

금속 가드 링이 SiC 쇼트키 다이오드의 항복전압에 미치는 영향

Effect on Metal Guard Ring in Breakdown Characteristics of SiC Schottky Barrier Diode

김성진^{1,a}
(Seong-Jin Kim^{1,a})

Abstract

In order to fabricate a high breakdown SiC-SBD (Schottky barrier diode), we investigate an effect on metal guard ring (MGR) in breakdown characteristics of the SiC-SBD. The breakdown characteristics of MGR-type SiC-SBD is significantly dependent on both the guard ring metal and the alloying time of guard ring metal. The breakdown characteristics of MGR-type SiC-SBDs are essentially improved as the alloying time of guard ring metal is increased. The SiC-SBD without MGR shows less than 200 V breakdown voltage, while the SiC-SBD with Al MGR shows approximately 700 V breakdown voltage. The improvement in breakdown characteristics is attributed to the field edge termination effect by the MGR, which is similar to an implanted guard ring-type SiC-SBD. There are two breakdown origins in the MGR-type SiC-SBD. One is due to a crystal defects, such as micropipes and stacking faults, in the Epi-layers and the SiC substrate, and occurs at a lower electric field. The other is due to the destruction of guard ring metal, which occurs at a higher electric field. The demolition of guard ring metal is due to the electric field concentration at an edge of Schottky contact metal.

Key Words : SiC, SBD, Breakdown voltage, Metal guard ring

1. 서론

에너지 절감 및 환경친화에 대한 깊은 관심과 미래 산업에 대한 전망은 기존의 반도체 재료 성능을 뛰어넘는 새로운 반도체 재료를 요구한다. 이러한 관점에서 Si보다 단단하고, 밴드 갭이 크며, 우수한 전기적, 열적, 화학적 특성을 갖고 있는 ZnO, GaN, SiC는 차세대 반도체 재료로서 많은 관심을 불러일으키고 있다[1,2]. 특히, SiC는 높은 내전압, 높은 전자 포화속도, 우수한 열전도도 특성을 갖고 있기 때문에 차세대 고전력, 고주파 전

자소자 재료로서 폭 넓은 응용이 기대되고 있다 [3,4]. 또한, SiC는 Si과 비교하여 쇼트키 장벽이 2 배 높고, 절연과피 전계는 Si나 GaAs에 비하여 약 10배 높으므로 높은 구동전력과 높은 내전압을 갖는 쇼트키 다이오드 (SBD; schottky barrier diode) 제작뿐만 아니라, 소자 크기도 크게 줄일 수 있다. 한편, SiC를 이용하여 고전압 쇼트키 다이오드를 제작할 경우 높은 내전압을 구현하기 위한 박막의 두께를 현저하게 줄일 수 있어 소자의 동작전압을 크게 감소시킬 수 있고, SiC의 고속특성 때문에 고전압(> 600 V)이면서도 전력손실이 작은 고속 스위칭용 전력소자 제작이 가능하다.

고전압 SiC-SBD에 대한 연구는 차세대 산업에 응용가능성 때문에 활발히 진행되고 있다. 높은 내전압 SiC-SBD에 적용되고 있는 FET (field edge termination) 구조는 크게 4 가지로 나눌 수 있다.

1. (주) 이츠웰 부설연구소

(충북 청원군 옥산면 남촌리 오창과학산업단지 9-4 블럭)

a. Corresponding Author : kseongjin@itswell.com

접수일자 : 2005. 6. 15

1차 심사 : 2005. 8. 11

심사완료 : 2005. 8. 19

첫째, 쇼트키 금속과 산화막 일부가 증착된 FP (field plate) 구조이다. FP 구조는 제작이 비교적 간단하여 제작비용이 적게 들지만, SiC-SBD 내전압 특성은 주로 산화막질에 의존하기 때문에 높은 내전압화에 한계가 있다. 둘째는 JTE (junction termination extension) 구조로서, 이온주입 공정을 통하여 p형 영역을 형성해 주어야 한다는 단점이 있지만, 높은 내전압을 실현시킬 수 있다. 셋째, FLR (field limiting ring) 구조이고, 이온주입 공정을 통하여 p형 영역을 형성해 주어야 하는 추가 공정이 필요하지만, JTE 구조와 마찬가지로 높은 내전압을 실현할 수 있다. FLR 구조에서 내전압 특성은 쇼트키 금속 가장자리와 GR (guard ring)과의 간격, 이온 주입된 영역의 선폭, 링의 수, 이온주입 농도에 따라 크게 의존하며, 링의 수가 많고, 이온주입 선폭이 넓을수록 높은 내전압을 실현할 수 있다. 마지막으로, glass passivation 구조는 쇼트키 접촉 주위에 trench를 형성하고 glass passivation 함으로써 산화막 증착영역 가장자리에서의 전계 집중화를 완화시켜 높은 내전압을 실현시킨다.

본 연구에서는 FLR 구조를 갖는 SiC-SBD 제작에서 이온주입 공정을 대체할 수 있는 쇼트키 금속과 다른 제 2의 금속으로 가드 링(MGR; metal guard ring)을 형성하여 가드 링 금속의 종류와 가드 링 금속의 열처리 시간에 따른 항복전압 의존성을 조사하였다.

2. 실험

그림 1은 본 연구에서 사용된 쇼트키 금속과 제 2의 금속이 증착된 금속 가드 링 구조를 갖는 SiC-SBD의 개략도를 나타낸 것이다. SiC-SBD는 캐소드, SiC기판, 이동층, 아노드, 금속 가드 링으로 구성되어 있다. SiC기판은 4H n⁺-SiC 기판위에 10 μm 두께의 질소 (nitrogen) 도핑된 n형 에피 웨이퍼를 사용하였다. SiC기판의 비저항은 0.01-0.05 Ωcm이고 마이크로 파이프 밀도 (micropipe density)는 50개/cm² 이하이며, 이동층의 도핑농도는 5×10¹⁵ cm⁻³이다. 에피 두께 및 도핑농도는 시뮬레이션을 통하여 결정하였다. 아노드는 제 2의 금속과 증착되어 있고, 가드 링 금속의 폭은 9 μm이며 쇼트키 금속과 가드 링 금속은 6 μm 증착 되도록 설계하였다.

금속 가드 링 구조를 갖는 SiC-SBD 제작순서는 다음과 같다. 웨이퍼를 세정한 후에 전자빔 증

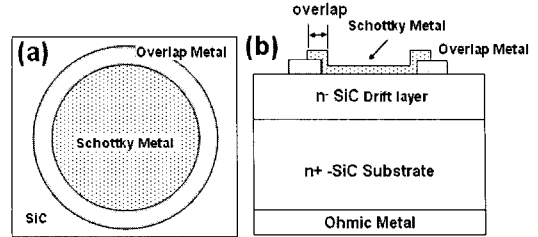


그림 1. 금속 가드 링 구조를 갖는 SiC-SBD의 개략도. (a) 평면도, (b) 측면도.

Fig. 1. (a) Plan view and (b) cross-sectional schematic diagrams of MGR-type SiC-SBD.

착장비(electron beam evaporator)를 이용하여 금속 가드 링을 형성하기 위한 금속을 증착하였다. 이온주입 효과를 얻기 위하여 가드 링 금속은 쇼트키 금속이 아닌 Al, Pd를 증착하여 RTP (rapid thermal process) 장치로 900 °C에서 5분, 10분간을 열처리 하였다. 가능한 높은 온도에서 열처리하는 것이 가드 링 금속의 확산을 촉진시키기 위하여 바람직하지만, RTP의 성능 한계 때문에 본 실험에서는 900 °C로 고정하였다. Al, Pd를 열처리하면 SiC 에피층 속으로 금속이 확산되고 p형 캐리어가 형성되어 쇼트키 가장자리에 집중되는 전계를 완화시켜 줄 것으로 기대된다. 이후, SiC기판 뒷면에 전자빔 증착장비를 이용하여 Ni/Ti 오믹금속을 증착하고 RTP 장치를 이용하여 질소분위기, 900 °C의 온도에서 90초간 열처리 한 후[8], 금속 표면의 산화를 방지하기 위하여 Ti/Au 금속을 증착하였다. 오믹접촉 특성은 소자의 특성에 영향을 미치므로 오믹 접촉저항을 낮추는 것이 중요하다. 이후, 쇼트키 전극 (아노드)을 형성하기 위하여 Ni/Ti/Au 금속을 증착하고, 쇼트키 금속의 접착력을 향상시키기 위하여 질소 분위기, 400 °C의 낮은 온도에서 30초간 열처리 하였다. 제작된 금속 가드 링 구조를 갖는 SiC-SBD의 전기적 특성은 패키징되지 않은 웨이퍼 상태에서 HP-4156 Semiconductor Parameter Analyzer와 Tektronix 310 Curve Tracer를 사용하여 평가되었다.

3. 결과 및 토론

그림 2(a)는 3 μm의 산화막 증착폭을 갖는 FP 구조를 갖는 SiC-SBD에 대한 전계분포를 나타내

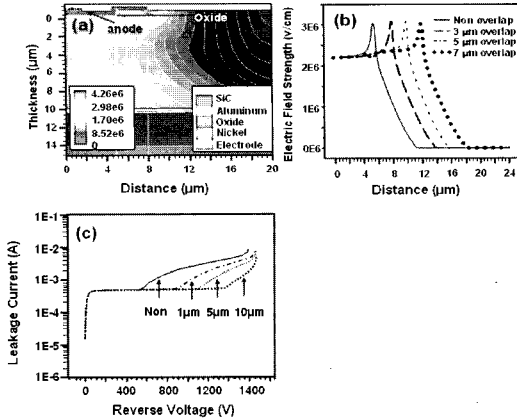


그림 2. (a) FP구조를 갖는 SiC-SBD의 전계분포, (b) FP구조를 갖는 SiC-SBD의 전계강도, (c) 산화막 중첩 폭에 대한 FP구조를 갖는 SiC-SBD 항복전압 의존성.

Fig. 2. (a) Electric-field distribution, (b) electric-field strength along the lateral direction, and (c) breakdown characteristics as a function of oxide overlap width for the FP-type SiC-SBD.

는 SILVACO ATLAS를 이용한 2차원 시뮬레이션 결과이다. 여기서 금속 가드 링 구조를 갖는 SiC-SBD에 대하여 시뮬레이션하지 않은 것은 금속 확산에 의한 정확한 캐리어 농도를 예측할 수 없기 때문에 동일한 조건에 대하여 시뮬레이션 할 수 없으므로 유사한 구조를 갖는 산화막이 중첩된 FP구조를 갖는 SiC-SBD에 대하여 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션을 위한 파라미터는 1200 V 급 SiC-SBD 제작을 위한 최적화된 값을 적용하였고, 5000 Å의 산화막, $3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 의 도핑농도와 10 μm 이동층 두께 값을 사용하였다.

그림 2(b)는 산화막 중첩 폭의 변화에 대한 FP구조를 갖는 SiC-SBD에 대한 측면방향의 전계강도를 나타내는 시뮬레이션 결과이다. 산화막을 중첩하지 않은 경우는 쇼트키 전극의 가장자리에서 전계가 집중되고, 산화막을 중첩하면 산화막 중첩 영역의 가장자리에서 전계가 집중되는 것을 알 수 있다. 또한, 산화막을 중첩하면 최대 전계강도에는 큰 변화가 없지만, 전계중심은 밖으로 이동하고 전체적인 전계분포는 넓게 퍼진다는 것을 알 수 있다. FP구조의 SiC-SBD의 항복전압은 산화막 중첩 폭에 크게 의존하며, 산화막 중첩 폭이 넓을수록

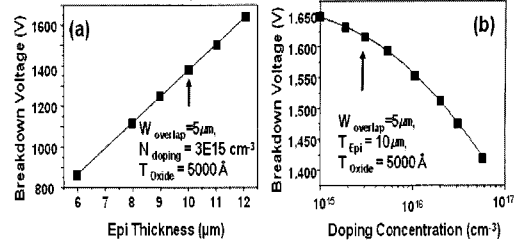


그림 3. (a) 이동층 두께에 대한 FP구조의 SiC-SBD 항복전압 의존성, (b) 이동층 도핑농도에 대한 FP구조의 SiC-SBD 항복전압 의존성.

Fig. 3. Breakdown characteristics as the function of (a) drift layer thickness and (b) doping concentration for the FP-type SiC-SBD.

높은 항복전압을 나타내고 5 μm의 산화막 중첩 폭일 때 1200 V 이상의 항복전압을 얻을 수 있음을 알 수 있다 (그림 2(c)). 이러한 결과는 쇼트키 금속 산화막과 중첩시켜 줌으로써 공핍영역이 쇼트키 영역 밖으로 확장되는 효과로 쇼트키 금속 가장자리에서 집중되는 전계를 완화시켜주기 때문이다.

그러나 FP구조의 SiC-SBD의 항복전압은 산화막질에 크게 의존하여 1200 V 이상의 높은 내전압을 얻는 것이 어렵기 때문에 이에 대한 지속적인 연구가 필요하다[7,9].

그림 3은 이동층 두께와 이동층의 도핑농도에 대한 FP구조를 갖는 SiC-SBD의 항복전압 의존성을 나타낸 것이다. 그림 3(a)에서 알 수 있는 바와 같이, FP구조의 SiC-SBD의 항복전압은 이동층 두께에 크게 의존하며, 이동층 두께가 두꺼울수록 높은 항복전압을 얻을 수 있다. 특히, 1200 V의 항복전압을 얻기 위해서는 9 μm 이상의 이동층 두께가 필요하다. 그러나 현재 공급되고 있는 SiC 기판은 공급회사에 관계없이 많은 마이크로 파이프와 결정결함을 갖고 있기 때문에 시뮬레이션 결과와 동일한 결과를 기대하기는 힘든 실정이다. 그림 3(b)에서 보는 바와 같이, 이동층의 도핑농도에 대한 FP구조의 SiC-SBD의 항복전압 의존성을 보면, 도핑농도를 증가시키에 따라 항복전압은 감소하고 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 내지 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 정도 이면 1200 V 이상의 내전압 특성을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 도핑농도를 증가시키에 따라 공핍영

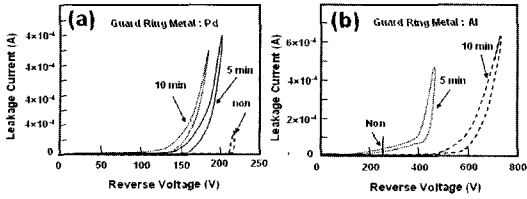


그림 4. (a) Pd 가드 링 금속을 갖는 SiC-SBD의 열처리 온도에 대한 역전압 I-V 특성. (b) Al 금속가드 링 금속을 갖는 SiC-SBD의 열처리 온도에 대한 역전압 I-V 특성.

Fig. 4. Reverse I-V characteristics depending on the guard ring metal and the alloying time for MGR-type SiC-SBDs with (a) Pd and (b) Al guard ring metals.

역 감소와 쇼트키 장벽이 낮아져 누설전류를 유발하기 때문이다. 이와 같이 이동층 두께와 이동층의 도핑농도는 항복전압과 밀접한 관계가 있지만, 순방향 동작전압과도 깊게 관련되기 때문에 동작전압을 고려하여 도핑농도를 결정하여야 한다.

그림 4는 금속 가드 링 구조를 갖는 SiC-SBD의 가드 링 금속종류에 대한 역방향 I-V 특성을 나타낸 것이다. 가드 링 금속이 Pd인 SiC-SBD의 항복전압은 열처리 시간에 관계없이 항복전압은 200 V 미만으로 가드 링을 하지 않은 SiC-SBD의 220 V와 비교하여 큰 차이가 없으며, 열처리 시간을 증가하여도 항복전압은 개선되지 않았다. 반면에, 가드 링 금속이 Al인 SiC-SBD의 항복전압은 열처리 시간을 증가함에 따라 크게 증가하며, 10분 열처리 한 경우의 항복전압은 700 V로 가드 링을 하지 않은 경우 보다 크게 개선되었다. 이러한 결과는 이온주입을 통한 가드 링 구조 및 산화막을 증착한 SiC-SBD와 유사한 결과이며[7], 가드 링 금속을 증착시킴으로써 쇼트키 금속 가장자리에서 발생하는 전계집중을 완화시켰기 때문이다. Pd와 Al의 상반된 특성을 보이는 이유는 열처리하여 Pd를 SiC층으로 확산을 시키더라도 SiC 이동층의 내부에 p형 캐리어가 형성되지 않았지만, Al인 경우는 이동층으로 Al이 확산하여 p형 캐리어가 형성되었기 때문으로 생각된다. 이러한 현상은 p-n형 구조를 사용하거나[5], Al 이나 B 을 이온주입하여 p형 캐리어를 활성화시켜주는 것과 유사한 효과를 나타내는 것으로 생각되며, 열처리 시간을 증가시킴에 따라 항복전압이 증가한 것도 이온주입 효과

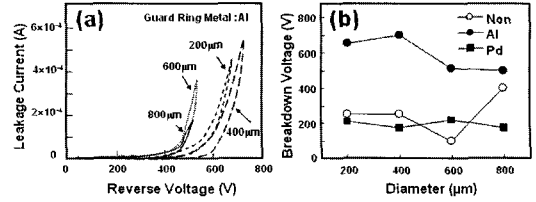


그림 5. (a) Al로 가드 링한 SiC-SBD의 아노드 직경에 대한 역전압 I-V 특성. (b) 가드 링 금속 종류에 대한 SiC-SBD의 항복전압 의존성.

Fig. 5. (a) Reverse I-V Characteristics as a function of anode diameter for MGR-type SiC-SBD with Al guard ring metal. (b) Breakdown characteristics as a function of guard ring metal for MGR-type SiC-SBD.

를 간접적으로 입증해주는 증거라고 할 수 있다.

그림 5는 Al을 가드 링 금속으로 하여 900 °C에서 10분간 열처리한 금속 가드 링 구조를 갖는 SiC-SBD에 대한 소자 크기 (쇼트키 접촉 영역) 변화에 따른 역방향 I-V 특성을 나타낸 것이다. 명확한 경향을 보이는 것은 아니지만, SiC-SBD의 크기가 증가할수록 누설전류는 증가한다는 것을 알 수 있다. 그림 5(b)에 보는 바와 같이, SiC-SBD의 항복전압은 가드 링 금속의 유무에 따라 큰 영향을 받는다. 그리고 다소 소자의 크기에 의존하는 경향이 있다 할지라도 가드 링 금속이 없는 SiC-SBD의 항복은 대부분 300 V 미만에서 일어난다. Pd 금속으로 가드 링한 경우도 소자의 크기에 관계없이 300 V 근처에서 항복이 일어난다는 것을 알 수 있다. 그러나 Al로 가드 링한 경우는 가드 링이 없는 소자와 Pd로 가드 링한 소자와는 다르게 높은 항복전압 특성을 보이고 있고, 소자의 크기가 증가함에 따라 항복전압은 감소하지만, 쇼트키 접촉 직경이 400 μm인 소자에서 최대 700 V의 항복전압을 보여준다. 이렇게 소자의 크기가 증가함에 따라 항복전압이 감소하는 것은 SiC기판의 마이크로 파이프 밀도, 이동층에 존재하는 결함밀도와 관련이 있다. 본 연구에서 사용한 SiC기판의 마이크로 파이프 밀도는 50개/cm² 이므로 200×200 μm² 면적 내에 2개의 마이크로 파이프가 존재할 확률이 있다는 것을 의미하고, 소자의 면적이 증가하면 증가할수록 마이크로 파이프가

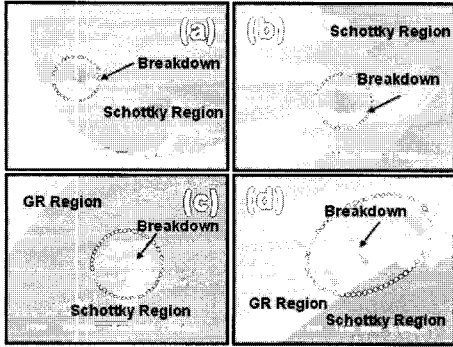


그림 6. (a)와 (b)는 금속 가드 링이 없는 SiC-SBD가 항복을 일으킨 SEM사진이고, (c)와 (d)는 Al 가드 링 금속을 갖는 SiC-SBD가 항복을 일으킨 SEM사진.

Fig. 6. (a) and (b) are SEM images of breakdown MGR-type SiC-SBDs without guard ring metal. (c) and (d) are SEM images of breakdown MGR-type SiC-SBDs with Al guard ring metal.

존재할 확률이 높아져 항복전압이 낮아지는 것이다. 이와 같이 Al으로 가드 링을 형성하여 SiC-SBD를 제작하면 높은 항복전압을 얻을 수 있으며, Pd과 같은 전이 금속 (Ni, Pd, Pt, Rh, Co)보다는 Al과 같은 3족 금속 (B, Al, Ga, In, Tl)으로 가드 링을 형성하는 것과 높은 온도에서 장시간 열처리하여 금속의 확산을 깊게 하는 것이 높은 항복전압을 얻는데 유리할 것이다. 그러나 상기 3족 가드 링 금속들에 대한 항복전압 의존성을 명확하게 규명하기 위해서는 좀 더 체계적인 연구가 필요하다.

그림 6은 항복이 일어난 금속 가드 링 구조의 SiC-SBD에 대한 SEM (scanning electron microscopy)사진이다. SiC-SBD는 강제로 항복을 일으켜 쇼트키 금속을 제거한 후 SEM을 관찰하였다. 그림 6(a)는 금속으로 가드 링을 하지 않은 SiC-SBD가 170 V 정도의 낮은 전압에서 항복을 일으킨 경우이고, 그림 6(b)는 금속 가드 링을 하지 않은 SiC-SBD가 250 V 정도의 전압에서 항복을 일으킨 경우이다. SEM사진에서 알 수 있는 바와 같이, 170 V 정도의 낮은 전압에서 항복이 일어난 경우는 쇼트키 전극의 가장자리에서 항복이 일어나지 않고 쇼트키 접촉 영역 내에서 항복이 일어났으며, 250 V의 비교적 높은 전압에서 항복을 일어난 경우는 쇼트키 영역 내에서 항복이 일

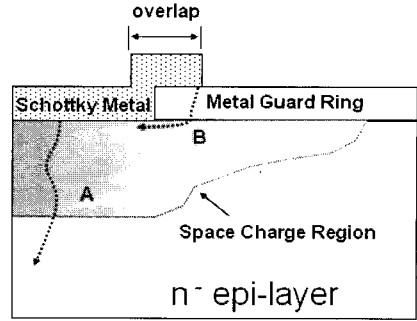


그림 7. 금속 가드 링 구조를 갖는 SiC-SBD의 항복요인을 설명하는 개략도. 항복은 쇼트키 접촉 영역 내에서 일어나거나(A 영역), 혹은 금속 가드 링 영역에서 일어난다(B 영역).

Fig. 7. Illustration diagram of breakdown origin in MGR-type SiC-SBD. The device breakdown is occurred by crystal defects (A region) or destruction of guard ring metal(B region).

어나지 않고 쇼트키 전극 가장자리에서 항복이 일어난다는 것을 알 수 있다. 한편, 그림 6(c)는 Al으로 가드 링을 한 SiC-SBD가 300 V에서 항복을 일으킨 경우이고 6(d)는 Al으로 가드 링을 한 SiC-SBD가 600 V 정도에서 항복을 일으킨 경우이다. SEM사진에서 알 수 있는 바와 같이, Al으로 가드 링을 한 SiC-SBD도 300 V의 낮은 전압에서 항복을 일으키는 경우는 쇼트키 영역 내에서 항복이 일어나고 600 V의 비교적 높은 전압에서의 항복은 금속 가드 링 영역에서 항복이 일어난다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 그림 6(a)와 그림 6(b)의 결과와도 유사하다.

그림 7에서 보는 바와 같이, 금속 가드 링 구조의 SiC-SBD 항복요인은 크게 두 가지로 크게 나눌 수 있다. 첫째, 마이크로 파이프나 결정결함에 의한 것이고 (A 영역), 둘째, 가드 링 금속의 파괴에 의한 것이다 (B 영역). 일반적으로 100 V 내지 300 V 근처의 낮은 전압에서 일어나는 항복현상은 마이크로 파이프나 결정결함에 의한 것이다. 항복을 일으킨 소자들을 SEM 관찰하면 금속 가드 링 주위에는 어떠한 손상도 발견할 수 없었으며, 쇼트키 접촉영역에서 파인 손상이 관찰되었다. 그러나 가드 링 금속 파괴에 의한 항복은 대체로 높은 전압에서 일어났으며 쇼트키 접촉 영역에서의

손상은 관찰 할 수 없었다. 이와 같은 결과는, 그림 2의 시뮬레이션 결과와도 일치하는 것이며, 가드 링 영역에 전계가 집중되기 때문이다. 그러므로 금속 가드 링 구조의 SiC-SBD의 항복전압을 높이기 위해서는 기판의 마이크로 파이프 밀도의 감소, 에피 결정결함 감소뿐만 아니라, 가드 링 구조 및 공정조건을 보다 최적화시켜야 한다.

4. 결 론

고전압 특성을 갖는 SiC-SBD를 제작하기 위하여 Al, Pd으로 금속 가드 링을 형성하여 가드 링 금속과 열처리 시간에 대한 항복전압 의존성을 조사하였다. SiC-SBD의 항복전압은 가드 링을 형성하는 금속의 종류와 열처리 온도에 크게 의존했으며, 가드 링 금속이 Al이고, 열처리 온도가 높을수록 높은 항복전압 특성을 나타냈다. 금속 가드 링이 없는 SiC-SBD는 대부분 200 V내외의 항복전압을 보인 반면, Al으로 가드 링을 한 SiC-SBD는 최고 700 V의 항복전압을 나타냈고, 금속 가드 링을 형성함으로써 높은 항복전압을 얻을 수 있음을 알 수 있었다. SiC-SBD의 항복현상은 결정결함과 금속 가드 링 파괴에 의하여 발생했으며, 낮은 전압에서의 항복은 기판, 또는 에피결함에 의하여 유발되고, 높은 전압에서의 항복은 금속 가드 링에 의하여 유발됨을 SEM분석을 통하여 명확하게 알 수 있었다. 그러므로 금속 가드 링 구조의 SiC-SBD에서 항복전압 특성을 높이기 위해서는 마이크로 파이프와 같은 격자결함을 줄이고, 금속 가드 링 구조 및 열처리 조건을 최적화시키는 것이 무엇보다 중요하다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 차세대 신기술 사업인 "SiC 반도체 기술개발사업"의 지원금으로 수행된 결과입니다.

참고 문헌

- [1] S. Sriram, R. Siergiej, R. Clarke, A. Agarwal, and C. Brandt, "SiC for microwave power transistors", *Phys. Stat. Solidi(a)*, Vol. 162, No. 1, p. 441, 1997.
- [2] C. Carter, J. Tsvetkov, R. Glass, D. Henshall, M. Brady, S. Muller, O. Kordina, K. Irvine, J. Edmond, H. Kong, R. Singo, S. Allen, and J. Palmour, "Progress in SiC: from material growth to commercial device", *Mater. Sci. Eng.*, Vol. B61, p. 1, 1999.
- [3] R. Clarke and J. Palmour, "SiC microwave power technologies", *Proc. of the IEEE*, Vol. 90, No. 6, p. 987, 2002.
- [4] A. Elasser and T. Chow, "Silicon carbide benefits and advantages for power electronics circuits and systems", *Proc. of the IEEE*, Vol. 90, No. 6, p. 969, 2002.
- [5] V. Saxena, J. Nong, and A. Steckl, "High-voltage Ni- and Pt-SiC Schottky diodes utilizing metal field plate termination", *IEEE Electron devices*, Vol. 46, No. 3, p. 456, 1999.
- [6] K. Ueno, T. Urushidani, K. Hashimoto, and Y. Seki, "The guard-ring termination for the high-voltage SiC Schottky barrier diodes", *IEEE Electron device Lett.*, Vol. 16, No. 7, p. 331, 1995.
- [7] 김성진, 오동주, 김상철, 방 옥, 유순재, 김송강, "Field plate구조의 SiC 쇼트키 다이오드에서 산화막 중첩 폭에 대한 항복전압 의존성", *새물리*, 51권, 2호, p. 169, 2005.
- [8] N. Lundberg and M. Ostling, "Thermal stable low ohmic contacts to p-type 6H-SiC using cobalt silicides", *Solid State Electronics*, Vol. 39, No. 11, p. 1559, 1996.
- [9] 오동주, 김성진, 한영현, 김창연, 최용석, 유순재, "산화막 형성조건에 따른 field plate구조 SiC schottky barrier diode의 항복전압 의존성", *새물리*, 51권, 1호, p. 66, 2005.