ISSN 1975-8359(Print) / ISSN 2287-4364(Online)
The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 62, No. 10, pp. 1421~1424, 2013
http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2013.62.10.1421

펄스방사선에 대한 전자장비 방호용 모듈구현 및 기능시험

Implementation of the Radiation Protection Module for Electronic Equipment from Pulsed Radiation and Its Function Tests

이 남 호*
(Nam-Ho Lee)

Abstract - The electronic equipment which is exposed to high level pulsed radiation is damaged by Upset, Latchup, and Burnout. Those damages come from the instantaneous photocurrent from electron-hole pairs generated in itself. Such damages appear as losses of a power in military weapon system or as a blackout in aerospace equipment and eventually caused in gross loss of national power. In this paper, we have implemented a RDC(Radiation detection and control module) as a part of the radiation protection technology of the electronic equipment or devices from the pulsed gamma radiation. The RDC, which is composed of pulsed gamma-ray detection sensor, signal processors, and pulse generator, is designed to protect the an important electronic circuits from the a pulse radiation. To verify the functionality of the RDC, LM118s, which had damaged by the pulse radiation, were tested. The test results showed that the test sample applied with the RDC was worked well in spite of the irradiation of a pulse radiation. Through the experiments we could confirm that the radiation protection technology implemented with the RDC had the functionality of radiation protection for the electronic devices.

Key Words : Transient radiation, Pulsed Gamma-ray, Radiation protection, Functional test

1. 서 론

동위원소로부터 방출되는 연속적인 방사선과는 달리 핵폭에서 방출되는 펄스형 방사선은 폭발초기에 순간적으로 발생되는 즉발감마선(Prompt gamma-rays) 및 중성자선원(Neutrons)과 함께 비교적 긴 시간동안 전달되는 지연방사선(Delayed gamma-rays)으로 나뉘며, 이 가운데 고속의 즉발 감마선은 전자소자의 전기적 특성을 변화시킴과 동시에 일시적 과도현상에 의한 다양한 형태의 피해현상을 발생시킬 수 있고 나아가 전자시스템 전체에 심각한 고장을 유발하게 된다[1-4]. 이 과도선량률효과(Transient dose-rate effects)는 반도체 소자의 pn 접합면 및 공핍층 확산거리 내에서 이온화 현상으로 생성된 전자-전공 쌍(Electron-hole pair, EHP)에 기인한 순간 광전류(Photocurrent)가 주요 원인으로 알려져 있다[5]. 생성된 광전류는 트랜지스터를 개방시키거나 플립-플롭(Flip-Flop)과 메모리 셀(Memory cell)의 논리상태(Logic state)를 변화시키기도 하고, CMOS 소자의 내부에 기생 p-n-p-n 구조를 형성시켜 래치업(Latch up) 현상을 발생시키게 된다[6,7]. 이러한 초기 핵방사선에 의한 반도체 소자의 피해현상을 확인하기 위해 앞서 기 수행한 군용 전자소자의 펄스방사선 조사시험에서는 대부분의 소자에서 다양한 피해현상이 관측되었다[8]. 이 가운데 LM118 소자에서는 경우 약 1×10^8 rad(si)/sec의 선량률 조건에서 소진(Burnout) 현상의 심각한 피해현상이 발생되어 핵폭 방출 펄스형 방사선에 의한 방호기술 개발의 필요성이 확인되었다.

본 연구에서는 반도체 소자의 과도 선량률 효과에 의한 피해현상 실험을 통해 이를 유발하는 원인을 분석하고, 펄스형 방사선 피해로부터 반도체를 보호할 수 있는 내방사선 기술을 개발하여 실측시험에서 피해가 심각했던 LM118 소자를 대상으로 내방사화 기술의 실증시험을 수행하였다.

* Corresponding Autuor : Dept. of Nuclear Convergence Technology Development Korea Atomic Energy Research Institute, Korea
E-mail : nhlee@kaeri.re.kr
Received : February 18, 2013; Accepted : September 24, 2013

2. 과도방사선 효과 및 실측시험

2.1 과도방사선의 전자소자 영향

과도펄스 감마선이 반도체 소자에 입사하면, p-n 접합의 공핍영역에서 과잉 소수 캐리어가 발생되고, 이 캐리어들은 접합 전계에 의해 각각 p-n 영역으로 끌려가며 순간 광전류에 기인하게 된다. 입사 감마선의 선량률에 따른 p-n 접합에서 발생되는 광전류를 Wirth-Rogers는 다음과 같은 식으로 설명하였다[9].

$$I_{pp}(t) = eA[W_t G + \frac{1}{\sqrt{\pi}}\int_0^t G(t-u)\times (\sqrt{D_n}e^{-u/\tau_n} + \sqrt{D_p}e^{-u/\tau_p})\frac{du}{u}] \quad (1)$$

여기서, e는 단일전하량, A는 접합 면적, W_t는 공핍영역의 폭, G는 전하생성상수와 흡수된 선량율의 곱, t는 펄스 폭, D_n과 D_p는 각각 p와 n영역에서의 소수캐리어 확산계수,

τ_n과 τ_p는 전자와 정공의 소수캐리어 수명시간이다.

이러한 과도펄스 방사선에 의해 소자 내부에서 발생된 광전류는 과전류 형태로 출력되어 다양한 형태의 전자소자에 직접적인 피해현상을 초래하게 된다.

2.2 군용 전자소자의 과도방사선 효과 실측시험

펄스 감마선에 대한 피해현상을 실측하기 위해 먼저 전자빔을 텅스텐(W) 표적에 조사하여 제동복사(Bremsstrahlung)에 의해 생성된 감마선으로 핵폭발 방출 펄스형 감사방사선을 모사하였다. 이때 생성된 감마선은 전자빔과 동일한 펄스폭과 최대 에너지를 갖는다. 최대출력 에너지 60MeV의 포항가속기연구소 선형가속기(Test LINAC)로부터 발생된 전자빔을 두께 6㎜ 텅스텐에서 변환시킨 감마 펄스방사선을 전자소자에 조사하여 온라인으로 반응특성을 계측하는 시험을 진행하였다. 실측실험에서는 여러 가지 전자소자에서 Latchup과 Upset과 같은 펄스방사선 영향이 나타났으며, LM118에 대해서는 과전류로 인한 소진 현상이 그림 1과 같이 측정되었다.

그림 1은 LM118에 대한 과도방사선 시험의 측정 오실로스코프 화면으로 LM118은 일정 선량률(8.94×10^7 rad(Si)/sec) 이상에서 래치업 상태에 도달한 상태를 나타내고 있고, 실험 종료 후 소자를 디캡(Decap)한 사진이 그림 2이다. 칩을 제거한 기판 중앙의 일부 금속라인이 검게 타버린 것으로 보아 과전류 생성에 의한 발열로 소진이 발생했음을 알 수 있다.

그림 1 LM118 소자의 과도방사선 반응파형
Fig. 1 Transient radiation response of LM118

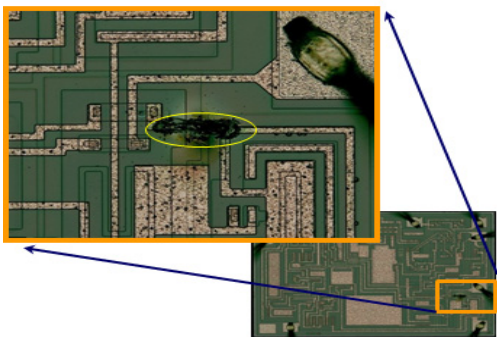

그림 2 펄스방사선 조사 후 LM118 내부 Decap. 사진
Fig. 2 Photo of decapsulated LM118 after pulse irradiation

이와 같은 전자소자 단위에서의 과전류에 의한 과열 및 발화는 전자보드 단위의 손상을 초래하고 나아가 장비전체의 고장 및 기능손실로 발전될 가능성이 있다. 이 실험 결과는 군용 전자장비 내의 전자소자가 펄스방사선에 취약하다는 사실과 더불어 펄스방사선에 대한 내방사선화의 필요성을 알려주고 있다.

3. 과도방사선 고속탐지 및 방호신호 발생기술

과도선량율 효과에 대한 내방사선화 기술로는 SOI 반도체 공정기술과 광전류 보상회로를 통한 광전류신호 억제기술 등이 있으나 반도체 공정이나 시스템의 재설계로 인해 높은 비용과 장기간의 개발기간이 요구된다. 이에 반해 핵폭발 초기에 순간적으로 발생되는 고선량의 즉발감마선으로부터 방출되는 짧은 시간동안만 일시적으로 시스템의 전원을 차단 및 복원함으로써 전자시스템을 방호하는 펄스방사선 회피기술은 기존의 시스템에 대한 큰 설계변화 없이 간단한 장치구성이 가능하므로 적용성 및 비용적인 측면에서 효과적인 방법이다. 이 방사선 감지 및 제어장치(Radiation detection and control module, RDC)는 반도체 센서를 사용해 펄스신호를 검출하고, 이 검출신호로부터 보호대상 시스템의 전원 공급을 일시적으로 차단한 다음, 일정 시간 경과 후 정상상태로 복원시키는 기능이 구현된 것이다.

그림 3은 설계된 RDC 회로의 기능 구성도로서 펄스 방사선 센서회로와 증폭기, 래치회로, 타이머 회로, 그리고 NOR 회로 및 출력단으로 설계되어 있다.

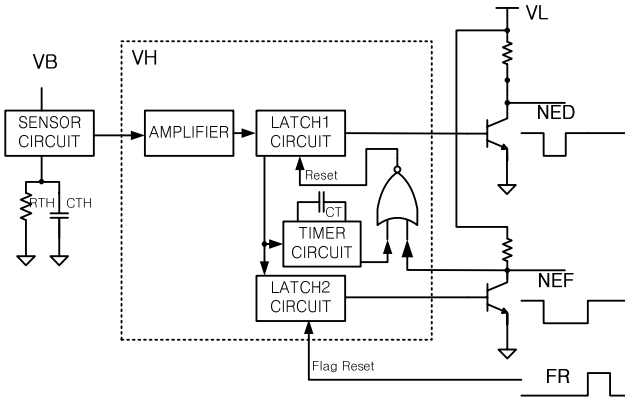

그림 3 RDC 회로의 기능구성도
Fig. 3 Functional block diagram of RDC Circuit

설계 회로는 센서 출력이 증폭기를 거쳐 래치 1을 트리거시키면 타이머회로의 지연시간 없이 전원제어 출력신호를 고속으로 발생시키고, 일정 시간 후 타이머 회로와 NOR 게이트를 통해 다시 출력신호를 복귀시키는 기능을 수행한다. 출력신호에 따라 보호대상 소자의 전원의 차단과 복귀가 연동되며, 전원의 효율적 차단을 위해서는 추가적인 전원 단속회로(Crowbar circuit)의 부가설계가 필요하다.

4. 과도방사선에 방호기술 적용시험

4.1 과도방사선 탐지 및 방호기술을 적용한 내방사선 실측평가시험의 구성

과도방사선 조사시험을 통하여 소진현상이 확인된 2개의 LM118 샘플소자에 대해 RDC 적용 및 펄스방사선 방호기능 실증시험을 수행하였다. 그림 4는 실증평가 시험을 위한 두 개의 LM118 소자, 펄스감마선을 검출하여 전원단속 제어출력을 발생시키기 위한 RDC, 그리고 RDC 출력신호를 입력으로 보호대상 LM118 소자의 전원을 효율적으로 차단하는 기능의 전원 단속회로(Crowbar circuit)로 구성된 시험장치를 보여주고 있다. 그림 5는 설계한 시험장치를 전자빔 포트 전면에 설치한 평가시험 실물모습이다.

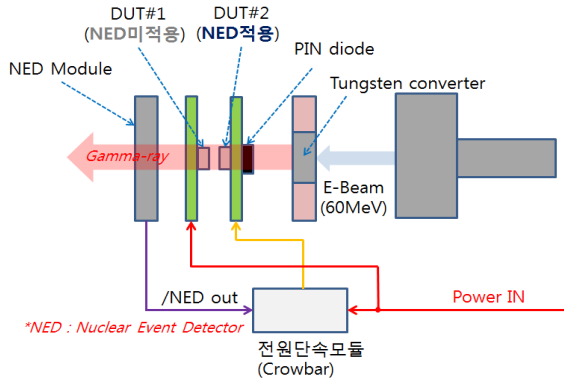

그림 4 RDC 적용 LM118소자 방호실증 시험구성
Fig. 4 Test configuration of LM118 with RDC

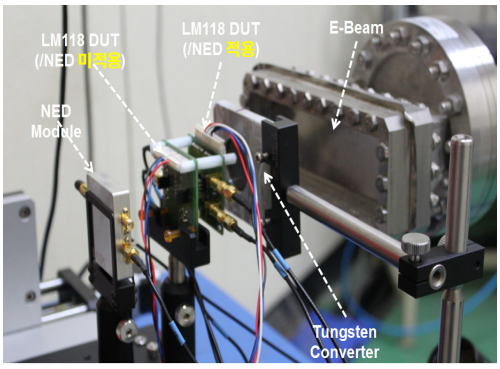

그림 5 LM118의 방사선 평가시험장치
Fig. 5 Test fixture for LM118 with RDC

내방사선 평가 실증시험 방법은 2개의 동일한 LM118 샘플 중 1개에 대해서만 RDC 및 전원단속 기능을 적용한 상태에서, 동시에 펄스감마선을 조사시켜 각 샘플의 피해현상을 확인 과정으로 진행된다. 이 실험에서는 RDC를 적용한 소자를 전자빔 포트로 부터 가까운 거리에 위치시켜 거리에 따른 감쇄요인에 대한 보수적인 조건을 적용하였다.

4.1 실증평가시험 결과 및 분석

LM118 소자에 대해 RDC를 이용한 펄스방사선 내방사선화 실증시험은 포항가속기의 Test LINAC에서 동일한 조건으로 진행되었으며 그 결과를 그림 6에 나타내었다. 이 결과 그래프에서 동일한 펄스감마선 조사조건에서 내방사선 기술이 적용되지 않는 시험소자(DUT #1)는 펄스방사선 조사 직후 과전류가 발생되었고, 곧 이어 래치업과 소진현상이 관측되었다. 이 현상은 그림 7의 적외선 영상(오른쪽 소자)에서 과열현상(129.8도)으로도 확인할 수 있었다. 그러나 RDC로 내방사선 기술이 적용된 소자(DUT #2)의 경우 펄스방사선 조사에도 불구하고 정상적인 동작 상태임을 출력신호로 알 수 있었으며, 적외선 영상(그림 7의 왼쪽소자, 42.8도) 결과도 정상상태의 온도를 보여주고 있었다. 이러한 결과는 동일한 펄스방사선에 대해 RDC의 적용만으로 전자소자의 보호기능이 작동됨을 확인시켜 주는 것으로서, 개발한 펄스방사선에 대한 내방사선화 기술이 성공적으로 구현되었음을 알 수 있다.

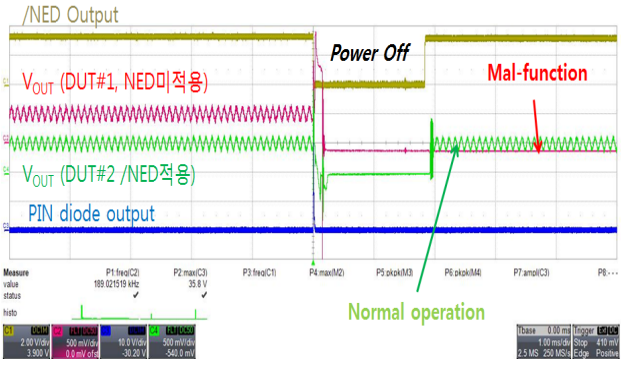

그림 6 LM118의 펄스방사선 방호 실측시험 결과
Fig. 6 Test result of LM118 to the pulse radiation

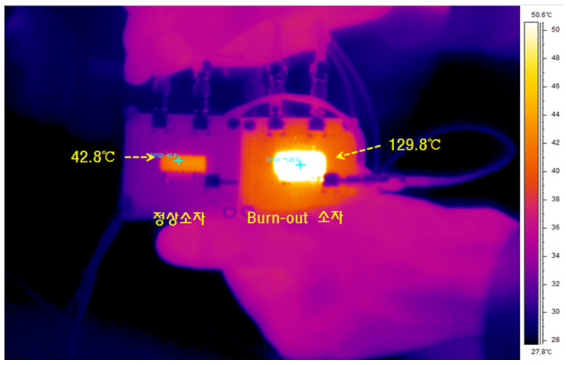

그림 7 LM118의 RDC 적용시험 결과
Fig. 7 Test result IR image of LM118 with RDC

5. 결 론

본 연구에서는 펄스형 방사선으로부터 전자소자 및 시스템을 방호할 수 있는 방사선화 기술에 대해 살펴보았다. 펄스방사선의 노출로 인해 심각한 손상이 초래되는 대표적 군

용 전자소자인 LM118을 대상으로 자체 설계한 내방사선 기술을 적용하고 실측시험을 통해 설계기능을 검증하였다. 펄스 방사선 방호를 위해, 반도체 센서와 신호처리기 및 펄스 발생기로 설계한 RDC는 핵방출 펄스방사선을 신속히 탐지하여 펄스방사선 보호용 제어신호를 고속 출력하는 역할을 수행한다.

개발한 RDC의 방호기능 검증을 위해 펄스방사선에 취약한 특성을 나타낸 LM118 소자를 대상으로 RDC를 적용한 펄스방사선 실측시험을 포항가속기 연구소 Test LINAC에서 수행하였다. 시험은 동일한 두 개의 샘플을 대상으로 RDC의 적용 유무에 따른 펄스방사선 피해현상 발생을 실측하고 분석하는 과정이었다. 실험결과 RDC가 적용되지 않은 소자는 과전류에 의한 소진 현상이 나타난 반면 RDC가 적용된 LM118 소자는 정상적인 동작 상태를 유지하였다. 실측결과를 통해 펄스방사선 방호기술이 성공적으로 구현되었음을 확인할 수 있었다.

본 연구내용은 군분야와 더불어 우주항공분야에서의 우주방사선 방호분야에도 적용 가능성이 높을 것으로 예상된다.

Acknowledgements

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MEST) (No. : 2011-0031840)

References

[1] Seung-Chan Oh, Nam-Ho Lee, Heung-Ho Lee, “The Study Transient Radiation Effects on Commercial Electronic Devices”, The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol.61, No. 10, pp. 1448-1453, 2012.

[2] Sang-Hun Jeong, Nam-Ho Lee, Min-Su Lee, Seong-Ik Cho, “A Study of CMOS Device Latch-up Model with Transient Radiation”, The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol.61, No. 3, pp. 422-426, 2012.

[3] Messenger G. C., “Transient Radiation Effects on Electronics”, IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 33, no. 5, pp. 1125, 1986.

[4] Darwish M. N., Dolly M C., Goodwin C. A., “Radiation Effects on Power Integrated Circuits”, IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 35, no. 6, pp. 1547-1551, 1988.

[5] Chugg A. M., “Ionising Radiation effects: a vital issue for semiconductor electonics”, Engineering Science and Education Journal, vol. 3, no. 3, pp. 123-130, 1994.

[6] Sullivan D. C., “Transient Radiation-Induced Response of MOS Field Effect Transistors”, IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 12, no. pp. 31-37, 1965.

[7] Johnson A. H., Swift G. M., Edmonds L. D., “Latchup in Integrated Circuits from Energetic Protons”, IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 44, no. 6, pp. 2367-2467, 1997.

[8] Nam-ho Lee, Seung-Chan Oh, Sang-Hun Jeong, “Transient Gamma-ray Pulse Radiation Damage Analysis of Electronic Devices Used in Millitary Equipment”, 2012 the Korea Institute of Millitary Scinece and Technology Conference, 2012.

[9] Alexander D. R. , “Transient Ionizing Radiation Effects in Devices and Circuits”, IEEE Transactions on Nuclear Science, No. 3, pp. 565-582, 2003.

저 자 소 개

이 남 호 (李 南 昊)

1991년 경북대학교 전자공학과 학사 졸업, 1993년 경북대학교 전자공학과 석사 졸업, 2004년 충남대학교 전기공학과 박사 졸업, 현재 : 한국원자력연구원 원자력융합기술개발부 책임연구원 및 충남대학교 겸임교수

주관심분야 : 내방사선 전자시스템 및 OF 센서연구, 방사선 3차원 형상화연구