

# 실리콘에서의 2 차원적 불순물 분포의 산출

## (Characterization of Two-Dimensional Impurity Profile in Silicon)

梁 榮 日\*, 慶 宗 旻\*

(Yeong Yil Yang and Chong Min Kyung)

### 要 約

본 논문에서는 확산공정이나, ion-implantation 공정 후에 실리콘에서 2 차원적 불순물 농도 분포를 계산하는 프로그램, PRECISE에 사용된 물리적 모델과 수치해석적인 면을 살펴보고자 한다. PRECISE는 마스크 edge 근처나, 새부리 근처에서의 불순물 농도 분포를 구하는 것을 가능하게 하였다. 그리고 1 차원 process simulator인 DIFSIM에 비소확산 모델과 emitter dip 효과를 첨가하여, 실험치와 비교하여보았는데 잘 일치함을 알 수 있었다.

### Abstract

In this paper, we describe the physical modelling and numerical aspects of a program called PRECISE (PROgram for Efficient Calculation of Impurity Profile in Semiconductor by Elimination) which calculates a two-dimensional impurity profile in silicon due to diffusion and ion implantation steps. The PRECISE enables rapid prediction of the two-dimensional impurity profile near the mask edge or the bird's beak during the local oxidation process. This has been developed by modifying the existing one-dimensional simulator, DIFSIM (DIFFusion SIMulator) to include models for arsenic diffusion and emitter dip effect which were found out to agree fairly well with the xperimental data.

### I. 서 론

제작이전에 반도체 소자의 성능을 정확히 예측하고 새로운 소자를 빠른 시간내에 설계하기 위해서는 다양한 공정 모델을 가지고 있는 simulation program을 사용할 필요가 있으며, 소자의 크기가 꾸준히 줄어들어 설계규칙이 submicron 영역에 도달함에 따라 수직 방향 외에도 lateral 방향의 불순물 농도 분포를 구하는 것이 필요하게 되었다.

본 논문에서는 기존의 1 차원 공정 simulator인 DIFSIM<sup>1)</sup>에 비소(As)의 확산 모델과 인(P)에 의한

붕소의 확산 계수의 변화 즉, emitter dip 효과에 대한 모델을 추가하였으며, 2 차원 공간에서 불순물 분포를 산출해 내는 해법 및 결과에 대해 서술하려고 한다.

### II. 확산모델

실리콘내에서 불순물의 확산은 vacancy와 interstitial과 같은 점 결함에 의해 이루어 지는데, 온도가 높아지면 결정내에서 점 결함이 발생하고 불순물 농도의 기울기에 의한 확산과정에 큰영향을 미치게 된다. 여기서, 불순물 확산과정의 확산계수는 불순물의 농도가 전성 반송자 농도보다 적으면 주어진 온도에서 일정하게 되고, 불순물 농도가 이보다 증가하면 농도에 대한 함수가 된다는 사실이 알려져 있다.<sup>2)</sup> 불순물 농도외에 확산계수에 영향을 주는 요소인 점 결함은 여러가지 전하 상태를 갖고, 확산계수는 불순물과 점 결

---

\*正會員, 韓國科學技術院 電氣 및 電子工學科  
(Dept. of Elec. Eng., KAIST)  
接受日字: 1986年 3月 25日

함 사이의 상호 작용에 영향을 받으며, 다음과 같은 식으로 표시할 수 있다.<sup>2)</sup>

$$D = D^* + D^+ \left( \frac{n_1}{n} \right) + D^- \left( \frac{n}{n_1} \right) + D'' \left( \frac{n}{n_1} \right)^2 \quad (1)$$

여기서,  $D^*$ 는 전하가 없는 점 결함과 불순물과의 상호작용에 의한 진성 확산계수이고,  $D^+$ ,  $D^-$ ,  $D''$ 는 각기 표시된 전하상태의 점 결함과 불순물과의 상호작용에 의한 진성 확산계수를 나타내며  $n$ 은 전자 농도,  $n_1$ 는 해당 온도에서의 진성 반도체의 전자농도를 각각 나타낸다. 진성 반도체에서는  $n_1/n = 1$ 이므로 확산계수는  $D = D^* + D^+ + D^- + D''$ 로 표시된다.

1. 비소의 확산계수

실리콘에서 비소의 확산은 주로 전하를 띄지않은 점 결함과 -전하 상태를 갖는 점 결함과 상호작용에 의해 이루어지며  $+n_1 = (2 \text{ 가운잡하})$ 로 대전된 점 결함에 의한 영향은 무시된다고 할 수 있다.<sup>2)</sup>

$$D_{As} = D^* + D \left( \frac{n}{n_1} \right) \quad (2)$$

이 논문에서는 도우핑한 산화막을 실험 source로 사용하였는데, 실리콘 표면에서의 농도는 비소 clustering이 일어날 만큼 높지 않았다. Barry등<sup>3)</sup>은 doped oxide를 사용하여 불순물을 확산하였을 때 실리콘 표면에서의 농도  $C_s$ 는

$$C_s = \frac{C_o \sqrt{\frac{D1}{D2}}}{1 + \frac{1}{m} \sqrt{\frac{D1}{D2}}} \quad (3)$$

로 된다고 수학적 모델을 제시하였다. 여기서  $D1, D2$ 는 산화막과 실리콘내에서 확산계수이고,  $m$ 은 segregation 계수이다. 또한  $C_o$ 는 doped oxide에서의 불순물 농도를 뜻한다.

2. 과포화 점 결함에 의한 확산의 증가현상

점 결함의 농도증가로 인해 불순물의 확산공정이 영향을 받는 메카니즘으로는 OED(Oxidation Enhanced Diffusion)와 ED(Emitter Dip)가 있다. OED는 실리콘에서 열적 산화가 일어날때 불충분한 산화과정에 의한 잉여 실리콘 원자의 interstitial이 증가되고, 증가된 interstitial은 bulk내로 들어가 일종의 점 결함으로 작용함으로써 불순물의 확산을 증가시키는 현상이다. OED의 lateral 방향의 영향은 Lin등<sup>5)</sup>에 의해 연구되었다. 이 program에서 oxidation mask film 아래 영역에서의 확산계수는 1 차원에서 구한 확산계수<sup>1)</sup>에  $\exp(-y/2)$ 를 곱하여 구하였다. 여기서  $y$ 는 mask edge에서 lateral 방향의 거리로서 단위는  $\mu m$ 이다.

붕소로 base를 만들고 인으로 emitter를 만든 narrow base NPN transistor에서 emitter 영역밀의

base/collector 접합은 다른곳 보다 훨씬 깊게 되는 현상을 emitter dip 또는 emitter push라 하며 Fair 와 Tsai<sup>6)</sup>가 제안한 인 확산 모델에 의해 설명될 수 있다. 그림 1 (a)는 실리콘에서의 인의 분포로서, 농도가 높은 곳 ( $n > n_e$ )에서의 인의 실험적 확산계수는  $p^+ - v^-$  vacancy 상호작용에 의해 지배되므로 전자농도의 제곱에 비례한다.

$$D \propto n^2 \quad (4)$$

실리콘 표면에서 안으로 들어감에 따라 전자농도가 점점 줄어들어 Fermi 준위가 conduction band edge 보다 0.11eV 아래로 되면  $v^-$ 는 한개의 전자를 내놓아  $p^+ - v^-$ 쌍은  $p^+ - v^-$ 쌍으로 바뀌는데,  $p^+ - v^-$ 쌍의 결합 에너지 준위는  $p^+ - v^-$  쌍의 그것보다 0.3eV만큼 작으므로,  $p^+ - v^-$ 쌍의 분해가 쉽게 일어난다. 이때,  $v^-$ 는  $p^+$ 에 비해 훨씬 확산계수가 크므로 빨리 확산되어 tail 영역까지 도달하여, 이곳에 있는 불순물의 확산을 증

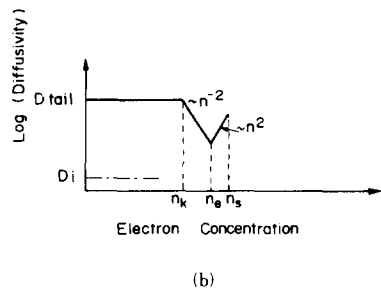
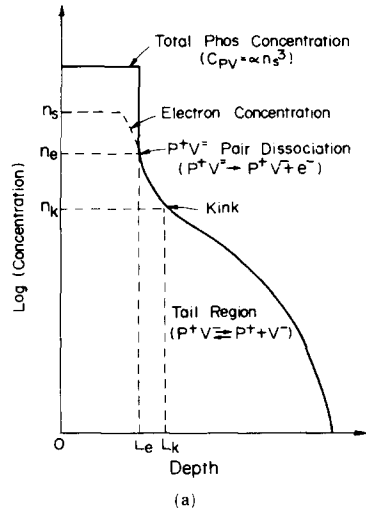


그림 1. 실리콘에서의 인의 확산

- (a) 농도분포
- (b) 전자농도에 확산계수

Fig. 1. Phosphorus diffusivity in silicon.

- (a) concentration profile.
- (b) diffusivity vs. electron concentration.

가시킨다. Vacancy가 과포화된 tail 영역에서의 확산 계수는

$$D_{tail,p} = D_p^* + D_p^- \frac{n_s^3}{n_e n_i^3} \left( 1 + \exp\left(\frac{0.3eV}{KT}\right) \right) \quad (5)$$

로 되며  $n_e$ 는 pair dissociation이 일어나는 곳에서의 전자농도이고,  $n_s$ 는 표면에서의 전자농도이다.<sup>17)</sup>

이에 영향을 받은 붕소의 확산계수를 실험적으로  $D_b = (D)_b \cdot X$  (6)

로 표시하면 확산계수가 증가되는 정도를 나타내는 X는

$$X = \frac{D_{tail,p}}{D_p^*} \quad (7)$$

이다. 여기에서  $(D)_b$ 는 붕소의 진성 확산계수를 나타낸다.

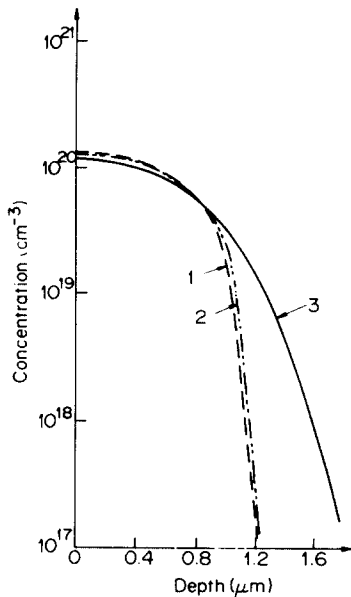


그림 2. 인의 영향을 받은 붕소의 농도분포와 받지 않은 붕소의 농도분포의 비교

Fig. 2. Comparison of boron concentration between with and without the effect of phosphorus.

그림 2는 simulation의 결과로서 이 현상을 보여주고 있다. 여기서 1로 표시된 곡선은 1050°C에서 30분간 BN1100소오스로 붕소를 predeposition 한후, 1050°C에서 20분간 질소 분위기에서 drive-in 공정을 거친후의 붕소의 농도 분포이다. 곡선 2는 위의 공정후 계속해서 1000°C에서 15분간 질소 분위기에서 drive-in이 이루어진 후의 농도분포이고, 곡선 3은 곡선 1의 공정후에 인으로 같은조건(1000°C, 15분)으로 predeposition 한후의 붕소의 농도분포이다. Emitter dip 효과는 인

의 확산에 의한 vacancy의 증가로 붕소의 확산이 증가되는 것을 뜻하며 곡선 2와 3의 차이로 나타난다.

### III. 2 차원 수치해석 방식

확산 방정식의 해를 구하는데 있어서 predeposition과 질소 분위기에서의 drive-in의 경우에는 실제적인 좌표계가 사용되었고, 실리콘 표면의 산화가 일어나는 moving boundary 문제의 경우에는 움직이는 실제좌표를 고정된 가상좌표로 변환시켜 문제를 풀었다.<sup>18)</sup> 확산 방정식의 discretization을 위하여 ADI(Alternating Direction Implicit) 방법으로 유한 차등식을 세운뒤, Gaussian 소거방법으로 해를 구하였다.<sup>10,11)</sup>

#### 1. Discretization 방정식

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D \frac{\partial C}{\partial y} \right) \quad (8)$$

식(7)과 같은 2 차원 공간에서 확산 방정식은 다음과 같이 유한 차등법(Finite Difference Method)을 써서 discretize 할 수 있다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j}^n}{\Delta t} \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial C}{\partial x} \right) = \frac{D_{i+\frac{1}{2},j}}{(\Delta x)^2} C_{i+1,j} - \frac{D_{i+\frac{1}{2},j} + D_{i-\frac{1}{2},j}}{(\Delta x)^2} C_{i,j} + \frac{D_{i-\frac{1}{2},j}}{(\Delta x)^2} C_{i-1,j} \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( D \frac{\partial C}{\partial y} \right) = \frac{D_{i,j+\frac{1}{2}}}{(\Delta y)^2} C_{i,j+1} - \frac{D_{i,j+\frac{1}{2}} + D_{i,j-\frac{1}{2}}}{(\Delta y)^2} C_{i,j} + \frac{D_{i,j-\frac{1}{2}}}{(\Delta y)^2} C_{i,j-1} \quad (11)$$

여기서  $\Delta x, \Delta y$ 는 grid간의 거리이고,  $i, j$ 는 각각  $x, y$  방향의 공간 index이며  $n$ 은 시간 index이다. 식(10), (11)에는 시간index가 표시되지는 않았는데 시간 index를  $n + 1$ 로 하면, implicit(backward Euler) 방법이라 하고 시간 index를  $n$ 으로 하면 explicit(explicit Euler) 방법이라 한다. 시간 index를 모두  $n+1$ 로 하는 fully implicit 방법을 사용하면 한 row에 5개의 0이 아닌 성분이 존재하는 matrix를 형성하나, 2개의 0이 아닌 element가 main diagonal에서 많이 ( $n \times n$  grid로 2차원 공간을 분할한 경우에  $n$ 만큼) 떨어져 있어서 gauss 소거 방식으로 해를 구하기가 어렵다. 여기서는 ADI 방법을 사용하였는데, 이 방법은  $\Delta t$  구간을 전반  $\Delta t/2$ 와 후반  $\Delta t/2$ 로 나누고, 전반  $\Delta t/2$ 에서는  $x$ 방향으로는 implicit Euler 방식을,  $y$ 방향으로는 explicit Euler 방식을 적용하고, 후반  $\Delta t/2$ 에서는  $x$ 방향으로 explicit Euler를,  $y$ 방향으로 implicit Euler를 적용함으로써 한 row에 3개 이하의 nonzero element가 나타나게 되어, 2 차원 문제에서도 gauss 소거방식을 사용할

수 있게 하였다.

2. 새부리(bird's beak) 영역에서의 좌표 변환

Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> mask에 의한 local 산화는 bird's beak 현상을 일으키므로, 2차원 평면에서의 moving boundary 문제가 되는데, 이것은 적당한 좌표변환을 하여 moving boundary가 움직이지 않게 함으로써 해를 구하는 방식이 발표되었다.<sup>18,91</sup> 그림 3의 simulation 영역에서 좌표를 (x, y)라 하고, 변환된 좌표를 (ξ, η)라 하면 경계조건은

$$(a) y=0, y=y_1; \frac{\partial C}{\partial y} = 0 \quad (12)$$

$$(b) \text{SiO}_2\text{-Si 경계면: } C\left(\frac{k}{\alpha} - 1\right) \dot{B} = D\left(\frac{\partial C}{\partial x} - B' \frac{\partial C}{\partial y}\right)$$

$$k: \text{segregation 계수, } \dot{B} = \frac{\partial B}{\partial \tau} \quad B' = \frac{\partial B}{\partial y} \quad (13)$$

α: 단위 산화막을 만드는데 소비되는 silicon 양 (0.44)

(12), (13)의 확산 방정식에

$$\xi = x - B(y, t), \eta = y, \tau = t \text{의 좌표변환식을 적용하면}$$

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial \xi} D \left[ 1 + (B')^2 \right] \frac{\partial C}{\partial \xi} - B' \frac{\partial C}{\partial \eta} + \frac{\partial}{\partial \eta} D \left( \frac{\partial C}{\partial \eta} - B' \frac{\partial C}{\partial \xi} \right) + \dot{B} \frac{\partial C}{\partial \tau} \quad (14)$$

이 되고 SiO<sub>2</sub>-Si 경계면에서는

$$D \left[ -B' \frac{\partial C}{\partial \eta} + [1 + (B')^2] \frac{\partial C}{\partial \eta} \right] = C \left( \frac{1}{\alpha k} - 1 \right) \dot{B} \quad (15)$$

으로 바뀐다.

이때, SiO<sub>2</sub>-Si 경계면 x=B(y, t)는 ξ=0로 변환되고, x=x<sub>1</sub>+B(y, t)는 ξ=x<sub>1</sub>로 변환되며 y=y<sub>0</sub>, y=y<sub>1</sub>은 η=y<sub>0</sub>, η=y<sub>1</sub>로 각각 변환된다.

즉, 그림 3 (b)와 같은 영역에서 (8)식을 푸는 문제 대신, 그림 3 (c)와 같은 영역에서 (14), (15)식을 유한차등방식에 의해 풀게 된다.

앞에서 언급한 모델과 좌표변환 방법을 사용하여 program을 제작하였다. 그림 4의 흐름도를 살펴보면, 먼저 공정과정을 선택한다. 시간을 증가 시키면서 단일 산화가 일어나는 경우이면 좌표변환을 하고, 각 시간증가에 대해 불순물 농도를 계산하고 원하는 시간이 될 때까지 반복 수행한다. 하나의 공정과정이 끝나면 다음 공정과정을 수행하게 된다.

IV. 실험과 simulation 결과의 비교

Emitter dip 효과 및 비소의 확산 실험 및 농도 산출은 참고문헌<sup>11</sup>의 방식의 방식에 준하였다. 즉, BN975, BN1100, PH1000, Arseno silicafilm을 확산 source로 하여 sample을 만든후, sample을 ethylene glycol에 0.04 N농도의 KNO<sub>3</sub>를 넣은 용액내에서 실리콘 표면

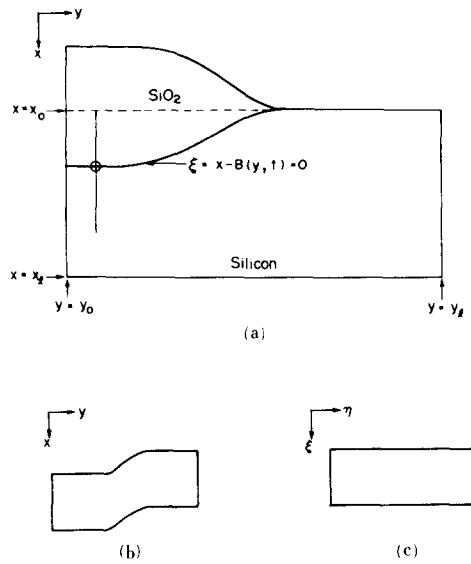


그림 3. 좌표 변환

- (a) simulation 영역
- (b) 변환되기 전의 좌표계
- (c) 변환된 후의 좌표계

Fig. 3. Coordinate transformation.

- (a) simulation region.
- (b) coordinates before transformation.
- (c) coordinates after transformation.

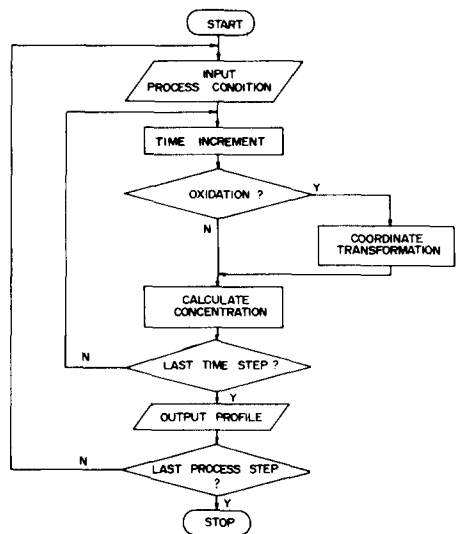


그림 4. PRECISE의 흐름도

Fig. 4. A flow chart of PRECISE.

을 일정 두께 만큼 산화시키고, 4point probe로 측정 한 sheet 저항값을 이용하여 불순물 농도분포를 구했다. 이때, 1cm×1cm의 사각형을 확산 영역으로 사용

하였으므로, 실험에서 얻어진 sheet 저항에 보정계수인 0.9를 곱하여 보상이었다. 2 ~ 4 ohm-cm의 비저항을 갖는 실리콘 wafer를 실험에 사용하였는데, 비소의 확산 효과를 관찰하기 위해 p형 wafer가, emitter dip 효과를 관찰하기 위해서는 n형 wafer가 사용되었다. 비소의 확산 실험은 순수한 산소 분위기에서 이루어졌는데, 식(3)에서의  $C_0$  값은 실험적으로  $7.2236 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ 으로 산출되었다.

그림 5는 비소의 농도분포에 대해 측정결과와 simulation 결과를 비교한 것이다. 여기에서 실험치와, O는 같은 process 조건에 대해 따로 행하여진 실험에서 얻어진 data를 나타낸다. 그림 5(a)는 1150°C에서 30분간 순수한 산소 분위기에서 predeposition한 것이다. 그리고, 그림 5(b)는 1100°C에서 30분간 순수한 산소 분위기에서 predeposition한 것이고, 이를 계속해서 1100°C에서 30분간 질소 분위기에서 drive-in을 하였을 경우가 그림 5(c)에 있다.

그림 6(a)는 붕소로 950°C에서 25분간 질소 분위기에서 predeposition하고 계속해서 질소 분위기 1050°C에서 150분간 drive-in을 한 후 인을 1000°C에서 15분간

질소 분위기에서 predeposition 했을 경우 붕소와 인 농도를 보여주고 있다. 붕소로 1050°C에서 30분간 질소 분위기에서 predeposition을 한후에 1050°C에서 20분간 drive-in을 한 다음 950°C에서 30분동안 인으로 질소 분위기에서 predeposition했을 경우의 불순물 농도 분포가 그림 6(b)에 나와있다. 그림 7은 PRECISE로 simulation한 결과를 보여준다. Ion implantation model은, 비소나 인의 경우에는 projected range R와 두개의 standard deviation을 갖는 model을,<sup>12)</sup> 붕소의 경우에는 projected range-R, standard deviation  $\Delta R$ , skewness, kurtosis의 분포를 model에 사용된다.<sup>13)</sup> Silicon 표면의 수직 방향으로는 위의 model을 사용하는 SUPREM의 결과를 사용하였고, lateral straggle effect는 다음과 같이 나타내었다.<sup>14)</sup>

$$F(x, y) = F_x(x) \cdot F_y(y)$$

$F_x(x)$  : Silicon 표면에서 수직방향으로의 1 차원 농도 분포함수

$F_y(y)$  : lateral straggle effect function

$$F_y(y) = \frac{1}{2} \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{y+a}{\sqrt{2} \Delta R_t} \right) - \operatorname{erfc} \left( \frac{y-a}{\sqrt{2} \Delta R_t} \right) \right] \quad (16)$$

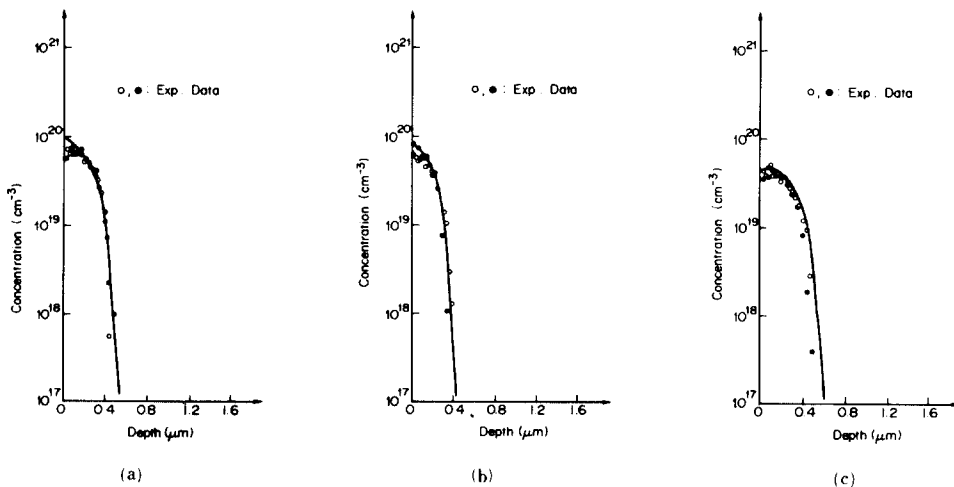


그림 5. 비소 농도분포의 simulation 결과와 실험치와의 비교

- (a) 실험치와 simulation결과(1150°C, 30분, predeposition)
- (b) 실험치와 simulation결과(1100°C, 30분, predeposition)
- (c) 실험치와 simulation결과(1100°C, 30분, predeposition+ 1100°C, 30분 drive-in)

Fig. 5. Comparison of the arsenic concentration profile between simulation results and experimental values.

- (a) experimental values and simulation result(1150°C, 30min, predeposition).
- (b) experimental values and simulation result(1100°C, 30min, predeposition).
- (c) experimental values and simulation result(1100°C, 30min, predeposition and 1100°C, 30min, drive-in).

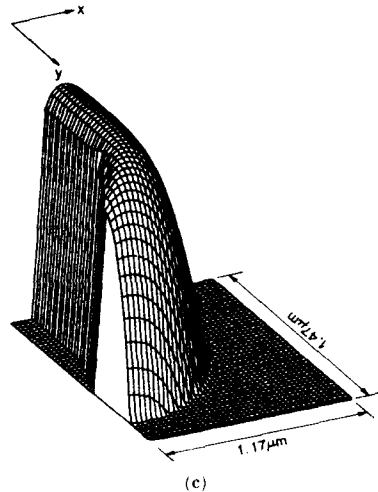
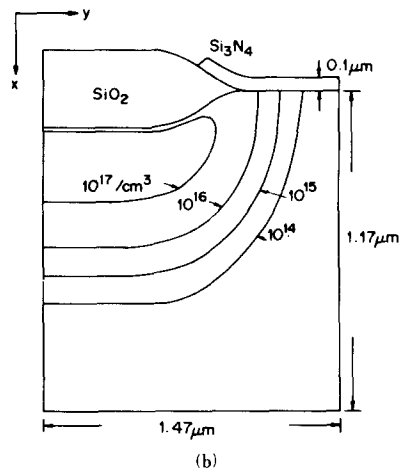
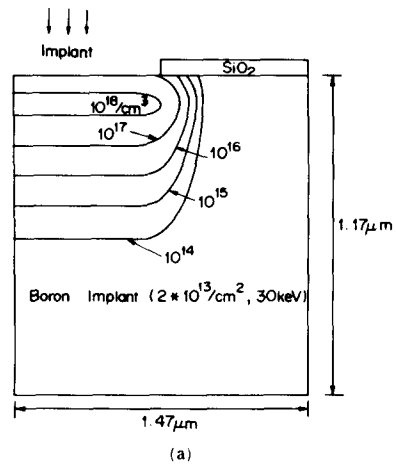
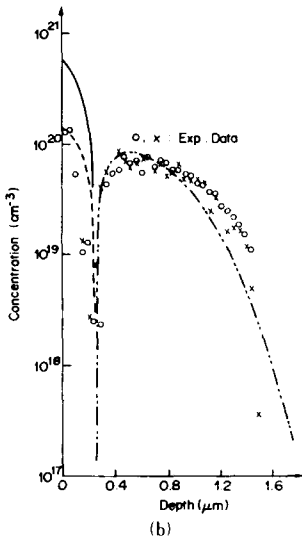
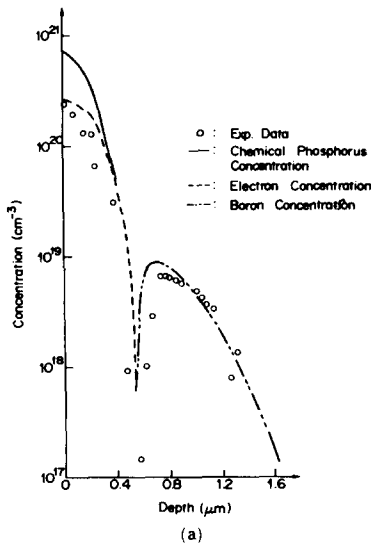


그림 6. 붕소와 인의 농도분포의 simulation 결과와 실험치와의 비교  
 (a) 실험치와 simulation 결과(950°C, 25분, 붕소 predeposition + 1050°C, 15분, drive-in + 1000°C, 15분 인 predeposition)  
 (b) 실험치와 simulation 결과(1050°C, 30분, 붕소 predeposition + 1050°C, 20분, drive-in + 950°C, 30분, 인 predeposition)

Fig. 6. Comparison of the boron and the phosphorus concentration profile between simulation results and experimental values.  
 (a) experimental values and simulation result (950°C, 25min, boron predeposition and 1050°C, 15min, drive-in and 1000°C, 15 min, phosphorus predeposition).  
 (b) experimental values and simulation result (1050°C, 30min, boron predeposition and 1050°C, 20min, drive-in and 950°C, 30min, phosphorus predeposition).

그림 7. Local oxidation의 영향

(a) 산화가 일어나기 전의 붕소의 농도분포  
 (b), (c) 산화가 일어난후의 붕소의 농도분포

Fig. 7. Effect of local oxidation.

(a) Boron concentration profile before oxidation.  
 (b), (c) Boron concentration profile after oxidation.

여기서 a는 mask edge 사이의 거리의 반이다. 그림 7은 PRECISE로 simulation한 결과를 보여준다. 그림 7(a)은 붕소를  $2 \times 10^{13}/\text{cm}^2$ 으로 30KeV로 implant 했을 경우의 농도분포를, (b), (c)는 이를 1000°C에서 60분간 산화막을 기른후의 농도 분포를 보여주고 있다. 그림 7(b)을 보면 oxidation mask film 아래 영역은 oxidation mask film이 없는 영역에 비해 oxidation에 의한 확산 증가 현상이 적게 일어나는 것을 알 수가 있다.

## V. 결 론

본 연구에서는 기존의 program DIFSIM에 비소의 모델과 emitter dip 효과를 첨가하여 실험하여 얻은 결과와 비교하여 보았다. 적당한 모델과 조정 가능한 parameter를 조절하여 본 실험실의 공정을 예측할 수 있는 근거를 만들었다. 그리고 mask 근처에서의 농도 분포를 알아보기 위해 1 차원에서 얻은 모델을 사용하여 2 차원 process simulation program을 제작하였다.

## 參 考 文 獻

- [1] 오형철, 경종민, "수치 해법에 의한 실리콘에서의 불순물 분포의 산출" 전자공학회지, vol. 21, pp. 17~26, November 1984.
- [2] S.M. Sze, *VLSI Technology*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1983.
- [3] M.L. Barry and P. Olofsen, *Doped Oxides as Diffusion Sources*, J. Electrochem. Soc., pp. 854-860, June 1969.
- [4] T.L. Chiu and H.N. Ghosh, *A Diffusion Model for Arsenic in Silicon*, IBM J.Res. Develop., pp. 472, November 1971.
- [5] A.M. Lin, R.W. Dutton and D.A. Antoniadis, *The lateral Effect of Oxidation on Boron Diffusion in <100> Silicon*, Appl. Phys. Lett 35 <10>, pp. 799~801, 15 November 1979.
- [6] R.B. Fair and J.C.C. Tsai, "A quantitative model for the diffusion of phosphorus in silicon and the emitter dip effect," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 124, no. 7, pp. 1107~1118, July 1977.
- [7] D.A. Antoniadis, S.E. Hunsen, and R.W. Dutton, *SUPREM II-A Program for IC Process Modelling and Simulation*, SEL 78-020, Stanford Electronic Labs, Stanford University, June, 1978.
- [8] Bhasakara Reddy Penumalli, *A Comprehensive Two Dimensional VLSI Process Simulation Program*, BICEPT, IEEE Trans. Electron Devices, ED-30, pp. 986~992, 1983.
- [9] Albet Seidl, *A Multigrid Method for Solution of the Diffusion Equation in VLSI Process Modeling*, IEEE Trans. Electron Devices, ED-30, pp. 999~1004, 1983.
- [10] 양영일, 경종민, 오형철, "반도체 내에서의 2 차원 불순물 분포를 얻기 위한 수치해법의 비교" 전자공학회지, vol 22, pp. 292~299, May 1985.
- [11] Y.Y. Yang, C.M. Kyung, *A Semi-Two-Dimensional Numerical Scheme for Solving Impurity Profile in Semiconductors*, IEEE Trans. Electron Devices, ED-32, pp. 1887-1889, 1985.
- [12] J. Gibbons and S. Mylorie, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 22, pp. 568, June, 1973.
- [13] W.K. Hofker, D.P. Oosthoek, N.J. Koelman, and H.A.M. DeGrefle, *Appl. Phys.*, vol. 2, pp. 265, 1973.
- [14] S. Furugawa, H. Matsumura, and H. Ishwara, "Theoretical consideration on lateral spread of implanted ions," Japan, *J. Appl. Phys.*, vol. 11, no. 2, pp. 134~142, 1972.