

채널 영역의 불균일 농도를 고려한 MOSFET 문턱전압 모델

論文

51C-11-2

Threshold Voltage Model of The MOSFET for Non-Uniform Doped Channel

趙明石
(Myung-Suk Jo)

Abstract - The channel region of deep-sub-micrometer MOSFET is non-uniformly doped with pocket implant. Therefore, the advanced threshold voltage model is needed to account for the Short-Channel Effect and Reverse-Short-Channel Effect due to the non-uniform doping concentration in the channel region. In this paper, A scalable analytical model for the MOSFET threshold voltage is developed. The developed model is verified with MEDICI and TSUPREM simulator.

Key Words : MOSFET, 채널농도, 문턱전압

1. 서론

VLSI 기술의 발전에 따라 집적도와 동작 속도의 향상을 위해 단위 소자의 크기는 점점 더 작아져 채널 길이가 deep sub-micrometer($L < 0.2\mu\text{m}$)에 이르렀으며 게이트 산화막 두께 역시 수십 Å 정도로 얇아졌다. 이런 영역에서는 단위 소자에서 나타나는 short-channel effect (SCE)가 아주 커져서 전체 소자의 특성을 좌우하게 된다. 그러므로 소자의 동작 특성, 특히 문턱전압(V_{TH})을 명확히 기술하기 위해서는 SCE를 정확히 해석할 필요가 있다. V_{TH} 를 구하는 방법은 크게 수치해석 방법[1], 준실험적 분석 방법[2], 이차원적 분석 방법[3] 등 세 가지 정도의 범주로 나눌 수 있다. 수치해석 방법은 게이트 산화막과 substrate의 경계에서의 2차원 Poisson방정식을 수치해석 방법을 이용해 V_{TH} 를 구하는데 세 가지 방법 중 가장 정확하다고 할 수 있으나 시뮬레이션 시간이 많이 소요되므로 회로 시뮬레이터 등에 사용하기 어려운 단점이 있다. 전하 분배 모델로 대표되는 준실험적 분석 방법은 SCE에 의한 V_{TH} 의 감소를 채널 공핍 영역 중에서 게이트 전압에 의한 부분과 소스-드레인에 의한 부분이 서로 겹침으로써 게이트 전압에 의해 영향을 받는 부분이 감소한다는 사실로써 설명한다[4,5]. 이 모델은 직관적으로 SCE를 이해할 수 있고 V_{TH} 를 구하는 시간이 짧다는 장점이 있으나 deep sub-micrometer채널인 경우에는 그 정확도가 떨어지는 단점이 있다. 그 이유는 전하분배 모델에서 게이트 산화막과 실리콘의 경계 면에서의 표면 전압이 일정하다고 가정하기 때문이다. 이차원적 분석 방법은 게이트 아래 부분의 substrate영역의 공핍 영역에서 이차원 Poisson방정식을 일차원적 문제로 환원하여 해석함으로써 V_{TH} 를 구하는데, 실험적 모델에 비해서 보다 기본적인 물리

방정식으로부터 유도되므로 물리적인 바탕에서 해석하여 SCE에 의한 V_{TH} 감소를 잘 표현한다.

SCE와 더불어 deep sub-micrometer소자의 V_{TH} 에서 나타나는 중요한 현상은 Reverse Short-Channel Effect (RSCE)로서 L 이 작아지면서 V_{TH} 가 점차로 증가하는 효과를 준다. L 이 작아지면서 처음엔 RSCE가 주된 기여를 하여 V_{TH} 는 점차로 증가하여 최대값을 가진 뒤 SCE에 의해 다시 감소하는 양상을 갖게 되므로 V_{TH} 를 L 의 증가와 비교해 그려보면 봉우리 모양이 그려지게 된다. RSCE는 게이트의 재산화 과정에서 발생하는 불순물의 확산에 의해 채널의 수평 방향의 불순물 농도가 균일하지 않은 결과로 인해 채널 길이가 짧은 소자에서의 유효 불순물 농도가 증가하기 때문으로 알려져 있다[6]. 준실험적 분석 모델에서는 전하분배 모델에 수평 방향으로의 불순물 농도변화를 적용하여 RSCE에 의한 V_{TH} 를 설명하였으나 측정값과 정량적인 불일치는 여전히 존재하며 deep sub-micrometer소자에 적용하는 데는 한계가 있다[2].

BSIM 3V3 모델[7]은 Z.-H. Liu와 C. Hu 등의 이차원적 분석 모델[3]에 그 기반을 두고 있다. 그러나 Z.-H. Liu 등이 제안한 모델은 substrate 불순물 농도 분포가 균일한 경우로 단순화시켜 문제를 고려하였기 때문에 BSIM 3 모델은 SCE에 의한 V_{TH} 의 감소현상은 잘 기술하고 있으나 RSCE에 의한 V_{TH} 의 증가 현상은 실험적인 모델 파라메타에 의해 결정되며, 파라메타가 여러 개이기 때문에 공정 파라메타의 변화가 모델 수식에 적절히 반영되지 못하여 공정 파라메타 변화에 따른 V_{TH} 의 변화를 정확히 예측하지 못한다.

본 논문에서는 기존의 이차원적 분석 모델을 확장시켜 수평 방향과 수직 방향의 일정하지 않은 불순물 농도의 영향을 고려하여 SCE와 RSCE를 보다 명확히 기술하고, 이로부터 BSIM 3 모델과 비교하여 공정 파라메타의 변화를 보다 잘 반영하고 채널길이 변화를 적용할 수 있는 이차원적 분석 모델을 구하고자 한다. 또한 이차원 소자 및 공정 시뮬레이터인 MEDICI와 TSUPREM을 이용하여 새로운 모델을 검증하고 실제의 소자 V_{TH} 모델에 적용하고자 한다.

* 正會員 : 江陵大 電子工學科 副教授

接受日字 : 2002年 2月 26日

最終完了 : 2002年 8月 20日

2. 본 론

2.1 채널영역의 수직 불순물 농도의 변화에 대한 고찰

Substrate의 수직 방향과 수평 방향의 불균일한 불순물 농도 분포를 고려하기 위해서 먼저 수직 방향만을 고려하려고 한다. 수직 방향의 농도분포는 V_{TH} 조절용 불순물 주입의 dose와 에너지, punch-through를 막기 위한 불순물 주입의 조건에 의해 결정된다. 채널 표면에서의 농도분포가 Gaussian분포라고 가정을 하면, V_{TH} 는 실제 농도분포 보다 낮은 농도에 의존한다는 사실로부터 농도분포를 계단 형태로 근사 시켰으며, 이로부터 더욱 간단한 형태의 V_{TH} 표현식을 얻을 수 있다[그림 1 (a)]. 따라서

$$(N_S - N_B) X_i = \int_0^\infty [N(x) - N_B] dx = D_i \quad (1)$$

로 쓸 수 있다. 여기서 N_S 와 N_B 는 각각 계단형 substrate 농도 분포의 첫번째와 두번째 최대치를 나타내고 D_i 는 채널 농도의 dose이다. 실제의 농도분포는 Gaussian분포가 아니므로 Gaussian분포 형태에서 벗어난 정도를 θ 라는 파라메타를 도입하여 기술할 수가 있는데, θ 는 농도분포의 평균 침투 깊이와 표준 편차가, 각각 혹은 동시에 정상 Gaussian 농도분포에서 벗어난 정도를 기술하는 파라메타가 된다. 따라서 $D_i = \theta D_i$ 와 같이 나타냄으로써 중요한 공정 파라메타인 채널농도 dose로 V_{TH} 를 표현할 수 있다. 게이트 산화막과 substrate 경계면에서 드레인 방향을 y축, substrate 방향을 x축으로 택하면[그림 1 (b)], 경계면으로 부터 공핍 영역에서의 Poisson 방정식은

$$\frac{d E_{si}(x)}{dx} = -\frac{q}{\epsilon_{si}} [p - n + N_S + N_B] \quad (2)$$

로 주어진다. 여기에서 depletion 가정을 사용하여 소수 캐리어의 영향을 무시하면

$$\frac{d E_{si}(x)}{dx} = -\frac{q}{\epsilon_{si}} [N_S + N_B] \quad (3)$$

을 얻는다. 그림 1 (b)에서 $E_{si}(X_{dep})=0$ 과 전위가 $x=X_i$ 에서 연속이라는 경계 조건을 이용하여 Poisson 방정식을 풀면 공핍 영역 폭에 관한 표현식

$$X_{dep} = \sqrt{\frac{2 \epsilon_{si}}{q N_B} \left[\phi_{si} - \frac{q(N_S - N_B)}{2 \epsilon_{si}} X_i^2 \right]^{1/2}} \quad (4)$$

을 얻는다. 다음, 산화막과 실리콘 경계면에서의 Gaussian box(그림 2)를 고려해보자. Gauss 법칙으로부터

$$\begin{aligned} & \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} \\ &= \int \vec{E} \cdot d\vec{l}_{AB} + \int \vec{E} \cdot d\vec{l}_{BD} + \int \vec{E} \cdot d\vec{l}_{DC} \\ & \quad + \int \vec{E} \cdot d\vec{l}_{CA} \\ &= -\frac{\epsilon_{ox}}{\epsilon_{si}} \int_0^y E_{ox}(0, y) dy + \int_0^{X_{dep}} E_{si}(x, y) dx \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & - \int_0^{X_{dep}} E_{si}(0, y) dx \\ &= -\frac{Q_b}{\epsilon_{si}} = \frac{q N_S X_i + q N_B (X_{dep} - X_i)}{\epsilon_{si}} y \end{aligned} \quad (5)$$

를 얻는다. 위 식의 첫 항은 substrate로 들어오는 게이트 전압에 의한 전계이며, 셋째 항이 공핍 영역 폭을 통과하여 나가는 전계인데 이 항의 값은 0이다. 둘째 항과 넷째 항은 소스쪽에서 들어오는 전기장과의 임의의 점 y에서 빠져나가는 전기장의 성분이다. 여기서

$$E_{ox}(0, y) = \frac{V_{gs} - V_{fb} - V(y)}{t_{ox}} \quad (6)$$

를 대입하면

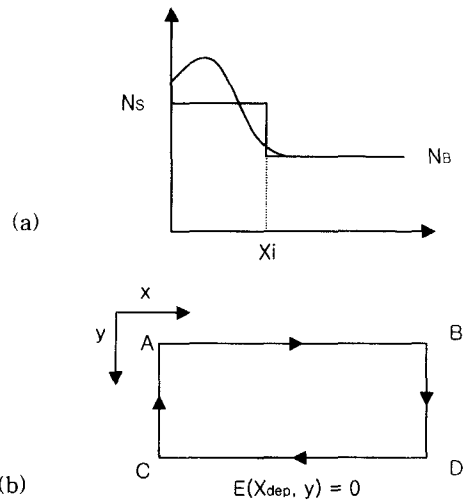


그림 1 (a) 게이트 아래 채널 영역에서의 수직 방향 불균일한 불순물 농도 분포. (b) 채널 영역의 단면도

Fig. 1 (a) Non-uniform doping profile of channel implantation region under gate in vertical direction and step-type profile (b) Cross-sectional view in channel region

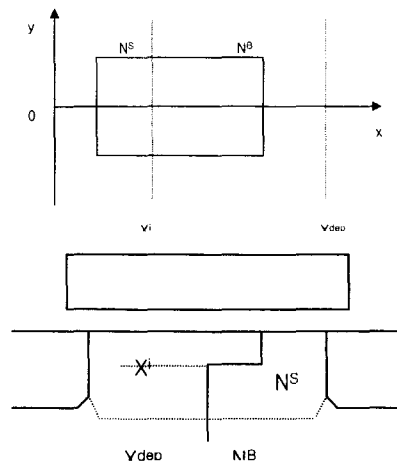


그림 2 Gaussian box와 경계조건

Fig. 2 Gaussain box and its boundary condition

$$\begin{aligned} & \frac{\epsilon_{ox}}{\epsilon_{si}} \int_0^y \frac{[V_{gs} - V_{fb} - V(y)]}{t_{ox}} \\ & + \int_0^{X_{dep}} E_{si}(x, y) dx - \int_0^{X_{dep}} E_{si}(0, y) dx \quad (7) \\ & = \frac{[q N_s X_i + q N_b (X_{dep} - X_i)] y}{\epsilon_{si}} \end{aligned}$$

식 (7)의 양변을 y로 미분하면 다음과 같은 미분 방정식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \epsilon_{si} \frac{X_{dep}}{\eta} \frac{dE_{si}(y)}{dy} + \epsilon_{ox} \frac{[V_{gs} - V_{fb} - V(y)]}{t_{ox}} \\ = q N_b X_{dep} + q(N_s - N_b) X_i \quad (8) \end{aligned}$$

여기서 η 는 드레인 전압이 인가되었을 경우, 드레인 근처의 공핍 영역 폭이 소스 근처보다 큰 효과를 고려하기 위한 파라메타인데 여기서는 $\eta = 1$ 을 사용하기로 한다[8]. 또한 전기장 정의식으로 부터 $E_{si}(y) = -\frac{dV(y)}{dy}$ 이므로

$$\begin{aligned} \epsilon_{si} \frac{X_{dep}}{\eta} \frac{d^2 V(y)}{dy^2} - \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} V(y) + \\ \left\{ \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} (V_{gs} - V_{fb}) - [q N_b X_{dep} + q(N_s - N_b) X_i] \right\} = 0 \quad (9) \end{aligned}$$

을 얻게 되며 이를 정리하면 다음 식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \frac{d^2 V(y)}{dy^2} - \frac{\epsilon_{ox} \eta}{t_{ox} \epsilon_{si} X_{dep}} \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} V(y) + \frac{\eta}{\epsilon_{si} X_{dep}} \\ \left\{ \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} (V_{gs} - V_{fb}) - [q N_b X_{dep} + q(N_s - N_b) X_i] \right\} = 0 \quad (10) \end{aligned}$$

다음과 같이 정의하면

$$\begin{aligned} l^2 = \frac{\epsilon_{si} t_{ox}}{\epsilon_{ox} \eta} X_{dep} \quad V_{TH0} = \\ V_{fb} + \phi_{si} + \frac{t_{ox}}{\epsilon_{ox}} [q N_b X_{dep} + q(N_s - N_b)] \quad (11) \\ V_{SL} = V_{gs} - V_{TH0} + \phi_{si} \end{aligned}$$

주어진 미분 방정식은

$$\frac{d^2 V(y)}{dy^2} - \frac{V(y)}{l^2} + \frac{V_{SL}}{l^2} = 0 = 0 \quad (12)$$

이며,

이 때의 경계조건은 $V(0) = V_{bi}$, $V(L) = V_{bi} + V_{DS}$ 이다. 여기서

$$V_{bi} = \frac{2 k_B T}{q} \ln \left(\frac{N_{SD} N_S}{n_i^2} \right) \quad (13)$$

으로 주어지며, 소스/드레인과 substrate사이의 내부 전위차이다. 식(12)는 2차 inhomogeneous 미분방정식이므로 해는 $V(y) = V_c(y) + V_p(y)$ 의 형태로 주어지는데, $V_c(y)$ 는

$$\frac{d^2 V_c(y)}{dy^2} - \frac{V_c(y)}{l^2} = 0 \quad (14)$$

을 만족시키는 일반해이며 $V_p(y)$ 는 특이해이다. Inhomogeneous 항이 상수항이므로 $V_p(y) = \text{상수} = V_{SL}$ 이 되어 표면 전압은

$$\begin{aligned} V(y) = V_{SL} + (V_{bi} - V_{SL} + V_{DS}) \frac{\sinh(y/l)}{\sinh(L/l)} \\ + (V_{bi} - V_{SL}) \frac{\sinh[(L-y)/l]}{\sinh(L/l)} \quad (15) \end{aligned}$$

이 된다. 표면 전압 $V(y)$ 가 최소가 되는 위치는 다음 조건으로부터 구할 수 있으며

$$\frac{dV(y)}{dy} \Big|_{y=y_0} = 0 \quad (16)$$

V_{DS} 가 작은 경우 ($V_{DS} \sim 0.1$ V) 에 $y_0 \sim L/2$ 이므로(그림 3)

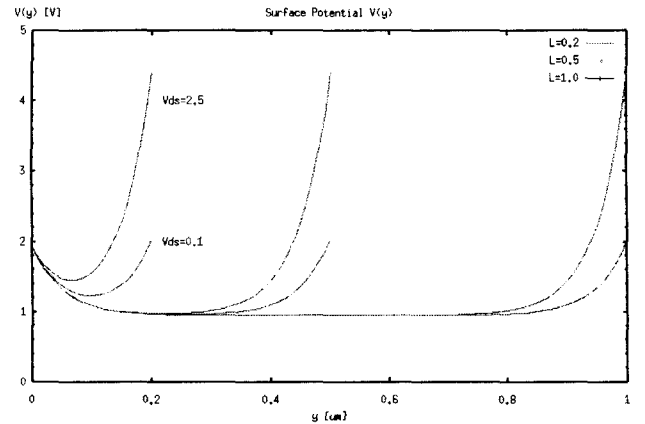


그림 3 $L = 0.2, 0.4, 1.0 \mu\text{m}$ 의 표면 전압. 공정 파라메타는 각각 $t_{ox} = 70 \text{ \AA}$, $N_{SD} = 1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$, $N_S = 1 \times 10^{17} / \text{cm}^3$, $N_B = 1 \times 10^{16} / \text{cm}^3$, $N_{GS} = 0.5$ V 이고 $y_0 \sim 0.5$ 이다.

Fig. 3 Surface potentials for $L = 0.2, 0.4, 1.0 \mu\text{m}$. Process Parameters are $t_{ox} = 70 \text{ \AA}$, $N_{SD} = 1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$, $N_S = 1 \times 10^{17} / \text{cm}^3$, $N_B = 1 \times 10^{16} / \text{cm}^3$, $N_{GS} = 0.5$ V, and $y_0 \sim 0.5$ L.

$$V(y_0) = V_{SL} + [2(V_{bi} - V_{SL}) + V_{DS}] \frac{\sinh(L/2l)}{\sinh(L/l)} \quad (17)$$

로 주어진다. $V_{GS} = V_{TH}$ 일 때 최소 표면 전압은 $2\phi_F$ 이며 ϕ_F 는 substrate의 페르미전압이다. 따라서

$$V_{TH} = V_{TH0} - \frac{[2(V_{bi} - \phi_{si}) + V_{DS}]}{2 \cosh(L/2l) - 2} \quad (18)$$

로 주어진다. 위 식의 두 번째 항이 SCE에 의한 V_{TH} 의 감소를 나타낸다. 특성 길이 l 은 $0.05 \sim 0.15 \mu\text{m}$ 정도의 크기를 가지므로 $l \ll L$ 인 영역에서는

$$\Delta V_{TSC} = \frac{[2(V_{bi} - \phi_{si}) + V_{DS}]}{2 \cosh(L/2l) - 2} \approx [2(V_{bi} - \phi_{si}) + V_{DS}] [e^{-L/2l} + 2e^{-L/l}] \quad (19)$$

의 형태로 나타낼 수 있다. 식 (19)로부터 ΔV_{TSC} 는 내부 전위차에 비례하여 증가함을 알 수 있는데, 따라서 LDD 구조를 갖는 소자가 V_{TH} 감소폭이 작음을 알 수 있다. 또한 ΔV_{TSC} 는 l 이 증가함에 따라 증가함을 알 수 있는데 식 (4)와 (11)로부터 t_{ox} 와 substrate 불순물농도가 클수록 V_{TH} 감소폭이 커짐을 알 수 있다. 식 (19)는 V_{DS} 에 의존하는 항을 포함하므로 DIBL(Drain Induced Barrier Lowering) 효과도 포함하고 있다고 할 수 있으나, 식 (19)를 유도하는 과정에서 V_{DS} 가 작다는 가정을 하였으므로 불완전하게 그 효과를 내포하고 있다. 그러나 BSIM3 모델에서와 같이 DIBL 효과를 나타내는 파라메타($\eta_0, \eta_{sub}, D_{sub}$ 등)를 도입하면 이 문제는 해결이 가능하다.

2.2 채널영역의 수평 불순물 농도의 변화에 대한 고찰

채널영역의 수평 방향의 불균일한 불순물 농도 분포에 의한 V_{TH} 의 증가현상을 고려해 보자. 게이트 아래의 substrate의 불균일한 농도 분포를 수직 방향과 수평 방향 분포의 곱으로 생각하면 $N(x,y)=N(x)N(y)$ 이라 쓸 수 있다. $N(y)$ 는 수평 방향 농도 분포의 특성 길이 a 가 $a \ll L$ 인 경우와 $a \sim L$ 인 경우에 매우 다른 분포를 가지게 되는데, 전자의 경우는 전체 채널 영역의 평균(또는 유효) 농도는 수평 방향의 불균일성에 거의 영향을 받지 않게 되고, 후자는 평균농도를 무시 못할 정도의 크기로 높이는 효과를 주게 된다. 이러한 수평 방향의 불균일 분포를 그림 4에 나타내었다. 양방향의 불균일 분포 효과를 동시에 고려하는 경우, 전체 분포는 그림 5와 같게 된다.

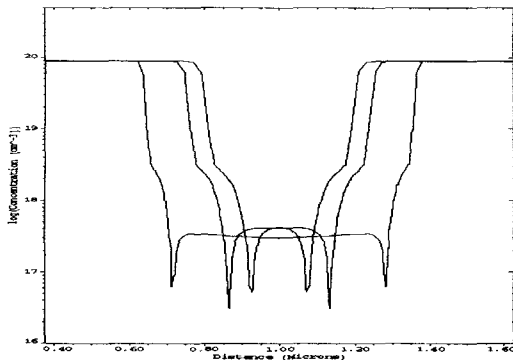


그림 4 $L = 0.25, 0.4, 1.0 \mu m$ 의 채널 길이를 가진 소자에서 수평 방향의 유효 채널 불순물농도. 채널 길이가 작아지면서 유효 채널 불순물 농도가 커짐을 알 수 있다.
Fig. 4 Effective channel doping profiles of non-uniform profile in lateral direction for different channel length, $L = 0.25, 0.4, 1.0 \mu m$. As the channel lengths decrease effective channel doping concentrations increase.

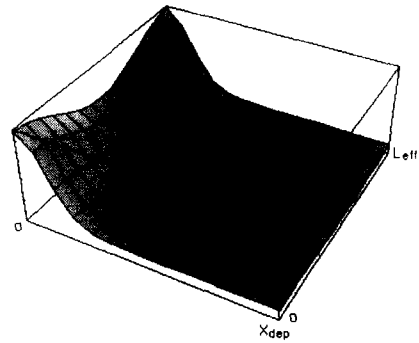


그림 5 수직방향과 수평방향의 불균일성을 모두 포함한 전체 채널 불순물 농도 분포
Fig. 5 Total channel doping profile including both vertical and lateral non-uniformity

이와 같은 $N(y)$ 의 특성을 고려하여 다음과 같은 함수 형태를 가정하자.

$$N(y) = Q_F e^{-y^2/a^2} + 1 + Q_F e^{-(L-y)^2/a^2} \quad (20)$$

여기서 Q_F 는 수평과 수직분포와의 상대적인 비율 나타내는 양이다. 식(20)으로 주어진 수평 분포는 a 와 L 의 관계에 따라 위에서 기술한 $N(y)$ 의 분포 조건을 만족시킨다.

이제 게이트 산화막과 substrate사이의 경계면에서 Gauss box에서의 총 전하는

$$-Q_B = \int_0^y N(x)N(y')dy' = [q N_S X_i + q N_B (X_{dep} - X_i)] \int_0^y [Q_F e^{-y'^2/a^2} + 1 + Q_F e^{-(L-y')^2/a^2}] dy' = Q_{B0} \int_0^y [Q_F e^{-y'^2/a^2} + 1 + Q_F e^{-(L-y')^2/a^2}] dy' \quad (21)$$

으로 주어지므로 이차 미분 방정식은

$$\frac{d^2 V(y)}{dy^2} - \frac{V(y)}{l^2} + \frac{1}{l^2} \left\{ V_{SL} - \frac{t_{ox}}{\epsilon_{ox}} Q_{B0} [Q_F e^{-y^2/a^2} + 1 + Q_F e^{-(L-y)^2/a^2}] dy' \right\} = 0 \quad (22)$$

이다. 위 식의 일반해는

$$\frac{d^2 V_c(y)}{dy^2} - \frac{V_c}{l^2} = 0, \quad V_c(y) = A e^{y/l} + B e^{-y/l} \quad (23)$$

을 만족시키는 일반해와 특이해, $V_p(y)$ 의 합으로 주어지는데 inhomogeneous 항이 세 개이므로 중첩의 원리에 의해

$$V_p(y) = V_{p1}(y) + V_{p2}(y) + V_{p3}(y) \quad (24)$$

로 주어진다. 각각의 해는

$$\begin{aligned} \frac{d^2 V_{p1}(y)}{dy^2} - \frac{V_{p1}(y)}{l^2} + \frac{V_{SL}}{l^2} &= 0 \\ \frac{d^2 V_{p2}(y)}{dy^2} - \frac{V_{p2}(y)}{l^2} - \frac{t_{ox} Q_{FB}}{l^2 \epsilon_{ox}} Q_F e^{-y^2/l^2 a^2} &= 0 \\ \frac{d^2 V_{p3}(y)}{dy^2} - \frac{V_{p3}(y)}{l^2} - \frac{t_{ox} Q_{FB}}{l^2 \epsilon_{ox}} Q_F &= 0 \\ e^{-(L-y)^2/l^2 a^2} &= 0 \end{aligned} \quad (25)$$

위 식의 특이해는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} V_{p1}(y) &= V_{SL} \quad V_{p2}(y) = \\ \frac{\alpha \beta l Q_F}{2} e^{\alpha^2/4 l^2} \left[e^{y/l} \operatorname{Erf}\left(\frac{y}{a} + \frac{\alpha}{2l}\right) - e^{-y/l} \right. \\ \left. \operatorname{Erf}\left(\frac{y}{a} - \frac{\alpha}{2l}\right) \right] \\ V_{p3}(y) &= \\ \frac{\alpha \beta l Q_F}{2} e^{\alpha^2/4 l^2} \left[e^{(L-y)/l} \operatorname{Erf}\left(\frac{(L-y)}{a} + \frac{\alpha}{2l}\right) - \right. \\ \left. e^{-(L-y)/l} \operatorname{Erf}\left(\frac{(L-y)}{a} - \frac{\alpha}{2l}\right) \right] \end{aligned} \quad (26)$$

여기서 $\operatorname{Erf}(y)$ 는 Error 함수이며

$$\beta = \frac{t_{ox} Q_{FB}}{l^2 \epsilon_{ox}} \quad (27)$$

로 주어진다. 따라서 경계조건 $V(0)=V_{bi}$, $V(L)=V_{bi}+V_{DS}$ 를 적용하면, 이차 미분 방정식의 해를 다음과 같이 얻는다.

$$\begin{aligned} V(y) &= V_{SL} + (V_{bi} - V_{SL} + V_{DS} - K) \frac{\sinh(y/l)}{\sinh(L/l)} + \\ & (V_{bi} - V_{SL} - K) \frac{\sinh[(L-y)/l]}{\sinh(L/l)} + \frac{\alpha \beta l Q_F}{2} e^{\alpha^2/4 l^2} \\ & \left[e^{y/l} \operatorname{Erf}\left(\frac{y}{a} + \frac{\alpha}{2l}\right) - e^{-y/l} \operatorname{Erf}\left(\frac{y}{a} - \frac{\alpha}{2l}\right) + e^{(L-y)/l} \right. \\ & \left. \operatorname{Erf}\left(\frac{(L-y)}{a} + \frac{\alpha}{2l}\right) - e^{-(L-y)/l} \operatorname{Erf}\left(\frac{(L-y)}{a} - \frac{\alpha}{2l}\right) \right] \end{aligned} \quad (28)$$

여기서

$$\begin{aligned} K &= \frac{\alpha \beta l Q_F}{2} e^{\alpha^2/4 l^2} \left[2 \operatorname{Erf}\left(\frac{\alpha}{2l}\right) + e^{L/l} \operatorname{Erf}\left(\frac{L}{a} + \frac{\alpha}{2l}\right) \right. \\ & \left. - e^{-L/l} \operatorname{Erf}\left(\frac{L}{a} - \frac{\alpha}{2l}\right) \right] \end{aligned} \quad (29)$$

로 주어진다. 만약 V_{DS} 가 일반적인 V_{TH} 측정시와 마찬가지로 작다면 ($V_{DS} \sim 0.1V$), 표면 전압이 최소가 되는 위치는 $y_0 \sim L/2$ 로 주어지므로(그림 3) 이때의 전압은

$$\begin{aligned} V_{\min} &= V_{SL} + [2(V_{bi} - V_{SL} - K) + V_{DS}] \frac{\sinh(L/2l)}{\sinh(L/l)} \\ & + \alpha \beta l Q_F e^{\alpha^2/4 l^2} \left[e^{L/2l} \operatorname{Erf}\left(\frac{L}{2a} + \frac{\alpha}{2l}\right) - e^{-L/2l} \right. \\ & \left. \operatorname{Erf}\left(\frac{L}{2a} - \frac{\alpha}{2l}\right) \right] \end{aligned} \quad (30)$$

이다. $V_{GS}=V_{TH}$ 일때 $V_{\min} \cong 2\phi_F = \phi_s$ 임을 이용하면

$$\begin{aligned} V_{TH} &= \\ V_{TH0} &- \frac{[2(V_{bi} - \phi_s) + V_{DS}]}{2 \cosh(L/2l) - 2} + \frac{2K}{2 \cosh(L/2l) - 2} \\ &- \alpha \beta l Q_F e^{\alpha^2/4 l^2} \left[e^{L/2l} \operatorname{Erf}\left(\frac{L}{2a} + \frac{\alpha}{2l}\right) - e^{-L/2l} \right. \\ & \left. \operatorname{Erf}\left(\frac{L}{2a} - \frac{\alpha}{2l}\right) \right] \frac{\cosh(L/2l)}{\cosh(L/2l) - 1} \end{aligned} \quad (31)$$

으로 주어진다.

α (L 인 영역에서는 $L/2\alpha \gg 1$, $L/\alpha \gg 1$ 이며, l 이 $0.1 \sim 0.15\mu m$ 정도이고, α 또한 l 과 비슷한 크기이므로 $x \gg 1$ 인 경우 $\operatorname{Erf}(x) \sim 1 - \frac{e^{-x^2}}{x}$ 로 근사된다는 사실을 이용하면

$$\begin{aligned} \operatorname{Erf}\left(\frac{L}{2a} + \frac{\alpha}{2l}\right) &\sim 1 - \frac{2\alpha e^{-L^2/4 a^2}}{L} \\ \operatorname{Erf}\left(\frac{L}{2a} - \frac{\alpha}{2l}\right) &\sim 1 - \frac{2\alpha e^{-L^2/4 a^2}}{L} \\ \operatorname{Erf}\left(\frac{L}{a} + \frac{\alpha}{2l}\right) &\sim 1 - \frac{\alpha e^{-L^2/4 a^2}}{L} \\ \operatorname{Erf}\left(\frac{L}{a} - \frac{\alpha}{2l}\right) &\sim 1 - \frac{\alpha e^{-L^2/4 a^2}}{L} \end{aligned} \quad (32)$$

이 된다. 따라서 V_{TH} 는

$$\begin{aligned} V_{TH} &= \\ V_{TH0} &- \frac{2(V_{bi} - \phi_s) + V_{DS}}{2 \cosh(L/2l) - 2} + 2\alpha \beta l Q_F e^{\alpha^2/4 l^2} \\ & \frac{\left[\operatorname{Erf}\left(\frac{\alpha}{2l}\right) - \frac{\alpha}{L} (e^{-L^2/l^2 a^2} - 2e^{-L^2/4 a^2}) \sinh(L/l) \right]}{2 \cosh(L/2l) - 2} \end{aligned} \quad (33)$$

로 주어진다. 또한 $L \ll l$ 이므로

$$\frac{1}{2 \cosh(L/2l) - 2} \cong (e^{-L/2l} + 2e^{-L/l}) \quad (34)$$

을 이용하면, 최종적으로

$$\begin{aligned} V_{TH} &= \\ V_{TH0} &- [2(V_{bi} - \phi_s) + V_{DS}] (e^{-L/2l} + 2e^{-L/l}) + \\ & 2\alpha \beta l Q_F e^{\alpha^2/4 l^2} \left[\operatorname{Erf}\left(\frac{\alpha}{2l}\right) - \frac{\alpha}{L} (e^{-L^2/l^2 a^2} - \right. \\ & \left. 2e^{-L^2/4 a^2}) \sinh(L/l) \right] (e^{-L/2l} + 2e^{-L/l}) \\ \Delta V_{TRSC} &= \\ & 2\alpha \beta l Q_F e^{\alpha^2/4 l^2} \left[\operatorname{Erf}\left(\frac{\alpha}{2l}\right) - \frac{\alpha}{L} (e^{-L^2/l^2 a^2} - \right. \\ & \left. 2e^{-L^2/4 a^2}) \sinh(L/l) \right] (e^{-L/2l} + 2e^{-L/l}) \end{aligned} \quad (35)$$

을 얻는다.

식 (35)의 첫째 항은 식 (11)로 주어지는 채널이 긴 MOSFET의 V_{TH} 이고, 둘째 항은 L 이 작아짐에 따라 SCE에 의한 V_{TH} 의 감소를 나타내는데 이 항의 값은 전하분배 모델에서 예측하는 값보다 크며 또한 DIBL 효과까지 나타낸

다. 셋째 항은 수평 방향의 불순물 농도 분포의 불균일성에 의한 항으로 V_{TH} 의 증가를 나타내는 항이다. 따라서 L 에 따라 V_{TH} 의 선제적인 양상은 채널이 긴 경우에 L 의 항에 영향을 크게 받으므로 L 는 채널길이의 변화에 무관하다가 L 이 작아짐에 따라 식(35)의 둘째 항과 셋째 항의 경쟁적인 관계에 따라서 증가한 후에 감소하는 양상을 보인다. 식(35)의 ΔV_{TRSCF} 은 SCE에 의한 ΔV_{TRSCF} 과 연관되어 있다. 기존의 준실험적 모델은 수평 방향의 전하 모델에서 출발하여 ΔV_{TRSCF} 를 얻었으므로 수평 방향과 수직 방향의 농도 분포가 서로 무관하였으나[2], 새로운 모델에서는 ΔV_{TRSCF} 가 두 효과의 곱에 비례하는 결과를 나타내므로 보다 직관적으로 타당한 모델임을 알 수 있다.

3. 시뮬레이션 및 측정에 의한 모델 증명

3.1 이차원 소자 시뮬레이터(MEDICI)를 통한 증명

3.1.1 $V_{BS} = 0$ 인 경우

식 (35)로 주어진 V_{TH} 표현식을 파라메타를 추출하기 쉬운 형태로 변환시키기 위해, 일반적으로 l 과 α 의 크기가 비슷하므로 $Erft\left(\frac{\alpha}{2l}\right) \sim 1$ 의 근사를 이용하면

$$V_{TH} = V_{TH0} - [2(V_{bi} - \phi_s) + V_{DS}](e^{-L/2l} + 2e^{-L/l}) + 2\alpha\beta l Q_F e^{\alpha^2/4 l^2} \left[1 - \frac{\alpha}{2L}(e^{-L^2/\alpha^2} - 2e^{-L^2/4\alpha^2})(e^{L/l} + e^{-L/l})\right](e^{-L/2l} + 2e^{-L/l}) \quad (36)$$

으로 표현할 수 있다. 여기서

$$V_{TH0} = V_{fb} + \phi_{si} + \frac{t_{ox}}{\epsilon_{ox}} [q N_B X_{dep} + q(N_S - N_B)]$$

$$\phi_{si} = \frac{2k_B T}{q} \ln\left(\frac{N_S}{n_i}\right)$$

$$V_{bi} = \frac{2k_B T}{q} \ln\left(\frac{N_{SD} N_S}{n_i^2}\right)$$

$$l^2 = \frac{\epsilon_{si} t_{ox}}{\epsilon_{ox} \eta} X_{dep}$$

$$X_{dep} = \sqrt{\frac{2\epsilon_{si}}{q N_B} \left[\phi_{si} - \frac{q(N_S - N_B)}{2\epsilon_{si}} X_i^2 \right]^{1/2}}$$

$$X_i = \frac{D_i}{N_S - N_B} (1 - \lambda_L V_{BS})$$

$$\beta = -\frac{t_{ox}}{l^2 \epsilon_{ox}} [q N_S X_i + q N_B (X_{dep} - X_i)] \quad (37)$$

이다. 표 1에 V_{TH} 를 추출하기 위한 공정 및 모델 파라메타와 그 의미를 나타내었다. 이들 파라메타를 포함하는 V_{TH} 식은

$$V_{TH} = V_{TH0} - l_F [2(V_{bi} - \phi_s) + V_{DS}](e^{-L/2l} + 2e^{-L/l})$$

$$2\alpha\beta l Q_F e^{\alpha^2/4 l^2} \left[1 - \frac{\alpha}{2L}(e^{-L^2/\alpha^2} - 2e^{-L^2/4\alpha^2})(e^{L/l} + e^{-L/l})\right](e^{-L/2l} + 2e^{-L/l}) \quad (38)$$

이다. 그림 6과 7에 MEDICI로 생성시킨 채널 농도 분포로부터 구한 V_{TH} 와 식 (38)을 이용하여 추출한 V_{TH} 를 나타내었다. 이때 사용된 모델 파라메타를 표 2와 표3에 나타내었다.

표 1 공정 및 V_{TH} 모델 파라메타

Table 1 Process and V_{TH} model parameters

파라메타	내용
t_{ox}	게이트 산화막 두께
N_{SD}	소스/드레인 불순물 농도
N_S	계단형 substrate 농도 분포의 첫번째 최대치
N_B	계단형 substrate 농도 분포의 두번째 최대치
l_F	SCE 관련 파라메타 [(35)식을 보상]
α	SCE 관련 파라메타 [수평 불균일 농도 분포의 특성 길이]
Q_F	RSCE 관련 파라메타 [수평 불균일 농도 분포의 최대값]
V_{FB}	Flat-band 전압

표 2 게이트 산화막 두께의 변화에 따른 V_{TH} 관련 모델 파라메타(그림 6)

Table 2 V_{TH} model parameters for gate oxide thickness variations(Fig. 6)

$t_{ox}(A)$	$N_S(cm^{-3})$	$N_B(cm^{-3})$	$N_{SD}(cm^{-3})$	l_F	$\alpha(\mu m)$	Q_F	V_{FB}
40	1×10^{17}	5×10^{16}	1×10^{20}	0.108	0.125	1.8×10^{-4}	-0.771
50	1×10^{17}	5×10^{16}	1×10^{20}	0.120	0.129	5.5×10^{-4}	-0.767
60	1×10^{17}	5×10^{16}	1×10^{20}	0.138	0.129	1.2×10^{-3}	-0.760
70	1×10^{17}	5×10^{16}	1×10^{20}	0.150	0.130	2.0×10^{-3}	-0.753
80	1×10^{17}	5×10^{16}	1×10^{20}	0.172	0.130	3.3×10^{-3}	-0.745
90	1×10^{17}	5×10^{16}	1×10^{20}	0.196	0.130	4.8×10^{-3}	-0.740
100	1×10^{17}	5×10^{16}	1×10^{20}	0.215	0.130	6.6×10^{-3}	-0.734
150	1×10^{17}	5×10^{16}	1×10^{20}	0.338	0.135	1.7×10^{-2}	-0.698

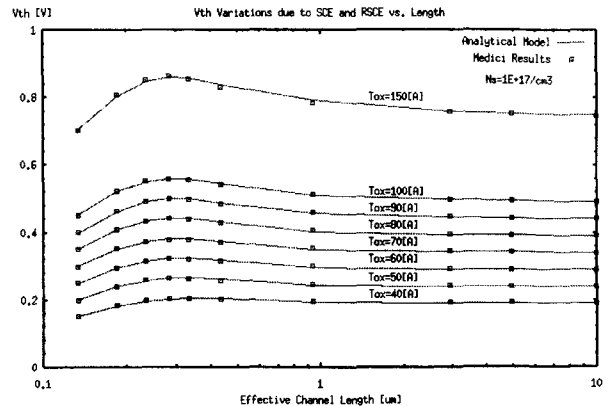


그림 6 산화막 두께가 다른 일반적인 구조를 가진 소자 시뮬레이션 결과와 모델의 V_{TH} 비교

Fig. 6 Comparison between simulated and modeled V_{TH} of standard source/drain structural device for various oxide thicknesses

표 3 Substrate 농도분포의 변화에 따른 V_{TH} 모델 파라메타(그림 7)

Table 3 V_{TH} model parameters for substrate doping profile variations(Fig. 7)

$t_{ox}(A)$	$N_s(cm^{-3})$	$N_B(cm^{-3})$	$N_{sp}(cm^{-3})$	l_F	$\alpha(\mu m)$	Q_F	V_{FB}
70	7×10^{16}	5×10^{16}	1×10^{20}	0.147	0.118	1.1×10^{-3}	-0.753
70	8×10^{16}	5×10^{16}	1×10^{20}	0.148	0.122	1.45×10^{-3}	-0.753
70	9×10^{16}	5×10^{16}	1×10^{20}	0.148	0.124	1.9×10^{-3}	-0.753
70	1×10^{17}	5×10^{16}	1×10^{20}	0.150	0.130	2.0×10^{-3}	-0.753
70	1.5×10^{17}	5×10^{16}	1×10^{20}	0.245	0.122	6.0×10^{-3}	-0.753
70	2×10^{17}	5×10^{16}	1×10^{20}	0.39	0.110	1.25×10^{-2}	-0.753
70	3×10^{17}	5×10^{16}	1×10^{20}	0.6	0.096	2.15×10^{-2}	-0.753

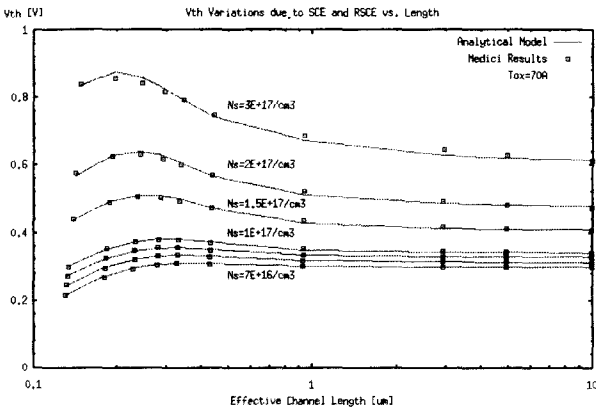


그림 7 채널의 불순물 농도가 다른 일반적인 구조를 가진 소자 시뮬레이션 결과와 모델의 V_{TH} 비교

Fig. 7 Comparison between simulated and modeled V_{TH} of standard source/drain structural device for various channel doping concentrations

3.1.2 $V_{BS} \neq 0$ 인 경우

Substrate 전압에 의한 V_{TH} 에의 영향을 포함하는 식은

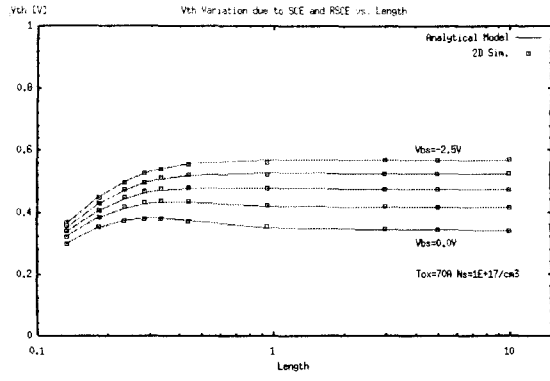
$$\begin{aligned}
 V_{TH} = & \\
 V_{TH0} - l_F(1 + \lambda_S \sqrt{V_{BS}})[2(V_{bi} - \phi_s) + V_{DS}] & \\
 (e^{-L/2l} + 2e^{-L/l}) + 2\alpha\beta l Q_F(1 + \lambda_R V_{BS}) e^{a^2/4l^2} & \\
 \left[1 - \frac{\alpha}{2L} (e^{-L^2/a^2} - 2e^{-L^2/4a^2})(e^{L/l} + e^{-L/l}) \right] & \\
 (e^{-L/2l} + 2e^{-L/l}) & \quad (39)
 \end{aligned}$$

으로 표현된다(식 (37) 참조). 여기서 λ_L , λ_S , λ_R 는 각각 채널이 긴 소자의 기판 효과, V_{TH} 감소의 기판 효과의존도, 그리고 V_{TH} 증가의 기판 효과 의존도를 나타낸다. 그림 8에 이차원 소자 시뮬레이터를 이용하여 구한 V_{TH} 와 식 (37)을 이용하여 추출한 V_{TH} 를 비교하여 나타내었다. 두 경우 모두 V_{BS} 에 의존하지 않는 파라메타는 각각 표 2와 3의 값을 사용하였고 V_{BS} 에 의존하는 파라메타의 값은 표 4에 나타내었다. 주어진 채널 길이와 substrate 전압 영역에서 두 값은 잘 일치하고 있다.

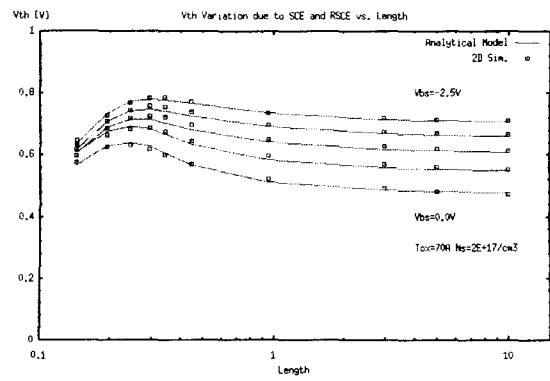
표 4 $V_{BS} \neq 0$ 인 경우 V_{BS} 관련 파라메타(그림 8)

Table 4 V_{BS} related parameters for $V_{BS} \neq 0$ (Fig. 8)

	$t_{ox}(A)$	$N_s(cm^{-3})$	$N_B(cm^{-3})$	$\lambda_L(V^{-1})$	$\lambda_S(V^{-1/2})$	$\lambda_R(V^{-1})$
(a)	70	1×10^{17}	5×10^{16}	-0.105	-0.11	0.509
(b)	70	2×10^{17}	5×10^{16}	-0.05	-0.147	0.09



(a)



(b)

그림 8 V_{BS} 가 다른 일반적인 구조를 가진 소자의 시뮬레이션 결과와 모델의 V_{TH} 비교

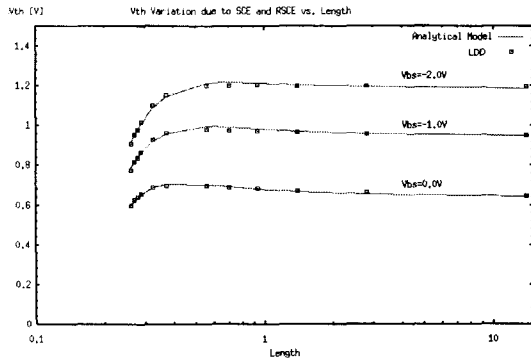
Fig. 8 Comparison between simulated and modeled V_{TH} of standard source/drain structural device for various V_{BS}

3.2 측정 결과와의 비교

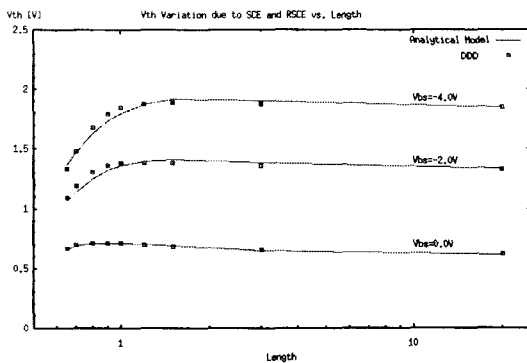
실제 소자의 측정 결과와 비교하기 위해서 LDD(Lightly Doped Drain)구조를 갖는 소자와 DDD(Double Diffused Drain)구조를 갖는 소자를 택하여 모델 파라메타를 추출하였다. 모델 파라메타의 값을 표 5에 나타내었다. 그림 9의 a)는 LDD구조이며 b)는 DDD구조이다. 각 소자의 t_{ox} 는 커패시턴스 측정 방법을 이용하여 구한 값인데, 이것은 두 구조의 소자에 대해 모두 충분히 정확한 방법이다. 그림에서 알 수 있듯이 전체 V_{BS} 영역에서 식 (39)로 주어진 모델은 측정치와 잘 일치함을 알 수 있다. 또한 a) 소자에 대해 채널 길이가 긴 경우와 짧은 경우의 V_{TH} 를 V_{BS} 에 따라 식 (39)을 이용한 결과와 측정치를 비교하여 그림 10에 나타내었다. 전체 V_{BS} 영역에서 측정치와 모델에 의한 값은 잘 일치하고 있다.

표 5 측정치에서 추출한 V_{TH} 모델 파라메타(그림 9)
 Table 5 V_{TH} model parameters extracted from measured data(Fig. 9)

	소자 형태	t_{ox} (Å)	N_S (cm^{-3})	N_B (cm^{-3})	I_F	α (μm)	Q_F	λ_L (V^{-1})	λ_S ($V^{-1/2}$)	λ_R (V^{-1})
(a)	LDD	80	2.5×10^{17}	1.37×10^{17}	1.95	0.1	1.0×10^{-2}	1.49	-9.15×10^{-2}	0.259
(b)	DDD	175	8.7×10^{16}	4.07×10^{16}	0.095	0.095	1.75×10^{-1}	11.89	1.035×10^{-1}	0.03



(a)



(b)

그림 9 LDD and DDD 구조를 가진 소자의 측정치와 모델의 V_{TH} 비교 [(a)LDD, (b) DDD]

Fig. 9 Comparison between measured and modeled V_{TH} for LDD and DDD type Devices [(a)LDD, (b) DDD]

4. 결 론

게이트 아래 채널지역의 불순물의 분포가 포켓 이온 주입 등과 같은 여러 가지 공정에 의해서 수직 수평 방향으로 모두 불균일하게 분포함으로써 전기적인 특성에 변화를 일으키게 한다. 본 논문에서는 수직 방향과 수평 방향의 불순물 농도분포의 불균일성을 동시에 고려함으로써, SCE와 RSCE가 잘 반영되는 새로운 V_{TH} 표현식을 차원적 분석 방법으로 구하였다. 2장에서 기존의 전하분배 모델에 비하여 두 효과가 연관되어 있는 형태의 V_{TH} 증가 변화, 식 (35)로 나타내는 ΔV_{TRSC} 을 얻었으며, 또한 기존의 이차원적 분석 모델에 비해 실제 농도 분포의 형태를 고려한 식(19)의 ΔV_{TSCE} 을 얻었다. 3장 1절에서는 V_{BS} 의 값에 따라 근사식을 구하고, 이

차원 소자 시뮬레이터(MEDICI)를 이용하여 일반적인 소스/드레인 구조를 갖는 소자에 대한 모의 실험을 하였다. 게이트 산화막 두께를 40Å에서 150Å까지 변화시키고, 채널길이를 변화시키면서 시뮬레이션한 결과와 모델로 계산한 결과는 그림 6에서와 같이 잘 일치한다. 또한 채널의 불순물의 농도를 N_S 를 $7 \times 10^{16} cm^{-3}$ 에서 $3 \times 10^{17} cm^{-3}$ 까지 변화시키고, 채널길이를 변화시키면서 시뮬레이션한 결과와 모델로 계산한 결과는 그림 7에서와 같이 잘 일치한다. 그림 8에서는 V_{BS} 를 0V에서 -2V까지 변화시키고, 채널길이를 변화시키면서 시뮬레이션한 결과가 모델로 계산한 결과가 잘 일치함을 보여주고 있다. 3장 2절에서는 모델을 측정치와 비교하였다. 여기서는 LDD와 DDD 구조를 갖는 실제 소자를 V_{BS} 를 변화시키면서 측정하여 모델과 비교하였는데 그림 9에서와 같이 잘 일치하였다. 그림 10에서는 V_{BS} 의 변화에 따른 측정치와 모델을 이용한 계산치를 비교하였는데, 두가지 다른 채널길이를 가진 소자에 대해 잘 일치함을 보여주고 있다. 따라서 새로운 모델은 기존의 이차원적 분석 모델을 확장시켜 수평 방향과 수직 방향의 일정하지 않은 불순물 농도의 영향을 고려하여 SCE와 RSCE를 보다 명확히 기술하며 BSIM3 모델과 비교하여 채널길이 변화를 적용할 수 있고 이차원적 분석 모델 공정 파라메타의 변화를 적절히 반영하며 여러 가지 전기적인 특성을 잘 반영하고 있다.

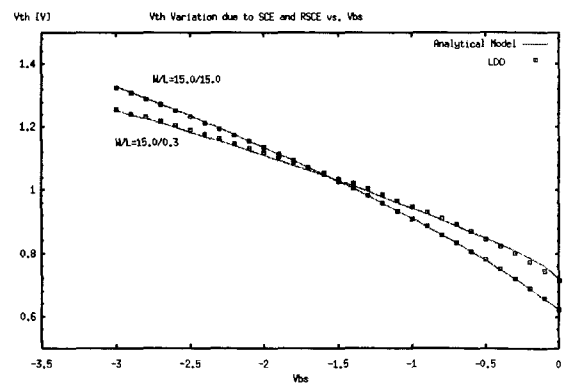


그림 10 LDD 구조를 가진 소자의 측정치와 모델의 V_{BS} 내 V_{TH} 비교

Fig. 10 Comparison between measured and modeled V_{TH} for versus V_{BS} for LDD type Device

참 고 문 헌

- [1] J. A. Greenfield and R. W. Dutton, "Nonplanar VLSI Device Analysis using the Solution of Poisson's Equation," IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-27, 1520, 1980.
- [2] N.D. Arora and M.S. Sharma, "Modeling the Anomalous Threshold Voltage Behavior of Submicrometer MOSFET's," IEEE Trans. Electron Devices Letters, vol. EDL-13, 92, 1992.
- [3] Z.H. Liu, C. Hu, J.H. Huang, T.Y. Chan, M.C. Jeng, P.K. Ko, and Y.C. Cheng, "Threshold Voltage Model

- for Deep-Submicrometer MOSFET's," IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-40, 86, 1993.
- [4] L.D. Yau, "A Simple theory to Predict the Threshold Voltage of a Short-Channel IGFET's," Solid-State Electron., vol. 17, 1059, 1974.
- [5] L.M. Dang, "A Simple Current Model for Short-Channel IGFET and its Application to Circuit Simulation," IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-26, 436, 1979.
- [6] M. Orlowski, C. Mazure, and F. Lau, "Submicron Short Channel Effects due to Gate Reoxidation Induced Lateral Interstitial Diffusion," IEDM Tech. Dig. 632, 1987.
- [7] "BSIM3 v3 MOSFET Model Users' Manual," Depart. of Electrical Engineering and Computer Sciences, University of California, Berkeley (1997-1998).
- [8] K.W. Terrill, C. Hu, and P.K. Ko, "Analytical Model for the Channel Electric Field in MOSFET with Graded-Drain Structure," IEEE Electron Device Letters, vol EDL-5, 440, 1984.

저 자 소 개



조 명 석 (趙 明 石)

1954년 12월 31일 생. 1982년 연세대 전기공학과 졸업. 1989년 University of Florida 전기공학 박사. 1990-1991년 현대전자 반도체연구소 책임연구원. 1991-현재 강릉대학교 전자공학과 부교수.
 Tel : (033)640-2381. Fax : (033)640-2244.
 E-Mail : msjo@kangnung.ac.kr