

## 이온주입 공정을 이용한 4H-SiC p-n Diode에 관한 시뮬레이션 연구

### Simulation Study of Ion-implanted 4H-SiC p-n Diodes

이재상<sup>1</sup>, 방 옥<sup>2</sup>, 김상철<sup>2</sup>, 김남균<sup>2</sup>, 구상모<sup>1,a</sup>

(Jae-Sang Lee<sup>1</sup>, Wook Bahng<sup>2</sup>, Sang-Cheol Kim<sup>2</sup>, Nam-Kyun Kim<sup>2</sup>, and Sang-Mo Koo<sup>1,a</sup>)

#### Abstract

Silicon carbide (SiC) has attracted significant attention for high frequency, high temperature and high power devices due to its superior properties such as the large band gap, high breakdown electric field, high saturation velocity and high thermal conductivity. We performed Al ion implantation processes on n-type 4H-SiC substrate using a SILVACO ATHENA numerical simulator. The ion implantation model used Monte-Carlo method. We simulated the effect of channeling by Al implantation in both 0 off-axis and 8 off-axis n-type 4H-SiC substrate. We have investigated the effect of varying the implantation energies and the corresponding doses on the distribution of Al in 4H-SiC. The controlled implantation energies were 40, 60, 80, 100 and 120 keV and the implantation doses varied from  $2 \times 10^{14}$  to  $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ . The Al ion distribution was deeper with increasing implantation energy, whereas the doping level increased with increasing dose. The effect of post-implantation annealing on the electrical properties of Al-implanted p-n junction diode were also investigated.

**Key Words** : 4H-SiC, Ion implantation, p-n diode

#### 1. 서 론

최근에 고온, 고출력 및 고주파를 위한 반도체 전력 소자의 요구가 급증함에 따라 전자회로의 중요 소자로 탄화규소(4H-SiC)에 관해 많은 연구가 진행되고 있다[1-3].

4H-SiC는 ~3.2 eV 정도의 높은 에너지 밴드 갭을 갖고 있으며 실리콘보다 절연 파괴 강도가 약 10배 이상, 열전도도는 약 3배 정도 높아서 고전압 전력 소자로서 높은 열적 안정성과 열전도성을 가지는 차세대 재료이다[4]. 이러한 SiC를 전력 소자에 사용하기 위해 p-n 접합의 제작이 필수적이며, p-n 접합 형성을 위한 대표적인 공정이 이온주입

공정이다. SiC 기판에 대한 이온 주입 공정은 Si의 경우 보다 높은 에너지가 요구되며, 최근 p-n 접합 다이오드를 제작하기 위한 p-type 물질로 알루미늄 불순물에 의한 이온 주입 실험이 많이 진행되고 있다[5,6]. 하지만 SiC는 Si보다 매우 높은 결합 에너지를 가지며, 따라서 소자 제작 공정에서 가장 큰 문제점 중의 하나는 이온주입 후에 진행되는 불순물 활성화 공정이다.

본 논문에서는 4H-SiC에 있어서 P-well 형성에 주로 사용되는 알루미늄(Al)의 이온주입에 의한 도핑 특성 분석과 불순물 활성화 공정인 후속 열처리 공정의 온도와 시간에 따른 I-V 특성을 시뮬레이션 통해 분석해 보았다.

#### 2. 실험

소자는 n-type 4H-SiC 기판 위에 알루미늄(Al)을 이온주입한 P-N 접합 구조를 이용하였다.

1. 광운대학교 전자재료공학과  
(서울시 노원구 월계동 447-1)  
2. 한국전기연구원 고집적전원연구그룹  
a. Corresponding Author : smkoo@kw.ac.kr  
접수일자 : 2008. 11. 24  
1차 심사 : 2008. 12. 16  
심사완료 : 2009. 1. 21

Silvaco사의 2차원 소자 시뮬레이터인 Athena 공정 시뮬레이션을 이용하여 알루미늄 이온주입의 에너지, tilt 와 dose 양에 따른 도핑 분포를 비교해 시뮬레이션 하였다. 정확한 2차원 이온주입 공정 시뮬레이션을 수행하기 위해서 Monte carlo implant 모델을 사용하였다. 각각 이온 주입 공정에 따라 제작된 P-N 접합의 후속 열처리 공정을 Athena공정 시뮬레이션을 통해 온도와 시간에 따라 비교 시뮬레이션 하였으며, 제작된 소자의 전기적 특성 분석을 위해 Atlas소자 시뮬레이션을 통해 다이오드의 I-V 특성을 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

그림 1은 이온주입 공정시 tilt에 따른 도핑분포의 변화를 나타내고 있다. SiC는 hexagonal구조를 가지고 있기 때문에 불순물 이온의 주입 방향과 SiC 기판의 c축방향이 평행이 될 경우 채널링 현상에 의해 주입되는 물질이 기판 내부로 보다 깊이 침투되는 현상을 보인다. 이런 채널링 현상을 없애기 위해 기판에 약간의 각을 주어 tilt함으로써 침투된 프로파일 깊이를 줄일 수 있다.

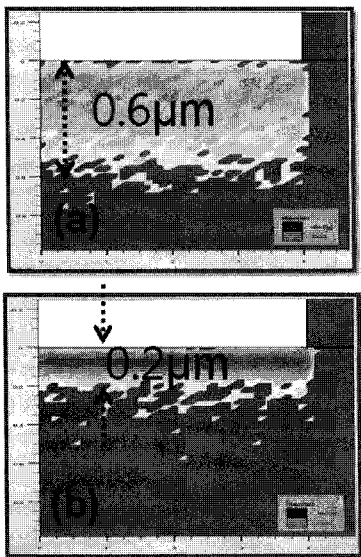


그림 1. 알루미늄 이온주입공정 tilt에 따른 2차원 도핑분포. (a) tilt = 0° (b) tilt = 4°  
 Fig. 1. 2 dimensional depth profiles of Al implants for different tilt angles of (a) tilt = 0° and (b) tilt = 4°.

그림 2는 이온주입공정의 주요 변수인 energy와 dose 양에 따른 도핑 분포의 변화를 나타내고 있다. 그림 2(a)는 에너지의 변화에 따른 도핑 분포 변화를 나타내고 있는데, 이온주입의 에너지가 커짐에 따라 도핑 되는 깊이가 깊어지는 현상을 나타내고 있다. 이 결과에서 보이 듯 이온 주입 에너지를 다르게 함으로서 불순물의 도핑 깊이를 조절할 수 있는 것을 알 수 있다. 그림 2(b)는 dose 변화에 따른 도핑 분포 변화를 나타내고 있는데, 이온 주입의 에너지가 일정하기 때문에 도핑되는 깊이는 일정하지만 dose양의 변화에 따라 도핑의 농도가 변화되는 것을 확인 할 수 있다. 이온주입 공정시 주입되는 불순물의 양이 많아지면 이에 비례하여 기판 내부로 도핑 될 수 있는 불순물의 양이 많아지기 때문이다.

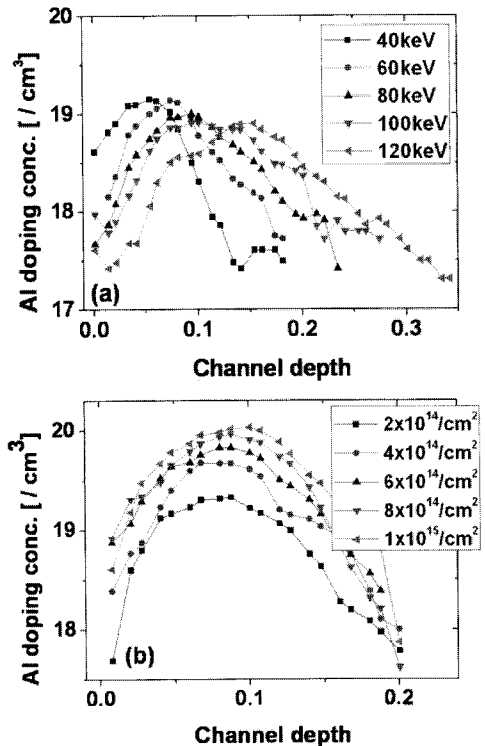


그림 2. 알루미늄 이온주입공정 energy와 dose에 따른 도핑분포 (a) energy 변화 (b) dose 변화.  
 Fig. 2. Doping profiles of aluminium ion-implantation as a function of the implantation (a) energy and (b) doses, respectively.

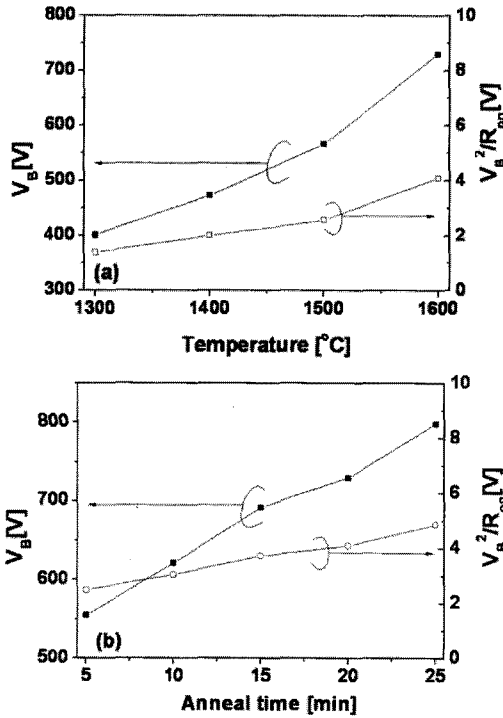


그림 3. 후속 열처리 온도에 따른 breakdown voltage의 변화.  
 Fig. 3. Variation of breakdown voltage as a function of the post-annealing temperatures.

높은 항복전압은 SiC 전력소자가 갖추어야 하는 중요한 소자 특성이며, 따라서 이러한 이온주입된 프로파일이 소자 특성에 미치는 영향을 파악하는 것은 매우 중요하다. 그림 3은 알루미늄 이온주입 공정에 의해 형성된 p-n 접합 다이오드의 후속 열처리 공정 온도와 시간에 의한 항복전압 (breakdown) 시뮬레이션 결과이다. 항복전압 시뮬레이션에는 고전계에서 높은 에너지에 의한 캐리어의 운동을 반영 할 수 있는 impact ionization 모델을 사용하였다. 먼저 후속 열처리 온도에 의한 영향을 알아보기 위해 알루미늄 이온 주입공정을 tilt=4°, energy=60 keV, dose=1×10<sup>14</sup> /cm<sup>3</sup>의 조건에서 수행후 열처리 시간을 30초로 일정하게 1300도에서 1600도까지 100도 간격으로 수행하였다. 그림 3(a)에 나타난 결과에서 확인 할 수 있듯이 후속 열처리 온도가 올라가게 되면 thermal damage에 의해 내부 저항이 올라가지만, 열처리 온도가 증가함에 따라 이온 주입된 불순물들이 활성화되

어 p-type의 전기적 특성을 잘 나타내게 된다. 따라서 p-n접합의 항복전압이 높아지게 됨을 알 수 있다.

후속 열처리 공정의 변수 중에서 시간에 의한 전기적인 특성에 관해서도 시뮬레이션을 통해 분석해 보았다. 후속 열처리 시간에 의한 영향을 알아보기 위해 알루미늄 이온 주입 공정의 조건은 앞의 실험과 같은 조건에서 수행 하였다. 그림 3(b)에서 확인 할 수 있듯이 후속 열처리 시간이 길어짐에 따라 항복 전압 특성이 높게 나타났다. 이 결과를 통해서 알루미늄 이온 주입에 의한 p-n접합 형성시 같은 온도에서 열처리 공정을 수행 할 경우 시간이 길어짐에 따라 항복 전압이 증가하는 특성을 확인 할 수 있다. 소자의 특성을 나타내는  $V_B^2/R_{ON}$ 의 수치를 보면 후속 열처리의 온도와 시간이 증가함에 따라 소자의 특성이 향상되는 것을 확인 할 수 있다.

#### 4. 결론

알루미늄 이온주입 공정에 관해 tilt, energy, dose 양에 따른 도핑 분포 변화를 분석하였다. 이온주입 공정시 energy 크기에 의해 도핑의 깊이를 조절 할 수 있고, dose양에 따라 도핑의 농도가 변화함을 확인 하였다. 또한 후속 열처리 온도와 시간의 증가에 의해 다이오드 소자의 항복전압 (breakdown voltage)가 증가 하였고, 1600도에서 25분간 후속 열처리 공정을 수행 할 경우 조건 중 가장 우수한 소자 특성이 관찰되었다. 시뮬레이션을 통한 알루미늄 이온주입 공정을 실제 소자 제작 공정에 적용함에 있어서 응용 가능하다고 판단 된다.

#### 감사의 글

본 논문은 산업자원부가 지원하는 국가 반도체 연구사업인 "시스템집적반도체기반기술개발사업(시스템IC2010)"을 통해 개발된 결과임을 밝힙니다.

#### 참고 문헌

[1] H. O. Olafsson, G. Gudjonsson, F. Allerstam, E. O. Sveinbjornsson, T. Rodle, and R. Jos, "Stable operation of high mobility 4H-SiC

- MOSFETs at elevated temperatures”, IEEE. Eelctrons Letters, Vol. 41, p. 825, 2005.
- [2] 김형준, 나훈주, 정재경, “SiC 반도체 공정 및 소자기술 연구 현황”, 전기전자재료학회논문지, 13권, 3호, p. 9, 2000.
- [3] 이원선, 오충완, 최재승, 신동현, 이형규, 박근형, 김영석, “고온 응용을 위한 SiC MOSFET 문턱전압 모델”, 전기전자재료학회논문지, 15권, 7호, p. 559, 2002.
- [4] J. Richmond, S. H. Ryu, M. Das, S. Krishnaswami, S. H. Jr, A. Agrwal, and J. Palmour, “An overview of cree silicon carbide power devices”, IEEE Aerospace Conf., p. 37, 2004.
- [5] C. Dutto, E. Fogarassy, D. Mathiot, D. Muller, P. Kern, and D. Ballutaud, “Long-pluse duration excimer laser annealing of Al<sup>+</sup> ion implanted 4H-SiC for pn junction formation”, Applied Surface Science, Vol. 208, p. 292, 2003.
- [6] Y. Negoro, T. Kimoto, and H. Matsunami, “Electrical activation of high-concentration aluminum implantrd in 4H-SiC”, J. Applied physics, Vol. 96, No. 9, p. 4916, 2004.