

양성자 주입 조건에 따른 Si 다이오드의 전기적 특성

이강희, 김병길*, 이용현, 백종무**, 이재성*, 배영호*

경북대학교 전자전기컴퓨터학부, 위덕대학교 정보통신공학부, 대원과학대학 전자정보통신과**

Electrical characteristics of Si diode with proton irradiation conditions

Kang-Hee Lee, Byoung-Gil Kim*, Yong-Hyun Lee, Jong-Mu Baek**, Jae-Sung Lee* and Young-Ho Bae*
School of Electrical Engineering and Computer Science Kyungpook National University, Division of Information and Communication Engineering Uiduk University*, Department of Electronic Telecommunication Daewon Science College**

Abstract

양성자 주입 기술을 pn 다이오드의 동작 속도를 향상시키기 위한 방법 이용하였다. 양성자 주입은 에너지를 2.32 MeV, 2.55 MeV, 2.97 MeV 로 변화시키며 수행하여, projection 범위를 각각 집합, 공핍, 중성영역에 위치하도록 하였다. 또한 각각의 에너지 조건에서 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 변화시켰다. 양성자 주입 조건 변화에 따른 소자 동작특성의 변화를 관찰하기 위하여 소자의 전류-전압 특성, 용량-전압 특성, 역방향 회복시간 측정을 수행하였다. 분석결과 양성자를 주입하지 않은 소자에 비해 특성의 큰 열화없이 역방향 회복시간을 약 1/5 수준으로 단축시킬 수 있는 것으로 나타났다.

Key Words : 양성자, 다이오드, 도즈, 역방향 회복시간

1. 서 론

반도체 소자의 동작 속도 향상을 위해서 소수 캐리어 수명 제어는 필수적인 기술이다. 소자의 소수캐리어 수명을 제어하기 위하여 의도적으로 재결합 중심을 형성시키는 방법으로는 금이나 백금 등의 금속 불순물을 열확산 시키는 방법, 전자선 조사법, 그리고 양성자 등의 이온을 주입하는 방법 등이 있다.[1-3]

양성자 주입 법은 주입 에너지 조건에 따라서 국부적으로 결함대역을 형성시킬 수 있으므로, 원하는 위치에서 선택적으로 캐리어 수명을 감소시킬 수 있다.[4] 또한 공정의 마지막 단계에서 이루어지기 때문에 다른 공정에 의한 영향을 받지 않아 정확한 제어가 가능하며, 열처리 공정으로 쉽게 불필요한 결함의 생성을 억제시킬 수 있다.[5]

본 논문에서는 pn 다이오드의 역방향 회복시간 향상을 위하여 다양한 조건으로 양성자를 주입하

고, 그 전기적인 특성을 분석하기 위해서, 순방향 및 역방향 전류-전압 특성, 용량-전압 특성, 역방향 회복시간을 측정하였다. 그 결과 소자 동작 특성의 큰 열화없이 역방향 회복시간을 약 1/5 수준으로 단축시킬 수 있었다.

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 확산에 의해 각각 55 μm 의 두께로 제작 하였으며, 전체소자의 두께는 Au/Ni (260 nm/240 nm) 전극을 포함하여 256 μm 이고, 접합면적은 1.794 mm \times 1.794 mm 이다.

양성자 주입은 웨이퍼 제작이 완료된 후, 패키지 전의 공정단계에서 수행되었고, 양성자의 농도 피

크가 각각 p+n 접합 부위, 역바이어스 상태에서 n-type Si의 공핍영역 그리고 n-type Si의 중성영역에 위치하도록 양성자 주입 에너지를 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 용량-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.

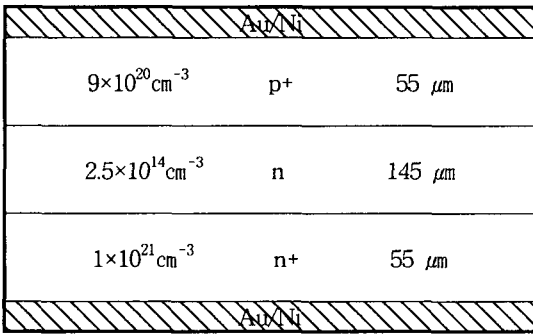


그림 1. 다이오드의 단면구조.

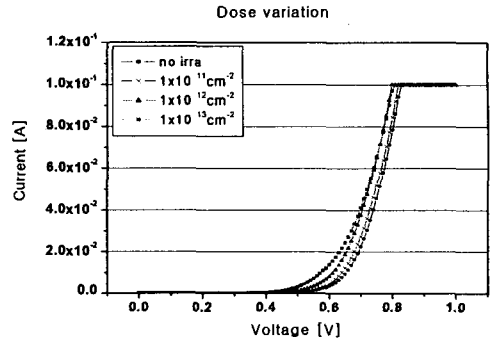
표 1. 양성자 주입 에너지 조건

위치	깊이 (μm)	에너지 (MeV)
접합영역	60.2	2.32
공핍영역	70.3	2.55
중성영역	90.6	2.97

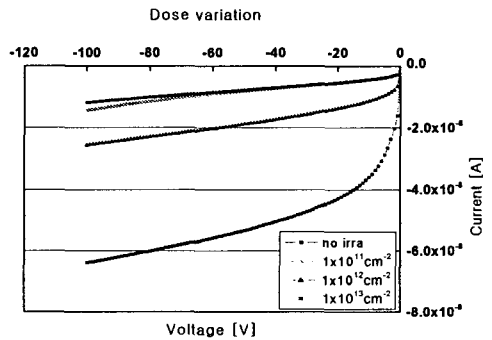
3. 결과 및 고찰

3.1 전류-전압 특성

그림 2는 양성자 주입 에너지를 2.97MeV로 고정하고 도즈를 변화시켰을 때의 전류-전압 특성의 변화를 나타낸다.



(a)



(b)

그림 2. 다이오드의 양성자 주입 도즈 변화에 따른 전류-전압 특성.

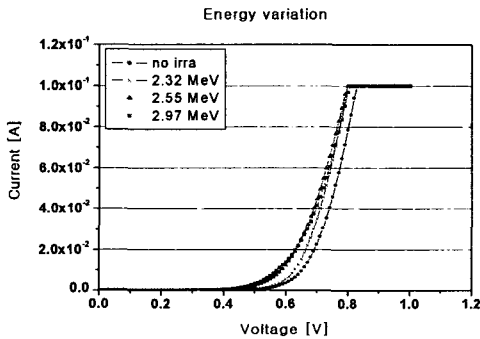
(a) 순방향 전류-전압 특성

(b) 역방향 전류-전압 특성

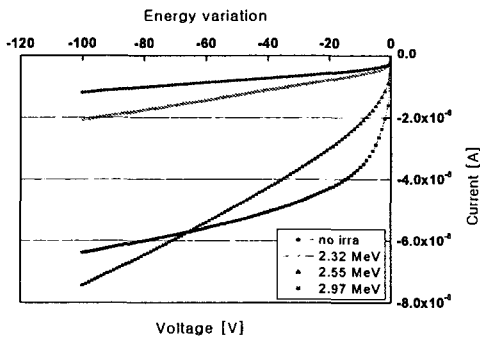
그림 2 (a)에서 양성자를 주입하지 않은 소자와 비교했을 때 다이오드의 전류곡선 기울기가 감소하는 현상이 나타난다. 이것은 양성자를 주입하면 결정 결함 밀도가 증가되어 소자의 저항성이 커지므로, 주입되는 도즈 증가에 따라 순방향 저항이 증가하는 것이다. 하지만 순방향 저항의 증가는 크지 않고 양성자가 주입되기 이전 소자의 특성을 대체로 유지하고 있다.

그림 2 (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 높을수

특 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 약 65 nA로 작은 값을 유지하고 있다.



(a)



(b)

그림 3. 다이오드의 양성자 주입 에너지에 따른 전류-전압 특성

(a) 순방향 전류-전압 특성

(b) 역방향 전류-전압 특성

그림 3은 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 MeV의 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 떨어져지게 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 용량-전압 특성

양성자가 소자 내에 주입되었을 경우, 캐리어의 라이프타임을 제어하는 재결합 준위가 생성되는 것과 동시에 양성자가 도너로 작용하여 소자 내의 도핑 농도를 변화 시킨다는 연구 보고가 있다. [4,5,6] 이것은 주입된 양성자가 도너로 작용하여 양성자 projection 깊이의 도너 농도 증가를 초래하기 때문이다. 이러한 도핑 농도 변화는 용량-전압 특성 측정에 의해 계산될 수 있고, 계산식은 아래와 같다.

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

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

도핑 프로파일 계산 결과, 도핑 농도는 양성자 주입 도즈가 증가 할수록 커진다는 것을 알 수 있었다. 이러한 도핑 농도 변화는 소자의 항복전압을 변화 시키게 된다. 즉 양성자 주입 도즈가 증가 할수록 소자의 항복전압은 감소하였다. 이것은 표 2에 나타내었다.

표 2. 도즈 변화에 따른 다이오드의 항복전압

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

3.3 역방향 회복시간 특성

표 3은 양성자 주입 에너지를 2.97MeV로 고정하고 도즈를 $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 의 세가지 조건으로 변화시켰을 때 나타나는 역방향 회복시간을 측정 한 것이다.

표 3. 도즈 변화에 따른 역방향 회복시간

에너지	도즈	역방향 회복시간
no irradiation	-	240 nsec
2.97 MeV	$1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$	200 nsec
2.97 MeV	$1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$	120 nsec
2.97 MeV	$1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$	50 nsec

양성자를 주입하지 않은 소자의 역방향 회복시간은 약 240 nsec로 나타났으며, 주입되는 양성자 도즈가 증가할수록 역방향 회복시간은 감소하였다. 이것은 다이오드가 순방향에서 역방향으로 스위칭 되었을 때 소자 내부에 남아있는 소수캐리어가 재결합 준위에 의해서 소멸되었고, 양성자 도즈가 증가함에 따라서 재결합 준위로 작용하는 결정결함 밀도가 더욱 커지게 됨을 알 수 있다.

4. 결론

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. pn 다

이오드의 정적인 특성은 양성자를 주입하지 않은 소자와 큰 차이를 보이지 않았으며, 동적인 특성은 1/5정도의 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] W. D. Nowak, W. Wondrak, D. Silber, "Use of proton irradiation in semiconductor power devices technology", Archiv fur Elektrotechnik. Vol. 72, pp. 133-140, 1989.
- [2] W. Wondrak, A. Boos, "Helium implantation for lifetime control in silicon power devices", in Solid State Devices, G. Soncini and P.U. Calzolari (eds) Elsevier Science publishers B.B (North-Holland), 1998.
- [3] P. Hazdra, J. Vobecky, "Accurate simulation of fast ion irradiated power devices", Solid State Electronics, Vol. 37 pp. 127-134, 1994.
- [4] P. Hazdra, K. Brand, J. Rubes, J. Vobecky, "Local lifetime control by light ion irradiation : impact on blocking capability of power P-i-N diode", Microelectronics Journal 32, pp. 449-456, 2001.
- [5] P. Hazdra, J. Vobecky, K. Brand, "Optimum lifetime structuring in silicon power diodes by means of various irradiation techniques", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 186, pp. 414-418, 2002.
- [6] S. Godey, E. Ntsoenzok, D.C. Schmidt, J.F Barbot, "Effect of shallow donors induced by hydrogen on P+N junctions", Materials Science and Engineering B58, pp 108-112, 1999.