

실리콘 포토다이오드를 이용한 방사선 검출기 개발에 관한 연구

° 이운근*, 김종선**, 손창호**, 백광렬*

** 삼창기업(주) 제어기술연구소, * 부산대학교 전자공학과

A Study on the Development of Nuclear Radiation Detector with Silicon PIN Photodiode

° Un K. Yi*, Jung S. Kim**, Chang H. Sohn**, Kwang R. Baek*

** Samchang Enterprise Co., Ltd., * Pusan National University

Abstract - In this paper, we have developed a high-sensitivity SNRD(Semiconductor Nuclear Radiation Detector) using silicon PIN photodiode. The SNRD is constructed with silicon PIN photodiode(S3590-05), preamplifier and shaping amplifier. To show the effectiveness of SNRD, nuclear radiation experiments are conducted with γ -ray Ba-133, Cs-137 and Co-60. The SNRD is different in characteristics of the energy spectrum from scintillation detectors. However, the SNRD have a good linearity on γ -ray energy and activity. The results of this paper can be applied to electronic personal dosimeter.

1. 서 론

개인용 피폭 선량계는 일차적으로 국가적인 방사선 방호 차원에서 일정기간 동안 개인의 피폭 선량을 최대한 정확하게 측정하여 개인 피폭량의 데이터 베이스를 유지하는데 그 목적이 있으며, 높은 정밀도로 선량을 측정할 수 있고 환경 인자의 영향(온도, 습도 및 전자파 간섭 등)이 적은 열형광 선량계(Thermoluminescence Dosimeter : TLD)가 사용되고 있다. 그리고, 이의 보조적인 장치로서 현장에서의 과 피폭을 방지하기 위한 알람기능, 순간 피폭률 측정 등의 기능을 갖는 포켓 선량계(Pocket Dosimeter)가 있다.

현재 초소형 전자기술의 발전은 환경 인자의 영향이 적고 높은 신뢰성을 갖는 다기능 계측 장치의 소형, 경량 및 저 소비전력화를 이룩하였다. 이러한 기술은 방사선 계측기에도 응용되어 새로운 능동적인 피폭 선량계(이하 EPD(Electronic Personal Dosimeter)라 칭함)의 구현이 가능하도록 하였다. 이는 방사선 피폭 선량, 선량률 및 과 피폭 경보기능 뿐만 아니라 출입구 관리시스템과의 통신기능이 포함되어 있다[1][7].

EPD의 방사선 검출 소자로는 GM 계수관(GM Counter)과 실리콘 포토다이오드(Silicon Photodiode)가 사용되고 있으며 소형, 저 소비전압 및 고 전압이 필요 없다는 장점으로 주로 실리콘 포토다이오드가 사용되고 있다[2].

X-선 또는 γ -선을 실리콘 포토다이오드와 같은 반도체 검출소자에 직접 조사하면 수십 나노초(Nanoseconds)의 펄스 폭을 가진 약한 전하 펄스(Weak Charge Pulse)가 발생하게 된다. 이 신호는 고 임피던스 신호이며, 미약한 신호에 대한 잡음 차폐, 임피던스 정합 등의 문제로 반도체 검출소자의 전치증폭기(Preamplifier) 및 성형증폭기(Shaping Amplifier)의 구현이 어렵다[3][4].

본 연구에서는 방사선 검출소자 즉, 실리콘 포토다이오드에서의 미세한 출력신호를 보상하기 위해 입력 임피던스가 높은 전치증폭기를 구성하여 미세한 전하펄스를

적분하고 전압펄스로 증폭하여 저 임피던스 신호를 출력하는 전치증폭기와 정형화된 펄스파형을 출력하는 성형증폭기를 제작하였다. 그리고, 실리콘 포토다이오드, 전치증폭기 및 성형증폭기로 구성된 반도체 방사선 검출기는 $10\mu\text{Ci}$ 의 γ -선 Ba-133, Cs-137 및 Co-60의 세 핵종에 대하여 방사선 조사실험을 수행하여 제작된 검출기의 유용성을 입증하였다.

2. 실리콘 포토다이오드를 이용한 방사선 검출

최근 실리콘 포토다이오드의 성능은 수광면적의 증가와 응답과장 대역이 넓어지는 등 많은 개선을 하였다[5][6]. 이것은 종래의 신틸레이션 검출기(Scintillation Detector)의 광전증배관(Photomultiplier Tube)의 대체로 이어지고 있다.

실리콘 포토다이오드는 저 바이어스 전압, 높은 안정성을 가지며, X-선 및 γ -선 분광기에 적용된 예가 보고되고 있다[8]. 그러나 실리콘 포토다이오드는 가시광이나 적외선광의 검출에만 사용되므로 CsI(Tl)등의 신틸레이션 물질과 함께 사용된다. 그 이유는 CsI(Tl)에 방사선이 조사되어 발생된 발광과장이 실리콘 포토다이오드와 잘 일치하기 때문이다[9].

한편, 실리콘 포토다이오드를 이용한 방사선 검출기의 용도가 정밀측정용이 아닌 2차적인 보조역할을 담당한다면 고가의 CsI(Tl)등의 신틸레이션 물질 없이 직접적으로 실리콘 포토다이오드에 조사되는 X-선과 γ -선을 검출할 수 있다.

일반적으로 X-선과 γ -선 에너지에 대한 실리콘 포토다이오드의 검출효율은 10KeV보다 높은 에너지의 X-선과 γ -선에 대해서는 참고문헌 [6]에 있는 실리콘 포토다이오드의 에너지와 효율에 대한 그래프에서와 같이 광전효과(Photoelectric Effect)가 급속히 저하된다. 그러나 효율은 떨어지지만 콤프톤 산란(Compton Scattering) 때문에 감마선 검출이 가능하다.

따라서, γ -선과 같이 높은 에너지의 포톤(Photon)은 대부분이 실리콘 포토다이오드를 그냥 통과하고, 일반 환경에 존재하는 γ -선원의 선량이 적다는 점에서 센서는 효율이 좋고 저 잡음인 것이 필요하다.

이와 같은 이유로 본 연구에서는 수광 면적이 10mm^2 으로 크고, 공핍층이 넓은 HAMAMATSU사의 실리콘 포토다이오드 S3590-05를 사용한다.

3. 반도체 방사선 검출기

반도체 방사선 검출기는 방사선 검출소자인 실리콘 포토다이오드와 이의 신호변환을 위한 전치증폭기와 성형증폭기로 구성된다. 그림 3.1은 제작된 반도체 방사선 검출기의 구성을 나타낸다.

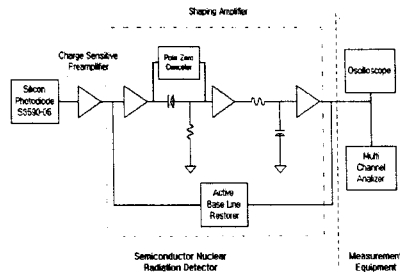


그림 3.1 반도체 방사선 검출기의 구성
Fig 3.1 Structure of the semiconductor radiation detector

실리콘 포토다이오드에 방사선이 조사되면 전하 펄스가 발생되고 이 신호는 전하 증폭형 증폭기(Charge Sensitive Amplifier)로 적분되어 전압 펄스로 변형된다. 그리고, 성형증폭기는 파형 정형용의 미분, 적분 회로를 포함하고 있으며, 펄스의 높이 측정에 적합한 가우스형태의 펄스를 만들어 낸다. 이때 파형 정형의 시정수는 S/N비 즉, 에너지 분해능과 밀접한 관계가 있다.

성형증폭기의 극 제로 상쇄기(Pole Zero Canceller) 및 베이스 라인 복원기(Base Line Restorer)는 펄스의 높이를 정확하게 측정할 수 있도록 하기 위한 것이다. 극 제로 상쇄기는 CR 미분 후에 출력펄스가 기준선(Base Line) 보다 아래로 내려가는 것을 막아주는 역할을 한다. 만약 극 제로 상쇄기가 없으면 후속 펄스의 펄스 높이가 낮게 측정될 수 있다. 베이스 라인 복원기는 노이즈 등의 원인으로 직류레벨이 변동될 경우 이를 능동적으로 기준전압에 복원된다.

표 1.1은 제작된 반도체 방사선 검출기의 전하 증폭형 전치증폭기의 특성을 나타내며, 그림 3.2는 이의 외형을 나타낸다.

표 1.1 반도체 방사선 검출기의 특징
Table 1.1 Specification of the semiconductor radiation detector

Feedback Capacitance Cf(pF)	Feedback Resistance Rf(MΩ)	Charge Gain (V/coulomb)
2	50	0.5

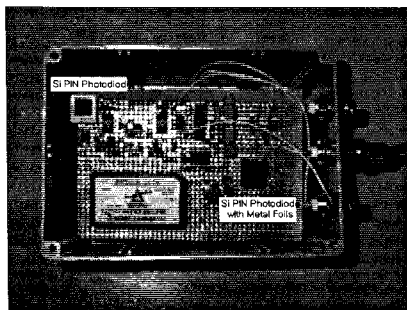


그림 3.2 반도체 방사선 검출기
Fig 3.2 The semiconductor radiation detector

그림 3.3은 제작된 반도체 방사선 검출기에 γ -선 Cs-137을 조사했을 때 얻어진 검출기의 출력 파형이다. 이 신호는 MCA(Multi Channel Analyzer)에서 에너지 스펙트럼을 분석하기 위한 신호로 적합하다.

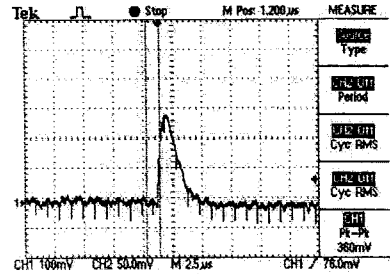


그림 3.3 Cs-137에 조사된 반도체 방사선 검출기의 출력 신호
Fig 3.3 The semiconductor radiation detector output signal by γ -ray Cs-137

4. 실험 및 결과 고찰

제작된 반도체 방사선 검출기의 유용성을 평가하기 위하여 그림 4.1과 같이 실험장치를 구성하였다.

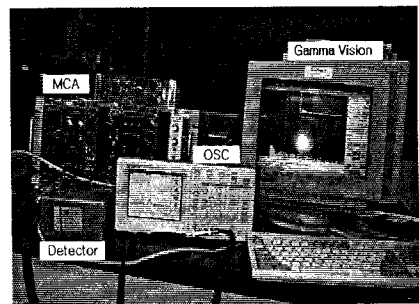


그림 4.1 실험 장치의 구성
Fig 4.1 Structure of the experimental equipment

방사선원에서 발생된 신호는 제작된 반도체 방사선 검출기로 검출되어 MCA로 전달된다. 이 신호는 디지털화되어 PC의 감마 비전(Gamma Vision)으로 보내져 에너지 스펙트럼을 분석하게 된다.

실험에 사용된 방사선원은 $10\mu\text{Ci}$ 의 γ -선 Ba-133, Cs-137 및 Co-60이며, 방사선원과 실리콘 포토다이오드와의 거리는 서로 밀착시키고 실험 중 움직이지 않도록 고정체로 고정시켰다. 그리고, 그림 4.2와 같이 γ -선원과 흡수체와의 상호작용을 조사하기 위하여 방사선원과 실리콘 포토다이오드 사이에 1mm 두께의 구리판을 삽입하여 비교실험을 실시하였다. 그림 4.3, 4, 5는 각 핵종에 대한 에너지 스펙트럼을 나타낸다.

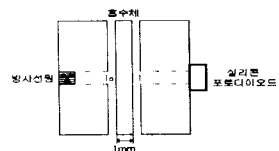


그림 4.2 γ -선의 전흡수계수 측정
Fig 4.2 The measurement of absorption coefficient by γ -ray

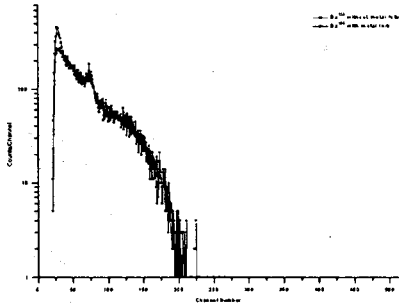


그림 4.3 Ba-133의 스펙트럼
Fig 4.3 The spectrum of Ba-133

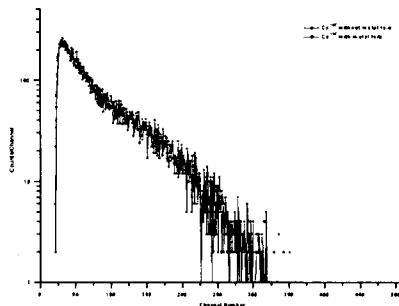


그림 4.4 Cs-137의 스펙트럼
Fig 4.4 The spectrum of Cs-137

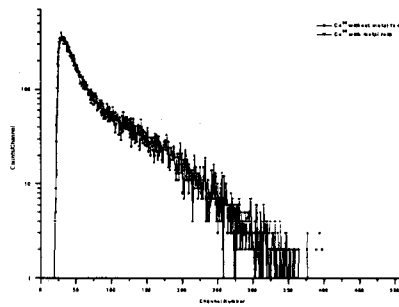


그림 4.5 Co-60의 스펙트럼
Fig 4.5 The spectrum of Co-60

수행된 방사선 조사 실험은 기준 선량계가 $100 \mu\text{Sv}$ 가 될 때까지 측정된 에너지 스펙트럼이며, 이는 γ -선의 에너지 스펙트럼과 일치하지는 않지만 에너지 크기에 따른 선형성은 뛰어난 것을 알 수 있다.

본 연구에서 제작된 반도체 방사선 검출기의 에너지 스펙트럼이 γ -선과 일치하지 않는 이유는 실리콘 포토다이오드가 γ -선의 광전효과 보다 콤프톤 산란에 의해서 검출되고, 낮은 바이어스 전압 및 측정 오차 등에 기인한 것으로 추정된다. 만약 방사선 에너지가 형광 에너지로의 변환효율이 좋은 신틸레이션 물질을 실리콘 포토다이오드에 부착하여 측정하면 광전효과 및 콤프톤 산란 등에 의해 생기는 γ -선의 에너지 스펙트럼을 얻을 수 있다.

구리판의 부착 여부는 고 에너지 방사선 검출시에는 특별한 차이가 없지만 저 에너지 방사선에서는 구리판

부착시 측정 소요시간이 증가하였다. 향후 휴대형 피폭 선량계에 응용 시, 비록 Ba-133 보다 낮은 에너지를 이용한 추가적인 실험이 요구되지만, 구리판은 저 에너지로 방사선 피폭 선량이 과대 평가되는 것을 보정해 주는 역할을 이용할 수 있다. 그리고, γ -선의 검출효율은 높은 에너지의 γ -선 일수록 실리콘 결정을 그냥 통과하여 검출효율이 저하됨을 알 수 있었다.

5. 결 론

방사선은 사람의 눈에 보이지 않을 뿐 아니라 그 피해 또한 서서히 나타나 인간에게 치명적인 피해를 입힐 수 있다. 따라서 방사선에 의한 피해를 미연에 방지하기 위한 방사선 피폭 선량계 및 오염검사장비는 필수적으로 요구된다.

본 연구에서는 고가의 신틸레이션 물질 없이 직접적으로 실리콘 포토다이오드에 조사된 X-선 및 γ -선 반도체 방사선 검출기를 제작하였으며, 실험 결과 나타난 에너지 스펙트럼은 CsI(Tl)등의 신틸레이션 물질을 사용하였을 때의 스펙트럼과 일치하지는 않았다. 이는 실리콘 포토다이오드가 X-선 및 γ -선의 콤프톤 산란에 의해서 검출되고, 낮은 바이어스 전압 등에 기인한 것으로 추정된다. 그러나 핵종 실험결과와 같이 에너지 스펙트럼의 선형성은 뛰어나므로 휴대형 피폭 선량계 또는 환경 모니터 등에 바로 적용이 가능하리라 판단된다.

향후, 다수의 실리콘 포토다이오드에 흡수체의 종류 및 크기를 달리한 반도체 방사선 검출기의 제작 및 선량 알고리즘의 개발에 대한 연구가 필요하며, 이의 적용은 정밀도가 높은 피폭 선량계의 구현이 가능하리라 판단된다.

(참 고 문 헌)

- [1] E. Beuville, K. Borer, E. Chesi, E.H.M. Heijne, P. Jarron, B. Lisowski, and S. Singh, "Amplex, a low-noise, low-power analog CMOS signal processor for multielement silicon particle detectors", *Nucl. Instr Meth.*, vol. A288, pp. 157~167, 1990
- [2] S. Izumi, H. Kitaguchi, S. Mitani and H. Kikuchi, "A computerized personal dosimeter with an IC card", *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 36, pp. 1150~1153, 1989
- [3] P.O'Connor, et al., "CMOS preamplifier with high linearity and ultra low noise for X-ray spectroscopy", *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 44, pp. 318~325, 1997
- [4] V. Radeka, "Low noise techniques in detectors", *Rev. Nucl. & Part. Sci.* vol. 38, pp. 217~277, 198
- [5] M. Traczyk and M. Slapa, "Commercially manufactured photodiodes in detection of low-energy X- and γ -ray radiation", *Nukleonika*, vol. 40, pp. 51~60, 1995
- [6] Hamamatsu Photonics K.K., Solid State Division, "S photodiodes and charge sensitive amplifiers for scintillation counting and high energy physics", Catalog #KOTH0002E05, Jun, 1997
- [7] N. Horiuchi, T. Sato, E. Kobayashi, "A high-sen neutron dosimeter using the coherent demodul technique", *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 42, pp. 2203~2208, 1995
- [8] U. Kilgus, R. Kotthaus, and E. Lange, "Prospects o CsI(Tl)-photodiode detectors for low-level spectroscopy", *Nucl. Instr Meth.*, vol. A927, pp. 425~440, 1990
- [9] G. F. Knoll, "Radiation Detection and Measur John Wiley and Sons, ISBN: 0-471-49545-X, 1979