

As⁺이온을 주입시킨 Si 표면부 미세구조와 특성

신동원 · 최 철 · 박찬경 · 김종철*

포항공과대학 재료·금속공학과

*현대전자 반도체 연구소

Microstructure and Characteristics of Near Surface of As⁺ Ion Implanted Si

D. W. Shin, C. Choi, C. G. Park, and J. C. Kim*

Dept. of Materials Science and Engineering, Pohang Institute of Science and Technology

*Semiconductor R & D Lab., Hyundai Electronics

초 록 As⁺이온을 주입시킨후 열처리 방법을 달리한 Si 표면부 미세구조와 성분분석 및 전기적 특성을 조사하였다. 이온주입에 의해 형성되었던 비정질층은 열처리에 의해 결정화 되었으며 열처리 방법에 따라 결정화 양상의 차이를 보였다. 또한 주입된 이온의 분포 및 전기저항을 미세구조와 비교한 결과 주입된 이온의 농도가 최대인 깊이에서 최대의 손상이 발견되었으며 열처리 후에도 매우 작은 결함이 존재하였다. 하지만 이러한 작은 결함들은 전기적 성질에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

Abstract The microstructure, dopant distribution and electrical properties of the As⁺ ion-implanted surface layer differ significantly depending on the methods of subsequent heat treatments, furnace annealing(FA) and rapid thermal annealing(RTA). The amorphous layer created by ion implantation was recrystallized during the thermal annealing through solid phase epitaxial(SPE) growth. The dopant distribution and electrical properties are discussed with respect to the TEM cross-sectional microstructure observed. The microstructure, dopant distribution and electrical properties depended upon especially the annealing time of the heat treatment.

1. 서 론

반도체 소자의 제조공정중에 얇은 P-N접합을 만들기 위한 이온주입(Ion Implantation)은 중요한 문제로 인식되어 현재 많은 연구가 진행되고 있다¹⁻³⁾. 이온주입은 소자 제조시 반도체 소자 특정부위에 불순물을 넣어주는 공정으로 많이 사용된다. 일반적으로 기계적 이온주입은 열적확산(thermal diffusion)에 의한 공정보다 dopant 농도를 정확히 조절할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 기계적 이온주입에 의하면 소자의 표면부에는 많은 격자결함이 생성되며²⁻⁷⁾, 이러한 결함들을 제거하기 위하여 이온주입 후속공정으로 일련의 어닐링 처리를 한다. 어닐링 처리에 의하여 이온주입 부위의 격자결함은 감소하며, 아울러 Si표면에 무작위 위치를 점유하고 있는 dopant들이

전기적 활성화 위치, 즉 치환형 위치를 점유하게 된다. 열처리 방법 및 조건에 따라 dopant의 활성화 비율 및 표면으로부터 깊이 방향으로의 분포, 결함의 양상 등이 다르다. 이러한 미세구조적 변화는 소자의 전기적 특성을 변화시키는 직접적인 원인으로 작용하며, 궁극적으로는 소자의 전기적 성질을 결정짓는다.

이상의 관점에서 본 연구에서는 이온주입된 Si 소자의 표면부 미세구조와 어닐링에 따른 미세구조의 변화를 조사하였다. 우선 투과전자현미경(TEM)의 단면분석법(Cross-sectional analysis)^{8,9)}을 이용하여 미세한 격자결함을 관찰하였다. 또한 이러한 미세구조적 특징을 dopant 성분의 깊이분포 및 전기적 성질과 비교, 검토하였다.

2. 실험방법

2.1 시편제조(이온주입 및 열처리)

CZ(Czochralski)법으로 성장시킨 (001) Si 웨이퍼 표면에 As^+ 이온을 가속전압 100keV, Dose 양을 5×10^{15} ions/cm²으로 주입시켰다. 이렇게 이온주입된 시편을 rapid thermal annealing(RTA) 및 furnace annealing(FA)처리를 하였다. FA처리는 시편을 vacuum sealing하여 800~1000°C 온도범위에서 30분간 열처리하였고, RTA처리는 Si 웨이퍼의 표면산화물을 막기 위해 N₂분위기에서, 600~800°C 온도범위에서 10초간 행하였다.

2.2 TEM 시편제작 및 관찰

As^+ 이온주입된 Si 표면부 미세조직 관찰을 위해 단면분석용 TEM시편을 제작하였다. 즉, 관찰하고자하는 면을 서로 접착한 후 단면을 절단, 연마하여 최종적으로 ion milling하여 제작하였다. Ion milling은 가속전압 4.5kV, 입사각도 15°의 조건으로 행하였으며, 이온주입부의 milling 속도를 동일하게 유지시키기 위하여 속도변환 stage를 사용하였다. 본 연구수행의 주요 분석기기인 투과전자현미경은 JEOL 1200EX와 4000FX를 사용하였다. 박막층의 미세결함은 미소회절법(microdiffraction)으로 분석하였다.

2.3 Dopant 분포 및 전기저항 측정

주입시킨 이온의 분포를 분석하기 위해 동자연구소의 RBS(Rutherford Backscattering Spectroscopy)분석을 하였다. RBS분석은 2.425MeV의 에너지를 갖는 He^{2+} 이온으로, 산란각 170°, 그리고 -40°tilting시켜 스펙트럼을 얻었다. 본 실험에서는 열처리 양상에 따른 dopant의 깊이 분포(depth profile)를 정량적으로 분석하여 확산정도를 조사하였다. 또한 ASR(Auto Spreading Resistance)을 이용하여 이온주입부의 전기저항도 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 이온주입부 단면미세구조

Si 웨이퍼나 반도체 소자에 이온 주입법(Ion Implantation)으로 불순물을 doping하면 Si 표면부에 미세한 격자결함들이 생성된다. 즉 이온주입시에 As, Sb등의 가속된 이온이 Si 표면에 강제로 주입될 때 Si 표면부위에 격자결함이 많이 생성되며, 비정질층이 형성되기도 한다. 이러한 결함들은 반도체 소자의 전기적 성질을 저하시키는 주요 원인으로 지적되고 있다.

이온주입 직후의 단면 미세구조는 Photo 1과 같이 관찰하였다. 이온주입에 의해 두께가 약 1500 Å 정도의 비정질층이 형성되었음을

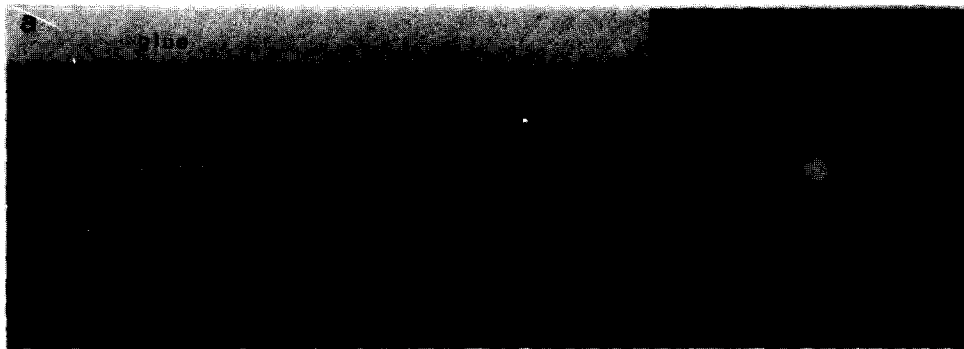


Photo 1. Cross sectional electron micrograph (a) and its diffraction pattern (b) of the ion implanted layer (5×10^{15} ions/cm², 100keV)

미소회절 패턴을 통해 알 수 있었다. 이와같이 형성된 비정질층을 800, 900, 1000°C로 각각 30분 FA처리한 시편의 단면미세구조를 Photo. 2에 나타내었다. 이온주입부는 모두

결정화되어 Si 기판 위로 SPE(Solid Phase Epitaxy)성장을 하였고 Photo. 2.(b)에서처럼 표면 바로 아래에 석출물 및 전위 loop가 존재함을 볼 수 있었다(P로 표시). 또한 (c)에

서는 불순이온들이 모두 Si 기지에 고용되어 석출물 및 전위 loop는 관찰되지 않았다. FA 처리에 의해 비정질층이 결정으로 변화한 상태에서 잔재하는 결함은 주로 공공 (vacancy) 및 전위 loop 형태로 존재한다⁶⁾. 이중 공공은 과잉의 불순 이온들이 석출되는 자리를 제공하며, 전위는 열처리 과정에서 이동하여 표면으로 빠져 나가거나 석출물과 반응하여 석출물 주위에 전위 loop를 형성시키기도 한다. Photo 2(c)는 (b)에 비해 석출물이 상대적으로 감소함을 보여주며 높은 온도로 열처리시에 불순이온의 고용도가 높아짐을 보여준다.

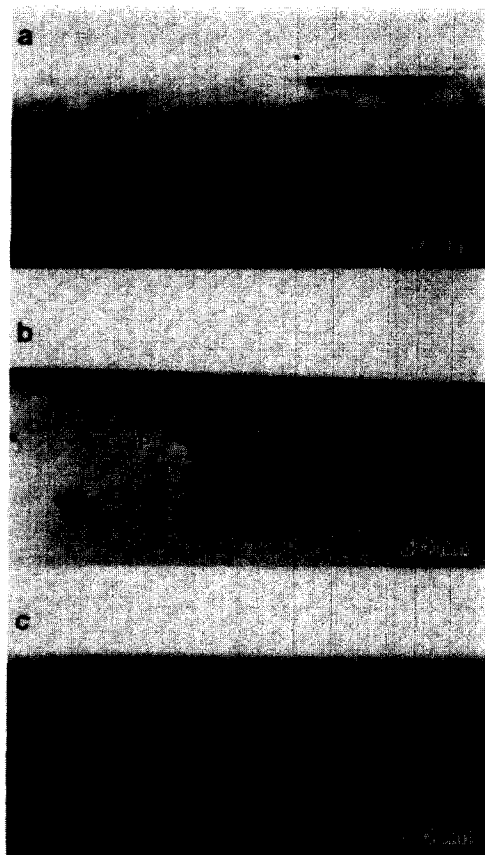


Photo 2. Cross sectional electron micrographs of Si surface area which were ion implanted and subsequently FA heated at various temperatures : (a) 800°C, 30min. (b) 900°C, 30min. (c) 1000°C, 30min.

Photo 1. 에서 나타낸 시편을 RTA 열처리를 한 단면 미세구조를 Photo 3.에 나타내었다. RTA는 질소 분위기에서 600~700°C 사이에서 각각 10초간 행하였다. Photo 3.에서 보는 바와 같이 600°C, 10초 RTA 처리의 경우(Photo 3.(a)), Si 기판으로부터 약 500Å 정도 SPE 성장하였음을 관찰되었다. 즉, 이온주입에 의해 형성되었던 비정질층이 이 조건에서 SPE 성장하는 중간단계로서 기판의 결정방향과 동일한 결정방향을 나타내고 있음을 미소회절 패턴으로 알 수 있었다. Photo. 3.(b)의 경우는 완전히 SPE 성장한 사진이다. 박막층 내부에 수십 Å 정도의 작은 알갱이로 관찰되는 것은 미세공동(micro-void)으로서 SPE 성장시 미처 표면으로 빠져나가지 못한 vacancy의 집합이며 다음절에서 언급한 최대 As⁺ 이온 농도 피크와 일치하는 깊이에서 관찰된 점이 특이할만하다. 이와같이 미세구조적 특성과 주입된 이온의 열처리에 따른 확산 및 전기적 활성화 정도를 다음장에서 서로 비교, 분석하였다.

3.2 불순 이온 분포

열처리에 따른 미세구조의 변화는 앞서 살펴보았으나 주입된 이온의 확산정도는 미세조직상에는 관찰할 수 없었다. 소자의 열처리 목적은 SPE 성장된 무결함의 박막층 형성의에도 dopant 원자들을 전기적으로 활성화시키는 치환형 위치 점유비율을 높이는데 있다. 그러나 dopant 원자의 확산거리가 크면 doping 두께가 두꺼워져 소자의 집적도를 저하시킬 수 있다. 따라서 dopant 원자의 확산거리에 대하여 살펴보았다.

이온주입 직후(Photo 1)의 As⁺ 이온의 깊이 분포에 대한 RBS 결과를 Fig. 1.에 나타내었다. As⁺ 이온의 침투 거리는 약 1500Å 정도로서 이온주입에 의해 형성된 비정질 박막의 두께와 거의 일치함을 알 수 있었다. 또한 dopant 분포는 Gaussian 분포 양상을 띄며, 그 최대값은 표면 아래(~500Å)에 존재하였고, 주입시킨 이온이 거의 1500Å 정도에 걸쳐 모두 존재하였으며, 주입시킨 이온의 dose 양과 거의 일치하였다. 이러한 시편을 Photo 2.와 동일한 조건으로 FA 처리를 하여 RBS 분석한 결과를 Fig. 2.에 나타내었다. Fig. 2.에 나타난 바와 같이 FA 처리에 의해 dopant 등은

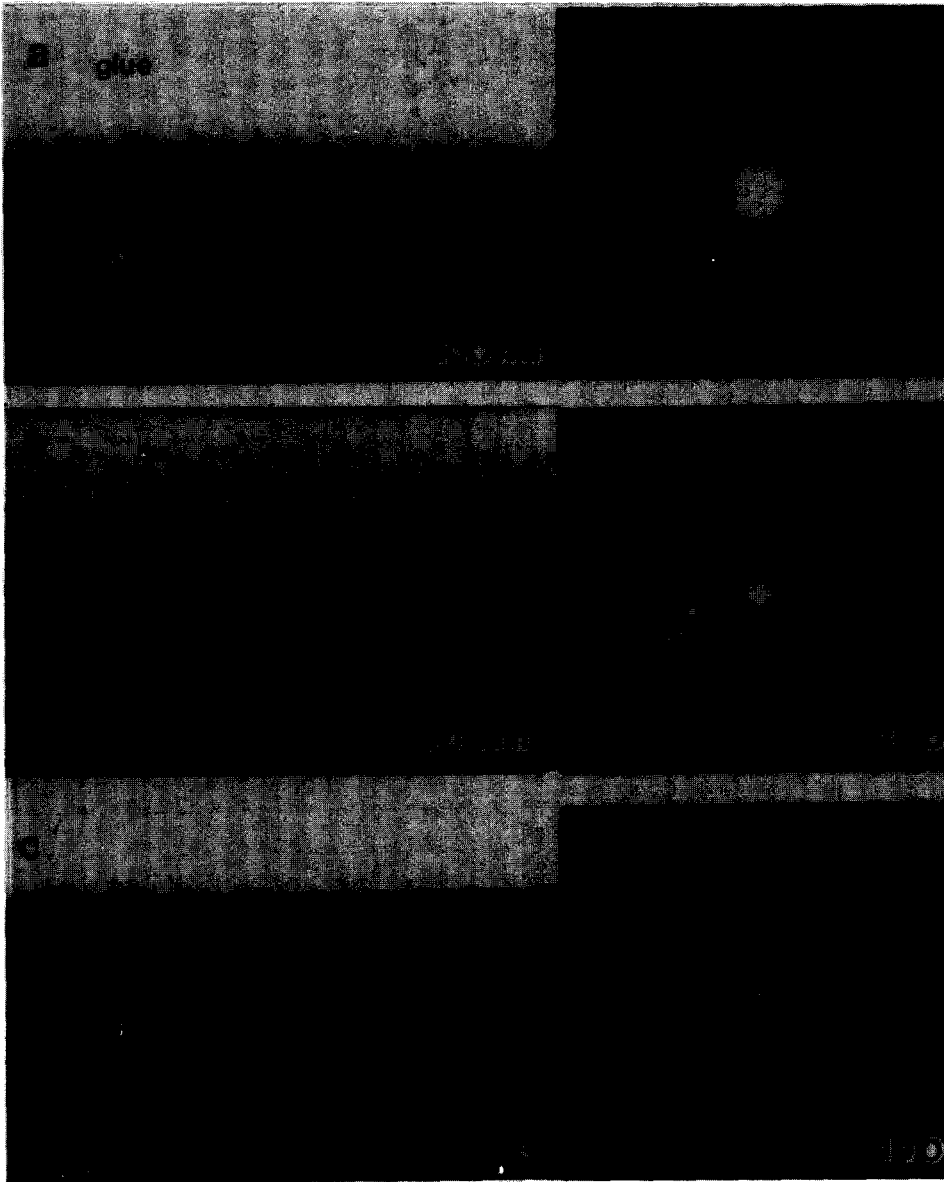


Photo 3. Cross sectional electron micrographs and diffraction patterns of Si surface area which were ion implanted and subsequently RTA treated at various temperatures : (a) 600°C, 10sec. (b) 650°C, 10sec. (c) 700°C, 10sec.

Si 기지 내부로 상당히 확산하여 어닐링전과 크게 다른 분포를 나타내고 있다. 특히 1000°C, 30분 FA결과 dopant원자 분포층은 거의 두배에 가까운 정도의 두께 (3000Å)가 측정되었으며 최대 농도 피크도 현저히 줄어들었다. 이러한 결과를 Photo 2.의 미세구조와 비

교하여 살펴보면 미세구조상으로 거의 완전한 무결함 박막층이 형성된 1000°C, 30분 FA시편의 경우 전기적 성질의 향상이 예상되나, 반면 dopant 원자의 확산 거리가 커서 얇은 박막층을 형성시킬시에는 적절하지 못한 조건으로 사료된다. 열처리의 궁극적인 목적인 미세구조

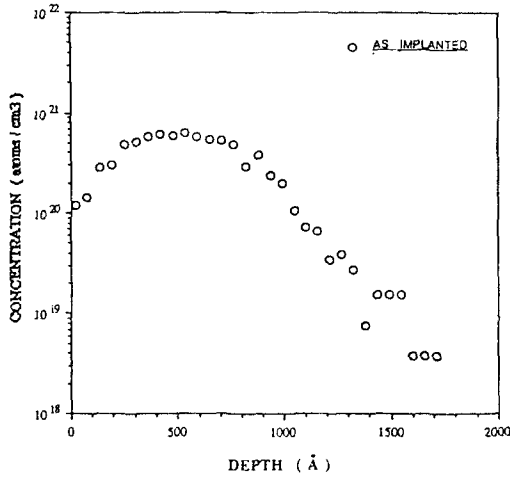


Fig. 1. Depth distribution of As⁺ ions in the implanted layer (5×10^{15} ions/cm², 100keV)

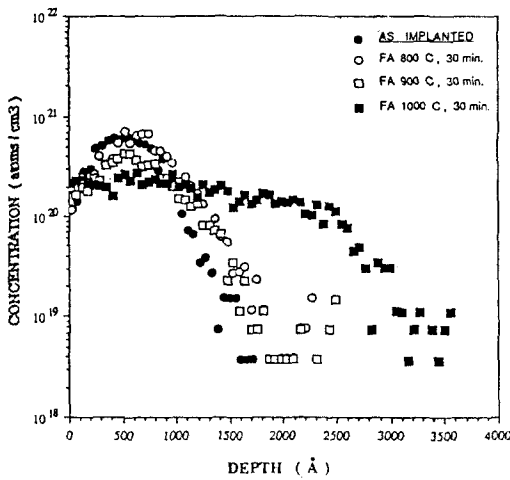


Fig. 2. Depth distribution of As⁺ ions in the implanted layer after FA (5×10^{15} ions/cm², 100keV).

의 향상과 dopant의 확산 정도를 줄이기 위해 RTA처리를 시도하여 분석하였다. Fig. 3에 RTA처리를 600, 650, 700°C에서 각각 10초간 행하여 Photo 3.의 미세구조와 비교하였다. Fig. 3에서, 이온주입 후의 dopant 분포와 각각의 온도에서 RTA처리 후의 dopant 분포는 거의 차이가 없었다. 또한 앞 절에서도 언급하였듯이 RTA처리 후 최대 As⁺이온 농도가 존재하는 깊이($\sim 500 \text{ \AA}$)와 미세공동이 존재하는 깊이(Photo. 3.(b) 참조)가 일치하는 것은 다음과 같이 설명되어질 수 있다. 즉 As⁺이온 농도가 최대인 곳에서 원자들의 무질서도가

가장 커지고 따라서 RTA 처리동안 미처 격자 점까지 확산하지 못하여 미세공동을 남긴채 SPE 성장을 하였다. RTA처리시 짧은 시간향으로 인하여 dopant원자의 확산거리는 매우 작아 거의 무시할 수 있을 정도이며 이로써 열처리에 의해 결정화되는 과정에서 인접 원자위치를 점유하였다는 사실로 예상할 수 있다.

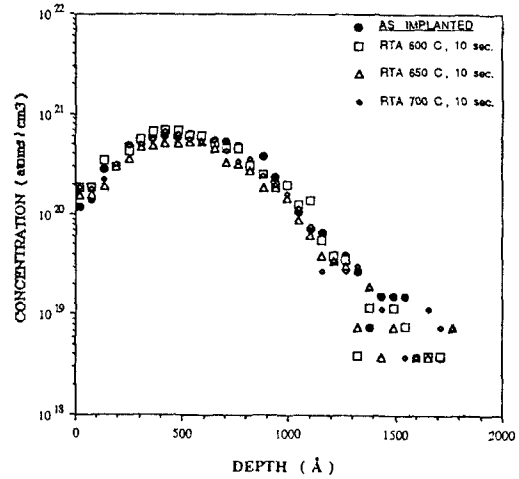


Fig. 3. Depth distribution of As⁺ ions in the implanted layer after RTA (5×10^{15} ions/cm², 100keV).

3.3 전기저항 측정

이온주입시킨 Si 표면부위의 전기적 성질을 ASR을 이용하여 살펴본 결과를 Fig. 4와 5에 각각 나타내었다. Fig. 4는 이온주입 후 FA 처리한 시편의 Spreading Resistance(SR)값으로, FA처리전 SR값은 상당히 높은 수치($>10^5 \Omega$)를 나타내어 주입된 As이온이 전기적으로 활성화되지 않았음을 보여준다. 또한 500~700 Å 깊이에서 SR피크를 볼 수 있으며 이는 Fig. 1의 최대 As⁺이온 농도 피크와 거의 일치한다. 이온주입후 열처리를 하기전에는 전기전도도에 미치는 dopant의 영향은 거의 무시할 수 있으며 따라서 SR값의 변화는 이온주입시 형성된 결과와 연관지을 수 있다. 즉, 최대 As⁺이온 농도 피크 부근에서 원자의 무질서도가 가장 크다는 결론을 유추할 수 있으며 이것은 이온주입시 여러 조건을 바꾸어 이온 농도 분포를 변화시켜준 시편의 미세조직을 관찰한 다른 논문에서도 역시 같은 결과를 나타내어

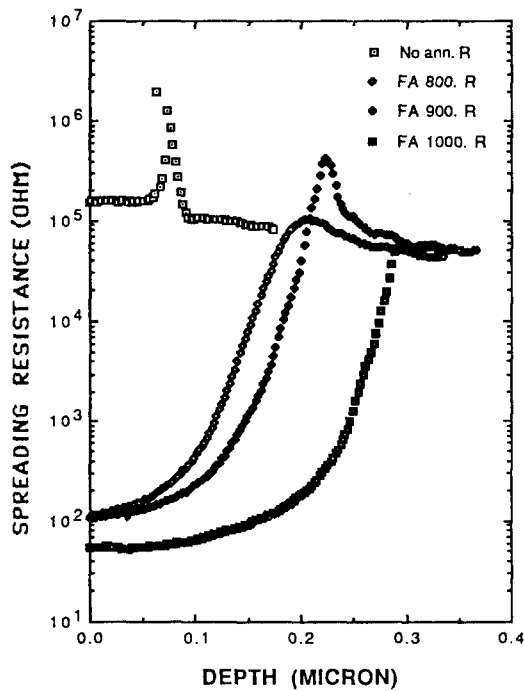


Fig. 4. Spreading resistance vs. depth of As^+ ions in the implanted layer after FA.

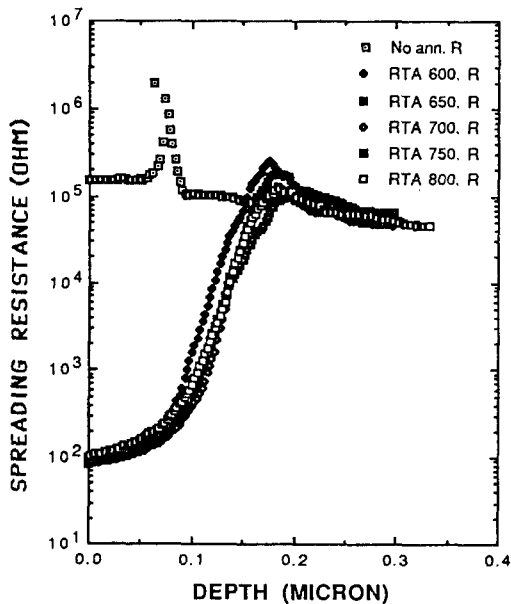


Fig. 4. Spreading resistance vs. depth of As^+ ions in the implanted layer after RTA.

준다¹⁰⁾. 또한 FA처리후 SR값은 현저하게 감소

하여 주입시킨 As^+ 이온이 전기적으로 활성화 되었음을 보여주는데, FA 900°C의 경우 약 0.2 μm 깊이에서 약간의 접합 피크를 나타내며 이것은 Fig. 2에서 나타낸바와 같이 As^+ 이온의 분포 깊이와 일치한다. 한편 RTA처리한 시편의 경우를 Fig. 5에 나타내었다. FA처리에 비해 RTA처리에 의한 SR값의 감소는 다소 미약하며 RTA온도 증가에 따른 SR값의 변화는 거의 없었다. 또한 Photo. 3.(b)에서 관찰된 미세공동은 전기저항에 영향을 미칠것이라 생각되었으나 본 실험에서는 미세공동이 관찰된 깊이에서 특이한 점을 발견하지 못하였다.

IV. 결 론

As^+ 이온을 주입시킨 Si 표면부 미세구조를 TEM 단면분석법(cross section analysis)과 RBS 및 ASR을 이용하여 분석한 결과 다음과 같은 결과 및 결론을 얻었다.

1. As^+ 이온을 주입시킨 Si 표면부는 비정질층이 형성되었으며, 형성된 비정질층은 600°C에서 10초간 RTA처리결과 SPE 성장을 하였다.

2. RTA처리시 SPE 성장후에도 표면으로부터 500Å 정도 깊이에서 미세공동이 관찰되었으며 불완전한 결정성을 보여주었다.

3. 미세공동이 관찰된 부위는 이온주입 직후 As^+ 이온의 농도가 최대인 곳으로 나타났으며 이것은 이 깊이에서 이온주입에 의하여 가장 큰 손상을 입었기 때문이라고 사료된다.

4. SR측정결과 어닐링 전후로 전기저항값이 크게 향상되었으며 RTA처리시 미세공동에 의한 SR값의 변화는 거의 없었다.

* 감사의 말 *

본 연구는 ETRI 차세대 기억소자 반도체 기술 공동개발사업과 RIST 순수기초연구의 연구비 지원으로 수행된 것의 일부로 그 지원에 감사드립니다.

V. 참고문헌

1. D. G. Hasko, R. A. McMahon, H. Ahmed, W. M. Stobbs and D. J. Godfrey, Inst. Phys. Conf. Ser. No. 76 ; section 3 p. 99(1985)
2. J. Van Landuyt, A. De Veirman, J. Vanhellefont and H. Bender, Inst. Phys.

- Conf. Ser. No. 100 ; section 1 p. 1(1989)
3. P. Ruterana, P. Stadelmann and P. A. Buffat, Inst. Phys. Conf. Ser. No. 100 ; section 1 p. 39(1989)
 4. B. J. Sealy, International Materials Reviews Vol. 33, No. 1(1988)
 5. J. Narayan, C. W. White, O. W. Holland and M. J. Aziz, J. Appl. Phys. 56(5) 1821(1984)
 6. D. K. Sadana and J. Washburn, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 4(1983)
 7. F. A. Ponce, Inst. Phys. Conf. Ser. No. 76 ; section 1, p. 1(1985)
 8. J. M. Bravman and R. Sinclair, Thin Solid Films, 104, p. 153(1983)
 9. J. M Bravman and R. Sinclair, J. Electro. Microsc. Tech., 53(1984)
 10. D. K. Sadana, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 92, p. 319, 1987