

## 광노광을 위한 투영광학계의 기술분석

이종현\* 배남진\*\* 전치훈\*\* 장원익\*\*  
이용일\*\* 김윤태\*\* 김상호\*\* 김보우\*\*\*

### 목 차

- I. 서 론
- II. 투영광학계의 발전
- III. Deep-UV형 투영광학계의 비교
- IV. 결 론

### I. 서 론

반도체 생산업계에서는 1M DRAM에 이어 sub-micron의 선폭을 요구하는 4M DRAM의 양산을 서두르고 있으며, 여기에서의 미세패턴 형성기술은 축소투영을 이용한 광노광기술의 발전에 의하여 이루어진 것이다. 또한 16/64M DRAM의 개발에 따라  $0.35\mu m$  이하의 해상도(resolution)를 만족하는 노광기술의 필요성이 대두되고 있다.

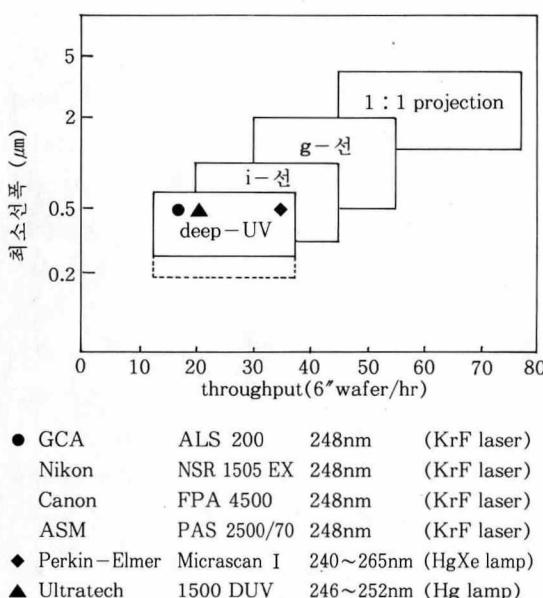
위 해상도를 만족하기 위하여 기존의 g-선 또는 i-선을 광원으로 한 고 NA의 굴절광학계를 사용할 수 있으나, 보다 큰 공정여유도(process latitude)를 얻기 위하여 파장 200~300nm의 원자외선(deep-UV)<sup>[1,2]</sup>, X-선, 전자빔 및 이온빔을 이용한 노광기술이 연구되고 있다. 그러나 현재의 X-선 기술은 중금속의 패턴을 가진 mask의 제작 및 정렬(alignment)에 어려움이 있으며,<sup>[3]</sup> 현재 많은 투자를 요구하는 SOR(Synchrotron Orbital Radiation)을 제외하고는 안정된 광원을 얻지 못하고 있어 당

\* 공정장비연구실 선임연구원

\*\* 공정장비연구실 연구원

\*\*\* 공정장비연구실 실장

분간은 기억소자의 양산을 위한 실용화에 어려움이 있을 것으로 생각된다. 전자빔 기술과 FIB(Focused Ion Beam) 기술<sup>[4]</sup>은 우수한 해상도에도 불구하고 낮은 throughput으로 인하여 기억소자의 양산에는 적합하지 않으며, MIBL (Masked Ion Beam Lithography)<sup>[5]</sup>, IPL(Ion Projection Lithography)<sup>[6]</sup>등 이온빔을 이용한 노광기술도 아직 충분히 개발되지 않은 상태이다. 반면 deep-UV를 이용한 투영노광기술은 기존의 광노광기술의 연장선상에서 광원의 단파장화를 통하여 촛점심도의 큰 열화없이 해상도의 개선을 이루고 있으므로<sup>[7,8]</sup> 최소선폭 0.35μm의 64M DRAM을 양산할 수 있는 가장 안정된 기술로 볼 수 있다(그림 1).



〈그림 1〉 투영광학계를 이용한 노광장비의 응용 영역

본 연구에서는 이와 같이 deep-UV를 이용한 투영노광기술의 특성을 분석하고 장단점을 비교함으로써 64M DRAM용의 노광장비에 대

한 개발방향을 정립하고자 한다. 먼저 투영광학계를 렌즈 또는 반사경 등의 구성에 따라 분류하고 각각의 발달과정에 대한 고찰을 통하여 광노광기술을 분석한다. 또한 지금까지 응용되어온 광노광장비의 개발경향을 분석하고 투영광학계의 해상도, 촛점심도(depth of focus), 노광영역(field size)등의 성능 및 특성을 살펴봄으로써 deep-UV를 이용한 투영광학계의 응용가능범위를 논의한다.

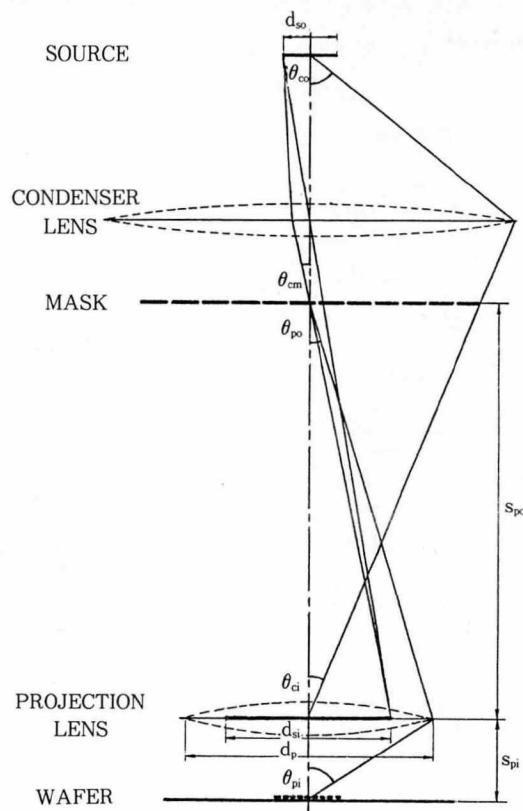
## II. 투영광학계의 발전

반도체 제조업계에서는 IC(Integrated Circuits)의 노광공정에 적합한 투영광학계의 설계 및 제작을 요구하고 있으며, 이에 따라 굴절, 반사 및 반사굴절형 등의 투영광학계가 발전해 오고 있다.<sup>[9]</sup> 〈그림 2〉는 mask의 패턴이 투영광학계에 의하여 wafer에 전사되는 개념을 보인 것이며, 먼저 현재까지 개발되어온 투영광학계의 기술경향을 알아본다.

'60년대 초에는 IC mask의 제작을 위하여 성능이 좋은 현미경의 대물렌즈가 사용되었다. '60년대 말에는 노광영역이 확대된 굴절광학계가 개발되었으나 wafer의 크기가 증가되는 속도를 따르지 못하여 상용화가 되지 못하였다.

'70년대초 두개의 반사경만으로 구성된 Offner형의 투영광학계가 출현하였으며, 세번의 반사에 의해 상이 형성된다.<sup>[10]</sup> Mask의 패턴은 수차보정된 annular field를 scan함으로써 직경 3 inch의 wafer에 전사되며 해상도보다는 생산성이 높다는 장점을 가지고 있다. 이 광학계는 광대역의 파장범위에 대하여 사용이 가능하며 광원의 특성, resist의 감도 및 반사경의 반사율 등에 의해서만 대역폭이 제한된다.

보다 큰 wafer를 노광하기 위하여 '70년대말



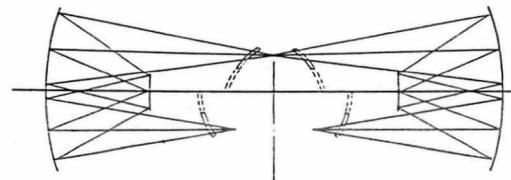
$\theta$  : 각  
 s : 거리  
 $d_{so}$  : 광원의 유효직경  
 $d_{si}$  : 광원의 상  
 c : condenser lens  
 p : projection lens  
 o : objective 방향  
 i : image 방향  
 m : mask 방향

$$\begin{aligned}
 &\text{condenser lens의 배율, } M_c = d_{si}/d_{so} \\
 &\text{projection lens의 배율, } M_p = s_{pi}/s_{po} \\
 &\text{해상도 } R = k_1 \lambda / NA_i \\
 &\text{총점심도 } \Delta f = \pm k_2 \lambda / NA_i^2 \\
 &\text{coherence } \sigma = NA_{cm}/NA_{po} = d_{si}/d_p
 \end{aligned}$$

〈그림 2〉 Köhler 조명일 경우의 투영광학계

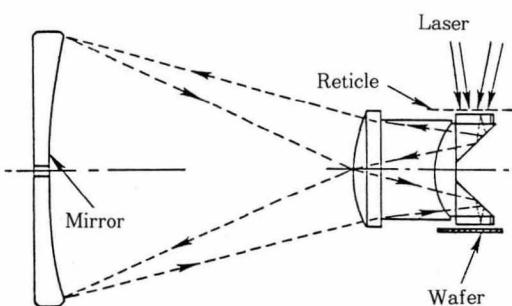
에 반사광학계에 굴절렌즈가 추가된 catadioptric system이 개발되었으며, 굴절렌즈는 투과도를 좋게 하기 위하여 fused silica<sup>[11]</sup>로 만들어졌다 (그림 3). 추가된 굴절렌즈는 파장의 변화에

따라 Petzval sum의 변동을 야기시키며, 동시에 annular field의 총점거리를 변화시킨다. 따라서 광학축 위에서 크기가 같고 부호가 다른 총점거리의 변화를 발생시켜 색수차를 보정하였다. 이와 같이 보정된 annular field의 폭은 1mm에서 4mm로 확장되어 throughput을 향상시킬 수 있었으며, '90년 현재 축소투영의 step & scan system으로 발전하고 있다.<sup>[12]</sup>



〈그림 3〉 Perkin-Elmer사의 500/600투영광학계

다른 catadioptric system으로는 한개의 반사경에 굴절렌즈를 추가하여 수차를 보정한 Wynne-Dyson 광학계가 있다(그림 4). '70년대 후반 Wynne은 동심원의 반사경과 렌즈로 구성된 Dyson 망원경을 변형하여 노광공정에 응용하기 위한 Wynne-Dyson 광학계를 개발하였다. 이 광학계의 구면수차는 높은 굴절율의 동심원 meniscus와 plano-convex 렌즈를 접착한 doublet에 의하여 보정된다. 즉, 적절한 굴절율과 곡률을 선택하면 Petzval sum의



〈그림 4〉 Ultratech사의 Wynne-Dyson 광학계

보정이 유지되는 동시에 접착면과 meniscus 볼록면에서의 구면수차가 크기는 같지만 다른 부호를 가지게 되므로 이것이 서로 상쇄되어 수차가 보정된다.

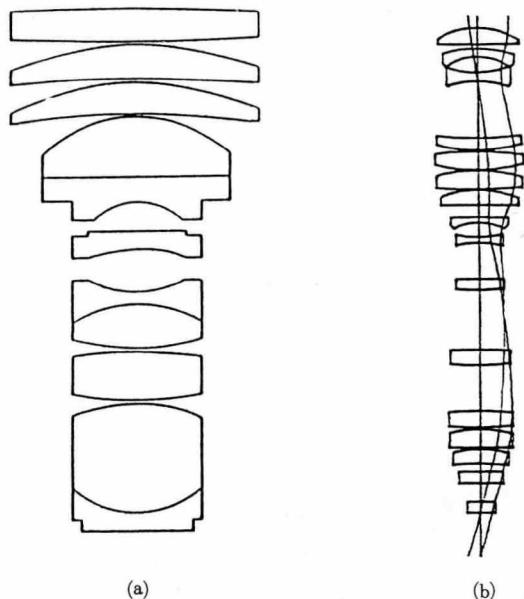
투영광학계의 다른 대안으로 '70년대 말 성능이 향상된 축소율 5:1의 굴절광학계가 개발되었다. 광원의 중심파장은 436nm(g-선), 대역폭은 수십 nm이며, NA=0.35의 광학계에 의하여 선폭  $1\mu\text{m}$ 의 양산에 사용되었다. 현재는 단파장화, 고 NA화에 의한 i-line stepper 가 생산되고 레지스트 및 공정개발 등에 의하여  $k_1=0.8$  이하에서도 양산이 가능하다고 생각되어  $0.5\mu\text{m}$ 의 패턴까지는 i-선 stepper로 충분하다는 의견이 지배적이다.<sup>[13]</sup> 그러나 최소 선폭이  $0.35\mu\text{m}$ 로 예측되는 64M DRAM의 양산에서는 resist의 개발이 충분히 이루어 진다면 공정여유도가 큰 KrF laser의 excimer stepper 가 많이 사용될 것으로 예측된다.<sup>[14]</sup>

### III. Deep-UV용 투영 광학계의 비교

〈그림 5〉의 굴절광학계를 이용하는 step & repeat system은 단파장화와 고 NA화에 의하여 성능개선을 이루었으며 현재까지 노광장비 분야에서 주류를 이루어왔다. 광노광기술의 적용범위는 새로운 광원인 excimer laser의 출현과 위상 shift,<sup>[15]</sup> DESIRE(Diffusion Enhanced Silylating Resist) 등의 공정기술개발에 의하여 더욱 연장될 것이다. 향후  $0.35\mu\text{m}$ 의 패턴형성을 위한 굴절광학계는 KrF laser를 광원으로 하고 있으며,<sup>[16]</sup> 그 요구성능은 〈표 1〉과 같다.

동일한 파장의 광원으로 해상도를 향상시키기 위해서는 NA를 크게 해야 한다. 이를 위해서는 높은 굴절율의 광학재료, 저수차의 설

계기술, 가공 및 측정기술등의 발전이 선행되어야 하며, 〈표 2〉에 각 파장별로 기술의 발전 가능성과 NA의 한계를 보였다.<sup>[17]</sup>



(a) h-선용 achromatic lens (J. Wilczynski, IBM)  
(b) KrF laser-용 chromatic lens (Admon Sci. Inc.)

〈그림 5〉 굴절광학계(J. Wilczynski, IBM)

〈표 1〉 Excimer laser-용 투영광학계의 연구목표

변 수	요 구 조 건	
DRAM 밀도 개발년도	16M bit 1990	64M bit 1992
중심파장(center wavelength)	248.4 nm	
대역폭(bandwidth)	3 pm	
축소율(reduction ratio)	5:1	
개구수(numerical aperture)	0.42	0.50
공정변수(process factor : $k_1$ )	0.8	0.5 - 0.7
해상도(resolution)	$0.5\mu\text{m}$	$0.35\mu\text{m}$
총점심도(depth of focus : TIR)	$>1.4\mu\text{m}$	$>1.0\mu\text{m}$
왜곡(distortion)	$<0.06\mu\text{m}$	$<0.1\mu\text{m}$
노광영역(field size : $\phi$ )	21.2 mm	28.3 mm

〈표 2〉 투영광학계의 고 NA화 가능성 비교

광원 (파장)	g-선 436nm	i-선 365nm	KrF 248nm	ArF 193nm	F <sub>2</sub> 157nm
고구질렌즈재료 설계기술의진보 제조기술의진보	가능성작용 가능 가능	가능성큼 가능 가능	불가능 가능 가능	불가능 가능 가능	— — —
현재의 NA NA의 한계	0.54 0.65	0.45 0.60	0.42 0.50	— 0.50	— —
비고	—	—	—	광흡수 가작은 재료 개발 필요	반사광 학계 개발 필요

〈표 3〉은 현재 양산용으로 제작되고 있는 deep-UV 노광장비의 사양을 보여주며 굴절광학계의 대부분은 색수차를 보정하지 않는 chromatic lens를 채용하고 있음을 알 수 있다. [18,19] 이 외에 Anvik, ASET, HITACHI 등에서도 excimer stepper에 대한 연구개발이 진행되고 있는 것으로 알려져 있다.

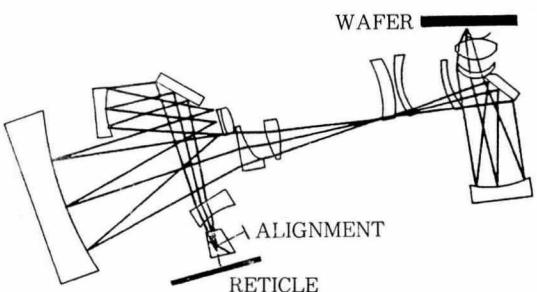
〈표 3〉 상업용 또는 prototype의 deep-UV 노광장비

제작회사	ASM LITHOGRAPHY	CANON	GCA	NIKON	PERKIN- ELMER	ULTRATECH STEPPER	deep-UV 노광기술 의 미래 성능	i-선 stepper의 현재 성능
model 명	PAS 2500/70	FPA-4500	ALS LASER- STEP 200	prototype (NSR 1505EX)	MICRASCAN I	1500 DUV		
광원	KrF laser	KrF laser	KrF laser	KrF laser	HgXe lamp	Hg lamp		
축소율	5 : 1	5 : 1	5 : 1	5 : 1	4 : 1	1 : 1		
NA	0.42	0.37	0.35	0.42	0.35	0.35		
해상도 $\mu\text{m}$	0.47	0.54	0.5	0.5	0.5	0.5	0.30~0.35	0.5
촛점심도 $\mu\text{m}$	1.4	1.8	1.0	—	1.5	1.5	2.0	1.0
distortion $\pm \mu\text{m}$	0.06	0.1	0.1	0.12	0.07	0.1	0.05~0.1	0.10
노광영역 $\text{mm}^2$	$15 \times 15$	$15 \times 15$	$15 \times 15$	$15 \times 15$	$20 \times 32.5$	300	$20 \times 20$	$15 \times 15$
정렬정밀도 $\mu\text{m} : 3\sigma$	0.1	0.15	0.15	0.15	0.1	0.15	0.1	0.1
정렬방법	TTL	non-TTL	non-TTL	non-TTL	TTL	TTL	TTL	TTL
최대 wafer 크기 inch	6	6	8	6	8	8	8	8
throughput wafer/hr	—	—	17	10	35~50	20	30~35	15~30
비고	Lambda Physik 248L chromatic	achromatic	Lambda Physik 248L chromatic	chromatic	broadband	broadband		

미세패턴의 형성에 응용된 deep-UV용의 반사광학계로는 두번의 반사로 사이 형성되는 Schwarzschild형이 있다. 그러나 노광영역이 좁다는 단점으로 인하여 양산용 장비로서는 아직 충분히 개발되지 않은 상태이다.[20]

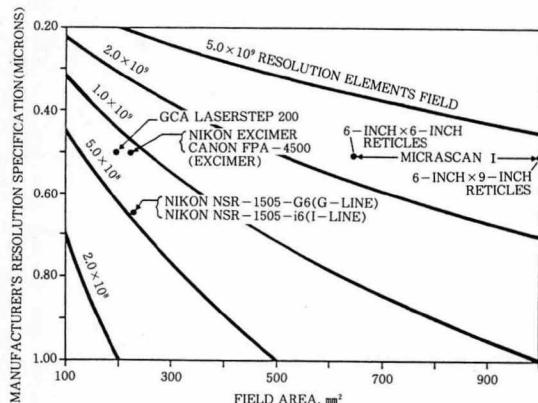
상용화를 위한 반사굴절광학계는 Perkin-Elmer사와 Ultratech사에서 연구개발되고 있으며, 각각 광대역의 HgXe램프와 Hg램프를 광원으로 사용하고 있다. (그림 6)과 같은 Perkin-Elmer사의 Micrascan I은 수차보정된 slit field를 scan하여 노광한다.[21] 이 scan system은 해상도와 노광영역 사이의 trade-off 관계

를 제거하므로 일반적으로 큰 노광영역을 얻을 수 있다(그림 7). 그러나 4:1의 축소투영에

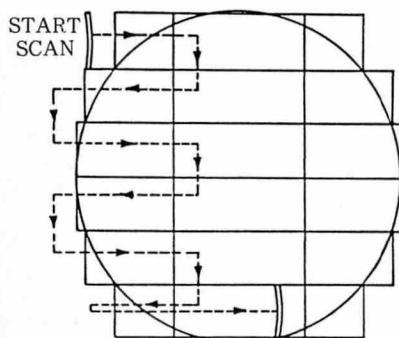


〈그림 6〉 Perkin-Elmer사 Micrascan I의 투영광학계

의하여 광학계가 복잡해지고, <그림 8>과 같이 mask와 wafer stage 사이의 synchronization을 유지하면서 step & scan을 해야 하므로 stage의 제어가 어려워진다.<sup>[22]</sup>



<그림 7> 0.65μm 이하의 해상도를 가진 노광장비의 성능 비교



<그림 8> Micrascan I의 step & scan 개념

<그림 9>의 Wynne-Dyson-Herschel형은 축소율이 1:1이며, step & repeat로 노광을 한다. 이 광학계는 Micrascan I과 마찬가지로 비교적 넓은 대역폭의 광원을 이용할 수 있으며 <그림 10>, 구조가 매우 간단하고 가격이 비교적 싼 편이다. 반면에 수차보정을 위한 doublet에서 중앙의 접촉부에 사용하는 inter-

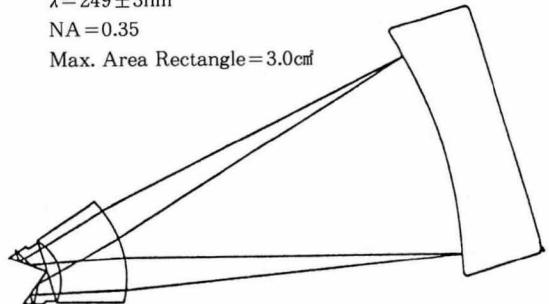
face oil이 오염되는 경우 교환해야 하는 번거로움이 있으며, 축소투영이 아니기 때문에 패턴이 작아질수록 mask의 제작 및 defect 문제 가 예상된다.

대칭형의 반사경이 이용된 노광장비는 일반적으로 residual distortion이 작으므로 상면을 벗어날 경우에도 상의 열화가 균일하게 일어나는 특징이 있다. 따라서 Perkin-Elmer사와 Ultratech사의 반사굴절광학계에 대한 공정변수  $k_1$ 이 굴절광학계에 대한 공정변수인 0.8보다 작은 0.6 정도이며, 이것은 같은 NA일 경우 굴절광학계보다 미세한 패턴의 형성이 가능한 것에 대한 이유가 된다.

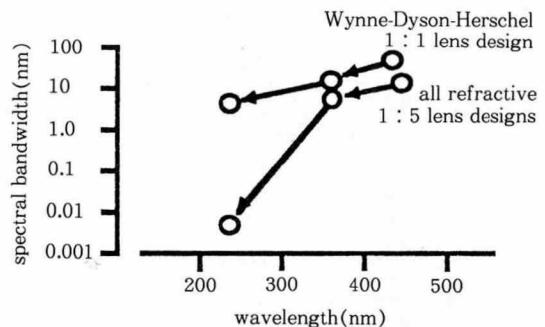
$$\lambda = 249 \pm 3 \text{ nm}$$

$$\text{NA} = 0.35$$

$$\text{Max. Area Rectangle} = 3.0 \text{ cm}^2$$



<그림 9> Ultratech사의 Wynne-Dyson-Herschel 광학계



<그림 10> 굴절광학계와 Wynne-Dyson-Herschel 광학계의 대역폭 비교

## IV. 결 론

최소선폭  $0.35\mu\text{m}$ 의 64M DRAM 생산을 위한 노광장비의 개발방향을 정립하기 위하여 지금 까지 노광공정에 사용되어 온 투영광학계의 특성을 분석하였다.

굴절광학계를 이용한 노광장비는 광원의 단파장화와 고 NA화에 의하여 성능개선을 계속하고 있으며, 반사광학계에 비하여 고 NA의 설계가 수월한 특징을 가지고 있다. 이와 함께 미국내에서는 반도체 제조기술개발을 위한 기업연합인 SEMATECH의 지원도 이루어지고 있으며, 현재 KrF laser를 이용한 stepper가 가장 많은 곳에서 연구개발되고 있음을 미루어 볼 때 향후 64M DRAM의 양산을 위한 핵심

노광장비가 될 것으로 전망된다.

반사굴절광학계를 이용한 step & scan형의 노광장비는 축소투영 및 step & scan 구동방식에 의하여 광학계와 stage가 복잡해졌으나 throughput과 노광영역이 크다는 장점이 있다. Deep-UV의 광원으로는 HgXe램프가 사용되며 장비가격은 높은 편이다. 현재는 IBM 등에서 장비의 field test를 수행중이지만 미국외의 기업에 매각될 가능성이 있다고 전해진다.<sup>[23]</sup>

Wynne-Dyson-Herschel형의 반사굴절광학계를 이용한 노광장비는 광학계가 간단하고 기존의 광원인 Hg램프를 사용하여 가격이 저렴한 편이다. 그러나 축소율이 1:1이므로 다른 노광장비에 비하여 mask의 제작 및 오염문제가 심각할 수 있으며, 현재는 개발이 보류된

〈표 4〉 Deep-UV를 이용한 노광장비의 투영광학계에 따른 성능비교

제작회사	GCA, Nikon, Canon	Perkin-Elmer	Ultratech
광학계	굴절광학계	반사굴절광학계	반사굴절광학계 Wynne-Dyson-Herschel
stage 구동	step & repeat	step & scan	step & repeat
광원 출력	KrF excimer laser 3W (multi-mode 운용)	HgXe arc lamp 2400W	Hg arc lamp 200W (안정하고 저렴함)
대역폭	협대역 chromatic 0.003nm achromatic 0.4 nm	광대역 240~265nm	광대역 246~252nm
축소율	5:1	4:1	1:1 (mask 문제)
해상도	0.5μm 0.6~0.8	0.5μm 0.6	0.5μm 0.65
공정변수 $k_1$			
총점심도	적당함	적당함	적당함
노광영역	적당함	넓음(scanning)	적당함
정렬정밀도	적당함	적당함	적당함
throughput (wafers/hr)	10~27	35~50	20
resist감도		10mJ/cm <sup>2</sup>	100mJ/cm <sup>2</sup> 60mW/cm <sup>2</sup>
광intensity			
flexibility	—	$\lambda, \sigma$	$\lambda, NA$
추정가격	2백만불	4백만불	1.5백만불
장비를 사용하는 기관	IBM, Shipley, Texas Instrument, Univ. of California at Berkley, Dept. of Defense, $\mu$ -electronics center at North California	IBM	

것으로 알려져 있다.

따라서 지금까지 〈표 4〉와 같이 분석된 Deep-UV용 투영 광학계의 특성을 미루어 볼 때 최소선폭  $0.35\mu\text{m}$ 를 요구하는 64M DRAM의 생산까지는 굴절광학계를 이용한 stepper가 노광장비의 주류를 이를 것으로 생각된다. 장비가 개발된 후 상업화의 관점에서 볼 때도 기존 g-선, i-선 stepper의 시장점유율과 반도체 업계의 기종 선택에 대한 보수성에 의하여 excimer stepper에 대한 수요자의 선호도가 가장 높을 것으로 예상된다.

그러나 확대되는 노광영역의 요구조건을 굴절광학계가 만족할 수 없거나 또는 단파장화에 따른 투과도의 저하로 인하여 광학재료의 선택이 한계에 부딪힐 때에는 비구면 렌즈나 반사 굴절광학계를 사용할 수 있으며, 반사광학계를 이용한 2-D scan 방식도 주목할 필요가 있다. 투영광학계에 의한 광노광기술은 해상도의 측면보다는 촛점심도와 정렬정밀도의 측면에서 먼저 한계에 이를 것으로 예측되며, 이 경우를 대비한 X-선 노광기술의 실용화를 위해서는 mask의 제작 및 정렬문제가 해결되어야 한다.

### 참 고 문 헌

1. M. Nakase, 월간 *Semiconductor World*, pp. 93–101, May 1987.
2. V. Pol et al., SPIE, vol. 633, *Optical micro-lithography V*, pp. 6–18. 1986.
3. W. Arden et al., *Microelectronic Engineering* 6, pp. 53–60. 1987.
4. R. Aihara et al., *J. Vac. Sci. Technol.* B6(1), pp. 245–248, Jan/Feb 1988.
5. J. L. Bartelt, *Solid State Technology*, pp. 215–220, May 1986.
6. G. Stengl et al., *Solid State Technology*, pp. 119–126, Feburuary 1986.
7. B. J. Lin, *Microelectronic Engineering* 6, pp. 31–51. 1987.
8. 이종현 외 1인, 전자통신, 제11권 4호, pp. 128–138. 1990.
9. J. R. Meryer-Arendt, *Introduction to Classical and Modern Optics*, chap. 1, Prentice Hall. 1984.
10. D. A. Markle, *Solid State Technology*, pp. 159–166, September 1984.
11. R. R. Shannon et al., *Applied Optics and Engineering*, vol. II, pp. 65–70, Academic Press. 1979.
12. SEMS Newsletter, Dataquest, *Lithography* 0003574, April 1989.
13. J. Greeneich et al., SPIE, vol. 1088, pp. 194–207. 1989.
14. 이종현 외 1인, 전자통신, 제11권 4호, pp. 139–150. 1990.
15. Nikkei Microdevices, pp. 67–69, May 1989.
16. T. A. Znotins et al., SPIE, vol. 922, pp. 454–460. 1988.
17. Nikkei Microdevices, pp. 103–107, August 1989.
18. Nikkei Microdevices, pp. 70–80, May 1989.
19. P. Burggraaf, *Semiconductor International*, pp. 62–69, August 1989.
20. M. Rothschild, *J. Vac. Sci. Technol.*, B6(1), Jan/Feb, pp. 1–17. 1988.
21. J. D. Buckley et al., *J. Vac. Sci. Technol.* B7(6), pp. 1607–1612, Nov/Dec 1989.
22. J. D. Buckley et al., SPIE, vol. 1088, pp. 424–433. 1989.
23. S. Runyon, *Nikkei Electronics*, no. 495, p. 207. 1990.