

## Philips Unified 이동도 모델의 구현에 관한 연구

윤석성 윤현민 이은구 김철성  
인하대학교 전자공학과

### The study on the Implementation of Philips Unified Mobility

Seok-Seong Yoon Hyun-Min Yoon Eun-Gu Lee Cheol-Sung Kim  
Dept. of Electronics Eng., Univ. of Inha  
#253 YongHyeon-Dong Nam-Ku, Incheon, Korea

#### 요약

고 농도의 반송자가 존재하는 영역에서의 지배적인 산란 효과인 억셉터 및 도너 산란과 반송자-반송자 산란, Screening 효과를 수치적으로 구현하는 방법을 제안한다. 또한 높은 바이어스가 인가된 경우 Slotboom 변수를 사용함으로써 발생하는 부동 소숫점 한계를 극복하기 위한 척도변환 방법을 제안한다.

구현된 모델의 정확성을 검증하기 위해서 자체 개발된 소자 시뮬레이터인 BANDIS를 이용하여, 척도변환에 대해서 n-MOSFET 소자로 17[V]이상에서도 모의 실험이 가능함을 보였고, 전력 BJT 소자에 대해서 Philips Unified 이동도 모델의 모의 실험 결과, 상업용 2차원 소자 시뮬레이터인 MEDICI에 비해 척도변환은 최대 12%, Philips Unified 이동도는 최대 2.8%이내의 상대오차를 보였다.

#### I 서론

대부분의 전력용 소자의 개발은 실험에만 의존하여 많은 개발 비용과 시간이 요구된다. 따라서 모의 실험을 통해 소자의 특성 분석 및 개선을 모의 실험할 수 있는 시뮬레이터가 필요하다.

고농도의 불순물이 존재하는 영역에서는 다수의 산란기구들에 의해 전자 전류의 크기가 왜곡된다. 따라서 이러한 현상을 정확하게 모델링하기 위해서는 체계적인 연구가 필요하다.

본 논문에서는 BJT 소자에 적합한 구별된 억셉터 및 도너 산란, 반송자-반송자 산란 및 Screening 효과를 모두 포함하는 Philips Unified 이동도 모델<sup>[1]</sup>을

수치적으로 구현하였다.

구현된 모델을 이용하여 비교적 높은 바이어스에서 동작하는 전력 BJT 소자의 드레인 전압-드레인 전류 특성을 추출하기 위해서 자체 개발된 소자 시뮬레이터인 BANDIS<sup>[2]</sup>를 이용하였다.

소자의 전류-전압 특성을 모의 실험하는 과정에 전자 및 정공 Slotboom 변수의 사용으로 인하여 바이어스가 증가함에 따라 overflow 문제가 발생하는데 이러한 부동 소숫점 한계를 극복하기 위한 방법으로 척도변환을 사용하여 해결하였다.

2장에서는 제안된 Philips Unified 이동도의 모델을 수치적으로 구현하는 방법을 보이고 3장에서는 제안된 척도변환 방법에 대해서 설명하고 4장에서는 모의 시료를 제작하여 구현된 모델을 사용하여 모의 실험하고 상업용 2차원 소자 시뮬레이터인 MEDICI의 결과와 비교 분석하였다.

#### II Philips Unified 이동도 모델의 구현

BJT 소자의 정특성을 설명하는데 적합한 Philips Unified 이동도<sup>[1]</sup>는 구별된 억셉터 및 도너 산란과 반송자-반송자 산란, screening 효과를 동시에 고려하며, 다수 반송자와 소수 반송자 이동도를 분리해서 모델링할 수 있는 장점이 있으며 지배적인 이동도는 Mathiessen 규칙을 따른다.

Philips Unified 전자 이동도 및 정공 이동도는 다음 식 [1]과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu_n = \frac{\mu_{latt, n} \cdot \mu_{D+A+p}}{\mu_{latt, n} + \mu_{D+A+p}} \quad [1a]$$

$$\mu_p = \frac{\mu_{latt, p} \cdot \mu_{D+A+n}}{\mu_{latt, p} + \mu_{D+A+n}} \quad [1b]$$

여기서 위 식에 포함된 전자 및 정공에 대한 격자 산란 이동도인  $\mu_{latt, n}$ ,  $\mu_{latt, p}$ 는 다음 식 [2]로 정의된다.

$$\mu_{latt, n} = MMXN.UM \left( \frac{T}{300} \right)^{-TETN.UM} \quad [2a]$$

$$\mu_{latt, p} = MMXP.UM \left( \frac{T}{300} \right)^{-TETP.UM} \quad [2b]$$

단, 파라미터 MMXN.UM과 MMXP.UM은 각 Philips Unified 이동도에서 전자 및 정공에 대한 최대 이동도를 나타낸다.

그리고 screening 효과를 고려한 전자 및 정공에 대한 이동도는 다음 식 [3]으로 나타낸다.

$$\mu_{D+A+p} = \mu_{N, n} \frac{N_{sc, n}}{N_{sc, eff, n}} \left( \frac{NRFN.UM}{N_{sc, n}} \right)^{ALPN.UM} + \mu_{c, n} \frac{n+p}{N_{sc, eff, n}} \quad [3a]$$

$$\mu_{D+A+n} = \mu_{N, p} \frac{N_{sc, p}}{N_{sc, eff, p}} \left( \frac{NRFP.UM}{N_{sc, p}} \right)^{ALPP.UM} + \mu_{c, p} \frac{n+p}{N_{sc, eff, p}} \quad [3b]$$

위 식에 포함된 파라미터 NRFN.UM과 NRFP.UM은 각각 전자 및 정공에 대한 Philips Unified 이동도 모델을 적용하기 위한 기준 불순물 농도이며 전자에 대해서  $\mu_{N, n}$ ,  $\mu_{c, n}$ ,  $N_{sc, n}$ 과  $N_{sc, eff, n}$ 항은 각각 다음 식 [4]~[7]로 정의된다. 정공의 경우도 유사하므로 생략한다.

$$\mu_{N, n} = \frac{MMXN.UM^2}{MMXN.UM - MMNN.UM} \left( \frac{T}{300} \right)^{3(ALPN.UM) - 1.5} \quad [4]$$

$$\mu_{c, n} = \frac{MMXN.UM \cdot MMNN.UM}{MMXN.UM - MMNN.UM} \left( \frac{300}{T} \right)^{0.5} \quad [5]$$

$$N_{sc, n} = N_D^* + N_A^* + p \quad [6]$$

$$N_{sc, eff, n} = N_D^* + N_A^* G(P_n) + \frac{p}{F(P_n)} \quad [7]$$

위 식 [4]~[5]에 포함된 파라미터 MMNN.UM은 고농도 불순물 혹은, 높은 반송자 레벨에서 전자 이동도를 결정하기 위한 이동도 파라미터이고 식 [6]~[7]에 포함된 유효 불순물 레벨  $N_D^*$ ,  $N_A^*$ 는 매우 높은 도핑

효과를 고려한 항으로 다음 식 [8]과 같이 정의된다.

$$N_D^* = N_D \left\{ 1 + \frac{1}{CRFD.UM + \left( \frac{NRFD.UM}{N_D} \right)^2} \right\} \quad [8a]$$

$$N_A^* = N_A \left\{ 1 + \frac{1}{CRFA.UM + \left( \frac{NRFA.UM}{N_A} \right)^2} \right\} \quad [8b]$$

위 식에서 도너에 대해서 CRFD.UM, CRFA.UM과 억셉터에 대해서 NRFD.UM, NRFA.UM 파라미터는 각각 ultra-high doping 효과를 결정하는 인자 및 기준 불순물 농도이다.

식 [7]의 전자의 경우에 대해서 산란하는 정공의 유한 질량 및 억셉터의 반발 전위를 고려한 함수  $F(P_n)$ 과  $G(P_n)$ 는 다음 식 [9]로 정의된다.

$$F(P_n) = \frac{0.7643P_n^{0.6478} + 2.2999 + 6.5502 \frac{m_e}{m_h}}{P_n^{0.6478} + 2.3670 - 0.8552 \frac{m_e}{m_h}} \quad [9a]$$

$$G(P_n) = 1 - \frac{0.89233}{\left[ 0.41372 + P_n \left( \frac{m_0}{m_e} \frac{T}{300} \right)^{0.28227 \cdot 0.19778} \right]} + \frac{0.005978}{\left[ P_n \left( \frac{m_e}{m_0} \frac{300}{T} \right)^{0.72169 \cdot 1.80628} \right]} \quad [9b]$$

파라미터  $P_n$ 은 screening 효과를 고려한 항으로 다음 식 [10]으로 다시 나타낼 수 있다.

$$P_n = \left( \frac{2.459}{3.97 \times 10^{13} \cdot n_i^{-2/3} \cdot N_{sc, n}^{-2/3}} + \frac{3.828}{1.36 \times 10^{20} / n_i \left( \frac{m_e}{m_0} \right)} \right)^{-1} \left( \frac{T}{300} \right)^2 \quad [10]$$

단,  $m_0$ 는 자유 전자의 정지질량이고 유효 전자 및 정공 질량은  $m_e = 1.0m_0$ ,  $m_h = 1.258m_0$ 를 사용하였다.

$P_n \leq P_{n, min}$ 인 값에 대해서  $G(P_n)$ 대신에  $G(P_{n, min})$ 이 사용하였고  $P_{n, min}$ 은  $G(P_n)$ 이 최소값에 도달할 때 값으로 수치 해석적인 방법으로 얻어진  $3.2464 \times 10^{-1}$  값을 사용하였다.

모의 실험에 사용되어진 파라미터를 정리하면 표 1과 표 2와 같다.

전자		정공	
파라미터	값	파라미터	값
MMNN.UM	52.2	MMNP.UM	44.9
MMXN.UM	1417.0	MMXP.UM	470.5
TETN.UM	2.285	TETP.UM	2.247
ALPN.UM	0.68	ALPP.UM	0.719
NRFN.UM	9.68e16	NRFP.UM	2.23e17

표 1. 전자 및 정공에 따라 구분한 파라미터

도너		억셉터	
파라미터	값	파라미터	값
NRFD.UM	4.2e20	NRFA.UM	7.2e20
CRFD.UM	0.21	CRFA.UM	0.50

표 2. 도너 및 억셉터에 따라 구분한 파라미터

### III 척도 변환

Slotboom 변수를 사용하는 소자 시뮬레이터는 상온에서 단자에 17[V]이상의 바이어스가 인가되면 IEEE에서 정한 부동 소숫점 한계를 초과하는 overflow 문제가 발생하는데 이러한 연산의 한계를 결과에 영향이 미치지 않는 범위내에서 해결해야 한다.

모의 실험에 사용되는 포아송 방정식과 전자 및 정공 연속방정식을 포함하는 Newton 행렬식<sup>[3]</sup>은 다음 식 [11]로 변경 가능하다.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F_u}{\partial u} & \frac{\partial F_u}{\partial v} & \frac{\partial F_u}{\partial w} \\ \frac{\partial F_v}{\partial u} & \frac{\partial F_v}{\partial v} & \frac{\partial F_v}{\partial w} \\ \frac{\partial F_w}{\partial u} & \frac{\partial F_w}{\partial v} & \frac{\partial F_w}{\partial w} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-u-v} & 0 \\ 0 & 0 & e^{u-v} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta v \\ \Delta w \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} F_u \\ F_v \\ F_w \end{bmatrix} \quad [11]$$

식 [11]의 좌변항의 첫 번째 두 행렬과 나머지 두 행렬의 두 부분으로 나누어 계산함으로써 연산의 크기를 감소시키면 행렬 풀이 횟수는 증가하는 단점이 있으나 높은 바이어스를 인가하여도 연산이 가능하게 된다.

위 식 [11]에서 좌변항의 첫 번째 연산은 Jacobian 행렬의 척도변환으로 전자 및 정공 연속 방정식의 척도변환 수행과정을 다음 식 [12]에 보였다.

$$\frac{\partial F_v}{\partial n} = \frac{\partial F_v}{\partial v} e^{-u-v} = \frac{\partial F_v}{\partial v} e^{u+v} \quad [12a]$$

$$\frac{\partial F_w}{\partial p} = \frac{\partial F_w}{\partial w} e^{u-v} = \frac{\partial F_w}{\partial w} e^{-u+v} \quad [12b]$$

여기서,  $n = e^{u+v}$ ,  $v = e^{u+v-u}$  이다.

위 식 [11]에서 좌변항의 두 번째 연산은 Slotboom 변수의 척도변환으로 전자 및 정공에 대해서 다음 식 [13]에 보였다.

$$\Delta n = e^{u+v} \Delta v = e^{u+v-u} \Delta v \quad [13a]$$

$$\Delta p = e^{-u+v} \Delta w = e^{-u+v+u} \Delta w \quad [13b]$$

### IV 결과 및 고찰

Philips Unified 이동도 모델의 정확성과 척도변환 알고리즘을 검증하기 위해서 BJT 시료 및 n-MOSFET 시료를 상업용 2차원 공정 시뮬레이터인 TSUPREM-4를 이용하여 제작하였고 모의 실험결과를 상업용 2차원 소자 시뮬레이터인 MEDICI의 결과와 비교하였다.

MEDICI는 HP 9000/715 workstation의 Unix환경하에서 모의 실험하였고 구현된 모델은 자체 개발된 BANDIS를 이용하여 DEC 600[MHz] PWS의 Windows NT환경하에서 모의 실험하였다.

Philips Unified 이동도 모델을 모의 실험한 결과 게이트 바이어스 대 드레인 전류 특성이 그림 1과 같이 나타났으며 MEDICI의 결과와 비교할 때 그림 2와 같이 잠음영역을 제외한 나머지 영역에서는 최대 2.8% 이내의 상대오차를 얻었다.

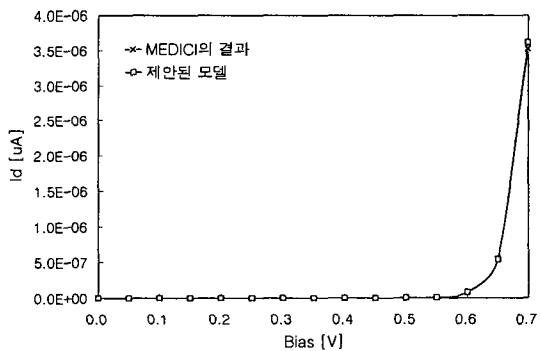


그림 1. MEDICI와 제안된 모델의 바이어스 대 단자 전류 특성 비교

구현된 척도변환 알고리즘을 검증하기 위해서 제작한 시료는 0.8[um] n-MOSFET으로 dimension은 그림 3과

같고 깊이 방향의 1차원 불순물 농도분포는 그림 4와 같다.

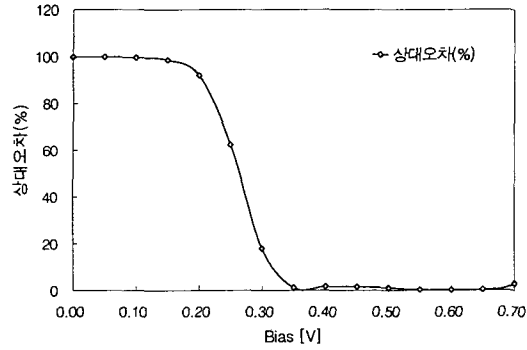


그림 2. 제한된 모델과 MEDICI 결과와의 상대 오차 분석

요소 수 : 11246개  
총 질점 수 : 5835개

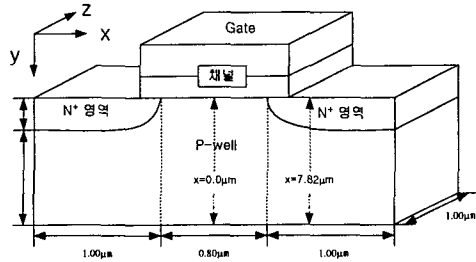


그림 3. 모의 실험용 n-MOSFET 기본구조

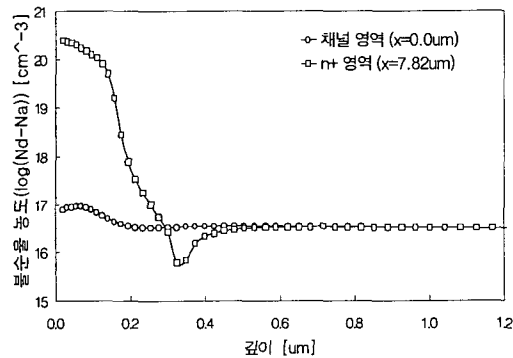


그림 4. 표면 근처의 실리콘 영역에서 n-MOSFET의 깊이(y축) 방향 농도 분포

사용되어진 물리적인 모델은 볼츠만 통계와 analytic 이동도이며 모의 실험결과는 그림 5에서와

같이 척도변환을 이용함으로써 드레인-소스 전압을 Slotboom 변수의 부동 소숫점 한계인 17[V]이상으로 인가하여도 Slotboom 변수의 우수한 수렴특성을 유지하면서 연산의 크기를 감소시켜 모의 실험이 가능함을 보였다. MEDICI의 결과와 비교하면 높은 인가 바이어스에서 최대 12%의 상대오차를 보였다.

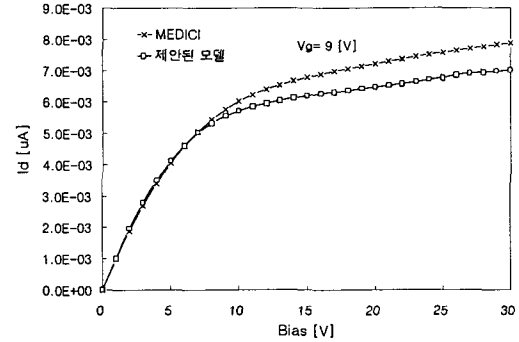


그림 5. 채널길이가 0.8[µm]인 n-MOSFET 소자의 제안된 방법과 MEDICI에서의 모의 실험 결과 비교

## V 결론

고농도의 불순물이 존재하는 BJT 소자의 정확한 전류-전압 특성을 고려하기 위해서 Philips Unified 이동도 모델을 구현하였고, Slotboom 변수의 사용으로 인한 부동 소숫점 한계를 극복하기 위해서 척도변환을 수치적으로 구현하였다.

BJT 시료를 사용한 Philips Unified 이동도 모델의 모의 실험 결과는 MEDICI의 결과와 최대 2.8%이내의 상대오차를 보였고 구현된 척도변환 알고리즘을 검증하기 위해서 0.8[µm] n-MOSFET 시료를 제작하여 모의 실험결과 17[V] 한계를 해결하였으며 MEDICI의 모의 실험 결과와 최대 12%이내의 상대오차를 얻었다.

## 참고 문헌

- [1] 김태한, "변형된 결합법을 이용한 혼합모드 소자 회로 시뮬레이터 구현에 관한 연구," 인하대학교 대학원 박사논문, 1998.
- [2] TMA, *MEDICI manual*, Technology Modeling Associates, California, 1995
- [3] 윤현민, 김태한, 김대영, 김철성, "3차원 정상상태의 드리프트-확산 방정식의 해석 프로그램 개발," 대한전자공학회 논문집 제34권 D편 제8호, pp.41-51, 1997