

Development of a Fast Neutron Detector

李南昊* · 金承鎬** · 金良模***

(Nam-Ho Lee · Seung-Ho Kim · Yang-Mo Kim)

Abstract - When a Si PIN diode is exposed to fast neutrons, it results in displacement damage to the Si lattice structure of the diode. Defects induced from structural dislocation become effective recombination centers for carriers which pass through the base of a PIN diode. Hence, increasing the resistivity of the diode decreases the current for the applied forward voltage. This paper involves the development of a neutron sensor based on the phenomena of the displacement effect damaged by neutron exposure. The neutron effect on the semiconductor was analyzed. Several PIN diode arrays with various thickness and cross-section area of the intrinsic layer(I layer) were fabricated. Under irradiation tests with a neutron beam, the manufactured diodes have a good linearity to neutron dose and show that the increase of thickness of I layer and the decrease of cross-section of PIN diodes improve the sensitivity. Newly developed PIN diodes with thicker I layer and various cross section, were retested and then showed the best neutron sensitivity at the condition that the I layer thickness was similar to a side length. On the basis of two test results, final discrete PIN diodes with a rectangular shape were manufactured and the characteristics as neutron detectors were analyzed through the neutron beam test using on-line electronic dosimetry system. Developed PIN diode shows a good linearity as dosimetry in the range of 0 to 1,000cGy(Tissue) and its neutron sensitivity is 13mV/cGy at constant current of 5mA, that is three times higher than that of commercially available neutron detectors. And the device shows little dependency on the orientation of the neutron beam and a considerable stability in annealing test for a long period.

Key Words : NEUTRON, PIN DIODE, RADIATION, DOSIMETRY, SENSITIVITY

1. 서 론

방사선이 인체에 미치는 효과를 정량적으로 측정하고 평가하기 위하여 개인 선량계가 사용된다. 최근 민간부문의 원자력발전소, 치료 방사선, 비파괴 검사 등 중성자 취급이 확대됨에 따라 중성자 선량계의 사용 요구 빈도가 증가 추세에 있고, 군사부문에서는 한반도내의 국지전 가능성에 따른 중성자탄 사용 가능성으로 인하여 중성자 선량계의 수요 또한 증가할 전망이다. 또한 지금까지 주로 누적 방사선 선량계로 사용되어온 필름 배지 또는 TLD 등은 사용자가 현장에서 직접 판독을 할 수 없어 비상시 작업자의 고방사선 피폭 대처능력을 저하시킬 뿐 아니라, 판독을 위한 장치와 인력이 추가로 요구된다. 이러한 관점에서 정확하고 편리한, 저가의 소형 실시간 개인 중성자 선량계의 개발은 필수적이다. 일반적으로 중성자탄에서 방출되는 중성자 에너지는 크게 두 종류로 구별된다. 이는 중성자탄의 뇌관 역할을 하는 핵분열 부분에서 발생하는 평균 0.8 MeV의 에너지와 주 폭

탄 장치 내부에서 핵융합에 의하여 방출되는 14 MeV의 에너지이며 모두 고속 중성자 에너지 영역이다. 이 고속의 중성자가 실리콘 PIN 다이오드 반도체에 입사되면 내부 실리콘 격자와 충돌하게 되고, 이때 중성자의 에너지가 격자 구성물질에 전이되어 산란된 되튐핵을 발생시켜 격자결함을 유발한다. 운동에너지를 가진 되튐핵은 또 다른 격자 결합군을 유발시켜 전하들의 함정(Trap)이 됨으로써, 결과적으로 PIN 다이오드의 전류-전압(I-V) 특성 곡선을 변화시키게 된다.[1]

본 논문에서는 실리콘의 변위 손상효과를 이용한 속중성자 탐지소자를 개발함에 있어 PIN 다이오드의 중성자 감도 증대에 관하여 논하였다. 소자 구조별 중성자 반응 시험과 시뮬레이션 결과를 반영하여 고감도의 개별 중성자 탐지소자를 반도체 공정과정을 통해 제작하고 중성자 감도(mV/cGy)와 방향 의존성, 그리고 열화(Annealing) 특성 등에 관하여 고찰하였다.

2. 본 론

2.1 PIN 다이오드의 속중성자 영향

실리콘(Si) PIN 다이오드 소자가 일정 에너지 이상의 중성자에 노출되면 소자 내부에서 이온화와 변위손상(displacement damage) 현상이 동시에 발생된다. 이 가운데

* 正 會 員 : 韓國原子力研究所 原子力로봇랩
 ** 正 會 員 : 韓國原子力研究所 原子力로봇랩 · 工博
 *** 正 會 員 : 忠南大 工大 電氣工學科 教授 · 工博
 接受日字 : 2003年 6月 8日
 最終完了 : 2003年 12月 15日

이온화 현상에 의해 발생된 전자-전공쌍(electron-hole pair)은 외부 바이어스에 따라 비교적 짧은 시간 내에 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.[1](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 주입되는 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.

공핍영역으로 주입된 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. 또한 PIN 다이오드 외부 전압은 식 (2)와 같이 비례관계로 표현된다.[2],[3] 따라서 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, W 는 PIN 다이오드 베이스 폭, V_D 는 PIN 다이오드 인가전압이다.

중성자 피폭선량 증가에 따라 PIN 다이오드 양단 전압이 증가되는 이와 같은 관계는 소자의 입출력 특성곡선(I-V)에서 그림 2와 같이 특성곡선이 오른쪽으로 이동하는 현상으로 나타난다. 그림 2의 중성자 피폭에 의해 변형된 특성곡선에서 피폭 중성자 선량의 전기적 변화량을 추출하는 방법으로 일정 전류에서의 전압 변화량을 확인하거나, 역으로 일정 전압에서 전류 변화량을 측정하면 된다. 즉 임의의 중성자장에서 소자에서의 중성자 피폭선량을 확인하기 위해서는 사용된 PIN 다이오드의 정전류에 대한 전압이나 정전압에 대한 전류의 값을 측정하면 그때까지 소자에 누적 피폭된 중성자의 선량을 도출할 수 있다.

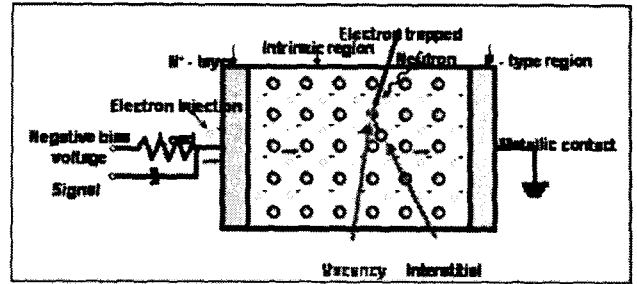


그림 1 중성자 피폭에 의한 PIN 다이오드 내부 변위손상효과
Fig. 1 Displacement damage effect in the PIN diode by neutron irradiation

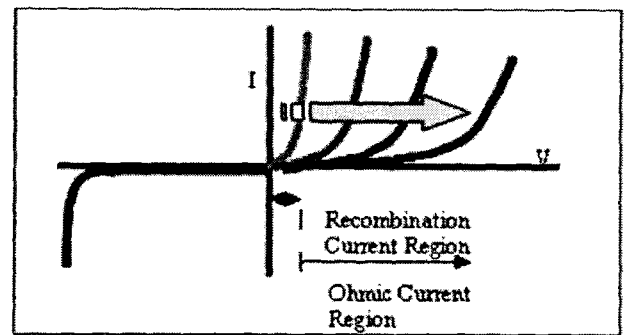


그림 2 중성자 피폭량 증가에 따른 I-V 특성곡선의 변화
Fig. 2 Shift of the I-V characteristic curves with the dose of neutron irradiation

2. 2 PIN 다이오드 구조별 중성자 감도 분석

2.2.1 구조별 제작 및 중성자 감도

중성자 탐지소자를 사용한 중성자 선량 측정 시 중성자 단위 선량에 대한 감도가 개선될수록 방사선 측정의 정확성이 증대되므로 감도의 개선은 중성자 탐지소자 개발에 있어서 대단히 중요한 요소이며, 특히 소자의 기하학적 구조는 중성자 탐지감도와 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있다.[4] PIN 다이오드에서 중성자 감도에 대한 구조적 요소들을 파악하기 위해 다양한 형태의 소자를 제작하여 직접 중성자 선장에서 조사시험을 수행하고 그 결과를 분석하였다. 350 μ m 두께의 고순도(1000 $\Omega \cdot$ cm) 실리콘 웨이퍼를 사용하여 PIN 다이오드 소자를 제작하는 과정에서 식각공정을 가변하여 소자의 두께(p-n 방향)를 3 종류(300, 150, 80 μ m)로, 마스크에 따라 소자의 유효 단면적을 4 종류(5x5, 1x1, 0.2x0.2, 0.05x0.05mm²)로 설정하여 그림 3(a)와 같이 다이(Die) 형태의 PIN 다이오드 집합체를 제작하였다. 그림 3(b)는 제작된 다이의 평면 내부 구성을 보여주는 것으로서 서로 다른 단면적의 PIN 다이오드 17개로 구성된 것을 확인할 수 있다.

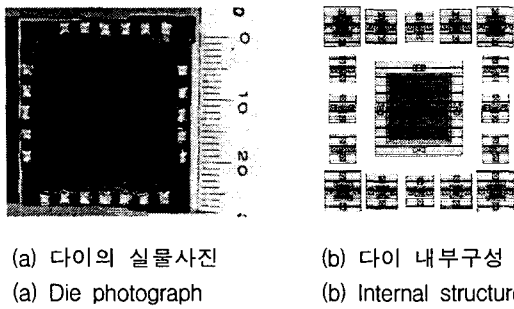
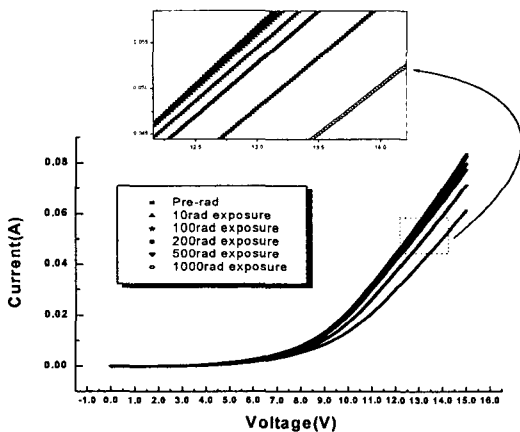


그림 3 구조별로 제작된 PIN 다이오드 집합체(Die)
 Fig. 3 PIN diode assembly outlook and inside structure

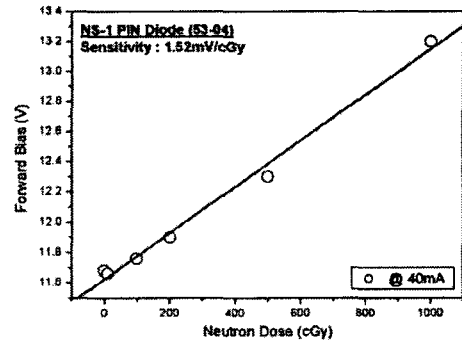
14MeV의 평균 에너지를 갖는 양성자 가속 중성자 조사 장치에서 제작된 소자를 이용한 중성자 조사시험을 수행하였다. 모두 다섯 단계에 걸쳐 PIN 다이오드를 총 1000cGy 중성자에 조사시키면서 각 단계별 다이오드 출력특성(I-V)을 반도체 변수 분석장치(HP4145B)로 측정하고 기록하는 방법을 반복하여 소자의 중성자 조사에 따른 저항의 변화를 관찰하였다. 시험에 사용된 중성자용 양성자 빔 전류는 40μA로 설정하였고, 최대 피폭 선량치는 1000cGy, 최소치는 10cGy, 그리고 선량률을 6.7cGy/Min@ Ip=40μA로 고정하고 조사시간만으로 누적 중성자 조사량을 조절하도록 하였다.

그림 4(a)는 폭 300μm, 단면적 0.2x0.2mm²인 PIN 다이오드에 대한 시험 결과를 도시한 것으로서 조사선량의 증가에 따라 곡선이 오른쪽으로 이동함을 확인할 수 있다. PIN 다이오드에 대한 중성자의 조사선량이 증가될수록 P, N 양극에서 이동하는 캐리어 수명의 감소에 기인하여 소자 양단의 저항 값이 증가된다. 이 결과를 정전류(40mA)에서의 전압 변화를 조사선량에 대해 나타낸 그림 4(b)에서 중성자 조사 선량의 증가에 따라 PIN 다이오드의 특성이 선형적으로 변화함을 보여주며 여기서의 단위 중성자 선량(cGy)당 1.52mV이다.

수행한 시험 결과로부터 PIN 다이오드 I층 폭과 단면적에 따른 중성자 감도 변화를 분석해 보았다. 그림 5는 동일한 I층 단면적(5x5mm²)에 대해 I층 폭과 중성자 감도의 관



(a) 중성자 조사선량에 대한 I-V 특성곡선 변화
 (a) Shift of the I-V characteristic curves with the dose of neutron irradiation



(b) 중성자 감도 (I층 두께: 300μm, 단면적: 0.2x0.2mm²)
 (b) Neutron sensitivity (I layer thickness : 300μm, Cross section : 0.2x0.2mm²)

그림 4 집합체형 PIN 다이오드의 중성자 반응
 Fig. 4 Neutron reaction of PIN diode assembly

계를 나타낸 것으로서 I층의 두께가 증가할수록 중성자에 대한 감도가 향상된다는 것을 알려준다. 그리고 그림 6은 I층 폭 300μm인 소자의 단면적 변화에 따른 중성자 감도관계를 분석한 것으로서 I층 단면적과 중성자 감도는 서로 반비례 관계에 있음을 알 수 있다. 그림 5와 6의 결과를 통하여 PIN 다이오드의 구조와 중성자 감도는 밀접한 관련이 있으며 중성자에 감도가 높은 PIN 다이오드의 형태는 좁은 단면적과 두꺼운 구조가 바람직함을 알 수 있다.

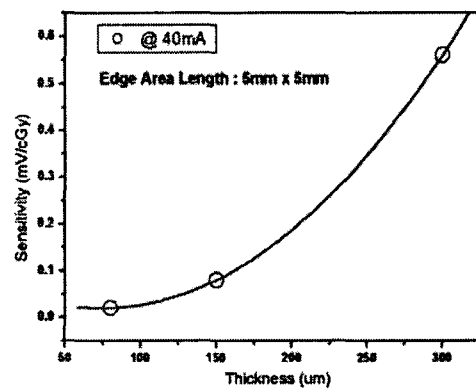


그림 5 두께별 중성자 감도 변화
 Fig. 5 Changes in neutron sensitivity to the thickness

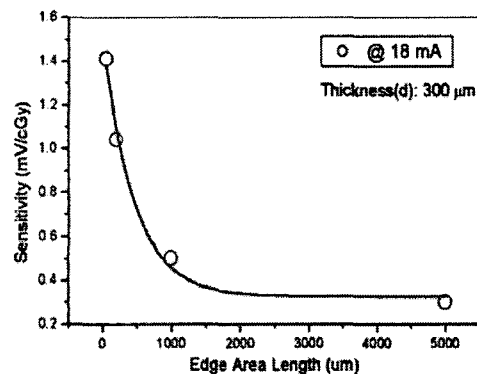


그림 6 단면적별 중성자 감도 변화
 Fig. 6 Changed in neutron sensitivity to the cross section

2.2 시뮬레이션을 통한 구조별 중성자 감도

Swartz 등[5]은 PIN 다이오드가 고속 중성자에 피폭될 경우 변위손상 현상에 의한 외부 전류-전압의 특성변화를 다음과 같이 기술하고 있다.

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

여기서, V는 다이오드의 바이어스 전압, k는 볼츠만 상수, T는 온도, q는 전자의 전하량, kT/q는 열전압(Thermal voltage), b는 전자 전공의 이동도 비(=μn/μp), d/L는 확산 길이(L)에 대한 다이오드의 두께(d) 비, R은 베이스 영역 양쪽 경계에서의 정공 농도비(=p(d)/p(0) = (n+c/p+a)1/2), β는 열전압의 역수(=q/kT), J는 전류밀도, 그리고 Dn은 전자의 확산계수를 나타낸다.

이 수식에서는 중성자 조사선량의 증가에 따른 PIN 다이오드 전압-전류 특성 변화와 소자 내부 함수들의 영향에 대하여만 기술되어 있으므로, 소자의 구조별 중성자 특성을 고찰하기 위해서는 기존 수식에 나타나 있지 않는 PIN 다이오드 구조 변수를 도입하는 치환과정을 거쳐야 한다. 앞 절에서 언급된 직접 중성자 실험과는 달리 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 전류밀도 보다도 전류자체에 영향을 미친다.

표 1 중성자 대한 소자 구조함수의 치환 관계함수
Table 1 Relation function for transposing

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

수식 3으로부터 표 1에 의한 함수 치환으로 새로운 수식을 만들었으며, 이 수식을 일정 중성자 선량에 대하여 d와 A를 가변하면서 감도를 계산하였다. 이들 구조변수와 중성자 감도의 상호관계를 그림 7에 도시하였다.

본 시뮬레이션의 결과는 중성자에 대한 고감도의 PIN 다이오드 소자를 위해서는 두께(d)가 크고 단면적(A)이 작은 구조를 가져야 한다는 것을 나타내고 있다. 이 결과는 다양한 구조의 소자 제작을 통한 중성자 감도평가 시험의 결과와 유사하다. 그러나 PIN 다이오드 두께의 지나친 증가는 불균일한 소자 특성과 구동전압 상승으로 인한 과다 전력소모의 원인이 되고, 소자 단면적이 한계치 이하로 감소할 경우 표면 누설전류의 증가로 이어져 오히려 중성자 감도를 떨어뜨리게 되므로 적정 변수 값을 선택하는 것이 중요하다.

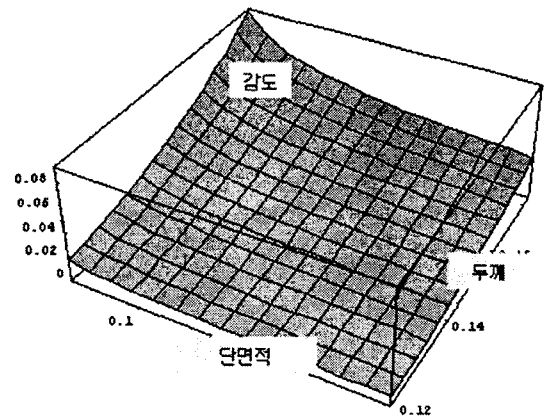


그림 7 두께와 단면적에 대한 중성자 감도변화 특성
Fig. 7 Neutron sensitivity characteristic to the thickness and cross section

2.3 고감도 중성자 탐지소자 제작

300μm 두께의 웨이퍼로부터 다양한 구조로 제작된 PIN 다이오드에 대한 중성자 시험 결과와 소자 구조변수 가변을 통한 중성자 감도 시뮬레이션 결과를 반영하여 진성영역의 두께가 증가된 PIN 다이오드 제작을 위해 현재 구입 및 소자제작이 용이할 것으로 판단되는 최대치인 1.2mm의 웨이퍼로부터 PIN 다이오드를 제작하였다. 소자의 제작 공정은 300μm 웨이퍼의 경우와 동일하였으나 식각공정은 제외하였다. 따라서 제작된 PIN 다이오드는 동일한 두께(1.2mm)에 4 종류(5x5, 1x1, 0.5x0.5, 0.2x0.2mm²)의 면적을 갖게 되며, 외형은 그림 3(a)와 유사하다. 300μm 소자에서와 동일한 조건과 절차로 수행된 중성자 조사시험에서 새롭게 제작된 소자는 중성자에 대한 감도가 향상되었으며 특히, 소자 면적별 중성자 감도 특성에서 그림 8과 같은 특성을 보여주었다. 이 결과는 소자의 면적이 감소할수록 중성자 감도는 증가하지만, 소자의 두께에 비해 단면적이 지나치게 감소하게 되면 표면전류(Edge current)의 증가 등으로 인해 오히려 감도는 떨어지는 경향이 있음을 보여준다.

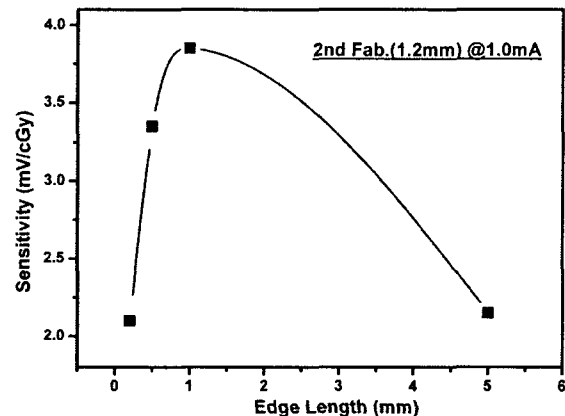


그림 8 1.2mm PIN 다이오드의 면적별 중성자 감도
Fig. 8 Neutron sensitivity to the cross section of 1.2mm PIN diode

이상의 제작 및 중성자 시험결과를 토대로 두께 1.2mm, 저항도 $3.000\Omega \cdot \text{cm}$ 의 고순도 웨이퍼로부터 단면 한번의 길이(1)가 1mm인 PIN 다이오드 개별소자를 그림 9와 같이 제작하였다. 제작된 소자의 내부 구조는 그림 10에 나타나 있고 HP4155B를 사용하여 측정된 출력 전류-전압(I-V) 특성은 그림 11에 도시하였다.

2.4 중성자 조사시험

제작된 개별 PIN 다이오드의 중성자 감도(mV/cGy)와 중성자 입사 방향에 따른 감도 변화(방향 의존성), 그리고 중성자 조사로 인해 변화된 특성의 시간 경과에 따른 열화(Annealing) 현상을 고찰하기 위해 중성자 조사시험을 수행하였다. 중성자 조사 시 발생하는 소자의 특성변화를 실시간 측정하기 위해 온라인 선량계 모듈을 제작하여 이용하였다.

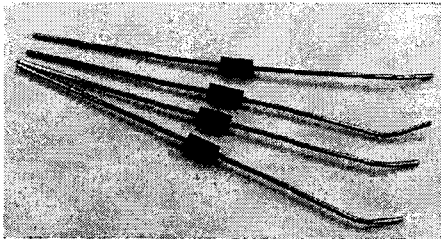


그림 9 제작된 PIN다이오드
Fig. 9 Manufactures PIN diode

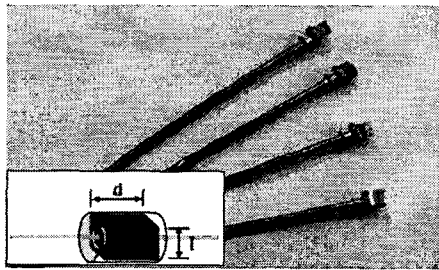


그림 10 제작소자의 내부구조
Fig. 10 Inside of the manufactured PIN diode

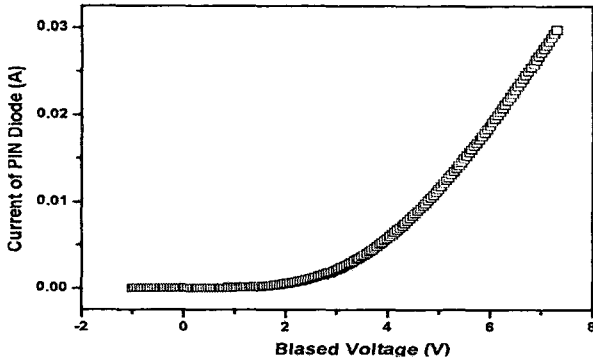


그림 11 제작소자의 I-V 특성
Fig. 11 I-V characteristic of the PIN device

2.4.1 온라인 중성자 선량 측정 모듈 제작

제작된 PIN 다이오드 소자에 대한 보다 신뢰성있는 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 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 12와 같은 형태(전면 덮개 제거)로 제작된 온라인 선량계 모듈은 그림 13과 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 측정된 다음 중성자 피폭선량으로 변환하여 모듈내의 LCD 화면에 표시함과 동시에 직렬 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 정 전류의 크기와 인가 펄스의 지속시간을 조절하여 인가하는 기능과 더불어 측정과정에서 발생하는 소자의 열화현상과 측정오차 등의 부작용 발생을 점검하는 역할도 포함되어 있다.

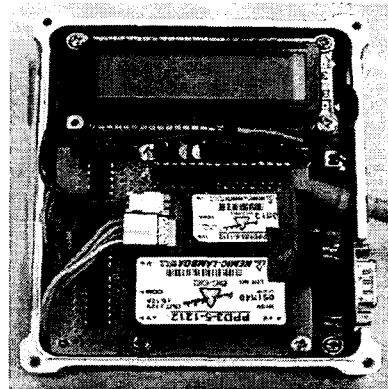


그림 12 온라인 방사선량계모듈
Fig. 12 On line radiation dosimetric module

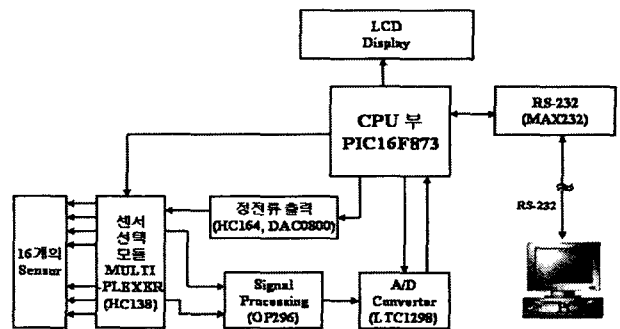


그림 13 온라인 방사선량계모듈의 내부 구성도
Fig. 13 Block diagram of the radiation dosimetric module

2.4.2 실험 방법 및 구성

한국원자력병원의 싸이크로트론(MC-50)에서 35MeV의 가속 양성자가 베릴륨(Be) 표적물과 반응할 때 발생하는 2차 중성자를 PIN 다이오드 샘플에 조사하였다. 이 중성자에너지는 최고 14MeV, 그리고 6.11MeV에서 최대 및 평균 값을 갖는 가우시안 통계분포 형태를 가지고 있다. 제한된 실험시간 내에 선량 목표치인 최대 1,000cGy를 조사시키기 위해 양성자 빔 전류(Ip)를 40 마이크로암페어, 중성자 조사 선량은 분당 6.7cGy로 설정하였고 샘플에 대한 중성자 조사와 동시에 중성자 피폭으로 인한 특성변화를 실시간으로 측정하여 변환된 중성자 선량 값을 컴퓨터에 저장하는 과정으로 실험을 진행하였다.

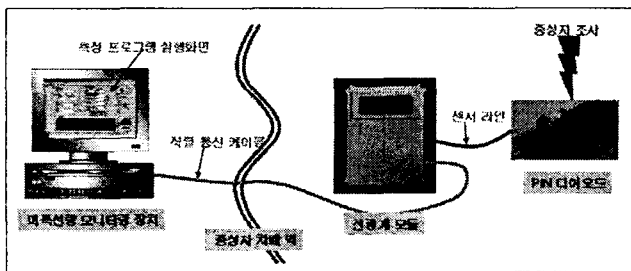


그림 14 온라인 중성자 조사 및 측정장치 구성도
Fig. 14 The configuration of neutron test and measurement

실시간 중성자 선량 측정 장치는 그림 14와 같이 선량계 모듈, 소자 모듈, 선량계-컴퓨터 통신용 케이블(RS-232), 그리고 변수 값의 조절과 측정 및 저장기능이 구현된 PC로 구성되어 있다. 중성자 조사시설 내에 샘플을 고정하고 중성자의 직접적인 영향을 피하기 위해 온라인 선량계 모듈은 중성자 조사장치의 중심에서 벗어난 곳에 설치할 한 다음, 20미터 데이터 통신 케이블을 외부 제어실의 제어 및 측정용 컴퓨터와 연결하였다.

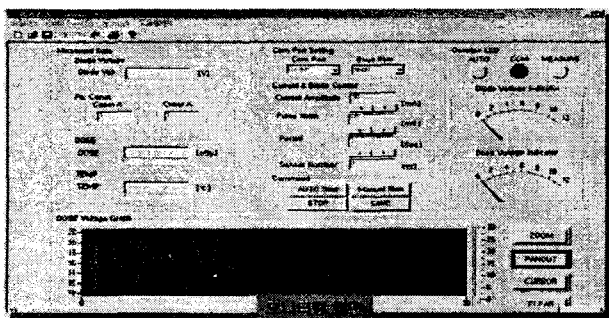


그림 15 신호 제어 및 측정용으로 구성된 컴퓨터 화면
Fig. 15 PC display for signal control and measurement

비주얼 C++로 PC에 구현된 인가 신호제어 및 실시간 측정용 프로그램(그림 15)은 측정하고자 하는 샘플 소자에 정해진 형태의 정전류를 인가하는 동시에, 이에 대응한 출력 특성변화를 원격에서 온라인으로 계측하고 자동으로 저장하며 시간적인 변화를 그래프로 비교할 수 있는 기능을 내재하고 있다.

2.4.3 중성자 조사시험 결과

2.4.3.1 중성자 감도

개발된 여덟 개의 샘플 소자와 두개의 상용 외산 중성자 탐지소자(DN-156, Bicon사)에 대한 중성자 조사와 측정을 병행한 실험에서 5mA, 10msec의 인가 정전류 펄스에 대한 소자 문턱전압의 변화를 피폭 중성자 선량에 대해 온라인 기록한 결과가 그림 16에 나타나 있다. 이 결과는 개발된 소자가 중성자 피폭선량에 대해 모두 선형적 전압 변화특성을 가지고 있고, 단위 중성자 선량(1cGy) 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 연구에서 개발한 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 17)

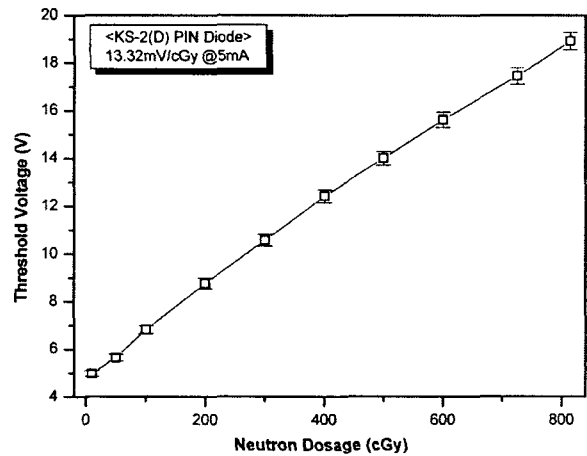


그림 16 중성자 감도 결과
Fig. 16 Neutron sensitivity

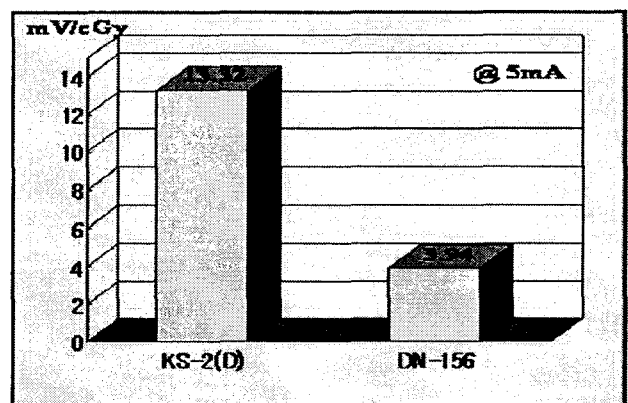


그림 17 중성자 감도 비교
Fig. 17 Comparison of neutron sensitivity

2.4.3.2 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, 30도로 전체 90도 범위 내에서의 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 18이다. 이 실험을 통해 나타난 PIN 다이오드의 전체 방향에 대한 중성자 감도 오차는 3.5% 이하로서, 이 결과는 개발된 PIN 다이오드가 중성자 입사 방향에 관한 의존성이 거의 없다는 사실을 보여준다.

2.4.3.3 열화특성 및 감도비교

중성자 피폭에 의하여 PIN 다이오드 내부에 생성된 변위 손상이 상온에서 시간의 경과에 따라 회복되는 열화 현상 (annealing effect)[6]을 고찰하기 위해 중성자 조사시험 완료 후 시간의 경과에 따른 여덟 개 소자의 문턱전압 변화를 기록한 그림 19의 그래프에서, 총 308시간 동안 열화된 값은 평균 13%로 나타났다. 이 오차는 일반적인 중성자 선량계에

서 허용되는 범위에 포함될 뿐만 아니라 선량계에서의 소프트웨어적인 보상(Off-set)법을 통하여 보정할 수 있으므로 기능상 문제를 일으키지는 않을 것으로 판단된다. 그리고 중성자 피폭 종료 후 약 70시간 전후까지 열화가 급격히 진행되는 반면 그 이후에는 비교적 안정된 상태를 유지하는 경향이 주목된다.

3. 결 론

본 논문에서는 PIN 다이오드 속중성자 탐지용 소자를 반도체 공정을 통하여 개발하고, 제작된 소자의 중성자장 시험에서 중성자 탐지소자로서의 사용 가능성에 대한 특성을 분석하였다. 개발된 소자는 10-1000cGy(Tissue)까지 선량계로써의 탁월한 선형성을 보였으며, 감도는 5mA 정전류에서 약 13mV/cGy로서 현재 상용으로 시판되는 외산에 비해 3 배 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 전자적 선량계로써의 실용성이 우수함을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 국방부 민군겸용기술사업의 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] 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.
- [5] 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
- [6] Andrew Holmes-Siedle, et al, Handbook of Radiation Effects, Oxford University Press, 1993

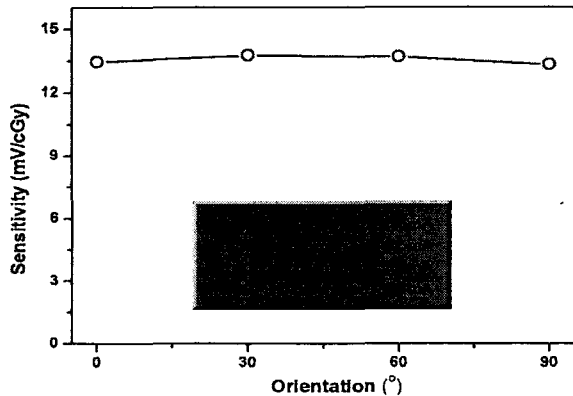


그림 18 방향 의존성
Fig. 18 Angular dependency

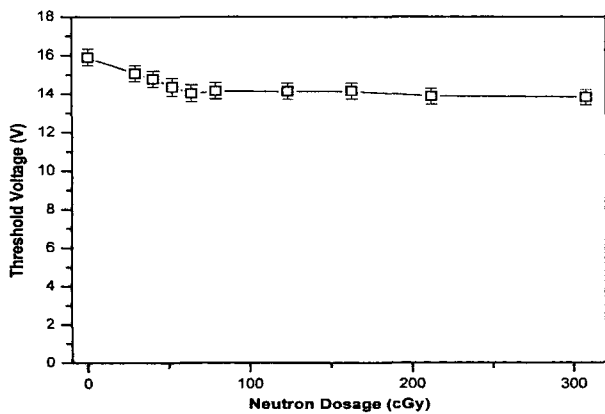


그림 19 어닐링 특성
Fig. 19 Annealing characteristic

저 자 소 개



이 남 호 (李 南 昊)

1963년 4월 28일생. 1993년 경북대학교
전자공학과 대학원 졸업. 1992년~현재
한국원자력 연구소 원자력로봇랩 근무
Tel : 042-868-2931, Fax : 042-868-8833
E-mail : nhlee@kaeri.re.kr



김 승 호 (金 承 鎬)

1953년 6월 15일생. 1975년 연세대학교
기계공학과 졸업. 1988년 동대학원 기
계공학과 졸업(공학). 1980년~현재 한
국원자력연구소 원자력로봇랩 랩장
Tel : 042-868-2928, Fax : 042-868-8833
E-mail : RobotKim@kaeri.re.kr



김 양 모 (金 良 模)

1950년 3월 29일생. 1973년 서울대 전
자공학과 졸업. 1983년 동경대 대학원
전자공학과 졸업(공학). 1979년~현재
충남대 전기공학과 교수
Tel : 042-821-5657, Fax : 042-823-7970
E-mail : ymkim@cnu.ac.kr