

전자빔 조사에 의한 반도체 소자의 기능저하 연구 A Study on Quality Degradation of Semiconductor Devices by Electron Beam Exposure

조 규 성, 이 태 훈, 한국과학기술원
Gyuseong Cho, Tae Hoon Lee, KAIST

Abstract

본 연구에서는 BJT(Bipolar Junction Transistor)와 MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) 등을 1MeV에너지의 전자빔을 선량을 변화시켜가며 조사시켜 그 특성 변화를 분석하였다. BJT에 대해서는 조사 전, 후의 전류 이득의 측정을 통해 base 지역에서의 minority-carrier의 수명 변화에 의해서 전류 이득이 감소하는 것으로 나타났으며, MOSFET의 경우는 oxide 지역의 전하량 변화에 의해서 문턱 전압이 영향을 받음을 확인할 수 있었다. BJT의 minority-carrier의 수명 감소량은 조사 선량이 증가함에 따라 직선적으로 변화함을 알 수 있었고, MOSFET의 문턱 전압의 변화는 nMOS와 pMOS의 경우 서로 다름을 관찰할 수 있었는데 이는 oxide내에서 발생하는 전하에 의해 차이가 남을 알 수 있었다.

1. 서론

원자력 발전소나, 인공위성, 가속기, 의료기기 등의 방사선 환경에서 전자회로가 사용되기 때문에 본 주제에 관한 연구는 1950년대 초반부터 많이 행해져 왔다. 방사선에 대한 내구성이 강한 반도체 소자들의 수요가 해마다 늘어남에도 불구하고 아직까지 한국에서는 눈에 띄는 연구가 이뤄지지 않고 있는 실정이다. 본 연구는 방사선 환경에서의 BJT와 MOSFET의 특성 변화를 분석하여 내방사선 전자 소자에 대한 방향을 제시하였다.

2. 실험

총 140개의 반도체 트랜지스터가 실험에 사용되었는데 npn형 BJT와 pnp형 BJT는 각각 40개씩, nMOS와 pMOS는 각각 30개씩 사용되었다. BJT는 가장 범용으로 쓰이는 2N3904와 2N3906이 선택되었는데 이 둘은 서로 상호 보완적이다. MOSFET은 nMOS와 pMOS가 함께 들어있는 CD4007로 선택하였다. CD4007 소자는 inverter로서 그 특성이 내부의 MOSFET의 문턱 전압의 변화에 민감하다. 방사선원은 삼성중공업에 있는 전자선 가속기를 이용하였으며 모든 조사실험에서

전자선의 에너지는 1MeV로 고정되었고 조사선량을 0.5, 1, 10, 50, 100kGy의 단계로 조사시켰다. 조사전 후의 측정은 HP4155A(semiconductor parameter analyser)를 이용하였다. 조사 및 측정은 모두 실내 온도에서 수행되었다. 측정 실험 및 조사 실험 setup은 그림 1에 나와 있다.

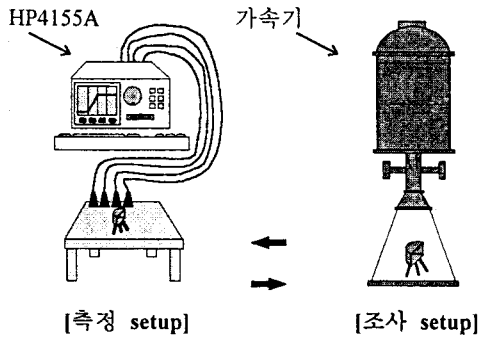


그림 1. 실험 setup

3. 방사선에 의해 영향이 큰 트랜지스터 매개변수

(가) BJT의 전류 이득

전류 이득(h_{FE})이 BJT에 있어서 중요한 이유는 트랜지스터는 주로 증폭기 형태로 사용되게 되는데 이때 트랜지스터의 전류 이득이 작게 되면 그 증폭기의 전압 이득이라든지 주파수 특성이 나빠지게 된다. 전류 이득을 트랜지스터의 내부 변수들로 나타내면 다음의 (1)식과 같다[1].

$$h_{FE} = \frac{1}{\frac{W_B}{2\tau_B \cdot D_n} + \frac{D_p}{D_n} \cdot \frac{W_B}{L_p} \cdot \frac{N_A}{N_D}} \quad (1)$$

여기서 W_B 는 base 지역의 폭, τ_B 는 base 지역에서의 minority-carrier lifetime, L_p 는 emitter에서의 정공의 확산길이(diffusion length), N_A 와 N_D 는 각각 acceptor와 donor의 농도, D_p 와 D_n 는 각각 정공과 전자에 대한

확산상수(diffusion constant)이다.

이 모든 변수들은 방사선의 피폭에 의한 영향을 받지만 그 중에 특히 minority-carrier lifetime이 가장 큰 영향을 받는다. 식(1)으로부터 전류 이득과 minority-carrier lifetime과의 관계를 다음의 식(2)와 같이 유도할 수 있다.

$$\Delta\left(\frac{1}{h_{FE}}\right) \propto \Delta\left(\frac{1}{\tau_B}\right) \quad (2)$$

(나) MOSFET의 문턱 전압

MOSFET은 gate단자에 어느 크기 이상의 전압을 가해주어야지 비로소 oxide아래에 전도층이 생기게 되고 drain과 source 단자 사이에 전류가 흐르게 된다. 이 전압값을 문턱 전압(threshold voltage)이라고 하는데 nMOS에 대해서는 (+)값, pMOS에 대해서는 (-)값을 가진다. MOSFET이 아날로그 회로나 디지털 회로에 쓰일 때 만약 이 문턱 전압값이 변한다면 그 회로가 제대로 동작하지 못할 가능성이 크다. 문턱 전압값을 트랜지스터의 내부 변수로 나타내면 다음의 (3)식과 같다[1].

$$V_{TH} = \phi_{MS} + 2\phi_f - \frac{Q_{BO}}{C_{OX}} - \frac{Q_{int}}{C_{OX}} \quad (3)$$

여기서 ϕ_{MS} 는 금속-반도체(metal-semiconductor)사이의 work-function 차이, ϕ_f 는 Fermi level, Q_{BO} 는 inversion에 의한 depletion charge, Q_{int} 는 oxide 지역에서의 고정 전하(fixed charge), C_{OX} 는 oxide의 capacitance값이다.

4. 실험 결과 및 고찰

(가) BJT의 전류 이득의 분석

Ic-Vce 특성 곡선에서 알 수 있는 정보는 그 트랜지스터의 전류 이득(hFE), breakdown 전압, 출력 저항 등 중요한 변수들을 추출해 낼 수 있다. BJT가 방사선을 받으면 그 내부 변수들이 변화하여 그 특성 곡선이 달라지게 된다. 그림 2.에서 볼 수 있듯이 조사 후의 전류 이득이 조사 전의 전류 이득에 비해 많이 감소했음을 확인 할 수 있다.

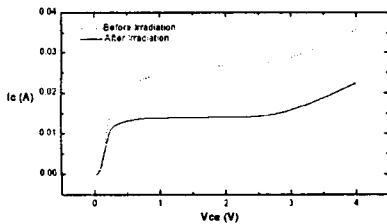


그림 2. BJT 특성곡선의 조사전, 후의 변화

전류 이득의 변화값의 역수를 조사 선량의 단계에 따라 그래프를 그려보면 그림 3.과 같이 나타나는데 선량의 증가에 따라 그 값이 거의 직선으로 나타남을 알 수 있다. 여기서 기울기를 손상 상수(damage constant) K라고 정의하면 식 (4)와 같이 K를 나타낼 수 있다[2].

$$\Delta\left(\frac{1}{\tau_B}\right) \propto \Delta\left(\frac{1}{h_{FE}}\right) = \frac{\phi}{K} \quad (4)$$

여기서 ϕ 는 조사된 전자빔의 선량이다.

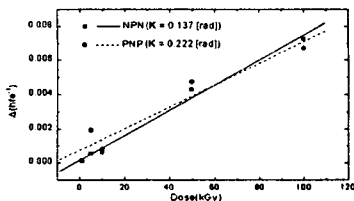


그림 3. 조사선량의 변화에 따른 전류이득의 역수값의 변화.(손상상수 K를 정의할 수 있다.)

2N3904(npn형)과 2N3906(pnp형)은 K값이

서로 다른데 그림 3.에서 알 수 있듯이 기울기가 더 작은 2N3906의 경우가 전자빔 조사에 대해서 그 저항성이 더 크다 하겠다. 이를 이용하여 다른 소자들에 대해서도 K값을 측정하여 방사선에 대한 내구성을 비교할 수 있는 기준을 정할 수 있을 것이다.

BJT의 전류 이득은 그 base 지역에서 이동하는 minority-carrier의 수명에 의해 결정되는데 트랜지스터가 방사선에 조사되면 그 격자 구조에 손상이 생겨 e-h pair가 이동하다가 다시 재결합하는 중심(recombination center)이 늘어나게 되는데 이런 현상을 재결합(recombination)이라고 하며 재결합하는 중심에서 e-h pair가 사라지게 된다[3]. 그림 4.에서는 재결합 중심에 대한 개념도를 보여주고 있는데 npn형 BJT와 pnp형 BJT의 경우 Ec(conduction band)와 Ev(valence band)사이에서 생기는 재결합 중심의 에너지 레벨이 서로 다름을 알 수 있다[4].

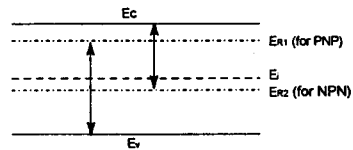


그림 4. e-h쌍의 재결합 중심의 개념도

그림 4.의 개념도는 G. C. Messenger가 1965년 IEEE지에 실었던 그림인데 본 실험 결과를 이 개념도로 설명이 가능하였다. npn형의 경우 minority-carrier가 정공(hole)이고 npn형의 경우 전자(electron)인데 pnp형의 재결합 중심의 에너지 레벨(ER1)과 정공이 지나다니는 valence band의 에너지 레벨과의

차이가 npn형의 재결합 중심의 에너지 레벨(E_{R2})과 전자가 지나 다니는 conduction band의 에너지 레벨과의 차이보다 커서 pnp형의 BJT가 npn형의 BJT보다 방사선에 의한 minority-carrier의 수명 감소가 덜 일어난다고 볼 수 있는 것이고 실험 결과와도 일치한다.

(나) MOSFET의 문턱전압의 분석

MOSFET의 Id-Vds곡선으로부터 얻을 수 있는 정보는 문턱 전압(threshold voltage), transconductance, 출력 저항, breakdown 전압 등이다. 그림 5.에서 볼 수 있듯이 nMOS의 경우 방사선 조사 후에는 조사전 보다 문턱 전압이 감소함을 알 수 있다.

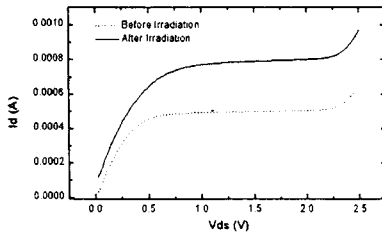


그림 5. MOSFET 특성 곡선의 조사전, 후의 변화

MOSFET의 문턱 전압 V_{th} 는 방사선 조사를 받으면 그 값이 바뀌게 되는데 이는 SiO_2 내에 전하(charge)와 결함(defect)들이 생겨나기 때문이다. 이들이 생겨나면 문턱 전압을 설명하는 식 (3)에서 Q_f 와 Q_i 의 값이 바뀌게 된다. 그림 6.에서 nMOS와 pMOS에서 발생하는 Q_f 와 Q_i 를 보여주고 있는데 Q_f 는 산화층(oxide)내에 방사선에 의해 결함들이 발생하면 이들이 속도가 느려 포획될 확률이 큰 정공(hole)들을 포획하게 되고 산화층내에

이동성이 없는 (+)의 전하를 축적하게 된다[5].

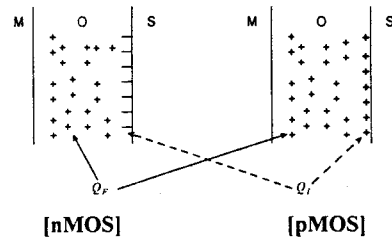


그림 6. SiO_2 에서 발생하는 Q_f 와 Q_i 의 분포

이 현상은 nMOS, pMOS 모두에 공통적이며 선량이 증가함에 따라 선형적으로 증가하다가 약 10kGy에서 그 증감이 둔화된다. 또 한편 Q_i 는 SiO_2 와 Si사이의 계면에서 발생하게 되는데 nMOS에서는 (-) 전하로, pMOS에서는 (+)전하로 쌓이게 된다. 전자빔을 받은 MOSFET은 Q_f 와 Q_i 의 효과가 함께 나타나므로 nMOS와 pMOS에서 문턱 전압의 변화는 서로 차이가 나게 된다.

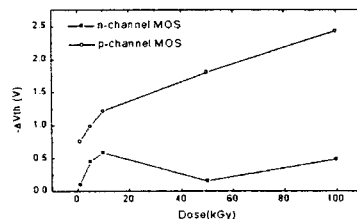


그림 7. 조사후의 문턱전압의 조사선량에 따른 변화

실제로 조사전, 후의 문턱 전압의 변화를 선량의 변화에 따라 그래프를 그려보면 그림 7.과 같이 나타나는데 nMOS와 pMOS의 경향에 차이가 있음을 알 수 있다. 그림 7.의 그래프를 바탕으로 Q_f 와 Q_i 의 선량에 따른 변화를 유추해보면 그림 8.과 같이 나타나게 되며 그림 7.와 비교해보면 가정이 적절함을

알 수 있다.

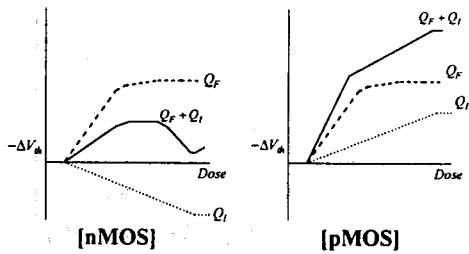


그림 8. Q_f 와 Q_i 의 선량에 따른 모델링

5. 결론

본 연구에서는 트랜지스터에 1MeV 전자빔을 조사시켜 그 변화를 관찰하고 그 원인을 분석하였다. 트랜지스터는 상용 트랜지스터를 선택하였으며 선량을 다섯 단계로 증가시켜가며 그 변화를 보았다. BJT는 2N3904(npn형)와 2N3906(pnp형)이 선택되었으며 MOSFET은 CD4007의 inverter소자가 선택되었다. BJT에서는 중요 변수 중에 하나인 전류 이득(h_{FE})의 변화를 관찰하였으며 MOSFET은 문턱 전압(threshold voltage)의 변화를 분석하였다. BJT의 전류 이득은 npn형 pnp형 모두 선량이 증가함에 따라 감소하였는데 그 기술기로부터 전자빔에 대한 손상 상수(damage constant)를 구할 수가 있었으며 pnp형이 npn형보다 방사선 조사에 대한 내구성이 더 우수한 것으로 나타났다. 이에 대한 설명은 재결합 중심(recombination center)의 에너지 레벨을 정의함으로써 가능하였다. 그리고 MOSFET의 문턱 전압의 변화는 nMOS와 pMOS의 경우 서로 다르게 나타났는데 이는 SiO_2 내에서 생기는 Q_f 와 SiO_2 와 Si의 계면에서 생기는 Q_i 를 적절히 가정함으로써 설명이 가능하였다.

향후 본 연구를 바탕으로 트랜지스터를 증폭기 회로로 꾸며서 그 변화를 관찰하고 또 그에 대한 변수를 모델링하여 PSpice simulation도 함께 병행해나갈 생각이다.

본 연구의 결과는 방사선 환경에서 쓰이고 있는 트랜지스터 소자에 대한 평가에 이용될 수도 있으며 그 수명을 예측하는데도 이용될 수 있다. 방사선 환경에서의 반도체 소자의 사용은 계속 증가 추세에 있으며 우리 나라도 예외는 아니다. 따라서 이 분야에 대한 연구는 꼭 필요하며 계속되어야 할 것이다.

참고 문헌

- [1] Paul R. Gray and Robert G. Meyer, *Analysis and Design of Analog Integrated Circuits*, John Wiley & Sons Inc., p. 15, p. 62 (1993)
- [2] Henning Lind Olesen, *Radiation Effects on Electronic Systems*, Plenum Press, p. 58 (1966)
- [3] W. E. Horne and R. R. Brown, "Correlation of Electron-Induced Changes in Transistor Gain with Components of Recombination Current", *IEEE Trans. on Nucl. Sci.*, Vol. NS-13, No.6, p. 181 (1966)
- [4] G. C. Messenger, "Displacement Damage in Silicon and Germanium Transistors", *IEEE Trans. on Nucl. Sci.* Vol. NS-11, No. 6, p. 53 (1965)
- [5] A. I. Barry and D. F. Page, "Radiation Hardening of MOS Transistors for Low Ionizing Dose Levels", *IEEE Trans. on Nucl. Sci.*, Vol. NS-13, No. 6, p. 255 (1966)