

트렌치 표면에서의 RIE 식각 손상 회복

이주욱 · 김상기 · 배윤규 · 구진근

한국전자통신연구원 기반기술연구소
(2003년 11월 17일 접수)

RIE induced damage recovery on trench surface

Ju Wook Lee, Sang Gi Kim, Yoon Kyu Bae, Jin Gun Koo

Basic Research Laboratory, ETRI, Yusong P.O.Box 106, Taejeon, 305-600, KOREA
(Received November 17, 2003)

요 약

트렌치 소자 제조시 게이트 산화막 성장과 내압 강하의 원인이 되는 식각손상 회복과 코너 영역의 구조를 개선하기 위해 수소 분위기 열처리를 하였다. 열처리시 수소 원자에 의한 환원 반응을 이용하여 표면 에너지가 높은 코너 영역에서는 원자들의 이동에 의한 결정면 재배열, 산화막 측벽에서의 실리콘 원자 적층, 표면 거칠기의 개선 효과 등을 전자현미경 관찰을 통해 확인하였다. 실리콘 원자의 이동을 방해하는 식각 후 잔류 산화막을 수소 가스의 환원성 분위기에서 열처리함으로써 표면 에너지를 낮추는 방향으로 원자의 이동이 일어나 concave 영역, 즉 트렌치 bottom corner에서는 (111), (311) 결정면 재분포 현상이 일어남을 확인할 수 있었다. 또한 convex corner에서의 원자 이동으로 인해 corner 영역에서는 (111) 면의 step 들이 존재하게 되고 원자 이동에 의해 산화막 측벽에 이르러 이동된 원자의 적층이 일어나며, 이는 열처리시 표면 손상 회복이 원자이동에 의함을 나타낸다. 이러한 적층은 표면 상태가 깨끗할수록 정합성을 띄어 기판과 일치하는 에피 특성을 나타내고 열처리 온도가 높을수록 표면 세정 효과가 커져 식각손상 회복효과가 커지며, 이를 이용하여 이후의 산화막 성장시 균일한 두께를 코너영역에서 얻을 수 있었다.

주제어 : 식각 손상, 반응성이온식각, 트렌치, 표면, 원자이동

Abstract

A damage-reduced trench was investigated in view of the defect distribution along trench sidewall and bottom using high resolution transmission electron microscopy, which 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. To reduce the RIE induced damage and obtain the fine shape trench corner rounding, we investigated the hydrogen annealing effect after trench formation. Silicon atomic migration on trench surfaces using high temperature hydrogen annealing was observed with atomic scale view. Migrated atoms on crystal surfaces formed specific crystal planes such as (111), (113) low index planes, instead of fully rounded corners to reduce the overall surface energy. We could observe the buildup of migrated atoms against the oxide mask, which originated from the surface migration of silicon atoms.

Using this hydrogen annealing, more uniform thermal oxide could be grown on trench surfaces, suitable for the improvement of oxide breakdown.

Key Words : Reactive ion etching, etch-induced damage, recovery, surface, migration

1. 서 론

반응성이온식각(Reactive Ion Etching, RIE)으로 인한 손상이나 표면 반응에 의한 오염은 결과적으로 형성되는 소자 격리 구조 등의 절연 특성에 영향을 주므로 [1-3], 가능하면 발생을 억제하여야 하며 발생된 경우에는 이를 효과적으로 제어하는 기술 또한 연구되어야 한다 [4,5]. 특히 트렌치를 이용하는 공정의 경우 트렌치를 형성한 후에 산화막을 증착하거나 또는 이를 열적으로 성장시키므로 트렌치 바닥과 벽면의 코너 영역에 응력이 집중되어 산화막 두께 등이 불균일해져 이것이 절연 파괴 등의 원인이 되기도 한다. 특히 최근에 많이 연구되고 있는 트렌치 게이트형 소자에서는 게이트산화막층으로 이용되는 트렌치 벽면과 코너에서 소자특성의 열화원인이 발생하므로, 균일한 산화막의 성장과 함께 응력발생을 완화할 수 있는 방법에 대한 연구가 필요하다 [6].

본 연구는 높은 집적도를 갖는 트렌치 게이트 소자 등에 응용하기 위한 트렌치 식각 공정에 대한 것으로, 식각 반응에 대한 micro-process 의 분석을 통해 잔류물이 없는 깨끗한 표면 상태의 건식 식각 결과와, 트렌치 형성 후 열처리를 통해 응력 집중이나 전류 흐름에 방해가 되는 영역을 곡면화하는 방법으로 소자 내압을 향상시켜 응력발생 및 산화막 열화를 해결한 연구결과에 대해 서술하였다.

2. 실험 방법

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 [7,8]. 세정된 웨이퍼 위에 트렌치 식각을 위한 식각 방지막으로 0.5 μm 정도의 TEOS 산화막을 저압화학증착법으로 증착하였으며, 여기에 감광막을 입힌 후, 트렌치 식각을 위한 패틴을 1 μm 폭으로 제

조하였다.

TEOS 산화막의 건식식각후 P-5000 MERIE 장치에서 HBr 식각가스 및 O_2 , SiF_4 , CF_4 등의 첨가가스를 이용하여 건식식각한 후, 일부 시편에 대해서는 산화막 strip후 식각특성을 분석하였다. 건식식각시 챔버 압력은 125 mtorr, 전극 온도는 20 $^\circ\text{C}$, 자계는 30 Gauss로 유지하였으며 식각가스 유량비와 플라즈마의 RF power를 200W ~ 600W영역에서 변화시켜 2~10분 동안 공정을 하였다.

식각된 시편의 표면형상 관찰 및 미세형상분석을 위해 주사전자현미경을 이용하였으며, 트렌치 벽면층과 바닥층에 존재하는 결함의 원자단위 관찰을 위해 200 kV의 가속전압을 갖는 JEOL사의 JEM 2000EX 고분해능 투과전자현미경을 이용하였다. 건식 식각 공정으로 형성된 트렌치 식각손상 회복을 관찰하기 위해 수소 열처리를 시행하고 그 결과를 관찰하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 RIE 후의 식각표면상태

벽면층이나 바닥층에 형성, 또는 증착되는 식각 방지막은 F-계의 식각가스가 아닐 경우 산화막 계열의 횡방향 식각 방지 효과가 가장 유리한 것으로 알려져 있다. 마스크로써 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 [9,10]. 본 실험에서는 횡방향 식각의 제어를 위해 트렌치 벽면층에 얇은 식각 방지막의 형성을 돕는 O_2 가스를 첨가하였으며, 식각 마스크로서 저압화학증착된 산화막을 이용함으로써 산화막 strip 후 표면 평탄도를 양호하게 유지할 수 있었다.

Fig. 1은 600 W의 RF power 조건에서 HBr을 주요 식각가스로 하고 O_2 , SiF_4 , CF_4 를 모두 첨가하여 120초동

안 건식식각하였을 때 형성된 트렌치 코너 부근을 고분해능 투과전자현미경을 이용하여 관찰한 사진이다. 마스크 산화막을 벗겨내지 않은 상태에서 주사전자현미경으로 관찰한 식각 프로파일을 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 종로시 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.

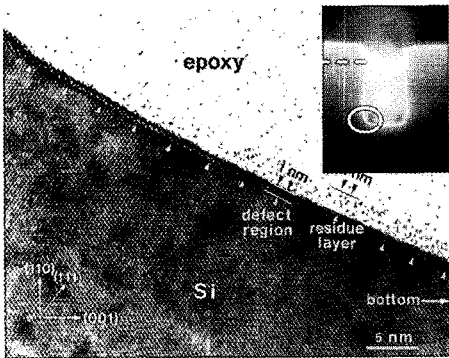


Fig. 1. Etched surface state of the trench corner marked with a white circle in the upper right SEM photograph. Sidewall undercut trench. Etch condition : HBr/O₂/SiF₄/CF₄, 600W RF power, 120 sec etching.

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 산화막

으로 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.

Fig. 2는 횡방향 식각을 최소화하고 곡면화된 코너 영역에서의 원자 구조를 고분해능 투과전자현미경으로 관찰한 것이다. 횡방향 식각을 줄이는 방법으로는 산소유량과 식각가스중 SiF₄ 등의 첨가가스 유량비를 증가시켜서 조절하였으며, 잔류막 형성이 균일하게 일어날수록 횡방향 식각은 줄어들었다. 여기서는 산화막 제거를 하지 않고 관찰한 것으로, 잔류막층의 두께가 약 5 Å 정도 증가하였으며 코너 영역에서 균일하게 분포하는 것으로 확인되었다. 두꺼워진 이층 아래로 결합층이 거의 제거되었으며, 화살촉으로 표시한 일부 결합층이 undercut이 일어난 경우보다 깊이가 감소하여 일부 영역에서 관찰되었다. 잔류막층의 두께

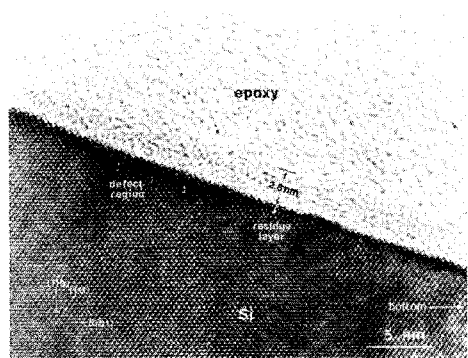


Fig. 2. High resolution micrograph of the bottom to corner transition region of the sidewall controlled trench. Defect region was almost disappeared below the thick residue layer.

가 표면에 충돌하는 식각종들의 에너지를 크게 완화하여 결함 생성이 억제된 것으로 생각된다. 결정학적인 방향성을 가지고 있는 결함들은 생성되지 않았으며 주로 표면에서의 식각 반응에 따른 결함들만 관찰되었다. 횡방향 식각으로 인한 undercut이 일어난 경우와 비교하였을 때 트렌치 벽면 하단부에 균일한 잔류막이 존재하여 이들이 화학적인 식각의 방지막으로써 역할을 하여 undercut이 없는 양호한 식각 프로파일이 나타났다.

2. 수소 열처리를 통한 표면손상회복

일반적으로 각 재료의 녹는점의 1/2이 되는 온도 이상에서는 각 재료의 원자들의 이동 (migration)이 비교적 자유로이 일어난다고 알려져 있다. 고상 실리콘의 녹는점 T_m 은 1,415°C이며, 따라서 실리콘 원자들은 750°C 이상이 되면 이동이 가능하다고 여겨지고 있다. 만약 열처리시 실리콘 원자의 이동이 가능하다면 실리콘 원자는 어떤 구동력 (driving force)에 의해 표면에서 재배치하려 할 것이다. 그러나 트렌치 형성후 열처리를 진행하면 일반적으로 표면에서 원자의 재배치는 일어나지 않는다. 본 실험에서는 이러한 원자 이동을 방해하는 막을 제거하기 위해 수소를 이용한 환원성 분위기에서 열처리를 진행하였다.

수소 열처리를 통해 Fig. 3에서 확인할 수 있듯이 트렌치 top corner 및 bottom corner가 효과적으로 rounding 되어 있는 것을 확인할 수 있다. 일반적인 열처리 진행 시에는 이러한 코너 rounding이 일어나지 않는데 비해

환원성 분위기에서 열처리를 하면 이러한 변화가 나타나는 이유는 본 실험의 열처리 시에는 실리콘 원자의 이동이 일어나는 데 기인하는 것으로 생각할 수 있다. 이는 트렌치가 형성된 상태에서 표면에 존재하는 산화막이 실리콘의 이동을 방해하고 있는 것을 환원성 분위기에서 열처리를 함으로써 표면의 자연 산화막을 계속 제거해 주기 때문에 실리콘 원자의 이동이 가능해지기 때문인 것으로 생각된다. 트렌치 코너 rounding을 위해 산화막의 pull-back width를 2000 Å로 크게 하였을 때의 결과이다. 코너 영역에서의 변화와 함께 표면의 미세구조 또한 식각손상을 회복하는 방향으로 변화하였음을 Fig. 4에 나타내었듯이 본 실험으로써 확인하였다.

열처리 시의 실리콘 원자의 이동을 용이하게 하기 위한 산화막의 pull-back width를 크게 하면 corner 반경이 커지지만 Fig. 3에 나타내듯이 코너 rounding의 곡률이 계속 크게 일어나는 것은 아니다. 이것은 실리콘 원자들의 이동이 표면 에너지를 줄이는 방향으로 일어나고 따라서 특정 결정면으로 재배치한 후에는 이동이 어려워지기 때문이다. Fig. 3의 top corner를 보면 실리콘 원자들의 열처리 후 배열이 (111) 면으로 배열하고 있음을 알 수 있다. 또한 결정면으로의 재배열이 일어난 후에는 열처리 시간을 길게 하더라도 코너 rounding의 진행이 거의 없는 것으로 밝혀졌다.

트렌치 top corner에서의 rounding 뿐만 아니라 bottom corner에서도 실리콘 원자들의 이동에 의해 표면의 결정 상태가 변화함을 Fig. 3의 왼쪽 그림에서 확인할 수 있다. Fig. 3에서 보면 하단의 코너 영역에서도

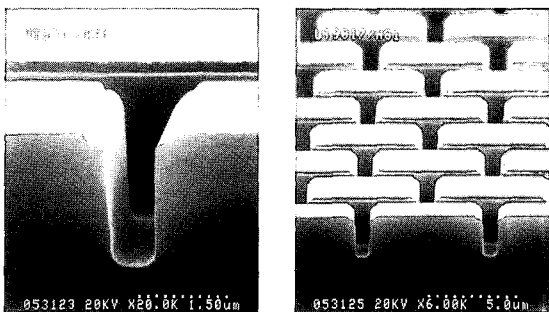


Fig. 3. Tilted view of hydrogen annealed trench structure and multiple trench cell photographs. (2000 Å oxide pull back, 1000°C hydrogen annealing)

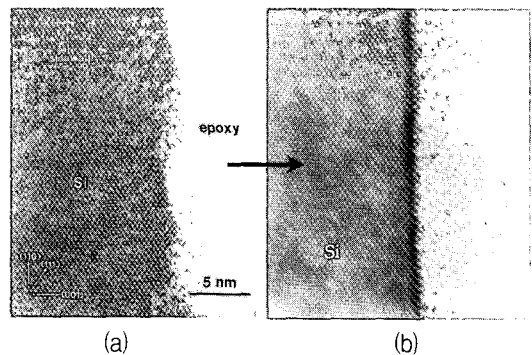


Fig. 4. Surface roughness change on the sidewall due to the hydrogen annealing. (a) before, (b) after hydrogen annealing

결정면으로의 재배열이 일어나는데, (113) 결정면을 거쳐 (111)면으로의 원자 이동이 일어나고 있음을 확인할 수 있다. Closed cell type의 트렌치들의 교차선을 보면 이와 같은 rounding의 영향으로 인해 다른 영역에 비해 트렌치 폭이 삼각형 모양으로 변하였음을 확인할 수 있다. 트렌치 폭이 넓은 영역에서 열처리 후의 사진을 보면 이와 같은 경향이 뚜렷이 보인다. Fig. 5는 이와 같은 bottom corner에서의 결정면 재배열을 고분해능 사진으로 관찰한 것이다.

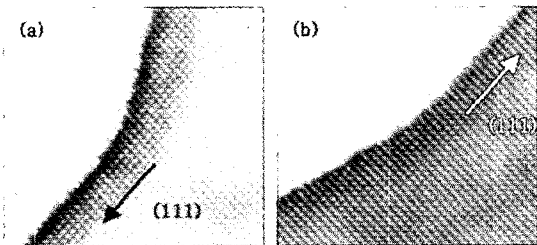


Fig. 5. Faceted atomic configuration at the trench concave corners due to the atomic migration by hydrogen annealing. (a) sidewall to (111) transition, (b) (111) to (311) transition region.

표면의 에너지를 줄이기 위해 표면에 존재하는 원자들이 낮은 에너지 상태의 자리를 찾아 이동하여 정렬한다면 원자들의 배열 상황은 특정 결정면에 정확하게 잘 들어맞도록 위치하게 될 것이며, 이것이 원자 이동에 의한 표면 형상 변화의 증거가 될 수 있다. Fig. 5는 concave corner에서 원자들의 배열을 관찰한 것으

로 (111)면과 (311)면의 facet이 분명히 드러나면서 원자들이 수소 열처리에 의해 안정된 자리로 이동하여 배열되어 있음을 보여준다.

트렌치의 바닥 영역의 concave corner에서는 원자 이동에 의한 표면 형상 변화가 결정면 재배열에 의해 흡수되어 여분의 원자들의 적층이나 부피의 변화가 관찰되지 않는다. 그러나 트렌치 top 영역의 경우 표면에 너지를 줄이기 위해 convex corner로부터 이동해 간 원자들은 표면 위로 이동해 나가면서 산화막의 blocking에 의해 적층이 되기도 한다. 이러한 적층 현상은 수소 열처리에 의한 구조 변화가 표면의 실리콘 원자 이동에 의한 것임을 분명히 증거하는 결과가 되는데 Fig. 6은 원자 이동에 의한 적층 형태를 보여주고 있다. 수소 열처리에 의한 원자 이동 현상은 앞에서 밝혀졌듯이 트렌치 식각 후의 잔류막 성분이 세정 후에도 주로 산화막 성분으로 구성되어 있고 수소 분위기에 의해 이러한 잔류 산화막이 환원되어 표면에서 원자들의 자유로운 이동이 가능해짐으로 이루어진다고 결론지을 수 있다.

수소 열처리에 의한 식각손상 회복과 트렌치 구조 변화는 이후 소자나 격리구조에 이용시 산화막 성장 특성 개선에 활용될 수 있다. Fig. 4에서 관찰하였듯이 표면의 거칠기 개선과 코너 영역에서의 결정면 재배열로 인한 미세구조 변화는 Fig. 7에 나타내었듯이 산화막 성장시 균일도를 키우고 파괴가 일어나는 weak point oxide를 제거하는데 효과가 있다. 결정면에 따른 산화막의 성장 두께는 (111), (110) 면의 경우 유사하게

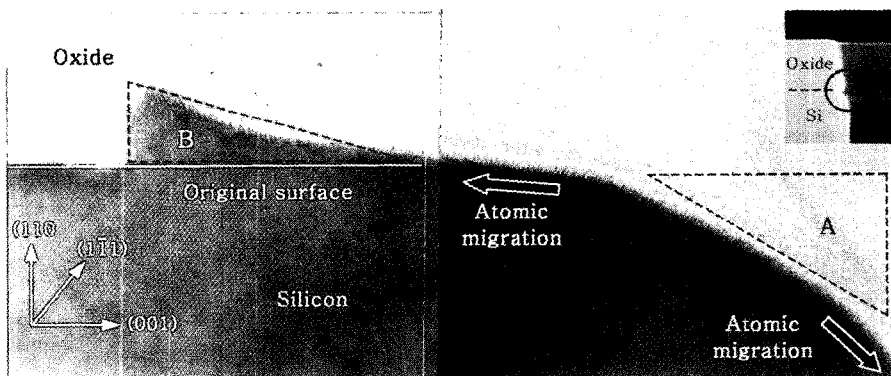


Fig. 6. Short range stacking due to the atomic migration at a region marked with circle of upper right photograph. 500Å pull-backed, hydrogen annealed over 1000°C samples.

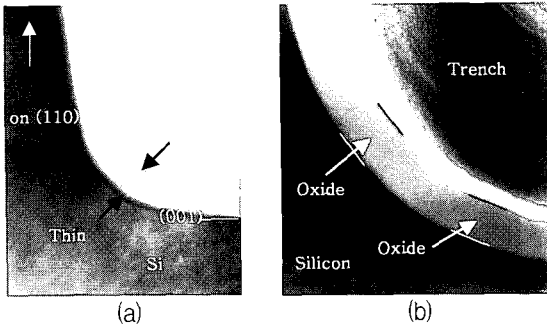


Fig. 7 Oxide growth (a) without, (b) with hydrogen annealing.

성장하므로 결정면 재배열로 인해 산화막의 균일도가 증가하고 또한 응력완화 효과를 기대할 수 있다. 실제 열처리 전후의 산화막 성장 차이로 인한 내압의 증가는 타 논문에서 보고되었으며 [6], I-V 곡선의 모양도 수소 열처리시 전류변화가 내압근처에서 급격히 일어나는 특성을 나타내어 소자특성이 개선되었다.

4. 결 론

트렌치 식각시 첨가 가스에 따른 잔류막의 형성과 이들이 결합 생성 및 식각 프로파일에 미치는 영향에 관해 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. 트렌치 식각 후 RIE 식각손상 회복 및 트렌치 구조를 개선하기 위해 수소 분위기에서 열처리한 결과 응력이 집중되고 산화막 두께 형성이 잘 안되는 코너 부근을 rounding 할 수 있었다. 실리콘 원자의 이동을 방해하는 식각 후 잔류 산화막을 수소 가스의 환원성 분위기에서 열처리함으로써 표면 에너지를 낮추는 방향으로 원자의 이동이 일어나 concave 영역, 즉 트렌치 bottom corner에서는 (111), (311) 결정면 재분포 현상이 일어남을 확인할 수 있었다. 또한 convex corner에서의 원자 이동으로 인해 corner 영역에서는 (111) 면의 step 들이 존재하게 되고 원자 이동에 의해 산화막 blocking에 이르러 이동된 원자의 적층이 일어난다. 이러한 적층은 표면 상태가 깨끗할수록 정합성을 띄어 기판과 일치하는 에피 특성을 나타내고 열처리 온도

가 높을수록 표면 세정 효과가 커져 원자 적층의 정합성이 커짐을 알 수 있었다.

5. 감사의 글

본 연구는 한국전자통신연구원 반도체원천기술연구소 기관고유사업의 일환으로 정보통신부의 지원을 받아 이루어졌으며, 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] J. P. Simco and G. S. Oehrlein, J. Electrochem. Soc. **138**, 2748 (1991).
- [2] M. Konuma, F. Banhart, F. Phillipp, and E. Bauser, Mater. Sci. Eng. **B4**, 265 (1989).
- [3] L. Y. Tsou, J. Electrochem. Soc. **136**, 3003 (1989).
- [4] F. H. Bell and O. Joubert, J. Vac. Sci. Technol. B **15**, 88 (1997).
- [5] C. C. Cheng, K. V. Guinn, I. P. Herman, and V. M. Donnelly, J. Vac. Sci. Technol. A **13**, 1970 (1995).
- [6] S. G. Kim, T. M. Roh, J. Kim, I. Y. Park, J. W. Lee, J. G. Koo, I. H. Bae, and K. I. Cho, J. Crystal. Growth **255**, 123 (2003).
- [7] J. H. Lee, G. Y. Yeom, J. W. Lee and J. Y. Lee, J. Vac. Sci. Technol. A **15**, 513 (1997).
- [8] 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).
- [9] 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).
- [10] T. D. Bestwick and G. S. Oehrlein, J. Vac. Sci. Technol. A **8**, 1696 (1990).
- [11] M. Nakamura, K. Iizuka, and H. Yano, Jpn. J. Appl. Phys. **28**, 2142 (1989).
- [12] O. S. Nakagawa, S. Ashok, and J. K. Kruger, J. Appl. Phys. **69**, 2057 (1991).
- [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. André, P. Dumas, and F. Salvan, *J. Appl. Phys.* **75**, 7498 (1994).
- [18] T. Kuroda and H. Iwakuro, *Solid State Electron.* **29**, 923 (1990).
- [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).