

## 리소그래피의 최신기술동향

안진호

### 1. 서론

리소그래피 기술은 반도체 프로세스의 핵심 기술로서 반도체 디바이스의 미세화와 집적화를 주도하는 역할을 담당하고 있다. 반도체 디바이스의 미세화는 매 3년마다 패턴의 크기가 약 0.7배씩 작아지는 1세대 technology의 진전이 계속되어 왔다. 이러한 반도체 디바이스의 미세화는 리소그래피 기술의 진화에 의해서 유지되어 왔다 해도 과언이 아니다. 리소그래피 기술은 i-line(파장 365 nm), KrF(파장 248 nm), ArF(파장 193 nm)로 이어지는 단파장화와 위상변위 마스크(phase shift mask) 등의 해상도 향상기술, 레지스트의 성능향상에 의해 연장되어온 전통적인 광리소그래피가 주류를 이뤄왔다. 현재는 이러한 발전을 계속하기 위해 F<sub>2</sub>(파장 157 nm) 리소그래피 기술의 개발이 활발히 이뤄지고 있다. 이러한 F<sub>2</sub> 리소그래피 기술은 종래의 개념으로서는 최후의 광리소그래피가 될 가능성이 있다.

F<sub>2</sub> 리소그래피 기술의 이후에는 NGL(Next Generation Lithography, 차세대 리소그래피 기술)로 불리우는 다양한 기술의 개발이 진행되고 있는데, 그 중 중요한 기술들은 EUVL(Extreme Ultraviolet Lithography : 극자외선 노광기술), EPL(Electron Projection Lithography, 전자빔 투영 노광기술), ML2(Maskless Lithography), PEL(Proximity Electron-beam Lithography: 근접 전자빔 노광기술), PXL(Proximity X-ray Lithography, 근접 X선 노광기술) 등이다. 그 이외에도 EBDW(Electron-beam Direct Writing, 전자빔 직접 묘화 노광기술)의 개발도 계속되고 있다.

한편, 반도체 디바이스의 미세화는 노광장치 및 마스크 분야에서 새로운 기술뿐만 아니라 보다 엄격한 정밀도를 요구함에 따라 장치들의 고가격화에 따른 cost 증가의 문제를 야기한다. 리소그래피 cost는 장비 가격, 장비 생산성, 마스크 가격, 마스크당 노광 웨이퍼의 매수 등에 의해 영향을 받는다. 앞으로는 소자의 크

기 (design rule)뿐만 아니라 생산량에 따른 리소그래피 기술의 선택이 한층 더 중요할 것으로 생각이 된다.

### 2. F<sub>2</sub> 리소그래피 기술의 개발 동향

#### 2.1 노광시스템

현재 이용 가능한 노광시스템은 small field의 노광기, 즉 micro-stepper로서 레지스트 개발과 초해상 기술개발에 적용되고 있다. Fig. 1은 NA 0.6, 축소배율 1/10, 이미징 사이즈 1.5 mm의 micro-stepper를 이용한 단층 레지스트에 대한 해상성능의 예로, 막두께 100 nm의 레지스트에 110 nm L/S가 해상되었으며, 130 nm L/S 분해 범위에서 0.5 μm의 집점심도가 얻어졌다.

이 micro-stepper는 반사굴절 광학계를 채용하고 있는데, 본격적인 양산용 노광시스템에서는 F<sub>2</sub> laser의 협대역화 기술의 개발과 관련한 광학계의 선택이 중요한 해결과제이다. ① 파장선택을 포함한 F<sub>2</sub> laser(스펙트럼 폭 ~1.1 pm)와 반사굴절 광학계의 구성, ② 협대역 laser(~0.6 pm)와 BaF<sub>2</sub> 등의 제2 소재를 포함한 굴절 광학계의 구성, ③ 초협대역화 laser(0.2 pm이하)와 CaF<sub>2</sub> 단일소재의 굴절 광학계의 구성, 등 3가지 선택의 여지가 있다. 어떠한 방식에서도 고NA, 저수차의 실현이 가능하다고 생각이 되나, 장래의 양산용 F<sub>2</sub> 노광기에서는 반사굴절 광학계가 주류가 될 것이라 생각된다.

또한 157 nm의 빛은 산소에 의한 흡수가 크고, 수분 및 유기물에 의한 흡수도 ArF의 경우에 비해 상당히 크다. 따라서 F<sub>2</sub>에서는 노광부의 충분한 purge가 필요하며, 레티클 및 웨이퍼 부위의 분위기 제어도 필요하다. 이를 위하여 종래의 노광기에는 없는 purge기구의 개발이 필요하여 이에 대한 실용화를 위한 개발이 현재 진행되고 있다.

#### 2.2 레지스트 재료 및 프로세스

F<sub>2</sub>용 레지스트로서는 DUV와 마찬가지로 화학증폭형 레지스트가 검토되고 있는데 DUV용 레지스트의 base 수치는 157 nm 영역에서의 흡수도가 크다. 예를 들어 KrF용 레지스트에 사용되고 있는 Poly hydroxy

\*서울 성동구 행당동 17 한양대학교 신소재공학부 (jhahn@hanyang.ac.kr)

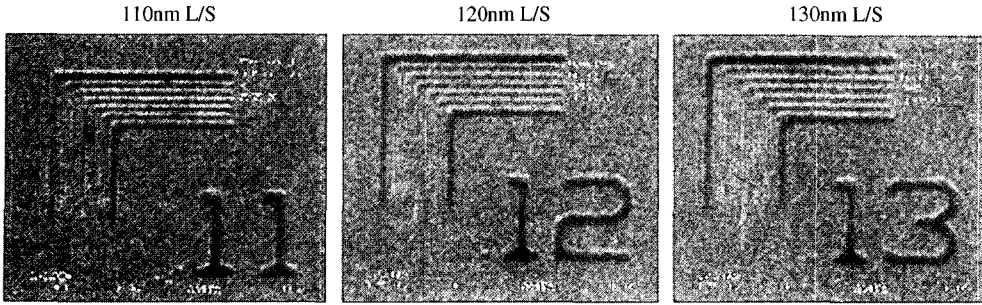


Fig. 1. F<sub>2</sub> Micro-Stepper에 의한 레지스트 패션

styrene은 광흡수가 커서 F<sub>2</sub> 영역에서 사용하기 위해서는 레지스트의 두께를 100nm 이하로 박막화해야 하므로, 에칭을 고려한다면 실용화가 곤란하다. 이 때문에 F<sub>2</sub>용 레지스트로서는 이 영역에서 흡수가 작은 불소수지 등이 검토되고 있다. 불소수지를 이용해 제작된 단층 레지스트의 해상특성을 Fig. 2에서 보여주고 있는데, 전술한 micro-stepper 및 150 nm 두께의 레지스트를 이용하고 Alt-PSM을 적용하여 95 nm L/S의 해상도가 얻어졌다.

F<sub>2</sub>용 레지스트를 사용해 gate 패턴을 형성한 예가 Fig. 3에 나타나 있다. 레지스트 형상은 테이퍼가 저여서 개선이 필요하지만 패턴 전사특성은 확인되었다. 157 nm영역에서 투명성이 높은(광흡수계수 3.0/μm이하) 레지스트 재료는 나와 있지만, 레지스트 형상, 알카리 용해성, 드라이 에칭 내성 등 종합성능에 대한 균형을 가지는 레지스트를 위해서는 개선이 필요한 실정이다. 반사방지막에 관해서는 지금까지 사용되어온 유기막 및 무기막 재료가 157 nm영역에서도 유효하다는

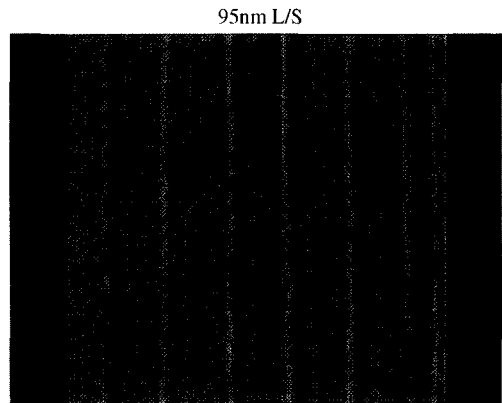


Fig. 2. 불소수지계 레지스트 패턴.

확인을 한 바 있다.

2.3 마스크 재료

현재 DUV에 사용되고 있는 합성 석영은 재질 중의

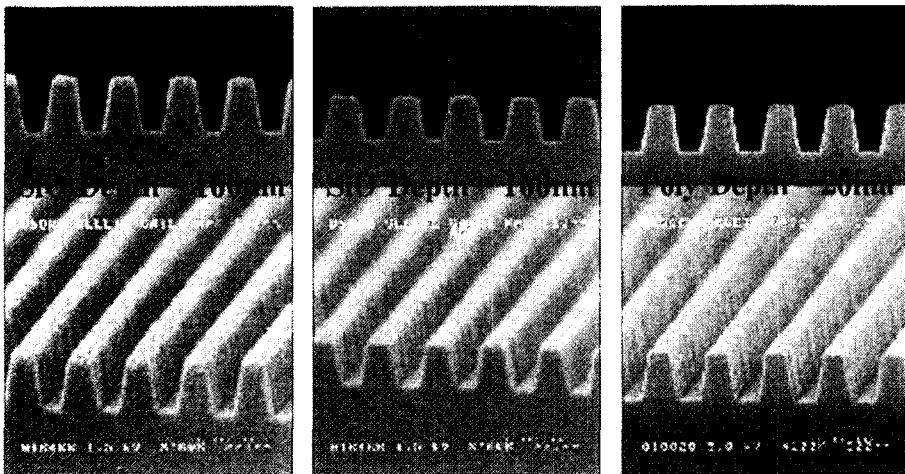


Fig. 3. F<sub>2</sub> 레지스트에 의한 게이트 패턴 형성 예(불소수지 레지스트 100 nm/SiO<sub>2</sub> 160 nm/Poly-Si 20 nm).

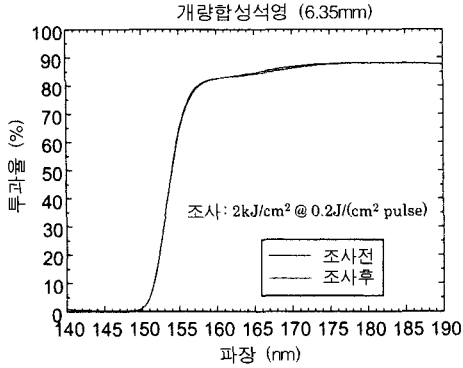


Fig. 4. 개량합성 석영 마스크의 내광성.

산소 및 수산기에 F<sub>2</sub>광이 흡수되어 광투과율이 감소하기 때문에 F<sub>2</sub>용으로는 사용할 수 없다. 이를 위해 개발 초기에는 노광기 광학계의 소재와 똑같은 CaF<sub>2</sub> 혹은 MgF<sub>2</sub> 등이 검토되었다. 그 이후 불소를 함유한 개량합성 석영이 F<sub>2</sub>광에 대해 높은 초기 투과율을 가진다는 사실이 발견되었다. Fig. 4에 표시된 바와 같이 개량합성 석영은 F<sub>2</sub>광에 대하여 내광성을 보유하고 있어 F<sub>2</sub>용 마스크 기판으로 사용될 수 있다.

차광막(패턴재료)으로는 종래의 Cr이 적용가능성이 있다고 확인되었다. Cr 차광막은 F<sub>2</sub> 레이저에 대한 내광성이 양호하여 통상 사용하는 두께(약 100 nm)에도 문제가 없다고 여겨진다. Half-tone 위상변위 마스크용 재료에 관련해서도 몇 가지의 후보가 보고되고 있다. Fig. 5에 half-tone 마스크의 해상특성이 보여지고 있는데, 개선이 필요하긴 하지만 본질적인 문제는 없는 것으로 생각된다. 펠리클에 관해서는 유기재료를 사용한 soft 펠리클과 합성 석영을 이용한 hard 펠리클이 검토되고 있다. Soft 펠리클은 1 μm의 두께에서 초기 투과율이 93%정도가 얻어졌으며, 내광성면에 있어서는 개량이 필요한 상황이다.

	100nm	95nm	90nm	85nm
Binary				
박막 Cr				
TaSiO/Ta				

Fig. 5. Half-tone 위상변조 마스크의 해상 특성.

### 3. EUV 리소그라피 기술의 개발 동향

극자외선(파장 13 nm)을 사용하는 EUV 리소그라피도 광을 사용하여 축소투영한다는 점에서는 광리소그라피의 극한 기술이라 말할 수 있다. EUV 리소그라피는 일본, 미국, 유럽에서 콘소시엄 중심의 개발이 진행되고 있다. 미국에서는 EUV LLC가 중심이 되어서 scan 방식의 test 노광 시스템을 완성하여 100 nm의 L/S 패턴의 노광에 성공하였고, 다층막 마스크 기판 결합, 마스크 패턴링, 광원의 개발이 진행되고 있다. Static printing으로는 50 nm 이하까지도 보고되어 있어 기술연장상의 면에서도 경쟁력이 있다. 일본에서는 ASET(기술연구조합초선단전자기술개발기구)이 중심이 되어 비구면 미러 계측용 간섭계, 다층막 마스크, 레지스트 프로세스의 개발이 수행되고 있다. ASET는 NA 0.3의 고 NA small field 노광기기도 개발하였다. 유럽에서는 MEDEA+프로젝트가 중심이 되어 광원, 노광시스템, 마스크의 개발이 수행되고 있다. 장비 업체에 의한 EUV 노광시스템의 개발은 빠르면 2005년경에 β-tool, 2007년경에는 양산용 장비를 생산할 것으로 계획되어 있다. EUV 리소그라피 기술의 문제는 아직도 많이 있지만, 그중에서도 마스크 기판의 결합 저감, 노광시스템의 contamination 대책과 열대책, 광원의 파워 증가이 최대 과제이다.

#### 3.1 마스크

극자외선 노광공정에 사용되는 13 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 웨이퍼 상에 축소투영할 수 있다. 이를 위해서 상이한 광학적 성질을 가지는 물질을 반복 적층하여 그 계면에서 일어나는 부분적인 반사의 보강간섭을 이용하게 된다. 기본적으로 반사도는 교대로 증착된 두 물질의 굴절율(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. 또한 반사되는 극자외선의 파장과 최대 반사도는 구성 물질의 종류와 그 다층박막의 구조인자(structure factors)에 의해 결정되게 된다. Fig. 6은 반사 다층박막의 개략도를 보여주고 있는데, Mo/Si 이중층 다층박막의 경우 약 75% 정도의 이론적 최대 반사도를 갖지만 실험치는 약 65% 내외를 보여주고

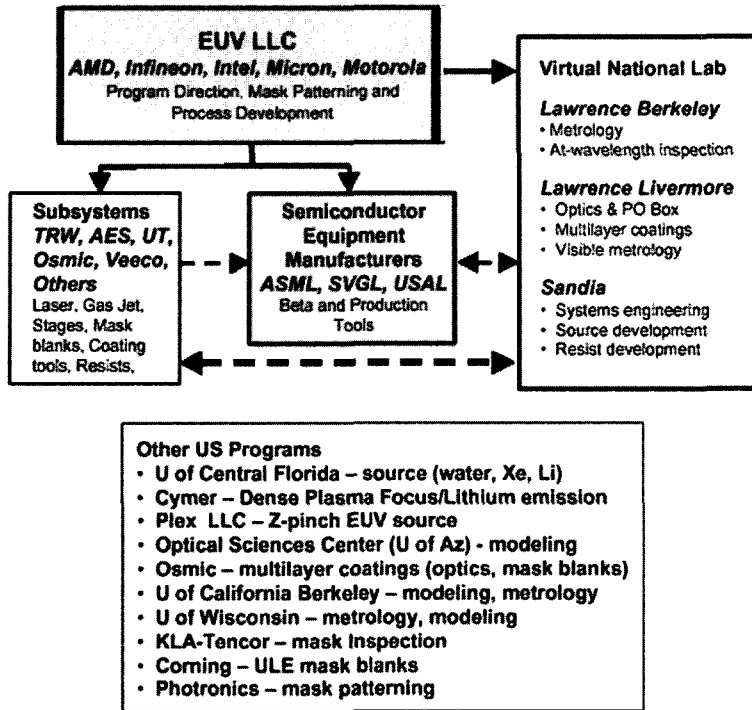


Fig. 6. 미국의 EUV 리소그라피 개발 현황.

있다. 이는 이중 박막간의 상호확산, 표면 거칠기 등을 포함하는 불균일성 요인과 다층박막 자체의 광학적 성질이나 밀도 등의 변화에 기인한 것으로, 이러한 비이상적 특성을 최소화 하기위한 개발에 의해 개선이 될 수 있을 것이다.

또 한 가지 다층박막 증착에 있어 중요한 이슈는 증착 시에 형성될 수 있는 결함의 조절이다. 전면을 scanning하는 마스크의 경우 다층박막내의 결함은 반사광의 intensity 변화를 가져와 소자의 결함으로 이어진다. 하나의 예로서 폭 40 nm에 높이 5 nm 이상의 결함은 wafer로 전사되어 불량률 유발(10% 이상의 critical dimension 변화) 한다. 따라서 다층막 제작 시 결함의 저감뿐만 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. 결함을 intensity defect와 phase defect 두 가지로 분류하고 각각에 대한 해결책을 제시하였는데, 이를 위해서 focused ion-beam을 이용한 국부적 milling과 focused e-beam을 이용한 국부적인 가열 등이 연구 개발되고 있다.

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(high inspection contrast) 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. X-선 노광기술에서 연구가 많이 이루어졌던 TaN 등의 Ta-계열 흡수체가 대체적으로 우수한 성질을 보이고 있으나 검사장비에서의 contrast 부분에서는 CrN이 더 우수하여 현재 이 물질을

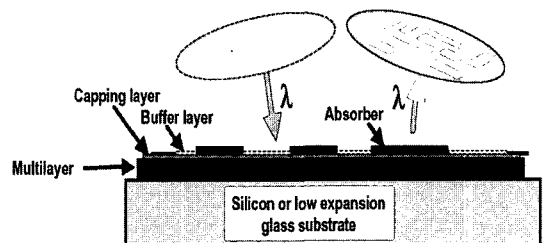


Fig. 7. EUV 리소그라피 마스크의 구조.

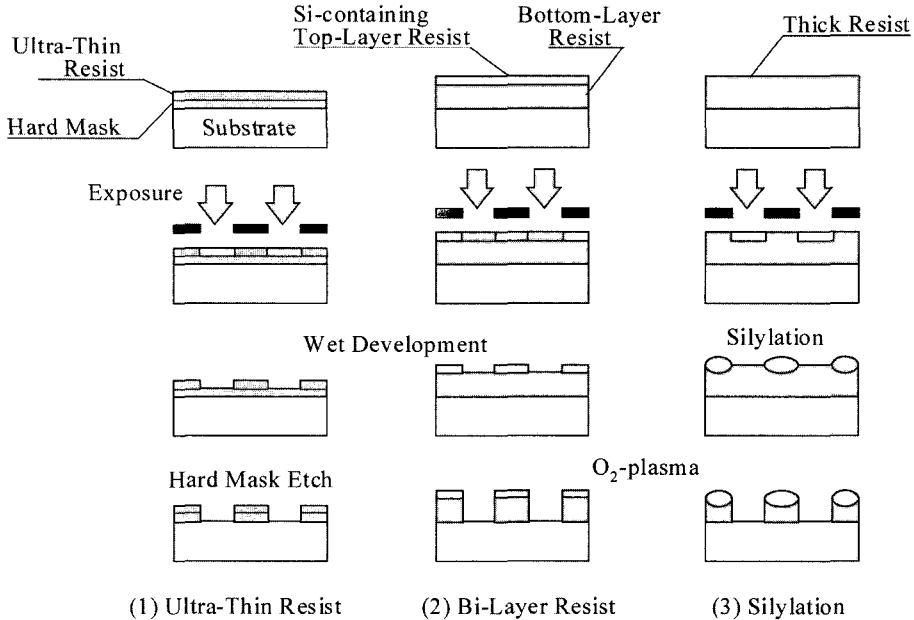


Fig. 8. EUV 레지스트 공정.

이용한 개발이 많이 이루어지고 있다. 흡수체 패턴 형성 후에는 focused ion-beam을 이용하여 잘못된 패턴을 삭제하거나 첨가하는 공정을 거치게 된다.

3.2 레지스트 및 노광공정

미국이나 유럽, 일본에서는 이미 오래전부터 차세대 리소그래피 연구동향에 맞춰 IBM, Eternal Technology Corporation, Shipley, TOKYO OHKA, Hitachi, JSR, HOECHST등의 기업들을 중심으로 EUV용 레지스트를 개발하는 연구를 진행 중에 있다. 레지스트의 sensitivity는 중요한 특성 중 하나로, 현재 알려진 DUV 레지스트인 UV6에 비해 10배 정도 높은 sensitivity가 요구된다. 이외에도 EUV 리소그래피용 레지스트는 line-edge roughness(LER), 평활도, 내에칭성, 결함, side wall slope 등의 조건이 요구된다.

EUV 리소그래피에 사용되는 레지스트 공정은 top-surface imaging(TSI)법, ultra-thin single layer(UTR)법, Bilyer(BLR)법으로 나눌 수 있는데, 미세가공용 레지스트들의 공통적인 취약점중의 하나가 내에칭성에 관한 부분이다. UTR과 BLR은 내에칭성을 향상하기 위해서 연구가 되어지고 있는 분야이다. TSI법은 EUV 리소그래피 공정 중 처음 개발된 방법으로 UTR에 비해 복잡하고 process control, CD variation 및 낮은 레지스트 sensitivity 등의 문제점을 갖고 있다. TSI에 비

해 UTR은 공정이 간단하고 현재 상용되는 공정과 가장 유사하기 때문에 각광을 받고 있다. 이 방법은 etch resistant hard 마스크위에 유기층을 코팅한다. 유기층의 두께가 얇을수록 해상능력이 증가하기 때문에 무엇보다 박막 도포성이 중요하다. BLR법은 planarizing organic underlayer를 support층으로 하고 그 위에 silicon containing layer를 코팅한 것으로 UTR에 비해 많이 연구가 되어지고 있지는 않은 실정이다.

3.3 광원

EUV 리소그래피의 중요한 특징 중의 하나가 광원 부분이다. 현재 EUVL에서 목표로 하는 생산성 (throughput)의 수준은 300 mm size의 wafer를 기준으로 시간당 80장 정도이다. 이는 현재의 DUV 리소그래피와 비슷하거나 더 높은 값인데 이와 같은 생산성 목표를 달성하기 위해서는 기본적으로 높은 power의 EUV 광원을 구현하는 것이 필요하다. 현재 목표로 하고 있는 광원의 power는 약 80W 정도이나 개발단계에서 응용이 되고 있는 LPP(Laser Produced Plasma source)와 synchrotron 광원은 각각 4W, 30W 정도의 수준에 머무르고 있어 새로운 광원의 개발이 시급한 실정이다. Table 1은 현재 개발 중인 2가지 광원에 관한 간략한 특징을 보여주고 있다.

LPP 광원은 현재 개발 단계에서 EUV를 손쉽게 구

Table 1. 플라즈마 EUV 광원의 종류와 특징

구분	PLASMA	
	LPP	DPP
원리	Plasma Electron Black Body Emission	Plasma Electron Black Body Emission
효율	Two Step Conversion Low Efficiency	Direct Conversion High Plasma Load
초기 투자비	High	Low
운영비	High	Low
비고	Risk (Debris, Material)	Higher Risk (Debris, Material)

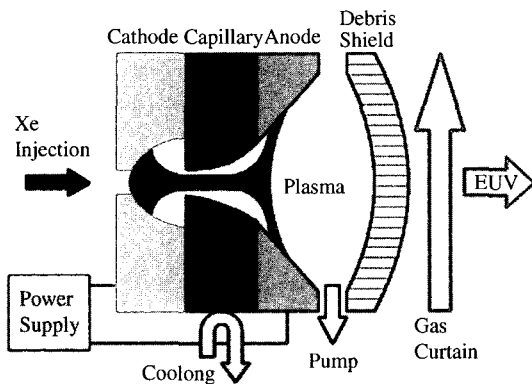


Fig. 9. DPP를 이용한 EUV 광원장치 개요.

현하여 개념을 검증하려는 용도로 개발된 광원이다. 그러나 debris로 인한 미러의 오염 등의 문제와 2단계의 에너지 변환과정이 개입된 효율의 저하로 인하여 충분한 수율을 보장할 수 없는 약점을 지니고 있어 새로운 광원의 개발 필요성이 대두되었고 이에 의해서 떠오르고 있는 후보 기술이 DPP이다. 그러나 DPP의 경우 전극의 erosion으로 인한 하드 debris가 발생하게 되고 아직 파워 목표치에 달하는 값을 내놓지 못하고 있어 많은 연구가 필요한 분야라 하겠다. 미국의 Cymer, TRW, JMAR, 일본의 Gigaphoton, 독일의 Xtreme 이외에도 다수의 회사들이 EUV 광원장치 개발에 힘을 쏟고 있다.

### 3.4 노광시스템

광학계의 성능에 의해 노광장비의 해상력이 좌우되므로 리소그라피 장비에 있어서 필수 불가결한 중요한 핵심 부분이다. 수은등의 i-선, g-선 그리고 KrF와 ArF 엑시머 레이저를 광원으로 쓰는 노광장비는 대부분 렌즈를 광학계로 채용하였다. 그러나 13 nm 영역과장의 EUV 영역에서는 물질에 대한 흡수율이 크기 때문에

이전처럼 렌즈를 사용한 굴절 광학계를 쓸 수가 없어 모두 반사경으로 광학계가 구성되어야 한다. EUVL에 쓰이는 광학계는 진공 환경에서 사용되며, 해상도를 높이기 위해서는 고도의 정밀성이 요구된다. 또한 안정적인 열적 환경에서도 열팽창이 적어야 하고 빛의 반사율이 높아야 한다. 광학계 반사경의 다층박막 결함은 마스크보다는 결함에 대한 요구조건이 덜 엄격하지만 50 nm 이하의 선폭을 결상하기 위해서는 수차가 없도록 초정밀도로 연마 가공되어야 하며, 표면 거칠기와 위상도 정확히 측정되어야 한다. 리소그라피 장비가 50 nm이하의 선을 그릴 수 있기 위해서 요구되는 반사경의 형상오차는 0.3 nm rms 미만, 표면의 거칠기는 0.1 nm rms 미만이다. 거울들의 대부분이 비구면형이기 때문에 제작과 측정이 아주 어려워 고도의 기술을 요하게 된다. 해상력을 높이려면 최적의 광학계 설계를 하고, 개개 광학부품이 완벽하게 제작되어 정확한 시스템 조립과 환경 조절이 되지 않으면 안된다. 대부분의 EUVL projection 광학계는 4개 이상의 반사경으로 이루어진다. 광원에서 발생된 빛은 condenser에 의해 집중되어 마스크에 입사되어 반사된 빛은 projection 광학계 시스템에 들어가게 된다.

미국의 VNL에서는 ETS(Engineering Test System)로 불리는 시험용 리소그라피 장비를 개발하였다. 이 ETS는 미국 EUV-LLC와의 협약으로 유럽의 EUVL 개발 컨소시엄인 EUCLIDES의 ASML에 의해 제작된  $\alpha$ -tool이다(Fig. 10). 이는 4-mirror 시스템이며 하나는 구면이고 나머지 세 개는 비구면 반사경으로 구성되었다. 반사광학계는 Mo/Si의 다층막 코팅된 반사경을 사용하였으며 13 nm의 EUV광에 대해서 65%이상의 반사율을 얻고 있다. 투영광학계 시스템은 4개의 미러로 구성되어 있으며 ring-field를 구성한다. 개구수(NA)가 0.1이며 웨이퍼의 리소그라피 영역이 24 mm×1.5 mm 인 고리조각 모양의 ring field를 가지고 있고 step-and scan 시스템으로 마스크와 웨이퍼는 동시에 서로 반대 방향으로 움직이도록 되어있다. 이와 더불어 ASML은 Carl Zeiss, Phillips, TNO 등과 함께 0.25 NA를 가진 6-mirror 리소그라피 시스템을 개발하고 있으며 미국 EUV LLC와 함께 MET(Micro Exposure Tool)를 이용하여 리소그라피 연구를 수행하고 있다. Canon은 EUV1이라는  $\beta$ -tool을 개발하고 있으며 이 시스템은 반사경 6개로 구성된 5X(NA $\geq$ 0.20,  $\sigma\leq$ 0.8, field size 22 mm × 26 mm) 시스템이며, 2005년까지  $\beta$ -tool을 개발할 예정이다. 이러한 연구들의 결과를 보면 연구 개발을 통해 반사경의 반사도가 지속적으로 개선되고 있으며 표면 거칠기도 50 nm급 패터닝을 할 수 있는

수준에까지 도달하였다. 그러나 아직도 반사경의 성능 개선을 위한 표면 연마가공기술의 개발과 함께 flare, 열팽창 문제, 산화 및 카본 침착에 의한 반사도 감소문제 등 연구해야 할 것이 많다.

#### 4. EB 리소그래피기술의 개발동향

EB 리소그래피에는 여러 가지 방식이 존재하는데, 이들은 패턴생성 자유도(flexibility)와 생산성(throughput)의 관점에서 구분할 수 있다. 종래의 point-beam 노광방식 뿐만 아니라, shaped-beam 노광방식, cell projection 혹은 block 노광방식과 같은 부분일괄 노광방식이 있는데, 어느 정도의 flexibility는 모두 가지고 있지만 EB 리소그래피의 최대 문제점인 throughput의 향상을 위한 노력이 필요하다.

현재에도 부분일괄 노광방식에 의한 노광면적의 증대 혹은 레지스트 감도 향상에 의한 저가속 EB의 응용 등의 개발이 이루어지고 있다. 한편 flexibility와 함께 throughput도 향상시킬 수 있는 방법으로 multi-beam 혹은 multi-column 방식과 같은 EB을 이용한 ML2의 개발도 이루어지고 있다. ML2에서는 패턴을 픽셀로 분해하여 다수의 묘화장치(multi-beam의 경우는 각각의 beam)에 전송하여야 한다. 이를 위해 초고속 데이터 전송, 막대한 데이터의 처리, 데이터 무결함성 보정 등이 해결 과제이다.

최근 flexibility를 유지하면서도 throughput을 향상시키는 방법으로서 EPL(Electron Projection Lithography) 혹은 PEL(Proximity E-beam Lithography)이 개발되고

있다, PEL은 등배 마스크를 웨이퍼에 근접시켜 저가속 EB을 조사하여 패턴을 전사하는 방식이다. 이 개념은 1984년경에 제창되어 최근에 이르러 새로이 주목을 받고 있는 기술이다. PEL의 최대 과제는 고정밀의 등배 마스크의 실현이라 볼 수 있다.

#### 5. EPL 기술의 개발 동향

##### 5.1 노광시스템

EPL의 역사는 1973년 전자빔 축소투영의 아이디어가 지 거슬러 올라가는데, 현재 개발되고 있는 EPL의 기본 개념은 1990년 Bell 연구소에서 제안되었다. 노광 시스템의 개발은 Lucent Technology에 의한 SCALPEL과 IBM이 제작한 전자광학계(PREVAİL)를 탑재한 Nikon의 EB Stepper로 양분되어 왔으나, 현재는 후자의 기술개발만 이루어지고 있다. 이 두가지 기술 모두 산란 contrast에 의한 결상원리, 다수의 sub-field로 이루어진 마스크를 이용한 stitch-and-scan 노광방식 등의 다수의 공통점을 가지고 있어 기본적으로는 같은 기술로 볼 수 있다.

노광 시스템의 과제는 sub-field 접속정밀도, 상보(complimentary)마스크의 접속 정밀도, 왜곡 보정 정밀도 등 여러 가지가 있으나, 그 중에서도 고해상도와 고생산성의 동시 달성이 최대의 과제이다. 고생산성의 달성을 위해서는 빔 전류의 증대가 필요하나, 빔 전류의 증대는 전자 간의 Coulomb 상호작용에 의한 해상도의 저하를 초래하게 된다. 따라서 장래의 장비에는 이의 해결을 위해 sub-field size를 확대하는 개념이 실현될 것으로 생각된다.

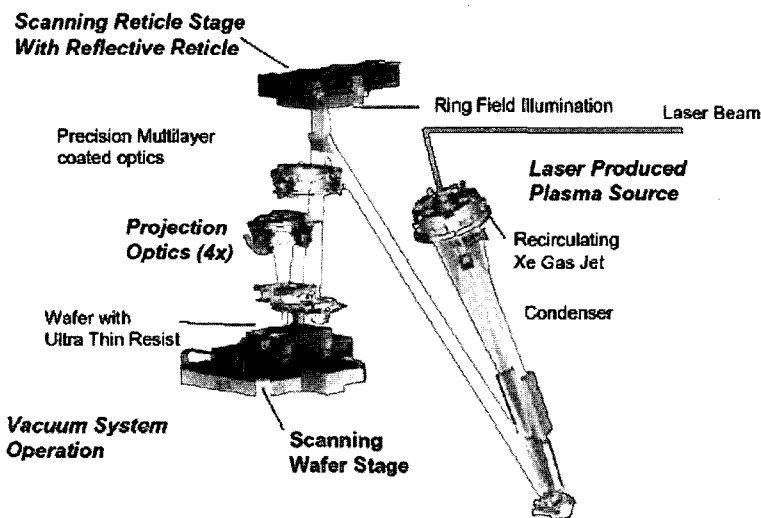


Fig. 10. EUV 리소그래피 시스템 개요도.

Table 2. EPL 마스크의 비교

마스크 종류	스텐실	후막 멤브레인	극박막 멤브레인
대표적 구조	Si/hole	W/Cr/SiN	DLC/Si/DLC
멤브레인 두께	---	100-150 nm	30 nm
산란체 두께	2 $\mu\text{m}$	30-50 nm	600 nm
패턴 특징	deep hole	얇은 산란체	멤브레인상 가공
EB 투과율	100%	< 30%	70-80%
에너지 손실	없음	~22 eV	~20 eV
해상도에의 영향	없음	큼	작음
상보 마스크	필요	불필요	불필요
결함 검사	EB 투과식	광학식	광학식 ?
비교	현시점에서 최적	장래성 의문	장래 후보

### 5.2 레지스트 및 노광공정

EPL에 사용되는 레지스트는 기본적으로는 EB 직접 묘화에 사용되고 있는 것과 동일한 화학 증폭형 레지스트이다. 그러나 EPL에서는 100 kV정도의 고가속 EB에 의한 감도저하가 심각한 문제이다. 일본의 Selete는 개발목표를 레지스트 감도 5  $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ , 해상도는 50 nm로 설정하고 있으며, 이미 목표치에 상당히 접근하고 있다. Fig. 10은 Nikon의 100 kV 시험장비에서 노광시킨 레지스트 패턴의 예이다. EB 레지스트의 내식각성은 Novolak계 레지스트와 비슷한 수준으로 별 문제가 없을 것으로 판단된다. 레지스트와 관련한 중요과제로는 레지스트 패턴의 도패(collapse) 대책과 line edge roughness(LER)의 향상이다. EPL에서는 기본적으로는 단층 레지스트 프로세스가 가능한데, Fig. 11에서 볼 수 있듯이 아주 미세한 패턴에서는 패턴의 collapse가 발생한다. 패턴 collapse의 원인은 rinse액의 표면장력으로 이에 대한 대책이 제안되고 있으나 실용적인 장치의 개발이 필요하다. EPL용 레지스트의 LER은 현재 10 nm(3 $\sigma$ )정도로, 5 nm까지 개선할 필요가 있다. EPL 레지스트는 F<sub>2</sub> 레지스트에서처럼 광투과성 관점에서 재료의 제약을 받지 않으므로 개선의 여지가 크다고 하겠다.

### 5.3 마스크

EPL에서는 산란 마스크가 사용되는데, EB stepper에 사용되는 스텐실(stencil) 마스크와 SCALPEL에 사용되는 멤브레인 마스크의 형태가 있다. 이들은 각 장치에 따라 한정되는 것은 아니며, 노광동작에 따라 호환이 가능하다. 최근 종래의 멤브레인 마스크의 beam loss와 에너지 분산에서 기인하는 문제점을 해결하기 위해 LOTUS(Light on the ultimate EPL system)이라 불리는 신구조의 극박막 멤브레인 마스크가 제안되었다.

Table 2에서 상기 세 종류의 마스크를 비교하고 있는데, stencil 마스크는 상보 마스크의 필요성, deep hole 가공, 검사 등에 있어 문제점을 보유하고 있지만, 해상도에서의 우월성으로 인해 현재로서는 EPL 마스크로서 주류를 이룰 것으로 생각된다. 장래에는 극박막 멤브레인 마스크도 스텐실 마스크와 함께 EPL 마스크에서 중요한 위치를 차지하리라 생각된다. 스텐실 마스크의 개발은 현재 마스크 메이커에 의해 진행되어 빠르면 2002년에  $\alpha$ -마스크의 개발, 2005년 경에는 생산용 마스크의 출하가 계획 중이다. EPL노광장치의 throughput을 향상시키기 위해 scan 동작의 가속도를 높여 가속 및 감속

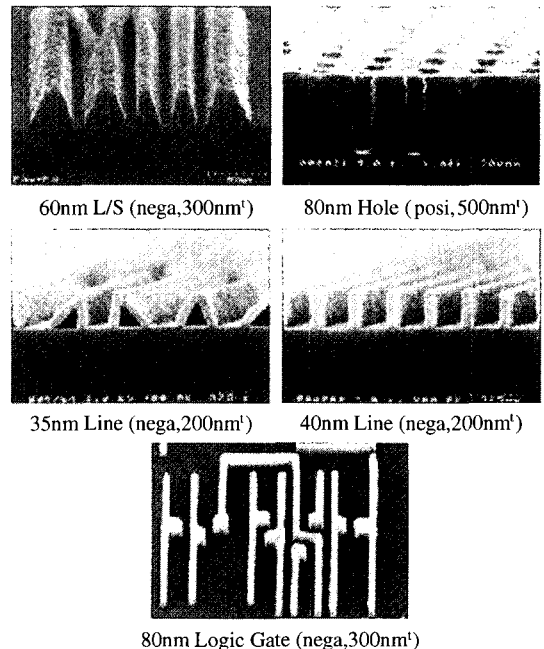


Fig. 11. EPL 노광에 의한 레지스트 패턴.



시간을 단축하는 것이 효과가 있지만, 큰 가속도는 스텐실 마스크의 패턴의 진동을 야기하여 노광 정밀도의 저하가 우려된다.

**5.4 마스크 결함검사 및 수정**

마스크 결함 검사에서는 결함의 전사성(printability) 파악이 중요하다. Fig. 12에는 프로그램 결함(즉, 의도적으로 삽입된 결함)을 넣은 마스크 패턴의 전사 결과를 보여주고 있다. Dot계 결함은 마스크 패턴 상 100 nm 이하의 경우 웨이퍼 상에서 5 nm 이하의 dimension 변화만을 일으킨다. Dimension shift계 결함은 마스크 상에서 40 nm만 되어도 광학계의 축소비율에 따라 축소 전사됨을 알 수 있다.

웨이퍼 상의 50 nm 패턴은 마스크 상에서 200 nm에 해당되므로 두께 2 μm의 마스크의 hole 패턴의 종횡비(aspect ratio)는 10에 해당된다. 이러한 패턴을 광학적으로 검사하기는 어려우므로 전자빔을 이용한 검사가 유효하다. Fig. 13에서는 투과전자를 검출 가능한

SEM(주사전자현미경)에 의한 스텐실 마스크의 검사결과를 보여주고 있다. 반사 전자로 검출하기 어려운 hole 패턴의 불량 및 high contrast의 결함이 투과전자로 검지될 수 있다. 앞으로는 검사 속도를 높인 실용적인 검사장비를 개발하는 것이 중요한 과제이다.

스텐실 마스크의 결함 수정에는 FIB(Focused Ion Beam)가 어떠한 종류의 결함에도 유용하게 사용될 수 있음이 보고되었다. 앞으로의 과제는 정밀도를 고려한 수정 시스템의 구축이라 볼 수 있다.

**5.5 데이터 처리**

EPL에서는 다수의 sub-field로 이루어진 마스크의 사용, 상보 마스크가 필요한 스텐실 마스크의 구조, 고가속 EB에 의한 웨이퍼에서의 후방산란 등의 특성 때문에 종래와는 다른 마스크 데이터의 처리가 필요하다. 여기에는 패턴 레이아웃 데이터의 sub-field 분할, 패턴의 상보분할, 근접효과보정 등이 있다. 또한 EB 스텐실에서는 패턴 의존성 공간전하효과에 의해 발생하는 결상특성의 변화(예를 들어 focus위치 변화)를 보정하기 위해 패턴 데이터로부터 노광기를 보정하는 파라미터를 계산할 필요가 있다. 이러한 EPL용 데이터 처리 시스템은 현재 개발중이며, 상기의 기능을 모두 통합하는 소프트웨어가 개발되고 있고, 상보패턴분할 소프트웨어 및 근접효과보정 소프트웨어가 별도로 개발되고 있다. 데이터 처리 부분에 있어서는 대규모의 실제 패턴 데이터에 의한 검증이 과제로 남아 있다.

**6. 결 론**

그 어느 때보다도 반도체 소자의 개발에 리소그래피 기술의 역할이 중요하게 여겨지는 오늘날, 기술적인 장벽뿐만 아니라 천문학적인 기술개발 비용 때문에 더 이상의 반도체 집적화에 대한 회의적인 의견이 종종 거론되고 있음이 사실이다. 이러한 상황에서 외국에서는 공동기반구축과 최첨단 기술개발 이라는 두 가지

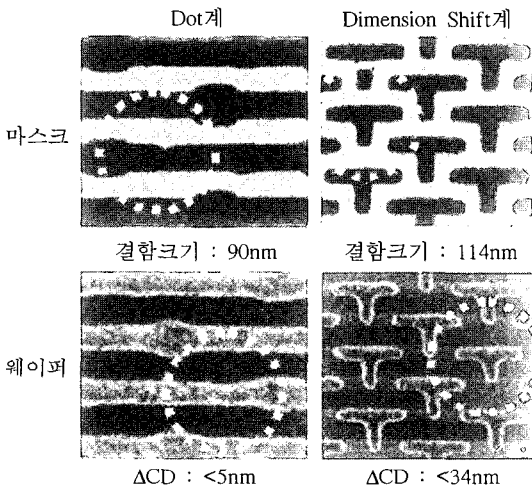


Fig. 12. 프로그램 결함을 가진 마스크의 전사 특성.

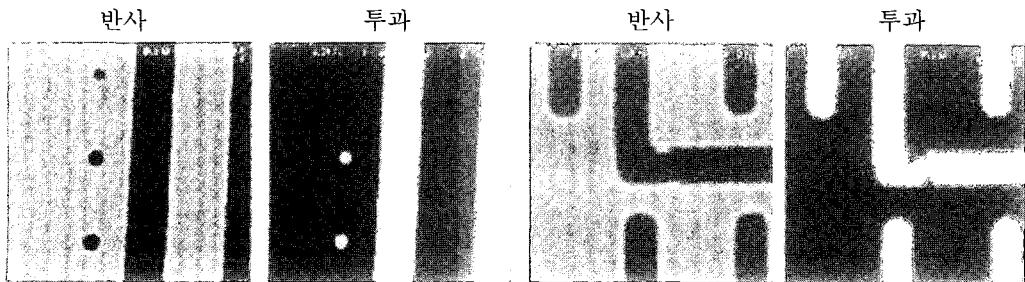


Fig. 13. 스텐실 마스크의 반사 및 투과 전자 이미지.

큰 목적을 한꺼번에 달성하기 위한 실행방법으로 컨소시엄 형태의 공동개발을 택하고 있다. 이미 하나의 기관에서 독립적으로 개발하기에는 너무나 커져버린 리소그래피 기술분야는 산학연의 협력뿐만 아니라 국제적인 공조가 없이는 불가능하게 된 것이 사실이다. 최근 우리나라에서도 늦게나마 차세대 리소그래피 개발을 위한 국가적인 지원이 태동한 것은 반도체 강국의 위치를 굳게 지키기 위해 어려운 첫걸음을 시작했다는 커다란 의미가 있다. 과연 우리나라에서는 무엇을 할 수 있으며 무엇을 개발해야 하는가를 객관적으로 판단하여, 불모지와 다름없던 차세대 리소그래피 분야에서

도 많은 발전을 이루어야 할 것이라 생각된다.

## 7. 맺음말

본 내용은 Selete에서 2002년 1월 SEAJ Journal에 기고한 내용을 참고하였으며, EUV 리소그래피 시스템에 관한 그림은 EUV-LLC의 발표내용을 인용하였음을 밝혀둔다. 또한 저자는 'EUV 리소그래피용 마스크 연구'에 대한 「테라급나노소자개발사업단」의 지원과 'EPL 마스크 연구'에 대한 「한국전자통신연구원」의 지원에 대해 감사의 뜻을 표한다.