

FEM에 의한 NUDFET의 특성해석에 관한연구

°김종열°, 정중척°, 김영식°, 성만영°, 조호열**

* 고려대학교 전기공학과, ** 삼성전자 연구원

A Study on the Characteristic Analysis of NUDFET by FEM.

Jong-Ryeul Kim°, Jong-Chuck Jung°, Young-Cig Kim°, Man-Young Sung°, Ho-Yeol Cho**

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

Abstract

In this paper, NUDFET(NonUniformly Doped Field Effect Transistor) is presented as an alternative which offers the possibility of reducing the power necessary to operate switching circuits without a substantial loss in speed. The purpose of this NUDFET is to modify the electric field profile in order to cause carrier velocity saturation to occur at a lower voltage than it would occur in the uniformly doped device of the same channel length. The more MESFET and NUDFET circuits are realized, the more accurate modeling the performance of these devices become required. Analytic modeling was replaced by numerical analysis because of the complexity of device configuration. In this paper, FEM is selected because of simpler local mesh refinement and smaller computer memory than FDM. For accurate analysis, this paper has applied the Scharfetter-Gummel(S-G) Scheme and seven-point Gaussian Quadrature rule to assembly of the finite-element stiffness matrices and right-hand side vector of the semiconductor equations.

1. 서론

NUDFET는 채널의 불순물 도핑 농도를 부분적으로 변화시켜 줌으로써 특성의 향상을 이루하고자 시도한 소자로서 드레인 부분 농도를 채널의 소오스 부분 농도보다 낮게 도핑함으로써 전계의 분포를 변경시켜서 균일하게 도핑된 소자보다 낮은 전압에서 캐리어의 포화 속도를 얻을 수 있어 빠른 동작 특성을 얻을 수 있는 동시에 전력의 수준을 낮출 수 있다. 본 논문에서는 NUDFET의 낮게 도핑된 영역의 길이 변화에 따른 포화 전류와 포화 전압의 변화에 대해서 살펴보고 있다.

초기에는 Shockley에 의한 긴 채널의 해석⁽¹⁾과 속도 포화를 고려한 1차원 모델들이 제시되었으나⁽²⁾ 이런 모델들은 소자들이 쏘 채널화되어 가면서 실제 소자의 특성과 많은 오차를 나타내었고 이와같은 오차의 원인과 아울러 정밀한 소자의 모델링을 위하여 2차원 해석이 요구되어졌다. 본 논문에서는 새로운 반도체 소자의 설계 제작과 그 특성 해석이라는 차원에서 유한요소법을 이용하여 NUDFET의 2차원 해석을 실시하였으며, 해석 변수는 Slotboom 변수를 사용하고 전류 연속식의 이산화는 Scharfetter-Gummel 법에 의한 방법을 사용했다. 유한요소법에 의한 2차원 해석으로부터 NUDFET의 구조가 전류포화에 미치는 영향에 대해서 정

성적인 해석을 실시하였다.

2. NUDFET의 유한요소법에 의한 해석

유한요소법에 의한 반도체의 수치 해석은 크게 Decoupled Method와 Coupled Method의 두가지 방법으로 나눌 수 있다. 본 논문에서는 메모리를 적게 사용하는 Decoupled Method를 사용했으며, 연속식의 이산화 방법은 일정한 수렴성을 가지고 있는 Scharfetter-Gummel Scheme을 사용하였다.

본 논문에서 해석하는 N-type NUDFET의 주 전류 메카니즘은 전자에 의한 드리프트 전류이기 때문에, 정공에 대한 연속의 식은 풀지 않아도 되며, 캐리어의 발생-재결합 성분은 무시하였다.

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\epsilon_s \nabla \psi) &= q(n - p - N_D^+ + N_A^-) \\ &= q(n - N_D^+) = q(\nu e^{\psi} - N_D^+) \end{aligned} \quad (1.a)$$

$$\nabla \cdot (\mu_n e^{\psi} \nabla \nu) = \frac{\partial (\nu e^{\psi})}{\partial t} + R = 0 \quad (1.b)$$

식 (1.a)에서 ψ 는 전위, 식 (1.b)에서 ν 는 $e^{-\phi}$ 을 나타내는 Slotboom 변수이며, μ_n 은 전자의 이동도, ϕ_n 은 전자의 준페르미 준위, R은 발생-재결합 항이다.

식 (1.a)와 식 (1.b)의 ψ 와 n 의 값들은 컴퓨터 해석상에서 Overflow가 일어날 수 있을 정도로 크기때문에 정규화가 필요하며 논문에서 사용되는 정규화 인자(Factor)들은 표 1과 같다.

Description	Normalized Quantity	Normalization Factor	
		Symbol	Numerical Value
Position Coordinate	x, y	$L_0 = (\epsilon_s V_0 / q n_i)^{1/2}$	$3.3541 \times 10^{-3} \text{cm}$
Electrostatic Potential	ψ	V_0	$25.875 \times 10^{-3} \text{V}$
Quasi-Fermi Level	ϕ_n	V_0	$25.875 \times 10^{-3} \text{V}$
Electric Field	E	V_0 / L_0	7.7145V/cm
Carrier Density	n	n_i	$1.5 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$
Net Impurity, Donor Density	N_D^+	n_i	$1.5 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$
Total Electron Current Density	J_n	$-q D_n \nu / L_0^2$	$2.136 \times 10^{-4} \text{A/cm}^2$
Carrier Mobility	μ_n	D_n / V_0	$38.6473 \text{cm}^2/\text{V-sec}$
Carrier Diffusion Constant	D_n	D_0	$1 \text{cm}^2/\text{sec}$

<표 1> 컴퓨터 시뮬레이션을 위한 정규화 인자(Factors)

유한요소법에 의해 이산화된 최종적인 결과식을 구하면 Poisson 방정식의 경우는

$$\sum_{j=1}^{j=N} (K_{ij}^{V_e} + G_{ij}^{V_e}) \Delta \Psi_j = -(\sum_{j=1}^{j=N} K_{ij}^{V_e} + f_i^{V_e}) \quad (2.a)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, N$$

$$K_{ij}^{V_e} = \int_{\Omega} \nabla \phi_i \cdot \nabla \phi_j d\Omega \quad (2.b)$$

$$G_{ij}^{V_e} = \int_{\Omega} \rho \nabla \phi_i \cdot \nabla \phi_j d\Omega \quad (2.c)$$

$$f_i^{V_e} = \int_{\Omega} \rho (v_e - N_D) \phi_i d\Omega \quad (2.d)$$

이 되고 전자에 대한 연속식은

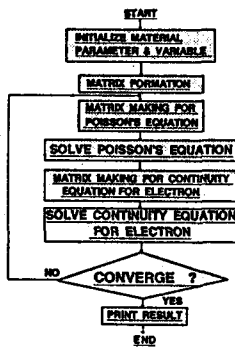
$$\sum_{j=1}^{j=N} K_{ij}^{V_e} \Delta \nu_j = -\sum_{j=1}^{j=N} K_{ij}^{V_e} \nu_j \quad (3.a)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, N$$

$$K_{ij}^{V_e} = \int_{\Omega} \sigma \mu_n e^{-V} \nabla \phi_i \cdot \nabla \phi_j d\Omega \quad (3.b)$$

으로 된다. 여기서 $K_{ij}^{V_e}$, $K_{ij}^{V_e}$ 를 Stiffness 행렬, $f_i^{V_e}$ 를 Load 벡터라고 한다. 식 (2.b)~(2.d)와 식 (3.b)에서 적분은 직접 적분법⁽³⁾과 Gaussian Quadrature가 사용되는데, 본 논문에서는 직접 적분법에 의했을 때 발생하는 적분 오차를 줄이기 위해서 7-Point Gaussian Quadrature⁽⁴⁾를 사용하였다.

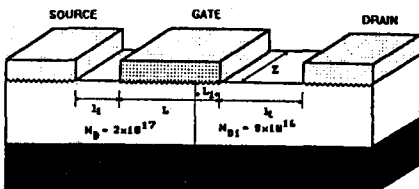
초기조건은 열평형 상태로 가정하여 내부의 전위는 모든 영역에서 0이고 캐리어의 농도는 열평형 상태에서의 값을 취했으며⁽³⁾, 경계 조건은 Dirichlet 경계와 Neumann 경계를 사용하였고 Dirichlet 경계조건에서 저항성 접촉과 쇼트키 접합을 고려했다. 본 논문에서 채택한 Decoupled Method를 사용한 수치해석적 모델링에 대한 흐름도는 그림 1과 같다.



<그림 1> 유한요소법을 위한 흐름도(Flow Chart)

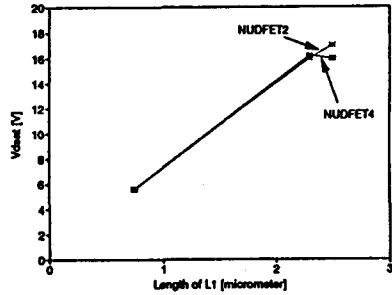
3. NUDFET의 특성 및 고찰

본 논문에서 제안 제작한 NUDFET는 일반적으로 논리 회로의 디플리션 부하나 정전류원으로 사용될 경우 그 우수성을 강조한다는 측면에서 $V_{gs}=0$ 일 때의 특성을 주로 측정하고 그 결과를 시뮬레이션 결과와 비교 검토하였다. NUDFET의 설계 단면 구조는 그림 2에 나타내었다.



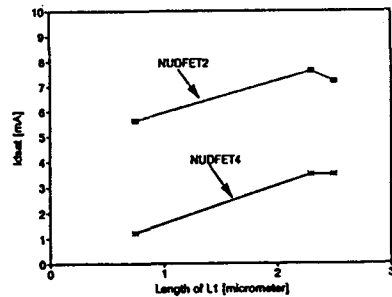
<그림 2> NUDFET 설계 단면 구조

그림 3은 L_1 의 변화에 따른 포화 전압의 변화를, 그림 4는 L_1 의 변화에 따른 포화전류의 변화를 도시한 것으로, L_1 이 짧아짐에 따라 포화 전압이 감소함을 볼 수 있고, 포화 전류의 감소 경향은 포화 전압이 감소함에 따라 채널 저항이 증가하기때문으로 생각된다.



<그림 3> NUDFET의 L_1 의 변화에 따른 포화 전압의 변화

$$V_{dsat} = 20.2 \sim 21[V], I_{dsat} = 8.6 \sim 10[ma]$$



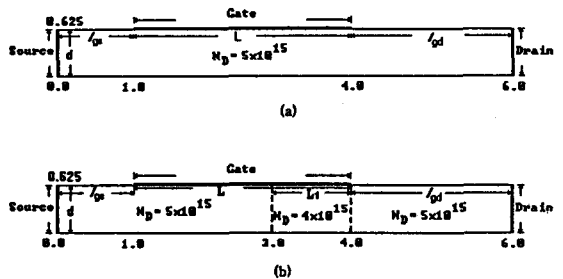
<그림 4> NUDFET의 L_1 의 변화에 따른 포화 전류의 변화

$$V_{dsat} = 20.2 \sim 21[V], I_{dsat} = 8.6 \sim 10[ma]$$

4. 유한요소법에 의한 NUDFET의 특성 고찰

NUDFET는 일반적인 FET의 동작 특성으로부터 그 해석을 유추할 수 있으나, 채널의 불순물 농도 분포의 변화에 따른 특성의 변화를 정량적으로 언급하는 것은 불가능하다. 그러므로 본 논문에서는 NUDFET의 특성을 정량적으로 고찰하여 채널내에서의 전계, 전위 및 캐리어 분포를 각 바이어스 조건과 Design 및 Process 파라미터 별로 분석하여 NUDFET의 동작 메카니즘을 설명하고자 시도하였다.

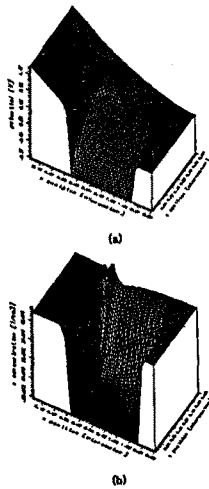
시뮬레이션 소자의 구조를 MESFET의 경우는 그림 5(a)에, NUDFET의 경우는 그림 5(b)에 나타내었다.



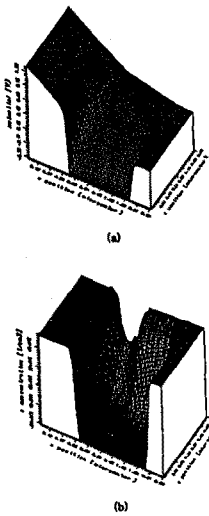
<그림 5> 시뮬레이션에 사용된

(a) MESFET의 구조 (b) NUDFET의 구조

시뮬레이션에 의한 MESFET과 NUDFET의 전위 분포와 캐리어 농도 분포를 그림 6과 그림 7에 나타냈으며, 그림 8에서는 두 소자를 비교하여 나타내었다.



<그림 6> MESFET의 (a) 전위 분포 (b) 캐리어 농도 분포
($V_{ds} = 1.0V$ 일때)



<그림 7> NUDFET의 (a) 전위 분포 (b) 캐리어 농도 분포
($V_{ds} = 1.0V$ 일때)

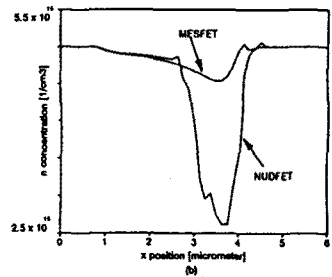
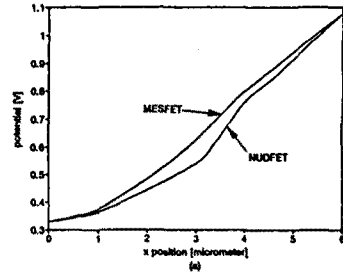
인가 전압이 1.0V일 때 공핍층의 폭은 NUDFET의 경우가 MESFET의 경우보다 약간 큼을 알 수 있으며, 이것은 핀치 오프에 의해 전류 포화가 일어날 경우 NUDFET가 낮은 드레인 전압에서 포화가 이루어짐을 의미한다.

NUDFET의 정량적 고찰을 위해서 전류-전압 특성을 그림 9에 MESFET과 비교하였다. 이 사실로부터 포화 전류는 MESFET의 경우가 NUDFET의 경우보다 큼을 예측할 수 있으며 NUDFET가 MESFET과 같은 전류 수준을 가지려면 게이트 폭이 증가하여야 함을 알 수 있었다.

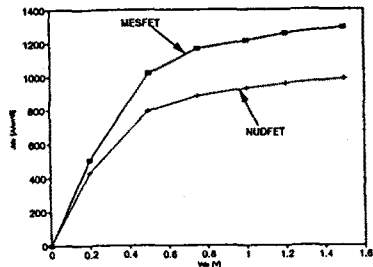
4. 결론

불순물 농도 분포를 변화시킨 영역인 L_1 의 길이가 짧아짐에 따라 포화 전압은 감소하였으며, 포화 전류도 감소하였다. 따라서 포화 전압과 포화 전류 사이에는 Trade Off관계가 존재하며 최적치를 구하는 문제는 앞으로 연구되어야 할 과제라고 생각되며 인버터로 사용했을 경우 Delay Time의 개선은 NUDFET의 스위칭 속도 개선의 효용성을 의미한다.

유한요소법의 수치 해석 결과는 채널에서의 전계가 NUDFET의 경우 도핑 농도가 낮은 영역에서 크게 나타나고, 공핍층의 폭이 낮은 도핑 영역에서 크게 나타남을 보였다. 이것은 NUDFET가 낮은 드레인-소스 전압으로도 포화 상태에 이를 수 있음을 수치해석적으로 뒷받침하는 것으로 좀 더 파라미터의 변화를 다양하게 주어 NUDFET의 특성 해석을 Design 및 Process 파라미터로 분리해 해석한다면 본 논문의 결과가 크게 활용될 수 있다고 생각된다.



<그림 8> 도관 채널에서 MESFET와 NUDFET의 전위 분포와 캐리어 농도 분포 비교



<그림 9> MESFET과 NUDFET의 전류-전압 특성

참고 문헌

- [1] W. Shockley, "A Unipolar Field-Effect Transistor", Proc. Inst. Rad. Eng., vol.40, p.1365, 1952.
- [2] M. S. Shur, "Analytical model of GaAs MESFETs", IEEE Electron Dev., ED-25, p.612, 1978
- [3] John J. Barnes and Ronald J. Lomax, "Finite-Element Methods in semiconductor Device simulation", IEEE Electron Dev., ED-24, pp.1082-1089, 1977.
- [4] Gen-Lin Tan, Xiao-Li Yuan, Qi-Ming Zhang, Walter H. Ku & An-Jui Shey, "Two-Dimensional Semiconductor Device Analysis Based on New Finite-Element Discretization Employing the S-G Scheme", CAD, vol.8, No.5, pp.468-478, 1989.