



# 극자외선 반사를 위한 마스크 및 광학계의 개발 동향

이 승 윤, 안 진 호, 손 영 수\* / 한양대학교 재료공학과, \*한국전자통신연구원

## 서 론

극자외선 노광공정은 최근 가시광 노광공정을 대체할 수 있는 가장 유력한 차세대 노광기술로 전 세계적인 관심이 집중되고 있는 기술이다. 이 기술의 장점은 여러 가지가 있으나 대표적으로는 20nm 이하 수준까지 연장 가능성 있는 해상도, 시간당 웨이퍼 80장 노광을 목표로 하는 높은 생산성, 그리고 기존 노광기술과의 유사성 등을 들 수 있다<sup>1)</sup>. 그러나 기존 기술 및 여타 차세대 노광기술들과 차별화 되는 가장 큰 특징으로는 반사형 노광계(반사광학계 및 마스크)를 꼽을 수 있다(그림 1). 해상도 향상을 위한 노광기술의 발전은 **Raleigh criteria**에 따라 광원의 단파장화를 큰 축으로 진행되어 왔으나, 단파장 광원의 낮은 투과도는 대부분의 차세대 노광공정에서 새로운 형태(멤브레인, 스텐실 등)로의 마스크 구조의 변화를 가져오게 되었다<sup>2)</sup>.(그림 2) 그러나 이러한 대부분의 마스크 형태는 나름대로의 취약점을 안고 있으며 이는 해당 노광기술의 현실화에 상당한 걸림돌로 작용해 왔음이 사실이다. 그림 3은 극자외선 노광공정에 사용되는 반사형 마스크의 개략도이다. 그림에서 보는 바와 같이 극자외선 마스크는 반사 다층막과 흡수체 패턴으로 이루어져 있다. 이러한 마스크에 있어서 가장 중요한 것은 반사막의 반사도와 마스크 전체의 결함의 크기와 밀도 조절이다. 현재 개발

중인 EUV-LLC의 alpha-tool을 기준으로 계산을 해 보면 각 반사 미러의 반사도를 1%씩만 증가시키도 전체 생산성은 10% 이상 증가하게 되므로 높은 반사도를 가지는 반사막의 제조 기술은 그 중요성을 아무리 강조해도 지나치지 않다 하겠다<sup>3)</sup>. 또한 다층 반사막이라는 특수한 구조는 결함의 수정이 매우 어려워 증착단계에서부터 결함의 생성을 억제하여야 하고, 궁극적으로는 생산성 있는 결함 검사 및 수정기술의 개발이 필요하다. 상을 형성하기 위한 광학계도 EUV의 파장대에서 투명한 렌즈 재질이 없으므로 이전처럼 렌즈를 사용한 굴절 광학계를 쓸 수가 없으며 전부 반사경으로 구성되어야 한다. 광학계 반사경의 다층박막 결함은 마스크보다는 결함에 대한 요구조건이 덜 엄격하지만 50 nm 이

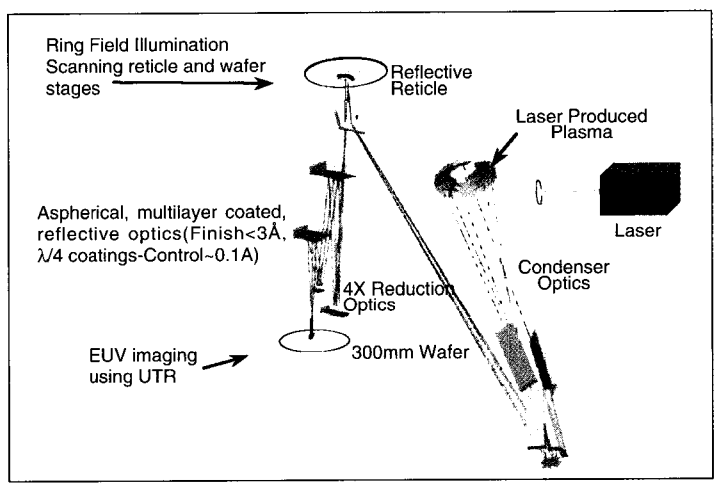


그림 1 13 nm 파장의 EUV 리소그래피 시스템 구조도. [Cortes, J. EUV]



하의 선폭을 결상하기 위해서는 수차가 없도록 초정밀도로 연마 가공되어야 하며, 표면 거칠기와 위상도 정확히 측정하여야 한다. 본 글에서는 이러한 극자외선 노광공정용 마스크의 특징과 제작방법, EUV 광학계의 소개와 연구 개발 현황 등에 대하여 이야기한다.

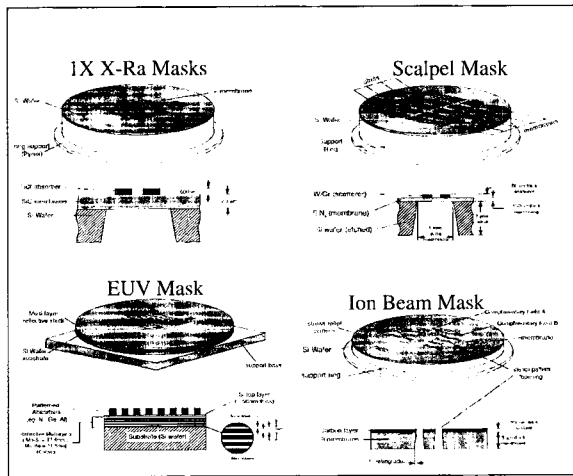


그림 2. 극자외선 리소그래피를 위한 마스크 구조. [Courtesy of CARO]

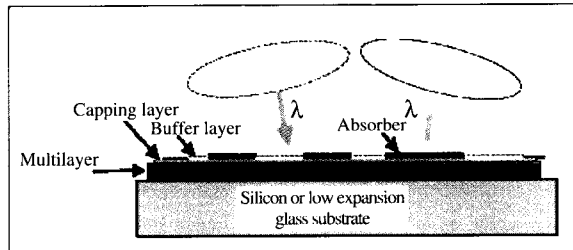


그림 3. EUV 마스크 구조. [Courtesy of EUV LLC]

### 다층 반사막 물질과 구조

극자외선 노광공정에 사용되는 13.5 nm 파장 대역의 빛은 흔히 soft X-선과 혼용되어 사용된다. 이 대역의 빛은 현재 우리가 알고 있는 자연계의 대부분의 물질에 대해 거의 투과도를 갖지 못하는 특성을 가지고 있어 이를 노광공정에 이용하기 위해서는 반사형의 노광계와 마스크를 이용해야만 이미지를 웨이퍼상에 축소 투영할 수 있다. 이를 위해서 상이한 광학적 성질을 가지

는 물질을 반복 적층하여 그 계면에서 일어나는 부분적인 반사의 보강간섭을 이용하게 된다<sup>7,8)</sup>. 기본적으로 반사도는 교대로 증착된 두 물질의 굴절률(complex refractive index의 실수부)의 차의 제곱에 비례한다. 동시에 다층반사막에 사용되는 물질은 흡수계수(complex refractive index의 허수부)가 낮아야만 높은 반사도를 기대할 수 있게 된다<sup>9)</sup>. 그림 4는 13.5 nm의 파장에 대한 여러 물질들의 굴절률(실수부)과 흡수계수(허수부)를 보여주고 있다. 또한 반사되는 극자외선의 파장과 최대 반사도는 구성 물질의 종류와 그 다층박막의 구조인자(structure factors)에 의해 결정되게 된다. 그림 5는 반사 다층박막의 개략도, 그리고 표 1은 마스크의 광학적 특성을 결정하는 구조인자를 표시하였는데, Mo/Si 이중층 다층막의 경우 약 75% 정도의 이론적 최대 반사도를 나타낸다. 이 구조인자의 값이 변할

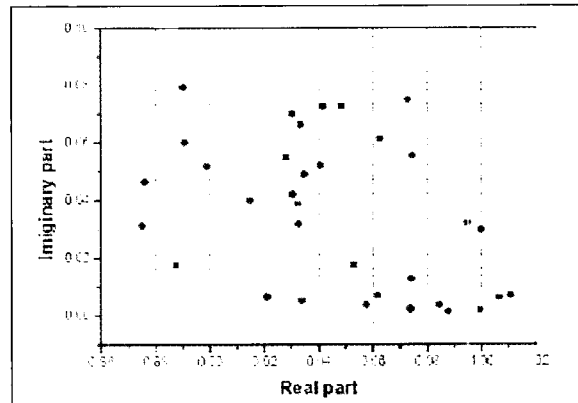


그림 4. 13.5 nm 파장에서의 복소 굴절률.

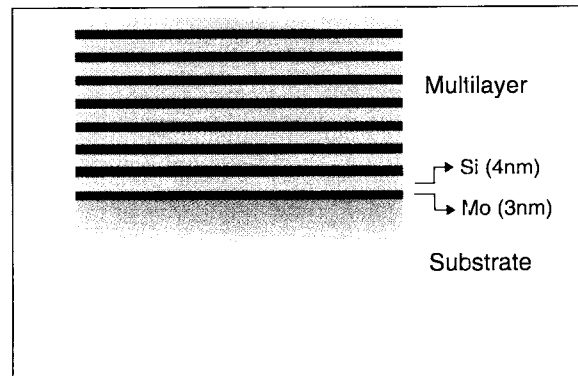


그림 5. 반사 다층박막의 개략도.

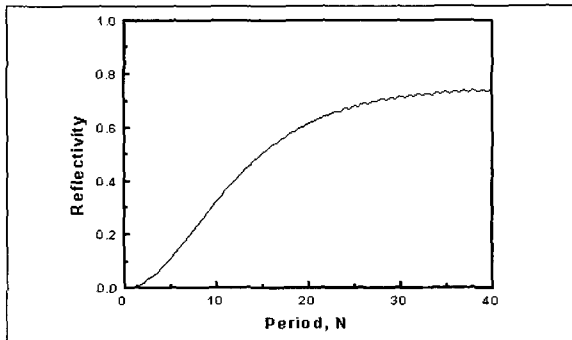


# 기획 시리즈 ③

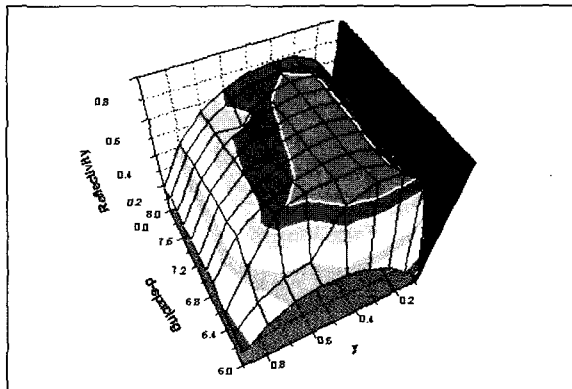
때의 반사도의 변화를 시뮬레이션 한 결과를 그림 6의 (a)와 (b)에 표시하였다. 최대 반사도는 40 period 부근에서 포화되며 그 이상에서는 반사와 흡수가 상쇄됨을 알 수가 있다. 그림 6(b)는 d-spacing의 변화와  $\gamma$ -ratio의 변화에 대한 최대 반사도의 분포 곡선으로, 적정치로부터 벗어남에 따라 최대 반사도가 감소함을 알 수 있다.

〈표 1〉 Structure factor of multilayer

film thickness	$d_h, dl$
d-spacing	$d_h + dl$
$\gamma$ -ratio	$d_l/d$ -spacing
N	total period
최대 반사도 75% @ 13.5nm	d: 7nm, $\gamma$ : 0.4, N: 40, Mo/Si



(a)



(b)

Figure 6: Simulation structure factors and maximum reflectivity

## 다층반사막의 제작공정

그림 7은 반사형 마스크의 제작공정을 개략적으로 보여주고 있다. 그림에서 보여지듯 마스크의 제작은 극자외선 반사 다층박막의 형성, 흡수체 증착 및 패터닝 공정 그리고 마지막으로 결함의 검출과 수정작업을 거치게 된다<sup>10,11)</sup>. 흡수체 패터닝공정을 제외하면 반사경의

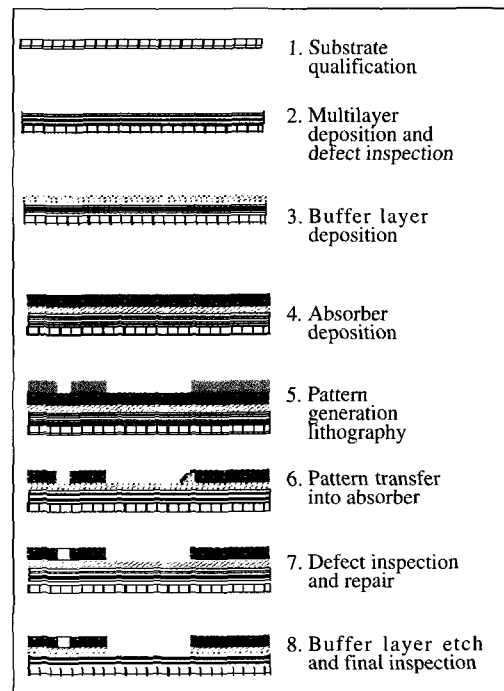


그림 7 Basic EUVL mask fabrication process (Courtesy of ELV LLC)

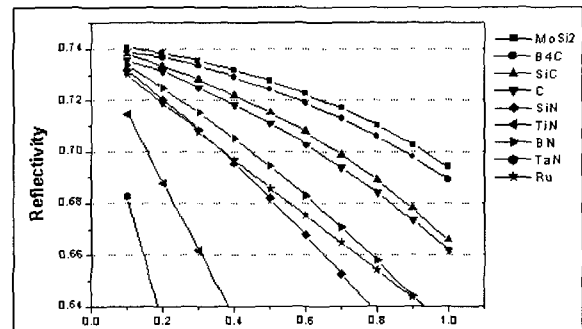


그림 8 Various Barrier Layer/Mo Barrier Layer simulation



제작공정과 동일한 공정이라 할 수 있다.

극자외선 반사용 다층박막은 주로 스퍼터링 공정을 이용하여 증착된다. 스퍼터링 공정을 이용하는 이유는 고순도의 이종 물질을 저온에서 연속적으로 적층하기에 가장 적합하기 때문이다. 이때 증착공정에 있어서의 주안점은 얼마나 이론치에 근접한 반사도를 갖는 다층박막을 형성하느냐 하는 것이다. 이종 박막간의 상호확산, 표면 거칠기 등을 포함하는 불균일성 요인과 다층박막 자체의 광학적 성질이나 밀도 등의 변화를 고려하지 않은 Fresnel eq.12)를 이용한 이론적 반사도 계산 결과는 실제 반사막의 반사도에 비해 높은 값을 나타내게 된다<sup>13)</sup>. 따라서 실제적인 반사도의 향상을 위해 층간 물질의 도입 및 구조 변화 등에 많은 연구가 진행되고 있으며, 그 예로 Ru, C 등의 물질 삽입 및 삼중층, 사중층 등의 구조 변화가 시도되고 있다. 그림 8에서는 여러 층간 물질을 사용하였을 경우의 최대 반사도에 대한 simulation 결과를 수록하였다. 여기서 보듯이 대부분의 경우 층간물질의 삽입에 의해 이론적인 반사도는 저하됨을 알 수 있다. 그러나 실질적 반사도는 이론반사도와 상당한 차이를 보이고 있으므로 층간 물질의 도입으로 실질적인 반사도가 향상될 가능성은 충분히 있다. 그 예의 한가지로 EUV LLC에서는 2001년도 하반기 B,C를 계면확산 방지막으로 사용하여 이론 반사도의 90%를 상회하는 70% (@13.5nm)의 반사도를 갖는 다층박막을 발표하였다. 그림 9에서는 Mo/Si의 이중층과 Mo/Ru/Si의 삼중층의 단면 투과전자현미경 사진을 비교하여 보았다. Ru 도입에 의해 계면에서의 거칠기 및 상호확산 억제 등에 있어 뚜렷한 향상이 관찰된다.

또 한가지 다층박막 증착에 있어 중요한 이슈는 증착시에 형성될 수 있는 결함의 조절이다. 특히 반사경으로 사용될 다층박막의 경우는 결함에 대한 요구조건이 덜 엄격하지만, 전면을 scanning하는 마스크의 경우는 다층박막내의 결함은 반사광의 intensity의 변화를 가져와 그 부분에서 소자의 결함으로 이어진다.

다음 그림 10에서는 다층박막의 증착에 쓰이는 대표적인 형태의 스퍼터링 시스템의 개략도를 보여주고 있다. (a)는 일반적인 magnetron sputtering system에 기관의 회전장치를 추가하여 여러 개의 반사경을 한꺼번에 증착할 수 있게 함으로써 하나의 스텝퍼 내에 들어

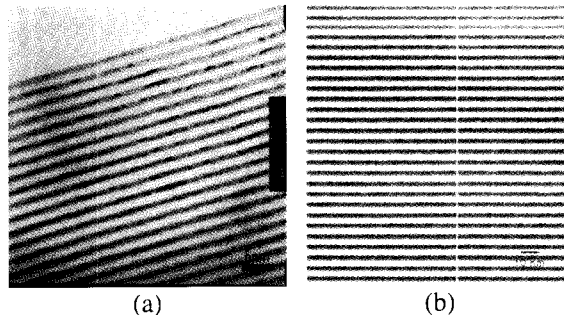
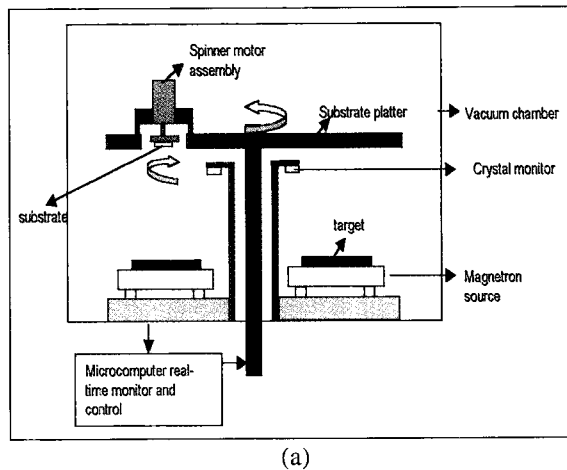
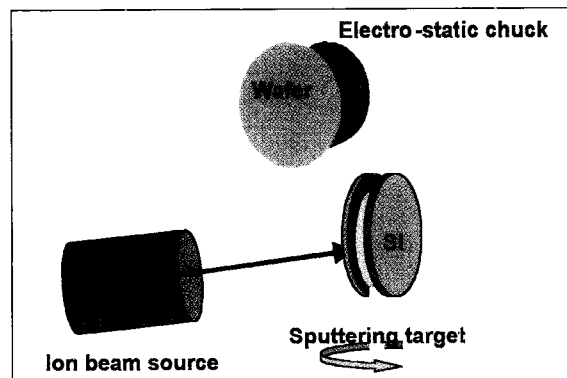


Fig. 9 High resolution TEM images of (a) Mo/Si and (b) Mo/Ru/Si multilayers



(a)



(b)

Fig. 10 Sputtering systems for multilayer deposition. (a) magnetron sputtering system for mirror.

가는 반사경간의 반사광의 coherency를 추구하는 증착



장비이고, (b)는 저결함 마스크 증착을 위해 magnetron source에 비해 particle contamination이 적은 ion-beam source를 사용한 스퍼터링 장비이다.

그림 11은 마스크 다층박막에 존재하는 결함이 전사 패턴에 미치는 영향을 보여주는 그림이며, 하나의 예로서 폭 40 nm에 높이 5 nm 이상의 결함은 wafer로 전사되어 불량을 유발 (10% 이상의 critical dimension 변화)함을 알 수 있다. 따라서 다층막 제작시 결함 크기

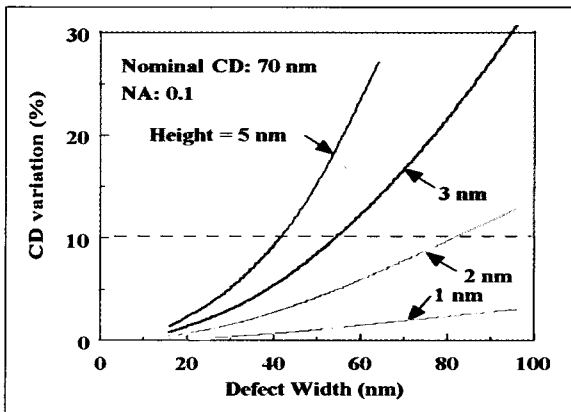
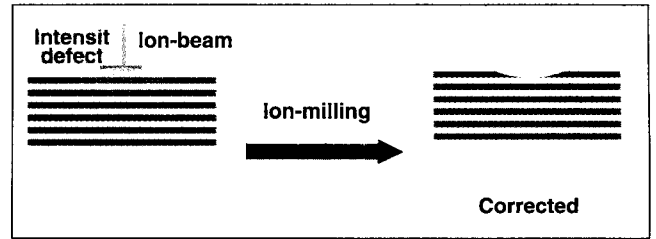


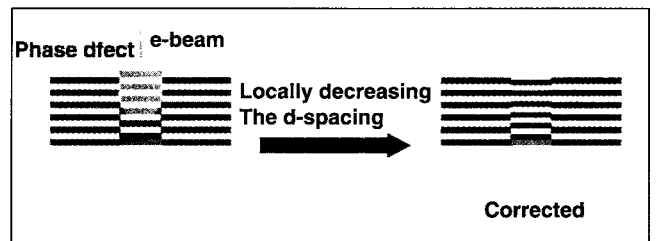
그림 11 Non-printable defects in multilayer. [Courtesy of ASET]

의 조절뿐만 아니라 빠른 속도로 수십nm 크기의 결함을 검출할 수 있는 기술의 개발도 시급한 실정이다.

이제까지는 다층박막에 존재하는 결함에 대한 수정이 불가능한 것으로 알려져 왔지만, 최근 연구에 의해 기술적 개념 및 방법론이 제안되어 다층막 결함 수정을 위한 첫걸음을 내딛게 되었다<sup>4,15)</sup>. 그림 12는 최근에 제안된 반사 다층막의 결함 수정 방법으로써, 결함을 intensity defect와 phase defect 두 가지로 분류하고 각각에 대한 해결책을 제시한 것이다. 그림 12 (a)는 다층박막의 표면에 structure factor에 어긋나는 이물질이 존재하여 국부적으로 반사광의 intensity를 저하시키는 결함을 수정하는 방법으로써 focused ion-beam을 사용해 국부적으로 milling해냄으로써 이물질을 제거하는 방법이다. 그림 12 (b)는 wave front error를 유발하는 phase defect를 제거하는 방법이다. 다층박막의 하부에 이물질이 존재할 경우 적층시에 이물질의 표면굴



(a)



(b)

그림 12 Defect correction methods for multilayer. (a) Intensity defect correction. (b) Phase defect correction. [Courtesy of EJV LLC]

곡이 표면까지 전파되어 전체적인 반사광의 intensity는 크게 저하되지 않으나 가장자리에서 wave front error가 일어나게 된다. 이 경우는 e-beam을 그 부분에 집중시켜 국부적인 가열을 하게 되면 화합물 형성에 의해 다층박막의 두께가 국부적으로 감소하게 되고 결과적으로 wave front error를 해소할 수 있다는 것이다.

### 흡수체 패턴의 형성

극자외선용 마스크의 흡수체는 음영비를 높이기 위하여 일반적으로 원자번호가 큰 중금속의 물질을 사용한다. 또한 흡수체 물질은 건식 식각이 용이해야 하며 마스크 제작의 마지막 단계인 결함 검사에서 하부의 반사 다층박막과 구별이 용이한 것이 유리하다. 이러한 요구조건 하에서 여러 가지 물질들이 시험되고 있는데 주로 X-선 노광용 마스크 재료로 개발되어온 Ta-계열의 흡수체나 Cr-계열의 흡수체가 많이 연구되고 있는 실정이다<sup>6-13)</sup>. 다음 표 2에서는 각 흡수체 물질간의 적합성 여부를 정리해 보았다. X-선 노광기술에서 연구가 많이 이루어졌던 TaN 등의 Ta-계열 흡수체가 대체적으로 우수한 성질을 보이고 있으나 검사장비에서의



〈표 2〉 Preliminary evaluation of absorber materials for EUVL mask.

Material	Absorbers							
	TiN	Cr	NiSi	TaN	TaSiN	Ta	Ti	Al
CD control	0	0	0	0	0	0	-	-
Cleaning	+	+	+	+	+	+	-	-
Emissivity	+	+	+	+	+	+	0	-
DUV inspection	+	+	+	0	-	-	+	-
Repair selectivity	0	0	0	0	0	0	0	+
Aspect ratio	-	0	+	0	-	+	-	0

+ : meets requirements  
 0 : may meet requirements  
 - : does not meet requirements

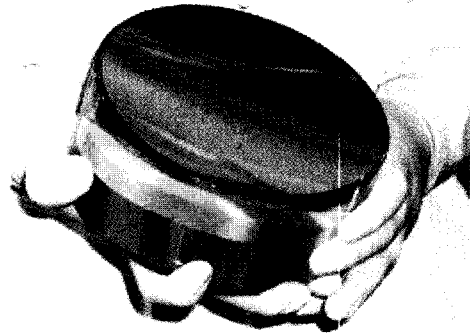
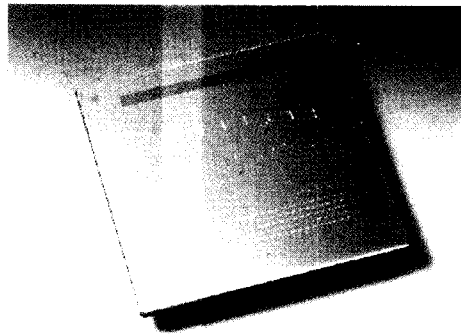


그림 13 Aspherical mirrors for EUVL at Carl Zeiss. [Courtesy of EUV LLC]

contrast 부분에서는 CrN이 더 우수하여 현재 이 물질을 이용한 개발이 많이 이루어지고 있다. 흡수체 패턴 형성 후에는 focused ion-beam을 이용하여 잘못된 패턴을 삭제하거나 첨가하는 공정을 거치게 된다.



### 마스크 관련 연구 개발 동향

극자외선 노광기술에 대해 가장 활발한 기관인 EUV LLC는 상용 스텝퍼 개발에 있어 ASML과 협력하고 있으며, alpha-tool 제작에 이어 beta-tool을 개발하고 있다. 이 스텝퍼에 들어가는 aspherical mirror는 Carl Zeiss에서 제작하고 있으며 (그림 13), 이밖에 모든 반사 다층막과 마스크는 Virtual National Laboratory (Sandia, Berkeley, Livermore 국립연구소내의 극자외선 노광기술 연합 연구팀)에서 개발을 담당하고 있다. 2000년도 말과 2001년도 초반에 걸쳐 EUV LLC는 극자외선용 마스크를 제작했다고 발표했으며 (그림 14) 이를 이용해서 노광실험을 실시하여 static exposure로 40 nm의 line & space 패턴을 노광한 결과를 공개하였다. 이밖에 현재 EUV LLC내에서 마스크 관련 연구로 심도 있게 다뤄지고 있는 분야는 결함 평가와 저감 및 수정기술에 관한 것으로 알려져 있다.

그림 14 EUVL mask at EUV-LLC. [Courtesy of EUV LLC]

일본에서도 마스크 분야의 연구가 극자외선 기술개발의 핵심으로 인정되어 중점적으로 진행되고 있다. ASET에 이어 새로운 국책 프로젝트가 시작되고 있으며, NTT Atsugi 연구소와 Himeji 대학의 방사광가속기에 극자외선 노광 전용 빔라인이 설치되어 마스크 및 반사경의 평가와 노광기술의 개발에 이용

되고 있다.

EUV-LLC의 발표에 따르면 마스크의 가격은 blank의 경우 1만4천불, 결함수정까지 거친 patterned mask의 가격은 약 7만 불에 이를 것으로 예상된다. 위의 가격은 모두 기본적인 공정 비용만을 감안한 최소치이며 여기에 부속 공정과 로열티 등의 지적재산권 비용과 이윤을 포함시키게 되면 실제 가격은 개당 수억 원을 호가할 것으로 보여진다. 마스크의 설계 수정 주기가 점차 짧아지는 최근의 추세를 감안하면 마스크 제작기술의 보유여부는 생산되는 소자의 가격 결정에 적지 않은 영향을 미치는 변수가 되리라 예측할 수 있다.

### EUV 광학계 개요 및 개발 현황

일반적으로 EUV 리소그래피용 광학계는 EUV의 파



### 기획 시리즈 ③

장대에서 투명한 렌즈 재질이 없으므로 이전처럼 렌즈를 사용한 굴절 광학계를 쓸 수가 없으며 모두 반사계로 구성된다. 대부분의 EUVL projection optics는 4개 이상의 반사경으로 이루어진다. 광원에서 발생된 빛은 condenser lens에 의해 집속되어 마스크에 입사되면 반사된 빛은 projection optic 시스템에 들어가게 된다. 각 반사경마다 다른 각도로 입사하게 되어 동일한 과정에서 최적의 반사를 위해서는 각 반사경마다 다른 조건의 다층 박막이 필요하게 된다. 또한 각 반사경에서의 입사광의 각의 범위도 고려해야 하며 다층 반사막에 입사되는 각의 변화가 작은 경우에는 반사경의 전 영역에 같은 두께의 다층박막을 쓰지만 입사각의 변화가 큰 경우에는 다층 박막의 두께 주기를 바꿔주어야 한다. 리소그래피를 위한 반사광학계의 설계는 자유도가 적어서 굴절광학계 설계보다 어렵다. 최적의 결과를 얻기 위한 EUV 광학계의 반사경은 대부분 비구면을 가지도록 설계된다<sup>9)</sup>. 미국 EUV LLC의 EUVL 시스템의 광학계 구성도는 다음 그림15와 같다.

이 시스템은 반사경을 4개 사용하는 4-mirror 시스템이며 M3는 구면이고 나머지 세 개는 비구면 반사경이다. 노광 시 반사경 전체 면적을 다 이용하지 않고 가장

자리부분을 이용하므로 고리조각 모양의 ring field를 가진다. 이 시스템은 step-and scan 시스템을 위한 것으로 마스크와 웨이퍼는 동시에 서로 반대 방향으로 움직인다. 4× 시스템이므로 마스크가 웨이퍼보다 4배 빨리 움직인다. 그림 16은 Canon의 EUV 리소그래피 광학 시스템의 구성도이다. EUV LLC의 시스템과는 달리 projection system에 6개의 반사경을 사용하는 방식이며 ASML도 이러한 6-mirror system을 개발하고 있다.

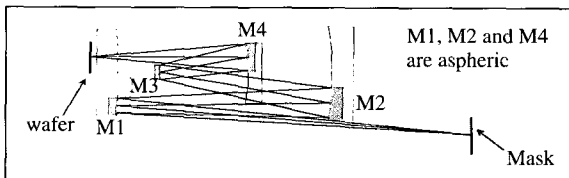


그림 15 EUVL 광학계의 구성도 [Courtesy of EUV LLC]

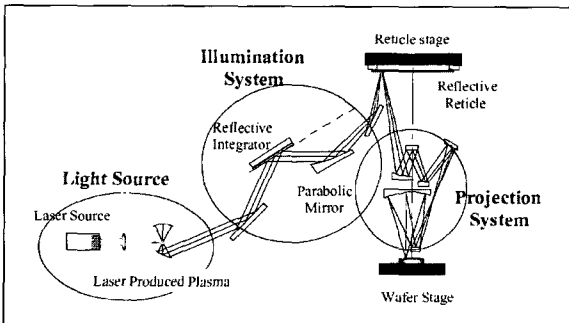


그림 16 Canon의 EUV 리소그래피 시스템의 구성도 [Courtesy of Canon]

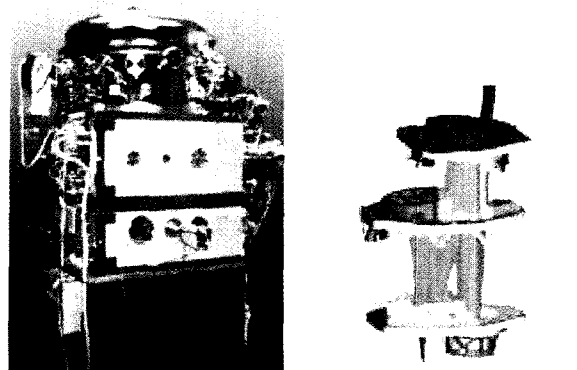


그림 17 EUV 리소그래피 시스템의 projection optics box의 외형과 구조도 [Courtesy of EUV LLC]

그림 17은 미국에서 개발한 EUV 리소그래피 시스템의 projection optics box의 외형과 구조도를 나타낸다. 이 광학계는 24 mm 32.5 mm의 full field와 0.1 NA, 4× 시스템으로 개발된 Engineering Test Stand (ETS) 라는 알파 장비를 위해 제작한 두 광학 세트 중 첫 번째 것이다. 마스크에서 반사된 빛이 M2를 통과하여 입사된 뒤 아래의 반사경 M3에 먼저 반사되고 위의 M2,

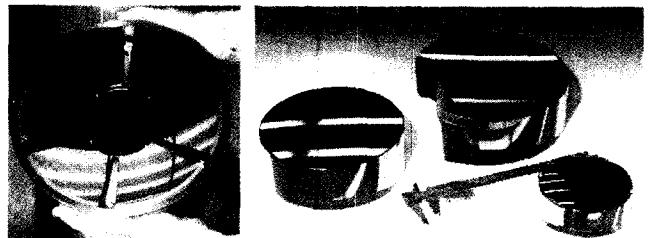


그림 18 EUV 리소그래피 시스템의 condenser 및 projection optics. [Courtesy of EUV LLC]

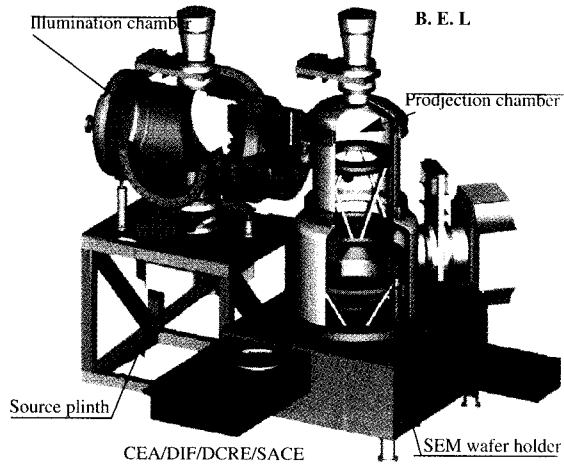


그림 19 유럽의 EUV 프로그램에서 개발 중인 Laboratory Exposure Bench (BEL).

아래의 M3 그리고 위의 M3를 거쳐 최종적으로 아래의 웨이퍼에 도달한다. 이때 웨이퍼의 노광되는 영역은 24 mm 1.5 mm의 ring field이다. 다음 그림18은 이 시스템에 사용된 EUV 집광용 condenser 및 projection optic을 보여주고 있다. 그림 19는 유럽 EUV 프로그램에서 개발 중인 EUV 시스템의 구조도를 나타낸다.

### EUV 광학계의 측정

EUV용 광학계는 작은 파장의 빛을 이용하여 미세 패턴을 형성하므로 아주 고정밀도를 요구한다. 이를 위해서 projection optics에 쓰이는 반사경에 대해서 모든 공간 주파수가 고려되어야 한다. 13.4 nm의 파장에서 회절한계의 이상적인 상을 얻으려면 rms wavefront error가 1 nm 이하라야 하며 이 것은 표면오차가 균일하게 분포되었다고 가정할 때 각 반사경의 surface figure가 0.25 nm rms 이하가 되어야 함을 의미한다. 표면 거칠기는 그 spatial wavelength에 따라 여러 가지로 나뉘어지는데 surface figure는 spatial wavelength가 1 mm 이상인 경우를 나타내며 이것은 선폭에 영향을 미친다. 1 mm부터 1 $\mu$ m 사이는 mid-spatial frequency roughness(MSFR)가 되며, 이 중간 정도의 MSFR은 입사광이 반사경 표면에서 작은 각도의 산란을 일으키게 하여 결과적으로 어두운 영역에 비치는

flare가 되어 상의 대비(contrast)를 떨어뜨린다. 이 MSFR에 의한 산란은  $1/\lambda^2$ 에 비례하는데 파장이 작은 13.4 nm EUV의 경우 248 nm DUV보다 약 340배나 크다. 이 flare를 적정수준으로 유지하기 위해서는 MSFR는 0.2 nm rms 이하이어야 한다. Spatial wavelength 1  $\mu$ m 이하의 roughness는 high-spatial-frequency roughness (HSFR)로 정의되며 큰 각도의 산란을 일으킨다. 이 경우 대개 빛이 반사경 바깥영역으로 나가기 때문에 빛의 세기가 약해지게 된다. 이 HSFR은 0.1 nm rms 이하가 되어야 한다. 제작된 반사경은 간섭계로 측정을 하는데 주로 point-diffraction interferometer(PDI)를 써서 비구면 측정을 한다. MSFR은 interference microscope를 사용해서 측정하고 HSFR은 AFM으로 주로 측정한다. 그림 20은 일본

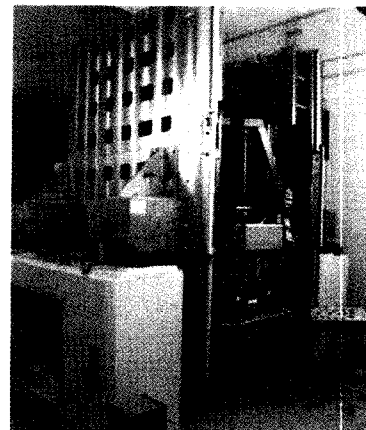


그림 20 일본 ASET에서 개발된 diffraction interferometer [Courtesy of ASET]

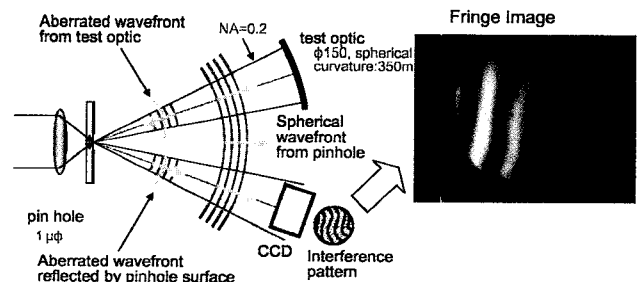


그림 21 Interference pattern from a test optic [Courtesy of ASET]



ASET에서 개발 한 PDI시스템의 모습이며 그림 21은 그 개념도와 실험 결과 얻은 간섭무늬를 보여준다.

이 장치는 He-Ne laser를 광원으로 쓰며 0.15 nm 이하의 정확도와 0.03 nm의 repeatability를 가지고 있다. 가시광에서의 측정은 EUV와는 다른 특성을 보이므로 좀 더 정확한 측정을 하기 위해서는 EUV 파장을 이용해서 측정하는 at-wavelength 방식을 쓴다.

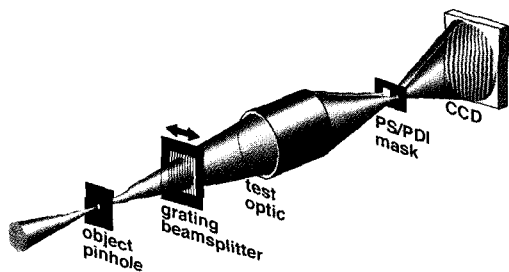


그림 22 Phase-shifting point-diffraction interferometer(PS/PDI)의 구성도

그림 22는 현재의 가장 정밀한 EUV interferometer로 연구되고 있는 phase-shifting point-diffraction interferometer(PS/PDI)의 구성도를 보여준다<sup>20)</sup>.

2001년 10월 일본에서 개최된 EUVL 워크샵에서 ASET에서 개발한 반사경은 curvature가 200~2200 mm이고 최대 직경이 550 mm이며, repeatability는 0.03 nm,  $\Delta\lambda/\lambda \sim 30$  이었다고 보고되었다. Nikon이 개발하는 광학계는 6-mirror projection optics이며 (NA=0.25) ring field illumination optics이다. 비구면의 제작 결과 figure 0.3 nm rms, MSFR 0.2 nm rms, HSFR 0.1 nm 결과를 얻었으며 ASET과 함께 PDI 시스템을 완성하여 측정하여 측정 결과 정확도는 0.10

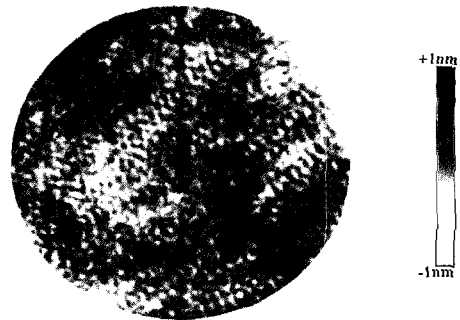


그림 24 EUV LLC의 Optic Set 2의 표면 거칠기 (Courtesy of EUV LLC)

nm rms 이고, 0.03~0.04 nm repeatability를 보였다. 미국 EUV LLC는 두 세트의 projection optics를 제작하였으며 optics set 1의 flare는 26%,  $\lambda/14$  rms의 wavefront, set 2의 flare는 13%,  $\lambda/20$  rms wavefront의 측정결과가 보고되었다. 그림 23은 ETS optic set 2의 at-wavelength interferometry로 측정된 wavefront error를 보여 주고 있다.

그림 24는 Optic Set 2의 반사경 M3의 표면 거칠기를 나타내는 그림으로 반사경의 figure는 0.18 nm rms, MSFR이 0.15 nm rms, 그리고 HSFR이 0.15 nm rms 이었다. 개발규격이 figure 0.25 nm rms, MSFR 0.20 nm rms, HSFR이 0.10 nm rms이므로 규격 내에 들어 오거나 근접해 있는 상태이다. 반사광학계의 경우 반사도가 점차 개선되고 있으며 표면 거칠기도 상당한 수준까지 도달했으나 flare, 열팽창 문제, 산화 및 카본 침착에 의한 반사도 감소를 막기 위한 environment control 등과 함께 반사경의 성능 개선을 위한 연구는 계속되어야 할 것으로 본다.

## 결론

극자외선 노광용 마스크 및 반사경은 전체 노광기술의 성패를 가름할 만큼 핵심적인 부분이다. 지난 10여년간 세계 각국의 집중적인 연구의 결과로 이론치의 90%를 상회하는 반사도를 가지는 다층막을 얻을 수 있게 되었다. 그러나 아직까지 반사도에 서도 수%의 개선의 여지가 남아 있으며,

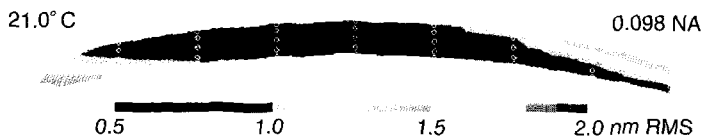


그림 23 At-Wavelength Interferometry of ETS Set 2 Optics. (Courtesy of EUV LLC)

결함의 평가 및 저감 공정 등의 분야에서는 많은 연구가 필요한 실정이다. 공정기술이 뛰어난 국내의 여건상 국제적인 경쟁력을 가질 수 있는 몇 안 되는 분야이며, 지속적인 반도체 분야에서의 기술우위를 지키기 위해서 꼭 자체 개발이 필요한 전략적인 분야이기에 본격적인 투자가 필요하다.

[참고문헌]

- [1] C. W. Gwyn, R. H. Stullen, D. W. Sweeney, and D. T. Attwood, *J. Vac. Sci. Technol. B* 16, 3142 (1998).
- [2] J.P. Silverman, *J. vac. Sci. Technol. B* 15, 2117 (1997).[2]
- [3] L.R. Harriot, *J. Vac. Sci. Technol. B* 15, 2130 (1997).
- [4] B. Terris, L. Folks, D. Weller, J. E., E. Baglin, A. Kellock, H. Rothuizen, and P. Vettiger, *Appl. Phys. Lett.* 75(3), 403 (1999).
- [5] D. G. Stearns, R. S. Rosen, and S. P. Vernon, *Appl. Opt.* 32(34), 6952 (1993).
- [6] D. W. Sweeney, R. Hudyma, H. N. Chapman, and D. Shafer, *SPIE*, 3331, 2 (1998).
- [7] H. Kinoshita, K. Kurihara, Y. Ishii, and Y. Torii, *J. Vac. Sci. Technol. B* 7, 1648 (1989).
- [8] C. Montcalm, S. Bajt, P. B. Mirkarimi, E. Spiller, F. J. Weber, and J. A. Folta, *SPIE*, 3331, 42 (1998).
- [9] D. E. Kim, D. H. Cha, and S. W. Lee, *Jpn. J. Appl. Phys.* 37, 2728 (1998).
- [10] J. M. Slaughter, D. W. Schulze, C. R. Hills, A. Mirone, R. Stalio, R. N. Watts, C. Tarrío, T. B. Lucatorto, M. Krumrey, P. Mueller, and C. M. Falco, *J. Appl. Phys.* 76(4), 2144 (1994).
- [11] P. Mangat, S. Hector, S. Rose, G. Cardinale, E. Tejníl, and A. Stivers, *SPIE*, 3997, 76 (2000).
- [12] V. G. Kohn, *Phys. Stat. Sol. B* 187, 61 (1995).
- [13] D. G. Stearns, R. S. Rosen, and S. P. Vernon, *J. Vac. Sci. Technol. A* 9(5), 2662 (1991).
- [14] S. Burkhart, C. Cerjan, P. Kearney, P. Mirarimi, C. Walton, A. R. Chaudhuri, *Proc. Emerging Lithography Technologies III*, 570 (1999).
- [15] M. J. Brukman, Y. Deng, A. R. Neureuther, *Proc. Emerging Lithography Technologies IV*, 799 (2000).
- [16] M. Niibe, T. Watanabe, H. Nii, T. Tanaka, and H. Kinoshita, *Jpn. J. Appl. Phys.* 39, 6815 (2000).
- [17] J. M. Slaughter, D. W. Schulze, C. R. Hills, A. Mirone, R. Stalio, R. N. Watts, C. Tarrío, T. B. Lucatorto, M. Krumrey, P. Mueller, and C. M. Falco, *J. Appl. Phys.* 76(4), 2144 (1994).
- [18] P. Mangat, S. Hector, S. Rose, G. Cardinale, E. Tejníl, and A. Stivers, *SPIE*, 3997, 76 (2000).
- [19] T.E. Jewell, J.M. Rodgers, and K.P. Thompson, *J. Vac. Sci. Technol. B* 8, 1509 (1990).
- [20] Patrick P Naulleau, Kenneth A Goldberg, Jeffrey Bokor, *J. Vac. Sci. Technol. B* 18, 2939 (2000).
- [21] Next Generation Lithography (NGL) Workshop, 29-30 August 2001, Pasadena, California