

1. 서론 - Optical lithography

전자와 정보화의 측면에서 볼 때 지난 1947년 트랜지스터가 개발된 이후 60여년은 반도체 소자의 집적화를 통한 혁신의 연속이었다. 이러한 혁신은 Moore's law나 Hwang's law로 대변되는 반도체 제조기술의 발전에 힘입은 것이다.

반도체 제조공정 중 lithography 공정은 제작하고자 하는 반도체의 형상을 mask로 제작하여 사진을 찍듯이 실리콘 웨이퍼 위에 전사하여 집적도가 높은 회로를 대량으로 생산할 수 있도록 하는 기술이다.

전통적으로 optical lithography 기술에서는 제작하려는 회로형상의 mask(원판)을 e-beam writer를 이용하여 제작하고 사진관의 카메라와 원리적으로 대응하는 stepper를 이용하여 mask의 축소 영상을 silicon wafer 위에 전

pattern을 wafer면에 정확하게 전사해 줄 수 있는 성능을 가져야 되는데, 이를 나타내는 척도가 분해능(Resolution, Res.)과 초점 심도(Depth of Focus, DOF)이다. 분해능은 mask pattern을 전사하였을 때 분해될 수 있는 최소 크기의 척도가 되고, 초점 심도는 분해능을 유지할 수 있도록 mask와 광학계 그리고 wafer등의 상대적인 정렬을 할 때 허용 가능한 정렬 오차의 척도이며 각각 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\text{Res.} = k_1 \frac{\lambda}{\text{NA}} \quad (1)$$

$$\text{DOF.} = k_2 \frac{\lambda}{\text{NA}^2} = k_2 \left(\frac{\text{Res.}}{k_1} \right)^2 \frac{1}{\lambda} \quad (2)$$

위 식들에서 k_1 과 k_2 는 공정 factor들이고, λ 는 사용되는 광원의 파장이며, NA는 노광 광학계가 가지는 wafer

특집 X-ray 광학

EUV Lithography와 관련 광학기술

니승유*

사한 후 후처리를 통하여 집적회로를 생산하고 있다. 전자빔을 사용하는 e-beam writer의 경우 가시광이나 자외선을 광원으로 사용하는 optical lithography 기술에 비하여 전자빔의 에너지가 높기 때문에 좀 더 작은 크기의 회로 형상을 선명하게 제작할 수 있지만 mask의 2차원 형상을 광학계를 이용하여 전사하는 optical lithography에 비하여 전자빔 주사로서 영상을 제작해야 되는 단점으로 인해 생산성은 매우 낮다. 따라서 optical lithography 기술이 집적회로의 대량생산이 가능하게 해주는 결정적인 요인이다.

2. 왜 극자외선인가?

Lithography에 사용되는 광학계는 정교한 mask

쪽의 개구수(Numerical Aperture, NA)이다.

식 (1)을 보았을 때, 좀 더 정교한 pattern을 전사하기 위해서는 k_1 과 λ 가 작아져야 되고 NA는 커져야 된다. 또한, 식 (2)를 보았을 때 같은 분해능을 갖는 광학계라면 k_2 가 커지고 λ 가 작아져야만 정렬 오차가 커서 공정이 쉽게 된다. 반도체의 집적도가 증가함에 따라 보다 조밀한 형상을 전사할 수 있는 광학계가 요구되었고 이에 부응하기 위하여 노광 광학계에 사용되는 광원의 파장은 짧아지는 쪽으로 발전하여 g-line(436nm)에서 i-line(365nm)을 거쳐 KrF laser(248nm)와 ArF laser(193nm)를 광원으로 사용하기에 이르렀다. 또한 개구수도 커지는 쪽으로 발전하여서 immersion(액침) lithography의 경우에는 $\text{NA} > 1$ 이 되어서 $\text{Res.} \sim \lambda/3$ 정도의 값에 이르게 되었다. 지금까지 노광 광학계는 다양한 재질과 온도변화에

* 포항기속기 연구소

대한 안정성 등 여러 긍정적인 이유로 가시광선과 DUV 영역의 투과매질을 기반으로 하는 굴절광학계로 구성되어 왔으며 제한된 범위 안에서 반사광학소자가 사용되었다. 그러나, 광원의 파장이 짧아짐에 따라서, 투과 매질의 종류가 줄어들면서 투과도도 낮아져서 더 이상 굴절 광학계를 고도의 광학적 성능이 요구되는 노광광학계로 사용할 수 없는 한계에 다다르고 있다. 이에 따라 고려할 수 있는 방안이 보다 짧은 파장영역에서도 결상을 할 수 있는 광학계를 찾는 것이다.

그림 1은 가시광 영역에서 사용되는 광학유리를 구성하는 기본 성분 중의 하나인 SiO₂의 입사광 파장에 따른 굴절률의 변화를 나타낸 것이다. 여기서 알 수 있듯이 파장이 짧아지면 매질에 입사하는 광의 흡수율은 매우 크며 굴절률의 실수부분은 1보다 작은 값을 갖게 된다. 파장이 더욱 짧아짐에 따라서 매질에 의한 광 흡수는 작아지지만 굴절률의 실수부분은 더욱 1에 가까워지게 되어서 흡수가 적은 단파장에서도 굴절광학소자를 이용하는 것은 거의 불가능하다. 이에 따라 단파장영역에서 사용할 수 있는 광학계가 반사형 광학계이다. 한편 물질 표면에서 짧은 파장의 빛이 반사하게 될 경우 반사율은 입사각에 따라서 큰 변화를 가진다.[1] 수직 입사의 경우 반사율은 다음과 같다.

$$R_{s,1} \approx \frac{\delta^2 + \beta^2}{4} \quad (3)$$

한편, 입사각이 커지는 경우 반사면의 표면에서 전반사 현상에 의해서 높은 반사율을 얻을 수 있다. 전통적으로

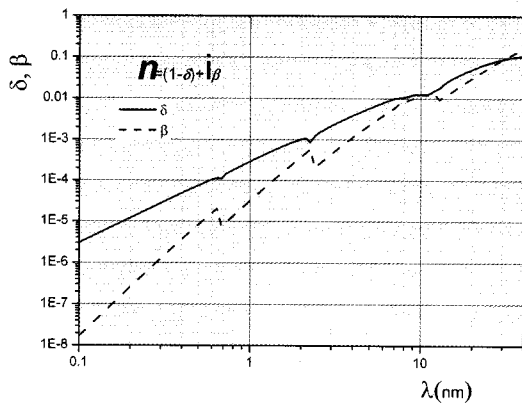


그림 1. SiO₂(density = 2.2g/cm³)의 광 파장에 따른 굴절률.

이런 현상을 이용하여 soft-x-ray 영역에서는 광선의 집속을 위하여 grazing incidence mirror를 사용하고 있다. 그러나, grazing incidence mirror의 경우 큰 수차로 인하여 결상광학계로 사용하기는 어렵다. 이런 어려움에 대하여 희망을 준 것이 다층박막거울을 사용하는 수직입사거울이다. 주기적인 격자 구조를 갖는 crystal에 의한 Bragg 반사를 이용하면 특정 파장의 x-선에 대하여 높은 반사율을 얻을 수 있다. 같은 방법으로 격자 구조가 아니더라도 주기적인 다층박막을 활용할 경우에는 입사각이 critical angle보다 작은 경우에도 높은 반사율을 가지는데 이를 이용하면 개구수를 키우고 수차를 줄일 수 있는 긍정적인 효과를 기대할 수 있다. 그러나 다층박막이 2층의 서로 다른 물질의 층으로 구성된 수직입사 거울의 경우 박막의 두께는 입사하는 광선 파장의 약 1/4정도가 되어야 하므로 사용되는 광원의 파장은 1nm보다는 커야 된다. 현실적으로 안정된 구조의 다층박막으로써 높은 반사율을 얻기 위해서는 파장이 약 10nm보다는 커야 된다.

광원의 파장이 더욱 짧아질 경우, 다층박막 제작의 어려움으로 인하여 결상광학계로써 거울을 사용하기 어렵고 굴절광학소자나 회절 광학소자의 사용도 매우 제한되어서 넓은 면적에 대하여 높은 분해능이 요구되는 lithography 공정에 지금까지 사용되어오던 광학적 lithography 기술을 사용하기는 어렵다.

이런 이유로 13~14nm 파장의 EUV를 이용한 lithography가 DUV lithography의 뒤를 이을 기술로 그 자리를 명확히 하고 있다. EUV를 이용한 lithography 기술은 사용되는 광학소자가 굴절광학소자에서 반사광

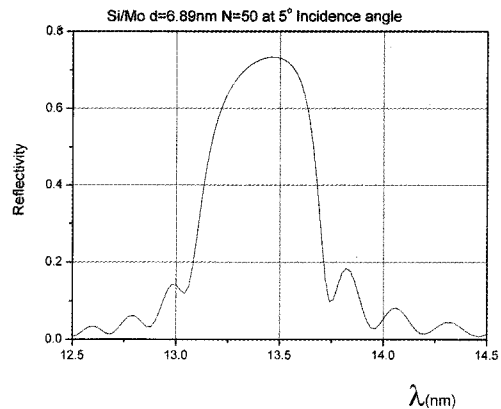
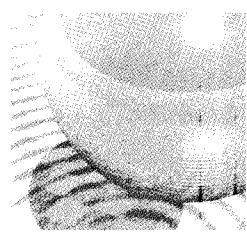


그림 2. 전형적인 Mo/Si 다층박막거울의 reflectivity curve.[2]



학소자로 바뀌는데도 불구하고 사용되는 광원의 파장이 193nm에서 13.4nm로 대폭 짧아짐에 따라서 현재 생산 라인에서 사용되는 stepper system보다 낮은 개구수의 광학계로써 요구되는 분해능을 얻을 수 있고 요구되는 초점심도가 보다 더 완화됨으로써 현재 사용되는 기술적 바탕아래서 반도체 소자의 집속도를 높여가는 행진을 당분간 지속할 수 있을 것으로 전망된다.

EUV 광원은 초기에 Xe jet을 target으로 ND:Yag laser를 이용하여 발생하는 Laser Produced Plasma source를 사용하였는데 EUV로의 전환 효율이 높은 13.4nm가 EUV 광원으로써 고착화되고 있다.

3. 광원 파장의 변화에 수반되는 변화

우리에게 친근한 x-선 발생장치나 흑체복사광원으로서 EUV 영역에서 유용한 광량을 발생시킬 수 있는 광원은 없었으며, laser도 이에 예외는 아니다. 지금까지 사용하고 있는 광원 중에서 방사광가속기(Synchrotron)와 특정 원소를 이용한 방전관(Discharge produced plasma)와 laser produced plasma등이 유용한 EUV 광원이다. DUV lithography에서 EUV lithography로 기술이 바뀌면서 기존의 기술 중에서는 그대로 활용되는 기술이 있는 반면 전반적으로 새로이 연구되어야 하는 분야가 많이 있다. 이 중 중요한 분야들이 광원, mask, photo-resist, 광학계 등이며, 또한 이 변화에 수반하여 새로이 필요해진 부분이 광학계 및 mask의 오염과 세척, 결합의 검사 등이 있다.

- 환경: EUV 광선은 공기 중에서 쉽게 흡수될 뿐만 아니라 물질에 대한 투과도가 극히 낮기 때문에 광원으로 부터 조명광학계, mask, 노광 광학계, 그리고 감광제가 coating된 Si wafer등 대부분의 장치가 서로 개방된 진공장치 속에 설치되어야 하며, 극히 얇은 고체나 기체상태의 filter만이 제한적으로 사용될 수 있다. 광원에서 발생하는 debris와 진공장치 안에 존재하는 유기 화합물은 lithography 장치를 구성하는 mask와 노광 광학계를 오염시켜 결함을 유발하거나 부품의 수명을 극단적으로 단축시킬 수 있다. 이에 따라 진공장치의 내부는 초고진공(UHV) 상태로 유지되어야 한다.
- 광원: 앞서 언급한 바와 같이 EUV lithography 공정

에 사용하고자 하는 광원의 파장은 13.4nm로써 다층박막거울의 반사특성으로 인하여 약 1.5% band 내에 광량을 극대화 할 수 있도록 LPP나 DPP 광원을 사용한다. 반도체의 생산 현장에 사용하기 위해 요구되는 광원의 세기는 파장 13.4nm 근처 1.5% in-band radiation 200W 이상이 조명광학계에 입사하여야 한다. 또한 광원에서 발생하는 debris의 저감도 중요한 과제의 하나이다.

- Mask: mask도 투과형 mask를 사용할 수 없으므로 다층박막으로 제작한 반사거울 위에 e-beam lithography로써 흡수형 pattern을 형성하여 사용한다. 다층 박막의 제조과정에 발생하는 표면 및 경계면의 결함이 생산 공정에 영향을 미치지 않도록 완벽한 다층 박막의 제조와 결함의 검사, 그리고 결함의 제거기술이 요구된다. 아울러 박막의 제작과정에 발생하는 경계면에서의 물질의 확산을 방지하고 표면의 강도를 높이기 위한 기술도 요구된다.
- Photo-resist: photo-resist는 노광 광학계에 의해 Si wafer면에 형성된 mask pattern의 영상에 따라 입사된 photon에 반응하여 화학변화를 일으켜 상을 저장하는 물질이다. EUV lithography에서 사용되는 광의 파장은 DUV의 경우에 비하여 높은 에너지를 가지므로 DUV에서 사용하던 감광제와 다른 EUV에서 적절한 특성을 가지는 감광제가 요구된다. 요구되는 특성은 EUV에 대한 감광도와 작은 pattern에 요구되는 작은 값의 line edge roughness(LER) 및 line width roughness(LWR)등 일반적 특성과 더불어 진공 중에 사용될 때 진공에 영향을 주는 out-gassing이 작아야 되는 요구도 함께 충족시켜주어야 한다.
- 광학계: EUV lithography에 사용되는 광학계는 condenser 광학계와 노광 광학계 모두 다층박막 코팅을 하여 높은 반사율을 갖는 거울로써 구성된다. 다층박막의 반사율이 최대 70%수준에 머무르기 때문에 광학계를 구성하는 반사면의 수를 최소화하여야 하며 반사면의 위치에 따라서 광의 입사각이 달라지기 때문에 다층박막은 대부분 위치에 따라서 각 층의 두께가 변화하는 graded multi-layer가 되어야 한다. 상업적인 생산 공정을 위해 통상 노광 광학계의 축소비는 1/4이 되도록 하며 한 번에 노광되는 면적

은 1"×1"이다.

4. EUV lithography장비의 개발 현황

EUV lithography는 1989년 Dr. H. Kinoshita(3)에 의해 가능성이 제시된 후 발전을 거듭하여왔다. 1990년대 소규모로 이어져 오던 EUV 관련 연구는 1990년대 말에 들어서 차세대 lithography 기술 후보로 여겨지던 x-ray proximity lithography 기술이 장래가 밝지 않다는 결론에 다다르면서 2000년대 초 부터는 많은 관심을 끌기 시작하였다. DUV lithography 기술과 여러 분야에서 나타나는 차이와 반도체 집적도의 발전 단계에 부드러운 전이를 위한 시간의 제한으로 인하여 EUVL로의 진입을 위해 필요한 기술적 변화는 한두 개의 거대 기업에 의해서 견인되기에는 다양한 기술의 융합이 필요하고 그에 걸 맞는 인력 및 자본의 투자가 요구되었다. 이에 따라서, 유럽에는 EAGLE, IMEC, CEA-LETI, 미국에는 VNL, SEMATECH, INVENT, CNSE-Albany, 그리고 일본을 중심으로 하는 아시아에는 Selete, EUVA, Leading PJ등 반도체 회사와 장비회사 그리고 부품회사 및 연구소 등으로 구성된 다양한 형태의 컨소시엄과 연구소들이 서로 협력과 경쟁을 통해 관련 기술을 발전시키고 있다.[4] 현재 연구 개발이 진행되는 상태로 보아 생산현장에 EUVL이 도입될 수 있는 시기는 2012년이 될 것으로 보인다. 반도체 장비의 개발은 ASML이 주축이 되어 이끌고 있으며, Canon과 Nikon등의 업체들이 경쟁하는 양상이다. 전체적으로 보아 모든 장비 업체들이 2012년 생산용 tool을 출고하는 것을 목표로 총력을 집결하고 있다. 목표로 하는 사양은 표 1.에 요약된 바와

표 1. 상업생산용 EUV lithography system의 목표 사양.

Resolution	32nm L/S
NA	>0.25
Magnification	1/4
Field size	26×33mm ²
결상광학계	비구면 6 거울
Wavefront error	<0.5 nm RMS
Flare	10%
Incidence angle(on Mask)	6°
Throughput*	> 50~80wph(12") @5~10mJ/cm ² sensitivity

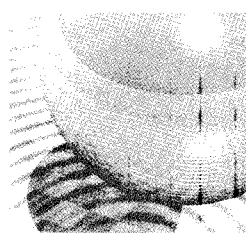
* 생산성은 장비 회사의 가정과 사양에 따라서 차이가 있다.

같다. 상업용 장비의 생산에 앞서서 2006년 ASML은 Sn DPP를 광원으로 하는 2대의 α -demo tool을 생산하여 각각 IMEC과 CNSE-Albany에 납품하였으며 2009년을 시작으로 몇 대의 PreProduction tool(β -tool)을 완성할 예정이며 그 중에는 우리나라에 설치될 장비도 포함된 것으로 알려지고 있다.[5] Nikon은 공정 개발을 위한 연구용 장비를 조립하는 중이다.[6] 이들은 모두 상업 생산에 적절한 크기의 field size를 갖고 있으며, 제반 lithography 공정의 연구는 물론 장치 자체의 성능 검증 등 여러 분야에서 상업용 장치가 생산될 때까지 활용될 예정이다. 한편, Canon은 작은 크기의 field를 갖는 장비(SFET, Small field exposure tool)를 제작하여 제반 연구에 활용 중이며 2010년을 전후하여 PreProduction tool을 제작 완료할 예정이다.[7] 반도체의 집적도가 지금과 같은 추세로 증가하게 되면 2012년 무렵에는 고굴절을 액침 DUV lithography공정과 다중 노광을 이용하여 32nm급의 형상이 제작될 것으로 보이며 이 시점에 EUV lithography 장치로써 32nm 구조를 기반으로 하는 노광장비가 도입될 것으로 예상된다. 초기의 노광 광학계는 6개의 비구면 반사경으로 구성되고 있다. 그러나, resolution을 높이기 위해 큰 개구수가 필요할 경우에는 소요되는 반사면의 수가 늘어날 것이다. 한편, 반사광학계는 상의 위치에 따라서 광량의 분포의 변화가 커지는 단점이 있는데, 이 때문에 비축상의 mask를 wafer면에 결상하도록 하고 mask와 wafer를 scan하여 정방형의 field에 대한 노광을 구현한다.

5. EUV lithography 관련 연구현황

EUV lithography기술을 도입하기 위하여 개발해야 될 기술들은 매우 다양한 분야에 걸쳐있다. 그 중에서 광학 기술과 연관이 되는 부분을 소개하면 다음과 같은 것들이다.

Mask를 구성하는 다층박막의 제작기술은 이론적으로 획득 가능하고 안정된 값의 반사율을 구현하고 있는 것으로 판단된다. 좀 더 연구가 필요한 과제로는 다층박막을 구성하는 물질들이 시간에 따라서 확산되며 발생하는 경계의 변화와 이에 따른 반사율의 변화에 대한 연구가 필요하며, 노광 공정 중에 다층박막 표면에 발생하는 훼손을 막기 위한 연구도 진행된다. 이를 위하여 다층 박막



제조 시 2가지 이상의 층으로 박막을 제조하는 것과 다층 박막의 최 상층부에 보호용 박막을 추가로 증착하는 등 다양한 시도들이 진행되고 있다. 또, 노광 공정이 진행됨에 따라서 발생하는 표면의 산화와 오염으로부터 복구하기 위하여 오존이나 이온형태의 수소, 염소 등을 이용한 시도들도 진행 중이다. 마스크를 구성하는 다층박막의 표면 혹은 내부에 존재하는 nano 입자들은 반사광의 세기나 위상을 변화시켜 제조 공정에서 결함으로 작용한다. 이런 결함을 검사하기 위하여 기존의 검사장비에 더하여 EUV를 광원으로 하는 현미경을 이용한 검사 방법들이 추구하고 있으며, 화학적 세척이나 집속된 레이저 광에 의해 발생하는 충격파를 이용한 건식 세척방법 등이 연구되고 있다. 또, 이온 빔을 이용하여 박막 내부에 존재하는 결함을 수리하는 등에 대해서도 연구가 진행되고 있다. 분해능을 증진시키기 위한 phase contrast mask의 제작에 대한 연구도 진행되고 있다.

EUVL 연구 초기에 고려되던 광원은 Xe jet을 target으로 하는 LPP나 DPP등이 연구되었으나 밀도가 높아 에너지 전환효율이 높은 Sn을 이용한 LPP와 DPP등으로 거의 이동되었다. Sn을 사용함으로써 에너지 전환효율은 증가하였으나 결국 이온상태나 고에너지 상태의 debris가 발생하는 단점은 안고 있는 상태이다. debris로부터 광학계통을 보호하기 위하여 전자기장을 이용하여 하전 입자를 차단하거나 물리적인 filter와 기계적인 chopper등을 이용한 다양한 시도들이 있다. discharge lamp의 가동에 수반되는 열과 전극의 마모는 광원의 안정성 및 수명에 영향을 주는데, 용융 주석에 담긴 회전하는 전극을 사용함으로써 효율적인 냉각과 긴 수명을 얻을 수 있다. 최근 들어서는 Laser assisted DPP로써 효율을 증대시키고 있다. 상업적인 EUVL이 시작되는 시점에 필요한 광원의 세기는 in-band(그림 2에서 반사율이 높은 파장의 폭), intermediate focus(조명광학계의 앞) 위치에서 >180W가량이 요구되고 있다. [8] 지금까지 보고된 결과에 의하면 DPP나 LPP를 이용하여 intermediate focus에 도달하는 in-band EUV power는 100W 가량이(출력 scaling된 결과에 의함) 된다.

초기 EUV lithography에 사용될 감광제에 요구되는 조건(ITRS 2006에 의함)은 세 가지이다. 요구되는 분해능은 32nm(1:1 L/S)이고 low frequency LWR(line with roughness)는 1.7nm(3 σ), 감광도는 5-15mJ/cm²이

다. 지금까지 개발된 감광제들은 위 조건 중 하나 혹은 두 가지를 동시에 만족하는 경우는 있다. 그러나 세 가지 조건을 모두 만족시키는 감광제는 아직 개발되지 않았다. 감광제의 진공 특성과 관련하여 SEMATECH에서 요구하는 outgas는 6.5×10^{-4} molecules/cm² 이하이다.

EUV lithography 장비에 사용되는 광학계통은 광원으로 부터 collector 거울과 조명 광학계, 그리고 노광 광학계 등이다. collector 광학계는 사입사 거울이 사용되기도 하지만 수직입사거울과 복합적으로 사용되기도 한다. 조명광학계와 노광 광학계는 대부분 수직입사거울을 사용한다. Mask와 같이 다층박막거울로 구성되지만 대부분 곡면으로 이루어져 있어서 graded coating이 되어있다. 반사면의 오염은 반사율의 저하를 가져오지만, pattern의 형태를 변화시킬 수 있는 mask의 오염에 비하면 심각성이 덜하다. 그렇다고 하더라도 광학계가 덜 중요하다라는 뜻은 아니다. EUV 광학계에 요구되는 요소들은 1차적인 광학특성(배율, NA등) 이외에 수차, 형상오차 코팅 등이 있다. 광학계의 형상오차는 광원의 파장이 짧아진 만큼 작아져야한다. 형상오차의 고주파 성분 중 nm 단위의 고주파 성분은 거울의 반사율에 영향을 끼치고, 1 μ m~1mm에 이르는 중간 주파 성분은 flare에 주로 영향을 준다. 반사거울의 제작 시 발생하는 제작오차에 따라 세 가지의 차이가 발생한다. 반사율이 예상보다 낮아지거나 반사율이 높은 대역의 폭이 다르거나 혹은 대역의 중심파장이 달라질 수 있다. 노광 광학계나 조명광학계 처럼 많은 수의 반사거울로 구성된 경우 반사대역의 중심파장이 일치하지 않으면 많은 광량의 손실을 초래한다. 정밀한 광학계통의 제작을 위해서는 적절한 제작 기법의 개발과 함께 제작된 소자를 정밀하게 측정할 수 있는 장치도 요구된다. 광학소자의 형상 측정을 위해서는 때에 따라서 기존의 상용 장비를 널리 사용할 수 있으나 정밀한 측정이 가능하도록 안정된 환경을 조성하고 유지할 필요가 있다. 또, 측정하고자 하는 양이 상용 장비에서 사용되는 광원의 파장에 비하여 매우 작기 때문에 측정 오차와 구별이 어려울 수 있다. 정밀한 파면 수차의 측정을 위해서 EUV 파장을 광원으로 하는 간섭계도 활용되고 있다.

제작하려는 형상의 크기가 작아짐에 따라서 mask에 제작된 형상도 매우 작다. 이에 따라서 mask에 제작된 형상의 크기에 비견되는 크기의 결함이 mask 위에 존재

할 때 이를 검출하여 제거하는 작업이 중요하다. EUV 파장의 광원을 이용하여 이러한 결함을 찾기 위해 운대판을 대물렌즈로 하는 현미경이나 EUV 주사 현미경을 사용하여 검사한다.

6. 결론

반도체 소자의 집속도를 증가시키기 위하여 lithography 공정에 사용되는 광학계를 개량하고 짧은 파장의 광원을 사용하는 등 부단한 노력이 이루어져왔다. 굴절광학소자에 의존하였던 이러한 발전들이 파장의 변화에 따라 변하는 물질의 광학적 성질로 인하여 한계에 이르렀다. 이런 어려움을 해결하기 위하여 EUV lithography에 대한 연구가 세계적으로 진행되고 있으며, 2012년에 EUV 기술을 이용한 반도체의 상업생산 가능하도록 하기 위한 노력에 의해 관련 기술이 발전 개 발되고 있다. EUV lithography 기술은 기존 기술의 연장선상에 있으면서도 광원의 파장이 대폭 짧아지고 축소 광학계의 개구수가 작아서 앞으로도 거듭되는 집속도의 증가 요구에 부응하며 발전할 수 있는 기술이 될 것이다.

참고문헌

- (1) D. Attwood, *Soft X-rays and Extreme Ultraviolet Radiation*(Cambridge University Press, Cambridge, 1999), pp.74.
- (2) S. Bajt, SPIE talk July 31, 2001, San Diego, SPIE Proc. Vol. 4506-12,
- (3) H. Kinoshita et al, *J. Vac. Sci. Technol. B7(6) P1648(1989)*
- (4) S. Okazaki, 6th EUV Symposium, Sapporo, Japan(2007)
- (5) H. Meiling et al, 6th EUV Symposium, Sapporo, Japan(2007)
- (6) T. Miura et al, 6th EUV Symposium, Sapporo, Japan(2007)
- (7) S. Uzawa et al, 6th EUV Symposium, Sapporo, Japan(2007)
- (8) V. Banine et al, 6th EUV Symposium, Sapporo, Japan(2007)

약 령



나승연

학 령

- 1989. 2 한국과학기술원 물리학과 졸업
이학박사(광학)
- 1986. 2 한국과학기술원 물리학과 졸업
이학석사(광학)
- 1984. 2 전남대학교 자연과학대학 물리학과 졸업
이학사

경 령

- 1989. 3. 1.-1991. 9. 1. 포항기속기연구소 선임연구원
- 1991. 9. 1.- 현재 포항기속기연구소 책임연구원