

반도체 중성자 탐지소자 개발 및 응용

Development and Application of the Semiconductor Neutron Radiation Detector

이 남 호* 이 흥 규** 육 영 호***
Nam-Ho Lee Hong-Kyu Lee Young Ho Youk

Abstract

In this paper, we developed the semiconductor neutron radiation detector and the multi-purpose radiation detection technologies for the next generation military personal surveymeter. The PIN type semiconductor neutron detector and the prototype measure the neutron radiation dose upto 1,000cGy with $\pm 20\%$ error. It also have a good performance about the Gamma, Alpha and Beta radiation and MIL-STD-810F.

Keywords : Neutron Radiation(중성자 방사선), Neutron Dose(중성자 선량), Surveymeter(방사선측정기), Dose Rate(방사선 선율)

1. 서론

군사적으로 야전에서 탐지되어야 할 대표적인 방사선으로는 알파, 베타, 감마, 중성자방사선이 있다. 이들 방사선은 인체에 매우 유해하며 전신적으로 600 Rad 이상 조사될 경우 전투력을 상실하게 되는 등 매우 위험하다. 특히 핵무기가 사용되는 군사적 상황을 고려하면 군은 핵폭발시 발생하는 다양하고 높은 방사선을 측정할 수 있어야 한다¹⁾. 이러한 군 요구를 충족하기 위하여 2차대전 이후 야전용 방사선측정기가 정규 무기체제로 편제되어 운용되고 있다. 그러나 군사적으로 위해도가 큰 방사선중 알파, 베타, 감마방

사선은 다양한 검출기의 개발로 야전에서 개인 휴대 운용이 가능할 정도로 소형의 방사선측정기 개발이 가능하였으나 중성자방사선은 그 특성상 야전에서 운용이 가능할 정도로 소형의 검출기 개발이 어려워 최근까지 야전에 배치된 방사선 측정장비중 중성자방사선을 탐지하는 군용 방사선 측정기는 개발이 곤란하였다. 그러나 최근 반도체 기술이 발전함에 따라 반도체소자를 이용한 중성자 탐지소자 개발에 대한 가능성이 높아졌다. 반도체 소자를 이용하여 중성자 방사선을 탐지할 경우 탐지소자의 크기를 매우 작게 제작할 수 있으며 소모전력 또한 최소화 할 수 있는 장점이 있다. 본 논문에서는 이러한 장점을 갖는 반도체를 이용한 중성자 탐지소자 개발 기술과 그 특성을 분석하였으며 그 이외에 알파, 베타, 감마방사선도 하나의 모듈에서 측정할 수 있는 시제품을 제작하여 그 특성을 조사하였다. 제작된 방사선 탐지 시제품은 주어진 기준을 모두 충족하였으며 환경시험 조건인 MIL-STD-810F, 역시 충족함을 보였다.

† 2011년 1월 28일 접수~2011년 3월 28일 게재승인

* 한국원자력연구원(KAERI)

** 국방과학연구소(ADD)

*** (주)HKC

책임저자 : 이흥규(addlee@naver.com)

2. 중성자 탐지용 반도체 소자

가. 중성자 탐지원리

반도체 소자가 중성자방사선을 탐지하는 원리는 다음과 같다. 우선 실리콘 PIN 다이오드 소자가 중성자에 노출되면 소자 내부에서는 전자-정공쌍(Electron-hole Pair)을 발생 시키는 이온화(Ionization) 현상과 중성자와 실리콘 격자의 충돌로 인한 실리콘 격자의 위치변화 과정에 따라 내부에 생성되는 공극(Vacancy)과 간극(Interstitial)과 같은 결함 영역들이 생성되는 변위손상(Displacement Damage) 현상이 동시에 발생된다. 이온화 현상에 의해 발생하는 전자-정공쌍은 외부 바이어스에 따라 비교적 짧은 시간 내에 소멸 되는 반면에, 변위손상 효과의 영향은 반영구적으로 유지된다^[2,3]. 중성자 피폭 선량이 늘어남에 따라 증가되는 실리콘 PIN 다이오드 내부의 회복 불가능한 결함들은 다이오드 외부 전계에 따라 이동되는 내부 전하들의 재결합 중심으로 작용하게 되어 공핍영역으로 주입되는 소수 반송자의 지속적인 수명 감소를 초래한다. 중성자 조사선량의 증가에 따른 반송자(Carrier) 수명 감소 관계식은 다음과 같다.

$$\frac{1}{\tau} - \frac{1}{\tau_0} = K\varphi \quad (1)$$

여기서, τ_0 는 중성자 피폭 전 반송자의 수명, τ 는 중성자 피폭 후 반송자의 수명, φ 는 중성자 플루언스(Fluence), K 는 소자 베이스 영역에서의 변위손상 계수이다. 따라서 중성자 피폭선량 증가에 따라 PIN 구조 다이오드 내부 저항의 변화는 양단 전압의 증가로 나타나게 되고 소자의 입출력 특성곡선(I-V)에서 곡선을 오른쪽으로 이동시키는 결과를 가져오므로 이러한 소자의 저항변화는 피폭 중성자 선량의 측정변수로 활용이 가능하다^[4,5].

나. 고감도 중성자 탐지소자 특성 분석

PIN 다이오드형 탐지소자 제작은 두께 1.0mm, 1.5mm, 2.0mm의 세 가지 웨이퍼로 공정을 진행하였다. 이 웨이퍼는 3,000k Ω /cm 고저항의 지름 100mm, 두께 2.0mm 웨이퍼로부터 그라인딩을 통해 분리 제작한 것이다. 시뮬레이션 변수인 두께 및 면적 의존성 시험을 위해 웨이퍼 두께와 면적을 다양하게 구성하여 마스크를 제작하였다.

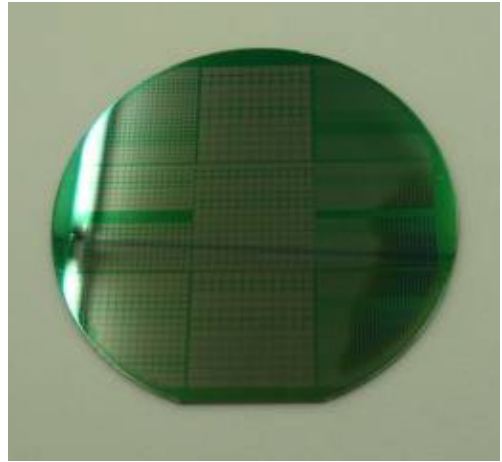


Fig. 1. Scribe Lane 공정 처리 후의 웨이퍼

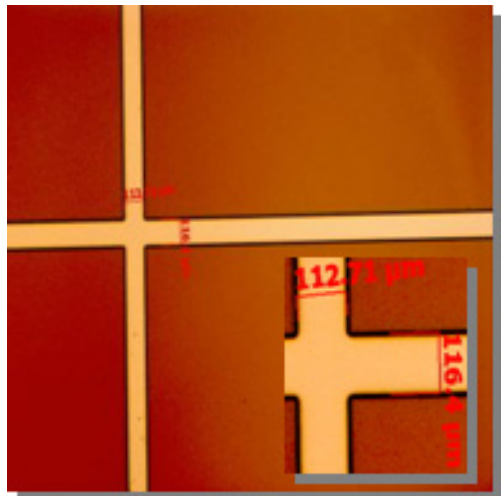
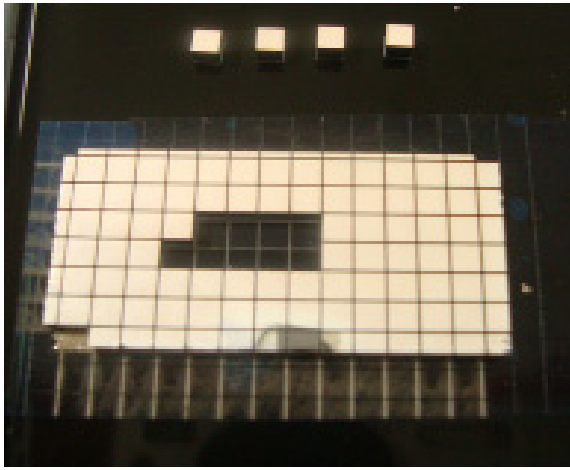
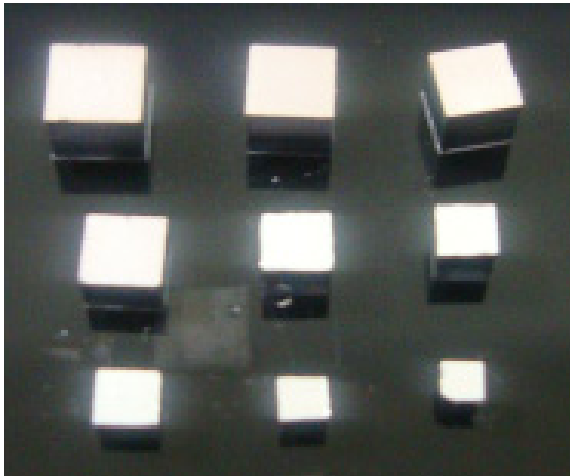


Fig. 2. S/L 공정 후 Lane 에칭 폭 실측

먼저 1.0, 1.5, 2.0mm의 웨이퍼를 공정에 투입하여 초기 세척과 초기 산화공정을 거친 다음 저 누설전류 개별소자 제작을 위한 Scribe Lane(S/L)을 마스크에 따라 10 μ m 식각하였다(Fig. 1, 2). 임플란트 공정에 앞서 필드 산화막 처리에 이어 B의 임플란트 처리로 P 부분을 형성하였고, 후면도 유사한 과정을 거쳐 Ph로 N 영역 임플란트 과정 처리하였다. 그 후 양면에 금속을 증착하고 저항성(Ohmic) 접촉이 형성되도록 열처리한 다음, 절삭하여 세 종류의 웨이퍼를 통해 각기 3가지 종류의 면적을 가지는 9가지 구조의 중성자 탐지소자용 PIN 다이오드 셀을 Fig. 3의 (a), (b)와 같이 제작하였다.



(a)



(b)

Fig. 3. 제작된 구조별 PIN 다이오드의 단위 셀
(a) 2.0mm×2.2mm×2.2mm 소자, (b) 9가지 단위 셀

제작한 셀을 이용하여 개별 PIN 다이오드를 형성하였고, 각각의 소자에 대한 중성자 특성분석 시험과정은 중성자 선량을 고정하고 시간을 조절함으로써 피폭 선량을 제어하는 방법으로 한국원자력병원 MC50 양성자가속 중성자 조사장치에서 진행하였다. Fig. 4는 9가지 구조로 제작한 소자의 4개의 샘플에 10mA 인가전류에 대한 중성자 선량별 소자 출력전압 변화를 평균하여 얻은 중성자 탐지 소자의 단위 선량당 감도를 나타낸 시험 결과 그래프로서 소자 두께변화에 따른 중성자 감도 특성을 보여주고 있다.

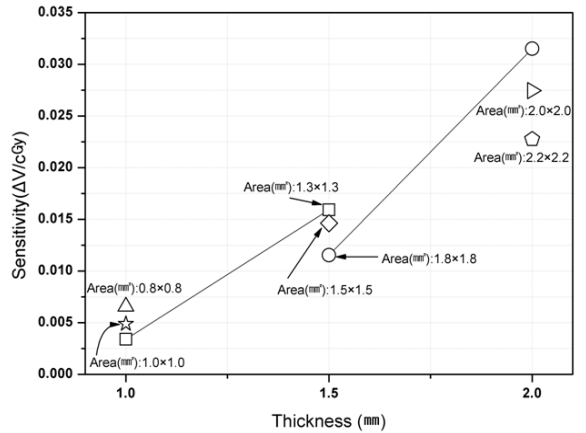


Fig. 4. 두께변화에 따른 감도 특성

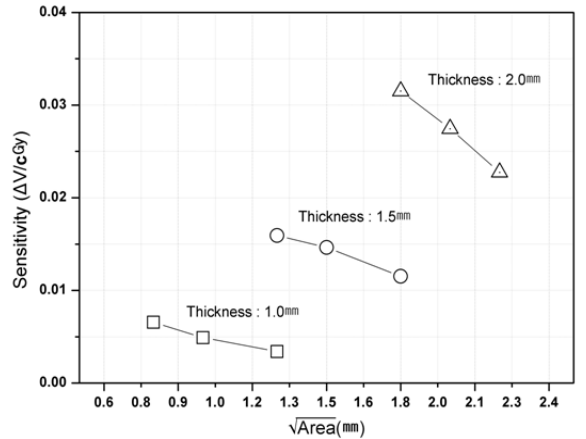


Fig. 5. 면적변화에 따른 감도 특성

Fig. 4에서 1.3mm와 1.8mm 단면의 소자가 두께증가에 대해 중성자 감도 특성이 향상됨을 확인할 수 있다. 1.3mm 단면의 경우는 두께 1.0mm 보다 1.5mm의 감도가 12.52mV/cGy 정도 향상되었으며, 1.8mm 단면의 경우는 1.5mm 두께의 소자보다 2.0mm의 두께의 PIN 다이오드가 20mV/cGy가 높게 나타났다. 이는 검출기 두께가 증가함에 따라 유효 검출 두께가 증가함에 기인한다. Fig. 5는 면적 변화에 따른 감도 특성을 나타낸 그래프로서 동일한 두께에서 면적이 작아질수록 감도가 증가 한다는 것을 확인할 수 있다. 특히, 두께가 작아질수록 면적에 의존하는 감도의 증가율이 작아진다는 것을 직관적으로 알 수 있으며 유효 검출 체적을 좌우하는 두께와 단면적이 검출 효율에 큰 영향을 줌을 알 수 있다.

3. 중성자 탐지 최적 감도 도출

가. 안정적 특성의 최적 감도 소자

Fig. 6은 소자 구조별 중성자 탐지감도 증가를 위해 2.0mm 구조의 셀을 이용하여 패키징한 소자의 정밀 감도분석의 결과를 보여주고 있으며, 선량계에서 설정된 1mA 정전류로 구동할 경우 12V 선량계 구동전압으로는 1krad 선량범위 측정이 불가능하게 됨을 보여주고 있다. 즉, 2.0mm 후막 PIN 다이오드 구조는 1mA 정전류 인가방식의 선량계에 적합하지 않을 뿐 아니라 소형 저전력형 선량계 구현에도 제약조건으로 작용하게 됨을 나타낸다.

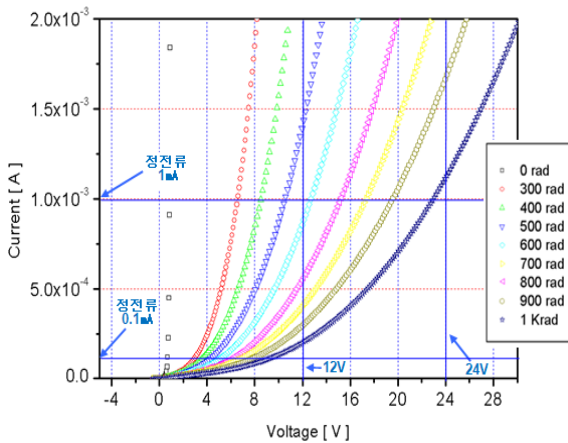


Fig. 6. 선량측정용 인가 정전류에 대한 중성자 탐지범위

나. 최적 감도의 중성자 탐지소자 구현

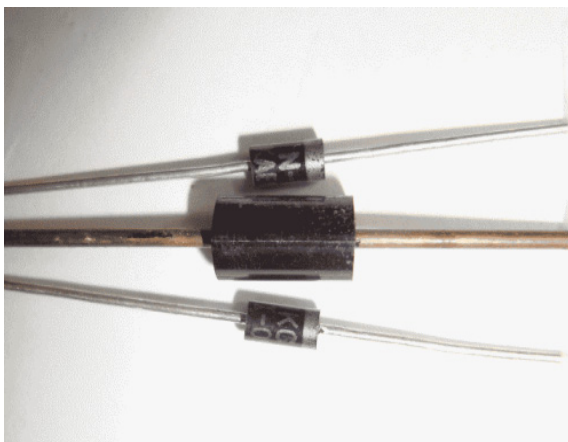


Fig. 7. 20mm와 12mm 구조셀의 PIN 다이오드 개별소자

선량계 구동전류와 소형화, 그리고 저전력 소모형을 위해 12mm 구조의 PIN 다이오드 중성자 탐지소자를 시스템에 적용이 가능하도록 다이오드 구조의 반도체 공정과정으로 제작하였고, 그 실험을 Fig. 7에서 20mm 소자와 외형 비교가 가능하도록 배치하였다. N(-) 단자에 흰색 선을 표시하여 다이오드임을 나타내었다. 제작된 소자는 일반 전자부품과 동일한 형상을 가지면 시스템에 적용되는데 아무런 문제점이 없으며 전자회로 기판상에 장착할 수 있다.

4. 시스템 적용 및 시험

가. 시스템 적용

제작된 중성자 탐지소자를 실제 선량계에 적용하기 위하여 “다목적 방사선 탐지모듈”에 적용하였고 시험평가를 실시하였다. 제작된 모듈은 Fig. 8과 같으며 이 모듈은 중성자방사선외에 알파, 베타, 감마선까지 탐지가 가능하다. 전체 시스템의 중량은 10kg이하였으며 개인 휴대가 가능하고 차량이나 함정등 다양한 탑재체에 장착이 가능하다. 이 다목적 방사능 탐지모듈 중 주 시스템인 방사능탐지모듈은 전체 시스템을 제어하고 감마선과 중성자방사선을 탐지하는 탐지모듈과 알파와 베타방사선을 탐지하는 확장 프루브, 차량

| 탐지모듈 | 차량 거치대 |
|----------|--------|
| | |
| 외부 센서 모듈 | 확장 프루브 |
| | |

Fig. 8. 다목적방사능 탐지 시스템

외부의 감마선을 탐지하는 외부센서부와 탐재체에 장착시 탐지모듈을 거치할 수 있는 장착대로 구성된다. 탐지모듈은 감마선과 중성자를 탐지하는데 감마선을 탐지하기 위하여 두 개의 GM tube를 사용하였다. 감마저선율을 측정하기 위하여 에너지 보상형 GM tube와 고선율을 측정하기 위하여 별도의 GM tube를 사용하였다. 누적선량 측정을 위하여는 MOSFET type의 반도체 검출기를 적용하여 10⁵Gy 이상의 선량 측정이 가능하다. 중성자방사선 탐지를 위하여는 본 연구에서 제작된 반도체형 중성자 탐지소자를 적용하였으며 알파와 베타 방사선을 탐지하기 위한 확장프루브에는 photo diode type의 반도체 검출기를 사용하였다.

나. 시험평가

제작된 탐지모듈에 대한 알파, 베타, 감마방사선에 대한 시험평가는 한국표준과학연구원에서 수행하였다. 탐지모듈의 감마방사선에 대한 응답특성, 각 분포 시험 및 에너지 의존성 시험 결과는 Fig. 9와 같다. 시험에 사용된 선원은 Cs-137과 Co-60이며 낮은 에너지는 X-ray를 사용하였다. 그림 (a)에서 보는바와 같이 1,000cGy/hr 이상의 감마선율에서도 5% 미만의 양호한 응답성을 보이고 에너지 의존성은 그림 (b)에서 보는 바와 같이 100KeV에서 3MeV까지의 에너지 범위에서도 ±20% 이하의 변동을 보임을 알 수 있다. 또한 그림 (c)을 통하여 ±60도의 각분포에서도 양호한 응답특성을 보임을 알 수 있다. 외부센서 모듈도 동일한 특성을 조사한 결과 유사한 특성을 보였다. 알파와 베타 방사선에 대한 시험에서도 주어진 조건인 ±20% 이하의 오차율을 보여 양호한 특성을 가짐을 확인하였다.

중성자방사선에 대한 선량 시험평가는 미국 NIST (National Institute of Standard and Technology)의 중성자 조사시설에서 수행되었다. 중성자 조사는 Cf-252 선원을 사용하였으며 장시간 대선량 중성자 조사에 따른 유도 방사선의 영향을 줄이기 위해 회로기판 상태와 단소자로 시험을 수행하였다. Fig. 10은 치구에 장착된 반도체 중성자 탐지소자 형상이다.

시험에 적용된 중성자 총 조사시간과 조사선량은 1,625.6cGy였으며 실측된 측정치는 1,510cGy였다. 이 경우 검출기의 감도는 2.60mV/cGy 였다. 측정된 결과는 약 7% 이하의 오차율을 가지며 기준을 측정하였다. 비교 시험을 위하여 미군의 개인 휴대용 선량계인 AN/UDR-13에 적용된 중성자 검출기도 같이 조사한 결과 매우 낮은 특성을 보임을 확인하였다.

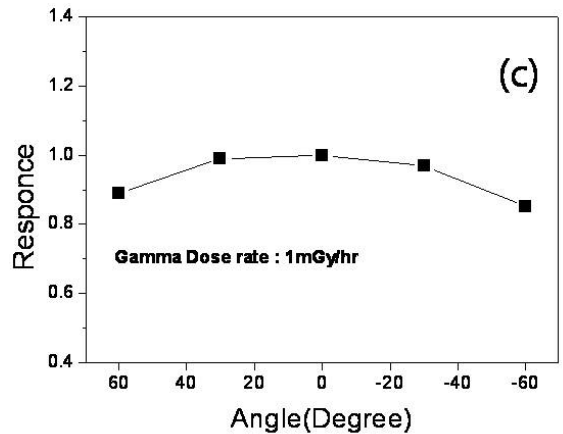
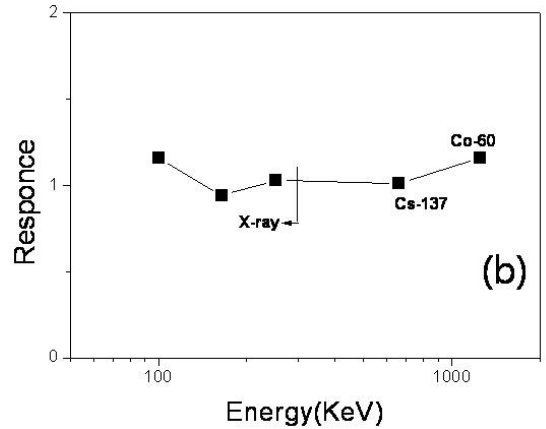
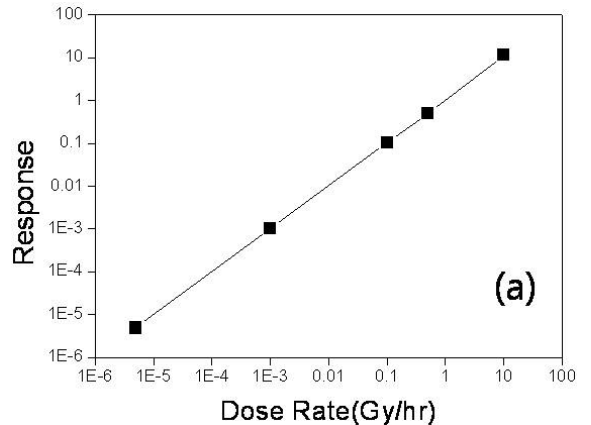


Fig. 9. 탐지모듈의 감마선 특성시험결과. (a) 감마선 선율범위 시험결과 (b) 에너지 의존성 시험결과. 주어진 에너지 범위에서 ±20% 이내에 만족. (c) 방향 의존성 시험결과, 좌우상하 ±60도에서 기준 충족.

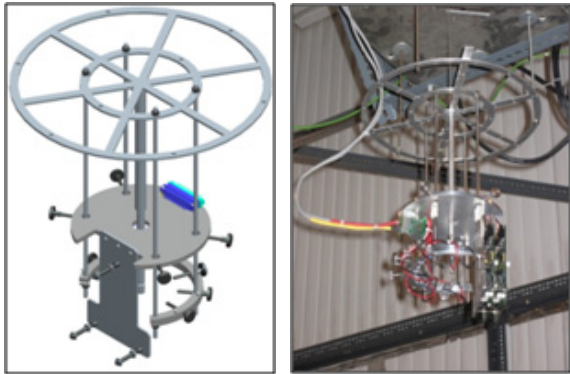


Fig. 10. 중성자 탐지소자 시험용 치구와 설치 형상

Table 1. 중성자 선량 시험 결과

| 구분 | 내용 | 비고 |
|----------|------------|-----------------------------|
| 총 조사시간 | 6,018분 | |
| 측정치 | 1,625.6cGy | |
| NIST 조사량 | 1,510cGy | |
| 시험 결과 | +7.07 | 기준충족($\pm 20\%$) |

5. 결론

본 논문에서는 1krad 범위의 중성자 선량을 실시간으로 측정할 수 있는 반도체형 PIN 다이오드 탐지센서를 개발하고 이를 군사용 방사선측정기에 적용하는 방안에 대하여 논하였다. 반도체 중성자 탐지소자를 개발하기 위하여 다양한 구조 변수로 PIN 다이오드

소자를 제작하고, 각각에 대한 중성자 감도 분석시험을 수행하였다. 시험을 통해 얻은 최적감도 결과와 소형 선량계에서의 안정적인 사용조건을 동시에 만족하는 최적 중성자 탐지소자로서 12mm 셀의 PIN 다이오드를 공정을 통해 제작하고, 개발하였으며 성공적으로 시스템에 적용하였다. 또한 반도체 중성자 탐지소자를 포함한 차세대 군용방사선측정기 핵심기술인 다목적 방사능 탐지기술을 개발하여 특성을 분석하였으며 야전 적용이 가능함을 입증하였다.

Reference

- [1] “화생방 상황하 환자처치”, 교육참고 18-11, 육군본부, 2002.
- [2] S. H. Kim, N. H. Lee et al, “Development of a Semiconductor Neutron Dosimeter with a PIN Diode”, Jn of Nuclear Science and Technology, 2004.
- [3] George C. Messenger et al, “The Effect of Radiation on Electronic System”, Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1986.
- [4] M. Valdinoci, et al. “Analysis of Conductivity Degradation in Gold/Platinum -Doped Silicon”, Trans. On Electron Devices, Vol. 43, No. 12, pp. 2269~2275, 1996.
- [5] O. J. Mengali, E. Paskell, R. W. Beck, and C. S. Peet, “The Use of Diffused Junction in Silicon as Fast-Neutron Dosimeters”, Proc. of 2nd Conf. on Nuclear Radiation Effects on Semiconductor Devices, Materials and Circuitss, 1959.