

A Study on Radiation-Shielded Electronics Technology Survey

Sun-Tae Hwang, Suck-Ho Hah
Korea Research Institute of Standards and Science

우주방사선차폐 전자공학기술조사 연구

황선대 · 하석호
한국표준과학연구원

(2001년 1월 30일 접수, 2001년 3월 19일 채택)

요약 - 오늘 날 인공위성을 이용하는 통신, 방송, 기상, 환경모니터링 및 원격탐사 등이 각광을 받고 있는 때에 위성에 설치되는 수많은 전자제품 및 부품들의 우주방사선에 대한 내구성이 매우 중요한 문제로 제기되고 있다. 이러한 관점에서 국내에서는 아직 확보할 수 없는 우주방사선차폐 전자공학기술에 관한 정보자료를 조사·수집하여 기술적으로 직접 활용해야할 필요성이 시급하게 대두되고 있다. 따라서 선진국에서 개발된 우주방사선차폐를 위한 첨단전자공학기술에 관한 기술정보·자료를 체계적으로 서술한다.

중심어 : 우주방사선, 에너지 손실, 변위손상, 전류이득, 접합단선, 방사선 내구화, 집적회로

Key words : space radiation, energy loss, displacement damage, current gain, junction burnout, radiation hardening, integrated circuit

서 론

인공위성은 지구주위의 궤도상에서 그 주어진 사명을 수행하는 동안 우주방사선에 노출되어 위성 탑재체내에 설치된 각종 전자제품과 부품들이 우주방사선에 의하여 손상될 수 있다. 이러한 우주 환경에 존재하는 우주방사선은 세가지의 주요성분으로 구성되는데 그들은 은하우주선, 태양우주선 및 지구자장에 의하여 생성된 Van Allen 방사선대(帶)의 포획입자들이다[1]. 역사적으로 우주선은 1911년 V. F. Hess에 의하여 발견되었다. 태양우주선은 그 1차 우주선이 지구를 향하여 빠른 속도로 진행하면서 지구대기층과 충돌하면서 2차 우주선을 생성시키며 그 2차 우주선은 양성자, 중성자, 중간자 및 감마선 등의 우주방사선으로서 지상에 까지 도달하게 된다. 그러나 은하우주선은 약 85%의 양성자, 14%의 알파입자 및 1%의 중이온핵으로 구성되어 있다[2]. 그러나 Van Allen 방사선대내에는 전자, 양성자 및 저에너지의 중이온핵

이 많이 분포되어 있다. 그러한 전자와 양성자 등의 우주방사선은 위성탑재체내의 전자제품 및 부품의 주요 구성요소인 반도체장비에 방사선 손상을 일으킬 수 있다. 이와 같은 방사선 손상은 위성제작자가 위성본체에 설치한 전자장비의 수명에 영향을 끼쳐서 결국은 위성에 주어진 상업적 및 군사적 사명을 수행하는데 필요한 우주에서 체재 시간의 단축을 초래하게 된다. 위성은 방송, 통신, 기상, 지구자원 및 환경탐사 그리고 우주탐험 등에 활발하게 이용되고 있어서 오늘 날 항공우주산업에서 매우 각광을 받고 있는 대상이다. 따라서 우리나라의 우리별 위성, 무궁화 위성 및 다목적 실용위성의 연구·개발사업이 거국적 차원에서 추진되어 오고 있다. Van Allen 방사선대에서의 우주방사선 영향외에도 은하계의 다른 곳에서 출발하여 태양계로 진입된 방사선은 그 위험한 영향을 기존의 우주방사선 환경에 추가하게 된다. 그러므로 지구주위에서 인공위성이 그 주어진 사명을 성공적으로 잘 수행할 수 있도록 하기 위하여 위성

제작자는 각종의 전자제품 및 부품들이 우주공간에서 겪을 수 있는 우주방사선에 의한 장애영향에 대하여 충분한 이해와 예비지식을 갖고 각종의 탑재장비의 특성을 고려하여 위성탑재체를 설계·제작하는 것이 중요하다.

우주방사선 장해

방사선이 물체를 통과할 때 생기는 방사선에너지 손실은 두가지의 성분으로 구분될 수 있다. 즉, 전자저지(electronic stopping)와 핵저지(nuclear stopping)에 의한 에너지 손실이다. 전자저지의 과정에서 우주방사선 입자와 광자가 갖고 있는 대부분의 에너지를 상실하며 이러한 현상을 전리에너지 손실(ionizing energy loss: IEL)이라 한다. 그러나 핵저지의 과정에서 생기는 에너지 손실현상은 비전리에너지 손실(non-ionizing energy loss: NIEL)이라 한다. 비록 우주방사선이 NIEL과정에서는 IEL과정에서 보다 적은 양의 에너지를 손실하지만 우주에서 사용되는 저주파수 bipolar transistor, charge coupled device(CCD) 등과 같은 미세전자부품의 기능을 약화시키는 정도가 NIEL과정에서 압도적으로 더 강하게 나타난다. IEL과 NIEL 현상의 구분은 우주방사선의 종류에 따라 양적으로 다르다. 예를 들면, 중성자는 비전하입자이기 때문에 전리에너지 손실에서 비효율적이지만 그 반면에 양성자는 전하입자이기 때문에 전리에너지 손실에서 대단히 효율적이다. 그러나 중성자와 양성자 모두 어떤 원자의 변위(displacement)를 크게 일으킬 수 있다. 반면에 전자와 광자는 원자의 변위를 훨씬 적게 일으킨다.

전리에너지 손실효과

물질의 전자여기(electronic excitation)는 일차적으로 그 물질이 평형상태로 돌아가는 속도에 따라서 여러 가지의 방사선효과를 일으킨다. 금속내 전자분포는 매우 짧은 시간(~pico-second)내에 평형상태로 돌아간다. 그리고 금속은 그 구성원자에서 전하를 잃어버리지 않는 한 방사선에 의하여 심각하게 영향을 받지 않는다. 반도체의 전자여기는 전자-정공(e-h)쌍을 만드는 내부전리화(internal ionization)현상으로서 평형상태로의 복귀는 10^{-9} s ~ 10^{-6} s의 시정수(time constant)를 갖고서 e-h쌍이 재결합함으로써 이뤄진다. 전장내에서 생성되는 e-h쌍은 전자회로에 중대한 영향을 끼칠 수 있는데 그러한 영향중 가장 중요한 것은 이른바 단일사건효과(single event effect: SEE) 현상이며

SEE에는 단일사건혼란(single event upset: SEU), 단일사건폐쇄(single event latchup: SEL), 단일사건단선(single event burnout: SEB) 및 단일사건게이트파열(single event gate rupture: SEGR) 등이 포함된다. 절연체의 전자여기에서도 역시 e-h쌍이 생긴다. 그러나 절연체의 방사선 피폭에 의한 전기적 효과는 흔히 반도체의 방사선 피폭효과와는 매우 다르다. 절연체는 평형상태로 재정립되기 위한 시정수가 대단히 크므로 집적회로(integrated circuit: IC) 기술에서 널리 사용되고 있는 절연체인 이산화실리콘(SiO_2)내에 생성된 e-h쌍은 전장에 의하여 속히 양분되는 과정에서 정공은 오랜 시간동안 절연체내에 포획되어 있는 상태에 머물게 된다. 그 동안 실리콘(Si)산화물의 성능이 정공에 의하여 심각하게 약화될 수 있다.

비전리에너지 손실효과

우주방사선에 의하여 생기는 수준에서는, solar cell, bipolar transistor 및 charge coupled device(CCD)와 같은 반도체 장비 등에서의 경우를 제외하고, 비전리에너지 손실효과는 무시될 수 있다. 그러나 우주방사선 환경에서 비전리에너지 손실효과를 무시할 수 없는 그러한 장비들 중에서 NIEL에 의하여 발생하는 변위손상(displacement damage)은 e-h쌍의 재결합 또는 e-h쌍중 한쪽 성분의 포획현상에 이르게 된다. 그 결과로 solar cell에서 태양에너지 전환효율(solar power conversion efficiency), bipolar transistor에서 전류이득(current gain), 그리고 CCD영상기에서 전하이전효율(charge transfer efficiency) 등과 같은 중요한 전기적 매개변수들과 관련되는 기능이 상실될 수 있다.

IC 기술에 대한 방사선 효과

현재, 가장 많이 사용되고 있는 IC 기술은 CMOS(complementary metal oxide silicon) 기술과 bipolar장치 기술이다.

(1) CMOS 기술의 경우

CMOS는 N-channel MOS 장비와 P-channel MOS장비를 함께 사용하는 IC 기술로서 계수형장치에서 직류전력의 소산(dissipation)을 최소화하기 때문에 이 문제를 굉장히 중요시 하고 있는 항공우주산업에서 상당히 인기있는 전자기술중의 하나이다. MOS장비는 대다수가 담체(carrier)장비이기 때문에 CMOS 기술의 경우, 방사선의 선속밀도가 실리콘(Si)의 비저항에 영향을 끼칠 정도로 높지

않은 한 구성원자의 변위손상은 거의 문제가 되지 않는다. 우주공간에서는 통례적으로 방사선선량률의 수준이 높지 않기 때문에 오직 전리화(ionization) 과정만이 방사선 효과와 관련하여 중요시되고 있다. 실제로 CMOS는 전리화가 Si에서 발생하였는지 또는 SiO₂에서 발생하였는지에 따라서 다르게 전리화 손상에 반응한다. 본래 CMOS 기술에 연계된 부수적 장비들이 작동중에 고에너지의 은하우주선 또는 태양우주선으로부터의 강한 방사선과 고에너지 포획양성자에 조사되면 전기적 폐쇄작용[3]과 접합단선(junction burnout)의 결과를 초래하며 또는 금속화(metalization) 현상을 일으킬 수도 있다.

(2) Bipolar장치 기술의 경우

Bipolar 전자제품이 전리방사선에 조사되면 부품의 표면을 덮고 있는 산화물에 포획전하가 생성되어 표면전위에 영향을 끼치며 그 부위에 있는 실리콘(Si)의 종류에 따라서 표면축적(surface accumulation) 현상으로부터 표면역전(surface inversion) 현상에 걸치는 다변적 변화를 알 수 있다. 또한 Si/SiO₂ 계면에서 표면재결합 속도를 증가시키는 계면상태를 조성함으로써 bipolar IC의 전류이득을 약화시킬 수 있다. 이러한 방사선 효과는 잘 알려져 있는 현상으로 특히, IC내의 bipolar transistor는 높은 방사선선량률보다 오히려 낮은 방사선선량률에 조사될 때 더 빠르게 그 성능이 약화된다[4]. 이러한 결과는 MOS장치에서의 경험과는 정반대의 현상이다. 그러나 최근의 연구결과는 항공우주산업에 사용할 수 있는 전자제품 및 부품의 방사선에 대한 내구성 보증절차를 개발하면서 위에서의 변칙적 현상을 규명하고자 하는 실험데이터를 제시하고 있다[5]. 한 예로서, 인공위성이 우주에서 주어진 사명을 완수하도록 하기 위해서는 위성탑재체내의 bipolar장치를 방사선에 대한 내구성 보증절차에 따라서 설계·제작하는 것이 매우 중요한 과제라 할 수 있다.

우주환경용 전자제품 기술

우주공간 관련프로그램에서 방사선에 대한 내구성 문제는 회로(circuit), 장치(system) 및 고안물(device) 등의 방사선에 대한 내구화(hardening) 기술을 조합함으로써 해결될 수 있다. 회로 및 고안물 설계문제를 일차적으로 고려할 때, 그 설계는 전자장치의 기능을 수행하는데 필요한 미세전자회로의 유용성에 기반을 두게 된다. 일찍이, 군

사적 목적과 우주연구장치용으로 bipolar IC들이 대단히 많이 사용되었으나 1980년대말 이후부터 CMOS IC의 낮은 전력소산과 진전된 기능활용의 가능성으로 인하여 CMOS 기술이 널리 상용화되었다.

CMOS 기술

CMOS 장비는 전압의존성을 갖고 있어서 N channel MOS와 bipolar 장비와 다르게 높은 작동전류를 필요로 하지 않는다. CMOS는 열을 적게 소산시키며 아울러 전력소모가 적다는 유리한 특징을 나타내기 때문에 방사선에 내구적인 CMOS가 계속 개발되고 있다. CMOS chip은 탈열기(heat sinks)나 냉각선(cooling fans)을 사용하지 않고서도 전자장치 제작에 사용될 수 있을 뿐만 아니라 낮은 전류의 가용성은 보다 적고 더 가벼운 전원의 사용을 가능하게 한다. 그러한 조건의 장비가 우주공간에서의 활용에 필수적이기 때문에 적은 전력소모와 정적 설계에 연계되어 보다 더 가벼운 탑재체(payload)를 가능하게 하는 CMOS 기술은 인공위성사업에 있어서 매우 이상적인 첨단전자기술이라 할 수 있다.

방사선 내구화 기술

방사선에 대한 내구화는 두가지 방법에 의하여 성취될 수 있다. 하나는 특정 설계 및 처리기술에 의한 것이고 다른 하나는 오직 웨이퍼(wafer) 처리기술이다. 방사선에 내구성을 갖는 CMOS회로 제작에 있어서 몇가지 방법이 있다. 즉, guardband 삽입, field oxide 주입, SIMOX(silicon isolated by implanted oxygen) 처리 및 SOS(silicon-on-sapphire) 처리 등이다. SIMOX와 SOS의 경우, transistor 사이에 있는 Si 표면과 그 표면 역전(inversion)에 연계된 전류누설이 없어지게 된다. 이와 같이 절연체에 의한 격리처리에 의하여 고에너지 우주방사선에 의한 단일사건폐쇄(single event latchup: SEL)의 가능성을 제거할 수 있다. 특히, 여러 가지의 전자잡음에 대한 높은 면역성은 CMOS의 내구화 처리에서 얻을 수 있는 중요한 특성이기도 하다.

우주전자공학 응용기술

미국 Washington, DC 소재, 해군연구소(Naval Research Laboratory: NRL), 방사선과학부 소속의 Dr. Dennis B. Brown에 의하면[6], 우주전자공학 응용기술로서 세가지의 “우주를 향한 선진기술”이

선택될 수 있다.

불휘발성 기억장치 기술

불휘발성 기억장치(nonvolatile memories)는 전원이 단절되어 있는 상태에서 입수된 정보를 그대로 유지하는 기능을 갖는다. 넓은 범위에서 다양한 특성을 갖고 있는 불휘발성 기억장치로서 다음과 같은 것들이 있다.

- (1) ROM : Read Only Memory
- (2) PROM : Programmable Read Only Memory
- (3) EPROM : Erasable Programmable Read Only Memory
- (4) OTP EPROM : One Time Programmable Erasable Programmable Read Only Memory
- (5) FG EEPROM : Floating Gate Electrically Erasable Programmable Read Only Memory
- (6) SNOS EEPROM : Silicon-Nitrate-Oxide-Semiconductor Electrically Erasable Programmable Read Only Memory
- (7) Ferroelectric Capacitor and Thin Film Magnetics Memories

전력집적회로 기술

우주에서 사용될 전자장치는 방사선에 내구성을 갖는 전원으로부터 전력을 공급받아야 하는데 이 경우, 미세조정전력이 필요하며 따라서 전력의 신뢰도가 인공위성사업의 성패에 매우 중요한 관건이 된다. 지구궤도상에 있는 대부분의 인공위성은 대형의 배열을 갖고 있는 태양전지의 전력에 의존하여 주어진 사명을 수행한다. 미세조정된 전력을 각종의 전자제품에 공급하는 방법에는 집적전력식과 분배전력식의 두가지 기법이 있다. 오늘 날, 우주산업에서 분배전력식 기법이 더 실용적인 것으로 알려져 있다[7]. 미국 AT&T의 전력집적회로(power integrated circuit: PIC) 기술은 bipolar와 CMOS 및 DMOS (double-diffused MOS)를 합축한 BCDMOS 기술로 인정받고 있다[8].

Silicon-on-Insulator (SOI) 장치 기술

SOI장치 기술은 유전체 절연(dielectric isolation: DI)장치 기술과 SOS장치 기술의 후속 기술이라 하겠다. SOI 장치의 가장 중요한 점은 고에너지 방사선에 의하여 발생하는 "soft error"에 대한 감수성과 고준위 X-선 피폭에 의한 혼란(upset) 현상을 줄일 수 있고 폐쇄(latchup) 현상을 제거할 수 있다는 것이다. SOI 구조를 이용하여 SIMOX (separation by implantation of oxygen) 구조와

BESOI (bond and etchback SOI) 구조형성이 가능하기 때문에 그 제작 기술은 CMOS와 bipolar IC 제작기술과 양립될 수 있다. 한편, SIMOX 구조는 고성능의 CMOS 제작에 응용될 수 있다.

결 론

위성탑재체내의 각종 전자제품 및 부품의 전자회로가 고에너지 방사선피폭에 의하여 단일사건혼란(SEU)을 겪으면 soft error 현상이 발생하지만, 어떤 회로에서는 고에너지 방사선피폭에 의한 충격으로 hard error가 발생하여 영구적 회로손상을 일으키는 경우도 있다[9]. 특히, 불휘발성 기억장치에서 hard error현상이 발생되면 단일사건게이트파열(SEGR)을 겪게 된다. 이러한 관점에서 고에너지의 우주방사선 역시 전자회로의 기능파손을 일으킬 수 있을 정도의 높은 전류를 발생시킬 수 있다. CMOS 집적회로에서 SEL 현상, NMOS 장치에서 snapback 현상, 그리고 transistor에서 SEB 현상 등은 전자회로파손의 결과를 초래하게 된다. 이와 같은 단일사건 현상(single event phenomena: SEP)을 첨단전자공학기술로 해결하기 위하여 국내에서도 우주환경에서 방사선피폭효과를 극복할 수 있는 미세전자회로 기술의 연구·개발이 활성화 되어 그 기술이 국산 인공위성에 조만간 활용될 수 있어야 한다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 시행한 해외기술정보 조사사업의 일환으로 지원받아 수행한 과제로서 우주방사선차폐 전자공학기술 조사연구와 관련하여 "우주를 향한 선진기술"자료를 최초로 제공한 미국 Naval Research Laboratory (Washington, DC 소재)의 Dr. Dennis B. Brown에게 감사하는 바입니다. 본 연구는 과학기술부에서 시행한 해외 기술정보사업의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. F. W. Sexton, "Measurement of Single Event Phenomena in Devices and ICs," *1992 IEEE NSREC, Short Course*, (1992).
2. P. Merger, R. Ramaty, and W. R. Weber, "Cosmic Rays-Astronomy with Energetic Particles," *Physics Today*, 27, 23-30(1974).
3. T. P. Ma and P. V. Dressendorfer, *Ionizing Radiation Effects in MOS Devices and*

- Circuits*, Wiley-Interscience Publication, New York(1989).
4. A. Wei, S. L. Kosier, and R. D. Schrimpf, D. M. Fleetwood, W. E. Combs, "Dose-rate Effects on Radiation Induced Bipolar Junction Transistor Gain Degradation," *Appl. Phys. Ltrs.*, 65(15), 1918-1920(1994).
 5. L. Cohn, "Linear Bipolar: Total Dose/Dose Rate Issues," presented at 1996 Radiation Hardened Electronics Technology Conference, Lexington, MA, Nov. 5-7(1996).
 6. IEEE NPSS Radiation Effects Committee, *1991 IEEE NSREC, Short Course*, San Diego, CA(1991).
 7. John C. Desko, Jr., "The Application of Power ICs and Smart-Power to Space System," *1991 IEEE NSREC, Short Course*(1991).
 8. C. Y. Lu, N. S. Tsai, C. N. Dunn, P. C. Riffe, M. A. Shibib, R. A. Furnanage, and C. A. Goodwin, "An Analog/Digital BCDMOS Technology with Dielectric Isolation-Devices and Processes," *IEEE Trans. on Elec. Dev.*, 35(2), 230-239(1988).
 9. IEEE NPSS Radiation Effects Committee, *1992 IEEE NSREC, Short Course*, New Orleans, LA(1992).