

구조별 특성분석을 통한 최적감도의 중성자 측정센서 개발

이남호*, 황영관, 육영호**, 남성만, 이홍규***
 한국원자력연구원*, (주)HKC**, 국방과학연구소***

Development of Neutron Detectors with an Optimal Sensitivity on the Geometric Analysis

Nam-Ho Lee*, Young-Gwan Hwang, Yong-Ho Youk**, Seung-Man Nam, Hong-Kyu Lee***
 KAERI*, HKC Inc.**, ADD***

Abstract - 실리콘형 다이오드가 중성자에 노출되면 소자 내부에서 변위손상 발생으로 인한 저항의 변화현상이 발생하며, 이 변화량은 피폭된 중성자의 선량과 비례관계에 있다. 단위 중성자 피폭량에 대한 소자의 저항성 변화량은 감도로 표현되며 감도의 크기는 측정하려는 용도에 적합하게 조절되어야만 활용도를 높일 수 있다. 본 연구에서는 군용 중성자 탐지소자로 활용할 중성자 탐지소자로서 다양한 구조의 핀 다이오드를 제작하고 구조에 따른 중성자 감도를 분석하여 최적의 감도를 가지는 조건을 설정하고 개별소자 형태의 반도체 소자를 제작하였다. 제작된 소자의 중성자탐지능은 측정범위내에서 우수한 선형성을 보였고 온도에 대한 의존성 시험에서 안정적인 특성을 나타내었다.

1. 서 론

반도체식 방사선 탐지기는 반응시간이 빠르며 내구성이 강하기 때문에 중성자 측정에 유리하다. 이러한 장점으로 인해 최근 선진국에서는 반도체형 전자적 중성자 선량계의 연구개발에 심혈을 기울이고 있다. 그 결과 일본의 알로카사(Aloca Co. Ltd)는 전자적 중성자 선량계 PDM-303을 연구 개발하였고, 후지전기(Fuji Electric Co.)는 NRN이라는 중성자 선량계를 실용화하였다. 또한 미국과 프랑스는 각각 AN/UDR-13과 SOR 1060이라는 군용 개인 휴대용 중성자 및 방사광 선량계를 개발하고 현장 적용연구 중에 있다.[1,2] 그러나 국내에서는 소형의 전자적 중성자 탐지기 개발에 대한 연구가 아직 미흡한 실정이다. 특히 실시간 측정이 가능한 반도체형 중성자 탐지소자의 개발에는 다양한 분야의 기술이 접목되어야 하는 관계로 연구가 시도되기 어려운 실정이었다. 그러나 중성자 탐지기에 관련된 기술 분야는 기술 급수관련 품목으로 분류되어 선진국으로 부터의 핵심기술 도입 및 정보 확보가 용이하지 않아 자체 기술개발을 통하여 고감도의 중성자 탐지기 및 정밀 측정용 선량계를 구현하여야 한다.

본 연구에서는 일정 범위의 중성자를 실시간으로 탐지할 수 있는 반도체 탐지 센서를 개발하기 위해 최적 구조의 PIN 다이오드에 대해 연구하였다. 먼저 중성자에 대한 최적의 고감도를 갖는 PIN 다이오드의 구조 도출을 위해 다양한 구조별 집합체형 PIN 다이오드 소자를 제작하고 중성자 감지능 시험을 수행하였다. 또한 1krad 중성자 선량 측정이 가능하고 선량계의 정전류 구동방식 및 소형 저전력형에 적합한 반도체형 중성자 탐지소자를 개발하고자 시도하였다.

2. 중성자 탐지용 반도체 소자

2.1 중성자 탐지원리

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.[1,2] 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.

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

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 피폭 선량 증가에 따라 PIN 다이오드 내부 저항의 변화는 양단 전압의 증가로 나타나게 되고 소자의 임출력 특성곡선(I-V)에서 곡선을 오른쪽으로 이동시키는 결과를 가져오므로 이러한 소자의 저항변화는 피폭 중성자 선량의 측정변수로 활용이 가능하다.[3,4]

2.2 고감도 중성자 탐지소자 특성분석

PIN 다이오드 제작은 두께 1.0mm, 1.5mm, 2.0mm의 세 가지 웨이퍼로 공정을 진행하였다. 이 웨이퍼는 3,000kΩ/cm 고저항의 4인치 2.0mm 두께 웨이퍼로부터 그라인딩을 통해 분리 제작한 것이다. 시뮬레이션 변수인 두께 및 면적 의존성 시험을 위해 웨이퍼 두께와 면적을 다양하게 구성하여 마스크를 제작하였다.

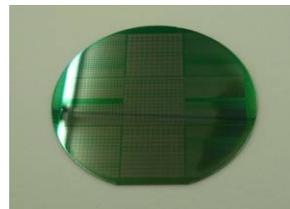
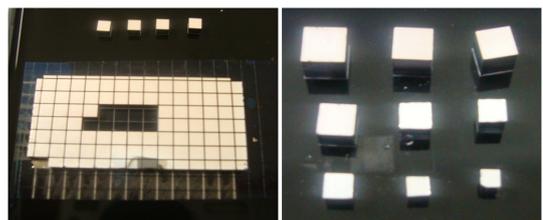


그림 1. Scribe Lane 공정 처리후 웨이퍼



그림 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 10μm 식각하였다.(그림 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 옴믹(Ohmic) 접촉이 형성되도록 열처리한 다음, 절삭하여 세 종류의 웨이퍼를 통해 각기 3가지 종류의 면적을 가지는 9가지 구조의 PIN 다이오드 셀을 그림 3과 같이 제작하였다.



(a) 2.0mm 두께의 2.2mm×2.2mm 소자, (b) 9가지 단위 셀
 그림 3. 제작된 구조별 PIN 다이오드의 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. 그림 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. 그림에서 1.3mm와 1.8mm 단면의 소자가 두께증가에 대해 중성자 감도 특성이 향상됨을 확인할 수 있다. 1.3mm 단면의 경우는 두께 1.0mm보다 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. 그림 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 있다.

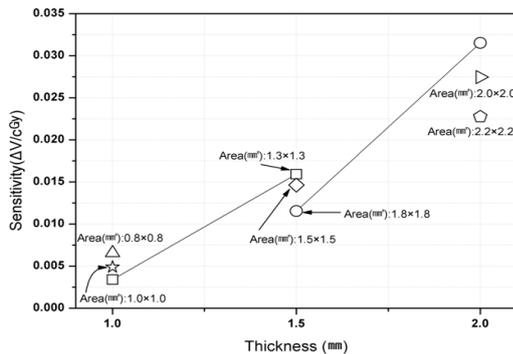


그림 4. 두께변화에 따른 감도 특성

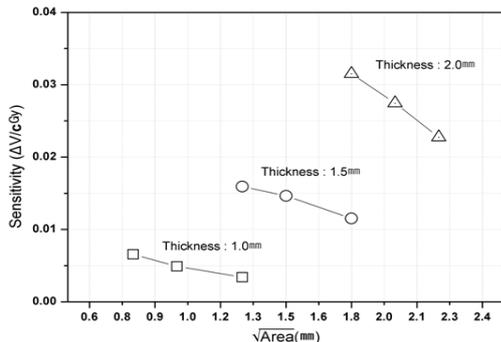


그림 5. 면적변화에 따른 감도 특성

3. 중성자 탐지 최적감도 도출

3.1 안정적 특성의 최적감도 소자

그림 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.

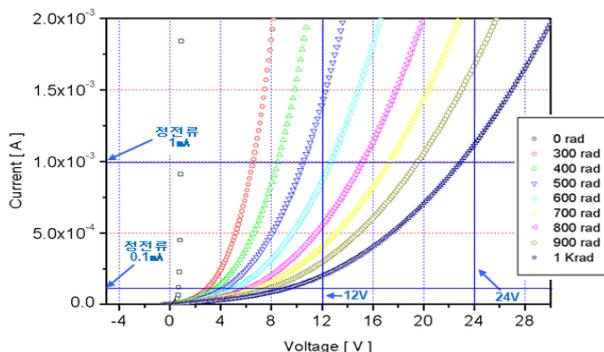


그림 6. 선량측정용 인가 정전류에 대한 중성자 탐지범위

즉, 2.0mm 후막 PIN 다이오드 구조는 1mA 정전류 인가방식의 선량계에 적합하지 않을 뿐 아니라 소형 저전력형 선량계 구현에도 제약조건으로 작용하게 됨을 나타낸다.

3.2 최적 감도의 중성자 탐지소자 구현

선량계 구동전류와 소형화, 그리고 저전력 소모형을 위해 12mm 구조의 PIN 다이오드 중성자 탐지소자를 반도체 공정과정으로 제작하였고, 그 실물을 그림 7에서 20mm 소자와 외형 비교가 가능하도록 배치하였다. N(-) 단자에 흰색 선을 표시하여 다이오드임을 나타내었다.



그림 7. 20mm와 12mm 구조셀의 PIN 다이오드 개별소자

그림 8은 제작된 12mm PIN 다이오드의 중성자 탐지감도 측정결과를 도시한 것이다. 샘플에 대한 중성자 탐지특성을 두 번에 걸쳐 제작된 소자에 대한 한국원자력병원 양성자가속 중성자 조사장치에서의 시험결과로 얻었다. 결과 그래프는 선형적인 반응 특성과 함께 13~15mV/rad의 비교적 높은 탐지 감도를 보여주고 있다. 또한 소자에 대한 온도특성 시험에서는 10mA의 높은 측정 정전류에 대해 -20~50도 온도범위에서 5%이내의 안정된 온도변화특성 결과를 확인할 수 있었다.

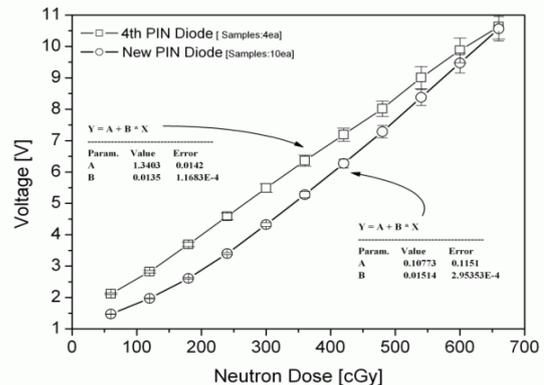


그림 8. 최적 감도로 설계 제작한 PIN 다이오드의 중성자 감도특성

3. 결 론

본 논문에서는 1krad 범위의 중성자 선량을 실시간으로 측정할 수 있는 반도체형 PIN 다이오드 탐지센서를 개발하고자 시도하였다. 이를 위해 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, 개발된 소자에 대한 특성을 분석하였다. 그 결과 개발된 소자가 우수한 중성자 탐지능과 함께 안정적 온도특성을 가진 중성자 탐지센서임을 확인할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] 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
- [2] George C. Messenger et al, The Effect of Radiation on Electronic System, Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1986
- [3] 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
- [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 Circuits, 1959.