

리소그래피와 광학계

Optical Systems in Lithography Tool

곽창수, 정해빈

한국전자통신연구원

hbchung@cadvax.etri.re.kr

리소그래피 공정은 반도체 공정에 있어서 그 선평과 집적도를 결정짓는 핵심 공정이다. 이러한 리소그래피 공정 중 만들고자 하는 패턴을 사진전사에 의해서 형성해주는 도구인 노광장비는 광학계, 스테이지계, 제어계로 구성되는 데, 여기에서는 이 중에서 광학계를 중심으로 노광장비를 설명한다.

노광장비의 기본적인 형태는 그 사용되는 광학계에 따라서 결정되는데, 크게 나누어서 밀착 노광 방식과 투영 노광 방식이 있다. 밀착 노광 방식은 다시 원본과 작업물을 완전히 밀착시키는 완전 밀착 방식과 약간의 간격을 두는 근접 노광 방식으로 나뉜다. 투영 노광 방식에는 1:1 투영 노광 방식과 n:1 투영 노광 방식으로 나뉜다.

밀착 노광 방식은 일반적으로 형성하고자 하는 패턴의 선평이 얇은 경우에 사용되는 방식으로 현재에도 선평이 큰 반도체 소자, 평판 디스플레이, 인쇄회로기판의 제조 등에 사용되고 있다. 완전 밀착 방식은 보다 단순하여 장비제작이 쉽다는 장점은 있으나 원판과 작업물이 완전히 밀착되기 때문에 작업물에 입혀져 있는 감광제의 일부가 원판에 묻어난다든지 하여 원판이 쉽게 손상되는 문제점이 있어서 현재에는 거의 사용되지 않고 있다. 통상적으로는 수십 마이크로미터에서 수백 마이크로미터 정도를 띄워주는 근접 밀착 방식이 주로 사용된다. 이 방식에서 성능에 중요한 영향을 미치는 요소는 이차 광원의 크기를 얼마나 줄일 수 있는가와 콜리메이팅 미러 또는 콜리메이팅 렌즈의 수차 보정, 그리고 원판과 작업물 사이의 일정 거리 유지 가능 여부 등이다. 여기에서는 이들 요소가 어떤 식으로 성능에 영향을 미치는지를 살펴보도록 한다.

투영 노광 방식은 원판과 작업물의 사이가 통상 수백 밀리미터 정도 떨어져 있고, 이들 사이에 투영 광학계가 존재하여 이 광학계를 통해 등배 또는 축소 노광하게 된다. 이러한 투영 광학계의 특징으로 텔레센트릭 광학계라는 점을 들 수 있다. 즉, 이 광학계를 지난 후의 주광선은 모두 광축에 평행하게 나아가게 되며, 그 결과 상면의 위치가 바뀌더라도 배율이 일정한 값을 유지할 수 있다. 또한 광학 설계상의 특징으로는 상면 어느 위치에서나 동일한 정도의 해상력을 가질 것이 요구되며, 왜곡수차에 대해서 통상적인 광학계에 비하여 지극히 높은 수준의 수차 보정이 요구된다는 점이다. 이러한 요구는 최적화에 사용되는 목적함수를 결정함에 있어서 세심한 주의를 필요로 한다. 결과적으로 설계된 광학계는 회절에 의해서 성능이 제한되고, 왜곡수차가 거의 없는 광학계가 된다.

투영 노광 방식이 개발되던 초기에는 반도체에 사용되는 회로의 선평이 크고 작업물이 되는 웨이퍼의 크기가 작았기 때문에 등배 광학계가 사용되었다. 이러한 등배 광학계는 스테이지를 써서 주사하는

데 따르는 동작상의 어려움을 쉽게 해결해준다는 장점이 있었다. 하지만 점차 회로에 사용되는 선폭이 작아짐에 따라서 원본을 등배로 만드는 것이 어려워지게 되고 이에 따라서 원본을 확대된 형태로 만들고 이를 광학계로 축소해주는 n:1 축소투영광학계가 사용되게 되었다. 축소 비율에 있어서는 초기에는 10:1이 주로 사용되다가 그 후 5:1이 주류가 되었으며, 다시 4:1로 변해가는 단계에 있다. 하지만, 점차 반도체 회로의 패턴이 0.1 μ m대로 접어들게 됨에 따라서 원본 제작상의 어려움이 따르게 되어 다시 5:1 또는 6:1 등의 축소비율이 검토되고 있다.

일반적으로 반도체 회로 선폭의 미세화는 조명광원의 파장이 더 짧아질 것을 요구하게 되고, 이로 인해 조명 파장에서 투명한 물질을 선택하는 데 큰 제약이 따르게 되며, 엑스선 리소그래피에 이르면 엑스선이 거의 모든 물질을 투과하기 때문에 광학계 구성에 굴절 현상을 이용할 수 없게 된다. 이러한 광학재료 선정상의 제약에 의해서 사용되는 광학계의 형태도 초기의 렌즈들만으로 구성되는 굴절광학계에서 점차 렌즈와 미리의 결합으로 구성되는 반사굴절광학계로 변해가게 되었다. 또한 통상적으로 극자외선(EUV; extreme ultra-violet)이라 부르는 엑스선 리소그래피에의 적용을 위해서는 순수한 반사광학계가 연구되고 있다. 여기에서는 이들 광학계 각각의 형태를 살펴보고, 그 특징 및 장단점에 대해서 논하도록 한다.

작업물을 움직여주는 스테이지의 구동 방식은 구현하고자 하는 회로 패턴의 크기, 작업물인 웨이퍼의 크기, 광학계로 한 번에 노광할 수 있는 필드 크기 등과 깊은 관련이 있다. 투영 방식의 초기 단계인 1:1 투영 방식에서는 회로 선폭이 크고, 필드 크기가 작으며, 웨이퍼 크기도 작았기 때문에 주사형이 사용되다가 점차 웨이퍼의 크기가 커지고 선폭이 작아짐에 따라서 한 번에 한 필드만을 노광하고 이동하여 정지한 후 다시 다음 필드를 노광해주는 이른바 스텝 앤드 리피트 방식이 사용되게 되었다. 현재에는 필드 사이즈가 매우 커짐에 따라서 한 번의 노광으로는 한 필드에 해당하는 면적을 노광해줄 수 없게 되어 한 필드 내는 주사 방식에 의해서 노광해주고, 다음 필드까지의 이동은 스텝 방식으로 해주는 스텝 앤드 스캔 방식이 채택되고 있다. 이밖에 한 번의 노광으로 한 필드를 모두 노광해줄 수 없는 문제점을 해결해주기 위한 해결책으로 스티칭 방식 등도 제안되고 있으나 실용화되지는 않고 있다.

투영 노광방식에 있어서 또 다른 주요 요소는 조명광학계이다. 노광장비용의 조명 방식으로는 흔히 콤팩트 조명이 사용된다. 콤팩트 조명을 사용하면 텔레센트릭 광학계인 투영광학계와 결합하여 배경 조명을 일정한 강도로 유지할 수 있게 되어 광원의 상에 의해 조명의 불균일이 발생하는 것을 막을 수 있다. 또한 플라이즈 아이 렌즈로 구성되는 인테그레이터를 사용하여 조명 균일도를 높여주는 원리에 대해서 논하고, 플라이즈 아이 렌즈의 종류와 특징 등에 대해서 간략히 논한다. 또한 칼레이도스코프 등을 이용하여 조명 균일도를 높여주는 방법 등에 대해서도 논한다.