

고밀도 Cl_2/HBr 플라즈마에 의한 비도핑 α -Si 식각시 나칭 현상Notching Effect in Etching of the Undoped α -Si
by using High Density Cl_2/HBr Plasma

신성욱*, 김남훈*, 유석빈*, 김창일*, 장의구*

(Seong-Wook Shin*, Nam-Hoon Kim*, Seok-Bin Yu*, Chang-Il Kim*, Eui-Goo Chang*)

Abstract

The notching effect in etching of undoped amorphous silicon gate had different characteristics and mechanism comparing with reported ones. The undoped amorphous silicon was etched by using HBr gas plasma. First, in the region of small line width, the potential was increased as a result of ions in the exposed surface of oxide, and the incident ions between the small line width were deflected more wide range, therefore the depth of notching was shallow and wide. Second, in the region of large line width of gate, electrons were charged on the top of photoresist and the side of gate, a part of ions deflected. The deflected ions were locally charged positive on the side of gate, and then the potential difference was produced, therefore, ions stored up more at independent line than at dense line, and nothing became deeper by Br ion bombardment.

Key Words : amorphous silicon(비정질 실리콘), notching(나칭), plasma etching(플라즈마 식각), ion bombardment(이온 충격), Cl_2/HBr

1. 서 론

반도체 소자의 제조 공정에서 패턴의 전사(transfer) 방법으로 플라즈마 식각기술이 널리 이용되고 있다. 최근 고안된 저압 고밀도 플라즈마(high density plasma:HDP)를 이용한 실리콘 게이트 식각 공정은 비등방성 프로파일(anisotropic profile), 낮은 미세입자(particle) 등 우수한 장점을 가지고 있는 것으로 보고 되었으나,^[1] 대전(charging)에 의한 프로파일 왜곡(distortion)현상 즉, 나칭(notching)이 단점으로 지적되고 있다.^[2-5]

앞서 보고된 논문들은, 나칭의 메카니즘을 규명하기 위하여 Cl_2 가스를 사용하였으며, 비교적 두꺼운 산화막에서 식각 실험을 수행하였다.^[3,4] 그러나, 실제 다결정 실리콘 게이트의 식각공정에서는 50Å 이하의 얇은 게이트 산화막에 대한 높은 선택비(selectivity)가 요구되고 있다. 따라서, 높은 선택비를 얻기 위하여 HBr 또는 O_2 가스 등의 첨가 가스(additive gas)를 Cl_2 가스에 첨가하는 것이 효과적이다.^[6,7] HBr, O_2 가스를 첨가하여 게이트를 식각하면 높은 선택비

를 얻을 수 있으나, 새로운 형태의 나칭이 발생되었다.^[7] 특히, 나칭이 발생되지 않는 것으로 알려진 도핑되지 않은 비정질 실리콘(undoped amorphous silicon: α -Si)에서 나칭이 발생하였고, 나칭의 모양이 최외곽 라인의 바깥쪽에서 발생하여 종래에 보고된 것과 다른 특징을 보이고 있다.

본 연구에서는 $Cl_2/HBr/O_2$ 의 가스 조성으로 도핑되지 않은 비정질 실리콘 게이트의 식각을 진행할 때, Cl_2/HBr 의 가스 조성에 따른 도핑된 다결정 실리콘 및 도핑되지 않은 비정질 실리콘의 식각율을 조사하고 공정조건의 변화에 따른 나칭의 특성을 고찰하고자 하였다.

2. 실험

본 실험에 사용된 시편은 150mm의 p형 웨이퍼 위에 50Å의 열 산화막을 성장시키고, 그 위에 2500Å의 도핑되지 않은 비정질 실리콘을 증착한 후 반사 방지막을 순차적으로 적층하고 0.7 μ m의 감광막으로 패턴하였다. 또한 도핑되지 않은 비정질 실리콘과 비교하기 위하여 기판 웨이퍼 위에 1000Å의 열 산화막을 성장시킨 위에 40 Ω/\square 정도의 면저항(sheet resistance)을 가지도록 도핑된 2500Å의 다결정 실리콘을 증착하고 반사 방지막을 순차적으로 적층하

* 중앙 대학교 전자전기공학부
(서울특별시 동작구 흑석동 221,
Fax: 02-812-9651 e-mail: cikim@cau.ac.kr)

여 0.7 μm 의 감광막으로 패턴하였다. 이와 같이 준비된 시료는 반응로 내의 압력, 소스 전력, 바이어스 전력 및 $\text{Cl}_2/\text{HBr}/\text{O}_2$ 조성비 변화에 따른 식각특성을 조사하였다. 저압 고밀도 플라즈마형 다결정 실리콘 식각장치인 Lam 사의 TCP9400 모델을 사용하였다.^[1] 각 조건에 따른 etchant의 변화를 알기 위하여 반응로 내의 상대적인 Cl 라디칼 밀도(radical density)는 OES(optical emission spectroscopy)로 Ar(812nm)을 이용한 actinometry 방법으로 구하였다. 나치의 관찰을 위한 진단지점은 라인 사이의 공간이 0.25 μm 에서 2.0 μm 의 범위로 나누어져 있는 패턴(unconnected line)을 관찰하였다. 나칭 깊이의 측정에는 SEM(scanning electron microscope; Philips, XL-30) 단면 사진을 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

Cl_2 가스를 사용하여 다결정 실리콘을 식각할 때, 다결정 실리콘의 도핑 정도에 따라 식각율이 차이가 나는 것으로 알려져 있다.^[8] 그림 1은 바이어스 전력을 0W, 소스 전력을 500W, 100% Cl_2 가스만으로 플라즈마를 유지한 상태에서 반응로 압력에 따른 식각율을 측정할 결과이다. 그림 1에서 15mTorr 이하의 비교적 낮은 압력에서 식각율의 경향은 도핑 여부에 따라 상반되는 특성을 나타내었다. 도핑된 다결정 실리콘의 경우, 압력이 증가할수록 식각율은 증가한다. 그러나, 도핑되지 않은 비정질 실리콘의 식각율은 도핑된 다결정 실리콘의 식각율과 비교하여 전체적으로 낮게 나타내며, 도핑된 다결정 실리콘의 식각율은 압력이 증가함에 따라 증가하는 도핑되지 않은 비정질 실리콘의 식각율과는 다르게 압력이 증가할수록 식각율이 감소하는 경향을 나타낸다. 그림 1에서 도핑된 다결정 실리콘의 식각율이 압력에 비례하는 이유는 압력이 증가할수록 Cl 라디칼의 상대적 밀도가 증가하고, etchant의 증가에 따라 화학적인 반응이 증가하여 도핑된 다결정 실리콘의 식각이 빠르게 진행되기 때문으로 판단된다. 이는 OES를 이용한 actinometry의 방법으로 도출한 결과에서도 Cl 라디칼 밀도가 압력에 비례하는 사실이 확인되었으며, 이러한 결과는 앞서 보고된 논문의 결과^[1]와도 일치하였다. 그러나 도핑되지 않은 실리콘의 경우 압력이 증가함에 따라 식각율은 오히려 감소하였는데, 이는 실리콘과 etchant의 화학 흡착^[8]에 기인한 것으로 라디칼 밀도보다 다른 인자에 의하여 영향을 받는 것으로 판단된다. 일반적으로 반응로 내의 압력이 낮아질수록 이온 밀도와 이온 충격이 커진다는 사실을 고려할 때, 도핑되지 않은 비정질 실리콘의 식각에서는 실리콘 etchant인 Cl 라디칼의 밀도보다는 이온 충격이 주된 역할을 하는 것으로 판단된다.

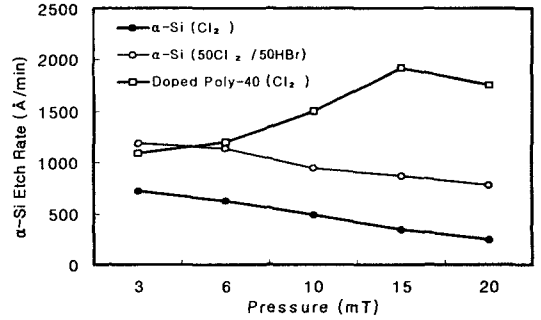


그림 1. 바이어스 전력 0W 및 소스 전력 500W 하에서 반응로 압력에 따른 식각율

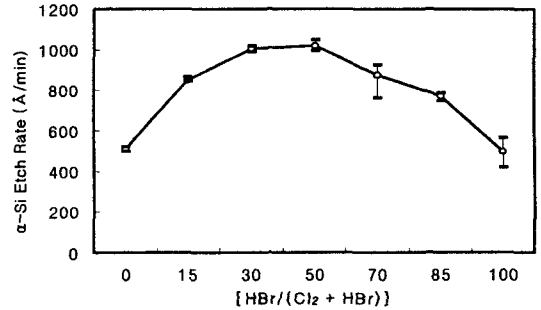


그림 2. 바이어스 전력 0W, 소스 전력 500W 및 반응로 압력 10mTorr 하에서 Cl_2/HBr 가스 혼합비에 따른 도핑되지 않은 비정질 실리콘의 식각율

그림 2는 바이어스 전력을 0W, 소스 전력을 500W로 인가하고 압력을 10mTorr로 고정시킨 뒤, 반응로 내에 주입되는 Cl_2/HBr 가스의 조성비의 변화에 따라 도핑되지 않은 비정질 실리콘의 식각율을 나타낸 것이다. 그림 2에서 100% Cl_2 만으로 식각한 경우, 화학 흡착으로 인하여 식각율이 상당히 낮게 나타내고 있지만, 이후 HBr의 첨가량이 증가함에 따라 식각율이 증가하여 $\text{Cl}_2:\text{HBr}$ 의 비가 1:1로 갈 때 최대값을 보이고, HBr 첨가량이 증가함에 따라 식각율은 점점 감소하였다. HBr의 분압이 0에서 0.5까지 증가함에 따라 식각율이 증가하는 것은 Cl^* 보다 무거운 Br^* 에 의한 이온 충격의 증가(Br^* 의 충격량은 Cl^* 에 비해 약 1.5배)에 기인한다고 판단된다. HBr의 양이 Cl_2 보다 증가하는 경우, 식각율이 감소하는 것은 Cl 라디칼과 Br 이온으로 이루어진 이온 조력 식각에서 화학적으로 반응할 수 있는 Cl 라디칼의 절대적인 양이 감소하였고, 증가된 Br은 실리콘과의 반응성이 낮기^[6] 때문이라고 판단된다.

도핑되지 않은 비정질 실리콘 게이트 식각시 $\text{Cl}_2/\text{HBr}/\text{O}_2$ 의 가스 조성비로 과도 식각할 때, 최외곽 라인의 바깥쪽에 깊은 나침이 발견되었다. 이와

같은 새로운 경향의 나칭을 보다 자세하게 분석하기 위하여 과도 식각 시간과 다결정 실리콘 라인의 공간에 따른 나칭의 변화를 고찰하였다.

그림 3은 과도 식각 시간과 공간에 따른 나칭의 깊이를 나타내었다. 그림 3에서 보인 바와 같이 나칭의 깊이는 과도 식각 시간에 비례하는 특성을 가지고 있으며, 라인 사이의 공간이 넓어질수록 나칭의 깊이도 깊어지는 특성을 보였다. 과도 식각 시간에 따라서는 거의 선형적인 특성을 보이고 있는데, 이는 나칭이 어느 순간에 발생하는 것이라기보다는 어떠한 인자에 의해 지속적으로 진행되고 있음을 의미한다.

도핑된 다결정 실리콘의 식각 시, 전자 shading에 의한 종래의 나칭은 그림 3에 "A"로 표시된 라인과 같이 라인 사이의 공간이 넓어질수록 산화막 표면으로 입사되는 전자의 수가 많아져 최외곽 라인의 안쪽과 바깥쪽의 전위 차이를 줄일 수 있기 때문에 나침의 깊이가 감소한다. 그러나, 본 실험에서 발견된 나침은 그와 반대되는 특성을 보여, 그 발생 메커니즘이 다른 원인에 의한 것으로 판단된다. 이와 같이 나침을 유발시킬 수 있는 인자를 추출하기 위하여 이온 및 라디칼의 밀도를 변화시킬 수 있는 소스 전력과 웨이퍼로 향하는 이온의 충격 에너지를 조절할 수 있는 바이어스 전력을 변화하면서 식각하였다. 그림 4는 소스 전력과 바이어스 전력에 따른 나침의 깊이를 나타내었다. 그림 4에서 나침의 깊이는 소스 전력에 비례하고 바이어스 전력에 반비례하는 특성을 관찰할 수 있었다. 소스 전력의 증가에 의해서 이온 및 라디칼의 밀도는 동시에 증가하기 때문에 정확한 요인을 알기는 어렵다. 그러나, 바이어스 전력의 증가에 따라 나침의 깊이가 감소한다는 사실로부터 나침을 유발하는 주요 인자는 바이어스 전력에 의해 크게 영향을 받는 이온에 의한 것으로 보여진다. 즉 바이어스 전력이 증가함에 따라 이온의 직진성이 개선되어 나침의 정도가 변화하는 것으로 판단된다.

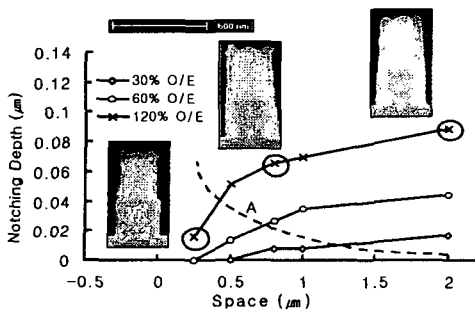


그림 3. 반응로 압력 3mTorr, 소스 전력 300W, 바이어스 전력 30W 및 Cl₂(35)/HBr(35)/O₂(7) 가스 혼합 조건에서 과도 식각 시간 및 라인 공간에 따른 나침 깊이의 경향성

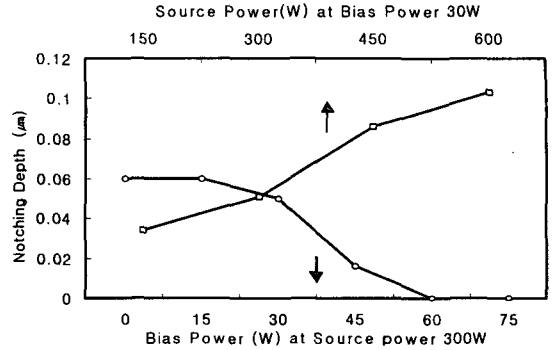


그림 4. 반응로 압력 3mTorr, 소스 전력 300W, 바이어스 전력 30W 및 Cl₂(35)/HBr(35)/O₂(7) 가스 혼합 조건에서 소스 전력 및 바이어스 전력의 변화에 따른 격리된 패턴에서의 나침 깊이의 경향성

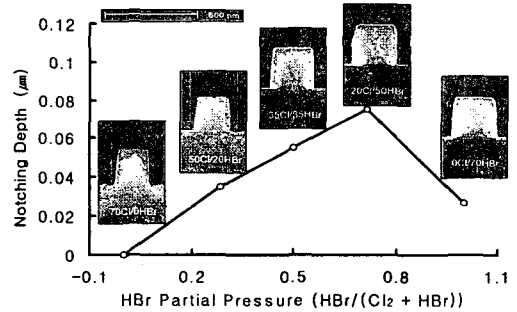


그림 5. 반응로 압력 3mTorr, 소스 전력 300W, 바이어스 전력 30W 및 Cl₂(X)/HBr(Y)/O₂(7) 가스 혼합 조건에서 Cl₂/HBr 가스 혼합비에 따른 격리된 패턴에서의 나침 깊이

그림 5는 Cl₂/HBr의 가스 조성비를 변화시키면서 도핑되지 않은 비정질 실리콘의 독립된 라인에서 100% 과도 식각한 시료에 대한 나침의 깊이를 나타낸 것이다. 그림 5에 보인 바와 같이 Cl₂ 가스만의 플라즈마로 식각한 경우, 선택비 부족으로 게이트 전극 바로 옆에 micro-trench가 발생되었으나 나침은 발생되지 않았다. HBr 분압이 증가함에 따라 나침의 깊이는 점점 증가하여 HBr 분압이 70%일 경우에 최대값을 나타내었고, HBr 만으로 식각한 경우는 상당히 감소하는 양상을 보였다. 이와 같이 HBr 분압에 대한 나침의 깊이 변화는 Cl⁻에 비하여 충격 특성이 강한 Br 이온에 기인한 것으로 보여진다. 특히 그림 2에서 HBr을 첨가하면 별도로 바이어스 전력을 인가하지 않고도 이온 충격을 증가시킬 수 있었던 결과와 마찬가지로 자기 바이어스에 의한 이온의 궤적(trajecory)이 직진성을 갖지 못했을 때, Br 이온은 실리콘 게이트의 측면에 대해서 Cl⁻ 보다 강한 충격을 유발하여 이온 조력에 의하여 측면을 식각한다고 판단된다. 70% HBr 분압에서 나침의 깊이

가 최대값을 나타내는데, 이는 그 가스 조성에서 측벽에 대한 이온 조력 식각이 최대의 효율을 나타낸다고 생각된다. 또한 100% HBr로 식각한 경우에 나칭의 깊이가 50%와 70%의 조건보다 감소하는데, 이는 그림 2에서 보인 바와 같이 etchant인 chlorine 라디칼이 없는 상태에서 bromine 단독으로는 실리콘과의 반응성이 낮아 Br 이온의 충격만으로는 식각율이 감소하기 때문으로 판단된다. 여기서 조밀한 패턴에 대하여 고찰하여 보면, Br 이온의 충격 특성에 의해 발생된 나칭은 이온의 궤적과 밀접한 관련이 있는 것으로 생각할 수 있다.

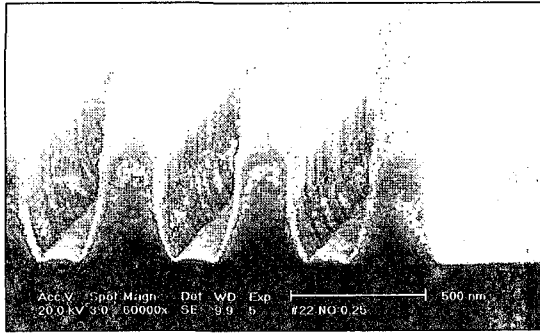


그림 6. 반응로 압력 3mTorr, 소스 전력 300W, 바이어스 전력 30W 및 $Cl_2(35)/HBr(35)/O_2(7)$ 가스 혼합 조건에서 식각한 후, C_2F_6 를 이용하여 게이트 산화막을 제거한 시료의 SEM 단면 사진

그림 6은 주 식각 공정 후 C_2F_6 가스 플라즈마로 게이트 산화막을 제거하고 난 뒤, 100% 과도 식각한 시료의 SEM 단면 사진을 나타낸 것이다. 그림 6에 보인 바와 같이, 하부층의 물질이 산화막이 아니고 실리콘일 경우에는 계속하여 식각이 진행되고 나칭은 발생하지 않음을 알 수 있었다. 따라서 게이트 산화막이 노출된 과도 식각에서 더 이상 식각에 참여하지 못하는 이온이 산화막의 표면에 대전되고, 뒤이어 유입되는 bromine 이온의 궤적을 변화시켜 나칭을 유발시키는 것임을 확인할 수 있었다. 이러한 관점에서 라인 사이의 공간이 넓어지게 되면 산화막 표면의 전위의 증가 정도는 점점 낮아지게 되고, 그에 따라 이온의 궤적은 대부분 직진성을 회복하게 된다. 그러나, 측벽은 포획된 전자에 의해 전위가 상대적으로 낮아지게 되어 이온의 궤적이 측벽 방향으로 휘어져서 라인 바로 옆의 산화막 표면은 양으로 대전된다. 이 같은 전위의 급격한 변화에 의해 휘어진 Br 이온은 측벽의 하부에서 이온 조력 식각을 진행시켜 깊은 나칭을 형성시키는 것으로 판단된다.

4. 결 론

도핑되지 않은 비정질 실리콘의 게이트 식각시

HBr 가스는 이온 조력 식각의 특성이 있어 첨가 가스로서 식각율, 선택비 등의 측면에서 유용하게 사용되지만, 공간이 넓은 부분에서 게이트의 하부가 깊게 파이는 새로운 형태의 나칭이 발생된다. 도핑되지 않은 비정질 실리콘의 게이트 라인 사이의 공간이 (1) 좁은 지역에서는 노출된 산화막 표면이 이온에 의해 양으로 대전되어 전위를 높이게 되어, 좁은 라인사이로 입사되는 이온의 궤적이 보다 넓은 범위로 휘게 되어 나칭의 깊이가 얕고 넓게 나타난다. (2) 넓은 지역(isolated pattern)에서는 전자들이 감광막과 게이트 측벽으로 대전되어 이온의 궤적을 일부 휘게 만든다. 따라서 휘어져 입사된 이온은 게이트 바로 옆부분만을 국부적으로 양으로 대전하여 전위차를 발생시키게 되어 독립된 라인은 조밀한 라인에 비하여 보다 많은 이온이 집중될 수 있고, Br 이온의 집중적인 충격으로 나칭의 깊이도 깊어진다.

참 고 문 헌

- [1] J. B. Cater, J. P. Holland, E. Peltzer, B. Richardson, E. Bogle, H. T. Nguyen, and Y. Melaku, "Transformer coupled plasma etch technology for the fabrication subhalf micron structures," J. Vac. Sci. Technol. A11(4), p.1301, 1993.
- [2] G. S. Hwang and K. P. Giapis, "On the origin of the notching effect during etching in uniform high density plasma," J. Vac. Sci. Technol. B15(1), p.70, 1997.
- [3] N. Fujiwara, T. Maruyama and M. Yoneda, "Profile control of poly-si etching in electron cyclotron resonance plasma," Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 34, p.2095, 1995.
- [4] T. Nozawa, T. Kinoshita, T. Nishizuka, and A. Nariai, "The electron charging effects of plasma on notch profile defects", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 34, p.2107, 1995.
- [5] Kyeong Koo Chi, Hwa Sook Shin, Won Jong Yoo, and Cham Ouk Jung, "Effect of conductivity of polysilicon on profile distortion," Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 35, p.2440, 1996.
- [6] L. Y. Tsou, "High selectivity reactive ion etching of polysilicon with hydrogen bromide," J. Electrochem. Soc., Vol. 136, No. 10 p.3003, 1989.
- [7] 유석빈, 박근주, 강양범, 박창욱, 이원규, "HBr induced notching in undoped amorphous Si gate etching", 제6회 한국반도체학술대회 논문집 pp.293-294, 1998.
- [8] D. M. Manos and D. L. Flamm, "Plasma Etching An Introduction," Academic Press, 1989.