
전자소자의 과도방사선피해 평가체계 구축 연구

이남호* · 황영관** · 김종열** · 정상훈** · 오승찬**

A Study on Implementation of Transient Radiation Effects on Electronics(TREE) Assessment System

Nam-Ho Lee* · Young-Gwan Hwang** · Jong-Ryul Kim** · Sang-Hun Jeong** · Seung-Chan Oh**

이 논문은 포항가속기연구소(PAL)와 World Class University(WCU)의 기술지원 및 국방과학연구소의 국방핵심기술개발사업의 일환으로 수행하였음

요 약

본 논문에서는 초기 핵 펄스방사선에 대한 군 무기체계내의 반도체 소자에 대한 피해를 분석하기 위해 피해평가 모델개발 연구를 수행하였다. 우선 핵 펄스방사선을 입력신호로 모델링하고 물성과 구조특성에 따라 정밀하게 모델로 구현한 다이오드 소자에 인가하여 소자내부에서 생성되는 전하들의 거동을 모사하고 출력특성을 분석하였다. 구축한 펄스방사선 피해 평가모델의 신뢰성 검증을 위해서 모델링한 소자와 동일한 공정변수로 제작한 다이오드 소자에 대해 유사한 특성의 펄스 방사선을 조사하고 출력전압의 순간 변화량을 실측하는 실험을 진행하였다. 실험결과 얻은 실측값은 동일소자의 모델에 대한 입력 펄스방사선의 출력 시뮬레이션 결과와 22.9%의 오차를 보여 개발한 피해평가 모델을 통해 핵 펄스방사선의 전자소자 피해현상을 비교적 정확히 모사하고 있음을 확인할 수 있었다.

ABSTRACT

In this paper, we performed a study of damage assessment model development to analyze the initial nuclear pulse radiation damage to semiconductor devices for military weapon systems. At first we modeled(M) the nuclear pulse radiation and diode device, and simulated(S) the output characteristics of the device to the input, Then the manufactured diodes which had the same characteristics with the modeled one were irradiated to the similar pulsed type radiation and their output signals were measured simultaneously. Error between the M & S results and the measured values of the analysis was 22.9%. Through the error value we could confirm that the damage assessment model simulated the TREE effects with a quite accuracy.

키워드

펄스방사선, 피해현상, 평가체계, 평가모델, 감마방사선, 선량율

Key word

Pulse Radiation, Damage Effect, Assessment System, Analysis Model, Gamma-Radiation, Dose rate

* 정회원 : 한국원자력연구원(nhlee@kaeri.re.kr)

접수일자 : 2012. 08. 23

** 정회원 : 한국원자력연구원

심사완료일자 : 2012. 09. 19

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2012.16.10.2329>

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서 론

핵폭발 시 발생하는 펄스방사선은 군 전자장비에 심각한 손상을 유발하게 되는데, 이를 펄스방사선효과 (Transient Radiation Effects on Electronics, TREE)[1] 라 한다. 핵폭발에 의한 군 전자장비의 심각한 피해는 주로 초기에 발생하는 높은 에너지와 선량을 가지는 즉발 감마 펄스선(prompt gamma pulse)[2]에 기인한다고 알려져 있다. 핵폭발 후 초기에 고속으로 전달되는 감마 펄스방사선은 전자소자/장비에 Upset, Latchup, Burnout[3] 등의 영향을 미치며, 심각한 경우 복구 불가능한 심각한 손상을 일으키거나 전자장비의 전체 기능 마비로 이어지기도 한다.

펄스방사선 피해를 분석하고 대비하는 기술은 대부분 미국과 유럽 등 국방기술 선진국에서 군 무기체계 뿐만 아니라 민간산업의 통신 및 전력시설 등 국가 기간망의 피해를 최소화하기 위해 오랜 기간을 거쳐 연구개발해 오고 있다. NASA[4]나 SNL(Sandia National Laboratory)[5]과 같은 방사선 관련 국가연구기관에서는 우주방사선이나 핵폭발에서 방출되는 펄스형 방사선에 대한 연구와 함께 다양한 반도체 소자에 대한 펄스 방사선 피해현상 실측연구를 수행하고 그 결과를 축적하여 데이터베이스로 관리해오고 있다. 또한 반도체 내부로 입사된 펄스방사선의 핵적 전하거동 특성을 모사하기 위해 반도체 소자와 입력 펄스방사선을 수치적 기반으로 정밀 모델링하는 기술을 연구하고 있다.

최근의 연구는 인공위성이나 무기체계에 사용되는 다양한 종류의 전자소자에 대한 핵방출 펄스방사선의 피해현상을 효율적으로 분석하기 위해 반도체 소자의 3D 모델[6-7]에 펄스방사선 입력함수를 적용하여 피해 특성을 정밀하게 분석하는 피해평가 모델 기반 ‘펄스방사선 피해평가 체계’ 개발에 역량을 집중하고 있는 추세이다. 이 피해평가 체계는 현실적으로 한계가 있는 전체 소자에 대한 펄스방사선의 실측시험이 없이도 피해평가 모델을 대상으로 펄스 방사선에 대한 신뢰성 있는 분석이 가능하다. 즉, 초기 모델 구축 후 펄스방사선의 조건과 반도체 구조, 물질, 공정 등의 특성변인이 용이하여 다양한 방사선 조건 및 수많은 반도체 소자에 대한 정성적인 펄스방사선 피해예측이 가능한 장점을 지니게 된다.

본 논문에서는 PIN 다이오드를 대상으로 핵폭발출

펄스형 방사선을 입력 신호로 모델링하여 소자 구조와 공정변수에 따라 3D 모델링한 반도체 소자에 입력한 후, 입력 방사선신호로 인해 소자 내부에서 생성된 전하의 거동을 모사하고 소자의 출력특성을 분석하였다. 또 동일한 조건으로 제작한 PIN 다이오드를 핵방출 방사선과 유사한 펄스형 감마 방사선을 발생시켜 조사하고 순간 반응결과를 실측하였다. 이상의 두 과정에서 얻은 대상 소자의 측정 결과값과 모델 소자의 출력 모사결과를 정량적으로 비교하여 PIN 다이오드 소자에 대한 피해평가 모델 구축의 신뢰성을 검증하였다.

II. 본 론

2.1. 핵방사선 과도펄스 입력신호 M&S

펄스 감마선에 의한 반도체 소자의 피해현상을 분석하기 위한 ‘피해현상 모델 구축’은 대상 전자소자의 정밀 3D 모델링뿐만 아니라 모델소자의 입력 펄스방사선도 수치적 모델이 동시에 개발되어야 한다.

펄스 방사선은 $1 \times 10^8 \text{ rad/s}$ 이상에서 반도체 소자 내부에 피해현상을 유발하므로 실측에서의 기준과 동일한 세기를 펄스 입력방사선 기준으로 설정하였다.

반도체 소자의 매질인 실리콘에서 $1 \times 10^8 \text{ rad/s}$ 의 에너지를 받을 때 발생하는 전자전공쌍(Electron Hole Pairs: EHPs)을 에너지로 변환하면

$$1 \times 10^8 \text{ rad/s (Si)} = 1 \times 10^6 \text{ J/kg} \cdot s (\text{Si}) \quad (1)$$

$$= 2.33 \times 10^3 \text{ J/cm}^3 \cdot s$$

이 에너지에 의해 발생하는 전자전공쌍의 수를 계산하면

$$(2.33 \times 10^3 \text{ J/cm}^3 \cdot s) \times (EHPs/3.6 \text{ eV}) \quad (2)$$

$$= 4.04 \times 10^{21} \text{ EHPs/cm}^3 \cdot s$$

계산된 전자전공쌍의 수로부터 입사 방사선량을 도출하면 광 입사 시 순간 방사광 선량에 의하여 발생하는 전자전공쌍의 수는 다음 식을 따른다.

$$G = \frac{\alpha P_0}{hv} \cdot \exp(-\alpha x) \quad (3)$$

여기서, G 는 전자정공쌍의 생성율, P_0 는 입사된 빛의 세기로 단위면적당 입사되어야 하는 선량, h 는 플랑크 상수, ν 는 빛의 주파수를 의미한다. 수식 2과 수식 3으로부터 P_0 에 관하여 정리하면

$$P_0 = \frac{2.33 \times 10^{21} \times 1.98 \times 10^{-13}}{9 \times 10^{-2}} = 8.868 \times 10^9 \text{ W/cm}^2 \quad (4)$$

그리고, 흡광계수(extinction coefficient) K 는

$$K = \frac{\alpha \lambda}{4\pi} = (0.1/\text{cm}) \times (1 \times 10^{-10} \text{ cm}) / 4\pi = 8 \times 10^{-13}$$

따라서 $1 \times 10^8 \text{ rad/s}$ 의 감마선은 $8.868 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ 의 단위면적당 입사 선량으로 변환된다.[8]

2.2. PIN 다이오드 펄스방사선 영향 M&S

PIN 다이오드 피해평가 모델 개발을 위하여 실제 제작 공정에 맞게 TCAD를 이용하여 PIN 다이오드 모델링을 진행하였다. 그림 1은 모델링 결과를 나타낸 것이고, 모델링 소자 면적은 $1\text{mm} \times 1\text{mm} \times 1\text{mm}$ 이며 PIN 다이오드 제작 공정 조건은 표 2에서 보여준다.

PAL Test Linac의 펄스방사선량은 $1 \times 10^8 \text{ rad/s}$ 로 시뮬레이션에 입력하기 위해서는 단위 면적당 $W(\text{Watt})$ 로 변환하여야 한다.

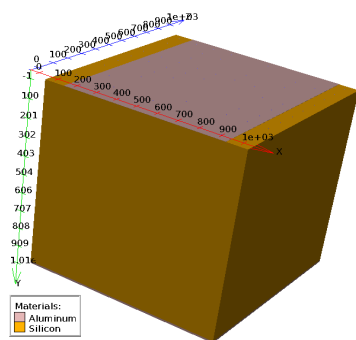


그림 1. PIN 다이오드 3D 모델링
Fig. 1 The 3D Modeling for the PIN Diode

표 1. 과도 감마선의 시뮬레이터 입력 변수
Table. 1 Input parameters of the simulation for transient gamma ray

Parameters	Values
Index of refractivity (silicon, real)	1
Index of refractivity (silicon, imaginary)	8×10^{-13}
Wave length	$1 \times 10^{-6} \mu\text{m}$
Input angle	90°
Gamma photon energy	1.24 MeV
Absorption coefficient	0.1/cm
Minimum power	$8.868 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$

앞서 설명한 수식을 이용하여 W 로 변환하면 $8.83 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ 가 되며, 이 임펄스 형태의 입력을 100ns 동안 PIN 다이오드에 인가하였다.

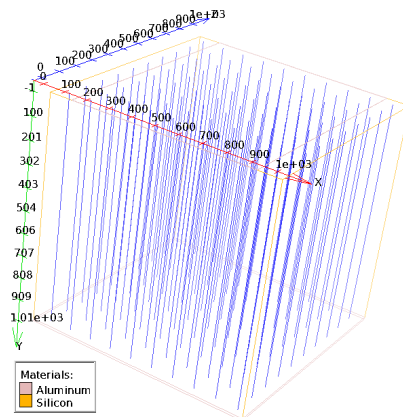


그림 2. 펄스방사선 입력 모사
Fig. 2 The simulation of the pulse radiation input

그림 2에 PIN 다이오드에 펄스방사선을 입력한 모델의 형태이며 그림 3은 입력 펄스방사선 인가시 수직방향으로 방사광이 입사되는 시뮬레이션 과정을 보여준다. 시뮬레이션 결과 그림 3과 같이 최대 출력전류는 4.086 mA가 발생하였다.

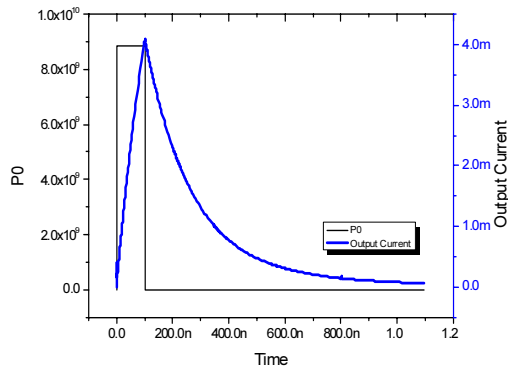


그림 3. PIN 다이오드 광전류 출력 결과
Fig. 3 The photo current output of the PIN diode

표 2. PIN 다이오드 공정 조건
Table. 2 Conditions for the PIN Diode fabrication

Wafer 종류 및 결정방향	n-type (111)
두께(μm)	1.0
I층 농도 (Wafer 비저항: $\Omega \cdot \text{cm}$)	3,000
Dopant (Front side : B)	2×10^{16}
Dopant (Back side : Ph)	2×10^{16}
면적(mm^2)	1.0×1.0

표 2의 PIN 다이오드 공정 조건을 이용하여 제작된 다이오드를 보여준다.

2.3. PIN 다이오드 펄스방사선 실측시험

제작한 PIN 다이오드의 펄스방사선 실측 실험을 진행하기 위하여 그림 4와 같이 DUT 보드를 제작하기 위해 다이오드의 전류를 관측하기 위한 저항 R1과 오실로스코프 상에서 누설전류에 의한 DC 성분을 제거하기 위하여 C1, R2를 추가하여 설계하였다. 그림 5는 PIN 다이오드 펄스방사선 실험 PAL Test LINAC에서 진행한 펄스방사선 조사 및 실측과정의 사진을 보여준다.

감마펄스 방사선 세기는 $1 \times 10^8 \text{rad/s}$ 로 텅스텐 변환기를 거쳐 PIN 다이오드에 입력되며 수십 차례에 걸쳐 반복 시험을 진행하면서 2차 Dosimeter TLD를 이용하여

정규화 한 결과 60V의 역방향 바이어스를 인가한 상태에서 50V의 출력이 발생하는 것을 확인하였다.

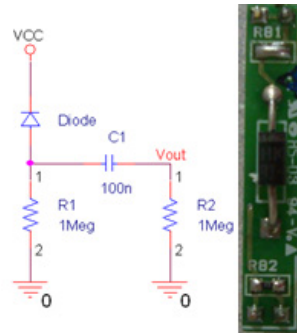


그림 4. PIN 다이오드 DUT 보드
Fig. 4 The PIN diode DUT board

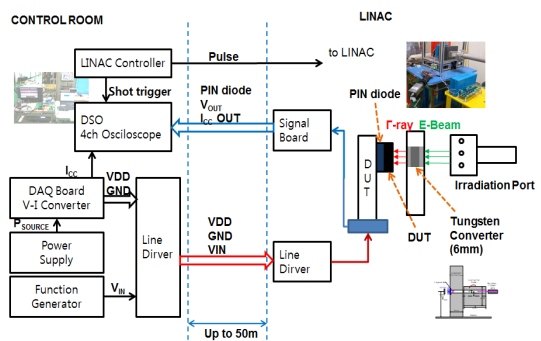


그림 5. Test LINAC 온라인 측정 시험장치도
Fig. 5 The on-line measurement configuration of the LINAC facility

제작한 PIN 다이오드의 구조는 $1\text{mm} \times 1\text{mm} \times 1\text{mm}$ 으로 2차원으로 계산 하였을 경우 PIN 다이오드의 면적은 1mm^2 , 빔 스팟 범위는 π^2 으로 $4.62\pi\text{mm}^2$ 이므로 $1/66.48$ 로 감소되어 입력된다고 볼 수 있다. 그림 7은 PIN 다이오드 펄스방사선 출력결과로 60V의 역방향 바이어스를 걸어준 상태에서 출력 전압이 약 50V 발생하였다. Load 저항이 $1\text{M}\Omega$ 이므로 전류는 $50\mu\text{A}$ 가 발생했다고 할 수 있으며 펄스방사선이 퍼지지 않고 PIN 다이오드에 전부 입력된다고 가정하면 3.321mA 가 발생됨을 알 수 있다.

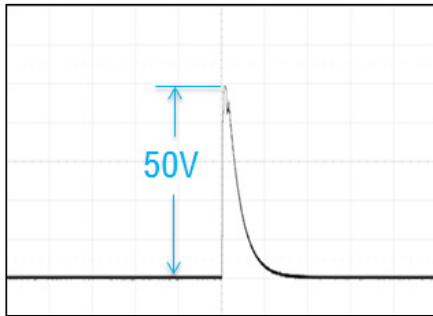


그림 6. PIN 다이오드 실측결과
Fig. 6 The result of the PIN diode for the pulse radiation test

2.4. 3D 모델의 시뮬레이션과 실측값의 비교

PAL Test LINAC 방사선 선량은 $1 \times 10^8 \text{ rad/s}$ 로 조사하였으며 M&S 시에는 W(Watt)로 변환하여 $8.83 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ 의 임펄스 형태의 세기로 100ns 동안 인가하였다. M&S 결과에서 최대 전류가 4.086mA가 발생하였고 실측에서는 최대 출력전압이 50V로 Load 저항이 1 MΩ이므로 50μA의 전류가 발생됨을 확인하였다. 시험과정에 측정된 펄스방사선 빔 스팟이 9.2mm로 넓게 퍼져 PIN 다이오드에는 방사선 선량이 전체의 약 1/66.48만이 입력되기 때문에 모두 PIN 다이오드에 입력된다고 가정하면 최대 출력 전류는 3.324mA가 발생할 것이다. 표 3은 M&S 결과와 실측 결과의 오차가 22.9%임을 보인다.

표 3. PIN 다이오드 M&S 값과 실측 값 비교
Table. 3 The comparison the M&S value and the measurement result for the PIN diode

		rad/s	P ₀ (W/cm ²)	전류 (mA)	면적비 환산 전류(mA)	오차
M&S		1.0 E+08	8.833 E+09	4.086	4.086	22.9%
실측 시험	빔직경 (9.2mm)		-	0.005	3.324	

III. 결 론

본 연구에서는 군 무기체계에 사용되는 다양한 전자 소자에 대한 핵방출 펄스방사선의 피해현상을 분석하기 위해 소자의 3D 모델에 펄스방사선 입력함수를 적용하여 피해 특성을 분석할 수 있는 ‘피해평가 모델’ 기반 ‘펄스방사선 피해평가 체계’구축을 위한 연구를 수행하였다. 전자소자 가운데 기본 소자인 PIN 다이오드를 대상으로 핵폭방출 펄스형 방사선을 입력 신호로 모델링하여 구조나 공정변수에 따라 3D 모델링한 대상 반도체 소자에 입력한 후 이로 인해 소자 내부에서 생성된 전하의 거동을 모사하고 소자 출력특성을 분석하고자 시도하였다.

그 결과 펄스 방사선에 의한 물리적 피해현상에 기인한 실측결과와 모델링과 시뮬레이션(M&S)를 통한 피해 분석 예상값의 오차가 22.9%로 측정되어 개발한 ‘피해평가 모델’ 기반 ‘펄스방사선 피해평가 체계’가 신뢰성을 가짐을 확인하게 되었다. 이 연구결과를 바탕으로 향후 CMOS를 비롯한 다양한 반도체 소자에 대한 펄스방사선 피해평가 연구를 진행하여 군 무기체계 전반으로 확대할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 포항가속기연구소(PAL)와 World Class University(WCU)의 기술지원 및 국방과학연구소의 국방핵심기술개발사업의 일환으로 수행하였습니다.

참고문헌

[1] George C. Messenger, “Transient Radiation Effects on Electronics”, IEEE Trans. Nuclear Science, vol. 33, no. 5, pp. 1125, 1986.
[2] Mohamed N. Darwish, Martin C. Dolly, Charles A. Goodwin, “Radiation Effects on Power Integrated Circuits”, IEEE Trans. Nuclear Science, vol. 35, no. 6, pp. 1547-1551, 1988.

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

[4] <http://www.nasa.gov/>

[5] <http://www.sandia.gov/>

[6] D. Kobayashi, K. Hirose, V. Ferlet-Cavrois, D. McMorro, T. Makino, H. Ikeda, Y. Arai, M. Ohno, "Device-Physics-Based Analytical Model for Single-Event Transients in SOI CMOS Logic", IEEE Trans. Nuclear Science, vol. 56, no. 6, pp. 3043-3049, 2009.

[7] Rathod. S.S, Saxena. A.K, Dasgupta, S, "Effect of Border Traps on Electron Mobility of Nano-Scale MOS Devices" Electronic System Design(ISED), 2010 International Symposium on, pp. 91-94, 2010.

[8] H. Spieler, "Semiconductor Detector Systems", Oxford University Press. 2008.

저자소개



이남호 (Nam-ho Lee)

1991년 경북대학교 전자공학과 (공학사)
 1993년 경북대학교 전자공학과 (공학석사)

2004년 충남대학교 전기공학과 (공학박사)
 현재: 한국원자력연구원 원자력융합기술개발부 책임연구원
 ※ 관심분야: 방사선 센서, 입체영상, 원격제어시스템



황영관(Young-gwan Hwang)

2008년 수원대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
 2010년 충남대학교 대학원 정보통신공학과(박사과정)

현재: 한국원자력연구원 연구원
 ※ 관심분야: 방사선 검색장치, X-ray 영상처리



김종열(Jong-yeol Kim)

2009년 한양대학교 전자전기공학부 (공학사)
 2011년 한양대학교 전기공학과(공학석사)

현재: 한국원자력연구원 연구원
 ※ 관심분야: 내방사선 광섬유, 광섬유 센서



정상훈(Sang-Hun Jeong)

2009년 전북대학교 대학원 전자정보공학부 (공학석사)
 2012년 전북대학교 대학원 전자정보공학부 (박사과정)

현재: 한국원자력연구원 연구원
 ※ 관심분야: 저전력/고성능 A/D Converter, PLL, Transient Radiation Modeling



오 승 찬(Seung-Chan Oh)

2000년 건양대학교 컴퓨터공학과 졸업(학사)
 2002년 동대학원 컴퓨터공학과 졸업(석사)

2008~현재 중남대학교 전기공학과 박사과정.
 현재: 한국원자력연구원 연구원
 ※ 관심분야: 방사선계측, 내방사선