

양성자가 주입된 NPT형 전력용 다이오드의 전류-전압 특성

Current-voltage Characteristics of Proton Irradiated NPT Type Power Diode

김병길¹, 백종무², 이재성¹, 배영호^{1,a}

(Byoung-Gil Kim¹, Jong-Mu Baek², Jae-Sung Lee¹, and Young-Ho Bae^{1,a})

Abstract

Local minority carrier lifetime control by means of particle irradiation is an useful technology for production of modern silicon power devices. Crystal damage due to ion irradiation can be easily localized by choosing appropriate irradiation energy and minority carrier lifetime can be reduced locally only in the damaged layer. In this work, proton irradiation technology was used for improving the switching characteristics of a pn diode. The irradiation was carried out with various energy and dose condition. The device was characterized by current-voltage, capacitance-voltage, and reverse recovery time measurements. Forward voltage drop was increased to 1.1 V at forward current of 5 A, which was 120 % of its original device. Reverse leakage current was 64 nA at reverse voltage of 100 V, and reverse breakdown voltage was 670 V which was the same voltage as original device without irradiation. The reverse recovery time of device was reduced to about 20 % compared to that of original device without irradiation.

Key Words : Proton, Defect, Carrier lifetime, Diode, Power device

1. 서 론

전력 반도체 소자에 있어서 스위칭 동작 속도의 향상은 필수적인 사항이다. 스위칭 동작 속도 향상을 위한 방법으로는 소자 설계와 구조를 변화 시키는 방법이 있고, 금이나 백금 등의 금속 불순물을 열확산 시키는 방법이 있으며, 전자선, 양성자 이온, 헬륨 이온 주입과 같은 격자 결함 유기를 이용하여 캐리어 수명을 제어하는 방법이 있다[1,2]. 기존에 주로 사용된 금속 불순물 열 확산법은 간단한 공정이 가능하지만 불순물 확산속도가 빠르고 광범위해서 정확한 농도제어가 어렵다. 따라서 역방향 누설전류가 크고 품질관리가 어려운 단점이 있다[2,3]. 또한, 최근 제작되고 있는 3세대 전력 소자의 경우 격자 결함 유기를 이용한 캐리어

수명 제어 기술의 수반 없이 스위칭 동작 개선을 기대하기가 어렵다[4]. 캐리어 수명 제어를 위한 입자 주입법 중, 전자선 조사법은 저온공정이 가능하고 도즈의 변화로 격자 결함의 밀도를 조절할 수 있는 장점이 있지만 국부적인 위치의 결함생성이 어렵다[3]. 이에 비해 양성자 주입법은 주입 에너지 조건에 따라서 국부적으로 결함대역을 형성시킬 수 있으므로, 원하는 위치에서 선택적으로 결함을 생성시켜 효율적으로 캐리어 수명을 감소시킬 수 있다[5,7]. 또한 공정의 마지막 단계에서 이루어져 다른 공정에 의한 영향을 받지 않아 정확한 제어가 가능하며, 열처리 공정으로 불필요한 결함을 안정화시킬 수 있다[6]. 본 논문에서는 NPT(non punch through)형 전력용 다이오드에 다양한 조건으로 양성자를 주입하고 주입 조건에 따른 전류-전압 특성, 항복전압 특성, 역방향 회복시간 등을 분석한 연구 결과를 기술하였다.

1. 위덕대학교 정보통신공학부
(경북 경주시 강동면 유금리 525)
2. 대원과학대학 전자정보통신과
a. Corresponding Author : yhbae@uu.ac.kr
접수일자 : 2005. 9. 1
1차 심사 : 2005. 10. 18
심사완료 : 2005. 11. 1

2. 실험

본 연구를 위해 사용된 소자는 NPT 형 p+n/n+

$9 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$	p +	55 μm
$2.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$	n	145 μm
$1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$	n +	55 μm

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

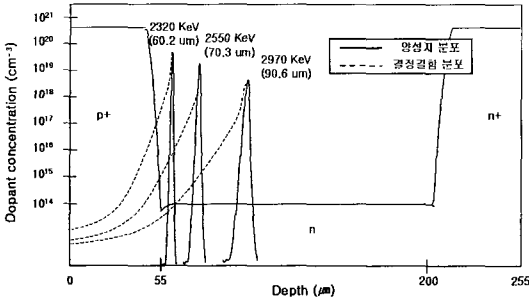
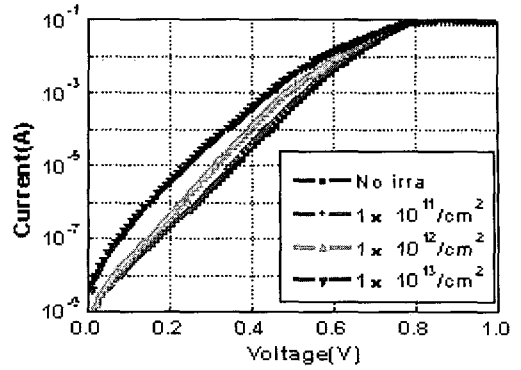


그림 2. 결정결함 및 양성자 농도 분포.
Fig. 2. Crystal defects and proton concentration profile.

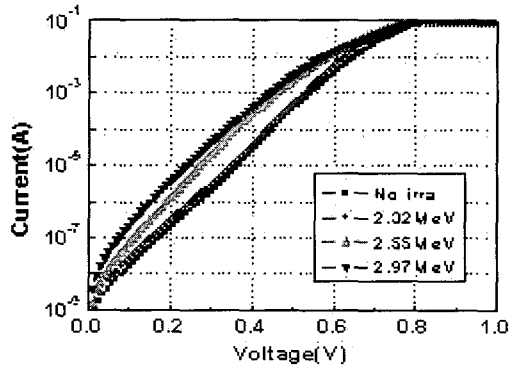
구조의 실리콘 다이오드이다[7]. 그림 1에 제조된 소자의 단면 구조를 나타내었다. 소자 전체의 두께는 255 μm 이고 p+와 n+영역의 두께가 각각 55 μm 이며 접합면적은 $3.2 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$ 이다. 양성자 주입은 소자 제조 공정을 완료하고 패키지를 하기 전에 수행 되었다. 양성자 농도 피크를 p+접합 부위, 역 바이어스 상태에서 n-type Si의 공핍영역, n-type Si의 중성영역에 위치시키기 위해서, SRIM-2003 시뮬레이션을 통해 필요한 양성자 에너지를 구하였고 에너지 주입 조건은 각각 2.32 MeV, 2.55 MeV, 2.97 MeV이다. 양성자 주입시 나타나는 소자 내의 결정 결함 분포와 양성자 농도 분포 시뮬레이션 결과를 그림 2에 나타내었다. 각 주입 에너지 조건에서 도즈를 $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 로 변화시키며 소자를 제작하여 양성자가 주입되지 않은 소자와 비교 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 3은 양성자 주입 도즈 및 에너지 변화에 따른 순방향 전류-전압 특성이다. 그림 3(a)은 주



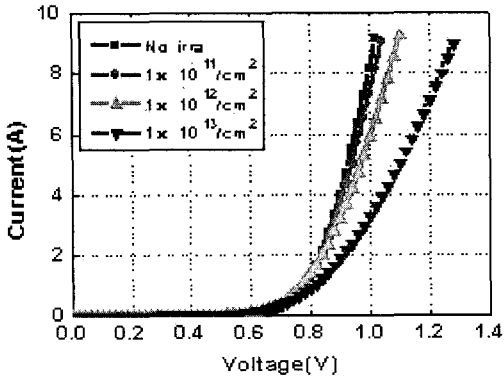
(a) Proton irradiation dose variation



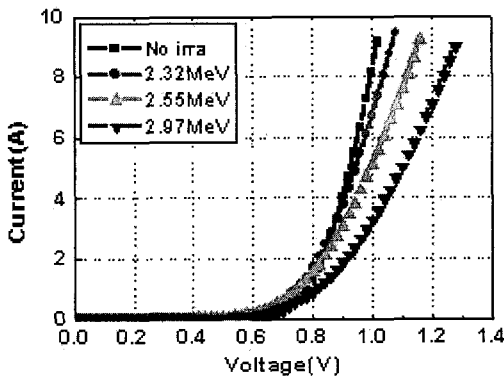
(b) Proton irradiation energy variation

그림 3. 순방향 전류-전압 특성.
Fig. 3. Forward current-voltage characteristics.

입에너지를 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 증가시켰을 때 순방향 전류-전압 특성이다. 그림에 나타난 바와 같이 주입 도즈가 증가함에 따라 전류 값이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그 이유는 양성자 주입 도즈가 증가함에 따라 재결합에 영향을 미치는 결정결함의 밀도가 높아지며 순 바이어스에서 주입된 소수 캐리어의 재결합이 활발해진다. 따라서 주입된 소수 캐리어의 수명이 감소하게 되고 확산이 보다 활발해지므로 캐리어 확산 방정식에 의해 얻어진 이상 다이오드 방정식이 적용되는 낮은 전류 수준에서 절함밀도가 증가함에 따라 전류가 증가한다. 하지만 주입된 소수 캐리어 밀도의 감소로 인하여 바이어스 증가에 따른 전류의 지수 함수적인 증가는 둔화하게 된다. 그림 3(b)는 양성자 주입 도즈를 $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 으로 고정하고, 주입 에너지



(a) Proton irradiation dose variation



(b) Proton irradiation energy variation

그림 4. 고 전력에서 순방향 전류-전압 특성.

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

지를 2.32 MeV, 2.55 MeV, 2.97 MeV 로 변화시킨 경우의 전류-전압 특성 곡선이다. 이 결과 역시 주입 에너지가 증가할수록 결함이 형성되는 영역이 증가하여 전류 증가가 관찰된다.

그림 4는 양성자 주입 도즈 및 에너지 변화에 따른 고 전력 순방향 전류-전압 특성이다. 그림 4(a)는 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 때, 순방향 전류-전압 특성이다. 그림에서 주입 도즈가 증가함에 따라 곡선의 기울기가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그 이유는 고 전력에서는 캐리어 확산에 의한 영향보다는 소자 내 저항성의 영향이 우세하기 때문에 도즈가 증가할수록 결정결함의 증가로 인한 저항성이 커지기 때문이다. 그림 4(b)는 양성자 주입 도즈를 1×10^{13}

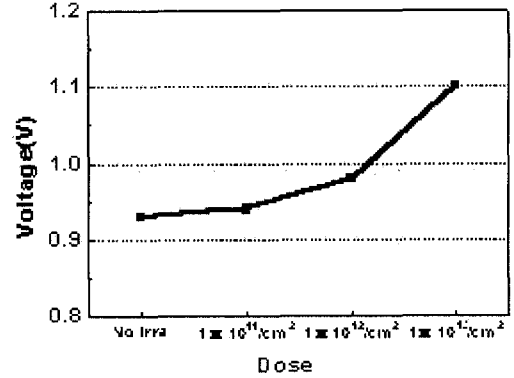


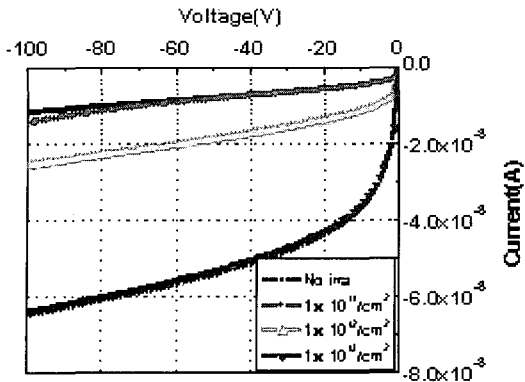
그림 5. 도즈 변화에 따른 5 A에서 순방향 전압강하.

Fig. 5. Forward voltage drop at 5 A with dose variation.

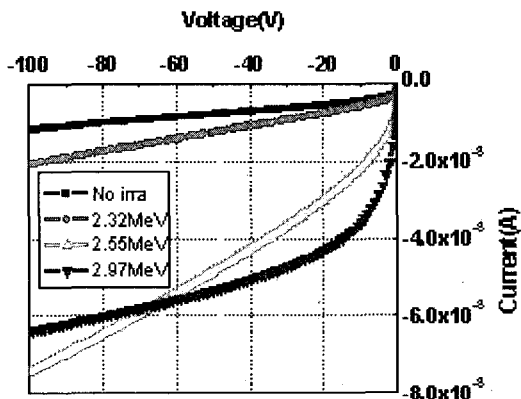
cm^{-2} 으로 고정하고, 주입 에너지를 2.32 MeV, 2.55 MeV, 2.97 MeV 로 변화시켰을 때의 순방향 전류-전압 특성이다. 이 역시 같은 이유로 주입 에너지가 증가할수록 결정 결함에 의한 저항성이 커지기 때문에 기울기가 감소하여 순방향 전압강하가 커지는 것이다.

그림 5는 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 때, 순방향 전류 5 A에서의 바이어스 전압을 측정된 결과이다. 주입 도즈의 증가에 따라 결정결함 증가로 인한 재결합율의 증가로 순방향 전압강하가 증가하며 $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 의 경우 1.1 V로써 최초 소자에 비해 약 20 % 증가하였음을 알 수 있다. 전압강하는 전력 시스템 회로 동작 중 소모 전력과 밀접한 관계가 있으므로 작은 값을 가지도록 해야 하지만, 역방향 회복 특성과의 상호 모순 관계에 있기 때문에 용도에 맞는 적절한 trade-off가 필요하다.

그림 6은 소자의 역방향 전류-전압 특성이다. 그림 6(a)는 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 때, 역방향 전류-전압을 측정된 것이다. 양성자를 주입하지 않은 소자와 비교했을 때, 주입 도즈가 증가할수록 또, 인가전압이 증가할수록 소자의 누설전류가 증가한다. 역방향 누설 전류는 캐리어의 수명과 반비례, 공간 전하 영역의 폭에 비례 관계에 있다. 주입 도즈가 증가함에 따라 캐리어의 수명을 제어하는 결정 결함 밀도가 높아지고 캐리어의 수명이 단축되어 역방향 누설



(a) Proton irradiation dose variation



(b) Proton irradiation energy variation

그림 6. 역방향 누설 전류 특성.

Fig. 6. Reverse leakage current characteristics at high power.

전류는 증가한다. 100 V의 역방향 전압에서 특성을 비교했을 때, 양성자를 주입하지 않은 소자에 비해 주입에너지 2.97 MeV, $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 도즈로 양성자를 주입한 소자의 누설 전류가 다소 증가하였지만 약 65 nA로 작은 값을 유지하고 있다. 그림 6(b)은 양성자 주입 도즈를 $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 으로 고정하고, 주입 에너지를 2.32 MeV, 2.55 MeV, 2.97 MeV 로 변화 시켰을 때, 역방향 전류-전압을 측정 한 결과이다. 이 경우에 낮은 전압 영역에서는 주입 에너지가 클수록 누설전류가 큰 값을 가지지만, 약 70 V 이상의 역 바이어스 전압에서는 2.97 MeV의 에너지로 주입한 경우보다 2.55 MeV로 주입한 소자의 누설 전류가 크다. 그 이유는, 다이오드 역방향 전압의 증가에 따라서 공간 전하 영역

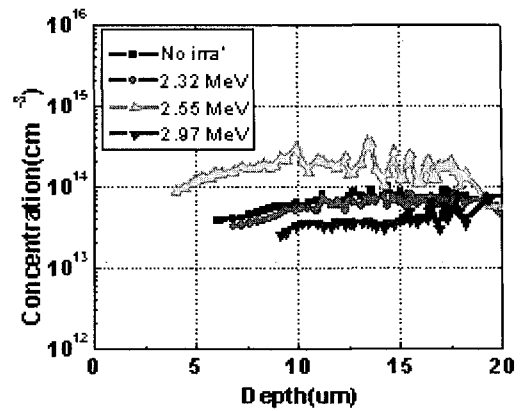


그림 7. 주입 에너지 변화에 따른 도핑농도 프로파일.

Fig. 7. Doping concentration profile with irradiation energy variation.

의 폭은 커지게 되고, 약 70 V 이상의 역방향 전압에서는 공간 전하 영역의 폭이 접합에서 약 20 μm 정도 떨어지게 되어, 2.55 MeV로 주입한 소자의 결정 결함 농도 분포에 피크 위치가 포함 되게 된다. 반면에 2.97 MeV의 경우는 상대적으로 낮은 결정 결함 농도 위치에 해당하여 2.55 MeV의 소자에 비해 누설전류가 작게 된다. 이 결과로 양성자 주입 시 농도 피크의 위치가 중성 영역에 있을 때 더 우수한 소자 특성을 가질 수 있다는 것을 알 수 있다.

그림 7은 양성자 주입 도즈를 $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 으로 고정하고, 주입 에너지를 2.32 MeV, 2.55 MeV, 2.97 MeV 로 변화 시켰을 때의 도핑농도 프로파일이다. 도핑농도 프로파일은 역방향 인가전압에 따른 정전용량-전압 특성을 측정 한 후 그 결과 값을 식 (1)에 대입시켜 구하였다.

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

$$x = \frac{\epsilon_{si}\epsilon_0}{C} A \quad (1)$$

여기서 x는 p/n 접합부로 부터 n영역으로의 거리이다. 소자는 계단형 접합이므로 저 농도로 도핑된 n영역 쪽으로 대부분 공핍층이 생기게 되며, 그림의 도핑농도 프로파일은 p와 n사이의 접합부를

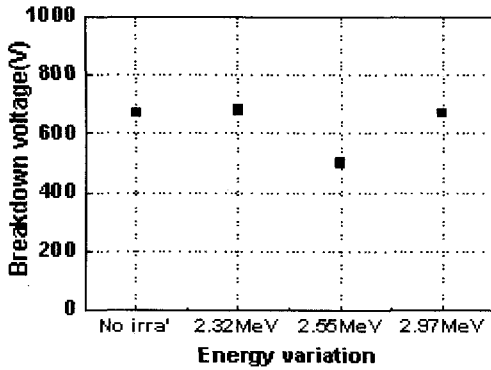


그림 8. 주입 에너지 변화에 따른 역방향 항복 전압 특성.

Fig. 8. Reverse breakdown voltage characteristics with irradiation energy variation.

기준으로 n방향으로의 도핑농도 분포가 측정된 것이다. 실리콘에 양성자를 주입하면 주입된 양성자 즉 수소 이온은 일반적으로 도너로 작용하며 양성자 주입에 의한 결함은 억셉터로 작용하여 소자의 도핑 농도에 복합적인 영향을 준다[8]. 그림에서 주입에너지 2.32 MeV 소자의 경우 양성자 주입에 의한 영향이 미미하여 도핑 농도에 큰 영향을 주지 않았지만 2.55 MeV 소자의 경우 양성자를 주입하지 않은 소자에 비해 도핑 농도가 증가하였고 반대로 2.97 MeV 소자의 경우 양성자를 주입하지 않은 최초 소자와 비슷한 도핑 농도로 감소한 것을 확인할 수 있다. 그 이유는 2.55 MeV 소자의 경우 억셉터 작용하는 결정 결함에 의한 영향보다는 도너로 작용하는 수소이온에 의한 영향이 더욱 커 농도가 증가하였고 2.97 MeV 소자의 경우 억셉터로 작용하는 결정 결함이 증가하여 상호 보상 작용을 함으로써 초기의 도핑농도로 회복된 것으로 보인다. 이러한 도핑농도의 변화는 소자의 항복 전압을 결정하는 요소가 되며 도핑농도가 커질수록 항복전압은 낮아지게 된다.

그림 8은 양성자 주입 도즈를 $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 로 고정하고 주입 에너지를 2.32 MeV, 2.55 MeV, 2.97 MeV 로 변화 시켰을 때 역방향 항복 전압을 측정한 결과이다. 역방향 항복전압은 도핑농도가 낮을수록 큰 값을 가진다. 그림에서 보면 2.32 MeV에서는 양성자가 역방향 항복전압에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 그러나 2.55 MeV에서는 항복전압이 낮아지는 것을 알 수 있다. 그 이유는 앞의 도핑농도 프로파일에서도 확인했듯이 2.55 MeV로 공핍층 내에 양성자가 주입된 경우에

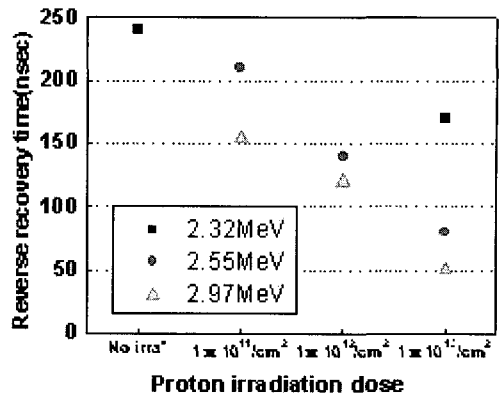


그림 9. 역방향 회복시간 특성.

Fig. 9. Reverse recovery time characteristics.

는 공핍층 근처에서 양성자 농도의 피크가 위치하여 이 부분의 도너 농도가 증가하고 도핑 농도의 증가로 인해 항복전압이 감소한다. 반면 2.97 MeV 소자의 경우 항복전압이 다시 증가하여 양성자를 주입하지 않은 소자와 비슷한 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 이는 2.97 MeV 소자의 수소 피크 위치가 중성 영역에 존재하며 도즈가 증가 하더라도 대부분의 수소 이온은 중성영역에 존재하기 때문에 공핍영역에는 결정결함 밀도의 영향이 우세하여 도핑농도가 낮고 역방향 항복전압이 증가하는 것이다. 이것은 앞에서 확인한 도핑농도 분석과 동일한 결과를 보이고 있다.

그림 9는 양성자 주입 에너지 및 도즈 변화에 따른 역방향 회복시간의 특성 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 양성자가 주입되지 않은 소자의 역방향 회복시간은 약 240 nsec로 나타났으며 주입되는 양성자 에너지와 도즈가 증가할수록 역방향 회복시간과 역방향 전류는 점점 더 감소하였다. 2.32 MeV의 에너지로 주입한 경우에는 큰 효과를 얻을 수 없었지만 2.55 MeV와 2.97 MeV로 주입한 경우에는 역방향 회복시간 감소가 확연히 나타났으며 각각의 경우에 도즈 증가에 따라 역방향 회복시간 감소가 나타났다. 특히 2.97 MeV의 에너지와 $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 도즈로 중성 영역에 양성자를 주입한 경우 역방향 회복시간은 50 nsec로 최초 값의 약 20%의 값을 나타내었다. 양성자 주입량 및 에너지 증가에 따라 결정 결함 밀도가 증가하고 이에 따라 재결합 센터의 밀도가 증가하여 소자 내 소수 캐리어의 수명을 효과적으로 감소시키고 있다는 것을 말해 준다.

4. 결 론

반도체 소자의 스위칭 특성을 향상시키는 방법으로 소자 내의 소수 캐리어 수명을 제어하기 위해 양성자 주입 기술을 적용하였다. 전력용 NPT 다이오드에 다양한 조건으로 양성자를 주입한 후 주입 조건에 따른 소자의 전기적 특성을 분석하였다. 소자의 특성을 분석한 결과, 주입에너지 2.97 MeV, 도즈 $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 의 조건으로 양성자를 주입한 소자에서 순방향 전류 5 A를 위한 순방향 전압강하는 1.1 V로 최초 소자의 120 %, 역방향 전압 100 V에서 역방향 누설 전류는 64 nA, 그리고 역방향 항복전압은 주입하지 않은 소자와 비슷한 670 V의 값을 보였다. 그리고 역방향 회복시간은 50 nsec로써 최초 소자의 20 %로 향상시킬 수 있었다.

감사의 글

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

참고 문헌

- [1] N. Keskitalo, 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.
- [2] 김은동, 장창리, 김상철, 김남균, "양성자 조사법에 의한 고속 사이리스터의 제조", 전기전자재료학회논문지, 17권, 12호, p. 1264, 2004.
- [3] V. Benda, J. Gowar, and D. A. Grant, "Power Semiconductor Devices Theory and Application", John Wiley & Sons Ltd, p. 1, 1999.
- [4] 김상철, 김은동, "전력반도체 기술 및 시장동향", 전기전자재료학회지, 15권, 3호, p. 15, 2002.
- [5] 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, p. 449, 2001.
- [6] P. Hazdra, J. Vobecky, and K. brand, "Optimum lifetime structuring in silicon power diodes by means of various irradiation techniques", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research : Section B 186, p. 414, 2002.
- [7] 이강희, 김병길, 이용현, 백종무, 이재성, 배영호, "양성자 주입 기술을 이용한 초고속 회복 다이오드의 제작", 전기전자재료학회논문지, 17권, 12호, p. 1308, 2004.
- [8] 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 B58, p. 108, 1999.