

NF₃ / H₂O 원거리 플라즈마 건식 세정에 의한 SiGe 표면 특성 변화

박세란* · 오훈정 **† · 김규동 *** · 고대홍*

*연세대학교 신소재공학과, **†연세대학교 비아이티 마이크로 팹 연구소, ***(주) ACN

SiGe Surface Changes During Dry Cleaning with NF₃ / H₂O Plasma

Seran Park*, Hoon-Jung Oh**†, Kyu-Dong Kim*** and Dae-Hong Ko*

*Department of Materials Science and Engineering, Yonsei University,

†BIT Micro Fab Research Center, Yonsei University, *ACN Co. Ltd

ABSTRACT

We investigated the Si_{1-x}Ge_x surface properties when dry cleaning the films using NF₃ / H₂O remote plasma. After the dry cleaning process, it was found that about 80-250 nm wide bumps were formed on the SiGe surface regardless of Ge concentration in the range of x = 0.1 ~ 0.3. In addition, effects of the dry cleaning processing parameters such as pressure, substrate temperature, and H₂O flow rates were examined. It was found that the surface bump is significantly dependent on the flow rate of H₂O. Based on these observations, we would like to provide additional guidelines for implementing the dry cleaning process to SiGe materials.

Key Words : SiGe, Dry Cleaning, Plasma, Remote Plasma, NF₃ / H₂O Dry Cleaning, SiGe Cleaning

1. 서 론

현재 반도체 산업에서는 소자의 소형화에 따른 성능 감소를 극복하고 소자 특성을 향상시키기 위해 소형화에 따른 게이트 유전막의 누설 전류 개선을 위한 고유전상수 박막 개발, 60mV/dec의 부임계 스윙 한계를 돌파하기 위한 터널링을 활용한 전계 효과 트랜지스터 개발 등의 다양한 공정 및 재료 기술이 반도체 공정에 적용되어 연구되고 있다 [1-3]. 반도체 대량 생산 공정에까지 도입된 대표적인 소재기술로 SiGe 물질의 도입을 들 수 있다. 금속-산화물-반도체 전계효과 트랜지스터 (Metal-oxide-semiconductor field effect transistor; MOSFET)의 채널물질에 스트레인이 가해질 때 물질 변화 없이도 전자 또는 정공의 이동도가 증가하는 특성을 이용하는 기술에 SiGe이 이용된다. P-채널 MOSFET (P-MOSFET)의 소스 / 드레인 영역에

Si보다 격자상수가 큰 SiGe에 피증을 형성하면 소스와 드레인 사이의 채널에 압축 응력을 가하게 되고 채널을 지나는 정공의 이동도가 증가되어 소자의 드레인 전류 증가 및 구동속도가 향상된다 [4-6]. 스트레인에 의한 이동도 증가 기술은 90 nm 노드의 소자의 대량 생산 기술에 SiGe 에피공정 도입으로 적용되기 시작하였으며, 반도체 기술이 발전함에 따라 SiGe 에피증의 Ge 농도도 계속 증가하고 있다 [7].

반도체 기술은 소재의 변화뿐만 아니라 신공정의 필요성을 대두시켰다. 반도체 소자의 집적도가 향상됨에 따라 패턴의 종횡비가 높아지게 되고 이에 따른 공정의 문제점이 발생한다. 특히 증착공정이나 식각 공정의 전후 필수 공정으로 수행되는 세정 공정의 패턴 의존성은 점점 심각한 문제가 되고 있다. 높은 종횡비의 구조에서 습식 세정을 진행하는 경우 표면장력에 의해 발생하는 패턴 무너짐 현상과 고종횡비 패턴 사이에 세정액이 패턴 아래쪽까지 잘 침투되지 않아 세정력이 감소하는 문

[†]E-mail: hi5hj@yonsei.ac.kr

제는 반도체 소형화가 진행됨에 따라 습식세정이 극복해야 할 심각한 문제이다 [8, 9]. 이러한 습식 세정에 기인한 문제를 피하기 위한 대안으로 건식 세정 공정 기술이 반도체 산업에 도입되고 있다. 다양한 건식 세정 방법 중에서도 플라즈마를 이용한 건식 세정 공정은 높은 세정 능력을 가지고 있으며 나노 스케일의 패턴에 적용이 가능하다는 장점이 있지만, 이온 충격에 의한 전기적 손상의 가능성 있다[10]. 원거리 플라즈마 건식 세정 기술을 이용한다면 반응 챔버와 분리된 곳에서 라디칼을 형성한 뒤 세정을 진행하여 플라즈마에 의한 전기적 손상을 최소화할 수 있으므로 이를 이용한 건식 세정 공정 연구가 진행되고 있다[11-13].

그런데, 건식 세정연구가 적용될 반도체 제조 공정의 단계와 종류에 따라 요구되는 특성이 다양함에도 불구하고, 기존의 연구는 주로 산화막이나 질화막등의 절연물질의 식각 특성에 집중되어왔다[12, 14, 15]. 특히 최신의 반도체 공정에 있어서 필수 소재인 SiGe 박막에 대한 건식 세정 연구는 거의 보고된 바가 없다. 본 연구에서는 Ge 농도가 다른 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x = 0.1, 0.2, 0.3$) 박막에 $\text{NF}_3/\text{H}_2\text{O}$ 플라즈마 건식세정을 다양한 공정조건에서 진행하면서 공정변수별 영향을 관찰한 결과를 보고하고자 한다.

2. 실험 방법

P 타입의 (100) Si 웨이퍼를 $18\text{M}\Omega\text{cm}$ 의 초순수에 대하여 1% 부피비로 희석된 HF로 세척하여 자연산화막을 제거한 뒤에 초고진공 화학 기상 증착 (Ultra-high vacuum chemical vapor deposition, UHV-CVD) 장비를 활용하여 불순물이 도핑되지 않은 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x = 0.1, 0.2, 0.3$) 단결정 박막을 성장시켰다. 에피택시 박막 성장은 575°C 에서 GeH_4 와 Si_2H_6 가스를 이용하여 진행되었다. 성장된 SiGe 박막의 특성은 고분해능 X선 회전 분석(X-ray diffraction, XRD)을 이용하여 측정하였다. Fig. 1은 스트레이인이 Ge의 농도가 높아짐에 따라 증가함을 보여주는데, 이로부터 UHV-CVD로 성장된 SiGe 에피 박막의 평면 격자 상수가 Si기판과 같은 결정성을 가진 SiGe 에피 박막이 형성되었으며 각 박막의 농도가 10, 20, 30%라는 것을 확인하였다. 건식 세정 공정은 (주) ACN에서 제작한 300 mm 기판용 원거리 플라즈마 건식 세정 장비를 이용하여 진행되었으며 반응 챔버의 구조는 Fig. 2에 개략적으로 나타내었다. 본 실험에 사용된 건식세정 장비는 플라즈마에 의한 기판 손상을 최소화하기 위하여, 플라즈마로 직접 여기된 반응종이 있는 영역과 반응이 일어나는 웨이퍼 표면 영역이 분리된 원거리 플라즈마 방식을 사용하였다. Si 웨이퍼 기판 및 SiGe 샘플들은 1 cm X 1 cm의 크기로 잘라서 300mm Si wafer에 부착하

여 실험하였다. NF_3 및 He 의 유량은 각각 70 sccm, 1500 sccm, 플라즈마 파워는 600 W으로 고정하였다. 공정 압력 13 Torr, 기판 온도 13°C , H_2O 유량 1500 sccm을 기준조건으로 하여 공정 압력 12, 14 Torr, H_2O 유량 1300, 1700 sccm, 기판 온도 11, 15°C 의 조건에서 SiGe에 대하여 건식세정을 진행하였다. 동일한 두께의 산화막을 제거하는 시간동안 건식세정을 진행하여 건식세정 조건의 영향만을 비교하기 위하여, 각 공정조건에서의 식각률을 구한 뒤에 SiO_2 20 nm 제거에 필요한 시간으로 각 조건별 공정 시간을 설정하였다.

박막의 두께는 엘립소미터(J.A. Woollam Co. Ltd, alpha SE)를 이용하여 측정하였다. 원자력 현미경 (Atomic force Microscope, AFM; Park system, XE-100)을 이용하여 표면의 물리적 특성을 분석하였고, X선 광전자 분광법(X-ray photo-electron spectroscopy, XPS; Thermo U.K., K-alpha)를 활용하여 화학적 특성을 분석하였다. 또한 투과 전자 현미경(Transmission electron microscopy, TEM; JEOL, 2100F) 및 에너지 분산 X선 분광법 (Energy dispersive spectrometry, EDS)을 사용하여 건식 세정을 진행한 SiGe 시편의 표면으로부터 깊이에 따른 Ge 농도 분포를 조사하였다.

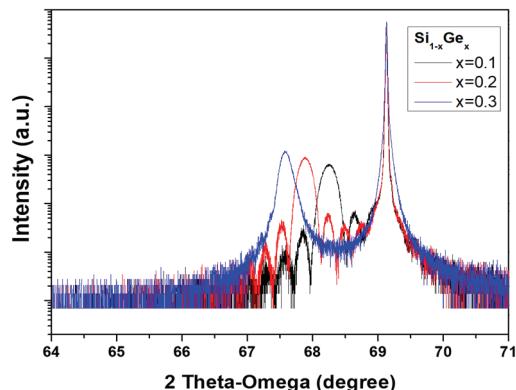


Fig. 1. High-resolution XRD ω/θ rocking curves for the symmetric (004) Bragg reflection of bulk Si and $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ layers.

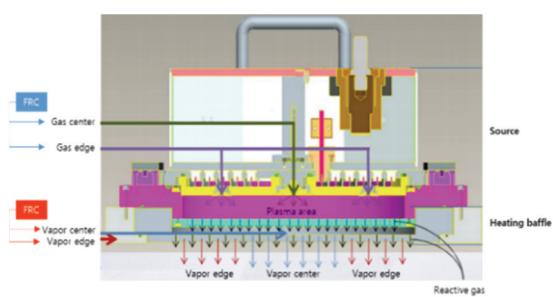


Fig. 2. Schematic representation of the dry cleaning chamber.

3. 결과 및 고찰

기본 공정 조건(공정 압력 : 13 Torr, H₂O 유량 : 1500 sccm, 기판 온도 : 13 °C)으로 건식 세정을 진행한 뒤의 Si 및 Si_{0.9}Ge_{0.1} 시편의 AFM으로 측정한 표면 거칠기를 Fig. 3에 나타내었다.

표면의 변화가 없는 Si 기편과는 달리 Si_{0.9}Ge_{0.1} 시편에서는 직경 200 nm, 높이 6 nm가량의 돌출부가 표면 전체에 형성되어 표면 거칠기가 증가하였다. 균일하지 않고 비이상적인 표면이 형성된 원인을 확인하기 위하여 Si_{0.9}Ge_{0.1} 시편에 플라즈마를 가하지 않고 건식세정공정을 진행하여 보고, 습식세정공정과도 비교하였다. 실험 조건별 AFM 측정 이미지를 Fig. 4에 나타내었다. 건식 세정을 진행하지 않거나 건식 세정 공정에서 플라즈마를 가하지 않고 가스만 흘려준 샘플(플라즈마 파워 0 W)에서는 0.2 nm의 표면 거칠기와 돌출부가 없는 표면상태를 보여주었지만, 플라즈마 파워를 가하여 건식 세정을 진행하였을 때(플라즈마 파워 600 W)에는 박막 표면에 아일랜드가 형성되어

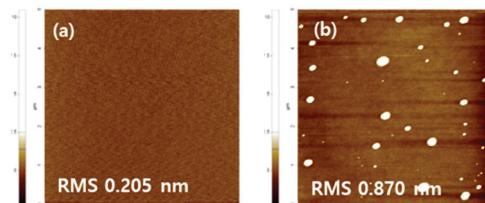


Fig. 3. AFM surface images after NF₃ / H₂O dry claning at 13 Torr, 13 °C, NF₃ 70 sccm, H₂O 1500 sccm for 24 sec.; (a) Si, (b) Si_{0.1}Ge_{0.9} (scan size : 5 μ m × 5 μ m, z scale : 10.5 nm).

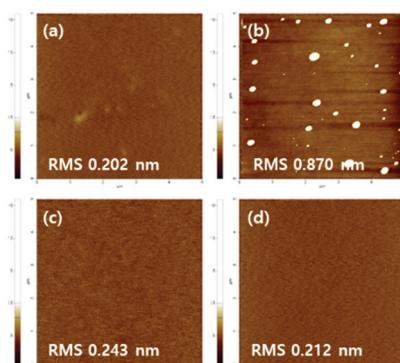


Fig. 4. AFM surface images of Si_{0.9}Ge_{0.1}; (a) as-grown, (b) NF₃ / H₂O plasma dry-cleaned at 13 Torr, 13 °C, NF₃ 70 sccm, H₂O 1500 sccm, 600 W (c) NF₃ / H₂O plasma dry-cleaned at 13 Torr, 13 °C, NF₃ 70 sccm, H₂O 1500 sccm, 0 W, and (d) cleaned in 1 % HF solution (scan size : 5 μ m × 5 μ m, z scale : 10.5 nm).

표면 거칠기가 약 4배 증가하였다. SiGe 위에 형성된 자연 산화막이 HF에 의해 제거되는 과정에서 나타나는 현상인지 확인하기 위하여 HF 용액을 이용한 습식 세정 공정과 비교하였다(Fig. 4(d)). 1% HF 습식 세정의 경우도 SiO₂ 20 nm 식각에 소요되는 시간을 공정시간으로 적용하였다. Fig. 4(d)에서 보는 바와 같이 1% HF 습식 세정 후 Si_{0.9}Ge_{0.1} 표면 거칠기는 0.2 nm였으며 세정 전의 표면상태와 같이 균일한 표면이었다. Fig. 3,4의 결과로 보아 SiGe 표면에 돌출부가 형성되는 표면 변화는 플라즈마에 기인한 반응 단계에서 발생하였음을 알 수 있었다.

NF₃ / H₂O 건식 세정 조건에 따른 영향을 살펴보기 위하여 공정 압력, 기판온도, H₂O 유량 조건을 13 Torr, 13 °C, 1500 sccm을 기준으로 전후 값으로 변화하여 SiGe의 표면 변화를 관찰하였다. 먼저 공정조건에 따른 산화막 식각률을 20 nm로 고정하기 위하여 조건별 SiO₂ 식각률을 측정하였다(Fig. 5). 실험범위에서 SiO₂의 식각률은 H₂O 유량이 증가할수록, 공정 압력이 증가할수록, 온도가 감소할수록 증가하였다. H₂O의 유량보다는 온도변화가 식각률에 미치는 영향이 더욱 커졌다. 식각률은 H₂O 유량 1500 sccm, 공정 압력 13 Torr, 온도 11°C일 때 최대값 10.1 Å/sec이었고, H₂O 유량 1500 sccm, 공정 압력 15 Torr, 온도 13°C일 때 최소값 2.1 Å/sec으로 측정되었다.

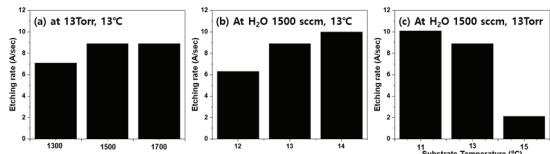


Fig. 5. Etching rate of SiO₂ according to (a) H₂O flow rate, (b) pressure, and (c) substrate temperature in the NF₃ / H₂O remote plasma dry cleaning.

NF₃ / H₂O 플라즈마를 이용하여 SiO₂의 식각률을 연구한 다른 연구에서도 공정 압력이 증가하고 H₂O의 유량이 감소하였을 때에는 식각률이 감소하고 온도가 감소함에 따라 식각률이 증가하였는데, 본 실험 결과와 유사한 경향성을 보이는 것을 확인할 수 있었다[15]. NF₃ / H₂O 플라즈마를 이용한 건식세정공정은 H₂O가 포함된 응축된 반응층이 형성되어 식각반응이 진행된다고 생각된다. 온도가 낮을수록, 공정 압력이 높을수록, H₂O 유량이 클수록 액상과 유사한 응축 반응층이 잘 형성되고, 응축 반응층의 형성이 용이해질수록 산화막의 식각률이 증가함을 유추할 수 있다.

기준조건(H₂O 유량 1500 sccm, 공정 압력 13 Torr, 온도 13 °C)에서 H₂O의 유량 1300, 1700sccm, 공정 압력 12, 14 Torr,

기판 온도 11, 15°C로 변화를 주면서 Ge 농도가 다른 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x=0.1, 0.2, 0.3$) 시편에 $\text{NF}_3/\text{H}_2\text{O}$ 플라즈마 건식 세정을 진행한 뒤의 표면 상태를 확인하였다(Fig. 6). 모든 실험 조건에서 표면에 돌출부가 형성되었으며, 따라서 표면 거칠기가 세정 전 0.2 nm에서 0.5 ~ 1.5 nm 범위로 증가하였다. 기판 온도나 공정 압력과는 뚜렷한 상관 관계를 보여주지 않았다. 반면 H_2O 유량에 따른 효과는 Ge 농도가 다른 모든 SiGe 시편, 즉 $\text{Si}_{0.9}\text{Ge}_{0.1}$, $\text{Si}_{0.8}\text{Ge}_{0.2}$, $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$ 에서 동일한 경향성을 보였다. Fig. 7에 Ge 농도 및 H_2O 유량 변화에 따른 샘플의 표면 형상 AFM 결과를 비교하였다. 전 조건에서 아일랜드가 형성되었으며, Ge 농도에 관계없이 H_2O 유량이 증가할수록 아일랜드의 크기가 증가하고 개수가 감소하였다. Ge 농도보다는 H_2O 유량 변화에 따른 경향성이 뚜렷함을 확인할 수 있다.

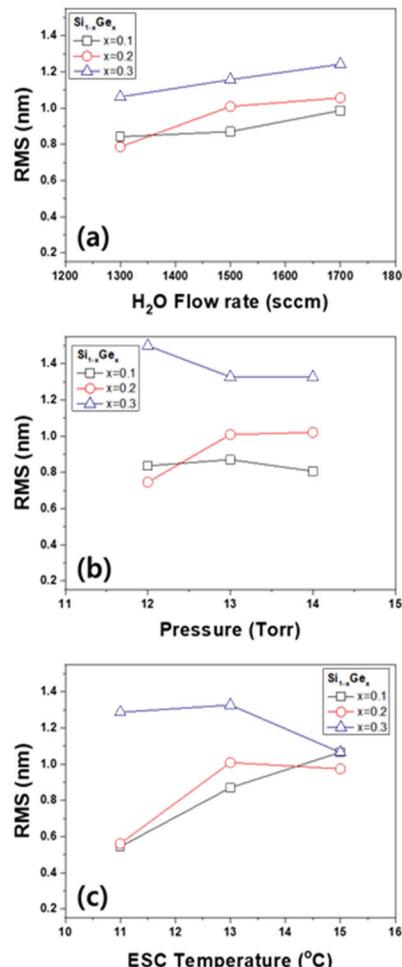


Fig. 6. Surface roughness correlations with (a) H_2O flow rate, (b) pressure, and (c) substrate temperature.

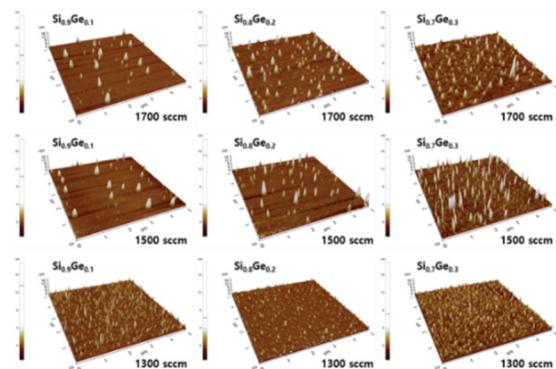


Fig. 7. AFM surface images of $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x=0.1, 0.2, 0.3$) films after dry cleaning at different H_2O flow rates (1300, 1500, 1700 sccm) (scan size : $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$, z scale : 18.8 nm).

Fig. 5, 6, 7의 결과로부터 $\text{NF}_3/\text{H}_2\text{O}$ 플라즈마 건식 세정의 H_2O 유량 조건이 SiGe 표면 아일랜드 형성에 주요 변수로 작용하였으며, SiO_2 식각률에 미치는 공정 조건의 경향성과는 다르게 작용하고 있음을 알 수 있다.

$\text{NF}_3/\text{H}_2\text{O}$ 플라즈마를 활용한 산화막의 식각은 표면에 응축상을 형성한 뒤 중간 생성물(H_2SiF_6)이 형성되는 다음과 같은 반응이 있을 것으로 생각된다[15].

1. $\text{NF}_3 \rightarrow \text{NF}_2^* + \text{F}^*$ (Radical)
2. $2\text{H}_2\text{O} + 4\text{F}^* \rightarrow 4\text{HF} + \text{O}_2$
 $\text{HF} \rightarrow \text{H}^+ + \text{F}^-$
 $\text{F}^- + \text{HF} \rightarrow \text{HF}_2^-$
3. $\text{HF} + 2\text{HF}_2^- + 2\text{H}^+ + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{SiF}_6 + \text{H}_2\text{O}$

SiGe 표면의 아일랜드의 형성이 F를 포함하는 중간생산물의 잔류로 발생하게 되는지를 확인하기 위하여 기준 조건으로 건식 세정을 진행한 $\text{Si}_{0.9}\text{Ge}_{0.1}$, $\text{Si}_{0.8}\text{Ge}_{0.2}$, $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$ 박막 표면의 화학적 조성을 XPS를 이용하여 분석하였다(Fig. 8). 분석 결과, F와 관련된 잔류물은 거의 검출되지 않았으며 이를 통하여 SiGe 표면의 건식 세정 과정에서 형성된 아일랜드는 F 잔여물이 응축되어 형성된 것으로 판단하기는 어렵다고 생각된다.

또 다른 원인으로 건식 세정 과정에서 표면에 Ge이 응축되어 아일랜드가 형성되었는지를 확인하여 위하여, 건식 세정을 진행한 뒤 SiGe 박막의 단면 이미지와 Ge의 깊이 방향으로의 놓도 분포를 분석하였으며 결과는 Fig. 9에 나타내었다. 분석 결과, 표면 및 박막 내부에서의 Ge 농도는 측정 오차 범위 안에서 비슷하였으며 표면에서의 아일랜드의 형성과 Ge의 응축의 관련성을 확인할 수 없었다.

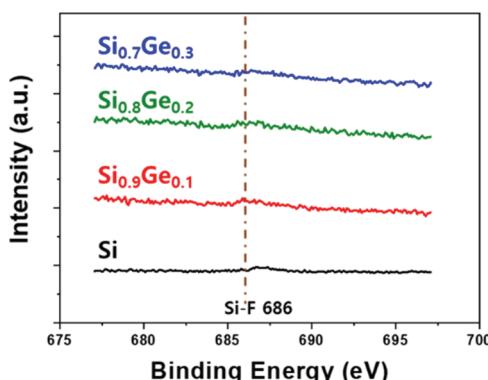


Fig. 8. F 1s XPS spectra of Si_{1-x}Ge_x films after dry cleaning at 13 Torr, 13 °C, H₂O 1500 sccm for 24 sec.

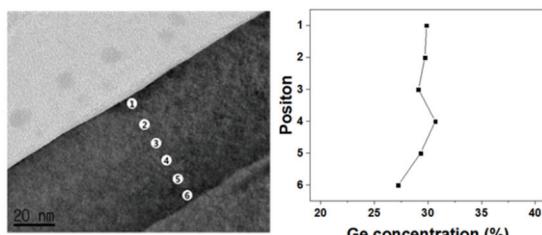


Fig. 9. (a) TEM image and (b) Ge concentration depth profile of Si_{0.7}Ge_{0.3} measured by EDS after dry cleaning at 13 Torr, 13 °C, H₂O 1500 sccm for 24 sec.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 메모리 및 비메모리 반도체 제조 과정에서 많이 쓰이고 있는 Si_{1-x}Ge_x ($x=0.1, 0.2, 0.3$)에피 박막에 NF₃/H₂O 원거리 플라즈마 건식 세정 공정을 진행하고, 공정 압력, 기판 온도, H₂O 유량 조건이 미치는 영향을 조사하였다. Si 기판과 달리 SiGe 필름에서는 Ge의 농도와 관계없이 건식 세정을 진행한 이후 표면에 아일랜드가 형성되어 표면 거칠기가 증가하였다. 표면 특성 열화가 관찰된 SiGe 시편의 XPS 측정 결과로 보아 불소를 포함하는 잔류물의 잔존은 유의미하게 검출되지 않았다. 또한 돌출부가 형성된 Si_{0.7}Ge_{0.3} 시편의 단편 TEM 및 EDS 분석 결과에서도 돌출부가 형성된 표면에서의 Ge 농도 변화는 확인할 수 없었다. HF 습식 세정 및 반응 가스만 흘리며 비교한 결과, 원거리 플라즈마로 여기된 NF₃와 H₂O가 반응하는 건식 세정 공정 중에 SiGe 표면에 아일랜드가 형성되었음을 확인하였다. 건식 세정 이후 SiGe 필름의 표면에 형성된 아일랜드의 크기와 수는 SiGe의 Ge 농도, 공정 압

력, 기판의 온도와는 유의미한 관계를 보여주지 않았으나, H₂O의 유량과는 유의미한 비례 관계를 나타내었다. SiGe 표면 변화는 NF₃/H₂O 건식 세정 공정에서의 SiO₂ 식각과는 다른 경향성을 나타내는 것으로 보아, SiO₂ 식각률의 속도 결정 단계와는 다른 반응 단계에서 기인한, 그러나 Ge 농도보다는 H₂O의 농도에 민감한 반응에 의해 초래되었을 것으로 생각된다. 본 실험 결과로부터 SiGe 표면에 아일랜드가 형성되는 원인은 규명하기 어려웠지만, SiGe 표면 거칠기는 H₂O 유량 조절로 감소시킴으로써 반도체 제조 공정에 식각을 변화 없이 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 본 실험을 통하여 건식 세정 연구에 있어서 SiGe 표면 변화 연구는 반드시 병행되어야 할 영구 항목임을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 정부의 재원으로 전자정보디바이스산업 원천기술개발사업(반도체) (과제번호 10043438) 및 한국연구재단의 기초연구사업(과제번호 NRF-2017R1A2B2004986)의 지원을 받아 수행되었다.

참고문헌

- D.-H. Shin, et al., "Improvement in Capacitor Characteristics of Titanium Dioxide Film with Surface Plasma Treatment," Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 18, No. 1, pp. 32-37, 2019.
- W. Li, et al., "Vertical P-TFET With a P-Type SiGe Pocket", IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, VOL. 67, NO. 4, pp.1480-1484, 2020.
- Z.-H. Li, et al., "Performance Improvement by Blanket Boron Implant in the Sigma-Shaped Trench Before the Embedded SiGe Source/Drain Formation for 28-nm PMOSFET", IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS, VOL. 41, NO. 6, pp.796-799, 2020.
- B. M. Haugerud, et al., "Mechanically induced strain enhancement of metal oxide semiconductor field effect transistors", Journal of Applied Physics, Vol. 94, pp. 4102-4107, 2003.
- Kah-Wee Ang, et al., "Beneath The Channel Strain Transfer Structure (STS) and Embedded Source/Drain Stressors for Strain and Performance Enhancement of Nanoscale MOSFETs", 2007 IEEE Symposium on VLSI Technology, pp. 42-43, 2007.
- M.L. Lee et al., "Strained Si, SiGe, and Ge channels for high-mobility metal-oxide-semiconductor field-effect transistors", Journal of Applied Physics, Vol. 97, 011101, 2004.

7. M.D.Giles, et al., "Understanding Stress Enhanced Performance in Intel 90nm CMOS Technology", 2004 Symposium on VLSI Technology Digest of Technical Papers, pp. 118-119, 2004.
8. T. Tanaka, et al., "Mechanism of Resist Pattern Collapse during Development Process", Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 32, pp. 6059-6064, 1993.
9. X. Xu, et al., "Wetting Challenges in Cleaning of High Aspect Ratio Nano-Structures", Solid State Phenomena, Vol.195, pp. 235-238, 2013.
10. J. Shoeb, et al., "Damage by radicals and photons during plasma cleaning of porous low-k SiOCH. I.Ar/O₂ and He/H₂ plasmas" Journal of Vacuum Science & Technology A, Vol. 30, 041303, 2012.
11. J.W. Park, et al., "In situ dry cleaning of Si wafer using OF₂ / NH₃ remote plasma with low global warming potential", Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 51, 445201, 2018.
12. M.S. Lee, et al., "Removal of Interfacial Layer in HfO₂ Gate Stack by Post-Gate Cleaning Using NF₃/NH₃ Dry Cleaning Technique", Solid State Phenomena, Vol. 219, pp. 11-15, 2015.
13. S. Park, et al., "SiGe surface morphogenesis during dry cleaning with NF₃/H₂O plasma", 2019 Electron Devices Technology and Manufacturing Conference (EDTM), pp. 348-350, 2019.
14. H. Ogawa, et al., "Dry Cleaning Technology for Removal of Silicon Native Oxide Employing Hot NH₃/NF₃ Exposure", Japanes Journal of Applied Physics, Vol. 41, pp. 5349-5358, 2002.
15. S. Kang, et al., "Study on the Etching Selectivity of Oxide Films in Dry Cleaning Process with NF₃ and H₂O", Solid State Phenomena, Vol. 255, pp. 86-90, 2016.

접수일: 2020년 6월 3일, 심사일: 2020년 6월 11일,
제재확정일: 2020년 6월 18일