

광 리소그래피의 최후? The End of Optical Lithography?

오혜근

한양대학교 물리학과

hvekeun@hanyang.ac.kr

전체 반도체 소자 제조 공정의 40 %를 차지하고 있는 리소그래피 기술은 기억 소자뿐만 아니라 마이크로 프로세서, ASIC 등의 실리콘 소자와 군사 및 통신에 많이 사용되고 있는 화합물 반도체를 만드는 데도 쓰이고 있고, 요즘은 DRAM 의 리소그래피 기술들을 LCD 등의 평판 표시 장치, 디스크 헤드, 프린터 헤드 및 MEMS (Micro-Electro-Mechanical System), 나노 바이오 칩 등의 제작에 응용하여 쓰고 있다. 리소그래피 기술은 생산 원가 면에서 제일 큰 비중을 차지하고 있을 뿐만 아니라 집적소자의 초고집적화 및 초미세화를 선도하는 기술이다. 우리가 흔히 집적소자를 256 Mb DRAM 대신 250 nm 소자 혹은 1 Gb DRAM 대신 180 nm 소자 등의 최소 패턴 크기로 언급하고 있는 이유도 리소그래피 기술이 선행되어 원하는 크기를 기판에 만들어 주어야만 다음 공정들이 가능하기 때문이다.

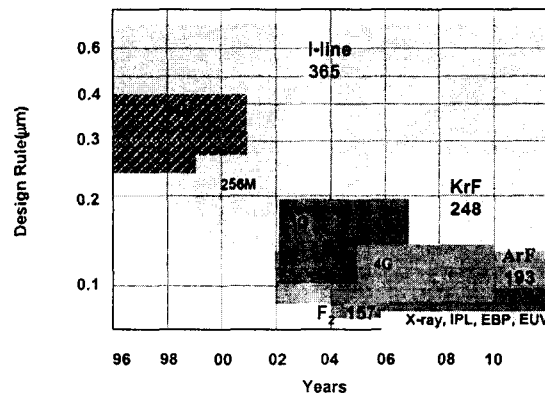
반도체 메모리 소자가 더욱 진보하여 대용량 소형으로 되어가고 있고 더불어 앞으로 handphone 이나 PDA 등에 많이 사용되게 될 나노 정보 소자도 최소 선폭이 계속 작아지고 있다. 이에 따라 패턴 형성을 위한 광 리소그래피 빛의 파장이 365 nm 에서 248 nm 를 거쳐 이제는 100 nm 급 이하의 패턴 형성을 위해서 193 nm 광 리소그래피를 적용하는 단계에 와 있다. 이 다음 세대에는 157 nm 의 파장을 이용한 광 리소그래피 기술이 적용될 것으로 기대되고 있다. 365 nm 파장의 i-line 리소그래피와는 달리 248 nm, 193 nm 에서는 화학 증폭형 레지스트 (CAR) 가 주로 쓰이게 되었다. 또한 선폭이 작아질수록 광학적 해상력 한계를 극복하기 위한 초해상도 기술들이 많이 연구되었고 이에 대한 많은 변수들이 등장하므로 이를 제대로 이해하고 분석하는 것이 리소그래피 공정을 위하여 필요해 졌다. 즉, 효율적이고 체계적이면서 빠르고 직접실험보다 경제적인 분석 및 실제 공정에도 적용할 수 있는 computer 모델링 (modelling) 기술이 등장하였다.

리소그래피를 연구하는 많은 과학 기술자들은 소자의 선폭이 계속 작아짐에 따라 사용하고 있는 빛의 파장보다 더 작은 선폭의 해상력은 얻을 수 없다는 근본적인 물리 법칙에 따라 언젠가는 선폭 형성을 위한 빛의 사용이 불가능하게 될 것이라고 믿고 빛이 아닌 다른 source를 찾으려고 하였다. 빛보다 파장이 짧은 대표적인 것들은 x-선, 전자빔 및 이온빔 등이 있고 이들을 리소그래피에 이용하려고 지난 십여년간 수많은 연구 개발이 있어왔다. 따라서 차세대 리소그래피 기술의 후보들 중 전자나 이온을 이용한 대전빔 기술과 x-선, EUV(극자외선, 파장 13 nm) 및 VUV(진공자외선, 157 nm)를 이용한 광 리소그래피 기술 등이 있으나 VUV를 이용한 기술이 100 nm 이하의 선폭 형성은 물론이고 50 nm 이하까지의 소자에도 양산에 적용될 수 있는 가장 유력한 기술이다. 빛을 이용한 리소그래피 기술은 이제까지의 모든 반도체 소자를 양산하는데 사용되었기 때문에 공정 기술자들에게 친숙한 기술이며 가장 많은 사람들이 지속적으로 연구하여 발전시켜 왔기 때문에 광 리소그래피의 연장선상에 있는 VUV 기술이 50 nm 의 소자가 양산될 2015 년까지도 주력을 이룰 것이다.

즉 250 nm 소자 양산이 1997 년에 시작되었고, 230, 210, 200 nm 로 줄면서 1999 년에 180 nm 소자의 양산이 시작되었다. 2001 년에는 최소 선폭 127 nm (KrF, 248 nm 파장) 그리고 2003 년에 90 nm (ArF, 193 nm 파장) 소자가 양산될 예정이다. 앞으로 약 10 년 후면 지금의 1 Giga bit 소자에서 1 Tera bit 소자로 갈 것이고 그 핵심에 157 nm 파장을 이용한 리소그래피가 있다. 그 동안 차세대 노광 기술 후보들 중 X-ray에 가장 많은 투자를 해 왔던 IBM이 그

기술 개발에서 손을 떼었고 (2000 년) 전자빔을 이용하는 SCALPEL 이라는 기술도 미국에서 2000 년 11 월에 포기되었으 며 EUV 만이 157 nm를 이을 유일한 선택이라고 대부분의 사람들이 생각하고 있다. 즉 97 년 말 까지만 해도 150 nm 소자를 생산하게 될 2001 년에는 광 리소그래피는 밀려날 것이라고 예상했었지만 현재 많은 사람들이 비광학적 리소 그래피 방법은 만약 쓰여진다면 2015 년 이후에나 사용될 가능성이 있거나 전혀 쓰여질 가능성이 없다고 생각하고 있다. 많은 전문가들은 193 nm 파장으로 65 nm 까지의 선폭을 만들려고 하고 157 nm 파장으로는 65 nm 이하에서 약 32 nm 의 해상력을 얻을 수 있고 13 nm 의 파장으로 ~ 16 nm 의 소자를 양산할 수 있을 것이라고 예견한다. 아래 그림은 메모리의 각 세대(64M - 4G)의 양산시기와 최소 선폭(design rule) 그리고 그에 대응되는 리소그래피 광원(365 - 157 nm, x-선, 대전빔 과 13.5 nm EUV)들을 나타내고 있다.

Trend in DRAM Production



파장보다 훨씬 작은 패턴을 만들어 주는 것이 가능했던 이유는 우리가 잘 알고 있는 광학 법칙들을 폭 넓게 잘 이용한 초해상도 기술들이 적용되었기 때문이다. 역사적으로 제일 먼저 제안되고 시도되었던 것이 소위 위상 변이 마스크(phase shift mask, PSM)를 이용한 것으로 이는 빛이 스칼라가 아닌 벡터이기 때문 에 위상이 반전되었을 때 전기장의 값이 음수를 갖는다는 간단한 원리를 이용한 것이다. 인접한 두 개의 빛이 서로 위상이 반전되게 함으로써 중간에 빛의 전기장이 0 이 되도록 해서 해상력을 향상시킬 수 있었다. 위상 변이 마스크 다음으로 나온 것이 변형 조명법(modified illumination) 혹은 사입사 조명법 (off-axis illumination, OAI)이라고 불리는 것으로 마스크에 들어오는 빛을 수직으로 하는 것이 아닌 각도를 가지고 비스듬히 마스크에 들어가도록 한 것이다. 이는 마치 회절격자에서 들어오는 빛의 각도를 크게 함으로써 분해능을 크게 해주는 것과 같은 원리로 보다 더 적은 패턴을 형성할 수 있게 되었다.

실제 소자를 만들어 주기 위해서는 아주 많은 패턴이 다양하게 작은 면적에 모여 있게 된다. 그 결과 어쩔 수 없이 주변에 있는 다른 패턴들에게 영향을 주게 된다. 예를 들어 고립된 패턴은 밀집된 패턴보다 배정빛을 주위에서 적게 받게 되고 그 결과 서로간의 선폭이 같지 않고 차이가 나게 된다. 또한 선 중앙 보다 끝 쪽이 빛을 더 적게 받아서 선의 길이가 줄어든다든가 꺾어진 패턴의 구부러진 부분에서 원치 않게 둥그런 형태가 된다. 이러한 현상들은 패턴이 컷을 경우에도 있었으나 별로 문제가 안 되었던 것이 패턴이 작아지면서 심각한 문제가 되었고 우리는 이를 광근접효과라고 부르며 이를 방지하기 위해서 마스크 의 모양을 보정(optical & process correction, OPC)해 주어야 한다. 이는 해상력을 향상시켜 주는 것은 아니나 이를 하지 않을 경우 해상도를 떨어뜨리기 때문에 초해상도 기술에 포함을 시킨다.

우리는 이러한 초해상도 기술들의 보다 근본적인 광학적 근거를 찾고 보다 더 해상도를 향상시킬 수 있는 방법들을 같이 생각해 볼 것이다. 더불어 정말로 광학적 리소그래피의 종말이 올 것인지? 온다면 언제가 될 것인지? 아니면 광학적 리소그래피 기술을 연장해서 인류가 원하는 소자들을 충분히 양산할 수 있을 것인지에 대해 살펴보고자 한다. 그 과정으로 수은등의 g-선(436 nm)과 i-선(365 nm), KrF(248 nm), ArF(193 nm), VUV(157 nm) 및 EUV(13.5 nm) 등으로 짧아지고 있는 광원들에 대해 그 가능성과 문제점 등을 알아볼 것이다.