

pMOSFET의 과도펄스 방사선 영향 연구

이현진*, 오승찬*, 이남호*, 이민수**, 이용수**
 한국원자력연구원*, 한국과학기술원**

Study for Transient Pulse Radiation on pMOSFET

Lee Hyun Jin*, Oh Seung Chan*, Lee Nam Ho*, Lee Min Su**, Lee Yong Soo**
 Korea Atomic Energy Research Institute*, Korea Advanced Institute of Science and Technology**

Abstract - 핵폭발 등에서 방출되는 과도펄스(Transient pulse) 형태의 방사선이 반도체 소자에 조사되면 소자 내부에서는 짧은 시간에 다량의 전하가 생성된다. 이 전하들이 일정방향으로 증폭된 광전류가 소자의 고장과 오동작을 유발하거나 극단적으로 소진(Burn out)되는 원인이 된다. 본 연구에서는 과도방사선 펄스가 입사하였을 때 pMOSFET 소자 내에 생성되는 전자 정공 쌍(EHP)으로 인해 형성되는 광전류가 소자의 방사선 피해로 나타나는 과정 및 영향을 연구하기 위해 반도체 공정 시뮬레이터를 이용해 전하들의 거동과 광전류 크기를 시뮬레이션하고, 전자가 속기에서 실측시험을 병행하였다. 가속기 주변의 전자장을 인한 큰 잡음으로부터 가속기 펄스신호에 의해 pMOSFET에서 발생된 소신호의 광전류를 측정하기 위해서 정밀 신호처리 회로를 구성하였다. 시뮬레이션과 실측시험에서의 결과 비교/분석에서 두 광전류 파형은 유사한 형태를 확인할 수 있었다.

1. 서 론

북한은 2006년 1차 핵폭발 시험에 이어 지난 5월 25일 2차 핵폭발 시험을 감행했다고 공표하였다. 남북한 유해공 무기전력 공식비교자료를 바탕으로 유사시 우리군의 우세가 예상되나 이번 북한의 핵무기 개발로 인해 이 분야의 전력은 상대적으로 약세에 놓이게 된다. 특히 현대전 군장비는 가격을 기준으로 70% 이상을 전자부품이 차지하고 있고, 이 전자부품들은 군장비 가운데 핵폭발 영향에 가장 민감하여 쉽게 고장이나 오동작을 유발할 수 있으며 전자제어부품의 이상은 바로 전체 장비나 군 시스템의 불용상태를 초래하게 된다.

그러나 북핵에 대응한 전략 핵무기 개발이 원천적으로 불가능한 대한민국의 실정을 감안하면 미연의 국지적 핵공격에 충분히 대비할 수 있는 방어 및 피해 최소화 기술의 개발이 현실적으로 가장 효율적인 대응 전략이며 관련 기술의 시급한 개발이 요구된다.

핵폭 방출 방사선은 그 종류와 에너지, 그리고 소자 입사형태에 따라 다양한 영향을 미치게 되는데, 특히 순간적으로 고에너지의 펄스 형태로 입사되는 감마선 또는 X-ray는 전자부품의 고장이나 오동작 및 소진(Burn-out) 현상을 일으킨다.^[1] 이 영향을 과도방사선효과(Transient Radiation Effect)라 하며, 핵폭발의 위험이 컸던 1950 - 1960년대에 Bell Lab.에 Rogers를 중심으로 활발하게 연구되었지만 그 정보는 공개되지 않고 있다. 현대는 우주공간의 펄스형 방사선이 인공위성, 우주선 등에 미치는 피해현상에 대한 연구도 다양하게 진행되고 있다.

본 논문에서는 군장비 내방사선화에 대한 기초연구로서 반도체 소자 레벨에서의 과도방사선효과 연구를 시도하였다. 먼저 공정변수 및 구조변수를 자체적으로 설정한 단일 pMOSFET 소자를 대상으로 과도펄스 방사선에 의한 영향을 반도체 시뮬레이터(TCAD)로 정밀 모사하였다. 다음으로 설정변수에 따라 실제 제작한 pMOSFET 소자를 한국원자력 연구원의 MICROTRON 전자가속기에서 온라인 실측시험하여 펄스형 방사선(전자빔)에 대한 출력특성을 정밀 분석하였다. 그리고 마지막 단계에서 시뮬레이션에서의 출력전류 결과와 실측을 통해 얻은 전류펄스 응답파형은 형태를 서로 비교분석하였다.

2. 과도방사선효과 TCAD 시뮬레이션

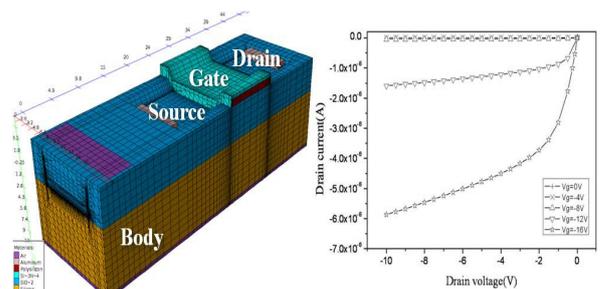
2.1 pMOSFET 구조 모델링

상용 pMOSFET의 내부공정 변수를 기준으로 표 1의 공정변수 값을 갖는 pMOSFET 구조를 3D로 모델링하였다. 동시에 전기적 파라미터를 추출하여 소자의 구동 전압 및 전류 값들을 실측시험에도 동일하게 반영하였다.

〈표 1〉 pMOSFET 시뮬레이션 모델 파라미터

Parameter	Value
Gate Oxide Thickness	2 μm
Channel Length	10 μm
Channel Width	10 μm
Body Thickness	10 μm

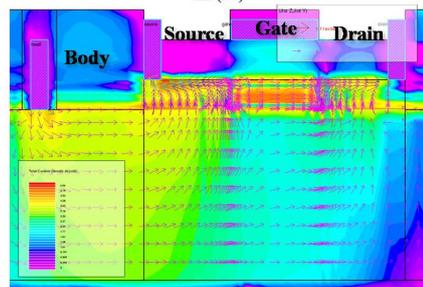
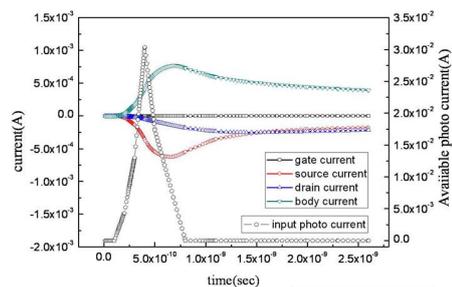
그림 1은 반도체 공정시뮬레이터에서 설계한 pMOSFET 모델과 그 출력 특성곡선을 보여주고 있는데, 드레인 전압에 대한 전류관계 그래프는 설정된 변수를 정확히 반영한 pMOSFET 모델이 완성되었음을 나타낸다. 이 소자는 감마선을 검출하기 위한 용도로서 상용에 비해 다소 두꺼운 Gate Oxide 층을 사용한 것이 특징이다.



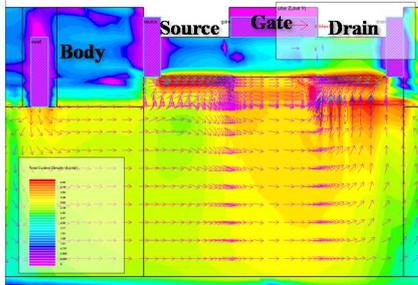
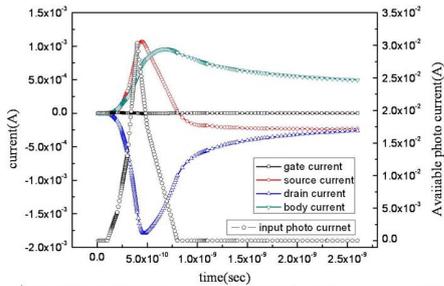
〈그림 1〉 pMOSFET 모델링 및 I-V 특성 곡선

2.2 pMOSFET 과도펄스 시뮬레이션

모델링한 pMOSFET에 과도펄스를 입력하여 각 단자에서의 전류특성을 관찰하였다.



(a) $V_{GS} = -15V, V_{DS} = 0V$



(b) $V_{GS} = -15V, V_{DS} = -5V$

<그림 2> pMOSFET 과도펄스 영향 시뮬레이션 결과

과도펄스신호는 감마선의 파장, 에너지, 실리콘에서의 흡수율, 펄스폭 등의 입력 파라미터로 모델링하였다. 이렇게 모델링한 과도펄스신호를 pMOSFET에 입사시켜 발생하는 내부 전자 정공 쌍들의 거동을 관찰하고, 이들이 만들어내는 광전류가 각 단자에 미치는 영향을 분석하였다. 채널이 형성되는 $V_{GS} = -15V$ 를 인가하고, V_{DS} 가 0과 $-5V$ 일 때 두 경우의 시뮬레이션 결과를 <그림 2>에서 보여주고 있다.

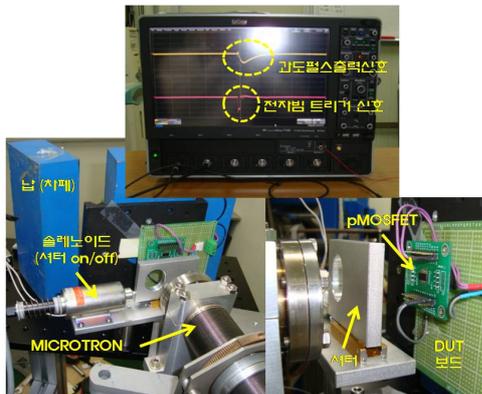
<그림 2> (a)의 경우 p형 실리콘(소스, 채널, 드레인)과 n형 실리콘(Body)의 공핍영역(Depletion Region)의 전계로 인해 높은 전하밀도를 확인할 수 있다. 이는 생성된 전자 정공 쌍이 공핍영역으로 끌려가 광전류에 기인하는 것을 알 수 있다. 또한 Body와 가까운 소스 접합에 생기는 공핍영역으로 지배적인 전하 Sweep이 일어난다. (b)의 경우 드레인과 Body 접합이 $V_{DS} = -5V$ 로 역방향 바이어스가 가해져 공핍영역의 확장으로 소스로 유기되는 전류보다 좀 더 큰 전류가 발생한다. 이와 같은 이유로 동일한 과도펄스 입력에도 바이어스 인가상태에 따라 각 단자에 발생하는 광전류 값은 다르게 된다. 단일소자가 연결된 로직회로 등에서 각 단자에 발생하는 전류는 다음 소자에 유기되기 때문에 단일소자에 대한 광전류 분석은 매우 중요하다.

3. 과도방사선효과 실험시험

3.1 MICROTRON 전자가속기 시험 과정

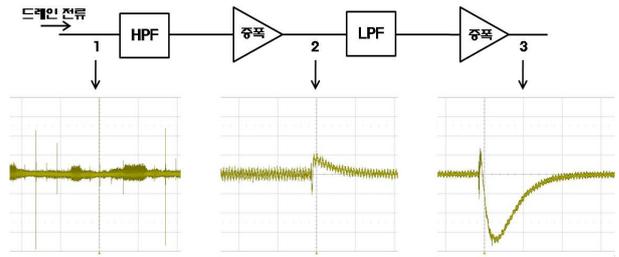
한국원자력연구원에서 MICROTRON 전자가속기는 $5\mu s$ 의 펄스 폭과 $40mA$ 의 최대전류를 발생시킨다. 단일펄스를 조사하기 위해 셔터를 제작하여 빔출력 트리거 신호에 맞춰 셔터를 열어 조사할 수 있도록 하였다. 또한 조사시설 내에는 RF Generator로 인한 잡음신호가 크기 때문에 정확한 광전류 측정을 위해 신호처리 회로를 추가하였다.

출력신호는 조사실 외부로 저잡음 케이블을 연결하여 디지털 오실로스코프(WavePro, 20GS/s, LeCroy)로 측정한다. <그림 3>은 조사실 내부에 DUT가 장착된 모습과 조사실 외부에서 출력신호를 측정하는 모습을 보여주고 있다.



<그림 3> MICROTRON 조사실 내부와 외부 시험모습

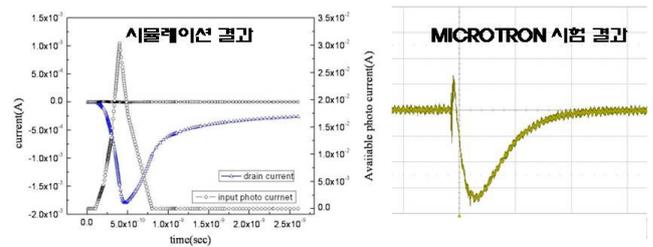
3.2 pMOSFET 과도펄스 실험시험 결과



<그림 4> MICROTRON 조사실 내부와 외부 시험모습

앞서 언급했듯이 조사시설 내에 저주파수 잡음으로 인해 초기 시험에서는 드레인 출력전류 파형을 관측할 수 없었다. <그림 4>에서와 같이 하이패스필터(HPF)와 증폭기를 연결하여 2번 파형을 획득하였다. 2번 파형은 펄스형태는 보이지만 명확한 신호를 확인할 수가 없기 때문에 다시 로우패스필터(LPF)와 증폭기를 연결하여 3번과 같은 광전류 파형을 관측하였다.

<그림 5>는 실험결과에서 얻은 <그림 4>의 그래프의 최종 성형파형을 오른쪽에서 다시 나타내었고, 왼쪽의 파형은 앞서 수행한 시뮬레이션 결과에서 입력펄스에 대한 드레인 출력전류 파형만을 추출하여 보여주고 있는데, 유사한 형태를 띠고 있음을 확인할 수 있다. 다만, MICROTRON 전자가속기는 감마선을 발생시키지 않지만 감마선과 전자빔은 실리콘 매질 입사 시 전리화(Ionizing)를 일으키므로 정량적인 광전류 값의 비교에는 다소의 시간과 얼마간의 과정이 더 필요하겠다.



<그림 5> TCAD 시뮬레이션 결과와 MICROTRON 결과 비교

3. 결 론

본 논문에서는 내방사선화관련 기초연구로 반도체 소자레벨에서의 과도방사선효과 분석을 위해, 자체적으로 설정한 공정 및 구조변수로 단일 pMOSFET 소자를 설계제작하였다. 이와 동시에 변수 설정값에 기반하여 반도체 공정시뮬레이터를 통해 모델링과 시뮬레이션을 수행하였다.

이어서 제작한 소자에 대하여 전자가속기에서 발생하는 펄스방사선에 대한 소자의 출력특성을 실험하고 앞서 도출한 시뮬레이션 결과와 서로 비교분석하였다. 그 결과 두 출력 신호는 서로 유사한 형태를 보였고, 이 결과를 통해 펄스입력 방사선 신호에 대한 pMOSFET 소자의 전반적인 모델링 및 시뮬레이션이 정확하게 수행되었음을 확인할 수 있었다.

추후 두 출력 결과의 정량적 비교와 더불어 고휘도 전자가속기를 이용하여 빔 크기에 따른 소자의 영향, 소자의 파괴현상을 확인하는 시험, 그리고 TCAD 시뮬레이션을 수행할 계획이다.

[참 고 문 헌]

- [1] George C. Messenger, "The Effects of Radiation on Electronic Systems", 1986.
- [2] David R. Alexander, "Transient Ionizing Radiation Effects in Devices and Circuits", IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol. 50, No. 3, pp. 565-582, 2003.
- [3] Tor A. Fjeldly, "Modeling of High-Dose-Rate Transient Ionizing Radiation Effects in Bipolar Devices", IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol. 48, No. 5, pp. 1721-1730, 2001.