알파 입자가 기억 소자의 SENSE AMP.에 미치는 영향

'88 추계학술대회
'88 - D - 4

°이 성 규, 한 민 구
서울대학교 전기공학과

The Effects of Alpha Particles on the Sense Amplifier in Memory Devices

°Seongkyu Lee and Minkoo Han
Dept. of Electrical Eng. Seoul National Univ.

Abstract

The purpose of this paper is to investigate the effects of alpha particles on the memory circuits such as a sense amplifier and bit lines. Sense amplifiers column alpha particle hits have been simulated for a mega bit DRAM using SPICE, a circuit simulation program. The energy of alpha particle and the substrate concentration are found to strongly influence the likehood of soft errors. Our results may be useful for the designing of alpha particle immune sense amplifiers.

1. 서 론

메모리 소자들이 고집적화 되어감에 따라 MOSFET의 크기가 점점 감소하면서 알파 입자에 의한 soft error가 기억소자의 신뢰도에 심각한 영향을 미치고 있다.

신뢰도에 영향을 미치는 대표적인 현상으로 hot carrier 및 soft error가 있는데, hot carrier 문제는 LDD를 사용하여 감소시켜가고 있는데 반하여 soft error 문제는 소자 크기의 감소에 따른 정전용량이 femto farad 수준으로 되어감에 따라 더욱 심각한 현상으로 부각되고있다.

알파입자의 문제는 1978년 INTEL사에서 메모리의 soft error가 알파입자에 의한 문제라는 것을 보고한 이래, 알파입자에 의해 생성된 전하를 수집하는 메카니즘을 drift 와 diffusion 개념에서 연구가 진행되었다. 1980년대 초에 전하수집 과정중 electron-hole pair의 전하 분리 과정에서 depletion 영역의 전계가 확장되어서 유효 수집 영역이 늘어나는 "funnelling" 현상을 규명하게 되었다.

Funnelling 개념의 도입에 따라서 알파 입자에 의해 발생하는 전류의 최대치가 증가되며, 유효 전류 흐름시간이 감소된다고 보고되었다. 전류의 최대치가 증가되면서 이론적으로 알파입자에 의한 영향이 증대될 수 있다.

알파 입자에 의한 메모리 소자의 신뢰도 문제는 정전용량이 작은 submicron 소자에서 더욱 심각해지기 때문에 소자를 packing 하기 전에 polyimide를 사용, overcoating 함으로써 packing 물질로 부터 나오는 알파입자의 영향을 감소 시키기는 하였으나 아직도 공정과정에서 함유된 불순물 및 coating 물질인 polyimide에서 알파입자가 발생되고 있다.

알파 입자가 MOSFET 에 미치는 영향에 대한 연구가 수행되어 있으나, 주변회로에 미치는 연구는 거의 보고된 바가 없다. 따라서 본 연구에서는 알파입자가 sense amp.에 미치는 영향이 어떤가를 알아보았고, 또한 알파입자의 에너지와 기판농도에 따른 영향도 알아보았다.

2. 알파 입자의 특성 및 전하 수집 메카니즘

Sense amp.에 미치는 알파입자의 영향을 정성적으로 알기 위해서 알파입자의 특성과 기판 내에서 일어나는 전하 수집 메카니즘을 분석하였다.

알파입자는 packing 물질 및 silicon die에 포함된 방사성 물질이 그 근원이며, 에너지는 0 - 9 MeV 이다. (그림1). 알파입자가 실리콘 기판에 침투될 때 track을 따라 수 많은 EHP가 생성되며, 이 EHP의 밀도는 track의 range에 따라 변화한다.(그림2)

알파입자의 입사에 의해 기판 내에 생성된 ion pair 들은 이들의 생성 당시 농도와 기판 농도의 차이에 의해 diffusion으로 이들 중 electron의 일부가 수집되며, n^+-p 접합의 depletion 영역에 존재하는 전계에 의해 electron들과 hole들이 분리되어 원래의 전계 방향과 반대 방향으로 전계가 형성됨에 따라 전계가 감소한다. 이것을 보상하기위해 등전위면이 기판 쪽으로 밀려 내려가 실효 depletion 영역이 증대되는 funnelling 현상에 의해 drift로 electron 들이 대부분 수집되게 된다.

Funnelling 현상에 의해 모여진 전하량 Q_F를 어떻게 정확히 추정할 수 있는가가 중요한데, Q_F를 수식적으로 표현하면 다음과 같다.

$$Q_F = \frac{d\Psi(x,t)}{dx}\,\mu_n\, n(x)\, dt\, dx \qquad (1)$$

$\Psi(x,t)$: 전위

μ_n : electron mobility

n(x) : electron density

Funnelling 에 의해 모여지는 electron의 움직임을 수식적으로 해석하면 다음과 같이 funnelling 길이의 식을 표현할 수 있다.

$$L_f = \frac{1}{qn_p}\left(\frac{\mu_n}{\mu_p}\right)\int_0^{t_f} I_p(t)dt$$

$$\propto \left(\frac{\mu_n}{\mu_p}\right) W / \cos\theta \quad \propto \left(\frac{\mu_n}{\mu_p}\right)\left(\frac{V}{N_a}\right)^{1/2} \qquad (2)$$

μ_n : electron mobility

μ_p : hole *mobility*

I_p : hole 전류

W : 초기 depletion 영역의 넓이

θ : 입사 각도 (표면에 대해 수직일때 0°)

V : depletion 영역에 인가된 전압

N_a : 기판 농도

t_f : 등전위면의 구부러짐이 회복될때 까지의 시간

3. 알파 입자에 의한 전류 모델

알파입자에 의해 생성된 전하들이 전하 수집 메카니즘에 의해 일정 node로 모여짐으로써 흐르는 전류는 funnelling 길이에 따라 변화한다.

알파입자가 기판 내로 침투한 후 quasi-neutral 영역에서의 전압 강하는 electron 과 hole 들의 track에 의해 주어지는 전기적 저항과 기판 내의 track 끝에서 부터 발생하는 spreading 저항의 합에 전류를 곱한 것과 같다. 따라서 전류의 수식적 표현은 다음과 같다.

$$I_0 = (V+V_{bi}) / \left[\frac{L}{q(\mu_n+\mu_p)n_p} + \frac{1}{q\mu_p(2\pi n_p N_a)^{1/2}}\right] \qquad (3)$$

V : 인가 전압

V_{bi} : 전위 장벽

L : junction 아래의 알파입자의 track 길이

n_p : 초기 발생 hole의 밀도 (cm^{-1})

N_a : 기판 농도 (cm^{-3})

[· · ·] 의 첫째항 : column의 전기적 저항

[· · ·] 의 둘째항 : spreading 저항

$$I(t) = I_0 \cosh\left(\frac{I_0\, t\cos\theta}{1.56\times10^{-19}\times(1+\mu_n/\mu_p)\, n_p\, W}\right) \qquad (4)$$

4. 모의 계산(simulation) 및 결과

본 연구에서는 알파입자에 의해 발생하는 시간에 따른 전류값을 전류 모델에서 얻은 전류식으로 부터 계산하였는데, 이 모델에서 고찰한 바와 같이 알파 입자의 에너지에 따라서 funnel 길이가 변화하므로 전류파형이 변화함을 알 수 있다. 그러므로 알파 입자의 에너지를 1 - 9 MeV로 변화시키고, 동시에 기판농도를 1×10^{15}, 3×10^{15}, 5×10^{15}, $7\times10^{15}\,cm^{-3}$ 으로 변화를 주었다.

DRAM 회로중에 sense amplifier의 bit line에 알파 입자가 소자 표면에 수직으로 입사했을 경우에 관하여 전류파형을 얻었다. (그림3)의 파형에서 보면 알파 입자 에너지에 따른 전류의 최대치가 크게 변화함을 알 수 있는데 그 이유는 (그림2)에서 알파 입자에 의해 생성되는 ion-pair의 수는 알파 입자의 track 끝단에서 생성된 ion-pair의 밀도가 상대적으로 많음을 알 수 있고, 알파입자의 에너지가 작을수록 track의 길이가 짧으므로 funnel 길이 내에 발생하는 ion-pair가 알파 입자의 에너지가 큰 경우보다 많기 때문이다. 따라서 알파입자의 에너지가 작을수록 전류의 최대치가 커지지만, diffusion에 의한 전자의 이동이 적으므로 빠른 시간 안에 전류가 흐르게됨을 알 수 있다.

본 모의계산에서는 회로 simulation program인 SPICE를 사용하였다. 이에 사용된 등가회로는 *dummy cell*이 있는 회로와 dummy cell이 없고 dummy line (bit line)이 그 역할을 하게되는 회로를 사용하였다.(그림4)

(그림3)의 전류파형을 알파입자에 의한 전류원으로하여 두가지 등가회로의 bit 선 node에 연결시킴으로써 각각의 경우에 대해 모의계산을 수행하였다.

(그림5)의 (a),(b)는 (그림4)의 (a),(b)의 각 등가회로가 "0"의 정보를 읽을 경우에 대한 시간에 따른 각 node의 전압변화 graph 이다.

(그림6), (그림7) 에서 보인 graph는 dummt cell이 있는 sense amp.의 node 50에 각각의 전류원을 연결시킨 경우인데 알파입자의 에너지가 1 MeV일 경우에는 기판농도 크기에 관계없이 error가 발생하였으며, 기판농도가 $1\times10^{15}cm^{-3}$일 경우에는 알파입자의 에너지가 3, 5 MeV일때도 error가 발생함을 보이고 있는데, 그 이유는 dummy cell의 전위와 cell의 전위를 비교하는 과정에서 node 50의 전위가 알파입자에 의한 전류원에 의해 순간적으로 dummy cell의 전위 보다 높아지는데 있다하겠다. 이와 같은 현상은 전류원의 최고치의 값에 따라 발생의 여부가 결정되므로 위와 같은 error 발생의 경향을 보이고 있다.

(그림8), (그림9)는 dummy cell이 없는 회로의 node 50에 입력전류원을 연결시켜 얻어진 결과이다. 이 경우의 error 발생의 경향은 dummy cell이 있는 경우와 유사하지만 기판농도가 $10^{15}cm^{-3}$이고 알파입자 에너지가 5 MeV일때 error가 발생하지 않은 것으로 보아 dummy cell이 있을때 보다

error 발생 가능성이 적음을 보이고 있다.

이와 같이 dummy line을 사용한 경우가 상대적으로 error 발생이 적은 이유로는 dummy line에는 항상 일정 전압(2.5 V)이 인가되어 있기 때문에, dummy line의 capacitor에 저장된 전위와 비교하는 경우 보다는 알파입자에 의한 전류에 비교적 큰 영향을 받지않는 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 알파입자가 고집적 기억소자의 주변회로인 sense amp.에 미치게되는 영향을 정량적으로 보여주었으며, 소자 및 회로가 알파입자에 의해 어떻게 오동작을 일으키게 되는지에 관한 메카니즘에 대한 물리적 배경을 설명하였다.

또한 회로 simulation을 통해서 알파입자의 에너지와 실리콘 기판 농도가 soft error에 미치는 영향을 밝히고 dummy cell이 있는 경우와 없는 경우의 두가지 등가회로에 대한 simulation 결과를 비교하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 알파입자의 에너지에 따라 funnel 길이가 변하여 전류원의 최대치가 달라지므로 error의 발생 여부가 결정된다. simulation 결과를 보면 알파입자의 에너지가 1 MeV 일때는 error 발생의 가능성이 큼을 알 수 있는데 알파입자의 발생빈도는 4 - 5 MeV의 에너지를 갖는 알파입자의 경우가 최대이므로 1 MeV의 알파입자에 의한 영향은 크지않음을 알 수 있다.(그림10)

2) 기판농도의 변화에 따른 알파입자의 영향은 기판농도가 커질수록 funnel 길이가 짧아지므로 줄어들어 error 발생의 가능성이 적어짐을 알 수 있다.

3) Dummy cell이 있을 경우와 없을 경우의 두가지 회로를 simulation한 결과를 보면 dummy cell 대신에 dummy line을 사용한 회로가 알파입자의 영향을 적게받음을 알 수 있다.

참 고 문 헌

[1] Yaney.D.S., Nelson.J.T., and Vanskike.L.L. "Alpha particle tracks in silicon and their effect on dynamic MOS RAM reliability." IEEE Trans., 1979 ED-26, (1), pp. 10-16

[2] Kirkpatric.S., "Modeling diffusion and collection of charge from ionizing radiation in silicon devices." IEEE Trans., 1979, ED-26, (11), pp. 1742-1745

[3] Hsieh.C.M., Murley.P.C., and O'Brien.R.R. "Dynamics of charge collection from alpha particle tracks in integrated circuits." Proc. 19th International Reliability Physics Symposium., Orlando, Fl, USA, April 1981. pp. 38-42

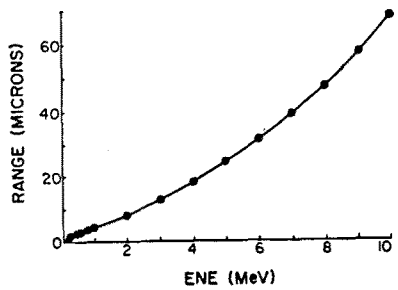
[4] Hu.C. "Alpha particle induced field and enhanced collection." IEEE Electron Device Lett., Vol. EDL-3, Jan. 1982. pp. 31-34

[5] Messenger.G.C. "Collection of charge from junction nodes from ion tracks." IEEE Trans., 1982, NS-29, (6), pp. 2024-2031

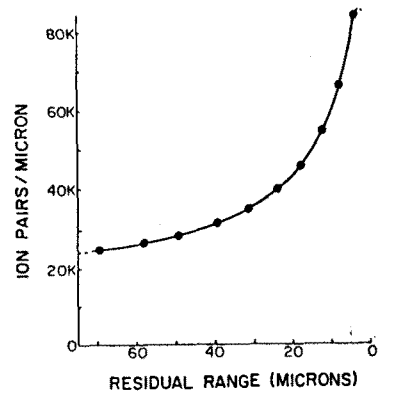
[6] McPartland.R.J., Nelson.J.T., and Huber.W.R. "Alpha particle induced soft errors and 64K DRAM design interaction." Proc. of the 18th International Reliability Physics Symposium, Las Vegas, NV, USA, April 1980, pp. 261-267

[7] McLean.F.B., and Oldham.T.R. "Charge funnelling in n- and p-type silicon substrates." IEEE Trans., 1982, NS-29, (6), pp. 2018-2023

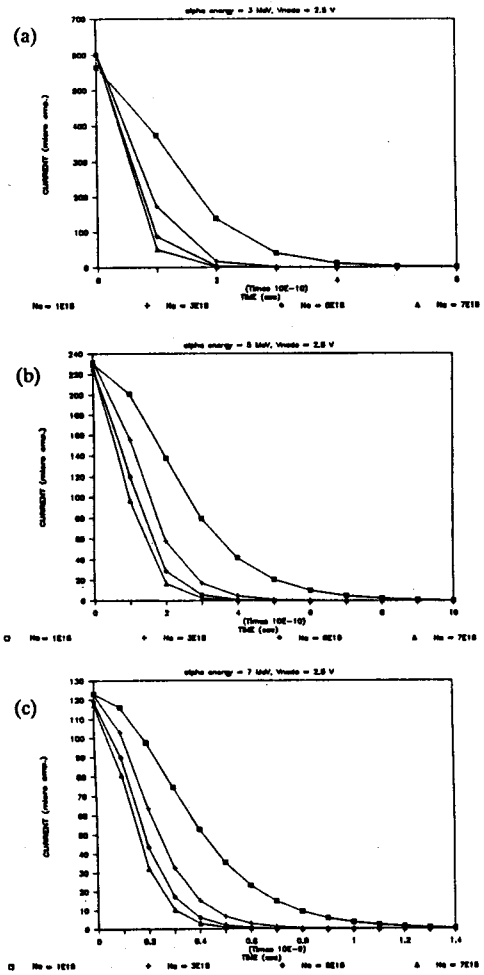
[8] Carter.P.M., and Wilkins.B.R. "Alpha particle induces soft errors in NMOS RAMs: a review." IEE Proc., Vol.134, No.1, Feb. 1987



(그림 1) silicon에서의 알파입자의 에너지-range 관계



(그림 2) Silicon에서의 알파입자의 ionization density

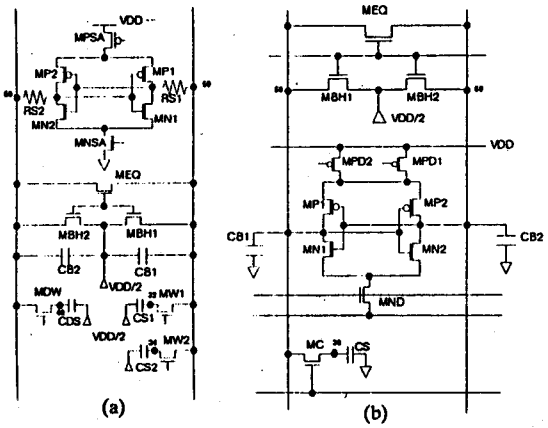


(그림 3) 알파입자에 의해 발생하는 전류

(a) E_α = 3 MeV

(b) E_α = 5 MeV

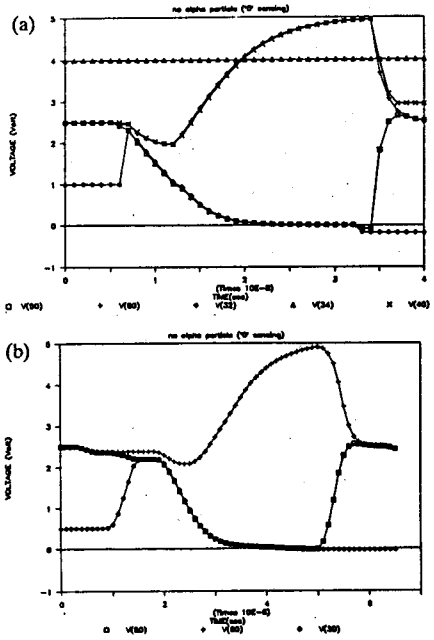
(c) E_α = 7 MeV



(그림 4) 입력 등가회로 (sense amp. 와 cell)

(a) Dummy cell이 있는 경우

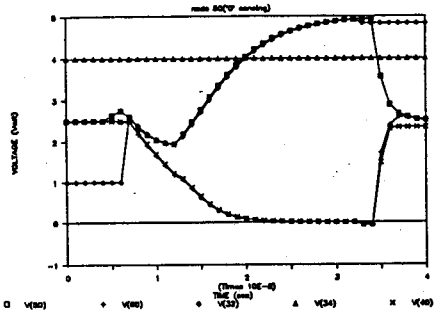
(b) Dummy cell이 없는 경우 (Dummy line 있음)



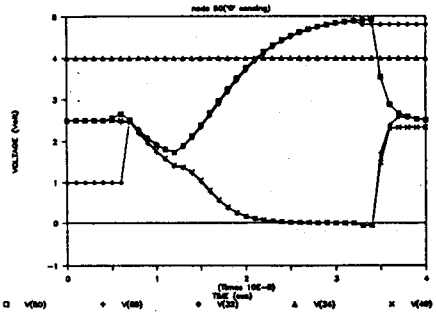
(그림 5) 각 node의 전압 변화 graph (no alpha hits)

(a) Dummy cell이 있는 경우

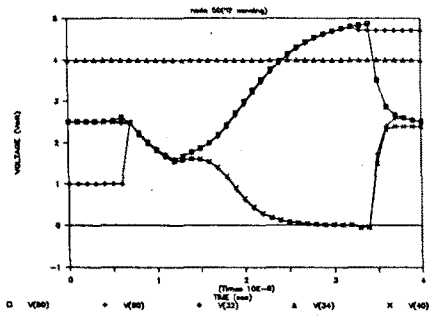
(b) Dummy cell이 없는 경우



(a) E_α = 1 MeV

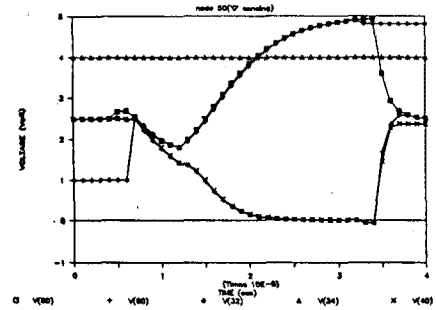


(b) E_α = 3 MeV

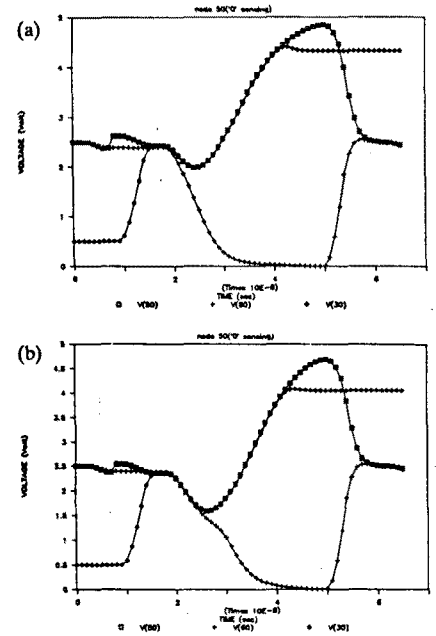


(c) E_α = 5 MeV

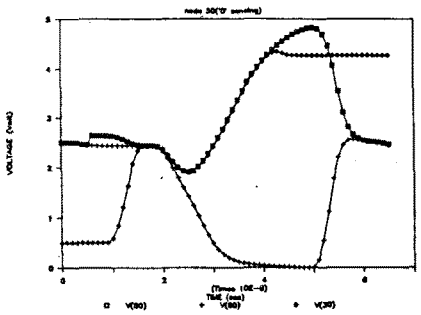
(그림 6) 시간에 따른 각 node의 전압 변화,
error 발생, dummy cell이 있는 경우
(정보 "0" 읽음, $N_a = 1\times10^{15} cm^{-3}$)



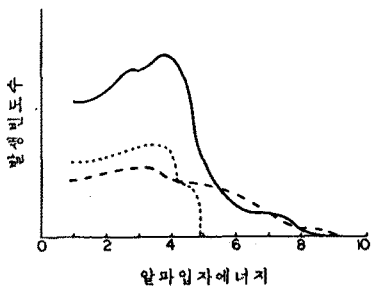
(그림 7) E_α = 1 MeV, 각 node의 전압 변화 graph
error 발생, dummy cell이 있는 경우
$N_a = 3\times10^{15}$ 5×10^{15} $7\times10^{15} cm^{-3}$



(그림 8) 시간에 따른 각 node 의 전압 변화
error 발생, dummy cell이 없는 경우 (a) E_α = 1 MeV
(정보 "0" 읽음, $N_a = 1\times10^{15} cm^{-3}$) (b) E_α = 3 MeV



(그림 9) E_α = 1 MeV, 각 node의 전압 변화
error 발생, dummy cell이 없는 경우
$N_a = 3\times10^{15}$ 5×10^{15} $7\times10^{15} cm^{-3}$



(그림 10) 전형적인 package물질에서 방출되는 알파입자의
에너지 스펙트럼.
——— package emitted alpha particles
------- uranium - 238
– – – – thorium - 232