

Sensitivity Variations with pre-irradiation dose to P-type Semiconductor for radiation dosimetry

최 태진, 김 옥배

계명대학교 의과대학 치료방사선학교실

초 록

반도체검출기는 소형 및 방사선에 고감도특성을 갖고 있으나, 고에너지 광자선 및 전자선등의 조사에 의해 손상을 입어 감도저하를 초래하게 되며 계속시 선량재현성을 기대하기어려워진다.

실험대상은 P-형 실리콘 반도체검출기이며 선량을, 검출방향 및 온도 변화에 따른 선량특성이 조사되었고, 선량재현성을 높이기 위해 18 MeV 고에너지전자선으로 3KGy까지 전처리조사하고 광자선 및 전자선의 전처리조사선량에 대한 감도특성변화를 얻었다.

전처리조사가 작은 0.5KGy인 경우, 저선량율과 고선량율하의 단위선량당 감도는 약 35%의 차이를 보였으며, 3KGy인 경우 약 20%의 차이를 보여 전처리선량이 클 수록 감도차는 작아짐을 알 수 있다.

실리콘 반도체검출기의 검출방향성은 임의의 조사각에서 최저치와 최대치의 선량차가 약 13%를 나타내었으며, 검출기의 온도의존성은 4도 에서 35도 까지 거의 선형성을 보였다.

1. 서 론

반도체 검출기는 계측용적이 수 μm^2 정도이며, 선량계측에 많이 이용되고 있는 공기전리함의 용적에 비해 매우 소형으로 공간분해능이 우수하며 방사선감도가 공기전리함에 비해 약 1000~18000배 이상 높은 것으로 알려져 고에너지 광자선 및 전자선의 선량계측에 많이 이용되고 있으며, 소형조사면의 출력선량 및 심부선량 결정에 유효한 검출기이다.

Rinker 는 전자선의 심부선량 계측에서 실리콘 반도체 검출기로 측정된 전리곡선으로 부터 직접 심부선량곡선으로 사용한 바 있으나, Dikson 과 Ekstrand, 또 Grusell 과 Rinker 등에 의하면 실리콘 반도체 검출기에 영향을 주는 변수들이 많이 있음을 발표한 바 있다.^{1,2)}

특히 반도체 검출기에 의한 비교적 저에너지 광자선의 심부선량곡선에서 깊은 지점의 선량이 과대평가되었으며, 큰 조사면의 선량 스케치에서 왜곡이 나타남을 보고한 바 있으며 이들은 광자선 에너지가 200 KeV 이하에서는 물에 비해 실리콘의 광전효과 단면적이 증가하기 때문으로 생각하였다.³⁾ 반도체검출기는 검출기의 구조와 모양 및 고원자번호물질의 접속reed 와 diode 형태에 따라 선량 특성이 다르게 나타날 수 있으므로, 본 연구에서는 P-형실리콘반도체 (Terathos)검출기의 방사선 방향 의존성, 검출기 온도 및 선량률에 대한 감도변화 등을 조사하고 양호한 선량재현성을 얻고자 한다.

2. 방 법

P-형 실리콘반도체검출기는 다이오드의 p 와 n 층 사이는 전위차가 약 0.7 V 로 수 마이

크로미터의 공핍층이 생성된다. 방사선이 조사되면 전자-정공쌍이 다이오드 내에 생성되고, 공핍층내 생성된 많은 수의 전하캐리어로 인해 전류신호를 얻게 된다.

반도체검출기는 하전입자에 의한 손상을 입게 되므로 전자-정공쌍의 생성 및 전하캐리어의 감소로 감도가 저하된다. 본 연구에서는 검출부의 크기가 $0.25 \times 0.25 \times 0.04$ mm 인 p-형 실리콘검출기 (Silicon Semiconductor) 에 에너지 18 MeV 전자선으로 전처리 조사하여 전처리 조사선량에 따른 감도변화와 방향 의존성을 조사하였다.

측정재현성은 일정량의 방사선을 조사했을 때 측정치의 최대 및 최소선량의 차이를 구하여 측정치의 재현성을 얻었으며, 본 실험에서는 차이가 거의 무시할 수 있는 정도를 얻기위한 전처리조사량을 결정하였으며, 선량안정 및 재현성에 영향을 미치는 선량율, 조사방향 및 온도변화에 의한 감도변화를 조사하였다.

반도체검출기의 전처리조사에 이용된 선원은 선형가속기(Mevatron KD8067, Siemens) 의 전자선을 이용하였으며, 검출기에 대량의 조사선량을 주기 위해 검출기는 전자선 중심선상에 전자선 표적으로부터 22cm되는 지점에 위치하여 반도체소자에 0.5K Gy를 조사한후 전자선의 에너지에 따른 선량감도관계와 선량율의 변화에 대한 감도변화를 조사하였으며, 3K Gy까지 조사하여 검출안정성을 얻고자 하였다.

검출기의 선량율의존성은 선원과 검출기의 거리를 변화시켜 최소선량율이 최대선량율의 5% 까지 출력할 수 있는 거리를 정하여 선량률의 변화와 검출기 감도의 변화를 조사하였다.

검출기의 방향의존성은 선형가속기의 회전중심에 광자선조사면 ($10 \times 10 \text{cm}^2$)의 중앙에 검출기를 고정하고 선형가속기를 회전조사하여 조사방향에 대한 선량감도를 조사하였다.

반도체의 전하이동은 온도에 따라 영향을 받게 되므로 방사선감도의 차이를 예상할 수 있으며, 수조팬텀의 물온도는 4계절을 통해 섭씨 약 10~30도 범위에 있으므로, 본연구에서는 Fig. 1 과 같은 소형수조팬텀을 단열처리하여 검출기와 물의 온도가 평형을 이루게하여 4도에서 35도까지 온도를 변화시키고 6MV광자선을 측방 조사하여 검출기의 온도변화에 따른 방사선감도를 비교하였으며 선형가속기의 출력선량율의 변화를 우려하여 일차선속에 영향을 미치지 않는 후방에 공기전리함을 설치하여 선량률변화에 대한 보정이 가능하도록 고안하였다.

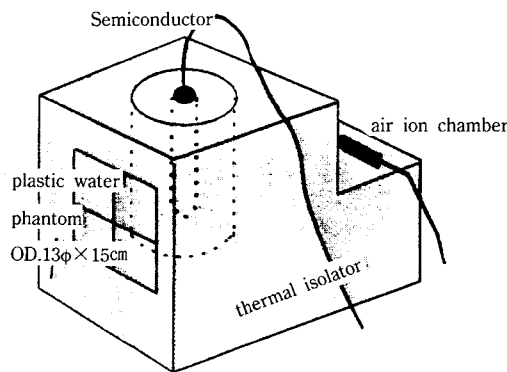


Fig.1 Schematic diagram showing the thermal isolator for measuring a sensitivity of semiconductor

3. 결 과

반도체검출기의 방사선감도는 조사선량을 300 cGy/min 에서 전처리선량이 없는 경우 평균66.8 nC/cGy 를 보였으며, 이 감도는 공기전리함 (IC-10, 0.14ml)의 감도에 비해 약1670 배 높게 나타났다. 반도체검출기가 방사선에 대한 감도는 높았으나 동일 선량률과측정위치에서 약 1~3.7 % 의 검출오차를 보였다.

반도체는 하전입자에 의한 손상을 입게 되어 방사선계측중 검출값의 변화를 초래하게 되므로, 본 연구에서는 반도체검출부에 18 MeV 전자선으로 전처리조사하여 감도를 둔화시켜 계측시 안정된 선량재현성을 얻을 수 있었다.

반도체검출기에 대해 선량율에 따른 감도를 조사하기 위하여, 조사선량률의 변화는 SDD(source-detector distance) 100cm에서 분당 300cGy 출력모드를 선택하고 검출기를 80cm에서 300cm까지 이동하여 선량율이 470 cGy/min 에서 33 cGy/min 까지 임의의 선량율에서 일정선량을 조사하여 검출기의 단위선량당 감도를 Fig.2 와 같은 결과를 얻었다.

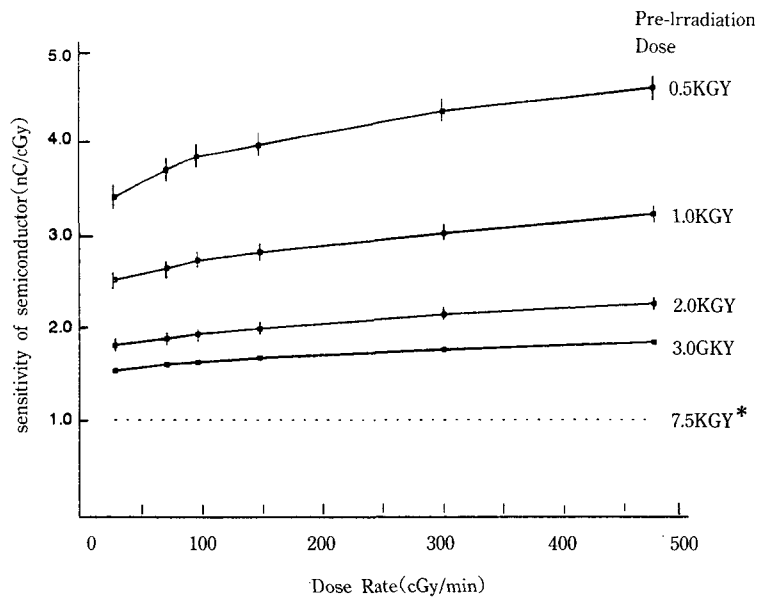


Fig.2 Sensitivity variation as a function of dose rate in a given pre-irradiation dose with the 18 MeV electrons for p-type semiconductor detector

Fig. 2 에서 반도체검출기의 선량감도는 전처리조사선량이 증가할 수록 저선량률과 고선량율의 선량감도 차이가 적어지는 경향을 알 수 있었다.

Fig.3 은 전처리 선량에 따른 선량율 감도비로 저선량율 (33cGy/min) 에서 일정선량에 대한 단위선량당 감도에 대한 고선량율 (470cGy/min) 의 단위선량당 감도비를 나타내며, 전처리선량이 0.5KGY인 경우 1.348, 1KGY에서 1.282, 2KGY에서 1.248과 3KGY에서 1.201를 보여 전처리선량이 높을 수록 1에 가까운 값을 보였으며, 실험치로 부터 선량율감도비 S는

Sensitivity Variations with pre-irradiation dose to P-type Semi conductor for radiation dosimetry

$$S = \alpha e^{-K/\gamma} \quad (1)$$

와 같이 Fitting 함수를 구하였다.

여기서 S 는 저선량의 감도에 대한 저선량의 감도 비, α , γ 는 최적화상수로 각각 1.3571012, 24.718998 이며, K는 전처리선량을 나타내며 감도비의 최대오차는 0.021을 보였다.

S가 1이면 감도가 항상 일정함을 나타내며, 이 때 전처리선량 K는 약 7.5K Gy 를 얻을수 있다.

전처리선량에 대한 단위선량당 감도의 변화는 초기 전처리선량이 비교적 적은 영역에서 심한 감도 저하를 보였다.

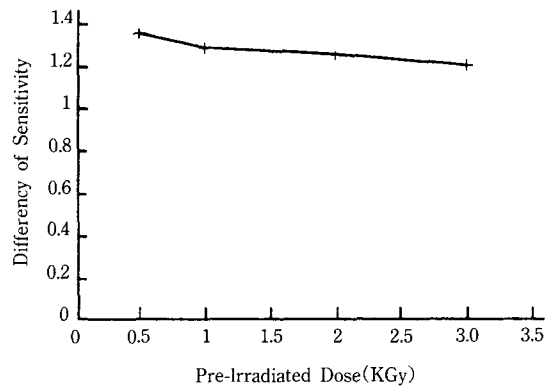


Fig.3 Differeny of sensitivity as a function of a pre-irradiation dose with the18 MeV electrons

전자선에너지 4MeV에서 15MeV의 일정선량에 대한 반도체검출기의 선량감도는 Fig.4와 같이 나타났다.

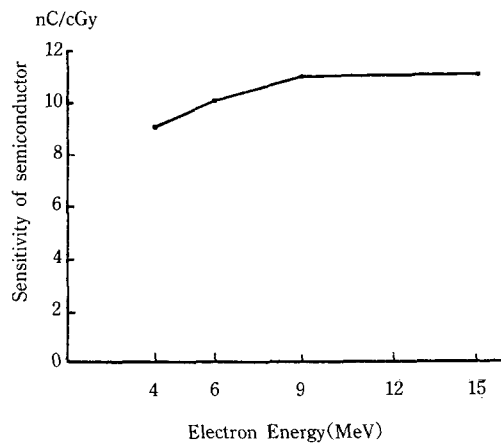


Fig.4 Sensitivity variation of semiconductor in a different electron energy

즉 15MeV에 대해 4MeV의 감도는 약 82%를 보인 바, 심부선량율의 측정에서 깊은 부위에 도달하는 전자선의 에너지는 깊이에 따라 에너지감쇄를 일으키므로 심부선량백분을 평가시 에너지 의존성에 대한 보정이 필요하다.

한편, Fig.4 에 의하면 동일 전자선조사면에서 깊이에 따른 에너지 변화로 저에너지 전자선에서 실제 심부선량백분율보다 낮게 평가되고 있음을 알 수 있었다.

실리콘반도체의 조사선량방향에 따른 감도의 변화를 조사한 결과 Fig.5 와 같이 방향성을 보였으며 최소치와 최대치간 약 13%의 선량감도 차이가 있었다.

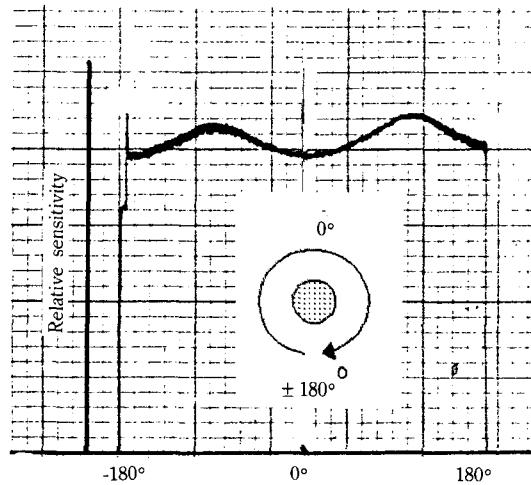


Fig.5 Dependency of sensitivity against to the irradiation angle

선형가속기의 Inplane 콜리메이터는 개방하고 Cross-plane의 콜리메이터를 개폐하여 0.1mm 개방되게 하고 반도체검출기를 주사한결과 강도분포는 거의 Dirac 파형을 보였으며 FWHM 이 약 5.0mm 였다. 이것은 반도체검출기의 검출영역을 나타내며 소형조사면의 출력선량결정은 선속중심과 검출기의 중앙이 잘 일치한 가운데서 얻어져야 정확한 선량평가를 할 수 있음을 보여주고 있다.

본 실험에서 검출부 중앙은 좁은 조사면에서 검출기를 3축 방향 (X, Y, Z 축) 으로 연속이동하여 가장 선량강도가 높은 위치로 정하여 졌다.

반도체는 검출부의 온도에 따라 전하 캐리어 이동에 변화를 주며 특히 열전도계에 반도체를 이용하고 있는 점에 착안하여 Fig.1 의 장치를 고안하여 온도 변화에 대한 선량감도를 측정 하였다.^{3,4)}

수조펜텀의 온도를 섭씨 5도에서 35도 까지 5도씩 올려 반도체검출기의 온도변화에 의한 방사선 검출감도를 비교한 결과 Fig.6 과 같이 온도증가에 따라 단위선량당 감도는 증가함을 보였다. 또 온도변화에 따른 반도체검출기의 감도변화는 3KGy 의 전처리조사가 이루어진 검출기에서도 섭씨 5 도에서 얻어진 감도에 비해 35도에서 나타난 감도는 약 39%의 감도증가를 보였으며, 실온 20도의 선량감도기준으로 15~25도 사이에서 ± 3%의 감도변화를 보였다.

Sensitivity Variations with pre-irradiation dose to P-type Semi conductor for radiation dosimetry

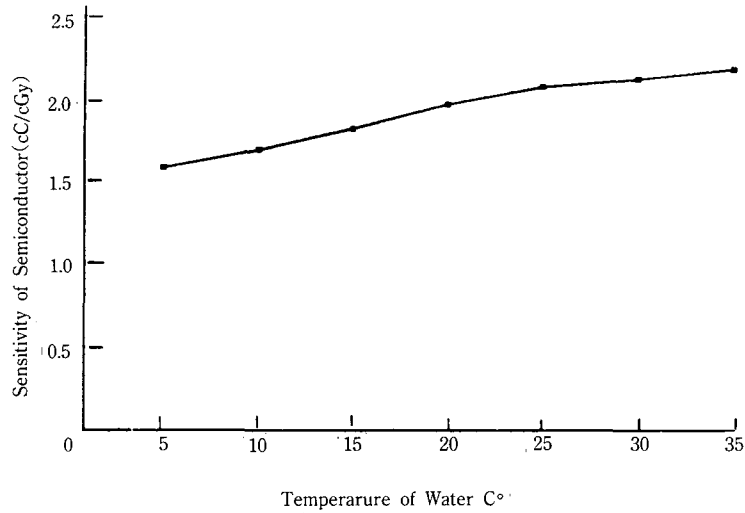


Fig.6 Sensitivity of semiconductor as a function of temperature of detector

Fig.6 에서 보는 바와 같이 검출기의 온도변화에 따른 선량감도는 오차 범위내에서 선형적으로 변화를 보임을 알 수 있었으며, 이 결과는 방사선장에서 검출된 선량값은 온도변화에 따라 교정이 필요함을 의미한다.

다이오드식에 의하면 검출기의 온도변화에 대한 다이오드전류 I 는 다음과 같이 주어진다.⁵⁾

$$I = b \exp \left(- \frac{E_g - qV}{kT} \right) \quad (2)$$

여기서 V는 다이오드전압, T는 절대온도, K는 볼츠만상수, q는 전자의 전하, E_g는 밴드갭이며 b는 실험상수이다.

식 2 에서 $V \gg kT$ 이면 다이오드전류는 증가함을 알 수 있다.

검출선량의 보정은 교정방사선장의 온도 T₀, 방사선장의 온도 T 에서 얻어진 선량을 R(T) 라 하면 실험에서 구한 온도변화에 따른 감도 함수 F(T) 와 F(T₀) 로 부터 온도 보정된 선량 D (T) 를 다음과 같이

$$D(T) = R(T) F(T) / F(T_0) \quad (3)$$

구할 수 있다.

4. 고 찰

반도체검출기는 검출용적의 크기가 수 μm³ 정도로 소형이나 방사선에 대해 고감도를 나타

내므로 방사선계측에 많이 이용되고 있다.⁶⁾ 그러나 선량평가에 있어서 반도체 도핑의 두께와 크기 및 모양에 따라 방사선감도가 매우 다르므로 표준선량계로써는 이용되지 못하나 상대선량측정에는 유리한 점이 많다. 특히 공기전리함은 벽물질의 특성과 용적 및 공기이온화 에너지 등이 잘 알려져 있고 세계 공통이므로 비교표준선량계로 이용되고 있으나, 2차전자의 전자평형을 전체로 한 선량평가이므로 수 mm 의 조사면과 같이 소조사면에 대한 출력선량계측에 많은 오차를 수반하게 되어 정확한 선량을 기대할 수 없다.

이에 비해 반도체검출기는 공기전리함을 충분히 포함할 수 있는 방사선장에서 보정계수를 구하여 공기전리함으로 측정이 어려운 방사선장에 이용될 수 있다. 그러나 반도체검출기는 선량율의존성, 방향의존성, 온도특성 등이 크게 나타났으며, 선량율의존성은 심부선량백분율과 거리변화에 따른 선량평가, 조사면 내의 선량스캐치 등 출력선량율의 변화가 큰 경우 선량계측에 오차가 크게 나타날 수 있음을 말해준다.

본 실험에서는 반도체검출기의 선량감도가 다소 감쇄하더라도 선량재현성을 높이기 위하여 18MeV전자선으로 0.5씩 조사하여 3.0K Gy까지 전처리 조사하였으며, 선량재현성은 매우 높았다.

본 연구의 반도체검출기는 방향성이 있어 임의의 각도에서 상대적으로 약 13 % 선량차를 보여 선량대칭성을 잃고 있었으며, 이와같이 등방성을 잃게 되면 선량스캐치에서 조사면의 크기 결정에 오차를 불러 일으킬 수 있다. 특히 검출등방성의 유지가 필요한 산란선 평가에는 검출기의 선택에 유의해야 될 줄 믿는다. 또한 선량 등방성의 결여는 방사선장에서 설치된 반도체검출기의 방향에 따라 판독선량이 달라지게 되므로 매 측정시 검출기의 위치가 일치되어야 함을 보여주고 있다. 실험에 이용된 반도체검출기는 주위 온도증가에 따라 감도의 증가를 보였다. 실험에 적용한 최저온도 4도와 최고온도 35도의 수조벤텀의 온도는 실험계측또는 임상에서 흔히 이용될 수 있는 물의 온도이다. 따라서 방사선계측시 검출기의 온도유지에 한층 더 유의할 필요가 있다.

반도체검출기를 이용한 출력선량결정은 표준선량계와 비교한 상대선량에 국한되어야 하며, 등방성, 온도교정, 선량률의 변화 등에 대한 감도변화에 대한 교정이 이루어져 한다.

Rinker 등¹⁾ 은 실리콘반도체검출기를 이용한 저에너지광자선의 심부선량이 실리콘의 광전 효과에 의해 과대평가되고 있다고 발표한 바 있다. 본 연구에서는 전처리선량이 없는 경우 고선량율에서 감도가 높게 나타났으며, 감도교정이 없는 경우 최대선량점에 비해 상대적으로 낮은 선량율을 갖는 심부의 선량율은 낮게 평가되어지므로 선량율의 차이에 의한 감도변화는 심부의 선량백분율 측정시에도 보정이 필요함을 의미한다.

한편 전자선에너지가 높을 수록 반도체검출기의 선량감도는 증가함을 보인 바, Rinker 등의 P-형 반도체검출기의 선량감도가 에너지가 높을 수록 감도가 높은 결과를 발표한 것과 잘 일치됨을 알 수 있었다.¹⁾

반도체검출기를 이용하여 전자선의 심부선량백분율을 평가하는 경우, 검출깊이에 따라 에너지 감쇄를 보이는 전자선의 심부선량백분율은 에너지 의존성을 고려하여 평가되어야 하며, 반도체검출기가 적합한 지 또는 기준선량계와 비교 검토가 필요할 것으로 생각된다.

5. 결 론

반도체선량검출기는 공기이온함에 소형이며 감도가 높아 소형조사면의 출력선량과 심부선량평가에 편리한 점이 있으나 선량평가지 방사선의 에너지, 선량률범위, 검출부의 온도 및 방

향성에 대해 각각의 교정이 필요함을 알 수 있었다.

전자선 18MeV에 의한 3KGy의 전처리조사를 한 P형 반도체선량검출기의 감도는 광자선 6 MV광자선의 200cGy/min 선량률에서 약 1/500 로 감소되었으나 선량율에 대한 감도변화가 작아 선량재현성이 매우 향상됨을 알 수 있었다.

본실험에 이용된 P형 실리콘 검출기는 전처리조사량이 0.5KGy와 같이 작은 경우, 저선량율 (33cGy/min)에서 단위선량당 감도는 고선량율(470cGy)의 감도에 비해 약 35% 낮게 나타났으며 전처리선량이 클 수록 감도차는 현저하게 감소함을 알 수 있었다.

방향의존성은 조사방향에 따라 최대 13%의 선량오차를 보였으며, 선량재현성을 위해서는 항상 일정한 위치에 조사되어야 함을 알 수 있었다.

Reference

1. RL Dixon, KE Ekstrand : Au and Pt doped radiation resistant silicon diode detectors : Med. Phys., 13, 608 (1986)
2. G Rinker, E Grusell : General specifications for silicon semiconductors for use in radiation dosimetry : Phys. Med. Biol., 32, 1109-1117 (1987)
3. SR Domen : Absorbed dose water calorimeter : Med. Phys., 7,157 (1980)
4. FM Khan : The physics of radiation therapy : pp 144 (1984)
5. E Grusell, G Rinker : Evaluation of temperature effects in p-type silicon detectors : Phys. Med. Biol., 31, 527-533 (1986)
6. 강위생 등 : 광자선 소조사면의 선량 측정에 관한 연구 : 의학물리 제5권 2호, 57-67 (1994)

최태진, 김옥배

Sensitivity variations with pre-irradiation dose to P-typesemiconductor for radiation dosimetry

Tae Jin Choi,Ph.D., Ok Bae Kim,M.D.

Dept. of Therapeutic Radiology, College of Medicine, Keimyung University

Taegu 700-310 Korea.

Abstract

The semiconductor detector has a high sensitive to radiation and a small volume. It has been frequently used in high energy photon and electron beamdosimetry.

However, Semiconductor detector are subject to radiation damage in high energy radiation beam which reduces the sensitivity and creat a large discrepancy.

In this experiments, P-type semiconductor was irradiated to 18 MeV electron beam with pre-irradiation for reducing the sensitivity for high reproducibility and investigated the dose characteristics against the dose rate variations.

The sensitivity per unit dose in small dose rate showed a 35 % large different to a large dose rate with pre-irradiation dose for 0.5 KGy and 20%for 3 KGyin this study.

The silicon detector has showed a large dependency of beam direction with 13% discrepancy and a linear sensitive as increased temperature.