

트렌치 식각시 식각 방지막의 형성과 이들이 결함 생성에 미치는 영향

이주욱 · 김상기* · 김종대* · 구진근* · 이정용 · 남기수*

한국과학기술원 재료공학과
*한국전자통신연구원 반도체연구단

Formation of Passivation Layer and Its Effect on the Defect Generation during Trench Etching

Ju-Wook Lee, Sang-Gi Kim*, Jongdae Kim*, Jin-Gun Koo*, Jeong-Yong Lee and Kee-Soo Nam*

Department of Materials Science and Engineering, KAIST, Taejeon 305-701

*Semiconductor Technology Division, ETRI, Taejeon 305-600

(1998년 3월 9일 받음, 1998년 5월 14일 최종수정본 받음)

초 록 HBr을 이용한 트렌치 식각시 식각 방지막의 형성과 이들이 결함 생성 및 분포에 미치는 영향을 고분해능 투과전자현미경을 이용하여 연구하였다. O₂ 및 다른 첨가 가스로 SiO₂F₂, SiO₂Br, 등의 식각 방지막을 표면에 형성시켜 벽면 undercut을 방지하고 표면의 거칠기를 감소할 수 있었으며, 이후의 트렌치 채움 공정에서 void가 없는 잘 채워진 구조를 얻을 수 있었다. 형성된 식각 방지막은 격자 결함의 생성 및 이들의 분포에 영향을 미쳤다. 대부분의 식각 유도 결함들은 트렌치 바닥의 가장자리에서 10 Å 이내의 깊이로 분포하였으며, 잔류막의 두께에 의존하였다. 두꺼운 잔류막층 아래로는 결함들이 거의 사라졌으며, 결함층의 깊이와 잔류막 두께는 대체로 반비례하는 것으로 나타났다. 기판 내에 존재하는 결정학적인 결함들은 식각중의 입사각이나 에너지에 의존하는 반면에, 식각된 표면에서 관찰되는 결함들은 트렌치 식각동안 형성되는 이러한 잔류막의 두께에 크게 의존하는 것으로 나타났다.

Abstract A well-shaped trench was investigated in view of the defect distribution along trench sidewall and bottom using high resolution transmission electron microscopy. The trench was formed by HBr plasma and additive gases in magnetically enhanced reactive ion etching system. Adding O₂ and other additive gases into HBr plasma makes it possible to eliminate sidewall undercut and lower surface roughness by forming the passivation layer of lateral etching, resulted in the well filled trench with oxide and polysilicon by subsequent deposition. The passivation layer of lateral etching was mainly composed of SiO₂F₂, SiO₂Br, confirmed by chemical analysis. It also affects the generation and distribution of lattice defects. Most of etch induced defects were found in the edge region of the trench bottom within the depth of 10 Å. They are generally decreased with the thickness of residue layer and almost disappeared below the uniformly thick residue layer. While the formation of crystalline defects in silicon substrate mainly depends on the incident angle and energy of etch species, the region of surface defects on the thickness of residue layer formed during trench etching.

1. 서 론

반응성 이온 식각 (reactive ion etching, RIE)은 현재 실리콘을 기본으로 하는 반도체 미세소자 제조공정에서 폭넓게 이용되고 있으며, 여러 재료에 대한 식각 기술의 개발이 요구되고 있는 중요한 플라즈마 공정이다. 미세선폭을 갖는 형상 전이 (pattern transfer)를 위해서는 플라즈마종의 화학반응 뿐만 아니라 물리적인 식각 효과를 이용하여야 한다. 한 예로 트렌치 형성을 위한 건식식각 공정의 개발은 마이크론 이하의 제조기술에 대한 요구가 커짐에 따라 차세대 DRAM용 소자격리나 커패시터 등에 이용하기 위해 활발히 연구되고 있다. 소자격리 공정으로 지금까지 이용되어 왔던 국부실리콘산화 (LOCAL Oxidation of Silicon, LOCOS) 방법의 한계로 인해, 이를 대체하여 이용될 것으로 기대되는 트렌치 격리공정은 트렌치 형성을 위한 건식식각시 발생하는 격자결함 및 잔류막 등이 구동 영역에

존재하는 소자들간의 전기적 특성 열화를 유발하는 문제점이 있다. 또한 횡방향 식각으로 인한 마스크 아래 영역의 undercut이 이후의 채움 공정에서 완전한 채움을 어렵게 하여 이를 개선하기 위한 연구가 활발하다.

트렌치 식각의 마스크로는 감광막이나 질화막에 비해 기판으로의 응력 유발이 적고 증착이나 형성이 용이한 산화막이 폭넓게 이용되고 있다. 반응성 이온 식각에 이용되는 가스로는 실리콘과 산화막의 선택비를 조절하여 식각할 수 있는 CF₄, CHF₃, CHF₂, SF₆, Cl₂, HBr 등의 할로젠족 가스들이 있다.¹⁾ 이들 할로젠족 가스를 이용할 경우 트렌치 벽면층에 횡방향 식각의 방지막을 형성함으로써 방향성 식각이 가능하다.²⁾ 그러나 C-F계 플라즈마의 경우 식각후 표면에 남아 제거되지 않는 잔류물들이 이후의 공정에서 누설 전류의 원인으로 작용한다.³⁻⁵⁾ 따라서 F계 가스에 비해 화학반응성이 적은 Cl계나 Br계 가스를 이용한 방향성 식각 공정에 대한 관심이 커지고 있다.⁶⁾ 특히 HBr 가스의 경우

산화막 마스크에 대한 선택비가 좋고 undercut이 없는 방향성 식각 프로파일을 얻는데 더 유리한 것으로 보고되고 있다.^{7~9} 최근에는 식각속도의 저하나 트렌치 구조에 기인한 결합 생성 등과 같은 HBr 식각의 단점을 개선하기 위해 HBr/Cl₂ chemistry를 이용한 고밀도 플라즈마 식각기술에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다.^{10,11)}

반응성 이온 식각중 높은 에너지를 갖는 이온들의 충돌에 의해 식각된 표면에는 심각한 격자손상이 발생하여 이후의 공정에서 산화막 파괴 (oxide breakdown)의 원인이 된다. 기존의 반응성 이온 식각에 비해 자제를 이용하여 낮은 압력에서 높은 이온 flux를 제공하는 magnetically enhanced reactive ion etching (MERIE)의 경우, 반응성 이온이 상대적으로 낮은 에너지를 갖기 때문에 격자손상을 감소시킬 수 있으며 산화막의 식각속도를 크게 할 수 있다.^{12~16)} 그러나 지금까지 트렌치 식각에 따른 각 영역에서의 격자결합의 발생 및 분포, 생성기구 등에 대한 자세한 연구가 이루어지지 않았으며, 대부분 미세구조의 관찰없이 공정결과에 대한 보고만 되어 있어 고분해능 투과전자현미경 등을 이용한 원자 단위의 결합 관찰 및 생성기구에 대한 규명이 필요하다.

본 연구에서는 새로운 식각가스 조합을 이용하여 횡방향 식각 특성을 제어하고, 표면 거칠기 개선 및 결합 감소를 위한 트렌치 식각조건을 제시하였다. 식각된 표면 근처에 발생하는 격자결합들의 미세구조를 고분해능 투과전자현미경을 이용하여 관찰하고, 이들 결합의 생성 원인을 표면에 형성되는 잔류막과 연관지어 설명하였다.

2. 실험 방법

본 실험에서는 개선된 식각공정을 제시하기 위하여 트렌치 식각공정시 횡방향 식각을 제어하고 방향성 식각에 유리할 것으로 기대되는 HBr 플라즈마를 이용하여 건식식각을 수행하였고, O₂, SiF₄, CF₄ 등 미량 첨가가스의 유량을 조절하여 이들이 횡방향 식각에 미치는 영향에 대하여 연구하였다.

트렌치 형성을 위한 실리콘의 건식식각을 위해 다음과 같은 과정으로 실험하였다. 건식식각전 웨이퍼 표면의 세정을 위해 (001) p형 실리콘 웨이퍼를 표준세정 (standard cleaning)을 통하여 표면의 잔류산화막 등을 제거하였다. 세정된 웨이퍼 위에 트렌치 식각을 위한 식각 방지막으로 0.5μm 정도의 TEOS 산화막을 저압화학증착법으로 증착하였으며, 여기에 감광막을 입힌 후, 트렌치 식각을 위한 패턴을 1μm의 폭으로 제조하였다.

TEOS 산화막의 건식식각후 P-5000 MERIE 장치에서 HBr 식각가스 및 O₂, SiF₄, CF₄ 등의 첨가가스를 이용하여 건식식각한 후, 일부 시편에 대해서는 산화막 strip후 식각 특성을 분석하였다. 건식식각시 챔버 압력은 125 mtorr, 전극 온도는 20℃, 자제는 30 Gauss로 유지하였으며 식각 가스 유량비와 플라즈마의 RF power를 200W ~ 600W 영역에서 변화시켜 2~10분 동안 공정을 하였다. 이들 식각조건을 간략히 나타내면 표 1과 같다.

Table 1. Process conditions of trench formation for magnetically enhanced reactive ion etching of silicon using HBr plasma and additive gases.

Substrate	(001) p type Si
Etch mask	TEOS oxide
Trench opening	1μm
Etch gas	HBr
Additive gases	O ₂ , CF ₄ , SiF ₄
RF power	200~600W
Magnetic field	30Gauss
Pressure	125mtorr
Etch rate	7000~9000 Å/min
Etch time	120~600sec

식각된 시편의 표면형상 관찰 및 표면성분, 잔류물 분석을 위해서 식각 방지막이 없는 실리콘 웨이퍼를 위와 동일한 조건으로 30초동안 건식식각한 후 곧바로 X-선 광전자 분석을 수행하였으며, AFM을 이용하여 표면형상을 관찰하였다. 식각 프로파일 관찰을 위해서는 주사전자현미경을 이용하였으며, 트렌치 벽면층과 바닥층에 존재하는 결합의 원자단위 관찰을 위해 200 kV의 가속전압을 갖는 JEOL사의 JEM 2000EX 고분해능 투과전자현미경을 이용하였다. 그림 1에 트렌치 식각을 위한 공정과 분석 과정을 나타내었다.

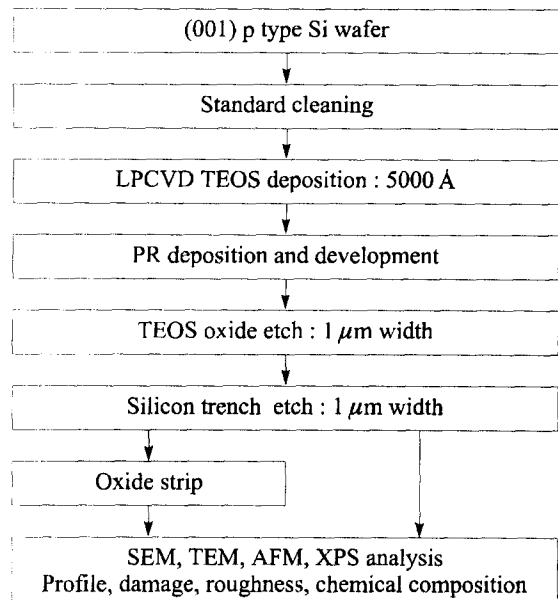


Fig. 1. Process flow of trench etching in MERIE and analysis.

3. 결과 및 고찰

1. 잔류막의 형성 및 표면 거칠기 변화

벽면층이나 바닥층에 형성, 또는 증착되는 식각 방지막은 F-계의 식각가스가 아닐 경우 산화막 계열의 횡방향 식각 방지 효과가 가장 유리한 것으로 알려져 있다. 마스크로서 산화막을 이용하였을 때 마스크 식각 및 표면층 흡착에 의한 것이나, 산소종 또는 다른 source가 존재할 때 산화막이

표면층에 얇게 형성됨으로써 식각 방지가 가능하다. 잔류막을 구성하는 이러한 산화막은 F나 Br 등의 성분이 첨가되어 있는 할로젠화된 산화막이다.²⁾ 본 실험에서는 횡방향 식각의 제어를 위해 트렌치 벽면층에 얇은 식각 방지막의 형성을 돕는 O₂ 가스를 첨가하였으며, 식각 마스크로서 저압 화학증착된 산화막을 이용함으로써 산화막 strip 후 표면 평탄도를 양호하게 유지할 수 있었다. 또한 F-계열의 가스로서 SiF₄, CF₄ 등을 첨가함으로써 이들로 인한 식각속도 및 화학반응성의 변화가 벽면층의 식각 제어에 미치는 영향을 고찰하였다.

그림 2는 600 W의 RF power 조건에서 HBr을 주요 식각가스로 하고 O₂, SiF₄, CF₄를 모두 첨가하여 120초동안 전식식각하였을 때 형성된 트렌치 코너 부근을 고분해능 투과전자현미경을 이용하여 관찰한 사진이다. 마스크 산화막을 벗겨내지 않은 상태에서 주사전자현미경으로 관찰한 식각 프로파일을 그림 2의 우측상단에 나타내었는데, 여기에서 마스크 산화막 아래의 횡방향 식각이 일어났음을 알 수 있다. 횡방향 식각이 가장 심하게 관찰된 지점이 대체로 트렌치의 하부 영역에 가까운 곳으로 나타났는데 이는 식각 종료시 방향성을 잃은 이온들의 등방성 식각 효과가 커지기 때문인 것으로 생각된다. 같은 식각조건으로 깊은 트렌치 형성을 위해 식각시간을 길게 하면 횡방향 식각이 크게 나타났던 조건에서는 벽면층이 (001) 표면에 대해 90°로부터 양의 각을 갖기가 어려웠다. 반면에 횡방향 식각이 거의 없던 조건에서는 양의 각을 갖는, 즉 이후의 산화막과 다결정실리콘의 복합층을 채우기 용이한 트렌치 구조가 만들어진다.

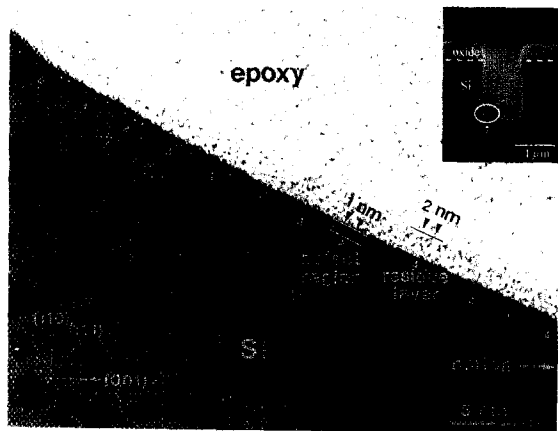


Fig. 2. High resolution transmission electron micrograph of the trench corner marked with a white circle in the upper right SEM photograph having sidewall undercut trench profile. Etch condition : HBr/O₂/SiF₄/CF₄, 600W RF power, 120 sec etching.

식각 프로파일 사진에서 백색원으로 표시된 부근을 [110] 투과빔을 이용하여 원자단위로 관찰하였다. 실리콘의 격자 이미지가 관찰되며, 표면층에서는 에폭시와 실리콘층의 사이에 두 영역을 구분하면서 잔류막층이 약 20 Å 정도 형성되어 있음을 콘트라스트 차이로써 알 수 있다. 이러한 잔류막층은 식각이 완료된 후 바닥 영역에서는 대체로 균일한

두께로 존재하고 코너에서 벽면층으로 가면서 감소하는 것으로 관찰되었다. 즉, 마스크 산화막 erosion에 의한 표면층으로의 산화막 흡착이나 O₂ 첨가로 인한 산화막의 형성이 트렌치 바닥 영역에서 주로 일어남을 알 수 있다. 벽면층이나 코너 영역에서는 극히 얇은 산화막으로 이루어진 식각 보호막이 형성됨을 확인할 수 있었다.

잔류막층 아래로는 사진상에서 백색 화살촉으로 표시되어 있는, 10 Å 이하의 두께를 갖는 결합층이 역시 균일하게 존재함을 알 수 있다. 잔류막층의 두께와 결합층의 깊이는 대체로 반비례하는 것으로 확인되었다. 이는 잔류막층이 존재함으로써 결합 생성이 억제되는 효과가 있음을 의미한다. 고분해능상을 이용해서 관찰한 실리콘과 잔류막층의 계면에서 표면 거칠기는 약 1~2 원자층으로 확인되었다. 잔류막층이 균일하게 존재하는 영역에서는 계면에서의 표면 거칠기도 낮게 나타나 표면층의 평탄도가 양호하였다. 또한 잔류막의 분포 상태에 따라 식각 프로파일의 모양이 크게 달라지는 것을 확인하였다.

동일한 식각조건에서 패턴이 없는 웨이퍼를 전식식각 및 세정한 후 표면의 거칠기를 AFM을 이용하여 관찰한 결과를 그림 3에 나타내었다. 그림 3(a)는 식각 전의 표면 거칠기를 관찰한 것으로 높이 프로파일상에서 최고 높이차 (peak to valley)는 5.5 Å이며, root mean square (RMS) 거칠기는 0.8 Å이었다. 그림 3(b)는 그림 2와 같은 조건으로 식각한 후의 표면 거칠기 결과로, 최고 높이차 15 Å, RMS 거칠기 3.3 Å로 변화되었다. 식각후 표면 거칠기가 약 3~4배 증가하였음을 확인할 수 있으며, 이 값은 그림 2에서 설명한 고분해능 관찰결과와 거의 비슷하다. 식각후 표면 거칠기에 대해 보고된 논문에 의하면 RMS 거칠기는 수십~수백 Å이었으나¹⁷⁾ 본 실험의 HBr/O₂/SiF₄/CF₄ chemistry의 경우에는 보고된 값보다 훨씬 작은 5 Å 이하로 표면 거칠기를 감소시킬 수 있었다.

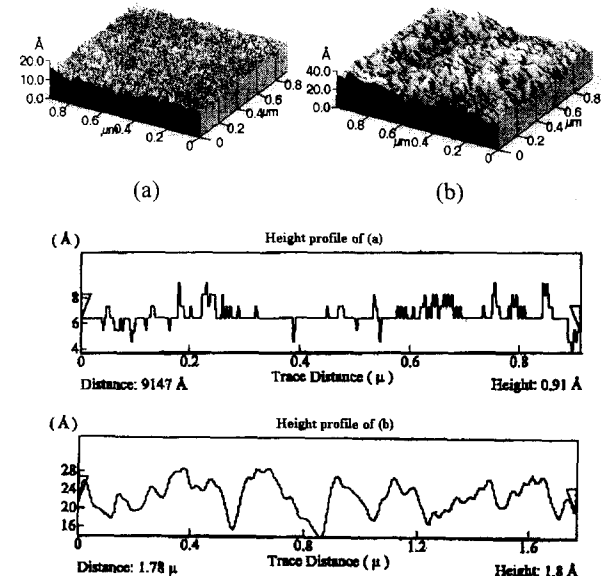


Fig. 3. Change of surface roughness and height profile. (a) before etch, (b) HBr/O₂/CF₄/SiF₄, 600W RF power, 120 sec etching.

플라즈마의 RF power 변화에 따른 잔류막 형성 및 결함 밀도의 변화를 관찰하기 위하여 RF power를 200 W로 변화시켜 식각하였을 때의 표면 상태를 관찰한 결과를 그림 4에 나타내었다. 식각된 실리콘 표면 위로 잔류막층이 약 150 Å 정도로 관찰되었으며 이 두께는 균일하게 분포하는 것으로 나타났다. 잔류막 두께의 증가는 우선 식각종들의 표면 흡착으로 인한 증착 효과가 큰 원인이라 생각되며, 표면에 형성되는 얇은 산화막들이 이온들에 의해 스퍼터링되는 효과가 power 감소에 의해 크게 떨어지기 때문이라 생각된다. 잔류막 두께의 증가는 광흡수 (extinction) 계수가 power 감소시 급격히 증가하는 것으로도 확인할 수 있다. X-선 광전자분석 결과 이들 잔류막들은 주로 Br, F 등이 미량 첨가된 SiO₂F₂, SiO₂Br₂ 등의 할로겐화된 산화막 계열인 것으로 나타났다.

잔류막층이 두껍게 존재하는 경우의 결함분포를 살펴보면 잔류막층이 얇을 때 표면 아래의 일정 깊이에서 관찰되는 결함띠가 형성되기 보다는 {111}이나 {311} 면을 따라 주로 놓여있는 결정학적인 적층결함 형성 이전의 단계인 것으로 관찰되었다.¹⁸⁾ 사진상에서 A, B, C로 표기한 결함들은 표면 안쪽의 결함들로 주로 {111}이나 {311} 면상에서 격자들의 뒤틀림 현상이 관찰된 것이며, 반면에 D, E로 표기한 결함들은 표면에서부터 확장해간 결함들로 거칠기가 심한 영역에서 발생한 결함들이다. 결함들의 깊이는 대체로 100 Å 이하이며 이들 결함은 거칠기가 심한 영역 등에서 국부적으로 분포함을 알 수 있다.

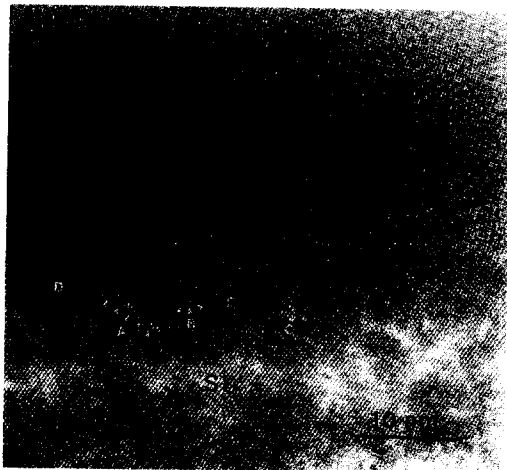


Fig. 4. HRTEM micrograph of residue layer and microstructural defects under the etched surface at low RF power condition.

Etch condition : HBr/O₂/SiF₄, 200W RF power, 120 sec etching.

2. 트렌치 식각에 따른 결함 분포

그림 5는 트렌치 바닥 영역에 가까운 코너 부근의 고분해능 투과전자현미경 관찰결과로써 이 영역에서는 잔류막층의 두께가 약 23 Å 정도로 균일하게 존재함을 알 수 있다. 화살촉으로 표시된 결함층의 두께는 7~8 Å 정도로 잔류막층의 두께가 증가하였을 때에 그 깊이가 약간씩 감소되는 것을 확인할 수 있다. 결함 생성 에너지 이상의 충돌 에너지를 갖는 이온화된 Br이나 F 등이 실리콘 기판으로 충돌할 때 잔류막에 의한 에너지 흡수가 일어나며 이는 잔류막층이 두꺼울수록 커질 것이다. 이와 같은 이유로 인해 잔류막층의 두께에 의존한 결함 분포가 나타난다.

결함층을 자세히 관찰해 보면 표면으로부터 일정한 깊이에서 심한 격자 뒤틀림에 의한 비정질화가 일어난 영역이 존재함을 알 수 있다. 이온화된 식각종들이 가지고 있는 충돌 에너지가 위의 영역에서 가장 크게 흡수되므로 표면 아래의 일정 깊이에서 이러한 비정질화된 영역이 존재하게 된다. 균일한 잔류막층이 존재하는 표면 아래에서는 이러한 비정질화된 영역이 표면으로부터 일정 영역에 존재하므로 결함띠가 생성되어 있는 것처럼 보인다. 이 영역의 상단에는 식각된 표면에서의 실리콘의 끊어진 결합과 충돌 에너지 흡수에 의한 격자 뒤틀림 영역으로 이루어져 있으며 격자에 변형 콘트라스트 (strain contrast)가 존재한다. 잔류막층이 존재하는 경우의 이와 같은 결함띠의 생성은 식각반응의 조절을 통한 결함제거보다는 식각후 희생산화 등을 이용하여 표면으로부터의 일정 영역을 제거하는 것이 유리할 것으로 생각된다.

그림 5의 경우와 달리 가시적인 잔류막층이 뚜렷이 관찰되지 않는 코너 영역의 고분해능 투과전자현미경 결과를 그림 6에 나타내었다. 트렌치 벽면층에 가까운 코너 영역에서는 erosion으로 인한 산화막 증착이나 O₂ 첨가로 인한 표면 산화막 형성이 식각 깊이가 깊어질수록 어려워 식각된 표면 위로 잔류막이 거의 남아있지 않음을 알 수 있다. 이러한 영역은 그림 2의 식각 프로파일상에서 횡방향 식각이 최고로 일어난 지점의 하단부를 나타내므로 횡방향 식각은 식각 방지막이 충분히 형성되지 않았을 때 일어남을 알 수 있다. 또한 등방성 식각 특성을 나타내는 이와 같은 영역에서 잔류막이 거의 관찰되지 않는 것으로 보아 잔류막의 생성이 화학반응이 활발한 영역일수록 어려움을 확인할 수 있다. 잔류막의 두께 변화를 살펴보면 트렌치 바닥 영역에 균일한 잔류막이 존재하다가 코너 영역에서 점차 그 두께가 감소하고 벽면층

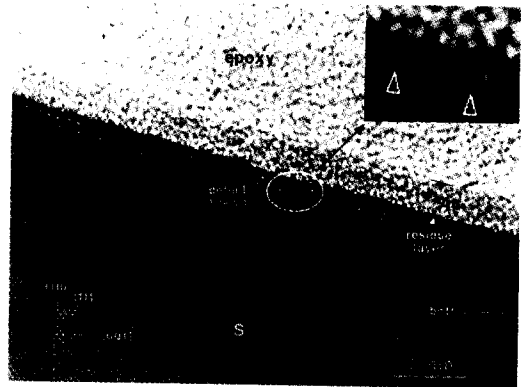


Fig. 5. HRTEM micrograph of the bottom to corner transition region uniformly covered with residue layer. Defect region marked with open triangles was observed below the 2.3 nm thick residue layer.

잔류막층이 표면 위에 균일하게 덮여있는 그림 5의 경우와 달리 가시적인 잔류막층이 뚜렷이 관찰되지 않는 코너 영역의 고분해능 투과전자현미경 결과를 그림 6에 나타내었다. 트렌치 벽면층에 가까운 코너 영역에서는 erosion으로 인한 산화막 증착이나 O₂ 첨가로 인한 표면 산화막 형성이 식각 깊이가 깊어질수록 어려워 식각된 표면 위로 잔류막이 거의 남아있지 않음을 알 수 있다. 이러한 영역은 그림 2의 식각 프로파일상에서 횡방향 식각이 최고로 일어난 지점의 하단부를 나타내므로 횡방향 식각은 식각 방지막이 충분히 형성되지 않았을 때 일어남을 알 수 있다. 또한 등방성 식각 특성을 나타내는 이와 같은 영역에서 잔류막이 거의 관찰되지 않는 것으로 보아 잔류막의 생성이 화학반응이 활발한 영역일수록 어려움을 확인할 수 있다. 잔류막의 두께 변화를 살펴보면 트렌치 바닥 영역에 균일한 잔류막이 존재하다가 코너 영역에서 점차 그 두께가 감소하고 벽면층

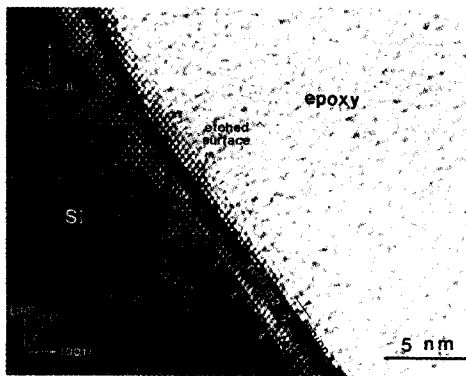


Fig. 6. HRTEM micrograph of sidewall to corner transition region not covered with residue layer (sidewall undercutting region). Thickness of defect layer and the surface roughness were increased, because of the absence of residue layer.

에 가까운 영역에서 잔류막이 거의 사라지는 것으로 나타났다.

잔류막층이 거의 없고 이온화된 식각종들에 그대로 노출되는 이러한 코너 영역에서는 그림 6에서 알 수 있듯이 결합층의 깊이가 상당히 커졌음을 알 수 있다. 결합층 깊이가 증가의 원인은 잔류막에 의한 이온화된 식각종의 충돌 에너지 흡수가 거의 없어 이온들이 가지고 있는 충돌 에너지의 대부분을 실리콘 격자 영역이 흡수하기 때문인 것으로 생각된다. 식각에 기여하는 이온들이 (001) 면에 수직입사한다고 가정하면 바닥 영역에 가까울수록 충돌 에너지의 격자로의 전이가 클 것이다. 그림 6에서 보면 충돌 에너지의 흡수가 가장 크게 일어나는 비정질 영역의 폭이 바닥 영역으로 갈수록 커지고 있음을 알 수 있다. 그림상에서 세가지 영역으로 표기한 결합 영역의 깊이는 약 20~25 Å 정도로 그림 5의 잔류막 존재시의 결합생성 깊이보다 약 3배 정도 커졌다.

결합 생성 깊이의 증가와 함께 결합이 존재하는 영역 또한 크게 세가지로 구분할 수 있다. 그림 5에서 설명한 충돌 에너지의 대부분이 흡수되면서 발생하는 표면층으로부터 일정 깊이 아래의 비정질화된 영역과 상단의 격자 뒤틀림 영역 및 비정질 영역 하단의 격자 뒤틀림 영역 등 세가지 영역으로 구분할 수 있다. 일반적으로는 트렌치 식각시 코너 부근에 결합이 집중적으로 분포하는 원인에 대해 트렌치 모양으로 인한 응력 유발이 주원인이라 알려져 있다. 응력 유발로 인해 면밀도가 가장 높은 {111} 면을 따라 트렌치 코너 영역에서 결합이 집중된다는 것이다.^{19,20} 격자결합 발생의 이러한 측면 이외에도 곡면화된 코너 영역에서의 결합 발생은 본 실험 결과에서 알 수 있듯이 잔류막의 결합 생성 억제 효과가 적기 때문인 것으로 생각된다. 각 영역에 따른 결합층 깊이의 변화는 충돌 에너지를 갖는 이온의 입사각도 변화에 기인한다. 고분해능 관찰상에서 보이는 식각 표면의 거칠기는 약 3~4 원자층 수준으로 역시 잔류막이 존재할 때보다 크게 증가하였음을 알 수 있다.

트렌치 벽면층에서의 결합 분포에 대한 고분해능 관찰 결과를 그림 7에 나타내었다. 벽면층에서 식각된 표면의 거칠

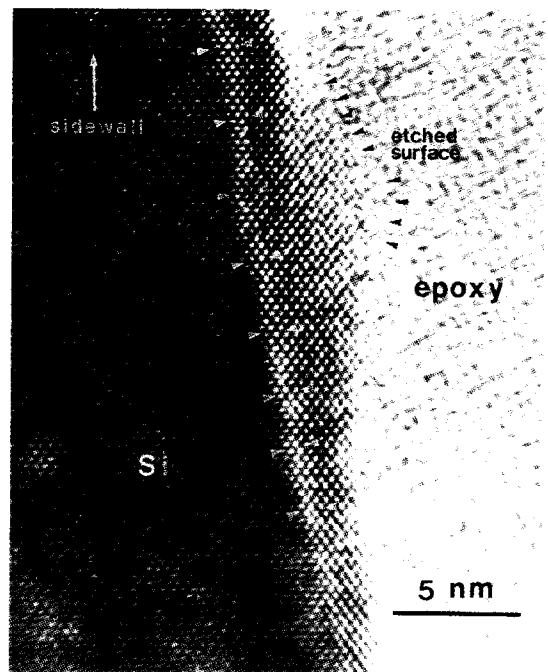


Fig. 7. HRTEM micrograph of the trench sidewall region. White marked triangles indicate the region having the state before defect formation.

기가 심한 부분을 고분해능 투과전자현미경으로 관찰하였다. 검은 화살촉으로 표시된 식각된 표면의 거칠기는 약 5~10 원자층 수준으로 잔류막이 존재하는 바닥층이나 코너 영역보다 상대적으로 상당히 큰 값을 나타내었다. 표면 위의 잔류막은 균일하게 존재하지 않고 국부적으로 존재하는 것으로 관찰되었다. 대체로 잔류막이 관찰되는 영역에서의 표면 거칠기는 심하지 않았으나 잔류막이 존재하지 않을 때는 표면 거칠기가 심한 것으로 나타났다.

벽면층의 표면 안쪽에 존재하는 결합 분포를 살펴보면 바닥층이나 코너에서 보이는 결합 띠는 관찰되지 않으며, 격자 뒤틀림에 의해 변형 콘트라스트가 관찰되는 영역이 백색 화살촉으로 표시한 것처럼 20~50 Å의 일정 깊이에서 관찰된다. 잔류막이 존재하지 않는 벽면층에는 수직으로 입사하는 이온들이 거의 없어 실리콘 격자로의 충돌 에너지 전이가 크게 일어나지 않기 때문에 벽면층에서는 결합이 크게 발생하지 않고 이러한 격자 뒤틀림만이 존재하는 것으로 생각된다. 그러나 표면거칠기는 잔류막층이 존재하는 바닥 부근이나 코너 영역에 비해 훨씬 큰 것으로 나타났다. 벽면층에서는 바닥층과 같이 이온의 균등한 입사없이 입사 산란에 의한 임의 방향의 이온들이 국부적으로 충돌하므로 표면에서의 거칠기는 오히려 커진 것으로 생각된다.

실제 실리콘 격자의 표면 거칠기와 AFM 등으로 측정된 표면 거칠기는 잔류막이 표면 거칠기에 기여하는 성분이 있으므로 약간의 차이가 있을 것으로 생각된다. 식각된 실리콘 표면의 거칠기를 고분해능 관찰 결과로 확인해 보면 바닥층이나 코너에서보다 벽면층이 훨씬 더 큼을 알 수 있다. 트렌치 격리시 이러한 벽면층에서의 표면 거칠기가 트렌치

Table 2. Analysis result of defect distribution along the trench sidewall and bottom.

	Bottom	Bottom to corner	Sidewall to corner	Sidewall
Residue	uniform thickness	decrease	thin or less	thin or less
Defect Region 1	○	○	○	○
Defect Region 2	○	○	○	×
Defect Region 3	×	○	○	×
Single defect	uniformly distributed	none	none	none
Roughness	medium	uniform surface	uniform surface	severe
High-strained lattice	×	○	○	×

격리를 가로지르는 누설전류의 가장 큰 원인이 될 것이라 생각된다.

표 2는 트렌치 각 영역에서의 잔류막 형성 및 결합 발생에 관한 결과를 요약한 것이다. 잔류막의 형성은 주로 바닥층에서 일어나며 벽면층에서는 잔류막이 아주 얇게 형성되는 것으로 확인되었다. 각 영역에서의 결합층의 깊이는 대체로 잔류막의 두께에 반비례하여 증가하였으며 표면의 거칠기는 트렌치 벽면층에서 가장 큰 값을 나타내었다. 또한 잔류막이 균일하게 형성된 바닥층의 경우 표면에 밀집된 결합 때 보다는 단일 결합들이 {111}, {311}과 같은 결정학적인 조밀면을 따라 발생하는 양상을 나타내었다.

3. 벽면 기울기 제어시의 결합 분포

횡방향 식각으로 인한 undercut이나 트렌치 벽면층의 기울기가 양의 각을 갖지 못할 때 트렌치 채움 공정에서 void가 발생한다. 본 실험에서는 첨가 가스의 유량비를 조절하여 이후의 공정에서 void의 형성이 없는, 양의 각을 갖는 트렌치 격리 구조를 구현할 수 있었다. 그림 8은 O₂와 SiF₄ 첨가 가스의 유량비를 조절하여 식각한 트렌치 구조로, 곡면화된 트렌치 코너영역을 얻은 결과를 보여준다. 산화막 마스크를 제거한 후 관찰한 것이다. 앞의 그림 6에서와 같

이 잔류막이 충분히 형성되지 않을 때 트렌치 벽면의 하단부에 횡방향 식각으로 인한 undercut이 관찰되는데 O₂나 SiF₄와 같은 첨가 가스의 유량비를 증가하여 제거할 수 있었다. 잔류막 형성이 코너 영역에서 균일하게 일어나 이들이 횡방향 식각을 방지하는 역할을 한다.

곡면화된 코너 영역에서의 원자 구조를 고분해능 투과전자현미경으로 관찰하였으며 그림 9에 나타내었다. 산화막 제거를 하지 않고 관찰한 것이다. 잔류막층의 두께가 약 5 정도 증가하였으며 코너 영역에서 균일하게 분포하는 것으로 확인되었다. 두꺼워진 이 층 아래로 결합들이 거의 제거되었으며, 화살촉으로 표시한 일부 결합층이 undercut이 일어난 경우보다 깊이가 감소하여 일부 영역에서 관찰되었다. 잔류막층의 두께가 표면에 충돌하는 식각종들의 에너지를 크게 완화하여 결합 생성이 억제된 것으로 생각된다. 결정학적인 방향성을 가지고 있는 결합들은 생성되지 않았으며 주로 표면에서의 식각 반응에 따른 결합들만 관찰되었다.

벽면층에서 원자 단위로 관찰한 결과는 그림 10에 나타내었다. 결합들은 존재하지 않으며 표면의 거칠기는 앞의 경우와 비슷한 것으로 나타났다. 역시 가시적인 잔류막층으로 보이는 것은 관찰되지 않았으며 거칠기만 바닥이나 코너

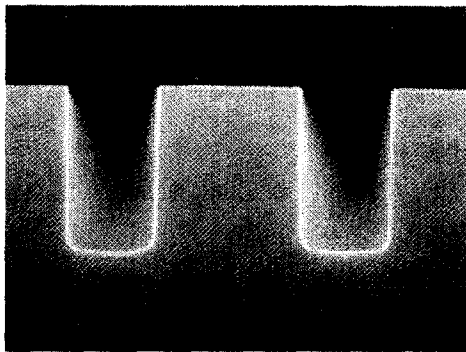


Fig. 8. Sidewall controlled trench etch profile shown by SEM after stripping oxide mask. Vertical trenches having rounded edge corner were obtained by controlling the flow rates of O₂ and SiF₄ in MERIE.
Etch condition : HBr/O₂/SiF₄, 600W RF power, 120 sec etching.

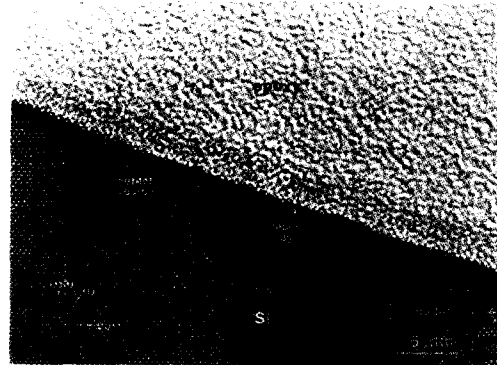


Fig. 9. HRTEM micrograph of the bottom to corner transition region of the sidewall controlled trench. Defect region was almost disappeared below the thick residue layer except the region marked with open triangle.

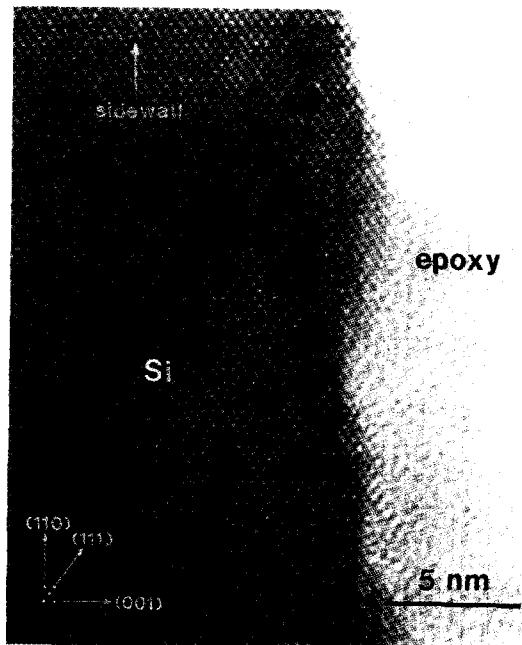


Fig. 10. HRTEM micrograph of the sidewall region of the sidewall controlled trench. No defect can be observed, but the surface roughness remained to be 3~5 atomic level.

영역에 비해 잔류막이 두껍게 형성되지 못해 3~5 원자층 수준으로 크게 나타났다.

횡방향 식각으로 인한 undercut이 일어난 경우와 비교하였을 때 트렌치 벽면 하단부에 균일한 잔류막이 존재하여 이들이 화학적인 식각의 방지막으로써 역할을 하여 그림 8과 같은 식각 프로파일이 나타났다.

4. 결 론

트렌치 식각시 첨가 가스에 따른 잔류막의 형성과 이들이 결함 생성 및 식각 프로파일에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 방향성 식각에 유리한 HBr 가스와 O_2 , SiF_4 등의 첨가 가스를 이용하여 식각 방지막의 형성을 돕고 이들이 기판에 발생하는 격자 결함들을 감소시키는 것을 고분해능 투과전자현미경 관찰 결과로 확인하였다.

잔류막의 형성은 RF power가 감소할수록 크게 증가하였으며 트렌치 식각시 각 영역에 따라 다른 분포를 나타내었다. 바닥이나 코너 영역에서는 잔류막층이 20~30 Å 정도로 형성되어 이들이 결함 생성을 억제하는 효과가 있음을 확인하였다. 그러나 벽면층에서는 잔류막층이 가시적으로 형성되지 않으며 이것은 표면의 거칠기 증가로 나타났다. 횡방향 식각의 방지를 위해서는 이들 잔류막층이 화학적 식각의 방지막 역할을 해야 하며, 잘 채워지는 트렌치 구조를 얻기 위해서는 잔류막 형성이 용이한 첨가 가스를 이용해야 한다는 것을 트렌치 코너에서의 원자 구조 관찰 결과로 알 수 있었다. 결론적으로 트렌치 식각시 결정학적인 결함의 생성은 식각 이온의 입사각, 에너지 등에 의해 좌우되며, 특히 표면에서의 결함 영역은 잔류막의 두께와 크게 연관됨을 알 수 있었다. 트렌치 격리 구조에서 문제가 되는 결함

에 의한 누설전류 발생이나 채움과정에서의 void 형성 등은 첨가 가스에 의한 잔류막의 형성으로 인해 제어하는 것이 효과적임을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 정보통신부 출연금으로 수행한 정보통신 연구개발사업 연구결과의 일부입니다.

참 고 문 헌

1. H. H. Park, K. H. Kwon, S. H. Lee, B. H. Koak, S. Nahm, H. T. Lee, K. I. Cho, O. J. Kwon and Y. I. Kang, ETRI Journal, **16**, 45 (1994)
2. T. D. Bestwick and G. S. Oehrlein, J. Vac. Sci. Technol. A **8**, 1696 (1990)
3. M. Konuma, F. Banhart, F. Phillipp, and E. Bauser, Mater. Sci. Eng. B **4**, 265 (1989)
4. L. Peters, Semiconductor International 66 (May 1992)
5. J. P. Simco and G. S. Oehrlein, J. Electrochem. Soc. **138**, 2748 (1991)
6. J. H. Lee, G. Y. Yeom, J. W. Lee and J. Y. Lee, J. Vac. Sci. Technol. A **15** (3), 513 (1997)
7. L. Y. Tsou, J. Electrochem. Soc. **136**, 3003 (1989)
8. M. Nakamura, K. Izuka, and H. Yano, Jpn. J. Appl. Phys. **28**, 2142 (1989)
9. O. S. Nakagawa, S. Ashok, and J. K. Kruger, J. Appl. Phys. **69**, 2057 (1991)
10. F. H. Bell and O. Joubert, J. Vac. Sci. Technol. B **15** (1), 88 (1997)
11. C. C. Cheng, K. V. Guinn, I. P. Herman, and V. M. Donnelly, J. Vac. Sci. Technol. A **13**(4), 1970 (1995)
12. T. Kuroda and H. Iwakuro, Solid-State Electron. **29**, 923 (1990)
13. G. Y. Yeom and M. J. Kushner, J. Vac. Sci. Technol. A **7**, 987 (1989)
14. Y. Horiike, H. Okano, T. Yamazaki, and H. Horie, Jpn. J. Appl. Phys. **20**, L 817 (1981)
15. K. Hirobe and H. Azuma, J. Electrochem. Soc. **132**, 938 (1985)
16. H. Kinoshita, T. Ishida, and S. Ohno, J. Appl. Phys. **62**, 4269 (1987)
17. R. Petri, P. Brault, O. Vatel, D. Henry, E. Andr, P. Dumas, and Franck Salvan, J. Appl. Phys. **75**, 7498 (1994)
18. D. H. Weon, J. H. Lee, J. H. Kim, G. Y. Yeom, J. W. Lee, and J. Y. Lee, Kor. J. Mat. Res. **6**, 524 (1996)
19. Y. Tamaki, S. Isomae, K. Sagara, T. Kure, and M. Kawamura, J. Electrochem. Soc. **135**, 726 (1988)
20. R. Sinclair, K. B. Kim, O. Shippou, and H. Iwasaki, J. Electrochem. Soc. **136**, 511 (1989)