

## 극자외선 리소그래피용 화학증폭형 레지스트

최재학\*노영창\*홍성권†

충남대학교 공과대학 고분자공학과, \*한국원자력연구소 방사선이용연구부  
(2005년 11월 1일 접수, 2006년 3월 17일 채택)

### Chemically Amplified Resist for Extreme UV Lithography

Jaehak Choi\*, Young Chang Nho\*, and Seong Kwon Hong†

Department of Polymer Science and Engineering, Chungnam National University, 220 Gung-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-308, Korea

\*Radiation Application Division, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-353, Korea

(Received November 1, 2005; accepted March 17, 2006)

새로운 극자외선 리소그래피용 화학증폭형 레지스트의 매트릭스 수지로 poly[4-hydroxystyrene-co-2-(4-methoxybutyl)-2-adamantyl methacrylate]를 합성하고 평가하였다. 이 중합체로 제조된 레지스트로 KrF 엑시머 레이저 노광장비를 사용하여 선폭 120 nm (피치 240 nm)를 구현할 수 있었다. 극자외선 리소그래피 장비를 이용하여 평가한 결과 선폭 50 nm (피치 180 nm)의 포지형 패턴을 얻었다. CF<sub>4</sub> 플라즈마를 이용한 건식에칭내성 평가 결과 기존 원자외선 레지스트용 매트릭스 수지인 poly(4-hydroxystyrene)보다 약 10% 향상되었다.

Poly[4-hydroxystyrene-co-2-(4-methoxybutyl)-2-adamantyl methacrylate] was synthesized and evaluated as a matrix resin for extreme UV (EUV) chemically amplified resist. The resist system formulated with this polymer resolved 120 nm line and space (pitch 240 nm) positive patterns using a KrF excimer laser scanner (0.60 NA). The well defined 50 nm line positive patterns (pitch 180 nm) were obtained using an EUV lithography tool. The dry etching resistance of this resist for a CF<sub>4</sub>-based plasma was 1.1 times better than that of poly(4-hydroxystyrene).

**Keywords:** extreme UV lithography, chemically amplified resist, adamantyl methacrylate

### 1. 서 론

극자외선 리소그래피(Extreme UV lithography; EUVL)는 32-nm 공정에 적용될 차세대 반도체 리소그래피 중의 하나로 많은 연구가 이루어지고 있으며, 따라서 여러 가지 요구조건을 만족시키는 새로운 레지스트의 개발이 매우 절실히 요구되고 있다[1-4]. 그러나 극자외선을 발생시키는 선원 및 노광 장치 등을 가지고 있는 곳이 매우 적어 극자외선 리소그래피용 레지스트의 개발과 관련한 연구들이 활발히 진행되지 못하고 있다. 일반적으로 poly(hydroxystyrene) 등의 원자외선 레지스트나 노블락 등의 i-line 레지스트들이 극자외선 영역에서의 투과율 및 건식에칭내성이 우수하여 극자외선 리소그래피용 초박막 단층 레지스트 재료로서 사용될 것으로 보인다[5-7]. 투과율과 에칭내성 이외에도 고해상력을 갖고 있는 고감도 EUV 레지스트의 개발이 매우 필요하다. 일반적으로 해상력과 감도는 초박막을 사용하면 어느 정도 개선할 수 있으나 에칭내성이 나빠지는 결과를 가져오게 된다. 현재 PMMA나 poly(hydroxystyrene)을 기본으로 하는 레지스트들은 아세탈, tert-butoxycarbonyl, 혹은 tert-butyl 에스테르 등의 보호기들을 사용하고 있다. 그러나 이들 보호기들은 지방족 구조로 구성되어

있기 때문에 에칭내성이 매우 나쁜 단점을 가지고 있다[8,9]. 이를 해결하기 위하여 ArF 리소그래피용 레지스트이 경우 2-methyl-2-adamantyl 기와 같은 전지방족 고리형 구조로 되어 있는 보호기를 도입하여 사용하고 있으며, 이로 인한 해상력, 감도, 그리고 건식에칭내성도 향상된 것으로 보고 되고 있다[8,10-12].

본 논문에서는 해상력, 감도 그리고 건식에칭내성을 향상시키기 위하여 새로운 전지방족 고리형 구조로 되어있는 보호기 즉 2-(4-methoxybutyl)-2-adamantyl를 매트릭스 수지에 도입하여 이들의 합성, 물성, 그리고 기본적인 리소그래피 성능을 평가하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1. 시약 및 기기 분석

합성 시약인 2-methyl-2-adamantyl methacrylate (MAMA), 2-(4-methoxybutyl)-2-adamantyl methacrylate (MBAMA), acetoxystyrene (AcOSTy)는 ENF Technology사와 DuPont사에서 공급받았으며 사용 전 중합금지제를 제거하기 위하여 증류하였다. 2,2'-Azobisisobutyronitrile (AIBN)은 Aldrich사에서 구입한 것을 에탄올에서 재결정화하여 정제한 후에 사용하였다. 광산발생제인 triphenylsulfonium nonafluoro-1-butane-sulfonate (TPSNf)는 Seoul Fine Tech사에서 제공받아 사용하였다.

† 주 저자 (e-mail: skhong@cnu.ac.kr)

$^1\text{H}$  NMR spectrum은 Varian VXR-300S을 사용하여 측정하였고 FT-IR spectrum은 Thermo Nicolet NEXUS 870 분광계로 측정하였다. Differential scanning calorimeter (DSC)와 Thermogravimetric analyzer (TGA)는 TA Instruments사의 TA series-7 system을 이용하여 질소 기류 하에서 측정하였으며, 승온 속도는 각각 5와 10  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 이었다. 분자량 및 분자량 분포는 Waters사의 장비를 이용하였다. 건식 에칭 속도는 Plasma Technology사의 RIE-80 system을 사용하여 측정하였다.

## 2.2. 고분자 합성

AIBN, AcOSty, 그리고 MBAMA를 증류한 테트라히드로푸란(THF)에 녹인 후 감압하에서 65  $^{\circ}\text{C}$ 로 24 h 동안 중합하였다. 반응 후 메탄올 용매를 사용하여 침전시킨 후 상온의 진공오븐에서 48 h 동안 건조한 후 흰색 분말의 중합체 [poly(AcOSty-co-MBAMA)]를 얻었다. 얻어진 중합체를 암모니아수와 메탄올의 혼합액에서 완전히 녹을 때까지 교반시킨 다음 진한 초산으로 산성화시켰다. 그 다음 증류수에 침전시키고 얻어진 침전물을 진공 오븐에서 48 h 동안 건조하여 흰색 분말의 중합체 [poly(HOSty-co-MBAMA)]를 얻었다[8,13].

Poly(AcOSty-co-MBAMA):  $^1\text{H}$  NMR ( $\text{CDCl}_3$ ): 6.2~7.2 (Phenyl), 3.2~3.4 ( $\text{CH}_3\text{O}$ -), 2.0~2.4 ( $\text{CH}_3\text{COO}$ -), 0~2.0 (Alkyl). FT-IR (NaCl):  $\nu_{\text{max}}$  3034 (aromatic C = C), 2921 & 2854 (Aliphatic CH), 1766 ( $\text{CH}_3\text{COO}$ -), 1712 (Methacrylate  $\text{COO}$ -)  $\text{cm}^{-1}$ .

Poly(HOSty-co-MBAMA):  $^1\text{H}$  NMR ( $\text{DMSO}-d_6$ , ppm): 8.8~9.3 (Phenolic-OH), 6.0~7.0 (Phenyl), 3.0~3.5 ( $\text{CH}_3\text{O}$ -), 0~2.5 (Alkyl). FT-IR (NaCl):  $\nu_{\text{max}}$  3384 (Phenolic OH), 2920 & 2861 (Aliphatic CH), 1708 (Methacrylate  $\text{COO}$ -)  $\text{cm}^{-1}$ .

## 2.3. 건식 에칭 내성

에칭 속도는 반응성 이온 에칭 공정 중 레지스트 막을 완전히 에칭 하는데 필요한 시간을 측정하여 얻었다. 에칭에 사용된 가스는  $\text{CF}_4$ , flow rate는 50 sccm, RF power는 100 W, chamber내의 압력은 30 mTorr이었다.

## 2.4. 리소그래피 평가

중합체 1 g, 광산발생제인 TPSNf 0.05 g, tetrabutylammonium hydroxide 0.0025 g을 에틸락테이트 10 g에 잘 녹인 레지스트 용액을 웨이퍼 위에 도포하기 전에 0.10  $\mu\text{m}$ 의 pore 크기를 갖는 필터에 통과시켰다. 원자외선 리소그래피 평가를 위하여 hexamethyldisilazane (HMDS)로 처리된 실리콘 웨이퍼 위에 반사방지막으로 Brewer Science사의 DUV-30을 도포하였다. 이 반사방지막이 도포된 실리콘 웨이퍼 위에 레지스트 용액을 스핀 코팅하고 남아있는 용매를 제거하기 위하여 100  $^{\circ}\text{C}$ 에서 90 sec 동안 열처리하였다. 원자외선 노광은 KrF 엑시머 레이저 스캐너인 Micrascan III (0.60NA, 0.3 sigma)를 이용하여 행하여졌다. 노광된 웨이퍼를 다시 110  $^{\circ}\text{C}$ 에서 90 sec 동안 가열한 후 표준 2.38 wt% tetramethylammonium hydroxide (TMAH) 수용액에서 60 sec 동안 현상하고 증류수를 이용하여 씻어주었다. EUVL 평가를 위하여 HMDS로 처리된 실리콘 웨이퍼 위에 레지스트 용액을 직접 스핀 코팅한 후 100  $^{\circ}\text{C}$ 에서 90 sec 동안 가열하였다. EUV 노광은 Synchrotron Radiation Center (University of Wisconsin at Madison)에서 10x Microstepper를 사용하여 이루어졌다. 노광된 웨이퍼를 다시 110  $^{\circ}\text{C}$ 에서 90 sec 동안 가열한 후 표준 2.38 wt% TMAH 수용액에서 60 sec 동안 현상하고 증류수를 이용하여 씻어주었다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 고분자 합성

전지방족 고리형 보호기를 포함하는 2-(4-methoxybutyl)-2-adamantyl methacrylate과 아세톡시 스티렌을 다양한 조성으로 라디칼 중합하여 poly(AcOSty-co-MBAMA)를 얻었다(Figure 1). 중합된 poly(AcOSty-co-MBAMA)를 ammonium hydroxide의 메탄올 용액에 잘 분산시켜 완전하게 녹이고 초산으로 산화시킨 후 증류수에 침전시켜 poly(HOSty-co-MBAMA)를 합성하였다[8,13]. 합성한 공중합체는 FT-IR spectrum (Figure 2)을 이용하여 그 구조를 확인하였다. FT-IR spectrum에서 1766  $\text{cm}^{-1}$ 에서 나타나는 acetoxy기의 카르보닐 피크가 가수 분해 반응 후에 완전히 사라졌으며 또한 3300  $\text{cm}^{-1}$  근처에서 페놀의 히드록시에 해당하는 피크가 나타난 것으로 가수분해 반응을 확인하였다.

중합결과는 Table 1에 나타내었다. 중합체의 분자량은 2000~7200, 분자량 분포는 1.9~3.1이었다. 중합체 A, B, C는 중합개시제인 AIBN을 5 mol%를 사용한 것이고 분자량이 작은 중합체 D, E, F는 20 mol% 사용하였다. 중합체의 유리전이 온도는 분자량이 큰 경우는 140  $^{\circ}\text{C}$  이상, 작은 중합체는 104  $^{\circ}\text{C}$  근처로 나타났다.

### 3.2. 건식에칭내성

현재 고해상도를 요구하는 반도체 리소그래피의 특성상 사용가능한 레지스트 막의 두께는 점점 낮아지고 있어 건식에칭내성이 나빠지는 매우 큰 문제점이 발생하게 된다. 레지스트의 건식 에칭 속도는 반응성 이온 에칭 공정 중 레지스트 막을 완전히 에칭하기 위하여 요구되는 시간을 측정함으로써 얻어진다. 사용된 건식 에칭 내성 평가는  $\text{CF}_4$  플라즈마 가스를 이용하여 행하여졌다(Table 2). 원자외선 레지

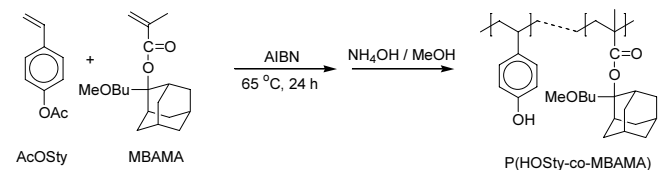


Figure 1. Overall synthetic scheme.

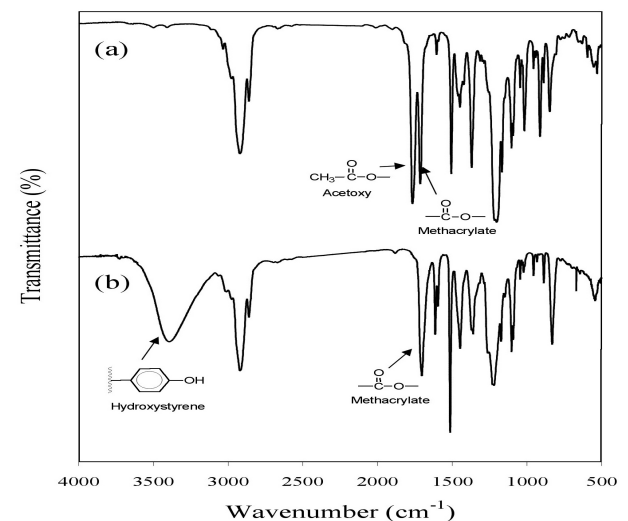


Figure 2. FT-IR spectral changes: (a) before and (b) after hydrolysis.

**Table 1. Polymerization Results of Poly(HOSTy-co-MBAMA)**

Polymer	Molar Feed Ratio (mol%)		Copolymer Composition <sup>a</sup> (mol%)		Yield (%)	M <sub>n</sub> (MWD) <sup>b</sup>	T <sub>g</sub> (°C) <sup>c</sup>
	AcOSty	MBAMA	HOSTy	MBAMA			
A	80	20	78	22	46	5600 (1.9)	157
B	60	40	57	43	44	7200 (2.0)	145
C <sup>d</sup>	70	30	69	31	60	3400 (2.1)	143
D	90	10	87	13	71	3290 (3.1)	105
E	82	18	81	19	66	2045 (2.1)	104
F	70	30	73	27	57	2245 (2.1)	103

<sup>a</sup> Copolymer compositions were calculated by <sup>1</sup>H NMR spectrum.

<sup>b</sup> M<sub>n</sub> and MWD were calculated with polystyrene standards after hydrolysis.

<sup>c</sup> The glass transition temperatures (T<sub>g</sub>) were measured at a heating rate of 10 °C/min.

<sup>d</sup> 2-Methyl-2-adamantyl methacrylate was used for polymer C instead of MBAMA.

**Table 2. Dry Etching Resistances**

Polymer	Relative etch-resistance
Poly(4-hydroxystyrene)	1.00
Polymer B	1.06
Polymer C	1.07

Etching condition: Flow rate 50 sccm, Power 100 W, and Pressure 30 mTorr.

스트의 대표적인 매트릭스 수지인 폴리히드록시스티렌과 대비하여 본 연구에서 합성된 중합체들은 약 10% 정도 향상된 건식에칭내성을 가지고 있다. 이유는 adamantyl 기와 같은 지방족 고리형 구조가 함유되어 있어 레지스트의 내건식에칭성을 향상시켰기 때문이다[4-6].

### 3.3. 리소그래피 평가

EUVL의 경우 렌즈 대신 거울을 이용하여 빛을 굴절시켜야 한다는 차이점을 제외하고는 기존의 포토리소그래피와 동일한 원리로 작동한다. EUVL의 장비는 매우 한정되어 있고 또한 장비의 이용도 매우 제한적인 시간 안에서만 이루어지기 때문에 EUVL 장비를 이용하여 레지스트를 평가하기 전에 먼저 원자외선 리소그래피 장비를 이용하여 평가하였으며 그 결과를 Table 3에 나타내었다. 중합체 A와 B는 기존의 레지스트용 중합체인 C와 비교하여 adamantyl기에 붙어있는 알킬기의 길이가 길다. 이로 인하여 리소그래피 공정 중의 산촉매에 의한 탈보호 반응시 부가적인 inductive effect나 hyperconjugation으로 인하여 발생하는 carbocation 중간체의 안정성을 증가시켰기 때문이라고 볼 수 있다[11,12]. 따라서 중합체 A, B로 제조된 레지스트들이 중합체 C으로 제조된 레지스트보다 우수한 감도(sensitivity, dose-to-clear)를 나타내었으며 또한 실제 120 nm 패턴을 얻기 위한 노광량도 작았다.

중합체 A, B, C로부터 얻어진 원자외선 리소그래피 평가결과를 Figure 3에 나타내었다. 특히 중합체 A, B로부터 제조된 레지스트들은 원자외선 리소그래피 장비(0.60NA)를 이용한 평가 결과 120 nm (L/S, Duty ratio 1:1)의 해상도를 나타내었다. 그러나 중합체 C로 제조된 레지스트는 같은 조건에서 duty ratio 1:1.6의 120 nm 패턴을 얻었다. 중합체 A, B로 제조된 레지스트들로부터 보다 좋은 해상도를 얻을 수 있었다. 중합체 A로부터 얻어진 패턴의 형상은 중합체 B로부터 얻어진 형상과 비교하여 보다 적은 line edge roughness를 갖는 것을 볼 수 있다. 일반적으로 작은 dark erosion 특성을 보여주는 원자외선 레지스트들에서 T-top 형상의 패턴이 보다 쉽게 만들어지며 이로 인한 line edge roughness도 매우 크다. 가장 좋은 리소그래피 성능이

**Table 3. Summary of KrF Lithographic Evaluation Results**

Polymer	E <sub>0</sub> (mJ/cm <sup>2</sup> ) <sup>a</sup>	Dark Erosion (Å) <sup>b</sup>	Contrast (γ)	Exposure Dose (mJ/cm <sup>2</sup> ) <sup>c</sup>
A	10.5	150	36	27.0
B	13.0	0	16	33.2
C	18.0	90	26	41.0

<sup>a</sup> The dose-to-clear (E<sub>0</sub>) defined as the minimum exposure dose to achieve full clearance of the resist after development.

<sup>b</sup> Dark erosion defined as the thickness loss of the unexposed region after development.

<sup>c</sup> The exposure dose required for the patterning of 120 nm patterns.

70~100 Å의 dark erosion 성능을 갖고 있는 레지스트들에서 나오는 것이 알려져 있다[2,14]. 또한 레지스트 패턴의 line edge roughness는 레지스트의 contrast와 직접적으로 연관이 되어 있으며 보다 큰 contrast 값을 갖는 레지스트들이 보다 작은 line edge roughness를 보여준다. 따라서 중합체 B로부터 제조된 레지스트의 dark erosion이 거의 없으며 또한 contrast도 중합체 A의 경우 보다 작아 큰 line edge roughness를 보여준다고 할 수 있다.

EUVL 평가는 Synchrotron Radiation Center (Center for Nanotechnology)에서 10x microstepper를 이용하여 행하여졌다. 중합체 B로 제조된 레지스트의 감도는 5.6 mJ/cm<sup>2</sup>로 매우 우수하게 나타났으며 얻어진 SEM 사진을 Figure 4에 나타내었다. EUVL 장비와 기존의 TMAH 현상액을 이용하여 노광량 11.2 mJ/cm<sup>2</sup>에서 100 nm elbow, 60 nm (180 nm pitch) line 패턴을 얻을 수 있었다.

중합체 E로 제조된 레지스트의 contrast curve를 Figure 5에 나타내었다. 이 레지스트는 원래 포지티브형으로 설계되었으나 네가티브형의 contrast curve 특성으로 보여주었다. EUV의 노광 에너지는 일반적인 유기물의 결합에너지 보다 커서 모든 결합을 끊어 라디칼, 이온 등을 형성시킬 수 있다. EUV 노광량이 매우 큰 경우 형성된 많은 라디칼 등이 이후 가열 공정 등에서 원하지 않는 부반응을 일으킬 수 있다. 특히 방향족 중합체의 경우 형성된 라디칼이 안정화될 수 있으며 이후 공정에서 가교 반응을 일으킬 수 있다[15,16]. 중합체 E의 경우 분자량이 매우 작고 또한 현상액에 대한 용해도가 매우 좋아 레지스트 막이 현상액에 모두 녹아버렸다. EUV 노광량이 매우 큰 경우 (> 400 mJ/cm<sup>2</sup>) 위와 같은 이유로 인하여 네가티브 형의 contrast curve 특성을 보이는 것으로 생각된다. 이 레지스트로 얻어진 네가티브형의 35 nm (L/S) 패턴 사진을 Figure 4c에 나타내었다.

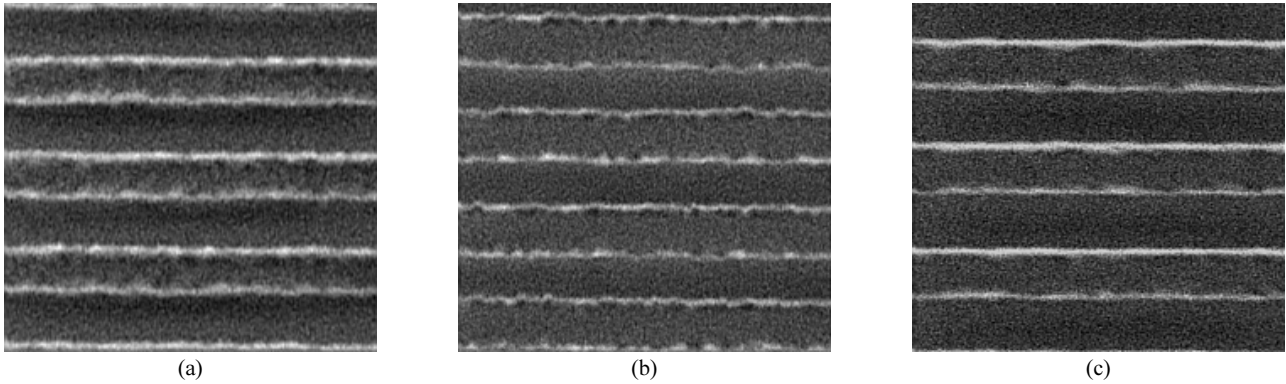


Figure 3. KrF lithography pattern profiles: (a) 120 nm line and space (1:1) pattern obtained with the polymer A (Dose: 27.0 mJ/cm<sup>2</sup>), (b) 120 nm line and space (1:1) pattern obtained with the polymer B (Dose: 33.2 mJ/cm<sup>2</sup>), and (c) 120 nm line and space (1:1.6) pattern obtained with the polymer C (Dose: 41.0 mJ/cm<sup>2</sup>).

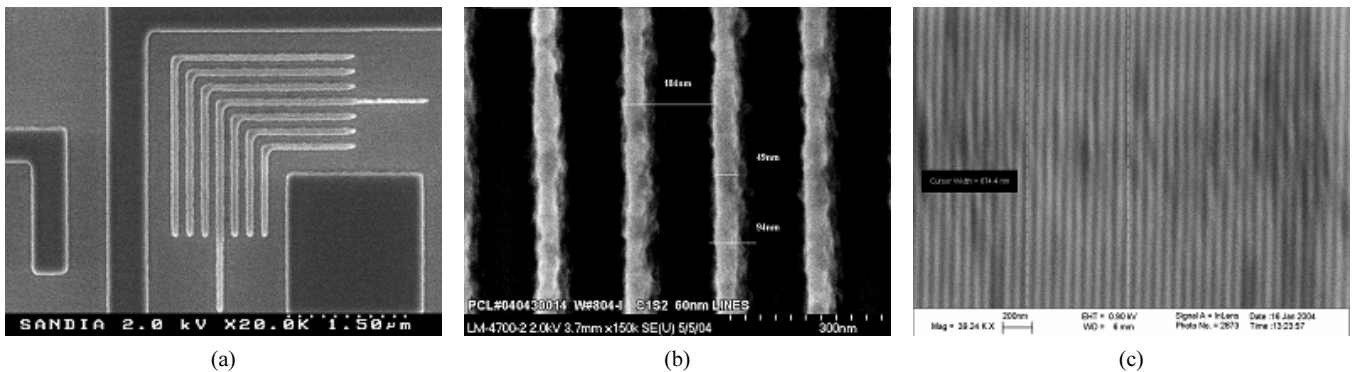


Figure 4. Extreme UV lithography pattern profiles: (a) 100 nm line and space (1:1) elbow pattern obtained from the polymer B (Dose 11.2 mJ/cm<sup>2</sup>); (b) 50 nm line (pitch 180 nm) pattern obtained from the polymer B (Dose 11.2 mJ/cm<sup>2</sup>); (c) 35 nm line and space patterns obtained from the polymer E (Dose : 400 mJ/cm<sup>2</sup>).

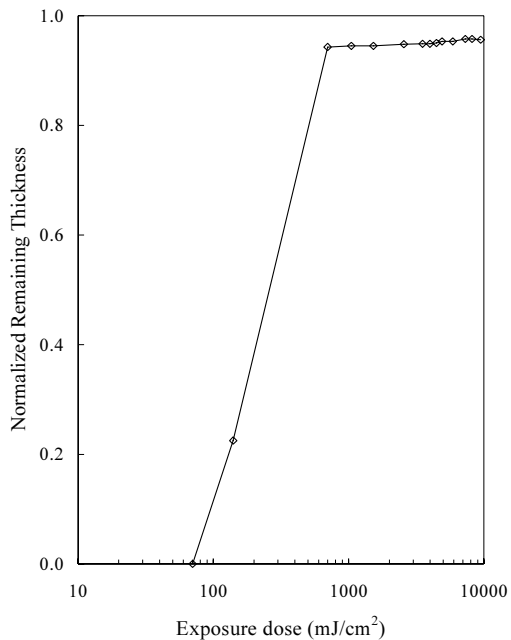


Figure 5. Contrast curve obtained from the polymer E.

## 4. 결 론

전지방족 고리형 보호기인 2-(4-methoxybutyl)-2-adamantyl기를 해상도, 감도 등과 같은 리소그래피 성능 향상, 내건식에칭성을 향상시키기 위하여 매트릭스 고분자에 도입하였다. 합성된 중합체인 poly[4-hydroxystyrene-co-2-(4-methoxybutyl)-2-adamantyl methacrylate]는 리소그래피 평가 결과 우수한 내건식에칭성과 리소그래피 성능을 보여주었다. KrF 엑시머 레이저를 이용한 원자외선 리소그래피 평가 결과 120 nm (L/S, Duty Ratio = 1:1)의 매우 우수한 패턴을 얻을 수 있었다. EUVL 평가 결과 노광 에너지가 작은 경우는 포지티브형의 100 nm elbow와 60 nm line (pitch 180 nm) 패턴, 노광 에너지가 큰 경우에는 네가티브 형의 35 nm (L/S) 패턴을 얻을 수 있었다. CF<sub>4</sub> 플라즈마 가스를 이용한 반응성 이온 에칭 결과 기존의 원자외선 레지스트의 매트릭스 고분자인 폴리비닐페놀과 비교하여 약 10% 정도 우수한 내성을 나타내었다. 현재 EUVL을 이용한 30 nm 이하의 패턴 형성을 위하여 레지스트 조성, 리소그래피 공정 조건 등의 최적화 등을 진행 중에 있다.

## 감사의 글

이 논문은 2004년도 충남대학교 자체연구비의 지원에 의하여 연구

되었음. 특수 화학 약품을 제공해 주신 ENF Technology, Seoul Fine Technology에 감사를 드립니다.

### 참 고 문 헌

1. V. N. Golovkina, P. F. Nealey, F. Cerrina, J. W. Taylor, H. H. Solak, C. David, and J. Gobrecht, *J. Vac. Sci. Technol. B*, **22**, 9 (2004).
2. R. L. Brainard, J. Cobb, C., and A. Cutler, *J. Photopolym. Sci. Technol.*, **16**, 401 (2003).
3. J. L. Cobb, R. L. Brainard, D. J. O'Connell, and P. M. Dentinger, *Mat. Res.Soc. Symp. Proc.*, **705**, 91 (2002).
4. The 2003 Edition of the ITRS: Lithography, 2003 International Technology Roadmap for Semiconductors.
5. N. N. Matsuzawa, S. Okazaki, and A. Ishitani, *Microolithography World*, **Autumn**, 20 (2000).
6. N. N. Matsuzawa, H. Oizumi, S. Mori, S. Irie, E. Yano, S. Okazaki, and A. Ishitani, *Microelectron. Eng.*, **53**, 671 (2000).
7. N. N. Matsuzawa, H. Oizumi, S. Mori, S. Irie, S. Shirayone, E. Yano, S. Okazaki, A. Ishitani, and D. A. Dixon, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38**, 7109 (1999).
8. K. Nojaki and E. Yano, *Fujitsu Sci. Tech. J.*, **38**, 3 (2002).
9. S. Hein, S. Angood, D. Ashworth, S. Basset, T. Bloomstein, K. Dean, R. R. Kunz, D. Miller, S. Patel, and G. Rich, *Proc. SPIE.*, **4345**, 439 (2001).
10. J. Kim, T. Oh, J. Choi, and J. Lee, *Proc. SPIE.*, **5039**, 689 (2003).
11. G. G. Barclay, Z. Mao, K. Xiong, and P. Trefonas, *Proceedings of the 12th International Conference on Photopolymers*, edited by H. Ito, M. M. Khojasteh, and W. Li, Society of Plastics Engineers Mid Hudson Section, 153 (2000).
12. H. Kim, D. Jung, S. Lee, S. Choi, S. Woo, R. J. Kavanagh, G. Barclay, B. Blacksmith, D. Kang, G. Pohlars, J. Cameron, J. Mattia, S. Caporale, T. Penniman, L. Joesten, and J. W. Thackeray, *Proc. SPIE.*, **4345**, 776 (2001).
13. H. Ito, G. Breyta, D. Hofer, and R. Sooriyakumaran, *J. Photopolym. Sci. Technol.*, **7**, 433 (1994).
14. R. L. Brainard, C. Henderson, J. Cobb, V. Rao, J. F. Mackevich, U. Okoroanyanwu, S. Gunn, J. Chambers, and S. Connolly, *J. Vac. Sci. Technol. B.*, **17**, 3384 (1999).
15. W. Domke, S. Hirscher, O. Kirch, K. Kragler, and K. Lowack, 2nd Int. EUVL Symposium, Antwerp, Belgium (2003).
16. AIXUV web site. <http://www.aixuv.de/>.