

실리콘 에피-웨이퍼 기반의 펄스감마선 검출센서 최적화 연구

이남호^{1*} · 황영관¹ · 정상훈¹ · 김종열¹ · 조 영²

A Parametric Study of Pulsed Gamma-ray Detectors Based on Si Epi-Wafer

Nam-Ho Lee^{1*} · Young-Gwan Hwang¹ · Sang-Hun Jeong¹ · Jong-Yeol Kim¹ · Young Cho²

^{1*}Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-353, Korea

²Agency for Defense Development, Daejeon 305-600, Korea

요 약

본 연구에서는 전자장비 내방사화 기술의 새로운 효율적 접근방법인 전원제어형 방호장치에서 핵심 기능을 수행하는 고속 반도체 센서를 개발하고 그 특성을 분석하였다. 먼저, 펄스방사선에 의한 다이오드 내부에서의 생성 전하를 계산한 후 TCAD로 모델링하여 42 μm 진성층의 실리콘 에피텍시 웨이퍼 기반의 고속 신호탐지용 PIN 다이오드 센서를 다양한 구조로 설계하였다. PAL의 Test LINAC의 전자빔 변환 감마방사선 4.88E8 rad(Si)/sec에 대한 실측시험에서 소자의 면적에 비례하는 광감도와 응답속도 증가 결과를 얻었으며 포화특성과 소자의 균일성을 기준으로 2 mm 직경의 센서를 최적으로 판단되었다. 선정 센서를 대상으로 한 펄스감마선 고출력 범위(2.47E8 rad(Si)/sec ~ 6.21E8 rad(Si)/sec)로 선량을 가변시험에서는 개발한 소자가 시험장치의 고 선량률 영역에서 전원제어 신호처리예 충분한 60mA 이상의 광전류 피크값과 함께 350 ns 이하의 고속 응답특성을 가지는 선형적 센서임을 확인하였다.

ABSTRACT

In this paper, we designed and fabricated a high-speed semiconductor sensor for use in power control devices and analyzed the characteristics with pulsed radiation tests. At first, radiation sensitive circular Si PIN diodes with various diameters(0.1 mm ~ 5.0 mm) were designed and fabricated using Si epitaxial wafer, which has a 42 μm thick intrinsic layer. The reverse leakage current of the diode with a radius of 2 mm at a reverse bias of 30 V was about 20.4 nA. To investigate the characteristic responses of the developed diodes, the pulsed gamma-radiation tests were performed with the intensity of 4.88E8 rad(Si)/sec. From the test results showing that the output currents and the rising speeds have a linear relationship with the area of the sensors, we decided that the optimal condition took place at a 2 mm diameter. Next, for the selected 2 mm diodes, dose rate tests with a range of 2.47E8 rad(Si)/sec to 6.21E8 rad(Si)/sec were performed. From the results, which showed linear characteristics with the radiation intensity, a large amount of photocurrent over 60mA, and a high speed response under 350ns without saturation, we can conclude that the our developed PIN diode can be a good candidate for the sensor of power control devices.

키워드 : 펄스방사선, 핀다이오드, 선량률, 광전류, 강도

Key word : Pulse radiation, PIN diode, Dose rate, Photocurrent, Intensity

접수일자 : 2014. 05. 23 심사완료일자 : 2014. 06. 24 게재확정일자 : 2014. 07. 07

* **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.2014.18.7.1777>

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. 서 론

2013년 1월 우리나라는 나로호의 발사에 성공함으로써 우주강국으로 도약하기 위한 발판을 마련하였고, 금년 1월에는 2020년 달 궤도선과 달 착륙선 발사를 목표로 달탐사 연구개발에 착수함으로써 머지않아 우주 선진국의 대열에 합류할 것으로 기대된다. 대기권을 벗어난 지구주변과 우주공간에서는 태양으로부터 방사되는 고에너지의 우주 방사선으로부터 인공위성이나 우주선이 치명적 손상을 입을 수 있다. 고준위 방사선으로 부터의 피폭은 반도체 소자에 과도한 전하를 제공하여 치명적인 손상을 가져오며, 나아가 전자장비 전체의 기능마비나 오동작을 유발하게 된다[1-3].

이러한 펄스방사선의 피해는 군 분야에서도 중요하게 다루어지고 있는데, 이는 핵폭발 시 발생하는 펄스방사선이 군 전자장비에 심각한 손상을 유발하기 때문이다. 이러한 펄스방사선효과(Transient Radiation Effects on Electronics, TREE)에 의해 유발되는 군 무기체계의 심각한 피해는 주로 초기에 발생하는 높은 에너지와 선량을 가지는 즉발 감마 펄스선(Prompt gamma pulse)[2]이 주된 원인으로 알려져 있다. 펄스 감마방사선은 전자소자나 장비에 Upset, Latchup, Burnout 등의 형태로 영향을 미치며, 심각한 경우 복구 불가능한 치명적 손상을 입히거나 군장비의 전체 기능마비로 이어지기도 한다[4]. 전자소자를 방사선으로부터 보호하는 내방사선(Radiation hardening) 연구는 냉전(Cold war) 시대에 미국과 유럽을 중심으로 본격적으로 시작되었고 우주산업의 발전과 더불어 급성장하였으며 NASA나 SNL(Sandia National Laboratory), ESA와 같은 국가기관과 대학을 중심으로 현재까지도 꾸준한 연구개발과 투자가 이루어지고 있다. 그러나 최근에는 전통적인 방식과는 달리 전원제어를 통한 효율적이고 내방사선 기술이 연구되기 시작하였으며, 여기서는 펄스방사선 고속 탐지용 반도체 센서가 중요한 기능을 수행하고 있다.

박막의 실리콘을 이용한 PIN 다이오드 센서는 완전 공핍화 전압을 낮게 유지할 수 있기 때문에 도핑농도 변화에 따른 다이오드 동작 특성 변화를 최소화할 수 있는 장점이 있다[5-7]. 박막으로 인한 공정상의 문제점은 CZ법으로 길러낸 고농도 실리콘 기판 상에 FZ법으로 성장시킨 고저항 박막 에피택셜 실리콘층

형태의 웨이퍼로 극복이 가능하여, 이러한 형태의 센서는 방사선 탐지 및 내방사선화 연구에 활용되고 있다[8].

본 연구에서는 전원제어식 내방사선 장치용 펄스방사선 고속 검출센서 개발을 위해 실리콘 에피택시 웨이퍼를 사용하여 고속 PIN 다이오드를 설계 제작하고 펄스방사선에 대한 반응특성을 시험을 통하여 분석하였다. 먼저, 다양한 면적으로 공정 제작한 다이오드를 일정 세기의 방사선에 조사(Irradiation)시키면서 감도와 반응속도를 평가하였고, 최적 구조로 선정된 센서에 대해 펄스방사선에 세기별 특성변화를 분석하여 고속 펄스방사선 센서로서의 성능을 검증하였다.

II. 펄스방사선 탐지용 센서 설계 제작

2.1. 펄스방사선 탐지센서 모델링

일반적인 전자소자에 손상을 입힐 수 있는 선량률 준위와 실측시험이 가능한 국내 고준위 펄스발생 전자빔 장치를 고려하여 펄스 감마선률 약 1E8 rad(Si)/s을 선정하고, 이 펄스가 반도체 센서에 조사되었을 때 발생하는 전자-정공쌍(Electron-Hole Pair, EHP)을 고속으로 탐지하고 처리할 수 있는 반도체 센서를 설계하기 위해 먼저 수식을 전개하였다. 설정한 펄스감마선률로부터 발생하는 에너지는 다음과 같다.

$$1 \times 10^8 \text{ rad/s (Si)} = 2.33 \times 10^3 \text{ J/cm}^3 \cdot s \quad (1)$$

이 에너지에 의해 센서 내 생성 전자-정공쌍의 수는 $4.04 \times 10^{21} \text{ EHPs/cm}^3 \cdot s$ 가 되며, 이 값을 이용하면 다음 식을 통해 다이오드 형태의 방사선 탐지센서 특성 설계가 가능해진다.

$$G = \frac{\alpha P_0}{hv} \cdot \exp(-\alpha x) \quad (2)$$

여기서, G는 전자-정공쌍의 생성율, P0는 입사된 빛의 세기로 단위면적당 입사되는 선량, h는 플랑크 상수, v는 빛의 주파수이다. 전개한 수식으로부터 도출된 광전 변수들을 기반으로 반도체 설계 프로그램(TCAD)을 사용하여 반도체 소자의 정밀설계를 진행하였다.

2.2. 센서 설계 및 공정제작

펄스방사선을 고속으로 탐지할 수 있는 센서를 구현하기 위해 수치적 모델링과 시뮬레이션을 통해 설계한 직경 2 mm의 실리콘 PIN 다이오드 소자의 평면 및 단면 구조가 그림 1에 나타나 있다. 소자 공정제작에는 두께 380 μm의 4인치 <111> 방향의 고농도의 As가 주입된 후막 n+ 실리콘 기판 위에 고저항 특성의 42 μm 두께의 박막 n- 실리콘 에피층이 성장된 웨이퍼를 사용하였다. 기판과 에피층의 비저항은 각각 0.004-0.008 Ω·cm와 2,000 Ω·cm이다. 제작은 다이오드 소자를 주위와 전기적으로 절연하기 위해 소자가 제작될 활성영역을 형성하고, 그 밖의 영역은 두꺼운 산화막을 성장하는 LOCOS 공정으로 시작하였다. 이후 활성영역에 이온주입 시 표면 손상을 줄이기 위한 얇은 산화막 증착공정을 진행한 다음 다이오드의 양극이 형성될 활성영역과 누설전류 억제에 위한 가드링(Guardring) 영역에 붕소 이온을 1E15/cm², 50 KeV의 조건으로 주입하여 p+ 영역을 형성하고 열처리로 활성화시켰다. 그리고 소자 표면 보호용 산화막 증착 후, 금속화 공정을 위하여 양극이 형성될 p+ 영역의 산화막을 선택적으로 식각하고 TiN/Al을 증착하였다. 음극의 형성을 위하여 웨이퍼의 후면의 n+ 영역 전체에는 Ti/TiN/Al을 증착하였다.

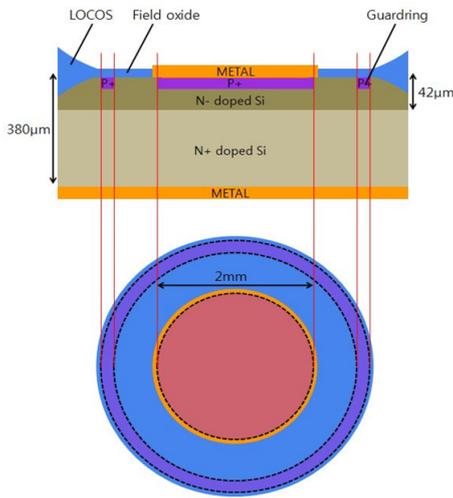


그림 1. 42 μm 고저항 에피층 성장 실리콘 기판을 이용한 PIN 다이오드 단면도
 Fig. 1 Cross section of Pin-diode with 42um high resistivity silicon epitaxial wafer

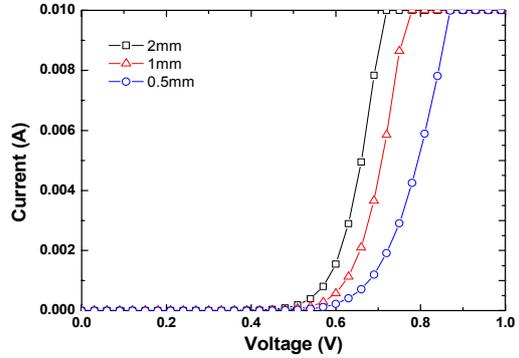


그림 2. 제작 소자의 전기적 특성곡선
 Fig. 2 Electrical characteristic curves of the fabricated sensors

고정된 단면과는 달리 직경은 0.2 mm, 0.5 mm, 1.0 mm, 2.0 mm, 3.0 mm, 5.0 mm으로 구분하여 6가지의 수광 면적으로 제작하였다. 펄스방사선 조사시험에 사용할 개별 소자를 위해 다이싱(Dicing) 공정 후, 캔형으로 패키징 하였다. 공정이 완료된 PIN 다이오드 소자에 대해 반도체 변수측정기(HP-4156)로 측정한 순방향 전류-전압 (I-V) 특성이 그림 2의 그래프이다. 순방향 전압(VF)은 직경 0.5 mm에서는 0.9 V, 직경 1 mm에서는 0.78 V, 2 mm에서는 0.72 V로 직경이 클수록 낮은 값을 보였고, 잡음 성분으로 작용하는 역방향 누설전류는 2 mm의 경우 20.4 nA로 안정된 특성을 보였다[9].

III. 센서 구조별 펄스방사선 응답특성

3.1. 펄스 방사선 조사시험

다양한 면적으로 제작한 PIN 다이오드 센서에 대한 펄스방사선 성능분석 시험은 포항가속기연구소의 (PAL) Test LINAC에서 그림 3과 같이 구성한 온라인 실시간 측정장치를 통해 진행되었다.

2 μm 펄스폭으로 발생된 단일 펄스(Single pulse) 전자빔은 최대 에너지 60 MeV, 평균 빔전류 150 mA (±10%)이며, 텅스텐 변환기(Converter)를 거쳐 펄스 감마선으로 전환된 다음 PIN 다이오드 센서로 조사된다. MCNP 모사로 계산한 최대의 감마 방사선량 발생 조건은 텅스텐 두께 6mm일 경우이며, 이때의 변환 감마선의 평균 에너지는 1~2 MeV 범위, 선량률은 약 4.88E8

rad(Si)/sec였다. 이 값은 센서 설치위치에서 반도체측정기와 TLD(Thermoluminescent Dosimeter)를 통하여 실측한 방사선량과 거의 유사하다. 그림 3에서와 같이 다양한 면적의 센서를 빔 조사 공간 내 XYZ 스테이지에 10mm간격으로 일렬 배열한 다음 원격제어를 통해 빔 진행 방향(Z)에 대해 수직(Y)으로 스테이지를 순차적으로 이동시키면서 조사실험을 진행하여 시험시간 단축과 함께 작업자의 방사선 피폭을 최소화하였다.

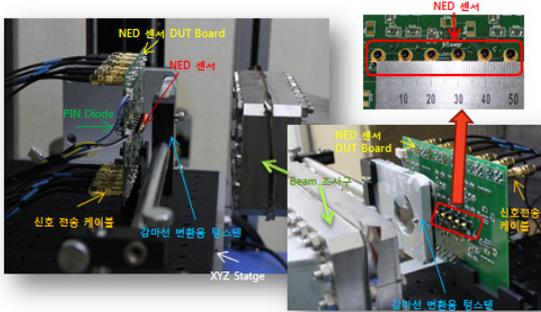


그림 3. 제작 소자에 대한 펄스감마선 조사시험
Fig. 3 Pulse irradiation tests with fabricated sensors

3.2. 센서의 펄스방사선 출력 특성

그림 4는 하나의 센서 어레이를 대상으로 수행한 시험결과로서 입력 펄스방사선에 대한 센서 출력신호를 센서의 직경별로 기록한 것이다. 방사선 조사 직후 고속으로 상승한 후 상대적으로 느린 하강시간을 갖는 펄스형태의 출력파형을 보여주고 있다. 이 결과 그래프로 부터 센서 면적별 광전류 최대값과 상승시간의 특성을 분석하기 위해 정리한 그림 5와 그림 6은 첨두전압의 평균값과 출력펄스의 상승시간 평균값을 센서 면적에 대해 나타내고 있다. 그림 5는 센서의 광전류 순간 출력량이 센서 면적 증가에 따라 초기에는 급격히 증가하나 2mm 직경 이상에서는 포화되는 특성을 보이고 있다. 그리고 그림 6에서는 센서 면적에 반비례하여 출력신호의 상승시간의 짧아지나 넓은 면적으로 갈수록 상승시간이 역시 포화되고 있음을 알 수 있다.

이상의 면적별 제작 센서에 대한 펄스방사선 출력 광전류의 감도특성과 고속 반응특성 시험 결과분석에서 신호의 포화특성과 소자 공정조건에 안정화 측면에서 직경 2mm의 PIN 다이오드가 펄스방사선 탐지용 센서로서 최적의 조건임을 알 수 있었다.

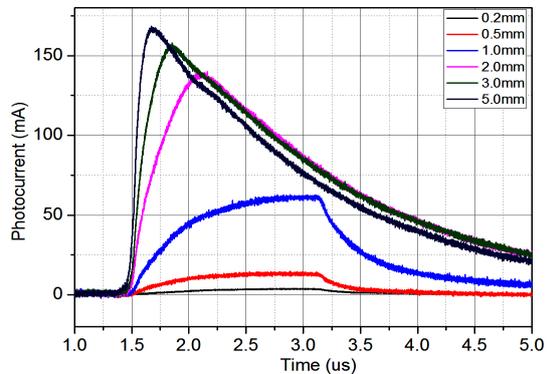


그림 4. 센서 구조에 따른 출력 펄스 파형
Fig. 4 Output pulse shapes of sensors with various diameters

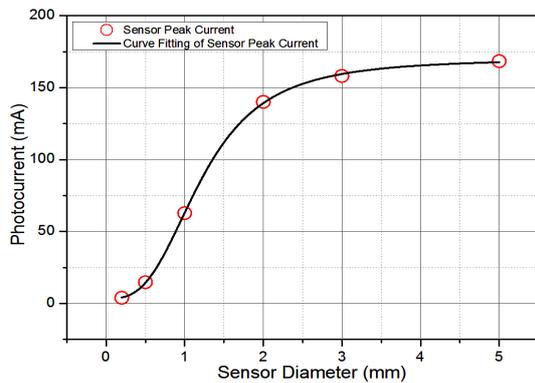


그림 5. 센서 직경별 출력 광전류 크기
Fig. 5 Saensor peak current with various diameters

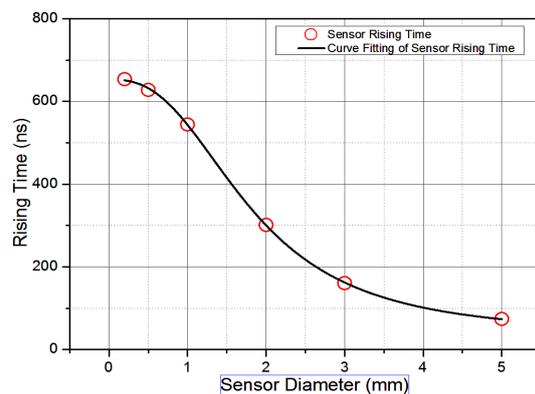


그림 6. 센서 직경별 상승시간
Fig. 6 Rising Time with various diameters

IV. 펄스방사선 세기별 센서 출력특성

다음으로 일정 선량률에 대한 면적별 광 출력량과 응답속도 시험을 통해 선정된 2mm직경의 PIN 다이오드 센서를 대상으로 펄스 감마선의 세기 변화에 따른 센서 출력특성 분석시험을 진행하였다. 조사 감마선률은 전자빔장치 최대출력 범위($2.47E8 \text{ rad(Si)/sec} \sim 6.21E8 \text{ rad(Si)/sec}$)로 설정하였고, 시험방법은 앞서 수행한 면적별 조사시험과 유사하게 진행하였다. 선량률은 센서 어레이 보드를 장착한 XYZ 스테이지를 의 Z-방향 이동하여 텅스텐 변환체와 센서간 거리 변화를 통해 조절하였다.

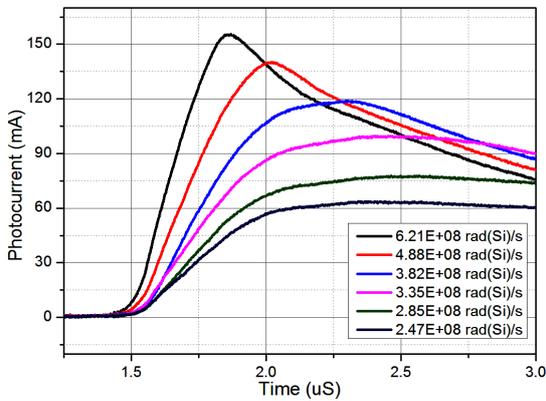


그림 7. 선량별 센서 출력 결과
Fig. 7 Sensor output characteristics to the various dose rate

조사 선량률별 선정 센서(2mm x 2mm)의 출력 특성을 그림 7에 동시에 도시하였으며, 펄스방사선 특성의 정량적 분석을 위해 출력 광전류량과 응답시간에 대해 각각 그림 8과 그림 9로 다시 정리하였다. 그림 8의 결과는 조사된 펄스방사선 세기에 따라 센서 광전류 출력이 증가됨을 나타내고, 그림 9의 그래프는 방사선의 선량률 증가에 따라 응답특성도 빨라지고 있음을 알려준다.

이상의 선량률 시험을 통해, 최적 조건으로 설계 제작한 2mm직경의 PIN 다이오드 센서가 PAL 전자빔 변환 펄스감마선 장치의 최대 출력영역에서 포화현상 없이 선형적 응답특성을 나타내는 센서임을 확인할 수 있었다. 더불어 가용 선량률 범위에서 60mA 이상의 높은 광전류 피크값과 함께 350 ns 이하의 고속 응답특성을 지니고 있음도 알 수 있었다.

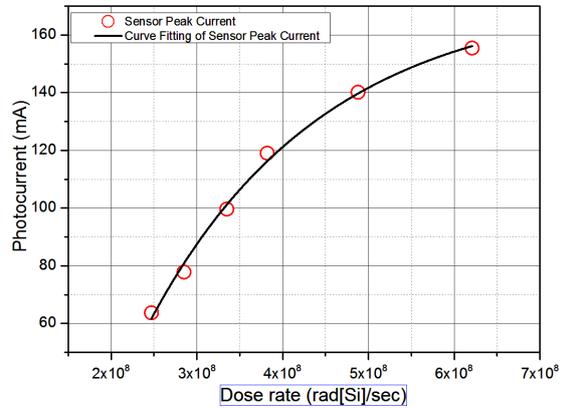


그림 8. 선량별 센서 출력량
Fig. 8 Sensor peak current to various dose rate

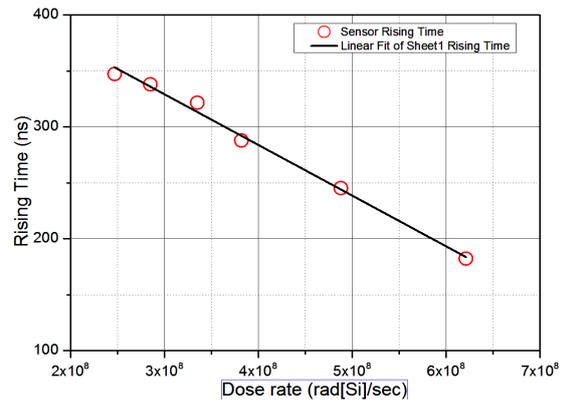


그림 9. 선량별 센서 응답시간
Fig. 9 Sensor response time to various dose rate

V. 결론

본 연구에서는 전자장비 내방사화 기술의 새로운 효율적 접근방법인 전원제어형 방호장치에서 핵심 기능을 수행하는 고속 반도체 센서를 개발하고 특성을 분석하였다.

먼저, 펄스방사선에 의한 다이오드 내부에서의 생성 전하를 계산하여 실리콘 에피택시 웨이퍼 기반의 고속 신호탐지용 반도체 센서를 다양한 구조로 설계하였다. PAL 전자빔 변환 펄스 감마방사선으로 구조별 제작 소자에 대한 고정 선량률 실측시험에서 소자의 면적에 비

레하는 광감도와 응답속도 개선결과를 얻었으며 포화 특성과 소자의 균일성에 근거하여 2mm 직경의 센서가 최적으로 판단되었다.

다음으로 선정 센서를 대상으로 펄스감마선 고출력 범위(2.47E8 rad(Si)/sec ~ 6.21E8 rad(Si)/sec)로 조사 시험을 수행하였으며, 그 결과 본 연구에서 개발한 PIN 다이오드 센서가 시험장치의 고 선량률 영역에서 전원 제어 신호저리에 충분한 60mA 이상의 광전류 피크값과 함께 350 ns 이하의 고속 응답특성을 가지는 센서임을 확인할 수 있었다.

향후 본 연구에서 설계 제작한 센서를 장착한 전원 제어식 방호장치에 대해 내방사선 기능 검증시험을 진행할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 국방과학연구소 민군기술협력센터의 지원 및 교육과학기술부 지원에 의한 원자력기술 개발 사업의 일환으로 수행된 연구임.

REFERENCES

[1] George C. Messenger, "Transient Radiation Effects on Electronics", *IEEE Trans. Nuclear Science*, vol. 33, no. 5, pp. 1125, Oct.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, Dec. 1988.

[3] Chugg, A.M., "Ionizing Radiation effects: a vital issue for semiconductor electronics", *Engineering Science and Education Journal*, vol. 3, no. 3, pp. 123-130, Jun. 1994.

[4] Sang-Hun Jeong, Nam-Ho Lee, Min-Su Lee, Seong-Ik Cho, "A Study of CMOS Device Latch-up Model with Transient Radiation", *The Transactions of The KIEE*, Vol.63, No. 3, pp. 422~426, Mar. 2012.

[5] H. G. Nam, M. S. Shin, K. H. Cha, N. I. Cho and E. J. Yun, "Fabrication of a Silicon PIN Diode for Radiation Detection", *Journal of Korean Physics Society*, 48, pp. 1514-1519, Jun. 2006.

[6] M. Aceves-Mijares, M. Estrada, A. Cerdeira, and A. Cerdeira-Estrada, C. A. Grimes, E. C. Dickey, and M. V. Pishko, Eds., "Silicon PIN diodes as radiation detectors," *All Rights of Reproduction in any Encyclopedia al Sensors*, vol. 9, pp. 431 - 451, 2006.

[7] S. Ronchin, M. Boscardin, G.-F. Dalla Betta, P. Gregori, V. Guarnieri, C. Piemonte, and N. Zorzi, "Fabrication of PIN diode detectors on thinned silicon wafers", *Nuclear Instruments and Methods. A*, 530, pp. 134-138, Sep. 2004.

[8] E. Fretwurst, F. Honniger, G. Kramberger, G. Lindstrom, I. Pintilie and R. Roder, "Radiation damage studies on MCz and standard and oxygen enriched epitaxial silicon device" *Nuclear Instruments and Methods, A*, 583, pp. 58-63, Aug. 2007.

[9] You-Mi Kwon, Hee-Sung Kang, Nam-Ho Lee, Young-Gwan Hwang, Jung-Hee Lee and Yong-Soo Lee, "Fabrication of High-Speed PIN Diode Radiation Detectors using Silicon Epitaxial Wafer", *Journal of Photonic Science and Technology*, Vol. 3, No.1, pp. 36~39, Oct.2013.



이남호(Nam-Ho Lee)

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



황영관(Nam-Ho Lee)

2006년 수원대학교 전자공학과 학사 졸업,
2008년 수원대학교 전자공학과 석사 졸업,
2014년 충남대학교 정보통신공학과 박사 졸업,
현재 : 한국원자력연구원 융합기술개발부 연구원
※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 연구원
※관심분야 : Transient Radiation Modeling, 고속 방전 회로, 펄스신호 고속신호 처리



김종열(Jong-Yeol Kim)

2009년 한양대학교 전자전기공학부 학사 졸업,
2011년 한양대학교 전기공학과 석사 졸업,
현재 : 한국원자력연구원 원자력융합기술개발부 연구원
※관심분야 : 내방사선 광섬유, 광섬유 센서, 방사선 센서



조영(Young Cho)

1978년 연세대학교 생화학과 학사 졸업,
1982년 충남대학교 화학과 석사 졸업,
1991년 충남대학교 화학과 박사 졸업,
현재 : 국방과학연구소 공용기술단 국방전문기술실 책임연구원
※관심분야 : 생체전지, 반도체 센서, 뇌신경생리