

고농도 붕소가 도핑된 실리콘 웨이퍼에서의 산소석출에 관한 연구

11-9-6

A Study on Oxygen Precipitation in Heavily Boron Doped Silicon Wafer

윤상현*, 광계달**

(Sahng-Hyun Yoon, Kae-Dal Kwack)

Abstract

Intrinsic gettering is usually used to improve wafer quality, which is an important factor for reliable ULSI devices. In order to generate oxygen precipitation in lightly and heavily boron doped silicon wafers with or without high energy $^{75}\text{As}^+$ ion implantation, the 2-step annealing method was adopted. After annealing, the wafers were cleaved and etched with the Wright etchant. The morphology of cross section on samples was inspected by FESEM (field emission scanning electron microscopy). The morphology of unimplanted samples was rather rough than that of the implanted. Oxygen precipitation density observed by an optical microscope in lightly boron doped samples was about $3 \times 10^6/\text{cm}^3$. However, in heavily boron doped samples, the density of oxygen precipitation was largest at 600°C in 1st annealing, and decreased abruptly until 800°C . But it increased slightly at 100°C and was independent with the implantation.

Key Words(중요용어) : High Energy Ion Implantation (고에너지 이온주입), Surface Morphology (표면형상), Oxygen Precipitation (산소 석출), 2-step Annealing (2단계 열처리), Defect Density (결함 밀도)

1. 서 론

반도체 기술의 급격한 발달로 초고집적회로의 설계규칙이 점차 줄어들고 있으며, 이에 따른 소자의 구조가 매우 복잡해지고 공정기술은 다양해졌으며 해결해야 할 될 문제가 많아지고 있다. 이와 관련하여 실리콘 웨이퍼에 요구되는 제 규격은 더욱 엄격해지고 있으며 그 중의 하나로 실리콘 웨이퍼내의 산소원자농도를 들 수 있다. 이것은 웨이퍼내에서 일정수준으로 유지되어야 하는데 이러한 산소의

존재로 이후에 이어지는 소자의 제조과정에서 산소석출물(oxygen precipitates)이 나타나게 된다. 이 석출물들이 소자가 형성되는 활성영역에 놓이게 되면 누설전류의 원인이 되어 결국 소자의 신뢰성에 영향을 미치게 된다. 따라서 이러한 문제해결을 위해 CZ 실리콘 웨이퍼 벌크에 intrinsic gettering을 시도하였으며¹⁾, 열처리에 기인한 미세결함에 대한 연구도 있었다^{2),3)}. 3단계 열처리(High-Low-High temp.)시 격자간 산소농도 분포변화와 denuded zone 폭의 변화에 대해서도 연구되었다^{4),5)}. 여기서 3단계 열처리란 첫째는, 고온에서 웨이퍼 표면의 산소를 외부로 확산시키고, 둘째는, 저온에서 산소농도가 높은 벌크에 핵생성을 시키며, 셋째는, 고온에서 벌크에 산소석출물을 성장시키면서 gettering 효과를 얻는 것이다. 또한, 최근에 CMOS소자에 고농도 도핑된 에피탁살(epitaxial) 웨이퍼가 많이 요구됨에 따라 고농도 도핑시의 산소석출에 대한 연구도 시도되었다^{6),7)}. 그러나 고농도 도핑시의 산소석

* : 두원공과대학 전자과

** : 한양대학교 공과대학 전자전기공학부

(서울특별시 성동구 행당동 17, Fax: 294-6429,

E-mail: kwack@shira.hanyang.ac.kr)

1998년 6월 17일 접수, 1998년 7월 14일 심사완료

출물 밀도와 잔류 결함에 관해서는 아직도 해결해야 할 과제가 많이 남아 있다.

본 논문에서는 고농도 도핑이 된 에피탁살 웨이퍼와 저농도 도핑이 된 p-type 웨이퍼에 2단계 아닐링 조건을 변화시켜 산소 석출물 밀도의 변화를 조사했으며 고에너지 이온주입 유무에 따른 표면 morphology 변화를 조사하였다.

2. 실험 방법

시편은 CZ(Czochralski)방법으로 제조된 p-type (저농도) 웨이퍼($\rho = 8 \sim 12 \Omega\text{cm}$, $[\text{O}_i]: 12 \sim 14 \text{ppma}$)와 에피탁살(고농도) 웨이퍼(p-epi.층: 두께 $\approx 3.5 \mu\text{m}$, $\rho = 11 \sim 15 \Omega\text{cm}$, p+기판: $\rho = 0.01 \sim 0.02 \Omega\text{cm}$)를 이용하였다. 먼저 p-type 웨이퍼의 초기 격자간 산소농도를 FTIR(Fourier Transform Infrared Spectroscopy)로 측정하였다. 이온주입시 격자의 지나친 손상과 채널링을 막고, N_2 분위기 아닐링 초기에 웨이퍼의 slip을 막기 위해 전 웨이퍼에 대해 RTO(Rapid Thermal Oxidation)를 적용하여 산화막을 $100 \sim 200 \text{\AA}$ 씩 성장하였다. 이들 두 가지 웨이퍼는 각각 두 그룹으로 나누어 한 그룹은 $^{75}\text{As}^+$, 1.5MeV , $1 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ 으로 이온주입하고 한 그룹은 하지 않았다. 이들 그룹은 모두 2단계 아닐링(Low-High)을 실시하였다. 첫 번째 단계인 낮은 온도 아닐링은 $600, 700, 800, 900, 1000^\circ\text{C}$ 에서 10시간 동안, N_2 분위기에서 실시 하여 핵생성 밀도의 변화를 주었다. 높은 온도 아닐링은 1000°C , 5시간 동안, N_2 분위기에서 아닐링하여 산소 석출물(oxygen precipitates)의 성장 유무를 볼 수 있게 하였다. 그리고 열처리후의 p-type 웨이퍼의 격자간 산소농도를 FTIR로 측정하였으며, 웨이퍼 단면을 자르고 그곳을 Wright용액을 사용해서 에칭하였다. $^{75}\text{As}^+$ 이온주입에 따른 2단계 열처리후의 농도분포 및 벌크농도(bulk concentration)를 알아보기 위하여 SRP(Spreading Resistance Profilometer)분석을 하였다. 그리고 이온주입된 표면부근의 morphology 관찰은 FESEM으로 하였으며, 산소 석출물의 밀도를 알아보기 위해 광학현미경을 이용하였다. 그림 1에 개략적인 순서도가 나타나 있다.

3. 결과 및 토의

열처리전후에 p-type 웨이퍼의 FTIR로 측정된 격자간 산소농도, $[\text{O}_i]$ 는 초기치 13.7ppma 에서 약

1.05ppma 가 감소하였는데 각 실험 조건에 따른 차이가 없었다. 이것은 p-type 전 웨이퍼에서 산소석출물이 거의 발생하지 않은 것과도 일치한다.

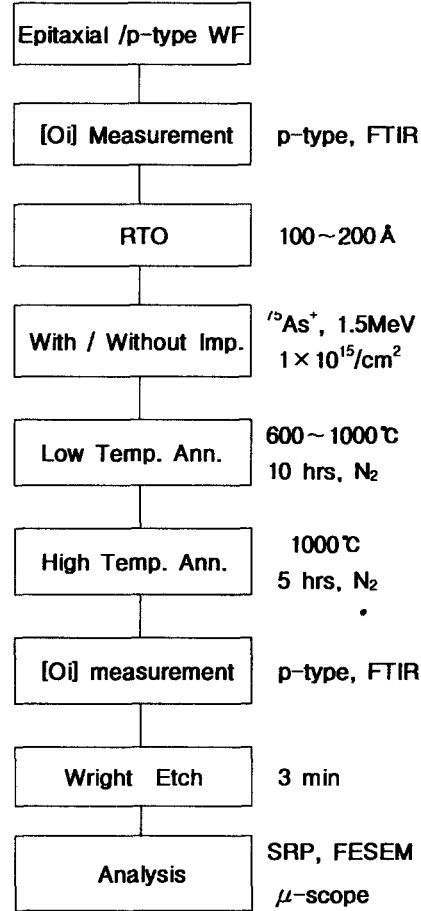
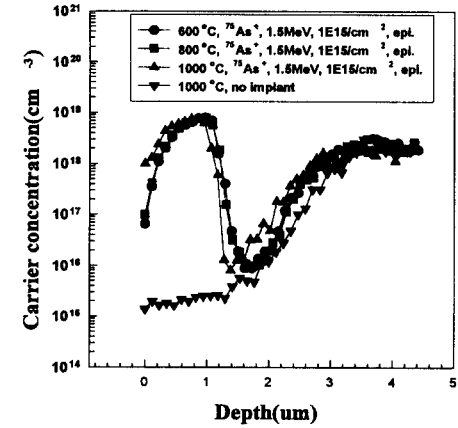
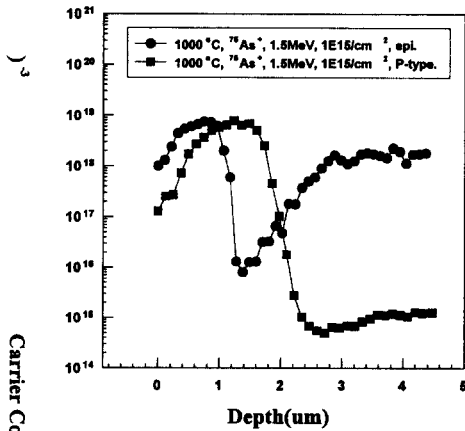


그림 1. 실험 순서도
Fig. 1. Flow chart of experiment

그림 2는 2단계 열처리후의 SRP 농도 분포이다. 먼저 (a)그림은 에피탁살 웨이퍼에 이온주입후 열처리한 웨이퍼로서, 침투치 깊이(peak depth)는 $\sim 0.9 \mu\text{m}$ 이며 침투치 농도(peak concentration)는 $\sim 8 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 이었으며 벌크농도는 $\sim 2 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 정도의 고농도 도핑이었다. 특이한 것은 1차 열처리 온도가 높아짐에 따라 벌크의 붕소가 표면 밖으로 확산되면서 비소원자와 재결합하여 없어지면서 접합깊이가 줄어들었음을 알 수 있다. 이온주입을 하지 않은



(a)



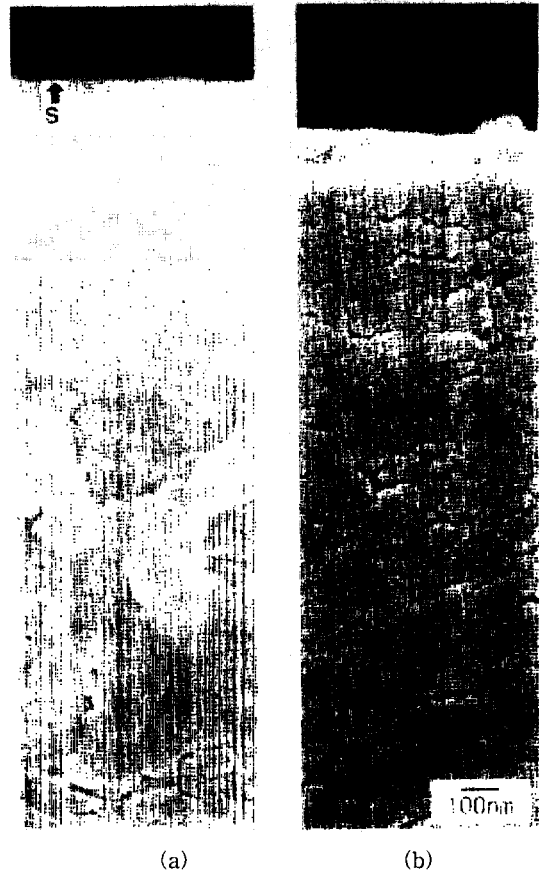
(b)

그림 2. 2단계 열처리조건(X°C, 10hrs + 1000°C, 5hrs, N₂분위기)에 따른 carrier 농도를 SRP로 측정한 결과. (a) 에피탁살 웨이퍼에서 ⁷⁵As⁺, 1.5MeV, 1E15/cm² 이온주입 유무에 따른 결과 (b) 웨이퍼 타입에 따른 결과.

Fig. 2. Carrier concentration profiles measured by SRP after 2-step annealing(X°C, 10hrs + 1000°C, 5hrs in N₂). (a) with/without implantation (b) epitaxial or p-type wafer.

시료의 경우도 벌크에서 표면 밖으로 붕소가 확산되면서 반송자 농도가 점차 감소함을 알 수 있다.

(b)그림을 보면 벌크의 농도차에 따른 접합깊이의 변화를 잘 알 수 있다.



(a)

(b)

그림 3. 2단계 열처리(1단계는 700°C)한 p-type 에피탁살 웨이퍼를 쪼개어 Wright 식 각후 표면근처의 morphology를 찍은 FESEM사진. (a) ⁷⁵As⁺이온주입 하였을 때. (b) 이온주입 하지 않았을 때.

Fig. 3. Surface morphology observed by FESEM near surface on the cross section of silicon wafer after 2-step annealing (1st ann. at 700°C) followed by Wright etching of cleaved samples. (a) with ⁷⁵As⁺ ion implantation. (b) without implantation.

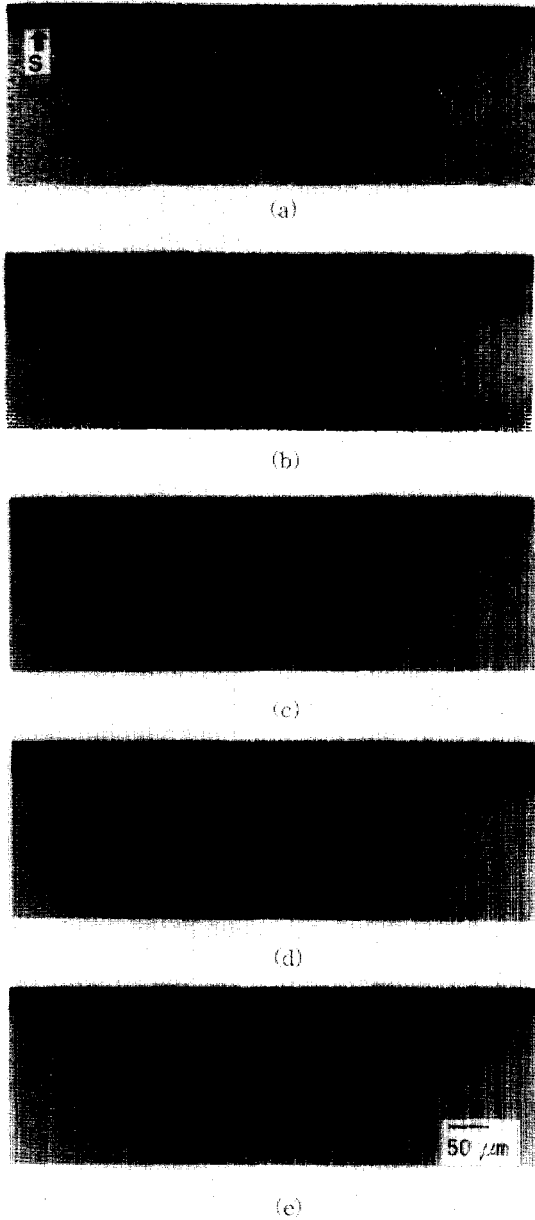


그림 4. 에피탁살 웨이퍼에 대하여 2단계 열처리 온도에 따른 Wright 식각시 웨이퍼 단면에 나타난 산소석출물의 현미경사진. (a) 600 (b) 700 (c) 800 (d) 900 (e) 1000°C.

Fig. 4. Oxygen precipitates in silicon after 2-step annealing followed by Wright etch. (a) 600 (b) 700 (c) 800 (d) 900 (e) 1000°C.

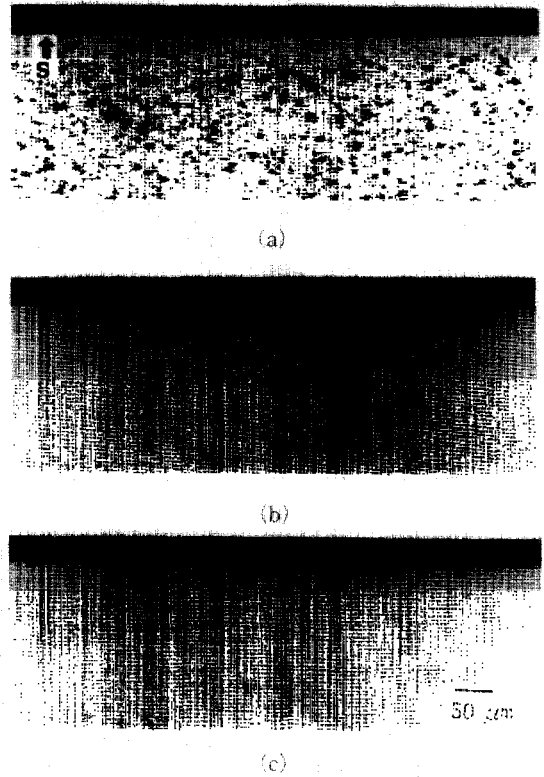


그림 5. 1단계 온도가 600°C일 때 Wright 식각시 웨이퍼 단면에 나타난 산소석출물의 현미경사진. (a) 이온주입된 에피탁살 웨이퍼. (b) p-type 웨이퍼 (c) 이온주입된 p-type 웨이퍼

Fig. 5. Oxygen precipitates in silicon after 2-step annealing with 1st step annealing at 600°C followed by Wright etch. (a) for epitaxial wafer with ion implantation (b) for p-type wafer without ion implantation (c) for p-type wafer with ion implantation.

그림 3은 이온주입 유무 및 웨이퍼의 종류에 따른 결과로서, 2단계 열처리후 웨이퍼의 단면을 자르고 표면 가까운 위치에서 FESEM (Field Emission Scanning Electron Microscopy)으로 관찰한 결과이다. 그림 3(a)은 이온주입을 하지 않은 시료인데 상당히 거친 표면과 불규칙한 grain의 크기를 볼 수 있다. 그러나 그림 3(b)는 이온주입을 한 시료로서 거친 표면이 보이지 않고 grain의 크기도 상당히 일

정함을 볼 수 있었다. 이것은 이온주입을 한 경우 주입된 불순물과 많은 1차 결합이 열처리과정에서 다결정질을 이루며 안정을 찾았다고 볼 수 있다.

그림 4는 2단계 열처리후의 웨이퍼의 단면을 Wright 용액에서 식각하고 광학현미경으로 찍은 사진이다. 그림 4(a)는 에피탁살 웨이퍼를 600°C에서 1단계 열처리한 시료로 검은 점으로 보이는 부분이 산소석출물에 해당된다. 이 조건에서는 많은 산소석출물이 골고루 분포하고 있으며 그 크기도 다양하고 모양은 대체로 타원형에 가까웠다. 표면에서 약 10~20 μm 범위에서는 이러한 석출물이 보이지 않는데 이 영역은 denuded zone에 해당된다.

이것은 에피탁살층의 불순물 농도가 기판의 그것에 비해 낮고 산소농도도 훨씬 낮기 때문에 나타난 결과이다. 그리고 이와 같은 denuded zone은 intrinsic gettering의 결과로 형성되며 이를 형성하기 위해서는 일반적으로 HLH공정을 적용하는데 여기서는 첫 번째 열처리 단계가 빠진 것이 차이점이다. 그림 4(b), (c), (d), (e)는 1단계 열처리 온도가 각각 700, 800, 900, 1000°C로 증가할 때의 결과로서 800°C까지 산소석출물의 수가 감소하다가 1000°C에서는 다시 증가하는 특이한 결과를 보였다.

그림 5는 이온주입유무 및 낮은 불순물농도와 산소농도일 경우에 열처리후 웨이퍼 단면을 Wright식각한 사진이다. 그림 5(a)는 그림 4(a)의 조건과 동일하나 다만 열처리전에 고에너지 이온주입이 추가된 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 이온주입에 따른 산소석출물 밀도나 크기에는 변화가 없었다. 그림 5(b)는 붕소 도핑농도가 $\sim 1.3 \times 10^{15}/\text{cm}^3$ 이고 격자간 산소농도가 약 13.7ppma인 p-type 웨이퍼에 대해 앞에서와 같이 열처리한 결과이다. 그림에서 산소석출물 밀도는 그림 4(a)의 그것에 비하여 매우 낮은 수준인데 이것은 비록 열처리 조건이 낮은 온도로서 핵생성에 유리한 조건이지만 산소농도가 13.7 ppma로서 낮은 편이고, 붕소 도핑농도도 기준치($\approx 5 \times 10^{16}/\text{cm}^3$)보다 낮은 값이기 때문에 나타난 결과이다⁷⁾. 그림 5(c)는 그림 5(b)조건과 같으나 비소 이온주입이 된 것이 차이점이며 5(b)에서와 같이 낮은 산소석출물 밀도를 보여주고 있다.

그림 6은 에피탁살 웨이퍼에서 이온주입유무에 따른 산소석출물 밀도이다. 그 결과는 이온주입유무에 관계없이 비슷한 경향을 보이며 600°C일 때 산소석출물 밀도가 $\sim 6 \times 10^9/\text{cm}^3$ 로서 최고치를 이루었다. 그리고 온도가 800 ~ 900°C까지 증가함에 따라 그 값은 2승가량 감소하였고 1000°C에서는 다시

증가하였다. 이는 기존의 산소농도가 높고 도핑농도가 낮은 경우에 산소석출물 밀도의 최대치가 650°C에서 나타난 것과 비교하면 대체적인 경향이 유사하다고 볼 수 있다. 즉, 이것은 산소농도가 높을

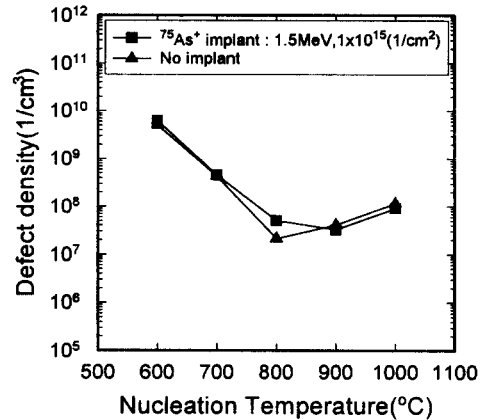


그림 6. 에피탁살 실리콘 웨이퍼에서 핵생성 온도에 따른 산소석출물 밀도의 변화.

Fig. 6. Oxygen precipitates density variations in epitaxial silicon wafers for different nucleation temperatures.

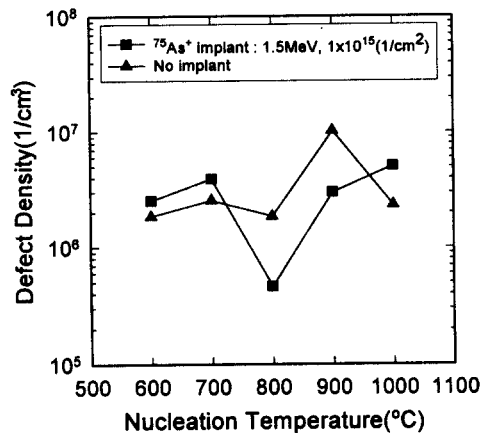


그림 7. 저농도 도핑된 p-type 웨이퍼에서 핵생성 온도에 따른 산소석출물 밀도의 변화.

Fig. 7. Oxygen precipitates density variations in lightly doped p-type silicon wafers for different nucleation temperatures.

때와 불순물 농도가 높을 때 산소석출반응의 온도 의존성이 비슷한 경향을 가짐을 알 수 있다.

그림 7은 p-type 웨이퍼 즉, 저농도의 산소, 붕소 농도인 경우 온도에 따른 산소석출물 밀도로서 온도에 따라 변화가 적으며 그 값은 $\sim 10^6/\text{cm}^3$ 으로 매우 낮다. 이것은 이들 웨이퍼 조건들이 그 어느 것도 산소석출에 필요한 조건을 만족시키지 못하고 있다고 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 도핑 농도가 다른 실리콘 웨이퍼를 이용하고 비소 이온주입 유무에 따른 Low-High 2단계 열처리시 그 단면 morphology 및 산소석출물 형성에 대하여 조사하였고 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 이온주입시 에피탁살 웨이퍼 내에 생성된 많은 불순물과 1차 결합은 비교적 작고 규칙적인 grain을 형성할 수 있으나 이온주입을 하지 않은 시료에서는 크고 불규칙적인 grain을 형성하였다.
- 2) 산소 농도는 낮지만 붕소 도핑농도가 높은 에피탁살 웨이퍼에서 1단계 열처리 온도가 600℃일 때 산소석출물이 가장 많이 발생하고 온도증가에 따라 감소하다가 1000℃일 때 다시 증가하는 특이한 결과를 보였다. 이것은 기존의 고농도 산소 웨이퍼에서 650℃에서 산소석출이 다량으로 발생한 것과 유사하며 붕소농도만 높아도 동일한 산소석출이 유도된다는 것을 나타내고 있다.
- 3) 비소 고에너지 이온주입 유무에 따른 산소석출물 형성의 차이는 없었으며 저농도 도핑시 산소석출물은 거의 발생하지 않았다.
- 4) 이상의 결과는 향후 intrinsic gettering에 응용할 수 있는 자료라고 판단된다.

참 고 문 헌

1. T. Y. Tan, E. E. Gardner, W. K. Tice, "Intrinsic gettering by oxide precipitates induced dislocations in Czochralski Si", *Appl. Phys. Lett.*, 30, 175(1977).
2. S. Kishino, Y. Matsushita, M. Kanamori, and T. Iizuka, "Thermally Induced Microdefects in Czochralski-Grown Silicon: Nucleation and Growth Behavior", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 21, 1(1982).
3. D. M. Maher, A. Staudinger, and J. R. Patel, "Characterization of structural defects in annealed silicon containing oxygen", *J. Appl. Phys.*, 47, 3813(1976).
4. S. Isomae, S. Aoki, and K. Watanabe, "Depth profiles of interstitial oxygen concentrations in silicon subjected to three-step annealing", *J. Appl. Phys.*, 55, 817(1984).
5. K. Yang, J. Carle, and R. Kleinhenz, "Information of the oxygen precipitation-free zone in silicon" *J. Appl. Phys.*, 62, 4890(1987).
6. W. Wijaranakula, "Oxygen precipitation and defects in heavily doped Czochralski silicon" *J. Appl. Phys.*, 72, 2713(1992).
7. S. K. Bains, D. P. Griffiths, and J. G. Wilkes, R. W. Series and K. G. Barraclough, "Oxygen Precipitation in Heavily doped Silicon", *J. Electrochem. Soc.*, 137, 647(1990).