보할 수 있다. 수십 나노미터 크기의 빛을 형성하는 나노 개구를 병렬형으로 수백 ~ 수만 개를 제작하여 이용하는 것으로서 제작하는 프로브의 수에 따라 생산능력이 확장될 수 있다.

빔 펜 리소그래피 (beam pen lithography)는 Northwestern 대학의 Chad, A. Mirkin 그룹에서 연구하는 기술로서 PDMS(polydimethylsiloxane)라는 유연한 물질을 이용하여 1cm<sup>2</sup>당 15,000개의 피라미드 형태의 프로브를 제작한다. 각 프로브에 나노 개구를 가공함으로써 수만 개의 빛을 동시에 이용하여 패턴을 제작한다. 패턴 크기를 약 70nm까지 확보하였으나, 프로브의 특성으로 인해 라인 패터닝이 어렵다는 것이 단점이다.(FengweiHuo 외, Nature Nanotechnology 2010, 6 637-640 논문에서 인용, 그림 5 참고)

SNOMIPEDE는 Sheffield 대학의 Graham J. Leggett 그룹 등에서 연구하는 결과로, 근접장 현미경(scanning near-field optical microscopy)프로브를 병렬형으로 제작하여 패턴을 수행하였다. 초기 수행 결과로

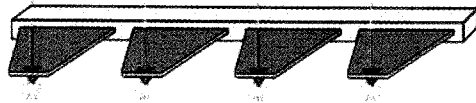
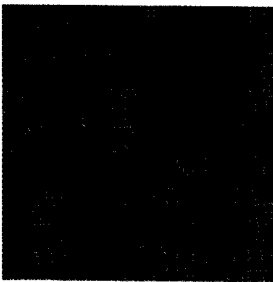


그림 5 빔 펜 리소그래피(위)와 SNOMIPED(아래)

12개의 프로브를 이용하여 분해능 70nm를 보였으나 속도가 200nm/s 으로 느린 것이 단점이다.(Ehtsha mulHaq 외, NANO LETTERS 2010, 10. 4375-4380. 논문에서 인용, 그림 5 참고)

병렬형 접촉식 프로브를 이용한 플라즈모닉 레이저 광 나노리소그래피 기술은 국내에서도 연구가 진행 중이며, 10 x 10 병렬 구조로 프로브가 설계되었다. 단일 광 프로브를 통해 분해능은 50nm 이하가 가능함을 확인하였으며, 접촉식프로브를 이용하여 10mm/s의 속도로 라인 패터닝을 수행하며 개별 프로브로 입사되는 레이저 신호를 컨트롤함으로써 임의의 패턴을 제작할 수 있다.(그림 6 참고)

### 맺음말

플라즈모닉 레이저 광 나노리소그래피 기술은 마스크리스 리소그래피 기술로서 고 분해능과 병렬형 방식을 통한 높은 생산성을 갖춘 기술로 발전하고 있다. 산업응용과 새로운 나노 스케일의 고집적 나노 소자 개발을 위하여, 생산성과 분해능을 높이기 위한 다양한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이러한 기술은 차세대 레이저 나노 생산기술로 다양한 나노 소자의 생산 기술로 활용될 가능성이 높으며, 활용에 따른 국내외 산업분야에 파급 효과도 매우 클 것으로 예상된다.

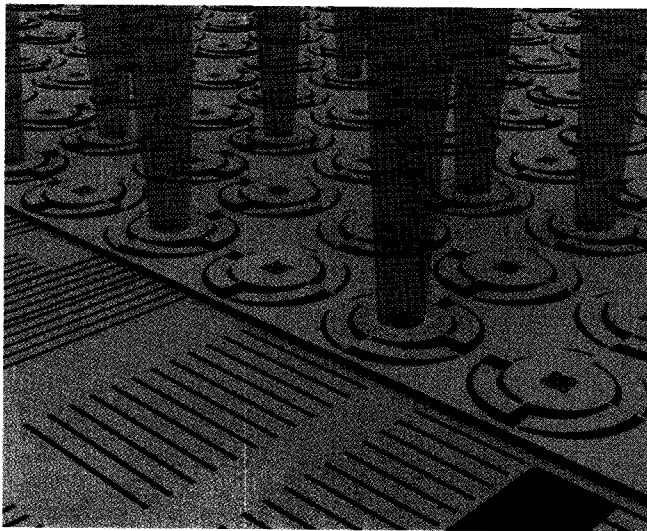


그림 6 병렬형 접촉식 플라즈모닉 나노리소그래피 개요