

베타선원을 이용한 마이크로전자 구현 연구

이남호, 정현규, 정승호  
한국원자력연구소 원자력로봇팀

A Study on Micro-Battery using Beta Source

Namho Lee, Hyunkyu Jung, Seungho Jung

**Abstract** - 반도체에 이온화 방사선을 조사시키면 소자 내부에서 전자-정공쌍(Electron-Hole Pair, EHP) 생성 현상이 나타난다. 이 발생 전하는 방사선원에 따라 반영구적인 전원으로 활용이 가능하다. 본 논문에서는 반감기가 100여년인 Ni-63 베타 방사성 동위원소와 PN 접합형 반도체 소자를 사용한 방사선 전지를 개발하기 위한 연구의 일환으로 효율적인 방사광 변환법과 전류 발생방법 및 전지회로 구현에 대해서 고찰하였다. 또한 Ni-63 방사선의 베타선 스펙트럼을 계산하고 이에 해당하는 광입력 특성에 대한 실리콘 PN 접합 다이오드의 반응특성을 태양광 시뮬레이션용 소프트웨어를 사용하여 검증하였다.

전력을 공급할 수 있는 전원으로 방사선 동위원소의 적용 가능성을 분석해 보고자 하였다.

2. 베타전압형 방사선원

2.1 방사선원 선정

방사성 동위원소의 선택은 방사선 전지의 설계에 있어 중요한 변수가 된다. 현재 베타전압형 변환에 사용 가능한 방사성 동위원소로는  $H^3$ ,  $Pm^{147}$ ,  $Ni^{63}$  등이 있다. 본 연구에서는 이들 방사선 동위원소 가운데 안정성과 수명, 세기(Activity), 그리고 사용의 용이성을 고려하여 니켈(Ni-63)을 방사선원으로 선정하였다. Ni-63에서 방출되는 베타(Beta) 입자의 운동에너지는 0keV에서 66.7keV의 범위를 가지며 평균에너지는 17.6keV로 알려져 있다. 실리콘의 평균 문턱전압 에너지(Mean threshold energy)는 25eV이다. 따라서 이 에너지는 반도체 물질을 주성분인 실리콘(Si)에 영향을 미쳐 이온화 현상에 따라 실리콘 소자 내에서 전하를 발생시킬 수 있는 반면 소자에 대한 가벼운 차폐만으로 인체 피부에 대한 손상 방지가 가능하므로 베타전압형 방사성 동위원소로 채택하였다.

2.2 베타선원의 에너지 스펙트럼

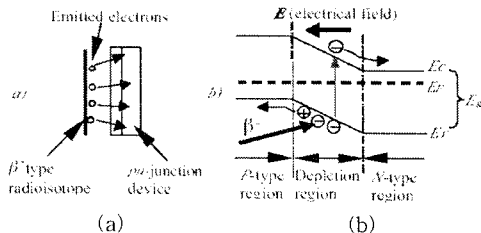
베타전압형 전지에 대한 연구를 수행중인 코넬대학의 A. Lal 등[2]은 연속 감쇠 근사(Continuous Slowing Down Approximation, CSDA)법을 사용하여 Ni-63의 에너지 스펙트럼을 계산하였다. 그러나 본 연구에서는 베타 선원에 대한 보다 정확한 에너지 특성을 분석하기 위해 NEA에서 개발한 BTSPEC와 BTPLLOT 프로그램을 사용하여 정확한 에너지 데이터를 구하였다.

1. 서 론

Micro-electromechanical System(MEMS)는 센서로부터 최근에는 광학적 응용분야에 이르기까지 그 연구범위가 확대되고 있는 추세이다. 이러한 장치들은 적용 분야에 따라 원격 작동에 필요한 온보드(On board) 전원이 종종 요구되며, 특히 의학분야에서는 장시간 작동이 가능한 전원에 대한 중요성이 부각되고 있다. 현재 사용되는 전원으로는 연료전지나 태양전지 등이 있으나 방사성 동위원소 전원은 특수한 분야에서 큰 장점을 가진다.[1]

방사성 동위원소 전지는 동위원소에 발생하는 방사선으로부터 변환장치 등을 사용하여 열이나 전기를 생산하는 원리로 구현되며 주로 베타전압 효과(Betavoltaic effect)를 이용하여 전기를 발생시킨다.

베타전압 효과는 그림 1과 같이 방사선에 의해 여기된 전자에 의해 반도체 소자(PN Junction) 내부에 전자-정공쌍이 생성되고 이로 인해 전계가 형성되는 것을 일컫는다. 생성된 EHP가 공핍영역(Depletion region)으로 확산되어 이동함에 따라 전류가 형성되며 이로 인해 전력이 발생되게 된다.



a) 베타전압형 전원의 형성구조 b) 베타전압 효과의 전위 구조도

그림 1. 베타전압 효과

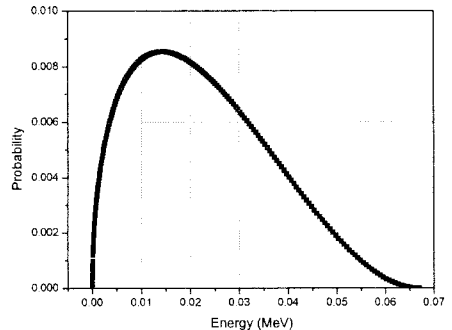


그림 2. Ni-63 동위원소의 에너지스펙트럼 계산

본 연구에서는 MEMS와 같은 저전력 소모형 소자에

이 결과 나타난 Ni-63 동위원소의 방출 베타선원의 에너지 분포는 그림 2와 같다. 이 에너지 스펙트럼은 이전에 구해진 베타선 에너지에 대한 근사 값보다 저에너지 영역에 많이 분포되어 있음을 알 수 있다. 따라서 일반적으로 사용되는 평균 에너지의 값을 대입할 경우 실제 반응도가 실험값보다 낮게 나타나게 됨을 예상할 수 있다.

### 3. 베타전압 효과 시뮬레이션

#### 3.1 베타전압용 반도체 소자

방사선원을 전지로 구현하는 원리는 직접변환을 이용하는 방법과 신디레이터 등의 광변환기를 사용하는 간접변환법 등이 있으나 전력 효율면에서는 직접변환법이 유리하다. 직접 변환법은 이온화 방사선을 반도체 소자에 직접 노출함으로써 소자 내에서 전기에너지를 발생시키는 것으로서 그 전형적인 구성이 그림 3에 베타 방사선선원인 Ni-63과 PN 접합 반도체가 결합된 형태로 나타나 있다. 증착에 의한 얇은 막(Foil) 형태의 Ni-63 동위원소에서 발생된 베타입자가 PN 접합소자의 공핍영역으로 입사되면 EHP가 발생되고 생성 전하는 전계에 따라 외부 부하로 전류를 형성하여 전력의 공급이 가능하게 된다.

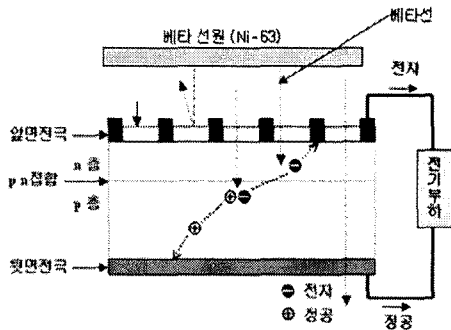


그림 3. Ni-63을 이용한 동위원소 전지 소자 및 회로 구성

이때 생성되는 최대 전류는 다음과 같이 예상된다.

$$I_{MAX} = e\varphi_{\beta 0} \frac{\bar{E}_{\beta}}{\epsilon}$$

여기서  $\varphi_{\beta 0}$ 는 입사 베타입자의 플루언스,  $\bar{E}_{\beta}$ 는 베타입자의 평균 에너지,  $\epsilon$ 은 소자의 방사율(emissivity)이다.

여기서 사용되는 Ni-63의 경우는 반감기가 100여년이므로 전원의 교체 없이 장시간 사용 가능하다는 큰 장점을 지니고 있다.

#### 3.2 베타선원 효과 시뮬레이션

실리콘형 PN 접합 반도체에 대한 Ni-63 방사성 동위원소의 베타전압형 효과의 확인을 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 현재 반도체에 대한 방사선 효과를 전기적으로 검증할 수 있는 용도의 프로그램이 개발되어 있지 않아 반도체에 대한 태양광의 특성을 시뮬레이션하는 용도로 오스트레일리아 뉴 사우스 웨일즈 대학에서 개발된 PC1D[3]를 사용하였다.

시뮬레이션에 사용된 소자는 단면적  $1\text{cm}^2$ , 두께  $250\mu\text{m}$ ,  $2.781\text{e}15$  농도의 불순물 p형 실리콘 PN 접합 다이오드이고 n층은 벌크 재결합율( $\tau_n, \tau_p$ )이 각각 0.7인 기판(Substrate)의 구조를 설정하였다. 입사광 정보는  $10\text{mCi}/\text{cm}^2$  세기의 Ni-63 동위원소에 대해 베타선원의 주파수  $7\text{e}-11$ 과 세기  $1\text{mW}$ 를 적용하였다.

시뮬레이션 결과 단락전류( $I_b$ ),  $-1.69\text{e}-7$  암페어와 개방전압( $V_b$ ) 0.1705 볼트로 나타나  $15.96\text{nW}$ 의 전력을 발생시킬 것으로 예상되었다. 이 값은 일반적인 전력 기준으로는 약한 수준이지만 효율이 높은 반도체의 설계와 방사성 동위원소의 개선을 통하여 나노단위의 회로 구동용 마이크로 전원으로 응용이 가능할 것으로 판단된다. 본 시뮬레이션에 사용한 프로그램 및 결과 화면이 그림 4와 5에 나타나 있다.

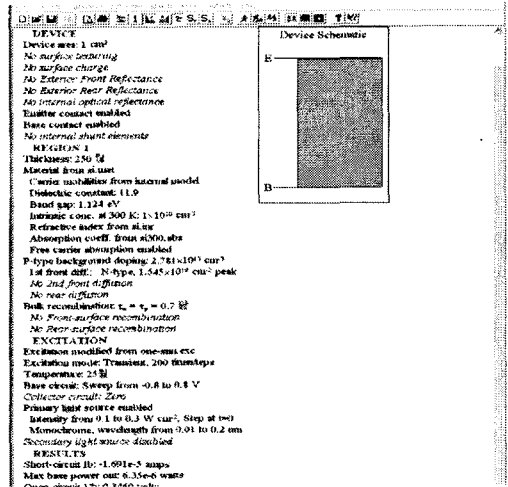


그림 4. PC1D 변수설정 및 결과 화면

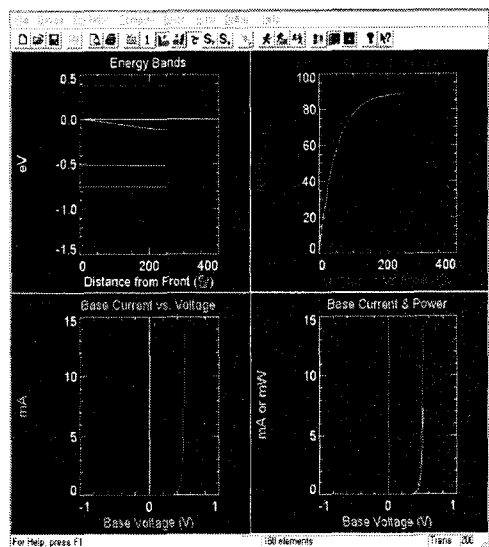


그림 4. Ni-63 동위원소에 대한 PN 다이오드의 PC1D 시뮬레이션 결과 그래프

### 3. 결 론

본 연구에서는 Ni-63 베타 방사성 동위원소와 PN 접합형 반도체 소자를 사용한 마이크로 전지 개발을 위한 기초연구로서 효율적인 방사선 동위원소의 선정과 광전환법 및 소자 구조에 대해 고찰하였다. 그리고 신뢰도를 향상시키기 위해 Ni-63 방사선의 베타선 스펙트럼을 정밀 계산하고 입사베타 방사광에 대한 센서 출력 전력 특성을 분석하기 위해 태양광 시뮬레이션용 소프트웨어를 사용하여 검증을 시도하였다. 추후 고기능의 방사성 동위원소와 높은 효율의 반도체 구조로 베타전압형 마이크로 전지를 구현한다면 의료 및 나노분야에서 다양한 활용도가 예상된다.

### 후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력기반확충연구사업의 일환인 원자력핵심기초연구과제의 지원으로 수행되었습니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Kenneth E. Bower, et al, Polymers, Phosphors, and Voltaics for Radioisotope Microbatteries, CRC Press, pp.441-455, 2002.
- [2] Hang Guo and Amit Lal, "Nanopower betavoltaic micro-batteries", The 12th International Conference on Solid State Sensors, Actuators and Microsystems, Transducers '03, 2003.
- [3] PC1D Version 5 Manual : 32-bit Solar cell modeling on personal computers, 1997.