

반도체 초미세 공정화와 F₂(157 nm) 포토레지스트용 고분자의 개발 동향

김 재 현 · 김 덕 배

1. 서론

현대 산업의 쌀이라고 불리는 반도체는 1947년 처음 미국의 벨 연구소에서 트랜지스터가 개발된 이후 계속적으로 미세화와 집적화를 거듭해 왔다. 미세화란 반도체 디바이스에 들어가는 회로의 선폭이 점차 작아지는 것을 말하며, 집적화는 제한된 반도체의 면적에 여러가지 회로를 층층으로 쌓아 올리는 것을 말하는데 이 두 가지 기술 모두 작은 크기에 보다 많은 정보를 담아내기 위한 노력이다. 이런 반도체의 발전을 예측한 인텔 창업자 Moore는 반도체 산업의 초창기였던 1965년에 미래 예견을 위한 아무런 데이터를 갖고 있지 않았음에도 장차 다수의 디바이스들 (트랜지스터)을 마이크로 칩에 집적시킬 수 있을 것이라 확신하고 그 트랜지스터의 개수가 대략 18개월마다 두 배로 증가할 것이라 제안했는데, 이것이 바로 유명한 무어(Moore)의 법칙이다. 1959년에 하나의 트랜지스터에서, 1964년에 32개, 1965년에 64개에 불과했던 트랜지스터가, 2000년 11월 20일에 발표한 펜티엄 4에는 8,300 만개가 집적되어 있다. 2010년 경에는 무려 10억 개의 트랜지스터가 집적될 것으로 예측된다. 무어의 법칙은 처리 속도인 스피드의 두 배 증가, 메모리 저장 데이터량의 두 배 증가, 반면에 비용은 상대적으로 떨어지는, 예컨대 성능은 증가하고 비용은 떨어지는 효과를 예상한다.

반도체 소자의 미세화를 주도해 온 핵심은 포토레

지스트 (photoresist)를 이용한 식각 (lithography) 기술이다. 포토레지스트는 고분자와 감광제가 섞인 혼합물로 빛에 의해 그 화학적인 성질이 변화하여 어떤 파장의 빛에 노출을 시키면 특정 용매에 대한 용해도가 크게 바뀌게 된다. 따라서 그 용매에 대한 노광부와 비노광부의 용해 속도에 차이가 나서 일정 시간의 용해 시간이 지나면 미처 다 녹지 않은 부분이 남아 패터닝이 형성되는 것이다. 이런 포토레지스트의 성질을 이용하여 반도체가 그려진 설계도



김재현

1987 서울대학교 공과대학 섬유공학과 (학사)
 1989 서울대학교 공과대학 섬유공학과 (석사)
 1988 ~ 1994 (주)동진화학 제2기술연구소
 2000 University of Massachusetts at Lowell (Ph. D.)
 2000 ~ 현재 (주)동진 세미켐 전자재료사업부 사업3팀 부장



김덕배

1989 서강대학교 이과대학 화학과 (학사)
 1991 서강대학교 이과대학 화학과 (석사)
 1991 ~ 현재 (주)동진 세미켐 전자재료사업부 사업3팀 차장

Needs for Ultra-fine Features in Advanced Semiconductor and Polymer Development Trend for F₂(157 nm) Photoresist

(주)동진세미켐 전자재료사업부 사업3부 (Jaehyun Kim and Deogbae Kim, DongJin Semichem, Electronic Materials Division 3, 625-3 Yodang-Ri, Yanggam-Myun, Hwasung-Si, Kyungki-Do 445-931, Korea) e-mail:jaehkim@dongjin.com

를 새겨 넣은 마스크(mask)를 광원과 실리콘 웨이퍼 위에 코팅된 포토레지스트막 사이에 놓고 광원을 쬐면 마스크에 새겨진 회로가 그대로 포토레지스트에 옮겨지게 되고 이것을 광식각 (photolithographic) 공정이라고 한다 (그림 1).

광식각 공정이 소자제작에서 차지하는 비중은 총 공정비용의 약 35% 이상, 총 공정시간의 약 60% 이상이며 반도체의 집적도가 커짐에 따라 점차 그 비중이 늘어가고 있는 추세이다. 일반적으로 포토레지스트 해상도의 증가는 파장 및 공정변수 k_1 을 줄이거나 렌즈의 수차 (NA)를 크게 함으로써 이루어 질 수 있다 (식 (1)).

$$\text{Critical Dimension (nm)} = k_1 (\lambda/\text{NA}) \quad (1)$$

여기서, Critical Dimension (CD): 최소 선폭

k_1 : Process parameter (공정 조건 및 photo-resist에 따라 결정되는 변수)

λ : 입사광의 파장 (nm)

NA: 노광 장비의 렌즈의 수차 (Numerical aperture)

이중 해상도에 미치는 영향이 가장 큰 입사광의 파장은 최초의 G-선(436 nm)에서 점차 I-선(365 nm) 및 KrF(248 nm)로 변화하여 왔고,¹ 현재는 ArF(193 nm)가 사용되기 시작하고 있다. 따라서 식각 공정에 사용되는 파장에 따라 포토레지스트의 종류 역시 바뀌어 왔다. G-선 및 I-선에서는 페놀계의 노볼락 (Novolac) 수지와 디아조 화합물 유도체로 구성된 PAC (Photo-Active-Compound)과의 조합으로 이루어지는 포토레지스트를 사용하였으나, 파장이 248 nm인 KrF 노광 방식이 도입되면서 레지스트 물질의 투과도와 관련된 광학적 이유와 용해 거동의 변화를 감안하여 새로운 레지스트의 개념이 도입된 화학증폭성 레지스트 (Chemically Amplified Resist)를 사용하기 시작하였다.² 화학증폭성 레지스트는 부분 용해 억제된 PHS (polyhydroxystyrene)와 용해억제제를 활성화시키는 광산발생제 (Photoacid-Generator)로 구성되어 있다. 또한 새롭게 도입되고 있는 ArF 레지스트도 이러한 화학증폭성에 기초한 레지스트이다. 물론 ArF 파장에 적합한 광학 특성을 갖기 위해서는 고분자의 구조적인 변화를 필요로 한다 (그림 2).

한편으로는 새로운 고분자를 적용한 포토레지스트의 사용에 대해 공정상의 부담을 느낀 반도체 회사들이 장파장의 제한적인 해상도 한계를 연장하고자 주로 광학적 기술을 응용하여 여러 가지의 해상도 향상기술 (Resolution Enhancement Techniques: RET)을 개발하여 왔다. 이에 따라 1997년도의 0.25 μm 세대부터 리소그라피 광원의 파장이 소자의 최소 선폭보다 길게 되는 기술적 반전이 생기게 되었는데 248 nm의 KrF 포토레지스트가 그 파장보다 훨씬 적은 100 nm 선폭 공정에도 사용되는 것은 바로 이 RET 덕분이다. 이런 기술들을 응용, 193 nm 파장을 갖는 ArF 포토레지스트 역시 193 nm 파장의 삼분의 일인 65 nm 선폭 공정까지 사용될 것으로 예상된다.

193 nm 이후, 60 nm 이하의 선폭에 사용될 광원으로는 여러가지의 대안이 나오고 있지만 F_2 레이저 (157 nm)가 될 것으로 많은 전문가들은 예측하고 있다 (그림 3). F_2 의 경우에 있어서 157 nm의 파장은 모든 탄화수소화합물의 기본 흡수파장 영역에 속해 있어 많은 연구 기관 및 관련 기업에서는 이러한 흡광도를 최소화 하는 노력이 진행 중에 있다.^{3,4} 본 고에는 2006년부터 도입되어 2008년부터 본격적으로 반도체 생산공정에 적용될 157 nm 포토레지스트용 고분자의 최근 개발 동향을 소개하고자 한다.

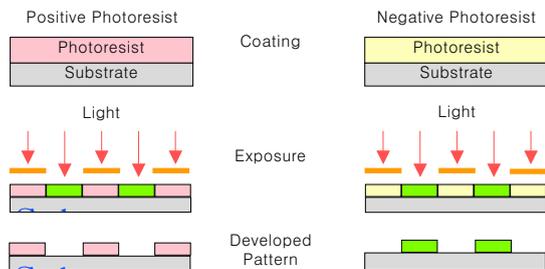


그림 1. 포토레지스트 노광/현상공정도.

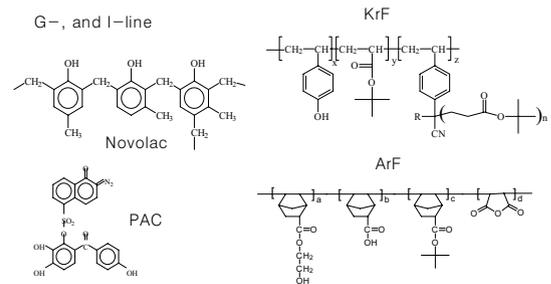


그림 2. 입사광원에 따른 포토레지스트용 고분자의 변화.

2. 157 nm 포토레지스트용 고분자

50 nm 정도의 극미세 패턴을 형성하기 위한 157 nm 포토레지스트의 개발을 위해 극복해야 할 여러 가지 과제가 있는데 여기에는 광원에 대한 높은 투과성 (transparency), 마스크 재료로서의 높은 내에칭성, 여러 종류의 기판 (substrate)에 대한 접착성, 노광 후 수용성 열기성 용액에 대한 용해성, 157 nm의 높은 에너지에 의해 생길 수 있는 out-gassing의 최소화 등이 포함되어 있다.⁵ 이상의 과제들 가운데, 포토레지스트의 특성에 가장 중요한 요인이 되는 것은 광밀도 (optical density)로 노광용 빛이 포토레지스트 필름을 투과할 수 있어야 미세 패턴이 제대로 형성되기 때문이다. **그림 4**에 KrF, ArF 레지스트 및 현재 개발되고 있는 고분자의 각 파장에 따른 투과도를 나타내었는데 대표적인 157 nm용 고분자의 후보인 fluorocarbon 고분자의 흡광도가 ArF 및 KrF 포토레지스트가 각 파장에서 보이는 흡광도에 비해 상당히 높음을 알 수 있다

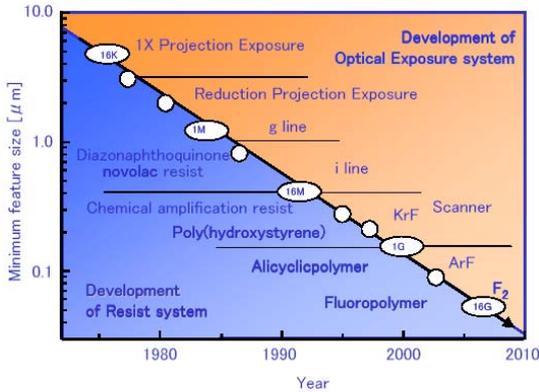


그림 3. 반도체의 공정 미세화와 그에 따른 광원, 그리고 포토레지스트의 변화.

Transparency of resist film (200 nm thickness)

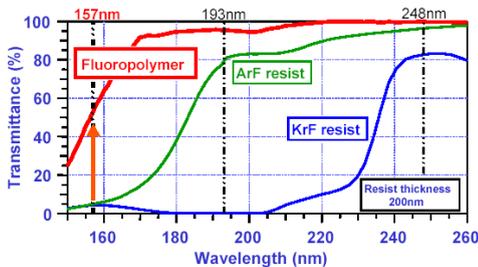


그림 4. 파장에 따른 각 포토레지스트별 투과도.

(그림 4).

현재까지 157 nm의 파장에 대한 투과도를 높이기 위해 많은 물질들이 제안되고 연구되어 왔으나 가장 가능성이 있는 방법으로 실록산 (siloxane)을 이용하거나 불소 (fluoride) 치환 유기 고분자를 이용한 레지스트가 주목받고 있다 (**표 1**).⁶

2.1. 실록산계 고분자

실록산에 기초한 single layer용 157 nm 박막 레지스트로는 다양한 단일 또는 공중합체가 개발되어 왔는데, 특히 poly(dimethyl siloxane) (PDMS), poly(dimethyl siloxane-co-tertiary-butyl methacrylate), 또는 poly(methyl silsesquioxane) (PMSQ) 등의 157 nm의 파장에 대한 낮은 흡광도를 이용한 레지스트용 고분자들에 많은 관심이 모아지고 있다 (**그림 5**).

PDMS의 경우에 이미 전자선 (E-beam)에 의하여 포토레지스트로서의 특성을 평가 받고 있으며, 우수한 내에칭성을 나타내고 있다.⁷ PDMS는 유기 용매에 현상 가능하여 이 경우 negative tone 레지스트로도 작용할 수 있다. Poly(dimethyl siloxane-co-tertiary-butyl methacrylate)의 경우에는 공중합체로 작용된 tertiary-butyl methacrylate의 함량 조절에 의하여 열기성 현상액에 현상이 가능하다.⁸ 다른 실록산을 포함하는 레지스트

표 1. 대표적인 157 nm용 포토레지스트의 구조

157 nm Platform	Company
$\left[\begin{array}{c} R \\ \\ -Si-O-Si-O- \\ \\ R \end{array} \right]_n$ $R_x = X-C(CH_3)_2-CF_3$ $R_y = Y-C(=O)-O-R_2$	IBM / JSR
	IBM /
	Du Pont / Shipley / TOK
	UT Austin / Clariant

로는 ethyl POSS (polyhedral oligomeric silsesquioxanes)를 이용한 레지스트가 있다.⁹ 이러한 silsesquioxanes의 구조는 cage-type 구조를 가지고

있어, out-gassing의 위험을 감소시킬 수 있고 전통적인 레지스트의 physicochemical 필름 특성을 닮은 성능을 나타내고 있다.¹⁰

실록산을 함유하는 레지스트로 또 다른 시도는 다음과 같은 그래프트 공중합체를 이용한 새로운 고분자의 도입을 연구하는 경우도 있다 (그림 6).¹¹

상기의 여러 종류의 실록산 함유 레지스트의 경우에 있어서 여러 가지 제약에도 불구하고 미국의 SEMATECH, 일본의 SELETE 등의 연구기관의 157 nm 관련 연구 결과는 어느 정도 성과를 거두고 있다.¹² 다음은 ISMT에서 최근의 실리콘 함유 레지스트를 Exitech사의 0.6 NA stepper를 이용하여 해상한 것으로 많은 해상도 향상을 볼 수 있다 (그림 7).

실록산 함유 레지스트의 괄목할 만한 성과를 거두고 있음에도 다음과 같은 여러 가지 문제점을 안고 있어 추가적인 연구가 진행되어야 한다.

- (1) Polymer backbone에 함유된 Si에 의한 out-gassing
- (2) Transparency
- (3) Inherently low T_g
- (4) Poor adhesion properties
- (5) Poor imaging performance

특히 out-gassing 문제는 심각하다. 실리콘이 함유된 기체가 발생하여 노광 장비의 렌즈에 증착이

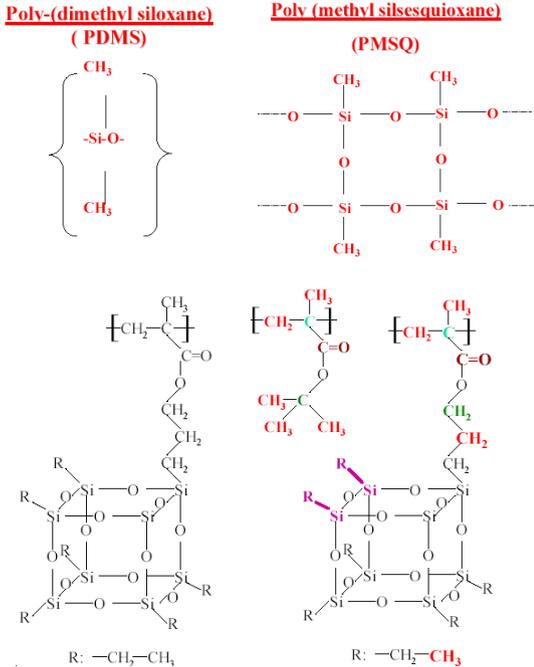


그림 5. 157 nm 포토레지스트용 silicon-containing polymers.

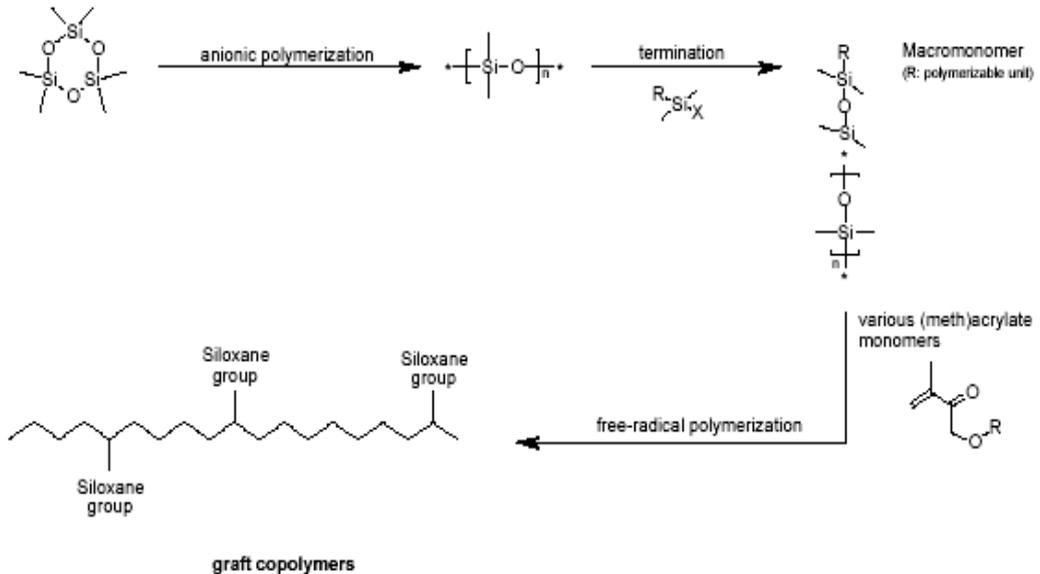


그림 6. 실록산기로 그래프트된 공중합체.

되면 공기 중의 산소에 의해 쉽게 SiO_2 로 산화되어 렌즈의 굴절률에 영향을 주어 렌즈를 통해 전달되는 회로도의 이미지를 왜곡할 수 있기 때문이다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 실록산 고분자 주쇄의 안정화와 다양한 기능기에 대한 많은 연구가 필요하다.¹³

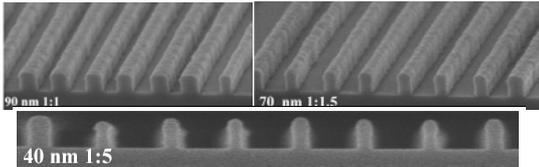


그림 7. 실록산계 포토레지스트의 157 nm 노광에 의해 형성된 패턴.

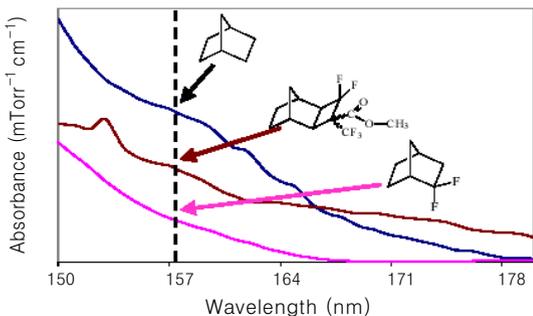
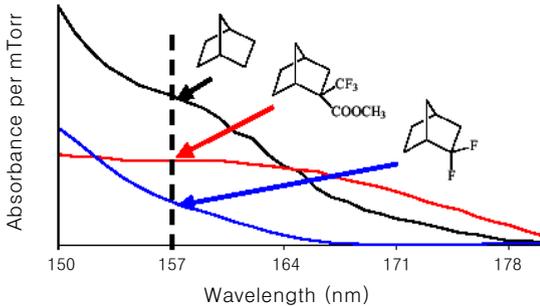
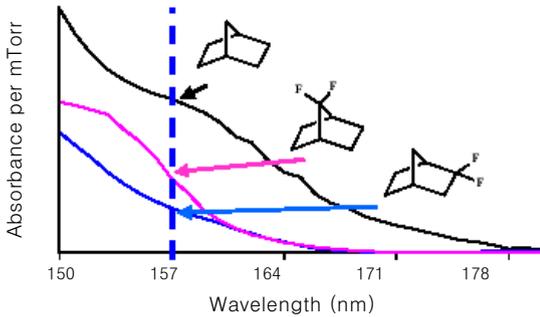


그림 8. Fluorination에 따른 157 nm에서의 흡광도 변화.

2.2 Fluorocarbon계 고분자

다음으로 불소 함유 레지스트의 경우에 있어서는 실리콘 함유 레지스트에 비하여 우수한 투과도를 바탕으로 텍사스대, 코넬대 및 많은 레지스트 제조 회사에서 불소화학을 이용한 연구를 진행하고 있으며, 레지스트 성능이 상당히 향상되고 있다.

157 nm 레지스트의 투명도 향상을 위한 근간이 된 실험은 157 nm 영역에서의 VUV를 이용한 투과도 측정이다. 다음은 단량체의 불소 치환에 따른 투과도의 변화를 그림 8에 나타내었다.¹⁴

상기의 흡수 데이터에서는 놀보넨 화합물의 불소 치환 정도 및 그 위치에 의하여 VUV 흡수가 변하고 있음을 나타내고 있다. 즉 불소 치환 정도 및 치환 위치를 조절함으로써 투과도 개선에 의한 레지스트 성능 향상을 이룰 수 있음을 제시하고 있다. 이러한 기초적인 연구를 바탕으로 다음과 같이 고분자 주쇄에 불소를 치환시켜 157 nm 영역에서 투과도를 획기적으로 낮출 수 있음을 보여주었다 (그림 9).¹⁵ 그림 10은 다양하게 개발된 불소치환 고분자의 구조와 157 nm에서의 투과도를 보여준다.¹⁶⁻²¹ 불소치환 고분자의 투과도 향상으로 레지스트 성능은 크게 향상되었는데, 다음의 텍사스대의 연구 결과가 이를 뒷받침하여 준다 (그림 11).²² 이러한 성능의 향상은 현재 많은 과제를 안고 있는 157 nm의 레지스트에서 해상도 향상의 해결책을 제시하고 있다고 할 수 있다.

2.3. 첨가제

텍사스대 연구진은 여러 가지의 연구 결과를 토대로 몇 가지 157 nm용 첨가제를 개발하여 첨가하는 시도를 하고 있다.²³ 이러한 첨가제로는 단분자형 첨가제와 고분자형 첨가제로 구별될 수 있다. 단분자형 첨가제의 종류는 다양하지만 대표적으로는 현상액에 대한 용해 억제제 (dissolution in-

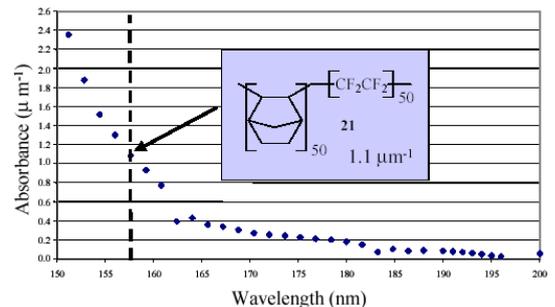


그림 9. Poly(tetrafluoroethylene-co-norbornene)의 흡광도.

	Clariant	Dupont	Sumitomo	IBM, Ito	Asahi Glass
Platform					
Transmittance (μm)	> 2	1.75	3.1		0.5 - 1.5

그림 10. 다양한 157 nm용 불소치환 고분자와 그 흡광도 비교.

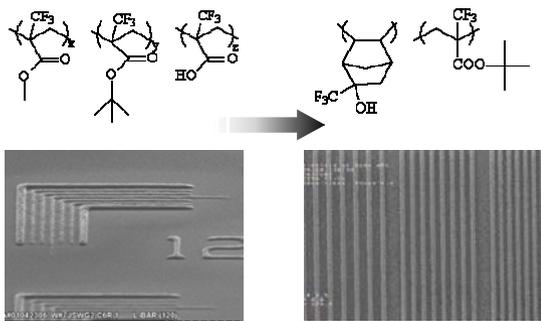


그림 11. 고분자 구조에 따른 157 nm 레지스트의 패턴.

inhibitor)를 들 수 있으며, 첨가제 함량에 의하여 투과도 개선효과도 볼 수 있다. 이러한 투과도 개선 효과는 첨가제가 157 nm 영역에서 높은 투과도를 나타내고 있어 고분자에서 나타나는 흡광도를 희석한 결과로 볼 수 있다 (그림 12).

레지스트에 적용하기 위하여 용해 억제제는 다음과 같은 기본적인 특성을 유지해야 하며, 부가적으로 몇 가지 합성의 용이, 재현성 등의 충족 요건을 만족해야 한다.

- 1) Inhibit base polymer - polymer에 대해 용해 억제 효과가 있을 것
- 2) Switchable - 노광 후 발생한 산에 의해 현상액에 대한 용해성이 증가할 것
- 3) Transparent - 투과도가 좋을 것
- 4) Soluble in casting solvent - 포토레지스트 용매에 대한 용해성이 좋을 것
- 5) Low volatility - 포토레지스트 공정 중의 다양한 bake 조건에 휘발성이 없을 것
- 6) Etch resistance - 내에칭성이 좋을 것
- 7) Phase compatible with base polymer - 상분리가 되지 않을 것

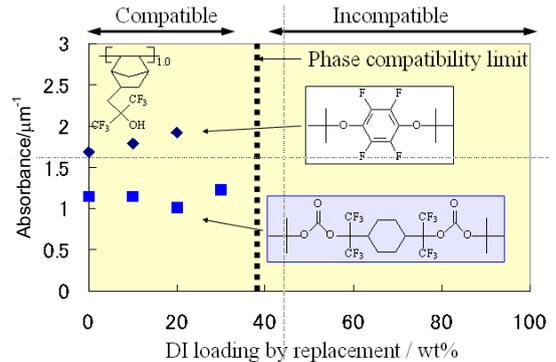


그림 12. 첨가제에 따른 157nm에서의 흡광도 변화.

8) Cheap, non-toxic, etc. - 경제성, 환경 친화성이 있을 것

용해 억제제의 종류와 양에 따라 dissolution inhibition 효과는 변화할 수 있으며 이는 용해 억제제 자체의 용해도 저하에 의한 현상이기 보다는 분자 구조와 기능기에 따른 고분자와의 상호작용에 의해 용해 억제 효과가 나타남을 의미한다 (그림 13).

3. 내에칭성 - 157 nm 포토레지스트의 또 다른 문제점

위에 열거했던 많은 연구의 결과로 157 nm에서의 투과도 향상은 꾸준히 이루어져 왔는데 (그림 4) 각 고분자의 투과도 값은 표 2와 같다.

하지만 포토레지스트는 설계된 회로의 패턴을 잘 구현하는 기능 이외에도 광식각 공정 뒤의 에칭 공정 중에 형성된 패턴을 유지하는 masking 기능을 함께 갖추어야 하는데 현재까지의 결과는 투과도가 높은 고분자일수록 내에칭성이 떨어지는 경향을 보

이고 있어 (그림 14) 이를 극복하는 것이 중요한 과제가 되었다. 다음은 상업용 포토레지스트에 어느 정도 적합한 정도의 투과도가 확보된 고분자의 etch resistance를 나타낸 것이다 (표 3).

이러한 투과도 측면에서 가장 우수한 것으로 평가되고 있는 고분자 구조는 골격구조에 불소를 치환시킨 고분자로 main-chain fluorinated 고분자이다. 이러한 구조는 다음과 같은 3가지 측면에서 우

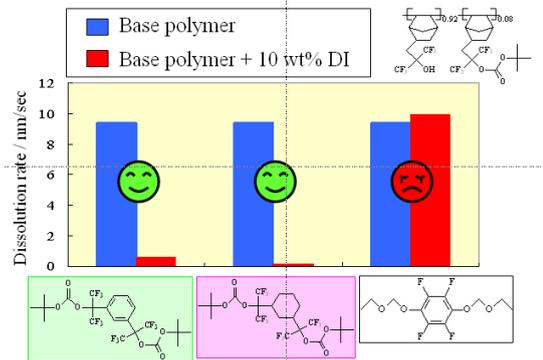


그림 13. 용해 억제제의 종류에 따른 고분자의 용해 속도의 변화.

표 2. 157 nm 포토레지스트용 고분자의 개발과 투과도 향상 추이

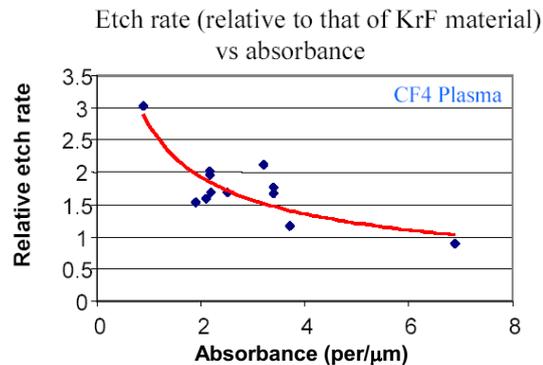
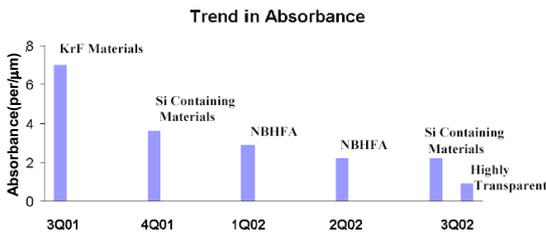
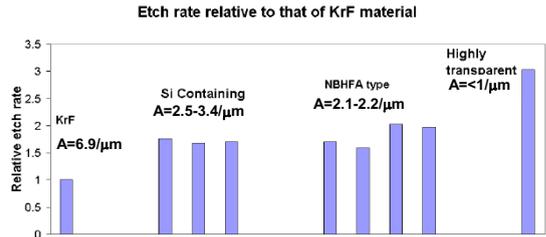


그림 14. 불소치환 고분자의 투과도와 내에칭성과의 관계.

표 3. 높은 투과도를 가진 157 nm 포토레지스트용 고분자의 내에칭성 비교



수한 결과를 나타내고 있어 157 nm에서 매우 성과 있는 결과물이라 할 수 있다.

내에칭성을 향상시키기 위해 고분자 주쇄를 fluorination 시키고 다환 구조를 도입시킨 고분자도 발표되었는데 현재까지 발표된 고분자 가운데 투과도를 희생하지 않은 채 내에칭성을 높인 최초의 고분자로 보고되었다. 그러나 반도체 공정에 적용하기 위한 수준에는 크게 미치지 못해 내에칭성을 향상시킨 새로운 고분자의 개발은 여전히 가장 중요한 문제가 되고 있다. Main-chain fluorinated 고분자의 경우에는 이러한 장점에 그 동안 문제점을 안고 있던 평윤 문제를 해결함으로써 앞으로 157 nm의 개발에 획기적인 대안을 제시하였다고 볼 수 있다.

4. 결론

18개월마다 반도체의 집적도가 두 배로 증가할 것이라는 Moore의 법칙은 앞으로도 유효할 것으로 많은 전문가들은 확신하고 있다. 이에 따라 반도체 디바이스의 미세화와 집적화는 더욱 가속화 할 것인데 최근에 양산에 적용되기 시작한 193 nm 포토레지스트의 다음 세대는 157 nm 광원을 이용한 새로운 포토레지스트가 될 것으로 보고 있다. 이는 E-beam이나 X-ray와 같은 전혀 새로운 기술의 개발 대신 193 nm에서 사용 중인 장비를 개량함으로써 장치에 들어가는 비용을 최소화할 수 있고, 광식각 공정 초기부터 사용하여 친숙해진 photon을 이용한 공정에 더 익숙해져 있기 때문이다. 그러나 157 nm의 파장은 거의 모든 탄화수소 화합물에 의해 흡수되기 때문에 그 파장에 대한 투과도가 높은 새로운 물질이 포토레지스트 개발을 위해서는 필수적이다. 현재 실록산계와 fluorocarbon 계 고분자가 공정 적용 가능한 높은 투과도를 보이

고 있지만 내에칭성이나 기관에의 접착성 등이 앞으로 크게 개선되어야 하는 수준이다. 이런 어려움 때문에 한편으로는 single layer 방식이 아닌, 얇은 포토레지스트층과 두꺼운 내에칭성 고분자층으로 이루어진 bilayer resist system의 개발을 시도 중이다.²⁴ 하지만 날로 치열해지는 반도체의 가격 경쟁을 고려해 볼 때 생산성 측면에서 아직도 포토레지스트 한 층만을 사용할 가능성이 높다. 따라서 실록산 고분자의 경우에는 out-gassing의 우려를 잠재울 수 있는 구조의 개발에, 또 fluorocarbon 고분자는 내에칭성을 강화할 수 있는 구조의 개발과 첨가제의 개발에 더 많은 연구가 진행되어야 상용화가 가능할 것이다.

참 고 문 헌

1. R. R. Dammel, *J. Photopolym. Sci. Technol.*, **11**, 687 (1998).
2. H. Ito, C. G. Wilson, and J. M. J. Fréchet, *Digest of Technical Papers of 1982 Symposium on VLSI Technology*, 86 (1982).
3. R. R. Kunz, T. M. Bloomstein, D. E. Hardy, R. B. Goodman, D. K. Downs, and J. E. Curtin, *J. Vac. Sci. Technol., B*, **17**, 3267 (1999).
4. R. Sooriyakumaran, D. Fenzel-Alexander, N. Fender, G. H. Wallraff, and R. D. Allen, *Proc. SPIE*, **4345**, 319 (2001).
5. A. K. Bates, M. Rothschild, T. M. Bloomstein, T. H. Fedynyshyn, R. R. Kunz, V. Liberman, and M. Switkes, *IBM J. Res. & Dev.*, **45**(5), 605 (2001).
6. R. R. Kunz, T. M. Bloomstein, D. E. Hardy, R. B. Goodman, D. K. Downs, and J. E. Curtin, *Proc. SPIE*, **3678**, 13 (1999).
7. M. Sakata, T. Ito, and Y. Yamashita, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **30**, 3116 (1991).
8. H. V. Tran, R. J. Hung, D. A. Loy, D. R. Wheeler, J. Byers, W. Conley, and C. G. Willson, *Polym. Prepr.*, **42**(1), 206 (2001).
9. (1) M. H. Somervell, D. S. Fryer, B. Osborn, K. Patterson, S. Cho, J. Byers, and C. G. Willson, *Proc. SPIE*, **3999**, 270 (2000). (2) R. Sooriyakumaran, D. Fenzel-Alexander, N. Fender, G. M. Wallraff, and R. D. Allen, *Proc. SPIE*, **4345**, 319 (2001). (3) R. J. Hung, M. Yamachika, T. Chiba, H. Iwasawa, A. Hayashi, N. Yamahara, and T. Shimokawa, *J. Photopolym. Sci. Technol.*, **15** (4), 693 (2002).
10. H. Wu, Y. Hu, K. E. Gonsalves, and M. J. Yacaman, *J. Vac. Sci. Technol. B*, **19**(3), 851 (1999).
11. E. Tegou, P. Argitis, E. Godolides, I. Laptis, and J. Cashmore, *Resist 193-157 Final Review Meeting*, Brussels, Oct. 2001.
12. K. Turnquest, V. Graffenberg, S. Patel, D. Miller, K. Dean, A. M. Goethals, and K. Ronse, *3rd International Symposium on 157 nm Lithography*, Antwerpen, Sept. 2002.
13. Stefan Hien, K. Dean, R. R. Kunz, D. Miller, S. Patel, and G. Rich, *Proc. SPIE*, **4345**, 439 (2001).
14. (1) K. Patterson, M. Yamachika, R. Hung, C. Brodsky, S. Yamada, M. Somervell, B. Osborn, D. Hall, G. Dukovic, J. Byers, W. Conley, and C. G. Willson, *Proc. SPIE*, **3999**, 365 (2000). (2) R. J. Hung, H. V. Tran, B. C. Trinquet, T. Chiba, S. Yamada, D. P. Sanders, E. F. Cooner, R. H. Grubbs, J. Klopp, J. M. J. Frechet, B. H. Thomas, G. J. Shafer, D. D. DesMarteau, W. Conley, and C. G. Willson, *Proc. SPIE*, **4345**, 385 (2001).
15. M. K. Crawford, A. E. Feiring, J. Feldman, R. H. French, M. Periyasamy, F. L. Shadt III, R. J. Smalley, F. C. Zumsteg, R. R. Kunz, V. Rao, L. Liao, and S. M. Holl, *Proc. SPIE*, **3999**, 357 (2000).
16. R. R. Dammel, R. Sakamuri, A. Romano, R. Vicari, C. Hacker, W. Conley, and D. Miller, *Proc. SPIE*, **4345**, 350 (2001).
17. M. K. Crawford, A. E. Feiring, J. Feldman, R. H. French, V. A. Petrov, F. L. Schadt III, R. J. Smalley, and F. C. Zumsteg, *Proc. SPIE*, **4345**, 428 (2001).
18. T. Ogata, K. Endo, H. Komaro, and T. Nakayama, *Proc. SPIE*, **4345**, 1048 (2001).
19. R. R. Kunz, R. Sinta, M. Sworin, W. A. Mowers, T. H. Fedynyshyn, V. Liberman, and J. E. Curtin, *Proc. SPIE*, **4345**, 285 (2001).
20. (1) H. Ito, G. M. Wallraff, P. Brock, N. Fender, H. Truong, G. Breyta, D. C. Miller, M. H. Sherwood, and R. D. Allen, *Proc. SPIE*, **4345**, 273 (2001). (2) H. Ito, H. Truong, M. Okazaki, D. C. Miller, N. Fender, G. Breyta, P. J. Brock, G. M. Wallraff, C. E. Larson, and R. D. Allen, *Proc. SPIE*, **4690**, 18 (2002).
21. S. Kodama, I. Kaneko, Y. Takebe, S. Okada, Y. Kawaguchi, N. Shida, S. Ishikawa, M. Toriumi, and T. Itani, *Proc. SPIE*, **4690**, 76 (2002).
22. B. C. Trinquet, B. P. Osborn, C. R. Chambers,

- Y.-T. Hsieh, S. Corry, T. Chiba, R. J. Hung, H. V. Tran, P. Zimmerman, D. Miller, W. Conley, and C. G. Willson, *Proc. SPIE*, **4690**, 58 (2002).
23. W. Conley, D. Miller, C. Chamber, B. Osborn, R. J. Hung, H. V. Tran, B. C. Trinqué, M. Pinnow, T. Chiba, S. McDonald, P. Zimmerman, R. R. Dammel, A. Romano, and C. G. Willson, *Proc. SPIE*, **4690**, 69 (2002).
24. (1) A. Jamiesori, M. Somervell, H. V. Tran, R. Hung, S. A. MacDonald, and C. G. Willson, *Proc. SPIE*, **4345**, 406 (2001). (2) I. Satou, M. Watanabe, H. Watanabe, and T. Itani, *Proc. SPIE*, **4345**, 361 (2001). (3) M. Shirai, M. Endo, and M. Tsumooka, *J. Photopolym. Sci. Technol.*, **13** (3), 669 (1999). (4) M. Wolf, G. N. Taylor, T. Venkatesan, and R. T. Kraetsch, *J. Electrochem. Soc.*, **131**, 1664 (1994). (5) K. H. Baik, L. Van den Hove, A. M. Goethals, M. Op de Beeks, and B. Roland, *J. Vac. Sci. & Technol.*, **B8** (6), 1481 (1990).