포토리소그래피의 기본원리

DOI: 10.3938/PhiT.20.001

안진호·이상설

Principles of Photolithography

Jinho AHN and Sangsul LEE

For more than three decades, semiconductor industry has been able to supply better device solution due to lithography technology, which enables better performance with less cost. Optical projection lithography and its extension are expected to face its technical limit in a couple of years, and now is the critical moment to get prepared for a new lithography technology. For this purpose, the principles of photolithography are introduced.

들어가는 글

세계 반도체 산업은 1947년 최초의 트랜지스터가 개발된 이후 1980년대와 90년대를 거치면서 비약적 성장을 거듭하였다. 우리나라의 반도체 산업 역시 매년 양질의 성장을 이룩하여 지난 20년간 국가 중추 산업으로서 한국 경제를 이끌어왔다. 특히 메모리 분야의 세계 시장 점유율이 50%에 육박하는 등 한국 반도체 산업은 최첨단의 반도체 제조 기술과 이의 파급기술인 디스플레이 기술을 바탕으로 최근 수년간 가속화된 정보기술혁명(Information Technology Revolution)

저자약력

안진호 교수는 미국 텍사스주립대학(UT-Austin)에서 공학박사를 취득하고 일본 NEC 연구소를 거쳐 1995년부터 한양대학교 신소재공학과에서 교수로 재직 중이다. 현재 차세대 EUV리소그래피핵심기술개발사업단과 디스플레이용노광기개발사업단 단장을 맡고 있으며 국가과학기술위원회 주력산업분과위원으로 활동 중이다. (jhahn@hanyang.ac.kr)

이상설 연구원은 한양대학교 디스플레이공학연구소에 전임연구원으로 재직 중이며, 한양대학교 석사(2007)와 박사과정(2009 수료) 연구를 통해 차세대 반도체 리소그래피 기술인 EUVL용 마스크 평가기술 개발 연구를 수행 중이다. (ssleuelsi@hanyang.ac.kr)

과 유비쿼터스(Ubiquitous) 시대를 선도해 왔다.

반도체 산업은 지난 30년간 ‘반도체 소자의 집적도는 18개월마다 두 배씩 증가한다’는 무어의 법칙(Moore’s Law)에 따라 진보를 계속해 왔다. 여기서 일컫는 진보는 소자의 고집적화 즉, 동일 면적당 메모리 용량의 증가를 의미하는데, 이러한 고집적화의 가장 핵심적인 역할을 한 것은 바로 노광기술(lithography)이라고 말할 수 있다.

노광공정은 1G DRAM 생산을 기준으로 소자가 완성되기까지 약 20~25회 적용되는 단일 최다수요 공정으로 대략 메모리 제조 공정 시간의 60% 총 생산 원가의 35%를 점하고 있다. 2010년 현재 양산을 시작한 30 nm급 2G DDR3 D램의 경우 40 nm급 DDR3 D램에 비해 약 60%의 생산성을 증가시킬 수 있었던 것처럼, 향후 반도체 소자의 design rule(DR)을 지속적으로 축소하기 위해서 리소그래피 기술은 차세대 기술로의 도약을 이루어야 할 것이다. 본 원고에서는 반도체 산업 성장의 최전선 기술인 포토리소그래피의 기본 원리를 리소그래피 엔지니어가 아니더라도 쉽게 이해할 수 있도록 기술하며, 더불어 차세대 노광 기술인 극자외선 노광 기술(EUVL)에 대해서도 간략히 설명하도록 한다.

Fig. 1. (a) Finished wafer(300 mm, Intel). (b) Individual chip (DDR2 DRAM, Hynix), cut from wafer. (c) Individual chips (DDR3 DRAM, Samsung), contained within package.

Fig. 2. The basic concept of Photolithography.

반도체 포토리소그래피 공정의 개요

포토리소그래피(Photolithography)는 원하는 회로설계를 유리판 위에 금속패턴으로 만들어 놓은 마스크(mask)라는 원판에 빛을 쬌어 생기는 그림자를 웨이퍼 상에 전사시켜 복사하는 기술이며, 반도체의 제조 공정에서 설계된 패턴을 웨이퍼 상에 형성하는 가장 중요한 공정이다. Lithography는 라틴어의 lithos(돌)+graphy(그림, 글자)의 합성어인 석판화 기술로서 인쇄기술로 쓰이다가 현재는 반도체 노광공정 기술을 통칭하는 이름으로 쓰이고 있으며 반도체 미세화의 선도 기술이다.

반도체 소자는 3차원 구조물이지만 CAD 등의 software로 복잡한 구조를 각각의 높이에 따라 2차원적인 레이어로 나누어 회로설계가 가능하다. 이러한 2차원 회로를 펜으로 일일이 그린다면 아주 많은 시간이 소요되겠지만, 그림 2에 삽화로 표현했듯이 마스크라는 하나의 원판을 정확하게 제작한 후 빛을 사용하여 같은 모양의 패턴을 반복하여 복사하면 짧은 시간에 소자의 대량 생산이 가능하다. 물론 포토리소그래피 공정만으로 3차원 구조가 만들어지는 것은 아니고 박막증착과 식각 등 여타 단위공정과 조합하여야 가능하며, 리소그래피 공정을 통해서 선택적인 보호막을 형성하여 부분적인 식각이 가능하게 한다.

빛을 사용하여 노광하는 포토리소그래피 장비의 기본적인 형태는 사용되는 광학계에 따라서 결정되는데, 크게 나누어서 근접 노광 방식과 투영 노광 방식이 있다(그림 3).

반도체 생산 초기에는 주로 밀착 노광(contact printing) 또는 근접 노광(proximity printing) 방식을 사용하였는데, 이 두 방식은 마스크와 웨이퍼 사이의 gap 유무에 따라 구분되며, 일반적으로 마스크와 웨이퍼가 균일하게 밀착되어 일정한 양의 빛이 고르게 감광제(photoresist)와 반응하는 것이 기술의 핵심이다. 그러나 접촉식의 경우 감광제가 묻어남에 따라 마스크의 수명이 짧아지는 단점이 있고, 근접 노광 역시 노광 중에 감광

Fig. 3. Schematic diagram of photolithography systems. (a) Proximity printing, (b) Projection printing.

제에서 발생하는 gas로 인하여 분해능이 급격히 감소하고 재현성이 저하될 뿐만 아니라 해상도의 한계도 문제점으로 지적되었다. 따라서 마스크와 기판의 접촉이 없어서 마스크의 수명이 길고 분해능이 높으며 생산성이 높은 장점이 있는 투영 노광 방식(projection printing)이 반도체 제조의 주력 기술로 사용되어왔다. 앞으로 본 원고에서 설명할 포토리소그래피 공정 및 원리는 projection printing 방법에 기준하여 기술할 것이다.

포토리소그래피 공정 순서

반도체 소자에 사용되는 물질들은 빛에 노출되어도 그 특성이 변화되지 않아, 노광공정을 통해 마스크 원판의 회로설계를 웨이퍼로 전사하기 위해서는 매개체가 필요한데 그 매개체를 감광제(photoresist, PR)라 한다. 감광제는 특정 파장의 빛을 받아 현상액에서의 용해도가 변하는 특성을 이용해 후속 현상 처리 과정 중 빛을 받은 부분과 그렇지 않은 부분을 선택적으로 제거할 수 있는 물질을 말한다.

Fig. 4. Concept of photoresist reaction.

Fig. 5. Flowchart of photolithography process.

일반적으로 많이 사용되는 감광제는 현상액을 이용하여 빛에 의하여 선택적으로 변화된 부분을 제거하게 되는데, 빛을 받은 부위가 현상액에 의해 잘 녹는 경우를 positive resist, 그 반대를 negative resist라고 한다(그림 4). 감광제의 특성에 대한 설명은 원고의 후반부에 조금 더 기술하기로 하고, 이러한 감광제의 선택 반응 특성을 이용한 노광공정 전반에 대해 설명하겠다.

총 7단계의 lithography 공정을 그림 5에 공정 순서대로 나타내었는데, 그 중 첫 번째 단계는 웨이퍼의 표면을 화학 처리하는 HMDS(HexaMethylDiSilazane) 처리이다. 웨이퍼 표면에 HMDS와 같은 Silazane gas 분자를 통하여 Si-O-H 형태의 친수성인 웨이퍼 표면을 소수성으로 바꾸어 주어 웨이퍼와 감광제의 접착력을 향상시킨다.

패턴이 미세해질수록 수용성 알칼리 현상액(developer)에 대한 용해 속도 차를 증대시키기 위하여 감광제를 점점 더 소수성으로 개발하는 경우가 많아지므로 극성 반발로 인한 coating 불량을 막기 위해 HMDS 처리는 필수 공정으로 자리 잡았다.

HMDS 처리 후에는 spin coating 방식을 이용하여 감광제를 코팅한다. 코팅의 일반적인 순서는 저속 회전 상태에서 감광

Fig. 6. Typical wafer processes following patterning step (a) Ion implantation (b) Etch process.

제를 뿌린 후 특정 회전수까지 가속한 후 고속으로 회전시켜 PR을 원하는 두께로 조절하며 최종 단계에 저속회전으로 PR 주변의 잔여물을 제거하게 된다.

Coating 공정 후에는 감광제에 남아있는 유기 용매를 제거하기 위하여 낮은 온도에서 soft bake를 실시한다. 잔류 용매로 인한 노광설비 및 마스크 오염을 방지하고 감광제 반응 특성을 일정하게 유지하기 위함인데 일반적으로 90–110도 정도로 가열하여 용매를 제거하고 PR의 밀도를 높여서 환경 변화에 대한 민감도를 줄이게 된다.

Soft bake 후에는 웨이퍼와 마스크를 정밀하게 정렬(align)하고 노광 공정을 진행한다. 노광이 끝나면 또 한번 bake를 실시하는데, PEB(post exposure bake)는 감광제의 확산을 통한 패턴 형성에 매우 중요한 과정이다. 특히 193 nm 파장을 이용한 ArF PR의 경우 화학 증폭형 감광제(CAR: chemical amplified resist)를 사용하는 경우가 많은데, 이 경우 PEB 과정을 통해 화학 증폭 반응이 일어나므로 PEB 온도가 PR의 감도에 미치는 영향이 매우 크다.

노광과 bake가 끝난 감광제는 일반적인 사진현상과 마찬가지로 현상 과정을 거친다. 일반적인 감광제의 현상액은 대부분 수용성 알칼리 용액을 사용하고 있으며 주 원료로는 KOH와 TMAH(TetraMethyl-Ammonium-Hydroxide) 수용액을 사용하고 있다. 일반적인 경우 현상 시간은 약 60초 정도이나 감광제의 두께가 낮아지면 현상 시간을 줄이는 것이 유리하며, 최근의 ArF immersion lithography 기술로 구현하는 미세 패턴의 경우 약 100 nm 두께의 PR이 사용되기도 하며 약 10초 정도의 짧은 현상 시간을 가진다. 실험실 수준에서는 주로 큰 통에 현상액을 담고 웨이퍼를 넣어서 흔들어 주는 dip 방식이 사용되기도 하지만 실제 양산에서는 공정 조절 능력이 좋은 puddle 방식이 사용된다. Puddle 방식은 현상 초기에 느린 속도로 웨이퍼를 spin하며 약간의 현상액을 뿌려 현상 초기에 제거된 부위를 씻어낸 후 정지 상태에서 웨이퍼 위에 developer를 표면 장력으로 잡아서 현상하는 방식이며, 현상액의 소모량이 작고

uniformity가 우수한 특성을 보인다.

현상이 끝나면 현상액을 제거하고 필요에 따라 마지막으로 hard bake를 수행한다. 우선은 순수(DI water)로 감광제를 충분히 린스하여 잔여 감광제를 제거한 후 건조를 하며, 이후 감광제의 변형이 일어나지 않도록 PR의 유리질 천이온도(T_g)보다 조금 높은 온도에서 bake를 한다. Hard bake 과정 중 노광이 완료된 감광제의 roughness가 개선되는 현상을 보인다.

그림 6은 이렇게 현상이 완료된 패턴이 어떠한 공정에 사용되는지를 보여주고 있다. 대부분의 반도체 제조 공정은 기판에 모양을 형성하고자 하는 물질의 층 (도체, 절연막, 확산 방지층 등)을 형성하고 리소그래피 공정을 통해 국부적인 감광제 보호막을 만든다. 이때 감광제는 현상을 통해 빛과 반응한 부분을 구별해 내는 것 외에, 후속하는 식각 공정에서 손실 없이 잘 견뎌야 한다. 또한 후속 공정으로 이온 주입을 하기도 하는데, 이때 감광제가 주입되는 이온의 에너지를 흡수하여 감광제 내에서 이온을 정지시켜야 한다. 식각 또는 이온 주입 공정 등이 끝나면 감광제는 소자의 특성을 이루는 데 필요가 없으므로 제거한다. 대체로 감광제는 유기 폴리머로 구성되어 있으므로 산소 플라스마에 의하여 쉽게 제거된다.

반도체 소자 제조 공정은 최소 5번 이상에 걸쳐 식각 및 이온 주입 등이 수행되며 각각의 단계에서 리소그래피 공정을 진행한다. 대부분의 반도체 제조 공정에서는 노광 공정이 20~25회 정도 반복되는데 배선과 배선을 위아래로 연결하거나, 필요에 따라 연결되지 않게 형성하여야 하므로 각 layer 간의 수평 위치를 정확히 맞추어 쌓아야 한다. 이렇게 위치를 찾는 작업을 정렬(alignment)이라고 하며, 층과 층간의 위치정확도는 overlay accuracy라 한다.

분해능(Resolution)과

초점심도(DOF: Depth of focus)

지금까지 포토리소그래피 공정에 대해 설명하였는데, 이 공정에서 가장 중요한 것은 mask pattern을 웨이퍼에 전사하는 한계인 분해능(resolution, RES)이다. 분해능은 mask pattern을 노광하였을 때 전사될 수 있는 최소 크기의 척도이다. 광학 렌즈의 분해능은 Heisenberg의 불확정성 원리에 따라 파동의 회절 현상에 의해 제한되어 있으므로 이론적으로 리소그래피에서 구현할 수 있는 최소 선폭의 한계는 사용되는 광학계와 공정에 의해 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$RES = k_1 \frac{\lambda}{NA}$$

위 식에서 k_1 은 노광설비의 공정 factor이고 λ 는 사용되는

Fig. 7. Illustration of depth of focus.

광원의 파장이며, NA는 노광 광학계가 가지는 개구수 (numerical aperture, NA)이다. 공정계수를 제외하면 좀 더 정교한 pattern을 전사하는 것은 짧은 파장을 사용하고 높은 NA의 광학계 (큰 렌즈)를 이용하면 가능하다. 그러나 실제 패턴을 반도체 공정에서 구현하기 위해서는 분해능을 유지할 수 있도록 마스크와 광학계 그리고 웨이퍼를 상대적으로 정렬할 때 허용 가능한 수직정렬 오차의 척도인 초점심도 (Depth of Focus, DOF)를 함께 고려해야만 한다. 초점심도는 다음의 식으로 주어진다.

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

초점심도가 클수록 공정 여유가 존재해서 패턴 형성이 용이해지며 위의 식과 같이 표현된다. DOF를 쉽게 이해하기 위해서 그림 7을 참고하면 분해능의 관점에서 좀 더 큰 NA의 광학계를 설계했을 때 해상도는 좋아지지만 NA^2 에 반비례하는 초점심도가 줄어들어 공정에 대한 여유도가 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

렌즈의 크기는 노광 설비 내에서 공간적인 제한과 정밀제작의 한계로 인해 NA값의 지속적인 증가는 불가능하기에, 대신에 해상도의 개선은 g-line(436 nm)에서 i-line(365 nm)을 거쳐 KrF laser(248 nm)와 ArF laser(193 nm)와 같이 점차 단파장의 광원을 사용함으로 실현해 왔다.

물론 k_1 , k_2 factor를 조정하여 해상력을 증가시킬 수 있지만 공정계수는 포토레지스트의 감도, 리소그래피 장비의 유연성, 마스크 제작의 난이도, 현상 공정의 난이도 등 복잡한 상황을 내포하고 있어서 극미세 패턴 구현이 필요한 현재의 리소그래피 기술은 해상도와 집점심도와의 “trade off”를 고려하여 더욱더 단파장(λ)을 사용하는 경향으로 발전해왔다.

리소그래피 분해능 향상 기술

반도체 소자 제조업체는 리소그래피 공정을 통해 마스크의

Fig. 8. Schematic diagram of Off-Axis illumination.^[1]

패턴과 정확히 같은 형상을 웨이퍼 상에 전사시켜야 한다. 그러나 패턴이 미세화되면서 현재의 ArF 스캐너는 193 nm 광원의 이론적인 분해능 이하의 이미지를 구현해야 하며, EUV (13.5 nm) 등 더 짧은 파장의 광원을 사용하는 차세대 리소그래피 기술의 개발이 완료되지 않은 시점에서 다양한 리소그래피 분해능 향상 기술을 통해 광학적 공정의 한계를 넘어왔다. 패턴이 미세화되면 회절과 산란 현상에 의해서 선 폭 주변에서 간섭 현상을 일으켜 원래의 마스크 패턴이 왜곡되어서 인쇄되는 현상을 야기하는데, 이러한 패턴의 왜곡을 방지하기 위하여 위상변위마스크(phase shift mask, PSM)와 근접효과보정(optical proximity correction, OPC), 비등축조명(off-axis-illumination, OAI) 등 다양한 분해능 향상 기술이 이용된다.

일반적으로 PR의 노광은 마스크를 통과한 빛의 세기에 의해 결정되므로 인쇄하고자 하는 선폭이 분해능의 한계에 도달하면 회절과 산란에 의해서 구현하고자 하는 선 폭 주변에 간섭으로 인한 그릇된 상이 맺히게 된다. 위상변위마스크는 통과한 빛의 세기뿐만 아니라 위상까지도 조절이 가능하여 웨이퍼 상에 원치 않는 회절광을 소멸간섭 원리를 통해 없애는 방법이다. 그러나 위상변위마스크는 여러 겹의 박막 층으로 이루어진 경우가 많아서 제작이 어렵고 제작 단가도 매우 높은 단점이 있다. 따라서 패턴링 경험에 의해 왜곡된 이미지가 나타나는 부분의 패턴을 인위적으로 변조시킨 마스크를 제작하기도 하는데 이를 OPC라고 한다.

마지막으로 소개하는 방법은 분해능이 아닌 노광공정의 공정 여유도에 의한 해상력을 증가하기 위해 NA를 증가시키면서 DOF를 높이는 광학적인 방법으로 비등축조명(OAI) 혹은

Fig. 9. Thickness of residual resist after exposure.

변형조명이라고 한다. 수직입사의 경우 pitch가 작은 마스크 패턴에서 회절된 광은 0차 이상의 빛이 렌즈를 통해 집광되지 못해 웨이퍼에 상을 맺지 못하는 경우가 있는데, 같은 상황 일지라도 빛의 사입사를 통해 0차항뿐만 아니라 +1 혹은 -1 차항의 빛을 렌즈로 집속시킬 수 있어 상을 맺을 수 있게 하는 해상도 향상기술이다 (그림 8).

위에서 기술한 세 가지 광학적 기술을 포함한 다양한 분해능 향상 기술을 이용하면 리소그래피의 이론적 한계보다 더 미세한 패턴을 보다 선명하게 얻을 수 있고 기존의 노광설비의 수명이 길어지므로 과도한 설비 투자비 증가를 막을 수 있다. 하지만 반도체의 설계는 지속적으로 작아지고 있는 추세이기 때문에 궁극적으로는 k_1 factor의 여유가 있고 분해능이 좋은 새로운 노광 설비 및 노광기술이 확보되어야만 한다.

포토리지스트

지금까지 포토리소그래피의 기본 원리와 공정, 광학적 원리와 해상도 증가를 위한 방법에 대해 알아보았는데 정밀한 패턴을 구현하기 위하여 정확한 굴절률과 우수한 광학 평탄도를 가진 렌즈가 중요하다면 웨이퍼 표면에서 해상력에 가장 큰 영향을 미치는 소재는 감광제이다. 앞서서도 간략히 언급했듯이 감광제는 빛을 받아 물질의 특성이 변하여 후속 처리를 통하여 빛을 받은 부분과 그렇지 않은 부분을 선택적으로 제거할 수 있는 물질을 말한다. 감광제에 빛을 쬔면 감광제가 빛과 반응하여 화학구조가 바뀌어 현상액에 반응하는 속도가 달라진다. 빛을 쬔 부분이 현상액에 녹아 나가면 positive, 빛을 받지 않은 부분이 녹아나가게 되면 negative라고 정의하며 그림 9에서 노광광과 현상 후 잔류 감광제 두께의 상관관

REFERENCES

- [1] Harry J. Levinson, *Principles of Lithography*, 2nd ed. (2004).

계를 표현하였다.

감광제는 일정량의 빛에 반응하여 현상이 되는 것이 중요한데 이는 반응한 곳과 그렇지 못한 부분의 contrast를 결정하는 요소이다. 감광제를 현상하여 보면 노광량에 따라서 현상 후의 두께가 달라진다. 이상적인 positive 감광제는 한계 노광량을 넘기면 완전히 현상되고 그 이하에서는 전혀 현상되지 않는 것이다. 그래야 마스크 상의 패턴을 똑같이 감광제 패턴으로 재현할 수 있기 때문이다. 그러나 실제 감광제는 노광되지 않은 부분도 약간씩 현상되고 노광량에 따라 현상 속도가 빨라지는 형태를 가진다. Negative 감광제는 이와 정반대의 현상 특성을 가진다. 그러므로 이상적인 감광제와 비교하여 얼마나 차이가 나는지 알 필요가 있으며 이를 위하여 고정된 현상 조건에서 노광량을 변화시켜 남은 두께를 관찰하는 방법이 선행되어야 한다.

Positive 감광제 현상 후 남은 감광제가 없어지는 최소 노광량을 E_{th} 라고 하고, 감광제 두께가 크게 변하지 않는다고 할 수 있는 가상의 노광량을 E_0 라고 하면, contrast는 두 값의 비로 결정된다. 실제 감광제는 빛을 조금만 받아도 현상 후 두께는 조금씩 감소한다. 하지만 어느 정도의 빛을 받을 때까지는 크게 변하지 않는다. 현상 후 남아있는 감광제의 두께와 노광량의 로그수에 대비하여 그린 contrast 곡선을 기초하여 노광 공정을 수행해야 한다.

그러나 기관의 반사가 있으면 정상파(standing wave) 현상이 발생하여 실제 노광 현상은 복잡해진다. 이는 PR 박막은 입사되는 빛에 대해서 웨이브 가이드 역할을 하기 때문인데, PR 내부에서 반사 및 투과된 빛은 CD 제어를 어렵게 한다. 또한 PR 내부에서 발생하는 정상파는 의도치 않은 여러 가지 노광 현상을 일으킨다. 따라서 이런 현상을 방지하기 위해 반사방지막(anti-reflective coating: ARC)을 기관 위에 증착하여 반사와 발생을 억제하는 방법을 사용하게 된다.

차세대 리소그래피 기술 - EUVL

지금까지 포토리소그래피의 기본 원리에 근거하여 지속적인 design rule 축소에 대응하기 위해 수행되는 광학계 개선 및 공정과 소재(PR)에 대해 알아보았다. 마지막으로 현재의 포토리소그래피 공정 기술이 어떻게 진화해 나가야 하는지에 대하여 잠시 살펴보면 RES와 DOF의 trade-off 특성에 대비해 보아 결국 30 nm 이하의 미세 선폭을 구현함에 있어서는 현재의 ArF immersion lithography 방법은 한계에 봉착할 것임을 추측할 수 있다. 이는 차세대 리소그래피 기술 개발의 필요성을 의미하며, 이러한 세계적인 요구에 따라 DUV lithography의 대안책으로 X-ray lithography와 Nano imprint

Fig. 10. Continuous scaling on wavelength, NA and k_1 .^[2]

lithography(NIL), E-beam lithography 등 수많은 차세대 노광공정(Next Generation Lithography: NGL)이 연구되어 왔다. 그러나 현재까지 진행되어왔던 여러 가지 차세대 노광 공정 후보기술들은 각각의 한계가 존재하여 기존의 포토리소그래피 기술의 연장 관점에서 접근했을 때 차세대 노광공정 기술로 극자외선 노광기술(Extreme Ultra Violet Lithography: EUVL)이 채택될 가능성이 현재로서는 가장 높을 것으로 예측되고 있다. EUVL을 제외한 나머지 기술의 경우 현재의 축소 투영 방식과 시스템 자체에 많은 차이가 있는데 x-ray lithography는 등배투영을 위한 membrane 마스크 제작이 대단히 어렵고, NIL과 E-beam lithography, Ion-beam lithography 등은 각각 대면적 노광시 non-uniformity 문제와 낮은 through-put 등의 문제로 차세대 노광기술 경쟁에서 한 발자국 정도 물러나 있는 것이 현실이다.

극자외선 노광기술은 대부분의 매질에 흡수되는 성질의 13.5 nm 극자외선을 사용함에 따라 마스크와 감광제, 광학계 등 노광공정의 전 영역에 걸쳐 새로운 개발이 이루어져야 하지만, 기존 포토리소그래피의 축소 투영 개념을 그대로 이어받으므로 현재로서는 대량생산이 가능한 유일한 차세대 노광 기술이다. 현재의 기술이 EUVL로 이어질 경우 그림 10에서 나타내듯 반도체 노광 기술은 EUV의 짧은 파장으로 인해 공정 여유도를 충분히 확보함과 동시에 집적도 향상을 통한 진보율 10 nm 이하 영역까지 확대할 수 있는 가능성이 충분하다.

극자외선 리소그래피는 2010년 말 현재 ASML에서 개발한 PPT(pre-production tool)의 도입을 눈앞에 두고 있으며 세계 최초의 PPT 도입 1호 국가는 대한민국으로 결정되었다. 이렇듯 EUVL 기술이 pre-production 단계를 넘어서 2012

REFERENCES

- [2] EUVL Projection on Samsung's Device Roadmap, 2009 EUVL Symposium, J. Yeo (2009).

Fig. 11. The first pre-production EUV scanner of ASML's NXE 3100.^[3]

년 이후 32 nm 혹은 22 nm 이하 DRAM에 최초로 도입되기 위해서는 몇 가지 EUV의 난제가 해결되어야 하는데 이는 파장(13.5 nm)의 변화에 따른 전반적인 EUVL의 기술적 한계를 나타내므로 간략히 언급하겠습니다.

우선 극자외선 리소그래피 기술이 기존 기술과 가장 차별화되는 부분이 바로 EUV가 대부분의 물질(기체 포함)에 흡수되는 특성에 의해 기존의 투과형 렌즈를 사용하지 못하고 반사형 다층박막 거울(multi-layer mirror)을 사용해야 하는 것이다. Mo-Si 박막이 반복하여 쌓인 다층박막 거울의 최대 반사 효율은 약 70%인데 그림 11의 EUV 리소그래피 시스템의 모식도를 보면 EUV 광원에서 시작하여 스캐너의 반사광학계와 다층박막 마스크를 통과한 EUV광원이 웨이퍼의 감광제 표면에 도달했을 때에는 이미 엄청난 양의 energy 손실이 일어난 후임을 알 수 있다. EUV가 여타 NGL 기술들에 비해 뛰어난 점은 현재의 포토공정과 같은 개념의 대량 생산이 가능한 점인데, 높은 생산성을 유지하려면 이에 적합한 high-power의 EUV 광원의 개발이 대단히 중요한 상황이다.

이와 더불어 결함이 없는 마스크의 제조 또한 중요한 기술적 장벽인데 이 마스크 결함 또한 13.5 nm 파장의 특수성에 의해 다른 파장에서는 찾아 낼 수 없는 특성을 가지고 있어 새로운 마스크 검사장치의 개발이 요구되고 있다. 아주 미세한 패턴을 구현해야 하는 레지스트에도 많은 성능의 개선이 요구되고 있으며, 해상도-감도-선평거칠기 등의 세 가지 특성

을 동시에 만족시키는 새로운 구조의 물질개발이 속속 진행 중이다.

그러나 극자외선 리소그래피 기술이 현재까지 연구 개발된 여러 가지 차세대 노광기술들 중에서 가장 실용화에 근접해 있는 현 시점에서, 광원의 개발과 함께 양산 직전 단계의 스캐너가 도입되고 마스크 검사기가 개발되어지고 있으므로 향후 1~2년 내에 기술적 돌파구가 마련되어 산업에 적용되는 것을 기대해볼 수 있다.

나오는 글

포토리소그래피 기술은 지난 30년간 반도체의 질적 양적 성장을 주도해 왔으며 본 원고에서는 리소그래피의 기본 원리와 공정, 감광제 그리고 해상력을 강화하기 위한 방법에 대한 기초를 설명하였다. 사용되는 광원이 G-line(436 nm)에서 현재 ArF(193 nm)까지 변화되어 왔지만 리소그래피의 기본 원리는 큰 맥을 같이 하였으며, 앞으로 EUV(13.5 nm)까지 스캐너가 사용하는 빛의 파장이 축소되더라도 축소 투영하는 방식의 포토리소그래피의 기본 원리와 분해능 향상 기술 등은 지속적으로 발전해 나갈 것이다.

현재 반도체 산업은 큰 흐름에서 변화를 눈앞에 두고 있다. 10여 년 전부터 지속적으로 제기되어온 design rule 축소의 한계 시점(ArF lithography 기준으로 70 nm)은 이미 ArF immersion 기술과 Double Patterning으로 인해 그 끝을 알 수 없게 진화해 왔고, 반도체 산업이 한 발자국 더 성장하기 위해서는 이 기술들의 한계점이라고 여겨지는 32 nm 혹은 그 이하의 미세 패턴을 어떻게 구현할 수 있을지에 대한 정답을 찾아야 하는 시점이 점점 더 다가오고 있다. 리소그래피 시스템에 최적화된 광학계 수정과 높은 해상력의 감광제 개발, 마스크 및 감광제 평가 기술의 발전 등을 통해 한 번 더 포토리소그래피 기술이 반도체 혁명을 주도할 수 있기를 기대해 본다.

REFERENCES

- [3] EUV into production with ASML's NXE platform, 2010 EUV Symposium, Rard de Leeuw (2010).