

**핀(PIN) 다이오드 소자를 이용한 중성자 측정장치 개발**

이승민\*, 이흥호\*, 이남호\*\*, 김승호\*\*, 여진기\*  
 충남대학교 전기공학과\*, 한국원자력연구소\*\*

**Development of a neutron Dosimeter using PIN diode**

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

**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 neutron dosage can be measured by the pin diode neutron dosimeter with constant current power.

**1. 서 론**

오늘날 원자력 에너지는 혁신적인 대체연료의 발견이 없는 상황에서 규정을 지켜 안전하게 사용한다면 단시간에 고 에너지를 얻을 수 있는 가장 깨끗한 에너지로 인식되어 있고, 다양한 부분에서 원자력 에너지를 이용하며 특히, 의료산업 부분에 응용하여 인류의 건강증진에 이바지하는 점은 큰 장점 중에 하나이다. 하지만 장점이 있는 것은 아니며, 안정성을 고려하지 않고 원자력 에너지를 이용한다는 것은 가지고 있는 큰 장점만큼이나 엄청난 재난을 가져다 줄 수 있고, 극단적인 가정으로 무기의 형태로 이용되는 것은 큰 단점이라 하겠다.

원자력 에너지를 이용함에 있어서 불안정한 이용으로 인한 방사능 누출은 충분히 가정해 볼 수 있고, 그 누출은 작업자 혹은 불특정 다수가 방사선에 피폭될 수 있음을 의미한다. 이에 따라 방사선 피폭량을 실시간에 산출할 수 있는 휴대용 계측장비의 개발은 시대적인 요구이며, 이미 미국, 일본을 위시한 선진국에서는 휴대용 선량에 개발이 오래 전부터 연구, 개발, 보급되고 있는 상황이다.

기존에 널리 사용되고 있는 선량계로는 필름벤티지 또는 TLD (thermoluminescent dosimeters) 등이 있으나, 이들은 실시간 방사선 피폭정보를 제공할 수 없어 비상시 작업자의 대처능력을 저하시키는 단점을 가지고 있다. 실시간에 운용가능하며 더 나은 성능을 가진 선량계 및 센서 개발에 많은 관심을 가지고 있다. 선량계 센서를 개발함에 있어서 고려되어야 할 점은 방사선의 종류 및 에너지, 그리고 센서의 민감도, 저 선량 한계치 및 최대 허용 준위 등이 있고, 사용 목적에 잘 부합되고 높은 정확도를 가지면서 경제적 측면에서도 유리한 센서개발이 요구되며, 선량계 부분에서는 측정결과와 정확성,

장비의 내구성, 안정성, 내방사성, 다기능성의 구현이 필요하다.

본 연구에서 개발한 중성자 탐지소자 및 선량계는 전시에 사용될 군사 작전용 소형 중성자 선량계로서 중성자탄 폭발 시 발생되는 중성자의 흡수선량 측정을 목적으로 개발 제작되고 있다. 일반적으로 중성자탄에서 방출되는 중성자 에너지는 크게 두 종류로 구별되는데 중성자탄의 뇌관 역할을 하는 핵분열 부분에서 발생하는 평균 0.8 MeV의 에너지와 주 폭탄 장치 내부에서 핵융합에 의하여 방출되는 14 MeV의 에너지이다. 이들은 모두 빠른 중성자 에너지 영역이다.

최근까지 빠른 에너지 영역의 중성자를 검출하기 위하여 반도체 물질을 이용한 여러 가지 센서개발 방법들이 제시되어 왔고, 그 가운데 특히 최근에 PIN 다이오드를 이용한 센서가 주목받고 있다. PIN 다이오드를 이용한 중성자 검출기는 동작 메카니즘에 따라 크게 두 종류로 구분할 수 있는데 하나는 핵반응막과 결합한 펄스 계수형이며, 다른 하나는 반도체의 변위손상 효과를 이용한 선량 누적형이다. 펄스 계수형의 경우 방사선 신호가 외부의 충격이나 움직임에 대하여 무척 민감하고 선량계 제작시 저 잡음 신호, 증폭회로 및 논리 회로 등을 필요로 한다. 따라서 방사선 센서 외에 선량계 회로에 대한 내 방사선 기술과 주변환경 특성 등이 파악되어야 하며, 이러한 조건들을 만족시킬 수 있는 소자를 사용하기 위하여 생산 단가가 높아 질 수밖에 없다. 이에 비하여 누적 선량계는 실시간 판독 회로의 단순함과 그 상대적 견고성으로 인하여 군사 작전용 소형 중성자 선량계로 사용하기 적합하다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 변위 손상효과를 이용한 빠른 중성자 탐지용 반도체 센서와 이 센서를 사용한 중성자 선량계를 개발하고자 한다.

**2. 본 론**

**2.1 PIN 다이오드를 이용한 중성자 탐지**

실리콘 PIN 다이오드의 중성자 피폭시 원자 변위과정에 의하여 실리콘 내부에 회복 불가능한 결함이 생성되게 된다. 이 결함들로 인하여 소수 캐리어의 수명 감소 및 이동도 감소와 저항도 증가 등의 현상<sup>(1,2)</sup>이 나타나게 된다. 특별한 에너지 분포를 가진 중성자에 실리콘이 노출되었을 때 반도체 변위 손상도는 측정된 중성자 플루언스와 비례한다. 여러 저자들에게 의한 실험과 이론을 통하여 다음과 같은 경험식이 확인되었다.

$$\frac{1}{\tau} - \frac{1}{\tau_0} = \frac{\phi}{K} \quad (2-1)$$

여기서  $\tau_0$  는 중성자 피폭전 캐리어 수명,  $\tau$  는 피폭 후의 수명,  $\phi$  는 중성자 플루언스, 그리고  $K$  는 수명 변위손상 계수를 나타낸다.

방사선 센서 및 선량계 개발이란 궁극적으로 앞에서 기술된 여러 현상들 중 하나를 물리적인 양으로 변화시켜 측정할 수 있도록 검출 시스템을 설계하고 제작하는 것

을 말한다. 중성자의 피폭은 PIN 다이오드 내부 격자에 변위손상을 일으키고 이 손상에 의해 소자의 전기적 특성이 변화된다. PIN 다이오드에 중성자가 입사되면 그림 2-1(a)에서 설명된 바와 같이 소자 내부에서 실리콘 격자와의 충돌로 인해 변위손상 현상이 발생되고, 이로 인해 격자와 그리고 격자 사이에서 공극과 간극이 생성된다. 이 변위손상의 결과들은 외부의 전계에 의해 다이오드의 진성영역을 통과하는 반송자의 재결합 중심으로 작용하게 되어 반송자의 수명을 감소시킨다. 결국 중성자의 피폭량이 증가할수록 이러한 변위손상에 의한 저항도가 증가되고, 이로 인해 외부 전류-전압(I-V)<sup>(3)</sup> 특성곡선에서는 그림 2-1(b)에서 보이는 것과 같이 천이 현상이 나타난다. 이 곡선의 천이 정도는 총 누적 중성자 선량(Fluence)과 비례하므로 이 정보를 이용하면 소자에 대한 중성자의 조사량을 파악할 수 있다.

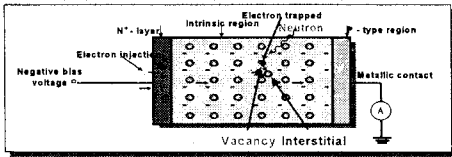
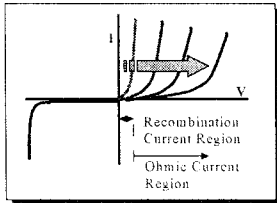


그림 2-1(a). 핀(PIN) 다이오드의 구조



2-1(b). 피폭에 따른 다이오드의 I-V 특성곡선 변화

## 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. 특별 제작한 TMAH를 이용한 실리콘 습식 식각 장비는 아래 그림 2-2와 같다.

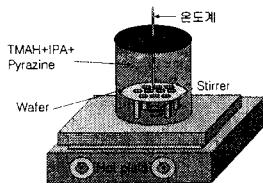


그림 2-2. 실리콘 습식 식각장비

본 공정에서 사용한 습식 식각 조건은 다음과 같다.

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

아래 그림은 위 공정으로 실제 제작된 소자이다.

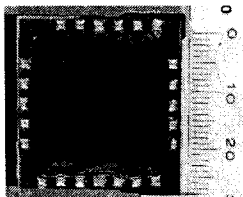


그림 2-3. 제작된 실물 사진

## 2.3 중성자 조사시험 및 결과 분석

### 2.3.1 중성자 조사시험 조건

중성자 조사시험은 한국원자력연구소 부설 한국원자력병원의 양성자 가속기 중성자 조사시험 시설에서 수행하였다. 이것은 가속된 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 1000cGy를 조사시키기 위해 양성자 빔 전류(Ip)는 40 μA로 설정하여 표 2-1에서와 같이 총 6단계로 나누어서 PIN 다이오드에 조사시켰다. 최대 피폭 선량치는 1000cGy, 최소치는 10cGy로 설정하였고 제한된 시간 내에 측정 시간을 고려하여 조사 및 측정 시간은 총 6 단계로 결정되었고 총 조사선량은 조사 선량률(6.7rad/Min, @ Ip=40A)을 고정하고 조사시간만으로 조절토록 하였다.

조사시간 (분)	1.5	15	37.5	75	112.5	150
누적 조사 선량 (cGy)	10	100	250	500	750	1,000

표 2-1. 중성자 조사 실험 절차

### 2.3.2 중성자 조사 시험 소자

1차년도에 제작된 중성자 탐지소자에 대한 중성자 조사시험 및 중성자 특성평가 결과와 앞 절에서 수행한 시뮬레이션 결과에 따라 개선 제작된 PIN 다이오드(KS-2)를 조사시험에 사용하였다.

소자명	DN-156	KS-1	KS-2
두께 (μm)	1000	300	1,200
광학 면적 (mm)	1.0 x 1.0	0.2 x 0.2	1.0 x 1.0
구조	PIN Diode	PIN Diode	PIN Diode

표 2-2. 중성자 조사 실험에 사용된 소자

언급한 바처럼 1차년도 연구를 통하여 제작된 중성자 탐지소자의 중성자에 대한 감도를 개선하기 위해 고저항도의 웨이퍼를 사용한 두꺼운 진성영역과 좁은 단면적의 형태를 가진 PIN 다이오드로서 제작한 것이다. 이와 더불어 선진국에서 중성자 탐지용 반도체 소자로 시판되고 있는 PIN 다이오드 소자(DN-156)를 동일 조건에서 시험함으로써 중성자에 대한 감도를 비교하고자 시도하였다. 두 종류의 소자와 더불어 1차년도에 제작되었던 PIN 다이오드(KS-1)에 대한 특성을 표 2-2에 정리하였다.

### 2.3.3 실험 결과 분석

중성자 조사 시험에 사용된 두 가지 PIN 다이오드(KS-2, DN-156)에 대하여 조사시험 직전에 전류-전압(I-V) 특성을 측정 한 후 모두 여섯 단계에 걸쳐 정해진 양의 중성자 선량을 조사시키면서 각 단계별로 오프 라인으로 I-V 특성을 측정하여 기록하는 방법으로 시험을 진행하였다. 본 중성자 탐지소자에서 사용되는 중성자 피폭선량 탐지 방식에서는 소자에 기록된 중성자 피폭량의 정보가 짧은 시간 범위에서 거의 변화가 나타나지 않지만, 가능한 각 단계별 오프라인 측정 시간을 짧게 정하였고, 또한 전 단계에 포함한 실험은 시작에서부터 종료까지 연속적인 시간이 되도록 설정하였다. 일련의 시험을 마친 후 기록된 I-V 값들을 분석하는 과정을 통하여 단위 중성자선량에 대한 PIN 다이오드의 전기적 변화량을 소자의 중성자에 대한 감도 인자로 사용하였다.

그림 2-4(a)는 2차년도에 제작한 PIN 다이오드 소자의 중성자 조사 선량을 증가시키면서 측정된 I-V 특성곡선들을 동일한 그림으로 나타낸 것이다. 중성자 조사량이 증가함에 따라 I-V 곡선이 점점 위쪽에서 나타나는 경향을 보여주고 있다. 이것은 소자에 대한 중성자 피폭량 증가가 소자 내부 변위손상의 증가로 이어져 PIN 다이오드 베이스 영역에서의 저항 성분이 크짐으로써 결국 일정한 량의 전류가 인가된 소자에 대하여 외부에 나타나는 전압값의 감소로 귀결된다. 그림 2-4(b)는 그림 2-4(a)의 그래프에서 일정한 전류량(9mA)에 대한 전압의 값을 조사 중성자 선량별로 표시하고 이 점들을 선형 근사화시킨 것으로서 단위 중성자 선량(cGy)에 대한 소자 양단의 전압 변화량을 7.35mV로 나타낸다. 즉 이번에 제작한 중성자 탐지소자는 9mA의 정전류원을 인가할 경우의 중성자 감도는 7.35mV/cGy라는 것을 알 수 있다.

이번 2차년도에 중성자 감도를 개선하여 제작한 소자의 감도 증가율은 1차년도 제작 PIN 다이오드의 8배 이상 증가 되었다.(그림 2-5 참조)

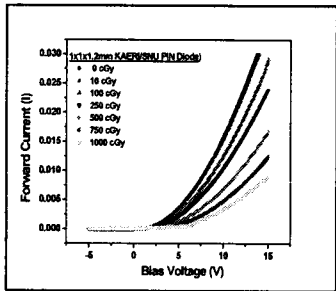


그림 2-4(a). 조사 후 I-V 특성곡선 변화

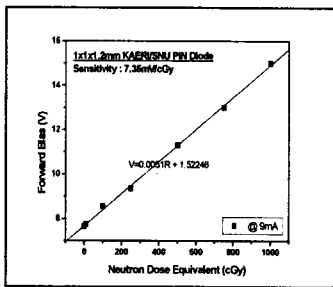


그림 2-4(b). 조사 중성자 선량별 감도

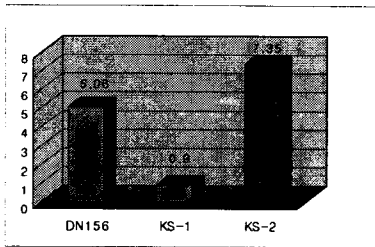


그림 2-5 소자별 비교 관계

중성자 감도 (@ 9mA)	DN156	KS-1	KS-2
평균 ( $\mu$ m)	1.000	300	1.200

표 2-3. 시험에 사용된 PIN 다이오드의 중성자 감도

## 2.4 휴대용 중성자 선량계 모듈

이상에서 개발된 PIN 다이오드가 장착 될 중성자 선량계를 구현하는 방법에는 정전류 펄스 방식과 정전압 펄스 방식이 있는데, 여기서는 정전류 펄스(10mA, 10ms)를 센서에 인가하여 발생하는 전압값의 크기로 그 특성을 판별하는 방법을 사용하였다.

### 2.4.1 선량계 모듈의 구성

제작한 장비의 구성은 전원부, CPU부, 입력부, 정전류 펄스 발생부, 센서부, 디스플레이부로 나눌 수 있고, 흐름은 다음(그림 2-6)과 같다.

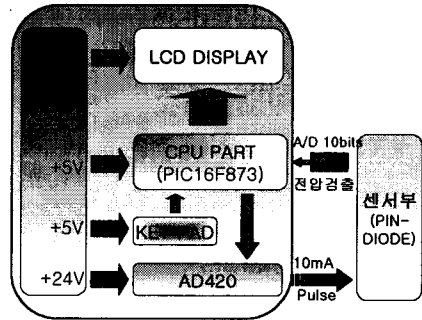


그림 2-6. 구현한 선량계의 블럭도

#### 2.4.1.1 전원부

전체적인 구동은 DC24V 배터리로 구동하며, 내부에 사용되는 5V 전원은 레귤레이터를 사용하였다. 장치 작동시 전류소비량은 펄스발생상태 36mA, 대기상태에서 31mA, 슬립모드상태 24mA가 소비되었고, 평균사용시간은 2-3정도이다.

#### 2.4.1.2 입력부

입력은 버튼식이며, 각 버튼은 Check, Sleep, Init, Reset로 나누어지고 각각의 기능을 가진다. 살펴보면, Check버튼은 측정기능, Init버튼은 기존 센서의 손상값을 측정값에 반영하는 기능, Sleep버튼은 시간초과 Sleep에 반하여, 강제적인 슬립모드 기능을 가지며, RESET 버튼은 하드웨어적인 RESET 기능이 있다. 키패드 입력은 컨트롤러의 PORTB를 이용하였으며, 이중 Check(portb.7)를 사용하여, 비트 반전 인터럽트를 구현하여, 슬립모드에서도 측정버튼을 누르면 정상모드로 깨어나게 하였다.

#### 2.4.1.3 정전류 펄스 발생부

정전류 펄스의 발생은 결과값에 큰 영향을 미치게 되므로, 장치의 성능을 좌우한다. 여기서는 정전류 발생 칩으로 알려진 AD420을 이용하여, 4~24mA로 가변할 수 있게 구현하였고, 컨트롤러에서 스위칭신호를 받아 펄스를 발생하게 구성되어 있다. 성능은 10mA로 고정되어 발생하는 정전류는 0~수백K  $\Omega$ 의 부하에서 일정한 전류를 발생할 수 있다.

#### 2.4.1.4 센서부

센서는 PIN 다이오드 전반부에서 설명한 PIN 다이오드를 말하며, 이 센서에 순방향으로 전류가 인가되면, 양단에 임의의 전압이 발생되는데, 이를 A/D 컨버터하여 센서의 고유 저항값을 산출하게 된다.

#### 2.4.1.5 CPU부 (Processing, A/D)

컨트롤러로는 작고 기능이 다양한 PIC16F873을 이용하였으며, 프로그램을 ONE-CHIP에 탑재하여 동작한다 이 부분은 시스템의 전반에 관한 통제를 담당하며, 펄스 발생에 연이어 실시하는 A/C converting은 칩 자체에 내장된 분해능 10bits A/D convert를 이용하여 A/D converting 하게 된다.

#### 2.4.1.6 디스플레이부

디스플레이는 LCD(8X2)출력을 하며, 장치의 동작상태나 측정결과를 나타내며, Serial-LCD를 모듈을 도입

단일의 Data선을 통하여 RS232 방식으로 LCD에 원하는 데이터를 출력하게 된다. 또한 LCD전원 자체도 컨트롤러에서 스위칭 할 수 있는데, Sleep 모드시 전원이 차단된다.



그림 2-7. 제작된 선량계의 실물사진

### 2.4.2 선량계의 소프트웨어적인 흐름

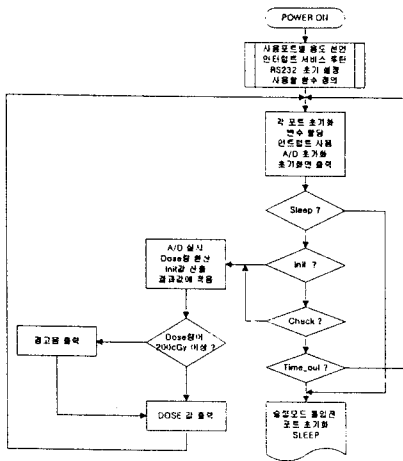


그림 2-7. 선량계의 프로그램 흐름도

C언어를 사용하여 프로그램을 compiler하였으며 전체적인 흐름을 살펴보면, 우선 전원 스위치를 누르면 컨트롤러는 초기 설정을 마치고 입력대기상태가 된다. 입력형태는 키 패드에 있는 4가지 기능들이 되며, 각각의 입력 발생시 위의 흐름에 따라 처리하게 된다. 그리고, 기타 기능들로는 일정시간 미 사용시 파워절약모드 돌입, 측정치가 규정치(200cGy)를 초과시 경보음 발생, 일정시간 주기 측정 등이 있다.

### 2.4.3 실험 및 결과 분석

#### 2.4.3.1 실험 방법

이상에서 구현된 선량계 모듈을 가지고 측정결과와 신뢰성을 알아보기 위해 피폭량이 서로 다른 10, 100, 250, 500, 750, 1000(cGy)인 반도체 소자에 대해 정전류 펄스(10mA, 10mS)를 인가하였을 때 디스플레이 되는 결과 값을 기록하여 실제 피폭량과 비교해 보았고, 장비 자체에 대한 전류소비측정을 위해 기본운용시, 펄스 발생시, Sleep 모드 돌입 후로 나누어 소비전류를 측정하였고, 안정적인 동작여부를 판단하기 위해 설정한 기능에 대한 정확한 작동여부를 살펴보았다.

#### 2.4.3.2 실험 결과 분석

아래의 표 2-4는 피폭량이 서로 다른 소자들을 개발된 선량계에 장착하여 그 특성을 본 실험의 결과이다. 이 결과에 따르면, 실제 피폭된 양과 표시된 선량과는

10(cGy)에서 약간의 오차가 존재했으며 있으며, 피폭량이 커질수록 그 오차가 1/1000 오차를 보이고 있는데, 이는 PIN 다이오드의 특성 그래프에서 고유 저항치가 낮은 영역에서는 그 차이가 별로 없기 때문이라 생각된다. 이 실험의 결과는 지난 1차 실험때와 비교하여 소자자체의 감도 향상과 더불어 안정성과 신뢰성을 얻었다고 할 수 있겠다. 그리고 앞서 시험한 시뮬레이션과 실험의 결과와도 일치함을 알 수 있었다.

피폭량(cGy)	10	100	250	500	750	1000
표시된 전압 (V)	1.568	2.024	2.742	4.05	5.317	6.601
표시된 선량 (cGy)	12.4	98.3	239.1	495.6	744.1	995.8

표 2-4. 피폭량에 따른 각각의 표시값

동작 형태	기본 운용시	측정시	슬립모드
소비 전류값(mA)	32	36	24

표 2-5. 동작형태에 따른 전류소비

전류소비량 측정실험결과에서는 측정시와 기본운용시 4mA, 슬립모드와는 24mA의 전류차이를 보였다.

동작실험에서 Check(측정), 강제Sleep, 시간초과 Sleep, Init(측정결과보상), 측정값 규정치 초과시 경보음 발생, Sleep시 LCD 자체전원 공급차단, Sleep 상태에서 측정시 Sleep 해제, 일정간격 주기적 측정, Reset 기능 모두 정상적으로 작동하였다.

## 3. 결 론

본 논문에서는 지난 1차와 비교하여 탐지소자 개발 부분에서 최대 1200 $\mu$ m 두께의 고저항 실리콘 웨이퍼를 사용하여 PIN 다이오드 제작공정을 수행하여 1 $\mu$ m 두께와 단면적을 달리하는 다수의 PIN다이오드를 개발하였으며, 개발된 소자의 감도 측정을 통해 1차년도에 개발된 소자에 비해서는 8배 성능향상을 보여 선진국 수준의 기술력을 갖추었고, 휴대용 선량계 모듈 개발부분에서는 측정 오차를 1/1000로 줄였으며, 휴대용 프로토타입 모듈을 제작하였다. 향후 연구에서는 시뮬레이션을 통한 측정 중성자 에너지 영역에서 소자 손상정도 예측, 보다 두꺼운 고저항 실리콘 웨이퍼를 사용한 고 감도의 PIN다이오드 개발, 선량계의 다 기능성은 물론, 신뢰성 향상과 충격, 진동, 방수 등을 고려한 설계 및 장시간 사용이 가능한 개인 휴대형 중성자 선량계를 개발하기 위한 다양한 실험과 연구를 수행할 것이다.

## 후기

본 연구는 국방부 민군겸용기술사업의 일환으로 수행되었습니다.

## [참 고 문 헌]

- [1] 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
- [2] 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
- [3] The effect of radiation on electronic system, George C. Messenger et al..