

DI 스위칭 소자의 Turn on 특성에 관한 연구

* 이계훈*, 강호철*, 성만영*, 이현석**

* 고려대학교 전기공학과, ** 삼성전자 연구원

A Study on the modelling of DI Switching Device by FEM

Kye-Hun Lee*, Ho-Cheol Kang*, Man-Young Sung*, Hyun-Seok Lee**

* Dept. of Electrical Engineering, Korea University, Seoul. ** SAMSUNG Electronics Co

Abstract

Double Injection(DI) switching devices consist of p+ and n+ contact separated by a nearly intrinsic semiconductor region containing deep trap. The FEM is chosen as a simulation method for DI switching device, because of the advantage in local mesh refinement and computer memory comparing with other methods. And Scharfetter-Gummel(S-G) scheme is applied, with which an accurate-seven point Gaussian Quadrature rule is combined. The existence of deep trap requires the modification of conventional equation set. So recombination rate equation is modified and a new equation is included in the equation set which conventionally consists of Poisson equation and current continuity equations.

1. 서론

전력용 반도체 소자의 가장 심각한 문제점은 고내압화와 대용량화 및 고온에서의 특성 변화에 관한 안정성 문제이다. 이러한 문제점들을 개선 한다는 맥락에서 본 논문에서는 Thyristor와 같은 PNP 구조의 이론 이외의 다른 메카니즘을 스위칭 소자에 활용한다는 측면에서 반도체에서의 2중 주입 현상을 소자의 실제 제작에 반영하고 있다. 특히 깊은 불순물 준위를 형성하는 원자를 도핑한 시료에서 발생하는 2중 주입 현상이 전압 전류 특성에서 전류 제어형 부성 저항을 일으킨다는 사실이 보고된 이후, 실용상 많은 흥미를 불러 일으키고 있다. 지금까지 부성 저항 특성을 활용한 스위칭 특성 해석은 몇가지 가정을 통해 이루어 졌다. 그러나 본 논문에서는 이러한 가정을 통한 근사 해석으로 발생하는 오차를 줄이고 보다 실제적인 반도체 소자의 특성 해석을 위해 현재 반도체 소자의 구조적인 분석에 널리 적용되고 있는 유한 요소법(Finite Element Method : FEM) 기법을 도입하여 2중 주입이 발생하는 메카니즘을 해석하였다.

2. 2중 주입 스위칭 소자의 기본 모델

Lampert^[1] 등은 완벽하게 보상된 반도체에서의 2중 주입 현상을 분석하기 위해 다음과 같은 모델을 사용하였다.

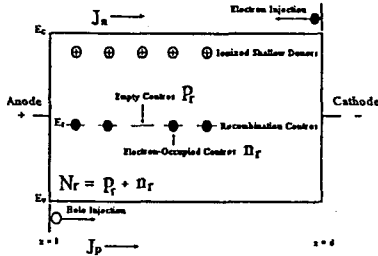


그림 2.1 Au 도핑된 p-i-n Si 반도체의 에너지 밴드 모델

이 모델에서 깊은 억셉터와 같은 트랩(deep acceptor-like traps)은 재결합 중심으로 작용하고, 얇은 도우너(shallow donor)는 이들 깊은 억셉터(deep acceptors)에 보상 전자(compensating electron)를 제공한다. 이렇게 해서 국부적인 전기적 중성(local electrical neutrality)이 유지되는 것이다. 이와 유사하게, 중성 상태의 채워지지 않은 재결합 중심의 존재는 열평형 상태에서 이온화되지 않는 얇은 도우너가 존재한다는 사실을 의미하게 된다. 2중 주입은 이러한 열평형 상태의 국부적

인 중성 조건에 왜란을 가져올 것이다. 얇은 도우너는 열평형 상태에서 오직 보상 전자만을 제공하고, 재결합이나 conduction process에는 아무런 역할을 하지 못하는 것으로 간주된다. 그러나 재결합 중심은 2중 주입에서 아주 중요한 역할을 하며 정공에 대한 포획 단면적이 전자에 대한 포획 단면적보다 크다. 이것은 전자의 수명 시간이 정공의 수명 시간보다 길다는 것을 의미하며 반도체 소자의 스위칭 특성을 변화시키는 방법으로써 깊은 준위의 불순물(deep impurity)의 도핑에 의한 재결합 중심의 형성이 이용되고 있다.

3. 2중 주입 현상에 대한 유한 요소법의 적용

3.1 기본 방정식과 정규화

정상 상태에서 고체 내부의 2중 주입의 현상은 포아송 방정식, 전류식, 연속의 방정식에 의해 결정 된다. 그러나 이방정식들은 실제 계산에서 overflow를 발생시키기 때문에 정규화 과정을 거쳐야 한다. 본 논문에서의 정규화 과정은 De mari^[2]에 의해 주어지는 과정과 동일하다. 전류식을 포함한 포아송 방정식, 연속의 방정식을 정규화된 변수로 표현하면 식 3-1이 된다.

$$\begin{aligned} \nabla^2 \phi &= \nabla \cdot \nabla \phi = e^{-\phi} - e^{-\phi} - N - P_r \\ \nabla \cdot (\gamma_n^{-1} e^{\phi} \nabla e^{\phi}) &= R \\ \nabla \cdot (\gamma_p^{-1} e^{-\phi} \nabla e^{-\phi}) &= R \end{aligned} \quad (3-1)$$

$$\begin{aligned} \gamma_n^{-1} &= \frac{D_n}{D_0} \\ \gamma_p^{-1} &= \frac{D_p}{D_0} \end{aligned}$$

3.2 재결합과 깊은 준위의 트랩

본 논문에서는 이제까지의 논문에서는 다루어 지지 않은, 깊은 준위의 트랩(deep trap)이 존재하는 디바이스의 경우에 대해 유한 요소법을 적용하고 있기 때문에, 기존의 재결합 식을 변형 시켜서 사용한다. 그러므로 본 논문에서는 내부 전위, 전자의 농도, 정공의 농도 이외의 변수를 설정한다. 이 4번째 변수는 바로 중성 상태의 재결합 중심의 농도이고 식 3-1에서 P_r 이란 기호로 쓰여 졌다. 전지와 정공에 대한 capture rate의 인자인 전자와 정공의 포획 단면적 σ_n 과 σ_p 는 재결합 중심의 상태에 따라 그 값이 변화한다. 그 관계를 본 논문에서는 아래와 같은 관계식을 이용하여 계산한다.

$$\sigma_n = \frac{(N_r - P_r)SR + P_rSN}{N_r} \quad (3-2)$$

$$\sigma_n = \frac{(N_r - P_r)SA + P_rSN}{N_r}$$

SA와 SN과 SR은 각각 attractive trap, neutral trap, repulsive trap에 대한 포획단면적의 값^[3]이다. 식 3-2의 관계식이 고려된 P_r 을 식 3-1과 같은 정규화 과정을 거치면, 식 3-3이 되고, 이것이 유한 요소법을 적용하는데 사용되는 4번째 수식이 된다.

$$P_r = N_r \frac{((N_r - P_r)SR + P_rSN)(1+n) + ((N_r - P_r)SA + P_rSN)(1+p)}{((N_r - P_r)SR + P_rSN)(1+n) + ((N_r - P_r)SA + P_rSN)(1+p)} \quad (3-3)$$

또한 이와 같은 과정을 거쳐서 재결합율을 나타내는 식은

$$R = \frac{L_n^2 \langle u \rangle}{D_0} \frac{n^2 - 1}{(N_r - P_r)SA + P_rSN} + \frac{p^2}{(N_r - P_r)SR + P_rSN} \quad (3-4)$$

이 된다.

3.3 유한 요소법의 적용

이제까지 언급한 수식들, 식 3-1과 식 3-3에 slotboom variable¹⁶⁾ ($\psi_n = e^{-\phi}$; $\psi_p = e^{\phi}$)을 도입한다.

$$F_1(\phi, \psi_n, \psi_p, P_r) = \nabla \cdot (\nabla \phi) - (e^{-\phi} \psi_n - e^{\phi} \psi_p - N - P_r) = 0$$

$$F_2(\phi, \psi_n, \psi_p, P_r) = \nabla \cdot (\gamma_n^{-1} e^{-\phi} \nabla \psi_n) - R = 0$$

$$F_3(\phi, \psi_n, \psi_p, P_r) = \nabla \cdot (\gamma_p^{-1} e^{\phi} \nabla \psi_p) - R = 0$$

$$F_4(\phi, \psi_n, \psi_p, P_r) = (P_r - N) \times$$

$$\frac{((N_r - P_r)SR + P_rSN) + ((N_r - P_r)SA + P_rSN)e^{-\phi} \psi_p}{((N_r - P_r)SR + P_rSN)(1 + e^{-\phi} \psi_n) + ((N_r - P_r)SA + P_rSN)(1 + e^{\phi} \psi_p)}$$

= 0

(3-5)

이 식들은 모두, 변수 ($\phi, \psi_n, \psi_p, P_r$)에 대한 비선형 수식이기 때문에 Newton Method를 적용한 반복 계산의 방법으로 수식을 풀는다. 본 논문에서는 이러한 반복계산 방법으로 안정되고 빠른 수렴을 얻기 위해, 식 3-5에 Coupled Method를 적용하였고 그 결과를 나타내면 식 3-6이 된다.^{13,17)}

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial \phi} & \frac{\partial F_1}{\partial \psi_n} & \frac{\partial F_1}{\partial \psi_p} & \frac{\partial F_1}{\partial P_r} \\ \frac{\partial F_2}{\partial \phi} & \frac{\partial F_2}{\partial \psi_n} & \frac{\partial F_2}{\partial \psi_p} & \frac{\partial F_2}{\partial P_r} \\ \frac{\partial F_3}{\partial \phi} & \frac{\partial F_3}{\partial \psi_n} & \frac{\partial F_3}{\partial \psi_p} & \frac{\partial F_3}{\partial P_r} \\ \frac{\partial F_4}{\partial \phi} & \frac{\partial F_4}{\partial \psi_n} & \frac{\partial F_4}{\partial \psi_p} & \frac{\partial F_4}{\partial P_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \phi \\ \Delta \psi_n \\ \Delta \psi_p \\ \Delta P_r \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{bmatrix}$$

(3-6)

식 3-6은 $\Delta \phi, \Delta \psi_n, \Delta \psi_p, \Delta P_r$ 이 임의의 허용 범위내에 들 때까지 반복 계산을 한다. 이 식 중에서 F_1, F_2, F_3 에 해당하는 식은 상태 변수와 흐름(Flux)을 나타내는 변수가 포함되어 있는 편미분 방정식이다. 이것을 이산화하는 과정에서 가중 잔차법(Weighted Residual Method)의 한 종류인 Galerkin Method를 적용한다. Galerkin Method로 전개한 식에는 적분항이 포함되어 있다. 이 적분을 행하는 방법으로는 본 논문에서는 일정한 수렴성이 보장되어지는 Shaffeter-Gummel Scheme과 결합된 7-point Gaussian Quadrature를 사용한다. F_4 식의 경우는 편미분 방정식의 형태가 아니므로, 유한 요소법을 적용하는 것이 아니라, 단순히 Newton Method의 적용하는 것만으로 충분하므로 $\frac{\partial F_4}{\partial \phi}, \frac{\partial F_4}{\partial \psi_n}, \frac{\partial F_4}{\partial \psi_p}, \frac{\partial F_4}{\partial P_r}$ 는 모두 대각 행렬의 활용을 취하고 있다.

3.4 흐름도

DI 스위칭 소자에 유한 요소법의 적용을 적용시킨 정량적인 해석 기법에 관한 계산과정은 그림 3.1에 나타난 흐름도와 같다.

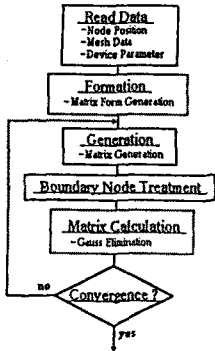


그림 3.1

DI 스위칭 소자의 FEM 해석 흐름도

3.5 반도체 소자의 구조와 파라미터

그림 3.2와 그림 3.3은 2중 주입 현상을 설명하기 위하여, 해석될 Device의 구조와 Mesh의 형태를 나타내고 있다.

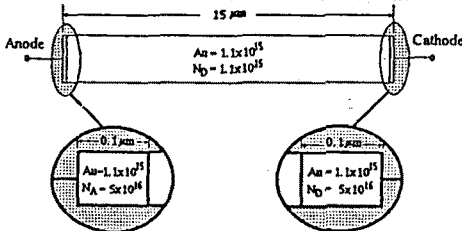


그림 3.2 FEM에 의해 해석될 소자의 구조

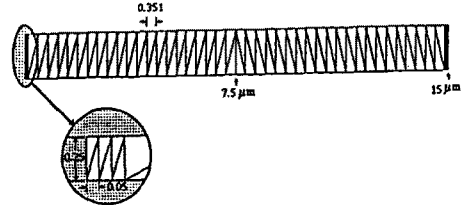


그림 3.3 Mesh로 분할된 소자의 형태

모델링에 사용한 값들은 표 1과 같으며, 파라미터 값의 선정에 적당한 Scale Rule을 적용하였다.

SN	1x10 ⁻¹⁴	
SR	1x10 ⁻²⁰	
SA	1x10 ⁻¹³	
N (1/cm ³)	Anode	-5x10 ¹⁶
	Cathode	5x10 ¹⁶
	Au-Doped i	= 0
Mesh 수	96	
Node 수	Total Node 수	98
	Internal Node 수	94
	Boundary Node 수	4

4. 수치 해석의 결과

DI switching device의 Turn On 시 Simulation 결과를 그림 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5에 나타내었다. bias가 가해지지 않은 상태에서 n형의 불순물에 의해 제공되는 전자에 의해 부로 이온화된 Au acceptor가 주입된 정공을 포획하여 중성을 띠는, 중성 트랩의 농도는 거의 0으로 설정하였다. 즉 열평형 상태에서 Au acceptor는 모두 전자에 의해 채워져, Simulation에서 변수로 설정한 중성 캐리어의 농도는 0이다. 이러한 상태에서 Anode에는 양의 전압을 Cathode에는 음의 전압을 인가하여, 그림 4.1과 4.2에 나타난 것처럼, Anode와 Cathode로부터 정공과 전자가 각각 주입된다. 같은 바이어스 상태에서 전자와 정공의 농도를 비교하면 그 크기에 상당한 차이가 있다. 이러한 현상은 그림 4.3에 나타난 중성 트랩(Au acceptor)의 농도 분포에 의해 설명된다. Anode에서 주입된 정공은, 부로 이온화된 Au acceptor의 정공에 대한 큰 포획 단면적 때문에 일단 Au acceptor에 포획되어, Au acceptor를 중성으로 만들고, 포획 단면적을 변화시킨다. Au acceptor가 중성을 띠는 부분에서의 정공에 대한 포획 단면적이, 부의 성질을 띤 Au acceptor가 존재할 때보다 작다. 포획 단면적은 곧, 수명시간과 연결되므로 중성의 Au acceptor가 존재하는 부분에서의 정공의 수명 시간이 길다는 사실을 판단할 수 있다. 그림 4.2와 그림 4.3을 살펴보면 바이어스가 증가함에 따라 정공의 주입되는 양이 많아져 보다 많은 Au acceptor (트랩)를 중성으로 만들고 그로 인해 정공의 분포양 역시 증가한다. 그러나 어느 특정한 바이어스가 가해지기 전까지는 Cathode에 도달하는 정공의 양은 Anode에 도달하는 전자의 양보다 작아, 거의 전자에 의한 전류 성분만이 존재한다고 볼 수 있다. Threshold 전압이라고 불리는 어느 특정한 전압 이상으로 바이어스가 가해진다면 거의 모든 Au acceptor가 중성으로 되고 이때부터는 일반 p-i-n 다이오드와 동일한 특성을 나타내게 된다. 이러한 현상이 바로 2중 주입이다. 0.7V 이상의 바이어스 상태에 대해 그림 4.1, 4.2, 4.3을 살펴보면, 중성 트랩(Au acceptor)의 농도는 거의 주입된 Au의 농도인 1x10¹⁵ 정도의 값을 가지고, 정공과 전자는 거의 같은 레벨의 값을 가진다. 이러한 2중 주입이 일어나기 전과 일어난 후에 대한 예를 그림 4.4와 그림 4.5에 나타내었다.

5. 결론

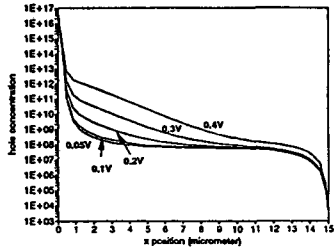
본 논문에서는 전력을 반도체 소자에 관한 새로운 소자의 모색이라는 차원에서 스위칭 메카니즘으로 2중 주입 현상을 도입하여, 이 현상을 유한 요소법에 적용 시키는데 필요한 식들의 제시와 함께 기본적인 구조에 대한 시뮬레이션을 행하여 그 결과의 타당성을 살펴 보았다.

본 논문에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

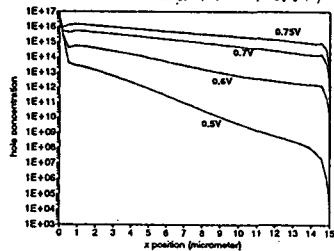
- 2중 주입 현상에 유한 요소법을 적용시키기 위하여, 기존의 포아송 방정식과 전류 연속식에 첨가하여 중성 트랩의 농도에 관한 식을 사용하였으며, 전류의 연속식에 포함된 재결합률에 관한 식에도 변화를 주었다.
- 유한 요소법을 적용한 시뮬레이션은 IBM RS/6000 을 사용하였으며, Iteration 을 한번 행하는데 걸리는 CPU TIME 은 23초였다. 본 논문에서 제시한 모델링 알고리즘을 적용해 최적 Node와 Element 수의 설정과 특정 해석 Software

의 효율적인 작성이 이루어진다면 모든 2중 주입 현상에 대한 컴퓨터 모델링의 완성과 소자의 설계 제작에 큰 도움이 될 것으로 판단된다.

그림 4.3 바이어스에 따른 증성 트랩 농도의 분포

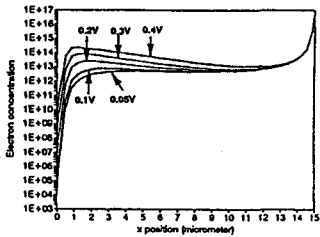


a) 바이어스 전압 (0.0V ~ 0.4V)

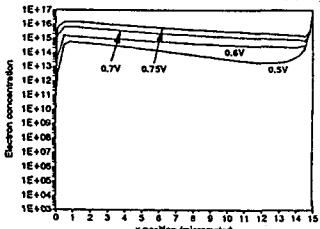


b) 바이어스 전압 (0.5V ~ 0.75V)

그림 4.1 바이어스에 따른 Hole 농도의 분포

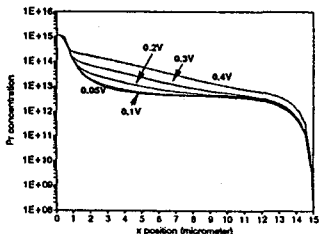


a) 바이어스 전압 (0.0V ~ 0.4V)

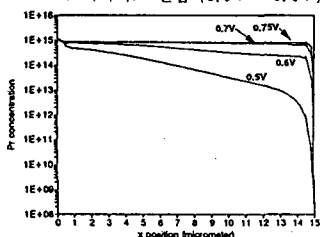


b) 바이어스 전압 (0.5V ~ 0.75V)

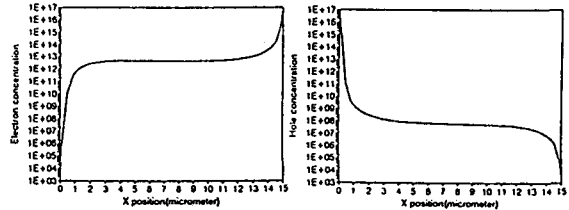
그림 4.2 바이어스에 따른 전자 농도의 분포



a) 바이어스 전압 (0.0V ~ 0.4V)

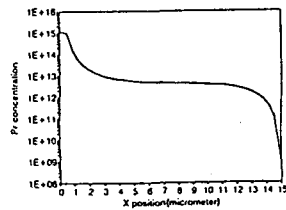


b) 바이어스 전압 (0.5V ~ 0.75V)



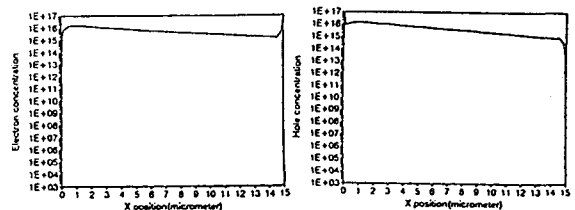
a) Electron Distribution

b) Hole Distribution



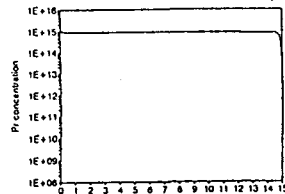
c) Pr Distribution

그림 4.4 2중 주입 이전의 농도 분포 ($V_{ca} : 0.05V$)



a) Electron Distribution

b) Hole Distribution



c) Pr Distribution

그림 4.5 2중 주입 이후의 농도 분포 ($V_{ca} : 0.75V$)

참고 논문

- (1) R. Seaverns and J. Armijos, *MOSPOWER application handbook*, Siliconix Inc., 1984
- (2) N. Holoyak, "Double injection with negative resistance in semi-insulators", *Phys. Rev. Letters*, Vol. 8, p. 426, 1962
- (3) G. Tan et al., "Two-dimensional semiconductor device analysis based on new finite-element discretization employing the S-G scheme", *IEEE Trans. CAD*, Vol. 8, No. 5, pp. 468-478, 1989
- (4) M. A. Lampert, "Double injection in insulators", *Phys. Rev.*, Vol. 125, p. 126, 1962
- (5) V. P. Sondaevskii and V. I. Starev, "Injection in semiconductors with deep I. L.", *Soviet Phys. Solid State*, Vol. 6, p. 63, 1964
- (6) Nick Holoyak Jr., "Double injection diodes and related D. I. phenomena in semiconductors", *Proc. I.R.E.*, Vol. 50, p. 2421, 1962
- (7) H. J. Deuling, "Double injection current in long p-i-n diode with one trapping level", *J. Appl. Phys.*, Vol. 41, pp. 2179-2184, 1970
- (8) P. Migliorato, G. Margaritondo and P. Perfetti, "Double injection in semiconductors", *J. Appl. Phys.*, Vol. 47, pp. 656-663, 1976