

Arsenic heavy ion damage 처리 후 이온 분포에 관한 연구

*안병목 · 정원채
경기대학교 전자공학과
경기도 수원시 팔달구 이의동 산 94-6 번지
E-mail : wcjung@kuic.kyonggi.ac.kr

A Study of Ion Distribution after As heavy ion damage treatments

*Byong Mok Ahn · Won Chae Jung
Department of Electronic Engineering, Kyonggi University
E-mail : wcjung@kuic.kyonggi.ac.kr

요 약

본 연구는 boron-doped 실리콘 기판에 heavy 이온인 비소를 먼저 이온 주입시키고 비소의 주입에 의해 실리콘 표면이 손상된 영역에 다시 인을 이온 주입시켰을 때, 인의 확산을 관찰하기 위해 Microtec 시뮬레이터를 통해 모의공정실험을 실행 하였다. 손상된 비정질의 실리콘 기판에서 열처리 전과 inert(N₂) 분위기에서 인은 느리게 확산을 하였다. 그렇지만 dry 와 wet oxidation 열처리 분위기에서는 인의 확산 속도가 증가됨 (OED : Oxidation- Enhanced Diffusion)을 관찰되었다. 실리콘 기판에서 인의 확산을 관찰하기 위해 ICECREM 시뮬레이터를 사용하여 앞의 경우와 동일하게, 먼저 비소를 주입하여 실리콘 표면에 손상을 입히고 그 다음 공정에서 인을 주입하였을 때, 열처리 전과 inert, dry 산화분위기에서는 비정질의 실리콘 기판에 이온 주입한 경우와 동일하게 인의 확산 속도가 증가하였지만, wet 산화분위기에서는 오히려 dry 산화분위기에서 보다 확산이 늦어짐이 관찰되었다.

1. 서론

초장기 바이폴라 npn 트랜지스터에서는 에미터를 붕소가 도핑된 영역에 인을 확산시켜 형성하였다. 고농도에서 인은 붕소의 확산 속도를 증가시키고, 안티몬의 확산 속도를 지연시킨다는 사실이 알려져 있다. 붕소, 인, 비소의 경우에는 확산이 증가되는 - OED (Oxidation Enhanced Diffusion)효과가 나타나는 반면, 안티몬의 경우에는 ORD (Oxidation Retarded Diffusion)효과가 나타나게 된다[1]. 산화 중, 결정적자역서는 interstitials이 생성되기 때문에 확산 계수가 변하게 된다. 이러한상을 설명하기 위해 다음의 Taniquchi의 OED 모델이 적용된다.

$$D_i^{ox} = D_i + \Delta D_i \left(\frac{du}{dt} \right)^{\beta} \exp\left(-\frac{E_{ox}}{kT}\right) \exp\left(-\frac{\Delta x}{\lambda_x}\right) \exp\left(-\frac{y}{\lambda_y}\right)$$

여기서, Δx 는, 마스크 가장자리로부터의 거리 ($\Delta x > 0$ 마스크의 바깥쪽 영역), y 는 표면으로부터의 수

직거리이다. 위 식에서 확산계수는 지수적으로 감소함을 알 수 있다 [2]. 또한, 산화 중, interstitials의 과포화는 interstitial-vacancy (I-V) 재결합에 의해 생성된 이들의 평형 레벨에서 결공의 밀도를 감소시킨다. 안타몬은 결공의 메커니즘에 의해 지배적으로 확산하게 된다. 다른 도판트가 지연되는 동안, 동시에 하나의 도판트가 증가하는 것은 두 개의 상호 확산 메커니즘이 있음이 분명하다. 실리콘 산화시 실리콘 표면은 산화동안에 소모되고 silicon dioxide (SiO_2)로 변하게 된다. 열산화 중, 도판트는 Si/SiO_2 경계면이 실리콘 벌크방향으로 이동 할 때, 성장하는 옥사이드와 실리콘 사이에 재 분포된다. 이것은 실리콘 표면 근처에서의 불순물을 상당히 변화시킨다. 농도의 급격한 변화는 두 물질의 계면에 걸쳐서 일어난다 [3]. 옥사이드 또는 실리콘에 대한 도판트의 물리적인 해석은 실리콘에서의 열평형 농도와 계면 근처의 산화실리콘에서의 열평형 농도의 비로 정의되는 분리 계수(segregation coefficient) m 에 의해 결정된다. 도판트의 재 분포는 옥사이드에서 그들의 확산계수와 산화물에 의해서 영향을 받게 된다. 옥사이드에서 불순물의 확산율에 비해 옥사이드-실리콘 경계가 실리콘 쪽으로 움직이는 비율은 실리콘에서 불순물 농도의 재분포를 결정하는 중요한 요소가 된다. 분리계수를 측정할 대부분의 실험들은 붕소의 경우이고, m 은 일반적으로 0.1 ~ 0.3으로 나타나며, 산화 중 붕소의 공핍이 일어난다 [4, 5, 6]. 이 효과를 설명하기 위해, 경계면에서 피크값을 가지는 이상적인 half-gaussian 분포가 산화 전 초기 프로파일로 사용된다. 매우 얇은 옥사이드의 경우, 붕소의 많은 양이 옥사이드를 통해 out-diffusion할 수 있고, 대기 분위기 속으로 이탈하여, 단지 확산으로부터 얻어진 값 이하로 충분히 떨어지게 된다. 붕소의 경우, 분리계수는 온도가 증가함에 따라 동시에 증가하게 되고, 결정 방향에 의존하며, $\langle 111 \rangle$ 방향보다는 $\langle 100 \rangle$ 방향에서 더 큰 값을 가진다. 열산화 중, 불순물의 재분포는 특히, MOSFET의 문턱전압과 같은 디바이스 파라미터에 중요한 영향을 주게 된다.

2. 시뮬레이션 방법

시뮬레이션 과정은 다음의 조건으로 실행하였다.

1. 붕소가 $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 으로 도핑된 $\langle 100 \rangle$ 방향성을

가지는 실리콘 기판을 사용하였다.

- 이온이 주입되는 영역을 설정하기 위해 폭이 $1.0 \mu\text{m}$ 의 마스크를 덮는다. 이 때 주입되는 비소 이온의 에너지가 700 keV, dose 가 $5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 이었다.
- 그다음 공정으로 인을 100 keV, dose= $5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 로 이온주입 하였다.
- 열처리 과정은 1000 °C, 20 분간 inert, dry, wet 산화 분위기에서 각각 실행하였다.

3. 결과 및 검토

그림 2에서 5까지는 Microtec 시뮬레이터를 이용하여 비정질의 실리콘에 비소를 먼저 주입하여 손상을 입힌 후, 다음 인을 주입한 후, 열처리 전과 열처리 후의 농도 프로파일을 보여주고 있다. 그림 2는 (100) 붕소가 도핑된 실리콘 기판에 먼저 비소 ($700 \text{ keV}, 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$)를 주입한 후, 인 ($100 \text{ keV}, 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$)을 주입했을 때, 깊이에 따른 인의 농도 분포를 보여 주고 있다. 그림 2는 실리콘 표면 전 영역에 대해서 이온을 주입한 것이 아니라, 주입되는 마스크영역을 $1 \mu\text{m}$ 으로 제한하였다. 높은 주입에너지와 고농도에 의해 마스크 아래 부분에서 측면으로 이온이 퍼지는 현상이 관찰되었다. 이 상태에서 열처리를 수행하면 측면뿐만 아니라, 깊이 방향으로도 산화에 의한 인의 확산 속도의 증가로 인해 더 넓은 범위에서 분포되리라고 예상된다. 그림 3은 그림 2의 조건에서 1000°C, 20 분간 inert (N_2) 분위기에서 열처리를 수행한 후, 인의 분포를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 인은 열처리에 의한 경우는 열처리 전에 비해 넓은 범위에서 분포됨을 알 수 있다. 그러나, 깊이 방향보다는 오히려 측면으로 농도 분포선이 더 퍼지고 있음을 볼 수 있다. 이것은 인의 확산이 조밀하게 격자들이 배열된 실리콘 벌크영역 보다는 손상에 의해 결정 격자가 느슨해진 영역으로 더 빨리 확산해 갔기 때문이라 생각된다. 그림 3은 dry O_2 분위기에서 열처리 한 후의 인의 분포를 보여주고 있다. 그림 3에 비해 측면으로의 분포선이 다소 완만한 것을 볼 수 있다. 또한 깊이 방향으로도 그림 3에 비해 더 깊이 침투하였음을 알 수 있다. 측면으로 분포선이 더 완만한 것은 산화에 의해 인의 확산속도가 증가되었기 때문이라 생각된다. 이 사실로부터 인의 이온이 손상된 영역으로 더 빨리확

산해 가는 비율이 낮아지고 실리콘 벌크 속으로 확산해 가는 비율이 증가되었음을 의미한다. Dry O_2 분위기에서 열처리를 수행하면, 산화층이 형성되는데 산화층 두께가 얇은 관계로 그림 상에는 나타나 있지 않다. 그림 5는 그림 2에서와 동일한 이온 주입 조건에서, wet O_2 분위기에서 열처리한 후의 인의 분포를 보여주고 있다. 그림 5에서 보는 바와 같이 측면으로의 분포선이 그림 4에 비해 더욱 완만해졌음을 알 수 있고, 이것은 dry O_2 분위기보다 wet O_2 분위기에서 더 빠른 속도로 인이 실리콘 벌크속으로 더 깊이 침투하였음을 알 수 있다. 이 사실로부터 wet O_2 분위기에서는 인의 확산속도를 더 증가시켰음을 알 수 있다.

그림 6에서 9는 단결정의 실리콘 내에서 인의 확산으로 인한 분포를 확인하기 위해 ICECREM을 이용하여 모의실험한 결과들을 보여주고 있다. 이 때 이온 주입의 조건은 Microtec의 경우와 동일하며, 단지 실리콘 기판 위에 마스크를 덮지 않았다는 것만이 다르다. 그림 6은 열처리 전의 이온의 분포를 보여주고 있다. 이때 인의 분포가 비소의 주입에 의해 손상된 영역 내에 국부적으로 제한되어 있음을 볼 수 있다. 인의 주입으로 인해 생성된 인과 기판과의 접합의 깊이는 약 0.5 μm 정도로 나타난다. 그림 7은 inert gas 분위기에서 열처리 한 후의 이온의 분포를 보여주고 있다. 인은 손상된 영역 내에서 확산하고 있음을 알 수 있다. 이때 접합의 깊이는 열처리 전과 비교 해 볼 때, 대략 0.15 μm 정도 더 깊이 침투하였음을 알 수 있다. 그림 8은 dry 산화분위기에서 열처리 한 후 이온의 분포를 보여주고 있다. 예상한 대로 산화에 의해 인의 확산속도가 증가되어 실리콘 벌크속으로 이전 보다 훨씬 더 깊이 침투하였음을 알 수 있다. (접합 깊이 : 1.6 μm , 산화층 두께 : 0.0558 μm). 그림 9는 wet O_2 분위기에서 열처리한 후 이온의 분포를 보여주고 있다. 이때에 특이한 현상이 발견된다. 비정질의 실리콘에서의 wet O_2 분위기에서 인의 확산은 dry O_2 분위기에서 보다 더 빨리 확산함을 앞에서 확인하였는데, 단결정 실리콘에서는 오히려 인의 확산이 늦어짐이 나타났다 (접합깊이 : 1.1 μm). 이 현상은 산화층의 성장속도와 관련된 인의 복잡한 확산 메커니즘에 기인한 것이라 생각된다.

4. 결론

본 연구에서는 As로 손상된 실리콘 표면에 인을 주입하여 각각의 열처리 분위기에서 인의 확산분포를 시뮬레이션을 통해 알아보았다. 본 논문에서 확인한 바와 같이 열처리 전, 손상된 영역 내에서 인의 확산은 지연되고 산화 열처리 공정에 의해서 인의 확산 속도가 증가됨을 알 수 있었다. 단결정 실리콘의 경우, 인은 wet 산화분위기에서의 열처리를 제외하고 확산의 속도가 증가된다. 마지막으로 단결정 실리콘 경우, wet O_2 분위기에서 손상된 영역 내에서 인의 확산이 dry O_2 분위기에서 보다 늦어지게 되는 원인은 아마도 wet oxidation에서 더 두꺼운 SiO_2 막이 형성되어 실리콘 벌크로 침투하였기 때문이라고 예상되며 이에 대한 연구가 지속적으로 더 필요하다고 사료된다.

참고문헌

- [1] Badih El-Kareh, IBM Corporation. "Fundamental of Semiconductor Processing Technology ", Kluwer Academic Publishers, 1995, pp. 45, 485~487, 488.
- [2] K.Tanigushi et al. "Two-dimensional computer simulation models forMOS-LSI fabrication processess," IEEE Trans. Electr. Dev., v.ED-28, pp. 574, 1981
- [3] A. S. Grove, O. Leisteko, and C. T. Sah, "Redistribution of Acceptor and Donor Impurities During Thermal Oxidation of Silicon," J. Appl. Phys. 35 (7), 2695-2397 (1964).
- [4] T. Kato and W. Nishi, "Redistribution of Diffused Boron in Silicon by Thermal Oxidation," Jpn. J. Appl. Phys., 3, 377 (1964).
- [5] R. B. Fair and J. C. C. Tsai, "Theory and Direct Measurement of Boron Segregation in SiO_2 during Dry, Near Dry, and Wet O_2 Oxidation," J. Electrochem. Soc. 125, 2050 (1978).
- [6] S. P. Murarka, "Diffusion and Segregation of Ion-Implantation Boron in Silicon in Dry Oxygen Ambient," Phys. Rev. B. 12, 2502 (1975).



그림 1. 붕소가 도핑된 기판에 비소 이온의 분포.
(700 keV, $5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$)



그림 2. 그림 1과 같은 조건에서 inert gas 분위기에서 열처리 후의 인의 분포.



그림 3. 그림 1과 같은 조건에서 dry oxidation 열처리 후의 인의 분포.



그림 4. 그림 1과 같은 조건에서 wet oxidation 열처리 후의 인의 분포.

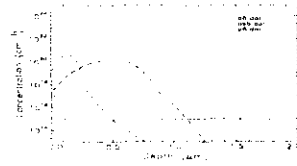


그림 5. 열처리 전의 이온의 분포.



그림 6. inert gas 분위기에서 열처리 후의 이온의 분포.



그림 7. dry oxidation 열처리 후의 이온의 분포.



그림 8. wet oxidation 열처리 후의 이온의 분포.