

0.5 μm 이하의 미세형상 가공 기술에 대한 비교 분석

姜 浩 英, 李 文 庸

三星電子 半導體研究所 基礎技術센터

I. 서 론

지난 20여년간 ULSI의 집적도는 거의 2~3년을 주기로 4배씩 증가하여 현재 16M DRAM의 양산 단계에 도달하고 나아가서 64M DRAM의 개발단계에 있다. 이러한 집적도의 증가는 소자의 소형화에 의존하는 것으로, 이것이 가능하게 된 것은 포토리소그래피 기술의 발달로 인한 미세 형상 가공기술의 발전 덕분이라고 볼 수 있다. 앞으로 집적도는 점점 높아져 2000년이 되면 0.25 μm 의 양산이 가능하고 0.1 μm 수준의 개발이 가능할 것이다. 그러나 기존의 기술 즉 빛을 이용하는 방법은 형상의 크기가 0.3-0.35로 줄어드는 상황에서는 형상의 크기가 기존에 사용되던 G, I선의 파장 이하가 된다. 이를 개선하기 위해서는 더 짧은 파장의 광원을 사용하거나 이를 극복하기 위한 새로운 기술 또는 빛을 사용하지 않는 새로운 기술의 등장을 필요로 한다. 빛을 이용하는 경우 낮은 분해능을 높이는 방법으로 낮은 contrast를 높이거나 낮은 contrast로도 좋은 형상을 만드는 기술이 여러가지로 개발이 되고 있다.

알려진 바와 같이 projection optical lithography의 분해능은 Raileigh limit에 의해 결정된다.

$$R = k1 \frac{\lambda}{N.A}$$

Raileigh equation.

N. A. projection lens의 개수구

이 식에 따르면 고 분해능을 얻기 위해서는 파장을 줄이는 것이 가장 용이한 방법인 것처럼 보인다. 이에 따라 리소그래피에 사용하는 빛의 파장은 G-line (436nm)에서 I-line (365nm)으로 바뀌어 가고 있

으며 더 짧은 파장에 대한 개발도 빠른 속도로 진행되어 헤파대역 KrF excimer laser (248nm)를 이용한 5:1 축소 투영 stepper와 반사식 또는 복합식 광학계를 이용한 광대역 (240-260nm) 노광장치등이 개발되고 있다.

그러나 파장이 짧아지면 렌즈 재료에 제한이 많아져 개수구를 높이기 어려워진다. I-line에서도 대부분의 광학 유리가 불투명하여 많은 제한이 따르고, 그 이하에서는 Qz와 일부 결정 재료만이 사용가능

표 1. 파장별 최대 NA와 사용 가능한 광학재료

파 장	G-line	I-line	KrF	ArF
사용가능 NA	0.65	0.60	0.50	0.50
사용가능 광학재료	모든 광학유리	Qz, 광학유리	Qz, LiF, CaF2	Qz, LiF, CaF2

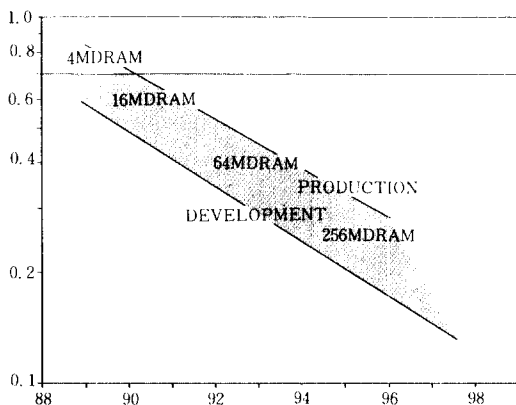


그림 1. DRAM 제조의 최소 선폭 변화

하다. 특히 200nm 이하의 파장을 갖는 광원을 사용할 경우 굴절광학계에서는 주 투영렌즈의 투과율이 최고 50%를 넘기 어렵다. 이 경우 단시간의 노광에는 사용 가능하나, 대량 생산 적용시 렌즈의 열팽창으로 거의 사용이 불가능할 것으로 보인다.

II. 미세 가공기술의 현황과 전망

1. 근자외선 광학계를 이용한 미세 형상 가공

오래전부터 이용되어 온 G-line의 뒤를 이어 16 M DRAM에서 부터 0.5 μ m의 분해능을 위하여 시작한 I-line 기술은 G-line에서 사용된 기술의 대부분을 그대로 이어받아 급격한 변화없이 개선되어 오고 있다. 노광장비를 제외한 대부분이 그대로 적용 가능하였고 일부 기술은 I-line에서 먼저 개발되어 G-line으로 이전된 것(CEM; contrast enhancement material)도 있다. 특히 CEM 내장형의 resist와 MLR 기술등이 실제 적용되면서 그 분해능은 급격히 개선되었다. 그 위에 위상 쉬프트 마스크(phase shift mask)를 이용할 경우 그 분해능은 Raileigh의 한계를 넘어 0.3 μ m 이하까지도 가능하게 되었다. 위상 쉬프트 마스크는 분해능을 낮추는 빛의 간섭을 역이용하여 분해능을 개선하는 기술으로써 기존장치를 그대로 이용하고 마스크만 바꾸어 최고 2배까지의 분해능을 낼 수 있다. 종래 마스크는 빛의 강도만 조절할 수 있었으나, 위상 쉬프트 마스크는 빛의 강도와 위상을 같이 조절하여 두가지의 정보로 패턴을 형성한다. 그러나 위상 쉬프트 마스크는 이론적으로는 큰 문제가

없으나, 실제 적용에 있어서 마스크 제작상의 가장 중요한 점의 하나인 무 결함 마스크를 제작하기가 어렵고, 특히 이 결함을 검사 수정하는 기술이 현재 까지 뒷받침되지 못하여 앞으로 수년간은 사용하기 어려울 것으로 보인다. 그러나 많은 연구가 진행되고 있으므로 조만간 실현될 수도 있을 것으로 보인다.

2. 원자외선 광학계를 이용한 미세 형상 가공

현재 가장 많은 연구가 진행되고 있는 원자외선 광학계를 이용한 미세 형상 가공기술은 다음 세대의 가장 주목받는 기술이라고 말할 수 있다. I-line에 비하여 파장이 67%이므로 이상적으로는 분해능이 33%가 개선된다. 그러나 현실에서는 렌즈의 개구수(NA)가 0.5정도로 제한되어 실질적으로는 25% 정도의 개선이 가능하다. 최근 개구수가 한계치 0.5에 이르고 field size가 30mm에 달하는 대구경이 개발되고 있는 상태이며 공정면에서는 chemically amplified resist의 개발과 더불어 resolution이 혁신적으로 개선되어 k factor가 0.5 수준에 달하는 장족의 발전이 이루어 졌다.

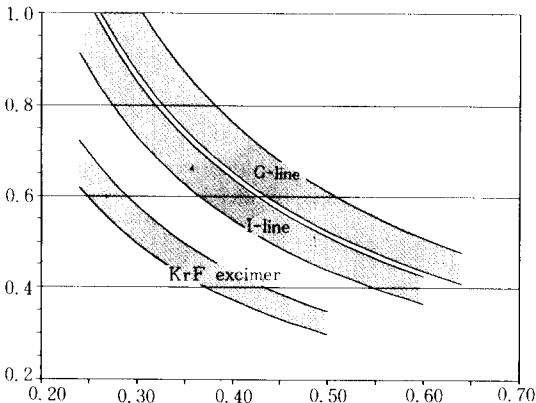


그림 2. 파장별 최소 분해능 변화

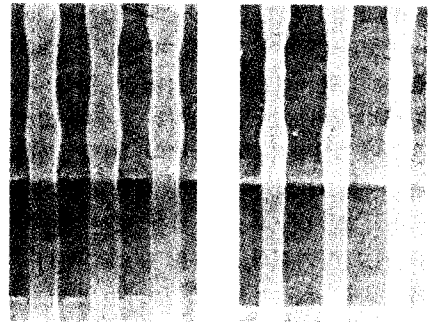


그림 3. 정재파에 의한 선폭변화 형상

그러나 단파장 광학계에서 발생하는 여러가지 문제점이 아직 해결되지 않은 상태이다. 대표적인 문제로는 resist의 높은 광흡수와 하저층의 고반사로 인한 정재파(standing wave) 문제가 심각하고, 단파장의 고 에너지광으로 인한 광학계의 오염등이 문제시되고 있다. 전자는 건식 식각시의 내성을 유지하기 위하여 phenol base polymer를 사용해야 하나 이 재료의 광투과율은 G-line이나 I-line에서 만큼 높아질 수 없다. Chemically amplified resist를 사용하면 sensi-

tizer 만큼 흡수율을 줄일 수 있으나, resist내의 catalizer의 안정성, 암 반응등의 문제와 더불어 catalizer의 확산으로 인하여 공정 관용도가 좁은 문제외에도 분해능의 감소가 일어날 수 있다. G-line과 I-line에서도 금속 배선층 등에 문제가 되고 있는 정재파 문제는 KrF laser를 광원으로 사용하면서 모든 layer로 확장되었다. G-line, I-line에서 20-30%의 반사율을 보이던 silicon의 반사율이 67%나 되어 사소한 단차위의 resist 두께변화에 대해서도 아주 심각한 수준의 선폭변화를 보이고 있다. 이를 해결하기 위해서는 기관의 반사를 억제하는 것이 바람직하나 이는 반도체 재료의 특성이므로 어렵고, resist의 투과율을 낮게하여 일부 억제가 가능하나 분해능의 감소가 따른다. 이중 앞의 두가지 문제는 서로 연결된 형태여서 기존의 일반적인 방법으로는 해결이 거의 불가능하다. 따라서 ARC(anti-reflective coating)를 적용하거나 기관의 반사와는 무관하게 패턴을 형성하는 방법으로 MLR(multilayer-resist)이나 silylation공정의 적용이 필수적으로 적용되어야 할 것이다.

3. 단파장, 광대역을 이용한 반사노광계

앞에서 본 바와 같이 KrF laser를 이용하는 방법은 여러가지 문제와 굴절 광학계의 여러가지 문제점을 가지고 있다. 그러나 단파장, 광대역(240-260nm)을 사용하는 반사형 노광계에서는 이러한 대부분의 문제를 해결할 수 있다. 특히 가장 심각한 양상을 보이는 정재파가 거의 나타나지 않으므로 실용화가 쉽게 가능하다. Step-and-scan 방식을 이용하는 4:1 축소 반사 노광장치를 이용할 경우 mask 제작이나 노광측면에서는 아무런 문제가 없다. Mask의 경우에는 4X, 6inch이므로 기존의 기술을 그대로 적용하는 것이 가능하며 field size를 mask 크기의 한계까지 늘릴 수 있는 장점이 있고, Hg-Xe lamp를 사용하여 laser와 관련되는 문제를 야기하지 않는다. Alignment에서는 excimer laser를 사용하는 장비가 이루어기 어려운 TTL(through the lens)을 실현하여 상대적인 장점이 있다. 그러나 기존의 이동계와는 다른 구조를 가진 이동계가 필요하며, 4:1의 속도로 움직이는 두 개의 다른 이동계가 10cm/sce의 속도로 움직이며 움직이는 동안에 상대적인 위치정확도가 0.04 μm 이내로 조절되어야 한다. 그러나, 이 기술은 새로운 기술이며 고도의 난이성을 갖는 기술로서 두 이동계간의 동기여부는 좀 더 깊이 확인해 볼 필요가 있다.

같은 Hg-Xe lamp를 사용하고 240-260nm의 광대역을 사용하는 장비로서 1X Half-Dyson system 또한 0.25 μm 영역의 좋은 장비로서 개발되고 있다. 광대역 노광계의 장점을 살리며 단순한 형태의 장비로 1X 반사광학계의 장점을 살려 개구수를 0.7로 대폭 증대시켜 분해능을 개선하고 field size를 확장하였다. 대부분의 전형적인 1X 노광계의 장점을 가지고 있으나 mask 제작방법이 기존의 방법과는 전혀 달라 새로운 기술개발이 요구되고 있다. 그러나 이 방법으로 제작된 mask는 제작중이나 사용시에 먼지의 영향을 거의 받지 않아 mask 제작이 되면 생산에서의 분해는 없는 것으로 보인다. 그리고 같은 1X를 사용하는 X-ray 근접노광과 비교하면 이 방법이 보다 간단한 것으로 보인다.

4. X-ray 노광기술

X-ray 근접노광의 기본적인 원리는 종래 오랫동안 사용해 온 광학 근접노광과 완전히 동일한 원리를 사용한다. 이 때의 극한 분해능은 다음과 같다.

$$R = k\sqrt{(S + t/2)} \lambda$$

S; mask to wafer거리

t; resist 두께

λ ; 사용파장

표 2. 최고수준의 분해능 예

파 장	X-ray(10Å)	광학(436nm)
분해능	0.15 μm	3 μm

$$S = 10, t = 1\mu\text{m}, k = 1.5$$

(S는 최소 10 μm 에서 50 μm 까지 사용된다.)

대체로 비례상수 k는 1.5정도이고, 이식에 따르면 X-ray 근접노광의 극한 분해능은 0.15 μm 정도가 된다.

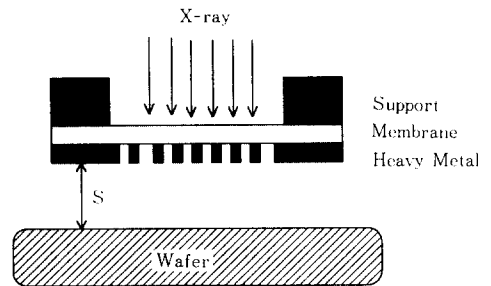


그림 4. X-ray 근접 노광

또한 X-ray는 fab내에서 유발되는 particle의 대부분을 차지하는 유기 물질을 투과하므로 particle를 무시할 수 있는 장점과 우수한 투과성으로 단층 resist로도 고 분해능이 가능한 잇점이 있다.

그러나, 이 기술이 70년대 초반부터 개발되면서도 실용화 되지 못한 이유는 X-ray용 mask의 개발 어려움에 있다. X-ray용 mask는 기판이 1-2 μm 의 membrane으로 만들어져 기판 자체의 제작이 어렵고 stress와 충격으로 쉽게 부서지는 특성을 가지고 있다. 그 위에 1 μm 두께의 중금속으로 패턴을 형성하는데 stress로 인하여 심한 distorsion이 발생하여 pattern 형성이 되어도 alignment spec.을 만족시키기 가 거의 불가능하다. 그러나 이런 이유보다도 이 기술을 더 지연시키는 이유는 급격히 발전한 optical lithography 기술이 이미 0.2-0.3 μm 의 가능성을 보이고 있기 때문이다. 따라서 차세대(즉 64M DRAM 시대)의 기술로서 X-ray 근접노광 기술은 적합하지 않다.

그러나 최근 개발되기 시작한 반사 투영 노광계를 사용한 X-ray 기술은 노광장비와 mask 모두 직층 반사막을 이용하며 (현재 기술로는 제작하기가 쉽지 않으나) 분해능과 초점 심도가 충분히 확보되는 기술이며 지금 사용되는 optical lithography 기술의 연장선상에 있어 차 세대의 기술로 충분한 조건을 갖추고 있다. 현재까지 나온 결과를 보면 NA = 0.05, $\lambda = 130\text{\AA}$ 로서 0.13 μm 의 분해능을 보이며 앞으로 NA가 0.13 정도까지 개발되면 분해능이 0.05 μm 에 이를 수 있다. 특히 이때의 DOF(depth of focus)는 1.0 μm 에 달하여 양산성이 있는 수준이 된다. 그러나 파장이 130 \AA 인 X-ray는 plasma source로부터 발생하는 약한 광원과 large SOR의 undulator등 insertion device로서만 가능하여 source 개발이 중요한 위치를 차지하고 장치와 source, mask 모두 많은 개발을 요구한다. 그러나 앞으로 십여년 후 0.1 μm 이하의 기술로서 가장 가능성이 있는 방법이다.

5. 전자선 노광기술

전자선 노광기술은 mask 제작이나 고주파 소자의 gate 형성에 많이 사용되어 왔다. 이 기술은 상대적으로 높은 분해능을 내어 실험용 또는 개발단계 소자의 개발에 적용할 수 있다. Proximity effect 등의 문제가 있으나 고 에너지 전자선(high acceleration voltage)등을 이용하여 일부 개선이 가능하며 다른 방법 (data 처리)을 이용하여 보완 가능성은 충분히

있다. 그러나 가장 큰 문제점은 순차적 노광에 따른 낮은 생산성에 있다.

64M DRAM에서 평균적으로 3-4 억회의 노광이 필요한데 평균 1 μs 만 소요시에도 chip당 5분, wafer당 3-4시간이 소요된다. 따라서 대량 생산이 필요한 경우에는 전혀 사용이 불가능하다.

최근 이러한 문제를 해결하기 위하여 반복이 많은 몇개의 flash를 mask로 만들어 노광하는 "cell projection" 방법을 적용할 수 있다. 여기에 고감도 chemically amplified resist가 같이 적용될 경우 생산성은 기존에 비하여 수 백배까지 향상되어 시간당 10 wafer 이상을 처리할 수 있어 광학 장비와도 비교할 수 있는 수준이 되어 대량 생산 체제에 적용될 가능성도 없지 않다. 그러나 proximity effect의 보정이 기존 장비에 비하여 어렵고 개발 되어야 할 부분이 많이 있으나 이 기술은 0.2 μm 이하에 대한 좋은 가능성을 보여 주는 것이다.

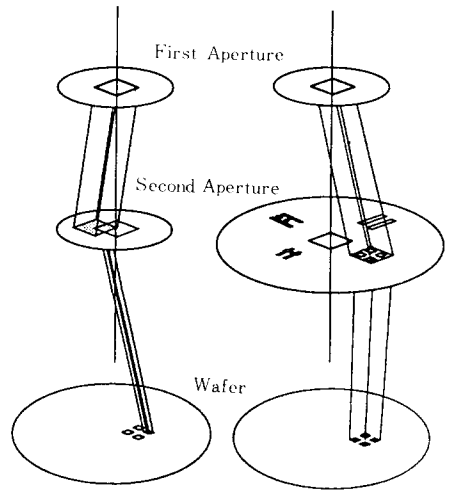


그림 5. Conventional, cell projection 전자선노광

6. 새로운 공정기술

기존의 lithography가 대부분 single layer resist를 이용하여 단순히 노광, 현상을 실시한 것에 비하여 앞으로의 기술은 훨씬 복잡한 것이 될 것이다. 분해능 향상이라는 측면에서 이를 개선하기 위한 방법과 정제과 문제등 제반 다른 문제를 해결하기 위하여 도입되는 기술로 나누어 생각할 수 있는데, 대표적으로 전자의 경우는 contrast enhanced material의 적용과 위상 쉬프트 마스크(phase shift mask)를 사용

하는 방법이고 후자는 표면 영상형성과 건식 현상기술의 적용이다. 물론 건식 현상 기술도 분해능 향상의 가능성을 충분히 가지고 있다.

위상 쉬프트의 적용은 분해능을 최고 2배이상 개선할 수 있다. 그러나 현재까지 제조 방법과 검사 수정하는 기술이 충분히 개발되지 않고 있으나 많은 연구가 진행되고 있으므로 64M DRAM 시대에 그 기대가 모아지고 있다.

CEM은 노광량에 따라 투과율이 변하는 물질로서 빛이 약한 부분을 아주 약하게, 강한 부분을 거의 그대로 투과시켜 contrast를 높이는 기능을 가진다. Resist 위에 CEM을 도포하고 노광하면 광학적으로 만들어진 영상의 contrast에 비하여 훨씬 큰 contrast를 갖는 영상이 resist에 전달된다. 이 경우 분해능이 20-30% 정도 개선되어 나타난다. 현재까지 이러한 물질은 I-line과 G-line용이 개발되어 있으나 250nm 근처에서도 원리적으로 충분히 가능하기 때문에 이러한 물질이 개발될 가능성은 많다. 특히 이 방법은 원리가 간단하고 공정이 단순하며 새로운 장비비를 요구하지 않아 쉽게 고분해능을 얻을 수 있다. 여기서 이상적인 분해능 개선을 위해서는 감광액의 감도와 CEM의 감도를 잘 조절하여 두 재료의 감도를 맞추는 것이 바람직하다. 최근에는 이런 기능을 갖는 고 해상도의 resist가 개발되고 있어 공정이 단순화되고 있다.

일반적으로 습식현상시 기관과 resist의 접촉성 불량으로 현상, rinse후 건조를 위하여 고속 회전할 때 떨어져 나가는 현상이 발생한다. 일상적으로 패턴이 큰 경우에는 잘 일어나지 않으나 0.5 μm 이하로 가면 심각한 문제로 등장하고 있다. 이는 건식 현상을 할 경우 전혀 문제가 되지 않는다. 일반적인 노광 현상시에는 정재파가 발생하고 -특히 KrF laser 광원을 사용할 경우에 심각하게 나타난다.- 단차상에서 notching, scum등이 발생하거나 고단차상에서 패턴형성이 불가능한 경우가 많다. 그러나 표면영상형성(surface imaging) 기술을 사용하면 단차등 하부 막질과 무관하게 패턴을 형성할 수 있다. 이 기술의 대표적인 방법이 DESIRE(defusion enhanced silylating resist)이다. 이는 resist의 투과율을 극단적으로 낮추어 내부로부터의 반사율을 낮추고, 노광 후 silicon함유 가스(silazane)를 주입하여 resist 내부의 phenol기에 치환시킨다. 이렇게 silicon이 함유된 resist를 산소 플라즈마를 이용하여 건식 식각하게 되면 silicon이 함유된 부분은 상대적으로 식각속도가

낮아 건식 식각후에도 남게 된다. 이러한 방법은 MLR에 비하여 공정이 간단하고 소요시간이 짧아 적용의 가능성이 높은 것으로 생각된다. 특히 이 방법은 KrF excimer laser를 광원으로 사용하는 경우가 가장 큰 문제가 되는 정재파문제와 resist 투명도 문제를 동시에 해결할 수 있어 이를 필수적으로 적용하여야 할 것으로 보인다.

이 외에도 많은 새로운 기술이 도입되고 있고 도입되어야 할 것이며 이런 새로운 기술은 많은 경우 새 장비의 도움없이도 개발할 수 있는 경우가 많이 있으므로 우리나라에서도 새로운 기술의 개발에 노력하여야 할 것이다.

7. 64M DRAM과 256M DRAM의 미세 형상 형성 기술

64M DRAM에는 0.30-0.35 μm , 256M DRAM에서는 0.20-0.25 μm 의 패턴의 형성이 요구된다. 설계나 소자 구조에 따라 달라질 수 있으나 이를 개발 생산하기 위하여 사용할 패턴 형성방법은 과연 무엇이 될 것인가 반도체 업계의 큰 관심사가 되고 있다. 특히 64M DRAM의 생산이 어떤 장치를 사용할 것인가 하는 문제는 보는 입장에 따라 서로 다른 견해를 보이고 있어 더 결정하기 어려운 상황에 있다. 최근 관심있는 회사를 대상으로 조사한 결과에 따르면 I-line 광원에 phase shift mask를 사용하는 방법과 KrF excimer laser stepper를 사용하는 방법을 지지하는 회사가 거의 같은 수를 보이고 있으며, 같은 회사 내에서도 다른 의견은 보이는 경우도 많은 것이 현실이다. 이는 phase shift mask의 개발과 excimer laser를 사용하는 공정이 둘 다 충분히 개발되지 않고 있음을 의미하는 것이기도 하다. 그러나 좀더 들여다 보면 phase shift mask는 DRAM에는 적용이 용이하나, 다른 소자에는 일률적으로 적용되기 어렵고, excimer laser를 사용하는 경우에는 공정상의 난제와 장치의 가격, 유지비 등이 문제가 되고 있다. 그러나 지금까지의 경험으로 보아 64M DRAM을 생산하는 공장에서는 16M SRAM등 유사한 수준의 소자가 동시에 생산될 것이 예상되므로 두 가지 장비와 공정이 같이 사용될 가능성이 크다. 즉 PSM 적용이 용이한 부분에서는 PSM을 사용하고, 그 외의 부분에서는 I-line 단독이나 KrF excimer laser를 사용할 경우 앞에서 열거한 문제점은 최소화될 수 있을 것으로 생각된다.

그러나, 64M DRAM에 대해서는 많은 이견이 있음에도 불구하고 256M DRAM에 대해서는 대부분의 의

견이 일치하여 모든 회사에서 KrF excimer laser stepper와 phase shift mask의 동시 적용을 그 방법으로 제시하였다. 이는 앞으로 4-5년 후에는 이러한 공정이 충분히 개발될 것이라는 기대와 반대로 다른 공정이나 장비(cell projection electron beam, X-ray등)가 그만큼 개발되지 못할 것임을 의미하는 것으로 받아들일 수 있다.

Ⅲ. 결 론

다음 세대의 노광 기술로서 KrF excimer laser 또는 광대역 방사노광장치를 이용하는 것이 가장 이상적이다. 장치 측면에서 보면 이들은 충분히 개발되어 있어 현재라도 적용할 수 있는 단계이나, resist를 포함한 chemical 측면과 공정측면을 포함한 물리학적 이유로 적용이 지연되고 있다. 따라서 이들은 조만간에 실제로 적용될 것으로 보이며 phase shift mask와 더불어 256M DRAM까지도 충분히 사용 가능한 것으로 생각된다. 그 이후의 공정 또한 많은 연구가 이루어지고 있어, 앞으로 상당한 기간동안 소

자개발의 한계가 패턴형성 그 자체에 있지는 않을 것으로 보인다.

參 考 文 獻

- [1] J.D. Buckley et al., Proc. SPIE, vol. 1088, p. 424, 1989.
- [2] V. Pol, et al., Proc. SPIE, vol. 1088, p. 6, 1986.
- [3] A. Tanimoto, et al, Proc. SPIE, vol. 1088, p. 434, 1989.
- [4] M. Sasago et al., Proc. SPIE, vol. 1264, p. 466, 1990.
- [5] Y. Ozaki et al., Proc. Micro Process Conference, 1990.
- [6] J.W. Thackeray et al., Proc. SPIE, vol. 1086, p. 24, 1989.
- [7] M. Sugawara et al., Proc. EIPB, p.1561, 1989.
- [8] J.D. Buckley et al., Proc. EIPB, p. 1607, 1989.
- [9] O.R. Wood et al., Proc. EIPB, p. 1613, 1989.
- [10] H. Kinoshita et al., Proc. EIPB, p. 1648, 1989.
- [11] J.M. Shaw et al., Proc. EIPB, p. 1709, 1989.



筆 者 紹 介



姜 浩 英

1963年 1月 10日生

1985年 2月 서울대학교 물리학과 졸업

1985年~현재 삼성전자 기흥연구소 연구 1 실

주관심분야 : MASK 제작, Lithography (Electron Beam)