

# Retrograde Well 형성을 위한 고에너지 이온주입에 대한 연구

논문  
11-5-4

## A Study on High Energy Ion Implantation for Retrograde Well Formation

윤상현\*, 광계달\*\*

(Sahng-Hyun Yoon, Kae-Dal Kwack)

### Abstract

Retrograde well is a new process for ULSI fabrication. High energy ion implantation has been used for retrograde well formation. In this paper the forming condition for retrograde well using high energy ion implantation is compared with that for conventional well. TW signals for retrograde p-, n-well(900°C) after annealing are similar trends to those of conventional ones(1150°C), however the signals for RTA have the highest value because of small thermal budget. Junction depths of retrograde well are varied from about 1.2 to 3.0  $\mu\text{m}$  as for conventional well. The peak concentrations of retrograde well, however, are about 10 times higher in values than those of conventional ones so that they can be used as any types of potential barriers or gettering sites. The critical dose for phosphorus implantation in our experiments is between  $3 \times 10^{13}$  and  $1 \times 10^{14}/\text{cm}^2$ . Under the above critical dose, there are many secondary defects near projected range such as dislocation lines and dislocation loops.

**Key Words(중요용어)** : High Energy Ion Implantation (고에너지 이온주입), Retrograde Well (역경사 우물), RTA (급속열처리), Junction Depth (접합깊이), Channeling (채널링), Secondary Defects (2차 결함)

### 1. 서 론

반도체 기술의 급격한 발달로 소자의 설계규칙이 점차 줄어들고 있으며, 이에 따른 소자의 구조는 매우 복잡해지고 공정기술도 다양해 지고 있다. 그 중의 하나로 이온주입기술은 저에너지범위에서의

불순물 도핑에서 뿐만아니라 고에너지 범위에서도 여러가지 응용이 시도되고 있다. 즉, 고에너지 이온주입기술로서 CMOS소자의 미세화로 인해서 나타나는 latch-up방지를 위해서는 에피층(epilayer)을 대신할 수 있는 층이나 latch-up에 강한 불순물 분포를 얻을 수 있으며<sup>1,2)</sup>, DRAM에서는 알파 입자( $\alpha$ -particle)에 의해서 soft error가 발생하게 되는데 이의 감소를 위해서 기판 깊숙한 곳에 이들을 막을 수 있는 전위언덕(potential barrier)을 형성할 수 있다<sup>3,4)</sup>. 소자의 미세화로 기존의 우물(well)형성시의 고온 장시간 열처리로는 우물의 불순물 분포 제어 가 불가능하므로 이를 역경사우물(retrograde well)으로써 대체시 고에너지 이온주입이 응용되며<sup>5)</sup>, 기판 내에는 웨이퍼 제조과정 또는 공정진행과정에서 여

\* : 두원공업전문대학 전자과

\*\* : 한양대학교 공과대학 전자전기공학부

(서울특별시 성동구 행당동 17, Fax:02-294-6429

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

1998년 1월 23일 접수, 1998년 4월 14일 심사완료

러 가지 금속이온에 노출되므로 이들이 형성하는 결합으로 인하여 여러 가지 소자 불량을 유발하게 되는 데 이들 금속이온을 원하지 않는 곳으로 모으는 gettering공정에 이 공정이 적용된다<sup>6),7)</sup>. 한편, 필드 산화막을 경유하여 고에너지 이온주입함으로써 소자격리효과를 개선할 수 있으며<sup>8)</sup>, 채널의 이동도, 펀치쓰루 전압, 기관상수, 집합용량등의 최적화를 위해 이 공정에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 그러나 이러한 다양한 응용에 비하여 고에너지 이온주입 자체가 실리콘결합에 어떤 영향을 주고 열처리 조건에 따라서 불순물 농도분포와 잔류결합이 어떻게 달라지는지에 대한 해석이 불충분하다.

본 논문에서는 고에너지 이온주입시 격자와 이온 충돌에 의한 1차결합 즉, 격자손상이 열처리 조건에 따라 회복되는 정도를 Therna Wave신호로서 해석하였다. 주입된 이온분포가 금속열처리 과정에서 어떻게 달라지고, 이 것이 역경사우물 형성에 적합한지를 알아 보았으며, 1차결합이 열처리후 어떠한 2차결합으로 잔류하는지를 조사하여 고에너지를 응용한 공정에 필요한 중요한 자료를 확보하였다.

2. 실험 방법

시편은 CZ(Czochralski)방법으로 제조된 p-type (100)실리콘 웨이퍼에 <sup>11</sup>B<sup>+</sup>, 80keV~2MeV, 1E13~6E13/cm<sup>2</sup> 및 <sup>31</sup>P<sup>+</sup>, 150keV~3MeV, 1E13~4.5E13/cm<sup>2</sup>의 조건으로 이온주입하였다. 기존 우물과 비교하기 위해 확산로에서 기존우물의 열처리 조건, FA1(1150℃, 7시간, N<sub>2</sub>분위기)과 retrograde well의 열처리 조건, FA2(900℃, 1시간, N<sub>2</sub>분위기)에서 어닐링 하였다. 여기에 retrograde well형성을 위해 금속열처리, RTA(1000℃, 15초, N<sub>2</sub>분위기)를 실

표 1. 이온주입 및 열처리조건

Table 1. Implantation and annealing condition

WF 번호	이온주입 조건	열처리 조건
11	<sup>11</sup> B <sup>+</sup> , 80keV, 1.0E13/cm <sup>2</sup>	FA1
12	<sup>11</sup> B <sup>+</sup> , 300keV, 5.0E13/cm <sup>2</sup>	FA2
13	<sup>11</sup> B <sup>+</sup> , 900keV, 2.0E13/cm <sup>2</sup>	FA2
14	<sup>11</sup> B <sup>+</sup> , 1.5MeV, 4.0E13/cm <sup>2</sup>	FA2
15	<sup>31</sup> P <sup>+</sup> , 150keV, 1.0E13/cm <sup>2</sup>	FA1
16	<sup>31</sup> P <sup>+</sup> , 450keV, 1.0E13/cm <sup>2</sup>	FA2
17	<sup>31</sup> P <sup>+</sup> , 1.5MeV, 2.0E13/cm <sup>2</sup>	FA2
18	<sup>31</sup> P <sup>+</sup> , 3.0MeV, 4.0E13/cm <sup>2</sup>	FA2
20	<sup>11</sup> B <sup>+</sup> , 450keV, 2.5E13/cm <sup>2</sup>	RTA
21	<sup>11</sup> B <sup>+</sup> , 500keV, 3.0E13/cm <sup>2</sup>	RTA
22	<sup>11</sup> B <sup>+</sup> , 500keV, 3.5E13/cm <sup>2</sup>	RTA
23	<sup>11</sup> B <sup>+</sup> , 500keV, 4.0E13/cm <sup>2</sup>	RTA
24	<sup>11</sup> B <sup>+</sup> , 800keV, 4.0E13/cm <sup>2</sup>	RTA
25	<sup>11</sup> B <sup>+</sup> , 1.0MeV, 4.5E13/cm <sup>2</sup>	RTA
1	<sup>31</sup> P <sup>+</sup> , 800keV, 2.0E13/cm <sup>2</sup>	RTA
2	<sup>31</sup> P <sup>+</sup> , 825keV, 3.0E13/cm <sup>2</sup>	RTA
3	<sup>31</sup> P <sup>+</sup> , 825keV, 4.0E13/cm <sup>2</sup>	RTA
4	<sup>31</sup> P <sup>+</sup> , 825keV, 5.0E13/cm <sup>2</sup>	RTA
5	<sup>31</sup> P <sup>+</sup> , 1.0MeV, 6.0E13/cm <sup>2</sup>	RTA
6	<sup>31</sup> P <sup>+</sup> , 2.0MeV, 6.0E13/cm <sup>2</sup>	RTA
FA1: 1150℃, 7hrs, N <sub>2</sub>		FA2: 900℃, 1hr, N <sub>2</sub>
RTA: 1000℃, 15sec., N <sub>2</sub>		

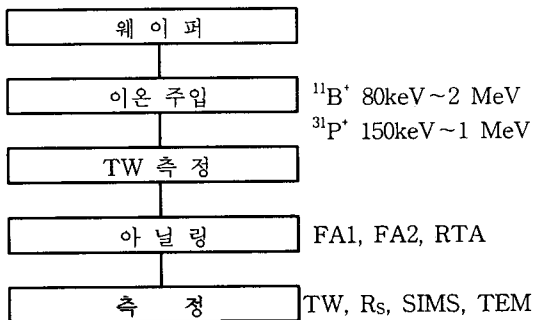


그림 1. 실험 순서도

Fig. 1. Flow chart of experiment

시하여 기존의 확산로 열처리 방식과 비교하였다.

표 1은 이온주입 및 열처리조건을 나타낸 도표이다. 격자손상의 회복을 알아보기 위해 Therna Wave (TW)신호를 측정하였고, Four-point probe로써 면저항을 분석하였다. 불순물의 분포를 알아보기 위해 SIMS(Secondary Ion Mass Spectrometry) 분석을 하였으며, TEM (Transmission Electron Microscopy)으로 이온주입에 따른 격자결합이 열처리후에 어떤 2차결합으로 잔류하는지를 조사하였다. 그림 1에 개략적인 실험 순서도가 나타나 있다.

3. 결과 및 토의

고에너지 이온주입시에는 격자에 많은 손상을 주게 되는데 이 손상은 열처리하여 회복시킨다. 최근에는 열처리 예산의 감소로 열처리후에도 이온주입시에 받은 격자손상이 충분히 회복되지 않을 수도 있다. 이러한 손상의 회복 정도는 TW신호로써 알아볼 수 있으며 고에너지 이온주입후의 FA1과 FA2를 각각 적용시 TW신호값의 변화를 살펴보았다. 이러한 결과가 표 2에 나타나 있다. FA2시료의 경우 이온주입직후(as-implant)의 TW값은 p-well형성조건일때의 635-867에 비하여 n-well형성조건인 경우에는 1230-2240으로 2배이상의 값을 가졌는데 이는 인(phosphorus)이온의 질량이 붕소(boron)이온의 질량에 비하여 약3배정도 크므로 상대적으로 핵정지 에너지가 크고 실리콘 격자의 이에 따르는 충격이 크져서 격자의 손상(damage)이 많아졌기 때문이다. 따라서 동일한 dose 및 에너지에서 인이온에 의한 실리콘내의 일차결함 즉, 실리콘 격자간원자(silicon interstitial)와 격자빈자리(vacancy)가 붕소이온의 그것에 비하여 많이 발생하였다고 볼 수 있다.

이들 시료의 확산로 열처리후의 TW값을 보면 먼저 붕소와 인은 FA1과 FA2 모두 100이하의 값을 가졌는데 이렇게 TW값이 많이 떨어진 이유는 이닐링과정에서 이온주입된 불순물과 실리콘 격자간 원자가 각기 격자 빈자리를 찾아서 활성화 되었기 때문이며 이 값은 bare 실리콘 웨이퍼에 해당되는 값이다. 한편 RTA로 열처리한 시료의 경우 p-well, n-well이온주입후 as-implant 상태의 TW값은 붕소인 경우 631 - 678의 값을 가졌고 인의 경우는 1084 - 1758로서 질량차에 따른 차이가 나타나며 RTA후의 그 값은 두 이온의 경우 모두 약 200정도의 값으로서 앞서 언급한 FA1, FA2에 비하여 큰 값을 나타내고 있다. 그 이유는 RTA조건에서는 고에너지 이온주입시의 격자손상의 회복이 확산로 열처리에 비하여 너무 짧은 시간에 이루어지므로 부분적으로 활성화가 이루어 졌음을 알 수 있다. 열처리 전후의 TW신호에 대한 균일도(uniformity)는 대체로 수%내외의 값을 나타내고 있었다.

한편 열처리후의 면저항(sheet resistance)값은 기존의 n-well인 경우 FA1후 840 ± 50 Ω/sq. 범위를 보이는데 반해 FA2조건에서는 854Ω/sq.의 비슷한 값을 가졌다. 이는 고에너지인 경우 낮은 온도, 짧

은 시간임에도 불구하고 기존 우물과 유사한  $X_j$ 와 표면농도(surface concentration), 첨두농도(peak concentration)를 얻을 수 있으므로 충분히 확산을 시키지 않아도 낮은 면저항을 얻을 수 있다는 것을

표 2. TW 및 면저항 측정값  
Table 2. TW signal and sheet resistance

WF 번호	TW 값		Sheet resist ( Ω/sq )
	as-implant	after anneal	
11	635	60.0	1826
12	648	62.5	---
13	772	33.1	--
14	867	34.5	--
15	1230	33.0	840
16	1348	31.8	854
17	1893	30.6	320
18	2240	37.5	161
20	631	188	1087
21	650	213	946
22	664	219	848
23	678	219	774
24	668	223	693
25	655	185	680
1	1084	185	486
2	1293	194	374
3	1500	192	315
4	1699	187	277
5	1758	184	243
6	1386	202	227

잘 보여주고 있다. 에너지와 dose가 증가할수록 면저항이 감소 하듯이 표 2에서도 많은 감소를 보이고 있다. 표 2에서 면저항 값을 보면 p-well인 경우 1100Ω/sq.이하의 면저항 값을 가졌는데 에너지와 dose증가에 대해 서서히 감소하는 경향을 보였다. n-well인 경우도 500Ω/sq.이하의 면저항을 보였으며 경향은 p-well인 경우와 유사하였다.

표 3에서 SIMS결과를 보면 retrograde p-well의 형성조건에 해당하는 WF#12, 13, 14의 경우 FA2후에 접합깊이( $X_j$ )는 에너지와 dose증가에따라 1.2 μ

m에서 2.86  $\mu\text{m}$ 까지 변하고 침투깊이( $X_p$ )는 0.7  $\mu\text{m}$ 에서 2.2  $\mu\text{m}$ 까지 변하는데 이것은 dose와 에너지가 증가함에 따라 Projected Range( $R_p$ )와 불순물 도핑(doping)량이 증가하기 때문이다.

Retrograde n-well의 형성조건에 해당하는 WF#16, 17, 18의 경우도 마찬가지로 경향으로 FA2후에  $X_j$ 가 1.25  $\mu\text{m}$ 에서 3.4  $\mu\text{m}$ 까지 변하며  $X_p$ 가 0.5  $\mu\text{m}$ 에서 2.36  $\mu\text{m}$ 까지 변하는 것을 알 수 있다. 이러한 수치는 기존의 p-well 및 n-well과 유사한 결과로서 기존의 well을 대체하기에 필요한 불순물 도핑모양과 접합깊이를 임의로 조절할 수 있음을 뜻한다.

한편 RTA후의 SIMS결과를 보면 우선 그림 2에서 붕소(boron)는 인의 경우와 달리 침투치부근에서 농도의 붕우리가 2개로 나누어지는 경향을 보였다. 이것은 이온주입시 웨이퍼에 대한 이온빔의 경사각을 0°로 하였으므로 불순물의 채널링(channeling)이 일어나 더 깊숙이 불순물이 침투하고, 웨이퍼간에도핑 재현성이 떨어졌기 때문이다<sup>9)</sup>. 이 급속열처리(RTA)과정에서는 과도증가확산(TED: Transient Enhancement Diffusion)이 일어날 수 있는데 이것은 열처리가 시작되어 약10초이내에 일어나는 현상으로 이 때에는 확산계수의 값이 정상상태보다 수백배이상 크게되며 그 원인은 비정상적인 격자간 원자의 농도에 있다고 보는 이도 있다<sup>10)</sup>. 이렇게 아주 빠른 확산을 하게되면 그 결과로 불순물 농도분포에서  $R_p$ 보다 더 깊은 쪽의 끝부분에 tail이 일반적으로 나타나게 되는데 여기서는 그러한 현상이 뚜렷이 나타나지는 않고 있다. 그 원인의 하나로는 0°이온주입에 따른 as-implant상태의 농도분포의 차이를 들 수 있겠다. 한편, 인의 경우는 이중 붕우리가 없으며 일반적인 불순물 모양을 갖는다. 그렇지만 엄밀하게 관찰해 보면  $R_p$ 를 중심으로 오른쪽의 불순물농도가 그 왼쪽보다 높은 것을 알 수 있는데 이 차이가 바로 채널링에 의한 불순물 농도의 변화임을 알 수 있다.

표 3, 그림 2에서와 같이 WF#20, 21, 22, 23에서  $X_j$ 가 각각 1.78, 1.88, 1.90, 1.89  $\mu\text{m}$ 로 조금씩 증가하는 경향을 보이고 있는데 이는 앞서 언급되었듯이 이온주입량이 증가함으로써 나타난 결과이며,  $X_p$ 는 1.30 ~ 1.35  $\mu\text{m}$ 로서 예상치보다 다소 큰 값이다. 그림 2와 표 3에 나타난 바와같이 불순물 농도의 침투치가 dose의 증가에 따라 4.50E17/cm<sup>3</sup>에서 7.29E17/cm<sup>3</sup>까지 서서히 증가함을 알 수 있으며, 예

Table 3. SIMS measurements

표 3. SIMS 측정값

WF 번호	Peak conc. (/ cm <sup>3</sup> )	Peak depth ( $\mu\text{m}$ )	Junc. depth ( $\mu\text{m}$ )
11	--	--	--
12	--	0.70	1.20
13	--	1.50	2.18
14	--	2.20	2.86
15	--	--	--
16	--	0.50	1.25
17	--	1.40	2.25
18	--	2.36	3.40
20	4.50E17	1.30	1.78
21	4.85E17	1.35	1.88
22	5.92E17	1.32	1.90
23	7.29E17	1.30	1.89
24	6.70E17	1.43	1.89
25	7.74E17	1.65	2.72
1	1.34E17	0.76	1.78
2	3.52E17	0.80	2.20
3	6.30E17	0.83	2.35
4	9.12E17	0.86	2.42
5	8.39E17	1.04	2.67
6	7.69E17	1.52	3.54

너지 증가에 따라서는 감소하고 있다. 그림 3은 인(phosphorus)의 경우의 SIMS결과이다. 표 3, 그림 3에서와 같이 WF# 1, 2, 3, 4인 경우도  $X_j$ 가 각각 1.78, 2.20, 2.35, 2.42  $\mu\text{m}$ 로 조금씩 증가하는데 이것은 붕소의 경우와 마찬가지로 에너지가 증가하고, 이온주입량이 증가함으로써 나타난 결과이다.  $X_p$ 는 0.76 ~ 0.86  $\mu\text{m}$ 범위에서 조금씩 증가하고 하고 있다. 일반적으로 에너지 증가에 따라서 침투농도가 감소하듯이 인의 경우도 그러한 경향이 보인다. 한편 불순물 농도의 침투치는 dose의 증가에 따라 1.34E17/cm<sup>3</sup>에서 9.12E17/cm<sup>3</sup>까지 상당히 큰 증가를 보이는데 이것은 붕소의 접합깊이보다 인의 그것이 더 적으므로 dose변화에 따른 침투값 변화가 더 민감해지기 때문이다.

<sup>31</sup>P<sup>+</sup> 이온주입에 따른 950°C, 30분 열처리후의 결

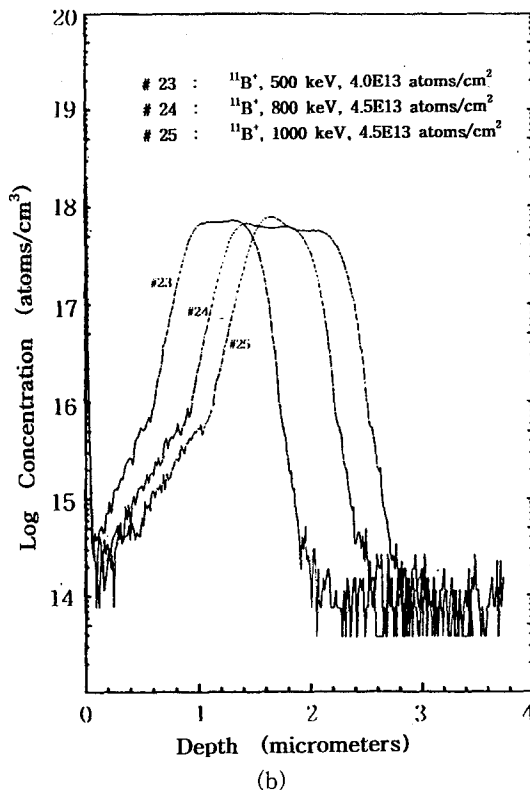
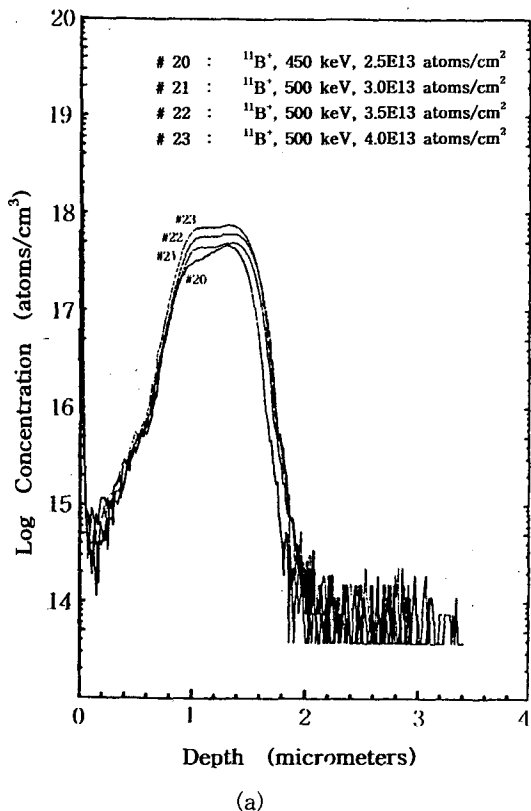
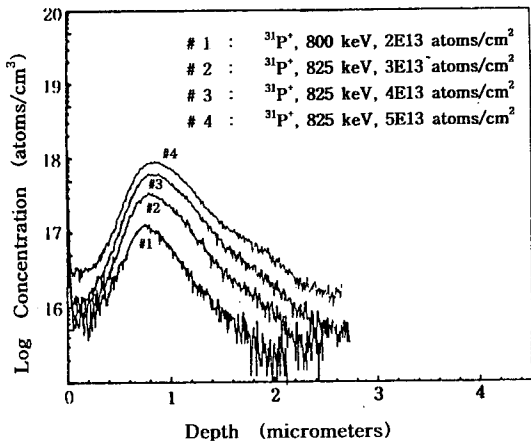


그림 2. 1000°C, 15초, 질소분위기 급속열처리후의 붕소 농도분포. (a) 주입량 변화. (b) 에너지 변화.  
 Fig. 2. Boron concentration profiles after 1000°C, 15sec., N<sub>2</sub> ambient Rapid Thermal Annealing.  
 (a) dose variation. (b) energy variation.

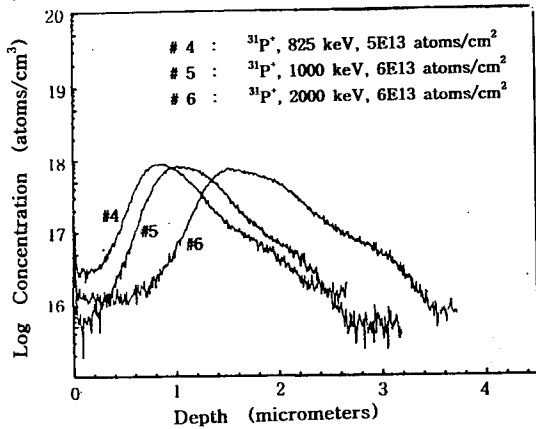
함은 투과전자현미경(TEM)을 이용하여 분석하였다. 그림 4는 <sup>31</sup>P<sup>+</sup>, 1MeV, 3E13/cm<sup>2</sup>에서 이온주입후에 생성된 많은 일차결함 즉, Frenkel 결함이 불순물 분포와 유사한 분포를 보이며 이들 실리콘 격자간원자와 격자빈자리들은 열처리과정에서 일부는 재결합하여 없어지고 나머지는 핵생성(nucleation)site를 중심으로 격자간원자의 응결(agglomeration)이 일어나게 되는데 이것이 바로 2차결함(secondary defects)이다. 이러한 2차결함의 생성은 주입이온의 임계주입량(critical dose)이상일 때만 가능하고 그 이하일때는 불가능하다.

그림 4(a)에 나타나 있는 사진을 보면 시료의 표면이나 R<sub>p</sub>부근 어디에도 2차결함이 나타나지 않고 있는데 이것은 앞서 언급된 바와같이 이온주입량이 임계주입량보다 적기 때문에 나타나는 결과이며 이것은 또한 K. S. Jones등이 분류한 카테고리 I에 해

당된다고 볼 수 있다<sup>11)</sup>. 그림 4(b)는 이온주입량이 1E14 /cm<sup>2</sup>으로 임계주입량이상이므로 이때에는 as-implant상태에서 다량으로 발생한 격자간실리콘이 열처리과정에서 가장 안정된 곳(site)으로 응결되면서 선전위(dislocation line)의 2차결함(secondary defect)이 아주 드물게 나타나고 있다. 그림 4(c)는 이온주입량이 3E14/cm<sup>2</sup>로 더 증가되면서 이온주입에 의한 격자간 원자가 더 증가하였고 이들에 의해서 R<sub>p</sub>에 해당하는 2~2.4 μm깊이에 선전위(dislocation line)와 전위환(dislocation loop)이 다량으로 발생하였다. 이것은 as-implant상태의 격자간 원자농도의 침투치가 R<sub>p</sub>보다 약간 큰 위치에서 최고가 되고 이곳을 중심으로 격자간원자의 응결이 집중적으로 일어나므로 R<sub>p</sub>부근에서 2차결함이 많이 발생하였다.



(a)



(b)

그림 3. 1000°C, 15초, 질소분위기 급속열처리후의 인 농도분포 (a) 주입량 변화 (b) 에너지 변화.

Fig. 3. Phosphorus concentration profiles after 1000°C, 15sec., N<sub>2</sub> ambient Rapid Thermal Annealing. (a) dose variation. (b) energy variation.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 우물형성을 위해 고에너지 이온주입을 적용시 발생하는 격자손상의 회복과 우물 분포 및 잔류결함의 관점에서 고찰하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) P-well형성 이온주입조건일 때에 비하여 n-well 형성 이온주입조건일 때 TW신호값이 약2

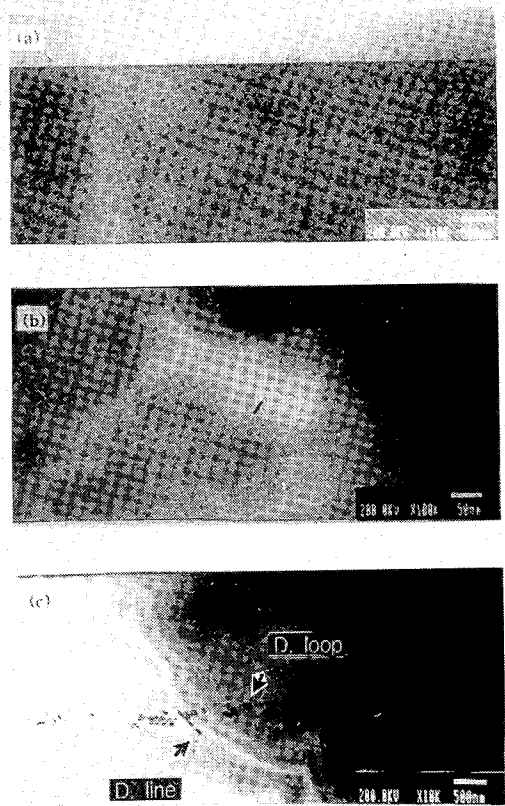


그림 4. 950°C, 30분, 질소분위기 열처리후 투과전자현미경에 나타난 2차결함. (a) 1MeV, <sup>31</sup>P<sup>+</sup>, 3E13/cm<sup>2</sup>. (b) 1MeV, <sup>31</sup>P<sup>+</sup>, 1E14/cm<sup>2</sup>. (c) 1MeV, <sup>31</sup>P<sup>+</sup>, 3E14/cm<sup>2</sup>.

Fig. 4. TEM micrograph showing secondary defects after 950°C, 30min., N<sub>2</sub> ambient annealing. (a) 1MeV, <sup>31</sup>P<sup>+</sup>, 3E13/cm<sup>2</sup>. (b) 1MeV, <sup>31</sup>P<sup>+</sup>, 1E14/cm<sup>2</sup>. (c) 1MeV, <sup>31</sup>P<sup>+</sup>, 3E14/cm<sup>2</sup>.

배정도 큰 값을 가졌는데 이는 인의 핵정지 에너지가 크기 때문이다. 확산로 열처리후의 이들의 값은 100정도이지만 급속열처리 진행후의 TW값을 보면 200으로 큰값인데 이 것은 짧은 열처리 조건에서 점결함등의 1차결함이 이동하여 재결합을 못하였거나 2차결함에 기여하지 못했기 때문이라 생각된다.

2) 기존 우물조건에 그리고 역경사 우물조건에 이르는 이온주입조건에 대하여 먼저함은 서로 비슷한 값을 가졌는데 이는 고에너지인 경우 낮은 온도에

서도 접합깊이가 크고, 상당한 표면농도, 침투치농도를 얻을 수 있기 때문이다.

3) 본 실험에서 RTA적용시 나타난 역경사우물의 접합 깊이는 n-, p-well 공히  $1.78 \mu\text{m}$  이상이며 침투치 농도가  $1.34 \times 10^{17}/\text{cm}^3$  이상으로 이는 기존우물 대비 접합깊이는 다소 적으며 침투치 농도는 10배 이상 크므로 역경사우물 형성에 적합하다고 사료된다.

4) 고에너지 이온주입후 고온 열처리시 2차결함은 임계 dose 이하일 때는 TEM에 나타나지 않았으며, 그 이상 일 때 나타나기 시작하였는데 본 실험에서 나타난 임계 이온주입량은  $3 \times 10^{13} \sim 1 \times 10^{14}/\text{cm}^2$  이었다. 임계주입량 이상 일때의 2차결함의 형태는 선전위 또는 전위환이 주류를 이루었으며, 2차결함은  $R_p$ 를 중심으로 하나의 띠를 이루며 형성되었다.

#### 참 고 문 헌

1. R. D. Rung, C. J. Dell'Oca and L. G. Walker, "A Retrograde p-Well for Higher Density CMOS" IEEE Trans. Electron Devices, ED-28, NO. 10, pp. 1115-1119, 1981.
2. K. W. Terrill, P. F. Byrne, H. P. Zappe, N. W. Cheung and C. Hu, "A New Method for Preventing CMOS Latch-up", IEDM Technical Digest, p. 406-409, 1984.
3. G. A. Sli-Halasz, M. R. Wordeman and R. H. Dennard, "Alpha-Particle-Induced Soft Error Rate in VLSI Circuits", IEEE Trans. Electron Devices, ED-29, NO. 4, pp. 725-731, 1982.
4. H. Momose, T. Wada, I. Kamohara, M. Isobe, J. Matsunaga and H. Nagawa, "A p-Type Buried Layer for Protection against Soft Errors in High Density CMOS Static RAMS" IEDM Technical Digest, p. 706-709, 1984.
5. A. G. Lewis, R. A. Martin, T-Y. Huang, J. Y. Chen and M. Koyanagi, "Latchup Performance of Retrograde and Conventional n-Well CMOS Technologies" IEEE Trans. Electron Devices, ED-34, pp. 2156-2164, 1987.
6. W. Skuropa, R. Kögler, K. Schmalz, P. Gaworzewski, G. Morgenstern and H. Syhre, "Iron Gettering and doping in silicon due to MeV carbon implantation", Nucl. Instr. and Math., B74, pp. 70-74, 1993.
7. T. Kuroi, Y. Kawasaki, S. Komori, K. Fukumoto, M. Inuishi, K. Tsukamoto, H. Shinyashiki and T. Shingyoji, Extended Abs. of the 1992 International Conference on Solid State Devices and Materials, pp. 398-400, 1992.
8. A. Stolmeijer, "A Twin-Well CMOS Process Employing High Energy Ion Implantation", IEEE Trans Electron Dev., ED-33, NO.4 pp. 450-457, 1986.
9. P. A. Packen and J. D. Plummer, "Transient diffusion of low-concentration B in Si due to  $^{29}\text{Si}$  implantation damage". Appl. Phys. Lett. 56 (18), pp. 1787-1789, 1990.
10. L. Rubin, W. Shaw, M. A. Jones and R. G. Wilson, "Range and Moments of Depth Distributions of Boron and Phosphorus Implanted into Silicon in the Energy Range 1.7-5.0 MeV with an Eaton NV-GSD/VHE Implantor", Ion Implantation Technology, p567 1996
11. K. S. Jones, S. Prussin and E. R. Weber, Appl. Phys. A, 45, pp. 1, 1988.