

## 고밀도 플라즈마를 사용한 polysilicon 박막의 nanometer 크기의 패터닝

변요한, 김혜인, 송영수, 정지원  
 인하대학교 화학공학부

Nanometer-sized patterning of polysilicon thin films using  
 a high density plasma

Yo Han Byun, Hye In kim, Young Soo Song and Chee Won Chung  
 School of Chemical Engineering, Inha University

### 서론

21세기 정보/통신화 시대에는 명령만을 수행하는 기존의 computing system과는 달리 자기학습이 가능한 “인공지능 로봇”이 등장하고 문자, 음성, 영상 등을 송수신할 수 있는 지능화된 개인용 슈퍼 컴퓨터가 등장할 것으로 예상된다. 그러나 현존하는 또는 현재 연구개발중인 메모리소자(예를들어 1G, 4G DRAMs)의 기억용량으로는 단지 1-2시간 정도의 동영상밖에는 구현할 수가 없는 실정이다. 현재 반도체소자의 주류를 이루고 있는 Si MOSFET은 성능 향상을 위해 Moore 법칙에 따라 세대가 바뀔 때마다 0.7 배정도 선 폭을 줄여왔다. 그 결과 1999년 말에는 최소 선폭이 180 nm 수준인 1G DRAM이 개발되었으며 이러한 추세가 계속된다면 2008년에 70 nm급 이하, 2014년에는 게이트 길이 35 nm 수준의 1 Tera DRAM이 개발될 것으로 전망된다[1].

한편으로 진정한 의미의 나노기술을 이용하는 새로운 개념의 소자로서 불휘발성 반도체 메모리(nonvolatile semiconductor memories; NVSMs)가 연구되고 있다. 이 가운데서 MONOS(metal/oxide/nitride/oxide/silicon)는 구조의 간편함으로 인하여 활발히 연구되고 있다. 게이트 금속은 주로 다결정 실리콘(polysilicon)이 적용되며 oxide와 nitride는 SiO<sub>2</sub>와 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>가 사용되고 있다. 핵심기술로는 초박막 산화막들의 형성과 게이트 금속인 polysilicon 박막의 nanometer 크기의 식각공정이다. 특히 polysilicon 박막의 nanometer 수준의 식각공정 개발은 앞에서 언급된 Giga급의 DRAM 소자의 개발에서도 반드시 필요한 나노식각(nanoetching) 즉, 나노기술(nanotechnology)의 중요한 분야이다[2,3].

본 연구에서 100 nm 크기의 극미세 패터닝을 할 수 있는 이론적 배경은 식각가스에 포함되어 있는 물질을 이용하여 얇은 passivation layer(측면보호막)를 마스크와 식각되는 polysilicon 박막의 측면에 생성하여 측면으로의 식각을 방지하는 것이다[4]. 예를 들어 식각가스로서 HBr 가스를 사용하여서 polysilicon 박막을 식각할 수 있는데, 식각가스내의 수소원자와 실리콘과의 결합을 유도하여 식각되는 패터닝의 측면에 얇은 식각 inhibitor를 생성하는 원리를 이용하는 것이다(그림 1 참조). 즉, 수직 방향으로 식각은 진행이 되나 측면(수평방향)으로의 식각은 거의 진행이 되지 않아서 완전한 비등방성 식각(anisotropic etching)이 이루어진다. 이러한 polysilicon 박막의 극미세 nanometer 크기의 패터닝의 원리가 그림 1에 보여진다.

본 연구에서는 차세대 메모리인 MONOS의 gate 물질로서 사용되어지는 polysilicon 박막을 고밀도 플라즈마를 이용하는 ICP RIE(inductively coupled plasma reactive ion etcher)를 사용하여 Cl<sub>2</sub>/Ar, C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>/Ar 그리고 HBr/Ar 식각가스의 농도에 따라 건식 식각하고, 그에 따른 식각 속도, 식각 선택도 그리고 식각 profile 등에 대한 영향을 조사하여 최적의 식각가스와 식각 조건을 찾고자 하였다. 그리고, C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>/Ar 가스를 사용하여 초고 집적 소자에서 요구되어지는 nanometer 수준의 패터닝을 형성하였다.

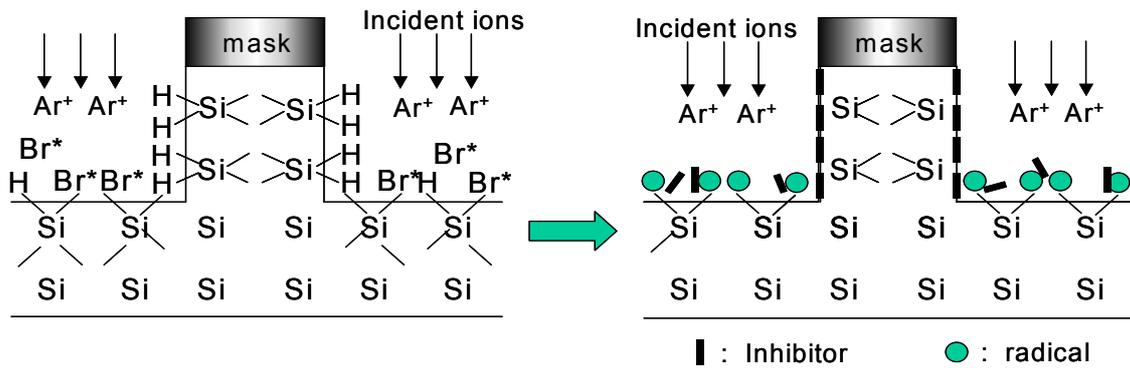


그림 1. poly-Si 박막의 초미세 패터닝의 원리 및 도식도.

**실험**

본 연구에서는 저압하에서 고밀도 플라즈마를 사용하는 ICP RIE를 사용하여 polysilicon 박막에 대한 패터닝이 진행되었다. ICP RIE 시스템은 크게 load lock chamber, process chamber와 substrate susceptor로 구성되어 있다. 기판은 chiller에 의하여 냉각되어진 He 가스를 매개체로 하여 냉각되며 substrate susceptor에 밀착되어진다. 유도 결합 플라즈마 생성을 위하여 반응 챔버 주위에 감겨진 코일은 13.56 MHz RF power supply에 연결되어 있으며 이에 의해 high density plasma가 유도된다. 기판에 대한 self bias voltage는 또 하나의 13.56 MHz의 RF power가 연결되어 유도되고 독립적으로 플라즈마 내의 ion energy를 조절한다.

본 실험에서의 공정변수로는 식각가스의 종류, 선택된 식각가스의 농도, 식각가스의 flow rate, gas pressure, coil-RF power, dc-bias voltage 등이 선택되었다. 시료는 SiO<sub>2</sub> 박막이 1000 Å 두께로 입혀진 Si 기판 위에 polysilicon 박막이 1500 Å으로 증착되어 준비되었다. 그 후 1.2 μm 두께의 감광제(photoresist, PR)를 마스크로 사용하여 lithography 공정을 이용하여 패터닝되었다. 본 연구에서는 polysilicon 박막의 건식 식각 시, 염소계 가스로서 Cl<sub>2</sub>/Ar과 불소계 가스로서 C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>/Ar 그리고 브롬계 가스로서 HBr/Ar을 선택하여 사용하였고 식각 조건은 가스 flow rate을 30 sccm으로 하고 600 W의 coil-RF power, 200 V의 dc-bias voltage, 5 mTorr의 gas pressure로 고정한 후 가스 농도에 따른 식각 특성이 조사되었다.

식각 속도와 식각 선택도는 nanospec을 이용하여 식각 전후 박막의 두께를 측정함으로써 평가되었으며, 식각 profile은 FESEM(field emission scanning electron microscopy)을 사용하여 관찰되었다.

**결과 및 토론**

그림 2에는 식각가스로 선택되어진 Cl<sub>2</sub>/Ar, C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>/Ar 그리고 HBr/Ar 가스의 농도변화에 따른 polysilicon 박막과 PR의 식각 속도와 PR에 대한 polysilicon의 선택도를 나타내었다.

그림 2(a)로부터 polysilicon 박막의 식각 속도는 Cl<sub>2</sub>의 농도가 증가함에 따라서 크게 증가하는 것이 관찰된다. Polysilicon 박막의 식각 속도가 Cl<sub>2</sub> 농도의 증가에 따라 큰폭으로 증가하는 것은 식각 메커니즘이 화학반응에 의존하고 있음을 나타낸다. 이러한 식각 농도 의존성은 PR의 식각에서 더욱 확연하게 드러나고 있다. 그 결과 PR에 대한 polysilicon의 식각 선택도는 0.7~1로 낮게 나타난다.

식각가스로 C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>/Ar을 사용하여 polysilicon 박막을 식각한 경우의 식각 속도와 PR에

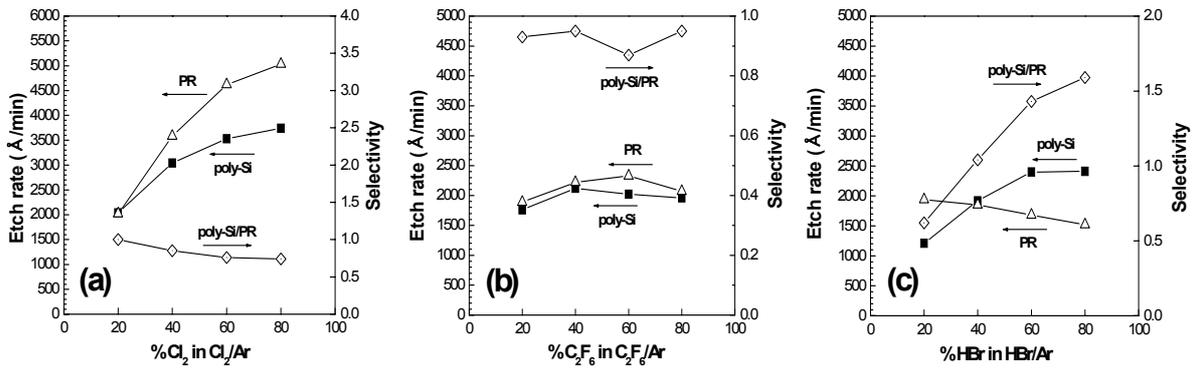
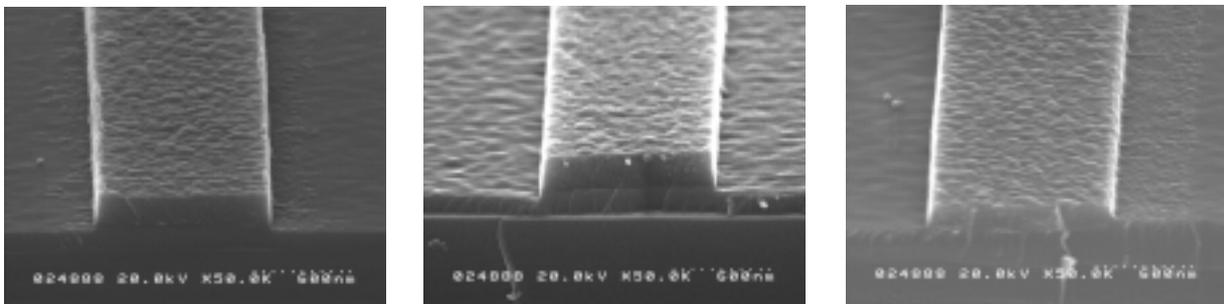


그림 2. Etch rate of polysilicon and PR, and etch selectivity of polysilicon to PR as a function of etch gas concentration; total gas flow rate: 30 sccm; coil-RF power: 600 W; dc-bias voltage: 200 V; and gas pressure: 5 mTorr.

대한 식각 선택도가 그림 2(b)에 보여진다. C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>/Ar을 사용한 polysilicon 박막의 식각은 Cl<sub>2</sub>/Ar을 사용한 식각과 비교하여 현저하게 낮은 식각 속도를 보여준다. Polysilicon 박막과 PR의 식각 속도는 C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>의 농도가 40~60% 범위에서 가장 빠른 식각 속도를 보여주고 그 이상의 농도에서는 속도가 약간 감소하는 것이 관찰된다. 이것은 C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>의 농도가 40%일 때까지는 주로 화학반응에 의하여 polysilicon 박막과 PR의 식각이 이루어지고 그 이상의 농도에서는 이러한 현상이 감소되는 것으로 생각된다. 즉, 식각 시에 polysilicon 박막과 PR의 표면에서 C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>에 포함되어 있는 F가 얇은 막을 형성하여 Ar 가스에 의한 sputtering 효과를 방해하기 때문에 반응성 가스의 농도가 증가할수록 식각 속도는 감소하게 된다. PR에 대한 polysilicon의 식각 선택도는 0.9 정도의 값을 나타내고 있는데, 이 값은 Cl<sub>2</sub>/Ar 가스를 사용한 경우와 비교해서 약간 향상된 값이다.

그림 2(c)는 HBr/Ar을 사용하여 polysilicon 박막과 PR을 식각하였을 때의 식각 속도와 식각 선택도를 보여주고 있다. PR에 대한 polysilicon 박막의 식각 선택도가 40% HBr을 사용하였을 때의 1에서 80% HBr의 1.6까지 향상된 결과가 관찰된다. HBr 가스에 포함되어 있는 수소원자는 앞에서 제안되었듯이 Si와 결합하여 passivation layer를 형성하기도 하지만 유기물로 구성되어 있는 PR과 폴리머를 형성하여 PR의 식각을 느리게 하는 효과를 나타내는 것으로 생각된다.

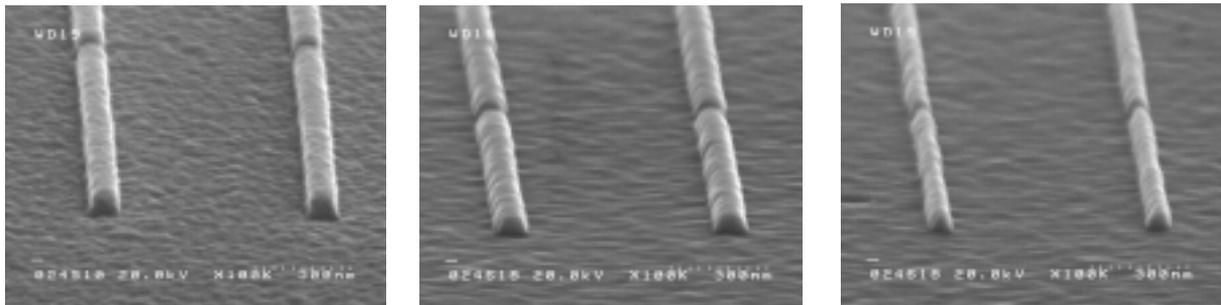
그림 3은 polysilicon 박막을 Cl<sub>2</sub>/Ar, C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>/Ar 그리고 HBr/Ar을 사용하여 건식 식각한 패턴의 FESEM 사진을 보여주고 있다. 식각가스의 종류와 관계없이 식각 경사도는 85°이상으로 높게 관찰되고 있다.



(a) 20%Cl<sub>2</sub>/80%Ar (b) 20%C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>/80%Ar (c) 20%HBr/80%Ar

그림 3. FESEM micrographs of etched polysilicon thin films.

본 연구에서 사용된 세 가지 식각가스 중에서  $C_2F_6/Ar$  가스를 사용하여 nanometer 수준의 초미세 패턴을 형성한 FESEM 사진들이 그림 4에 보여진다. 그림 4(a)는 E-beam 을 사용하여 형성된 resist의 패턴을 보여주고 있고, 그림 4(b)와 4(c)는 각각 식각된 100 nm와 70 nm 패턴이다. 식각 경사도는 그림 3의 1  $\mu m$  패턴보다 감소되어 대략  $70\sim 80^\circ$  정도로 낮게 나타나고 있는데, 이러한 문제점은 앞에서 제안되어진 passivation layer를 형성할 수 있는 가스를 혼합하고 식각 조건을 조절함으로써 개선될 수 있을 것이다. 이들의 식각 패턴은 초기단계의 결과로서 식각 프로파일의 anisotropy가 개선되어야 하지만 현재로서는 nanometer 수준의 극미세 패턴의 형성이 기존의 식각 장비로 가능하다는 고무적인 결과를 보여주고 있다.



(a) before etch: 100 nm line (b) after etch: 100 nm line (c) after etch: 70 nm line  
그림 4. FESEM micrographs of polysilicon thin films etched by  $C_2F_6/Ar$  gas.

## 결론

Polysilicon 박막의 식각 메커니즘은 사용하는 식각가스의 종류에 따라 다르게 나타났다.  $Cl_2/Ar$  가스를 사용한 경우에는  $Cl_2$ 의 농도가 증가함에 따라 식각 속도가 빠르게 증가하는 현상으로부터 화학반응이 주요한 식각 메커니즘으로 판단되어지며,  $C_2F_6/Ar$  가스는  $C_2F_6$ 의 농도가 40%일 때까지 식각 속도가 증가하고 농도가 더 증가함에 따라서 식각 속도는 약간 감소하는데 이것은  $C_2F_6$ 의 농도가 40%까지는 화학반응에 의하여 식각이 진행되나 그 후부터는 이러한 효과가 감소하는 것으로 이해된다.  $HBr/Ar$  가스를 사용하였을 경우는 PR에 대한 선택도가 가장 우수하게 나타났다. 선택되어진 세 가지 가스들을 사용하여 식각하였을 때, 식각 경사도는  $85^\circ$ 이상으로 높게 나타났다.

$C_2F_6/Ar$  가스를 사용하여 nanometer 크기의 패턴이 성공적으로 형성되었다. 식각 경사도는 대략  $70\sim 80^\circ$  정도로 나타났고 식각 잔류물 등은 관찰되지 않았다. 향후 극미세 패턴의 식각 경사도를 높이기 위하여 passivation layer를 형성할 수 있는 가스의 혼합과 식각 조건의 최적화가 제안된다.

## 감사

이 논문은 인하대학교 청정기반연구소의 지원에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

1. The International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS), Tables 28a, 28b(1999).
2. White, M. H., Adams, D. A., and Bu, J., Circuits & Devices, 22(2000).
3. Cho, M. K., and Kim, D. M., IEEE Electron Device Lett., 21, 399(2000).
4. Wolf, S., and Tauber, R. N. : "Silicon Processing for the VLSI era, Vol. 1", Lattice press(1986).