



# 극자외선(EUV) 리소그래피를 위한 광원 및 스테이지 기술

■ 진윤식, 박도영, 전정우, \*정영민 / 한국전기연구원, \*포항가속기연구소

## 서론

반도체 리소그래피용 광원은 집적도 246K~1M의 DRAM에서는 수은 램프의 G-선(436nm), 4M~16M까지는 수은램프의 G-선과 I-선(365nm)이 사용되었으며, 64M에서는 수은의 Deep Ultraviolet 영역의 248nm와 KrF 엑시머 레이저(248nm)로 발전되어 왔으며, 256M DRAM에는 KrF 엑시머 레이저와 더불어 ArF 엑시머 레이저(193nm), F2 엑시머 레이저(157nm)의 사용이 검토되어지고 있는 단계이다. 이와 같이 리소그래피 기술은 반도체 집적회로에서 요구되는 미세화, 고집적화에 부응하기 위해 광원의 파장을 지속적으로 줄여왔다. 리소그래피의 로광파장을 단파장화하고, 다양한 신기술의 도입에 의해 자외선에서의 0.13um 정도의 패턴을 가진 디바이스의 제작 가능성이 확실해지고 있다. 그러나 그 다음의 0.1um 이하의 서브미크론 리소그래피용 광원으로서 전자빔, 이온빔, X-선, 극자외선(Extreme Ultra-Violet; EUV) 등이 검토되어 지고 있으나, 현재의 자외선광을 대체할 수 있는 극단자외선 광원에 의한 리소그래피(EUVL) 기술이 가장 현실성 있는 방법으로서 주목을 받고 있다.

극단자외선 리소그래피는 원리적으로는 현재의 축소로광기술과 동일하며, 굴절렌즈 대신으로 EUV 영역에서 높은 반사율을 가진 다층막 미러를 이용한 반사축소 광학계를 사용하는 것을 특징으로 한다. 이와 같은 EUV 광의 발생방법으로는 펄스레이저 플라즈마, 방전 플라즈마, 가속기(싱크로트론), 전자빔 및 이온빔 등에

의한 방법이 대표적이다.

또한 EUVL을 위해서는 진공속에서 동작해야 하는 정밀도가 매우 높은 wafer 및 reticle 스테이지가 사용되는데, 이들의 위치 제어 오차는  $\pm 3\text{nm}$  이내이고 jitter는 10nm rms를 초과하지 않아야 한다. 이를 위해 고도의 제어기술이 적용된 자기부상(磁氣浮上) 방식을 채용한 스테이지가 해외에서는 개발되어 있으며, 일부에서는 공기부상 방식을 채용한 스테이지가 개발되고 있다. 본 고에서는 극자외선 리소그래피의 출발점이 되는 레이저 플라즈마와 방사광 가속기에 의한 EUV 발생 방법에 대한 소개와 최근의 세계적인 기술 동향 및 자기부상 방식에 의한 wafer 및 reticle stage에 대해서 기술하고자 한다.

## 레이저 플라즈마에 의한 EUV 광의 발생기술

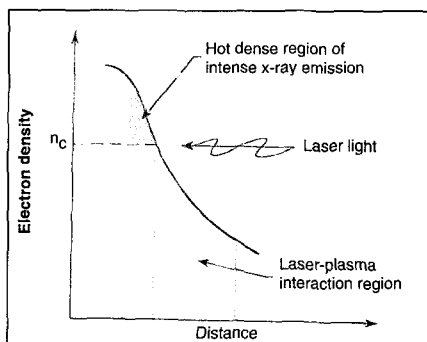
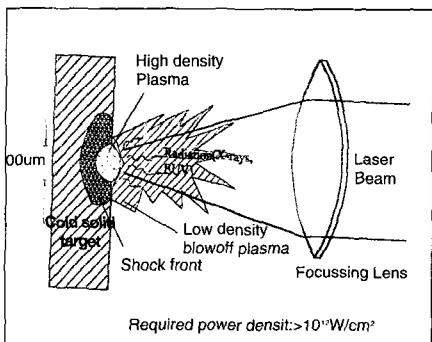
### 레이저생성 플라즈마와 EUV의 발생[1][2] [3][4]

대출력 레이저 펄스를 렌즈나 미러를 통해 집광하여 물체의 표면에 조사하면 고온 고밀도 플라즈마가 생성된다.(그림1, 그림 2) 이 플라즈마로부터 다양한 파장을 가진 광이 복사(輻射)되어 나오며, 이 가운데 극자외선이라고 할 수 있는 5 - 40nm의 빛이 포함되어 있다. 레이저 플라즈마를 이용하여 EUV 광을 발생시키기 위해서는 초점면에서의 레이저 광의 세기가  $10^{12}\text{W}/\text{cm}^2$  이상이 되어야 한다. 이러한 레이저 광의 세기는 에너지 1J, 펄스 폭 10ns의 레이저빔을 직경 100um이하의 원에



집광할 때 얻어진다. 레이저 플라즈마 유기 EUV 광원의 특성은 레이저를 집광하는 직경과 거의 같은 영역(수십  $\mu\text{m}$ )에서 레이저 펄스폭과 거의 동일한 시간(수 ns)에 걸쳐 방사되는 점펄스 광원이라는 점이다.

1.06 $\mu\text{m}$ 의 Nd:YAG 레이저에 대하여 임계밀도  $n_c \approx 1 \times 10^{21} \text{ e/cm}^3$ 이며, 제2고조파인 0.53  $\mu\text{m}$  파장에 대해서는  $4 \times 10^{21} \text{ e/cm}^3$ 으로 증가한다. 파장  $\lambda$ 를 가진 레이저가 플라즈마 내를 진행할 때 임계밀도보다



레이저 광에 의해 플라즈마 발생의 개념도

레이저 플라즈마의 상호작용

낮은 영역(under-dense)에서는 흡수와 산란을 통하여 전파되지만 임계밀도 이상인 영역(over-dense)에서는 더 이상 전파되지 못하고 반사되어 소멸된다. 따라서 레이저 파장이 짧은 쪽이 고밀도 플라즈마 중에 보다 쉽게 직접 침투가 가능하며, 그 부분을 고온으로 만든다.

효과적인 EUV 발생을 위해서는 고온(10-1000 eV), 고밀도( $10^{19} - 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ )의 플라즈마의 생성이 필요하며, 이를 달성하기 위한 펄스레이저의 요구조건으로는 고려해야할 요소로서 레이저의 펄스당 에너지, 펄스폭, 초점에서의 스폿크기, 파장을 들 수 있다. 레이저의 초점을 타겟에 일치시켜 레이저 플라즈마를 형성하면 플라즈마 내의 전자는 그림 2에 개략적으로 보인 바와 같은 분포를 보이게 된다. 플라즈마 내의 전자들은 레이저와의 상호작용에 의해서 에너지를 주고받게 된다. 먼저 레이저 광 에너지는 주로 역제동복사(Inverse Bremsstrahlung)라고 불리는 과정을 통하여 플라즈마 중의 전자의 운동에너지로 전달된다. 이 과정은 전자가 레이저의 전기장에 의해서 진동하면서 파동으로부터 에너지를 얻고, 이 전자들이 이온과 충돌하여 이온을 가열하는 것으로서 레이저 플라즈마의 형성과 가열에 매우 중요한 역할을 한다. 레이저 광 에너지는 플라즈마 진동수  $\omega_p$ 와 레이저의 진동수  $\omega$ 가 거의 일치하는 부근에서 가장 효율적으로 이루어진다.  $\omega = \omega_p$  조건을 만족할 때의 플라즈마밀도를 임계밀도  $n_c$ 로 정의되며 다음식에서 알 수 있는 바와 같이 파장의 제곱에 반비례한다.

$$n_c \equiv \frac{E_0 m \omega^2}{e^2} = \frac{1.11 \times 10^{21} \text{ e/cm}^3}{\lambda^2}$$

레이저 광에 의해 에너지를 얻은 전자는 이온과의 충돌을 반복하여 전리도가 높고, 높은 에너지 상태로 여기된 이온을 주성분으로하는 플라즈마를 생성한다. 이 플라즈마는 X-선과 그 외의 복사방출, 열전도에 의한 열확산, 팽창에 따른 운동에너지로의 변환을 통해서 에너지를 잃는다. 원자번호가 큰 이온에서는 궤도각운동량이 큰 수많은 상태가 X-선의 발생에 기여하며, 전리도가 조금 밖에 차이하지 않는 이온들의 전자에너지 상태가 근접해서 존재하므로 다수의 선 스펙트럼이 겹쳐서 확장된(broadened) 스펙트럼으로 된다. 역으로 원자번호가 작은 이온에서는 비교적 소수의 고강도 선 스펙트럼으로 된다. 이 특성으로부터 목적에 맞는 X-선 또는 EUV 광을 발생시킬 수 있다. 일반적으로 플라즈마로부터의 X-선(또는 EUV)의 복사는 (a)bound-bound transition(선복사), (b) free-bound transition(재결합복사), (c)free-free (제동복사)의 3종류가 있다. 이 가운데 레이저 플라즈마에서의 EUV 방사에 주로 기여하고 있는 것은 (a)의 선복사와 또는 이들의 집합체이다. 레이저 플라즈마 생성의 타겟 재료로서는 고체, 액체, 기체 모두 사용이 가능하지만, 리소그라피용의 광원으로 사용하기 위해서는 EUV 영역에서의 고효율과 debris 문제를 해결하여야 한다. 고체 타겟을 사용할 경우 사용할 수 있는 재료가 다양하고, 고밀도의 플



라즈마가 용이하게 얻어지며, 경제적인 반면, 재료의 ablation으로 발생한 debris가 주위의 광학계를 오염시킴으로서 장시간 운전에 치명적 영향을 미치게 된다. 따라서 최근 연구에서는 gas puff를 이용한 기체 타케트를 사용함으로써 debris 문제를 근본적으로 해결하고, 레이저와 플라즈마의 상호작용을 제어할 수 있게 되었다. 가스타케트는 압축된 기체(주로 Xe가스)를 냉각하여 1mm 이하의 작은 노즐을 통하여 순간적으로 분사시키는 구조로 되어있으며, 레이저 광과의 상호작용을 효과적으로 유도하기 위하여 레이저와 적절한 동기화(synchronization)와 여러 가지의 노즐형상이 시도되고 있으며, 그림 3에 그 일례를 보인다.

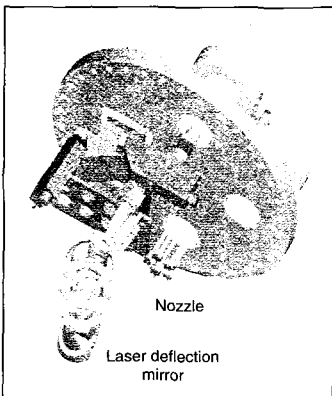


그림 3 레이저 플라즈마 발생용 가스타케트

### 레이저 플라즈마를 이용한 EUVL의 연구동향

레이저 생성 플라즈마(Laser Produced Plasma ;LPP)원은 현재 EUV 리소그래피를 위한 기술적 완성도가 가장 높은 분야이다. 사용되는 레이저로서는 mode-locked KrF 엑시머

레이저를 이용한 예도 있으나, 최근에 개발된 시스템들은 Nd:YAG 레이저의 제2고조파(532nm)가 주로 이용되고 있다. 레이저 플라즈마 EUVL 분야에서 세계적 선두를 지키고 있는 미국의 Sandia National Lab.과 Lawrence Livermore National Lab.에서 개발중인 Engineering Test Stand (ETS) 시스템을 그림 4에 보인다[3]. 이 시스템은  $\alpha$ -class 수준이며, full-field EUV imaging을 실증하고 production-tool 개발을 위한 데이터를 반도체 장비업체에 제공하기 위한 것이다. 플라즈마 발생용 레이저는 6개의 Nd:YAG 레이저를 사용하고 있으며, 레이저는 펄스당 에너지 280mJ, 평균출력 1700W, 주파수 6000Hz로 운전한다. 이 때의 타케트에의 빔크기는 180um  $\times$  85um이고, 레이저 빔 강도는 3-10  $\times$  10<sup>11</sup> w/cm<sup>2</sup>이다. 타케트로서는 debris의

문제를 근본적으로 해결하기 위해서 Xe 가스 제트(10-20bar)를 이용하고 있으며, 고압고속으로 진공 용기속에 분사한 Xe에의 에너지 흡수율은 95%이상이다. 또한 터보분자펌프로 타케트 챔버를 배기함으로써 1mTorr의 압력을 유지하여 13.4nm의 EUV광에 대해서 85%의 투과도를 실현하고 있다. 레이저 에너지에 대한 EUV의 변환 효율은 13.4 nm 에서는 1%/steradian, 11.3 nm에서는 4%/steradian 이다. 반사광학계는 Mo/Si의 다층막 코팅된 미러를 사용하여 13.4nm의 EUV광에 대해서 65%이상의 반사율을 얻고 있다. 투영광학계 시스템은 4개의 미러로 구성되어 있으며 ring-field를 구성한다. 4x의 축소 시스템은 NA 0.1을 실현하여 100nm feature를 프린팅하기 위한 조건을 만족한다. 웨이퍼와 레티클을 위한 자기부상 스테이지는 평균 위치정밀도 에러 15 nm를 실현하였다. 그림 5는 제작완료된 ETS의 외관을 보여주며, 그림 6은 내부의 광학계와 스테이지 등의 모습을 보인다.

국내에서는 한국과학기술원과 포항공대에서 레이저

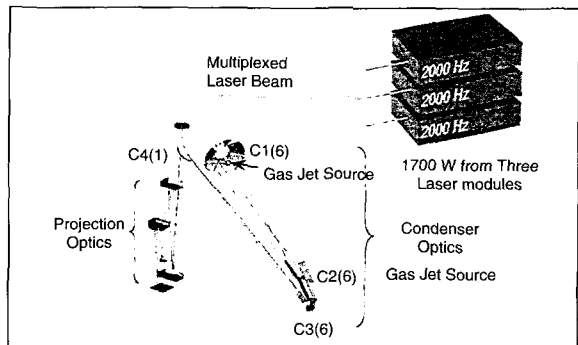


그림 4 고효율 EUV 레이저 플라즈마원과 조사계



그림 5 제작된 ETS 시스템 외관

플라즈마를 이용한 X-선 발생 및 계측에 대한 기초연구를 수행하여 왔으며, 한국전기연구원에서 Nd:YAG 레이저를 이용한 EUV 발생연구를 수행중에 있다. 한국전기

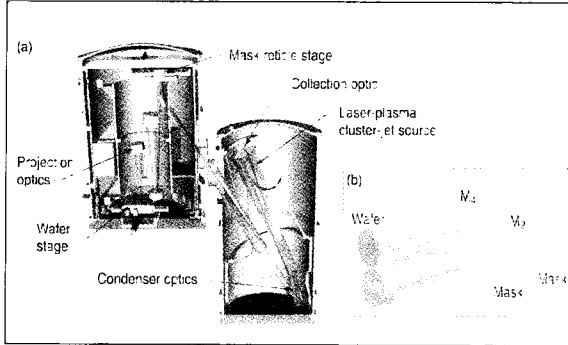


그림 6 ETS 시스템의 내부구조 조형도 (오른쪽이 조사케이트 부분의 조형도와 스타이지 부분이다)

연구원에서 채택한 레이저는 펄스폭 10ns 내외, 반복주파수 10Hz, 1.06 μm에서 2J, 0.53μm에서 1J의 에너지를 갖는 Q-switched Nd:YAG 레이저이다(그림 7). 이 레이저 빔을 초점 스폿크기 100μm로 집광하면  $1.3\sim 2.6 \times 10^{12} \text{ w/cm}^2$  의 조사강도와 임계밀도  $10^{21}$ 을 달성할 수 있어 앞서 기술한 요구조건들을 만족한다. 또한 EUV 발생 진공챔버는 그림 8에 보이는 바와 같이 터보분자펌프와 로터리 펌프를 부착한 직육면체형(600 x 600 x 1200 mm)의 진공챔버를 설계, 제작하였다. 진공 챔버 내에는 레이저 빔 집광용 렌즈류, gas jet 타겟트 그리고 EUV 계측장치가 설치될 예정이다. 가스타겟트 시스템은 그림 9에 보이는 바와 같은 General valve 사의 솔레노이드 펄스 밸브와 구동 장치를 이용할 계획이며, 타겟트 가스로서는 Xe을 고려하고 있다. 밸브 노즐의 직경은 0.2-0.5mm이며, Xe 가스를 10기압 정도로 압축하고, 노즐을 통하여 팽창시킴으

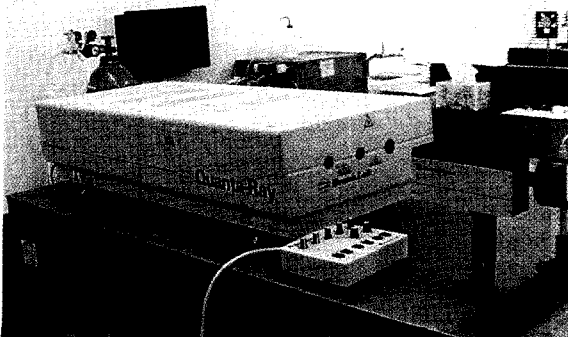


그림 7 Q-switched Nd:YAG 레이저(펄스폭 10ns, 반복율 10Hz, 펄스당에너지 1J(532nm), 2J(1064nm))

로서 gaseous cluster를 형성하여 레이저를 조사함으로써 에너지 흡수를 증가시키고자 한다. 또한 레이저와 펄스 밸브 드라이브는 digital delay generator (DG353 ; Stanford Res. Inc.) 이용하여 동기화 할 예정이다. 그림 10에는 상기의 레이저를 이용하여 대기중에 플라즈마를 생성한 사진을 보인다.

### 방사광을 이용한 EUV 핵심기술 개발

#### 방사광이란 무엇인가?

전자가 가속을 받아 회전하면 접선방향으로 빛을 방출하게 된다. 방사광가속기는 이러한 원리를 이용하여 빛을 발생시키고 이를 연구에 활용하는 넘국가적 공동 연구시설로 우리나라에는 포항가속기연구소[5]가 있다. 방사광가속기는 선형가속기, 저장링 및 빔라인으로 구성되는데 포항가속기연구소를 중심으로 설명하면 다음과 같다.

- 선형가속기: 전자총에서 나온 전자를 가속시키는 장치이다. 길이가 150m인 가속관 끝에 도달했을 때 전자는 20억 전자볼트(2.0 GeV)의 에너지와 광속의

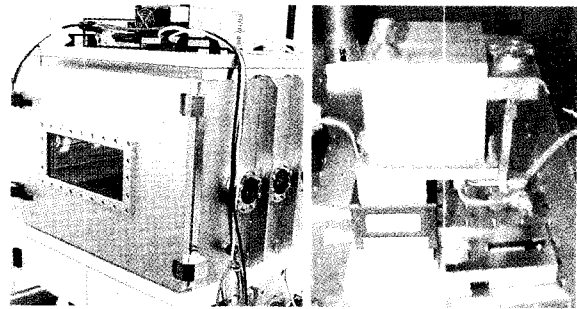


그림 8 EUV 발생용 진공챔버 그림 9 Gas Target Assembly

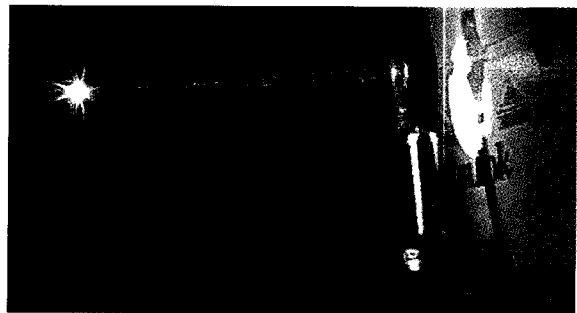


그림 10 대기중 레이저 플라즈마 생성실험



99.999997%에 달하는 속도를 갖게된다.

- 저장링 : 선형가속기에서 가속된 전자를 원형궤도에 저장하여 지속적으로 원형운동을 할 수 있도록 하는 시설이다. 포항가속기연구소의 경우 저장링 둘레에 36개의 힘자석이 놓여있어 힘자석을 통과할 때마다 전자의 방향이 10°씩 꺾이게 된다. 전자는 힘자석을 통과할 때마다 방사광을 방출하는데 여기에는 자외선으로부터 고에너지 X-선까지 모든 파장의 빛이 섞여있다. 만약 더 높은 출력의 방사광이 필요하다면 삽입장치를 설치하기도 한다. 삽입장치란 저장링의 직선구간에 자석을 주기적으로 배열하여 전자빔을 진동시키는 장치이며 이를 이용하면 광자 수를 최고 1000배까지도 증가시킬 수 있다. 한번 저장된 전자의 평균수명은 20시간이 넘는데 이는 전자가 저장링을 7백 20억 바퀴를 도는 것에 해당되며 거리로 환산하면 200억km에 달한다.

- 빔라인 : 저장링에서 인출한 방사광은 모든 파장의 빛을 포함하고 있어 백색광이라고 불리우며 특수한 경우를 제외하고는 바로 실험에 사용할 수 없다. 방사광을 유용하게 활용하려면 우리가 원하는 파장을 선택하여 사용할 수 있도록 하여야 하는데 이러한 역할을 하는 것이 빔라인이다. 빔라인에서 사용하는 방사광이 어디에서 발생했는가에 따라 힘자석 빔라인, 삽입장치 빔라인으로 구별되며 삽입장치 빔라인은 다시 위글러 빔라인과 언들레이터 빔라인으로 나누어진다. 특히 삽입장치에서 발생하는 방사광은 금속을 달굴 정도로 고출력을 가지고 있다. 방사광 이용자들은 파장의 선택 이외에도 고휘도(단위 면적당 광자의 수), 편광(선형, 원형, 타원) 등의 특성을 이용하여 각종 첨단 연구를 수행할 수 있다.

현재 포항가속기연구소에서 운영중인 빔라인은 14기이며 건설중인 빔라인은 7기에 이른다.

빔라인에서는 초고집적회로제작, 결정 및 비결정체의 미세구조분석, 신소재 개발, 물질의 표면/계면의 구조연구, 신약개발, 단백질/생체구조연구, 의학, 화학/촉매연구 등 매우 다양한 연구가 수행된다. 외국의 경우 방사광을 이용하여 화장품의 특성을 분석할 정도이니 방사광과 우리의 생활이 결코 멀지 않다는 것을 알 수 있다.

### 방사광을 이용한 EUV 리소그래피 핵심기술 연구 극자외선 광원

외국의 경우 레이저 플라즈마를 이용한 극자외선 광원을 개발하기 위하여 많은 연구가 진행되고 있으나 아직 노광에 필요한 출력의 5-10% 정도를 얻고 있는 실정이다. 또한 광원에 의한 광집속장치의 오염 문제도 해결하여야 할 중요한 문제로 남아있다. 광집속장치의 평균수명을 1년으로 연장하려면 보다 깨끗한 광원을 개발하여 광집속장치의 수명을 100배 이상 늘릴 수 있어야 한다.

방사광은 이러한 문제점들을 해결할 수 있는 청정 광원이다. 또한 필요한 부분의 방사광이 많이 발생하도록 설계할 수도 있다. 전자빔의 에너지가 높아지면 방사광의 분포가 고에너지 X-선 쪽으로 이동하게되므로 극자외선 노광과 같이 높지 않은 에너지를 요구하는 할 경우에는 전자빔의 에너지를 낮추어 설계하면 된다. 오염면에서 볼 때 방사광가속기는 초고진공( $1 \times 10^{-10}$ Torr, 1/10조 기압) 상태에서 운영되므로 광원에 의한 오염은 무시해도 된다. 방사광은 퍼짐성이 매우 낮으므로 광집속 장치의 개발이 용이하고 따라서 빛을 효과적으로 이용할 수 있다.

### 방사광을 이용한 EUVL 핵심기술 개발

차세대 노광기술이 거론될 당시만 해도 극자외선 노광은 실용화 가능성이 적은 기술로 인식될 정도로 최첨단 기술을 요구하는 것이었다. 재미있는 것은 이러한 요구조건을 만족시켰는지를 정확히 측정할 수 있는 장비조차 없었다는 점이다. 지난 수년간 극자외선 노광기술은 획기적인 발전을 이루었지만 아직도 극복해야 할 문제점들이 많이 남아있으며 극자외선과 관련한 기술 개발은 거의 전적으로 방사광에 의존하고 있다고 해도 과언이 아니다. 이미 미국의 ALS(Advanced Light Source)[6], 일본의 NTT Super ALIS 및 New SUBARU, 독일의 BESSY II와 같은 방사광 시설에는 극자외선 노광 기술 개발을 위하여 여러 기의 빔라인을 운영하고 있다. 방사광이 극자외선 노광 핵심기술 개발에 활용되는 예를 들어보면 다음과 같다.

- Mo/Si 다층박막 특성 연구 : 극자외선 노광은



다층박막으로 빛을 반사시켜 상을 축소한다. 따라서 다층박막에 대한 전반적인 연구뿐만 아니라 개개 소자의 광학적 특성을 측정하는 것도 매우 중요하다. 방사광은 파장을 마음대로 선택할 수 있기 때문에 다음과 같은 연구에 매우 유용하다.

파장 혹은 입사각에 대하여 반사율이 어떻게 변하는가?  
 소자의 모든 위치에서 반사율이 균일한가 (uniformity)?  
 모든 소자들이 같은 파장에서 최고의 반사율을 갖는가 ( $\lambda$ -matching)?

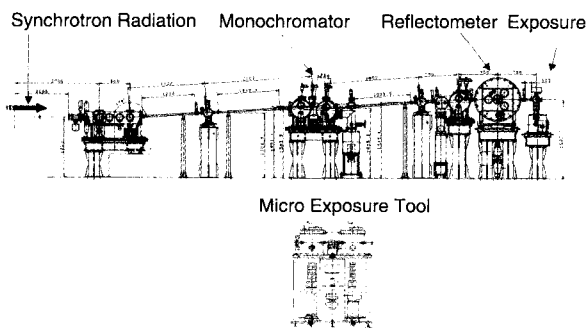


그림 11 일본 NTT Super ALIS의 극자외선 노광 연구 빔라인. 방사광을 이용하여 다층박막 및 극소 노광에 관한 연구를 수행. Super ALIS는 방사광의 산업적 이용에 관한 연구를 수행 위하여 건설한 방사광 시설이다.

각종 결함이 반사에 미치는 영향은 무엇인가?

그림 11은 이와 같은 연구를 수행하기 위하여 일본의 NTT Super ALIS에 설치한 빔라인을 보여주고 있다. 참고로 Super ALIS는 방사광의 산업적 활용을 연구하기 위하여 건설한 방사광 시설이며 초전도 전자석을 이용하고 있다. 그림 12는 극자외선 방사광을 이용하여 측정된 다층박막의 반사율을 보여주고 있다.

- 마스크 결함 검출 : 마스크의 상이 웨이퍼에 축소 복사된다는 점에서 마스크의 결함은 다른 광학소자의 결함보다 치명적인 영향을 미친다. 크기가 약 70nm 이상인 결함은 웨이퍼에 흔적을 남기는 것으로 알려져 있으며 결함을 획기적으로 줄이려는 노력이 계속되고 있다. 흔히 마스크에서 하나의 결함을 찾아내는 것을 미

국 로드아일랜드주에 떨어진 골프 공을 찾는 것에 비유하곤 한다. 그림 13은 마스크 결함 검출을 위한 ALS의 빔라인을 보여주고 있다. 마스크의 결함 검출을 위하여 빛의 산란을 이용하는데 결함의 크기가 수십 nm에 불과하므로 이에 의한 빛의 산란은 검출하기 힘들 정도로 미미하다. 우리가 검출할 수 있을 정도의 산란광이 발생하려면 검출에 사용하는 빛의 강도가 매우 높아야 하는데 방사광을 이용하면 이것이 가능해진다. 즉, 방사광을 수  $\mu\text{m}$ 로 집속하면 단위 면적당 광자 수가 매우 높아지므로 이 빛으로 마스크를 스캔하면서 결함을 검

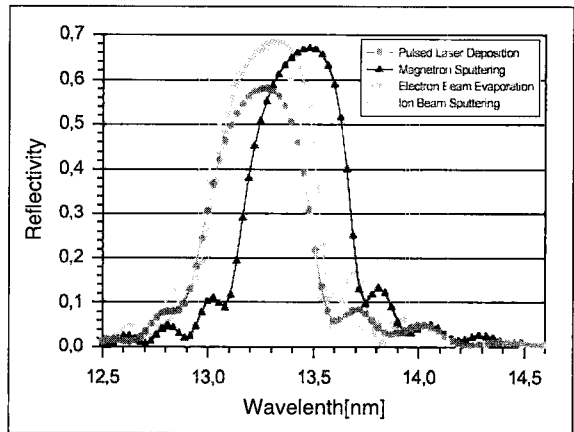


그림 12 방사광을 이용한 다층박막의 극자외선 반사율 측정. ASML 2nd Int. EUV Workshop (2009).

출하는 것이다.

- 초정밀 광학 측정 : 빛을 집속하여 상을 축소할 때 우리가 얻을 수 있는 최소 크기는 빛의 파장에 의하여 결정된다. 노광에서 사용하는 빛의 파장이 점차 짧아지는 이유는 파장이 짧을수록 작게 집속할 수 있기 때문이다. 다른 차세대 노광기술과 마찬가지로 극자외선 노광 역시 완벽에 가까운 설계, 제작 및 측정을 요구한다. 가령 제작한 거울의 형상오차는 0.3nm 미만이어야 하며 거울 표면의 거칠기는 0.1nm 미만이어야 한다. 더구나 거울들의 대부분이 비구면형이기 때문에 제작과 측정이 모두 어렵게 된다. 개개 광학소자가 완벽하더라도 정해진 위치에 있지 않으면 전체 시스템은 제 기능을 발휘할 수 없다. 이러한 문제들은 초정밀 광학 측정



## 기획 시리즈 ②

을 통해서만 해결할 수 있는데 미국, 유럽, 일본 등은 이를 위한 극자외선 간섭계[7-9]를 개발하여 개개 광학 소자의 구면형상 측정 및 전체 시스템 정렬과 같은 핵심기술 개발에 활용하고 있다. 특히 미국은 세계 최고의 광학 측정기술을 보유하고 있는데 ALS에서 운영중인 극자외선 간섭계는 13.4nm에서 파장의 1/250 오차를 측정할 수 있다고 한다.

- 감광물질의 광특성 연구 및 노광 공정 연구 : 모든 물질은 극자외선을 효과적으로 흡수한다. 감광물질의 광 흡수성이 지나치게 높으면 모든 빛이 코팅의 표면에서 흡수되어 표면 아래쪽의 감광물질은 감광이 되지 않는다. 최적의 노광 조건을 결정하기 위해서는 기존 혹은 신개발 감광물질의 광특성, 코팅 조건 등에 대한 방대한 데이터가 필요하며 극자외선 광조사량 측정을 위한 검출기의 개발 혹은 특성 연구도 따라야 한다. 환경 문제 즉 극자외선에 의한 감광물질의 광분해 및 이에 의한 오염도 주요 연구 과제이다. 또한 마스크, 웨이퍼 및 광학계로 이루어진 전체 시스템의 특성 연구도 필수적인데 이러한 종류의 모든 연구들이 방사광을 이용하여 수행되고 있다. 그림 14는 방사광을 이용한 Nikon의 극소 노광 시스템을 보여주고 있다.

### 극자외선 노광기술 개발환경 구축계획

포항가속기연구소에서는 극자외선 노광의 중요성을 인식하고 국내에서도 이에 대한 연구를 시작할 수 있도

록 극자외선 노광기술 개발환경 구축계획(안)을 수립하였다. 계획은 극자외선 광원 개발과 핵심기술 개발을 위한 빔라인 개발로 구분된다.

- 극자외선 광원 개발 : 포항가속기연구소는 방사광을 이용한 광원 개발을 제안하고 있다. 방사광을 이용하여 강력한 극자외선을 발생시킬 수 있을 뿐만 아니라 어느 광원에서든 얻을 수 없는 청정도를 지니고 있기 때문이다.

현재 전자빔 가속에 사용중인 선형가속기는 전자를 20억 전자볼트까지 가속시킬 수 있으며 중간 부분에서 전자를 인출하면 이보다 낮은 에너지의 전자빔을 얻을 수 있다. 따라서 새로운 선형가속기를 건설할 필요가 없으며 점자빔을 저장링까지 유도하는 유도관이 필요할 뿐이다.

가장 중요한 부분은 저장링인데 설계 시 고려하여야 할 점은 극자외선 출력과 저장링의 크기이다. 극자외선 노광에서는 13.4nm를 이용하므로 이 영역에서 최대의 출력을 얻을 수 있도록 설계하는 것은 당연하다. 출력을 결정하는 요인은 저장된 전자빔의 에너지와 전류이다. 전자빔의 에너지가 높으면 노광에 사용되지 않는 X-선의 방출이 많아져서 빛을 효율적으로 사용할 수 없으며 이들은 결국 광학소자에 흡수되어 열 부하를 증가시킬 뿐이다. 방사광의 출력을 결정하는 또 다른 요인은 저장링에 저장하는 전자빔의 전류이다. 출력은 저장 전류에 비례하여 증가하지만 전류를 올리는 데는 기

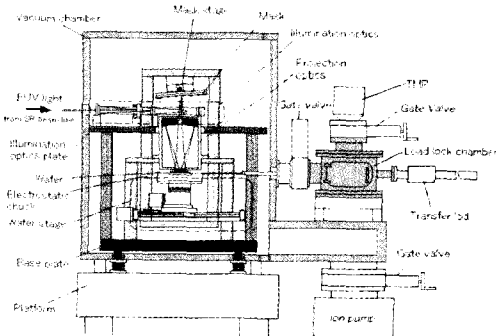
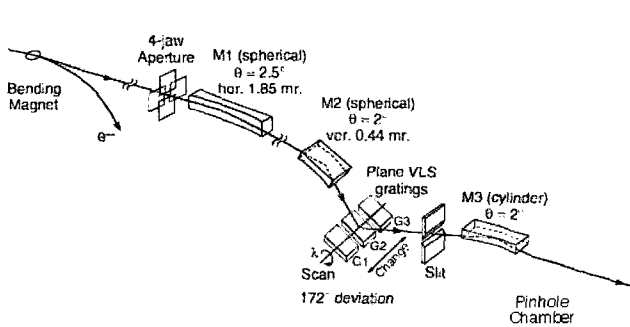


그림 13 마스크 결함을 검출하기 위한 ALS의 빔라인 개념도. 방사광을 2.5 umX4um 크기로 집속하여 사용한다.

그림 14 방사광을 이용한 극소 노광 시스템. 이러한 시스템을 이용하여 마스크, 웨이퍼, 감광물질 및 노광공정에 대한 전반적인 연구를 수행할 수 있다. Nikon, 5th NGL Workshop, Aug. 30, 2001.



술적 한계가 따르므로 이러한 점도 염두에 두어야 한다. 또한 개발하고자 하는 광원의 궁극적 목표가 Fab.에 응용하는 것이므로 소형 저장링을 목표로 하였다. 광원을 Fab.에서 이용할 경우에는 선형가속기를 소형 microtron으로 대체할 수 있다. 소형 극자외선 저장링의 개념도는 그림 15와 같다.

전체적으로 한번의 길이가 8m 정도인 사각형 모양이며 네 모서리에 위치한 휩자석을 이용하여 전자빔을 90° 씩 꺾도록 되어있다. 저장링 직선구간에는 2개의

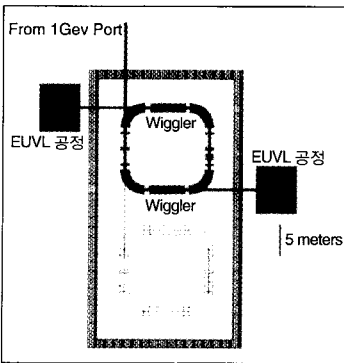


그림 15 극자외선 노광을 위한 방사광 광원의 개념도 6억 전자볼트의 전자빔이 기존 선형가속기로부터 인출되어 저장링에 저장된다. 저장링 직선구간에 설치한 2기의 위글러에서 발생하는 강력한 극자외선을 노광 공정에 사용한다.

위글러를 설치하여 이로부터 발생하는 방사광을 극자외선 노광에 사용하게 된다. 전자빔의 에너지는 극자외선 출력을 최대화하기 위하여 6억 전자볼트(0.6GeV) 결정하였다. 저장링에 저장하는 최대전류는 2A를 목표로 삼고 있는데 이 경우 위글러에서 얻을 수 있는 극자외선 출력은 18W 정도가 된다. 차세대 노광기술이 요구하는 80wph를

만족시키려면 mask에 도달하는 극자외선 출력이 7-10W 정도는 되어야 한다. 광집속장치(condensing optics)의 효율을 50%로 잡으면 mask상에서 9W를 얻을 수 있으므로 요구조건을 만족시킨다고 볼 수 있다.

- 극자외선 노광 핵심기술 개발 비라인 건설

극자외선 노광 개발에 방사광이 어떻게 활용되는지는 앞에서 설명하였다. 극자외선 노광 핵심기술 개발을 위하여 1기의 휩자석 비라인과 1기의 삽입장치 비라인의 건설을 추진하고 있다. 이들 비라인은 현재 운영중인 2.5GeV 저장링에 설치할 예정이며 휩자석 비라인은 다층박막, 결합, 감광물질 광특성 및 오염 등에 관한 연구 장비를 갖춘 예정이며 삽입장치 비라인은 극자외

선 간섭을 이용한 광학 소자 및 시스템에 관한 초정밀 광학측정에 사용할 예정이다.

### 정밀 위치제어 시스템

EUVL에 적용되는 wafer 및 reticle stage는 진공환경에서 사용이 되며 wafer에 식각되는 이미지의 손상을 없애기 위해서 고도의 정밀성이 요구된다. 안정적인 열적 환경을 유지하기 위하여 열 발생량은 최소가 되어야 하고, 진공 환경에서 동작하는 부품들은 가스 배출이나 입자 배출 등으로 인한 오염을 최소화 해야 하고, IC의 주요한 부분을 인쇄하는 도중에 일그러짐을 방지하기 위하여 입자 발생 등을 최소화 해야 한다. 이러한

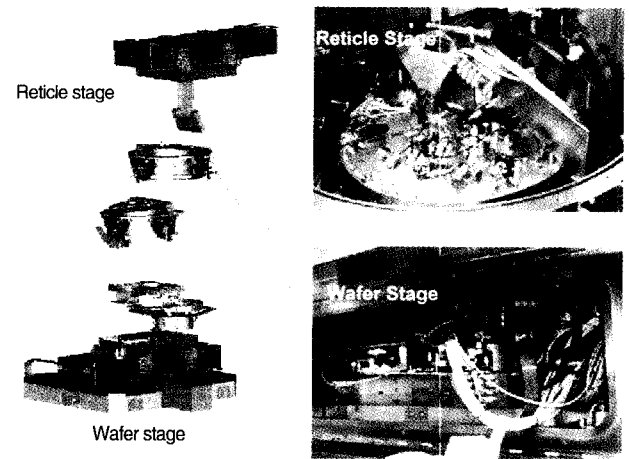


그림 16 Reticle Stage와 Wafer Stage

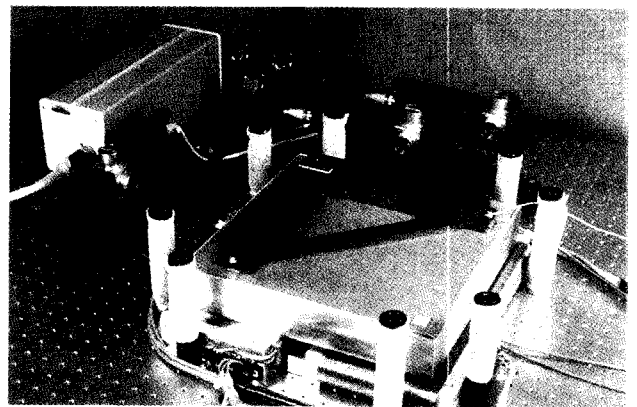


그림 17 3기부상 휩자석 단계





## 기획 시리즈 ②

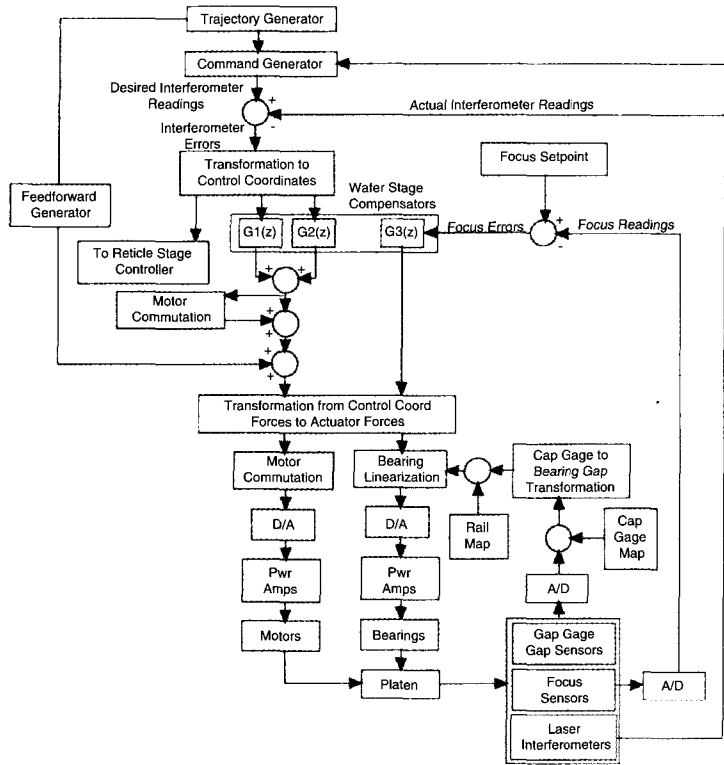


그림 18 wafer stage 제어 블록도 (high-level)

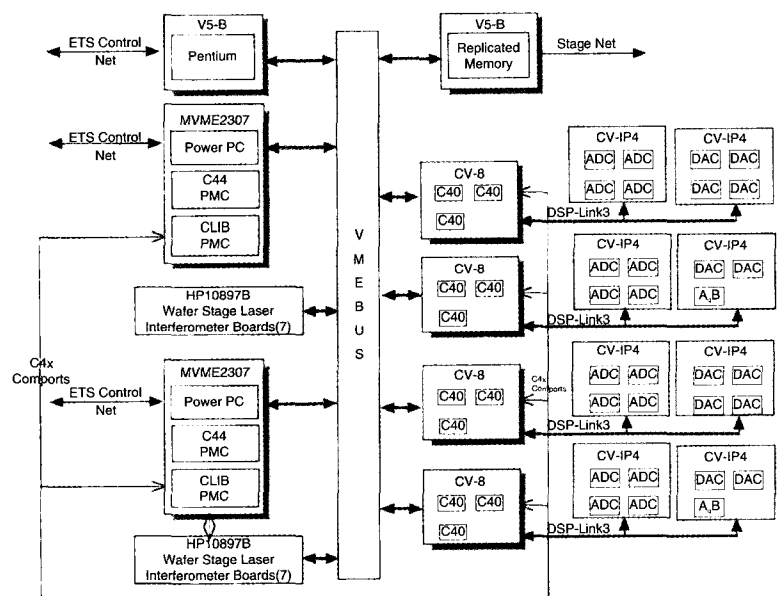


그림 19 wafer stage 제어 블록도 (low-level)

여러 요구 조건을 충족시키기 위하여는 자기부상 방식을 채용한 stage가 적용되고 있으며, 이의 제어를 통해 wafer와 reticle stage의 동기화를 위해 고도의 컴퓨터 제어를 위한 하드웨어 및 소프트웨어가 적용된다.

Wafer Stage는 stage base, off-axis coarse stage, 자기부상 platen, cable stage, 그리고 wafer chuck으로 구성되어 있다. Reticle stage는 wafer stage와 동일하지만 off-axis coarse stage가 없으며 위 아래가 뒤집혀진 형태이다. 부상 platen은 무게 감소와 열적인 일그러짐을 최소화 하기 위해 Zerodur를 가공하여 만들어 졌다. 자기부상되는 부분은 X 및 Z 방향으로는 500 $\mu$ m, Y 방향으로는 225mm, 그리고  $\theta_x$ ,  $\theta_y$ ,  $\theta_z$  방향으로는 각각 1milliradian의 이동거리를 가지고 있다. 6 자유도의 자기부상 scanning-axis는 5 자유도를 제어하는 10개의 variable-reluctance 액츄에이터(5개의 bipolar 쌍)와 1 자유도의 3상 선형 전동기로 구성되어 있다. 중력 부하에 대응하기 위하여 영구자석이 각 액츄에이터 하우징에 부착되어 있다. 또한 stage의 위치를 정밀하게 검출하기 위하여 sub-nanometer scale의 간섭계(interferometer)가 사용된다. 그림 16은 wafer 및 reticle stage의 시작품을 나타내고 있으며, 그림 17은 자기부상-선형 전동기 stage를 보여 준다.

정밀 위치제어를 달성하기 위하여 stage 제어기는 여러 개의 real-time embedded computer를 활용한다. 제어기는 각 stage의 위치 오



차를 비교하여 feedback 및 feedforward 제어를 통하여 위치 오차를 제어한다. feedback 제어는 디지털 필터를 통하여 측정된 현재 오차에 대하여 정정하기 위한 구동력을 발생시키고, feedforward 제어는 외란이 위치 오차로 작용하기 이전에 제거하는 역할을 수행한다. 그림 18은 wafer stage의 제어기 블록 도이다.

제어를 위한 하드웨어는 VME-bus를 기반으로 하고 있으며, 이중 real-time 시스템은 3개의 64 bit floating point processor, 12개의 32 bit DSP, 32개의 아날로그 입력, 40 개의 아날로그 출력, 48 개의 디지털 입력, 14 개의 간섭계(interferometer) 채널, 3개의 이터넷 접속부, 그리고 shared-memory network 인터페이스(stage-net) 등으로 구성되어 있다. 기판의 수가 30장이거나 되므로 두 개의 21 slot VME back-plane을 사용하고 이들 사이의 원활한 통신을 위해 VMEbus 리피터 기판을 사용한다. 그림 19는 제어시스템 컴퓨터 구성도이고, 여기서 레이저 인터페이스 보드(CLIB)가 고정밀 클럭을 사용하여 모든 I/O, 간섭계 샘플링, 시스템 프로세서의 인터럽트를 위한 타이밍 시그널을 제공한다.

## 결 론

차세대 리소그래피(NGL) 기술의 하나로서 극자외선(EUV)을 광원으로 하는 EUVL 기술이 매우 유망하며, 이 리소그래피에 응용될 EUV 광의 발생원으로서 펄스 레이저 플라즈마와 방사광 가속기를 이용하는 방법을 살펴보았다. 또한 EUVL에 사용되는 자기부상을 이용한 정밀 위치제어 stage 기술도 소개하였다. 미국, 일본, 유럽등 선진국에서는 차세대 리소그래피 기술로서 레이저 플라즈마 기술, 전자빔 기술, 이온 빔 기술, EUV 광학 기술, 정밀 위치제어기술 등을 기업뿐만 아니라 정부차원에서도 적극 지원하여, 해당기술의 선두

를 선점하고자 노력하고 있다. 국내에서도 기업뿐만 아니라 국가가 적극 지원하여 국책연구소에서 NGL 기술에 대한 연구를 수행함으로써 현재 한국이 반도체 분야에서 차지하고 있는 기술 우위를 차세대에도 유지할 수 있을 것으로 생각된다.

## [참 고 문 헌]

- [1] Hirouki DAIDO, "Laser Plasma X-ray Source", 레이저 연구, Vol. 27, 3, 1999
- [2] K. Koyama, T. Tome and M. Yano, "X-ray lithography and X-ray Microscopy Using Laser- Produced Plasma", 眞空, Vol. 29, 529, 1986
- [3] C.E. TURCU and J.B. DANCE, "X-Rays from Laser Plasmas", John Willy & Sons, 1999
- [4] David ATTWOOD, "Soft X-Rays and Extreme Ultraviolet Radiation", Cambridge University Press, 1999
- [5] Home page <http://pal.postech.ac.kr>
- [6] J. H. Underwood et al., Rev. Sci. Inst. 67 (1996) 1
- [7] H. Meddecki et al., Opt. Lett. 21 (1996) 1526
- [8] E. Tejnil et al., J. Vac. Sci. Technol. B 15(1997) 2455
- [9] P. Naulleau et al., J. Synchrotron Rad. 7 (2000) 405
- [10] J. B. Wronosky et al., "Wafer and Reticle Positioning System for the Extreme Ultraviolet Lithography Engineering Test Stand", Proc. of SPIE, Emerging Lithographic Technologies IV(2), Vol. 3997, 2000
- [11] M. Williams, et al., "Six Degree of Freedom Mag-Lev Stage Development", ibid, Vol. 3051, 1997