

Field Limiting Ring termination을 이용한

고전압 4H-SiC pn 다이오드

송근호, 방 옥, 김형우, 김남균
한국전기연구원 전력반도체그룹

High-Voltage 4H-SiC pn diode with Field Limiting Ring Termination

G. H. Song, W. Bahng, H. W. Kim and N. K. Kim
KERI

Abstract

4H-SiC pn diodes with field limiting rings (FLRs) were fabricated and characterized. The dependences of reverse breakdown voltage on the number of FLRs, the distance between p-base main junction and first FLR, and activation temperatures, were investigated. Al and B ions were implanted and activated at high temperature to form p-base region and p⁺ region in the n-epilayer. We have obtained up to 1782V of reverse breakdown voltage in the pn diode with two FLRs on 10 μ m thick epilayer. The differential on-resistances of the fabricated diode are 5.3m Ω cm² at 100A/cm² and 2.7m Ω cm² at 1kA/cm², respectively. All pn diodes with FLRs have higher avalanche breakdown voltages than that of diode without an FLR. Regardless of the activation temperature, the pn diode with a FLR located 5 μ m apart from main junction has the highest mean breakdown voltage around 1600V among the diodes with one ring. On the other hand, the pn diode with two rings showed different behavior with activation temperature. It reveals that high voltage SiC pn diodes with low on-resistance can be fabricated by using the FLR edge termination.

Key Words : SiC pn diode, ion implantation, ohmic contact, edge termination, Schottky diode

1. 서 론

SiC는 wide bandgap, high breakdown field, high thermal conductivity, high saturation electron drift velocity 등 뛰어난 특성 때문에 high-power, high-temperature, high-frequency 소자에 매우 유용한 재료이다. 이러한 특성은 실리콘과 탄소의 강한 결합력 때문에 나타나는데, 이는 고온 열처리 공정과 같은 소자의 제작공정을 어렵게 한다.

SiC 소자는 불순물의 낮은 확산계수 때문에 불순물 도핑은 고에너지의 이온주입에 의해 형성된다. SiC에서 p형 영역은 주로 aluminum이나 boron을 이온주입하고 활성화(activation)하여 형성한다. Aluminum은 낮은 면저항을 가지는 고농도 p⁺ 영역을 형성하는데 주로 이용되는데, 이는

aluminum 억셉터가 boron 보다 낮은 이온화 에너지를 가지기 때문이다. Boron은 비교적 가볍고 이온주입시 넓은 투사 영역을 형성하므로 깊은 p-n 접합을 형성하는데 매우 효과적이다[1].

SiC 고전압 소자에서의 내전압 특성은 우수한 전기적인 특성에도 불구하고 이론적인 내전압 특성에 미치지 못하고 있다. 효과적인 내전압 특성을 위해 실리콘 소자에서는 field plate, guard ring, field limiting ring (FLR), junction termination extension 등 다양한 edge termination 방법들이 도입되어 사용되고 있다. 특히 FLR의 경우 MOSFET을 제작시 사용되는 p-well과 동시에 형성할 수 있어 추가의 공정없이 효과적인 edge termination 구조를 만들 수 있다[2].

본 연구에서는 aluminum과 boron을 이온주입한

FLR을 가지는 pn 다이오드를 제작하고 특성을 분석하였다. 금속 전극과 p형 영역의 낮은 접합 저항을 가지도록 n형 SiC epilayer의 표면에 high-dose로 aluminum을 이온주입 하였고, 깊은 p-n 접합을 얻기 위하여 boron을 고에너지로 이온주입 하였다. Boron을 이온주입시 termination을 위한 FLR도 동시에 형성하였다. FLR의 간격 및 폭 그리고 이온주입된 불순물의 활성화에 따른 pn 다이오드의 내전압 특성을 분석하였다.

2. 실험

FLR termination 구조를 가지는 pn 다이오드는 $5.4 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ 농도의 $10\mu\text{m}$ 에피층을 가지는 n형 4H-SiC 웨이퍼를 사용하였다. 그림 1은 제작된 pn 다이오드의 단면을 나타낸다. P-base와 p+ 영역은 각각 boron과 aluminum을 600°C 에서 다중 에너지로 이온주입 하여 형성하였다. Boron의 이온주입 에너지는 30, 60, 100, 170, 260, 370keV이고, 도즈량은 0.5, 0.8, 1.5, 3, 5, $10 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ 이다. Aluminum의 이온주입 에너지는 30, 70, 140keV이고 도즈량은 0.15, 2.0, $5.0 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ 이다. 이온주입으로 형성된 p-base와 p+ 영역의 깊이는 각각 $0.65\mu\text{m}$ 와 $0.2\mu\text{m}$ 이다.

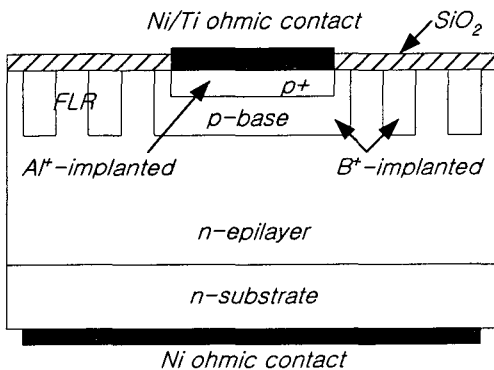


그림 1. B⁺와 Al⁺을 이온주입한 FLR termination 구조를 가지는 pn 다이오드.

이온주입 후 불순물의 activation을 위해 고온로에서 열처리하였다. Activation 온도에 의한 농도 변화에 따른 내전압 특성을 알아보기 위하여 시편들은 각각 1600°C 와 1700°C 에서 30분 동안 Ar 분

위기에서 열처리 하였다.

다이오드의 표면은 1150°C 에서 3시간동안 wet +O₂ 분위기에서 성장한 산화막으로 passivation 하였다. 이온주입된 p+ 영역과 n+ 기판의 ohmic 접합을 위하여, 각각 스퍼터로 증착한 Ni/Ti와 Ni을 950°C , 90초 동안 Ar 분위기에서 RTA(rapid thermal annealing)로 열처리 하였다.

FLR termination의 구조에 따른 내전압의 특성을 분석하기 위하여 ring의 폭은 $5\mu\text{m}$ 으로 일정하게 유지하고 ring의 간격과 개수를 다양하게 제작하였다. 제작된 FLR의 구조는 표 1에서와 같이 ring이 없는 것, 하나 그리고 두개의 ring을 가지는 pn 다이오드를 제작하였다. 그리고 p-base와 1st ring 사이의 간격은 3, 5, $7\mu\text{m}$ 로 바꾸어 가면서 제작하였고, 1st ring과 2nd ring 사이의 간격은 $5\mu\text{m}$ 으로 일정하게 하였다.

표 1. 제작된 pn 다이오드의 FLR 구조.

	ring 수	ring 폭	p-base 와 1 st ring의 간격	1 st 와 2 nd ring의 간격
R0	0	-	-	-
R3-1	1	5	3	-
R3-2	2	5	3	5
R5-1	1	5	5	-
R5-2	2	5	5	5
R7-1	1	5	7	-
R7-2	2	5	7	5

3. 결과 및 고찰

그림 2는 크기가 $100\mu\text{m}$ 인 pn 다이오드의 전압에 따른 전류밀도를 나타낸다. 전류밀도 $100\text{A}/\text{cm}^2$ 에서 순방향 전압강하는 약 3.6V 이다. 이때의 specific on-resistance는 $5.3\text{m}\Omega/\text{cm}^2$ 이다.

그림 3은 Tektronix 371 curve tracer에서 2개의 field limiting ring을 가지는 pn 다이오드의 내전압 측정 사진이다. 역방향 전류가 $100\mu\text{A}$ 일 때 1782V 의 높은 내전압을 얻었다. 이 전압은 $10\mu\text{m}$ epilayer 두께에서 termination 구조 없이 얻을 수 있는 이론적인 내전압의 90% 이상의 전압이다.

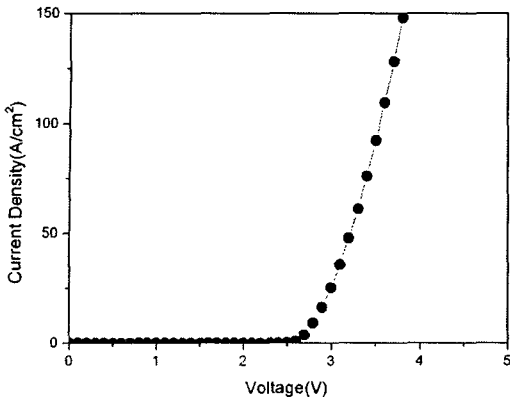


그림 2. 제작된 pn 다이오드의 순방향 특성.

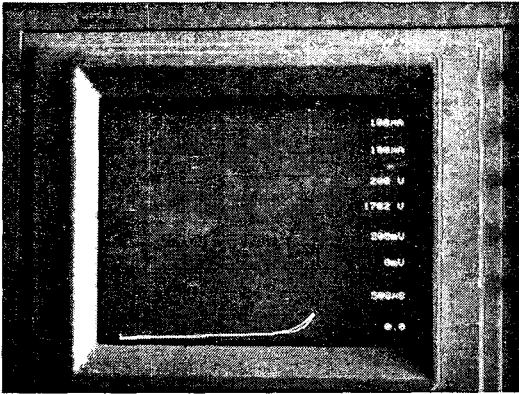


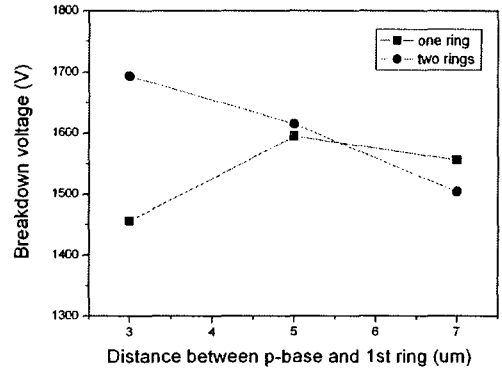
그림 3. FLR의 수가 2개인 pn 다이오드의 내전압 측정 사진.

그림 4는 FLR의 개수 및 간격 및 열처리 온도에 따른 내전압 특성을 보여준다. 그림 4(a)는 1600°C에서 열처리한 시편의 FLR 개수와 간격에 대한 내전압의 평균값을 나타낸다. Ring이 한 개인 경우, 3, 5, 7µm 중 5µm에서 가장 좋은 내전압 특성을 나타내었다. 그러나 ring이 두개일 경우, 첫 번째 간격이 3µm이고 두 번째 간격이 5µm인 구조에서 가장 높은 내전압 특성을 나타내었다.

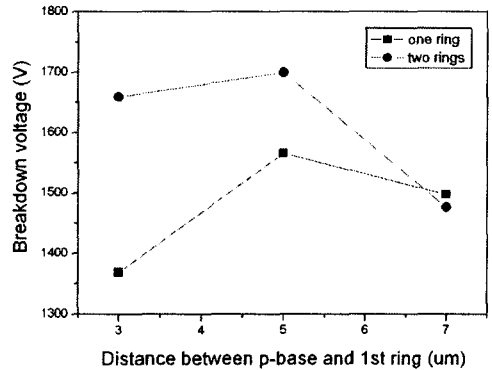
그림 4(b)는 1700°C에서 열처리한 시편의 결과를 보여주는데, ring이 하나인 경우 1600°C에서 열처리한 결과와 같이 5µm 간격에서 가장 좋은 내전압 특성을 나타내었다. 그러나 ring이 두개인 경우 1600°C의 경우와 다르게 첫 번째 간격이 5µm이고 두 번째 간격이 5µm인 시편에서 가장 높은 내전압

특성을 나타내었다. 이는 이온주입된 불순물들의 열처리 온도에 따라 FLR의 도핑 농도가 변화되고, 또한 고온에서 열처리하여 소량의 boron이 확산되어 ring의 간격과 profile이 변화하여 나타나는 것이다[3].

FLR termination 구조가 없는 pn 다이오드의 경우 평균 1230V 정도의 내전압 특성을 나타내어, FLR을 사용할 경우 edge termination에 매우 효과적인 것을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 4. FLR의 개수 및 간격과 열처리 온도에 따른 breakdown의 평균 전압. (a) 1600°C, (b) 1700°C에서 열처리.

그림 5는 R3-1시편의 reverse breakdown에 의해 파괴된 시편의 사진이다. P-base는 anode 전극보다 10µm 더 넓고, p-base와 1st ring의 간격이 3

μm , ring 폭이 $5\mu\text{m}$ 으로 anode 전극과 FLR의 바깥쪽 모서리까지의 거리는 $18\mu\text{m}$ 이다. 사진에서 보는 바와 같이 breakdown에 의해 파괴된 부분이 anode 전극에서 약 $20\mu\text{m}$ 에서 나타나, FLR termination이 효과적으로 내전압 특성을 개선하고 있는 것을 알 수 있다.

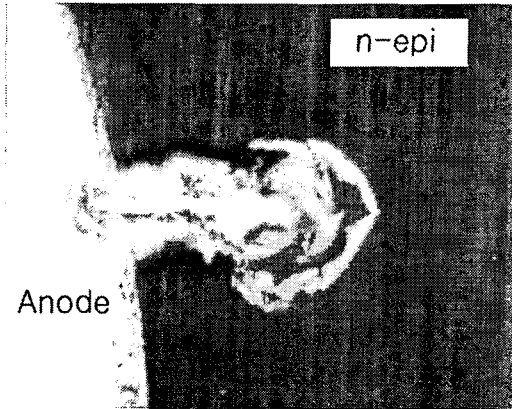


그림 5. Reverse breakdown에 의해 파괴 pn 다이오드 표면 사진.(직경 : $700\mu\text{m}$, R3-1 구조).

이상에서 살펴본바와 같이 본 논문에서 사용한 FLR termination 구조에 의해 $10\mu\text{m}$ epilayer 두께에서는 얻기 힘든 매우 높은 내전압 특성을 얻었다. FLR의 구조에 따라 내전압 특성이 다르게 나타나는데, 본 연구에서 사용한 웨이퍼에서 ring의 개수가 두개인 R5-2 시편을 1700°C 열처리할 경우 가장 좋은 내전압 특성을 나타내었다. 또한 순방향 특성에서 $5.3\text{m}\Omega\text{cm}^2$ 의 낮은 specific on-resistance 값을 얻어 저손실 고전압 소자를 효과적으로 제작할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 FLR termination 구조를 가지는 고전압 pn 다이오드를 제작하고, FLR의 구조에 따른 내전압 특성을 분석하였다. Ring이 하나인 경우 p-base와 ring 사이가 $5\mu\text{m}$ 일 때 열처리 온도에 상관없이 가장 좋은 내전압 특성을 나타내었다. Ring이 두개인 경우 1600°C 에서는 R3-2 구조에서, 1700°C 에서는 R5-2 구조에서 각각 내전압 특성이

좋게 나타났는데, 이는 activation 열처리에 따른 FLR의 도핑 농도와 ring들의 간격 및 profile이 바뀌어 나타나는 특성이다. Ring이 두개인 pn 다이오드에서 1782V 의 높은 내전압을 얻었는데, 이는 이론적인 내전압에 가까운 전압이다. 순방향 특성의 경우 specific on-resistance가 낮게 나타나, 저손실 고전압 소자를 제작할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 차세대연구개발사업인 'SiC 반도체 기술개발 사업(SiCDDP)'의 지원으로 이루어진 것입니다.

참고 문헌

- [1] Y. Negoro, N. Miyamoto, T. Kimoto, and H. Matsunami, "Avalanche phenomena in 4H-SiC p-n diodes fabricated by aluminum or boron implantation", IEEE Tran. on E. Devices, Vol. 49, No. 9, 2002
- [2] B. J. Baliga, "Modern Power Devices", Chap. 3, 1987.
- [3] M. A. Capano, S. Ryu, J. A. Cooper, Jr., M. R. Melloch, K. Rottner, S. Karlsson, N. Nordell, A. Powell and D. E. Walker, Jr., J. Electron. Mater., Vol. 28, 214, 1999.