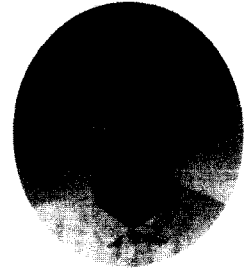


100 nm 광 리소그래피 기술



오혜근

한양대학교 이과대학 물리학과

1. 서론

기억소자와 마이크로 프로세서(micro processor) 등의 실리콘 소자 뿐만 아니라 화합물 소자나 thin film disk head, inkjet printer head 그리고 LCD 및 MEMS(microelectromechanical system) 등을 만들어 주기 위해서는 리소그래피가 필요하다. 더불어 전체 제조 공정의 약 35%가 리소그래피 공정이므로 제일 중요한 기술이며 반도체 집적소자의 초고집적화 및 이를 위한 초미세화는 리소그래피(lithography) 기술이 이끌어 가고 있다. 우리가 흔히 집적소자를 말함에 있어서 0.25 μm 소자 혹은 0.18 μm 소자 등 패턴의 최소 선폭 크기로 언급하고 있는 이유도 리소그래피 기술이 선행되어 원하는 크기를 기판 위에 만들어 주어야만 다음 공정들이 가능하기 때문이다. 따라서 1 Gb DRAM(giga bit dynamic random access memory)은 0.18 μm 기술에 의해서 만들어진다고 하고 있다. 리소그래피를 우리말로 굳이 바꾼다면 빛을 쪼인다는 노광으로 할 수 있을 것이다. 즉 빛을 쪼여서 원하는 모양과 크기를 만드는 기술인 리소그래피 기술의 현황과 함께 우리가 알고 있는 광학적 원리들이 어떻게 적용되고 있는지를 살펴볼까 한다.

우선 리소그래피 공정 과정을 알아보고 미세 패턴을 형성하기 위해 고려되어야 할 해상력 및 초점심도에 대한 것을 정리한 다음 극자외선 및 원자외선 기술을 언급한다. 더불어 보통의 리소그래피 방법으로는 얻을 수 없었던 최소선폭을 구현하기 위해서 대두된 위상 변이 마스크, 변형 조명법 및 위상 대조법 등의 초해상도 기술들의 원리를 기술한다. 추가로 100 nm 소자를 만들기 위해 반드시 고려되어야 할 정렬 과 선폭 조절 등에 적용되는 광학의 원리를 설명하면서 현황 및 향후 전망을 하고자 한다.

2. 리소그래피 기본

2.1 리소그래피 공정

석판 인쇄 기술로부터 리소그래피 기술이 비롯되었다. 즉 리소그래피란 우리가 원하는 모양과 크기를 가진 형상을 만들어 주는 기술이다. 특히 반도체나 디스플레이 등에 사용되는 리소그래피 공정은 웨이퍼(wafer)나 유리 등의 기판 위에 요구되는 모양과 크기를 갖는 박막을 만들어 주는 과정이다. 그 과정을 그림 1에서 보여 주고 있다. 기판 위에 SiO_2 나 Si_3N_4 등의 얇은 박막을 증착 등의 방법으로 입힌다. 여기에 빛에 잘 반응하는 화학 물질인 감광제(photoresist, PR)를 회전 도포(spin coating) 방법으로 균일하게 입힌다. 감광제가 입혀진 기판을 대표적인 광 리소그래피 장비인 이동식 축소 투영 노광 장치(stepper)에 올려놓고 만들고자 하는 모양이 새겨진 마스크(mask 혹은 reticle)를 광원과 기판 사이에 놓아서 선택적으로 빛을 통과하게 한다. 그 결과 감광제는 빛을 받은 부분과 그렇지 못한 부분이 화학적으로 차이를 보인다. 빛을 받은 부분이 현상액(developer)에 반응하여 상대적으로 잘 용해되어 떨어져 나가는 감광제를 양성 감광제(positive resist, 그림 1 왼쪽 아래)라 하고 반대로 빛을 받은 부분의 결합력이 커져서 현상액 속에서 용해되지 않고 남아 있게 되는 감광제를 음성 감광제(negative resist, 그림 1 오른쪽 아래)라 한다. 이러한 현상 과정을 거치면 감광제가 남아 있어서 여전히 그 밑의 박막을 덮고 있는 부분과 감광제가 용해되어 그 밑의 박막이 드러나는 부분이 생긴다. 여기에 화학 물질을 가하면 감광제가 남아 있지 않은 부분은 드러난 박막과 화학 반응(식각, etching)을 하여 날아가 버리고 보호막으로 사용된 감광제가 남아있는 부분은 화학 반응을 하지 않아 그 밑의 박막은 그대로 남게된다. 덮여져 있는 감광제를 제거(strip)하면 최종적으로 우리가 원하는 모양을 가진 박막이 형성된다.

2.2 해상력과 초점심도

어떠한 광학계가 상을 형성할 때 우리는 그 광학계의 분해능을 Rayleigh criterion을 사용하여 $(\Delta)_{\text{min}} = 1.22 f \lambda / D = 0.61 \lambda / \text{NA}$

Lithography Process

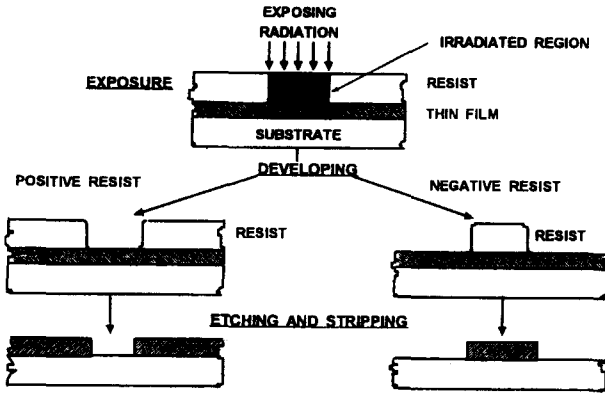


그림 1. 리소그래피 공정.

라 한다^[1]. 여기서 λ 는 광원의 파장이며, 보통 결상계는 렌즈의 초점거리인 f 만큼 떨어진 거리에 상면을 두고 있다고 가정하였고, 렌즈의 개구수(numerical aperture, NA)는 $NA=(D/2)/f$ =렌즈 반경/상거리를 사용한다(그림 2). 즉 파장이 짧으면 보다 작은 것을 구별할 수 있다는 것과 렌즈 반경을 크게 하고 초점거리를 짧게 하면 보다 많은 빛(정보)을 모을 수 있다는 것이다. 리소그래피 공정에서의 광학계도 이를 따를 것이므로 우리는 해상력(분해능) R 을 아래와 같이 쓴다.

$$R = (\Delta L)_{\min} = k_1 \lambda / NA$$

여기서 0.61 대신에 소위 공정변수라고 이름 붙인 k_1 을 사용하였는데 그 이유는 감광제와 노광 방법 및 공정 조건에 따라 해상력이 달라질 수 있기 때문이다. 이 공정변수는 실제 광원이 점이 아닌 어떤 크기를 가지므로 이에 따른 공간 가간섭성 정도(degree of coherence, σ 그림 2)에 따라서도 달라질 수 있다.

집적소자의 집적도는 3년에 4배씩 증가하였고 그에 따라 최소 선폭은 0.7 정도로 줄었고 앞으로도 이 경향은 계속될 것이다. 패턴 크기를 작게 하기 위해서는 해상력이 증대되어야 하는데 앞의 식에서 볼 수 있듯이 광원의 파장을 줄이는 한편 렌즈의 개구수를 늘이고 공정변수를 줄임으로써 해상력이 향상되어 왔다. 광원의 파장은 수은 방전 등의 g-선($\lambda=436$ nm)에서 i-선($\lambda=365$ nm)으로 더욱 나아가 KrF 엑시머(excimer) 레이저($\lambda=248$ nm)와 ArF 엑시머 레이저($\lambda=193$ nm) 등으로 짧아지고 있다. 16 Mb DRAM까지는 주로 g-선을 사용하였고 64 Mb DRAM이나 256 Mb DRAM은 i-선으로, 256 Mb 혹은 1 Gb DRAM은 주로 KrF를 사용할 것이며 1 Gb DRAM 이후는 ArF를 사용하게 될 것이다. 결상 렌즈의 개구수는 계속 커져서 i-선 광원인 경우 $NA=0.7$ 정도되는 노광 장비도 나와 있다. 마지막 변수인 k_1 은 감광제 및 공정 기술의 발달로 연구소에서는

Numerical Aperture & Partial Coherence

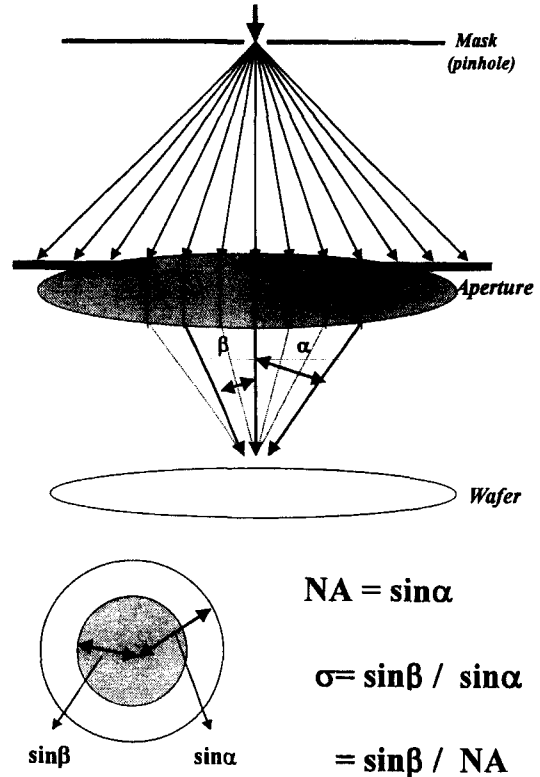


그림 2. 결상계 렌즈 개구수(NA) 및 공간 가간섭도(σ).

0.3, 양산의 경우는 약 0.7 정도까지 줄일 수 있었다. 나중에 언급하겠지만 여러 가지 초해상도 기술들을 이용해서 더욱 더 작은 k_1 값들도 얻어서 현재 사용하고 있다.

실제 소자를 만들기 위해서는 기판 위에 여러 박막 층을 쌓아야 하므로 해상력 못지 않게 중요한 것이 초점심도(depth of focus, DOF)이다. 어쩔 수 없이 존재하는 단차를 극복하고 단차의 위, 아래에서 같은 크기를 갖게 하기 위하여 높낮이에 따른 수차를 최대한 극복해야 한다. 즉 초점 이탈이 어느 정도 일

Trend in DRAM production

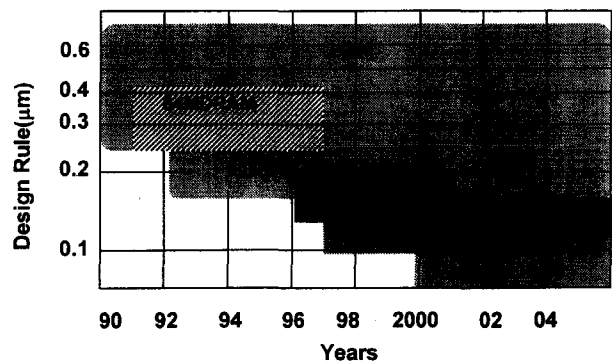


그림 3. 기억소자의 세대별 최소 선폭 및 사용 파장.

DOF (Depth of Focus)

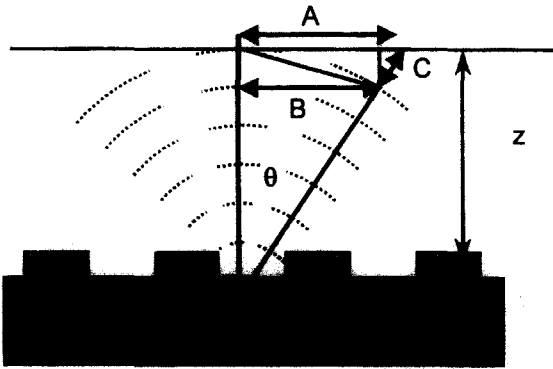


그림 4. 초점심도.

어ना더라도 그에 따른 선폭 변화가 원하는 범위 안에 있어야 할 것이다. 이러한 적정 초점이탈 범위를 초점심도라 하고 이는 다음과 같이 사용한다^[2].

$$DOF = k_2 \lambda / NA^2$$

그림 4에서 보는 것처럼 초점 심도는 렌즈의 중앙 부분과 가장자리 부분을 지나는 빛들 간의 광 경로 차가 반 파장만큼 차이가 나서 소멸 간섭이 일어나는 범위로 정의한다. 즉 그림 4에서 보면 광 경로 차이는 $C = (A^2 + z^2)^{1/2} - z = z(1 + \tan^2 \theta)^{1/2} - z \approx z \sin^2 \theta = z NA^2$ 이고 이것이 $\lambda/2$ 만큼 차이가 날 때 $z = DOF = \lambda / 2 NA^2$ 가 되며 우리는 보통 상수 $1/2$ 대신 또 다른 공정변수인 k_2 를 사용한다. 위의 식에서 볼 수 있듯이 초점심도를 크게 하려면 긴 파장과 작은 개구수를 사용해야 하는데 이는 높은 해상력을 얻기 위한 조건과 정면으로 배치된다. 즉 높은 해상력을 얻기 위해 사용하려는 단 파장과 및 고 개구수화는 초점심도의 저하를 동반한다. 따라서 우리는 먼저 원하는 해상력을 가질 수 있는 파장과 개구수를 결정하고 또 다른 공정 변수인 k_2 를 가능하면 크게 하여 공정을 하기에 충분한 초점심도를 얻어야 할 것이다. 256 Mb DRAM급 이상의 집적 소자를 만들어 주기 위해서는 최소 선폭(해상력)이 $0.25 \mu\text{m}$ 이하이어야 한다. 이를 위해 파장이 짧은 레이저를 광원으로 사용하거나 광학적 한계를 확장시킬 수 있는 초해상도 기술들을 사용한다.

3. 극, 원 자외선(Deep UV, ArF) 리소그래피

해상력을 높이기 위해 더욱 더 짧은 파장이 요구되었고 이에 따라 KrF($\lambda=248 \text{ nm}$)나 ArF($\lambda=193 \text{ nm}$) 엑시머 레이저를 광원으로 사용하게 되었다. 이들을 광원으로 한 리소그래피 기술은 감광제의 개발과 노광 장비의 개발로 나눌 수 있을 것이다. 극 자외선용 감광제는 1988년경부터 음성 감광제의 개발을 시초

로 하여 활발히 연구가 진행되어 왔다. 극자외선 감광제의 특징은 광원 자체의 밝기가 수은 등에 비해 많이 떨어지고 감광제 자체에서 흡수가 많이 일어나므로 이를 극복하기 위해 화학 증폭형 감광제(chemically amplified resist, CAR)가 개발이 되었다. 말 그대로 산 촉매 반응을 이용하여 빛을 받은 감광제의 화학 반응이 연쇄적으로 일어나게 하여 고감도를 이룰 수 있게 하였다. ArF 용 감광제도 화학 증폭형으로 개발이 되고 있는데 더욱 더 나은 감광제의 감도가 요구되어 진다. 그 이유는 193 nm의 빛을 렌즈가 많이 흡수하기 때문에 렌즈의 굴절률이 심하게 변하고 이에 따라 심각한 투과도 및 색수차 문제가 발생하게 되므로 가능하면 적은 량의 에너지를 렌즈에 주어야 하기 때문이다. 현재 $5\sim 10 \text{ mJ/cm}^2$ 정도의 감도를 갖는 감광제가 우리나라를 비롯한 여러 나라에서 개발되어 상업화 단계에 와 있다.

KrF 및 ArF excimer 레이저를 광원으로 하는 노광 장비는 광학계 못지 않게 레이저 광원 자체의 개발이 선행되어 왔고 최근 많은 연구를 통해 우리가 목표로 하는 수준까지 올라와 있다. 레이저의 가장 큰 문제는 수은등에 비해 가스(gas)의 수명을 포함한 유지비가 훨씬 많이 든다는 것과 파장이 짧아질수록 굴절을 변화 정도가 심해지기 때문에 생기는 렌즈의 색수차에 의해 해상력과 초점심도가 떨어진다는 것이다. 예를 들어 KrF의 경우 248.38 nm 근처에서 100 pm bandwidth당 약 $15 \mu\text{m}$ 정도의 색수차가 생긴다. 따라서 bandwidth를 감소시켜야 하고 프리즘과 회절격자를 이용하여 약 0.5 pm 까지 그 폭을 줄여서 현재는 $0.1 \mu\text{m}$ 이내로 색수차를 조절할 수 있게 되었다. 이 외에도 광원의 특성에 따라 리소그래피 공정에 직접적인 영향을 끼치게 된다. 예를 들어 파장의 절대값이 변하면 배율 차이에 의한 상뒤틀림이 생기고, 레이저의 출력이 좋아야 생산성이 향상되고, pulse간의 에너지 차이가 적고 반복수가 일정해야 노광량이 정확하게 제어될 것이며, 빔의 형상, 편광 및 시간섭성에 따라 노광 균일도가 결정될 것이다. 현재 상업용으로 나와 있는 KrF 장비에 들어가는 레이저의 경우 10 mJ/cm^2 의 에너지, 1 KHz 의 반복수, 0.7 pm 의 bandwidth와 1×10^8 pulse 정도의 가스 수명을 얻고 있다. 짧은 가스 수명 및 레이저 광학계의 수명 때문에 생기는 down-time과 그에 따른 유지비가 매우 큰 점 등 해결되어야 할 것들이 아직도 남아 있지만^[3] 양산 시까지는 모두 극복이 될 것이다.

ArF 엑시머 레이저의 경우도 1 KHz 의 반복수와 0.7 pm 의 bandwidth를 갖는 것이 개발되었고 계속 향상시키고 있다. 하지만 ArF 노광 장비는 193 nm 의 파장을 투과하는 렌즈 재료가 fused silica나 CaF_2 로 한정되어 있을 뿐만 아니라 빛을 많이 받을수록 렌즈 수축과 color center 등의 결함이 생기고 그 결과 오랜 노출시 투과도가 현저히 떨어질 뿐만 아니라 굴절률이



그림 5. 193 nm를 이용한 패턴 형성[표지사진].

심하게 변한다. 이를 극복하기 위하여 가능하면 적은 양의 에너지를 렌즈에 주면서도 생산성에는 차질이 없도록 고감도의 감광제가 요구된다. 더불어 색수차에 민감한 렌즈만으로 구성되었던 굴절 결상계 대신에 색수차에 민감하지 않은 거울을 일부에 사용한 반사 결상계가 사용되고 있다. 현재는 193 nm 감광제 및 공정 연구용으로 노광 면적을 작게 한 장비가 상업화되어 있다. 그 예로 그림 5는 삼성에서 만든 감광제와 ISI 사의 작은 면적 노광 장비로 100 nm 이하의 패턴까지도 잘 형성됨을 보여주고 있는 전자 현미경 사진이다. 양산용 장비는 국내 전자 통신 연구소 및 국외 장비 회사에서 활발히 추진중이고 '99년 중에는 장비를 납품할 수 있다고 장비 회사들은 말하고 있다. 193 nm 파장을 사용할 때 문제가 되었던 193 nm 에너지 부근에서 공기중의 산소에 의해 흡수가 일어나서 오존이 발생하고 그 결과 빛의 세기가 줄어드는 것은 광 경로를 질소나 진공 환경으로 만들어 줌으로써 해결할 수 있었다.

4. 초해상도 기술

해상력을 향상시키기 위하여 렌즈의 개구수를 증대시키고 파장을 짧게 하더라도 일반적인 방법으로는 파장보다 작은 선폭의 형성은 불가능하기 때문에 광을 이용한 리소그래피 시대는 마감하고 훨씬 파장이 짧은 전자빔이나 x-선 등의 비광학적인 방법을 이용한 리소그래피 시대가 올 것이라고 80년대 말부터 사람들은 예견했었다. 하지만 전자빔이나 x-선 등의 비광학적인 방법들의 실용화가 아직까지도 이루어지지 못하고 있고 적어도 5~10년은 지나야 될 것이라고 생각하는 사람들이 많다. 반면에 광 리소그래피의 경우에는 이미 많은 경험들이 축적되어 있을 뿐만 아니라 새로운 방법들에 대한 두려움이 없었기 때문에 모든 노력을 다하여 해상력을 향상시키려 하고 있

Wave Propagation - grating pattern

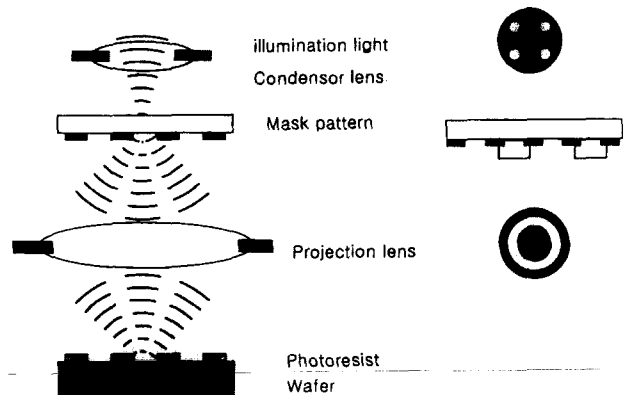


그림 6. 축소 투영 노광 장비의 주요 부분 및 빛의 진행과 각 부분들에 적용된 초해상도 기술.

다. 그 결과 파장을 줄이고 개구수를 크게 하는 한편 리소그래피 공정상의 거의 모든 부분에 대한 연구를 통하여 해상력 한계를 확장해 나가고 있다. 이 장에서는 마스크를 포함한 노광 장비에 관련된 초해상도 기술들에 대하여 알아보고 다음 장에서 기판을 포함한 공정 과정에서의 한계 극복에 대해서 살펴본다. 축소 투영 노광 장비를 그림 6의 왼쪽에 간략하게 나타내었다. 일정 크기를 가진 광원을 집속(condensor) 렌즈에 의해 모아진 빛이 마스크를 통과하여 결상(projection) 렌즈에 의해 마스크의 모양이 기판 위에 투영된다. 오른쪽에 있는 그림들은 주요 부분에 적용된 초해상도 기술들을 보여 주고 있다. 위에서부터 광원을 변형한 변형 조명법(modified illumination, MI, or off-axis illumination, OAI), 마스크를 개조한 위상 변이 마스크(phase shift mask, PSM) 그리고 입사동을 조정시킨 위상 대조법(phase contrast lithography, PCL, or pupil filter, PF) 등을 나타내었다.

4.1 위상 변이 마스크

위상 변이 마스크는 1982년에 IBM의 Levenson^[4] 등에 의해 제안되었으나 한동안 잊혀져 있다가 1989년에 Hitachi^[5]에 의해 가치를 인정받아 광 리소그래피의 한계를 100 nm까지 연장시킬 수 있는 길을 열어 주었다. 빛이 전자기파이기 때문에 진폭은 물론 위상을 갖는다는 생각에서 착안한 PSM은 빛이 통과하고 못하고의 진폭만을 이용한 보통 마스크(binary intensity mask, BIM)가 무시한 위상 정보를 추가하여 해상력을 향상시킬 수 있다. 보통의 마스크는 세기가 0이 되어야 할 크롬(chrome) 밀 부분이 크롬을 사이에 둔 두 개의 투명한 인접 부분을 지나가는 빛들이 회절하고 간섭하여 0이 되지 못한다. 반면 PSM은 그림 7에서 보듯이 위상이 180°로 바뀐 전기장(-)과

Phase Shift Mask - Alternating

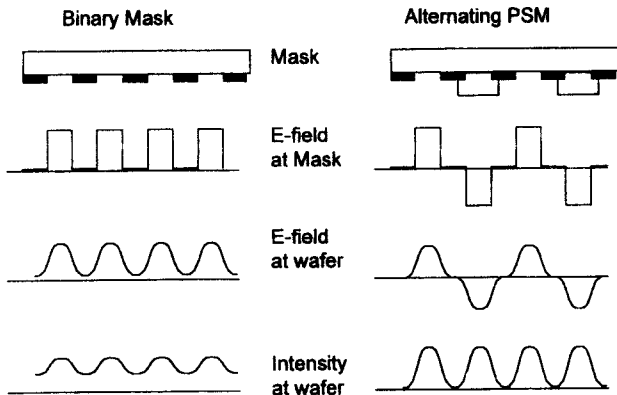


그림 7. 공간 주파수형 위상 변이 마스크. 왼쪽은 보통 마스크의 경우이다.

위상이 그대로인 전기장(+)이 크롬 밀 부분에서 만나 소멸 간섭에 의해 전기장은 0이 된다. 그 결과 빛의 세기 곡선의 대조(contrast)가 증가하여 해상력이 향상되게 된다. 이러한 PSM의 장점을 살릴 수 있도록 많은 연구가 이루어져 왔다. PSM은 원하는 패턴 및 위상 변이를 만들어 주는 방법에 따라 크게 공간 주파수형(alternating)^[4], 보조 패턴형^[5], 가장자리 강조형^[6], 감쇄형(half-tone, attenuated)^[7] 및 무 크롬형(chromeless)^[8] 등으로 나눌 수 있다. 위상을 변이시켜 주기 위해 전에는 SiO₂나 SOG(spin on glass) 등을 사용하려 했으나 지금은 석영으로 되어 있는 마스크 자체를 식각하여 쓰고 있다. 하지만 PSM은 보통 마스크에 비해 위상 변이가 추가되므로 훨씬 더 복잡한 마스크가 되며 마스크 자체를 만드는 공정이 복잡하기 때문에 세심한 주의가 요구된다. 따라서 최적의 PSM을 전산 모사에 의하여 찾아야 하고, 자동으로 위상 변이를 배치할 수 있도록 해야 하고, 복잡한 마스크 공정 때문에 생기는 결함 검출 및 수정이 가능하여야 한다. 이러한 많은 문제점들 때문에 과연 PSM 기술이 실제 양산 공정에 사용될 수 있을까 하는 의구심이 많

Phase Shift Mask - Attenuated

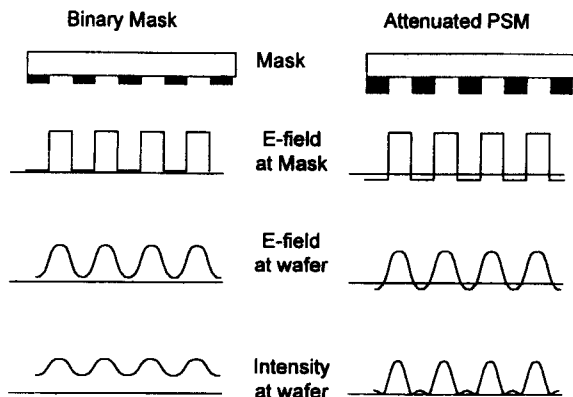


그림 8. 감쇄형 위상 변이 마스크.

았으나 256 Mb DRAM급 이상에서의 반복된 패턴에는 공간 주파수형을, 고립된 패턴(contact hole)에는 감쇄형의 PSM(그림 8)을 사용하고 있다. 또 다른 변형된 마스크 형태로 마스크의 뒷면에 위상 변이 패턴을 추가함으로써 PSM과 같은 원리를 가지면서 마스크를 만들기 쉽게 한 보조 회절 마스크(dummy diffraction mask, DDM)^[9,10]가 개발되어 양산 적용을 위해 노력중이다.

4.2 변형 조명법

마스크를 변형시킬 수 있다는 것에 자극을 받아서 사람들은 노광 장비 자체도 변형시킬 수 있지 않나 생각하게 되었고 그 결과 집속 렌즈의 구경(aperture)을 변형시키는 변형 조명법^[11-13]을 고안하게 되었다. 변형 조명법의 원리는 그림 9에 잘 나타나 있다. 보통의 조명계에서는 집속 렌즈의 가운데를 빛이 지나가게 함으로써 대부분의 빛이 수직으로 마스크를 통과하고 회절된 빛의 0차 항은 결상 렌즈의 중앙 부분을 수직으로, ± 1 차 항은 경사를 가지고 렌즈의 가장자리 부분을 지나 기판 위에 도달하게 된다. 따라서 초점이 정확하게 맞을 때를 제외하고는 이들의 광 경로 차가 다르기 때문에 탈 초점에 따라 상이 제대로 맺히지 않아 작은 초점심도를 갖는다. 이와는 반대로 집속 렌즈의 가운데를 막고 가장자리만 빛을 통과하게 하면 마스크에 도달하는 빛은 경사지게 들어오게 되고 따라서 회절된 빛의 0차 항과 ± 1 차 항 중의 한 빔이 같은 각도를 가지고 결상 렌즈를 지나 기판 위에 도달하게 된다. 렌즈의 중앙에서 같은 거리만큼 떨어진 부분을 지나기 때문에 기판 위에 도달하

Off-Axis Illumination

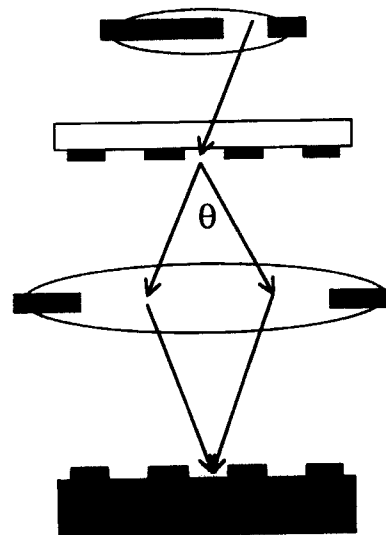


그림 9. 변형 조명법.

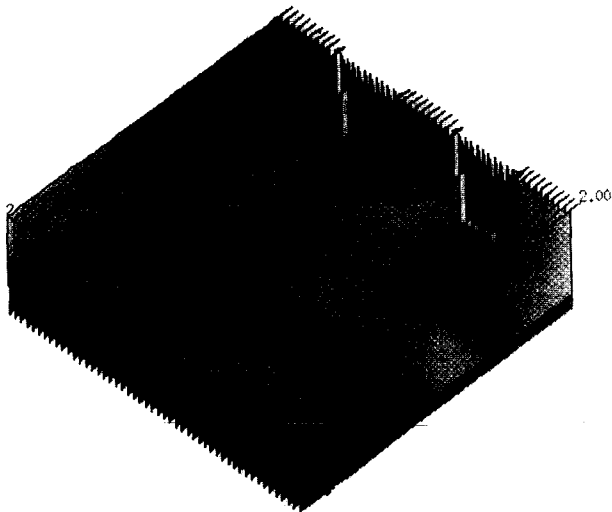


그림 10. 전산 모사에 의한 단차가 있는 경우의 현상된 감광제 3-D 모양.

는 두 개의 빔은 서로 광 경로가 같다. 따라서 탈 초점이 일어나더라도 상을 잘 맺을 수 있어서 큰 초점심도를 갖는다. 집속 렌즈의 구경은 그림 6에서 처럼 4극(quadrupole)을 쓰거나 패턴의 방향성을 적게 타는 윤대형(annular)을 많이 쓴다. 변형 조명법의 가장 큰 장점은 약간의 구경 변경만으로 해상력과 초점심도를 최대한으로 향상시킬 수 있다는 데 있다. 하지만 PSM에서 처럼 이 경우에도 단점은 존재한다. 우선 이 방법은 반복된 패턴에서만 그 효과가 나타나고 고립된 패턴에서는 효과가 보이지 않는다. 더불어 대부분의 빛이 통과하는 가운데 부분을 막고 가장자리를 통과하는 빛만 사용하기 때문에 기관 위에 도달하는 빛의 양이 줄어들어 생산성의 저하를 초래한다. 빛의 세기 저하는 axicon 방법이나 광섬유를 이용하여 대부분의 빛을 가장자리로 보낼 수 있도록 만들어서 해결하고 있다.

4.3 위상 대조법

변형 조명법이 반복된 패턴을 향상시켰다면 위상 대조법^[14]으로 고립된 패턴을 향상시켜 줄 수 있다. 전부터 이미 많이 써 오고 있던 위상 대조 현미경의 원리를 결상계 렌즈에 적용시켜서 해상력을 향상시키는 것이다. 즉 결상계 렌즈의 입사동에 필터(pupil filter, spatial filter)를 집어넣어 낮은 공간 주파수는 줄이고 높은 공간 주파수는 늘려서 해상도를 증가시키는 것이다. 입사동 필터는 가운데 부분의 위상을 0°로 하고 테두리를 180°로 하는 가장 단순한 형태를 비롯하여 필터의 위상과 투과도 까지 변화시켜 그 효과를 최대한으로 보도록 하는 것 등이 계속 연구 개발되고 있다. 하지만 이 방법은 반복된 패턴에서는 그 효과가 상대적으로 적고 또한 결상계 렌즈를 건드리는

것이 용이하지 않다는 단점이 있어서 앞의 초해상도 기술들보다는 연구 개발 및 양산 적용이 덜 되어지고 있다.

4.4 조 합

지금까지 살펴 본 위상 변이 마스크, 변형 조명법 및 위상 대조법 등은 해상력과 초점심도를 향상시키는 데 큰 공헌을 하고 있지만 어느 한 방법을 사용해서 반복된 패턴과 고립된 패턴 등의 모든 패턴들을 동시에 향상시켜 주지는 못한다. 예를 들어 4극을 이용한 것보다 원형의 변형 조명을 사용하는 것이 패턴의 방향성 문제를 해결할 수 있어서 좋고, 반복된 패턴들은 공간 주파수형 PSM이나 변형 조명법을 사용할 수 있지만 고립된 패턴은 별 효과를 보지 못한다. 감쇄형 PSM은 효과가 상대적으로 크지 않지만 상대적으로 제작 과정이 단순하고 모든 패턴에 다 적용할 수 있다는 점과 특히 contact hole 과 같은 패턴에서 그 효과가 크기 때문에 제일 잘 쓰이고 있다. 또한 각 방법들의 장점들을 효과적으로 이용하고자 이들을 최적으로 조합해서 모든 패턴들에 적용해서 해상력을 극대화하고자 하는 노력들^[15,16]이 계속되고 있고 그 중 가장 실용적이며 효과적인 조합인 윤대형의 변형 조명과 감쇄형의 위상 변이 마스크를 조합한 것의 양산 적용이 이루어지고 있다. 또한 이들을 효과적으로 사용하기 위해서는 초해상도 기술들의 방법마다 각기 다른 최적의 렌즈 개구수 및 공간 가간섭도가 있으므로 이들을 원하는 대로 변경시켜 사용할 수 있도록 해야 한다. 요즈음의 노광 장비는 이들을 조절할 수 있도록 개발되어 있어서 최대한의 해상력 및 초점심도를 얻도록 하고 있다. 더불어 이러한 초해상도 기술들은 새로운 노광 장비의 구입이 없어도 기존의 감광제, 공정 기술 및 약간의 장비 개조만으로 충분한 초점심도를 가진 해상력을 얻을 수 있으므로 매우 유용하게 쓰여질 수 있다.

5. 선폭 조절 및 반사 방지막

초고집적 소자의 양산을 위해서는 보다 작은 선폭을 만들 수 있어야 할뿐만 아니라 선폭을 일정하게 해주어야만 원하는 소자 특성을 얻을 수 있다. 일반적으로 원하는 선폭의 ±10% 이내로 되도록 공정을 조절해 주고 있다. 최소 선폭이 작지 않았을 때에는 그 변화가 상대적으로 크지 않아서 별 문제가 없었으나 선폭이 작을 경우에는 똑같은 크기의 변화라도 심각한 문제를 야기한다. 예를 들어 100 nm의 선폭인 경우는 10 nm 이내의 오차만 허용이 된다. 선폭을 일정하게 해 주지 못하는 이유는 여러 가지가 있으나 대부분은 다중 간섭에 의한 것이다.

감광제에 입사된 빛과 감광제 밑의 박막이나 기판에서 반사된 빛들이 서로 만나 정상파를 형성하고 그로 인해 빛의 세기가 심한 변화를 보이게 된다. 감광제는 빛의 세기에 따라 감광 정도가 차이가 나고 그 결과 현상이 되고 난 후의 감광제 측면이 울퉁불퉁하게 되어 깊이에 따라 선폭의 차이가 생긴다. 정상파는 $\lambda/(2n_{PR})$ 의 주기로 변하므로 약 1 μm 의 대표적 두께를 가진 감광제의 경우에 약 10번 정도의 높낮이 변화가 나타난다. 특히 기판에 요철이 있는 경우에는 이러한 정상파 때문에 더욱 심한 선폭 변화를 초래한다. 다행히도 이러한 정상파 효과는 빛을 쪼여준 후에 감광제에 열을 가함(post exposure bake, PEB)으로써 제거시킬 수 있다. 감광제에 열을 가하면 확산에 의해 빛에 반응한 화학 물질이 퍼지게 되어 높낮이 차이가 현저하게 줄어든다.

또 다른 선폭 변화는 다층 박막 간섭 효과에 의한 전체 에너지 흡수 차에서 기인한다. 즉 감광제와 그 밑에 있는 박막의 굴절률 및 두께에 따라 선폭이 왔다 갔다 하게 된다. 우리는 이로 인해 생기는 선폭 변화를 swing 곡선이라 부른다. 국부적인 빛의 세기 차이에 의한 정상파와는 달리 이 현상은 감광제 전체에 흡수된 에너지가 박막의 두께에 따라 변하는 데에 원인이 있다. 감광제를 포함한 다층 박막에 빛이 입사하면 굴절률 차이에 의해 각 경계면에서 반사 및 투과가 일어나고 이 들을 다 합친 최종적인 공기/감광제 경계면에서의 반사는 각 박막의 두께 변화에 따라 변하게 된다. 반사가 많이 일어날 때에는 상대적으로 감광제에 들어오는 에너지가 적으므로 그만큼 화학 반응이 적게 일어나고 반사가 적을 때에는 화학 반응이 많이 일어난다. 그 결과 현상이 되고 난 후 선폭의 차이가 생긴다. 감광제 및 박막 두께에 따른 선폭 변화의 주기는 $\lambda/(2n_{\text{박막}})$ 로 전체 반사율의 관계에서 유추할 수 있고 이는 정상파의 주기와 같다. 특히 이러한 주기는 파장이 짧아질수록, 굴절률이 커질수록 작아져서 극, 원 자외선을 사용할 경우 막의 두께가 조금만 변해도 선폭은 매우 심하게 변한다. 예를 들어 248 nm의 광원으로 굴절률이 1.7인 감광제에 노광하였을 경우, 감광제의 두께가 0.073 μm 정도 변할 때마다 선폭은 0.1 μm 에서 0.4 μm 까지 아주 크게 변한다. 정상파 효과는 감광제 내부에서 국부적으로 일어나기 때문에 열을 가함으로써 해결할 수 있지만 이러한 선폭 swing은 전체 흡수된 에너지의 차이에 의한 것이므로 다른 해결 방법을 찾아야 한다. 우선 감광제나 박막의 두께를 정확하고 균일하게 입혀서 두께에 따른 변화를 줄일 수 있다. 현재의 도포 방법으로 감광제의 경우 3 nm 이내의 균일도를 얻을 수 있다. 또한 swing 곡선 중 극소에 해당하는 두께 근처에서 변화가 상대적으로 덜하므로 이를 이용할 수도 있다. 하지만 소자를 만들기 위해서는 공정 과정 중에 요철이 있는

기판을 사용할 수밖에 없는데 이러한 경우에는 앞의 두 방법이 소용이 없게 된다. 또 다른 방법들인 빛을 잘 흡수하는 염료를 감광제에 추가(dyed resist)하여 반사된 빛을 줄이거나 단색광이 아닌 다색광을 써서 여러 주기를 갖게 함으로써 평균값을 갖도록 할 수도 있고 여러 층의 감광제를 사용하거나 표면에만 상을 맺게 하고 그 상이 수직적으로 전사되도록 하는 것 등이 있으나 이들에 따르는 단점들 때문에 사용을 피하고 있다.

보다 더 나은 해결책은 이러한 선폭 변화의 원인인 입사파와 반사파간의 간섭을 줄이는 것이다. 공기와 감광제 사이나 감광제와 박막간의 경계면에서 반사를 줄일 수 있는 반사 방지막(top antireflection coating, TARC)을 사용함으로써 가능하다. 공기와 감광제 사이에서의 반사를 막기 위해서 사용하는 반사 방지막은 일상 생활에서 많이 사용하고 있는 것으로 $n_{ARC} = \sqrt{n_{PR}}$ 의 굴절률과 $\lambda/(4n_{ARC})$ 의 두께를 갖도록 하면 된다. 하지만 이 경우는 기판에서 반사되는 빛을 줄일 수가 없어서 기판의 요철 때문에 생기는 notching(경사진 면에서 반사되는 빛이 옆으로 치고 들어가서 주위보다 많은 빛을 받아 선폭이 일그러지는 것)을 제거할 수 없다. 선폭 변화를 줄이기 위하여 제일 많이 사용되고 있는 것은 감광제 밑에 반사 방지막(bottom ARC, BARC)이 위치하도록 해서 박막 혹은 기판 경계에서 감광제 쪽으로 반사되는 빛을 줄이면서 notching 문제도 해결하는 것이다. 이 방지막의 굴절률은 $n_{ARC} = \sqrt{n_{PR} n_{\text{박막}}}$ 이 되도록 하고 어느 정도의 빛을 흡수할 수 있는 소광계수를 갖도록 한다. 소광계수가 0이 아니기 때문에 일반적으로 알려져 있는 반사 방지막의 두께인 1/4 파장의 정수배가 아닌 두께에서 반사가 최소가 된다. 반사가 최소로 되는 여러 두께 중에서 우리는 어느 정도 빛을 흡수하면서도 식각을 통해 쉽게 벗겨지도록 가능하면 얇은 두께를 사용하는 것이 좋다. 이러한 반사 방지막을 사용함으로써 notching을 포함한 기판에 요철이 있을 때 생기는 선폭 변화뿐만 아니라 정상파나 swing 효과를 막을 수 있다.

6. 정렬, 근접 효과 보정 및 전산 모사

6.1 정 렬

하나의 집적소자를 만들어 주기 위해서는 수백 가지의 공정이 필요하고 마스크만 하더라도 20장 전후가 요구된다. 따라서 원하는 위치에 원하는 선폭과 모양이 만들어지도록 마스크와 기판간의 정렬(alignment)과 layer와 layer간의 정렬(overlay)이 매우 잘 되어야 한다. 모든 오차를 다 포함한 전체 정렬 범위는 보통 최소 선폭의 30% 이내로 들어와야 한다고 말하고 있다. 따라서 최소 선폭이 작아지면 작아질수록 훨씬 더 정확한 정렬

이 요구된다. 정렬을 틀어지게 하는 원인들은 여러 가지가 있는데 렌즈의 수차 등에 의해 상이 제 위치에 오지 않는 것 외에 가장 큰 원인은 마스크나 기판을 올려 놓은 스테이지(stage)가 정확하게 움직이지 않는데 있다. 또 다른 원인은 정렬을 위해 마스크나 기판 위에 만들어 놓은 표식(alignment mark, target)을 제대로 읽지 못하는데 있다. 대개의 표식은 기판 위에 요철을 만들어서 간섭, 회절 및 산란 등의 모든 광학적 방법들을 동원해서 사용하고 있는데 이들이 다른 공정에 의해 뭉개지거나 파손되게 되어 인식을 하지 못한다. 특히 기판의 요철을 줄이기 위해 최근 많이 사용하고 있는 화학 역학적 연마(chemical mechanical polishment, CMP)로 표식을 인식하는 것이 더욱 더 어려워졌다. 표식을 인식하기 위해 지금까지 개발된 방법들을 살펴보면 우선 식각된 표식들이 산란에 의해 주위에서 반사된 밝은 빛보다 어두운 것을 현미경으로 관찰하는 방법이 있다. 그리고 마스크와 기판에 있는 표식간의 거리 차를 간섭계에 의해 인식하는 방법과 세기나 위상 회절격자를 이용한 레이저 간섭 방법 등이 있다. 정렬 방법에서 고려해 주어야 할 또 하나의 사항은 정렬시 사용되는 빛을 결상계 렌즈를 통과하게 할 것인가 하는 것이다. 결상계 렌즈를 통과하게 하지 않으면 간접적으로 정렬을 하기 때문에 그만큼 정확도가 떨어지게 된다. 반면 렌즈를 통과(through the lens, TTL)하게 하면 정확도가 향상될 수 있으나 사용하는 파장에 따라 극복해 주어야 할 문제점들이 있다. 노광 파장과 다른 파장을 사용할 경우에는 정렬 파장도 충분히 투과할 수 있는 렌즈를 만들어 주어야 할뿐만 아니라 색수차 보정이 되어 초점이나 배율도 원하는 만큼 되도록 해야 하기 때문에 렌즈가 복잡하게 된다. 노광 파장과 같은 파장을 사용할 때에는 정렬에 사용되는 빛을 충분히 약하게 해서 정렬하는 빛에 의해 감광제가 반응하지 않도록 하거나 잘려져 나가는 부분을 이용하여 정렬을 해야 한다. 각 노광 장비 회사는 이러한 방법들을 여러 가지로 응용하여 최대한의 정렬도를 얻고자 노력하고 있다. 현재까지 나와있는 노광 장비 중에서 정렬도가 제일 좋은 것은 약 30 nm 정도까지 얻고 있다.

6.2 근접 효과 보정

최소 선폭의 크기가 작아지면서 생기는 또 다른 심각한 문제는 근접 효과이다. 원하는 선폭보다 파장이 작았을 경우에는 회절이 크게 일어나지 않아 상의 변형이 심각하지 않았으나 원하는 선폭이 파장과 비슷하거나 작아지면서 회절이 많이 일어나서 상의 변형이 심하게 일어난다. 그 결과 선들이 반복해서 많이 있는 부분에서의 선폭과 고립된 선이 하나만 있는 경우의

선폭이 큰 차이를 보이게 된다. 뿐만 아니라 사각형으로 나와야 할 모양이 구석진 곳에서 구부러져 타원형 모양이 되기도 하고(corner rounding) 의도했던 길이보다 짧은 길이(line shortening)가 나오기도 한다. 이러한 근접 효과를 보정해 주기 위해서는 마스크에서의 선폭을 조절해야 할뿐만 아니라 원하는 모양이 기판 위에 형성되도록 보조 패턴을 마스크에 집어넣기도 해야 한다. 하지만 집적 소자를 만들기 위해서 사용되는 모양과 선폭과 길이 등이 워낙 다양해서 이들을 일일이 다 해결해 주기는 쉬운 일이 아니다. 근접 효과를 보정해 주기 위해서 사용하는 방법들은 크게 두 가지로 나눌 수 있는데 첫 번째가 회절에 의한 상들을 일일이 계산하여 이를 보정할 수 마스크 모양을 만들어 주는 것이고 두 번째는 있을 수 있는 대표적인 것들을 표로 만들어 이를 적용하도록 하는 것이다. 당연히 첫 번째 방법이 정확한 방법이겠지만 보정 시간이 너무 많이 걸릴 뿐만 아니라 보정된 마스크 모양이 너무 복잡하고 마스크를 만드는 전자빔의 크기보다 작은 크기도 생기기 때문에 실용성이 없다. 따라서 현재 상업용으로 구할 수 있는 근접 효과 보정용 프로그램은 대개 두 번째 방법을 사용하고 있고 어느 정도 효과를 보고 있다. 하지만 더욱 더 빠르고 효율적인 프로그램이 필요하다.

6.3 모델링

선폭이 작아질수록 광학적 해상력 한계를 극복하려는 기술들이 많이 나오고 있고 이에 대한 많은 변수들이 등장하므로 리소그래피 공정을 위해서 이를 제대로 이해하고 분석하는 것이 필요해 졌다. 효율적이고 체계적이면서 빠르고 직접 실험보다 경제적인 분석 및 공정 적용이 모델링(modelling)을 통하여 가능해 졌다. 즉 리소그래피에 적용되는 재료, 노광 장비, 마스크 및 공정 기술들의 바탕에 깔린 물리와 화학에 대한 모델링을 함으로써 더욱 더 나은 선폭 형성이 가능해졌다. Dill^[17]에 의해 시작된 리소그래피 모델링은 Berkeley 그룹이 만든 SAMPLE^[18]에 의해 그 필요성을 인정받아 널리 퍼지게 되었다. 현재는 모델링을 이용하여 리소그래피의 연구 및 개발에 널리 쓰여지고 있을 뿐만 아니라 소자 생산의 중요한 하나의 도구가 되고 있다. 여러 개의 상용 프로그램이 개발되어 나와 있고 우리 나라에서도 본인을 포함한 연구진에 의해 G7 프로젝트의 일환으로 리소그래피 전산 모사 프로그램이 개발되어 이의 보급을 추진중이다. 개발된 프로그램들은 광원에서 시작한 빛이 집속 렌즈를 지나 마스크를 통과한 후 결상 렌즈에 의해 기판 위에 상을 맺고 이에 따른 에너지 분포 차이에 의해 감광제가 반응하고 열 확산되어 현상을 거치면 최종적인 감광

제 프로파일(profile)을 볼 수 있는 전 공정 과정에 대한 전산 모사가 가능하도록 되어 있다. 물론 기본적인 상형성 뿐만 아니라 위상 변이 마스크나 변형 조명법과 같은 초해상도 기술들에 대한 모사가 가능하고 벡터 회절 이론을 사용하여 편광이나 높은 개구수 혹은 3-D 마스크에 따른 영향 등도 알아볼 수 있도록 되어 있다. 더불어 화학 증폭형 감광제나 silylation과 같은 복잡한 화학적인 처리 및 출력으로 감광제 프로파일 뿐만 아니라 해상도와 초점심도 및 노광 여유도 등을 볼 수 있어서 하고자 하는 공정의 가능성을 타진할 수도 있다. 더 나아가 광 근접 효과 보정 및 PSM 등을 자동으로 디자인해서 마스크를 만들어줄 수 있는 프로그램도 개발이 되고 있다. 앞으로 더욱 빠른 컴퓨터와 효율적인 계산 방법들에 의해 더 많은 물리, 화학적인 변수들을 고려할 수 있도록 하여 빠르고 정확한 리소그래피 공정을 알아볼 수 있도록 하여 우리가 원하는 선폭을 얻을 수 있는 데 많은 도움을 줄 것이다.

7. 결 론

기본적인 물리 현상인 회절 때문에 빛을 이용한 광 리소그래피는 벌써 오래 전에 종지부를 찍을 것이라는 예견은 오늘날의 우수한 렌즈 디자인 및 생산성 때문에 빗나가게 되었다. 즉 노광 장비의 파장을 짧게 하고 렌즈의 개구수를 높임으로써 해상력과 초점심도를 동시에 향상시켰을 뿐만 아니라 위상 변이 마스크나 변형 조명법과 같은 초해상도 기술들에 의하여 광학적인 한계를 계속 극복해 나가고 있다. 250 nm나 180 nm 소자들은 248 nm 기술들을 사용하여 양산할 수 있을 뿐만 아니라 최근에 열린 VLSI 심포지움에서 DUV(248 nm)를 이용하여 60 nm의 gate를 만들었다고 TI(Texas Instrument)에서 발표하여 그 이하의 소자에서도 248 nm가 적용될 가능성도 있다. 193 nm를 광원으로 한 기술은 현 단계에는 풀어야 할 것들이 아직 남아 있지만 노광 장비나 감광제 등이 1~2년 안에 개발이 될 것이다. 더불어 위상 변이 마스크나 변형 조명법 등의 초해상도 기술들을 함께 사용하면 130 nm나 100 nm 소자의 생산이 가능할 것이다. 100 nm 이하의 패턴을 위해서는 아직 뚜렷한 기술이 없다. 157(Ar₂) nm나 126(F₂) nm 등의 짧은 파장을 제대로 투과할 수 있는 물질이 거의 없기 때문에 마땅한 렌즈를 만들어 주기 쉽지 않고 감광제도 두께를 얇게 해서 빛을 가능하면 많이 투과하도록 해야하나 이를 위해서는 기관의 단차를 최소화할 수 있는 공정이 함께 요구된다. 아울러 회절 때문에 생기는 해상력의 한계와는 또 다른 문제인 정렬도의 향상이 없이는 아무리 선폭 자체를 작게 만든다 해도 소자를 만들 수 없다는 것을 인식해야 한다.

감사의 글

본문 그림중의 상당 부분을 제공해 주신 삼성 전자의 강 호영 선임 연구원님께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Hecht, "Optics" 3e, Addison-Wesley, p 464 (1998).
2. Goodman, "Introduction to Fourier Optics", McGraw-Hill, p 124 (1968).
3. 전자신문 p 15, '97. 11. 12.
4. M. D. Levenson, N. S. Viswanathan and R. A. Simpson, "Improving resolution in photolithography with a phase-shifting mask", *IEEE ED-29*, p 1828 (1982).
5. T. Terasawa, N. Hasegawa, T. Kurosaki and T. Tanaka, *SPIE 1088*, 25 (1989).
6. A. Nitayama, T. Sato, K. Hasimoto, F. Shigemitsu and M. Nakase, "New PSM with self-aligned phase shifters for a quarter micron photolithography", *IEDM Tech. Digest*, p 57 (1989).
7. B. J. Lin, "The attenuated phase shift mask", *Solid State Technology*, **35**, p 43 (1992).
8. H. Jinbo and Y. Yamashita, "Improvement of phase-shifter edge line mask method", *JJAP*, **30**, p 2998 (1991).
9. Y.-H. Oh, H. J. Yoo, B.-S. Park, Z. Cha, H.-J. Kim and Y.-J. Jeon, "New mask technique for optical lithography-dummy diffraction mask", *SPIE 1927*, p 214 (1993).
10. H.-Y. Kang, C.-H. Kim, W.-S. Han, Y.-B. Koh and M.-Y. Lee, "New method of tilted illumination using grating mask: advanced tilted illumination on mask", *SPIE 1927*, p 266 (1993).
11. M. Noguchi, M. Muraki, Y. Iwasaki and A. Suzuki, "Subhalf-micron lithography system with phase-shifting effect", *SPIE 1674*, p 92 (1992).
12. N. Shiraiishi, S. Hirukawa, Y. Takeuchi and N. Magome, "New imaging technique for 64 Mb DRAM", *SPIE 1674*, p 741 (1992).
13. K. Tounai, H. Tanabe, H. Nozue and K. Kasama, "Resolution improvement with annular illumination", *SPIE 1674*, p 753 (1992).
14. M. N. Noguchi, Y. Yoshitake and Y. Kembo, "Resolution enhancement of stepper by complementary conjugate spatial filter", *SPIE 1674*, p 662 (1992).
15. Jeong-Ung Koo, Young-Min Cho and Hye-Keun Oh, "Combination of halftone mask and pupil filter for deep-UV (193 nm) lithography", *JKPS*, **28**, p S65 (1995).
16. Hye-Keun Oh, Jeong-Ung Koo, Young-Min Cho, Byung-Sun Park, Hai-Bin Chung and Hyung-Joun Yoo, "Optimum combination of source, mask and pupil filter for better lithographic performance", *SPIE*, **2440**, p 838 (1995).
17. F. H. Dill, "Optical lithography", *IEEE ED-22*, p 440 (1975).
18. W. G. Oldham, S. N. Nandgaonkar, A. R. Neureuther and M. O'Toole, "A general simulator for ULSI lithography and etching processes: Part I-Application to projection lithography", *IEEE ED-26*, p 717 (1979).