

1. 서론

반도체 산업의 지속적인 성장이 가능했던 것은 '소자의 최소 선폭의 감소는 비용(cost per function)의 감소와 동시에 소자의 기능성을 향상 시킨다'는 특징에 근거하고 있다. 소자의 선폭은 대부분의 반도체 산업 역사에서 3년마다 70%의 속도로 감소하였으며, 최근에는 주기가 2년으로 가속되었다. 동시에 기능 당 비용은 매년 평균 25-30%의 속도로 감소하고 있다. 이러한 경향은 Moore의 법칙("칩에서 부품의 수는 매 18개월마다 두 배로 늘어난다.")이라 불리는데, 이렇게 지난 45년간 지속되어온 반도체 성장동력인 소자미세화기술은 더욱 작은 크기의 이미지를 전사시킬 수 있는 노광기술 (lithography)의 발전이 그 핵심이라 말할 수 있다.

전통적인 투사형 노광기술 (Projection lithography) 에

이러한 원리에 따라 1.2 μ m 이상의 패턴 전사에는 수은램프의 G-line (436nm) 파장을, 0.8 μ m 세대부터는 I-line (365nm) 파장을 이용하였으며, 약 0.35 μ m부터 KrF excimer laser (248nm)가 이용되어 0.13 μ m의 패턴전사까지 그 기능을 수행하였다. 90nm 세대에 들어서면서 ArF excimer laser (193nm)가 사용되기 시작하는 등 광원의 단파장화가 주된 해상도 연장을 위한 접근방법이었다.

그러나 광노광기술 (optical lithography)의 한계가 수년 앞에 다가올 것이라는 예측이 지난 80년대 중반부터 꾸준히 제기되어 획기적 신기술의 도입이 계속적으로 거론되기도 했지만, 그때마다 새로운 해상도 연장기술의 개발로 인해 (위상변위 마스크: Phase shift mask, 변형조명: Off-axis illumination 등) 지금까지도 이 광노광기술이 유용하게 양산에 적용되고 있다. 최근에는 공기보다 굴절률이 큰 액상매체를 이용하여 (초순수 n=1.44 vs. 공기

특집 X-ray 광학

극자외선 노광기술

안진호*

서 전사 가능한 최소선폭은 다음의 Rayleigh Equation에 의해 결정된다.

$$R = K_1 \frac{\lambda}{NA} \quad (1)$$

여기서 R은 최소선폭, λ 는 노광파장, NA (numerical aperture)는 렌즈의 개구수, K_1 은 레지스트 공정에 의해 결정되는 비례상수이다. 따라서 해상도를 향상 (R을 감소)시키기 위해서는 짧은 파장의 광원을 이용하거나 개구수를 증가시켜야 하는 것이다. NA는 물리적으로는 렌즈 주위 매개체의 굴절률 (n)과 렌즈의 집속각 (acceptance angle, α)과 다음과 같은 관계가 있다.

$$NA = n \sin \alpha \quad (2)$$

* 한양대학교 신소재공학부

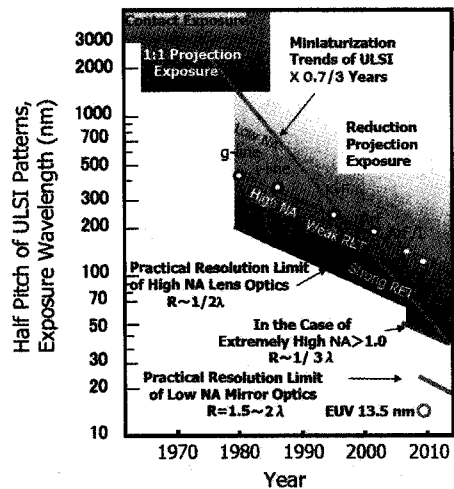


그림 1. 반도체 소자의 미세화와 노광 광원의 단파장화 추세

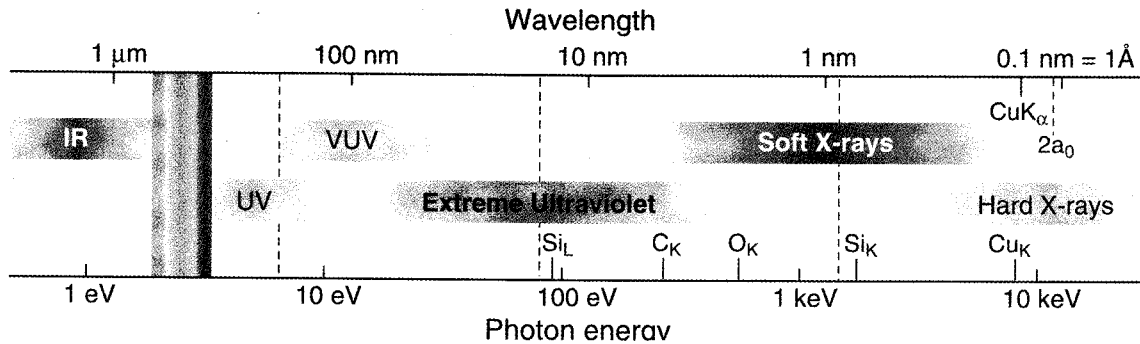


그림 2. 자외선부터 x-ray 영역까지의 전자기파 스펙트럼

$n=1$ 해상도를 연장하는 액침 (immersion) 기술이 제안 되어 양산에 도입되기 시작하는 단계에 접어들고 있다. 그러나 ArF 액침노광기술은 종래의 개념으로서는 최후의 광리소그라피가 될 가능성이 있다.

그 이후 더욱 미세한 해상도 확보를 위해서 NGL (Next Generation Lithography, 차세대 리소그라피 기술)로 불리는 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. 그러나 이 중에서 대량 생산에 양산적용 가능한 기술로는 극자외선 노광기술이 가장 유력하며 이 기술의 상용화 적용을 위해 전세계에서 연구개발 활동이 펼쳐지고 있다. 특히 본 기술의 첫 번째 수혜자는 메모리 산업을 주도하고 있는 우리나라의 반도체 소자 업체로 예상되므로 본 기술분야에 많은 전문가의 투입과 경험축적이 필요한 상황이다. 따라서 본 기고에서는 극자외선 노광기술의 전반적인 상황을 소개하여 광학 및 관련기술 분야의 전문가들의 관심을 얻기를 희망한다.

2. EUV 리소그라피 기술의 개발 동향

극자외선 (EUV)은 x-선과 자외선 중간의 전자기파로서 일반적인 스펙트럼 차트에서는 암흑영역으로 표시되기도

하였다. 그 이유인 즉 이 영역의 파장은 원자공명을 야기 하여 모든 물체에서 흡수도가 크기 때문에 생성되더라도 대부분 소멸되어 인류가 활용해 본 역사가 없었기 때문이다. 이 중간영역을 예전에는 모두 합하여 soft x-ray 영역으로 칭하기도 하였으나, 더욱 세분화하여 광자에너지 30 eV부터 250 eV까지, 파장으로는 5nm부터 40nm까지를 극자외선 영역으로 구분하며, soft x-ray는 250eV (탄소의 K-edge 바로 아래)로부터 수 keV영역으로 구분하고 있다. (그림 2) 이러한 원자공명과 광흡수의 특성 때문에 활용하기 어렵다는 단점도 있으나, 원소와 화합물을 고감도로 식별하는 등 과학기술 분야의 새로운 기회를 제공할 수도 있다.

반도체 공정 중 극미세 패터닝에 활용하기 위한 극자외선 노광기술은 약 13.5nm의 파장을 활용하도록 고안되었으며, 이 극자외선 노광기술도 광을 사용하여 축소투영한다는 점에서는 광리소그라피에 극한 기술이라 말할 수 있다. 그러나 렌즈에서의 광흡수로 인해 등축정렬 투과광학계라는 기존의 노광 시스템을 채택하지 못하고 비등축 반

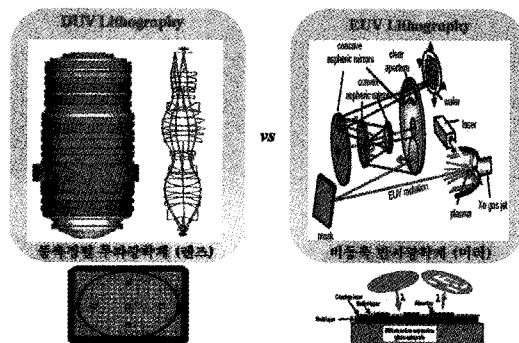
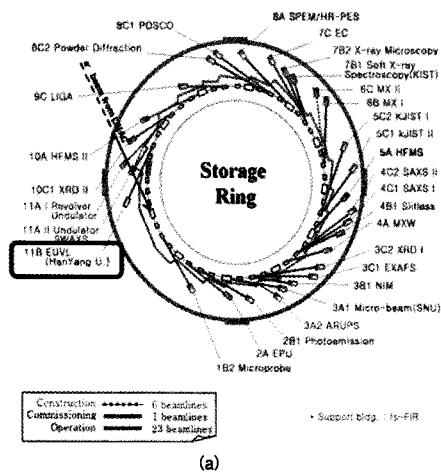
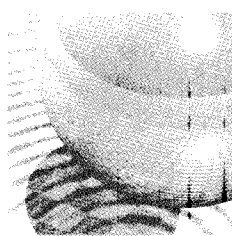


그림 3. 기존 노광기술과 극자외선 노광기술의 원리적 차이



(b)



(d)

그림 4. 포항가속기연구소의 EUVL 설비 (a) 빌라인 배치도, (b) 빌라인, (c) Micro Exposure Tool, (d) Out-gassing chamber

사광학계를 활용해야 하는 등 기존의 기술과는 과격적으로 다른 원리들을 채용하여야 한다. (그림 3)

극자외선 노광기술은 1986년 Kinoshita에 의해 처음 제안된 이후에 일본, 미국, 유럽에서 콘소시엄 중심의 개발이 진행되어 왔으며, 미국에서는 EUV-LLC가 중심이 되어 scan 방식의 test 노광 시스템을 완성하여 100nm 이하의 line and space (L/S) 패턴의 노광에 성공하였고, 현재는 SEMATECH를 중심으로 마스크와 감광제의 개발에 주력하고 있다. Albany에는 ASML에서 개발한 alpha demo tool이 설치되어 운영되고 있기도 하다. 일본에서는 ASET (초선단전자기술개발기구)와 SELETE가 중심이 되어 비구면 미러 계층용 간섭계, 다층막 마스크, 레지스트 프로세스의 개발이 수행되었다. ASET는 NA 0.3의 고 NA small field 노광기기도 개발하였으며 Nikon과 Canon은 상용 노광기를 개발 중에 있다. 유럽에서는 MEDEA+프로젝트가 중심이 되어 광원, 노광시스템, 마스크의 개발이 수행되었으며, More Moore program을 통해 ASML의 alpha demo tool을 활용한 상용기술 개발에 박차를 가하고 있다. 우리나라에서는 경쟁국에 비해 훨씬 늦은 2002년도 말부터 산업자원부의 지원으로 차세대 EUVL 신기술 개발사업이 시작되어 노광기를 제외한 핵심기술의 개발에 산학연이 협력하고 있으며, 포항가속기 연구소에 EUVL beamline을 설치하고 각 세부기술의 평가에 필요한 설비들을 구축하고 있다. Schwarzschild optics를 이용한 micro exposure tool (MET)과 out-gassing test chamber를 활용하여 마스크 및 감광제의 평

가를 진행하고 있으며, 극자외선 파장에서의 마스크 검사 장치 (혹은 EUV Microscope)인 aerial image measurement system (AIMS)와 reflectometer 등의 설비를 구축 중에 있다. (그림 4)

3. 마스크 기술

전술한 바와 같이 극자외선 노광공정에 사용되는 13.5nm 파장 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 축소 투영할 수 있다. 이를 위해서 상이한 광학적 성질을 가지는 물질을 반복 적층하여 그 계면에서 일어나는 부분적인 반사의 보강간섭(Bragg reflection)을 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. 그림 5는 극자외선 마스크의 단면사진을 보여주고 있는데 극자외선을 반사하기 위한 Mo/Si 이중층 다층막의 경우 약 75% 정도의 이론적 최대 반사도를 갖지만 실험치는 약

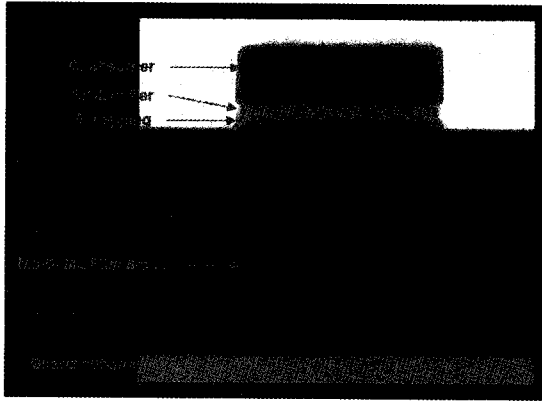


그림 5. EUV 노광공정용 마스크의 구조

65% 내외를 보여주고 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 접근방법에 의해 개선되고 있다.

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 40nm에 높이 5nm 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 반사도 저하에 의해 나타나는 intensity defect와 위상차로 나타나는 phase defect의 두 가지로 분류하고 있는데, 이들 결함을 수정하기 위한 여러 가지 기술들 (focused e-beam)이 연구 개발되고 있다.

극자외선용 마스크에서 음영의 형성은 다층반사막 위에 제작된 흡수체 패턴에 의해 형성되는데, 음영비를 높이기 위하여 흡수체 재료로 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 우수한 특성을 보이기도 한다.

극자외선 노광기술 특유의 노광특성으로 shadow effect 라는 것이 있다. 반사막을 이용한 비등축 광학계의 특성상 광의 입사가 수직이 아닌 사각입사이며 (NA=0.25에서 약 6°의 입사각), 흡수와 반사가 일어나는 표면에 단차가 존재하기 때문에 이 단차부분에서 그림자 효과가 발생한다는 것이다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법으로서 는 흡수체의 두께를 줄여 단차를 최소화 하는 방법과 더불어 조명방향과 각도를 고려해 마스크 bias를 부여하는 방법이 있다.

4. 광원 기술

EUV 노광공정의 생산성을 결정짓는 가장 중요한 요소 기술이 광원 부분이다. 현재 EUVL에서 목표로 하는 생산성 (throughput)의 수준은 300mm size의 wafer를 기준으로 시간당 100장 정도이다. 이는 현재의 DUV 리소그라피와 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 180W (in-band power at intermediate focus) 정도이며 이를 달성하기 위해 LPP (Laser Produced Plasma)와 DPP (Discharge Produced

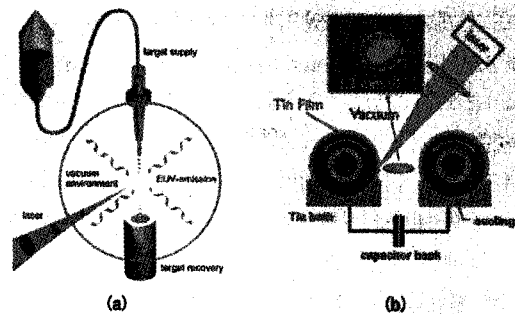
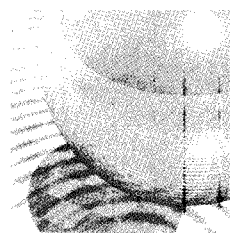


그림 6. LPP 및 DPP를 이용한 EUV 광원 장치 개요 (a) LPP source with CO₂ laser and Sn fuel (courtesy Cymer), (b) DPP source with rotating liquid Sn electrode (courtesy Philips)



Plasma) 두 가지 접근방법이 시도되고 있다. 현재 CO₂ laser를 채택한 LPP source는 DPP source에 대비하여 같은 출력을 내기 위해 필요한 power load가 4-5배 낮고, micro particle이 적으며, 생성되는 ion의 에너지가 작아 (3keV vs. 50keV) collector 수명이 길다는 장점을 보이고 있어 high volume manufacturing 장비용 광원으로의 적용 가능성이 높다.

5. 노광시스템

광학계의 성능에 의해 노광장비의 해상력이 좌우되므로 리소그래피 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 13nm 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 결합은 마스크보다는 결합에 대한 요구조건이 덜 엄격하지만 32 nm 이하의 선폭을 결상하기 위해서는 수차가 없도록 초정밀도로 연마 가공되어야 하며, 표면 거칠기와 위상도 정확히 측정되어야 한다. 리소그래피 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. ASML에서 개발된 alpha demo tool은 6-mirror, 0.25 NA, 26×33mm² field size를 갖춘 4X reduction system으로 현재 전세계에 2대가 미국 SEMATECH-North와 유럽 IMEC에 한 대씩 설치되어 있다. Nikon도 EUV1이라는 process development tool (0.25 NA, 4X)을 개발하고 있으며 2011년까지 EUV2라는 32nm production tool을 개발할 예정이다.

6. 맺음말

극자외선 노광기술은 32nm 이하급 반도체 대량생산의 유일한 lithography solution으로 주목받고 연구개발이 한창 진행 중인 신기술이다. 이러한 상업적인 needs에도 불구하고 기존의 노광기술의 concept과 획기적으로 상이한 원리를 적용하는 극자외선 노광기술을 상용화 하기 위해서는 해결해야 할 문제점들이 산적해 있다. 이러한 문제점들의 해결을 위해서는 공학적인 접근 뿐만 아니라 원리적인 접근방법이 절실히 필요한 바, 광학·기계·소재·화학 분야의 전문가들의 도움이 요구된다. 저자는 현재 국내에서 유일한 EUVL 연구개발 프로그램인 '차세대 EUVL 신기술 개발사업'을 지원하고 있는 산업자원부와 차세대 성장동력반도체사업단, 나노산업기술연구조합에 감사드리며, 함께 연구개발을 진행하고 있는 삼성전자, 동진세미캠, 아이엠티와 포항공대, 인하대, 성균관대, 부산대 등의 교수님께도 감사를 표하는 바이다.

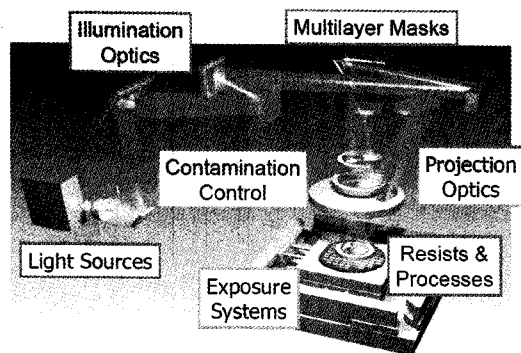


그림 7. EUV 리소그래피 시스템 개요도 (courtesy S. Okazaki)

약 력



안진호

1986년 : 서울대학교 공과대학 금속공학과, 공학사
 1988년 : 서울대학교 공과대학원 금속공학과, 공학석사
 1992년 : Univ. of Texas at Austin, Materials Sci. & Eng., 공학박사
 1989년~1992년 : UT/Austin, Microelectronics Research Center, Research Assistant
 1992년~1995년 : 일본 NEC, Microelectronics Research Lab, Researcher
 1995년~현재 : 한양대학교 신소재공학부 교수