

속중성자 탐지용 반도체 소자의 개발과 특성분석

이남호 · 조재완 · 정현규 · 김승호, 김양모, 한민규
한국원자력연구소, 충남대학교, 서울대학교

Development of Fast Neutron Detector and its Characteristics

Namho Lee, Jaewan Cho, Hyunkyu Jung, Sungho Kim
KAERI, CNU, SNU

Abstract

속중성자 피폭 시 실리콘 다이오드 내부에서 발생하는 변위 손상을 이용한 속중성자 탐지용 PIN 다이오드를 개발하고 중성자장에서 특성변화 및 감도 실험을 통하여 성능을 검증하였다. 시뮬레이션과 다양한 구조로 제작된 소자에 대한 방사선 실험을 거쳐 집합체 형태와 개별 PIN 다이오드를 제작한 다음 중성자 반응 특성과 감도 분석을 위한 중성자 방사선 실험을 수행하였다. 여러 개의 PIN 다이오드 샘플에 대한 중성자 특성변화를 실시간으로 측정하기 위해 디지털 정전류 구동 방식의 온라인 전자적 선량계 모듈을 제작하여 사용한 실험의 결과, 본 연구에서 개발한 PIN 다이오드 소자는 중성자 방사선에 대하여 우수한 감도 특성을 갖는다는 것과 입사 중성자에 대한 방향 의존성이 거의 없다는 사실을 알 수 있었다. 그리고 이어 수행된 300여 시간의 열화실험을 통하여 본 연구에서 제작된 PIN 다이오드 소자는 중성자 탐지소자로서의 사용 가능성이 충분함을 확인할 수 있었다.

1. 서 론

방사선을 감지하기 위해서 방사선을 전류나 빛과 같은 물리적인 양으로 변환하는 탐지소자와 변환된 값을 정제하고 정량화하여 지시해주는 선량계가 사용되며 알파, 베타, 감마선, 중성자와 같은 여러 방사선원이 인체에 미치는 영향을 측정하기 위한 다양한 종류의 개인 선량계(personal dosimeter)가 존재한다. 최근 민간부분의 원자력발전소, 치료용 방사선 시설, 비파괴 검사 장비 등에서 중성자 취급이 확대됨에 따라 중성자 선량계의 사용 요구 빈도가 증가 추세에 있고, 군사부문에 있어서는 한반도 내의 국지전 발발 가능성 증가에 따른 중성자탄 사용 가능성으로 인하여 중성자 선량계의 수요 또한 증가할 전망이다. 지금까지 주로 누적 방사선 선량계로 사용되어온 필름 뱃지(Film Badge)나 열형광선량계(TLD) 등은 사용자가 현장에서 직접 판독을 할 수 없어 비상시 작업자의 고방사선 피폭 대처능력을 저하시킬 뿐 아니라, 판독을 위한 장치와 인력이 추가로 요구된다. 따라서 미국 등 선진국에서는 실시간 개인 선량계 수요가 점점 증가하고 있으며, 보다 더 나은 성능을 가진 선량계 개발에 많은 관심을 가지고 있다. 이러한 관점에서 중성자를 정확하고 신속하게 측정할 수 있는 소형 실시간 개인 중성자 선량계의 개발이 요구되고 있다.

일반적으로 중성자탄에서 방출되는 중성자 에너지는 크게 두 종류로 구별된다. 중성자탄의 뇌관 역할을 하는 핵분열 부분에서 발생하는 평균 0.8 MeV의 에너지와 주 폭탄 장치 내부에서 핵융합에 의하여 방출되는 14 MeV의 에너지이며 이들은 모두 고속 중성자 에너지 영역이다. 이 고속의 중성자가 격자 실리콘 PIN 다이오드 반도체에 입사되면 내부 실리콘 격자와 충돌하게 되고, 이때 중성자의 에너지가 격자 구성물질에 전이되어 산란된 되튀핵을 발생시켜 격자결함을 유발한다. 운동에너지를 가진 되튀핵은 또 다른 격자 결함군을 유발시켜 전자

들의 함정(Trap)이 됨으로써, 결과적으로 PIN 다이오드의 전류-전압(I-V) 특성 곡선을 변화시키게 된다.⁽¹⁾

본 논문에서는 시뮬레이션과 다양한 구조로 제작된 소자에 대한 방사선 실험을 통하여 최적의 감도를 갖는 개별소자 형태의 PIN 다이오드를 제작하고, 중성자장에서 온라인 실험을 위해 디지털 정전류 구동 방식의 온라인 전자적 선량계 모듈을 제작하였다. 속중성자 조사와 온라인 측정 실험에서 PIN 다이오드 소자의 중성자 감도 분석과 중성자에 대한 방향 의존성, 그리고 중성자 조사 후의 열화 특성을 분석함으로써, 개발된 소자의 중성자 탐지소자로서의 사용 가능성을 평가하였다.

2. 본 론

2.1 PIN 다이오드의 속중성자 영향

실리콘(Si) PIN 다이오드 소자가 일정 에너지 이상의 중성자에 노출되면 소자 내부에서 이온화와 변위 손상(displacement damage) 현상이 동시에 발생된다. 이 가운데 이온화 현상에 의해 발생된 전자-전공쌍(electron-hole pair)은 외부 바이어스에 따라 비교적 짧은 시간 내 소멸될 수 있는데 반해, 변위손상 효과는 중성자와 실리콘 격자의 충돌로 인한 실리콘 격자의 위치변화 과정에 따라 내부에 생성되는 공극(vacancy)과 간극(interstitial)과 같은 결함 영역들이 생성되는 것으로서 그 영향은 반영구적으로 유지된다.(그림 1) 실리콘에서 전자-전공쌍을 생성하는데 필요한 에너지는 약 3.6eV이며, 변위손상을 일으키는데 필요한 에너지는 약 25eV로 알려져 있다. 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 주입 되는 소수 반송자의 지속적인 수명 감소를 초래한다. 중성자 조사선량의 증가에 따른 반송자(carrier) 수명감소 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. 공핍영역으로의 주입 반송자 농도의 분포는 베이스 폭과 확산길이($L = \sqrt{D \tau}$, D:반송자 확산상수, τ : 반송자의 수명)의 함수이므로 중성자 피폭은 캐리어 수명과 이에 따른 확산 길이를 감소시키게 된다^(4,5). 또한 PIN 다이오드 외부전압은 식 (2)과 같이 비례관계로 표현되므로^{(2),(3)} 위의 식 (1)에서 중성자 플루언스는 소자의 반송자 전하 수명에 반비례하고, PIN 다이오드 인가전압 V_D 는 확산길이 관계식과 식 (2)로부터 반송자 수명에 반비례하므로, 결국 소자 양단전압 V_D 는 중성자 플루언스에 비례하게 됨을 확인할 수 있다.

$$V_D \propto \left(\frac{W}{L}\right)^2 \quad (2)$$

여기서, L은 반송자 평균 확산거리, D는 반송자 확산상수, τ 는 반송자 평균 수명, W는 PIN 다이오드 베이스 폭, V_D 는 PIN 다이오드 인가전압이다.

중성자 피폭선량 증가에 따라 PIN 다이오드 양단 전압이 증가되는 이 같은 관계는 소자의 입출력 특성곡선(I-V)에서 그림 2와 같이 특성곡선이 오른쪽으로 이동하는 현상으로 나타난다. 그림 1에서 중성자 피폭에 의해 변형된 특성곡선에서의 피폭 중성자 선량에서의 전기적 변화량을 추출하는 방법으로 일정 전류에서의 전압의 변화량을 확인하거나, 역으로 일정 전압에서의 전류값의 변화량을 측정하면된다. 즉 임의의 중성자 장에서 소자에서의 중성자 피폭선량을 확인하기 위해서는 사용된 PIN 다이오드의 정전류에 대한 전압이나 정전압에 대한 전압의 값을 측정하면 그때까지 소자에 누적 피폭된 중성자의 선량을 도출할 수 있다.

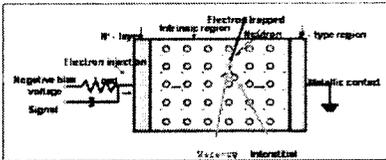


그림 1. 중성자 피폭에 의한 PIN다이오드 내부 변위손상효과

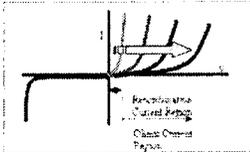


그림 2. 중성자 피폭에 따른 I-V 특성곡선의 변화

2.2 속중성자 탐지용 PIN 다이오드 개발

2.2.1 PIN 다이오드 구조와 중성자 감도

Swartz 등⁽⁴⁾은 PIN 다이오드가 고속 중성자에 피폭될 경우 변위손상 현상에 의한 외부 전류-전압의 변화 특성 변화를 다음과 같이 기술하고 있다.

$$\frac{dV}{d\phi} = \alpha \tau d \frac{kT}{q} \left[\frac{bJ}{4qD_n(b+1)p^+a} \right]^{1/2} \frac{(R+1)(\cosh d/L - 1)}{(2R \cosh d/L - R^2 - 1)} + \frac{\alpha \tau d \frac{kT}{q} \left[\frac{bJ}{4qD_n(b+1)p^+a} \right]^{1/2}}{(2R \cosh d/L - R^2 - 1)^{3/2}} \{ [R \cosh d/L - 1] (\cosh d/L - R) - \frac{\sinh d/L}{d/L} (2R \cosh d/L - R^2 - 1) \} \left(\arctan e^{d/L} \left[\frac{R - e^{-d/L}}{e^{d/L} - R} \right]^{1/2} - \arctan \left[\frac{R - e^{-d/L}}{e^{d/L} - R} \right]^{1/2} \right) \quad (3)$$

여기서 사용된 변수는 다음과 같다.

V_B : 다이오드의 베이스에 걸린 전압, k : 볼츠만 상수, T : 온도, q : 전자의 전하량, kT/q : Thermal Voltage,

b : μ_n/μ_p . 전자의 이동도 비, d/L : 확산길이 L에 대한 base 길이(또는 다이오드의 두께) d의 비

R : $p(d) / p(0) = (n^+c / p^+a)^{1/2}$, 베이스 영역 양쪽 경계에서의 정공 농도비, β : Thermal Voltage의 역수 (=q/kT)

J : 전류밀도, D_n : 전자의 확산계수

식3은 중성자 조사선량의 증가에 따른 PIN 다이오드

전압-전류 특성 변화와 소자 내부 함수들의 영향에 대하여란 기술되어 있으므로, 소자의 구조별 중성자 특성을 고찰하기 위해서는 기존 수식에 나타나 있지 않는 PIN 다이오드 구조 변수를 도입하는 치환과정을 거쳐야 한다. PIN 다이오드 구조에 따른 중성자의 감도를 수식 전개와 시뮬레이션을 통해 살펴보기 위해 Swartz의 논문을 다음 표와 같이 치환하였다. 여기서 d는 PIN 다이오드의 두께로 전하의 수명에 영향을 미치고, A는 소자의 단면적으로 전류밀도보다 전류자체에 영향을 미친다.

표 1. 중성자 대한 소자 구조함수의 치환 관계함수

변경 전	변경 후
$dV_B/d\phi = f(\tau, J)$	$dV_B/d\phi = g(d, A)$
ϕ 일정	ϕ 일정

수식 3을 표 1에 의해 함수 치환하여 새로운 수식을 전개하였고, 이 수식에서 일정 중성자 선량에 대하여 d와 A를 가변하면서 감도를 계산하여 얻은 소자의 구조 변수와 중성자 감도의 상호관계를 그림 3에 도시하였다. 본 시뮬레이션의 결과를 통하여 중성자에 대한 고감도의 PIN 다이오드 소자 개발을 위해서는 두껍고(d) 단면적(A)이 작은 구조를 가져야 함을 알 수 있다.

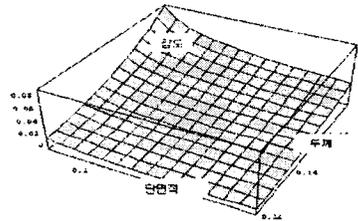


그림 3. 길이와 단면적에 대한 중성자 감도변화 특성

2.2.2 고감도 속중성자 개별 탐지소자 제작

최대의 중성자 감도를 가지는 PIN 다이오드를 제작하기 위해 그림 3의 시뮬레이션 결과를 바탕으로 다양한 단면 길이(1)와 두께(d)를 가진 소자를 제작하여 실제 중성자 장에서 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 다양한 구조의 여러 소자들 가운데 하나의 중성자 실험 결과를 그림 4에 나타내었다. 그림 4는 1mm의 두께를 가진 소자의 단면의 길이 변화에 대한 중성자 감도를 도시한 것으로써, 단면의 길이가 줄어들어 따라 중성자 감도가 증가하게 된다는 시뮬레이션의 결과와 일치하는 경향을 보이고 있다. 그러나 단면의 길이가 지나치게 감소하여 소자의 두께 보다 작아지게 되면 오히려 감도가 감소하는 특성을 보여주고 있으며, 이 현상은 단면적이 한계치 이하로 감소할 경우 표면 누설전류의 증가로 이어져 오히려 중성자 감도를 떨어뜨리는 것으로 이해할 수 있다. 따라서 최대의 중성자 감도를 가진 PIN 다이오드를 제작하기 위한 구조적인 조건으로 소자의 두께와 단면의 길이가 비슷한 형태를 선택하였다.

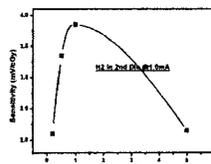


그림 4. 조사실험상의 구조특성 그림 5. 제작된 PIN다이오드

이상의 소자의 구조에 대한 시뮬레이션과 중성자 실험 결과를 토대로 두께 1.2밀리미터mm, 저항도

3,000 \cdot cm의 고순도 웨이퍼로부터 단면 한번의 길이 (1)가 1mm인 PIN 다이오드 개별소자(그림 5, 그림 6)를 제작하였다. 제작된 소자로부터 HP4155B를 사용하여 출력한 출력 전류-전압(I-V) 특성 자료는 그림 7에 나타내었다.

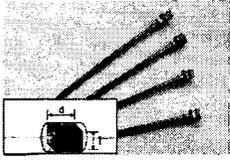


그림 6. 제작소자의 내부구조

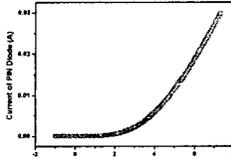


그림 7. 제작소자의 I-V 특성

2.3. 중성자 조사시험

제작된 두 종류의 PIN 다이오드 탐지소자의 중성자에 대한 탐지감도 측정과 중성자 입사 방향에 따른 소자의 탐지감도 변화 정도(방향 의존성), 그리고 중성자 실험에서 특성이 변화된 PIN 다이오드의 시간에 따른 열화(Annealing) 현상, 즉 시간의 경과에 의한 소자 자체에 기억된 중성자 정보량이 손실되는 경향을 확인하기 위해 한국원자력병원 양성자 가속 중성자 조사장치에서 조사시험이 수행되었다. 중성자 조사시험과 동시에 소자의 특성변화를 측정하기 위해 온라인 선량계 모듈을 이용하였다.

2.3.1 온라인 중성자 선량 측정 모듈 제작

제작된 PIN 다이오드 소자에 대한 보다 신뢰성 있는 방사선 영향 평가시험을 위해서는 피폭 중성자에 대한 소자의 특성변화를 원격지에서 실시간으로 측정할 수 있는 장치가 필수적이다. 이 장치의 기능은 온라인 선량계에 해당하는 것으로서, 본 실험뿐만 아니라 추후 제작하고자 하는 전자적 개인 선량계를 위한 시험개발의 성격을 띠고 있다고 할 수 있다. 따라서 본 온라인 선량계 모듈의 제작 시, 최종 선량계의 구현을 위해 결정되어야 할 여러 가지 변수를 가변하면서 실험을 수행할 수 있는 기능이 포함되도록 제작하였다. 그림 8과 같은 형태(전면 덮개 제거)로 제작된 온라인 선량계 모듈은 그림 9과 같이, 중성자 피폭 실험에 사용될 여러 개의 PIN 다이오드 샘플이 설치된 센서모듈에서 측정을 원하는 소자를 선택하고, 선택된 소자에 디지털 정전류를 인가하여 중성자 피폭으로 인한 탐지소자의 저항 변화량을 측정한다. 중성자 피폭선량으로 변환하여 모듈내의 LCD 화면에 표시함과 동시에 시리얼 통신을 통해 원격지의 메인 PC로 전달하여 그 값을 자동 저장하는 기능을 가지고 있다. 또한 소자의 중성자 변화특성 파악과 최종 개인 선량계의 제작에 중요한 요소가 되는 정전류의 크기와 인가 펄스의 지속시간을 조절하여 인가하는 기능과 더불어 측정과정에서 발생하는 소자의 열화현상과 측정오차 등의 부작용 발생을 점검하는 역할도 포함되어 있다.



그림 8. 온라인 방사선량계모듈

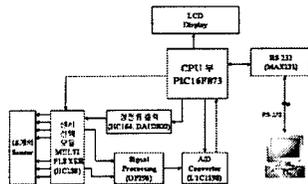


그림 9. 내부 구성도

2.3.2 실험 방법 및 구성

한국원자력병원의 싸이크로트론(MC-50)에서 35MeV의 가속 양성자가 베릴륨(Be) 표적물과 반응할 때 발생하는 2차 중성자를 PIN 다이오드 샘플에 조사

하였다. 이 중성자 에너지는 최고 14MeV, 그리고 6.11MeV에서 최대 및 평균값을 갖는 가우시안 통계분포 형태를 가지고 있다. 제한된 실험시간 내에 선량 목표치인 최대 1,000cGy를 조사시키기 위해 양성자 빔 전류(I_p)를 40 마이크로암페어, 중성자 조사 선률은 분당 6.7cGy로 설정하였고 샘플에 대한 중성자 조사와 동시에 중성자 피폭으로 인한 특성변화를 실시간으로 측정하여 변환된 중성자 선량 값을 컴퓨터에 저장하는 과정으로 실험을 진행하였다.

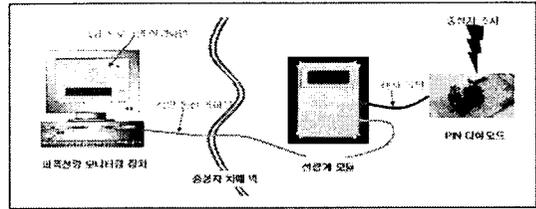


그림 10. 온라인 중성자 조사 및 측정장치 구성도

실시간 중성자 선량 측정장치는 그림 10과 같이 선량계 모듈, 소자 모듈, 선량계-컴퓨터 통신용 케이블(RS-232), 그리고 변수 값의 조절과 측정 및 저장기능이 구현된 PC로 구성되어 있다. 중성자 조사시험 내에 샘플을 고정하고 중성자의 직접적인 영향을 피하기 위해 온라인 선량계 모듈은 중성자 조사장치의 중심에서 벗어난 곳에 설치를 한 다음, 20미터 데이터 통신 케이블을 외부 제어실의 제어 및 측정용 컴퓨터와 연결하였다. 비주요 C++로 PC에 구현된 인가 신호제어 및 실시간 측정용 프로그램(그림 11)은 측정코자하는 샘플 소자에 정해진 형태의 정전류를 인가하는 동시에, 이에 대응한 출력 특성변화를 온라인으로 계속하고 자동으로 저장하는 동시에 시간적인 변화를 그래프로 비교할 수 있는 기능을 내재하고 있다.

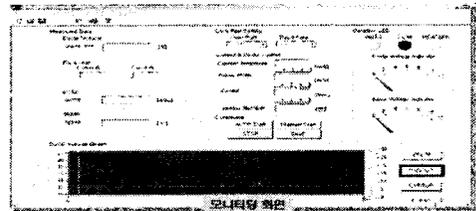


그림 11. 신호 제어 및 측정용으로 구성된 컴퓨터 화면

2.3.3 중성자 조사시험 결과

2.3.3.1 중성자 감도

개발된 여덟 개의 샘플 소자와 두개의 상용 외산 중성자 탐지소자에 대한 중성자 조사와 측정을 병행한 실험에서 5mA, 10msec의 인가 정전류 펄스에 대한 소자 문턱전압의 변화를 피폭 중성자 선량에 대해 온라인 기록한 결과가 그림 12에 나타나 있다. 이 결과는 개발된 소자가 중성자 피폭선량에 대해 모두 선형적 전압 변화특성을 가지고 있고, 단위 중성자 선량(1 cGy)당 평균 13.32mV의 감도를 가지며, 소자간의 오차는 7.98%이하로써 신뢰도 있는 중성자 특성을 가짐을 보여준다. 일반적으로 단위 중성자 선량당 1mV 정도이면 전자적 선량 회로에 구현 가능한 소자 감도로 알려져 있으므로, 본 연구에서의 소자는 중성자 탐지센서로서의 사용 가능성이 충분하다고 판단되며, 이 감도는 동일한 조건하에서 실험된 외산 중성자 탐지용 PIN 다이오드의 감도, 3.94mV/cGy에 비해서도 3배 이상 높은 것이다.(그림 13)

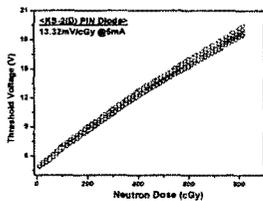


그림 12. 중성자 감도 결과

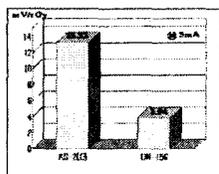


그림 13. 중성자 감도 비교

2.3.3.2 방향 의존성

일반적으로 반도체형 방사선 탐지소자의 단점으로는 방사선 탐지소자에 대한 방사선의 입사방향에 따라 탐지 감도가 달라진다는 점을 들 수 있으며, 이는 정확한 방사선량 계측에 있어 오차를 초래하는 요소가 된다. 따라서 개발된 PIN 다이오드 중성자 탐지소자에 대해 중성자 입사 방향에 대한 감도의 변화, 즉 방향 의존성 유무를 알아보기 위한 실험을 적용하였다. 실험에 적용한 소자의 P-N 방향은 중성자 입사 방향에 대한 수직, 수평, 60도, 30도의 전체 90도내 범위에서의 각 방향에 대한 중성자 감도를 비교하였다. 여기에 소자의 대칭성을 적용하면 전 방향(360도)의 특성을 살펴볼 수 있기 때문이다.

5mA의 정전류에 대한 각 소자별 출력전압을 소자의 중성자 감도 비교 변수로 사용하여 각 방향에 대한 감도를 도시한 것이 그림 14이다. 이 실험을 통해 나타난 PIN 다이오드의 전체 방향에 대한 중성자 감도 오차는 3.5%이하로서, 이 결과는 개발된 PIN 다이오드가 중성자 입사 방향에 관하여 의존성이 거의 없다는 사실을 보여준다.

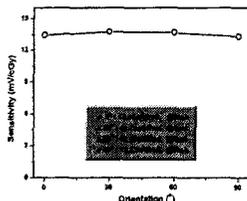


그림 14. 방향 의존성

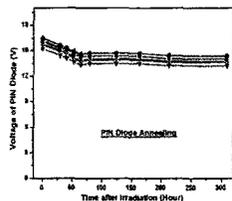


그림 15. 어닐링 특성

2.3.3.3 열화특성 및 감도비교

중성자 피폭에 의하여 PIN 다이오드 내부에 생성된 변위 손상이 상온에서 시간의 경과에 따라 회복되는 경향을 열화 현상(annealing effect) 이라고 하며, 이로 인한 누적 방사선량 기억의 일부 손실은 누적 방사선량을 기억하고 있는 어느 센서에서나 불가피한 것이다. 개발된 소자에 대한 열화현상을 고찰하기 위해 중성자 조사시험 완료 후 시간의 경과에 따른 문턱전압의 변화를 기록한 그림 15의 그래프에서, 총 308시간 동안 열화된 값은 평균 13%로 나타났다. 이 범위의 열화 특성은 본 개발의 목표인 중성자 탐지소자의 오차율 20%에 포함될 뿐만 아니라 선량계에서의 소프트웨어적인 보상(Off-set)법을 통하여 보정할 수 있으므로 기능상 문제를 일으키지는 않을 것으로 판단된다. 열화실험에서 나타난 특징은 중성자 피폭 종료 후 약 70시간 전후까지 열화 현상이 급격한 진행을 보이지만, 그 이후에는 비교적 안정된 상태를 유지한다는 것이다.

3. 결 론

본 논문에서는 PIN 다이오드 속중성자 탐지용 소자를 개발하고, 중성자 장에서의 실험을 통하여 개발된 소자의 중성자 탐지소자로서의 사용 가능성에 대하여 분석해 보았다. 개발된 소자는 0 - 1000 cGy(Tissue)

까지 선량계로서의 탁월한 선형성을 보였으며, 감도는 약 13mV/cGy로써, 현재 상용으로 시판되는 의산에 비해 3배 이상의 우수한 감도를 나타내었다. 또한 중성자 입사 방향에 대하여 의존성을 보이지 않았고 장시간의 열화실험에서도 안정적인 특성을 보여 주었다. 따라서 개발된 PIN 다이오드 소자는 중성자 탐지소자로서의 사용 가능성이 충분할 뿐만 아니라, 기존의 개인 선량계 보다 그 성능 및 휴대용 전자선량계로서의 실용성이 우수함을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 국방부 민군겸용기술개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] George C. Messenger et al, The Effect of Radiation on Electronic System, Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1986
- [2] M. Valdinoci, et al. "Analysis of Conductivity Degradation in Gold/Platinum-Doped Silicon," Trans. On Electron Devices, Vol. 43, No. 12, 1996, pp. 2269-2275
- [3] M. McPherson, T. Sloan, B. K. Jones, "Suppression of Irradiation Effect in Gold-Doped Silicon Detectors", J. Phys. D: Appl. Phys. 30, 1997, pp. 3028-3035
- [4] John M. Swartz and Marlin O. Thurston, "Analysis of the Effect of Fast-Neutron Bombardment on the Current-Voltage Characteristic of a Conductivity-Modulated P-I-N Diode," J. Appl. Phys. 37 No. 2, 1966, pp. 745-755