

# SiC MOSFET에서 발생하는 Single Event Effect 현상의 실험 및 기하구조 기반 Geant4-TCAD 통합 분석 연구

송상윤<sup>1</sup>, 이연주<sup>1</sup>, 김동석<sup>2</sup>, 김홍기<sup>3</sup>, 이재길<sup>3</sup>, 강혜민<sup>1</sup>  
한국에너지공과대학교<sup>1</sup>, 한국원자력연구원<sup>2</sup>, 파워마스터반도체<sup>3</sup>

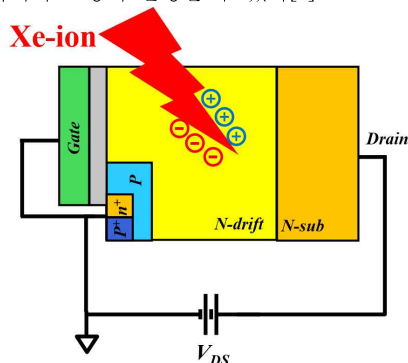
## Experimental and Geometry-Based Geant4-TCAD Integrated Study of Single Event Effects in SiC MOSFETs

Sangyun Song<sup>1</sup>, Seunghyun Park<sup>1</sup>, Dong-seok Kim<sup>2</sup>, Hong-Ki Kim<sup>3</sup>, Jaegil Lee<sup>3</sup>, Hyemin Kang<sup>1</sup>  
Korea Institute of Energy Technology<sup>1</sup>, Korea Atomic Energy Research Institute<sup>2</sup>, Powermaster Semiconductor<sup>3</sup>

**Abstract** - 본 연구에서는 650 V 평면형 4H-SiC MOSFET에서 발생하는 중이온 유도 단일사건효과를 실험과 Geant4-TCAD 연계 해석을 통해 분석하였다. Xe 중이온 조사 결과, 드레인-소스 전압 400 V에서는 드레인 및 게이트 전류가 급격히 증가하며 파괴적 단일사건효과가 발생하였고, FIB/SEM 분석에서 소스 측 게이트 산화막/SiC 계면 부근의 SiC 용융과 알루미늄 금속 배선 침투가 확인되었다. 반면 드레인-소스 전압 100 V에서는 게이트 누설전류 증가만 관찰되었으며 파괴적 손상은 발생하지 않았다. 실제 소자 단면 구조를 반영한 형상 정합 Geant4 모델을 이용하여 깊이 방향 LET 분포를 추출하고, 이를 TCAD 중이온 생성원으로 입력하여 과도 전기-열 해석을 수행하였다. 해석 결과, 단일사건효과는 얇은 SiC 영역의 전류 집중, 기생 BJT 활성화, 애벌랜치 증폭, 줄 발열이 결합된 열폭주에 의해 발생함을 확인하였다. 본 연구는 SiC MOSFET의 단일사건효과 발생 위치와 물리적 메커니즘을 실험 손상 분석 결과와 시뮬레이션 고온 영역을 직접 연계하여 설명하였다.

### 1. 서 론

SiC Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET)은 높은 항복전계, 낮은 온저항, 우수한 고온 특성을 가지기 때문에 우주 환경 및 고신뢰성 전력변환 시스템에 적합한 소자로 주목받고 있다[1]. 그러나 중이온과 같은 고에너지 입자가 소자 내부를 통과하면 순간적으로 많은 전자-정공 쌍이 생성되고, 차단 상태에서 형성된 높은 드레인 전계에 의해 국부 전류가 흐를 수 있다. 이 전류가 충돌 이온화와 기생 bipolar junction transistor (BJT) 턴온에 의해 증폭되면 단일사건효과와 같은 파괴적 고장이 발생할 수 있다[2].



〈그림 1〉 Xe-ion 조사 조건에서의 planar 4H-SiC MOSFET SEB 발생 개념도

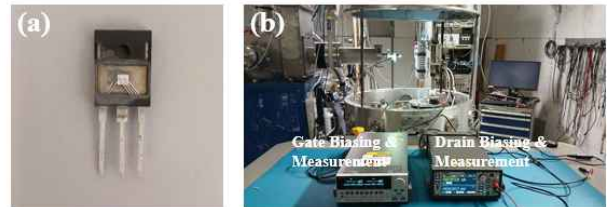
기존 연구에서는 단일사건효과 분석을 위해 실험 또는 TCAD 해석이 수행되었지만, 실제 소자 단면에 존재하는 금속, 산화막, 다결정 실리콘, SiC 층 구조를 단순화하는 경우가 많았다[3]. 이러한 단순화는 얇은 SiC 영역의 LET 분포와 국부 고온 영역 위치 예측에 오차를 만들 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Xe 이온 조사 실험, FIB/SEM 고장 분석, 실제 기하구조 기반 Geant4 해석 및 TCAD 전기-열 시뮬레이션을 연계하여 SiC MOSFET

의 단일사건효과 발생 메커니즘을 분석하였다.

### 2. 본 론

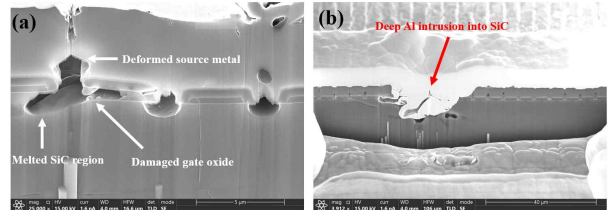
#### 2.1 Heavy-ion 조사 실험 및 고장 분석

본 연구에서는 탈캡 처리된 650 V 평면형 4H-SiC MOSFET을 대상으로 RADEF 시설에서  $^{131}\text{Xe}^{35+}$  중이온 조사를 수행하였다. 조사 조건은 게이트-소스 전압 0 V의 차단 상태이며, 드레인 전압은 100 V와 400 V로 설정하였다.



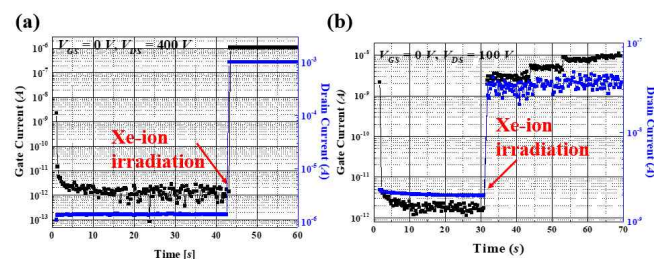
〈그림 2〉 Heavy-ion 조사에 사용된 650 V planar 4H-SiC MOSFET 및 측정 구성: (a) Decap 처리된 650 V planar 4H-SiC MOSFET 소자, (b) RADEF heavy-ion 조사 중 gate 및 drain bias 인가와 전류 측정을 위한 실험 구성.

드레인 전압 400 V 조건에서는 Xe 이온 조사 직후 드레인 전류가  $10^{-13}\text{A}$  수준에서  $10^{-3}\text{A}$  수준까지 급격히 증가하였고, 게이트 전류도  $10^{-12}\text{A}$  수준에서  $10^{-6}\text{A}$  수준까지 증가하였다. 이는 파괴적 단일사건효과가 발생했음을 의미한다.



〈그림 3〉 드레인 전압 400 V 조건에서 단일사건효과 발생 후 관찰된 손상 형상 (a) 단일사건효과 발생 위치의 상부 SEM 이미지, (b) 알루미늄 금속 배선이 SiC 내부로 침투한 손상 영역의 확대 FIB 이미지.

조사 후 FIB/SEM 분석에서는 소스 접착부 근처의 SiC 용융, 게이트 산화막/SiC 계면 손상, 그리고 알루미늄 금속 배선의 에피층 내부 침투가 확인되었다. 이는 단일사건효과가 단순한 누설전류 증가가 아니라, 국부 열폭주에 의해 발생한 파괴적 고장임을 보여준다.

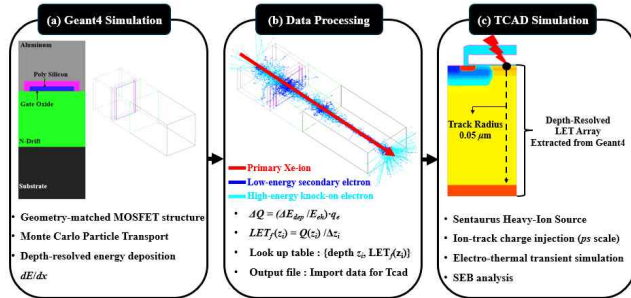


**<그림 4> Xe-ion 조사 중 drain 및 gate current transient 측정 결과:** (a)  $V_{DS} = 400\text{ V}$  조건에서 파괴적 단일 사건효과 발생에 따른 드레인/게이트 전류 증가, (b)  $V_{DS} = 100\text{ V}$  조건에서 비파괴적 게이트 누설전류 증가 및 드레인 전류 회복 특성.

반면 드레인 전압  $100\text{ V}$  조건에서는 게이트 누설전류의 점진적 증가는 있었지만, 드레인 전류는 안정적인 누설전류 수준으로 회복되어 단일사건효과는 발생하지 않았다.

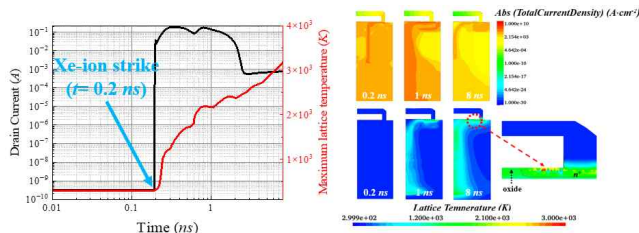
## 2.2 Geometry-matched Geant4-TCAD 해석 및 SEB 메커니즘

단일사건효과 메커니즘을 해석하기 위해 실제 MOSFET 단면 구조를 반영한 기하구조 정합 Geant4 모델을 구성하였다.



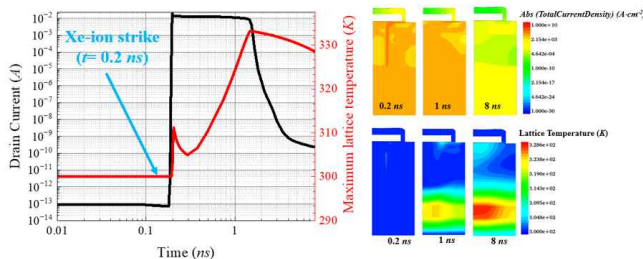
**<그림 5> 기하구조 정합 Geant4-TCAD 통합 해석 절차:** (a) Geant4 구조 모델, (b) 깊이 방향 LET 분포 추출, (c) TCAD 전기-열 단일사건효과 해석.

Geant4에서는 이온이 금속, 산화막, 다결정 실리콘, SiC 층을 통과하면서 발생시키는 깊이 방향 LET 분포를 계산하였고, 이를 Sentaurus TCAD의 중이온 생성원으로 입력하였다. 단순 SiC 단일층 모델과 비교하면 전체 전하 생성량 차이는 크지 않았지만, 단일사건효과가 시작되는 얇은 SiC 영역에서는 LET 최대값 차이가 크게 나타났다.



**<그림 6>  $V_{DS} = 400\text{ V}$  조건에서의 드레인 전류, 최대 격자 온도 및 전기-열 TCAD 해석 결과.**

TCAD 전기-열 해석 결과, 드레인 전압  $400\text{ V}$ 에서는 Xe 이온에 의해 생성된 전하 운반자가 높은 드레인 전계에 의해 얇은 SiC 영역으로 집중되었다. 이때 게이트 산화막 아래쪽에 정이 축적되면서 p-body 전위가 상승하고, 소자 내부의 기생 NPN BJT가 활성화되었다.



**<그림 7>  $V_{DS} = 100\text{ V}$  조건에서의 전류, 최대 격자 온도 및 전기-열 TCAD 해석 결과.**

이후 애벌랜치 증폭과 줄 발열이 결합되어 국부적인 열폭주가

발생하였다. 시뮬레이션에서 예측된 국부 고온 영역 위치는 FIB/SEM에서 관찰된 SiC 용융 및 알루미늄 침투 위치와 일치하였다. 반면 드레인 전압  $100\text{ V}$ 에서는 전계가 충분하지 않아 지속적인 전류 경로가 형성되지 않았고, 온도 상승도 약  $330\text{ K}$  수준에서 안정화되었다.

## 3. 결 론

본 연구는  $650\text{ V}$  평면형 4H-SiC MOSFET의 중이온 유도 단일사건효과를 실험과 기하구조 정합 Geant4-TCAD 해석을 통해 분석하였다. 드레인 전압  $400\text{ V}$ 에서는 파괴적 단일사건효과와 함께 SiC 용융 및 알루미늄 침투가 관찰되었고, 드레인 전압  $100\text{ V}$ 에서는 비파괴적 누설전류 증가만 나타났다. TCAD 해석 결과, 단일사건효과는 얇은 SiC 영역의 전하 운반자 집중, 기생 BJT 활성화, 애벌랜치 증폭, 줄 발열이 결합된 전기-열 열폭주로 설명되었다. 또한 시뮬레이션에서 예측된 국부 고온 영역 위치가 실제 FIB 손상 위치와 일치하여, 제안한 Geant4-TCAD 통합 해석의 물리적 타당성을 확인하였다. 본 연구는 향후 방사선 내성 SiC MOSFET 설계를 위한 구조적 취약 위치와 단일사건효과 저감 방향을 제시한다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부의 지원을 받아 국가 과학기술연구회(NST) 「우주항공 반도체 전략연구사업」(No. GTL25051-000) 및 한국연구재단(NRF) 과제(RS-2024-00423646)의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처 및 지원기관에 감사드립니다.

## [참 고 문 헌]

- [1] J. M. Lauenstein, M. C. Casey, R. L. Ladbury, H. S. Kim, A. M. Phan, and A. D. Topper, "Space Radiation Effects on SiC Power Device Reliability," IEEE International Reliability Physics Symposium Proceedings, 2021.
- [2] C. Peng et al., "Experimental and simulation studies of radiation-induced single event burnout in SiC-based power MOSFETs," IET Power Electronics, vol. 14, no. 9, pp. 1700 - 1712, 2021.
- [3] D. R. Ball et al., "Ion-Induced Energy Pulse Mechanism for Single-Event Burnout in High-Voltage SiC Power MOSFETs and Junction Barrier Schottky Diodes," IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 67, no. 1, pp. 22 - 28, 2020.