

PIN 다이오드를 이용한 중성자 탐지소자 개발 Development of a Neutron Sensor using PIN Diode

이남호 박일진 정현규 김승호 한민구*
Nam Ho Lee, Il Jin Park, Hyun Kyu Jung, Sung Ho Kim, Min Ku Han

한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150번지
*서울대학교
서울 관악구 신림동 산 56-1

요약

실리콘 PIN 다이오드가 속중성자에 노출되면 다이오드의 실리콘 격자구조에 변위 손상을 가져오게 된다. 이 손상은 PIN 다이오드 베이스 영역을 통과하는 전하에 대해 재결합 중심으로 작용하게되어 전하의 수명을 감소시키게되며, 저항의 증가로 인한 순방향 전류의 감소 현상으로 나타난다. 본 논문에서는 이러한 변위 손상을 이용한 중성자 센서의 개발에 관하여 논하였다. 다양한 구조를 가진 PIN 다이오드를 공정과정을 거쳐 제작한 후 다이오드에 대한 중성자 손상효과를 측정하기 위해 중성자 빔에서 조사실험을 수행하였다. 실험을 통하여 일정 전류값에서 중성자 피폭선량이 증가됨에 따라 다이오드 순방향 전압이 증가하는 현상을 고찰하였고 중성자 선량에 대한 다이오드의 선형적인 특성변화 관계를 도출하였다. 또한 중성자에 대한 감도 향상을 위해서는 두꺼운 웨이퍼를 사용한 좁은 단면적의 다이오드 구조가 유리함을 실험적으로 확인하였다.

ABSTRACT

When a Si PIN diode is exposed to fast neutrons, it can produce displacement damage to the Si lattice structure of the diode. The resultant defects become effective recombination centers for carriers which drift through the base region of the PIN diode. When forward voltage is applied, it can cause increase in resistivity of the diode thus decreases in current. This paper presents the development of a neutron sensor based on the displacement damage effect. PIN diodes having various structures were manufactured through micro-fabrication processes. Irradiation tests under a neutron beam were performed to measure neutron damage effect to the diodes. From the tests, it was shown that a forward voltage increase of the diode, at a constant current, maintained a good linearity with neutron dosage. Also it was found that a Si PIN diode having a structure of thick base length and of small cross-section area is desirable for good neutron sensitivity.

1. 서론

중성자 선량계는 중성자 환경 내에서 작업하는 사람들의 중성자 피폭량을 감지하여, 작업의 안전도를 높이기 위한 목적으로 제공된다. 원자력 발전소, 치료 방사선, 비파괴 검사 등 중성자를 취급하는 분야들이 확대되고 있는 추세이고, 특히 군사적 측면에 있어서 중성자탄의 사용 가능성 증대로 인하여 중성자 선량계의 수요가 계속 증가할 전망이다. 이러한 관점에서 볼 때 높은 정확성, 저렴한 가격을 가진 소형의 실시간 개인 중성자 선량계의 자체 개발은 필수 적이라 할 수 있다. 지금까지 주로 누적 방사선 선량계로 사용되어온 것은 필름 बै지 또는 TLD 등이나 이들은 판독을 위한 장치와 인력이 추가로 요구되고 비상시 작업자의 대처능력을 저하시킨다. 따라서 미국 등 선진국에서는 실시간 개인 선량계 수요가 점점 증가하고 있으며, 보다 더 나은 성능을 가진 선량계 개발에 많은 관심을 가지고 있다.

선량계 센서 개발에 있어서 우선적으로 고려되어야 할 점은 사용 목적과 에너지 영역을 결정하는 것이다. 물론 모든 에너지 종류와 크기에 대하여 좋은 감도를 가진 센서를 개발하는 것이 최선책이라 할 수 있겠으나, 에너지 영역 별로 주요 반응 메커니즘이 다르게 나타나기 때문에 한 종류의 선량계로 모든 에너지 영역을 대처하기란 현실적으로 어려운 일이다. 본 연구는 전시에 사용될 군사 작전용 소형 중성자 선량계 개발을 목적으로 수행되었다. 최근 전차 부대에 대한 중성자탄의 전술적 사용 가능성이 증대되면서 전차병 및 후속 보병의 중성자 방호를 위한 중성자 선량계가 필요하게 되었다. 일반적으로 중성자탄에서 방출되는 중성자 에너지는 크게 두 종류로 구별되는데 중성자탄의 뇌관 역할을 하는 핵분열 부분에서 발생하는 평균 0.8MeV의 에너지와 주 폭탄장치 내의 핵융합에 의하여 방출되는 14MeV의 에너지이다^[1]. 이들은 모두 빠른 중성자 에너지 영역이다.

현재 실리콘 PIN 다이오드를 이용하여 휴대용 중성자 선량계를 개발하기 위한 연구가 선진국에서 활발히 진행되고 있다. 이것은 동작 메커니즘에 따라 두 종류의 중성자 선량계로 나뉘어 진다. 그중 하나는 펄스 계수형이고 다른 하나는 선량 누적형이다. 펄스 계수형은 실리콘 PIN 다이오드에 역바이어스를 걸고 중성자와 핵반응을 일으키는 박막을 다이오드 앞에 위치시키는 구조를 가지고 있다. 이때 중성자는 박막내의 핵과 반응하여 이차 입자들을 방출한다. 이렇게 방출되는 이차 입자들은 다이오드의 I층 내로 입사하여 순간 유도 펄스를 출력하는데, 이 펄스들을 계수하여 중성자 선량을 계측한다^[2,3]. 그러나 이들은 주로 느린 중성자용 선량계로 사용되는 방법이며, 빠른 중성자 검출에 적용시키는 경우 핵 반응 단면적이 느린 중성자에 비해 상대적으로 매우 낮은 값을 나타내므로 좋은 감도를 예상할 수 없다. 다른 하나는 중성자에 의한 실리콘 자체의 변위 손상 효과를 이용한 것이다. 실리콘 PIN 다이오드는 빠른 중성자와 실리콘 격자의 충돌에 의해 중성자의 에너지를 타겟 물질에 전이시켜 산란된 되튐핵을 발생시킨다. 운동에너지를 가진 되튐핵은 또 다른 격자 결합군을 유발시켜 결과적으로 PIN 다이오드의 전류-전압(I-V) 특성 곡선을 변화시키는 것으로 알려져 있다^[1].

따라서 본 연구에서는 중성자에 의한 실리콘의 변위 손상효과를 이용하여 빠른 중성자 영역에 민감한 중성자 탐지용 반도체 소자를 개발하였다. 우선 선량계 감도에 영향을 주는 요소들을 파악하기 위하여 PIN 다이오드의 전기적 특성 시뮬레이션을 수행하였으며, 이를 기반으로 하여 실리콘 PIN 다이오드를 제작하였다. 중성자 노출 시 다이오드의 면적과 두께에 따른 중성자 민감도를 분석하기 위하여 $80\mu\text{m} - 300\mu\text{m}$ 의 두께에서 다양한 유효 단면적을 가진 다이오드를 제작하였다. 제작된 다이오드들은 평균 14MeV의 에너지를 방출하는 중성자 빔에 노출시켜 조사시간에 따른 다이오드의 전기적 특성 변화 실험을 수행하였다.

실험 결과, 본 연구에서 제작된 실리콘 PIN 다이오드는 입사 중성자의 조사 선량에 비례하여 안정적인 전압 강하 특성을 나타내었다. 그리고 다이오드의 두께와 단면적이 선량계 감도에 미치는 영향을 분석하여 최적의 센서 구조를 도출하였다. 이 실험 결과들을 토대로 우수한 성능의 실시간 누적 중성자 선량계의 국내 생산 가능성을 확인할 수 있었다.

2. 본론

가. PIN 다이오드를 이용한 중성자 탐지

p^+-p-n^+ 구조의 실리콘 PIN 다이오드 소자가 속중성자에 피폭되면 실리콘의 격자구조에 손상을 일으켜 실리콘 원자를 그 원래 격자 위치로부터 이탈시킨다. 이 과정에서 실리콘 격자 내부에 공간(vacancy)과 간극(interstitial) 등의 작은 결함영역들이 만들어지게 된다.

PIN 다이오드에 순방향 전압을 인가하게 되면 양쪽의 높게 도핑된 영역으로부터 베이스 영역으로 양과 음의 캐리어가 주입되고, 주입된 캐리어가 전기장을 따라 반대쪽으로 이동하게 된다. 이 과정에서 캐리어들은 중성자의 피폭으로 인해 베이스 영역에 형성된 결함영역과 만나 재결합하게 된다. 이러한 베이스 영역에서의 재결합은 결국 베이스를 거쳐 반대 영역으로 확산되어 도달하는 캐리어의 수를 감소시키고 이 영향으로 실리콘 PIN 다이오드 주입 캐리어의 수명 감소가 초래된다.

중성자 조사량의 증가에 따른 캐리어 수명감소 관계식은 다음과 같다.

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

여기서

τ_f 는 중성자 조사 후 수명,

τ_0 는 과잉 캐리어 초기 수명,

K_τ 는 소자의 베이스 영역에서의 효율적인 수명 손상 상수,

그리고 φ 는 누적 속중성자 플럭스이다.

주입 캐리어 농도의 분포는 베이스 폭과 확산길이($L = \sqrt{D\tau}$, D : 캐리어 확산 상수/ τ : 수명)의 함수이며 중성자 피폭은 캐리어 수명과 이에 따른 확산 길이를 감소시키게 된다^[4,5].

결국 중성자 조사로 인한 다이오드의 P, N 극에서 주입된 캐리어의 수명과 이동도의 감소는 순방향 바이어스 상태에서 베이스로 확산된 순방향 전류를 감소시켜 일정 전압하의 베이스 영역에서의 저항의 증가를 가져오게 된다. 이 저항 값의 변화는 PIN 다이오드에서 조사된 누적 중성자 량의 계측 변수로 사용 가능하다.

이와 같은 중성자 탐지용 PIN 다이오드 소자를 개발하기 위하여 다양한 구조와 크기를 가진 PIN 다이오드를 제작하여 전기적 실험과 중성자 선원에서의 반응 실험을 수행하였다. 이 실험 결과를 통하여 중성자 감지용 PIN 다이오드의 최적 구조에 대한 분석을 수행하였다.

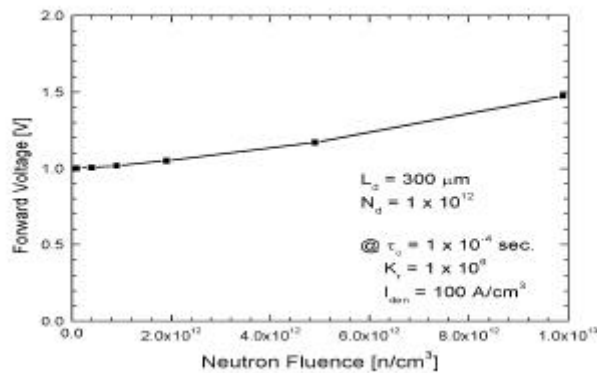


그림 1. 중성자 플루언스에 대한 순방향 전압 강하의 변화

제작에 앞서 시뮬레이션(Medici)을 통하여 중성자 플루언스에 대한 PIN 다이오드 전기적 특성 변화를 살펴 보았다. 중성자 플루언스와 순방향 전압 강하의 관계는 그림 1과 같다

이 시뮬레이션 결과를 통하여 중성자의 조사선량이 증가할수록 PIN 다이오드의 순방향 전압이 증가하게 된다는 결론을 얻을 수 있으며 이는 식 (1)에서 중성자 플루언스는 소자의 캐리어 수명에 반비례하고 다음의 식 (2)에서 I 층에 걸리는 전압 V_I 는 캐리어 수명에 반비례하므로 결과적으로 V_I 는 중성자 플루언스에 비례하게 될 것임을 확인할 수 있다.

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

여기서, W는 I 층의 두께이다.

나. 반도체 탐지 소자의 제작

반도체 탐지 소자 제작을 위한 공정은

- 전체 공정의 균일도를 높이고, Si 습식 식각 시 평평한 식각면을 얻기 위한 웨이퍼 폴리싱 공정
- 실리콘의 습식 식각 시 산화막을 마스크로 쓰기 위해 산화 공정
- 웨이퍼 뒷면의 산화막을 부분적으로 식각해 내어 산화막(SiO₂) 마스크를 만든 후 I 층의 두께를 조절하기 위해 TMAH를 이용한 실리콘 벌크 습식 식각 공정
- 웨이퍼 앞면의 산화막을 부분적으로 식각해 내어 산화막 마스크를 만든 후 PIN 다이오드에서 P 영역을 만들기 위한 전면 불론(B) 이온 주입 공정
- 후면의 산화막 제거 후 N 영역을 만들기 위한 후면 아세나이드(As) 이온 주입 공정
- P 와 N 영역에 전극을 만들기 위해 웨이퍼 앞뒷면에 알루미늄(Al)을 증착하는 공정
- 소자 보호를 위해 산화막을 증착한 후 측정을 위한 영역을 만드는 공정
- 웨이퍼 단위의 소자를 물리, 화학적으로 보호하고, 측정을 쉽게 하기 위해 세라믹이나 PCB를 사용한 패키지 공정

으로 이루어지고 그 가운데 I 층 두께 조절을 위한 실리콘 식각 공정에서는 습식 식각 공정이 사용되었다. 습식 식각의 예천트로는 TMAH 용액이 사용되었으며, 계면 활성제로 pyrazine 이 사용되었고 이소 프로필 알코올(IPA)을 계면활성제를 용해시킬 목적으로 첨가하였다. 이를 위해 특별 제작한 TMAH를 이용한 실리콘 습식 식각 장비는 아래 그림 2와 같이 hot plate 와 테프론 판 등을 이용하여 제작되었다.

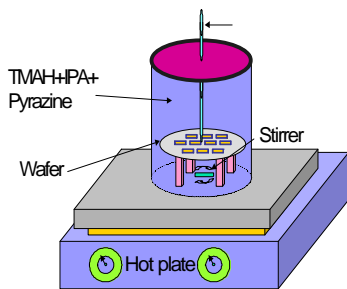


그림 2. 실리콘 습식 식각장비

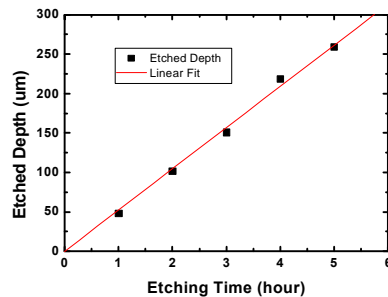


그림 3. 습식 식각시간에 따른 식각깊이의 변화

본 공정에서 사용한 습식 식각 조건은 다음과 같다.

- TMAH(20 wt%)= 1000ml
- IPA= 67ml
- Pyrazine = 6.7g
- 온도: 88~90℃,

그리고 평균 0.87um/min의 식각률(Etch rate)로 그림 3과 같이 시간에 비례하는 특성

에 따라 원하는 I층의 두께를 제작하였다.

그림 4는 위와 같은 제작 공정 과정을 통해 완성된 소자 모습이다. 그림 4(a)는 9개의 다이(Die)를 포함한 한 장의 웨이퍼를, (b)는 그 가운데 하나의 다이를 확대한 것으로 면적이 다른 PIN 다이오드를, 그리고 (c)는 제작된 소자의 실물 사진을 보여주고 있다.

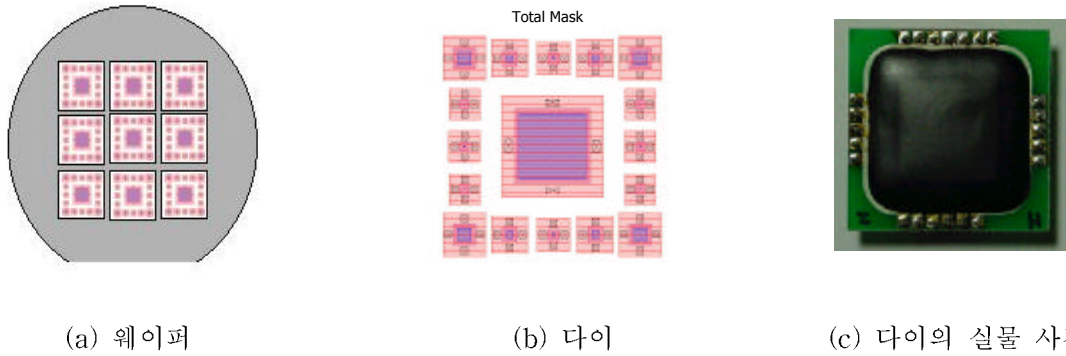


그림 4. 제작된 소자의 형태

다. 중성자 조사시험 및 결과 분석

1) 중성자 조사시험

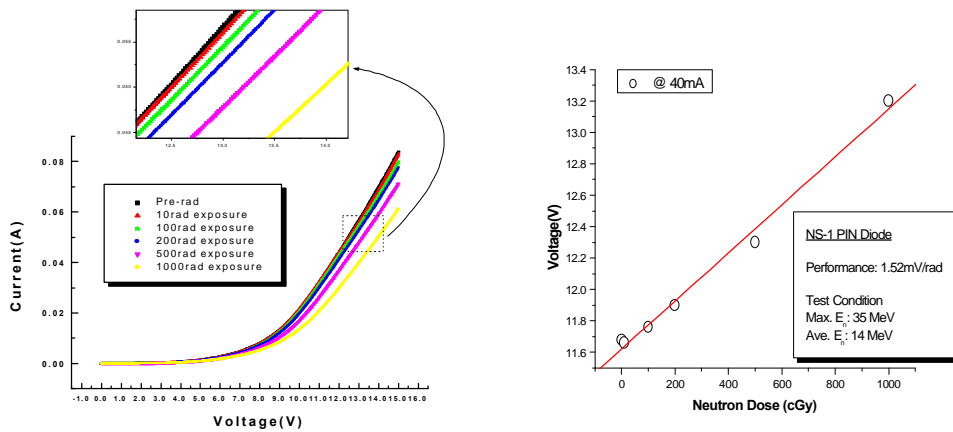
중성자 조사시험은 한국원자력연구소 부설 한국원자력병원의 양성자 가속기 중성자 조사시험 시설에서 수행하였다. 이것은 가속한 양성자를 베릴륨(Be) 표적물을 사용해 중성자로 변환한 후 중성자를 이용하는 시설로서 양성자 단일 에너지는 35MeV이고, 표적물과의 반응에서 나오는 2차 중성자 에너지는 최고 35MeV, 그리고 14MeV 근방에서 최대 및 평균값을 갖는 Gaussian 통계분포 형태를 가지고있다. 제한된 시간에 최대 1000rad를 조사시키기 위해 양성자 빔 전류는 40 μ A로 설정하여 표 1에서 처럼 총 5단계로 나누어서 제작된 PIN 다이오드에 조사시켰다. 최대 피폭 선량치는 1000rad, 최소치는 10rad로 설정하였고 제한된 시간 내에 측정 시간을 고려하여 조사 및 측정 시간은 총 5단계로 결정되었고 총 조사선량은 조사 선량률(6.7rad/Min, @ Ip=40A)을 고정하고 조사 시간만으로 조절토록 하였다.

표 1. 중성자 조사시험 절차

	1	2	3	4	5
	1 30	7 30	15	45	75
	10 rad	100 rad	200 rad	500 rad	1000 rad

제작된 소자 가운데 I층 두께별 3종류(300/ 150/ 80 μm) 선택하였고 각각의 경우에 대하여 유효 단면적이 5x5/ 1x1/ 0.2x0.2/ 0.05x0.05mm² 인 PIN 다이오드를 선택하여 중성자 조사시험에 포함하였다. 이는 중성자가 PIN 다이오드에 조사될 경우 다이오드의 구조에 따라 어떠한 특성을 나타내는지를 파악하기 위한 목적이다. 각 단계별로 정해진 시간을 조사한 뒤 수거하여 HP사의 반도체 변수 측정기(Parameter Analyzer, 4155B)를 이용하여 전류-전압 특성을 측정하는 과정을 반복 시행하였다.

2) 실험 결과 및 분석



(a) 조사 후 I-V 특성곡선 변화

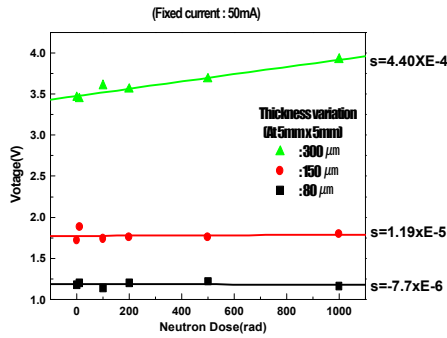
(b) 조사 선량별 감도

그림 5. PIN 다이오드의 중성자 조사결과

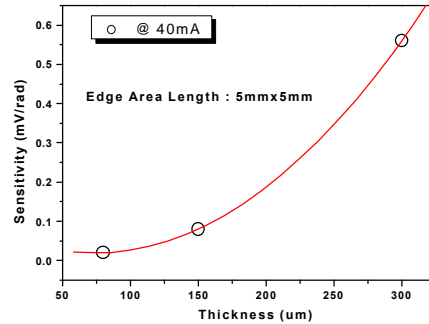
그림 5(a)는 I층 두께가 300 μm , 단면이 0.2x0.2mm²인 PIN 다이오드의 각 단계별 중성자 조사 후 I-V 측정 결과를 도시한 것이다. 중성자 피폭 선량이 증가할수록 PIN 다이오드의 I-V 특성에서 곡선들이 오른쪽으로 이동하는 경향을 보인다. 이는 PIN 다이오드에 대한 중성자의 조사선량이 증가될수록 P, N 양극에서 이동하는 캐리어 수명의 감소에 기인하며, 이러한 특성은 다이오드에 인가된 일정 순방향 전압에 대한 전류 값의 감소, 즉 다이오드에서의 저항 값의 증가로 나타나게 된다. 여기에서 피폭 중성자 선량에 대한 감도는 그림 5(b)에서 처럼 rad당 1.52mV의 선형적인 특성을 가짐을 알 수 있다. 따라서 중성자 조사 시험을 통하여 본 연구에서 제작된 PIN 다이오드는 중성자 탐지용 반도체 소자로서의 사용 가능성을 확인할 수 있다.

중성자 탐지소자를 사용한 중성자 선량 계측시 중성자 단위 선량에 대한 감도가 개선될수록 방사선 계측에서 정확성이 증대된다. 따라서 본 연구에서 시험 제작한 PIN 다이오드에서의 구조별 특성을 분석하여 보다 향상된 감도를 가진 PIN다이오드를 제작하는 자료를 도출하기 위해 다음과 같은 소자의 I층 두께와 단면적에 대한 중성자 영향을 분석해 보았다.

그림 6은 소자의 단면적이 $5 \times 5 \text{mm}^2$ 인 경우 I층 면적이 서로 다른 PIN 다이오드간의 중성자 반응 특성을 비교하여 본 것이다. 그림 6(a)에서 중성자 조사선량별 일정 전류 값에서의 전압 값을 I층 두께 별로 도시하였다. 이 값을 (b)에서 처럼 선량에 대한 측정 전압 값으로 나타낸 결과 I층의 두께가 증가할 수록 중성자에 대한 감도가 향상된다는 것을 알 수 있다.



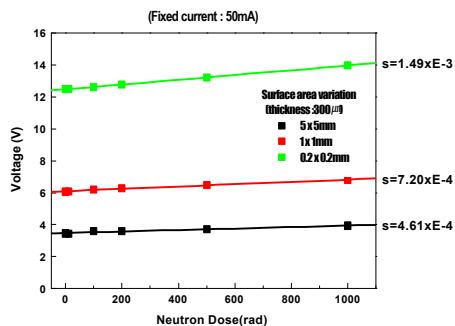
(a) 두께별 전압변화 특성



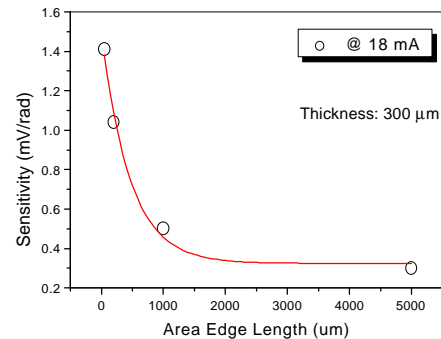
(b) 두께별 중성자 감도 변화

그림 6. PIN 다이오드의 두께별 중성자 반응

다음으로 PIN 다이오드 I층의 두께가 $300 \mu\text{m}$ 인 소자들의 경우 서로 다른 단면적에 대한 중성자 피폭의 영향을 분석해 보았다.



(a) 단면적별 전압변화 특성



(b) 단면적별 중성자 감도 변화

그림 7. PIN 다이오드의 면적별 중성자 반응

그림 7(a)의 그래프를 통하여 동일한 I층 두께를 가진 PIN 다이오드에 중성자를 조사할 경우 단면적이 증가할수록 중성자에 대한 감도가 감소함을 알 수 있다. 이러한 추세는 그림 7(b)의 소자 단면의 길이에 대한 중성자 감도 변화 곡선을 통하여 확인할 수 있다.

이상의 소자 I층 두께와 단면적에 대한 중성자 영향을 분석에서 중성자에 민감한 PIN 다이오드 소자는 보다 두꺼운 I층과 상대적으로 좁은 단면적의 형태를 가져야 한

다는 것을 알 수 있다.

3. 결론 및 향후 계획

본 논문에서는 중성자를 탐지할 수 있는 PIN 다이오드 구조의 반도체 소자를 개발하기 위한 연구로서 실리콘 반도체 다이오드에 대한 중성자 조사시의 영향과 이로 인한 전기적 특성변화를 시뮬레이션을 통하여 고찰하였다. 다음으로 최대 $300\mu\text{m}$ 두께의 고저항 실리콘 웨이퍼를 사용하여 PIN 다이오드를 제작 공정을 수행하여 I층 두께와 단면적을 달리하는 다수의 PIN다이오드를 개발하였다. 그리고 제작된 반도체 소자를 14MeV 의 평균 중성자 에너지를 가지는 양성자 가속기에서 조사시험을 수행한 결과 조사 중성자 선량에 선형적으로 비례하는 특성 변화를 통하여 중성자 탐지용 소자로서 사용 가능성을 확인하였다. 그리고 PIN 다이오드의 구조별 중성자 영향 분석을 통해 중성자에 민감한 PIN 다이오드로는 보다 두꺼운 I층과 상대적으로 좁은 단면적 구조를 가지는 것이 바람직하다는 것을 알 수 있었다.

향후 중성자의 소자 구조별 감도에 대한 심도있는 연구를 통하여 보다 우수한 중성자 감도를 가지는 PIN다이오드를 제작할 예정이며, 현재 제작된 반도체 소자를 사용한 소형 전자적 중성자 선량계의 개발에 대한 연구를 수행하고 있다.

참고문헌

- [1] The effect of radiation on electronic system, George C. Messenger et al.
- [2] A. Ndoye, F.Cosset, B. Barelaud, A. Clerier, J.L. Decossas and J.C. Vareille, Nucl. Inst. and Meth. A 423, 1999, pp. 414-420.
- [3] L.J. Rakovan, T.E. Blue and A.L. Vest, Nucl. Inst. and Meth. A 414, 1998, pp. 357-364.
- [4] 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
- [5] 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
- [6] J. Baliga, Modern Power Devices, 1987