

Lithography 기술 현황 및 향후 전망

全 國 鎮,* 吳 惠 根,** 金 成 柱***

서울大學校*, 漢陽大學校**, 錦湖石油化學(株) 研究所***

I. 서 론

기억소자의 고집적화를 가능하게 한 배경에는 lithography 기술의 진보, 특히 노광기술의 발달과 포토레지스트 재료의 기능의 향상이 크게 기여하고 있다. 기억소자를 제작하는데 필요한 lithography 공정의 사양은 minimum feature size, overlay, CD변화, chip의 크기, defect의 크기 등에 의해 표현된다. 예를들면 4M 이상의 DRAM 제작을 위한 lithography 공정의 필요조건이 표1에 나타나 있다. 현재 lithography 공정은 여러가지의 optical, non-optical, 방법이 혼재하고 있고, 이에 이용되는 장비, 마스크 및 포토레지스트의 문제 또한 아직 완전한 해결을 보지 못한 분야이다. 본 논문에서는 초미세 패턴 형성에 있어 가능한 방법 및 이에 따른 문제점을 비교, 검토하고자 한다.

II. Optical Lithography

반도체 기억 소자의 고성능화, 미세화는 photo-lithography의 비약적인 해상도(resolution)의 방향으로 실현되고 있다. 해상도는 노광 파장 λ 와 lens의 개구수(NA, numerical aperture) 및 공정계수 k_1 의 항수로서 다음과 같이 표현한다.

$$R = k_1 \lambda / NA$$

따라서 해상도를 향상시키기 위해서는 노광 파장의 단파장화가 필요하고 그 결과 G-line($\lambda=436\text{nm}$)에서 I-line($\lambda=365\text{nm}$)으로 더욱 나아가 KrF excimer laser($\lambda=248\text{nm}$)로 발전이 되었다. NA의 경우는 과거 약 0.3에서 현재 I-line의 경우 약 0.6까지 가능하게 되었다. 또한 마지막 변수인 k_1 은 photoresist 및 process의 많은 개발에 의해 양산의 경우 약 0.7까지 줄일 수 있었다. 그런데 device는 단차를 가지므로 해상력 못지 않게 충분한 초점심도(DoF, depth of focus)를 가져야 한다. 초점심도는

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

로 표시되는데 또 다른 공정 변수인 k_2 는 process의 많은 개발이 이루어지고 있다. 고 해상도를 얻기 위해 필요했던 단파장화, 고 NA화는 초점심도의 저하를 동반한다. 기억 소자의 process에는 현재 약 $1.2\mu\text{m}$ 의 DoF가 최소한 필요하다고 말해진다. 따라서 실제 process 가능한, 충분한 DoF를 확보한, 실용 해상력을 고려해야 한다.

차세대 기억 소자인 64MB DRAM급 이상에서는 최소 선폭이 $0.35\mu\text{m}$ 이하이어야 한다. 이의 실현을 위해서 현재 활발히 진행되고 있는 연구는 파장을 낮춘 KrF excimer laser를 이용한 방법과 이제까지 견드리지 않았던 mask 자체를 수정해서 공정변수들을 바꾸고자 하는 위상변이 mask(PSM, phase shift mask)방법이 있고 최근에 노광 장비의 광원면의 형상을 변형시키는 변형조명법이 두드러지고 있다. 일본 반도체 회사들을 대상으로 조사한 자료(표2)에서 볼 수 있듯이 64MB DRAM 양산시 절반 정도는 KrF를 사용하려 하고 나머지 절반은 I-line + PSM을 사용하려 한다. 그러나 대비책으로 현 시점에서 거의 모든 회사가 다 KrF와 I-line+PSM을 동시에 진행시키고 있다. 먼저 KrF excimer laser를 사용한 deep UV(DUV)방법에 대해 알아 보고자 한다.

1. Deep UV(DUV)

현재 까지 발표된 KrF excimer laser stepper($\lambda=248\text{nm}$)

표 1. DRAM 제작을 위한 lithography 공정의 필요 조건

DRAM	CHIP SIZE (mm ²)	EXPOSURE FIELD SIZE(mm ²) 2 CHIPS	TOOL AVAILABILITY FOR DEVELOPMENT/ PRODUCTION	MINIMUM FEATURE SIZE(μm)	CD VARIATION (±μm)	OVERLAY ACCURACY (±μm)
4M	80-90	15×15	1986/1989	0.8	0.15	0.35
16M	120-140	18×18	1989/1992	0.5	0.10	0.25
64M	170-200	20×20	1992/1995	0.35	0.05	0.09
256M	250-300	22×22 (1 CHIP)	1995/1998	0.25	0.04	0.06
1G	350-400	25×25 (1 CHIP)	1998/2001	0.2	0.03	0.05

표 2. 일본의 8대 반도체 회사가 사용하려는 차세대 lithography 제1후보

Design Rule 노광	0.5μ 16M 0.4μ 64M 개발	0.35μ 64M 1세대	0.3μ 64M 2세대	256M		
I-line	All					
I+PSN		NEC, Toshiba Fujitsu, Oki Mitsubishi				
MrF Eximer		NEC, Hitachi Matshushita SONY	Matsushita SONY			
KrF+PSM			NEC Hitachi	All		

(자료 : Nikkei Microdevices, May, 1991)

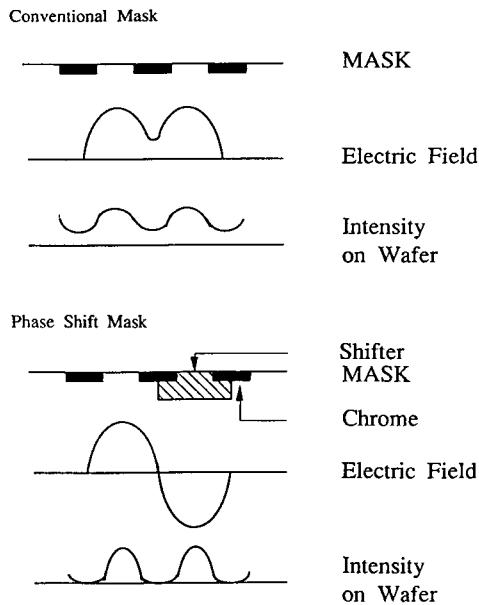
248nm)중에서 제일 큰 NA=0.5를 이용해 0.3μm의 해상력을 얻으려면 $k_1=0.6$ 이어야 하며 process가 가능한 초점심도 1.2μm를 얻기 위해서는 $k_2=1.2$ 가 필요하다. 현재의 공정기술 수준은 $k_1=0.7$ 이상이고 $k_2=1.0$ 이하라는 것을 상기한다면 DUV의 연구 방향을 결정할 수 있을 것이다. 즉 파장을 낮추어 해상도는 향상시킬 수 있지만 그 만큼 초점심도도 줄어들어 이의 극복을 위해 공정 가능한 focus 여유를 가진 실용 해상력을 위한 process 기술의 개발이 요구된다. DUV의 개발은 크게 resist부분과 stepper부분으로 나눌 수 있을 것이다. Excimer resist는 negative PR(photo resist)을 위주로 1989년 부터 활발히 연구가 진행되어 왔다. 주로 개발된 resist는 화학 증폭형 resist(CAR:chemically amplified resist)로서 산 촉매 반응을 이용하여 반응이 cascade식으로 일어나게 해서 고감도를 얻을 수 있었다. 이런 종류의 resist는 248nm에

서의 투명도가 문제가 되어 있었는데 현재 약 70% 정도 까지 끌어 올릴 수 있고^[1] resist의 안정성도 해결은 되었지만 photo-active-component에 의한 normality의 해결이 필요하다. 또한 248nm의 파장은 substrate 위에서 반사가 많이 되어 다중 간섭 효과에 의한 standing wave가 심하게 나타나므로 이를 억제하기 위해서 ARC(anti-reflection coating)층이나 정확한 resist의 두께 조절이 요구된다. Positive PR은 최근에 IBM과 Hoechst가 공동 개발하여 좋은 반응을 얻고 있다.

Stepper의 spectral bandwidth는 파장 못지 않게 해상력을 좌우하는데 bandwidth가 작을수록 색수차 감소효과에 의해 해상력 및 DOF가 향상된다. Bandwidth의 감소는 etalon이나 grating을 이용하여 현재까지 발표된 것 중에서 약 1.0pm^[2]가 제일 작다. 초점심도와 해상력이 좋기 위해서는 파장의 안정성도 요구되며 현재 약 ±2% 정도까지 개선되었으며, pulse-to-pulse energy 변화를 극복하기 위해 pulse들의 많은 반복이 요구되어 현재 약 600Hz 정도까지 개발되었다. Laser의 power는 stepper의 throughput에 결정적 요인이 되므로 high power(~10 watt)로의 연구가 진행 중이다. Alignment는 off-axis 방법을 사용하여 문제가 있었으나 현재는 TTL (through the lens) 방식이 채택되어 많은 향상이 이루어지고 있다. Excimer laser stepper의 가장 큰 단점은 gas(~10° shots) 및 laser optics의 수명이 짧기 때문에 생기는 down-time과 그에 따른 유지비가 매우 크다는 데 있다.

2. 위상변이 Mask(PSM)

1982년에 IBM의 Levenson^[3]에 의해 시작된 PSM 기술은 한동안 잊혀져 있다가 optical lithography의 한계를



-PSM을 통과하는 빛의 Intensity변화와 contrast의 증가를 가져와 process상의 resolution과 DOF를 증가시킨다.

그림 1. Conventional mask와 PSM의 비교

극복하기 위한 방법으로서 1989년에 Hitachi^[4]에 의해서 재창조된 뒤 지금까지 활발한 연구가 진행되어 0.35μ 기술은 물론 optical lithography의 한계를 $0.12\mu\text{m}$ 까지 연장시킬 수 있는 길을 열어 주었다.

Mask 자체를 변형시켜 k_1 과 k_2 의 향상을 이를 수 있는 PSM의 원리는 다음과 같다. 빛은 전자기파의 일종이므로 파장과 진폭은 물론 위상을 갖는다. 보통의 mask는 부호는 그대로 두고 진폭의 크기만을 바꾸어 준다. 보통 mask의 두개의 투명한 인접 부분을 통과한 빛들은 회절되고 그 회절된 빛들의 전기장은 서로 같은 부호를 갖기 때문에 constructive 간섭이 생기고 그 결과 Rayleigh criterion에 따른 해상력을 갖는다. PSM의 경우는 위상이 180° 로 바뀐 전기장(-)과 위상이 그대로인 전기장(+)이 만나서 destructive 간섭 현상이 생긴다. 따라서 경계부분의 전기장은 0이 된다. 빛의 세기는 전기장의 제곱에 비례하므로 경계부분에서는 0이 되지만 그 외 부분에서는 +진폭이나 -진폭이나에 상관없이 같은 세기를 갖는다. (그림 1) 결과적으로 빛의 세기 폭선의 FWHM(full width half maximum)인 resolution이 증가하고(k_1 감소), 또한 minimum의 감소로 contrast가 증가하여 초점심도도 증가하게 된다(k_2 증가). 예를 들어 현재 사용하고 있는 I-line stepper($\lambda=365\text{nm}$, NA=0.55)의 경우, 보통

mask($k_1=0.7$, $k_2=1.0$)를 사용했을 경우 $R=0.46\mu\text{m}$ 와 DOF= $1.2\mu\text{m}$ 을 얻는 반면, 위상변이 mask($k_1=0.4$, $k_2=2$)의 경우는 $R=0.27\mu\text{m}$ 과 DOF= $1.8\mu\text{m}$ 로 충분한 focus margin을 가진 향상된 해상력을 얻을 수 있다.

이러한 위상변이 mask는 기존의 resist, process 기술 및 노광 장비를 그대로 사용하면서 충분한 focus margin을 가진 해상력을 얻을 수 있으므로 매우 유용하게 쓰여질 수 있다. 그러나 패턴에 따른 공정변수를 더욱 향상시키기 위한 목적으로 또는 위상변이 mask의 제조과정을 단순화 시키려는 노력으로 지금까지 많은 연구가 이루어져 왔다. PSM은 phase shifter를 만들어 주는 방법에 따라 크게 Levenson^[3] 보조 패턴^[4], Edge 강조^[5], Attenuated^[6], Chromeless^[7] type 등으로 나눌 수 있다. Equal line/space 같은 반복된 패턴은 공간 주파수형이라고도 불리는 Levenson형을 이용하는 것이 design 및 제조 과정이 비교적 간단해서 대부분의 회사가 채택하려고 한다. 국내에서도 현대전자^[8] TLR(threee-layer-resist)process와 병행하여 $1.2\mu\text{m}$ 이상의 DOF를 가진 $0.25\mu\text{m}$ 의 resolution을 I-line으로 만들 수 있었다. 고립된 contact이나 hole 같은 경우는 빛이 투과하는 주변의 위상을 변환시키는 방법인 edge 강조형을 많은 회사들이 선호하고 있는 것으로 조사되었다.^[9] 위상을 변환시켜주는 shifter 재료는 E-beam resist로 연구가 시작되었으나 현재는 SiO₂, SOG (spin-on-glass), 혹은 mask(quartz) 자체를 etching하여 쓰려고 한다.

그러나 우리가 원하는 해상력과 초점심도를 얻을 수 있는 PSM 기술은 쉽게 얻어지는 것만은 아니다. 기본의 mask에 비해 shifter가 더 추가되므로 훨씬 더 복잡한 design이 필요하고 또한 위상변이 mask 자체를 만드는 공정이 아직 정립되어 있지 않으며 노광 공정시에도 기존의 process보다 나은 통제가 필요하다. Design의 문제는 먼저 우리가 원하는 패턴과 CD(critical demension)에서의 최적 PSM type이 무엇이며 shifter들을 어떻게 배치할 것인 지가 해결되어야 한다. 많은 simulation에 의해서 wafer에 도달하는 빛의 aerial image와 PR development를 조사하여야 할 것이다. 이렇게 얻어진 design을 어떻게 현재의 device 패턴에 붙이는가 하는 CAD의 문제는 designer와 process engineer 그리고 mask maker가 합동해서 auto CAD가 가능하도록 해야 할 것이다. 기존의 mask보다 복잡하고 많은 공정이 들어가는 PSM 제조 과정은 쉽지 않으며 따라서 적지 않은 결함이 생길 소지가 많다. 대부분의 PSM type들은 shifter layer를 기존의 mask 위에 만들어 주어야 하므로 이전에는 생각지 않았던 alignment 문제를 고려해야 한다. 5X reticle상에

서 $0.2\mu\text{m}$ 이내의 alignment 정확도를 가져야 한다. Shifter layer의 두께에 의해서 위상이 정해지기 때문에 shifter를 붙이는 방법 및 두께를 조절할 수 있어야 한다. Shifter의 deposition과 dry 혹은 wet quartz etching 및 etching stopper는 어느 정도 해결되었고 두께 및 위상의 측정도 interferometer와 atomic force microscopy로 기본적으로는 해결되었다.^[10]

PSM의 공정이 기존 mask를 만드는 공정에 비해 복잡하기 때문에 결함은 늘어나게 되고 그것을 검출해 내서 수정하는 것 또한 큰 문제이다. 일반적으로 shifter의 결함은 chrome의 결함에 비해서 약 2배 정도 나쁜 것으로 알려져 있다. 기존 reticle 검사 장비의 대표적인 KLA의 궁극적인 개발 목표는 shifter의 위상각, 두께 및 결함을 찾아 내는 데 있다고 말하고 있다. 결함은 laser나 focused ion beam에 의해 수정이 가능하다고 알려져 있긴 하지만^[11] 임의의 패턴이나 두께를 가진 shifter의 수정을 해 줄 수 있는 장치는 아직까지 발표되지 않고 있다.

이 외에도 stepper 자체의 condensor와 reduction lens 사이의 coherence 비율과 NA에 따라 최적 PSM type이 변하므로 이런 것들을 변경시킬 수 있는 stepper가 필요하며 PSM 효과는 positive PR과 negative PR에서 각각 틀리기 때문에 최대의 효과를 얻기 위해서는 양쪽 resist를 병행해서 써야되고 이에 따른 PR의 개발이 필요하다.

3. 선택

DUV와 PSM 기술과는 별도로 stepper 자체의 조명 방법을 변형시켜서 해상도와 초점심도를 향상시키는 방법이 최근에 두각을 나타내고 있다.^[12-16] Condensor lens를 tilt 시키거나 annular illumination 및 spatial filtering에 의해 회절된 빛의 0차와 1차광 사이의 간섭 현상을 이용하여 해상도 및 초점심도를 향상시키는 이 방법들은 반복된 패턴상에서는 효과가 PSM 만큼 좋으나 고립된 패턴에서는 효과가 없는 단점이 있다.

이상과 같은 변형 조명법 및 Desire^[17]등의 공정 기술 등은 KrF 및 I+PSM과 결들여 쓸 수 있으며 64MB DRAM을 위한 lithography 기술의 선택은 결국 비용 문제이다.

위상변이 mask의 비용은 KrF mask에 비해 약 3배 정도가 되겠지만 KrF stepper 및 유저비를 고려했을 때 mask당 10^4 이상의 wafer를 노광한다면 I+PSM이 비용 면에서 유리하다. 256M급 이상은 DUV+PSM의 사용이 유력시 되며 따라서 DUV와 PSM은 동시에 연구가 필요하다. 이 외에도 현재 궁극적인 optical lithography의 한

계를 $0.12\mu\text{m}$ 로 보았을 때 overlay accuracy가 이를 뒷받침해 줄 수 있느냐 하는 문제가 남는다.

III. Non-Optical Lithography

광학노광장치를 이용하고 않고 미세패턴을 형성할 수 있는 방법으로는 전자선, X-ray 등이 있다. 본절에서는 이와 같은 방법을 이용하여 높은 해상도를 가지는 패턴을 구현하는 원리와 문제점 및 개선방안에 대해 논하고자 한다.

1. Electron Beam Lithography

현재 가장 안정되고 광학적인 방법보다 높은 해상도를 가질수 있는 E-beam lithography는 광학 및 X-ray 노광을 위한 마스크제작, 반도체 소자 제작을 위한 direct writing 및 ASIC 제작등에 널리 쓰이고 있다. E-beam은 높은 resolution, flexibility, accuracy의 장점이 있으며, direct writing 방법을 이용하여 10nm이하의 패턴, 60nm의 grating, $0.1\mu\text{m}$ 이하의 채널길이를 가지는 MOSEET^[18], $0.05\mu\text{m}$ 채널길이의 MESFET등이 제작되었다.

표3은 널리 이용되고 있는 direct-writing용 e-beam 장비의 사양을 나타낸 것이다. E-beam source로는 W, LaB₆ crystal등이 많이 사용되며 thermal emission에 의한 e-beam의 형성이 많이 이용되고 있으며, field emission에 의한 높은 전류밀도의 beam도 많이 연구되고 있다. 표3에서 알 수 있듯이 이 방법은 6인치 웨이퍼의 가공이 가능하며, 높은 해상도를 가지나, 광학적인 방법이나 X-ray 노광에 비해 낮은 throughput을 가짐을 알 수 있다. 이외에도 근접효과(proximity effect)에 의하여 패턴이 왜곡되는 현상을 이야기시켜 e-beam 장비의 근본적인 두 가지 문제점으로 지적되고 있다.

Throughput은 고감의 포토레지스트를 사용하여 노광에 필요한 dose를 낮추거나 전류밀도를 증가시켜 향상시킬 수 있으며, 표 1에 나타낸 바와 같이 gaussian 빔보다는 성형빔(shaped beam)을 이용하여 향상시킬 수 있다. 성형빔에는 고정 성형빔, 가변, 성형빔 또는 반복되는 패턴에 유용한 cell/character projection등이 사용되고 있다. 그러나 이 방법들로는 광학노광방법에 비해 한계가 있으며, projection 형 e-beam^[19]이나, stepper와의 mix-and-match^[20]를 통한 기술이 시도되고 있다. Projection e-beam은 광학노광장비와 같으나, 광원으로 e-beam을 사용하며, 높은 throughput을 가지나, imaging optics, X-ray lithography mask와 비슷한 형태의 mask 제작,

표 3. Electron beam 장비의 사양

VENDOR 사양 (MODEL)	LEICA (EBML 300)	ETEC (AEBLE 150)	HITACHI (HL 700 D/M)	JEOL (8600 DV)
1) Writing Strategy	Step & Repeat Gaussian Vector	Continuous Shaped Vector	Step & Repeat Gaussian Vector	Step & Repeat Gaussian Vector
Area(mm)	127 × 130	160 × 160	165 × 165	175 × 200
2) Accuracy(μm)				
• Resolution	0.05	0.15~0.25	0.2	0.2
• Linewidth Control	0.04	≤0.08	0.1	0.07
• Overlay	0.1	0.15	0.1~0.15	0.125
• Switch	0.1	0.15	0.08~0.1	0.1
3) Throughput				
• Field size(mm)	0.3~4	2	3	1.5
• 4" wafer/hr	1~2	3~30	5~10	5

높은 에너지 gun(100KeV 이상)의 제작동의 문제점이 있으며, 이의 개발은 오래전부터 시도 되었으나, 아직 초기단계에 머물러 있다. 기존의 stepper와의 mix-and-match를 이용한 방법은 높은 해상도를 갖는 층(예: MOSFET의 gate)은 e-beam으로, 나머지는 stepper로 구현함으로써, 생산성을 향상시킬 수 있으며, 현재 ASIC, GaAs MMIC등의 생산에 이용되고 있다. 이 방법은 빠른 turn-around time과, 높은 정확도의 장점이 있으나, stepper와 e-beam의 field 및 registration 방법의 차이로 overlay accuracy를 stepper의 오차인 0.1μm 이하로 줄일 수 없어 256M 이상의 DRAM 생산에는 높은 대비를 가지는 mark 감지 및 overlay 감소등의 연구가 필요하다.

Proximity 효과는 입사되는 e-beam이 포토레지스트 내부 및 계면에서 forward/back scattering에 의하여 산란됨에 따라 패턴이 왜곡되는 현상으로서 포토레지스트에 노출되는 실제 e-beam dose가 적어지는 intra-proximity와 많아지는 inter-proximity로 구분된다. 따라서 패턴의 edge 및 corner부분이 원하는 것과 같지 않게 구현된다. 이 효과는 높은 원자번호를 가지는 물질에서 더욱 크게 나타나며, 높은 에너지(>50KeV)의 빔을 이용하여 back scattering을 줄이거나, 아주 낮은 에너지(<3KeV)의 빔을 사용하여 forward scattering을 줄이거나 또는 tri-layer등의 multi-layer photoresist를 이용하여 감소시킬 수 있다.

Tri-layer photoresist 방법으로는 기판위에 optical photoresist, 전도성막, 얇은 photoresist 등을 차례로 사용하여 평탄화 및 균접효과의 감소를 꾀할 수 있다. 그러나 이 방법은 두꺼운 포토레지스트로 인하여 registration 오차가 증가하게 되며, 높은 비동방성 식각기술등이 요구된다. 또한 전도성막에 이용되는 적합한 물질과 비전도성 막을 사용하였을 경우 charging effect를 고려하여야 한다. Charging effect는 e-beam의 전자가 비전도성막에 남아있어 입사되는 전자를 편향시킴으로써 왜곡된 패턴을 초래하며, registration 오차를 유발하는 현상이다. E-beam lithography에서 실제 사용되는 균접효과에 대한 보정은 EID(energy intensity distribution)을 여러개의 gaussian 또는 exponential 함수로 가정하여, 실험에 의한 이들 함수의 상수를 구하고, 이를 이용하여 각각의 분리(fracture)된 패턴에 대하여 dose를 변화시킴으로써 이루어진다. 예를 들어, 같은 line 패턴이라도 line/space의 가운데 있으면 dose를 감소시켜야 하며, 독립된 line인 경우는 dose를 증가시켜야 원하는 패턴을 얻을 수 있다. 이는 가장 간단한 방법이나, 분리된 패턴의 수와 gaussian 항이 많을수록 정확도가 증가하므로 data의 양이 매우 커지며, data의 변환시 매우 오랜 시간을 소요하게 된다. 따라서 초고집적 반도체의 제작에는 유용한 방법이 될 수 있으며, Hitachi에서 개발한 DRAM의 주변회로 패턴과 cell 패턴을 각각 다른 방식으로 보정하는 방법^[21]과 global 보정 및 local 보정을 혼합시키고, 이들의 hierarchy를 유지하

며, lithography 공정의 image processing 모델에 입각하여, 패턴을 변형시킴으로써 보정을 행하는 pyramid 방식이 고집적회로를 구현하는데 더욱 유용할 것이다.

2. X-Ray Lithography

X-ray를 이용한 패턴형성은 deep submicron 패턴에서 유용할 것으로 예상되어 1970년대부터 개발되어오고 있다. 이 방법의 장점은 큰 DOF를 초미세($0.1\mu\text{m}$) 패턴형성, 큰 field size, particle에 의한 영향감소, 간편한 공정 등이며, Brookhaven Oxford, NTT, Fraunhofer 등에서 SOR(synchrotron orbital radiation)을 이용한 광원 개발, Hampshire Instrument사에 의한 1X proximity stepper, Phillips, IBM 등에 의한 mask제작 공정이 개발되었다. 이들은 700MeV의 에너지로 형성되는 $7\sim12\text{\AA}$ 의 파장을 가진 hard x-ray를 사용하며, optical stepper와의 mix-and-match로 $0.3\mu\text{m}$ 의 채널길이를 갖는 MOSFET, 1M DRAM^[22]등이 제작되었다.

X-ray lithography의 단점은 SOR 광원이 너무 크고 비싸며, mask의 제작이 어렵고, x-ray damage에 의한 소자의 열화 등이다. 광원은 표 4에 나타나 있는 바와같이, 고 power 및 적은 blurring 효과의 싱크로트론 외에도 laser plasma, plasma discharge 등을 사용한다.

표 4. X-ray sources for lithography^[24]

구 분	Electron Impact	Plasma Discharge	Laser Plasma	Synchrotron
Spectrum(nm)	0.44-1.3 line	0.7-1.5 line	0.9-1.7 line	0.4-2.0 broadband
Diameter(nm)	3	0.2	0.1	0.5
Divergence (mrad)	50	50	50	5
Source/mask Blurring(nm)	0.4 400	0.4 <35	0.4 15	4 <10
Power on mask (mW/cm ²)	>1	>10	>1	>100

Synchrotron을 이용한 광원은 물질을 이용하여 반경 5m로 크기를 줄여나가고 있으며, 1:1 hard x-ray가 아닌 파장 $125\sim140\text{\AA}$ 의 projection형이 연구되고 있으며^[24], KrF eximer laser를 이용한 140\AA 파장의 laser plasma 광원도 개발되고 있다.

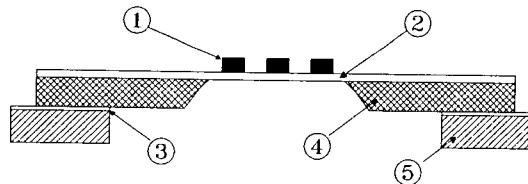
X-ray lithography에 사용되는 mask는 얇은 diaphragm 위에 absorber 패턴을 형성하여 구현되고 있으며, diaphragm으로는 Si, SiNx, SiC, BN, diamond 등이

사용되며, absorber로는 Au, W, Ta 등이 이용된다(그림 2). 또한 soft x-ray를 이용한 mask로는 Mo/Si를 multilayer로 도포한 reflection 형이나, Si diaphragm 위에 Ge를 absorber로 이용한 transmission 형이 연구되고 있다. X-ray mask에 사용되는 diaphragm은 $1\sim2\mu\text{m}$ 으로 매우 얕아서 stress에 의한 distortion이 일어나기 쉬우며, 이는 그림 2에서처럼 rim에 mount할 때와 x-ray에 많이 노출되었을 경우 열적 변화에 의해서 야기된다. 또한 mask 상의 defect 검사도 1X mask에 $0.5\mu\text{m}$ 이하의 패턴을 구현할 경우 현재의 광학적인 방법을 이용한 장비로는 어려우므로 e-beam 등을 이용한 방법이 모색되어야 한다^[25]. 이 defect는 무거운 원자인 경우(Au, Fe 등) 보다는 작은 원자(Si)나 polymer(PMMA)인 경우 표 5에서처럼 적은 영향을 나타낸다. X-ray lithography는 defect에 적은 영향을 받지만 이들 defect에 대한 mask 보수도 deep submicron 패턴형성에는 문제가 될 것으로 예상된다.

표 5. Critical X-ray mask defect sizes^[25]

(단위 : nm)

Critical wafer defect size :	250	
	CD/10	CD/5
Au	60	70
Fe	110	150
Si	500	1100
PMMA	1000	2100
hole	60	80
smallest critical size	60	70



① Absorber(- 1 μm)(Au, W, Ta)
 ② Mask Membrane (2 - 4 μm)(BN, SiN, Si, SiC)
 ③ Glue, Solder
 ④ Mask Substrate (Si Wafer: 100mm Φ)
 ⑤ Mask Frame (Pyrex 5 mm)

그림 2. X-ray mask의 구조

IV. Photoresist 재료

1986년에 양산이 개시된 IM DRAM의 제조는 g선(436nm의 광)스테퍼가 사용되었으며, 4M DRAM은 g선과 i선이 사용되고, 설계 룰이 $0.5\mu\text{m}$ 인 16M에서는 i선 스테퍼가 주류를 이루리라 예상하고 있다. 미국의 Rose Associates사의 조사에 의하면, 전세계의 서브마이크론 스테퍼의 설치 대수는 1992년에 g선이 2650대, i선이 1500대, DUV가 100대 미만이던 것이 1995년에는 g선이 2800대, i선이 3500대, DUV가 250대 정도로 증가가 두드러진다^[26]. 256M의 경우, 현재 기술의 연장선상에서 디바이스의 제작이 가능하다면, 보다 단파장의 광을 사용한 엑사이머 레이저 또는 X선이 사용되리라 예측하고 있다.

한편, 레지스트에 요구되는 기능은 리소그라피, 특히 노광 방법과 밀접한 관계가 있어 노광 방법이 밀착 노광으로부터 투사 노광, 축소 투사 노광으로 변천함에 따라, 네가형 레지스트에 비해 해상성과 내 드라이 애칭성이 뛰어난 포지형 레지스트가 주류를 이루게 되었다. 이 레지스트는 1950년 초기에 개발되었고, 노블락 수지와 나프토퀴논-디아지이트로 구성되어 있다. 이는 오늘날의 4M LSI의 제조에도 그 개념이 도입되고 있으며, 16M DRAM용 g선 또는 i선 레지스트로서의 사용 가능성도 높다. 또한 최근, 엑사이머 레이저 레지스트의 개발에 있어서, 주목을 받고 있는 것은 화학증폭 레지스트이다.

이하에서는 g선, i선 대응 포토레지스트, 엑사이머 대응 레지스트, 그리고 전자선 · X선 대응 레지스트의 순으로 언급코자 한다.

1. g선, i선 대응 포지형 포토레지스트

포지형 포토레지스트로 대표적인 재료는 그림 3에서와 같이 노블락 수지(1)에 감광제 디아조나 프토퀴논의 슬픈 산 에스테트(2)를 혼합한 계가 사용되고 있다.

노블락 수지는 알카리에 가용이다. 감광제는 그림 4와

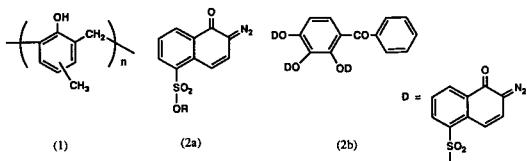


그림 3: g선 i선용 포지형 포토레지스트

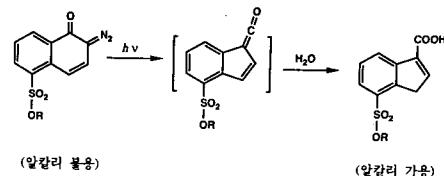


그림 4: 포지형 포토레지스트의 반응

같은 반응 경로를 통해 알칼리 불용에서 알카리 가용으로 된다.

즉, 포지형 포토 레지스트는, 노광전에는 알카리 불용이지만 노광후 알카리 가용으로 되어, 포지형 패턴을 발현한다.

레지스트의 개발에 있어서 요구되는 기능은, 감도, 해상도, 드라이 애칭 내성, 내열성, 마스크 충실성, 패턴 폭의 노광량 의존성 등을 들 수 있다.

디아조나프토퀴논-노블락 수지계 포지형 포토레지스트의 고성능화(특히 고해상도화)는, 재료적 측면에서 이하와 같은 상세한 연구가 있다^{[27]~[31]}. 노블락 수지 단량체의 조성(크레졸의 치환위치, 크레졸의 이성체비 및 제3성분과의 공중합, 크레졸/포름알데히드 투입비, 축합촉매), 수지의 다분산도 제어, 노광파장에 있어서의 광투과성의 향상, 감광제(2)의 에스테르화의 상대가 다가페놀(2a의 R)(통상, 2,3,4,-하이드록시멘조페논의 치환체(2b)가 사용되어진다.)의 구조와 에스테르화율(디아조나프토퀴논 기의 수), 감광제의 광표백성의 향상 등이다.

디아조나프토퀴논-노블락 수지 레지스트 시스템은 1970년대에 LSI 미세가공에 도입된 이후, 기본적 구성은 변경시키지 않고, 재료 각 성분에 대한 상세한 연구의 결과, 해상도의 비약적인 향상을 가져왔다.

2. 엑사이머 대응 포토레지스트

노광 장비의 개발과 병행해서 KrF 엑사이머 레이저 리소그라피 기술 및 그에 대응하는 레지스트의 개발도 다수 행해지고 있지만, 개발시 가장 문제가 되는 것은 $0.5\mu\text{m}$ 이하의 깨끗한 레지스트 패턴이 얻어지는 레지스트가 아직 개발된 예가 드물다는 점이다. 현재 시판되고 있는 노블락 계 포지형 포토레지스트를 엑사이머 레이저로 노광하면, g선 또는 i선 스테퍼로 노광 할 때와 달리 패턴이 형상이 삼각형이 된다. 이를 노블락계 포토레지스트의 365nm와 249nm에서의 흡광 계수의 차, A값과 B값을 아래에 나타내었다.

	A값	B값
365nm	0.47	0.19
249nm	0.76	3.20

이 표에서 알 수 있는 바와 같이 249nm에서는 B값이 좋지 않다. 이것은 노광후의 투명성이 낮다는 것을 의미한다. 그 결과, 광이 레지스트의 하부까지 도달하기 어렵게 되어 패턴이 삼각형이 된다. 이것은 감광제와 노블락 수지 양쪽 모두 249nm에서의 흡광이 높다는 것에 기인한다. 따라서, 엑사이머 레지스트를 개발함에 있어, 249nm에서 투명성이 높은 수지의 개발 및 적합한 감광제의 개발이 필요하다.

지금까지 발표되어 있는 엑사이머 레지스트는 다음의 3 가지로 크게 나눌 수 있다.

- (i) 주쇄분해형
- (ii) 용해억제형
- (iii) 화학증폭형

(1) 주쇄분해형

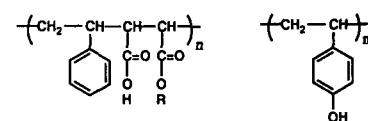
주쇄분해형 고분자는, 광의 조사에 의해 주쇄가 절단되어, 저분자화 하는 것에 의해 조사부가 비조사부부터 잘 녹게 되어, 포지형 레지스트로 채용할 수 있다. 이들 주쇄분해형 고분자를 크게 poly(methyl methacrylate)계, poly(isopropenyl ketone)계 및 poly(olefin sulfone)계 등 3가지로 구분 할 수 있다.^[32] 이들 고분자의 대부분은 249nm에서 투명성이 높기 때문에 많은 연구자들의 연구 대상이 되었다. 이들에 관한 상세한 내용은 생략한다.(참고 문헌 32 참조)

(2) 용해억제형

이것은 종래의 포지형 포토레지스트와 같은 개념으로 되어있다. 즉, 알카리 가용성 수지에 감광제를 넣어서 알카리 불용화 시킨다. 노광하면 이 감광제가 알카리 가용으로 되어 patterning할 수 있게 된다. 이와 같은 2성분계는 수지에 드라이 에칭에 대한 내성을 투여할 수 있고, 감광제에 감도를 갖게 할 수 있기 때문에, 레지스트 설계의 자유도가 높아진다.

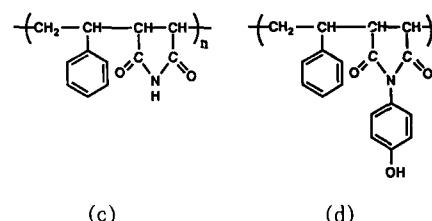
현재 개발되어 있는 대표적인 수지를 그림 5^{[33], [34]}에, 감광제를 그림 7^{[35]~[37]}에 나타내었다.

그림 5의 수지의 249nm에서의 투과율은, 화합물(a)를 제외하고 1μm의 막두께에서 10%이하이다. Hoechst에서는 2 및 3 hydroxystyrene, 그리고 알카리 치환 hydroxystyrene의 종합체에 대한 연구가 있으나, 그림 5(a)와 비교해 투과율의 괄목할 만한 차이는 없어진다.^[38] 일본의



(a)

(b)



(c)

(d)

그림 5. 노블락 수지 이외의 알카리 가용성 수지

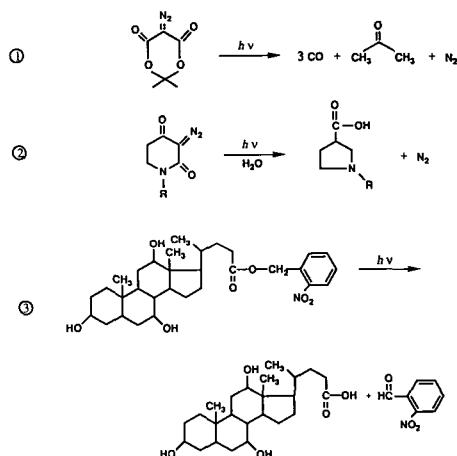


그림 6. 나프토퀴논이외의 용해억제제와 광분해성 반응

Maruzen 석유화학은 hydrostyrene의 부분수첨 반응에 의해 투명성이 높은 수지를 개발하였다.^[39] 한편 그림 6의 감광제에 있어서 ①의 화합물은 비노광부의 용해 억제능이 낮고, ②의 화합물은 노광량이 증가함에 따라 포지형으로부터 네가형으로 레지스트 패턴의 반전을 일으킨다. Bell 연구소에서 제한한 ③의 화합물은 광에 의해 카트본 산이 생성된다. 이 화합물은 비노광부의 알카리에 대한 억제능이 높다.

(3) 화학증폭형

화학증폭이란 에너지 선을 조사해서 촉매작용이 있는 활성종을 생성시켜, 이들이 화학 반응에 참여하여 고분자의 주쇄분해, 가교 또는 극성 변화를 촉진시키는 기구를 말한

다. 노광에 의해 발생하는 산의 촉매작용을 이용하는 감광성 고분자가, 반도체 미세기공용 레지스트로서 유용하다고 실증한 사람은 IBM의 Ito와 Wilson이다^[40]. 그들은 그림 7과 같은 디아조나움염, 요도니움염, 슬폰니움염 등의 오니움염이 노광에 의해 분해되서, MX_{n-1} (루이스산) 또는 HMX_n (브뢴스테드산)을 발생하는 것을 이용하여, 이들 오니움염과 산에 대한 반응성이 큰 고분자와 혼합계를 보고했다. 산에 반응성이 큰 고분자로서는 tertiary butyl ester 고분자(그림 8)가 유용하다. 최근, BASF^[41]는 동일 분자내에 용해 억제제와 광산발생제의 역할을 동시에 발현하는 화학증폭형 레지스트 시스템을 개발하였다(그림 9).

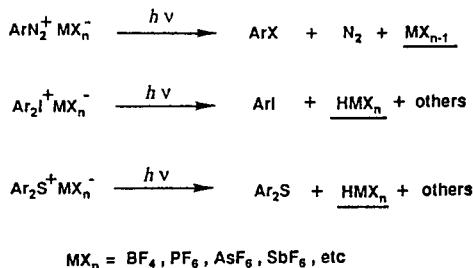


그림 7. 양이온 광 개시제

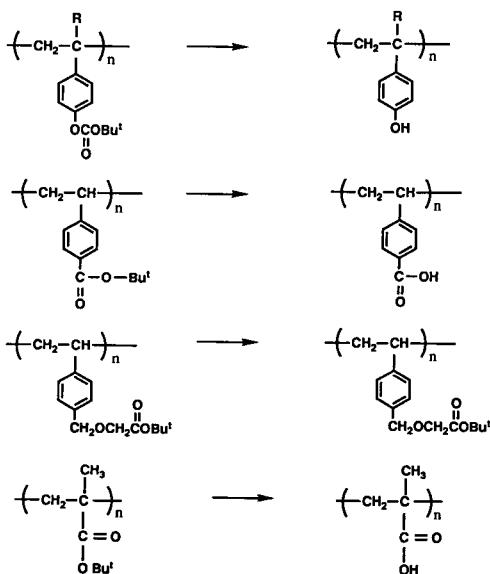


그림 8. Tertiary butyl ester polymer

이들 화학증폭형 레지스트가 엑사이머 레지스트로 응용 가능한 최대의 잇점은, 249nm에서의 흡수가 어느 정도 크더라도, 깨끗한 패턴을 해상할 수 있다는 점이다. 또

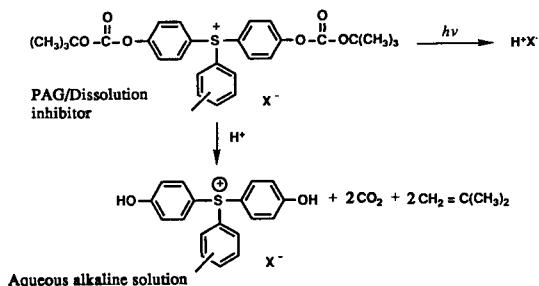


그림 9. 광산발생제와 용해억제제의 역할을 동시에 하는 분자 구조

촉매반응을 이용하기 때문에, 고감도화가 비교적 용이하게 해결될 수 있다는 점이다. 단 노광으로 부터의 PEB, PEB로부터 현상까지의 시간 의존성과 PEB시 촉매의 열화산이 일어나기 때문에 패턴 치수가 설계치에서 벗어난다는 점 등을 가지고 있고, 본 개념의 레지스트가 64M DRAM에 본격적으로 사용되기 위해서는 아직도 개량해야 할 여지가 많이 남아 있다.

3. 전자선 · X선 대응 레지스트

전자선이 레지스트 재료에 미치는 화학반응은, X선과 유사하기 때문에, 전자선 레지스트가 그대로 X선 레지스트로 이용할 수 있다. 본 레지스트 재료도, 엑사이머 레지스트의 경우와 마찬가지로, 주체분해형 레지스트와 화학증폭형 레지스트 등의 연구가 주류를 이루고 있다. 화학증폭형 레지스트는 2장에서 비교적 자세히 다루었기 때문에 여기서는 생략한다.

방사선 분해형 포지형 레지스트 재료로서 유명한 것은 PMMA계와 polysulfone계를 들 수 있다. Poly(1-butene sulfone)(그림 10)은, $1\mu\text{m}/\text{cm}^3$ 로 PMMA의 약 50배에 해당하는 고감도를 나타내어, 포토마스크 제작용 전자선 레지스트로서 널리 이용되고 있다.

PBS는 분해형 레지스트의 공통적인 문제점인 드라이에칭에 대한 내성이 아주 좋지 않다는 문제점을 갖고 있다. 드라이에칭 내성을 높히기 위해서는 불포화기 특히 방향화의 도입이 유효하다는 것이 알려져 있다^[41]. 이의 한 예가 2:1 PSS이다. 그러나 이는 드라이에칭 내성은 개선되나 감도가 떨어진다는 문제점을 갖고 있다. 최근 Si 기^{[43][44]}, Ge 기^[45]를 포함하고 있는 1:1 PSS(그림 11)는 전자선 · X선에 고감도, 고해상성일 뿐만 아니라, O_2 RIE에 대한 내성 또한 노블락계 레지스트 보다 훨씬 우수하다는 연구결과가 있다.

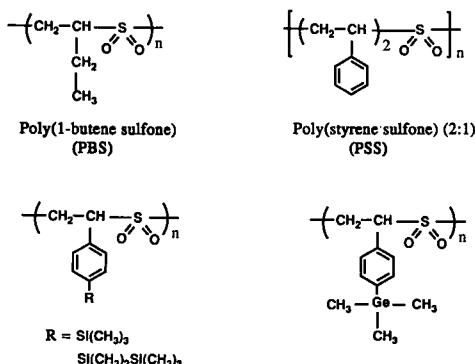


그림 10. Polysulfone계 레지스트 재료

V. 결 론

본 논문에서는 초고집적 기억소자에 응용될 수 있는 $0.5\mu m$ 이하의 미세패턴을 형성하는 방법에 대하여 알아보았다. Optical lithography로는 i-line stepper, deep UV, PSM, 조명 방법을 개선한 i-line stepper 및 DESIRE공정 등이 사용될 것이며, 64M DRAM의 생산은 위의 방법 중 i-line+PSM 등이 사용될 전망이다. 256M DRAM 이상의 집적도에는 이들의 혼합적용이 경제적인 측면을 고려하여 이루어질 것으로 보이며 DUV+PSM이 유력시 된다. 적절한 mask 및 포토레지스트의 개발이 선 행된다면, X-ray lithography도 이용 가능성이 있다. E-beam은 mask 및 ASIC 제작 용도로 쓰일 전망이며, 이를 mask의 보수, 공정중에 포토레지스트의 cross section을 측정하는 용도로 focused ion beam(FIB)이 사용 가능하다. FIB는 liquid metal ion source를 이용하여 maskless 공정을 행할 수 있으므로 $0.1\mu m$ 이하의 소자 제작에 이용될 수 있는 잠재력을 갖고 있으며, 이에는 매우 작은 크기의 ion beam, 높은 throughput, ion beam에 의한 포토레지스트의 carbonization 등의 문제 해결이 선 행되어야 한다. 포토레지스트는 디아조나프퀴논-노불락 수지계가 개량되어 널리 쓰이고 있으며, 장래의 DUV, 전자성, X선 lithography에는 화학증폭형 레지스트가 유망 하리라 예상되고, 주체분해형 레지스트 또한 가능성을 내포하고 있다고 하겠다.

參 考 文 獻

- [1] A. Oikawa, S. Miyata, K. Maeda, H. Tanaka, K. Nakagawa, SPIE 1672-39, 1992.
- [2] P. Lokai, U. Rebhan, U. Stamm, H. Bücher, H.-J. Kahlert, D. Basting, SPIE 1674-71, 1992.
- [3] M. D. Levenson, N. S. Viswanathan, R. A. Simpson, IEEE Trans. Electron. Devices, ED-29, p. 1828, 1982.
- [4] T. Terasawa, N. Hasegawa, T. Kuroasaki, T. Tanaka, SPIE 1088, 25, 1989.
- [5] A. Nitayama, T. Sato, K. Hasimoto, F. Shigemitsu, M. Nakase, IEDM, p. 57, 1989.
- [6] N. Hasegawa et al., Proc. JAP Symp., abst. no. 29P-ZC-3, 1991.
- [7] K. Nakagawa, M. Taguchi, T. Emi, SPIE 1674-37, 1992.
- [8] S. M. Ham, Y. S. Kim, H. K. Oh, D. J. Ahn, K. H. Oh, SPIE 1674-37, 1992.
- [9] Nikkei Microdevices, May 1991.
- [10] A. P. Ghosh and D. B. Dove, SPIE 1673-18, 1673-66, 1992.
- [11] L. R. Harriot, J. G. Garofalo, and R. S. Kostelak, SPIE 1671-31, 1992.
- [12] A. Suzuki, M. Noguchi, M. Maraki, Y. Iwasaki, SPIE 1674-06, 1992.
- [13] N. Shiraishi, S. Hirukawa, Y. Takeuchi, N. Magome, SPIE 1674-63, 1992.
- [14] K. Tounai, H. Tanabe, H. Nozue, K. Kasama, SPIE 1674-64, 1992.
- [15] M. Noguchi, Y. Yoshitake, Y. Kembo, SPIE 1674-69, 1992.
- [16] T. Terasawa, N. Hasegawa, K. Hama, S. Katagiri, SPIE 1674-08, 1992.
- [17] K. Kato, K. Taira, T. Takahashi, K. Yanagihara, SPIE 1672-22, 1992.
- [18] C. Reeves, et. al., J. Vac. Sci. Tech., B 9(6), p. 2851. Nov/Dec. 1991.
- [19] S. Berger, et. al., J. Vac. Sci. Tech., B 9(6), p. 2996, Nov/Dec. 1991.
- [20] W. Flack, D. Dameron, V. Alameda, G. Malek, SPIE 1671-03, 1992.
- [21] F. Murai, et. al., Micro Process Conf., p.172, 1990.
- [22] S. Hoffman, S. Nash, R. Ritter, W. Smith, J. Vac. Sci. Tech., B 9(6), p.3241, Nov/Dec. 1991.

- [23] H. Yoo, Workshop on Advanced Litho., p.7, 1991.
- [24] D. Tennant, et. al., J. Vac. Sci. Tech., B 9(6), p. 3176, Nov/Dec. 1991.
- [25] W. Arden, Microelectronic Eng., 13, p.231, 1991.
- [26] W. C. O'Mara, Semiconductor Photore sist Products, Rose Association, 1990.
- [27] U. S. Patent 4, 404, 272(1983). A. Z. Hoechst.
- [28] H. Hiraoka, in "Materials for Microlithography", ed. L. F. Thompson, et. al., ACS Symp. Ser. 266, 339, 1984.
- [29] M. K. Templeton, et. al., SPIE Symp. Proc., vol. 771, 136, 1987.
- [30] M. Hanabata, et. al., SPIE Symp. Proc., vol. 771, 85, 1987.
- [31] M. Hanabata, et. al., SPIE Symp. Proc., vol. 920, 349, 1988.
- [32] C. G. Wilson, et. al., in "Electronic and Photonic Applications of Polymers", ed. M. J. Bowden, et. al., ACS Symp. Ser. 218, 75, 1988.
- [33] 伊藤 洋, 月刊 Semiconductor World, 11月, 93, 1987.
- [34] S. Richard, et. al., Polym. Eng. Sci., 26, 1096, 1986.
- [35] B. D. Grant, et. al., IEEE Transaction on Electronic Device, ED-28, 1300, 1981.
- [36] C. G. Wilson, et. al., SPIE Symp. Proc., vol. 771, 2, 1987.
- [37] E. Richmanis, et. al., J. Electrochem. Soc., 130, 1433, 1983.
- [38] K. Przybilla, et. al., SPIE Symp. Proc., vol. 1466, 174, 1991.
- [39] 小澤 計雄, et. al., 特開-平 1-103604
- [40] H. Ito, et. al., Polym. Eng. Sci., 23, 1012, 1983.
- [41] R. Schwalm, Proc. ASC Div. Polymeric Mat. Eng., 61, 278, 1989.
- [42] H. Gokan, et. al., J. Electrochem. Soc., 130, 143, 1983.
- [43] S. J. Kim, et. al., IUPAC MACRO '88, Kyoto, 218, 1988.
- [44] A. S. Gozdz, et. al., SPIE Conf. Proc., vol. 1466, 200, 1991.
- [45] S. J. Kim, et. al., SPIE Conf. Proc., in press, 1922.

筆者紹介



金成柱

1951年 11月 5日生

1979年 2月 전북대 화학과 졸업

1981年 2月 전북대 대학원 화공과(공학석사)

1987年 3月 일본 동북대학 공학연구과(공학박사)

1987年 3月 ~ 1988年 1月 일본 Chisso(주) 연구소

1988年 1月 ~ 현재 금호석유화학(주) 연구소(수석연구원)

주관심 분야: 고분자 합성, 전자재료 분야



吳惠根

1956年 5月 8日生

1980年 2月 서울 대학교 (이학사)

1982年 2月 서울 대학교 (이학석사)

1985年 11月 미국 Indiana University (이학석사)

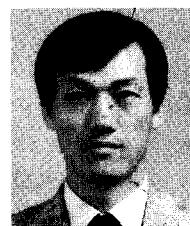
1989年 8月 미국 Indiana University (이학박사)

1989年 8月 ~ 1989年 11月 미국 Indiana University Post-Doc.

1989年 11月 ~ 1991年 9月 현대전자 반도체 연구소 선임연구원

1991年 9月 ~ 현재 한양대학교 물리학과 조교수

주관심 분야: Lithography, 광학 및 응용물리



全國鎮

1955年 3月 24日生

1977年 2月 서울대학교 전자공학과 (학사)

1981年 8月 미시간대학교 전자공학과 (석사)

1986年 5月 미시간대학교 전자공학과 (박사)

1986年 3月 ~ 1989年 5月 위성턴 주립대학교 조교수

1989年 6月 ~ 현재 서울대학교 조교수

주관심 분야: Lithography, 반도체 소자, 반도체 센서