

## 반도체형 실시간 전자적 선량계 개발

이승민<sup>\*</sup>, 이홍호<sup>\*</sup>, 이남호<sup>\*\*</sup>, 김승호<sup>\*\*</sup>, 여진기<sup>\*\*</sup>  
충남대학교 전기공학과<sup>\*</sup>, 한국원자력연구소<sup>\*\*</sup>

### Development of a real time neutron Dosimeter using semiconductor

Lee, Seung-Min<sup>\*</sup> Lee, Heung-Ho<sup>\*</sup> Lee, Nam-Ho<sup>\*\*</sup> Kim, Seungho<sup>\*\*</sup> Yeo, Jin-Gi<sup>\*\*</sup>  
Dept. of Electrical Eng. Chungnam National Univ.<sup>\*</sup> Korea Atomic Energy Research Institute<sup>\*\*</sup>

**Abstract** Si PIN diodes are subject to be damaged from the exposure of fast neutron by displacement of Si lattice structure. The defects are effective recombination centers for carriers which migrate through the base region of the PIN diode when forward voltage is applied. It causes an increase in current and a decrease in resistivity of the diode. This paper presents the development of a neutron sensor based on displacement damage effect. PIN diodes having various structures were made by micro-fabrication process, and neutron beam test was performed to identify neutron damage effect to the diode. From a result of the test, it was shown that the forward voltage drop of the diode, at a constant current, has good linearity for neutron dosage. Also it was found that the newton dosage can be measured by the pin diode neutron dosimeter with constant current power.

#### 1. 서 론

증성자 선량계란 증성자 복복량을 측정하는 장비로 증성자 환경 내에서 작업하는 사람들의 안전도를 높이기 위한 목적으로 제작된다. 원자력 발전소, 치료 방사선, 비파괴 검사 등 증성자를 취급하는 분야들이 확대되고 있는 추세이고, 특히 군사적인 측면에 있어서 증성자 탄의 사용 가능성 증대로 인하여 증성자 선량계의 수요가 증가할 전망이다. 이러한 관점에서 볼 때 높은 정확성, 경제성을 가진 소형의 실시간 개인 휴대용 증성자 선량계의 자체 개발은 필수적이라 할 수 있다. 지금까지 누적 방사선 선량계로 사용되어온 것은 필름 뱃지 또는 TLD 등이나 이들은 판독을 위한 장치와 인력이 추가로 요구되고 비상시 작업자의 대처능력을 저하시킨다. 따라서 미국 등 선진국에서는 실시간 개인 휴대용 증성자 선량계의 수요가 증가하고 있으며, 보다 더 우수한 성능을 가진 선량계에 많은 관심을 가지고 있다.

선량계의 핵심소자인 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 메카니즘이 다르게 나타나기 때문에 한 종류의 선량계로 모든 에너지 영역을 대처하기란 현실적으로 어려운 일이다. 본 연구는 전시에 사용될 군사 작전용 소형 증성자 선량계 개발을 목적으로 수행되었다. 최근 전차 부대에 대한 증성자 탄의 전술적 사용 가능성이 증대되면서 전차병 및 후속 보병의 증성자 방호를 위한 증성자 선량계가 필요하게 되었다. 일반적으로 증성자 탄에서 방출되는 증성자 에너지는 크게 두 종류로 구별되는데 증성자 탄의 뇌관 역할을 하는 핵분열 부분에서 발생되는 평균 0.8MeV의 에너지와 주 폭탄장치 내의 핵융합에 의하여 방출되는 14MeV의 에너지이다<sup>[1]</sup>. 이들은 모두 빠른 증성자 에너지 영역

이다.

현재 실리콘 PIN 다이오드를 이용하여 휴대용 증성자 선량계를 개발하기 위한 연구가 선진국에서 활발히 진행되고 있다. 이것은 동작 메카니즘에 따라 두 종류의 증성자 선량계로 나뉘어 진다. 그중 하나는 펄스 계수형이고 다른 하나는 선량 누적형이다. 펄스 계수형은 실리콘 PIN 다이오드에 역바이어스를 걸고 증성자와 핵반응을 일으키는 박막을 다이오드 위에 위치시키는 구조를 가지고 있다. 이때 증성자는 박막내의 핵과 반응하여 이차 입자들을 방출한다. 이렇게 방출되는 이차 입자들은 다이오드의 I-V 내로 입사하여 순간 유효 펄스를 출력하는데, 이 펄스들을 계수하여 증성자 선량을 계측한다<sup>[2,3]</sup>. 그러나 이들은 주로 느린 증성자에 비해 상대적으로 매우 낮은 값을 나타내므로 좋은 감도를 예상할 수 없다. 다른 하나는 증성자에 의한 실리콘 자체의 변위 손상 효과를 이용한 것이다. 실리콘 PIN 다이오드는 빠른 증성자와 실리콘 격자의 충돌에 의해 증성자의 에너지를 타겟 물질에 전이시켜 산란된 되腥해를 발생시킨다. 운동에너지를 가진 되腥해는 또 다른 격자 결함군을 유발시켜 결과적으로 PIN 다이오드의 전류-전압(I-V) 특성 곡선을 변화시키는 것으로 알려져 있다<sup>[4]</sup>.

따라서 본 연구에서는 증성자에 의한 실리콘의 변위 손상효과를 이용하여 빠른 증성자 영역에 민감한 증성자 탐지용 반도체 소자를 개발하였다. 우선 선량계 감도에 영향을 주는 요소들을 파악하기 위하여 PIN 다이오드의 전기적 특성 시뮬레이션을 수행하였고, 이를 기반으로 하여 실리콘 PIN 다이오드를 제작하였으며, 구현된 프로토타입 선량계가 정확한 측정결과를 나타내는지를 살펴보았다.

실험 결과, 본 연구에서 제작된 실리콘 PIN 다이오드는 입사 증성자의 조사 선량에 비례하여 안정적인 전압 강화 특성을 나타내었다. 그리고 구현된 선량계의 결과값이, 시뮬레이션과 실험을 통하여 예상한 결과와 일치함을 알 수 있었다. 본 연구의 결과들을 토대로 우수한 성능을 가진 패킷형 실시간 누적 증성자 선량계의 국내 생산 가능성을 확인할 수 있을 것이다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 PIN 다이오드를 이용한 증성자 탐지

p<sup>-</sup>-p-n<sup>-</sup> 구조의 실리콘 PIN 다이오드 소자가 속증성자에 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 인가하게되면 양쪽의 높게 도핑된 영역으로부터 베이스 영역으로 양과 음의 캐리어가 주입되고, 주입된 캐리어가 전기장을 따라 반대쪽으로 이동하게 된다. 이 과정에서 캐리어들은 증성자의 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.

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

여기서

$\tau_f$ 는 중성자 조사 후 수명,

$\tau_0$ 는 과잉 캐리어 초기 수명,

$K_r$ 는 소자의 베이스 영역에서의 효율적인 수명 손상 상수

$\varphi$ 는 누적 속중성자 플럭스이다.

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

결국 중성자 조사로 인한 다이오드의 P, N극에서 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.

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

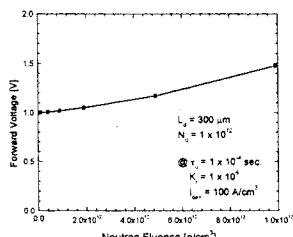


그림 1. 중성자 플루언스에 대한 순방향 전압 강화의 변화

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,  $W$ 는 I 층의 두께이다.

## 2.2 반도체 탐지 소자의 제작

반도체 탐지 소자 제작을 위한 공정에서 가운데 I 층 두께 조절을 위한 실리콘 식각 공정에는 습식 식각 공정이 사용되었다. 습식 식각의 애초로는 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 텐트론 판 등을 이용하여 제작되었다.

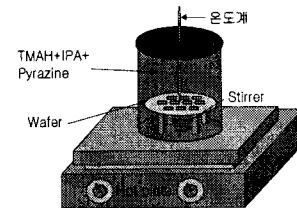


그림 2. 실리콘 습식 식각장비

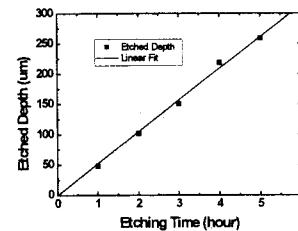


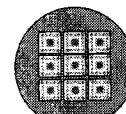
그림 3. 습식 식각 시간에 따른 식각 깊이의 변화

본 공정에서 사용한 습식 식각 조건은 다음과 같다.

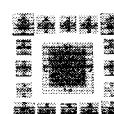
- TMAH(20 wt%)= 1000ml
- IPA= 67ml
- Pyrazine = 6.7g
- 온도: 88 ~ 90°C,

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



(a) 웨이퍼



(b) 다이



(c) 다이의 실물 사진

그림 4. 제작된 소자의 형태

## 2.3 중성자 조사시험 및 결과 분석

### 2.3.1 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 통계 분포 형태를 가지고 있다. 제한된 시간에 최대 1000rad를 조사시키기 위해 양성자 빔 전류는  $40\mu A$ 로 설정하여 표 1에서처럼 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, @  $I_p=40A$ )을 고정하고 조사 시간만으로 조절도록 하였다.

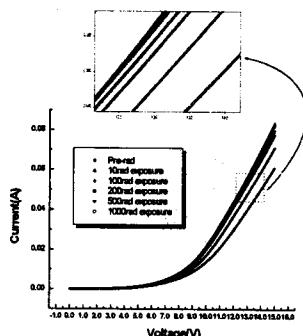
표 1. 중성자 조사시험 절차

조사시간	1분 30초	7분 30초	15분	45분	75분
누적 조사 선량	10 rad	100 rad	200 rad	500 rad	1000 rad

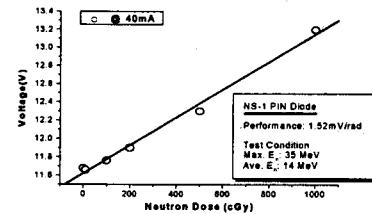
제작된 소자 가운데 I층 두께별 3종류( $300/\ 150/\ 80\mu m$ ) 선택하였고 각각의 경우에 대하여 유효 단면적이  $5\times 5/\ 1\times 1/\ 0.2\times 0.2/\ 0.05\times 0.05\text{mm}^2$ 인 PIN 다이오드를 선택하여 중성자 조사시험에 포함하였다. 이는 중성자가 PIN 다이오드에 조사될 경우 다이오드의 구조에 따라 어떠한 특성을 나타내는지를 파악하기 위한 목적이다. 각 단계별로 정해진 시간을 조사한 뒤 수거하여 HP사의 반도체 변수 측정기(Parameter Analyzer,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

### 2.3.1 실험 결과 및 분석

그림 5(a)는 I층 두께가  $300\mu m$ , 단면이  $0.2\times 0.2\text{mm}^2$ 인 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)에서처럼 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.



(a) 조사 후 I-V 특성곡선 변화



(b) 조사 선량별 감도

그림 5. PIN 다이오드의 중성자 조사결과

## 2.4 프로토타입 선량계

### 2.4.1 프로토타입 선량계의 모듈 구현

모듈 구현방법으로는 크게, 소자에 공급전압을 고정시킨 상태에서 전류를 검출하는 것과 일정한 전류를 공급하여 전압을 측정하는 두 가지 방법이 있는데, 우리는 여기서 정-전류(10mA, 1.5ms) 펄스를 공급하는 후자의 약간 변형된 방법을 사용할 것이다. 이유는 다이오드(센서)에 오랜 동안 적당히 큰 전류가 흐르면 열화 할 수 있다는 점을 고려함이다.

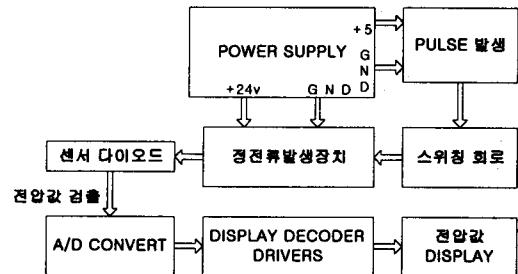


그림 6. 선량계 블럭도

### 2.4.1.1 펄스발생 부분

펄스발생은 컨트롤러의 P1.1번 핀을 프로그램 상에서 ON/OFF 함으로써 얻을 수 있고 이 신호는 스위칭회로에 입력으로 사용된다. 그리고, 펄스의 bandwidth는 소프트웨어적으로 가변 할 수 있다.

### 2.4.1.2 스위칭회로 부분

스위칭소자로는 C1815에 주변 저항을 달아 스위칭 회로를 구성하였고, 펄스신호의 입력을 받아 그 밴드를 유지하면서 스위칭을 하였다. 스위칭회로가 필요한 이유는 컨트롤러 신호는 5V에 국한되는 반면에 정 전류 펄스가 인가되는 부분엔 24V까지의 전원이 인가되기 때문에 그 두 회로간의 매개체로 필요 한 것이다.

### 2.4.1.3 정 전류 부분

부하의 변동에 적용하여 정 전류를 만들어 내기 위해 필요한 회로 부분으로 정 전류 소자로는 LM334를 사용하였다. 이 정 전류회로는 저항용량 1K  $\Omega$ 이하에서 정상 동작을 보장할 수 있다.

### 2.4.1.4 컨버터 부분

정 전류가 센서에 공급되어 발생하는 전압을 검출하기 위한 부분으로써 10bit A/D 컨버터를 이용하여 5V를 1024 단계로 나타낼 수 있으며, 십진수로 소수점 2째 자리까지 표현하였다. 그리고 1.5ms 동안 10번 A/D 컨버팅하였고 그 평균값을 취하는 방법을 소프트웨어 적으로 구현하였다.

### 2.4.1.5 디스플레이 부분

A/D 컨버팅 된 값을 LCD에 소수점 두자리의 십진수로 표현하였다. A/D 컨버팅 된 10bit 결과 값을 부동소수점 연산하여 나타내는 방법을 이용한다.

#### 2.4.1.6 구현된 선량계의 소프트웨어적 흐름

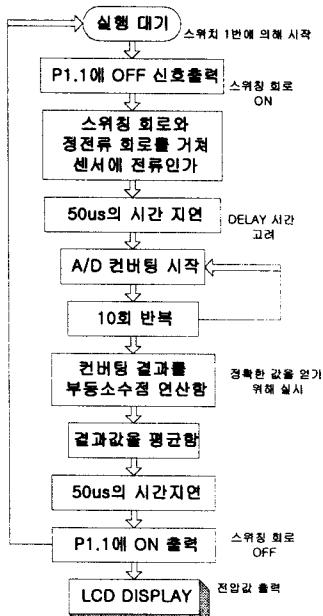


그림 7. 선량계 흐름도

#### 2.4.2 실험 및 결과 분석

##### 2.4.2.1 실험 방법

이상에서 구현된 프로토타입 모듈을 가지고 피복량이 서로 다른 반도체 소자에 대해 각각의 정 전류 펄스가 인가되었을 때 나타나는 전압특성을 검토하였다.

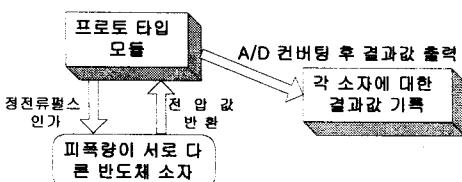


그림 8. 프로토타입 선량계를 이용한 실험방법  
프로토타입 선량계를 이용하여 각기 피복량이 다른 반도체 소자에 대한 각각의 측정전압을 비교하여야 하나 처음에 실시한 누적 실험을 한 관계로 피복되지 않은 것과 누적된 반도체 소자에 대해 이 선량계를 이용하여 실험을 실시하였다.

##### 2.4.2.2 실험 결과 분석

아래의 그래프는 전압, 선량계에 의해 소자에 공급되는 전류간의 관계를 나타낸 결과이다.

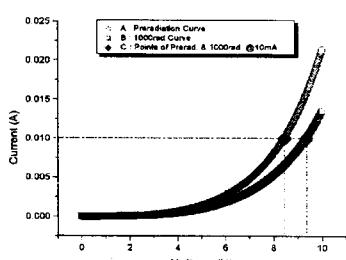


그림 9. 선량계를 이용한 전압측정

그림 9는 피복되지 않은 샘플과 1000rad 누적된 두 가지 샘플을 놓고 측정한 것이다. 선량계에 의해 측정된 결과는 10mA의 정 전류 펄스가 인가되었을 때 피복되지 않은 샘플은 측정된 전압값이 8.42V로 고유저항값이 842Ω이며, 1000rad 누적된 샘플은 9.36V로 피복된 후 증가된 고유저항값이 936Ω임을 알 수 있었다.

이 결과는 앞서 시험한 시뮬레이션과 실험의 결과와 1% 미만의 오차만을 보이고 있으며, 상당히 일치하는 것을 알 수 있었다. 이것은 구현된 정 전류 펄스 공급형 선량계가 실시간 중성자 탐지에 이용될 수 있음을 입증시켜 주었다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 중성자를 탐지할 수 있는 PIN 다이오드 구조의 반도체 소자를 이용하여 구현한 정 전류 펄스 탐지 반도체형 실시간 선량계가 중성자 탐지에 사용될 수 있음을 입증한 연구로서 실리콘 반도체 다이오드에 대한 중성자 조사시의 영향과 이로 인한 전기적 특성 변화를 시뮬레이션을 통하여 고찰하였다. 다음으로 최대 300μm 두께의 고저항 실리콘 웨이퍼를 사용하여 PIN 다이오드를 제작 공정을 수행하여 I-V 두께와 단면적을 달리 하는 다수의 PIN다이오드를 개발하였다. 그리고 제작된 반도체 소자를 14MeV의 평균 중성자 에너지를 가지는 양성자 가속기에서 조사시험을 수행한 결과 조사 중성자 선량에 선형적으로 비례하는 특성 변화를 통하여 중성자 탐지용 소자로서 사용 가능성을 확인하였다. 그리고 구현한 정 전류형 선량계가 중성자 탐지용 소자의 변화된 특성을 잘 나타낼 수 있다는 것 이였다. 향후 중성자의 소자 구조별 감도에 대한 심도있는 연구를 통하여 보다 우수한 중성자 감도를 가지는 PIN다이오드를 제작할 예정이며, 아울러 선량계의 신뢰성과 내구성을 높이고, 패킷화하여 개인 휴대형 전자적 중성자 선량계의 개발에 대한 연구를 수행하고 있다.

### 후기

본 연구는 국방부 민군겸용기술사업의 일환으로 수행되었습니다.

### (참 고 문 헌)

- [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. Varella, 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