

SF₆, C₄F₈, O₂ 가스 변화에 따른 실리콘 식각율과 식각 형태 개선

Improvement of Etch Rate and Profile by SF₆, C₄F₈ and O₂ Gas Modulation

권순일¹, 양계준¹, 송우창², 임동건^{1,a}

(Soon-Il Kwon¹, Kea-Joon Yang¹, Woo-Chang Song², and Dong Gun Lim^{1,a})

Abstract

Deep trench etching of silicon was investigated as a function of RF source power, DC bias voltage, C₄F₈ gas flow rate, and O₂ gas addition. On increasing the RF source power from 300 W to 700 W, the etch rate was increased from 3.52 $\mu\text{m}/\text{min}$ to 7.07 $\mu\text{m}/\text{min}$. The addition of O₂ gas improved the etch rate and the selectivity. The highest etch rate is achieved at the O₂ gas addition of 12 %. The selectivity to PR was 65.75 with O₂ gas addition of 24 %. At DC bias voltage of -40 V and C₄F₈ gas flow rate of 30 sccm, We were able to achieve etch rate as high as 5.25 $\mu\text{m}/\text{min}$ with good etch profile.

Key Words : ICP-RIE, Dry etching, Etch rate, SF₆, C₄F₈

1. 서 론

초고집적회로 시대로 접어들면서 반응성 플라즈마를 이용한 건식식각 공정은 미세소자 제조를 위한 핵심공정으로 그 중요성이 더욱 증대되고 있다. 소자의 박막두께와 선폭이 감소되고 소자의 구조가 더욱 복잡해지면서 높은 이방성 식각과 선택도, 선폭의 제어, 균일도 확보와 플라즈마 노출에 따른 물리적, 전기적 손상과 오염 입자 발생의 최소화 등이 엄격히 요구되고 있다[1]. 집적회로의 밀도가 증가됨에 따라 종횡비(aspect ratio)가 높은 트렌치(trench)구조나 연결 홀(via hole)을 식각하는 기술은 3차원 구조를 갖는 초고집적회로의 생산에는 없어서는 안 될 주요기술이 되었다. 트렌치 구조나 연결홀을 식각하는데 있어 면적에 따라 식각율(etch rate)이 달라지는 "RIE Lag" 현상 또는 종횡비 식각이라 불리는 문제점이 제기되고 있다[2].

이런 현상의 주요한 원인으로서 식각 기체 또는 반응성 라디칼(radical)이 트렌치 구조의 내부로의 전달 과정에서의 한계(transport limitation)[3], 감광제(PR)의 하전(charging)에 의한 이온의 굴절(deflection)[4,5], 쉬스(sheath)내에서 중성자와 이온의 충돌에 의한 산란(scattering)[6] 등이 보고되고 있다.

이러한 초고집적회로나 3차원 구조를 제작하기 위한 차세대 식각 장비의 개발은 크게 새로운 플라즈마 소스의 개발과 시변조, 방전, 극저온 식각 등과 같은 새로운 공정의 개발들을 들 수 있다. 고밀도 플라즈마 소스의 대표적인 것으로는 ECR (Electron Cyclotron Resonance) 플라즈마, 헬리콘(Helicon) 플라즈마, 평판형(Planar Type) 유도결합 플라즈마 (Inductively Coupled Plasma : ICP) 등을 들 수 있다.

본 논문에서는 고밀도 플라즈마를 대면적에 걸쳐 고르게 생성할 수 있는 ICP를 소스원으로 사용하는 반응이온 식각장치(Reactive Ion Etching : RIE) 시스템을 사용하였고, 실험의 공정변수는 트렌치 구조나 미세구조물 식각공정에 적용하기 위해 표 1과 같이 C₄F₈ 가스량, RF 소스 전력, DC 바이어스 전압, O₂ 가스 혼합량의 영향을 분석하였고 최적화 값을 도출하였다.

1. 충주대학교 전자공학과
(충북 충주시 대학로 72)
2. 충주대학교 BINT 신기술 연구소
a. Corresponding Author : dglim@cju.ac.kr
접수일자 : 2008. 2. 15
1차 심사 : 2008. 3. 17
심사완료 : 2008. 3. 20

2. 실험

2.1 ICP-RIE 시스템 구성

본 논문에서 사용한 ICP-RIE 시스템은 그림 1에서와 같은 단일 웨이퍼 공정용 평판형 플라즈마 형태이다. 챔버의 상부에는 안테나 코일을 사용하여 위하여 원판형 석영창(quartz plate)을 두었고, 고주파 전원을 공급받는 상부 안테나는 지름 180 mm 동판을 사용하여 3회 감은 코일을 사용하였다. 상부의 코일과 하부 전극에 공급하는 고주파 발생 전원부는 13.56 MHz의 주파수를 가지며, 각 고주파 전원은 매칭 네트워크를 통해 코일과 기판에 공급된다.

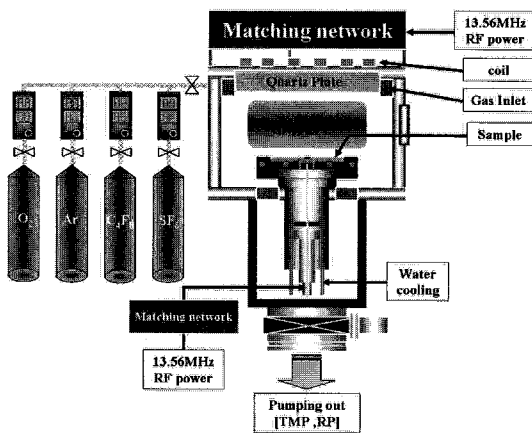


그림 1. Deep RIE 이용한 비등방성 Si 식각 장치 개략도.

Fig. 1. Schematic diagram for anisotropic Si etching equipment by deep RIE.

실험에 사용한 주반응 가스로 SF₆(99.9%), C₄F₈(99.9%) 가스를 사용하였고, 이밖에 각 공정에 첨가할 수 있는 가스로는 고순도 O₂(99.995%), Ar(99.999%)를 사용하였다. 이때 반응기체가 균일하게 챔버 내부로 유입되도록 가스 분사링(shower head)를 사용하여 가스를 주입하였고, 또한 하부 전극은 반응 플라즈마로 발생하는 열에 의한 소자의 손실을 줄이기 위해 5 °C의 냉각수로 기판을 냉각하였다. 진공시스템으로는 저 진공 펌프로 로터리 펌프를 사용하여 1.0 × 10⁻³ Torr 까지 챔버 내부의 진공을 유지한 후, 터보분자 펌프를 이용하여 1.0 × 10⁻⁶ Torr 로 챔버 내부의 진공

을 유지하였다. 챔버의 유량과 압력은 독립적으로 조정이 가능하도록 하였는데 가스유량은 MFC를 사용하여 SF₆, C₄F₈, Ar가스는 0~100 sccm, O₂는 0~20 sccm까지 가변 할 수 있게 제작되었다. 압력은 스톱 밸브(throttle valve)를 사용하여 공정 시 일정한 압력을 유지 하였다.

2.2 실험방법

트렌치 구조의 이방성 식각을 위한 시료는 (100) 방향의 P형 실리콘(Si) 웨이퍼를 사용하였으며, Si 웨이퍼 위에 트렌치 구조의 패턴을 제작하기 위해 양성(positive) 감광제(Tokyo ohka 사, P-LA 900)를 사용하였다. 먼저 스프인코터(spin coater)를 사용하여 감광제를 6 μm로 일정하게 도포한 후 감광제에 혼합되어있는 용매를 제거하기 위하여 핫플레이트에서 110 °C로 5분간 베이크 한 후, 퀴즈(quartz) 마스크로 30초간 노광을 하였다. 노광에 사용된 마스크는 식각 면적에 따른 식각율에 대한 특성을 실험하기 위하여 2 μm부터 50 μm 까지 다양한 폭을 가진 트렌치 선평과 100 μm이상의 대면적을 가진 형태로 되어있다. 노광 후 빛과 반응한 감광제 부분을 식각하기 위하여 현상액(PMER developer P-7G)으로 6분간 현상을 하여 패턴을 형성하였다. 현상 후 감광제에 남아있는 용매 제거와 경화를 위해서 110 °C에서 2분간 베이크 하였다.

본 논문에서 실험한 중요한 식각공정변수로서 패시베이션 가스인 C₄F₈ 가스량, RF 소스 전력, DC 바이어스 전압, O₂ 가스 첨가로서 이 공정변수들이 이방성 식각에 어떠한 영향을 미치는지 실험을 하였다. 실험한 식각공정변수의 범위는 표 1과 같은 범위에서 실험을 하였다.

표 1. 이방성 식각공정변수 범위.

Table 1. The range of anisotropic etch process variable.

Parameter	Basic	Variable
	Values	Ranges
C ₄ F ₈ 가스량(sccm)	30	0 ~ 50
RF 소스 전력[W]	400	300 ~ 700
DC 바이어스 전압[V]	-30	0 ~ -100
O ₂ 가스 혼합량[%]	0	0 ~ 29

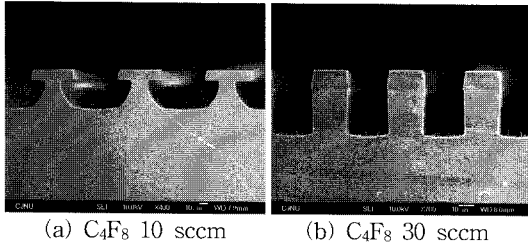


그림 2. C₄F₈ 가스량에 따른 언더컷 현상.
Fig. 2. Generated undercut with C₄F₈ gas flow rate.

3. 결과 및 고찰

3.1 C₄F₈ 가스량의 영향

패시베이션 공정시 C₄F₈ 가스량에 따라 증착된 패시베이션 층이 Si 식각율과, 식각표면에 미치는 영향에 대해서 실험하였다. 실험에서 사용된 트랜치 구조의 종횡비는 0.4인 시료, 즉 트랜치 선폭이 25 μm, 마스크의 높이는 10 μm인 시료를 사용하였다. C₄F₈의 가스 변화량으로는 10 sccm부터 50 sccm까지 10 sccm 단위로 증가를 시키면서 실험을 하였고, 이때 식각공정 가스는 SF₆ 50 sccm으로 일정하게 유지하였다. 그림 2(a)와 같이 C₄F₈ 가스량을 10 sccm으로 공정을 한 시료는 패시베이션 층이 얇게 증착되어, 다음 식각공정에서 패시베이션 층이 보호층으로서의 역할을 못하여 언더컷(undercut)이 발생하였다. 20 sccm은 10 sccm 공정보다 이방성 식각특징이 나타났지만, 마스크 밑으로 언더컷 식각이 발생함을 볼 수 있다.

그림 2(b)에서 나타난 30 sccm부터 50 sccm까지 공정은 트랜치 형태에서 언더컷이 나타나지 않는 형태의 이방성 식각을 볼 수 있었다.

그림 3에서는 SF₆ 50 sccm일때 C₄F₈ 30 sccm 이상부터는 식각 하단부 표면이 거칠어지기 시작하여 50 sccm 공정에서는 식각 하단부 표면에 10 μm이상의 종유식 모양의 표면을 나타내었다. 이런 표면에 종유식 모양은 마이크로 마스크링(micro masking) 현상으로 패시베이션 공정에 표면에 증착된 패시베이션 층이 식각공정에서 다 제거되지 않아 다음 식각공정에서 제거되지 않는 패시베이션 층이 마스크의 역할을 함으로서 발생한 것이다. C₄F₈ 가스량이 증가할수록 마이크로 마스크링현상이 더 많이 발생함을 볼 수 있다. 또한 C₄F₈ 가스량의 변화는 Si 식각율에도 영향을 미친다.

그림 4는 C₄F₈의 가스량 변화에 따른 Si 식각율을 나타낸 것이다. 10 sccm에서는 5.24 μm/min를

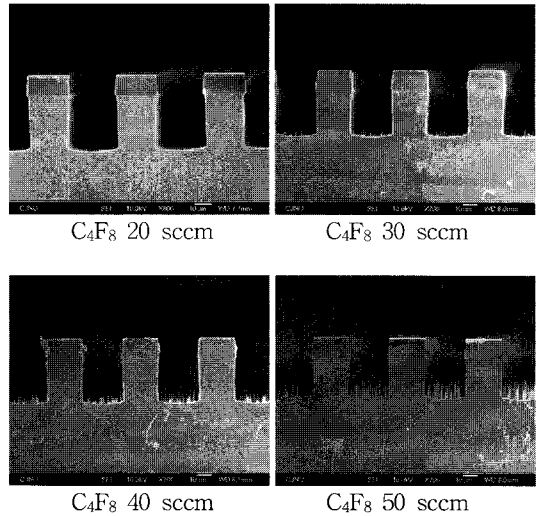


그림 3. C₄F₈ 가스량에 따른 micro masking 현상.
Fig. 3. Micro masking as C₄F₈ gas flow rate.

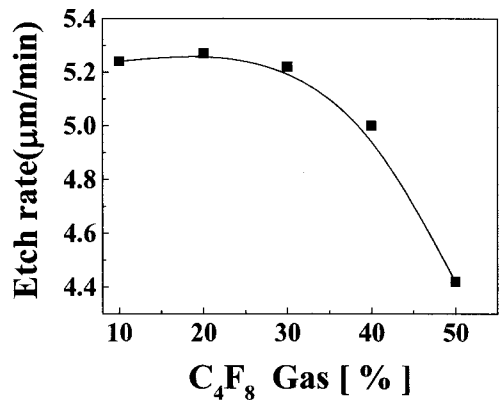


그림 4. C₄F₈ 가스 변화량에 따른 Si 식각율.
Fig. 4. Si etch rate as a function of C₄F₈ gas flow rate.

나타내었지만, 50 sccm에서는 4.42 μm/min로 많은 차이를 보였다. 30 sccm 이상부터 마이크로 마스크링 현상이 보이는데 마이크로 마스크링 현상이 급격히 증가함에 따라 Si 식각율도 급격히 감소함을 알 수 있었다.

3.2 RF 소스 전력

RF 소스 전력(source power)을 변화하게 되면 전자의 에너지 분포에 영향을 주게 되어 그 결과 반응성 라디칼과 전자 이온의 농도에 영향을 미치

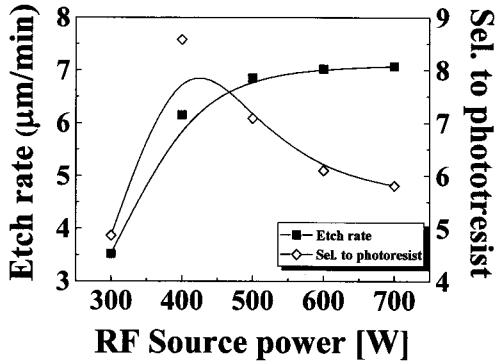


그림 5. RF 소스 전력 증가에 따른 Si 식각율과 PR 선택도.

Fig. 5. PR selectivity and Si etch rate as a function of RF source power.

게 된다. RF 소스 전력의 가변조건을 300 W ~ 700 W까지 100 W씩 증가 하며 식각공정에 적용하였다. RF 소스 전력이 낮을수록 측면이 수직으로 잘 형성이 되었고, 높을수록 트렌치 구조에서 언더컷이 발생한 것을 볼 수 있었다. 이에 따른 Si 식각을 결과는 그림 5와 같다. Si 식각율은 RF 소스 전력이 높을수록 Si 식각율이 증가하는 경향을 보였으며, 300 W에서는 3.52 $\mu\text{m}/\text{min}$, 700 W에서는 7.07 $\mu\text{m}/\text{min}$ 로 3.55 $\mu\text{m}/\text{min}$ 차이를 보였다. 따라서 RF 소스 전력이 증가하면 플라즈마내의 전자가 더 많은 에너지를 얻게 되며 전자충돌반응(electron impact reaction) 즉 여기, 이온화와 해리 반응들이 촉진되어 전자와 이온농도가 증가하고 이에 따른 반응성 라디칼인 플루오린 원자의 농도가 증가하여 화학적 식각이 증가하게 되므로 RF 소스 전력이 높을수록 Si 식각율은 증가하지만 마스크 패턴 밑으로 언더컷이 일어나게 되는 것으로 판단된다. 반면에 Si 식각율 증가와 반대로 마스크물질인 PR과의 선택도는 그림 5에 나타난 것과 같이 낮아지는 것을 볼 수 있었고, PR과의 선택도는 8.58로 RF 소스 전력이 400 W에서 가장 좋은 결과를 볼 수 있었다.

3.3 DC 바이어스 전압의 영향

RF 소스 전력으로 형성된 플라즈마는 전자충돌 반응으로 전자와 이온, 이에 따른 반응성 라디칼인 플루오린 원자들을 생성하게 된다. 여기서 생성되는 플라즈마내의 이온들은 시료에 입사하여 물리적인 식각작용을 일으키게 되는데 입사되는 이온들을 수직으로 입사시키기 위해서 기판에 DC 바이어스

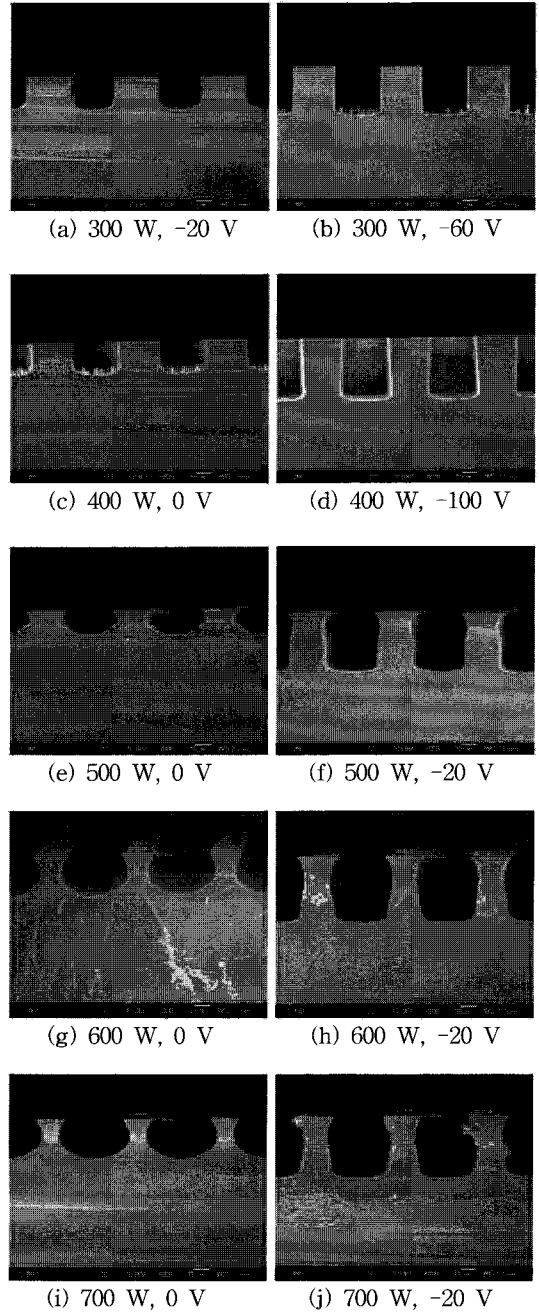


그림 6. RF 소스 전력 300 W~700 W에서 DC 바이어스 전압 영향.

Fig. 6. Influence of DC bias power at 300 W ~700 W of RF source power.

전압을 인가한다. RF 소스 전력을 300 W부터 700 W까지 100 W씩 증가시켜 각 RF 소스 전력별로

DC 바이어스 전압을 0 V에서 -100 V까지 -20 V 씩 증가시키며 DC 바이어스 전압에 대한 영향을 실험하였다.

RF 소스 전력 300 W에서 DC 바이어스 전압 영향에 대한 실험결과, 0 V에서는 식각현상이 전혀 이루어지지 않았고, 그림 6(a)와 같이 -20 V이상 DC 바이어스 전압이 인가되었을 때 Si 식각이 되었다. 언더컷 현상은 없었으며, 수직으로 트렌치 구조가 식각되었다. 하지만 RF 소스 전력 300 W와 DC 바이어스 전압 -60 V에서는 그림 6(b)와 같이 마이크로 마스크링 현상이 6 μm 정도의 높이로 나타났다. 그림 6(c)은 400 W에서 DC 바이어스 전압이 인가되지 않는 0 V에서 마이크로 마스크링 현상이 나타나는 것을 보여주고 있고, 0 V에서 -100 V까지 실험에서는 전반적으로 언더컷은 나타나지 않는 트렌치 구조를 나타내는 것을 그림 6(d)에서 보여주고 있다. RF 소스 전력이 500, 600, 700 W에서 DC 바이어스 전압 실험결과, 각각 DC 바이어스 전압이 0, -20 V일 때 언더컷이 발생한 것을 그림 6(e)-(j)에서 나타내고 있는데 이는 RF 소스 전력의 증가로 인해서 전자와 이온, 반응성 라디칼의 증가로 인하여 발생한 것으로 판단된다. DC 바이어스 전압이 증가함에 따라서 시료에 수직으로 입사는 이온들의 영향으로 이방성 식각 성분이 반응성 라디칼보다 더 많이 작용하는 것을 알 수 있었다.

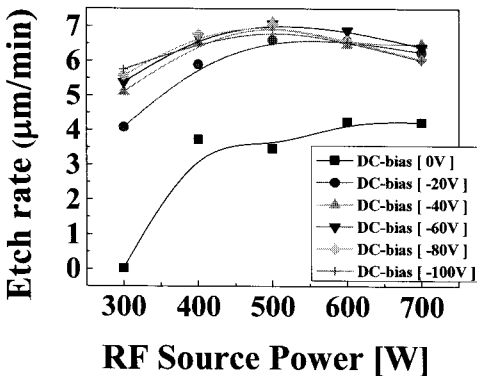


그림 7. DC 바이어스 전압에 따른 Si 식각율.
Fig. 7. Si etch rate as a function of DC bias power.

그림 7은 각 DC 바이어스 전압별로 Si 식각율을 나타낸 그래프이다. RF 소스 전력 500 W와 DC 바이어스 전압 -40 V에서 7.07 $\mu\text{m}/\text{min}$ 의 Si 식각

율을 나타내었고, 각 RF 소스 전력별로 나타낸 그림 7에서는 RF 소스 전력 500 W에서 Si 식각율이 평균적으로 높게 나타났다.

3.4 가스 혼합량의 영향

O₂ 가스 첨가의 영향으로는 SF₆ 가스의 플르오린을 분리 및 반응물질의 활성화로 Si 식각율의 향상과, 측면부의 패시베이션 층을 형성하여 국부적인 Si 식각을 감소를 가져오지만 이방성 식각은 증가하는 경향을 가져온다[7,8]. 챔버 내부의 반응 가스를 순수한 SF₆ 가스로 100 % 고정 후 O₂ 가스를 혼합하여 실험을 하였다. 이때 SF₆ 가스량은 50 sccm으로 일정하게 유지한 후 그림 8과 같이 O₂ 가스의 첨가량을 6 %에서 29 %까지 첨가하며 O₂ 가스 혼합에 따른 식각영향에 대하여 실험하였다. O₂ 가스 24 %일때 PR과의 선택도는 65.75를 나타내었고, 이때 Si 식각율은 6.14 $\mu\text{m}/\text{min}$ 로 선택도는 가장 좋았지만, Si 식각율은 가장 낮은 결과를 보였다. Si 식각율은 O₂ 가스량이 0 ~ 12 %까지 증가시켰을 때 Si 식각율이 6.52 $\mu\text{m}/\text{min}$ 에서 6.86 $\mu\text{m}/\text{min}$ 으로 향상되었고, O₂ 가스 혼합량이 Si 식각율의 최대치 이상으로 더 많이 공급하면 Si 표면 위에 O₂가 흡착되어 Si과 플르오린 사이의 반응을 오히려 방해하기 때문에 Si 식각을 감소가 일어나는 것으로 판단된다. O₂ 가스 혼합량이 증가함에 따라서 이방성 식각이 향상되는 결과는 볼 수 없었다.

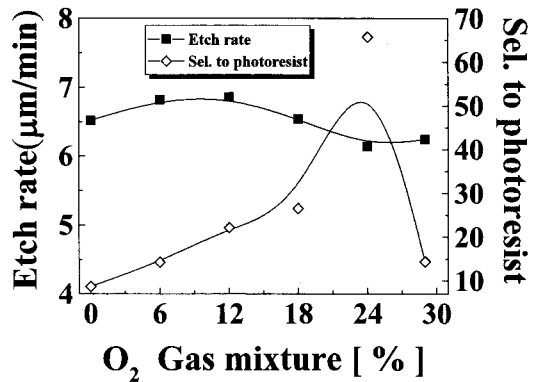


그림 8. O₂ 가스 혼합량에 따른 식각율과 선택도.
Fig. 8. Etch rate and selectivity as a function of O₂ gas mixture.

3.5 최적화시킨 각 공정변수

C₄F₈ 가스량의 영향은 비등방성 식각을 위한 보호막 형성을 위해 사용되었으며 그 양에 따라 측

벽 형태와 표면 거칠기에 나타났으며, RF 전원에 대한 실험에서 이온 플럭스의 증가는 측벽 형태에 영향을 있었으며, 이온 에너지의 증가는 식각율과 직접적인 영향이 있었다. DC 바이어스 전압은 플라즈마내의 이온들을 시료에 수직으로 입사시켜 물리적인 식각작용을 함으로서 식각율과 측벽 형태의 표면 거칠기에 영향을 주었으며, O₂ 가스의 첨가는 비등방성 측벽 형태에 영향이 있었지만, 일정 비율을 넘어서면 반응물질 활성화 보다 국부적인 마스크 역할을 하는 작용을 하게 된다.

그림 9는 앞에서 언급한 공정변수의 영향을 고려하여 최적화시킨 조건인 RF 소스전력 400 W, DC 바이어스 전압 -40 V, SF₆ : C₄F₈ 가스량 50 : 30 sccm, O₂ 가스 혼합량 12 % 일때 식각한 SEM 이미지이다. 언더컷은 없으며 표면 거칠기와 측벽 형태가 우수함을 알 수 있다.

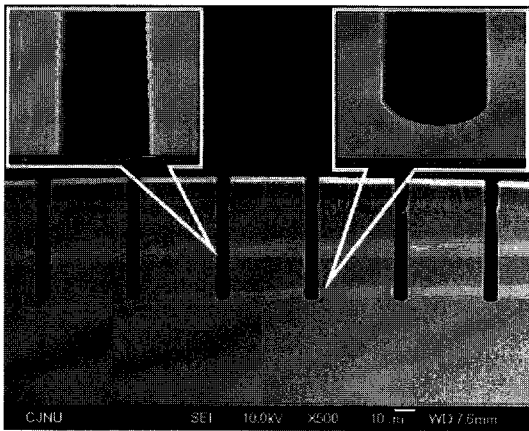


그림 9. 최적 조건에서 표면 거칠기와 측벽 형태.
Fig. 9. Surface roughness and sidewall profile at optimized process condition.

4. 결 론

ICP-RIE 시스템을 이용한 Si 식각특성에서 C₄F₈ 가스량, RF 소스 전력, DC 바이어스 전압, O₂가스 혼합량의 변화가 식각율, 이방성 식각등의 식각특성에 미치는 영향을 살펴보았다.

C₄F₈ 가스량으로는 30 sccm에서 식각표면 거칠기와 이방성 식각도가 우수하게 나왔으며, 코일에 인가하는 RF 소스 전력은 증가할수록 Si 식각율이 증가하여 700 W에서는 7.07 μm/min 보였다. 하지

만 RF 소스 전력이 증가할수록 반응성 라디칼의 증가로 언더컷이 발생하였다. DC 바이어스 전압의 영향으로는 DC 바이어스 전압이 증가할수록 이방성 식각경향과, Si 식각율은 -40 V 이상에서 -100 V까지 식각율은 크게 증가하지 않는 경향을 보였다. O₂ 가스 혼합량으로는 O₂ 가스가 12 %에서 가장 높은 Si 식각율을 보였고, PR과의 선택도는 O₂ 가스가 24 %일때 65.75를 나타내었다. O₂ 가스는 12 %이상 혼합하였을 경우 표면에 산화막 형성으로 Si 식각율 감소를 가져왔다.

감사의 글

이 논문은 충주대학교 대학구조개혁지원 사업비(교육인적자원부 지원)의 지원을 받아 수행한 연구임.

참고 문헌

- [1] J. M. Cook and K. G. Donohoe, "Etching issues at 0.35 μm and below", Solid State Technol., Vol. 34, p. 119, 1991.
- [2] R. A. Gottoscho and C. W Jurgensen, "Microscopic uniformity in plasma etching", J. Vac Sic. Technol., Vol. B10, p. 2133, 1992.
- [3] T. Arikato, K. Horioka, M. Sekine, H. Okano, and Y. Horrike, "Single silicon etching profile simulation", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 27, p. 95, 1998.
- [4] N. Fujiwara, H. Sawai, M. Yoneda, K. Hishiyoka, and H. Abe, "High selective AlSiCu etching using BBr₃ mixed-gas plasma", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 29, p. 2223, 1990.
- [5] H. C. Jones, R. Bennett, and J. Singh, "Size dependent etching of small shapes", Proc. 8th Symp. Plasma Proc., Vol. 90-2, p. 45, 1990.
- [6] N. Fusiwara, T. Shibano, K. Nishioka, and T. Sato, jpn. "Cold and low-energy ion etching", J. Appl. Phys., Vol. 28, p. 2147, 1989.
- [7] L. Jiang and R. Cheung, "Impact of Ar addition to inductively coupled plasma etching of SiC in SF₆/O₂", Microelectronic Engineering., Vol. 73-74, p. 306, 2004.
- [8] J. H. Min and G. R. Lee, "Redeposition of etch products on sidewalls during SiO₂ etching in a fluorocarbon plasma. V. Effects of C/F ratio in plasma gases", J. Vac. Sci. Technol., Vol. B22(3), p. 2580, 2004.