

엑스선에 의한 반도체 소자의 방사선 손상

김동성, 홍현승, 박혜민, 김정호, 주관식

명지대학교 물리학과

2015년 3월 9일 접수 / 2015년 4월 14일 1차 수정 / 2015년 6월 5일 2차 수정 / 2015년 6월 15일 채택

최근 방사선을 이용한 반도체 검사장비 산업의 증가로 이에 대한 기술 연구 수요 또한 증가하고 있다. 반도체 검사장비는 저에너지 엑스선으로 최저 40 keV에서 최고 120 keV의 에너지 영역을 사용하고 있지만, 국내에서는 저에너지 엑스선이 주는 방사선 손상 연구가 미흡한 상황이다. 따라서 본 연구는 저에너지 엑스선을 이용하여 반도체 소자의 한 종류인 BJT (bipolar junction transistor)가 받는 방사선 손상에 관한 것이다. BJT는 NXP반도체사의 BC817-25 (NPN type)를 사용하였으며, 엑스선 발생장치를 사용하여 엑스선을 조사하였다. BJT의 방사선 손상 여부는 엑스선 조사 전과 후에 전류 이득을 10으로 고정하고, 콜렉터 전류에 따른 콜렉터-이미터 전압을 측정하여 변화 정도를 분석하여 확인하였다. 엑스선 발생장치의 관전압은 40 kVp, 60 kVp, 80 kVp, 100 kVp, 120 kVp 등 다섯 가지로, 조사 시간은 60초, 120초, 180초, 360초, 540초 등 다섯 가지로 변수를 두었다. 실험 결과 BJT에서 저에너지 엑스선 즉, 120 keV 이하의 엑스선을 조사하여도 방사선 손상이 발생하는 것을 확인하였고, 특히 80 kVp에서 가장 큰 방사선 손상이 발생되었다. 이는 ELDRS (enhanced low dose rate sensitivity) 현상이 80 kVp을 기준으로 발생하는 것으로 판단된다. 본 연구의 결과는 저에너지 엑스선을 이용한 반도체 검사장비의 효율적인 선량관리와 엑스선 여파기의 연구 및 개발에 기여할 것으로 기대한다.

중심어 : BJT, 저에너지 엑스선, 방사선 손상, TID(total ionizing dose), ELDRS 현상

1. 서론

최근 원자력 관련 산업의 발달함에 따라 방사선을 이용한 반도체 검사장비에 관한 연구 수요가 증가하고 있으며, 반도체가 받는 방사선 손상 관련 연구가 많이 이루어져왔다. 반도체 소자의 방사선 손상의 종류는 total ionizing dose (TID), single event effect (SEE), displace damage (DD) 등 크게 세 가지로 나누어 볼 수 있다.

SEE는 이온화에 의한 손상으로, 주로 전기적 신호를 바뀌게 하며[1], DD는 원자핵을 격자에서 벗어나게 하여 물리적인 손상을 입히게 된다[2]. 이 둘의 손상은 주로 1 MeV이상의 방사선이 조사되는 경우에 발생하게 되며, 이에 대한 이론은 이미 많은 연구를 통해 알려져 왔다.

TID는 주로 반도체 내의 silicon과 silicon dioxide의 사이에서 전자 정공이 형성되어 charge trapping에 의해 발생하게 된다. MOSFET의 경우 TID가 발생하면 문턱전압이 변화하며, 누설 전류가 증가한다. BJT의 경우는 전류이득이 감소하게 된다. 이 소자들의 차이점은 radiation annealing에 있다. MOSFET은 시간이 흐르면 annealing에 의해 손상을 회복하는 반면, BJT는 시간이 지나도 회복되지 않는다는 점이다[3].

TID 또한 이미 많은 연구가 진행되었지만, 대부분 고 에너지의 엑스선과 감마선, 중성자, 양성자, 전자 등의 방사선을 사용한 연구였다. 따라서 저에너지 엑스선을 사용하여 반도체가 받는 방사선 손상에 대한 연구가 필요하다.

2. 재료 및 방법

2.1 반도체 소자 선정

반도체 소자는 Fig. 1과 같은 NXP반도체사의 BJT NPN type으로 선정하였다. BJT는 radiation annealing에 의한 방사선 손상의 회복이 없으며, ELDRS (enhanced low dose rate sensitivity) 현상으로 인해 낮은 선량에서 손상이 더 크기 때문이다[4, 5].

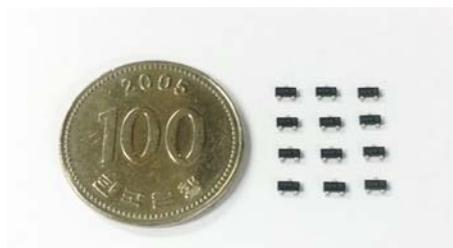


Fig. 1. BJT NPN Type (NXP BC817-25).

책임저자 : 주관식, ksjo072@gmail.com
경기도 용인시 처인구 남동 명지대학교 물리학과

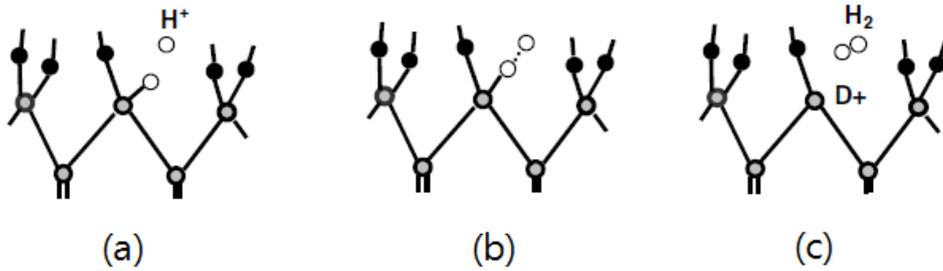


Fig. 2. ELDRS phenomenon. Protons are displaced by polaron hopping.

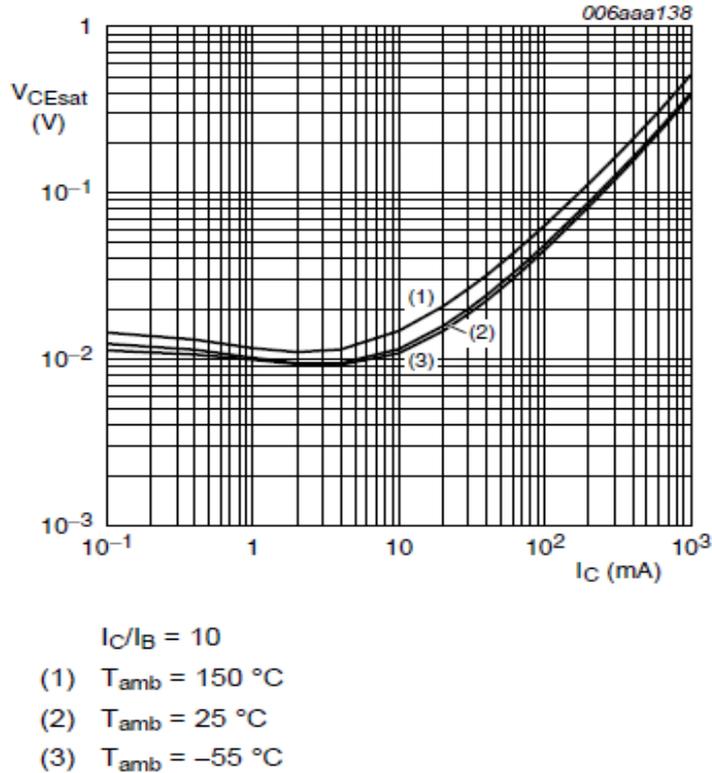


Fig. 3. When NPN type of BJT of current gain fixed 10, the collector-emitter voltage of the characteristic graph according to the collector current.

BJT에 방사선이 조사되면 이온화로 인하여 생긴 양이온 이 Oxide층에 쌓이게 되는데, 저선량을 조사하였을 때에는 양이온 수가 적어 proton이 interface로 polaron hopping하는데 수월하다. Interface로 이동한 proton은 passivation되어있는 수소와 10 Å 정도로 가까워지게 되면, 수소의 결합이 끊어지면서 Fig. 2와 같이 proton과 결합하여 수소 분자를 만들게 되며, dangling bond가 생겨 trap이 형성된다[6]. 하지만 고선량을 조사하였을 경우는 양이온이 많이 생기기 때문에 (+)를 띤 Proton이 척력에 의해 이동이 어려워져 저선량에 비해 interface trap의 수가 적어진다[7, 8]. 따라서 고선량일 때보다 저선량에서 방사선 손상이 더 크며, 이러한 현상을 ELDRS 현상이라고 부른다[9, 10].

이러한 이유로, 저에너지 엑스선을 사용한 반도체의 방사선 손상을 쉽게 확인할 수 있는 NPN형 BJT를 실험 대상으로 선정하였다.

2.2 실험 방법

본 실험은 엑스선 조사 전과 후의 콜렉터-이미터 전압의 변화를 보고 BJT의 방사선 손상을 판단하기 위함으로 엑스선을 조사하기 전, Fig. 3과 같은 BJT 특성 그래프가 나오는지 확인을 하였다(BC817-25 Data sheet, NXP, Netherlands, www.nxp.com).

이를 확인하기 위하여 Fig. 4와 같이 회로를 연결하였으며, 콜렉터 전류와 베이스 전류를 각각 2 mA, 0.2 mA로 맞춰 전류이득을 10으로 고정하고, 콜렉터 전류는 2 mA씩, 베이스 전류는 0.2 mA씩 올려주어 콜렉터-이미터 전압을 측정 기록하였다.

측정 결과 Fig. 5와 같은 그래프를 얻을 수 있었으며, 특성그래프의 수치와 일치 하므로 실험에 쓰인 장비의 정확도를 확인하였다.

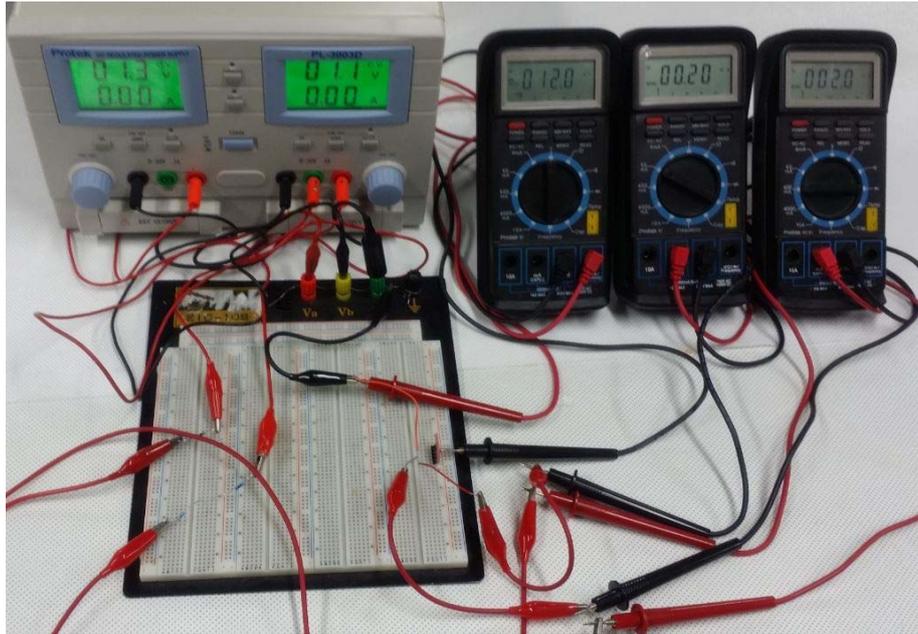


Fig. 4. Before X-ray irradiation, collector-emitter voltage of measurement using digital multi-meter and power supply. Digital multi-meter : collector-emitter voltage of measurement (left), base current (center), collector current (right).

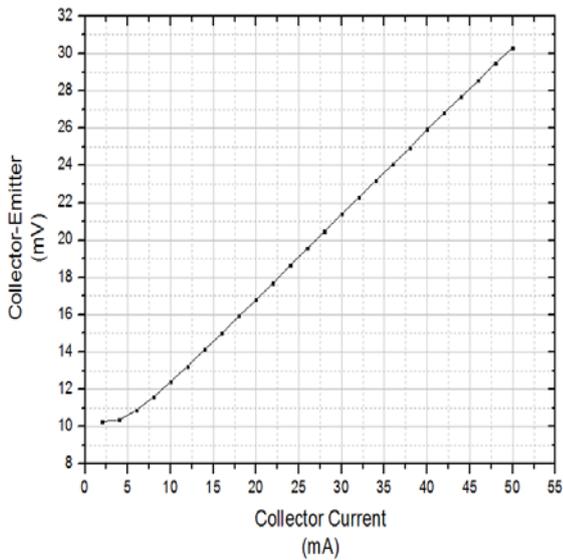


Fig. 5. Before X-ray irradiation, actual graph, collector-emitter voltage average of twenty BJT.

엑스선 발생장치의 관전압은 40 kVp, 60 kVp, 80 kVp, 100 kVp, 120 kVp로 측정하였으며, 각 관전압 별로 BJT 4개씩 사용하였다. Target은 $2\mu\text{m}$ 의 텅스텐과 $200\mu\text{m}$ 의 diamond로 구성되어있으며, target에서 BJT 까지의 거리는 1.5 cm로 하였고, 조사시간은 180초, 360초, 540초로 180초 간격으로 측정을 하였다.

2.3 선량 측정

엑스선 발생장치의 target의 텅스텐 두께에 따라 관전압별 선량률이 상이하므로, $2\mu\text{m}$ 텅스텐을 사용하였을 때의 관전압별 선량률을 측정 필요하였다.

선량률 측정은 Fig. 7에 있는 선량계를 이용하였으며, target과의 거리와 관전압에 따른 선량률을 측정하였다.

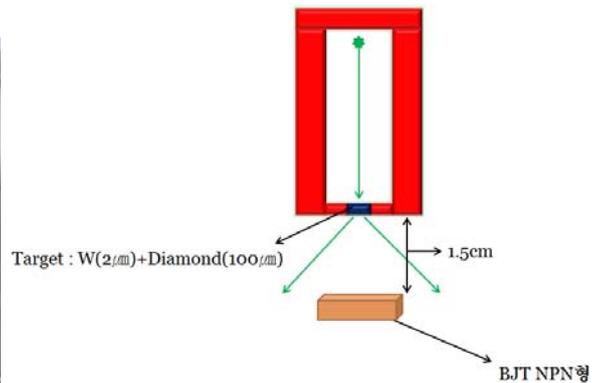
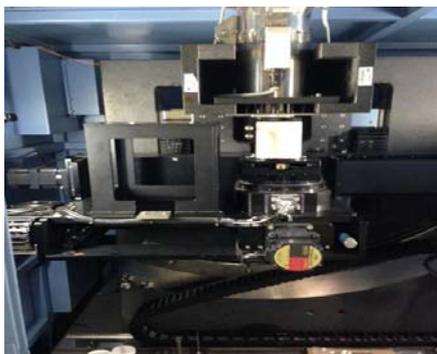


Fig. 6. Picture of X-ray generator (left), and schematic (right).

Table 1. Result of Dose Rate According to Distance and Tube Voltage.

Distance (m)	Dose Rate (R/h)				
	40 kVp	60 kVp	80 kVp	100 kVp	120 kVp
0.3	38300	64100	70700	72100	73700
0.4	21300	35700	39400	40100	41000
0.5	12500	22600	24900	25500	26000
0.6	9290	15600	17200	17600	18000
0.7	6770	11400	12500	12800	13100
0.8	5140	8650	9530	9750	9980
0.9	4030	6790	7480	7660	7850



Fig. 7. VeriDose V electrometer (dosimeter).

Table 1은 선량률 측정 결과이며 Fig. 8은 선량률 측정 결과를 그래프로 표현한 것이다.

선량률 측정에 있어, dosimeter의 구조적 문제로 0.3m부터 측정하여, BJT 실험 조건인 1.5 cm에서의 선량률은 Fig. 9와 같이 역자승의 법칙을 이용하여 구하였다. 먼저, Table 1에서의 선량률 측정 결과에서 역자승의 법칙을 적용할 수 있는지를 Fig. 10의 거리에 따른 선량률과 $\frac{1}{r^2}$ 의 비교 그래프를 통하여 확인하였다.

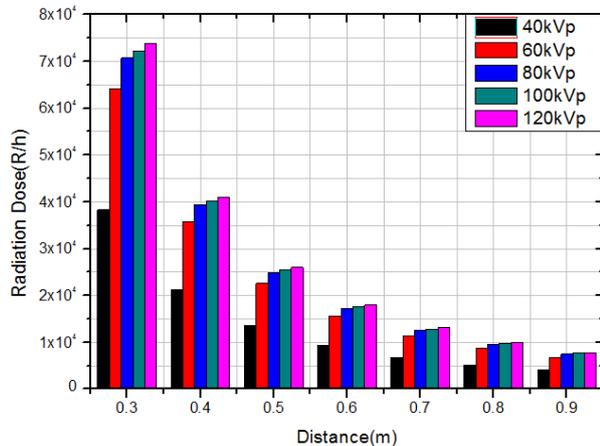


Fig. 8. Graph of dose rate according to distance and tube voltage.

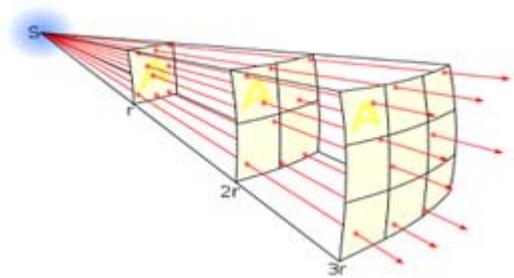


Fig. 9. Inverse-square rule.

Fig. 10과 같이 선량률 측정 결과가 역자승의 법칙에 따랐으므로, 식 1과 같이 실측 조건인 1.5 cm 거리에서 관전압이 40 kVp일 경우의 선량률을 계산할 수 있고, Table 2는 식 1과 같은 방법으로 각 관전압에 따른 1.5 cm에서의 선량률을 계산한 결과이다.

$$\begin{aligned}
 (0.3m)^{-2} : 38300R/h &= (0.015m)^{-2} : x \\
 x &= 38300 \times \frac{0.3^2}{0.015^2} [R/h] \\
 x &= 1.53 \times 10^7 R/h
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Table 2. Result of Dose Rate at 1.5 cm.

	40 kVp	60 kVp	80 kVp	100 kVp	120 kVp
Dose rate (R/h)	1.53×10^7	2.56×10^7	2.83×10^7	2.88×10^7	2.95×10^7

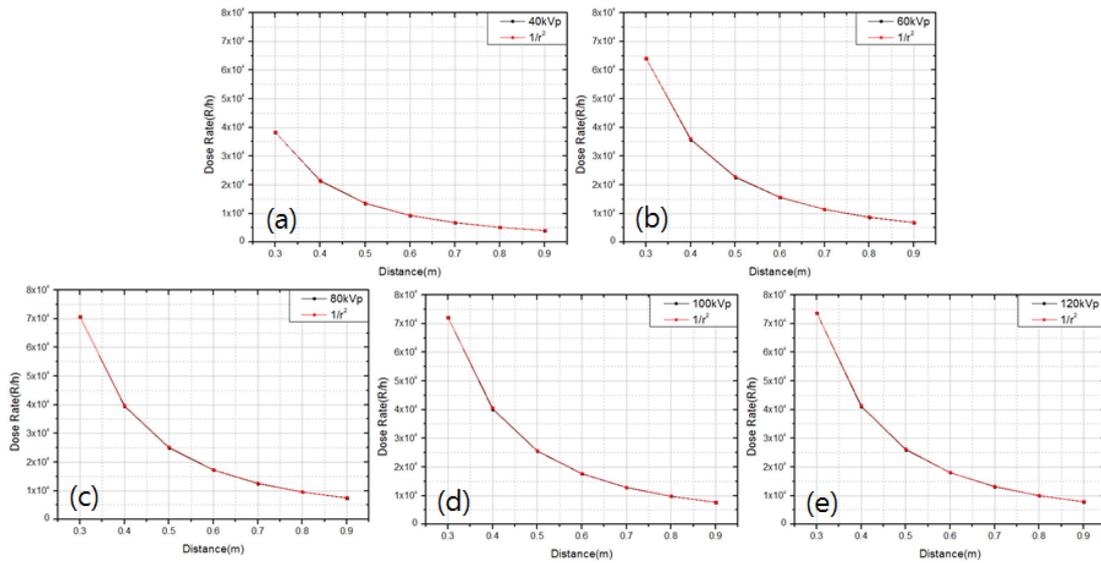


Fig. 10. Comparison graph of dose rate according to distance and $\frac{1}{r^2}$. The black line is dose rate and the red line is $\frac{1}{r^2}$, (a) 40 kVp, (b) 60 kVp, (c) 80 kVp, (d) 100 kVp, (e) 120 kVp.

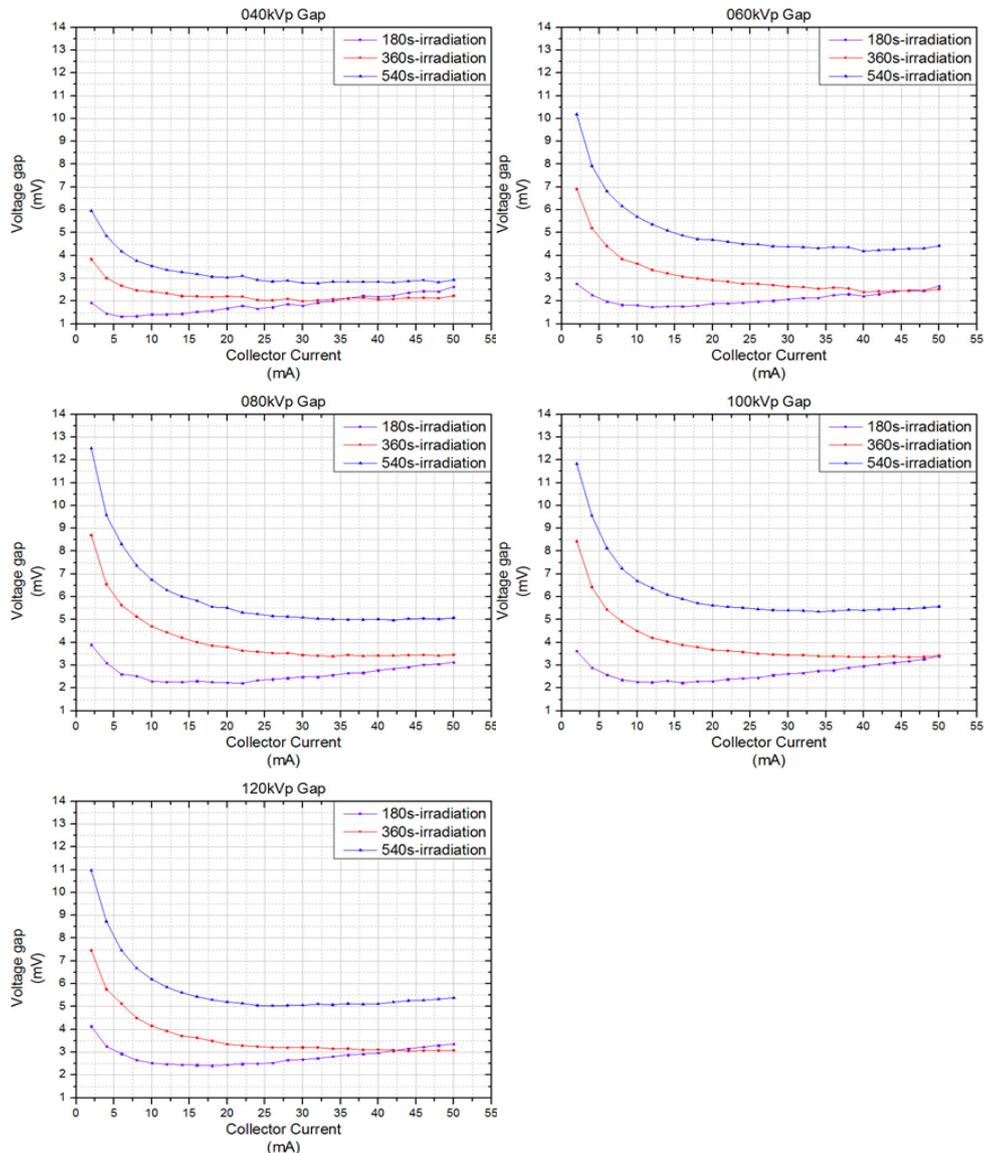


Fig. 11. Before and after X-ray irradiation, collector-emitter voltage gap each tube voltage.

3. 결과 및 논의

다음 Fig. 11은 콜렉터 전류에 따른 엑스선 조사 전과 후의 콜렉터-이미터 전압의 차를 관전압별 그래프로 나타낸 것이다. 이 그래프를 보면, 조사시간이 길어질수록 전압차가 커지는 것을 알 수 있다.

Fig. 12은 콜렉터 전류에 따른 엑스선 조사 전과 후의 콜렉터-이미터 전압의 차를 조사시간별 그래프로 나타낸 것이다. 이 그래프에서는 관전압이 80 kVp일 경우 전압차가 가장 큰 것을 알 수 있으며, 그 다음은 100 kVp, 120 kVp, 60 kVp, 40 kVp 순으로 전압차가 크다는 것을 알 수 있었다.

일반적으로 BJT의 방사선 손상은 콜렉터-이미터 전압을 고정하였을 때, 전류이득이 감소한다고 알려져 있다. 따라서 다음 식 2를 통해 본 실험과 방사선 손상의 관계를 알아보았다.

$$\begin{aligned}
 h_{FE}(\text{전류이득}) &= \frac{I_C}{I_B} = \text{고정}, V_{CE} = \text{증가} \\
 V_{CE} &= V_C - V_E = I_C R_C - V_E \\
 &= I_B \frac{I_C}{I_B} R_C - V_E \\
 &= I_B h_{FE} R_C - V_E \quad (2)
 \end{aligned}$$

식 2에서 h_{FE} 는 고정이므로 I_B 또한 고정이고, R_C 는 상수이므로 V_{CE} 가 증가하면 V_E 는 감소해야 한다.

$$\begin{aligned}
 V_{CE} &= \text{고정}, h_{FE} = \text{감소} \\
 V_{CE} &= I_B h_{FE} R_C - V_E \Rightarrow h_{FE} = \frac{1}{R_C I_B} (V_{CE} + V_E) \quad (3)
 \end{aligned}$$

식 3에서 V_{CE} 는 고정이고, R_C 는 상수이므로 h_{FE} 가 감소하면 V_E 는 감소해야 한다. 따라서 식 2, 3의 결과가 같으므로 본 실험에서의 콜렉터-이미터 전압의 증가는 방사선 손상을 받았다고 할 수 있다.

이러한 결과는 BJT에 엑스선을 조사하면, 전류이득을 고정하였을 때, 콜렉터-이미터 전압이 높아지는 것을 보여주며, 이는 저에너지 엑스선을 사용하여도 반도체에 방사선 손상이 나타나는 것을 알 수 있다. 특히, 80 kVp에서 가장 큰 전압차가 나타나는 것은 ELDRS 현상이 80 kVp를 기준으로 발생된다고 판단된다.

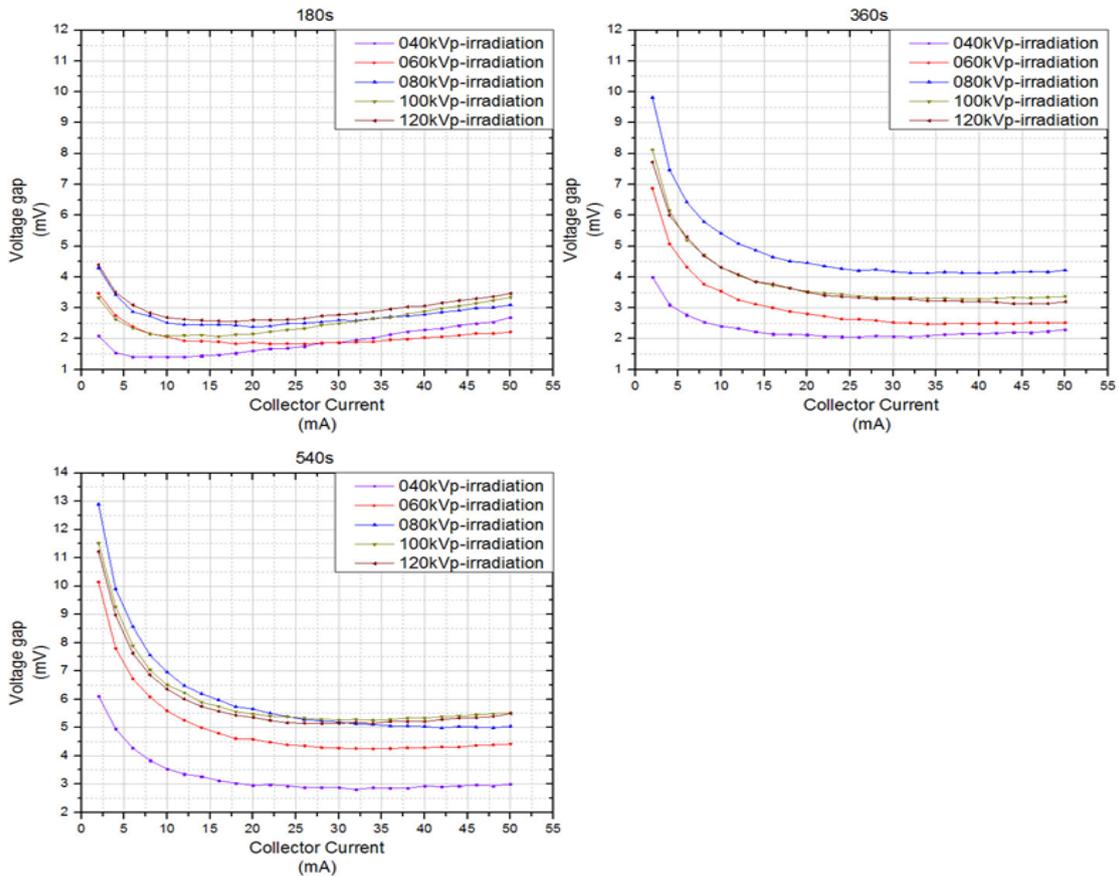


Fig. 12. Before and after X-ray irradiation, collector-emitter voltage gap each irradiation time.

4. 결론

방사선 기술의 발달로 엑스선을 사용한 반도체 검사 장비의 시장이 확대되고 있다. 이로 인하여 엑스선 검사 장비를 사용하는 반도체 회사들이 증가하여, 수요 또한 증가하고 있다. 하지만 저에너지 엑스선이 반도체에 주는 방사선 손상에 관한 연구는 아직 부족하며, 이에 대한 연구가 요구된다. 따라서 본 연구에서는 저에너지에서 방사선 손상을 많이 받는 BJT를 이용하여 콜렉터-이미터 전압차를 확인하였으며, 콜렉터-이미터 전압이 높아질수록 방사선 손상이 커지는 것을 확인하였다. 특히, 80 kVp 이하일 경우에는 엑스선에 의해 생성되는 양이온 수가 충분하지 않아 양성자의 polaron hopping을 막지 못하여 방사선 손상은 관전압에 따라 증가함을 보였으며, 80 kVp 이상일 경우에는 생성된 양이온 수가 충분해져 양성자의 polaron hopping을 막기 때문에 관전압이 증가하면 방사선 손상은 줄어드는 것으로 보인다. 따라서 80 kVp를 기준으로 ELDRS 현상이 발생된다고 판단된다. 본 연구의 결과는 차후에 저에너지 엑스선을 이용한 반도체 검사장비의 효율적인 선량관리와 엑스선 여과기의 연구 및 개발에 기여할 것으로 예상되며, 추후에 다양한 모델의 BJT과 다량의 개수로 추가적인 연구가 요구된다.

REFERENCES

1. McDonald PT, Henson BG, Stapor WJ, Mark Harris. Destructive heavy ion SEE Investigation of 3 IGBT devices. Radiation Effects Data Workshop. 2000 July 11-15.
2. Srour JR, Cheryl J. Marshall, Paul W. Marshall. Review of displacement damage effects in silicon devices. IEEE Trans Nucl Sci. 2003;50(3):653-670.
3. Daniel MF. Total ionizing effects in MOS and low-dose-rate-sensitive linear-bipolar devices. IEEE Trans Nucl Sci. 2013;60(3):1706-1730
4. Harold PH, Ronald LP, Steven CW, Marty RS, James RS, Arthur HE, Charles EH, Thomas RM. Mechanisms for radiation dose-rate sensitivity of bipolar transistors. IEEE Trans Nucl Sci. 2013; 50(6):1901-1909
5. Ronald LP, Lewis MC, Daniel MF, Mark AG, Tom LT, Dennis BB, Allan HJ. A proposed hardness assurance test methodology for bipolar linear circuits and devices in a space ionizing radiation environment. IEEE Trans Nucl Sci. 1997;44(6) :1981-1988
6. Rashkeev SN, Fleetwood DM, Schrimpf RD, Pantelides ST. Defect generation by hydrogen at the Si-SiO₂ interface. Phys Rev Lett. 2001;87(16): 165506
7. Pershenkov VS, Chumakov KA, Nikforov AY, Chumakov AI, Ulimov VN, Romanenko AA. Interface trap model for the low-dose-rate effect in bipolar devices. RADECS 2007 European Conference, 2007 September 1-6.
8. Rashkeev SN, Cirba CR, Fleetwood DM, Schrimpf RD, Witczak SC, Michez A, Pantelides ST. Physical model for enhanced interface-trap formation at low dose rate. IEEE Trans Nucl Sci. 2002;49(6):2650-2655
9. Fleetwood DM, Kosier SL, Nowlin RN, Schrimpf RD, Reber RA, Delaus JM, Winokur PS, Wei A, Combs WE, Pease RL. Physical mechanisms contributing to enhanced bipolar gain degradation at low dose rates. IEEE Trans Nucl Sci. 1994;41 (6):1871-1883
10. Leonidas T, Ronald DS, Daniel MF, Ronald LP, Sokrates TP. Common origin for enhanced low-dose-rate sensitivity and bias temperature instability under negative bias. IEEE Trans Nucl Sci. 2005;52:2265-2271

Radiation Damage of Semiconductor Device by X-ray

D. S. Kim, H. S. Hong, H. M. Park, J. H. Kim, and K. S. Joo
Department of Physics, Myongji University

Abstract - Recently, Due to the increased industry using radiation inspection equipment in the semiconductor, this demand of technology research is increasing. Although semiconductor inspection equipment is using low energy X-ray from 40 keV to 120 keV, Studies of radiation damage about the low energy X-ray are lacking circumstance in our country. Therefore, It is study that BJT (bipolar junction transistor) of one type of semiconductor elements are received radiation damage by low energy X-ray. BJT were used to the NXP semiconductor company's BC817-25 (NPN type), and Used the X-ray generator for the irradiation. Radiation damage of BJT was evaluated that confirm to analyse change of collector-emitter voltage of before and after X-ray irradiation when current gain fixed to 10. X-ray generator of tube voltage was setting 40 kVp, 60 kVp, 80 kVp, 100 kVp, 120 kVp and irradiation time was setting 180s, 360s, 540s into 180s intervals. As the result, We confirmed radiation damage in BJT by low energy X-ray under 120 keV energy, and Especially the biggest radiation damage was appeared at the 80 kVp. It is expected that ELDRS (enhanced low dose rate sensitivity) phenomenon occurs on the basis of 80 kVp. This studies expect to contribute effective dose administration of semiconductor inspection equipment using low energy X-ray, Also Research and Development of X-ray filter.

Keywords : BJT, Low energy X-ray, Radiation damage, TID (total ionizing dose), ELDRS phenomenon