

## 양성자 주입 기술을 이용한 초고속 회복 다이오드의 제작

### Fabrication of Ultra Fast Recovery Diodes using Proton Irradiation Technique

이강희<sup>1</sup>, 김병길<sup>2</sup>, 이용현<sup>1</sup>, 백종무<sup>3</sup>, 이재성<sup>2</sup>, 배영호<sup>2,a</sup>

(Kang-Hee Lee<sup>1</sup>, Byoung-Gil Kim<sup>2</sup>, Yong-Hyun Lee<sup>1</sup>, Jong-Mu Baek<sup>3</sup>, Jae-Sung Lee<sup>2</sup>, and Young-Ho Bae<sup>2,a</sup>)

#### Abstract

Proton irradiation technology was used for the improvement of power diode switching characteristics. Proton irradiation was carried out at the energies of 2.32 MeV, 2.55 MeV, 2.97 MeV so that the projection range of irradiated proton would be at the metallurgical junction, depletion region and neutral region of pn diode, respectively. Dose conditions were varied into three conditions of  $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ ,  $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ,  $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  at each condition of energies. Characterization of the device was performed by I-V(current-voltage), C-V(capacitance-voltage) and trr(reverse recovery time) measurement. At the optimum condition of irradiation, the reverse recovery time of device has been reduced about 1/5 compared to that of original un-irradiated device.

**Key Words** : Proton, Trr, Diode, Projection range

#### 1. 서론

쌍극성 반도체 소자의 동작 속도 향상을 위해서 소수 캐리어의 수명 제어가 필요하며[1] 이를 위하여 반도체 결정 내부에 재결합 중심(recombination center)을 형성하는 방법이 사용된다. 재결합 중심을 형성하는 기술로는 금이나 백금 등의 금속 불순물을 열확산 시키는 방법, 전자선 조사법, 그리고 양성자 등의 이온을 주입하는 방법 등이 이용되고 있다[2-5]. 금이나 백금을 열 확산 시키는 방법은 불순물의 확산 속도가 대단히 빠르므로 정확한 농도 제어가 불가능하다[6]. 따라서 역방향 누설 전류가 크고 순방향 저항이 커지며 소자의 신뢰성이 떨어지는 단점이 있다. 전자선 조사법 역시

결함대역의 정확한 제어가 용이하지 않으므로 역방향 누설 전류가 크고 순방향 저항이 커지게 된다[6]. 양성자 주입 법[7]은 주입 에너지 조건에 따라서 국부적으로 결함대역을 형성 시킬 수 있으므로, 원하는 위치에서 선택적으로 캐리어 수명을 감소시킬 수 있다. 또한 공정의 마지막 단계에서 이루어지기 때문에 다른 공정에 의한 영향을 받지 않아 정확한 제어가 가능하며, 열처리 공정으로 쉽게 불필요한 결함의 생성을 억제 시킬 수 있어서 최근에 많은 연구가 진행 중이다[8-10]. 그러나 소수 캐리어 수명 제어의 여러 가지 변수(영역의 위치, 소수 캐리어 수명 등)에 대한 최적화가 완전하지 않아서 아직까지는 주로 실험에 의존하고 있다.

본 연구에서는 pn 다이오드의 역방향 회복시간 향상을 위하여 다양한 조건으로 양성자를 주입하고, 그 전기적인 특성을 분석하기 위해서, 순방향 및 역방향 전류-전압 특성, 정전용량-전압 특성, 역방향 회복시간을 측정하였다. 그 결과 소자 동작 특성의 큰 열화없이 역방향 회복시간을 약 1/5 수준으로 단축시킬 수 있었다.

1. 경북대학교 전자공학과  
2. 위덕대학교 정보통신공학부  
(경북 경주시 강동면 유곡리 525)  
3. 대원과학대학 전자정보통신과  
a. Corresponding Author : yhbae@uu.ac.kr  
접수일자 : 2004. 10. 9  
1차 심사 : 2004. 11. 4  
심사완료 : 2004. 11. 10

## 2. 실험

본 연구에 사용된 소자는 p+/n/n+ 구조를 갖는 전형적인 pn 다이오드이다. 그림 1에 제조된 소자의 단면을 나타내었다. 소자는 n-type Si 기판에 p+영역과 n+영역을 각각 55  $\mu\text{m}$ 의 두께로 제작하였으며, 전체소자의 두께는 Au/Ni(260 nm/240 nm) 전극을 포함하여 256  $\mu\text{m}$ 이고, 접합면적은 1.794 mm  $\times$  1.794 mm이다.

양성자(수소 이온) 주입은 웨이퍼 제작이 완료된 후, 패키지 전의 공정단계에서 수행되었고, 양성자의 농도 피크가 각각 p+n 접합 부위, 역바이어스 상태에서 n-type Si의 공핍영역 그리고 n-type Si의 중성영역에 위치하도록 양성자 주입 에너지 조건을 결정하였다. 이때 각각의 조건에서 주입되는 양성자 농도는  $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ ,  $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  및  $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 으로 하였으며, 각각의 조건에서 소자의 전기적인 특성을 측정하였고, 양성자를 주입하지 않은 소자와 비교 분석하였다. 소자의 전기적인 특성 분석은 전류-전압 및 정전용량-전압 측정 그리고 역방향 회복시간 측정을 통해 수행되었다.

다이오드의 접합, 공핍, 중성영역에 각각 양성자를 주입하기 위해서 SRIM-2003 시뮬레이션을 통해 양성자 주입 에너지를 구했으며, 이를 표 1에 나타내었다. 또한 양성자 주입시 나타나는 소자 내의 결정 결함 분포와 양성자 농도 분포 시뮬레이션 결과는 그림 2에 나타내었다. 그림에 나타난 것과 같이 양성자 농도는 projection 위치에 분포하고, 결정 결함 밀도 분포는 projection 위치에 특히 높게 나타난다.

Au/Ni		
$9 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$	p+	55 $\mu\text{m}$
$2.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$	n	145 $\mu\text{m}$
$1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$	n+	55 $\mu\text{m}$
Au/Ni		

그림 1. 다이오드의 단면 구조.  
Fig. 1. Cross section of diode.

표 1. 양성자 주입 에너지 조건.

Table 1. Conditions of proton irradiation energy.

위치	깊이 ( $\mu\text{m}$ )	에너지 (MeV)
접합영역	60.2	2.32
공핍영역	70.3	2.55
중성영역	90.6	2.97

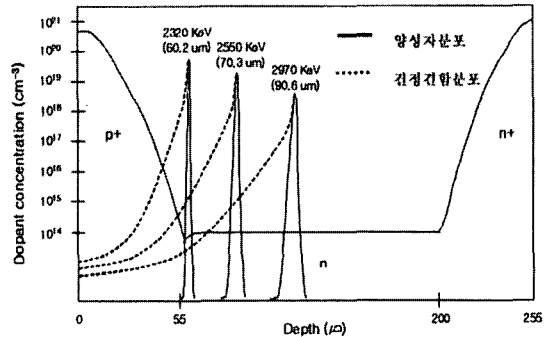


그림 2. 결정 결함 및 양성자 농도 분포.

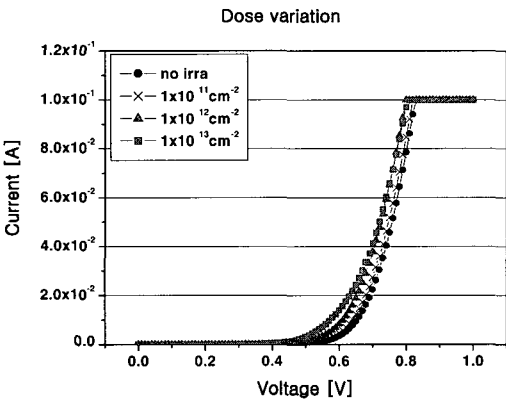
Fig. 2. Crystal defects and proton concentration profile.

## 3. 결과 및 고찰

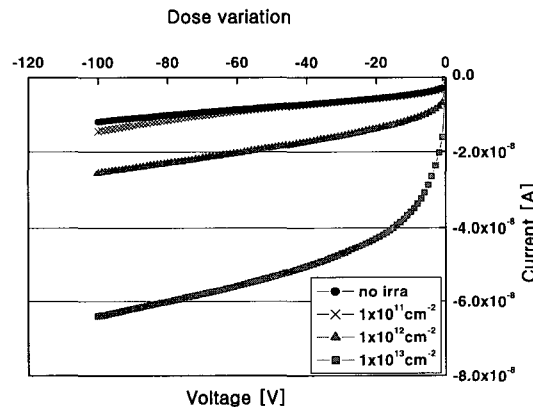
### 3.1 I-V 특성분석

그림 3은 양성자 주입 에너지를 2.97 MeV로 고정하고 도즈를  $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ ,  $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ,  $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 로 변화시켰을 때의 전류-전압 특성의 변화를 나타낸다. 그림 3(a)에서 양성자를 주입하지 않은 소자와 비교했을 때 다이오드의 전류곡선 기울기가 감소하는 현상이 나타난다. 이것은 양성자를 주입하면 결정 결함 밀도가 증가되어 소자의 저항성이 커지므로, 주입되는 도즈 증가에 따라 순방향 저항이 증가하는 것이다. 하지만 순방향 저항의 증가는 크지 않고 양성자가 주입되기 이전 소자의 특성을 대체로 유지하고 있다. 그림 3(b)에 나타난 것처럼 역방향의 경우에는 주입되는 도즈가 증가할수록 소자의 누설전류가 증가한다. 다이오드의

역방향 누설전류는 pn 접합부 이외의 부분으로 흐르는 기생 누설전류를 제외하면 공핍영역 내의 캐리어 생성으로 인해서 나타나는 현상이다. 그러므로 결정 결함 밀도가 높을수록 생성-재결합 중심의 밀도가 높아지게 되어 누설전류가 증가하게 된다. 100 V의 역방향 전압에서 특성을 비교했을 경우, 양성자를 주입하지 않은 소자에 비해  $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  도즈로 양성자를 주입한 소자의 누설전류가 5배 정도 증가하였지만 100 V의 역바이어스에서 약 65 nA로 작은 값을 유지하고 있다.



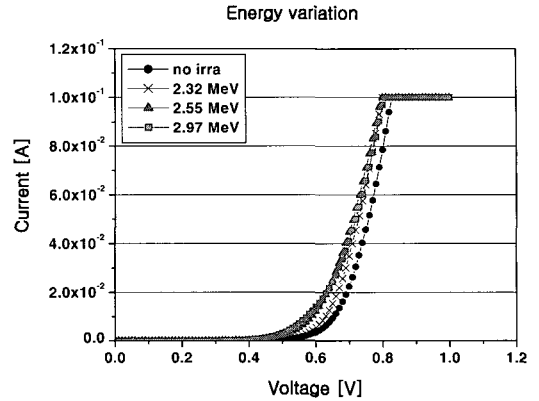
(a) forward I-V



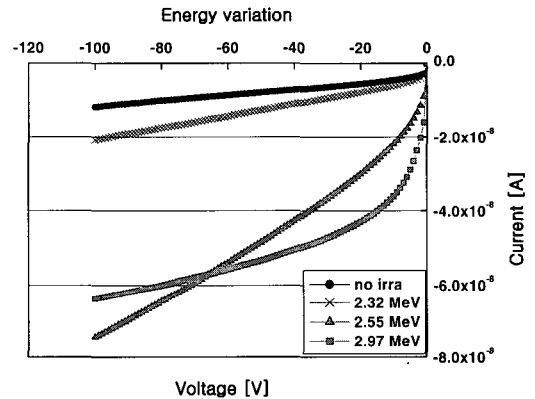
(b) reverse I-V

그림 3. 다이오드의 양성자 주입 도즈 변화에 따른 전류-전압 특성.

Fig. 3. Current-voltage characteristics with proton irradiation dose variation.



(a) forward I-V



(b) reverse I-V

그림 4. 다이오드의 양성자 주입 에너지 변화에 따른 전류-전압 특성.

Fig. 4. Current-voltage characteristics with proton irradiation energy variation.

그림 4는 양성자 주입 도즈를  $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 으로 고정하고, 주입 에너지를 변화 시켰을 경우의 전류-전압 특성이다. 순방향의 경우에 에너지가 증가함에 따라서 다이오드의 이상 계수는 1.5~1.7 사이의 값으로서 양성자를 주입하지 않은 경우와 큰 차이를 보이지 않았다. 역방향의 경우에 낮은 전압 영역에서는 주입 에너지가 클수록 누설전류가 큰 값을 가지지만, 역 바이어스 전압이 커짐에 따라서 2.97 MeV의 에너지로 주입한 경우보다 2.55 MeV의 경우가 누설 전류의 크기가 크다. 즉 2.55 MeV

의 에너지로 주입한 경우가 역 바이어스에 따른 누설전류의 증가율이 크다. 이 원인은 다음과 같다. 다이오드 역방향 전압의 증가에 따라서 공핍 영역의 폭은 커지게 된다. 그리고 70 V 정도의 전압에서는 공핍영역의 폭이 접합에서 약 20 μm 정도 떨어지게 되어, 2.55 MeV로 주입한 경우에는 양성자에 의한 결정 결함 농도 분포 피크의 위치에 해당하고, 2.97 MeV의 경우는 상대적으로 낮은 결정 결함 농도 위치에 해당하여, 누설전류의 증가율이 크게 되는 것이다. 이것은 양성자 주입 시 농도 피크의 위치가 중성 영역에 있을 때 누설 전류 값이 작은, 더 우수한 소자 특성을 가질 수 있다는 것을 말해준다.

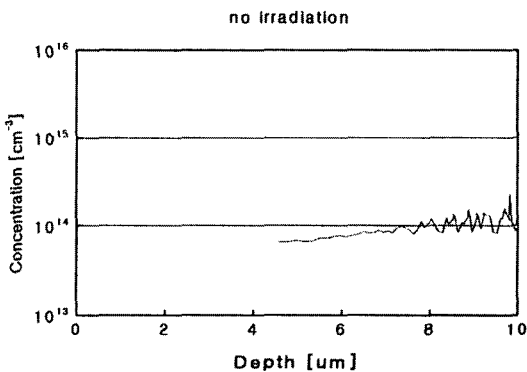
### 3.2 C-V 특성분석

양성자가 소자 내에 주입되었을 경우, 캐리어의 수명을 제어하는 재결합 준위가 생성되는 것과 동시에 양성자가 도너로 작용하여 소자내의 도핑농도를 변화시킨다는 연구 보고가 있다[10]. 그림 5는 양성자 주입 에너지를 2.55 MeV로 고정하고 도즈를  $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ ,  $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ,  $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 로 변화시켰을 때, 정전용량-전압 특성 측정에 의해 계산되어 나타나는 도핑 프로파일의 변화를 비교하여 나타낸 것이다.

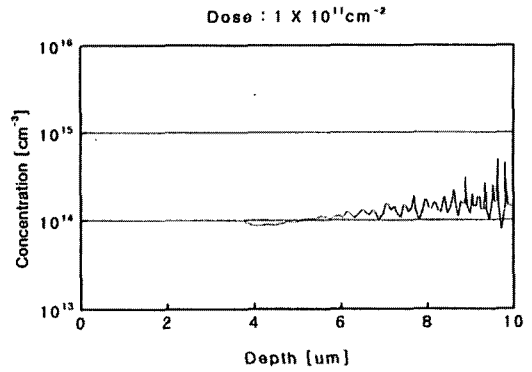
도핑 프로파일은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$N_B(x) = \frac{2}{q\epsilon_{si}\epsilon_0 A^2} \left| \frac{d(1/C^2)}{dV_A} \right| \quad (1)$$

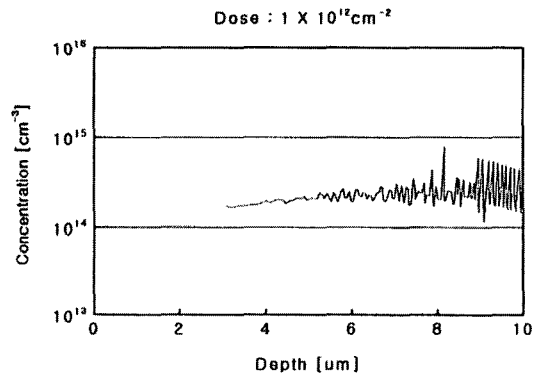
$$x = \frac{\epsilon_{si}\epsilon_0}{C} A \quad (2)$$



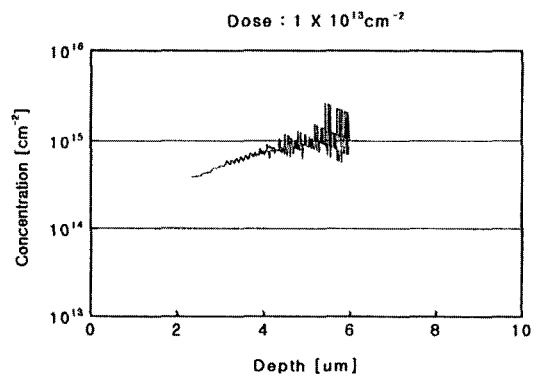
(a) no irradiated device



(b) Dose :  $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$



(c) Dose :  $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$



(d) Dose :  $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$

그림 5. 양성자 주입 도즈 변화에 따른 도펀트 농도 프로파일의 변화.

Fig. 5. Dopant concentration profile with proton irradiation dose.

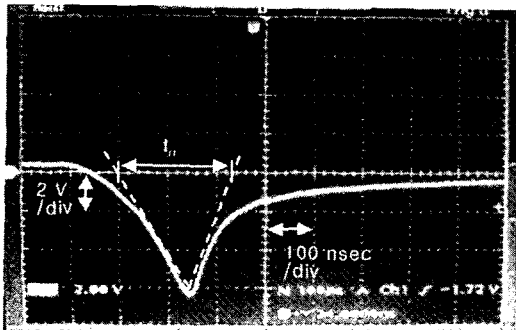
표 2. 도즈 변화에 따른 다이오드의 항복전압.  
Table 2. Breakdown voltage of diode with dose variation.

에너지	도즈	항복전압
no irradiation	-	670 V
2.55 MeV	$1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$	640 V
2.55 MeV	$1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$	590 V
2.55 MeV	$1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$	500 V

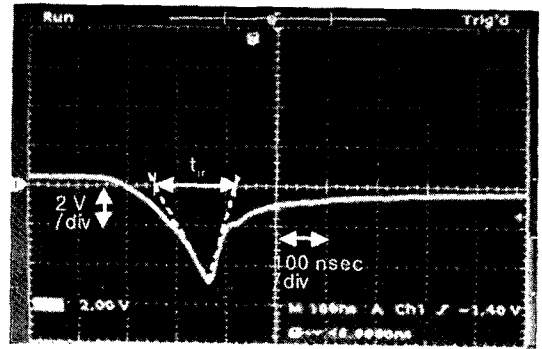
그림 5에 나타난 바와 같이 양성자가 주입되지 않은 경우의 소자와 비교하면 주입되는 양성자 도즈가 증가할수록 소자내의 도펀트 농도가 증가하게 된다. 이것은 주입된 양성자가 도너로 작용하여 n-type Si 내부 (양성자 projection 깊이 내)의 도너 농도 증가를 초래하기 때문이다. 이러한 농도 증가는 소자 내의 전계를 커지게 하고, 결국 다이오드의 항복전압은 감소하게 된다. 각 소자에 대한 항복전압은 표 2에 나타내었다.

### 3.3 trr 특성분석

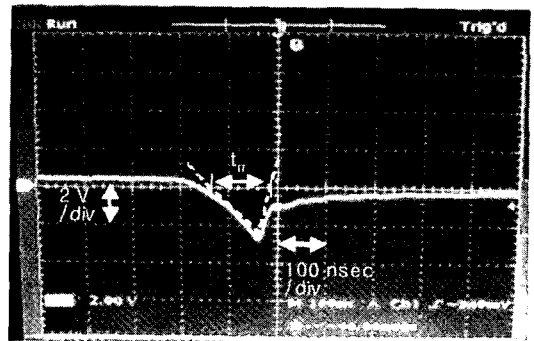
소자의 역방향 회복 시간은 인덕터 스위칭 회로를 구성하여 측정하였다[6]. 스위칭 회로를 이용하여 다이오드에 순방향의 전류를 흘려 준 후 역방향으로 스위칭하고 이때 다이오드에 직렬로 연결된 크기 1 ohm의 저항에 나타나는 전압 변화를 오실로스코프를 이용하여 측정함으로써 다이오드에 흐르는 역방향 전류의 시간적인 변화를 측정할 수 있다.



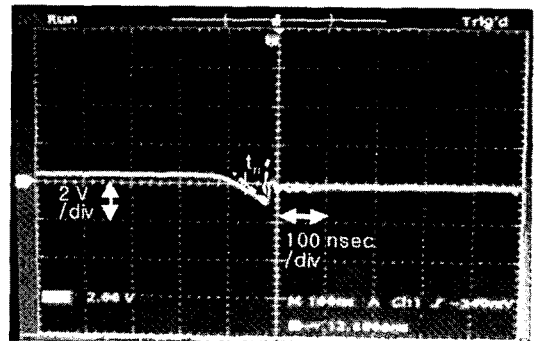
(a) no irradiated device



(b)  $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$



(c)  $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$



(d)  $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$

그림 6. 양성자 주입 도즈 변화에 따른 역방향 회복 시간.

Fig. 6. Reverse recovery time with proton irradiation dose variation.

그림 6은 양성자 주입 에너지를 2.97 MeV로 고정하고 도즈를  $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ ,  $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ,  $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  의 세 가지 조건으로 변화시켰을 때 나타나는 역방향 회복시간 및 역방향 전류를 측정한 것이다. 그림 6(a)는 양성자가 주입되지 않은 소자의 측정 결과로써 역방향 회복시간은 약 240 nsec이

고 역방향 순시 피크 전류는 6 A 이상임을 알 수 있다. 주입되는 양성자 도즈가 증가할수록 역방향 회복시간과 역방향 피크 전류는 점점 더 감소하였다. 이것은 다이오드가 순방향에서 역방향으로 스위칭 되었을 때 소자 내부에 남아있는 소수캐리어가 재결합 준위에 의해서 소멸되었음을 나타낸다.

$1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  도즈의 양성자를 주입한 경우는 역방향 회복시간이 약 50 nsec로 단축되었고, 역방향 전류 역시 0.6 A로 감소하였다. 이는 주입되는 양성자 도즈가 증가함에 따라서 재결합 준위로 작용하는 결정 결함 밀도가 더욱 커지게 되고, 이로 인해 캐리어의 재결합이 더욱 활성화되었기 때문이다.

#### 4. 결 론

반도체 소자 내의 소수 캐리어 수명을 제어하는 방법으로 양성자 주입 기술을 적용하였다. pn 다이오드를 제작하고 다양한 조건으로 양성자를 주입한 후 그 제반 특성을 분석 및 평가하였다. 전류-전압 관계에서 순방향 특성은 양성자 주입 에너지와 도즈를 변화시켰을 경우 모두 큰 변화가 없었으며, 역방향 특성은 양성자를 중성영역에 주입한 경우가 더 우수한 특성을 나타내었으며, 누설전류는 다소 증가하였으나 대체로 양호한 값을 나타내었다. 주입되는 도즈가 증가할수록 도너 농도가 증가하였고 이에 따라 역방향 항복전압은 감소하였다. 역방향 회복시간은 양성자를 주입하지 않은 경우에 약 240 nsec 였으나  $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 의 도즈로 중성영역에 주입한 경우에 50 nsec로 1/5 정도의 수준으로 단축시킬 수 있었다. 즉, 본 연구에서는 pn 다이오드의 정적인 특성과 동적인 특성 모두를 측정 및 분석한 결과 정적인 특성은 양성자를 주입하지 않은 소자와 큰 차이를 보이지 않았으며, 동적인 특성은 1/5 정도의 수준으로 소자의 역방향 회복시간을 단축시켰다. 이는 현재 사용되고 있는 초고속 회복 다이오드의 범위를 만족한다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업 및 21세기 프론티어연구개발사업으로 시행한 양성자 기반공학기술개발사업의 지원을 받았다.

#### 참고 문헌

[1] 김용주, 정희환, “고속 전력변환용 반도체 Switching 소자(IGBT)의 기술 및 특허동향”,

전기전자재료학회지, 13권, 6호, p. 9, 2000.

- [2] W. D. Nowak, W. Wondrak, and D. Silber, “Use of proton irradiation in semiconductor power devices technology”, *Archiv fur Elektrotechnik*, Vol. 72, p. 133, 1989.
- [3] P. Hazdra and J. Vobecky, “Accurate simulation of fast ion irradiated power devices”, *Solid State Electronics*, Vol. 37, Issue 1, p. 127, 1994.
- [4] T. Flohr and R. Helbig, “Determination of spatial variation of the carrier lifetime in a proton-irradiated Si N+-N-P+ diode by OBIC measurements”, *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 37, Issue 9, p. 2076, 1990.
- [5] 김상철, 김은동, “전력반도체 기술 및 시장동향”, *전기전자재료학회지*, 15권, 3호, p. 19, 2002.
- [6] Vitezslav Benda, John Gowar, and Duncan A. Grant, “Power Semiconductor Devices Theory and Application”, John Wiley and Son, p. 162, 1999.
- [7] Won-Chae Jung, “I-V and C-V Measurements of Fabricated P+/N junction Diode in Antimony doped(111)Silicon”, *Trans. EEM*, Vol. 3, No. 2, p. 10, 2002.
- [8] P. Cova, R. Menozzi, and M. Portesine, “H+ irradiation for reverse recovery softness and reliability of power p-i-n diodes for subberless applications”, *PROC. 23rd International Conference On Microelectronics*, Vol. 1, p. 143, 2002.
- [9] Zhiyun Luo, Tianbing Chen, John D. Cressler, David C. Sheridan, John R. Williams, Robert A. Reed, and Paul W. Marshall, “Impact of proton irradiation on the static and dynamic characteristics of High-voltage 4H-SiC JBS switching diodes”, *IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE*, Vol. 50, Issue 6, p. 1821, 2003.
- [10] P. Hazdra, K. Brand, J. Rubes, and J. Vobecky, “Local lifetime control by light ion irradiation : impact on blocking capability of power P-i-N diode”, *Microelectronics Journal*, Vol. 32, Issue 5-6, p. 450, 2001.