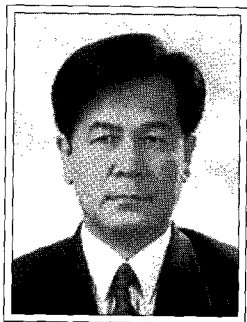


실시간 방사선량 측정용 PIN형 반도체 검출기

-개발 경위와 향후 전망-

김 용 균

한국원자력연구소 연구지원부
방사선안전관리실 책임연구원



원자력 산업에서 방사선 취급 업무에 종사하는 개인의 방사선 피폭 선량을 측정하는 개인 선량계는 합리적으로 달성 가능한 범위에서 개인의 방사선 피폭을 최소로 유지하는 데 필수적으로 사용되고 있다.

법정 개인 선량계로 사용되는 TLD와 필름 배지와 같은 수동형 선량계(passive dosimeter)는 선량계의 패용 기간 동안 개인의 누적 피폭 방사선량을 사후에 정확하게

측정할 수 있지만 개인 피폭 방사선량에 대한 정보를 방사선 작업 현장에서 제공하지는 못한다.

이러한 점을 보완하고 방사선 작업 현장에서 효과적인 개인의 방사선 피폭 관리를 위하여 능동형 선량계(active dosimeter)인 포켓 도시메타가 사용되어 왔으며, 전자 기술의 발달과 함께 방사선 검출기로서 GM 계수관을 이용한 알람 메타와 전자식 개인 선량계가 개발되어 사용되었으나 GM 계수관은 방사선 에너지와 측정 범위의 한계 등의 단점을 갖고 있다.

최근에는 PIN형 반도체 방사선 검출기를 이용한 전자식 개인 선량계와 피폭 선량 판독 시스템이 개발되어 사용되고 있다.

이 시스템은 즉각적인 선량 및 선량률 표시 기능, 경보 기능, 피폭 이력의 제공 및 선량 자료의 관리 효율성 등의 장점을 갖고 있어서 보조 선량계로 국내의 원자력 관련 시

설에서 널리 사용되고 있으며, 고가임에도 불구하고 전량 외국에서 수입하여 사용하고 있는 실정이다.

PIN형 반도체 방사선 검출기를 선량계로 응용하기 위한 기술은 많은 연구진에 의해 연구되어 왔다.

최근에는 국내에서도 PIN형 반도체 방사선 검출기를 사용한 전자식 개인 선량계가 연구 개발되어 사용되고 있다.

그러나 선량 평가를 위한 반도체 방사선 검출기에 대한 연구는 아직 미진한 상태에 있다.

따라서 이번 연구에서는 기존에 사용되고 있는 반도체 검출기보다 성능이 우수하고 가격이 저렴한 반도체 검출기를 제작하기 위하여 전산 모사를 통하여 새로운 제작 공정을 확립하여 PIN형 반도체 방사선 검출기를 제작하고, 개인 선량 측정을 위한 검출기로서의 특성을 조사하였다.

또한 이를 이용한 전자식 개인 선



〈그림 1〉 설계된 (a)실리콘 웨이퍼의 구조와 (b)PIN 반도체 방사선 검출기의 구조

량제를 제작하여 그 성능을 확인하였다.

개 념

P형 반도체와 N형 반도체를 접합시킨 반도체를 PN 반도체라고 하며, 접합면에는 공간 전하 영역이 형성된다.

PN 반도체에 역전압을 인가하면 공간 전하 영역이 넓어지게 되며, 방사선은 이 영역에 입사하여 전자-양공쌍을 생성시킨다.

생성된 전자는 양극으로 이끌려 이동하고 양공은 음극에 이끌려 이동함으로써 미세한 전류를 형성하게 된다. 이때 생성된 전류는 입사된 방사선의 양에 비례한다.

이 전류는 미세 신호 처리 전자 회로에서 펄스 형태의 전압 신호로 변환된다.

최종적으로 펄스의 숫자를 계수함으로써 방사선에 의한 피폭 방사선량이 정확하게 측정되는 것이다.

PN 반도체는 공간 전하 영역이 클수록 방사선에 잘 반응한다. 이러한 원리를 이용하여 PN 접합 사이에 고순도 반도체(Intrinsic Semiconductor)를 넣어 공간 전하 영역을 크게 한 것을 PIN 반도체라고 한다.

이 PIN 반도체 방사선 검출기의 제작 기술은 선진국에서 공개하지도 않고, 기술 이전도 기피하는 원천 기술이며, 방사선에 반응하여 피폭 선량을 정확하게 측정하는 전자식 개인 선량계에서 가장 핵심적인 부품이다.

PIN형 반도체 방사선 검출기의 특성을 결정하는 인자는 검출기가 역바이어스에서 동작될 때 발생하게 되는 잡음이다.

따라서 특성이 우수한 반도체 검출기를 제작하기 위해서는 잡음이 최소화되어야 한다.

잡음을 발생시키는 주요 원인은 누설 전류이다. 누설 전류는 반도체 소자에 존재하는 불순물인 수소 캐

리어에 의해서 증가한다.

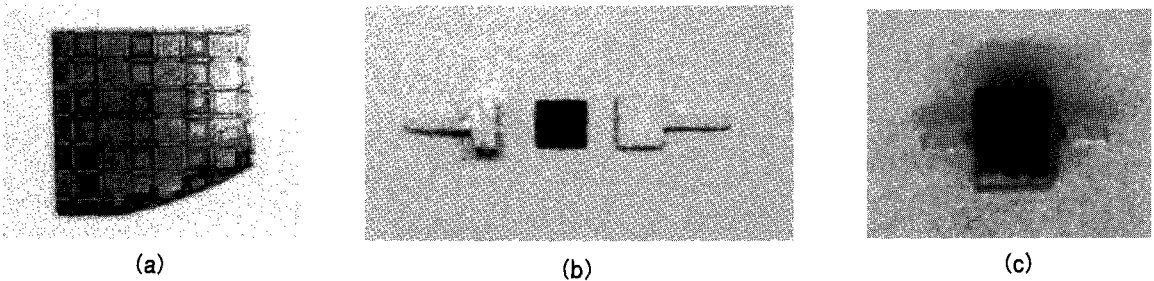
불순물은 제작 공정 과정에서 오염 물질의 침투에 의한 것이다. 이러한 불순물들은 실리콘의 에너지 밴드 사이에서 포획 준위를 형성하여 검출기에서 생성되는 캐리어의 이동도와 생성 수명을 감소시켜 검출기의 특성을 저하시킨다.

p+층면의 실리콘 기판과 SiO₂층 사이의 경계면에 열적으로 생성되는 oxide 캐리어에 의해서도 표면의 누설 전류가 증가된다.

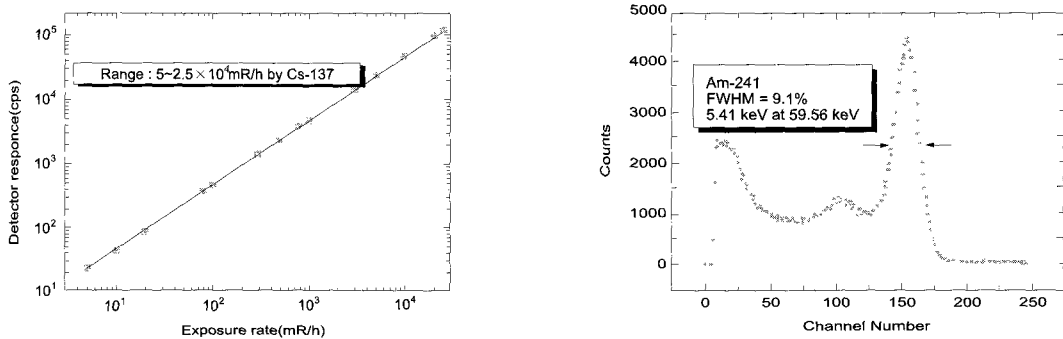
또한 p+층과 n+층을 형성하기 위한 이온 주입(ion implantation)에 의하여 생성되는 결함과 Si 기판에서 개별 소자로 분리하기 위하여 기판을 절단하는 과정에서 생성되는 결함에 의해서도 누설 전류가 크게 증가한다.

일반적으로 검출기는 누설 전류를 적게 하기 위하여 수 kΩ cm의 고순도 실리콘 웨이퍼 위에 제작되고 있는 것으로 알려져 있다.

이 방법은 누설 전류도 크고 제작



〈그림 2〉 PIN 반도체 방사선 검출기 제작 (a) 새로운 제작 공정으로 처리된 저순도 실리콘 웨이퍼 (b) 웨이퍼에서 분리된 실리콘(크기 : 3 x 3 x 0.25 mm)과 전극 (c) 제작 완료된 PIN 반도체 방사선 검출기(크기 5 x 5 x 3 mm)



〈그림 3〉 PIN 반도체 방사선 검출기의 (a)Cs-137에 의한 선형성 (b)Am-241에 의한 반응 스펙트럼

단가가 높다. 따라서 본 연구에서는 가격이 저렴한 저순도 실리콘 웨이퍼에서 PIN형 반도체 검출기를 설계 제작하였다.

반도체 공정 변수를 분석하는 프로그램인 TSUPREM-IV와 소자의 전기적 특성을 분석하는 프로그램인 DAVINCI를 이용하여 p+층의 폭(width)과 이온 주입(ion implant)되는 붕소의 농도 변화에 따른 누설 전류의 변화와 열처리 공정에서 SiO₂층에 의한 불순물의 차단 효과를 전산 모사하였다.

전산 모사 결과로부터 최적의 변수들과 검출기의 구조가 결정되었

으며, 검출기는 변수들을 반도체 집적 회로 공정에 적용하여 제작되었다.

제작 공정이 완료된 후 검출기를 기판에서 분리한 다음 동작 전압을 공급하기 위한 전극을 연결하고 설계된 에너지 보상 필터를 부착하여 최종 시제품을 완성하였다.

시제품 검출기는 전압과 온도에 따른 누설 전류가 측정되었으며, 또한 Cs-137 선원에 의한 감마선을 조사시켜 방사선 반응 특성을 시험하여 개인 선량 측정에 사용할 수 있음을 확인하였다.

PIN형 반도체 방사선 검출기는

누설 전류를 최소화하기 위해서는 반도체내에서 존재하는 불순물을 억제하고, 생성되는 캐리어(carrier)의 수명을 크게 해주어야 한다.

이를 실현하는 방법은 실리콘 기판상에 gettering 기술을 적용하여야 하며, 소자의 가장자리는 guard ring 구조를 갖도록 하여야 한다.

PIN형 반도체 방사선 검출기의 구조 설계

검출기의 구조를 설계하기 위하여 먼저 소자의 크기는 1 mm(L) × 1 mm(W) × 5 μm(H)로 임의로 설

정하고, 이에 따른 p+ 영역의 폭을 1 μm, 0.5 μm로 설정하여 소자 특성 분석 프로그램인 DAVINCI로 각각의 암전류(dark current)를 분석함으로써 p+ 영역의 크기에 따른 누설 전류 변화를 분석하였다.

또한 p+영역, i 영역과 n+영역의 도핑 농도는 각각 $3 \times 10^{20} \text{cm}^{-2}$, $1 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$, $1 \times 10^{21} \text{cm}^{-2}$ 로 설정하고 p+ 농도 변화에 따른 암전류를 측정하였다.

이 분석 결과를 토대로 하고 감지하고자 하는 에너지 대역의 방사선 특성, 특히 침투 깊이 등을 고려하여 소자의 구조를 3mm(L) × 3mm(W) × 250μm(H)로 수정하고, p+ 영역의 폭은 1μm, p+ 영역의 도핑 농도는 $3 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$, $4 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$, $3 \times 10^{16} \text{cm}^{-2}$ 로 변화시키며 특성을 분석하였다.

전산 모사 결과로부터 가장 우수한 특성을 나타내는 구조를 선정하였으며, 이에 따른 실리콘 기판은 400Ω cm, i영역의 두께는 250μm, p+영역 및 n+영역 농도는 $4 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$, p+영역의 금속 접합 크기는 0.5μm로 주요 공정 변수를 설정하였다.

또한 guard ring 구조의 효율성을 검출기의 절단면 가장자리에서의 누설 전류 분포의 관점에서 분석하여 검출기 구조를 설계하였다. <그림 1>

<표 1> PIN형 반도체 방사선 검출기의 전기적 특성 비교

전기적 특성	기존 PIN형 반도체 방사선 검출기	개발된 PIN형 반도체 방사선 검출기
동작 전압	3.6 V	3.6 V
3.6V에서의 누설 전류	< 3 nA	< 0.165 nA
3.6V, f=1 MHz에서의 정전 용량	23 pF	8.3s pF
최대 동작 전압	32 V	55 V
60℃에서의 누설 전류	55 nA	2 nA
20℃에서의 누설 전류	3800 nA	450 nA

PIN형 반도체 방사선 검출기의 제작 공정

전산 모사를 통하여 설계된 PIN 반도체 검출기의 구조와 공정 변수를 사용하여 검출기를 제작하였다.

제작에 사용된 실리콘 기판은 floating zone 기판으로서 두께 250μm, 직경 4inch, 저항 400Ω cm, 격자 방향이 <100>인 p형 기판을 사용하였다.

제작 공정은 먼저 기판의 앞면에 1μm의 산화막을 증착하고 LPCVD로 양면에 1μm의 다결정 실리콘(poly silicon)을 증착한 다음 뒤면에 gettering을 위하여 이온 주입(ion implantation)으로 균일하게 인(phosphorous ; 50keV, $4 \times 10^{-5} \text{atoms/cm}^{-2}$)을 도핑(doping)하여 n+영역을 형성하였으며, 전면의 다결정 실리콘을 제거하고 photolithography를 사용하여 p+ 영역과 guard ring 영역을 형성하기 위한 window를 열고 붕소

(boron ; 50keV, $4 \times 10^{15} \text{atoms/cm}^{-2}$)를 1 μm 증착하였다.

i영역내의 불순물을 제거하기 위하여 900℃에서 2hr 동안 열처리를 실행하였다. 후속 공정을 위하여 불순물 등으로 오염된 산화막을 모두 습식 식각을 사용하여 제거하였다.

검출기의 전극을 증착하기 위하여 다시 산화막을 증착하고 photolithography를 사용하여 금속 접합을 위한 window를 열고 sputter로 알루미늄을 0.1μm 증착하였다.

이 위에 다시 한 번 산화막을 증착하고 wire bonding용 pad를 형성하기 위한 window를 열어 검출기 제작 공정을 완료하였다.

전극 단자는 우선 구리 foil에 마스크를 사용하여 전극 단자의 패턴을 제작한 다음 은을 코팅하였으며, 특히 검출기의 옆면에 연결되는 전극 단자의 경우에는 핀과 전극 단자 패턴을 silver soldering을 사용하

여 접합하였다.

검출기와 wire bonding을 하여 전극 단자를 연결한 후 epoxy resin으로 passivation을 하고 검출기의 앞면에 에너지 필터인 1.1 mm의 알루미늄을 부착시키고 최종적으로 epoxy로 코팅하여 PIN 반도체 방사선 검출기를 제작하였다(그림 2).

제작 완료된 검출기의 전기적 특성은 p+층과 n+층에 역바이어스를 인가하고 guard ring에는 전압이 인가하지 않고 측정되었다.

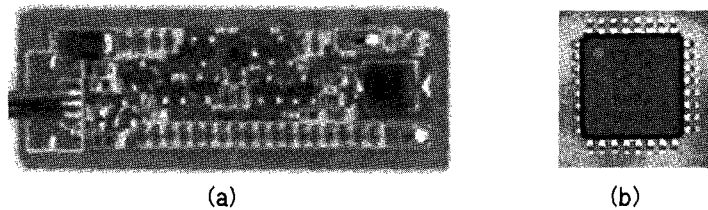
온도의 변화에 따른 검출기의 암전류는 60℃에서 2nA로 측정되었다.

누설 전류는 공핍층 두께 250 μ m, 역바이어스 3.6V에서 0.165 nA로 측정되었으며, 항복 전압(breakdown voltage)은 기존 검출기에서 보다 큰 55V인 것으로 나타났다.

따라서 제작된 검출기의 전기적 특성은 <표 1>과 같이 기존 검출기보다 우수한 것으로 나타났다.

개인 선량계의 검출기로서 사용가능성을 시험하기 위하여 Cs-137 선원을 이용하여 조사선량률 5 mR/h ~25 R/h의 범위로 조사하였다.

방사선 반응 특성은 양호한 직선성을 보였다. 또한 저에너지에 대한 방사선 반응 특성을 확인하기 위한 Am-241에 대한 검출기의 반응 스



<그림 4> 미세 신호 처리 전자 회로 (a)아날로그형 미세 신호 처리 전자 회로 (b)미세 신호 처리 IC 칩

펙트럼을 측정에서 에너지 59.56 keV에 대한 반치폭은 5.41 keV보다 적은 것으로 나타내어 에너지 분해능이 9.1%인 것으로 확인되었다(그림 3).

전자식 개인 선량계

전자식 개인 선량계의 전자 회로는 검출기의 신호를 처리하는 아날로그 부분과 신호를 계수하고 선량계를 동작시키는 디지털 부분으로 나누어 설계 제작하였다.

그 구성은 감마 방사선에 의해 전기적 신호를 발생하는 PIN형 반도체 검출기, 검출기에서 출력되는 신호의 펄스 형성 및 신호를 증폭하는 전치 증폭기와 주증폭기로 구성되는 미세 신호 처리 전자 회로와 측정 자료를 나타내는 LCD 표시 장치, 사용자에게 경보를 주는 경보장치, 판독기와의 통신을 위한 적외선 통신 장치, 직류 전원 장치, 선량계를 교정할 수 있고 독립적으로 동작하도록 변수를 설정하기 위한

Keypad, 선량계를 제어하는 마이크로 프로세서 및 메모리 장치로 구성된다.

방사선에 의한 PIN 반도체 방사선 검출기에서 생성되는 수 nA의 전류 신호를 처리하는 미세 신호 처리 전자 회로는 방사선 계측 회로에서 사용되는 전하 감도형(charge sensitive type)으로서 hybrid형 전치 증폭기와 IC칩을 제작하였다.

기존의 미세 신호 처리 기술은 방사선에 의한 반응 감도가 낮아 저준위 방사선에서 정확도가 낮다. 정확도를 향상하기 위하여 방사선에 의해 생성된 전압 펄스의 폭을 얼마나 적게 하느냐에 달려 있다. 따라서 본 연구에서는 전압 펄스폭을 12 마이크로초 이하가 되도록 미세 신호 처리 기술을 개발함으로써 방사선 반응 감도를 기존 기술보다 27%이상 향상시키게 되었다(그림 4).

마이크로프로세서는 16 bits RISC 구조를 갖으며, 24kbyte×256byte의 Flash 프로그램 메모리와 1 kbyte의 데이터 메모리를

갖고 있으며, 160 segments LCD를 제어할 수 있는 Texas instrument사의 MSP430F436IPZ chip을 사용하여 디지털 부분의 전자 회로 기판을 제작하였으며, 최종적으로 전자식 개인 선량계를 개발하였다(그림 5).

전자식 개인 선량계는 방사선 작업 환경에서 개인이 받는 선량을 정확하게 측정하여야 하며, 또한 주변의 환경, 즉 온도·충격·전자기파 등에 의한 영향을 받지 않고 안정하게 동작하여야 한다.

이러한 성능을 확인하기 위하여 방사선 반응 특성 시험은 한국원자력연구소에서 수행하고, 기계적 성능 시험과 주변 환경 조건에 따른 성능 시험은 산업기술시험원에 의뢰하여 수행하였다.

성능 시험 결과 피폭 방사선량에 대한 선량계의 측정 오차는 8% 이하이며, 기계적 성능 검사와 주변 환경 조건에 따른 성능 시험에서도 국제 기준을 만족하는 것으로 확인되었다.

향후 전망

본 연구는 전자식 개인 선량계를 완전히 국산화하였다는 점에서 방사선 작업 종사자의 안전을 순수한 국내 기술로 지킬 수 있게 되었다는데 커다란 의미가 있으며, 방사선 방호 분야에서 기술 선진화를 이루

고 선진국과의 경쟁력을 확보할 수 있게 되었다.

또한 국내 방사선을 이용하는 산업에 종사하는 방사선 작업 종사자의 건강 보호를 위하여 전량 수입하여 사용하고 있는 전자식 개인 선량계의 완전한 국산화로 연간 2천만 달러의 수입 대체 효과와 수출 창출 효과가 기대된다.

방사선을 이용하는 기술은 환자를 진단하거나 치료하는 의료 분야, 생산된 제품의 품질을 확인하는 공업 분야, 제조 식품의 안전성을 확인하는 식품 분야 등에서 널리 활용되고 있다. 방사선을 이용하는 기술 중의 원천 기술은 방사선 검출기의 제작 기술이며 부가가치가 높은 기술이다.

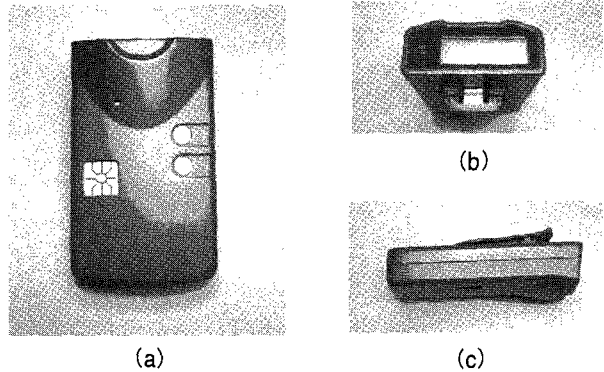
초기의 방사선 검출기는 가스를 이용한 검출기를 사용해 오고 있었으나 최근 선진국에서는 성능이 우수한 반도체 방사선 검출기 등의 첨

단 기술을 개발하고 있는 상황이다.

향후 국내에서도 엑스선과 감마선에 의한 피폭 선량뿐만 아니라 베타선과 중성자선에 의한 피폭 선량을 측정할 수 있는 고기능 고품질의 전자식 개인 선량계를 개발하기 위하여는 각종 반도체 방사선 검출기의 연구 개발에 더 많은 투자가 필요할 것으로 생각된다.

국내의 독자적인 기술 개발로 선진국에서 기술 이전이나 공개를 기피하는 첨단 반도체 방사선 검출기의 설계 제작 기술을 바탕으로 향후 의료 분야와 산업 분야에서 수입하여 사용되고 있는 첨단 방사선 영상 검출기의 국산화 노력에도 크게 기여할 수 있을 것이다.

본 연구 개발은 과학기술부 원자력 실용화 사업의 후원으로 (주)에스에프테크놀로지(대표 채현식 박사)와 공동으로 수행한 것으로 이에 감사드립니다. ☎



〈그림 5〉 제작 완료된 전자식 개인 선량계(크기 : 84 x 48 x 24 cm)
(a)앞면 (b)위면 (c)옆면