

論文99-36D-1-11

알파 입자에 의한 전하 수집량에 대한 통합 모델 (Unified Model for Alpha-particle-induced Charge Collection)

申 炯 淳 *

(Hyungsoon Shin)

요 약

알파 입자의 입사에 의하여 생성된 전하중 접합으로 수집되는 전하량을 예측할 수 있는 통합 모델을 개발하였다. 이 모델은 funneling과 diffusion에 의한 전하 수집 현상을 모두 고려함으로써 접합 면적, 접합 전압, 알파 입자의 입사 에너지, 입사 각도, 입사점의 위치, 그리고 접합간 격리에 사용되는 트렌치 산화막 깊이의 변화에 따른 수집전하량의 변화를 정확하게 예측할 수 있다.

Abstract

A Unified model for the alpha-particle-induced charge collection has been developed. By accounting for the funneling and diffusion charges separately, new model accurately describes the dependence of collected charge on junction size, junction bias, injection energy, injection angle, injection point, and trench oxide depth.

I. 서 론

DRAM 집적도의 급격한 향상으로 소자의 크기가 감소하면서 이에 따른 신뢰성 문제가 심각하게 대두되고 있다. 여러 종류의 신뢰성 문제중 알파 입자에 의한 soft error와^[1] 핫-캐리어에 의한 hard error가^[2] 가장 중요한 문제로, 이에 따라 소자의 크기, 셀 캐패시턴스, 전원 전압 등이 제한을 받게 되었다. 이러한 신뢰성 문제중에서 핫-캐리어 현상은 LDD (Lightly Doped Drain) 등의 소자 구조 변화와 전원 전압의 감소로 그 영향을 감소시켜 왔다. 그러나 알파 입자에 의한 soft error는 전원 전압 감소에 따른 critical 전하의 감소로 그 영향이 증가하여 셀 캐패시턴스의 감소를 제약하고 있다. 따라서 soft error의

영향을 최소화하는 셀 구조를 개발하기 위해서는 funneling과 diffusion에 의한 전하 수집 현상에 기초를 둔 수집 전하량 예측 방법을 개발하는 것이 필수적이다. 그러나 소자 시뮬레이터를 이용하여 수집 전하량을 예측하는 방법은 한가지 입사 조건에 대하여 SUN Ultra2로 8시간 이상이 소요되므로 다양한 입사 조건에 대하여 모두 시뮬레이션을 수행하는 것이 현실적으로 불가능하다. 본 논문에서는 이러한 단점을 보완하기 위하여 계산 시간이 매우 작은 해석적 모델을 개발하였다. 이 통합 모델은 funneling과 diffusion에 의한 전하 수집 현상을 모두 고려하고 있으므로 다양한 입사 조건에 대하여 수집 전하량을 정확하게 예측할 수 있다.

* 正會員, 梨花女子大學校 電子工學科

(Department of Electronics Engineering Ewha Womans University)

接受日字:1998年6月17日, 수정완료일:1998年11月18日

II. 수집 전하량 모델

알파 입자의 입사에 의하여 생성된 전자와 정공중 접합으로 수집되는 전자의 수집 전하량은 funneling

현상에 의하여 수집되는 funneling 전하와 diffusion 현상에 의하여 수집되는 diffusion 전하로 구성되어 있다.^[3] 따라서 총 수집전하량 (Q_t)에 대한 모델은 다음과 같이 funneling 전하(Q_f)와 diffusion 전하(Q_d)의 합으로 구성된다.

$$Q_t = Q_f + Q_d \\ = q \int_0^{L_f} N(r) dr + q \int_{L_f}^{L_d} D(r) N(r) dr \quad (1)$$

여기서 L_f 는 알파 입자 에너지에 따른 알파 입자 궤적의 길이^[4], L_d 는 궤적 상에서의 funneling 길이, $N(r)$ 은 궤적 상에서 μm 당 생성된 전자-정공의 수^[4], $D(r)$ 은 궤적 상에서의 위치에 따른 diffusion에 의한 수집율이다.

L_f 에 대한 모델은 Hu의 모델을^[5] 근간으로 입사 각도, 접합 면적, 셀 접합간의 격리에 사용된 트랜치 산화막 깊이에 의한 변화를 고려할 수 있도록 개선된 모델로 다음의 식과 같다.

$$L_f = \frac{Z_f}{\cos \theta} \quad (2)$$

$$Z_f = Z_j + W_d \left[1 + \frac{\mu_n}{\mu_p} \frac{F(Z_{ox})}{1 + \alpha A^{-\beta}} \right] \quad (3)$$

$$F(Z_{ox}) = \gamma Z_{ox} + \delta \quad (4)$$

여기서 Z_f 는 기판과 수직 방향으로의 funneling 길이, θ 는 기판 수직 방향과 알파 입자 궤적과의 각도, Z_j 는 셀 접합의 깊이, W_d 는 셀 접합의 공핍층 길이, μ_n 과 μ_p 는 mobility, A 는 접합 면적, Z_{ox} 는 트랜치 산화막의 깊이이고 α , β , γ , δ 는 보정 계수이다. Hu의 모델은 큰 접합 면적에서 funneling에 의한 전압 왜곡이 1차원적이라는 가정 하에 공핍층에서 1차원 drift식을 이용하였다. 그러나 높은 집적도를 갖는 DRAM에서는 접합 면적이 매우 작으므로 전압 왜곡에 대한 3차원 효과가 증가하게 된다. 따라서 funneling 깊이에 대한 모델에 접합 면적에 따른 3차원 효과를 고려하기 위하여 식3과 같이 $1 + \alpha A^{-\beta}$ 항을 추가하였으며 이 항의 값은 접합 면적이 증가함에 따라 1에 근접하게 된다. 식4는 트랜치 산화막 깊이에 의한 영향을 고려하기 위하여 추가되었으며 이에 대한 자세한 설명은 다음절에서 하겠다.

Q_d 모델에 사용된 diffusion에 의한 수집율 $D(r)$ 은 3차원 diffusion식을 단순화한 식으로^[6] 다음과 같

다.

$$D(x_s, y_s, z_s) = \sum_{m=1}^{\infty} [H(x_s, y_s, -z_s + (2m-1)a) \\ + H(x_s, y_s, -z_s - (2m-1)a) - H(x_s, y_s, z_s + (2m-1)a) \\ - H(x_s, y_s, z_s - (2m-1)a)] \quad (5)$$

$$H(x_s, y_s, z) = h(x_s, y_s, z, x_1, y_1) - h(x_s, y_s, z, x_1, y_0) \\ - h(x_s, y_s, z, x_0, y_1) + h(x_s, y_s, z, x_0, y_0) \quad (6)$$

$$h(x_s, y_s, z, x, y) = \pm \frac{1}{4\pi} \arctan \left[\frac{(y - y_s)^2 + z^2 + (y - y_s) \cdot \sqrt{(x - x_s)^2 + (y - y_s)^2 + z^2}}{|z(x - x_s)|} \right] \quad (7)$$

여기서 (x_s, y_s, z_s) 는 궤적 상에서의 생성된 전하의 위치, (x_0, y_0) 와 (x_1, y_1) 은 접합의 위치, a 는 전하가 수집되는 absorption boundary사이의 거리로서 본 모델에서는 triple-well구조의 경우에 해당하는 Z_f 에서 p-well접합 깊이까지의 거리를 사용하였다. Toyabe의 모델은^[6] 전하의 수집에서 funneling을 제외한 diffusion만을 고려하였으므로 a 값으로 twin-well구조의 경우에 해당하는 공핍층 하단에서 기판 끝까지의 거리를 사용하였다. 그러나 전하 수집에서 funneling에 의한 수집이 diffusion에 의한 수집보다 크고, 또한 funneling이 지속되는 시간동안에 Z_f 보다 깊은 곳에 위치한 전자도 접합 부근으로 drift되는 현상이 발생하므로 Toyabe의 모델은 수집 전하량을 실제보다 작게 예측하게 된다. 따라서 통합 모델에서는 이를 보정하기 위하여 a 를 정의하는 absorption boundary로 공핍층 대신에 Z_f 를 사용함으로써 수집 전하량을 정확하게 예측할 수 있다.

III. 모델의 검증

256M DRAM급 셀 구조에 대하여 접합 구조와 알파 입자의 입사 조건을 다양하게 변화시키면서 통합 모델로 계산된 수집 전하량과 3차원 소자 시뮬레이터로^[7] 계산된 수집 전하량을 비교하여 모델의 정확도를 검증하였다.

1. 소자 시뮬레이션 방법

알파입자에 의한 전하수집 현상 중 funneling이 지속되는 시간은 3차원 효과에 의한 전하 재분포에 크게 영향을 받으며 이러한 3차원 효과는 고집적 기억소자에서의와 같이 접합면적이 작고 기판농도가 높을수록 그

영향이 크다. 따라서 본 연구에서는 이러한 3차원 효과를 고려하기 위하여 3차원 소자 시뮬레이터인 DAVINCI를^[7] 사용하였다. 알파입자의 입사에 따른 전자-정공의 생성은^[4] photogeneration option을 사용하여 표현하였다. 이외에 전자-정공의 재결합을 고려하기 위하여 SRH과 Auger 모델이 사용되었으며 캐리어 이동도 모델로는 lattice scattering, ionized impurity scattering, carrier-carrier scattering이 고려된 CCSMOB와 high field effect를 고려한 FLDMOB가 사용되었으며 band gap narrowing 현상을 고려하기 위하여 BGN 모델도 사용되었다.

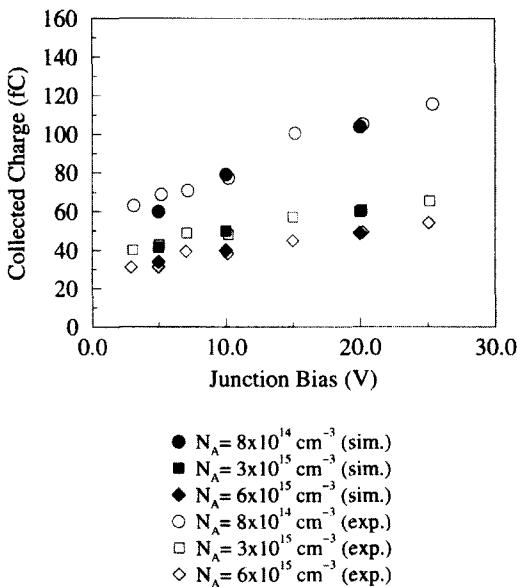


그림 1. 다양한 접합 전압과 농도에 대한 실험값과 시뮬레이션의 비교

($E_0=5.4\text{MeV}$, $A=6400\mu\text{m}^2$)

Fig. 1. Comparison of experiment and simulation for various junction bias and doping concentration.

위와 같은 시뮬레이션 환경을 이용하여 계산된 수집 전하량의 정확도를 검증하기 위하여 기존의 논문에 발표된 실험값과 비교하여 보았다. 그림 1은 다양한 접합 전압과 도우핑 농도 조건에서 simulation과 실험값이^[8] 일치함을 보이고 있다. 그림 2는 알파입자 에너지가 변화하는 경우에 비교한 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 에너지가 큰 경우, 생성된 전하의 일부만이 접합에 도달하여 에너지의 증가에도 불구하고 수집 전하량이 오히려 감소하는 Bragg peak 현상을^[9]

시뮬레이션 결과가 잘 나타냄을 알 수 있다. 이와 같이 시뮬레이션이 다양한 조건에서 실험값과 일치하므로 여러 조건에서 수행한 시뮬레이션 결과를 앞에서 설명한 모델과 비교함으로써 모델의 정확도를 검증할 수 있다.

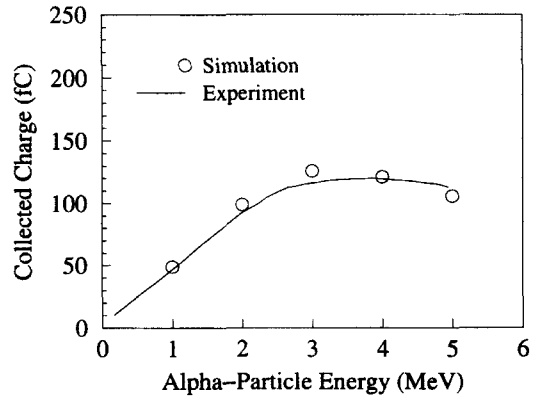


그림 2. 다양한 입사 에너지에 대한 실험값과 시뮬레이션의 비교($A=100\mu\text{m}^2$, $V_r=8\text{V}$)

Fig. 2. Comparison of experiment and simulation for various injection energy.

2. 셀 구조

모델의 검증에 사용된 셀 구조는 256M급 DRAM의 셀 구조로서 그림 3과 같이 soft error를 감소시키는 triple-well 구조를 사용하고 있다. 셀 접합, p-well, n-well, p-기판의 인가 전압은 각각 2.2, -1, 3.8, -1V이다. 셀 접합의 면적은 $0.36 \times 0.36 \mu\text{m}^2$ 이고 셀과 셀 사이의 $0.24 \mu\text{m}$ 소자 격리를 구현하기 위하여 $0.3 \mu\text{m}$ 깊이의 트랜치 산화막을 사용하고 있다.

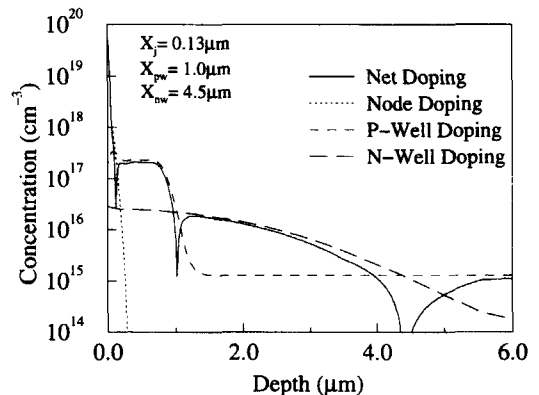


그림 3. 셀 접합의 농도 분포(triple-well)

Fig. 3. Doping profile in cell junction area (triple-well).

3. 접합 면적과 전압의 영향

통합 모델에서 사용하는 Z_i 의 모델을 검증하기 위하여 접합 면적(A)과 알파 입자가 입사된 셀 접합의 전압(V_{n1})을 변화시키면서 모델과 소자 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 그림 4 알파 입자의 입사 에너지는 2MeV이고 기판에 수직 방향으로 ($\theta=0^\circ$), 접합의 중앙에 ($x_i=y_i=0$) 입사되는 경우에 대하여 인접 셀의 접합 전압(V_{n2})은 0V로 고정하였다. 그림에서 보는 바와 같이 접합 면적이 0.25×0.25 에서 $0.5 \times 0.5 \mu\text{m}^2$ 까지 변화하고 V_{n1} 이 1.5에서 3.0V까지 변화할 때 모델이 소자 시뮬레이터의 결과를 재현하고 있다. 이때 접합 면적의 영향을 고려하기 위하여 식 3에서 사용된 보정 계수의 값은 $\alpha=0.64$, $\beta=0.18$ 이다. 수집 전하량의 변화를 분석하여 보면, 접합 면적이 증가하는 경우에는 식 3에서와 같이 Z_i 가 증가하고 또한 diffusion 전하를 수집하는 접합 면적이 증가하여 그림과 같이 수집 전하량이 증가하는 것이다. 접합 전압이 증가하는 경우에는 식3의 W_d 가 증가하여 수집 전하량이 증가하게 된다.

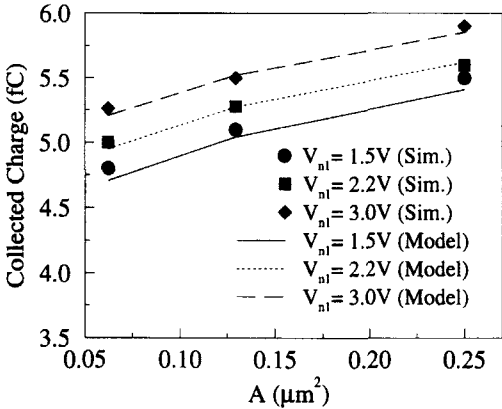


그림 4. 다양한 접합 면적과 인가 전압에 대한 모델과 소자 시뮬레이션의 비교
($E_0=2\text{MeV}$, $\theta=0^\circ$, $x_i=y_i=0\mu\text{m}$, $V_{n2}=0\text{V}$, $Z_{ox}=0.3\mu\text{m}$)
Fig. 4. Comparison of model and simulation results for various junction area and bias.

4. 입사 에너지의 영향

알파 입자 입사 에너지(E_0)의 변화에 따른 수집 전하량의 변화를 검증하기 위하여 E_0 를 0.1에서 2MeV 까지 변화시키면서 모델과 소자 시뮬레이터를 비교한 결과, 그림 5에서 보는 바와 같이 일치함을 알 수 있었다. 모델에서 E_0 의 영향은 식 1의 $N(r)$ 과 L_i 가 E_0 변화에 따른 발생 전하의 분포 변화를 고려함으로써

구현된다. 그림 5에서 E_0 가 증가함에 따라 수집전하량이 감소하는 것은 발생 전하의 양이 알파 입자 궤적의 끝부분에서 큰 값을 가지며 E_0 가 증가함에 따라 L_i 가 증가하여 대부분의 발생 전하가 n-well안에 분포하게 되어 셀 접합에 수집되지 않기 때문이다. 즉 E_0 가 증가하면 총 발생 전하량은 증가하지만 식3에서 Z_i 는 변화하지 않으면서 p-well안에 발생하는 전하량은 $N(r)$ 에 의하여 감소하므로 셀 접합으로 수집되는 전하량이 감소하게 되는 것이다.

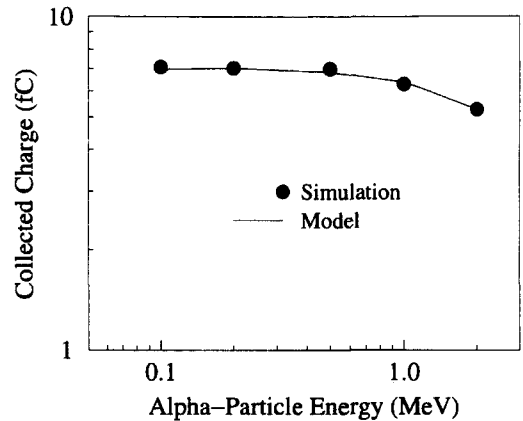


그림 5. 다양한 입사 에너지에 대한 모델과 소자 시뮬레이션의 비교($A=0.36 \times 0.36 \mu\text{m}^2$, $\theta=0^\circ$, $x_i=y_i=0\mu\text{m}$, $V_{n1}=2.2\text{V}$, $V_{n2}=0.0\text{V}$, $Z_{ox}=0.3\mu\text{m}$)
Fig. 5. Comparison of model and simulation for various injection energy.

5. 입사 각도의 영향

알파 입자의 입사 방향과 기판의 수직 방향과의 각도인 θ 의 변화에 따른 수집 전하량의 변화를 검증하기 위하여 θ 가 다양하게 변화하는 경우에 대하여 모델과 소자 시뮬레이션 결과를 그림 6에 비교하였다. 그림에서 node1은 알파 입자가 입사된 접합이고 node2는 인접한 접합이다. 그림에서 보는 바와 같이 모델과 시뮬레이션 결과가 node1뿐만 아니라 node2에 대하여도 일치함을 알 수 있다. 그림 7은 여러 가지 θ 에 대하여 소자 시뮬레이터로 계산된 생성 전자와 전압의 분포를 보이고 있다. θ 가 증가함에 따라 생성된 전자 중 인접 셀에 위치하는 전하량이 증가하여 인접 셀로 수집되는 전하가 증가하는 현상을 보이고 있다. 모델에서는 식 2와 3으로 계산된 L_i 중 트랜치 산화막 사이의 실리콘 부분에 위치하는 부분만을 식1의 funneling 전하식에서 적분하도록 하여 소자 시뮬레이션의 결과를 재현할 수 있었다.

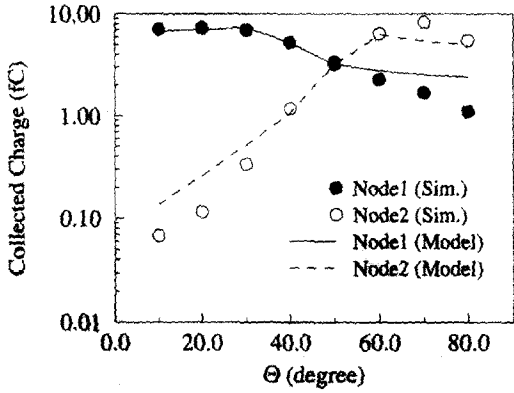


그림 6. 다양한 입사 각도에 대한 모델과 소자 시뮬레이션의 비교
 ($A=0.36 \times 0.36 \mu\text{m}^2$, $E_0=0.5\text{MeV}$, $x_i=y_i=0\mu\text{m}$, $V_{n1}=2.2\text{V}$, $V_{n2}=0.0\text{V}$, $Z_{ox}=0.3\mu\text{m}$)
 Fig. 6. Comparison of model and simulation for various injection angle.

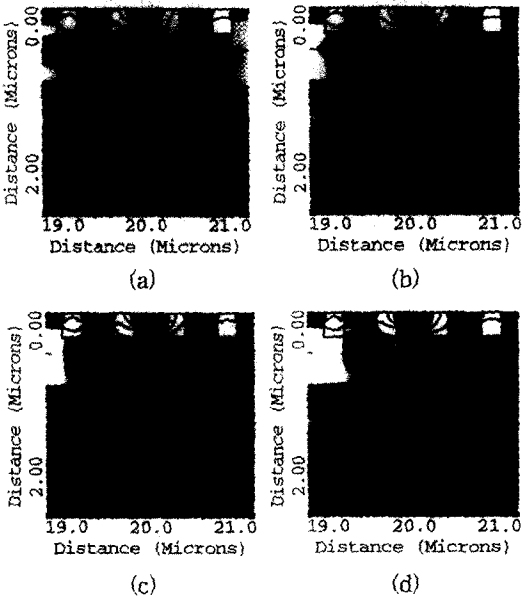


그림 7. 입사 각도의 변화에 따른 전압 및 전자 농도의 변화
 (a) $\theta = 30^\circ$ (b) 50° (c) 60° (d) 70°
 ($A=0.36 \times 0.36 \mu\text{m}^2$, $E_0=0.5\text{MeV}$, $x_i=y_i=0\mu\text{m}$, $V_{n1}=2.2\text{V}$, $V_{n2}=0.0\text{V}$, $Z_{ox}=0.3\mu\text{m}$, $t=6\text{ps}$)
 Fig. 7. Potential and electron concentration contours for various injection angle.
 (a) $\theta = 30^\circ$ (b) 50° (c) 60° (d) 70°

6. 입사점의 영향

$\theta=30^\circ$ 의 각도를 가진 알파 입자의 입사점을 다양하게 변화하면서 모델과 소자 시뮬레이션 결과를 그림 8에 비교하였으며 $x_i=0\mu\text{m}$ 가 접합의 중앙에 입사된 경

우이다. 전체적으로 모델이 소자 시뮬레이션의 결과를 재현하고 있다. 다만 알파 입자가 입사된 셀 접합의 인접 셀인 node2로 수집되는 전하량을 모델이 시뮬레이션 결과에 비하여 과다하게 계산하고 있으나 수집 전하량의 절대값이 soft error를 발생하는 critical 전하량에 비하여 매우 작은 값을 갖는 부분이므로 soft error rate를 계산하는 데는 영향이 없다.

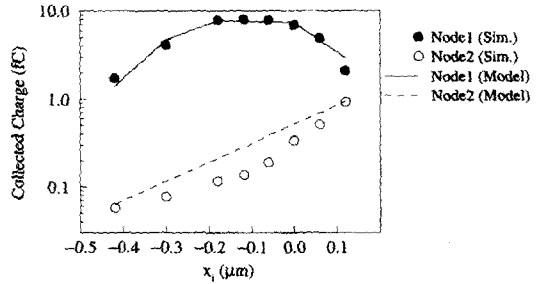


그림 8. 다양한 입사점에 대한 모델과 소자 시뮬레이션의 비교
 ($A=0.36 \times 0.36 \mu\text{m}^2$, $E_0=0.5\text{MeV}$, $\theta=30^\circ$, $y_i=0\mu\text{m}$, $V_{n1}=2.2\text{V}$, $V_{n2}=0.0\text{V}$, $Z_{ox}=0.3\mu\text{m}$)
 Fig. 8. Comparison of model and simulation for various injection point.

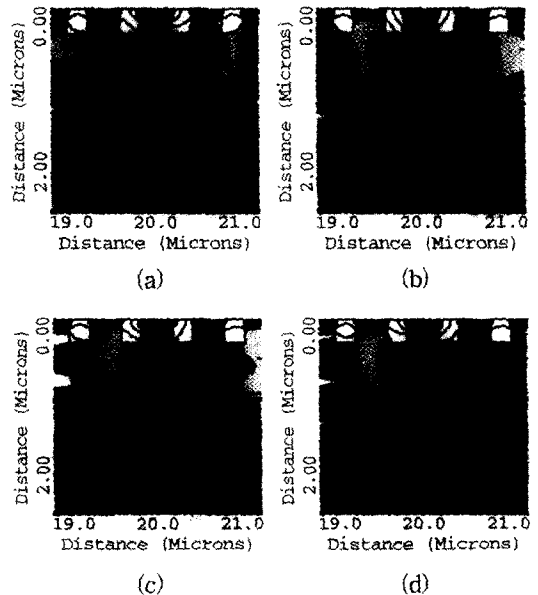


그림 9. 입사점의 변화에 따른 전압 및 전자 농도의 변화 (a) $x_i = -0.3\mu\text{m}$ (b) $-0.12\mu\text{m}$ (c) $0.0\mu\text{m}$ (d) $0.12\mu\text{m}$ ($A=0.36 \times 0.36 \mu\text{m}^2$, $E_0=0.5\text{MeV}$, $\theta=30^\circ$, $y_i=0\mu\text{m}$, $V_{n1}=2.2\text{V}$, $V_{n2}=0.0\text{V}$, $Z_{ox}=0.3\mu\text{m}$, $t=6\text{ps}$)
 Fig. 9. Potential and electron concentration contours for various injection point.
 (a) $x_i = -0.3\mu\text{m}$ (b) $-0.12\mu\text{m}$ (c) $0.0\mu\text{m}$ (d) $0.12\mu\text{m}$

그림 9에는 소자 시뮬레이터로 계산된 전자와 전압의 분포를 다양한 입사점에 대하여 비교하여 보이고 있다. 입사점이 접합의 왼쪽 끝 부분에 위치하는 경우에 생성 전자가 알파 입자가 입사된 셀 접합 부근에 많이 분포하게 되어 그림 8과 같이 수집 전하량이 최대가 됨을 보이고 있다.

7. 트렌치 산화막 깊이의 영향

셀과 셀 사이의 격리를 위하여 사용되는 트렌치 산화막 깊이의 변화에 따른 수집 전하량의 변화를 그림 10에 보이고 있다. 모델과 소자 시뮬레이션 결과가 일치함을 알 수 있으며 이때 사용된 식4의 보정 계수는 $\gamma=0.68$, $\delta=-1.0$ 이다. 그림에서 볼 수 있듯이 트렌치 산화막 깊이의 변화가 수집 전하량에 큰 영향을 미치고 있으며 깊이가 증가하면 예상과 반대로 수집 전하량이 증가한다. 그 이유를 분석하기 위하여 그림 11에 소자 시뮬레이터에서 계산된 전자 및 전압 분포를 보이고 있다. 트렌치 산화막의 깊이가 증가함에 따라 전압의 왜곡이 증가하고 따라서 Z_i 가 증가함을 알 수 있다. Funneling 현상은 접합의 공핍층에 생성된 전자-정공이 공핍층의 전계에 의하여 분리되면서 캐리어 분포를 변화시킴으로써 포아슨식을 만족하기 위하여 기판 쪽으로 전압 분포가 확산되어 발생한다.^[3]

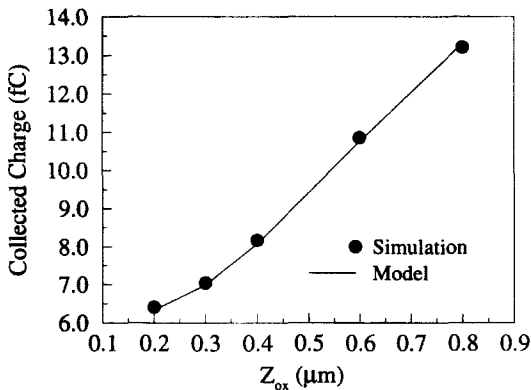


그림 10. 다양한 트렌치 산화막 깊이에 대한 모델과 소자 시뮬레이션의 비교

($A=0.36 \times 0.36 \mu\text{m}^2$, $E_0=0.2\text{MeV}$, $\theta=0^\circ$, $x_i=y_i=0\mu\text{m}$, $V_{n1}=2.2\text{V}$, $V_{n2}=0.0\text{V}$)

Fig. 10. Comparison of model and simulation for various depth of trench oxide.

따라서 생성된 전하의 농도가 클수록 funneling이 증가하는데 그림 11에서 볼 수 있듯이 트렌치 산화막의 깊이가 증가하면 알파 입자에 의하여 생성된 전하가

옆으로 확산되는 것을 트렌치 산화막이 제어하므로 생성된 전자-정공이 트렌치 산화막 사이의 p-well 영역에 집중되어 농도가 증가하는 현상을 발생시킨다. 따라서 Z_i 가 증가하여 그림 10과 같이 수집 전하량이 증가하는 것이다.

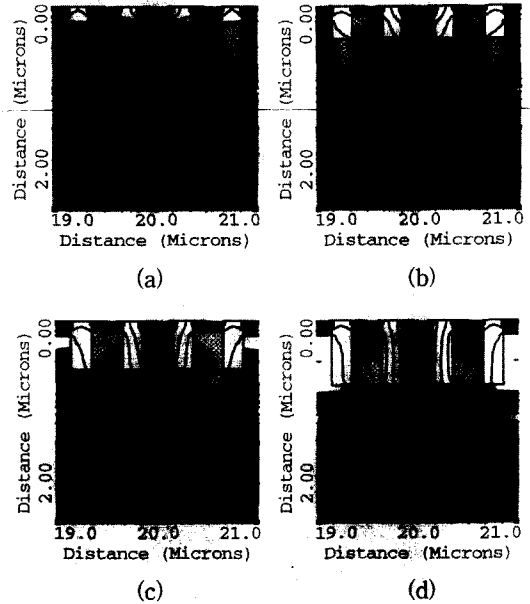


그림 11. 트렌치 산화막 깊이의 변화에 따른 전압 및 전자 농도의 변화

(a) $Z_{ox}=0.2\mu\text{m}$ (b) $0.4\mu\text{m}$ (c) $0.6\mu\text{m}$ (d) $0.8\mu\text{m}$ ($A=0.36 \times 0.36 \mu\text{m}^2$, $E_0=0.2\text{MeV}$, $\theta=0^\circ$, $x_i=y_i=0\mu\text{m}$, $V_{n1}=2.2\text{V}$, $V_{n2}=0.0\text{V}$, $t=6\text{ps}$)

Fig. 11. Potential and electron concentration contours for various depth of trench oxide.

(a) $Z_{ox}=0.2\mu\text{m}$ (b) $0.4\mu\text{m}$ (c) $0.6\mu\text{m}$ (d) $0.8\mu\text{m}$

IV. 결론

고집적 DRAM에 입사된 알파 입자에 의한 수집 전하량을 예측할 수 있는 통합 모델을 개발하였다. 이 모델은 funneling과 diffusion에 의한 전하 수집을 모두 고려함으로써 하나의 보정계수 조합을 ($\alpha=0.64$, $\beta=0.18$, $\gamma=0.68$, $\delta=-1.0$) 사용하여 접합 면적, 접합 전압, 알파 입자 입사 에너지, 입사 각도, 입사점, 그리고 트렌치 산화막의 깊이 변화에 따른 수집 전하량의 변화를 예측할 수 있다. 기존 논문에 발표된 실험값과 3차원 소자 시뮬레이터의 결과를 비교하여 시뮬레이션의 정확도를 검증하였으며 다양한 조건에 대하여 시뮬

레이션 결과와 모델의 계산 결과를 비교하여 모델의 정확도를 검증하였다. 본 논문에서는 트랜치 산화막의 깊이가 수집 전하량에 영향을 주는 현상을 최초로 보고하였으며 그 원인을 규명하였다. 따라서 트랜치 산화막의 깊이는 소자 격리 특성뿐만 아니라 soft error rate를 고려하여 결정하여야 한다. 새로 개발된 통합 모델은 소자 시뮬레이터와는 다르게 한가지 조건에 대하여 SUN Ultra2에서 0.2초만 소요되므로 다양한 소자 구조 및 입사 조건의 변화에 대한 수집 전하량 변화를 예측하여 soft error에 강한 셀 구조 연구에 활용이 가능하며, 또한 이를 발전시키면 실용적인 soft error rate 시뮬레이터의 개발이 가능하다.

감사의 글

※ 본 연구는 LG반도체의 연구비 지원에 의한 결과임.

참 고 문 헌

- [1] T. May and M.H. Woods, "Alpha-Particle-Induced Soft Errors in Dynamic Memories", *IEEE Transactions on Electron Device*, vol. ED-26, no. 1 pp. 2-9, Jan. 1979.
- [2] E. Takeda, "Hot-carrier effects in submicrometre MOS VLSI's", *IEE Proceedings*, vol. 131, no. 5 pp. 153-162, Oct. 1984.
- [3] C.M. Hsieh, P.C. Murley, and R.R. O'Brien, "A Field-funneling Effect on the Collection of Alpha-Particle-Generated Carriers in Silicon Devices", *IEEE Electron Device Letters*, vol. EDL-2, no. 4. pp. 103-106, Apr. 1981.
- [4] D.S. Yaney, J.T. Nelson, and L.L. Vanskike, "Alpha-Particle Tracks in Silicon and their Effect on Dynamic MOS RAM Reliability", *IEEE Transactions on Electron Device*, vol. ED-26, no. 1 pp. 10-16, Jan. 1979.
- [5] C. Hu, "Alpha-Particle-Induced Field and Enhanced Collection of Carriers", *IEEE Electron Device Letters*, vol. EDL-3, no. 2. pp. 31-34, Feb. 1982.
- [6] T. Toyabe, T. Shinoda, M. Aoki, H. Kawamoto, K. Mitsusada, T. Masuhara, and S. Asai, "A Soft Error Rate Model for MOS Dynamic RAM's", *IEEE Transactions on Electron Device*, vol. ED-29, no. 4 pp. 732-737, Apr. 1982.
- [7] DAVINCI v.3.0, Technology Modeling Association.
- [8] F.B. Mclean and T.R. Oldham, "Charge Funneling in n- and p-type Si substrates", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, NS-29, no. 6 pp. 2018-2023, June 1982.
- [9] C.M. Hsieh, P.C. Murley, and R.R. O'Brien, "Collection of Charge from Alpha-Particle Tracks in Silicon Devices", *IEEE Transactions on Electron Device*, ED-30, no. 6 pp. 686-693, June 1983.

— 저 자 소 개 —

申 炯 淳(正會員) 第 35卷 D編 第 8號 參照