

중성자 조사에 의해 생성된 점결함 연구

김진현* · 이운섭* · 류근걸* · 김봉구** · 이병철** · 박상준**

A Study on Point Defect Induced with Neutron Irradiation

Jinhyun Kim*, Woonseob Lee*, Kunkul Ryoo*, Bonggoo Kim**,
Byeongcheol Lee** and Sangzun Park**

요 약 반도체 소자의 기판 재료로 사용되고 있는 실리콘 웨이퍼는 그 정밀도가 매우 중요하다. 본 연구에서는 균일한 Dopant 농도 분포를 얻을 수 있는 중성자 변환 Doping을 이용하여 실리콘에 인(P)을 Doping하는 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 하나로 원자로를 이용하여 고저항(1000~2000 Ωcm) FZ 실리콘 웨이퍼에 중성자 조사하여 저항의 변화를 관찰하였고, 중성자 조사시 발생하는 점결함을 분석하여 점결함이 저항 변화에 미치는 영향을 알아보았다. 중성자 조사 전 이론적 계산에 의해 HTS조사공은 5 Ωcm, 20.1 Ωcm이고 IP3조사공은 5 Ωcm, 26.5 Ωcm, 32.5 Ωcm이었고, 중성자 조사 후 SRP로 측정된 결과 실제 저항값은 HTS-1 2.10 Ωcm, HTS-2 7.21 Ωcm이었고, IP-1은 1.79 Ωcm, IP-2는 6.83 Ωcm, 마지막으로 IP-3는 9.23 Ωcm이었다. DLTS측정 결과 IP조사공에서 새로운 피크의 결함을 발견할 수 있었다. 또한 중성자 조사후의 저항 변화는 열중성자량에 의존하며 조사공의 종류와는 무관하다.

Abstract Silicon wafer is very important accuracy make use semiconductor device substrate. In this research, for the uniformity dopant density distribution obtained to Neutron Transmutation Doping on make use Si in P Doping study work. In this research, we irradiated neutron on FZ silicon wafers which had high resistivity (1000~2000 Ωcm), HANARO reactor was utilized resistivity changes due to observed, the generation of neutron irradiation on point defect analyzed, point defect on resistivity changes inquire into the effect. Before neutron irradiation theoretical due to calculated 5 Ω-cm, 20.1 Ω-cm for HTS hole and 5 Ω-cm, 26.5 Ω-cm, 32.5 Ω-cm for IP3 hole. After neutron irradiation through SRP measurement the designed resistivities were approached, which were 2.1 Ω-cm for HTS-1, 7.21 Ω-cm for HTS-2, 1.79 Ω-cm for IP-1, 6.83 Ω-cm for IP-2, 9.23 Ω-cm for IP-3, respectively. Also after neutron irradiation resistivity changes due to thermal neutron dependent irradiation hole types free.

Key Words : HANARO, Neutron, Point defect, NTD, DLTS, SRP, Annealing

1. 서 론

산업이 발전함에 따라 실리콘 웨이퍼의 수요가 대거 증가되고 직접화 되고 있다. 특히 공급되는 실리콘 웨이퍼의 대부분이 CZ(Czochralski)법에 의해서 공급되고 있다. 그러나 전통적인 실리콘 웨이퍼 생산 방법인 CZ법이나 FZ(Floating Zone)법과 같은 웨이퍼 생산 방법은 축방향이나 원주 방향으로의 불균일한 저항 분포를 지니고 있다.

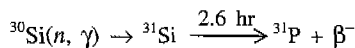
특히 CZ법으로 제조된 실리콘 웨이퍼는 웨이퍼 내의 산소 함유량이 10 ppm 내외가 함유되어 장점과 단점을 갖고 있다. 산소에 의한 고용체 강화 혹은 산화물 석출

에 의한 재료 강도의 증가라는 장점이 있으나, 불순물로 작용하여 전기적인 특성을 저해할 우려가 있다. 산소 불순물의 문제를 해결하기 위하여 수소처리 웨이퍼, FZ 웨이퍼 및 SOI(Silicon on Insulator)웨이퍼 등이 대안으로 제시되고 있다. 그러나 이들 실리콘 웨이퍼들의 경우 결정성장시 액체와 고체의 계면반응에 따라 저항 분포 균일도가 낮기 때문에 대전력 소자(high power diodes)와 thyristors 제조시에 요구되는 저항 분포 균일도를 만족하지 못하고 있다. 이런 저항 분포 불균일도는 소자의 오작동 및 break-down의 원인으로 작용된다. 따라서 대전력 소자 및 thyristor 제조에 요구되는 균일한 저항 분포를 만족하는 실리콘 웨이퍼 생산을 위해서는 NTD(Neutron Transmutation Doping)방법이 유일한 방법임이 잘 알려진 사실이다. NTD란 실리콘 웨이퍼에 열중성자를 조사하여 실리콘 동위원소인 ^{30}Si 를 ^{31}P 로

*순천향대학교
**한국원자력연구소
Tel: 031-53-1660

변환시켜 균일한 저항 분포를 얻을 수 있는 반도체 재료의 제조 방법을 말한다. 일반적인 실리콘 웨이퍼의 Dopant 농도 분포는 거시적으로는 10~25% 정도의 차이를 보이고, 미시적으로는 50% 이상의 다양한 분포를 갖고 있는 것으로 보고되어 진다[1]. 이같이 불균일한 Dopant 농도를 제거하기 위하여 Figure 1과 같이 FZ법으로 제조된 실리콘 웨이퍼에 중성자를 조사하여 균일한 저항을 확보하여 보완될 수 있다[2].

보통 반도체 재료들에서의 전기적 Carrier들(electrons and holes)은 주기율표 상에서 인접 원자 그룹들의 원자들이 반도체 재료 내에서 불순물 중심으로 존재함으로써 생성된다. 예를 들어 4족 반도체 원소인 Si의 경우 3족(B 등)과 4족(P 등)이 Doping되어 전기적 Carrier들을 만들어 준다. 이런 Carrier들은 핵입자(deutrons, protons, neutrons or alpha particles)를 반도체 재료에 조사함으로써 핵변환 반응들에 의해 생성될 수 있다. 이 반응들은 거의 일정하게 원재료보다 하나 적거나 하나 많은 원자번호의 새로운 재료를 생성한다. 실리콘 웨이퍼의 경우, 중성자를 조사함으로써 핵변환 반응을 통해 인을 생성시켜 n-type 실리콘을 제조할 수 있다. 그 핵변환 반응식은 다음과 같다[3].



열중성자가 원자번호 30인 실리콘 원자에 조사되면 원자번호 31의 실리콘으로 전환된다. 이 불안정한 실리콘 원자는 2.6시간의 반감기를 갖고 Decay되면서 인(P)으로 변하게 되어 n-type 실리콘 웨이퍼가 된다. 그러나 중성자 조사에 의한 결정의 손상이 예상되고 있으나, 이에 대한 연구가 국내에서는 전무하며 외국에서도 진행중에 있는 상황이다. 특히 접결함은 불활성 분위기에서 약 700~900°C로 가열하여 소둔(Annealing) 소멸시킬 수 있으나 이 같은 연구가 국내에서는 전무한 상태이다. 접결함은 대부분 실리콘 웨이퍼에서 Energy Gap 내에 깊은 에너지 준위(deep level)를 형성하여 Trap으로 작용하거나, 재결합 중심으로 작용하여 Carrier의 Lifetime에 큰 영향을 미친다. 따라서 반도체 소자의 오작동 및 Break-down을 일으킬 수 있다. 본 연구에서는 DLTS(Depth Level Transient Spectroscopy)를 이용하여 결함이 실리콘 웨이퍼에 미치는 영향과 종류 및 양을 관찰하려 하였다. 또한 미세 저항 분포를 확인할 수 있는 SRP(Spreading Resistance Probe) 측정을 통해 중성자 조사후의 저항 분포를 확인하였다.

본 연구는 HANARO 원자를 이용한 NTD 실리콘 웨이퍼의 생산 가능성을 확인하고 문제점들을 도출함으로써 향후 HANARO 원자로를 이용한 NTD 실리콘 웨이

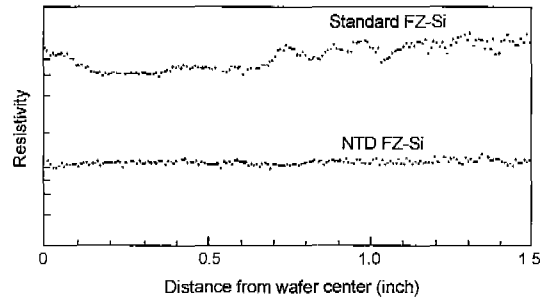


Figure 1. Comparison of NTD dopant uniformities with standard ones.

퍼의 대량생산 가능성에 대한 예비 연구를 수행하여 기술 자료를 확보하려 했다.

2. 실험 방법

본 연구를 위해 저항값이 1000~2000 Ω-cm인 고저항 FZ 웨이퍼(n-type, (100))를 준비하여 HANRO원자로의 HTS 조사공 과 IP 조사공 에서 중성자를 조사하기 위해 99.99%의 순도를 가지는 Al Rod를 구매하여 Figure 2와 같이 Sample Container를 제작하였다.

이 Container에 웨이퍼를 넣기 위해 직사각형 형태로 Clean room에서 wafer를 절단하였으며, 이 절단된 웨이퍼를 후드에서 Sample Container에 넣고 Figure 3에서 볼 수 있는 것과 같이 또 다른 2개의 Al Container에 넣고 용접하여 완전 밀봉하였다. 이렇게 준비된 시편은 하나로 원자로 HTS 조사공과 IP 조사공에서 5 Ωcm와 20 Ωcm 그리고 30 Ωcm의 저항을 얻기 위해 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 각 시편의 조사 시간을 계산하였다. 이 계산값을 기준으로 하여 HTS 조사공 시편은 26시간 8.3시간 중성자를 조사하였고, IP 조사공에서 13시간 3.2시간 그리고 2.0시간 중성자를 조사하

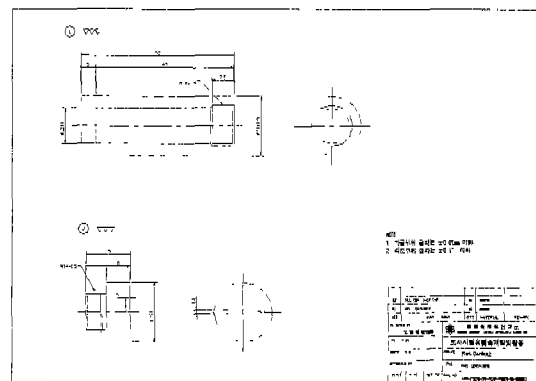


Figure 2. Schematic of Al specimen container.

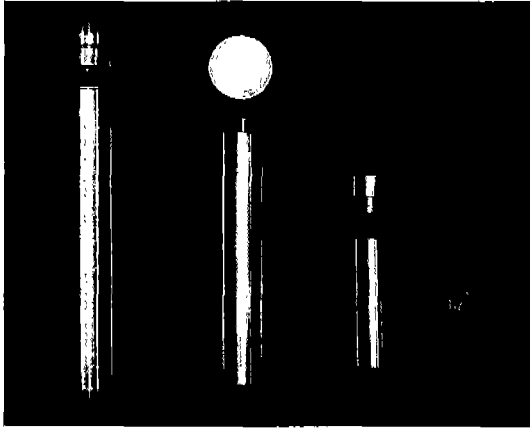


Figure 3. Photographs the sample and Al containers.

였다. 앞으로 편의상 HTS 조사공에서 26시간 조사된 시편을 HTS-1, 8.3시간 조사된 시편을 HTS-2로 지칭하고, IP 조사공에서 13시간 조사된 시편을 IP-1, 3.2시간 조사된 시편을 IP-2, 2.0시간 조사된 시편을 IP-3로 지칭하겠다.

$$\text{resistivity}(\Omega\text{cm}) = \frac{100}{C(\text{ppba})} = \frac{5.1 \times 10^{15}}{C(\text{atoms}/\text{cm}^3)} \quad (1)$$

$$C_{NT} = \phi t \sigma n (^{30}\text{Si}) \quad (2)$$

where ϕ : the thermal neutron flux ($\text{n}/\text{cm}^2/\text{s}$),
 t : the irradiation time (s),
 σ : the cross section for $^{30}\text{Si}(n, \gamma) \approx 0.11 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$
 $n(^{30}\text{Si})$: the number of ^{30}Si atoms/ cm^3 (1.52×10^{21} atoms/ cm^3)

이렇게 준비된 시편은 점결함을 제거하고 계획된 저항을 얻기 위해 800°C에서 1시간 Annealing 처리하였다. 이렇게 Annealing 중성자 처리된 시편을 SRP를 이용하여 저항을 측정하였고, 점결함의 정량적 측정을 위하여 Schottky diode를 제작하여 DLTS 측정을 하였다. 위의 SRP측정과 DLTS 측정은 포항 RIST와 LG-silitron의 협조를 얻어 수행되었다.

3. 결과 및 고찰

중성자 조사 동안에 HTS 조사공과 IP 조사공의 열중성자 fluence를 측정하여 본 결과 HTS-1은 $1.853\text{E}18 \text{ n}/\text{cm}^2$, HTS-2는 $4.633\text{E}17 \text{ n}/\text{cm}^2$ 이었고, IP-1은 $2.569\text{E}18 \text{ n}/\text{cm}^2$, IP-2는 $6.324\text{E}17 \text{ n}/\text{cm}^2$ 그리고 IP-3는 각각

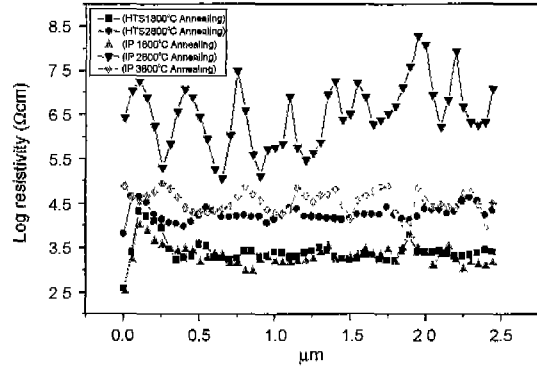


Figure 4. Resistivity changes of NTD silicon wafers after annealing.

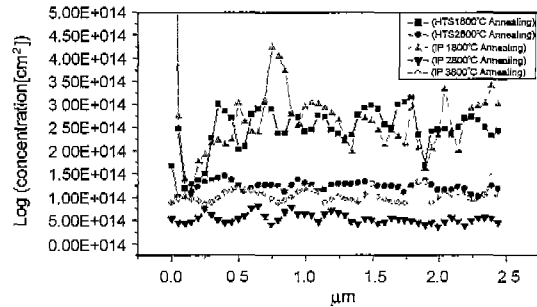


Figure 5. Changes of NTD dopant concentrations in silicon wafer after annealing.

$3.952\text{E}17 \text{ n}/\text{cm}^2$ 이었다. 이 결과로부터 이론적 저항값을 계산하여 보면 HTS 조사공은 $5 \Omega\text{cm}$, $20.1 \Omega\text{cm}$ 이고, IP 조사공은 $5 \Omega\text{cm}$, $26.5 \Omega\text{cm}$, $32.5 \Omega\text{cm}$ 이었다. 실제로 중성자 조사 후 저항의 감소 정도와 시편의 저항이 얼마나 이론값과 일치하는지를 확인하기 위하여 SRP로 시편의 저항을 측정하여 보았다. 본 연구에서는 점결함의 형태 및 양을 분석하여 E. Gaubas, et al.[4]의 결과와 비교하였다. Figure 4는 1시간 Annealing한

Table 1. Comparison of measured resistivities with designed ones depending on holes and fluences

Hole	HTS		IP		
	1	2	1	2	3
Designed (Ωcm)	5	20	5	26.5	32.5
measured (Ωcm)	2.1	7.21	1.79	6.83	9.23
fluences (n/cm^3)	1.853 E18	4.633 E17	2.569 E18	6.324 E17	3.952 E17

Table 2. Thermal neutron and fast neutron flux of HTS and IP Rigs

	열중성자속	고속중성자속
HTS 조사공	$1.98E13 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$	$8.70E10 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$
IP 조사공	$5.49E13 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$	$9.11E11 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$

결과 저항 변화를 나타내고, Figure 5는 Dopant 농도를 보여 주고 있다. 평균적으로 HTS-1은 $2.10 \Omega\text{cm}$, HTS-2는 $7.21 \Omega\text{cm}$ 이었고, IP-1은 $1.79 \Omega\text{cm}$, IP-2는 $6.83 \Omega\text{cm}$, 마지막으로 IP-3는 각각 $9.23 \Omega\text{cm}$ 이었다. Table 1은 저항 분석에 대한 실험결과를 종합한 것이다. 실제 확보된 저항은 계산치와 상이함을 알 수 있었다. 이같은 문제점은 사용된 각 조사공의 고속중성자/열중성자의 비 Table 2 차이로 인한 결과라 사료된다.

Figure 6은 HTS-1시편의 DLTS 측정 결과이다. 그림에서 보여지는 것과 같이 점결함이 발견되었는데 발견된 점결함을 E1, E2로 명시하였다. 이들은 $4.42E11/\text{cm}^3$ 과 $1.73E11/\text{cm}^3$ 의 농도를 지니고 있으며 중성자 조사시간이 적음에 따라 점결함 농도가 큼을 알 수 있다.

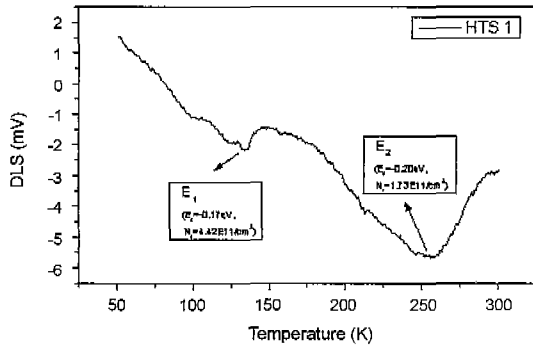


Figure 6. DLTS result of neutron irradiated silicon wafer for 26 hours in HTS-1.

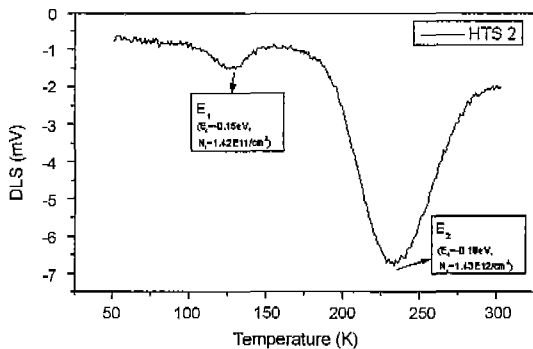


Figure 7. DLTS result of neutron irradiated silicon wafer for 8.3 hours in HTS-2.

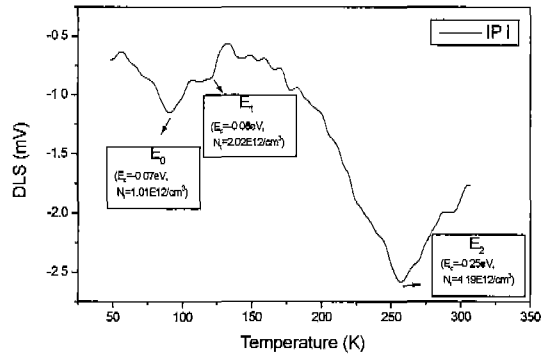


Figure 8. DLTS result of neutron irradiated silicon wafer for 13 hours in IP-1.

Figure 7은 HTS-2 시편의 결과인데 HTS-1 시편과 같이 E1, E2 두 개의 피크가 발견되었고 125 K와 약 300 K에서 피크가 관찰되었다. 이들은 0.15 eV와 0.18 eV의 에너지 준위와 $1.42E11/\text{cm}^3$ 와 $1.43E11/\text{cm}^3$ 의 농도를 지니는 것으로 관찰되었다. Figure 8은 IP-1 시편의 결과이다. E0와 E1이 80 K와 약 125 K에서 피크가 관찰되었고, 0.07 eV와 0.08 eV의 에너지 준위 $1.01E12/\text{cm}^3$ 와 $2.02E12/\text{cm}^3$ 의 농도가 관찰되었다. 또한 E2라는 새로운 결함은 0.25 eV의 에너지 준위를 가지고 $4.19/\text{cm}^3$ 의 농도를 지니고 있었다.

IP-2시편 Figure 9의 경우도 IP-1 시편과 마찬가지로 E1과 E2가 125 K와 230 K에서 피크가 관찰되었고, 0.12 eV와 0.18 eV의 에너지 준위와 $3.14E11/\text{cm}^3$, $1.04E11/\text{cm}^3$ 의 농도가 관찰되었다. 그러나

E4의 경우는 약 300 K 부근에서 농도와 저항 측정이 예상된다. 마지막으로 IP-3시편의 Figure 10에서도 E1, E2 피크가 관찰되었고, 0.14 eV와 0.33 eV의 에너지 준위를 가지고있고, $9.75E10/\text{cm}^3$ 와 $1.04E11/\text{cm}^3$ 의 농도가 관찰되었다. IP-2 시편과 마찬가지로 E4 피크의 에너지 준위와 농도는 약 300 K 부근에서의 측정이 예상

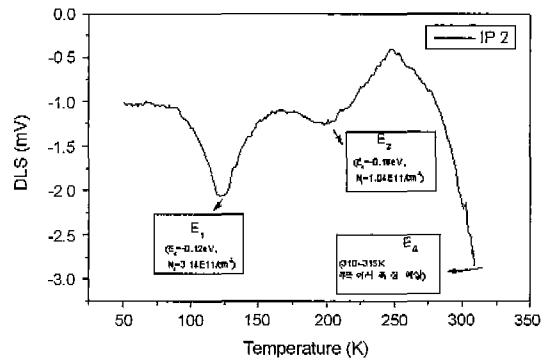


Figure 9. DLTS result of neutron irradiated silicon wafer for 3.2 hours in IP-2.

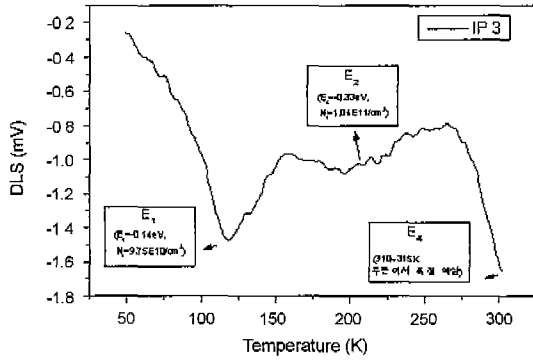


Figure 10. DLTS result of neutron irradiated silicon wafer for 2.0 hours in IP-3.

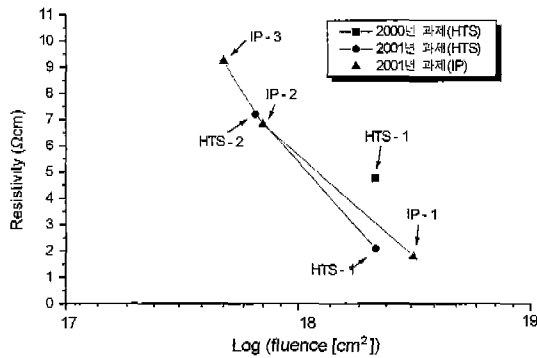


Figure 11. The diagram of resistivity compared with fluence.

된다.

Figure 11은 중성자 조사 후 저항과 fluence를 비교한 결과이다. 그동안 수행되었던 연구과제를 비교 분석한 결과 저항의 변화는 열중성자량에 의해서 변화를 일으키고 중성자 조사공의 종류와는 무관함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구를 통하여 중성자 조사에 의한 인 농도의 분포와 점결함의 영향을 분석할 수 있었다. 중성자 조사 후 시편의 저항이 계획된 저항값 보다 낮게 나타났다. 이론적으로 계산된 저항값은 HTS 조사공 시편은 5

Ωcm , 20.1 Ωcm 이었고, IP 조사공 시편은 5 Ωcm , 26.5 Ωcm , 32.5 Ωcm 이었으나 Annealing 후의 저항값은 HTS-1이 2.10 Ωcm , HTS-2가 7.21 Ωcm 이고, IP-1이 1.79 Ωcm , IP-2는 6.83 Ωcm , 마지막으로 IP-3는 9.23 Ωcm 이었다. 이는 Annealing을 통하여 점결함이 제거되었기 때문이라 사료된다.

DLTS 측정을 하여 점결함을 분석한 결과 IP 조사공에서 HTS 조사공에서는 발견되지 않았던 새로운 점결함 피크가 관찰되었다. 이는 조사공에 따라 중성자 속의 차이에 따른 것이라 생각한다. 실제 HTS 조사공과 IP 조사공의 열중성자 속의 차는 IP 조사공에서 더 큰 에너지를 가지고 있다. 더욱이 고속중성자속 차는 IP 조사공이 더 큼을 알 수 있다(Table 2). 따라서 발견된 새로운 피크는 조사공에 따른 고속중성자/열중성자 비차이에 따른 손상이 컸기 때문에 생긴 결과라 예상되고, 특히 고속중성자 fluence에 의해서 생성된 것이라 판단된다. 또한 저항 변화는 중성자 조사공의 종류에 무관하고 열중성자량에 의존한다.

감사의 글

본 연구는 과기부가 지원한 “2001년도 원자력 연구 기반 확충사업(하나로이용연구지원사업)”을 통해 수행되었으며, 이에 심심한 사의를 표하는 바입니다.

참고문헌

- [1] B. D. Stone, Neutron Transmutation Doping of silicon. In “Impurity Doping Processes in Silicon” (F. F. Wang, ed.), North-Holland Publ., Amsterdam, p. 217-257, 1981.
- [2] J. M. Meese, ed., “Neutron Transmutation Doping in Semiconductors”, Plenum, New York, 1979
- [3] F. Shimura, “Semiconductor Silicon Crystal Technology”, Academic Press, Inc. p. 127, 1989
- [4] E. Gauba, J. Vanhellefont, E. Simoen, P. Clauws, H. W. Kraner, G. Vilkelis, and A-P Smilga, “Study of Recombination Properties of Neutron Transmutation Doped Silicon Wafers”, Semicond. Sci. Technol. 12, p. 1092-1099. 1997.