

나노소자 제조를 위한 Optical Lithography 최근 동향: Immersion Lithography

고창현
한국에너지기술연구원

1. 서론

나노소자를 형성하는 방법을 크게 두 가지로 분류하면 물질의 기본 단위인 분자들을 모아서 나노소자를 만들고자 하는 화학적 접근법 (bottom-up process)과 단결정이나 크기가 매우 큰 입자를 잘게 쪼개서 나노소자를 형성하는 물리적 접근법 (top-down process)이 있다. 화학적 접근법은 최근에 많은 진전을 보이고 있으나 아직 상용화에 이르기까지는 더 많은 발전이 필요하다. 반대로 패턴 형성 및 식각에 의한 물리적인 접근은 분자수준에 근접하기에는 패턴 크기가 수십 nm로 너무 크다. 하지만 높은 생산성으로 인해서 이미 실용화되었으며 Moore's law, Hwang's law 와 같이 2-3년을 주기로 전자소자의 크기를 절반으로 줄이는 엄청난 기술발전을 이루고 있으므로 나노소자의 구현 및 실용화에 급속히 다가서고 있다 [1]. 본 기고에서는 이러한 물리적 방식에 기초한 리소그래피법의 내용과 최근 동향을 정리하고자 한다. 특히 DRAM, flash memory를 실제로 생산하고 있는 반도체 산업에서 현재 사용되고 있으며 다음 세대의 제품까지 적용하고자 하는 광학 리소그래피법 (optical lithography)의 최신 동향인 immersion lithography에 대해서 소개하고자 한다.

2. Optical lithography의 최근 동향

A. 기본 개념Patterning 원리:

리소그래피법(lithography)의 사전적인 의미는 “단결정 실리콘 웨이퍼 표면에 일정한 모양의 패턴을 만들어서 집적회로를 형성하는 하는데 사용되는 공정”이다. 반도체 공정에서는 이러한 리소그래피법을 이용해서 Si, SiN, SiO₂, 등과 같은 다양한 물질로 이루어진 패턴을 형성한다. 그림1은 광학 리소그래피법을 이용해서 다양한 물질로 이루어진 패턴의 형성하는 과정을 나타냈다. 감광성 고분자인 photoresist (PR)이 빛에 노출되면 현상액 (development solution, 2.38 wt%

tetramethyl ammonium hydroxide 수용액)에 녹는다. 따라서 원하는 부분에만 빛을 노출시키고 현상하면 원하는 pattern을 형성하며 이렇게 PR에 의해서 형성된 패턴을 일종의 마스크로 이용해서 식각 (etching)하게 되면 PR이 아닌 다른 재료로 이루어진 패턴을 얻을 수 있다.

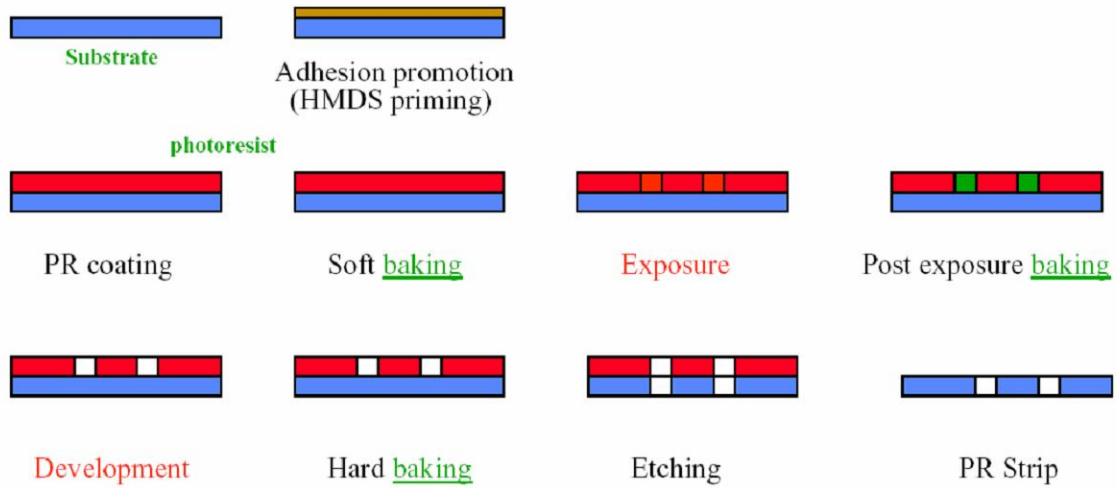


그림1 일반적인 광학 리소그래피법의 패턴 형성 과정 [2]

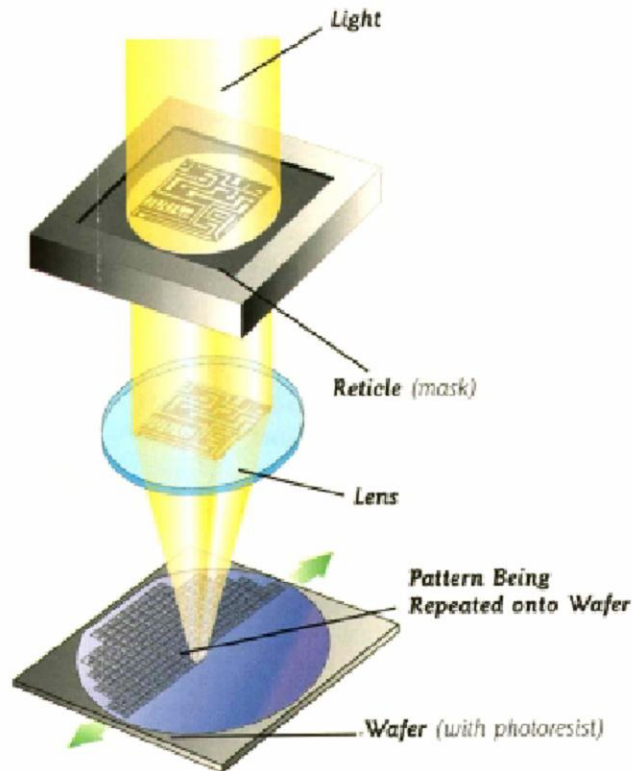


그림2 일반적인 lithography 장비에서 이루어지는 Patterning의 기본 과정

나노미터 크기를 지니는 패턴을 형성하기 위해서는 그림1의 모든 과정이 다 중요하지만 특히 PR이 빛에 노출되는 과정인 “노광” (exposure)이 패턴크기를 결정하는 가장 중요한 요소이다. 이러한 노광을 구현하는 방법을 구체적으로 표현한 것이 그림2 이다.

그림2와 나타난 바와 같이 mask에 미리 식각된 패턴이 렌즈를 거쳐서 PR이 코팅된 wafer 표면에 1/5로 축소되어서 전달된다. 이러한 과정에서 패턴의 최소 크기를 결정하는 resolution은 Rayleigh equation (식(1))과 같이 표현된다.

$$\text{Resolution} = k_1 * \lambda / \text{NA} \quad (1)$$

k_1 : 공정 상수, λ : 사용된 빛의 파장, NA: numerical aperture (렌즈의 능력)

수십 nm 크기의 나노소자를 제조하기 위해서는 공정상수(k_1)와 사용하는 광원의 파장(λ)을 줄이고 렌즈의 능력인 NA를 증가시켜야 한다. 다음에 소개되는 3개의 절을 통해서 현재까지 진행되고 있는 optical lithography법의 패턴의 최소크기 구현을 위한 resolution 향상법을 공정상수, 광원의 파장, NA 향상법의 관점에서 정리하였다.

B. 파장 감소를 통한 Resolution 향상

Resolution 향상을 위해서 가장 중요한 요인은 광원의 파장을 감소시키는 것이다. 표1은 광원의 파장 감소와 최소선폭(minimum linewidth)의 변천과정을 나타냈다. 선폭이 350nm 수준일 경우에는 Hg arc lamp에서 436, 365 nm 파장의 빛을 이용해서 노광했지만 선폭이 계속 줄어들면서 KrF, ArF excimer laser를 이용하고 있다. 향후 F₂ excimer laser를 이용해서 157 nm 까지 파장을 줄이려 하고 있으나 기존 quartz (SiO₂)로 이루어진 렌즈와 mask 대신에 CaF₂로 이루어진 렌즈와 mask를 사용해야 한다. EUV를 사용해서 광원의 파장을 13.5 nm 까지 줄일 경우 해당 빛을 흡수하지 않는 물질이 존재하지 않으므로 기존 렌즈체계로 구현할 수 없어서 reflective mirror system으로 전환해야 하므로 노광기 설계 및 제조에 큰 변화가 필요하다.

Year	Minimum Linewidth (nm)	Wavelength (nm)	Light Source
1986	1,200	436	Hg arc lamp (G-line)
1988	800	436/365	Hg arc lamp (I-line)
1991	500	365	Hg arc lamp
1994	350	365/248	I-line/KrF excimer laser
1997	250	248	KrF excimer laser
1999	180	248	KrF excimer laser
2001	130	248	KrF excimer laser
2003	90	248/193	KrF/ArF excimer laser
2005	65	193	ArF excimer laser
2007 (예상)	45	193	ArF excimer laser
?	?	157	F ₂ excimer laser
?	?	13.5 (EUV)	EUV, Laser or discharge of liquid target

표1. 최소 선폭, 광원의 파장 및 종류의 변천과정

C. 공정 상수 감소를 통한 Resolution 향상

공정상수인 k_1 은 phase shift mask, off-axis illumination, optical proximity correction 등과 같은 resolution enhancement technology (RET)와 PR의 특성에 좌우된다. 일반적으로 k_1 은 최소 한계는 0.25 인 것으로 알려져 있으며 2007년까지 곧 0.3 수준에 도달 할 것으로 예상하고 있다. RET에 대한 자세한 내용은 본 기고의 범위를 넘어서는 것이므로 생략하도록 하겠다.

D. NA 증가에 의한 Resolution 향상

NA는 그림3과 같이 렌즈의 accepting angle (α)와 렌즈를 둘러싸고 있는 매질의 굴절율(refractive index)에 의해서 결정되며 다음의 식(2)와 같이 표현된다.

$$NA = n \sin \alpha = d / (2f) \quad (2)$$

d: 렌즈 지름, f: 초점 거리, α : accepting angle, n: 굴절율

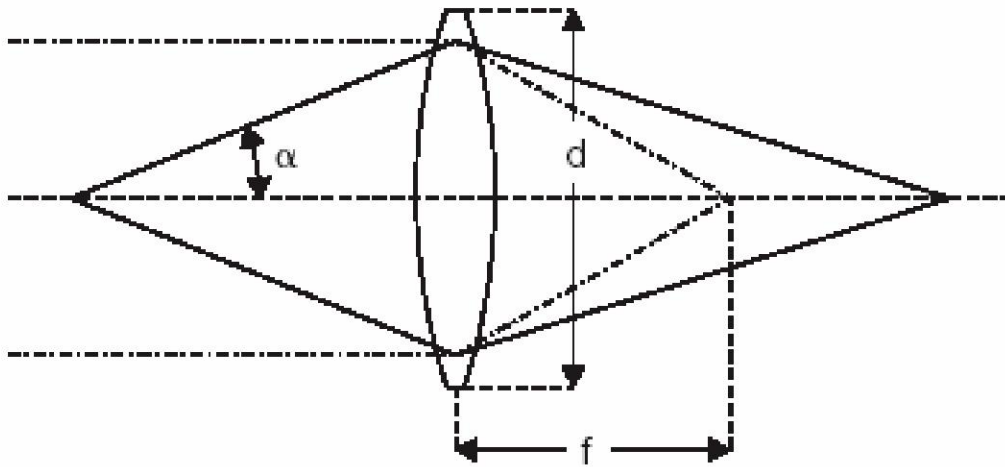


그림3. Numerical aperture의 정의

렌즈의 acceting angle (α)를 늘리기 위해서는 렌즈 바깥쪽까지 수차가 없이 잘 만들어져야 한다. 하지만 현재 렌즈생산 기술로는 렌즈구경의 93%까지 사용하는 것이 한계인 것으로 알려져 있다. 렌즈의 바깥쪽까지 수차가 없는 완전한 렌즈를 사용한다고 해도 공기 중에서 렌즈의 NA는 1을 넘지 못한다. 하지만 굴절율 (n)이 1보다 크고 193 nm 파장의 빛에 대해서 흡수가 적으며 PR과 친화도가 좋으며 균일한 매질을 사용할 경우 NA는 굴절율에 의해서 증가된다. 놀랍게도 순수한 물은 $n \approx 1.47$ 이며 [3], 실제 작동 조건인 6 mm 두께의 물층을 통과해도 흡수도는 5% 미만이므로 [4] 위의 조건을 만족시키는 매질로 판단된다. 물을 매질로 이용하고 공정상수를 0.25, $\sin \alpha$ 를 0.93으로 가정하고 ArF 광원을 사용할 경우 resolution은 35 nm 인 것으로 나타났다. 이렇게 공기가 아닌 매질을 사용해서 NA를 증가시키고 나아가 resolution을 증가시키는 방법을 immersion lithography라 명명하고 있다. 이러한 immersion lithography의 구현은 그림4와 같다 [5].

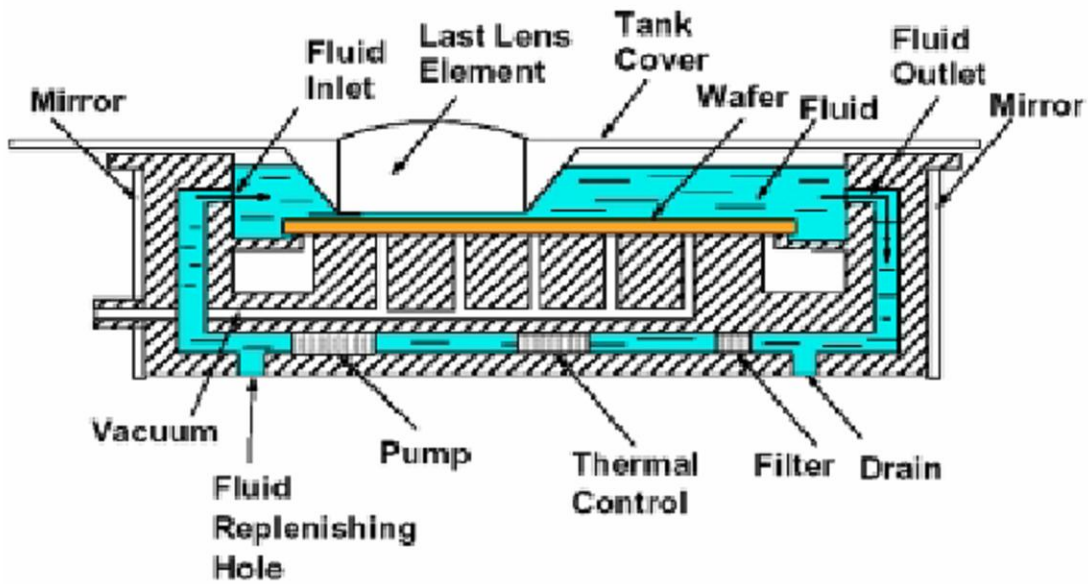


그림4. 렌즈와 wafer사이에 매질이 포함된 Immersion lithography설비 개략도[5]

그림5는 공정상수 k_1 과 NA 에 의한 최소 단위 패턴의 크기를 나타냈다. ArF 기반의 lithography 공정에서 k_1 는 0.3 이며 이를 감소시키기가 매우 힘들다. 하지만 물을 이용한 immersion lithography에 NA를 1.4 까지 증가시켜면 45 nm 크기의 패턴까지 구현이 가능하다고 예측하고 있다.

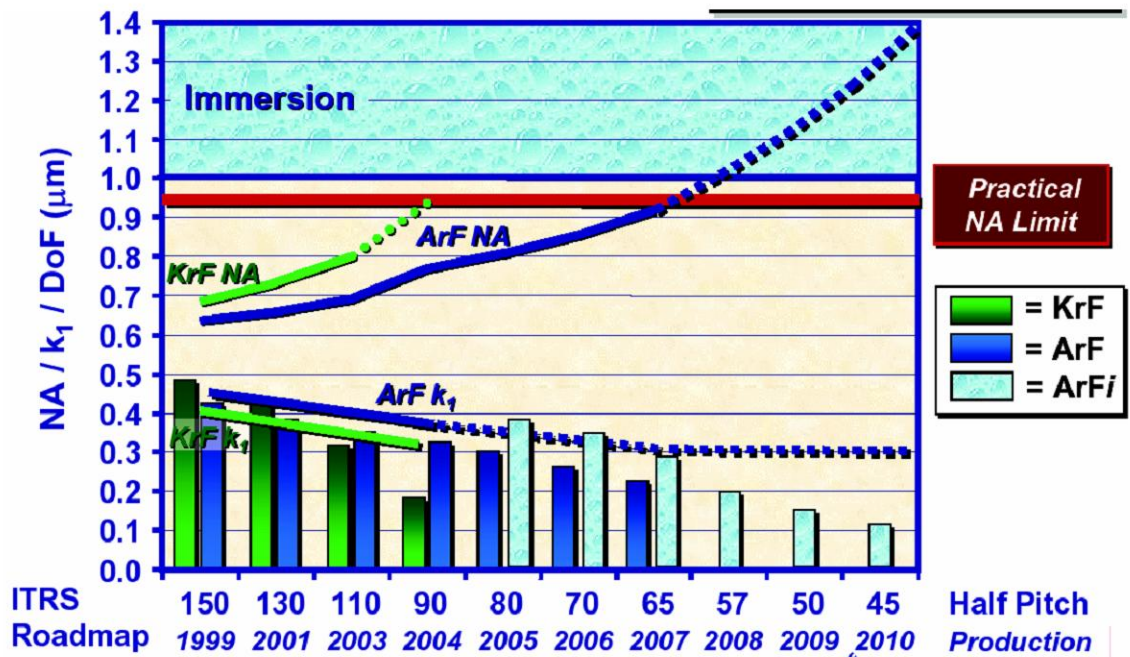
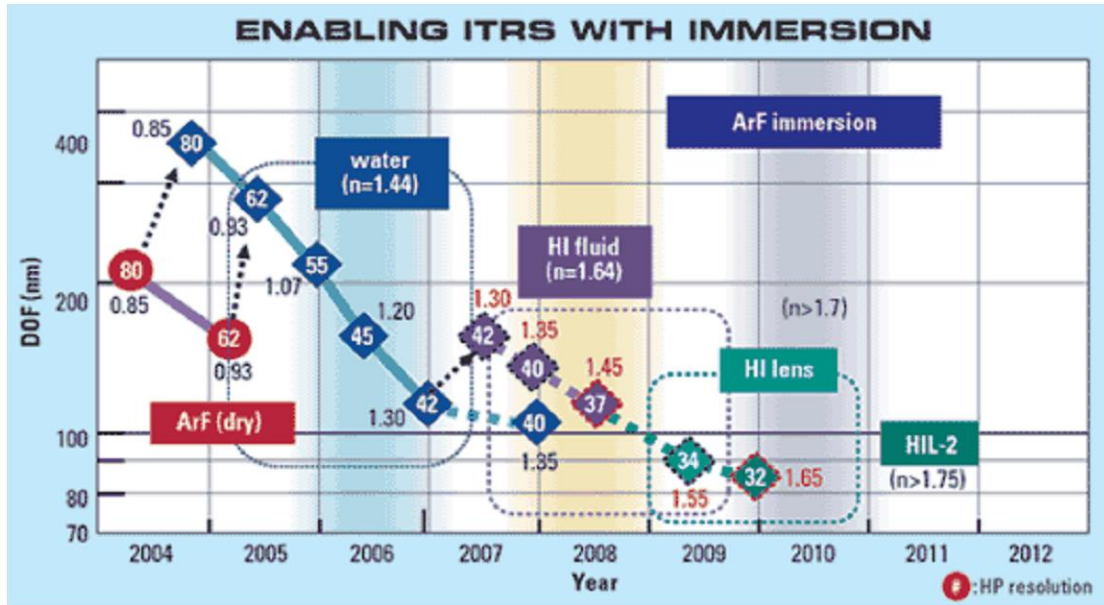


그림5. 노광에 사용되는 광원의 파장, NA, k_1 (공정상수) 따른 최소패턴 크기의 변화

그림6과 같이 물보다 굴절율이 큰 매질로 바꿀 경우 2010년까지 기존의 ArF 광원을 사용하는 장비를 기반으로 32 nm 크기의 패턴을 형성할 수 있을 것으로 lithography 장비제조회사인 ASML은 판단하고 있다.



*ITRS: International Technology Roadmap for Semiconductor

그림6. Immersion lithography에 의해서 확장된 ArF lithography

Immersion lithography의 가장 큰 장점은 파장 감소 효과이다. 굴절율의 증가로 물을 이용한 193 nm 파장의 immersion은 132 nm 파장의 빛과 동일하며 157 nm immersion은 116 nm 파장의 빛과 동일하다. 따라서 현재 가장 많이 사용되고 있는 ArF 광원의 기존 lithography 장비를 약간의 변화를 통해서 2세대 가량 연장할 수 있을 것으로 예상된다. ArF 광원에는 immersion lithography의 적용이 수월하지만 F₂ 광원을 이용한 lithography는 문제점이 일부 지적되고 있다. 앞에서 일부 언급한 바와 같이 F₂ 광원을 사용할 경우 CaF₂로 이루어진 렌즈와 mask를 사용해야 한다. 하지만 CaF₂로 이루어진 렌즈의 대량생산이 매우 어려우며 F₂ 광원용 PR의 성능개선도 추가로 진행되어야 하므로 아직 상업화에 어려움이 있다. 또한 157 nm 광원에 적합한 매질의 개발도 오히려 193 nm 광원에 대한 매질에 비해서 어려울 수 있다. 특히 ArF 광원에 대해서 굴절율이 1.75 이상인 매질이 성공적으로 개발되고 이에 상응하는 F₂ 광원에 대한 1.75 이상의 매질이 개발되지 않으면 F₂ 광원을 이용하는 lithography에 대한 장점이 사라지므로 현재까지 KrF-ArF-F₂-EUV로 이루어진 광원변화에 대한 roadmap이 KrF-ArF-EUV로 수정될 가능성도 있다.

3. 결론

나노소자를 형성하기 위해서는 수십nm 크기의 패턴을 일정하게 형성해야 한다. 이를 위해서 optical lithography가 사용되고 있으며 resolution의 감소를 위해서 사용광원의 파장을 감소시켜왔다. 최근에는 광원의 파장 뿐 아니라 렌즈와 wafer 사이의 공간에 공기보다 굴절율이 큰 매질을 사용해서 렌즈의 능력인 NA을 증가시키는 immersion lithography가 도입되어서 사용되고 있다. 물을 매질로 사용하고 있으며 향후 굴절율 1.7 이상인 매질을 도입할 경우 최소 패턴크기가 32 nm 인 나노소자의 형성도 가능할 것으로 예상된다.

4. 참고문헌

- [1] Gordon E. Moore, "cramming more components onto intergrated circuits," Electronics, Vol. 38, N. 8, Apr. (1965)
- [2] J. R. Sheats, B. W. Smith, "Microlithography: Science and Technology", p. 87, Marcel Dekker, New York, (1998)
- [2] E. D. Palik, Academic Press, Boston, Vol. 2 (1991)
- [3] M. Switkes, M. Rothschild, R. R. Kunz, S-Y. Baek, D. Coles, M. Yeung, "Immersion lithography: Beyond the 65 nm node with optics," Microlithography World, p. 4, May (2003)
- [5] B. J. Lin, US6788477, "Apparatus for method for immersion lithography", TAIWAN SEMICONDUCTOR MANUFACTURING COMPANY, (2004. 9. 7.)