

'99 춘계학술발표대회 논문집
한국원자력학회

PN 접합 Si 다이오드를 이용한 전리방사선 측정에 관한 연구

A Study on Measurement of Ionization Radiation Using
a PN Junction Si Diode

김종수 · 서인원 · 신장수 · 이 환*

한국원자력연구소 대전광역시 유성구 덕진동 150
*대전산업대학교 대전광역시 유성구 덕명동 산 16-1

요 약

소형의 PN 접합 실리콘 다이오드를 이용 전리 방사선 측정을 위하여 전치증폭기 설계 및 시스템 성능시험을 수행하였다. 전치 증폭기는 전하감응 연산 증폭기, 클리핑 회로, 증폭기 그리고 low-pass filter 회로로 구성되었다. 전치증폭기의 최종 출력 단에서 잡음과 방사선에 의하여 발생된 펄스 진폭은 각각 50mV와 200mV 정도로 현저한 차이를 보였다. 성능 시험은 선형성, 에너지 의존성 및 상대 평균편차를 평가하였다. 선형성은 2% 이내를 그리고 $^{137}\text{Cs}(662\text{keV})$ 를 기준으로 상대적인 에너지 의존성은 54.2keV에서 1.82, 118keV에서 1.23을 나타내었다. 또한 상대 평균편차는 방사선량을(2 mR/h)에서 최고 2.7%로 평가되었고 선량이 증가함에 따라 감소 경향을 나타내었다.

Abstract

For a detection of ionizing radiation using a small size PN junction Si diode, pre-amplifier design and system performance test were carried out. The pre-amplifier consists of charge sensitive operational-amplifier, clipping circuit, amplifier, and low-pass filter. Noise level and pulse amplitude created by ionizing radiation at the final output of the pre-amplifier were approximately 50mV and 200mV, respectively, and those electric signals showed the outstanding difference. As a performance test, linearity, energy dependence and relative average deviation were evaluated. The results showed that the linearity was within 2 percent and the relative energy dependence was 1.82 at the 54.2 keV and 1.23 at the 118 keV under the reference of $^{137}\text{Cs}(662\text{ keV})$. Also the relative average deviation was evaluated 2.7 percent in the maximum at the radiation dose rate(2 mR/h), but it showed decreasing trend as increasing radiation intensity.

1. 서 론

원자력 시설 및 이와 관련된 환경에서 방사선/능의 측정을 위하여 여러 형태의 방사성 검출기들이 개발되어 왔다. 반도체 검출기는 전리작용으로 동작되는 반도체 소자로서 전자 반송자(charge carrier)가 가스형 계수기는 전자와 이온인 반면에 이것은 전자와 정공이다. 현재 범용의 반도체 검출기는 실리콘(Si)과 게르마늄(Ge)을 사용하고 있다. 이들은 다른 방사선 측정기와 비교하여 에너지 분해능이 현저히 우수하며, 넓은 에너지 범위에 걸쳐 선형 응답(펄스폭과 대 입자에너지)이 좋고, 제조에 사용된 고체 물질의 높은 밀도 때문에 단위 크기에 우수한 효율과 빠른 펄스 상승시간을 갖는다[1]. 또한 소형의 반도체 소자는 수십 볼트 이내의 바이어스 전압에서 동작되므로 소형이 가능하다.

소형의 PN 접합 Si 다이오드를 사용하여 전리 방사선을 검출하기 위해서는 개개의 검출기의 형태 및 특성에 따라 방사선과의 상호작용으로 발생하는 전기적 신호는 물론 센서 자체의 임피던스가 다르고, 또한 검출기 자체와 전자 부품 및 주변의 환경에 의한 저주파 수 및 고주파 성분이 신호에 영향을 미치기 때문에 전치증폭기의 설계·제작은 필수적인 요건이다. 전치증폭기 최종 출력에 펄스카운터를 연결하여 방사선 강도 및 에너지의 변화에 따른 검출기의 성능 시험을 수행하였다.

2. PN 접합 반도체 검출기

순수 반도체(4가 원소)의 전기적 성질은 도너(donor:5가 원소)나 액셉터(acceptor:3가 원소)와 같은 불순물을 첨가하면 변화한다. 도너 원소가 첨가된 반도체를 n-형, 액셉터 원소를 첨가한 반도체를 p-형 반도체라 한다. 이들은 각각 반도체 내에서 과잉의 전자와 정공을 생성하여 전도성을 증가시킨다. 이들은 어떠한 chemical bond에도 속하지 않게 되고 매우 약하게 결합되어 있어서 매우 낮은 양의 에너지(5eV)에 의하여도 자유롭게 전도대로 이동한다[2]. p-형과 n-형을 서로 접합하면, 그림 1에 나타낸 바와 같이 전자와 정공은 각각 높은 밀도 영역에서 낮은 밀도 영역으로 확산하는데 외부로부터의 전압 인가에 의한 전계(electric field)에 의하여 전자는 n-형에서 p-형으로, 정공은 이와 반대 방향으로 이동한다. n-형 반도체에 대한 에너지 band 모델의 관점에서 보면, 과잉 전자는 전도대에 매우 밀접한 위치의 에너지 상태에 속하게 된다. 근본적으로 p-형과 n-형은 전기적 중성이었지만, 확산의 결과로 n-형 지역은 정(+) 전하가 되며, 반면에 p-형 지역은 부(-) 전하를 갖게 된다. 확산 후, 평형 상태가 이루어지게 되면 두 지역 사이에 대략 0.5V의 전위장벽에 의한 전위차(V_1)가 존재하게 된다. 또한 외부로부터 n-형에 정(+) 그리고 p-형에 부(-) 전압 (V_2)를 인가하면 공핍층 깊이 d 는 $d = \sqrt{\mu_p \rho (V_1 + V_2)} \sim 0.5\sqrt{\rho V_r}$ 이며, 이것은 대략 수 μm 정도이다. 여기서, ρ 는 반도체 물질의 저항성($\Omega\cdot\text{cm}$), V_r 은 $V_1 + V_2$ 로서 역 바이어스 전압이다. 실질적으로 PN 접합 Si 반도체는 역 바이어스 상태에서 하전입자의 검출기로 사용된다[2]. 감응영역인 공핍층은 반도체 소자의 표면에 매우 근접되어 있으며, 이의 깊이 d 는 역바이어스 전압에 의존한다. 방사선 에너지가 이 접합에 통과함으로써 전자-정공 쌍을 생성하며, 전자는 정공 보다 대략 2-3 배 빠르게 이동하고 보통 이들을 수집하는데 걸리는 시간은 10^{-7}s 정도이다.

역바이어스 전압에 의한 PN 접합의 공핍층 영역(캐패시턴스 : C)은 검출기의 에너지 분해능에 영향을 미치고 다음과 같이 역바이어스 전압과 관련함을 알 수 있다[2,3].

$$C = \epsilon \frac{A}{4\pi d} \approx \frac{1}{\sqrt{V_r}} \dots \dots \dots (1)$$

여기서, ϵ : 물질의 유전체 상수
 A : 검출기의 표면적
 d : 공핍층 깊이이다.

본 연구에서는 n 층의 두께가 1 μm 정도의 boron이 확산되어 있는 PN 접합 다이오드를 사용하였고, 표 1에는 이의 특성을 나타내었다.

표 1. PN 접합 Si 다이오드 검출기 특성

Effective Area (mm)	Spectral Response Range λ (nm)	Photo Sensitivity (A/W)				Short Circuit Current 100 lx (μA)	Dark Current (nA)		Reverse Voltage V_r Max (V)	Power Dissipation P Max (mW)	Operating Temp. ($^{\circ}\text{C}$)
		λ_p	660nm	780nm	830nm		Typ.	Max.			
100 (10x10)	320 to 1060	0.56	0.23	0.28	0.50	90	1.5	5	50	100	-20 to 60

3. 전치증폭기

반도체 검출기에 방사선 에너지가 입사하면 반도체의 크기 및 구성 성분에 따라 다르지만 대략 $\sim 10^{-12} \sim 10^{-6}\text{A}$ 정도의 전류가 발생한다. 이것은 역바이어스 전압에 의한 검출기 자체의 캐패시턴스(capacitance) C_D 와 shunt 저항 R_D 에 의하여 전류펄스로 누설하게 된다. 이와 같이 상당히 적은 전류펄스의 직접 측정은 어려운 일이므로 시간적분이 요구된다 [4]. 이것은 에너지 또는 검출의 감도가 미약할 경우에 검출기가 생성하는 전하 또한 약하게 출력하며, 잡음이 측정상의 정확도를 떨어뜨리게 된다. 그리고 검출기가 비교적 높은 강도에 조사될 경우에 펄스와 펄스가 발생하는 사이의 시간 분리가 짧아지게 될 가능성이 존재하게 되며, 이로 인하여 전하 측정에 수반되는 시간이 감소되거나 baseline의 불안정 및 펄스들의 겹침(이전에 발생한 펄스가 0으로 회복되기 전에 다음 펄스의 상승)을 일으킨다. 검출기에서 발생하는 전류 펄스를 전하 감응 연산 증폭기(Operational Amplifier : Op-Amp)를 사용하고, 펄스들의 겹침을 해결하기 위해 검출기의 시정수 $C_D R_D$ 보다 더 짧은 클리핑 회로를 적절히 사용하면 해결 가능하다.

이러한 관점에서 Si 반도체 검출기로부터 출력되는 전기적 신호의 처리를 위해 그림 2에 나타낸 바와 같이 전하 감응회로, 클리핑회로, 증폭기, 그리고 low-pass filter로 전치증폭

기를 구성하였다. Si 다이오드는 C_D 와 R_D 가 병렬 구조인 등가회로로 간주 할 수 있다[5]. 검출기로부터의 출력 전류 펄스가 시간의존 $\alpha(t)$ 라 가정하고 하나의 전류 펄스에 대한 test point 1에서의 전압 $V_1(t)$ 은 식 1과 같이 표현된다.

$$V_1(t) = A_1 \frac{Q}{C_D} e^{-\frac{t}{R_D C_D}} + A_1 \cdot V_N \dots \dots \dots (1)$$

여기서 A_1 은 Op-Amp의 전압이득이고, Q 는 방사선에 의하여 생성된 전하이며 V_N 은 잡음이다. 신호가 A_1 을 거쳐 클리핑 회로 1을 통과하게 되면 진폭 변화는 거의 없고 C_D R_D 의 시정수 보다 클리핑 회로 1의 시정수 τ_1 을 짧게 설정함으로써 높은 방사선에 의하여 펄스의 겹침이 발생할 경우 측정상의 손실을 개선하고자 하였다. 또한 전치 증폭기 최종 출력 test point 2에서의 출력 전압 V_2 는 다음과 같다.

$$V_2(t) = A_1 A_2 A_3 \frac{Q}{C_D} \cdot \frac{t}{\tau_2} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \dots \dots \dots (2)$$

마찬가지로 $A_2 A_3$ 는 전압이득이고 τ_2 는 펄스들의 겹침을 해결하기 위한 시정수로서 연속 펄스의 경우에 펄스 사이의 평균 시간 간격이 $R_D C_D$ 의 시정수 보다 더욱 짧게 설정 함으로서 다음 펄스가 도달하기 전에 0으로 회복되게 한다. Si 다이오드 내에서 방사선에 의하여 자체에서 발생하는 고주파 잡음은 저항과 콘덴서로 구성된 low-pass filter에 의하여 처리되게 설계하였다[6].

4. 결과 및 고찰

소형의 Si 반도체 다이오드로 전리 방사선의 측정 및 성능시험에 앞서 환경 주변으로부터 누출되는 빛 또는 마그네틱에 의한 자계 등에 기인하여 야기될 수 있는 잡음을 감소시킬 목적으로 알루미늄 foil로 검출기를 차폐하였다. Shield wire가 검출기에서 전치증폭기의 신호 전송을 위해 사용되었다. 검출기의 형태와 크기에 따라 전기적 신호가 다르기 때문에 소형의 Si 반도체 다이오드에 적합한 전치 증폭기를 설계·제작하였다.

펄스의 겹침은 측정상의 계수 오차를 유발하는 요인으로 일차적으로 클리핑 회로 (1)의 τ_1 을 검출기의 시정수 $C_D R_D$ 보다 짧게 설정하여 펄스의 시간 폭을 줄인 후, 이를 증폭하고 클리핑 회로 (2)에서 다시 펄스 폭을 줄임으로서 그림 4의 최종 출력과 같이 펄스의 겹침이 없는 파형을 얻을 수 있었다. 그림 3과 4는 비교적 높은 방사선량을(1 R/h)을 조사하였을 때 test point 1과 2에서의 전압 펄스를 보여주고 있다. 또한 High-pass filter 인 클리핑 회로 (1)은 A_1 과 그 자체 그리고 외부 환경에 기인한 저주파 잡음 성분을 제거하는 역할을 한다. 반도체 검출기가 방사선과의 상호작용에 의하여 발생하는 고주파 성분의 처리를 위해 low-pass filter인 RC 적분회로를 클리핑회로 (2)의 다음에 설치하였고, 이의 시정수는 이전의 시정수 보다 좀 더 짧게 설정하였다. 이와 같이 구성한 전치증폭기

최종 출력 단에서의 잡음은 50mV 정도였으며, 이는 방사선에 의한 펄스의 진폭 200mV와 비교하여 현저한 차이가 있었다.

성능 시험은 표준 감마 및 X-선장(원자력연구소 보유)에서 수행하였다. 주증폭기 및 펄스 카운터/타이머를 전치증폭기의 최종 출력 단에 연결한 후, 방사선 강도 및 에너지 변화에 따른 응답 관계로서 선형성과 에너지 의존성을 실시하였다. 1 mR/h에서 1 R/h 까지 ^{137}Cs 의 감마선 방사선량을 변화시켜 측정된 결과로부터의 선형성 관계는 전반적으로 잘 일치하였으며, 500 mR/h 주변에서의 오차가 2% 정도였다.

에너지 의존성은 X-선 Beam Code M100(54.2keV) 및 H150(118keV) 그리고 감마선 ^{137}Cs (662keV)에 대하여 실험하였다[7]. ^{137}Cs 의 측정값을 기준으로 하였을 때, 54.2 keV에서는 1.82 그리고 118 keV는 1.23으로 평가되었다. 이들은 가스형 검출기(G.M 계수기) 보다 약간 높은 수치이며, 본 실험의 결과로 판단하였을 때 에너지 의존성은 큰 것으로 사료된다.

표 2는 각각 5회 측정하여 이들에 대한 평균과 표준 편차를 보여주고 있으며, 또한 그림 5에서 보는 바와 같이 상대 평균편차는 낮은 선량(2 mR/h)에서 최대 2.7%로 평가되었으며, 방사선의 강도가 증가함에 따라 이것은 감소하였다.

5. 결 론

전치 증폭기는 방사선과 Si 다이오드와의 상호 작용에 의하여 발생된 비교적 낮은 전류 펄스를 측정하는데 사용할 수 있으며, 높은 방사선량에 기인한 펄스의 겹침을 해결하는 데에도 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

Si 다이오드의 전리 방사선 측정기로의 이용은 소형화가 가능하며, 방사선 계측기로서 넓은 에너지 범위에서 사용될 수 있다. 이를 위해서는 다양한 종류의 반도체를 선별하고 이에 수반되는 적절한 전치 증폭기를 구성한다면 여러 분야의 방사선 측정에 활용이 가능하다.

참고문헌

1. N. Tsoulfanidis "Measurement and Detection of Radiation", Hemisphere Pub., pp. 165-191, 1979.
2. G. Knoll, "Radiation Detection and Measurement", 2 ed Ed., pp. 157-172, 1979.
3. S. Pospisil et al., "Si Diode as a Small Detector of Slow Neutrons", Radiation Protection Dosimetry, Vol. 46 No. 2, pp.115-118, 1993.
4. K. hodyr and S. Wysock, "Current Transients Induced by Fast Electrons and bremsstrahlung in Polyethylene Films", Radiation Measurements, Vol. 26, No. 4, pp. 593-598, 1996.
5. D. Neamen, "Semiconductor Physics and Devices", Richard D. IRWIN, pp. 269-306, 1992.
6. D. E. Jhnson, "Introduction to Filter Theory", Prentice-Hall, pp. 69-82, 1976.
7. 장시영 외, "방사선 방어 및 측정기술 개발" 과학기술처, 1996.

표 2. 방사선량을 변화에 따른 평균 및 표준편차

방사선량을	Counts/sec.					평균	표준편차
	1 차	2 차	3 차	4 차	5 차		
2 mR/h	117	111	120	134	123	121	8,51
10 mR/h	594	533	562	599	558	560,2	29,14
100 mR/h	5,507	5,464	5,284	5,512	5,511	5,448,4	98,14
500 mR/h	28,329	28886	28653	28632	28549	28,609,8	200,74
1 R/h	59,666	59,444	59,494	60,074	60,542	59,844	462,14

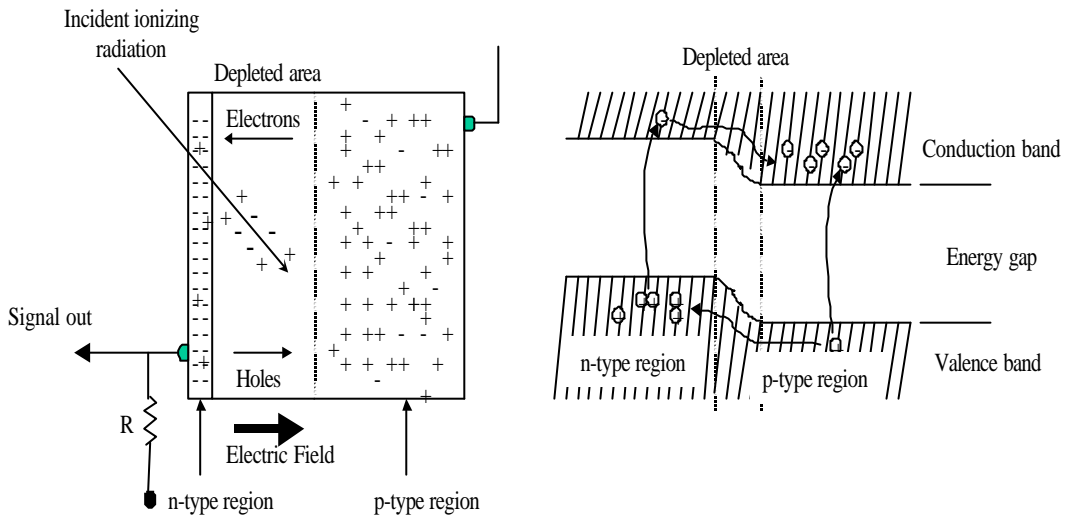


그림 1. 전리 방사선 검출기로서 PN 접합 다이오드

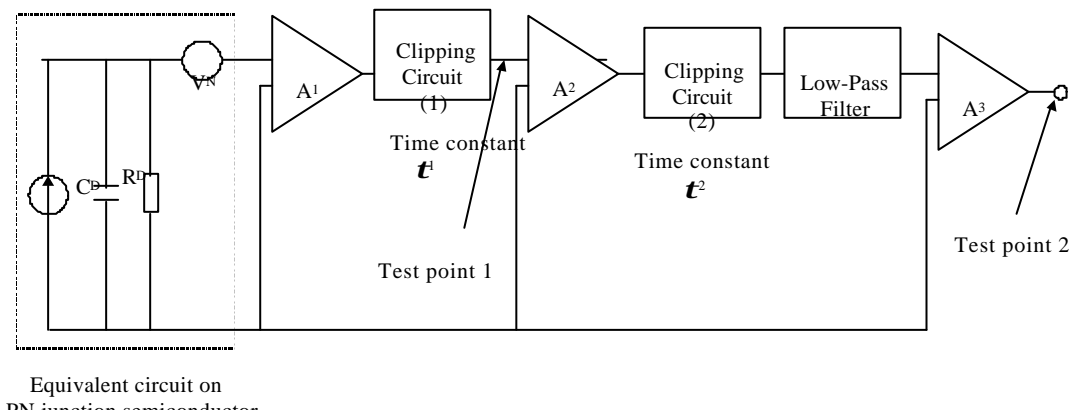


그림 2. 전치증폭기의 구성

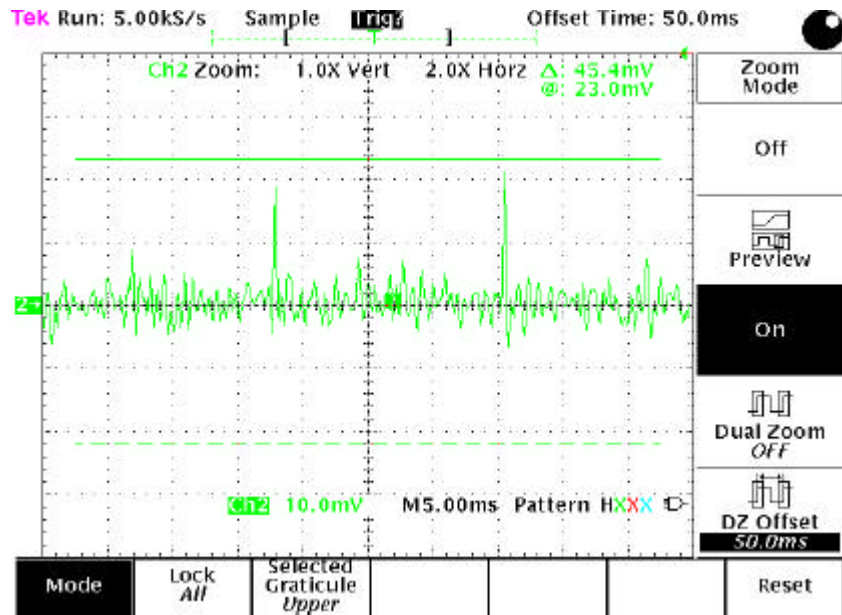


그림 3. 클리핑 회로 1을 통과한 test point 1에서의 전압 펄스

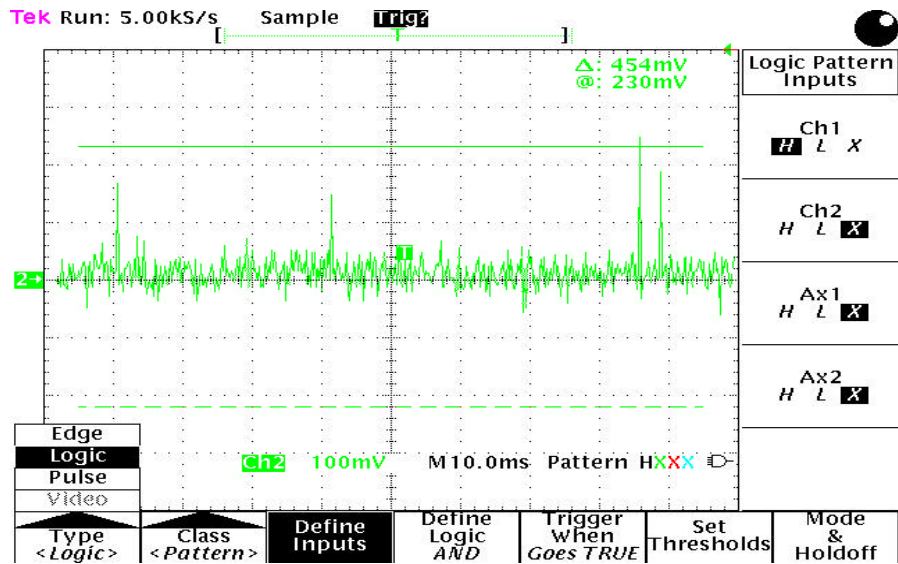


그림 4. 전치증폭기의 최종 출력 단(test point 2)에서의 전압 펄스

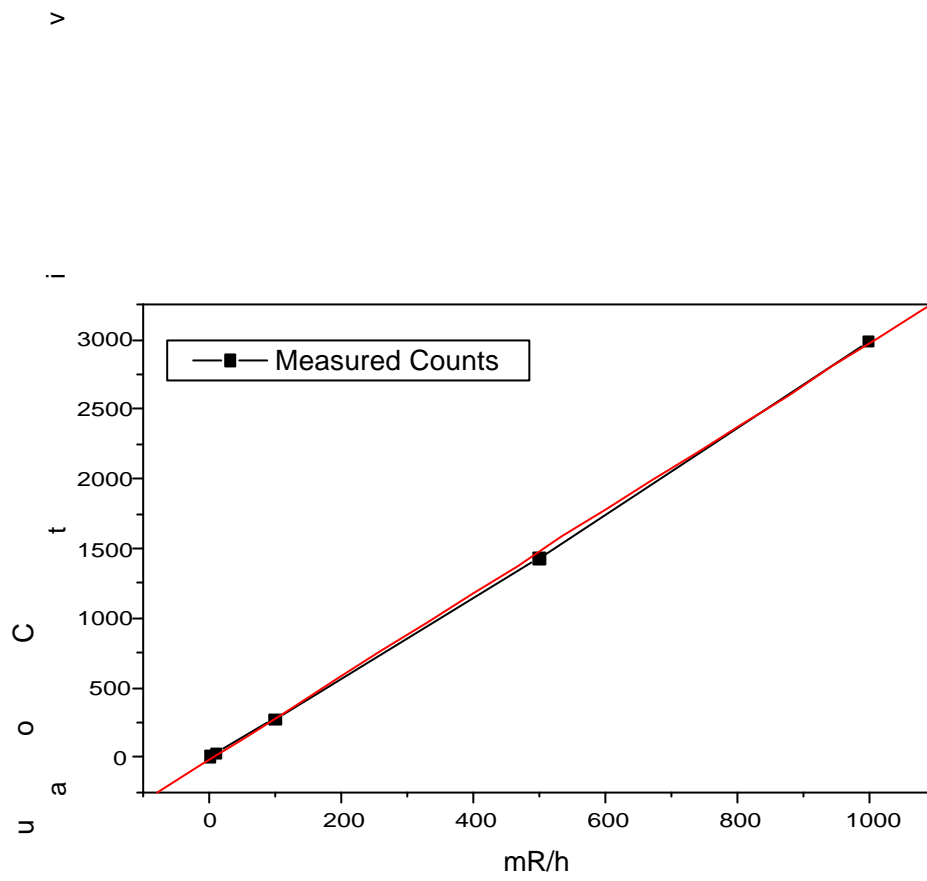


그림 5. 방사선량을의 변화에 따른 Si 다이오드의 선형 응답

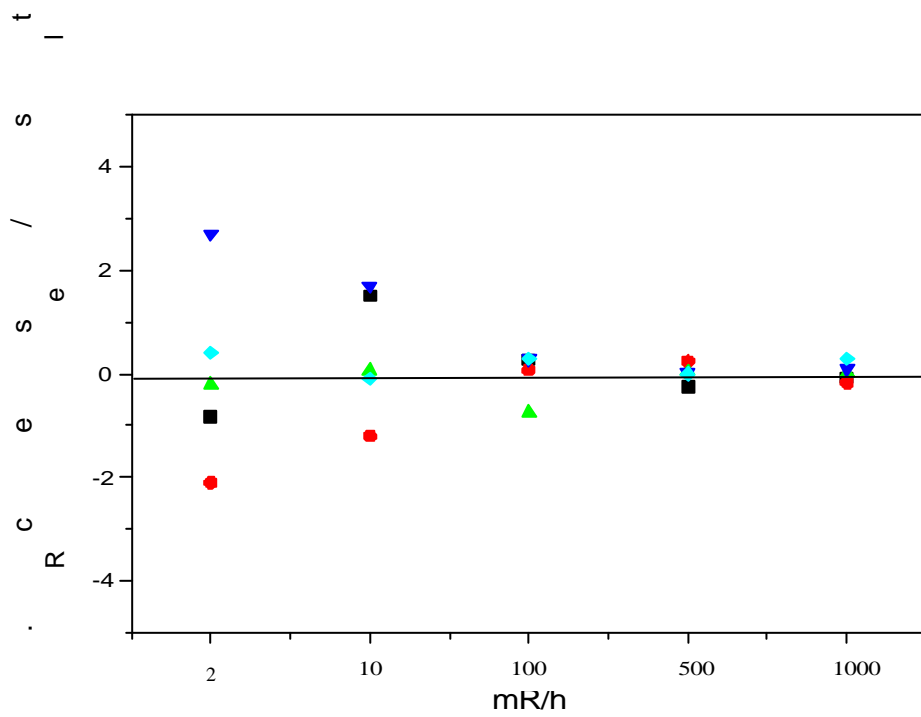


그림 6. 각각의 방사선량에 대한 상대 평균편차(%)