

고준위 펄스방사선에 의한 전자소자 Latchup의 발생시험 및 분석

이남호* · 황영관 · 정상훈 · 김종열

An Experimental Analysis for a High Pulse Radiation Induced Latchup Conformation

Nam-ho Lee* · Young-gwan Hwang · Sang-hun Jeong · Jong-yeol Kim

Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-353, Korea

요 약

펄스 방사선에 의해 전자소자가 받는 영향으로는 Upset, Latchup, Burnout 등이 있다. 이 가운데 Latchup은 대상 소자에 회복 불가능한 영구손상(Permanent Damage)을 가져오게 되며 Burnout으로도 이어져 장비전체에 치명적 기능마비를 유발하기도 한다. 본 연구에서는 전자소자의 내부 공정설계 및 구조정보 활용이 불가능한 상황에서 실험을 통해서 펄스 방사선에 의한 Latchup 발생을 분석하고자 시도하였다. 소자를 전자빔변환 고준위 펄스 감마선 조사한 직후 수행한 전원제공 회로의 차단, 적외선 카메라의 열원측정, 그리고 손상발생 소자의 내부 회로분석의 세 단계별 확인과정은 펄스 방사선에 의해 유발된 Latchup임을 검증하는 효율적 방안으로 여겨진다.

ABSTRACT

When an integrated circuit device is burned out under high-intense radiation and device-level simulation that usually requires manufacturer's proprietary information is not available, experimental conformation of a failure mechanism is often the only choice. To distinguish Latchup from other causes experimentally, a new combination of multiple techniques have been developed and demonstrated. Power supply circumvention, hot-spot monitoring using an infrared camera, and supply current monitoring techniques were implemented for the conformation of the Latchup.

키워드 : 펄스방사선, 래치-업, 선량률, 광전류, 소진

Key word : Pulse radiation, Latchup, Dose rate, Photocurrent, Burnout

접수일자 : 2014. 10. 13 심사완료일자 : 2014. 10. 31 게재확정일자 : 2014. 11. 12

* **Corresponding Author** Nam-Ho Lee (E-mail : nhlee@kaeri.re.kr, Tel:+82-42-868-2931)

Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-353, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2014.18.12.3079>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©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.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서론

전자소자가 방사선 기준 이상으로 노출되면 내부에 과잉전하(Excess charges)가 생성되며, 이로 인해 고장이나 오작동이 발생할 수 있다. 이러한 손상은 반도체 소자에 따라 차이가 있으며 동종의 소자라도 제조 공정 변수에 따라 결과가 달라지기도 한다[1-3]. 손상원인을 정확하게 분석하기 위해서는 제조사로 부터 제공받은 소자 설계정보를 바탕으로 한 소자의 방사선 영향 시뮬레이션이 가장 정확하다고 알려져 있으나 기술공개 문제로 쉽지 않은 일이다[4-5]. 따라서 소자에 대한 펄스 방사선 직접 조사시험 및 분석이 현실적으로 수행할 수 있는 방안이다.

고준위 펄스방사선에 의한 전자소자의 손상 가운데 소진(Burnout) 상태에 이르게 되는 경우는 Latchup이나 바이폴라 증폭과 같은 단기간 복구 불가능한 과도상태의 두 가지 경우로 예측해 볼 수 있다[6-12].

먼저 Latchup이 가지고 있는 주요한 특징으로 알려진 사실은 Burnout 포인트 도달 전에 연속 재생-피드백 사이클(Regenerative-Feedback Cycle) 상태에 이른다는데 있다. 이 피드백 사이클은 공급전원의 차단으로 중지시킬 수 있다. 펄스 방사선 노출에 의한 최종 Burnout 상태의 도달 이전의 적정 순간에 전원공급을 차단시키기 위해서는 방사선 감지센서와 함께 전원 제어회로(Circumvention Circuit, CC)가 필요하다. 즉 설정된 준위 이상의 고준위 방사선율이 센싱되면 시험소자(Device Under Test, DUT)로 공급되는 전원을 즉시 차단하는 기능을 가지도록 구현하여야 한다. 이러한 제어회로는 개별 바이폴라 트랜지스터로 구성되어 펄스방사선에 의한 기생 트랜지스터 생성이 억제되도록 설계되어야 한다. 다음으로 Latchup이 원인임을 온도효과의 관점에서 분석할 경우 손상된 소자의 패키지를 제거(Decapsulation, or Decap.)한 상태로 열 발생지점(Hot Spot)의 위치를 찾음으로써 pnpn Latchup 구조로부터 생성된 Latchup 현상으로부터 펄스 방사선의 의한 Latchup을 구분할 수 있다. Hot Spot의 위치 확인은 적외선 카메라의 관측을 통해 온도의 시간적 변화를 관찰함을 통해 가능하다.

세 번째로 전체 공급전원 전류의 증가를 모니터링을 통해 두 가지를 구분할 수도 있다. 이 경우 Latchup의 특이한 전류상태가 손상원인 분석의 한 가지 기준이 될

수 있다. 일단 Latchup 시작 조건에 도달하게 되면 재생-피드백 루프에 의해 지속적으로 전원 전류를 끌어오게 되며, 이후 방사선 조사가 중지된 상태에서도 지속되기 때문이다.

본 연구에서는 대상 소자의 제작 공정변수를 확보를 배제한 상태에서 방사선 실측 및 분석실험을 통하여 두 가지 가능성에 대한 분석을 시도하였다

이상에서 설명한 세 가지 실험 방법-전원차단, 적외선 열상 이미징, 그리고 전원공급 전류 측정기술-은 방사선 손상의 원인이 Latchup에 있을 가능성에 대한 해답 찾을 수 있다. 이에 대한 검증은 위해 각각에 대한 실험과 분석을 진행하였다.

II. 본론

2.1. 실험구성 및 방법

펄스방사선 시험을 위해 선형가속기(LINAC)로 가속된 60MeV의 전자를 텅스텐 타겟(Target)에 충돌시켜 최대 60MeV의 제동복사(Bremsstrahlung) X-선을 생성시켰다. 그림 1에 보여진 타겟의 두께는 MCNP(Monte Carlo N-Particle) 시뮬레이션을 기반으로 최대 강도의 방사선 발생 조건으로 결정한 것이다.

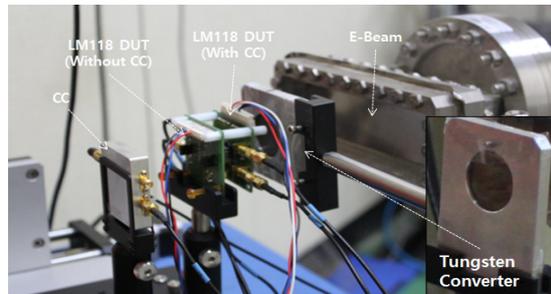


그림 1. 텅스텐 변환체와 두 개의 LM118, 그리고 전원제어 회로로 구성된 실험장치

Fig. 1 Experimental setup with a tungsten converter, two LM118s, and a CC module

실험장치 구축 과정으로 먼저 조사시험 전자소자로 선정된 Texas Instrument의 바이폴라(Bipolar)형 OP-앰프(OP Amp), LM118과 함께 펄스방사선 모니터링 및 제어회로로 구성된 두 개의 DUT를 그림 1에서와 같이

빔포트(Beam Port) 전단에 부착하였다. 최대 방사선 조사를 위해 두 LM118 소자의 중심은 LINAC 빔의 중심축과 일치시켰고, 별도로 설계 제작한 전원 제어회로(CC)는 DUT 후면에 빔 중심축에 정렬하여 설치한 다음 하나의 LM118에만 연결하였다. 이는 펄스 방사선이 전원 제어회로의 방사선 감지센서에서 탐지되면 둘 중 하나의 LM118로 공급되는 전원 전류를 차단하게 되도록 하기 위한 것이다. 또한 펄스 빔의 선량 캘리브레이션 용도의 전용 PIN 다이오드와 TLD(Thermo-Luminescence Dosimeters)를 빔 경로의 뒷 부분에 부착하였다. 또한 설치된 DUT 상의 두 LM118에서의 온도변화를 실시간 녹화하기 위해 열영상 카메라를 조사 빔 중심으로부터 일정 거리 떨어진 위치에 설치하였다.

2.2. 방사선 실측 실험결과

그림 2는 두 DUT를 촬영한 열영상의 스냅 사진으로, 두 DUT의 온도 차이를 선명하게 보여주고 있다. 즉, 왼쪽의 DUT는 전원 제어회로가 연결되어 정상 작동 온도(42.8°C)로 복귀한 반면 오른쪽의 DUT는 Burnout 상태에 도달하였다. 이 결과 영상은 전원 제어회로에 의해 좌측 LM118에 대한 Latchup 보호기능이 제대로 작동하고 있음을 나타낸다.

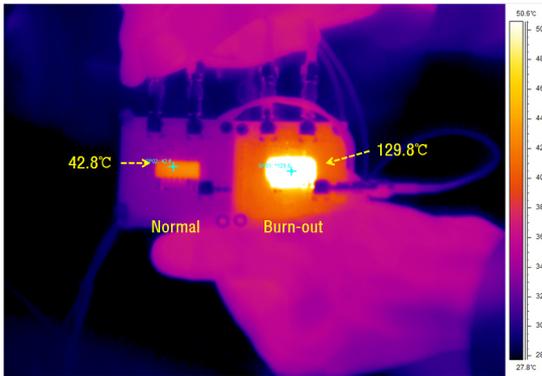


그림 2. Latchup 확인을 위한 열영상
Fig. 2 Thermal means of latchup conformation

그림 3은 DUT로 공급되는 전원 전류의 측정결과를 나타낸 것으로 전원 외부 차단 전까지 10 μs 이상 전류가 지속적 증가되고 있음을 보여준다. 단기 과도 메커니즘이 2μs 이하인 점을 고려해 볼 때 비교적 장시간에 걸친 DUT의 전류증가는 Latchup 가능성을 높여준다.

또 그림 4는 DUT로 공급되는 전류의 오실로스코프 관측 신호로서 핑크색(Magenta) 파형은 펄스 방사선에 의한 Latchup 발생과 뒤이은 Burnout에 의해 기능이 정지됨으로서 전력소모가 멈춘 상태를 보여주고 있다. 이에 반해 녹색(Green) 파형은 전원 제어기능에 의해 순간적인 전원차단 및 복원 후 정상상태로 복귀하는 과정을 시간의 경과에 따라 순차적으로 나타낸다. 이 결과 그래프는 전원 제어회로에 의해 Latchup이 성공적으로 방호되고 있음을 나타낸다.

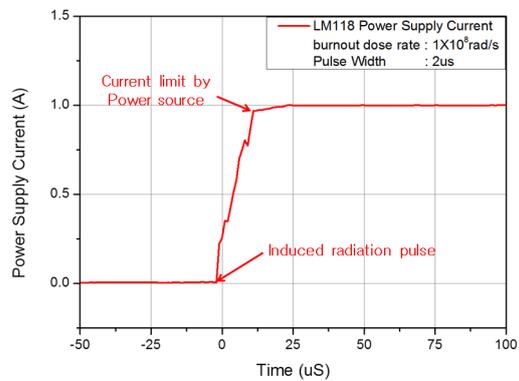


그림 3. 시간 '0'을 기준으로 측정된 방사선 펄스조사 전후의 LM118 공급 전류의 파형
Fig. 3 LM118 Power supply current profile before and after a radiation pulse at time zero

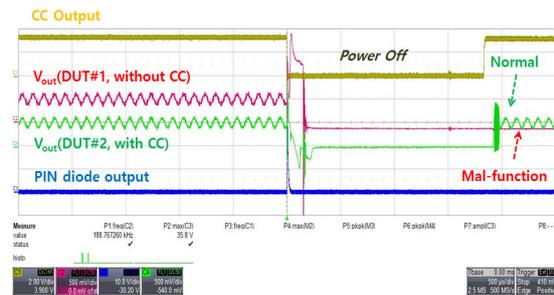


그림 4. 오실로스코프 캡처화면
Fig. 4 Oscilloscope snap shot

그림 5는 전원 제어회로가 연결되지 않은 DUT로부터 연기 발생이 관찰된 다음 소자를 디캡(Dedap) 처리한 후 현미경으로 관찰한 사진으로 과도전류로 인해 Burnout된 금속라인 부분(B)이 선명히 보이고 있다. 이외 다른 부분에서는 정상상태를 유지하고 있다.

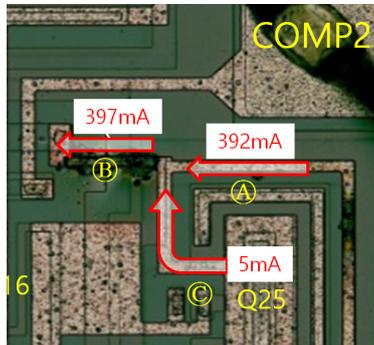


그림 5. Decap 한 LM118 소자
Fig. 5 The LM118 chip with its lid removed

2.3. 실험결과 분석

상기 실험의 전원공급 전류 그래프 분석결과 펄스방사선 조사 직후 손상된 LM228 소자에 비교적 장시간 전원 전류를 공급하게 됨에 따라 Latchup 손상이 발생한 것으로 추정된다. 그러나 과전류 손상 발생 위치가 반도체의 접합(Junction) 부분이 아니라 전원 공급 금속선(Line) 상이기 때문에 특정 트랜지스터에서 Latchup이 발생한 것이라고 단정하기에는 무리가 있어 ‘방사선-유기 금속 라인 Burnout’이라고 칭하는 것이 보다 정확할 것으로 판단된다. 그러나 단기간 과도상태와 더불어 단락이나 바이폴라-증폭에 의한 파괴현상과는 거리가 있어 보인다.

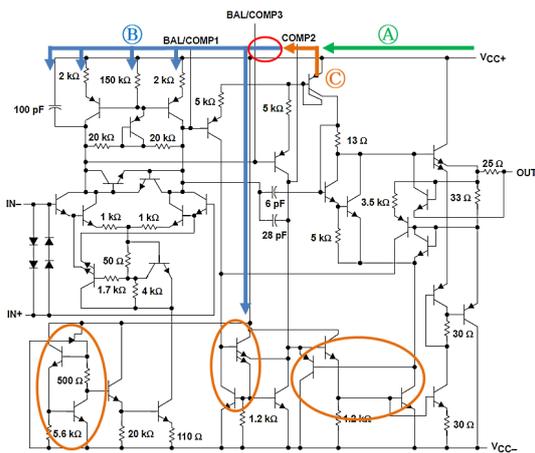


그림 6. 주요 전류경로 관련 SPICE 회로 시뮬레이션 결과
Fig. 6 SPICE circuit simulation result with the major current flow paths

정확한 손상 메커니즘 규명은 제조사의 공정변수 제공을 통한 회로 시뮬레이션과 병행된 소자 시뮬레이션이 최적의 방법이다. 하지만 소자 공정정보 확보가 불가능한 현 단계에서는 SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)에 기반한 최대 전류생성 부분과 Burnout 발생 금속라인 위치의 일치 여부에 대한 추가 분석을 진행하였다.

시뮬레이션은 주변 트랜지스터에 의한 전류의 회로 단위 증폭과 더불어 모든 트랜지스터에 의한 방사선 여기 광전류 생성을 가정하여 수행하였다. 시뮬레이션 결과를 통하여 기생 Latchup 경로(Path)의 생성 가능성과 더불어 그림 6에 표시한 붉은색 실원으로 표시한 회로에서의 잠재적 pnpn Latchup 가능성이 예상되었다. 일단 방사선 여기 광전류가 트랜지스터의 베이스 단에 공급될 경우 잠재적으로 연속 피드백이 형성되어 최종적으로 Latchup의 발생이 가능하기 때문이다.

이처럼 pnpn 트랜지스터 쌍으로 부터 방사선 여기 Latchup이 발생될 경우에도 금속 라인이 녹게 될 가능성이 높다. 이러한 현상은 기존에 알려진 방사선 여기에 의한 기생 트랜지스터의 형성과 별개로 소자의 기판(Substrate)과 무관한 회로 레벨의 Latchup 형성을 의미한다. 추후 향후 제조사의 협조로 소자 공정변수에 대한 시뮬레이션이 추가로 구현된다면 방사선 여기에 의한 Latchup에 대한 보다 정확한 분석이 가능할 것으로 예상된다.

이상에서 수행한 세 가지 실험을 통해 방사선 여기에 의한 Latchup 발생을 분석하고자 시도하였다. 첫 번째 실험은 방사선 펄스 조사 이후 상당시간(10 μ s) 동안 전류의 상승 상태의 지속여부, 두 번째는 소자 전원공급 전류의 차단기능 제공 유무에 따른 전류제어 여부, 그리고 세 번째 실험은 적외선 영상을 통한 온도의 관측이었다. 이 세 가지 실험의 결과를 통해 방사선-여기-Latchup 발생에 대해 확인할 수 있었다.

III. 결 론

본 연구에서는 소자의 제조 공정변수에 대한 정보 확보의 어려움으로 인해 정밀 소자의 시뮬레이션 없이 실험적인 방법만으로 방사선에 의한 Latchup 발생을 확인하는 단계적 실험에 관하여 논하였다.

전자빔 변환 고준위 펄스 감마선에 전자소자를 조사한 직후 단계적으로 수행한 소비전류의 관측, 전원 전류 차단, 그리고 온도 모니터링의 세 가지 결합기술을 통해 실험적으로 소자의 Latchup 발생을 검증하고자 시도하였다. 개발된 실험 방법은 다른 반도체 소자의 Latchup 확인에도 성공적인 적용이 가능할 것으로 생각된다. 향후 트랜지스터에 대한 소자 레벨의 열영상 모니터링 연구와 금속 라인의 방사선 유기 Burnout, 그리고 회로 레벨의 Latchup에 관하여 연구를 지속할 예정이다.

감사의 글

이 논문은 국방과학연구소 민군기술협력센터의 지원으로 수행된 연구임

REFERENCES

- [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] Tor A., Yanqing Deng, Michel S. "Modeling of High-Dose-Rate Transient Ionizing Radiation Effects in Bipolar Devices", *Contract AF29(601)-6489*.
- [5] David E. Fulkerson, David K. Nelson, Roy M. Carlson, Eric E. Vogt, "Modeling Ion-Induced Pulses in Radiation-Hard SOI Integrated Circuits", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 3, no. 3, pp. 1406-1505, 2007.
- [6] H. B. O Donnel, J. M. Loman, P. Ritter and J. R. Stahlman "Spacecraft Hardness Assurance Program", *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. NS-33, no. 6, 1986.
- [7] J. F. Leavy, R.A. Polle, "Radiation-Induced Integrated Circuit Latchup," *IEEE Trans. Nuc. Sci.* NS-16, pg 96-103, Dec 1969.
- [8] M. Shop, J. Gorelick, R. Rau, R. Kop, A. Martinez, "Observation Of Single Event Latchup In Bipolar Devices," ISBN: 0-7803-1906-0 pp.118 *Proceeding of Radiation Effects Data Workshop*, 1993.
- [9] Martha V. O'Bryan¹, Kenneth A. LaBel², Robert A. Reed², James W. Howard Jr.³, etc., "Radiation Damage and Single Event Effect Results for Candidate Spacecraft Electronics" *NSREC Workshop Proceedings of the Radiation Effects Data Workshop*, 1-14. ORTEGA, G. 1999.
- [10] J. Howard et al., "Heavy Ion Transient and Latchup Test Results for the National Semiconductor LM139," radhome.gsfc.nasa.gov/radhome/papers/b082699a.pdf, August 1999. SET no SEL
- [11] Robert Reed, Jim Forney, Donald Hawkins, "Heavy Ion Single Event Effects Test Results for the Analog Devices AD783 Sample and Hold Amplifier," radhome.gsfc.nasa.gov/radhome/papers/b112499b.pdf, October 1999. SET no SEL.
- [12] A. H. Johnson, G. M. Swift, L. D. Edmonds, "Latchup in Integrated Circuits from Energetic Protons", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 44, no. 6, pp. 2367-2467, 1997.



이남호(Nam-Ho Lee)

1991년 경북대학교 전자공학과 학사 졸업
 1993년 경북대학교 전자공학과 석사 졸업
 2004년 충남대학교 전기공학과 박사 졸업
 현재 : 한국원자력연구원 원자력융합기술개발부 책임연구원
 ※관심분야 : 방사선 센서, 입체영상, 원격제어 시스템



황영관(Young-gwan Hwang)

2006년 수원대학교 전자공학과 학사 졸업
2008년 수원대학교 전자공학과 석사 졸업
2014년 충남대학교 정보통신공학과 박사 졸업
현재 : 한국원자력연구원 원자력융합기술개발부 선임연구원
※관심분야 : 방사선 센서, 영상처리, 방사선 카메라



정상훈(Sang-hun Jeong)

2007년 전북대학교 반도체과학기술학과 학사 졸업
2009년 전북대학교 전자정보공학부 석사 졸업
2014년 전북대학교 전자정보공학부 박사 졸업
현재 : 한국원자력연구원 원자력융합기술개발부 선임연구원
※관심분야 : 아날로그 회로설계, 내방사선 회로 설계



김종열(Jong-Yeol Kim)

2009년 한양대학교 전자전기공학부 공학사
2011년 한양대학교 전기공학과 공학석사
2011년 ~ 현재 한국원자력연구원 연구원
※관심분야 : 내방사선 광섬유, 광섬유 센서