

양성자 조사법에 의한 PT-IGBT의 Turn-off 스위칭 특성 개선

Improvement of Turn-off Switching Characteristics of the PT-IGBT by Proton Irradiation

최성환¹, 이용현¹, 권영규², 배영호^{2,a}

(Sung-Hwan Choi¹, Yong-Hyun Lee¹, Young-Kyu Kwon², and Young-Ho Bae^{2,a})

Abstract

Proton irradiation technology was used for improvement of switching characteristics of the PT-IGBT. Proton irradiation was carried out at 5.56 MeV energy with $1 \times 10^{12} / \text{cm}^2$ dose from the back side of the wafer. The I-V, breakdown voltage, and turn-off delay time of the device were analyzed and compared with those of un-irradiated device and e-beam irradiated device which was conventional method for minority carrier lifetime reduction. For proton irradiated device, the breakdown voltage and the on-state voltage were 733 V and 1.85 V which were originally 749 V and 1.25 V, respectively. The turn-off time has been reduced to 170 ns, which was originally 6 μs for the un-irradiated device. The proton irradiated device was superior to e-beam irradiated device for the breakdown voltage and the on-state voltage which were 698 V and 1.95 V, respectively, nevertheless turn-off time of proton irradiated device was reduced to about 60 % compared to that of the e-beam irradiated device.

Key Words : Proton, Irradiation, Lifetime, Minority carrier, PT-IGBT

1. 서론

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)는 낮은 on 전압 강하와 빠른 스위칭 속도 특성으로 널리 사용되고 있는 전력 반도체 소자이다[1]. 그러나 turn-off시 발생하는 tail 전류로 인해 turn-off 지연 시간이 발생하고 이는 스위칭 속도를 감소시키는 요인으로 작용한다. tail 전류는 on 상태 동안 컬렉터 영역으로부터 n-드리프트 영역으로 주입된 소수 캐리어에 의해 발생된다. 따라서 이 소수 캐리어 수명을 줄임으로써 turn-off 지연 시간을 감소시킬 수 있다[2]. 반도체 소자의 소수 캐리어 수명 제어에 의한 스위칭 동작 속도 향상 기술은 금속 불순물 확산법, 전자선 조사법 그리고 양성자

조사법이 있다[3,4]. 금속 불순물 확산법의 경우에는 도핑된 금속 불순물이 실리콘 에너지 밴드 금지 대역 내에서 깊은 준위 (deep level)로 작용하고 전자선, 양성자 주입 등의 입자선 주입 기술에서는 주입 중 형성되는 결정 결함이 깊은 준위로 작용한다. 이러한 깊은 준위는 소수 캐리어의 재결합 중심으로 작용하여 소자 동작 중 주입되는 소수 캐리어의 수명을 단축시킴으로써 소자의 turn-off 지연 시간을 단축시킨다[3-5,8-10]. 금속 불순물 확산법은 정확한 농도 제어가 불가능하고 공정상의 문제로 다른 특성들이 열화 되기 쉬운 단점이 있다[5]. 전자선, 양성자 등의 입자선 조사법의 경우 주입되는 입자의 에너지와 양을 조절하여 생성되는 결정 결함의 양을 제어하며 결정결함의 밀도가 높아질수록 소수 캐리어의 수명이 단축되어 스위칭 특성은 향상되지만 순방향 전압강하는 증가하므로 용도에 따라 적절한 선택이 필요하다. 전자선 조사법의 경우 전자선이 웨이퍼 전체를 관통하므로 전자선 주입 중 형성되는 결정 결함이 소자 내에 전체적으로 균일하게 분포한다[6,7]. 이에 비해

1. 경북대학교 전자전기컴퓨터공학부

2. 위덕대학교 전자공학부

(경북 경주시 강동면 유금리 525)

a. Corresponding Author : yhbae@uu.ac.kr

접수일자 : 2006. 9. 6

1차 심사 : 2006. 10. 12

심사완료 : 2006. 11. 15

양성자 조사법은 수소 이온의 주입 공정이므로 주입 에너지와 도즈를 조절하여 웨이퍼 내에서 원하는 부위에만 결정 결함을 국부적으로 형성시킬 수 있으며 도즈를 조절하여 생성되는 결정 결함의 양을 조절할 수 있다[7-10]. 따라서 소수 캐리어 수명 제어를 위한 결정 결함 생성 시 수반되는 순방향 전압 증가 등의 부작용을 줄일 수 있다는 장점이 있다. 본 논문에서는 양성자 주입 기술을 이용하여 순방향 전압 증가 등의 부작용을 감소시킨 고속 스위칭 IGBT 소자 제조 기술을 개발하기 위하여 PT-IGBT 소자에 양성자를 조사하여 전기적 특성을 측정하고, 아무런 주입도 하지 않은 소자 그리고 전자선을 조사한 소자와 그 특성을 비교 분석하였다.

2. 실험

본 연구에 사용된 소자는 Punch Through 형, 600 V 급의 IGBT 소자이다. 그림 1에 소자의 단면과 양성자 주입으로 생성된 결정 결함의 분포를 나타내었다. 양성자 주입은 소자 제조 공정이 완료된 후 웨이퍼 상태에서 양성자를 조사하였다. 양성자 조사 후 생성된 결정 결함의 안정화를 위하여 300 °C에서 1 시간 동안 열처리 하였다. 양성자는 $1 \times 10^{12} / \text{cm}^2$ 의 도즈로 웨이퍼 뒷면으로부터 5.56 MeV의 에너지로 조사하였다. 주입 에너지에 따른 결정 결함 밀도의 분포를 예측하기 위하여 SRIM

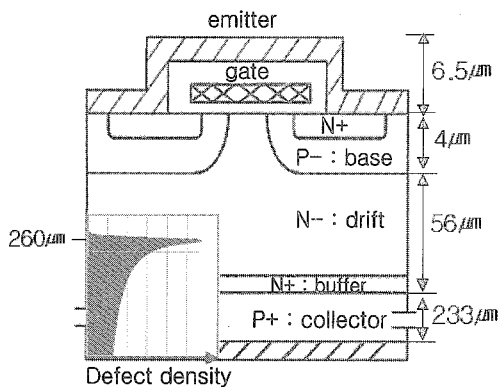


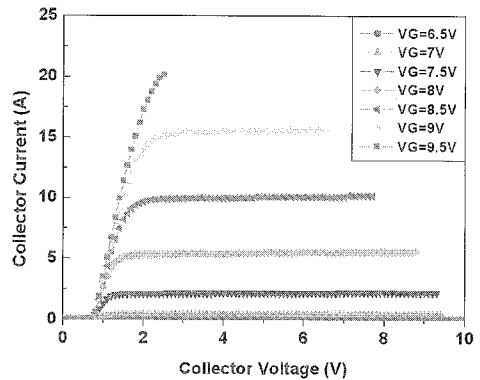
그림 1. IGBT 단면 구조 및 양성자를 웨이퍼 뒷면으로부터 주입하여 소자에 나타나는 결정 결함 분포.

Fig. 1. Cross section of IGBT and defect density by proton irradiation from the back side of the wafer.

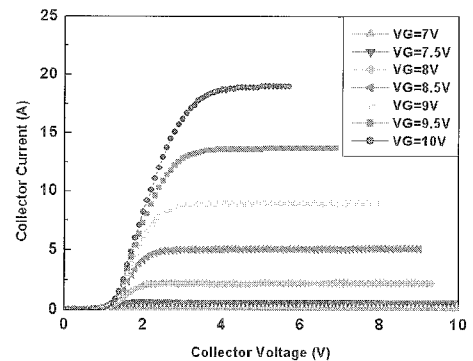
2003 프로그램을 이용하였으며 그림 1에 나타낸 바와 같이 뒷면에서부터 약 260 μm 떨어진 p+ 컬렉터와 n- 드리프트 접합에 가까운 n- 드리프트 영역에 결정결함밀도의 피크가 위치하도록 하였다. 제조된 소자의 전기적 특성 분석을 위해 전류-전압 특성, 항복 전압, turn-off 지연 시간 특성 등을 측정하였으며 그 결과를 아무런 주입도 하지 않은 소자 그리고 전자선을 조사한 소자와 비교 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 2는 제조된 IGBT 소자의 출력 특성을 나타낸 것이다. 측정은 Tektronix사의 curve tracer



(a) un-irradiated device



(b) proton irradiated device

그림 2. IGBT 소자의 출력 특성. (a) 아무런 주입도 하지 않은 소자, (b) 양성자를 주입한 소자.

Fig. 2. Output characteristics of IGBT. (a) un-irradiated device, (b) proton irradiated device.

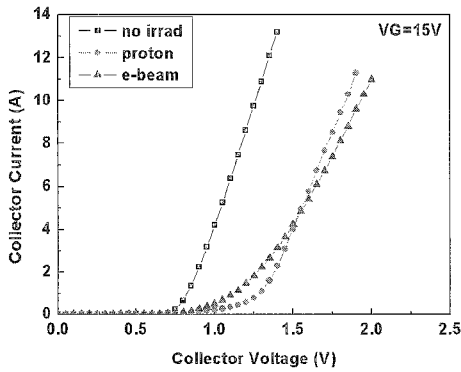
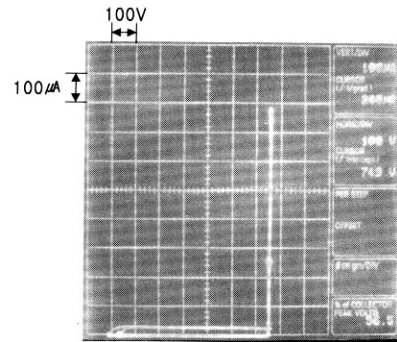


그림 3. IGBT 소자의 컬렉터 포화 전류 특성 (VG=15 V).

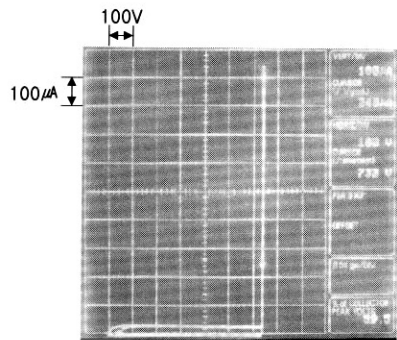
Fig. 3. Collector saturation current characteristics of IGBT(VG=15 V).

370 A를 이용하였으며 최대 측정 가능한 전류는 20 A 이다. 그림 2(a)에서 입자가 주입되지 않은 초기 소자의 경우 소자가 0.7 V에서 turn-on 되는 전형적인 IGBT 소자의 특성을 보이고 있다. 그림 2(a), (b)를 비교해 보면 초기 소자의 그래프 기울기에 비해 양성자를 주입한 소자의 그래프 기울기가 감소하였으며 동일한 게이트 전압, 컬렉터 전압 인가 조건에서 컬렉터 전류 값의 크기도 감소하였음을 관찰할 수 있다. 이것은 진술한 바와 같이 양성자 주입에 의해 생성된 결정결함에 의해서 n-드리프트 영역으로 주입되는 캐리어 밀도가 감소하여 n-드리프트 영역의 저항성이 커졌기 때문이다.

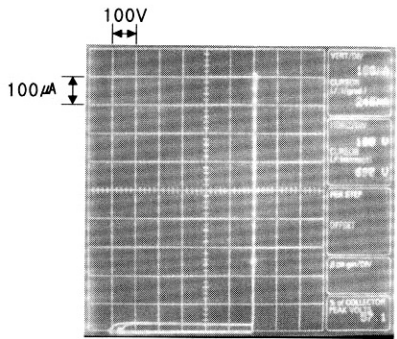
그림 3은 각 소자에 대해 게이트 전압 15 V를 인가했을 때 컬렉터 포화 전류 특성을 비교한 그림이다. 양성자를 조사한 소자와 전자선을 조사한 소자의 그래프 기울기는 아무런 주입도 하지 않은 초기 소자의 기울기보다 감소하였고 전자선을 조사한 소자의 기울기가 양성자 조사 소자의 기울기보다 더욱 작았다. 그림 3으로부터 소자의 순방향 전압 강하 값을 구할 수 있다. 즉 소자의 동작 범위인 게이트 전압 15 V에서 컬렉터 전류 10 A를 위한 컬렉터 전압을 순방향 전압 강하로 정의하였다. 양성자를 조사한 소자와 전자선을 조사한 소자의 전압 값은 각각 1.85 V, 1.95 V이며 그 값들은 초기 소자의 1.25 V에 비해서 전압 값이 증가하였다. 이는 앞에서 설명한 바와 같이 입자선 주입에 의해 결정 결함이 발생하고 이 결정 결함은 소수 캐리어의 재결합 센터로 작용하여 소자의 저항 성분을 증가시키기 때문에 나타나는 현상이다. 양성자를 조사한 소자에서 전류 곡선의 기울기가 전자



(a) un-irradiated device



(b) proton irradiated device

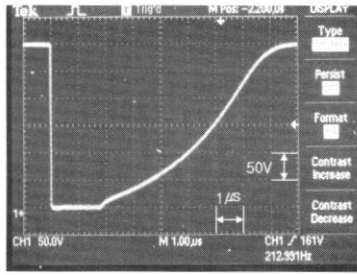


(c) e-beam irradiated device

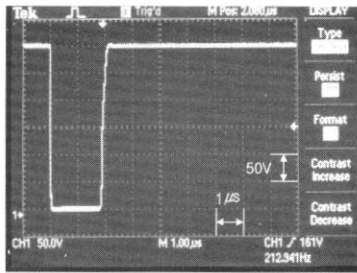
그림 4. IGBT 소자의 항복 전압 특성. (a) 아무런 주입도 하지 않은 소자, (b) 양성자를 주입한 소자, (c) 전자선을 주입한 소자.

Fig. 4. Breakdown voltage characteristics of IGBT. (a) un-irradiated device, (b) proton irradiated device, (c) e-beam irradiated device.

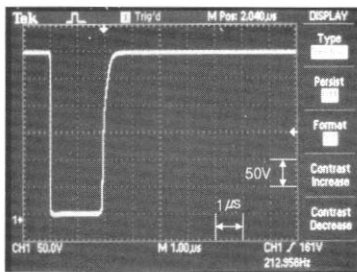
선을 조사한 소자보다 큰 것은 양성자를 주입한 경우 결정 결함이 생성되는 영역이 n-드리프트 영역의 일부 구간으로 제한되기 때문에 소자 전체에 결정결함이 균일 분포하는 전자선 조사 소자에



(a) un-irradiated device



(b) proton irradiated device



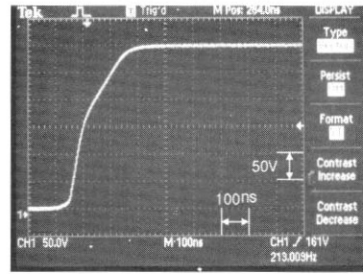
(c) e-beam irradiated device

그림 5. IGBT 소자의 Turn-off 지연 시간 특성. (a) 아무런 주입도 하지 않은 소자, (b) 양성자를 주입한 소자, (c) 전자를 주입한 소자.

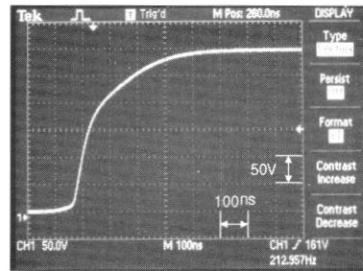
Fig. 5. Turn-off delay time characteristics of IGBT. (a) un-irradiated device, (b) proton irradiated device, (c) e-beam irradiated device.

비하여 저항 성분이 작기 때문이다[9,11]. 즉 본 연구에서 행한 조건의 양성자 주입 조건으로 제조된 소자가 전자선을 조사한 소자보다 순방향 전압 강하 특성이 우수하다는 것을 말해 주고 있다.

그림 4는 각 소자의 항복 전압 특성을 나타낸 그림이다. 그림에서 전자선이나 양성자 주입 조건 어느 경우에도 soft breakdown은 나타나지 않음을 확인할 수 있다. 그림 4(b)에서 나타난 양성자 조사한 소자에서 항복 전압이 미세하게 감소하였지만 그림 4(c)에 나타난 전자선 조사법에서 감소하



(a) proton irradiated device



(b) e-beam irradiated device

그림 6. IGBT 소자의 Turn-off 지연 시간 특성. (a) 양성자를 주입한 소자, (b) 전자를 주입한 소자.

Fig. 6. Turn-off delay time characteristics of IGBT. (a) proton irradiated device, (b) e-beam irradiated device.

는 폭보다 작았다. 이와 같이 입자선 조사 후 항복 전압이 미세하게 감소하는 현상은 입자선 주입으로 생성된 결정 결함의 영향으로 보이지만 이에 대해서는 보다 심도 있는 연구가 필요하다.

그림 5는 각 소자의 turn-off 지연 시간 특성을 비교한 그림이다. 그림에 나타난 바와 같이 입자선을 주입하기 전의 소자에서 turn-off 지연 시간은 약 6 μsec 정도의 큰 값을 가지다가 양성자 혹은 전자선을 조사한 후 큰 폭으로 감소하고 있다. 이것은 양성자와 전자와 같은 입자선 조사에 의해서 생성된 결정 결함이 재결합 센터로 작용하여 n-드리프트 영역에 주입된 소수 캐리어의 수명을 효과적으로 단축시켜 소수 캐리어의 농도가 감소하였기 때문이다.

그림 6은 그림 5(b), (c)에서 나타난 양성자 조사 소자와 전자선 조사 소자의 특성을 상대적으로 비교하기 위하여 시간 축을 확대하여 나타낸 그림이다. 그림에서 전압 값이 최종 값의 10%에서 90%까지 변화하는 시간을 turn-off 지연 시간으로 정의하면 양성자를 조사한 소자는 약 170 ns, 그리

고 전자선을 조사한 조사는 약 280 ns의 turn-off 지연 시간 값을 가진다. 즉 양성자를 조사한 소자의 스위칭 특성이 전자선을 조사한 소자보다 우수하다는 것을 알 수 있다. 이는 전자선을 조사하여 결정 결함이 소자 전체에 균일하게 분포하는 경우보다 양성자를 조사하여 소수 캐리어가 주입되는 접합부 근처에 국부적으로 보다 높은 결정 결함 밀도를 가지는 소자에서 소수 캐리어의 재결합이 더 효과적이라는 것을 의미한다.

4. 결론

본 연구에서는 600 V급 PT-IGBT의 turn-off 스위칭 속도 개선을 위해 양성자를 웨이퍼 뒷면으로부터 조사하여 소자를 제작하고 그 특성을 상용 기술인 전자선 조사법으로 제조된 소자 그리고 스위칭 특성 향상을 위한 처리가 되지 않은 초기 상태의 소자와 비교 분석하였다. 양성자를 주입한 소자는 초기 소자에 비해 순방향 전압 강하 특성과 항복 전압 특성이 다소 저하되었다. 하지만 양성자 주입 기술로 국부적으로 높은 농도의 결정 결함을 생성시킨 소자의 특성을 전자선을 조사하여 결정 결함이 소자 전체에 균일하게 분포하는 소자의 특성과 비교하면 순방향 전압 강하 특성과 항복 전압 특성에서 대등 혹은 우수한 특성을 가지면서 turn-off 지연 시간은 170 ns 로서 전자선을 조사한 소자의 280 ns에 비하여 약 60 % 수준으로 향상 시킬 수 있었다. 따라서 양성자 조사 기술을 이용하여 순방향 전압 강하 특성, 항복 전압 특성의 열화를 감소시키면서 우수한 스위칭 특성을 가지는 IGBT 소자를 제작할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 21세기 프론티어연구개발사업으로 시행한 양성자 기반공학기술개발사업의 지원을 받았음.

참고 문헌

[1] 김용주, 정회환, “고속 전력변환용 반도체 switching 소자(IGBT)의 기술 및 특허동향”, 전기전자재료학회지, 13권, 6호, p. 9, 2000.

[2] B. J. Baliga, “Power Semiconductor Devices”, PWS Publishing Company, p. 476, 1996.

[3] B. J. Baliga and E. Sun, “Comparison of gold, platinum and electron irradiation for controlling lifetime in power rectifiers”, IEEE Trans. Electron Devices, Vol. ED-24, p. 685, 1977.

[4] 김상철, 김은동, “전력반도체 기술 및 시장동향”, 전기전자재료학회지, 15권, 3호, p. 15, 2002.

[5] 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.

[6] P. Cova, R. Menozzi, M. Portesine, M. Bianconi, E. Gombia, and R. Mosca “Experimental and numerical study of H+ irradiated p-i-n diodes for snubberless applications”, Solid State Electronics, Vol. 49, p. 183, 2005.

[7] A. Mogro-Campero, R. P. Love, M. F. Chang, and R. F. Dyer, “Shorter turn-off times in insulated gate transistors by proton implantation”, IEEE Electron Device Letters, Vol. EDL-6, No. 5, p. 224, 1985.

[8] 이강희, 김병길, 이용현, 백종무, 이계성, 배영호, “양성자 주입 기술을 이용한 초고속 회복 다이오드의 제작”, 전기전자재료학회논문지, 17권, 12호, p. 1308, 2004.

[9] P. Hazdra, J. Vobecky, and K. brand, “Optimum lifetime structuring in silicon power diodes by means of various irradiation techniques”, Nuclear Instruments and Methods physical research section B, Vol. 186, p. 414, 2002.

[10] 김병길, 최성환, 이종현, 배영호, “양성자 주입 기술을 이용한 PT형 전력다이오드의 스위칭 특성 향상”, 전기전자재료학회논문지, 19권, 3호, p. 216, 2006.

[11] P. Hazdra, J. Vobecky, H. Dorschner, and K. Brand, “Axial lifetime control in silicon power diodes by irradiation with protons, alphas, low- and high-energy electrons”, Microelectronics Journal, Vol. 35, p. 249, 2004.