

베타전지 기술동향 분석

Trends in Betavoltaic Battery Technology

강태욱 [T.W. Kang, twkang@etri.re.kr]

최병건 [B.G. Choi, cbgun@etri.re.kr]

박성모 [S.M. Park, smpark@etri.re.kr]

박경환 [K.H. Park, khpark_2001@etri.re.kr]

이재진 [J.J. Lee, ceicarus@etri.re.kr]

강성원 [S.W. Kang, kangsw@etri.re.kr]

SoC 설계연구그룹 선임연구원

SoC 설계연구그룹 책임연구원

SoC 설계연구그룹 책임연구원

SoC 설계연구그룹 책임연구원

SoC 설계연구그룹 책임연구원/그룹장

지능형반도체연구본부 책임연구원/본부장

One of the main technical constraints of a conventional battery is the limited lifetime of electric energy supplied. With self-power generation using an internal radioisotope as an emitter of beta particles, and a PN-junction semiconductor as an absorber of the beta particles, a betavoltaic battery can provide electric energy to electric devices in a semi-permanent manner. Hence, a betavoltaic battery can be adopted as the solution to the power source issue of IoT devices placed in locations that people cannot easily access, such as in the deep sea, a desert, and space, and requiring a long operation time without an electrical charging. This paper covers the current trends in betavoltaic batteries including issues regarding their technology, application, and patents.

* DOI: 10.22648/ETRI,2017,J,320605

* This material is based upon work supported by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, Korea) under Industrial Technology Innovation Program[No.1415143708].



본 저작물은 공공누리 제4유형
출처표시+상업적이용금지+변경금지 조건에 따라 이용할 수 있습니다.

2017
Electronics and
Telecommunications
Trends

4차 산업혁명 선도를 위한
ICT소재부품기술 특집

- I. 개요
- II. 베타전지 원리
- III. 베타전지 활용 분야
- IV. 기술 개발 및 특허 동향
- V. 결론

I. 개요

최근 각종 무선통신 및 휴대형 기기에 기반한 서비스가 사회적으로 보편화되고 있으나, 기기의 동작에 필요한 전원 공급은 기존의 화학전지 또는 물리전지에 의존하여 동작시간에 한계와 배터리의 교체 또는 충전에 따른 불편함과 제약이 있다. 베타 전지는 (그림 1)에서 제시하는 것과 같이 동위원소와 같은 베타 방출체에서 방출되는 베타선(전자)을 반도체의 PN 접합층에 흡수시켜 전기에너지를 생산하는 기술이다 [1]-[4]. 태양광 발전에서 태양에서 오는 빛 에너지 대신 베타선을 사용하지만, 태양전지의 원리를 그대로 적용한다. 기존의 태양전지 같은 경우 날씨에 따른 태양 빛의 변화로 전력 생산량이 일정치 않고 태양 빛이 부재한 밤에는 전력 생산이 불가능한 단점이 있다. 그러나 베타전지 같은 경우, 주변 환경 변화에 영향을 받지 않고 외부 동력원 없이 자체적으로 전력을 생산하며 극저온이나 고온 등의 극한 환경에서도 안정적으로 전력생산이 가능하다는 장점이 있다. 또한, 동위 원소의 반감기가 길면 길수록 배터리의 수명이 길어지기 때문에 Ni-63과 같이 100년 이상의 반감기를 가지는 원소를 에너지원으로 사용하게 되면 배터리의 수명도 그만큼 길어진다.

베타전지는 따로 충전이 필요 없고 수명도 오래가기 때문에 사물인터넷기기의 전원 이외에도 충전이 어려운 극한환경의 전지로 사용이 가능하다. 인체 삽입형 의료

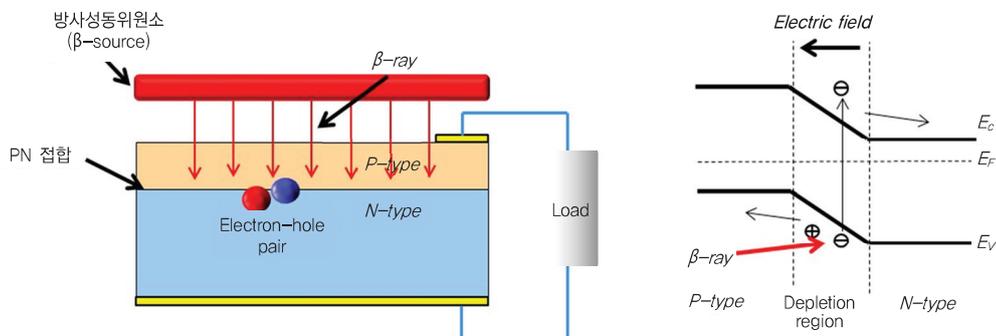
기기인 페이스메이커의 전원이나 원전 사고 시 인간의 접근이 불가능한 상태에서 노심외 방사능 유출 감지 센서, 터널이나 교량 등 인프라 시설의 센서 전원, 군사용 마이크로 로봇의 미소전원으로 사용이 가능하다.

한편, 반영구적인 베타전지 기술은 기존 배터리가 가지고 있는 짧은 작동 주기를 획기적으로 극복했다. 향후 모바일 기기의 전원으로 사용이 가능하게 된다면 매일 충전하지 않아도 되기 때문에 여러 가지 충전 문제를 해결할 수 있는 차세대 배터리 기술이 될 것이다.

한국전자통신연구원을 비롯한 공동 연구진은 베타전지의 전력 생성 크기 및 효율 개선을 위한 다양한 베타선원 기술 개발을 진행하고 있다. 베타선원 별 최적의 에너지 흡수체 구조를 개발하기 위한 다양한 반도체 흡수체 기술 개발을 수행 중이다.

II. 베타전지 원리

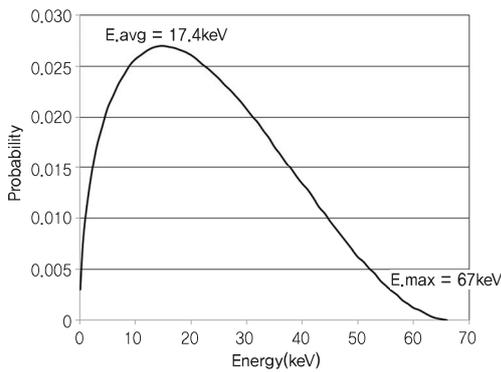
베타전지는 베타입자(전자)를 방출하는 방사성동위원소로부터 PN접합 반도체 표면을 통해 베타선을 흡수하여 전기에너지로 변환하는 동위원소 전지이다. 베타전지의 동작원리는 베타선원으로부터 방출되는 베타선은 PN접합 반도체 내의 공간전하영역에서 전자-정공쌍을 생성시키고, 이때 생성된 캐리어는 베타전지의 전압 전류 특성을 띄게 된다. <표 1>은 순수 베타선을 방출하는 동위원소의 종류별 반감기와 평균 에너지를 나타낸다.



(그림 1) 베타전지 개념도

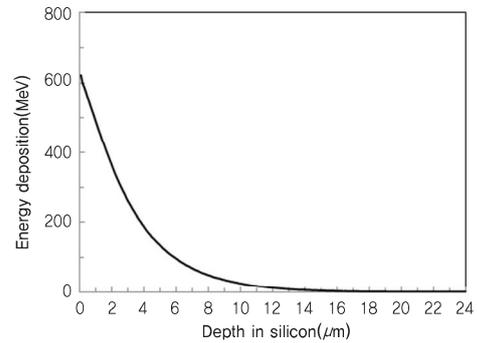
〈표 1〉 순수베타선 방출핵종[3]

| 베타방출핵종 | 반감기 | 평균에너지(keV) |
|--------|--------|------------|
| Ni-63 | 100.2y | 17.4 |
| H-3 | 12.3y | 5.7 |
| Pm-147 | 2.6y | 62.0 |
| Sr-90 | 28.8y | 195.8 |
| Ca-45 | 162d | 256.0 |



(그림 2) Ni-63 베타선원의 에너지 분포

베타입자를 방출하는 방사성동위원소는 핵종에 따라 수 eV에서 수백 keV의 에너지 스펙트럼과 고유한 최대 에너지와 평균에너지를 가진다. (그림 2)는 Ni-63 베타선원의 에너지 스펙트럼을 보여주는데, 17.4keV의 평균에너지와 67keV의 최대 에너지를 가진다. Ni-63 베타선원에서 방출되는 베타입자(전자)를 실리콘 PN 접합 반도체에 흡수시켜 에너지 변환을 일으키고자 할 때, 베타입자의 반도체 내의 투과 깊이는 반도체 구조 설계를 위한 중요한 변수가 된다. 베타입자의 에너지가 클수록 투과 깊이는 깊어지기 때문에 입사되는 베타입자가 모두 공간전하영역에서 흡수되어 전자-정공쌍 생성에 기여할 수 있도록 PN 접합구조를 설계하여야 한다. (그림 3)은 Monte Carlo 시뮬레이션을 통해 실리콘의 깊이에 따른 베타선 에너지의 흡수 분포를 보여준다. 베타입자의 에너지는 실리콘 깊이가 깊어질수록 지수적으로 감소하여 대부분이 수 μm 이내에서 흡수가 일어나고 최대 투과 깊이는 약 $16\mu\text{m}$ 정도가 됨을 알 수 있다. 따라서 베타입자의 투과깊이와 에너지 분포를 고려하여 실



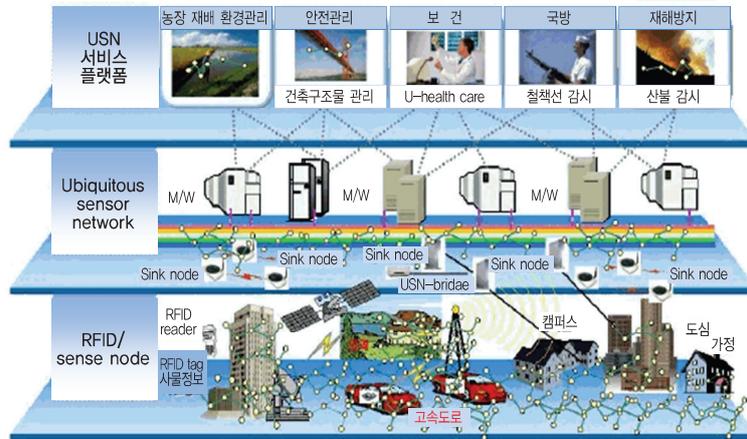
(그림 3) 실리콘 깊이에 대한 Ni-63 베타선원의 에너지 흡수 분포

리콘의 흡수층을 $10\mu\text{m}$ 내외로 설계하여야 함을 알 수 있다.

장반감기 핵종을 사용할수록 베타전지 출력 수명이 길어지게 되지만, 그만큼 붕괴 속도가 느려지게 되어 출력 전력이 낮아질 수 있어 적절한 반감기와 에너지를 선택하여 용도에 맞는 베타전지를 구현할 수 있다. 장반감기와 높은 에너지 밀도를 가지는 동위원소 전지의 특성을 이용하여 장시간 인간의 손길이 미치지 못하는 극지, 오지, 우주 또는 군사용 센서의 미소전력원으로 사용이 가능하다. 베타전지의 효율을 높이기 위한 노력으로 여러 연구기관에서 3차원 구조의 실리콘 PN 접합을 제작하였으며[2], [5], [6], 실리콘 반도체에 비해 더 높은 출력을 얻기 위해 고밴드갭 반도체인 SiC 또는 GaN를 이용한 베타전지도 발표되었다[4], [7].

III. 베타전지 활용 분야

긴 수명 동안 환경 변화에 독립적으로 안정적인 전력 공급원으로 공급할 수 있는 베타전지는 우주, 심해, 극지방, 군사무기 체계 등 사람의 손길이 닿기 어려운 극한 환경이나 한번 설치가 완료되면 배터리 교체가 불가능한 교량, 댐, 터널, 원자로 내부 등에 사용되는 안전 모니터링용 센서의 충전 기술 문제를 해결할 수 있는 기술로 활용될 수 있다. 이와 와 같이 저전력 인프라 모니터링을 위한 통신규정이 IEEE 802.15.4K 에서 제정하

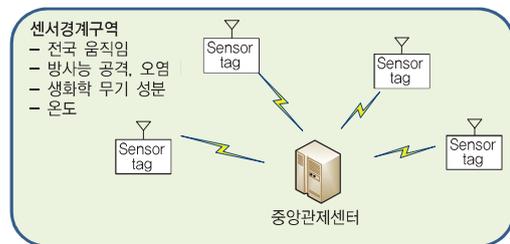


(그림 4) 센서네트워크/USN 서비스용 전원 개념도

고자 표준화가 진행되고 있으며, 인프라 모니터링용 센서의 전원으로 동위원소전지의 활용이 가능하다.

(그림 4)에서 제시하는 센서네트워크 및 Ubiquitous Sensor Network(USN) 서비스용 전원 개념도를 참고하면, 베타전지 기술은 배터리 사용시간 제약 및 비용 문제로 인해 아직 활성화되지 못하고 있는 USN 관련 산업의 활성화 및 조기 상용화에 기여할 수 있다. 지난 수년간 도시관제, 교량관리, 기상관측, 자산관리 등 다양한 분야에서 수행된 USN 실증시험 및 현장시험 결과에 의하면, 현재의 USN 기술이 가진 가장 결정적인 문제점은 (그림 4)의 응용개념도에서 제시된 바와 같이 센서 노드에 구동 전력을 공급하고 이를 유지하는 문제와 배터리에 의한 소형화의 한계 및 높은 비용 등인데, 베타전지의 장점인 장시간 동작 가능하고 초소형화 가능한 전원기술을 통해 이러한 핵심 문제 해결이 가능하다.

베타 전지 기술은 이처럼 기존 전지가 가진 한계를 보완할 수 있고, 안정성에 문제없어 저전력으로 수년 이상 장시간 동작해야 하는 시스템에서 가장 필요로 하는 기술이며 사람의 접근이 어려운 지역의 감시나 군사보호 구역에서 전원교체나 충전 없이 10년 이상 작동이 가능한 RFID 센서태그의 전원으로 활용이 가능할 것으로 판단된다. 예를 들어 광범위한 군사 분계선의 대치지역에 대한 효율적인 경계 및 모니터링을 위해서는 많은 병



(그림 5) 국방용 경계구역 감시 및 모니터링용 센터태그 전원 응용도

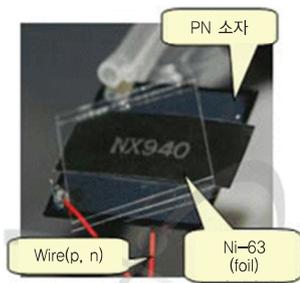
력의 배치와 24시간 노력이 필요하지만, (그림 5)에서 제시하는 외부 환경 조건에 영향을 받지 않고, 전력 공급을 위한 사람의 개입이 필요 없는 베타전지를 사용한 국방용 경계구역 감시 및 모니터링용 센터태그 전원 장치를 이용하면, 적은 수의 병력으로 효율적인 감시와 모니터링 통한 적 병사의 움직임의 자동적 추적이 가능하고, 적이 사용한 생화학, 방사능 무기로부터 아군의 안전을 확보하기 위한 각종 센서가 내장되어 자동적으로 모니터링을 수행할 수 있다.

VI. 기술 개발 및 특허 동향

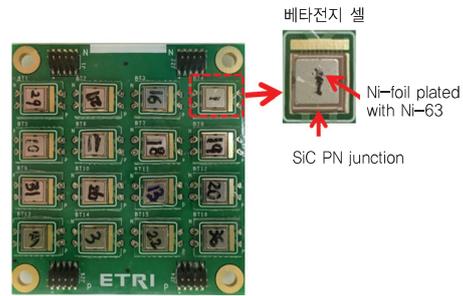
1. 기술 개발 동향

가. 국내 기술 개발 동향

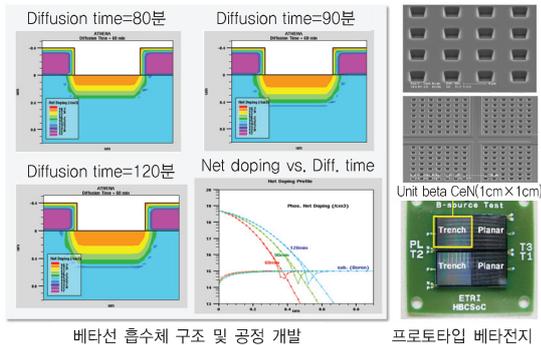
국내에서는 2007년 한국원자력연구원에서 국내 최초로 (그림 6)과 같은 평면 형태의 PN접합 다이오드를 베



(그림 6) 한국원자력연구원에서 제작한 베타전지



(그림 8) Ni-63과 SiC 기반 베타전지 모듈



(그림 7) 한국전자통신연구원서 연구한 프로토타입 베타전지

타전지로 활용한 실험 보고서를 발표하였다. Ni-63을 투명한 플라스틱막에 고정하여 베타선을 흡수하여 전기 에너지로 변환하는 실험을 실시하여 측정된 베타셀의 전력은 대략 0.3nW 수준으로 최초 목표치인 10nW 수준에는 미치지 못하였으나, 국내에서 베타선원을 이용한 최초의 연구를 수행함으로써, 마이크로 베타전지 연구의 가능성을 제기하고 관련 연구그룹들의 관심을 촉발하였다. 그 후 한국전자통신 연구원에서는 2010년 밀봉선원인 Ni-63, Pm-147, Sr-90 등의 베타선원을 이용하여 (그림 7)와 같이 고효율 베타선 흡수체 구조 연구를 진행하였다.

2016년 한국전자통신연구원에서는 한국원자력연구원과 공동연구를 통하여 동위원소 Ni-63과 Silicon carbide(SiC)를 기반으로 한 반도체 흡수체를 이용한 베타전지 개발을 발표하였다. (그림 8)에서 제시하는 것과 같이 베타전지는 여러 개의 단위 베타전지 셀이 연결되어 구성되어 있다. 각 베타전지 셀은 $4 \times 4\text{mm}^2$ 크기의

SiC 반도체 흡수체와 Ni-63 동위 원소가 도금된 금속 Foil의 2개 층이 샌드위치 형태를 갖도록 구성된다. H. GUO 외의 연구[8]는 2011년 단일베타전지 셀을 이용해 Open-circuit voltage(V_{oc}) 0.98V를 달성하고 Short-circuit current (I_{sc}) 0.51nA를 달성하여 Fill Factor(FF)를 약 78%로 가정하였을 경우 단일 베타전지 셀당 약 0.39nW의 전력을 생산하는 반면, 2016년 ETRI가 개발한 단일 베타전지 셀은 V_{oc} 1.99V, I_{sc} 3.05nA를 달성하여 동일 FF 약 78%를 가정하였을 때, 그보다 큰 단일 베타전지 셀당 약 6.07nW의 전력을 생산한다.

나. 해외 기술 개발 동향

반도체 기술을 이용한 베타전지에 대한 연구는 2000년을 기점으로 러시아, 미국, 캐나다 등의 대학 및 연구기관에서 수행되었다.

러시아에서는 2000년 Ioffe 기술연구소에서 태양전지용 AlGaAs PN 접합을 이용하여 기체상태의 삼중수소 환경에서 빛을 조사함으로써, 베타선이 태양전지용 다이오드의 광전류에 미치는 영향을 연구를 수행하였다.

캐나다의 토론토 대학에서는 2003년 비정질 수소화 실리콘을 Hydrogenated amorphous silicon(a-Si:H) 제작하여 진성베타전지(Intrinsic Betavoltaic Device)를 제안하였다. 수소화 실리콘을 제작함으로써 외부의 베타선을 사용하지 않고 자체의 방사선을 사용한 베타전지를 구현하였으나, 시간이 지남에 따라 베타선이 방출됨으로 인해 그 빈자리에 남는 불포화결합(Dangling

bond)가 늘어나 단락전류(Short circuit current)가 줄어들어 장기간 사용할 수 없는 단점이 있다. 이후 2009년에도 기체상태의 삼중수소로부터 베타선의 흡수율을 높이기 위하여 3차원의 미세기공이 형성된 실리콘 PN접합을 제작하여, 삼중수소 기체의 압력을 증가시킴에 따라 미세기공 내에서 베타선의 흡수가 증가하여 유효전력이 증가하는 실험결과를 보여주었으나, 단락전류밀도는 $60\text{nA}/\text{cm}^2$ 수준으로 낮게 측정되었다.

미국 코넬 대학에서는 2006년 이후 베타선원을 이용한 마이크로 전지에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 4H-SiC와 미세기공 실리콘 PN접합을 이용한 마이크로 셀을 제작하여 Pm-147, Ni-63 등의 동위원소를 베타선원으로 이용한 마이크로 베타전지를 발표하였다. 4H SiC와 Ni-63을 이용한 베타전원으로 0.72V와 $16.8\text{nA}/\text{cm}^2$ 의 개방전압과 단락전류밀도를 보여주었으며, 미세기공 공정을 이용하여 베타선의 변환효율을 향상시킨 실리콘 PN접합과 Pm-147을 이용한 베타전원으로는 $0.55\mu\text{A}$ 와 0.12V의 단락전류와 개방전압을 제시하였다. 그리고, DRIE공정을 이용한 3차원 실리콘 PN접합을 이용한 베타전원 구조를 제안하여 주사현미경의 전자선을 이용하여 Pm-147을 이용한 베타선의 변환전력을 예측하였다.

2. 특허 동향

베타 전지 관련 기술은 아직 연구 초기 단계이므로 국내외 특허 10건 이내로 극히 적다. 주로 미국을 중심으로 베타전지와 관련된 특허가 발표되었으며, 최근 한국 전자통신연구원에서 베타전지의 에너지 변환효율을 증가시키기 위한 구조에 대한 특허가 발표되었다. 베타전지의 응용 기술들로 확장에서 확인해 보면, 베타전지 적용 대상인 RFID 관련 특허는 국내 출원건수가 최근 2년간 2,204건 이상이며 대부분 응용 시스템 분야에서 출원되고 있으며, 칩 및 태그 분야는 138건으로 집계된다.

베타전지관련 연도별 순으로 국내외 특허를 분석해

보면 1979년 미국의 J.C. Ritter는 Radioisotope photoelectric generator를 통해 베타선이 아닌 감마선이나 X선을 이용하여 광전자를 생성하고, High atomic-number(high-Z) 물질과 Low-Z 물질 간의 전자 발생률의 차이에 의해 전류가 흐르도록 하여 전기 에너지 생성하는 방법을 제안하였다.

그 후, 1989년 미국의 Paul M. Brown은 ‘Apparatus for Direct Conversion of Radioactive Decay Energy to Electrical Energy’ 특허에서 동위원소에서 발생하는 베타선 등을 직접 전기에너지로 변환시키는 방식에 대한 세계 최초 특허를 제안하였다. 이 전까지는 열에너지로 변환 후 전기에너지로 변환시키는 전통적인 발전 방법을 이용하므로 크기가 매우 커서 민수용으로 사용 불가능했으나, 본 특허는 코일로 구성된 LC 공진회로에 베타선이 에너지를 공급하여 공진이 지속되도록 하는 방식으로 직접 전기에너지로 전환이 가능하게 된다.

1994년 미국의 John J. Day는 ‘Electric Power Cell Energized by Particle and Electromagnetic Radiation’ 특허에서 유전체 물질 사이에 감마선 등의 방사성 물질을 놓고 유전체 외부로는 금속 전극을 배치하면 방사선에 의해 유전체 내의 물질이 이온화되면서 전자가 생성되고, 이렇게 생성된 전자를 금속 전극(Collector)을 통해 모으면 전류가 생성되는 방식을 제안하였다. 그러나 이 방법은 이온화된 전자가 재결합해서 효율이 떨어지는 문제가 있다.

2000년 미국의 P.M. Fauchet는 ‘Stabilizing Process for Porous Silicon and Resulting Light Emitting Device’ 특허에서 3차원 PS 반도체 구조 형성 방법에 관한 특허를 출원하였으며, 본 특허에서는 베타 전지와 관련한 언급은 없지만, 3차원 PN 접합형 반도체 구조를 구현하는데 필요한 반도체 기판상의 Porous 형성 공정에 대해 기술하고 있다. 출원인 및 출원기관(Rochester 대학)은 본 특허를 기반으로 2005년도에 Tritium Gas를 이용한 베타 전지를 제작 실험에 성공하였다.

2001년 미국의 Paul M. Brown은 ‘Isotopic Semiconductor Batteries’ 특허를 통해 베타선 에너지를 PN 접합 반도체 이용해서 전기 에너지로 직접 변환하는 방식에 대한 세계 최초 특허를 제안하였다. N형 반도체와 P형 반도체 사이에 방사성 동위원소를 포함한 반도체층이 끼어있는 구조를 이용해 P형 반도체와 N형 반도체의 Intrinsic work function 전위의 차이에 의해 전압을 이러한 P-i-N 접합 구조를 반복적으로 적층하면 높은 전압을 얻을 수 있다고 제안한다.

2002년 미국의 A.L. Lal 외는 ‘Direct Charge Radioisotope Activation and Power Generation’ 특허에서 MEMS형 배터리 구조 관련 특허를 제안하였으며, 베타소스에서 방출되는 전자에 의해 휘어지는 막대구조체가 진동하고, 이 진동하는 기계적 에너지를 압전 물질 이용하여 전기 에너지로 변환하는 구조를 제시하고 이러한 구조를 반도체 공정으로 제작하는 방법에 대해서도 기술되어 있다. 그러나 발명자 및 발명기관(Cornell 대학)은 후에 이 구조를 구현하여 제시한 측정 결과를 보면 출력 전력이 1nW 이하로 매우 작아서 아직은 실용화가 불가능하다.

한국전자통신연구원 최병진이 2011년에 출원한 특허 ‘Apparatus for Beta-Battery and Method of Making Same’에서 국내 최초로 베타선 흡수율을 높일 수 있는 PN접합 면적 향상을 위한 입체적인 디바이스 구조를 제시하였다.

V. 결론

베타전지 기술은 자체 전력원인 베타 입자를 방출하는 동위원소를 전지 내부에 포함하여, 외부 환경의 변화와 관계없이 안정적으로 일정한 전력 생산이 가능하며, 전지의 수명이 사용하는 동위원소의 반감기에 의해 결정되기 때문에 반영구적 사용이 가능하다. 예를 들어 동위원소 Ni-63을 사용하였을 경우, 100년 이상 전력을

생산해 낼 수 있는 베타전지 제작이 가능하다.

러시아, 캐나다, 미국 등의 국가에 의한 베타 전지 개발 사례들이 보고 되고 있으며 관련 특허도 지속적으로 출원되고 있다. 국내에서는 유일하게 한국 전자통신 연구원이 Ni-63동위원소의 베타 입자로부터 효율적으로 전력을 생산할 수 있는 SiC를 기반으로 한 반도체 흡수체를 개발 중에 있으며 최근 다수 개의 베타 셀을 연결하여 생산 전력을 높인 베타전지 모듈 개발에 성공하였다.

최근 베타전지는 전력 충전이 어려운 심해, 우주, 극지방과 같은 인간의 접근이 어려운 극한환경에 사용되는 디바이스나 한번 설치가 완료되면 배터리 교체가 불가능한 교량, 댐, 터널 등에 사용되는 센서들의 전원 문제의 획기적인 해결 방안으로 제시되고 있다.

용어해설

베타전지(Betavoltaic Battery) 베타입자(전자)를 방출하는 방사성 동위원소와 반도체의 PN 접합을 결합하여 베타입자가 반도체 내에서 흡수가 일어나 전자-정공쌍을 생성시켜서 핵분열 에너지가 전기에너지로 변환되는 현상을 이용한 전지

약어 정리

| | |
|--------|--------------------------------|
| a-Si:H | Hydrogenated Amorphous Silicon |
| FF | Fill Factor |
| High-Z | High Atomic-Number |
| Isc | Short Circuit Current |
| SiC | Silicon Carbide |
| USN | Ubiquitous Sensor Network |
| Voc | Open Circuit Voltage |

참고문헌

- [1] B.G. Choi et al., “Ni-63 Radioisotope Betavoltaic Cells Based on Vertical Electrodes and Pn Junctions,” *IEEE Int. Conf. Nanotechnol.*, Rome, Italy, July 27-30, 2015, pp. 889-892.
- [2] B. Liu, K.P. Chen, N.P. Kherani, and S. Zukotynski, “Power-Scaling Performance of a Three-Dimensional Tritium Betavoltaic Diode,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 95, 2009, pp. 233112:1-233112:3.
- [3] T. Wacharasindhu, J.W. Kwon, D.E. Meier, and J.D.

- Robertson, "Radioisotope Microbattery Based on Liquid Semiconductor," *Appl. Phys. Lett.*, vo. 95, 2009, pp. 014103:1-014103:3.
- [4] M.V.S. Chandrashekhar, C.I. Thomas, H. Li, M.G. Spencer, and A. Lal, "Demonstration of a 4H SiC Betavoltaic Cell," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 88, 2006, pp. 33506:1-33506:3.
- [5] R. Duggirala, S. Tin, and A. Lai, "3D Silicon Betavoltaics Microfabricated using a Self-Aligned Process for 5 Milliwatt/CC Average, 5 Year Lifetime Microbatteries," *Int. Conf. Solid-State Sensors, Actuators Microsyst.*, Lyon, France, June 10-14, 2007, pp. 279-282.
- [6] H. Guo, H. Yang, and Y. Zhang, "Betavoltaic Microbatteries Using Porous Silicon," *Int. Conf. Solid-State Integr. Circuit Technol.*, Hyogo, Japan, Jan. 21-25, 2007, pp. 2365-2370.
- [7] C. Honsberg, W.A. Doolittle, M. Allen, and C. Wang, "GaN Betavoltaic Energy Converters," *IEEE Photovoltaic Specialists Conf.*, Lake Buena Vista, FL, USA, Jan. 3-7, 2005, pp. 102-105.
- [8] H. Guo et al., "Fabrication of SiC p-i-n Betavoltaic Cell with ^{63}Ni Irradiation Source," *IEEE Int. Conf. Dev. Solid-State Circuits*, Tianjin, China, Nov. 17-18, 2011, pp. 1-2.