

SiC 다이오드를 이용한 원자로내 고준위 방사선 측정에 관한 연구

이 승 민 이 흥 호  
충남대학교

A study on a high level radiation dosimetry for reactor

Lee, Seung-Min Lee, Heung-HoLee  
Dept. of Electrical Eng. Chungnam National Univ.

**Abstract** - 본 논문은 원자력 발전소의 원자로 내 고준위 방사선 환경에서의 방사선량 측정에 SiC 다이오드를 이용하여 발생하는 펄스를 관측, 방사선량을 측정하는 기술에 대한 연구이다. 일반적으로 고준위 방사선 환경에서는 방사선측정 센서가 높은 방사선 에너지로 인해 손상되기 쉽다. 이러한 이유로 고준위 방사선 환경에서 내성이 강한 SiC 다이오드를 사용하였다. 방사선 입자를 하나의 에너지로 취급하면 방사선 입자가 센서로 입사하는 경우, 센서에는 방사선 에너지에 따라 약한 에너지가 유기된다. 유기된 에너지는 센서에서 전류의 형태로 출력되면, 이 전류를 신호처리하면 펄스의 형태로 성형이 가능하다. 시간당 성형된 펄스 수는 센서가 받은 방사선량에 비례하며 방사선이 많은 곳에서는 직류의 형태가 된다. 본 논문에서는 약한 전류형태로 출력되는 신호를 성형하여 디지털 신호처리를 하기위한 펄스 형태로 성형하는데, 필요한 일련의 기술적인 사항에 관하여 연구하였다.

1. 서 론

원자력활용기술의 발전으로 우리나라의 원자력 및 관련 산업은 비약적인 성장을 이루고 있다. 이로 인하여 원자력 산업에 종사하는 사람 및 시설에 대한 방사성물질 및 방사선 노출되는 확률도 증대되어 방사선 안전성 확보가 시급한 문제로 대두되었으며, 이러한 방사선안전성을 확보하기 위하여 종사자 및 시설에 대한 방사선 방호가 중요시되고 있다. 방사선방호의 궁극적인 목표는 방사선 피폭을 합리적으로 달성 가능한 범위에서 최소화하는 것이므로 방사선량을 측정 평가하는 것이 방사선방호의 기초 기술임과 동시에 매우 중요한 분야이다. 따라서 방사선을 측정 감시하는 계측기의 연구 개발은 무엇보다 중요하다.

국내의 원자력 발전소, 병원, 산업체 및 연구기관 등에서 사용하는 각종 방사선계측장비는 방사선장의 특성에 따라 계측기의 사양이 다양하고 그 수요가 한정되어 있기 때문에 고가임에도 불구하고 전량 외국에서 수입을 하고 있는 실정이다. 특히, 원자력발전소의 원자로에서 나오는 방사선은 고준위 방사선으로 일반적인 방사선센서들이 이러한 고준위 방사선환경에 장시간 노출되면 센서자체물성의 변화로 센서로서의 역할을 상실하는 상황에 이르게 된다. 그러나 SiC를 이용한 방사선 센서 다른 센서들에 비하여 방사선 내성이 강한 특징이 있다고 알려져 있어 이를 응용한 방사선 측정기의 개발은 고준위 방사선 측정에 있어 필수적인 기술이라고 하겠다.

2. 본 론

2.1 방사선센서의 이론적 고찰

2.1.1 반도체센서의 원리

물질 구성의 최소단위인 원자는 분자를 형성하기 위해 원자의 결합 상태를 유지하고 있다. 이러한 원자에 전자

를 인가하거나, 전자를 분리해내면, 인가되거나 제거된 수만큼의 양전기 또는 음전기를 띠게 된다. 이와 같이 전기를 띠는 원자를 이온이라 하며, 이렇게 이온화 시키는 과정을 이온화(ionization)이라 한다. 방사선이 어떤 물질을 통과하는 동안 상호작용으로 이온을 만들 수 있는 것은 전리방사선(ionizing radiation)이라 한다. 전리방사선의 종류는 X-선,  $\gamma$ -선과 같은 전리파 방사선,  $\alpha$ ,  $\beta$  n관 같은 입자방사선이 있다. X-선과  $\gamma$ -선은 정지질량이 없으며, 광자로 구속되어 빛의 속도로 전파되는 가시광성보다 짧은 파장을 갖는 전자파 방사선이다.

전리방사선은 충돌에너지를 전달하는 직접전리 방사선과 상호작용에 의한 간접전리 방사선, 광자로 나눌 수 있다. 방사선과 물질의 상호작용은 물질의 밀도와 원자수에 의존하며, 방사선이 물질을 통과하면 통과되는 물질에 에너지를 전달하는 과정이다. 에너지 전달의 양은 생성되는 이온쌍은 수로 정의되며 이는 전리 방사선의 에너지  $E_r$ [keV]에 비례하고, 이온쌍을 형성하는 평균에너지  $W_m$ [eV]와 전리 방사선의 물질내 이동거리  $L_r$ 의 차( $W_m \cdot L_r$ )에 반비례한다. 전리방사선이 반도체를 통과하면 불순물(도너 또는 액셉터)에 의해 과잉전자와 정공은 가전도대에서 전도대로 이동하게 된다. 실리콘반도체의 경우 외부 광자의 에너지가 3.76eV당 1개의 전자-정공 쌍을 생성한다. 따라서 수심에서 수천[keV]의 에너지를 갖는 방사선을 반도체는 측정이 가능하게 된다.

2.1.2 P-N 접합의 형태

P형 반도체와 n형 반도체를 접합하면 p형의 정공이 n형으로 확산하고 n형의 전자가 p형으로 확산해 들어간다. 확산에 의한 전자와 정공은 접합 부근에서 만나 결합해서 소멸하고 접합부근의 p형에는 음(-)전하를 띤 액셉터 이온이 n형에는 양(+)전하를 띤 도너이온이 남게 된다. 접합부에는 이 전하로 인해 전계가 존재하게 되고 이 전계의 영향으로 더 이상의 확산은 일어나지 않는다. 이와 같이 전자와 정공은 존재하지 않고 고정전하만 존재하는 p-n 접합부근의 영역을 공핍영역(depletion region) 또는 전이영역(transition region)이라 한다.

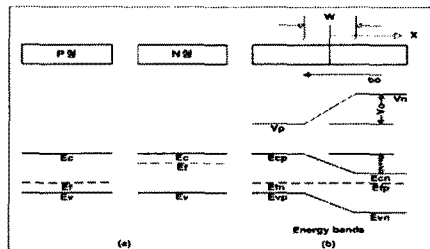


그림 1 p형, n형, p-n 접합의 에너지 밴드

빛이 조사되면 빛 에너지를 받아 전자-정공쌍이 발생한다. 공핍영역 (B)와 (C)에서 발생된 전자-정공쌍은 전계의 영향으로 전자는 n형 중성영역으로 정공은 p형 중

성영역으로 쏠려간다. 이 결과로 p형 쪽에는 정공이, n형 쪽에는 전자가 축적되어 접합부분에서 기전력이 발생하고 이 기전력이 외부 회로에 전류를 흘릴 수 있게 된다. 이러한 빛의 조사에 의한 기전력의 발생을 광 기전력 효과(photovoltaic effect)라 한다.

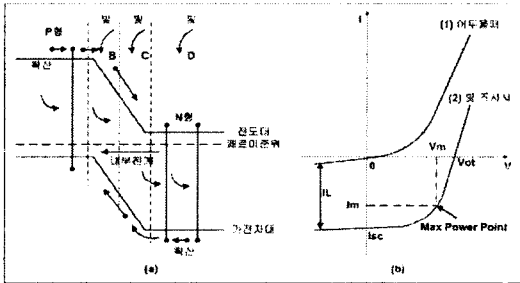


그림 2 (a)빛이 조사될 때 에너지 밴드 (b)어두울 때와 빛 조사 시 I-V 특성곡선

p-n 접합에 빛을 조사하지 않을 때와 조사할 때의 전압-전류 특성을 그림 2의 (b)에 나타내었다. p-n 접합을 이용하여 광을 측정하는 방법에는 그림 2의 (b)에서 제 4상한의 특성을 이용하여 Isc를 측정하는 방식과, 외부에서 역바이어스를 걸어 제3상한의 특성에 따라 역방향전류를 측정하는 방법이 있다. 본 연구에서는 역바이어스 전압을 걸고 이때 흐르는 전류를 측정하는 방식으로 실험하였다.

### 2.1.3 PIN형 포토다이오드

진성반도체(intrinsic semiconductor)에 가까운 고저항 기판을 사용한 것을 pin 포토다이오드라 하고, 그 구조는 그림 3의 n형 기판 대신에 불순물 농도가 낮은 고저항의 n-기판을 사용한 것과 같다. pin 포토다이오드는 역방향 바이어스를 인가하면 그 전압이 대부분 n-층에 걸리게 되며 n-층 전체가 광검출역역을 하게 되어 입사되는 광의 대부분은 여기에서 흡수된다. 그래서 일반적으로 역바이어스를 인가한 상태로 사용하게 된다. 또한 pin 다이오드는 광도전효과를 이용한 소자라 할 수 있다.

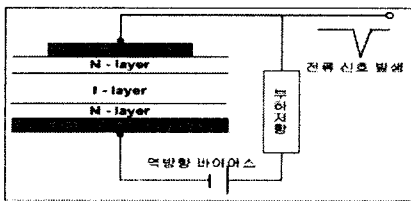


그림 3 PIN 포토다이오드의 Layer

### 2.1.4 SiC(Silicon Carbide) 다이오드

SiC 다이오드의 기본적인 두 가지형태는 그림 4와 같으며, 광 또는 방사선에 대한 반응은 pin 포토다이오드와 유사한 특성을 보인다. 그러나, pin 포토다이오드와 다른 특징은 Carbide를 사용하였기 때문에 센서자체의 방사선 내성이 강하다는 점이다. 이는 SiC 다이오드를 고준위 방사선에 오랜 시간 노출되어도 센서의 특성을 유지할 수 있기 때문에 높은 에너지를 갖는 방사선 환경에 오랜 시간 노출되어 그 선량을 측정할 때 이용될 수가 있다. 하지만, pin 포토다이오드에 비해 전자-정공쌍을 만들기 위한 에너지량이 크기 때문에 감도가 떨어진다는 단점이 있다.

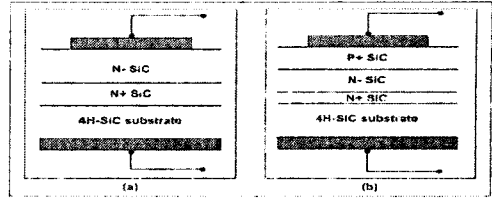


그림 4 Schematic diagram of (a) Schottky diodes (b) P-n junction diodes

## 2.2 신호처리기 설계

방사선용 반도체센서의 출력은 전자-정공쌍의 생성에 비례하는 전류를 출력하게 된다. 이 출력은 일반적으로 수 pA( $10^{-12}[A]$ )에서 수십 pA의 낮은 전류값을 나타내므로 이를 직접 측정하는 것은 불가능하다. 최근 개발된 electro meter를 이용하면 연속적인 저 전류의 측정이 가능하나, 반도체의 이온화는 연속적으로 발생되는 것이 아니고 입사입자가 이온화 시킬 때만 발생하므로 맥동전류가 되어 측정이 불가능하게 된다. 그러므로 이를 측정하기 위한 회로를 그림 5과 같이 구성하였으며, 부하저항 RL에 여기되는 전압을 증폭하는 것이 방사선용 반도체센서의 초단증폭기가 된다.

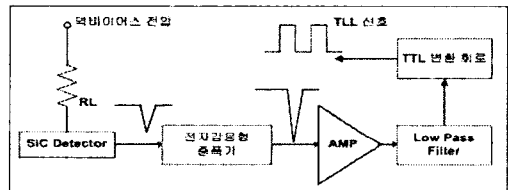


그림 5 방사선측정 반도체센서용 회로구성

본 회로를 구성함에 있어 갖추어야할 기본적인 조건은 기판위의 모든 부품이 차폐가 되어야한다는 점과 인가되는 전원이 스위칭 전원공급기가 아닌 배터리나 선형 전원공급기를 사용해야 한다는 점이다.

### 2.2.1 전하감응형 증폭기

전하감응형 증폭기의 구성은 아래 그림 6과 같이 구성하였다. 그림의 구성은 연산증폭기(OP-AMP)를 이용한 직류 결합 방식으로써 제한으로 C1이 걸려 있어 적분회로를 구성한다. 적분회로의 동작 특성상 전하에 의한 축적의 기능을 수행하며 시간이 지남에 따라 포화되는 특성을 나타내므로 포화를 방지하기 위하여 저항 R1을 걸어 결정되는 시정수  $(C1 \cdot R1)$ 가 측정하고자 하는 펄스의 최소폭 보다 적게 설정 하여야 신호의 관측이 가능하다. 또한 신호의 증폭을 방지하기 위해 시정수를 과도하게 크게 설정하지 말아야 한다. 초단증폭기로 사용될 OP-AMP가 갖추어야할 특성으로는 잡음이 적고, 입력 임피던스가 크며, 넓은 주파수 대역을 가짐과 동시에 Input Bias Current가 적어야 한다. 본 연구에서 사용된 연산증폭기는 이러한 요건들을 갖춘 Burr-Brown사의 OP404KP로 입력 임피던스  $10^{14} \Omega$  대역폭 6.4Mhz, Input Bias Current 4pA의 성능을 가지고 있다.

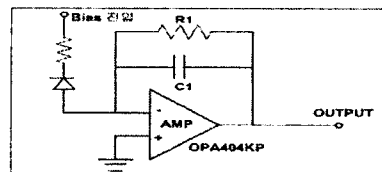


그림 6 전하감응형 증폭기의 구성

초단증폭기의 입력부분에는 노이즈 차폐를 위하여 부분 쉴딩을 하였으며, 이는 전원 노이즈를 제외한 초기 노이즈의 저감에 큰 영향을 주는 요소라고 할 수 있다. 그림 7에서 보드 중간의 호일 부분이 증폭기 입력단의 차폐를 실현한 상태이다.

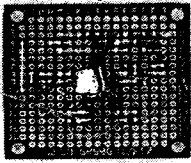


그림 7 입력부 차폐

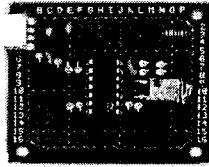


그림 8 증폭기의 전면

### 2.2.2 증폭단 설계

초단증폭기에서 출력되는 신호는 미소전압신호이므로 이를 직접 측정하거나, 오실로스코프 등으로 관측하기는 어렵다. 그래서 아래 그림 7과 같이 다단의 증폭회로를 구성하였다.

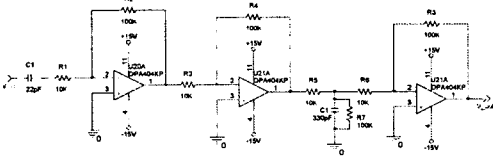


그림 9 다단 증폭기의 구성

다단증폭기를 구성함에 있어 주요한 사항은 증폭의 기능을 수행하고 동시에 필터의 기능도 함께 수행할 수 있도록 설계해야 한다는 점과 효율적인 증폭기의 동작을 보장하기 위하여 적절한 증폭이득의 결정이다.

## 3.1 방사선 조사실험

### 3.1.1 방사선 조사 실험 환경

초기 방사선 조사 실험은 방사선원(Cs-137)을 사용하여 실험 하였으며, 실험에 사용한 센서들은 그림 10과 같이 센서들을 사용하였다.

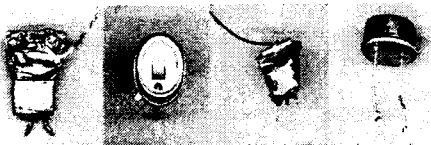


그림 10 방사선 조사 실험에 사용된 센서

그림 10의 (a)는 일반적인 트랜지스터인 2SC5021 (NPN) 트랜지스터이고, (b)는 창의 크기가 큰 SiC 다이오드이며, (c)는 작은 창의 SiC 다이오드를 차폐시킨 모습인데, 차폐 후 차폐 접지선은 전원의 접지에 접속해야 한다. (d)는 큰 창의 SiC 다이오드의 옆면이다. 또한 최종실험 직전에는 구성된 회로를 전체적으로 차폐하는 작업이 필요하며, 그림 11과 같다.



그림 14 구성된 회로의 전체적인 차폐

### 3.1.2 방사선 조사 실험 결과

실제 방사선 조사 실험은 한국원자력연구소내의 저준위 조사시설을 이용했으며, 그림 11의 (a)는 50rad에서 발생하는 파형이며, (b)는 500rad의 모습을 보여 주고 있다. 본 실험에는 10-10Krad 대역을 실험해 보았으면 펄스 카운터를 이용한 방사선량의 선형성을 추측해 볼 수 있었다. (c)는 5Krad 때의 검출 파형이고 이때의 특징은 파형이 중첩이 확인되는 시점으로 보인다. 이는 사용한 넓은 창의 SiC 다이오드는 5Krad 이하의 방사선량 측정에 사용되어야 할 것으로 인지된다. (d)의 출력 파형은 단일 펄스를 관측한 그림이다. 여기서 출력되는 펄스는 폭이 7 $\mu$ s, 크기가 450mV 정도이며, 이는 충분히 디지털로 처리될 수 있는 출력이었다.

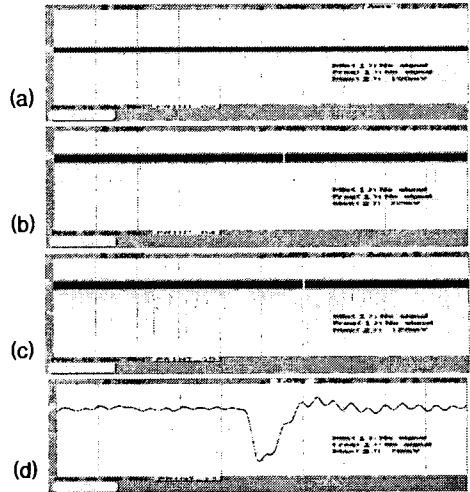


그림 11 방사선 조사 실험 결과 파형

## 3. 결론

본 논문에서는 방사선 내성이 강한 SiC 다이오드를 방사선 측정에 이용하기 위한 회로의 구성 대하여 살펴 보았고, 이를 사용한 실험에서 전자-정공쌍 생성에 의해 발생하는 전류를 신호 처리한 파형을 관측할 수 있었다. 파형의 관측을 통하여 방사선량에 따른 선형성과 창의 넓은 SiC 센서의 측정 한계를 5Krad 이하점을 취해야 하는 것을 알 수 있었다. 또한 디지털신호로 처리하여 보다 정확하고 빠르게 방사선량을 측정 및 표시할 수 있는 계측기 개발을 확신할 수 있다. 하지만 출력 파형의 폭이 7 $\mu$ s로 비교적 길다는 단점이 있었다. 차후 지속적인 연구를 통하여 출력 펄스의 폭을 줄이고, 디지털신호로 처리하여 처리된 펄스를 단위시간당 카운터 하여 실시간 방사선량을 표시할 수 있는 기법에 대한 연구와 아주 넓은 범위의 방사선량을 측정할 수 있도록 작은 창의 SiC 다이오드와 큰 창의 SiC 다이오드를 적절히 조합하여 회로를 구성하는 방법을 모색해야 할 것이다. 또한 출력펄스를 카운팅 할 때 적절한 트리거링 전압 레벨을 결정하는 문제를 해결해야 하겠다.

### [참고 문헌]

- [1] McLaughlin, Boyd Chadwick, McDonald, and Miller, "Dosimetry for Radiation Processing", Taylor & Francis, London 1989.
- [2] G. F. Knoll, "Radiation Detection and Measurement", 2nd ED, John Wiley & Sons, New York, 1989.
- [3] Burr Brown, OPA404KP DataSheet