고 방사선 환경을 위한 상용 디지털-아날로그 컨버터의 감마선 조사 시험 결과 및 분석

권 인 용[1,*]

[1]한국원자력연구원 원자력ICT연구부

The Irradiation Test Result and Analysis of a Commercial Digital-to-Analog Converter for Using in Harsh Radiation Environments

Inyong Kwon[1,*]

[1]*Nuclear ICT Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute, 111, Daedeok-daero 989 beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon 34057, Republic of Korea*

Abstract - This work presents irradiation test results of a commercial digital-to-analog converter (DAC) which is an essential component widely used in circuits and systems to convert natural signals from digital bits. Especially, a DAC requires a radiation tolerance in nuclear applications, for instance a nuclear black box which can store and transfer necessary data observed the status of nuclear reactors in accident situations like Fukushima. The selected DAC is AD5433 of 10-bit and 10 MHz for multipurpose applications such as waveform generators, analog processing, instruments, programmable amplifiers and attenuators, digitally controlled calibration, composite video, and ultrasound. The test PCB includes two design-under-test (DUT) DACs controlled by a microcontroller communicating with a PC. We observed the DUTs for 21 hours in the facility of high gamma energy irradiation at KAERI. The 10 V DAC outputs reached 3% of an allowable error after 51 and 48 mins at the irradiation dose of 846 and 825 Gy, respectively. In the environment of severe accidents, electrical components for observing reactor behaviors should be survived up to 5 kGy in total ionizing dose for approximately 72 hours that is minimum time to mitigate the accidental situation as soon as possible. However, the DACs were operated under 1 kGy, that is, we need a better DAC specialized for the nuclear applications required such harsh environments.

Key words : Digital-to-analog converter, Gamma irradiating test, Harsh environment, Radiation tolerant circuit

서 론

디지털 아날로그 컨버터는(DAC: digital-to-analog converter) 마이크로 프로세서 등 디지털 연산기기에서 처리한 0과 1의 신호를 자연적이고 연속적인 아날로그 신호로 변환해 주는 중요한 장치이다. 이러한 디바이스는 부드러운 음질의 스피커 출력, 파형 생성기, 펌프 및 모터 등 기계 제어, 영상 신호 송출 등 다양한 분야에서 중요하게 사용되고 있다. 근래에는 집적회로 공정과 설계 기술의 발달에 힘입어 12 bit 이상의 해상도와 함께 수백 MHz에서 수 GHz 대역의 속도를 보이는

* Corresponding author: Inyong Kwon, Tel. +82-42-868-4925, Fax. +82-42-868-8034, E-mail. ikwon@kaeri.re.kr

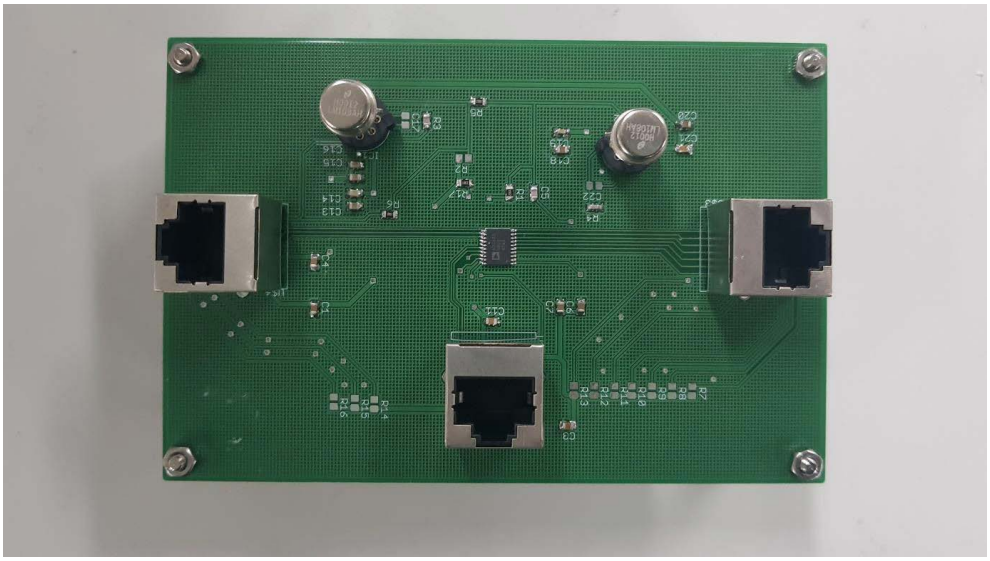

Fig. 1. Configuration of the design-under-test (DUT) PCB for the selected DAC tested in the gamma irradiation facility at KAERI.

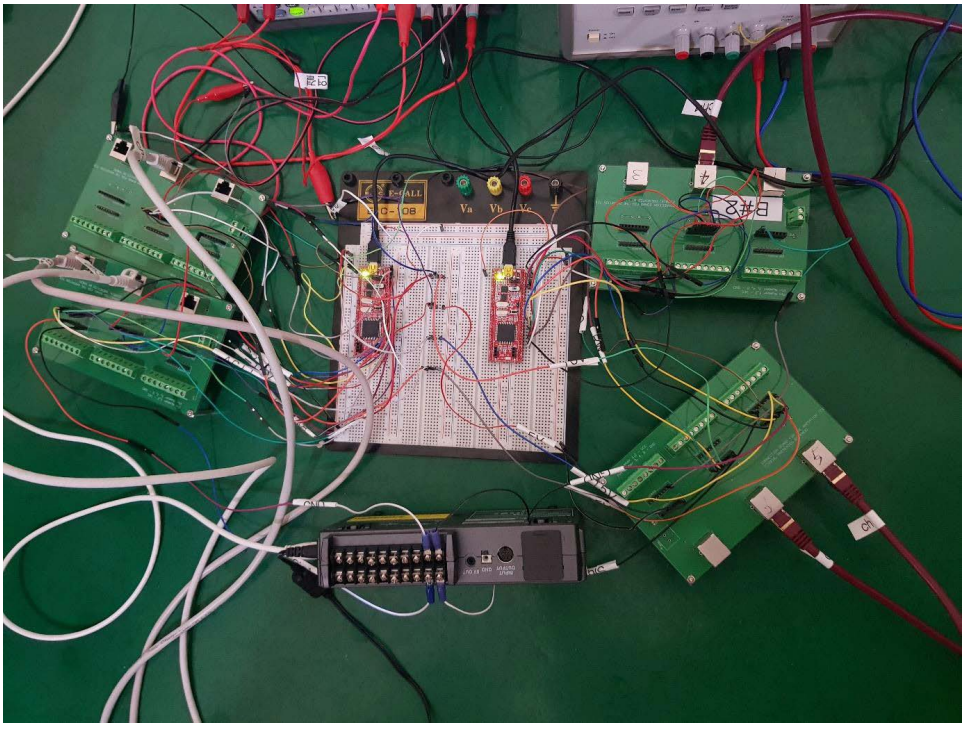

Fig. 2. Configuration of the designed data acquisition system placed in the outside of the irradiation room.

첨단 DAC들이 사용되어 인간의 삶의 질 향상에 많은 영향을 끼치고 있다(Chung *et al*. 2018; Fan *et al*. 2018).

특히, 원자력발전소의 경우 계통 시스템을 제어하기 위해 수많은 펌프와 모터들이 사용되는데 이를 위해서는 안정적인 DAC가 필수적이다. 다양하고 까다로운 검증과 인허가 절차를 거친 디바이스들이 사용되고 있으나 후쿠시마와 같은 극단적 사고상황에서도 동작하기 위해서는 높은 수준의 방사선에서도 견딜 수 있는 특별한 구조가 필요하다. 예를 들면, 중대 사고상황에서 계측 필수 정보를 수집하고 분석하여 주요 기기를 컨트롤할 수 있는 원전 블랙박스의 경우 DAC가 방사선 환경에서 정상 작동을 하여야 아날로그 기기들을 제어할 수 있는데, DAC 내부의 디지털 회로들이 방사선에 영향을 받

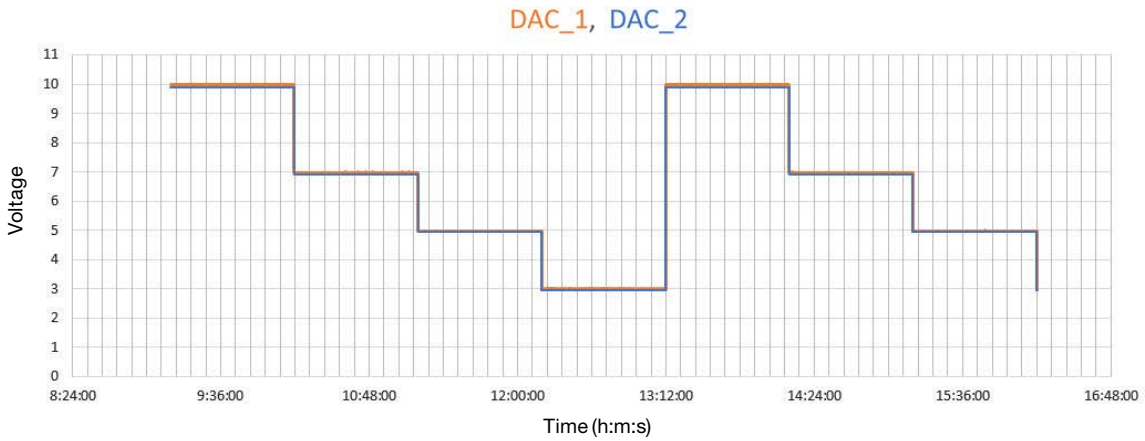

Fig. 3. Laboratory test results of the analog outputs as 10, 7, 5, 3 V for the two DUTs.

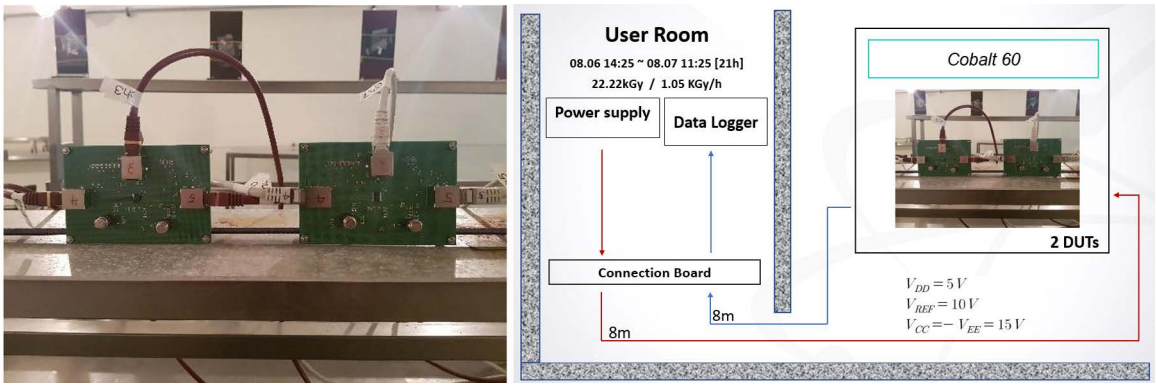

Fig. 4. Photo and configuration of the DUTs placed in the gamma-ray irradiation facility at KAERI.

아 잘못된 신호를 발생할 수 있다(Kim *et al*. 2018).

이러한 필요성에 의해 범용 DAC를 선정하여 한국원자력연구원의 고준위 방사선(Cobalt-60, 490 kCi) 조사 시험 시설에서 조사 시험을 진행하였다. 마이크로 컨트롤러를 이용하여 대상 DAC에 디지털 신호를 입력하였고 출력 아날로그 회로를 방사선량에 따라 측정하였다. 2개의 샘플은 10 V DAC 아날로그 출력이 유지되어야 하는데 각각 51분과 48분이 지난 시점, 즉 846 Gy와 825 Gy의 방사선량이 조사된 시점에서 3%의 허용 오차 범위를 넘어서는 결과를 보였다.

이 논문에서는 해당 시험 방법 및 결과를 기술하고 내부 회로의 방사선 영향을 분석하여 고방사선 환경에서도 견딜 수 있는 새로운 형태의 DAC 구조를 개발하기 위한 기초 데이터를 제시하고자 한다.

재료 및 방법

본 논문에 사용된 DAC AD5433 (Analog Device, 미국)는 10-bit의 디지털 신호를 처리하여 아날로그 출력신호로 변환시킬 수 있으며 10 MHz의 고속으로 동작하여 다양한 응용분야에서 사용이 가능한 범용 디바이스이기 때문에 선정하였다. 조사 시험을 진행할 DAC를 위하여 PCB를 Fig. 1과 같이 설계하였다. 방사선이 직접적으로 영향을 미치는 공간 밖에서 디지털 신호를 입력하고 전원 공급 및 출력 신호를 수신하여야 하기 때문에 인터넷용으로 사용되는 RJ45 포트를 3개 설치하고 전송 선로 간 신호 간섭 및 잡음을 줄이기 위해 캐패시터들을 배치하였다. 캐패시터의 경우 수동형 소자로서 능동형 소자와 달리 Impact Ionizing Effect에 의해 추가 전하를 생성하기 어렵기 때문에 방사선량에 따른 물리적인 변화가 거의 없다(Cressler and Mantooth 2013).

데이터를 입출력하는 것을 제어하기 위하여 ATmega128을 코어로 하는 JMOD-128-1 컨트롤러(제이씨넷, 한국)를 사용하였다. 해당 모듈은 USB 통신을 사용하여 PC와 연결한 후 터미널 에뮬레이터 프로그램에서 코딩 및 컴파일이 가능하다. 사용 모듈은 데이터 전송 핀을 포함하여 총 58개 핀이 제공된다. Fig. 2와 같이 DAQ (data acquisition system) 시스템

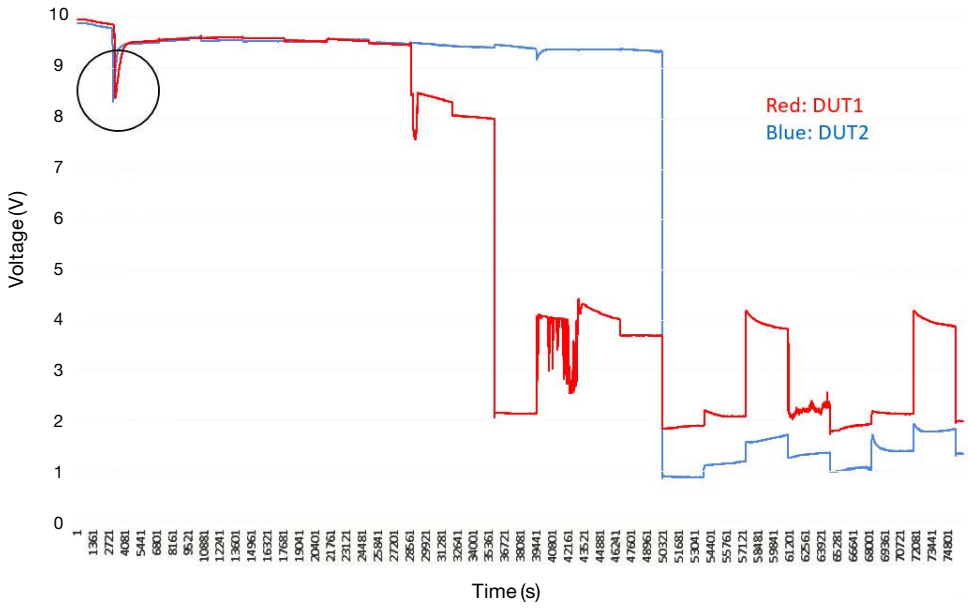

Fig. 5. Plot of the irradiated DUTs up to 22.22 kGy in total.

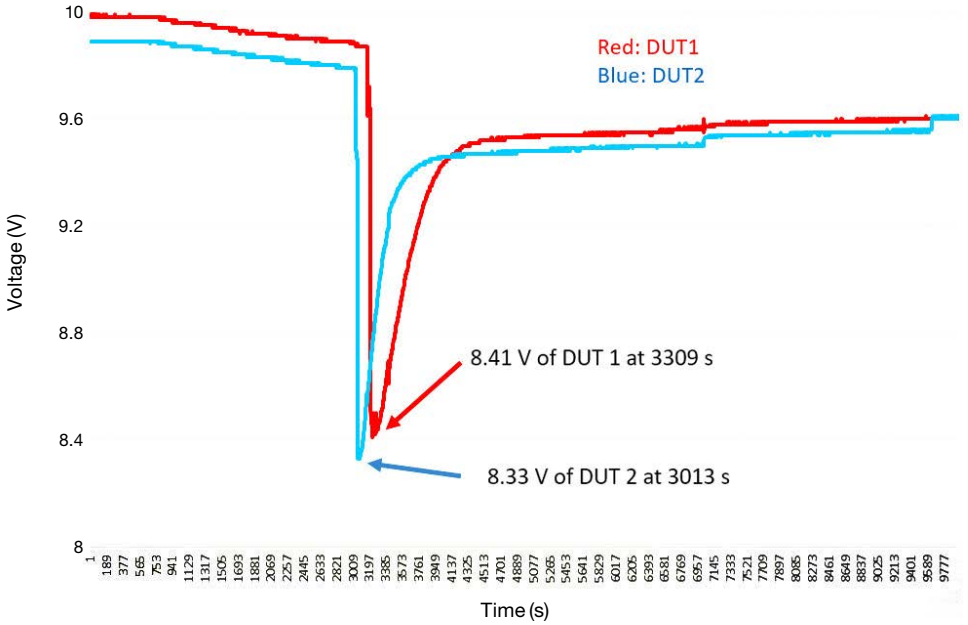

Fig. 6. Zoomed-in plot of the irradiated DUTs with a glitch around 800 Gy corresponding to about 3000 seconds.

을 구성하였고 방사선 조사 시험 전 DAQ와 DUT 간의 원활한 데이터 통신이 되는지를 확인하기 위하여 Fig. 3과 Lab 실험을 진행하였다. 총 4가지 아날로그 값인 10, 7, 5, 3 V을 출력 전압으로 설정하고 측정하였을 때 각각의 신호가 일정하게 DAQ 시스템에 입력되는 것을 확인하였다.

완성된 DUT는 한국원자력연구원의 고준위 방사선(Cobalt-60, 490 kCi) 조사 시험 시설에 Fig. 4와 같이 설치되었고 DAQ 시스템은 약 8 m 뒤에 방사선에 안전한 공간에서 작동하도록 배치하였다.

결 과

Fig. 5와 같이 총 22.22 kGy (1.05 kGy·h^{-1})의 감마선을 21

시간 동안 조사한 결과 DAC가 정상적인 Fig. 3과 비교하였을 때 정상적인 아날로그 출력이 발생시키지 못하는 것을 확인하였다. 미리 설정된 DAC 디지털 입력 값은 1시간이 경과할 때마다 10 V에서 7, 5, 3 V로 변해야 하는데 1시간이 채 지나지 않아 10 V의 출력을 유지하지 못하고 하향 글리치가 심하게 발생하는 것을 확인하였다. 이후에도 7 V의 출력이 나와야 하나 9.5 V 근방의 불안정한 출력이 형성되고 약 8시간 이후에는 DUT1의 경우 완전히 오작동을 하는 것을 확인하였다. 일반적인 아날로그 신호의 오차 허용 범위를 3%라고 가정하였을 때 Fig. 6의 확대 그래프를 분석하면 DUT1의 경우 51분 05초가 경과한 846.16 Gy에서 9.64 V에 도달하였고 DUT2의 경우 48분 47초가 경과한 825.25 Gy에서 9.61 V에 도달한 것을 확인하였다.

고 찰

해당 DAC는 R-2R 래더 타입의 수동형 소자들을 사용하여 방사선의 영향에 강할 것으로 예상하였으나 아날로그 출력 신호가 1 kGy도 안 되는 지점에서 정상작동이 불가능한 것으로 측정되었다. 이는 R-2R 래더를 구성하는 저항의 문제가 아닌 각각의 저항들을 조합해주는 스위치 트랜지스터에서 문제가 생긴 것으로 유추된다(Saks *et al*. 1986; Manghisoni *et al*. 2003; Re *et al*. 2005; Gromov *et al*. 2007; Schwank *et al*. 2008; Fleetwood *et al*. 2014). 일반적인 스위치는 단일 NMOS 트랜지스터를 사용하여 빠른 속도로 동작할 수 있다는 장점이 있지만 방사선 영향에 취약하여 수 백~수 천 개의 NMOS 스위치들이 짧은 시간 동안 받은 방사선에 의해 오작동을 일으킨 것으로 분석된다. 일반적으로 DAC의 성능을 평가하기 위해서는 SNR, 누설전류, INL, DNL 등 다양한 지표를 사용할 수 있지만 본 실험에서 사용한 DAC는 방사선 조사 초기에 동작 자체를 상실하여 측정이 불가능하였다. 기본 동작이 유지되는 DAC가 개발된다면 다양한 평가 지표를 활용하여 방사선이 조사되지 않았을 때와 비교 분석이 가능할 것이다.

결 론

본 논문에서는 상용 DAC의 방사선 조사 시험을 통해서 고 방사선 환경에서도 동작할 수 있는지에 대한 검증을 수행하였다. 원자력 발전소의 중대사고 상황을 가정한다면 약 72시간 동안 5 kGy 수준의 누적 방사선량(TID: Total Ionizing Dose)에서도 디바이스가 정상 동작을 하여야 필수적인 신호들을 전송하고 기기를 제어하여 발전소의 상황을 조기에 완화할 수 있으나 시험에 사용된 DUT는 부적합한 것으로 결론지을 수 있다.

본 논문에서 도출한 시험 결과 및 분석 내용을 바탕으로 NMOS의 방사선 취약점을 보완한 스위치 구조를 이용하여 방사선에 강한 DAC 설계를 진행하고 회로 시스템 최적화를 통하여 실질적인 응용 분야에 쓰일 수 있도록 관련 연구를 지속할 계획이다.

사 사

DAC 실험 구성과 방사선 조사 시험에 도움을 준 충남대학교 이준호 학생, 한국원자력연구원의 김덕현, 신동성 연구원들께 감사인사를 드립니다. 본 연구는 과학기술정보통신부 지원으로 수행되었습니다(NRF-2017M2A8A4017933, 2016M2A8A1952801).

참 고 문 헌

Chung Y-H, Yen C-W, Tsai P-K and Chen B-W. 2018. A 12-bit 40-MS/s SAR ADC With a Fast-Binary-Window DAC Switching Scheme. *IEEE T. VLSI. SYST*. **26**(10):1989-1998.

Cressler J and Mantooth H. 2013. Extreme Enviornment Electronics, CRC Press.

Fan H, Li D, Zhang K, Cen Y, Feng Q, Qiao F and Heidari H, 2018. A 4-Channel 12-Bit High-Voltage Radiation-Hardened Digital-to-Analog Converter for Low Orbit Satellite Applications. *IEEE T. CIRCUITS-I*. **65**(11):3698-3706.

Fleetwood ZE, Member S, Kenyon EW, Lourenco NE, Jain S, Zhang EX, Member S, England TD, Cressler JD, Schrimpf RD and Fleetwood DM. 2014. Advanced SiGe BiCMOS technology for multi-mrad TID-hard electronic systems. *IEEE Trans. Device Mater. Reliab. to Be Publ*. **14**:844-848, doi:10.1109/TDMR.2014.2331980.

Gromov V, Annema AJ, Kluit R, Visschers JL and Timmer P. 2007. A radiation hard bandgap reference circuit in a standard 0.13 μm CMOS technology. *IEEE Trans. Nucl. Sci*. **54**:2727-2733, doi:10.1109/TNS.2007.910170.

Kim S, Lee J, Kwon I and Jeon D. 2018. TID-Tolerant Inverter Designs for Radiation-Hardened Digital Systems. *Nucl. Instrum. Meth. A*. doi: 10.1016/j.nima.2018.10.151.

Manghisoni M, Ratti L, Re V, Speziali V, Traversi G and Candelori A. 2003. Comparison of Ionizing Radiation Effects in 0.18 and 0.25 μm CMOS Technologies for Analog Applications. *IEEE Trans. Nucl. Sci*. **50**:1827-1833, doi:10.1109/TNS.2003.820767.

Re V, Manghisoni M, Ratti L, Speziali V and Traversi G. 2005. Total ionizing dose effects on the noise performances of a 0.13 μm CMOS technology. *Radiat. Eff. Data Work. (REDW),* 2006 *IEEE*. **53**:1599-1606, doi:10.1109/TNS.

2006.871802.

Saks NS, Ancona MG and Modolo JA. 1986. Generation of interface states by ionizing radiation in very thin MOS oxides. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **33**:1185-1190, doi:10.1109/TNS.1986.4334576.

Schwank JR, Shaneyfelt MR, Fleetwood DM, Felix JA, Dodd PE, Paillet P and Ferlet-Cavrois V. 2008. Radiation effects in MOS oxides. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **55**:1833-1853, doi:10.1109/TNS.2008.2001040.

Received: 27 January 2019
Revised: 20 February 2019
Revision accepted: 7 March 2019