

Ion-Implanted E-IGFET의 Doping Profile과 Threshold 전압과의 관계에 관한 연구 (I) (A Study on the Relation of Doping Profile and Threshold Voltage in the Ion-Implanted E-IGFET(I))

孫尚熙*, 吳應起**, 郭桂達**

(Sang Hee Son, Eung Gie Oh and Kae Dal Kwack)

要 約

이온주입형 E-IGFET에서 이온주입층내 불순물 profile을 임의의 형태로 가정하였으며, 가정된 불순물 profile을 이용하여 threshold 전압에 대한 간단한 model을 유도하였다. 유도한 model을 이용하여 Gaussian-profile일 때의 threshold 전압치를 구하였고, 실제의 측정 data와 비교하였을 때 일치함을 확인할 수 있었다. 더불어, box-profile일 때의 threshold 전압치의 오차를 계산해 보았다. 또한, substrate-bias에 의한 threshold 전압의 변화를 simulation하였으며, 계산과정에서 이온주입층의 깊이 D를 구하는 새로운 방법을 제시하였다.

Abstract

A simple model for the impurity profile in an ion-implanted channel layer of an enhancement type IGFET is assumed and a simple expression for the threshold voltage derived by using the assumed impurity profile is analyzed in detail. Also, this simple model is applied to simulating the substrate bias dependence of its threshold voltage. Excellent agreement is obtained between theory and experiment on n-channel devices.

The error range of threshold voltage between gaussian-profile and box-profile is calculated in this paper and a new method of calculating the depth of ion-implanted layer D is also introduced.

I. 序 論

지금까지 이온주입형 (ion-implanted) E-IGFET에서 이온주입층내 도핑 profile을 이용하여 threshold 전압을 구해왔다.^{1)~16)} 이때 이온주입층내 도핑 profile의 형태로서 Gaussian분포를 적용시켰으나 식 전개가 매우 복잡하고 계산량이 많아진다는 단점이 있었다.⁸⁾¹⁵⁾¹⁶⁾ 한편, 도핑 profile을 box-profile(혹은 step-profile)

로 가정하여 사용하였으나⁷⁾⁹⁾¹¹⁾ 이같은 가정은 계산이 간단해진 반면에, 기판저항이 낮거나 주입된 dose량이 적을 경우外에는 threshold 전압치의 오차가 크다는 문제점이 발생하였다.¹⁾²⁾⁸⁾⁹⁾

따라서 본 논문에서는 Gaussian profile의 정확성과 box-profile의 간편성을 포함할 수 있는 이온주입층의 불순물 profile식을 가정하였고, 그 가정된 식을 이용하여 threshold 전압 model을 유도하였다.

*準會員, **正會員, 漢陽大學校 工科學 電子工學科
(Dept. of Electron. Eng., Han Yang Univ.)

接受日字: 1984年 4月 19日

II. Mathematical Analysis

1. 도핑 Profile

이온주입층내 도핑 profile의 형태는 Gaussian 분포

로서 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.^(9,10,11)

$$N(y) = N_B + C \cdot \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right] \quad (C: \text{常數}) \quad (1)$$

그러나 이와같은 형태로 전개할 때는 error function의 형식으로 전개되어 식 전개가 복잡하므로, 본문에서는 Gaussian분포식의 지수項 $\exp(-y^2/2\sigma^2)$ 을 식(2)와 같이 Taylor 급수 전개하였다.

$$\begin{aligned} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right) &= 1 - \frac{y^2}{2\sigma^2} + \frac{1}{2!} \cdot \left(\frac{y^2}{2\sigma^2}\right)^2 \\ &\quad - \frac{1}{3!} \cdot \left(\frac{y^2}{2\sigma^2}\right)^3 \dots\dots \\ &= 1 - \left\{ \frac{y^2}{2\sigma^2} - \frac{1}{2!} \cdot \left(\frac{y^2}{2\sigma^2}\right)^2 \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{3!} \cdot \left(\frac{y^2}{2\sigma^2}\right)^3 \dots\dots \right\} \quad (2) \end{aligned}$$

다시 y^2 項 이하의 전체項을 하나의 y 項으로 묶어서 나타내면 식(2)를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right) = 1 - A \cdot y^n \quad (A: \text{常數}, n: \text{常數}) \quad (3)$$

식(3)을 식(1)에 대입하면

$$N(y) = N_B + C \cdot [1 - A \cdot y^n] \quad (4)$$

여기서 C와 A의 값은 $N(y=0) = N_0$ 이고

$N(y=D) = N_B$ 의 경계조건을 만족해야 하므로

$$C = N_0 - N_B, \quad A = 1/D^n \quad (5)$$

로 나타내어진다. 최종적으로 식(4)와 (5)에서

$$N(y) = N_B + (N_0 - N_B) \cdot \left[1 - \left(\frac{y}{D}\right)^n\right] \quad (6)$$

으로 귀결되는 도핑 profile을 설정하였다. 이때, 식(6)에서 n의 값을 조절함으로써 다양한 형태의 도핑 profile을 나타낼 수가 있다. 이와 관련된 내용으로 다음節에서 Gaussian-profile 및 box-profile을 가지는 n 값과 n값에 따르는 도핑-profile의 형태에 대해서 자세히 다루기로 하겠다.

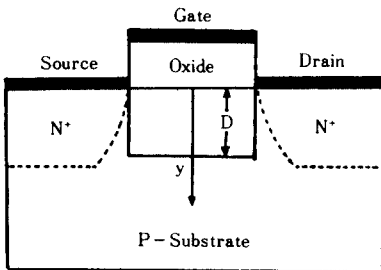


그림 1. 이온주입형 E-IGFET의 구조
Fig. 1. Structure of ion-implanted E-IGFET.

한편, $N(y)$ 는 y 축의 불순물 농도, N_B 는 기판의 불순물 농도, N_0 는 채널 표면에서의 농도이며, D 는 제작의 마지막 단계에서의 이온주입층의 깊이가 된다. n은 陽의 實數로서 불순물 profile의 형태를 결정시켜 주는 profile factor이다. 채널 표면에서 기판까지의

거리는 y 로서 나타낸다(그림 1 참조).

주입된 Dose량은

$$Dose = \int_0^D [N(y) - N_B] dy \quad (7)$$

로 나타낼 수 있으므로 식(6), (7)을 이용하면 채널 표면에서의 불순물 농도 N_0 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$N_0 = \left(1 + \frac{1}{n}\right) \cdot \frac{Dose}{D} + N_B \quad (8)$$

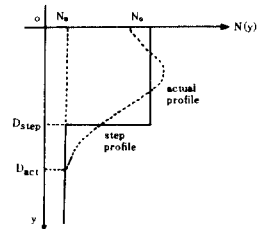


그림 2. 도핑 profile의 형태⁽⁶⁾
Fig. 2. The shape of doping profile.

그림 2에서 실선은 불순물 profile을 box-profile로 근사한 것이고, 점선은 이온주입층의 실제 profile을 나타낸 것이다.

또한, 그림 2에서 다음과 같은 경계조건을 가진다.

$$N(y) = \begin{cases} N(y), & y \leq D \\ N_B, & y \geq D \end{cases} \quad (9)$$

2. Determination of Profile Factor n

도핑 profile 형태를 가장 Gaussian 분포에 가깝게 만드는 profile factor n을 구하기 위해서, 임의의 샘플 ($t_{ox} = 500\text{\AA}$, $N_B = 7.0 \times 10^{14}/\text{cm}^2$, $Dose = 3.2 \times 10^{11}/\text{cm}^2$)을 대상으로 하여 여러가지 n값에 따른 도핑 profile의 형태를 그림 3에 도시하였다. 여기서 n값에 따라서 변화하는 이온주입층의 깊이 D를 구하는 방법은 다시 IV章에서 자세히 설명하겠다. 그림 3에서 보면 n값이 점점 커짐에 따라 box-profile에 근사함을 알 수 있었고, $n=0.2$ 에서 표면 가까운 얇은 층을 제외하고는 거의 Gaussian 분포를 가짐을 볼 수 있었다. 결국 n이 無限大의 값을 가질 때 불순물 농도의 분포를 box-profile로 가정할 수 있고 $n=0.2$ 일때 Gaussian분포를 가진다고 말할 수 있으나 실제 그림 3에서 확인할 수 있는 바와 같이 $n=100$ 혹은 $n=10$ 일 때 거의 step-profile을 나타낸다고 할 수 있다.

II. Threshold 전압의 계산

1. Threshold 전압

Threshold 전압은 채널이 형성되기 시작할 때의 최소 gate전압으로서 I-V 특성을 구하기 위하여 전계

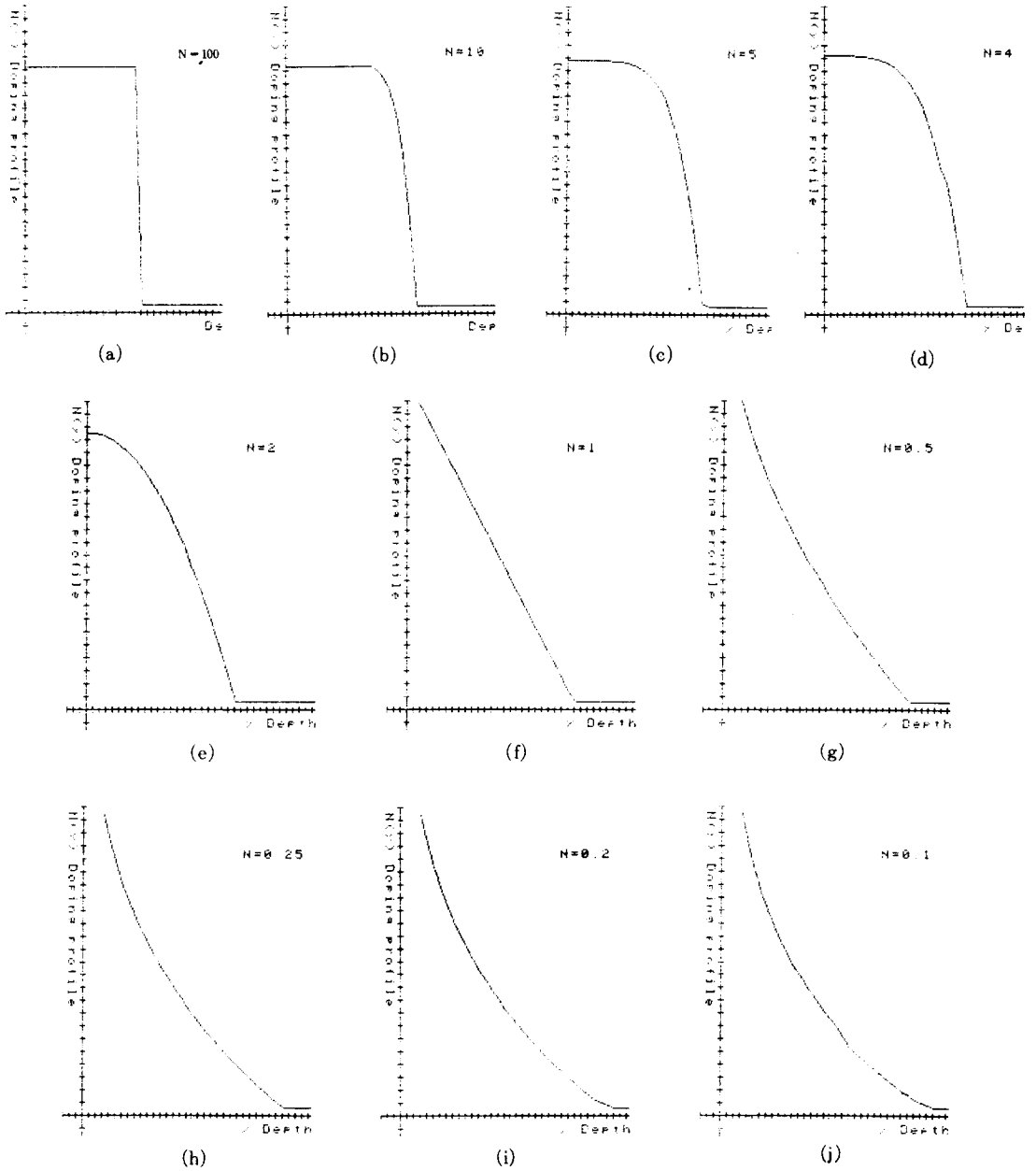


그림 3. n에 따른 도핑 profile의 형태
 Fig. 3. Doping profile depending on the profile factor, n.

조건이 되는 중요한 요소가 된다. n-채널 device의 경우, 가정한 식(6)을 사용하여 유도한 threshold 전압 model을 다음과 같이 두 가지 경우로 생각할 수 있다. W가 y방향의 공핍층의 깊이라 하면

i) $W \leq D$ 일 때

$$V_T = V_{FB} + 2\phi_f + K \cdot \frac{q}{C_{ox}} \int_0^W N(y) dy \quad (10)$$

식(6)과 식(8)을 이용하여 적분하면

$$\begin{aligned} \int_0^W N(y) dy &= \int_0^W \left[N_B + (N_0 - N_B) \cdot \left[1 - \left(\frac{y}{D} \right)^n \right] \right] dy \\ &= N_B \cdot W \left[1 + \left(1 + \frac{1}{n} \right) \frac{Dose}{N_B \cdot D} \cdot \left[1 - \frac{1}{n+1} \left(\frac{W}{D} \right)^{n+1} \right] \right] \end{aligned} \quad (11)$$

식(10)과 (11)로부터

$$V_T = V_{FB} + 2\phi_F + K \cdot \frac{q}{C_{ox}} N_b \cdot W \left[1 + \left(1 + \frac{1}{n} \right) \frac{Dose}{N_b \cdot D} \cdot \left[1 - \frac{1}{n+1} \left(\frac{W}{D} \right)^n \right] \right] \quad (12)$$

ii) $W \geq D$ 일 때

$$V_T = V_{FB} + 2\phi_F + K \cdot \frac{q}{C_{ox}} \int_0^W N(y) dy \quad (10)$$

식(7)과 (9)를 이용하여 적분하면

$$\int_0^W N(y) dy = \int_0^D [N(y) - N_b] dy + \int_D^W N(y) dy = Dose + N_b \cdot W \quad (13)$$

식(10)과 (13)으로부터

$$V_T = V_{FB} + 2\phi_F + K \cdot \frac{q}{C_{ox}} [Dose + N_b \cdot W] \quad (14)$$

위의 식(12), (14)에서 K 는 short-channel correction factor[8, 12, 13, 17, 18]이고, V_{FB} 는 flat band 전압이며, C_{ox} 는 단위면적에 대한 gate capacitance이다. 여기서 short-channel correction factor K 값은 순수 gate 전압에 의한 공핍층의 면적과 source, drain 전압에 의해 잠식되어지는 gate 공핍층의 면적에 관계한다. 즉, $K = (Q_d - Q_j)/Q_d$ 로 나타내어진다. 여기서 Q_d 는 gate 전압에 의한 공핍층의 총전하량이고 Q_j 는 source와 drain 전압에 의해서 생성되는 공핍층의 전하량이다. 보통 long-channel 일수록 K 는 1에 접근하고 short-channel 일수록 K 값은 작아진다. 이에 대한 상세한 논의는 다음 기회로 미룬다.

2. Criterion

공핍층의 두께 W 가 이온주입층의 깊이 D 와 비교하여, $W \leq D$ 의 경우와 $W \geq D$ 의 경우의 각각의 threshold 전압에 대한 관계식을 식(12), (14)에 유도하였다. 그러면 식(12)와 (14)에서 어느 것을 선택할 것인가를 결정하기 위해 식(6)의 profile 방정식을 poisson방정식을 이용해서 풀어보면 다음과 같다.

i) $W \leq D$ 일때

$$\frac{d^2V}{dy^2} = \frac{q}{\epsilon_s} N(y) = \frac{q}{\epsilon_s} \left[No - (No - N_b) \cdot \left(\frac{y}{D} \right)^n \right] \text{을 풀면}$$

$$V(y) = \frac{q}{\epsilon_s} \left[\frac{No}{2} \cdot y^2 - \frac{No - N_b}{(n+1)(n+2)} \cdot \frac{y^{n+2}}{D^n} \right] + C_1 y + C_2 \quad (15)$$

(C_1, C_2 는 常數)

위 식에서 $dV/dy|(y=w) = 0$ 과 $V(y=w) = 0$ 의 경계 조건을 만족하는 C_1 과 C_2 값은 다음과 같이 구해진다.

$$C_1 = -\frac{q}{\epsilon_s} \left[No \cdot W - \frac{No - N_b}{n+1} \cdot \frac{W^{n+1}}{D^n} \right] \quad (16)$$

$$C_2 = -\frac{qN_b \cdot D^2}{2\epsilon_s} \left[-\frac{No}{N_b} \left(\frac{W}{D} \right)^2 + 2 \cdot \frac{No - N_b}{N_b} \cdot \frac{1}{n+2} \cdot \left(\frac{W}{D} \right)^{n+2} \right]$$

$$= -\frac{qN_b \cdot D^2}{2\epsilon_s} \left[\frac{2}{n+2} \left(\frac{No}{N_b} - 1 \right) \cdot \left(\frac{W}{D} \right)^{n+2} - \frac{No}{N_b} \left(\frac{W}{D} \right)^2 \right] \quad (17)$$

식(15)에서 D 와 W 의 관계를 추적하기 위하여 $y=0$ 을 대입하면 다음과 같이 되며 이때 $V(y=0) = 2\phi_F - V_b$ 이고 $V^* = qN_b D^2 / 2\epsilon_s$ 이다.

$$V(y=0) = -V^* \cdot \left[\frac{2}{n+2} \left(\frac{No}{N_b} - 1 \right) \cdot \left(\frac{W}{D} \right)^{n+2} - \frac{No}{N_b} \left(\frac{W}{D} \right)^2 \right] \quad (18)$$

다시 전개하면 다음과 같다.

$$\frac{2}{n+2} \left(\frac{No}{N_b} - 1 \right) \cdot \left(\frac{W}{D} \right)^{n+2} - \frac{No}{N_b} \cdot \left(\frac{W}{D} \right)^2 + \frac{V(y=0)}{V^*} = 0 \quad (19)$$

ii) $W \geq D$ 일 때

$$\frac{d^2V}{dy^2} = \frac{q}{\epsilon_s} N(y) = \frac{q}{\epsilon_s} \{ N(y) - N_b \} + N_b \quad (20)$$

위식을 다시 두 가지 경우로 나누어 생각하면

a) $y \leq D$ 인 경우

$$\frac{d^2V_1}{dy^2} = \frac{q}{\epsilon_s} (N(y) - N_b) = \frac{q}{\epsilon_s} \{ (No - N_b) \cdot [1 - (y/D)^n] \} \quad (21)$$

식(21)을 풀면

$$V_1(y) = \frac{q}{\epsilon_s} \left\{ (No - N_b) \left(\frac{1}{2} y^2 - \frac{1}{(n+1)(n+2)} \cdot \frac{1}{D^n} \cdot y^{n+2} \right) \right\} + C_1 y + C_2 \quad (22)$$

경계조건 $dV_1/dy|(y=D) = 0, V_1(y=D) = 0$ 을 만족하는 C_1, C_2 는 다음과 같다.

$$C_1 = -\frac{qD}{\epsilon_s} \left[(No - N_b) \frac{n}{n+1} \right] \quad (23)$$

$$C_2 = -\frac{qD^2}{2\epsilon_s} \left[(No - N_b) \cdot \left(\frac{2}{n+2} - 1 \right) \right] \quad (24)$$

b) $y \geq D$ 인 경우

$$\frac{d^2V_2}{dy^2} = \frac{q}{\epsilon_s} \cdot N_b$$

$$V_2(y) = \frac{q}{2\epsilon_s} N_b \cdot y^2 + C_3 \cdot y + C_4 \quad (25)$$

경계조건 $dV_2/dy|(y=w) = 0, V_2(y=w) = 0$ 을 만족하는 C_3, C_4 는 다음과 같다.

$$C_3 = -\frac{q}{\epsilon_s} N_b \cdot W, C_4 = \frac{q}{2\epsilon_s} N_b \cdot W^2 \quad (26)$$

따라서 식(22)와 (25)에서 $W \geq D$ 인 경우에 $V(y) = V_1(y) + V_2(y)$ 가 된다. 이 $V(y)$ 에 $y=0$ 을 대입하면 다음과 같고 이때의 $V(y=0) = 2\phi_F - V_b$ 이다.

$$V(y=0) = -\frac{qN_b D^2}{2\epsilon_s} \left[1 - \left(\frac{W}{D} \right)^2 - \frac{1}{n+2} \left(\frac{No}{N_b} + 2 \right) \right] \quad (27)$$

식(27)을 다시 전개하면

$$\left(\frac{W}{D}\right)^2 = 1 + \frac{V(y=0)}{V^*} - \frac{1}{n+2} \left(n \cdot \frac{N_0}{N_B} + 2 \right)$$

$$W = D \cdot \sqrt{1 + \frac{V(y=0)}{V^*} - \frac{1}{n+2} \left(n \cdot \frac{N_0}{N_B} + 2 \right)} \quad (28)$$

식(28)에서 $V^* = qN_B D^2 / 2\epsilon_s$ 이다.

식(19)와 (28)에서 각각 $W=D$ 로 놓았을 때 전압값은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{w=D} = \frac{1}{n+2} \left(n \cdot \frac{N_0}{N_B} + 2 \right) \cdot V^* \quad (29)$$

식(29)의 $V_{w=D}$ 의 값은 공핍층의 깊이를 계산하기 위하여 식(19)와 (28)중 어느 것을 택할 것인가를 결정해주는 동시에 threshold 전압에 관한 식(12)와 (14)의 선택기준이 되어진다. 즉, 식(29)에서 구한 $V_{w=D}$ 의 값과 $V(y=0) = 2\phi_F - V_B$ 의 값과 비교하여 만약 $V(y=0) = 2\phi_F - V_B$ 의 값이 $V_{w=D}$ 보다 작다면 $W \leq D$ 의 경우에 해당하는 것이고, $V(y=0) = 2\phi_F - V_B$ 의 값이 $V_{w=D}$ 보다 크다면 $W \geq D$ 의 경우에 해당하는 것이다. 이렇게 하여 식(19)와 (28)에서 구해진 W 를 식(12)와 (14)의 식에 각각 대입하여 threshold 전압 V_T 를 구할 수 있다.

IV. Calculation of Implanted-Depth D

Threshold 전압을 구하는 데 필요한 data인 이온주입층의 깊이 D 는 제작할 때 조절할 수 있고 이미 알고 있는 경우가 대부분이나, D 를 모른다고 했을 경우에 제한 유용한 알고리즘을 제시하겠다. 이온주입층의 깊이 D 는 여러 가지 형태로 구해진다.^{1), 15), 16)} 본 논문에서는 식(6)을 이용하여 다음과 같이 구했다.

(D 를 구하는 과정은 복잡하나 간단히 약술하겠다).

i) $W \leq D$

$$N_0 = \left(1 + \frac{1}{n} \right) (Dose/D) + N_B \quad (8)$$

$$V_T = V_{FB} + 2\phi_F + K \cdot \frac{qN_B W}{Cox} \left[1 + \left(1 + \frac{1}{n} \right) \cdot \frac{Dose}{N_B \cdot D} \cdot \left(1 - \frac{1}{n+1} \left(\frac{W}{D} \right)^n \right) \right] \quad (12)$$

$$\frac{n}{n+2} \left(\frac{N_0}{N_B} - 1 \right) \left(\frac{W}{D} \right)^{n+2} - \frac{N_0}{N_B} \cdot \left(\frac{W}{D} \right)^2 + \frac{V(y=0)}{V^*} = 0 \quad (19)$$

$$V^* = \frac{qN_B D^2}{2\epsilon_s} \quad (30)$$

또, $V_T - V_{FB} - 2\phi_F = T$ 라 하면

식(8)과 (19)에서

$$\left(\frac{W}{D} \right)^{n+1} = n \cdot \frac{N_B}{Dose} \left[W + \left(1 + \frac{1}{n} \right) \cdot \frac{Dose}{N_B} \left(\frac{W}{D} \right) - \frac{1}{K} \cdot \frac{T \cdot Cox}{qN_B} \right] \quad (31)$$

식(19)와 (31)에서

$$D = \frac{n+1}{n+2} \cdot \frac{Dose}{N_B} W^2 \left/ \left[2 \cdot \frac{n+1}{n+2} \cdot \frac{T \cdot Cox}{qN_B} \cdot \frac{W}{K} - \frac{n}{n+2} \cdot W^2 - \frac{2\epsilon_s \cdot V}{qN_B} \right] \right. \quad (32)$$

식(31)과 (32)에서

$$\left(2 \cdot \frac{1}{K} \cdot \frac{T \cdot Cox}{q \cdot Dose} - \frac{n}{n+1} \cdot \frac{N_B \cdot W}{Dose} - \frac{n+2}{n+1} \cdot \frac{2\epsilon_s \cdot V}{q \cdot Dose \cdot W} \right)^{n+1}$$

$$= n \cdot \frac{N_B}{Dose} \cdot W - \frac{n}{K} \cdot \frac{N_B}{Dose} \cdot \frac{T \cdot Cox}{qN_B} + \frac{2(n+1) \cdot T \cdot Cox}{q \cdot Dose}$$

$$\cdot \frac{1}{K} - \frac{n \cdot N_B \cdot W}{Dose} - 2(n+2) \cdot \frac{\epsilon_s \cdot V}{q \cdot Dose \cdot W} \quad (33)$$

식(33)의 방정식을 풀어서 W 를 구한 다음에 식(32)에서 D 값을 구한다.

ii) $W \geq D$

$$N_0 = \left(1 + \frac{1}{n} \right) \cdot (Dose/D) + N_B \quad (8)$$

$$V_T = V_{FB} + 2\phi_F + K \cdot \frac{q}{Cox} [Dose + N_B \cdot W] \quad (14)$$

$$\left(\frac{W}{D} \right)^2 = 1 + \frac{V(y=0)}{V^*} - \frac{1}{n+2} \left(n \cdot \frac{N_0}{N_B} + 2 \right) \quad (28)$$

$$V^* = \frac{qN_B \cdot D^2}{2\epsilon_s} \quad (30)$$

식(8), (28), (30)을 연립해서 풀면

$$W = \left[V \cdot \frac{2\epsilon_s}{qN_B} - \frac{n+1}{n+2} \cdot \frac{Dose}{N_B} \cdot D \right]^{1/2} \quad (34)$$

의 식을 구할 수 있다. 식(14)에서 W 를 구한 다음에 그 결과를 식(34)에 대입하면 D 값을 구할 수 있다.

위 i), ii)의 경우, 각각 D 값을 구하는 조건에서 $V_B = 0$ 일 때 측정된 V_T 값을 이용해 D 값을 구한다.

V. Simulation Analysis

앞에서 구한 D 값과 가정한 도핑 profile식에 의하여 식(12)와 (14)와 같이 이론적인 threshold 전압의 model들이 유도되어졌다. 그러나 여기서 short-channel correction factor K 값이 channel길이, source와 drain 전압에 의해 변하므로 해석이 복잡하게 되어진다.

본 논문에서는, 제시되어진 도핑 profile 형태에 관한 타당성 여부와 threshold 전압 model의 정확성을 알고자하므로 해석을 간단하게 하기 위해서 $K=1$ 로 가정하였다. 즉 비교대상으로서 long-channel device를 사용하고, 이 device의 source 전압과 drain 전압을 zero로 하므로써 gate 전압에 의하여 형성된 공핍층에 거의 영향을 미치지 않게 하였다. 또, 실제의 도핑 profile factor로 $n=0.2$ 를 택하였고 각각의 샘플에 대하여 $V_B = 0$ 인 상태에서 측정된 V_T 에 맞게끔 computer simulation으로 D 값을 구했다. 이와 같이 하여 계산된 결과와 측정값은 표 1과 같은데 측정 data는 東芝 I.C

lab.에서 나온 값을 이용했다.

표 1. 측정값과 계산값의 비교

Table 1. Comparison between measured and calculated value.

i) 샘플A($\times 610-20-5-E-4-1$): W(채널width)/L(채널 length)=100/10 (단위: micron)
 $t_{ox}=500\text{\AA}$, $N_B=7.0 \times 10^{14}/\text{cm}^2$, Dose= $3.2 \times 10^{11}/\text{cm}^2$
 $V_{FB}=-1.07$ (V) D=0.3155 micron

V_B	0	-0.25	-1	-2.25	-4	-5	-6.25
V_T (meas.)	0.58	0.62	0.69	0.80	0.89	0.94	1.0
V_T (calc.)	0.5787	0.6163	0.7142	0.8205	0.9289	0.9804	1.0382

ii) 샘플B($\times 610-7-12-E-4-1$): W/L=100/10 (단위: micron)

$t_{ox}=300\text{\AA}$, $N_B=6.0 \times 10^{14}/\text{cm}^2$
 Dose= $5.5 \times 10^{11}/\text{cm}^2$ $V_{FB}=-0.9783$ (V)
 D=0.3779 micron

V_B	0	-0.25	-1	-2.25	-4	-5	-6.25
V_T (meas.)	0.52	0.57	0.64	0.70	0.75	0.78	0.81
V_T (calc.)	0.5213	0.5824	0.6553	0.7079	0.7654	0.7919	0.8228

iii) 샘플C($\times 610-7-12-E-4-1$): W/L=100/10 (단위: micron)

$t_{ox}=300\text{\AA}$, $N_B=1.9 \times 10^{14}/\text{cm}^2$
 Dose= $5.5 \times 10^{11}/\text{cm}^2$ $V_{FB}=-0.9628$ (V)
 D=0.3237 micron

V_B	0	-0.25	-1	-2.25	-4	-5	-6.25
V_T (meas.)	0.59	0.66	0.77	0.88	0.98	1.03	1.08
V_T (calc.)	0.5935	0.6879	0.7522	0.8669	0.9790	1.0316	1.0901

iv) 샘플D($\times 610-7-16-E-4-1$): W/L=100/10 (단위: micron)

$t_{ox}=710\text{\AA}$, $N_B=1.8 \times 10^{14}/\text{cm}^2$
 Dose= $2.2 \times 10^{11}/\text{cm}^2$ $V_{FB}=-1.057$ (V)
 D=0.3580 micron

V_B	0	-0.25	-1	-2.25	-4	-5	-6.25
V_T (meas.)	0.70	0.77	0.95	1.17	1.41	1.52	1.65
V_T (calc.)	0.6999	0.7708	0.9748	1.2068	1.4482	1.5637	1.6938

v) 샘플E($\times 610-05-4-E-4-1$): W/L=100/10 (단위: micron)

$t_{ox}=300\text{\AA}$, $N_B=2.5 \times 10^{14}/\text{cm}^2$
 Dose= $5.5 \times 10^{11}/\text{cm}^2$, $V_{FB}=-1.018$ (V)
 D=0.3928 micron

V_B	0	-0.25	-1	-2.25	-4	-5	-6.25
V_T (meas.)	0.85	0.97	1.28	1.64	2.05	2.25	2.48
V_T (calc.)	0.8501	0.9921	1.3228	1.6834	2.0946	2.3247	2.5074

또한, $n=10$ (box-profile인 경우)일 때의 threshold 값과 $n=0.2$ (Gaussian-profile인 경우)일 때의 threshold 값의 오차를 계산하여 그 결과를 표 2에 보였다.

표 2. Box-profile일 때와 Gaussian-profile일 때의 오차 비교

Table 2. Comparison of error between box-profile and Gaussian-profile.

i) 샘플 A

V_B	0	-0.25	-1	-2.25	-4	-5	-6.25
ΔV_T ($V_{FB}-V_{FB}$) $\times 10^{-4}$		-0.1245	-0.7366	-0.4297	-0.2951	-0.2267	-0.2030
		$\times 10^{-4}$	$\times 10^{-4}$	$\times 10^{-4}$	$\times 10^{-4}$	$\times 10^{-4}$	$\times 10^{-4}$

ii) 샘플 B

V_B	0	-0.25	-1	-2.25	-4	-5	-6.25
ΔV_T	-0.0184	0.2729	-0.2230	-0.1416	-0.1046	-0.9316	-0.8307
			$\times 10^{-1}$	$\times 10^{-1}$	$\times 10^{-1}$	$\times 10^{-1}$	$\times 10^{-1}$

iii) 샘플 C

V_B	0	-0.25	-1	-2.25	-4	-5	-6.25
ΔV_T	-0.1743	0.4005	-0.1925	-0.1264	-0.9434	-0.8427	-0.7529
	$\times 10^{-1}$		$\times 10^{-1}$	$\times 10^{-1}$	$\times 10^{-1}$	$\times 10^{-1}$	$\times 10^{-1}$

iv) 샘플 D

V_B	0	-0.25	-1	-2.25	-4	-5	-6.25
ΔV_T	-0.7703	-0.5582	-0.3586	-0.2543	-0.1966	-0.1967	-0.1595
	$\times 10^{-4}$	$\times 10^{-4}$	$\times 10^{-4}$	$\times 10^{-4}$	$\times 10^{-4}$	$\times 10^{-4}$	$\times 10^{-4}$

v) 샘플 E

V_B	0	-0.25	-1	-2.25	-4	-5	-6.25
ΔV_T	-0.2345	0.4382	0.4779	0.6230	-0.6789	-0.6073	-0.5433
	$\times 10^{-1}$				$\times 10^{-1}$	$\times 10^{-1}$	$\times 10^{-1}$

위의 표 2를 살펴보면, $W \leq D$ 인 조건에서 $n=10$ 인 경우가 $n=0.2$ 인 경우보다 V_T 값의 오차가 0.4~0.7V 정도로 비교적 큰 값을 나타내는 것은 box-profile 분포와 원래 불순물 분포와의 농도차에 의한 것이다. 그러나, $W \geq D$ 인 조건에서는 거의 오차가 생기지 않은 것을 확인할 수 있었다.

VI. 結 論

본 논문에서는 이온주입된 주입층内の 도핑 profile 을 임의의 형태로 가정하였고, 그 가정한 도핑 profile 의 식은 $n=0.2$ 근처에서 Gaussian 분포를 갖고 있는 것을 확인할 수 있었으며, 이 식을 사용해서 유도한 threshold 전압 model의 계산치는 실험치와 비교한 결과 거의 일치하는 것을 볼 수 있었다. 또한, box-profile일 경우와 Gaussian-profile일 경우, 각각의 threshold 전압에 대한 오차의 편차를 확인해 보았고, 불순물을 주입시켰을 때 이온주입층의 깊이 D를 구하는

새로운 계산방법도 제시하였다.

본 논문에서는 long-channel인 경우($K=1$)에 한해 도핑 profile을 적용하였으나, 채널길이가 $1\mu\text{m}$ 정도의 short-channel인 경우까지 확장시킬 수 있을 것으로 생각되어진다.

参 考 文 献

- [1] M.R. Macpherson, "Threshold shift Calculations for ion-implanted MOS devices," *Solid-State Electronics*, vol. 15, pp. 1319-1326, 1972.
- [2] M. Kamoshia, "Threshold voltage and gain beta of ion implanted enhancement mode N-channel MOS transistors," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 22, pp. 404-405, 1973.
- [3] M. Kamoshia, "Electrical characteristics of boron-implanted N-channel MOS transistors," *Solid-State Electronics*, vol. 17, pp. 621-626, 1974.
- [4] P.P. Peressini and W.S. Johnson, *Threshold Adjustment of N-Channel Enhancement Mode FETs by Ion Implantation*, in 1973 IEDM digest, pp. 467-468, 1973.
- [5] R.H. Dennard et al, "Design of ion implanted MOSFET's with very small physical dimensions," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. SC-9, pp. 256-266, 1974.
- [6] V.L. Rideout, F.H. Gaensslen and A.R. LeBlanc, "Device design considerations for ion implanted N-channel MOSFET's," *IBM J. Res. Develop*, vol. 19, pp. 50-59, 1975.
- [7] Jack S.T. Huang, Geoffrey W. Taylor, "Modeling of an ion-implanted silicon-gate depletion-mode IGFET" *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-22, No.11, pp. 995-1001, 1975.
- [8] Paul P. Wang, "Double boron implant short-channel MOSFET," *IEEE Trans. Electron. Devices*, vol. ED-24, no.3, pp. 196-204, 1977.
- [9] G. Dearnaley et al, *Ion Implantation*. New York: Elsevier pp. 39, 1973.
- [10] J.E. Gibbons, "Ion implantation in semiconductors, part I: range distribution theory and experiments" *Proc. IEEE*, vol. 56, pp. 295-319, 1968.
- [11] V.G.K. Redd: and A.Y.C. Yu *Ion Implantation for Silicon Device Fabrication*, Solid State Technology, pp. 35-41, 1972.
- [12] L.D. Yau, "A simple theory to predict the threshold voltage of short-channel IGFET's" *Solid-state Electron*, vol. 17, pp. 1059-1063, 1974.
- [13] Gerard Merckel, "A simple model of the threshold voltage of short and narrow channel MOSFETs", *Solid-state Electronics*, vol. 23, pp. 1207-1213, 1980.
- [14] W.S. Johnson, P.P. Peressini, and K.H. Christie., *Design of Short Channel Ion Implanted MOSFETs with Relatively Deep Junction*. in 1974 IEDM Digest, pp. 440-553, 1974.
- [15] P.P. Wang and O.S. Spencer, "Threshold voltage characteristics of double boron implanted enhancement-mode MOSFETs" *IBM J. Res. Develop*, vol. 19, pp. 530-538, 1975.
- [16] Geoffrey W. Taylor, Pallab K. Chatterjee and Hu H. Chao "A device model for buried-channel CCD's and MOSFET's with Gaussian impurity profiles," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-27, no. 1, 1980
- [17] Geoffrey W. Taylor, "Subthreshold conduction in MOSFET's", *IEEE Trans. Electron.Devices*, vol. ED-25, no.3, pp. 337-350, 1978.
- [18] G.W. Taylor, "The effects of two-dimensional charge sharing on the above-threshold characteristics of short-channel IGFETs" *Solid-State Electron.*, vol. 22, pp. 701-717, 1979.