

# 전자소자의 과도방사선 영향 연구

이남호\*, 오승찬\*, 황영관\*, 강홍식\*\*

\*한국원자력연구원

\*\*포항가속기연구소

e-mail: nhlee@kaeri.re.kr

## A Study of Transient Radiation Effects on Semiconductor Devices

Nam-Ho Lee\*, Seung-Chan Oh\*, Young-Gwan Whang, Heung-Sik Kang\*\*

\*Korea Atomic Energy Research Institute

\*\*Pohang Accelerator Lab.

### 요약

우주방사선이나 과도펄스(Transient Radiation) 형태의 감마 방사선이 반도체에 조사되면 소자 내부에서 짧은 시간에 다량의 전하가 생성된다. 이 전하들과 증폭된 과전류는 소자의 고장(Upset, Latchup)과 오동작을 유발시키게 되고 나아가 전자부품이 소진(Burnout)되는 직접적인 원인이 된다.

본 연구에서는 이러한 핵폭 방출 과도방사선에 대한 피해분석 시험을 수행하고 나아가 과도방사선 방호기술 체계구축의 필요성에 대해 논하였다. 과도펄스 방사선시험은 군용으로 분류된 반도체 칩을 대상으로 포항 전자빔가속기를 사용하였다. 핵폭발 방출 과도방사선을 모사하기 위해 감마선 변환장치를 MCNP 설계를 통해 제작하고 단일모드의 마이크로초 단위 감마펄스 방사선을 방출시켜 시험대상 칩을 부착한 시험보드에 조사하는 과정으로 실험을 진행하였다. 온라인 고속 측정장치를 통한 전자소자의 과도방사선 시험에서 다양한 피해현상을 측정할 수 있었고, 열상카메라 촬영을 통하여 과열상태를 관측함으로써 피해현상의 검증과 더불어 소진현상으로의 전개 가능성을 확인하였다.

### 1. 서론

태양으로부터 방출되는 펄스형태의 우주방사선은 인공위성의 전자장비에 장애를 초래하며, 핵폭발 시 전달되는 고준위 펄스방사선도 유사한 특성을 가진다. 가격의 70% 이상이 전자관련 부품으로 이루어지는 첨단 군 장비는 핵폭발로부터 발생하는 방사선에 민감하게 반응하여 고장이나 오동작이 유발되며, 전자제어 부품의 이상은 전체 장비나 군 시스템의 불용상태로 이어진다.

핵폭 방출 방사선은 그 종류와 에너지, 그리고 소자 입사형태에 따라 다양한 영향을 미치게 되는데, 특히 순간적으로 고에너지의 펄스 형태로 입사되는 감마선 또는 X-선은 전자부품의 고장이나 오동작 및 소진(Burnout) 현상을 일으킨다.[1] 이 영향을 과도방사선효과(Transient Radiation Effect)라 하며, 핵전의 긴장이 상존했던 1950 - 1960년대에 Bell Lab.에 Rogers를 중심으로 활발하게 연구되었지만 상세한 정보는 여전히 미공개 상태에 있다. 최근에는 우주공간의

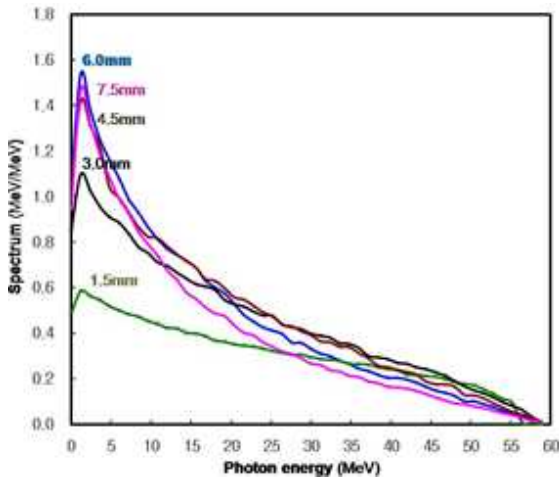
펄스형 방사선이 인공위성, 우주선 등에 미치는 피해현상에 대한 연구도 광범위하게 진행되고 있다.

본 연구에서는 이러한 핵폭 방출 과도방사선에 대한 전자부품/장비의 내방사선관련 기초연구로 군 전자부품의 감마-과도방사선에 대한 피해분석 시험을 수행하였다. 과도펄스 방사선시험은 군용으로 분류된 반도체 칩을 대상으로 포항 전자빔가속기를 사용하였다. 핵폭발 방출 과도방사선을 모사하기 위해 감마선 변환장치를 MCNP 설계를 통해 제작하고 단일모드의 마이크로초 단위 감마펄스 방사선을 방출시켜 시험대상 칩을 부착한 시험보드에 조사하는 과정으로 실험을 진행하였다. 온라인 고속 측정장치를 통한 전자소자의 과도방사선 시험에서 다양한 피해현상을 측정할 수 있었고, 열상카메라 촬영을 통하여 과열상태를 관측함으로써 피해현상의 검증과 더불어 소진현상으로의 발전가능성을 확인하였다.

2. 전자소자의 펄스방사선 특성분석시험

2.1. 펄스감마선 발생장치

핵폭에서 방출되는 펄스형 방사선을 모사할 수 있는 장치로 고출력의 전자가속기가 가장 적합하다. 전자빔을 고에너지로 가속하여 금속(텅스텐, W) 표적에 조사하면 제동복사(Bremsstrahlung)에 의해 감마선이 발생되는데 그 펄스폭은 전자빔의 펄스폭과 같고, 감마선의 최대에너지는 전자빔의 에너지와 같다. 본 연구에서 필요한 최대의 감마선량을(Dose rate) 발생을 위해 포항가속기연구소의 선형가속기를 기반으로 텅스텐 표적을 최적화하여 설계하였다. 그림 1은 최대 선량을 발생 조건의 텅스텐 두께 도출을 위한 MCNP 시뮬레이션 결과 그래프로 전자가속기 최대출력 에너지 60MeV에 대한 텅스텐의 두께는 6.0mm임을 나타내고 있다. 그림 2는 연속 펄스빔을 단일 펄스빔으로 조절하는 셔트(Shutter)와 텅스텐 포일(Foil)을 납(Pb) 차폐체 홀(Hall) 끝부분에 장착한 상태의 모습이다. 텅스텐 뒷부분에 조사할 전자부품을 위치시켜 감마 펄스시험을 진행하게 된다.



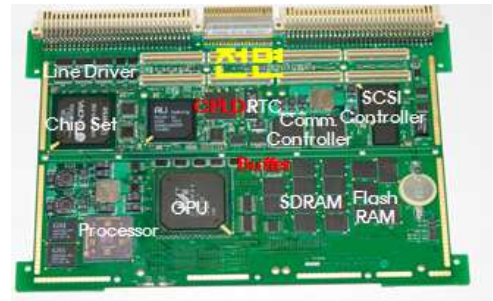
[그림 1] 텅스텐(W) 두께(mm)별 전자빔의 최대 감마선 변환효율(MCNP)



[그림 2] 감마펄스 변환용 표적(W)

2.2. 펄스감마선 조사시험

2.2.1 시험대상

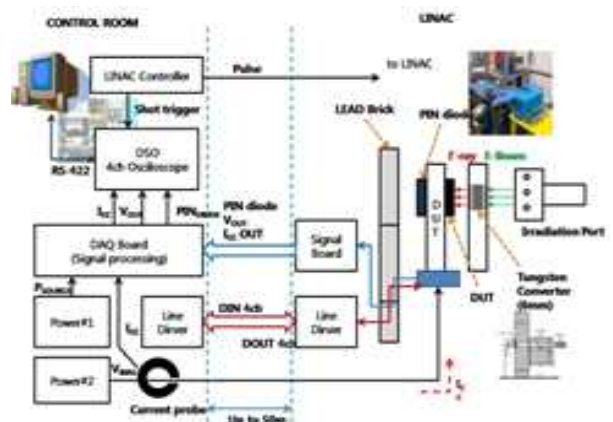


[그림 3] 군용장비 내 전자보드와 시험용 전자소자

고준위 펄스 방사선 조사에 사용된 전자소자는 현재 군에서 운용중인 장비를 대상으로 선정하였다. 그림 3의 보드는 군용장비에 사용되는 보드이며 이 보드에 사용된 전자소자 가운데 다양한 군장비에 범용으로 사용되는 전자소자를 선택하여 시험에 투입하였다. 소자는 일반 상용품으로 다양하게 사용되는 DC-DC 컨버터, TPS54315와 군사용급 연산증폭기, LM118을 선정하여 각각의 소자에 실측이 가능하도록 설계하여 시험용 DUT(Device Under Test) 보드를 제작하였다.

2.2.2 측정시스템 구성

전자가속기는 지하 2층에 설치되어있고 빔 제어 장치 및 신호측정 계측시스템 지상 1층에 위치하고 있다. DUT의 전자소자로부터 펄스방사선 조사에 대한 반응신호를 실시간으로 고속으로 측정하고 분석하는 계측시스템의 구성은 그림 4와 같다. 라인 드라이버를 통해 원거리에서 정확히 디지털 신호 송수신이 가능하도록 하였고 고속 신호취득(DAQ)를 통해 신호를 저장하고 분석하였다.



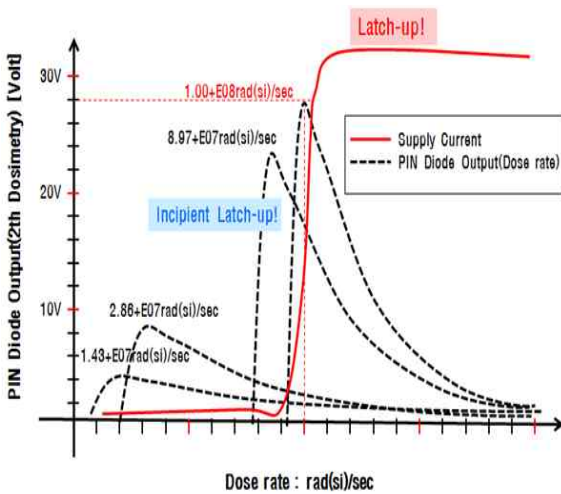
[그림 4] 펄스감마선 조사시험 계측구성

2.2.3 시험조건 및 방법

조사실험은 음극관의 인가전압과 펄스 지속시간 (Duration Time)을 조절하여 낮은 선량율로부터 점차 선량율을 증가시키는 과정에서 각각의 소자 반응특성을 순차적으로 측정/분석하였다. 대상 전자소자에 입력되는 정확한 선량율을 확인하기 위해 TLD(Thermoluminescence Dosimeter, 열형광선량계)과 함께 자체 제작한 PIN 다이오드와 전류측정 회로를 구성하여 입력 펄스방사선의 선량율의 값을 동시에 모니터링하였다.

2.2.4 시험결과

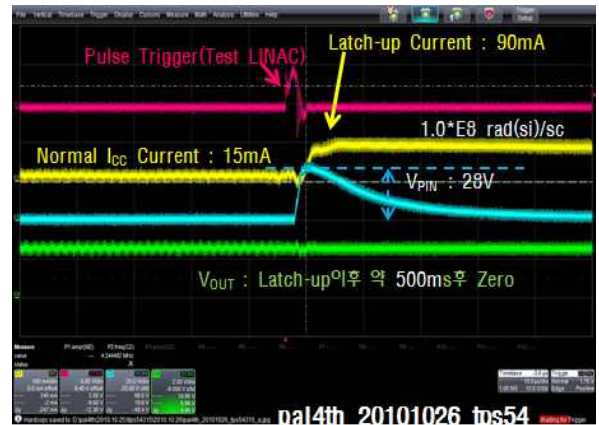
TPS54315의 측정결과 그래프인 그림 5에는 전자소자에 조사된 선량율 값의 크기에 따른 출력전류 형태를 보여주고 있다. 가장 낮은 선량율값  $1.43 \times 10^7$  rad(Si)/sec에서 작은 전류를 출력하였고 선량율의 증가에 따라 출력 전류값도 점점 증가된다. 그런데 이 순간적 펄스방사선에 의해 생성된 출력전류는 곧 원래의 정상상태의 출력 전류값으로 되돌아오게 되며, 이는 펄스방사선에 의해 생성된 전자-정공쌍에 해당하는 양 만큼의 전류를 비례적으로 출력하기 때문이다. 이러한 특성은 조사선량율이  $1.00 \times 10^8$  rad(Si)/sec에 도달하게 되면 더 이상 정상상태로 복원되지 않고 증가된 과전류가 계속 흐르는 상태를 유지한다. 실험에서와 같은 전류제한 기능이 없는 일반회로에서는 최대전류가 유도되어 소자에 고열과 소진(Burnout)을 유발하게 되며, 이 현상은 래치업(Latchup)으로 알려져 있다.



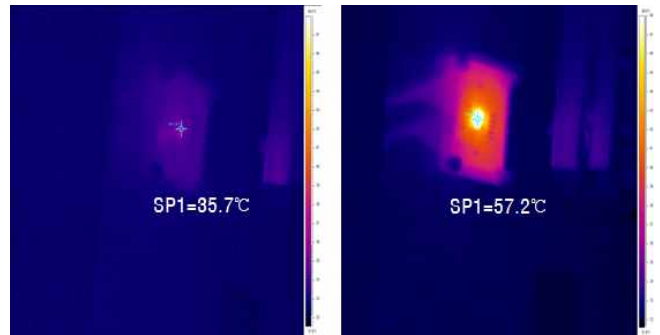
[그림 5] TPS54315 과도방사선 Latchup 특성

그림 6은 래치업 상태의 실험 오실로스코프의 화면을 캡처한 것으로 전류 제한값 90mA에 도달된

출력상태를 측정된 것이다. 이 상태를 정상상태와 비교하여 열영상카메라를 통해 관측한 것이 그림 7이며, 좌영상은 정상작동 상태의 TPS54315를 보여주고 우영상은 래치업 상태를 촬영한 것으로 온도의 급격한 상승을 관찰할 수 있다. 이를 통해 전류의 급격한 상승은 소자에서의 과열로 이어지는 래치업 현상에 기인한 것임을 확인할 수 있다.

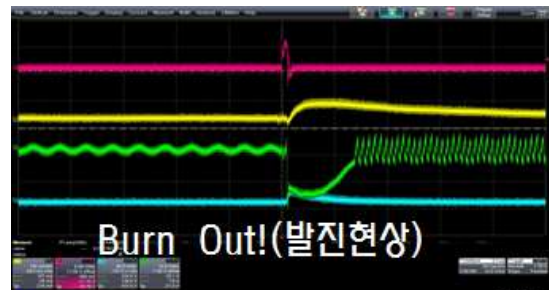


[그림 6] TPS54315 과도방사선 반응파형 (Osc.)



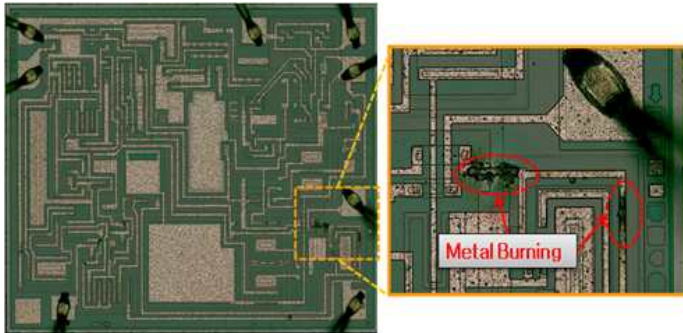
[그림 7] 펄스방사선 조사 전(좌), 후(우)의 열영상 변화

그림 8은 LM118에 대한 동일 조사실험 과정의 결과 측정 오실로스코프 화면으로 TPS54315 보다 낮은 선량율( $8.94 \times 10^7$  rad(Si)/sec)에서 래치업 상태에 도달하고 있음을 알 수 있다.



[그림 8] LM118소자의 과도방사선 반응파형 (Osc.)

특이 현상은 과전류의 발생과 동시에 소자에서 연기가 발생한 것이다. 실험 종료 후 소자를 디캡(Decap)한 사진을 그림 9이다. 칩을 제거한 기관상태의 일부 금속라인이 검은색으로 타버린 사진을 통해 과전류 생성에 의한 발열이 소진상태에 도달했음을 보여주고 있다.



[그림 9] 펄스방사선 조사후 LM118소자 내부 Decap. 사진

### 3. 결론

본 연구에서는 펄스형태의 고준위 방사선에 대한 전자부품/장비의 내방사선관련 기초연구로 군 전자부품에 대한 피해분석 실험을 수행하였다. 과도방사선을 모사하기 위해 감마선 변환장치를 MCNP 설계를 통해 제작하고 단일모드의 마이크로초 단위 감마펄스 방사선을 방출시켜 두 종의 전자소자에 대해 조사하였다. 온라인 고속 측정장치를 통한 실험결과 두 종 모두에서 래치업 현상이 관측되었으며, 군용 사양 LM118소자는 소진현상까지 전개되는 심각한 펄스방사선 피해가 나타났다. 펄스방사선에 의한 군용전자 소자의 피해현상 관측실험은 열영상카메라 촬영을 통한 확인과 소자의 디캡을 통해 소자내부의 상태 검증과정으로 신뢰성을 높일 수 있었다. 본 시험결과에서 나타난 군용 반도체의 과도방사선 피해현상을 통해 우리나라 군용 전자부품 및 전자장비에 대한 과도방사선 피해연구 및 이를 기반으로 한 내방사선 연구가 시급히 필요함을 인식하게 되었다.

### 참고문헌

- [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

- [4] K.M. Cham, S.-Y. Oh, D. Chin and J.L. Moll, Computer-Aided Design and VLSI Device Development, Kluwer Academic Publishers (KAP), 16. [ISBN9780898382044](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2044-4)