

반도체 공정용 리소그래피 기술의 최근 동향

Recent Trends of Lithographic Technology

정태진(T.J. Chung)

산업지도팀 책임연구원, 팀장

유종준(J.J. You)

벤처창업지원팀 선임연구원

Phase-shifting masks (PSM), optical proximity correction (OPC), off-axis illumination (OAI), annular illumination (AI)의 리소그래피 분해능 향상 기법과 deep ultraviolet photoresist의 개발 및 리소그래피의 최근 기술 동향을 요약 소개한다. DUV 리소그래피의 대안으로 관심을 끌고 있는 scattering with angular limitation projection electron-beam lithography (SCALPEL[®]), extreme ultraviolet lithography (EUVL), X-ray lithography (XRL), ion projection lithography (IPL) 등의 새로운 리소그래피 기술들의 기본 원리와 최근 기술 동향도 소개하였다. 리소그래피는 반도체 공정에 있어서 가장 중요한 부분을 차지하기 때문에 리소그래피의 최근 기술 동향을 검토해 봄으로써 국내 리소그래피 장비 산업의 기술 개발을 위한 방향 설정에 도움이 될 것으로 생각한다.

I. 서론

오늘날 문명의 발전은 상당한 부분이 반도체 기술의 발달과 더불어 이뤄졌음을 부정하는 사람들은 그렇게 많지 않을 것이다. 반도체라고 하면 반도체 자체의 물성적 성질이나 반도체 논리 소자의 특성을 생각하기보다는 수십 mm²속에 수십만 개의 반도체 소자가 집적되어 있는 집적회로(integrated circuit: IC)가 먼저 떠오른다. RLC 수동 소자와 반도체 소자들을 이용하여 이 집적회로를 기판 상에 설계한다면 그 회로의 부피는 대단히 클 것이다. 이러한 거대한 부피의 회로를 단지 수십 mm²의 면적으로 축소하는 기술을 리소그래피(lithography)라 한다. 리소그래피 기술의 발전이 없었다면, 오늘날 PC나 PCS가 인간의 일상 생활 속에서 보편화될 수 없었을 것이다. 그러므로

반도체 기술은 리소그래피의 발전과 더불어 발전하였고, 리소그래피의 발전은 오늘날의 문명 발전의 핵심을 차지하고 있다고 말할 수 있다.

반도체 소자 제조업체는 단위 웨이퍼당 보다 많은 칩을 생산하여 보다 많은 이윤을 얻으려 한다. 또한 우수한 성능의 칩을 생산하기 위해 보다 많은 소자를 집적하기 때문에 칩의 크기도 증가하게 되었다. 단위 웨이퍼당 이윤의 한계에 도달하였을 때마다 반도체 제조업체는 design rule (DR)을 축소시켰고 웨이퍼의 크기를 증가시켜왔다.

반도체 소자 제조업체는 436nm (mercury g-line)의 파장을 이용하여 0.5 μ m DR을 구현하였고 365nm (mercury i-line)을 이용하여 0.35 μ m DR을 구현하였으며, 지금은 248nm (KrF excimer

laser)을 이용하여 $0.25\mu\text{m}$ DR이 실현되었고 조만간에 198nm (ArF excimer laser)를 이용한 $0.18\mu\text{m}$ DR 시대의 개막을 앞두고 있다. 또한 157nm (F_2 excimer laser)를 이용하여 $0.15\mu\text{m}$ DR을 구현하려는 연구도 활발히 진행중이다. 248nm 와 198nm 는 deep ultraviolet (DUV) 파장 범위에 속하며 이 DUV 광선을 이용한 리소그래피를 DUV lithography (DUVL)라고 한다[1].

그러나 노출 광선의 파장이 DUV로 이동하면서 새로운 198nm DUV용 광절연도료(photoresist) 개발이 시급하며 stepper의 내부에서 광선을 운반하고 안내하는 렌즈(fused silica)가 DUV에 대해 좋지 않은 광학 특성을 갖는 등의 문제가 대두되고 있다[1, 2]. 많은 연구가들은 파장이 198nm 까지 내려오면 광학 리소그래피(optical lithography) 기술이 한계에 도달할 것으로 생각하며 이러한 DUVL의 문제들을 피하려고 scattering with angular limitation projection electron-beam lithography (SCALPEL[®]), extreme ultraviolet lithography (EUVL), X-ray lithography (XRL), ion projection lithography (IPL) 등의 새로운 리소그래피 기술들의 필요성을 강조하고 있다.

본고는 반도체 공정용 DUVL의 최근 기술동향을 요약 및 소개하고 DUVL의 대안으로서 새롭게 각광받고 있는 그 밖의 리소그래피 기술들의 최근 기술동향을 논하고자 한다.

II. 광학 리소그래피

광학 리소그래피는 광학 현미경을 이용하여 리소그래피를 구현하는 기술을 말한다. 광학 리소그래피를 이용하여 반도체를 제조하는 데 있어서 가

장 중요하게 고려해야 할 것은 높은 분해능, 높은 depth of focus (DOF), 낮은 k_1 계수이다.

광학 렌즈의 분해능은 Heigenberg의 불확정성 원리에 의해서 (광학적 용어로 말하자면 파동의 회절 현상에 의해서) 제한되어 있다. Rayleigh는 분해능을 λ/NA^2 로 표현하였다. λ 는 파장, NA는 렌즈의 numerical aperture이다. 높은 분해능을 얻기 위해서는 λ 를 줄이고 렌즈의 직경을 크게하여 NA를 높인다. 그러나 DOF는 λ/NA^2 로 표현되기 때문에, 높은 분해능을 얻기 위해서는 DOF와의 “trade-off”를 고려해야 한다. k_1 은 리소그래피 공정의 난이도를 표현하는 계수로서 $w\text{NA}/\lambda$ 으로 나타낸다. w 는 인쇄하고자 하는 선 폭을 의미한다. k_1 은 photoresist의 감도, 리소그래피 장비의 유연성, 정확한 CD 제어, 마스크 제작의 난이도, 현상 공정의 난이도 등을 내포하고 있다. k_1 의 이론적 한계는 0.25이다. 리소그래피 공정의 최적화를 위해서 사용되는 또 하나의 계수 σ 가 있다. 사용되는 광선의 단면 내부를 어느 정도 차단하는가(blocking)를 나타낸다. 다시 말하면 σ 는 광선의 부분 일관성(partial coherence)을 의미한다.

III. 노광 기술

Stepper는 지금까지 반도체 소자 제조업체들이 사용해온 노출 장비이었다. 마스크 상의 패턴을 통과한 광선을 렌즈로 웨이퍼 위에 증착된 photoresist 박막에 집광하는 장치이다. 마스크는 IC 전체 회로를 포함하고 있으며 최적 시간 동안 일정 면적의 photoresist를 노광한 후 stepper는 웨이퍼를 한 단계 이동하여 photoresist 박막의 다른 위

〈표 1〉 상업용 DUV 리소그래피 장비

업체	모델	파장(nm)	NA	분해능(nm)	DOF(nm)	렌즈 field (mm ²)
ASML	PAS5500/90	248	0.4-0.5	0.25	0.7	21 × 21
Canon	FPA-3000EX LS	248				
ISI	XLS7800/31	248	0.35-0.53	0.25	0.8	
	ELS4000	248				
	193nm MicroStep	193				
Nikon	NSR2005FX10B	248				
	NSR-S5201A	248	>0.6	<0.25		25 × 33
	NSR-S5202A	248				
SVGL	MICRASCAN II	248	>0.6	<0.25		<22 × 50
	MICRASCAN III	248				
	193nm Micrascan	193				
Ultratech	Titan	248				

치를 노광하고 웨이퍼 전체를 모두 노광할 때까지 웨이퍼를 한 단계씩 이동시킨다(그림 1).

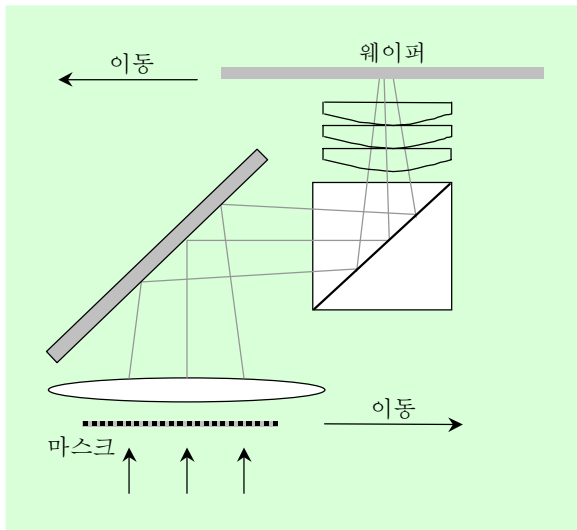
Stepper에서 사용되는 투사 렌즈는 마스크 전체 면적을 투사할 수 있어야 한다. IC의 회로가 커지면 마스크의 크기도 증가하며 이에 따라 렌즈의 투사 면적(field)도 증가해야 하기 때문에 렌즈의 직경도 커지게 된다. 렌즈의 직경이 커지면 렌즈의 수차(aberration), 코마(coma), 비점 수차(astigmatism) 등을 제어하기가 어려워진다. IC의 크기가 커지면서 렌즈의 field가 더 이상 마스크의 전체를 포함할 수 없게 되었다.

렌즈 투사 면적의 한계를 극복하는 두 가지의 방법이 있다. 마스크의 전체 면적을 렌즈 투사 면적으로 나누어서 마스크의 전체를 photoresist에 노광하는 “mix-and-match” 방법이 있다. 마스크의 면적이 렌즈 투사 면적보다 4배가 크다면 마스크를 4배로 나누어서 photoresist를 노광해야 한다. 마스크를 슬릿을 통해 주사하고 동시에 웨이퍼를

마스크의 주사 속도와 일정 비율의 속도로 주사하면서 마스크의 전체 면적을 photoresist에 노광하는 “step-and-scan” 방법도 있다(그림 1). 4배 축소 투사 렌즈 (4× reduction lens)가 사용된다면 웨이퍼의 주사 속도는 마스크의 속도보다 4배 느리다.

Step-and-scan 방식은 주사하는 동안 렌즈의 광학 특성이 주사 거리에 걸쳐서 평균되어지기 때문에 IC의 속도를 결정하는 요소인 across-chip linewidth-variation (ACLV)가 작다. 그러나 웨이퍼의 거칠기가 균일하지 않으면 ACLV 효과가 크고 마스크와 웨이퍼를 일정한 비율의 속도로 정확하게 주사하는 기술이 요구되며 마스크와 웨이퍼 사이의 경사는 리소그래피의 성능을 저하시킨다. 지속적인 소자 크기의 증가 추세는 리소그래피 장치의 제작을 더욱 어렵게 만든다.

DR이 작아질 때마다 기존의 리소그래피 장비를 개조하거나 새로운 장비들이 개발되어야 한다.



(그림 1) Steper의 기본구조

장비 업체들은 i-line 시스템을 개조하여 228nm 파장을 사용할 수 있도록 하거나 228nm 전용 시스템을 제작하고 있다. 일부 업체는 발 빠르게 산학연 공동연구를 통하여 193nm 시스템 개발을 완료하여 출품하기도 하였다(표 1).

IV. 리소그래피 분해능 향상 기술

반도체 소자 제조업체는 리소그래피 마스크의 패턴과 정확히 같은 그림을 photoresist에 노출시켜야 한다. 그러나 248nm DUV 광선을 이용하여 분해능의 한계인 $0.5\mu\text{m}$ DR의 회로를 photoresist에 인쇄하면 회절과 산란 현상에 의해서 마스크의 패턴과 같은 이미지를 얻을 수 없다. 이러한 광선의 파동 현상은 선 폭 주변에서 간섭 현상을 일으켜 원래의 마스크 패턴이 왜곡되어서 인쇄되기 때문이다. 이런 마스크의 패턴이 왜곡되는 것을 방지하기 위하여 phase-shifting masks (PSM)과 optical proximity correction (OPC) 방법이 이용된

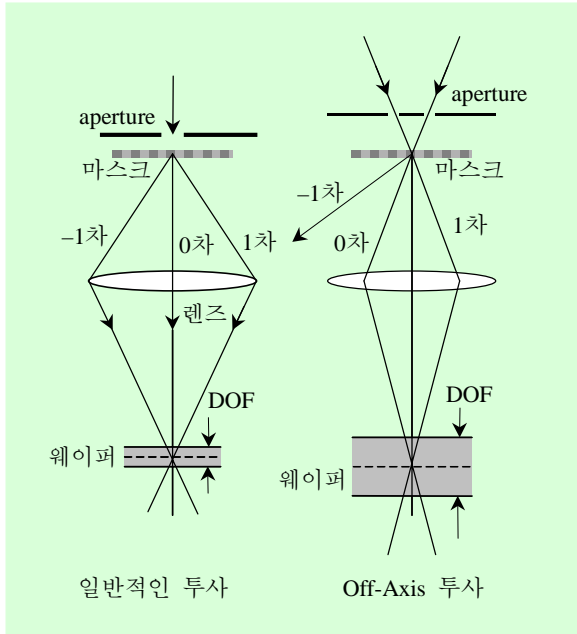
다[2]. 반도체 소자 제조업체는 이 방법을 이용하여 분해능의 한계를 다소나마 극복할 수 있다.

일반적으로 리소그래피 마스크를 통과한 광선은 광선의 세기만 조절하여 photoresist를 노광하기 때문에 인쇄하고자 하는 선 폭이 분해능의 한계에 도달하면 회절과 산란에 의해서 선 폭 주변에 간섭 무늬가 나타난다. PSM 방법은 원래의 IC 패턴 마스크와 더불어 별도의 PSM 마스크를 이용하여 통과한 광선의 위상과 세기를 조절하여 photoresist 박막 위에 간섭 무늬가 나타나지 않도록 하는 방법이다[2]. PSM 마스크는 여러 겹의 마스크 층으로 이루어졌으며 제작이 매우 어렵고 제작비도 매우 높다.

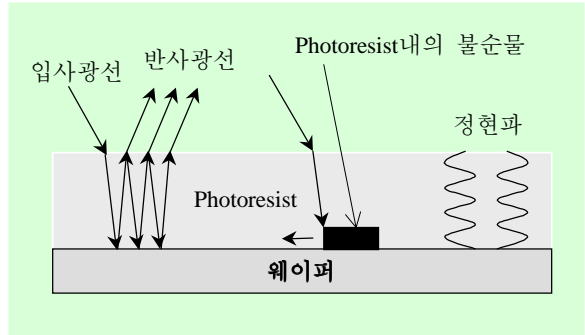
회절과 산란 현상에 의해서 photoresist 박막 위에 왜곡된 이미지가 나타나는 것을 방지하고 IC설계자가 원하는 모양의 패턴이 나타나도록 원래의 마스크 패턴을 인위적으로 (간섭 무늬가 상쇄되도록) 변조시킨 마스크를 이용하여 리소그래피를 하는 방법을 OPC라고 한다.

분해능을 높이기 위해서 NA를 증가시키면 DOF가 낮아진다. NA를 증가시키면서 DOF를 높이는 광학적인 방법을 off-axis illumination (OAI)라고 한다. OAI는 마스크를 통해서 산란되어 나오는 광선 전체 (-1차, 0차, +1차)를 렌즈로 집광하는 대신 0차와 +1차 광선만을 집광하여 DOF를 높이는 기술이다(그림 2)[3].

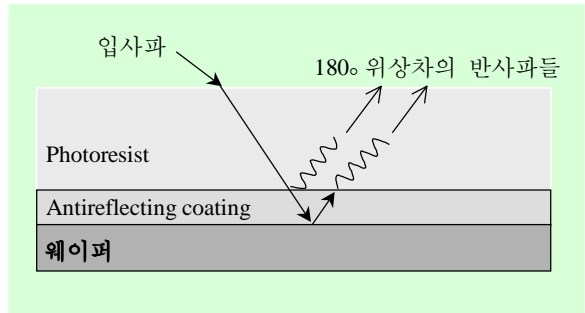
광선의 파동의 일관성(coherence)을 변화시키면 σ 를 조절할 수 있어 리소그래피의 성능을 최적화하여 보다 선명한 선 폭의 이미지를 인쇄하는 방법을 annular illumination (AI)이라 한다. 광선의 일관성을 조절하면 회절과 산란 현상을 억제할 수 있어 간섭 무늬를 어느 정도 제거할 수 있



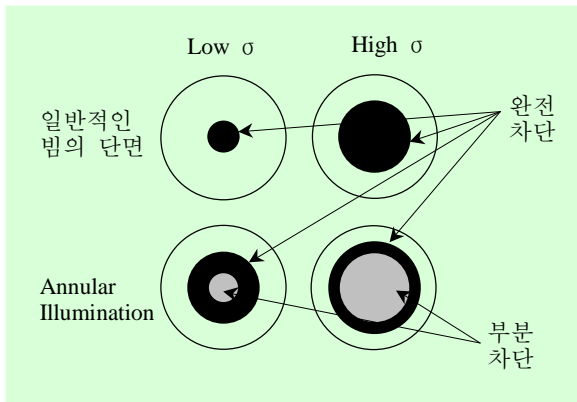
(그림 2) Off-Axis Illumination에 의한 DOF향상



(그림 4) Photoresist 웨이브 가이드 현상



(그림 5) ARC코팅에 의한 반사파 상쇄



(그림 3) Black disk에 의한 빔의 단면 차단 조절 (σ 조절)

기 때문이다. (그림 3)에서와 같이 광선의 단면 내부를 광학적으로 가리면 광선의 일관성을 조절할 수 있다[3].

Photoresist 박막은 광선에 대해서 웨이브 가이드

드 역할을 한다. photoresist 내부에서 반사/투과된 광선은 결국 CD제어를 어렵게 하고 ACLV를 높이는 결과를 초래한다(그림 4). 또한 photoresist 내부에서 발생하는 정현파 현상과 지지기판 표면의 물리적 화학적 불균일도 리소그래피의 성능을 저하시킨다. 선 폭이 $0.35\mu\text{m}$ 이하로 내려가면서 이런 현상은 더욱 더 심하게 나타나 반도체 소자 개발자의 의욕을 저하시킨다. 이런 현상이 발생하는 것을 방지하기 위해서 antireflective coating (ARC)을 지지기판 위에 증착하여 photoresist 내부에서 반사파 발생을 억제하는 방법(그림 5)과 photoresist에 색소 분자(dye)를 첨가하여 반사파를 흡수시키는 방법이 이용되고 있으며 전자의 방

법이 보다 효과적이다. 기존의 ARC 증착은 “spin-coating” 방법을 사용하였으나 선 폭이 0.35 μm 이하로 내려가면서 보다 정확한 ARC 박막의 성분과 두께의 제어가 필요하여 CVD를 이용한 증착 기술이 이용되고 있다[4].

〈표 2〉 리소그래피 분해능 향상 효과[1]

	i-line	248nm	193nm
가변 NA	0.35 μm	0.25 μm	0.18 μm
AI	0.35 μm	0.25 μm	0.18 μm
OAI	0.30 μm	0.20 μm	0.15 μm
OPC	0.30 μm	0.20 μm	0.15 μm
PSM	0.25 μm	0.18 μm	0.13 μm

위에서 기술한 다섯 가지의 광학적 기교를 이용하면 보다 선명한 선 폭을 인쇄할 수 있고 낮은 k_1 계수를 얻을 수 있으며 분해능의 한계를 다소 극복할 수 있다. 〈표 2〉는 이들 기법을 이용하여 얻을 수 있는 분해능의 한계를 보여준다. i-line을 이용하여 0.25 μm 의 선 폭을, 248nm 광선을 이용하여 0.18 μm 의 선 폭을 구현할 수 있기 때문에 i-line 장비나 248nm DUV 장비를 다소 개조하면 새로운 설비 투자비를 절약할 수 있다. 그러나 DR은 계속적으로 작아지는 추세이기 때문에 위의 방법들은 분해능의 한계에 도달하였을 때 보다 선명한 패턴을 인쇄하고자 할 때 이용될 뿐이며 높은 분해능의 리소그래피 장비를 구입하는 것이 장기적인 관점에서 보다 유리하다.

V. DUV Photoresist의 최근 개발 동향

리소그래피 장비만의 발전은 결코 DR의 축소를 따라갈 수 없다. photoresist는 파장의 변화에

매우 민감한 광학 특성을 갖고 있기 때문에 파장의 변화에 따라 새롭게 합성되어야 하며, 고 분해능의 장비와 더불어 새로운 파장에 대한 새로운 photoresist가 개발되어야 DR의 축소를 따라갈 수 있다. novolac/diazoquinone photoresist는 g-line, i-line, 365nm의 파장에 대한 광학 특성이 거의 유사하여 이들 파장 대역에서의 리소그래피를 위해 널리 사용되어 왔다. 그러나 이 photoresist는 248nm에 대한 감도가 매우 낮고 흡수도가 매우 높아서 더 이상 사용될 수 없고 새로운 photoresist가 개발되어야 했다.

Chemical amplification (CA)이라는 화학적 현상을 이용하여 1982년에 248nm에 대해서 높은 감도를 갖는 새로운 photoresist가 IBM에 의해서 개발되기 시작하였다. CA는 photoacid generator (PAG)를 photoresist를 형성하는 고분자 수지에 첨가하여 노광과 post exposure bake (PEB) 과정 중에 발생하는 acid로 하여금 노광된 지역의 photoresist 수지 고분자의 분해를 촉진시키는 현상이다[5]. 그 후 여러 가지의 248nm photoresist가 개발되었다.

그러나 불행하게도 이미 개발된 248nm photoresist는 198nm 파장에 대한 흡수도가 너무 높기 때문에 198nm 리소그래피를 위해서는 새로운 photoresist가 개발되어야 한다. 현재 활발히 연구가 진행되고 있으나 완벽한 198nm photoresist는 개발되어 있는 상태가 아니다.

1. 248nm DUV Photoresist

248nm photoresist 연구 개발은 IBM에 의해서 주도되어 왔다. 최초의 248nm photoresist는 “tBOC”이었고 IBM은 이 photoresist를 이용하여

1M DRAM을 개발하였다. 그 후 Shipley, Hoechst, Olin, JSR, TOK 등의 photoresist 생산업체가 여러 photoresist를 생산하고 있다.

〈표 3〉 248nm DUV photoresist[6]

제조업체	수지 platform	제품	선평변화/ PEB온도 (nm/°C)
Shipley		APEX-E	15
	ESCAP	UVIHS	4-8
	ESCAP	UVIII	4-8
JSR		K series	
	ESCAP	KRF-L	
		KRF-R	
Olin	Acetal group	ARCH2	< 3
TOK		TDUR-P007	
		TDUR-P009	
Hoechst	Acetal group	AZ DX-1179	< 3

〈표 3〉은 양각 CA photoresist들을 보여준다[6]. 모든 양각 CA photoresist는 공통적으로 아래와 같은 몇 가지의 문제를 갖고 있다. photoresist는 노광된 후 공기 중에 내재해 있는 미량의 염기 성분(amines, N-nethylpyrrolidone)을 흡수하기 때문에 PEB가 지연되면 선 폭이 가늘어지는 현상이 발생한다. 이 현상을 PEB delay 효과라 한다. 고분자 분해에 필요한 활성화 에너지가 높은 수지를 이용한 photoresist는 높은 PEB delay 효과를 갖는다. 그러나 ESCAP은 높은 활성화 에너지를 가지나 UVIHS[®]나 UVIII[®]는 상대적으로 낮은 PEB delay 효과를 보인다. 또한 ketal/acetate group은 저 활성화 에너지를 가지며 이를 이용한 양각 CA photoresist는 낮은 PEB delay 효과를 보인다. 양각 CA photoresist는 질소를 포함하고 있는 SiN이나 TiN 같은 지지기판에 대해서 흡착력이 커서 식

각 효과가 나쁘다. 이를 보완한 양각 CA photoresist는 ARCH2[®]이다. 그러나 저 활성화 에너지 수지를 이용한 양각 CA photoresist에 대해서는 정현과 패턴이 쉽게 나타난다.

음각 CA photoresist는 양각 CA photoresist 만큼 종류가 많지 않다. 음각 CA photoresist는 PEB delay 효과가 낮은 반면 SiN이나 TiN 같은 지지기판에 대해서 notching과 microbridging이 쉽게 발생한다. Shipley 사의 SNR200[®], CGR248[®], UVN Prototype-C[®]와 TOK 사의 TDUR-N908[®] 등이 음각 CA photoresist로 사용되고 있다.

2. 193nm DUV Photoresist

248nm DUV photoresist를 형성하는 대부분의 고분자 수지(페놀 혹은 hydroxylstyrene)의 흡수도가 193nm에 대해서는 매우 높기 때문에 새로운 193nm DUV photoresist가 개발되어야 한다. 248nm DUV photoresist 개발 때와 같은 방법으로 대부분의 개발자들은 새로운 저 흡수도 고분자 수지에 새로운 PAG와 새로운 dissolution inhibitor (DI)를 첨가함으로써 새로운 193nm photoresist를 개발하려고 한다[7].

새로운 저 흡수도 고분자 수지는 다음과 같은 특성을 가지고 있어야 한다.

- 1) 우수한 양각 식각 특성을 위한 고 친수성 (hydrophilicity)
- 2) 우수한 열적 특성을 위한 고 유리 전이 온도 t_g (glass transition temperature)
- 3) 우수한 식각 저항력을 위한 방향성 유기 성분 (aromatic rings)
- 4) acid의 분해 능력을 갖는 hydroxyl group 함유

IBM/MIT Lincoln Laboratory는 iodonium triflate onium (PAG)과 methacrylate 삼량체 고분자를 이용하여 Version 1이라는 최초의 193nm DUV photoresist를 개발하였다. 이들은 Version 1으로 SVGL사의 Micrascan 193 prototype[®](0.5NA)을 이용하여 0.22 μ m 선 폭을 만들었고, Version 1B[®]로 XLS사의 GCA[®]를 이용하여 0.3 μ m 선 폭을 만들었으며, Version 1C[®]로 ISI사의 ArF MicroStep[®](0.6NA)을 이용하여 0.13 μ m 선 폭을 만들었다. 그러나 Version 1 계열의 photoresist는 대단히 낮은 식각 저항력을 갖고 있어 새로운 193nm DUV photoresist 개발이 계속 진행 중이다.

Acrylic 고분자, maleic anhydride 고분자, cyclic olefin 고분자 등이 유망한 193nm DUV photoresist용 수지로서 연구가 진행되고 있다[8]. Acrylic 고분자는 Toshiba, NEC, Fujitsu 등의 일본 반도체 소자 제조업체에 의해서 연구되고 있으며 maleic anhydride 고분자는 Lucent Technologies, Bell Labs, 삼성, 현대가 활발히 연구하고 있으나 식각 저항력이 매우 낮은 결점이 보완되어야 한다. cyclic olefin 고분자는 University of Texas (Austin, Texas), IBM, BF Goodrich (Brecksville, Ohio)에 의해서 연구가 진행되고 있고 식각 저항력이 우수하다. 그러나 아직 완벽한 193nm DUV photoresist는 개발되지 않은 상태이다.

VI. 자외선 흡수에 의한 유리 응축

광학에서 사용되는 렌즈는 quartz, CaF₂, LiF₂, MgF₂의 물질로 만들 수 있으나 이들은 자외선에 대한 높은 흡수도와 나쁜 열적 특성과 매우 힘든

표면 가공 기술 때문에 DUV 리소그래피를 위한 렌즈로 사용될 수가 없었다. Fused silica는 우수한 열적 특성과 낮은 흡수도 및 표면 가공의 용이함으로 DUV 리소그래피용 렌즈의 재료로서 이용되고 있다. 그러나 최근에 DUV 광선이 fused silica 내부에서 color center 형성과 응축 현상이 발생하는 것이 보고되었다. 이들 현상은 DUV 광선을 흡수하여 렌즈의 온도를 높이고 렌즈내의 SiO₂ 분자의 배열을 바꾸어 렌즈의 유전 상수를 변화시킨다[8].

Color center는 작은 양의 에너지를 흡수하고 시간이 지나면서 color center 형성이 포화되기 때문에 리소그래피 성능 저하에는 큰 영향을 미치지 않으나, 렌즈의 응축은 DUV를 사용하는 시간에 비례하여 계속적으로 진행하여 장시간 후에는 렌즈의 특성을 크게 바꾸고 렌즈를 통과한 광선의 광로차를 변화시켜 리소그래피 성능을 저하시킨다.

최근의 보고에 의하면 DUV에 의한 렌즈의 응축 현상은 이중 광자(2 photons) 흡수 현상이고 193nm는 248nm보다 fused silica 렌즈의 응축을 20-30배 빠르게 진행시키며 렌즈의 응축은 $\Delta\rho/\rho = k(NI/\tau)^{0.7}$ 으로 표현된다. $\Delta\rho$ 는 DUV 통과 후 렌즈의 밀도차, ρ 는 DUV 통과 전 렌즈의 밀도, τ 는 DUV 광선의 펄스 길이(ns), N 은 렌즈를 통과한 펄스의 수, I 는 펄스당 에너지, 그리고 k 는 비례 상수이다. 렌즈의 밀도 변화는 렌즈의 두께를 변화시킨다: $(\Delta L/L) \approx 0.19(\Delta\rho/\rho)$. L 은 렌즈의 두께이고 ΔL 은 두께의 변화이다. 렌즈의 두께가 1cm이고 파장이 193nm이면, 1ppm의 응축은 2.7nm의 광로차를 발생시키기 때문에 고 분해능

의 선폭의 CD 제어를 어렵게 한다. 렌즈를 통과하는 광선 레이저의 전력을 낮추고 펄스의 길이를 늘리면 렌즈의 응축을 약화시킬 수 있으나 정기적으로 렌즈를 교체해야 한다. 그러나 높은 NA와 넓은 투사 면적을 갖는 렌즈의 제작이 매우 어렵기 때문에 보다 근본적인 해결책이 필요하다.

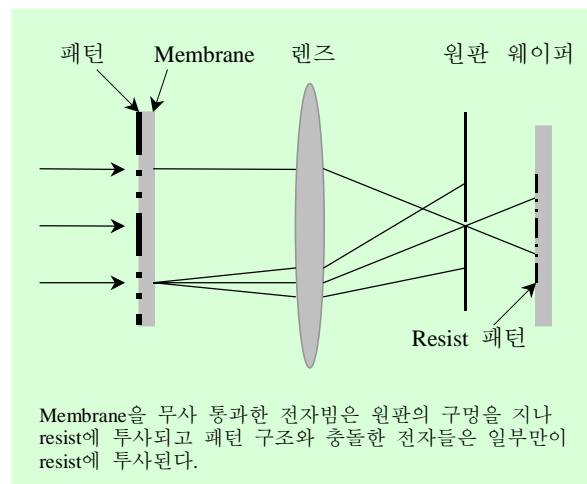
VII. DUV 리소그래피의 대안 기술

파장이 193nm로 내려오면서 새로운 193nm photoresist가 개발되어야 하고 fused silica 렌즈의 응축 현상을 극복해야 한다. 193nm 파장으로 얻을 수 있는 분해능의 한계는 $0.13\mu\text{m}$ 정도이고, $0.100\mu\text{m}$ 의 한계를 넘기 위하여 보다 짧은 파장을 이용하고 NA를 높이려면 새로운 photoresist를 개발해야 하고 DOF가 줄지 않도록 하는 새로운 기술이 필요하다. 많은 리소그래피 기술자들은 지속적인 DR의 축소와 소자 크기의 증가를 추구하는 반도체 소자 개발자의 욕구를 DUVL로서는 더 이상 실현할 수 없다고 생각하며 DUVL의 대안책으로 SCALPEL®, EUVL, XRL, IPL 등의 새로운 리소그래피 기술을 반도체 공정에 이용하려 하고 있다. 오래 전부터 이들 리소그래피 기술에 대한 연구가 진행되어 왔으나 광학 리소그래피 기술의 빠른 발전으로 인하여 반도체 소자 제조업체들은 광학 리소그래피를 지금까지 이용하여 왔다. 본 장에서는 이들의 새로운 기술의 기본 원리와 최근 기술 동향을 소개하고자 한다.

1. SCALPEL®

기존의 electron beam lithography (EBL)에서는 마스크 패턴 구조가 입사된 전자 빔을 흡수하

기 때문에 마스크의 열적, 역학적 특성이 우수해야 하며 패턴 구조로부터 산란된 전자들 때문에 분해능의 한계가 있다. 1990년에 AT&T Bell 연구소의 과학자들은 마스크 패턴 구조로부터 산란된 전자를 이용한 새로운 리소그래피 기술을 제안하였다. 전자 집광 렌즈를 이용하여 산란된 전자를 렌즈 초점에 집속하고 집속된 전자는 초점 위치에 설치한 작은 구멍을 통과한다. 통과된 전자빔은 이 작은 구멍에 의해서 공간 전하 효과와 큰 각도로 산란된 전자가 감소되었으며 resist 박막에 투사되어 마스크 패턴의 축소된 이미지를 웨이퍼에 인쇄한다. 이러한 산란된 전자를 이용한 리소그래피 기술을 scattering with angular limitation projection electron-beam lithography (SCALPEL®)이라고 한다[10].



(그림 6) SCALPEL의 기본 원리

(그림 6)은 SCALPEL®의 기본 원리를 보여준다. SCALPEL®의 마스크는 낮은 원자 번호 원자들로 만든 membrane 바탕 위에 높은 원자 번호 원자들로 형성된 패턴 구조를 갖는다. 100KeV의 에

너지를 갖는 전자빔이 마스크에 투사되면 membrane은 작은 양의 에너지만을 흡수한 채 전자빔을 무사 통과시키고 패턴 구조와 충돌한 전자들은 큰 각도로 산란되면서 마스크를 통과한다. 산란된 전자와 무사 통과한 전자들은 전자 렌즈의 초점 거리에 집광된다. 초점 위치에 적당한 크기의 구멍을 갖는 원판은 공간 전하 효과와 산란에 의해서 초점 위치에서 벗어난 전자들이 제거된 전자들만을 통과시켜 resist 박막에 투사시킴으로서 패턴의 축소된 그림을 웨이퍼에 그린다. 다시 말하자면 confocal 광학 현미경과 같은 원리이다.

SCALPEL[®]은 EBL보다 높은 throughput과 높은 분해능을 제공하며 기존의 stepper 기술을 그대로 이용할 수 있다. 마스크 제작과 resist 개발이 SCALPEL[®]이 갖고 있는 두 가지 과제이다. EBL의 마스크는 높은 에너지의 전자빔을 정지시키기 위해서 패턴 구조물의 두께를 두껍게 해야 하는데 이는 패턴을 지지하는 membrane에 큰 스트레스를 준다는 점에서 SCALPEL[®] 마스크의 제작이 보다 용이하나 아직도 패턴을 지지하는 membrane의 연구가 더 필요하다.

SCALPEL[®]에서 사용되는 resist는 감도가 상당히 높아야 한다. 높은 에너지의 전자빔은 resist와 웨이퍼를 가열하며 공간 전하 효과를 증가시켜 선폭의 CD 제어를 힘들게 만들기 때문에, 낮은 에너지의 전자빔으로서도 선 폭 인쇄가 가능케 하려면 resist의 감도가 높아야 한다. Bell Lab의 SCALPEL[®] 과학자들은 100KeV의 전자빔에 대해서 $10\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 가 SCALPEL[®] resist의 최적 감도라고 말한다. 또한 전자빔 흡수로 인한 가열로 resist의 용해를 방지하려면 유리 전이 온도 t_g 가

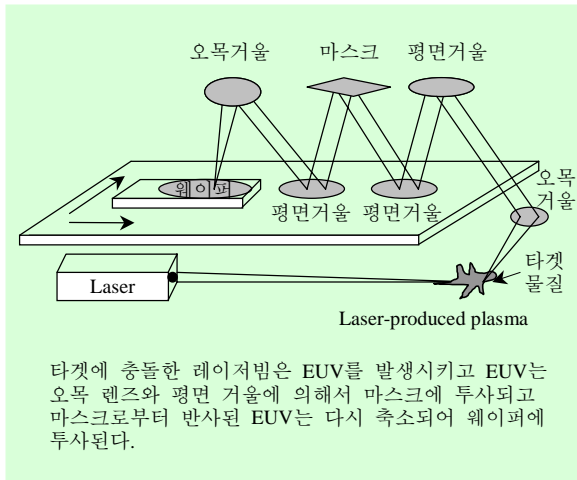
50°C 이상 되어야 한다. Bell Lab의 SCALPEL[®] 과학자들은 CA resist가 최상의 SCALPEL[®] resist라고 한다. 그들은 Olin사의 resist ARCH[®]를 이용하여 $0.075\mu\text{m}$ 의 선폭을 만들었으며 0.26 lines/spaces 구조의 DOF를 $75\mu\text{m}$ 까지 확장하는데 성공하였다. 이 정도의 성능은 193nm DUV 시스템으로서 결코 달성될 수 없을 것이다. 현재 ISI 사는 Bell Lab과의 공동 연구를 통하여 SCALPEL[®]의 상용화에 가장 적극적이다.

2. EUVL

파장이 DUV 대역으로 내려 오면서 stepper 내부에서 사용되는 렌즈의 높은 흡수율과 응축의 문제를 피하면서 100nm 이하의 분해능을 달성할 수 있는 새로운 리소그래피 기술이 1988년에 A.M. Hawryluk에 의해서 제안되었다. Hawryluk은 13nm의 파장을 이용한 이 기술을 soft X-ray projection lithography라고 명명하였으나 후에 과학 기술계는 extreme ultraviolet lithography (EUVL)라고 하였다[11].

EUVL의 기본 원리는 렌즈를 통과함으로써 soft X-ray가 흡수되는 것을 방지하기 위해서 EUVL 시스템 내부에서 특수한 코팅을 한 평면 거울과 오목 거울만을 이용하여 soft X-ray를 집광하고 투사한다(그림 7). 레이저 펄스 빔을 타겟 물질에 입사시키면 EUV가 발생된다. EUV는 반사 코팅이 되어 있는 평면 거울과 오목 거울을 통하여 마스크에 투사된다. 마스크는 높은 반사율의 코팅 박막 위에 높은 흡수율을 갖는 IC 패턴 구조로 되어 있기 때문에 마스크로부터 반사된 EUVL은 같은 패턴의 이미지를 갖고 있다. 이 반사

된 EUVL은 다시 평면 거울과 오목 거울을 통하여 4배 축소되어서 resist 박막에 투사된다. EUV 코팅 박막이 증착된 거울들에 의해서 반사만 되기 때문에 렌즈의 흡수와 응축을 염려할 필요가 없으나 우수한 코팅 표면과 낮은 열팽창 계수가 요구된다.

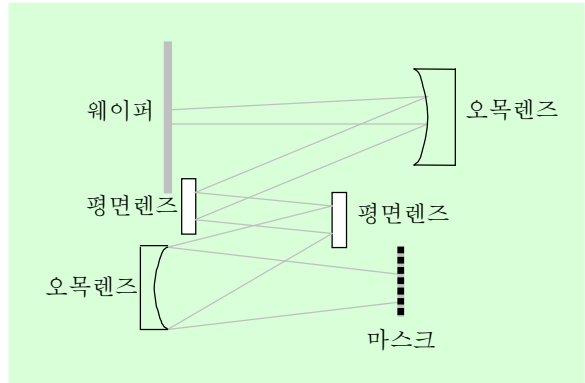


(그림 7) EUVL의 기본 구조

EUVL 시스템은 다섯 가지 기술의 통합으로 이루어진다. 즉, EUV 발생 기술, EUV를 집광하고 축소시키는 정확한 광학 기술, EUV 코팅 증착 기술, EUVL 마스크 제작 기술, EUV resist이다.

싱크로트론, 자유전자레이저(free electron laser: FEL), 레이저 유기 플라즈마(laser-induced plasma) 등을 이용하여 EUV를 발생시킬 수 있으나 경제적인 측면을 고려하여 레이저 유기 플라즈마가 많이 이용된다. 레이저 유기 플라즈마는 레이저 펄스를 타겟 물질에 입사시켜 플라즈마를 발생시킴으로써 EUV를 발생하는 기술이다. Laser-to-EUV 전환 효율이 1%이상 요구되며 5ns-1Jule의 레이저 펄스로 2%의 효율을 얻을 수

있다. 고 에너지의 레이저 펄스의 충돌에 의해서 타겟 물질의 분말 입자가 발생되어 EUV 코팅 거울이 손상되지 않도록 EUVL 시스템을 설계해야 한다.



(그림 8) 마스크로부터 반사된 EUV를 축소하여 웨이퍼에 투사시킨 광학 설계도

EUV 코팅이 증착된 거울들을 이용하여 플라즈마로부터 EUV 빔을 만들어 마스크에 투사하고 마스크로부터 반사된 EUV를 축소하여 resist에 투사하려면 (그림 8)과 같은 정확한 광학 기술이 필요하다. 일정한 축소배율을 얻기 위한 오목 거울의 정확한 곡률 반경 제어와 정확한 거울의 위치 제어가 가장 어려운 작업이다. 코팅의 반사율이 70% 정도이기 때문에 많은 거울을 이용하면 resist에 투사되는 EUV의 세기가 약화된다. 코팅의 표면도 표면 거칠기 계수가 1nm 이하가 되도록 가공되어야 한다. (그림 8)은 4 배 축소의 광학 시스템이다. 보다 작은 선 폭을 얻으려면 더 많은 거울을 이용하여 축소 배율을 늘릴 수 있으나 EUV의 세기가 약화되어 throughput에 영향을 준다.

EUV 코팅은 Mo-Si 혹은 Mo-Be의 다층 (multi-

layered) 구조로 되어 있다. 최고의 반사율을 얻기 위해 다층의 주기 Λ , 입사각 θ , 파장 λ 사이에 Bragg 조건을 만족해야 한다: $\lambda = 2\Lambda \sin \theta$. 거울 표면 전체에 걸쳐서 균일한 반사율과 균일한 두께를 갖도록 코팅을 증착해야 한다. 사용 파장에 대해서 최고의 반사율을 얻을 수 있는 다중 층의 주기와 코팅의 두께를 결정해야 하고 코팅은 불순물을 적게 포함하고 열 팽창 계수가 작아야 한다.

EUVL 마스크는 웨이퍼 위에 EUV 반사 코팅과 resist를 증착하고 EBL에 의해서 패턴을 만든다. EUVL 마스크 역시 불순물의 수가 적어야 한다(10^{-3} 개/cm²이하). EUV 코팅은 ion beam sputter 증착 기술(10^{-2} 개/cm²)이 magnetron sputter 증착 기술(10^4 개/cm²)보다 불순물을 적게 만들기 때문에 많이 이용되고 있다.

Resist는 EUV에 대해서 매우 높은 흡수율을 갖기 때문에 top surface imaging 방법이 주로 이용되고 10mJ/cm² 이상의 높은 감도가 요구된다. D. Wheeler *et al.*은 15mJ/cm²의 감도를 갖는 EUV resist를 이용하여 130 lines/spaces구조를 인쇄하였다.

(표 4)는 EUVL 시스템의 각각의 요소들의 최소한의 조건을 나타낸다. Ultratech Stepper는 Sandia National Lab과의 공동 연구를 통해 EUVL의 상업화에 가장 적극적이다.

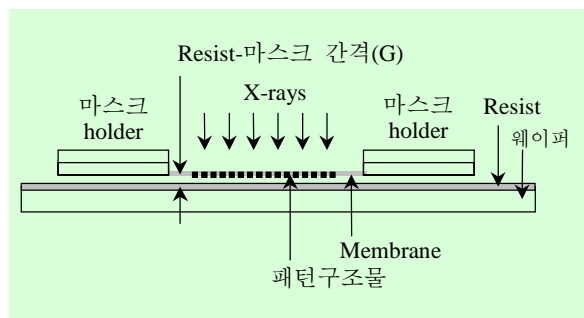
3. XRL

X-Ray Lithography (XRL)은 1970년대 초부터 연구되어온 잘 알려진 리소그래피 기술이다. 가장 유망한 DUVL의 대안으로 인정되기 때문에 여러 학교, 연구소, 업체들이 경쟁적으로 XRL 시스템

(표 4) EUVL technical baseline values[11]

거울 반사율	70%
빔 수축 거울의 수	3
평면 거울	4
Resist 감도	10mJ/cm ²
창의 투과율	70%
창의 수	2
레이저 에너지	0.5-1Jule/pulse
최대 평균 레이저 에너지	1.5kW
Laser-to-EUV 전환율	1%

을 연구 개발하고 있다. (그림 9)는 XRL의 기본 구조를 보여 준다. XRL은 축소 투사가 아니라 1:1 투사 시스템이기 때문에 마스크 패턴의 크기와 같은 그림이 웨이퍼 위에 인쇄된다[12]. XRL의 가장 큰 장점은 X선의 유전 상수가 거의 모든 물질에 대해서 같은 값을 갖기 때문에 반사, 산란, 정현파 발생 등에 의한 리소그래피 성능 저하를 염려할 필요가 없다. (그림 9)와 같은 X선 투사 장치는 SVGL, SAL, Canon에 의해서 제작되고 있다.



(그림 9) XRL의 기본 구조도

마스크와 resist 박막 사이의 거리 G는 5~50 μ m 범위 내에서 $G = \alpha w^2 / \lambda$ 에 따라 조절된다. α 는 $1/k_1$, w는 인쇄하고자 하는 선 폭, λ 는 X선의 파

장인 $\sim 1\text{nm}$ 이다. XRL은 resist에 대한 특별한 제한을 갖지 않는다. X선은 photoresist를 $1\mu\text{m}$ 까지 침투하기 때문에 높은 DOF를 얻을 수 있다.

XRL 마스크 제작이 가장 어렵다. 최근에 미국의 NIST는 XRL 마스크 제작에 관한 표준안을 제안하였다. XRL 마스크는 membrane 바탕 위에 높은 흡수율의 패턴 구조물로 이루어졌다. SiC가 최적의 membrane 물질이고 두 가지 방법에 의해서 마스크를 제작한다. SiC 지지기판 위에 Ta나 W같은 고 흡수율 물질의 박막을 증착하고 우수한 열적, 역학적 특성을 위하여 열처리 후 EBL에 의한 패턴을 인쇄한 다음에 SiC membrane이 형성될 때까지 SiC 지지기판의 바닥을 에칭하는 방법과 먼저 SiC 지지기판의 바닥을 에칭하여 SiC membrane이 형성한 후에 Ta나 W를 증착하고 EBL 패턴 작업을 하는 방법이 있다.

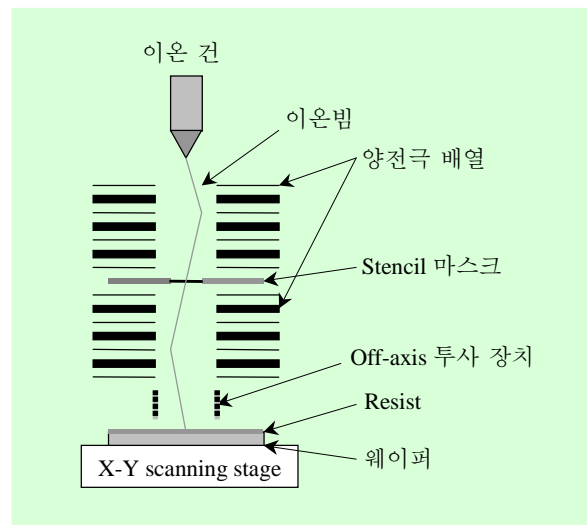
XRL 마스크 위의 불순물도 역시 리소그래피 공정에 큰 영향을 준다. 마스크 위의 불순물을 검색하고 교정하는 장비가 KLA, FEI, SEIKO 등의 업체들에 의해서 제작되고 있다. 최근에는 근접장 광학 현미경을 이용한 방법도 제안되었다. IBM과 NATEC는 상업용 마스크를 제작하기도 한다.

XRL은 오랜 기간 동안 연구되어 오면서 기술적인 많은 문제점들이 상당히 해결되었으며 많은 리소그래피 기술자들은 XRL이 DUV를 계승할 것으로 생각하고 있다. Motorola, IBM, Lockheed-Sanders는 XRL 시스템을 생산 공정에 적극적으로 설치하려고 한다.

4. IPL

Ion Projection Lithography (IPL)의 원리는 EBL과 비슷하다. EBL은 전자 빔 대신에 이온 빔

을 사용하고 EBL보다 훨씬 낮은 에너지의 이온 빔을 사용하기 때문에 resist 하층 구조에 적은 손상을 준다[13]. (그림 10)은 EBL의 기본 구조이다. 이온 발생 장치에서 발생된 이온은 다중 양극 전극 배열에 의해서 빔으로 형성되어 마스크에 투사된다. 마스크를 통과한 이온 빔은 일정 배율로 축소되어서 resist에 투사된다. 이온의 선택은 사용자에 따라 다를 수 있다(H^+ , H_2^+ , H_3^+ , He^+ , Be^{++} , Ga^{++}). IPL은 공간 전하 효과에 의해서 분해능의 한계를 갖는다. SCALPEL과 마찬가지로 Global 공간 전하 효과는 집광 장치를 이용하여 줄일 수 있으나 stochastic 공간 전하 효과는 피할 수가 없다.



(그림 10) IPL의 기본구조도

IPL 마스크는 Si membrane을 EBL과 식각 공정을 거친 후 구멍들로 형성된 패턴이다. 그러므로 도넛 형태의 패턴은 불가능하다. 이온의 에너지는 10KeV 정도이고 membrane은 이온을 흡수하고 구멍 패턴은 이온을 무사 통과시킨다. mem-

brane에 구멍 패턴을 만들면 스트레스의 균형이 깨져 membrane이 뒤틀려서 패턴의 형태가 변할 수 있다. 이온을 흡수하여 membrane이 가열되기도 한다.

IPL의 가장 큰 장점은 사용자가 원하는 이온과 resist를 선택할 수 있는 것이다. Hughes Research Labs는 Ga^{++} 를 이용하여 12nm 선 폭을 만들었으며, Be^{++} 를 이용하여 MIT는 50nm 선폭의 PMMA resist 구조를, NEC는 50nm 선폭의 SAL601 resist 구조를 제작하였다.

IPL은 미국의 advanced lithography group (ALG)과 유럽의 micro-electronics development for European applications (MEDEA)의 주도로 연구 개발이 되어 왔다. ALG는 DARPA의 지원으로 형성된 IPL 컨소시엄이다. Lawrence Berkeley Lab은 2eV FWHM의 이온 발생 장치를 개발하였고 Oak Ridge National Lab은 이온 집광 렌즈 시스템을 개발하였으나 현재 DARPA의 지원 중단으로 prototype IPL 시스템 제작이 미완성된 상태이다. MEDEA는 3천 6백만 달러를 투자하여 1999년에 IPL 마스크 제작 장비를 개발하고 2001년에 prototype IPL 시스템을 개발할 예정이다.

VIII. 결론

DUVL, SCALPEL, EUVL, XRL, IPL 등의 기본 원리와 최근 기술동향을 요약 소개하였다. DUVL은 새로운 193nm resist의 개발이 되어야 하며, 100nm 이하의 선 폭을 제작하려면 또 다시 과장을 줄여야 하고 렌즈 응축, 새로운 과장에 대한 resist의 개발 등의 문제들을 극복해야 한다. 이러한 문제들 때문에 다른 리소그래피 기술을 이용

하려는 시도가 보다 적극적으로 진행되는 추세이다. SCALPEL[®]는 기존의 EBL 보다 높은 분해능과 throughput을 제공하나 다른 리소그래피 기술보다 낮은 throughput을 갖는다. EUVL과 XRL의 가장 큰 과제는 보다 높은 신뢰성을 갖는 마스크 제작 기술의 개발이 필요하다. 높은 감도의 EUVL resist가 요구되나 많은 반도체 소자 제조업체들은 resist의 제한이 없는 XRL의 이용을 선호하고 있다. IPL은 최근에 집중 투자에 힘입어 많은 발전을 하였으며 차세대 리소그래피 장비로서 XRL과 심한 경쟁을 할 것이다. 또한 리소그래피 목적 외에도 이온 주입과 같은 다른 반도체 공정에도 이용도가 높을 것으로 기대된다.

그밖에 spatial light modulator를 이용한 리소그래피 기술[14]과 입사파와 반사파 간의 간섭 효과를 이용한 리소그래피 기술[15]도 최근에 관심을 끌고 있다. 또한 scanning probe microscope (SPM)을 이용하여 수 nm 크기의 소자 개발이 가능하다. Scanning tunneling microscope (STM)과 atomic force microscope (AFM)을 이용하여 강한 탐침력으로 금속 박막을 주사하면 공기 중에 있는 수분과 화학 반응을 하여 주사된 지역이 산화되고 이 지역은 전자에 대한 부도체 역할을 한다. SPM을 이용한 이러한 방법의 리소그래피는 수 nm의 분해능을 제공하며 양자 효과를 이용한 새로운 소자의 연구 개발을 가능케 하나 소자의 대량 생산이 불가능한 단점이 있다.

참고 문헌

- [1] R. DeJule, "Lithography: 0.18 μ m and Beyond," *Semiconductor International*, February 1988, pp. 54-60.

- [2] C.A. Levenson *et al.*, "Improving Resolution in Photolithography," *Optics & Photonics News*, Vol. 7, No. 4, April 1996, pp. 29–33.
- [3] J. Mukens *et al.*, "High-Throughput Wafer Stepper with Adjustable Illumination Modes," *Solid State Technology*, July 1996, pp. 193–199.
- [4] C. Bencher *et al.*, "Dielectric Antireflective Coatings for DUV Lithography," *Solid State Technology*, March 1997, pp. 109–114.
- [5] H. Ito and C.G. Willson, *Technical Papers of SPE Reginal Technical Conference on Photopolymers*, 1995, pp. 57–68.
- [6] H. Ito, "Deep-UV Resists: Evolution and Status," *Solid State Technology*, July 1996, pp. 164–173.
- [7] R.D. Allen, G.M. Wallraff, D.C. Hofer, P.R. Kunz, S.C. Palmateer, and M.W. Horn, "Photoresists of 193 nm Lithography," *Micro lithography World*, 1995, pp. 21–26.
- [8] R. Allen, "Progress in 193 nm Photoresists," *Semiconductor International*, September 1997, pp. 72–80.
- [9] M. Rothschild *et al.*, "Laser Induced Damage in Optical Materials," *2nd Int'l Symp. on 193 nm Lithography*, 1996.
- [10] J. Alexander Liddle, L.R. Harriott, and W.K. Waskiewicz, "Projection Electron-Beam Lithography: SCALPEL," *Micro lithography World*, Spring 1997.
- [11] *Trends in Optics and Photonics, OSA TOPS on Extreme Ultraviolet Lithography*, Vol. 4, G. Kubiak and D. Kania, eds., 1996.
- [12] H.I. Smith and F. Cerrina, "X-Ray Lithography for ULSI Manufacturing," *Micro lithography World*, Winter 1997, pp. 10–14.
- [13] A.A. Mondelli, I.L. berry, J.L. Melngailis, and G. Gross, "Ion projection lithography," *Micro lithography World*, Autumn 1997, pp. 12–18.
- [14] J. Paufler *et al.*, "High-Throughput Optical Direct Write Lithography," *Solid State Technology*, July 1997, pp. 175–182.
- [15] S.R.J. Brueck, "Imaging Interferometric Lithography," *Micro lithography World*, Winter 1998, pp. 2–10.