

# 양성자 주입기술을 이용한 PT형 전력다이오드의 스위칭 특성 향상

## Switching Characteristics Enhancement of PT Type Power Diode using Proton Irradiation Technique

김병길<sup>1</sup>, 최성환<sup>2</sup>, 이종현<sup>3</sup>, 배영호<sup>1,a</sup>

(Byoung-Gil Kim<sup>1</sup>, Sung-Hwan Choi<sup>2</sup>, Jong-Hun Lee<sup>3</sup>, and Young-Ho Bae<sup>1,a</sup>)

### Abstract

Lifetime control technique by proton implantation has become an useful tool for production of modern power devices. In this work, punch-through type diodes were irradiated with protons for the high speed power diode fabrication. Proton irradiation which was capable of controlling carrier's lifetime locally was carried out at the various energy and dose conditions. Characterization of the device was performed by current-voltage, capacitance-voltage and reverse recovery time measurement. We obtained enhanced reverse recovery time characteristics which was about 45 % of original device reverse recovery time and about 73 % of electron irradiated device reverse recovery time. The measurement results showed that proton irradiation technique was able to effectively reduce minority carrier lifetime without degrading the other characteristics.

**Key Words** : Proton, Electron, Defect, Carrier lifetime, Diode

### 1. 서론

전력 소자의 스위칭 특성향상을 위해 다양한 연구가 진행 되어 왔다[1]. 스위칭 동작 속도 향상을 위한 방법으로는 소자 설계와 구조를 변화 시키는 방법, 금이나 백금 등의 금속 불순물을 열확산 시키는 방법이 있으며, 전자선, 양성자이온, 헬륨 이온 주입과 같은 격자 결함 유기를 이용하여 캐리어 수명을 제어하는 방법이 있다[2,3]. 기존에 주로 사용된 금속 불순물 열 확산법은 공정이 간단하지만 불순물 확산속도가 빠르고 확산 범위가 광범위해서 정확한 농도제어가 어렵다. 따라서 역방향 누설전류가 크고 품질관리가 어려운 단점이 있다[4]. 이러한 단점을 보완하여 개발된 기술이 입자 조사

기술이다. 캐리어 수명 제어를 위한 입자 주입법 중, 전자선 조사법은 지온공정이 가능하고 도즈의 변화로 격자 결함의 밀도를 조절할 수 있으며 공정의 마지막 단계에서 이루어져 다른 공정에 의한 영향을 받지 않아 정확한 제어가 가능하다는 장점이 있지만 국부적인 위치에 결함을 생성시키기 어렵다[5,6]. 이에 비해 양성자 주입법은 전자 주입법과 비슷한 효과를 가지는 동시에 주입 에너지 조건에 따라서 국부적으로 결함대역을 형성시킬 수 있으므로, 원하는 위치에 선택적으로 결함을 생성시켜 효율적으로 캐리어 수명을 감소시킬 수 있다[6,7]. 또한 열처리 공정으로 수소 이온 주입시 발생하는 불필요한 결함을 안정화시킬 수 있다[8]. 본 논문에서는 PT(punch through)형 전력용 다이오드에 다양한 조건으로 양성자를 주입한 후 전기적 특성을 분석하였다.

1. 위덕대학교 전자공학부  
(경북 경주시 강동면 유금리 525)  
2. 경북대학교 전자전기컴퓨터학부  
3. 페어차일드 코리아(주) Discrete팀  
a. Corresponding Author : yhbae@uu.ac.kr  
접수일자 : 2005. 12. 13  
1차 심사 : 2006. 1. 12  
심사완료 : 2006. 1. 31

### 2. 실험

본 연구를 위해 사용된 소자는 PT형 p<sup>+</sup>/p/n/n<sup>+</sup> 구조의 실리콘 다이오드이다. PT형 다이오드와

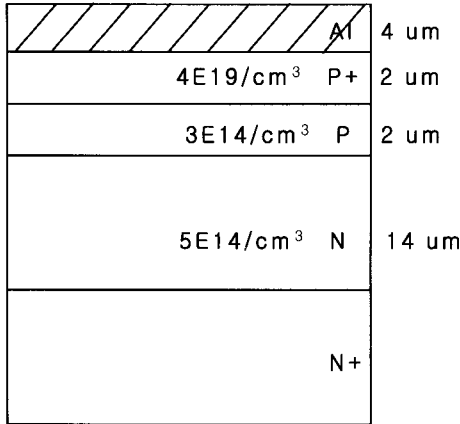


그림 1. 다이오드 단면구조.  
Fig. 1. Cross section of diode.

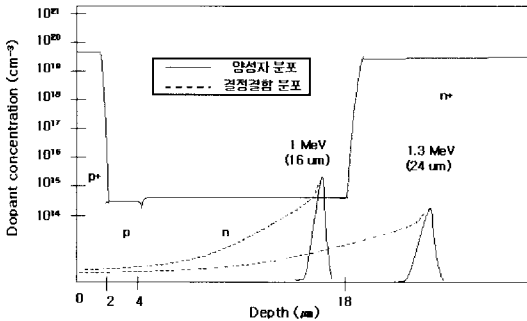


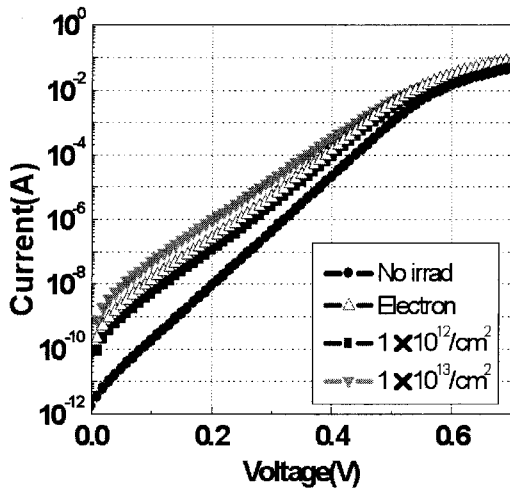
그림 2. 결정결함 및 양성자 농도 분포.  
Fig. 2. Crystal defects and proton concentration profile.

NPT(non punch through)형 다이오드의 구조상 차이는 그림 1에서의 저농도로 도핑된 p와 n영역의 두께이다. PT형 다이오드는 NPT형 다이오드에 비해 이 저 농도로 도핑된 영역(lightly doped region)의 두께가 얇기 때문에 역방향 항복전압이 낮지만 순방향 전압강하가 적고 역방향 회복 시간이 짧으며 스위칭 때에 회로에 큰 피해를 줄 수 있는 역방향 최대 전류(reverse peak current)도 작은 장점이 있다[9]. 그림 1은 제조된 소자의 단면 구조이다. 소자 제조 공정을 완료하고 패키지를 하기 전에 양성자를 주입하였다. SRIM-2003 시뮬레이션을 이용해 필요한 양성자 에너지를 구하였고 구해진 에너지 주입 조건은 1 MeV, 1.3 MeV로 이는 소자에 역 바이어스를 인가하였을 때 공핍영역과 중성역역에 각각 해당한다. 양성자 주입

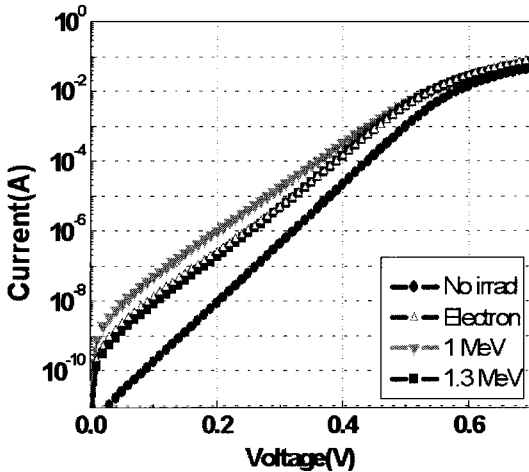
시 나타나는 소자 내의 결정 결함 분포와 양성자 농도 분포의 시뮬레이션 결과를 그림 2에 나타내었다. 각 주입 에너지 조건에서 도즈는  $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ,  $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 로 변화시켰으며 전기적인 특성을 측정 후 전자가 조사된 소자와 입자 주입이 없는 소자와 함께 비교 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

그림 3은 양성자 주입 도즈 및 에너지 변화에 따른 순방향 전류-전압 특성이다. 그림 3(a)은 주입 에너지를 1 MeV로 고정하고 도즈를  $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ,  $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 로 변화시켰을 때 순방향 전류-전압 특성이다. 그림 3(b)은 양성자 주입 도즈를  $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 으로 고정하고, 주입 에너지를 1 MeV, 1.3 MeV로 변화시킨 경우의 전류-전압 특성 곡선이다. 그림 3(a)에서 입자 주입을 한 소자는 입자 주입이 없는 소자에 비해 전류 값이 증가함을 알 수 있다. 또 양성자의 경우 주입 도즈가 증가함에 따라 전류 값이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그 이유는 다음과 같다. 양성자 주입 도즈가 증가함에 따라 재결합 준위 밀도에 영향을 주는 결정결함의 밀도가 높아져 재결합 준위에서 소수 캐리어의 발생과 재결합이 활발해진다. 따라서 결정결함의 증가로 인해 캐리어의 재결합이 증가하게 되고 캐리어 수명은 짧아지게 되어 전체 전류는 증가하게 된다. 그러므로 결함 밀도가 증가함에 따라 전류가 증가하게 되는 것이다. 그림 3(b)에서는 양성자 주입 에너지 1 MeV의 소자가 주입 에너지 1.3 MeV의 소자에 비해 주입 에너지가 더 낮음에도 불구하고 더 큰 전류 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 그 이유는 그림 2에서 확인할 수 있듯이 주입 에너지 1 MeV 소자의 결정결함 밀도가 1.3 MeV의 결정결함 밀도 보다 크기 때문이다. 캐리어 수명은 저농도로 도핑된 활성영역의 결정결함이 주요한 영향을 주게 되며 중성영역에서의 결정결함은 높은 도핑농도로 인해 큰 영향을 주지 못한다. 따라서 앞에서 설명한 것처럼, 낮은 전류 상에서 재결합 준위의 밀도가 높아짐에 따라 소수 캐리어의 활발한 재결합에 의한 캐리어 수명 감소로 확산 전류가 더욱 커지게 되는 것이다. 그림 3(b)의 결과 역시 입자 주입을 한 소자가 입자 주입이 없는 소자에 비해 전류 값이 증가하였지만, 전자와 양성자를 주입한 소자를 비교 했을 때의 순방향 전류 전압 특성은 큰 차이가 없음을 확인하였다.



(a) Proton irradiation dose variation



(b) Proton irradiation energy variation

그림 3. 순방향 전류-전압 특성.

Fig. 3. Forward current-voltage characteristics.

그림 4는 양성자와 전자를 조사한 소자의 순방향 특성을 높은 전력상에서 측정된 결과이다. 그림에서 입자를 조사한 소자의 폭전 기용기가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이유는 다음과 같다. 높은 전력에서는 낮은 전력에서와는 달리 캐리어의 재결합에 의한 전류보다는 소자의 직렬 저항성분에 의한 전압강하가 전체 전류 크기에 큰 영향을 준다. 입자가 소자 내에 주입되면 입자에 의한 결정결함의 증가로 인해 저항성이 커지게 된다. 이 결과는 입자가 소자내에 조사되었을 경우 입자 조사 없는 소자에 비해 전력 소모와 관계있는 순

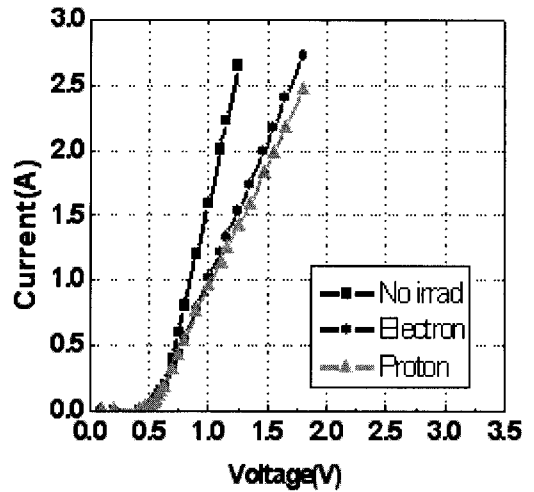
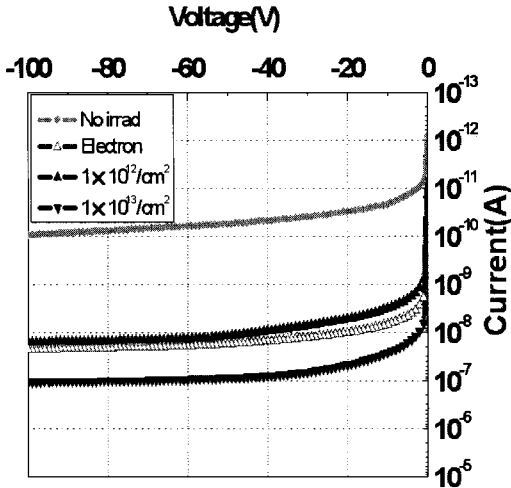


그림 4. 높은 전력에서 순방향 전류-전압 특성.

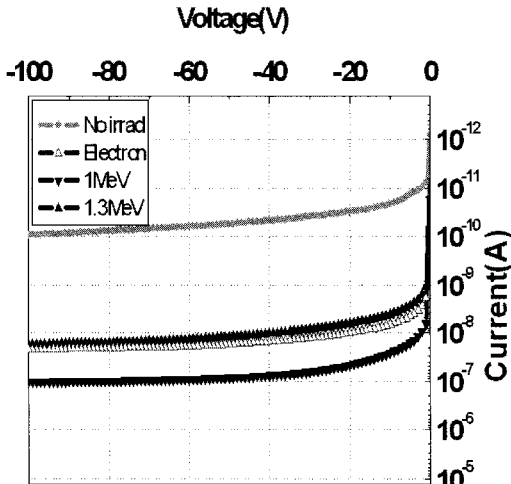
Fig. 4. Forward current-voltage characteristics at the high power.

방향 전압 강하가 크다는 것을 의미한다. 고속 스위칭 소자를 구현하기 위해 소수 캐리어 수명을 제어하게 되면 순방향 전압 강하는 필연적으로 나타나며, 이는 역방향 회복특성과 반비례 관계에 있으므로 사용용도에 맞게 적절한 절충이 필요하다. 순방향 전류-전압 특성 역시 양성자가 조사된 소자와 전자가 조사된 소자의 특성차이는 거의 없었다.

그림 5는 소자의 역방향 전류-전압 특성이다. 그림 5(a)는 양성자 주입 에너지를 1 MeV로 고정하고 도즈를  $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ,  $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 로 변화시켰을 때, 역방향 전류-전압을 측정된 것이다. 역방향 누설 전류는 캐리어 생성과 재결합, 공간 전하영역의 폭에 비례관계에 있으며 역방향 인가 전압이 증가할수록 누설전류도 증가한다. 이것은 그림에서도 확인할 수 있다. 입자 주입된 소자의 경우 입자 주입이 없는 소자에 비해 누설전류가 커지며 도즈가 증가 할수록 누설전류가 증가하는 것을 알 수 있다. 그 이유는 주입 도즈가 증가함에 따라 캐리어의 수명을 제어하는 결정 결함 밀도가 증가하고 이로 인해 재결합 준위의 밀도가 높아져 캐리어의 생성과 재결합이 활발해지기 때문이다. 100 V의 역방향 전압에서 특성을 비교했을 때, 양성자를 주입하지 않은 소자에 비해 주입에너지 1 MeV,  $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  도즈로 양성자를 주입한 소자의 누설 전류가 다소 증가하였지만 약 100 nA로 작은 값을 유지하고 있다. 그림 5(b)는 양성자 주입 도즈를  $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 으로 고정하고, 주입 에너지를 1 MeV,



(a) Proton irradiation dose variation



(b) Proton irradiation energy variation

그림 5. 역방향 누설 전류 특성.

Fig. 5. Reverse leakage current characteristics.

1.3 MeV로 변화시켰을 때, 역방향 전류-전압을 측정된 결과이다. 마찬가지로 입자를 주입시킨 소자는 입자 주입이 없는 소자에 비해 누설전류가 증가하였다. 한편 앞의 순방향 전류 전압특성에서 확인했듯이 1.3 MeV로 양성자를 주입한 소자에 비해 1 MeV로 주입한 소자가 더 높은 결함 밀도로 인해 누설전류가 더 큰 것을 확인할 수 있다. 전자를 주입한 소자와 양성자를 주입한 소자의 누설전류는 여전히 비슷한 수치를 유지했다.

본 논문에서는 양성자의 역방향 항복특성을 분석하기 위해 역방향 항복특성과 반비례 관계에 있

는 도핑농도를 측정해 보았다. 그림 6(a)은 양성자 주입 에너지를 1 MeV으로 고정하고 주입 도즈를  $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ,  $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 으로 변화시켰을 경우, 도핑농도를 구한 결과이다. 도핑농도 프로파일은 역방향 인가전압에 따른 정전용량-전압 특성을 측정 한 후 그 결과 값을 식 (1)에 대입시켜 구하였다.

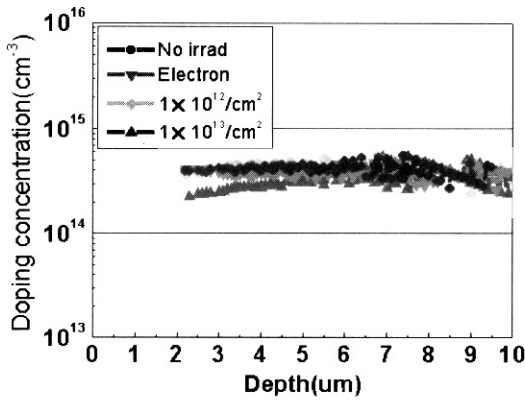
$$N_B(x) = \frac{2}{q\epsilon_{si}\epsilon_0 A^2} \left| \frac{d(1/C^2)}{dV_A} \right| \quad (1)$$

여기서  $x$ 는 p/n 접합부로부터 n영역으로의 거리이며 식 (2)를 이용하여 구한다.

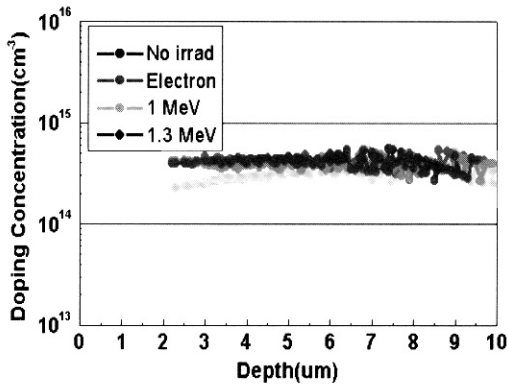
$$x = \frac{\epsilon_{si}\epsilon_0}{C} A \quad (2)$$

소자는 PT형 다이오드이므로 저 농도로 도핑된 p와 n영역 쪽으로 공핍층이 생기게 되지만, p영역은 짧기 때문에 바이어스가 증가함에 따라 대부분은 n영역 쪽으로 공핍층이 증가하게 된다. 그림의 도핑농도 프로파일은 p와 n사이의 접합부를 기준으로 n방향으로의 도핑농도 분포가 측정된 것이다. 실리콘에 양성자를 주입하면 주입된 양성자 즉 수소 이온은 일반적으로 도너로 작용하며 수소 이온에 의해 유기된 결함은 억셉터로 작용하여 소자의 도핑 농도에 복합적인 영향을 준다[10]. 그림에서 양성자를 주입한 소자와 전자를 주입한 소자, 그리고 입자주입이 없는 소자 모두 비슷한 값을 나타내고 있다. 양성자 주입에 의해 도핑농도가 변하지 않고 입자 주입이 없는 소자와 비슷한 값을 나타내는 이유는 양성자를 주입했을 때 양성자인 수소 이온과 수소이온에 의해 유도된 결함의 영향이 서로 상쇄되어 도핑농도 변화에 영향을 주지 못했기 때문이다. 그림 6(b)은 양성자 주입 도즈를  $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 로 고정하고 주입 에너지를 1 MeV, 1.3 MeV로 변화시켰을 때, 도핑 농도를 구한 결과이다. 대체로 모든 조건에서 비슷한 값을 나타내고 있지만 양성자를 1 MeV로 주입한 소자의 경우 오히려 입자 주입이 없는 소자에 비해 도핑농도가 약간 감소한 것을 알 수 있다. 이는 주입에너지 1 MeV 소자의 경우 도너로 작용하는 수소이온의 영향보다 억셉터로 작용하는 결정 결함의 영향이 더 우세하여 도핑농도가 줄어든 것으로 보인다.

그림 7은 소자의 역방향 항복 전압을 나타낸 것이다. 역방향 항복전압은 도핑농도와 반비례 관계



(a) Proton irradiation dose variation



(b) Proton irradiation energy variation

그림 6. 도핑농도 프로파일.

Fig. 6. Doping concentration profile.

에 있다. 본 논문에서 역방향 항복 전압을 측정할 결과 양성자를 주입한 소자와 전자를 주입한 소자, 그리고 입자 주입이 없는 소자 모두 그림과 같은 260 V의 역방향 항복 전압을 나타내었다. 이 결과는 앞에서 확인한 도핑농도 분석의 결과와 그 경향성이 일치함을 알 수 있다. 한편 앞의 도핑농도 결과에서 양성자 주입에너지 1 MeV 소자의 도핑농도가 다른 조건의 소자에 비해 낮았지만, 그 차이가 매우 적어 항복전압에는 큰 영향을 미치지 못한 것으로 보인다.

그림 8은 양성자 주입 에너지 및 도즈 변화에 따른 역방향 회복 시간 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 주입 도즈가 증가할수록 역방향 회복 시간이 감소함을 알 수 있다. 이는 주입 도즈가 증가할수록 결정결함 밀도가 증가하여 재결합 센터의 밀

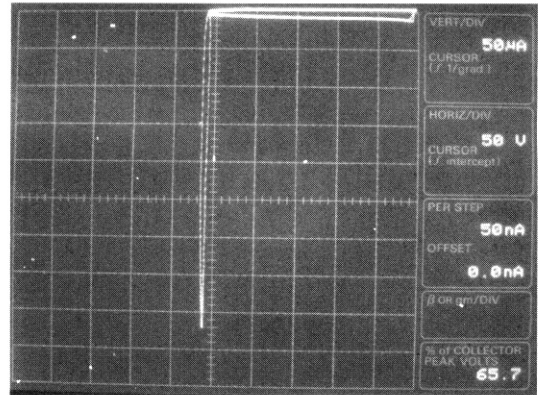


그림 7. 역방향 항복 전압 특성.

Fig. 7. Reverse breakdown voltage characteristics.

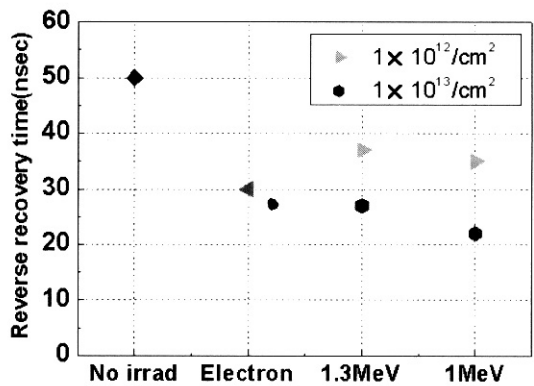


그림 8. 양성자 주입 에너지와 도즈에 따른 역방향 회복 시간.

Fig. 8. Reverse recovery time with irradiation energy and dose variation.

도가 증가하게 되고 소수 캐리어 수명이 감소하기 때문이다. 양성자를 조사한 소자의 역방향 회복시간은 주입 도즈가  $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 의 경우 1.3 MeV 주입 에너지의 소자는 27 ns이고 1 MeV는 22 ns로 두 조건 모두 입자 주입이 없는 소자의 50 ns와 전자가 조사된 소자의 30 ns에 비해 역방향 회복 시간이 감소하였다. 또한 역방향 회복특성에서도 앞의 결과처럼 더 많은 결정 결함을 가진 1 MeV 에너지 소자가 1.3 MeV 소자에 비해 더 빠른 회복시간을 보이고 있다.

#### 4. 결 론

전력 소자의 스위칭 특성 향상을 위해 양성자 조사 기술을 이용하였다. 전력용 PT 다이오드에 다양한 조건으로 양성자를 주입한 후 주입 조건에 따른 소자의 전기적 특성을 분석하였다. 특성 분석을 위해 양성자 주입 소자의 전기적 특성을 입자 조사가 없는 소자, 동일 소자에 전자를 주입한 소자의 전기적 특성과 비교하였다. 그 결과, 양성자를 주입한 소자는 입자 주입이 없는 소자에 비해 순방향 전압강하, 역방향 누설 전류는 입자 주입이 없는 소자에 비해 증가하였지만 전자를 조사한 소자와는 큰 차이가 없었다. 역방향 항복전압의 경우 모든 조건의 소자에서 같은 값을 나타내었다. 역방향 회복 시간의 경우, 주입에너지 1 MeV, 도즈  $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  의 조건으로 양성자를 주입한 소자의 회복시간이 약 22 nsec로 입자 조사가 없는 소자 값의 약 45 %, 전자선이 조사된 소자 값의 약 73 % 값으로 향상 시킬 수 있었다. 따라서 양성자 주입기술을 이용하여 다른 전기적인 특성의 큰 열화 없이 스위칭 특성이 우수한 소자의 제작이 가능함을 확인하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 21세기 프론티어연구개발사업으로 시행한 양성자기반 공학기술개발사업의 지원을 받았다.

#### 참고 문헌

[1] 김병길, 최성환, 이종현, 배영호, "입자 조사에 의한 PT형 전력 다이오드의 스위칭 특성 향상", 한국전기전자재료학회 2005추계학술대회 논문집, 18권, p. 16, 2005.  
 [2] N. Kesitalo, A. Hallen, F. Masszi, and J. Olsson, "Simulation of forward bias injection

in proton irradiated silicon pn-junctions", Solid State Electronics, Vol. 39, No. 7, p. 1087, 1996.  
 [3] 김상철, 김은동, "전력반도체 기술 및 시장동향", 전기전자재료학회지, 15권, 3호, p. 15, 2002.  
 [4] A. Guerra, K. Andoh, and S. Fimiani, "Ultra-fast recovery diodes meet today's requirements for high frequency operation and power ratings in SMPS applications", International Rectifier, p. 1, 2000.  
 [5] P. Cova, R. Menozzi, M. Portesine, M. Bianconi, E. Gombia, and R. Mosca "Experimental and numerical study of H<sup>+</sup> irradiated p-i-n diodes for snubberless applications", Solid State Electronics, Vol 49, Iss. 2, p. 183, 2005.  
 [6] 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", Micro-electronics Journal, Vol. 32, Iss. 5-6, p. 449, 2001.  
 [7] 이강희, 김병길, 이용현, 백종무, 이제성, 배영호, "양성자 주입 기술을 이용한 초고속 회복 다이오드의 제작", 전기전자재료학회논문지, 17권, 12호, p. 1308, 2004.  
 [8] P. Hazdra, J. Vobecky, and K. brand, "Optimum lifetime structuring in silicon power diodes by means of various irradiation techniques", NIMB, Vol. 186, Iss. 1-4, p. 414, 2002.  
 [9] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, "Power electronics", John Wiley & Sons Inc., p. 1, 2003.  
 [10] S. Godey, E. Ntsoenzok, D. C. Schmidt, and J. F. Barbot, "Effect of shallow donors induced by hydrogen on p+n junctions", Materials Science and Engineering B, Vol. 58, Iss. 1-2, p. 108, 1999.