

# MINIMOS를 이용한 디바이스 시뮬레이션

朴 弘 俊

韓國電子技術研究所 研究員

## I. 서 론

디바이스 시뮬레이션(device simulation) 프로그램이란 디바이스의 제원과 불순물 농도 분포, 바이어스 조건으로부터, 포아슨(poisson) 방정식과 전류 연속 방정식을 풀어서 전류, 전압 특성과 디바이스内的 전위 분포, 캐리어분포, 전류분포 등을 출력시켜 주는 프로그램을 말한다.

디바이스 시뮬레이션 프로그램의 용도로는, 디바이스를 직접 제작하지 않고도 여러가지 조건을 바꾸면서 디바이스의 특성변화를 예측할 수 있고, 또한 측정하기 힘든, 디바이스内的 전위, 전류, 캐리어 등의 분포를 알 수가 있다. 현재 여러 종류의 디바이스 시뮬레이션 프로그램이 나와 있는데 (SEDAN, TANDEM, JEMINI 등), 이 중 MINIMOS는 1980년 오스트리아에서 개발된 MOSFET에 대한 2차원 디바이스 시뮬레이션 프로그램으로서, numerical simulation of MINIature MOS transistor란 의미로 MINIMOS라고 이름지어 졌다.<sup>[1]</sup> 집적화를 높이기 위해서, MOSFET의 채널 길이를 점차 줄임에 따라 나타나는 short channel 현상을 해석하는데 MINIMOS와 같은 2차원 시뮬레이션 프로그램이 극히 유용하리라고 예상된다.

MINIMOS는 약간의 프로세스 시뮬레이션 기능을 가지고 있는데, 확산이나 이온 주입 조건을 주면 자체적으로 어떤 식에 의해서 불순물 농도 분포를 계산해 낼 수 있다.

또한 punch through등을 방지하기 위해서 채널 영역에 이온 주입을 2번까지 할 수 있도록 프로그램되어 있다.<sup>[2]</sup>

MINIMOS는 MOSFET의 통상적인 선형 영역과 포화 영역의 전류, 전압 특성외에도, subthreshold 전류, threshold 전압, 임팩트 이온화에 의한 애벌랜슈 전류도 계산할 수 있다.<sup>[1]</sup>

## II. 기본 가정과 수치해석 방법

### 1. 기본 가정

MINIMOS에서 고려하는 MOSFET의 기하학적 구조는 그림 1과 같다.

여기서 게이트 전극과 소스, 드레인 전극은 서로 일치(self align)되어 있다고 가정한다.

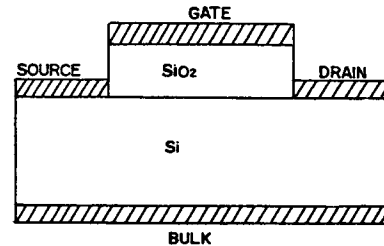


그림 1. MINIMOS에서 고려하는 MOSFET의 기하학적 구조

정확도는 별로 떨어뜨리지 않으면서도 수식을 간단하게 하고 컴퓨터 사용 시간등을 줄이기 위해 다음과 같은 가정을 하고 있다.

- ① DC 특성만 고려한다. 즉 과도 해석의 경우와는 달리 시간에 대한 미분이 0이 된다.
- ② 실리콘과 산화막(SiO<sub>2</sub>)의 유전상수가 일정하다.
- ③ 모든 불순물이 다 이온화된다.
- ④ 전성 캐리어 농도 n<sub>i</sub>는 불순물 농도에는 무관하고 단지 온도만의 함수라고 가정한다.
- ⑤ 다수 캐리어에 의한 전류를 무시한다. 이런 경우 재결합이 없게 되어, 역방향 전압이 인가되어 있는 소스, 드레인 접합의 공핍영역에서는 캐리어가 거의 완전히 없어지게 되어, 수치해석에서 stability 상에 문제가 생긴다.<sup>[1]</sup>

이런 문제를 피하기 위해서 소수 캐리어에 의한 전류에서만 재결합을 고려한다. 여기서 소수 캐리어라 함은 n 채널 MOSFET의 경우 전자를 말한다.

⑥ 온도는 전체 영역에 대해서 균일하게 한 값으로 주어진다 가정한다. 그 범위는 250°K에서 450°K 사이로 제한했다.

⑦ 캐리어 분포는 페르미-디락 통계 대신 볼츠만 통계로 나타낸다.

$$n = n_i \cdot \exp((\psi - \phi_n)/V_t) \quad (1)$$

$$P = n_i \cdot \exp((\phi_p - \psi)/V_t) \quad (2)$$

여기서 n, P는 각각 전자의 정공의 농도이고  $\psi$ 는 정전위(electrostatic potential)이고,  $\phi_n, \phi_p$ 는 각각 전자와 정공의 유사 페르미 레벨(quasi fermi level)이고,  $V_t$ 는 열전압이다.

⑧ 아인슈타인 관계식이 성립한다.

$$D_n = \mu_n \cdot V_t \quad (3)$$

$$D_p = \mu_p \cdot V_t \quad (4)$$

여기서  $D_n, D_p$ 는 각각 전자와 정공의 확산계수이고,  $\mu_n, \mu_p$ 는 각각 전자와 정공의 이동도이다.

⑨ 모든 전극은 ohmic 전극이다.

즉, 전극에서는 전하 중성이 성립하고, 공간전하가 없고, 캐리어 분포가 열평형 상태에 있다.

⑩ 실리콘과 게이트 산화막의 경계면에는 표면전하가 존재하지 않는다고 가정한다. 그런데 실제로 존재하는 표면 전하의 효과는 flat band 전압에서 고려한다.

## 2. 기본 방정식

기본 방정식으로는 다음의 3가지 종류가 있다.

① 포아송 방정식

$$\text{div}(\epsilon \cdot \text{grad } \psi) = -q \cdot (P - n + N_D^+ - N_A^-) \quad (5)$$

② 전류 연속 방정식

$$\text{div}(J_n) - q \cdot \frac{\partial n}{\partial t} = q \cdot R \quad (6)$$

$$\text{div}(J_p) + q \cdot \frac{\partial P}{\partial t} = -q \cdot R \quad (7)$$

③ 전류 관계식

$$J_n = -q \cdot (\mu_n \cdot n \cdot \text{grad } \psi - D_n \cdot \text{grad } n) \quad (8)$$

$$J_p = -q \cdot (\mu_p \cdot P \cdot \text{grad } \psi + D_p \cdot \text{grad } P) \quad (9)$$

여기서  $\epsilon$ 은 유전상수이고,  $N_D^+, N_A^-$ 는 각각 이온화된 도우너, 억셉터의 농도이고,  $J_n, J_p$ 는 각각 전자와 정공의 전류밀도이고, R은 재결합율이다.

재결합은 S. H. R.이론에 따르는데, 재결합 센터는 금지대의 한 가운데에 놓이고, 수명  $\tau_p, \tau_n$ 은 캐리어 농도에 상관없이 일정하다고 가정하여, 재결합율 R은

다음 식으로 주어진다.

$$R = \frac{P \cdot n - n_i^2}{\tau_p \cdot (n + n_i) + \tau_n \cdot (P + n_i)} \quad (10)$$

식 5, 6, 7, 8, 9를 그대로 컴퓨터로 풀려면 변수값 사이에 자릿수가 너무 차이가 나서 오버플로우나 언더플로우등이 생겨나게 된다.

이러한 현상을 막고, 또한 식을 좀더 간단하게 표현하기 위해서 각 변수값들을 어떤 양들로 정규화시킨다.<sup>[5]</sup> 식 5, 6, 7, 8, 9를 정규화시키고, 앞에서 나온 기본 가정을 적용시키면 n 채널의 경우 다음과 같은 식들로 된다.

$$\text{div}(\text{grad } \psi) = n - P - N_D^+ + N_A^- \quad (11)$$

$$\text{div}(J_n) = R = \frac{P \cdot n - 1}{\tau_p \cdot (n + 1) + \tau_n \cdot (P + 1)} \quad (12)$$

$$J_n = -\mu_n \cdot n \cdot \text{grad}(\phi_n) \quad (13)$$

$$J_p = 0 \text{ (that is, } \phi_p = \text{constant)} \quad (14)$$

식13을 식12에 대입하면 전류 연속방정식은 다음과 같이 변형된다.

$$\text{div}(\mu_n \cdot n \cdot \text{grad } \phi_n) = \frac{1 - P \cdot n}{\tau_p \cdot (n + 1) + \tau_n \cdot (P + 1)} \quad (15)$$

식11과 식15의 연립 미분 방정식과 경계치 조건으로부터 전위  $\psi$ 와 전자의 농도 n을 구할 수 있다.

$\psi$ 와 n을 알면  $\phi_n$ 이 구해지므로, 식13으로부터 드레인 전류가 계산된다.

## 3. 수치해석 방법

식11, 15의 미분방정식을 각각 有限差等法(finite difference method)에 의해서 차등방정식(difference equation)으로 바꾼 다음,<sup>[1]</sup> 이 두 식의 연립방정식을 풀어야 한다.

이 연립방정식을 푸는데는 크게 두 가지 방식이 있는데, 하나는 직접적인 방식으로 두 방정식을 한꺼번에 연립하여 푸는 방식이고, 다른 하나는 굼멜 알고리즘(Gummel's Algorithm)이라고 하는 방식인데, 한번에 한가지 방정식만 푸는 방식으로, 주어진 전자 농도 n에 대해서 포아송 방정식을 풀어서 정전위  $\psi$ 를 구하고, 이  $\psi$ 에 대해서 전류연속방정식을 풀어서 n을 다시 구한다.  $\psi, n$  값이 수렴할 때까지 이 과정을 반복한다.<sup>[4]</sup> 고려하는 그리드 점(grid point)이 2500개라고 하면, 한 반복 과정에서 직접적인 방법으로는 5000×5000의 매트릭스 식을 한번 푸는데 비해, 굼멜 알고리즘에서는 2500×2500의 매트릭스 식을 2번 풀어야 한다.

MINIMOS에서는 디부분의 다른 디바이스 시뮬레이션 프로그램과 마찬가지로 굼멜 알고리즘을 채택하고

있다.

매트릭스 식을 푸는데는 여러가지 방식이 있지만 MINIMOS에서는 SIP (strongly implicit) 방식이라는 반복법을 사용하고 있다.<sup>(1)</sup>

4. 경계치 조건

정전위  $\psi$ 에 대한 경계치 조건은 그림 2와 같다.

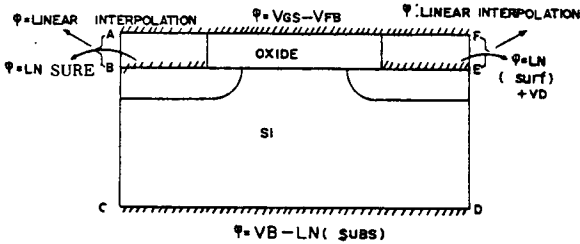


그림 2. 정전위  $\psi$ 에 대한 경계치 조건

n 채널의 경우를 고려해 보면, 소스 전극에서의 전자의 유사 페르미 레벨을 0으로 잡고, 소스 전극에서  $\psi = \ln(\text{SURF})$ 이고 드레인 전극에서  $\psi = \ln(\text{SURF}) + \text{VDS}$ 이다. 여기서 SURF는 소스, 드레인 확산의 표면 불순물 농도이고 VDS는 드레인 전극과 소스 전극 사이에 인가된 전압이다. 각 양들은 정규화된 값이다. 게이트 전극은 그림 2의 A 및 F점까지 확장되어 있다고 가정하고, 게이트 전극에서의 정전위는  $\psi = \text{VGS} - \text{VFB}$ 로서, VGS는 게이트 전극과 소스 전극 사이에 인가된 전압이고 VFB는 flat band 전압이다. 기판 전극에서의 정전위는  $\psi = \text{VBS} - \ln(\text{SUBS})$ 로서, VBS는 기판 전극과 소스 전극 사이에 인가된 전압이고 SUBS는 기판의 불순물 농도이다. 산화막과 실리콘 경계면에서는 표면전하가 없다고 가정했으므로, 가우스 법칙에 따라 유전율과 전계의 수직방향 성분을 곱한 값이 연속이 된다.

산화막이 AB, EF선까지 확장되어 있다고 가정하고 산화막속에는 전하가 존재하지 않는다고 가정하여, 직선 AB 사이의 전위는 점A와 점B의 전위가 이미 주어져 있으므로 이 두 값으로부터 직선식에 의해서 구해진다. 직선 BC사이의 전위는 점B와 점C의 전위는 주어져 있으므로 이 두 값을 경계치 조건으로 하여 1차원 포아손 방정식을 풀어서 구한다.<sup>(2)</sup> 직선 EF 사이와 직선 DE사이에서도 마찬가지로 전위를 구한다. 또한 직선 AC와 직선 DF에서는 이 직선에 수직방향의 전계의 세기를 0으로 한다.

정공의 유사 페르미 레벨은 모든 실리콘 영역에 대

해서  $\phi_p = -\text{VBS}$ 로 주어지는데, 이것은 정공에 의한 전류를 무시하고, 소스, 드레인 확산 영역에서는 정공의 농도가 실제 양보다 무시할 수 있을 정도로 작은 양으로 가정하는 것이다. 전자 농도 n에 대한 경계치 조건은, 소스, 드레인 전극에서는 전자의 농도는 표면 불순물 농도와 같고, 다른 모든 경계면에서는 경계면에 대한 수직방향의 전류성분이 0이라고 가정한다.

III. 물리적 모델

1. 이온 주입 (Ion Implantation)

이온 주입시킨 직후의 불순물 분포는 가우시안 분포를 갖는다고 가정한다.

$$N(y) = \frac{N'}{\sqrt{2\pi} \cdot \Delta R_p} \cdot \exp\left\{-\frac{(y-R_p)^2}{2(\Delta R_p)^2}\right\} \quad (16)$$

여기서  $N(y)$ 는 표면에서 y만큼 떨어진 점에서의 불순물 농도이고,  $N'$ 은 이온 주입 농도(dose)이고,  $R_p$ 는 침투깊이(projection range)이고,  $\Delta R_p$ 는 표준편차를 나타낸다.  $R_p$ 와  $\Delta R_p$ 는 이온 주입 에너지로부터 계산된다. 두께가 TOX인 산화막이 덮혀 있는 실리콘 웨이퍼에 이온 주입을 할 경우, 실리콘 내부의 등가 침투깊이  $R_p$ 은, 산화막을 등가 실리콘 두께로 환산하여 다음과 같이 계산된다.

$$R_p = R_p - \text{TOX} \cdot \frac{R_p}{R_{pox}} = R_p \cdot \left(1 - \frac{\text{TOX}}{R_{pox}}\right) \quad (17)$$

여기서  $R_p$ 는 실리콘만 있을 경우의 침투깊이이고,  $R_{pox}$ 는 산화막만 있을 경우의 침투깊이이다.

2. 불순물 분포 (Doping Profile)

MINIMOS 입력에서 불순물 분포는 다음의 3가지 방식으로 명시할 수 있다.

1) 이온 주입에 의한 경우

불순물 농도의 x방향 함수를  $f_x$ , y방향 함수를  $f_y$ 라고 하면, 불순물 분포  $C(x, y)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$C(x, y) = f_x \cdot f_y + \text{SUBS} \quad (18)$$

여기서 SUBS는 기판의 불순물 농도이고, x, y 방향은 그림 3에 나와 있다.

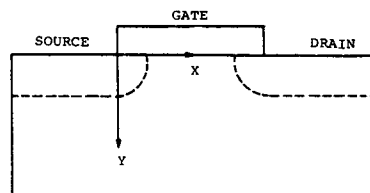


그림 3. 불순물 농도 분포의 x, y 방향

소스, 드레인 확산에 대해서  $f_x, f_y$ 는 식19, 20과 같이 주어진다.

여기서  $D$ 는 확산계수이고  $t$ 는 확산시간이다. 채널

$$f_x = \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) + \operatorname{erfc}\left(\frac{L-x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (19)$$

$$f_y = \frac{1}{2\sqrt{2}} \cdot \frac{C_{max} \cdot \Delta R_p}{\sqrt{4Dt + 2(\Delta R_p)^2}} \cdot \left[ \exp\left(-\frac{(y-R_p)^2}{4Dt + 2(\Delta R_p)^2}\right) \cdot \left\{ 1 + \operatorname{erf}\left(\frac{R_p \cdot \sqrt{Dt} + \frac{\Delta R_p}{2\sqrt{Dt}} \cdot y}{\sqrt{2Dt + (\Delta R_p)^2}}\right)\right\} + \exp\left(-\frac{(y+R_p)^2}{4Dt + 2(\Delta R_p)^2}\right) \cdot \left\{ 1 + \operatorname{erf}\left(\frac{R_p \cdot \sqrt{Dt} - \frac{\Delta R_p}{2\sqrt{Dt}} \cdot y}{\sqrt{2Dt + (\Delta R_p)^2}}\right)\right\} \right] \quad (20)$$

영역에서는  $f_x=2$ 가 되고  $f_y$ 는 소스, 드레인 영역에서와 같다.

### 2) Pre Deposition에 의한 경우

이 방식은 소스, 드레인 영역에만 적용되는 것으로서, 드라이브 인(Drive In)후의 최종 표면 불순물 농도 SURF만 명시하면  $C(x, y)$  및  $f_x$ 는 식18, 19와 같고  $f_y$ 는 다음 식으로 주어진다.

$$f_y = \frac{1}{2} \cdot \text{SURF} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{4Dt}\right) \quad (21)$$

### 3) 도핑 파일(Doping File)에서 읽어 들일 경우.

직접 측정에 의해서나, SUPREM 출력으로부터, 100개의 등간격 점에 대한 1차원 불순물 농도 데이터 작업을 만든 다음, 이로부터 각 그리드 점에 대한 불순물 농도를 보간법에 의해서 구해낸다. 특히 소스, 드레인 영역에 대해서는 주어진 1차원 데이터를 적당한 식을 사용하여 2차원 데이터로 바꾼다.<sup>(6)</sup>

### 3. 이동도(Mobility)

각 그리드 점에 대한 2차원 이동도가 계산되는데 격자 충돌 효과(lattice scattering effect), 불순물에 의한 효과(impurity scattering effect), 게이트 산화막과 실리콘 경계면에서의 표면 충돌 효과(surface scattering effect), 드리프트 속도에 의한 이동도 포화 현상(drift velocity saturation effect)을 다 고려한다. 입력의 OPTION 카드에서 네가지 변수값을 변화시킴으로써 각각의 효과를 조절할 수 있다.<sup>(6)</sup>

### 4. 확산 계수(Diffusion Coefficient)

확산 계수는 다음 식으로 계산된다.

$$D = D_0 \cdot \exp(T_a/T) \quad (22)$$

여기서  $D_0, T_a$ 는 각 원소에 따라 달라지는 값이다.<sup>(6)</sup>

### 5. Flat Band 전압

Flat band 전압은 다음 식으로 계산된다.

$$V_{FB} = \Phi_{ms} - q \cdot \text{NSS} / \text{COX} - V_t \cdot \ln(\text{SUBS}) \quad (23)$$

여기서 NSS는 surface state이고 COX는 게이트 캐패시턴스이고 SUBS는 기판 농도이다. 각 게이트 물질에 따른  $\Phi_{ms}$ 는 표 1과 같다. MINIMOS 입력에서는 NSS와 게이트 물질을 같이 명시하거나 아니면 V-FB를 직접 명시할 수도 있다.

표 1. 게이트 물질에 따른 work function 차이

$\Phi_{ms}$ (eV)	Gate Material
-0.55	N poly gate
+0.55	P poly gate
-0.59	Al gate

### IV. 프로그램 구조<sup>(6)</sup>

MINIMOS의 흐름도(flow chart)를 그림4에서 보았다.

먼저 입력을 읽어 들인 다음, 각 변수값들을 정규화시키고 자체 계산에 의해서 그리드 점(grid point)들을 정하는데 실리콘 영역에서는 최소 25×25에서 최대 60×60까지이고 산화막 영역에서는 최소 25×10에서 최대 60×20개의 그리드 점들을 잡는다.

다음에 2차원 불순물 분포(doping profile)를 계산하고 계산식에 의해 정전위와 전자 농도의 초기치를 정한다.

그 다음 초기 반복(pre iteration)과정에서 2차원 포아손 방정식과 1차원 전류 연속방정식으로부터 근사적인 해를 구하는데 모든 인접한 두 그리드점 사이의 전위차가 정해진 값보다 작아질 때까지 그리드 점들을 재조정해서 위 과정을 반복한다. 초기 반복이 끝나면 주 반복(main iteration) 과정으로 가서 2차원 이동도 분포를 계산한 다음, 2차원 포아손 방정식과 2차원 전류 연속방정식을 교대로 풀어서 드레인 전류를 계산하는데 바로 하나 앞선 반복과정에 비교해서 드레인 전류의 상대적인 변화가 입력에서 명시되는 ERROR(0.025 by default)보다 작아지거나 모든 그리드 점에서 전위의 변화가  $10^{-6} \cdot V_0$ 보다 작아질 때까지 위 과정을 반복한다.

주 반복 과정이 끝나면 최종 반복 과정을 거친 다음, 출력 과정으로 넘어가서 입력의 OUTPUT 카드에 명시된 대로 각 변수 값들을 출력시킨다. MINIMOS 의

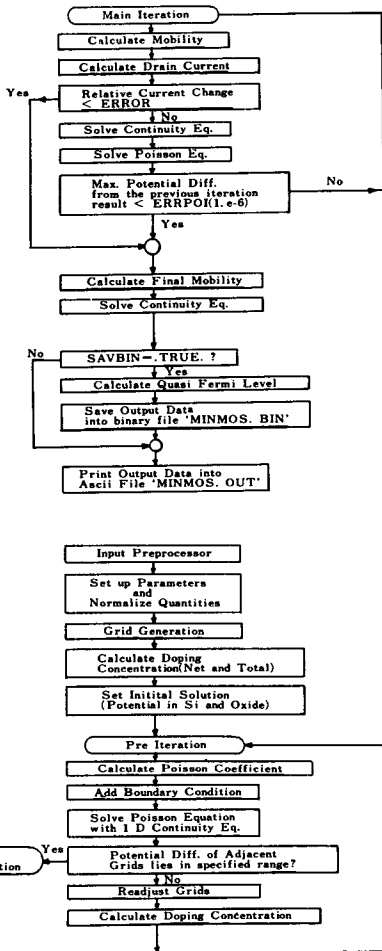


그림 4. MINIMOS의 흐름도(flow chart)

출력 변수 값들은 다음과 같다.[6,7]

- ① 드레인 전류
- ② 접합 깊이(junction depth)
- ③ 측면 확산(lateral diffusion)
- ④ Threshold 전압
- ⑤ 애벌랜시 전류
- ⑥ 2차원 불순물 분포(doping profile)
- ⑦ 2차원 정전위 분포(electrostatic potential)
- ⑧ 2차원 측면 방향 전계 분포
- ⑨ 2차원 깊이 방향 전계 분포
- ⑩ 2차원 소수 반송자 유사 페르미 레벨 분포
- ⑪ 2차원 소수 반송자 농도 분포
- ⑫ 2차원 공간 전하 분포
- ⑬ 2차원 측면 방향 전류 밀도 분포

- ⑭ 2차원 깊이 방향 전류 밀도 분포
- ⑮ 2차원 이동도 분포

### V. 프로그램의 수행 및 결과

마스크 상에서  $W/L=30\mu\text{m}/5\mu\text{m}$ 인 NMOS enhancement 트랜지스터에 대해서  $V_{BS}=0$ 이고,  $V_{DS}=1, 2, 3, 4, 5\text{V}$ ,  $V_{GS}=1, 2, 3, 4, 5\text{V}$ 에 대해 각각 드레인 전류를 계산하기 위한 MINIMOS 입력을 그림 5에 보였다. 그림 5에 대한 MINIMOS 결과와 측정치를 그림 6에서 보였다. 전류밀도가 높아질 때, 특히  $V_{GS}=5\text{V}$ 에서의 포화영역에서는 MINIMOS 결과와 실험치가 잘 일치하지 않았다.

```

EXAMPLE RUN OF NMOS ENH. TR. W/L=30/5
* DEVICE CARD FOR SPECIFYING DEVICE DIMENSIONS
DEVICE CHANNEL=N W=28.2E-4 L=5.E-4 TOX=870.E-8
BIAS UD=1. UG=1. UB=0.
STEP BD=1. ND=4 DG=1. AG=4
* PROFILE CARD FOR SPECIFYING SOURCE, DRAIN
* IMPURITY PROFILE
PROFILE NB=6.E14 TEMP=1100 TIME=2400 NS=5.E20
OPTION UFB=-0.89
* IMPLANT CARD FOR SPECIFYING THE IMPURITY
* PROFILE OF CHANNEL REGION BY ION IMPLANTATION
IMPLANT ELEMENT=B DOSE=2.3E11 AKEV=50 TEMP=1100
+ TIME=3000
* OUTPUT CARD FOR SELECTING OUTPUT VARIABLES
OUTPUT DC=YES PSI=YES OXIDE=NO ELAT=YES ETRAM=YES
+ MOB=YES CC=YES PHI=NO RHO=NO JLAT=YES
+ JTRAN=NO
END ERROR=1.E-2 SAVE=NO
    
```

그림 5. MINIMOS 입력

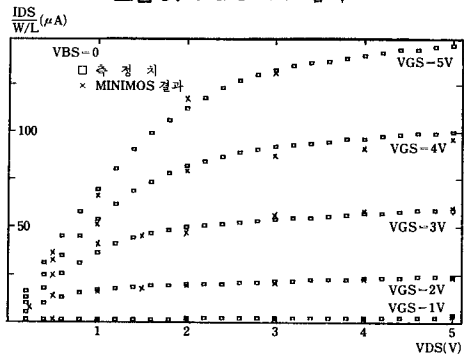


그림 6. 그림 5에 대한 MINIMOS 결과와 측정치의 비교

$W/L$ 이 20/20과 30/5인 트랜지스터에 대해서  $V_{DS}=0.13\text{V}$ 일때 threshold 전압의 측정치와 MINIMOS 결과를 그림 7에서 보였다. 입력의 PROFILE 카드와 IMPLANT 카드를 그림 5에서와 같이 했다.

채널 이온 주입시의 보른 농도를 달리해서  $V_{DS}=0.1\text{V}$ 에서의 게이트 전압에 따른 드레인 전류의 변화를 그림 8에서 보였다. 이때의 입력은 그림 5와는 달

리했다. Threshold 전압이 대체로 보른 농도에 선형적으로 변화함을 확인할 수 있다.

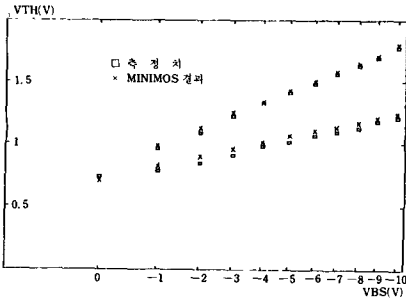


그림 7. W/L=20/20, 30/5에 대한 VBS에 대한 threshold 전압의 측정치와 MINIMOS 결과

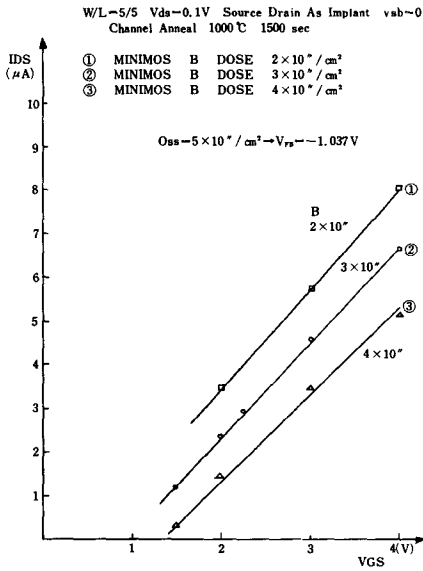


그림 8. 보른 농도의 변화에 따른 전류, 전압의 특성 변화

### VI. 결 론

MOSFET에 대한 2 차원 디바이스 시뮬레이션 프로그램인 MINIMOS의 기본 가정과 물리적 모델, 프로그램 구조를 알아보고, 실제로 전류, 전압 특성과 threshold 전압을 계산해서 실험치와 비교해 보았더니 대체로 일치했다.

특히 채널 길이와 이온 주입 조건을 변화시키면서 threshold 전압이 변하는 현상을 해석하는데 극히 유용하리라고 예상된다. 이외에도 subthreshold 전류와 애벌랜슈 전류도 계산할 수 있다.

MINIMOS의 제약점으로는 DC 특성만 고려하므로 과

도 특성은 해석할 수 없고, 또 2 차원 시뮬레이션 프로그램이기 때문에 채널 길이가 짧아질 때 나타나는 short channel 현상을 해석하는데는 유용하지만 채널 폭이 짧아질 때 나타나는 narrow channel 현상은 알아낼 수가 없다.

또한 전류 밀도가 높아질 때나, 채널 길이가 길어질 때는 잘 수렴하지 않는다. 그리하여 채널 길이가 20μm 이하인 경우에만 적용하는 것이 좋다.

### 참 고 문 헌

- [1] S. Selberherr, *English Translation of Two Dimensional Modeling of MOS Transistors*. The Original Paper is Ph. D. Dissertation Thesis, Technical University of Vienna, Austria, Translated by 'Semiconductor Physics, Inc., 1982.
- [2] S. Selberherr, A. Schütz, H. Pötzl "MINIMOS-a two-dimensional MOS transistor analyzer," *IEEE Transaction on Electron Devices*, vol. ED-27, no. 8, pp. 1540-1550, Aug. 1980.
- [3] M. S. Mock, "A two-dimensional mathematical model of the insulated gate field effect transistors," *Solid State Electronics*, vol. 16, pp. 601-609, 1973.
- [4] H. K. Gummel, "A self consistent iterative scheme for one dimensional steady state transistor calculations," *IEEE Transaction on Electron Devices*, vol. ED-11, pp. 445-465, 1964.
- [5] A. DeMari, "An accurate numerical steady state one dimensional solution of the PN junction," *Solid State Electronics*, vol. 11, pp. 38-58, 1968.
- [6] A. Schütz, S. Selberherr, H. Pötzl, *MINIMOS 1.0 Short Form User's Guide*. Technical University of Vienna, Austria, June 1980.
- [7] A. Schütz, S. Selberherr, H. Pötzl, *MINIMOS 2.0 User's Guide*. Technical University of Vienna, Austria, May 1982.
- [8] "제 2 절. Device simulation program MINIMOS," 설계 자동화에 관한 연구보고서, 한국전자기술연구소, pp. 104-196, 3월, 1983년.