

## 우리별 1호에서의 총 방사선 측정 실험

이 대 회 · 신 영 훈 · 민 경 욱

한국과학기술원 물리학과

### RESULTS OF THE TOTAL DOSE EXPERIMENT ON KITSAT-1

Dae Hee Lee, Young Hoon Shin, Kyoung Wook Min

Department of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology

email: dhlee@space.kaist.ac.kr

(Received April 20, 1997; Accepted May 15, 1997)

#### 요 약

지구 주변의 방사선대에 존재하는 고에너지 입자들은 위성체의 전자 재료, 부품, 및 집적 회로 등에 일시적 또는 장기적인 영향을 준다. 따라서 이러한 고에너지 입자들에 의한 우주 방사선 환경에 대한 정보를 아는 것은 매우 중요하다. 총 방사선의 양을 측정하는 장치로서 MOSFET을 개량한 RADFET을 많이 사용하는데, 본 연구에서는  $\text{Co}^{60}\gamma$ -ray를 이용하여 TOT500 RADFET을 보정하였다. 그 결과, 방사선에 대한 RADFET의 특성 곡선 변화가 온도의 변화에 매우 민감한 것을 확인하였다. 또한, 우리별 1호에서의 TDE 결과를 위성의 온도와 비교하였으며, 그 결과 TDE 실험에 나타난 특이한 현상은 지구에 의한 위성의 식 현상에서 비롯된 온도 변화가 주된 원인이었음을 확인하였다.

#### ABSTRACT

High energy particles in the earth's radiation belts cause transient and long term effects on electronic materials, devices, and integrated circuits on board the satellites. Hence, it is very important to have the information on the space radiation environment and the damage on the electronics caused by these high energy particles. One of the radiation monitor devices frequently used in space is RADFET, a specially designed MOSFET with a thick gate oxide region. The present study focuses on the calibration of RADFET TOT500 using the  $\text{Co}^{60}\gamma$ -ray source. The result shows that the response of RADFET is very sensitive to the change of temperature. The peculiar behavior observed in the TDE (Total Dose Experiment) on board the KITSAT-1 is identified as the thermal effect due to the change in the eclipse rate of the satellite.

## 1. 서 론

지구 자기권은 이온층과 태양풍 플라즈마로부터 하전 입자들을 공급 받고 이 입자들을 가속, 저장 및 이동시키는 역할을 하게 된다 (Kivelson & Russell 1995). 특히 고도 300 ~ 6400km에 형성되는 안쪽 반 알렌대 (inner Van Allen belt)에는 고에너지 양성자 (10 ~ 100MeV)와 전자 (10keV ~ 수 MeV)들이 많이 존재하는데 이러한 지구 자기장 주변의 방사선 환경 (radiation environment)은 그 궤도에서 운용되고 있는 위성체의 반도체 부품이나 전자 회로를 손상시키는 등의 심각한 영향을 끼칠 수 있다 (Garrett & Pike 1980). 고에너지 양성자와 전자 또는 중성자 등, 방사선원에 따라 반도체 물질과 작용하는 반응이 달라지지만 크게 두가지 종류의 방사선 해를 반도체 물질에 입히게 된다. 하나는 방사선에 따른 이온화 반응이고 다른 하나는 물질의 격자 구조 변화이다. 이러한 방사선 효과에 의해 위성체는 TID (Total Ionizing Dose) effect나 SEU (Single Event Upset)와 같은 영향을 받게 된다.

1992년 발사된 우리별 1호 (KITSAT-1)에는 이와 같은 기본적인 방사선 효과를 측정하기 위한 우주 환경 측정 장치인 CRE (Cosmic Ray Experiment)가 탑재되어 있다. 그 중 TDE (Total Dose Effect)를 측정하기 위해 사용한 RADFET은 MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)의 일종으로서, MOSFET에 방사선을 쬐일 때 MOSFET의 고유 특성인 문턱 전압이 변하는 것을 이용한 것이다 (Zaininger & Holmes-Siedle 1968, Holmes-Siedle 1974). 즉 이 변화가 선형적인 구간에서 이온화 방사선에 의한 문턱 전압 변화를 관측함으로써 위성체가 받은 총 방사선 양을 계산할 수 있다.

본 연구에서는 우리별 1호에서 사용된 RADFET의 보정을 위해 원자력 연구소의 고준위 방사선 조사실에서  $Co^{60}\gamma$  - ray source를 이용한 실험을 수행하였다.  $Co^{60}\gamma$  - ray는 반도체에 주로 이온화 방사선으로서 작용한다. 한편 열에 의한 annealing은  $SiO_2$  내의 hole trap에 갇힌 hole들을 활성화 시키고 (Lelis *et al.* 1989, Simons & Hughes 1971), 이는 문턱 전압의 변화에 매우 중요한 작용을 하기 때문에 (McWhorter *et al.* 1990) 온도 변화에 따른 방사선 조사 실험도 수행하였다. 여기서 나온 결과와 우리별 1호에서 측정한 RADFET data를 분석하여 우리별 1호가 받은 총 방사선 양을 구할 수 있었다.

## 2. 이온화 방사선 측정기로서의 MOSFET

MOSFET는 입력 임피던스가 매우 크고 전류를 적게 사용하며 미세 공정이 가능하기 때문에 집적회로 등의 소자에 광범위하게 쓰이고 있다. Bipolar Transistor나 solar cell 등이 방사선 효과에 의해 변형되거나 성능이 저하되는 것과 달리 MOSFET는 작동 범위만 변하는 성질이 있다. 이러한 특성 곡선의 변화를 이용하여 MOSFET를 이온화 방사선 검출기로서 사용할 수 있다. MOSFET의 작동 원리는 다음과 같다 (Srouf 1982). MOSFET의 gate에 bias를 가하지 않은 상태에서는 source와 drain 사이에 전압을 걸어도 전류가 흐르지 못하지만 gate에 positive bias를 걸면 p-type silicon 내의

두 n-type silicon 사이에 n-type channel이 형성되게 된다. 이때 n-type channel이 형성되어 source와 drain 사이에 전류가 흐르기 시작하는 때의 gate의 bias 전압  $V_{gs}$ 를 문턱 전압이라고 한다. 한편 고에너지 입자들이나 광자가  $\text{SiO}_2$ 에 입사되면 oxide에는 입사된 입자의 에너지에 비례하는 electron-hole pair가 생성된다. 상온의  $\text{SiO}_2$ 에서 electron의 mobility는  $\sim 20 \times 10^2 \text{cm}^2/\text{Vsec}$ 이고 hole mobility는  $\sim 2 \times 10^{-5} \text{cm}^2/\text{Vsec}$ 으로 electron이 hole보다 약 100만 배 정도 빠르므로 electron은 곧 전극을 따라 이동하여 없어지고 hole만 남게된다. 이러한 hole들은 gate에 걸려진 bias에 따라 천천히 이동하다가 oxide 내의 hole-trap에 잡히게 되어 양전하를 형성하게 된다 (Zaininger & Holmes-Siedle 1968, Holmes-Siedle 1974). 이렇게 형성된 양전하는, P-channel MOSFET인 경우, 걸어준 bias 전압을 상쇄시키는 역할을 하게 되므로 MOSFET는 문턱 전압의 변화를 겪게 된다 (Srouf 1982). 여기서 이온화 방사선에 의해 oxide 내에 형성된 space charge에 의한 문턱 전압의 변화는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$-\Delta V_t = \frac{t_{OX} N_{OX}}{2.1 \times 10^{10}} + f(N_i) + g(t) \quad (1)$$

위에서  $t_{OX}$ 는 oxide의 두께( $\mu\text{m}$ )이고,  $N_{OX}$ 는 hole trap의 local area density,  $N_i$ 는 interface state density이다.  $f(N_i)$ 는 interface state creation에 의한 항이고,  $g(t)$ 는 trapped-charge leakage나 annealing에 의한 항이다. 보통  $N_{OX}$ 의 값은  $10^{11} \text{cm}^{-2}$  정도인데,  $N_i$ 는 oxide growth의 조건에 따라  $10^{10} \text{cm}^{-2}$  이하로 낮출 수 있고 특히 P-channel MOSFET의 경우 그 밀도가 더욱 작기 때문에 interface state에 의한 항을 무시할 수 있다.  $g(t)$ 는 주로 온도에 의한 thermal effect에 관여한다고 생각되므로 일정한 온도의 경우 이항도 무시할 수 있다. 이온화 방사선에 의해 생성된 trapped hole이 annealing되는 기작은 thermal emission model로 기술될 수 있다 (Simons & Hughes 1971). 이 모델은 온도가 증가함에 따라 hole-trap에 갇혀 있던 hole들이 열적으로 활성화되어 oxide의 valence band로 여기되고, valence band에 일단 들어간 hole들은 silicon substrate로 빠져나가게 되는 과정을 가정한다. 이때는 온도가 중요한 역할을 하므로 문턱 전압 변화에 온도가 미치는 영향을 다음과 같이 정량적으로 계산할 수 있다.

$$P_t(\phi_t, t) = P_0(\phi_t) \exp\left(-AT^2 \exp\left(-\frac{\phi_t q}{kT}\right) t\right) \quad (2)$$

위에서  $P_t$ 는 trapped hole distribution function이다. 온도가 커질수록  $P_t$ 가 작아지는 것을 알 수 있다. 그 결과로 양전하의 수가 감소되어 bias 전압에 미치던 영향이 줄어들게 된다. 다시 말하면 문턱 전압의 변화를 감소시키는 역할을 하게 된다. 또한  $P_t$ 가 초기 상태, 즉  $P_0$ 에 비례하는 값을 주목할 필요가 있다. 이것은 oxide 내에 trapped hole이 많이 있을 수록 온도의 효과가 더 크게 나타난다는 것을 의미하기 때문이다.

### 3. $\text{Co}^{60}\gamma$ - ray를 이용한 MOSFET의 특성 곡선 측정

본 연구에서는 실제로 이온화 방사선의 양에 따른 MOSFET의 특성 곡선의 변화를 측정하였다. 방사선원으로는 원자력 연구소의 고준위 방사선 조사실의  $\text{Co}^{60}\gamma$  - ray를 사용하였다.  $\text{Co}^{60}\gamma$  - ray는

1.17MeV와 1.33MeV의 에너지를 가진 광자를 방사하기 때문에 평균적으로 단위 광자 당 1.25MeV라고 생각해도 좋다. 이러한 에너지 대의 광자는 대부분 Compton scattering을 하며, 이온화 방사선으로서 보통의 에너지 대의 전자나 양성자와 거의 비슷한 효과를 보인다 (Ray *et al.* 1992). Co<sup>60</sup> 방사선 원으로부터 54cm 떨어진 곳에 실험 장치를 위치시켜 수 % 이내의 오차로 시간 당 0.09MeV (SiO<sub>2</sub>)의 dose를 받도록 하였다. 실험에는 방사선 검출기로서 널리 사용되는 TOT500 RADFET을 사용하였다. TOT500 RADFET은 P-channel MOSFET을 개량한 것으로 그 안에 K-type과 R-type이 있다. K-type은 보통의 MOSFET보다 oxide의 두께가 2배 두껍고, R-type은 10배 두껍다. K-type은 넓은 영역의 dose까지 작동하는 장점이 있고, R-type은 동작 영역은 작지만 더 민감하다는 장점이 있다.

우선 온도를 상온으로 일정하게 유지시키면서 총 방사선에 대한 문턱 전압 변화를 측정하여 그림 1과 같은 결과를 얻었다. 이 결과에서 R-type은 문턱 전압이 7V 변하는데 0.015 Mrad (SiO<sub>2</sub>)가 필요하고 K-type은 0.16 Mrad (SiO<sub>2</sub>)가 필요한 것을 볼 수 있으므로 R-type이 약 10배 민감한 것을 알 수 있다. 우주 환경에서는 오랜 시간에 걸쳐 많은 양의 dose를 받게 되므로 K-type의 RADFET을 사용하는 것이 적당하다.

두 번째 실험은 온도 변화에 의한 효과를 측정하기 위하여 동일한 장소에서 동일한 dose 양으로 앞의 방법과 같이 4시간 동안 수행하였으며 온도를 18°C와 72°C 사이에서 두 주기 동안 변화시키며 실시하였다. 그 결과를 그림 2에 나타내었는데, 이 그림에서 두번째 온도 주기에서의 thermal effect가 더 크게 나타난다는 점이 주목된다.

이와 같은 결과가 나오는 이유는 dose가 증가할수록 hole-trap에 갇힌 hole들이 증가하고, 따라서 thermal emission에 의해 hole-trap에서 탈출하는 hole의 양도 증가하기 때문이라고 생각된다. 예를 들어 온도가 72°C 일 때, dose가 0.08 Mrad인 경우는 0.9V 만큼의 변화를 가져온 데 비해 dose가 0.29 Mrad일 때는 2.5V 만큼 문턱 전압 변화에 영향을 주었다. 즉 dose가 클수록 thermal emission 효과가 크게 나타난 것을 의미한다. 이는 초기상태의 trapped hole분포  $P_0(\phi_t)$ 가 문턱 전압 변화에 많이 기여한다는 것을 의미하며 식 (2)에서 기술한 바와 같다.

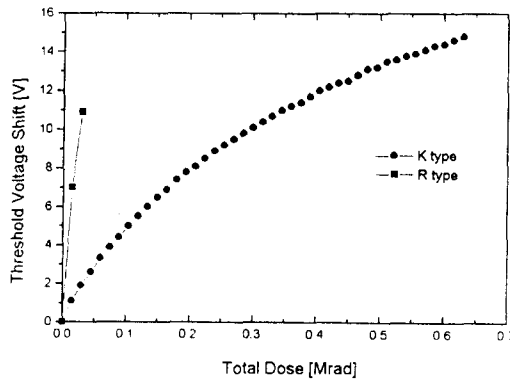


그림 1. 총 방사선에 따른 R-type과 K-type의 문턱 전압 변화.

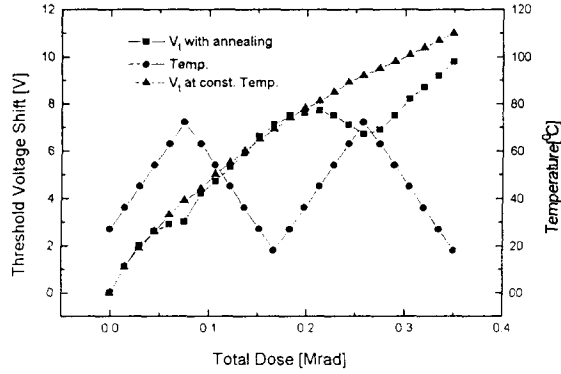


그림 2. 문턱 전압 변화의 온도에 의한 변화.

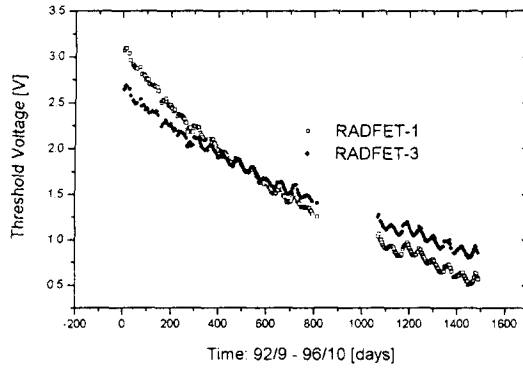


그림 3. 1992년 9월부터 1996년 10월까지 우리별 1호의 RADFET-1과 RADFET-3의 문턱 전압 변화.

#### 4. 우리별 1호에서의 총 방사선 양 측정

앞에서의 RADFET 보정결과를 이용하여 우리별 1호의 RADFET-1과 RADFET-3의 실험 결과를 분석하였다. RADFET-3는 우리별1호 module 안 쪽에 있고 RADFET-1은 바깥 쪽에 있어 RADFET-3가 상대적으로 더 많이 shielding되어 있다. 그림 3은 우리별 1호가 방사된 1992년 9월부터 1996년 10월까지의 RADFET-1 및 RADFET-3의 문턱 전압을 나타낸 것으로 문턱 전압이 총 방사선에 따라 감소하는 것을 볼 수 있다(앞에 설명한 그림에서는 문턱 전압이 증가하는데 실제로는 부호가 음수인 값의 절대값만 취해서 그러기 때문이다).

그림 3의 결과에서 RADFET-1은 4년에 걸쳐 2.5V의 문턱 전압 변화가 있었고, RADFET-3는 1.7V의 변화가 있었음을 알 수 있다. RADFET-1이 RADFET-3보다 위성체의 바깥 부분에 존재하기 때문에 shielding 효과를 적게 받아 더 많은 문턱 전압 변화를 보여준 것으로 생각된다. 한편 그림 3의

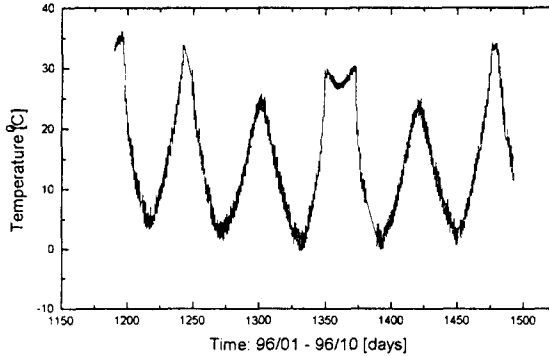


그림 4. 1996년 1월에서 1996년 10월까지의 TDE 온도.

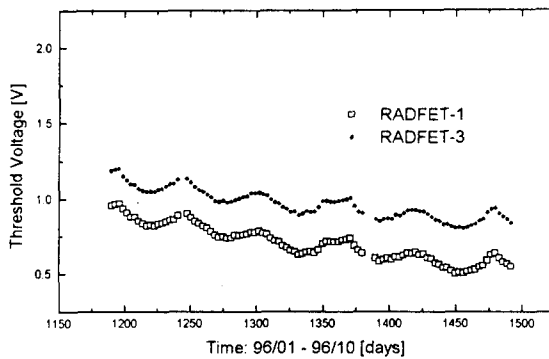


그림 5. 1996년 1월에서 1996년 10월까지의 문턱 전압 변화.

결과에 회로의 증폭에 의한 효과를 보정해 주어야 하므로 이를 고려하면 실제로는 RADFET-1은 7.5V, RADFET-3는 5.1V의 문턱 전압 변화를 겪은 것과 같은 것으로 나타난다. 이 값을 원자력 연구소의  $Co^{60}$   $\gamma$ -ray source를 이용하여 보정한 결과와 비교하면 RADFET-1은 191 krad ( $SiO_2$ ), RADFET-3는 114 krad ( $SiO_2$ )의 방사선을 받았다고 말할 수 있다.

한편 Dose에 따라 threshold voltage는 항상 감소해야 하는데 시간에 따라 진동하는 등 오히려 부분적으로 증가하는 현상이 보인다. 이는 온도의 변화에 의한 열적 효과로 TDE 온도와 RADFET-1, 3의 문턱 전압을 비교하며 그린 그림 4와 그림 5에서 그 타당성을 확인할 수 있다.

### 5. 결론 및 논의

본 연구에서는 우주의 방사선에 의한 총 조사량을 측정하기 위해 우리별 1호에서 사용된 MOS-FET를 보정하고자 원자력 연구소의 고준위 방사선 조사실에서  $Co^{60}$   $\gamma$ -ray source를 이용하여 실험

하여 다음과 같은 결과를 얻었다. 즉 Dose 양의 증가에 따라 음으로 걸어진 문턱 전압의 값이 감소 (절대값은 증가)하였다. 처음에는 선형적인 모습을 보이다가 어느 정도 지나면 포화되는 경향을 보였다. 또한 온도의 증가에 따라 문턱 전압의 절대값이 감소하였다. 이 경우 oxide 내의 trapped hole density에 따라 그 효과가 커지는 것을 확인하였다. 이와 같은 실험 결과와 우리별 1호의 RADFET-1, 3의 data를 분석하였다. 4년 동안 우리별 1호의 RADFET-1은 191 krad (SiO<sub>2</sub>), RADFET-3는 114 krad (SiO<sub>2</sub>)의 방사선을 받은 것으로 나타났으며 TDE data에서 나타났던 특이한 진동은 온도에 의한 영향이었음을 알 수 있었다.

MOSFET는 그 구조의 단순성 때문에 앞으로 총 방사선 양을 측정하는데 많이 사용될 전망이다. 한편 본 연구의 결과로 나타난 바와 같이 온도에 의한 효과가 매우 크므로, 우주 환경 측정을 위해 위성에 사용하려면 세밀한 온도 보정이 필요하다. 이 온도 효과는 이미 축적된 방사선 양의 크기에 따라서 달라지므로 MOSFET의 특성에 대한 물리적 이해와 이를 바탕으로 한 모델의 개발이 실험과 함께 수반되어야 할 것이다.

#### 참고문헌

- Garrett, H. B & Pike, C. P. 1980, Space Systems and Their Interactions with Earth's Space Environment, Progress in Astronautics and Aeronautics (New York Univ. Press: New York), 71
- Holmes-Siedle, A. G. 1974, Nuclear Instrument and Method, 121, 169
- Kivelson, M. G. & Russell, C. T. 1995, Introduction to Space Physics (Cambridge Univ. Press: New York)
- Lelis, A. J., Oldham, T. R., Boesh Jr., H. B. & McLean, F. B. 1989, IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-36, 1808
- McWhorter, P. J., Miller, S. L. & Miller, W. M. 1990, IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-37, 1682
- Ray, K. P., Mullen, E. G., Bradley, T. E., Zimmerman, D. M. & Duff, E. A. 1992, IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-39, 6
- Simons, M. & Hughes, H. L. 1971, IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-18, 106
- Srouf, J. R. 1982, Basic Mechanisms of Radiation Effects on Electronic Materials, Devices, and Integrated Circuits (Defense Nuclear Agency: Washington)
- Zaininger, K. H. & Holmes-Siedle, A. G. 1968, IEEE Trans. Reliability, R-17, 1