

技術論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 42(11), 981-987(2014)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2014.42.11.981

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

DC/DC 강압컨버터용 MOSFET의 TID 및 SEGR 실험

노영환*

TID and SEGR Testing on MOSFET of DC/DC Power Buck Converter

Young Hwan Lho*

Dep't of Railroad Electricity System, Woosong University

ABSTRACT

DC/DC switching power converters are commonly used to generate a regulated DC output voltage with high efficiency. The DC/DC converter is composed of a MOSFET (metal-oxide semiconductor field effect transistor), a PWM-IC (pulse width modulation-integrated circuit) controller, inductor, capacitor, etc. It is shown that the variation of threshold voltage and the breakdown voltage in the electrical characteristics of MOSFET occurs by radiation effects in TID (Total Ionizing Dose) testing at the low energy γ rays using ^{60}Co , and 5 heavy ions make the gate of MOSFET broken in SEGR (Single Event Gate Rupture) testing. TID testing on MOSFET is accomplished up to the total dose of 40 krad, and the cross section(cm^2) versus LET($\text{MeV}/\text{mg}/\text{cm}^2$) in the MOSFET operation is studied at SEGR testing after implementation of the controller board.

초 록

DC/DC 컨버터는 임의의 직류전원을 부하가 요구하는 형태의 직류전원으로 변환시키는 효율이 높은 전력변환기이다. DC/DC 컨버터는 MOSFET(산화물-반도체 전계 효과 트랜지스터), PWM-IC(펄스폭 변조 집적회로) 제어기, 인덕터, 콘덴서 등으로 구성되어있다. MOSFET는 스위치 기능을 수행하는데 코발트 60 (^{60}Co) 저준위 감마발생기를 이용한 TID 실험에서 방사선의 영향으로 문턱전압과 항복전압의 변화와 SEGR 실험에 적용된 5종류의 중이온 입자는 MOSFET의 게이트(gate)에 영향을 주어 게이트가 파괴된다. MOSFET의 TID 실험은 40 Krad 까지 수행하였으며, SEGR 실험은 제어보드를 구현한 후 LET($\text{MeV}/\text{mg}/\text{cm}^2$)별 cross section(cm^2)을 연구하는데 있다.

Key Words : MOSFET(산화물-반도체 전계 효과 트랜지스터), TID(전체 이온조사), SEGR(단일현상 게이트파괴), SEE(단일현상 효과), DC/DC Converter(DC/DC 컨버터)

1. 서 론

우리나라 위성 관련 부품산업은 다른 전자 및 기계 산업에 비해 낙후하며 초기단계이다. 전자

소자의 방사선 관련 기술은 미국 등 우주산업이 발달한 나라에서 미 공개의 군사 관련 기술로 많은 개발이 이루어져 왔고 국가적인 차원에서 엄격히 관리하고 있어 기술이전을 기피하고 있는

† Received : May 13, 2014 Revised : October 16, 2014 Accepted : October 28, 2014

* Corresponding author, E-mail : yhlho@wsu.ac.kr

핵심기술로 차세대 위성체의 부품 국산화를 위해 필수적으로 요구되는 첨단기술이다.

상용 반도체소자들은 방사선에 과다한 노출 시 오동작으로 인하여 부품자체의 동작에 문제를 야기 시킴으로 인하여 시스템에 영향을 준다. 이러한 영향은 방사선의 조사량 (dose)와 조사율 (dose rate)에 따라 그 영향이 축적되다가 결국 전자부품을 파손시킨다. 방사선의 형태는 일반적으로 소립자 방사선 (particle radiation)과 광자 방사선 (photon radiation)으로 나누어진다. 소립자 방사선은 하전입자와 중성자입자로 나누어지는데 하전입자는 전자, 양성자, 알파, 이온입자들이며, 중성자입자는 중성자로 구성된다. 광자 방사선은 γ 선 및 x선으로 나누며, 광자 방사선의 영향을 받은 반도체 물질이나 부품이 과다한 매체(carrier)를 발생시켜 특성이 변한다. 소립자 방사선을 나타내는 단위는 flux (ions/cm²/sec)이거나 fluence (ions/cm²)이다. 광자 방사선에 의해 발생된 이온을 나타낼 때 단위는 rad [100 ergs/g]이다. 위성체의 부품에 미치는 방사선의 영향은 크게 TID (Total Ionizing Dose)[1], Displacement Effect (변위 영향), SEE (Single Event Effect)로 나눌 수 있다. TID (Total Ionizing Dose)는 핵무기 폭발이나 Van Allan Belts에 형성된 전자나 양성자 혹은 γ 선 및 x 선 같은 자연환경에서 야기될 수 있다. Fig. 1의 DC/DC 강압컨버터[2~4]에서 수동소자, diode와 회로설계에서 bipolar의 구조로 설계된 전자소자는 일반적으로 TID 시험을 수행한다.

그리고, unipolar로 설계된 MOSFET는 SEGR (Single Event Gate Rupture) 실험을 CMOS와 Bi-CMOS(bipolar와 CMOS 구조를 공유)구조를 가지는 OP-Amp. 와 PWM-IC, DRAM 등 메모리 소자는 SEL 시험을 수행한다.

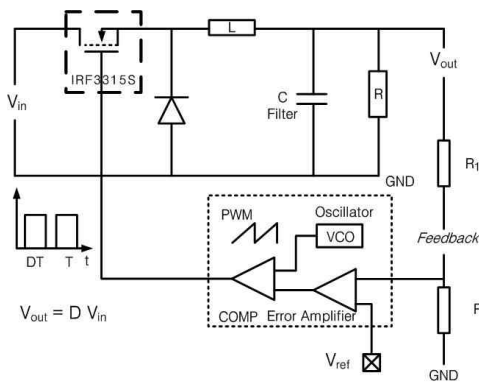


Fig. 1. Block diagram of Buck Converter

Van Allen Belt 에는 지구의 자기장에 의해 형성된 전하입자가 존재한다. 전자는 35,000 mile 까지 펼쳐 존재하는 반면에 지구의 가장 가까이 있는 지역은 주로 양성자(proton)로 구성된다. 지역의 양성자와 전자는 일반적으로 위성체의 방사선 문제와 관련이 있다. 최대 양성자 flux는 cm²/f 당 1×10⁴f개이다. 이것은 조사율 0.001 rad/sec에 해당되며 전자 flux는 cm²/f 당 1×10¹⁰개이고 최악의 상태에서 0.028 rad/sec 에 해당된다[5]. 태양 섬광이 발생하는 경우 양성자 flux는 수십만 배의 크기로 증가될 수 있다. SEE는 우주 공간에서 농축 이온이나 강력한 양성자와 중성자의 영향에 의해 발생되어 위성체의 전자회로에 민감한 부분에서 발생된다. 이와 같은 입자들은 회로에 일시적인 지장을 주거나 치명적인 손상을 야기시킬 수 있는 회로에 이온에너지를 축적시킨다.

방사선이 존재하는 우주환경에서 동작하는 트랜지스터의 전류이득 β 와 조사량(dose)의 특성을 예측할 수 있는 많은 실험식이 제안되었다. 일반적으로 조사 이전에는 NPN 트랜지스터 (transistor)의 β 값은 일반적으로 200 이상이며 1 Mrad 이상의 조사량에 대하여 β 값은 약 30, PNP 값은 20 정도 떨어지는 경향이 있다. 중성자에 조사 시 손실은 식 (1)과 같은 Messenger-Spratt[6]으로 편리하게 특징지어질 수 있다.

$$\frac{1}{\beta_{post}} = \frac{1}{\beta_{pre}} + 10^{-7} \frac{\phi_n}{f_T} \quad (1)$$

여기서 β_{post} 는 방사선 조사 후 전류 이득이고, β_{pre} 은 방사선 조사 전 전류 이득이며, ϕ_n 은 조사량이고, f_T 는 단위이득 주파수(unity gain frequency)이다. 식(1)에서 PNP 트랜지스터의 정해진 f_T 값에 대해 조사량이 증가하면 전류이득 β 는 감소한다. 조사 시험에서 중성자는 성능저하(전류이득 저하)를 일으키는데 전류이득 저하는 컬렉터 전류가 아주 적은 영역에서 영향을 많이 받는다.

부품소자 경우 트랜지스터에서 방사선의 영향으로 조사량이 커질 때 소수 캐리어들의 생존시간(life time)이 줄어들고 소자의 표면에 중성자 입자가 충돌하면서 표면상태(surface state)가 손상을 입으면 손상을 입은 표면을 따라 누설전류가 증가하여 전류이득의 감소가 발생된다. 트랜지스터의 활성영역에서 동작은 컬렉터 전류가 컬

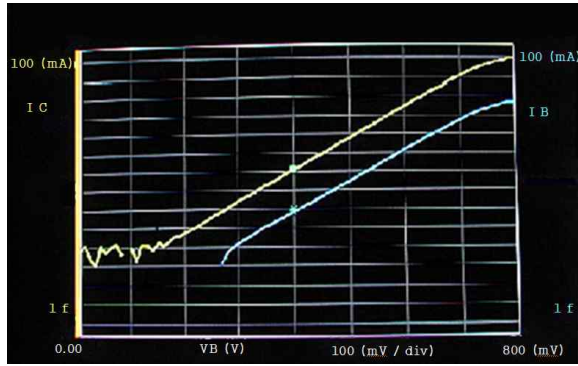


Fig. 2. Gummel characteristics in Pre-irradiation

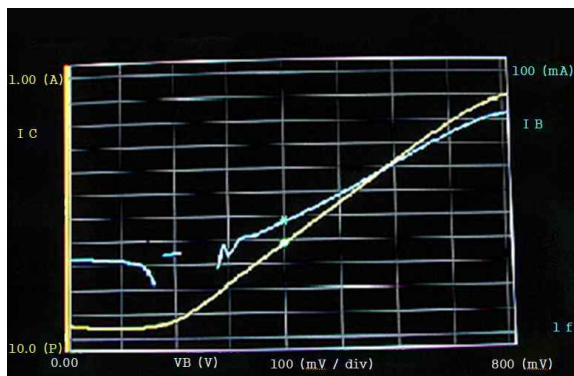


Fig. 3. Gummel characteristics after 40 krad

렉터 전압에 달려있다. 이때 $i_C - v_{CE}$ 특성은 완벽하게 직선이 아니고 전기적 변화는 방사선에 조사 시험을 실시한 결과 전압 V_{CE} 를 일정하게 놓고 V_{BE} 를 변수로 설정하여 I_B 와 I_C 를 동시에 표시하는 Fig. 2와 Fig. 3의 전류이득(β) 값을 Gummel Poon Model을 이용하여 동시에 표시함으로써 방사선이 존재할 때 2N2222A 트랜지스터의 전류이득 변화를 조사전과 조사후를 비교하는 것이 용이하다. 조사전에는 전류이득이 200을 일정하게 유지하다가 조사량이 증가하면 I_C 는 일정하게 유지되나 I_B 가 증가되어 40으로 떨어진다.

II. MOSFET의 전기 특성

MOSFET[7]는 N형과 또는 P형의 반도체 벌크에 드레인, 소스라 불리는 벌크와 반대되는 반도체 형의 확산영역을 만들고, 그들 사이에 SiO₂ 절연층으로 분리된 게이트 전극이 놓인 구조로

이루어져 있다. MOSFET의 게이트는 매우 작고 뛰어난 특성을 갖는 커패시터이며, 채널을 통한 전도는 게이트와 소스 사이에 인가된 전압에 의하여 제어된다. MOSFET는 두 단자사이의 전압이 제3의 단자에 흐르는 전류를 제어한다. 따라서, MOSFET는 증폭기로서 사용될 수 있고, 스위치로도 사용될 수 있다. MOSFET의 전류 제어구조는 제어 단자에 인가된 전압에 의해서 생기는 전계에 기초를 두고 있다. 그리고, 전류가 MOSFET의 유형에 따라 N 채널 또는 P 채널로 구별되는데 단지 한 종류의 캐리어(전자 또는 정공)에 의해서 전도되므로 MOSFET를 유니폴라 트랜지스터(unipolar transistor)라고 부른다.

2.1 문턱전압

P형 반도체에 SiO₂ 근처에 유도되는 전자 층을 N형 반전층 (n-type inversion layer)이라 부른다. 이 반전 층이 형성되는 최소 전압을 Fig. 4와 같이 드레인과 게이트를 단락(short) 시켜 채널전류가 250 μA 흐를 때 형성되어 Fig. 5와 같이 $V_{GS(th)}$ 혹은 V_{th} 라 한다. MOSFET가 포화영역에서 동작될 때 드레인 전류(i_D)[8]는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$i_D = K_P (V_{GS} - V_{th})^2 \quad (2)$$

여기서 K_P 는 MOS 트랜스 컨덕턴스, V_{GS} 는 게이트와 소스간 전압을 나타낸다. 식 (2)로부터 V_{GS} 는 식 (3)과 같이 계산된다.

$$V_{GS} = V_{th} + \sqrt{\frac{i_D}{K_P}} \quad (3)$$

식 (3)에서 문턱전압 V_{th} 는 식 (4)와 같이 나타낸다.

$$V_{th} = V_{T0} - K\phi \quad (4)$$

여기서 V_{T0} 는 조사전 문턱전압이고, K 는 문턱전

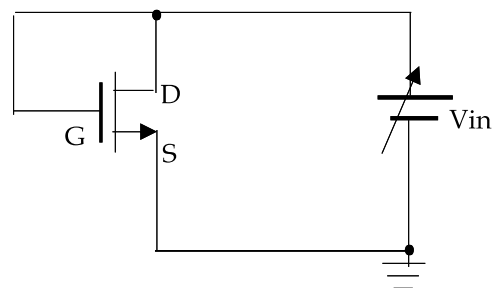


Fig. 4. Biased circuit of measuring the threshold voltage of MOSFET

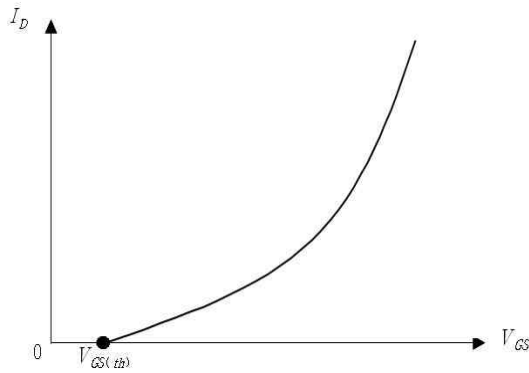


Fig. 5. Characteristic curve of $I_D - V_{GS}$ in N-MOSFET

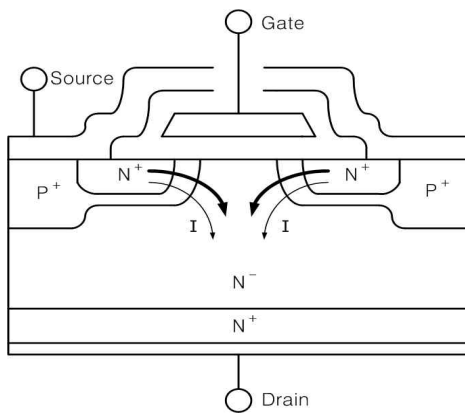


Fig. 6. Charge trapping phenomenon caused by the voltage between gate and source

압 감소계수이며, ϕ 는 전체 조사량을 의미한다. 그리고 게이트-소스간의 전압이 드레인-소스간 전압보다 클 경우 순간적으로 전류가 도통함으로써 Fig. 6과 같은 charge trapping이 발생된다. 입력전압(V_{in})을 증가시켜 문턱전압은 드레인과 소스 사이의 채널을 도통시키기 위한 최소 게이트 전압이다.

2.2 항복전압

BV_{DSS} (항복전압)는 부품의 epi영역의 저항과 두께의 함수로 결정되는데 Fig. 7과 같이 게이트와 소스를 단락시킨 상태에서 bias 전압을 가변시켜 드레인에서 소스로 제시한 일정한 값 250 μA 의 전류를 흘린 상태에서 측정된 전압을 항복 전압[8]이라 부른다.

특히, 고 전압 응용에서 일정 기간 이상이 지나면 $BV_{DSS}(V)$ 레벨이 감소하는 경향을 보이는데 이러한 현상을 방지하기 위해 충분히 우물(well) margin을 두고 설계를 한다. 정션(junction) 온도가 올라 갈수록 BV_{DSS} 가 Fig. 8과 같이 증가

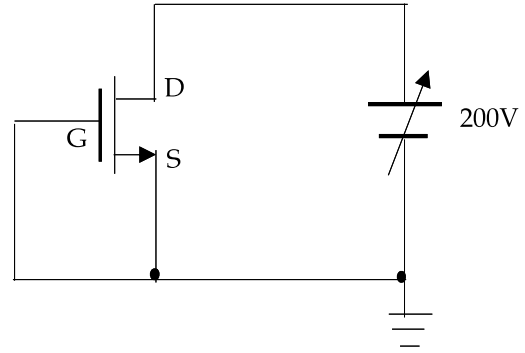


Fig. 7. Biased circuit of measuring the breakdown voltage of MOSFET

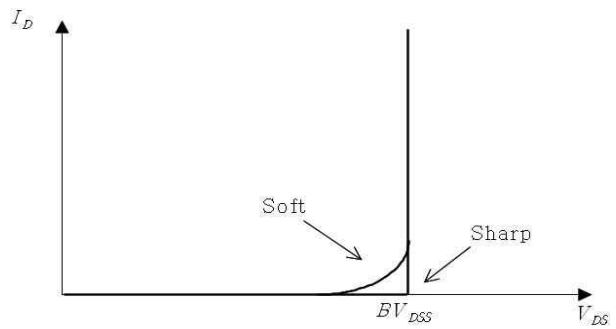


Fig. 8. Breakdown voltage of the power MOSFET

Table 1. MOSFET(IRF3315S) electrical characteristics

PARAMETER	TEST CONDITIONS	IRF3315S			UNIT
		MIN	TYP	MAX	
V_{BR}	Drain-to-Source Breakdown Voltage $V_{GS} = 0V$ $I_D = 250\mu A$	150	-	-	V
V_{th}	Gate Threshold Voltage $V_{DS} = V_{GS}$ $I_D = 250\mu A$	2.0	-	4.0	V

하는 경향을 보인다.

본 실험에서 적용되는 MOSFET의 사양은 Table 1과 같다. 시료로서 항복전압이 150 V 인 International Rectifier 제품인 IRF3315S[7]를 사용한다.

III. MOSFET의 방사선 영향

부품에 미치는 방사선의 영향[1]은 크게 TID(Total Ionizing Dose), Displacement Effect (변위 영향), SEE(Single Event Effects)로 나눌 수

있으며 SEE는 SEL(Single Event Latch-up), SEU(Single Event Upset), SET(Single Event Transient), SEGR(Single Event Gate Rupture) 등으로 나눈다.

3.1 TID 실험

TID 시험절차는 Fig. 9의 Mil-Std-883 Method 1019를 따르는데 한국항공우주연구원이 개발한 다목적실용위성2호(KOMPSAT-2)에서 적용되는 K2-RAD-IGG-0001와 같으며 측정 장비로는 반도체 소자의 측정 장비인 HP Semiconductor Parameter Analyzer과 Digital Multimeter를 사용한다. 조사시설로는 한국원자력연구원 정읍방사선연구소의 저준위 방사선 조사실의 코발트 60 (⁶⁰Co) γ 발생기를 이용한다. 여기서 γ 붕괴 조사 시료의 거리가 가까우면 조사시간이 짧아지고 γ 붕괴 조사시료의 거리가 멀어지면 조사시간을 길게 하여 총 선량이 같게 한다.

조사량은 2.5, 5, 7.5, 10, 20, 그리고 30 Krad까지 6등급으로 구분하고 선량율(조사율)은 저준위 조사 시 많이 사용하는 5 rad/sec로 설정한다. 총 조사선량은 조사율, 거리, 그리고 시간에 따라 결정되는데, 예를 들어 2.5 Krad가 4회 누적되면 10 Krad가 되고 10 Krad가 2회 누적되면 20 Krad로서 총 선량은 30 Krad가 된다. 조사율을 5 rad/sec로 설정 시 조사량이 2.5 krad가 되기 위해서는 500 sec(초) 소요되고 6개의 시료를 사용한다. 각 조사 횟수가 끝나고 다음 조사로 들어가기 위해 필요한 조사간격은 30분 이내에 이루어져야 한다. 30분이 경과되면 시료의 전기적 특성이 어느 정도 복원될 수 있기 때문이다.

MOSFET의 TID 실험에서 조사량별 문턱전압과 항복전압의 결과는 Fig. 10과 Fig. 11과 같다. 그림 10의 실험 결과는 조사전 3.0 V에서 조사량이 증가함에 따라 문턱전압이 선형적으로 감소하여 이론 식(4)를 만족하고 있으며 조사량이 40 Krad 까지 최소 문턱전압 2.0 V임을 확인하였다. 항복전압은 최소 150 V를 요구하고 있는데 조사

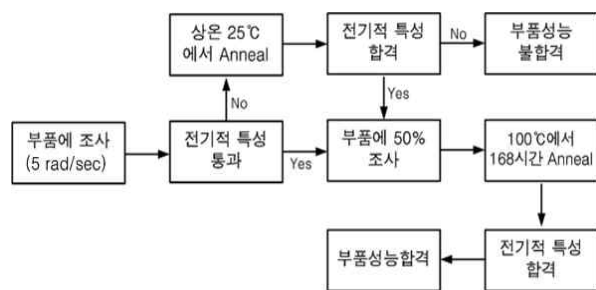


Fig. 9. Testing Method and Procedure of TID

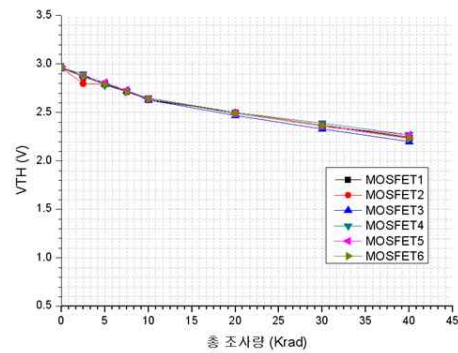


Fig. 10. Threshold voltage vs. dose

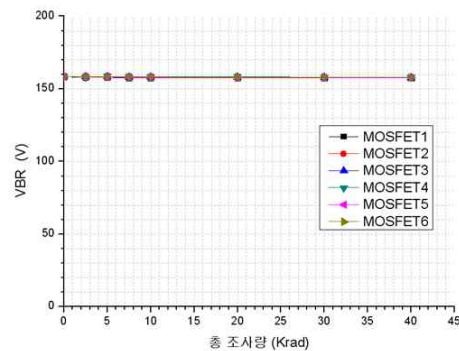


Fig. 11. Breakdown voltage vs. dose

량이 증가하여도 Fig. 11과 같이 변함없이 일정하게 155 V로 측정되어 전기적 사양을 만족하고 있다.

3.2 SEGR 실험

PWM-IC의 SEGR 실험을 위해 Fig. 12와 같이 회로를 설계 및 구현한 후 NASA 등 산업체가 많이 이용하고 세계적으로 가장 권위 있는 Fig. 13과 같은 미국 Texas A&M University Cyclotron Facility의 중이온가속기에서 Table 2에서 보여준 에너지가 15 MeV/u인 중이온 5종 (Ar, Kr, Xe, Ho, Au)을 bare chip 상태의 시료에 조사하였다. 실험결과 Ar 경우 transient(천이

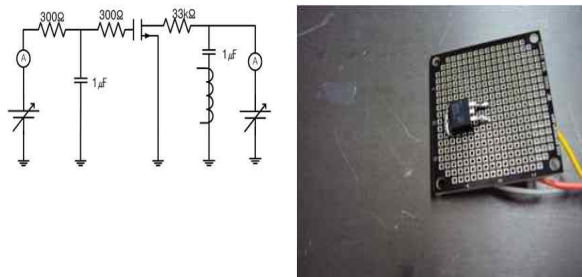


Fig. 12. MOSFET SEGR Circuit and Implementation

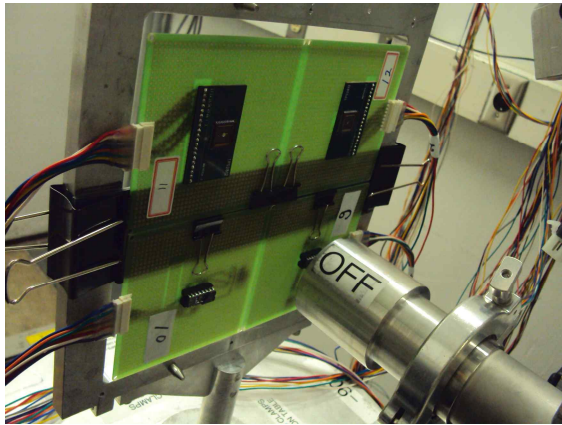


Fig. 13. Testing Scene of heavy ions (Texas A&M Univ. Cyclotron Facility, USA)

Table 2. Ions' spec. of 15MeV/u energy

Ion	Mass(u)	Total Energy(MeV)	Initial LET(air)	LET at Bragg Peak
⁴⁰ Ar	39.962	599	8.0	20.1
⁸⁴ Kr	83.912	1259	26.6	41.4
¹²⁹ Xe	128.905	1934	49.3	63.4
¹⁶⁵ Ho	164.930	2474	66.7	79.2
¹⁹⁷ Au	196.967	2954	82.8	93.5

Table 3. Transient and dropout capture of MOSFET(IRF3315S)

SAM PLE	LET (MeV/mg/cm ²)	Fluence (ions/cm ²)	Cross Section(cm ²)	SEL Event	비고
1	8.9	2.73×10 ⁸	3.66×10 ⁻⁹	발생없음	4분3초
2	8.9	8.04×10 ⁶	1.24×10 ⁻⁷	발생없음	2분42초
3	27.8	5.71×10 ⁵	1.75×10 ⁻⁶	발생	1초
4	40	1.00×10 ⁷	1.00×10 ⁻⁷	발생	10초
5	56	1.00×10 ³	1.00×10 ⁻³	발생	5초
6	56	5.00×10 ²	2.00×10 ⁻³	발생	10초
7	69.1	6.00×10 ¹	1.66×10 ⁻²	발생	2초
8	69.1	2.00×10 ¹	5.00×10 ⁻²	발생	2초
9	85.4	3.00×10 ²	3.33×10 ⁻³	발생	10초
10	85.4	6.00×10 ¹	1.67×10 ⁻²	발생	2초

현상)이 발생하였고, Kr, Xe, Ho, Au 경우는 일정한 시간이 경과함에 따라 게이트가 파괴(gate rupture)가 Table 3과 같이 발생하였다. LET (Linear Energy Transfer)별 cross section은 Fig. 14와 같다.

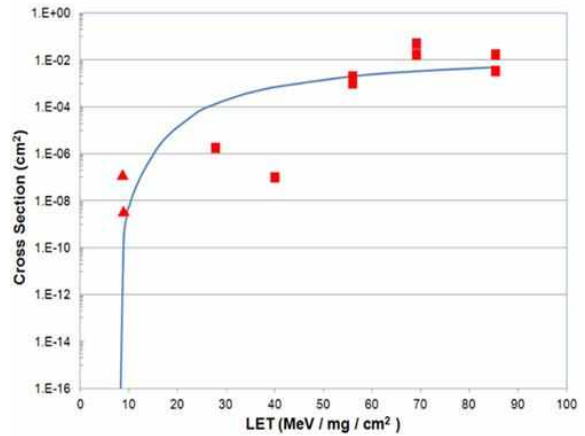


Fig. 14. Cross section vs. LET in MOSFET(IRF3315) (▲; transient capture, ■; dropout capture, LET_{th} = 8.9 MeV/mg/cm²)

여기서 cross section은 입자(particle) 들 간에 반응하는 정도를 나타내는 지표인데 사건이 한번 일어나는 시간을 T(sec.) 라고 하면 cross section[8,9]은 식 (5)와 같이 표현된다.

$$\sigma(cm^2) = \frac{1}{fluence} (ions/cm^2) \quad (5)$$

Table 3에서 시료(sample)를 10개를 사용하였는데 시료 1과 2를 ⁴⁰Ar에 조사 시 4분 3초와 2분 42초 동안 게이트 파괴(gate rupture)가 발생되지 않았고 질량이 증가시켜 시료 2과 4를 Kr, 시료 5와 6을 Xe, 시료 7과 8을 Ho, 시료 9와 10을 Au에 조사시켜 비교에 표기된 시간에 게이트 파괴가 발생하였다. 이때 조사 시 fluence가 측정되어 식 (5)로부터 cross section을 계산할 수 있다. Fig. 14의 cross section 값은 1×10⁻²(cm²) 미만 값으로 수렴함을 보여주고 있다. 실험 결과 cross section의 수렴성은 각 시료의 전기적 특성을 평가하는데 중요한 부분이다.

본 논문에서 사용한 IRF3315S MOSFET 부품은 방사선 실험결과 전기적 특성을 만족하므로 저궤도 위성체에 사용되는 150 V 스위칭 전력소자로 사용이 가능하다고 평가한다.

IV. 결론

설계에서 MOSFET에 대하여 코발트 60 (⁶⁰Co) 감마발생기를 활용하여 40 krad 조사량까지 TID 실험을 수행하였으며, MOSFET의 SEGR 평가를 중이온가속기의 에너지 15 MeV/u에서 중이온 5종(Ar, Kr, Xe, Ho, Au)을 이용하여 bare chip으

로 LET(MeV/mg/cm²) 별 cross section(cm²) 실험을 성공적으로 수행하였다. 향후, 본 연구결과를 바탕으로 차세대 위성체의 부품국산화 추진에서 내방사선 특성 및 평가기술로 활용될 수 있고 우주용 전자부품 영향평가 기술개발의 기반을 마련하였다고 본다.

References

- 1) P. C. Adell et Al, "Total-Dose and Single-Event Effects in DC/DC Converter Control Circuitry," *IEEE Transactions Nuclear Science*, Vol. 50, No. 6, December, 2003
- 2) Y. H. Lho, "A Study on the Design of Voltage Mode PWM DC/DC Power Converter," *Journal of the Korean Society for Railway*, 14(5), October, 2011
- 3) S. H. Lee, J. Y. Jung, "Power Electronics Engineering," Seoul, *Hyung Seol Publications Inc.* pp. 147~153, 2006
- 4) E. C. Roh, K. B. Jung, N. S. Choi, "Power Electronics," *Moon Woon Dang*, pp. 190~218, 1997 (in Korean)
- 5) Radiation Effects Research Program at IUCF Newsletter, March 2003
- 6) Rene Donaldson and M. G. D. Gilchrisese, *Proceedings of the Workshop on Calorimetry for the Supercollider*, pp.575, University of Alabama, Tuscaloosa, Alabama, 1989
- 7) Data sheet of IRF3315S/L, International Rectifier
- 8) Adel S. Sedra, Kenneth C. Smith, "Microelectronics Circuits," *SAUNDERS COLLEGE PUBLISHING* pp. 320~326, 2002 (in Korean)
- 9) N. W. Van Vonno, L. G. Pearce, GM Wood et. al, "Total Dose and Single Event Testing of a Hardened Single-Ended Current Mode PWM Controller," *NSREC*, July, 2010
- 10) A Technical Report, "Development of Evaluation Technology of SEL Effects on Electronic Component for SPACE," *National Research Foundation of Korea* (2011) (in Korean)