

MOS FET의 중반전에서의 반전층 깊이해석

정희원 노영준*, 김철성**

Analysis of the Inversion Layer Depth in Moderate Inversion of the MOS FET

Young-Joon Noh*, Cheol-Sung Kim* *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 저전압으로 동작하는 MOS FET의 중반전에서의 반전층 깊이를 구하는 방법을 제안한다. 즉, 이온주입된 불순물농도를 벌크방향으로 미세한 'box'로 분할하고, 각 'box'의 경계면에서의 수직전위를 구하고, 이 수직전위로부터 각 'box'내의 반전전하량을 구하였다 그리고 각 'box'의 반전전하량을 합한 총량이 중반전에서 요구되는 전하량과 같게 되는 깊이까지를 반전층 깊이로 하여 컴퓨터 시뮬레이션으로 구하였다. 본 논문에서 제안한 방법에 의해 구한 결과 본 논문에서 제시한 제작조건을 갖는 n-MOS FET에서는 중반전상태에서 0.0024[μm]~0.0055[μm]정도의 반전층 깊이가 형성됨을 알 수 있었다.

ABSTRACT

In this paper, we propose the method that extracts the inversion layer depth in the moderate inversion of the MOS FET behaviors with low voltage. That is, the gaussian distribution that exposes by ion implantation is equally divided into n boxes and we calculated the vertical potential and the inversion layer charge of the each box. We induced the inversion layer depth in the moderate inversion of n-MOS FET from the position that the total sum of the inversion layer charges of each box equals with the total inversion layer charges obtained by the step approximation method. The numerical results show that the depths are 0.0024[μm]~0.0055[μm] under a fabrication condition that presents in this paper.

I. 서 론

MOS FET의 동작 메커니즘을 정확하게 이해하기 위해서는 무엇보다도 게이트 전압과 반전층의 형성깊이에 관한 물성문제 상관관계를 규명할 필요가 있다. 그러나, 지금까지 이러한 연구가 진행되지 않았고, 관심밖이었다. 다만, 반전층의 두께가 대단히 얇다는 가정하에 General Charge Sheet Model^[1,2,3,4]에 의한 MOS FET의 드레인 전류전압 특성을 모델링하여 왔다. 현재 ULSI회로설계의 경

향이 아날로그-디지털 저전력으로 향하는 추세이므로, 트랜지스터의 반전영역중에서 강반전영역뿐만아닌 중간반전영역에서나 약반전영역에서의 소자특성을 더 정확하게 나타낼 수 있는 모델식이 필요하게 되었다. B. J. Sheu^[5], J. H. Huang^[6]등의 모델링들은 기판의 농도가 균일하다는 가정하에 수행되어졌기 때문에 기판표면쪽 이온주입한 불균일 기판농도의 소자의 예측에는 적용이 될 수 없었다. 기존 일부의 모델링은 불균일 기판농도를 계단형으로 근사화시켜 수행되었으나, 그것은 단지 트랜지스터 반전영역중 강반전영역만을 위주로 수행되는 것에 그

* 재능대학 정보통신과(nohyi@mail.jnc.ac.kr)

** 인하대학교 전자공학과

논문번호: 00008-0215, 접수일자: 2000년 2월 15일

처 현재와 같이 소자의 크기가 감소하고 집적도가 증가함에 따르는 저전력 모델링이 필요한 시점에서 높은 정확성과 효율성이 요구되고 있다. 따라서, 이온주입된 채널을 갖는 MOS FET의 정확한 I-V 모델링을 위해서는 벌크표면에 형성되는 불순물이온농도를 충실히 살리고, 또한 게이트전압에 의한 반전층의 형성깊이를 시료의 조건에 따라 수치화하여야 한다.

본 논문에서는 정확성을 기하기 위하여 불순물 이온주입에 의하여 형성되는 가우스농도분포를 계단형 근사법에 의존하지 않고 벌크방향의 깊이에 따라 일정한 간격으로 미세하게 n 동분하고 분할된 'box'마다 농도분포가 일정하다고 가정하였다. 즉, 표면으로부터의 수직방향을 벌크표계의 y 방향으로 하고, 이온주입에 의한 가우시안 분포를 Δy의 일정한 간격의 'box'로 세분화하고, 벌크 포텐셜을 기준으로한 각 'box'의 상부 경계면까지의 수직전계와 각 'box'의 농도와 폭에 의하여 결정되는 potential drop Δφ(y_n)을 고려하여, 각 'box'의 하부 경계면의 potential을 구하므로써 연속적 연산법에 의하여 각 'box'의 상하 경계면의 vertical potential φ(y)를 구하였다.

다음 이 vertical potential φ(y)로부터 이온주입농도를 고려한 각 'box'별 전하량 Q_{inv}(Δy)를 구하고, 이 'box'들의 전하량을 합한 총전하량 Q_{inv(TOT)}로 구한 전하량밀도 Q_{inv'}가 이미 알려진 계단근사법에 의하여 구한 값인 증반전층에서의 단위면적당 반전층 전하량밀도 Q_{inv'}와 같게 되는 깊이를 반전층 깊이 D_{inv}로 하여 증반전층의 깊이를 구하였다.

II. Vertical Potential 해석

반도체웨이퍼에 1차 이온 주입을 한 후 웨이퍼의 손상을 복구하고 동시에 implant를 활성화시키기 위하여 2차 열처리과정을 거치는데, 이 때 t 시간 동안 온도 T에서 어닐링을 수행하였다면 straggle ΔR_F^[7]는 다음과 같이 변한다.

$$\Delta R_F \Rightarrow \sqrt{\Delta R_P^2 + 2Dt} \quad (1)$$

여기서, ΔR_F는 주입된 이온분포의 폭을 나타내는 표준편차이며, D는 도펀트 불순물원자들의 Si 내에서의 확산계수로 온도의 함수이며, t는 어닐링 시간이다. 이 경우 최종 implant 농도 N_{ion}(y)는 다음 식에 의하여 Gaussian profile로 분포된다.

$$N_{ion}(y) = \frac{D_I}{\sqrt{2\pi} \sqrt{(\Delta R_P)^2 + 2Dt}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y - R_P}{\sqrt{(\Delta R_P)^2 + 2Dt}}\right)^2\right] \quad (2)$$

$$N(y) = N_{ion}(y) + N_{BC} \quad (3)$$

여기서, D_I는 단위면적당 주입원자들의 수이고, R_F는 웨이퍼내부로 침투한 주입원자들의 평균거리이고 N_{BC}는 원래의 기판농도이다.

본 논문에서는 5 × 10¹⁶ [cm⁻³]의 기판농도를 갖는 p형 Si 웨이퍼에 도우즈(dose) 농도 1.4 × 10¹² [cm⁻²] 보론을 50[KeV]의 에너지로 가속하고 1000°C 에서 1400초간 어닐링을 한 n-MOS FET를 기본 시료로 하였으며, 이 때 이온주입의 범위와 폭을 나타내는 R_F와 ΔR_F는 주입된 불순물의 종류뿐만 아니라 주입이온 빔의 에너지의 크기에 의존하며, 이들의 값들은 위에서 주어진 조건하에서 R_P ≃ 1.4 × 10⁻⁶ [cm], ΔR_P ≃ 5.5 × 10⁻⁶ [cm]^[8]로 된다.

그림 1은 웨이퍼 내부의 깊이의 함수로서의 불순물 원자들의 분포를 보여준다. 어닐링을 한 후의 implant profile은 좀 넓어진 모양을 나타낸다.

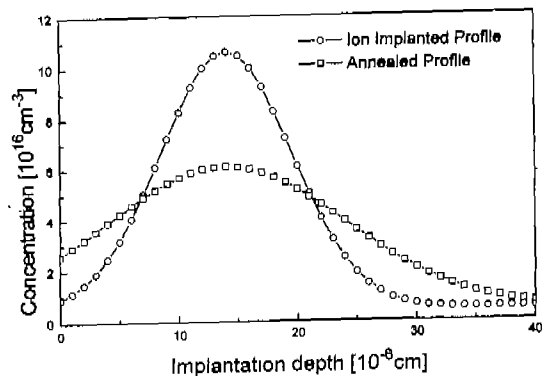


그림 1. 이온주입후의 불순물분포

이상적인 MOS 트랜지스터의 I-V특성을 결정하는 정량적 모델인 Charge-Sheet 모델의 기본개념은, 모든 이동전하는 실리콘 표면에서 무시될 수 있을 정도로 얇은 반전층 깊이로 제한되며, 공핍층에는 이동전하관 없다는 가정하에 근거하고 있다. 달리 말하면, 모든 이동전하가 마치 반전층이 2차원면인 것처럼 산화막-실리콘의 계면에 존재하고 있다고 보는 것이다. 이 모델을 사용하면, 단위 면적당 증반

전층 전하를 정확히 구할 수 있으며, 드레인 전류도 반전층 전하로부터 정확히 유도할 수 있다. 이처럼 단순화시킨 Charge-Sheet 모델은 수직전계와 수평전계는 서로 영향을 미치지 않는다고 가정하고, 또한 공핍층과 반전된 채널의 전계를 서로 별개로 간주하여, 각 영역의 1차원 Poisson방정식을 구하여, 전압, 산화층커패시턴스 및 공핍층 커패시턴스의 함수로 반전층 전하의 표현식을 얻어, MOS FET의 I-V 모델링을 한다.

그러나 본 논문에서는 새로운 'box'분할기법을 이용하여 이온주입농도분포를 충실히 구현하고 표면전위뿐만 아니라 반전층내의 수직전위를 구하여, 시료의 조건에서 형성되는 반전층의 깊이를 정확히 수치화하였다. 즉, 반전층의 깊이를 유도하기 위한 방법으로 그림 2와 같이 표면에서 벌크방향으로 불순물 농도분포를 Δy 간격으로 'box'분할하고, 각 분할 점 $y_0, y_1, y_2, \dots, y_n$ 에 해당하는 불순물농도가 각 'box'내에서는 균일하다는 점에 착안하여 구간별 정적분으로 vertical potential을 구하였다.

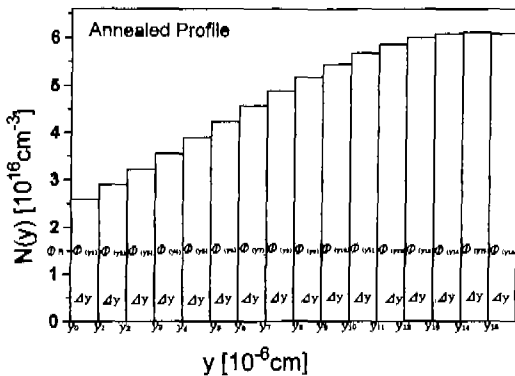


그림 2. "box" 분할된 불순물 농도 분포

강반전에서는 표면전위 ϕ_s 가 거의 일정하나, 증반전에서는 게이트전압 V_{GS} 에 의해 $6\phi_i$ 의 범위에서 표면전위가 지수함수적으로 변한다. 따라서, 본 논문에서는 V_{CB} 에 따르는 표면전위의 범위 값 $\Delta\phi_i$ 를 다음 표와 같이 정하였다.

표 1. V_{CB} 에 의한 $\Delta\phi_i$ 의 선정값

V_{CB} [V]	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
$\Delta\phi_i$ [V]	0.2 ϕ_i	2.3 ϕ_i	3.4 ϕ_i	4.2 ϕ_i	4.75 ϕ_i	5 ϕ_i	5.38 ϕ_i	5.6 ϕ_i	5.82 ϕ_i	5.95 ϕ_i

(b) $V_{CB}=0.5[V]$

V_{CB} [V]	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2	2.1
$\Delta\phi_i$ [V]	1.24 ϕ_i	3.3 ϕ_i	4.1 ϕ_i	4.6 ϕ_i	5.13 ϕ_i	5.5 ϕ_i	5.7 ϕ_i	5.86 ϕ_i

(c) $V_{CB}=1[V]$

V_{CB} [V]	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7
$\Delta\phi_i$ [V]	1.13 ϕ_i	2.98 ϕ_i	4 ϕ_i	4.7 ϕ_i	5.2 ϕ_i	5.5 ϕ_i	5.8 ϕ_i

채널내의 전자농도식은 p형 3-terminal MOS구조의 경우 표면전위 $\phi(y)$ 를 $\phi(y) - V_{CB}$ 로 바꾸어야 하고, 정공은 외부전원과 직접적으로 관계하지 않는다고 가정한다면, 정공농도는 단지 $\phi(y)$ 에만 의존한다고 할 수 있으므로 벌크 내부 y깊이에서의 전하밀도는,

$$n(y) = n_{p0} e^{\frac{\phi(y) - V_{CB}}{\phi_i}} \quad (4)$$

$$p(y) = p_{p0} e^{-\frac{\phi(y)}{\phi_i}} \quad (5)$$

로 표시된다. 또한 부가된 이온주입농도를 고려할 경우 Poisson의 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d^2\phi(y)}{dy^2} = -\frac{q}{\epsilon_S} [p_{p0} e^{-\frac{\phi(y)}{\phi_i}} - n_{p0} e^{\frac{\phi(y) - V_{CB}}{\phi_i}} - N_{ion}(y) - N_A] \quad (6)$$

여기서 $N_{ion}(y)$ 는 y깊이에서의 추가된 이온주입농도이다. 식 (6)의 양변에 $2(\frac{d\phi(y)}{dy})$ 를 곱하면,

$$d \left[\frac{d\phi(y)}{dy} \right]^2 = -\frac{2q}{\epsilon_S} [p_{p0} e^{-\frac{\phi(y)}{\phi_i}} - n_{p0} e^{\frac{\phi(y) - V_{CB}}{\phi_i}} - N_{ion}(y) - N_A] d\phi(y) \quad (7)$$

양변을 $\phi(y_n) \leq \phi(y) \leq \phi(y_{n+1})$

(단, $n=0, 1, 2, 3, \dots, n$) 범위까지의 정적분을 취하고 풀면, 각 'box'의 수직 전계 $E(y_{n,n+1})$ 은 다음 식과 같다.

$$E(y_{n,n+1}) = \sqrt{\frac{2qN_A}{\epsilon_S} [\phi_i (e^{-\frac{\phi(y_n)}{\phi_i}} - e^{-\frac{\phi(y_{n+1})}{\phi_i}}) + \phi_i e^{-\frac{-2\phi_i(y_n) - V_{CB}}{\phi_i}} (e^{\frac{\phi(y_n)}{\phi_i}} - e^{\frac{\phi(y_{n+1})}{\phi_i}})]}$$

$$\begin{aligned}
 & + (1 + N_{ion}(y_n) / N_A) \Phi(y_n) \\
 & - (1 + N_{ion}(y_n) / N_A) \Phi(y_{n+1})^{1/2}
 \end{aligned} \tag{8}$$

여기서, $p_{j0} = N_A$, $n_{j0} = n_i e^{-\frac{\phi_f(y_n)}{\phi_i}}$,
 $n_i \approx N_A e^{-\frac{\phi_f(y_n)}{\phi_i}}$, $\phi_f(y_n) = \phi_i \log\left(\frac{N(y_n)}{n_i}\right)$
 이다.

그런데, $\phi(y_{n+1})$ 을 $\phi(y_\infty) = 0$ 즉 bulk내의 $y = \infty$ 의 기준 점으로 취하면 식 (8)에 의하여 bulk로부터 n 'box' 상부 경계면까지의 수직전계는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 E(y_n)_{bulk} = & \sqrt{\frac{2q N_A}{\epsilon_s}} \left[\phi_i \left(e^{-\frac{\phi_f(y_n)}{\phi_i}} - 1 \right) \right. \\
 & + \phi_f e^{-\frac{2\phi_f(y_n) - V_{cb}}{\phi_i}} \left(e^{-\frac{\phi_f(y_n)}{\phi_i}} - 1 \right) \\
 & \left. + (1 + N_{ion}(y_n) / N_A) \Phi(y_n) \right]^{1/2}
 \end{aligned} \tag{9}$$

게이트전압에 의해서 형성되는 반전층깊이를 알아내기 위해서는 각 'box'와 'box' 사이의 경계면에서의 vertical potential $\phi(y_n)$ 를 우선 추출하는 것이 중요하다.

지금, 각 점점 y_{n+1} 에 해당하는 bulk potential $\phi(y_{n+1})$ 은, 이온주입에 의하여 부가된 'box'내 도펀트농도와 거리에 의한 potential drop $\Delta\phi(y_n)$ 를 고려하므로써 다음과 같이 구할 수가 있다.^[9]

$$\phi(y_{n+1}) = \phi(y_n) - \Delta\phi(y_n) \tag{10}$$

$$\Delta\phi(y_n) = \Delta y E(y_n)_{bulk} + \frac{q N(y_n) \Delta y^2}{2 \epsilon_s} \tag{11}$$

중반전층일 때, $n=0$ 에서의 표면전위 $\phi(y_0)$ 인 ϕ_s 는 다음과 같이 구한다.

$$\phi_s = 2 \phi_f + \phi_i \log[N(y)_{AVE} / N_{BC}] + \Delta\phi_i \tag{12}$$

여기서, $N(y)_{AVE}$ 는 개략적인 반전층 깊이까지의 계단근사에 의한 평균불순물농도로 다음 값으로 하였다.

$$N(y)_{AVE} = 3 \times 10^{16} [cm^{-3}] \tag{13}$$

그림 3.은 $V_{CB}=0[V]$, $\Delta y=0.0005[um]$ 일 경우, V_{CB} 를 변화시켰을 때의 vertical potential을 나타낸다.

$V_{CB}=0.6[V]$ 에서는 표면전위 $\phi_s=0.713[V]$ 이고, $0.01[um]$ 깊이에서 vertical potential은 $0.637[V]$ 로 potential drop 폭은 $0.0755[V]$ 로 선형으로 감소하고, $V_{CB}=0.7[V]$ 에서는 표면전위 $\phi_s=0.7698[V]$ 이고, $0.01[um]$ 깊이에서 vertical potential은 $0.691[V]$ 로 potential drop 폭은 $0.0788[V]$ 로 선형으로 감소한다. 또한, $V_{CB}=0.8[V]$ 에서는 표면전위 $\phi_s=0.8137[V]$ 이고, $0.01[um]$ 깊이에서 vertical potential은 $0.732[V]$ 로 potential drop 폭은 $0.0817[V]$ 로 선형으로 감소하며, $V_{CB}=0.9[V]$ 에서는 표면전위 $\phi_s=0.837[V]$ 이고, $0.01[um]$ 깊이에서 vertical potential은 $0.7526[V]$ 로 potential drop 폭은 $0.0844[V]$ 로 역시 선형으로 감소한다. 게이트전압이 감소할수록 potential drop 폭은 감소하므로 게이트전압이 낮은 경우에는 표면전위의 변화는 거의 없다고 볼 수 있다. 또한 게이트 전압이 증가할수록 표면전위 값은 크게 증가함을 알 수 있다.

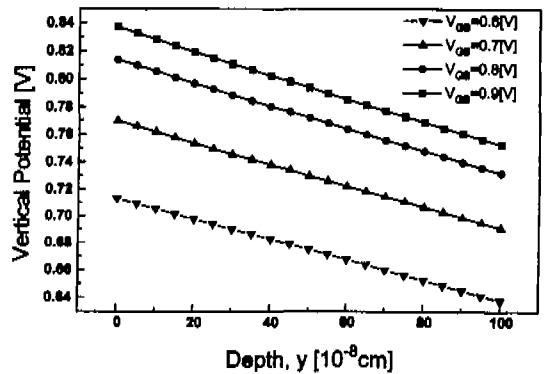


그림 3. V_{CB} 에 의한 vertical potential $\phi(y)$

III. 중반전층 깊이 해석

ion 농도분포의 일반적인 형태인 Gaussian 분포를 계단형으로 근사화시켜 놓고 반전상태에서의 MOS FET 특성을 나타낸 식들인 potential balance식과 charge balance식 그리고 전하량과 potential과의 관계식들을 이용하여, 표면전위 ϕ_s 와 채널전압 V_{CB} 로 표시되는 중반전에서의 단위면적당 반전층전하 $Q_{M'}$ 는 다음과 같이 표시된다.^[10]

$$Q_{M'} = FV \sqrt{N(y)_{AVE}} \left[\sqrt{\phi_s + \phi_i e^{[\phi_s - (2\phi_{N_{AVM}} + V_{cb})] / \phi_i}} - \sqrt{\phi_s} \right] \tag{14}$$

$$\phi_{(AVE)} = \phi_t \log(N(y)_{AVE} / n_i) \quad (15)$$

따라서, Charge-sheet 모델에 의한 총전하량은,

$$Q_{(TOT)}' = Q_{IM}'WL \quad (16)$$

이다.

implant되어 있을 경우의 깊이 y_n 'box'에서의 반전층 전자농도는,

$$N_{inv}(y_n) = n_{po} e^{(\phi(y_n) - V_{cb}) / \phi_t} \quad (17)$$

이고, 이때, 'box'폭 Δy 내외 전하량은,

$$Q_{inv}(\Delta y_n) = q N_{inv}(y_n) \Delta y WL \quad (18)$$

이다. 따라서, y 깊이에 따라 누적되어 가는 총전하량은,

$$Q_{inv(TOT)} = \sum_{n=0}^{\infty} Q_{inv}(\Delta y_n) \quad (19)$$

으로 나타낼 수 있다. 따라서, 식 (10)의 vertical potential $\phi(y_n)$ 의 값을 이용하면 식 (19)로부터 Δy 구간내의 전하량을 수치화할 수 있고, y 깊이에 따라 누적되어 가는 총전하량 $Q_{inv(TOT)}$ 가 Charge-sheet 모델에 의해서 요구하는 단위면적당 반전층 전하량 밀도 Q_{IM}' 로 계산된 전하량 $Q_{(TOT)}$ 와 같게 되는 깊이가 바로 반전층이 형성되는 깊이로 간주할 수 있으므로 본 논문에서는 식 (16)과 식 (19)가 같게 되는 표면깊이 y 를 반전층의 깊이 D_{inv} 으로 하여 computer simulation으로 구하였다.

그림 4는 $V_{CB}=0[V]$, $\Delta y=0.0005[um]$ 일 때, $V_{GB}=0.6[V], 0.7[V], 0.8[V]$ 및 $0.9[V]$ 로 변화시켰을 때의 각 구간별 반전층 전자농도를 나타낸 것이다. $V_{GB}=0.6[V]$ 의 경우, 표면에서는 $7.776 \times 10^{15} [cm^{-3}]$ 이고, 깊이 $0.01[um]$ 에서는 $3.75 \times 10^{14} [cm^{-3}]$ 으로 감소폭은 약 $7.4 \times 10^{15} [cm^{-3}]$ 로 지수적으로 감소한다. $V_{GB}=0.7[V]$ 의 경우, 표면에서는 $7.018 \times 10^{16} [cm^{-3}]$ 이고, 깊이 $0.01[um]$ 에서는 $2.987 \times 10^{15} [cm^{-3}]$ 으로 감소폭은 약 $6.72 \times 10^{16} [cm^{-3}]$ 로 지수적으로 감소한다. $V_{GB}=0.8[V]$ 의 경우, 표면에서는 $3.842 \times 10^{17} [cm^{-3}]$ 이고, 깊이 $0.01[um]$ 에서는 $1.45 \times 10^{16} [cm^{-3}]$ 으로 감소폭은 약 $3.7 \times 10^{17} [cm^{-3}]$ 로 지수적으로 감소

한다. $V_{GB}=0.9[V]$ 의 경우, 표면에서는 $9.45 \times 10^{17} [cm^{-3}]$ 이고, 깊이 $0.01[um]$ 에서는 $3.224 \times 10^{16} [cm^{-3}]$ 으로 감소폭은 약 $9.13 \times 10^{17} [cm^{-3}]$ 로 지수적으로 감소한다. 따라서, 전자농도는 반전층 표면 가까이 거의 대부분이 강하게 형성됨을 알 수 있고, 벌크쪽으로 내려 갈수록 급격히 떨어진다. 또한, V_{GB} 가 $0.1[V]$ 씩 증가할 수록 반전층 전하량은 급격히 증가함과 동시에 감소폭도 증가함을 관찰할 수가 있다.

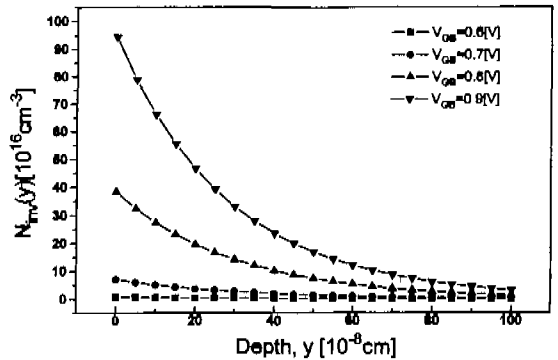


그림 4. $V_{CB}=0[V]$ 일 때, V_{GB} 에 따르는 반전전하농도

그림 5는 $V_{CB}=0[V]$, $\Delta y=.0005[um]$ 일 때, $V_{GB}=0.6[V], 0.7[V], 0.8[V]$ 및 $0.9[V]$ 로 변화시켰을 때의 각 구간별 반전층전하량을 나타낸 것이다. $V_{GB}=0.6[V]$ 의 경우, 표면에서는 $3.737 \times 10^{-17} [C]$ 이고, 깊이 $0.001[um]$ 에서는 $1.8 \times 10^{-18} [C]$ 으로 감소폭은 약 $3.557 \times 10^{-17} [C]$ 로 지수적으로 감소한다. $V_{GB}=0.7[V]$ 의 경우, 표면에서는 $3.373 \times 10^{-16} [C]$ 이고, 깊이 $0.01[um]$ 에서는 $1.436 \times 10^{-17} [C]$ 으로 감소폭은 약 $3.23 \times 10^{-16} [C]$ 로 지수적으로 감소한다. $V_{GB}=0.8[V]$ 의 경우, 표면에서는 $1.846 \times 10^{-15} [C]$ 이고, 깊이 $0.01[um]$ 에서는 $6.96 \times 10^{-17} [C]$ 으로 감소폭은 약 $1.776 \times 10^{-15} [C]$ 로 지수적으로 감소한다. $V_{GB}=0.9[V]$ 의 경우, 표면에서는 $4.541 \times 10^{-15} [C]$ 이고, 깊이 $0.01[um]$ 에서는 $1.549 \times 10^{-16} [C]$ 으로 감소폭은 약 $4.39 \times 10^{-15} [C]$ 로 지수적으로 감소한다. 따라서, 전하량은 반전층 표면 가까이 거의 대부분이 강하게 형성됨을 알 수 있고, 벌크쪽으로 내려 갈수록 급격히 떨어진다. 또한, V_{GB} 가 $0.1[V]$ 씩 증가할 수록 반전층 전하량은 급격히 증가함과 동시에 감소

폭도 증가함을 관찰할 수가 있다.

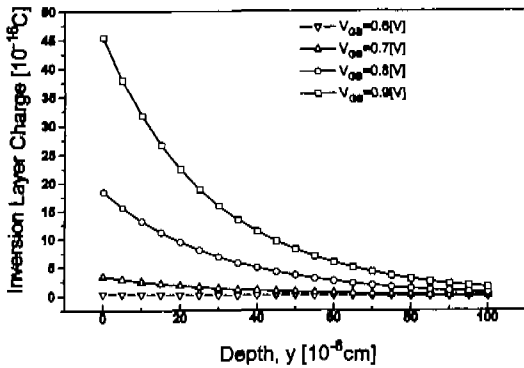


그림 5. $V_{CB}=0[V]$ 일 때, V_{GB} 에 따르는 반전층전하량

IV. 시뮬레이션 결과 및 고찰

제작된 시료는 산화막 두께 $T_{OX}=0.011[\mu m]$, 채널폭 $W=30[\mu m]$, 채널 길이 $L=2[\mu m]$, 게이트 재료로는 $N_D=10^{20}[cm^{-3}]$ 의 고농도를 갖는 n형 polysilicon gate를 사용하였으며, 이 때 Fermi potential은 $-0.56[V]$, $\phi_{MS}=-0.932[V]$ 로 하여 $V_{FB}=-0.958[V]$ 로 계산하였다. 이러한 조건에서 그림 6에 채널전압 V_{CB} 가 0[V]일 경우, 반전층의 깊이를 computer simulation으로 구한 결과를 나타냈다. $V_{CB}=0[V]$ 일 때에는 중반전 하에서 $V_{GB}=0.6[V]$ $V_{CB}=0.6[V] \sim 1.5[V]$ 의 값을 취하며, $V_{GB}=0.6[V]$ 에서 반전층 깊이는 $0.0055[\mu m]$ 이고, $V_{GB}=1.5[V]$ 에서는 $0.0003[\mu m]$ 로 게이트 전압이 $0.1[V]$ 씩 증가할 때 반전층 깊이는 약 $0.0002[\mu m]$ 에서 $0.0004[\mu m]$ 정도 감소한다,

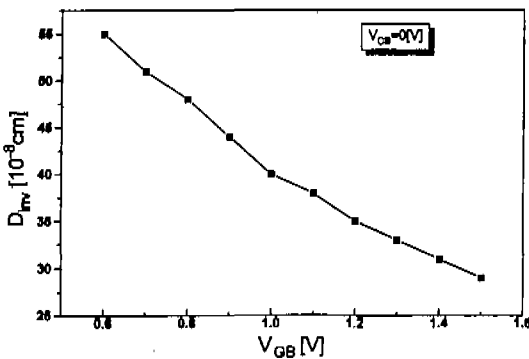


그림 6. $V_{CB}=0[V]$ 일 때의 V_{GB} 에 의한 반전층의 깊이 (단위 $[10^{-9}cm]$)

그림 7에 채널전압 V_{CB} 가 $0.5[V]$ 일 경우, 반전층의 깊이를 computer simulation으로 구한 결과를 나타냈다. $V_{CB}=0.5[V]$ 일 때에는 중반전 하에서 $V_{GB}=1.4[V] \sim 2.1[V]$ 의 값을 취하며, $V_{GB}=1.4[V]$ 에서 반전층 깊이는 $0.004[\mu m]$ 이고, $V_{GB}=2.1[V]$ 에서는 $0.0027[\mu m]$ 로 게이트전압이 $0.1[V]$ 씩 증가할 때 반전층 깊이는 약 $0.0001[\mu m]$ 에서 $0.0003[\mu m]$ 정도 감소한다.

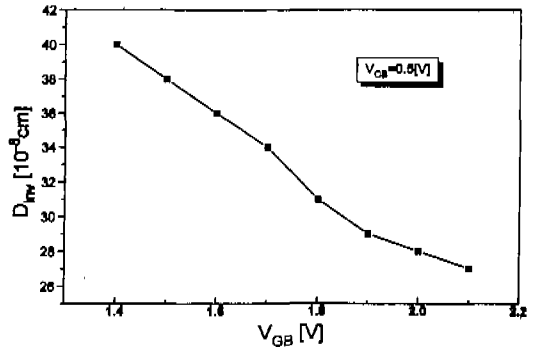


그림 7. $V_{CB}=0.5[V]$ 일 때의 V_{GB} 에 의한 반전층의 깊이 (단위 $[10^{-9}cm]$)

그림 8에 채널전압 V_{CB} 가 $1[V]$ 일 경우, 반전층의 깊이를 computer simulation으로 구한 결과를 나타냈다. $V_{CB}=1[V]$ 일 때에는 중반전 하에서 $V_{GB}=2.1[V] \sim 2.7[V]$ 의 값을 취하며, $V_{GB}=2.1[V]$ 에서 반전층 깊이는 $0.0033[\mu m]$ 이고, $V_{GB}=2.7[V]$ 에서는 $0.0024[\mu m]$ 로 게이트전압이 $0.1[V]$ 씩 증가할 때 반전층 깊이는 약 $0.0001[\mu m]$ 에서 $0.0002[\mu m]$ 정도 감소한다. 채널전압 V_{CB} 가 0[V]에서 $1[V]$ 로 증가함에 따라 채널깊이는 급격히 감소함을 알 수 있는데 이것은 채널전압이 유지된 채널층에 역바이어스로 걸려 채널단자를 통해서 이동전하들이 흘러 나가기 때문이다. 본 논문에서 제안한 방법에 의한 nMOS FET의 중반전에서의 반전층깊이는 $0.0024[\mu m]$ 에서 $0.0055[\mu m]$ 범위로 나타났다. 이 값은 이미 반전층이 약 $0.003[\mu m] \sim 0.03[\mu m]$ ^[11]으로 알려진 값과 같음을 알 수 있다. 결국 게이트전압에 따라서 반전층의 두께 D_{inv} 가 결정되며, V_{CB} 가 일정할 경우 게이트전압의 변화 ΔV_{GB} 에 의해서 ΔD_{inv} 가 이루어지고 이로 인해 소스에서 드레인으로 흐르는 채널전류는 제어된다. 지금까지 반전층의 두께가 게이트전압에 의해서 결

정된다는 것만을 알고 있었을 뿐 얼마의 깊이까지 형성되는가에 대해서는 정확한 데이터가 없었는데 본 논문에서 제안한 방법에 의해 게이트전압과 채널전압에 의한 반전층의 형성관계를 수치 해석하게 되고, 이를 이용 저전압에서 동작하는 미세한 소자의 물리적 특성을 해석할 수 있도록 하였다.

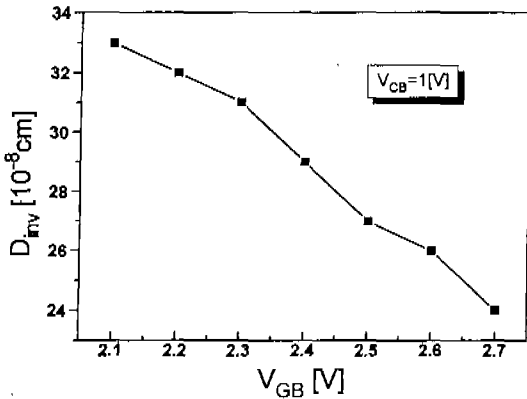


그림 8. $V_{DS}=1[V]$ 일 때의 V_{GB} 에 의한 반전층의 깊이 (단위 [10^{-8} cm])

V. 결론

본 논문에서는 기존의 계단근사법에 의존하지 않고 'box' 다중분할기법에 의하여 증반전에서의 반전층 깊이를 유도하였다. 유도한 과정을 정리하면 다음과 같다.

1. 증반전에서는 게이트전압에 따라 표면전위가 다르므로 제작된 시료의 조건에서 증반전에서의 게이트전압의 범위를 결정하고 이 범위내에서 각 게이트전압에 대한 표면전위를 구한다.
2. 이온주입농도분포를 미소한 간격 Δy 로 벌크방향으로 분할하고, 각 분할 점에서의 농도가 균일하다고 가정하여 벌크 포텐셜을 기준으로 하여 각 'box'의 상부 경계면까지의 수직전계를 구하였다.
3. 각 'box'의 농도와 폭에 의한 potential drop을 고려하여, 다음 'box'의 경계면의 potential을 구하되 연쇄적 연산법에 의하여 각 'box'의 vertical potential $\phi(y)$ 를 구한다.
4. vertical potential $\phi(y)$ 로부터 각 'box'의 반전전하농도 $N_{inv}(y)$ 를 구한다.
5. 반전전하농도로부터 각 'box'별 전하량 $Q_{im}(\Delta y)$ 를 구한다.

6. y 깊이에 따라 누적되어 가는 총전하량 $Q_{im(TOT)}$ 가 Charge-sheet 모델에 의해서 요구하는 반전층 전하량 밀도 Q_{IM} 로 계산된 전하량 $Q_{i(TOT)}$ 와 같게 되는 깊이를 반전층 깊이 D_{inv} 로 하여 컴퓨터 시뮬레이션으로 구하였다.

그 결과 제작된 MOS FET는 $V_{CB}=0[V]$ 일 때, 게이트전압의 범위는 $0.6[V] \sim 1.5[V]$ 이고 이 때 반전층의 깊이는 $0.003[\mu m] \sim 0.0055[\mu m]$ 이고, $V_{CB}=0.5[V]$ 일 때, 게이트전압의 범위는 $1.4[V] \sim 2.1[V]$ 이고 이 때 반전층의 깊이는 $0.0027[\mu m] \sim 0.004[\mu m]$ 이고, $V_{CB}=1[V]$ 일 때, 게이트전압의 범위는 $2.1[V] \sim 2.7[V]$ 이고, 이 때 반전층의 깊이는 $0.0024[\mu m] \sim 0.0033[\mu m]$ 이고, V_{CB} 가 $0.1[V]$ 증가하는데 따라 반전층 깊이는 $0.0001[\mu m] \sim 0.0004[\mu m]$ 정도 감소함을 나타냈으며, 특히 증반전 시에는 강반전과는 달리 V_{CB} 가 증가함에 따라 반전층 깊이는 오히려 감소함을 확인할 수 있었다.

이로서, MOS FET의 구조에 따르는 게이트 전압과 반전층 깊이 형성관계를 수치화하되므로

반전층깊이를 저전압에서 동작하는 MOS FET의 I-V modelling에 적용할 수 있게 되었다.

참고 문헌

- [1] G. Bacarani et al., "Analytical i.g.f.e.t model including drift and diffusion currents." *IEE journal on Solid-state and Electron Devices*, vol. 2, pp. 62, March 1978.
- [2] J. R. Brews, "A Charge-Sheet Model of the MOSFET," *Solid-State Electronics*, vol. 21, pp.345, 1978.
- [3] I. R. M. Mansour, "Improved modeling of MOS devices," *Proceeding of the European Conference on Circuit Theory and Design*, Italy, 1976.
- [4] Y. A. El-Mansy and A. R. Boothroyd, "A new approach to the theory and modeling of insulated-gate field-effect transistors," *IEEE Transistors on Electron Devices*, vol. ED-24, pp.241-253, March 1977.
- [5] B. J. Sheu, D. L. Scharfetter, and H. C. Poon, "Compact short-channel IGFET model (CSIM)," *Electronics Research Laboratory, Memo, ERL-M84-20, University of California*,

